

【本书得到上海汽车工业教育基金会资助】

现代系统科学学

XIAN DAI XI TONG KE XUE XUE

陈 忠 盛毅华 编著

上海科学技术文献出版社

目 录

前言	(1)
----------	-------

第一篇 基础系统论

第一章 绪论	(3)
--------------	-------

1.1 系统科学的新时代	(3)
--------------------	-------

1.1.1 科学探索重点的转移与科学范式的改变	(4)
-------------------------------	-------

1.1.2 科研工具与科学方法的创新	(5)
--------------------------	-------

1.1.3 科学与社会关系的变革	(6)
------------------------	-------

1.2 系统科学的对象与问题	(6)
----------------------	-------

1.2.1 系统科学——关于整体的科学	(7)
---------------------------	-------

1.2.2 整体不同于部分和	(7)
----------------------	-------

1.2.3 整体生存于环境之中	(9)
-----------------------	-------

1.2.4 整体的四大问题	(10)
---------------------	--------

1.3 系统科学的四大特点	(10)
---------------------	--------

1.3.1 基础性	(10)
-----------------	--------

1.3.2 前沿性	(11)
-----------------	--------

1.3.3 综合性	(12)
-----------------	--------

1.3.4 实用性	(13)
-----------------	--------

1.4 系统科学的体系	(13)
-------------------	--------

1.4.1 基础系统论	(15)
-------------------	--------

1.4.2 复杂系统论	(16)
-------------------	--------

1.4.3	系统技术与方法	(17)
1.5	系统定义与系统公理	(19)
1.5.1	系统的特征	(20)
1.5.2	系统定义	(25)
1.5.3	系统“公理”	(26)
1.5.4	系统科学的概念体系	(27)
1.6	系统的分类	(29)
1.6.1	系统分类的原则	(29)
1.6.2	按组成分类	(30)
1.6.3	按大小分类	(31)
1.6.4	按属性分类	(32)
1.6.5	按动态特征分类	(34)
1.7	系统的描述	(35)
1.7.1	定性描述	(35)
1.7.2	定量描述	(36)
1.7.3	系统模型	(37)
1.8	系统的环境	(39)
1.8.1	系统与环境的边界	(40)
1.8.2	环境的层次	(40)
1.8.3	环境的保护	(41)
1.8.4	环境的发展	(42)
1.9	系统科学的由来与发展	(42)
1.9.1	系统思想的渊源	(43)
1.9.2	古代的系统思想	(44)
1.9.3	近代科学中的系统思想	(49)
1.9.4	系统科学的创立	(51)
1.9.5	非线性系统与复杂系统研究	(57)

第二章 系统结构	(59)
2.1 结构的概念	(59)
2.1.1 结构的定义	(59)
2.1.2 结构的实例与问题	(62)
2.2 元素与要素	(63)
2.2.1 元素	(63)
2.2.2 要素	(65)
2.2.3 基本元素	(66)
2.2.4 子系统与分系统	(69)
2.3 关联	(69)
2.3.1 关联的数量	(70)
2.3.2 关联的性质	(70)
2.3.3 关联的强度	(72)
2.4 内部秩序与整体构型	(73)
2.4.1 序的概念	(73)
2.4.2 整体的拓扑构型	(77)
2.5 系统的层次	(82)
2.5.1 时空与数量层次	(83)
2.5.2 微观、中观与宏观	(85)
2.5.3 层次分化的效率原则	(86)
2.6 元素组合与内部协调	(87)
2.6.1 元素组合	(88)
2.6.2 组合模型	(90)
2.6.3 关系协调	(91)
2.6.4 协调度	(93)
2.6.5 协调与共振	(94)
附录 米勒的生命系统理论	(98)

第三章 系统的性态	(102)
3.1 系统的整体性	(102)
3.1.1 系统的属性	(103)
3.1.2 系统的功能	(104)
3.1.3 系统的价值	(105)
3.2 系统的形态	(106)
3.2.1 系统的外形	(107)
3.2.2 系统的模式	(108)
3.2.3 形态的拓扑量	(109)
3.3 系统的稳定性	(110)
3.3.1 李亚普诺夫(Lyapunov)稳定性	(112)
3.3.2 渐近稳定性	(113)
3.3.3 大范围稳定与轨道稳定性	(113)
3.3.4 线性稳定性分析	(114)
3.3.5 李亚普诺夫直接法	(120)
3.4 系统的结构稳定性	(123)
3.4.1 等价性	(124)
3.4.2 结构稳定性	(125)
3.4.3 函数族的结构稳定性	(128)
3.5 系统的受控特性	(131)
3.5.1 可观察性	(131)
3.5.2 可控制性(controllability)	(134)
3.5.3 鲁棒性(robustness)与灵敏性	(135)
3.6 系统的主动性	(136)
3.6.1 系统的目的性	(137)
3.6.2 适应性	(139)
3.6.3 适应控制(adaptive control)	(141)

3.6.4	自主性	(142)
3.6.5	选择性	(145)
3.7	系统的标度性与临界行为	(146)
3.7.1	相变与临界指数	(147)
3.7.2	标度性与标度理论	(148)
3.7.3	重正化群方法	(150)
3.8	系统的随机行为	(153)
3.8.1	随机性的几个概念	(154)
3.8.2	朗之万方程	(155)
3.8.3	福克——普朗克方程	(158)
3.8.4	主方程	(160)
3.8.5	实例——舆论形成	(163)

第二篇 复杂系统论

第四章	系统的复杂性	(169)
------------	---------------------	--------------

4.1	复杂性的概念	(171)
4.1.1	客观(内禀)复杂性	(172)
4.1.2	主观(认识)复杂性	(176)
4.2	复杂性的测度	(178)
4.2.1	数学结构的复杂度	(178)
4.2.2	描述复杂度	(181)
4.2.3	计算复杂度	(184)
4.2.4	兰帕尔——齐夫(A. Lempel, J. Ziv)复杂度	(187)
4.2.5	纵向复杂度与横向复杂度	(188)
4.2.6	不确定性的测度	(189)
4.3	复杂系统	(196)

4.3.1	一般复杂系统	(196)
4.3.2	复杂系统的一般特征	(198)
4.3.3	动力系统的复杂性	(201)
4.4	两个复杂系统模型	(204)
4.4.1	元胞自动机模型(CA)	(205)
4.4.2	耦合映象格子(CML)	(213)
4.5	复杂适应系统	(222)
4.5.1	复杂适应系统的特征	(223)
4.5.2	复杂适应系统(CAS)模型	(226)
4.5.3	回声(ECHO)模型.....	(229)
第五章	系统中的混沌	(231)
5.1	系统中的非线性	(231)
5.1.1	线性关系与非线性关系	(232)
5.1.2	非线性特征	(236)
5.1.3	非线性科学的范例	(242)
5.1.4	非线性与复杂性	(246)
5.2	混沌运动	(247)
5.2.1	随处可见的混沌	(249)
5.2.2	混沌的定性特征	(253)
5.2.3	混沌的定义	(255)
5.3	混沌的定量测度	(260)
5.3.1	宽带功率谱	(260)
5.3.2	正的季亚普诺夫指数	(262)
5.3.3	分数维数	(266)
5.3.4	各种熵测度	(266)
5.4	保守系统中的混沌	(269)

5.4.1	刘维定理(Theory of Liouville)	(269)
5.4.2	不可积系统与 KAM 环面	(271)
5.4.3	KAM 定理	(274)
5.4.4	不稳定环面与 Poincare-Birkhoff 定理	(276)
5.4.5	一个典型实例——太阳系中的混沌	(281)
5.5	耗散系统中的混沌	(282)
5.5.1	奇怪吸引子	(282)
5.5.2	虫口模型、周期分叉与切分叉	(285)
5.5.3	阵发混沌	(289)
5.5.4	通向混沌的道路	(291)
5.6	混沌控制	(292)
5.6.1	OGY 控制法	(293)
5.6.2	偶然正比反馈技术(OPF 技术)	(297)
5.6.3	混沌控制的物理机制	(301)
第六章	系统中的分形	(303)
6.1	分形的概念与意义	(303)
6.1.1	分形的概念	(303)
6.1.2	各种分数维数	(306)
6.1.3	奇怪吸引子的分形维数	(315)
6.1.4	分形的定义	(316)
6.2	分形类型	(318)
6.2.1	数学中的分形	(318)
6.2.2	自然界中的分形	(322)
6.2.3	社会经济中的分形	(326)
6.2.4	分形的分类	(329)
6.3	分形生长	(329)

6.3.1	受限扩散凝聚(DLA)模型	(330)
6.3.2	动力学集团凝聚(KCA)模型	(334)
6.3.3	似分形晶体的生长	(337)
6.3.4	准晶体的分形结构	(339)
6.3.5	渗流模型	(343)
6.4	<u>分形集合与多分形</u>	(344)
6.4.1	Julia 集	(345)
6.4.2	Mandelbrot 集	(346)
6.4.3	分形集的相关原理	(347)
6.4.4	多分形	(348)
6.5	<u>分形的测量与计算</u>	(349)
6.5.1	分数布朗运动	(349)
6.5.2	Hurst 指数与 R/S 分析	(351)
6.5.3	相空间重构	(352)
6.6	<u>分形与系统的自相似性</u>	(355)
6.6.1	相似与自相似	(355)
6.6.2	系统的自相似性	(357)
6.6.3	自相似的起源	(358)
6.6.4	自相似的意义	(359)
6.6.5	特征形态与系统基因	(362)
6.6.6	SOC 与 $1/f$ 噪声	(362)
第七章	系统的演化	(364)
7.1	<u>演化与进化</u>	(364)
7.1.1	演化的含义	(365)
7.1.2	演化方向与时间箭头	(368)
7.1.3	进化的判据	(371)
7.1.4	进化的必要条件	(376)

7.2 演化的标度	(379)
7.2.1 结构标度	(380)
7.2.2 属性标度	(385)
7.2.3 行为标度	(387)
7.2.4 形态标度	(388)
7.2.5 信息流量标度	(392)
7.3 系统的创生	(393)
7.3.1 创生的条件	(394)
7.3.2 整体性的涌现	(396)
7.3.3 创生的过程	(399)
7.4 系统的发展	(402)
7.4.1 发展的方向	(402)
7.4.2 发展的阶段	(404)
7.4.3 发展的条件	(408)
7.4.4 发展的动力	(408)
7.5 系统的消亡	(413)
7.5.1 消亡过程	(413)
7.5.2 趋极过程	(415)
7.5.3 极值状态	(418)
7.5.4 趋极的意义	(422)
7.6 群体的进化	(423)
7.6.1 群体的进化模式	(424)
7.6.2 群体生态模式	(427)
7.6.3 宇宙演化的模式	(430)
第八章 系统的自组织与演化机制	(433)
8.1 系统的自组织	(434)

8.1.1	组织与自组织	(435)
8.1.2	三类系统的自组织	(437)
8.1.3	自组织的两个阶段	(438)
8.2	自组织临界性	(441)
8.2.1	沙堆模型	(442)
8.2.2	噪声对系统生长的影响	(448)
8.3	涌现机制	(451)
8.3.1	演化的内部动力	(452)
8.3.2	序参量的涌现	(454)
8.3.3	支配原理(slaving principle)	(457)
8.4	协同机制	(465)
8.4.1	役使原理	(467)
8.4.2	协同的阶段性的	(467)
8.5	自耦合机制	(469)
8.5.1	完整但不完备	(470)
8.5.2	哥德尔不完备性定理	(470)
8.5.3	系统的不完全性	(472)
8.5.4	系统的“自耦合”	(473)
8.6	质朴性原理	(476)
8.6.1	边界的作用	(477)
8.6.2	“边界的边界为零”	(479)
8.6.3	边界崩溃	(481)

第三篇 社会系统论

第九章	信息与智能系统	(485)
9.1	信息	(485)

9.1.1	人类利用开发信息资源的历史	(485)
9.1.2	信息的特征及功能定义	(487)
9.1.3	三种不确定性	(491)
9.1.4	信息的量度	(494)
9.1.5	信息的分类	(498)
9.2	信息系统	(499)
9.2.1	通信系统与信息系统	(499)
9.2.2	信息过程	(501)
9.2.3	信息系统的一个实例——教育系统	(505)
9.3	智能系统	(508)
9.3.1	智能活动	(509)
9.3.2	智能系统	(513)
9.3.3	人脑智能系统	(516)
9.3.4	人工智能	(526)
9.3.5	群体智能	(528)
9.4	智能社会	(529)
9.4.1	智能劳动	(529)
9.4.2	智能社会	(531)
9.4.3	智能社会的经济学	(533)
9.4.4	知识经济	(536)
9.5	知识创新的机制	(541)
9.5.1	创新的微观动力	(542)
9.5.2	创新的中观机制	(545)
9.5.3	创新的宏观环境	(548)
第十章	社会系统	(551)
10.1	人与社会	(552)

10.1.1	人的本性	(552)
10.1.2	人类社会	(561)
10.2	社会系统的特征	(565)
10.2.1	社会系统的定义	(565)
10.2.2	社会系统的开放性	(566)
10.2.3	社会系统的亚稳定性与临界稳定性	(568)
10.2.4	社会系统的复杂性	(570)
10.3	社会的三大子系统	(572)
10.3.1	经济系统	(573)
10.3.2	政治系统	(576)
10.3.3	文化系统	(579)
10.4	社会系统的发展	(581)
10.4.1	社会进化的判据与标度	(582)
10.4.2	社会系统发展的阶段和路线	(585)
10.4.3	社会系统发展的动力与机制	(588)
10.4.4	社会系统的可持续发展	(599)
10.5	网络社会	(606)
10.5.1	社会网络	(606)
10.5.2	网络社会的新特征	(607)
10.5.3	网络社会中社会关系的变化	(609)
10.5.4	网络社会的发展	(610)
第十一章	系统原理与方法	(612)
11.1	系统科学的方法论原则	(614)
11.1.1	整体性原则	(614)
11.1.2	有序性原则	(616)
11.1.3	演化性原则	(616)

11.1.4	价值性(目的性)原则	(616)
11.2	系统的分析与诊断	(617)
11.2.1	目标功能分析	(618)
11.2.2	结构分析	(620)
11.2.3	进程分析	(623)
11.2.4	动力分析	(624)
11.2.5	确诊与对策	(625)
11.3	系统工程方法	(626)
11.3.1	人造系统的建构	(627)
11.3.2	系统的生命周期	(629)
11.3.3	系统工程的逻辑	(631)
11.4	控制系统的方法	(634)
11.4.1	反馈方法	(634)
11.4.2	黑箱方法与功能模拟方法	(637)
11.4.3	系统模型与模型方法	(638)
11.5	处理复杂社会问题的科学方法	(639)
11.5.1	综合集成法	(639)
11.5.2	从定性到定量的综合集成研讨厅体系	(640)
参考文献		(642)
后记		(645)

前 言



系统科学也许是人们谈论最多、评价最不一致的学科之一。一些科学史家把系统科学看作是 20 世纪后半叶创立的新兴横断学科，甚至可以作为现代科学的代表；一些哲学家们对系统哲学推崇备至，认为它不仅对传统思维方式提出了挑战，而且带来了一种新的系统科学世界图景；而一些实践家，特别是面临社会、经济、文化等复杂问题的人们，更是渴望从这里找到解决难题的灵丹妙药。于是，运用系统科学的理论、观点、方法成了一种时髦，甚至在大众媒体中时常可以找到“某某项目是一个复杂的社会系统工程”的说法。似乎只要用系统工程方法，一切难题都会迎刃而解。同时，也有一些人对系统科学持谨慎或否定的态度。如 20 世纪 30 年代，《一般系统论》初创之时，冯·贝塔朗菲用开放系统的观点来阐释生命现象，但这一做法曾被许多生物学权威视为“精神不正常”。即使到系统论成为热门理论的 20 世纪 70~80 年代，仍有不少人视之为空洞的哲学清谈。阵阵热潮之后，现在人们似乎冷静多了。在国外，系统科学尚难找到“对口”的专业；在国内，虽经多方努力，系统科学被定为我国的一级学科，但系统工程却被归入“自动控制”的范畴。该领域原来一些研究人员由于种种原因放弃它而转到其他领域，其中一些人则走向了另一个极端，甚至提出“非系统”、“反系统”的“理论”。一位研究文学的学者就宣称“文学领域中的系统科学已经寿终正寝”。虽然这只是个别人的意见，或者仅仅是学科走向成熟前的“阵痛”，但这足以引起那些正在从事系统科学和准备学习系统科学的人们对它的前途命运作一番冷静的思考。

可以相信,系统思维方式将成为 21 世纪的基本思维方式,系统理论,特别是自组织理论、非线性系统理论和复杂性态理论在未来将得到充分的发展,它的应用前景是极其广阔的。因此,对该学科的发展应持慎重态度,这是因为:

第一,系统科学像其他学科一样是一门科学,而不是能解释一切问题的“哲学神话”。因为任何一门科学都有其自身的局限和适用的“边界”,超出这个“边界”就成为谬误,即使在其适用范围,其中的一些具体结论也可能被“证伪”。系统科学主要给人们的不是现成的结论,而是解决复杂系统问题的思路、方法、原则和模型,因此,不能指望系统科学包打天下,包医百病。特别是社会经济中的一些问题,由于涉及面甚广,需要在各方面密切有效配合下才有可能得到解决,单靠系统理论或系统工程是难以见效的。

第二,系统科学目前所面临的不是如何用现成的理论指导实践,而是如何从实践中“提炼”出系统问题并发展系统理论去解决它。如果没有理论基础,只是盲目实践、急于求成,是办不好事情的。应该承认,目前介绍系统科学的文献不少,但真正能指导实践并解决问题的却并不多,其中一个重要原因就是对一些基本概念尚未完全把握。

第三,对于一门发展中的现代科学来说,冷静的思考、严密的研究、同行的评议,都缺一不可。但可惜的是,长期以来,我们对国外的理论引进介绍多,分析评价少。国内除钱学森等少数学者发表了有影响的论著外,对系统论的原创性研究很少,该领域研究者相互间实质性的交流更少。这种情况已严重影响了中国系统科学的普及和发展,也影响到系统科学的实际应用。

我们同意路甬祥院长的系统科学理论框架,他提出“信息论、运筹学、控制论,20 世纪 60~70 年代兴起的突变论、耗散结构论、协同学、超循环论、微分动力系统、混沌理论等,为系统科学的发展

提供了理论基础。然而,系统科学理论框架的构建尚未真正完成。”这意味着在发展系统科学,建立系统科学的理论体系方面,还有许多艰苦的工作要做。

系统科学的飞速发展,要求不断加强国内外的学术交流。在与国外学术界的交流中,既要看到自己的不足和别人的长处,谦虚谨慎地向外国同行们学习,又要看到自己的工作成果和独到之处,决不能枉自菲薄,老当“学者”,只介绍别人的东西,不去创造和发展自己的东西。

虽然目前国内外已有不少介绍系统科学的论著,但本书作者仍想强调以下几个特色:

首先,为系统科学提出了一个概念体系和理论框架。本研究作为系统科学的基础,不仅包括现代系统科学中最基本的内容,而且包含了笔者对系统科学的见解,因此,可以作为系统科学进一步深入研究的参考。

其次,在对目前成熟理论进行综合、归纳和评述的基础上,增加了许多自己的研究成果,最主要的是关于自组织、复杂系统演化、智能系统和社会经济系统的研究。此外,将当代非线性科学、复杂性态科学与系统科学结合起来,并把这些观点、方法、模型等运用于复杂系统,特别是对社会经济系统和智能系统也作了一些探索。

第三,本书对系统科学中一些基本概念和命题进行了定义,如关于系统的基本特性和关于混沌与分形的定义等。在此基础上,本书对容易引起误解的命题进行了澄清,如在理解“整体大于部分之和”这一命题时,把系统与全体和集合混为一谈;又如把人体看作是“由原子、分子所组成的”等。

本书分为三部分,共十一章。第一部分为基础系统论,对系统科学的概貌和基本内容作了简要的介绍。这一部分共有三章:第一章绪论、第二章系统的结构、第三章系统的性态,分别介绍系统

科学的对象、特点、体系、历史和发展进展,系统科学的基本概念与分类,系统的结构、属性、功能和价值。

第二部分为复杂系统论,着重讨论复杂系统的若干基本问题,试图为现代系统科学提供一个理论基础。这里包括五章:第四章系统的复杂性、第五章系统中的混沌、第六章系统中的分形、第七章系统的演化、第八章系统的自组织与演化机制,分别讨论系统的复杂性态和非线性机制,重点对系统中的混沌运动、分形形态、自组织等复杂性态在时空上的典型表现,以及系统演化过程与动力机制做了详细讨论。

第三部分为社会系统论。这部分包括第九章信息与智能系统、第十章社会系统以及第十一章系统原则与方法,着重研究了与人和人类有着特殊关系的信息与智能系统、社会政治、经济文化系统,以及与系统方法和方法论原理有关的问题。

系统科学是一个庞大的学科群,在一本书中不可能面面俱到,为避免过于臃肿,有些内容只得从略。

最后,为了不致引起误解,这里还有几点需要特别说明:

一、现代系统科学是一个正在走向成熟的学科,经过一个多世纪的发展,许多内容早已为人熟知,甚至成为“经典”(例如稳定性、协同学、混沌控制理论,以及 CA、CML、DLA、SOC、CAS 模型等),为了结构的完整和论述的需要,书中对一些公开出版的著作与论文进行了引用和摘录,并注明了文献的来源和作者。在此对被引用者表示衷心感谢。对于因作者水平所限,书中难以避免的错误表示歉意,并敬请读者,特别是同行不吝指正。

二、现代系统科学又是一个正在迅速发展的学科,虽然在本书写作的过程中作者力图完善而又增加了许多新的内容,但还是难以跟上系统科学快速发展的步伐,许多新的内容没有能在书中得到反映,其中尤其值得提到的是本次世纪之交,复杂网络和混沌同步方面的突破性进展,揭开了系统科学历史的一个新篇章。本书

没有包含这些新的内容。但这并不等于它们不重要,不应纳入系统科学的视野,恰恰相反,我们相信,也热切地期待着人们(当然也包括本书作者)能在后续的著作中得到充分地反映。

三、编著本书的宗旨是试图根据笔者对现代系统科学理解,着重讨论其基础理论和思想方法,因此书中包含了许多作者个人的观点和看法,将这些并非全都得到公认的观点和看法提将出来,目的在于引起思考,把系统科学的研究引向深入。同时,笔者的另一个目的是为对系统科学有兴趣的读者提供一个较为完整的理论体系,尽管这个体系耗费了作者多年心血,并且自认为有其道理,但也可能,甚至必然引起争议,而这也是作者所期望的。所以希望有关学者和同行不吝赐教。

作 者

2005 年 5 月



第一篇 基础系统论

I CHU XI TONG LUN

第一章 绪 论

20 世纪后半叶,科学领域出现了一系列根本性的变化,科学的历史由此翻开了新的一页,系统科学就是在这个时候创立的。经过了半个多世纪的发展,它已成为现代科学中的一个新兴学科群。正如中科院院长路甬祥 1998 年 3 月在《科学技术的时代特征和发展展望》一文中指出的那样:“系统广泛存在于自然、社会、人体和思维之中。以系统的观点研究现实世界以形成系统的认识论、方法论和科学思维,这就是系统科学的任务。系统科学在 21 世纪将会有重大的发展,将改变科学世界的图景,革新传统的科学认识论和方法论,引起科学思维方式的革命。”本章对系统科学概貌以及它的来龙去脉作一简要介绍。

1.1 系统科学的新时代

19 世纪末,当有人向著名的物理学家玻尔茨曼问道:“19 世纪可以给它取一个什么样的名称”时,他几乎不加思索地说:“可以称之为进化的时代”。

当爱因斯坦、玻尔、海森堡回忆起 20 世纪 20~30 年代的科学时,他们都毫不犹豫地提到相对论和量子力学的创立,并把它称为“物理学激动人心的年代”。

20 世纪中叶,又有人向天才的数学家、控制论的创始人 N. 维纳问起 20 世纪科学的特征时,他的回答是“一个通信与控制”的时代。

尽管大师们对时代特征的回答大多带有个人的色彩,但都是十分中肯的。因为在 19 世纪众多的科学成果中,以热力学第二定律为代表的物理进化论、达尔文的生物进化论、以马克思为代表的社会进化论这三大进化论当居“榜首”。到了 20 世纪初,科学中最

具里程碑意义的显然是作为现代物理学支柱的相对论和量子力学。而 20 世纪中叶,控制论、信息论和一般系统论的创立集中地体现了科学时代精神的转变,随着 21 世纪的到来,一个以探讨复杂事物整体性的新科学雏形已明确地呈现在人们面前,正如著名华裔物理学家、诺贝尔奖得主李政道总结的那样:“总结 20 世纪物理学的发展,可以简单地说,它着重简化、归纳。另外,我们相信找到最基本的粒子,就会了解大物质的构造。这个方向使我们获得了很大的成功。可是到了 20 世纪中叶,我们发现,不是光知道基本粒子就能完全了解整个宇宙大问题的。对称与不对称的矛盾、看不见的夸克、暗物质、类星体都在基本粒子之外。我猜想 21 世纪的方向要整体统一,微观的基本粒子要跟宏观的真空构造、大型的量子态结合起来,这些很可能是 21 世纪的研究目标。”这意味着“整体统一的问题”已成为包括物理学在内的所有基础科学关注的焦点。如果把系统科学作为一门研究事物整体性科学的话,把 21 世纪的科学称为“系统科学的新时代”,或者更准确地称为“复杂系统或非线性系统的时代”也许是恰当的。

系统科学在 20 世纪的兴起具有开时代之风气、创历史之丰碑的意义。这样说的理由是一个科学新时代的到来至少有三大基本特征:①科学研究重心与科学范式的转移;②科研方法与工具的创新;③科学与社会关系的变革。系统科学恰恰集中地体现了这些特征,如果这种讲法能够成立,系统科学就是现代科学当之无愧的代表。

1.1.1 科学探索重点的转移与科学范式的改变

1986 年诺贝尔奖得主、耗散结构理论创始人 I·普里高津和他的学生、同事尼科里斯出版了一本名为《探索复杂性》的书,虽然人们对书的内容有各种各样的看法,但大体都会同意,这本书的名字反映了一个科学新时代的特征。

一个新的科学时代必将开拓新的科学思潮,产生新的科学范式。这是因为新时代科学研究的重点和探索的方向发生了重大乃至根本性的转移,在人们面前展现出几乎全新的研究领域。对于从事智力探险的科学家来说,这块“未开垦的处女地”上将是

“遍地黄金”,只要勇敢勤奋,就会有丰硕的成果。比如在 19 世纪与 20 世纪之交,物理学探索的重点从牛顿时代的宏观低速运动转向了微观高速运动,从而迎来了物理学史上“激动人心的年代”,现代物理学的两大支柱——相对论、量子力学就此应运而生。当然,从整个科学史的角度来看,20 世纪初物理学的转向还只是局部“地区”的变革,真正根本性的变化是发生在 20 世纪的后半叶。这种变化主要体现在三个方面:

(1) 从追求简单性到探索复杂性,即从主要关注简单事物转向重点探索复杂事物或事物的复杂性;

(2) 从对存在的研究转向对演化的研究,即从对事物存在性与规律永恒性转向对“历史的”研究;

(3) 从以主要研究线性相互作用转向重点研究非线性相互作用。

这三方面的转移归纳起来就是“从研究简单系统向研究复杂系统的转移”,这正是现代系统科学的核心内容。

1.1.2 科研工具与科学方法的创新

科学研究总是需要“硬的”设备工具和“软的”技术方法,一个新科学时代到来的基本前提就是在这两个方面的突破和创新。例如,实验方法使得 14 世纪前后西方科学史上迎来了近代科学的新时代,当时科学的“旗手”F. 培根将科学实验称为“新工具”。近代科学正是借助于实验方法才得以出现的。

20 世纪后半叶以来,科学研究“工具”上的创新最集中表现是对计算机的利用。和以往科学研究方法与技术不同,它的特点是部分替代和强化了人脑的智能,并在此基础上形成了一种新的、与理论探索和实验研究并驾齐驱的第三种科研工具——科学计算。借助于这一“新工具”,人们不仅可以“模拟现实”,而且可以“虚拟现实”,在计算机上构造出几乎所有能够想像出来的东西,通过对它们的研究来大大地扩充科学认识的疆界。

不难看出,无论科学计算还是模拟现实、虚拟现实,都是建立在对事物进行分析、整合基础上的,而用计算机对事物整体,特别是复杂的社会经济系统进行各个层次的分析、预测,模拟正是现代

系统科学的主要研究手段和“拿手好戏”。从总体上来讲,这些都是建立在“把事物作为整体”来研究的观点之上的系统方法论。

尤其值得指出的是,近年来现代通信技术正在迅猛发展,全球高速信息网络作为“地球社会的神经系统”,在把全世界连成一体的同时,也赋予地球以新的“生命形式”。对于科学研究来说,它的直接后果是把分散在世界各地的个体研究者结合成一个被称为“跨地域项目组”的有机整体,从而产生出一种在本质上不同于个体智能的集体智能(我国学者将其称之为“大成智慧”系统)。这种威力无穷的新智能在一定意义上也可看成是系统科学方法论发展的最新成果。

1.1.3 科学与社会关系的变革

科学作为人类探索未知世界的理性活动,应是人类社会活动的一个组成部分。科学无论服务于社会,还是在社会活动中发展,都必须得到社会其他方面的认同与支持。因此,一个科学新时代的到来必然引起科学与社会关系的重大变革。和以往的科学相比,现代科学可以称之为“开放的大科学”,这是因为以往的科研活动基本上采取的是个体劳动和手工劳动的方式,集中于少数科学家的范围之内,被相对地孤立于社会主流之外,对社会的影响也是十分有限的。20世纪后半叶以来,这方面的情况大为改观,现代科学成为一个全开放的体系。科学活动融入了社会的主流,作为智能劳动者的科学家成为社会主要劳动成员之一。这不仅大大缩短了从科学研究到实际应用的过程,而且在直接服务于社会的同时,大大地发展了自己,成为推动社会发展的第一动力。

科学与社会的新型关系中系统科学同样得到了十分充分的体现,因为系统不仅存在于自然界,而且广泛存在于社会经济、政治、文化等活动领域。系统科学将自然科学和社会科学的最新研究成果结合起来,为解决那些被称为社会“热点”与“世纪难题”的巨大、复杂的自然与社会问题提供了有力的思想武器。

1.2 系统科学的对象与问题

一门学科要在现代科学之林中占有一席之地,必须有自己不

同于其他学科的研究对象、内容和思维方式。也就是说,只有当它对世界的观测和研究具有自己独特的视角、鲜明的观点、专门的方法和相对完整的理论体系时,才能真正被现代科学所接纳。系统科学是现代科学群体中当之无愧的代表。那么,它独特的研究对象和观察世界的角度是什么呢?

如果要给系统科学下一个简单的定义,或用一句话来概括它的特征,明确它的研究目标,那么恰当的提法是:系统科学是一门研究事物整体的学科,是一门从事物整体性的角度观察世界、研究事物、认识问题的学问。

作为一门横断科学,系统科学与数学有许多类似之处。它不以某一类具体事物为研究对象,而以所有事物都具有的某一种属性为研究对象。按照通常的理解,数学是研究事物的数量、形态及相互关系的学问,而系统科学则是研究事物整体性的学问,因此,事物的整体性就成了系统科学最核心的问题。

1.2.1 系统科学——关于整体的科学

(1) 整体性是事物的普遍属性;

(2) 世界上一切事物,从原子、分子到所有的人为事物,乃至符号、概念体系,都有自己的整体性;

(3) 不同事物的整体性各不相同,需要分别从事物的内部和外部来加以研究其整体性。

1.2.2 整体不同于部分和

对内部来讲,整体是由若干部分所组成的,部分是包含于同一整体中的若干事物。整体不是一些事物的简单“凑合”或混合。是否处在一个整体之中,无论对构成它的“部分”还是整体,意义都是不同的。正如一个自由电子与一个处在某个原子中的电子,一个人在参军之前和参军之后是有本质不同的。这些本质区别表现在以下两个方面:

首先,处于一个整体内部的各个部分之间存在一种特殊的“组成方式”,或者说构成整体的各个部分处在一种特定的关系之中。这种特定的关系原则上有两方面的表现:

(1) “牵一发,动全身”。只要其中的一个部分发生变化,就会

影响到整体中“所有的”其他部分,而不是某些其他部分,例如附近的

部分。

(2)“缺一不可”。虽然处于一个整体中的各个部分在整体中的地位、作用可以有很大的不同,但原则上每个部分都是不可缺少的,否则就不能看成是一个完整的整体。例如,在一台包含上千个元件的电视机中,一个小小的螺丝钉或电阻器的“地位”往往是微不足道的,但缺了它,或者损坏了,就可能影响到整台电视机的整机效果,甚至进一步会导致整台机器的损坏。而不处在同一整体中各个事物之间,虽然也可能有这样或那样的关系,但那些关系往往只存在于参与相互作用的两个事物之间,即是一种“对偶”关系,而不存在于“所有”事物之间。

其次,一旦一些事物构成了一个整体,整体就会“突现”出一种原来事物所不具有的新的属性,通常称为整体属性。例如,一些电视机元件,即使它们在数量和品种上都足够安装一台电视机,但只要它们没有被“组装起来”,就不能发挥电视机的作用,它们也就不具有电视机的功能。同样,构成飞机的所有部件都是“不能飞”的,但它们的整体——飞机,却能飞上天。

在研究系统或事物的整体性时,要特别注意整体与部分的关系。这里有几个容易引起歧义和误解的地方。

(1)究竟是“整体大于部分和”还是“整体不同于部分和”:在许多场合,人们喜欢用“整体大于部分和”来表达整体与部分的不同,并且举出“人多力量大,团结就是力量”的例子来加以说明。但这仅仅从数量的大小来理解整体与部分的关系,却并没有抓住问题的实质。因为对于构成系统的部分来说,每个部分(部件、元素、组成部分)都有自己的属性,而整体性是属于元素“上一层次”的东西,它和部分层次的属性在性质上不相同,在数量上“不可比”,而无论大于、等于、小于都是一种数量关系,是不能反映整体属性与部分属性间的本质不同。

此外,求“部分和”的前提是可以“加和”,这正是“非”系统的一大特征,系统内部的关系恰恰是不能加和。所以,比较准确的提法是:“整体不同于部分和”,“不同于”既可指性质的不同,又可指数

量的不同。

顺便提一下,关于以上两种提法,我国有学者曾对它的来源进行过考证。他们发现,这种提法最早来自亚里士多德的著作,但是在翻译中错把原来的“不同”两字译成了“大于”,想不到这一错带来了一些人们对系统理解上的根本偏差。

(2) 整体与总体、全局、全体、集合:整体有一定的格局,这就是通常所说的全局。但整体与总体、全体的概念有本质区别,整体强调属于它的事物间必须存在特定的“组成方式”,并产生出不同于组成部分的“特殊属性”。关于整体与总体,这里有必要多讲几句。最近有人提出要将系统科学“发展”为研究总体的科学,认为总体比整体包含的东西更多,例如,包含了整体的环境,其实这种说法是站不住脚的。关于总体在科学上早有明确的界定,“总体是某种性质事物的全体”,而全体只是表明部件在数量上“齐全”了,不涉及部件之间的特殊关系。零部件齐全了,并不一定能构成一个整体。相反,构成一个整体则一定要求部件“齐全”。

至于集合,它在数学上也有明确的定义,研究集合总要涉及组成集合的元素和元素间的关系,但集合只强调属于同一集合的元素所具有的某种共同属性,而不研究元素间通过什么样的相互作用来构成一个整体。可见,集合与整体也是两个不同的概念。在系统科学中,尽管在研究系统常常会用到集合论与集合的概念,但不应把整体与集合混同起来。

1.2.3 整体生存于环境之中

对外部来讲,一个事物的整体性总是相对于其他事物的整体性而言的,这些“其他事物”的全体构成了“该事物”的环境。所以,事物的整体既“生活”于其他事物构成的环境中,又反过来构成了“他事物”赖以生存、发展的环境。

世界中不存在两个完全相同的事物(整体),不同整体除构成元素不同、时空和数量不同外,主要指的是整体属性间的区别,即各种环境中,特定整体所表现出来的特殊属性。

需要强调的是,在系统与外界的关系中,总是以整体的形式与其他系统的整体发生关系的,也就是说,无论系统的哪个部分与外

界“接触”,它总是在一定程度上体现并代表了它所属的那个整体。这一点也许对身处异乡的华侨和游子感受最深,因为他们无论在哪里,都是中华民族这个整体的一部分,中华民族的强大与否,将在他们个人的对外关系中有着重大的影响。

1.2.4 整体的四大问题

从内部来看整体性,是研究系统的结构;从外部看整体性,是研究系统的性态,这两个方面构成了系统科学的基本内容。除此之外,系统运动的特征、系统价值的实现,也是系统科学的基本内容。这四个方面构成了系统科学研究的“经典”对象,从系统角度提出问题、观察问题、分析问题、解决问题,就是从以下四个基本方面出发的。

(1) 系统整体的组成和结构问题,即事物的整体是由什么构成和怎样构成的?

(2) 系统整体的性态问题,即一个事物在整体上和他事物有什么样的区别和特点,作为一个整体,具有哪些和它的组成部分不同的新属性、新功能和价值。

(3) 系统整体的演化发展问题,即整体按什么样的规律运动,这些规律与组成它的部件在运动规律上有哪些不同?有哪些新的运动特征?

(4) 系统的整体价值与价值实现的问题,系统科学一方面要从理论上阐明系统整体的普遍属性、功能和价值。另一方面又要从实际的环境和需求出发,探索自然系统和人为事物价值实现的途径,开发各种具体的应用方法,针对系统发展中的具体问题进行分析,寻找利用、控制、管理、改造的对策。

1.3 系统科学的四大特点

作为现代科学体系中一门相对独立的学科,系统科学和其他学科相比,具有基础性、前沿性、综合性和实用性四个特点。

1.3.1 基础性

所谓基础性,是指它能为其他学科提供一般的研究思路、理论、观点和方法,成为它们研究的出发点和理论基础。科学史上曾

出现过一系列带头学科和基础学科,例如 15 世纪中叶牛顿力学创立后,力学和物理学就曾经成为了近代科学的基础。它的理论依据是把世界上所有的事物都作为一种由质点所组成,服从牛顿运动定律的力学体系。

现在,系统科学把事物的整体性作为自己的研究对象,而世界上所有的事物无不具有自己的整体性,这样一来,世界上所有的事物就都成了系统科学研究的对象。它的理论、观点、思路和方法就成了所有学科,特别是应用学科的基础和出发点。以管理科学为例,这是一门实用性很强、涉及面很广的学科,但从系统的角度来看,管理科学中对组织、人事、指挥、协调、报告、预算等管理职能的研究,对需求、动力、激励的研究,以及对各种管理模式的研究,在大范围上讲,都是对一类特殊社会系统的研究,因此,离不开系统思想的指导,可以说系统科学或系统理论是管理科学的基础。

把系统科学作为社会科学的基础,似乎不难理解,但对于一些相对成熟的自然科学和数学来说,情况又是如何呢?如果有人系统科学是天体物理学、固体物理学、生物学等的基础恐怕就难说了。然而这些学科研究的同样也是一类特定的自然系统,它们也必须服从系统科学的一般规律。比如,生物学所研究的生命系统就是一种复杂的耗散结构,而耗散结构理论又正是构成系统理论的基本素材。当人们把生命系统的内部结构、外部性态和存在环境结合起来研究时,就会使之更全面、更深刻。

当然,系统科学的基础性是在与其他学科的结合中才能有效地发挥出来的,基础性研究从来不能等同,或者代替其他学科的具体研究。有一阶段,人们到处搬用系统科学的名词概念,似乎只要一用上系统的概念,什么复杂问题就会迎刃而解。这显然是十分幼稚的,其结果,不仅不能解决实际问题,反而败坏了系统科学的名声。

1.3.2 前沿性

首先,系统科学的前沿性可以从它研究的问题,即学科的内容中看出。今天的系统科学以复杂的社会经济系统、生命系统和智能系统为自己的研究重点,这些问题大多是以往科学所没有涉及

或难以回答的,比如要研究复杂系统的演化规律,就要“动用”许多最新、最难、最复杂的数学和理论工具,涉及许多科学史上“千古之谜”、“百年难题”。如不可逆性的起源问题、湍流问题、多体问题、“整体不同于部分和”之谜、人脑的结构与功能等。

其次,系统科学的前沿性可以从它被人们关注的程度、发表论文的比例、以及第一流科学家参加的人数、获奖的级别、人次等方面中看出。近半个世纪以来,系统科学一直吸引了大量当代第一流的科学家来参加,他们的工作有些被授予了科学中的最高奖——诺贝尔奖(如普里高津、艾根)和其他世界级奖,系统科学每年发表的论文占科研论文总数中很大的比例,这些都是众所周知的。

最后,系统科学的前沿性可以从它与当代最新成果和研究“热点”的密切关系中看出:近年来科学中出现了像混沌、分形、孤子、湍流、复杂图形等当代科学的大热门,这些大多可以与系统的非线性相关和复杂性态联系起来。

1.3.3 综合性

系统科学的综合性有三层含义:一是指系统科学不是一个单一的学科,正如物理学中包含了力学、电学、光学、原子物理等多门学科一样,系统科学也是由多门学科所组成的。现代系统科学从20世纪40年代开始创立,经过半个世纪的发展,这个新的学科群本身已基本形成了一个相对完整的体系,随着其理论的发展,它的应用领域也在日益扩大。

二是每门学科都有自己所擅长的领域,系统科学也有自己最擅长的方面,那就是研究复杂的自然与社会系统,系统越复杂,系统科学的功效也就越大。由于系统科学是以自然界、人类社会和思维领域的复杂现象和复杂系统为主要研究对象,因而必须动用各种“武器”,采用多“军种”、“兵种”联合作战的方式,发挥综合的优势,才能有效地解决问题,也就是说,它要求学科群中的各分支学科相互配合,形成一个有机的整体。

三是系统科学在研究内容上的横断性。就研究的对象和内容而言,可以把现有的学科分为纵向学科和横向学科,纵向学科以自然界或社会中的某类事物为研究对象,横向学科以所有事物的某

个共同方面或性质为研究对象。物理学、化学、生物学、地理学等是纵向学科的典型,而数学则是横向学科的典型,它不局限于某个具体对象,而是以世界上所有事物都具有的数量、形态和关系为研究对象。系统科学也如此,它研究的是一切事物所具有的整体性,或者说,一切与整体属性有关的问题,如事物(系统)整体的组成、结构、属性、演化、价值等,都是系统科学研究的对象。

1.3.4 实用性

系统科学的实用性来自它对整体价值的关注,这也是系统科学的特色之一。从这个意义上讲,系统科学不再是以单纯认识世界为目的、“不计功利”、“纯探索性”的学科了。它总是要追求实效,过问价值,求得最优。系统科学的实用性还表现在它对方法、方法论的特殊关注。众所周知,方法本来就是理论见之于实践的东西,方法的不同就会带来效果的不同,因此,可以把系统科学看成是一门关于方法和方法论的学科。

实用性在经济学上是与价值、目的密切联系在一起的。有应用效果就有经济价值,就有“性能价格比”,这些都是非常实际的东西。为了研究具有实用价值的人造系统和系统价值实现的具体途径,系统科学中有一个专门的应用层次——系统工程。系统工程几十年的发展早已证明,它对解决实际的、复杂的“人为或人造事物”问题具有特殊的功效。

在众多现代科学的门类中,系统科学通过自己强大的实用功能,不仅把自己的科研与社会实践紧密地联系起来,而且为其他门类的自然科学与社会科学提供了一条通向实践的桥梁。

1.4 系统科学的体系

系统科学是一个包含了多个学科的学科群,经过近半个世纪的发展,这个学科群已经具有了一个相对完整的体系。下面就这个体系中各门学科所处的位置、作用和相互关系,以及它们是怎样构成一个完整体系的进行研究。

关于系统科学的体系已有不少论述,其中较有代表性的是《一般系统论》创始人贝塔朗菲的研究纲领和我国学者钱学森的观点。前

者把系统研究分为系统科学、系统技术和系统哲学三个方面。后者从对现代科学的层次、门类研究出发,把系统科学分为四个层次。在谈到现代科学技术体系时钱学森先生提出,可以把它分为以下四个层次:“首先是工程技术这一层次,然后是直接为工程技术作理论基础的技术科学层次,再就是基础科学这一层次,最后通过进一步综合、提炼达到最高概括的马克思主义哲学。”他认为“现代科学技术体系中大部门应该是自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学和人体科学这六个大部门”。在《再论系统科学的体系》一文中,他给出了一张描述系统科学体系的图,从这个图中看出,系统科学同样可分为哲学、基础科学、技术科学和工程技术四个层次。作为系统科学哲学层次的是系统观,它是马克思主义哲学与系统理论联系的纽带,而系统学是系统科学的理论基础,下面是包括信息论、运筹学、巨系统理论与控制论等的技术科学层次,作为系统科学的工程技术层次的是各门系统工程、自动化技术和通信技术等。

除了上述观点外,还有斯德哥尔摩大学教授萨缪尔森提出的系统科学“心形图”,把系统科学划分为一般系统和特殊系统两个层次,认为系统科学是系统论、控制论和信息论的综合。1977年日本学者市川淳信角塔在他的《系统科学》一文中,画了一个由五个等级组成的“金字塔”,这五个等级是:系统概念级、一般系统理论级、系统理论各论级、系统方法论级和面向对象的系统处理法级。此外,我国学者朴昌根、苗东升、谭跃进等也在各自的论著中包含了对系统科学体系框架的思想。

上述观点虽然在侧重面上各有不同,但基本思路是一致的,即大体可以把系统科学划分为系统哲学、系统理论、系统技术和系统工程四个基本层次。但是,系统科学经过20多年的发展,人们发现,虽然层次划分可以明确学科的内容特征,但也存在两方面的问题:

(1) 有些内容在层次划分时出现困难,比较突出的问题有:系统哲学应该包括哪些内容?它究竟是哲学还是科学?科学与哲学的桥梁纽带如何理解?系统工程应该放在哲学方法论层次,还是放在应用层次?

(2) 按以上层次划分难以反映各学科间的横向联系,系统科学

仍然不能成为一个整体,特别是在论述上显得比较分散零乱。

针对上述问题,笔者认为系统科学在内容上可以分为基础系统论、复杂系统论和系统方法论。

1.4.1 基础系统论

基础系统论也可以称为一般系统论或系统科学概论(这就是本书第一篇的内容)。一个学科体系是否完整,是否在逻辑上自洽,关键看它的概念体系是否完整。系统科学要作为一个完整的体系,应该有一个基本的线索,它的逻辑起点就是系统的概念。所以基础系统论主要是围绕系统的概念体系来展开的。系统科学基础主要包括以下内容:

(1) 对系统概念进行科学分析:什么是系统观点?它包括哪些基本方面或基本内容?显然,这里涉及许多原来包含于系统哲学层次的内容。要从科学的角度加以回答,就必须对它的判断和结论作科学的论证和实验的检验,所以系统观是一种科学观念,而不是一种哲学思辨与猜测。

系统观念应该包括哪些基本要点?系统原理有哪几个?系统规律有哪几条?这些问题在许多系统科学的创始人和系统哲学家如贝塔朗菲、拉兹洛、邦格以及我国学者钱学森等人的论著中都作了详细讨论,只是各人的表达方式不同而已。而且在一些研究系统理论、自组织理论、复杂性态的科学著作中,系统观点也是十分明显的。基础系统论要做的工作是如何把它们统一在一个逻辑上自洽的体系之中。

(2) 对系统本质特征和基本属性的研究:系统科学从事物整体性这样一个特殊角度来观察世界,它与从别的角度观察世界有什么不同呢?

不少著作在谈到系统的特征和基本属性时,列举了整体性、有序性、层次性、突现性、稳定性、目的性、开放性、同型性、动态性、差异性、协同性、相似性等。但人们不禁要问,这些究竟是否都是系统基本的属性?它们是不是处在同一个层次上?哪些更基本一些?前面已指出,系统是由多个部分组成的整体,并以整体的形式存在于环境之中,与环境发生相互作用,从中表现出各种各样的属

性。因此,整体性就是系统最根本的属性。

系统的整体性可以从三个基本方面加以研究:①从整体内部的组成与结构来研究;②从整体外部的属性和状态来研究;③从整体在时空中的运动特征,即演化过程来研究。这三个方面就是基础系统论的核心内容,也是本书第一章的主要内容。

(3)对系统科学中一些基本问题、命题和难题的研究:系统科学中有一些所谓“千古之谜”,如“整体不同于部分和”、“整体性的突现”、“不可逆性的起源”、群体演化的终极等;还有些几乎成了定论的命题,如“非平衡是有序之源”(普里高津)、“开放推动系统发展”(贝塔朗菲)、“生命体是负熵的小岛”(薛定谔)、“边界的边界为零”(惠勒)等。这些问题和命题有些是从哲学角度提出来的,有些是从科学的角度提出来的,但不管来自何方,都是一些根本性的重大问题,在基础系统论中必须对它们加以回答或解释。

不难看出,基础系统论是对系统最一般、最基本问题的研究,它的结论和原理适用于所有的系统,在一定程度上可以把它看作是系统科学的基础,也可以作为初学者入门的第一个台阶。

1.4.2 复杂系统论

虽然系统科学研究世界上所有的系统,但复杂系统却是系统科学的主攻方向,或者说系统越复杂,系统科学的作用就发挥得越充分。事实上,从20世纪60年代末算起,40年来系统科学的主要进展也是在复杂系统研究方面,因此,复杂系统研究或复杂系统理论就成了今天系统科学的主题和主要内容。复杂系统论应该包括两方面的基本内容:

(1)对复杂系统运动、演化一般过程、普遍规律和原理的研究:这方面内容与原来的系统理论层次的内容是基本符合的,这里特别冠以“复杂”系统,原因在于只有在复杂系统那里,系统演化的规律性才表现得特别充分。例如,系统的自组织行为、混沌行为和分形形态,都是非线性系统表现出来的典型复杂性态。20世纪70年代以来,从理论化学、理论物理、理论生物学以及现代数学、气象学等领域中创立出耗散结构理论,协同学、超循环理论等自组织理论以及突变论、混沌理论、分形理论、非线性系统、复杂系统理论等,

尽管它们侧重点各有不同,但都是围绕复杂系统在其发生、发展和消亡过程中的问题而展开的。同时,作为一个全面的理论,不仅要包括单个系统的演化规律,而且要包括系统群体的发展规律,这些构成了复杂系统论的主干。

(2) 对信息与智能系统、社会经济系统的研究:这两类系统是复杂系统中特别有代表性,也是与人类关系最直接、最密切的。现在,信息时代所带来的巨大影响早已超出了科学技术的范围,成为世纪之交最重大的事件之一。信息时代的到来,迫使人们加紧研究信息系统运行的规律,特别是对人工智能、人脑智能和人机智能的研究。社会经济系统是一类典型的复杂巨系统,它的许多结构特征、行为特征和运行规律是其他系统所不具有的。因此,对上述两类特殊系统的研究,不应被简单地看作是系统理论在这些领域中的应用,它本身就具有非常深刻的理论和实践意义。

由于系统理论要刻画系统的一般运动规律,不仅要用到定性分析的方法,而且需要大量的定量分析、计算机模拟和计算机仿真,这些内容在动力系统理论(包括微分动力系统理论)、复杂系统理论、非线性系统理论中有许多专门的论述,它们也是复杂系统论的基本内容之一。

1.4.3 系统技术与方法

方法论是系统科学的一个重要特色,系统方法是架设在系统观念、系统理论与实际应用之间的桥梁,因而也是系统科学中必不可少的基本内容。

当然,方法本来就是观点理论见之于实践的东西。观点、理论、方法三者之间并没有截然的界限,许多观点、理论就具有很强的方法论意义。但是,方法和方法论所关注的不是规律的探索,而是面向实际对象和问题的思维逻辑与行动步骤。正是因为要解决实际问题,而实际问题又往往要涉及许多物质方面(硬的)的技术和方法论方面(软的)的原则与程序,所以,系统方法包含了系统技术与系统工程两个层次的内容和系统科学方法论原理的内容。具体包括三个方面:

(1) 系统技术:技术所要解决的是不同类型系统相对具体的问

题,其中包括系统控制的技术问题、通信中的技术问题、系统建构中的预测、决策、规划、计划等问题。因而,在人们熟悉的学科中,控制论(包括可控制性、可观察性、不同的控制类型与方法的问题)、信息论(通信的数学理论,包括对信息传递中的经济性、可靠性、传输速率、编码规则、噪声干扰等的研究和相应的处理方法)、运筹学(包括线性规划、非线性规划、整体规划、动态规划、图论、网络理论、博弈论、决策论、排队论、库存论、搜索论)等都属于系统技术的范畴。

技术问题的解决无疑需要系统观点和系统理论的指导,但正如哲学不能代替理论一样,理论也不能代替技术。因为技术问题的解决还要结合某类系统更为具体的特征,问题的性质以及具体的边界条件和初始条件。

(2) 系统工程:在系统科学中,系统工程是最接近实际应用的一个层次,从逻辑上讲,它应该处在系统科学的最底层,是最基础的层次。因为它所要解决的问题比技术问题更为具体,它所针对的不是一类对象而是某个具体的对象。每个对象都有自己不同于其他对象的特殊属性和特殊环境。解决工程问题就要考虑特定的时机、具体性质、工作对象和工作主体不同的目的等。

系统工程使系统科学的层次划分碰到了难题,即究竟把系统工程放在观念层次,作为一种观点方法,还是把它放在实践层次,作为一项具体的工作或活动。我们认为,系统工程虽然直接面对实际问题(项目或工程),但它本身并不是一项“工程”,而是一套方法和思路。但是,如果在系统工程前面加上一个具体的名称,情况就不同了,如教育系统工程、军事系统工程、农业系统工程等。这样的工程就是指干一件具体的“事情”,如建设一个水利工程,一幢房屋,制造一件物品等。不过,某某系统工程与一般工程仍然有所不同,某某系统工程在“干事”时不仅运用了系统的观点、理论和方法,而且运用了系统工程的专门思路、程序和模型,如著名的霍尔三维模型、行动步骤模型、动态系统原理(福雷斯特)等。在本书末,将对一般系统工程方法、逻辑思路、工作程序、数学模型等进行专门介绍。

系统工程上述两重性决定了它在应用中的特殊地位和特殊作用。运用系统工程的思想方法可以使人们更好、更有效、更快地干成某件具体的工作,使人们在处理具体问题时变得更聪明,考虑问题更系统、更全面。但系统工程却不能代替具体的工程,即系统工程不能“单干”,必须与具体的人和物有机地结合起来。从某种意义上讲,系统工程的作用就像做菜时使用的盐和味精,它们能使菜的味道变得“鲜”,但它却不能单独作为一道菜,要把系统工程作为单独一道“菜”来吃,肯定是不行的。

(3) 系统科学的方法论:系统方法本身又构成了相对完整的方法论体系。在这个体系中包含三个层次:

1) 系统观念层次的方法,以系统观、系统概念为核心,对研究所有的系统提供了一般的思路和原则,主要从思想方法上给人以启示;

2) 系统理论层次的方法,以系统观为指导,为研究复杂系统提供可作参考的模型、原理;

3) 特殊系统层次的具体方法,是针对一些特殊系统或特殊问题而给出的方法论体系。

1.5 系统定义与系统公理

一个独立的学科都有自己特定的研究对象或研究角度,这个研究对象或角度的主要部分是不与其他学科的研究对象或角度发生重叠的,否则该学科就可以由其他学科所替代,从而失去其存在的理由,而学科的研究对象和研究角度往往又是通过对其核心、基本概念的界定和定义来确定的。系统科学作为现代科学中一门(类,或群)独立的学科,它特定的研究对象和角度是什么呢?不仅如此,一个独立的学科还要有自己独特的观点和方法,人们正是通过使用这些观点、方法来解决特定领域的问题。那么,系统科学又有哪些与其他学科不同的观点和方法呢?

既然系统科学是从“整体”的角度来观察和研究世界上的各种事物的,因此我们把系统科学定义为“研究事物整体性及其与环境关系的科学”。

1.5.1 系统的特征

要给系统下一个确切的定义,先要搞清系统的基本特征。

什么是系统?通常的回答是:系统是由多个部分组成的有机整体。这个回答简单明确,很容易为人们理解和接受,但并不完整,因为它只讲到系统的组成而没有涉及系统其他方面的特征。那些“其他方面的特征”对于事物的整体性来说同样是十分重要的。例如,在许多场合,人们总是带有特定的目的去认识和利用一个事物的,这时他主要关心的是该事物具有什么样的属性和功能,能对实现自己目的的过程中起什么作用,“派何种用途”,而对该事物由什么东西所组成并不十分在意。这就是说,人们主要着眼的一系统(事物)与他系统(系统)和环境的关系。可见,要全面地认识系统,不能单从一个方面来看事物的整体,而必须从它的内部结构和外部属性来进行研究和考察。

为了认识系统,不妨从正反两方面举些例子。

正例:

一个相对完整的物体可以作为系统:物理化学中的原子、分子、元素、太阳、地球、月亮及其他天体;生物学中的细胞、器官、人体、种群、生态;社会经济中的企业、政党、集团、民族、社区、城市、国家以至跨国家的联合国组织等;人造事物中的汽车、飞机、建筑物、计算机、网络、艺术作品等。

一个有始有终的事件可以作为系统:人们有头有尾地做完了一件事,如完成了一项工程,研究了一个课题,甚至教完了一门课程,做好了一套家具,安装好一台电脑等。这里强调有始有终地完成,主要是要求这件事能产生,或部分产生预期的效果。就是说,一个能产生一定功效的事情,也可以把它们当作一个系统。有时把它们称为“人为事物”而区别于通常的物体;有些功效性不强或不十分明确,但具有一定完整性的东西也可以称为系统,如一幅完整的图画,一段文章或歌曲,一个故事,一个完整的想法,一套理论,甚至语言中一个能表达完整意义的句子。

反例:

举出系统的正例是很容易的,因为世界本来就是由具有各种

不同整体性的事物所组成。但要找出几个不是系统的例子却十分困难。仔细想来就会发现,并不是有哪些事物不具有整体性,而是有些事物的整体性不明显,或者它的整体性与人们对它的期望和研究目的关系不大,所以通常不作系统来看待。例如:不把一个“单一”的东西,如力学中的“质点”、莱布尼兹的“单子”当作系统;不把一个“天马行空,独来独往”的个人看作一个社会系统;不把一盘散沙、一派胡言乱语、一些杂乱的符号等不着边际的东西当作系统;不把一堆相同的事物看作系统,如一部机器的所有零件,某些整数的集合;不把一个静止的或“死的”东西,如一张照片,一个没有活力的东西看作系统。

事实上,对于那些即使整体性很强的东西,人们也不一定把它作为系统来研究,例如,对一个水分子或一个天体,化学家和天文学家也许关心它的系统特征;而物理学家只关心它的质量、电荷、力、运动、温度、热量;数学家只关心它的数量、形态、关系;生物学家只关心它们对生命的影响等。可见,对事物局部的研究不能称为系统或系统研究。

通过比较系统正、反两方面的例子后,可以将系统的特征归纳为以下几方面。

(1) 组分的多元性:从部件(元素)的数量看,系统由多种(个)部件所组成。这里的多个,包括数量上的多个和种类上的多种。

1) 从部件或元素的数量而言,单一元素是不能称为系统的,因为“单丝不成线,独木不成林”,只有两个和两个以上的元素或部件才能构成一个系统。但是,在现实世界中并不存在仅仅只有两个元素或两个部件构成的系统,所以两个元素的系统只是一种简化的或理想的情况,把它称为“简单系统”。

应该指出,由两个元素构成的简单系统与由至少三个或三个以上元素构成的复杂系统是有本质区别的,这一点在物理学上早已用“两体问题”和“三体问题”、“多体问题”来加以区别,后者至今仍是物理学中的难题。复杂系统最少要有三个元素。因此,可以把“三”这个数字作为复杂系统的一个标识性常数。

其实任何实际的复杂的事物都包含多个元素,这是没有疑问

的,但这并不等于在研究它们时不可以对它们进行合理的简化和“一分为二”。从研究系统的方法而言,两元素组成的简单系统还是有其不可替代的价值。因为,只要有可能,还要运用两分法,把复杂的系统“一分为二”,从矛盾的两个方面来进行分析。

2) 从种类而言,一个系统总是包含有不同性质的各种成分,单一成分或性质的事物,即使数量再多也不能构成系统。很明显,对于构成一个完整的系统来说,种类上的多样性是比数量上的多个性更为重要。

把系统部件数量上的多个与种类上的多样共称为系统组分的多元性,它是系统的第一个特征。

(2) 结构的有序性:结构的有序性是系统区别于非系统的第二个重要特征,它有如下含义。

从部件间的关系性质看,系统存在一个整体的有序结构。

关于系统的结构,将在第二章中作详细讨论,这里只是强调系统中各部件或元素之间必须存在一种有序的特殊关联(以下简称有序关联或有序结构)。它主要表现在以下方面:

1) 有序结构是在系统范围之内的特殊关联,它仅仅存在于统一的全局(整个)范围之内。例如,领导与被领导的关系往往是组织结构有序性的体现,它只存在于那个特定的组织之内,超出了这个范围,就“谁也管不了谁”了。而事物间的普遍联系则不受这个限制,比如,物理学上的“万有引力”定理指出:一切有质量的物体之间都存在引力,它的大小可以用万有引力定理来计算。万有引力就是实物之间的一种最普遍联系,但除了在力学,主要在天体演化中加以考虑之外,它对其他学科的构成并不发生实质性的影响。马克思在谈到人的本质特征时曾经指出:“人是一切社会关系的总和”,社会上的任何一个人都可以与另一个人“拉上”关系,但并不就此认为他们同属于一个社会系统。精神世界中的情况更是如此,人的联想能力可以把一切事物都联系起来,但并不能因此而认为被联想的实物都属于同一系统。

2) 有序结构是全局性的,关系到所有部件的联系,一方面它把原来分散、独立的个体联系成一个有机的整体;另一方面,两部

分之间的联系总会影响对其他部件之间的联系。这就是系统内部的各元素之间会“牵一发动全身”的原因。而事物间的一般联系则只在局部起作用,或者只发生在个别事物之间,如两个或少数几个事物之间。

3) 有序结构在系统内部是必然的、相对稳定的、基本不变的联系。如房屋的结构,企业内部的人事关系就是如此,而其他联系通常是随机的、偶然的、不稳定的。

(3) 整体的突现性:整体性是系统最基本、最主要的特征。这种特征不是各元素特征的简单加和,而是在结合成整体时“突现”出来的。这意味着从整体与部分的性质来看,系统具有“突现性”和“非加和性”。从外部性质来看,系统和非系统的最大区别在于,系统具有一种构成它的部件(元素)所没有的完全不同的新属性。非系统的事物既然不构成整体,也就谈不上什么新的整体属性。但是,若干非系统的事物可以“构成”(严格地说是“看成”)某些集合或全体。它们的属性在性质上与部分的性质相同,在数量上等于各个组成部分数量的加和。例如,一盘散沙的重量是各个沙子重量的加和,一堆沙子的物理化学性质与一粒沙子的相同。可见,在外部属性上系统与非系统的区别在于系统具有“非加和性”,非系统具有“加和性”。

系统整体性态的突现无疑是系统科学中最具有“神秘”色彩的特征,一直被视为“千古之谜”,本书将从系统内部元素的非线性相互作用来对它加以解释。

(4) 系统时空与功能的有限性:从时空范围来看,系统内外有别,有确定的边界;有始有终,有确定的生命周期。

系统和非系统的区别在于,系统是内外有别的,而非系统的事物之间是没有内外之分的。系统的“内外”有别,实质上是它时空有限性的一种体现,所以说时空有限性是系统的另一基本特征。

系统的时空有限性具体表现在两个方面:

1) 在系统的元素中有一群处在边界上的特殊元素,这些元素对系统的存在发展都起着“关键”作用。相比起来,非系统的各事物之间虽然也有这样那样的区别,但却没有明确的分工,更没有哪

些元素起特殊的边界作用。

2) 每个系统都有自己的特征尺度和特征时间,特征尺度与它存在的特殊空间范围有关。如人的特征尺度在 1~2 米,细菌的特征尺度在千分之几个毫米,大象和鲸鱼的特征尺度在几米到十几米等。特征时间就是系统的“生命周期”,即一个系统从创生到消亡的时间间隔。

系统的时空有限性是人们认识、研究、改造系统的基本出发点和重要依据。中国古代早有所谓“大宇宙”、“小宇宙”的说法,从一定意义上讲,小宇宙就是系统“自己的时空尺度范围”。

(5) 系统变化的不可逆性:从发展变化来看,系统的变化具有“不可逆性”,称为“演化性”。系统和非系统在运动变化的形式和方式上也有本质区别。非系统的事物由于相互间不存在稳定的联系,所以在运动变化时总是各行其是,即使与周围的事物发生联系,相互关联的范围和尺度都很小,基本上就在附近,因而,一个部分的变动对其他部分或者总体没有什么影响。不仅如此,由于不存在整体间的联系,也就不存在整体的性质,因此,部分的变化对总体来说只有量的变化和相对位置的变化,没有质的变化。最重要的是这种变化往往是可以“逆转”的,也就是说,当发生了某种变化后,可以“无后效”地回到原来的状态。

系统的运动变化则与此不同,系统除了有位置、数量、规模等方面的变化外,当它发展到一定阶段时还会实现质的飞跃,这种质的飞跃总是不可逆的。系统变化的不可逆性是系统运动变化的一个基本特征,这一点下面还将进行专门的讨论。

(6) 整体的价值性与目的性:从功能价值来看,系统有自己特殊的目标、功能与价值。在研究一个系统时,人们不仅关心它的属性,而且关心它对其他系统实现某个特定目标所起的作用,这就是系统的功能。比如,人们关心由一些建筑材料做成的房屋的居住功能,由一些电子元件构成的计算机系统的计算功能,由一些符号、语法所构成的语言的交际功能等。这些功能不是哪个元素独自所能发挥的,而是一个系统所具有的功能,这些功能是系统属性的一种特殊表现,是针对某个特定的系统(对象)实现某个特定的

目标所具有的特殊作用。因此,系统的功能总是具有特殊指向的,是整体相对某个特定系统或事物的特殊关系。

在一个系统的许多功能或与其他系统的诸多关系中,有一类关系或功能对我们来说有着特殊重要的意义,那就是系统与人类或个人实现某个目标的关系,把系统在这些方面的功能称为系统的价值。因此,一个系统的价值不仅取决于系统自身的结构和属性,而且取决于它与人的特定关系,以及当时的环境、时机等。这意味着谈到某个系统的价值时总是把它和人或某个事物的目的联系起来,由它们共同构成了一个新的、具有价值属性的系统。

不难看出,以上关于系统的特征都是事物整体性在各个方面的体现。在搞清了这些特征之后,就能对系统下一个确切的定义,并给出系统公理。

1.5.2 系统定义

现在,关于系统的定义很多,著名系统学家 A. 拉波波特认为,可以从两个方面来定义系统:一是数学的、分析的定义;二是直觉的、整体的定义。例如,麦萨维奇把系统定义为:“关系的集合”,这是一种数学定义;贝塔朗菲把系统定义为:“相互作用的诸元素的复合体,即相互联系的诸元素的复合体”;钱学森对系统的定义是:“系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的,具有特定功能的有机整体”。《中国大百科全书》中宋健给系统所下的定义是:“按一定的秩序或因果关系相互联系、相互作用和相互制约着的一组事物所构成的体系,称为系统”。

将这些具有代表性的定义与上一节对系统特征进行比较,不难发现,各种定义虽然侧重面有所不同,但基本内容还是相同的。它们都包括以下五个方面:

(1) 系统是由多元素构成的有机整体。就是说“单丝不成线,独木不成林”,系统内部总要包含多个组成部分。

(2) 元素不能随意组合,必须按特定的方式才能(组)合成一个有机的整体,才能“突现”出元素所不具有的整体性质。

(3) 整体在和其他事物及环境的关系中表现出自己的特殊性。也就是说,系统不能“天马行空,无牵无挂”,它总是存在于一

定的环境之中,并在与环境或其他系统的作用中表现出特殊的性质和状态。

(4) 整体的结构和性态不仅在运动变化,而且会发生不可逆性的演化。

(5) 系统整体在与其他系统和环境的关系中表现出自己独特的属性,并对实现某个目标有一定的功能,对人有一定的价值。

根据这些特征,可以给系统下的定义是:“系统是由多个部分、按特定方式结合起来、不断演化发展的整体,它在与其他事物和环境的相互关系中体现自己的属性、功能和价值”。

1.5.3 系统“公理”

根据上面系统的五大特征,可以对系统提出一种“公理化”的表示。

设:

(1) 系统包含 n 个元素,用 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ 表示构成系统的元素集合,用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ 表示元素的状态变量, m 为状态变量的维数。

(2) r_{ij} ; $i, j = 1, 2, \dots, L$ 表示元素间的关联; $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_k\}$ 表示关系的集合。

(3) 用 E 表示从元素的相互作用中“突现”出来的整体属性,即系统的中观变量。

$$\frac{dE}{dt} = f(r, R, t)$$

表示 E 随时间的变化, f 通常是非线性关系(非线性算子)。

(4) 系统对不同的目标、不同的环境和其他系统有不同的功能和价值:

$V = (S, t)$, 它们同样是随时间变化的。

(5) 用 e 表示系统的边界。

(6) 用 S 表达系统的熵值(无序的量度)。

于是,根据上面的“公设”,有 4 条系统公理:

第一公理: $n \geq 2$ 即系统元素的个数大于 1; 简单系统 $n = 2$, 复杂系统元素个数大于 2(多系统公理);

第二公理： $S \neq \sum A_i, i = 1, 2, \dots, n$, 即整体不同于部分和；它具有特殊的整体结构与属性（实现公理）；

第三公理： $\frac{dS}{dt} \geq 0$, 即系统作不可逆运动——演化（演化公理）；

第四公理： $e^2 = 0$ 系统时空有限；“边界的边界为零”（有限公理）。

1.5.4 系统科学的概念体系

每个相对成熟的学科都有自己的概念，概念中有一些是主要的和基本的，在基本概念中又有那么一个或少数几个是最主要和最基本的，把它们称为核心概念。这些概念不仅随着学科的发展而不断明晰与深化，而且会逐渐形成一个概念体系。学科的概念体系通常具有“金字塔”结构或树状结构，即由一个或几个该学科最基本的概念出发，不断分支，构成一个多层次的概念网络体系，这个概念体系的结构也就构成了学科理论的骨架。通常学科的概念体系可以分为四个层次：处在最上层的是核心概念；它的下面是基本概念层次；由基本概念再往下是主要概念层次；最下面的是普通概念或一般概念层次。了解了这个概念体系，就好比抓住了学科的基本线索和纲领，因而是把握该学科概貌的一条捷径。

系统科学也是如此，它的核心概念是“系统”（有时也称为整体、组织等）；基本概念有四个：结构、性态、演化、价值，它们体现了系统的四个基本方面；而主要概念是由以上四个基本概念“引申”出来的。如在结构概念之下又包括组分、关联、构形、层次等四个主要概念，在组分概念之下包括元素、要素、子系统、分系统、部件、构件等概念；在关联概念之下包括关联数、关联度、关联性等概念；在构形概念之下包括空间、时间、功能构形等概念；在层次概念之下包括等级、集团、功能团等概念。到了普通概念层次，有些概念还可以进一步往下分，例如，要素的概念可以按所起的主要作用的不同方面来分出一些具体的概念，而有些普通概念则到此层次为止。当然，系统科学作为一个正在发展之中但尚未完

全成熟的学科,目前还不能把所有与学科有关的概念都准确地包罗进去,而且,现有的概念也在不断发展,概念的层次和地位也会不断变化。

系统科学的概念体系:

核心概念:系统——事物的整体。

基本概念四个:结构、性态、演化、价值。

主要概念多个,如:

与结构有关的有组分、关联、构形、层次……层次等。

与性态有关的有整体性、复杂性、非线性、不完全性、稳定性……层次等。

与演化有关的有他组织、自组织、不可逆性、创生、发展、消亡……层次等。

与价值有关的有目的、效用、成本、功效……层次等。

系统科学中普通概念更多:包括元素、要素、关联性、关联度、关联数、空间结构、时间结构、功能结构等。

这些概念随着学科的发展而不断明晰与深化(有时概念的层次和地位也会发生变化),逐渐形成一个“金字塔”结构或树状结构的概念体系(如图 1-1)。这个多层次的体系的结构构成了学科理论的骨架。了解了这个概念体系好比抓住了学科的基本线索和纲领,因而不失为把握系统科学概貌的一条捷径。

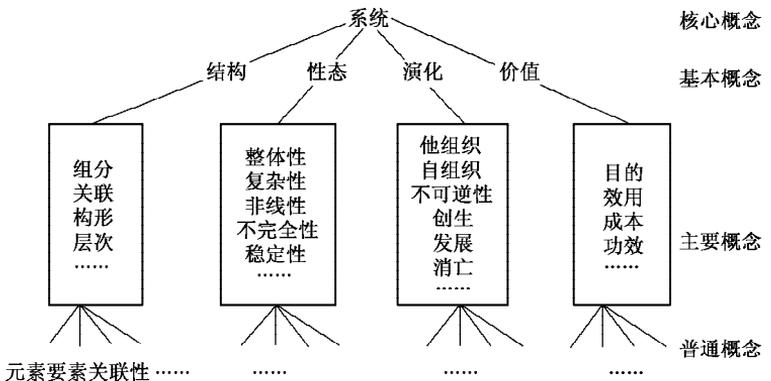


图 1-1 系统科学的树状概念体系

1.6 系统的分类

系统概念的外延极广,不仅包括世界上大至宇宙中的天体,小至分子、原子的一切“实物”,而且包括所有具有自己整体性的思想、概念体系和符号系统,还包括那些完整的活动、过程和事情。在具体研究一个系统时,首先就要对系统进行分类,这是因为:

(1) 世界上的事物或系统本来就是“物以类聚,人以群分”的。这是世界有序性和层次性的体现,它为我们提供一个“他山之石,可以攻玉”,“联想类比,模拟仿真”的客观基础。

(2) 分类就是对事物进行分析和分门别类的研究,它可以使人们的思想条理化,建立起对复杂的客观世界有次序、有层次的理解和认识。因此,分类的方法乃是科学研究的一种基本方法。在科学史上对植物、动物的分类,对化学元素的分类,对突变类型的分类等就曾对科学的发展起过重大作用。同样,当我们面对世界上各种各样的事物(系统)时,对系统的分类就成了研究的第一步。

(3) 研究一个系统的最根本也是最直接的目的,是利用它来达到某个具体的应用目的,而要利用或应用一个系统又必须认识它,了解它的状态特征、特性和运动的规律。对这些特征和规律的认识可以通过对该系统的直接研究,也可以通过对它同类系统的研究来得到认识。直接研究固然很好,也很省事,但往往受到许多限制。比如,我们总不能对世界上所有的事物都一一加以研究,碰到一些巨大的、复杂的对象更是难以下手,而对同类的研究结果又往往可以用到该类中的某个具体对象。

本节研究系统的分类,而在对系统进行分类之前先要研究一般的分类方法和系统分类的原则。

1.6.1 系统分类的原则

从方法论上讲分类的最基本的原则有三条:存在性、唯一性和完备性。

存在性:即分类的出发点应是对象的客观存在,是它本身所具有的属性和规律。

唯一性:一种分类标准确定以后,一个对象就只能属于某一

类,不能同时属于两个或两个以上的类,这里是唯一的,排他的。

完备性:所有的对象加起来应该等于它的总类,即不能存在一个对象不属于任何一类。

上述三个基本的分类原则是任何分类都必须遵守的,对于系统科学来讲,应有较低层次的分类原则。我们以为,在对系统进行分类时主要应考虑以下几个方面:要反映系统基本结构与性质上的差异;要反映系统运动变化规律上的根本差异;要反映应用和价值上的主要差异。

总之,系统的基本出发点是系统的特征、一系统与他系统间的差异。据此,提出以下几种系统分类法。

1.6.2 按组成分类

系统是由若干元素和要素组成的,元素、要素的性质、大小、边界的不同构成了不同种类的系统。由于组分的不同,使得系统的性质与运动规律各不相同。

按元素性质可将系统分为物质系统与观念系统、天然系统、人为系统和人造系统。

(1) 物质系统:实质是指客观存在着的实物系统,它包括大至天体,小到原子、基本粒子的所有自然系统,以及各种人造的、人为的系统,它的基本特征就是由实际的事物所构成,并且有特定的时间和空间范围,因而比较直观,可以看得见,摸得着,或感受得到。实物实际上也是一个大类,它既包括实际的事物,也包括实际的事情、事件,如某个项目、某个工程。

(2) 观念系统:其特点是由观念、意识、想法、思路等构成的系统。它们同样客观存在着,例如,一个语言系统是由音节、字、词、句、章节等组成,它们具有在人与人之间传递信息的功能,各元素间有特定的语法关系;一个事件,也是一个系统,它有起因、过程、结局,起到一定的效果;一个完整的想法也可以看作是一个系统等。实物系统和观念系统有着各自的特征,但在人类社会许多事都既包含实物又包含观念。管理就是这样,如何调动人力、物力、财力,就要处理好各类系统间的关系。

(3) 天然系统、人为系统、人造系统:这种划分是以人的实践对

系统干预的程度来进行划分的,这种划分具有相对性,天然系统指的是人们对它的存在和运动影响可以忽略的系统,人类出现以前的物质世界,包括远在天边的星体,它的天然性是显然的。但就是有些近在眼前,我们却不能或无须变动的事物,如中国对美国的某项国内政策,就可以把它作为“天然”的系统来对待。人为系统是指那些在考察过程中,人们能主动干预或不可避免地发生相互作用的系统。人的行为在这些系统之上打上了不容忽视的印记,在与人发生关系的前后,系统的性质发生了根本性变化,实质上变成了一个新的、有人介入的系统。这种系统不仅在构成上,而且在运行的规律上都有着重大的改变。在研究中,特别重视这类系统,比如,社会经济系统就是属于这一类。人造系统是指世界上原不存在,而是由人按自己特定的目的制造出来的系统。前面所说的各种各样的工程,就是为了制造人造系统。同样,人造系统可以是一件实物,也可以是一个事件或事物的某种状态,如理论体系、完整的计划、概念体系、语言系统等。

1.6.3 按大小分类

可将世上的事物按规模大小分为巨系统、大系统、系统、子系统、分系统、胀观、宇观、宏观、中观和微观系统等。这是按系统所涉及范围的大小来进行划分的,大小可以指时空范围,组成部分的数量和性质的多少,种类和层次的多少等。大小是一个量的概念,而系统分类主要关心的是系统不同的质。这就要求在按大小分类时要抓住由数量的差异而带来的质的差异。这里特别要提到“中观系统”的概念,中观系统介于宏观与微观之间,实际上是人们研究问题时主要关心的系统。中观范围的划分包含一定的主观性,但却并不“随意”。统计物理学中常提到“宏观无限小,微观无限大”看似矛盾,实际上却是可能的。比如一滴水,包含了 10^{23} 次方数量级的水分子,要进行定量的刻画,这个数量实在是太大了。但如果只考虑一个或几个分子的行为,又往往体现不了它的统计规律,因此常选一个适中的数量,这个数量的大小可以用斯特林公式是否成立为标准。它既不失一般性,可以很好地运用统计或其他方法,又不会因数量过大而无法处理。对于复杂系统,从上述划

分中引出的“中观方法”是一个常用的、非常有效的方法。

1.6.4 按属性分类

事物的性质千差万别,如何按系统的性质进行分类是个十分复杂的问题。这里不去涉及事物具体的性质,只是从数学、物理上对性质作最基本的划分。

(1) 按数学性质分,主要可以分为线性系统与非线性系统。线性与非线性作为一个数学概念,都是描述量与量之间的相互关系的。从代数来讲,线性就是成正比的关系,或者一次方的关系(通常也叫比例关系)。

$$Y = aX + b \quad \text{其中 } a, b \text{ 为常数。}$$

从几何来讲,就是直线关系,在 X, Y 平面上的斜率(比例)为常数。

线性系统也就是内部或外部关系为线性相关的系统,如输出与输入为线性关系等。

非线性系统是相对线性而言的,即不是线性相关就都是非线性相关,其实世界上几乎所有现实的关系都是非线性的。但是,有些关系在一定条件下可以近似地看作线性关系,或简化为线性关系来处理。当非线性效应较小,以致在处理问题时可以忽略时,仍把这样的关系作为线性的。只有那些非线性效应不可忽略时,才把它作为非线性关系和非线性系统来处理。由于相互关系的数学性质不同,导致非线性系统具有许多和线性系统本质上不同的属性,其中出现混沌、分形、复杂图形、自组织等就是当前非线性科学所研究的内容。

(2) 复杂系统与简单系统,这是按系统自身的或“内禀”复杂程度与人们对系统描述与研究中的复杂程度来进行划分的。因此,划分复杂系统与简单系统也可以有两种标准。通常称为客观标准与主观标准。在对系统进行分类时,希望能给出一个明确的界限,但什么是复杂性,复杂性如何描述和把握,都是极其复杂的问题,也正是当前兴起的“复杂性态科学”研究的基本内容。系统科学尽管要研究所有系统的共同规律,但它对于复杂系统更有理

论和实用价值。在本书中研究的大部分问题都与复杂性和复杂系统有关。

按系统包含元素的多少划分为简单系统、简单巨系统和复杂巨系统。中国科学院院长路甬祥指出：“系统科学本来研究的重点是巨系统，其中一类是简单巨系统，一类是复杂巨系统。简单巨系统的组分虽然数量庞大，但种类不多，较少中间层次，相互关系简单。21世纪可能依靠集合论、协同学、耗散结构论，并结合动力学的确定性描述，概率论的不确定性描述，以及信息论、运筹学和控制论，对这类系统建立定量的，甚至形式化的描述，建立起简单巨系统的组织理论，乃至系统建构、控制、优化的一般理论。复杂巨系统则不仅组分巨大，而且种类繁多，并有许多层次交叉重叠，相互关系也极其复杂。生态系统，人体系统，脑与神经系统，社会和经济系统，地理与环境系统等，均属复杂巨系统。这类系统中存在着物质的、精神的和社会的各种因素，描述和归纳极其困难，目前尚无协同学那样的理论可以借鉴，也没有从微观到宏观的规范性处理方法。必须在认识论和方法学上有新的创造和突破，才能建立起复杂巨系统科学的框架。然而，未来生命科学、脑和认知科学、生态与环境、全球经济和社会等重大课题，正期待着系统科学的发展和突破。”

(3) 保守系统与耗散系统原来是从系统的能量能否保持来进行划分的，它可以推广到系统的物质、能量和信息是否得到保持，这就使上述划分具有很重大的意义，因为这两类系统具有非常不同的属性和运动特征。和上述划分密切联系的是物理学上按边界性质的划分，即将系统分为三类：开放的、封闭的和孤立的系统。开放系统可以和外界交换物质、能量和信息，孤立系统与此相反，完全与外界隔绝，不能交换任何东西；封闭系统则只能交换能量而不能交换物质。当然，上述划分是一种理想的划分，任何现实的系统都应该是开放的，只不过开放的程度、性质和内容各不相同而已。

(4) 按关系的性质划分。系统内部关系的性质往往对系统外部性质有着重大的影响，因此在划分时常常需要考虑系统内部关

系的性质。一个力学系统或物理系统内部关系,指的是内部相互作用的种类;一个社会经济系统的内部关系,主要指的是人与人的关系,如利害关系、利益关系、契约关系等。对不同的关系研究往往构成一门专门的学科。

1.6.5 按动态特征分类

事物的运动形态是一事物区别于他事物的基本特征,因此,按运动形态对系统进行划分是系统分类的一个重要方面。其基本分类有:

(1) 静态系统、动态系统和动力系统:动态和静态通常是相对时间而言的,静态系统就是系统的状态不随时间变化的系统。显然,世界上并不存在绝对的静止,所以静态系统只是一种相对的简化的或理想的情况。静态系统着重研究的是系统的空间关系,就好比研究一张“定格”的照片一样,对于搞清系统的各个方面是十分必要的。研究静态系统与静止的观点看问题是不相同的,前者是一种有用的研究方法,后者是看不到事物变化,把运动的事物错误地认为是静止的。动态系统和动力系统虽然都是研究系统状态随时间的运动变化的规律,但作为一个专用的术语,它可以相对于时间,也可以相对于某个参数的变化。因为对于某些特殊系统或特殊问题,人们主要关心的是系统状态随参数的变化。

(2) 可逆系统与不可逆系统:可逆与不可逆不能单纯理解为是否可以反过来,或向相反方向运动。物理学对可逆运动有着严格的定义,它不仅是指可以恢复到原来的状态,而且更重要的是在回复的过程中不产生新的后果。例如,当气温升高后,可以用制冷的机械将气温降到原来的温度,但开动制冷机却要消耗能量。热力学第二定理告诉我们,所有宏观的事物,可逆是一种理想的或极限的情况,实际的过程都是不可逆的。

在我们的理论中,把具有不可逆性的运动定义为演化,而演化正是复杂系统运动的基本特征。

(3) 连续系统与离散系统:连续和离散通常是相对时间而言的,但扩大来讲也可以相对于其他的参量,它们的区别在数学上指系统状态或控制参量是不是连续和可微。连续系统的状态变化通

常用微分方程来描述,而离散系统则用差分方程来描述。

1.7 系统的描述

本节不讨论具体的系统描述方法,因为这是本书以下章节的基本内容。在本节中要研究的是描述系统的一般方法、原则和途径。

对任何一个系统都可以从定性与定量两个方面进行描述。

1.7.1 定性描述

顾名思义,定性描述就是描述事物的属性或性质。一个事物的属性可以有很多种,其中有些是本质属性,有些是固有属性,有些则是偶然属性。尽管这些都是在研究系统时需要描述的,但研究者往往只对其中的本质属性感兴趣。所以,人们总是问,该系统、该事物的本质属性是什么?然而,要回答这个问题却并不容易,事物的本质属性并不那么容易被人们所认识和把握,这需要进行认真研究后才能准确地描述。这就是人们平常说的抓住事物的本质。

定性描述是认识事物的基础,也是进一步作定量描述的基础,所以十分重要。但是,定性描述可以有不同的侧面,系统科学侧重于整体性的描述。

根据系统的定义,定性描述应该回答以下四个基本问题:①系统是由什么构成的?②系统内部各元素和要素的关系是什么?它具有怎样的整体结构?③系统是怎样发展、演化的?它的运动变化有什么规律?④系统的价值如何体现和实现,它对研究者、使用者以及人类社会有何功能与价值?

不难看出,以上四个问题实际上几乎包含了有关系统的所有问题,是对系统进行研究的四个基本方面。下面将有专门的章节来加以讨论。这里应该指出的是,要对系统的性质作全面的描述是非常困难的,但对特定的问题来说也并非总是需要。例如,对一个买房者,他主要关心的是花多少钱买一套自己满意的住房,所以他关心的是成本和使用价值;而对一个造房者来说,他会关心成本,但他更关心的是房屋的结构、材料、工期等。所以,对于特殊的

问题,定性的描述也是有选择、有侧重的,并不需要面面俱到。

对于特殊的系统或特殊的系统问题,有以下基本问题:

(1) 一系统区别于另一系统的特点或特征是什么?对于一个复杂的系统需要有一个指标体系来刻画这些特点和特征。

(2) 对一个特定的系统,哪些方面的问题是人们感兴趣的,或者说,人们对该系统的哪些方面感兴趣?

(3) 人们的目的是什么?该系统的哪些方面与此目标有关,人们可通过哪些途径来实现目的。

总的来说,系统的定性描述要对研究的对象、问题、目标、路线四个问题进行回答。

1.7.2 定量描述

定量的目的在于使研究者做到心里有数。定量描述是人们对事物认识的深化。现代科学特别强调定量描述,认为对事物作定量描述是认识进入理论阶段的标志。

系统的定量描述总是建立在定性和简化这两个前提之上的,定量描述实际上就是对系统上述四个方面基本性质进行量、形、关系的精确刻画。

作为研究事物的数量、形态和关系的学问,系统定量描述的主要工具和方法是数学,其中包括函数论、近世代数、微分方程、微分几何、拓扑、群论等。从这个角度看,系统科学简直成了现代数学的“大检阅”。但是,系统的定量描述又不能简单地等同于一般的数学,不能简单地把它看作是应用数学的一部分;而且,为了对付复杂系统和复杂性态问题,现有的数学工具还远远不够,系统学家不仅要不断“借用”其他领域行之有效的数学方法,而且要“制造”自己特有的新数学方法,使用由现代计算机技术所支撑起来的计算数学、数值计算等。

为了对系统的形态有一个精确的描述,在定量研究时有四个基本环节或步骤:

要确定系统状态的指标体系。指标体系和系统的状态不同,系统的状态可以从各个方面来进行描述,原则上状态空间的维数是无限维的,而指标体系则是选取状态变量中少数反映系统本质属性,或

在研究中起重要作用的量加以构成。这里要注意四个“空间”：

(1) 变量空间 :通常就是由系统的指标体系所构成的抽象空间。在这个空间中系统的每个状态变量是空间的一个维度,空间中的点代表了系统的一种可能的状态,而空间中的轨线则描述了系统的运动。

(2) 参量空间 :指由对系统行为起主要控制作用的量所支撑的抽象空间。虽然变量与参量之间并无严格的界限,但常把那些在“考察”范围内变动较少的量作为控制参量,相当于协同学中的“慢变量”,而把变动较快的作为状态变量,相当于“快变量”(函数)。

(3) 初值空间 :由所有可能的初始状态所构成的空间。系统的变化总是与初始状态密切相关,甚至对初始状态极为敏感,因此,初始空间将对系统行为 and 变化趋势起重大影响。

(4) 切空间 :对一些容易受扰动而发生偏离的系统来说,单单研究系统在状态空间中的轨道,有时很难得到正确的极限行为,为了刻画它的极限状态,就需要引入一个维数和状态空间相同的与变量空间相“切”的“切空间”。

如果要全面描述以上的“空间”,实际上也是非常困难而复杂的。即使只考虑三个变量,两个控制参量也要在 11 维空间中进行研究,用今天最强大的超级计算机也难以胜任,所以,对系统进行定量描述的一个重要而关键的问题是如何进行简化。

1.7.3 系统模型

要设法构造出能描写系统运动、演化规律的数学模型,也就是搞清系统各变量间的关系以及这些关系如何随时间(或某个特殊参量)变化。

建立系统的数学模型是一门很大的学问,有许多问题要研究,这里只讨论通常所用的数学方法。描述一个真实的系统往往要涉及系统的空间变量、时间变量和状态变量,需要考虑许多方面,以至无穷多个方面,用数学的话来说就是无穷维动力系统的问题(包括时空混沌的问题)。对付无穷维或时空问题在数学上通常有四种模型:偏微分方程(PED);耦合常微分方程(COED);耦合映象格子(CML);元胞自动机(CA)。

针对不同性质的问题,又可以从连续的或离散的两方面来研究。据此,可以对上述四种模型进行一个简单的分类:

模型类型	空间变量	时间变量	状态变量
偏微分方程(PED)	连续	连续	连续
耦合常微分方程(COED)	离散	连续	连续
耦合映象格子(CML)	离散	离散	连续
元胞自动机(CA)	离散	离散	离散

在这四种模型中,无疑偏微分方程是最接近现实情况的。但尽管人们对偏微分方程已经研究了数百年,至今还只能对极少数几个线性的偏微分方程的通解有较好的认识,对绝大多数还基本上不了解,更困难的是,用来描述系统变化和演化的几乎都是非线性偏微分方程。四种模型中最简单的要算元胞自动机,即使这一种模型应用时也十分复杂,并且存在很大的局限性。其他两种这里不作详述,在讨论时空混沌时将着重介绍耦合映象格子模型。

要对模型进行求解和数学模拟,又会碰到一大堆困难问题,有些问题,特别是非线性问题,求解析解几乎是不可能的。面对系统数学问题的求解困难,有两种基本方法:一是尽量对其进行化简,使之成为可解问题(在用微分方程进行描述时,使化简为可积问题);二是回过头来对它们进行“定性”研究,数学上的定性理论和微分方程稳定性理论就是专门研究这类问题的。应该说在实际的系统问题中可解的或可以化简后进行定量分析的是十分稀少的。这就需要将定性的方法与定量的方法结合起来。

在许多时候我们往往更关心模型的定性结果,比如对系统的长期行为,关心的是它的极限状态,即演化结果,通常可用吸引子来描述。数学上的吸引子可以分为两类,即平庸的和奇怪的。吸引子的种类很多,在一定程度上体现了系统局部的演化态势。这些将在动力系统一章中进行专门讨论。

要对定量研究、数值模拟,及各种计算的结果进行合理的解释,也就是让问题回到现实问题中来。

在这方面要特别注意的是,不同的系统在其变化和演化中都

存在着许多“度”。物质世界演化的度往往由若干个“自然”常数来表征,如光速 C 、普朗克常数 h 、原子的精细结构常数、数学中的 π 、 e 等,对于特定的系统也有系统自身所独有的“度”和关节点。此外,一个系统在时间和空间上也有自己的“生命周期”和特征尺度。这些以数字出现的东西,其意义已大大超出了单纯“数与量”的层次,必须从本质上加以理解。

总之,针对不同类型的系统,进行描述时有许多具体的、专门的方法(如线性化方法、微扰方法、元胞自动机方法、符号动力学、耦合映象格子模型等)。但无论是定性研究,还是定量研究,都要花很大的气力,并且要把两者很好地结合起来,才能得到对系统的全面了解。

1.8 系统的环境

系统科学特别强调要从微观、中观、宏观三个层次来研究事物,这里所说的中观层次就是直接面对的研究对象,它可以是一件事情,一个物体,如果把它作为一个整体来考虑,它就是一个系统。微观层次指的是系统的构成,它包括由哪些成分构成和怎样构成两方面的问题;而宏观层次则是指作为一个整体的系统如何与周围环境或其他系统相互作用的问题。大量事实证明,许多问题局限在一个层次是永远讲不清楚的,必须到另外两个层次中去寻找依据,即从事物的构成和外界的环境中找原因,这就是我们对系统的研究总要分析整体与部分的关系、系统与环境的系统的原因。

前面着重对系统本身进行了较为详细的研究,这还仅仅是理解系统概念的一个方面,从系统与外界的关系看,与系统对应的是系统的环境。本节将要涉及系统科学中的另一个重要方面——系统与环境的系统。

系统存在于一定的环境之中,受环境的影响和支配,又反过来作用于环境,并在环境中实现自己的功能和价值。从理论上讲,系统与环境的系统是明确的,简单的,但实践中环境与系统的系统却十分复杂,需要专门加以研究。

什么是系统的环境?按宋健的讲法:环境就是存在于系统周

围与系统有关的各种因素的集合,通常包括自然、社会、国际、劳动和技术等方面的因素。

系统与环境的的关系包括边界划分、环境的层次结构和环境的保护与发展等三个基本问题。

1.8.1 系统与环境的边界

这里先研究系统与环境的边界划分。从理论上讲,系统与环境的边界应该是明确的,但实际划分时却要具体问题具体分析。如国土的边界是明确的,来不得半点含糊。但国家的边界却较难确定,特别是在对外关系中,如何保护国家的权利和利益的问题就十分复杂。系统与环境的边界划分对研究系统的特殊重要性使我们不得不对边界划分作仔细地研究。划分系统与环境的至少有这样一些原则:

(1) 系统与环境的之间应有一个界线,研究系统时首先要明确哪些属于系统之内的元素,哪些是属于系统之外的环境。不过,系统与环境的界线划分又有一定的相对性,在一些场合边界比较模糊。特别是对于那些非物质的系统,就不存在一个物质上的“边界”。常常是你中有我、我中有你。当然,边界的明确与否也有一定的规律,一般在宏观层次上比较明确,而微观层次上就比较模糊。物质系统的边界比较明确,抽象系统,如概念系统、言语系统、学科体系等的边界就比较模糊。两个相互接触的物体,如仪器与实验对象在微观层次上就几乎难以划分边界,因为边界层上的物质都由原子核与电子所组成,根据泡利不相容原理,电子是不可区分的,无法区分哪些是属于仪器,哪些属于实验对象,这就导致了量子力学中著名的“观察问题”。

(2) 系统与环境的“内外有别”的,就是说属于系统内部的组成部分(元素),与不属于系统的其他事物之间有本质不同的。系统的内部元素对系统的整体性有确定的影响,而属于环境中事物只对系统有偶然的影响。这就是区别内外,区分内因与外因的相对标准。

1.8.2 环境的层次

环境有层次和结构。环境的层次通常可以按与系统的相对位

置和对系统关系密切程度、作用的大小来划分,如大环境、小环境、小生境等。

此外,环境也不是系统之外所有事物“杂乱的堆积”,构成环境和各种事物之间也会有确定的关系和结构。如一个企业的生存与发展总要考虑它的自然地理环境、历史人文环境、政治经济环境等。一个人的发展也是如此,他的家庭、社会关系、所受的教育、人际关系等。环境的结构就是指各种对系统的存在与发展有影响的因素之间的相互关系。对系统的环境因素以及它们间的关系进行分析,是认识、改造和构造系统的基本前提。

它包括以下四个基本方面:环境的特征与环境的分类;环境的结构与层次,如何划分小环境与大环境;环境对系统的存在与发展有哪些方面的影响;在短、中、长期内系统对环境有哪些方面的影响。

1.8.3 环境的保护

环境的保护问题已成为当今社会经济发展的基本问题。保护环境就是要保护系统生存发展的环境。从系统科学的角度来看,系统与环境是一对相互作用的整体,本身也构成一个系统。系统和环境中的任何一方发生变化都不可避免地要影响到另一方。因此,不能只注意系统的发展而忽视环境状况,也不能片面强调环境的保护而不要系统的发展。所以,“先发展后治理”或者不发展,只保护“回到原始社会去”都是不对的。环境问题或环保问题今天之所以被提高到如此重要的位置,原因在于社会的高速发展已对环境构成了巨大的威胁,已经影响到社会经济的进一步发展。环境问题具体表现在人口危机、能源危机、资源危机(包括土地、森林、矿产等),环境污染(包括大气污染、水质污染等)等。现在唯一的策略是在考虑环境问题的前提下,有计划地发展。在不可能制订完善计划的情况下,至少也要边发展边治理。

保护和治理环境的问题,在理论上好讲,实际操作起来常常十分困难,其中一个重要原因是,保护和治理都需要付出相应的代价,这个代价迟早总要付出,但越迟所花的代价越大。此外,还有一个从什么立场来考虑保护与治理的问题。世界上有一些发达国

家,或者发达地区,采取“转嫁污染”的办法来保护自己的环境,将污染或污染源转给别的国家和地区,这是极不道德的。我们认为,本地的污染必须本地消化解决,这应该作为一个基本法则。

1.8.4 环境的发展

我们不仅要保护环境,而且要发展环境。对系统而言,发展环境的根本目的是扩大和发展对系统生存与发展有利的环境因素,而不是泛指环境的变化与发展,因为不管你愿意与否,环境总是在不断发展变化的,问题的关键是环境朝着有利于还是不利于系统生存发展的方向变化。对一个生命体或一个经济实体来说,环境的发展首先是要为系统提供更大的“生存空间”,和提供更多的资源。这个问题对于那种生存空间有限、资源有限、又存在多个竞争对手的情况更为重要。

现在世界上许多国家包括我国都把“可持续发展”作为一项基本国策。这个问题的提出有很强的国际国内背景,它的核心问题是:人类生存环境的保护与发展。但是研究的主题则是某个特定社会经济系统是否可持续的问题。从系统的角度考虑可持续问题包括以下几个方面:发展主体的定位;社会经济系统发展的含义与标度体系;可持续发展的含义与可持续度;可持续发展的条件;系统与环境协调的含义以及协调度等等。

关于发展主体的定位,其实就是系统与环境如何划分的问题。发展的主体不同,许多评价指标、发展途径、方法、政策等都会有很大的区别。例如,从某个局部的利益出发,将会采取本位主义的做法,用牺牲其他地区的环境来保护与发展本地区的环境。从道义上讲,这样做当然是不对的,但在现实生活中,每个人都必须站在某个特定的立场上考虑环境问题,一个地方长官与一个国家主席,一个联合国环境保护委员会的官员与一个学者等考虑问题的角度,以及处理问题的方式都会有很大的不同。

1.9 系统科学的由来与发展

系统科学有一段相当长的酝酿、创立和发展的历史,人们对此作了大量研究。为了让初学者对它的来龙去脉和大体轮廓有一个

基本的了解,有助于对系统科学的认识和理解,本节简要介绍一些系统科学的思想渊源和创立过程。

1.9.1 系统思想的渊源

系统观的核心是把事物作为一个有机的整体来看待,这种观念起源于人类社会产生的初期,一直可以追溯到人类脱离动物界的时候。试想一个刚刚脱离动物界的人或人群,和动物相比它们有什么优势呢?论体力,他不如牛羊;论奔跑,他不如犬马;论视力,他不如鹰鹫;论嗅觉,他不如老鼠。可见,人类在体能和感官等方面远不如一般的动物,而唯一的优势则在于它具有远远超出一般动物的智能。现在,人们对智能已经作了许多研究,发现智能其实是多种能力的结合,如观察、学习、记忆、分析、综合、联想能力等。其中最主要的是“整体构想能力”,即能把事物的各个方面联系起来,用对事物的知觉和表象在自己头脑中“构想”一个“对象”的整体,从而在整体上把握事物。这就是马克思所说的“最笨的工程师”与“最聪明的蜜蜂”的本质区别。当然,在原始人那里,系统的观点是十分模糊的,对系统的认识也远未达到理性的高度,系统思想主要是通过直觉和猜想的形式表现出来。但是,如果没有这种最原始、最起码的系统观念,人们就无法在变化无常、极其险恶的环境中生存下去,发展起来。所以,每一个正常的人头脑中都会有系统观念的“种子”。这就是为什么在古代的思想、文化、工程、医学、天文、战争中几乎到处都可找到系统思想的“影子”的原因。

古代的系统观从模糊到清晰,从一般的猜测到形成明确的概念,经历漫长的岁月。正如钱学森所说:“系统作为一个概念既不是人类生来就有,也不是像有些外国人讲的那样,是20世纪40年代突然出现的東西。系统概念来源于古代人类的社会实践经验,所以一点也不神秘”。

当人们探索系统思想的源头时会发现一个令人惊奇的事实,那就是尽管由于山河阻隔,交通不便而使古代东西方的文化交流甚少,但在相隔遥远的两个地方却产生了十分相近的系统思想。这一事实表明:系统思想是植根于人类头脑深处的一种思维模式,

时空的差异只会改变它的表现形式,而不会改变其本质特征。

1.9.2 古代的系统思想

1. 中国古代的系统思想

在中国古代的自然观中系统思想是极其丰富的,这似乎成了东方文化的一大特色,下面是一些最典型例子(详见魏宏森、曾国屏著《系统论》第一篇)。

(1)《周易》,八卦——中国古代的宇宙大系统:《周易》其实包括《易经》和《易传》两个部分。《易经》全称《周易上经》;《易传》又名《周易大传》,是战国(前 551~前 479)以来人们解释《易经》的作品汇集。

《周易·易辞下传》中说:“古者包牺氏之王天下也,仰则观象于天,俯则观法于地,观鸟兽之文与地之宜,近取诸身,远取诸物,于是始作八卦”。

《周易》所论述的包罗万象,其中的八卦:乾、坤、震、巽、坎、离、艮、兑,分别代表天、地、雷、风、水、火、山和泽等八种最基本的要素。世上的万事万物就是由这八种要素按一定的秩序组合而成,即所谓“八卦成列,象在其中矣;因而重之,爻在其中矣;刚柔相推,变在其中矣;系辞焉而命之,动在其中也”,这里已经有了“大统一”观点的萌芽。

不仅如此,《周易》中还对事物的形成也作了解释。其中世界被看作是一种演化的结果,在《系辞上传》中说:“是故《易》有太极,是生两仪,两仪生四象,四象生八卦”。“有天地,然后万物生焉。盈天地之间者唯万物”。在《周易》中乾坤代表天地,由乾坤生万物,由万物充满天地。所以,乾坤二卦为八卦的起始,象征万事万物的其余六十二卦置于其后,总共六十四卦构成一个宇宙大系统。而六十四卦中的每一卦又自成一个子系统,组成每一卦的六爻相互制约,任意一爻的变动不仅会造成内部关系的改变,而且可能影响系统整体的对外关系。可见,《周易》中的宇宙体系十分完整,而又严密有序。

(2) 阴阳,五行——事物发展的动力和机制:阴阳的观念在中国产生很早,《周易》中对此进行了发展和系统化。《周易》中认为,

宇宙最初开始是混沌未分的太极,太极产生天地阴阳两仪,两仪产生象征四时的太阳、太阴、少阳、少阴四象,这四象的相生相克,刚柔相济再产生出乾、坤、震、巽、坎、离、艮、兑八卦。所以“刚柔者,立本者也”,阴阳就成了推动事物演化发展的根本动力。

早期五行说的思想在《尚书》的《洪范》篇中有较系统的记载:“我闻在昔,鲧埋洪水,汨陈其五行……五行:一曰水,二曰火,三曰木,四曰金,五曰土。水曰润下,火曰炎上,木曰曲直,金曰从革,土爰稼墙。润下作咸,炎上作苦,曲直作酸,从革作辛,稼墙作甘。”这里的五行除了包含对构成世界基本要素的猜想外,更重要的是初步包含了五行相克相生的思想。春秋战国时期,五行说逐渐与阴阳说结合起来。一般认为,战国末年的邹衍(约前305~前240年)是这种结合的早期重要人物。他说:“乃深观阴阳消息,而作怪迂之变,终始大圣之篇”,“称引天地剖判以来,五德转移,治各有宜,而符应若兹”。这里,他不仅把阴阳与五行相结合,而且提出“五德转移,治各有宜”。“五德终始说”以五行生克来解释朝代的更替,即木克土,金克木,火克金,水克火,土克水。到了汉代,阴阳五行说得到了很大发展,形成了一种统一的自然体系和人事体系。

五行的排列顺序具有特殊的含义,中国古代有四种最重要的排序:①生序为演化生成的顺序:水、火、木、金、土;②相生序:木、火、土、金、水;③相胜序:木、金、火、水、土;④“常言”序:金、木、水、火、土。英国著名学者李约瑟(D. M. Needham, 1906~1995年)在研究时,特别注意到五行的排列顺序和象征间的联系。他认为由顺序②和③可以推出两个原理——“相制原理”和“相化原理”。在相制原理中,特定的毁灭过程被某种元素所“控制”,例如,木灭(胜)土,但金控制其过程;金灭(胜)木,但火控制其过程;火灭(胜)金,但水控制其过程;土灭(胜)水,但木控制其过程。相化原理同时依赖于相灭(胜)序和相生序,指的是由一种过程来相化另一种变化过程,而这种过程产生出更多的基质,而且产生新基质的速度比被初级过程毁灭的更快,即有木灭(胜)土,但火相化这一过程;火灭(胜)金,但土相化这一过程;土灭(胜)水,但金相化这一过程;金灭(胜)木,但水相化这一过程;水灭(胜)火,但木相化这一过程。

阴阳五行说不仅对事物发展动力和演化规律作了一般的解释,而且被广泛地用来指导人们的实践活动。比如,它对中医就有着十分巨大的影响,甚至成为中医的主要理论基础。中医的经典《黄帝内经》中指出:人的身体结构是自然的一个组成部分,人的养生之道应与自然的运行密切相关,据此提出了“天人相应”的医疗原则。把生理现象与自然现象联系起来,用自然现象、生理现象和神经活动三者结合的观点来考察疾病的根源。认为人体是一个有机的和谐整体,当阴阳失调时人就会生病,即所谓“阴阳匀平,以充其形。九候若一,命曰平人”,所以“平人者不病”;“阴阳乖戾,疾病乃起”;“从其气则和,违其气则病”。

(3) 老庄学说——中国古代系统思想的代表:讲中国古代哲学离不开儒家,而讲系统思想则应首推道家。道家学说以“道”为核心概念,经老子、庄子的发展而自成体系,这个体系中包含了丰富的系统思想。

道家的创始人老子,姓李名耳,字聃(dan)(约前580~前500年),他以“道”为其学说的核心。在《老子》中一开始就指出:“道,可道,非常道;名,可名,非常名。无名,天地之始;有名,万物之母”,接着又说:“道冲,而用之或不盈。渊兮,似万物之宗”,认为虚而无形的道是万物赖以存在的根据,又是派生万物的本原,天地万物皆由道演化而来,由此得出“道生一,一生二,二生三,三生万物”的著名论断,成为中国古代最有代表性的宇宙演化观点。按照这种观点:

第一,演化始于道,道虽是一种“无状之状,无象之象”的“无形”之物,却“独立而不改,周行而不殆,可以为天下母。吾不知其名,字之曰道。强为之名曰大”,它虽超越形体,不能为人们的感官所直接感知,却实实在在地存在着。

第二,宇宙是逐渐“生”出来的,在“生”当中体现出宇宙的演化过程:首先是由道生出“一”来,然后由“一”生出“二”来,如此等等。

第三,道家学说中的一、二、三,都有其特殊的含义。一为尚未开化的混沌态,既是“纯粹的”单一,也代表了最原始的统一体;二是指天地、阴阳、乾坤,这是一种简单的对立物,但却是宇宙间一切

有形之物形成的基础。由于这两个元素的对立而导致了三的出现。在道家学说中“三”这个数字,与三成倍数,或有着某种关系的数字,如九,二十七等都具有十分特殊的意义。

100多年之后,庄子(约前369~前286年)将老子的道发扬光大,形成一套完整的理论。首先,庄子认为:道不仅产生万物,而且支配万物,是事物变化的根本规律。如《渔父》篇中说:“道者,万物之所由也,庶物失之者死,得之者生,为事逆之则败,顺之则成”。其次,庄子认为:不仅万物在变,作为运动变化的规律的道也在变,正是道的变化才生成了万物,即《天道》篇里所说的:“天道运而无所积,故万物成”。最后,庄子谈到了道与人的关系,认为人也是道的产物:“人之生,气之聚也,聚则为生,散则为死”。

在老庄学说中关于“自然”的观点是特别值得提及的,老子把“天道自然”的本体论发展到了以道为“万物之宗”的实践论,即从一种对宇宙的看法中推演出一种指导人们行动的法则,要求人们在待物处世时应该“听其自然”,要“自然而然”,不要作违背自然法则的事情。

庄子在《天运》篇里以发问的形式提出了一个带根本性的问题:“天其运乎?地其处乎?日月其争与所乎?孰主张是?孰维纲是?孰居无事而推行是?意者其有机缄而不得已邪?意者其运转而不能自止邪?”当代著名科学家、诺贝尔奖得主普里高津把庄子的这段话放到了自己著作的卷首,认为这正是今天系统自组织理论所要回答和解决的问题。

(4) 都江堰——古代水利系统工程的杰作:系统观念不仅表现在古代的哲学著作中,更体现于人们的生产、生活实践之中。比如水利工程的成败常常直接关系到国家、地区的经济命脉,在以农业为主的中国古代更是如此。古今中外,水利工程失败的不少,成功的不多,名扬中外的都江堰就是少数成功之作的杰出代表。成功的一个重要原因就在于都江堰的设计者和实施者们自觉或不自觉地运用了系统的观点作指导。

都江堰位于成都平原西部灌县附近的岷江上,岷江水资源丰富,四川北部为高山峻岭,灌县一带却地势突然平坦。岷江从高

山峻岭中急流而下,流到灌县一带时,流速骤减,使顺流而下的泥沙淤积于河床。每到夏季水量集中,加上冰雪融化,常发生季节性水患,西岸洪水泛滥,而东岸缺水为旱。公元前 250 年,秦国蜀郡郡守李冰父子在对岷江周密勘察的基础上,吸取了前人的治水经验,巧妙地利用了当地自然条件,制订了修建都江堰的规划,并率领广大民工奋战多年,克服种种艰难,终于创造了这项人类水利史上的奇迹。

都江堰是一个庞大的有机整体,它包括鱼嘴分水工程、飞沙堰分洪排洪工程、宝瓶口束水工程三项主体工程。主体工程延绵约 3 000 米,与 120 个附属渠堰工程相互联结。其中分水鱼嘴筑于岷江河道正中天然的江心洲北端,将岷江分为东西两流,东流用以灌溉成都平原,西流是岷江正道,主要用于排洪。都江堰工程的精妙之处在于:利用鱼嘴、上游堤坝和四周的地形地势,使它不但具有分流引水的作用,而且可以自动控制水量。春耕季节灌溉用水量大,较大比例的水量进入东流,较少的水量流入西流。夏季洪水到来时,这种比例就自动地颠倒过来了,形成了“分四六,平潦旱”的情况。

宝瓶口是灌溉水流进入灌区的要道。西流水流至飞沙堰,被玉垒山伸向岷江的一道岩石长脊挡住。李冰指挥民工在这里开凿了一个门口,状似瓶口,故名宝瓶口。西流通过宝瓶口,经下段仰天窝等节制闸,一分二,二而四,一分再分,缓缓流入农田灌渠。这样利用成都平原西北高东南低的地势,形成扇形自流的灌溉网络系统。

都江堰建成后成都平原 14 个县 33.33 万公顷[500 万多亩(古亩)]农田受益,使整个四川获得“天府之国”的美誉。更值得提及的是,尽管都江堰工程是在 2 000 多年以前实现的,但是它的规划、设计和施工的科学水平和创见,用今天的系统工程方法来衡量也毫不逊色。

2. 西方古代的系统思想

前面提到了系统思想是人类思维的基本方式,因此,无论东方还是西方,都有不同形式的表现。说到西方古代的系统思想,不能不提到古希腊哲人们在这方面的贡献。

古希腊的米利都学派开创了宇宙体系论时期。约在公元前

500 多年泰勒斯(Thales, 约前 624~约 547 年)提出了“水是万物的始基”这一命题。泰勒斯认为,在不断变化和运动中,世界一定具有统一性,只要把握了始基,就可以把握世界这一整体。

毕达哥拉斯(Pythagoras, 约前 570~约前 490 年)学派提出了“数是万物的始基”的命题。他们认为,数体系的和谐就是宇宙的和谐,也是社会的和谐。因此,数体系就反映了宇宙体系,数结构也即宇宙结构。恩格斯对这一命题给予了高度评价,认为在毕达哥拉斯的命题中“数服从一定的规律,同样,宇宙也是如此。于是宇宙的规律性第一次被说出来”。

与毕达哥拉斯同时代的赫拉克利特则认为,“火是万物的始基”,世界万物的运动变化都是有规律、有秩序的,这些规律和秩序都是火的属性。因此,他认为火变成万物,万物又归于火。

希腊人中第一个百科全书式的学者德谟克利特创立了原子论,对构成宇宙的要素进行了猜测。他认为,世界的始基是原子,原子是不可分割的。它们间的相互结合构成了世界万物万事。他从原子论出发,强调系统的要素,肯定系统是由要素构成。

古希腊最伟大的哲学集大成者亚里士多德较早从哲学上概括系统思想,他认为,理论体系有它的原型,并反映了客观体系。他说:“如果知识的对象不存在,就没有知识;这是真的,因为将会没有什么东西可以被认识。同样这也是真的:如果某物的知识不存在,此某物却很可能是存在着”。他关于整体和部分的关系的著名命题,“整体不同于部分之和”受到现代系统论思想的高度赞赏,而整体何以不同于部分之和,则被认为是系统科学的千古之谜,一直推动人们去思考系统的实现、创生和演化等根本问题。

1.9.3 近代科学中的系统思想

西方近代科学史的第一大飞跃是著名的文艺复兴,早在 13 世纪,原来那种由神学一统天下的局面就开始发生动摇,经过培根、达·芬奇、伽利略、开普勒、哥白尼等的努力,最后到牛顿,问题的提法和判定的标准都发生了根本的变化,科学开始从神学的襁褓中独立出来,成为人类一项独立的社会活动。这时问题的提法是只问“怎么样”而不问“为什么”,也就是说,人们关心的是对世界的

描述,而不是原因,而对问题的回答是否正确则由实验来判定,而不是上帝来判定,这是一次从神学向科学的转移。精密的、描述性的实验科学由此得以产生。这是科学研究对象的第一次战略转移。这个时代科学的特点是比较注重从局部的方面细致地研究世界,比如,从力学的角度研究世界,把事物看成是质点的集合,世界上所有的事物都服从同一个规律,即牛顿的力学规律。但是,这种思想上的相对统一却包含了对世界非统一的理解,古代朴素的系统观念被淹没在对局部精确的认识之中了。

近代科学中,实验占了极重要的地位,从而产生了经验论思想。但与此同时也兴起了笛卡尔的唯理论,笛卡尔的方法几乎成了近代理论研究的标准方法。它的特点是分析、解剖,即把复杂问题和事物分解为相对简单的,进行研究后,又把简单的合为复杂的。这种思路是建立在与系统思想完全对立的“可分”与“可加”基础之上的。但它在牛顿体系兴起的时候的确取得了巨大的成功。以至被许多人认为是处理一切复杂问题的“钥匙”。当这种思想被“凝固”起来之后,就变成了历史上有名的“形而上学”思潮。在其影响下系统思想一度受到冷遇和轻视,对局部问题的过度重视往往使人们忽略整体,只见树木不见森林。但是,即使在那样一种大气候下,系统思想仍然在不断积累,在人们对世界的构成方式进行认真思考时发现万有引力并不是构成世界的唯一力量。电磁相互作用在构成人类所生活的世界起着决定性的作用。电磁力在作用方式上与万有引力很不相同,尽管它们都属于远程作用的力,并且都服从平方反比的形式,但在作用的方向上却出现了“法向”的垂直作用。这一点十分重要,可以说由此引出了多维空间的复杂相互作用,成为现代系统科学中结构理论的基础。

到了19世纪,形而上学的局限性显现出来,大哲学家黑格尔说:“脱离了人体的手不能说是人手”,这已经包含了某些部分不能脱离整体的思想。然而,真正的突破发生在19世纪后半叶,由于科学史上出现了一系列新的进展和新的思潮,从那时起现代意义上的系统科学才开始酝酿起来。

1.9.4 系统科学的创立

1. 系统科学的萌芽

系统科学思想的第二次大飞跃发生在 19 世纪后半叶,这时的经典物理已经发展到了顶峰,理论力学的发展以哈密顿原理的出现而达到公理的高度,而电磁学则把牛顿的世界图景大为丰富和改观,事物的运动从绝对到相对,相互作用从两点间的连线到了平面和立体,作为物理学一大门类的热力学也开始进入了统计物理的阶段,这里引进的统计概念其实是对经典力学的一大反叛。当人们向大物理学家玻尔茨曼问及 19 世纪可以称为一个什么世纪的时候,他毫不犹豫地回答,可以称为“进化的世纪”。事实也的确如此,在 19 世纪下半叶出现了三大进化的理论,这就和热力学第二定理联系在一起的物理学进化论,和达尔文的名字联系在一起的生物进化论,和马克思的名字联系在一起的社会进化论。这种转移实际上已经预示着科学研究的重心将要从简单的物理系统转向复杂的生命系统。

除了物理、生物和社会领域的进展外,数学进展对系统思想发展的影响也是不容忽视的,其中概率论与数理统计学的产生更是这样,它打破了确定论的一统天下,为研究复杂系统和不确定性问题提供了有利的思想武器。20 世纪著名的数学家 N. 维纳在他的名著《控制论》一开始就指出,它们带来了“一个偶然性的宇宙观”。

19 世纪末在生物领域中产生了一股有机论的思潮,出现了一批与此有关的新理论和新的哲学论著,如斯宾塞的《社会有机论》;柏格森的《生命哲学》;20 世纪初怀德海的《过程哲学》;波格丹诺夫的《组织形态学》、韦特海默、柯勒和卡夫卡等的《格式塔心理学》;皮亚杰的《结构主义》;乔姆斯基的《结构主义语言学》。在这些论著中许多地方已经涉及到现代系统科学的核心问题,即对复杂性态和动力学机制的研究。

然而,科学的发展也不是直线性的,20 世纪上半叶,由于物理学中相对论和量子力学的巨大影响,科学家们仍然关心的是简单体系,这当然与当时的物理学为人类提供了新的能源和新的通讯手段有关,于是物理学仍然大行其道,作为带头学科又继续了

近半个世纪,直到 20 世纪 40 年代末,通讯技术和控制技术的发展,为现代系统科学的产生提供了直接动因;二次世界大战对系统科学的诞生扮演了“催生婆”的角色。现代管理科学的兴起,为系统思想的应用打开了广阔的领域之后,才迎来了现代系统科学的第一个春天。

2. 系统科学的创立

20 世纪中叶,现代系统科学正式创立,从历史上看,先后出现了所谓“老三论”,尽管这些提法并不十分准确,但比较容易记忆。下面对这些理论作些简单介绍。

(1)《一般系统论》:1937 年前后,美籍奥地利理论生物学家 V. 贝塔朗菲(Von Bertalanff, L)提出了《一般系统论》的基本思想。当时他认识到传统的机械论无法揭示生命活动的规律,于 20 世纪 20 年代逐步形成“机体生物学”,即“机体系统论”的思想,以强调活机体的开放性与整体性。1937 年,贝塔朗菲首次提出一般系统论的概念。1945 年,《一般系统论》一文正式发表,标志着该学说正式创立。第二次世界大战后,贝塔朗菲在美国致力于一般系统的研究,发起成立了“一般系统研究会”,创办了《一般系统》年鉴。1968 年,贝塔朗菲的《一般系统论:基础、发展和应用》一书出版,被视为系统科学的经典著作。从内容上看,“一般系统论”是一门数学和逻辑的学科。它运用数学和逻辑的工具,探求适用于一切系统的模式、原则与规律,揭示系统的同型性、同构性,并尽可能给予定量的描述。贝塔朗菲指出:一般系统论是对整体和整体性的科学探索。这是它最基本的特征,广义地说,一般系统论包括三个主要领域:一是系统科学,即各门科学中对系统的科学探讨和科学理论,以及适用于所有系统的原理性学说;二是系统技术,即系统工程;三是系统哲学,包括系统本体论、系统认识论和系统价值论。

(2)《控制论》(Cybernetics)(Kolmogonov):“控制论”一词最初是由法国科学家 A. 安培从希腊语中借来用到国务管理科学中的,其意义为操舵员或管理员。控制论的思想可追溯到古希腊时代。作为一门学科创立于 20 世纪 20~40 年代,1948 年底美国数学家 N. 维纳(N. Wiener)出版了《控制论》一书,该书的副标题为

“或关于在动物和机器中控制和通讯的科学”。维纳把控制论看成是一门类似于“舵术”的方法论,他认为,通过反馈等手段,可以研究机器、动物和组织内部以及它们之间的控制和通讯的规律。用来揭示自动控制与生命有机体之间的相互作用,特别是人类与机器之间的相互作用。控制论既研究动物系统的自然控制机制,又研究在人机控制系统中人作为某一操作元件时的行为。

除维纳外,控制论的奠基人还包括 N. 马诺尔斯基、H. 奈奎斯特、H. 海任、H. 伯德、W. 坎农以及前苏联数学家柯尔莫哥诺夫等,控制论创立的标志是 N. 维纳的《控制论》一书的出版,其主要研究内容包括:①最优控制如何按一定目标来确定一个控制函数;②最优估计如何从受到随机干扰的输出值来求状态向量值;③随机最优控制如何为一个承受随机干扰的系统按一定目标确定一个控制函数;④动态系统辨识如何从动态系统输入和输出求系统的方程;⑤适应控制如何用各种直接或间接辨识系统动态特征的方法,随时调整控制,使之得到最优控制。从学科的发展来看,1962年以前的控制论被称为经典控制论,它主要是用频率法研究单变量控制系统的动态特性;1962年前后美国学者卡尔曼提出现代控制论,它以状态空间法、极大值原理和滤波理论研究系统状态,并按所要求的各种指标最优为目标来改变系统的运动规律。1970年在英国伦敦成立了“世界系统论与控制论研究组织(WOGSC)”,每3年召开一次代表大会,出版《控制论》和《机器人》等重要刊物。

(3) 信息论(Information Theory):1948年底,美国数学家、工程师 C. 申农(C. Shanno)发表《通信的数学理论》一文,被认为是信息论创立的标志。信息论研究信息与信息系统的基本特征及运动规律,并运用这些规律建构高效率的信息系统,评价它的有效性和可靠性。信息论是20世纪中叶从通信技术,主要是电信技术中总结和发展而来的。在申农以前,1924年 R. 哈特莱就提出了信息量的概念。针对有噪声和无噪声下的通信编码、抗干扰等问题进行了研究,建立了相应的理论。与此同时,N. 维纳研究了抑制噪声的滤波问题,提出维纳波,后又发展为卡尔曼滤波。前苏联学者 A. И. 柯尔莫哥诺夫对信息论的建立也作出了重大贡献。20世纪

50年代以来,许多国家的学者投入这一领域,大大推动了它的发展。一般认为,信息论包括:①狭义信息论,即申农的通信数学理论,主要研究信息量和编码问题;②一般信息论,除上述内容外,还研究信号在噪声中的预测、滤波、检测及调制等问题;③广义信息论,涉及与信息有关的所有领域。

广义信息论又是数学的一个分支。信息论主要内容包括:①信息的度量,它以申农信息熵公式为基础;②通信系统的结构及信息过程,前者由信源、信道、信宿三要素组成;后者包括信息的发送、编码传输、贮存、接收、解码、显示等环节;③信源编码及纠错编码等问题;④信息传输和信道容量问题;⑤信息率——失真理论;⑥检测和估计理论;⑦保密学等。信息论是现代技术科学中的一门新兴科学,其理论和方法已被广泛运用于社会科学和自然科学中的许多科学。

3. 系统理论的形成

20世纪70年代前后出现了一批对建立系统理论有着重大影响的新学科,这些学科后来被中国学者称为“新三论”。但在不同场合新三论的具体内容各不相同,有时是指I. 普里高津(Prigogine)的《耗散结构理论》Dissipative Structures Theory, H. 哈肯(Haken)的《协同学》Synergetics和艾根M. Eigen的《超循环理论》(hypercycle theory)(M. Eigen & P. Schuster A Principle of Natural Self-Organization)(以上三论都被其创立者称为自组织理论Self-organization Theory);有时(主要是在社会科学和哲学领域)又用法国数学家托姆Thom的突变或“灾变”思想作为一“论”(Catastrophe theory)取代超循环论。下面作一简单介绍:

(1)《耗散结构理论》(Dissipative Structures Theory):1972年前后,由比利时理论化学家、1977年诺贝尔化学奖获得者I. 普里高津(I. Prigogine)为首的布鲁塞尔学派创立了耗散结构理论。它是一种运用微分方程稳定性理论和分支理论研究非平衡系统自组织过程的理论,是非平衡热力学和非平衡统计物理的一个新分支。

在1969年,I. 普里高津等人在一次理论物理与生物学的国际会议上正式提出这一理论。它的主要内容是通过系统熵流方程

的分析,指出只要系统从外界吸收的负熵流足够大,能抵消和超过系统内部的熵产生值,就可以使系统总熵保持不变或减少,从而产生一种新的有序结构,即为耗散结构。但是,系统开放,与外界交流物质和能量还仅仅是产生耗散结构的一个前提,此外,还需3个必要条件:①系统处于远离平衡态,外部控制参量达到临界点,旧结构(状态)才会失稳;②系统内部存在非线性相干机制或正反馈反馈机制,才会出现自催化过程;③要有“涨落”起“触发器”的作用。耗散结构理论第一次明确提出了新的有序结构可能产生,并给出了相应的模型和一般条件,为人们认识系统演化和不可逆过程提供了新的思路和许多哲学启示。

(2)《协同学》(Synergetics):20世纪70年代初,由德国理论物理学家H.哈肯创立协同学。1976年,H.哈肯(Haken)在论文《远离热动平衡系统中的和非物理系统中的合作现象》的基础上所撰写的《协同学》一书,成为协同学创立的标志。此后他又主编了《协同学丛书》,其专著《高等协同学》使理论更加完整。主要内容是研究大量子系统或元素在何种条件下怎样自行组织成具有特定结构与功能的体系,同时也给出了处理这类问题的一般方法。哈肯是从激光研究中得到启发的,他发现,尽管许多系统的具体物质机制不同,但从无序到有序的转变具有“令人惊异的相同规律”。于是他把对这种一般规律与原理的探讨作为协同学的宗旨。他认为,一个新的有序结构,即一个系统的形成演化是子系统在特定条件下“合作、协同”的结果,这一过程无需从外界输入特殊的组织指令而自发进行。按照哈肯的归纳,协同学处理问题的过程大体分三步:①进行线性稳定性分析,找出失稳的条件和机制;②应用伺服原理,建立“支配”方程,找出序参量及序参量方程;③求解序参量方程。现在协同学已被学术界普遍接受,它的理论和方法正在广泛用于自然与社会的各个领域。作为一门成功的科学理论,它不仅给出了大量的定性与定量的结论,而且给了人们许多哲学和方法论的启示。近年来,哈肯等人继续研究了复杂系统自组织中一系列新的课题。如从有序到混沌中伺服原理失效的问题,又提出相变点会出现最大信息熵等。他还把伺

服原理和中心流形方法联系起来,开拓了一个新的方向。协同学也有其局限性,如侧重于研究系统的创生阶段,这仅仅是系统自组织的一个阶段,而且并非所有的问题都可以用协同学方法处理。因此,应把协同学看成是复杂系统自组织理论中的一部分或一个学派。

(3)《超循环理论》(hypercycle theory):1971年前后,德国生物物理与生物化学学家、诺贝尔奖得主 M. 艾根(M. Eigen)发表《A Principle of Natural Self-Organization》一文,提出了超循环是由催化循环构成的更高级的循环。它是将多个催化或自复制单元按循环形式连接起来的复杂系统,其中每个自复制单元既能指导自己的复制,又能对下一个中间产物的产生提供催化帮助。这种催化帮助往往是由富能物质提供的,其形式记为 H ,它构成为 $H = X \rightarrow I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n \rightarrow I_1$ 。从形式上看,它和催化循环有些类似,但超循环的特点是:①它具有更高层次的自我复制能力,代表了一种新的组织水平;②包含于超循环当中的催化循环 I 往往不直接去催化或影响下一个反应,而是通过它所“编码”的催化剂来影响下一个反应,例如,生物体中自复制的核酸序列就是通过它所编码的酶对下一个序列发生影响的;③它同样具有可选择性和竞争性,而且竞争比达尔文物种间竞争还要激烈,不过这种竞争是一种综合性的竞争;④从动力学上看,它是更高层次的反应,若不加限制,其产物增长曲线可以呈双曲线型,在有限的时间内就可趋向无穷。它的一个典型例子是 RNA 噬菌体感染大肠杆菌进行自我复制。超循环概念是 M. 艾根自组织理论的核心概念,他认为,这种具有自复制和自催化的反应循环网络提供了一个广泛意义上的自组织机制。构成这一循环是具有积累、保存和加工遗传信息能力的大分子组织最基本的要求。正是超循环才为生命进化提供了一种“一旦——永久”性选择机制,最终造成了使用统一密码的细胞机器,实现了生命起源中从有机大分子到生物分子转化的关键一步。它的提出,激起了人们对自组织内在机制的思考。对它的作用、意义、运行规律等目前正在探讨之中。

(4)《突变论》(catastrophe theory):1971年前后,法国数学家

托姆(Thom)提出突变的思想,但他本人一直并不认为这是一门完整的学科理论,而只是研究了自然界与社会中广泛存在的“灾变”现象,后来其他的学者把此称为“突变论”。从学科内容来看,突变论是20世纪70年代发展起来的一种研究突变与灾变现象的数学理论。突变现象指的是事物突然从一种状态跳跃到另一种状态;或事物经过一段连续变化后在一定的外界条件下出现一种不连续的、发散的、强烈依赖于初始条件的变化。这种情况在自然界、社会领域及技术过程中普遍存在着,如桥梁的断裂,火山、地震的爆发,超流超导的突然出现,动物行为的骤变,人的情绪的波动,市场崩溃,舆论哗变,战争爆发等。但以往的数学对此无能为力,既没有适当的数学工具,又无确切的数学模型。托姆于20世纪50年代首先提出了横截性的概念,并用它来研究具有势函数系统(梯度系统)的结构稳定性。1969年在《生物学中的拓扑模型》一文中,又用它对梯度系统,即一类特殊的映射 $f: \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$ 奇点进行分类,提出初等突变理论。1972年,托姆的名著《结构稳定性与形态发生学》在法国出版,标志着一门新的数学学科诞生。拓扑学家齐曼将这一新理论称为“灾变论”(中译时改为突变论),E. C. 齐曼及 T. 波斯顿、斯图尔特、R. 吉尔摩等人的研究工作使之在数学理论上日趋完善,并应用于物理、化学、生物、社会、工程技术等领域。为了描述突变现象,突变论把突变看作是势函数由一个极小值变到另一个极小值的变化,即看成是稳定结构之间的变更,认为可用由控制的“控制因子”(控制参量)构成的“控制面”与被控制的“反应因子”(状态参量)构成的“反应面”来描述突变过程。突变的种类有七种基本类型:折叠型、尖点型、燕尾型、双曲脐点型、椭圆脐点型、蝴蝶型、抛物脐点型。突变论自创立以来在理论、应用和哲学方法论上取得了许多公认的成果,使之成为现代科学尤其是数学和系统学的一个重要部分,但也在应用中引起一些争议。

1.9.5 非线性系统与复杂系统研究

1. 非线性科学与非线性系统研究

现代科学在20世纪80年代又有了新的发展,创立了包括混沌理论、分形理论、微分动力系统理论、孤子理论在内的非线性科学。

从学科划分来讲,非线性科学是与系统科学平行的学科,但由于非线性相互作用是系统创生、发展、演化的基本机制,可以把它作为系统科学发展的一部分。

2. 复杂系统研究(复杂性态研究、智能系统研究和大系统研究)

20世纪90年代以复杂性态为研究对象的复杂性科学在更大的范围内覆盖了非线性科学研究的内容。在这门新学科中,美国圣菲研究所(SFI)作出了引人注目的贡献,并引起了不同观点的讨论,但不管具体观点和结论如何,其研究在很大程度上是与系统理论的发展方向相同或者相近的,它们的研究内容极大地丰富了系统理论。

最后,应该指出,对系统科学发展历史的回顾不能忘记中国学者的贡献。20世纪70~80年代以来,我国许多有见识的学者就曾提出,要建立一门相对完整的系统科学,其中系统理论或系统学是它的理论基础。同时,在即将建立的系统理论中还应该较好地体现中国传统文化中独具特色的有机论、整体论和自然演化论的思想,这是一件意义深远而又极其艰巨的工作。

第二章 | 系统结构

结构问题是系统科学的基本问题,也是近代科学中议论较多的问题。20世纪以来,结构主义观点盛行,普遍认为结构决定功能。一个典型的例子是金刚石和石墨都由碳原子所构成,但因构造方式不同,而在硬度、透明度、导电性以及价值上都有着巨大差异。行为主义则认为,在许多场合,人们无法知道或者不必过问事物内部的结构,只要研究它们的外部表现,即输入与输出的关系就可以了解和把握其行为。系统科学认为,虽然在许多场合,人们主要关心系统的外部属性和功能,但要真正认识一个事物的运动规律与行为模式,又必须考虑它的内部结构。在许多情况下,结构对系统的属性、功能、价值起着决定性的作用,所以系统科学总是把结构和属性作为两个基本方面来研究,既考虑它们的密切关系,又研究它们的相对独立性。

结构问题涉及面很广,我们先从结构的特征、含义和定义开始,对系统结构给出一个总体的解释,然后讨论与结构有关的几个基本问题,最后对结构进行定量分析。

2.1 结构的概念

系统科学如何看待结构?下面先对一些人们熟悉的结构定义进行分析,提出较为合适的结构定义,然后举出一些结构的实例,从中分析归纳结构问题所包含的基本方面。

2.1.1 结构的定义

为了避免发生歧义,在讨论结构前需要先给结构下一个定义。《中国大百科全书·自动控制与系统工程》中认为系统结构是“从系统目的出发按照一定规律组织起来的、相互关联的系统元素的集合”;在魏宏森、曾国屏的《系统论——系统科学哲学》中写道:

“结构是指系统内部各个组成要素之间的相对稳定的联系方式、组织秩序及其时空关系的内在表现形式”；在董肇君编的《系统工程学原理》中，结构的定义是：“系统的各组成部分按有序性原则构成的关系实体，它是由系统的目的决定的”。

上面是几位中国学者对结构的定义，而许多外国著名学者早就对结构问题进行了深入的研究，20世纪以来甚至形成了一个影响巨大的结构主义思潮，明确提出了结构的定义。皮亚杰1979年在《结构主义》一书中写道：“结构是一种由种种转换规律组成的体系”，该体系中包含一些转换规律，在它们的作用下转换体系得以保持自己的守衡或充实自己，并且转换在体系内部进行，而无需借助外来的因素；“总之，一个结构包含了三个特征：整体性、转换性和自身调整性”。朴昌根在《系统学基础》一书中，列举了国内外许多学者关于结构的不同观点和定义，其中包括辞典中的结构、数学上的结构、经济学上的结构、社会学与人类学中的结构等。在谈到系统理论中的结构定义时，他引述了G. J. Klir的定义：“所谓系统，是可用一组变量（它们皆为时间函数）值的轨道来描述其活动的存在物。他把与系统有关的各变量之间的‘时不变关系’称为系统的行为，又把系统行为分为三种：①永久行为；②相对永久行为；③暂时行为。他把‘产生行为的系统特性’称为‘系统的组织’。这时，由于系统行为是可变的，组织也不能没有可变部分。所以，他把组织的可变部分称为‘程序’，不变部分称为‘结构’，并把作为永久行为为基础的结构称为‘真正的结构’，把作为相对永久行为为基础的结构称为‘假想结构’”。

上面各种关于结构定义都从各个不同方面揭示了系统结构的一个基本特征，即元素间的一种特殊关联，这无疑是十分重要的。但仅从系统内部关联来看结构还不够，因为结构总是相对于系统整体而言的，结构离不开系统的整体性。因此，我们给出的定义如下：

“结构是由系统元素间相对稳定的关联所形成的整体构架”，简单地说“结构是系统的整体构架”。

上述定义指明了系统结构的两个基本特征：

(1) 结构是元素间的特殊关联：首先，结构所涉及的是系统的

内部关系问题,而不是系统(事物)之间或系统与环境间的关系。其次,结构指的是元素间的特殊联系,而不是所谓“内部关系的总和”或元素间一般的联系。因为,元素间总是存在各式各样的联系,如万有引力、电磁相互作用、个人感情、思想上的联系等,但并非所有这些关系会对系统整体性产生影响,例如,研究企业的结构,只需考虑各个职能部门间的联系,而不必涉及职能部门内部的人际关系,更不会涉及到万有引力或基本粒子层次的相互关联,所以把结构定义为元素间关系的总和没有实质意义。

此外,一些文献往往强调结构是“元素的集合”、“关系实体”、“关系的内在表现形式”等,这也是不正确的。因为,结构不是元素的“集合”,而是元素间特定的结合方式。集合强调的是“同类事物的全体”,即同类就必须有一定范围和明确的界限,以便区分哪些事物属于这个集合,哪些不属于这个集合,对于一个确定的系统来说,显然不能从包含所有的同类结构的角度来强调如何构成一个有机的整体。例如,课堂上要有学生,但并不能把所有的学生都包含于一个课堂之中。相反,在许多情况下,系统恰恰是各类事物的相互配合,而不需要“清一色”的同类事物的“凑合”。此外“关系实体、表现形式”,作为一种哲学语言的描述是可以的,用它来给系统结构下定义就太空泛、太模糊了。

(2) 结构是系统的整体构架:结构显然是相对系统整体的属性、功能、价值而言的,离开了系统整体也就没有什么结构可言。因为系统属性与功能并不唯一地取决于某个组成成分(部件、材料)和某些局部关联,而是所有元素的全局性关联,即整体构架——元素结合成系统整体的形式或方式。我国著名化学家唐有祺院士指出:“直接决定一般物质性能的不是分子的化学组成,而为其结构,即原子在空间结合成分子或物质的方式;生物大分子的功能也是直接在其立体结构或高级结构的基础上发挥作用的……”。这种情况在社会系统中则更为明显,人们在谈论企业结构时,不去考虑人与人之间的万有引力是因为它对企业的运作影响甚小或者没有实质性的影响。而企业结构则指的是各部门或各个人之间为实现企业整体目标时所结成的特殊关系。

所以,系统结构的特殊性总是与系统整体的特殊性、稳定性、目的性联系在一起。正如皮亚杰在谈到系统整体性时所指出的那样:“结构的概念是和没有依存关系的聚合体相区别的。结构中的成分需服从于某些组成规律,这些规律把不同于部分属性的整体属性赋予给全体。如整数就是从数的序列中表现出来的,它并不单独地存在。这个数的序列具有群、体、环等的结构性质,这些性质不同于数的奇偶性、素性等个体的性质”。“在原子论式的联想图式和涌现式的整体性之外,还有运算结构主义的立场,即组成的程序或过程。因为整体是组成过程的结果,这些关系的规律就是体系的规律”。

2.1.2 结构的实例与问题

无论是在自然科学、社会科学的研究中,还是在日常生活中,人们经常会碰到有关结构的问题,这说明对结构的研究并不是系统科学的“专利”。但是,结构作为事物内部的构成方式却是系统科学的基本问题,因此,需要对它作专门的研究。为此,先从一些公认的“结构”实例开始。

(1) 原子的结构:原子是由电子和原子核所组成的,组成原子的相互作用主要是电磁相互作用。物理学家可以根据原子包含电子的多少来计算电子轨道,及其轨道稳定性,能级的分布和受外部电场磁场的扰动,这些都是研究原子的结构问题。

(2) 生物体的结构:生物体有许多层次,根据米勒的《生命系统理论》,广义的生命系统可以分为细胞、组织、器官、个体、群体、国家、联合国等七个层次,每个层次的生命体都有自己独特的结构。如细胞中包含细胞膜、细胞核、细胞质三大部分,它们按不同的方式组成世界上各种各样的细胞,研究细胞结构是生物学的基本内容。

(3) 社会的结构:研究一个社会或社会系统可以从政治、经济、文化(意识形态)三个方面来进行,每个方面都有它们特殊的结构问题,如政治结构中涉及阶级成分的划分,阶级关系的处理;经济结构中生产、消费、流通三个环节的相互关系等,这些都是社会结构问题。

(4) 企业内部的结构:企业是一个复杂的社会经济系统,在它

内部不仅包含多个部门、层次,而且涉及多个方面、多种功能等。如何围绕着企业的目标协调各种关系,是典型的结构问题。

(5) 计算机的结构:计算机是一种典型的人造系统,人们在组装和使用一台计算机时必须了解它的软件和硬件结构,比如计算机硬件包括 CPU、主板、硬盘、内存、显示器、显示卡、机箱、键盘、软驱等;一台多媒体计算机还要包括光驱、声卡等。不同的配件,不同的组合方式(主要由主板的总线形式所决定),计算机的功能就有很大区别。

(6) 语言文字的结构:一个完整的句子,一篇独立的文章,都有自己的讲法和章法。发音不准,用词不当,搭配不合理,都不能表达完整准确的意思,这就是语言文字中的结构问题。

(7) 科学的体系、理论的结构:比如,前面已经讨论的概念体系、学科层次结构等。

此外,还可以举出很多关于结构的例子。从这些例子不难看出,结构是指事物(系统)内部各组成部分相互关联的方式,归纳起来它总是离不开三个基本问题:①系统是由哪些部件(元素)构成的?②这些部件(元素)通过什么样的相互关系来构成系统整体?③元素和它们间的关联对系统整体性有什么影响?

下面就这三个方面展开讨论。

2.2 元素与要素

整体(系统)由哪些部分(元素)所组成?这是系统结构首先碰到的问题,接下来人们会进一步提出,元素中哪些是主要的?哪些是次要的?同类系统中是不是存在一些必不可少的基本元素?本节就来讨论这些问题。

2.2.1 元素

整体由若干部分组成,通常称这些组成部分为系统的元素、部件、组分、部分等(以下总称为元素)。系统元素有以下特征:

(1) 元素是系统中不可再分的“基元”:系统是由多个部分构成的有机整体,各个部分是不可分割的。例如,生命体由各种器官所组成。如果“五马分尸”般将这些器官分开,生命体就

不再有生命了。构成系统的元素本身也是一个系统,它有自己的元素和内部构造,它也是可以分析但不可分开的,因为构成元素的部件一旦分开就失去了作为某系统元素的“身份”,正如一个解散了的企业成员作为一个人还存在着,但已经失去了该企业员工的身份。

不仅系统不可分,而且构成系统的元素也是不可分的,这就是元素的“基元性”。这意味着在研究一个系统结构时,只能涉及构成该系统的元素这“一个层次”,而不涉及构成元素的“下一层次”。比如,问一个生物体有哪些组成部分,正确的回答是“生物个体由若干器官所组成”,而不能说是由原子、分子或细胞所组成的。同样,问一个企业有哪些组成部分,也只能回答是某些职能部门,而不能说是由单个的原子或分子所组成。理由是:组成部分是相对系统整体而言的,它只是系统以下的一个层次,而元素的构成则是更深层次的问题,即子系统层次而不是系统层次的问题。否则,层次混乱了,就没有元素可言,把基本粒子或夸克说成是一切系统的元素,也就无需研究具体系统的构成元素了。

(2) 元素的属性是系统整体所赋予的:一个系统是由若干元素所组成的,反过来,一个事物也能作为一个或多个系统的元素或组成部分。例如,一个人可以作为许多社会组织的成员;在家里,他是家庭的一员,参了军,他是部队的一名士兵,进了工厂,他又可以作为一名工人。他可以专于一个职务或身份,也可身兼数职。不过,有一点十分重要,作为元素的属性是在它成为系统的组成部分后才具有的。正如一个人只有结婚之后才具有了丈夫或妻子的“属性”;一个青年,只有当他参军后,才具有了士兵的身份。也就是说,某事物被称为元素,就在于它包含于某个系统的整体之中,是整体赋予了它元素的属性。

(3) 元素影响系统,部分牵动全局:元素在系统中的作用可大可小,但不是可有可无。如果一个元素的存在与否对系统整体没有影响,它就成了系统中的“多余”部分,就失去作为元素的意义和价值。因此,在对系统元素进行分析时,要强调元素的“不可缺少”和“牵一发,动全身”的性质,比如,大机器中的小螺丝钉,分量虽

小,却不可缺少。许多大的、全局性的问题往往由小的部分所引起,说明即使很小的元素,对整体来说也是不可或缺的。在现实生活中,人们也许会找到一些整体中“多余”的部分,如人体中的盲肠。但这种“多余”是进化的“遗迹”,在人体的进化中它是起过作用的。只是现在那种作用减少或消失了而已。盲肠炎如果不治好也会危及生命,这从反面说明它的作用。

2.2.2 要素

元素因所处的地位或自身结构与属性不同而对系统整体的作用或贡献各有不同,在某些时空范围内,总有一些元素对整体性质和结构起主要和关键作用,将其称为“要素”,即主要的元素。

要素的主要和关键作用是相对于某时刻的整体结构与功能而言的。因此,要素又分为两类:一类为基本要素,一类为关键要素。前者如人体中的心脏和大脑,太阳系中的太阳等,在整体的“一生”中都起主要作用。但也有一些元素,则可能只在某个特殊的时刻起主要作用。如平常所说的“瓶颈”,进门时的门栓,一旦打开就不起作用了,这就是关键要素。

在人造系统中,人们常常按所发挥的效能及所占成本的多少来确定部分的重要程度(当然,也可以按其他原则,如按所占重量、体积等的比例来确定重要程度)。由于各元素地位的不一致性和不平衡性,使得曲线(图2-1)总是存在。

从上面的曲线可以看出,在所有的元素中,一小部分元素(例如仅占20%的元素)占了大部分(例如80%)的成本。这个曲线分布显示,要降低成本,就必须首先在这20%的元素身上想办法。其他场合也有类似情况,往往抓住了这20%的元素,即要素,就抓住了解决问题的重点和要点。

通常,在系统的各元素中找出哪些是要素是不难的,但也有以

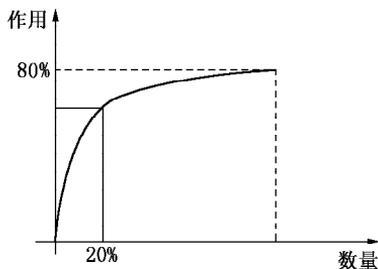


图 2-1 “2—8”曲线:成本与功效的非线性关系

下两种情况需要加以注意 :①元素在系统中的重要性往往依问题的性质不同而异 ;②要素与一般元素是会转化的。

2.2.3 基本元素

基本要素是同类系统中所有时间内都起主要作用的元素。

寻找基本要素的原始想法来自米勒的生命系统理论。米勒在他的理论中把生命体分为细胞、组织、器官、个体、群体、国家、超国家(联合国)等七个层次,他认为,每一个生命体都包含了 19 个子系统,这 19 个子系统中有两个是系统共有的:自复制子系统和边界子系统。另外的 17 个分为两组:一组是物质、能量分系统;一组是信息分系统。它们又分别包括吸收、处理、转换、输出、传递等子系统。米勒理论给我们的启示是,生命系统是由若干个基本的生命功能支撑起来的,每个基本的生命功能都需要一个相应的子系统来承担,它们就是生命系统中那些承担着基本生物功能的要素。

生命系统是这样,非生命系统是不是也是这样呢?完全照搬是没有根据的,但对于同类型的系统,特别是那些人造的、与人类活动有着密切关系的复杂系统,的确存在一些与上述“基本要素”相似的要素。对基本要素分析的研究实际上是对系统内部基本功能的研究,它对系统要素的分类和对系统内部基本“职能”的认识具有很强的方法论意义。例如,将生命体与一台被视为现代科学技术结晶的计算机进行比较,人的大脑所起的作用,与作为计算机“核心”的中央处理器(CPU)是相似的,它们都是决策器,起着指挥、控制、管理整个系统以及所有子系统和分系统的作用;与外界交换信息的显示屏和键盘就起着输出输入信息的作用,是联系人与计算机的纽带,与生命系统中输入器、输出器十分类似;而机箱底板起着基础、骨架、支持的作用;开关电源起着动力要素的作用(能源和工作动力);各种连线起着联系内部要素的作用(内部的物质、能量、信息的传输、储存)等。从以上类比中不难发现,一个复杂系统至少包括以下七种基本要素:

(1) 核心要素:核心要素是对系统的整体结构与行为进行控制与调整的“首脑”或“领导核心”。一个复杂开放系统总是会不断受

到来自系统内部和外部各种因素的干扰,这些干扰势必使系统离开原来的状态,甚至威胁系统的生存。为了对付这些干扰和威胁,保持系统完整性和结构与行为的相对稳定性和定常性(不变性),就需要及时发出指令,采取各种合理的步骤,对系统的元素结构、行为及与环境的关系进行调整,以使系统恢复到原来的稳态或寻找更合适的稳态。同样,在系统外部和内部又存在各种资源,系统必须对它们进行选择、获取、分配,使之得到充分利用,这也要求对系统进行控制调节。所以,对于复杂的开放系统需要有一个专门的核心要素(部门或层次),核心要素的典型例子就是人体中的大脑,企业中的领导班子,计算机中的中央处理器(CPU)。

(2) 动力要素:动力要素是为系统的运动提供动力和能源的“发动机”。系统要生存发展,需要不断提供能源,但是,对于不同的系统,能源往往是十分不同的,是不能简单地从外界直接输入的。正如人不能靠吃煤炭、喝汽油、通电力来生存一样,系统需有一个能把外来能源转化为自己能源的转换机构,这就是作为“发动机”的功能。

应该指出:动力要素给系统提供动力和能源,但它本身不是动力和能源,它只是一个将外部或内部储存的能源转化为内部动力的机制或机构,所以它不是汽油,而是发动机。如人体中以心脏为核心的血液循环系统,由某些政策所体现的社会激励机制等。

(3) 基础要素:基础要素是支撑系统的“骨架”和基础,就如同房子需要有支撑的栋梁和基础、人要有骨骼肌肉一样。要保持系统整体的相对稳定,一个坚强的骨架和扎实的基础是不可少的,除了这些“硬”的骨架,系统相对稳定的行为模式,是“软”的骨架。

基础要素系统的主要工作部分,例如,工厂的主要工作部分是处在基层的工人,社会的基础是广大劳动群众,特别是劳动者的主体等。

(4) 自复制要素:自复制是生命现象的基本特征,自复制要素是生命系统的基本要素,是系统的“复制器”,它的作用是制造出一个“与自己相似的个体”。自复制在系统个体消亡或更新换代中保留系统结构、属性、行为、演化规律等方面的基本信息(遗传信息)。

在系统演化中,个体的消亡是不可避免的,只有通过个体的自复制,才能使系统群体的“生命”得以保存、更新、延续和发展。按照米勒的观点,更为复杂的社会系统也有这种机能。可以把自复制作用理解为系统稳定机制的延伸,即在保持环境条件不变,又存在相同或相似的内部机制时,产生出同类系统的机制。

(5) 边界要素:边界要素指处在系统边界的元素,如人的皮肤,工厂的供销部门,国家的国际部、外交部、情报部等都是典型的边界要素。边界要素的作用:一是把系统与外界隔开,对系统的范围作相应的限制,体现了系统与环境“内外有别”;二是作为系统与外界联系的纽带,充当系统开放的门户和与外界进行物质、能量、信息交换的通道。由于边界要素处于这样一种关键地位,它对系统整体属性和演化发展有着重大的影响。这种影响和作用可以把它恰当地称为“关键”要素。

(6) 传输要素:传输要素的作用就是在内部传递信息与输送物质、能量,它由系统中各种各样的线路和管道所组成,比如,人体内的血液循环系统、神经网络系统;一个国家中的铁路、公路、航空网、电力网、通信网;一个企业内部的信息系统、计算机网络等。系统通过传输将分散的元素连接成一个有机的整体,传输要素充当了系统结构的实体。系统运行不正常,经常与内部传输线路不畅通有关。

(7) 转换要素:转换要素担负着系统内部物质、能量、信息的转换、处理工作。它一方面是从系统外部吸收的物质、能量、信息转换为内部元素所需要的形式;另一方面又要担负起内部元素间物质、能量、信息的转换。生物体内的消化系统就是典型的转换要素。

如果分析一下系统的活动,人们不难发现,内部物质、能量、信息的转换往往与它们的传输、分配结合起来,成为系统内部的“主要工作”。转换出了故障,系统的活动,以至生命就会停止下来。

最后,应该指出系统的“基本要素”是客观存在的。要认识系统就要找到这些基本要素。但是,在有些情况下,基本要素所承担的基本功能可以“合并”起来,由少数基本要素承担。

2.2.4 子系统与分系统

系统由元素按一定方式组成,组成系统的元素本身也是一个系统,从这个意义上可以把元素看作是系统的“子系统”或“分系统”。但仔细分析就会发现子系统与分系统的含义还稍有差别。子系统强调系统的组成,分系统强调系统所包含的各个方面,例如,中国由29个省和3个直辖市所组成,其中的每一个都是一个子系统;而国家的管理职能又可以分为外交、国防、教育、卫生、科技、司法、工业、交通、能源、环保等方面,每一个方面就是国家的一个分系统。子系统与分系统主要是从“纵”的方面和“横”的方面来进行区分。这样的区分也可以是相互交叉的,如在每个省市中又可以分为工业、文教、治安等方面;国家的各部委也管辖着各省市的有关方面。

系统与子系统、分系统属于两个不同的层次。在属性上,在结构的复杂程度上不能直接进行比较。比如,人脑也许是世界上最复杂的东西,包含人脑的人体就不一定比人脑复杂,而由两个人组成的家庭却应该算作简单家庭,它显然比人脑简单。因而复杂的子系统可以构成简单的系统,简单的子系统也可以构成复杂的系统,如由多个只有低等智能的蚂蚁、蜜蜂个体可以构成复杂的蚁群和蜂群。

当然,在实际的子系统与分系统的划分包含了一定的人为因素,但基础仍然是它们自身的系统性,它们在所属的系统中具有较强的独立性。

2.3 关 联

系统结构不仅要研究系统由哪些元素所构成,而且要研究它是怎样构成的。系统构成包含两个层面:一是元素间的关系;二是元素与整体的关系。先讨论元素间的关系。

如前所述,系统的元素之间可以有各式各样的联系,但并不是所有的联系都对系统整体性发生影响,把其中直接关系整体属性的那一部分关系称为(定义为)元素间的关联。

关联是系统结构的基础,系统的整体构架就是由各种关联按

特定的方式组成的。关联通常可以从它的数量、性质、强度三个方面来研究。

2.3.1 关联的数量

关联数量是指元素间关联的数目,元素间的关联通常是双向的,但有时根据性质不同也可以先运算单向关联,在计算时分别把它们称为1对(双向)和1个(单向)关联。

系统中的要素少时,关联数量的计算比较容易,如两要素间的关联最多为1对,3个要素间最多为3对,4个要素间最多为6对等。对于更多的要素组成的系统,关联数的计算可以运用初等数学中的排列组合法则:

设 n 为元素个数,最大关联数为

$$A_n^k = n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1) = \frac{n!}{(n-k)!}$$

当只考虑两要素间的联系时, $k = 2$ 。

例如 $n = 2$ 时,最大关联数为 2; $n = 3$ 时,最大关联数为 6; $n = 4$ 时,最大关联数为 12; $n = 5$ 时,最大关联数为 20 等,而最大关联对数为以上数字除以 2。

以上计算所得是最大可能的关联数,即最多可能有这么多关联。在实际情况下要视每个关系的重要程度来选取,关联数的计算不仅对结构的理论研究有意义,而且在分析和设计系统结构时不会“遗漏”那些隐藏在背后、实际发挥作用的关联。例如,在设计网络时,考虑总共需要架设多少条线路。所以在工程技术上研究出不少实际的计算方法,如用布尔代数的方法和用可达矩阵来计算系统中关联的数量。

2.3.2 关联的性质

关联既有数量问题,又有性质和种类问题。以上对关联数的计算中有一个基本假设,那就是在每一对元素中只存在一对关联,即正向与反向的关联。但在实际结构分析中,两个元素之间可能存在多种关联。如两个人之间,可能有工作关系、亲戚关系、领导与被领导的关系等;在两个国家之间,可以是和平友好关系,也可以是战争关系等。其实,在系统结构分析中关联的数量有时并不

重要,而更重要的是关联的性质,因为,系统的整体属性往往取决于元素间存在什么性质的关联。

现代科学中的许多“纵向学科”如物理学、化学、生物学、社会学、经济学等已经对不同领域中的关联性质进行了深入的研究,为研究系统结构提供很好的素材。如物理学中,关联的性质就是粒子间相互作用的性质。现代物理学认为,物质之间的相互作用只有四种形式(有的认为有五种或六种相互作用):引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用(在弱电统一之后,就只存在三种基本的相互作用了)。每一种相互作用都有自己特殊的性质,引力和电磁力是长程力,即长程相关,强相互作用与弱相互作用是短程相关。化学在一定意义上可以称为研究物质结构与属性的科学,它所涉及的是原子、电子、原子核、离子间的相互作用,在这个范围内起主要作用的是电磁相互作用,它们的细微差别对物质的结构和属性有决定性的影响。如世界上各种不同的化学物质都是通过四种不同的化学键来结合(构成)的,即金属键、共价键、离子键和范德瓦尔斯键,又称为离子性结合、共价结合、金属结合和范德瓦尔斯结合。由于它们关联的性质不同,使得它们在结合力的性质、结合的几何形式、键强度、电学性质等方面都各不相同。金属键是通过自由电子与金属离子之间的相互吸引来实现的,它的特点是电子的“共有化”。也就是说,在结合成金属时,原来的价电子不再束缚在某一个原子上,而是转化为整个金属晶体内的运动。共价键是通过共用电子对来结合的,氢分子就是靠共价键结合的典型。离子键是靠正离子与负离子之间的相互吸引来结合的,由此形成的晶体称为离子晶体或极性晶体,最典型的离子晶体是碱金属元素 Li、Na、K、Rb、Cs 和卤族元素 F、Cl、Br、I 之间形成的化合物,它的特点是以离子为单位而不是以原子为单位进行结合。范德瓦尔斯结合则是产生于原来具有稳固电子结构的原子和分子之间。

生命体内起主要作用的也是电磁相互作用,但是,除了在分子生物学和特殊的医疗技术之外,人们并不十分注意电磁作用的影响,而是关心“物种进化和生存竞争”。因为层次不同,关联的

性质也不同。

社会学和经济学主要是研究人与人、集团与集团间的相互关系。马克思把人看作是社会关系的总和,中国古代早就有“人之初,性本善”与“性本恶”的不同观点,讲的也是人与人之间关系的性质。而且,从不同性质的关系理论出发,可以引出不同的社会学观点。在现代社会学和经济学中,研究者们常常需要建立各种不同的社会和经济模型,其出发点之一也是对人与人之间关系的某种基本假设,如本书的第十章专门讨论社会系统,其基本假设是“有限理性经济人”,这也是对关系性质的一种假定。

2.3.3 关联的强度

确定了关联的数量和性质之后,还要对关联的强度进行分析,需要对元素间联系的紧密程度进行量化。物理学对物体间相互作用强度的测度方法给了我们启示:事物间的相互作用是通过交换某些“中介”来实现的,而且不同的相互作用交换的内容各不相同。引力相互作用交换的是引力子,电磁相互作用交换的是光子(电磁能量子),强相互作用交换的是胶子等。同样,也可以用交换来解释许多社会经济现象,如金融活动中可以把作为“通货”的货币看作是“胶子”,现在的金融工程中十分重视股市的“成交量”,有人甚至把它作为基本的尺度,就是这个道理。市场经济中把商品看作胶子,现代物流产业从事的就是产品交换。此外,信息其实也是一种“通货”或胶子,连人与人之间的感情也可以作为胶子。人们总是通过交换货币、商品、信息、感情来体现和加强相互间的联系的。交换“中介”、“胶子”越频繁,数量越大,关联强度也越大,即可用交换的数量来表征关联的强度。例如,两个国家间的关系密切程度,可以通过人员、物质、经费、往来的数量(级别)来度量。在信息社会中,一个人或一个社会集团的活动能力,可以用它与外界交流的信息流量来测度。从本质意义上讲,人们常说的感情的交流、金钱的交流、利益的交流等也是一种信息交流,它的流量体现了关联的强度。

在计算流量时,要注意两种情况:单向交流和双向交流。单向

交流比较简单,可以用物理学中的运输方程来描述,先定义相关的物理量,然后考察单位时间通过单位截面(界面)的“流量”。有时甚至连这个截面大小和时间多少也不去管它,只计算交流的总量就可。对于双向交流,情况比较复杂,要区分交流总量(绝对量)和相对量(差值)。

2.4 内部秩序与整体构型

关联的数量、性质、强度,都是从元素与要素层次来研究系统结构的,但仅仅停留于元素间的关联层次还难以把握系统的整体构造,因而需要更上一层,即从整体层次来研究,看到关联之上还有关联的关联,以及更高层次的整体关联,整体关联也就是系统整体布局、秩序、构形与构架。只有把它们搞清楚了,才能真正认识系统的结构。

2.4.1 序的概念

系统内部的次序或秩序是元素组织方式或形式的体现,由于它对整体属性有着极为重要的影响,许多学科都曾对此作了研究,从不同的侧面反映了系统内部秩序的特征。下面是几种对“序”的论述:

(1) 数学中的序:序概念是现代数学中的一个基本概念,20世纪30年代法国年轻的数学家们创立了以推崇结构主义而著称的布尔巴基学派,他们认为,全部数学基于三种母结构,即代数结构、序结构和拓扑结构。其中对序概念作了精确论述。数学中序概念或序数概念是对日常生活中第一、第二等表示次序的数的推广;而序数概念又是建立在偏序、全序、良序基础上的。数学上认为,系统内部最基本的关系是二元关系(数学上用映射来表示),系统内部的序结构是以二元为基础的,次序是二元关系中一个非常重要的类型。先从简单的情况开始:

- 1) 偏序:设 R 是定义在集合 A 上满足下列条件的二元关系:
- ① 对一切 $x \in A$ 有 xRx (自反性);
 - ② 对一切 $x, y \in A$ 由 xRy 与 yRx 可得 $x = y$ (反对称性);
 - ③ 对一切 $x, y, z \in A$ 由 xRy yRz 可得 xRz (传递性)。

则称 R 是定义在集合 A 上的偏序,或半序,记作 $a \leq b$,读作 a 在 b 前。集合 A 连同它上面定义的偏序称为偏序集,如实数集上的大小、包容、可整除等都是偏序结构。从系统的角度看,偏序仅仅表明系统中存在沿“某一方向”的秩序,而并不要求所有的元素都包含于这一秩序之中,即容许有独立于该秩序以外,不归它“管”的元素。显然,这样的秩序还只是局部而不是全局的。

2) 全序:如果在偏序集上再加上

④ 对一切 $x, y \in A$, 总有 $x \leq y$ 或 $y \leq x$ (及 $x \leq y, x \geq y, x = y$ 中至少一个成立)

就称 \leq 为 A 上的全序或线序。这是一个比偏序要求更高的秩序,它要求所有的元素都归属于同一种秩序之中,这已经包含整体秩序的含义。

3) 良序:如果在全序集上再加上

⑤ A 的任一非空子集都有最小元,就称 \leq 是 A 上的良序。如按任何次序排列的有限集,自然顺序的自然数,奇数集合等都是良序集。良序的要求就更高了,它要求存在一个秩序的起点或基础(最小元),对于系统来说,这倒不是绝对需要的,而且,即使存在,也仅仅具有相对的意义。但是,对于从理论上讲,良序结构是最严密的整体结构。

4) 序数:序数被定义为良序集的类型。如:集合 $0, 1, 2, \dots, 8$ 中 9 是一个序数。序数有三类:零、后继序数、极限序数。

定理 1 对任何一个良序 A , 必有一个,而且仅有一个 a 使 A 与 a 序同构,此时称 a 为 A 的序数,用 $A = a$ 表示。

定理 2 任何两个具有相同序数的良序集,必定同构,这就是说序数是同构良序集的共同特征。

从以上定义和定理中不难看出,数学中的序、序数和序结构概念,不仅是对日常生活中有秩序排列现象的形式化描述,而且揭示了秩序关系深刻的内涵,因此,可以作为系统科学中研究有序结构的有力“武器”。比如,系统的有序程度,就是指系统中秩序的多少,理论上可以用序数来度量的。先看几幅图(图 2-2)(圆形,正方形,长方形和像碎玻璃一样的复杂图形)。



图 2-2 几种图形的序

哪个最有序(有序度高)或最无序(有序度低,无序度高)?也许会有不少人回答:圆形最有序,碎玻璃最无序。其实,正确的答案恰恰相反。因为,画一个圆只要一个“规矩”,即圆是与一点等距离的曲线,所以它是有一个“序”,而正方形则要规定一个边长和直角,需要两个“序”,长方形要规定两个边长和直角,需要3个“序”,如此等等。一个复杂图形所要规定的地方就非常多了,因而需要很多“序”。

(2) 物理学中的序:物理学从另一些角度对序进行了研究,其中有些非常具体,有些十分抽象。如原子物理学研究原子中的序,固体物理学研究固体材料中的序,表面物理则研究物体的表面结构中的序,这些序都很具体,很容易观察和测度。以固体物理学为例,固体是一种高度密集的凝聚态,在一立方厘米的体积中大约有 10^{23} 次方个原子,如此高度密集的原子势必按某种秩序进行排列,所以固体物理学中,物质结构主要表现为原子的排列,通常可将这种排列分为三种:一是规则的周期排列,即晶体的结构;二是非周期排列;三是介于两者之间,称为准晶体。

理论物理中对序的表述就十分抽象,它是以“对称性破缺”来定义序的,对称与对称破缺是现代物理学中两个最基本的概念。对称现象人们见得很多,从图形的对称到物体的对称,从直观的对称到抽象的对称,它们的本质特征就是所谓“变换中的不变性”。如圆形的对称性表现在它无论旋转多少角度,都保持形状不变,一个具有轴对称的图形,将它转动 180° 度会与原来的图形重合。这说明尽管它变化了(转动一定的角度),但形状却没有变(与原来的形状重合),这就是“变换中的不变性”。物理学的许多重要定理、定律都可以这样表述为某种特定的对称性,如能量守恒定理对应

了时间平移变换的不变性,即总能量不随时间变化;动量守恒是空间“平移”变换的不变性,角动量守恒是空间旋转变换的不变性等。物理学中把每一种这样的不变性用一个对称性元素来表示。对称性破缺就是对称性的破坏,或对称元素的减少,反过来说就是一种变换引起的变化。如果把它与事物的有序行为联系起来,就会发现它具有极其深刻的理论意义。因为,任何秩序都反映了事物属性如何随某方面的变化而变化。例如,要求一群人按身高排队,是一种秩序,按体重排队是另一种秩序。它们分别表现了身高或体重随位置(次序)的变化,是对原来没有这种秩序(对称)时的破缺。

前面的例子提到,由于画圆形只要“一个”规则(秩序),所以它可以随便向哪个方向,转动多少角度,都能保持原来图形不变,几乎具有无穷多个对称元素。相比之下,正方形的对称性元素就少多了,它只能每转 90° 度才能与原来图形相重合, 360° 度内有4次重合,所以有4个对称元素。长方形要每转 180° 度才能重合,一周内只有2次重合,因而有2个对称元素。和正方形相比,有2个对称性元素发生了破缺,即出现了2个新的秩序。对上面的复杂图形就更是如此,旋转一周只能重合一次,说明又发生了一次对称性破缺。

(3) 系统科学中的序:在系统科学创立过程中对序的研究也不少,其中最具有代表性的是对熵与负熵的研究,如普里高津的耗散结构理论就是从热力学第二定律出发提出来的,耗散结构是一种依靠与外界交换物质、能量、信息来维持和发展自身有序性的特殊系统。这里引用了热力学熵的统计解释,认为熵是对系统无序程度的量度,反过来,系统有序程度就可以用“负熵”来进行衡量。耗散结构理论的基本观点是系统通过对外开放从外界吸收负熵,如果能抵消内部的熵增加(产生)则保持原来的有序程度不变,如果流进的负熵流大于内部的熵产生,系统的有序程度就增加了。上述观点可以从统计物理角度作出解释,即系统的熵与 $\ln W$ 成比例,比例常数为 K 。

按照1877年奥地利物理学家玻尔茨曼的统计解释: $S \propto K_B \ln W$

式中 K_B 为玻尔茨曼常数, W 为系统微观状态数。这里需要特别指出的是,微观状态数的计算是依赖于模型的选取的,建立系

统微观结构模型必须考虑元素间的秩序。

社会系统的秩序比较直观具体,通常表现为“特定的规则、条文、法律和制度”。人们常说“没有规矩,不成方圆”,讲的就是秩序问题。

系统科学中的序概念既是数学、物理中序概念的发展和推广,也是对日常生活中秩序概念的概括和提高。系统的序或序结构是指系统中所有关联的“规矩”或秩序,它同时也是整体中所有元素变化所应服从的规则或规律。

系统科学中序概念的内涵是十分丰富的,在使用时既要把握其主要特征,又要注意细致分析,不可把一些相近的概念混为一谈。例如,系统的有序和有序度就有所不同,前者指系统内部有没有秩序、规矩、约束,有什么秩序;后者指的是秩序、规矩、约束的数量多少。很显然,一个系统是要有有序结构的,但并不是有序程度越高,规矩和约束的数量越多越好,也不能认为提高有序度是系统发展的唯一尺度。因为关键不是“序”的多少,而要看整体有什么样的秩序、规矩和约束,即整体究竟具有什么样的有序结构。

2.4.2 整体的拓扑构型

系统的结构不是一般的秩序,而是整体秩序,把这种整体秩序称为系统的构型。即系统内部各种关联的整体形态,它既可以指空间构型,所有元素间的次序和相对位置,如前后、距离、角度等,或元素在系统中相对稳定不变的分布或布局;也可以指系统运行中的不变性和守恒性,如一些规矩、规则、行为规范等,这些都可用系统运动方程的数学结构来表示。

数学中的拓扑学是专门研究关系及其在拓扑变换下不变性的学科。

整体构型可以划分为四种基本的拓扑构型:对偶型、星型、环型、嵌套型,但实际构型往往是这四种基本构型的混合或组合,以一种立体网络的形式出现。

(1) 对偶构型:对偶型是由两个元素组成的构型,它的特点是:

1) 它只有或只考虑两个元素的相互作用,即使是一个复杂系统,也把它“一分为二”,简化为两个元素构成的系统,如原子中的

电子与原子核,社会系统中的领导与被领导、上级与下级、正面与反面、敌人与朋友等。

2) 它不考虑中间环节和相互作用中的延迟,否则就变成了多极作用。

对偶或者耦合是一种极其普遍的现象,任何两个相互作用的事物都可以构成一个耦合系统或对偶构型。同样,如果系统内部只有两个元素,它们就构成一个对偶构型,如果有多个元素,它们中的每两个都可以构成一个对偶构型,整个系统就成了对偶构型的复合系统。

从控制的角度来看,对偶中的相互作用就是反馈作用(图 2-3)。按照艾什比的讲法,任何两个相互作用的事物之间都存在反馈。因此,分析对偶构型时可以运用控制论中的反馈原理。控制论把反馈定义为:系统功能作用的结果反过来影响系统的功能特性。反馈过程就是系统输出的一部分回输到输入端,这是对一个系统而言的。在对偶构型或耦合系统中它就表现为一元素的输出等于它的对偶元素的输入,反之亦然。如果把把这个图转 90 度,就成了两个元素相互耦合的对偶构型图(图 2-4)。

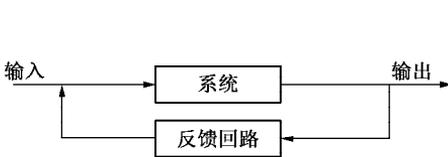


图 2-3 反馈系统

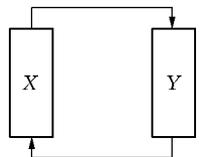


图 2-4 对偶系统

(2) 星形(树状)构型:除了对偶型外,自然系统和社会系统中还有许多星型结构。如社会系统中的集中领导、中央控制、家长制,城市中辐射状的交通路线、电台的广播等。

星型构型有以下特征:

1) 元素中存在一个“中心”或“结点”,这个“结点”可以是发出作用的“源”,也可以是汇集作用的“汇”(归宿)。

2) 元素间只有向上和向下的关联,没有横向的关联,因此,它

在本质上是串行的。

3) 复杂的星型构型往往是分层的,层次间的作用具有某种“单向”性,如上级对下级的控制、“统帅”作用,下级处于被控制和服从的地位。

星型结构可以按“源”和“汇”进行分类。树状结构或分叉结构也是一种星型结构,见图 2-5 所示。

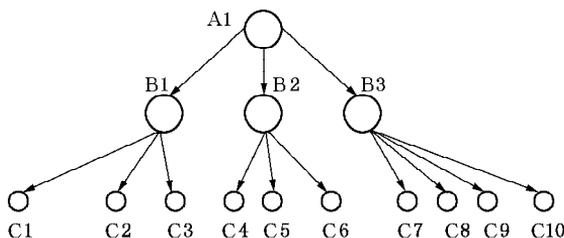


图 2-5 星型结构

控制理论和网络理论中都对基础结构进行了详细研究,把星型控制分为集中控制、分散控制和多级递阶控制等等。

(3) 环型构型:环型构型是由两个以上元素构成的首尾相连的环型,因果环、生态链、催化循环、超循环等是典型环型构型。从形态来讲,环型构型可以看作是对偶构型中增加了某些中间环节,因此,前面谈到的对偶构型中许多特征在环型构型中仍然存在。此外,环型构型还有以下特征:

1) 环型构型中的元素不少于 3 个,这是复杂系统的基本条件,简单系统所不具有的特性,如自催化、混沌等,环型构型都具有。

2) 环型构型中无首尾之分,只要从环中任何一点发出的作用,最终又回到它自己身上来。

不难看出,数学、物理中许多内容与环型结构有关,如周期、准周期的问题、非游荡点的回归问题,甚至数学、物理学中的悖论也与思维中的环型结构有关。

在系统科学中环型构型最典型的例子有:一是艾根的“超循环”理论;二是福雷斯特的“动力系统理论”。前者来自理论生物学,后者产生于对世界环境和前途问题的研究。作为环型构型的

实例,下面对超循环理论作一简单介绍。

超循环理论是德国生物物理学家艾根创立的。1971年前后,艾根在研究生物体内的快速化学反应时,对核酸和蛋白质的起源与相互作用发生了浓厚的兴趣。核酸和蛋白质的起源问题直接关系到对生命起源的理解。在此之前,人们已经确认,生命是通过化学的途径演化而成的,并且把生命起源分为三个阶段:一是从无机物到有机小分子;二是从有机小分子到生命大分子;三是从生物大分子到多分子体系。当时人们对第一和第三个阶段的问题已经基本搞清,而第二阶段,也是生命起源中最关键的阶段却一直不太清楚。艾根的超循环理论就是对此提出来的。

超循环理论(图 2-6)指出自然界和社会领域中都存在各种各样的循环,如大气中水的循环、生物链、生物体内的血液循环、生物个体的生老病死等。这些循环又往往表现为一定的因果链或因果环。

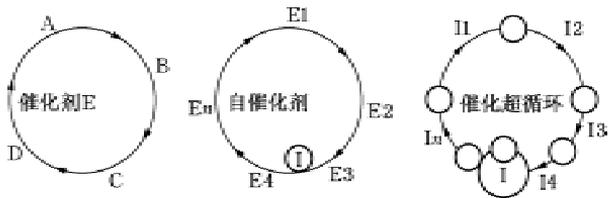


图 2-6 超循环

一个复杂的体系中的各种循环可以处在不同的地位和层次,即存在不同等级的循环,如生物中最基本的是反应循环,是指一个反应序列中每一步的产物(生成物)都是它前面反应的结果,同时又是后面反应的“反应物”。所以在这里“反应物”和“生成物”是同一件物品,故称为“反应循环”。

在反应循环中又有一类特殊的循环叫“催化循环”,它指的是反应循环中至少有一个中间产物是催化剂。它与一般反应循环的区别是它能进行自催化。

如果系统能把自催化或自复制单元联系起来,那就成了艾根所说的超循环。可见,超循环是一个高层次的环型结构。它的奇

异功能是能作为生命进化的起点,通过它产生出生命信息。

福雷斯特动态系统理论的基本思想是在复杂的社会经济系统或生态系统中,总可以找到各种各样的反馈回路,这些反馈回路中又必有一个对其他反馈回路起支配作用的“主反馈回路”。研究这类复杂系统时,先要全力找出这个主反馈回路,研究它对其他回路的控制机制,最后实现对整个系统的控制。

从上面两个例子中可以看出,系统内部的循环环型结构对系统的存在和演化具有重要的意义。

(4) 嵌套构型:嵌套构型是一种具有“自相似性”的包容结构,它的基本特点是:

1) 层层嵌套。如空间上的大套小,小套更小,一层层套下去,一层层包容下去;也可理解为其他形式的“套”或“包”,如概念、理论上的包容。

2) 嵌套的每个层次间具有一定的相似性。

嵌套结构在自然界和社会经济中同样是十分普遍的,广泛存在于自然和社会中的分形形态、无限嵌套的自相似结构。

嵌套结构可以用两个要素来刻画:第一要素为“基元形态”;第二个要素为“生长方式”。只要有这两个要素,就能构造出几乎无限复杂的结构,如用前面提到的对偶构型或树状分叉作基元形态,嵌套一次就可以得到催化循环,嵌套两次就得到“超循环”。其实现实世界中许多复杂图像都是这样嵌套出来的。

从数学上讲,嵌套结构中的元素关联实际上是一种递归关系。严格地说,嵌套构型属于一种复合构型,它的特点是用“基元形态”按大小或其他包容性进行复合。所以嵌套可以沿两个方向展开:一是将一个基元形态扩大到多个基元形态;二是将一种包容方式扩大为多种包容方式。

(5) 网状构型:网状构型是另一种重要的复合构型,自然界和人类社会中的许多现实的连接方式都是网络型。随着现代信息技术的高速发展,人类社会正在进入一个全新的网络社会,从而激起人们对网络构型极大的兴趣。网状结构有如下特点:

1) 从局部看,网络是串联与并联的结合。

前面已经指出,网络可以看作是星型与环型的复合(图 2-7)。由于星型的本质是串行,而环型的本质是并行,这两种连接方式的复合会产生许多新的特点,如并行计算的容错性大大高于串行计算等。

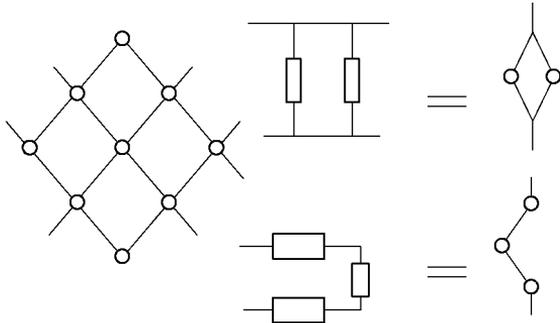


图 2-7 网络结构

2) 从全局看,网络包含了所有的连接方式和所有的构型,使它具有其他构型所不具有的新的整体特征。

上面讨论了系统结构几种主要的构型。对不同类型构型都可以计算它们的关联数,如一个包含 N 个元素的系统中,理论上可以计算出有多少个对偶,多少个循环,多少个星型和多少个“自相似”的嵌套结构,每个相互关系的性质、强度等。

在研究系统的结构时,还要注意系统间的同型性、同态性和同构性,这些概念在自然科学的其他领域里曾有过涉及,各有各的不同定义,但在系统科学中将赋予其更精确的含义,并且把它作为系统科学中的重要方法——模型方法的客观基础。

2.5 系统的层次

世界是分层的,系统的结构也是分层的。所谓“物以类聚,人以群分”就是这个道理。为了理解层次,先从自然界的层次性谈起。

同一层次的事物不一定需要结合为一个新的统一整体,但必须具有一些共同的特征,如服从同一运动规律,有着大体相同的属

性,有相似的利益和追求等,而不同层次的事物或元素具有不同规律和属性。

2.5.1 时空与数量层次

层次划分的基础是事物间的某些共性,但具有相同共性的事物或元素不一定形成一个独立的层次,这说明它们所具有的共同特征必须是特殊的,反映问题或事物共同本质的特征。例如,相同体重或身高的人,不一定构成社会的一个阶层。社会阶层总是按一定的社会分工、社会地位来进行划分的。

自然科学对物质世界的层次进行了许多研究,其中的一些成果对人们认识系统的层次结构很有启示意义,这些成果主要反映在三个方面:

(1) 前面讲的宏观、微观、中观以及渺观、胀观、宇观就是按不同时空尺度划分的。

层次	典型尺度	过渡尺寸	例	理论
胀观	10^{40} 米 = 10^{24} 光年 = 10^{16} 亿光年	3×10^6 亿光年 3 亿千米	银河星系、 太阳系、篮 球场、大分 子、基本粒 子	?
宇观	10^{21} 米 = 10^5 光年			广义相对论
宏观	10^2 米	3×10^{-4} 厘米		牛顿力学
微观	10^{-17} 米 = 10^{-15} 厘米			量子力学
渺观	10^{-36} 米 = 10^{-34} 厘米	3×10^{-25} 厘米		超波

(2) 不同的时空层次对应了一定的质量和能量的量级,美国物理学家韦斯科夫(V. F. Weisskopf)把这称为“量子阶梯”。

(3) 不同的时空层次对应了不同的普通常数或自然常数。这一观点最早是由恩格斯提出来的,他在《自然辩证法》中指出:“物理学的所谓常数,大部分不外是这样一些关节点的标记,在这些关节点上,运动的量(变化)增加或减少会引起该物体状态的质的变化,所以在这些关节点上,量转化为质”。如果说当时恩格斯还只是天才的预见的话,那么,到 1958 年,德国著名物理学家海森堡

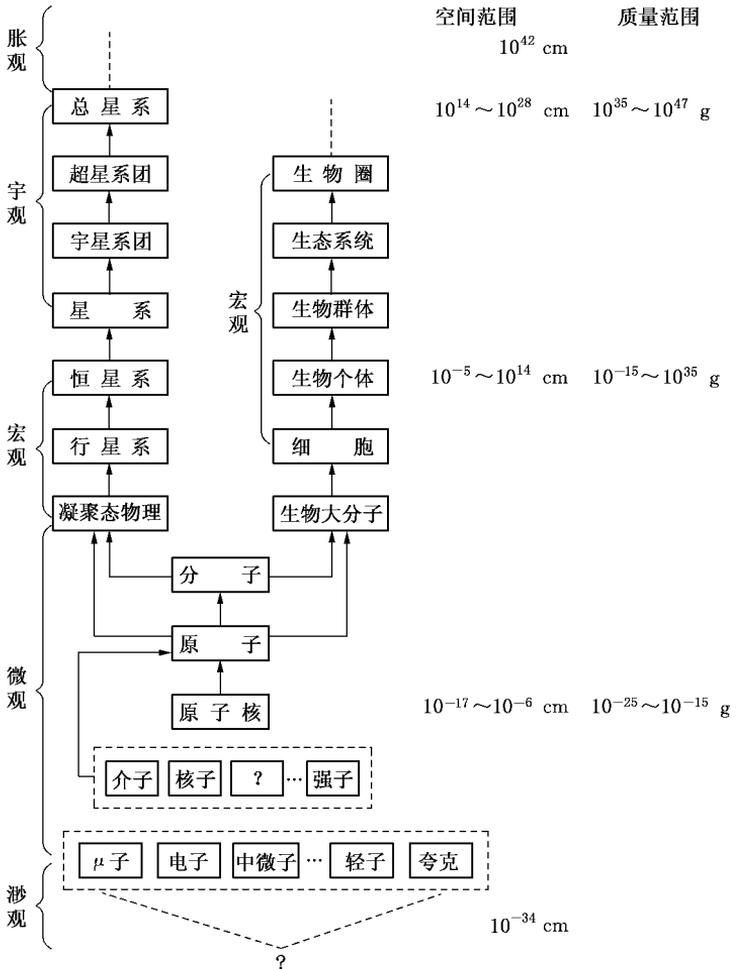


图 2-8 物质系统的时空与质量层次

(W. K. Heisenberg)在《物理学与哲学》一书中就提得更具体了,他指出:“相对论是与自然界中的一个普通常数光速相联系的”,“量子论是和自然界的另一个普通常数——普朗克常数相联系的”,他预言“自然界必定还存在第三个自然常数”。20世纪80年代初,中国学者提出,用普朗克常数、万有引力常数、哈勃常数分别作为微观、

宏观和宇观层次的表征。20世纪80年代末,钱学森将“普朗克长度” $\left(L_p = \sqrt{\frac{hG}{2\pi C^3}} \approx 10^{-34} \text{ 厘米}\right)$ 与“超弦”理论中的“弦长”联系起来,提出存在一个比微观层次更小的“渺观层次”。如果这一预见被以后的科学所证实的话,那么可以认为是层次观点对自然科学的一大贡献。

自然科学和社会科学所揭示的世界层次性同样适应于系统科学,系统内部的层次性可以从四个方面来划分:

1) 按规模范围划分:如大、中、小型企业。

2) 按功能或职能划分:如企业中的领导决策层(高级)、协调管理层(中级)、执行操作层(基层)。

3) 按数量划分:如人群中的少数与大多数。

4) 按逻辑划分:即按思维的先后顺序,如工作和行动步骤。

2.5.2 微观、中观与宏观

不同系统内部层次的划分不同,各层次间的关系也要具体问题具体分析,但总可以将系统分为微观、中观和宏观三层。这里的微观与物理学中的划分有所不同,它是相对于系统整体说的,即先确定系统本身所处的层次,把它称为“中观”层次,整体下面的层次是系统的“微观”层次,它们是指元素、子系统或分系统;整体“之上”是宏观层次,它们是系统的环境或演化背景。例如,把个人作为研究对象时,组成人体的器官是人体的微观层次,个人所处的社会、自然环境是他的宏观层次。如果再上升或下降“一级”,也存在类似的层次结构,如以器官为考察对象,那么,组成器官的细胞就是器官的微观层次,而整个人体则是宏观层次。以社会为考察对象时,组成社会的个人与家庭为微观层次,社会的存在环境,如地球生态环境、国际政治经济环境等则是它的宏观层次。总之,不论着眼于哪个层次,都有与该层次不同的上、下两个层次,把系统像“夹心面包”似地夹在中间。用这种三分法来划分虽然十分简单,但却在研究和寻找系统演化的机制、动力、背景时十分有用。协同学的创始人哈肯就曾据此提出了他的“中观方法”,用以研究所有系统的自组织。中观方法的主要特点是从所研究的对象中划分出

一个“宏观小、微观大”的中间层次作为主要的研究对象,而把它的上下两个层次作无穷大与无穷小处理。

在系统层次结构中存在一个非常重要的原则,即作为研究对象的“中观”层次的存在理由、发展动力和形成机制等,都不能在该层次自身中找到完备的说明,只有深入到它的微观层次和宏观环境,才能找到满意的答案。正如物理学家郝柏林指出的那样,必须抓住与这三个层次相应的尺度。他认为:“一个好的模型往往要涉及三个层次,一个由特征尺度决定的基本层次,更大尺度的环境用‘平均场’、决定外力的‘位势’等来替代,而更小尺度上的相互作用则化成摩擦系数、扩展系数这些通常取自实验的‘数字’。如果从理论上推算摩擦或扩散系数,那就必须转入更细的层次,从物质运动的更为微观的图像出发,看准了特征尺度,问题就比较容易解决”。

2.5.3 层次分化的效率原则

从演化的角度看,层次并不是一开始就有的,层次划分是系统演化的结果,并且随着系统的发展而日趋细微,以至在层次内又产生新的更细小的层次。层次的增加一方面使系统结构日趋复杂,但每一层次的划分又会使系统在属性功能上得到一次简化,从而提高效率,趋向优化。

对高效生存与发展的需求是导致出现层次的根本原因。诺贝尔经济奖得主 A. 西蒙在他的名著《人工科学》一书中讲了一个绝妙的寓言:有两位受人尊重的钟表匠,一个叫霍拉,一个叫坦普斯,他们同时用 1 000 个零件组装一个钟。但在组装过程中又常常被电话打断,使得已经装好的部分散掉,因而不得不再次从头装起。为此,他们两人采取了不同的装配策略,霍拉用的是分组,即我们讲的分层的办法,先用 10 个零件装成一个组件,然后用 10 个组件装成一个更大的组件,最后用 10 个大组件装成一个完整的钟。每当来电话打断他的工作时,他损失的只是手头的那组元件(10 个)的装配活,显然,这样做比较麻烦,装好一只 1 000 个元件的钟要组装 111 次。而坦普斯却希望一气呵成,采取的是不分层的方法,虽然一个钟只装一次,但每次被电话打断都造成前功尽弃,不得不全部重装。由此他因重装而带来的损失远远大于霍拉的,因为有可

能他在装好 999 个元件时又被电话打断,使装配工作又要从头做起。经过简单的计算,人们发现:虽然霍拉装一只钟的装配数为坦普斯的 111 倍,但坦普斯因被打断而损失的活计是霍拉的 20 倍,而且坦普斯干 100 万次才装成 44 次,而霍拉干 10 次就装成 9 次,因而每装完一只钟,坦普斯比霍拉多付出 20 万倍的努力,相比之下,霍拉(即分层方式)的效率是坦普斯(不分层)的 4 000 倍。上面是个十分简单的例子,如果增加零件数,两者的效益差距还会呈指数上升。这对于那些由天文数字的细胞组成的生命体、由上亿个成员组成的国家,以及由上百亿个神经元组成的大脑来说意义之巨大是可想而知的。此外,在这个例子中还有些寓意深刻的“细节”,如由来电话而打断装配工作,实际上对应了系统演化中的外界干扰,它对于每一个个体来说无疑是一种损害,但对于分层化的过程,即系统群体的进化来说则起到了某种催化与促进的作用。

由分层而提高效率的例子在现实世界中是很多的,语言的学习和单词的记忆也是如此。人们的记忆是分成记忆组块的,据测定,每个组块大约包含 6~7 个以下的字母。因此小于 7 个字母的单词容易记,而大于这个数字的,记起来就困难得多。这种组块记忆模式显然也是语言进化中经过自然选择而产生的。此外,在经济领域,在一个大型的企业中,要提高效率,必须将人员分成既相对独立又相互关联的若干层次,而那种不进行分工分层,大家都干一样工作的生产方式,则对应了十分低下的生产水平。

2.6 元素组合与内部协调

前面分别讨论了系统结构中的元素、关联、秩序、构形和层次等基本问题,相对地说,元素与关联属于局部问题,秩序、构型和层次属于整体性的问题,但是,研究系统的结构,不仅是为了认识结构,而且更重要的是如何通过对局部关系的调整来达到整体的优化。本节就来讨论与此有关的要素组合,安排与协调问题,试图在明确组合、安排的实质的基础上提出关于优化组合与系统协调的尺度。

2.6.1 元素组合

系统结构研究中一个特殊而又重要的问题是对元素的“安排”,即存在若干个元素,如何按一定的规则或需要来对这些元素进行“安排”。例如,有 $\{A\} = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ 个人,有 $\{B\} = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_n\}$ 件事,如何安排这 N 个人去干这 N 件事,这里可能存在多种安排方式,如让 A_1 去干 B_1 , A_2 去干 B_2 ,依此类推,也可以让 A_1 干 B_2 , A_2 干 B_3 ……依此类推,直到 A_n 干 B_1 。有另一种安排,但也可能没有一种安排能满足要求。可举出许多通过巧妙的安排而获得成功的例子:如中国古代传为美谈的田忌赛马,他用自己的上等马对齐王的二等马胜一局,又用二等马对齐王的三等马,再胜一局,最后用自己的三等马对齐王的一等马负一局,结果二胜一负取得总体胜利。国外著名的例子有欧拉“36军官问题”。设有36名军官来自6个不同的团,每个团6名,且分属六种不同的军阶,能否把他们排成一个方阵,使得每行、每列的军官都来自不同的团和分属不同的军阶?对这类问题的研究目前成为数学的一大分支——组合数学(combinatorial mathematics)。

其实组合的问题,在历史上早有研究。传说公元前2200年左右,大禹治水时发现一个“神龟”,背上有花纹,用数字写出来就是1到9的9个数字,按三行三列排成方阵,其中每行、每列和每个对角线上的数字之和都为15,这就是著名的洛书图,后来这类图被称为纵横图。纵横图可以有三阶、四阶(如图),以至多阶。

4	9	2
3	5	7
8	1	6

三阶纵横图

16	3	2	13
5	10	11	8
9	6	7	12
4	15	14	1

四阶纵横图

纵横图虽然古老,但目前仍为组合数学所研究,并发展成广义幻方、幻体、双随机矩阵等。20世纪以来,许多理论科学和应用科

学对组合数学提出了大量新的课题,如区组设计、组合优化、组合算法等,这些问题实际上都是系统科学中的结构问题,它促使组合数学在数学领域中异军突起,为系统科学研究元素的最优组合或组合优化提供了有力的武器。组合数学有4个基本问题,它们在系统科学中有广泛的应用。

(1) 组合的存在性问题(即符合要求的安排是否存在):将它翻译成系统科学的问题就是,能否找到一种恰当的组合方式,使已有的元素满足某种整体属性或功能的要求。大家知道,整体的功能当然与元素的安排有关,但并不是所有的要求都能通过适当的安排来达到,有些过高或特殊的要求实际上是无法通过安排来满足的。究竟存不存在满足要求的安排,需要作专门的研究。组合数学在这方面为我们提供了一些有价值的结论,如抽屉原理和它的推广——拉姆齐定理、区组设计中的不存在定理等,就可以用来判定这种组合是否可能。例如,在前面的三阶纵横图中要求每行每列之和大于15的安排就不可能存在。

(2) 组合的计算问题(即符合要求的安排如何计算):用系统科学的话来说,就是能够满足某种整体性要求的组合方式究竟有多少种,这类问题在研究人为事物的构造和进行决策、预测时碰到最多。这类问题称为组合计数问题,已经有许多十分有用的成果,如利用组合计数理论中的三个简单原则:积则、和则、补则就可以对 N 个不同物件的组合数进行计算;利用母函数作为工具,可以解决诸如系统中的分配、分析、限位排列等问题。此外,还有容斥原理、波伊亚定理、 $(0,1)$ 矩阵、递归关系等。在系统演化中有着典型意义的斐波那契数就是在一种特殊的线性递归关系中显示出来的。

(3) 组合的构造问题(即符合要求的安排怎样构造):在解决许多实际问题时,往往需要构造出特定的组合构形,并且常常只有构造才能解决存在性问题。解决构造问题的主要方法有递归法、数论法、代数法和几何法等。实验安排中的“拉丁方”,前面提到的36名军官问题以及著名的更列问题、家政问题等都属于组合构造的范畴。

(4) 组合的优化问题(即怎样求出最优安排的问题):组合优化

(combinatorial optimization)又称组合规划,它是在给定满足某种特征的子集中,按某个目标要求找出最优的子集的数学方法。最初这类问题研究广播网的设置、开关电路设计、旅游路线、课程时间表、装箱问题、开采计划、推销员问题等,都是一些网络上的极值问题,后来人们从理论上概括抽象,提出了一般性的组合优化问题和算法。这些问题包括线性组合优化问题,网络上的最优化问题,独立系统和拟阵问题, P 问题和 NP 完全类问题等,比较著名的算法有“贪心算法”、多项式算法。

2.6.2 组合模型

用组合数学方法来解决实际问题,首先要建立适当的组合模型。组合模型是针对具体的情况和具体的要求来建立的,归纳起来大体有四类情况和与之相对应的四种模型:

(1) 妥善分派与 I 型分派模型:设人员 $A_i (1 \leq i \leq n)$ 有能力承担的工作是 $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik}$,若能使尽可能多人员分派到他们能承担的工作,则认为是合理的,且称为妥善分派。作 n 阶矩阵 $A = (a_{ij})$,这里当 A_i 能胜任工作 B_j 时, $a_{ij} = 1$;对于其他情形, $a_{ij} = 0$,于是一个合理分派对应于矩阵 A 的积和式不为零的一个最大阶子方阵。一个 n 阶矩阵 $B = (b_{ij})$ 的积和式定义为 $\text{per}B = \sum b_{1i_1} b_{2i_2} \dots b_{ni_n}$,这里积和式遍及 $1, 2, \dots, n$ 的全部排列 $i_1 i_2 \dots i_n$ 。全部妥善分派的个数,就是 A 的积和式非零且阶数最大的子方阵的积和式之和。

(2) 最佳分派与 II 型分派模型:设人员 A_i 担任工作 B_j 的效益(例如经济效益)为 $a_{ij} (1 \leq i \leq n)$,则能使全部效益的总和达到最大的分派被认为是合理的,且称为最佳分派。作 n 阶矩阵 $C = (c_{ij})$, c_{ij} 是一个实数,表征人员 A_i 工作 B_j 的效益。最佳分派是使 $c_{1i_1} + c_{2i_2} + \dots + c_{ni_n}$ 当 $i_1 i_2 \dots i_n (1, 2, \dots, n)$ 的一切排列达最大值的排列 $x_1 x_2 \dots x_n$ 所对应的分派:人员 A_i 承担工作 B_{x_i} 。

(3) 稳定分派与 III 型分派模型:若人员 $A_i (1 \leq i \leq n)$ 对诸工作的选择次序为 $B_{i_1}, B_{i_2}, \dots, B_{i_n}$ 则说明人员 A_i 对工作 B_{ik} 的评级为 k_0 。注意,评级的数值越小的工作,被选择的次序越前。工

作 $B_j (1 \leq j \leq n)$ 对诸人员的选择次序为 $A_{j_1}, A_{j_2}, \dots, A_{j_n}$, 则说明工作 B_j 对人员 A_{j_k} 的评级为 k_0 , 对诸人员的一个工作分派叫作不稳定的, 是指根据这一分派有两位人员 A_p, A_q 分别承担工作 B_i, B_u , 但是人员 A_q 对 B_i 的评级小于对 B_u 的评级, 且工作 B_i 对人员 A_q 的评级小于对 A_p 的评级。一个不稳定的分派, 不能认为是合理的; 不是不稳定的分派才认为是合理的, 叫作稳定分派。作 n 阶矩阵 $D = (e_{ij}, f_{ij})$, 其中 e_{ij} 是人员 A_i 对工作及 B_j 的评级, f_{ij} 是工作 B_j 对人员 A_i 的评级。于是, 一个分派是稳定分派的充要条件是, 假定按此分派人员 A_i 承担工作 $B_{k_i} (1 \leq i \leq n)$, 那么, 绝不存在一对整数 $i, j (1 \leq i \neq j \leq n)$ 合于 $e_{jk_i} > e_{jk_j}$ 和 $f_{ik_i} > f_{ik_j}$ 。

(4) 最优分派与 IV 型分派模型 如果一个分派使得每位人员承担的工作的评级, 都不大于任一稳定分派中该人员承担的工作评级, 那么, 这样的分派称为对人员的最优分派。类似的有对工作的最优分派。最优分派被认为是合理的。称工作 B_j 对人员 A_i 是可行的, 如果存在一个稳定分派, 按此分派人员 A_i 承担工作 B_j 。最优分派是具有下述性质的分派: 按此分派每一人员承担的工作的评级都不大于该人员的诸可行工作的评级。

2.6.3 关系协调

系统内部关系是否协调、匹配、和谐, 对系统有着十分重要的意义。经常听到人们在讨论协调问题, 但是, 什么是协调, 用什么方法来判定和度量协调, 却并不是人人都清楚的。下面就给出关于协调的定义、判据和量度。

协调是指几个物体或事件的一种特殊关系。究竟什么样的关系才算协调, 其实很多人心目中都有一定的“数目”, 只是没有一个明确的概念和定义。为了搞清协调关系的特殊含义, 先看几个大家熟悉的例子。

第一个例子是著名的“水桶”原理。一个水桶的最大容积是由最短的一块桶板所决定的, 也就是说, 要使水桶材料最省、容积最大, 只有让所有的水桶板都一样长。

第二个例子是“三个和尚没水吃”。为什么没水吃, 原因是他

他们没有协调好相互关系,如果协调好了,他们就可能既有人挑水,又有人砍柴,还有人烧饭。

第三个例子是阻抗匹配。信号传输过程中如果负载阻抗与信源内阻之间存在以下特定的配合关系,它们就是匹配的:如果信源内阻与负载阻抗相等,即它们的模的幅角分别相等,则在负载上可得到无失真的电压输出;如果负载阻抗与信源内阻共轭相等,即它们的模相等而幅角之和为零,则在负载上可以得到最大的功率;如果两个的阻抗都为纯电阻时,两类匹配的条件相同。

第四个例子是钥匙开锁。

从这些例子中不难看出,协调关系可以从两个方面来进行研究:一是从参与相互作用的事物(元素)本身来看,它们处在一种特殊关系之中;二是从包含相互作用的整体(系统)来看,内部的协调会对整体属性发生一定的影响。下面就从这两个方面来讨论系统内部元素或要素间的协调。和以前一样,尽管讨论是针对元素间的关系,但它的结论和原则对系统之间的关系以至事物间的关系也是适用的。

元素间的协调包含匹配、互补、合作、和谐等含义。上述说法中除了匹配概念在科学中有较确切的定义外,其他多是日常用语,只是一些定性的描述,其核心思想是元素间相互“吻合”,如果是这样,就可以用吻合的程度来刻画协调的程度。

比较下面两把钥匙(图 2-9)。显然,如果钥匙与锁相吻合,锁就能打开,否则不能开锁。而吻合与不吻合的区别在于存不存在多余和有多大的多余。上述情况与第三例中的阻抗匹配是相似的。



图 2-9 吻合与不吻合

它们对应了阻抗共轭匹配。为了测度协调的程度,先来看两元素耦合的情况(图 2-10)。由于不存在第三个元素,使得在二元耦合

中必定是A的输出全部等于B的输入,同样,B的输出也必定等于A的输入。这样一来,在二元耦合中就不存在不协调或者是不匹配的问题。这种情况有些像处在“独木桥”上,是别无选择的。因此,我们的结论是二元系统中没有协调问题。

但是,大多数情况下总是“留有余地”的,如果把这种“余地”也看作系统的一个元素的话,那么,当其中的二元发生耦合时,就允许出现供求的短缺和多余。只有在这种情况下才会产生协调与不协调,匹配与不匹配的问题,也只有这时,才能谈到协调度的问题。

2.6.4 协调度

为定义协调度,下面就来做一个简单的计算:

令:冗余(AB) = A输出 - B输入(短缺即为负的冗余)

冗余(BA) = B输出 - A输入

总冗余 = 冗余(AB) + 冗余(BA)

显然,元素A与元素B的协调度与总冗余的多少成反比,为避免总冗余为零时协调度为无穷,让二元耦合的协调度在(0, 1)区间取值,即令当总冗余度为零时协调度为1,而当冗余度最大时协调度为零。

这里需要解释一下冗余度最大的含义。冗余度最大与下列四种情况有关:

- (1) A的输出完全不为B所接受。
- (2) A的输入完全不能从B的输出中得到。
- (3) B的输出完全不为A所接受。
- (4) B的输入完全不能从A的输出中得到。

如果上述四条都成立,实际上是A与B之间不存在任何关系,因此,可以把两元素不存在相互关联,即完全没有关系的情况定义为冗余度最大(为1),协调度为零。

定义协调的两个极端情况是比较容易的,如果要实际计算两元素的协调度,就必须考虑部分吻合的情况。

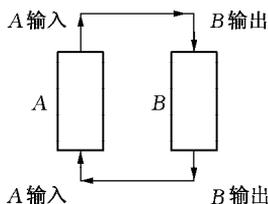


图 2-10 二元耦合

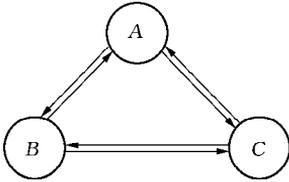


图 2-11 三元耦合

下面以三元素耦合为例来计算它们间的协调度(图 2-11)。为简单起见,这里暂不考虑输出与输入在种类、性质上的不同,否则就谈不上协调与匹配的问题。同时,三元素的协调问题也是考虑存在冗余的最简单情况。而如果对 A 来说将 B 、 C 看作一个整体,则回到二元素的情况。

对于元素 A 来说,它的输出可以在 B 、 C 两个元素间进行分配,它的输入也有 B 、 C 两个来源。显然 A 与 B 的协调度是与上述输出、输入的分配比例有关的。如果 A 输出给 B 的多,就说 A 对 B 的输出协调度大,反之亦然。也就是说,可以给出以下定义:

- A 对 B 的输出协调度(从 0 到 100%);
- B 对 A 的输出协调度;
- A 从 B 的输入协调度;
- B 从 A 的输入协调度。

通常,上述四种协调度是要分别求得的,但有时对这四种协调度取平均值,不失为对它们之间协调情况的一个大体的定量描述。

2.6.5 协调与共振

前面着重从元素间的关联研究了协调问题,其实,协调问题更多的是从系统整体的角度来看的。本节介绍元素协调与系统整体性的关系。

在本章开始时指出,系统结构对整体属性有重要的影响。前面所举的例子也说明了一个明显的事实:内部元素间的关系越协调,系统的整体性体现得越明显。当内部协调度达到最大时,系统的整体性也会达到最优。这种情况与物理学中的共振十分类似。下面是几个共振的实例。

(1) 机械共振:设 $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t$ 是一受迫振动方程,它由两部分组成,方程左边为阻尼振动,右边为周期性驱动, ω 为驱动频率。振子受迫振动的响应为 $x = h \sin(\omega t - \varphi)$

$$\text{其中 } h = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad \varphi = \arctg\left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right)$$

当驱动(激励)频率与振子的固有频率接近时,振幅急剧增加,产生共振。共振时,系统的增益取极大值。

(2) 电磁谐振:电路中储能元件内电能与磁不断相互转换的过程叫电磁振荡,若系统受到外界周期性的电磁激励,且激励的频率等于系统的自由振荡频率,则系统与激励源间形成电磁谐振。

串联 RLC 电路(图 2-12)的谐振情况(图 2-13)如下:

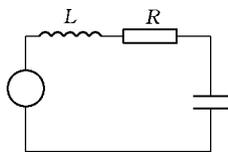


图 2-12 RLC 电路

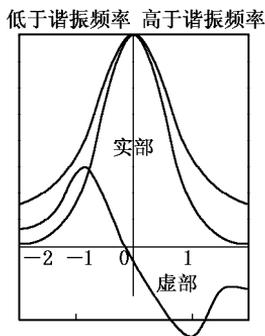


图 2-13 通用谐振曲线

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{c} \int i dt = e(t)$$

$$\text{或 } Lc \frac{d^2V}{dt^2} + RC \frac{dV}{dt} + V = e(t)$$

式中 $e(t)$ 为电源电压, $V(t)$ 为电容器上电压, $I(t)$ 为电源,

$R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时自由振荡

$$V(t) = e^{-\alpha t} [A \cos \omega t + B \sin \omega t]$$

单回路自由振荡频率

$$f \approx f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

品质因数

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

表示有损耗时自由振荡角频率对固有回路的偏离程度

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{1}{4Q^2}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

回路时间常数

$$\tau = \frac{2Q}{\omega_0} = \frac{2L}{R}.$$

回路相对失谐

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$$

$\delta = 0$ 时发生谐振, 此时电容与电感上的电压都等于电源电压的 Q_0

倍, Q_0 为 $\omega = \omega_0$ 时的电路的 Q 值, $Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R}$

$\delta \neq 0$ 时系统失谐, 被迫在电源频率 f 下振荡, 这时电源为

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{R \left(1 + jQ_0 \delta \frac{2 + \delta}{1 + \delta}\right)}$$

在谐振频率 $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ 附近, 即 $\delta = 1$ 时有近似关系 $\frac{\dot{I}}{\dot{I}_0} = \frac{1 - j2Q_0\delta}{1 + 4Q_0^2\delta^2}$

以 $Q_0\delta$ 为横坐标, 以 $\frac{\dot{I}}{\dot{I}_0}$ 为幅值, 实部和虚部为纵坐标, 可得通

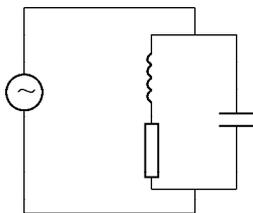


图 2-14 并联 RLC 谐振电路

用谐振曲线。峰值在 $Q_0\delta = 0$ 点, 相对幅值等于 1。当 $Q_0\delta = \pm 1/2$ 时, 即 $\omega = \omega_0(1 \pm 1/2Q_0)$ 时, 相对幅值下降到 $1/\sqrt{2}$, 功率下降到 $1/2$, 为半功率点。两半功率点之间所覆盖的频率范围通称通频带。 Q_0 值越大, 则通频带越狭, 选择性越好, 反之亦然。

并联 RLC 电路(图 2-14)的谐振:

回路两端阻抗

$$\begin{aligned} Z &= \frac{L}{RC} = \frac{1 - j \frac{R}{\omega_0 L} \frac{\omega_0}{\omega}}{1 + j \frac{\omega_0 L}{R} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \\ &= \frac{L}{RC} \frac{1 - j \frac{1}{Q_0} \frac{\omega_0}{\omega}}{1 + j Q_0 \delta \frac{2 + \delta}{1 + \delta}} \end{aligned}$$

并联谐振频率

$$\omega_b = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{L}} = \omega \sqrt{1 - \frac{1}{Q_0^2}}$$

并联谐振阻抗

$$Z_b = R_b = L/CR = \omega_0^2 R$$

(3) 核磁共振(nuclear magnetic resonance):核磁共振是在一个恒磁场中,磁矩不为零的原子核受射频场的激励,发生磁能级间共振跃迁的现象。当原子核在恒磁场中作进动时,进动频率(拉莫尔频率)与恒磁场的磁通密度 B_0 成正比, $\nu = \frac{\gamma}{2\pi} B_0$, γ 为回磁比(ν 相当于振动系统的固有频率),当外加振荡频率与 ν 相当时,出现核磁共振,条件为 $\gamma = 2\pi\mu/Ih$, I 为量子数。

从上面共振的例子中可以得到启示:元素间的协调关系不仅可以从静态的匹配、互补来理解,而且可从动态的“合拍”上加以理解,因为只有运动中的合拍,才能引起共振,使系统的整体性达到最优,而这种最优又可以从两个方面来理解:一是整体功能最大;二是整体效率最高。

以上从理论上探讨了系统内部协调的问题。对于具体问题往往情况更为复杂,因为现实事物的整体性总是包含多个方面,不太可能做到各方面都最优,从而需要研究对应于不同方面的协调度。整体效率高也是如此,看指哪方面的效率,例如,现代人对服装的要求就是多方面的,如果在保暖方面要求最优就难以做到装饰性

上的最优,两种情况在原材料搭配,即元素组合上就各有不同,对协调的要求也就有所不同。

在结束本章之前,要再提一下“三个和尚”的例子,这是一个非常直观的系统协调的例子,但也是一个具有重大理论价值的、值得深入探讨的例子。如果说物理学中有一个著名的三体问题,那么,在社会科学中就有一个具有同等意义的“三个和尚”的问题,而且后者比前者更复杂,意义也更为深远。

附录 米勒的生命系统理论

生命系统理论是美国心理学家、精神病学家、系统科学家、行为主义的创始人之一 J. 米勒(J. G. Miller)20 世纪 60 年代提出来的。1978 年他对自己的理论进行了整理,发表了被称为经典的《生命系统》一书。

米勒首先提出了生命系统的九大特征:①生命系统是开放系统;②保持负熵状态;③具有某一极小程度以上的复杂性;④由脱氧核糖核酸组成的遗传物质或章程、模板等构成原始的“蓝图”和“程序”;⑤由大分子的蛋白质组成;⑥有一个控制整个系统,使各分系统和各组元相互作用的决策器;⑦有其他一些特殊的关键分系统;⑧具有目的和目标,能主动地自行调节并逐步发展整体系统;⑨只能存在于一定的环境之中。

米勒认为在生命系统中起主要作用的是信息流和负反馈。这些思想与《一般系统论》创始人冯·贝塔朗菲的思想一脉相承。我们认为,米勒在系统论方面的最大贡献是对广义生命系统层次和子系统的划分。开始时米勒曾把生命系统分为七个层次:①细胞;②器官;③生物体;④群体;⑤组织;⑥社会;⑦超国家系统(后来他又在组织和社会之间增加了一个社区层次,变为八个层次)。他认为,每个层次中都有 19 个关键的子系统,这些子系统又分为三类:

第一类是物能与信息处理分系统,共有 2 个:复制和边界。

第二类是物能处理分系统,有 8 个分系统:摄取器、分配器、变换器、生产者、物能储备器、排放器、驱动器、支持器。

第三类是信息处理分系统,有 9 个分系统:输入转换器、内部转换器、道与信息网、解码器、联系器、储存器、决策器、编码器、输出转换器。

米勒还列举了 133 项可用于生命系统 2 个或 2 个以上层次的假说或命题,即对应于七个层次、19 个分系统的生命体。

下面是米勒给出的广义生命系统七个层次、19 个关键分系统的主要组元选例。

分层次	细胞	器官	生物体	群体	组织	社会	超国家系统
复制器	染色体	无: 向下分散于细胞层次中	生殖器	配偶	为组织发放许可证的群体	立宪会议	产生另一超国家系统的超国家系统
边界	细胞膜	内脏壁膜	皮肤	武装警察	组织所有权护卫队	边境护卫队组织	超国家边境护卫队组织
摄取器	细胞膜	器官的输入动脉	口部	供应点和饮料等的人	接纳部门	进口公司	管理国际港口的超国家系统官员
分配器	内质网	器官的血管	维管系统	向家庭成员分配食物的母亲	监工	运输公司	联合国儿童基金会
变换器	线粒体内的酶	实质细胞	上消化道	屠夫	炼油厂经营群体	炼油厂	欧洲原子能联营
生产者	线粒体内的酶	实质细胞	未知	厨师	工厂生产单位	工厂	世界卫生组织
物能储备器	三磷酸腺苷 (ATP)	胞间液	脂肪组织	贮存食物的家庭成员	贮藏室管理群体	存货公司	国际红十字会

(续表)

分层次	细胞	器官	生物体	群体	组织	社会	超国家系统
排放器	细胞膜间隙	器官的输出静脉	尿道	清扫工人	交货部门	出口公司	国际原子能机构废物处理部门
驱动器	微管	器官的肌肉组织	腿部肌肉	无、横向分散于共同移动的所有群体成员中	驱使组织全体人员移动的一小部分核心人物	汽车货运公司	北约组织运输部门
支持器	微管	基质	骨骼	体力上支持群体内其他人员的人	组织建筑物管理群体	管理公共建筑物和国土的国家官员	建筑物与境界的超国家官员
输入转换器	细胞膜的特殊感受器部位	感觉器官的感受器细胞	外感受器官	监视者	电话话务员群体	国际新闻服务部门	为超国家系统提供信息的新闻服务部门
内部转换器	阻遏物分子	心脏窦房结的特殊细胞	对血液状态变化作出反应的感受器细胞	向决策器报告群体状态的群体成员	检查单位	民意测验机构	超国家检查组织
信道与信息网	细胞膜	器官的神经网络	网状神经系统的组成部分	通过空气向其他成员传递信号的群体成员	民间电话交换台	国立电话网	万国邮政联盟

(续表)

分层次	细胞	器官	生物体	群体	组织	社会	超国家系统
解码器	分子组合部分	感受器官的感受器或次级细胞	感觉中心内部细胞	译员	外语翻译团体	语言翻译单位	超国家语言翻译单位
联系器	未知	未知	未知	无、横向分散于联结群体的成员中	无、向下分散于各个人与生物体层次中	教学机关	超国家大学
存储器	未知	未知	未知	家庭的成年人	档案室	图书馆	联合国图书馆
决策器	调节基因	窦房结的交感纤维	大脑皮质部分	户主	行政办公室	政府	欧洲共同体部长会议
编码器	激素产生部位	器官输出神经元前突触区	人的优势大脑半球的叶	群体声明撰写人	语言与书写部门	新闻秘书	联合国国际情报局
输出转换器	前突触膜	器官输出神经元前突触区	喉部	发言人	新闻发布室	政府发言人办公室	华约组织正式发言人

米勒的理论虽然未必十分严密,但却非常实用,据介绍,已用于美国和其他国家的政治经济问题之中,如系统诊断、边界问题的处理等。

第三章 | 系统的性态

为了认识事物的整体,上一章研究了系统的结构,即从各组成部分及其内部关系中探讨事物如何构成。但正如人们常说的那样,“不识庐山真面目,只缘身在此山中”,只从内部无法全面认识事物的整体,还必须研究它与环境及其他事物的关系,即从事物的外部联系中把握整体性态,而对一个系统的认识也正是从这些关系中得到的。

事物的特性,也就是一事物区别于他事物的特殊属性、功能、价值、形态、行为,总称为系统的性态。系统的特性不是它自己“固有”的,也不是由系统“单方面”决定的,而是由与之作用的对象共同确定的,并且受到环境、场合、时机等多种因素的影响。所以,要根据不同的对象、问题、场合、时机来研究系统的性态,特别要针对在一般情况下表现出来的性质和状态;在某些特定场合和时期所表现出来的特性和形态;在受到一定的外界扰动后所表现出来的性态;在受到控制或控制其他系统时所表现出来的状态和特性;以及系统在被使用时的性态进行研究。这就是本章所要讨论的系统整体性、稳定性、控制性、随机性以及行为特征。

系统科学把事物作为一个“有机整体”,着重研究一事物与其他事物或环境的相互作用所表现出来的特殊性和定常态。这个问题可以从两个方面来考察:一是系统具有哪些其他事物不具有的性质、状态、规律;二是系统的这些整体特征从哪里来,系统的特性从哪里来。在实践中如何体现系统的特色,如何最大限度地发挥整体功能价值,本章对这些问题将作适当研究。

3.1 系统的整体性

系统的整体性可以从两个方面来考察:一方面,从系统整体相

对于组成它的元素所表现出来的特殊性来考察,即整体具有而元素不具有的特殊性质。例如一幅美景、一位美人、一首优美的乐曲,它们的美蕴涵于整体的和谐协调之中,而并不是它们具有更多的“美原子”、“美器官”、“美音符”;一架飞机的整体能够飞上天空,但构成它的零件却并不具有“飞行”的能力;水是无色透明的液体,而构成水分子的氢和氧却是气体;对一个宏观物体来说它总是具有温度、压强等可测量的物理属性,而对组成它的单个微观粒子来说,温度、压强却完全没有意义。这些问题在理论上涉及整体性的突现,即系统的整体是如何创生的,对此将留在后面研究系统演化与自组织时再作讨论。另一方面,将事物作为一个整体看待,从它与周围环境或其他系统发生关联时所体现出来的独特性质和状态来考察。本节主要从系统在一般场合下所具有的共同性态这一层面来探讨,从系统的属性、功能和价值等方面进行研究,即系统在完成某个特定目标时能有什么作用?与某个特定的人或系统的特定目标有什么关系?

3.1.1 系统的属性

系统论认为,事物的属性是它与其他事物相互作用中所表现出来的某些不变性、定常性或对称性。所谓不变性、定常性和对称性,指尽管与之作用的对象、环境、场合、时机发生了一些变化,但它仍然能保持某种特征不变,用物理学术语来讲,就是“守恒性”或“变换中的不变性”。例如,如果认为一件东西是“坚硬”的,即具有硬度大的属性,是指它在与其他物体的相互作用中,总是能“砸碎”、“入侵”或“迫使”其他物体发生形变,而自己的形态则变化不大;如果说一样东西具有一定的能量,是指它具有一定的作功“本领”,即使场合不同,这种本领的大小也不会发生变化(或以一定的比例等价换算);说一个物体具有一定的质量,是指它在不同的场合包含了相同数量的“物质”,如此等等。正是因为事物具有这种定常性、不变性和守恒性,人们才能认识和把握事物。当然,应该看到,世界上一些事物的定常与不变都是相对的、有条件的,超出一定范围就会发生变化,不过在变化的过程中也总会表现出某种新的定常性和不变性,如运动的物体位置发生了变化,但速度、加

速度可能保持不变。

系统的属性存在于系统与其他事物和环境的相互关系之中。例如,一个物体具有“红的颜色”,是指它能发出或反射出红色的光谱。人的社会属性也是如此,如果他不和别人打交道,就很难了解他的个性,只有当他参与社会活动,并且总是站在某种特定的立场,经常表现出某些稳定的活动规律,才能认识他的社会性。同时,事物的性态是多方面的,不同的学科研究问题的角度不同,关注的方面不同,其特征也不尽相同。比如,物理学关心事物的力学特征、电磁特征以及热学特征;化学关心元素和分子的化学性质;生物学关心生命体的生活习性;社会学关心人际关系、社会制度、国家、民族特征等。

3.1.2 系统的功能

什么是功能?功能就是起什么作用,派什么用途。一些研究中往往将系统的功能与结构作为一对范畴来研究,其实这并不十分恰当。因为系统的功能只是系统属性和形态在一个特殊方面的表现,所以,严格来说,系统的结构和系统的性态是一对范畴,而系统的功能和系统的目的是另一对范畴。下面从如何更好地发挥系统的功能这一特殊而重要的角度来考察系统的性态。

(1) 系统的功能是该系统为实现某个目标时所表现出来的作用或用途,人们重视系统的功能主要也是从功利的角度对它的作用和用途感兴趣,但是,作用和用途总是相对于某种特定的目的或目标而言的。正如对某人是仙丹的东西,对另一个人可能就是毒药;同一块材料用在不同的地方可以派不同的用场,起不同的作用;一个内部元素和结构相对确定的系统,对于不同的目的或目标作用往往也极不相同。因此,如何根据目标来选择系统,以使它发挥最大的功能,是特别重要的。

(2) 元素与结构是发挥系统功能的内因。但系统功能的发挥还与它所处的环境和场合密切相关,这一点在复杂的社会经济领域表现得特别明显。一个人、一个企业能不能取得成功,能不能充分发挥自己的作用,很多情况下取决于它所处的社会、政治、经济、文化环境。因此,系统应主动地认识、了解环境,根据环境和形势

来选择合适的策略。

(3) 系统功能的发挥不仅与环境、形势有关,而且与它自身所处的阶段以及运行的时机有关。任何一个系统都有一个成长、发育、成熟、衰老的过程,处在不同发展阶段的系统,其功能的发挥也不同。教育心理学关于人成长的研究表明,人在成长的过程中存在一些所谓的“关键”阶段:3~6岁是学习语言最好的年龄段;14岁左右是长身高最关键的年龄等,这些研究结果对于家长和教育工作者来说是需要及时把握的;对于发挥人的作用来说,20~25岁是体育方面出成果的黄金时代;对从事物理、数学,特别是理论物理研究来说,26~35岁是最好的年龄;如果要从事教育、管理、文学艺术、政治法律等工作,由于需要丰富的社会经验作基础,因而最佳年龄一般也相对较大。例如,统计资料表明,历史上著名的军事家,其年龄大多集中在65岁左右。系统功能的发挥与时机有关的类似情况,在许多人造事物方面也有明显表现,如一辆新的汽车开始使用时要有一个磨合阶段,一个人干工作要有一个适应阶段等。这些情况表明,任何系统的功能都有一个从低到高、由高到低的钟形或“正态分布”曲线。因此,无论是用人或用物都需要把握时机。

3.1.3 系统的价值

如果系统的功能是相对于一定的目的和目标而言的,那么,系统的价值就是相对于特定的使用对象的特定目标而言的。从概念的范畴来说,它是一种特殊的功能,不妨用下面的图形(图3-1)来描述系统属性、功能、价值三者的包容关系。

属性、功能、价值虽然有上述包容关系,但在实际应用中功能和价值总是联系在一起。因为,应用总是或多或少地涉及一定的目的或目标,所不同的是在研究系统的价值时更关注具体的对象和目标。特

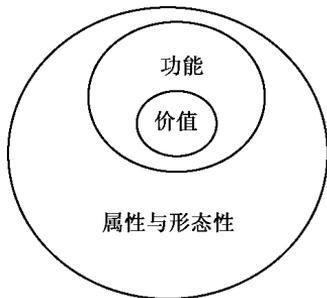


图 3-1 属性、功能、价值的关系

别是在许多场合下,系统的价值往往是相对于人、社会或某个社会团体而言的,这样,系统的价值就常常被认为是对人、人类社会或集团的作用。

经济学、社会学和哲学都对价值概念作过许多研究,并给出不同的定义。例如,经济学将价值分为“使用价值”和“交换价值”。前者指的是功能,后者则被定义为商品交换中的一种比例,即:

$$\text{价值 } V = \text{效用} / \text{成本}$$

这表明,正是因为价值是对特定的对象和某个目的而言的,所以“世界上没有免费的午餐”,任何系统价值的获取与实现都要付出相应的代价,即耗费一定的成本。从这一角度来研究系统的价值会给人们一个重要启示,即经济学上的价值指的是系统与环境或与其他系统间的一种特定关系的数量体现。人们通常很关心商品的“性能价格比”,在商品交换这个层面上,性价比与其说是由系统“自身的”品质所决定,不如说是由商品交换双方的关系所决定,它表现为收入与支出的一种比值,而这种比值在特定环境下可以用一个可变的数字或符号来表示,也就是价格。

如何确定一个系统价格的问题,在现代经济学中占有极其重要的地位,这通常称为定价问题或定价理论。从系统的角度看,定价问题实质上是通过对系统与环境或其他系统关系的分析,合理地确定不同性质与功能的系统(商品)交换比例。所谓合理是指能导致商品正常流通,并使由交换双方所构成的系统达到整体优化。用通俗的话来讲,就是使交换双方各得其所、互惠互利。

以上分析表明,商品的定价原则上可以与商品原来的使用价值和人们为得到它所耗费的劳动相脱离,而随环境与时机发生变化。例如,某个公司的股票、某种图案、面值的邮票、某样特殊物品的价格在功能没发生任何改变的情况下,可能会因人造的“炒作”而大幅度变化。

3.2 系统的形态

如果系统的性质是系统之间或系统与环境之间的相互作用以

及在相互作用中所表现出来的行为特征,那么,系统的形态则是系统与系统之间、系统与系统之间的相对位置、顺序、分布、态势等与空间有关的关系。

3.2.1 系统的外形

系统作为一个整体,有一个封闭的时空上的边界。时间上的边界划分出系统创生与消亡的界限,空间上的边界则将系统与环境区分开来。对于自然和社会中大量存在的固态事物系统,空间边界通常都有一定的形状,这就是系统的外形。例如,一些液态、气态的实物系统,其外形虽然存在,但往往因变化不定而难以确定;语言系统、逻辑系统等相对抽象的系统则无外形可言。

系统的外形是指系统外部的几何形态或整体的存在形式,是事物内容的外在表现,为内容所制约。但是,事物的外形在事物与事物的相互作用中往往起着决定性的作用。例如,物理学的一个重要分支表面物理就是专门研究物体表面的构造和形态的,表面形态不同,物理性质会有很大的差异。化学和生物更是与物质的外形有着十分密切的关系,一物质是否能和另一物质结合,结合的速度和程度往往是由它们的外部形态所决定。生物细胞和分子的外部形态往往决定它的生命活性。生物大脑进化的研究结果表明,大脑皮层上的沟回的多少及深度变化,甚至比大脑体积的大小变化更为重要,因为它与大脑皮层表面积的大小直接有关,而后者又决定了大脑的控制和信息处理水平。换言之,系统的外形本质上是系统边界的形式。而边界是否闭合、有什么样的拓扑性质、拓扑性如何演化等问题,都是分析系统演化理论的重要课题。一个复杂系统的边界总是十分复杂的,边界的演化也是如此。尽管在系统演化的整个过程中边界总是闭合的(见系统演化原理中的质朴学原理),但它的拓扑性则在不断地变化。例如,从对称性程度高的圆形或球形变到其他不规则的形态,从单连通到复连通,从低维到高维,从小的分数维到大的分数维等,都从各个不同的角度展现了系统外形的演化。因此,可以通过对外形拓扑性变化的研究来寻找系统外形演化的标度。

外形对认识和利用系统同样有着十分重要的意义。例如,人们往往通过外形来识别或判定一个事物。社会交往中一个人的外形和气质总是会给人深刻的印象,这一点不光是爱美的少女,就是所有的成年人都感受很深。在生物和化学层面上,人们早就对外形和构型进行过许多研究,在生物体和化学物质进行接触时,常常需要考虑“形态的互补性”,这一点已在结构一章中提到。在系统(事物)之间的相互作用中,形态互补的意义更为明显,其原因在于外形可以表达系统的有关信息,从而对系统间的相互关系进行调控或产生影响。特别是当它体现了系统的时空界限和基本特征时,就表达了系统的特征信息。

人们研究得很多、也利用得最多的“符号”,在一定意义上也是一种通过外形表达的信息,它是通过某种编码在某特定的信息内容与事物外形之间建立一一对应关系来发挥作用的。这就是为什么在许多实际应用领域中,物体的形态及其表面形状,对认识物体和系统的性质有着决定性作用。例如,在人们感官所接受的信息中,视觉形象与声音形象占了几乎95%以上的比例。

3.2.2 系统的模式

系统的存在总有一定的模式,模式一词包含了类别的意义。模式问题的重要性在于,一旦人们认识了系统的模式,就可以根据该模式共同的特征来识别和处理该系统。例如,外形的模式(符号)、运动的模式、相互作用的模式、管理的模式等。以运动模式为例,人们早就对从简单的匀速直线运动、匀加速运动、圆周运动到复杂的椭圆运动、曲线运动、周期运动、非周期运动以至随机运动中的无规行走、自回避无规行走等多种类型的运动进行了研究,近年来,又对“游荡”和“非游荡”集等作了广泛而深入的研究,建立了许多反映一类模式运动特征的数学模型,取得了许多重大成果。现代科学中形态的变化、形态的发生等更是一些引人注目的领域。近年来,对分形、时空混沌、复杂性态的研究中发现,一个系统的“图形”与演化模式之间有着重要的关系。

在管理科学中,管理模式是一个基本问题。管理模式实质上是对社会关系和行为模式深刻认识基础上的控制模式。例如,计

划体制下的管理模式与市场经济体制下的管理模式、对实物生产与精神产品生产的管理模式、对企业中不同层次的管理模式就有很大的不同。

事物与系统的形式在哲学上早有研究。形式作为一个基本的哲学范畴一度被认为是体现事物本质的东西,它和内容、质料一样,曾引起不少学者的关注。亚里士多德也许是第一位对形式问题进行详细论述的学者,他在批判他的老师柏拉图割裂一般与个别的观点的基础上,提出了著名的“四因”说,其中形式因被放到了十分重要的位置。他认为:“形式是每一个事物的本质”,也是事物的“原形”、模型和形状。形式作为质料(构成事物的材料或系统的元素、部件)的对立概念,它既是质料追求的目的,又是使质料变化的动力。和质料相比,形式是能动的、现实的、第一性的。F. 培根在继承亚里士多德的观点的同时,又给形式赋予了新的内容,他在《新工具论》一书中明确指出:“形式是支配和构造简单性质的那些绝对现实的规律和规律性”,是事物性质的内在基础和根据;是物质内部固有的、活生生的、本质的力量,物体的个性、特殊性也是由它所决定的。他认为,只要掌握了形式就可以在认识上获得真理,在行动上获得自由。哲学家康德是从美学的角度对形式问题进行研究的,他开形式主义和形式美学之先河,提出:“在所有美的艺术中,最本质的东西无疑是形式”。此后,一大批艺术家对艺术作品与文学作品的结构、布局、表现手法等进行了大量的研究,创立了至今在西方仍有着巨大影响的形式主义美学,他们的工作甚至被称为“形式科学”。许多带有科学倾向的结构主义、格式塔美学、心理学、符号主义等也与此有着密切的关系。“形式”不仅是一个重要的哲学范畴,而且在科学上也有深刻的意义,这里指的形式不单是指事物的外表,而且与系统演化的内容、本质和动力等都有着密切的联系。

3.2.3 形态的拓扑量

用拓扑学来研究系统形态顺理成章,因为拓扑学本来就是专门研究事物形态和相互关系的“形式分析学”。拓扑学重点研究几何图形的拓扑不变性,即在只容许作拉长、缩小、扭曲,

而不许割断与黏合条件下连续变换下保持不变的性质。从系统的角度来看,拓扑不变性也就是在边界闭合的前提下系统形态的定常性、守恒性和对称性。实际上只要系统的边界不发生割断和黏合,无论系统的形态如何发展变化都可以保持系统的整体性。

将拓扑学中一些经典例子与系统形态问题联系起来是十分有趣的,如欧拉的多面体公式与曲面的分类问题,可以认为是系统最本质、最典型的空间形态分类,同时揭示了分类中的拓扑学原则;四色问题表明在系统边界上区分不同系统的最少类别数目;此外,还有扭结问题、维数问题、布线问题(嵌入问题)、向量场问题(包括奇点和指数问题)、不动点问题等。这些例子都在不同层次上与系统的形态有关。此外,拓扑学以流形、复形等拓扑空间为研究对象,以几何图形的连续变形(同胚)为典型问题,为人们提供了对图形加以分类的方法。而这些方法的基础就是给每个几何图形一个“量”,这些量可以是一些数,如维数、欧拉数、同伦不变量;也可以是一些代数结构,如群、环;还可以是一些性质,如连续性、紧致性等。在分析系统的形态时,这些数量、性质和结构都是特别有用的。

当然,如何运用拓扑学的成果来刻画系统形态的特征还是一门需要深入研究的学问,但拓扑学给系统形态研究提供了许多有力的武器,它对系统科学发展的意义是值得充分认识和肯定的。

3.3 系统的稳定性

系统的性态广义上指的是事物的性质与状态,包括哲学在内的许多学科都对之有过专门研究。系统科学有自己特定的研究角度,它将事物作为一个整体,并从整体与环境及其他系统的关系角度来研究性态。主要从以下几方面讨论系统的性态:

- (1) 系统受到外界随机扰动后的相应特征,即系统的稳定性;
- (2) 系统受到来自特定方向的作用后的表现,即受控性;
- (3) 系统为实现特定目标而与外界发生关联时所表现出来的特征,即主控性或通常所说的主动性。

稳定性理论是数学、系统科学和控制论中相对成熟的理论,本节仅对有关资料进行一些综述,详细内容可参考有关专著。

本节先研究系统的稳定性,仍然从定性开始,然后给出一些定量的测度。

稳定性是现代科学中的一个重要概念,也是系统整体最重要的属性之一。因为系统的稳定性是研究系统的结构和性态的基本前提,换言之,对象必须相对稳定(包括动态稳定,局部或大的范围内稳定),才具有认识、把握、控制、利用的可能。如果事物整体的性质状态与运行规律会因微小的、随机的扰动(这种情况总是存在的)而变得“面目全非”,那么,研究结果就会不具有普适性和定常性,因而就难于指导实践。当然,稳定的边界是尤其要注意的,即当扰动达到何种程度时稳定性会丧失,为此,需要从相反的方向来对稳定性进行研究。

现在从微小的随机扰动开始。从最一般的意义上讲,系统的稳定性是系统在受到微小扰动后的相应特征。这里所强调的是微小的随机扰动,而不太强调引起扰动的原因是否来自系统外部。

系统稳定性同时也是对动力学系统的基本要求和评价系统优劣的重要品质指标。一个系统必须具备稳定性,才可能发挥预定功能,评价其他品质指标才有意义。一个不稳定的系统在实践中是无法控制和把握的,故很难对它的行为进行预测,也无法对它进行控制。

稳定性的概念虽然重要,但是比较直观,谁都知道,一个放在谷底或低洼凹处的球比放在山顶凸处的球要稳定。谁都可以试一下桌子或椅子是否放稳。



图 3-2 小球的稳定性

从系统的角度来看,稳定性基本含义是:当系统受到扰动而发生偏离后能不能自动回复到原来的状态,如果能回到原来的状态,或者接近原来的状态,它是稳定的;相反,如果偏离越来越大,不能回到原来的状态,它是不稳定的。

根据系统状态以及响应方式的不同,理论上可以将稳定性分为李亚普诺夫(Lyapunov)稳定性、渐进稳定性、轨道稳定性、结构稳定性等,这些稳定性在数学上都有明确的定义。这里仅作简要介绍。

3.3.1 李亚普诺夫(Lyapunov)稳定性

稳定性的概念最早出现于流体静力学。上世纪末,俄国数学家李亚普诺夫在一系列论文和自己的博士论文《运动稳定性的一般问题》中提出,可以用一个特殊函数来直接判定非线性常微分方程的稳定性,后来这个函数就被称为“李亚普诺夫函数”,这种方法被称为李亚普诺夫直接法。

李亚普诺夫稳定性在数学上相当于要求在 $X(t)$ 上对初始条件的“一致连续”,即系统在受到扰动而发生偏离后,能尽可能地回到原来状态的附近,只要与原来状态的差距不大于指定的某个值。它的数学表达为

设向量 $X = \varphi(t)$ 是微分方程

$$X = f(X, t) \quad (3.3.1.1)$$

的解,定义域为 (t_0, ∞) ; 对于给定的初始条件 $X(t_0) = X_0$ 。如果对于足够小的 $\varepsilon > 0$, 总有 $\delta > 0$, 使得只要 t_0

$$|X_0 - \varphi(t_0)| < \delta \quad (3.3.1.2)$$

就可推知解 $X = x(t; t_0, X_0)$ 满足

$$|X(t; t_0, x_0) - \varphi(t)| < \varepsilon \quad (3.3.1.3)$$

则称解 $\varphi(t)$ 是李亚普诺夫稳定的。

通俗地讲,如果小的扰动(小 x_0)引起运动轨迹的小偏离,则称该运动是李亚普诺夫稳定的。对于实际问题,系统是否具有李亚普诺夫稳定性是很重要的,可以把这种稳定性理解为“小扰动下的

有限偏离”。这是因为,任何偏离都依赖于扰动的大小。只要扰动不超过某个给定的值,系统就会有限而不是无限的偏离扰动前的状态,这就是李亚普诺夫稳定。

3.3.2 渐近稳定性

李亚普诺夫稳定性是允许存在偏离的稳定性,它并不要求系统最终回到原来状态。渐近稳定性的要求更高,它要求随着时间的推移,系统状态与原状态的差距趋近于零,即准确地回到原来的状态。它的数学表达为:

设方程(3.1)的解 $X = \varphi(t)$ 是李亚普诺夫稳定的,如果存在 $\eta > 0$,使得只要

$$|X_0 - \varphi(t_0)| < \eta$$

就可推知 $X(t; t_0, x_0)$ 满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |X(t; t_0, x_0) - \varphi(t)| = 0$$

则称解 $\varphi(t)$ 是李亚普诺夫意义下渐近稳定的,简称 $\varphi(t)$ 是李亚普诺夫渐近稳定的。图 3-3 和图 3-4 就是二阶系统在状态空间(相平面)中的李亚普诺夫稳定性和渐近稳定性的比较,图中可以看出,渐近稳定性要求回到原来状态,而李亚普诺夫稳定性则只要求回到原来状态的附近。

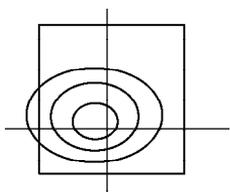


图 3-3 李亚普诺夫稳定

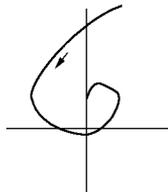


图 3-4 渐近稳定性

3.3.3 大范围稳定与轨道稳定性

一个系统是否稳定,既与它自身的结构有关,又与它所受扰动的大小有关。所谓结构,一是指系统的物理结构,即元素、要素之间的整体关联及其秩序;二是指系统运动方程的数学结构(它由描

述系统的变量、参数以及它们的关系所决定)。至于扰动,则要看它发生在什么地方和扰动力的大小。如果扰动发生在系统状态空间的“平庸点”上,即一般的点上,通常问题不大,不太会引起系统的失稳;如果发生在诸如临界点等一些特殊的点上,则小的扰动可能被很快放大,从而引起系统失稳;如果扰动的力度大,引起的偏离显然也大,所以总存在一定的限度,超过这个限度,系统就再也回不到原来状态了。于是就可以相对于一定的扰动力度在系统的状态空间中划定一个区域作为稳定区域。稳定区域的划定和对它的结构分析,在理论与实践上都有重要意义。特别是对一类存在势函数的系统,可以定义能够实现渐近稳定的最大区域为引力域(有时也称为引力盆)。

(1) 大范围稳定:引力域是状态空间的一部分,是一些初始状态的集合,凡起源于这些初始状态的运动一定是渐近稳定的。如果引力域充满状态空间,则系统是大范围渐近稳定的;如果系统是大范围渐近稳定的,显然状态空间中存在唯一的平衡点。大范围稳定的定义如下:

设 $X = \psi(t)$ 系统运动方程的解,如果从状态空间的任一初态 (t_0, x_0) 出发,都有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t; t_0, x_0) - \varphi(t)| = 0$$

成立,则称解 $\psi(t)$ 是大范围稳定的。

(2) 轨道稳定性:前面两种稳定性都是相对于系统的某个状态而言的,轨道稳定性则是相对于系统运动轨道的稳定性。即要求受到扰动而发生偏离之后能回到原来的运动轨道上,或轨道附近。这相当于把轨道从一条线变成一个“管子”,只要系统的状态最终能回到这个“管子”中来,就可以认为是轨道李亚普诺夫稳定的。

3.3.4 线性稳定性分析

上面对稳定性概念作了一般介绍。作为一种重要特性,系统科学主要关心的是如何判定一个系统是否稳定,以及用什么方法来研究系统的稳定性。

要判断一个系统是否稳定,直观地讲,就是要看它在受到扰动后能否自动回归或逼近原来的状态。能否做到这一点,除了取决于扰动发生地点和大小外,还主要取决于系统本身的数学结构。要研究系统的数学结构,通常是对运动方程进行求解,这无疑是一件十分困难的工作,但特殊情况下可以大为化简。下面从“可线性化”和存在李亚普诺夫函数两种情况下介绍稳定性理论在系统科学中的应用。

根据系统的性质和运动规律可以把系统划分为线性系统和非线性系统。非线性系统的运动往往十分复杂,但是其中有一些可以在特定条件下简化为线性系统处理,这种方法叫作线性化方法。

设运动方程为非线性常微分方程组

$$\dot{x} = f(x, \mu)$$

其中 $x = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$, $f(x, \mu) = [f_1(x, \mu), f_2(x, \mu), \dots, f_n(x, \mu)]^T$ 是 n 维向量, μ 是控制参数。设 x_e 为平衡点(定态解),即满足

$$\dot{x} = 0 \text{ 或 } f(x_e, \mu_e) = 0$$

如果定态解是稳定性的,则意味着初始扰动不会被逐步放大,甚至可能随时间衰减为零。为此,引入对定态解的扰动 $\eta(t) = x(t) - x_e$,在平衡点 (x_e, μ_e) 附近作泰勒(Taylor)展开:

$$\dot{x} = f_i(x_e, \mu_e) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \eta_j(t) + O(|\eta|^2), (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\text{因此, } \dot{\eta}_\lambda(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \eta_j(t) + O(|\eta|^2), (i = 1, 2, \dots, n),$$

写成向量式,有 $\dot{\eta}_\lambda(t) = A\eta + O(|\eta|^2)$, 其中 $A = (A_{ij}) =$

$\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right)_{(x_e, \mu_e)}$ 是取值平衡点上的线性化算子,称为雅可比矩阵。

对线性化方程 $\dot{\eta}_\lambda(t) = A\eta$, 其解 $\eta(t) = e^{tA}\eta_e(0)$, 由此可推出当 A 的全体特征值有负实部时, $\dot{\eta}_\lambda(t)$ 是衰减的。因此,不必考虑非线性项 $O(|\eta|^2)$ 就能断言非线性方程 $\dot{x} = f(x, \mu)$ 的定态解是

稳定的。

当 A 的特征值至少有一个具有正实部时, $\eta_p(t)$ 是增长的, 非线性方程 $\dot{x} = f(x, \mu)$ 的定态解是不稳定的。

值得注意的是, 当 A 的特征值谱中除有负实部的特征值外, 还有零实部的特征值, 但当无正实部的特征值时, 运动方程的定态解是否稳定需由非线性项 $O(|\eta|^2)$ 来判定。

以上就是李亚普诺夫线性化稳定性原理。

下面以线性化后的二阶自治系统为例, 讨论平衡点的各种类型。系统解的稳定性通常由其特征值 λ_1 和 λ_2 在复平面上的分布来决定, 可以有以下六种情况(图 3-5):

(1) λ_1 和 λ_2 为位于复平面左半平面的共轭复数, 这时每条相轨迹都以振荡方式无限地“卷向”平衡点(各条相轨迹彼此不相重叠), 这种类型称为稳定焦点。

(2) λ_1 和 λ_2 为位于复平面右半平面的共轭复数, 这时每条相轨迹都以振荡方式“卷离”平衡点, 这种类型称为不稳定焦点。

(3) λ_1 和 λ_2 均为负实数, 这时相轨迹以非振荡方式趋近于平衡点, 这种类型称为稳定节点。

(4) λ_1 和 λ_2 均为正实数, 这时相轨迹以非振荡方式从平衡点

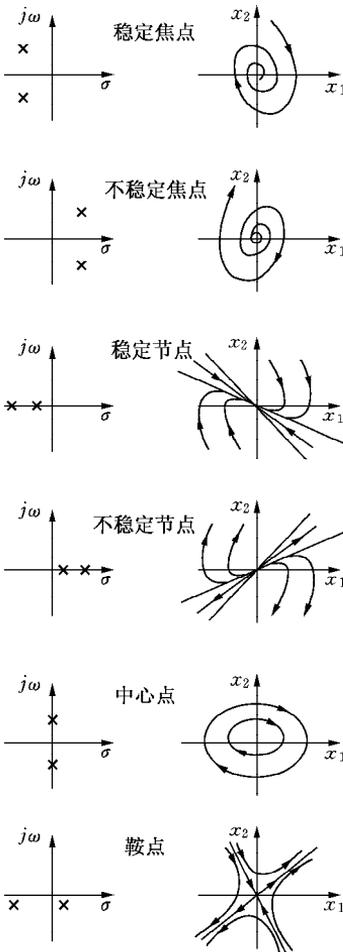


图 3-5 二阶系统的稳定性

散出, 这种类型称为不稳定节点。

(5) λ_1 和 λ_2 为共轭的纯虚数,这时相轨迹是围绕平衡点的一组封闭曲线,这种类型称为中心点。

(6) λ_1 和 λ_2 一个为负实数,一个为正实数。这时每条相轨迹都是先趋近平衡点,随后在尚未达到平衡点之前又远离平衡点而去。只有四条孤立的相轨迹例外,其中两条趋于平衡点,另两条从平衡点扩散出,这种类型称为鞍点。

以上是对二阶系统平衡点的分类,对于三阶和更高阶的系统,通常将平衡状态分为稳定的、渐近稳定的和不稳定的。

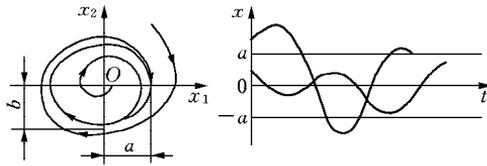
对于线性系统来说,平衡点的类型完全确定于系统运动的性质。而对于非线性系统,平衡点的类别只能确定系统在平衡状态附近的行为,而不能确定整个相平面上的运动状态,所以还要研究离平衡态较远处的相平面图。其中极限环具有特别重要的意义。

相平面图上,如果存在一条孤立的封闭相轨迹,而且它附近的其他相轨迹都无限地趋向或者离开这条封闭的相轨迹,则这条封闭相轨迹为极限环。根据附近轨道是否趋向于它,可以将极限环分为稳定的、不稳定的和半稳定的三种。

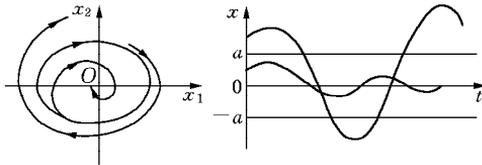
(1) 稳定极限环:如图 3-6(a)所示,当 $t \rightarrow \infty$ 时,由内部或外部平面任何一点起始的相轨迹都无限地趋向这个极限环。因此,如果由于任何小的扰动使系统状态稍稍离开极限环,则经过一定的时间后,系统状态仍能回到这个极限环。所以,极限环代表一种稳定的运动,这样的极限环称为稳定的极限环。在极限环上,系统的运动状态表现为稳定的固定周期的自持振荡。

(2) 不稳定极限环:如图 3-6(b)所示,极限环内外两侧的相轨迹都是螺旋状地从极限环离开,称为不稳定极限环。任何微小的扰动都可以使系统状态离开极限环。

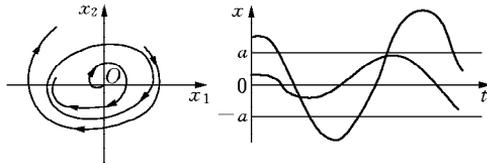
(3) 半稳定极限环:如图 3-6(c)和(d)所示,极限环两侧的相轨迹中有一侧是离开极限环的,另一侧则是趋向极限环的,这样的极限环为半稳定极限环。从图像上看,半稳定极限环有些像从中心出发的一个旋涡,不同的是在这个极限环上系统是亚稳定的,这种性质在理论和实践上都应引起注意。



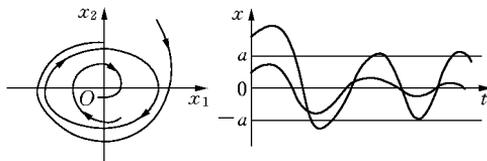
(a) 稳定极限环



(b) 不稳定极限环



(c) 内侧稳定极限环



(d) 外侧稳定极限环

图 3-6 三种极限环

对线性系统稳定性的判定一般有以下几种方法：

(1) 通过求解运动方程判定稳定性：通常求解运动方程是十分困难的，但对线性系统则可以作到。对于一阶线性系统：

$$\dot{y} + ky = u$$

(其中 y 为受控量， u 为控制量，通常为时间的函数 $u = u(t)$ ； K 为常数)

有解析解： $y = y_0 e^{-kt} + e^{-kt} \int_0^t u(\tau) e^{k\tau} d\tau$ ，其中 y_0 为初值。

从通解的形式中可以看出，系统的稳定性完全由方程的系数 k 所决定。当 k 大于零时，扰动引起的偏离（瞬间响应）随时间衰减，系统渐近稳定；当 k 小于零时，扰动将被放大，系统不稳定；当 k 等于零时，系统处在临界状态，是否稳定需要更精确的稳定性判据。如果是高阶线性系统，直接求解会碰到困难，这时可先转化为代数方程，再根据特征方程和特征根来进行判断。

(2) 按传递函数、频率特性判别稳定性：如果从行为主义或控制论的角度研究系统，可把它看成是一个将输入转换为输出的装置，这种转换作用可以用传递函数来表示：

$$\text{输出} = \text{输入} / \text{传递函数 } D(S)$$

如果令传递函数的分母 $D(S) = 0$ ，得到的解叫作传递函数的极点，也就是系统运动方程的特征根。这样就可以根据特征根来判别系统的稳定性。由于 $D(S)$ 的根由方程系数决定，可以不求解方程 $D(S) = 0$ ，而直接对方程系数作代数处理的方法来判别特征根是否有负实部。这种方法称为稳定性的代数判据。罗斯不等式就是一种代数判据。

代数判别法是一种纯数学操作，无法揭示控制系统的物理意义，而且以掌握传递函数解析表达式为前提，所以在许多实际问题中难以应用，而传递函数和频率特性则有丰富的物理意义，常用于工程实践之中。需要寻求一种利用直接传递函数或频率特性（如可用实验方法求得）判别稳定性的方法，奈魁斯特判据即是一例，它从开环传递函数着手，用作图方法判别闭环系统的稳定性。

奈氏判据的理论基础是哥西关于复函数幅角特性的定理：

设 C 为复平面上一条简单闭环曲线，解析函数 $f(S)$ 在 C 的内部有 n 个零点和 m 个极点（点的重数计入），则当 S 沿 C 顺时针方向转动一周时，轨迹 $f(c)$ 绕原点逆时针方向转动 $m - n$ 周，即 $f(c)$ 的幅角满足

$$\text{Arg } f(c) = 2\pi(m - n)$$

设 C 为右半平面的“边线”,即虚轴与半径为 $R = +\infty$ 的半圆组成的闭曲线,如图 3-7 所示。当 $f(s)$ 在虚轴上有零点 $\pm ib$ 时,可用具有无限小半径的半圆使这些点处于 C 的外部,如图 3-8 所示。设开环传递函数为 $W(s)$,在 C 内有 m 个极点。通过设置单位反馈形成一个闭环系统。奈魁斯特判据可表述为:一个具有单位反馈的闭环控制系统是稳定的,当且仅当开环轨线 $W(C)$ 绕 $(-1, i_0)$ 点逆时针方向转动的圈数等于 $W(C)$ 在 C 内的极点个数。如果已知 $W(s)$,只要作出 $W(C)$,即可判别闭环系统是否稳定。当开环传递函数 $W(s)$ 在 C 内部无极点 ($m = 0$) 时,奈氏判据等于要求 $W(C)$ 不包含 $(-1, i_0)$ 点。

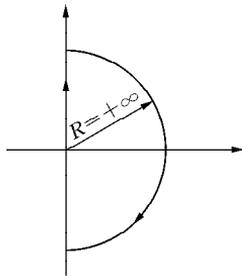


图 3-7 闭环奈氏判据

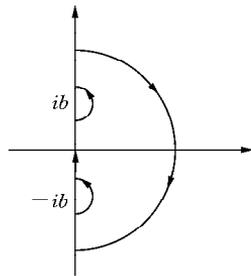


图 3-8 开环奈氏判据

3.3.5 李亚普诺夫直接法

前面介绍的几种方法,原则上都要求解运动方程或对方程本身进行分析,这样做总是比较困难,采用直接法则相对容易。不求解运动方程而直接作出判别的方法在稳定性理论中称为直接法。奈魁斯特判据就是一种直接方法,但最有意义的是李亚普诺夫直接方法(又称为李亚普诺夫第二法,相应的判据即李亚普诺夫稳定判据),它可以用于定常系统和非定常系统、线性系统和非线性系统,是研究系统稳定性的基本方法,在理论和实践中都有广泛应用。

李亚普诺夫直接方法的基本思想是:如果能为所研究的系统找到一个函数 $V(x)$,它在平衡点附近具有和能量函数一样的性质,即 $V(x) > 0$ 而它对 x 的导数 < 0 ,则可以把这样的 $V(x)$ 看成广义的

能量函数,并用它来判定系统在该平衡状态附近的稳定性。

例如,如果某运动物体因受力的作用而使运动状态发生变化,根据力学原理,作用力可以表示为质量与加速度的乘积。如果加速度的方向与速度方向相同,则会使运动加快,否则就会阻止运动,使速度慢下来。这个例子用在稳定性问题上,可以把作用力看作是对偏离的作用,方向相同则增加偏离,系统不稳定,否则系统稳定。由此可见,李亚普诺夫直接方法的关键是能否找到一个能体现上述作用的函数,如果能找到,就可以通过对它与偏离运动的符号的比较来对系统稳定性作判定,这就是李亚普诺夫稳定性的基本定理。下面就正式引进李亚普诺夫直接方法:

设系统运动方程和平衡状态如下:

$$\dot{x} = f(x, \mu); x_e = 0$$

如果可找到单值标量函数 $V(x)$, $V(x)$ 对状态向量 x 的每个分量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 都存在一阶偏导数,而且 $V(x)$ 及模对时间的导数满足下列条件:

(1) $V(x) > 0$, 即 $V(x)$ 是正定的,且

$$V(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} & \frac{\partial V}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ M \\ x_n \end{bmatrix} < 0,$$

即 $V(x)$ 是负定的,则平衡态 $x_e = 0$ 是渐近稳定的,并称 $V(x)$ 是系统的一个李亚普诺夫函数。

(2) 如果 $V(x)$ 还满足:

$\lim V(x) = \infty$, 则平衡状态 $x_e = 0$ 是大范围渐近稳定的。

(3) 如果 $V(x)$ 和 $\dot{V}(x)$ 满足:

$V(x) > 0$, 即 $V(x)$ 是正定的,

$\dot{V}(x) \leq 0$, 即 $\dot{V}(x)$ 是半负定的,则平衡状态 $x_e = 0$ 是稳定的。

(4) 如果 $V(x)$ 和 $\dot{V}(x)$ 满足:

$V(x) > 0$, 即 $V(x)$ 是正定的,

$\dot{V}(x) > 0$, 即 $\dot{V}(x)$ 也是正定的,则平衡状态 $x_e = 0$ 是不稳

定的。

上述定理给出了判定系统平衡状态是否渐近稳定的充分条件。如果在平衡状态附近找到满足上述条件的李亚普诺夫函数 $V(x)$, 则该平衡状态是渐近稳定的。但如果找不到满足条件的 $V(x)$ 函数, 并不能认定系统不是渐近稳定或不稳定的。

例如, 要判定非线性定常系统的稳定性, 其运动方程为:

$$\dot{x}_1 = x_2 - ax_1(x_1^2 + x_2^2)$$

$$\dot{x}_2 = -x_1 - ax_2(x_1^2 + x_2^2)$$

$$a > 0$$

(1) 确定平衡状态: 在上式中, 令 $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$ 可解得 $x_1 = x_2 = 0$, 所以平衡状态是

$$x_e = (0, 0)^T$$

(2) 寻找正定的李亚普诺夫函数: 选 $V(x)$ 为正定的二次型

$$V(x) = x^T \begin{bmatrix} 10 \\ 01 \end{bmatrix} x = x_1^2 + x_2^2 > 0$$

(3) 判定李亚普诺夫函数变化率的负定性:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= 2x_1\dot{x}_1 + 2x_2\dot{x}_2 \\ &= 2x_1[x_2 - ax_1(x_1^2 + x_2^2)] + 2x_2[-x_1 - ax_2(x_1^2 + x_2^2)] \\ &= -2a(x_1^2 + x_2^2)^2 \end{aligned}$$

显然有 $V(0) = 0$ 及当 $x \neq 0$ 时 $\dot{V}(x) < 0$, 所以 $\dot{V}(x)$ 是负定的。

(4) 判定大范围渐近稳定条件是否满足: 当 $\|x\|$ 趋向无穷大时, 显然有 $V(x)$ 趋向于无穷大, 所以 $x_e = (0, 0)^T$ 是系统的大范围渐近稳定的平衡态。

总之, 一个系统的微分方程, 只要正确反映了系统的运动规律, 本身必然包含有关判别系统稳定性的足够信息, 问题是如何提取这些信息。求出微分方程的解来研究稳定是一种提取信息的方式; 不求解微分方程, 直接从方程本身的结构和参数着手, 如罗斯判据、奈魁斯特判据, 是提取有关稳定性信息的另一种方式。李氏

直接方法属于后者,但更巧妙、更深刻。

3.4 系统的结构稳定性

关于结构稳定性在托姆的突变论提出后曾引起学术界的高度重视,一度被认为是自牛顿以来最大的突破,当然也招致许多批评。结构稳定性已成为现代系统理论的基本内容之一,它对于理解系统运行规律的保持与突变有着特别重要的意义。严格的数学推导可参考相关文献和突变论的有关资料,一些系统学的著作中也有关于突变论的论述。

这里讨论的结构不是系统的物理结构,而是指系统运动方程的数学结构,所表征的是系统运动规律,结构稳定性实质上就是系统运动规律的稳定性。通常认为,系统的位置和状态是可以变化的,而运动规律则始终不变,人们把这称为“铁的规律”。但是,在系统科学看来,一个特定的系统,如一个生命体、一个人、一个国家、社会,在不同的环境或发展阶段所遵循的规律也是不同的。换言之,系统的规律以及描述这些规律的运动方程的数学结构同样会因情况不同而发生变化。

如前所述,稳定性所描述的是系统受到扰动后的一种动态响应特征。结构稳定性也是如此,它指的是系统运动规律在受到扰动后发生与原规律的偏离,这种偏离可能被放大,也可能被缩小。如果偏离被放大到使运行规律与原来的规律有质的不同,就认为是系统的数学结构发生了突变;相反,如果虽然有所偏离,但偏离被缩小,使运行规律与原来规律没有本质区别,即保持了同一类型之内,则称它是(数学)结构稳定的。现借用突变论的一些数学工具来说明这一情况。

现实世界存在两种类型的变换方式:一是连续的、渐进的、光滑的、定量的变化,如行星围绕太阳运行、儿童身高变化等,从自然界到社会历史的各个领域,大量存在这种变化方式;二是变化形式是间断的、突然的、非光滑的变化。20世纪以来,人们在关于连续理论和不连续理论长期探索的基础上,提出了突变理论。前苏联著名学者阿诺德指出,突变理论起源于怀特涅关于光滑映射的奇异理论和彭加

勒、安德罗诺夫的动力学系统分叉理论。怀特涅提出了叠突变、尖点突变等概念。20世纪70年代初,法国数学家托姆在此基础上,建立了统一的数学模型,给出了基本突变的完备分类,对数学理论作出了贡献。突变理论与分叉理论相同之处在于它们都描述不连续的突变现象,但又有重要区别。分叉理论一般只考虑一个控制变量,强调临界点上解的多重性和选择性;而突变理论需考虑多个控制变量,强调在临界点上变化的不连续性或突变性。

由于研究的突变现象是由连续变化的原因所引起,因此,突变理论所使用的基本工具之一便是微积分学,其中泰勒级数、隐函数定理等都起着重要作用。此外,突变理论研究系统达到定性性质,许多现象涉及拓扑不变性,因而拓扑学是突变理论的重要基础。为了搞清楚结构稳定性概念,下面先从描述系统运动函数的变化开始。

3.4.1 等价性

前面提到,描述系统运行的函数在系统受到扰动后总是发生这样那样的变化,问题是这种变化是否意味着规律的根本改变?如果规律虽有变化,但仍保持在同一类型之中,就认为它没有发生根本变化,否则就是发生了突变。这里的关键是什么?是同一类型的规律,在数学上同类规律可以用规律等价来表示。

(1) 等价性定义:如果两个函数 f, g 是等价的,从局部来讲是在某一点的邻域内存在局部微分同胚 $y: R^n \rightarrow R^n$ 和常数 γ ,使得 $g(x) = f(y(x)) + \gamma$ 。

(2) 函数族的等价性定义:如果两个函数 f, g 在某个邻域(即原点 O 的邻域)中对所有的 $(x, s) \in R^n \times R^r$ 是等价的,在 $R^n \times R^r$ 的原点 O 的邻域内:

- 1) 存在一个微分同胚 $e: R^r \rightarrow R^r$ 。
- 2) 存在一个光滑映射 $y: R^n \times R^r \rightarrow R^n$ 使得对某个 $s \in R^r$, 映射 $y: R^n \rightarrow R^n$, 即 $y_s(x) = y(x, s)$ 是一个微分同胚。
- 3) 存在一个光滑映射 $y: R^r \rightarrow R$ 使得下式成立:

$$g(x, s) = f(y_s(x), e(s) + \gamma(s))$$

所谓函数族等价,其几何意义是指它们的某邻域内函数图像

大体相同,而在某邻域内的变化可以进行“光滑的(可微的)”拉伸、压缩、移动等。

3.4.2 结构稳定性

因为结构是否稳定是相对于不同点上的扰动而言的,对于一般的点,扰动的影响往往不大,对于特殊的点,如临界点、退化与不退化的定态点等的扰动,则可能引起结构的失稳和突变。所以,应对这些点扰动后的相应情况引起特别注意。

此外,方程的参数在运行过程中发生变化,可能导致方程结构类型的变化。对于有势系统,这意味着势函数本身受到扰动,其定性性质将发生变化。

设某系统的势函数原为 $V = x^2$,由于扰动变为 $\alpha x^3 + x^2$,或 $x^2 + \beta x$ 及其他形式。当 α 、 β 均为充分小的常数时, αx^3 和 βx 代表对势函数的扰动。这种函数扰动引起的不是运动轨线的稳定性问题,而是结构稳定性问题。通常认为,势函数在这类小扰动下不改变定性性质,是结构稳定的,否则,是结构不稳定的。类似运动稳定性、结构稳定性也可对局域特征作为简化讨论,讨论 O 点附近势函数的结构稳定性。

定义 1:如果对于 O 点的某个邻域内的一切点 X ,函数 P 的所有偏导数都足够小,则称函数 P 是充分小的。

定义 2:设 V 是某系统的势函数,如果对于所有充分小的光滑函数 P , V 与 $V+P$ 在 O 点的某个邻域内具有相同的定性性质,则称 V 在 O 点附近是结构稳定的。

结构稳定性就是势函数定性性质恒定,即函数几何特性(定态点配置方式)在小扰动下的不变性。

下面考察不同类型的点的结构是否稳定。

(1) 非定态点:设 O 点为 $V(X)$ 的非定态点, $DV|_0 \neq 0$,只要光滑函数 P 足够小,由于变化的连续 O 点的某个邻域内显然有

$$D(V+P)|_0 = DV|_0 + DP|_0 \neq 0 \quad (3.4.2.1)$$

函数 $V+P$ 与 V 都等价于线性函数, V 是结构稳定的,即势函数在非定态点是结构稳定的。

(2) 非退化定态点 设 O 点为 $V(X)$ 的非退化定态点, $DV|_0 = 0$, 而 $\det(HV|_0) \neq 0$, P 为充分小的光滑函数。此时可有两种情况:

$$DV|_0 = 0 \quad (3.4.2.2)$$

显然有 $D(V+P)|_0 = 0$ 。由于黑森行列式连续变化, 必有

$$\det[H(V+P)|_0] \neq 0 \quad (3.4.2.3)$$

函数 $V+P$ 在 O 点也非退化的。不难证明, V 与 $V+P$ 等价, 都与某个二次型定性性质相同。

$$DV|_0 = 0 \quad (3.4.2.4)$$

只考察一个具体函数 $V = x^2$ 在 O 点区极小值。用 $P = \epsilon x$ (ϵ 为小常数) 扰动它, 得

$$W = V + P = x^2 + \epsilon x \quad (3.4.2.5)$$

O 点不是 W 的极小点, 但 W 在 $x = -\frac{\epsilon}{2}$ 处取极小值。 W 与 V 的定性性质相同, 都有一个极小点, 不同之处在于极小点的位置, 但这不影响函数定性性质。

总之, 在非退化定态点, 任何函数都是结构稳定的, 小扰动不会改变函数的定性性质。

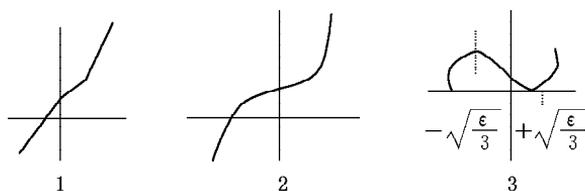
(3) 退化定态点 设 O 点为势函数 $V(X)$ 的退化定态点。由于黑森行列式为 0, 稳定性问题有完全不同的情形。可通过一个具体的函数来考察。令

$$V(X) = x^3 \quad (3.4.2.6)$$

如图 3-9 中②所示, O 点为退化定态点(拐点)。用小函数 ϵx 对 V 进行扰动, 得

$$W(x) = x^3 + \epsilon x \quad (3.4.2.7)$$

当 $\epsilon > 0$ 时, W 没有定态点, 如图 3-9 中①所示。当 $\epsilon < 0$ 时, 在 O 点的邻域内 W 有一个极小点 $x = \sqrt{\frac{\epsilon}{3}}$ 和一个极大点 $-\sqrt{\frac{\epsilon}{3}}$, 如图 3-9 中③所示。函数 W 与 V 有完全不同的定性性质。

图 3-9 $V(x) = x^3$ 的退化定态点

令 $V(x) = x^4$

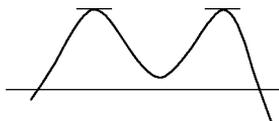
O 点是 V 的极小点, 且为二重退化点。用 αx^p 扰动 V , 得

$$W(x) = x^4 + \alpha x^p \quad (3.4.2.8)$$

若 $p > 4$, W 与 V 定性性质相同。若 $p = 3$, W 在 O 点有拐点, 在 $x = -\frac{3}{4}\alpha$ 有极小值。若 $p = 2$ 且 $\alpha < 0$, W 在 O 点取极大值, 在 $x = \pm\sqrt{-\frac{\alpha}{2}}$ 取极小值。若 $p = 1$, W 在 $x = \sqrt[3]{-\frac{\alpha}{4}}$ 有极小值。 $p < 4$ 时, W 与 V 定性性质完全不同。

根据以上讨论, 在退化定态点, 小扰动将改变定态点的配置, 或使定态点消失, 或改变定态点的类型、个数、相对配置, 因而势函数的结构是不稳定的。定态点的退化重数越高, 扰动引起的结构变化越多样复杂。

退化定态点的退化重数刻画的也是函数的定性性质。表面上看, x^3 与 x^5 是相同类型的函数, 经扰动分析它们并不等价。对于 x^5 加小扰动可以得到如下图 3-10 所示的定态点配置, 包括两个极大点和两个极小点; 对 x^3 加扰动不可能得到这样的结果。一般地, 当且仅当 $i = k$ 时, 函数 x^i 与 x^k 等价。

图 3-10 x^5 的退化定态点图 3-11 x^2 的退化定态点

需要再次强调:结构稳定性是一种局域性质,函数 $V = x^2$ 与 $W = x^2 - x^4$ 在 $x = 0$ 点附近结构相同。若超出一定范围, W 还存在两个极大点,如图 3-11 所示,与 V 不再等价。

3.4.3 函数族的结构稳定性

研究突变现象,重要的是判别势函数族的结构稳定性,即控制参量改变对势函数的定性性质的影响。势函数结构稳定性和势族结构稳定性,是两个既有联系又有区别的概念。

先将两个函数等价的概念推广到两个函数族,结构稳定性概念便可推广到函数族。从形式上看,给定函数族 $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$, 如果对于足够小的函数族 $p: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$, 族 f 与族 $f + p$ 等价, 则称族 f 是结构稳定的。

势函数族的结构稳定性取决于控制参量。族 f 中的每一个函数都可用控制空间 \mathbb{R}^m 中的一个点来代表。对于任一 $\alpha \in \mathbb{R}^m$, 令 f_α 代表点 α 对应的族 f 中的那个函数。所谓族 f 是结构稳定的,指的是对于控制空间 \mathbb{R}^m 中充分靠近 α 的任一点 β 来说,它所对应的函数 f_β 与 f_α 的定性性质相同,即在空间 \mathbb{R}^m 中对点 α 的小偏离不会引起函数族 f 定性性质的变化。满足这种要求的 f_α 称为 f 族的一个生成函数, α 称为 \mathbb{R}^m 中的一个生成点。函数族 f 把控制空间 \mathbb{R}^m 分为两种集合,生成点集合和它的补集合,后者称为分叉点集合。

一般来说,按结构稳定性可把函数族分为 3 类:

(1) 处处结构稳定的函数族:这类函数族的控制空间不存在任何非生成点(分叉点),不论在空间的哪个点附近,小扰动都不会改变势函数族的定性性质。因为控制空间的点要么是非定态点, $DV \neq 0$; 要么是非退化定态点, $DV = 0$, 但 $\det(HV) \neq 0$ 。前者与线性函数定性性质相同,后者与二次型定性性质相同,在控制空间每一点都稳定。

以势族 $V(x, a) = x^2 + ax$ 为例, a 是控制参量。 V 在 $x = -a/2$ 处有一个非退化定态点(极小点),其余均为非定态点。控制参量的变化只改变极小点位置,函数类型不变。除用常函数扰动外,没有其他低次多项式函数作添加项,常函数扰动不改变函数族

类型。函数族 $x^2 + ax$ 是处处稳定的。

(2) 几乎处处结构稳定的函数族 :考虑一个包含两个控制参量的非多项式函数族

$$V(x; a, b) = x^4 + ax^2 + bx \quad (3.4.3.1)$$

讨论在控制平面 $a-b$ 上,族 V 的定态点配置如何因 a 、 b 的变化而变化。

定态点方程为

$$DV = 4x^3 + 2ax + b = 0 \quad (3.4.3.2)$$

退化定态点还满足方程

$$D^2V = 12x^2 + 2a = 0 \quad (3.4.3.3)$$

由上式得

$$a = -6x^2 \quad (3.4.3.4)$$

代入(3.3.3.2),求得

$$x^3 = \frac{b}{8} \quad (3.4.3.5)$$

(3.3.3.5)平方减去(3.3.3.3)平方,整理得

$$8a^3 + 27b^2 = 0 \quad (3.4.3.6)$$

这就是分叉点(族 V 的退化定态点在控制平面上的投影)所满足的方程。几何上它是由原点下半平面两条对称曲线所组成的尖点曲线(图 3-12),达到分叉点之后曲线把控制平面上 $a-b$ 划分为三个区域:Ⅰ记曲线上方的区域;Ⅱ记曲线上所有点的集合;Ⅲ记曲线下方的区域。函数族在不同区域又有不同的定性性质。在Ⅰ区中,势 V 只有一个极小点;在下半平面的Ⅱ区中, V 增加了一个非退化拐点,函数性质仍未发生显著变化;在Ⅲ区中, V 有两个极小点和一个极大点,定性性质与Ⅰ区完全不同。在Ⅲ区中,位于 a 轴下半支上的点, V 的两个极小点对称,在其余点 V 的两个极小点不对称,但这不会改变 V 的定性性质。Ⅰ区与Ⅲ区都是结构稳定的。引人注目的是Ⅱ区的点。对于位与尖顶曲线上的每个点,势 V

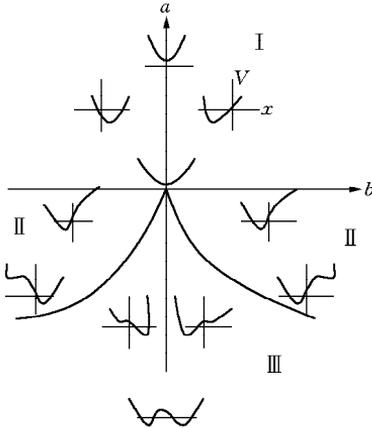


图 3-12 分叉点族

有一个极小点和一个退化的拐点,这是造成 V 在这些点上不稳定的根源。一个微扰可能使 V 进入 I 区,拐点不再是退化的,也可能使 V 进入 III 区,拐点分裂为一个极小点和一个极大点。II 区的点在小扰动下这两种性质不同的发展趋势,反映的正是上章所说的分叉现象。所以,尖顶曲线上的点称为分叉点,尖顶曲线叫作分叉点集,记作 B 。

在这个例子中,分叉点有无穷多个,即势族(3.4.3.1)包含

无穷多个结构不稳定的函数。但就整个控制平面看,无穷多个分叉点集仍然是测度为 0 的。势族(3.4.3.2)对整个控制平面几乎处处结构稳定,就是说结构不稳定的点只有零测度,不稳定性是孤立的,这样的势族称为实质上稳定的。

这里可以看出族的结构稳定性与单个函数结构稳定性的区别。对于单个函数,没有退化定态点是结构稳定的,而结构稳定的函数可以包括无穷多个具有退化定态点的函数,只要这些不稳定的函数全体在整个函数族中具有零测度就行。

(3) 实质上结构不稳定的函数族:自然界和数学中都存在与上述“几乎处处”结构稳定的族不同的函数族,即族中结构不稳定的函数集(控制空间中的分叉点集)具有非零的测度。为区别起见,这类函数族称为实质上结构不稳定的。

处处结构稳定的函数族在突变理论中没有研究价值,因为不会出现突变,实质上不稳定函数族也不是突变理论能够处理的对象,因为现实中不能存在。这样一来,给突变理论留下的只有几乎处处稳定的函数族。对于这类函数族描述的系统,在控制参量连续缓慢变化的过程中,系统的行为变化(对抗动的响应)一般是平稳的,定性性质也基本上恒定不变。只有在某些控制参量的阈值

上,系统行为才会发生性质上的突变。这种连续过程中发生的连续变化,正是突变理论研究的主要课题。

3.5 系统的受控特性

如果说系统的稳定性是当系统受到外界扰动偏离原状态时所表现出来的行为特征,那么当系统受到另一个具有目的性的系统作用时就表现出一定的受控性。

受控性是系统的一种被动行为特征。因为世界上几乎所有的系统(事物)都有可能被拿来为实现某个目标而派上用场,所以受控的系统可以是世界上的一切事物,它本身并不要求具有自己的主动性和目的性。但是,对于系统的应用及价值实现来说,受控性又是与控制者系统的目的和价值观密切相关并具有重要意义的。正因为如此,受控性一直受到应用科学和技术科学的重视,并在包括反馈理论、自动控制理论在内的控制论中早有研究。本节仅从系统受控的角度来进行讨论,包括以下三方面的内容:系统的可观察性、系统的可控制性以及反应的灵敏度与选择性。

3.5.1 可观察性

要控制和利用一个系统首先要认识了解这个系统,而认识系统的唯一途径就是对该系统进行观察与实验(实验可以看成是一种主动获取信息的方式),即通过对系统输出的观察来获得系统状态的有关信息。然而,系统的状态通常不是“一目了然”的,人们只能对系统的输入、输出进行直接观察,以此来推测系统所处的状态。但是,并不是所有的系统都可以通过对输出的观察来获取状态的信息的,例如,一个有意隐瞒实情的犯罪嫌疑人,一本闭合着的书本,都不能通过单纯的观察来获得它的全部信息。这样就需要从观察者或控制者的角度对系统进行深入研究,以期通过对系统输出的观察来获取系统状态的信息。

可观察性是现代控制论的一个基本概念,又称为能观察性(observability),是美国现代控制论的创始人之一 R. E. 卡尔曼在 1960 年针对线性系统提出来的,后来被用于所有的被控系统中。可观察性指的是“系统的初始状态可由其输出的测量值来确定的

一种性能”。为了准确地把握一个系统的有关信息,需要尽可能排除其他系统和环境的干扰,所以在控制论中特别强调,可观察性是在不考虑外部输入作用时通过对输出的考察获取系统有关信息的可能性。如果对某个非零的初始状态,系统在一个有限时间间隔内的输出恒等于零,即输出毫无变化,就称这个状态是不能观察的。相反,如果系统的所有可能的非零状态都不是不能观察的,则称系统是完全能观察的。

对于线性系统,能观察性及其判别条件已有成熟的研究成果。

如果一个定常系统的状态方程为 $\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t)$

输出方程为 $Y(t) = C(t)X(t) + D(t)U(t)$

其中 $X(t)$ 表示系统的状态向量; $Y(t)$ 表示输出向量; $U(t)$ 表示输入向量; $A(t)$ 表示 n 乘 n 阶系数矩阵; $B(t)$ 表示 n 乘 1 阶控制矩阵; $C(t)$ 表示 m 乘 n 阶输出矩阵; $D(t)$ 表示 m 乘 1 阶传递矩阵。它们都是时间的函数,则系统为能观察的充分必要条件是观察性矩阵 Q_0 的秩为 n ,

$$Q_0 = \begin{bmatrix} C \\ CA^{n-1} \\ CA^{n-2} \\ \vdots \\ M \\ CA \end{bmatrix}$$

其中 n 是系统状态空间的维数。对于线性时变系统,判别系统可观察的条件在形式上和运用上都要复杂一些,而且系统是否能观察还依赖于初始时刻的选取。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} u$$

例如,系统

$$y = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

的能观察矩阵为 $Q_0 = \begin{pmatrix} 2 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 & 0 \end{pmatrix}$ 的秩为 2,系统是完全可以观察的。

通过特别选定的坐标变换,可以把完全能观察的线性定常系统的状态方程和测量方程简化成一种标准的形式,称为能观察规范形。对于多变量系统,能观察规范形不是唯一的,在形式上也更复杂一些。常用的有吕恩伯格规范形、旺纳姆规范形和横山规范形。能观察规范形常被用于状态观察器的设计。

如果所研究的系统是不完全能观察的,那么,通过引入适当的坐标变换,可以把系统分解成能观察部分和不能观察部分。对于线性定常系统,系统分解后的形式为

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= A_{11}X_1 + B_1U \\ \dot{x}_2 &= A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + B_2U \\ Y &= C_1X_1\end{aligned}$$

式中 x_1 为能观察分状态, x_2 为不能观察分状态。当系统既不是完全能观察的,又不是完全能控时,则可将其分解成四个部分:①能控、能观察部分;②能控、不能观察部分;③不能控、能观察部分;④不能控、不能观察部分。这种分解通常称为系统结构的规范分解。在这四部分中,经典控制理论中广为采用的传递函数只能反映系统中能控、能观察部分。

能观察部分和能控性是对偶的。对于线性定常系统,系统

$$\begin{aligned}\dot{\Psi} &= -A^T\Psi + C^T\eta \\ \phi &= B^T\Psi - D^T\eta\end{aligned}$$

称为源系统的对偶系统。式中向量 Ψ 为对偶系统状态,向量 η 和 ϕ 分别为对偶系统的输入向量和输出向量, A 、 B 、 C 、 D 为源系统的系数矩阵,上标 T 表示矩阵的转置。系统的能控性及其判别条件等同于对偶系统的能观察性,而系统的能观察性及其判别条件则等同于对偶系统的能控性。这一理论称为对偶原理,表明能控性和能观察性间的对偶关系。

3.5.2 可控制性(controllability)

可控制性又称能控性,控制系统的目的是通过对系统施加一定的作用或影响,使受控系统的状态变量变化到控制者所希望的状态。但实际上并不总能作到这一点。其原因在于:第一,控制者的控制能力有限;第二,由受控系统的性质所决定。例如,当使用控制手段调节温度,人们却无法把石头变为鸡子。

能控性的概念是由 R. E. 卡尔曼在 1960 年首先提出的,它很快就成了现代控制理论中的一个基础性概念,在解决线性系统的极点配置、最优控制等问题时具有重要作用。能控性是表现可由外部输入作用来控制系统的一种性能。也就是说,如果在一个有限的时间间隔内可以用幅值没有限制的输入作用,使系统从偏离平衡状态的某个初始状态回复到平衡状态,则称这个初始状态是能控的。当系统的所有可能的初始状态都能控时,称系统为完全能控的,否则称系统为不完全能控的。

和能观察性一样,对于线性系统,能控性及其判别条件也有成熟的研究结果。如果是线性定常系统,它的状态方程为 $\dot{x} = Ax + Bu$, 则系统为能控的充分必要条件是系统的能控性矩阵 Q_0 的秩为 n , Q_0 为由系数矩阵 A 和 B 按一定规则组成的分块矩阵,

$$\text{表达式是: } Q_0 = \begin{bmatrix} B \\ BA^{n-1} \\ BA^{n-2} \\ \vdots \\ M \\ BA \end{bmatrix}$$

n 为系统的维数。判别线性定常系统能控性的判据还有其他的形式。对于线性时变系统,判别能控性的条件要复杂一些,而且系统是否能控,常常还依赖于初始时刻的选取。

对于完全能控的线性定常系统,通过特别选定的坐标变换,可以将其状态方程化成标准的变换和形式,称为能控规范形。对于只包含一个输入和一个输出的单变量系统,状态方程的能控规范形比较简单。多变量系统的能控规范形在形式上要复杂一些,而且不是唯一的。常用的也是吕恩伯格规范形、

旺纳姆规范形和横山规范形。能控规范形常被用于控制系统按期望极点的综合中。

当系统为不完全能控时,通过引入适当的坐标变换,可将它分解成能控的部分和不能控的部分。对于线性定常系统,如果能控性矩阵 Q_0 的秩小于 n ,则经分解后的状态方程具有如下的形式:

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + B_1U \\ \dot{X}_2 &= A_{22}X_2\end{aligned}$$

式中 i 维分状态 x_1 为能控分状态, $n-1$ 维分状态 x_2 为不能控分状态。

子系统 $\dot{x}_2 = A_{22}x_2$ 是系统的不能控部分,子系统 $\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + B_1U$ 是系统的能控部分。外输入作用 U 只能影响能控分状态 x_1 ,而不能影响不能控分状态 x_2 。

由此可见,当受控系统中存在有不受输出影响的部分时,无论如何施加控制作用也不能使系统完全达到指定的目标状态。例如,一名学生,不仅受到学校的影响,而且受到社会各方面的影响,学校的教育是不能实现完全控制学生成长的目的的。只有当受控系统为完全能控,也即没有不能控制的部分时,才有可能设计适当的状态反馈(控制手段与策略)来使闭环控制系统出现任意指定的性能,这当然是十分理想的情况。不过,如果仅要求所涉及的闭环控制系统为渐进稳定,那么,完全能控条件可放宽为不完全能控,而只要求不能控部分是稳定的。通常将不能控部分为稳定的不完全能控系统称为能稳定的系统。

3.5.3 鲁棒性(robustness)与灵敏性

系统在受到扰动或特殊的控制作用后反应的强度常常是许多实际应用中需要特别加以考虑的。在控制论和通信理论中对此也作了专门研究。下面从系统的稳健性和灵敏性两个侧面来讨论。

(1) 鲁棒性:控制论中系统是否稳健、强壮是用鲁棒性来加以描述的,这一概念来自统计学,20世纪70年代以后成为控制理论中的一个重要术语,指的是当参数发生摄动时系统保持其品质指标不变的性能。应该说鲁棒性属于稳定性的范畴,但它特别

强调控制系统的稳定和不变,通常包括结构渐进稳定性、结构无静差性和带状态观察器的系统鲁棒性等。运用鲁棒性理论可以进一步构造具有实用价值的“鲁棒控制器”,使系统实现结构无静差的控制。

(2) 灵敏性(度):不同的系统对相同的控制作用会有不同的响应特征,有的反应灵敏,有的反应迟钝。系统这方面的属性常常也是控制者所要考虑的,把这种控制作用(刺激)与反应的强度值比称为系统的灵敏度。但在具体应用中对灵敏度会有进一步的严格的界定。例如,在谈论无线电接收时,人们把能够接收到的最小电信号强度定义为接收机的灵敏度,它表明一种“接受微弱信号的能力”。显然,这里存在一个引起反应的阈值,低于这个阈值的控制作用就不能引起受控系统的反应。对于不同的系统引起反应的阈值是不同的,阈值越低,说明引起反应所需的“起码”的作用能量越小,系统也就越灵敏。例如,在收音机、电视机的产品说明书中就经常有关于灵敏度的数据,它标明能被接收电台的最低信号强度。最低信号强度越小,说明越能收到越远、越弱电台的信号。

在另一些场合,灵敏性是指系统对外界作用的反应速度和强度。灵敏度高的系统,外界只要有微小的作用,就可以作出快速、强烈的反应。所谓“响鼓不用重锤”,意思是指只要轻轻地敲击,鼓就可发出巨大的响声,这也是指它的灵敏度高。灵敏性从表面看是和稳定性相反的概念,但实际上它包含了用少的功激发大的功能的含义。也就是说,和不稳定性还是有一定的区别,它主要用在信息的接收和处理的领域。

影响一个系统灵敏性的因素很多,但都与系统的处理信息的效率和速度有关,这些又取决于受控系统内部元素和结构。

3.6 系统的主动性

受控性是系统受到特定的控制作用后所表现出来的响应特征,而主动性则是系统为实现自己独立的意识和目的而采取的行动。主动性不是所有系统都具有的一般属性,而是一类特殊复杂系统,具体地说,就是生命系统、社会系统所具有的一种属性。尽

管如此,它对人类却有着特殊重要的意义,因为在一定程度上人类正是因为其所具有的主动性而成为世界的主人的。

系统的主动性主要表现在对其他系统或环境的适应、控制和利用之上。具有主动性的系统必须具有自己的目的和一定程度的“自我意识”,所以,在讨论主动性之前先要对目的、目的行为作一些说明,然后再讨论系统的适应性。虽然适应可以是被动的,也可以是主动的,但它们都是在一定目的指引下进行的。当被动的适应逐步变为主动的适应时,系统就产生了诸如试错、学习、预测、决策、预调节等一系列更高级的行动。

3.6.1 系统的目的性

事物是否具有目的性?如何理解目的性?这曾是哲学上长期争论的问题。

在西方的文明史上,最早“悟”出这个道理,并作口头表述的也许要算苏格拉底。这位古希腊的智者第一个明确提出了作为事物发展变化终点的“目的”概念。他认为,世上的一切事物都要自发地“奔向”各自的终点——目的,但他把这解释为神的意志的体现,因此,世界之所以成为它们存在的那个样子,乃是神有目的安排的结果。这种观点后来就成了外在目的论的渊源。此后亚里士多德继承和发展了目的论,但他与苏格拉底的最大不同之处是认为目的是由事物自身决定的,从而开了内在目的论之先河。亚里士多德也许是对目的论研究得最多也表达得最完整的一位古代哲人。他认为,事物的运动变化总是趋向某个终极状态,这个状态就是它的目的,也是它的“理想”状态。他认为,奔向这个目的状态是事物发展的一个基本动因。亚里士多德的观点源于对大量自然现象、尤其是生命现象的观察,因此,对生命与社会等复杂现象有着许多精辟独到的见解。但他未能对生命界与无生命界的情况加以区分,而是简单地把生命、社会中的目的行为推广到了无生命的物理世界。显然,这种无条件的外推,是经不起近代科学家们的仔细推敲的。但后者却又在抛弃亚里士多德荒谬见解的同时,连同洗澡水一起把婴儿也抛弃掉了。因此,近代科学把目的论视为是一种非科学或伪科学的标本,这种局面直到上个世纪才得以改观,马克

思在改变这种局面中起了重要作用。他在生命科学和社会科学中恢复了目的和目的论的地位,使人们看到在这类复杂系统中确实有简单系统所不具备的新特征。

在 20 世纪关于极值的大量研究中,N. 维纳及其同事的工作尤其值得一提。1943 年他和 A. 罗森勃吕特、J. 毕格罗等 3 人合著了一本名为《行为,目的和目的论》的小册子,在这本后来被视作“控制论”的第一篇经典论著的文献中,他们第一次从科学的角度定义了“目的”,认为“有目的的一词就是用来表明那种可以解释作趋达目标的行为。换言之,它趋向于一个终极条件,即行为客体与另一个客体或事件发生确定的时间或空间的相关”。这样,“目的”才重新与事物变化、发展、运动的终极状态联系起来。20 世纪 70 年代,德国的哈肯和中国的钱学森对终极状态、目的和趋极性有了进一步的认识。他们将“目的”与相空间中的稳定吸引子联系起来,认为目的不仅是一个终极状态,而且是一个稳定的状态。

显然,目的性并不是所有的系统都具有的,因为很难说太阳的运行、地球绕太阳旋转、放手后的石头落到地上等这类事情有什么目的性。但人们的确看到,哪怕最低级的生物也会为自己的生存而奔忙,这说明有些系统的行动有目的性,有些系统却没有目的性。那么,目的性系统的界限应该划在哪里呢?一个最简单的办法就是划在生命系统和无生命系统之间。但可能会遇到如下问题:一位具有很明确目的性的人常常会有许多无意识或无目的的行为,而一架精密的电脑或即将出现的智能机器人则会表现出“自己”的目的性,因此,人们甚至相信未来总有一天会出现(或被人制造出来)一种智能超过人的“东西”,那么它们是否有目的性呢?该问题的产生与人们对生命的理解有关。将目的性与生命联系起来,等待着人们对生命界限的明晰,这并不会影响人们对目的性的理解和利用。

如果一个系统不行动,是很难判定它是否具有目的,正如人们难以知道一座逼真优美的雕像和一个沉思的思想家的目的一样。所以人们将具有某些特殊性的行为称为目的行为。系统目的行为有两个主要特征:第一,它总是趋向一个特定的状态,人们通常把它称为“目

标状态”。目标状态是系统可能状态空间中的一个部分,否则,这个目标就无法实现。目的行为将随着目标状态的到达而结束。紧接着,一个新的目标将会产生,为了实现和达到这一目标,新的目的行为也重新开始。第二,目的行为在时间上具有“超前性”。在这一点上,它与受控行为有着根本的不同。后者总是发生在受到控制作用之后,在一定意义上可以把控制作用看成是“因”,受控行为看成的“果”,两者之间存在一定的因果关系。然而,推动目的行为的并不是一种现实的作用力,而是受到某种尚未实现的状态的“吸引”并因而发生目的行为。

3.6.2 适应性

能否适应环境是系统主动性的重要方面,是生命体、人体、人类社会等一些特别高级的系统所特有的问题。如果说目的性是行为模式的话,适应性就是这种模式在与外部环境中的具体表现。

表面上,适应性是系统在受到外界作用后的一种特定反应,但它与受控性有着本质不同。因为无论是主动地适应还是被动地适应,都是一种目的行为,是在系统自身目的驱使下所进行的主动活动。

生物学上对适应有许多研究,指的是生命体为保持和发展自己的“生命”而对环境及其变化所作的调节活动,调节的内容可以是生命体的行为方式,也可以是它的内部结构以及它与外界的关系。能否适应环境是生命进化的一个重要标度。通常一个系统越高级,它对环境适应的水平 and 程度也越高,而一个刚刚创生或一个行将消亡的系统,则往往不能很好地适应环境。此外,还可以从其他方面来研究适应性问题。例如,从控制论与反馈的角度来研究适应就很富有启示性。在这里,适应可以看成是系统与环境相互耦合中呈现出来的一种性态。当系统的输入是环境能完全提供,而系统的输出也是环境能完全接收时,可以认为系统完全适应于环境了。

系统对环境的适应性与系统自身的敏感性和稳定性有着密切关系。从表面看,系统对环境变化越敏感,它对环境的适应性越差;系统越稳定,它对环境变化的反应也会越小。例如,人的高山反应、时差反应、对异国他乡风俗民情的不习惯,都是不适应的表现。因此,有些学者如札德就用系统对环境是否敏感来定义自适

应性：“一个自适应系统对它的环境是不敏感的。”从这个观点出发，他给自适应系统下了一个形式化定义：

设系统输入作用集为 $U_r = \{u\}$ ， u 是时间函数， U_r 中包括输入激励、环境扰动及系统自身的变换（如故障）等。用脚标 r 区分不同族类的输入，所有输入类构成源族 $\{U_r\}$ 。 $P(r)$ 表示与输入 U_r 相应的性能指标， W 表示容许性能指标集， Γ 表示 r 的一个特定集合，包括所有可能输入条件 r 。于是对适应有如下定义：

若相对于源族 $\{U_r\}$ 中每一个源 $r \in \Gamma$ ，都有系统 S 的性能指标 $P(r) \in W$ ，即系统 S 把 Γ 映射到 W 内，则称系统 S 对 Γ 和 W 是适应的。

简单地讲，如果系统对源族 $\{U_r\}$ 和 W 是满意的，则称 S 对于 $\{U_r\}$ 和 W 是适应的。这里的满意是相对于系统的性能指标而言的，就是说相对所有输入集中的输入，系统都能通过自身的调节，使自己的状态保持在这个性能满意的范围之内。

系统适应环境有三个基本条件：一是能有效地监测环境和自身的变化，及时获取关于环境与自身状态及其变化的信息；二是能对有关的信息进行处理，即根据自己的目的，通常总是生存与发展需求来对环境变化作相应的评价，并据此选择合适的对策；三是能对自身的行为方式和结构状态，包括内部各组分的组合方式和结构参数进行调整。由此可见，自适应能力是系统自己用内部重新组织的方法来学习和适应的能力。自适应控制是一种探索过程，根据环境的变化和自身的态势，系统有能力不断试探改变自身组合方式，直至达到与环境相适应的状态。

系统适应能力的大小表现在两个方面：一是抗干扰能力的大小；二是有效利用外部资源的能力。前者可以从系统能够抵抗多大的干扰来量度，后者可以从获取资源的主动性与利用资源的效率来看。这些问题是复杂系统自组织理论所要研究的。

从形式上看，可以把系统的适应性分为被动适应和主动适应。阿什比的名著《控制论导论》中有一个生动的比喻：乌龟是用坚硬的外壳来抵御外界的侵犯，而武士却用他敏锐的目光、灵活的反应和手中的剑来抵御敌人。人们也许可以把乌龟坚硬的外壳作为被

动适应的代表,从中可以看出被动适应有如下特点:①适应行为总是在发生了外部干扰或控制作用发生之后;②适应行为往往是以比较单一的方式来对付外界复杂的变化。

相反,主动适应通常包含某种预测或事先应变的成分,同时,它往往能根据外界不同的作用而采取不同的对策。一个系统要做到主动适应,包括适应环境和外部控制,前提是要有主动获取信息和有效处理信息、并作出相应调整的能力。

当主动适应发展到高级阶段后,必然与智能行为联系起来。智能行为是一类目的性很强的复杂行为,本书将在第九章作专门讨论,这里转向以主动控制为特征的适应控制。

3.6.3 适应控制(adaptive control)

适应控制是指当系统和环境的信息不完备时,能改变自身特性来保持良好工作品质的控制。所谓信息不完备是指对主控系统来说,系统和环境的特性或其变化规律具不确定性。信息的不完备性要求系统能通过有目的地搜索和试探来获取有关信息,即通过对环境不断进行观察和对已有控制品质进行评价和分析,在采集和加工信息的基础上学习和改进关于环境特性的知识,减小不确定性,进而模仿工程师的设计过程,自动地调整系统的结构或参数,达到改善系统品质的目标。

设计制造适应控制系统的最初尝试是在20世纪50年代初进行的,在条件反馈控制的基础上,人们希望建造一个能在更广范围内自寻最优的条件反馈系统。1958年前后,一种飞机自动驾驶仪的模型参考适应控制系统被设计出来,该系统能在空气动力特性变化很大的情形下正常工作。随后美国学者、现代控制论创始人R. E. 卡尔曼提出不断进行最小二乘递推估计并按此估计值修改控制器参数的自动最优化控制系统,R. 贝尔曼从动态规划观点出发,提出多步决策适应过程的一般数学模型,建立了适应控制系统的基本原理和可能途径。20世纪70年代以来,由于计算机技术和自动控制理论的迅速发展,适应控制技术又取得了许多重要成果。自校正调节器、模型参考适应控制系统、自镇定系统、自寻最优系统、自组织系统和学习控制系统等相继研制出来,把现代控制技术

发展成具有巨大潜力的智能控制技术。

适应控制系统在结构上比普通的反馈系统增加了一个适应控制回路,它能根据受控对象的输入输出关系辨识受控对象和外部干扰,并据此校正反馈控制规律,以达到适应环境变化的目的(图

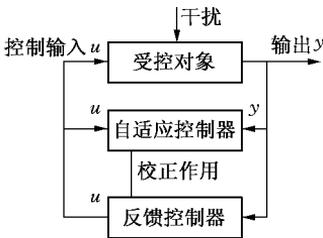


图 3-13 适应控制系统

3-13)。辨识与控制规律的设计可采用不同的方法和不同的组合,从而形成适应控制的不同方案。常见的有:参数适应控制系统,当环境特性及其变化可以用一些参数来描述时,可对这些参数进行辨识并使反馈控制规律跟踪这些参数的变化。以品质适应为目的的搜索系统是在复杂情况下,当只能用一些笼统的数量指标来

反映控制对象的品质时,以品质的优劣作为矫正控制规律的依据的系统。此外,对控制规律进行矫正也有多种方式。变结构系统可从根本上改变目的的搜索及其结构,而参数校正系统只控制一些参数(放大倍数)的方式。如果利用校正作用直接去影响控制信号的大小,则称为信号综合式系统。

按照适应控制原理设计的控制系统,常常会出现失稳或参数发散,即使受控对象是线性定常系统,它的闭环控制系统也是变系数或带有随机干扰的非线性系统,因而很难用一般分析方法给出稳定性判据。但有相当多的适应控制系统的稳定性可用李亚普诺夫稳定性理论和波波夫超稳定性理论来研究。模型参考适应控制系统和自矫正适应控制系统实质上是一致的,它们的稳定性分析方法也同样适用。李亚普诺夫稳定性理论和超稳定性理论的主要缺点是它们要求对系统的模型有十分精确的知识。系统参数的变化可能使整个控制系统失去稳定性。由于还没有一般的判据,在实际使用适应控制系统时,往往主要借助于人工智能技术来积累经验或进行逻辑判断。

3.6.4 自主性

具有目的性的主动系统进一步发展就出现了一系列围绕

“自我”的高级行为方式,如自镇定、自修复、自适应、自学习、自组织等,这些现象在生命体、特别是高等动物和社会系统那里是普遍存在的。

显然,要实现自我控制需要更精致的控制机制并遵循更复杂的控制原理,把它统称为自组织控制原理。阐明这种控制原理,用人工系统再现这些行为方式是现代控制论中极为诱人的部分。至于自组织在系统演化中的特殊作用,本书后面将有专门讨论,这里仅从主动控制的角度来研究它们的几种典型表现。

(1) 自镇定控制:“镇定”在控制论中的原意是保持预先确定或知道的稳态。在一般的镇定控制中,人们通常借助设计好的负反馈装置,让系统抵抗干扰维持预定的状态。但在高级生命系统中,镇定控制却没有这种预先设计好的稳定状态,而是从生存与发展的总目标出发,在多种可能的运动形式中进行选择,这些运动形式中有些是稳定的,有些是不稳定的,系统抛弃不稳定运动,寻找并保持稳定的运动形式。高级生命系统镇定控制的一个特点是系统中虽然存在反馈机制,但反馈是正是负最初并未完全确定。采用何种反馈方式更为合适,是通过学习和进化来确定的。对此,阿什比曾举过一个例子:小猫起初的反馈有些混乱,它可能在汤或牛奶面前畏缩不前,却奔向红热的火焰。但它的反馈机制在不断改进,最终趋向于可以保证其生存的那些正值或负值。在给定的环境下,系统经过这种探索而找到稳定的运动形式;环境改变了,原来的运动不再稳定,系统又开始探索,直到重新找到稳定状态。阿什比所说的这种自行镇定系统,不靠“先天”的(设计好的或遗传的)镇定控制机制,而是在“后天”的探索过程中通过“理解”而达到稳态的。

具有自镇定控制能力的系统,特别是活机体系统,其主要参数不是完全确定的,而是允许在一定范围内变化,从而使控制的作用能得以实施。由同样的元件组成的系统,由于参数选择和元件配置方式的不同,对给定的环境、系统的运动方式也不同。

阿什比最早用控制论观点研究了自镇定现象,并用磁电元件制作出一个自镇定控制的人工模型,即稳态机,证明借助于纯物理方法

产生有目的的运动是可能的。设想允许范围由一个封闭的边界包围起来,并建立起一套开关装置。于是,系统自行改变参数或选择元件组合方式,从而改变运动形式。如此反复进行,最后找到稳定状态。系统在一种搜索试探过程中,通过自行改变内部参数和结构方式

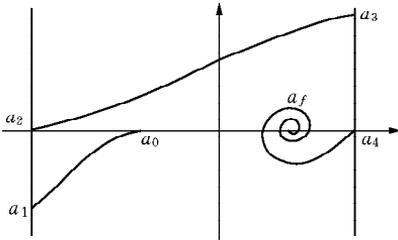


图 3-14 二阶自寻稳相图

而趋于稳态,称为自镇定控制。图 3-14 给出一个二阶系统自寻稳定点的相图。 ζ 为描述系统自行改变的参数。在 $\zeta = \zeta_1$ 时,系统进行第 1 次探索,从 a_0 开始,到 a_1 时触发边界开关,系统摒弃 ζ_1 ,改取 $\zeta = \zeta_2$,从 a_2 开始以新的运动进行探索,在 a_3 处再次触发开关,

改去 $\zeta = \zeta_3$,从 a_4 开始第 3 次探索,最后达到稳定点 a_f 。

(2) 自修复控制:系统在运行中出现故障或局部损伤是常见的。系统如果要存续和运行,必须排除故障,在容许范围内使损伤部位复原。若故障由其他系统来排除或修复,称为他修复。生命系统则能自行排除故障、修复损伤,这称为自修复。自修复的根本目的是恢复因损伤所造成的功能损失,所以并不要求完全恢复受损部分或重新长出一个与原来完全一样的部分,只需有一个能替代或提高抗损功能的部分就行。为此,首先需要确定一个作为衡量标准的性能指标 P^* , P 为时间函数 $P(t)$ 。当系统在 $t = 0$ 时刻受损, $P = P(0^+)$;如果经过时间间隔 $[0, t]$ 后,性能变化满足

$$P(T) \geq P^* > P(0^+)$$

则称系统在时间间隔 $[0, t]$ 内是自修复的。

(3) 自适应控制:如前所述,适应就是随着环境的变化系统本身发生有利于自己生存延续的变化。所以适应总是具有某种“自我”控制的成分,但是不同的适应系统对环境变化的适应能力是不同的,这表现在有些能在变化范围很大的情况下生存发展,有些则只能适应环境较小的变动。高级的生命系统和社会系统往往需要

面对环境的巨大而快速的变化,这就要求它们具有很强的适应力。

对于自适应控制来说,最基本的要求是系统稳定和可靠。因此,它的性能可以用系统的稳定性和可靠性来体现。显然,自镇定是维持系统稳定性的自适应行为,自修复是维持系统可靠性的自适应行为。而更高水平的自适应性则不论环境是否变化,系统都能通过与环境相互作用使自身的性能优化。这里的关键是对性能最优化的理解,通常把优化的基点放在系统能更好地生存和发展上。所以,优化实际上只对那些具有多种生存状态、多个发展前景的复杂系统才有意义。

综上所述,适应总是相对于一定的环境 E ,并以一定性能指标 P 为依据来衡量的。因此,在讨论适应问题时,必然涉及一个由系统 S 、环境 E 和性能指标 P 和鉴定器 C 组成的更大系统。若 E 变化而 P 保持在容许范围内,系统是稳定的。若 S 变化而 P 保持在容许的范围内,系统是可靠的。若 E 与 S 均变化而 P 保持在容许的范围内,则系统是稳定且可靠的。若在系统内部包含了对性能指标优劣进行评价的子系统,并且由它来引导系统趋向性能优化方向,这种适应就是最优适应或自适应。

3.6.5 选择性

在生物学中选择性的概念是人们早已熟悉的,如达尔文《进化论》中著名的“自然选择”,现代分子生物学中的“中心树法则”等。在通讯领域中,选择性和灵敏度是两个基本质量指标。例如,对一个接收机来说,除了需要有很好的接收微弱信息的能力外,还需要有区分两个相邻信号或作用的能力。否则,让许多电台的信号不加选择地一起接收、放大,就什么信息也得不到。对于系统科学来说,选择性是系统主动性的一个基本方面,它对复杂系统,尤其是生命系统和社会系统的演化有着极其重要的意义,以致被看作是系统进化的一个关键。这是因为系统如何对环境中的各种因素进行区分和选择往往决定了系统能否生存下去和向哪个方向演化。

选择性的基本含义是系统对外界作用的响应的选择,要做到这一点,必须具有相应的选择评价机制。它实质上是一个信息处理系统,其作用是根据预先确定的评价原则或指标来区分外部环

境信息,对其中的一部分加以放大或传送到相应的部门,而将其余的部分加以剔除。

一般情况下,只有非线性系统才能实现选择功能,这一点将在非线性一章中进行讨论。

3.7 系统的标度性与临界行为

系统作为一个整体,除在通常情况表现出其特有的属性、功能和价值,此外,还具有自己独特的行为特征,而这种行为特征往往在外界作用达到一定界限或阈值时才充分表现出来。把外界作用阈值点称为临界点,系统在临界点附近时所表现出来的行为叫作临界行为。

系统的临界点是系统变化的关节点、相变点。自然科学,尤其是物理学对此已有广泛而深入的研究,取得了许多重大成果,美国研究凝聚态的理论物理学家菲力普·安德森(Philip Anderson)还因此获得1977年诺贝尔物理学奖,本节中的一些基本观点和模型就是来自物理学中关于相变与临界现象的研究。现在,社会科学中对系统临界行为的研究正在引起人们的注意,发现许多重大社会经济问题的产生往往与临界行为有着深层的联系。例如,一个国家的失业和通货膨胀(紧缩)总是存在的,但这个数字一旦达到某个临界点后,就会引起社会结构的失稳,最终导致社会动荡和灾难;个人购物行为和市场形势的变化也与某些参数是否到达临界点有关。同样,购房、买车、投保等市场行为,从表面看都是分散的随机的,但当人均收入达到某个临界点,例如人均8000美元时就会出现跃变。由此可见,如果能预测系统临界点的存在,了解临界点附近的变化特征,对认识系统的本质和最大限度地发挥系统功能,都有十分关键的意义。

临界现象的一个重要特点是它的普适性,即通常情况下属性、功能、价值表现各异的不同系统,在到达临界点附近时会出现许多不依赖于其物理组成的共同特征和规律。这一点对于认识系统的共性、控制和把握其运行规律有特殊的好处。因为只要对某些典型系统的临界行为进行充分深入的研究,就可以将结果推广到其

他领域。临界点附近为什么会有如此特殊的性质呢？物理学的解释是临界点附近“关联长度的发散”。用系统学的话来说，就是外界作用达到临界，系统内部原来局限于元素附近的关联一下子传到了无限远处，对于时空范围有限的系统来说，这意味着部分和个体之间的作用达到了系统的全局范围，从而使得一个新的系统（整体结构）得以产生。可以设想一下，一场社会运动的形成过程，例如工人、农民的起义，不正是在他们遭受剥削压迫达到某个限度（临界点）时，原来仅仅在个人周围传递的不满情绪一下子传播开来，达到群体的每一个人后所形成的吗？在特定的政治经济形势下，一个政党、一个经济实体（如企业）的形成也是如此。

为了研究相变和临界现象，物理学家提出了许多理论和模型，它们虽然来自相对简单的系统，但由于普适性的存在，很多结论和方法仍然可以用到其他系统。下面作一简要介绍。

3.7.1 相变与临界指数

大家知道，通常物体有气体、液体、固体和等离子体四种物态，人们对前三种比较熟悉。一个最常见的例子就是水的三态，当水蒸气的温度降到摄氏 100 度时，水由气体变为液体，同时放出汽化热（量），当温度降到摄氏零度时，由液体变为固体，同时放出熔解热。物态的变化就是物体内部结构的变化，同时在体积、内部压强等方面都伴随有巨大变化，这些现象用物理学的语言来说就是相变。迄今为止，人们对此作了许多研究，并对相变进行了分类，如连续相变、不连续相变，连续相变又可划分为一类、二类。

以大家熟悉的水的相变为例，水在温度为零度和 100 度附近时会出现一系列特殊现象，如气液界面的消失，透明度和折光率的异常，出现“乳化”现象等。这就是所谓的临界现象。

研究临界现象的一个重要方面是用实验方法对临界指数进行测量，然后将所得结果与相应的理论推导结果进行比较。在以往的统计物理研究中，人们普遍运用一种叫作“平均场”的理论，这种理论的基本假设是认为热力学体系中微观粒子（系统）无需考虑周围粒子分别对它的作用，而可以把它看成是在一个由周围粒子（环境）的平均作用所构成的“场”中的运动。显然，取平均值可以使问

题大大简化,但同时也将体现周围粒子差异的信息给“平均”掉了。对于处在远离临界点的粒子,平均场理论在许多情况下与实验结果符合很好,因而一直为人们所肯定。

平均场假说最早由范德瓦尔斯引进,用来解释气液相变问题。后来苏联物理学家朗道引进了一个很有用的概念——序参量,以描述不同相的宏观特征,而不同的序参量代表了不同的相,在发生相变的临界点上序参量为零,于是对相变的研究就转化为对序参量变化的研究。

若一个序参量为 Ψ 的热力学系统的势函数为 $G(T, \Psi)$ 。平均场理论有两个基本假定:

(1) 假定 $G(T, \Psi)$ 是 Ψ 的偶函数,即关于 $+\Psi$ 和 $-\Psi$ 对称。

在临界点上对 G 展开,令偏导数为零,略去高次项即可得到系统的平衡方程:

$$g(T)\Psi + h(T)\Psi^3$$

平衡方程有三个解: $\Psi_0 = 0$; $\Psi_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{-g(T)}{h(T)}}$

(2) 假定 $g(T) = at$, 非零解 $\Psi_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{a}{b}}(-t)^\beta$

式中 T 为控制参数(温度), $g(T)$; $h(T)$ 分别为 G 对 Ψ 展开式中前面两项的系数,因系统发生相变(序参量 $\Psi = 0$)时 $g(T)$ 变号, $h(T)$ 恒为正,令 $g(T) = a\frac{T - T_c}{T_c}$; $h(T) = b > 0$ 。其中 a, b 为常数, T_c 为临界点温度, β 为临界指数。

临界指数 β 在物理学上具有十分重要的意义。顾名思义,临界现象就是当外界对系统的作用到达临界点附近时表现出来的特殊现象,这种现象将随着临界点的逼近而愈来愈显现出来,“临界指数”正好刻画了这种“随逼近而显现”的指数变化率。

3.7.2 标度性与标度理论

尽管平均场理论在通常情况下与实验结果相符合,但人们发现,在临界点附近实验精确测定的临界指数与平均场理论计算结果相差甚大。为了解释这种现象,威顿(Widom)、卡丹诺夫

(Kadanoff)、威尔逊(Wilson)等统计物理学家建立了一些处理临界点附近热力学函数的方法,将热力学函数在临界点附近的奇异部分,即受相变影响的部分用到达临界点的距离表示,从而建立起临界点现象的唯象理论——标度理论。

Widom 提出“标度”不变性概念,指出随着系统与临界点的距离变化,热力学函数将改变它的尺度而不改变它的函数形式。用数学语言来表示,就是热力学函数是临界点距离的“齐次函数”。进一步研究表明,临界指数的实验值满足一些所谓的“标度关系”,如:

$$\alpha + 2\beta + \gamma = 2$$

$$\alpha + \beta(\delta + 1) = 2$$

20 世纪 60 年代 Kadanoff 将标度思想巧妙地运用到统计学的一个经典模型——伊辛模型,为建立临界现象的近代理论打开了大门。Kadanoff 标度理论的主要观点是,当相关长度增大时,可以通过重新标出(增大)点阵的相互作用单位来保证热力学函数形式的不变。这里的相互作用单位原来是单个“自旋”来描述的点阵,经过重新标度后作用单位扩大为包含多个自旋的“块体”。

标度理论较好地解释了远离临界点时与试验符合得很好的平均场理论在临界点附近失效的原因,因为远离临界点时自旋(粒子或元素)间的“关联长度”只涉及粒子附近较短的范围(叫作短程相关),用“平均”抹去小的涨落是容许的,因此,平均场理论可以近似地描述小涨落。但在临界点附近涨落反常增大,不能再用“平均”来抹去,平均场理论也就碰到了困难。随着向临界点的趋近,系统内部元素间相互作用的相关长度在增大,而到达临界点时相关长度就可能“发散”,趋向无穷,这时任何体现系统特征的有限尺度和无穷相比都是无关紧要的,应该被“一视同仁”。这意味着无论从哪个尺度上去看、去量,关联长度都是无穷大,看到的图像都是一样的。用物理学的语言来说,系统行为在临界点上表现出尺度变换下的不变性,亦即不同的尺度下的自相似性。从系统的角度看,这正好对应了系统内部新结构的形成和突变的出现。正因为如此,系统科学才对标度理论给予了高度重视。

在揭示宏观系统临界行为共性的基础上,人们对临界行为的差异和个性也进行了深入研究,具体表现为根据某些特征对临界行为进行分类,以确定其普适性的类别,进而对属于同一类的系统求出相应的临界指数。例如,气液临界点和取向一定的磁系统的自由度 $n = 1$,属于同一普适类;超导、超流体相变具有连续对称性, $n = 2$,同属于另一普适类;三维各向同性的海森堡铁磁相变又属于另一普适类。研究表明,可以根据①空间维数 d ;②独立序参量个数 n ;③作用力的力程长短来划分普适类。对于只有短程作用的系统,一维情形因为相互作用只沿一条线传播,空间任一点出现的涨落都会破坏已有的秩序,最后只能形成一种处处均匀的无序相,所以一般不会出现相变。二维情况可以发生相变,但连续对称的二维系统不能形成长程序。现实的三维空间的相变极为丰富,而且临界特性与空间维数有关,这是标度理论的一大贡献。

3.7.3 重正化群方法

虽然标度理论给了人们许多启示,但还只是一种“唯象”的描述。为了从更深的层次上揭示临界现象的内部规律,威尔逊在标度理论的基础上将重正化群方法引入临界现象的研究,给出计算临界指数的理论方法,他因此获得1972年诺贝尔物理学奖。

重正化方法最早是量子场论研究中用来克服“发散困难”(如费曼积分趋于无穷,无法与实验结果进行比较)的一种方法,其原始的思想是首先将发散的部分分离出来,然后通过重新标度来“避开”发散。这种操作就叫作重正化。

威尔逊(Wilsonian)的基本方法包含两个步骤:第一步是在临界点附近将描述系统的有效哈密顿量反复加以重新标度,即把格点归并为块体,把小块体并为大块体,通过归并放大尺度,把短程相关效应去(平均)掉,以保持哈密顿量的形式不变。第二步求出有效耦合常数间的非线性递推关系,这个递推关系的不动点正好对应了临界点,而产生递推关系的转移矩阵的本征值可用临界指数来表示。其具体的作法是进行重正化变换:

令 R 为重正化变换, K 为格点系统最近邻格点间的相互作用(K 是确定哈密顿量的参数之一)。在简化的情况下,重正化变换

可表示为

$$K_1 = R(K)$$

R 一般为非线性函数。由于新的哈密顿量 K_1 的形式与原来的 K 相同,上述变换可反复进行。经 n 次变换后有

$$K_{n_1} = R(K_{(K_{n_1})_1})$$

对于非临界点,关联长度是优先值,放大块体尺度相当于缩小有效关联长度,重新标定的结果是离开临界点。但在临界点上,关联长度为无穷大,标度变换不会改变关联长度,因而不会改变 K 值,可见临界点是重正化变换的不动点。

令 K_c 为临界点上的 K 值,有

$$K_c = R(K_c)$$

把重正化变换的不动点与连续相变临界点上的关联长度无穷大这两件事联系起来,找到临界行为的数学特征,是相变研究取得成功的关键。为此,引进重正化群来描述临界行为(重正变换有多种方法,用群的变换来表示重正化变换的方法叫重正化群方法)。

群是一个代数结构。如果在集合 A 上规定一个二元运算 $*$, 满足以下条件

- (1) 封闭性:若 $a, b \in A$, 则 $a * b \in A$ 。
- (2) 结合率: $a * (b * c) = (a * b) * c$ 。
- (3) 存在单位元 e , 对任 $a \in A$, $a * e = e * a = a$ 。
- (4) 存在逆元:对任 $a \in A$, 存在 $a^{-1} \in A$ $a * a^{-1} = a^{-1} * a = e$; 则称 $A, *$ 为一个群, 如果不满足(3)、(4), 则称 $A, *$ 为一个半群。

在集合 A 上定义一元运算 T

$$T: a \rightarrow a' = T(a), a, a' \in A$$

叫作 A 上的一个变换。如几何点集的平移、旋转变换、实数集上的 $x \rightarrow x^2$ 等。同一类变换的全体,对于变换的乘法运算,常可构成一个群,成为变换群,平移群、旋转群、对称群等就是人们熟知的变换群。

设 T 为集合 A 上的一个变换,如果存在 $a \in A$, 使得

$$a = T(a)$$

则称 a 为变换 T 的不动点。对于平面上绕原点的旋转变换,原点是一个不动点, $x = 1$ 是变换 $x \rightarrow x^2$ 的不动点。不动点又分稳定的与不稳定的两种。

判别不动点的类型或系统在不动点附近的行为特征,可以通过将重正化变换 R 在不动点 K_c 附近线性化的方法进行。重正化变换 R 线性化后得到的特征矩阵,按其特征根可以鉴别不动点的类型,考察系统的行为特征。

重正化群方法也是论证普适性假设的理论手段。重正化变换的对象是系统哈密顿量的参数空间。重正化群可以有多个双曲不动点,把参数空间划分为若干区域。按重正化群方法计算表明,同一区域的临界指数相同,系统临界行为相同,对应于一个普适类。因此,普适类的划分也是重正化群理论的逻辑结果。重正化群理论还提供了一套计算临界指数的特殊技巧,其计算结果与实验测得数据相当接近,表明理论是正确的。

相继进行两个重正化变换的结果,可以通过另一个重正化变换一次获得。例如,将 9 个格点归并为一个小块体,再将 9 个小块体归并为一个大块体,相继进行这两个变换的结果,等于一次将 81 个格点归并为一个块体的变换结果。这种操作称为变换的乘法。重正化变换的全体相对于这样定义的乘法运算构成一个群,叫作重正化群,它实际上是一个半群,即不存在逆变换。

威尔逊重正化群方法的基本思想是:为了描述连续相变的临界行为,不去研究系统的热力学函数本身,而是研究使热力学函数形式保持不变的变换性质。把关联长度发散的临界点与非线性变换的不动点联系起来,把对物理系统临界行为的描述与重正化群的不动点附近的数学性质对应起来,把用标度理论的物理学语言表述的问题转化为用群论的数学语言表述的问题群的性质中提取有关系统临界行为的信息。

通过以上的论述可以看出,临界行为是系统整体运动中一种最能体现系统特征的行为,系统科学可以借用物理学对临界行为的研究成果,将其推广到对一般系统的研究,特别是复杂社会经济

系统的研究。

3.8 系统的随机行为

前述对系统的属性和行为所进行的研究中,主要考虑的是必然因素的影响,即认为系统服从一个必然规律,其行为是完全确定的。这种必然性和确定性实际上包含三个必然性要求:系统运行的规律确定、系统的环境确定和初始条件(状态)确定。在现实世界中,这三个要求其实是十分严格、难以做到的。因为一个实际系统的行为总是受到各种因素的影响,其中有些是必然因素,有些是偶然因素。这些偶然因素的存在,使得系统行为中多少包含了随机的成分,使人们对系统无法完全确定和控制。

偶然性是事物的一种本质属性,因此,对事物的认识就存在着不确定性。对一具体事物而言,偶然性与不确定性不是有和无,而是多和少的问题。对于那些偶然性少、不确定性小的问题和对象(例如天体的运行、铁路上奔跑的列车),可将其作为确定性系统来处理。而对那些偶然性和不确定因素起主导作用的系统(如大气的变化,社会经济系统的运行),则必须在考虑其必然性的同时,着重研究它的偶然性和不确定行为。

偶然性导致偶然事件的发生。偶然事件可以分为两种:一是偶然发生的事件,称很难或很少重复发生的事件为偶发行为或偶发事件,如某一机遇或灾难、某个历史事件等;二是偶然事件指那些虽然一次试验或观察中结果不能确定,但多次试验则不同的结果可能反复出现,并且具有一定的概率分布的事件,这就是随机性或随机事件,如博弈中的胜负、天气的好坏等。17世纪以来,人们对随机事件作了大量研究,并最终形成了一门学科,即概率论与数理统计学。现在这些理论已广泛地运用于对系统行为的研究,取得了令人鼓舞的进展。20世纪末,自然界和金融领域的一些偶发事件引起了人们的高度重视,并发现原以为没有规律可循的偶发事件背后也有深层次的规律,于是开展了艰苦的探索,尽管目前成果还不丰富,但已经使人们看到了把握系统偶发行为的希望。为了对系统的偶发行为与随机行为有一个大体了解,本节先引进一些基本概念,然

后对常用的模型进行一些介绍,最后给出一个实例。详细的数学推导可参考概率、数理统计及统计物理的有关著作。

3.8.1 随机性的几个概念

(1) 随机性与随机事件:系统的状态不能完全由初始条件和边界条件所确定,这就是系统的随机性,是复杂系统的基本属性。换言之,在相同的环境和条件下对系统重复试验,其结果是不确定的。这种在一次试验(观察)中无法确定是否出现的事件,称为随机事件,相应的试验,称为随机试验。例如,投硬币、掷骰子、对产品进行抽样调查,对市场上某件商品作检验等,都是最常见的随机试验,试验所得的结果即为随机事件(以下简称“事件”)。

随机事件与偶发事件的不同之处在于虽然一次试验的结果无法确定,但对多次(以至无穷次)试验的结果进行统计可以发现:①存在一个基本的事件集合,即无论哪次试验,其结果总会出现某些结果或某些状态,所有可能结果的全体构成一个基本事件集空间;②每种可能结果所出现的频率趋向于一个小于1,大于零的实数(频率=频数(某事件或状态出现的总次数/总试验次数),这个实数被称为事件的概率,而且所有事件的概率之和等于1;③如果每一事件是相对独立的,即事件间没有固定的联系,不会因为某事件的出现而影响另一事件出现的概率,则事件之和(不是这一事件出现就是另一事件出现)的概率等于它们的概率之和。

柯尔莫哥诺夫用公理来表征以上这些特性,即概率论的三条基本公理:非负性、归一性和在独立条件下的可加性。例如,在随机试验抛硬币、掷骰子过程中,由于硬币只有两个面,骰子有六个面,每次投掷只能出现一个面。但多次投掷发现,硬币正反面出现的概率相等,等于0.5,而骰子的六个面出现的概率相等,各为1/6。它们的概率相加都等于1。

(2) 随机变量与随机过程:一个随机试验的结果(事件)可以用一个或几个量来表示。例如,可以令投硬币出现正面时为1,反面为零(当然也可以相反);可以给骰子的面上刻1~6个点(当然,也可以给其他数字,只要保证总共6个数字就行),每次试验就只能也必然出现这6个数字中的一个。如果一个试验用两个或两个以

上的数字来表示,则它们构成一个两维或多维向量。例如,炮弹在平面上的落点就需要用两个数字(坐标)来描述。而在多个人中随机抽取一个人,他的身高、体重、血压、体温等健康状况就需要用一个多维向量来表示。

如果随机试验的结果随时间发生变化,则称为随机过程。

3.8.2 朗之万方程

为了建立描述随机行为的运动方程,需要先考察一种十分简单的现象——布朗粒子的运动。布朗运动是1900年英国生物学家布朗在观察水中花粉时发现的,20世纪初爱因斯坦、朗之万等物理学家对此进行了深入研究,给出了完备的描述。相应的方程和模型已成为描述系统随机行为的经典方程。早在1905年,爱因斯坦指出,花粉粒子虽然本身很小,但和液体的分子相比则显得非常巨大。液体分子对它的撞击可视为一种随机力的作用。

他认为根据牛顿定理,一个受外力 W 作用的物体的运动方程为:

$$m \frac{dv}{dt} = F \quad (3.8.2.1)$$

对于一个悬浮在流体中质量为 m 的粒子,所受外力为黏滞阻力,其最简单的形式可由斯托克斯定律给出

$$F = -\alpha v$$

因此,粒子的运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = -\alpha v \quad (3.8.2.2)$$

粒子的速度为

$$v(t) = v(0)e^{-t/\tau} \quad (3.8.2.3)$$

它将以弛豫时间 $\tau = \frac{1}{\alpha}$ 趋于零。

但是,这一理论结果与布朗运动的实验结果不相符。法国物理学家朗之万(Langevin)在此基础上进行研究,他认为,流体分子对布朗粒子的作用可分解为两部分:连续变化的黏滞阻力 $F = -\alpha v(t)$ 和无规则变化的随机力 $F(t)$,所以粒子的运动方程应为

$$m \frac{dv}{dt} = -\alpha v(t) + F_s(t) \quad (3.8.2.4)$$

或

$$\frac{dv}{dt} = -rv(t) + \xi(t)$$

上式称为朗之万方程。它描述了随机变量 $v(t)$ 本身随时间的演化,其中

$$r = \frac{\alpha}{m}, \xi(t) = \frac{F_s(t)}{m} \quad (3.8.2.5)$$

朗之万对 $\xi(t)$ 的统计性质提出了如下假设:

$$(i) \xi(t) = 0 \quad (3.8.2.6)$$

这是因为粒子的 $v(t)$ 应由确定论方程决定的缘故。

$$(ii) \xi(t)\xi(t') = D\delta(t-t') \quad (3.8.2.7)$$

其中设随机力 $\xi(t)$ 具有 δ 自关联函数或为零的自关联时间,常数 D 为 $\xi(t)$ 的均方涨落(噪声强度)。具有特性(i)和(ii)的随机力 $\xi(t)$ 叫白噪声。式(3.8.2.5)和式(3.8.2.6)、式(3.8.2.7)一起描写了布朗运动的物理过程。

设 $t=0$ 时,随机变量 v 具有 v_0 值, v 取 v_0 的概率有尖锐的极大值。在此初始条件下,微分方程(3.8.2.5)的解为

$$v(t) = v_0 e^{-rt} + \int_0^t e^{-r(t-\tau)} \xi(\tau) d\tau \quad (3.8.2.8)$$

对随机变量来说,重要的是各阶矩和关联性。利用(3.8.2.8)式进行计算,对(3.8.2.8)取平均,注意到 $\xi(\tau)$ 的特性(i),得到

$$\langle v(t) \rangle = v_0 e^{-rt} \quad (3.8.2.9)$$

由(3.8.2.9)可得

$$\begin{aligned} \langle v(t)v(t') \rangle &= v_0^2 e^{-r(t+t')} + \int_0^t \int_0^{t'} e^{-r(t-\tau)} e^{-r(t'-\tau')} \xi(\tau)\xi(\tau') d\tau d\tau' \\ &= v_0^2 e^{-r(t+t')} + \frac{D}{2r} [e^{-r(t'-t)} - e^{-r(t+t')}] \end{aligned}$$

若 t, t' 均很大, 且 $t + t' \gg t' - t$, 上式化为

$$v(t)v(t') \approx \frac{D}{2r} e^{-r(t'-t)} \quad (3.8.2.10)$$

上式说明布朗粒子的速度具有指数关联, 其关联时间(速度的存储时间) $r_c = \frac{1}{r}$, 在上式中取 $t = t'$, 则有

$$v^2(t) \approx \frac{D}{2r}$$

因而粒子的平均动能为:

$$E = \frac{1}{2} m v^2(t) \approx \frac{1}{2} m \frac{D}{2r}$$

又根据经典统计中的能量均分定理,

$$E = \frac{1}{2} k_b T$$

两式比较可得

$$D = \frac{2rk_b T}{m} \quad (3.8.2.11)$$

这里 k_b 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, r 是阻尼力的量度, 它代表一种耗散机制的强度, D 是随机力均方涨落大小的量度, 两方面性质通过式(3.8.2.11)建立联系, 耗散越强的系统, 随机力的涨落越大。

作为一个特别的例子, 随机力可用一个强度为 $\frac{\varphi}{m}$ 的 δ 函数来表示, 即:

$$\xi(t) = \frac{\varphi}{m} \sum \delta(t - t_j) (\pm 1)_j \quad (3.8.2.12)$$

其中

$$\delta(t - t_j) = \begin{cases} 1 & t = t_j \text{ 时} \\ 0 & t \neq t_j \text{ 时} \end{cases}, \pm 1_j \text{ 为一随机序列。}$$

由于随机序列 (± 1) 在正负号上的等概率性, 可直接得到

$$\xi(t) = 0 \quad (3.8.2.13)$$

对 t, t' 时刻 $\xi(t)$ 的乘积求平均, 采用泊松过程, 可求得相关函数为:

$$\xi(t)\xi(t') = \frac{\sigma^2}{m^2 t_0} \delta(t-t') = D\delta(t-t') \quad (3.8.2.14)$$

3.8.3 福克——普朗克方程

由于朗之万方程的解 $v(t)$ 是一随机变量, 可以用 $P(v, t)dv$ 表示在 t 时刻粒子的速度 v 落在 $v-v+dv$ 间的概率, $P(v, t)$ 叫速度概率密度。由朗之万方程(3.8.2.5)可推导出布朗粒子速度概率 $P(v, t)$ 的演化方程, 它的形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} P(v, t) = r \frac{\partial}{\partial v} (vP) + \frac{D}{2} \frac{\partial^2}{\partial v^2} P \quad (3.8.3.1)$$

式(3.8.3.1)就是福克——普朗克方程最简单的特例, 与朗之万方程(3.8.2.5)等价。

福克——普朗克方程对于描述系统的随机行为具有重要意义。对于一维情况, 朗之万方程的速度 v 可用更一般的变量来代替:

$$\frac{dq}{dt} = -rq(t) + \zeta(t) \quad (3.8.3.2)$$

福克——普朗克方程可以表示为:

$$\frac{df}{dt} = \frac{d}{dq} (rqf) + \frac{D}{2} \frac{d^2}{dq^2} f$$

如果令 $k = -rq$ 为漂移系数, D 为扩散系数, 当 $r = 0$ 时, 就可以得到扩散方程:

$$\frac{df(q, t)}{dt} = \frac{D}{2} \frac{d^2}{dq^2} f(q, t)$$

以上方法可以推广到多变量的情况和任意力的情况。

如果相应的朗之万方程的形式为:

$$\dot{q}_i = K_i(q) + \xi_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

$$K = (K_1, K_2, \dots, K_n)$$

并有 δ 型的相关涨落力 $\xi(t)$ 则一般形式的福克——普朗克方程为：

$$f(q, t) = -\nabla_q(Kf) + \frac{1}{2} \sum_{ij} D_{ij} \frac{\partial^2}{\partial q_i \partial q_j} f$$

其中 ∇_q 为拉普拉斯算子。

由于福克——普朗克方程在研究系统随机性中有极其重要的作用,下面不加推导地给出关于它的一些重要结果。

(1) 福克——普朗克方程的定态解:定态解就是按 $f = 0$, 即 f 与时间无关时的解。此时 $\frac{1}{2}D \frac{df}{dq} = Kf$ 福克——普朗克方程的定态解为：

$$f(q) = N \exp(-2v(q)/D), v(q) = -\int_{q_0}^q K(q) dq$$

其中 $v(q)$ 为势函数, N 为归一化常数。函数图像为：

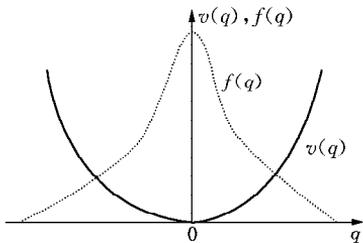


图 3-15 单一稳定点的势能曲线与概率分布

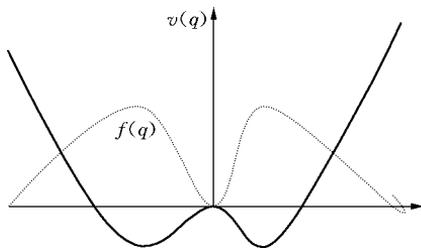


图 3-16 双稳的势能曲线与概率分布

从图像中可以看出,当势能最低时,找到粒子的可能性最大,这是与人们的常识相符合的。

同样,当势能曲线发生变化后,概率分布曲线也会有相应的变化。如图 3-16 所示。

(2) 福克——普朗克方程的含时解:在多数情况下,求解福克——普朗克方程的含时解是十分困难的,但是当漂移系数为 q 的线性函数概率分布为高斯分布时可以导出含时解：

$f(q) = N(t)\exp\left(-\frac{q^2}{a} + \frac{2b}{a}q\right)$, 其中 a 为高斯分布宽度, b 为

位移, 归一化常数为 $N(t)$, 它们都是含时间的。

3.8.4 主方程

要描述系统的随机行为, 最重要的是要知道概率分布如何随时间发生变化, 为此, 就需要建立相应的“主方程”。首先考虑一维的情况。

当粒子在一条直线上作向前或向后的随机运动时, 它的概率分布是如何随时间变化呢? 也就是要导出在粒子跳动 $n+1$ 次后, 它位于 $m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ 等处的概率分布方程。如果用 $P(m, n+1)$ 表示粒子跳动 $n+1$ 次后处于 m 点的概率, 因为粒子每次跳动所通过的元长是“1”, 所以跳动 n 次后, 粒子必定处于 $m+1$ 或 $m-1$ 的位置上。在那里它的概率应为 $P(m+1; n)$ 或 $P(m-1; n)$ 。因此, $P(m; n+1)$ 是由 $m-1 \rightarrow m$ 和 $m+1 \rightarrow m$ 两种情况的概率之和。

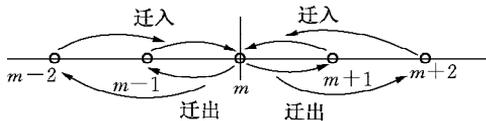


图 3-17 跃迁过程

设粒子从 $m-1$ 跳到 m 的跃迁概率是:

$$\omega(m, m-1) = \frac{1}{2} \quad (3.8.4.1)$$

当粒子跳动 n 次后处在 $m-1$ 的位置, 而跳动 $n+1$ 次后处在 m 位置的概率, 应该是跳动 n 次后处在 $m-1$ 位置的概率 $P(m-1; n)$ 与从 $m-1 \rightarrow m$ 的跃迁概率 $\omega(m, m-1)$ 的乘积。同样, 从 $m+1 \rightarrow m$ 的概率亦等于 $P(m+1; n)$ 和 $\omega(m, m+1)$ 的乘积, 由于从 $m-1 \rightarrow m$ 或从 $m+1 \rightarrow m$ 是两个独立事件, 故

$$\begin{aligned} P(m; n+1) &= \omega(m, m-1)P(m-1; n) \\ &\quad + \omega(m, m+1)P(m+1; n) \end{aligned} \quad (3.8.4.2)$$

上式中的

$$\omega(m, m-1) = \omega(m, m+1) = \frac{1}{2} \quad (3.8.4.3)$$

注意,当(3.8.4.3)式代入(3.8.4.2)式之前,(3.8.4.2)式是一个普遍公式,它只要能满足

$$p + q = \omega(m, m-1) + \omega(m, m+1) = 1 \quad (3.8.4.4)$$

就可。现在把联合概率引入到与时间有关的过程中去。当粒子跳动 n 次后处在 m' 的位置,在跳动 $n+1$ 次后处在 m 位置的概率用 $p(m'n+1; m', n)$ 表示,由上述可知,它由两种概率组成:

$$P(m; n+1; m', n) = \omega(m, m')P(m', n) \quad (3.8.4.5)$$

显然, $\omega(m, m')$ 是条件概率,因为每次跳动时粒子都要离开原来的位置,故

$$m \neq m' \quad (3.8.4.6)$$

而粒子一次只能跳过一元步“1”,故

$$|m - m'| = 1 \quad (3.8.4.7)$$

可见,在这种情况下除非 $m' = m \pm 1$, 否则 $\omega(m, m') = 0$ 。现在从这些条件出发讨论(3.8.4.2)式。令

$$\omega(m, m \pm 1)/\tau = \widetilde{\omega}(m, m \pm 1) \quad (3.8.4.8)$$

$\widetilde{\omega}(m, m+1)$ 是单位时间的跃迁几率。从(3.7.4.2)式的两边减去 $P(m; n)$, 然后用 τ 除两边便得:

$$\begin{aligned} \frac{P(m; n+1) - P(m; n)}{\tau} &= \widetilde{\omega}(m, m-1)P(m-1; n) \\ &\quad + \widetilde{\omega}(m, m+1)P(m+1; n) \\ &\quad - [\widetilde{\omega}(m+1, m) \\ &\quad + \widetilde{\omega}(m-1, m)]P(m; n) \end{aligned} \quad (3.8.4.9)$$

考虑到(3.8.4.3)式,这里的 $\widetilde{\omega}$ 都等于 $1/2\tau$ 。用 $t = n\tau$ 把分立变量 n 与时间变量 t 联系起来,为此引入

$$\tilde{P}(m, t) = P(m; n) \equiv P(m; t/\tau) \quad (3.8.4.10)$$

上式中的 $\tilde{P}(m, t)$ 就是 $P(m; t/\tau)$ 的另一写法。现在用时间的微商来代替差分：

$$\frac{P(m; n+1) - P(m; n)}{\tau} = \frac{d\tilde{p}}{dt} \quad (3.8.4.11)$$

则(3.8.4.9)式变为，

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{p}(m, t)}{dt} = & \tilde{w}(m, m-1)\tilde{p}(m-1, t) \\ & + \tilde{w}(m, m+1)\tilde{p}(m+1, t) \\ & - [\tilde{w}(m+1, m) \\ & + \tilde{w}(m-1, m)]\tilde{p}(m, t) \end{aligned} \quad (3.8.4.12)$$

这就是主方程。

虽然主方程的形式简单,但实际求解时,往往难以得到跃迁概率的具体表达式。为简化起见,常常需要借助于细致平衡假设才能求得定态解。

现在研究概率分布保持不变的定态,即概率分布不随时间变化的情形。粒子的跳动过程在进行着,而它的概率分布怎样才能保持不变呢?只有在任意两个位置之间,例如,在 m 和 $m+1$ 之间,当每单位时间内从 m 到 $m+1$ 的跃迁数与从 $m+1$ 到 m 的跃迁数保持相等时,才能保持概率分布不变,这个条件就是细致平衡原理。它的数学形式是：

$$\tilde{w}(m, m')P(m'; n) = w(m', m)P(m; n) \quad (3.8.4.13)$$

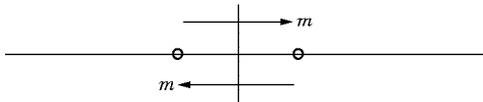


图 3-18 细致平衡的设想

在上一节中,用连续变量 $m = \frac{x}{a}$ 代替分立变量 m 给运算带来

了很大的方便。当 a 趋于 0, 而 x 为有限值时, m 就变成很大的数, 这时 m 的元步单位“1”与 m 的大小相比可看作是很小的量, 因此, 取连续变量时, 就用 ϵ 代替原来的单位“1”表示 m 的变化。

3.8.5 实例——舆论形成

舆论形成是系统随机行为的一个例子, 下面对该过程进行介绍(哈肯在其协同学中曾多次引用该例子, 以下资料也来自于此)。

无论是舆论的形成, 还是社会集团的活动, 这些社会现象都是人们的合作行为和协调运动所造成的。由于参与社会活动的都是有头脑会思考的人, 他们之间可以产生很强的协同效应。然而, 人类社会活动的因素, 远比自然复杂得多, 必然涉及到很多难以预料的复杂因素。如个别人的行动常常是由大量的未知原因决定的。但是, 在大量子系统构成的系统中, 至少要有两级描述: 一是分析个别系统以及它和环境的相互作用; 二是用宏观变量来描述系统的统计行为。只是在第二级上, 定量地描述社会集团之间的相互作用才成为可能。

因此, 为了描述舆论形成的过程, 第一步就要寻找描述社会的宏观变量。一开始就要寻找意见的有关特征。当然, “意见”本身就不是一个很清晰的概念。但是, 可以通过民意测验, 通过表决等使“意见”极化。在最简单的情况下, 只有正反两种意见。显然, 序参量就是相应于正和反意见的数目 n_+ 和 n_- 。现在要探讨的是, 意见是怎样形成的, 即数目 n_+ 和 n_- 的变化是一个合作效应: 某个意见的形成要受到相同或相反意见人们的影响。因此假定, 某个意见从正到反或者从反到正的变化来说, 可用一个单位时间的跃迁概率

$$P_{+-}(n_+, n_-) \text{ 和 } P_{-+}(n_+, n_-) \quad (3.8.5.1)$$

来表示。这就要用到概率分布函数 $f(n_+, n_-; t)$, 很方便地就可得到下面的主方程:

$$\begin{aligned} \frac{df[n_+, n_-; t]}{dt} = & (n_+ + 1)P_{+-}[n_+ + 1, n_- - 1]f[n_+ + 1, n_- - 1; t] \\ & + (n_+ + 1)P_{-+}[n_+ - 1, n_- + 1]f[n_+ - 1, n_- + 1; t] \\ & - \{n_+ P_{+-}[n_+, n_-] + n_- P_{-+}[n_+, n_-]\}f[n_+, n_-; t] \end{aligned} \quad (3.8.5.2)$$

当然,问题的关键并不在于求解该方程,因为这个方程可以用标准方案求解,问题在于确定跃迁几率。与物理学中的问题相似,在对个别相互作用知之不多时,可以引进合理的假设来推导 P 。一种可能是:假定一个人的意见变化率恰好增加了与他原来意见相反的人群,于是也就减少了与他原来意见相同的人群。再假定有一种社会风气,使意见易于变化或难以形成。最后,还要考虑到环境对个人意见的影响,例如,国外消息等。这使人们联想到铁磁学中的伊辛模型,借此把这些假定写成数学方程也就很方便了。若用自旋方向表示“+”和“-”时,就得到了与伊辛模型相似的表达式:

$$\begin{aligned} P_{+-}[n_+, n_-] &\equiv p_{+-}(q) = \nu \exp\left\{-\frac{(Iq + H)}{\Theta}\right\} \\ &= \nu \exp\{- (kq + h)\} \\ P_{-+}[n_+, n_-] &\equiv p_{-+}(q) = \nu \exp\left\{+\frac{(Iq + H)}{\Theta}\right\} \\ &= \nu \exp\{+ (kq + h)\} \end{aligned} \quad (3.8.5.3)$$

式中的 I 表示与周围适应程度的量度,即意见耦合程度。 H 是一个从优参数, $H > 0$, 表示“+”意见优于“-”意见, Θ 是社会风气参数,它相当于物理学中的 $k_B T$ (k_B 是玻尔茨曼常数,而 T 是绝对温度) Θ 的大小反映了意见改变快慢的程度。 ν 是意见改变的频率,而

$$q = (n_+ - n_-)/2n, \quad n = n_+ + n_- \quad (3.8.5.4)$$

为了定量地求解方程(3.8.5.2),假定社会集团足够的大,以致可把 q 看作连续参数。为将(3.8.5.2)式变成这种连续参数的方程,令

$$\begin{aligned} W_{+-}(q) &\equiv n_+ p_{+-}[n_+, n_-] = n \left(\frac{1}{2} + q\right) p_{+-}(q) \\ W_{-+}(q) &\equiv n_- p_{-+}[n_+, n_-] = n \left(\frac{1}{2} - q\right) p_{-+}(q) \end{aligned} \quad (3.8.5.5)$$

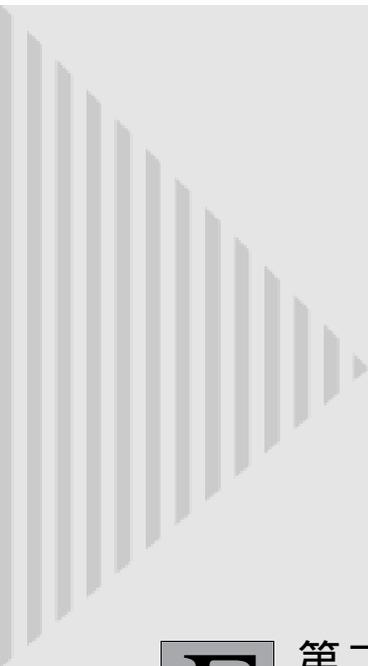
这样就把上式变成了偏微分方程,可用二次型方法来解

$$f_{st}(q) = ck_2^{-1}(q) \exp \left\{ 2 \int_{-\frac{1}{2}}^q \frac{k_1(y)}{k_2(y)} dy \right\} \quad (3.8.5.6)$$

而

$$\begin{aligned} k_1(q) &= \nu \{ \sinh(kq + h) - 2q \cosh(kq + h) \} \\ k_2 &= (\nu/n) \{ \cosh(kq + h) - 2q \sinh(kq + h) \} \end{aligned} \quad (3.8.5.7)$$

是不考虑外参量时所得到的结果。正像伊辛模型所预期的那样,有两种典型的结果。其一相当于高温极限:由于意见的频繁变化,得到了意见的中心分布。其二如果社会风气因子 θ 比较小,或人与人之间的耦合强度增加了,就会出现两组社会“极化现象”的鲜明意见。值得注意的是,至少在定性意义上,可用本模型解释社会系统演化的过程。例如,社会风气参量变为非稳定情况临界值时,会突然形成一股很大的意见潮流,而它的消失就很缓慢,并且谁(+或-)能最终取胜却仍无法确定。显然,相变理论的概念对此颇为有用,如临界慢化、临界涨落等。由于社会过程的随机因素很多,这种统计描述的确不能作出唯一肯定的预言。虽然个别事件可能是极其复杂的,而且还不易用数学描述。但上述模型对于了解合作行为的一般特征和人事方面的特征极有价值。显然,可以对这一模型进一步推广。



F

第二篇 复杂系统论

U ZA XI TONG LUN



第四章 | 系统的复杂性

 管人们希望简洁、明快地描述客观世界和解决实际问题，并将复杂的事物和问题简单化，甚至在方法论上将简单与科学之“美”联系在一起，把简单性作为科学追求的目标之一，但也不得不承认现实世界的复杂性，而复杂的世界是不能简单地归结为几个已知的原理和定理的。现代科技发展的历史表明，要在复杂的世界中求得生存发展，必须对复杂系统进行深入的研究。所以 20 世纪以来科学研究的重心从追求“简单性”逐渐转向“探索复杂性”。

19 世纪末与 20 世纪初可称为经典科学的鼎盛时期，因为 19 世纪末作为带头学科的物理学“经典物理”的大厦已告建成，而 20 世纪的前 20 年则是现代物理学“激动人心”的年代。现代物理学的三大支柱——相对论、量子力学和经典统计物理（平衡态统计）——在这个时候相继创立，并成为现代科学公认的理论基础。20 世纪 40 ~ 50 年代出现了控制论、信息论和一般系统论的新学科群。N. 维纳、贝塔朗菲等一批思想敏锐的学者看到了科学潮流的变化，指出“生命、非线性和自组织”将成为未来科学研究的重点。20 世纪 70 年代耗散结构理论、协同学、突变论、超循环理论、混沌学、分形理论等一大批与传统学科大异情趣的学科先后创立。科学研究重心转向的趋势越来越明显，一大批原来从事物理、数学及其他前沿学科研究的学者涌向了这些新的领域。

20 世纪 80 年代，当人们意识到上述新学科无不与非线性密切相关时，一方面，对以往的科学发展进行了深刻的反思；另一方面，对未来的科学进行了展望，逐渐认识到那种以线性化为基础的科学教科书不仅不是对客观世界的真实描述，而且把人们引向歧途。一些物理学的权威甚至为此向世人道歉，于是在世界范围内掀起了研究非线性的热潮。20 世纪 90 年代以来，人们进一步看到，尽

管非线性是构成复杂世界的核心和关键因素,但也不能把所有的复杂现象都归结为非线性。研究复杂性态和复杂系统的科学潮流开始形成并迅速发展,非线性系统与复杂性态研究成了现代科学的主题之一。

有人预见“复杂科学有可能成为一门广泛增加人类预见力的带头学科”。所谓带头学科,就是可为其他学科提供理论基础和研究方法,并以自己突出的成果成为科学关注的焦点,同时,它将吸引当代最有才华的学者投入到它的研究领域。科学史上,直到20世纪中期物理学就曾经是这样的带头学科,从伽利略、牛顿到麦克斯韦,从爱因斯坦、玻尔到杨振宁、李政道,再到霍金,一批最著名的科学家无不来自这一学科,或与这一学科有着密切联系的领域。20世纪后半叶以来,尽管物理学仍充满生机,发展迅速,但显然已称不上是带头学科,而复杂性和复杂系统的研究成了科学界引人注目的热点和“风眼”。这里有必要提到著名的圣菲研究所。这个研究所成立于1984年,总部设在洛斯阿拉莫斯美国国家实验室附近圣菲小城,是一个以两位诺贝尔物理学奖得主M.盖尔曼(理论物理学,夸克理论的提出者)、安德森(凝聚态物理学家)和一位诺贝尔经济学奖得主K.阿诺(经济学家,信息经济学创始人之一)“牵头”的松散研究集体。据基沃思(G. Keyworth)所言,现有70名研究人员中有大约22%,即15名诺贝尔奖获得者。这些领头人大多在各自领域名声显赫,硕果累累,并且对科学的真谛有着深刻而独到的见解。在他们周围聚集了一批数理基础极好、计算机水平高超又有深厚专业功底的中青年学者。这些人虽然分别来自物理学、生命科学、经济学等不同领域,但却有一个共同的研究方向——“探索复杂性”。圣菲研究所除少数专职人员外,大部分都是访问学者。这里每年要举行各种各样、时间不等的研讨会,似乎再现了当年“哥本哈根”(量子力学)和“冷泉”(分子生物学)的盛况。圣菲的科学思潮在科学界引起了巨大反响,也引起了种种不同的看法,这也许与人们对复杂性的研究刚刚开始,复杂性问题本身又十分复杂有关。然而,不管人们对圣菲研究所的工作如何评价,也不管复杂性研究的方向是否取得了科学界的一致认同,有一

点是有目共睹的,那就是,近几十年来人们对以生命和社会为代表的复杂系统和复杂性态的研究兴趣已越来越浓,一大批原来活跃在原子物理、基础数学领域的一流学者也都纷纷转向这一领域,许多有才华的学生把金融、计算机、通信、医学作为自己的首选方向,一切都预示着该领域新的突破即将到来。

我国学者对复杂性研究的起步也不晚,20世纪90年代以来逐步引起国家高层领导的重视,1999年起国家自然科学基金委员会还专门设立了复杂性科学研究资助基金,其资助的主要领域包括:复杂性科学的理论与方法、物理层次复杂系统、生物层次复杂系统、社会层次复杂系统的研究等。鼓励研究领域包括:复杂系统的演化、涌现、自组织、自适应、自相似的机制研究;金融避险与经济动力学;脑高级功能的复杂性;灾害系统;复杂系统与复杂性研究的典型方法,如演化计算、元胞自动机、多智能体(multi-agents)等,这些都说明复杂性研究将成为我国21世纪科学研究的主攻方向之一。

复杂性态和复杂系统研究涉及面很广,内容极其复杂,本书后面将要专门讨论的混沌、分形等就属于这一范畴,本章将着重对系统中的复杂性态和复杂系统作研究。主要包括以下四个方面:

- (1) 什么是复杂性?复杂性的一般含义是什么?
- (2) 如何对复杂性进行定性定量描述?复杂性的测度是什么?
- (3) 复杂系统以及不同类型系统复杂性的特征。
- (4) 复杂系统研究中的几个基本模型。

4.1 复杂性的概念

什么是复杂性,如何看待复杂系统?这些都是迄今为止学术界争论不休的问题,在一定程度上影响了复杂性研究进展。不同的学科领域对复杂性有不同的理解,与此相关的名称也很多,如:描述复杂性(describe complexity, DC)、代数复杂性(algorithmic complexity, AC)、生物复杂性(biological complexity)、计算复杂性(computational complexity, CC)、发展复杂性(developmental com-

plexity)、生态复杂性 (ecological complexity)、经济复杂性 (economical complexity)、语法复杂性 (grammatical complexity, GC)、柯尔莫哥洛夫复杂性 (Kolmogorov complexity, KC) 此外, 还有逻辑深度 (logical depth, LD)、热力学深度 (thermodynamic depth) 等。

复杂、复杂性等概念在日常生活中为人们广泛使用。人们总是通过比较来判定事情是复杂还是简单, 但却并不清楚复杂事物与简单事物究竟有什么本质上的区别。对同一事物, 有的人觉得复杂, 另一些人可能会觉得简单。比如打开一台电视机, 里面有那么多密密麻麻的电子元件和集成电路, 各种导线和印刷线路板纵横交错, 外行人总感到它的结构非常复杂, 但是对一名懂得其原理构造的专家或熟练的修理人员来说, 就成为一件简单的事, 并且能轻而易举地分析电路, 发现和排除故障。可见, 对复杂性的感受因人而异。那么, 是否存在判定复杂性的客观标准和尺度呢? 其实, 即使对同一个人、同一事物, 有时也会因要解决的问题不同、所涉及的层次不同而时而把它当作简单系统, 时而又把它当作复杂系统。例如, 一个两口之家或三口之家相对于三代同堂的大家族来说是简单的, 但这里没有涉及每个人是由哪些器官、每个器官是由哪些组织、每个组织是由哪些细胞组成, 也没有涉及每个成员分别属于哪些更大的集体、国家、民族等等。因为这种简单只是就家庭成员的个人层次而言的, 如果将其他层次的内容也考虑进去, 即使是最简单的家庭, 也是一个十分复杂的系统。上述情况表明: ①复杂与简单之间没有绝对的界限; ②复杂性的判断和感受因人而异, 涉及各人的知识背景和对该工作(事物)的熟悉程度; ③复杂性是相对一定系统和层次而言的, 离开具体的系统和层次难以判断简单与复杂。

复杂性问题的内禀复杂性和认识复杂性两个方面。

4.1.1 客观(内禀)复杂性

内禀复杂性就是不依赖于认识主体、观察者和工作主体, 仅仅与事物或系统本身的属性、功能、结构以及运动形态有关的复杂性, 因此又称为客观复杂性或本征复杂性。

(1) 多样性:看一个系统是复杂还是简单,往往看它包含的元素、要素、成分、层次的多少,一般包含多的为复杂,少的为简单。但多样性不只是一种数量概念,它至少包含下面三个方面。

1) 多维、高阶、高次是多样性的数学表征:数学上量的差异不仅仅表现在个数上,在数学上它是通过维数、阶数、次数等三个基本方面来表示的。从数学的发展看,传统数学以低维、低阶和低次为主,相对比较简单,而现代数学则越来越向多维、高阶、高次发展,并且逐渐成为其主攻方向,这从一个侧面反映了描述复杂系统的需要。

2) “3”是复杂性的特征数:多与少原是相对的,但在数量上“3”也许是一个“绝对”的界限。也就是说,复杂系统有一个最基本的测度,那就是“3”,凡包含3个,或3个以上的元素、层次、维数、阶数、次数的系统是复杂的,否则就是简单的。这个命题现在还只是一个猜想,难以证明,但可以用一些情况来加以说明。

中外古代的思想家中早有人注意到“3”这个数字的特殊性,把1视为单,2视为对偶,而把3视为“全”,即全面、统一的意思。中国古代的先哲老子有句名言:“道生一,一生二,二生三,三生万物”(老子,第十二章)。为什么不是2,不是4或其他什么数,而偏偏是三生万物?可以认为,这是揭示系统演化的一个带根本性的数量界限。

再看看物理学。物理学史上有许多未解的难题,“三体问题”就是其中最引人注目的一个,三体问题是指引力场中3个质点的运动问题。两百多年来,两体问题早已圆满解决,唯有三体问题(多体问题更是如此)虽然经过许多数学家和物理学家的研究,至今没有解决,也就是说,人们无法根据给定的初始位置和速度来确定以后的位置和速度。

在混沌研究中,李天岩的著名论文“周期3就是混沌”,又是一个“3”!这是从周期运动到混沌运动的根本转折点。在社会事务中,两方对阵或两方谈判是容易对付的,只要加进“第三者(方,国)”问题就变得十分复杂。如此等等,还可以举出更多的例子来说明“3”这个数字的重要性和关键性。但这还仅仅是一种启示和

猜想。就是说,如果要选择一个数作为复杂系统理论的“基本常数”的话,有理由选“3”作为最能体现复杂性特征的“数”。

3) 分层和具有层次结构是复杂系统的基本标志:是否分层是复杂系统与简单系统的另一个本质界限。在自然界中,其实大部分复杂系统都呈现出层级结构。据此可以断言,分层或层次化是事物复杂性增加的一个基本来源。反过来说,事物之所以简单,就在于它层次少,或者没有划分层次。而复杂事物之所以复杂,一个基本原因是它划分为多个层次。

许多研究复杂系统的学者都对层次、层次化和层次结构发表了自己的见解。例如,诺贝尔奖金获得者 A. 西蒙(Herbert A. Simon)1982年在《人工科学》(The Sciences of the Artificial)一书中说:“要构造一门关于复杂系统的比较正确的理论,有一条路线就是求助于层级理论”。“我的中心思想是:复杂性经常采取层级结构的形式,层级结构有一些与系统具体内容无关的共同性质,我将论证说,层级结构是复杂事物建筑师使用的主要结构方式之一”。“层级系统或层级结构是由相互联系的子系统组成的系统,每个子系统在结构上又是层级式的,直到我们达到某个基本子系统的最低层次”。从词源上说,“层级制”(hierarchy)这词是指权力关系中每个子系统都服从它所属的系统。更准确地说,在一层级制的正式组织中,每一系统由“头儿”和一组从属的子系统组成。每个子系统有一个“头儿”,这位“头儿”又是系统“头儿”的直接下属。在正式组织中,直接向一个头儿报告的下属的数目叫作“控制广度”。类似地,系统广度是指系统可以划分成的子系统的数目。如果在某一层级上广度很大,就说它在这一层级上是“扁”的。

在生物系统与物质系统中,层级结构是非常清晰的,它们和社会层级间的重大区别是前者更多从空间结构上描述,而社会层级主要看谁与谁作用,而不是空间距离。社会中有许多正式组织,如公司、政府、大学,它们有明晰可见的结构。但正式组织并不是唯一的,也不是最普遍的层级结构。西蒙指出“几乎所有的社会都有包括称为家庭的基本单位,家庭组织成子部落。后者组织成更大的群体。如果画一个发号司令的作用图,密集的簇集处(cluster)便

是相当确定的层级结构。”

应该指出,分层或层级结构是系统“内部”的事情,按西蒙的观点分层仅限于可以分解成少量或适量的子系统。但系统内部的分层不等于系统的解体,为区别起见,西蒙使用了“近可分解”一词,认为层次结构具有近可分解性。单元内联系一般比单元之间联系强。其作用是将层级结构的高频动态过程(包括单元的内部结构)与低频动态过程(包括单元间的相互作用)区分开来。近可分解性同时大大简化了层级结构的行为,也简化了复杂系统的描述,使人较易理解系统发育或繁殖所需的信息何以能够在合理的范围内储存起来。

(2) 无序性:无序性是复杂性的第二个基本方面。无序性通常被理解为“杂乱无章”,但无序并非不可认识,它和有序一样包含了极其深刻的含义。可以从随机性和非决定性两方面来认识复杂系统的无序性。

1) 随机性与偶发性:随机性与复杂性的关系是明显的,随机性所面对的多种可能性就是复杂性中多样性的直接表现,但多样性只是随机性的前提和基础,而不是它的要害。随机性的要害是对多种可能性的选择,即在一次试验中出现哪种结果不能确定。这就不可避免地要涉及实验者与被实验者、观察者与被观察者之间的相互作用,加上许多偶然因素和不可控因素的参与,情况就更为复杂。当然,随机性还只是偶然性的一种表现,除了可以用统计规律描述的随机性之外,还有所谓的“偶发性”。偶发事件的概率通常接近于零,但在特定的环境和条件下它却发生了,这是人们通常难以预料的。在处理复杂事物时,不得不考虑这些偶发的事件,这更增加了事情的复杂性和难度。

2) 非决定性:非决定性(论)和必然的、单一的因果关系相反。并非由某种事先的原因来决定事后的结果,这当然比能唯一决定的情况更复杂。

随机性和非决定性都是系统本身具有的属性,它并不以人们是否去观察试验和怎样观察试验为转移。但无序性并非不可认识,如随机性背后的统计规律就可以通过大量随机试验、统计调查

和统计推断来发现。这些就是概率论与统计学研究的内容。而信息的本质功能就是消除不确定性,消除了对系统的不确定性也就认识了系统。而如何消除认识主体对认识对象(系统)的不确定性,正是信息论、智能理论所要研究的内容,消除行动主体在行动方面的不确定性,则是控制论所要研究的内容。

4.1.2 主观(认识)复杂性

评价一件事情或一个系统是简单还是复杂,可以针对事情本身而言,也可以针对研究者或办事的人而言。前者是客观的,后者是认识上的或主观感受上的。认识复杂性就是人们在描述、测度、认识事物和系统以及解决有关问题时所表现出来的复杂性。

(1) 难度:一般说来,对同一个认识主体或工作者来说,认识和控制内禀复杂性高(大)的事物和系统总是要困难一些,要消耗更多的时间、精力和资源。但对不同的认识主体和工作者来说,复杂与简单的判断依赖于主体的观察、分析、思考能力、知识储备、信息来源以及解决问题的效率、成本(所耗费的时间、资源、精力)。所以,这里应该区分对象(包括事情、系统、问题)的客观难度与主观难度。原则上讲,客观难度直接与对象的内禀复杂度有关,后面将给出测量内禀复杂度的定量尺度。而主观难度则依赖于对事物的描述、计算与控制方法。

(2) 不确定性:不确定性与随机性和非决定性有关,但又有本质不同。非决定性是客观存在,不确定性是主观认识或感受。在谈到不确定性时,人们的问题是“谁”对什么不能确定。这里出现了一个认识主体“谁”的问题,确定与不确定包含了进行预测的意思。所以不确定是发生在主体本身,或主体与客体的关系上(例如,由于信息获取或通信上的原因)。也就是说,一些客观上原本必然的、完全决定了的关系,也可能由于种种主观认识上的原因而不能确定。一个明显的例子是,尽管远处的情况完全确定,但当人们因视力不好而不能看清远处的景色,因听力不好而不能听清远处的声音时,仍然不能确定远处事物处在何种状态。反之,根据随机性背后的统计规律,却可能在一定条件下确定非决定论产生的混沌行为,甚至可以用完全确定的数据或方程来加以描述。

不确定性与系统的复杂性有什么关系,这一关系主要通过系统内部和外部间关系的复杂性表现出来。具体地说,就是反映在认识和信息传输的关系上,这种关系说到底是一种选择关系。因为只有有了不确定性才需要进行选择,而信息是选择的依据和基础。

(3) 简单性原则:谈到认识的复杂性自然要涉及对复杂系统的理解和描述,在描述复杂系统时,科学中有一个简单性而不是简单化原则。

大家知道,和世界的复杂性相比,即使最复杂的人脑也是相对简单的,要用“相对简单的头脑”去理解和把握无限复杂的世界,唯一的办法就是根据问题的性质和对象的特点对事物进行简化,忽略次要的因素和关系,抓住主要的方面和联系,然后建构出一个现实世界的“模型”。这就是通常所说的“简化”与“建模”。对问题进行“化简”是件十分复杂而艰难的事情,它不仅需要深刻了解对象的结构特征和行为规律,而且需具备许多特别的方法和技巧。此外,有时灵感和机遇也是不可或缺的。寻找和获得这些方法与技巧本身就是科学研究的一个重要部分,同样需要付出艰巨的智力劳动。其实,很早以来人们就对简化问题给予了高度重视,例如,历史上著名的“奥卡姆剃刀”就是简单性原则的一种古老表示,指的是一种逻辑上的“经济原则”或“极度节俭法则”,即“没有必要不应当增加实体”。虽然奥卡姆这位14世纪名声显赫的英国经院哲学家在科学上并没有什么建树,但以他命名的“剃刀”原则却在现代科学中频繁为人们引用。现在看来这一“剃刀”未必十分锋利,但却成了科学研究的一个基本原则。

简化就是去粗取精,将系统从周围的环境中“剥离”出来,寻找其本质的过程。但抓住了本质事情并没有结束,作为科学研究的一个重要环节,有必要用简洁语言对所研究内容加以描述和表达,以便认识事物的本质,了解问题的核心和关键。不仅如此,“简化”还赋予科学以“美”的含义:“简洁就是美,对称就是美,和谐就是美”,这正是从牛顿、笛卡尔,到爱因斯坦、狄拉克、吉布斯等大师们终生追求的。但是,简化的世界毕竟只存在于人们的头脑之中,它是复杂的真实世界在观念中的“对应物”,两者是不能混淆的。20

世纪科学给人们最大的启示或“教训”就是,真实的世界是复杂的,也是美的,这种现实的美更值得人们去探索 and 追求。

西蒙在谈到复杂性的描述时指出:“系统有多复杂或多简单,关键取决于我们描述它的方式。世界上的多数复杂结构有大量的冗余成分,我们可以利用这一冗余性来简化其描述。但是,要想利用它,要想实现简化,我们必须找到正确的表现方式”;“用过程描述来替代状态描述这一思想在现代科学的发展中起着重要作用。用微分方程或差分方程系统的形式表达动态定律,在许多情况下提供了对复杂事物进行简单描述的线索”。

他还认为:“在科学和工程中,研究系统之所以越来越受到欢迎,与其说是适应了处理复杂性,不如说是适应了对复杂性进行分析和综合的需要。要使‘系统热’不仅仅风靡一时而已,就必须让需要来孕育发明”。

4.2 复杂性的测度

以上对复杂性作了定性分析,在本节中将对复杂性作定量分析。给复杂性一个什么样的定量测度是复杂系统研究的基础,也是复杂性理论的基本问题之一。它的实质就是要对系统复杂的程度进行定量描述和计算。下面先提出一个一般想法,即用刻画复杂系统的方程或模型的维数、阶数和次数多少来表征复杂度,然后再介绍几个常用的复杂性测度。

4.2.1 数学结构的复杂度

某种程度上系统的复杂性可以数学方程或模型来表征,一个复杂系统在数学上需要用高维、高次、高阶来描述,就是说,可以用维数、阶数和次数来定量描述数学结构的复杂程度。这种依赖于这3个数的数学结构复杂度称为数学复杂度。

(1) 系统状态空间的维数:前面提到,维数的原始含义是独立运动方向的个数。显然,系统越复杂,它所具有的独立方面也越多,描述它的状态空间的维数也越高。通常用状态空间的方法描述系统的行为,状态空间中的每个点都代表系统的一种可能状态,系统状态的变化则由状态空间中的轨迹来表示。如果轨迹封闭则

表示系统作周期性运动,否则就是非周期运动,也就是永不回归的“游荡”,通常把这样的点称为游荡点,称它们的集合为游荡集。与此相反,在周期轨道上的点的集合为非游荡集,如此等等,这就是系统的几何描述。常用 D 来表示状态空间的维数。

本质上维数是刻画事物形态复杂性的工具。一般情况下,维数越高越复杂。现代数学中经常用到抽象空间的概念,这是从抽象空间和状态空间的概念发展而来的,用来描述那些涉及多个方面、包含多方面(多元)变化因素的复杂问题,即高维问题。高维的复杂性不是简单地“线性增加”的,而是会出现质的变化。比如,可以用一个点来分割一条线,但不能分割一个面;在三度空间中无法做到的事,在四度空间中就轻而易举地做成了。现代物理学把真实空间说成是“四维连续统”(三度空间,加上一度时间),后来有人说是 11 维,以至 44 维,比三维空间要复杂得多。

(2) 系统随参量变化的阶数多少:再看高阶,数学上的“阶”专指求导(微分)的次数,但高阶并不等于简单地多求一次导数,物理学中速度与加速度,就属于两个不同的层次。高的阶数反映了高层次的变化率,是一个变化发展的问题,现在社会科学中的热门课题“可持续发展”就是其中的一个。数学上经常用微分方程来描述事物的变化,为什么偏微分方程(PDE)比常微分方程(ODE)要复杂,解起来困难也多,其原因在于它涉及时间、空间以及不断变化着的边界条件和初始条件(从系统学上讲就是涉及外部的变化),这些都是高维高阶的问题。

系统变元的多少只是一种静态或暂态的描述,动态描述发展的角度要考虑变元随某些参数以及时间和其他控制参量的变化。运动是状态差异对时间的比值,如果取极限就得到瞬时速度和加速度,速度是路程对时间的一阶导数,加速度是路程对时间的二阶导数。推而广之,系统状态的变化可以用它对时间或其他某个参数的导数来描述。这样一来,求导的次数,即阶数就从一个独特的方面描述了系统运动的复杂程度。对描述系统运动的微分方程来说,阶数越高,求解起来越困难,问题越复杂。

应该指出,导数和微分方程描述的是系统的局部行为,要描述

较大范围内的变化,或全局的变化,就要用到积分和积分方程。作为微分的逆运算,微分的阶数越多,积分的次数也越多。积分次数越多问题越复杂。在数学上求解积分方程要比求解微分方程更难,是否“可微”问题相对应的是是否“可积”的问题。可见,除了维数外,求导或积分阶数的大小从另一个方面表现了系统的复杂度。用 K 来表示阶数。

(3) 相互关系次数的多少:关于高次的问题更是涉及到世界上各种关系的本质特征,非线性科学在数学上就是一个高次问题。

事物间相互关系的变化是系统复杂性最重要的方面,相互关系既包括了系统内部各个元素间的相互作用,又包括了系统之间的相互作用。如在与外界交换物质、能量、信息时输出与输入之间的关系,刺激与反应间的关系,系统内部各子系统之间相互的竞争与协同关系等。关系的变化与状态的变化不同,它体现了规律的变化和运动方式。数学模型的变化,是比数量、规模大小变化更高层次的变化。例如,生物体为了适应环境的变化可以改变自己的状态或行为,也可以改变行为的方式或原则,以及身体内部的组织结构,但后一种改变是高层次的改变。因为状态的变化与行为的变化可以服从同一个规律,即所遵循的规律不变,而行为方式与结构的变化,意味着行为的规律或规则就发生了变化。

在相互关系中有一类特殊的关系,那就是与自身的关系,这在控制论中称为自反馈,人们有时把它称为“自缠绕”(自反),即将变化的结果再作用于原因。反馈的数学表现是“自乘”,反复一次,即自乘一次,为二次方;反复多次为自乘多次,为多次方,总的称为非线性相关。关系变化中一个最重要的变化是从线性关系变到非线性关系,即出现非线性相干。可以用线性与非线性来区分简单与复杂,出现非线性相干就意味着出现了复杂性,而且,非线性相干的次数,也就是方程的次数,可以用来描述关系变化的复杂程度。次数越高,关系变化越复杂。系统方程的次数越高,轨迹形态越复杂,它所描述的对象也越复杂。

从以上讨论可知,如果描述复杂系统的数学模型或方程的维数、阶数、次数分别为 D 、 K 、 N ,则定义该系统的数学复杂度为 F ,

$$F = f(D, K, N)$$

这是个一般的表达式。它仅仅表示一个问题或方程的复杂度与它的维数、阶数和次数有关,至于有什么关系,则要具体问题具体分析。例如,在最简单的情况下,可以认为系统演化的复杂度为上述3个数的加和,即 $F = D + K + N$ 。在另一种情况下,则可以是三者的乘积等,但在更多的情况下,则无法找出具体的数学表达式。

例如,一个系统,元素多,关系复杂,需要考虑的方面自然也多,它的状态自然需要用维数较高的状态空间来描述。假如状态空间的维数为15,即 $D = 15$;系统的动态行为状态(如位置、形状、属性)随时间而变化,加速度也随时间而变化,这样,动态方程中就需要包括位置对时间的一阶或二阶导数,即 $K = 2$;此外,状态的变化率有些是线性的,即一次方,有些则是非线性的,其最高次数达4次方。那么,该系统的“加性”数学复杂度为:

$$F_{+} = 15 + 2 + 4 = 21$$

“乘性”复杂度为:

$$F_{\times} = 15 \times 2 \times 3 = 90$$

之所以把数学复杂度分为“加性”、“乘性”或其他不同类型,是为了适应对不同种类复杂系统的描述。

4.2.2 描述复杂度

(1) 语言、符号串与随机性:对系统复杂性进行描述,除了运用一定的符号或语言外,还要考虑适当的方法或语法。描述系统复杂性实质上就是把系统的内禀复杂性用某种语言或符号方式表达出来。显然,系统越复杂,描述的方法就要越高级,使用的符号就越多,符号串也越长。正如讲故事,只要不讲废话,故事越复杂就越费口舌,讲的话也越多。如果一个故事需要讲1000句话才能讲清,另一个只需讲10句话就清楚了,这就意味着前一个比后一个复杂100倍。所以,通常可以用语言的长短或符号串的长短来描述事情的复杂程度。

当然,单纯只看符号串的长度是不行的,要对描述复杂性进行

测量,还必须保证符号串不重复,即不讲废话。著名物理学家 M. 盖尔曼在他的新著《夸克与美洲豹》中讲了一个故事:教师要求学生写一篇 300 字的作文,懒惰但聪明的学生写道:“昨天晚上邻居家的厨房着火了,我把头伸出窗外,大喊:起火了!起火了!起火了……”。当重复写了一串“起火了”之后,他的 300 字作文就大功告成了。从这个例子可以看出,如果符号串中出现重复,那么事情的复杂性并不因此而增加。因此,描述复杂度时,只应该计算那种不重复的符号串的长度,研究不重复符号串的长度,这就是“最短符号串(信息)问题”。

最短符号串问题是一个十分复杂的问题,其中包括最短符号串是否存在这一问题。如果存在的话,如何找到它呢?如果考虑到哥德尔不完备性定理,事情就更复杂了,因为人们甚至无法证明最短符号串的存在。

用不重复符号串来描述复杂性时还涉及另一个重要问题,即与随机性的关系。虽然前面已经指出,随机性从一个方面表现了复杂性,但毕竟只是一个方面,而不是复杂性的全部,所以不能简单地用随机系列的长短来代替不重复符号串的长度。因为随机的实质是每次随机试验(如投币)之前都不能准确地预知其结果。数学上可以证明任何随机序列原则都可以用投硬币的方式得到。因此,只要投币无限制地进行下去,随机序列就可以无限延伸,并且每个序列都不相同,说明掷骰子这件事在微观上是无限复杂的。但从宏观上考虑投币序列却十分简单,因为每次投币只有两种可能性,并且出现的概率相等。物理学中的随机性最强的是白噪声,还可以简单地用连续、平直的功率谱曲线来描述。这说明真正复杂的是介于完全随机与完全不随机之间(通常说的必然发生或必然不发生)的情况。对此,可以用各种概率分布来描述,并且将它大体分为平稳随机序列、似平稳随机序列和非平稳(快变或突变)随机序列等等。

(2) 柯尔莫哥诺夫复杂性 20 世纪 60 年代中期有 3 个人几乎同时独立提出了相同的描述复杂性方法。他们是柯尔莫哥诺夫(A. H. Kolmogorov)、柴廷(G. J. Chaitin)和索洛莫诺夫(R. So-

lomonoff)。现在许多文献中都称为柯尔莫哥诺夫复杂性,它的定义如下:

设给定的符号串为 X ,将产生 X 的程序记作 P ,对一个计算机来说, P 是输入, X 是输出,关于一个符号串 X 的柯尔莫哥诺夫复杂性就是产生 X 的最短程序 P 的长度。它反映了对符号串 X 的最经济的描述所需的符号个数。

如果将产生符号串的计算机记作 T ,则上述定义可写为:

$$K_T(X) = \min\{P \mid X \mid P\}$$

为产生 X 的程序,如果这样的 P 不存在,则令 $K_T(X) = \infty$ 。

显然,为了“客观地”描述符号串 X 的复杂性,应该保证这种复杂性是来自符号串 X ,而不是来自于计算机 T 。利用图灵机的概念证明这种不来自于计算机的复杂性描述是存在的。

据此,可以先取定一个通用图灵机 U ,将 $K_U(X)$ 简记为 $K(X)$,这时就可以称 $K(X)$ 是符号串 X 的柯尔莫哥诺夫复杂性。

描述复杂性理论中的证明是非构造性的,因为是通过证明其逆命题与已知的 $K(X)$ 是 X 的最短程序 P 之长小于 K ,得出矛盾来反证其存在,而不给出构造方法。

一般来说 $K(X)$ 有如下性质:

- 1) 作为 X 的函数, $K(X)$ 是不可计算的。
- 2) 长为 N 的串中至少有一串的描述复杂度等于 N 。显然,此类串中最复杂的串是“随机串”。

1974 年柴廷给出了一个著名的定理:“对任何相容的公理化体系 T ,都存在一个仅仅依赖于 T 的常数 $C_T > 0$,使得 $K(X) > C_T$ 。这样的命题在 T 内不可证明。”

不难看出,柴廷定理实际上是对哥德尔不完全性定理的一个改进,给出了一个更具体的不可证明命题,并从信息角度阐明了公理方法的局限性。这也许可以看作是描述复杂性研究的一个重大的副产品。

运用同样的方法可对复杂性的下界作如下的估计:

考虑语言 $L = \{x \in X \mid x \text{ 为 } 0,1 \text{ 串}\}$, C 为异于 $0,1$ 的字符在

多带图灵机上的识别问题。用 $T(n)$ 和 $S(n)$ 分别表示时间、空间复杂度,其中 n 是输入的长度。

可证有如下时空转换关系:对任何一个识别 L 的多带图灵机,都存在常数 $C > 0$ 。当 n 充分大时,有 $T(n)S(n) > Cn^2$ 。

可以证明上述结果是不可改进的,即对通常的 $S(n)$ 都可构造一台在 $C'n^2/S(n)$ 的时间内识别 L 的机器。

这些表明,描述复杂性是研究某些性质不可证明的有力工具。

4.2.3 计算复杂度

计算复杂度和描述复杂度都是理论计算机科学的基本内容,它与生命科学、信息科学、系统科学、自组织理论、复杂系统演化理论等都有着密切的关系。由于它给研究动力系统的复杂性态提供了新的工具,目前正受到学术界广泛重视。

计算复杂度(computational complexity theory)所研究的是如何使用数学方法对计算中所需的各种资源的耗费作定量的分析,并研究各类问题之间在计算复杂程度上的相互关系和基本性质,因而也是算法分析的理论基础。计算复杂度总是相对于一定的问题而言的。例如,计算矩阵的乘法,可用矩阵的阶数来量度问题的大小,计算一个图论中的问题,可用顶点数来作为问题大小的量度,一个问题在计算前总要用某种方式进行编码,这个编码的长度就是衡量问题大小的量度。

计算复杂度不仅依赖于问题本身,还依赖于算法。但根据计算复杂度理论中的相似性原理,对于理想的计算模型,复杂度没有本质的区别,各模型可以相互模拟,所耗资源量仅相差一个多项式(这是图灵——丘奇论题的新发展)。在这里所涉及的是按位计算的复杂度,它是具有根本意义的。

此外,还有代数复杂度,它是按完成一个问题的代数次数来计算的。但是,这种复杂度却可以随计算方法的改进而不断减少。而且可以证明,不存在最好的计算方法,因此,代数复杂度视算法的复杂度而异。

计算复杂度的研究开始于20世纪30年代,最初是建立可计算性理论,该理论定义了一项抽象机器,如图灵机、递归函数等计算

模型。20世纪40年代以后提出研究现实可计算性,即研究计算所需资源问题。20世纪70年代提出多带图灵机模型、随机存取机器模型等串行计算模型和向量机等并行计算模型。

计算一类问题,总要耗费一定的资源,资源耗费的多少决定于被计算问题的大小,表征问题大小的函数称为问题对资源需求的复杂度。复杂性理论就是对复杂度增加的阶作分析,并用阶来对计算问题分类,研究各种不同资源耗费之间的关系,对一项基本问题所耗费资源的上下限作出估计等。

(1) 资源:计算中所用的资源包括三种。

1) 并行时间与巡回并行时间:并行时间指并行计算所需的步数,如向量机执行指令的总条数。对于串行模型,可定义“巡回”资源,它相当于并行时间,对多带图灵机,即为工作带头部改变方向的次数。一般巡回是周相的总数。周相是串行模型工作的一个阶段,在此阶段中,仅记录而不读出信息。

2) 空间:一个复杂的计算往往划分多个阶段,每个阶段中间都会出现一些中间结果,在计算中随时可能调用这些中间结果,所以要有相应的信息储存设备。“空间”就是作为备用的最大中间信息存储量(纸),对于多带图灵机,为工作带上的方格数,它对应了计算机中的内存(储存空间)。

3) 串行时间:计算中的原始运算总量,在串行中为总步数。在并行中每一步可同时作多个原始运算,然后求各步的原始运算数的总和。

显然,时间的耗费是输入字符串 ω 的函数,记作 $t(\omega)$ 。对于所有长度为 n 的 ω , $t(\omega)$ 中必有一个最大的。它仅与 n 有关,记作 $T(n)$ 为最坏情况复杂度。类似的有平均情况复杂度。

(2) 计算的类型:这里只考虑判定问题或是非问题。机器状态转移和接受输入的方式称为计算的类型。最简单的计算类型为确定型,它只依赖于时间和输入,每一步都有唯一的确定状态,如果机器最后进入一个接受状态,即认为它接受了输入。

如果某一时刻可有若干种选择,进入若干不同状态,新状态又有若干不同的选择,就像树一样。若规定只要有一条路从树根通

向顶点,就认为机器接受了输入字符串。这就是非确定型的。这时,就用“树高”(对应层次的多少)作为非确定计算所需的时间。

对于随机计算,可定义多种概率算法,如每到树的分叉都由扔硬币决定去向。如用此法,碰到一个接受状态的概率大于 $1/2$ 就接受输入字符 ω 为弱定义,若此概率大于等于 $1/2$,就称为强定义。

(3) 上界和下界:计算同一类问题,算法有好坏之别。例如,确定一个具有 n 个顶点的无向图中有没有回路。以前最好的算法所需的工作空间 $S(n) = O(\log^2 n)$,现在发现只需 $O(\log n)$ 就够了。还可证明任何算法都至少需要正比于 $\log n$ 的工作空间,用 $\Omega(\log n)$ 表示,这说明 $\Omega(\log n)$ 是上述复杂性的一个下界。

又如两个 n 位二进制整数的乘法,在一个适当的模型中,原来的总运算量(时间)为 $O(n^2)$,改进算法后为 $O(n^{1.5})$,现在最好的只需 $O(n \cdot \log n \cdot \log \log n)$ 。如进一步采取存储修改,则只需 $O(n)$ 。

(4) 相似性原理:由于通常计算所需资源依赖于模型,从而没有一个统一的客观依据,相似性原理指出:“一个问题的内在的并行时间、空间和串行时间的复杂性在所有理想的计算模型中没有本质差异”,即各种模型可以相互模拟,所需资源差不超过一个多项式的范围(这是丘奇——图灵论题对复杂性理论的新发展)。

(5) 代数复杂性:相似性原理保证的是按“位”运算的总资源不变,代数复杂性则研究一个代数系统中(如实数域中)从给定量出发去计算某些函数所需的代数运算(加、减),代数判断(如大于、小于)的次数(时间),所需中间变元的个数(空间),计算深度(并行时间)等。

但由于在实际运算中,既不能给出一个无限长的实数,又不能在规定时间内完成两实数的乘法,真正的算术运算都是通过近似小数的按位运算得出的,所以按位的复杂性更具基本意义。

例如,两个 n 阶矩阵相乘要做 n^3 次方数乘法。V. 斯特拉森找到了一个算法,只需 $O(n^{2.807})$ 次乘法,以后又被人改进为 $O(n^{2.780})$ 、 $O(n^{2.779})$ 、 $O(n^{2.548})$ 、 $O(n^{2.522})$,1981年12月改进为 $O(n^{2.495364})$ 。

D. 科普尔史密斯和 S. 维诺格拉特还证明:最好的算法不存在,即上界可以永远改进下去。

4.2.4 兰帕尔——齐夫(A. Lempel, J. Ziv)复杂度

前面讲到柯尔莫哥诺夫复杂性,虽说它在逻辑上是完备的,但必须通过图灵机的模型来进行计算。而图灵机是一个用来定义可计算函数的“抽象计算模型”,无法进行直接的计算。实际上即使是对相对简单的“线性移位寄存器序列”,线性复杂性的计算也相当困难。为此,1976年兰帕尔和齐夫提出了一种相对容易的复杂度计算方法,人们有时就把它称为兰帕尔——齐夫复杂度。下面介绍这种复杂度的计算。

为了使计算成为可能,这里用两种简单的操作来代替柯尔莫哥诺夫复杂度计算中的图灵机,并将所需某种操作的次数作为序列复杂性的量度。第一种操作是复制,或“拷贝”;第二种操作是生成,或“插入”。例如,有一个离散的时间序列 (X_1, X_2, \dots, X_n) ,把这些值取一个平均值 m ,然后把序列中大于、等于 m 的取值1,小于 m 的取零,这样就得到一个(01)序列。这样做似乎是硬性地改变了序列的性质,其实是包含了统计物理学中的“粗粒化”处理。在这样的(01)时间序列中的一串字符 $S(S_1, S_2, \dots, S_n)$ 后再加一个或一串字符称为 Q ,看 Q 是否属于 SQ_v (SQ_v 是 SQ 字符串减去最后的一个字符)。出现的字句如果已经有过,那么,这个字符称为“复制”,如果没有出现过,则称为“插入”,“插入”时用一个“·”把前后字符分开。下一步是把“·”前面所有的字符看作是 S 再重复上述操作。

例如序列(0010)的兰帕尔——齐夫复杂度 $C(X)$ 可由下面的步骤取得:

- 1) 第一个字符永远是插入 $0 \cdot$;
- 2) $S = 0, Q = 0, SQ = 00, SQ_v = 0, Q$ 属于 $SQ_v, 0 \cdot 0$;
- 3) $S = 0, Q = 01, SQ = 001, SQ_v = 00, Q$ 不属于 $SQ_v, 0 \cdot 01$;
- 4) $S = 001, Q = 0, SQ = 0010, SQ_v = 001, Q$ 不属于 $SQ_v, 0 \cdot 01 \cdot 0$ 。

这时它的兰帕尔——齐夫复杂性 $C(4) = 3$ 。

不难看出,符号序列(0000...)或(1111...)是最简单的,运用上述方法计算, $C(n) = 2$,符号序列(010101...)的复杂度稍微大一些,计算得到 $C(n) = 3$ 。

这两种情况都比较容易理解,前者是一个恒定不变的符号序列,用两个符号就可以完全刻画;后者是一个周期变化的符号串,用3个符号就描述了,对于较复杂的情况可用“·”来把字符串分成段,段的数目实际上就定义为复杂度 $C(n)$ 。

据文献[14]的研究,几乎所有的(0,1)序列的 $C(n)$ 都趋向一个定值,即:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C(n) = b(n) = \frac{n}{\log n}$$

所以, $b(n)$ 是随机序列的渐近行为。可以用它来使 $C(n)$ 归一化,成为相对复杂度:

$$C(n) = \frac{C(n)}{b(n)}$$

用这种函数来表达时间序列的复杂变化,可以看出完全随机的序列 $C(n)$ 趋于1,而其他规律的和周期运动趋于0。

将对分形的分析可知,在非线性动力学中,时间序列的分维代表了这个动力系统的有关自由度在起作用。根据文献[14],当(0,1)序列的字符出现概率为0.5时, $C(n)$ 趋于 $hb(n)$,

$$h = - [p \log p + (1 - p) \log(1 - p)]$$

是一个熵函数,所以可以把测定一个时间序列的复杂度看成是确定这个序列所需的信息量。

4.2.5 纵向复杂度与横向复杂度

下面从纵向和横向两个维度来研究复杂性和复杂度。

(1) 纵向复杂度:从系统演化的角度研究系统的不同演化阶段复杂性的变化称为纵向复杂度。其基本观点认为,系统复杂度是随着系统的演化而变化的。这对认识系统的演化规律有重要意义。

谈到纵向复杂度必须提到美国圣菲研究所的工作,他们认为,系统的复杂度随着对外界的不断适应而增加。为此,他们特别关

注“复杂适应系统”(CAS),并且取得了许多世界公认的成果,如提出了著名的 ECHO 模型,开发了能供大家共同使用的计算机平台等。需要指出的是,适应的过程的确会对系统的复杂度发生重大影响,但这种影响并不是单方面地使系统的复杂度增加。在另一些情况下,特别是在生命系统和社会系统中,由于有智能介入和追求效率,往往会出现复杂度减少的情况。这只要将现代人们的生活方式与古代的作一些比较就可以发现。尽管这种减少是在系统高度发达的情况下才可能出现,但它同样也是系统进化的一种表现。

(2) 横向复杂度:除了纵向比较外,还可以进行横向比较,即对不同种类的系统的复杂程度和复杂性质进行比较。例如,物理系统、生物系统、社会系统、符号系统是本质上不相同的系统,它们复杂性的含义也有本质不同,因此,要找到一种对所有系统都适应的复杂性量度是很困难的。以社会系统为例,它不仅包含了物理系统和生命系统的复杂性,而且有自己独特的复杂性。如社会是由具有意识、目的、自我控制能力和主动性的人所组成的。社会系统的复杂性在某种意义上可以认为是来源于社会结构中的“自反性”,在人与人、人自身以及人与自然的关系中出现了一个个反馈环路。这时已经没有绝对的因和果,它们构成了因果环,从而引出了许多新的特性。如社会系统中的政治、文化集中地体现了社会在空间与时间上的“自反性”,这正是其他系统所没有的。显然,这不可能用其他系统的复杂性测度来衡量的。

基于以上原因,复杂性测度探索的重点应该放在不同种类系统所具有的特殊复杂性上,而不必硬要追求统一的复杂性测度。这个意义上可以说“不同种类系统的复杂性原则上是不可比的”。即不能简单地断定社会系统一定比生命系统复杂,生命系统一定比物理系统复杂,世界上最简单的系统是夸克。

4.2.6 不确定性的测度

第一节定性地分析了复杂性与不确定性(uncertainty)的关系,作为复杂性的一个基本方面,复杂度在一定程度上可以用不确定性的测度来表示。对不确定性的定量测度的研究最早可以追溯到

1872年波尔茨曼对热力学熵的统计解释。20世纪40年代出于通信技术发展的要求,有必要给通信中消除不确定性的一个定量的测度。美国数学家申农首先引进了以他的名字命名的申农熵(Shannon entropy),这就是著名的信息熵概念。20世纪50年代,为解决遍历理论中的经典问题,引进了柯尔莫哥诺夫熵。20世纪60年代,为了研究拓扑动力学,产生了拓扑熵,直到现在人们对熵的兴趣有增无减,从一个方面反映了对复杂系统及其不确定性定量测度的需求。

关于熵的文献很多,下面主要根据密歇根大学李天岩1987年发表于《数学进展》上的“熵”一文,对几种典型的熵作简单介绍。

(1) 申农熵(Shannon entropy):申农熵是1948年由申农(C. E. Shannon)引进的。

设样本空间 x 有 n 个基本事件,其基本事件 ω_i 的概率为 P_i , $i = 1, 2, \dots, n$,记作 $(X, P_1 \dots P_n)$,有基本关系 $\sum_{i=1}^n P_i = 1$, $P_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

定义 $H(P_1 \dots P_n)$ 为不确定度,用以表示上述样本空间的不确定度,若要它精确反映试验结果的不确定度,需满足以下3个条件:

1) 对固定的 n 来说, H 是 $(P_1 \dots P_n)$ 的连续函数;

2) 若 $P_i = \frac{1}{n}, i = 1, \dots, n$,则对应的 $H\left(\frac{1}{n} \dots \frac{1}{n}\right)$ 是 n 的单调递增函数;

3) 若某一试验分解成多个相继的试验,则原先的 H 值应为相应的各个 H 值之加权和,则函数有如下形式 $H(P_1 \dots P_n) = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$,称为样本空间 $(X, P_1 \dots P_n)$ 的熵。其中 K 为依赖于单位选取和对数“底”的正常数,虽然它只相当于对数的“换底常数”,如将以2为底换为以10为底时, $K = 0.301029995$,但在信息与智能理论中却十分重要。如对数以2为底, K 取1时,信息量的单位为比特,这是现代通信技术中应用最多最广的信息量单位。

可证明 $H\left(\frac{1}{n} \dots \frac{1}{n}\right) = \log n = \max\{H(P_1 \dots P_n) \mid P_i \geq 0\}$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \}$$

申农熵的引入使通信技术从此有了定量的基础,申农熵可以推广到所有的随机现象,给随机现象的不确定性一个定量测度,它表明在各种可能结果都可能出现的情况下(等概率)不确定性最大,人们对它也所知最少,即最无知。这就意味着任何对这种状态的偏离都减少了不确定性,从而增加了知识。因此,上述理论基本上是讨论知识量的出发点。

(2) 柯尔莫哥诺夫熵(Kolmogorov entropy):柯尔莫哥诺夫熵又称为测度熵,简称K熵,是柯尔莫哥诺夫(Kolmogorov)于1958年给出的。1959年他的学生J. G. Sinai作了改进,所以现在介绍的与Kolmogorov的原始定义稍有不同。

历史上引进K熵概念主要是为了研究概率空间保测变换之间共轭关系的不变量。由于共轭的保测变换具有同样的遍历性质,如果能找到关于共轭保测变换的不变量,就能从本质上刻画不同保测变换的特征,而K熵就是一个重要的不变量。

所谓共轭保测变换的“不变量(invariance)”是指这样一个“数量”,当两个保测变换共轭,则该数量必定是一样的。否则这两个保测变换就不共轭。用数学的语言来说就是:

设 (X_1, Σ_1, μ_1) 和 (X_2, Σ_2, μ_2) 是两个概率空间, $T_1: X_1 \rightarrow X_1$ 和 $T_2: X_2 \rightarrow X_2$ 为保测变换。 T_1 和 T_2 共轭(conjugate)是指存在一个保测同构 $\Phi: (X_2, \Sigma_2, \mu_2) \rightarrow (X_1, \Sigma_1, \mu_1)$,使得 $\Phi \cdot T_2^{-1} = T_1^{-1} \cdot \Phi$ 。

下面给出K熵(测度熵)的定义:

设 (X, Σ, μ) 为一概率空间, $f: X \rightarrow X$ 为一保测变换, $\bar{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ 为 X 的有限划分,则 f 关于 \bar{A} 的K熵定义为:

$$h_\mu(f, \bar{A}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H \left(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^i(\bar{A}) \right),$$

其中 $h_\mu(f) = \sup(f \cdot \bar{A})$, \bar{A} 为 X 的有限划分, H 为申农熵函数,即

$$H(\bar{A}) = - \sum_{i=1}^n \mu(A_i) \log \mu(A_i).$$

应该说,测度熵是一个比较抽象的数学概念,在它的定义中同时还涉及概率空间、保测变换、遍历性、有限划分、加细等专门的数学术语。但透过这些数学外衣,人们发现测度熵对于认识复杂系统动力学上的不确定性是十分有用的。

测度熵所表示的就是在某个保测变换 $f: X \rightarrow X$ 下,概率空间 X 的有限划分 \bar{A} 所具有的“不变量”。根据定义,该不变量与保测变换的某个申农熵函数极限的上界有关。因此,测度熵在一定程度上反映了保测变换不确定性的“大小”,这无疑是对复杂系统复杂程度的一个基本度量。

(3) 拓扑熵(Topological entropy):受测度熵的影响,阿德勒(R. L. Adler)、柯恩海姆(A. G. Honheim)和麦克安德鲁(M. H. Mcandrew)于1965年提出拓扑熵概念。测度熵和拓扑熵都是用来描述确定系统的相空间(可以是不定义测度的拓扑空间)的“平均混合速率”的。与测度熵类似,拓扑熵是拓扑共轭变换的不变量。

与测度熵相比,拓扑熵的概念比较好理解。因为“连续性”是系统状态变化和整体演化的基本性质,如果状态变化具有连续性,它的规律就比较容易把握,例如,可利用微积分方法,而拓扑就是用来刻画系统连续性的。因为拓扑空间的连续映射相当于测度空间的保测变换,但一般的拓扑空间中并没有相似的测度空间中的“测度”,所以需要“有限覆盖”来代替“有限划分”。这些都是对实际测量活动的一种抽象,反映了进行拓扑变换时的某种不变性,从另一角度刻画了系统的复杂性。

为了刻画拓扑空间 X 中子空间的混合或搅乱过程,先在 X 上引入一种“划分”(partition)或“覆盖”(cover),用 $N(A)$ 记作对 X 的 A 划分中子区域的个数。

设 X 有两个划分 $A = \{a_i\}$, $B = \{b_i\}$, 则 A 和 B 的积仍是 X 的一个划分,定义 $C = A \vee B \equiv \{c_i = a_j \cap b_k\}$, 对所有 j 和 k 。对于多对一映射 f ,会出现几个不同区域映射到同一个区域的情况,考虑 f 的逆映射 f^{-1} 不断作用于划分 A 的情况。如果 M 是 X 的一个子空间, $f^{-1}(M)$ 有多个区域,于是划分 $A \vee f^{-1}(A)$ 的区域的个数

$N(A \cup f^{-1}(A))$ 比 $N(A)$ 多许多。区域个数的变化,反映了动力系统非线性程度、复杂程度、不可预测程度的变化,这便是拓扑熵的基本含义。

连续映射 f 关于有限覆盖 \bar{A} 的拓扑熵定义为:

$$h_{\text{top}}(f, \bar{A}) \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^i(\bar{A})) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log N(\bar{A}, f, n)$$

显然,这样定义的拓扑 h 与划分 A 有关,一般取所有划分下的最大 h 值为拓扑熵,即:

$$h(f) = \sup h(f, \bar{A})$$

可以看出,只有划分的区域数 $N(A_n)$ 随 n 指数增长,才能保证 $h(f)$ 不为 0,这就是拓扑熵可以刻画动力学指数不稳定性的奥秘。

可以通过划分的加细(refinement)逼近法得出 h 以具体求出拓扑熵。如果 $N[A(n)] < N[A(n+1)]$,则 $h[f, A(n)] \leq h[f, A(n+1)]$ 。于是 h 的计算公式化为(在紧致 Hausdorff 空间中):

$$h(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} h(f, A(n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log N(\bar{A}, f, n)$$

当熵 h 大于 0 时,则一定存在李-约克意义上的混沌。对于连续映射 f 来说,若周期点都是 $2k$ 型的,则拓扑熵 $h(f) = 0$,但这并不意味着 f 一定不是混沌的。因此,混沌系统 f 的拓扑熵 $h(f) \geq 0$ 。 N 个符号的符号序列空间 $\sum(N)$ 上的位移映射的拓扑熵为 $\ln N$,帐篷映射的拓扑熵为 $\ln 2$ 。

下面从拓扑共轭的角度引进拓扑熵。先定义拓扑共轭。

设 $T: X \rightarrow X$ 和 $S: Y \rightarrow Y$ 分别为紧致拓扑空间 X 和 Y 的连续映射,若存在同胚(homeomorphism) $\varphi: X \rightarrow Y$ 使得 $\varphi \cdot T = S \cdot \varphi$,则称 T 拓扑共轭(topologically conjugate)于 S ,这时, φ 就称为一个共轭。

可以证明拓扑熵是拓扑共轭性的一个不变量,即两个拓扑共轭的连续映射有相同的拓扑熵。所以拓扑熵定量地刻画了不同共轭类的拓扑动力系统(topological dynamical system)的

性质。

连续映射 f 关于有限覆盖 \bar{A} 的拓扑熵定义为：

$$\begin{aligned} h_{\text{top}}(f, \bar{A}) &\equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H(\bigvee_{i=0}^{n-1} f^i(\bar{A})) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log(\bar{A}, f, n) \end{aligned}$$

紧致豪斯道夫(Hausdoff)拓扑空间 X 上的连续映射 f 的拓扑熵为：

$$h_{\text{top}}(f) = \sup\{h_{\text{top}}(f, \bar{A}), \bar{A} \text{ 为 } X \text{ 的有限开覆盖}\}.$$

关于拓扑熵与测度熵的关系,有如下定理：

设 f 为紧致拓扑空间 x 上的连续映射,则

$$h_{\text{top}}(f) = \sup\{h_{\mu}(f), \text{概率测度关于 } f \text{ 遍历}\}.$$

(4) 玻尔兹曼熵 Boltzmann entropy 热力学上的概念最初由 R. 克劳修斯(1822 ~ 1888)引进,后来玻尔兹曼(Boltzmann, 1844 ~ 1906)在他 1866 年发表的关于气体动力系统理论中开创性地给出了另一种形式。

玻尔兹曼熵与 K 熵、拓扑熵、测度熵并不一致,但有如下联系：

因为概率空间 (X, Σ, μ_f) 可看成是无穷样本空间,由 Shannon 熵的启示,可定义该概率空间函数 f 的玻尔兹曼熵(B 熵)：

$$\text{令函数 } \eta(u) = \begin{cases} -u \log u, & u > 0 \\ 0, & u = 0 \end{cases}$$

定义 4.1 设 $f \in D$, 且 $\eta(f) \in L(Z)$

则 B 熵定义为：

$$\begin{aligned} H(f) &= \int_X \eta(f(x)) d\mu \\ &= - \int_X f(x) \log(f(x)) d\mu \end{aligned}$$

根据概率论中的中心极限定理(central limit theorem)在渐近状态下,通常随机变量 T_u 的概率分布(probability distribution)遵守高斯(Gauss)分布,即：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(a \leq T_n \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{u^2}{2}} du,$$

其中 P 为样本空间的概率分布。

这一情况可以和热力学第二定律的熵增(平衡态熵最大)联系起来。从这个角度看,在 $E(T_n) = 0$, $\text{var}(T_n) = 1$ 的条件下, Gauss 分布的确是最大的 B 熵。

这可用以下命题来加以说明。

$$\text{记 } \bar{D} = \{f \in D\} : \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = 0, \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x)dx = 1.$$

$$\text{设 } f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \text{ 则 } f \in D, \text{ 且}$$

$$H(f) = \max\{H(f) : f \in \bar{D}\} = \log \sqrt{2\pi} + \frac{1}{2}, \text{ 类似地记}$$

$$\bar{D} = \left\{f \in D, \int_0^{\infty} xf(x)dx = \frac{1}{\lambda}\right\}, \text{ 有}$$

$$\text{设 } f_0(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \text{ 则 } f_0 \in \bar{D} \text{ 且}$$

$$H(f_0) = \max\{H(f) : f \in \bar{D}\} = 1 - \log \lambda$$

上述两命题可推广: 设 $g \in L$ 给定约束, $\int_x g(x)f(x)dx = \bar{g}$, 则 $H(f)$ 在约束下, 最大值的密度函数应为 $f_0(x) = e^{-rg(x)} / \int_x e^{-rg(x)} dx$, 其中 r 为一常数。同样, 若有两个约束

$$\int_x g_1(x)f(x)dx = \bar{g}_1 \text{ 和 } \int_x g_2(x)f(x)dx = \bar{g}_2$$

则密度函数

$$f_0(x) = \frac{e^{-(r_1 g_1(x) + r_2 g_2(x))}}{\int_x e^{-(r_1 g_1(x) + r_2 g_2(x))} dx}$$

给出了 $H(f)$ 在这两个约束下的最大值 $H(f_0)$, 其中 r_1, r_2 为两常数。

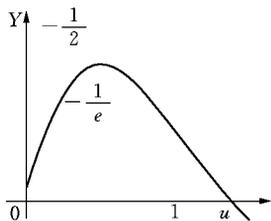


图 4-1 玻尔兹曼熵的变化

更一般地,有如下命题。

设 (X, Σ, μ) 为一测度空间, 非负函数 $(g_1, \dots, g_m \in L(X))$ 及正常数 r_1, \dots, r_m 满足条件

$$\frac{\int_X g_i(x) \prod_{j=1}^m e^{-r_j g_j(x)} d\mu}{\int_X \prod_{j=1}^m e^{-x_j g_j(x)} d\mu} = \bar{g}_i, i = 1, \dots, m,$$

则使 $H(f)$ 在约束 $\int_X g_i(x) f(x) dx = \bar{g}_i, i = 1, \dots, m$ 下最大值的密度函数为

$$f_0(x) = \frac{\prod_{i=1}^m e^{-r_i g_i(x)}}{\int_X \prod_{i=1}^m e^{-r_i g_i(x)} d\mu}.$$

特别是当 $m = 1$ 时,若 $g(x)$ 看成是系统的能量时, $f_0(x) = z^{-1} e^{-r g(x)}$ 恰好就是 Gibbs 典型分布函数,且 $Z = \int_X e^{-r g(x)} d\mu$ 为其分布(分析)函数,而对应最大熵 $H(f_0) = \log Z + r \bar{g}$ 恰好就是众所周知的热力学熵。1981 年罗伯特·肖(R. Shaw)又将动力学熵赋予信息论的解释,用来说明奇怪吸引子上行为的不可预见性。

4.3 复杂系统

4.3.1 一般复杂系统

前面对复杂性进行了一般讨论,从本节开始重点研究系统有哪些复杂性。如前所述,不同系统的复杂性是很不相同的,因此,对系统复杂性的研究要因系统而异。但是,在分别讨论不同系统的复杂性之前,有必要讨论一些与复杂系统有关的共同问题。

(1) 复杂系统的分类:要研究复杂系统,先要对复杂系统进行分类。世界上有各式各样的系统,如物理系统、生物系统、社会系统、符号系统以及各种人造系统,它们不仅在复杂的程度上,而且在复杂性的含义上有着很大的不同。如何对它们进行分类呢?我国学者钱学森等提出了一整套观点。下面按照我们的理解作一简

单介绍,所有的系统可以分为如下几类。

1) 简单系统:简单系统所包含的元素无论是个数还是种类都少,内部关系也相对简单,如两体问题。简单系统的问题实际上是对现实中复杂系统问题的简化,当然,这些简化是有条件的,即只考虑事物内部的两个方面,不考虑次要的第三方面,也不考虑环境对它们的作用和影响。虽然现实生活中并不存在严格意义上的简单系统,但作为实现复杂系统的一种简化模型,简单系统在研究问题、解决问题、分析矛盾性质、分清主要矛盾与次要矛盾、抓住矛盾的主要方面等都有重大的理论意义和价值。这里应该提到毛泽东的论文《矛盾论》,其所以被公认为当代哲学的重大成果之一,就是因为他对简单系统问题作了全面深刻的研究,中国人的确用此分析和解决了不少问题。当然,和任何伟大的著作一样,《矛盾论》也会有其不足和缺陷,但全部否定两点论,认为是简单片面的代表则是错误的。

2) 简单巨系统:包含元素多,但种类少,较少中间层次,内部关系也比较简单,如统计物理中的理想气体。虽然气体分子很多,达到 10^{23} 次方,但只考虑有一种分子,相互距离遥远,作完全弹性碰撞的简单情况,所以可以进行比较简单的统计分析,得出一些理想的速度分布,如麦克斯韦分布、玻尔兹曼分布等。

对简单巨系统的研究构成了现代系统学的主体部分,也集中了当代系统科学的主要成果。前面多次提到的所谓新三论(耗散结构论、协同学、超环境理论、突变论)及后来的确定性混沌、分形理论等都属于它的范畴。按照中国科学院现任院长路甬祥的预言:“21世纪初有可能依靠集合论、协同学、耗散结构论,并结合动力学的确定性描述、概率论的不确定性描述,以及信息论、运筹学和控制论,对这类系统建立定量的,甚至形式化的描述,建立起简单系统的组织理论,乃至系统建构、控制、优化的一般理论”。

笔者正期望着这一预言的实现,并希望用自己的工作对此作些贡献,本书在一定意义上就是这方面努力的结果。

3) 复杂系统:这个分类中所指的复杂系统是相对于简单巨系统和复杂巨系统而言的,具体是指那些包含元素少,但相应的种类多,存在少量中间层次,内部关系复杂的非线性系统。如三体、湍

流、复杂斑图等。

复杂系统仍然是一种对现实系统的模拟,并在作了大量简化后,为研究解决某类特殊问题而提出来的。复杂系统模型对于系统科学、复杂性科学和解决现实问题都有巨大的理论意义和实践价值。

4) 复杂巨系统:包含元素多,种类也多,层次多,并且交叉重叠,内部关系极其复杂,如生态系统、人体系统、脑与神经系统、社会经济系统、政治文化系统、地理与环境系统等。在研究这类系统时必须考虑到物质、精神、社会等各个层次、各个方面的因素和关系,因而描述和归纳极其困难,是对人类智能的严重考验。

复杂巨系统与人们面临的许多重大问题有密切关系,如社会的可持续发展、知识经济、国家发展、企业经营等。这些问题近年来引起了各国领导和科技界的高度重视,同时对复杂巨系统研究也产生了阵阵冲击,取得了一些成果。但是,这离解决复杂巨系统问题还有很大距离,前景不容乐观。正如路甬祥所说:“目前尚无类似协同学那样的理论可以借鉴,也还没有从微观到宏观的规范性处理方法。必须在认识论和方法学上有新的创造和突破,才能建立起复杂巨系统的科学框架。”

5) 开放的复杂超系统 这是笔者提出的一类新的系统。因为在复杂巨系统上面还应有一类更巨大、更复杂以至本质上超过原来系统范畴的东西,暂时把它称为“超”系统。这类系统的基本特征是群体性,如动物种群、全球经济、世界政治形势等。它们如果还能称为系统的话,除包含元素多、种类多、内部关系十分复杂外,与外部环境的关系也非常紧密复杂,以至难以按通常意义将系统与环境彼此分开,其特征已超出现在所讨论的系统。但是,它同时又具有明显的整体性、结构性、层次性和功能性,这就是称其为超系统的原因。

4.3.2 复杂系统的一般特征

在对复杂系统作出分类之后,再来了解复杂系统所共有的特征。

(1) 结构复杂 结构复杂是指从系统内部来看的复杂性,具体体现在构成的多元性和关系的非线性两个方面。

构成的多元性包括四个方面:①系统元素和要素多;②系统内部层次多;③系统内部关系数和关联数多;④系统内的反馈回路、因果回路多。

关联的非线性是指系统内部的复杂程度是与元素,特别是要素间的非线性相干程度有关的,而非线性相干的程度又取决于两个方面:①非线性项前面系数的大小。它反映了和线性项相比,非线性所起作用的大小;②非线性项的次数大小。它反映了不同非线性关系的强度和分布。

(2) 性态复杂:性态复杂是从系统与系统之间的相互关系来看的复杂性,也就是系统复杂性的外部表现。具体表现在三个方面:

1) 属性复杂:系统属性的复杂性通常表现在系统所具有的性质多样性和奇异性上。显然,和仅仅具有单一属性的事物相比,具有多种属性的系统要复杂一些,而具有奇异属性的系统又要比仅仅具有一般属性或平凡属性的系统要复杂一些。例如,有机体比无机物复杂,人又比低等生物复杂,原因就在于前者比后者具有更多、更奇异的属性。但是,从系统学的角度来说,人们主要关心的是作为特征的突变(突现)、临界现象(即临界点上的奇异性)和由系统随机性所带来的不确定性与随机共振。

2) 运动状态复杂:运动状态即行为的复杂表现在以下几个方面:①远离平衡态,是开放系统;②整体变化不可逆,是演化的;③对初始条件敏感,呈现混沌特征;④具有随机性,因而不确定。

湍流(turbulence)与时空混沌性(chaotics)。例如,在平稳的气流中,炊烟会沿直线冉冉升起,只要有一个小小的扰动就会突然卷曲,形成一团剧烈混乱的烟雾,四处飘散,这就是流体力学中的“开流不稳定性”。典型的例子就是贝洛索夫—札巴廷斯基反应(BZ反应),即将硫酸铈 $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ 、丙二酸 $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ 、溴酸钾 KBrO_3 混合,会发现生成物的浓度随时间变化,一会儿呈红色(产生过量的 Ce^{3+} 离子),一会儿呈蓝色(产生过量的 Ce^{4+} 离子),像钟摆那样作规则的时间振荡,这类现象称为化学振动或化学钟。有时也会观察到非周期的过程,这就是化学湍流。如果反应容器相对于反应物扩散

长度较大时,成分的浓度会很不均匀,形成很多漂亮的花纹,如图4-2所示,就是一种被广泛研究的化学混沌现象,它表现了贝洛索夫-札巴廷斯基反应中出现的同心圆和螺旋波向外传播的情况,这种图像在变形虫培养皿和心肌肌肉中也可以看到。这些过程很类似于生物体中的生物振荡行为和生物形态现象。

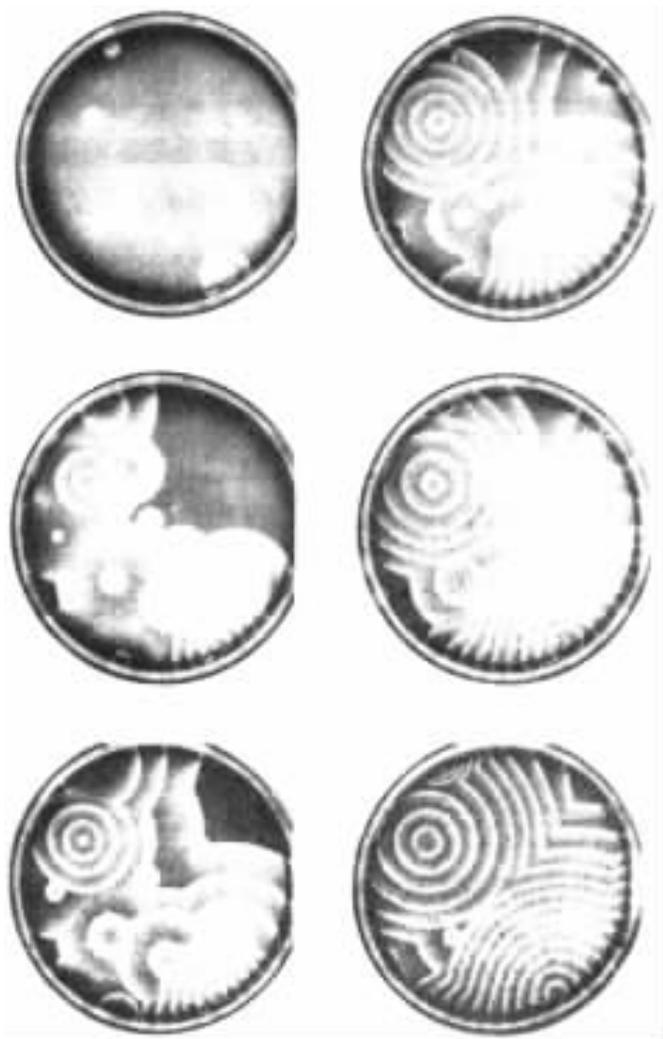


图 4-2 BZ 反应中的螺旋波

不难看出,这些复杂性态对于绝大多数现实的系统都是非常普遍的。对于高级一些的复杂系统,如生命系统、社会系统其复杂性主要表现在自适应、自学习、自稳定、自催化等自主行为。

3) 形状(外形与构形)复杂性:主要表现在分形性(fractals)、孤立波(solitons)、复杂图形(complexity patterns)等方面。这些内容在本书和许多文献中都有较为详细的讨论,这里不再重复。

4.3.3 动力系统的复杂性

动力系统被定义为“状态依时间或某个参数变化的系统”,不难看出,这是一个外延很广的定义,因而被认为是研究系统的基本工具。动力系统依其相空间的维数分为有限维和无限维。以往人们研究的大多是相对简单的有限维中的低维情况,即使这样,也出现混沌、湍流等复杂性,至于无限维的情况就更复杂了。下面介绍几种研究动力系统复杂性的典型方法。

(1) 功率谱分析:功率谱分析的原意是用傅立叶算法和频谱分析仪器,对非随机性的运动进行特征时间尺度和频率结构分析,现在被广泛用于对动力系统时空行为进行分析。

功率谱所表现的是功率按频率的分布。这是由于一个复杂系统的变化往往在多个频率或频段上进行,但每个频率或频段上的功率是不同的,这就有了一个分布。如果功率只分布在某些独立的频率上,对应的就是离散功率谱;否则,如果在所有的频率上都有一定的功率,就是连续功率谱。显然,分布集中比分布分散相对简单,不确定性也小。因此,无论对离散还是连续,相空间的维数是有限的还是无限的系统来说都可以用功率谱来描述。

功率谱包括空间和时间功率谱。它们分别定义为:

1) 空间功率谱:

$$S(k) = \left\langle \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_n(j) e^{2\pi i k j} \right|^2 \right\rangle,$$

其中 \dots 表示对时空的平均。运用计算机,可以看到六种运动模式及其在空间功率谱结构上的典型差异。

2) 时间功率谱:与空间功率谱相对应的是时间功率谱,但后者运用的相对较少。时间功率谱描述单个格点(位置)的时间行为。

取一个时间窗口 $n = t_0 + 1, t_1 + 2, \dots, t_0 + t_1$ 有

$$P(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{1}{t_1} \sum_{n=1}^{t_1} x_{t_0+n}(j) e^{-2\pi i n \omega} \right|^2$$

3) 空间时间功率谱:同时考虑空间和时间上的概率分布,空间时间功率谱的定义如下:

$$P(k, \omega) = \left\langle \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^{t_j} x_n(j) e^{2\pi i(jk - n\omega)} \right|^2 \right\rangle$$

在这3个功率谱中只有空间功率谱用得最多。对于不同的运动模式,其空间功率谱会有很大不同,从而使得复杂系统运动方式的变化可以从空间功率谱的变化中得到生动的反映。

(2) 图案复杂性分析:复杂系统的时空行为相当丰富,单用功率谱来刻画远远不够,因此,往往还要用图案的复杂性来加以描述。如在对CML时空复杂性的研究中,人们提出几个刻画图样复杂性的“量”。尽管它们并不完善,意义也不太清晰,但它们的确能明显地表现出运动图形的某些转变。

为了定量刻画图样的复杂性,还需把原来连续的状态变量 $x_n(i)$ 分立化,并用一个符号集合来表达这些分立的状态。这样就可以把空间图样转化为一个符号图。

设系统在 n 时刻 j 格点(空间位置)上的状态为 $x_n(i)$ 。显然,由于初始边界条件与控制参量等的不同, $x_n(i)$ 可在一定范围内连续变化。例如在 $[x_0, x_k]$ 之间变化。现在对状态离散化,并赋予某个分立态 $\sigma_n(i)$ 以一个符号: $[i = 0, 1, \dots, k]$

$$\begin{aligned} \sigma_n(i) &= 0 && \text{当 } x_n(i) \leq x_0 \text{ 时;} \\ \sigma_n(i) &= 1 && \text{当 } x_0 < x_n(i) \leq x_1 \text{ 时;} \\ \sigma_n(i) &= k && \text{当 } x_{k-1} < x_n(i) \text{ 时。} \end{aligned}$$

这实际上是将状态变化区间 $[x_0, x_k]$ 划分为 k 个小区域,并赋予每个小区间一个相应的符号。

显然,最简单的情况是 $k = 1$,即将变化区间分为两个部分,分别赋予 $0, 1$ 两个符号。通常可设

$$x_0 = x^* = (\sqrt{4a + 1} - 1)/2a$$

为单峰映象周期 i 不动点。如 $x_n(i) \leq x_0$ 时 $\sigma_n(i) = 0$, $x_n(i) > x_0$

有用的。

除了以上两种刻画复杂动力系统时空行为的方式以外,用得较多的还有李亚普诺夫分析、信息量分析等。本书后面将结合混沌运动和智能系统对此作详细讨论。

最后要特别提出的是,尽管已经找到了以上几种刻画时空复杂行为的方法,也引入了相应的量,但这些量还只是粗略地、局部地反映时空复杂行为,离全面、深刻地反映还有很大距离,有待对复杂系统及其行为进行本质的认识。

4.4 两个复杂系统模型

研究复杂系统需要借助于一些模型,下面对非线性科学和复杂性科学中研究复杂系统的一些常用模型作一简要介绍。

一个动态系统的变量可以分为三类:空间变量、时间变量和状态变量。这些变量通常是连续的,但为了使问题简化,可以对它们进行离散化。离散化可以分别进行,也可以同时进行。下面对几种常见的数学模型进行一些比较。

模型类型	空间变量	时间变量	状态变量
偏微分方程 PED	连续	连续	连续
耦合常微分方程 COED	离散	连续	连续
耦合映象格子 CML	离散	离散	连续
元胞自动机 CA	离散	离散	离散

在这四类模型中,最简单的是元胞自动机(CA),其次是耦合映象格子,而最难但也是最接近实际情况的无疑是偏微分方程(PED)。尽管人们对它进行了数百年的研究,但却只能对其极少数几个线性偏微分方程的通解有较好地认识,而对绝大多数偏微分方程可以说基本上还不了解。因此,用偏微分方程描述系统已经超出本书范围,有兴趣的读者可寻找有关专著,这里不再赘述。

4.4.1 元胞自动机模型(CA)

元胞自动机(CA)(cellular automata model, CA),又称格点自动机,是20世纪50年代初数学家冯·诺意曼为研究生命自组织过程提出出来的一种数学模型。当时他试图借助刚刚出现的计算机来进行模拟,但由于那时的计算机功能远远不能满足这种要求,致使CA的运用进展缓慢。直到1984年,年轻的美国理论物理学家S. Wolfram发表他的著名论文后,CA方法才再度引起人们的重视。用CA模型研究时空复杂行为的优点在于它的模拟计算效率高,用计算机定点计算速率往往大大高于浮点计算,因而是一种能运用计算机研究复杂性态十分简单而又实用的方法。特别是20世纪80年代以来,随着计算机技术的高速发展,借助于它研究实际问题已经成为可能,许多学者在应用上也取得长足进展,使之成为研究复杂行为和复杂系统的一种重要方法。

下面介绍元胞自动机模型。与其他描述动力系统的数学工具相比,CA具有如下特点:①时间离散。系统状态变化按某个最小时间间隔的整数倍进行;②空间离散。状态空间被划分为若干大小相等的“格子”,又称为“元胞”;③状态离散。仅仅考虑系统的少数几种可能状态。

这些特点适合于对复杂系统进行大胆而彻底的“粗粒化”。因为以上讨论表明,有很多复杂系统具有如下特征:

(1) 由许多基本单元组成:例如人脑有 $10^{11} \sim 10^{12}$ 个神经元,世界有 5×10^9 人口,激光有 10^{18} 个原子,水在标准状态下 1 cm^3 约有 10^{23} 个分子。由于构成系统的元素多,描述它所需的自由度也多,通常为元素个数 N 的6倍,即自由度 $= 6N - K$ (K 为系统内部的约束数)。

(2) 每个基本单元(或细胞)仅有少数几个状态,但它们的组合却极其复杂。

如粒子的自旋仅有两种,电子只具有正电荷或负电荷,电路中仅有开、关两种状态,围棋仅有黑、白两色等,但它们却构成了千变万化的真实世界。

(3) 在通常情况下,每个单元的状态随时间变化,仅与邻居的状态有关(由邻居状态决定)。

如围棋中规定周围的棋子决定着中间棋子的状态 ;个人行为主要受家庭和单位的影响等。CA 正好反映了这些特点。

通常可以按如下方式在系统状态空间中构造一个元胞自动机 :

(1) 将系统的状态空间分为若干相等的格子 ,格子形状可以是三角、正方、六角等 ,如一维的等分、二维的网格。

(2) 每个元胞仅有 K 种状态 [每个元胞可由符号 a_i (一维) , a_{ij} (二维) a_{ijk} (三维) ,分别表示位置上的状态]。

(3) 规定一个简单的元胞演化规则。如在一维时 , K 为 2 ,即 mod_2 用二进制加法 $0+0=0$, $1+1=0$, $0+1=1$,为演化规则。

有 $a_i^{(t)} = a_{i-1}^{(t-1)} + a_{i+1}^{(t-1)}$,即 i 位置上 t 时刻的状态 ,由左 (a_{i-1}) 和右 (a_{i+1}) 的状态决定。

(4) 规定一种固定的边界 和随机的初始状态。

显然 ,CA 虽然构造简单 ,但点阵的数目却极大 ,如一维 CA 有 K 种状态 ,有 n 个邻居 ,则整个点阵共有 K^n 种状态。二维方格点上 mod_2 时 ,有四个邻居 ,共有 $2^4 = 2^{16} = 65\,535$ 种 ,若 $N = 8$,则有 10^{77} 种。但点阵数目大的问题却能用高速计算机来处理 ,所以并不构成真正的困难 ,而最难、也最关键的却是格点形态的选取与每一步演化规律的提炼 ,即模型的建立。

下面以一维 CA 为例 ,对几种典型演化规律进行一般性讨论。

设一维 CA 具有以下四种演化规则。如果在一条直线上画若干个格子 ,每个格子只能有两种状态 ,分别用白色和黑色表示 ,下面根据不同的规则来看演化的结果 :

规则 1 由左右邻决定 , $0+0 \Rightarrow 0$, $1+1 \Rightarrow 1$, $0+1 \Rightarrow 0$, 3 步后结果为全 0 ,演化结果为一种定常态 ,相当于耗散系统中最简单的吸引子——稳定不动点(图 4-3)。

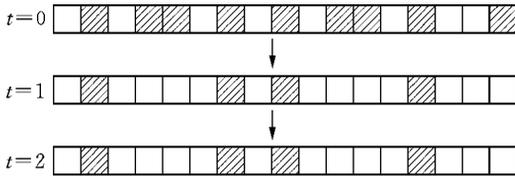


图 4-3 不动点(规则 1 的 CA 演化)

规则 2 由左右邻及自身状态决定 $010 \Rightarrow 1$ 其他 $\Rightarrow 0$ 演化结果为周期的振荡状态[第 2 步以后(吸引子)]相当于稳定的极限环(图 4-4)。

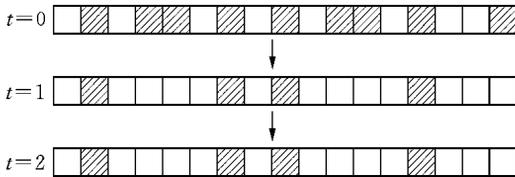


图 4-4 极限环(规则 2 的 CA 演化)

规则 3 由左右邻决定(与规则 1 相似),但 $0 + 0 \Rightarrow 0$ $0 + 1 \Rightarrow 1$ $1 + 1 \Rightarrow 0$, 经过第 1、第 3 步后即出现自相似结构——对应于混沌态(图 4-5)。

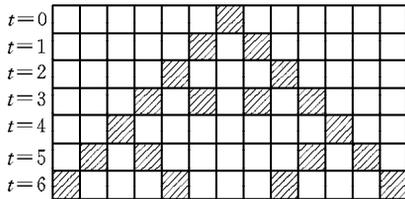


图 4-5 混沌态(规则 3 的 CA 演化)

规则 4 状态由四邻(左右各两个)及自身共同决定,若 5 个数中有 2 个 1 $\Rightarrow 1$ 4 个 1 $\Rightarrow 1$ 其他 $\Rightarrow 0$, 按此规则演化下去,就会出现复杂的图像(图 4-6)。

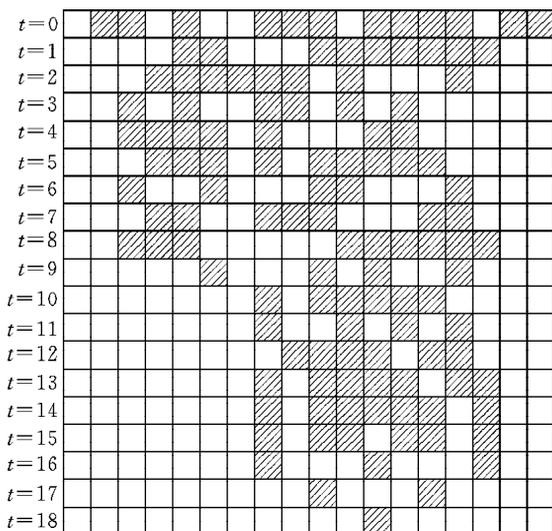


图 4-6 复杂结构(规则 4 的 CA 演化)

以上 4 个规则可以很方便地在计算机上模拟,对于绝大多数初始态会长成葡萄串,最后“死掉”(变为全 0)。但从生到死的步数(寿命)各有不同。而另一些初始状态则会一直活下去,有的还会以一定的波速传播,在一般的耗散系统尚未发现这些现象,它们被称为复杂“图形”。有人认为这是从周期向混沌的转换,是比混沌、分形还要复杂的真正的复杂性态。

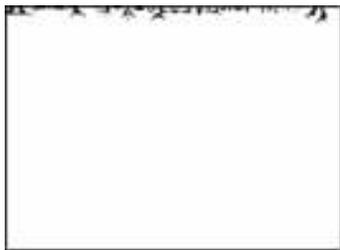
下面是 CA 通过计算机模拟的四类“吸引子”(图 4-7)。

以上讨论是对随机的初始条件进行的,如果初始条件稍有变化(如只改变 $t = 0$ 时一个元胞的状态),情况会如何呢? Wolfram 指出,一维 CA 有 4 类可能情况(微扰对演化结构的影响):

第一类是最简单的平衡态,它对应于相空间中的一个不动点,这是一个空间均匀的状态;

第二类是周期运动与准周期运动,它对应了简单的、稳定的周期结构;

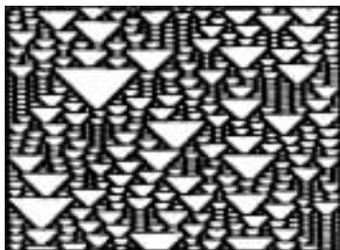
第三类是混沌运动,它的最大特点是局部非稳定和非周期性,一般它的李亚普诺夫指数为正(但最近有人提出了反例);



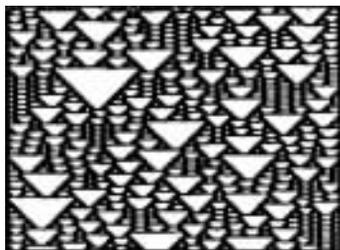
第一类吸引子 法则 4(000100)



第二类吸引子 法则 40(101000)



第三类吸引子 法则 38(011100)



第四类吸引子 法则 52(110100)

图 4-7 不同的吸引子

第四类是比混沌运动更为复杂的运动,他把这种运动形态称为“复杂性态”。这种性态的特点是会产生随时间和空间变化的局部复杂结构,而且这种结构会进行传播。

这就是著名的 Wolfram CA 分类原则,它原则上是适用于一切动力行为。而一维元胞自动机还只是其中最简单的一种,它尚且如此复杂,其他二维、三维以至更高维数的就可想而知了。

对于二维 CA(每一步都对应一平面网格),可看以下例子。

例 1:在 19×19 格点中放 5 个黑子,每个格子下一时刻的状态由四邻决定。演化规则:若四邻中黑子为单数,则下一时刻为黑(1),否则为白(0)(边界条件是边界上不放子,即为空格)。演化结果是出现周期性的复制过程(不过地点不同,见图 4-8),这种情况类似于生物学中的自我复制。

例 2:雪花的图像也可用二维 CA 来描述,不同的是用六角形网格,每个点上仅有冰、水两种状态,初始状态为一个冰晶核(种子)。

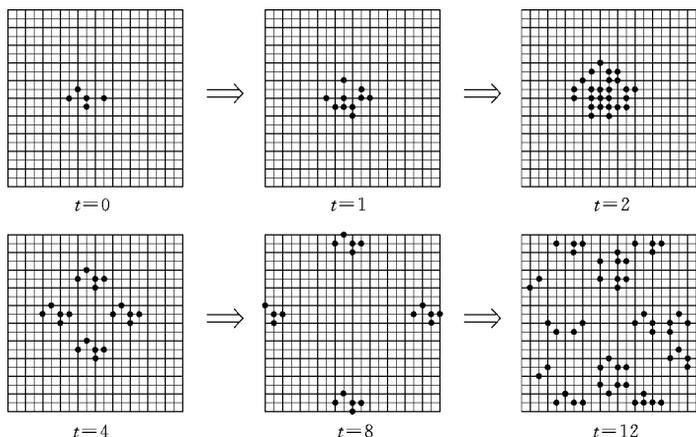
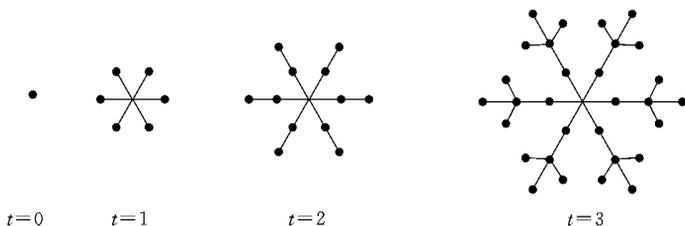


图 4-8 生命系统的遗传与变异

演化规则 若六个邻的和为奇数,则为冰(1),若六个邻的和为偶数,则为水(0)。这种奇、偶的物理机制为 若为奇数,表示元胞周围只有一个冰,温度降到冰点时,细胞解冻放出潜热,可迅速扩散。若为偶数,说明周围冰胞多,潜能放不出来,因而不易冻结,见图 4-9 所示:



元胞自动机模拟的雪花

图 4-9

例 3 :前面提到的 BZ 反应中 ,如果不断加入反应物 ,取出生成物(相当于一个耗散系统) ,会出现浓度随时间变化 ,而且有空间结构的变化 ,如螺旋卷的冰应波。可以用三维 CA($20 \times 20 \times 20$) 作容器 ,浓度分别为 0 , 1 , 2 三档 ,采用适当的反应规则 ,就能在 CA 上把反应波的动态在计算机上显示出来。

从以上讨论可以看出 ,CA 模型虽然简单 ,但却有着广泛的应用 ,能对复杂系统的行为进行很好的模拟。

值得一提的是 ,CA 模型与物理学中著名的格子气模型、统计物理中经常用到的伊辛模型在构造思想上非常相似。人们还试图运用 CA 来求解流体力学中的纳维—斯托克司难题。由于流体属于连续介质 ,可以设想为空间每个点上有一个平均密度、压力、温度、速度等 ,自由度很高 ,如果再考虑流体粒子因碰撞(局部)而在整体上表现的复杂动态(如大型团体操)的情况就更复杂。对于这一问题可以用三角形网格来说明 ,格子长度为 1 ,每个格点上最多有六个粒子 ,质量相同 ,速率为 1 ,指向六个连接方向用 0 , 1 , 2 , 3 , 4 , 5 表示 ;不准两个完全相同的粒子同时占据一个格点 ;发生对撞则改变方向(如转 60°) ,在足够长的时间后求统计平均 ,可以演示圆柱后面涡漩的形成。若在 CA 中加进随机性 ,即让每个格值以一定的几率 ,就会像湍流一样出现相变。如果借助于大型并行计算机强大功能 ,还可将 CA 用于对大脑活动进行模拟。

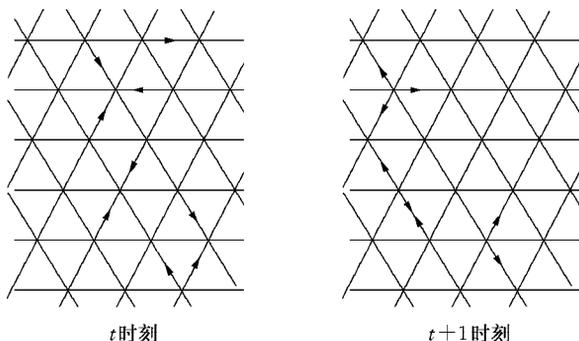


图 4-10 格子气细胞碰撞规则

以上例子表明,用 CA 来研究复杂性态与复杂系统有两个特点:第一,和其他数学工具相比简单而又不失精确;第二,可以方便地运用计算机进行模拟,在计算机技术高速发展的今天,其优越性是不言而喻的。

在对复杂行为的研究中,符号动力系统(方法)也是人们经常用到的,在我国以郝柏林为代表的一批学者已经在这方面取得了许多成果。符号动力系统方法与 CA 也有着深刻的联系。为了有效地刻画元胞自动机的复杂性态,1984 年 Wolfram 在《Computation theory of cellular automate》一文中提出:可以在乔姆斯基创立的形式语言和自动机之间建立如下对应关系:

零级	普适语言	图灵机
一级	上下文敏感依赖语言	线性有线自动机
二级	上下文无关语言	下推自动机
三级	正规语言	有限自动机

在这四种语言中第三级的正规语言是最简单的。他证明了一个元胞自动机在任何有限时刻所表现状态都属于正规语言。对于不同类型的正规语言可以用所对应的有限自动机的结点数来刻画,这个复杂性是不随时间减少的。

Wolfram 的工作使人们对复杂性的研究进入了一个新的阶

段,受他论文的启发,人们对复杂行为测度方法又作了许多探讨,针对不同类型的系统和不同的情况提出了另外一些刻画复杂性的方法。

1976年 A. Lempel 和 J. Ziv 在《On the complexity of finite sequences》一文中提出对实验所测得的一组数据的复杂性量度,即根据元胞数目的增加速率来定义一个符号序列的复杂性量度。

1987年 F. Kasper 和 H. G. Schuster 在《Easily calcaed mesure for the camplexity of spationtemporne patterns》通过了一系列例子证明了 A. Lempel 和 J. Ziv 量度的合适性。

1990年 D. Allsandro 和 A. Boliti 又指出了 A. Lempel 和 J. Ziv 在描述奇异性上的缺陷。他们进一步建议,在前面度量的基础上,定义描述复杂性的第二层次的量,用来刻画序列中不可约禁字符的增加率。

此外,1988年 P. Grassbargtv 在《Toward A quanti tative theory of self-generated Complexity》中用符号动力学的方法对自生长的复杂性又定义了一种量度。它和申农熵密切相关,并且强调“图形”(pattern)的复杂程度。

4.4.2 耦合映象格子(CML)

CA 虽然有其优点,但它对状态变量进行离散化(场变量)相对于宏观变量而言更适用于微观变量。因为,在描述系统的宏观行为时,CA 需要取很大的格子数,这样它的模拟效率高的优势就被抵消了。此外,由于 CA 对时间空间和状态都进行了离散化,很难观察到系统状态在参数微小变化时所发生的巨大变化,这对研究那些对参数变化十分敏感的系统特别是时空混沌系统是非常不利的。CA 受其自身局限,难以对付更复杂的情况,面临这样一种状况,近年来耦合映象格子(CML)方法逐渐引起了人们的重视,并被一些学者认为是研究无穷维动力系统复杂性态的最合适的工具。下面就对其作简单介绍,材料仍主要取自杨维明《时空混沌和耦合映象格子》一书。

(1) 问题的提出:杨维明的研究也许与他的老师郝柏林院士“混沌现象放在复杂典型行为的一般背景上研究”的建议有关。郝

柏林在一次报告中提出应该研究下列课题:①从低维向高维,再向无穷维的发展——研究无穷维动力学系统中的混沌;②从状态的时间演化,向空间变换及时空范围内的演化——研究时空混沌。

要刻画无穷维动力系统的复杂行为和时空混沌,关键是要找到既能反映运动本质特征,又简单易行的描述方法和运动模型。对由常微分方程描述的自由度较少的系统而言,可以通过取 Poincaré 截面的方法,将其化为映象系统。尽管这些系统可能非常复杂,但却普遍存在二次极值,即部分地包括了单峰映象。因此,可以利用前面对单峰映象的研究结果揭示混沌的共性,并从中发现倍周期分叉、标度规律等。这一范例的成功,利于在研究无穷维动力学系统中的混沌时再次使用。当然这是有条件的,即需要对每个步骤作认真的讨论分析。为此,在对复杂时空行为进行描述时引进了耦合映象格子模型。

和 CA 相比,CML 的主要特点是保持了状态变量的连续,从而使它具有如下优点:

1) 它是对时空系统的半宏观描述,因而数值模拟计算的效率高。

2) 整个计算过程的并行程度很好,可以直接并行化。由于各格点计算的过程完全相同,并行计算中相邻处理机之间几乎没有相互等待时间,因而特别适合并行计算。

3) 由于具有计算效率高的特点,可以通过对参数空间的描述来得到当参数变化时各种时空行为相互转化的规律,从而可以对不同类型的行为模式作细致的探讨。

4) 很容易将在低维系统研究中所得到的成果直接应用到无穷维系统的研究中,其中包括对混沌和复杂性研究很有用的功率谱、李亚普诺夫指数、信息熵等概念。

5) 由于系统的演化过程在模型中被分解为一些按顺序进行的简单过程,因此,对解析解的分析比偏微分方程容易得多。

(2) 模型的建立:耦合映象格子模型最初由日本学者金子邦彦(K. Kaneko)在 1983 年提出。由于许多工作都集中在一个单峰映象,因此需要先建立最简单的一维单峰耦合映象格子模型,然后

再分析它的几种行为模式并定量描述。

CML 的建立过程如下：

第一步 根据研究对象的宏观物理性质、拓扑结构和维数在一个网格上选取一些状态(场)变量,如物体的温度、流体的流速(率)、物质的浓度等,这些状态变量可以进行连续变化。网格可以是一维的(一条等分的直线)、二维的(一个平面上的“棋盘”)和多维的。

第二步:将影响系统发展过程的量分解成一系列相对独立的分量,如对流、反应、扩散等。

第三步:用网格上简单的并行动力学过程来表达(代替)每个独立过程的分量。即:①每个网格点上场变量是并行的非线性映象;②某些特定邻近格点的状态发生相互耦合,并影响其发展;③上述两个过程独立并行发展。

第四步:让各个独立过程分量按顺序发展变化,完成一个时间单位的演化。例如,对耗散结构理论和化学中常见的反应扩散方程:

$$\partial_t u = F(u) + \varepsilon \nabla^2 u$$

它可以分解为反应过程(局部动力学过程)和扩散过程两个部分,整个反应扩散过程所产生的时空复杂行为都是这两部分协同与竞争的结果。

下面先考虑一维空间和周期性边界条件。

用一个非线性映象 $x'(i) \rightarrow x'(i) = f(x(i))$ 表示局部反映过程。其中 x 为连续的系统状态, i 为格点坐标 ($i = 1, 2, \dots, L$), 它为离散的。 L 是系统的尺寸大小,可以分为若干个相等的“格子”(例如设每个格子的尺寸为 1, 整个系统的尺寸就为 L 个格子)。

用一个离散的拉普拉斯算子来表示扩散过程:

$$x'(i) \rightarrow (1 - \varepsilon)x'(i) + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)[x'(i+1) + x'(i-1)]$$

由此得到反应扩散过程的耦合映象格子模型(coupled map lattice, 简称 CML 模型):

$$x_{n+1}(i) = (1 - \varepsilon)f(x_n(i)) + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)[x_n(i-1) + f(x_n(i+1))]$$

其中 n 表示离散化后的时间, 周期性边界条件用 $X_n(0) = X_n(L)$ 来表示。

可以看出, CML 模型是一个时间、空间离散, 状态连续的动力学系统。

如果模型中的函数 $f(x(i))$ 为一单峰映象:

$$x'(i) = f(x(i)) = 1 - ax^2(i)$$

则模型变为耦合单峰映象格子模型(coupled logistic lattices), 简称 CLL 模型。

模型中有两个重要的参数: 代表非线性强度的 a 和体现扩散程度的 ε 。系统的行为将随着它们的变化而出现不同的类型, 当然, 由于初始条件的选取以及“历史”的原因, 在相同的参数下也可能几种运动模式同时存在。

由于单峰映象是在研究低维混沌系统时所熟悉的, 其中许多概念和结论可以借用到无穷维动力系统的研究中来, 所以以下的讨论将以它为基础。

(3) CML 模型的时空行为: 随着非线性参数 a 的逐步扩大, 单峰映象格子模型的时空行为可以呈现出六种运动模式, 分别与图 4-11 中的不同区域相对应。

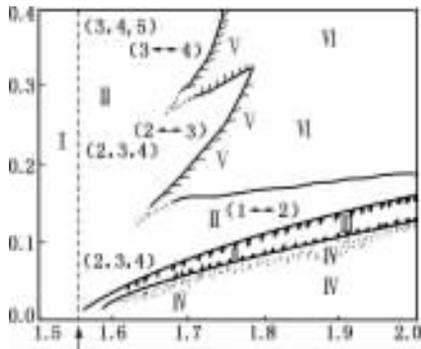


图 4-11 相图

I 区: 冻结化随机图案模式(frozen random pattern);

- II 区 图案选择模式(pattern selection) ;
- III 区 缺隔混沌模式(defect chaotic diffusion) ;
- IV 区 缺隔湍流模式(defect turbulence) ;
- V 区 图案竞争阵发混沌模式(pattern competition intermittency) ;
- VI 区 完全发展湍流模式(fully developed turbulence)。

可以构造两种变化图对这六种模式进行更深一步的探讨 :第一 ,空间振幅图(space-amplitude plot)以状态值为纵坐标 ,以空间位置为横坐标 ,每一幅图所表现的是在某一时间(步)上系统空间状态函数的全部叠加 ,这样可以通过读出多幅这样的图 ,看出各格点状态随时间的变化情况 ;第二 ,时空行为发展图(space-timedigram) ,分别以时间和空间作纵横坐标轴 ,反映一些图案结构在空间的传播行为。其方法是对每一个时空点的状态都进行判别 ,依判别的结果来着色。例如 ,将大于单个映象的不稳定不动点 $x^* = (\sqrt{4a + 1} - 1)/2a$ 的涂黑 ,反之为白。

1) 冻结化随机图案模式(FRP)(图 4-12)

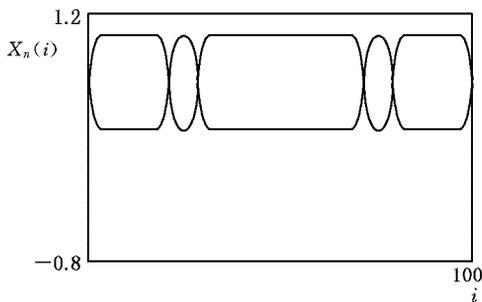


图 4-12 冻结化随机图

在图中 $\varepsilon = 0.2$, $X_n(i)$ $a = 0.9$

a. 当 $a \leq 0.75$ 时 ,单个单峰映象只有一个不动点 ,它对应一个“平庸的”周期解 ,即所有格点的状态最终都落在单峰映象的不不动点 $x^* = (\sqrt{1 + 4a} - 1)/2a$ 上。

b. 当 $a > 0.75$ 时, 单个单峰映象出现倍周期分岔, 单峰映象格子模型出现扭结和反扭结, 开始扭结的位置随初始条件的不同而不同。如果初始条件的选取是随机的, 那么扭结的位置也是随机的。但在经过一段过渡后, 扭结的位置就不再变化了。由于扭结的“屏蔽”作用使扭结两边的行为互不相关, 因而扭结实际上将空间分成一些互不相关的区域, 而区域的位置和尺寸的分布则完全取决于初始条件。

c. 当 a 进一步增大, 单个单峰映象的行为越来越复杂, CLL 中各个区域的格点状态行为也出现各种 2^i 周期行为。

d. 当 a 大于 Feigenbaum 累积点(cumulating point)以后, 即单个单峰映象可能出现混沌解时, 在一些大空间尺度的区域内, 格点状态也出现了混沌行为。但是在一些小的区域内部可能同时保持周期性变化。如 8 周期, 4 周期, 以至 2 周期。这说明格点状态与区域的大小有很大的关系。同时由于单峰映象格子模型是一个多吸引子系统, 吸引子的个数也会随系统空间尺度的变大而呈指数性增大。

例如当 $\varepsilon = 0.15$, $a = 1.52$ 时可以得到相应的空间振幅变化图(图 4-13)和时空行为发展图(图 4-14)。

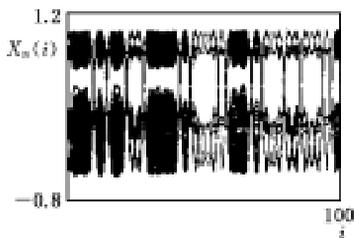


图 4-13 空间振幅变化图

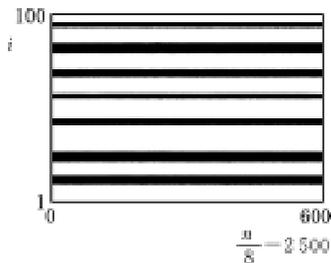


图 4-14 时空行为发展图

图 4-14 表明, 各区域的边界(即扭结位置)仍不随时间变化, 所以又称为“冻结化”随机图案。但这种情况只能保持在非线性参数 $a \leq 1.52$ 的范围内, 就是说“冻结”大致在 $a = 1.52$ 时结束(这里正好是单峰映象的二带混沌到一带混沌的并合点), 此后就将变为其他模式。

2) 图案选择模式 :随着非线性(参数) a 的增大 ,原来在“冻结”模式里大区域内的混沌性增强 ,而小区域里的混沌则因被“抑制”而保持周期性。随着这种趋势的进一步发展 ,所有区域中仅有特定大小尺寸的区域(一般是小区域)能保持稳定 ,其他大小的区域则被这些特定尺寸的区域所取代(可以称为被它们所俘获、同化) ,而且当非线性强度参量 a 逐步增大时 ,那些保持稳定的特定区域的个数会减小 ,而它们中每一个的范围(区域)会扩大。但是 ,这种变化过程仅仅发生在开始阶段 ,经过一段时间的“选择”后 ,系统所有区域的尺寸和位置都会被固定下来 ,不再随时间变化。

过
于
域
寸
沌
抑
中
此

散
在
区
尺
混
被
式
因

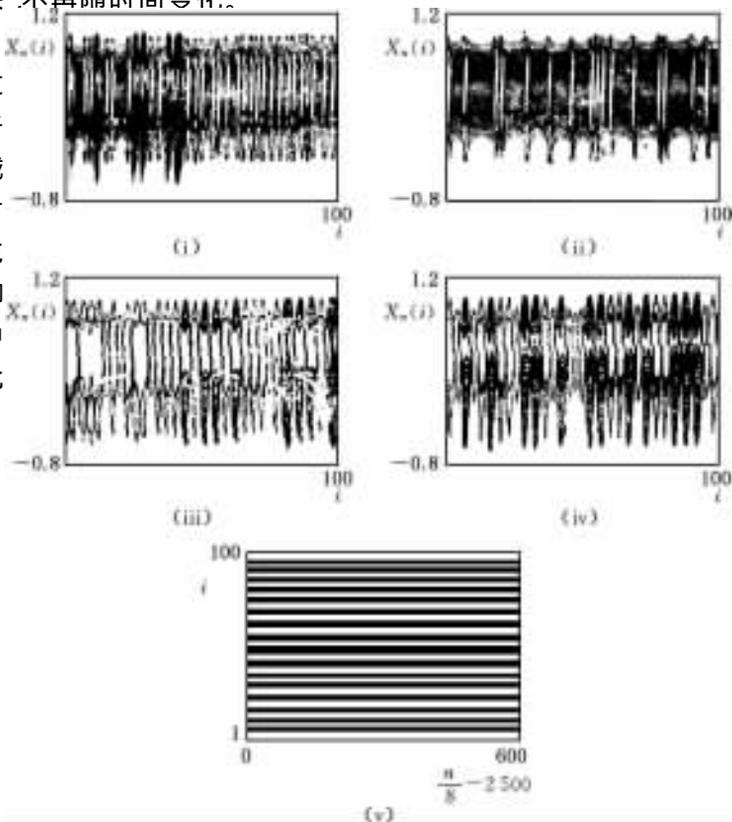


图 4-15 图案选择模式

3) 缺陷混沌扩散模式 随着非线性强度 a 的进一步增加, 状态对初始值敏感性也随之增强。在原来的“选择”模式上又发生了新的变化, 出现“缺陷”。所谓缺陷, 是指两个相互“错”了一个空间周期相位的区间之间所出现的“局部混沌”。

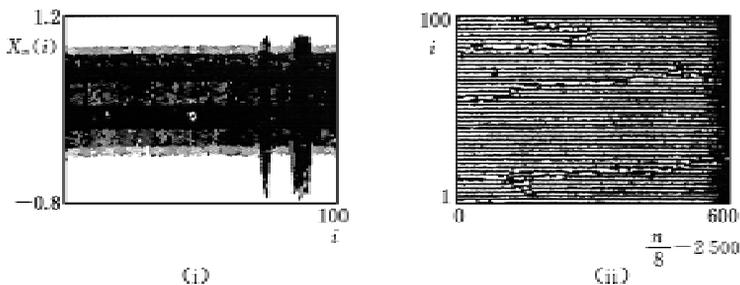


图 4-16 缺陷混沌扩散模式

图 4-16 表明, 缺陷是空间局域化的, 但形状却随机变化, 并且随机“行走”。如果它与另一个缺陷相撞, 就会相互湮灭。在这里缺陷是不能成对产生的, 因此, 在具有偶数个格子的系统中, 所有的缺陷最终将会成对湮灭, 而在有奇数个格子的系统中, 总会有至少一个缺陷在空间游荡。在没有缺陷的地方, 空间将被锯齿形图案所覆盖, 因为这时的区域选择个数为 1, 区域尺寸为 1, 空间周期为 2。

存在缺陷的模式具有缺陷游动、湮灭、产生和扩散的特征, 其中缺陷扩散系数是一个重要的参量。它的算法是对具有奇数格点的格子(偶数可能会因为成对的湮灭而出现完全没有缺陷的情况)设在初始态时的锯齿图案上加入一个缺陷态, 记下 n 时刻缺陷的位置 I_n , 将所得数据用下式拟合: $(I_n - I_0)^2 = 2D_n$, 其中 D 为缺陷扩散系数, \dots 表示对系统求平均。数值计算表明, D 会随非线性强度参数 a 的增大而增大。

4) 缺陷湍流模式 a 再进一步加大, 缺陷混沌模式中的锯齿形图案将失去稳定, 而出现“自发缺陷”, 其结果是缺陷可以成对产生。这就从混沌模式进入了湍流模式。在此模式中, 缺陷不仅可以成对产生, 而且会因相互碰撞而使缺陷个数增加(即不单有湮灭

的情况,也有产生的情况)。可以把缺陷的这种成对产生看成是局部动力学中发生“危机”的结果,而空间耦合又诱导了这种危机现象在格点上的传播。

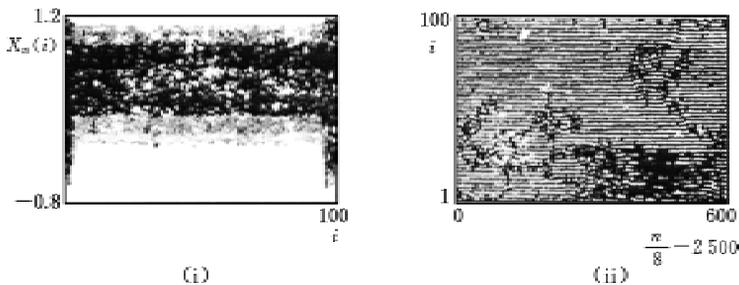


图 4-17 缺陷湍流模式

5) 图样竞争阵发混沌模式:在“选择”模式的基础上,进一步增大 a 值,还会产生另一种不同于“缺陷”的新的模式,那就是图样 (Pattern) 竞争阵发混沌模式。它具体表现为周期空间图样相位的错位引起局部混沌,即出现阵发混沌。但它的空间尺寸远比“缺陷”大。其特征是存在多个稳定图样,并且各图样间通过阵发行为来转换,因此,它是一种具有长程关联的运动模式。

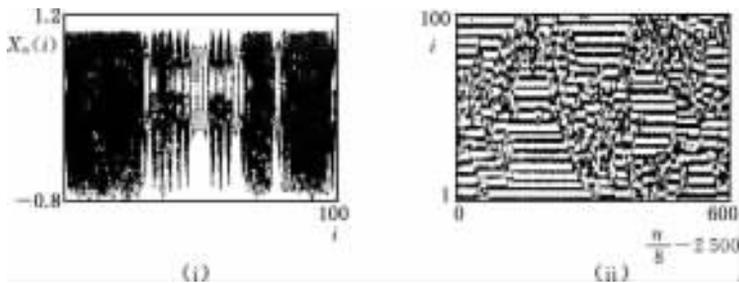


图 4-18 图样竞争阵发混沌模式

在这种模式中各图样自身保持稳定,但各个区域之间的相位会产生爆发式的“错动”,这就是所谓的“开关”行为。

6) 完全发展的湍流模式: α 再增加到很大, 整个时空中将很难看出任何有序行为, 此时称为完全发展的湍流模式。在此模式中扩散的有序化趋势被局部混沌的非均匀趋势所“压倒”, 混沌占了上风, 因此可以近似地认为, 存在一个时空变换下不变的连续状态分布。

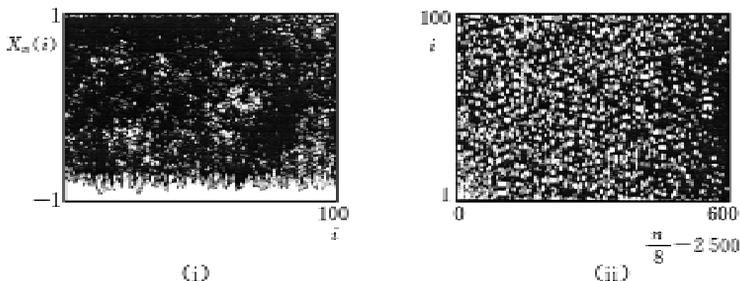


图 4-19 完全发展的湍流模式

以上通过计算机模拟, 给出了 CML 模型中当外部控制变量发生变化时运动模式的变化。尽管这只是对一种模型模拟的结果, 但却反映了复杂系统的结构与形态随环境变化的共同规律。如果能进一步结合具体情况对模型进行完善, 将对研究复杂系统有很好的作用。

4.5 复杂适应系统

复杂系统的动力学行为作为所有复杂系统的共同特征, 在复杂系统的所有层次上都有所表现。因此, 即使在十分简单的情况下, 借助于现代的计算机也难以进行详尽的分析, 更何况现实生活中的情况还远比上述模型所描写的复杂。如果要用动力系统模型研究实际问题还有很长的路程要走, 这或许正是人们希望运用复杂系统模型而实际上很少能有效地运用的基本原因, 这些领域包括生命、生态、社会经济等。当然, 人们在面对复杂的现实时也并非完全无能为力, 把握不同系统的特征并建立相应的模型仍然是研究复杂系统的主要方法。例如, 在生命和社会领域中的复杂系

统都有一个十分重要的特征,那就是对环境的适应,通过适应环境来保持生命,发展自己。针对这一特征来建立模型,刻画复杂系统,这也是目前许多学者已经和正在做的事情。下面就将复杂适应系统作为一个典型,通过对它的研究来说明复杂系统的基本属性。

关于系统的适应性前面已经涉及,系统的适应性是系统能够在与环境和其他系统的相互作用中通过“学习”与“积累经验”,并根据环境的变化来调节自己的行为模式和结构,使自己更好地生存与发展。适应性引起许多学者的兴趣。20世纪以来,包括坎农、皮亚杰、艾什比、维纳等在内的许多科学家都对它进行过广泛而深入的研究。但复杂适应系统(complex adaptive system,简称CAS)概念则是20世纪80年代由以J.霍兰德(Johh Holland)为代表的美国圣菲(又称圣塔菲,SFI)研究所学者们提出的。他们的基本观点是“复杂性来源于系统对环境的适应”,即系统在不断适应环境的过程中使自己变得越来越复杂(本节的内容主要取材于美国圣菲研究所J.霍兰德1995年出版的《隐藏的次序》一书和1998年出版的《突现》一书,在作介绍之后也提出一些作者的看法)。

所谓复杂适应系统(CAS)是指由一些具有某些适应性和主动性的个体(Active Agents——主体或智能代理)所组成的复杂系统。CAS的复杂性源于这些Active Agents对环境的适应以及它们与其他Active Agents的相互作用。在这种适应环境和主体间的相互作用中,主体既改变了环境,又改变了Active Agents自身,从而使整个CAS不断演化发展。

4.5.1 复杂适应系统的特征

CAS具有一些共同的特征,SFI的创始人之一著名理论物理学家M.盖尔曼在《夸克与美洲豹》中写道:“这种复杂适应系统在不同的过程中所起的作用,比如地球生命的起源、生物的进化、生态系统中各种生物的行为、哺乳动物免疫系统的运作、动物(包括人类)的学习与思考、人类社会的演变、金融市场投资者的行为等,以及为发展策略或在以往观察的基础上作出预言而设计的计算机软件及(或)硬件的使用等。所有这些过程中的共同特征是,每个过

程中都经由一个复杂适应系统来获取环境及自身与环境之间相互作用的信息,总结出所获信息的规律性,并把这些规律提炼成一种‘图式’(SCHEMA)或模型,最后以图式为基础在实际中采取相应的行动。在每种情形中,都存在各种不同的相互竞争的图式,而在实际中采取的行动所产生的结果反馈回来,将影响那些图式之间的竞争。”

按照 SFI 的观点,所有的复杂适应系统都具有如下共同特点:

第一,这样的系统(CAS)都是一个由许多并行发生作用的“Agents”(主体或智能代理)组成的网络。这些 Agents 在不同的环境中是不一样的,如在头脑中是神经细胞,在生态系统中是物种,在细胞中是细胞核和线粒体等细胞器,在胚胎中是细胞,在经济中是人或家庭,在商业中是公司,在国际社会中是国家等。每一个 Agents 都不断地在根据其他 Agents 的动向采取行动和改变行动,也就是说,在 CAS 环境中没有任何事情是固定不变的。

第二,每个复杂适应系统都具有多层次组织,一个层次的 Agents 对于更高层次的 Agents 来说起着建设砖块的作用。这些 CAS 并不是永远按一种模式把“砖块”堆砌起来形成不变的东西,而是能吸取经验、经常改善和重新安排这些砖块。这种对砖块的重新组合是最根本意义上的适应机制。

第三,所有的 CAS 都会预测未来。这里的预测并不是人类所独有的,从微小的细菌到所有的生命体,在其基因中都隐含了“预测密码”,它的作用就是告诉后代“在这样或那样的环境中,具有这样基因的生物体能很好地适应”,或者“在什么情况下,要采取怎样的行动和对策”。霍兰德指出,实际上每个 CAS 都经常在进行预测,这种预测是建立在它对外部世界认识的“假设模型”基础之上的。同样,这种假设模型也不是被动的、一成不变的基因蓝图。它是积极主动的,就像计算机程序中的子程序一样,可以在特定情况下被激活,进入运行状态,并产生行为效果。

最后,每个 CAS 都有自己的“小生境”,而每个小生境又会被那些能适应它的 Agents 所利用。同时,每个进入了适合自己小生境的 Agents 又打开更多的小生境,为新的寄生者、掠夺者、被捕食者、共生者等打开更多的生存空间。这就意味着,适应是一个不断发展的过程,永远不会停止在一个水平之上,不可能达到一个均衡状态,因为均衡和稳定的状态实际上是一个死的状态。或者说,根本不可能想像在这样的系统中 Agents 会永远把自己的适应或功用发挥到“最大化”。因为,生存的可能性空间会随着适应而无限制地扩大,以至使最大化失去了意义。这意味着 CAS 的特点是“永恒的

新奇性”。

CAS 还具有如下重要特性：

1) CAS 不仅在适应环境的过程中得以进化发展,而且它们之间的相互作用可形成更高层次的 CAS。也就是说,一个由 CAS 组成的“共同体”自身也可以作为一个复杂适应系统 CAS。

2) 适应的过程也是一个系统向环境“学习”的过程。不过,不同的复杂适应系统的学习策略各不相同。人类主要靠个人或集体的智慧来获得知识,而其他的动物则通过直接的基因遗传来获得它们生存所需的绝大部分信息。

向环境学习常常被称为是动物的本能。不管是草履虫、狗,还是人,他们从经验中学习的能力本身就是进化的结果。而且,进化不仅产生了学习,而且产生了其他新型的 CAS,这就为世界带来越来越多的 CAS。例如,大约 40 亿年以前,在地球的某些地方出现了一些与繁殖和可遗传的变异有关的化学反应,导致了首批生命形式的出现,并进而导致了组成生态群体中各种各样生物的产生。然后,生命进一步导致了像免疫系统、学习过程这样的 CAS 的产生。对于人类来说,符号语言能力的发展使学习扩展成复杂的文化活动,又从文化活动中产生出社团、组织、经济和科学活动,出现快速多功能的计算机等。

3) CAS 进化的过程大体如下:一个 CAS 总是会不断主动地从外界获得新的信息,经过适当选择,选取与自己生存发展有关的新信息,与自己原来储存的各种图式相结合,得出适应现实世界的结果。这些结果包括一个对被观察系统的描述,一个对未发生事件的预言,或对 CAS 自身行为的规定等。

包含于 CAS 中的图式总是处在一定的层次之上的,但这种层次又不是一成不变的,因为 CAS 需用它来进行预测,预测成功,则不仅会使其保存地位,受到重视,而且得以升级,否则将会被淘汰、降级。上述取舍形成了一种所谓“选择压力”。

4.5.2 复杂适应系统(CAS)模型

为了刻画 CAS,霍兰德分 3 步建立了 CAS 模型。

(1) 建立系统的行为模型:建立系统的行为模型(Performance system),即刺激—反应模型。

建立行为模型的目的是用一种统一的方式表达各种系统中的主体,其出发点是刺激—反应模型。即主体对于每个刺激都会有相应的反应,这可以用一个符号串来表示,符号串的前半部表示刺激,后半部表示反应。例如,青蛙看见小物体飞来就伸舌头,看见大物体飞来就逃避。大物体飞来和小物体飞来对青蛙来说

是两种不同的刺激,而伸舌头和逃避是两种不同的反应。一个这样的符号串表征了一个规则或算法(在遗传算法中这就是“染色体”,每个染色体记录了一对刺激反应的模式,也就是一条规则或算法)。显然,在个体内部储存了许多这样的规则,储存规则越多,说明个体越精巧。

这里涉及几个概念:输入——环境(其他个体)的刺激;输出——个体的反应(一般是动作);规则——对什么样的触发起什么样的反应;探测器——接受刺激的器官;反应器——作出反应的器官。

反应—刺激模型可用图 4-20 表示。

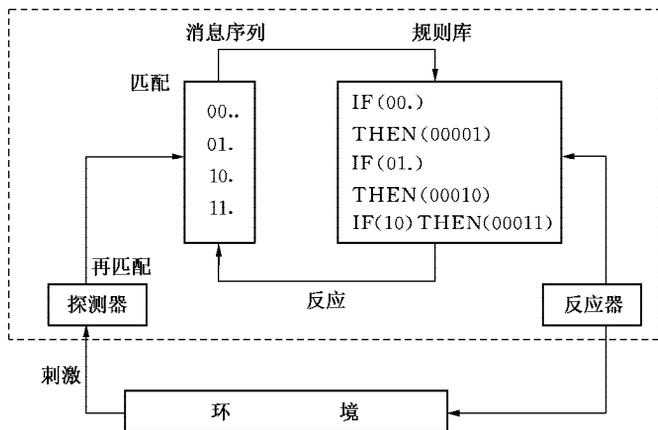


图 4-20 反应-刺激模型图

通常,一个规则集需要满足三个条件:完备性、无矛盾性和可重复性。但对于 CAS 则有所不同,因为它的特点是要在与环境的相互作用中进化,而进化的过程则要求在多种规则中进行选择,所以规则间的矛盾、冲突和重复往往是不可避免的。所以,需要建立一个对规则进行比较、选择和淘汰的机制。这就要求对“信用”进行确认。这一点正是 CAS 的独到之处和重要的地方。

总之,各种行为系统可以由不同器件组成,但都需要具有以下三大功能:

1) 从环境中抽取信息的功能:它由探测器来完成。例如抗体中的局部化学键、生物体上的感官、商业公司的信息情报部等

等。探测器的作用不仅是接受外来的信息,而且要对这些信息进行选择,选择那些与自己生存发展有关的信息(主体对之敏感的环境特征)来加以接收。探测器所接收的信息可以用统一的形式加以表达,例如用二进制。这就有利于人们对建立起来的模型进行计算机处理。

2) 对所得信息进行处理的功能:由于多种规则同时起作用,我们获得了描述 CAS 分布活动的一种自然方式。特别是在有并行现象的系统中,可以用熟悉的模块自动描述新的情况。

3) 对环境作出反应的功能:它由反应器来完成。

(2) 确定“信用”确认机制(credit assignment):为了对规则进行选择 and 比较,首先需要对假设的“信用程度”进行量化,即先要对每一条规则赋予一个特定的数值,这个数值称为“强度”(strength),或者按遗传算法称为“适应度”(fitness)。在每次使用规则的时候,系统就按特定的方式作出选择。选择通常是按概率大小判别的,具有较大强度或适应度的被选上的机会大,反之亦然。在此基础上还可以加上并行算法和缺损层次的思想,使规则更灵活也更符合实际。

信息确认的本质是强度与适应度都随应用的结果而变化,应用成功的将被加强,这实际上是“学习”和经验积累的过程。

在遗传学、经济学和心理学中定量分析就是根据要求,对感兴趣的对象加以赋值,如染色体直接赋予适应度,货物直接赋予效用,行为直接赋予奖赏等。

系统的进化是建立在一个内部分析器基础上的,探测器记录“储备仓库”中各种不同类型的资源(如水和食物)的状态,有机体的行为目标就是保持这些储备器不要空着,并且不断增加。而规则强度的增减取决于储存仓库的状态变化,显然,这些思想是来自现实世界中的竞争现象。

(3) 提供发现规则的手段(rule discovery) 经过与环境的对话和交流,已有的规则就会得到不同的信用指数,在此基础上考虑如何发现新的规则。

新规则是在较成功的规则基础上进行交叉组合(crossorer)和

突变(mutation)而创造出来的。正因为参与交叉组合的规则都经过证明是较成功的,所以它比纯粹按概率来进行交叉组合的效率要高得多。

规则地发现过程也就是合理假设生成的过程。“积木块的组合交叉和突变为规则的创新提供了广阔的天地,同时由于这些又是在经过测试的积木上进行的,所以以往成功的经验能被直接体现出来”。上述过程在神经生理学中的例子是细胞集合由几千个相互交叉、能保持“回响”(self-sustained reverberation)的神经元组成。细胞集合的运行有些像通过普通标识结合在一起的“小规则簇”,多个细胞集合的行为是并行的。细胞集合通过招募新兵(接收其他细胞集合的部分)或分化瓦解(分成作为后代的片断)来参与神经元的竞争,这实际上就是经过测试的积木块的重新组合。此外,多个细胞集合还可以聚集成称为“相序列”(phase sequences)的大结构。这些情况在现实世界中不难找到非常相似的例子,如来到新城市的一群年轻人,经过一段时间后,产生若干组志同道合者,并自行结合为各种小团体或小企业,等等。

个体的标志在规则的结合及其以后的活动中起着非常重要的作用。更为关键的是标志本身也拥有积木块,因此,标志实际上就是出现在规则的条件和运作部分的模式。它们的操作与规则的其他部分一样。在强规则中发现的那些标志将会产生出相关的标志,提供新的结合以及新的相互作用和新簇。标志总是试图通过缺损的层次来向内部模型的框架加入新鲜的相关事物,以此来丰富内部模型。根据以上思想,不难看出城市的发展与胚胎的生长极为相似。

4.5.3 回声(ECHO)模型

ECHO模型又称为回声模型,是霍兰德等人为了描述生物、生态和社会经济领域中一类由具有相互选择、交换和利用资源的系统(主体)所组成的CAS而提出来的。“回声”的含义是指各主体进行有选择的应答。

ECHO的建模分三步。

首先是定义资源和位置(site)。资源就是主体(agents)生存发

展所需要的物质、能量和信息。对于不同的系统和问题,所需的资源形式当然不同。对人这样的主体而言,资源是指食物、水、空气等。对于一个企业来说,资源则是银行提供的资金、生产所需的原材料等。

位置相当于主体生存发展的场所或“容器”,主体在每个位置都有相应的环境条件,如某个生活环境中的温度、经营环境中的政策,主体可从中得到相应的资源和服务。主体可以在不同的位置间移动和选择。位置与位置之间还可定义“距离”。

其次是提出一个刻画主体行为的基本模型。在这个模型中主体所具有的最基本、也是最简单的功能是寻找可以与之交换资源的其他主体,主动地与之接触,或当其他主体向它接触时作出应答。当双方的资源“匹配”时与之交换资源,同时,在自己内部储存和加工资源,繁殖新的主体。

为了完成这些功能,主体必须包含下列基本部分:①用于主动与其他主体进行联系与接触的主动标识(offence flag);②用于当其他主体与之联系时决定应答与否的被动标识(defense flag);③用于储存资源的资源库(reservoir)。

这样,一个基本的 ECHO 模型就已经构成。在此模型中整个系统包含若干个位置,每个位置上可有多个主体,主体与主体之间进行着相互接触和选择、交流资源和信息。

尽管上述模型已经具有 CAS 的基本特征,但用于描述复杂的系统行为还仍过于简单。因此,需要对上述基本模型进行扩展,对功能进行补充,以增加以下功能:

1) 增加“交换条件”的功能:在主动标识与被动标识相符的情况下,不能马上进行交换,还需要满足某些交换条件才能被“确认”,如在原料采购中,不仅需要原料的型号符合,而且要满足一定的价格与质量要求。后者就是交换条件。

2) 增加“资源转换”的功能:即要求每个主体都具有自己独特的加工、利用和重组资源的能力。这就为主体的分工和专门化打下了基础。

3) 增加“黏合”(adhesion)的功能:由于主体间可以进行黏合,

就可以把若干主体连接成一个相对固定的“聚合体”(集团),并在系统中以团队的形式活动。

4) 增加“选择交配”(selective mating)的功能:即主体可以选择与其他主体结合,以便形成新的更强大的主体。

5) 增加“条件复制”的功能:即并非资源丰富主体就可以进行自我复制,而是需要满足某些复制条件。

以上的补充加强了 ECHO 模型的功能,能够较好地描述各类生物、生态和社会经济领域中的复杂系统。

第五章 | 系统中的混沌

20 世纪 70 年代以来,系统科学出现了一系列新的突破性进展,这些新进展的重要标志就是自组织理论、混沌学与分形理论的创立。不久,人们就认识到,在这些复杂而有趣的现象背后是非线性关系在起作用,它们也正是复杂性产生的一个重要根源。

5.1 系统中的非线性

经过深刻反省,学者们惊奇地发现现实世界中线性关系其实并不多见,因此建立在它之上的传统科学所展现的只是一幅过度简单或者严重歪曲了的世界图景。为了把握真实的非线性的世界,一股研究非线性的热潮已在世界范围内兴起,非线性科学成了最引人注目的新兴横断科学。世界各国随之涌现出许多相关研究成果和机构,其中最著名的当属美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的非线性研究中心。它们并不是以世界上所有的非线性现象为研究对象,而是以那些原则上不能线性化的非线性关系为研究对象,即只研究那些最能体现非线性特色的问题。

系统科学与非线性有着“天然”的联系,这是因为无论是系统之外的还是系统内部的,一切现实的关系从本质上讲都是非线性的。所以,系统科学的许多基本问题本质上都是非线性问题。例如“系统整体为什么不同于部分和?”这一系统科学的千古之谜就与元素间的非线性相互作用有关,换言之,就是系统的整体性何以能“突现”的问题;另外,事物的发展为什么总是不可逆的?为什么系统能不断适应环境,并从中创造出新的形态,从而使系统乃至整个世界呈现出从简单到复杂,从低级到高级的发展态势?系统自组织的动力是什么?生命的遗传信息、人类的智能从哪里来?信息为什么是必要的?虽然不能指望所有这些问题都能从非线性中

找到答案,但却可以从对非线性和非线性系统的研究中得到许多有益的启示。

系统科学有两个最重要、最基本的问题:一是系统怎样构成,二是系统如何发展。非线性科学对回答这两方面的问题提供了巨大的帮助,许多创始人早就意识到系统与非线性性的关系。如1961年N.维纳在与原苏联《哲学问题》杂志编辑的谈话中指出,控制论所面临的最重要、最迫切问题“首先是研究自组织系统、非线性系统以及生命是怎样一回事那些问题,但所有这3种提法说的是同一件事情。”这里说的自组织与生命实际上就是系统自行发展与演化。V.贝塔朗菲把非线性关系看作是系统的本质,他说:“我们面对着整体,有组织化,多因素和过程的相互作用,各种系统(随便你选用哪种词句来表达)等情况,它们在本质上是非加法的”;耗散结构理论的创始人I.普里高津则把非线性作用看作是形成耗散结构的必要条件,他认为“只有保持在远离平衡和系统的元素之间存在着非线性机制的条件下,耗散结构才可能出现”。这些观点都深刻地揭示了非线性系统的内在联系。

5.1.1 线性关系与非线性关系

从某种意义上讲系统科学是一门关于关系的学科,它的目的是从系统的角度来研究事物之间的关系及其运动规律。空间上,系统科学把世界上所有的关系按系统内外进行划分,系统边界以内的是元素之间、要素之间和层次之间的关系,这些关系已经包含于前面讨论的系统结构问题之中;系统边界以外的是系统与环境,即其他系统的关系,也就是前面讨论的性态问题。时间上,运动规律也就是系统结构与性态随时间或某一参数变化的关系。系统科学把事物从无到有,又从有到无看作是系统(事物)的生命周期,系统的演化、运动与发展都是相对这个生命周期而言的。这其实也是一种特殊的关系,即系统前一时刻的结构性态与后一时刻结构性态的关系。于是,系统内外、前后关系的研究成为系统科学的核心。

当然,对关系的研究并非系统科学的专利,其他学科,从数学、物理、化学到生物、社会经济,以及意识形态、文学艺术,以至哲学都从不同角度对关系展开了深入的研究。但是,传统上科学家们

往往将非线性问题“线性化”,即在小范围内以直线来代替局部的曲线,使之局域化、粗粒化。就好比把本来是曲面的地球表面分割为若干“近似”平直的表面一样,将曲线加以分段描述。但是,这种“化曲为直”方法的作用是极其有限的,世界上还存在大量不能用“线性化”方法处理的非线性关系和问题。非线性的现实世界与“线性化”头脑之间的矛盾随之变得越来越尖锐,这些学科也铸造各自对付非线性的“武器”,对非线性有了更深刻的认识。因此,系统科学不仅要有自己独特的视角,而且要借用现代数学、物理及其他学科的工具和理论。

现实世界中大量非线性关系、非线性现象和问题的存在一直困扰着人们。尽管上个世纪之交已经有少数天才学者,如彭加勒等已经提到过它的一些现象(混沌等),但真正意义上的非线性科学却是在20世纪后半叶才产生出来,其中最主要的原因在于研究的数学工具和技术手段。从这个意义上讲,非线性科学与非线性系统研究决定性的突破是建立在现代计算机技术高速发展基础之上的。

非线性首先是一个数学概念,数学把世界上所有的关系分为两类:一类是线性关系(相互作用),一类是非线性关系(相互作用)。经典科学以研究线性关系为主,现代科学开始转向非线性关系。这并不是说过去人们没有碰到,或者不想去研究自然界和社会中的非线性关系。实际上,人们总是处在各种各样的非线性关系之中,只是由于长期以来人们手中的数学工具太有限了,实在难以“对付”非线性关系及由此导致的各种复杂现象。非线性是相对线性而言的,线性与非线性原来是数学中用来描述不同关系类型的概念。对于系统来说,可以把关系分为系统内部各元素间的相互作用、系统之间的相互作用和系统输出与输入之间的关系。

显然,关系可以发生在多个事物之间,但为简单起见,下面只讨论两元关系,而多元关系则可得到类似的结论。

作为一种数学概念的非线性是相对于线性而言的。线性关系比较简单,它有两个基本特征:一是数量上成比例;二是图像上成直线。

从数量上看,量与量成比例,即两个量之间存在一个比例常数 K (K 可以为任何实数),常数的意思是不随两个量的变化而变化,也不随时间、空间的变化而变化。这就表明线性相互作用在时空上是均匀的、对称的。

两个事物的量之间成比例需要有一个前提——质的等价关系,因为只有性质相同才能进行量上的比较。但质的等价并不要求事物(系统)全等或所有性质都相同,而是指某方面的性质相同。例如,牛和羊、牛肉和羊肉在许多方面不相同,但从重量上看两头牛总重量可以与5只羊的总重量相等。如果1000克牛肉与2500克羊肉的价格相同,则2头牛与5只羊的价值是等价的。至于2头牛与一台电视机的关系中,重量是完全不同的,但从“产生”它们所耗费的“抽象劳动时间”上看则可能是相等的,它们之间也可以具有某种等价性。如果既具有这种等价关系,或者只考虑事物间性质相同的方面,又存在不变的比例,就认为它们间具有线性关系。

从图像上看,线性关系表现为一种直线,可以用一个直线方程来表示:

$$y = ax + b$$

函数 y 是自变量 x 的一次多项式。函数图像为直线的基本特征是“斜率”为常数,即自变量的系数为常数,它的含义同样是数量之间成正比。

非线性关系则与线性关系相反,原则上线性关系以外的所有可能的关系都是非线性关系。如果线性关系只是空间中一个无限小的“几何点”,那么非线性关系是除这一点以外的整个空间。对于非线性可以从代数和几何两个方面来进行描述。

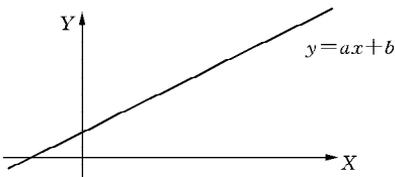


图 5-1 线性关系

从代数的角度来看,非线性关系是指不成比例的关系。从几何图形或函数图像上看,线性指的就是直线性(图5-1),非线性则为非直线性,即除直

线外的所有曲线。

(1) 非线性关系对应了大于一次的方程,其中最简单的就是二次方程,即抛物线方程

$$y = ax^2 + bx + c$$

它的函数图像是一条抛物线(如图 5-2)。

(2) 抛物线方程虽然简单,却几乎包含了非线性所有的基本特征。在非线形科学领域中讨论得很多的是单峰映射、虫口模型等都是只与二次项有关的非线性方程。

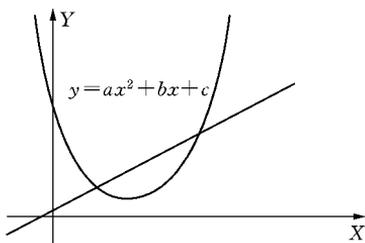


图 5-2 非线性关系

方程组的形式常被用于描述复杂的关系,如线性方程组和非线性方程组。一个复杂的函数,

只要它具有足够好的数学性质(如解析函数),通常可以进行泰勒展开。可以证明,对所有的“解析函数” $y = f(x)$,原则上都能在定义点 a 附近进行泰勒展开,将其表示为一个由从一次到高次函数组多项式组合:

$$\begin{aligned} f(x) &= f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{1}{2!}f''(a)(x-a)^2 + \dots \\ &\quad + \frac{1}{n!}f^{(n)}(a)(x-a)^n + o(|x-a|^n) \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!}(x-a)^k + o(|x-a|^n) \end{aligned}$$

这里指的解析函数,在数学上需要满足三个条件:

- (i) 在闭区间 $[a, b]$ 上有定义;
- (ii) 在此区间内函数有一直到 n 阶的连续导数 $f'(x), \dots, f^{(n)}(x)$;
- (iii) 当 $a < x < b$ 时,有有限导数 $f^{(n+1)}(x)$ 。

这三个条件简单地说就是为了保证函数在我们所考虑的问题

范围内是连续可微的,这就是具有“好的数学性质”的确切含义。

该式表明,只要二次以上项的系数或系数矩阵不全为零,那么,所有的解析函数全是非线性的。

现实世界中具有“好的数学性质”的函数并不多,更多的是那些不连续、不可微的函数,即“病态的”函数(关系)。虽然这些关系长期以来还没能进入数学研究的主流,但它们却是现实世界的真实体现。分形、分形生长的问题,其曲线就是处处不连续、不可微的,不能求微分和积分,所以,非线性还可以从方程的可积与不可积方面来考虑。这是非线性关系的一个更大的领域。

5.1.2 非线性特征

数学中的非线性关系都是现实世界中非线性关系的简化和抽象。现实比数学要丰富得多,复杂得多,事物之间一旦具有非线性关系,意味着它们的关系出现了质的变化,许多新的性质,包括系统整体性都将由此产生。事物间的非线性相干导致了以下特征的出现。

(1) 分叉与突变

事物或系统之间的非线性相互作用的最显著特征是分叉和突变。自然界和社会经济现象中广泛存在着分叉现象,其典型现象包括弹性结构的分叉(屈曲)、非线性振动中的分叉、化学中的分叉、流体力学中的分叉、旋转流体中的分叉、反应扩散系统中的分叉、生物系统的分叉等。这些现象的背后都有非线性在起作用。近年来发现非线性分叉不仅有自己独特的表现,且与其他非线性现象,如混沌、分形、突变、拟序结构等有着密切关系,因此,分叉也就成了非线性科学的一个重要分支。

事实上,一个动力系统总是会受到多种因素的作用,这里就会出现多参数动力系统中的分叉,从某种意义上讲,普里高津学派的耗散结构理论基本出发点就是分叉。他们认为当系统处在平衡态附近的近平衡区时,系统将保持在热力学分支上,而一旦外部控制参量达到和超过某个阈值,原来的状态就会失稳,产生如图 5-3 的两个新分支。

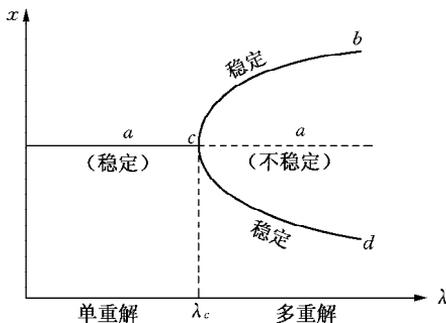


图 5-3 分叉图

经过选择系统将稳定在其中的一个耗散结构分支上。

但是,对系统科学而言,人们也许对环境和外部因素引起的多级分叉(图 5-4)更为有兴趣。

类似这样的分叉图不仅可以在生物进行的路线中找到,也可以从计算机中通过模拟获得。下面将要详细讨论的倍周期分叉就是这样获得的。

要更全面细致地考察一个真实系统,还将涉及到无限维动力系统中的分叉和随机分叉等。非线性分叉必然导致系统行为和结构的突变,而系统的结构往往会随外部控制参数的变化出现分叉,最终导致结构的变化。对此,法国数学家托姆对几种典型的初等突变进行了深入研究,并取得了公认的成果。

所谓分叉,就是含参数的系统在参数变化达到临界值时,系统的定性特征(如平衡态的性质、周期轨道的数目、稳定性等)发生突然的变化。

为了反映动力系统的定性性态随参数的变化,有必要引进分叉集和分叉图的概念。分叉集是指由全体分叉点组成的集

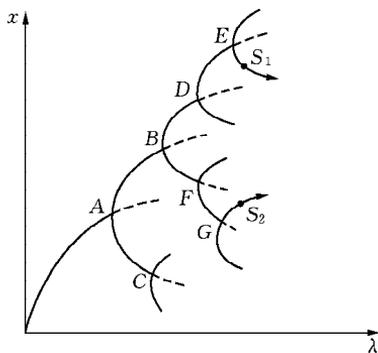


图 5-4 多支分叉图

合 ;分叉图是系统的极限集 ,如平衡点(不动点)、周期轨道、不变环面等随参数变化的图形。分叉集和分叉图刻画了系统状态变量随参数变化达到质变点(临界点)附近时的情况 ,这引起人们的高度重视。但是 ,要全面了解系统的分叉情况 ,需要研究它的全局拓扑结构 ,这是一件十分困难的事情 ,所以通常把分叉问题分为两类 :一类只研究某个平衡点(不动点)附近的拓扑结构变化 ,即它们邻域内向量场(或微分同胚)的局部分叉 ;另一类则分析大范围的全局分叉。而向量场的分叉又可分为平衡点分叉、闭轨分叉、同宿与异宿分叉等。如果将非线性相互作用看成是一种映射 ,按映射的本征值可以分为有一个特征值为 1 的映射分叉 ,有一个特征值为负 1 的映射分叉 ,以及有一对复共轭特征值为 1 的映射分叉。

(2) 多元性与非单一性

和线性相互作用的同一性、等价性、单一性、均衡性和对称性相反 ,非线性关系的基本特征就是它的多样性 ,可从以下几个方面来看 :

1) 从几何图像来看 ,只有一种直线 ,但曲线却有无限多种。在数学语言中 ,整数数目的无穷级别用“啊莱夫零”表示 ,所有直线上、平面上和立体中几何点数目的无穷级别用“啊莱夫 1”表示 ,曲线的数目的无穷级别则需要用“啊莱夫 2”来表示 ,这说明曲线的种类在数量上比几何点的无穷级别还要高 ,这是迄今为止人们所知道的最大的无穷级别。

2) 非线性相互作用导致多元性 ,还可以从非线性方程的多重解中得到解释。1799 年 C. F. 高斯证明了一个基本的代数理论 :“一个次数不小于 1 的复系数多项式 $f(x)$ 在复数域内有一根 ,由此推出 ,一个 n 次多项式 ($n \geq 1$) $f(x)$ 在复数域内恰有 n 个根(包括重根)。”

根据代数方程与多项式的关系 ,及实系数与复系数多项式的因式分解定理 ,每个复系数 n 次方程恰有 n 个复根 ,也就是说 ,一次方程有一个根(解) ,二次方程有两个根(解) ,如二次方程

$$a + bx + cx^2 = 0$$

它的两个根分别为：

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

从函数图像上看,它们对应了 $y = f(x) = 0$ 时两个不同的 x 值,大于二次的高次方程

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 = 0$$

理论上应该存在 n 个解(根)。

上述方程表达了函数 $y = f(x)$ 与自变量 x 和系数之间的关系。多个解(根)的存在表示自变量有多个值可以满足与函数 y 的同一个关系,这意味着存在“一对多,或多对一”的关系。如果这种关系指的是因果关系,那么,它就表明从同一初始条件出发可能得出不同的结果,或者同一结果可以来自多个原因,即一因多果或一果多因。

当然,多个解还不足以构成与经验事实对应的可观察状态,可能性不等于必然性。从可能变为现实还需要附加特定的条件,这里解的稳定性十分重要,因为只有稳定的解才有现实的意义。就是说尽管非线性相关可能导致多重稳态,但多重解和多重稳态当中只有一个能够从“可能”变为“现实”,究竟实现哪一个解?这就要看具体的边界与初始条件。

3) 将几何图像与方程求解结合起来,可以发现还存在更高层次的相互作用。如果把一个层次的相互作用,不管它是线性的还是非线性的,都用一条直线或曲线来加以描述的话,那么,研究直线与直线、直线与曲线、曲线与曲线之间的关系就必然涉及更高层次的相互作用。

非线性导致高层次相互作用的多元性可以用线与线之间交点的多数性来解释。相交就意味着可能出现一种新结合,发生一件新的事情。

直线与直线之间只存在重合、平行与相交三种关系。重合有

无数交点,平行没有交点,如果相交,则只有一个交点,直线与曲线之间则可能有多个交点。例如,直线与二次曲线的交点有两个,与三次曲线的交点有三个,它们分别对应了二次方程、三次方程和 n 次方程。至于曲线与曲线之间,关系就更复杂,因为它们可能会对应有有限多个或无限个交点。

非线性导致的多样性似乎可以用来解释许多问题。例如从非线性方程中得到的多个根和从几何图像中得到的多个可能的分支还只是理论上的“存在”而非现实的存在。现实世界中的某一时间地点只可能从中选择一个(这好比量子力学中被人称为波包收缩)。进行选择就是消除不确定性,从信息论角度看,进行选择和消除不确定性就需要信息。可见非线性的多样性是信息存在的前提,其逻辑是:

非线性→多样性→分叉→不确定性→选择→信息→智能。

此外,非线性相干导致的多元性不仅与不确定性有关,还与随机性有关。这与上面提到的混沌、分形、复杂图像等都有关联。因此,多元性是复杂性态的基础,也是世界复杂性之源。

(3) 非加和性

Campbell 指出,非线性的基本特征就是叠加性原理的失效,即非加和性。

从哲学上看就是会产生“新的质”,即发生质变。

非加和性的例子很多,“三个和尚”的故事就是如此。一个和尚挑水吃,两个和尚抬水吃,是因为他们构成了一个内部关系相对和谐的系统。到了三个和尚没水吃时,就是因为内部发生了矛盾,无法进行合理分工。这样三人的作用不是相加,而是抵消。

因为可加性和可分性(可加性的“逆运算”)本来只是线性关系,而非线性是相对于线性而言的。线性关系的可加性意味着进行加法或减法运算之后,关系的性质不会出现实质性的变化。反过来,只有性质相同的事物间才能够“相加”和“分解”。例如,只有一头牛加一头牛才能等于两头牛,一头牛和一只羊原则上是不可加的,除非只关心它们的重量,在重量上才能相加,但牛的重量与牛是完全不同的两个概念。可加性与可分性还表明,在相加或相

减的过程中不会产生、也不会丧失某些原来性质,即不会产生新的东西。这种性质在数量上表现为服从加法(减法)规则。

非线性相互作用或非线性关系远比线性关系复杂,从逻辑上讲,它包括除比例和直线关系以外的所有关系,即一切原则上不能线性化的关系。这意味着它已经不仅只是量与量之间的关系,还包含了质的突破,产生与原来相互作用双方完全不同的性质,或者说产生性质完全不同的东西。

由非线性相干所产生出来的新东西正是一种整体性的突现,它是元素间出现“支配”作用的结果,体现了系统中非线性相干的本质。例如,人们在研究物理系统时常按离平衡态的远近来划分平衡态,在昂色格倒易关系起作用时为近平衡态,否则为远离平衡态。从数学上讲,远离平衡态,就是泰勒展开式中高阶项不可忽略的状态,它意味着各种力和流的关系中非线性项在起主导作用,微小的变化将决定系统的运动方向。

可以设想:非加和性的根源在于自耦合、自缠绕和自反馈,从前面提到的泰勒多项式中看,产生上述复杂性态起主要作用的不是常数项,也不是一次项(线性项),而是高阶项。高阶项指的是两次或两次以上的项。以两次项为例, x^2 的含义是 x 作用于“自己”一次,对应于两次以上的高阶项,自己作用于自己的“次数”更多。这就出现了自反馈、自缠绕和自耦合。

自耦合和自缠绕的性质与线性相关截然不同,因为它是导致新质、新事物产生的“发生器”,是系统构成之本(黏合剂),而且是系统演化的动力与催化剂。

(4) 非对称性与对称性破缺

有序性是系统结构的一个基本特征,从物理学上讲,有序性和对称性破缺是密切相关的。对称和对称性破缺是现代物理学的基本概念,对称意味着“守恒”、“平衡”、不变或定常,也意味着某种规律与原理。物理学上把对称定义为“变化中的不变性”。例如,能量守恒定律对应了时间平移的对称性和不变性(因此在保守系统中总能量是不变的,既不会消失也不会产生),动量守恒定律对应了空间平移的对称性,角动量守恒定理对应了空间旋转的对称性

等。某种意义上物理学追求的就是对这些对称性、规律性的认识。对称的反面是对称性破缺,而对称性破缺又意味着“序”的产生,系统的一个基本特征就是有序。这些与非线性有什么关系呢?

非线性是导致对称性破缺的根源,原因在于非线性相互作用的存在与系统内部反馈作用的存在直接相关。具体而言,在两个物体之间的非线性相互作用中,双方都是作用的结果不正比于作用的原因,从而会产生多出部分。两个多出的部分还会相互结合形成新的东西,新产生出来的东西又会重新加入原来的相互作用之中,于是出现“第三者”。“第三者”的“介入”使原来的问题变得十分复杂,如引起时间上的不对称,即不可逆性(投入少而产出多,或者相反),打破原来的对称、均匀、平权、平衡稳定状态,使原来的关系变为一种新关系。具体表现为支配与从属、催化与被催化、策动与响应等。非对称源于对称性破缺,这是一种发展和创新,它产生了一种新的秩序,也增加了系统的复杂程度。

从数学上讲,对称性破缺是对称元素的减少(约束条件增加),即在具有对称性的变换群中,失去了一半的元素(逆元素),因而能用“半群”来描述,它与原来的“群”大不相同。例如,在自组织过程与分形生长中,运用重正化群方法,就是只允许“粗粒化”,不允许“细化”,这实际上是一个“半群”。

轨线的折叠导致突变性、奇异性和非连续性。这样在从某一角度研究时就会出现多次相交(多重解),在另一角度,则会出现叠折的投影,从而发生突变、奇异与非连续。这里不再是平行与重合,而是可以相交于有限的几个点,从而使变化“离散”化,出现间断。

由此可以设想一个连续与间断相统一的图景:原来在可能性(非现实性)空间中的非线性过程在与某一观察者相交时,出现了观察中的离散性、粒子性、间断性。

5.1.3 非线性科学的范例

非线性科学与系统科学的结合,一方面极大地推进了系统理论的发展,同时也揭示了一个新的世界层面,人们在这个领域发现了许多新的现象和规律,提出大量新问题。特别是当人们开始将非线性系统理论运用于复杂的社会经济现象的研究之后,为社会

科学的深入发展带来诱人前景。一种新的非线性系统观也在逐渐形成之中。非线性系统观给人们最大启示是它要求人们用非线性的观点去观察世界、处理问题,并且特别注重非逻辑的、直觉的、灵敏的、发散的和创造性的思维方式,努力发展人们的想像力,把探索的矛头伸向那些以前被认为是奇异的、混乱的、突变的、数学性态“不好”的、“病态”的领域,去发现新现象,寻找新规律。

1987年,美国 Los Alamos 国家实验室非线性科学中心主任 D. K. Campbell 对非线性科学作了十分准确地概括,在他那篇广为引用的论文《非线性科学——从范例到实用》中,把非线性科学定义为“研究那些不是线性的数学系统和自然现象的学科”。他认为:“线性与非线性的区别在数学上表现为线性方程满足叠加原理,即任何两个解都可以叠加起来成为一个新解,而非线性方程中叠加原理失效。”从物理学上看,非线性系统和线性系统相比有以下特征:

(1) 线性系统的时间和空间上的典型表现是作光滑和规则的运动,而非线性系统则表现为从光滑运动向混沌的、无规的以至随机的运动过渡。

(2) 线性系统对参数的微小变化或外部激发的响应是光滑的,即成正比的(这也就是线性系统原来的含义),而非线性系统的响应则可能出现与外部激发很大不同的响应。如当一个非线性系统受到周期性的驱动力作用时,其响应的周期可能是驱动周期的 $1/2$, $1/4$ 或 2 倍。

(3) 线性系统中,局部的脉冲会随着时间的推移,向外扩散,并且不断衰减,直到消失;而非线性系统则可能将局部的脉冲或“波峰”长期保持下去,呈现出高度的“拟序性”。

非线性系统为什么会有这些奇异的特性?这正是非线性科学所要研究的内容。Campbell 认为:研究非线性科学最好从一些反映其定性特征的典型范例入手。他在上述论文中提出了三大范例,即拟序结构和孤立子、确定性混沌和分形、复杂的图形和图像。在文章最后他讲了一段很有意思的话:“对非线性科学来说,最大的挑战显然是了解自适应、学习和演化。复杂的自适应系统具有

与通常的动力学系统所熟悉的性质,包括分层结构,多个吸引盆,以及许多亚稳态图形之间的竞争,除此以外,它们还必须有一种能应付并利用它们环境的变化机构。”这段话把非线性科学引向具体的、实际的应用,也把非线性科学与系统科学结合了起来。过了3年,1990年Campbell正式把自适应和自组织作为非线性科学的第四大范例。

从系统科学的角度来看,Campbell关于非线性科学的四大范例,实际上正是系统复杂性的四种典型表现。

(1) 拟序结构与孤立子(soliton)

非线性能够在一定时间范围内保持其结构不发生变化或衰减的性质称为“拟序结构”,孤立波或孤立子就是典型的“拟序结构”。孤立波是19世纪30年代英国工程师罗素在一次沿着河道骑马时,发现船头有一个高0.3~0.5米,长10米的孤立水波。1895年,数学家科特维格和德佛里斯用浅水波方程(KDV方程)首先得到了“孤波群”。此后孤波或孤立子就成了科学家们经常谈论的话题。其他方面拟序结构的例子也不少,如流体中的旋涡,化学反应波和非线性扩散阵面、激波,金属中的位错、气泡和液滴等。孤立子(soliton)之所以引起人们巨大的兴趣,其原因一是它非常奇特,当人们在水面上看到一个孤立、经久不灭的水波时都会感到惊异;二是它在理论研究和实际应用中都有着十分重大的意义。它是由各种复杂、动态的非线性因素相互作用产生的十分“简单的”、“相对不变的”结果。现在不少研究者正利用孤立子模型来研究自然界和人类社会中的复杂现象,甚至和人体中的经络联系起来。在理论和方法上,研究孤立子还取得了不少“副产品”,其中反射方法就是一个例子,它是对一批非线性发展方程的统一严格的方法,而且soliton是唯一的可严格求解的例子(方程有无穷多个守恒量)。

(2) 确定性混沌(chaos)与分形(fractal)

在非线性科学中人们对混沌和分形的研究相对较多,其中混沌指的是“来自确定性系统中的混沌”。用Campbell的话来说,就是“尽管过程是严格确定的,并且所有的力是已知的,但长期行为却不可预言,而且是像掷钱币那样随机”。仅这一点就足以让经典

科学感到奇怪了。如果说混沌主要表明系统在时间方面复杂的话,那么,分形就是非线性学在形态上的典型表现。分形的最大特征是局部与整体具有某种相似性。下一章将对分形作专门讨论。

(3) 复杂图形与湍流

当一个非线性系统被推到远离平衡态时,它就可能出现某些复杂的时空图形或模式,其中最典型的例子是流体中的湍流、木星红斑的复杂图形(Configuration),而这些复杂图形的形成和选择存在于整个自然界、社会以及思维领域,从电磁波到微观尺寸的晶体,从贝壳的花纹、老虎皮的条纹到股市的行情。

复杂图形与拟序结构有些类似,不同的是前者仅仅发生在系统的局部区域,而后者则是多个系统相互竞争的结果。在相空间中,它表现为多个暂时吸引盆的叠加,但它们既不是完全稳定,也不是完全不稳定,而是“亚稳定”的。

和混沌与分形相比,湍流(复杂图形)更为复杂,原因在于它涉及到无穷维动力系统时的时空混沌,以前人们设想它是发达的时空混沌,现在看来比这还复杂。湍流和复杂图形不仅在自然界中大量存在,而且在社会经济中也广泛存在。

(4) 自适应、学习行为与演化

在Campbell看来,对非线性科学最具挑战性的是自适应、学习与演化。自适应是生命系统最典型的特征,它的复杂性集中表现在为了自己的生存与发展,系统要根据环境来调整自己的行为模式和内部结构。这里的基本前提是要有效地获取和处理各种信息,并且具有自己的目的性和自我调节能力。适应环境有许多种策略,一种适应方法是构造一个明显的时间层次,在较快的层次上描述系统状态的动力学行为,在较慢的层次上表示非线性方程的变化。如人类免疫系统模型和自催化蛋白质网络模型就属于这类自适应方式。另一种连接型自适应,它是通过将简单的结构连接成一个巨大的网络来得到的,其中典型例子就是神经网络,它的一个重要特点是不仅能适应环境,而且能自己进化到高级形式。

以上主要引用了Campbell关于非线性科学的观点,非线性科学的四种范例,实际上都是系统复杂性的集中表现。其实,早在20

世纪 80 年代初,包括我国学者在内的许多学者都对非线性系统问题进行过深入的研究。钱学森将世界上的系统分为简单系统、简单大系统、复杂系统、复杂巨系统、特殊复杂系统等五类,这样的分类基本上是按系统内部包含元素的多少和是否存在非线性相互作用来划分的。

应该指出,非线性毕竟只是一种特殊的数学形式,尽管它具有很大的普遍性,但也不能包含科学研究和人们心目中的所有的复杂性,复杂性具有比非线性更广的含义,不能把复杂性全部归结为非线性。因为,即使在数学中,复杂性也不能完全归结为非线性,至少还有多元和高阶的问题。这些将在后面详细讨论。

5.1.4 非线性与复杂性

真实世界中能够严格用一次方程来描述的关系或现象极其罕见,而非线性关系和现象则随处可见。一个典型的例子是非线性振动,它具有许多与线性振动十分不同的性质。如线性振动的固有频率是不随振幅而变的,而非线性振动的频率却随振幅的大小变化;而且当负阻尼过渡到正阻尼时有一个阻尼为零,这时会出现自激振动;如果振动在多个稳定周期之间跳跃时,振幅会发生跳跃;还会出现亚稳共振(即 $\omega n = \omega/n$ 时也有共振);同步(锁频:即干扰力频率接近自振时被干频同步);参变激发(由某个参量激起的大幅度振动);参量镇定(参量周期性变化使系统稳定);组合频率响应;叠加原理失效;滞后现象等。

在光学现象中,非线性光学系统也具有如和频,差频,多次倍频,自聚焦,自透明,双、多稳态,光学吸收,多光学,电离荧光等有趣的性质。

非线性相关引起的复杂现象令人眼花缭乱,但由于历史的原因,大量的教科书中研究的几乎全是线性关系和线性现象,非线性现象反而成了奇特的东西。20 世纪 80 年代以来,非线性科学的兴起很快成为自然科学中引人瞩目的焦点,其中要数混沌运动、分形形态和自组织过程最引人注目。尽管知道目前这方面的研究还在继续进行,许多问题还没有得到彻底搞清,但对这些现象的深入研究使人们进一步认识到它们与系统科学和复杂性科学之间的内在

联系。下面分别对此进行讨论。

5.2 混沌运动

当人们一谈到现代的系统科学,或者系统科学的近期发展时,总会提到混沌,这是为什么呢?主要有以下几方面的原因:

(1) 混沌是系统的一种存在方式,几乎所有的系统都具有一定程度的混沌性:在混沌研究的初期,人们往往会为在某个领域发现存在混沌而惊奇,随着认识的深入,人们意识到混沌运动其实广泛存在于自然、社会和思维等各个领域。也就是说,世界上几乎所有的事物(系统)只要满足某些非常简单的条件,就很容易产生混沌(后面将要详细讨论的“周三”就是典型的例子)。当然,混沌运动的广泛存在并不能说明所有的运动都是混沌的,它只是事物(系统)众多运动形态中的一种基本的形态。由于事物或系统内部结构与外部环境的不同,混沌运动的方式也各不相同。这恰如指明事物在变化固然重要,但更重要的是区分不同的事物运动形态到底有什么不同。因此,目的不在于论证系统存在混沌运动,而要搞清它是“怎样的混沌”。对于系统科学来说,就是要研究不同的系统在什么条件下作什么样的混沌运动。

(2) 混沌是系统复杂性的典型表现,认识系统复杂性必然要研究系统的混沌运动:混沌有区别于其他运动形态的自身特征,这些特征也是本章的主要研究内容。总体上可以将它视为复杂运动的一种表现,而这些复杂运动又是事物或系统的特征所在。因此,要认识系统的复杂性,就必须研究作为其基本形式的混沌。

(3) 混沌是系统演化的起点和归宿:演化是系统运动的基本形态,任何一个具体的系统都有自己从无到有、从有到无的生命周期,这里所指的“无”是相对于系统存在的“有”而言的。根据对混沌学的研究,可以从更深的层次上理解这种“无”,即对应着混沌态的“无”。因为系统的产生实质上是宏观序的产生,但它不是凭空产生的,而是来自于超宏观序的“破碎”和微观序的“凝聚”与“归并”的结果,这是一种“重组”过程。而要达到这点,在原来的状态中就必须包含失稳、随机和非周期性的因素,这些又正是混沌的基

本特征。因此,有理由设想系统演化起源于混沌。相应地,把混沌态作为系统演化的一般去路或终结。

当然,除了上面的直接原因外,混沌学自身的迅速发展和大量成果,大大地加深了人们对系统的理解。从20世纪60年代算起,混沌学研究经过40多年的发展,尽管直到现在混沌的问题尚未完全解决,但它在各个领域的影响是显而易见的,以至不少学者,特别是研究生命、社会经济等复杂系统的学者越来越多地求助于混沌学,希望从中找到解决问题的新观念和新方法。现代混沌学像20世纪初的相对论、量子力学那样,不仅用大量具体的成果证明了自己的科学性,而且从思想上对传统的观念发起严重的挑战,对人们思维方式的革新作出了重大贡献。具体表现在两个方面:

1) 混沌打破了传统观念。混沌对传统观念的挑战是多方面的,而且是根本性的。科学历来以实验与观察为基础,这是自15世纪以来早已形成的“光荣传统”。实验科学的一个重要的前提是实验的“可重复性”,即在相同的条件下实验的结果应该相同,至少在“规律”水平上保持稳定不变。但是,混沌具有对初始条件的敏感的特征,即只要初始条件发生微小变化,结果就会有巨大出入,因而从根本上否定了重复实验出现相同结果的可能。那么,如何从实验中发现规律性呢?

又如,以往研究事物整体(系统)运动时主要注意的是它的稳定和周期性,这是很容易理解的,因为一切对于规律性的认识都是建立在这两点之上的,如果事物从一种状态出发以后就永远不能再回到它的起点(用数学的话来说就是存在所谓“游荡点”或“游荡集”),这就意味着它的每一步都来到一种新的状态,还怎么能谈得上定常的规律呢?混沌中不仅包含了无穷多不稳定的周期运动,而且包含了非周期运动,但它在整体上又具有稳定性和定常性,这种奇异的特性也是传统的观念无法理解的。

2) 混沌研究引进了新方法:打破传统观念并不等于新的观念会自然产生。然而,混沌学确实把破与立结合了起来。在对其进行系统深入的研究中,人们不仅获得了许多具体成果,如一些模型、公式、结论以至自然常数等,而且获得了大量探索复杂性的新

观点和方法。尽管混沌学是建立在现代理论自然科学基础上,要真正理解和把握它需要较多的数理知识,也并不是所有的结论都具有“放之四海而皆准”的功效,不能指望它能解决所有复杂的具体问题,但混沌学中的基本观点、方法、概念,如求各种指数、维数、熵的方法,元胞自动机的思想等却能很好地运用于包括自然、社会和思维的广大领域。这一点有些类似数论中对“哥德巴赫猜想”的研究,“一加二”、“一加一”的证明未必到处可用,但在对它探索过程中发明的许多方法,如“筛法”等确有广泛的用途。

5.2.1 随处可见的混沌

混沌运动广泛存在于自然和社会的各个领域,下面是一些经常被引用的例子。

(1) 混沌与混乱:在人们日常的用语中“混沌”(或浑沌)一词和“混乱”一词并无严格区别。英文、德文和俄文词典中的混沌(*chaos*)都源于希腊文,意思是混乱,完全无秩序,不整齐等。不过,尽管“混沌”和“混乱”的含义基本相同,但使用的场合却有很大区别。“混乱”一词使用得比较平常、普遍,而“混沌”一词则仅用于一些较特殊的场合。如用来描述一个智力尚未开发、对世界还十分无知的孩子,可以说他(她)处在“混沌未开”的状态。有趣的是,在人类的孩提时代,尽管相隔很远,又无音信相通,中国古代传说和西方圣经中都不约而同地把宇宙形成之初,那种模糊一团的景象说成是一片混沌,《山海经》中说,巨人“盘古”挥动大斧开天辟地,这才“混沌”初开,演化至今。为了在科学上区别混乱与混沌,近年来赋予“混沌”一词专门的意义,用它来称呼一种特殊的运动形态。这种运动形态既不简单地等同于绝对无序与混乱的状态,又不同于复杂的有序状态,而是由有序状态发展而来的“表现”上的无规律,随机的但却有着深刻内在规律性的新的运动形态。的确,从表面看,混沌运动是十分混乱的,但进一步研究表明,在混乱的表象背后存在着极其丰富而深刻的规律性。因此,不能把所有看上去是混乱的运动都认为是混沌。事实上,许多看上去混乱的运动既可能是混沌,又可能是一种复杂的周期运动,或者仅仅是那些一时还不清楚其规律性的简单运动。所以,从某种意义上说,人们谈论的

混乱与其说是对象的混乱,不如说是谈论者自身认识还处在模糊不清、或无法准确描述的状态。

(2) 非生命系统中的混沌:正因为混沌运动从表面上看既混乱又复杂,所以长期以来一直没有也不可能得到深入研究,对于那些简单的、特别是那些非生命系统的物理、化学系统,人们几乎看不到混乱的痕迹,所以当20世纪60年代在这个领域发现混沌时立即引起了人们高度注意,并把它作为混沌研究的基础。按照通常的推理,如果在这些领域中存在混沌,那么,在比它远为复杂的系统中,或者由它们所构成的系统中发现混沌就更不足为奇。基于这一原理,选择以下典型实例进行剖析。

1) 天体系统中的混沌:作为确定性运动典型的天体运动历来被认为是最简单、最有秩序的运动。但就在20世纪60年代,这个有序运动最坚硬的堡垒中却爆发了一场由平面三体运动的计算机模拟引起的革命。20世纪60年代计算机还刚刚发明不久,性能也远不如今天的微机,为了探讨三体问题这个物理学大难题,当时的苏联科学家就用来模拟著名的平面三体问题:设平面上有质量相等的两个大天体和一个小天体,假定它们在真空中只受到万有引力的作用,显然小天体唯一的平衡点应在两个大天体中心连线的中点,如果受到一垂直于连线力的作用,小天体就会在此连线上作周期运动。按照牛顿理论,小天体来回振荡的周期是固定不变的,即人们很容易准确算出预见隔多久之后小天体再回来。然而,计算机模拟的结果却出人意料,在经过一段暂态过程之后,小天体的运动周期完全变得不确定了,也就是说,根本无法预测下一次回来的时间。这对于一向以确定性为特征的天体运动来说是无法想象的。

2) 流体动力学中的不稳定性:贝纳德(Benard)对流的稳定性,是从耗散中产生有序结构的经典例子,但同时也是从有序中产生的混沌与湍流的典型。如果将平行板之间的温差继续增加,每经过一个临界值,都会使原来的有序结构(六角形花纹)失稳,接着产生一种新的复杂的花纹。随着复杂程度的增加,最后产生一种表现上的无序状态,即混沌态。这种现象称为 Rayleigh—Benard 不稳定性。1974年 Ahlers 首先用液氧进行了试验,研究了低温下的

失稳过程。后来 Libchaber 等人在小 Pradtl 数的情况下看到三维的不稳定性和阵发混沌现象。

耗散结构理论和协同学经常提到 Taylor 不稳定性。即在两个同轴圆筒间充满液体,让外筒固定,内筒旋转,随着转速增加到第一个临界的雷诺值 R_{c1} 时,整体均匀性失稳,接着出现径向流动,分成若干个不随时间变化的环流层。当转速继续增加到一个新的临界值时,水平的环流层又发生失稳,出现上下摆动,流体的速度频谱出现一个明显的基频尖峰 f_1 ,随后又出现了另一个不可约的 f_2 ,这时系统进入 f_1 准周期运动的状态。继续增加 R 值,速度频谱中出现噪声, f_1 和 f_2 也相继消失,只剩下连续噪声谱,于是系统进入混沌态。近来有人运用激光散射来对 Taylor 不稳定的演化过程进行测量,发现 Fourier 频谱序列有一个明显的规律:新频率恰好是按基频 f_1 的分数倍 $f_2 = (1/2)f_1$, $f_3 = (1/4)f_1$, $f_4 = (1/8)f_1$ 出现的,这就是通过“倍周期”分叉达到无周期的混沌。后面还要作详细讨论。

3) 化学湍流:Belousov-Zhabotinskii 反应作为典型的化学耗散结构系统曾被详细研究。当不断注入反应物和不断取出生成物时,该系统可能出现时空有序的定常态,这是一种典型的自组织现象。1977 年以来,人们开始观察某个组分(如 Br)离子的浓度受物质流量控制的情况,当流量不太大也不太小时,可观察到多种动力行为,如多种定态、简单和复杂的振荡、阵发混沌、倍周期分叉以及周期与混沌行为的交替等。实验观察还发现,那些依次出现的周期(序列)具有和许多其他的非线性系统很相像的规律性,可以将这种周期与混沌的交替出现看作是通向湍流的一条“新路”。

4) 固体物理学:固体噪声的产生一般被认为是热运动的结果,但是在某些情况下可能会出现一种“反常噪声”。例如 1977 年人们发现,作为参量放大器的约瑟夫森结在射频驱动下,当达到一定的临界值时会产生一种噪声,其等效温度高达 5 万度。显然,这不能用通常的热噪声解释,因为它就是来自约瑟夫森结动力学本身的混沌行为。

(3) 生命系统中的混沌:生命系统包括从病毒、细菌到生态系

统等一切具有生命特征的系统,为讨论方便,暂不考虑社会、经济和文化等因素。由于生命系统远比非生命系统复杂,其中的混沌也更为普遍和复杂,经常提到的例子有:

1) 脑电图、心电图上表现出来的混沌:生命过程与心电图、脑电图的关系早就引起了人们的重视。1928年,范德堡等人用耦合的非线性电路模拟心脏搏动和心律不齐现象。后来有人把鸡胚心肌细胞成团地分离出来,在培养液中观察,在没有外加因素时,这些细胞自发地无规则地跳动着,周期在 $0.4\sim 1.3$ 秒。当外加脉冲电流后,它们的跳动就同步起来,而且锁频到脉冲频率上,表现出明显的自组织性。如果把脉冲周期从 0.1 秒调到 0.7 秒的过程中,细胞集团的跳动经过倍周期分叉进入混沌状态。

长期以来,由于脑电图特殊的复杂性,对脑电图的研究一直未有大的突破。1961年,N.维纳在《控制论》一书再版时,又补充了“脑电波和自组织系统”一章,其中提到对视觉信号反应时间的研究。当以 $1/10$ 秒的闪光射入眼中时,大脑的中央 α 律的周期也会近似为 $1/10$ 秒,只是有一个时间上的延迟(这就是下面要提到的延迟方程)。维纳提到当时在德国的一个实验,“被研究对象的经验感觉是很紊乱的,它与一个类似的闪光所引起的紊乱感觉差不多”。在 10 周/秒的频率附近形成了一个“ α 丛的频率”。这已是一种混沌产生的迹象,但当时维纳主要想研究自组织导致有序结构,而没有更深入地了解自组织引起的混沌。

近年来,有学者发现脑电图在睡眠休息时有明显的周期性,一旦睁开眼睛开始接收并处理外界信号时,脑电图就变得“混乱”,而正常人的脑电波一般都是混沌的。而癫痫病患者的脑电图则常常显出明显的周期性;当心率出现有规律的周期震荡时,有可能有心脏突然停止或心脏猝死的危险。这一事实说明,在生命科学和脑科学中,混沌是非常“正常”的,这给人们研究认识机制提供了重要的启示。

2) 生态系统中物种的生存竞争所导致的混沌:在捕食者与被捕食者模型中,它们之间在数量上的此消彼长呈现出极其复杂的变化。如根据 Hudson Bay 公司从 $1845\sim 1935$ 年收购到的山猫和

野兔的皮毛数量,发现捕食者和被捕食者的数目随时间振荡,且彼此之间有一个位相差。生态学家为此建立的模型表明,这与混沌有关。在实际生态系统中,种群之间的捕食关系非常复杂,一旦某种被捕食者少到一定程度后,捕食者将放弃捕食这种动物而转向另一群数量较多的种群,这保证了生态系统的稳定。

(4) 社会经济系统中的混沌:社会系统,包括各种经济的、政治的、文化的、教育的、军事的等无疑都是十分复杂的非线性系统。在这类系统中实现混乱和混沌的情况往往比自然系统更为普遍。只不过由于社会系统中的混沌过于复杂以及精确定量方法的缺失,因此未能对其作深入研究,这样一来,即使碰到混沌也“见怪不怪”了。比如,通常的经济发展中有各种各样的“长波”,而一旦发生经济危机,原来的有序性就被打破了;在人们关心的股票市场中不时会出现“剧变”;在国际关系中,当对峙发展到紧张阶段时战争可能一触即发,也可能突然转向妥协;在供求关系中,一个微小的扰动可能引起巨大的价格变化;在社会中流行的思潮、服饰、风气都会因某些细微的、不为人们所觉察的因素而突然发生转向,如此等等。这些过程中的混沌运动显而易见,它有可能给人们带来意想不到的后果。但由于人们未能认识它和意识到它的存在,因此也无法对它加以利用,结果常常造成巨大损失。可以说,在自然界的各个角落,在人类社会的不同时期,混沌的例子俯拾皆是,无处不在。

5.2.2 混沌的定性特征

对于系统科学来说,指出哪些现象是混沌的还远远不够,重要的是研究混沌运动产生的原因及其特征。混沌的基本特征如下:

(1) 表观的无序:人们很容易将混沌与混乱无序混为一谈,不加区分地把所有的混乱现象看作是混沌运动显然是不正确的。其实混沌只是具体表观上的无序性,而实际上具有深层高级的有序性,从某种意义上可以认为混沌是有序与无序的互补。下面先讨论表观无序的一面,1986年笔者在《混沌运动的哲学启示》一文中曾将混沌的无序无规方面归结为以下几点:

1) 内随机性:通常人们认为系统自身不会出现随机性,并习惯

于将随机性的根源归结为来自系统外部的或某些尚不清楚的原因的干扰作用,称为“外随机性”。但外随机性是经受不住分析和实践验证的。对某些完全确定的系统进行数学模拟时发现,它能自发地产生出随机性来,称为“内随机性”。混沌所表现出来的随机性就是来自系统内部的非线性相干,前苏联学者辛德里柯夫和阿列克赛等人于20世纪60年代对平面三体问题的研究就是最典型的例证。这种内随机性的存在,使得人们无法从系统外部去完全控制和把握系统的运行,因而也表现为一定的不确定性。

2) 非周期性:混沌运动在相空间的轨迹中既包含了可数无穷多个周期轨道和不可数无穷多个非周期轨道,这些就是游荡点的轨道。混沌运动的非周期性可以从后面将要讨论的“倍周期分叉到达混沌”中明显看出。

3) 局部的不稳定性:所谓局部不稳定性是指系统运动的某些“维度上”或某些方面的行为强烈地依赖于初始条件。混沌理论早期研究者、著名气象学家罗仑兹(Lorenz)提出的蝴蝶效应就是典型例子。蝴蝶翅膀的一次小小的扇动会使得地球另一边的气象大变,也使气象学家无法预测一个月以后的天气情况,这就是蝴蝶效应。现在罗仑兹模型已成了混沌运动的“经典”模型,混沌的局部不稳定性也成了判定混沌发生的基本标志。

(2) 有序有律:人们常常把有序有律理解为事物的某种周期性、规整性和不变性。例如,说有序有律就是“有条有理”,按一定的规律运动,这其实还只讲到“序”和“律”的一个方面。混沌运动高层次的有序性则可以从以下几个方面看出:

1) 自相似结构:混沌的这种结构不是指它的实际几何形状,而是指它的行为特征。当系统的变化在相空间中可由一条轨线来描述时,无限嵌套的自相似几何结构就是这种相轨迹的几何形态。前面提到的“周期倍增”和“倍周期分叉”就是个很好的例子。这里有序性表现为每次分叉的形态都是相似的,而且,一层套着一层,明显地表现了某种“不变性”和规律性。

2) 普适性:任何规律性都表现为对一类事物的普适性,混沌运动也存在一些普适性的规律性。普适性一般可分为结构普适性和

测度普适性。前者是指趋向混沌过程中轨线的分叉情况与定量特征不依赖于该过程的具体内容,而只与它的数学结构有关;后者指的是同一映象或迭代在不同测度层次之间嵌套结构的相同,结构的性态只依赖于非线性函数幂级数展开式的幂次。混沌的这些普适性为人们研究和把握混沌现象及其规律性提供了方便。

3) 自然常数:新自然常数的发现是混沌研究中一件令人振奋的事情,正如物理学家海森堡所言,像 h 对应着量子力学、 c 对应着相对论一样,任何一个新的自然常数都对应了一个新的物理理论,而且标志着理论的相对成熟。在与混沌有关的自然常数中,费根鲍姆常数和标度变换因子是最著名的。现在人们对它们的测量和计算已经精确到了小数点后几十位,例如,费根鲍姆常数等于 $4.669\ 201\ 609\ 102\ 990\ 2\dots$ 。它是美国物理学家费根鲍姆利用计算机经过长期计算后发现的。事实上这种常数不止一个,而是一簇。它的理论意义是指分歧(叉)序列的收敛速率,表征了趋向混沌时的一种动态不变性。标度变换因子等于 $2.502\ 907\ 850\ 958\ 928\ 485\dots$,它表征了所谓标度不变性。即在趋向混沌时,只要把标尺缩小或把放大镜放大倍数增加,就会看到完全相同的“几何结构”。科学家们指出,在许多实际情况中,哪里有混沌或混沌现象存在,那里就可以找到它们的踪影。可见,它们正是混沌运动深层规律性的一种表现。

(3) 无序与有序的互补:量子力学产生之前,人们总认为波动性和粒子性是截然对立的,后来爱因斯坦等人提出著名的波粒二象性,并认为波粒二者是统一的,都是微观粒子的基本属性。相应的,混沌理论产生之前,人们也把系统的有序有律与无序无律截然对立起来。现在人们发现,它们两者在混沌运动中互补起来了。这种互补性可以从后面将要详细讨论的两个定量判据李亚普诺夫指数与分数维数中看出。

5.2.3 混沌的定义

通过对大量混沌现象的分析,知道了混沌的定性特征。那么,到底什么是混沌呢?事实上,自混沌研究以来,人们已经提出了不少混沌定义,比较著名的有彭加莱定义、哈肯定义、卡丹诺夫定义、

李-约克定义、萨可夫斯基定义、斯迈尔定义等,后来证明后几种定义在数学上是等价的。上述定义都从不同的侧面刻画了混沌的本质特征。下面着重介绍其中的几种。

(1) 哈肯的混沌定义:1979年德国物理学家、协同学的创始人 N. 哈肯在《协同学引论》第二版中写道:“我们定义混沌性为来源于决定性方程的无规运动”。这个定义不能说是最严格的,时间上也不算最早,但由于比较“通俗”,在哲学和其他社会科学的文献中经常被引用。该定义首先强调了混沌性的来源,认为这种“表现”上的不规则运动源于决定论性质的动力学方程。这对于习惯于传统思维的经典力学界是十分意外的。因为,按照通常的理解,决定性方程的每一步运动都是严格遵守因果关系的,只要初始条件决定,边界条件决定,运动方程决定,则运动的结果也应是完全决定的。这里似乎没有产生任何不规则性的可能。而混沌运动的客观存在却打破了这种观念。为了强调这种混沌是来源于决定性(确定论)方程,所以有时又称为“确定性混沌”。其次这个定义强调混沌是一种“无规运动”。这一点是十分含糊的,因为,规则运动尚可规定它几条,规则可以有許多,乃至无数种,而“不规则”却很难加以明确地描述。不规则的问题是十分复杂的,因为有表面和实质的不规则,客观和主观的不规则,一些表面上看来不规则的运动也许只是运动形态比较复杂而已,而另一些具有“定常性”的运动却可以十分混乱。在该书的后面他又谈到了量子混沌,并认为它们是两种不同性质的混沌,由此看来,哈肯的定义仅仅涉及了混沌中的一种,但在认识混沌的初期定义的不准确和不完善是可以理解的。

同样考虑到混沌的起因,在另外一些文献中,混沌常被称为自发混沌(self-generated chaos)、动力随机性(dynamic stochasticity)、内在随机性等。这些名称所强调的也是混沌性的来源,但同时也表明它主要是来自内部的原因,而作用只占次要地位。不难看出,这正好表明混沌运动是自组织运动的一种形态。

(2) 李-约克定义:混沌的李-约克定义是华裔学者李天岩和他的导师约克 1974 年前后提出来的,这个定义从数学上刻画了混沌的特征,现已成为人们经常引用的一个定义,并被证明与其他的许

多数学定义是等价的。

李-约克定义通俗地说就是“周期三蕴含混沌”，它可由一个同名定理(李-约克定理)来表述：

设 J 为一区间， $F: J \rightarrow J$ 是连续的。假定有一个点 $a \in J$ 使得 $b = F_1, c = F_2, d = F_3$ ，且满足 $d \leq a < b < c$ (或 $d \leq a < b < c$)，则

- 1) 对于每一个 $k = 1, 2, \dots, J$ 中有周期 k 的周期点。
- 2) 存在一个不可数集 S (S 中不包括周期点)， S 满足下列条件。

(a) 对于每一对 $p, q \in S$ 且 $p \neq q$ ，有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |F_n(p) - F_n(q)| > 0;$$

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} |F_n(p) - F_n(q)| = 0.$$

(b) 对于每一个 $p \in S$ 和周期点 $q \in J$ ，有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |F_n(p) - F_n(q)| > 0$$

特别是当一个周期为 3 的周期点时，定理的假设成立。这就是论文标题“周期三蕴含混沌”的本来意思。

后来李天岩在一篇介绍 1975 年的论文撰写经过的短文《关于 Li-Yorke 混沌的故事》中，简化了李-约克定理：

定理 假设 f 是从实数空间 R 的连续函数，同时假设 f 有一个周期三的点，则

- 1) 对任何一个正整数 n ，都存在一个周期 n 的周期点 X_n 。
- 2) (a) 存在一个不可数的子集 S ，对于其中的任何两点 x, y ，有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |F_n(p) - F_n(q)| > 0$$

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} |F_n(p) - F_n(q)| = 0$$

(b) 对于任一周期点 $p \in R_1$ 以及 S 里的点 q ，有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |F_n(p) - F_n(q)| \neq 0$$

定理的第二部分描述了混沌集 S 的特征。对于 S 中任意两个初值 x_0, y_0 ，其中 $x_0 \neq y_0$ ，由它们各自演化出的轨道为 $x_n =$

$f(x_{n-1})$ 和 $y_n = f(y_{n-1})$ 。定理说两个序列之间距离的上极限大于 0, 即当迭代次数趋于无穷大时, x_n 与 y_n 之间的距离不断地大于一个小的正数; 定理又说其下极限为 0, 意思是 x_n 与 y_n 之间的距离可以经常地无限接近。定理的第二部分的第二条含义是, 周期集与混沌集 S 是根本不同的, 周期集中的点在演化中不会无限趋近于 S 中的点的轨道。

(3) 萨可夫斯基定理: 在 20 世纪 70 年代, 在李-约克定义广为人知后, 人们想起早在 10 年前前苏联学者的工作, 事实上早在 1964 年苏联数学家萨可夫斯基 (A. H. Шарковский) 就证明了一个类似的定理——萨氏定理:

设 $f: I \rightarrow I = (0, 1)$, 是只有一个临界点的光滑映射, 满足 $f(0) = f(1) = 0$, 令 T 是按下述顺序排列的有序集

- 3, 5, 7, ... ;
- $1 \times 2, 3 \times 2, 5 \times 2, 7 \times 2, \dots$;
- $1 \times 2^2, 3 \times 2^2, 5 \times 2^2, 7 \times 2^2, \dots$;
- $1 \times 2^3, 3 \times 2^3, 5 \times 2^3, 7 \times 2^3, \dots$;
- ;
- ..., $2n, \dots$,
- $2 \times 4, 2 \times 3, 2 \times 2, 2 \times 1, 0$

设 p 和 q 属于 T , 其中 p 排在 q 之前。若映射 f 存在最小周期为 p 的周期点, 则 f 一定存在周期为 q 的周期点。显然, 若有周期 $6 (= 2 \times 3)$ 的解, 就有周期 $2 \times 5, 2 \times 7, \dots$ 等一系列周期解; 若有周期 3 解, 则有周期 $5, 7, \dots, 2 \times 5, 2 \times 7, \dots$ 等周期解。也就是说, 周期三蕴含混沌。反过来, 有周期五, 未必有周期三。上述序列的最后一行恰好表示倍周期分叉的逆过程。由于萨可夫斯基的论文发表在不引人注意的乌克兰的一家数学杂志上, 而且是用俄文写成的, 长期以来人们根本不知道这件事。1978 年经斯特凡 (P. Stefan) 的介绍, 萨氏定理才广为人知。

(4) 对上述定理的几点说明: 李-约克定理、萨可夫斯基定理提出后, 人们发现它们实际上都还是混沌运动的一种数学表

述,与实际系统的混沌运动还不完全是一回事。为了避免由这些数学定义引起的误解,下面以逻辑斯蒂映射 $x_{n+1} = ax_n(1 - x_n)$ 为例加以说明:

1) 李-约克定理指的是,当参数 a 取定值后,即在某一个特定的参数值处,周期轨道(或非周期轨道)的存在性问题。它并不直接涉及参数轴 a 上不同的参数值所对应的稳定周期轨道的分布形式,因而它不对应于通常人们可以看得到、在计算机上容易演示的分叉图谱。可见李-约克定理只谈到相空间 J 上周期轨道的存在性质。

2) 李-约克定理及萨可夫斯基定理只是说数学上存在某某轨道,并没有说它们是稳定的,也没有说它们的测度如何,这意味着它们一定是物理上可见的。如果周期轨道是不稳定的,则物理上看不到。事实上对于逻辑斯蒂映射,当参数取定后,系统最多只能有一个稳定的周期解(轨道)。

3) 有人从计算机上的逻辑斯蒂映射分叉图谱推想,如果从分叉图开始出现醒目的周期三窗口,在其两侧有模糊一片的区域,就说周期三与混沌并存,这是错误的。实际上,从计算机的图上看,混沌与周期运动是相互竞争的,虽然它们总是密切联系在一起的,但一般并不能并存!李-约克说的“混沌”,有的可见,有的不可见。在周期三窗口处,虽然有李-约克意义上的混沌,但看不见。因为这时只见稳定的周期三运动。

4) 李-约克说的混沌与后来人们公认的混沌有重大的差别,主要原因在于李-约克是在一般意义上使用混沌一词的,李天岩曾在一次会议上说,他们那时用的“混沌”基本上是“乱七八糟”同义语!他们的混沌可能是不稳定的,不见其他任何轨道。当然,这时从数学上看仍然存在周期 $5, 7, \dots, 8, 4, 2$ 等轨道。

5) 应当注意的是,“非周期的”这个概念比“混沌的”要广、要大得多,比如,准周期是非周期但不是混沌,遍历运动是非周期的,但纯遍历还不是混沌。混沌运动要求有“混合”(mixing)性质,即“对初始条件的敏感依赖性”(the sensitivity depending on the initial values)。

6) 大家已经知道,对于某些控制参数值 a ,逻辑斯蒂映射存在混沌运动,那么,在参数轴上能出现混沌的 a 值有多少呢?任取两

个这样的 a 值 a_1, a_2 在 (a_1, a_2) 小区间上至少存在一个更小的区间 $M(a_1, a_2)$, 使得在整个连续的 M 上映射 f 有稳定周期解。使映射具有稳定非周期(包含“混沌”)运动的参数值 a 构成的集合为 C , 因而 C 在整个参数轴上是处处不稠密的, 但这并不意味着 C 的测度为 0, 实际上 C 是测度不为 0 的无穷集合。

5.3 混沌的定量测度

上面是混沌的一些常见定义, 从这些定义出发当然可以对系统的混沌运动作一些研究, 但要研究不同的系统在作怎样的混沌运动, 就必须有一些定量的测度。可以从以下几个方面来定量刻画混沌。

5.3.1 宽带功率谱

物理学中有一个描述周期运动很方便的方法, 那就是功率谱。功率谱原来是用来表示复杂时间序列的统计特征的, 简言之, 就是周期运动的功率分布。功率谱方法就是把复杂的时间序列分解成不同频率的正旋波的叠加, 给定频率处的功率谱值就是该频率的正弦波系数的平方成正比。如果运动是严格按这个周期进行的, 它的功率谱就是分立的, 否则就是连续的。因此, 可以用“功率谱是分立还是连续来判别混沌”。

下面是一个混沌运动的指数型概率密度分布。

对于一个平稳的随机时间

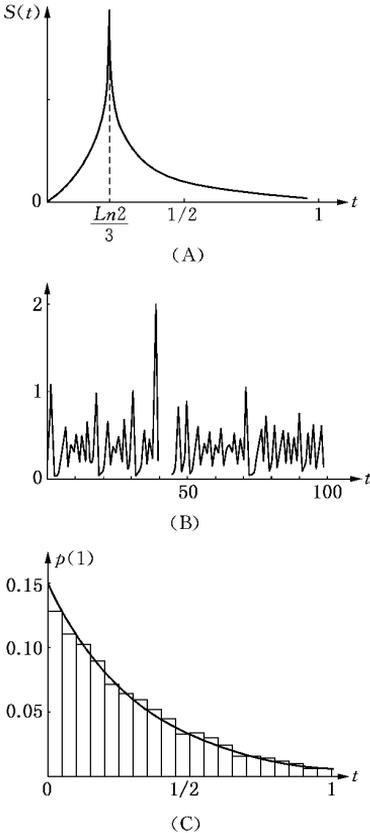


图 5-5 一个指数型概率密度的混沌过程

序列 $x(t)$ 的功率谱 $S_{xx}(\bar{\omega})$ 定义为：

$$S_{xx}(\bar{\omega}) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} r_{xx}(\tau) e^{-j\bar{\omega}\tau} d\tau,$$

式中 $r_{xx}(\tau)$ 为该时间序列的自相关函数,对于离散的情况,功率谱可表示为：

$$S_{xx}(e^{j\bar{\omega}T}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(m) e^{-j\bar{\omega}mT},$$

式中 T 为抽样时间间隔。

在实际测量中人们往往利用 N 个抽样值来计算其自相关估值,得到的功率谱估计值为

$$\hat{S}_{xx}(e^{j\bar{\omega}T}) = S_{Nx}(\bar{\omega}) = \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \hat{r}_{Nx}(m) e^{-j\bar{\omega}mT}$$

但是,按通常的计算自相关函数的方法算起来很慢,后来人们改用快速 Fourier 变换方法,就不用再计算自相关函数,而只要直接求其 Fourier 系数即可。

$$a_k = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N x_i \cos\left(\frac{\pi ik}{N}\right)$$

$$b_k = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N x_i \sin\left(\frac{\pi ik}{N}\right)$$

然后计算

$$\bar{p}_k = a_k^2 + b_k^2$$

通常对多个 x_i 计算一批 p_k ,平均后即可逼近前面定义的功率谱。

在实际测量中,人们通常可以从功率对数与频率的关系中看出功率谱的情况,从中判定混沌是否发生。下面是证券研究中测量的深圳证券综合指数日收益率序列的功率谱。

功率谱分析是一种十分实用的研究周期运动和混沌运动方法。通常按相等的时间间隔取 N 个数据 x_1, x_2, \dots, x_N ,构成一个时间序列,并对这个时间序列加入周期振动的边界条件,然后作快速 Fourier 变换。当然在进行功率谱分析前还要做以下工作：

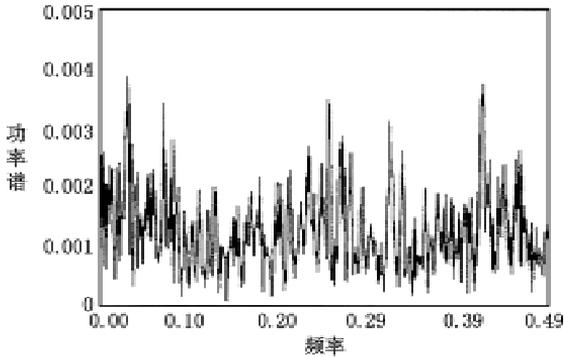


图 5-6 深圳成指日收益率序列的功率谱

(1) 确定系统的基频和计算能力所容许的取样点数目。

(2) 给定 $K = 4 \sim 8$, 确定取样间隔 $\tau = \frac{1}{2kf_0}$, 对于试验来说就是选定模数转换器(ADC)的频率, 在理论上则是决定每迭代几次或积分几次采一个点, 而并不需要对所有的点都作 Fourier 变换。

(3) 在分辨率和分频数目之间进行平衡, 以便得到清晰的功率谱图。

(4) 如果原始数据中含有较大的噪声和外界干扰, 则还要进行适当的滤波和平滑。

一般可从功率谱中对混沌作大体判断, 如果功率谱是完全平坦的, 这意味着混沌运动具有一切可能的周期。反过来也说明它不具有任何确切的周期性, 称为非周期性。

5.3.2 正的李亚普诺夫指数

前面指出, 混沌的基本特征是对初始条件的敏感性, 这个特征可以通过李亚普诺夫特征指数 (Lyapunov characteristic exponents, 简称 L 指数) 来定量测度。简单地说, L 指数是相空间中相近初始条件下轨道分离的平均速率。L 指数严格的数学定义先要从映射谈起, 再过渡到连续流的情形。

先考虑最简单的线性常微分方程

$$\frac{dx}{dt} = ax_0$$

解为

$$x = x_0 e^{at}$$

对于初始时刻的两个相邻轨道,如果系数 a 为正,则按

$$x = x_0 e^{at}$$

的速率作指数分离。如果为负,则它们间的距离指数衰减,只有当系数为零时才将原来的距离一直保持下去。对于大多数实际系统,特别是耗散系统,状态变量是不能趋向无穷的,只有对非线性系统在给定状态附近实行线性化,才能在局部严格按上面微分方程变化。一般说来,可以用矢量来表示状态变量,系数 a 就变成依赖于给定点的线性化点的矩阵。该矩阵的本征值既决定相邻两点间距离的拉伸、压缩或转动,而它们变化的速率又是与相空间中各点不同的。因此,只有对运动轨道上各点的拉伸或压缩率进行长时间的取平均才能体现运动的整体特征。L 指数就是用来描述这方面特征的一个指数。

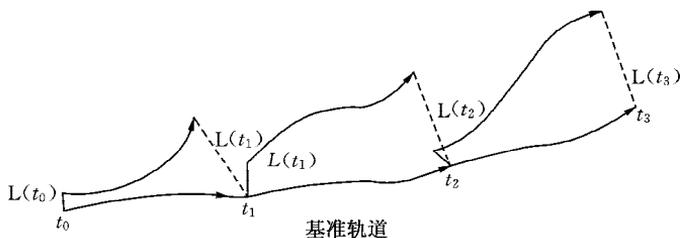


图 5-7

上图中表达了在不同时刻系统运动对基准轨道的偏离(发散)情况,相对于某个给定轨道 L 指数就是对它们的平均。

考虑一个初始点 x_0 和它邻近的点 $x_0 + \Delta x$,用映射函数 $f(x)$ 作一次迭代后,距离为:

$$\Delta_1 = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) \approx f'(x_0) \Delta x$$

迭代 n 次后得到:

$$\Delta_n = f^{(n)}(x_0 + \Delta x) - f^{(n)}(x_0) \approx \left. \frac{df^{(n)}}{dx} \right|_{x=x_0} \Delta x = \Delta x e^{\lambda n}$$

这里用 n 代替了时间 t , 而常数 λ 则原则上是依赖于初始值的, 因此,

$$e^{\lambda n} = \left. \frac{d}{dx} f^{(n)}(x) \right|_{x=x_0} = \sum_{i=0}^{n-1} f'(x_i);$$

可以定义 $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \log \left| f'(x_i) \right|$ 为 L 指数

由于相空间有界, 指数分离不可能, 在 n 较大时持续发生, 所以在取这个极限之前先要取另一个极限 $A \rightarrow 0$, 初始值 x_0 和它邻近的 y_0 间的距离趋向于零, 即 $|y_0 - x_0| \rightarrow 0$, 由此得 L 指数的表达式为:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \lim_{A \rightarrow 0} \ln \left| \frac{y_n - x_n}{y_0 - x_0} \right| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \lim_{A \rightarrow 0} \ln \left| \frac{f_n(y_0) - f_n(x_0)}{y_0 - x_0} \right| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \left| \frac{df_n(x_n)}{dx} \right| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \left| \frac{df_n(x_k)}{dx_k} \right| \end{aligned}$$

具有上述的“敏感依赖性”和“吸引力”的为混沌吸引子, 这时 $L > 0$, 参数值位于区间 $[a(1), 4]$ 上, 有无穷多个。

实际计算 k 维李氏指数有许多窍门, 需要具体问题具体分析, 并非是一件容易的事。

下面是抛物线映射的 L 指数图(图 5-8), 可以看出, 当 μ 取某些值时该映射具有正的 L 指数。

总之, 与那些稳定的运动相比, 混沌是对初始条件的微小差异十分敏感的运动, 它所对应的是正的李氏指数。当然, 实际应用中不能单纯以正的李氏指数作为确定混沌的保证, 杰克逊举过一个生动的实例, 它具有正的李氏指数但没有混沌。在多维系统中, 混沌存在的条件是既有正的李氏指数又有负的李氏指数, 它们分别对应于指数发散子空间和指数收缩子空间。当 $k = 3$ 和 $k = 4$ 时, 李氏指数的分布与运动体制的关系为:

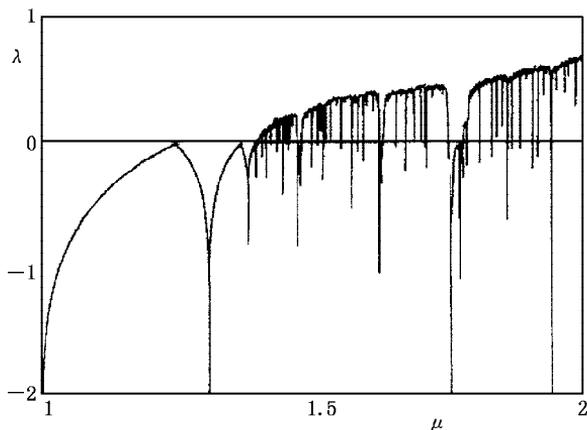


图 5-8 抛物线映射的 Lyapunov 指数

$k = 3$ 时, 李氏指数的分布

	λ_1	λ_2	λ_3	定态运动类型
1	-	-	-	不动点
2	0	-	-	极限环(周期运动)
3	0	0	-	二维面上的准周期运动
4	+	0	-	混沌

$k = 4$ 时, 李氏指数的分布

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	定态运动类型
1	-	-	-	-	不动点
2	0	-	-	-	周期运动
3	0	0	-	-	环面上的准周期运动
4	+	0	-	-	混沌
5	+	+	0	-	若斯勒超混沌

$$\text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时 } \lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \log |f'(x_i)|$$

5.3.3 分数维数

除连续功率谱和正的李亚普诺夫指数外,混沌的第三个定量测度是它在相空间中通常具有分数维数(特殊情况下也可为整数)。作为一种定量判据,通常认为混沌具有分数维。关于维数的定义以及分数维的特征将在下一节中进行详细讨论。这里只需指出,人们在研究混沌时总是要提到分维与分形,同样,在研究分形时总会提到混沌,这不仅因为它们同属非线性科学的典型范例,也几乎同在20世纪70年代引起学术界的注意,因为这两个领域存在着深刻的内在联系。

(1) 混沌是一种极其复杂的运动形态,而分数维数则从一个方面提供了空间复杂程度的量度。因此,用分数维来刻画其复杂性是顺理成章的。事实上,人们已经对一些典型的奇怪吸引子的维数进行了计算,它们的确是分数的。例如:

洛伦兹(Lorenz)吸引子的维数为2.06;海伦(Helton)吸引子的维数为1.26;罗斯(Rossler)吸引子的维数是2.014;强迫 Brusselator 振子的维数是2.15;三波耦合方程的维数是2.32等。

(2) 人们通常把奇怪吸引子与混沌吸引子等同起来,其中对于一般的描述是可以的,但严格地说,这是针对两种不同角度而言的。奇怪吸引子强调该吸引子在相空间中具有分数维,而混沌吸引子则强调它轨道的发散性,即具有正的李亚普诺夫指数。因此,这两种吸引子并不完全等价。

5.3.4 各种熵测度

混沌运动的第四个定量指标是各种熵。热力学和统计力学中的熵的含义都与系统内部的无序程度有关,从1872年起,熵理论都带有波尔茨曼统计理论色彩:

$$s = -K_b \sum_i p_i \ln p_i$$

后来在申农提出信息熵的概念之后,人们就把它和认识中的不确定性联系起来,用于混沌动力学熵是在信息熵之后,由柯尔莫哥诺夫(Kolmogonov)(1958)和西奈(1959)提出的,它是一种测度论的熵,而非拓扑熵。这种熵也叫 K_s 熵,它的定义如下:

考虑奇怪吸引子上动力系统的轨道 $x(t) = x_1(t), x_2(t), \dots, x_d(t)$, 设 d 维相空间被划分为大小为 ld 的盒子, 系统的状态可在时间 τ 的间隔内观测。设 $x(t) = p_{i_0} \Lambda$, i_n 是 $x(0)$ 的盒子 i_0 中, $x(\tau)$ 在盒子 i_1 中 \dots , $x(n\tau)$ 在盒子 i_n 中的联合概率, 则有

$$K_n = - \sum_{i_0, \dots, i_n} p_{i_0, \dots, i_n} \ln p_{i_0, \dots, i_n}$$

它正比如精度为 1 的确定系统在特殊轨道 i_0^*, \dots, i_n 所需的信息。因此, $K_{n+1} - K_n$ 是已知系统先前处在 i_0^*, \dots, i_n , 而预测系统处在 i_{n+1}^* 中所需的附加信息, 这意味着 $K_{n+1} - K_n$ 量度了系统从时间 n 到 $n+1$ 的信息损失。K 熵定义为信息的平均损失。

$$\begin{aligned} K &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{l \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} (1/n\tau) \sum_i (K_{i+1} - K_i) \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{l \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} (1/n\tau) \sum_i p_{i_0, \dots, i_{n-1}} \ln p_{i_0, \dots, i_{n-1}} \end{aligned}$$

极限 $l \rightarrow 0$ 说明 K 与划分的选取无关。

K 熵对区分规则运动与混沌运动很有用, 对于规则运动, $K = 0$, 而随机运动的 $K = \infty$; 若系统表现确定性混沌, 则 λ 是大于 0 的常数。 K 越大, 信息损失的速率也越大, 系统混沌程度也越高。值得指出的是: 一维在对熵的研究中 K 熵恰为正的 L 指数。例如, 对 logistic 映射, L 指数随参数而变。对规则运动 L 指数 $\lambda < 0$; 在分叉点上 $\lambda = 0$, 而在混沌区 $\lambda > 0$, 这时的 L 指数 λ 就是 K 熵。

应该说, 在研究混沌的熵历史中还包括另一位鲜为人知的、仅活了 30 岁的克雷洛夫 (N. S. Krylov)。受 K_s 熵的影响, 阿德勒 (R. L. Adler)、柯恩海姆 (A. G. Honheim) 和麦克安德鲁 (M. H. Mcandrew) 于 1965 年提出拓扑熵概念。 K_s 熵和 T_E 都是用来描述确定系统的相空间 (可以是不定义测度的拓扑空间) 的“平均混合速率”的。1981 年罗伯特·肖 (R. Shaw) 又将动力学熵赋予信息论的解释, 用来说明奇怪吸引子上行为的不可预见性。

下面只谈拓扑上的含义。为了刻画拓扑空间 X 中子空间的混

合或搅乱过程,先在 X 上引入一种“划分”(partition)或“覆盖”(cover),用 $N(A)$ 记对 X 的 A 划分中子区域的个数。设 X 有两个划分:

$$A = \{a_i\}$$

$$B = \{b_i\}$$

则 A 和 B 的积仍是 X 的一个划分,定义 $C = A \vee B \equiv \{c_i = a_j \cap b_k, \text{对所有 } j \text{ 和 } k\}$ 。对于多对一映射 f ,会出现几个不同区域映射到同一个区域的情况,考虑 f 的逆映射 f^{-1} 不断作用于划分 A 的情况。如果 M 是 X 的一个子空间, $f^{-1}(M)$ 有多个区域。于是划分 $A \vee f^{-1}(A)$ 的区域的个数 $N(A \vee f^{-1}(A))$ 比 $N(A)$ 多许多。区域个数的变化,反映了动力系统非线性的程度、复杂性的程度、不可预测性的程度。这便是拓扑熵的基本含义。令

$$\begin{aligned} A_n &\equiv A \vee f^{-1}A \vee f^{-2}A \vee f^{-3}A \vee \dots \vee f^{n-1}A \\ &= \bigvee_{k=0}^{n-1} f^{-k}A \end{aligned}$$

映射 f 相对于划分 A 的拓扑熵定义为

$$h = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln N(n)/n$$

显然,这样定义的拓扑熵 h 与划分 A 有关,一般取所有划分下的最大 h 值为拓扑熵,即

$$h(f) = \sup h(f, A)$$

显然,只有划分的区域数 $N(A_n)$ 随 n 指数地增长,才能保证 $h(f)$ 不为 0。这也是拓扑熵可以刻画动力学指数不稳定性的奥秘。

通常具体求出拓扑熵较困难,可以通过划分的加细(refinement)逼近法得出 h 。如果

$$N(A(n)) < N(A(n+1))$$

则

$$h(f, A(N)) \leq h(f, A(N+1))$$

其中 h 的计算公式化为:

$$h(f) = \lim h(f, A(n))$$

当熵 h 大于 0 时,一定存在李-约克意义上的混沌。对于连续映射 f 来说,若周期点都是 $2k$ 型的,则拓扑熵 $h(f) = 0$,但这并不意味着 f 一定不是混沌的。因此,混沌系统 f 的拓扑熵 $h(f) \geq 0$ 。例如 N 个符号的符号序列空间 $\sum(N)$ 上的位移映射的拓扑熵为 $\ln N$,而帐篷映射的拓扑熵为 $\ln 2$ 。

综上所述,从定量的角度判定系统是否在作混沌运动,至少有以下判据:①存在正负兼有的李氏特征指数;②相空间具有分形结构,维数一般是分数;③拓扑熵非负和测度熵为正的 L 指数之和;④功率谱连续。

5.4 保守系统中的混沌

应该说,保守系统与耗散系统是两类有着本质区别的系统。严格意义上的保守系统是指那些运动中能量始终保持不变的系统,这显然是一种理想化和简化的结果。然而,对这种理想模型的研究,特别是从研究中所获得的许多理论和方法对从本质上把握系统混沌运动的本质有着重大意义,因此,有必要对保守系统中的混沌以及有关的模型作专门探讨。

由于系统总要和外界进行物质、能量、信息的交流,所以都具有耗散的特征。但耗散速度有快有慢,对于那些耗散速度远低于演化速度的系统可以运用一类特殊的方法来对其进行处理。这种方法的核心就是把它当作保守系统来看待,借用物理学中那些相对成熟的 Hamilton 理论, KAM 定理以及近可积与不可积理论来处理其中的混沌问题。

5.4.1 刘维定理(Theory of Liouville)

在讨论保守系统之前,先要从理论上划清保守系统与耗散系统的界限。为此,需要用到物理学中的刘维定理(Theory of Liouville)。

刘维定理是经典统计物理中用吉布斯系统理论研究保守系统的一个很重要的定理。它准确地刻画了系统在相空间中代表点运动的总体特征。该定理有几种等价的表述:“保守系统在相空间中的代表点的密度在运动过程中是不变化的”;“相空间的体积不

变”；“相体积元中的全部相点在运动中既不会聚集，也不会弥散”，定理中的代表点既可以指同一运动系下不同的初始条件下不同的运动状态，又可以指系统某一时刻的代表点。从这些表述中不难看出，可以从时间和空间两个角度来理解代表点，从而把握运动状态和空间位置。如果满足刘维定理，则相空间中系统的代表点在新区域中的密度和在老区域中的密度相等。

刘维定理在数学上可表示为：

$$\frac{d\rho}{dt} = 0$$

式中 ρ 为系统在相空间中代表点的密度， ρ 作为力学量的 ρ ，定义 Hamilton 量

$$H = \int \rho \ln \rho \, d\tau$$

上式还可以表述为：

$$G_0 \, dp_0 \, dq_0 = G \, dp \, dq$$

数学上不难证明该式成立的条件是积分变换中 Jacobi 行列式

$$J = \frac{\partial(pq)}{\partial(p_0q_0)} = 1$$

而这只有在 Hamilton 正则方程成立的情况下才有可能。由

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial p_i} \quad \frac{\partial p_i}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial \rho}{\partial q_i} - \frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial \rho}{\partial p_i} \right) = 0$$

则永远有

$$\frac{dH}{dt} = 0$$

这意味着 Hamilton 量随时间 t 的变化率为零，即不随时间变化，这正是保守系统的基本特征，也是与耗散系统的本质区别。所以理论上可以用是否服从刘维定理作为划分保守系统与耗散

系统的界限。

因为代表点在空间的运动轨迹是连续的,代表点数目在运动中 will 保持不变,则密度函数应服从连续性方程,由此可以证明刘维定理。

刘维定理不仅是划分保守系统与耗散系统的理论界限,而且它的成立意味着系统在相空间中的代表点在历经一些可能状态之后,尽管回归所需的时间可能很长,以至没有实际意义。但总是可以回归或任意接近(无限回归)它的初始状态。这种情况在数学上称为周期点、准周期点或非游荡点,它们的集合称为非游荡集。联系到前面对于混沌的数学定义,知道混沌运动中应该包含游荡集、非游荡集。

此外,从几何上看,刘维定理的成立保证了 Poincare 返回的可能,因而系统的相轨道与 $n-1$ 维超平面——Poincare 截面的交集集合将被限制在足够小的范围内。但是,随着时间的推移,相轨道要无限延伸,唯一的办法就是在应该本质有限的范围内无限弯曲、折叠,从而导致极其复杂的性态,而这正预示着保守系统中出现混沌的可能。

5.4.2 不可积系统与 KAM 环面

在对保守系统混沌行为的研究中,KAM 定理以及与此有关的系统可积性是不能不涉及的核心内容,但有关的概念较为复杂,并且需要较多的数学知识,这里不便详述,下面仅对有关概念作一简单介绍。

这里的可积与不可积是指可否积分。因为如果用微分方程来描述系统的运动,这还仅仅是一种局部性的描述,它只涉及系统在某个具体时空点附近的性态。只有对该微分方程进行积分求解才能得到对系统运动总体的认识,而这正是研究系统的基本内容。所以可积系统简单地说就是描述其运动的微分方程可以积分求解的系统,由于可以积分,也就意味着在几何上存在积分曲线,即相空间中确定的轨道。在代数上可以找到完全积分,求解方程。

讨论混沌时为什么要涉及系统的可积性问题?道理很简单,就是以前一直主要关注可积系统,并认为可积系统中不会存在混

沌。而混沌的研究表明,这种观点至少有两大错误:

首先,在现实系统中可积系统极其罕见,大量的则是不可积系统,事实上如果从所有的 Hamilton 系统任选一个,几乎都是不可积的。就好比一条直线上的点中可积系统仅仅对应有理数或整数点,而其他的无理数点则对应了不可积系统。

其次,也是最重要的,不仅不可积系统中出现混沌是“正常”的,而且在可积系统中也可能出现混沌。

下面运用理论力学的一些具体例子来分析保守系统中混沌的产生。

对一个有 N 个自由度的不含 t 的 Hamilton 系统(保守系统),可用下则方程来描述其动力状态。

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial p_i} \quad \frac{\partial p_i}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

如果能够找到一系列的正则变换,将广义动量 p_i 和广义坐标 q_i 变到另一套被称为作用角度变量的坐标 $J_i, \theta_i (i = 1, 2, \dots, n)$,那么只要能使 Hamilton 函数只依赖于 J_i 而与 θ_i 无关,即 $\bar{H} = \bar{H}(j_1, j_2, \dots, j_n)$,则相应的 Hamilton 系统的运动方程可变为:

$$\dot{\theta} = \frac{\partial \bar{H}}{\partial J_i} = \Omega_i(j_1, j_2, \dots, j_n)$$

$$\dot{J}_i = -\frac{\partial \bar{H}}{\partial \theta_i} = 0$$

由于 Ω_i 是与 θ_i 无关的函数,这些方程可立即积分出来

$$\theta_i(t) = \Omega_i t + \theta_i(0)$$

$$J_i = J_i(0)$$

这样,该力学系统的运动方程就完全可以通过积分求解出来,因此,它就是一种可积系统。

可积系统的典型例子是减谐振动,其最简单的例子是单摆:

单摆 $H = \frac{1}{2m}\rho^2 - \mu_0 \cos \theta$, 相空间 (ρ, θ) 中的轨迹为 $\frac{1}{2m}\rho^2 = \mu_0 \cos \theta + E$, 当 $E = U_0$ 时,相图上呈现出的曲线称为分界线, $E < U_0$

时系统作振动运动, $E > U_0$ 时系统作转动运动。如图 5-9 所示。

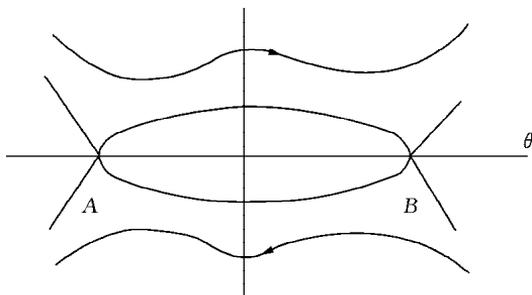


图 5-9 单相空间示意

该图中相图与 θ 轴的交点分别 $A = (\rho, \theta) = (0, -\pi)$, $B = (0, \pi)$, $O = (0, 0)$, 其中 A, B 称为不稳定不动点, O 为稳定的不动点。所谓不动点就是在这一点处动力系统处于滞留状态, 那么, 其计算方法就可以令 Hamilton-Jacobi 方程为 0 得到, 即 $\theta = 0$, $\rho = 0$ 。再则稳定不稳定的判定可以通过该点处的 Lyapunov 指数来确定, Lyapunov 指数小于 0 为稳定点。一般与双曲点相连接的轨道受扰动后就会出现混沌行为。

通常认为, 任何一个具有 n 个自由度的可积系统在作用一角变量后, 其运动方程与一组 n 个非耦合谐振子的运动方程相同, 每个谐振子都对应了一个 n 维环面上的周期运动。下面仅考虑 n 等于 2 的情况, 其结果可以推广到更多的自由度。

从图 5-10 中可以看出, 仅当下式成立时轨道才能闭合:

$$n\Delta\theta_2 = 2\pi \cdot m$$

即

$$\frac{\tilde{\omega}_2}{\tilde{\omega}_1} = \frac{m}{n} = \text{有理数}, m, n = 1, 2, \dots$$

如果比值为无理数, 则永远不能闭合, 但又要保持二维环面上。轨道将随着时间遍历这个二维流形上的所有点。

现在在系统原来的 Hamilton 函数 H_0 上附加一个扰动后, 系

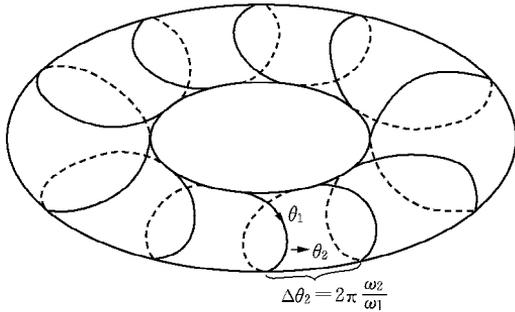


图 5-10 二维相空间示意

统的 Hamilton 函数变为：

$$v = \epsilon H_1$$

$$H(\bar{J}, \bar{\theta}) = H_0(\bar{J}) + \epsilon H_1(\bar{J}, \bar{\theta})$$

也就是说,可以通过加微扰于可积系统来形成近可积系统。近可积系统至少是二自由度的,它可等价于与时间有关的单自由度 Hamilton 系统。近可积与可积的保守系统的根本区别就是前者存在混沌运动。二自由度可积系统有两个孤立积分,相空间的轨迹被限制在一个二维环面上。如果在横截环面的某一 Poincare 截面上观察运动,将是一条光滑的闭曲线。周期运动的轨迹为这条曲线上的有限个点,而准周期运动的轨迹则充满整个曲线。研究表明,近可积系统是规则轨迹与混沌轨迹共存的系统。对于某些初始条件,轨迹呈现有规则的行为,而对于另一初始条件却呈现出混沌现象。不可积的二自由度系统只有一个积分,在 Poincare 截面上具有确定初始条件的混沌轨迹,它将随机散布在被规则轨迹划分出来的区域中,并随时间的延续而布满整个区域,具有二维测度。下面先看一些二自由度近可积系统的例子。在更高维的系统中,规则轨道将不能限制混沌轨道的运动,会出现匿名的 Arnold 扩散现象,这将在下面叙述。

5.4.3 KAM 定理

对可积系统的微扰将破坏其可积性。随着微扰的增强,能

量表面上存在不变环面的区域将逐渐减少。这些都是近可积系统的性质。

下面仍以 $n = 2$ 的情况为例,设系统受扰动后

$$H(\bar{J}, \bar{\theta}) = H_0(\bar{J}) + \epsilon H_1(\bar{J}, \bar{\theta})$$

现在考虑下面两种情况:①如果 $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2$ 接近一个无理数,受扰动的可积系统将会出现什么情况?②当 $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2$ 是有理数,扰动下的系统环面将发生什么变化?

KAM 定理对第一个给予了回答,成为研究保守系统中混沌行为的重要出发点。

1954 年苏联数学家 Kolmogorov 根据以上性质提出一条定理,该定理 20 世纪 60 年代被 Arnold 与 Moser 进一步证明。Arnold 主要对多自由度的解析的 Hamilton 函数情况作了证明, Moser 则对二维保面积映象情况作了证明。后人以这三位学者的姓氏的第一个字母命名这一定理,称为 KAM 定理。

KAM 定理一般可表述为:若系统频率的 Jacobi 行列式不为零

$$\left| \frac{\partial \bar{\omega}_i}{\partial J_j} \right| \neq 0$$

如果满足下列两个条件:

第一,哈密顿函数中可分离出来的不可积扰动项很小。

第二,未扰动的可积哈密函数 H_0 对应的频率满足不相关条件。即 $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2$ 足够无理以至下式成立:

$$\left| \frac{\bar{\omega}_1}{\bar{\omega}_2} - \frac{m}{s} \right| > \frac{k(\epsilon)}{S^{2.5}} [k(\epsilon \rightarrow 0) \rightarrow 0] \quad (m \text{ 和 } s \text{ 是互质整数})$$

那么,系统的哈密顿函数 H 的绝大多数解(除去测度为零的集合)仍然留在 N 维环面上。这些环面的形状比起 $V = 0$ 时可能略有改变,但运动的定性图像与未扰动的可积系统相同。

在上述 KAM 定理的两个条件中,第一个条件较易理解,它类似于耗散结构理论中最小熵产生原理,它表明小的扰动不会改变可积系统的定性性质,因此,在理论上给出保守系统混沌产生的必要条件。但是,这一结论初看有些出乎意料,令统计

物理工作者失望。因为在统计物理学中常常从没有相互作用的理想系统出发,指出虽然理想系统不会趋近平衡,但只要计入无限小的相互作用,系统就可达到平衡,但 KAM 定理告之,即使有很弱的相互作用,系统运动仍可以限制在 N 维环面上,与理想系统差不多,这时根本不能使用等能面上或等能面附近的系统平均。

KAM 定理从反面告诉我们,当对系统的不可积扰动足够大时,原来对应于可积系统的环面将被破坏,从而导致出现一系列复杂行为,混沌即是其中的一种。

这里应该特别指出的是,最后一个被破坏的 KAM 环面是频率比值 $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2 = (\sqrt{5} - 1)/2$ 的环面。它的破坏表现出与耗散系统通向混沌的茹勒—塔肯斯道路相似。由此可以看出,尽管系统在是否保守方面有所不同,但都可以通过扰动通向混沌。

由于 $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2 = (\sqrt{5} - 1)/2$ 环面还有一些十分有趣的性质,因而引起人们的注意,例如,它有一个简单的连分式

$$\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2 = (\sqrt{5} - 1)/2$$

正好对应了著名的 Fibonacci 数,即所谓黄金中项,所以把与它对应的曲线称为“贵重 KAM 曲线”。

5.4.4 不稳定环面与 Poincare-Birkhoff 定理

由 KAM 定理可知,对于充分远离有理数的无理转数,可证明不变圆在受扰时将分解为越来越小的环面,这些环面虽然其中一部分仍保持其拓扑结构,即按 KAM 定理仍然稳定,但在稳定环面之间运动完全是无规律的,只是在原相空间其形状偏离了未受扰时的圆。而在有理数及其邻域处,KAM 定理不成立。Poincare-Birkhoff 定理可以为有理转数邻域的结构提供线索。

该定理还表明,具有有理数频率比值的环面在扰动下没有完全破坏,而是保留偶数个不动点。在这些不动点中,椭圆不动点被旋转点所包围,相应的轨道是较小环面的 Poincare 截面。包围椭圆点的小环面中一部分是按 KAM 定理稳定的,其他的小环面继续分解为更小的环面,形成如图 5-11 的自相似结构。

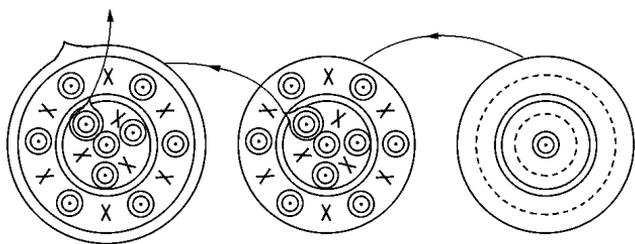


图 5-11 具有有理数频率比值的环面

而在双曲不动点附近,运动就变得不稳定起来。

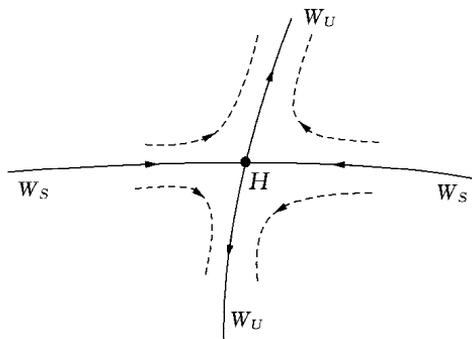


图 5-12 双曲不动点

因此,当初始条件受到微小扰动,将会导致如图 5-13 所示的复杂行为。

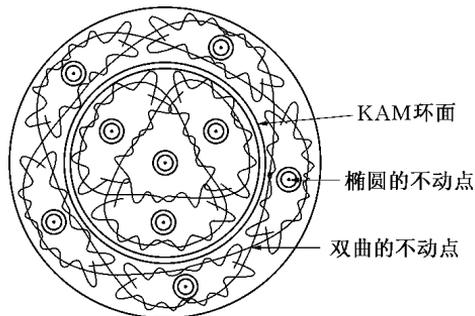


图 5-13 在一个不可积系统的相空间里规则和 irregular 运动

KAM 定理是关于近可积系 (Hamilton 系统) 运动稳定性的论据。混沌、遍历、随机性等都是稳定性的对立面。当 KAM 定理的两个条件不成立时, 迷走轨道的数目越来越多, 运动逐渐地布满整个等能面上。KAM 定理中的任何一个条件破坏了都会出现随机运动, 其中典型的是 Arnold 扩散, 下面作一简要介绍。

通常认为, 既然满足 KAM 定理的绝大多数轨道, 其运动仍然限制在 N 维环面上, 自然可以提出这样的问题: 这些 N 维环面能否成为等能面的边界, 使 KAM 定理成立的少数轨道被限制在边界的一面, 而达不到另一面。如果能够做到这一点, 那么, 那些迷走轨道的运动虽然已是不稳定的, 但仍然限制在等能面的一定区域内, 从整体上看, 还是具有某种稳定性的。但是, 进一步研究表明, 这种情况开始仅对只有 2 自由度的系统成立, 而对具有更多自由度的系统则情况开始大不相同。因为对 N 个自由度的系统, 具有 $2N$ 维的相空间和 $2N-1$ 维的等能面, 因此, 等能面的边界是 $2N-2$ 维的超曲面。 N 维环面要成为等能面的边界, 就必须满足 $N \geq 2N-2$ 。可见, 只有 $N=2$ 的系统, N 维环面才可能把等能面包围起来或分割成几部分。只要 $N \geq 3$, 迷走轨道就可以逐步发散到整个等能面上去。这是一种很慢的类似扩散的过程, 称为 Arnold 扩散。Arnold 扩散的存在不仅在一些简单模型中有严格的证明或计算机实验的演示, 而且在磁约束等离子体式粒子对撞机中作为不稳定性的一种来源, 成为物理工作者必须考虑的现象。

下面是一个保守系统中混沌运动的典型例子。

Henon 等人研究了具有非线性耦合的双振子系统。其哈密顿函数是

$$H = \frac{1}{2}(p_1^2 + p_2^2 + q_1^2 + q_2^2) + q_1^2 q_2 - \frac{1}{3} q_2^3$$

这个自由度为 2 的系统具有四维的相空间。为了形象地表示计算结果, 取 q_1, p_1 固定的截面, 在 (q_2, p_2) 平面上观察系统的时间演化。取相空间中某点为初值, 积分由 Hamilton 函数得到的运动方程。每当轨道按一定方向穿过 (q_2, p_2) 平面, 就将相应的交点

记录下来,这样就得到一个离散点列 $p_0, p_1, p_3, \dots, p_n, p_{n+1}, \dots$ 于是哈密顿函数所决定的连续流,在 (q_2, p_2) 平面中就表现为离散点的映象

$$p_{n+1} = TP_n$$

这就是所谓的 Poincare 映象。这是非常重要的研究手段。具体地说,相空间中不同初值可能对应不同的运动类型。只要运动是有界的,轨道穿过一次 (q_2, p_2) 平面后,迟早会第 2、第 3 次穿过。最简单的情形是每次都从同一点穿过。这就是不动点

$$p = TP_0$$

相空间中的运动是一条简单的封闭曲线。

如果原来的轨道在二维环面上,那就要区分两种情况,当决定二维环面的两个频率之比是有理数时,轨迹是绕在环面上封闭曲线,对应于 Poincare 截面上有限个点。例如 m 个点,那么这些点称为 T_m 的不动点。

当上述频率比为无理数时,运动轨道绕满整个环面,无始终,对应于 Poincare 截面上表现的一条封闭曲线。高维环面与二维环面的截道也是一些点或封闭曲线在相空间中迷走轨道,在 Poincare 截面上看出来是随机分布的点。

可以抛开原来相空间中的轨道,只考虑 Poincare 映象。孤立的不动点有稳定与不稳定之分。稳定不动点附近是一些同心圆,沿椭圆发生准周期运动。这样的点称为中心不动点。不稳定的不动点则是双曲点,其附近是双曲线分点,任何沿稳定方向趋近不动点的运动,最终都要沿不稳定方向离开不动点。对于保守的哈密顿系统,刘维定理保证相体积不变,因此,排列出邻域中单纯压缩的稳定焦点或结点,以及单纯膨胀的不稳定结点或焦点。

再回到对 Henon 模型的讨论,对于一个 Hamilton 系统,如果取能量 E 作为控制参数,Henon 等人的计算表明,当 E 较小时,满足 KAM 定理, Poincare 截面由一些环面的截迹组成。图 5-14 是当 $E = 1/8$ 的情况,其中每一个椭圆由一条轨迹所生成,而弥散于其间的点由另一条轨迹所生成。

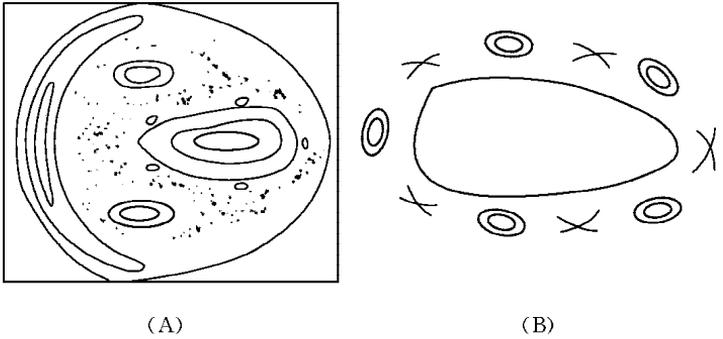


图 5-14 Henon-Heile 模型

Poincare 早在 19 世纪末就知道其中可能发生相当复杂的动力行为。一条不稳定分界线离开一个双曲点,并不作为稳定轨道直接进入另一个双曲点,而是在无穷次折叠中逐渐趋近于该点,在折叠过程中与另一条稳定轨道无穷次相交。如果所涉及的双曲点来自同一个有理环面,这样的点横截交称为单褶点(同宿点 homoclinic point),如果来自不同的有理环面则称为杂褶点(异宿点 heteroclinic point),如图 5-15。如果系统中出现了一个单褶点,则必定存在着无穷多个单褶点。稳定分界线与不稳定分界线的相交与相切还可能出现多种其他组合。

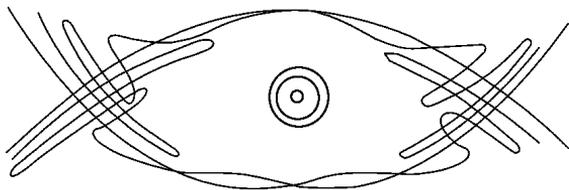


图 5-15 单褶点的产生

图中每个中心不动点附近仍存在有理和无理之分。在更小尺度上重复着有环面的破裂,出现交错的椭圆点和双曲点,同时出现横截交的现象。只要有足够的分辨力,这种几何结构就清晰可见。这就是所谓的“无穷嵌套的自相似的几何结构”。

5.4.5 一个典型实例——太阳系中的混沌

众所周知,天体力学系统是典型的保守系统。太阳系的运动往往被描述成一种很规则的运动,但目前研究发现太阳系中也存在混沌运动。Wisdom 用保守系统混沌分析的办法解决了太阳系中两个长期没有解决的难题,即太阳系小行星带的 Kirkword 间隙问题与地球上流星的起源问题。

火星与木星之间存在着一个小行星带,太阳系中的小行星大部分位于这个带中。其中几个直径超过 1 公里的小行星有完全确定的轨道。作出的行星数目随轨道周期的分布图,可在四处周期处发现明显的间隙。这些周期与木星周期 11.9 年之比为简单的分数 $1/3$, $2/5$, $3/7$, $1/2$ 。这些间隙称为 Kirkword 间隙。周期比为简单的分数表明存在一种共振现象。根据共振重叠判据可以说明共振区内存在着混沌行为。混沌运动可能使这一区域内小行星逃逸。长期以来,人们不明白 Kirkword 间隙的机制。Wisdom 注意到小行星的运动存在着几个标度差别很大的频率,并利用映象的办法研究了这个问题。例如, $1/3$ 间隙中小行星的周期小于 4 年,由于与木星运动共振产生的长轴的振动周期为几百年,而其近日点的进动周期为几万年,据此,Wisdom 在平面与小偏心率近似下,把微分方程问题简化为映象问题,以木星周期采样。计算发现,在开始的 20 万年内没有出现什么反常现象,偏心率在 10% 以内振动。20 万年以后,偏心率的变化增大,并突然涨落至 35%。这足以使小行星与火星发生近碰撞,从而脱离小行星带。这就是形成 Kirkword 间隙的原因。在 Wisdom 的研究工作之前,做过的数值计算时间最短也不少于年,所以一直未发现形成 Kirkword 间隙的原因,直到采用映象的办法把计算时间成千倍地缩短后才发现了混沌运动。

与小行星带有关的另一疑难问题是地球上流星的起源问题。太阳系的小行星大部分位于火星与木星之间,因此,地球上的流星也只能起源于这一小行星带。但是,这个行星带离地球很远,只有偏心率达到 57% 的小行星的轨道才能与地球轨道相交。Wisdom 进一步把非共面效应考虑进去,所谓非共面效应就是指木星轨道

平面相对小行星带的缓慢变化,发现混沌运动确实可以使偏心率达到 60%。为了得到令人信服的结果,他还用数值积分方法求解偏微分方程,对单个试验行星积分到年,证实了偏心率确实可以超过 57%。根据上述计算,能够给出与观察一致的流星轨道与丰度,特别是所谓“下午效应”,即下午观察到的流星是上午的两倍。

5.5 耗散系统中的混沌

不同类型系统中的混沌有着不同的形态与特点。前面引进刘维定理从理论上区分了保守系统和耗散系统,由于保守系统的相体积不变,经过足够长的时间后系统总可以返回到初始状态或与之极为接近的状态,因而称为回归运动,具有周期性或准周期性(准周期性表示可以无限接近于周期运动)。保守系统中的混沌轨迹不会逃逸到无穷远处去,内部运动也相对稳定。相反,耗散系统的特征是相空间中的体积在运动过程中不断收缩,系统在运动变化后,微观状态数目减少(空间中的点与状态相对)。系统内部出现了某种“同步”或“有序化”的趋势,或称为“自由度归并”,从而导致系统产生一种新的宏观态或整体属性,并可能导致内随机性的产生。

一般来说,只要时间足够长,任何一个实际系统都会与环境进行物质、能量和信息的交换。所以,原则上一切系统都或多或少具有一定的耗散性。只是有些系统在特定的研究中耗散效应可以忽略,在一定条件下可以作为保守系统来处理而已。耗散系统的广泛存在以及它所表现的特殊属性使得我们必须对它作专门的研究,尤其是一类被称为耗散结构的系统,不仅耗散效应不可忽略,而且正是由于耗散才使得其结构得以保持和更新,所以更引起了人们的高度重视。耗散是与“开放”相对应,开放系统的问题之所以更为复杂,原因在于它既要考虑系统内部,又要考虑系统外部,因而在这类系统中产生混沌往往更为容易,对它的混沌运动研究也更具有现实和理论意义。

5.5.1 奇怪吸引子

从耗散系统相体积收缩的特点可以看出,系统演化过程中的

自由度归并,运动最终趋于比原始空间维数低的极限集合,这就是吸引子。所以,从一定意义上讲,研究耗散系统最终是研究吸引子,吸引子可以是平庸的,也可以是奇怪的,与耗散系统混沌运动相对应的是奇怪吸引子。奇怪吸引子简单地说就是有初始敏感的吸引子。在讨论奇怪吸引子之前,简单地谈谈吸引子。

吸引子,顾名思义,就是相空间中的一些稳定的点或区域,由于在系统变化过程中一定范围内的其他不稳定点都将趋向于它,并且一旦到达就永不离去,就像具有“吸附作用”,所以称为吸引子。吸引子在一定程度上体现了耗散系统的“终极状态”,在数学上对应了微分方程的不动点、极限环、环面和高维环面,如图 5-16 所示。吸引子是系统相空间的子空间,故而维数比原来的相空间低。例如,原则上一维以上的相空间都可能产生不动点,即一维吸引子。而只有在二维以上的相空间中,才可能出现极限环。

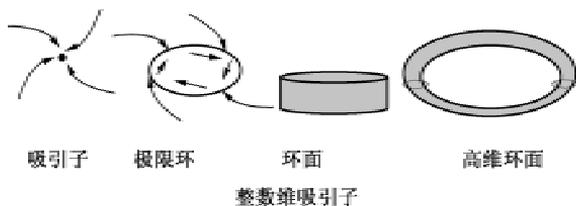


图 5-16 吸引子

无论是零维、一维、二维,还是高维的吸引子,都有一个共同点,即它们的相空间维数都是整数维,这样的吸引子称为“平庸吸引子”,而称具有非整数维数的吸引子为“奇怪吸引子”。奇怪吸引子的概念是 1971 年由法国物理学家 Ruelle 和 Takens 为耗散系统引入的。它最显著的特点是对初始条件的敏感性,即在系统的相空间中整体稳定而局部不稳定。它有一个复杂但明确的边界,系统一旦进入该吸引域就永不离开它,除非系统相空间发生根本性的变化。但系统在吸引子上运动,轨道会急剧分离。例如,Lorenz 吸引子由两个绕着不动点作周期运动的曲线所组成。在系统进入吸引域后,往往首先在某一片上作周期运动,然后又跳到另一片,

就这样在两片圆周上跳来跳去,呈现出一种随机的运动。它在平面上的投影如图 5-17 所示。也许是由于这种图像有些像蝴蝶翅膀,也许是因为从一片到另一片上仅需像蝴蝶翅膀振动那样小的扰动就会产生,洛伦兹最早称其为“蝴蝶效应”。

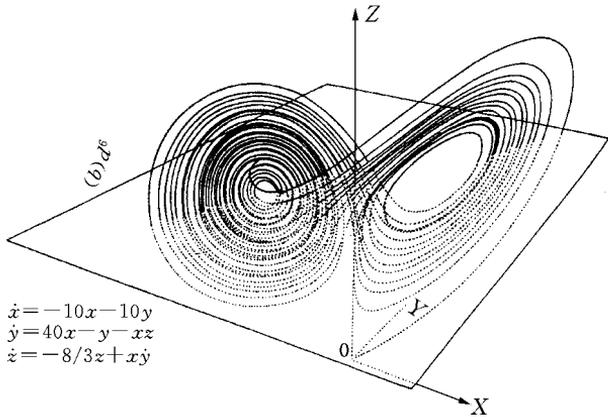


图 5-17 Lorenz 吸引子

数学上吸引子有严格的定义,下面参照 Lanfor 的定义作一解释。如果说相空间的一个子集 A 为吸引子,那么 A 必须满足:① A 是闭的不变集。所谓不变集就是 A 内的点运动仍回到 A 内;② A 的邻域内的点最终收缩至 A ;③ A 上的点 X ,最终回到 X 的邻域内。

从上面定义可以看到,吸引子是不可分解和正测度的。一般来讲,非线性系统可能具有 0、1、2、3、……等各种维数的平庸吸引子。高维吸引子则可能有准周期运动,而不是严格意义上的周期运动。然而自 Ruelle, Takens 的工作以来,人们越来越清楚地看到,准周期轨道构成吸引子的可能性不大,更可能出现的是所谓的奇怪吸引子。

奇怪吸引子产生的机制是耗散系统混沌行为的又一个重要问题,已经知道它与运动轨道的不稳定相关。也就是耗散使运动轨道稳定地收缩到吸引子上的同时,沿某些方向的运动又是不稳定的。不稳定运动轨道在局部看来总是指数分离的,也就是对于任何一个

自治非线性系统,它的近似线性系统必有正实部的特征值。那么,如何能在有限的几何空间中实现指数分离呢?按照美国数学家斯梅尔的观点,用 Ruelle-Takens 所谓描述奇怪吸引子的图像可以通过无穷次的折叠,构造出新的集合结构。这就是说,奇怪吸引子具有某种膨胀起来的“双曲性”。双曲点附近的轨道(流形)有一个方向稳定和一个方向不稳定。奇怪吸引子就有内外两种方向,一切在吸引子外的点都向它靠拢,而一切到达吸引子的轨线有相排斥的现象。由此可见,奇怪吸引子的测度必须大于零,否则就没有排斥的空间余地。而折叠又使奇怪吸引子具有层次和非整数维的特点。

归纳起来,奇怪吸引子的奇怪之处主要表现在以下几个方面:

(1) 奇怪吸引子内部的运动对初始条件敏感,即在它内部会出现“差之毫厘,失之千里”的局面,这种特征可以用正的 L 指数加以描述。

(2) 奇怪吸引子具有分维,它往往是 Cantor 集与整维流形的直积。

(3) 奇怪吸引子的空间是非连续地随参数变化的。在小扰动情况下,空间的位置和填充过程产生较大变化。

基于奇怪吸引子的这些特点,在奇怪吸引子研究中往往采用了维数计算(分维),Lyapunov 指数计算以及具备一定公理体系的公理 A 吸引子的多种角度来考察吸引子普适的特征。

5.5.2 虫口模型、周期分叉与切分叉

可以通过一些人们熟悉的例子对耗散系统中的混沌行为进行研究,许多文献中提到的虫口模型就是一个很好的实例,对它的研究使人们认识到通向混沌的一个典型途径——倍周期分叉,尽管它不是唯一的,但很有代表性。

(1) 虫口模型:虫口模型指的是一类描述昆虫繁殖(当然,原则上也可用来描述人口的变化)的简化模型。

设第 n 年的虫子数目为 x_n ,每只成虫每年产 a 个卵,那么第二年的虫子就有 $x_{n+1} = ax_n$ 个,不难看出,这是一个线性差分方程,通常有解

$$x_n = x_0 a^n$$

其中 x_0 是第一年的虫子数, x_n 是第 n 年的虫子数, 显然, 按此方程如果 a 大于 1, 虫子数将指数发散, 否则将指数衰减。但实际情况却要考虑到虫子过多将会引起内部疾病, 以及为争夺有限的食物而发生的内部“战争”, 这些导致虫口减少的因素都是与虫子数成二次方比例的, 因而可以用如下方程来对虫子繁殖进行描述:

$$x_{n+1} = ax_n - bx_n^2$$

不难看出, 这是一个十分简单的抛物线模型(由于它只有一个最大值, 数学上又称为单峰映象), 虽然简单(只包含了一个二次项), 但却几乎包含了非线性方程的全部特征, 因而可以作为非线性方程最简单的代表。

虫口模型有多种表达方式, 常见的标准形式有:

$$x_{n+1} = \lambda x_n(1 - x_n), \lambda \in (0, 4), x_n \in [0, 1]$$

$$x_{n+1} = 1 - \mu x_n^2, \mu \in (0, 2), x_n \in [-1, 1]$$

$$x_{n+1} = \mu - x_n, \mu \in (0, 2), x_n \in [-\mu, \mu]$$

下面可以使用通常的计算器进行计算一些简单的迭代, 来看从这些“确定论方程”如何产生出混沌。

以第二个方程为例, 显然方程的性质仅由唯一的参数 μ 来确定, μ 通常在 0 到 2 之间取值, 可以分段研究。

1) $0 < \mu < 0.75$, 例如任取一个 $\mu = 0.5$, $x_0 = 0$ (只要在 -1 和 +1 之间就行), 代入方程得

$$x_1 = 1 - 1/2(0)^2 = 1, \text{由 } x_1 \text{ 可以求出 } x_2;$$

$$x_2 = 1 - 1/2(1)^2 = 0.5, \text{由 } x_2 \text{ 可以求出 } x_3, \text{等等};$$

$$x_3 = 1 - 1/2(1/2)^2 = 7/8 = 0.875;$$

$$x_4 = 1 - 1/2(7/8)^2 = 0.6171875;$$

$$x_5 = 0.80953979;$$

$$x_6 = 0.67232266;$$

$$x_7 = 0.77399112;$$

$$x_8 = 0.700\ 468\ 87 ;$$

$$x_9 = 0.754\ 671\ 67 ;$$

...

$$x_\infty = 0.732\ 050\ 808。$$

这里的 ∞ 表示通过无数次迭代后的结果,发现它稳定在 0.732 050 080 上。实际上这个数字可以通过求解上面的二次方程得到,其解为:

$$x^* = \frac{-1 \pm (\sqrt{1+4\mu})}{2\mu}$$

当 $\mu = 1/2$ 时,

$$x_1 = \sqrt{3} - 1, x_2 = -\sqrt{3} - 1$$

由于 x 是定义在 -1 与 $+1$ 之间的变量,所以只能取 $x_1 = 0.732\ 050\ 808$,这说明参数 μ 在 0.75 以下时 x 的变化只有一个不动点。

2) $0.75 < \mu < 1.25$,例如取 $\mu = 1, x_0 = 0$,按方程计算,很快发现,数据将在 0 和 1 之间跳动,对它们进行稳定性检验后得知,这是两个稳定的不动点。

3) $1.25 < \mu$,逐渐增加 μ 值,发现分别出现 4 个、8 个、16 个,以至 2 的 n 次方个不动点,对应了人们常讲的倍周期分叉。

4) 最后,当 μ 达到 1.401 155 189 092 02... 时周期变得无限长,以至根本没有了周期,这就意味着出现了混沌。

(2) 倍周期分叉与切分叉:通过求解虫口模型,并对 x_n 随参数 μ 变化而出现的不动点进行稳定性分析,可以发现倍周期分叉。下面就是一个典型的倍周期分叉图,从图 5-18 中可以很明显地看出,经过倍周期分叉到达混沌的过程。

通过倍周期分叉到达混沌是通向混沌的一个典型道路,对它进行分析可以发现许多重要的东西,前面提到的以费根鲍姆常数为代表的一系列自然常数就是其中之一。

实际上费根鲍姆常数所反映的正是在倍周期分叉中与分叉

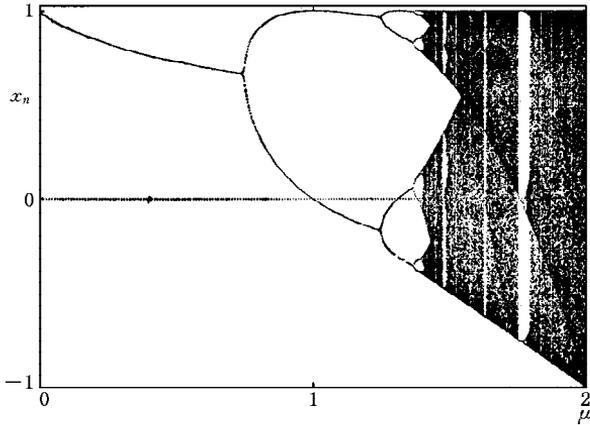


图 5-18 抛物线映射的分岔图

时 μ 值的所谓“压缩比”：

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_n - \mu_{n+1}}{\mu_{n+1} - \mu_{n+2}} = 4.669\ 201\ 609\ 102\ 990\ 9\dots$$

当然,倍周期分叉不是耗散系统通向混沌的唯一途径,此外,人们还研究了其他的分叉,如切分叉等,由于它与著名的阵发混沌和“周期三即混沌”的命题有着密切关系,这里需要稍加介绍。

前面多次提到约克-李天岩的“周期三蕴含了混沌”,显然,周期三不可能来自倍周期分叉,只可能来自一种新的分叉。从上面的分叉图中可以看出,周期三窗口的起点在参数 $\mu = 1.75$ 的地方,这里可能有多条曲线,一条是 $f_1(\mu, x)$,一条是 $f_3(\mu, x)$,后者有 4 个不动点,其中一个是从原来稳定不动点变化而来的不稳定不动点;另 3 个则是稳定的,在图像上它们正好与对角线 $(x=y)$ 有三处相切,因而被称为“切分叉”,对此有相应的“切分叉定理”：

如果映象 $f(\mu, x)$, 满足下列条件：

- 1) 在 (μ, x) 平面上存在不动点,即 $f^*(\mu^*, x^*) = x^*$
- 2) 在此不动点上有 $\frac{\partial f^n(\mu, x)}{\partial x} = +1$
- 3) 在此不动点处, $f^n(\mu, x)$ 对参量 μ 的一阶、二阶偏导数都

不为零,即

$$\left. \frac{\partial f^n(\mu, x)}{\partial x} \right|_* \neq 0; \left. \frac{\partial^2 f^n(\mu, x)}{\partial x^2} \right|_* \neq 0$$

则点 (μ^*, x^*) 附近存在一个小区域内将出现切分叉。

切分叉与倍周期分叉的不同之处在于它将引发新的“阵发混沌”。

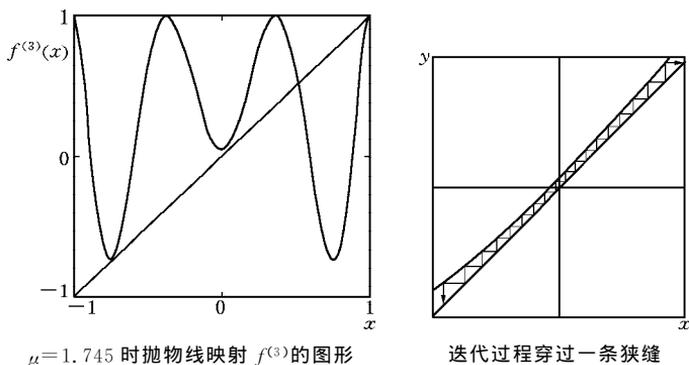


图 5-19 切分叉

5.5.3 阵发混沌

(1) Lorenz 模型与阵发混沌

阵发混沌最初见于 Lorenz 模型之中, Lorenz 吸引子可以说是迄今为止研究得最深的吸引子。混沌研究初期几乎所有的文献都要提到它, 该模型是 20 世纪 60 年代初美国气象学家 Lorenz 在研究大气动力学规律时得出的。由于当时的计算机非常简陋, Lorenz 把大气动力学方程简化到只剩下骨架, 并且让输入的数据不是初值而是上次运算的中间值。这样一来, 中间值引出的结果就与上一次不一样了, 而且随着时间的推移差距越来越明显。由于这一结果的出现, 迫使 Lorenz 进一步研究只有三个方程的系统, 也就是现在讲的 Lorenz 方程:

$$\dot{x} = -\sigma x + \sigma y$$

$$\dot{y} = -xz + rx - y$$

$$\dot{z} = xy - bz$$

其中 σ, b 为正的常数, r 为控制参量。令 $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0$ 就容易得出 3 个定态解是 O, C, C'

$$O(0, 0, 0)$$

$$C(\sqrt{b(r-1)}, \sqrt{b(r-1)}, r-1)$$

$$C'(-\sqrt{b(r-1)}, -\sqrt{b(r-1)}, r-1)$$

Lorenz 吸引子的结构几乎完全由 O, C, C' 三点邻域性质所决定, 它们的同宿线是一条向前向后都趋于同一不稳定不动点的轨道。

在 O 点的线性化方程有一个大于零的本征值与两个小于零的本征值, 因此, 就有了一维稳定流形与二维不稳定流形。 C 与 C' 的线性化方程有一个小于零的本征值与两个复本征值。因此, C 与 C' 的邻域, 轨道作环绕运动, 出现那个著名的类似蝴蝶的图所示的情况(此时 $p = 10, b = 8/3, r = 13.926$)。

现在再看一下它们在 Poincare 截面上映象, 即 $z = r - 1$ 截面。在原相空间上降低一维的平面上, 发现矩形框在映射变成了尖劈形。如图 5-20 所示 Σ 为 Poincare 截面。与其垂直的平面为 O 的稳定流形, 因为 z 轴为不变轴, Σ 平面同 z 轴垂直, 稳定流形与 Σ 的交线 D 把 Σ 分为两部分, D 的左边部分经过左边的返回流映象于 Σ , D 的右边部分流映象于 Σ 。一个矩形 $BCEF$ 返回映象是两个尖劈形。

显然, 在上图中的尖劈形存在一条对 Poincare 映象的不变曲线。不变曲线上点的 Poincare 映象是一种一维映象, 可以通过研究一维映象使问题进一步简化, 发现当 $p = 10, b = 8/3, 24.06 < r < 24.74$ 时有奇怪吸引子存在。

当然, 有数理基础的读者可进一步计算一些数据结果, 这只是描述实际 Poincare 映象在不变曲线上的投影。由于除不动点 O, C, C' 外, 微分方程的解是唯一的, 轨道不可能相交, Poincare 截面上的奇怪吸引子具有垂直不变曲线方向的 Cantor 集合的结构。其中值得注意的是同宿轨线, 这是研究混沌机制的主要着眼点。

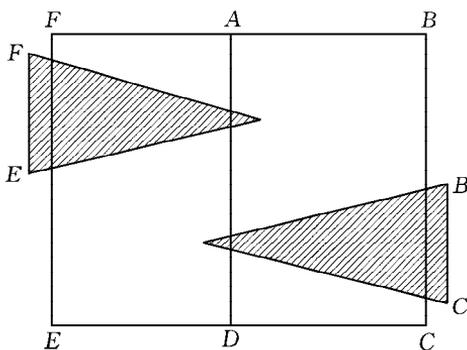


图 5-20 楔形 Poincaré 截面

5.5.4 通向混沌的道路

一个系统可以作各种各样的运动,混沌运动只是其中的一种,那么,原来作周期或准周期运动的系统通过什么样的途径进入混沌状态呢?这就是所谓通向混沌道路的问题。对这个问题的探讨,最早可追溯到前苏联著名的物理学家朗道(Landau)等人对湍流发生机制的研究。

一百多年来,湍流问题已成为物理学中一块“难啃的骨头”。20世纪40年代,朗道(Landau)和霍卜夫(Hopf)曾先后独立提出了一种湍流发生机制,其基本观点是“湍流是一连串不稳现象的结果”,即Hopf分叉。当流体流速随雷诺数 R 增加并经历了一系列阈值时,先是接连出现层流(对应一个不动点),到第二个阈值不动点失稳,出现极限环,到第三个阈值极限环失稳,出现二维环面……。从极限环开始,出现频率为 f_1 的振荡,到达二维环面时出现新频率 f_2 ,只要 f_1 与 f_2 的比值为无理数(即不可比),就意味着出现了不存在公共周期的准周期运动(永不准确地重复),接着会出现 f_3, f_4, \dots 等相互不可比的准周期运动,以至越来越乱,最后达到湍流。

Landau-Hopf道路曾经为许多学者所接受,但后来却被证明是错误的。因为从理论上讲,一个有限的耗散系统不可能无限制地出现不可比的新频率;而从实验上讲,人们运用激光干涉和多普

勒效应等方法发现,新频率不断产生之后到一定时刻两个相近的频率会突然靠拢并锁住,结果频谱中只剩下少数几个被锁定的频率。这就是所谓锁频现象。

既然 Landan-Hopf 道路行不通,就只能另辟蹊径。1971 年 Ruelle 从理论上证明,无需出现无穷多个不可比的新频率,只需经过 4 次分叉就可以产生湍流。他所提出的发展模式如下:



后来,他又和 Newhauss 一同提出,不一定经过三维环面,整个过程只需三步就行,即从二维环面上产生准周期运动后就可直接形成奇怪吸引子。

这条通向混沌的道路受到许多流体力学实验的检验。从功率谱上看,常常是先看到两个不可比频率带的出现,随后会突然出现宽带噪声,只是在少数情况下才看到出现三个不可比频率。就目前的研究而言,还不能确定其中是否存在普适的临界指数。

目前,对通向混沌道路的研究还没有完结,但可以设想,这里不止一条道路,而具体通过什么道路则与系统的结构和所处的环境有关。

5.6 混沌控制

本章开篇提出 20 世纪 90 年代以来人们对混沌的研究已经进入一个新的阶段,即理论上探讨无穷维动力系统混沌,实践上研究利用控制混沌的具体途径。本节先讨论混沌控制与同步。

混沌控制问题一定意义上是通向混沌道路的反问题。由于混沌运动具有对初始条件敏感的特征,这一特征使人们对具有混沌行为的系统难以预测和把握,因此,在实际场合下总是力图避开它。1989 年美国物理学家 M. Pecora 等人发现,在一定的条件下,一个混沌系统可以使其中的元件同步。这就使人们开始注意到混沌运动深层的有序性的一面,并在此基础上提出了控制和利用混沌的新研究方向。20 世纪 90 年代以来,Ott 等人提出了著名的

OGY 方法,使得混沌控制受到广泛注意。近年来的研究表明,对混沌的控制和利用的探讨不仅对认识混沌的本质有极高的理论意义,而且在提高通讯的安全与保密性能、增强激光器的输出功率、调整电子线路、控制化学反应、诊断防治心脏病等方面也有着巨大的实际应用前景。因此,一些有远见的混沌研究学者开始向这个方向转移,下面对这方面的研究进展作一简要介绍。

混沌现象包含诸如各种周期态与非周期态等极其丰富的信息,这引起了人们浓厚的兴趣。于是设想利用混沌现象在时间上、空间上及功能上的多样性作为特殊的信息源,用很简单的非线性元件来产生复杂而有用的功能。可用于信息存储及通讯等目的,也可作为特殊信号发生器产生有用的周期信号。但是,混沌奇怪吸引子内的轨线(或信息)是高度不稳定的,它瞬息万变,难以捕捉,即使信息存储下来,也会改变,所以往往难以重复识别。如不加控制,则根本无法应用。因此,长期以来就有人致力于寻找控制混沌并使之转变为周期运动的途径,在这方面的第一个大的突破来自 Ott 等人的工作,他们提出的 OGY 控制混沌的方法受到广泛关注,而且在一些实例中得到很好的应用。

5.6.1 OGY 控制法

OGY(E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke)法是第一种比较有效地控制混沌运动的方法,它的基本思路是根据混沌吸引子中镶嵌有无数个不稳定的周期轨道,因而可以利用很小的参数扰动把系统运动状态控制到某一人们所希望的周期轨道上去。

下面就用二维离散混沌系统来说明 OGY 方法。

设有一个二维离散系统

$$x_{n+1} = F(x_n, p) \quad (5.7.1.1)$$

p 是系统参数, $x \in R^2$ 是系统状态,控制参数 p 可以在 p_0 附近变化。若令 $p_0 = 0$,当参数 p 从 p_0 变到 p 时,不动点 $x_f(p_0)$ 变到 $x_j(p)$

$$G = \left. \frac{\partial x_f(p)}{\partial(p)} \right|_{p=0} \approx \frac{[x_f(p) - x_f(0)]}{p} \quad (5.7.1.2)$$

在不动点 $x_f(0)$ 附近对式(5.7.1.1)描述的混沌系统线性化(参数 p 也很小),得到一个映射

$$x_{n+1} - x_f(p) = M[x_n - x_f(p)] \quad (5.7.1.3)$$

M 是 2×2 的 Jacobi 矩阵,用 r_u 和 r_s 代表 M 的不稳定和稳定的特征值, $|r_u| > 1 > |r_s|$ 。在系统模型不知道的情况下,可以通过实验数据来确定 $x_f(p)$, M, G, r_u 和 r_s 。 $ME_u = r_u E_u, ME_s = r_s E_s, E_u, E_s$ 是 M 的不稳定和稳定的单位特征向量, F_s, F_u 代表与之正交的向量,即 $E_u F_u = E_s F_s = 1, E_u F_s = E_s F_u = 0$ 。式(5.7.1.3)可以表示为

$$x_{n+1} - x_f(p_0) = [r_u E_u F_u + r_s E_s F_s][x_n - x_f(p_0)] \quad (5.7.1.4)$$

由式(5.7.1.2),可把式(5.7.1.4)改写为

$$x_{n+1} = pG + x_f(0) + (r_u E_u F_u + r_s E_s F_s)(x_n - pG - x_f(0)) \quad (5.7.1.5)$$

式中 p 在 0 附近变化,通过 p 的扰动使 x_{n+1} 落在不动点 $x_f(0)$ 附近的稳定轨道(流形)上,即 $F_u x_{n+1} = 0$ 。

$$p = \frac{(1 - r_u)F_u x_f(0) + r_u F_u x_n}{(r_u - 1)F_u G} \quad (5.7.1.6)$$

因为 p 与 x_n 有关,每步迭代要计算 p ,控制由调节 p 的值来实现,使混沌系统的状态稳定到不动点 $x_f(0)$ 。为使式(5.7.1.2)成立,需 $|p| < p^*, p^*$ 充分小,如 $|p| > p^*$,令 $p = 0$,这时系统再次进入混沌运动状态,由混沌运动的遍历性,系统的状态将再次回到 $x_f(0)$ 的邻域,控制系统重新启动。

图 5-21 说明了 OGY 方法的实现过程,其中:(a)为第 n 次的迭代 x_n 落在不动点 $x_f(0)$ 附近;(b)扰动参数 p 值把不动点 $x_f(0)$ 移到 $x_f(p)$;(c)第 $n+1$ 迭代使 x_{n+1} 落在不动点 $x_f(0)$ 的稳定流形上,一旦达到后便撤销微扰。

E. Ott 等人用这种方法稳定了 Henon 系统中的周期 1 的轨道。对 Henon 映射

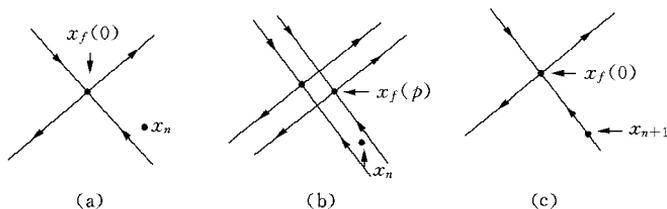


图 5-21 OGY 方法的实现过程

$$x_{n+1} = A - x_n^2 + B y_n \quad (5.7.1.7a)$$

$$y_{n+1} = x_n \quad (5.7.1.7b)$$

取 $B = 0.3$, 并假定量 A 能关于某个值 A_0 作微小的变化, 即 $A = A_0 + p$, p 为上面所说的控制参量, A_0 对应于一个混沌的并含有一个不稳定周期 1 的轨道的映射。

Ditto 等人把 OGY 法用于控制重力场中弹性磁条混沌运动的实验, 验证了 OGY 方法的有效性。他们选择了带状磁弹体在磁场作用下的微扰实验, 观察其刚性变化。实验表明, 当磁场较弱时, 磁弹体直立着(刚性较强); 当磁场强度逐渐增加时, 刚性减小, 弹性增大, 带状磁弹体开始软缩; 磁场继续加大时, 磁弹体便进入混沌状态。通过选择一条特定的周期轨道, 当这条磁弹体的振动频率接近该轨道时, 就给磁场一个小的扰动, 并适当地调节这个微扰量, 则可看到磁弹体驯服地进入所需的周期态下振动; 一旦微扰撤销, 混沌再次产生。

OGY 方法是基于混沌奇怪吸引子有着极其稠密的不稳定周期轨道, 混沌控制的首要任务就是设法把其中任一条所需的周期轨道挑选出来, 并加以稳定控制。为此, 他们选择非线性系统中易于测得和可调节的一个参数, 并认为所有其他的周期轨道都是该参数的函数, 而与其他的参数无关。为了实现对某个特定的周期轨道(即不动点)的稳定控制, 必须在系统靠近不动点时, 对参数值进行微扰, 随时间适当调整微扰量, 迫使所选的轨道向不动点移动, 利用该参数所允许的最大扰动量, 经过多次反复调整, 最终使所需的周期轨道稳定下来。

OGY 方法可以推广到 n 维非线性映象, 或可以由庞加莱映象描述的连续非线性系统。该法无须知道系统全局的动力学模型, 非线性映象可以利用时间延迟坐标法, 从实验测得的时间序列中构造出来, 然后通过考察所期望轨道附近的映象迭代, 由该映象在所需的周期轨道附近的线性控制来达到稳定控制。

OGY 与线性反馈: 从控制的角度来讲, OGY 控制混沌的方法实际上是一种线性反馈。对于离散系统

$$z_{i+1} = F(z_i, p) \quad (5.7.1.8)$$

以 $z_f(p_0)$ 代表不稳定的不动点。 $|p - p_0| < \delta$, 在 $z_f(p_0)$ 邻域内线性化得

$$z_{i+1} - z_f(p_0) = A[z_i - z_f(p_0)] + B(p - p_0) \quad (5.7.1.9)$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{p=p_0, z=z_f(p_0)} \quad (5.7.1.10)$$

$$B = \left. \frac{\partial F}{\partial p} \right|_{p=p_0, z=z_f(p_0)} \quad (5.7.1.11)$$

令 p 是 z_i 的线性函数

$$p - p_0 = k^T [z_i - z_f(p_0)] \quad (5.7.1.12)$$

调整 k^T 的值使系统稳定, 把(5.7.1.12)代入(5.7.1.9)得到

$$z_{i+1} - z_f(p_0) = (A + Bk^T)[z_i - z_f(p_0)] \quad (5.7.1.13)$$

令 $\delta z_i = z_i - z_f(p_0)$, 则上式变为

$$\delta z_{i+1} = (A + Bk^T)\delta z_i \quad (5.7.1.14)$$

由经典控制理论, 如果 $U = [B, AB, \dots, A^{n+1}B]$ 的秩为 N , 则系统可控, 这时对于给定的矩阵, 总可以通过调节 k , 使 $A + Bk^T$ 具有指定的特征值, 只要 $A + Bk^T$ 的特征值的绝对值小于 1, 就可以控制系统。OGY 法相当于在极点配置时把 $A + Bk^T$ 所有不稳定的特征值 r_u 配置为 0, 而稳定的特征值 r_s 不变, 其时只要 $|r_u| < 1$ 就可以。

5.6.2 偶然正比反馈技术(OPF 技术)

OGY 法要求系统的参数变化不能超过一定的允许范围,否则经微扰后系统的局部动力学行为被畸变,微扰量也限于比较小才能稳定控制较低周期的轨道,通常只能控制到周期 1, 2, 3, 更高周期的控制受到噪声的影响而难以达到。为了提高对混沌吸引子中高周期轨道的有效控制, B. Peng、V. Petrov 和 K. Showalter, 以及 E. R. Hunt 分别提出了偶然正比反馈技术(OPF 技术), 前者应用于由三个联立方程描述的化学反应系统, 后者先应用于二极管共振器系统, 后又应用于激光系统, 都取得了成功。

OPF 技术是一种分析技术, 用图阐明。

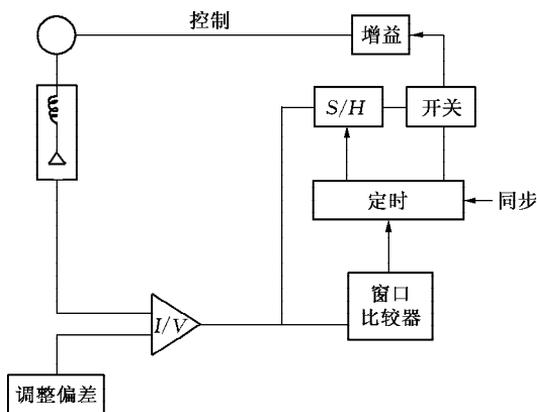


图 5-22 二极管 OPF 控制混沌示意

该系统为一系列 P-N 结矫正器及电感器所组成的二极管共振器。共振器采用一个 1N2858 型二极管, 电感器为 100 毫亨, 交流电阻为 25 Ω , 驱动频率为 53 千赫, I/V 为一个电流—电压转换器, S/H 表示采样/保持两种交替作用。窗口比较器是所谓限制微扰量的开窗口办法。二极管输出的峰值电流 I_n 作为系统的混沌变量, 当输入正弦电压随时间增加来驱动系统时, 则将通过倍周期增加通向混沌。它们可以用二维映象来描述。对峰值电流 I_n 采样, 如果 I_n 就在窗口所允许的电流值的范围内, 则受驱电压由正比

于 I_n 和窗口宽度的电流所调制。若 I_n 不落在窗口之内,则调制信号最大的修正正比于窗口的大小及系统的增益。一旦 I_n 在窗口之内,系统就采样,并产生增益,最后反馈到系统中去控制。适当改变增益和窗口大小就可以实现对系统中混沌的某个周期信号的稳定控制。显然,原则上这也是一种依赖于时间的小微扰方法,所以对于较低周期的控制本质上与 OGY 方法差不多,也是基于在不动点邻域内的线性化。

考虑

$$x_{n+1}(p) = f[x_n - x_s] + x_s(p) \quad (f > 1.0) \quad (5.7.2.1)$$

p 是系统参数, $f = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=x_s}$ 是映射斜率,给 p 一个扰动 δp ,

$$x_{n+1}(p + \delta p) = x_s(p + \delta p) + f[x_n - x_s(p + \delta p)] \quad (5.7.2.2)$$

$$x_s(p + \delta p) = \left(\frac{dx_s}{dp} \right) \delta p + x_s(p) \quad (5.7.2.3)$$

把 p 变到 $p + \delta p$,使下一次迭代系统回到 x_s ,即

$$x_{n+1}(p + \delta p) = x_s(p) \quad (5.7.2.4)$$

得到

$$\delta p = f[x_n - x_s(p)] / [(f - 1)] dx_s / dp \quad (5.7.2.5)$$

这就是所得到的控制规律。

但是,对于高周期轨道的控制,OPF 技术允许有足够大的微扰,比如在二极管的例子中驱动电压变化 $\pm 10\%$ 时,仍可以达到控制,可在 $20 \mu\text{s}$ 之内实现对高达周期 23 的稳定控制。

可见,OPF 技术具有很大的优点,它只需小微扰就很容易控制低周期态,而且通过调整信号限制窗口的宽度及反馈信号的增益量,能够有效地控制很高周期的轨道。虽然由于微扰量较大时,有可能改变吸引子的结构,被稳定下来的周期轨道不一定都在吸引子上,这一点使混沌系统更有希望被稳定下来。OPF 法能稳定吸引子高周期的不稳定轨道。这很重要,因为高周期的轨道能访问

吸引子中更多的区域,不同的区域对应系统不同的物理状态。OPF法对控制复杂而不知其机制的系统比较适用。由于其技术的可行性及高效率的实用性,把它的缺点掩盖了。因而,OPF技术广泛应用于许多实际系统,例如约瑟夫森结的网络系统、化学湍流系统、生物及激光系统等。

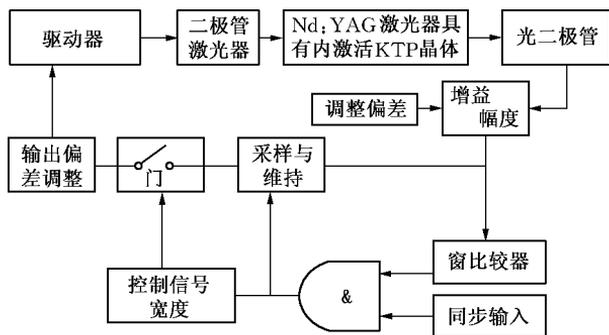


图 5-23 激光系统及 OPF 法控制示意

下面简单介绍应用 OPF 技术实现对自治的高维激光系统从实验上稳定控制混沌的方法。上图所示激光系统及 OPF 控制的示意图,其实验主体是一个二极管激光器,它由一个固态 Nd:YAG 系统所泵浦,Nd:YAG 包含一个约 3 cm 长的双晶体。该激光系统不能用二维映象来描述,它是一个典型的总体耦合的非线性振荡器,每个纵模都与所有的其他振荡器相耦合的松弛非线性振荡,因而采用 OPF 技术来控制。对该激光系统的一个给定的旋转方向用 60 mW(高于阈值 3 倍)去泵浦,可以观察到混沌吸引子出现 5~10 个纵向模,这取决于晶体的旋转方向及激光腔的长度。该激光系统是自治混沌激光系统,所以不加任何调制信号,主要观察系统的自然周期特性即系统的松弛振荡特性,采样频率与系统的松弛振荡频率有关,光二极管用来测量 $1.06 \mu\text{m}$ 的辐射,把它的输出作为控制线路的输入信号,用一个稳定振荡器来产生同步频率。用该频率去采样混沌输出信号,在激光信号上加一个变量补偿器,以便把信号引入窗口比较器内,有当输入信号波形在所

允许的窗口宽度之内时才被采样,且只有当被采样的信号的周期比同步信号的时间短的时候,被采样信号才能通过门输入,典型的周期时间为 $10 \mu\text{s}$,由具有对信号补偿及增益作用的放大器对二极管激光器的驱动器给予控制信号。调节波形的失谐度及窗口宽度,可以达到对混沌的控制,获得激光强度的许多高周期波形,如图 5-24 所示,可看到稳定控制了周期 9。在实验中发现,必须把同步频率调整到松弛振荡频率的简单有理分数,才便于控制。对高周期轨道,当微扰达到 10% 时,对原来的吸引子有所影响,对于低周期控制,微扰为百分之几,对吸引子几乎没有什么影响。

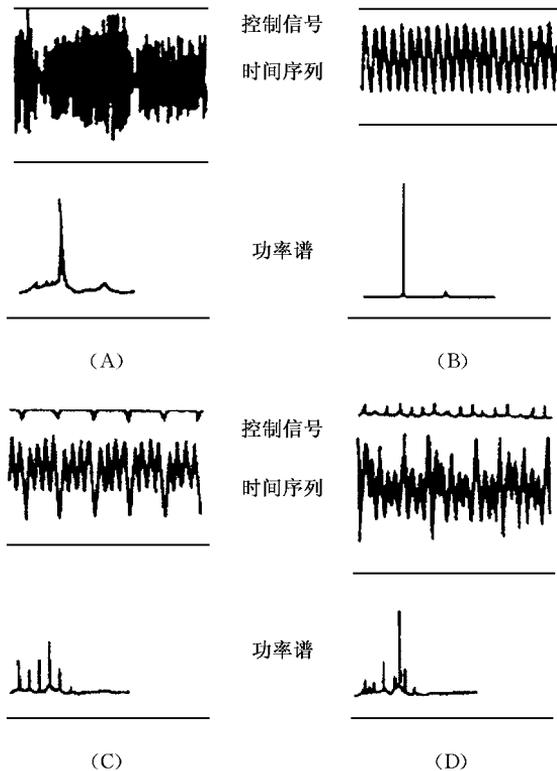


图 5-24 OPF 技术对激光信号的控制

OPF 技术的优点是:控制器所需的信息可直接从测量混沌行

为得到,能快速控制混沌。美国海军实验室的一个小组基于 OPF 技术开发出一种跟踪法,跟踪不稳定的周期轨道或恒定态,从而拓宽混沌控制的范围。这种 OPF 法的一种变型应用于激光系统取得了很大的成功,已经把激光装置的功率输出提高了 15 倍,展示了混沌控制的诱人前景。

5.6.3 混沌控制的物理机制

混沌控制的主要任务是根据不同领域的实际需要,从多种多样的非线性系统所产生的混沌行为中挑选出任意所需的各种周期信号或非周期信号,并实现其稳定控制,从而为众多领域提供各种各样的应用。为此,应深入研究各种混沌控制方法及其机制,从理论上为各种应用奠定牢靠的基础。

现行的混沌控制方法的共同点是利用与时间有关的连续小微扰来实现对混沌的稳定控制。当微扰趋于零或无限小时,达到了所需周期或非周期信号的稳定化。在 OGY 方法中,由于在不动点附近微扰,可将所需信号稳定控制住。在外力或延迟自反馈控制方法中,引入微扰后把系统的维数增加,以增加原系统的维数来获得稳定所必须的条件,即使表征混沌特性的李亚普诺夫指数从正数变为负数,从不稳定变为稳定,这就是物理实质所在。

应当看到,扰动或噪声所起的重要作用,乃是值得注意的一种普适效应,它在自然界中的积极意义越来越被人们认识。小微扰或小噪声在混沌控制中的妙用及建设性的作用,在上述方法中已充分显示出来,小微扰(小噪声)在其中引起了抗混沌效应。事实上几乎所有实际系统都受到外部环境或内部噪声的影响,这种情形是经常发生的。在合适的条件下,环境噪声及内部参数扰动(涨落)同样可以引起抗混沌效应,即起到对混沌自控制作用。

它揭示了自然界乃至人类社会中的一条基本原理,即宇宙万物之所以能够维持其稳定和平衡,是与周围环境的微扰密切相联系的。可以说,小噪声或微扰所引起的抗混沌效应对混沌的一种持久控制因素。

混沌同步的机制与混沌中非周期轨道的控制方法有关。研究表明,混沌同步与协同学中的使役原理具有类似性,混沌本身的特

性似乎是对抗同步的。但是,近年来的实验证实,同步的混沌电路是可以实现的。由一个系统去驱动另一个系统,即两个系统耦合起来,前者称为驱动系统,后者称为响应系统。同步定理告诉我们,当响应系统的条件李亚普诺夫指数为负值时,它将与驱动系统实现混沌同步。这样,混沌同步法及新近拓宽的串级混沌同步法都可应用于混沌中的非周期轨道的稳定控制。哈肯在协同学中提出的役使原理告诉我们,一个系统的行为由长寿命的子系统决定了短寿命的子系统,即长寿命者为命运主宰。这样同步定理中的条件,李亚普诺夫指数类似于役使概念的一种推广。据此,不难理解把延迟反馈法与同步原理结合起来,便产生了对混沌中非周期轨道的控制方法。究竟什么类型的混沌系统可以通过一个变量控制与它们的过去行为实现同步呢?只有当微扰具有足够大的自由度,以至可抑制住轨迹在所有扩张方向上发散时,才能达到响应系统所期望行为的稳定化,这是许多动力学模型所研究的结果。

目前,国际学术圈对混沌控制的方法及原理的研究十分活跃,这些研究从不同的角度出发,所关注混沌控制的目标以及策略和途径也各不相同。这正说明了非线性特性难以预料的本质。对混沌的控制目标主要有以下几种:

- (1) 抑制或消除某些类型的混沌。
 - (2) 稳定控制在混沌吸引子中所期望的不稳定的周期态。
 - (3) 通过控制达到新的动力学行为。
 - (4) 消除多重的混沌吸引子流域。
 - (5) 实现两个或多个相同动力学系统的周期同步、混沌同步及其控制。
 - (6) 控制混沌吸引子中的非周期态、周期态及其同步的可能应用。
- 目标不同,所采取的方法也应不同。但与控制论中的经典控制问题不一样,混沌控制从总体上仍无统一的共同理论框架。不过混沌控制有一个共同的物理机制,就是变原来的正的李亚普诺夫指数为负值,从而实现从不稳定到稳定的转变。不同的混沌控制方法有各自的优缺点,具体情况具体分析,更有效而便捷的方法仍有待发展。

第六章 | 系统中的分形



面从组成、结构、属性以及运动与演化等方面对整体性进行了深入探讨,其中多次提到整体的形态,指出对形态的研究是系统科学的重要研究方向,但这并不意味着只有系统科学才研究事物的形态。可以说形态问题无处不在,在人类文明的许多学科中,抽象如哲学,直观如美学,深刻如数学,都对形态有过大量研究成果。系统科学的独特之处在于它始终抓住整体的外形(边界的形态)、内部的构型(整体构成方式)以及整体运动形态(状态空间中轨道的形态)三方面来分析整体的形态,从而揭示形态与整体属性之间深刻的内在联系。此外,现代系统科学还特别关注事物的一类特殊形态——分形(尽管对它的研究目前已成为了一门新的学科),因为它在自然、社会、思维领域广泛存在。而且它对传统思维方式的巨大冲击和它所具有的大量的实际应用,显示出这是事物整体一个不容忽视的本质特征。本章将对此作详细讨论。

6.1 分形的概念与定义

6.1.1 分形的概念

1973年,既有深厚的数学基础、又精通计算机的美籍法国科学家曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot)凭着对几何图形的敏锐感觉提出分形概念。通过对自然界中许多复杂图形的观察,如云团、山峦、灰尘、闪电、河流、海岸、气象以及棉花价格、股票行情变化等的轨迹,发现这些形状各异、看上去极为粗糙、破碎不堪、不光滑、无规律的东西无法用传统的欧几里得几何进行描述,但它们却有一个共同的特征,即整体与部分之间存在某种自相似性。他这样写道:“我们观察一棵茂密的大树,可发现不仅树叶都是一样的,而且每个枝干与大树十分相似,每个分支又都与枝干相似……”。为了

给具有这些特征的形态命名,曼德尔布罗特创造了 fractal(分数维)一词。此词源于拉丁文 fractus,原意是指碎石块,因此开始时有人干脆将分数维理解为“大小碎片聚集的状态”。

1975年,曼德尔布罗特完成他关于分形的第一本专著《Fractal: Fractal dimension and dimension》。该书于1977年出版,总结了自相似性计算维数的方法,并将分形定义为豪斯道夫维数严格大于其拓扑维数的集合。1982年,曼德尔布罗特在《分形,形态,机遇和维数》的基础上,对之进行扩展和系统化,出版了《自然界的分形几何》(The fractal geometry of nature)一书,正式奠定了分形几何学的基础。1985年,曼德尔布罗特提出并研究自然界中广泛存在包括自相似集在内的自仿射集。此后,分形概念引起学术界的高度重视,许多原来从事物理、数学和计算机研究的学者都涌入这一新的领域,使之成为当代科学发展中最活跃的一个分支。

一门重大学科的创立往往不是哪个人单独能完成的,尽管目前大多数人都公认现代分形理论是由曼德尔布罗特首创的,但早期的工作却至少可以追溯到19世纪。1875年,德国数学家维尔斯特拉斯(Weierstrass)构造了处处连续、但处处不可微的函数。由于维尔斯特拉斯函数的特殊性而不能容纳于传统的数学框架之中,所以当时被视为是“病态的”。这种病态函数迫使人们去研究复杂的函数和图形。1877年,集合论创始人、德国数学家康托尔(G. F. P. Cantor)证明了12维形体上的点与线上的点一一对应,并构造了一个康托尔三分集,在这个集中点的数目无穷多,点的分布不均匀,却有着自相似性,使它成为后来分形理论的经典例子。1890年,皮亚诺(G. Peano)构造了著名的皮亚诺曲线,首先对传统的维数概念发难,为分数维概念的产生打开了缺口。1904年,瑞典数学家科赫设计出类似雪花和岛屿边缘的Koch曲线,成为数学分形最直观、最经典的例子。1911年,豪斯道夫(F. Hausdorff)提出以他的名字命名的H测度和新维数定义。

可见,早期数学家们已围绕着那些不能用欧几里得几何描述的复杂形态作了大量研究,那么为什么分形理论直到50年后才得以创立?其主要原因:一是需要有一个集大成者;二是需要有

新的研究工具和手段。后者指的是 20 世纪 80 年代以后迅速崛起的计算机技术。正是在曼德尔布罗特及其同行们的研究基础上分形理论才得以创建。1980 年,美国学者威特恩和桑德尔用随机行走的方式,在计算机上成功地模拟了悬浮于大气中的煤灰、烟尘或金属粉末的凝聚模型,揭示了其中所蕴藏的标度关系。他们将这个计算机模型命名为受限扩散凝聚模型,简称 DLA 模型。该模型十分容易在计算机上操作,且用计算机按此模型进行模拟,结果与实验数据相吻合,引起了多个领域科学工作者对分形研究的兴趣。

自 1982 年后,分形理论在很多领域逐渐得到越来越广泛的应用,“无处不分维”、“分数维病”等的提法在反面也说明了分维的普遍性。随着分形几何学的迅速发展和广泛使用,人们又对自相似的概念加以扩展,产生许多新的含义,如“功能”、“信息”等,因此,现在可以把在形态(结构)、功能、信息等方面具有自相似性的研究对象统称为分形。

1989 年 11 月,纪念曼德尔布罗特 65 寿诞的国际会议召开,会议论文集对分形的研究可分为以下几个方面:

(1) 对自然界、社会经济以及艺术等领域中的典型分形形态进行观察,实验。

(2) 分形的观念和理论应用于各个技术领域。

(3) 从数学理论的角度研究分形和分维,试图建立分形理论的数学基础。

(4) 对多分形和复分形 Multifractal 展开研究。

(5) 从物理的角度对分形形成的机制和动力学规律等进行研究。

(6) 从哲学、方法论和科学史的角度对分形与分维理论的认识论意义、哲学启示、来龙去脉进行研究。

分形理论的创立和发展,不仅为我们提供了许多研究复杂事物的工具和模型,也给现代科学一个观察世界的新视角。通过这一视角,人们惊奇地发现,许多关于时间、空间、形态等的传统看法都需要彻底改变。例如,现实世界中具有整数维的事物不是绝无

仅有,就是十分罕见,而随处可见、十分普遍的却是如晶体生长、雪花图案、血管分支、器官表面、海岸形状、云彩边沿那样的分形。社会经济、文化艺术领域中的各种事物更不具有连续、光滑的“好”形状,实际变化的轨迹也都是被传统数学认为是“病态”的、奇怪的曲线。传统的观点认为,如果没有特殊的限制,就应该“各向同性地均匀生长”,现在人们到处看到的却是像树状的分枝、土地的龟裂、天空的闪电、油层中“黏性指进”、道路的延伸那样非平衡而各向异性的发展。原以为毫无关系的概念,如形态、机遇、信息等等,现在发现它们之间存在着非常深刻的内在联系。这一切都意味着现实世界并不具有整数维数,事物大多不是连续、光滑、规整、确定的形态,而间断、突变、随机、奇异、病态却既普遍又正常。上述新观念很快引起系统学家们的注意,系统形态的分形观自然成了系统学的基本部分。

6.1.2 各种分数维数

分形理论是几何学的一个新分支。按照克莱因的观点,几何学本质上是研究图形对于变换群的不变性。1872年,克莱因在对当时出现的各种几何学进行分析、比较和总结的基础上,指出它们各自结构上的一般原则,并强调变换群在古典几何学中的主导地位。据此,他提出不同的几何学实际上对应了不同的变换群不变性。一种几何结构有一个相应的自同构群,它是由保持某种结构不变的所有的变换所组成的群,而这种不变量就是该几何的几何量。如欧氏几何对应了平直空间,几何图形在该空间中作任何平移、旋转都将保持其长度、角度不变。而黎曼几何对应了球面空间,罗巴切夫几何对应了双曲面空间,它们都是保测(长度)不变的,但三角形内角和却不等于 180° 。从变换群意义上来说,本章讨论的分形几何学所研究的也是图形的一种特殊几何量,它具体表现为在尺度变换下的不变性(标度性)。

如果说从变换群或对称性(变换中的不变性)的角度研究具有很强的内禀与客观性的话,那么,维数理论最早则是从观察和描述的方面来研究形态与形状。

什么是维数?数学家庞加勒认为,维数是“描述空间一个点的

位置最少所需独立坐标的数量”。按照数学上最一般的讲法,就是刻画几何图形拓扑性的一个数量。其通俗的解释是:当人们从不同的角度来观察一个事物的形状时,每个角度只能看到它的一个方面,而要把握事物的整体形状就需要从若干个不同的角度来进行观察,维数就是最少需要的观察角度数目。由于事物的形状是由若干个相互关联的点来组成的,对形状的描述实际上是对点与点相互关系的描述,要确定一个点在空间中的位置需要好几个坐标,维数就是最少所需的坐标个数,它是与空间的“度”数有关的。例如,在人们熟悉的真实空间中,用直角坐标系来确定一个点位置需要 X 、 Y 、 Z 三个数(极坐标或其他坐标系也是如此),它就是三维。在相对论中确定一个“世界点”的位置,除了原来的三个空间坐标外,还需要加上时间坐标,这就是所谓“四维连续统”。如果进一步考虑有限的多维状态空间,最后是无穷维的状态空间,每增加一维,就要多考虑一个方面。现在,随着科学的发展,人们对真实空间有了新的见解,根据克莱因—克卢扎的理论,真实空间可能有十一到四十维。根据 D. 玻姆的理论,在为人们直接看到的真实空间(它是有限的维数)背后还有一个多维的隐序空间。系统演化的过程,一定意义上就是它的隐序和显序不断转化的过程。对真实空间的描述有一个重要的特点,那就是它们的维数都是整数的,因为独立的方向不可能是分数。

其实,上述维数观早在欧几里得创立其几何时就有了。他提出:“曲面有两个度量,曲线有一个度量,点连一个度量也没有”。这里度量指的是欧几里得维数,用现代的话来说就是点是零维,曲线是一维,曲面是二维。直到 19 世纪对维数的认识还基本停留在这个水平上。但是,这种直观而朴素的早期维数定义无法精确描述复杂的现实世界。19 世纪末,这一定义遇到了挑战,意大利数学家皮亚诺(G. Peano)提出一个令人惊异的悖论:“存在一个定义于实数轴上闭区间的连续映射,使得将该区间满射到平面上的二维区域”。就是说,一条线上的点与平面上的点可以一一对应起来。为此,他特地构造了这样一条能充满空间的曲线。下面就是这条著名的皮亚诺曲线。

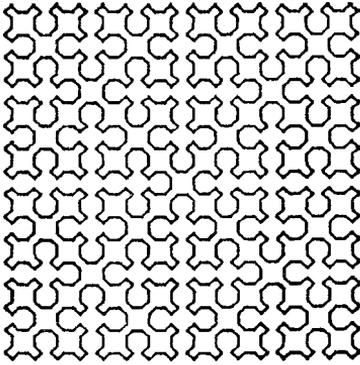


图 6-1 Peano 曲线

皮亚诺曲线的存在说明以往的维数定义存在不足之处,需要对维数问题作进一步的研究。20世纪初,抽象空间的拓扑学得到了迅速发展。1912年,H. 庞加勒指出,若在曲线上标出一点,曲线通常就被分离,故曲线的维数大于0,而为1。曲面就不能由点分成这样两块,但可以用曲线分离,故曲面的维数大于1,应为2,同样立体的维数应为3。基于这种

归纳想法,布劳威尔以及稍后的E. 切比给出了维数的一个严格定义,即大归纳维数(记作 Ind_x)。此后K. 门杰及П. C. 乌雷松又把上述思想局部化,得到另一种维数定义,称为小归纳维数(记作 ind_x)。此外,H. L. 勒贝格发现,可以用充分小的矩形把正方形覆盖起来,使得每一点至多属于3个小矩形,且至少有两个要相交。 N 维空间的立方体也有类似的特性,不过此时每一点至多属于 $N+1$ 个小立方体。这个事实就导致E. 切赫定义了第3种维数,即覆盖维数(也称勒贝格维数,记作 dim_x)。П. C. 亚历山德罗夫定义了第4种维数,即同调维数[记作 $D_n(X, G)$]。以上关于维数的定义有一个共同点,即研究如何对每个空间指定一个确定的整数(即维数),使得 N 维欧氏空间的维数为 N ;若 Y 是空间 X 的子空间,则 Y 的维数不超过 X 的维数;同胚的空间具有相同的维数。对可分度量空间而言,前三种定义是等价的。若 Y 是度量空间,则 $\text{ind}_x \leq \text{Ind}_x = \text{dim}_x$ 。

尽管20世纪初在定量刻画形式或形态方面的确取得了长足的进展,但是,总的来说还没有突破整数维的局限,对于精细地刻画复杂的形态仍然是不够的。特别是在现实世界中,那些不能用整数维数来刻画的形态又十分普遍,所以必须对原来的维数理论进行彻底改造。首先打破整数维观念的是德国大数学家豪斯道夫。1912年,他在对奇异集合性质与数量研究时,第一次提出了维

数可以为分数的思想。接着,布利干将闵可夫斯基密度应用于非整数维,并作了很好的分类。1932年,庞特里亚金等引入盒维数。1934年,贝塞考维合揭示了豪斯道夫测度和奇异的分数维,从而产生了豪斯道夫—贝塞考维合维数概念。然而,在此后相当长的时期内,这方面的研究只停留在少数数学家之中,没有能与现实世界中的复杂形态联系起来,也没能深入下去。直至1960年,曼德尔布罗特在对英国海岸线、尼罗河水位、信号传输等现象进行数学分析时才重新发现了分数维数。

分维是不同于传统维数定义的一种新的维数定义。而分形的基本特征就是整体与部分具有某种自相似性。现在人们从各个不同的角度,用不同的方法对分数维数进行定义,其中有豪斯道夫维数、柯尔莫哥诺夫维数、容量维数、信息维数、广义维数等,其中大多与覆盖和分割有关。下面列举一些常见的分形维数。

(1) 测度、覆盖与豪斯道夫维数:首先打破整数维观念,引入分数维概念的是德国数学家豪斯道夫。作为现代拓扑学创始人之一,他把维数看成是几何图形复杂程度的一种测度。

豪斯道夫维数概念是以点集的豪斯道夫测度为基础的。

设 U 是 n 维欧氏空间 R^n 中任意非空子集,它的直径是指 U 内任意两点 x, y 的距离 $|x - y|$ 的上确界 $|U|$,即 $|U| = \sup\{|x - y|, x, y \in U\}$,如果 U_i 是有限多或可数无穷多个点集构成的点集序列,说 U_i 是点集 F 的一个 δ 覆盖,就是说有

$$F \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$$

且对每一个 i 都有 $0 < U_i \leq \delta$ 。

设 F 为 R^n 中的任意子集, s 为非负实数,对任意给定的 $\delta > 0$,设

$$H_{\delta}^s(F) = \inf\{\sum |U_i|^s \mid U_i \text{ 为 } F \text{ 的 } \delta \text{ 覆盖}\}$$

考虑 F 的所有直径不超过 δ 的覆盖,并使上式右端出现的和式达到最小,当 δ 减少, $H_{\delta}^s(F)$ 随之增加,当 $\delta \rightarrow 0$ 时,极限值为

$$H^s(F) = \lim H_{\delta}^s(F) \text{ 称为集 } F \text{ 的 } s \text{ 维豪斯道夫测度。}$$

不难看出,豪斯道夫测度实际上是对长度、面积、体积概念的推广,求豪斯道夫测度的过程是对日常测量过程的一般化。当测量一个物体的长度时,有三个关键性的步骤:

首先,选定一个测量“尺子”,如公尺、市尺或其他固定的长度。尺子的选取原则上是任意的,但一经选定,在整个测量过程中就不能再改变。

其次,将尺子在被测量对象上一次次“量”下去,量的过程也就是“覆盖”过程。在测量中要求一次“紧接着”一次,中间不能有间隔,也不能有重复,否则就会影响测量结果的正确性。

最后,记下覆盖的次数,乘以尺子的长度就得到了测量结果。

上述测量方法或覆盖方法是普适的,不仅测量长度,而且在测量面积和体积以及所有对象时都同样可用,只不过选定的尺子不再是一个线段,而是一块标准大小的面积或体积,如一个正方形,一个圆形,一个正立方体,一个球体等。

从豪斯道夫测度的思想中可以发现,测量中存在一个重要的关系,即对同一测量对象,尺子选得越小,测量或覆盖的次数也就越多。而尺子变小与测量次数增加之间的关系与被测对象的形态有关。比如,对于一条固定长度的直线,尺子缩短1倍,测量的次数也要增加1倍,它们之间成反比关系。如果测量一块平整的面积,总是要选一个简单的二维图形,如一个小正方形,一个圆形等等作尺子,这样,在尺子的大小与测量(覆盖)次数之间就有一个平方反比的关系,即尺子的线度缩小(或放大)1倍,测量(覆盖)的次数就要增加(或减少)平方倍(4倍),如果是一个连续、光滑的立方体,则成立方(三次方)反比关系。可见,“成什么样的反比关系”取决于被测对象具有什么样的形态特征,也就是说,这种反比关系正好体现或反映了事物所处的空间及形态的特征。这是一个十分重要的思想,可以“反过来”用不同的比例关系来刻画对象的形态性质。

豪斯道夫维数就是用上述比例关系来反映形态特征的一个量,这个量并不一定要求是整数,分数维的概念就自然地被引进来了。

(2) 相似维与容量维 :上述维数定义中还隐含了一个重要思想,即相似性。广义上讲,直线和线段、平面上的大正方形和小正方形、空间中的大立方体和小立方体之间都是相似的。这种思想可以进一步推广到非规整性的几何形体,只要具有相似特征,就可以用相应的维数来刻画。可将相似维数定义为:整体与部分这两个非相似图形之间“大小”的对数之比:

$$D_s = -\log N / \log(1/\beta)$$

其中 N 为构成整体的局部的个数, β 为局部与整体的线度之比(相似比)。

如长度为 L 的直线,可以看成是由 $N = m$ 段长度为 L/m 的线段所组成 ($\beta = 1/m$);边长为 L 的正方形,可以看成是由 $N = m^2$ 个边长为 L/m 的正方形所组成 ($\beta = 1/m$);边长为 L 的正立方体,可以看成是由 $N = m^3$ 个边长为 L/m 的立方体所组成 ($\beta = 1/m$);按照相似维数定义,可以很方便地计算出直线 $D_s = 1$;正方形 $D_s = 2$ 和立方体的维数 $D_s = 3$ 。这些结果本身并不奇怪,它就是我们熟悉的:直线为一维,平面为二维,正方体为三维。但计算过程却可以适用于一切具有自相似性的形态。例如:

对康托尔三分集 $D_s = -\log 2 / \log(1/3) = D_s = \log 2 / \log 3 = 0.6309$,

科赫曲线的 $D_s = -\log 4 / \log(1/3) = D_s = \log 4 / \log 3 = 1.2618$,

谢尔宾斯基垫圈的 $D_s = -\log 8 / \log(1/9) = D_s = \log 8 / \log 9 = 1.5849$ 。

相似维数不仅可以用于具有自相似性的图形,而且可以推广到所有具有自相似性的对象,如自相似集合、统计自相似性以及自仿射集等。相似维数的意义不仅在于从定量的角度刻画了相似和自相似,而且揭示了不同类型的相似特征。

与相似维数类似的是容量维数,它是由前苏联著名数学家柯尔莫哥诺夫(A. N. Kolmogorov)定义的,有时也称为柯尔莫哥诺夫维数,它也是利用了“覆盖”的思想。

容量维是一个用得最广、又具有代表性的维数,其定义是:

设用一个直径为 ϵ 的小球去覆盖某个所要研究的图形,用 $N(\epsilon)$ 来代表盖满该图形所用小球的最少数目,显然当 ϵ 减少时, $N(\epsilon)$ 会增加,当 ϵ 趋近于零时, $N(\epsilon)$ 会趋向无穷大,于是可以取极值:

设 F 是平面上的一个有界点集,根据 F 的有界性,总可以找到一个矩形,使 F 包含在这个矩形之中。将这个矩形分割成若干个边长为 ϵ 的小方格,于是必有某些数目为 $N(\epsilon)$ 的小方格落在 F 内,于是定义 F 的容量维数为

$$D_c = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right)}$$

实际上集 F 并不限于平面点集,如果 F 是一条直线上的点集,则定义中所说的小方格应理解为长度为 ϵ 的小区间。如果 F 是 R^n 中的一个有界点集,则小方格应理解为 R^n 中边长为 ϵ 的立方体。上述定义提供了计算机上近似计算点集 F 容量维数的方法。

极值问题是一个局部问题,通过取极值所计算出来的容量维也是对图形局部几何性质的描述。因此,只有在一个特定的、相对较小的范围内容量维才可能为常数,它所刻画的形态特征才不会随尺度的变化而变化。这种保持“尺度变换的不变性”称为“无标度性”,相应的范围就是所谓“无标度区”。

在无标度区内的事物或系统是无所谓“特征尺度”的。是否与前面所提出的“每个事物或系统都有自己的特征形态”这一命题相矛盾?

诚然,特征形态与特征尺度是系统科学中的一个重要概念,系统科学认为任何一个系统或事物都有自己的特征尺度。人们常说“海水不可斗量”,为什么呢?是因为海太大,海水太多,斗太小。以一斗水的体积和海的体积相比可以忽略。可见,一样事物要度量它,总要选一个“恰当”的、能与该事物形态及时空尺度相“匹配”的尺度。这个尺度就是事物的“特征尺度”。

那么在什么情况下才会出现无特征尺度的“无标度”区呢?相变理论说明只有在即将发生物态变化的相变点附近才会出现这样的无标度区。这意味着分形形态的出现与物态的相变,即事物内

部的结构变化有着密切联系,它对于研究事物的演化具有十分重要的意义。

(3) 信息维与关联维:复杂的形态不仅表现在几何上,也表现在事件的分布和相互关联上。在这方面分形理论也给出了一些很有意义的启示。

对于分布和关联不均匀的对象,为了表明其复杂程度,需要对信息维数和关联维数进行定义。

1) 信息维数:在求容量维数时,为了求 $d_c(F)$,需要知道包含了 F 中的点的方格数,但却并不需要知道每个方格包含了多少个 F 中的点。这就是说,无论方格中包含了一个点,还是多个点,都没有区别,所以求出来的 $d_c(F)$ 只反映了 F 的几何尺度特征,而没有反映 F 在平面上分布疏密的情况。信息维数就是为刻画点集的分布特征而定义的。

$$\text{信息维 } d_i = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{I(\epsilon)}{\ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right)}$$

其中 $I(\epsilon) = \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} P_i \ln\left(\frac{1}{P_i}\right)$ 。熟悉信息论的人很快就会发现它就是通常信息熵的公式,这也是称上述维数为信息维的理由。

在式中 P_i 是 F 中的点落在第 i 个方格中的概率。如果所有方格以相等的概率包含 F 中的点, $P_i = \frac{1}{N(\epsilon)}$, 于是 $I(\epsilon) = \ln N(\epsilon)$ 。

这样,信息维数与容量维数相等。对于分布不均匀的对象就需计算概率 P_i 。通常情况下,可以用落在第 i 个方格中的点的频率代替概率,这样,为了求得 P_i 的较好的近似值,计算的点数将是很大的。所以对于除非事先知道样本点的分布概率,实际计算信息维数是比较困难的。

2) 关联维数:形态的复杂性往往与关系的复杂性联系在一起。而复杂的联系既可以表现于复杂的空间关联,又可以表现为复杂的时间关联。为了刻画关联的复杂程度,1983年P. 格拉斯贝格(P. Grassbergen)和普罗卡西娅(I. Procaccia)引入了一个刻画关联的函数:

$$H(\epsilon - | y_i - y_j |)$$

它表示在 $C(\epsilon)$ 中只考虑关联大于 ϵ 的关联。

看一下人们用尺子测量长度的情况,不难发现,这里 ϵ 相当于尺子的长度,而 $C(\epsilon)$ 相当于测量的次数。可以同样引入一个反映两者关系的维数,这就是关联维数。

把关联维数的思想用到时间序列上,可以得到一个十分有用的方法,那就是用时间序列来重构相空间,即用嵌入定理来求得时间序列的关联维数 D_c 。

设时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$, 取 m 为嵌入空间维数,构造一批矢量:

$$Y_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_{m1}\}, Y_2 = \{x_2, \dots, x_{(m+1)}\} \dots$$

给定 $\epsilon > 0$, 求 Y_i, Y_j 距离小于 ϵ 的比例 $C(\epsilon)$ 。变动 ϵ , 求出满足 $C(\epsilon) = \epsilon_\gamma, D_\gamma = \frac{\ln C(\epsilon)}{\ln \epsilon}$ 。它可以通过对一批 m , 在双对数坐标纸求直线部分的斜率来得到。

对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 。构造一批 m 维矢量, 支起一个嵌入空间。只要嵌入维 m 足够高 ($m > 2D + 1$, D 是吸引子维数), 就可以在只相差一个拓扑变换的意义下恢复原来的动力系统。这种方法具有很强的现实意义, 因为, 在许多情况下, 比较容易通过测量来得到时间序列。

构造 m 维矢量的办法通常采用时间差法, 即按间隔 p 从时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 中取数, 作为分量:

$$y_i = (x_i, x_{i+p}, x_{i+2p}, \dots, x_{i+(m-1)p}), (i = 1, 2, \dots)$$

构造好矢量 y_i 之后, 要定义它们之间的距离, $|y_i - y_j| = \max_{1 \leq a \leq m} |y_{ia} - y_{ja}|$, 凡是距离小于给定数 ϵ 的矢量, 称为有关联的矢量(因为它们相互间靠得近, 关系密切)。若一共构造了 M 个矢量 y_i , M 与 N 为同量级的大数, 数一下有多少对关联矢量。它在一切可能的 m^2 种配对中所占比例称为关联积分:

$$C(\epsilon) = \frac{1}{m} C(\epsilon) = \frac{1}{m^2} \sum_{ij} H(\epsilon - |y_i - y_j|), \text{ 其中当}$$

$\epsilon - |y_i - y_j| \geq 0$, $H(\epsilon - |y_i - y_j|) = 1$; 当 $\epsilon - |y_i - y_j| < 0$, $H(\epsilon - |y_i - y_j|) = 0$ 。如果 ϵ 取得太大, 任何一对矢量都发生关联, $C(\epsilon) = 1$, 取对数后为 0; 如果 ϵ 取得合适, 原始数据客观地反映出相应的标度性质, 就可以定义关联维数:

$$D_r = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\epsilon)}{\ln \epsilon}$$

显然, 如果 ϵ 取得太小, 很多关系密切的量会被排斥在外, 这意味着低于环境噪声和测量误差造成的矢量差别, 则上式算得的就不是关联维数, 而是嵌入维数 m 。实践中往往改变一批 m 值, 看能否得到不变的 D_r 。它在双对数坐标图上 $\log C(\epsilon)$ 与 $\log \epsilon$ 为一条直线段。这样既可检验标度性质, 又可有效地区分噪声和动力学信号。

以上介绍了几种典型的分形维数定义, 从目前情况看, 根据不同的对象定义各种分形维数已成为分形研究的重要发展方向, 其意义在于它为人们刻画形态、分布、关联等的复杂度提供了可行的方法和定量的测度, 而且它们的变化在一定程度上体现了系统形态复杂度的演化。

6.1.3 奇怪吸引子的分形维数

作为分数维数的一种典型应用, 上一章中提到的系统混沌运动的奇怪吸引子, 分数维数是奇怪吸引子的一个基本的定量特征。对于耗散系统来说, 这一特征主要表现在奇怪吸引子相空间的分形维数上。下面是一些典型的奇怪吸引子实际计算的结果。

(1) 伊依(Henon)吸引子:

$$X_{n+1} = 1 + Y_n - aX_n^2$$

$$Y_{n+1} = bX_n$$

当 $a = 1.4$; $b = 0.3$ 分形维数 $D = 1.26$ 。

(2) 洛伦兹(Lorenz)吸引子:

$$\dot{X} = -\sigma(X - Y)$$

$$\dot{Y} = \gamma X - Y - XZ$$

$$\dot{Z} = XY - bZ$$

当 $\gamma = 40$; $\sigma = 16$; $b = 4$ 时分形维数 $D = 2.06$ 。

(3) 罗斯(Rossler)模型

$$\dot{X} = -Y - Z$$

$$\dot{Y} = X + aY$$

$$\dot{Z} = b + Z(X - c)$$

当 $a = b = 0.2$; $c = 5.7$ 时 ,分形维数 $D = 2.014$ 。

(4) 强迫布鲁塞尔振子的分形维数 $D = 2.15$ 。

以上例子表明 ,通过计算动力系统在相空间中轨道的分形维数就能判定它是否处在混沌运动之中 ,同时还可以通过分形维数的具体数值来提供某些动力学原因。

6.1.4 分形的定义

在研究分形理论之初 ,往往将分形和分维联系在一起 ,认为分形就是具有分数维数的图形 ,是那些豪斯道夫维数不是整数的集合。这样的定义将把一些明显属于分形的形态排除在外 ,如著名的布朗运动曲线 ,它的维数就为整数 2。曼德尔布罗特也曾把分形定义为那些维数严格大于拓扑维数的集合。这个分形的数学定义尽管严格 ,但仍然没有能反映分形的本质。1982 年 ,曼德尔布罗特在他那本后来成为“经典”的《自然界中的分形》中提出 ,可以把分形定义为“部分与整体相似的图形” ,从而着重突出了自相似性这一特征。1986 年 ,他又推广为“其组成部分和整体以某种方式(自相似或自仿射)相似的形” 。这个定义很快为大多数人所接受。然而 ,这样的定义是不是就完全反映分形的本质特征了呢?人们尚需继续探讨。

但分形定义只是对现实世界一类特殊形态的几何抽象 ,自然界不存在绝对意义上的分形 ,所以 K. 法考勒(Falconer)建议 ,对分形的定义可以用和生物中生命定义的同样方法处理。生物中生命并没有严格和明确的定义 ,但却可以列出一系列生命体所具有的特性 ,比如 ,繁殖力、运动能力及对周围环境的适应能力等。他认

为,对分形似乎最好把它看成具有一些例外性质的集合,而不去寻找精确的定义。按照这种观点,K.法考勒称集合 F 是分形,是认为它具有下列典型的性质:

(1) F 具有精细的结构,即在任意小的尺度之下,它总有复杂的细节。

(2) F 是不规则的,它的整体与局部都不能用传统的几何语言来描述。

(3) F 通常有某种自相似形式,这种自相似可以是近似的或是统计意义下的。

(4) 一般地说, F 的某种方式定义下的分形维数大于它的拓扑维数。

(5) 在大多数令人感兴趣的情形下, F 以非常简单的方法确定,可能由迭代过程产生。

根据 K.法考勒的讲法,可以把分形的特征大体归纳为以下几方面:

(1) 具有自相似性,即事物形态不随尺度的变化而变化。这种保持“尺度变换的不变性”称作为“标度性”,这一范围就是所谓“无标度区”。在这个区域内,系统的形态是无所谓“特征尺度”的。显然,对一个真实的系统来说,无标度区的范围不可能很大,因此,实际系统的整体形态往往要分为许多个区域,每个区域都有一个相应的维数。如果要掌握系统的整体形态,就必须在考虑各区域不同维数的同时,要进一步考虑不同维数的分布,这就是目前分形理论的一个重要方面——多标度分形。

(2) 除了个别例外(如布朗运动),分形在大多数情况下都具有分数维数;同时,容量维数越大,表明系统的形态越复杂。可见,对于具有复杂形态的系统,多标度分数维数是一个较好的形态标度,它的变化在一定程度上体现了系统形态复杂度的演化。

(3) 分形通常可以通过反复迭代来产生。这种情况在现实世界中广泛存在,说明分形是自然界和社会中事物的普遍存在形式,也是事物发展的基本形式。

6.2 分形类型

如前所述,从系统的观点看,分形是事物整体的一种特殊形态;从数学的观点看,分形是对标度变换的不变性。根据标度变换的不同,可以对分形进行如下分类。

6.2.1 数学中的分形

数学上的分形大多可以通过反复迭代构造出来。这种构造过程可以分为:

第一步,选定一个作为“原多边形”的初始形态,例如一条直线线段,一个三角形,一个分叉的Y形或其他简单的几何图形;

第二步,对上述原多边形进行一种变换,产生一个新的图形。然后每次都对上一次变换的结果再进行一次同样的变换。这种变换可以称为“生成函数(曲线)”;

第三步,将上述变换无限地进行下去,产生一个具有无限精细的分形。

数学上典型的分形有:

例1 康托尔三分集

设 E_0 是一段直线,与之对应的区间为 $[0, 1]$ 。 E_1 表示由 E_0 除去中间 $1/3$ 之后得到的集,即 E_1 包含 $[0, 1/3]$ 和 $[2/3, 1]$ 两个区间。分别去掉 E_1 两个区间的中间 $1/3$ 而得到 E_2 。 E_2 包含 $[0, 1/9], [2/9, 1/3], [2/3, 7/9], [8/9, 1]$ 四个区间。按此方法继续下去。康托尔三分集 F 是由属于所有 E_k 的数组成的,确切地说, $F = \bigcap E_k$, F 可分成数集序列 E_k 当 k 趋于无穷时的极限。在这里闭区间 $[0, 1]$ (单位直线) E_0 就是“原多边形”,除去中间的三分之一就是一次变换,即生成函数。

例2 科赫(Koch)曲线

Koch曲线可以通过如下过程构造出来:对一条有限长度的直线,其一级构造是将线中部的 $1/3$ 去掉,并代之以一个等边(或等腰)三角形。曲线的长度为原长的 $4/3$,以后每次都对图形中的每一段直线如法变形,均变为原直线长的 $4/3$ 。如此一直构造下去,所得到的极限图形即为Koch曲线。此曲线有两点完全不同于传

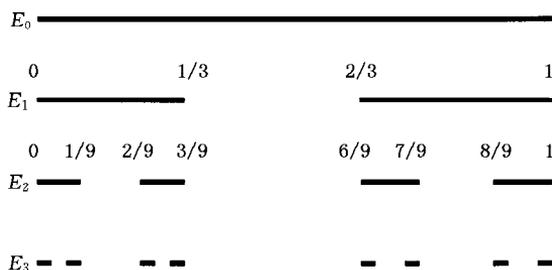


图 6-2 康托尔三分集

统的曲线:一是此曲线是经无穷次构造后得到的图形,长度为 $(\frac{4}{3})^n$,当 $n \rightarrow \infty$ 时曲线长度为无穷大;二是此曲线由无穷次的自相似构成,因此,它虽然处处连续,但又处处不可微。

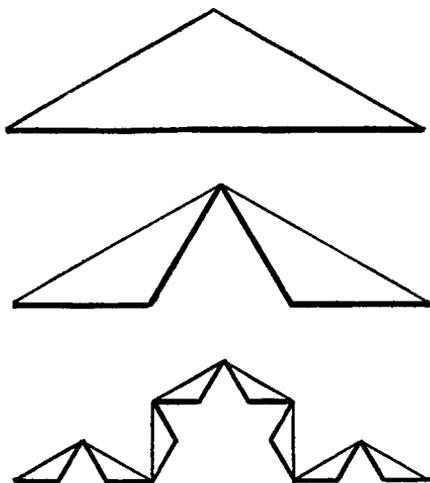


图 6-3 Koch 曲线

Koch 曲线在许多方面的性质与康托尔三分集的性质类似,它由 3 个与总体相似的部分组成,比例系数是 $1/3$ 。虽然可以称 F 为曲线,但它是如此的不规则,以至没有任何传统意义下的切线。简单的计算表明 E_k 的长度为 $(\frac{4}{3})^k$,令 k 趋于无穷,意味着 F 的长度

是无穷大的。而另一方面 F 是一条曲线,所以在平面内的面积为零,这意味着它的长度和面积都没有提供很有效的描述。

例 3 谢尔宾斯基(Sierpinski)垫

谢尔宾斯基垫(填料)的构造方法与上面相同。如果从一个初始的等边三角形中反复去掉中间相反方向的小等边三角形便能得到(图 6-4)。

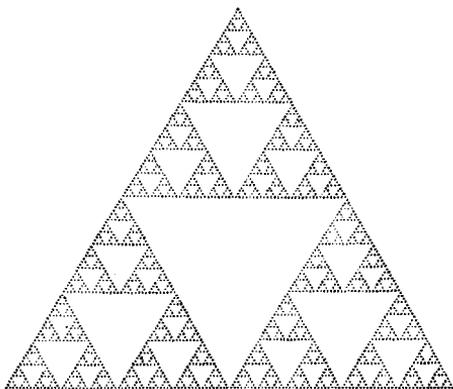


图 6-4 Sierpinski 垫

如果在空间取一个立方体,用上述方法“挖空”其中的部分,就可以得到一种有孔隙的结构,即如下的所谓谢尔宾斯基海绵。

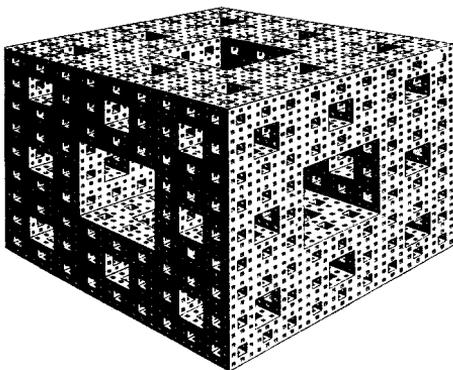


图 6-5 Sierpinski 海绵

例 4 随机 Koch 曲线

分形的自相似嵌套结构还可推广到随机成分的嵌套结构,只不过此时的分形是统计意义的自相似。随机 Koch 曲线是这样构成的:给定一个初始单位线段,然后用结构的生成成分之一(图中 b 或 c)去替换,相应的概率分别为 p 和 $1-p$ 。下一步再对新的基本线段(原单位线段的 $1/3$)实施同样替换办法,如此一直进行下去,就得到了随机的 Koch 曲线。有人把它称为科赫海岸线。

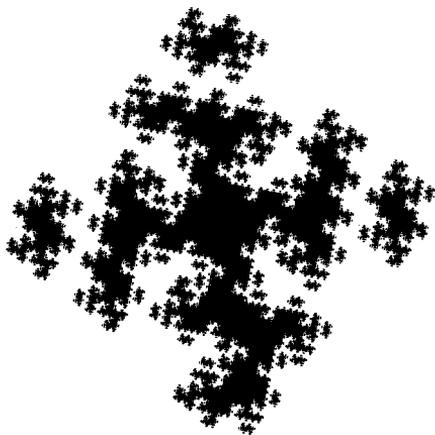


图 6-6 科赫海岸线

以上例子表明,数学分形具有如下性质:

(1) F 是自相似的,即 F 的部分与 F 的整体大小不同,而几何形状相似。

(2) F 有精细结构,它包含有任意小比例的细节。

(3) 虽然 F 有错综复杂的细节结构,但每个细节都非常简单明了,都与“原多边形”相似。

(4) F 是由一个迭代过程得到的,每一次迭代都可看成是“生成函数(曲线)”对上一次迭代结果的一次作用,如此反复地作用下去,直到无穷,得到 F 集。

(5) F 的几何性质难以用传统的术语来描述,它既不是满足某些简单条件的点的轨迹,又不是任何简单方程的解集。

(6) F 的局部几何性质也是很难描述的。

(7) 虽然 F 在某种意义上是相当大的集(不可数无穷集),然而它的大小不适宜于用通常的测度和长度来度量。

6.2.2 自然界中的分形

数学上的分形虽然简单,但毕竟都是人们刻意构造出来的。那么,现实世界中的分形又是怎样的呢?观察表明,现实世界中的分形同样具有自相似性,只不过不像数学分形那样规整,而往往具有更为复杂的形态。下面是几个典型的例子。

例 1 海岸线的形状

《英国的海岸线有多长》是曼德尔布罗特在创立分形理论时写的一篇文章,仅就题目来看就很引人注目。因为按照常理,一个国家的海岸线长度总是固定不变的,否则便无法确定其国土的大小,甚至会导致领海区域的争端。而且稍微仔细想一下,就会发现这个问题意义极其普遍。人们既可以问英国的海岸线有多长,也可以问其他国家的海岸线有多长,甚至可以问一切自然界中的边界,包括从海岸、江河的堤岸、云彩的边缘、到尘埃的外形、闪电的路径等有多长。可见,这实际上是一个关于自然界中事物边界与本质的本质性问题。从图 6-7 不难看出,一条曲折的线段,其长度是会随着测量的尺子的缩短而加长的。道理很简单,线段的总长度等于尺子的长度乘以测量的次数(所有测量结果的加和),尺子越短,不仅测量的次数会增加,而且越能将曲折的细节部分测量进去,所以总长度就会增加。不难想像,当尺子的长度趋近于零时,一条无限曲折的线段总长度将趋向于无穷。

例 2 湍流的结构

湍流既是大自然中普遍存在的一种运动形态,又是物理学乃至近代科学中的一大难题。湍流的分形性主要表现在它在不同的尺度层次上具有相似的结构,即在大到数千公里,小到几个毫米的尺度层次上具有层层嵌套的旋涡结构。湍流中的分形同样具有十分普遍的意义,因为湍流不仅可以发生在流体之中,而且可以出现在其他许多领域,从固体直到社会经济领域的复杂运动之中。

与湍流密切相关的是第五章中讨论过的混沌运动,作为混沌

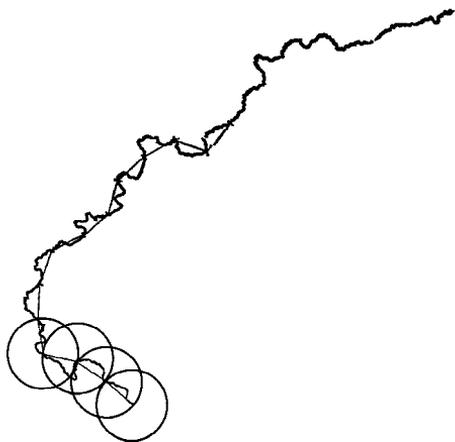


图 6-7 用折线近似海岸线

运动代表的奇怪吸引子在相空间中的运动轨迹就具有无限嵌套的分形结构,可以说,分形也是混沌运动的一个基本特征。

例 3:布朗运动轨迹

和数学分形具有严格的自相似性不同,大自然中大量存在的是统计意义上的自相似性。这方面最典型的例子是布朗运动轨迹。物理学家和数学家对布朗运动十分熟悉,它是 19 世纪后半叶英国植物学家布朗在观察水中微小的花粉时发现的。布朗在显微镜下惊奇地发现,花粉在水中做无规则运动。1905 年,爱因斯坦对此进行了解释,他指出,这种无规则运动起源于水分子对花粉的冲击,由于花粉颗粒很小,很容易受到水分子的冲击而发生明显的位移,就好比一个小个子处在散戏后的人流中一样。

布朗运动的分形性主要表现在它的运动轨迹,在统计意义上具有自相似性,即可以在多个尺度层次上都看到相似的无规则运动。

例 4:生命体内的分形

生命体内也到处存在着分形,其中有两个最典型的例子,一个是脑电图和心电图。人们通常以为一个正常的心脏和大脑总是作周期性运动的,表现在心电图和脑电图上应该是周期性波动,否则生命活动就会发生混乱。虽然粗看起来,正常人体的脉搏是周期性的和稳定的,但实际测量表明,每一个周期在细节上都不相同,

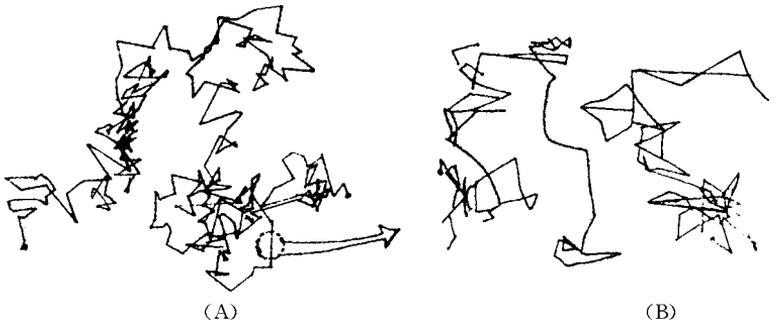


图 6-8 布朗粒子运动的轨迹

呈现出上节所讨论的混沌运动。不过这种混沌运动的轨迹也并非毫无规律,而是具有无限嵌套的自相似结构(奇怪吸引子),这正是分形的一种典型形态。

如果说上面的例子是一种时间序列的分形的话,那么,生命中分形的另一个例子是空间分布上的。仔细观察一下身体中血管、气管的分布,则会发现身体内有总血管、分支血管和毛细血管,血液从总动脉出发流向支血管,再分流向更小的毛细血管(气管也是一样),如果用放大镜和显微镜观察,会发现更多的支路。这些看上去杂乱无章、错综复杂的图景,每一层都是相似的(河流的分叉与道路的分叉也有类似情况)。下面有些像树枝的结构实际上是人体肺部的支气管。

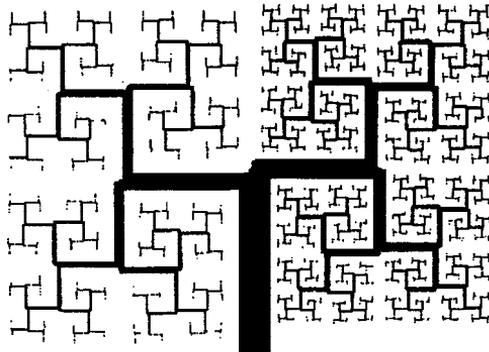


图 6-9 填满平面的递推支气管

例 5 :音乐中的分形

凡熟悉音乐的人都有一种体验,一首乐曲中的主旋律总会以各种形式反复出现,乐章中包含了许多“变奏”,听起来给人以似曾相识又不相识,好像在重复但又不完全重复的感觉。其实这也是嵌套着的自相似结构,如果乐章中没有这样的结构,那音乐就会变得不可想像。一些研究音乐的学者还发现,无论是古典的民歌,还是现代的流行歌曲,无论它们听起来相差如何巨大,它们的频谱都有相似的结构,并与物理学中的粉红色噪声($1/f$ 噪声)有密切关系,这一近乎神秘的现象也许暗示着分形形态的深刻内涵。

例 6 :地图上的分形

无论在天空还是在地面,分形无处不存在。如果说英国的海岸线是一条分形曲线的话,那么,地图上几乎所有的区域都是分形的。下面是美洲亚马孙河的流域图,仔细观察将会发现它的每一处都和整体有某种相似的地方,即使一时还难以说出其中的原因,但作为分形的典型仍是十分壮观的。

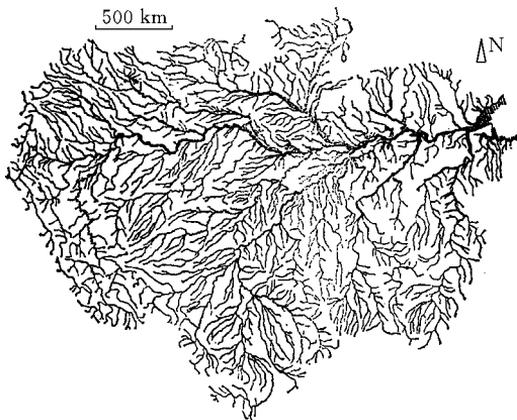


图 6-10 亚马孙河的形状

例 7 : $1/f$ 噪声

所谓 $1/f$ 噪声指的是功率谱与振动次数 f 的倒数成比例的噪声,有时也把它称为粉红色噪声或模糊噪声(flicker),它的特点是

在功率谱中频率越低、波长越长,波动成分的振幅也越大。从下面它的线谱中可以看出明显的自相似性。

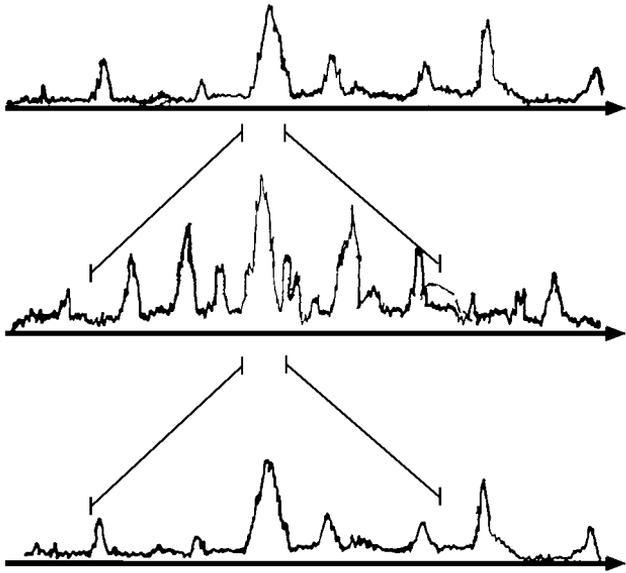


图 6-11 分数维分子的线谱(横轴为震动数,纵轴为线谱强度)

$1/f$ 噪声广泛存在于自然界与社会经济领域之中,如电路中的模糊噪声、水晶片的振动、公路上汽车的流动、气温变化、音乐、脉搏、神经纤维的膜电位变化等。一种能在如此广阔领域中存在的噪音,早就引起人们对它发生浓厚兴趣,但一直搞不清它的机制与发生的原因,以至成为科学中的一大谜团。现在,人们从分形的自相似入手,似乎找到了解开这一谜团的钥匙,特别是通过后面将要谈到的自组织临界态 SOC,人们发现它把分形与混沌联系起来。

6.2.3 社会经济中的分形

分形不仅广泛存在于自然界中,而且广泛存在于社会经济的许多领域。下面是一些常见的例子。

例 1 通信过程中的失误

若将失误的时间间隔记作为 r , 则其服从下列分布

$$p(t) \propto t^{-D}, D \approx 0.3$$

其中 $P(t)$ 表示失误的间隔比 t 大时的占有概率。分数维数为 0.3。也就是说, 失误的分布就如 Cantor 集合那样是形成自相似群体而分布的, 一旦产生失误, 就容易继续产生失误。现在还完全没有一个能够满意地说明这一经验法则的理论。

例 2: 居民的收入分布

已知居民收入在大范围内服从对数正态分布。图 6-12 是把美国 1935~1936 年的收入分布在对数正态图表纸上的图形。图中纵轴表示收入的对数, 横轴表示累积概率, 散点图呈直线就表示服从对数正态分布。从图可明显看出, 除了 1% 高收入者以外的各点, 几乎都呈直线排列, 收入分布确实服从对数正态分布。

对离开对数正态分布的居于 1% 以上的人的分布进行详细调查后发现为如下的幂分布:

$$p(X) \propto X^{-D}, D \approx 1.6 \quad (2.36)$$

与前面的分形图相比, 可以看出这一分布是多次出现的分数维分布。

收入分布中最有趣的可能是无产阶级和资产阶级的分布型有明显的区别。前者收入是对数正态分布, 后者则服从分数维分布。

根据正态分布的理论, 对数正态分布只可能在现象能分解为独立概率现象的积时才会出现。例如, 某人的成功概率等于此人具有适合工作才能的概率, 有好上级的概率和时间好的概率等的乘积。即 $p_0 = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n$, 两边取对数后得到:

$$\log p_0 = \log p_1 + \log p_2 + \dots + \log p_n \quad (2.38)$$

每个 p 如果在 $0, 1$ 区间独立取值, 根据中心极限定理, 右边渐接近高斯分布。因此, 分布可成为对数正态分布。

因为资产阶级的财产超过某一程度时, 其收入主要取决于投资, 所以就不能依照上述设想, 它可能直接反映下一项股票价格变动中所得的钱的分数维性质, 从而决定这些人的收入。

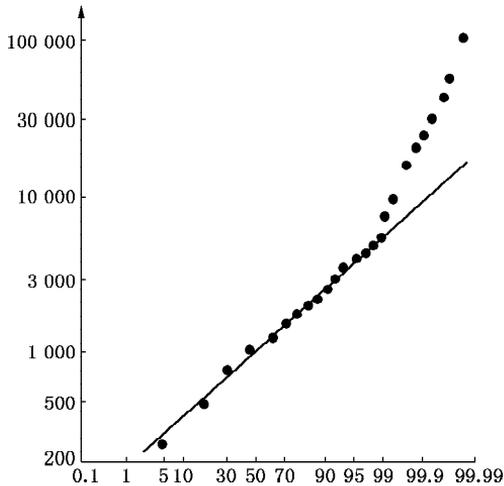


图 6-12 一年收入的分布[横轴为累积概率(%),纵轴表示收入(美金)]

例 3 股票价格的变动

股票价格的变动图虽可在媒体上经常看到,但因涨落得厉害,使人感到几乎完全是随机的、无规律可循。但统计学分析却发现有很好的规律。下面是 Mandelbrot 发现的两个法则。

(1) 每单位时间的股票价格变动服从特性指数为 1.7 的对称稳定分布。

(2) 单位时间间隔不论取多大,分布总是相似的。也就是说,适当地改变尺度,就可成为同样的分布,即表现出明显的自相似性。

这里的稳定分布表明,若单位时间 T 之间的股票价格变动 x 的分布密度记为 $P(x)$,则下述关系式成立:

$$\int_x^\infty p(x')dx' = \int_{-x}^{-\infty} p(x')dx' \propto x^{-D}$$

此关系式表示股票价格变动的大小分布为分数维。例如,一天的股票价格变动在 x 元钱以上的次数,比 $2x$ 元以上的变动次数多 $2^{1.7} \approx 3.2$ 倍。

其实,以上的规律性还可以解释更多的经济现象,如人们对金钱

的感受就是如此。对小孩(或者穷人)来说,1 000 元是个不太大的数字,10 万元就会被看成巨款了。对大人来说,10 万元是个不太大的数字,但 1 000 万元就算得上巨款了。对大富豪来说,1 000 万元也算不上什么财产,但 10 亿元也可能被看作巨额资金。可是从国家预算来看,就连 1 000 亿元也是微不足道的。如果做股票买卖,有的人以 100 万元为单位买卖股票,而另一些人则以 1 万元为单位来买卖,但不论是谁,只是交易位数不同,而买卖决断的方法是相同的。这就是自相似性,所以可把股票价格变动看作是分数维的。

不仅如此,法则(2)表示股票价格变动在时间上也是分数维。一天的股票价格变动图与一年的股票价格变动图相比,不同的只是股票价格尺度不同,而变动情况则十分相似,以至很难加以区别。这就告诉我们,可以通过对部分时段价格变化的分析来估计其他时段,以至预测整个阶段的价格变动。

6.2.4 分形的分类

综上所述,可以从数学上对分形进行如下分类:

数学上分形可以被看成是标度变换群体作用下的图形不变性(守恒性),因此,可以按变换群体的不同性质来对它们分类,将所有的分形分为线性变换保持图形不变的线性分形和非线性分形。

线性分形又可以分为严格保持自相似性的数学分形和统计意义上保持自相似的统计分形。数学分形包括前面讲的康托尔集合、Koch 曲线、Sierpinski 垫和海绵等,统计分形中最典型的是布朗运动。

非线性分形又可以看成是非均匀变换分形,这方面有着极其丰富的内容,也可以进行不同的分类。例如,可以将非线性分形分为自反演、自仿射、自平方等,它们对应了各种形式的非线性变换或非均匀变换。

6.3 分形生长

在《系统演化》一章中提到一种作为系统发展特殊形态的分形生长。其实,创生后的系统总会根据其内部结构与外部环境的不同而采取不同形式的生长路线,分形生长就是其中一种重要的生长方式。

分形生长既是分形系统理论的基本内容,又在复杂系统演化中占有极重要的地位。下面先介绍分形生长的特征,然后着重讨论一些具有重要理论意义和实用价值的分形生长模型。(本节主要参考李后强、彭光钺《分形与分维》一书,其中的图片也取自该书)

分形广泛地存在于自然界、人类社会和思维领域,那么,这些分形是从哪里来的呢?从系统科学的观点来看,世界上一切事物都有其自身的“来龙去脉”,即都有其创生、发展、消亡的历史。分形形态也是如此,它们是一种特殊生长过程的产物,这种生长过程称为分形生长。

早在分形理论正式创立前,人们就对分形生长这种特殊而有趣的生长过程有所觉察。例如,英国造船工程师 Henry S. Heleshaw 在 19 世纪就发现了所谓黏性指化(viscous fingering)现象。它是指在一种黏性系数较大的液体中注入另一种黏性系数较小的液体,就像在石油中注水一样,结果是形成一种像人的手指那样向前伸展的图形。早在 18 世纪,德国人 Georg Christoph Lichtenberg 发现了后来称为 Lichtenberg 的齿性线状放电现象。这两种情况都与后来 DLA 模拟的结果十分相像。遗憾的是,尽管它们奇特的形状引起了人们的注意,却长期没有得到更为深入的研究。

分形理论创立后,人们又对生长过程进行了大量试验研究和计算机模拟,提出了许多生长模型。这些模型大体可分为两类:一类是能量模型,涉及成核、晶化、畴壁生长过程;另一类是几何模型,它基于无序运动,并且大都具有不可逆性。但从实用的观点看,常用的有如下几种。

6.3.1 受限扩散凝聚(DLA)模型

DLA 模型又称“受限扩散凝聚模型”(diffusion-limited aggregation),它是 1981 年美国密歇根大学的威特恩(T. A. Witten)和桑德尔(L. M. Sander)针对悬浮在大气中的煤灰、烟尘或金属粉尘的扩散凝聚过程而提出的,为纪念这两位学者,有时也称为威特恩—桑德尔(Witten-Sander)模型。该模型一经问世,就引起了人们的高度重视,并成为分形生长的经典模型。这主要有两方面的原因:一是它描述了一类特殊的非平衡过程,即由无序(随机)的不

可逆过程导致的生长。类似过程无论在自然界(如金属扩散离子的电解液中的淀积、闪电裂纹、黏性指化、渗透、树枝分支、雪花、地震裂纹、材料等),还是在人类社会,以至思维中都普遍存在;二是该模型十分简单,既可以通过计算机进行模拟,又可以运用实际的实验来实现,并且两者的结果能够很好地吻合。

其基本思想如下:

(1) 取一个欧氏维为二维($d = 2$)的方形空间(正方形),将它分割成许多小方格,以形成方形点阵。在点阵中央附近的格点上,放置一个静止的微粒作种子微粒。

(2) 从区域边上某个地方随机地“释放”出一个粒子,让它在该区域的格点中作无规运动(无规行走或布朗运动)。

(3) 只要时间足够长,粒子的随机行走最终会产生两种后果:一是与种子微粒相碰,此时令该微粒附着(凝聚)于种子微粒之上,与之结合形成凝聚集团;二是行走至点阵的边界,此时令该微粒被边界吸收而消失。接着再随机地产生第2个微粒,但无论哪种情况,接着都放出第2个作无规运动的粒子。

(4) 重复上述过程,结果是在种子周围将会凝结越来越多的粒子,使它的面积或体积不断加大,形成如图6-13所示的“分支状”集团。

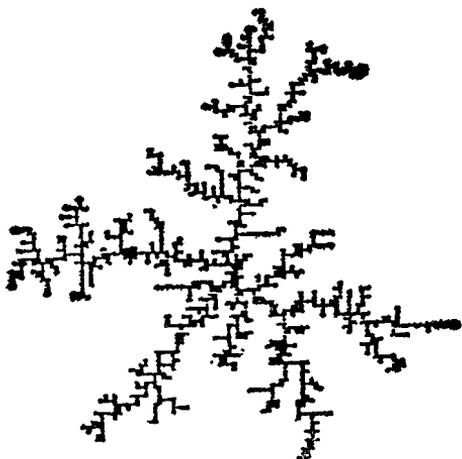


图 6-13 凝聚体的数字模拟结果

下面是通过 DLA 模型模拟电解液中锌叶生长的结果,与上面试验结果相比,可以看出是十分相似的,这说明 DLA 模型能很好地模拟分形生长。



图 6-14 锌金属叶的分形结构

图中可见,凝聚集团有向四周伸展、长短不一的分支,它们除了微粒大小(即点阵格子的大小,也称点阵常数)和凝聚集团本身的大小区别外,没有其他的特征长度,因而具有自相似的特征。

由于粒子行为中“噪音”(即随机的统计特性)的存在,分维团表面上将形成微小的隆起和凹洞。一旦表面有了隆起和凹洞,隆起处的生长速度就快于凹洞处的生长速度。这就是所谓的屏蔽效应。屏蔽效应产生的原因在于,当随机游动的粒子从外面循着弯弯曲曲的路径靠近时,附着在某一隆起的峰或其附近的机会要多些。由于粒子附着在接近峰的地方,因此,隆起部分就更为陡峭,而粒子填入凹洞的可能性也就变得越来越小。其结果是一个开始时稍有变形的集团,其变形程度会越来越大,这一效应称为生长不稳定性。伸出的尖端的生长及分裂,最终可能导致枝状的形成。

通常可以利用密度相关函数来计算凝聚集团的分维。

设密度相关函数 $C(r)$ 定义为:

$$C(r) = \frac{1}{N} \sum \rho(r_i) \rho(r_i + r) \quad (6.3.1)$$

这里的 $\rho(r_i)$ 代表 r_i 处的密度 (r_i 和 r 都是矢量), 若该点有微粒, 则 $\rho(r_i) = 1$, 无微粒则 $\rho(r_i) = 0$ 。当 r 远大于点阵格子尺寸, 且远小于凝聚集团的尺寸时, $C(r)$ 与 r 间存在如下关系:

$$C(r) = K r_f^{D_f - d} \quad (6.3.2)$$

式中 K 是常数, D_f 为凝聚集团的分维, d 为集团所在的空间的欧氏维 (在本情况下 $d = 2$)。

从 6.3.2 式可知, 只要测得不同 r 时的 $C(r)$, 在双对数纸上以 $\log C(r)$ 对 $\log r$ 作图, 从所得直线的斜率即可求出凝聚集团的分维 D_f 。图 6-15 中给出的是对大约 3 000 个微粒、6 个凝聚集团进行平均得到的结果。直线部分是在 $r = 3 \sim 27$ 范围内用最小二乘法拟合的结果。从该图可得:

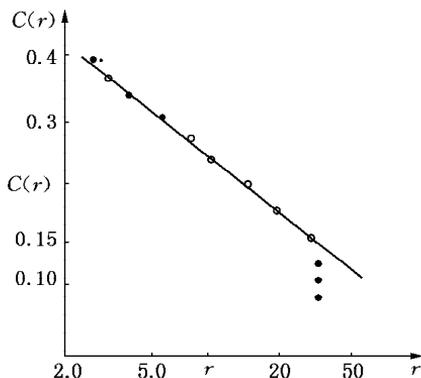


图 6-15 用相关函数计算凝聚集团的维数

$$C(r) \propto r^{-0.34}$$

因 $d = 2$, 故 $D_f = d - 0.34 = 1.66$ 。

有人按 DLA 模型用计算机对欧氏维 $d = 2 \sim 6$ 的情况进行了模拟, 发现 DLA 集团的分维 D_f 与所采用的点阵无关, 只依赖于欧氏维 d 。如果把 D_f 与 d 的关系写成公式, 则有

$$D_f = \frac{d^2 + 1}{d + 1} \quad (6.3.3)$$

由此式计算的分维与计算机模拟结果基本一致。

6.3.2 动力学集团凝聚(KCA)模型

1983年,米金(P. Meakin)对DLA模型进行了修正,他认为,DLA模型中假设微粒在中间不动是不符合客观实际情况的,因此,提出让所有微粒都进入点阵进行无规随机运动。当两个微粒相遇后就结成集团,集团也作随机运动,从而和其他粒子或集团结合,生成更大的集团。这样不断地进行下去,形成分形结构。这种模型后来称为动力学集团凝聚(kinetic cluster aggregation)模型,简称KCA模型,也有人称它为集团—集团凝聚(cluster-cluster aggregation)模型,简称CCA模型。

自然界有许多凝聚现象都与KCA模型相符合,例如,墙角尘絮、河口淤泥、金属超微粒子聚集等各种分散粒子的不可逆凝聚。

在欧氏空间维数 $d = 2 \sim 5$ 的情况下,用计算机对KCA模型进行模拟,所得图形都具有自相似性,和DLA模型一样,其分维 D_f 也依赖于空间维数,不过比DLA的分维小些。这可以用各集团之间只要有一点相接触就成为一个整体,因而不容易侵入对方内部来解释。由此可以推想,在KCA模型中,各微粒和集团的运动形式(随机行走)并不是实质性的。实际上已经证明,即使用直线运动,所得图形的维数也没有多少不同。日本学者松下贡等根据这一事实,以及生长中各集团大小比较一致,接近于分散的假设,提出了一种非常简单的KCA几何模型,求出的分形维数为:

$$D_f = \frac{\ln(2d + 1)}{\ln 3} \quad (6.3.4)$$

与所作的计算机模拟结果相当符合。

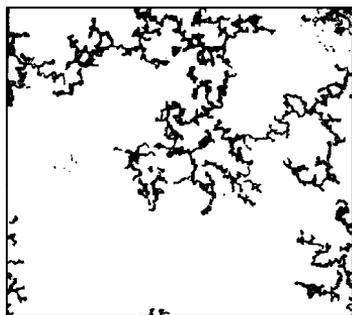
另外, D_f 与微粒和集团的运动形式无关,这一事实意味着只用 D_f 还不能完全反映出KCA的所有特征。因为分维是有关生长图形瞬时形状的特征量,它应反映图形的生长过程,因此,模型不同,所得图形的分维也应有差异。所以,仅仅根据分维尚难完全把握分形生长的丰富内容。松下贡等人还建立了相应的几何模型,

并导出平均粒径 $\bar{R}(t)$ 与凝聚时间 t 之间的关系：

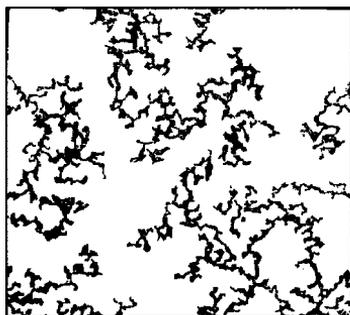
$$\begin{cases} \bar{R}(t) = t^{\frac{1}{Z}} \\ Z = D_f - 1 + 2D_f/d \end{cases} \quad (6.3.5)$$

这一结果反映了各集团的运动状态,其中 Z 为动态标度指数。可见,除分维 D_f 外,还应当考虑 Z 。

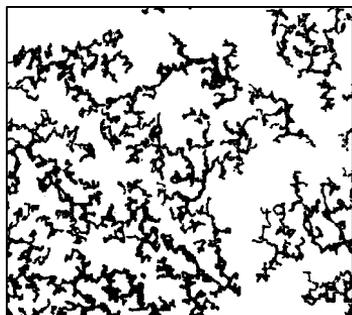
米金用计算机模拟的条件是:在一个 400×400 的方形点阵上放进 $N = 10\,000$ 个粒子(相当于每格点占有微粒数密度 $\rho = 0.0625$), $N = 15\,000$ 个粒子($\rho = 0.09375$), $N = 20\,000$ 个粒子($\rho = 0.125$)和 $N = 25\,000$ 个粒子($\rho = 0.15625$)。对这四种情况进行计算,得到的凝聚结构分别列如图6-16(A)、(B)、(C)、(D)。



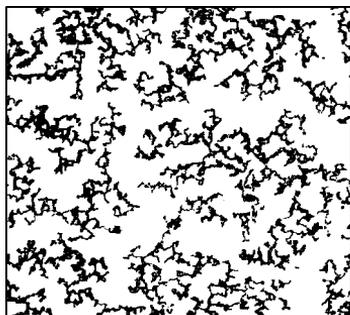
(A) 400 单包 ($\rho = 0.0625$)



(B) 400 单包 ($\rho = 0.09375$)



(C) 400 单包 ($\rho = 0.125$)



(D) 400 单包 ($\rho = 0.15625$)

图 6-16 KCA 模型

米金证明,这个模型的分维与欧氏维有如下关系:

$$D_f = \frac{5}{6}d \quad (6.3.6)$$

除了进行计算机模拟外,还可以用实际的实验来观察和测量金属叶与金属树的分形生长。例如,让某些金属在其盐溶液中电解析出,在阴极附近能形成所谓金属叶或金属树,它们都具有分形的结构。

下面是一个典型的实验。在一个圆柱形玻璃容器中装 $ZnSO_4$ 溶液,然后慢慢加入正丁基醋酸酯,使两者间形成一个分界面(两者彼此不相混溶)。用一细炭棒或铂丝做阴极,阴极自圆柱形容器中心垂直插入,使电极棒或电极丝的尖端刚刚接触到两个液体的分界面。用锌片做阳极,阳极做成圆筒状,直径略小于容器,放在与容器同心的位置。在阳极和阴极间加上电压后,由于锌离子只存在于下层的 $ZnSO_4$ 溶液中,而阴极却只有尖端触及此溶液层,故金属锌就会在阴极尖端凝聚(电沉积)并在两溶液之交界面上形成由小逐步变大的金属叶(锌叶)。图 6-17 示出的是一个典型的金属叶。这一种在电极尖端电沉积的过程,可以用前述 DLA 模型来模拟。的确,模拟的结果与实际情况也是一致的。

应该指出,只要温度和电压变化不大,所得的分形维数基本保持不变。因此,可把锌树的分维 D_f 定义为:

$$N \propto T^{D_f} \quad (6.3.7)$$

式中 T 是生长中连续拍摄的包括各种大小金属树的根均方(rms)厚度或高度。 N 是相应的像素(pixels)数,即用计算机对照片进行图像处理时,照片的有关区域分为若干小格,有树林影像者的数目即为 N 。 N 与 T 的典型关系如图 6-17 所示。由图可见, N 与 T 之间的对数线性关系很好。例子中分维 $D_f = 0.72$ 。10 次独立实验的平均值 $D_f = 0.72 \pm 0.06$ 。这个值与计算机模拟结果非常吻合。

电解槽中所生成的锌叶见图 6-14 与计算机生成的分形图案见图 6-13 极其相似,而且分维十分接近,这种一致性可认为是普适性

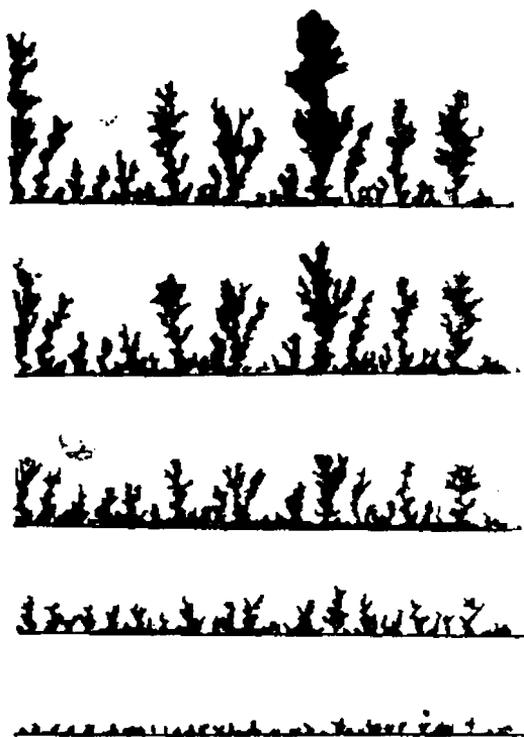


图 6-17 锌树林生长的过程

与标度不变性的实例。计算机模拟中,只用了大约 5×10^4 个点,而锌层中的锌原子数则非常之大,约为 10^{18} 个。虽然离子附着到沉积层上的细节与计算机模拟的细节有所不同,但并不影响所产生的图形的形状和所产生的分形维数。由此说明金属电沉积(凝聚)时形成的金属树的确具有分形结构。

6.3.3 似分形晶体的生长

以上例子中,随着枝状分形的生长,内部所填充的质量(粒子数)会越来越小,因此,分形的密度将随半径增大而减小。不论是在高度过饱和还是在超低温的条件下,枝状晶体的生长都非常类似于扩散物中发生的情况,而差别仅与结晶的各向异性有关。

现在枝状晶体生长的模型主要有几何模型和界层模型。几

何模型是研究界面运动动力学的一种模型。其原型是过冷熔态中枝状冰晶的形成。支配结晶生长的是边界运动的热扩散方程,主要描述了界面运动方程的域结构(domain structure)与界面邻近的区域几何结构间的关系。美国哈佛大学的布罗尔(R. Brewer)等人用这种模型仔细研究过尖端分裂现象。界层模型是二维的枝状结晶模型,在此模型中,扩散物的特征衰减长度比界面的局部曲率半径小得多。加利福尼亚大学的本·雅科布(E. Ben-Jacob)等对此模型进行过充分的研究,发现尖端在增殖分裂中,边枝的出现表现出周期性,并且形状没有什么变化。随着结晶各向异性的下降,稳定的尖端生长会过渡到不稳定的尖端分裂。虽然它们都是很简单的生长模型,但是由它们所预言的枝状晶体生长的尖端稳定性、尖端振荡和尖端分裂都能在过饱和 NH_4Cl 溶液中观察到。

1986年,日本学者本庄(H. Honjo)等第1次在过饱和 NH_4Cl 溶液中观察到似分形(DLA)晶体的生长。在过饱和条件下首先生成一个种子晶核,然后种子晶核不断生长。用显微镜和用磁带录像机摄下这个不断生长着的晶体形态,并用计算机进行分析。若底面玻璃在实验中采用无规粗糙的表面(粗糙的特征长度大约为 $7.5\ \mu\text{m}$),这个粗糙性起着随机扰动晶体生长的作用。此时晶体生长的典型模式如图 6-18 所示。

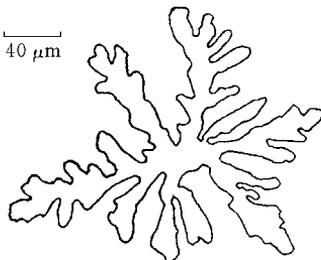


图 6-18 在无规粗糙表面上的似分形 NH_4Cl 晶体(经图像处理后的结果)

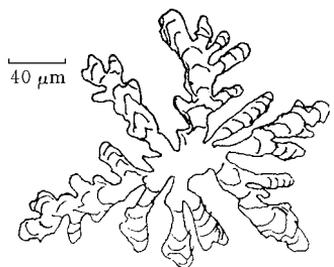


图 6-19 似 DLA 晶体生长照片的重叠(每 20 秒拍摄一次)。只有分裂的尖端向外生长,其界面生长不明显

这里界面曲线是对录像带进行计算机图像处理得到的。它具有类似分形的结构。图 6-19 所示的是每隔 20 s 拍摄的重叠图像。图中可清晰地看出屏蔽效应。

图 6-20 表示的是在晶体生长中,晶体的面积 N 和回转半径 R_g 的关系(录像机每隔 10 s 拍摄一次)。此图的分维 $D_f = 1.671 \pm 0.002$,与二维 DLA 模型的模拟结果吻合。这说明结晶过程是受限扩散的。在这种情况下,平均尖端曲率半径或平均尖端宽度与底板的粗糙度($\sim 7.5 \mu\text{m}$)相近。若在实验中,底面玻璃采用光滑表面,则所得的图形如图 6-21 所示,界面曲线也是经过图像处理得到的。这个模式常常作为有规枝状晶体的典型。

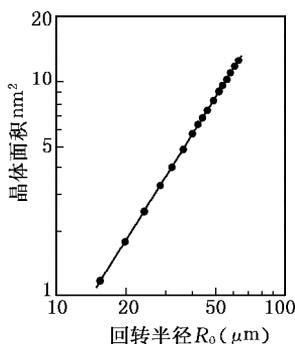


图 6-20 似 DLA 晶体生长中的 NH_4Cl 晶体面积 N 与回转半径 R_g 的关系

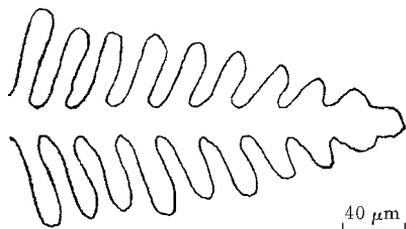


图 6-21 光滑平整表面上有规枝状晶体(经图像处理后的结果)

研究表明,似分形晶体结构的形成与结晶时是否各向异性有关,通常因受很强的晶格各向异性影响而观察不到似分形结构。只有当无规粗糙表面的粗糙度与枝状晶体尖端的平均曲率半径匹配时,能造成对结晶生成界面的无规扰动,从而有效地削弱各向异性。

6.3.4 准晶体的分形结构

通常的晶体,其内部微粒(原子、分子、离子)在空间作规则排列,有一定的几何外形。1984年,谢克特曼(D. Shechtman)等在微米级的铝-锰(Al-Mn)合金颗粒上发现了 5 次对称的衍射图,由此

导致二十面体准晶体(quasicrystal)的发现。

准晶体是一种介于玻璃和晶体之间的新的物质凝集态。近几年来,在研究准晶体的热潮中,涌现出了一些各具特色的模型,但其中由我国矿物结晶学家彭志忠提出的准晶体分形模型更有意义,与实验结果也符合得更好。

人们在研究五次对称准晶格的结构时发现,有二十面体原理和黄金中值原理两个原理在起作用。所谓二十面体原理,是指在少数原子构成的体系中,大小相近的原子形成孤立的十二次配位体时,二十面体配位在能量上最为有利。配位数为12的配位多面体有三种基本形式,即立方八面体、六方最紧密堆积配位和二十面体配位(图6-22)。但二十面体配位是最稳定的。因为在这种情况下,每个配位原子都是等效的,每个原子周围的其他原子是均等分布的,各连线的交角都是 60° ,因此,能量分布均匀,最稳定。相反,立方八面体和六方最紧密堆积皆不能满足这种条件。

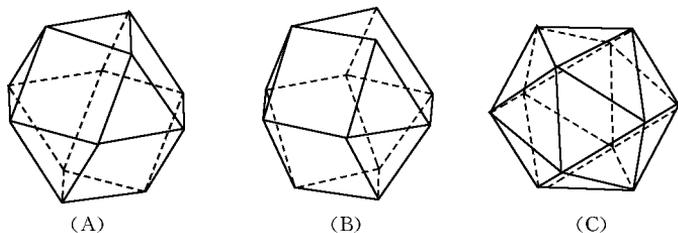


图6-22 几种配位数为12的配位多面体

(A) 立方八面体配位;(B) 六方最紧密堆积配位;(C) 二十面体配位。

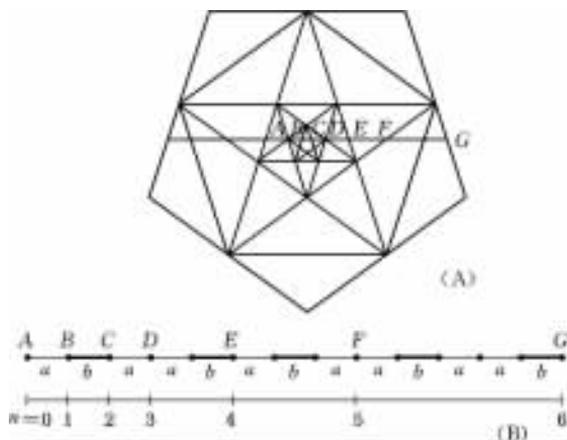
研究表明,金属升华进而形成的沉凝物具有五次轴对称。同时,围绕气体原子形成微晶时,开始几层原子就有长成二十面体的趋势。

有趣的是,从上面五次对称准晶格的结构研究中,人们发现了两个在空间形态与系统演化中有重要意义的原理:二十面体原理和黄金中值原理。前者表明,当大小相近的原子构成一个孤立的十二次配位体时,二十面体配位在能量上最为有利,也最为稳定。

而黄金中值原理则表明:黄金中值(1.618)是斐波纳奇数列中

相邻两项比值的极限。斐波纳奇数列 $F_N = 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, \dots$ 直到 ∞ ,其中从第二项起 ,后面一项都为前面两项之和。准晶格的分形生长在这里显示出来与黄金中值即斐波纳奇数列的联系应该有其深刻的内在原因 ,这些原因正需要我们努力加以思考。

图 6-23 中示出如何从正五边形引出斐波纳奇数列。这里只有两个基本单位 ,即 $AB = a, BC = b$,且有 $a/b = 1.618\dots$ 。



加 G 点 : $EG = a$, $GF = b$, 而 $a/b = 0.618\dots$ (图 6-25A) 或 $a/b = 1.618$ (图 6-25B)。按对称原则求出 H 、 I 、 J 、 K 各点。沿各线方向又可按斐波纳奇序列向两边递推 , 由此可推出整个格子。

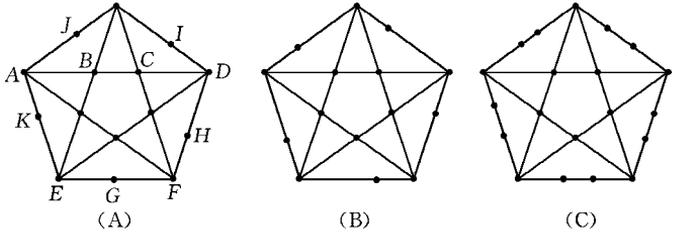


图 6-25

彭志忠按以上原则推导出四种准晶格 , 即等轴晶系二十面体准晶格、等轴晶系正五角十二面体准晶格、五方晶系五边形准晶格和十方晶系十边形准晶格。在图 6-26 中示出五方晶系五边形准晶格的投影图。

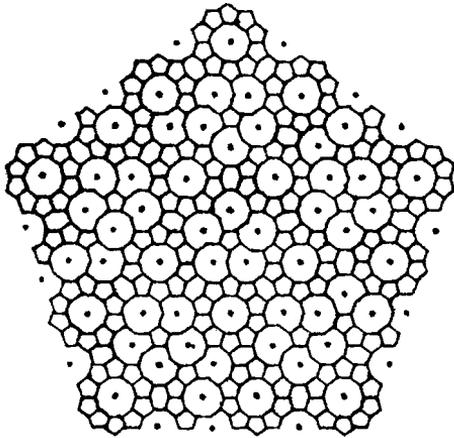


图 6-26 五方晶系准晶格投影

根据上述两原理推出的准晶格 , 广泛吸收了前人提出的各种模型的合理部分 , 彭志忠等提出了准晶体的分形结构模型 (分数维结构模型)。这种分形结构可以理解为结构的重复周期在尺度上

有变化,在维轴上周期的尺度增加时,相邻重复周期有一定比值,在准晶体中为黄金中值 1.618(或作为其倒数的黄金分割数 1.618...)。在三个维轴上都有这种情况。如图 6-23 中可看到,从中心向外五边形与五角形交替出现,其大小按黄金中值的整数幂增大。作为主体的模型,则各级二十面体有共同的中心。由中心出发向外,对应的二十面体族长棱 1.618^n 递增。从投影图还可以看出,这一图形放大或缩小 1.618^{2n} 时,整个图形实质上是不变的,这正是分形的特征。

为求此分形结构的分维,根据准晶格的推导原理(图 6-23 和图 6-25)进行了如下的计算:在二维欧氏空间中,分割份数(生成物数) $N = 5$,相似比 $\beta = 1 / \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2.618}$,由相似维数的定义可知

$$D_s(d = 2) = \frac{\ln 5}{\ln 2.618} = 1.672$$

在三维欧氏空间中,构成的是配位数为 12 的二十面体,故 $N = 12$,相似比 β 仍为 $\frac{1}{2.618}$,故

$$D_s(d = 3) = \frac{\ln 12}{\ln 2.618} = 2.582$$

这里计算出的分维值与 DLA 模型的值非常接近,这可能预示着上述模式的准晶格的形成与受限扩散凝聚有关,这是对认识准晶格的形成机制的一个重要启示。

6.3.5 渗流模型

DLA 模型提出之后,人们沿此思路进行扩展,1985 年前后密歇根大学 Raoul Kopelman 发现了渗透聚集团(percolation),这是一种在平衡态下形成的分形,它的化学反应速率在渗透聚集团上的反应速率是不恒定的,而且与时间有关。

1985 年 J. Nittman 重新对粘性指化进行了实验研究。人们还将其结果应用于指导石油开采。此外,人们观察了密苏里河、英国海岸、尘埃、星云、云彩、水墨画、电解、晶枝等,发现它们都是分

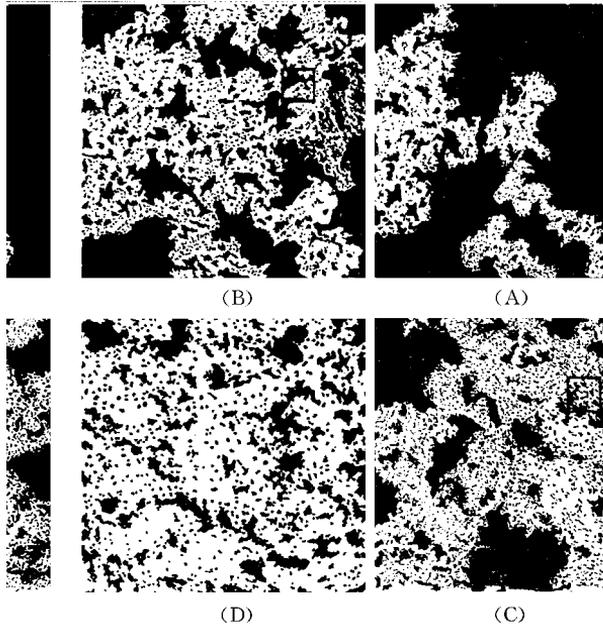


图 6-27 点阵上渗流集团的形成 ($P_c = 0.5928$)

(A) $P=0.59$, 未形成渗流集团;

(B) $P=0.59$, 渗流形成;

(C) 是图(B)小框的放大;

(D) 是图(C)小框的放大。

形生长的产物。

其他分形模型还有欧氏空间中的无规行走、自回避无规行走、晶格动物(分枝高分子生长的一个著名模型)、渗透集团(以格点渗透为例)等,这里就不一一详述。

6.4 分形集合与多分形

分形的广泛存在以及它与事物(系统)形态间密切的联系引起了人们对它的理论研究的持久兴趣,尽管这方面难度很大,但也产生了许多令人震惊的成果。多分形的研究给人们描绘了分形在现实世界中的真实图景,而分形集合则让人们欣赏到分形在相空间中的美丽图景,其中的 Mandelbrot 集和 Julia 集更成了现代科学的

标识图案。本节先从 M 集和 J 集谈起,然后引入分形集的若干相关原理,最后讨论多分形。

6.4.1 Julia 集

分形集合简单地说就是具有分形特征的点的集合。一谈到集合,自然涉及许多数学问题,鉴于篇幅限制,下面先讨论两个最有代表性,也是许多人在计算机上或科技书刊上常常见到,却未必知其所以然的分形集合,然后介绍一些分形集合相互关系的原理。

在分形集合中最著名的应该是居里叶(Julia)集合,这个以法国数学家 Goston Julia 命名的美丽数集的历史比曼德布罗特的分形还早。它之所以著名,不仅是因为它已作为许多科学杂志和书刊的封面,成为现代科学的标志,而且它提供了一个由简单函数通过迭代生成复杂结构的集合的典型例子。

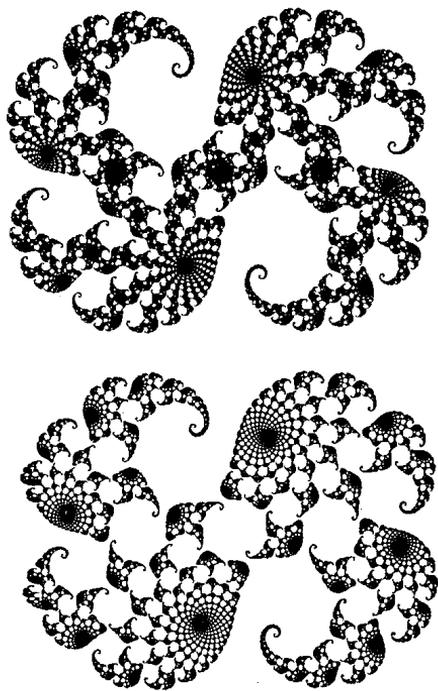


图 6-28 连通与不连通的 Julia 集

下面是 Julia 集合的数学定义：

设 C 是复平面, 变换 $f: C \rightarrow C$ 是一个次数大于 1 的多项式, 记: $F_f = \{z \in C: \{|f^{(n)}(z)|, n = 0, 1, 2 \dots\}$ 是有界的}, 即 F_f 是 C 中那些轨迹不收敛到无穷大点的点 z 集合, 则称 F_f 是伴随于多项式 f 的饱和集, 它的边界称为多项式 f 的居里叶 (Julia) 集。记作 J_f 。

数学家们对 Julia 集进行了大量研究, 发现它是复平面 C 上的非空紧子集, 并且在一定条件下是道路连通 (或不连通) 的等。

J 集的特点具有自相似性, 从而是一种有代表性的分形。此外, 还可给 J 集一个更直观的定义:

$$J_0 = \{z \in C \mid \text{函数族 } \{f^k\} (k \geq 0 \text{ 在 } Z \text{ 非正规})\}.$$

尽管如此, 非数学专业的人还是难以搞清其中的含义。但只要提到一个十分简单的多项式: $f_c(z) = z^2 + c$ 或 $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ (Z 为复数) 所对应的 J 集, 就是人们常见的“分形之美”的代表。

6.4.2 Mandelbrot 集

M 集的图形那极其复杂的外表下包含了深刻但十分简单的内容, 即通过对一个简单函数的反复迭代, 就可以生成无限嵌套的自相似结构。

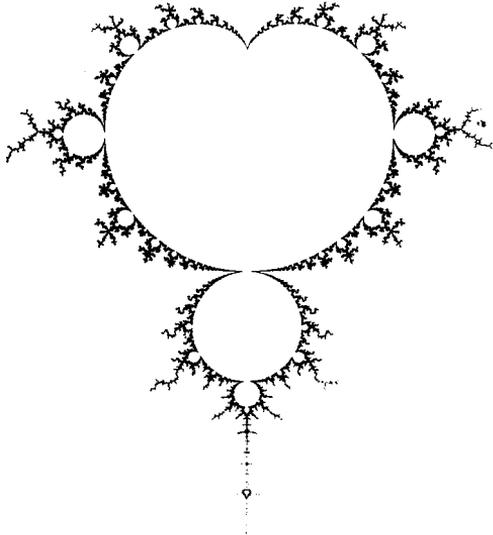


图 6-29 Mandelbrot 集

M 集的一个典型的例子是用 $Z \leftarrow Z^2 + C$ (Z 为复数) 构造出来的。每迭代一次,新的复数离开前面的 Z 一段距离,但并不是无限次迭代会使距离达到无穷。其中有一部分点,即使迭代无穷多次,仍然会留在复平面上某个区域之内。A. K. Dewdney 把这些“初始点”称为“囚徒”,而这个区域(监狱的“墙”)具有分形维数,它就是上面讲的 J 集。可见, M 集包含了 J 集构造的充分信息,并与迭代函数有密切联系。

M 集的数学定义如下: 设 $\{X; \bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2\}$ 是依赖于一个参数 $\lambda \in P$ 的迭代函数系, $A(\lambda)$ 表示迭代函数系的吸引子。令 $M = \{\lambda \in P : A(\lambda) \text{ 是连通的}\}$, 则称 M 是迭代函数系 $\{X; \bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2\}$ 的曼德尔布罗特集。

可以证明, M 集是连通的, M 集的边界是一组可数光滑集的并, 而且是分段可微的。为了研究 M 集的复杂结构, 可利用它的一个等价定义:

$$\begin{aligned} M &= \{c \in C : \{f_c^k(0)\} \text{ 有界} \\ &= c \in C : \lim_{k \rightarrow \infty} f_k(0) \neq 0 \end{aligned}$$

这一定义利用了函数族的原点迭代特征, 这正好是用计算机作 M 集和 J 集图的出发点。具体的作图有许多方法, 其中一种简单方法是令 Z 的初始值为零, 取另一个非零的值作为 C , 让 C 作有规律的变化, 其中必有一些 C 会导致发散, 即很快趋向无穷远, 在作图时把这些点用白色, 而另一些永远“逃不出监狱”的“囚徒”用黑色表示, 就得到了“心形” M 集图。如果用不同的颜色代表不同的逃奔速度, 就可以得到常见的美丽 M 集图。

如果操作的方式相反, 将 C 固定, 而变动 Z , 得到的就是 J 集。这就是说, 每一个 C 都对应了一个新的 J 集。进一步研究表明, 对有些 C 值所构成的 J 集是连通的, 而另一些 C 则是不连通的。

M 集是通过与 J 集的关系建立了与动力系统稳定性和混沌的内在联系。直到现在, 人们还对上述两个分形集充满兴趣, 这里似乎有着无穷无尽的宝藏。

6.4.3 分形集的相关原理

单个分形集合已十分复杂, 那么两个或多个分形集合相互结

合时,它们的维数又是怎样的呢?对于分形集合的关系,Viscek 给出了如下原理:

(1) 自相似原理:设集合 S 由不相重合的 N 个子集 S_i 组成,若此子集膨胀 r_i 倍后与 S 重叠,则 S 是一个自相似分形集。若所有的膨胀系数都相等,则为均匀自相似分形集,其相似维数 $D_f = \ln N / \ln(1/r)$,若并非全部相等,则为非均匀自相似分形集。其维数为 $\sum_i^N r_i D_f$,其中 r_i 为伸缩比,或自相似比。这一原理表明,分形的局部与整体间具有某种相似性。

(2) 积和原理(又称 Mandelbrot 经验定理):不相重叠的两分形集合的乘积的维数等于两分形维数之和。

(3) 和并原理:多个互不相关的分形之和的维数等于它们中维数最大的那个分形的维数。

(4) 包容原理:如果一个分形集合包含另一个,则它的维数必大于或等于被包含的那个,即如果 $M \supset S$,则 $D_s \leq D_m$ 。

(5) 匹配原理:如果两分形的维数相等,则它们可以组成一个共同的分形。也就是说,若要相互结合,维数必须相等,至少相近。

(6) 相交原理:两分形集合的交集的维数等于它们的维数和减去它们所在的空间的拓扑维数(即欧几里得维数)。

(7) 自仿射原理:设在欧几里得空间中 S 由 M 个不相交的子集 $S_I (I = 1, 2, \dots, n)$ 组成,若 S_I 可以通过仿射变换 r_a 能与 S 重合,则为仿形变换。

(8) 级差原理:若整体 M 由不同层次的子集 G_k 构成, ($k = 0, 1, 2, \dots$) k 为级次,则 G_k 与 M 以某种方式相似。若 $k = 0$,则为“生成元”,当 $k = \infty$ 时,为整体。

6.4.4 多分形

前面讨论的分形可以用一个分形维数来描述的“单分形”,它的前提是处在一个单一的无标度区内,具有“单一”的自相似形态。然而,这只能在非常理想化或简化的情况下才能出现。一个真实的分形事物往往并不是这样,因为无标度区的范围总是有限的,为了全面刻画整个具有复杂形态的分形事物,通常先将它划分为若干个小区

域,每个区域用一个相应的维数来描述,然后再考虑不同维数的分布。这样就引进一个重要的概念——多标度分形或多分形。

分形形态大多是多分形,只有多分形才能真实地反映现实世界中的分形特征,因此,多分形概念的引入,对分形理论的发展具有重大意义,它是分形理论面向现实、走向应用的重要一步。

下面是多分形的典型例子。

设想一个分形物体表面的不同点上有不同的生长几率,理论上可以将它们划分为若干个层次,每个层次都要求定义一个维数。为了描述分形体表面的生长几率分布,还要用一个量来描述该层次在总体分布中所占的分量。也就是说:

(1) 设第 i 小区域的特征标度指数为 a_i , a_i 构成一个无限集, 或一个“谱”。

(2) 用 $f(\alpha)$ 来描述不同 α 的差,它是一个连续函数,希望它与某个可观察量相联系。因为 $f(\alpha)$ 只表征 α 的奇异值,所以它们间的关系就是生长率 $P(x)$ (对应分形表面上每一点的测度),每个小区域的标度指数 $a = \{a_i\}$, 每个小区域的维数

$$D_q = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{(q-1)} \cdot \frac{\ln \{ \sum N(\epsilon) [P_i(\epsilon)]^q \}}{\ln \epsilon}$$

其中 $P_i(\epsilon) = \sum P$, 对小区域中每个小点生长几率求和; $N(\epsilon)$ 为覆盖整个分形表面所需线度为 ϵ 的小区域。

1988年,Shonosnke Ohta 等人首次在真实物理系统 (NH_4Cl 结晶过程) 中观察到了具有三种生长率的多分形形态。

6.5 分形的测量与计算

对分形维数的测量和计算可以发现和分析系统的许多特征,其中一个重要的实际应用是对时间序列的分析。下面介绍几种广泛应用的方法,这些方法已经成为分析和解决复杂时间序列、特别是社会经济中许多复杂问题的有利工具。

6.5.1 分数布朗运动

自然界中的许多变化都是由一些互不相关的小因素整合而成

的,可以用布朗运动和正态分布来描述,此时数据的方差应与观察的时间间隔 Δt 成正比,但也有些现象不能用上述模型来描述。英国水文学家 H. E. 赫斯特在研究埃及尼罗河流量如何决定水库排水量的问题时观察到一种有趣的现象:如果上一年的水量大,次年的水量也大,两者间存在一定的依赖关系,这与正态分布的情况明显不同。赫斯特还发现,河水流量数据的方差与时间间隔 Δt 的 $2H$ 次方成正比,这说明它类似于布朗运动,但他测得的 $2H$ 都不是整数。而在布朗运动中 $2H$ 应等于 1, $H = 0.5$ 。 $2H$ 不为整数,说明它不服从整数布朗运动规律,而服从分数布朗运动规律。对两者进行比较,可以发现布朗运动的特征。

理论上讲布朗运动是一种特殊的随机过程,以一维情况为例,可把它看成是在 X 轴上作随机运动的微粒(或醉汉),设每隔 τ 秒跳跃的步长为 $\pm \xi$,则步长服从正态分布:

$$p(\xi, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\tau}\right)$$

经过时间间隔 $t = n\tau$ 后,微粒所处的位置(坐标或位移)为

$$x(n\tau) = \sum_{i=1}^n \xi_i。$$

如果时间间隔趋近 0 时,上面的离散变量 X 变为连续变量,即为连续的布朗运动,用 $B(t)$ 表示,也即通常所说的维纳(Winer)过程。对它进行如下标度变换:

$$\hat{\xi} = \lambda^{1/2} \xi, \hat{\tau} = \lambda \tau, \text{得 } p(\hat{\xi}, \hat{\tau}) = \lambda^{-1/2} p(\xi, \tau)$$

该式表明,当时间标度增加 λ 倍、长度标度增加 λ 的 $1/2$ 次方时,布朗过程的概率密度将增加 λ 的 $-\frac{1}{2}$ 倍。这表明布朗运动的概率密度具有标度不变性。

标度不变性应是布朗运动的本质特征,至于标度指数,即 λ 的指数(也是后来引进的赫斯特指数 H)是否总是为 $1/2 = 0.5$ 则没有严格规定,不妨把 $H = 0.5$, $2H = 1$ 时的布朗运动称为整数布朗运动,而把其他的称为分数布朗运动。

分形理论创始人曼德尔布罗特给出了分数布朗运动的位移

公式：

$$B_H(t) = \frac{1}{\Gamma(H+0.5)} \int_{-\infty}^x K(t-1) dB(t)$$

式中积分核

$$K(t-1) = \begin{cases} (t-t')^{H-1/2} & 0 \leq t' \leq t \\ (t-t')^{H-1/2} - (-t')^{H-1/2} & t' < 0 \end{cases}$$

通常,上面的积分通常是发散的,但位移增量 $B_H(t+\Delta t) - B_H(t)$ 的变化却是一个有限、平稳、相关的随机过程。而且,当 $H \neq 0.5$ 时,观察值之间不再独立,表明分数布朗运动具有长相关性,即记忆性(这就是前面提到的水流量对前一年流量的依赖)。平均而言,在过去的位移增量与未来的位移增量之间存在相关性。

$$E[B_H(0) - B_H(-t)][B_H(t) - B_H(0)]$$

如果令 $B_H(0) = 0$,则未来增量 $B_H(t)$ 与过去增量 $B_H(-t)$ 间的相关函数可写为一个十分简洁的关系式：

$$C(t) = \frac{E[-B_H(-t)B_H(t)]}{E[B_H(t)^2]} = 2^{2H-1} - 1$$

其中的 H 即为 1965 年赫斯特在研究尼罗河水量时经验公式中的指数,故称为 Hurst 指数。

6.5.2 Hurst 指数与 R/S 分析

H 指数对分数布朗运动至关重要。研究发现, H 指数可以通过 R/S 分析方法求得。下面对该方法进行简单介绍。

R/S 法又称为重标极差法(rescaled range),设 R_n 是一个时间序列中 n 个数据的极差,它表示该时间序列最大的变化范围,而 S_n 为该时间序列的标准差,它表示数据平均偏离均值的程度,如果以它为单位重新标度极差 R_n ,则得到 R_n/S_n 。下面以金融领域中的例子来说明 R/S 分析的过程。

设有一个 n 期证券收益的时间序列 $y_1, y_2, \dots, y_n, m_n$ 为 n 期的平均收益, $X_{t,n}$ 为 n 期的累积偏差: $X_{t,n} = \sum_{i=1}^t (y_i - m_n)$,该时间序列的极差 R_n 就是上式的最大值和最小值之差：

$$R_n = \max_{1 \leq t \leq n} \{X_{t,n}\} - \min_{1 \leq t \leq n} \{X_{t,n}\}$$

为了比较各种不同类型的时间序列,用标准差除极差:

$$R_n/S_n = [\max_{1 \leq t \leq n} \{X_{t,n}\} - \min_{1 \leq t \leq n} \{X_{t,n}\}]/S_n$$

其中

$$S_n = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m_n)^2 \right]^{1/2}$$

显然,即使重标以后,极差 R 也将随时间增加而加大。赫斯特建立了如下关系式:

$$R/S = a^* n^H \text{ (式中 } a \text{ 为常数)}.$$

不难看出,如果时间序列为随机序列, H 应为 $1/2$,即累积离差的极差应随时间的平方根而增加。但实际观察结果表明, H 并不为 $1/2$ 。为了求得 H ,可以对上式两边取对数,从双对数图中,或用求对数图中的斜率的方法来求 H 。

$$\log(R/S) = \log a^* + H \log n$$

这样,就可以通过对时间序列赫斯特指数 H 的分析了解它的规律性。

6.5.3 相空间重构

除 R/S 分析方法外,对复杂的时间序列还有一些常用的方法,其中相空间重构也是人们常用的一种分形时间序列分析方法。

一般情况下,要完全描述一个动态体系的相空间维数不能少于体系自由度的个数,这通常是很高的。例如,流体中的每一个点都有自己的速度和坐标,要描述由无穷多个连续的点构成的流体,相空间也必须有无穷维。然而,实际上人们只对体系的少数宏观变量感兴趣,也就是说,决定复杂系统宏观运动状态的只是为数不多的一组变量。它们是高维相空间中的一组低维几何对象,如具有分维的混沌吸引子。不仅如此,实际测量时往往还不能跟踪这个低维对象的一切分量,只得把它投影到更低维的平面或直线上来观察,即只采集一两个变量的数据排列。另外,借助现代化数据采集设备,又可为少数观察量取得很长的(通常是等时间间隔)数

据序列。能不能在不知道背景相空间维数情况下,从这少数甚至单一数据序列(如时间序列)中取出关于对象维数的信息呢?回答是肯定的。20世纪80年代以来,发展了一种称为“相空间重构”的简便方法,可从实验数据计算分维。许多实验物理学家、生理学家和经济学家都已掌握了这一方法,著名学者尼科里斯和普利高津曾用此方法来对气候变迁的规律进行分析,取得了很好的效果。他们认为,单变量的时间序列乍看起来只能提供十分有限的信息,用“一维的”观点处理实际上含有大量相互关联变量的体系,是有局限性的。但他们的研究表明,时间序列包含了丰富的信息,它蕴藏着参与动态的全部其他变量的痕迹,并使人们得以验证潜在体系的某些与模型无关的重要特征。

处理数据时,需要知道如何确定和描述一个系统的相空间维数有多高。考虑实验中测得的一个数据序列:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots$$

x_i 是第 i 时刻测得的值。例如,第 i 秒时布朗粒子的横坐标,由于不知道实际的相空间维数有多高,先用这些数据支起一个 m 维的空间。构造这个 m 维的“嵌入空间”的办法很多。例如,设 $m = 10$,把 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10}$ 作为十维空间中的第一个矢量 y_1 。然后右移一步,把 x_2, x_3, \dots, x_{11} 作为十维空间中的第二个矢量 y_2 。这样产生一大批矢量 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_k$ 。现在随意给定一个数 ϵ ,把距离小于 ϵ 的“点对”在一切“点对”中所占的比例记作 $C(\epsilon)$,用计算机很容易从原始数据中算出 $C(\epsilon)$ 。

显然 ϵ 不能取得太大也不能太小,太大了,所有的数据点都包含进去;相反,太小了,包含的点又太少,计算量太大。因此,在处理时适当缩小 ϵ ,使得在 ϵ 的一段范围内有 $C(\epsilon) = \epsilon^D$,比较分形维数的定义,可以看出 D 是一种分维,并且可以用关联维数加以逼近。

如何选择 ϵ 变化的范围才能使得不管当 ϵ 太大, $D = 0$, 太小 $D = m$, 都与体系的实际性质无关?当 ϵ 取值适当时 $C(\epsilon) = \epsilon^D$ 在双对数图上处于斜率介于零到 1 的一条直线上,这正好对应了变化的无标度区,如果斜率很快从 0 变到 1,则表明“嵌入维数 m ”

选得不够大,或者系统本来就不具有分形维数。

在实验中可以用调整 m 的方法来寻找无标度区,对一批 m 画出 $\ln C(\epsilon) = \ln \epsilon^D$ 曲线,斜率在 $0 \sim 1$ 的那条就自动给出了分形维数的大小。

知道了相应的“嵌入维数”大小,就可以用它来重构相空间,然后就可以在此相空间中分析系统的行为了。

作为一个实例,下面引用尼科里斯对气候吸引子维数的测量。这一方法已经用于分析同图有关的气候数据。

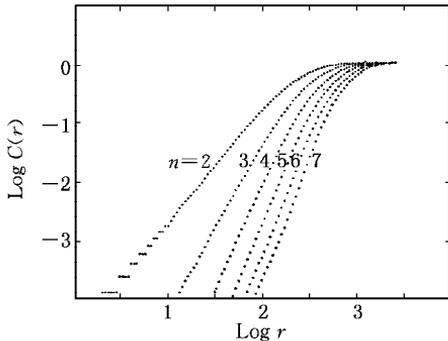


图 6-30 气候吸引子的关联函数与距离的关系(注意存在着广阔的线性区域,从中可以推导出吸引子的维数。这里 $r = 8000$ 年)

上图给出了对于 $n = 2$ 到 $n = 7$ 的 $\ln C(\epsilon)$ 同 $\ln \epsilon^D$ 的关系,可以看到,的确存在一个广阔的区域,在其中这个关系是线性的。

上图(圆圈点)表明,当 $n = 4$ 时,斜度达到饱和值,此时 $d \approx 3.1$ 。此图还表明了当所考虑的信号为高斯白噪声时, d 随 n 变化的方式:没有饱和的趋势。事实上,在这种情况下已经证明 d 等于 n 。这确立了气候动力学和随机噪声之间的明显区别;并表明,在过去 100 万年内的气候变化,可以看作是具有低维吸引子特征决定论动态的一种表现。吸引子的维数是小数这一事实,以自然的方式为我们理解气候系统本质的易变性和不可预期性提供了条件,因为这两个性质被列为混沌动态的主要特性。一个值得注意的事实是,这一动态特征可被约化为一个有限的(实际上为 4)关键

变量组来加以描述,尽管在现阶段变量的本质还无法验证。

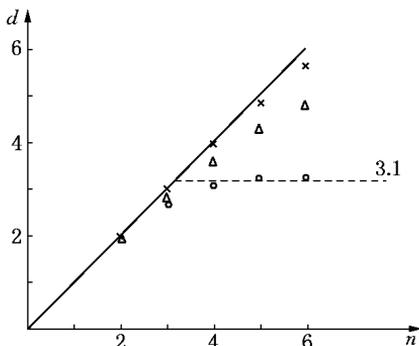


图 6-31 气候吸引子(o)及白噪声信号(x)的维数 d 同相空间变量数 n 的相互关系, $r = 8000$ 年。注意第一种情况下,在约为 3.1 的平台处达到饱和,对第二种情况,则存在 d 约等于 n 的关系

6.6 分形与系统的自相似性

分形的普遍存在给了人们许多启示,使能从更高的层次来认识系统和系统的演化,以及与系统相关而又长期无法解释的一些事物。作为一种猜想,提出如下几点,希望能引起思考。

6.6.1 相似与自相似

自相似是一种特殊的相似。相似是事物之间一类特殊而又普遍存在的关系,它是针对事物间的结构和形式而言的。

相似的概念源于初等几何学。如两个三角形的几何相似,指的是它们的对应角相等,对应边成比例。物理学上也有各种物理量的相似:如时间相似——对应的时间间隔成比例;动力学相似——力场中所有对应点上的作用力方向一致,大小相应地成比例;运动学相似——速度场的几何相似,即速度的方向相同,大小成比例。此外,还有压力相似、温度相似、浓度相似等等。从相似的现象中可以归纳出相似概念的两层含义:第一,说两图形或事物间相似,要求它们具有相同的结构(包括部件与关联数),如不同半

径的圆是相似的,但三角形与圆形之间就没有相似之处;第二,要相应部分在量上成一定比例,这个比例必须是“不变量”,而不一定是常数(量)。也就是说,各相应部分之比必须不变,但不一定处处相等。如仿射相似就是如此。总之,相似概念是针对事物间的结构和形式而言的,它要求结构相同而相应量成比例。

相似关系可以发生在两个相互独立、没有动力学或因果关系的事物或系统之间,如两个互嵌套的三角形之间,也可以发生在同一事物或系统的整体和部分之间,如生物体的整体与部分之间、湍流的大小旋涡之间及行星体系和原子结构之间。只有在整体与部分之间的相似才能称为自相似,因此,自相识是相似中的一种特殊情况。

分形所表现出来的自相似性是十分普遍的,它不仅可以体现于空间形态方面,而且可以体现于时间方面,即事物或系统演化的各个片段或阶段之间,以及片段和整个演化过程之间。洋葱头的层层相套与中国古代的箱套结构是空间自相似的典型。当每剥去一层时体积都会缩小,但形态不会变。黑格尔、马克思、恩格斯曾经提起过的个体发育对群体演化历史的“重演律”,是时间自相似的代表,因为个体是群体的一部分。

自相似的问题其实早就引起过人们的思考。我国古代有“大宇宙”和“小宇宙”的说法,认为可以由小见大,从一粒沙子之上看整个宇宙。汉代思想家董仲舒甚至对作为世界整体的天与作为世界一部分的人体进行了详细的比较,得出“天人同类”的观点,认为“天有阴阳,人亦有阴阳……”,天和人与人之间存在着“天人感应”。现代物理学初创时期,卢瑟福提出他的原子模型,1911年曾把原子的构造看作是行星结构的翻版。20世纪70年代前后,我国也有人提出了三种与相似相关的理论。内蒙古从事医学和生物研究的张颖清1973年7月发现人手的第2掌骨侧近心端有个与整体的腿部相关的位点,当腿部有病时,该位点的痛域降低,而按摩或针刺这一穴位,则可治疗腿部疾病。此后,他发现这种自相似现象在生物体中是十分普遍的,因而提出了他的全息生物学。山西农村经济农业系统工程研究室的张沁文,1983年提出“最大概率乘积定律”,

据此提出系统结构的三条基本规律,即子系统协同率、子系统等衡率、子系统同步率。他讲的系统整体结构中子系统与子系统之间的协调性、同步性和均衡性,实际上也是某种相似性。山西省社科院的张光鉴则从思维的角度提出了他的“相似论”。他认为,各种事物之间都存在现象与本质、静态与动态、宏观结构与微观结构的三种相似关系和四条相似规律:①事物都是由相似的单元、层次排列组合而来的;②相似的基因、相似的条件和环境产生相似的结果;③事物包含的相似功能越多,其作用就越大,应用就越广;④各学科中往往由一个或几个相似功能较多的学科作为带头学科,而带头学科中又有一条带头原理决定着它内部的相似规律和系列。

从人们对相似与自相似的研究中可以看出,无论是空间的还是时间的,是形态的还是结构的,相似与自相似关系都为人们拓展观察、深化对世界认识提供了一个很好的工具。而谢尔宾斯基垫圈的原始多边形则是一个正三角形,它们的生长因子分别是去掉中间 $1/4$ 的三角形。至于像曼德布罗特集和布朗运动轨迹这样的复杂分形,尽管原始多边形和生长因子的形态复杂,但在反复迭代中也是始终保持不变。这些都说明,由它们所体现的特征形态是相似变换中的不变量。

自相似性是分形最基本的特征,从这个意义上说,分形就是具有自相似性的形态,而由自相似所体现和“保持”的形态正是分形体的特征形态与基本信息。从这个意义上讲可以称之为“形态基因”。

系统演化中的另一个基本事实是系统的部分和整体之间具有某种相似性,这种相似性不是两个无关事物间的偶然近似,而是在系统演化中必然出现并始终保持的。基于这一事实,我们提出自相似性原理:系统在演化的整个过程中将始终保持自己特征状态的相对稳定,从而使它的整体和部分、部分与部分之间呈现某种相似性。

6.6.2 系统的自相似性

自相似是相似中的一种特殊情况,简言之,它是指系统的整体和部分相似。之所以特殊,是因为相似关系可以发生在两个相对独立的、没有动力学或因果关系之间的系统,而自相似则要求它们是属于同一个系统。如两个三角形相似就不具有自相似性,而在

生物体的整体与部分之间、湍流的大小旋涡之间,以及行星体系和原子结构之间才具有自相似性,因为它们中一个是由另一个所构成的。正因为整体和部分相似,因此,在部分中携带了整体的信息,人们就可以“窥一斑而知全豹”,即具有全息性。

自相似性是一种非常普遍的现象,通常被理解为系统的部分和整体在空间形态和结构上存在某种相似性。中国的箱套和洋葱的层层相套结构就是形象的例子。每剥去一层时,体积都会缩小,但形态不会变。但是,仅仅从空间上来理解还不够,还可以从时间上来理解。时间上的自相似性表现为系统演化的各个片段或阶段之间,以及片段和整个演化过程之间具有某种相似性。这种现象也就是黑格尔、马克思、恩格斯曾经提起过的个体发育对群体演化历史的“重演律”。

从对相似与自相似研究的历史回顾中发现,人们开始时总是对空间的相似和自相似感兴趣,而后就会逐步发现除了空间的自相似性外,还有时间上的自相似性,这也是演化中的自相似性。演化中的自相似性不仅涉及前面讲的演化过程中的自相似性,而且涉及一个更为重要的问题:自相似性的来源,因为,自相似性既如此普遍,那么,人们自然会问这些自相似性是从哪里来的?这个问题要求阐明自相似性产生的条件与机制,它小则涉及分形的生长,大则涉及复杂系统演化的基本规律。

6.6.3 自相似的起源

探索相似和自相似的起源比发现事物间的相似性更吸引人。的确,有不少学者对此有各自不同的解释,其中流行的就是“万物同源”的观点。例如,张光鉴认为:“为什么从微观到宏观运动存在着这种相似性呢?主要的原因在于客观物质运动中的四种作用力,乃是由交换共同的相似粒子形成的:引力交换引力子,库仑力交换光子,强作用力交换介子,而结构的相似性就呈现出功能的相似性!”而宇宙全息论者则提出“宇宙大统一律根源于宇宙整体的内同一性,同源性和相互作用”,“宇宙统一于全息统一场”。“万物同源”说对理解事物相似的根源的确不无启示作用,但是要把所有的自相似都归结为四大作用力交换共同的相似的粒子,或者归

结为宇宙全息统一场恐怕还缺乏科学证据,也令人难以置信。为了找到自相似性的根源,应该把问题的范围缩小一些,即只探讨系统演化过程中所呈现出来的自相似性,而不必讨论何以两个三角形、两个圆锥曲线相似的一般相似问题。关于系统演化中的自相似问题,笔者在1990年第一届系统学学术交流会上提出了一种设想:具有自相似的分形物质(结构)是一个特殊生长过程的产物,这个过程可以简称为“分形生长”。在分析了若干典型的分形生长模型后,我们发现:产生具有自相似性的系统或事物(分形形态即是一个典型)与下列三种过程有着密切的关系:①系统内部非线性相干的随机发生过程;②重复构造的“迭代”过程;③临界自组织过程。所有这些过程可被认为都具有某种“递归性”和原因与结果的循环(这正是下节将要详细讨论的“自缠绕”或“自反性”)。从物理学的角度看,自相似性就是非平衡态统计或相变理论中的“无标度性”,即系统的形态、结构在一定范围内不随测量尺度的变化而变化(这个范围就是所谓无标度区)。这一性质正是非平衡相变中临界现象的基本特征。当然,我们的研究还只是处在从现象到本质的认识过程之中,还有许多复杂的机制需要深入地探讨。在上面的那篇论文中,我们针对“分形是混沌运动的结构”这一观点指出,联系分形和混沌的“是它们共同存在的自相似性或无标度性,系统的分形结构根源于临界点上关联长度的发散和序参量的突现,SOC(即自组织的临界态)正是在这一点上揭示了问题的本质。确切地说,系统的分形结构根源于随参数(外部控制参量)变化而出现的一连串临界点上的结构变化,而且与外部的 $1/f$ 噪声的诱导有着密切关系”。现在看来,系统演化中的自相似性(无标度性或分形性)乃是系统在外部控制参量作用和 $1/f$ 噪声诱导下通过内部的非线性相干,达到临界点时留下的“痕迹”。

6.6.4 自相似的意义

对一件事的研究通常可以使用两种语言:一是因果论或动力学的语言,它的形式是“因为”……,“所以”……。二是语言是目的论的语言,它的形式是“为了”……,“才”……。前面对系统自相似根源的讨论主要使用了因果论的语言,把它归纳为临界自组织的

产物。下面还可以问:系统的自相似性,对系统演化有什么意义,有什么必要?对此,我们的回答是:系统的自相似性体现了系统对自己特征形态的保持。这里包含了三方面的含义:

(1) 每个系统都有自己的特征形态:人们常说,任何一个事物都有自己的特色,都有自己特殊的存在理由。这种特色和理由来源于一事物区别于它事物的特殊本质。但是,以往对这种本质通常主要是从“根本性质”的角度来理解,较少考虑到系统形态的方面。其实,一个系统与其他系统的区别,不仅在性质方面,而且在形态方面。尽管性质和形态有其内在的联系,但毕竟是两个相对独立的方面。也就是说,任何一个系统,不仅有自己独特的性质,而且有自己独特的形态,这个独特的形态可以称为系统的特征形态。人们常说“人不可貌相,海水不可斗量”,这里就包含了上述道理。

第一句话,人不可貌相。因为一个人的内在“性质”和他的外在“容貌”相互间具有相对独立性,判定一个人的好坏(性质)不能单纯地看他的外貌。但人的“貌”也是这个人所独有的。为什么尽管“女大十八变,越变越好看”,但总还是“她”,而不会变成另一个人?可见,变也有其限度,变当中也有不变,这不变的,就是她的特征形态。其他的事物也是一样。如行星的轨道可以有千万种,但总是一种圆锥曲线,因此,圆锥曲线是行星运行的特征形态,它是由它所服从的引力特征——平方反比律所决定的。当然,对大多数事物我们很难说出为什么它具有这种而不是那种特征形态的原因,就如同很难回答西施、貂蝉、杨贵妃为什么那么美一样。但是,她们的美都各有特色,各有韵味,绝不是由一个“美女”模子里“倒”出来的。看来大千世界之所以如此奇妙,就在于物各有貌,人各有貌,而且万物万貌,千人千貌,而不是“千人一貌”,这里的“貌”扩大一点也就是系统的特征形态。

第二句话,“海水不可斗量”。是因为海太大,海水太多,斗太小,以一斗水的体积和海的体积相比可以忽略。那么,用什么来量比较合适呢?看来至少要有“万立方公里”的数量级。可见,一事物要度量它,总要选一个“恰当”的、能与该事物形态及时空尺度相“匹配”的尺度。这个尺度就是事物的“特征尺度”。关于特征尺

度,前面曾经提到过,一个系统需要从上、中、下,或宏、中、微三个层次的三种尺度上来加以把握,但其中主要的是应该抓住处在本层次(即中观层次)的特征尺度。例如,人体的特征尺度大约在1.5米左右,简单地说,在1.5米的数量级范围内就决定了一切为人所用的物品和建筑物也必须在“米”的数量级范围之内。郝柏林在说明此事时形象地说,现在计算机的芯片等“内脏”越造越小,但显示屏和键盘却不能造得太小,因为它要直接和人体打交道,就是说要适应人体的特征尺度。

(2) 每个系统在演化中都力图保持自己的特征形态:特征形态不管外界对它的评价是美还是丑,都将被系统所保持。道理很简单,因为特征形态不是凭空产生的,它是在系统内部各要素的相互作用以及系统与外界的相互作用中“自然”产生的。根据前面论述的趋极原理,当最终形成某种特征形态时,它一定要满足“最优生存与发展效率”这一极值原则。换句话说,系统的特征形态也是最适合于它和当时的环境形态(在生物领域中它是生存竞争、自然选择的结果,在其他领域它要服从总的自组织规律性)。既然如此,只要外部条件不大变,系统的特征形态也不会大变,换言之,就是系统将力图保持这种形态,即保持一种最佳的形态。

保持特征形态的另一个原因是任何系统都有一定的“惯性”或“遗传性”,能不变则不变,能少变就少变。因为变总是要付出代价、消耗能量的,而系统又总是那样“节省”,从不干那些“劳而无功”或“多余”的事情的。上述情况就好比是处在某个吸引域之中的粒子,只要外界的扰动不超过该吸引域的边界阈值,粒子总要回到它原来的位置。就是说,系统的特征形态一旦形成,系统就会力图保持一定的相对稳定。

(3) 保持特征形态的稳定必然演化出一系列自相似的形态:特征形态的稳定不等于该系统绝对不变,特别是当系统要进行自复制,产生出类似子系统或“部分”时,尺度就必须发生变化。这时不变的就只能是系统的结构形态(相互关系的模式)和分布形态(几何形态)。当尺度变而特征形态不变时,就自然地出现自相似性。因为,自相似本来的含义就是自己和自己相似而不是全等。

上述三方面主要是从自相似对系统演化自身的意义而言的,从认识论上讲,了解客观事物的自相似性对认识系统演化也有十分重要的意义。正是根据这种特点,相似理论才被作为模型方法和类比方法的理论依据。从系统力图保持的特征形态中找到认识系统演化的特殊条件与机制,并可据此设计出各种控制利用系统的方法。

6.6.5 特征形态与系统基因

信息联系是事物或系统间相互作用的一种特殊形式。信息传递的目的就是将某种形态从信源传到信宿,从而“消除信宿关于信源状态或形态的不确定性”。它是通过事物间的相互作用来实现的。信息联系包括两个基本的方面:一是信息的内容,它在传递中始终保持不变;二是传递信息的载体,信息传递过程中载体将发生许多变化,例如,在看似简单的说话过程中,一个谈话的内容就要经过从人体内部的生化过程、电过程,到机械过程,再到体外的空气振动等物质过程的转换,但是无论载体如何变化,都不会改变说话的内容。因为谈话中人们主要关心的不是物质能量的交流,而是事物形态的交流,即事物的形态如何从一个事物“印证”或“复制(拷贝)”到另一事物之上。这说明信息的内容正是事物的形态,而形态在传递中被赋予了信息的含义。关于这一点,英国人在构造“信息”一词时似乎有所领悟,英文的信息一词 information 包含了“在形态 forma 之中”的意思。

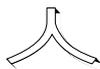
6.6.6 SOC 与 $1/f$ 噪声

分形作为一种特殊的形态,不仅存在于许多实际的事物的界面,而且从几何上描述了系统运动的一种基本形态。那么,人们很自然地会问:分形与现实世界中广泛存在的混沌运动,以及著名的 $1/f$ 噪声之间有什么关系?这个问题对于系统科学来说是带根本性的。现在一些学者指出,分形的自相似性就是相变理论中的“无标度性”,这正是非平衡相变中临界现象的基本特征。笔者也在一篇论文中针对“分形是混沌运动的结构”这一观点指出:联系分形和混沌的“是它们共同存在的自相似性或无标度性,系统的分形结构根源于临界点上关联长度的发散和序参量的突现,自组织

的临界态(SOC)正是在这一点上揭示了问题的本质。确切地说,系统的分形结构根源于随参数(外部控制参量)变化而出现的一连串临界点上的结构变化,而且与外部的 $1/f$ 噪声的诱导有着密切关系”。现在看来,系统演化中的自相似性(无标度性或分形性)乃是系统在外部控制参量作用和 $1/f$ 噪声诱导下通过内部的非线性相干,达到临界点时留下的“痕迹”。

本章对系统中的分形及其相关问题进行了较为详细的探讨,并得出这样的结论:分形不仅是系统存在的普遍形态,而且是系统演化的基本途径。从分形的角度出发,不仅可以考察自然界中许多新的现象和规律,而且可以考察社会经济和文化发展的分形生长过程,如社会风气的流行,经济走势的发展,甚至城市道路的延伸,商业网点的扩展等。

第七章 | 系统的演化



们不仅需要了解事物的结构与功能,而且要认识事物运动发展的规律。换言之,也就是研究系统的动态特征和演化规律。当然,运动是一个宽泛的范畴,只要事物的性态随时间或某个参数发生了变动,就可以说它运动或变化了。在系统科学领域,人们关心的是事物整体的状态性质与时间或参量的关系,这些通称为系统的动力学问题,或者动力系统问题。这些问题可以在函数空间和参数空间中研究,研究系统状态变量之间,以及状态变量与控制变量之间的关系。这对定量把握系统的变化规律是必要的。然而,一个复杂系统的状态空间往往具有无穷多个自由度,再涉及时间变量和控制参量,演化问题就变得十分复杂了。虽然在这个领域,许多数学家和系统理论学家作了多年潜心研究,近年来已经在混沌、分形、复杂性态等方面取得了许多重大的进展,但还有许多定性的或半定性的问题需要研究。这些问题包括:

- (1) 和事物的其他方面相比,整体的变化发展有什么相对特殊性?
- (2) 一个系统变化和发展的判据和标度是什么?
- (3) 一个系统的具体演化要经历哪些阶段?每个阶段有何特点?
- (4) 对一群相互联系的系统来说它们的发展有什么特点?
- (5) 系统演化的外部环境和内部机制是什么?

本章讨论前四个问题。第五个问题涉及面更广,需要更多的理论阐述,将在第八章讨论。

7.1 演化与进化

什么是演化?演化是系统(事物整体)的一种特殊运动形态。

所谓特殊运动可以从以下几个方面来理解。

7.1.1 演化的含义

(1) 演化是不可逆的运动:一般情况下,可从事物的运动、变化两方面来考察演化。第一,状态变化的快慢。即状态差与时间参数的比值,这叫作变化的“速率”与“加速率”,它们在数学上表现为系统状态随时间变化的导数,常用微分方程、差分方程或微分方程组来表示。第二,系统变化的方向。它不仅涉及系统状态的差异,而且涉及差异的方向。

根据变化方向的不同又可分为两大类:一类变化的方向可以逆转,这种“可逆”而又不引起其他任何“后果”的运动称为“可逆运动”;另一类为“不可逆运动”。系统运动的不可逆性是它的一个基本特征。这种具有不可逆性的运动形态就是“演化”。

演化之所以不同于一般的运动、变化,因为它不仅具有一定的速度和方向,而且有特定的路线和指向,即在一定的时空范围内它会沿某个特定的路线运动,并且保持方向的不变。也就是说,系统一旦发生了某种变化或运动,它就不能“自发地”或“无后效地”恢复到原来的状态。这里强调的是“自发性”和“无后效性”,而不是指不能回到原来的状态。事实上,一切周期运动都是能够回到原来状态的运动。但任何真实系统在实际运动过程中,总是会由于时间的单向性和能量的耗散性,使得要回到原来的状态总要花费一定的代价,造成一定的后果。这些“代价”不能减少为零,而要消除先前的后果,又会产生新的后果,这样就永远无法完全消除后果。例如,尽管老师在讲台上走来走去,不时地回到讲台中间的位置,但每来回走一次,都要耗费一定的时间和精力。尽管每次的耗费都十分微小,但时间和精力却永远不会再“回来”。如此不断地积累,人就这样一点点变“老”。关于不可逆性, N. 维纳曾经讲过一个令人毛骨悚然的故事,这个故事的名字叫“猴掌”。讲述的是一对得到猴掌的老夫妇在试图恢复原来状态时遇到的可怕经历。这当然是一个虚构的故事,但它寓意却非常深刻。就是说,如果一定要“恢复原状”,就必然要付出新的代价,而这个代价的追回则要付出更大更多的新代价。这个故事告诉我们,是系统的不可逆性才

赋予了时间以历史的含义,也正是这种“不可逆性”才使得人们要走历史的必由之路,并在历史的进程中抓住一切可能的机遇。

不可逆现象是人们司空见惯的,比如热的传导,从高温到低温;分子的扩散运动,从密度高的地方向密度低的地方扩散;生命体的生长、发育,直到消亡;社会的发展,从低级到高级等,这些运动变化就是典型的不可逆运动。科学早已证明,一切宏观物体的运动本质上都是不可逆的。当然,这并不意味着我们在研究和处理所有问题时都要考虑不可逆性。实际上在许多场合只要时间间隔短,“不可逆”效应就可以忽略不计。或者在“不可逆的后果”对我们所研究的问题无关紧要时,总是把实际的不可逆过程简化或理想化为“可逆的”。

(2) 演化是系统的普遍属性:19世纪后半叶,热能成为继机械能之后又一个重要的动力来源,对热和热机的兴趣引导着人们对热现象从理论上进行研究,导致了热力学的产生。热力学第一定律即能量守恒定律产生于1854年前后。热力学第二定律是1865年前后由克劳修斯、赫姆霍兹、焦耳等人几乎同时提出来的,它的历史可以追溯到1836年萨迪·卡诺对火的研究。如果说能量守恒定律揭示了能量的概念和能量在转换中保持不变的伟大的自然规律的话,那么,热力学第二定律则揭示了世界与系统演化的不可逆性这一更为伟大的自然定律。

热力学第二定律有两种最著名的表述:一是热量不可能自发地从低温流向高温;二是“第二类永远是不可能的”。这两种表述实际上是等价的。1865年,克劳修斯首先引出了热力学熵的概念,并给出了热力学第二定律的数学表达式:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0$$

它表明封闭系统中的熵 S 只可能随时间增加。这就是著名的刻画不可逆性的熵增加(不减)定律。这一定律在宏观体系中可以得到很好的验证,因此,宏观系统运动的不可逆性是人们公认的事实。

但是,在经典物理学中,一切微观客体,如原子、分子的运动都被认为是可逆的,即可以无后效地完全回复原来的状态。这样就

产生一个矛盾:由许多作可逆运动的原子、分子组成的宏观体系,其运动变化却是不可逆的。宏观体系的不可逆性是从哪里来的?从热力学第二定律提出以来这个问题就摆在了物理学家面前,一直无法解决。特别是20世纪60年代以来,不可逆性的起源问题更是成了许多科学家争论的热点。人们对此提出了不少解释,其中最著名的就是把不可逆性的起源归结为“大爆炸宇宙学”的基本前提,时间箭头是不可逆的。但是这样的回答总是难以令人满意。

20世纪80年代,笔者也对此作了一些思索。我们发现“微观客体运动可逆”一直是一个“逻辑上”的假设,从未得到实验的直接“验证”。困难在于一切微观客体的变化只有通过某种宏观仪器的转化才能为人们所感知。我们只能直接“看到”宏观现象,而不能直接“看到”微观客体,对它们的行为只能作理论的推导或“猜测”,而这种猜测与推导结果的正确性就值得怀疑了。认定微观客体的运动一定可逆的观点未必正确。因为微观层次和宏观层次的划分,尽管有其相对的界限,却没有绝对的标准。问题的关键在于认识的主体如何选择自己的参照系,人们既然可以选择“微观可逆”,为什么不可以选择“微观不可逆”呢?笔者认为,后种选择也许更为自然和合乎逻辑,因为不可逆性和复杂性是互为因果的。不可逆性的根源在于事物和运动的复杂性,而复杂性又是通过不可逆的演化积累的。同时,任何微观客体从本质上讲都是复杂的体系,它的运动变化当然也是不可逆的。如果用微观不可逆的假设来代替微观可逆的假设,在从微观到宏观的过程中如何产生不可逆性的问题也就自然消失了。这样就可以把不可逆性看成是事物运动的根本特征,就如同运动是事物的根本特征一样,不可逆性是没有“起源”和“原因”的。

以上分析表明,不可逆性是物质运动的普遍形式,就像运动是物质的基本属性一样,不可逆性不存在起源问题。世界上所有的物质体系(宏观事物),它们的运动都是不可逆的,即是演化的。

(3) 演化是有限的运动

尽管人们容易在哲学上接受物质、运动、时间、空间无限的观点,但实际上每一个具体事物的存在和发展演化总是有其特定的

时空范围,也就是说,每个具体的事物在时间、空间和功能属性上都是“有限的”或“局域性”的。根据这一观点,可以得出如下结论:

1) 系统演化是有限的运动,超出系统的时空界限系统就变为他物,原来的演化规律性也就失去了意义。

2) 任何系统都有自己特定的时间和空间尺度,把这称为系统的特征时间和特征空间。

3) 任何一个系统都有自己确定的、封闭的边界。这个边界既是系统与环境的分界线,又是它与外界事物相互作用的纽带,因此,对系统的演化有着特殊的意义。以至可以把它作为一条独立的演化原理。

系统演化的有限性与局域性对人们认识事物有着重大的意义。因为在任何具体的认识过程中,认识的主体和客体都是有限的、局域的,因而它们之间的关系也是有限的、局域的。这意味着科学上所有关于规律的研究都必须限制在一个确定的范围之内,否则就失去了意义,甚至导致了逻辑上的混乱。例如,在谈论月球运动的轨迹时,不应该要求对轨迹作空间无限精细的测量;当谈论热力学系统的统计规律时,也不打算对该行为作时间无限的测量等。对复杂系统的研究更应该如此,因为在其演化中,决定论的规律与统计规律结合得如此紧密,很难将它们截然分开。

7.1.2 演化方向与时间箭头

当人们谈论一个系统的演化或判定一个系统的演化方向时,总有一个不言自明的前提,那就是存在一个判定者和一个判定对象。但是,如果判定者本身也就是判定对象时,就似乎会失去判定的依据。这里却引出了一个更为深刻的问题,即时间箭头的问题。时间箭头与系统演化的方向有着十分密切的关系,因为,系统演化的方向本身就是相对于时间而言的。不过,以前总是把时间看成是单方向的,即时间箭头只具有唯一的一个方向,所以才把两者等同起来。现在看来,这种不加分析地将两者等同起来的观点实际上是牛顿绝对时间观的一种翻版。根据牛顿的理论,世上的万事万物都是在一个统一的时间长河中运动变化的,事物可以有各种不同的演化方向,时间却只有唯一的一个箭头。而笔者认为,上述

观点并不正确。其理由如下：

第一,时间是相对具体的事和物而言的,不同的系统都具有自己特定的存在或生存的时间范围,称为系统的生命周期。系统在自己的生命周期范围之内才有意义,才谈得上演化进度和演化方向。超出这个范围,虽然可以从系统之外对系统的生死存亡进行评价,但对系统自身来讲却没有意义。系统的时间箭头是就系统的整体演化而言的,但系统整体的演化则可以从各个不同方面和不同演化阶段来看,方向也有所不同,不同的系统方向更是不同。

第二,如果上述观点能够成立,根据前面的系统分类,可以有多种不同的时间箭头,如孤立的热力学系统时间箭头指向势能最小的热平衡态;开放的生命系统的时间箭头指向复杂、有序;而具有发达智能的社会系统的时间箭头指向多能高效等等。

第三,若将整个宇宙看成一个系统(这是一个至今没有定论的问题),那么,宇宙也应有宇宙的时间箭头。但是,从原则上讲,这个时间箭头的方向必须从宇宙之外来判定,而生活在这个宇宙中的人或事物则无法判定。不过,古往今来有许多学者对此发生了浓厚的兴趣,他们提出了不少理论来研究宇宙的时间。20世纪以来,人们发现了大量的天文观察事实,都说明宇宙起源于一原始地球的大爆炸,此后宇宙就在空间上不断膨胀,时间上不断发展,所以许多学者都认为,宇宙的时间箭头是由100多亿年前的宇宙大爆炸所决定的。至于为什么会选择这个方向?有没有其他的方向?这些问题是在现有的理论中都无法得到确切回答的。

当然,系统的发展总有一定的方向,演化的方向往往取决于不同的环境和条件。前面根据系统边界上发生的不同情况,将系统分为孤立系统、封闭系统和开放系统。系统演化理论认为这三类系统有三种不同的演化方向或时间箭头。

(1) 孤立系统趋向平衡:从整体上讲,孤立演化的方向完全由热力学第二定律所决定,它唯一地趋向热平衡态,这种状态相对于其他状态来说是最混乱、最无序、最均匀,也即熵值最大的状态。但是,值得特别提出的是,热力学第二定律仅仅规定了孤立系统整体的演化方向,并不要求系统内部处处都“同步”地趋向热平衡态。

这意味着即使是孤立系统,其内部也允许演化中出现局部的不平衡,在某些局部地区甚至可以出现与整体演化相反的演化方向,即出现熵减少或有序程度增加。因此,只要具备了适当的条件,新的子系统也有可能在孤立系统内部产生。同时,热力学第二定律只规定了孤立系统最终将演化到热平衡态,并没有给出演化的速率和达到平衡态的时间界限,因此,在系统内部的某些区域的某些阶段出现反常,也不是不可能的。而且,这个反常阶段和区域的大小、时间长短也没有特别的限制。换言之,正如 N. 维纳所说,我们甚至可以把人类生活的世界都看成是一个“负熵的小岛”,把有生命体存在的历史看作一个“反常的阶段”,这样趋向平衡的整体演化方向在系统内部实际上并没有什么限制,从而为探索系统的创生和发展,即有序结构的产生提供了理论上的可能性。

(2) 封闭系统低温有序:封闭系统原则上有两种可能的演化方向:一是随着温度的升高,系统内部的混乱程度增加,有序程度减少;二是随着温度的下降,系统内部的有序程度增加,混乱程度减少。这两个演化方向都可以用“波尔茨曼有序原理”即“低温有序原理”来加以描述。这个以著名统计物理学家波尔茨曼命名的原理可以从两个方面来讨论。从热力学的角度来看,根据自由能的公式:

$$F = E - TS$$

其中 F 表示系统的自由能函数, E 为系统的能量, T 为系统的温度, S 为系统的熵值。在封闭系统的演化中取决于它的自由能的减少,当达到热平衡态时,自由能减少到极小值。自由能公式反映了系统内部表征有序性的能量 E 和无序性的熵 S 之间的竞争;当系统处于低温时,公式中的第二项可以忽略,起作用的是代表有序性的能量;当系统处于高温态时,随着温度的增加,代表热的熵 S 起的作用越来越大,系统趋于无序。

从统计物理的角度来看也是如此,波尔茨曼曾给出了一个描述平衡系统内部分子能级分布的公式:

$$P_r = \exp(E_i / K_B T)$$

其中 T 为温度, E_i 为所选定的能级, K_B 为波尔茨曼常数。当温度趋近于零时, 唯一有意义的几率和最低的能级相对应, 而最低的能级只有一个(或低温时的少数几个), 因此, 对应的状态是相对有序的; 而在高温时, 相应的高能级很多, 几率分布比较均匀, 对应的状态也就是相对的无序态了。

对于封闭系统的演化方向, 有一点应该指出, 这里的有序态是一种凝固的“死”的次序, 和开放体系中的序及生命系统的有序态是有本质区别的。

(3) 开放系统多方位发展: 开放系统的情况十分复杂, 这里的“开放”是指那些与外界的物质、能量、信息交流对系统的演化有着重大作用的开放, 正因为如此, 这些系统原则上不可简化为孤立或封闭系统的系统。开放系统是复杂系统演化理论研究的主要对象, 由于开放导致了系统的演化具有多个演化方向和路径, 使系统的演化呈现出极其复杂的局面。例如, 开放既可以导致系统的进化、生长和发展, 又可以导致系统的蜕化和解体。而生长和发展既可以使系统产生复杂、奇异的性态, 又可以出现简化、归并, 导致效率的提高等。总之, 开放系统的演化是多方向的, 具体朝哪个方向演化, 则取决于开放的性质、程度、时机以及系统内部和外部的各种具体条件。这里值得一提的是, 当谈论系统的开放时, 不应忘记系统的开放是相对于系统的封闭而言的。尽管世上的一切系统原则上都是开放的, 但是, 对系统自身而言, 开放永远处于次要的地位, 而系统边界的完整和封闭则始终是处于主导地位的, 这一原则正好决定了开放系统的演化方向在很大程度上依赖于系统边界的性质。

7.1.3 进化的判据

如何描述系统的演化是系统演化理论的一个基本问题, 也是人们长期研究和探讨的内容, 目前已经积累了不少方法, 也有了許多刻画系统演化进程的判据与标度。特别是 1865 年克劳修斯提出熵概念以来, 这方面的研究更富成果, 逐渐形成了一个以熵概念为主干的类熵判据系统和以序概念为主的标度体系。近年来, 随着系统复杂性态研究的深入, 人们又引进和借用了诸如维数、指数、复杂度、确定度等概念, 为从各方面判定和量度系统的演化提

供了新的标准与尺度。但是,作为事物整体的系统演化问题比人们意想的要复杂得多,很难找到一个适合于所有系统的描述方法。进化的问题则有所不同,它首先需要确定一个演化的路线,然后才能选择用什么来判定系统在该路线上究竟是进化了还是退化了?用什么标度去度量系统进化(或退化)的速率和进程?

关于用什么作为统一的进化判据,人们也一直存在着分歧,甚至出现不少误解。例如,人们常从有序程度或混乱程度的角度来看系统演化,认为系统的进化总是伴随了有序程度的提高与混乱程度的减少。但是,对于复杂系统,特别是许多人为的事物却常常出现相反的情况。在日常生活中,“没有规矩,不成方圆”当然是对的,但规矩太多,条条框框太多,也不利于系统发展,更不用说约束、次序多的系统就一定“先进”。因为无论是“序”还是“有序程度”,都和“价值”没有必然的、固定的联系,而人们却常常是从目的和价值来评价进与退的。一种序,可以理解为好,也可以理解为坏,有序程度的增加可以是趋向目的,也可能背离目标方向,用它来判定进化与否显然并不确切和恰当。

此外,一般认为,系统演化的总趋势是从简单到复杂,从低级到高级。然而,简单尚可言,复杂度的描述和度量则是目前兴起的复杂性科学的一个基本课题。至于什么是低级,什么是高级,对不同的系统可以有完全不同的判断。可见,建立一个进化标度是一件十分复杂的事情。可从以下几个方面来考虑。

(1) 进化判据:系统的演化从某个状态出发,达到目前状态前经历了多少路程?到达了什么阶段?这些都是人们在研究系统演化时所要搞清的基本问题。一些描述,如中国正处在社会主义的初级阶段,某个工程才刚刚开始,那位学者的研究已达到了国际领先水平等,这些都是根据具体的目标来判定的进化标度。但系统的演化所处的阶段和进程不同往往对应了不同的性质和规律,也具有不同的演化形态。因此,要判定进化必须具有以下条件:

1) 确定演化的起点,即系统演化的初始状态。如果对系统的个体而言,演化的起点一般是取系统个体“生命”开始的状态为演化的起点。如果人们关心的仅仅是演化的某个阶段的话,这个起

点也可以是相对的。以往人们常说系统的演化是从无序到有序,似乎无序状态就是系统演化的起点,这其实也是相对于创生以后的系统而言的。实际上任何系统的演化都不可能从绝对的无序状态开始,只不过演化开始时的次序对于创生后的系统的次序有着本质的不同而已,因此,系统的创生过程实际就是一个改造旧序、创造新序的过程。

2) 选定一个测量的尺度,有时把这个尺度称为标度。测量系统演化的尺子可长可短,可大可小,但要真正能反映系统演化的本质却要选得恰当。前面提到“人不可貌相,海水不可斗量”,为什么人不可“貌相”呢?因为人的“貌”往往不能反映一个人的本质;为什么海水不可斗量呢?原因就在于“斗”这个尺子尽管也能用来测量海水的体积,但和大海相比却显得太小了。那么,究竟什么样比例的尺子才是恰当的呢?这也是一个需要认真加以研究的问题。一般任何一个系统都有一个最能反映自己特征的尺度,称为“系统的特征尺度”。例如,人体的特征尺度大约为1米左右,原子的特征尺度为一个“埃”,而天体的特征尺度则在几万千米左右等。在对系统演化的进程进行描述时必须着力找出这个特征尺度。

3) 有一个正确的测量方法。演化进程的测量初看起来比较容易,只需用尺子从起点一次又一次地量下去就行了。但是,当实际进行测量时,就会发现问题并不这样简单。这不只是因为复杂系统的演化包含多个侧面,主要是因为任何测量过程都是一个主客体相互作用的过程,这就使得测量的结果中总会打上测量者的“烙印”。同时,任何测量方式的选取都是在一定的理论指导下进行的,为什么要用测量智力而不是体力的方法来把握人类个体的演化?为什么对一个国家不能单看它的国民生产总值,而要看它的各项人均生活指标?其中就有许多值得研究的理论问题。可见,描述是理论研究的基础,而它本身又是在理论指导下进行的。选择正确的描述方法同样是理论研究的一部分。

(2) 速度判据:系统演化是一个动态的过程,因此,演化的态势和路径也是一个重要的方面。这里也存在以下问题:

1) 演化的速率,即演化进程与演化时间的比值。我们曾一再

强调只有复杂系统的不可逆运动才给时间赋予了历史的含义,这就是说,同一时间间隔在不同的演化阶段是具有不同的意义的,可见演化的速率虽然讲的只是一个比值,但却具有极其丰富的内容。不同的系统演化的快慢是极不相同的,正如每个系统都有自己的特征尺度或特征空间一样,每个系统也有自己的特征时间或生命周期。例如,对于人的一生来讲,年是一个比较合适的特征尺度,一个人的生命周期就大约为 100 年左右。对于地球来说,它的特征时间就应为万年或亿年,而对于某些病毒或细菌,其特征时间与生命周期就只能以分钟和秒来计算了。正因为如此,在测量某个系统演化的速率时,就必须以它的特征时间和生命周期为参照,选择适当的时间标度。如果能抓住系统演化进程的特征尺度,又能抓住系统演化的特征时间,即生命周期的话,就能比较好地把握系统的演化。演化的速率就是求路程对时间的一阶导数。按照这一思路,还可以有速度、加速度,前者要同时考虑系统演化的方向,后者表示演化进程对时间的高阶微商(导数)。对演化速度和加速度研究的意义同样是十分明显的,特别是在它们不为常数时,速度和加速度的变化往往更能反映系统演化的实质。但如果这样的话,要求解高阶方程(演化方程)就十分困难。

2) 演化的态势或形态。从数学上讲,就是轨迹的形状,这也是一个十分复杂的问题,著名科普作家阿西莫夫在其名著《从零到无穷》一书中说过,如果世上的有理数和无理数有无穷多个的话,那么,曲线形状的数目就比这更多。关于形态演化的标度问题,将在下面的章节中作专门讨论。

3) 演化速率与形态的描述方法。当描述对象一旦确定之后,描述方法就成了问题的关键。从目前情况看,用得最多的方法有状态空间方法和微分方程方法。

状态空间方法原则上是一种几何化的方法,它具有形象、直观的优点。此外,还可以用微分方程的方法来对系统演化进行描述。这种方程通常称为演化方程,它一般都具有非线性的形式。正如前面所指出的那样,复杂性的核心是非线性,但却不能把所有的复杂系统的演化问题都归结为非线性。不过用微分方程来描述系统

演化的关键却仍然是求解非线性微分方程。

(3) 主观判据 :以上主要是从客观的角度讨论了如何对系统的演化进行描述 ,力图找到一种能反映系统自身的演化而不依赖于其他系统的描述方法 ,但是任何描述方法都不可避免地要打上认识主体的烙印 ,绝对的和纯粹的客观描述是不可能的。同时 ,从方向、进程、速率和形态四个方面来描述系统演化尽管具有普遍的意义 ,但却并不是每个研究者都感兴趣和能做到的。实际上 ,研究系统演化的目的也不是仅仅在于了解一个“尚未踏上人类足迹的沙漠” ,而在于通过与认识对象的相互作用 ,了解系统在特定环境下的运动规律 ,进而达到利用、控制和改造对象的目的。在这个特定的环境中 ,人的存在又是一个十分重要的内容。因此 ,在描述系统的演化时 ,不仅要有客观的描述 ,而且要有主观的评价 ,这个主观评价也存在一个标度问题。

系统演化的主观评价是客观实际与主观目的相互结合的产物 ,它既与系统演化本身的性质有关 ,又与人们对它的需求及评价者自身的演化方向有关。通常人们总是把那些符合自己需要或和自己演化方向相同的演化看作是进化 ,而把那些与此相反的演化方向看作是退化。在对系统的演化进行标度时 ,人们常常是自觉不自觉地与自身的演化进程进行比较 ,这就不可避免地形成了一类特殊的、以人为尺度的评价体系。系统演化的主观评价又涉及两个方面 :一是系统演化对评价系统的有用性与经济性的关系 ;二是系统演化与评价系统自身演化方向间的关系。

当然 ,评价的结果还与评价方法的选择有关。例如 ,计算复杂性的问题和系统复杂性态的问题就是如此。一个系统的演化本身可能没有变化 ,但评价系统感兴趣的方面和评价方法变化了 ,评价的结果也会不同。

综上所述 ,为了做到全面系统地刻画系统演化 ,有必要引入一个多标度体系 ,将各种评价指标结合成有机的整体 ,该体系中至少包括两个主要方面 :①结构演化标度 ,从系统整体的内部来度量演化 ;②属性演化标度 ,从系统外部来度量演化。

对每一个方面又需要从进程、速度、评价(价值)三个维度来

衡量。

7.1.4 进化的必要条件

演化是系统的基本属性,无论什么系统,不是朝这个方向就是朝另外的方向演化;不是沿这条路线就是沿其他路线作不可逆运动,所以讨论演化的一般条件没有什么意义。但是,对于具体的系统来说,特定的演化方向或目的、特殊的路线何时创生、如何演化、结果怎样却十分重要。由于这些问题的回答都会随条件的不同而不同,所以先研究这些进化的一般条件,然后分别讨论在不同的演化阶段,如创生、发展、消亡的特殊条件。

一般而言,沿某个特定方向和路线的进化需具备以下必要条件。

(1) 对外开放,“吐故纳新”:为什么要对外开放?理论上可以从热力学第二定律的反面来加以说明。按照这个定律,孤立系统内部的任何相互作用和变化都会引起熵值的增加。也就是说,系统内部将“自生地”变得越来越混乱,直到热平衡态,熵值达到最大,内部最混乱。这种状态对应了系统的解体。而封闭系统(不交换物质,但可交换能量)的组织化是一种类似冷凝或结晶的过程,它随温度的下降而出现,产生的是“死”的结构。这样一来,要实现系统的创生,唯一的一条路就是对外开放。但是,真正要形成一个特定的系统,是不能随意对外开放的,需要对“交流活动”的内容、性质、数量等进行严格的控制和选择。因为对外开放说到底就是与外界进行物质、能量、信息的交流,即与外部环境进行相互作用(严格地说,在系统尚未创生之前,还不存在系统与环境的明确边界,因此,实际上是将要成为系统组成部分的事物与其他事物间的相互作用)。从外界吸收组成系统所必需的资源(组织对象)并对其适当的加工改造,同时还要及时排除系统所不需要的东西和创建过程所产生的废物。靠什么来进行选择与控制?唯一的只有靠元素(部件)之间的非线性相互作用,因为如前所述,只有非线性相互作用才具有多元性和非对称性,多元性提供了选择的可能和基础,然后通过非对称性来进行选择。

从现实意义上讲,开放就是与外界交换物质、能量和信息,这

是就系统与环境和其他系统的关系而言的。一个系统要朝某方向进化,无论是创造一个新系统还是发展一个已经存在的系统,都需要从外界获取适合这种特殊进化的新材料、新能量和新信息(包括指令、蓝图、程序等),并将内部运行所产生的废物排出系统之外。这里的“新物质、新能量和新信息”是指系统原来没有的,所以需要从外面获取。正因为如此,系统对外开放总是有严格限制的。也就是说,对什么东西开放,开放到什么程度,都要有所选择和限制,所以,从某种意义上讲,更重要的是获取的途径、选择的标准以及控制的手段。没有这些,开放就是空谈,因为一切实现的系统本来就是对外开放的,只不过在对外交换的品种与数量上不一定符合特定的需求而已。

此外,系统要进化,对外开放的交换不仅要达到一定的数量,而且要注意品种、资源的齐备。如前所述,系统创生的过程也就是将构成系统的材料和部件组织起来的过程,因此,系统组织的三要素:对象(材料)、动力(能量)、指令(信息)必须基本齐备,所谓基本齐备指的是基本部分不可缺少。比如,干一件事,完成一项工程,人、财、物、信、时,这五个方面的资源必需齐备。

(2) 远离平衡态,内部非线性选择放大机制:系统要进化必须远离平衡态,是就系统内部关系而言的。这里需要回答两个问题:①什么是远离平衡态,怎样才算远离了平衡态?②为什么要远离平衡态?对第一个问题,统计力学中的“昂色格倒易关系”给出了一个判定标准,即凡符合它或满足它的就是处在近平衡态,否则即为远离平衡态。普里高津学派提出了著名的“最小熵产生原理”,由此证明,在昂色格倒易关系成立时,系统总是自行趋向平衡态,因而旧结构是稳定的,即维持原状态,系统无法进化。

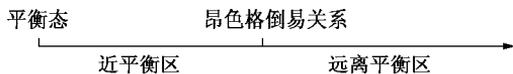


图 7-1 从平衡到远离平衡

近平衡与远离平衡的区别在于泰勒展开式中高次项是否起作

用,近平衡区中的高次项可以忽略,而远离平衡区内高次项将对新系统的创生作出重大、关键性的贡献。从物理学上来讲,判别的主要标志是“昂色格倒易关系”是否成立。如果昂色格倒易关系成立,则意味着在相互作用的各种流和力之间存在着相应的对易关系。例如,代表扩散力的密度梯度与电场力之间,与代表电场力的电位差与扩散流之间可以对易(对等、平衡或对称),否则,就会出现不对易,意味着参与作用的各种因素之间发生了非线性相干。

关于第二个问题,需要涉及系统演化的内部机制。一般讲来,系统要进化,内部必须存在适当的生长机制,这种机制对应了某种非线性关系。用统计力学的话来说,就是出现“远程相关”,使得系统内部的元素间产生“牵一发,动全身”的紧耦合。它是一种非对称的选择放大或衰减机制,能根据系统进化的需要对内部或外部关系与事物进行选择、控制、协调和引导。这里的选择,一方面是选择构成系统所需的材料和能源,另一方面是选择合适的组织路线、方针、步骤、程序、途径等。这里的“放大”,就是一种内部的正反馈激励机制,激励各组成部分相互配合,积极工作。选择放大机制通常表现为系统内部一些特殊的、相对稳定的关系,比如“多数服从少数”的领导、控制关系、员工间明确分工、相互协作的关系等。

协同学的创始人 H. 哈肯指出:“制约自组织的方程实际上是非线性的,从这些方程中我们可以发现模式,或者是竞争的结果只有一种模式继续存在,或者是彼此共同存在。”因此,按照协同学的观点,是非线性相互作用使得整体运动模式得以从包含了大量子系统的大系统中产生出来。为了说明这一点,协同学中有一个经典例子:激光。在激光系统中包含数量级 10^{23} 以上的子系统(工作物质的原子或分子),因而有 6×10^{23} 个自由度,为了描述这个系统,就需要同样多的变量和微分方程。而且即使知道了这些变量和方程,也未必能清楚整个系统的行为,因为这些变量和方程仍然是微观层次的东西。哈肯注意到,平常这些子系统的运动是互不相干的,向外发出具有各种频率的光波。一旦外界输入的能量达到激光系统激发的阈值,这些子系统就会像听到一道命令一样一

下子同步起来,向外发出一束巨大的单色光。

(3) 涨落的触发,临界点上的选择:只有前面的两个条件,系统的进化还不足以出现,还需要将上面两者结合起来,就像炸药的引信或汽车气缸的点火装置一样,进化需要通过涨落的触发才能真正启动。这里也有两个问题需要讨论:①什么是涨落?②在什么情况下它能起触发作用。

涨落的问题在物理学,特别是统计物理和量子力学中早有许多研究。从理论上讲,所谓涨落,就是在平均值上下(附近)的微小差异或变动。引起涨落的原因往往十分复杂,迄今知道至少有3种来源:统计涨落、量子涨落和混沌系统内部的随机性。对于系统的进化来说,主要关心的是涨落的特征和作用。研究表明,涨落有两大特征:一是它无时无刻不存在,即无论对于宏观物体还是微观粒子涨落总是存在的,并且通常满足某种统计分布,如正态分布等;二是通常情况下涨落都是微小的,对系统的属性和演化不发生大的影响。但是,当系统对外开放达到某个“临界点”时,系统内部的选择放大机制将发挥作用。如果它正好选择了某个原来微小的涨落(偏离)将它放大,原来的微涨落就有可能变为“巨涨落”,从而影响系统演化的方向,使得沿某个方向的进化或退化成为可能。

起选择放大作用的正是元素间的非线性相干。前面已经指出,非线性对应了相互关系中的高次项,它的物理机制就是自反馈或自缠绕。如果非线性相干是负反馈时,它就会对偏离进行衰减,使之回到原状态——系统稳定。当反馈是正反馈时,系统处于自激励状态,微小的涨落放大为巨涨落,它对应了微小的偏离被放大,导致原状态失稳,从而发生不可逆的变化,产生新的状态,它对应了系统的创生和整体性的突现。

以上论述的进化条件是对进化的所有阶段而言的,所以称进化的一般条件。在系统演化的不同阶段,还要将这些条件细化、具体化。

7.2 演化的标度

系统沿某个特定方向发展进化,会在它的结构、性态、功能、价

值以及形态等方面表现出来,为了定量地刻画这些方面的演化发展,人们提出了许多相应的标度,下面介绍其中主要的几种。

7.2.1 结构标度

第二章讨论了系统的结构,从定性的角度考虑结构的演化需要涉及许多方面,其中包括:①系统组成部分的演化,如元素多少的变化,元素与要素的转化;②内部关系的演化,如元素与元素、元素与要素、要素与要素间的关系变化;③关系的性质、强度、种类的演化;④局部与整体关系或结构形态的演化,即构形的演化等。从定量的角度来考虑,以下几个标度则是最主要的。

(1) 熵概念和类熵标度:类熵标度是以熵概念为核心的一组标度,它包括热力学熵、统计熵、信息熵、柯尔莫哥诺夫熵、测度熵、拓扑熵、混合熵等。尽管这些熵的含义不尽相同,但它们有着一个相似的数学结构,而且除热力学熵之外都与状态出现的几率的对数分布有关,这说明它们具有深刻的内在联系。在这一类熵概念中热力学熵是最早被提出来的,从1865年算起至今已有100多年历史了。这100多年它的内涵几经改变和拓广,使它成为目前系统科学中使用最多的一个演化标度。然而,由于结构演化特有的复杂性以及熵概念自身的原因,对它的理解一直存在较大的分歧。这些分歧一方面引出许多争论,带来不少误解,但另一方面也推动了人们对系统演化的理解。下面结合对熵概念历史的回顾来看看熵,以及类熵标度是怎样刻画系统结构演化的。

1) 熵概念的提出和发展:熵概念起源于热力学。早在上世纪中叶,由于人们对热现象和热机的逐步认识,先后发现了热力学第一定律和热力学第二定律。前者是人们熟悉的能量守恒与转换定律,它的核心概念是能量。后者描述了自然界中广泛存在的不可逆现象,但是它却缺少一个像能量这样的量度标度。为此,德国物理学家克劳修斯1865年提出了热力学熵的概念,热力学熵类似能量,但又不同于能量(因此它的名称为 Entropy,它的原始含义是演化与变化)。按照克劳修斯的想法,是用熵来量度能量从高级形式(如机械能、电能等)向低级能(如热能)转化的程度。为了解释熵的含义,他从热量自发从高温端流向低温端的事实出发,将熵的增

加与热量和温度的增加联系起来。认为熵和热一样,体现了系统内部的离散倾向。从热力学的观点看,系统熵的变化 dS 与系统的温度 T 和热量变化 dQ 之间具有如下关系:

$$dS = dQ/T$$

根据这个公式,人们对系统热力学熵的变化进行精确计算。

然而,在这里人们对熵的理解仍然是停留在宏观层次上的,而且公式中描述的还只是熵的变化,对熵的本质含义还是很不清楚的。

为了揭示熵的本质,特别是它所对应的微观状态,1872年物理学家玻尔兹曼提出了熵概念的统计解释:由于熵和玻尔兹曼积分微分方程中的 H 函数只差一个符号,因此可以用它来定量描述热力学第二定律,即熵增加或熵不减少定律。后来玻尔兹曼还提出,在熵和系统微观状态数的对数之间存在一定的比例关系。这一关系又由美国的吉布斯表述为:

$$S = K_B \log W$$

式中 K_B 为波尔茨曼常数, W 为系统的微观状态数(又称配容数)。显然,可能的微观状态数越多,系统内微观粒子的状态分布也就越平均。换言之,它们可以具有十分不同的运动状态,这从整体上看就表现为系统内部十分混乱,可见,熵值的大小可以作为系统内部混乱程度的标度。由这一公式还可以看出,当 W 值取极大值时熵也取极大值,这时系统正好处在热平衡态。

玻尔兹曼对熵的统计解释很快为人们所接受,并成了对熵概念最经典、最权威的解释。但是,这种解释也不是没有问题的。1871年麦克斯韦妖灵魂长期不散,1952年法国物理学家布里渊又指出:“系统的可能微观状态数是依赖于模型的选取的”。就是说,微观状态数并没有一个绝对的数值,它的大小是相对于特定的模型的。例如,可以对系统中不同重量、电荷与颜色(吸收与发射光谱)的元素进行特定的分类,把不同类别的不同组合数看成是系统的微观状态数,这种状态数显然就是依赖于分类的标准和方法的。

再进一步则不难看出,这个数值同样也是相对于不同的考察层次的,例如,当我们站在繁华的街道看周围的人群时,总会有一种十分混乱的感觉,但若从卫星上观察,就可能发现某种定向的流动,而从每个行人的个体来看,他们又都是在为各自不同的目的而定向地奔走的。由此可见,统计熵既没有绝对的数值,又不能在各个不同的层次上进行比较。正因为如此,熵概念一直蒙上了一层神秘的色彩,围绕它的争论一直延续至今。

但是,就是从那时候起,熵作为无序与混乱的量的观点逐渐成了主流,也成了后来许多理论的基础。例如,1944年量子力学的创始人之一、著名物理学家薛定谔出版了一本在学术界引起极大震动的书——《生命是什么?》,其中提出了“负熵”的概念,用以描述系统内部熵的减少。这一十分形象的概念一方面给人们描述系统向有组织方向发展的进程提供了一个好的标度,但也在一些人中带来了概念的混乱,目前仍有些人把负熵看成是一种类似食物的“东西”,当系统得到或吸取了它时就会向有序的方向发展。一些人进一步把它无条件地推广到社会和其他领域,用熵值的增减来评价社会乃至世界上一切事物的发展。法国的里夫金甚至以熵为基础提出一个“新的世界观”(见里夫金的《熵——一种新的世界观》)。这种将熵概念的作用无限夸大的观点自然引起了不少学者的批评。

1948年,申农和维纳提出的信息熵概念是对熵概念最深刻的一次发展。按维纳的意见,熵是消息的负对数,它代表了系统与外界进行交换的东西。按申农的理解,熵是像玻尔兹曼 H 函数一样表征了信息的不确定性程度。因此,系统不确定性程度的减少就意味着它的确定性程度的增加,即组织程度的增加。

信息熵的数学表达式为:

$$H = -K \sum P_i \log P_i$$

式中 \sum 表示对所有的可能性求和, P_i 表示状态 i 出现的概率。

在通信中系统因接收到了信息而减小或消除了它关于信源的

不确定性程度,因此,可以用信息熵的减小度来作为信宿得到信息的量度。这是一个与系统演化有着密切关系的量。

熵概念的另一方面的发展是各种数学熵的提出。用熵来量度动力系统的混乱程度或复杂程度,这是对熵概念的又一大发展。

这里首先要提到的是柯尔莫哥诺夫的工作。1958年,他把熵概念引进到动力系统的遍历理论。1959年,Sina改进了熵的定义,得到了遍历理论中的测度熵。1969年,Adler、Konheim、McAndrew在测度熵的启示下提出了拓扑熵。此外,还有如混合熵等。所有这些数学熵又可以分为两类:一类是静态熵,另一类是动态熵。前者描述系统的静态结构的复杂性和不确定性,后者描述系统变化的复杂性和不确定性。

2) 类熵标度与系统演化:以上主要回顾了熵概念独立发展的历史,将它明确地和系统演化联系起来的主要是普里高津的贡献。这位诺贝尔化学奖得主早年一直在思考着系统的有序结构如何从混沌中产生出来,这实际上就是系统的创生问题。后来,他和他的学派终于找到了问题的关键在于必需创造条件让旧结构失稳,而这又只能在远离平衡态的区域之中。因此,他们提出“非平衡是有序之源”。在他的整个研究过程中,“熵”占有十分重要的地位。他们不仅把熵作为系统演化的核心标度,而且认为熵增加会造成混乱,并在一定条件下还会推动系统演化,使系统的有序和复杂程度增加(见普里高津《熵是什么》一文)。与此类似,中国也有一些学者看到了熵的“建设性”作用,提出把熵看作是系统内部复杂程度的描述也许更为恰当。不过,国内外有不少学者不太同意给熵或类熵概念以过高的评价,认为它最多只是从一个方面刻画了系统的演化。还有一些学者指出,熵概念是一个历史的产物,人们对它早有明确的定义,不宜再对它作其他新的解释,否则将引起混乱。

总之,自从1865年热力学熵概念提出以来,它就一直受到科学界高度的重视。不管目前人们对它有何评论和批评,它的历史地位是无可置疑的。我们认为,这里除了熵概念应用的范围极广之外,主要原因在于,它在历史上第一次给人们提供了一个定量描述系统演化进程的标度,使人们在谈论系统演化时有了一个相对

确定的标准。由于类熵标度是从系统内部结构的混乱与不确定性(复杂性)的角度来描述演化进程的,因此显得特别重要。但是,不管这个侧面如何重要,它毕竟只是各个演化侧面中的一个,不能用它来否定或代替其他的演化标度。在许多情况下,有必要引进一些新的演化标度,例如,从有序性和组织程度的发展来看系统的演化就会发现许多新的内容。

(2) 有序度标度 除了类熵标度外,有序度也是人们常用的系统演化标度。由于熵被作为系统无序的量度,那么,熵的减少就意味着有序度的增加,因此,有序度就常常被看成是熵的对偶概念,而系统的演化也被看成是从无序到有序、从有序程度较低到有序程度较高的发展。因此,用系统有序度的高低来标度系统演化的进度是十分自然而又简明的。但是,在各个不同的领域人们对序的理解也有不同,能否把它们统一起来,如何用它来标度系统结构的演化,这里先要搞清序和有序度的关系。

前面章节对序的含义的描述表明,系统结构的有序性与系统结构的演化进程之间有一定联系。这种联系的基础就是任何系统的结构都是有序结构,而且系统内部的次序既是系统演化的产物,又是系统演化的标志。在后面的讨论中将看到系统的结构与功能、属性也是密切相关的,系统的属性在某种程度上是由它的结构的有序程度所决定的。某方面的结构有序程度越高,某方面的性能就越强。

序和有序度、组织程度也不相同,前者是指某种关系的性质,后者是指某些关系的数量。如果说序是指一定的次序、规矩、约束、组织条例和结构原则的话,那么,有序度和组织程度就是指这些东西的数量。例如,人们到了不同的场合,总要了解它的规矩和制度,每一条规矩和制度都代表了一种“序”,而它们的多少才是“有序度”和组织度。为了量度有序度或组织度的大小和变化,人们常用对称性元素的多少来作为有序或无序的尺度。这里只需考虑数量,不必去涉及对称性的性质。这样一个对称性元素就只相对于一种变换中的不变性,两个对称性元素就指两种变换中的不变性。例如,一个圆形可以绕圆心作任意角度的旋转,结果都可以

与原图完全重合;而一个正方形则只能作 90 度的整数倍的旋转;一个长方形就只能作 180 度的旋转;一个复杂图形只能作 360 度的旋转。在 0~360 度的范围内,圆有无穷多个对称性元素,正方形有 4 个,长方形有 2 个,复杂图像只有 1 个。可见,对称性元素的多少与有序度、组织度和复杂度是成反比的。

有序度、组织度的变化的确可以作为系统演化的标度。但是,这并不等于说有序度或组织度越高,系统就进步,越高级;反之,有序度和组织度低,也并不能说系统就低级,因为有序度和组织度高与系统演化的方向之间并没有单一的联系。判定系统的演化方向还必然要涉及序和组织的内容、意义、功能和价值,而这些是有序度和组织度所不考虑的。

7.2.2 属性标度

系统的演化不仅表现在结构的变化上,而且表现在属性的变化上,如果说结构的变化主要是从系统的内部来看的话,那么,属性的演化就是从系统外部来看的。属性的演化同样可以从不同的方面来加以研究,如从一般的对外关系上看可统称为属性,从对目的系统的关系上看可称为功能,从与人或人类的关系上看可称为价值,而价值又可以分为许多不同的层次等。本节讨论系统属性在这些方面的演化进程。

系统属性的演化说到底就是系统与其他系统相互关系的演化。与前面讨论内部关系的演化一样,可分为以下几个方面:

(1) 关联演化:它包括对外关联的数量、性质和强度演化。

1) 从数量上看:一个系统因与外界的关系不同而具有多方面的性能,即一物可以多用。一种产品,一个人造的系统或事物,如果其性能从单一发展到多个,这无疑是一种进化。例如,衣服的最基本功能是遮身蔽体,防寒保暖,但同时又可以用来作为装饰等。随着科技与社会的发展,一物多用的情况会越来越多。不过,在系统的多个性能中必有一个或几个是主要的,人们在利用某个事物时也主要着眼于它的主要功能,并不一定要求功能越多越好。

2) 从强度上看:在系统演化的不同阶段,性能的数量也是各不相同的。如前所说,通常系统在演化的过程中其主

要性能总有一个凸形的变化模式,在系统创生和发展的初期,演化的方向是上升的,系统的特殊属性在强度上呈上升的趋势。而在中期则有个发展的平台,以后就呈下降的趋势。因此,从系统属性的强度及其变化中也可以看出系统演化的程度。

3) 从性质或种类上看:关系的性质演化同样也是极普遍的,例如,在人与人的关系中,开始时两个人的关系是互不相识、相对独立的关系,接触多了,相互了解后就可能变为同志或亲人的关系等等。系统内部关系的性质与种类变化是一种质变,它是数量、强度变化达到一定阶段后的必然结果。这种性质的演变,既取决于系统自身的发展、外界的条件,又取决于系统和其他系统的联系。特别是系统功能、价值的演化,由于与目的和人有关,因此,在定量刻画其演化的程度时就更应该考虑到不同的“主体需求”。

(2) 交流量的演化:系统属性的演化还体现在系统与外界交流物质、能量、信息的种类和数量(流量)上。这是因为,任何一个开放系统的演化,都必须与外界交换物质、能量和信息,而交流的数量大小则在一定程度上反映了系统开放的程度,而系统开放程度又与系统的演化有着十分密切的关系。一般情况下,演化的程度越高,它与外界交换的东西就越多。这个多,不仅指交换的数量,而且指交换的种类。比如,一个具有旺盛生命力的机体,为了生存和发展,从外界获取的物质能量就会远比一个处在消亡过程中的机体多得多。但是,不同的系统交换物质、能量、信息的意义各不相同,对于相对简单的物理、化学系统来说,主要是交换物质和能量,而对于生命、社会等特别复杂的系统,信息的交流则占主导地位。关于信息的交流量,将在后面作详细讨论。

(3) 响应性演化:从一般意义上对性能演化及其标度进行的讨论,性能被笼统地理解为系统对外关系的性质。为了进一步明确性能演化的标度,有必要将系统的对外关系区分为被动的响应和主动的行为,它们分别对应了两类不同的演化标度。下面先讨论系统对外的响应。

系统对外界作用的响应或反应可以从以下几个方面来度量。

1) 灵敏度:指系统对外界作用的反应速度和强度。灵敏度高

的系统,只要外界有微小的作用,就可以作出相应的反应。比如,在通讯领域中,人们把灵敏度定义为“接受微弱信号的能力”;当人们说“这孩子很聪明”时,原本是讲他的眼力很好(为“明”),听力好(为“聪”),即他的灵敏度高。一个系统的灵敏度,不仅可以指接受信号的灵敏度反应强烈,而且可以指它接受其他作用的灵敏度。所谓“响鼓不用重锤”,意思是只要轻轻地敲击,鼓就可发出巨大的响声,这也是指它的灵敏度高。

在系统的演化过程中,对外界反应的速度和强度是有所变化的,如一般年轻人的灵敏度高,而老年人的灵敏度相对低一些。因此,在医学上和生理上灵敏度的高低常被作为人的生理年龄(非自然年龄)的一个指标。

2) 选择性:系统对外界作用的响应是有所选择的。系统演化的程度越高,它对外界作用的选择性越强。选择性是相对于不同的外界作用的响应而言的。在通讯领域中,系统的选择性大小指的是区分两个相邻信号或作用的能力。这个概念很容易推广到其他的领域。实际上选择性的强弱和选择价值的大小是有极其巨大的意义的。

3) 稳定性:稳定性是系统科学中的一个十分重要的概念,它是一种系统对外界扰动的响应特征。稳定性高的系统在受到外界扰动而偏离原状态后,能很快地回复到原状;而稳定性低的系统则回复较慢。如果它不能回复,偏离的大小随时间而不断增长,这就是所谓不稳定或“失稳”。从前面的讨论可知,在系统的演化过程中总是不断伴有旧结构的失稳,新结构稳定。当它不断发展后又再度失稳,形成一个循环反复的过程。因此,从稳定性的程度来看系统的演化,可以了解系统演化的阶段和发展程度。

7.2.3 行为标度

研究了被动的反应后,再来研究那些更高级、更复杂的对外反应,主要指系统对外部环境的适应程度与系统自身的自组织程度的演化。

(1) 自组织水平:系统在特定的外界条件下会沿着一定的方向进行自组织。所谓自组织,就是在不从外界输入特殊组织指令的

情况下系统自行创生、发展和消亡的过程,也称系统个体演化的三步曲。显然,自组织水平的高低是一个重要的演化标度。自组织的水平又可以从纵向与横向来看,所谓纵向的自组织水平,指的是在系统个体演化的一生中系统现在所处的发展阶段;横向的自组织水平,指的是各类系统间自组织程度比较的结果。例如,物理系统与社会系统的自组织就不在同一水平上,而同是社会组织,自组织的水平也可能相差很大。

(2) 生存与发展效率:对于生命、社会、思维这类特别复杂的系统,需要一种更能体现其演化特征的标度。由于这类系统都有一种力图保持自己的生命、发展和扩大自己生存空间的“意向”或本能,那么,它们的这种能力水平就自然成了一个很好的标度。但是,一个系统求生存、求发展都是要付出相应的代价的,特别在一个有限的生存空间中包含了多个这样的系统时,就必然会产生相互间的竞争,这时谁在竞争中能取得胜利,就要看它的效率了。生存与发展的效率主要体现在系统对外部环境或外部条件利用的效率上,因此,又可以把效率作为这类系统演化水平的标度。

除了上述几个方面外,在系统与外界的相互作用中还可以讨论它们相互控制与通讯的能力,以及对外界反应的连续性、间断性、奇异性等。由于这些方面涉及的问题更多,也非常重要,限于篇幅,本节不准备详细讨论。

7.2.4 形态标度

系统的演化不仅可以从结构和属性方面来研究,而且可以从形式与形态方面来研究。形式作为一个基本的哲学范畴,它和内容、质料一样,曾引起历史上许多学者的重视,对它的内涵和意义也有着各自不同的见解,所有这些,对我们研究系统的演化都有重要的意义。现代科学中,形态的变化和发生等更是一些引人注目的领域,近年来,人们在对分形、时空混沌、复杂性态的研究中发现,一个系统的“图形”与演化模式之间有着重要的关系。在许多实际应用领域,物体的形态,表面的形状往往对物体和系统的性质有着决定性的意义。就是人们感官所接受的信息中,视觉形象与语音形象也占了几乎95%以上的比例,说明从形态的角度来研究

系统的演化是十分必要的。但是,由于形态很难量化,如何将它和演化的标度列起来就成了问题的关键。本节先回顾人们对形态认识的历史,然后对形态进行分类,再提出一些形态演化的标度。

(1)“形”的含义:亚里士多德也许是第一位对形式问题进行详细论述的学者。他在批判他的老师柏拉图割裂一般与个别的观点的基础上,提出了著名的“四因”说,其中形式因被放到了十分重要的位置。他认为“形式是每一个事物的本质”,也是事物的“原形”、模型和形状。形式作为质料(构成事物的材料或系统的元素、部件)的对立概念,它既是质料追求的目的,又是使质料变化的动力。和质料相比,形式是能动的、现实的和第一性的。F. 培根在继承亚里士多德的观点的同时,又给形式赋予了新的内容。他在《新工具论》一书中明确指出:“形式是支配和构造简单性质的那些绝对现实的规律和规律性”,是事物性质的内在基础和根据,是物质内部固有的、活生生的、本质的力量。物体的个性、特殊性也是由它所决定的。他认为,只要掌握了形式就可以在认识上获得真理,在行动上获得自由。哲学家康德是从美学的角度对形式问题进行研究的,他开形式主义和形式美学之先河,提出:“在所有美的艺术中,最本质的东西无疑是形式”。此后,一大批美学家、美术家和音乐家对艺术作品与文学作品的结构、布局、表现手法等进行了大量的研究,创立了至今西方有着巨大影响的形式主义美学,他们的工作甚至被称为“形式科学”。许多带有科学倾向的结构主义、格式塔美学和心理学、符号主义等也与此有着密切的关系。“形式”不仅是一个重要的哲学范畴,而且在科学上也有深刻的意义,这里指的形式不单是指事物的外表,还与系统演化的内容、本质和发展的动力等都有着密切的联系。具体地说:①从形式演化的角度研究系统的演化,对认识演化的规律、动力及特殊性有着十分重要的意义,它在一定程度上反映了系统演化的本质;②形式、形态、模式等都是相对于一定的内部和外部关系而言的,这种关系可以是空间的,也可以是时间的,可以是动态的,也可以是静态的,但都集中地体现了系统的整体结构与态势;③系统的形态、形式及其演化,同样可以从不同的方面来研究,尽管不同的系统与不同的方面会具

有不同的形式,但我们认为,系统的外形、构型和轨迹形态对所有的系统演化都是重要的和基本的。

(2) 外形的演化:系统的外形通常是指系统外部的几何形态或整体的存在形式。从哲学上讲,它是事物内容的外在表现,是受内容所制约的。但是,事物的外形在事物相互作用中却往往起着决定性的作用。例如,物理学的一个重要分支,表面物理就是专门研究物体表面的构造和形态的,表面形态不同,物理性质会有很大的差异。化学和生物更是与物质的外形有着十分密切的关系,一物质是否能和另一物质结合,结合的速度和程度往往是由它们的外部形态决定的。而生物细胞和分子的外部形态也往往决定了它的生命活性。对生物大脑进化的研究结果表明,大脑皮层上的沟回的多少及深度变化甚至比大脑体积的大小变化更为重要。因为它与大脑皮层表面积的大小直接有关,而后者又决定了大脑控制和信息处理的水平。从根本上讲,系统的外形就是系统边界的形式,边界是否闭合,边界具有怎样的拓扑性质,拓扑性如何演化,这些都是分析系统演化理论的重要课题。一个复杂系统的边界总是十分复杂的,而边界的演化就更为复杂。尽管在系统演化的整个过程中边界总是闭合的(见系统演化原理中的质朴学原理),但它的拓扑性则在不断地变化。例如,从对称性程度高的圆形或球形变到其他不规则的形态,从单连通到复连通,从低维的到高维的,从小的分数维到大的分数维等等。这些都从各个不同的角度表现了系统外形的演化,因此,可以通过对外形的拓扑性变化的研究来寻找系统外形演化的标度。

(3) 构型的演化:系统的构型是系统结构的一个重要方面,前面讨论结构演化时只涉及系统内部关联的数量、性质和强度的演化,没有讨论它的结构形态演化。其实和那三方面相比,系统的构型更体现了结构的本质特征。因为即使前面三个方面相同,构型的不同就会使系统具有完全不同的性质。一个最典型的例子就是碳分子构型的性质的影响。通常,碳分子有两种不同的内部构型,正六边形的是金刚石,另一种为片状构型,它就是石墨,石墨和金刚石的分子都是由碳原子构成,但却具有几乎完全相反的属性。

前者具有非凡的硬度,后者却很软,很滑。此外,还可以看一看房屋的构型,运用同样的材料可以构造各式各样不同形式的房子。海边房子的屋顶是平的,可以防止大风的袭击;寒冷地区的房顶是尖的,可以承受积雪的重量。从上面的例子可以看出,系统的构型与系统内部所有元素的相对位置和分布,以及它们相互作用的空间角度等因素有关,但这里主要的是整体的构型和态势,而构型的演化就是指这种形式与态势的不可逆变化。然而,要找到一个尺子来定量地描述这种演化是十分困难的,在下面的讨论中希望借助于某些几何方法或拓扑方法,例如用对称性或对称度来标度系统构型的演化。

(4) 轨迹的演化:如果把时间也作为一个特殊的维度,那么,系统运动的轨迹同样有不同的形状和形态,运动轨迹的形态实际上就体现了系统运动的规律,而轨迹的形态变化在一定程度上反映了系统运动规律的变化,所以,运动轨迹的形态以及它的演化常常是一门学科的基本内容。例如,物理学中体系运动的路径问题、数学中的函数图像问题、控制论中的时域特征问题、经济学中变化曲线的形态问题等,就是这些学科研究的主要问题之一。当然,这里有一点需要加以说明:人们平常所说的规律性总是和一定的不变性联系在一起的,即认为只要具有某些条件,按照一定的规律,某种结果就一定会出现。似乎这就是规律的不变性,其实这里的要害是“条件”。条件不同,结果不同;条件不存在,也无所谓规律的存在。就好比在地球上没有人类之前,谈论人类社会的发展规律是毫无意义的。承认规律是可变的,是依赖于条件的,这一点在理论和实践上都具有重大的意义。它告诉人们,要改变事物的运动状态和运动结果,唯一的办法就是改变其变化的条件。当然,这里的条件也有内外之分,起决定作用的通常是内因,但也不排斥在特定情况下外因可能起主要作用。在现实世界中,运动轨迹形态的变化其实也是十分平常的。例如,事物的运动和状态的变化,是直线的还是曲线的,是随时间作指数增长还是按对数变化等,其区别就在轨迹的形态不同,而这些运动轨迹又是随系统的演化而变化的。如果在原来作直线运动的物体旁边放一个引力场时,它的运

动轨迹就会变为抛物线或椭圆。在系统演化的不同阶段,状态变化的轨迹也不相同,常用的生长曲线就是一个很典型的例子。在事物生长的前期,生长曲线的轨迹近似于指数曲线,中期近似于直线,后期近似于对数曲线等。

7.2.5 信息流量标度

一个系统的演化,不仅表现在它的结构、功能与形态上,而且表现在它与其他系统交流信息、控制与被控制的关系之中。尽管这种信息交流与控制关系并不在所有的系统间都存在,但它们对于计算机、生命体、人类等复杂系统却具有特殊重要的意义。下面就来讨论信息与这些系统演化的关系,并试图提出一种新的演化标度——信息流量标度。

为了量度系统与外界交流信息的多少,需要给信息量与信息流量一个确切的定义。有关信息和信息量的问题,将在下一节专门讨论,这里只使用信息的功能定义,把信息看作“消除信宿关于信源不确定性的东西”。既然如此,消除不确定性的多少就可作为得到信息多少的量度。

信息和信息量概念是相对于广义的通讯系统,即信息系统而言的。但是,我们也会常常听到某事物包含了多少信息的说法。例如,人们常说某人今天发言的信息量多,某本书的信息量大等,这实际上是指它们对某一类信息接收者来说可以消除较多的不确定性。可见,即使是在谈论某物或某系统所含的信息量时,它的基本前提也是信息的交流。前面提到的《信息究竟是什么》一文中指出:信息不仅只是存在于信息系统(广义通讯系统)之中,而且只存在于流动之中。信息量本质上是一个流动的量。这种观点对于人类社会这类特殊复杂的系统具有更为重要的意义。特别是在当代社会中,人与人交流信息,往往也是要“计算”价值的。所谓“时间就是生命,信息就是金钱”指的正是这个意思。在国与国、企业与企业之间要进行“技术转让”、“智力输出”,也有一个“按质按量计费的问题”。这说明现代社会中信息已经成为一种特殊的商品,它存在于流动之中,并在流动中实现自己的价值。笔者曾在《信息价值论初探》一文中指出,信息价值的实质是脑力劳动的价值,因

为在社会领域中一切有用的信息都是脑力劳动的结果。信息价值应与抽象的一般的脑力劳动时间相对应。从这个观点出发,我们提出信息价值理论的建立必将丰富和发展马克思的劳动价值论,它将成为未来社会,即智能社会中的一个重要的理论基础。应该看到,尽管信息价值或智能价值问题还刚刚提出不久,但自古以来智力劳动和体力劳动都是人类的社会劳动,是人类一切生产活动中必不可少的两个组成部分,只不过在古代和近代社会中,由于专门从事智能劳动的人数较少而被仅仅看成是一个附属部分。然而,这种观点把智能劳动排除在社会生产之外,轻视智能劳动,是根本错误的。智力或智能劳动在整个社会劳动中所占的比例决定了劳动的效率与社会生产发展的水平,也决定了社会发展的水平。可见,把智能劳动水平作为人类社会演化的标度是非常合适的。而智能劳动的水平又可从社会信息流量的大小看出,这就是人们今天特别强调信息流量的原因。

7.3 系统的创生

从哲学上讲,物质的演化和宇宙的演化都是无始无终的。从科学上讲,比较公认的观点是宇宙起源于一次大爆炸,也就是说,人们现在所居住的宇宙有一个起点,而没有终点。但对于任何有限的系统来说,都是既有起点,又有终点,即“任何产生出来的东西,都必然会消亡”。人们将这个系统从产生到消亡的时间段视为它的“生命周期”,同时把系统所涉及的空间划分为系统的生存空间和占有空间,包含系统的生存环境和它自身所占有的空间。生命周期和生存空间都是每个系统所特有的,可以称为“特征时间”和“特征空间”。不过有些系统,如实物系统,系统的个体生命周期和特征时间比较明显和明确,而有些系统或系统的群体,如生物种群、抽象系统和概念系统就比较模糊。在系统的“一生”(生命周期)中,任何系统的个体演化都可分为创生、发展和消亡三个阶段,即人们所称的系统演化的三步曲。而对于群体和整个宇宙来说,其阶段性就需要另行划分了。

下面研究系统个体的创生、发展、消亡的规律,然后讨论群体

演化和宇宙发展的相关问题。

7.3.1 创生的条件

前面研究了系统演化的一般条件,这些条件在系统演化的每个阶段都需要得到满足。系统创生阶段当然不能例外,但是,系统创生还需要有它特殊的条件。了解了这些条件,就可以或者创造它,促进对人们有利系统的产生;或者避免它,以防止对人们不利事物的发生。系统创生需要以下条件。

(1) 旧结构失稳:从一定意义上看,系统创生就是建立一个新的结构,这种新结构是从旧结构中产生出来的。俗话说“旧的不去,新的不来”或者“破旧才能立新”,这对于资源有限、生存空间有限的情况更是如此。要使旧结构或者系统创生前的状态失稳,可以采用外部干预,也可以采用内部突变的方法,但效果最好的是内外结合,既引进外部的变革因素,又培养内部的“革命”、“改革”和不稳定因素。只有先把旧世界搞乱,旧秩序瓦解了,新世界和新秩序才能获得生存空间与发展余地。

下面是两个形象的比喻:一个是推倒一样东西,必需推到一定程度才能使它失稳;一个是小球只有被推过了“势垒”才能进入新的状态。

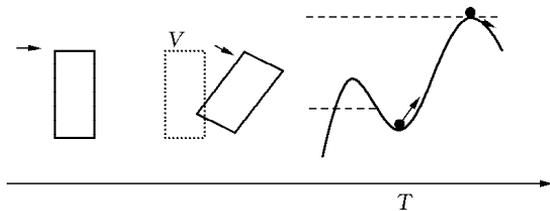


图 7-2

对系统整体性突现来说,前提也是原状态的失稳,这只能发生在远离平衡的情况下,其实质就是元素间出现非线性相干。这一观点在普里高津的理论中有很好的说明。尽管新系统或新有序结构时时刻刻都在出现,但由于存在前面讲的热力学第二定律,人们长期以来都无法从理论上加以解释。从 20 世纪初开始,普里高津及其学派花了几十年的时间来研究这个问题,希望找到产生新结

构的可能性。1954年,他们提出了著名的最小熵产生原理:系统趋于平衡态时“熵产生”趋向于零(图7-3)。

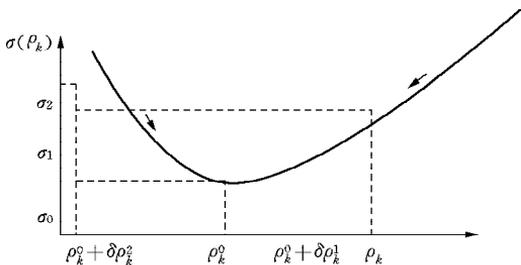


图7-3 最小熵产生原理

从图7-3中可以看出,最小熵产生原理表明,在近平衡区内参考态是渐近稳定的。从表面看,这一原理对寻找新结构或有序态产生的人来说是令人失望的,因为,原状态的稳定意味着新有序结构不可能产生。但是,普里高津的高明之处就在于他从反面得出了严格的极为有用的结论:新有序结构必须到远离平衡态的区域中去寻找。果然,他们很快发现在远离平衡态的区域内旧结构可能失稳,新结构可能产生。据此,他们提出了一个对系统演化理论十分重要的命题“非平衡是有序之源”。

当然,对于许多复杂系统的创生,特别是社会经济和思维中新系统的创生,新旧结构往往难以明确区分,新与旧的因素混在一起,有时甚至出现暂时的“和平共处”,这时就不能简单地先破后立,而应注意培养新的因素,等待时机,求得新系统的创立和发展。

(2) 新需求产生:一个新系统的创生对它所处的环境而言意味着加入一种新的因素,甚至改变原来的结构。那么,这种改变对环境来讲是否必要,是否会带来新的进步或者损害,一般只要当环境产生了新的需求时,新系统才可能“应运而生”。当然,就像在市场上一样,新需求可以是非常直观地呈现在人们面前,也可能是某种潜在的需求,需要人们去发现,以至“人为地”制造。

(3) 基本素材的具备:任何系统都不可以凭空产生,创立一个

新系统至少要将新系统所需的基本素材准备齐全后才有可能。从构成系统的基本成分来看,核心元素(起领导、控制作用)、基础元素(支持和承担基本工作)、动力元素(为系统的运转提供动力和能源)、边界元素(与外部环境进行物质、能量、信息交流的关口和纽带)、自复制元素、内部传输元素等是必不可少的。这里并不要求基本元素相互独立,而只要求确实有元素来承担这些功能。但是,应该看到,在系统创生的时期,构成系统的基本要素往往并不是现成就有的,而是在创生过程中逐渐分化出来,逐渐形成的。资源齐备的含义就是要准备好构成它们的材料。

从组织的能源来看,系统在创生时的结合能总是要大于离散的能量,也就是说,在系统创生的初级阶段,汇聚的趋势和力量一定要大于分散的力量。

从组织指令的角度看,系统创生的组织指令,在内部表现为既要集中领导,统一调控,又要有能“团结大多数”的协议、制度、规则、法令等,在外部要有适合创生的法令、法规,至少不能有系统创生的“禁令”。如要创立一个企业,就要具有合法的“法人”和“实体”资格,受到社会和法律的正式承认,再具体一点就是它要有一个“招牌”,有工商或政府部门的许可,有银行的账号、发票等。

(4) 联系畅通:在系统的内部和外部,既要有物质、能量的运输线路或网络,又要有信息的传输线路,其中特别重要的是信息反馈的通路。因为只有有了这些实际的联系线路,才能真正实现整体的协调与同步,才能形成一个整体。所以,及时地切断联系往往是防止坏事产生的有效措施。

(5) 适当的环境与时机:任何创生都具有一定的偶然性,都存在许多机遇和干扰,如何从这些不确定的因素中发现和抓住机遇,即利用系统内部和外部的随机涨落,这也是一个重要条件。常言道:“机遇只青睐有准备的人”,只有“万事具备”了,等“东风”一来才能取胜。这说明机遇只存在于适当的环境之中,而时机只存在于发展变化之中,单靠等待是求之而不可得的。

7.3.2 整体性的涌现

(1) 系统创生的三个标志:系统创生是系统演化的起始阶段,

这个阶段的划分通常从系统“诞生”到系统具有基本的雏形。为了研究这个阶段系统演化的规律,先要给出系统创生的标志,然后才能研究过程和规律。

系统创生的标志问题看似简单,实际却容易产生许多歧义,引起长期的争论。例如,从生物学的角度和从社会学的角度来看,一个人的创生就有很大的差别,就是仅仅从生物学的角度来看问题也十分复杂,究竟是把离开母体作为一个人创生的标志,还是把卵子受精作为人体创生的标志,这涉及堕胎和谋杀罪的判定。各国的法律出入很大;一门学科的创生,一项产品的发明,一种观点的提出,究竟以什么作标志,也常令历史学家、评论家、律师感到头疼。可见,尽管和系统演化的其他阶段相比,系统的创生几乎是在某一瞬间完成的,但是它毕竟需要一定的时间,要经过若干阶段或环节才能达到“基本成形”。为了判定系统的创生,从原则上提出了三个标志:

1) 系统的边界闭合,因为只有存在一个完整的封闭的边界才可以说出现了一个对环境有着相对独立性的系统(边界的边界为零)。

2) 系统的结构完整,从分散的“部件”形成一个相对完整的整体,即出现一个“牵一发动全身”的有机整体(关联长度发散)。

3) 系统整体特性的涌现,即新系统必须有它的组成部件所不具有的新的、特殊的属性、功能、价值和形态(序参量大于零)。

在这三个标志中整体性的涌现无疑是最关键的,需要较详细的讨论。

(2) 涌现的原因:整体属性从哪里来?这是系统科学所要回答的基本问题,也是系统思想发展史上的“千古之谜”,早在柏拉图和亚里士多德那里就被明确提了出来。因为他们早就看到,系统整体属性是不能通过部分属性的简单加和来得到的,这就是亚里士多德“整体不同于部分和”的著名论断。值得指出的是,在亚里士多德的这一论断中用词是十分准确的,他没有用“大于”或“小于”的说法,而是说“不同于”,因为无论大于、小于或等于都只是一种数量上的不同,而“不同于”则主要包含了性质上的区别(在过去有

一段时间内,因为翻译上的错误而译成为“整体大于部分和”,引起了不少误解)。但是,从逻辑上讲,“不同于部分和”只是一种否定的句式,并没有对整体性从哪里来的问题作正面的回答。他的老师柏拉图却作了一个具有神秘色彩的回答,他给那个整体身上,“部分和”之外,“多出来”的新东西起了一个奇怪的名称“隐德利希”,并且认为“隐德利希”乃是生命的“灵魂”,是“活力”之所在。

类似的问题在现代系统科学的书籍中也谈得很多,人们普遍认为,整体性是在元素构成系统时“涌现”出来的。按著名的系统学家邦格的说法:“所有的自然系统至少存在一种突现性质”。他举例说:“一个人的身体中的元素组成,即碳、氮、钙、铁等,其市场价格为1美元。另一方面,我们身体中的生物分子(DNA、RNA、蛋白质等)的市场价格大约600万元。有人说,这是信息的价格;但可以说,这是涌现结构的价格”。一些学者还对涌现的特点进行了归纳,认为涌现具有不可预测性、新质特性、不变序和宏观确定性等等。许多科学家都坚信系统科学的理论研究将最终破译整体性涌现之谜。

但是,提出整体性是通过涌现而来并不等于问题的解决,因为涌现还只是一种变化的形式,就如同哲学中所讲的“质变”一样。问题的关键是为什么会发生涌现和怎样进行涌现,即涌现的微观机制是什么?不少系统科学与哲学的研究者都试图回答这个问题。比如斯文森(Swensoa, R)1989年在一篇文章中写道:“涌现是一组元素(或广义粒子)从一种杂乱无章的状态向一种协调一致的状态的自发转变”;“涌现就是自发地产生一组新的宏观约束,它们将可达的微观状态由初始集 M 降低到一个小得多的子集,从而导致一个新的,不可约简的动态时空行为层次”;“自发”意味着没有外界“做功者”而自己产生。在讨论元素间的协调问题时,已经初步涉及到这个问题。我们的基本观点是,整体性是通过系统内部的自组织来涌现的。

整体性的涌现是下列几种因素综合作用的结果:

1) 元素间的非线性相互作用,或非线性相干。这种非线性相互作用具体是通过系统内部和外部都出现了不同层次的“反馈

环”,特别是那种自耦合、自缠绕的自反馈来实现的。当系统内部的非线性相互作用达到一定的强度阈值时,就不仅使得原来分散、独立、平权的事物变成了系统整体的组成部分,导致了整体属性的出现,而且使系统具有前面提到的一系列复杂性态。

2) 系统内部各元素的有序结合。如果说非线性相互作用主要是指存在于两元素之间的话,有序结合就是存在于多个元素、不同性质的组成部分间的相互作用。一个人们熟悉的例子是磁铁内部分子电流的有序排列,磁铁对外表现出来的磁性就是分子电流产生磁性的叠加。对于社会系统来说,有序组合的含义更加丰富,比如军队、企业中各种人员的有序组合表现在他们间的分工合作,取长补短,协同动作,产生出个人所不具有的“集体力量”,包括军队的战斗力、企业的生产效率等等。阿波罗登月计划的总负责人魏伯曾经说过:“在阿波罗宇宙飞船中没有一项新的技术发明,它所用的是各种各样现成的技术,但从整体上来讲,阿波罗却是全新的”。另一个类似的例子是前苏联的米格 15 战斗机,它在飞行速度(马赫数)、爬坡能力、转弯的灵活性等方面都大大超过了米格 13 型。在一个偶然的时机落入日本和美国人手后,后者对它进行了解剖分析,发现其零件全部都是米格 13 的,只是组合不同而已。

3) 整体性来自于系统与环境、时机的有效匹配。如果说前面两个原因指的是系统内部的关系的话,这最后一个原因就是系统的外部关系。整体性对环境与时机的依赖关系是十分明显的,不与外来侵略者抗争,中华民族的团结精神何以体现;不参与市场竞争,企业的实力就难以发展,这是大家都知道的道理,所谓“时势造英雄”、“英雄造时势”其实是相辅相成的。从这个意义上讲,整体性是在特定的时机下构成系统的部件(成分,元素)与特定的环境相互作用的结果。

7.3.3 创生的过程

系统创生意味着整体性的涌现,这也是前面提到的“整体不同于部分和”这个“千年之谜”的又一提法,所以为历来的研究者所重视。但是,尽管以往人们对涌现过程谈论不少,却对涌现的外部条件与内部机制一直不太清楚,所以,这个问题成了现代系统科学以及与它密

切相关的非线性科学、复杂性科学需要攻破的第一道关口。

根据我们的研究,系统的创生需要经历以下几个环节。

(1) 分化:系统在创生之前它的部件尽管可以有不同的构造和质地,但从对未来的系统的角度来看,它们却是处在同一个水平,具有相同的“权力”的。这种均衡或均势的状态从物理学的观点看也是无序的、平衡的、对称的状态,是系统演化的起点。但这种状态不是绝对的无序与平衡,它的上一个层次和下一个层次都存在着非平衡。具体地说,在它(指未来的系统)的层次之上有作为环境的“平均场”层次,在它之下有作为微观的“精细结构”层次。当这些层次的不平衡达到一定程度,即达到某个“临界点”时,就可能出现“对称性破缺”,打破原来的均衡状态,从而出现分化。这种情况从表面来看是与热力学第二定律相矛盾的,但是,当谈到系统之上的层次时,实际上已经超出了热力学第二定律的适应范围,不是封闭系统而是开放系统了。原来分散的部件在特定的条件下自行分化的情况在自然界与社会中都是极普遍的。例如,在外界压力、温度、磁场、电场的作用下,系统内部出现临界慢化,一些变量变为慢变量,另一些则保持不变,这就是一种分化;在敌人强大的压力下,有些人会变质,而另一些人则坚强不屈,这也是一种分化等。

(2) 类聚:分化后的部件在特定的条件下可以进一步出现“人群分,物以类聚”的过程,这个过程显然是不同部件之间相互竞争和相互吸引的结果。不过在不同的情况下具体的吸引力的内容各不相同。经过类聚会会出现许多不同的小集团或小“元胞”,它们的存在为更为激烈的竞争和吸引提供了基础,创造了条件。如果说分化的过程是以排斥为主的话,那么,类聚与成团的过程就是以吸引为主的。中国共产党建党之前一个时期的情况就是如此,当时出现了许多共产主义小组,也出现了不少其他的政治派别和组织,这就是一个类聚成团过程。不过这时出现的小集团还只是构成系统的部件,它们还需要进一步组装才能成为一个有机的整体。

(3) 成核:分化后的元素要结合成一个整体,往往需要一个核心,起着吸引的中心、支持的基础和建构的模板等三重作用。成核的例子很多,一个典型的例子是露珠或水滴的形成过程。当水蒸

气的密度达到或超过“露点”时,如果没有凝聚核,它们仍然不能凝结,只有当饱和水蒸气中被加入了杂质的颗粒(灰尘或某些电离产生的离子),才能以它为基础凝结成露珠和雨滴。社会集团的形成过程也是如此。一个政党、一个企业或民间团体的出现,总是需要先有一个核心人员和核心组织,才能吸引、团结、领导其他的成员。在系统形成过程中是否存在这样的核心往往是系统形成的关键。这种核心的来源:一是由外部进入,如入侵的“杂质”或被植入的“菌种”;二是由内部成员突变而来。

(4) 归并:由类聚产生的元胞或小集团在没有被组织成一个有机的整体之前是分散的,并且只能暂时存在,只有当它们被串通归并成一个整体后才能较为长期地存在下去。元胞归并的过程不仅是一个元胞间相互串通的过程,而且是元胞进一步改组的过程,这种过程往往发生在一个新的临界点上(前一个临界点上出现对称性破缺),它可以借助于一个量——关联长度来描述,关联长度表示元胞之间相互作用(主要是指非线性相干的距离)。在系统形成之前,即元胞归并之前,关联长度仅仅达到元胞的附近,因而称为短程相关。只有当系统与外界的相互作用达到临界点时,元胞间的关联长度才会迅速扩大,波及到整个系统的范围,从而把系统中所有的元胞都关联起来,叫作长程相关。由于系统的尺度总是远远大于元胞的尺度,因此可以把元胞归并的过程看作是相关长度“发散”的过程。对于不同的系统,元胞归并的形式可能很不相同,但是各种系统在临界点上相关长度的发散却有着相似的规律。

(5) 边界闭合:边界既是系统与外界隔离,又是系统与外界的纽带。一个完整的系统必须有完整的边界,因此,系统边界的闭合总被作为系统创生的标志。但是,边界的形成与闭合不是一蹴而就的,它需要一个过程。边界发端于差异,而差异又是不平衡或不对称的表现,这种差异是在系统形成之初产生的。但只有差异还不一定有界线,同类差异相联才能构成界线,把差异联成一线也是个类聚的过程。有了界线也不等于边界闭合,因为闭合需要一定条件,系统只有在边界闭合后才能成为一个和外界完全隔开、在时间和空间上都有限的整体。

归纳起来,系统创生大体经历了从分散、独立、平权到线性相干,到非线性相干、分化、成团、竞争、成核、役使、同步、协同以及边界闭合等若干阶段或环节。

7.4 系统的发展

刚刚创生的系统往往是极其弱小和不完备的,它必然进入一个发展进化的阶段。这个阶段的演化可以形象地用一条S形生长曲线来刻画,也可以用一个演化方程来描述,不过,这个方程的求解通常是十分困难的。这里仅定性地讨论系统发展的几个基本环节及几种基本形式。

7.4.1 发展的方向

研究系统的演化强调了运动变化的不可逆性,但并没有具体规定运动变化是朝哪个方向作不可逆变化,就是说,一个系统从某状态出发,原则上可以朝各个不同方向演化;而且,在不同的方向、不同的路线上演化可以有不同的规律与特征。实际上,在研究具体问题时,针对不同的系统总是需要事先选定一个方向和路线进行考察,只有当演化的方向和路线选定之后,人们才能谈论系统的进化与退化。因此,进化以及与进化相反的退化总是相对于特定的方向和路线而言的,否则也就无进化退化可言。这样一来,判定一个系统的发展方向或演化趋势在理论和实践上都有着重大的意义。

(1) 区分三种情况:判定一个系统演化的方向,就是搞清系统朝哪个方向发展,这个问题无论在理论上还是在实际中,都具有十分重大的意义。具体判定一个系统的演化方向时要区分以下情况:

1) 要区分系统的大量可能演化方向和实际的唯一演化方向。显然,一个复杂系统通常可以有許多可能的演化方向,就好比从一个平面或空间上的点出发可以引无数条直线一样。系统究竟朝哪个方向发展,要在这无数条线中进行选择,因此,系统每演化一步都是一个从可能向现实收缩的过程,也是一个对多种可能演化方向进行选择的过程。

2) 要区分系统演化的主要方面和次要方面。演化的方向是对

某个确定的方面而言的,复杂系统有着许多不同的方面,这当中有代表事物主流的主要方面,也有代表支流的次要方面。例如,人类个体的演化,可以从他的身高、体重、体能、智能等不同方面来量度,而人类社会的演化则可以从社会的政治、经济、文化、生产力等不同的方面来量度。在这么多的方面中究竟哪些方面更能反映系统演化的本质?这是需要认真加以研究的。对于人类个体的发展又可以从各方面来考察,仅就能力的发展而言,又可以分为体力和智力的发展。如果选择人的体力作为人类发展历史的尺度,则会发现,在漫长的文明史中,人的体力实际上没有大幅度的提高,相反有时还有所下降;但若选择人的智力作为演化的标度,就会发现,随着历史的进步,人的智能,即获得信息和处理信息的能力是在不断地提高。智能水平以及智能产品,或产品的智能成分,都在大幅度地提高和加速地发展,以致成了当代社会的一个重要特征。可见,选择人的智能作为刻画人类演化的标度比较能反映人类历史的本质。

3) 要区分进化还是退化。一个系统是前进了还是倒退了,是沿正确的方向前进还是沿错误的方向发展,这不仅关系到系统自身的前途,而且关系到周围的环境。任何实际的演化过程,从事后来看都只可能取一条唯一路线,选取哪一条路线作为系统的实际演化路线,则取决于它的内部结构和外部环境,系统演化的方向是相对于这条实际的演化路线而言的。可见,进化与退化问题实际上就是系统在特定路线上的演化方向问题。因此,只有事先选定演化的路径后才谈得上演化的进与退。

(2) 发展方向的判定:世上的事物千差万别,研究者的目的和考察的角度也各不相同,所以很难找出一个既能全面地反映系统演化的本质,又符合研究者的特殊需求,对所有的系统都普遍适用的判据体系。例如,一个热力学系统,可以把趋向平衡看作是演化的正方向,即进化的方向,也可以相反,把它称为退化的方向,但对于一种病菌或害虫,它自身的进化,如抗药性的增强,对人来说意味着生存环境的退化,而在许多生物群体中,个体的消亡对它自己来说也许是件坏事(有时也是好事),对群体来说则可能是件好事。

所以判定系统演化的方向要看对谁而言,是对系统自身而言还是对环境或人类而言,不能一概而论。对此,我们认为,可以按研究对象与人的关系将进化的判据分为两类。

1) 自然判据:自然判据主要用于那些人类活动对其演化的影响较小的领域,或者与人类活动关系不大的问题。如无生命界中天体的运动、地壳的变迁、原子的结构变化及物理化学系统的演化。生命界的许多领域以至人类社会的不少方面,只要不将它们与人的目的和利益联系起来,也可以运用自然判据。对于这样一类系统,它的演化可以从系统内部的结构、要素、层次等的变化来看,也可以从它与外部其他系统的关系中看。这些系统演化的方向正是由上述两个方面所决定的。

2) 效能判据:效能判据的对象主要是那些与人的目的性关系密切的系统,其中人造系统、人为事物是题中应有之义,因为人们制造它,改造它就是为了某种目的,所以它满足人的目的的程度就是一个十分自然的判据和标度。其实,除了这些人造的和人为的事物之外,即使对那些人们还一时难以左右的東西,也常常运用这种判据。例如,人们对那些好的天气、对阳光、雨露等就有着特殊的感情,原因就在于它们对人们所需要的作物生长有利。在这种意义上,处于一定自然与社会环境中的人就成了唯一的参照系,正如古希腊的智者普罗泰戈拉所说的那样,“人是万物的尺度,是存在的事物的存在的尺度,也是不存在的事物的不存在的尺度”。根据这个尺度,人们总是把事物效能的提高看成是系统的进化,而把相反的方向认为是退化或蜕化。用这种判据来判定人造系统,只要人肯在它身上下功夫,总是有一个从低效、单能向高效、多能发展的演化方向,而对其他的系统未必能满足人们的“一厢情愿”,因为这里还有一个人与自然协调发展的问题。

7.4.2 发展的阶段

从总体上看,事物总是呈波浪式前进,螺旋式发展的。但从事物整体的角度看,系统发展还只是系统整个生命周期的中间阶段,而且在这个阶段中又可以划分为起步、线性增长、非线性增长(包括自我更新、自我复制)等若干个小的阶段。可以用一个大家熟悉

的 S 形曲线来加以表示,显然,如图 7-4 这种 S 形曲线是包含了整个生命周期的钟形曲线的前半部分。

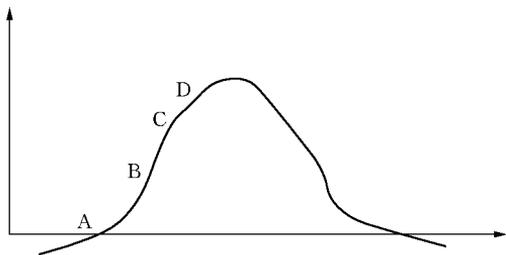


图 7-4 生长曲线

(1) “起步”阶段(图中的 AB 段):系统的发展有一个缓慢而艰难的起步阶段。在起步阶段系统必须调整其内部的结构和外部的关系,这时“投入”多而收益少,是系统快速发展的准备阶段。起步时的缓慢仅仅是从速度的角度来看的,这是一种表面现象,其实它的加速度是很快的,因为这里正在发生许多质的飞跃,就像运动员在起跑时那样,起跑时的动作对后面的速度具有关键作用。

(2) 线性生长阶段(图中的 BC 段):系统发展通常有两种形式,一种是线性生长,一种是非线性发展,两者的区别在于发展中是否实现部分质变。先讨论系统的线性生长。

演化起步之后会有一个线性发展阶段,线性生长是在保持系统的结构与功能基本不变的前提下作量的变化或时空上的扩张。这个阶段的特点是发展速度快而结构变化少。系统只有在经历了这个阶段后才能“初具规模”,使系统真正进入鼎盛时期。例如,工厂在保持产品质量和品种不变的前提下扩大生产,增加产量。为适应这种增长的需要,往往同时要增加职工人数,增加厂房等设施。生物体在一段时间内增加体重,天体在演化的某个阶段体积和重量的扩大等,都是这种生长的典型例子。

线性生长只发生量变而不发生质变,即在保持系统“特征(本征)信息”不变的前提下进行线性扩展。系统的这种特征信息是由系统的“特征量”如特征时间、特征尺度、特征形态等来决定的。在

生物学中生物体的基本信息就是它的“遗传信息”。

线性生长实际上只是系统发展中某一个阶段的特征,线性生长发展下去必然会引起质的变化,这就使系统的发展进入一个新的阶段,把它称为非线性发展阶段。和线性生长相比,非线性发展中包含多次部分质变,这些质变可以以突变的方式出现,也可以以渐变的方式出现。

(3) 自我更新阶段(图中的 BC 和 CD 段):系统的自我更新阶段属于非线性发展阶段,它是系统发展中最重要的一环。严格地说,自我更新在图中的 BC 段中已经出现。否则,仅靠外界的推动和物质补充是不能维持 BC 段快速发展的。但是,在经历了起步和线性发展阶段之后,系统只是在时间和空间上有了较大的范围,还只是局部的更新,并没有对自己整个内部结构进行更新,也没有对系统与环境的关系进行调整,因此,会出现一系列新的问题和矛盾。从对外关系来看,系统的增大和消耗的增加势必会导致争夺生存与发展空间矛盾的激化。现在地球上由于人口增加而带来的资源紧缺就是生存空间紧张的一个表现。同时,在系统与外界的相互作用中,还不可避免地造成部分的损失,如果不及时地加以补充和修复,就会危及系统的生存和进一步发展,这就需要对系统进行部分的更新。从系统内部来看,发展了的系统同样会引起内部各子系统间的矛盾和斗争,如子系统的发展带来资源分配上的矛盾,集中控制与各部分灵活发展之间的矛盾,等等,因而也需要重新调整内部关系或者对各个部件进行重新组合。

上一节中讨论了系统的适应性自稳定和适应性自重组,在系统的自我更新阶段中这两种形式是非常重要的。不过,对于自重组还会出现新的形式,那就是当外部环境还没发生重大的新的变化时,某些特别高级的复杂系统为了求得更好的生存环境和更大的发展余地所进行的探索,这就是前面提到的探索性自组织。和适应性自重组相比,它是一种更为主动、更富预见性的自组活动。探索性自组织的过程大体可以分为试错、记忆、学习、预测、决策和预调节等六个阶段。

通过这些适应性自组和探索性自组织之后,系统就会发展到一

个全新的阶段,在这个阶段中,系统不仅时空范围大了,而且更主要的是系统内部结构更加完整协调,系统的外在属性更加强大完善,表现出系统独自的特色,这时的系统就达到了个体发展的顶点。

(4) 自我复制阶段(图中的 CD 段):当系统的结构和属性发展到相当的程度以后,就有必要将这时系统特有的信息保持下来并留到下一代中去。这样做对系统的种群来说是十分重要的,因为它可以节约大量的“进化成本”,在群体发展和生存竞争中处于有利地位。

对一个复杂系统来说,保存信息的一个主要形式就是进行自复制。这种自复制现象在生命系统和社会系统中是十分普遍的。生命体的繁殖、社会对人的教育、计算机的文件拷贝等都是自复制的典型。N. 维纳对自复制曾有过经典论述:“一个动物进行繁殖,就是它能够产生出另一些虽然不是和它完全相同,至少是近似相同的动物。所谓近似相同就是在时间的进程中不是不能发生任何改变。如果这种改变本身是能遗传的,我们就有了供自然选择发生作用的原始材料”。照维纳的观点,系统自复制的目的在于在自然选择中群体的进化提供原始的材料。的确如此,如果系统的个体不能通过繁殖(自复制)来将自己的信息遗传给它的下一代的话,那么,个体在与环境的相互作用中所获得的“经验和教训”就会因为个体的消亡而一起消失,新的个体又必须从头做起,这是极不经济的。而对于群体来说,没有个体的自复制,切断了两代个体之间的联系,群体对于环境的适应和探索只能在同一个水平上不断地重复,这样的群体是永远不能发展进化的。关于自复制的意义,不仅可以从生物的繁殖中看出来,也可以从教育的社会功能中看出来。一个发达的社会,必需依赖于发达的教育,这一点是人所共知的。

自复制的过程包含两个看起来相互矛盾的方面:一方面,要求复制件和原版尽可能做到完全相同,以保证遗传信息不致在复制过程中丢失;另一方面,每一次复制都不可能保证复制件和原件一模一样,因此,信息的失真和丢失是不可避免的,这在一定意义上会给自复制造成错误和损失。但是,复制中出现的错误对群体的

变化来说也并非都是坏事,因为自复制的错误将产生许多新的变种,这些新变种对于群体的进化来说是中性的,不管它是好是坏,都增大了自然选择的余地。

7.4.3 发展的条件

系统演化的特殊条件有:

(1) 系统的发展同样是分阶段的,在演化的不同阶段,要求的条件不同,而条件的不同,演化的情况也不同。

(2) 系统的发展是指在已经存在的系统雏形的基础上系统的进一步发展。这里又可分两种情况:一种是系统的平凡发展,如系统体积与尺度的扩展,系统形态的部分变化等;另一种是系统的局部质变或阶段的更迭,如从扩展转为停顿。

(3) 在系统的平稳发展阶段,系统发展的基本条件是平衡和稳定,系统要发展就要适应周围的环境,要适应环境就要随时获取关于环境和系统本身的信息,以便根据这些来调整自己的行为 and 结构。

(4) 在系统的部分质变阶段,系统则要求有相应的激励和触发机制,它对环境和自身的需求又各不相同。

7.4.4 发展的动力

发展的动力就是发展的原因,原因可分为内因和外因,从因果关系中寻找系统发展的动力学根源有一定的道理。但系统发展原因往往十分复杂,并非哪个因素单独作用的结果,因而总是需要综合考虑各种因素的作用和影响。同时,不同层次的系统决定演化方向和速度的主要因素各有不同,我们的目的是找出推动系统发展的共同原因和基本因素。

很早以来,人们就在思考着事物发展运动的原因。亚里士多德把它归结为著名的“四因说”,即质料因、动力因、形式因和目的因。虽然现在看来这“四因说”有着过多猜测的成分,但用现代的语言来说却仍然很有道理。质料因讲的是事物因其自身的质料而运动,实际上就是来自系统内部结构的原因,指的是推动事物发展的内部机制。动力因没有区分是内部的动力还是外部的动力,但总是指受一定的作用而发生的运动。形式因比较抽象,从哲学上“形式即本质”的命题出发,可以理解为形式乃时空态势和对外关

系的总和,就像物体的惯性一样是系统之外所有事物对系统的共同作用。最后是目的因,我们不主张把目的的概念无条件地推广到一切事物,特别是非生命系统,但认为在生命系统范围内的确存在目的,或“合目的”的行为。例如,通常认为推动一个生命系统运动和演化的“动因”不外乎以下几个方面:①为保持“生命”而去适应环境;②为扩大“生存空间”而相互竞争;③因受某些共同的作用或在某些共同的需求驱使作用下而聚集在一起,力图通过集体的力量来获得更大的个体收益;④在特定环境与条件下系统的自行“展开”,或自我实现,以求到达完美和极限的状态(即系统功能的保持与扩展)。

尽管在无生命界我们不主张使用目的的概念,但上述“动因”在无生命界也有一些“痕迹”或“根源”。例如,保持生命从一定意义上讲可以认为是系统稳定性的延伸,而扩大生存空间与“自我实现”可以认为是系统演化趋极性的表现。所以,我们认为,在研究系统演化的动力或演化的机制时实际上存在两种语言:一种是动力学语言,注重的是系统在什么原因或“力”的推动下运动发展;另一种是目的论语言,强调的是为了什么而运动发展。这两种语言在一定条件下可以转换,但也存在习惯和使用方便的问题。

下面分别对这些方面进行讨论。为了研究的方便,仍然可以将演化的动力或原因分为外部的和内部的来加以研究。

(1) 外部动力和原因:系统在外部因素的作用下可能发生各种运动变化,但严格地说,外力只能改变系统的位置和形式,而不能直接影响系统的结构和属性,即外力只能使系统运动而不能使系统演化。但是,外因却可以通过内因来对系统的演化发生作用,因而外部因素是系统演化的重要条件。

在研究外部动力时先要搞清下面几个问题:

1) 外力的方向:研究哪些外力把系统引向哪些方向,而它们共同作用的结果又是把系统指向何方。

2) 外力的来源:搞清外力从哪里来,它的根源是什么。

3) 外力的大小:测度外力的大小。

4) 外力的特点:分析外力的各种特点。

外力因素实际上就是环境因素,一个系统要演化或实际发生演化都是当它要去适应环境或扩大生存空间时才会发生。从一定意义上讲,系统演化的过程是一个不断适应环境和改造环境的过程。而且,环境总是在发生变化,所以,适应总是暂时的,而不适应则是永恒的,系统演化的过程就在适应、不适应、再适应中交替发展。同时,即使环境一时没有变化,或者环境变化较小,系统自己也会发生变化。变化了的系统如何适应既存的环境,这需要系统调节自己的结构和行为方式。如果环境是相对稳定的,系统也是相对稳定的,但由于系统的运动而来到一个新的环境,系统同样存在一个适应新环境的问题,所以系统如何适应环境的问题,是一个既普遍而又重要的问题。

对于适应的概念,其实人们在生物学领域早有研究。生物学中一般把适应定义为“生物在生存斗争中适合环境条件而形成一定性状的现象。适应既可以表现为一个过程,又可以是一种结果”。例如,当外界温度升高时,生物体通过“出汗”、扩大气孔等办法来增加水分的蒸发,带走大量的热量,以达到保持原来体温的目的。当天气变冷时,生物体通过“落叶”、长出新的羽毛等方法来降低热量散发,以达到保持体温的目的。控制论的创始人之一艾什比则把适应过程与生命体“维持或保持生命”的过程联系起来。他认为,系统(生命体)的状态 M 可以用基本变量 $E = (E_1, E_2, \dots, E_N)$ 来表示,在生物体所有可能的状态中活着的那些状态只占其中的一部分,这些活着的状态 M_1, M_2, \dots, M_K 对应了基本变量的某个容许的区域,适应环境就是生命体把自己保持在这个容许的区域之内。从上面这些生物学中关于适应的定义中可以看出,适应性是对那些“正在生存着”的生命体而言的,因为生命体有一个最起码的目的,那就是要“保持生存”或维持生命,而适应正是在生命体与外部环境的关系发生变化时,为保持自己的“生存状态”而对自己的结构、形态、行为模式等所作的相应调整。上述对于生命体的适应概念是不是能进一步推广到一般的系统呢?仔细分析一下,发现其中包含以下几层含义。

首先,生存状态。生存状态对于生命体来说无疑是最为重要

的,也是最为基本的,所以,如何保持它就成了生命体的最起码目的。对于一般的系统来说,这个“生存”状态可以理解为系统在结构上保持整体结构完整,而不至于解体;在性能上保持系统特有的属性,而不至失去自己特殊的本质属性的状态,这种状态实际上是作为一个有机整体的系统所必须具有的。如果用状态空间的方法来描述系统的状态的话,它应该指的是状态空间中某个特定的区域。例如,当人们用体温、血压、血糖浓度、反应能力等作为状态参量来构成一个状态空间的话,那么,某个生命体的生存状态就只是它作为普通的物质的所有状态中的一个极小部分(因为后者范围极广,还可以包含那些不具生命属性的、分离的状态),正因为如此,才需要系统对自己的结构和行为进行调整。但是,上面讲的生存状态的区域对于一个生命体来说应该是一个极限(极大)的范围,所以说它只是一个起码的目的。实际上,生命体的生存状态内部还要划分许多层次或小的区域,其中有比较艰苦的生存,也有比较舒适的生存,还有最为理想的生存的状态,它们的范围一个包着一个,一个比一个小。系统或生命体的适应活动正是在这样一个划分层次的状态空间中进行的。

其次,生存状态的保持。一个生存状态,不管它是好是坏,如果需要保持,必须满足以下必要条件:

1) 系统要对自己的结构和行为方式能够进行变动或调整,也就是说,要有可以变动的适当范围和进行变动的能力,否则就无从达到适应的要求。

2) 系统要能及时地“感知”外界的变化,或系统与环境关系的相对变化。

3) 系统要对这种变化引起的结果做出对自己是有利还是不利的判断,也就是说系统要具有接受、获取、处理信息的能力,以及做出评价的标准和方法。

4) 系统的环境或系统与外界的关系要足够的“宽松”,即至少要给系统以适应的可能,而不能过于“严峻”,使得任何适应活动都失去意义。

当然,在通常情况下,以上条件都是能够得到满足的,这才引

出如何适应的问题。

最后是保持生存的方式和途径。保持不同的生存方式所付出的代价是各不相同的。系统总是希望付出最少的代价得到最优越的生存,所以系统在追求最优生存的同时,对效率的追求也是一种原始的动力。

(2) 内部动力和原因:从哲学的角度来说,内因是事物变化发展的依据,外因通过内因起作用。即适当的外部动力是系统演化的必要但非充分的条件,正如毛泽东形象而生动的说法“适当的温度能使鸡蛋孵出小鸡,却不能使石头变为鸡子”。从科学上来讲,人们感兴趣的推动系统发展演化的动力学机制,也就是引起系统演化的各种内部因素和关系。这里要搞清楚的是内因的种类和关系。内因的种类,即有哪些内部因素会引起系统的演化。

为了回答这个问题,需要对大量系统演化的实例进行分析,其中最具代表性也是在科学上最引人注目的是所谓“四大起源与演化”的问题:天体、地球、生命、意识的起源与演化,从中发现系统演化的基本原因:一是系统内部的非平衡;二是系统内部的秩序。

第一个原因通常被称为“非平衡是有序之源”,这一观点是耗散结构理论的创始人普里高津首先提出来的。按我们的理解,非平衡即是系统内部的整体差异,这里强调整体意义上的差异,而不是局部或个别元素、要素间的差异,因为后者总是不同程度地存在着。而内部的整体差异则有可能推动系统结构的整体变化。如社会内部的政治经济地位的差异是阶级划分的基础,当达到一定程度时就可能导致社会变革。

第二个原因通常看作制度,包括体制、法规、公约、行为规范等控制和约束系统内部各种因素之间关系的東西。这里涉及一个更为重要的问题,就是内部机制,将在下面专门讨论。

为了阐明内部动力的来源,提出如下“逻辑”思路:

1) 差异:“有差异才有次序”(或秩序)。但形成秩序的条件是差异相对稳定。

2) 次序:“有秩序才有势场”。“势场”一词是从物理学中借来的,秩序与势场的区别在于前者是相对于某个方向或路线的,而势

场则是全局性的。从某种意义上来讲,秩序表征了差异,而势场是全局相对稳定的秩序。

3) 势场:“有势场才有动力”。动力的大小总是依赖势场的强度。如果用梯度来量度势场的强度的话,动力就是势场的函数。

4) 动力:“有动力才有流动”。这是很显然的,但有了动力和势场,还只是具有了流动的可能性,要变成实际的流动还需要一个重要的条件,那就是流动的通道或路线。

5) 流动:“有流动才有演化”。演化就是向某个方向的不可逆运动变化和发展。

上面几条是原则性的看法,具体的研究和定量的描述可以运用数学中的场论和势理论,每一项都需要结合系统的具体情况进行分析。这里就不多说了。

7.5 系统的消亡

一个有限的系统,它的时间和空间的范围都是有限的,这就意味着任何系统的个体都有生必有灭,有发展必有消亡,系统消亡是系统演化过程中的一个必不可少的阶段。而且,系统的消亡并不一定发生在系统演化的后期,而是发生在系统演化的整个过程之中。

7.5.1 消亡过程

系统消亡的过程和系统创生的过程一样,也有一个逐步发展、不断加速的过程。这个过程大体可以分为系统的衰老阶段和系统的灭亡阶段。

(1) 衰老:衰老对于任何有限的系统个体来说都是不可避免的,如何认识和接受系统衰老这一现实和如何改变这一进程,是目前面临的两大难题。相比之下前者较为容易,因为它与其说是一个学术问题,不如说是个感情问题。古今中外许多有见识的人都能够正确地论述。公元前4世纪希腊哲学家伊壁鸠鲁(Epicurus)就曾经指出,衰亡对个体来说也许是个悲剧,但对社会和人类则未必不是好事。后来 Weismann 和 Waddington 几乎全面继承了这一论点。他在1882年写道:“死亡是由于衰老的组织不再复原……衰老的个体对物种非但无益,反而有害,这是由于他们代替

了健康个体的缘故”。现代的许多人也持同样观点。如生物学家卡卡特说：“现已证明，衰老和死亡是自然界的必然规律，是合乎个体和物种需要的”。当代发育和理论生理学家 C. H. Waddington 指出，衰老和死亡是必要的，“以便使新一代有成熟的空间。在那里，为适应新的环境，将进行新的基因组合”，所以，衰老和死亡是保证物种不至于“充满其赖以生存的生态环境”的一种途径。

既然衰亡不可避免，事情就转向了第二个方面——能否改变衰亡的进程？例如，延缓衰老，这正是许多科学家努力探索的。但是，这个问题远比人们想像的复杂，也许它本身就是由许多十分困难的问题组合在一起。正如美国加州大学生物学教授 Michael R. Rose 所说：“从理论上讲，当然能延缓人类衰老，然而，没有任何单一的灵丹妙药能完成此项使命。毫无疑问，未来的抗衰老疗法将不得不及时对付许多毁灭性的生化过程。”（《科学美国人》2000，4）。

找到延缓衰老方法的基础在于找出衰老的机制，这是个极其复杂的问题，尽管在分子生物学高度发达的今天，要回答这个问题也为时尚早。至于把衰老的进程完全归结为基因，那更是一种现代宿命论。从系统的观点看，衰老有多方面的原因，其中最主要的是系统在个体发展中为提高效率而产生的“特化”使系统不断丧失对环境的灵活性，所以衰老中的系统往往由于不能适应变化中的环境和不能满足环境（包括其他系统）对自己的需求而变成了多余的东西，这些多余的东西在有限的生存空间中是必须加以排除的。在系统的发展过程中其许多方面取决于合成代谢和分解代谢、生长和衰变的平衡。在青春期，合成代谢占优势，在成熟期，两种代谢平衡，之后则分解代谢占优势，导致衰老和衰弱。在系统的衰老过程中也伴随了自我更新能力的下降，它表现为人们常说的免疫能力的下降和免疫系统的崩溃，其结果是使得系统的结构越来越失去稳定，最终将使系统由于受到微小的扰动而彻底崩溃。

衰老过程是分阶段的，不同的阶段之内在一定程度上是可以逆转的。例如，通过改变生活习惯和加强体育锻炼，可以在很大程度上改变老年人的生活质量，以至焕发青春。但阶段与阶段之间则是不可逆的。以老年人为例，古希腊医学家希波克拉底（Hip-

pocrates)把老年期分为五个阶段,70岁前为老年青春期(spring-time of old age),70~75岁为老当益壮期(green old age),75~80岁为真正老年期(real old age),80~90岁为迟暮期(ultimate old age),90岁以上为天年期(caducity)。随着科学技术的发展,人类的平均寿命会越来越长,人生阶段的划分也将随之改变。

(2) 消亡:人们对系统的消亡、尤其是生命的死亡,从来就有很多研究和议论。英国的 N. D. 卡特在《发育,生长,衰老》一书中就说:“许多人认为衰老仅仅是老年人的事情。实际上,各种动物从胚胎到死亡的整个过程中都充满着变化。”只不过“成熟后,死亡的统计值随着增龄而相应增加”。

系统消亡往往成为系统个体生命的终点,它发生在:

1) 当一个系统已竭尽它的所有调节能力仍无法保持它的一个或多个关键变量处在稳定范围之内时。

2) 当它由于本身的信息传输和反馈停止,或充满噪声,或传递太慢,以致无用而失去控制时。

3) 当它无法使其子系统和组元保持相互调节并使整个子系统与环境保持稳态时,该系统便无法继续生存下去。

系统消亡意味着系统生命周期的结束,对应于系统的创生它也有许多严格的标志。从理论上讲,包括主要特征的丧失,整体结构的解体,以及闭合边界的崩溃等。从实践上讲,确定系统消亡的标志也是十分重要的。例如,在法律上关于如何判定一个人生命的结束就是复杂问题。通常有呼吸停止,心脏停止跳动,脑死亡等。从严格的意义上讲,消亡也有个过程,但和衰老的过程相比它是极其短暂的,不可逆的。

对于群体来说,消亡的意义与个体几乎完全不同,群体的消亡往往是新质代替旧质、新系统代替旧系统,这一过程将在后面讨论。

7.5.2 趋极过程

自然与社会的大量事实表明,系统演化到最后总是趋向某个由它自身与环境共同决定的终极状态,该状态往往对应了一个“自然极值”。

如果说关于趋极性的研究在哲学领域是围绕目的论而展开的话,那么在科学领域则与数学上的极值问题、变分法和物理中最小作用量原理、哈密顿原理有着不解之缘。

数学上的极值问题最早是与一个古老的故事联系在一起的。戴多是古希腊一位残暴的女王。当她的政权被推翻后,她和她的随从被赶到了地中海海边。她恳请追兵给她一块能用一张牛皮围成的立足之地。当她的要求被应允时,她们把一张牛皮切成细条,然后连接成一条具有定长的“皮带”。于是这里产生了一个用固定周长所能围成的最大面积有多大的问题。这就是数学史上著名的“戴多问题”。现在看来,戴多问题是一个典型的极值问题,它的答案非常简单,是一个圆或半圆。后来对这类问题的求解促使了变分法的产生。

关于变分法的起源有以下著名的例子:一是据说是由牛顿提出来的。他问道:要让一个在水中作常速运动的物体受到的阻力最小,该物体应具有什么样的旋转曲面。二是1696年由著名的贝努利数学家族的成员约翰·贝努利在《教师报》上提出来的。他问道:怎样得到一条最速降线,它是从一定点到它的非垂直下方的曲线,使质点沿此曲线下滑所用的时间最短。三是所谓“测地线”问题,即求一条连接曲面上两点的连线,使其长度最短。很显然,这些问题都是求极值问题的进一步发展,只不过这里已经不求某个具体的极值,而求一条满足极值的函数曲线。研究这些问题的求解方法,后来成了一个重要的数学分支——变分法。直到现在它仍然是数学和物理学中十分活跃的领域。

人们对于数学上极值的存在性曾有过许多专门的研究,熟悉微积分的人一定对一阶导数为零的点有着深刻的印象,因为它们正好对应了某个极值(最小或最大值)。在现实世界中这些极值有何实际意义,这个问题也许属于物理学的范畴。

物理上对趋极性的研究最早起源于17世纪法国大数学家费尔马对光传播路线的研究。1657年他提出:“光总是沿着费时最少的路线传播”。这就是著名的费尔马最小时间(光程差)原理。1661年,他据此证明光的折射率。费尔马的成果引起了数学家、物

理学家和哲学家们的极大注意。1744年,法国的莫泊丢受费尔马的启发,在《直到现在看起来还不能并存的法则的协调性》一文中提出了最小作用量原理。按照他的定义:“作用量”就是质量与速度乘积关于路径的积分,他认为,自然界中的任何改变都要使“作用量最小”。对变分法做出重大贡献的大数学家欧拉十分重视莫泊丢的工作。他认为,作用量最小和自然运动路径取极值,证明了“上帝的智慧”和自然界的和谐,由于自然界和上帝是“不作多余的事情的”,因此,它们给事物的运动规定了一条最短的极值路线。1834年,英国的天才数学家和力学家哈密顿接受了前人的启示和成果,总结出了力学的“最高原理”——哈密顿原理。它的内容是指“在任何可能的力学系统中如果给定初始状态和终极状态,那么,真实运动与其他运动的区别在于真实运动是使泛函 $J = \int (T - V) ds$ 取极小值”。哈密顿原理不仅在力学和物理学上具有重大的价值,而且大大地加深了人们对自然发展、演化的理解,因为它表明在自然界中的一切可能运动中只有真实的运动才是使作用量取极值的运动。20世纪以后,哈密顿原理继续被发展和推广。1923年,L. V. 德布罗意据此提出了物质波理论;1927~1928年,C. J. 戴维逊和 L. H. 革末用实验证实了这一理论。德布罗意的这些思想虽然几经周折,至今未能得到科学界的普遍认可,但它对人们的启示却是不可否认的。因为它从一个新的角度说明,事物运动和演化沿着取极值的路线进行,这个规律不仅适用于宏观领域,而且适用于微观领域。

如果说上面的“发现”还只是就简单系统的运动而言的话,那么,著名的热力学第二定律显然已涉及了由大量粒子所构成的复杂系统。正如人们所熟悉的那样,当一个热力学体系处在近平衡态时,它有唯一的演化方向,也就是趋向使熵值取最大值的近平衡态。而在其他的情况下,热力学和统计物理的理论则告诉人们,那里也同样存在一个趋向极值的过程,如系统的自由能取极小值等等。

从趋极性原理多次被发现的历史中不难看出:①系统演化必

然趋向一个特定的极值状态,这是系统演化的一个普遍规律;②一个普遍的客观规律迟早要被人们所发现。现在正是揭示这个原理的时候了。

7.5.3 极值状态

系统的演化既然不可避免地要趋向终极状态,那么,这个终极状态具有什么样的特征?它又有何种含义呢?人们发现,一个系统在其演化中趋向这种而不是那种极值状态总是有其特殊的原因的。关于这一点,古希腊的苏格拉底和亚里士多德早就有所猜测。他们一个说事物趋向目的状态,乃是上帝安排的最佳去所;一个说由于每样事物都有自己的理想,因此,事物运动总是力图达到这种“理想状态”。这些观点,在他们那个时代无疑属于天才的猜测,但拿到现在就很难令人满意了。不过,答案的错误并不等于问题的错误或者没有意义,从现在的材料看,极值态至少有以下几方面的特征。

(1) 极值状态由系统与环境共同决定,它对应了一个或几个自然极值:系统所要趋达的终极状态,不是由系统或环境单方面决定的,更不是由其他与之无关的事物(如上帝或救世主)事先所规定的,而是由系统自身的组成和结构,以及它与环境的相互作用共同决定的。这就是说,如果一个系统将要具有某种组成和结构,它又将处在某种特定的环境之中,那它就必然会演化到一个特定的极值状态。这一过程具有决定性的意义,即无论演化过程的具体情况如何,也无论演化需要多少时间,最终它都会达到这个状态。正是由于它仅仅取决于系统和环境“自身”而不是其他“外界因素”,所以把该状态称为系统的“自然极值状态”。同时,正如任何一个特定的状态都可以由一个或几个参数来加以描述一样,自然极值状态也可以由一个或几个自然极值来加以描述。例如,一个处在近平衡态的系统,只要它与周围隔绝,它就必然会演化到平衡态;而一个处在远离平衡态的系统,它必然演化到某种定态,这个定态往往对应了自由能最小、势能最小等,这时自由能的最小值和势能最小值就是它所对应的自然极值。

这里有一个观点需要说明,尽管自然极值状态可以事先预测,

但它却并不是实现“已经”存在,它实际上是系统在特定环境下演化的结果。也就是说,由系统的组成、结构和环境决定终极状态的过程就是系统的演化过程。为了说明这一观点,不妨设想在地球形成的初期,地球的表面正处在从高温岩熔状态向凝固状态的逐渐冷却过程中。如果此时有一块小的天体因被地球的引力所“俘获”而正向地球飞来,这时就会出现两种情况:一方面,地球表面因与小天体的相互吸引而发生改变,就如同月球在地球上引起潮汐一样。正处在冷凝过程中的地球表面形状会发生一系列不可逆的变化,最终形成一个隆起的山峰。另一方面,小天体如果不在大气中烧毁,它的形态也会变化,并且必然会落到地面,然后朝低洼的地方滚去。当它最终停下来时,可以认为,它达到了演化的终极状态。不难看出,在此过程开始前,小天体没有被地球引力所“俘获”之前,它的运动是根本不存在那个“目标状态”。但当过程结束时,小天体却实实在在地处在那个终极位置上了。可见,这个终极状态本身也是系统演化的结果。这个模型当然还可以进一步简化。实际上,人们在另一些地方常常看到类似的情况。当一个人刚刚出生时是很难预计他的“结局”的,但每个人都有自己特定的“结局”,这个“结局”可看作是他的终极状态。显然,一个人有什么样的结局和终态是由他的一生历程所决定的。

(2) 极值态是相对稳定的状态:常言道,“人往高处走,水往低处流”。水流向低洼之处时,不仅是因为这里具有最小的势能,而且因为这里是一个稳定的状态。系统演化趋向一个稳态是十分自然的,原因很简单,如果终态不是相对的稳定态,它的演化就不会停止下来,将继续不断地演化下去,直到稳定状态为止。稳定性是系统科学中十分重要的一个基本概念。它是指系统经过不超出一定范围的扰动后,仍能自动地恢复到原来的状态。稳态就是这种能自动恢复的状态。这种状态可以十分简单,如一个点,一个环,它们在数学上被称为稳定的不动点和稳定的极限环。哈肯和钱学森曾指出,这个稳定的不动点和极限环是系统演化的目的点与目的环。但是,对于复杂系统来说,稳态的结构可以十分复杂。例如,混沌理论中的奇怪吸引子和 SOC 理论中自组织临界态就是一

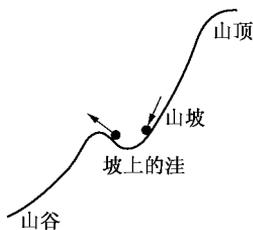
类十分复杂的稳态。当然,这里指的稳态实际上是某种“定态”,在具有耗散项的单摆中,势能最小的状态显然是与稳态相联系的。然而对于复杂的系统,终极状态往往并不一定势能最小。复摆的例子就是如此,在单摆下面再加一个单摆所构成的复摆,其运动状态异常复杂。它所趋达的状态不仅势能最小,而且是一种在状态空间中具有复杂构型的稳定“图形”(pattern)。例如,一个具有分形结构的湍流。

(3) 复杂系统演化的极值态往往是“自组织的临界态”(SOC):自组织的临界态(SOC)这一概念是1987年美国学者巴克(Bak)等人提出来的。它是指一种介于有序与无序、混沌与非混沌之间的边缘状态。有关内容将在下章中讨论,这里要指出的是:对自组织的临界态的研究,使我们找到理解系统演化趋极性的“钥匙”。对于复杂系统来说,由于状态和模式是多种因素的相互作用,相互竞争的结果,因此,不可能处在一个绝对不变的稳态,而只可能处在一个临界的稳态。

(4) 极值态是系统演化中多次选择的结果:上面主要讨论了单一稳态的情况。复杂系统演化所趋达的稳态还可以是多个的。如果说单一稳态好比地面的一个洼地或山谷的话,那么,多个稳态就好比地上的坑坑洼洼,正如地球、月球的表面。在月球上有许多中间洼下去的环形山脉,在地球上也有许多盆地和洼地。雨水下落,最终会向这些洼地聚集,一个洼地就对应了一个极值状态。这种情况在数学上可以用状态空间的吸引域来描述。吸引域可以是一个,也可以有多个。特别对于处在复杂环境中的复杂系统,其吸引域一般都有多个,当它演化到某一时刻时(有如雨水下落到地面的山脊),就要在多个稳定终态之间进行选择,“一旦选定”,就会奔向该吸引域的“终点”。正是由于存在多个需要选定的吸引域,才使系统演化中不仅有决定性的一面,而且有随机性的一面。当系统所具有的“自由能”不大于某个“阈值”,它的演化就必然以该“洼地”的谷底为终极态。而当它所具有的自由能大于那个“阈值”时,它就会在多个洼地的谷底中进行选择。然而,从更大的范围来看,整个趋极过程又受到两方面的作用:一方面是选择洼地的随机力

的作用 ;另一方面受到上一个层次决定力的作用 ,就像一个处在山坡上的小球 ,它在滑向坡上、洼底的同时正在向大的山谷滑去(如图)。

(5) 终态对应了“最优”(高效)和“可行”的状态 :复杂系统演化的终极稳态既然可以有多个 ,就出现了究竟“选择”哪一个的问题。系统按什么样的标准或原则去进行选择呢?一般 ,对于较低级的系统 ,如物理、化学等非生命的无机的系统来说 ,它的选择几乎完全是随机的



(当然 ,世界上绝对的随机和绝对的决定都是不存在的 ,某个层次上的随机性往往要受下一层次决定力的控制和影响) ,因而它由低级向高级的进化也带有很大的偶然性。但是 ,在长期的演化过程中 ,选择了某些特殊的终极稳态的系统 ,更能经受环境的干扰(好比“谷底”较深的洼) ,而另一些则稳定的范围较小 ;某些终态更有利于系统的进一步发展 ,而另一些则发展的余地较小 ,甚至限制了系统的发展 ,这种情况必然导致类似生物领域中的“自然选择”过程。因此 ,这里选择结果的优劣对于系统的演化是有着重大意义的 ,而选择的动力或直接“操纵者”就是我们通常在混沌理论中讲的系统内外部的随机性。

对于有机界、生命界和社会等复杂系统来说 ,终极稳态的选择就不完全是随机的了。由于这类系统都具有不同程度的自适应、自调节、自学习和自复制的功能(生命系统的基本特征) ,具有一个保持、发展“自我”的基本目的 ,对于这类系统可以引入某种称为“自我意识”或“自主意识”的选择机制。用目的论和拟人化的语言来说 ,这是一种“保持与发展生命”的基本功能。因为系统在其演化进程中总要不不断调整自身的结构及与外界的关系 ,使之更加适应于环境。这里的所谓适应 ,对系统自身来讲 ,就是从维持和发展系统自身“生命”出发 ,调整与外界的关系 ,使得系统既能有效地从外部环境中获得自己生存发展的资源 ,又能有效地向外排出生命活动(演化过程)中所产生的“废物”。但是 ,由于任何一种适应过程都是一种系统与环境的双边的活动 ,如果系统只顾自身的“利益” ,就不可避免地要损害环

境,污染环境,最终导致系统自己不能继续生存,因此,只有系统与环境的双向适应才是系统所真正需要的。从上述双向适应的要求出发,一个有“自主”或“自我”意识的系统在进行选择时就会“构筑”自己独特的选择标准,这个标准就是最优、最佳的“理想状态”。这个“理想”的状态就是能最大限度地利用环境提供的资源,以及系统自身的结构、位置等来保存和发展“自己”的状态。

对于有些复杂系统来说,单单考虑“最优”和“可行”往往还不够,这里还存在一个效率问题,即花多大的代价,得到多少效益的比值问题。从经济学角度,效率是与“价值”密切相连的。价值工程中价值的定义就是:价值 $V = \text{效益}/\text{成本}$,即平常所说的“性能价格比”。可见对复杂系统的演化来说,最优化、效益、价值和效率的核心都是“耗费最少而获利最多”,这种状态就是系统始终在追求的演化终态。

综上所述,我们认为,系统演化所趋达的极值状态或终极状态就是一种高效,最优的稳态。

7.5.4 趋极的意义

研究系统演化的趋极性对把握事物发展的趋势有着重要的意义。

首先,它体现了演化的方向,即在整个演化过程中,不管其演化的路径如何复杂曲折,总是指向一个相对确定的“目标”,系统只有演化到这个目标状态(终极状态)之后,才能保持稳定或转化为其他事物。

其次,终极状态不仅可以作定性描述,而且它还对应于一个特定的数量,即一个“自然极值”。例如,力学系统必然演化到它的势能最小的状态,近平衡态的热力学系统演化到热平衡状态(自由能最小的状态),经济系统演化到高效益状态等,它们分别与势能极小值、自由能最小值和效益最大值相对应。从更宽泛的意义上讲,甚至可以猜想系统演化的这些“自然极值”与数学、物理中的基本自然常数也有着密切的关系。这些神秘的自然常数,如圆周率 π 、自然底对数的底、光速、引力常数、原子的精细结构常数、普朗克常数、玻尔兹曼常数等,也许正是“我们这个宇宙”演化到现在阶段的“自然极值”。

最后,终极态或目的态是属于一种尚未实现的状态,它在时间

上是超前的,即在时间轴上处在以现实为“原点”的前半段(这说明许多物理方程中会出现“超前解”,实际的演化历史则处在“原点”的后半段)。但是,终极态或目的态对系统来说却具有某些类似万有引力一样的“吸引力”,它时刻吸引着系统向着它的方向前进。

7.6 群体的进化

在对单个系统进行详细讨论后即进入一个新的领域——群体。就目前的系统科学而言,人们对群体的认识远没有对单个系统那么完善,群体所表现出来的许多与个体大不相同的特征常常使人把它当成一种“超系统”。但从对系统的根本观点出发,我们以为与其把它作为超系统,不如把它作为一类特殊的系统来研究更合适,其原因是它具有明显的整体性,所以一般可将群体定义为“由特定相互作用的个体组成的特殊整体”。生物群体,包括了从植物群落、动物种群到人类社会的广大领域,它们的特殊性是相对于一般个体而言的。可以从以下方面认识群体:

群体首先是具有一定时间空间性的有机整体。它具有一定的结构和层次,其中最基础性的结构模式将决定群体的结构特征。其次,群体中既有他组织性,又有自组织性,这一点在生物社会和人类社会中表现得特别明显。再次,群体具有自身的繁衍性,群体内众多个体的此生彼亡、尔兴我衰,并不直接影响到整个群体的生命进程,正是这种众多个体相互交错出生、消亡,此起彼伏,才保持着群体的延续和生存。群体是一种集群演化,它不同于个体演化,具有与群体内个体不同的生存历程。通常群体生存期远比群体内个体生存期长得多。最后,群体是通过群体内个体的个别或集体的行为同外界环境发生作用,以适应环境,求得发展,并创造新的群体。

由于具有这些特征,可以把群体的生命进程看作更高层次的生命进程。它的演化模式,主要是作为个体群集的结构性、组织性和状态的演化,最典型的的就是具有周期性特征的“序”状态演化。

在群体的演化中涨落和不稳定因素是难以避免的,它们以群内个体和群体系统整体之间的复杂相互作用来影响系统的整体行为。这些因素在群体处于常态时对群体影响不大,但如果群体演

化处于分叉的临界区域时,就可能导致决定全局的方向性选择,使群体或者消亡,或者新生——转化为新的种群,或者进入周期性或混沌状态,经历“有序——无序——有序——……”这样循环往复而又生生不息的演化。每走过一个周期,群体系统就进到一个更新颖化、更复杂化的较高层次。

7.6.1 群体的进化模式

像以前一样,如果以适应环境、扩大自身生存空间作为群体进化的方向,那么,一个明显的事实是,群体在演化中,常常表现一种进化的趋势。正如生命系统理论的提出者米勒所说:“具有新的结构与过程的系统,作为逐渐积累的进化性变化的结果,出现在所有层次上。这是历史性的过程,是难以逆转或基本上不可逆转的过程”。群体进化的标志是对环境的适应能力和控制能力的增长,对内部要素的调控和调节能力的增强,以及群体中新型优化因素的创造。

群体进化的模式有:

(1) 突变:群体延续过程中的突变是指个体模板信息的变化。当群体的内部环境或者外部环境变化作用于群体时,群体首先在其模板信息中发生不可逆变化。变化的速率因群体系统的特征而异。一般地说,群体组织性层次越高,其突变速率越快。生物群体系统内细胞核里 DNA 分子的突变,通常是缓慢的;而人类群体系统内行为的规范,法律规章和经济章程的突变则可能迅捷发生。模板信息的变更可能影响群体对内部要素的调控,以及群体对外部环境或超系统的适应;相反,层次越低,突变的随机性越大。根据生物学中的中心树法则,生物群体内遗传物质的突变中,只有极少数是比其亲体更能适应环境的有利突变,大部分是中性突变和有害突变;但唯有组织性层次较高的群体系统,才能具有效率较高的突变。如新概念或新发明那样的有明确目标的创造性的新模板信息,只可能在人类群体中发生。尽管如此,人类社会因随机性而导致的盲目性仍然难以完全避免,如以开发新动力源为初衷而发明的核技术,实际上被主要用于制造核武器就是典型例子。所以突变并不直接导致进化,必须对突变进行选择。

(2) 选择:群体的选择包括自然选择和群内选择两种,这些选

择是在一定的环境条件下才有效,所以,归根结底是以自然状况为根据,更基本的选择是自然选择。

1) 群内选择:群内选择是特定群体内部同其他群体间的模板信息选择。生物群体内的遗传漂变和迁移等机制,就是具有群内选择行为的因素。

① 遗传漂变:也称遗传传播迁、遗传偏离或赖特效应。在群体遗传学中,赖特(S. Wright)用以描述由于小群体引起的基因频率随机增减甚至丢失现象。在大群体中,后代容易保持原有的遗传结构,不发生大的偏离。群体愈小,愈可能发生显著的漂变。由于存在遗传漂变的现象,群体基因中仅有5%的有利突变被保留下来。尤其在遗传漂变的极端现象——“建立者效应”中,与原来群体相隔离的少数个体的突变状况因其后代繁衍成隔离群体而获得巩固,无论这些突变而成的模板信息实际上是优化的还是退化的。

② 迁移:群体之间经常会发生的个体迁移,造成了模板信息的流动。当迁移者所携带的模板信息与当地群体有差异时,就会发生选择行为。一般对原群体有利的模板进入新群体后,由于群体内背景情况的不同,可能会成为不利因素而被淘汰。而在相近的背景条件下,又倾向于有利于原地保留迁移者所携带的模板。因而,在迁移现象中,群体内背景条件也对突变有选择作用。

2) 自然选择:用迈耶(E. Mayr)的话来说,自然选择是“不同基因型的有差异(区分性)的延续”,“自然选择是一个统计学现象,它只是意味着较好的基因型有较好的延续机会”,而阿耶拉和基杰则认为“自然选择可以简单地定义为不同遗传变异体的差别繁殖。它可以起因于差别的生存或差别的生殖力,或两者兼而有之”。这些看法基本上反映了自然选择过程的作用,即由于自然环境的选择压力作用,使群体系统内某些突变比另一些突变更能影响群体的新型结构和整体行为。

最基本的自然选择有稳定性选择、单向性选择和分裂性选择。在环境相对稳定的群体中,多见稳定性选择,即把趋于极端的变异淘汰掉而保留中间型个体,使群体具有相对稳定性。而当环境条件逐渐发生变化时,群体多见有单向性选择,这种选择把趋于某一

极端的变异保留下来,而淘汰掉另一极端的变异,使群体朝向某一变异方向发展。而当原先较为一致的生态环境分隔为若干次一级的环境,或群体向几种不同地域扩展时,群体系统会出现分裂性选择,即把一个群体的极端变异个体在不同方向保留下来,而中间常态型则大为减少。

其他一些重要的自然选择还有:能使两个以上不同形态性状在群体中维持若干代的多态并存现象的平衡性选择,促成性别差异以及与性别相联系的体形、颜色、行为等方面差异现象的性选择等。

自然选择是经常起作用的,它不断调整群体与环境的关系,在群体进化过程中起着“过滤器”的作用——载明某种群体模板信息,组成环境反馈回路(生命周期)的一种信息,在这信息中时常出现噪声(突变),因而减少了这一回路上信息的增益系数(突变减低了群体系统的增值力)。那些以等于一或大于一的增益系数通过过滤器(环境)的信息,产生正反馈;而噪声信息则无法通过过滤器,于是,那些有害突变经过多次反馈回路之后被淘汰出种系之外。这些信息便可比原来的信息复杂得多,这是自适应对进化的贡献。环境这个过滤器就是这样“奖赏”和“惩罚”群体的突变,并且产生某种类似学习的群体行为。终于,在自然选择过程中被“奖赏”的那些突变,以新的模板信息促成了新群体的形成。

(3) 新群形成:新群形成是群体进化中的一个主要环节。它意味着新的群体以新的方式利用环境条件,为群体发展开辟新的前景。在生物群体中,新物种形成就是典型形式,在人类群体中,新的社会形态、国家乃至超国家共同体的形成也是典型形式。它们表明,群体的延续中出现了非线性或间断性,原结构的群体由新型结构的群体所取代,从而以此为新的起点开辟群体系统新的进化前景。同时,它们也表明群体系统在类型上的增加,标志着群体系统在空间广度上出现了非同一性或多样性,新型结构的群体在新的适应性功能基础上开辟了新的发展领域,因而成为群体系统多样性的根据。

综上所述,群体进化的模式大体为突变——选择——新群形成,以此推动群体在优度和丰度上发展自身。

7.6.2 群体生态模式

群体演化以生态系统为背景,并受到生态系统内各种环境因素的影响。生态系统就是群体系统与其环境之间不断进行物质、能量和信息交换的统一整体。群体系统的生态关联特别表现出多样式的群体与群体之间的相互促进和相互制约,在一定的环境中实行协同进化。

群体的生态性演化模式主要描述群体与群体之间生态关联的演替。由于群体的实际活动和发展总是同其他群体以各种不同方式构成相互作用,因而考察特定群体与其他群体之间生态关联的变化,大体上可以勾勒出演化趋势。简略地说,有共生、竞争和协同进化等模式。

(1) 共生:群体必须与其环境建立和维持开放性的共生关系,才能持续自身的进化。群体的共生关系,就是它们在一定的生存环境(指介质、空间和其他自然环境)中保持群体之间,主要是不同种类的群体之间的共同生活而彼此有利。这种共生关系多种多样,包括:

- 1) 双方都得益的互利共生。
- 2) 单方得益而它方无害的偏利共生。

3) 敌对共生,即一种群体以另一种群体为生存条件,彼此之间构成直接或间接的生态关系的复杂网络。达尔文曾发现猫、田鼠、熊蜂、三色堇之间的共生关系。它们之间存在着相关关系:猫多,田鼠少;田鼠少,熊蜂多;熊蜂多,三色堇少。这就是人们常说的捕食关系——一种群体以另一种群体的个体为营养介质而赖以生存,这两个群体构成捕食者和被捕食物的关系。

4) 寄生,一种群体以另一种群体系统的局部组织为介质,并寄居于该群体系统之中。

不同种类的群体间的共生关联,实质是群体系统作为各自独立的定常共存,其中一种定常流只能在更大的定常流中才能存在。群体的外界环境和宇宙是更大的定常流。当这些定常流的相互关系处于相对平衡时,群体的生态关系处于稳定状态。其中,每一个群体系统生活在周围环境的一个特殊部分,并在和其

他群体系统的联系中起着特殊作用。由于环境的变化,原先的定常流之间的共存关系一旦发生变化,群体系统之间原先存在的共生关系也会丧失。于是群体间共生性生态关系便趋向于让位给竞争性生态关系。

(2) 生存竞争:生存竞争是群体系统,尤其是生命系统与其生存环境发生的关系。按达尔文在《物种起源》中提出的观点,这种关系包括“群体内个体和同群其他个体的斗争,或者和异群的个体斗争,或者和生活的物理条件作斗争”。因而,生存竞争是群体内和群体间发生的争夺生存条件的活动,在有限的生态环境内表现为“适者生存,优胜劣汰”。生态需要相似的竞争性群体不能共存于同一生态位置,因此,在为生态位的争夺过程中,必然会导致生态分离,包括群体的栖息空间、营养介质和生命活动时间等方面的变化。这种竞争大体上有两类情况:

1) 一群体完全排挤另一群体,并占领全部生态位置。据考克斯(C. B. Cox)的考察,19世纪北美有一种灰松鼠被引入不列颠岛,导致岛上的土著红松鼠数量减少。灰松鼠具有对岛上落叶林地中林冠层的食植性动物生态位置的更强适应能力,因此,最后灰松鼠成为岛上的定居者。

2) 一群体侵入另一群体的部分生态位置,并取而代之。这样,原先的生态领域(范围)被分隔成两个生态领域(范围)。例如,非洲东北部的苍头燕雀曾飞入西北部的加那利群岛,在那里形成新的亚种——加那利苍头燕雀。由于它们与岛上原居的蓝燕雀是近缘种,因而在食性和营巢地点上发生冲突。竞争结果加那利苍头燕雀占据岛上的落叶林,蓝燕雀则占据针叶林。

这两类竞争方式在各层次群体演化中都有表现。

生存竞争,使得一定环境内的有效资源得到最充分的开发,并且使得一定环境内的群体间生态关系变得复杂化,而那些“适者”群体对环境的适应能力也由此变得十分复杂,甚至十分精致化。例如米尔顿·洛夫(Milton Love)曾报道过这样的例子:羊肝吸虫必须从蚂蚁身上转移到羊身上,才能最终在那里再生自己。羊吞食一个受感染的蚂蚁的机会很小,于是,羊肝吸虫竟会钻入蚂蚁的

脑子,迫使它的牺牲者以自杀的方式去行动:被控制的蚂蚁不是如常态那样停在地上,而是爬到草叶的尖上,在那里一动不动地等待羊的吞食。在生存竞争中,群体系统的适应能力在专门化和广谱化两方面得到发展,以尽可能深或尽可能广地在有限的环境资源中获得生存机会,因而,生存竞争是促成群体有效地建立和运用群体间生存关系和群体生态环境的强大动力。

(3) 协同进化:协同进化指的是群体与群体、群体与生态环境之间在相互依存关系中的进化过程。处于生态关联中的群体系统,都是相互依存的生态网络中的一个环节,其中任何一个群体的增减存亡都会影响到整个生态网络的变化,而且那些参与进来的新群体系统总能利用这些生态关联的开放性而成为新的生态因子。因此,群体系统可能会获得一种更佳的综合表现的形式,即协同进化。以捕食者群体与被捕食物群体之间的生态关系而论,在长期进化过程中,捕食者群体和被捕食物群体之间就从单方的依赖性质发展为双方的依赖关系,它们之间在种群数量关系上保持一种动态平衡,在自然条件下共同进化。洛特卡——沃特勒方程就是描述这种关系的模型。假设捕食者和被捕食物共存于一有限空间,那么,捕食物的群体增长率会因为没有被捕食者而降低,这个降低因素还随被捕食者密度而变化。被捕食者群体的方程为:

$$dN/dt = (r_1 - \epsilon P)N$$

在这里 t 表示时间, r_1 表示被捕食物群体的内禀增长能力, ϵ 表示捕食压力常数, P 表示捕食者密度。捕食者群体的方程为:

$$dP/dt = (-r_2 + \theta N)P$$

在这里, $-r_2$ 表示捕食者在缺乏食物时的瞬时死亡率, θ 表示捕食效率常数。

上述两个方程描述出捕食者和被捕食物的模型行为,即捕食者群体和被捕食物群体产生周期性振荡。它表明各个群体的密度都受到另一群体密度的制约。在这一模型之后,罗森茨韦格(Rosenzweig)和麦克阿瑟(MacArthur)又提出新的图解模型,所描述的捕食者和被捕食物的关联,有稳定型关系、减幅型关系和不稳

定型关系等多种情况。它比前一种模型更切合实际些。

尽管模型描述不能很准确地反映群体间的生态关联,但已表明群体间相互作用应有一定限度,以免过分有害于对方而遭致生态关联的破裂。实际的群体进化过程中,自然选择已使某些捕食者对被捕食物不敢过分伤害。斯洛博金(Slobodkin)所谓“精明的捕食者”的动物群体就是在本能上较多地是捕食老年的、病弱的或幼小的个体,较少地捕食处于繁殖年龄的个体。这样,在客观上保证捕食者在自然界中获得源源不断的食料。此外,自然选择还造成另外一些有利于协同进化的情况,即群体之抵御能力的增强。例如,寄生者和宿主在共同进化过程中,危害作用因宿主产生免疫反应等自卫能力而必然逐渐减弱。20世纪50年代,澳大利亚为制止穴兔的爆炸性蔓延而引入黏液瘤病毒。开始时,穴兔的致死率几乎是100%,但后来便产生一定的免疫能力。上述的情形都表明,在自然选择中,群体之间的竞争关系也可能在一定条件下转化为共生关系,更确切地说,是形成了相互依存的协同进化方式。

自然界较低组织层次的生命系统的协同进化是在自发地缓慢地进行的,在高组织层次的人类群体系统参与的生态关联中,由于人类特有的进化模式——文化的功能,有可能自觉地、迅速地进入协同进化的生态网络。人类特有的文化,使人类群体能全面而准确地认识群体间的生态关系及进化趋向,从而有可能认识和获取协同进化的必要条件。而且人类特有的文化,比自然界的进化方式更为迅速有效。一个有价值的模板信息,科学技术的发明,合理化应用方案,等等,能够通过文字符号等通讯方式,广泛而迅速地传递到人类群体的所有有关部分,它们能够协调人类群体的行为,使之有效地、更合理地处理自己与其他群体和生态环境的共存关系,选择更好的方式,实现协同进化。

7.6.3 宇宙演化的模式

宇宙能不能称为系统是一个值得商榷的问题,在我们看来,它包含所有的系统,但本身并不是一个系统,最起码人们不知道宇宙有没有边界和边界在哪里,但这并不妨碍宇宙的演化。实际上,宇宙的演化可以由宇宙中物质的进化、生物圈中生命的进化以及人

类社会的进化等来体现。

怎样理解宇宙演化的逻辑?拉兹洛认为,“自然中存在逻辑,并且有统一性。这是自然内部固有的秩序,它是以几乎无限种方式出现的所有现象的秩序的基础,并使它们互相关联。在自然进化遵循的形式中,有一种重复出现的秩序,有一种保持着的不变性”。这里强调的宇宙内在秩序,实质上就是物质世界、生物世界和人类世界在进化过程中显示着的那些内在秩序或不变性。

作为对系统演化的总结,可以对宇宙演化中的内在秩序作如下归纳。

(1) 远离平衡的开放系统展开宇宙内的进化——进化中的起始:当处于能量和物流中后它们会形成具有整体性、自主性以及有序的结构和行为的系统。如果其组分足够多样,其结构足够复杂,最终会形成具有双稳定性或多稳定性,即能在两种或两种以上的稳定状态上持续存在的能力,而在更多的系统中,在下层系统之间和其基本组分之间还会有各种各样的反馈和催化循环。在自然界,处于远离平衡状态的系统几乎总是展现出某种催化循环。这些催化循环将凭借各种各样的条件持续存在,它的能力将受到时间考验,同时,环境将选择那些具有高稳定性和快反应速率的系统。当物质在时间进程中通过辐射造成了强大持续的能量流,这类系统就在宇宙中进化。

(2) 宇宙内的进化,汇成连续统一体:宇宙的演化是多种因素综合作用的过程。拉兹洛认为,进化过程在客观世界的所有领域展开。如果从体积、组织层次、结合能量和复杂程度等有关参量上看,这些进化过程就构成了一个“连续统一体”。

1) 体积由小趋大:从体积上来考察,基本粒子只有最细小的体积,原子则相对要大些,分子,已经可称为微观世界中的巨象。由众多分子聚成的大分子比分子大,但是,同那些多细胞的原生动物相比微不足道,具有巨大体积的人类系统,在整个生态系统中都显得颇为渺小了。

2) 结合力由强趋弱:从结合力来考察,从宇宙的基本粒子到高层次的社会和生态系统演化过程,人们看到了一个由强趋弱的方

向。像夸克那样的粒子,是由非常强的力结合在一起的。原子系统中的质子和中子由交换力结合在一起,核裂变可以显示这种力的惊人强度,原子外层的电子的结合力则比核内的结合力弱了一个量纲。而复杂分子内的原子是由离子键或共价键及其相对更弱的力连接在一起,有机大分子内把化学分子衔接在一起的那些力就更微弱。至于多细胞生物体内把细胞维系在一起的那些力就相对而言又弱一个量纲。最后,在社会系统以及生态系统中把人类系统和生物物种相结合的相互作用力,显然比物理的和生物化学的结合力要弱得多,因而人类在生态环境中可以表现出相当的自由度。

3) 组织性由低趋高:进化的序列上随着结合能递减,而相应的组织层次将递增。对一定层次的系统而言,较低层次系统作为它的下层系统发挥作用;而较高层次的系统又由这些系统通过会聚形成。若干个基本粒子共同构成原子核,由电子层环绕原子核又组成元素的原子。若干个原子形成分子,而比较简单的分子又构成大分子。由此顺序,细胞组成生物体,生物群体和居民又组成社会和生态系统。

4) 复杂性由简单趋向复杂,但层间简化:从复杂性来看,各领域的进化过程,我们所发现的是当组织性递增时,在层间简化的同时,系统总结结构的复杂化依层次而递增。原子已经是由电子壳层和原子核构成一定复杂程度的实体,而那些重元素则比原子更复杂些。在高一层次上,一个水分子要比蛋白质分子简单。更高一级的组合层次上,多细胞生物体比单细胞生物体复杂。最后,人类社会系统比狒狒群体系统要复杂得多。总之,一个更高的组织层次为复杂性发展提供了新的可能性,用以构成上层系统的组分种类越多,造成结构和功能的变异域越大,而且还在下层系统之间造成新的相互关联。

综上所述,就宇宙进化的产物形式看,演化的逻辑是:结合力最强的系统相互接触,结果创造出结合力较弱的更高层次的系统,这种较弱的结合力吸引或排斥较强结合力的组分。随着宇宙演化的进程,这个过程从强子、粒子和夸克开始,继续下去是原子、分子和细胞,在适合的条件下,以各种方式扩展到所有复杂的生物体和由它们组成的社会和生态系统。

第八章 系统的自组织与演化机制

 一章对系统演化进行了“现象学”或“运动学”的考察,发现在许多系统演化的具体过程中存在着一些共同的规律与模式。以此为前提,人们不禁会问,支配系统运动演化的原因和机制是什么?这就是通常被称为“动力学”的问题。动力学问题实际上是一个因果关系问题,正如当真空中飞行的粒子突然改变方向,人们立即会想到它是受了某种外来的作用一样。不过,系统科学特别强调内部原因。强调内部原因并不是不考虑外部环境的影响,而是要求回答,何以在环境相同或大体相同的情况下,有些系统会朝这个方向而不朝其他方向演化?

所谓内部原因,具体是指来自系统组成部分和结构方面的原因,其实质就是内部元素与要素之间的非线性相互作用。关于非线性本书已在第五章中作了一般性或基础性的讨论,并指出它是导致系统出现混沌、分形等复杂性态的核心原因,而非全部原因。至于导致系统朝着某个特殊方向演化的内部原因,则要做专门的分析。其实,演化的内部原因问题就是系统进化的动力学机制问题。要找出演化或进化的内在原因,远比描述演化与进化复杂得多。人们也许会问,回答这些问题的时机和条件是否成熟?我们的看法是肯定的。因为系统演化对人们并不陌生,人类本来就生活在一个充满复杂性的演化长河之中,无时无刻不在与各种系统演化打交道,积累了不少有关的知识,一部文明史就是一部人类进化史,个人的生、老、病、死,人世的沧桑,各人自有体味。从老子“道生一,一生二,二生三,三生万物”的思想到康德的宇宙演化论,从黑格尔的绝对理念运动到柏格森的时间哲学等,都为研究进化机制提供了丰富的素材。特别是19世纪后半叶以来,不少学者开始从理论上探讨演化机制,揭示了不少演化的规律性,如达尔文的

生物进化论,克劳修斯等人的热力学第二定律,马克思的社会发展理论等。20世纪以来,这方面的研究更为深入,从坎农到维纳、艾什比;从贝塔朗菲到拉兹洛;从普里高津、哈肯、艾根到目前我国的许多学者都提出了许多系统演化的原理。如普里高津的耗散结构理论,哈肯的役使原理,艾根的超循环原理,贝可—唐超的自组织临界态等,都为我们总结、归纳复杂系统演化的原理提供了充分的理论依据。更重要的是,自然界与人类社会实际演化进程中表现出来的“惊人的类似之处”(哈肯语)启示我们应该特别关注进化(演化)到达临界状态时的表现,那些看似突变、奇异、无标度的地方正是搞清进化机制的关键之所在。目前的研究形势也许有些类似17世纪的牛顿经典力学,18世纪法拉第、麦克斯韦的电磁理论,20世纪初的相对论与量子力学,系统演化理论的发展正在进入一个以综合、归纳、总结为特征的阶段,在这个时候提出一些关于系统机制与原理的思考是适时的。

本章是对演化原理与机制的一些思考,具体包括突现机制、自耦合(缠绕)机制等“自组织”机制、不完全性原理、质朴学原理等。先从自组织开始。

8.1 系统的自组织

在系统科学的发展进程中,于20世纪70年代初产生的自组织理论是系统理论发展史上的重要里程碑。这是因为人们从对系统演化的大量研究中发现,演化的原因最终只能从内部即自身中寻找,可以用一个“自”字来加以概括,如自组织、自缠绕、自相似、自闭合等等。但是,前面提到的耗散结构理论、协同学和超循环理论等自组织理论并没有包含系统自组织的全部内容,而是比较集中于对系统创生的研究。因为长期以来人们总是从热力学第二定律出发,认为趋向热力学平衡态是系统演化的唯一方向,即系统只能走向消亡而不能创生,但这样就无法回答现实世界中时刻涌现的新事物从哪里来的问题,所以系统理论首先要解释系统从何而来,对于系统向何处去的问题则需留在后面研究。只有到了20世纪80年代以后,非线性科学和复杂性科学才使人们对系统演化

的过程有了一个较为全面的认识,自组织理论才得以进一步完善。本节先介绍一些与此有关的基本概念。

8.1.1 组织与自组织

什么是组织?把“组织”看作一个名词,如平常讲的“党组织”、“团组织”、“工会组织”、人体中的“肌肉组织”、“结缔组织”等,实际上只是系统的一个代名词,所以这里不去说它。把“组织”当作动词来看,就是平时讲的“组织起来”,结合起来的意思,这就是指一个系统的产生或创造。如果扩大组织的含义,系统的组织过程是指系统从无到有,又从有到无的产生、发展和消亡的全过程。这也就是系统的“一生”。

组织作为一个过程,需要三个要素:组织的对象或材料,组织的动力或能源,组织的指令。

(1) 组织的对象:组织的对象就是“将要”参加组织过程的那些材料或事物,它们不同于已经作为系统部件的元素或部件。例如砖块,在被用来做建筑物之前可以看成是组织对象,在作为建筑物的一部分后就不再是组织对象了。

组织对象或材料可以各种各样,来源于不同的方面,并且相互间没有固定的联系,即相对地自由,不受约束。设想在系统创生之前就存在足够的物质(物资、材料、元件、部件等)和能量(能源、组织力等),它们可以有两个不同的来源:

1) 原来就存在着的。如在一个自然资源非常丰富的环境中,构成系统的基本要素已经存在,只不过需要加以组织而已。就好比在生命物质出现之前的地球,那里的原始大气或原始海洋中早已存在了构成生命物质的有机大分子,同时也有紫外线的辐射,大气中的放电等提供能源,可谓万事具备,从而为原始生命的产生提供了几乎一切材料和能源。但这种情况是十分难得的,所以更一般的情况是要从外界获得。

2) 来源于旧系统,即旧系统的解体。旧系统的解体首先要它的旧结构失稳,因为作为一个整体的系统是可以从无到有的,这和物质、运动不可以创生和消灭并不矛盾,因为这里创生的只不过是仅仅属于系统的特殊结构、形态和属性。但是作为构成系统的原

料一般原来就存在于世界之中的,这些原料实际上都是从其他的系统中拿来的,因此,系统的创生从组成的原料来说是一个“破旧立新”的过程,要求旧结构失稳。只有旧结构失稳,新结构才能产生。世界是广阔的,如果构成系统的原料是现成的或者已经足够了,那也可以先不必急于打破旧的系统,尽可能地把新系统先立起来,这样可以减少创立新系统所需要的物质和能量。如果旧的系统对新系统的创生构成了直接的阻碍,就必须先破后立了。

(2) 组织动力:组织动力就是把分散的事物或材料组织和连接起来的动力或能源,组成不同的系统当然需要不同种类和不同大小的动力和能源。例如,物理学上人们熟悉的能源和社会学上团结人民的精神力量。对于系统的自组织来说,组织的动力和从哪里来是一个十分复杂的问题。

(3) 组织指令:只有组织对象和动力,组织对象的活动还是没有方向和准则,对究竟要形成一个什么样的组织还没有一个概念和全貌。这就需要组织指令来为组织对象的活动指明方向,规定原则,划出范围,提供关于组织未来的“蓝图”。在具体的组织活动中,组织指令往往表现为一整套“指令集合”,如一套工作程序或设计蓝图。在系统工程中,组织指令的制订是一个重要的阶段,即系统的开发与设计阶段。

组织指令的产生,也需要材料,这些作为材料的信息则需要从外界来获取。因此,组织指令的产生过程实际上是一个信息的加工和处理过程,是一个极其复杂的过程。

系统组织的三要素中起主导作用的是组织指令。组织指令从哪里来?是从系统的组织成员内部自行产生还是来自系统之外?这就是系统“自组织”与“他组织”的分界。通常把组织指令来自系统内部的称为“自组织”,把组织指令来自系统之外的称为“他组织”。在给自组织下定义时,H.哈肯讲了一个很有代表性的例子:一批新进工厂的工人,进厂后被“工头”(还有车间主任等领导)分配到各个生产岗位,干各种不同的工作,于是这个车间就运转起来了,一定的产品被生产出来了。这就是作为一个系统的车间被组织起来的过程。显然,由于组织的指令来源于被组织的对象——新工人之外,所以对他

们来说,这是一个“他组织”的过程。在人为事物中“他组织”的过程是十分普遍的,一堆元件被装配成一个完整的钟表或电子设备,一堆建筑材料被建成一座建筑物,一群“散兵游勇”被组织起来,成了一支有战斗力的军队等,这些过程就是他组织。

显然,他组织和人们熟悉的控制概念有着密切关系,在一定意义上可以把他组织过程看成是一个控制与管理的过程。

自组织的概念是系统演化理论的核心概念。按照最一般的理解,我们可以把一切“无需外部特殊组织指令而自行形成具有特定结构与功能的整体过程”称为“自组织”。这个界定显然是十分广泛甚至“空泛”的,因为从唯物论的观点看来,任何现实的事物(整体)的形成,都无需“外来”神或上帝的干预。但从科学的角度来看,系统如何自组织?自组织成什么样的整体?则是十分重要的科学问题。正是在这个意义上,普里高津、哈肯、艾根等系统学的早期创始人都把自己的理论称为“自组织理论”。

20世纪70年代以来,系统自组织理论得到了充分发展。我们的讨论先从“自组织”的分类开始,然后重点论述耗散型自组织与自组织临界性。

8.1.2 三类系统的自组织

自组织的领域大体可分物理系统,即非生命系统的自组织;生命系统的自组织;社会系统的自组织。不同层次的自组织有着自己不同的特点。

(1) 物理系统的自组织:其主要特点是在特定的环境与条件下自行形成有序结构,即自行结合成一个有机的整体。例如,分散的星际物质结合成星球;从均匀的流体中产生出有序结构;凝聚态物理中的成核、成团、分形生长中的聚集等。这些过程人们已从不同角度进行过大量研究,但是从系统自组织的角度进行思考则还是近年来的事情,这里把它们作为系统自组织的一个基础层次,即物理层次来看待。

(2) 生命系统的自组织:这是一个比物理层次更复杂的层次,在生命系统的自组织中,既要服从物理层次的自组织规律,又有生命层次自己的特殊规律。生命系统自组织的主要特点是组织指令

真正具有了信息的特殊含义和性质。信息究竟是什么？将在第九章中作专门讨论，这里所要指出的是信息通过编码（解码）将物质活动与符号运动联系起来，从而具有了远比物理系统更高的调节控制效率。具体来说，生命系统中出现了信息，它们主要体现在生命体之间的通信和遗传之中。

(3) 社会系统的自组织：生命进化到一定阶段之后出现的群体性的活动，在群体活动的基础上又进一步产生了社会活动。人类社会还只是生物体社会组织的一种形态，但它却是人类最感兴趣的研究对象。社会系统的自组织原是社会学、经济学研究的内容，现在也进入了系统学研究的范畴。社会活动的主要特征之一是有不同程度的智能的介入。所以，社会系统自组织中的组织指令总是具有智能的形态，关于智能和智能系统将在第九章中作详细研究，这里所要指出的是，智能活动虽然仍属信息活动的范畴，但它是高层次的信息活动，而人类社会系统中智能又比一般生命系统中的智能要高一个层次，其特点是产生了一种全新的、不同于个体智能的“群体智能”或社会智能。

8.1.3 自组织的两个阶段

作为一个过程的自组织大体分为两个大的阶段：适应性自组织与探索性自组织，每个阶段中又可划分若干个小的阶段，下面分别加以讨论。

(1) 适应性自组织：系统演化总是从适应环境开始，所以自组织的第一个阶段就是以适应为目标的自组织。什么是适应？按照生物学的理解，适应就是根据环境来调整自己的行为 and 结构，使自己的生命得以保存和发展，对自然界中的所有生命来说，为了争夺有限的生存空间，就要进行生存竞争，“适者生存，优胜劣汰”。按照控制论的观点，适应就是将系统的状态保持在状态空间的一个特殊范围——生存空间之内。

生存空间是分层次的，最外层是最基本也是最“艰难的”生存空间，在外层生存空间中虽然艰苦，但总算活着。超出了这个范围生命就不存在了，适应当然就失去了意义。生存空间越向内越接近系统的理想生存状态，这是生命系统终生都在追求的。

所以,适应过程有:①当系统受外界影响自身状态即将离开生存空间时,力图返回原来的生存状态空间,这叫“死里逃生,为生存而斗争”,或者扩大原来的生存空间,把新状态包含进去,这叫“忍耐,苟且偷生”,实在适应不了就只得放弃生存;②在生存空间内部,当受到扰动而离开原来的生存状态时力图回到原来的状态,这是典型的自稳定行为;③改变原来的生存寻找新的理想生存状态,这属于探索性自组织。

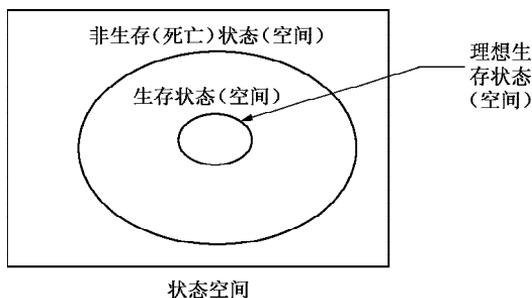


图 8-1 生存空间的层次性

以适应为目的的自组织通常又分两个小的阶段:适应性自稳定和适应性自重组。

1) 系统的自稳定过程:当外部的环境发生不大的变化时,系统只要对自己的行为和结构作少量的调整,或者只是对系统的可变部分作些变动,就可以适应环境的变化。

2) 系统的自重组:当外部的环境发生较大的变化时,系统只作少量的调整已不能适应环境的变化了,这时系统必须作要素与结构的重大调整,重新组合才能适应。

(2) 探索性自组织:探索就是创新。复杂系统往往不是单单被动地适应周围的环境,它总是以自己的存在来能动地改造环境。这里将发生以下变化,首先是系统自身,其次是环境,以此为前提,改造系统与环境的相互关系,使之达到一种新的结合。这就是探索性自组织。

探索是一个极其复杂的过程,目前引起社会各界的广泛重视,

也有许多专门的著作和论点,这里不再详细介绍。但作为自组织的一个特殊阶段,它原则上包括以下几个小的阶段:

1) 试错:试错是复杂系统的一种活动,它包含两个方面:①对环境或被试对象施加一定的作用和影响(输出);②看对方有何反应(获取反馈信息或被作用的后果);③将反应结果与原来的目标或系统的生存价值进行比较,判定是对还是错。其中第一、第二步都是自然发生的,因为当系统与外界发生耦合时,一定的输入总是有一定的输出。这里的关键:一是试错前是否有意识有目的,是否对实验结果有所预测,从而在各种试错行动中有所选择;二是对试错的结果进行怎样的评价。

2) 记忆:只试错没有记忆,只能使系统停留在原地踏步而不能发展,只有把试错的结果记录下来,才能不犯同样的错误。一个高级的生命体总是具有相应的记忆功能,记录那些生命过程中的种种探索行为的结果。记忆总是以某种不可逆性为基础,但这种不可逆的记忆又总是会被许多随机因素或微小的扰动所减退,这虽然对记忆不利,却有利于腾出有限的记忆空间,以便记录新的探索结果。

3) 学习:探索中只有记忆当然还不够,这是因为记忆空间有限,总有用完的时候,主要的是记忆的根本目的是为了以后碰到相同或相近的情况时不要再花代价去重新探索。这就要对记忆的材料进行处理,通过对以前经验的分析、归纳,从中找出带规律性的东西,这就是学习中的发现。

对于生命体来说,学习过程是一个根据上述发现的规律(周期性)来调节自己行为方式、内部结构以及对外关系的过程,这保证了它能通过调节来逐渐适应周围的环境。但是,学习活动总是建筑在对过去经验的基础之上的,所以学习是对过去的反思,其目的却是面向未来的,它是连接过去与未来的纽带。

和探索一样,人们对学习过程也有许多研究,通常认为学习有两种形式:一种是直接学习,即从自己以往的实践经验中学习,这是学习的基础,但直接学习的内容总是受个体实践范围的限制,学习的内容和时间都是有限制的。另一种是学方法,在一定意义上

也可看成是间接学习,即学规律而不是具体的内容。

4) 预测与决策:学习总的来讲是面向过去而意在未来,学习的根本目的就是通过获得过去的知识来认识规律,以使用它来预测未来进行决策。

5) 预调节:光有预测和决策还不行,还要依此来知道自己的行动,特别是当后果尚未发生之前,就根据决策所选定的正确方向对自己的行为方式与内部结构进行预先的调节、改变,而这种永久性的改变本身就是系统自组织和进化的过程。

8.2 自组织临界性

原则上自组织还可以分为两种:一种是普里高律、哈肯、艾根等人提出的、以自由度归并为特征的耗散型自组织,这类自组织通常发生在耗散系统中,表现出“役使”与“吸引”过程,导致系统状态空间中自由度(维数)的减少,即有序程度的提高。另一种是人们还不太熟悉的临界态自组织,这是一种极其重要的自组织形态,它是以真正多体系统为背景的自组织临界性(self organized criticality)。

对自组织的临界态的研究开始于1987年。当时布鲁克海文实验室的巴克(Per. Bak)、加州圣巴巴拉分校的唐超(Chao. Tang)和佐治亚理工学院的维森费尔德(Kurt. Wiesenfeld)等发现存在一类耗散的连续系统,即包含了成千上万个发生短程相互作用组元的复合系统,在特定的条件下,系统将自行演化,最终达到一个临界的稳态。他们把它叫作自组织的临界态(self organization critical),简称为“SOC”。从相空间来看SOC对应了一个有限维动力学吸引子,但这个吸引子既不是稳定的,又不是不稳定的,而是亚稳定的。巴克等人指出:当某系统处于这种临界稳态,或边界稳态(亚稳态)时,如果因扰动而发生偏离,系统会自发地演变,返回这个边界稳态。因此,系统自身将永远处在边界稳态,而不会达到平衡态。这时系统的进化也不是趋向某个稳定的吸引子,而是从一个亚稳态向下一个亚稳态进化。他们指出:自组织的临界状态是系统一种十分普遍的现象,在地质学、经济学、生物学和气象学中占有中心地位的许多复合系统中都有它的迹象。

8.2.1 沙堆模型

SOC 的情况可以通过著名的“沙堆模型”来说明。孩子们特别喜欢在沙堆上玩耍,用细细的沙子堆成各种各样的沙堆,而沙漠中那种变化万千,奇异而又神秘的景色也曾引起人们的注意,1979年 D. E. Gennes 在谈到凝聚态物理的不同层次时就提出过“回到沙堆中去”的想法。他认为“一个沙丘与银河系或原子核同样可以作为漂亮的研究课题”。然而,尽管如此,在 SOC 的研究兴起之前,人们并没有从理论上仔细地研究过沙堆。沙堆模型是 Bak 等在 1987 年首先提出来的,当在平面上随机地撒下沙子时,就会造成一个沙堆,沙堆的倾角取决于沙子的大小和重力加速度,沙堆将很快到达一个临界的稳定态,此后再往上面加沙子就会沿沙堆滑落,平均来讲加上的沙粒数应该正好等于落下的沙粒数。但对添加沙子的响应却是随机的,沙粒可以被固定在沙堆上,也可以引起小范围的重排和大面积的崩塌。

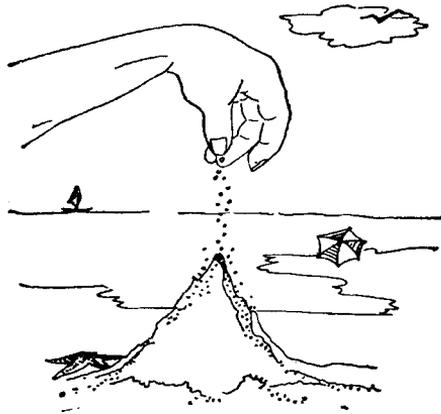


图 8-2 沙堆的形成

沙堆模型可以看成是一个带有局部相互作用和广延自由度的耗散动力系统。从这个简单的模型中可以获得许多非线性扩散动力学的定性和定量的信息,如各种临界的标度指数等。

我们说它“往往是”复杂系统演化的极值态,其实是一种谨慎的说法,原因是直到现在还无法证明趋向自组织的临界态是种必

然现象。但是,它的普遍性却是显然的。为了说明这一点,先来看看目前流行的“沙堆模型”。把细沙由上到下不断地撒在一个圆形底盘上,最终会形成一个以该圆盘为底的圆锥,这个圆锥就是临界稳态。因为当沙子过多时,它会沿圆锥面滑下,而当圆锥面上因崩溃出现缺损时,则会被继续撒下的沙子补充,因而它始终会保持一定的圆锥体形状。如果底盘变为一个正方形时,不难想像,最终产生的“临界稳态”一定是一个四棱锥体;当底盘为一长方形时,终态的形状有如旧式的屋顶;而当底盘为某一复杂形态时,终态就会变得十分复杂,但却是稳定的。这个例子只设想沙子是细的、均匀的,而且只受地球的引力作用这种相对简单的情况。如果改变这些条件,让沙子有粗有细,相互间有某种引力或排斥(如用某种磁性的铁砂作这种实验),可以想像,其终态会更加复杂。但是,不管它的形状如何,都会形成一定的临界稳态。这种奇妙的形态,不仅引起学者们的关注和思考,而且被心灵手巧的商人当作生财之道。市场上就有人利用这种现象做成了称为“沙屏”的小工艺品——在两块玻璃间装入细沙、水和油,让它们自动下落,形成酷似海滨、沙漠、蓝天等美丽的图景。总之,沙堆模型貌似简单,其实包含极为普遍和深刻的道理,它对人们理解终极态的临界性很有启示。

从沙堆模型中人们发现, SOC 虽然是一种自组织的临界稳态,却有许多不同于一般临界态的特征。首先,它和耗散结构理论与协同学中所说的自组织不同,它不能实现自由度的归并,不能将多自由度的非线性动力学问题约化为低维问题,但却可以根据时空尺度变换来描述;其次,它也不同于平衡相变的临界点,不能利用参数的调节来逼近临界点,但却可以作为一个亚稳定的吸引子,保持在远离平衡的状态之中。此外,这里的临界点指的不是相对于外部控制参量的临界点,而是系统内部相互作用的某个阈值,因此,它对外部参量的变化并不敏感,而对小的噪声相当敏感。这就是说,在研究 SOC 或沙堆模型时,一方面,必须利用它在临界点上的普适特性,另一方面,要注意它的特殊性,把它当作一个真正的多体问题来处理。根据临界现象的一般特征可知,临界现象的本质是关联长度发散,微小的涨落会引起系统全局的时空响应,从而导致系统属性的无标度性(即特

征尺度的丧失),而无标度性正是分形的基本特征。因为,分形是部分和整体间具有某种相似性,即它的形态不依赖于特征尺度,而具有尺度变换的不变性。SOC 和分形的这种类同不是偶然的,它们间存在一定的因果关系。用巴克的话说,分形是 SOC 的“快照”。由此可以认为,大自然中的分形正是临界自组织的结果。

上述论点同样可以从沙堆模型的计算机模拟和实际实验中得到。在巴克等人的论文和我国物理学家冯端先生的综述《凝聚态物理学新论》中都已指出:当沙堆被堆到一个亚稳的临界定态后,它就会保持动态的稳定,当沙粒继续落到它的上面时可能引起范围大小不同的崩塌,这相当于一个局域扰动所引起的范围大小不同的响应。在模拟中可以通过测量单个扰动感应的滑移总数来得到它所波及范围的分布。

(1) 一维沙堆模型:先来讨论最简单的一维沙堆模型,图 8-3 画出的是沙堆的右半边,显然,该模型只能处在亚稳态,边界条件为沙粒,只能朝右边离开沙堆。

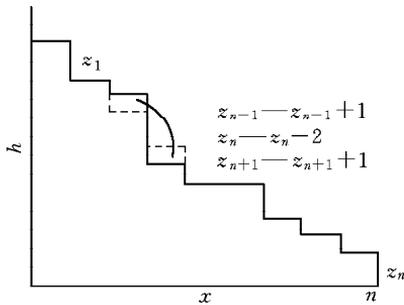


图 8-3 一维沙堆示意图

数字 z_n 代表两个相邻座位的高度差:

$$z_n = h(n) - h(n+1) \tag{8.2.1.1}$$

沙粒落在 n 位置的过程为:

$$z_n \rightarrow z_n + 1 \tag{8.2.1.2}$$

$$z_{n-1} \rightarrow z_{n-1} - 1$$

当高度差超过一个确定临界值 z_c , 即 $z_n > z_c$ 时, 一个沙粒跌落到下一个座位, 有:

$$z_n \rightarrow z_n - 2 \quad (8.2.1.3)$$

$$z_{n\pm 1} \rightarrow z_{n\pm 1} + 1$$

当 $z_n > z_c$ 时, 左端的封闭边界条件和右端的开放边界条件可以写作:

$$z_0 = 0$$

$$z_n \rightarrow z_n - 1 \quad (8.2.1.4)$$

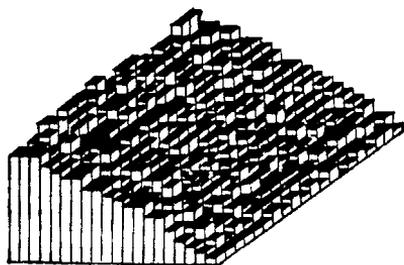
$$z_{n-1} \rightarrow z_{n-1} - 1$$

其中(8.2.1.3)式就是非线性分立扩散方程, 它的非线性来自上述阈值条件。分立变量 z_n 在时刻 $t+1$ 的状态依赖于时刻 t 本身的状态及其最邻近的状态。过程连续进行到所有的 z_n 均低于阈值 z_c 。这样, 稳定性条件可以简单地写成:

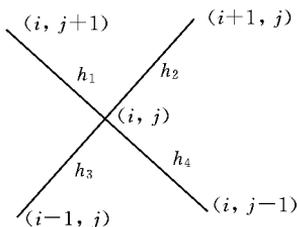
$$z_n < z_c (n = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8.2.1.5)$$

故稳定态数目是 z_c^n , 当沙堆从一个空系统开始无规地增加, 它最终将变成所有的高度差 z_n 都达到临界值 $z_n = z_c$ 。这是所有定态中的最小稳定态, 任何后加的沙粒都将自左向右从座位上跌落, 并在 $n = n$ 处离开系统。如果某个座位上的一个沙粒受到推动, 它也将连续跌落直至离开边界。当沙粒无规增加时, 所得到的沙堆是无规的白噪声。

(2) 二维沙堆模型: 二维沙堆模型如图 8-4 所示。



(a)



(b)

图 8-4 二维沙堆模型示意

(a) 二维沙堆; (b) 二维沙堆中出现的侧向滑动。

当每个座位的高度差超过临界值时 $z(x, y) > z_c$, 局域扰动的非线性扩散满足如下方程 :

$$z(x, y) \rightarrow z(x, y) - 4$$

$$z(x, y \pm 1) \rightarrow z(x, y \pm 1) + 1$$

$$z(x \pm 1, y) \rightarrow z(x \pm 1, y) + 1$$

它们的边界条件是 :

$$z(0, y) = z(x, 0) = z(n+1, y) = z(x, n+1) = 0$$

在对 50×50 阵列上 200 个样品进行系统平均所得的滑动总数 S 的分布为

$$D(s) \approx s^{-\tau}, \tau \approx 1.0$$

为幂律关系。

利用上面的演化方程在局部扰动的情况下可以用计算机进行模拟 , 测量单个扰动感应的滑动总数 S , 一次扰动会引起一定范围的坍塌 , 波及一定的范围(畴)。每次扰动之后系统又会恢复原样 , 下一个扰动则在另一个地方引起坍塌的“畴”。图 8-5 显示来自大单位座位感应的典型的畴结构 , 它们有各种不同的尺寸。

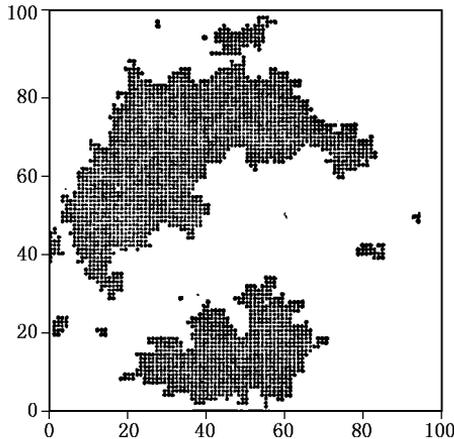


图 8-5 100×100 列阵上的自组织临界态

模拟中测量的数据可以得到坍塌尺寸的分布函数 $D(s)$, 图 8-6 显示 50×50 阵列上 200 个样品进行系统平均得到的分布函数, 在双对数图中的斜率为 -1.0 。

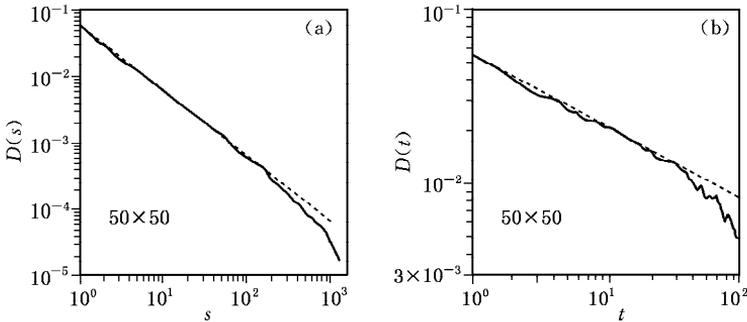


图 8-6

(a) 50×50 列阵上临界态时的集团尺寸分布; (b) 生存时间分布。

三维的情况: 对 $20 \times 20 \times 20$ 阵列上模拟的结果也发现类似的幂律关系:

$$D(s) \approx s^{-1.87}$$

从临界态的单个扰动过程可以转化为相应的集团随时间的演化过程, 总数为 s 的滑动相应于时间 t 。由于滑动速度通常大于一个单位, 所以滑动时间 t 一般小于 s 。在对上述模拟过程以平均响应 s/t 作为权重的生存时间 $D(t)$ 。这个量也有幂律行为:

$$D(t) \approx t^{-\alpha}$$

在二维情况下 $\alpha \approx 0.43$, 在三维情况下 $\alpha \approx 0.92$ 。

如果从能量的观点来看, 一次滑动相当于一个单位能量的耗散, 在位置 γ 和时间 t 的耗散能量, 可表示为:

$$f(\gamma, t) = \delta(\gamma, t)$$

集团尺寸 s 代表局域微扰引起的总的能量耗散, 在时间 t 的滑动总数代表耗散速率, 即:

$$f(t) = \int f(\gamma, t) d\gamma$$

对一次扰动持续时间进行积分可以得到整个集团尺寸：

$$s = \int F(t) dt$$

量 $F(t)$ 的功率谱为：

$$W(f) = \int F(t_0 + t) F(t_0) \exp(2\pi i f t) dt$$

这里 \int 代表对所有初始时间 t_0 的平均。由此同样可以得到幂律形式的功率谱：

$$W(f) = \int [t D(t) / 1 + (2\pi f t)^2] dt \approx f^{-\beta} = f^{-2+\alpha}$$

其中在二维情况时 $\beta \approx 1.57$ ，三维情况时为 $\beta \approx 1.08$ 。

如果改变边界条件，发现情况会有所不同。例如，将原来封闭的边界变为开放的边界时，沙粒可以从边界处离开沙堆，模拟结果表明，时间分布函数为：

$$D(t) \approx t^{-1.05} \text{ , 而功率谱 } W(f) \approx f^{-0.95}$$

从上述模拟结果看出，三维沙堆的功率谱是十分接近 $1/f$ 噪声的功率谱的。这种接近不是偶然的巧合，而是有着深刻的内部原因。这种原因就是 $1/f$ 噪声实际上来源于随机事件的无规叠加，可见， $1/f$ 噪声本来就是广延动力系统的普遍的动力学结果，它直接与空间的组织形态有关。这就意味着，如果说分形是 SOC 的“快照”的话，那么，可以认为噪声也就是 SOC 的“指纹”。

8.2.2 噪声对系统生长的影响

由以上讨论可知，SOC 已把噪声和分形联系了起来。根据巴克等人的理论，可以把它们看成是同一事物的两个方面，或者说 SOC 是它们的共同根源。然而，噪声和分形的关系还远不止如此，特别是 $1/f$ 噪声和分形生长之间并不是完全并列的关系，它们还有更深一层的联系。

一般噪声与分形生长的关系可以在三个层次上讨论：① 噪声

对生长过程的影响 ;②噪声对分形生长的影响 ;③有色噪声对分形生长的影响。

(1) 噪声对系统生长过程的影响 :这是极其普遍和显然的 ,它不仅可以从噪声对生物生长过程的影响中看出 ,也可以从噪声对晶体生长的影响中看出。这里噪声被看作具有一定随机性微小涨落 ,生长过程则被看成是系统演化的一个特定形态。因此 ,噪声对生长过程的影响问题实际上就是涨落与系统演化的关系问题。对此 ,以往的自组织理论作过一些原则上的讨论 :在一般情况下 ,微小的涨落对系统的演化是无关大局的 ,只有当系统被外部控制参量推到临界点时 ,微涨落才可能被放大为巨涨落 ,这时涨落将对系统的自组织起触发和方向选择的作用。但是 ,临界点上的涨落究竟如何触发系统的自组织 ? 它又怎样选择系统演化的方向 ? 这些问题以往都只是从统计的角度来讨论 ,虽然这也能提供某些统计意义上的预测 ,但却并不能使人们感到完全满意。因此 ,噪声对系统自组织的影响实际上还存在许多动力学上的问题需要从理论上进一步探讨。这些问题大体可以分为两个方面 :一方面是不同频谱或不同功率谱的噪声对系统自组织的影响 ,另一方面是不同强度噪声对系统自组织的影响。当噪声的强度较小时 ,可以把它作为微扰来处理 ,而当噪声的强度很大 ,以至超过某一阈值时 ,它对生长过程的影响就不仅仅是起“诱导”和“触发”作用了 ,它还在一定程度上起着动力或阻力的作用。这个问题十分现实 ,正在引起人们越来越大的重视。例如 ,高强度的噪声对生物 ,特别是对儿童生长发育的不良影响就是环保部门特别关注的问题。这里主要涉及的是噪声强度与系统生长的关系问题。

(2) 噪声对分形生长的影响 :噪声对一般生长过程的必要性是众所周知的。正如哈肯曾经指出的那样 ,在计算机模拟中如果不适当地加进噪声或涨落 ,就得不到与实际相符的结果。但是 ,在实验和计算机模拟中究竟如何加进噪声则是一个尚待研究的课题。这里的困难在于随机因素的引入 ,数学上必须求解非线性随机方程 ,在实验上则要同时测定噪声特性和生长的进程。对于噪声对分形生长的影响则有许多问题有待解决 ,即在产生分形形态的过

程中噪声起了什么样的作用？以往对分形生长的研究大多以拉普拉斯型为主，其理论基础是平均场理论。这些模型和理论并没有考虑噪声与涨落对系统自组织中不同生长形态的不同影响，或者说是将它们的不同影响给“平均”掉了。

根据系统的自组织理论，可以认为一切现实存在的东西都是某种系统演化的结果。那么，上述问题的提法就是：如果从可能性的角度看，各种形态和噪声出现的机会应该是相等或相近的。现实世界中分形结构的大量存在说明，在各种形态的竞争中大自然有一个特殊的选择机制。那么，这个选择机制是什么？这也可以从 SOC 中找到解开谜团的线索。从相变理论可知系统在临界点上将出现分叉，这时就出现了多种选择的可能，而在临界点上系统演化的方向又是由涨落来触发和选择的。要使分形大量出现，即具有远大于其他形态的概率，就必须对涨落有所限制。噪声和涨落在物理上实质是相同的，要产生具有无标度性的分形，就必须有具有无标度性的噪声， $1/f$ 噪声正是无标度性的（这一点可以从功率谱的反幂律形式中看出）。据此，不难推论分形的大量出现正是 $1/f$ 噪声大量存在，并在临界点上触发系统自组织和对形态选择的结果。问题的关键在于，如何解释自然界中 $1/f$ 噪声何以会大量存在，或者说“在所有可能存在的物种中自然界为什么会更偏爱分形与 $1/f$ 噪声”？如前所述，自组织的临界态是一种特殊的稳态，它的特征是亚稳而非完全的不稳或稳定。对于系统的演化来说，完全的稳定与完全的不稳定都是很难被大自然选中的。因为完全稳定的系统不会发生演化，而完全不稳定则又不可能存在于现实世界之中。只有处在亚稳定状态中的系统才既可以发生演化，又可保持一定的稳定性，因此最有可能被大自然所选中，在自然界出现的几率也最大。

为了解释自然界中分形物质的大量存在，还可以从自然选择中系统的容错性来考虑。众所周知，自然选择的过程既是一个环境对“物种”的选择过程，又是“物种”间相互竞争的过程。当环境确定后哪个能得以保存，并在生存几率上占较大的优势，主要取决于该“物种”对环境的适应性和对有害变化的承受能力，用现代的

术语来说,就是“物种”的容错性。显然,容错性与系统的稳定性是有一定关系的。但是,在动态行为上能得以保存的“物种”,既不能过于稳定保守,以至不能及时有效地根据外界的变化来调整自己的结构和行为,又不能过于敏感和苛求,否则不能适应外界的变化与扰动。这就决定了它的行为不能是平庸稳定的,也不能是混沌的,而只能是弱混沌的。对自组织的临界态的研究表明,尽管它是复杂系统自组织的结果,尽管它的动态过程十分复杂,但还是和完全的混沌态不同,它是系统在混沌边缘上的进化,因此,巴克等人把它称为“弱混沌态”。弱混沌和完全混沌的行为特性有显著的不同,完全混沌的系统有一个时间尺度,超过这个时间尺度就不可预测,而弱混沌系统则不存在这样的时间尺度,对它可以进行长期预测。上述情况说明,自组织的临界态是一种在时间和空间上都具有容错性的状态,在这种状态下产生的形态自然会具有较高的生存比例和选择价值。

(3) 有色噪声对分形生长的影响:这个问题的实质是不同频谱或功率谱的噪声和不同分形形态之间的关系,或者说功率谱与分形维数的关系。这个关系前面已经谈到了它的一个方面,指出了 $1/f$ 噪声和分形的关系在于它们都是源于SOC,即它们都是自组织临界态的一种表现,是同源的。然而,更重要的是有色噪声还是产生分形的一个基本条件,它对分形的形成起着特殊的诱导作用。

现在先来设想两种极端的情况:一种是白噪声,另一种是布朗噪声。前者是一种自相关函数为零的噪声,即前后不相关的噪声,它的功率谱指数为零。后者则相反,自相关函数为1,前后有着决定性的关系,它的功率谱指数为2。显然,这两种性质完全不同的噪声对分形生长的影响是不会相同的,至于具体有什么不同,则有待进一步研究。 $1/f$ 噪声是介于它们两种之间的,它对分形生长的影响是一个很有意义的课题,但很可惜,这个课题似乎至今没有引起人们足够的重视。

8.3 涌现机制

系统科学中最基本最重要的问题是:整体性何时出现和如何

出现?我们把它称为“涌现之谜”。显然,任何新的整体属性的产生(涌现)都有其内在的原因,这就是系统演化的内部机制。

8.3.1 演化的内部动力

什么是机制?机制就是系统内部的一组特殊约束关系,它通过对微观层次运动的控制、引导和激励来使系统微观层次的相互作用转化为宏观的定向运动。为了有一个形象的感受,先看几个实际生活中的例子。

第一个例子是汽车的发动。发动一辆汽车,需要两个基本条件:汽油和发动机。首先是汽油燃烧,将化学能变为热能,热能就是分子的高速运动的平均动能。其次,需要将微观层次的分子热运动变成汽车宏观层次的定向运动。可见,汽车宏观层次的机械运动来自对微观层次无规混乱的热运动的控制、约束和引导,将气体膨胀限制在一个特定的方向上。汽车发动机的作用就在于此,它具体表现为对点火时间的控制,高温气体的导向,使其在气缸内迅速膨胀,推动活塞的运动,然后又通过连杆和飞轮直到使得车轮旋转。

第二个例子是经济上的宏观控制与微观搞活。微观层次上每个人都从自己的需求和偏好出发,在受到一定约束的条件和环境下追求自己效用最大化。这好比汽车发动时汽油燃烧引起的分子热运动,它是微观层次上的动力。没有个人的积极性,经济是发展不起来的。但是,个人的经济活动从宏观看又是无序的、混乱的。如果不通过某种方式来加以控制、引导,就不会有宏观层次上的经济发展。所以一个社会必须具有种种行政或其他手段来限制人们的自由行动,将它们整合起来,形成宏观发展的动力。这就是社会经济的“发动机”,它是通过一定的生产关系和上层建筑来体现的,具体表现为社会共同遵循的法规、公约、制度、纪律、原则等。

然而,总体上这些起宏观调控作用的法规、公约又不是从社会之外,或某些特殊的个人强加给社会的,它产生于社会机体内部,是通过自组织的方式产生出来的。当每个人在追求自己的最大效用(利益)时必然与其他人发生利益关系。利益相同,可以协作和互补,利益对立,就会进行竞争。但无论是协同还是竞争,都必须

遵循一定的“游戏”规则,否则,不是劳而无功,就是两败俱伤。所以,处在同一社会系统中的人们,无论如何都不能无限制地不顾别人的利益去追求自己的绝对自由,而必须在与其他人的相处中理智地达成一定的“公约”或“默契”,共同约定某些行动或需求是合理的、适当的,而另一些则是不合理的、非法的等。这就是社会公约的产生过程,也是社会系统的形成过程。显然,社会公约的内容是会随时代的不同而变化的,如文化革命之前,人们把“长途贩运”视为是非法的,不容许的。在改革开放的今天,“长途贩运”则被认为是合理的,对搞活经济有利。

第三个例子是统计物理学中著名的麦克斯韦妖。1871年物理学家麦克斯韦提出一个理想实验,用以揭示微观可逆性与宏观不可逆的尖锐矛盾。

如图8-7,设想在一个封闭的体系中加进一个开有小孔的隔板,让一个小小的“精灵”(后来被人称为麦克斯韦妖)把守在这个小孔上,它的任务是对每个需要穿过小孔的分子进行选择,只让B区中运动速度快的分子通过隔板进入A区,而让慢的留下。同样,只让A区中的慢分子通过隔板进入B区,而让快的留在A区。这样一来,经过一段时间后,在A区中就会聚集大量快分子,B区聚集大量慢分子。由于快分子运动对应了高温,慢分子运动对应了低温,从而出现了宏观层次上的温度非均匀分布。

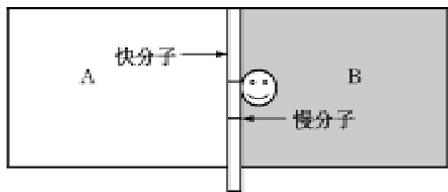


图 8-7 麦克斯韦妖

显然,这个理想实验的结果是违反热力学第二定律的,因为该定律规定封闭体系中对称性元素不可能自发减少(破缺),即原来均匀的体系中不会自发地出现宏观意义上的不均匀,否则,就可能

让热量由高温的 A 区流向低温的 B 区,从而实现第二类永动机。

但是,现实世界中“麦克斯韦妖”似乎不难找到,它的作用就是进行选择,相当于一个具有单向导电性的半导体二极管,或者剧场的看门人。有了这样的选择机制,就可能“绕过”热力学第二定律的限制,导致对称性元素的“破缺”,产生出新的有序结构。从这意义上讲,宏观层次上整体性突现与系统演化的全部秘密就在于存在这样的选择机制。

从以上三个例子不难看出,推动系统演化与自组织的关键是对微观层次运动的约束、控制、引导和选择。世界上有什么东西能产生这样的选择功能呢?线性相互作用是不行的,因为它的特点是单一和对称,所以只有非线性相互作用才能担此“重任”。前面已经讨论了非线性相互作用带来的对称破缺、支配原理和通过正负反馈实现的选择放大(衰减),这些都说明非线性在系统演化中起着“发动机”和“推进器”的作用。

在系统发展的所有问题中,机制问题也许是最重要、最核心的。至于这台发动机具体包含哪些部件,可以大体罗列如下:①稳定机制与超稳定机制。用以保持系统结构和性态的稳定;②反馈机制。包括自反机制、前馈机制;③自催化机制和超循环机制。起激励放大作用;④控制调节机制。起约束、抑制和引导作用;⑤评价选择机制。系统对自我的评价和对环境的评价;⑥自复制机制。

8.3.2 序参量的涌现

从定量的角度看,系统整体性的涌现要求代表整体性的某个参量将从零变为某个有限值。用什么量来刻画这个突变呢?开始时人们很自然地想到热力学熵,因为熵是系统内部无序程度的量度,它的减少就体现了有序性的增加。普里高津的耗散结构理论就是这个思路。但是,人们很快发现熵对刻画整体性的涌现并不是一个好的参量,因为熵值不能直接进行测量,更重要的是整体性发生涌现时,熵值没有发生跃变,用哈肯的话来说,用熵作自组织的标度,显得“太粗糙”了。哈肯认为,1937年苏联物理学家朗道在研究二类相变时提出的序参量是个极好的标度,因为这个量在相变的临界点附近具有不确定性,它既可以用来说明系统内部的有

序程度和对称程度,又可以进行宏观上的测量。例如,铁磁相变中的序参量为自发磁化强度,它就是铁磁体对外表现出来的磁性强度,当铁磁体的温度在临界点(居里点)以上时,内部处于无序相,对外的自发磁化强度为零;当温度下降到临界点以下时,铁磁体从无序相变为有序相,内部的分子电流排列整齐。作为序参量的自发磁化强度也变为一个有限值,这个从无到有的跃变正好对应了整体性的突变。物理学家们发现,类似情况在其他类型的相变中也同样存在。如在气液相变中的气液密度差,混合液的化学相变中的浓度差,超导相变中的“能隙”,超流相变中的“电子对量子几率幅”,铁电相变中的电极化强度等,都分别充当了序参量的角色。这就充分说明尽管在不同相变中的序参量有着不同的内容,但共同的特征是当系统内部处于相对无序、高对称时,序参量为零;当系统内部处在高度有序、低对称度时,序参量具有某个非零值,即在临界点或相变点上序参量发生了从无到有的变化,即使这个变化是连续的,也表明系统内部结构的突变和新整体性的“涌现”。这些都说明用序参量来刻画整体的涌现是十分恰当的。但是,这里要强调以下几点:

(1) 序参量是宏观参量:序参量究竟是宏观参量还是微观变量,对系统整体来说是十分重要的。宏观参量是刻画系统整体性的参量,它可以从系统外部直接进行测量;而微观参量则是描述元素或子系统的参量,它是不能进行宏观测量的。对于通常的系统来说,这样的参量有多达 10^{23} 个,需要有同样数量级的微分方程来进行描述。序参量是宏观参量,这一观点是协同学中再三强调的,但一旦谈到序参量从哪里来以及它与微观变量的关系时,事情就变得模糊了。比如,在讲述支配原理时,哈肯认为,当外部控制参量达到临界点时,因各子系统阻尼系数对外界作用的响应不同而会分化为两种模式。由于序参量 U 的弛豫时间比其他子系统(快变量)慢得多,所以“子系统的稳定阻尼模式必须直接随着序参量而变化,即子系统由序参量控制”,因此“我们可以通过寻找那些衰减最慢的模式来得到序参量”。这里哈肯强调的是序参量对子系统的“宏观”控制,和可以通过衰减最慢的模式来“得到”序参量。

这无疑是正确的。但一些文献中却以此为依据,把序参量与微观层次的慢变量等同起来,实际上错误地把序参量当做微观参量。出现这种错误的原因在于误解了序参量的支配作用。支配可以有两种方式:一种是微观变量之间的控制与支配,如同一个人把自己的意志强加于另一个人。另一种是人们常说的“宏观调控”,它是通过类似某种宏观的公约、制度、法规等手段来对微观客体实施控制的,而这些公约和法规正是宏观整体性的一种表现。序参量对子系统的控制就是属于后者。

(2) 序参量是系统内部元素间合作协调的强度标志:从物理学中相变的例子可以看出,序参量与外部的控制参量有本质的不同,它不是外部作用强加于系统的,而是系统内部元素间发生非线性相互作用达到一定程度后自动、自发产生出来的。这就是以后将要详细谈论的自组织行为的本质特征。当后来被称为元素或子系统的事物处于无序、独立、自由、不合作的状态时(此时它们还不能称为元素或子系统)不会有集体行动,也不会产生合作效应,这时的序参量为零。当外部控制参量趋近临界点时,原来的那些事物之间就会出现非线性的长程关联,出现相互间的合作与协同,这时就出现了对外体现整体属性,对内控制、支配或“维持”这种合作协同关系的序参量。这就是前面讲的激光系统中的情况,也是在人类社会中经常看到的。

(3) 序参量支配元素的行动,决定系统演化的进程:从一定意义上讲,序参量体现了整体的意志,支配一切元素或子系统的行动。哈肯在谈到序参量时特别举了语言和文化的例子,认为它们一旦产生出来,就具有支配个人行为的力量,正如电场一旦建立起来,就能驱使偶极子的运动一样。动物种群系统形成后,个体总数至少“在平均的意义上”控制着种群全体的命运,成为种群系统的序参量。通过控制一切子系统的行为,序参量就成为主宰系统演化过程的力量。子系统的合作产生序参量,序参量命令子系统合作行动,两者的关系有点像鸡与蛋的关系,不能说谁先谁后,而是相互作为对方存在的条件。这就是自组织过程的基本特征。

(4) 系统整体行为服从序参量方程:既然序参量决定了系统的

演化进程,那么,建立和求解序参量方程就成了系统理论的基本任务。协同学中正是通过求解广义金兹堡-朗道方程来处理激光系统自组织问题的。限于篇幅,这里不作详细引述,有兴趣的读者可以直接参考哈肯的《协同学引论》和《高等协同学》。当存在多个序参量时,情况会更复杂一些,它们之间可能合作,也可能出现竞争,产生出不同的结构。在上面的哈肯的书中,他对贝纳德流

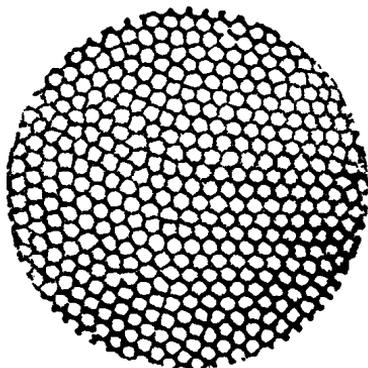


图 8-8 贝纳德元胞俯视图

进行了分析,指出发生第一次失稳之后,同时存在三个序参量,每一个代表一种波的振幅,支配着一个平面波。若三个序参量相互合作,液体表面形成六角形结构,发展到第二次失稳后,序参量间的合作被竞争所代替。若竞争的结果是某个模获胜,就会出现如图8-8所示的蜂窝状结构。

8.3.3 支配原理(slaving principle)

当系统处于临界点时,可以消去数目庞大的自由度,因而系统的宏观行为只由数目极少的几个自由度支配。支配原理在协同学中处于核心地位。

这一节将从数学上具体证明支配原理,证明当系统处于失去线性稳定性之点时,如何消去众多的变量。为此,先通过一个简单例子说明基本思想,然后给出一个适用于非线性微分方程的通用程序。

(1) 两个例子

例 1:令 q 表示系统的状态变量, q 是空间坐标 $X = (x, y, z)$ 和时间 t 的函数

$$q = q(X, t)$$

由于系统的变量数高达 10^{23} ,采用状态向量来表示:

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_n)$$

为了简单起见,将所有的变量分为两组:

$$q_u = (q_1, q_2, \dots, q_k)$$

$$q_s = (q_{k+1}, q_{k+2}, \dots, q_n)$$

设它们满足下列哈肯模型:

$$\dot{q}_s = -kq_s - aq_u q_s$$

$$\dot{q}_u = -\lambda q_u + b q_u^2$$

设系统是有阻尼的,对应的系统时间常数为:

$$\tau_s = \frac{1}{\lambda}, \tau_u = \frac{1}{k}$$

如果有 $\lambda \gg k$, 且 $\lambda > 0$, 则有 $\tau_s \gg \tau_u$, 即表示 q_s 为慢变量, q_u 为快变量。

运用绝热消去法,令 $\dot{q}_s = 0$, 代入上方程, 得到:

$$q_u = \lambda^{-1} b q_s^2$$

于是

$$\dot{q}_s = -kq_s - k_1 q_s^3$$

式中 $k_1 = \frac{ab}{\lambda}$, 显然这是一种过阻尼振动的运动方程, 其势函数:

$$V(q_u) = \frac{1}{2} k q_s^2 + \frac{1}{4} k_1 q_s^4$$

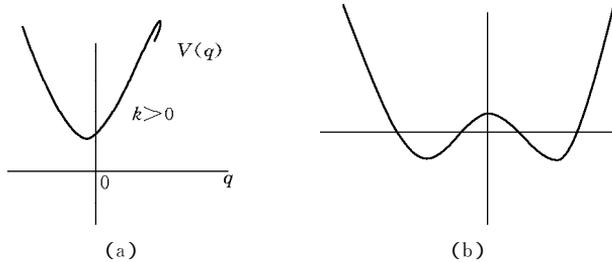


图 8-9 两种势能曲线

分别画出 $k > 0$ 和 $k < 0$ ($k_1 > 0$) 两种不同情况下的势能曲线。平衡点集由 $\dot{q} = 0$ 确定。

1) 当 $k > 0$ 时,如图 8-9(a)所示,有唯一稳定平衡点 $q = 0$ (吸引子);

2) 当 $k < 0, k_1 > 0$ 有三个平衡点:

$q = 0$ 为不稳定平衡点,

$q = \pm \sqrt{\frac{|k|}{k_2}}$ 为两个稳定平衡点。

如果把上述过程与过阻尼振动相比较,就可以很直观地看到,当 q_s 的弹性模量 k 从正变到负时,势函数曲线就从图 8-9(a)变到图 8-9(b),即平衡点的稳定性发生了变化。

从上面的例子中哈肯得出了两个极为重要的结论:

1) 当 k 从正变到负时,说明变量中有一部分(往往是少数) q_s 的势能曲线发生了根本变化。哈肯把这称为临界慢化,相应的 q_s 为慢变量。

2) 由于 q_s 的弹性模量 $k \ll q_u$ 的弹性模量 λ 相应的“回归”时间 $\tau_s = \frac{1}{k} \gg \tau_u = \frac{1}{\lambda}$, q_s 为慢变量 q_u 为快变量。

根据绝热消去法可得到少数慢变量 q_s 对大多数快变量 q_u 的支配——这就是哈肯当时所说的著名的支配原理(有时又称为役使原理、控制原理等)。

例 2: 首先处理下列具有 u 和 s 两个变量的非线性方程:

$$\dot{u} = \alpha u - us \quad (8.3.3.1)$$

$$\dot{s} = \beta s + u^2 \quad (8.3.3.2)$$

并假定: $\alpha \geq 0; \beta > 0$ 。

当分别忽略非线性项 us 与 u^2 时,得到两个非耦合方程,这类方程是大家在线性稳定性分析中所熟悉的。很明显,8.3.3.1 式在线性稳定性分析中表示一个临界稳定或不稳定的模,而 s 表示稳定模,这是我们所以选择记号 u (不稳定或不衰减)与 s (稳定)的原因。为了证明 s 可用 u 来表示,因而可以从(8.3.3.2)式中消去 s 。方程(8.3.3.2)很容易通过积分求解:

$$s(t) = \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} u^2(\tau) d\tau \quad (8.3.3.3)$$

其中,我们选择了初始条件: $t = -\infty$ 时 $s = 0$ 。如果 $|u(\tau)|^2$ 对所有 τ 有界或者在 $\tau \rightarrow -\infty$ 时发散,由于 $\exp(-|\beta\tau|)$, 则(8.3.3.3)之积分存在。当然,这是一个必须检验的自洽条件。

必须证明(8.3.3.3)的积分可以变换为这样的形式: t 时刻之 s 仅仅是 t 时刻 u 的函数。

(2) 绝热近似: 利用分部积分规则:

$$\int \dot{v}\omega d\tau = v\omega - \int v\dot{\omega} d\tau \quad (8.3.3.4)$$

对(8.3.3.3)积分,其中取 $v = \exp[-\beta(t-\tau)]$, $\omega = u^2$, 得到:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} u^2(t) - \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} 2(u\dot{u})_{\tau} d\tau \quad (8.3.3.5)$$

现在考虑 u 变化很小,因而 $\dot{u}u$ 可以当成小量的情况,它意味着(8.3.3.5)之积分可以忽略。这就是绝热近似。由此得到:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} u^2(t) \quad (8.3.3.6)$$

事实上只要在(8.3.3.2)的左端置

$$\dot{s} = 0 \quad (8.3.3.7)$$

就能得到解(8.3.3.6)。

现在考虑在什么条件下(8.3.3.4)的积分相对于第一项可以省略。为此,考虑(8.3.3.5)中的

$$(|u| |\dot{u}|)_{\max} \quad (8.3.3.8)$$

为对(8.3.3.8)的积分进行估计,可将(8.3.3.5)放在积分号之前,因此,要忽略积分项,必须:

$$\frac{(|u| |\dot{u}|)_{\max}}{\beta^2} \ll \frac{|u|^2}{\beta} \quad (8.3.3.9)$$

为此,只要

$$|\dot{u}|_{\max} \ll \beta |u| \quad (8.3.3.10)$$

上述条件便得到满足。条件(8.3.3.10)给出了绝热近似之含义的基本思想,它要求 u 的变化与由衰减常数 $\alpha = \beta$ 所规定的变化比较起来要足够缓慢。

现在看看如何精确地用 $u(t)$ 表示 $s(t)$ 。

(3) 精确消去法:为引出本方程的实质,让 $\alpha = 0$, 由此(8.3.3.1)就变成:

$$\dot{u} = -us \quad (8.3.3.11)$$

现在利用(8.3.3.5)(它仍是一精确的关系),并根据(8.3.3.11)将其中的 \dot{u} 用 $-us$ 替代:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} u^2(t) + \frac{2}{\beta} \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} (u^2 s)_\tau d\tau \quad (8.3.3.12)$$

由于 τ 时间出现在积分号中,因而上式是样子 $s(t)$ 的积分方程。为求解这一方程,应用一迭代程序,这等同于将 s 表示成 u 的幂级数。作为最低阶的近似,可以将(8.3.3.12)之右的 s 用(8.3.3.6)之近似关系表示。据此,(8.3.3.12)将被变换为:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} u^2(t) + \frac{2}{\beta} \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} \frac{1}{\beta} u^4(\tau) d\tau \quad (8.3.3.13)$$

为得到下一步的近似,用公式(8.3.3.4)对(8.3.3.13)进行分部积分,其中将(8.3.3.13)中之指数函数取为 V , 由此得到:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} u^2(t) + \frac{2}{\beta^3} + u^4(t) - \frac{8}{\beta^3} \int e^{-\beta(t-\tau)} (u^3 \dot{u})_\tau d\tau \quad (8.3.3.14)$$

在积分中可以根据(8.3.3.11)将 \dot{u} 代替掉,得到:

$$I = \frac{8}{\beta^3} \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} u^4 \left(\frac{1}{\beta} u^2 + \frac{2}{\beta^2} u^4 \right) d\tau \quad (8.3.3.15)$$

可以将(8.3.3.15)分解为两项:一项包含 u^6 之积分,另一项包含更高阶项:

$$I = \frac{8}{\beta^4} \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} u^6 d\tau + h.o. \quad (8.3.3.16)$$

如前一般,作一次分部积分,得到下列形式的 $s(t)$,

$$s(t) = \frac{1}{\beta}u^2 + \frac{2}{\beta^2}u^4 + \frac{8u^6}{\beta^3} + \dots \quad (8.3.3.17)$$

很显然,利用这一程序可以一而再地进行分部积分,由此将 $s(t)$ 表示成相同时刻下的 $u(t)$ 的某一幂级数。可以预料,如果 u 足够小,只要保留 b 之幂级数中的几项便可得到一相当好的近似。在研究这一程序之收敛性问题前,必须首先推导一些精确的关系式。为此,在原方程(8.3.3.11)中引入下列简记符号,即:

$$\dot{u} = -us = Q(u, s) \quad (8.3.3.18)$$

$$\dot{s} = -\beta s + u^2 = \beta s + P(u, s) \quad (8.3.3.19)$$

请注意在本特例中 P 只是 u 之函数:

$$P = P(u) \quad (8.3.3.20)$$

上面所描述之程序表明,可以用 u 将 s 表出:

$$s = s(u) \quad (8.3.3.21)$$

因此,假定已经进行了这一替代,想得到 $s(u)$ 的一形式化级数展开,可从(8.3.3.3)着手,将其改写成:

$$s(u(t)) = \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} P(u)_\tau d\tau \quad (8.3.3.22)$$

同前一样,进行分部积分:取(8.3.3.4)中之 w 为 $P(u)$ 。 $P(u)$ 对时间之微分可以这样来处理:首先 P 对 u 微分,然后 u 对时间微分。但根据(8.3.3.18) μ 的时间导数可用 $Q(u, s)$ 代替,而其中的 s 至少原则上说可以再次被考虑成 u 之函数。不断地进行这一分部积分,每一次均用(8.3.3.18),最终将得到关系式:

$$s(u) = \frac{1}{\beta}P(u) - \frac{1}{\beta}Q \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{\beta}P + \frac{1}{\beta}Q \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{\beta}Q \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{\beta}P + \dots \quad (8.3.3.23)$$

后面将看到,使用下列简记符号是有益的:

$$\left(\frac{d}{dt}\right)_{\infty} = Q(u, s(u)) \frac{\partial}{\partial u} \quad (8.3.3.24)$$

这一式子之右端对左端给出定义。很明显, 可以将(8.3.3.23)考虑成算子(8.3.3.23)之形式几何级数, 因而(8.3.3.23)可以概括地表示为:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\beta} \left(\frac{d}{dt}\right)_{\infty}\right)} P \quad (8.3.3.25)$$

或者利用原记号:

$$s(t) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{\left[1 + Q \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{\beta}\right]} P \quad (8.3.3.26)$$

两边乘上算符:

$$\left(1 + Q \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{\beta}\right) \quad (8.3.3.27)$$

由左边得到:

$$\left(\beta + Q \frac{\partial}{\partial u}\right) s = P(u, s) \quad (8.3.3.28)$$

(4) 支配原理的一般形式: 基本方程: 考虑一组随时间变化的变量 $u_1, u_2, \dots, s_1, s_2, \dots, \varphi_1, \varphi_2, \dots$, 或者写成矢量的形式 u, s, φ 。记号 u 表示系统的不稳定或不衰减模, 而 s 表示稳定模, 变量 φ 起着相角的作用。假定这些变量服从下列常微分方程组:

$$\dot{u} = \Lambda_u u + \bar{Q}(u, s, \varphi, t) + F_u(t) = Q(u, s, \varphi, t) \quad (8.3.3.29)$$

$$\dot{s} = \Lambda_s s + \bar{P}(u, s, \varphi, t) + F_s(t) = \Lambda_s s + P(u, s, \varphi, t) \quad (8.3.3.30)$$

$$\dot{\varphi} = \bar{R}(u, s, \varphi, t) + F_{\varphi}(t) = R(u, s, \varphi, t) \quad (8.3.3.31)$$

其中上述各行之最后一等式只是一简记符号。

我们的目标是通过一个显式的构造将(8.3.3.25~8.3.3.27)中的时变函数 $s(t)$ 表示成 u 与 φ (以及 t) 的函数。

(5) 支配原理的应用 :形象地说 ,役使方法好比一种“投影”的方法。将平面的图像投影到直线或曲线上 ,将空间立体的问题投影到平面上。但是它比投影方法更好 ,因为投影不可避免地要损失一部分信息 ,而“役使”则是将全部信息由少数几个变量集中体现 ,就好比平常选代表一样。将多变量的问题化为少变量的问题 ,在理论上具有极大的价值 ,因而也是物理学家和数学家们长期探索企望得到的。历史上役使原理与物理学中的绝热消去法有着深刻的渊源关系。哈肯正是受后者的启发 ,发现它的普遍性才提出役使原理的 ,因此 ,哈肯一向对役使原理评价很高。此外 ,役使原理与数学上的慢流形定理、中心流形定理及混沌学中的慢流形定理也有密切的关系 ,可以认为 ,后者是前者的数学表达 ,前者是后者的总称。例如 ,慢流形定理和中心流形定理针对系统在相空间中的运动轨迹而言 ,其中把慢变量的运动轨迹用慢流形来表示。开始演化时系统中存在快流形和慢流形 ,但演化的结果是系统稳定在慢流形之上。至于中心流形则代表了那些受到扰动后既不放大(如指数发散)也不缩小(如指数衰减)的稳定流形 ,它正好体现了运动中的“定常性”和“不变性” ,是系统演化的主要代表者。联系到前面所提到的自组织临界态(SOC) ,可以认为 ,中心流形也许正是可以表达自组织临界态的运动模式。至于惯性流形 ,作为研究混沌运动和奇怪吸引子结构的一种有力工具 ,其客观基础也是役使原理。由此可见 ,哈肯将役使原理看作是自组织或复杂系统演化的第一条原理是有充分的理由的。

既然运用役使原理对问题进行简化是一种十分重要的方法 ,那么 ,怎样来运用这种方法呢 ?应该抓住以下几点 :

1) 了解和把握什么“时刻”出现临界慢化 :因为临界慢化必然带来对称性破缺 ,这是产生有序结构的前提和基础。这里要把握的“时刻”就是“临界阈值” ,它通常被称为关键或关节点 ,在哲学上称为度。把握事物变化的“度”之所以十分重要 ,是因为这里包含了以后演化的契机和运动模式的萌芽 ,而且只有在这个时候加以适当控制 ,才具有方向选择的作用 ,因此 ,耗费最小 ,效果最佳。

2) 了解哪些元素或模式会出现临界慢化 :在外界控制参量的

作用下,哪些会出现临界慢化,哪些不会出现。那些发生慢化的运动模式就将在未来的系统中占主导地位,因此,事先发现和认识哪些元素或模式将发生慢化,在什么条件下发生慢化,就等于发现和把握了未来的“领袖”,这往往是解决问题的关键。

3) 找出慢变量对快变量的支配方程:它就是出现主从关系、役使关系后必须遵从的规律和原则,了解变量如何支配、控制快变量,就等于搞清了系统内部的动态结构。

4) 找出序参量方程:一般序参量方程有两种形式:一是当只有一个序参量时,它代表系统整体的运动模式,它是由于“役使”而产生的;二是当有多个序参量时,它体现了各种因素怎样相互协同而产生整体模式的,它相当于一个集体领导的原则。

8.4 协同机制

众所周知,复杂系统是由多个元素或子系统所构成的,这些“元件”不是简单地临时凑合,而是一个“牵一发而动全身”的有机整体。在这个整体的形成和发展过程中,子系统间的相互作用通常可以采取各种不同的形式。例如,为争夺生存空间,获得所需求的物质、能量、信息;为了争夺领导权、控制权、主动权而进行的竞争和为了共同的利益和目标所进行的分工协作等。这种竞争和协同的结果,必然使每个子系统(将要构成一个更大系统的元素或部件)丧失一部分原来的“自由”,而受到整体和其他元件的“约束”。整体上约束的必要性是显而易见的。因为整体要得以存在和保持,就不能让它的各个组成部分独立地“各行其是”,而要求它们相互配合,协同工作,“各尽所能”,“安守本分”,服从一个统一的原则。为了做到这一点,一个“好的”整体必需包容和“代表”自己各个部分的“利益”,为它们提供所需要的东西和“保护”。对于各个组成部分来说,它并不一定需要认识这种约束对于整体的必要性,也不一定完全是“自觉自愿”地去服从,但它只要还“生活”在这个系统之中,要得到系统的保护和其他子系统的支持,它就“不得不”服从系统给它的约束,接受其他部分对它的作用。系统中的约束关系可以通过子系统间的相互作用来体现,也可以通过某种共同

制定的“公约”、“条例”、法规、道德规范和默契等来体现。正如城市的交通规则原则上就是由每个需要在路上行走的人所共同约定的,一旦被制定出来,就会对每个行人发生约束作用。如果有谁违反,就会受到相应的惩罚,或者被交通警察罚款,或者发生交通事故(这是一种远比罚款重得多的惩罚),其结果仍然是迫使行人接受交通规则的约束。

也许有人会注意到,在人们谈论这些事情时常常使用一些“拟人化”的和带感情色彩的语言。例如,说子系统受到约束、控制,它必须服从、伺服从于整体或某个元件等。按照哈肯的说法,这也是子系统间的一种协同关系,或者一部分对另一部分的役使、支配、奴役关系。其实,这些带强烈感情色彩的说法都只是为了描述的生动和方便。在这里,最根本的是子系统相互间的作用形成一个有机的整体。对一个系统来说,不管各子系统之间的竞争如何激烈,也不管它们之间存在怎样的差异和不同,只要系统的整体性还被保持,它们之间的协同和配合总是占主导地位的。如果我们不管用词的感情色彩,这种协同和配合实际上就体现了系统内部相对稳定的结构。下面讨论这种结构形成的过程以及存在的意义。

从系统内部各子系统(元素)间相互作用的角度来看演化,会发现始终存在着两个既相互矛盾又相互补充的方面。一方面是子系统间的协同;另一方面是子系统间的竞争。没有协同,子系统会四分五裂,难以构成一个有机的整体;没有竞争,子系统会处于一种均衡状态,既不分化,又不分工和分层,系统同样不得生存和发展。因此,子系统间既协同又竞争,是使系统得以构成一个有机整体、并使它得以保存和发展的必要前提。但是在不同系统的演化中,子系统间协同与竞争的形式和内容各不相同。那么,其中有没有什么共同的规律性呢?我们发现,无论哪一类系统,竞争的结果都必然导致一种特殊的“主从”关系,或多数服从少数的关系。用哈肯的话来说,就是役使关系或伺服关系。哈肯是十分重视这一点的,他认为,役使原理是系统自组织的基本原理(slaving principle),按我们的观点,它同样是系统演化的一个基本原理。这个原理可以表述为:演化中的系统,由于内部的竞争与协同而必然导致

一种“主从”关系的出现。这种主从关系对于系统演化和人们认识系统演化都有十分重要的意义。

8.4.1 役使原理

可见,无论对于哪一种类型,内部元素、部件或子系统的竞争、协同,必然导致多数服从少数的“役使”。这是系统自组织的必然结果,也是复杂系统演化的一般规律。反之,“役使”的出现,又促进了系统的演化。为什么会出现这种情况呢?综上所述,役使的具体作用和意义有以下方面。

(1) 形成整体:由于“役使”的出现而使系统形成了一个有机的整体,具有了原来系统中的成员所不具有的新的整体属性。从这个意义上讲,它标志了系统真正的创生,就好比将分散的力量组成了一支统一的新军队。

(2) 提高效率:由于“役使”关系的出现,使得系统的结构或内部关系变得清晰、简单,从而在客观上提高了系统的生存发展效率。

(3) 简化结构:由于系统中存在“役使”关系,使我们只要分析少数为主的运动变量(慢变量)的变化就行了,从而使问题大大地简化。

以上几点中,前两点是关于系统演化本身的,后者则是关于人们对复杂系统演化的认识,它实际上为我们提供了一种新的方法。这种方法在理论和实践上都有着十分重大的意义。

8.4.2 协同的阶段性的

协同是系统内部的一种特殊状态,它是经历了一系列过程才达到的。一般协同过程包括以下阶段。

(1) 临界点上的自发对称性破缺:为了阐明原来分散的子系统如何自发地组织成一个内部相互协同的有机整体,哈肯在协同学中提出了著名的役使原理(有时也称奴役原理、支配原理、伺服原理等等)。这一原理在本节一开始就作了表述,它的内容也可以从名称中看出来。但是,子系统间的协同和役使关系同样是演化过程本身的产物,为了说明这一点,他首先谈到了临界点上的对称性破缺,为此,他使用了一个物理模型。设有一大批将要构成一个

“系统”的子系统,为了简单起见,可将其看成是一个由简谐振子组成的集合,其中各个振子的不同行为模式可以用不同的弛豫时间来描述。弛豫时间可以简单地理解为受到扰动发生偏离后回到了原状态的时间长短,它们与各子系统的弹性模量大小及“势能曲线”的形态陡峭与平坦有关的。当外部控制参量,如温度、压力达到某个阈值,即临界点时,在外部作用和涨落的诱导下,由于“系统”内各种振子对外界响应的不同,势必有一部分的弹性模量变小,势能曲线“软化”,变得平坦,因而弛豫时间变长,成了回复较慢的“慢变量”(通常称为临界慢化),而另一部分则因“感受”不大,变化不多,相比之下,就成了“快变量”。这种自行分化为慢变量和快变量的过程在物理学上被称为自发的“对称性破缺”。对称性破缺在复杂系统中其实是一个十分普遍的现象,它通常表现为系统创生与发展过程中的分化和类聚,而分化和类聚的结果又为系统内部关系的演化提供了一个必要条件——非平衡。

(2)“慢变量”对“快变量”的役使:出现“慢变量”和“快变量”的分化实际上已经打破了原来的平衡,改变了原来子系统间相互独立平权的关系,导致子系统间进一步的相干和竞争,而它们又使原来线性相干发展为非线性相干,其结果是少数子系统的运动模式(由慢变量所代表)支配和控制了大部分其他子系统的运动。这种新型关系的出现,使得系统不再是“一盘散沙”,而有可能变成了一个有机的整体,并且“涌现”出作为一个整体所独有的运动模式。但是,这对于一个复杂系统来说并不是一步就能完成的,后面还有许多路程要走。不过万事开头难,在由分散的独立的一堆子系统变为一个有机整体的过程中,慢变量“役使”“快变量”是走了关键的第一步。这种役使的情况,用数学语言表述就是所有的“快变量”都可以写成“慢变量”的某个函数形式,它就是协同学中的“支配方程”。根据支配方程可以由“慢变量”求得“快变量”。这对于把握系统的运动模式是十分有利的,因为只要知道少数慢变量及慢变量对快变量的支配方程就够了,而无需去了解每个快变量的变化。从方法论上看,这意味着系统的运动被“简化”了。

(3)“类聚”和役使的升级:慢变量对快变量的役使为系统的创

生和进一步发展提供了新的基础,在此基础上,各类子系统将以慢变量为核心进一步类聚,开始出现一些有核集团或无核的“元胞”。此时,在那些集团和元胞间又会出现更为激烈和更大规模的竞争,这种竞争的内容和形式极为丰富。例如,有为争夺有限生存空间和生活资料所进行的竞争;有为达到某个共同的(或不同的)目标而互相配合,互相帮助或利用,当然也有处在同一(或不同)位置或状态间的相互吸引与排斥等。但不管“相干”的形式和强度如何,其结果必然会导致进一步的聚合和分化。这时子系统间的关系会相对地明朗和简化,出现一个带有普遍性的态势,即其中的极少部分处在“主导”地位,而其他的绝大多数则处在次要的、被支配的地位。否则,如果占主导地位的子系统过多,它们之间也会发生竞争,从而会出现一个新的、更强大的“君主”,其他的降为“诸侯”,或者达到一种均衡。这时虽然谁也成不了“君主”或“国王”,但却会在它们之间达到某种共同遵守的协议或契约,而这种协议或契约就实际上起到了统帅全局的主导地位。这就是说,系统演化中内部元素或子系统之间的协同与竞争总是通过役使而不断升级,最终必然导致一种统一格局的出现,这个格局的特点就是“一主多从”或“少主多从”,可以称其为“多数服从少数”的原则。但“多数服从少数”的原则不能被理解为“一长制”或“独裁统治”。在子系统内部是十分“民主”的,因为它始终遵从同一类运动规律的“公平竞争”,而且从前面的讨论中也可以发现,这种“多数服从少数”中的“少数”,既可以由原来元素、部件中的某些成员来代表与实施,如同人群中的领袖,又可以是某种大家都必须遵守的公约、契约或协议。当然,有时也可以合二为一,由少数领袖监督公约的制定和执行。但是,一旦这些“领袖”不能代表“群众”的共同利益,失去了群众的信任,他就会被推翻,重新选出新的领袖。对于公约和协议也是一样,这时的公约和协议会被新的所取代。

8.5 自耦合机制

系统演化中经常表现出定义的不变性和定常性,如趋极性——方向的不变性,层次性——结构格局的不变性,自相似

性——形态的不变性等,这些都是人们较为熟悉的。然而,理论探讨发现,还有一些出乎人们想像的规律和属性在起作用,不完全性和质朴性(边界的不变性)就是其中有代表性的两种。本节先讨论不完全性原理。这个原理可以表述为:一切演化中的系统因其内部的自耦合而必然是不完全的,同时又因其不完全而必然对外开放,系统的演化过程就是在追求整体完整中不断超出旧的框架,得到新的属性、结构和形态的过程。

不完全性既是系统的存在方式,又是系统的演化形态,同时也是逻辑性质。演化的不完全性原理是受哥德尔不完备性定理的启示而提出来的,但它的意义和内容已经超出了后者纯逻辑的范畴,主要涉及的是系统演化的内在机制。

8.5.1 完整但不完备

任何系统都是一个有机而完整的整体,这种完整性集中体现在系统内部的任何一个部分或元素,都在原则上既是必不可少的又是决非多余的。据此,在系统科学的方法论原则中也有一条基本的原则——整体性原则。系统的整体具有不同于组成部分的特殊属性,这种属性来源于组成整体的元件质量、系统内部的结构以及系统所处的环境和时机等方面。系统作为一个有机的整体,其整体性必须时时得到维护和保障,前面所讲的边界的封闭性、形态的自相似性等在一定意义上都是整体性的表现。

整体性的保持是系统生存的充分必要条件,但是系统不仅要生存,而且要发展,这就是说,在系统的演化中,除了正面的肯定的方面之外,还必须包含它的反面的和否定的方面,用老黑格尔的话来说,一个事物有它的“正题”、“反题”和“合题”。如果说整体性是系统的正题的话,那么,不完全性就是它的反题,而合题就是系统的生存与发展。一个完整的系统,何以会具有不完全性呢?这个问题可以从逻辑形式和客观现实两个方面来加以讨论。

8.5.2 哥德尔不完备性定理

不完全性的问题发端于数理逻辑中的哥德尔不完备性定理。1931年,年仅25岁的捷克(当时的奥地利)数理逻辑学家K.哥德尔在题为《论数学原理和有关系统I的形式不可判定命题》的论文

中宣布了“一个包含初等数论的形式系统 P 如果是相容的则它是不完全的,即在本系统中必须存在不可证明的真命题”(哥德尔第一定理)。该定理还有一个推论:一个包含初等数论的形式系统的相容性在该系统内是不可证明的,即这样的系统其相容性在本系统中不可证明,更不能有穷方法证明(哥德尔第二定理)。

理解上述原理的关键是搞清公理系统的不完全性与不相容性。在逻辑上一个公理系统的完全性是有严格定义的。按照希尔伯特 1928 年在《理论逻辑基础》中的讲法,“这里完全的意思是指至少要求每个个体域中为真的所有逻辑公式都能从这个公理系统推导出来”。这句话也可以理解为该公理系统中所有的真逻辑公式都是从公理系统内部推导出来(产生)的。它意味着:①一个完全的逻辑系统内不允许存在不是由该系统自身所推导出来的“杂质”(即不是由该公理系统推导出来的真逻辑公式);②系统是“自给自足”的,在构造或推导所有的真逻辑公式时,无需借助于该公理之外的什么“东西”。而哥德尔不完备性定理却对这种可能性从根本上予以了否认。就是说,一方面系统内部可能存在“杂质”,另一方面构造一个“完备”的体系必须借助外界的“帮助”(例如在逻辑上抛弃有穷方法而引进超穷方法)。

从逻辑上看,一个体系的相容性就是它的协调性或无矛盾性,即人们常说的体系优美和谐。众所周知,世界上理论体系之完美莫过于数学。数学体系完美的标志就是体系内部的相容性或一致性,即不允许在推导或计算中得出相互矛盾的结果。这种数学无矛盾的观点几乎成了数学家们至高无上的信条。古希腊的毕达哥拉斯学派甚至把数学当作万物之源,试图从数学之完美中推演出宇宙的和谐。在现代的数学和物理学中,追求数学形式的美,成了一个推动人们探索自然奥秘的持续动力。然而数学的相容性和无矛盾性却要经过严格的证明。第一个要求证明其无矛盾性的是非欧几里得几何,接着是要求对自然数论和集合论的无矛盾性加以证明。但是,就是在这个最基本的问题上,人们却几乎碰到了不可逾越的障碍。这便是著名的罗素悖论:用不是自己的元素所构成的集合自己是不是该集合的一个元素?如果属于该集合,那么,它

不满足构成该集合的条件,应该从该集合中剔除;反之,如果它不属于该集合,它便满足上述条件,应该放入该集合中去,但这时的集合又不是原来定义的那个集合了。总之,无论它是否属于它自身,都会引起矛盾的结果。这一悖论由于发生在集合论最基本的地方,因此影响非常深远,它渗透到数学的各个领域。为了克服这一困难,人们提出了各种解决方案,其中最著名的就是希尔伯特的公理化“纲领”。它试图用经得起检验的有穷性方法来构造一个形式公理系统,即从几条公理出发,将体系中任何概念的含义都完全包含在该公理以及推理规则所演绎出来的形式体系之中。但是十分可惜,这一宏伟的计划却被哥德尔不完备性定理给予了彻底的否定。这一否定的影响是如此的深刻,以至现代的许多学者一致公认,哥德尔不完备性原理是逻辑发展史上的一块丰碑,它和塔斯基的形式语言及图灵机一道被国际上誉为现代逻辑的三大成果。为什么会对它作出这么高的评价呢?因为它所揭示的问题带有根本的性质,以至不仅震撼了整个逻辑界,而且动摇了数学、哲学乃至整个人类思维活动的基础。如果从逻辑上讲,任何一个复杂数学系统的无矛盾性,即相容性,原则上都可以归结为集合论与算术系统的相容性(初等数论的形式系统问题)的话,而算术系统的相容性竟然在本系统内都得不到证明,那就更不用说其他的系统了。可见哥德尔不完备性定理的提出无异于一枚威力巨大的炸弹,把几千年来人们执着追求的和谐与完美的美梦炸得粉碎!

8.5.3 系统的不完全性

但是,像任何一个具有划时代意义的理论一样,哥德尔不完备性定理不仅是“破坏者”,而且是“建设者”,由它所开拓的崭新思路正在各个方面给人们启迪,使人们看到了世界新的一面。当人们运用哥德尔不完备性的观点来观察现实世界,将会发现对于现实系统来说不完全性和不相容性是十分普遍的,只不过它们在对象、范围和含义上与逻辑系统或形式系统的不完全性有所不同。例如,逻辑系统或公理系统是一种思维的产物,只要系统足够简单,完全性和相容性仍然是可以兼得的,这种情况已经在欧氏几何和非欧几何、狭谓词演算系统得到了严格的证明,可见,对于逻辑系

统来说,不完全性和无矛盾性是相对的有条件的。但是现实系统则不然,由于一切现实系统原则上都是复杂的和开放的,因此,它的不完全性和不相容性(即矛盾性)是绝对的无条件的。又如对于逻辑系统和形式系统来说排中律是一块不可动摇的基石,否则就无法判定命题的真假和推理是否合理。而现实系统的存在和发展则是以矛盾为基础,容许“亦此亦彼”和“非此非彼”,这就决定了逻辑上的不完全性和现实系统的不完全性将有不同的含义。此外,现实系统的不完全性不是哥德尔不完全性定理的理论推导,而是现实世界的一种客观存在方式。一切现实的系统都是不完备的和不相容的,系统因不完备而对外开放,因不相容而展开内部竞争,由此推动着系统的发展演化。

那么,对于现实系统的不完全性应该如何理解呢?首先,不完全性和系统的整体性并不矛盾,一般来讲,一个有机的整体总是不完全的,所谓“金无足赤,人无完人”就是这个道理。其次,要一个系统绝对的完全或完善,即要求它可以完全“自给自足,闭关自守”,而这对于现实的复杂系统来说又是完全不可能的,因为一个系统为了自己的生存和发展,必须与外界交换物质、能量、信息,即必须对外开放,可见,不完全性就是系统的开放性。最后,也是最重要的,逻辑上的完全性要求从公理体系中推出全部的逻辑公式,这就必然地导致悖论,它对逻辑本身来说是件坏事,但它的出现却大大推动了逻辑学的发展。我们从这一追求完全开始,进而导致矛盾(悖论),最终在推动发展的模式中得到了启示:应到现实系统中去寻找产生悖论的机制,它们也许正是系统演化的动力。我们发现,这种机制正是系统内部的“自耦合”或“自缠绕”。

8.5.4 系统的“自耦合”

1979年,美国数学家道格拉斯·霍夫斯塔特写了一本引起轰动,并获普利策大奖的小册子:《GEB——一条永恒的金带》。书中把哥德尔不完全性定理、埃舍尔图画中的“怪圈”和德国古典音乐大师巴赫乐章中的“卡农”联系起来。他认为,在这些看来风马牛不相及的事物中有一个共同的主题,即存在一个互为条件、互为因果的自耦合循环。由于它们的存在会使系统在不知不觉之中变为

一种全新的东西,而这种变化又仿佛是在回到原来状态时完成的,这种情况对于系统的演化具有极其重大的意义。

耦合一词原意为相互连接,它是一种稳定的相互作用形式,如两个线圈通过磁力线进行耦合,两个电路通过电阻电容进行耦合等。自耦合通常是指事物对自己的作用,由于在系统内部各元素、部件或子系统之间存在某种因果关系的循环,使得从一个元素发出的作用几经传递和变换最终又回到它自己身上。这种情况对应着控制论中的反馈循环。从形式上看,它好像一根自己缠绕着自己的因果链,所以有时又称其为“自缠绕”。

自耦合或自缠绕是一种极其普遍而又十分奇妙的现象,由于它的存在,将为系统带来许多奇妙的属性。

(1) 几个典型例子:

1) 在普里高津的理论中有一个著名的三分子模型,而它的关键一步是 $2x + y = 3x$ 。这是一个明显的自耦合。只要反应不断进行下去,作为生成物的 x 又可以作为反应物而参加到反应中去,生成新的 x ,从而使 x 的含量呈指数增加,这就必将导致旧结构的失稳,而旧结构失稳正是新结构产生的必要条件。

2) 在经济学中的需求与供给也是自耦合的,需求的增加将刺激生产,生产多,供给多,满足了需求,反过来会刺激出新的需求。如此相互刺激,在一些条件下可能出现良性循环,但如果配合不当,也会带来经济上的混乱无序,甚至导致市场崩溃。

3) 在生态中的捕食者与被捕食者的关系也是这样。被捕食者数量的增加,等于为捕食者提供了更多的食物,使得捕食者的数量也相应增加,而捕食者的增加可能减少被捕食者的存在数量(假如生存空间有限),由此出现周期性振荡的局面。但捕食者多,也可能刺激被捕食者的繁殖能力,使它的数量也急增,从而出现混沌的局面。

除了上述例子外,还可以指出许多实际存在的自耦合,如艾根超循环理论中催化循环和超循环、生物自复制、计算机病毒等。它们的共同特点并不是只在自身原有状态上循环,而是不断地产生出新的原来系统中所没有的新东西,其中包括新的成分和新的运动模式,而这种新的成分一旦产生出来,它们又会自行投入到循环

中去,产生出更新的东西。

(2) 系统内部的反馈回路:如何认识系统演化中几乎随处可见的自耦合和自缠绕现象呢?自耦合和自缠绕是一个十分形象的说法,它指的是系统内部存在一种环形结构(机构或机制),这种机制可以有形的,如一些线路或管道,也可以是无形的,如某种因果关系。在这个环路中的各个部分互相串联,形成了相互左右的循环。也就是说,从其中的某个部分发出的一个作用或动作,经过了若干次转化和变形之后,又会回到它自己身上。这种情况在控制论中称为反馈,有了反馈通道后,就可以根据不同的情况进行正反馈和负反馈。前者能对系统的行为起到“自催化”和“自激励”作用;后者能对系统起到“自稳定”或“抑制”作用。通常认为,如果从推动系统前进的角度来看,可以把自我催化和自我激励放在首位,因为这样可以使系统在演化中不断产生出新的东西来,而新生事物的产生,就是系统的自我更新,是一种发生、发展的通常形式。不过,在实际过程中,正反馈和负反馈总是相互交叉的。比如,在一个波形的调节过程中,往往前半周应该是负反馈,而后半周则应该是正反馈。总之,当一个系统内部有了自耦合和自缠绕机制时,它就使系统具有了自行发展和自我稳定的可能,并使系统从简单到复杂,从低级到高级的可能,这就是系统的演化。从这个意义上可把它们看成是系统演化的“发动机”。

(3) 自耦合的形成机制:应该看到,这种自耦合和自缠绕机制本身是在演化过程中逐渐形成的,而这个过程反过来也是一种自缠绕过程,只不过它们是一种在更高(或更低,这要看分析问题时所站的角度而定)层次上的自缠绕。系统为什么会出现这样的自缠绕,在本章一开始曾经提到系统演化的三个基点,即系统演化的不可逆性、有限性和自组织性。正是这三方面的结合,使系统必然发生内部的自缠绕,因为当系统内各要素在一个有限的时空范围内相互作用时,它就必然会使自己发出的作用最终回到它自己身上。任何系统在演化过程中总要不断地追求整体的完备性,而完备性又必然导致矛盾(逻辑上的悖论和物理学上的佯谬等都是这种矛盾的一种表现),系统内部的矛盾又推动了系统的演化和发

展,从而使旧系统的稳定性不断被破坏,通过失稳产生不确定性,再经过选择而出现新的系统。

自耦合和自缠绕对于系统的演化具有十分重大的意义。正如金观涛在《整体哲学》中所说的:“无论是经济系统、人体系统、社会系统、生态系统,只要我们不断地向下追溯单项的因果关系,只要我们力图掌握整体,就发现它们的各个组成部分之间存在着互为条件、互为因果的循环圈。这种互为条件、互为因果的关系正是系统各个部分互相调节,以维持自己存在的机制”。他还提出,“可以证明这种互为因果循环圈的相互作用有两种模式:一种是自我肯定,一种是自我否定”。应该说这些观点是很有见地的。因为,系统不仅要生存,而且要发展,生存和发展是同一个事物的两个方面。存在是发展着的存在,而发展又是对存在的发展。要保持生存就必须“自我肯定”,使自己的结构处在一个相对稳定的状态之中;而要发展,就必须“自我否定”,使自己的结构不断得以更新。这种更新结构的机制和维持自我的机制都是自缠绕机制。

8.6 质朴性原理

世界上有不少事情看上去极其平凡而质朴,几乎随处可见,但其中往往包含了丰富和深刻的道理。比如,任何完整的系统都有一个闭合的边界,否则系统就无法区分其“内”、“外”,而没有内外之别的系统,无所谓“自我”完整的整体了。世界上还有另一些事情看上去极其荒谬而不合逻辑,但实际上可能寻常得很,可以说是一个普遍的真理。比如,任何一事物或系统都是从“无”中“生”出来的,而最终又会回到“无”中去,“无中生有”,有来源于无,又归之于无。不论你感到如何不可理解,这都是一个无可辩驳的事实。更有趣的是,这两件事竟然在系统边界的闭合上碰到了一块,结合成复杂系统演化理论中的一个重要原理,这就是美国物理学家惠勒在《物理学与质朴学》中所说的一条“全然没有系统性的系统性原理”,即“如何从几乎一无所有建造出几乎每一件东西”的质朴原理。本节将着重从系统演化的角度来讨论质朴原理,它可以表述为:任何系统都来自于无,又最终归之于无。其间边界从闭合到扩

充,从扩充到萎缩,从萎缩到崩溃,三种变化正好对应了系统演化中的创生、发展和消亡三个阶段。

8.6.1 边界的作用

边界对于系统及其演化的作用可分为以下几方面。

(1) 边界的隔离作用:任何一个系统都有一道有形或无形的界限,把系统和外界隔开,使系统具有相对独立的空间和时间区域。这个隔离性、间隔性和独立性,对于系统之所以必要,可以从国家的边防、人体的皮肤、细胞的(界)膜、种子的外壳、房屋的围墙等有形的界中看出,也可以从“党纪国法”、政策、公约、道德规范等无形的边界上看出。这里系统的边界有一个十分重要的特点就是它是闭合的。关于边界闭合的意义将是本节讨论的重点,这里暂且不谈。仅就隔离与间隔作用而言又可以分为两个方面:

1) 有了边界,系统就“内外有别”,在系统之内的元素、要素都服从统一的支配调动,结合成一个“牵一发而动全身的”有机整体。这种整体性在更高的层次上往往表现为系统的“自我存在意识和自我保护意识”,而在系统之外就是系统赖以生存和发展的环境。

2) 有了边界,就可以对系统起一定的保护作用,防止外界不利因素的干扰和入侵。例如,一个处在国境线之内的公民,他要遵守本国法律并受法律的保护,一个出国在外的公民也会受到他的国家的保护。

(2) 边界的纽带作用:边界不仅是系统与外界的隔离,而且是系统与外界进行交往的必经之道,系统与环境正是通过边界联系起来的。这一点对于开放系统具有特别重要的意义,比如,一个企业要有供销部门,一个国家要有外交部或对外联络部,一个生命体要有感官,食物的输入口和输出口等。它们的作用就是有选择地输入和输出,有选择地和外界进行相互作用。

(3) 边界的控制作用:边界既然是与外界联系的必经之路,那么,边界的形状和结构就必然会对这种联系、交流过程发生影响,从而对联系和交流的内容、数量、速度等起到控制作用,而某些边界的关口即人们常说的“关键”所在。边界对系统演化过程的调控作用是极其重要的(可惜这种情况常常没有引起人们的重视)。例

如,人们对细胞的研究发现,细胞膜对细胞的生物活性有着决定性的意义,一个正常细胞的细胞膜往往是光滑的,癌细胞的膜结构与膜形状都十分特别,像刺猬皮那样,这在很大程度上决定了癌细胞具有远大于正常细胞的生长速度。类似的情况还可以在无机物中找到,金属被腐蚀的机制中表面结构和形状也是决定性的,铁和铝的表面结构不同,它们的防腐性就有很大的差异。边界的这些性质如果能被人们加以利用,往往能产生很好的效果。

正是由于边界起着如此重大的作用,所以,一方面,在系统的演化过程中边界的结构、形态会发生相应的变化,如扩大、缩小、弯曲和扭转等等;另一方面,边界的变化又会对系统的演化发生巨大的影响。例如,在系统创生时,闭合的边界往往是光滑的、单连通的、没有折皱和分支点。随着系统与外界交流的频繁,就要求不断扩大系统的表面积,但又不允许超出某个空间范围,这就迫使边界发生弯曲,产生沟纹(如同人脑的皮层一样)。当系统要进行繁殖或分裂时,它的表面边界的拓扑性就出现分支,并由单连通变为复连通,拓扑学上这就意味着亏格的发展和连通度增加。

边界的变迁还可以从它的维数上来看。如前所述,事物的维数可以简单地认为是描述它上面的点所属的独立方向的个数,可见,系统越复杂,边界的维数越高。例如,一颗未发芽的种子为一简单的椭球面,维数近似为1,而当种子发芽,长成参天大树后,树的维数就会大为增加。有人实地考察了曲阜孔庙中的一棵参天古树,发现它的平面投影的边界维数为1.68。这和化学反应中氯化镉溶液的沉积图边界的维数大致相等。为什么会有这样的巧合呢?我们认为,关键就是它们都是系统“生长”的产物。再来看看河流的情况。按理讲,水往低处流,总希望“河床”(流水的边界)越直越好。但人们发现,一切实际的河流其形状都是弯弯曲曲的。如果有几条河流交叉,它们还会形成极其复杂的水流网络。如世界上的许多著名江河的流域那样纵横交错,这时它的维数就远不止一维了。有人测了亚马孙河的维数为1.85,而流过沙漠的尼罗河的维数为1.4。这些原来应该等于或近似等于1的河流维数为什么会大于1呢?看来同样是由于它自己生长、发育的结果。

8.6.2 “边界的边界为零”

在研究系统的演化时,一个特别引人注目的问题是:系统从哪里来?有的说系统起源于无序,有的说系统是从其他系统转化而来,这些都有道理。只要不是一个固执的形而上学者,就必然会承认世界上的一切事物和系统都不是自古有之,也不会永世长存,它们都是在历史发展的某个时刻,在某种特定的条件下,从一无所有中产生出来的。这个明白质朴的道理同样与系统的边界问题有着不解之缘。

(1) 系统源于“无”:我国的文明史中有许多十分宝贵的思想,其中老庄哲学就是一个代表。老子“天下万物生于有,有生于无”的著名论断曾使许多现代的西方学者为之倾倒。1981年10月,美国前物理学会主席、著名理论物理学家惠勒来访时,面对乾隆——武则天的陵墓前61尊外国使者的石像,感叹道:“当时的美国在哪里啊!”他的这一感叹,并非一个旅游者普通的触景生情,而是有着深深的思索。在他心目中,即使今天如此强大的美国,也是武则天之后历史的产物,也是从无中“生”出来的。更能表明他的心迹的是一次观看舞剧《凤鸣岐山》,当他被告知姜子牙手中拿的是一面“无”字旗帜时,他兴奋极了,认为在中国古代思想中找到了自己提倡的“质朴性原理”的前驱。质朴性,顾名思义是一种极其普遍的性质,用惠勒的话来说,就是“有生于无”。这种听起来不合逻辑、不合常理的观点,其实很容易理解。让我们用惠勒的方式问一下你自己:“100多年前你在哪里?”假如你目前的年龄还没有超过100岁的话,你一定对这个问题难以做出明确回答的。因为也许那时你的父母,你父母的父母都还不曾相识,又哪里谈得上目前这位“出类拔萃”或者平平常常的“你”呢?你或许会辩解道:“是的,的确那时没有我,但根据物质和能量守恒原理,组成我的那些原子、电子是的确存在于某个地方的”。这种辩解显然是不值一驳的。你甚至不敢提及组成你身体的“分子”。然而即使有了分子、细胞、器官等,也不能等同于存在一个有机整体的“你”,因为你是个“生命系统”,而不是各个部分的简单加和,所以到头来你还是不得不承认就在这100年的时间里,你从“无”中生出来了。

(2) 规律源于“无”：如果你对你自己或某个具体事物的“无中生有”还不以为然的话，那么来看看作为科学“典范”的物理学规律是从哪里来的。惠勒指出：“物理学的定律并非永恒而又永恒地存在着，它们本身必然是在大爆炸时才出现的”。既然定律是“产生”出来的，那么，它的结局会怎样呢？接下来惠勒又问道：“物理学是否‘终结于没有定律的定律’这句质朴性的至理名言？”他的回答是肯定的。在惠勒看来，一切事物包括事物运动的规律，都是从“无中生有”，从有到无的。

当然，惠勒的观点是建筑在大爆炸宇宙学的基础之上的，虽然迄今为止这种学说中还有不少假设的成分，但却有着越来越多的观察结果支持它。况且，只要仔细分析就会发现，规律来源于无的观点在逻辑上并不一定依赖于是否存在大爆炸。规律是什么？前面已经作了较多的讨论，系统的规律，事物的规律，都是与具体的系统和事物不可分割的。也就是说，规律是系统和事物的规律，而事物和系统的运动变化又都是有规律的，因此，没有事物和系统，当然就没有它的规律可言了。

(3) 边界闭合：如果说上面的论点还不足为怪的话，更令人惊异的是惠勒竟然把事物和世界上“有”与“无”的转化和一个人司空见惯的现象——系统边界闭合联系起来。为了说明这一点，他以电动力学、几何动力学和包括量子色动力学这个当今时代的最漂亮的场论体系为例，阐述它们与质朴性之间貌似矛盾而实则统一的思想。他认为，为了解释物理学和数学的严格论证，似乎有一条“全然没有系统性的系统性原理”在起作用，这条原理在数学中就是“边界的边界为零”。例如，在上述三个伟大的物理场论中，每个都两次用到这个原理。一次的形式是“一个三维区域的二维边界的一维边界为零”；另一次的形式是“一个四维区域的三维边界的二维边界为零”。他还指出，“边界的边界为零”这一表证质朴性的代数拓扑的基本原理可以表示为： $e^2 = 0$ 。显然，惠勒的观点是建筑在场的时空几何化基础上的。他以此作为出发点来解释人们熟悉的物质的能量、动量、张量等物理量的存在。惠勒的观点是不是可信，各人可以有自己的判断，而且惠勒本人也承认

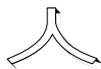
“在物理学中,除质朴性原理外,还有其他一些重要因素”。但是,惠勒的这些思想的确如他所说的那样,“使我们似乎找到了一些路标、一点线索、一点启发”,引导人们去理解“如何从几乎一无所有建造出几乎每一件东西”。这就是说,人们可以从边界的闭合,即边界的边界为零这条质朴性原则中找到理解事物从无到有、从有到无的演化规律。

8.6.3 边界崩溃

任何在空间上有限的和有界的系统在时间上也是有限和有界的。当人们接受了系统源于无的观点之后,接受它的逆命题也是不难的。因为,既然 $e^2 = 0$ 对应了系统的产生,那么 $e^2 \neq 0$,即边界的边界不再为零就必须对应系统的消亡。当边界不再闭合时,边界就退化为一简单的界线,这时系统已不再是一个完整的整体,边界的两边只存在某种量或位置的差异,而不具有内与外、你与我的差异了。

前面的讨论使我们看到系统演化与边界的演化的确有着深刻的联系。但是,应该承认,上述理解还是十分粗浅的。我们相信,随着对质朴性原理理解的深化,用形态学或几何学和拓扑学的方法来研究系统的演化,将越来越受到人们的重视。

第九章 | 信息与智能系统



无论从个体还是从群体而言,都是一类特殊的开放系统,因为都需要靠与外界交换物质、能量和信息来维持生存和发展自身。人类的历史是一部开发、利用各种材料、能源和信息的历史,人们从依靠自己的体力转向主要依靠自己的智力来适应和改造环境。历史的发展往往以制造工具的材料为标志,从石器时代到铜器时代,再到铁器时代;然后以能源的利用为标志,从人力到畜力,从机械能、化学能到电能、原子能;最后以信息的开发利用为标志,从信息的近距离传送到远距离传送,从低速到高速,从信息传输到信息处理,这样进入现代社会。现代社会又称为信息社会、智能社会和知识经济时代等等,其中涉及到“信息”和“智能”两个基本概念。本章就研究与此相关的系统——信息系统和智能系统。智能又可分为个体智能和集体智能,后者与社会系统有着密切的关系,将在下一章作专门讨论。

9.1 信 息

材料、能源、信息是现代社会的三大支柱,其中信息具有非常重要的意义。从系统的角度看,信息的运行本身也构成一个系统,即信息系统,这类系统对人类社会的存在与发展紧密关联。下面先简单回顾一下人类认识和利用信息的历史。

9.1.1 人类利用开发信息资源的历史

人类利用信息的历史远比认识信息的历史更为久远。在很长一段时间内,人是作为一个高等生物体,通过自己的本能来运用信息的。俄国著名生理学家巴甫洛夫曾经指出,高等生物除了有“觅食”、“繁殖后代”、“趋利避害”等三大本能外,还有一种“探究”未知世界的本能,即“探究”反射。他还指出,人类对知识的追求就是由

这种本能发展而来的。在这里,“探究”就是为了利用信息而获取信息。关于这一点,控制论的创始人维纳和艾什比都有过十分精彩的论述。他们认为,一个生物体只有随时从外界获取信息,才能在变化不定的环境中保存自己的生命。随着生命系统的不断进化,生命体利用信息的本领也越来越高。艾什比在他的名著《控制论导论》中提到,低等动物用坚硬的外壳来阻隔“有害变异度”,以达到保护身体的目的,如乌龟甲壳就是这样。高等生物则依靠对周围敏锐的观察和灵活多变的行为来战胜敌人并适应环境,从而获得生存发展所需的资源。人也是这样,低级的武士靠盔甲来防御敌人,武艺高强的斗士则能眼观六路,耳听八方,根据对手的动作来采取适当的对策。这就是一种获取信息、运用信息的过程。

人类利用信息的能力在历史上大体有四次关键性突破:

(1) 第一次突破是语言和文字的出现以及随后印刷术的发明:这实际上是人类最终脱离一般的动物,成为一个全新的物种最关键的一步,也是人类文明的开端,其意义怎么强调都不过分。从信息的角度看,语言文字都是一种特殊的编码方式,有了这种编码,人类学会了利用符号和制造符号,用卡西尔的话来说,这正是“人”的根本标志。语言文字的本质作用是解决思想的记录问题,实现人与人之间信息的异时异地传输,从而不仅个人获取、利用信息的能力大大加强,而且向形成人类集体智慧的方向跨出了决定性的第一步。

(2) 第二次突破是电讯技术的发展:发端于19世纪末、20世纪初的电信技术和语言相比,主要解决了远距离信息传输的问题。尽管自有史以来人类都在不断利用开发信息资源,试图利用一切可能的手段来加快信息传输的速度和扩大信息传输的距离,如古代幻想的千里眼、顺风耳、烽火台等,但效果一直不太理想,应用的范围也比较小,因而对社会的进步没能产生重大的影响。直到发明电报、电话和无线电以后,远距离、高速度信息传输才成为可能。到20世纪,通信等“弱电”的利用第一次超过了能源等“强电”的作用,成为推动社会的基本动力。以致N.维纳不无道理地把20世纪称为“通信与控制”的时代。

(3) 第三次突破是计算机技术的高速发展:电子计算机技术的出现和高速发展是人利用信息的第三大里程碑。和前面两次相比,这一次突破主要表现在对信息的加工处理上。如果说前面两次是极大地加强了人的感官功能的话,那么,这一次就是部分地解放了人的大脑。因为原来全部需要由人脑来处理的信息中有一部分是可以由计算机来处理的,当人类借助于计算机机械化地处理这一部分信息之后就可以更加集中地去处理那些需要进行高级处理的信息,真正发挥“人的用处”。

(4) 第四次突破将是人类群体智能的形成:智能技术是在计算机技术高度发展的基础上产生的,而智能技术与以因特网为代表的现代通信技术、多媒体技术和虚拟现实技术的结合,将导致人类利用信息的第四次大飞跃,这次伟大飞跃的意义已远不止是把人脑从机械性脑力劳动中解放出来,也不仅仅产生新一代的个体智能——人机智能,而是将形成一种全新的信息系统的信息能力,即在本章后面将要详细讨论的人类群体智能,它的出现,将使人类有可能对付社会系统中的种种复杂的社会、经济、政治、文化问题,并意味着旧人类社会的终结和新人类社会的产生。

信息与智能革命正席卷全球,其影响早已超出了纯技术领域,深入到了社会的各个角落。因特网就像给地球增加了神经网络一样,使整个地球成了一个整体(世界一体化),人类群体智能将逐步取代个体智能而成为人类系统的大脑。一个被称为信息时代、智能时代或知识经济时代的新时代已经或正在到来,尽管人们还无法预言这个时代的具体特征,但它至少应具备以下标志:①产品的智能成分大大增加;②劳动者中智能劳动者的成分大大增加,成为主体;③信息技术的发展成了新技术的核心;④社会生产方式、生活方式、思维方式都在随着信息技术的发展而发生根本性变化。

9.1.2 信息的特征及功能定义

(1) 信息究竟是什么:现在,许多议论都是围绕信息与智能展开的。但信息究竟是什么?这一根本问题并没有很好地解决,各种不同的观点及其争论还时时见于报端,困扰人们的思想,也阻碍理论与实践的发展。本书作者在20世纪80年代初曾指出这一问

题的严重性,并分析了当时关于信息的三种有代表性的观点,即物质属性论、特殊属性论和物质与能量以外的“第三者”论。

按照我们的观点,信息既不是所有事物间的一种普遍联系,又不是超乎物质、能量的第三者,它是一些具有目的行为的特殊事物间的一种特殊联系,在内容上它要表征事物的性态和运动趋势;在形式上它是借助于一定的物质形态来表征上述内容和意义的符号或代码系统;在效用上是能消除认识上不确定性的“东西”。

信息这种特殊联系方式是伴随着有目的的行为出现的,它是物质系统或生命发展到高级阶段后的产物。换言之,尽管在一般的生命系统中已经有了信息联系的某种萌芽,但只有到人类社会产生之后,信息联系才有了相对完整的形态,并且随着社会的发展而日趋完善。

(2) 信息的基本特征:既然信息是一类特殊系统之间的特殊联系,那么,它的特殊之处究竟表现在哪些方面,为了阐明信息联系的基本特征,以下举一些大家熟知的例子:

第一,人与人之间的通信,包括直接交谈、写信、收发 E-mail,一个人说,另一个人听。如果他们使用的语言不相同,例如一人只懂英语,另一人只懂汉语,他们之间就必须有一名既懂汉语又懂英语的翻译。

第二,电台,包括有线、无线广播,电视等以及各种大众传播活动,其中必有一个信息内容(包括各种消息、广告、数据、通知等)的发出者,一个信息的传播者(媒体)和一个或多个信息的接收者。这三者“一个不能少”。例如,只有广播的发出者而没有听众,这样的广播就失去意义了。

第三,一名为了某种目的进行市场调查、社会调研、科学观察实验而收集各种资料的人,他必须将自己和所要认识了解的对象构成一个可以进行通信的系统,才能寻找到可用的相关资料、数据。

从以上分析可以看出信息联系所具有的三大基本特征:

1) 标示性:信息的标示性是指信息的内容只是事物性质或状态的标示(或者表示),而不是事物本身或者事物的状态与属性。

从理论上讲,标示是一种对应关系,有标示就要有其被标示的对象,在信息论中这种关系由信息编码来确定。应该指出,标示物与被标示的对象在实际信息活动中都是物质的,或者说都是事物的某种状态。这就决定了信息的另一个重要特征,即信息活动不能单独进行,需要借助于一定的物质过程来完成。它们间的关系通常表现为信息内容、信号和符号三者相互间的关系。

信息的标示性是信息区别于其他事物最重要的属性,也是它作为一种符号能在人们社会生活中起巨大作用的原因。正因为它只是一种标示而不是事物本身,所以同一事物可以用不同的方式来标示,同一种标示也可以表示不同的内容。当然,信息的标示性也有一定限制,在同一个信息活动中标示不能随意变化,否则就会造成混乱。这就要求进行信息编码与解码。信息的标示性还为信息复制和共享提供了基础,其原因在于标示保存的位置是可变的,也是可以共享的。标示的改变虽然原则上也需要一定的能量,但需要的能量往往远比改变原来事物状态要小,这就是可以运用小能量控制大能量的原因。

2) 流动性:信息只存在通信活动之中或者信息的流动之中,即原则上没有静止的信息,而只有流动的信息。即使是被储存的某些信息载体,如磁盘、光盘中的数据以及纸上的文字或某件文物之中关于古代的那些秘密,也只是信息流动中传递速度暂时为零的部分阶段。因为如果只是储存而不取出来应用,就失去了储存的意义。

3) 功能性:为什么现代社会如此重视信息和智能,以至常常把它和金钱等同起来,究其原因,是因为信息对于人们有很强的功能性。前面例子表明,任何信息系统中的信息流动或联系都是与某种目的联系在一起的,尽管每一个信息活动的具体目的会因信息系统或环境的不同而不同,但信息对于具有某种特定目的接收者而言,总是具有相应的作用和功能。

需要指出的是,系统的目的性只对那些生活在变化不断、充满随机性(包括各种危害因素、有利机遇)的环境中的复杂系统才有意义,如生命系统、社会系统以及所有的控制论系统,而对其他的

非生命系统则无目的可言。系统的目的可分为两类：一类是保持系统自身的稳定，即保持自己当时所处的“生存状态”；另一类是求得自身的发展，即求得更有利于自己生存或生存得更好的状态。一个处在不断变化的环境之中的系统，随时可能受到来自外界的干扰和影响，其结果是导致系统偏离原来的状态，这种偏离对系统来说可能是有利的，也可能是不利的，需要根据外界干扰的情况和系统自身的情况进行选择，外界和系统自身的各种信息则是选择的依据。因为选择只有在存在多种可供选择的可能性时才会发生，这种情况下选择的过程实际上就是消除不确定性的过程。上面所谈到的对有利和不利情况的选择还只是最初级的选择，还有更复杂、更高级的选择。例如，在碰到不利的情况时，如何避开或选取什么对策；碰到有利的情况，如何加以利用并主动地去获取等等，都需要进行选择，而选择的过程中则需要更多、更复杂的信息。总之，只要情况不断发生变化，系统为了保持和发展与外界的相互作用，就要不断获取和使用信息。简言之，这些系统是从保持和发展自身的根本目的出发，去接收（或传递）信息，以消除对环境“认识上”的不确定性，进而达到消除“行动上”（控制上）的不确定性的。显然，系统越高级，它对外界的控制能力也越强，交流的信息量也越多。这是将信息流量作为这一类系统演化标度的基本出发点。

正是因为信息具有以上特征，可以把它作为一种特殊的系统行为来加以研究，并给出信息的功能定义。

（3）信息的功能定义：为了深刻认识信息的本质和运动规律，人们在研究时需要对它进行界定和定义。但是，信息概念作为现代社会中一个普遍使用的基本概念，对它的内涵与定义却一直模糊不清，甚至存在很大分歧，早在 20 世纪 70 年代就有人统计了不同领域中的 30 多种信息定义。1984 年本书作者在《哲学研究》上就一些学者关于信息本质观点提出质疑，指出：尽管人类长期使用信息，近年来，信息技术也得到了高速发展，但迄今为止还很难说已经搞清了信息的本质特征，在这种情况下下一个实质定义，不仅困难，而且简直就不可能。但为了研究信息，我们只能“不得以，求其次”，先根据信息的上述特点和主要功能给它下一个“功能定义”。

应该说,这样做既符合认识发展的规律,又符合逻辑,因为定义的目的就是为了揭开信息的实质,所以实质定义只能产生于研究之后而不是之前,而功能定义则并没有这样的要求,它只要表明能实现何种功能和目的就行。这种下功能定义的方法对于许多与人有关的事物,特别是能实现人的某种目的与价值的事物最为有用,如人们常把房子看成“是能住人的东西”,“水是能解渴的东西”,“衣服是能保暖的东西”。这实际上也是一种功能定义,虽然它不一定全面反映它们的本质,但却揭示了它们的主要功能。当时我们给信息下的功能定义是:“信息是一种特殊物质系统(广义通信系统)的特殊属性或活动,它的基本功能就是能消除(或部分消除)信宿关于信源的不确定性”。

信息的功能定义包含以下几方面的含义:

1) 信息只存在于信息系统这类特殊系统之中,它属于整个信息系统,而不是属于它当中的哪个部分。这就是前面讲的“信息的系统性”。根据这个定义,可以把所有的生命体都纳入到信息系统的范畴,包括人体、人类社会组织、城市、国家等等。当然,也可以从另外的角度来看这些系统,把它们归属于控制论、经济、政治系统的范畴。

2) 信息的基本功能是能够用它来消除信宿关于信源的不确定性。产生这种特殊功能的前提是信宿必须对信源的状态、属性等存在某种需要消除的“不确定性”。而这种功能得以实现的关键在于信宿物质和信源物质构成一个系统,并且信源能通过某种作用消除信宿对它的不确定性。例如,收听电台的气象广播,是希望消除关于未来天气状况的不确定性;教师向学生传播知识,是希望通过向学生传递教学信息来消除学生的无知等。

9.1.3 三种不确定性

认识信息与智能的关键在于认识“不确定性”。这里有一个问题特别需要加以澄清,那就是不确定性与非决定论的关系是什么?两者虽然关系密切,但不能将它们等同起来,混为一谈。因为是否决定属于本体论范畴,而是否确定则属于认识论范畴;是否决定涉及客观的因果关系,而是否确定仅仅涉及某些特殊主体是否认识

的问题,也就是说,决定了的未必确定,反之亦然。在信息论中我们要问的是:为什么会产生不确定性?这些不确定性应该如何消除?显然,对一个具体的认识主体来说,会因种种原因对某些事物的性质、状态、运动规律、出现的可能性以及这种可能性的变化产生不确定性。但从客观上讲,这些不确定性都来自事物的多样性,以及认识主客体间关系的多样性。而从我们对非线性的分析可知,这些多样性又来自事物间的非线性关系,在这里具体是指信息接收者(信宿)与信息发送者(信源)间的非线性联系。

当然,在研究不确定性来源时,必然要考虑环境因素对信息活动的干扰,但在一定意义上可以把这种干扰看成是认识对象或信源多样性的一部分。因为,在尚未通信之前接收者并不能完全区分信源和环境。

对一个认识主体来说,它对某件事物的性质与状态可能存在三种意义上的不确定性,或者说不确定性有三种不同的含义:统计的不确定、意义的不确定和价值的确定。

(1) 统计不确定性:指事件是否发生(出现)或以何种几率(可能性程度)出现的不确定性。例如,掷硬币,哪一面朝上不能确定,明天天晴的可能性有多大,下雨的可能性又有多大不能确定,某人是否出席会议不能确定等等。如果你得到了有关的信息,知道了哪一面朝上,明天一定是晴天,某人肯定不来参加会议,你原来的那些不确定性也就被消除了。这个不确定性被消除的过程就是你在各种可能的结果中进行选择的过程。而选择的困难程度又是与可能结果的个数以及它们的几率分布有关的。显然,可能结果的个数越多,几率分布越均匀,选择起来越困难,所需要的信息量就越大。为了量度这种统计的不确定性,申农、维纳等人从数学角度进行了充分的研究,找到了量度统计不确定性的数学公式,这就是著名的申农信息熵公式。对于离散的情况,设有一个非空的可能事件集, $E = [E] = E_1, E_2, \dots, E_n$ 对应于每个可能事件都有一定的“出现”几率 $P = [P] = P_1, P_2, \dots, P_n$, 这时平均不确定度 H 为

$$H = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

其中 K 为与单位选取及取何种对数有关的常数。当 $K = 1$ 时,取以 2 为底的对数时,信息量的单位为比特(Bit),取以 3 为底的对数,信息量单位为奈特(Net),取以 10 为底时,信息量单位为笛特(Dit),这些单位制使用于不同的场合,它们之间可以换算($1 \text{ Bit} = \log_2 10 \text{ Net} = 3.32 \text{ Net}$, $1 \text{ Net} = \log_3 10 \text{ Dit} = 2.30 \text{ Dit}$),不过,通常用的最多的信息量单位是比特。通俗地讲,一个比特的信息量就是回答一个问题:一个“二选一”(等可能性情况下)的问题时所需要的信息量。例如:二选一为一个比特,四选一为二比特,八选一为三比特。如果英语 26 个字母都是等可能出现(实际上不是如此),那么,每一个字母出现所给出的平均信息量为 4.7 比特。

(2) 语义不确定性:不确定性的第二层含义是关于意义的不确定性。有时人们借用语言学的概念来区分这几种不确定性,他们把统计不确定性称为语法问题或语法不确定性,把意义不确定性称为语义不确定性,此外,还有语用不确定性。

关于语义或意义的不确定性是指对事件意义的理解上的不确定性,即对该事件应属于哪一类的不确定性。例如,明天是否天晴,战争是否发生,是统计不确定性,而“天晴”、“战争”是何种意思则是语义不确定性。对于一位有一般知识的人来讲,“天晴”、“战争”的含义并不会产生什么歧义;但对一个不懂事的孩子来说,他因为没有这方面的知识而会产生许多令人发笑的问题。如幼儿园的孩子就因不知道战争的含义而把它们当作好吃的或好玩的东西,那么,究竟把它们归入天气类、政治类还是食品类、玩具类呢?这里同样存在不确定性。这个例子虽然是讲孩子,但却具有一般性。因为在无限的宇宙和未来的世界面前,哪怕现在最有学问的人也只是个“孩子”。例如,当西欧核子研究中心的物理学家宣布发现了中间波色子 W^{\pm} 和 E_0 时,恐怕未必大家都知道它的含义和类别了。对于意义的确定性应该如何量度?又怎样才能消除这种不确定性呢?这是个尚待研究的问题。我们设想,既然意义的不确定性是关于事件“类”的不确定性,那么可以用分类识别的方式来消除它。如果把世界的事物大体分成若干个类,并且找到每一类的典型特征,然后将可能发生的事件特征与其对照,即可以

“归类”了,显然,这些类分得越细,分类时就越难,所需的信息量也就越多。

(3) 语用不确定性:语用不确定性包括信息本身的价值不确定性和信息内容的价值不确定性两个方面。所谓价值不确定性,是指不能确定对使用者而言究竟能派什么用处,这个使用者在信息传递中指的就是信宿,而在其他场合,如控制领域,可以指其他具有目的性的系统。由于价值不确定性必须涉及“供”、“求”双方和主体的目的性,因而,比上面两种不确定性更为复杂。但从系统演化发展的角度看也更为重要,因为它关系到系统演化的一个重要的形式——系统自组织中组织指令的效用。如前所述,同一事物对于不同的使用者以及同一使用者的不同目的,其价值也是各不相同的。例如,对于战争是否爆发、股票价格是否上涨这样的问题,除了包含语法(统计)和语义不确定性之外,还包括了价值的确定性。因为战争对军火商和一般老百姓、股票对它的持有者和不持有者的价值是不同的。可见,价值的确定性实际上是一种特殊的关系不确定性,这个特殊关系就是“使用与被使用的关系”。为了定量地刻画价值不确定性,有必要在使用者和被使用者之中先“选定”一头,然后再计算另一头的确定性。例如,先确定“使用者”(信息的接收者和使用者),然后看它对各种不同信息的需求,或不同信息对它的目的的满足情况。如果使用者有不同的目的,则要先给不同的目的以不同的“权重”,才能研究不同的信息的价值。反过来,也可以先确定一个“被使用者”(信息的提供者或信源),再研究它满足不同使用者的程度。如果是一“物”多用的话,也要进行加权。

9.1.4 信息的量度

信息的定量描述问题曾经是信息论发展中的一个最基本、最关键的问题,同时也是最困难的问题。试想,当某人告诉你他昨天借到一本好书时,你从这句话中得到了多少信息呢?看来,即使是这样一个简单的例子也涉及多方面的问题,包含了许多难以量化的东西。如事件发生有多大的可能性,信息的内容、价值以及这条信息事前是否知道等。也正是因为这些困难,才使得人们尽管长

期与信息打交道,但信息的定量理论却直到20世纪40年代才得以产生。这一理论的建立是与哈特莱、申农、维纳等人的工作分不开的。1948年,申农发表了著名论文《通信的数学理论》,维纳写了名著《控制论——或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》,是信息论创立的标志。申农在他的论文一开始就将信息的工程问题与内容问题加以分开,并先从工程问题入手,引进了信息熵的概念。现在看来,这种把信息的工程问题与内容问题、价值问题等更复杂的问题暂时分开的做法,是使信息定量化得以成功的关键。但是,信息的内容和价值问题又是不可避免的。在申农信息论创立不久,就有不少人指出,信息的内容与价值是信息概念中的一个重要组成部分。尽管信息的价值至今在理论与实践上还有许多尚待研究的地方,但在人们研究信息量时是必须加以考虑的。

(1) 消除不确定性的途径:明确了信息的基本功能和不确定性含义之后,就可以考虑消除不确定性的途径了。为此,首先需要确定的是,究竟要消除谁的不确定性?虽然从原则上讲,信息系统中的不确定性指信源与信宿之间关系的不确定性。但正如前面所言,信息活动总是具有一定的目的性,所以有主动与被动之分。可以分为两种情况:一种是信宿主动地要求获得信息来消除它关于信源性质、状态的不确定性,而信源却并不一定具有自己的目的。如学者们到图书馆查找资料,天文学家对天体的观察;另一种是信源主动,希望通过某种方式让信宿了解它的状态(或者是假象),如广告或某些宣传。在第一种情况下,不确定性显然是属于信宿的,而在第二种情况下,信源对于自己的状态应该是确定的,而搞不清它的状态的仍然是信宿,信源正是因为知道信宿对它的状态不清楚,所以才会去作“广告”或宣传,否则,就没有这种必要了。

以上分析表明,要消除信宿关于信源的不确定性,首先要在信宿与信源之间进行通信,通过某种形式的相互作用来传递信息。其次,信宿要和信源处在同一个通信系统之中,也就是说,要明确这种不确定性关系是谁与谁的,找错了对象是不能消除不确定性的,这就好比到图书馆查资料必须知道资料放在哪里一样。最后,只有当确定存在某种不确定性时,通信才成为必要和可能。如果

事先就知道没有不确定的,通信就变得无足轻重,没有存在的必要了,就好比一场事先知道结果的比赛是没有吸引力的。

(2) 如何量度信息:既然信息的功能是消除不确定性,那么,信息的量度自然可以用消除不确定性的量度来衡量。第四章曾就不确定性的量度进行了讨论。根据李天岩的观点,熵的实质就是不确定性的量度,他引用了各种熵的数学定义,这里不再重复。需要强调的是,信息活动中信宿关于信源不确定性究竟消除了多少。

令通信之前的不确定度为 H_1 ,在只考虑统计不确定性时

$$H_1 = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

其中 K 为与对数选取有关的常数, n 为事件集中事件个数, P_i 为时间 I 出现概率。通信之后的不确定度为 H_2 ,同理

$$H_2 = -K \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

则这次通信消除的不确定度为:

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

就是这次通信的信息量,用 I 来表示。

一般 I 应大于零,表示信宿通过接收信息消除了对信源的不确定性。但是,因为通信活动总是要与环境发生联系,所以也会有相反情况,即通信的结果不仅没有消除原来的不确定性,而且增加了不确定性,这应如何解释呢?这是不难理解的,因为在这个公式中并没有要求 H_1 一定大于 H_2 。实际的情况可能是由于事件数目的变化,或者事件集中概率分布变化所引起。例如,日常生活中经常出现这样的情况:当一个人告诉你某件事的情况后,你以为得到了一定的信息,但另一个人又说前一个人的说法不对或不准确,你到底相信谁呢?这也许会使得你以为不确定度非但没有被消除,却反而增加了。其实,这里已经包含了两次通信,其中每一次都消除了一定的不确定性,但两次通信的共同结果却增加了不确定性,原因是第二次通信将你在第一次通信中考虑事件集合的范围扩大了,对第一个事件集合来说不确定性的确有所增加。但是,你在接

受了第二个信息之后,不仅知道了关于原来事件的信息,而且还对第一个人也增加了了解,总的信息量增加了。

当然,上面是关于信息量的基本公式,仅仅表达了量度信息的一个基本思路。信息活动的实际情况往往十分复杂,并不是一个单纯的通信过程,还要包含信息的变换、转换等,所以信息量的计算也不能简单从事。此外,更为重要的是上述信息量公式还只是考虑了信息中能够定量描述的那一部分,对于信息内容、意义、价值如何量度的问题尚未很好解决,所以在解决实际问题时还要注意下面一些问题:

1) 对信息量的量度只限于统计意义上的不确定性,对于意义的不确定性与价值的不确定性尚无很好的量度方法。其原因在于对后者涉及许多关系到信息内容与智能本质的深层次问题,这些至今都没有很好认识。例如,“意义”问题是语义学的核心问题,它关系到对事物类型和性质的理解,即关系到信息的内容能不能简单地归结为一个量来描述还是一个尚未解决的问题。至于价值,由于涉及信息内容,信息接收与发送者的状态、属性、目的等多方面,所以情况十分复杂,而且它是从主体目的上进行判断的,主体不同,目的不同,都会影响价值判断。例如,同样一句话,对不同的人会有不同的作用,在不同的时间地点讲作用也大不相同。尽管如此,对信息语义与语用方面的研究,其重要性仍不容忽视,也许这方面的突破将是理解信息本质的关键。

2) 20世纪80年代中期,出现了一种将信息等同于负熵的说法,我们曾在“信息究竟是什么”一文中对此进行了分析,认为信息就是“负熵”虽然出自大学者维纳、薛定谔等人之口,但需要进行正确的理解。应该看到,虽然可以用消除不确定性的多少来量度信息,但它们两者毕竟不是一回事,若将两者等同起来,不仅不利于对信息的理解,而且会引出许多误解,如“生命以负熵为生”就是一例,这种观点甚至影响到一些社会学家,试图建立新的世界观,用熵或负熵来作为历史进步的量度或动力。应该看到,负熵的原始含义是熵的减少,就像因为减肥而使体重减少一样并不是一件“实实在在的东西”,不能作为生命体的“食物”。

3) 信息的量度与信息的内容有关,而内容又与某种有序性,以及有序的程度有关。因此,一定程度上信息的确表现物质的有序性,但这只是就信息的内容而言的,并不能由此得出有序程度越高,所含信息越多的结论。关键是这些有序性如何“表现”出来,并用它消除了多少不确定性。

9.1.5 信息的分类

按意义或内容对信息进行分类具有本质性的意义。通常,信息的内容可分为:

(1) 状态信息:状态信息就是关于事物(系统)的性质、状态、结构等的信息,如花是红的,草是绿的,球是圆的等等。状态信息往往是一个陈述性的特称判断,仔细分析这个判断就会发现它实际上是在多种性质与状态中进行了一种选择。而这样做的前提是对所有的性质与状态进行完全分类,而这往往是不可能的,因此,状态信息是一种依赖于分类的不完全信息。信宿接收了这种信息后,只是部分地消除了它关于信源在状态方面的不确定性。

这里要特别提一下关于“状态信息,结构信息”的客观存在问题,状态信息与结构信息的概念在自然科学与技术领域中用得很多,直观地讲它是关于系统外部性态与内部结构的信息,这是就信息的特定内容而言的,并没有什么值得奇怪的地方。但是,有些学者提出,结构信息可以不依赖信息系统而单独存在,就是说,不管是否进行通信活动,状态信息与结构信息都“客观地不依赖于信息接收者而存在着”。这一说法是不正确的。因为事物的客观属性、状态和结构尽管可以不依赖于任何信息接受者而“客观”地存在,但如果该事物不进入通信系统或信息活动之中,它就不具有信息的特征,就不能被当作信息的内容来看待。例如,即使一名健康的青年具备了军人的条件,如果他没有正式参军的话,就不具有军人身份。

(2) 规律信息:规律信息或者理论信息是对一类特定环境条件下事物的共同性质或变化规律的表述。例如,牛顿三定律和万有引力定律,该理论表明宏观低速情况下质点或质点系运动的规律。对规律性的正确表述总是建立在对大量特殊状态相互关系

认识的基础之上的,一定意义上是对状态随时间变化的定常性与普适性的表达。

(3) 指令信息:指令信息同样是针对信息内容而言的。通常一个指令是在综合了大量状态信息和规律信息的基础上形成的,正确指令更是如此。如何形成一个正确的指令,是科学决策所要研究的内容,比如,战争中发出进还是退的指令,都是经过很多思考后得出来的。

9.2 信息系统

在讨论了信息的基本属性之后,本节讨论信息系统及其活动规律。

9.2.1 通信系统与信息系统

信息系统是一类特殊的系统,其特殊性表现在它具有信息特征并进行信息活动,就像生命运动是生命体的整体行为一样,信息活动是信息系统的整体行为。信息系统虽然有其自身的特殊性,但却广泛存在于自然与社会之中。例如,人们时常见到的各种通信系统、计算机网络(它们的活动都有人参与);各种动物、植物以至计算机病毒以及许多人和人为事物、图书馆、学校、电台、社会团体机构等。

信息系统的概念源于通信,往往指的是广义的通信系统。严格地说,通信活动还只是信息活动的一部分,信息活动显然不仅仅包括通信(信息传输),它还包括信息的储存,内容与形式的变换,以及信息的显示、表达、储存、使用等。一个实际的信息系统总是同时具有这些方面的功能,只不过侧重面各有不同而已。通信活动是人们熟悉的,它的目的在于信息传输,至于信息的显示和使用则可看成是一类特殊的信息过程,因为显示的目的在于进行人机通信。而信息使用则是通过一定的机制用信息来消除行动中的不确定性,即进行控制。例如,在通常被视为通信系统典型的电话传递中就包含了许多信号转换的过程,简单地说,就是先从发话者的语音的空气振动变为线路中的电磁振动,通过线路中的各种变化后再变为耳机或喇叭发出的空气振动。同样,在以信息处理为主

的计算机中,各部分间的信息传递也对系统的性能产生重大影响。如微机中的主板主要是传输和分配信息的,而内存、硬盘等信息储存部件,实际上只是让信息在那里的传输速度暂时为零而已。所以,在研究具体的信息系统时,需要先分清该系统在信息活动中主要扮演什么角色,然后按信息活动的不同类型进行研究。

如前所述,任何信息活动都是在一定的系统中进行的,依据活动的主要内容可以将信息系统分为通信系统、信息处理系统、控制系统等。所有这些信息虽然作用各不相同,但活动都是结合在一起的,并且具有相似的结构。例如,通信系统,包含信源、信道、信宿三个部分,控制系统包含控制者、控制对象和控制器三个部分,而信息处理系统包含处理器、处理对象和处理者三部分。当然,不同的系统还有一些其他特点,但根据它们结构的共同特征,可以简单地把它们看成是一种广义的通信系统。下面以此为例对信息系统进行分析。

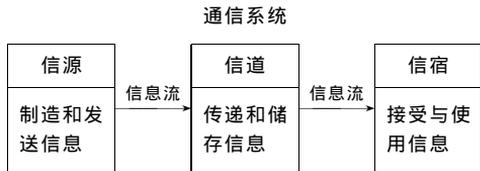


图 9-1 通信系统

通信系统由信源、信道和信宿三部分组成,三者之间的信息联系把它们结合成一个有机的整体。但是,在许多研究通信系统的文献中常常认为信息在通信系统中是单方向传递并且是独立于三个子系统的,即认为信息原来是属于信源的,后来通过信道传给了信宿。这种观点显然与实际情况不符合。因为,信息内容只是事物性态的一种标识,信源不会因为传出信息而失去它,就如同教师不会因向学生传授知识而使自己的知识减少一样。

需要特别强调的是,信息活动往往与生命和目的行为密切相关。这并不意味着构成信息系统的成员都是生命体或具有自己的目的性,甚至信息系统本身也不一定是生命体,而只要信息系统内部有一个部分具有目的性就行。

在研究信息系统时不能只看到系统内部的信息传输与变换,还要注意系统的环境。根据存在不存在外来干扰,即是否考虑噪声的影响,又可以将它分为有噪声和无噪声两类。显然,没有噪声是一种理想的或简化的情况,如果忽略了噪声对信息活动的影响,事情就会变得十分简单,即只要知道传输的速率和变换的形式就可以了。如果考虑噪声的影响,问题就会变得非常复杂,这时信源与信宿之间的符号集就不存在一一对应的关系,而可能是发出的是 A 符号,接收到的就不一定是 A,而是其他符号,而且它们间的一多对应关系还是随机的。

9.2.2 信息过程

信息系统又称为进行信息活动的系统,信息活动的基本内容包括信息的产生、传输、贮存、转化和处理。按照通信活动的顺序,可把信息系统分为信息产生(发生)系统、信息传输系统和信息处理系统。

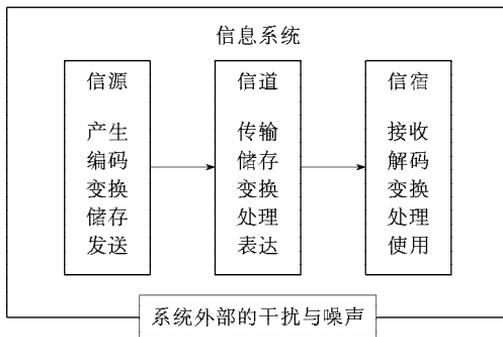


图 9-2 信息传输过程

信息产生→编码→变换→发送→接收→解码→
变换→处理→表达→传递→接收→变换→处理→显
示→使用。

图 9-3 广义的信息活动过程

下面对这些过程作简单分析。

(1) 信息的产生 :人类一直在使用信息 ,包括低等生物在内的其他系统也在有意无意地使用着信息 ,那么 ,这些信息是从哪里来的呢 ?信息发布时所发布出去的信息是从哪里来的呢 ?这些问题都涉及到信息的产生 ,那么“产生”指的是什么 ?简言之 ,产生就是通过某种特定的过程或活动将原来没有的东西制造出来。信息的产生一般有两个必要条件 :第一 ,存在着需要消除的不确定性 ,没有不确定性也就没有信息存在的必要 ,而这种不确定性是信宿对特定信源性态、结构等“它感兴趣”的方面的不确定性。信宿不同 ,它所感兴趣的方面也不同 ,将要产生的信息也不同。第二 ,信息产生需要通过消除不确定性来完成 ,而这种活动只有在一个专门的系统 ,即信息或广义通信系统中才能实现。否则 ,如果只有不确定性而没有消除不确定性的过程 ,信息是不能产生的。

实际上 ,消除不确定性的过程是一个选择过程。当通过信息系统内部的相互作用“选定”某种可能状态或事件之后 ,信息才得以出现。一个典型的例子是 ,当教师对学生的问题进行回答前 ,需要对某事物发展的多种可能结果进行分析之后 ,才可告诉学生当某些条件得到满足时 ,某种结果将会出现 ,这样可以传输给学生一定的信息。同样 ,当人们需要知道明天的天气情况时 ,就会去收听气象台的天气预报。当被明确告知明天哪种天气将会出现 ,或以哪种概率出现时 ,人们就获得了信息。尽管明天的天气不是气象台“制造”出来的 ,但天气预报的信息却是由气象台的工作人员通过精心分析各种气象资料后“选定”出来 ,即制造出来的。

“选择”是一个极其复杂的过程 ,它需要信息内部各要素的共同参加。实际上 ,选择过程是要素间关系的确定过程 ,也是一个系统的形成或结构变化过程。而信息就是这种变化结果的显示 ,或者新的整体属性的表征。一旦要素间的关系被确定之后 ,对它们来说就因没有不确定性需要消除而无信息可言了 ,它们作为信息系统的使命也就结束了。

如果说信息的原始产生来自于选择 ,那么 ,在许多场合下 ,新信息的产生往往是从对原有信息进行加工而得来的。要加工信息就要先收集信息 ,正如要制造机器先要准备材料一样。收集信息

的过程是发现和明确多种可能性的过程,而对信息的加工、转化也是对这多种可能性进行分析、选择、变换的制作过程。

(2) 信息的编码:信息作为事物性态的一种标识是不能单独存在的,因此,信息的传输必须借助一定的物质过程来实现。为了对信息进行发送和传输,必须对信息进行编码。从广义上讲,编码是一个“对应”或“映射”的过程。对应的前提是存在两个集合,然后将它们以某种方式联系起来。在编码时通常需要一一对应,这种对应关系在进行编码时具有相当的灵活性,即可以有多种对应关系。一旦“编”定,在整个通信过程中就不容许再作变动。正是因为存在多种可选择的编码方式,人们才可能从经济性或可靠性等方面进行编码研究,产生出许多编码理论和编码方法。

在通信理论中一般有两种编码,即信源编码和信道编码。

信源编码是将需要传输的内容与一定的符号对应起来的过程。信息的内容就是作为信源系统的特定性质与状态,符号则是一种分布、状态或构形。在编码时,人们对符号的物理内容(事件集合)是不加限制的,只要构成一个“完备的,不重复的”集合就行。编码时可以对这些符号进行各种排列组合,以构成多种“符号串”,以便和不同的信息内容进行对应。

信道编码是将符号与信号对应起来的过程。大家所熟知的信号有声音信号、光信号、电磁信号等,它们实际上也是一种物质过程或形态,只不过它们与信息内容的物质形态不同而已。例如,对于驾车的司机来说,交通路口可有三类情况:①可以安全通过;②可以通过但需要注意道路情况,可能存在危险;③危险,不能通过。交通指挥人员可以运用红、绿、黄三种信号灯将道路情况告诉司机。这里,将路口情况划分为三种情况是信源编码,将三种情况的内容用三种灯光来表达是信道编码,经过这样的编码之后信息内容被三种灯光表达了出来,不同的灯光就是包含不同信息内容的信号。

为了对编码的质量进行衡量,人们提出了许多编码指标,有些用来表征编码的效率(经济性),有些用来表征编码的可靠性(保密度)。

(3) 信息的发送 :经过上面的两种编码后 ,信息已经被“装载”到某个物质过程之上了 ,即已经具备了信号的形态 ,发送就是通过信号的发送来实现的 ,所以发送出去的实际上是某种作为信号的物质与能量。它与一般物质能量的区别在于 ,在这些物质能量的状态中“包含”了特定的信息内容。正因为如此 ,人们总是用发送信号的功率来衡量信息发送装置的质量与能力。例如 ,不同的电台发送信号的功率不同 ,它对信息传送的距离和质量也各不相同。

(4) 信息的储存 :信息储存可以被看作是信息传输速度暂时为零的信息传递 ,把它看成是信息传递的一种特殊情况的原因在于储存只是一个暂时的过渡 ,最终将会重新获得速度进行传递。

信息储存总是以某种物质变化的不可逆变化为基础的。例如 ,将事情记录在纸上 ,将声音、图像记录在磁带、光盘上 ,就是利用了染色、磁化、刻录中的不可逆性。

信息储存在信息处理中有十分重大的意义 ,信息储存设备和方式(格式)在计算机和多媒体技术中所占的重要地位清晰地表明了这一点。信息储存之所以在技术上有着如此重要的地位 ,主要在于它能够起到调节信息传递速度的作用 ,适当地调节传输速度 ,将起到保存信息内容和中间结果的作用。

(5) 信息的转换 :信息转换包括物质载体的转换和符号的转换 ,这种转换是指信息表达形式的变换 ,要求不改变信息的内容。如在教育过程中 ,为了表达某个教学内容 ,可以采用多种信号形式 ,如声音、图像等。教师的某一想法先是在他体内以神经细胞活动的形式进行传递 ,然后引起声带的振动 ,以声波的形式传到学生的耳膜 ,接着又变成学生体内的神经信号。在这一过程中 ,信息载体发生了多次变化 ,但信息的内容却始终不变。

载体变换在信息过程中同样具有重大的意义 ,原因在于不同的信息系统都有自己特定的信息载体 ,不仅要求符号相同 ,而且要求信号匹配 ,否则就不能实现通信。例如 ,说不同语言的人之间要进行信息交流就必须通过翻译 ,翻译的作用就是转换符号系统。而人们的感官不能接受红外线和超音波 ,则是因为它不能接收这些频率的信号。

与信息编码相似,信息转换前后应有一个确定的对应关系,这种对应关系在转换前是具有一定的灵活性的,即可以是一对一、一对多,也可以是多对一。一旦确定,就不能随意变动,否则将引起混乱。

(6) 信息的处理(加工):信息处理是指对信息内容的处理,从而使它的意义和价值发生相应的变化。如科学计算、推理等,输入与输出的信息在形式和内容上都有不同。前面提到,决策者将状态信息、规律信息和价值判断(也是一种特殊的信息)综合起来变成某个决策或实施方案的过程;指挥员根据不同的情况做出不同判断的过程,科学家在对资料进行分析之后,产生一个新的想法的过程等,都是对信息内容的加工。后者是一种创造性的智能劳动。这就是知识分子或脑力劳动者在做的事情。

一般信息处理包含以下基本环节:

- 1) 变换:即进行载体变换,如从书本、杂志上摘录、转抄某些资料。
- 2) 排序:按某种原则对所获得的资料进行分类和排序。
- 3) 核对:将排好序的资料与原始资料或实际情况进行核对,以识别真假,纠正错误。
- 4) 合并:将同类的资料合并起来,以便进行归类处理。
- 5) 增、删、改、补:即按信息处理的需要增加新的资料,删除无用或次要的,用新资料替换旧的、过时的资料。
- 6) 更新:这是信息处理中最核心的一步,即人们通常称为“创新”的过程。
- 7) 摘出:将新的观点或信息处理所需要的内容摘录出来。
- 8) 分筛:对摘录的新资料分清主次,并按信息输出的要求进行筛选。
- 9) 生成:最后生成新的信息,它可以是对新的事物性质状态的描述,对新规律性的表达以及某个具体行动的决策指令。

9.2.3 信息系统的一个实例——教育系统

可以从不同的角度来看待教育,如可以视其为一种社会公益活动,也可以看作是达到某种政治目的的工具等。就教育活动的

本质而言,它是一种特殊的信息活动。上面对信息系统与信息过程进行了一般性的讨论,以下以教育为例作一些具体说明。

教育活动可以分为三个层次:即社会教育层次(宏观层次)、学校教育活动层次(中观层次)和个人学习与智能活动层次(微观层次)。在第一个层次中,主要的问题是教育信息的形成,在第二个层次中,主要问题是教育信息的传播,在第三个层次中,主要问题是教育信息的处理和人脑智能系统的形成。教育系统是一种典型的信息系统,可以从它活动的目的、内容、行为特征、结构等方面来看。

(1) 教育活动的目的是在人类群体中传递信息:信息活动是有目的的活动,教育中的信息活动的目的性体现于教育的社会职能和对人的价值实现。首先,对社会来说,“教育信息是人类社会的遗传活动”,它将人类社会积累的经验、知识、文化代代相传,极大地提高了人类作为一个智能群体的进化效率,人类正是因为有了这种新的不同于生物遗传的信息通道,才有远比一般生物更快的进化速度。其次,从教育系统(有计划地实施教育的学校及其他教育机构)来看,教育活动的基本内容就是信息的制造、传播、加工与使用。这里的信息不是一般的社会信息,而是一种特殊的信息,即教育信息。再次,从教育者和教育对象的活动目的来看,教育的目的是通过一系列有计划、有组织的活动来改变受教育者的思维和行为习惯,使之从一个单纯的生物个体变成为一个具有一定社会性的社会成员。教育的内容是多方面的,仅以智育为例,它的目的就是培养学生获取、接收、使用和输出信息的能力,这种能力是人脑的一种特殊功能,人脑智能系统从本质上讲就是一个信息系统。

人们在教育活动中使用了一种在内容和形式上都不同于一般信息的特殊信息,它不仅携带了一定的知识,而且是为了特定的教学目的而“制造”出来的,称为教育信息。它在形式上具有明确性、系统性和浓缩性的特点,在内容上具有知识性、指令性、示范性等特点。

(2) 教育信息来源于对社会信息的加工处理:如前所述,信息是通过选择制造出来的,作为一类特殊信息的教育信息也是如此。和其他的制造活动一样,教育者在制造教育信息时不能无中生有,

他们必须先收集大量的教学素材,通过对各种社会信息,包括各种经验、理论、知识、消息、数据、广播等精心的挑选,并进行特殊的加工,使之具有适合于学生接受的形式后再应用于教学中。这一加工处理过程的实质就是信息的编码、转换、显示和储存。

那么,一部有意义的电影、小说、讲话以至广告是不是也有教育意义和价值呢?答案无疑是肯定的,它们作为一种社会信息具有一定的影响。但就教育特定的目的而言,它们还只是一种教育素材,而不是教育信息。只有经过专门挑选后,才可用于教育活动之中,这时才可称其为教育信息。其实,这种挑选和运用包含加工处理的成分。教育信息不是一般的信息,而是经过特殊加工处理出来的特殊信息,因为选择、加工和处理这些信息是一种极其复杂而艰巨的劳动,这就是教师应该受到社会尊重的原因。相反,如果不通过教育者的这些加工处理,随便将一些社会信息传授给学生,就不能达到教育的目的。因此,加工处理的质量总是直接影响着教学的效果。

教育信息的处理不仅指教育中某个阶段,它几乎贯穿于整个教育活动的始终。如在备课中有信息处理,在学习中有信息处理,在练习与复习中也有信息处理,在考试中更有信息处理。所以,教育中复杂艰巨的脑力劳动是教师与学生协同进行的。

(3) 教育信息的传递:广义上,信息传递应该包含信息的发送、传输和接收几个阶段。

从发送的角度看,信息在教育系统内部的传递有三个通道:①教育信息从教师到学生;②控制管理信息从管理人员到教师、学生;③学生对教师管理人员的反馈信息。

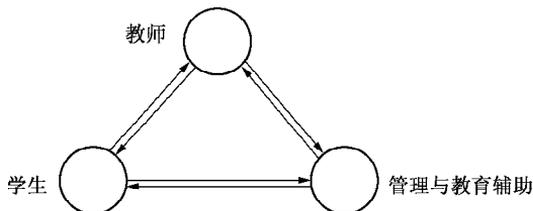


图 9-4 教育系统中的信息传输

此外,社会与教育系统之间也有一定的信息交流。例如,制造教育信息的素材源于社会,对教育系统控制、管理的信息同样也源于社会。

从接收角度看,这主要是学生的事,但接受到教育信息必须通过解码才能为学生(教育信息的接受者)所理解。所以教育信息的接受包括信号接受、信源解码、信道解码。

信号接受就是学生通过自己的感官和相应的辅助工具接受由教育者发出的教育信息,其中的关键是信号的匹配。换言之,要听到、看到、感知到,并引起某种反映,然后记录下这种反映,开始与内部储存的信息进行比较。

信源解码就是将信号与信息符号对应起来,足够大的“公共信号库”是至关重要的,即共同语言,从而要使学生能联想起已知的内容。

信道解码就是将符号组合(符号串)与特定的信息内容联系起来,这里的关键是学生对信息内容的理解。

随着现代信息技术的高速发展,在保持教育目标不变的前提下,教育活动的形式与内容都将发生巨大变化,要求注意以下几个方面:①信息接受的多种渠道和多种媒体;②信息接受中双向活动的必要性;③信息接受中的灵敏度和选择性;④有选择地接受与有选择的发送。在这些方面现代的多媒体技术为我们提供了很有用的工具;⑤教育信息接受中的噪声干扰。教育信息传递中的噪声干扰是不可避免的。从防止干扰的角度看,主要要分析哪种噪声对学生学习的影响最大,注意有针对性地抗干扰。从有害噪声与有用信息的相对性来看,又要学会转化和利用噪声;⑥教育信息接受与解码。

(4) 教育的信息环境:任何一个系统都存在于一定的环境之中,教育的信息环境问题同样值得引起人们的高度重视,它至少包括以下几方面:①“问题环境”与求知的动力;②社会对教育的需求信息;③资料与数据环境;④教育信息环境对教育活动的影响;⑤教育信息环境的建构与调控。

9.3 智能系统

如果对信息与信息系统的研究深入下去,必然涉及智能的问

题。智能及其相关问题早已引起人们的关注,如智力的问题、思维的问题等。由于问题的复杂性,人们的认识长期停留在定性的、哲学的、思辨的层次。近年来,随着计算机科学、人工智能以及脑科学的发展,智能问题才真正有所进展。

智能和智能系统的问题同样是系统科学和复杂性态科学以及非线性科学关心的重要问题。由于智能问题涉及面广又极其复杂,本书不可能作全面探讨,这里只从系统的角度加以分析。

9.3.1 智能活动

直观地说,“能”是作功的本领,智能是完成智力活动与思维活动的能力和本领。那么,什么是智力活动?什么是思维活动?不同的领域对智能有不同的理解。下面是哲学、心理学、信息论中关于智能的一些常见定义:

哲学认为,“智能是人脑这类特殊物质的一种属性,是提出问题和解决问题的本领”。

心理学认为,“智能是运用知识解决问题的能力,具体地讲就是运用知识发现问题,提出问题,解决问题的能力。具体表现为观察能力,理解能力,解决问题的能力以及表达问题的能力等。但是,这几种能力并不是同一层次的东西,其中最高的层次是以一定的知识、经验为基础的求解问题”。

信息论认为,“智能是以高效高速处理信息为主的信息获取、转化、储存、应用的能力”。也有学者把智能定义为“有效地获取、传递、处理、再生和利用信息,从而在任何给定的环境下成功地达到预定目的的能力”。

上述各种定义都有其合理性,从不同的方面表达了相近的内容,在这些定义的基础上可以将智能的定义归纳如下:智能是诸如人脑、电脑等一类特殊系统所具有的特殊功能,主要表现在进行思维和与思维有关的方面,如观察、记忆、学习、预测、决策以及灵感、直觉等方面。这些活动的特点是进行“高级或高效的信息处理”。这里“高级”的含义是相对的,主要是指能对大量的复杂信息进行处理,并生成能高效解决问题的新信息。严格地讲,智能并不是人类的专利,在一些低等生物那里早已存在智能的萌芽,随着生命系

统的长期发展演化,才在人类身上表现出越来越高级的形态。现在人们不仅在研究电脑和人工智能,而且对人脑智能、人机智能以及人类群体智能的研究正在取得突破性的进展。我们有充足的理由相信,不久的将来,一个基于因特网的全新的人类群体智能将会呈现在人们面前,大量以前靠个体智能无法解决的复杂问题,特别是全球性的社会(包括政治、经济、文化)问题将可能得到解决,并把人类社会带入一个新阶段。

(1) 信息能力

从信息的角度来看,智能表现为三个方面:

1) 获取信息的能力:获取信息的关键是在提高目的性的基础上增加灵敏度和选择性。目标一旦明确,就可主动、高效地去获取自己所需要的信息。获取有用信息的途径很多,如利用人的感官接收外界信息。换言之,就是人通过包括自己的和前人的实践等各种实践活动获取知识,所以学生在课堂听课只是其中的一个重要部分,其他还有大量的亲身实践、阅读、观察等。

对学生来说,获取信息是学习的基本目的,但更重要的是学习主动、高效获取信息的本领,这就是智能的一部分。因此,和传授知识相比,对教师而言,更重要的是要告诉学生如何获取信息的方法和选择信息的标准,包括听课、做笔记、摘录、观察、实验以及做记录等。

2) 处理信息的能力:处理信息就是将所学的东西加以思索和联想,通过分析、归纳、选择、判断、消化,使所学的知识变成自己的认识和见解。这方面的能力越强,表明信息处理的能力也越强,智能水平越高,就越聪明。

当然,聪明有天生的成分,但大量是通过后天的努力和培养。这里重要的是教与学的方法,还有环境因素的影响。其实,在一定意义上讲,教师对学生智能的发展的作用也是一种环境的作用,主要还要靠学生自己的主动性与积极性。因此,教师要教学生如何处理信息,其中包括:一要教知识,因为知识是智能的基础,是智能的砖块;二要教方法,方法在一定程度上表现为一定的思路,思考的规则、原则;三要教技巧,就是一些具体的作法,如如何听课、整

理笔记、复习、考试等 ;四要教如何想出新点子 ,即现在经常提到的创新方法。

3) 使用与表达信息的能力 :获取信息和处理信息的最终目的还在于使用信息。使用信息的过程就是用信息(知识)指导、控制自己的行动以及控制外部事物与环境的过程。同时 ,由于人类社会中的许多事情(绝大部分)是不能由一个人来完成的 ,这就需要与其他人交换信息 ,将自己的想法与需求信息传送给别人 ,达到影响、协调和控制别人行为的目的 ,即要正确地表达信息 ,也就是输出信息。智力或信息能力的三方面就表现在这里 ,它们可以通过信息使用效率和信息流量来加以定量标度。

(2) 智能活动

智能活动是高等动物的一类特殊活动。如前所述 ,它的活动内容是系统获取、处理、使用、表达信息的能力 ,这种能力是通过一系列诸如试错、记忆、学习、预测、决策等智能活动来体现的。上述内容在系统演化中已进行初步讨论 ,下面讨论智能活动的价值实现与价值创造。

1) 智能活动的特点

智能活动具有以下特点 :

① 试错活动是一种主动的探索 :试错的直接目的并不是食物或其他物质性的资源 ,而是为了获得一种可供今后应用的知识或感受 ,即一种有利于系统生存发展的信息资源。试错是生命系统的一种基本本能。正如著名的科学哲学家波普尔所言 ,作为一种本能 ,生命体一辈子都在试错之中 ,从最低等的生物阿米巴原虫到最天才的科学家爱因斯坦都在进行试错 ,不同的只是阿米巴以自己的生命作为犯错误的代价 ,而爱因斯坦则以放弃错误的假说为代价。事情的确如此 ,低等生物因思维(如果可以这样说的话)极其简单而以行动试错为主 ,一旦发生错误就会丧失生命 ,而像人这样的高等生物则可以先产生各种各样的试探性的想法 ,或者按常理和已知的规律进行推论 ,或者在尽可能小的损失的前提下进行试探。系统试错的目的是寻找达到正确的道路 ,所以一个正确的试错行为 ,或者说一个明智的试错必须有两个条件或前提 :一是能

够产生两个或两个以上的“主意”或行动,以便对行动进行选择。如果只有唯一的一种行动,就无所谓“试”了;二是有一个判定试错结果好坏的明确判据,以便对试错结果作出判别。

试错过程包含两个阶段,首先对环境或被试对象施加一定的作用和影响(输出),然后看对方有何反应(获取反馈信息或被作用的后果),并根据反应结果与原来的目标或系统的生存价值进行比较,判定是对还是错。

② 智能发展的基础是学习:学习是高等动物具有的一种智能行为。人类之所以具有高度发达的智能,其关键之一在于他们具有很强的学习能力。正因为如此,社会越发达,对于学习的研究和指导也越重视,以致在目前的企业竞争战略中学习能力成了最受关注的内容,并作为最基本的竞争能力。

人们正从各个方面来研究“学习”,有各种各样关于学习的定义。申农提出:“假定某个有机体或一台机器处于某种环境中,或者同该类环境有联系,而且还假定有一个对该环境是‘成功’的量度或‘自适应’量度。进一步假定,这种量度在实践上是比较局部的量度,让人们能够在比该有机体生命期为短的时间内测定这个成功的程度。如果对于所考虑的这类环境,这种局部成功量度有随时间而改善的趋向,则可说,相对于所选择的成功量度,该有机体或机器正为适应该环境而学习着。”这里,申农把学习作为系统适应环境的手段和活动,把适应环境作为学习的目的,在适应与学习之间建立起联系。这个定义把学习限于个体行为,用某种成功的量度来定义学习,范围较狭窄,但易于用精确语言表述。

维纳是这样来定义“学习”的:“外界环境可以看成是个体的过去经验,它能修改行为模式,使新的模式在这种或那种意义上更有效地应付未来的环境”。“学习,就像反馈的较初级形式,它是一种过程,学习前和学习后是不同的”。学习行为的特征是通过获取信息、积累经验而提高系统自身的组织力和适应力。如不考虑系统的生长(即增加元素或子系统),仅就环境改变或系统的学习行为来考察,可以用较精确的语言把学习定义为:若 $t=0$ 时环境发生变化,在 $[0, t]$ 间环境保持不变,但系统在 t 时刻的性能 $P(t)$ 满

足关系：

$$P(t) > P(0)$$

则认为系统在 $[0, t]$ 内是学习的,或称系统有学习能力(当然,这里的大于不仅指数量的增加,而且是指通过学习改进系统性能)。

心理学和教育学把学习系统分为两类:一类是有教师的学习系统,称为培训的或离线的学习系统;另一类是无教师的学习系统,或称在线的学习系统或自学习系统。就学习行为而言,称为教学与自学。

显然,学习是建立在对试错结果能加以记忆的基础上的,因为只有通过记忆,才能比较和判断两次试错结果的好坏,只有通过记忆才能形成经验,并将经验用于往后的活动之中,使得在碰到相同或相近的情况时不要再花代价去重新探索,从而不断提高探索活动的效果。

学习实质是对记忆材料(信息)进行处理,通过分析和归纳探索其规律性。这就是学习中的发现。对于一个生命体来说,学习的结果是一个根据所发现的规律(周期性)来调节和改变自己行为方式、内部结构以及对外关系,使它能逐渐适应周围的环境。由于学习总是建筑在经验的基础之上,所以学习将对过去的反思与未来的活动联系起来,成为智能系统进化的重要机制。

③ 智能活动的本质是创新:通过学习获得一定数量的直接知识和间接知识,这一过程已包含智能活动的成分,但本质上学习只是一种针对过去的信息处理手段。对于系统的演化发展来说,最根本的是保持和发展生命与生存空间,所以为了获得知识而进行的学习并不是智能活动的终极目的。智能活动最根本的目的是使活动主体面向未来时处在有利地位,能够应付和处理新的问题与困难。为此,智能主体必须创造出新的手段与方法。可见,智能活动的本质就是创新。现在创新已经引起人们的高度重视,后面章节将作专门讨论。

9.3.2 智能系统

前面把信息系统看成是进行信息活动的一类特殊系统,而这

类系统中有以传输信息为主的通信系统,有以处理信息为主的智能系统以及以控制为目的的控制系统。可见,智能系统是信息系统中的一类特殊系统。

按照智能系统的构成不同,通常可将它们分为以下几类:

①生物体的脑(主要是人脑)智能系统;②由人制造出来,可以对人脑的功能进行某种补充、扩展与延伸的人工智能系统;③人脑与人工智能系统相结合的人机智能系统;④大量个体智能系统所组成的人类群体智能系统。

在分别讨论它们的特点前,先讨论这类系统共同的结构与功能。

(1) 智能系统的结构与功能

1) 智能系统的一般构成:无论是人脑还是电脑,作为一个智能系统,它的核心部分总是信息处理器,与处理器相配套的还应该有信息的输入(获取信息的感觉器官)、输出和信息储存器等部分。智能系统就是由这四部分组成的。通常情况下,智能系统中的信息处理、转换、记忆等功能有明确分工,但对于复杂的、高级的智能系统,情况有所不同。例如,近年来脑科学和医学中发现在心脏移植中,出现换心人的性格和思维方式发生了与器官提供者相应的某种变化。这说明信息储存并不是哪个器官的专利,而是所有器官都或多或少具有一定的信息处理与记忆功能。这种有趣的现象也许可以解释为生命系统的全息性,即为了提高信息传输与储存的可靠性,所有的器官中都有隐含的信息“备份”,平常不同的器官各司其职,一旦专门的器官受到损毁,其他器官也能进行替代。

2) 高级智能系统的功能:智能活动是一个统称,按照功能可以进一步分解成若干个相对独立的活动,它们大体包括以下几方面:

①数值运算,包括运算的速度与精度;②知识获取;③知识表达;④知识处理,包括并行与串行处理;浅层(如模式分类)与深层处理(如逻辑推理)能力,不精确推理,启发式推理,串行并行结合的推理能力等;⑤学习能力;⑥稳定性、容错性和坚韧性;⑦知识领

域的敏感性 ;⑧形象思维 ;⑨创造性思维 ;⑩知识应用的方便性、灵活性、成熟性。

显然 ,不同的智能系统在以上各种能力方面都各有千秋 ,钟义信等在《智能理论与技术——人工智能与神经网络》一书中作了如下比较。表中的数字越小 ,表示智能水平越高。

智能类型	人	人工智能系统	神经网络	计算机系统
数值运算	4	3	2	1
运算速度	4	3	1	2
运算精度	4	2	3	1
知识获取	4	3	2	4
知识表达	1	3	2	4
并行处理	1	3	2	4
知识浅层处理(模式分类等)	1	3	2	4
知识深层处理(逻辑推理等)	1	2	3	4
不精确推理	1	2	3	4
启发式推理	1	2	3	4
学习能力	1	3	2	4
稳定性	1	2	4	3
容错能力、坚韧性	1	3	2	4
串行并行结合的推理能力	1	3	2	4
知识领域的敏感性	1	4	2	3
创造性思维	1	4	4	4
应用的方便性及成熟程度	1		4	2

从这个表中可以看出 ,人的综合智能水平是远高于其他智能系统的 ,至少在现阶段 ,其他智能系统都还是人工制造的产物。但最终人工产物能不能超过人自身 ,这是个有待研究的大问题 ,在此暂不加以评论。然而 ,即使现在人工系统也有远比人脑功能强大的方面。比如计算机系统长于数值计算 ;人工智能系统(AI)长于知识的逻辑推理 ;人工神经网络长于知识获取等。其实 ,比较各类智能系统的长短 ,目的是为了更好地发挥智能的综合优势 ,将人脑智能与人工智能有机地结合起来 ,以形成一个全新的人机智能系统。

(2) 智能的起源与进化:智能起源的问题与人类起源和智慧起源有密切联系,一般可以从个体与群体两个方面对这一问题进行分析。恩格斯及其前人早已提出了两者间存在的关联,个体发育在一定程度上重演了群体的发展,或是群体演化的精简版本。

就人的个体智能发展而言,根据脑生理学和儿童发展心理学的研究,一生中智力发展可以划分为若干个阶段,发展最迅速的阶段在5岁以前,而7岁前是智力发展的关键年龄期。因为人脑有约140亿个脑神经细胞,其中70%~80%在3岁以前形成。大脑皮层的发展也有一定的次序,最初是枕叶,随后依次是颞叶、顶叶和额叶,14岁额叶发育基本完成。与此相适应,如果把人在17岁时的智力记为100%的话,则4岁达到50%,8岁达到80%,8~17岁再增长20%。这些都是从智能的物质基础形成的过程来看的。如果这些说法确有道理,那么,在教育中抓住智力发展中的“关键年龄”就是很重要的。有人甚至认为这样可以提高30%的智商。

智能的群体起源可以追溯到最原始的动植物所表现的某种信息活动。从阿米巴原虫的试错,到灵长类动物的探究行为,都或多或少地包含智能的成分。但人类的群体智能与动物的智能是有本质区别的,人类智能不仅表现在对环境的适应上,而且表现在对环境的改造上,即表现在人的主观能动性上。人类的智能不仅是物质世界长期演化的结果,而且是人类社会实践的结果,人类在实践中进行学习,并受到历史的制约和环境的影响。

一般智能演化的阶梯依次表现为趋向性、反射、本能、学习等活动形式。

9.3.3 人脑智能系统

根据系统的构成,可把智能系统分为个体智能与群体智能两类,前者包括人脑智能、机器智能(人工智能)和人机智能;后者包括并行智能(即由若干智能个体共同工作的智能)和人类智能。虽然目前人们对群体智能的产生越来越感兴趣,从而引起广泛的关注,并产生了许多不同观点和意见,但目前只知道这是一类全新的智能,还不能就其结构与功能发表更多的意见,所以下面重点讨论个体智能。

(1) 人脑的结构

人脑的结构是世界上最复杂的结构,人脑的智能是世界上最奇妙的功能。为了明白人脑的结构和功能,人们进行了长期艰苦的探索,以至每当科学史上提出了新的观点和理论或结出新的技术之果时,人们就会想到用它来解释和研究人脑。

众所周知,人脑由左右两个半球所组成,整个大脑大约包含 10^{12} 个神经元,每个神经元又分别与大约 $100\sim 10\,000$ 个其他神经元相连接,形成错综复杂的神经网络。

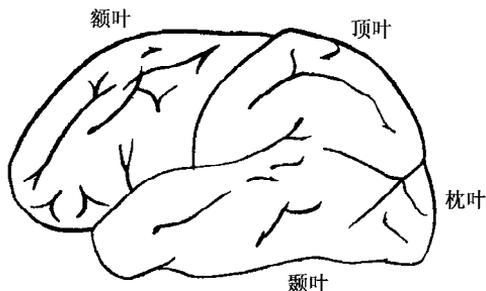


图 9-5 大脑半球的分叶

神经系统中有两类细胞,即神经元和支持这些神经元的胶质细胞。

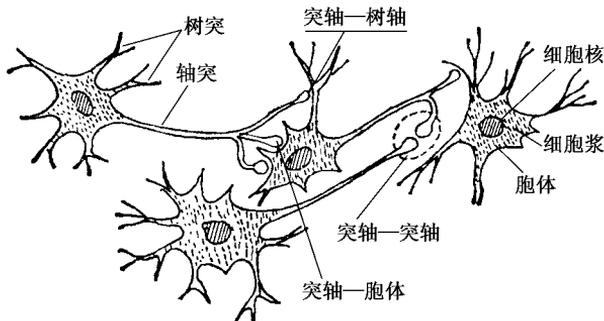


图 9-6 神经元细胞及其联系

对于大脑的物质结构和神经元的工作目前已有大量的研究成

果,这里不再重复。需要指出的是,搞清大脑物质构造固然重要,但这还不是研究人脑智能系统的全部,更重要的是揭示产生大脑特殊功能的内在机制。下面结合近年来对大脑脑电波中混沌与自组织行为的发现和研究,提出一些我们对这个问题的解释。

(2) 脑电图中的混沌:20世纪后半叶,人们发现正常思维活动的脑电图竟然是混沌的,而且测定了脑电图的分形维数和各种复杂度,从中发现它们与思维、意识、乐感、气功等之间存在某些联系。此外,作为一类特殊非线性系统的神经网络研究已成为近年的又一大热门,人们发现许多原来无法处理的计算,一旦用了神经网络方法(退火算法、进化算法等),就会使局面大为改观,这就预示着上述理论的确在大脑研究中有着广阔的前景。

如前所述,混沌现象是非线性系统的一种典型现象,它的最大特点是对初始条件具有极大的敏感性。如果这样的现象在流体运动(如气象)、经济行为(如股票)中被发现,这是不足为怪的。但是,人们发现,一个正常思维的人脑,他的脑电图却也是混沌的,而一个病态的人脑(如一个正在发癫痫病时的脑)的脑电波则呈现规则的周期性。为了进一步搞清脑电图与脑功能间的关系,一些研究者测定出了不同情况下的脑电图的分形维数, Kolmogorov 复杂度,以及相应的 Lyapunov 指数。比如,可以将脑的活动分为4种典型的状况:准备回答问题时的状态;正在问题求解时的状态;休息放松时的状态;深度入睡时的状态。实验表明:在第一种状态时分形维数较高,第二种时最高,第三种时较低,第四种时最低。这说明正常思维的脑电图不仅是混沌的,而且思维活动越“激烈”越紧张,脑电图的混沌程度也越高。这是十分令人惊奇的。因为,通常认为正常的思维总是要有条有理,即有严格的秩序,而决不能陷入混乱。

我们可以从以下几方面理解脑电图中的混沌与思维中有序性的关系。

1) 大脑也是一个极其复杂的非线性系统,混沌是这种非线性系统的“正常”行为。大脑的非线性性质可以从脑结构模型中看出。现在许多书上都谈到了脑的复杂结构,仅就它的组成来看,它

包含大约 10^{12} 个神经元,每个神经元又与 $10^2 \sim 10^4$ 个神经元相联系。在如此众多的元素组成的大系统中,每对相互作用的神经元都会受到其他神经元的影响,因而是一个极其复杂的“多体问题”,在这里产生混沌是很自然的。

2) 脑电图中的混沌和思维活动是两个层次的问题。前者是微观机制,后者是宏观表现。就像微观层次上大量分子的无规运动的动能在宏观上表现为一定的温度一样,人脑中微观层次的混沌运动恰恰是宏观层次有序思维的基础和前提。这一观点可直接从混沌的数学定义中引出。

首先,如果把思维活动中在逻辑上封闭的思路和周期轨道联系起来,那么,一个人的正常思维中应该包含可数无穷多个合乎逻辑的思路,这些思路体现了逻辑思维和抽象思维中的有序性。

其次,如果把思维活动中由一事物出发所进行的广泛的“联想”与非周期轨道联系起来,那么,一个思维活跃的人的头脑中应该有比逻辑思维更多的联想思路。这些思路体现了一个人的发散性思维,这是一种更高级的思维有序性。上面两种思维形式都是相对稳定的,这说明正常人的思维可以自行保持其稳定性和连续性,而不太容易受到外来因素和自我情绪波动的影响。但是,过于稳定的思路就会变成保守。

最后,混沌运动的基本特征就是它的“局部不稳定性”,这表现在那些不稳定的非周期轨道上。如果把这些不稳定的非周期轨道与思维中的创造性思维、灵感等超高级的发散性思维联系起来,则混沌性思维就为思想从一条思路“跳到”另一条思路提供了基础。可见,一个正常人的思维中包含混沌的成分不仅是可理解的,而且应该是必不可少的。所以,脑混沌是导致大量思维模式出现的根本原因,也是发散性思维和创造性思维的基础。而思维中的条理性则是一种对混沌控制的结果,它导致思想从混乱向有序化的转移。

3) 混沌性反映了思维的灵敏性,分形性反映了思维的复杂性。上述结论严格地说还只具有定性猜想的意义,因为直到目前为止,人们对思维的微观机制知之甚少,从脑电图的“微观”运动特

征到思维的“宏观”活动规律之间还差距甚远。脑电图中的混沌和思维的有序性之间的确存在联系,但毕竟不是一回事,所以,脑电图的混沌还只是思维活动一个侧面的表现,更应该引起重视的是,思维中混沌的定量特征和分形特征。这里不打算详细地讨论上述定量特征的具体定义,我们关心的是它们与思维活动的内在联系。在这方面已经有人做了一些理论和实验研究。实验表明:

① 不同的思维状态具有不同的分形维数,思维越活跃,分形维数越高。

② 不同的被试对象从低维数变到高维数的“速率”不同,反应越灵敏的人,维数变化的速率越快。由此不难得出如下结论(猜测):混沌程度体现了思维的灵敏程度;分形维数大小体现了思维的复杂程度。

(3) 大脑中的自组织:人脑中存在着自组织,思维就是一种自组织活动,智能是人脑自组织的产物。为了说明这一观点,举一个大家熟悉的例子。例如,当有人问你“你的母亲住在哪里”时,你就开始如下的思考:

首先,你必须理解这个提问的含义,然后你才能作出正确的回答。理解提问的含义也就是要确定他问的是什么?在这之前,你当然还要先对问话的每一个音节、词、句子等进行理解。这里存在两个相互联系的思维活动:第一步是在外部提问的“刺激”下从头脑原有的记忆中找出与问题有关的所有可能解答(答案)。这一过程可称为“问题空间”的建立过程;第二步是根据已有的经验或理论知识,对所有可能的答案进行分析、比较,最终选择其中的一个,作为你所理解的问题的“意义”。这一过程称为“答案搜索”。第二步的选择同样依赖原有的经验和知识。

其次,在分析清楚问题的含义之后,你又要去在头脑中去进行搜索。同样可分为两步,先是建立一个“答案空间”,然后在答案空间中进行搜索。不同的是,前面展开的是问题意义的空间,这里展开的是问题答案空间。问题空间所包含的是对提问的各种不同理解,在答案空间中包含各种各样的答案,如母亲住在上海、北京、广州等,然后根据记忆在这些可能答案中进行选定。

最后,当问题的答案在你心中“有数”之后,你要向提问者作出明确的回答,这时你又要运用你的语言,选择词汇,发出声音。过程与前面两个相似,只是内容有所不同。

上述思维过程表明,人脑在得到提问后就不再需要外部的特殊指令了,它会通过自己内部的自组织而求得问题的解答。具体地讲,问题空间和答案空间的展开是头脑中自行发生的。外部的提问只是起到一个“开关”的作用,等于打开了一个问题的“仓库”,至于仓库里原来装了哪些东西(答案),则是你原来思考和学习积累的结果。如果你的经验和知识越丰富,可供选择的答案也越多,被正确选中的可能性也就越大。问题的意义和答案的选择也是在头脑中自行进行的。选择就是问题求解,关键的问题是按什么样的原则来进行选择,以及如何进行选择,即选择的过程、规律和机制。如果说问题空间的展开还需要有外来提问的刺激的话,那么,选择的过程则完全是在“头脑”中自行完成的(这里没有考虑外来药物对思维过程的影响,尽管这是一个专门的研究领域,但可以把药物的作用作为一种特殊的控制参量而包含在下面的理论中),是一种明显的自组织过程。可见,问题空间和答案空间的展开(开发)正是在脑混沌的基础上进行的。没有混沌对初始条件的极其敏感性,就不能在各种“意义”和答案中进行选择。

下面着重研究智能系统自组织的机制和具体细节。

(4) 思维模式的产生:上面的讨论中有两个方面未作详细分析:第一,问题空间或答案空间是如何建立的?第二,选择过程具体是如何进行的?问题空间的建立实际上就是一个思考范围的划定,所有属于这个范围中的问题意义或答案都能满足对问题的理解(回答)要求,并且在许多情况下,各个不同的理解与答案之间还可以相互补充,但无论如何每个理解和答案都要能解决问题。因此,如果把问题空间看成是一个具有相似功能的系统的集合或“类”的话,每个理解和答案就是一个相对独立的系统。当然,在回答某个具体的问题时,一般不太会“临时”去构造这些答案。实际上这些答案应该是得到提问前就有所思考,即它在回答问题时只要作为一种现成的材料来提供选择。不过这并不重要,关键的

是现成的答案如何产生。其实,答案是头脑中的思维模式对外来信息进行加工的结果,所以更深一层的问题是思维模式是如何形成的。

思维模式是头脑自组织的结果。为了分析思维模式的产生,先看一个简单的思路的形成过程。设想一个新生儿的头脑中是“一片空白”或“一片混沌”,也就是说,没有任何现成的思维模式(这当然不是绝对的,因为他可以带有从遗传而来的某些思想),但却存在作为一个生命体(一个开放体系,一个耗散结构)的一系列本能,比如,需要获得食物和排出废物。开始时这些都由别人来照顾,他无需为此而进行思考。但随着他的长大,需要主动地去进行,这里就要花力气,动脑筋。到哪里去觅食最好、最省力,当然是找母亲最省力。在几乎每次都获得成功之后,孩子的头脑中形成了一个最初等、最简单的思路:“要食物,找妈妈”。此后,这个初等的基本的思路会随着孩子的长大和实践的丰富而不断扩展。皮亚杰研究了 this 扩展的过程和规律。他发现存在两种基本模式:当出现新情况时,最初是力图把它纳入旧的思维模式,同时对旧模式作量上的扩充(同化);当不能纳入旧模式时,就用试探的方式建立一种新的模式,看能不能解决问题。如果能,这个新模式就会被确立下来,并在今后加以巩固、发展(建构)。比如,要食物,找妈妈,找不到,找爸爸,找奶奶等,直到找一切能帮助自己的“好人”,这是一个思路扩展的过程,也是一个思维的同化与自适应的过程。当这些靠别人帮助的办法都行不通时,他也许会试着用自己的劳动成果去换取食物,或者去夺取别人的食物,这就产生了一条新的思路。这是一个新思路的建构过程。随着新的思路不断被建构出来,思路会越来越多。以后在出现肚子饿时,他就面临一个在各种思路或可行办法中进行选择的问题。而且,按什么样原则进行选择也有一个思路问题。如此等等,形成不同层次的思路,即思维模式。

下面借用非线性科学和复杂系统理论的概念来解释上面的现象。

1) 从复杂系统理论的角度看,一个思路对应一个能达到某个终点的“吸引域”。一片空白的新生儿的头脑,他的“相空间”应是平直

的,没有什么坑坑洼洼(吸引域),也没有什么山岭脊梁(不稳定点,奇点)。随着他的成长,在一些关键时刻与关键的外部形势下就会形成各种思路。这正好对应势函数的“临界慢化”,相空间发生变形和“褶皱”,变成一幅有着许多吸引域的、形态复杂的地图。

可以进一步设想,这些吸引域和吸引子的性态和结构也是十分复杂的。而吸引子可以分为两类:一类是平庸吸引子;另一类是奇怪吸引子。平庸吸引子的思路比较简单,奇怪吸引子所对应的思路就比较复杂。它在大范围内具有整体的稳定性,但在局部却是不稳的,具有对初始条件的敏感性。其实,思维中的吸引子应该说大多是奇怪吸引子。它们对应了思维的复杂性。思维的复杂性还表现在它的分形性上。一方面,一个吸引子与其他吸引子之间的边界是分形的,使得各种思路之间的界限变得模糊起来(这是否是模糊思维的基础);另一方面,奇怪吸引子中的轨线也具有分形性,使得即使在同一个思路中也可以有极其复杂的思想内容。

2) 一个新模式的出现,即一个具有新的属性和功能的系统的产生。新模式的出现是头脑中自组织与他组织(控制)的结果。思维在总体上是自组织的,但并不能把思维中的一切都归结为头脑中的自组织。因为作为世界上最复杂的系统——人脑,作为世界上最复杂的运动——思维,它的结构和运动形态不应是单一的,而应该是多种以至无数种结构和运动形态的结合。所以,人脑中的思维是分层次的,总体上和每个层次内部以自组织为主,而在各个层次之间则可能存在控制和“他组织”的运动。为了讲清这个问题,有必要对自组织和他组织作一个划分。一般情况下,自组织和他组织都是一种组织行为,即是系统形成(创生)、发展(生长、演化)和消亡的过程。一切组织过程都需要三个要素或基本条件:组织对象(材料、物资)、组织动力(能源)和组织指令(信息)。自组织和他组织区别的关键在于组织指令来自何方。如果是来自组织对象内部,叫作自组织;如果是从组织对象之外输入进来,则叫他组织。组织指令不是普通的信息,也不是一般的控制作用。组织指令要向组织对象提供组织的程序、蓝图、选择原则、工作方法等。在自组织系统中它常常表现为一种无形的公约、默契、规章,而在

他组织系统中组织指令具有一种由外部输入,强制执行的性质。但是,他组织系统是可以作为自组织系统的一个部分而存在的,只要把组织者和被组织者包含于同一个系统中,这个总系统就是自组织的了。在人脑的思维活动中尽管情况十分复杂,也可以作以上的划分。前面提到的同化与建构过程是自组织的一种典型形式。而当视觉图像信息进入人们的感官后,格式塔原则和“注意”所起的作用正是他组织的典型。如果我们仔细回顾或“自省”一下自己的思路形成过程,这样的例子还会找出不少。在许多情况下,新思路的形成类似于社会中一种公约或默契的产生。如果自组织系统是处在一个完全独立的状态,即较少受外界控制的状态,它可能达成各种各样的公约和默契。但如果外界对这个自组织系统加以某种限制与约束,情况就会有所不同。比如,在一条拥挤的道路上,行人们可能达成“行人靠右(左)”的交通公约(规则),也可能进一步将道路分为人行道、慢车道、快车道,但却不太会约定将道路加宽或改变路线,原因就在于后者超出了一定的许可范围。可见,任何自组织都不是孤立进行的,它总会受到来自内部或外部的控制,影响到组织指令的形成。不过这里影响的是组织的规则和原则,而不是指令的具体内容。因此,它仍属自组织的范畴。

(5) 思维模式的选择:自组织理论对解释思维模式的选择有重大意义。从前面对自组织的分析可知,它有两种不同形式:以自由度归并为特征的耗散型自组织和以亚稳的临界态为特征的自组织临界态(SOC)。大脑中的自组织与后者的关系甚为密切。如果要 SOC 与人脑中的思维联系起来,那么,临界态的沙堆形状由哪些因素所决定?显然,沙堆形状与底盘的形状有着密切关系。一个圆形底盘会托起一个圆锥形的沙堆,而一个长方形的底盘会托起一个类似屋顶的沙堆,一个稍微复杂一点的底盘托起的沙堆就会十分复杂。

对沙堆的复杂性态可以用稳定性和奇异性来进行分类。比如,在沙堆的顶点上,沙子可以向各个不同的方向下滑,这时它的奇异性最高。而沙子在某些“脊梁”上只朝两个或少数几个方向下滑,它们的奇异性较低。在某些面上下滑的可能方向更少,而有的

只有唯一的一个下滑方向,它们的奇异性几乎为零。

这说明如果把它看成是一种特殊的思维模式,那么,不断“堆上去的沙子”就是不断进入人们感官的信息,这些信息经过相应的处理后被保持在头脑的记忆中,而信息的遗忘也就相当于从沙堆边沿流失的沙粒。在这里,沙堆的形状、奇异点的层次结构、临界指数、标度率等一系列特征都是相对稳定的,它们可以和思维的许多方面对应起来。

1) 沙堆的形状对应了思维模式的性态特征。沙堆的形状由底盘形状、沙粒的形状、相互间的摩擦力、坍塌的临界阻力、地球引力等因素所确定。思维的性态特征则表现为思路的逻辑顺序,即思考问题(信息加工)时的流程。它取决于头脑原有的知识基础(相当于沙堆的底盘形状);头脑反应的灵敏性(相当于沙堆的摩擦阻力);外部的文化环境(相当于地球引力)。

2) 沙堆上的奇异点及其层次结构体现了沙堆系统的结构特征。有些研究者还进一步指出,尽管奇异点在整个状态点中只占极少的比例,但它却集中了整个系统 95% 以上的“能量”。这就告诉我们在研究沙堆和思维模式时,应该把主要的精力集中在那些奇异点上。思维中的奇异点也就是那些新思想、新想法的“生长点”。在这些点上思想可以跳出常规思路,在各种可能的思路中进行选择。显然,奇异点的层次级别越高,选择的余地越大,创造性也越强。一个头脑的思维“能量”或聪明程度正是由这些奇异点及其结构所决定的。

3) 沙堆是通过自组织的方式“自发”形成的,作为 SOC 的典型模型,它区别于耗散型自组织的基本特征是它的临界性和亚稳性。从物理学的知识可知,临界态时的物理行为会比平常有很大的不同,出现不依赖于尺度变换的标度性(标度不变性)就是一个代表。与此相联系的是思维中的分形和不受时空限制的无限想像能力。如前所述,脑电图的分形维数在一定程度上刻画了思维的复杂和活跃程度。

4) 思维的亚稳性是正常思维必须具备的基本属性,亚稳不同于绝对的稳定,因为过于稳定将是思维保守的表现,而不稳则意味

着思维的混乱,只有亚稳才恰到好处。

9.3.4 人工智能

人工智能一词于1956年首次出现的,经过40多年的发展已经取得了长足的进步,人工智能作为一种学科是计算机科学、生理学、语言学、数学、哲学等多学科相互结合的产物。它的研究范围很广,从专家系统到机器视觉,从神经网络到符号推理,都是人工智能研究的领域。随着理论与技术的发展,它的研究领域还在不断扩大,目前研究的热点开始转向智能主体或分布式人工智能、机器学习和知识发现、逻辑和知识表达、推理策略、自然语言处理、智能机器人等。但是,不管人工智能的领域怎样扩大,本质上人工智能研究的目的是揭示和仿真人类智能和智能行为及其规律,在此基础上建立智能信息处理系统,甚至设计出能像人一样能进行思考的机器。关于人工智能目前已有许多专著,这里仅从智能系统的角度作一些讨论。

(1) 人工智能系统的特点:在人工智能研究基础上制造出来的人工智能系统无疑有一个不断发展完善的过程,很难预料它最终会有何种形态,但就目前的人工智能系统而言,它具有以下特点:

1) 人工智能系统是人造的特殊系统,目的在于帮助人们进行信息处理。所以,至少目前它还只是人脑智能系统的一种工具,也就是说,只有在有人对它进行操作时,才能有目的地进行信息处理。这样,在人工智能系统发展的过程中,如何处理与使用者的关系,就成为核心和关键问题。

2) 人工智能系统是一类信息处理系统的总称,根据情况可以有各种专门的称呼,如专家系统、自然语言处理系统、机器翻译系统、模式识别系统、机器人系统和图像处理系统等。

3) 为了与人脑智能系统进行耦合,人工智能系统在具有一般智能系统的结构和功能之外还必须有一个人机交互界面,这种界面是否高效和友好,是人工智能系统作用能否发挥的关键。

4) 人工智能系统通常具有以下功能:知识表达、模式识别、机器学习和自适应等。这些功能的具体内容和实现方法在许多专著中都有详细的论述。

(2) 知识工程:知识工程的概念是1977年美国斯坦福大学计算机科学家费根鲍姆教授在第五届国际人工智能大会上首先提出来的,主要研究如何运用计算机技术表达知识,进行问题的智能求解。作为人工智能研究发展的结果,是人工智能、数据库技术、数理逻辑、认知科学、心理学等学科的交叉。它的特点是将信息处理的对象集中于知识。所以,广义地说,它是一门以研究知识信息处理的学科,目的在于提供开发智能系统的技术。

从系统的角度来看,知识工程的目的是构造一种知识型的人工智能系统。这类系统的功能特点是:①能解决具有专家水平的问题;②能快速地提出假设,并搜索解答;③能作出具有专家水平的解答;④具有丰富的知识,特别是基本原理和问题求解的知识;⑤能选择问题的合理表达;⑥是一个高效率的符号处理系统;⑦具有自推理能力;⑧能从结构步骤上分析解决推理问题等。

正因为知识工程系统具有以上独特的功能,它能广泛地运用于感知和识别、拟合和预测、观察和诊断、优化和设计、诊断和咨询、分类和计划等领域。

(3) 人机智能——人机互补的思想

个体智能系统同样会引出许多观点和争论,其中一个长期未能解决的问题是人脑与电脑的关系(这个问题其实属于一个更大、更带根本性的问题,即人与它的劳动对象和成果的关系问题。目前引起巨大争论的基因工程的伦理问题就属于这一范畴),不少学者对此发表观点,有的赞同电脑(计算机或人工智能最终将战胜或替代人脑),有的则表示反对。其实,目前人脑与电脑还有很大差异,电脑无论怎样发展都不可能、也没有必要具有人脑的全部的属性和功能。因为人脑毕竟是属于人这样一个特殊系统的。例如,人的主体性,即自我意识虽然属于信息处理的范畴,但却对它起着重大的、决定性的控制调节作用,而电脑永远只能作为一种人工的产物,不可能具有独立的自我意识,所以争论电脑与人脑谁战胜谁、控制谁似乎没有多大意义。实际上,假使未来高度发达的人工智能终将战胜人脑,并且是一个历史发展的必然的话,也是人类的一种进步,是任何力量都无法阻挡的。但人们真正需要解决的问

题是人工智能如何与人脑协同工作的问题。像任何一件人造的或人为事物一样,人构造它的目的总是为了利用它,用它来帮助自己实现某种目的。但一旦把它构造出来之后,人造物就具有了某种不以人的意志为转移的属性,并在一定意义上成为人的对立面,或者说必须面对的“对象”,同时,构成之前原来的目的性也会随之发生变化,于是,一对新的矛盾就不可避免地要产生。人们无法预见自己的构造物究竟是仙女、魔鬼还是奴隶,但不论它是什么,都得与之共处于一个系统之中,并最终发展成一个新的系统。因此,我们的意见是与其争论谁战胜谁的问题,不如从长远的观点考虑如何发挥各自的长处,将两者有机地结合起来成为一种新的智能体(系统)。

9.3.5 群体智能

人类群体智能的概念最近随着全球网络的高速发展被提出来。通常认为,它是一种由全部联网的电脑所构成的高级智能系统。在我们看来,事情远比人们想像的来得复杂,意义也远比电脑联网来得深远。前面已经指出,这将是智能系统的一次质的飞跃,并将对人类社会发生巨大影响。原因在于:

(1) 群体智能和个体智能属于不同层次,智能程度的高低不仅取决于构成它的个体,而是主要取决于个体(部件)之间的连接方式。在很多情况下,即使其中个体的智能比较低,也可能构成具有很高智能的群体。例如,目前有学者发现许多较为低等的动物,如蚂蚁和蜜蜂的群体就能够解决许多极为复杂的问题。

(2) 群体智能系统由个体智能系统结合而成,这种结合往往有一个较长的发展过程,而形成的过程通常都是自组织的。其中每个个体都有自己的偏好和相对有限的智能,但是,经过一段时间的摸索和协调之后,就能逐渐形成具有高度智能的群体。

(3) 人类在群体智能的形成,除了必要的硬件,如高性能的计算机系统和全球高速网络之外,主要是靠人们利用这些硬件所进行的交互作用,其中特别是各种问题的相互讨论,在讨论中逐渐形成对一些复杂社会经济问题的共同认识,这些认识将是解决全球高度复杂问题的新型智能。

(4) 对于涉及全人类和全球性的问题,靠个体智能是无法彻底解决的,只有靠人类群体智能才能解决。

9.4 智能社会

9.4.1 智能劳动

智能不仅可以作为系统个体能力的一种尺度,而且可以作为社会发展的一种尺度,从某种意义上说,人类社会的历史也是人类的个体与群体智能发展的历史。尽管在人类社会活动的每个方面都有物能和智能的参与,但不同的社会形态中它们的比例是不同的,随着社会的进步和发展,智能劳动在整个社会劳动中的比例,以及产品中的智能成分都会不断提高。当这种比例提高到一定程度时,整个社会就会发生质的变化,从现今以物质生产为主体的社会变到以智能生产为主体的社会。这种新型社会称为智能社会,或智能时代。

以上讨论没有特别强调智能活动主体的性质,也就是说,它可以是人或由人组成的社会系统,也可以是低等的生命体。现代生物学已经发现,即使是低等生物也有初级的智能活动。但如果谈到信息的社会价值,存在的范围就小多了,这是专指人类社会中的智能活动。随着社会越来越进步,智能活动在整个社会活动中的比例也越来越大,人们对信息价值也越重视。比如,现在人与人交流信息,往往也要“计算”价值,所谓“时间就是生命,信息就是金钱”。在国与国、企业与企业之间,要进行“技术转让”、“智力输出”,也有一个“按质按量计费的问题”。这说明,现代社会中信息已经成为了一种特殊的商品,它存在于流动之中,并在流动中实现自己的价值。从这一观点出发,信息价值理论的建立,必将丰富和发展马克思的劳动价值论,它将成为未来社会或智能社会中一个重要的理论基础。关于智能劳动与信息价值的关系,下面三点是非常重要的:

1) 智能劳动创造了信息价值:根据马克思的劳动价值论,一切社会财富都是劳动所创造的。信息具有一定的社会价值,能够帮助人们解决新的社会问题与困难,因为它不是凭空产生的,而是由

一种特殊的劳动——智能劳动所创造。笔者在《信息价值论初探》一文中指出,信息价值的实质是脑力劳动的价值,因为在社会领域中一切有用的信息都是脑力劳动的结果,信息价值应与抽象的一般的脑力劳动时间相对应。

2) 智能劳动水平是社会发展的尺度:尽管信息价值或智能价值问题还刚刚提出不久,但自古以来智力劳动和体力劳动都是人类的社会劳动,是人类一切生产活动中必不可少的两个组成部分。只不过在古代和近代社会中,由于专门从事智能劳动的人数较少而被仅仅看成是一个附属部分。这种情况的长期存在,使人们产生一种误解,以为社会劳动的主体是体力劳动而不是智能劳动,因而智能劳动对社会来说是可有可无的。从这种观点出发,长期以来,无论在统治者的心目中,还是在学术思想上,一直把智能劳动排除在社会生产之外。随着社会从自然资源经济向知识资源经济的转化,以及智能劳动在整个社会劳动中比例的迅速扩大,上述观点的错误与反动性也越来越明显。人们开始认识到以知识为主要资源的智能劳动不仅是社会主要的劳动形态,而且智力或智能劳动在整个社会劳动中所占的比例决定了劳动的效率与社会生产发展的水平,从而决定了社会发展的水平。以智能劳动水平作为人类社会演化的标度是非常合适的。而智能劳动的水平又可以从社会中信息流量的大小中看出,这就是特别强调信息流量的原因。

3) 智能劳动者代表了先进生产力的发展方向:智能劳动在社会劳动中比例的扩大,使得智能劳动者的社会地位也大大提高。但人们对此还并不十分清晰。主要有两种错误倾向:一种是狭隘的理解智能劳动,简单地将智能劳动者等同于知识分子,而知识分子又仅仅是那些从事科学技术的人,从而把从事经营管理、组织领导和政治工作的人都排斥于智能劳动者之外。另一种是过于宽泛地理解智能劳动者,把所有的知识分子,甚至把所有具有一定知识的人都看成是智能劳动者。这就使得智能劳动与体力劳动的界限变得模糊起来。这两种倾向都是不对的,也是有害的。

智能劳动者与非智能劳动者的活动特点与经济地位是有本质不同的,由于智能劳动的基本特征是进行知识创新,从中创造社会

价值,所以从经济学的意义上讲,智能劳动者是指那些运用知识创造社会价值,并以此谋生的人。其中不仅包括科技人员、教师、医务人员、文艺工作者等,而且包括从事经营管理、组织领导的人员。

由于智能活动从来都是社会活动的核心和控制部分,因此,智能劳动总是代表了社会发展的方向。人类在经历了长期靠体力来推动历史的时代之后,终于到了主要以智能来推动历史的时代。一个人的历史地位不在于他从事何种智能活动,而在于他是否站在先进生产力一边,起多大推动作用。

9.4.2 智能社会

(1) 智能社会是以智能劳动为主体的新的社会形态,智能社会的到来是必然的,其必然性来自人类对高质量生活的追求。这种高质量的生活包括物质生活与精神生活,而且随着社会的发展,人们对后者的需求越来越强烈。这些高标准的社会需求,只有通过高度发达的智能活动才能得到。

智能社会或智能时代的到来不仅是必然的,而且实际上已经和正在到来。正如美国著名预言学者托夫勒曾指出,从1956年起,美国就开始进入信息社会(智能)了,其标志就是在社会总劳动者中从事脑力劳动的“白领工人”数目第一次超过从事体力劳动为主的“蓝领工人”数。这一观点的出发点是看社会劳动者的主体。其实,早在19世纪,体力劳动还占社会劳动者绝大多数的时候,马克思就预言了这种新社会的到来。在《马克思全集》第46卷中他是这样描述未来社会的:到那时“劳动表现为不再像以前那样被包括在生产过程中,相反地,表现为人以生产过程的监督者和调节者的身份同生产过程发生关系”,到那时,“工人不再是生产过程的主要当事者,而是站在生产过程的旁边”,而且直接劳动不再是生产的基础,不再是财富的巨大源泉。这样,整个社会从生产方式到生活方式都将发生天翻地覆的变化,脑力劳动者将按自己的生产和生活方式来改变世界。

(2) 智能社会的生产方式:智能社会的劳动当然应该包括体力的和脑力的劳动,但以脑力劳动为主体,因而它的生产方式也以脑力劳动者的生产方式为代表。脑力劳动的基本特点是:

1) 要充分发挥脑力劳动者的智能,除了需要有较为充裕的物质基础外,主要是要有一个思想自由的精神环境,以便发挥人脑智能的创造性。

2) 自由创造不是抛弃所有的思维原则,但思维原则的把握又有赖于对思维活动规律,以及对自然、社会运动规律的深刻了解。因此,智能社会的生产方式应该是建立在科学高度发达的基础上的。按科学原则办事,服从事物客观规律应该成为智能社会一切活动的基础。

3) 不断创新,这应该是智能社会的基本原则。所谓“创新”不是指只要是前所未有的就是创新,而是有严格限定的。首先,只有那些对提高社会生产与生活质量有价值的新东西才算是创新;其次,只有那些对今后的发展起奠基作用的新东西才算是创新,这就排除了那些没有继承性或无法继承的新发明;最后,创新是建立在科学基础之上的,有相当系统性的东西,而不是偶尔出现的。

正是由于智能社会具有以上这些特点,表现在社会生产上就要求不断“推陈出新”,所以那些智能成分高的产品往往都会表现出“价格快速贬值”的特点,这种情况在目前的计算机行业中就已经十分明显了。

(3) 智能社会的价值观:智能社会价值观的核心是创造性。它体现在科学发现、技术发明、艺术创造、管理制度或体制的改革、生活与生产方式的革新等方面。创造性越强,价值就越高。这种创造的能力包括:①发现问题的能力;②概括提出问题的能力;③预见和评价能力;④灵活地运用知识求解问题的能力;⑤完成某项操作的能力等方面。

个人的智商来自两个方面:先天的智力因素,由遗传密码传递事先复制在DNA上的信息;后天的知识获取与积累。本质是一个信息化的过程。

聪明人能发展别人发展不了的问题,是信息灵敏度和信息获取能力的差异;能想到别人想不到的问题,是信息处理能力的差异;能做别人做不到的事情,能解决别人解决不了的问题,是信息创造能力的差异。

同样,对于一个企业,也有以上三方面的差异,表现在:①收集市场信息的能力,即能高效、经济(成本少)、广泛、灵敏地获取市场信息;②分析处理信息的能力,即能在“信息爆炸”的环境中正确选择企业经营所需信息,进行预测,决策分析,找出最佳运行策略;③利用信息的能力,即能把处理的信息正确用到适当的方面、时间、地点和对象(人)上,这是一种创造性思维能力。

世界上的企业信息化的过程就是从以上三方面提高企业智商的过程。因此,企业实力=硬资源 \times 软资源(软资源包括人才的质量和数量、经营管理水平、决策能力、品牌声誉、产品技术创新能力,即企业获取、处理、利用信息的能力)。该公式表达了一种新的管理定律:①硬、软资源不能为零;②增加硬资源只有在软资源不再提供的情况下才有效。

9.4.3 智能社会的经济学

研究智能社会必然要研究作为其基础的经济学。经济学是研究人类行为及其规律的科学,而人类的经济活动可以分为两类:一类是与物质能量转换有关;另一类与信息形态转换有关,分别构成物质经济学和信息经济学(Information Economic,以下简称IE)。

(1)信息经济学的创立与发展:西方的IE研究是从否定新古典经济隐含的“完全信息”假设开始的。他们从“不完全信息”的角度考察了新古典经济理论中所提出的一系列结论,从这个意义上讲,这时期的IE是在不完全信息前提下对传统经济理论的补充和修正。它是纯粹的经济学,而不研究信息和信息活动本身的经济问题。IE作为新兴的科学概念,首先由斯蒂格勒(G. Stigler)1961年在美国《政治经济学》杂志上提出,他在题为《信息经济学》的著名论文中第一次将信息作为经济活动的要素和经济运行的机制加以研究,讨论了信息的成本和价值,信息对价格、工资及其他生产要素的影响。1962年以后,马克卢普(F. Machlup)等人首开先河,对信息产业进行经济分析,成为IE的内容。他在《美国的知识生产与分配》(1962年)一书中提出知识产业的概念,阐明了知识产品对经济发展的重要作用。

20世纪70年代以来,IE的研究进一步深入和系统化,国际会

议也召开了多次。马克·波拉特(M. Porat)继承了马克卢普的成果,在美国商务部资助下,对美国的信息经济和信息产业结构进行了统计和实际测算,发表题为《信息经济学:定义和测算的大型研究报告》,为IE在产业研究方面提供了整套可操作的方法。以后各国学者纷纷效法,利用他的定义和指标体系对各国国家或地区的信息产业IE进行了测算,用数量化的图景向人们展现了IE。

20世纪60年代末到70年代,马歇尔·约维茨(M. Yovits)以广义信息系统为依托,对决策过程的信息流进行了定量研究。提出了具有经济意义的信息量、信息效率和信息价值的测度模型,并在计算机上对几个实际决策过程进行了模拟,对测度模型进行了验证,取得了较好的结果。在此期间,他以《决策过程信息经济分析》为题发表了5篇非常有价值的论文,从决策角度对信息利用、信息流的规律进行研究,揭示了信息对人类决策和选择活动的作用及作用机制,并定量描述了信息量、信息价值。

1972年,诺贝尔奖获得者肯尼斯·阿罗出版了《信息经济学》论文集,对IE作了开拓性研究,他认为,“IE是不确定性存在情况下的经济学”。他在序言中指出:“一旦不确定性的存在是可以分析的,信息的经济作用就变得十分重要了,人们可以花费人力及财力来改变经济领域以及社会生活的其他领域所面临的不确定性。这种改变恰好是信息的获得。不确定性具有经济成本,因而不确定性的减少就是一项收益。所以把信息作为一种经济物来加以研究,既是可能,也是非常重要的”。

1976年,日本学者增田米二在《信息经济》一书中提出信息时代产业将发生根本变革,出现第四产业并将进一步向系统产业发展。按照他的观点,第四产业分为“信息、知识、情绪、伦理”四大产业领域。信息产业又包括:信息加工、处理和服务,除原有的新闻、广播、通讯、出版、广告外,还增加了数据通信、软件处理、服务等有关产业。知识产业以知识和技术服务为主体,包括教育、律师、会计师,最重要的是教学和研究。情绪产业包括电影、电视、戏剧和艺术。伦理产业包括哲学、宗教等有关领域。

在增田米二那里IE完全超出了传统经济学的范围,成为研究

信息时代的产业结构及经济规律的学科。

20世纪80年代以来,信息经济学越来越受到社会的重视,成为研究信息活动的经济机制与规律,信息产品的生产、分配、流通、消费全过程及社会经济关系等重要分支。

(2) 信息经济学的内容:信息经济学包括以下的内容

1) 信息与信息活动的经济研究

① 信息商品与信息市场:信息商品化和市场形成,发育条件、环境、生产、消费、交换、流通的特征和规律、使用价值、特征和表现形态,价格形成的基础及影响因素,市场的特征、功能、结构和机制。

② 信息与信息活动的经济条件:对信息生产、服务的投资,信息资源成本、利用效率、信息活动、事业管理的经济规律,信息事业的资源及分配与约束,信息活动、事业管理。

③ 信息资源的开发、管理、分配利用。

④ 效益评价,包括评价和计算信息及信息服务、信息系统经济效益的方法,最小成本获得最大收益。

2) 信息的结构与规律研究

① 信息产业、IE的结构与规律:信息产业构成、分类、组织管理,政策法规,与非信息的作业、分析、测算。

② 经济与信息产品的发展战略、条件。

3) 经济活动的信息因素研究

① 信息对经济活动、行为的作用和影响:IE立足于信息不完全不充分的环境,研究信息获取、利用的成本与效益,消除不确定性的作用机制。在经济学中引入信息学科的原理方法,研究不确定性,不对称性,进行动态分析和非均衡分析。

② 经济活动中的信息要素问题:信息要素的成本、效益、特征及与其他要素的关系,结合条件、规律、常规劳力与资本投入与信息投入的关系,如何能替代一般劳力。

4) 信息学原理融入经济学的问题:如信息——经济新方法体系的建立。

此外,还有观点认为,信息经济学应该研究国际信息经济发展的条件、动力和环境等问题。

从系统科学的观点来看,信息经济学本来就是从研究信息社会或智能社会的经济问题中产生出来的,根据经济学的一般原理,可分为智能产品的生产、流通、消费三个环节。生产环节的核心问题是目前人们议论很多的“知识创新”问题,流通环节的核心问题是信息与智能产品交换的经济原则、法规、手段等,而消费环节的核心问题则是信息与智能价值的实现问题。当然,信息经济学的真正建立有待于人们对信息与智能在社会经济中运行规律的深刻认识,这一点在目前还远未达到,所以,信息经济学还有很长的发展过程,现在谈信息经济学体系还为时过早。

9.4.4 知识经济

自从1996年亚太经合组织明确提出:“人类正在步入一个以知识(智力)资源的占有、配置、生产、分配、使用(消费)为重要因素的经济时代”以来,一股研究“以知识为基础的经济”的热潮在我国广泛兴起。几乎所有论及知识经济的人都十分重视知识创新,以致把知识创新看作是知识经济的发动机。江泽民同志指出:“知识经济已见端倪”,“全党全社会都要高度重视知识创新、人才开发对经济发展和社会进步的重大作用,使科教兴国真正成为全民族的广泛共识和实际行动”。他还特别强调:“创新是一个民族进步的灵魂,是一个国家兴旺发达的不竭动力,没有科技创新,总是步人后尘,经济就只能永远受制于人,更不可以缩短差距”。经过一段时间的宣传普及之后,人们已对知识经济有了初步了解。怎样把研究深入下去,有两方面的问题特别需要展开:

(1) 站在时代高度从理论上分析知识创新的特征和规律。例如,知识创新的动力、条件、环境、定价及对社会各方面深层次的影响。

(2) 结合实际情况和存在的问题,寻找适合我国知识创新的具体途径。例如,如何制订促进我国知识经济发展的对策和政策,如何使作为知识创新基地的“高新技术开发区”更具吸引力;风险投资如何实施;产、学、研如何结合等。而这两个方面都与知识创新的动力机制有着密切关系。

知识创新作为一个具有社会经济意义的概念,包含两方面的

内容,即知识和创新。知识不仅包含自然科学和技术领域的知识,而且包含社会科学以及一切人类活动领域的知识。此外,包括记录在书本、论文和光盘中的知识,还包括以经验、直觉等形式存在于人们头脑中和实践过程中的知识;不仅指高新科技领域的知识,而且指一切产业、生产、流通和消费领域中的知识。

创新必须满足三个“必要条件”:第一,“前沿性”。发现、发明、创造出的东西至少应在相当范围内是处在前沿地位,即是以前所没有的新东西。这个范围可以是世界级,也可以是国家级、地区级、行业级等;第二,“有效性”。并非一切新东西都是有用的东西,但人们有目的、有意识创造出来的东西必须具有某种新的功能和用途,能解决某个老问题,满足某种新需求;第三,“系统性”。知识的创新不是某个偶然的、一时的新想法,新假设,而是经过深思熟虑和系统研究后产生的东西。

“知识”和“经济”自古有之,而体现人类特征的智能活动的本性就是创新,知识正是创新的成果。显然,一旦把“知识经济”作为新时代的特征写在当今社会的“旗帜上”,它就被赋予了一种全新含义。从知识经济公认的定义中可以看出,它是一种“以智力资源的占有、配置,以科学技术为主的知识的生产、分配和使用(消费)为新重要因素的经济”。因此,和以往的知识、经济、创新相比,知识经济时代的知识创新是产业意义上的知识创新。这主要体现在创新内容的社会化和创新活动的产业化两个方面:

(1) 创新活动的社会化:社会化的活动是相对于局部的、个别的、偶然的活动而言的。简单地说,社会化就是要产生一定的社会影响和达到一定的社会规模,并产生一定的社会效益。知识创新社会化具体表现为:

1) 创新活动具有明确的社会与经济目标:知识创新是通过大量研究才产生的,这些研究可以分为基础研究、应用研究和开发研究。以往这三方面的研究是相对分开的,因而每一种研究都有着自己相对独立的追求目标,如基础研究追求的是对自然或社会的新认识,以发现新的规律和原理为目标;应用研究追求的是对某些规律性的运用,以提出某种新的技术、技巧、方法为目标;而开发研

究追求的是某个具体功能、功效的实现,以创造出某种适应市场需求的产品为目标。研究目标的不同,不仅造成了各种研究人员在工作方式与思维方式上的很大不同,而且必然使得从发现、发明到产生社会效益需要经历较长时间,几十甚至上百年。例如,从爱因斯坦提出“质能原理 $E = MC^2$ ”,到制造出原子弹和和平利用原子能,就经历了几十年时间;从提出量子力学中的能带理论到制造出第一个晶体管,也经过了几十年。在知识经济时代,尽管三方面的研究仍然需要由不同的人在不同的时间来完成,但无论是哪种研究,从一开始就具有明确而统一的社会经济目标,因而现在从基础研究到实际应用的周期大大缩短,通常只需要几年以至几个月,原来需要两代以至几代人完成的过程,现在一个人就可以完成,这说明在知识经济时代,发现、发明、创造已被结合成一个有机的整体。

2) 创新主要针对产品、产业和市场:知识创新虽然覆盖着从知识发现、技术发明、产品、产业和整个市场的开发的全过程,但关键在于产品、产业和市场。按照熊彼德的观点,创新就是建立一种新的生产函数,把一种从没有过的关于生产要素和生产条件的新组合引入生产体系。作为资本主义“灵魂”的企业家的职能就是实现创新,引进新组合。经济发展就是不断地实现新组合。他认为,创新包括以下情况:采用一种新的产品,也就是消费者也不熟悉的产品,或一种产品的一种新的特性;采用一种新的生产方法,也就是在有关制造部门中尚未通过经验检定的方法,这种方法不需要建立在科学上新的发现的基础之上;并且,也可以是存在于商业上的一种产品的新的方式之中;开辟一个新的市场,也就是有关国家的某一个制造部门以前不曾进入的市场,不管这个市场以前是否存在过;掠夺或控制原材料或半成品的一种新的供应来源,也不问这种来源是已经存在的,还是第一次创造出来的;实现任何一种工业的新的组织,比如制造一种垄断地位(例如通过“托拉斯化”),或打破一种垄断地位。

3) 创新的内容扩展到社会的各个方面:许多学者都指出,知识经济在生产中以高科技为支柱,主要有信息科学技术、生命科学技

术、新能源与可再生能源科学技术、新材料技术、空间科学技术、海洋科学技术、环境技术和软科学技术。然而,产业意义上的创新却并不局限于上述高科技产业,也不再单纯指那些自然科学上的新发现和技术上的新发明,而是包括社会各个领域的创新活动,即一切能满足社会物质与精神上新需求的创新活动,如新管理模式、新的艺术作品、新的学说以至思维方式等。只要它们能直接或间接地推动社会经济的发展,满足人们日益增长的物质与精神需求。这里需要强调指出的是,知识创新虽然大量出现在上述高新技术产业,但并非是这些产业的专利。实际上在一些所谓的传统产业,如农业、制造业、服务业中都广泛存在这种创新的可能,并且特别需要用“创新”来对它们进行改造,使之成为“新的产业形态”。例如:原属农业范畴的种植、养殖业,就可以由引入新的生物工程技术而成为新的产业,原来的制造业,可以通过引入计算机网络和管理而成为新的生长点。

(2) 智能劳动产业化:知识创新活动在知识经济时代已不再是以往那种游离于社会经济之外少数知识分子或有闲阶层孤立的发现、发明和技术创造,而是一种直接的经济活动,是社会经济主流中的有机部分和核心部分。其具体标志是:

1) 智能劳动者成了社会劳动的主体,即托夫勒所说的“白领工人数超过蓝领工人数”(他认为1956年美国已经出现了这种情况,因而可把1956年作为美国进入信息社会的标志),这意味着知识创新活动已成为社会大部分人的终生事业,而不像以前那样只是少数有闲阶层或知识分子的专利。当智能活动从书斋或实验室、研究所中解放出来,成为推动社会与经济发展的主要动力之后,其社会地位就将发生根本改变,它不再像以前那样只是附着在体力劳动之上,作为一种次要的、附带的活动。从事智能劳动的知识分子(当然是全新意义上的知识分子)也不再是任何阶级“皮”上的“毛”(“皮之不存,毛将焉附?”),而是具有独立意义上的社会劳动者主体。正因为如此,他也将按照自己的工作、生活和思维方式来改造整个世界。

2) 知识创新成为产品价值中的主要部分。人们的任何活动中

都同时包含体能和智能的成分,只是所占比例不同。人们的劳动在农业社会主要靠体能,在工业社会一部分体能活动由机器所代替,人们付出的主要是介于体能与智能之间的“程序性”劳动。它的典型代表就是大量的操作工和流水线上的劳动,其特点是生产的重复,产品具有相对固定的形式,人们以继承传统为荣,所以产品中包含的“创新量”较少。一项发明创造可以用几十、上百年,而知识经济时代由于求新、求变已经成了市场经济的一大特征。产品没有新意,就找不到市场,也就无法存在。随着现代社会的到来,智能劳动的比例逐渐增加,直到超过体能劳动和程序性劳动,从而使智能劳动实现了产业化。因此,知识经济时代的知识创新,无论在产品价值中所占比例,还是在国民经济产值中所占比例,以及各项社会经济指标中所占比例,都超过非知识创新的比例。创新直接关系到产业发展的命运。

3) 知识创新内容与智能劳动的范围与方式极大地扩展。知识创新涉及社会的各个领域,而不是某些特定领域,例如,某些高科技产业。实际上,在一切有智能活动的地方都会有知识创新,其中也包括农业、制造业等所谓“传统产业”。随着智能劳动的产业化,它的活动范围和方式将大为扩展。创新不是单纯通过逻辑推理和理性思维来获得,而需要将多种方式紧密结合。特别是非逻辑、非理性的灵感,直觉在知识创新中的作用将越来越大,所占比重也越来越大。

从人类社会生产方式的发展来看,智能劳动的产业化是一场具有极其深刻意义的大变革。同时也是人类社会真正走向成熟的重要标志。因为和其他生物相比,人类在体能上没有特殊的优势,和自然的伟力相比甚至是微不足道的,而产生于人类头脑的智能才是人类所独有、取之不竭的动力来源。人类社会只有建筑在这种资源之上,才有可能得到高速、持久的发展。可见,知识创新是一种新时代的创新,是一种作为社会的第一生产力和知识经济的发动机的知识创新。

4) 知识创新的阶段性:创新就是要构造出有一定价值、前所未有的东西,它是人们对未知世界不断研究、探索的结果。产业意义上

的知识创新,不仅是新想法、新观点、新思路的偶然闪现,而且有一个形成、发展的过程。虽然这一过程从本质上不可能有完全确定的规律和固定的模式,但是科学技术的历史表明,一些典型意义的创新也并非纯粹偶然,它有着一些“统计”意义上的条件、环境、原则、方法和技巧。形成产业意义上的知识创新需要经历以下三个阶段:

第一,个人头脑中新想法、新观点、新思路、新假设的产生,这时虽然它们已经具有某种“新意”,但仍然只是一些局部、分散、无序、细微的创新。

第二,对上述新想法、新观点等进行筛选、整合、放大,使之条理化、系统化,然后经过实践或实验的检验、修正、完善,成为一个相对完整的思想理论或方法体系。

第三,把上述经过检验并相对完整的创新成果投入市场,使其产生社会效益和经济价值,而要实现这一点,需要进行不同规模和次数的“中间实验”,形成产品,逐步推广和被社会所接受。

在知识创新过程中的关键问题,那就是要找到一个转换的方式与实现的途径,这就是知识创新的动力学机制问题。

9.5 知识创新的机制

通常人们爱把动力与机制合起来谈,以为是一回事,其实不然。什么是动力?动力可以理解为推动事物运动变化的原因,这是个十分复杂的问题。从动力学的观点来看,具体事物的变化发展不会凭空而来,其中必有推动它的动力或动因。这类问题早就引起人们的注意。希腊哲学家亚里士多德曾经提出过著名的“四因说”,把事物变化发展的原因归结为“质料因,动力因,形式因和目的因”。到伽利略、牛顿时代,他们认为除动力因之外,其他原因都难以捉摸,主张不去追求最终的原因,而应该客观地描述事物运动变化的规律。所以牛顿力学在一定程度上是关于运动原因与结果关系的理论。由于主要涉及机械运动,两者关系比较简单,无需另外研究“机制”问题。但是,经典力学碰到了“三体”、“多体”问题就无能为力了,原因之一是“动力”与“运动”之间的关系变得十分复杂。对于复杂的社会经济系统,原因往往不止一个或少数几个,

而是大量因素的联合作用,情况就更加复杂。这就产生了动力机制的问题。

其实,机制问题在热力学和统计物理中的重要性已经十分明确。热力学问题复杂的原因在于涉及了宏观和微观两个层次,机制指的就是这两个层次的关系。例如,汽车、飞机的动力来源于汽油的燃烧,但汽油燃烧并不能直接推动汽车、飞机的运动,其中需要一个“发动机”,将汽油燃烧所产生的热能(微观层次上就是分子运动的平均动能)转化为宏观层次上的定向运动。发动机是通过把分散的“分子运动”聚集起来,约束到某些固定的方向、路线和时机上来实现这一点的。它对微观层次的运动起着聚集、约束、定向、导向的作用,而在宏观上它是由一些管道、通道和控制器所组成的(在喷气式飞机、火箭上这种情况更加明显)。从这里可以看出,所谓动力机制问题,实质上就是“发动机”的结构问题,一般地说就是“导致事物运动发展的内部联系”。

运用以上观点,从微观层次来分析知识创新的动力机制。

9.5.1 创新的微观动力

知识创新的微观层次对应了个体或局部创新的激励和心理驱动,其结果表现为一些新想法、新观点、新假设、新思路的提出。尽管这些微观层次的创新开始时还十分微小,但却是形成宏观层次上知识创新(新发现、新发明、新创造)的种子,和汽油燃烧产生的高速分子运动一样,是推动知识经济发展的“原动力”。新想法、新观点不是凭空产生的,它是创造性思维的产物,其中涉及到知识的表达、解释、采掘、发现(KDD)等。因此,微观层次创新活动的主要问题是弄清它的特点,寻找启发和激励个体创新精神和创造能力的具体途径。

(1) 微观层次创新的特点

1) 随机性:新想法、新观点、新思路的产生往往是可遇而不可求的,是随机发生的,人们很难事先预计会在什么时间、地点、问题上出现创新,但可以在统计意义上把握大致范围和时机。人们常说“机遇”偏爱有准备的头脑,可以通过“有准备的等待”来“捕捉”。根据突变理论,突变往往发生在“临界点”附近,因此,通过把思想

推向“极端”和“临界态”可获得新的想法。

2) 突发性:创新往往会突然出现。创新总是和“灵感”联系在一起。许多研究者指出,灵感可能与某些下意识、潜意识的活动有关。一定程度上可以把能够产生灵感的人脑看成是具有“并行运算”功能的“信息处理器”,下意识 and 潜意识就是“后台”运算。人脑在同一时间内会在不同层次的“后台”对各种问题进行思考,一旦产生新的想法和思路,就会从“后台”转到“前台”,出现了突发性的创新。

3) 价值的不确定性:根据前面对创新的界定,完整意义上的知识创新必需具有一定的社会功能和价值,即它必须能产生某种有用的效果。但是,产生在个人头脑中的新想法、新思路在开始出现时往往并不能确切地预见其最终的价值,是“祸”是“福”也难以确定。这种情况有些类似生命体的遗传变异,它是“中性”的“突变”,满足中性树法则。

(2) 知识创新的途径

1) 组合创新:系统理论告诉我们,“旧的”元件,可以构造出新的整体,就像同样的砖块可以建成无数新式建筑,同样的原子分子可以构成世界上千奇百怪的事物一样。能够提供新功能的新的整体并不需要由新的部件来构成,关键是新的“组合”和“搭配”。

事物间的组合、搭配就是系统内部的“关联”和结构,其形式可能多种多样。能够产生有用的功能的结构也是多种多样的,关键是要人们去实验、探索 and 发现。根据非线性系统理论,“周期三必然导致混沌”,只要存在非线性相干或系统中包含三个或三个以上成员(元素或因素),就可能出现混沌运动,这是一种包含无限多个周期与非周期轨道、对初始条件高度敏感的运动,只要控制适当,总是能在其中找到新的结构和功能的。

2) 进化和生长创新:知识创新可能产生于一个偶然得到的新想法,但从新想法到创新之间需要有一个形成发展的过程,即创新的进化与生长过程。在计算机 MIS 设计中,人们提出了一种原型化方法,它适用于那些半结构化或非结构化的问题,即用户需求不太明确的问题。其步骤是先设计构造一个小范围内的“原形”作为

种子,在此基础上通过不断的交互作用和扩充发展,使之成为完整的系统。许多创新也是循着类似的道路形成的。

创新进化的道路与途径有各式各样,自组织理论和分形生长理论为此提供了许多有价值的模型,如DLA模型、沙堆模型等,都对人们的创新活动有很好的参考意义。

3) 嫁接创新:人们常说“他山之石,可以攻玉”,通过嫁接可以产生新的品种。就是说,让一些原来得到了成功应用的方法通过合理外推,嫁接到新的地方,可能会产生意想不到的结果。

嫁接原则上也是一种新的组合形式,只不过这里强调与新环境的组合。其实,任何一样有生命力的东西,到了新的环境中时,为了自身的生存和发展,都会产生一系列“适应”性行为,去探索与新环境的最佳组合,去有效利用新的资源。即使一些老的东西,碰到新的环境,为了保持生命,也会积极探索,散发出新的生命力。这是知识创新的一种重要形式。

4) 间断与逆向式创新:创新往往不是在原有思路简单延伸扩展的结果,也不是从既定的公式中演绎出来的,创新往往产生于原有思路的“中断”或“逆转”,因此,具有相当大的突现性,是某种突变的结果。正如毛泽东所说:“最后的胜利,往往存在于再坚持一下的努力之中。”从哲学上讲,就是由量变引起质变。从这个思想出发,可以认为,知识创新往往产生于对原有状态和思路的中断和背叛,达到转折点的结果,转折点后面将会产生许多意想不到的新现象和新规律。

(3) 知识创新的动力

什么力量驱使人们去从事创新活动?这是知识创新的微观层次动力问题,对不同的人 and 不同的情况创新的具体动机当然会各有不同。但是,总的来看,个人创新的动力不外来自以下方面:

首先,求新,求异本来就是生命的本质特征之一,这一特征在高等动物,特别是人身上往往表现为对未知世界探索的“本能”。

其次,从经济学的角度来看,每个有理性的个人都在追求自己“效用的最大化”。在市场经济的环境下,对产品创新是求得“最大效用”的有效途径之一。到了信息社会和知识经济时代,“知识创

新”更成了最主要的途径。

最后,创新往往与激烈的竞争联系在一起,这种竞争可以是市场上的竞争,也可以是战场上的竞争或其他领域的竞争。这种情况早已为历史多次证实,只要想一下战争在带来巨大破坏的同时,又是怎样地激发人们的创造性就行了。

9.5.2 创新的中观机制

如果说微观层次的创新只是为知识创新提供类似“汽油燃烧”那样的原动力的话,那么,中观层次就对应了“发动机”的结构,这种结构是通过对微观创新活动的控制、约束、管理和引导来实现的。其作用是将微观层次上那些分散、局部、中性、微小的创新经过筛选和整合,使之系统化,成为一个具有特定整体属性的“创新”。中观层次的创新机制是通过一系列政策、制度、观念、法规和机构来体现和实施的,它具体包含以下几个方面:

(1) 评价选择机制:由于微观层次的创新具有“中性”的特征,所以要对它们进行筛选,筛选总是从某个具体的创新目标出发的,这个目标可大可小,如对整个社会,对某个国家地区,对某个企业,以至某个项目。选择与评价时,一要有一个定量的尺度;二要有一个完整的评价体系;三要有一个实施和管理选择评价的机构。

首先,知识创新的“定量尺度”,具体是通过对知识产权的“定价系统”来体现的。产业意义上的知识创新价值只有在获得了知识产权后才能得到社会的真正认可,并得到法律上的保障。这是实现创新价值的第一步。第二步是定价,知识创新是智能劳动的产物,应该服从“劳动价值论”的规律,即根据所耗费的“社会劳动时间”来定价。同时,创新又是一种特殊的智能劳动,其成果价值对环境及劳动者个人的依赖性远大于普通的物质产品。而且,创新在何时何地出现往往具有很大的随机性,给定价带来巨大的困难。这个问题正是知识经济时代中需要研究确定的关键。例如,对软件的定价就是如此,定价不恰当,将直接影响它的价值实现。具有知识产权的创新真正的价值实现还要等待它投入市场后有人来购买,这是第三步,这一步具有更大的随机性。那些耗费了大量劳动时间,能满足社会实际需求,并能及时为社会所认识的创新通

常能“卖到好价钱”。必要的社会宣传(广告)和市场引导也是必不可少的。因为在发现和开拓新市场中包括大量的创新劳动,这一部分也应该计算在定价之内。

其次,知识经济中,创新活动的最小单元是“项目”,所以建立以“项目组”为基础的评价与创新体制是至关重要的。从目前情况看,我国常把项目分为由社会企业资助的“横向”项目和由国家、省市下达拨款的“纵向”项目。而项目的评价往往分为“事前”立项(意味着拨款)与“事后”鉴定(通过,并有可能获得新的项目)。立项和鉴定都有一系列标准,它们构成了选择评价的指标体系。应该说,在“纵向”课题方面,我国对知识创新的选择评价体系的研究是下了不少功夫的,也取得了令人瞩目的成果,这主要是国家自然科学基金会所做的工作。虽然还有一些不尽如人意的地方,但总的来说问题不在评估标准和尺度,而在于支持的面和强度都远远不能满足知识经济发展的需要。对于“横向”的项目来说,基本上还没有真正形成一套科学的体系,因而很大程度上还取决于企业领导个人的知识、经验和兴趣。这是目前亟待解决的问题。

(2) 风险投资机制:一般微观层次的创新总是比较小的,相对于宏观(产业)层次的创新还只是“微涨落”。只有在特定的环境和条件下,微观层次经过选定的创新才能变成产业意义上的知识创新。如何把它变为“巨涨落”,需要一个放大机制,这个机制就是通常所说的“投资机制”。它的作用是对已经选定的项目进行资助,提供必要的“物质和能量”。

由于微观层次上的创新具有以上三个特征,因此,对它的投资存在很大的“风险”。从我国目前的情况看,对科学技术研究投资量的不足固然是一个大的问题,但相比之下,更大的问题是人们对风险投资、高风险与高回报、高效益间的关系还认识不清。因而,往往不是没有经费,而是不敢冒大的风险,使得许多经过论证、很有前途的研究项目不能及时得到足够的资助,以至丧失宝贵的机会。我国在物理、生物等领域错过获得诺贝尔奖的机会,在机器翻译、语音识别等方面错失占领市场的良机就是众所周知的沉痛教训。在技术和产品开发方面的情况更是如此。

理论上对创新投资所起的作用是“激励放大”,而放大通常是通过“正反馈”来实现的。正反馈系统由以下部分组成:一是反馈通道,它将效果与原因连接起来,使之形成一个“闭环”;二是反馈监视器,将系统输出与输入信号进行比较,以产生适当的反馈信号;三是反馈调节器,通过它来实施反馈控制,即对反馈的“相位”、数量、时滞等进行控制调节。对于知识创新的激励放大,其正反馈作用是通过将创新所产生的效益与对创新的投资联系起来实现的。原则上应该是“谁投资,谁承担风险,谁受益”,即国家投资,全社会、全民受益;集体(企业、单位)投资,集体受益;个人投资,个人受益。现在的问题是实际的“反馈通道”有待建立,即风险投资机构有待建立。

激励放大有多种形式,有交互的,也有自我的。可以通过物质金钱来激励,也可以通过精神鼓励。有时即使表面看没有什么物质与精神的激励,但只要适当满足人类对真理的追求和对自我价值的追求,也会产生巨大的激励效果。在科学家们的交往和讨论中,相互启发就是产生新想法和新思路的有效途径。这正是维纳所说的信息放大与增值机制。

(3) 控制管理机制:中观层次上的创新机制目的是将微观层次上那些微小的、分散的、相对无序的新想法、新思路、新观点经过整合,形成能产生一定社会经济效果的“产品”、产业和市场。要做到这一点,除了前面的选择、评价、激励、放大外,控制和管理也是必不可少的。在中观层次,对创新的管理主要体现在:

一是对研究项目的管理。其中包括科研项目“立项”的原则,项目的过程控制,以及对项目人、财(资金)、物(仪器、设备、场所等)、信(信息、资料、数据等)、时(时间)的管理。

二是对研究方向的管理。由于微观层次上的创新是相对“无序”的,它可能发生在社会经济的各个领域,但对于一定时期、一定范围来说,必然会有所侧重。如国家自然科学基金会每年发出的项目指南,就是提出了国家急需的研究方向,将有限的人力、物力集中在这些方向上,以期取得突破性的进展。有没有这样的“研究指南”,对于知识创新来说是至关重要的。

三是在研究和发现新时代科技发展新规律的基础上,提出新的科技管理规则、原理、思想和模式。如美国学者茨维基提出“矩阵管理”。

(4) 人才培养与选拔机制:知识创新靠的是人才,人才需要培养和选拔,需要发展各个层次的教育,如普及教育、高等教育、成人教育、终身教育等。关于教育的意义人们已谈论了不少,但要真正把教育搞上去,还有许多实际的问题需要研究。为什么我们一直在强调教育的重要性,并加大了对教育的投入,甚至动员全民来搞“希望工程”,但和发达国家相比,差距还有加大的趋势?为什么中国学生和外国学生相比,个人独立创造能力普遍不如学习成绩那样突出?为什么人们追求成为“学者”的多,而喜欢“标新立异”的少?这里除了有历史的、文化的、观念的因素外,关键之一是通过什么样的具体途径来获得经济高速发展所急需的人才。说到底也是一个机制问题,是教育体制、方针、内容和方法的问题。

此外,在人才的选拔方面,我国历来强调干部和“接班人”的选择,对什么样的人适合当干部、当领导有较明确的标准,但对什么样的人学术上有培养前途,什么样的人可以当学者或科学家、工程师、项目负责人等,并无明确的标准和规定。由谁通过何种途径和“程序”来进行人才的选拔和任命也不甚清楚,往往从政治和人际关系方面考虑得多,而从科学研究、技术创新的特殊性方面考虑得少。这里的关键同样是机制问题。知识创新人才的选拔有其自身特殊的规律,需要深入地研究,不能简单沿用选拔领导和干部的方法与途径。

9.5.3 创新的宏观环境

知识创新只有在适当的社会经济环境中才有可能实现,知识创新的宏观环境表现为一定的政治气氛、经济体制以及文化背景。尽管环境并不能直接产生新的知识,但它却是使知识创新真正成为社会与经济支柱的必要条件。需要满足两个条件:一是知识分子个人的生活与工作条件的保障;二是作为一个社会群体而存在的社会政治、经济保障。

(1) 生活与工作环境:知识创新主要是智能劳动,即脑力劳动

的产物,而脑力劳动需要特殊的生活与工作环境,如研究问题,进行创作需要足够的自由支配的时间和空间,需要方便地获得所需的信息、资料、数据等。因为从事知识创新的智能劳动者,不仅生活在物质世界之中,而且生活在精神世界之中,而信息则是精神生活的食粮。随着全球高速信息网络的建立,这种社会环境正在日益改善。但是,一方面是尚未很好普及,特别是对我国这样的发展中国家,另一方面是随之出现许多新的社会问题,如信息安全、资源共享、知识产权的关系问题等。不解决好这些问题,将会对知识创新起很大的制约作用。

(2) 政治环境与法律制度:知识创新需要适当的政治环境和相应的法律制度保障,其中包括对知识产权的保护,对知识创新劳动所得的合法占有,知识分子个人“独立思考”与“隐私权”的保障等。

制度和法律是人为制订的,目的是保证人们进行正常社会活动,制订适合社会发展需要的法律、制度需要有理论和实践依据。由于信息社会和知识经济时代还刚刚开始,对它的理论研究与实践经验还十分不够,因此,在制定政策和法律时,往往会自觉不自觉地站在农业经济与工业经济的立场上考虑问题。例如,过去一段时间,片面提出“知识分子劳动化的口号”,强调“接受工人,贫下中农的再教育”,实际上把本来属于工人阶级一部分的知识分子错误地排斥在劳动人民队伍之外,采取了限制、利用、改造的政策,客观上对知识创新起到了压制的作用。

知识经济时代的社会劳动主体正在发生变化(从以体力劳动为主体到以脑力劳动为主体),这是一场深刻的社会变革。面对知识经济,知识分子要充分认识自己的历史使命,同时也要充分估计到进入知识经济时代的长期性和过渡阶段的艰巨性、复杂性,甚至残酷性。因为要用脑力劳动的生产方式来改造整个世界,从附庸到主人,必然触及许多人的既得利益、权力和习惯。

(3) 文化环境与道德风尚:文化和道德在一定程度上可以看作是一种宏观评价与奖罚体系。适合于知识创新的文化环境,本质上是要对创新活动方式的社会认可,要提倡与鼓励“标新立异”,“与众不同”,要承认和尊重个人的突出贡献。这些都是和以往农

业经济、工业经济的文化环境、道德风尚极其不同的。如果用体能劳动的标准来衡量脑力劳动,片面强调思想上的“统一”和行动上的“步调一致”,就将在思想上束缚知识创新。

从意识形态上来说,随着智能劳动者逐步成为劳动者的主体,他必将按照自己的面目来改造整个世界。但要作到这一点,首先要改变自己,以成为知识经济时代全新的劳动者。对于知识分子而言,必须强调市场意识、产业意识和企业意识,要与企业家和工人相结合,而其中与知识分子最接近的就是企业家,他们本来就是知识分子中的一部分,其工作方式、生产方式是相同的。

第十章 | 社会系统

社会现象很早就引起了研究者们浓厚的兴趣。对人类社会活动的各种研究产生了诸如经济学、政治学、历史学、社会学等学科,这些学科构成了一门有别于自然科学的学科体系——社会科学。然而,也许由于人类社会远比一般的自然现象复杂,社会与人的关系过于紧密,而难以客观地进行研究和观察,也许社会中包含过多难以割舍的感情和利害冲突,总之,社会科学在理论深度、定量刻画等方面还远远落后于当今的自然科学。另外,社会科学与人类自身的关系实在是太密切了,社会科学的发展越来越引起人们的重视。社会科学研究广泛借用自然科学和其他科学中成功的理论和方法。

如果说科学探索的最终目的是为了人类更好地生存发展的话,那么,对人类社会的直接研究就成了当代科学最大的功利,社会经济系统也成了系统最重要的研究与应用领域。事实上,系统科学自创立以来一直对社会有着浓厚的兴趣,这是因为:一方面,社会系统是一类十分复杂的系统,这一领域运用的成效是对系统科学威力的极好检验;另一方面,也是最重要最直接的原因,即人本来就生活于社会之中,作为社会系统的一员,他的生存和发展与社会、社会系统、社会生态环境有着密切关系。本章将从系统的角度,对社会现象、社会系统以及人类的社会行为作一番考察。系统科学所涉及的内容几乎包括社会科学的所有领域,然而,我们无意用系统理论来“重写”社会科学,只是试图从事物整体性的角度来看待社会,运用系统科学的观点、方法,特别是复杂系统的理论和方法去研究复杂的社会经济问题,看一看它会给人们带来什么新的内容。

从系统的观点来看,社会系统是一类极其复杂而又巨大的特

殊系统。它的内部元素数量和种类众多,关系复杂,层次交错,与外部环境和与其他系统的关系也特别复杂,呈现出多方面的属性和功能,社会系统的发展演化更是有曲折的历史过程。这就告诉我们,社会系统所具有的独特结构和性质是不能简单照搬一般自然系统的那些现成理论,而应根据社会、社会系统的特点对原有的系统理论进行扩展和创新,甚至要超出原来以“整体性”为核心的系统概念,提出一种更适用于社会的系统概念,如“超系统”、“人类系统”的概念等。因此,本章除按一般系统方法分析社会系统的元素、结构、演化、价值外,将着重探讨社会系统的特殊问题。这些问题包括:

- (1) 作为人类社会基本元素的人及人的集团的特征。
- (2) 人类社会的特殊关系及社会系统的特殊结构。
- (3) 人类社会的历史进程和社会系统的演化发展会呈现出哪些特点。
- (4) 现代社会有什么新特征、新规律。

本章拟从这四个方面加以展开,首先对人类社会以及社会系统的特征进行概述。

10.1 人与社会

如果你是一位来自太空的“旁观者”,能够在遥远的天际,明察秋毫地观察地球这一特殊的天体,并且可以把时间尺度放大到与地球诞生以来的全部历史,你会惊奇地发现,只是到了地球演化十分晚近的时候才出现了一批具有特殊智能的生物,它们的群体活动已经和正在迅速地改变地球原有的面貌,开创了许多前所未有的新局面。这些智能生物的群体活动就是所谓社会或社会活动。

10.1.1 人的本性

如果从系统科学的观点考察人类社会和人的社会系统,不难发现,它们最突出的特点就是由人和人的集团所构成。因此,分析社会应从人开始。

(1) 人的生物性与“效用最大化原则”:不言而喻,“人”首先是一个生命体,尽管在人的行为中生物性并不总是占据主导地位,但

它却是人的一个基本的、不可回避的方面。从这个基础层面出发,可以解释许多(但不是全部)看来十分费解和矛盾的社会现象。例如,同一个人身上所表现出来的自私和为公的行为,对自我生命的爱和对他人的爱等。

生物体具有什么样的基本特征?许多生物教科书中都有详细的讨论。一个公认的观点是,生物体的基本特征就是要力图保持个体的生命和种群的延续,即保持生存和发展。用系统科学的话来说,就是保持和发展系统的整体性、稳定性及特征信息。前者容易理解,后者是生命体独有的特征,通常表现为生命体的遗传信息,包括个体和群体结构信息和对环境的经验与“认识”等。

生命体是一种耗散结构(系统),生命体为了生存发展,必须从外界获取物质、能量、信息。这是它的本能。用薛定谔和普里高津的话来说,生命是一个“负熵的小岛”,需要从外界获取“负熵”以维持自己的生命。特别是当有多个同类系统存在,生存发展所需要的资源和空间相对有限时,为更多、更有效地获得这些资源,生命体之间的相互竞争,以至格杀就不可避免。所以按照系统哲学家拉兹洛的话来说:生命体总是要损毁它处,发展自我。从这个意义上讲,“损人利己”、污染环境,正是生命体“自私基因”的体现,是生命体与生以来所具有的基本特征。因此,应该客观地看待由人的生物本性所带来的“自私”和利己行为,把它作为一种客观存在和基本事实来对待,不去回避它或人为地强行限制,而只能在正确理解的基础上加以转化和引导。

人的生物本性在经济学上表现为“从个人特定的偏好出发,追求自己的效用最大化”。正如西方经济学的先驱亚当·斯密在《国富论》中指出,在市场经济中,个人“所盘算的也只是他自己的利益。在这种场合,像其他许多场合一样,他受着一只看不见的手的指导,去尽力达到一个并非他本意所想达到的目的……他追求自己的利益,往往使他能真正出于本意的情况下更有效地促进社会的利益”。斯密的这一观点一经提出,就成了西方经济学的一个基本出发点。后来约翰·穆勒、西尼尔将其发展完善,提出了著名的“经济人”假设。他们认为:一个处在市场经济环境中的人,由于

他具有一定程度的自由,当他和其他人需要交换,并且可以进行交换时,“他将盘算自己的利益,追求自己效用的最大化”。

追求个人的“效用最大化”必然要影响到其他的人,特别是在一个资源相对有限的环境中,“自私行为”在一定条件下常常会和“损人利己”的非道德行为联系在一起。然而,在自私和非道德之间并不能划等号,因为,人除了生物的本能之外,还有作为社会一员的一面,人们要生活在一个社会共同体中,就必须遵守这个共同体的法律和道德准则,并为它作出自己应有的贡献。实际上,一个具有“自我意识”的明智的人,有能力预见自己行动的后果,他会明白世界上许多事不是单独的个体所能独自完成的。为了自身的生存并达到目的,个体间的合作是必要的,需要结合成一个更大、更强有力的组织,才能有效地对付比个人强大的自然和其他社会成员。如果他更聪明一点,也许能理解个人、集体,乃至整个社会、人类的关系,明白个人的历史使命。也就是说,当人把生命体自私的本性发展到完善而“明智”的地步后,就可能将“狭隘”的自私逐步转化为追求集体的效用最大化,以至为国家民族的利益而牺牲自我,做出与“自私”完全相反的行动。

(2) 人的智能与“智能介入原则”:人要从外界获取生活资源,要从自己的“偏好”出发去追求“效用最大化”。但是,怎样才能更有效地做到这一点?人和动物相比,最大的特点就是主要运用自己的智能和理性来实现目的,而不是单靠个体的体力。

1) 人的特殊智能:上一章对智能进行了一般的讨论,指出智能就是获取、处理、交换、表达、运用信息的能力。对一个生命体来说,智能主要表现在它能从环境中获取信息,进行学习,以适应和利用环境来保护和扩大自己的生存和发展。但人的智能又与一般生物的智能有着本质的不同,可以将它分为个体与群体两个层次。个体层次智能体现于信息获取、处理和交流;群体层次智能则体现为群决策与达成共识等。

① 信息获取:人能提出问题并主动有意识地去选择和获取自己所需要的信息,而不像动物那样只是被动地感受外界信息。例如,为了实现某个目标进行有意识的观察,以致设计专门的试验,

人类的科学正是从这里产生出来的。

② 信息处理 :人能运用知识求解问题 ,进行预测 ,做出决策 ,而不像动物那样 ,只是做出被动的反应。人能在复杂的环境中发现问题 ,寻找解决问题的最佳途径。所谓发现问题 ,就是要发现某个事物发展的多种可能性 ,比较各种可能事件的出现会产生的各种后果 ,并且对这些后果进行分类。所谓解决问题 ,就是对各种可能做出选择 ,或者有效地消除现实状态与目标状态之间的差距 ,即达到预定的目标。

③ 信息交流 :人能创造符号 ,运用语言、文字、图像、音响 ,以及各种各样的技术手段在“横向”实现空间上的高速、高效传播。卡西尔在他的名著《人论》中把人的基本特征定为“能制造和使用符号”的动物 ,而且能运用文化教育等在“纵向”实现时间上的“历史”传递。即不仅具有生物遗传(信息)的属性 ,而且具有文化遗传(信息)的属性。

人类智能集中地体现在随着世界经济一体化和全球高速信息网络(以 Internet 为代表)的实现以后 ,在人类个体智能基础上将产生一种全新的智能形式 ,暂时把它称为人类集体智能或人类智能。现在谈论这种新智能是什么样子为时尚早 ,因为它只有当人类社会真正结成一个整体之后才可能展现其特征。但是 ,我们相信它一定会出现 ,其理由 :一是从动物的发展中可以看出 ,动物处在分散状态和集中状态时行为有很大不同 ,这是由于它们之间进行广泛信息交流后 ,对内对外产生了新的信息反应的结果 ;二是如果把个人看作一个神经元 ,那么 ,人与人之间的信息网络就是神经元之间的神经通路 ,当后者发达到一定程度后 ,就会结成一个新的整体 ,表现出全新的性态。

2) 智能介入原则 :人的智能集中体现于他对各种关系的处理上 ,这些关系包括人与自然之间的认识与改造和人与人之间的社会关系。后者在很多情况下起着主导作用。

人把自己的智能运用于各种关系的处理之中 ,把这称为“智能介入”。智能介入是人类独有的 ,其他生物只有“本能介入”。有了智能介入 ,使得人与自然、社会的关系发生了根本变化 ,作为人际

关系总和的社会和人自身,就出现了质的飞跃。

人脑的智能是通过对社会活动的结果和规律进行预测的基础上主动介入社会实践的。在这里,预测是介入的基础,而按照预测结果进行趋利避害的选择,主动地干预社会,是介入的具体表现。进行预测通常包括:①对系统行为或运行后果进行预测;②对环境变化与系统变化进行预测;③对系统运行状态与过程进行预测;④在与其他系统发生关系时,对对方的行为或对策进行预测。

预测介入社会活动是分层次和级别的。作为一级预测行为,通过学习发现系统运行的规律,尔后根据这些规律进行预测。需要强调的是,一个系统可以因环境与条件的不同而服从不同的规律,也就是说,规律也是可变化的,关键是要弄清系统在什么样的环境与条件下服从什么样的规律。作为第二级预测行为,将对介入的后果及其对自组织发生影响。在对系统行为的后果进行了预测之后,就会对这些后果进行分类,尽量促使有利后果的到来,从而避免不利后果的出现。这样,系统自组织的路径就会因智能的介入而发生变化,因为预测的后果将会以一个“虚拟的条件”而加入到演化的条件中去,影响系统的演化路径和演化的结果。

预测的特点是时间上的超前性和“反因果性”,即可以在事件尚未发生之前就对其可能实现的后果进行“趋利避害”的选择和控制,使得预料中的不利后果不发生。

智能的介入将对系统的演化发生巨大影响。系统演化的后果因智能是否介入而有所不同。但是,有些后果是可以避免或得到的,而另一些后果则是不可避免或得不到的。对于可以得以避免的后果和可以得到的后果在智能介入之后演化的路径已经发生了变化。

对处在变化不定的社会环境中的系统来说,智能介入意义更大。因为尽管智能对事物的预测总是以“确定性”为基础的,但这种确定性中包含了统计确定性,即在特定的环境中事件以一定的概率发生。

预测在一定意义上是一种思维上的“自反馈”和“自缠绕”。它可以促进思维的深化,也会产生许多认识上和行动上的“悖论”。

3) 人的自我意识 :人在智能方面的另一个表现是人的自我意识。马克思、恩格斯、卡西尔、拉兹洛等对此都有过精彩论述。系统哲学家 E·拉兹洛在《用系统论的观点看世界》一书中用了专门一章讨论“用系统的观点看人”。他认为,尽管从进化的角度看,人类并没有获得像灵魂那样的独特的东西,不得不站到动物王国中去。然而,人毕竟有值得骄傲、唯独属于他而其他动物不可企及的特质:“意识、抽象思维、语言、感情以及表述和体现出以上这一切的那个信息交流的现实存在(譬如,口头语言和书面语言)表现感情和性情的艺术作品及其他客体化的东西,还有传达意义和指导人类世界中的行为的那许多信号和符号”。

拉兹洛特别强调人的自我意识,认为“如果我们把意识定义为系统体验它自己的主体性的能力的话,同主体性相反,自我体验没有表现为自然系统的普遍性质,我们有充分的理由认为,自我体验只属于具有最发达的神经系统,从而有高度整合神经功能的自然系统”。他还认为,判别一个生物体是不是具有意识,一个简单的方法就是看它是否发展出语言,是不是已经发展出了其他使用符号的表达方式和信息交流方式;看它是不是能够超越此时此地的局限,无需直接受到实际刺激的触动就能制定出行动计划。“具有意识的生物体,不局限于此时此地具体感觉到的世界,它们可以进入到它们自己创造的一个半独立的世界中去”,“唯有人能够通过这种体验”。

(3) 人的理性 :人不仅有生物性,更重要的是,人有智能和理性。人的理性以前两者为基础,但理性还具有不同的含义。在西方经济学中,理性作为一个基本的出发点,就曾引起过长期争论。对理性的分析有助于人们理解社会系统以及建立社会系统的模型。

1) 什么是理性 :理性是具有智能的个人或集体的一种行为方式。“理性”行为是在一定约束条件下,运用智能的结果。对个人来说,理性与认真的思考、逻辑分析、自我感情控制联系起来。对一个社会系统、群体或组织来说,理性除了上述含义外,还意味着“对理想型的‘合理合法当局’的”自觉适应。它要求组织的运转不受个人目标的有害影响,而是靠规章制度的非人格化的实施。如

亚里士多德所说的谋略和“慎思”精神,它是与“不作认真思考光凭情感用事的莽撞行为”相对立的。

对于理性的研究是社会理论尤其是经济学的出发点。理性被认为是现代经济分析的核心问题之一。在现代社会与经济理论中,“理性”被定义得更为明确和形式化。如西蒙 1964 年在《社会科学辞典》中写道:“广义而言,理性指一种行为方式,它 a. 适合实现指定目标, b. 而且在给定条件和约束的限度之内”,即“在给定条件和约束的限度适合达到给定目标的行为方式”。他认为,条件和约束包括可观环境的和系统(决策者)自身的,而目标也可以是决策者自身(个人)或他所属的群体(组织),或者观察者、研究者。至于目标,他的定义是:“效用函数的最大期望值”,而这个效用函数可以从决策者(系统或主体)偏好的有序性和一致性中导出,如消费者追求最大期望效用,企业家追求最大利润等。

① 需求函数:需求量是价格的函数: $q_d = D(p)$, 或 $p = D^{-1}(q_d)$

由于总收入等于价格乘以销售量,因此需求函数确定了总收入: $R = pq_d$

② 成本函数:生产成本是生产量的函数: $C = C(q_d)$

如果产量等于需求量 $q_s = q_d$

则欲求最大的利润无非是总收入与生产成本之差:利润 = $R - C = pq - C(q)$

在考虑到可微分性的适当假定下,最大利润将满足如下条件:

$$d(R - C)/dq = p + qd(D^{-1}(q))/dq - dC(q)/dq = 0$$

这个理论中的约束——需求函数 D 和成本函数 C , 均被放在活动者的环境当中了。活动者被认为要解算方程。为此,他必须具备有关那些约束的完备知识,必须有能力和进行必需的计算将利润对产量的导数置零,并求解所得到的代数方程。从理性的概念出发,人们提出了“理性经济人”模型(假说):这种人具备关于所处环境各有关方面的知识,而且这些知识即使不是绝对完备的,至少也相当丰富,相当透彻。此外,这种人还被设想为具备一个很有条

理的、稳定的偏好体系,并拥有很强的计算技能,他靠这类技能就能计算出,在他的备选行为方案中,哪些方案可以达到其偏好尺度上的最高点。

可以用数学的方式来描述这种理性行为(对无论是全面理性还是有限理性都适用):

① 一个点集 A 表示一组备选方案。

② 用 A 的一个子集 A' 表示“被考虑到的备选方案”。

③ 用点集 S 表示“未来可能状态”或“决策结果”, s 为 S 中的一个元素。

④ 用实函数 $V(s)$ 表示一个“报酬”函数,即各种可能结果的“价值”和“效用”。

⑤ 用信息 I 表示 A 中每个元素 a ,到子系 S_a 的映射,其中 S_a 表示选择 a 时所可能导致的结果的集合。

⑥ 用 I' 表示一个特殊结果将会发生的概率 $P_a(s)$ 的信息(显然 I' 比 I 精确),

$\sum P_a(s) = 1$, 其中 $P_a(s)$ 表示选择 a 时, S 将出现的概率。

2) 是完全理性还是有限理性:西方经济学争论的焦点就是人的理性是否完全。

完全理性假设产生于 18 世纪,它实际上是亚当·斯密“经济人”假说的一部分。传统的经济学把经济人的理性看成是“全面”的,即认为决策者完全掌握全部备选方案、行动后果的概率分布和效用分布,并能以此为据,迅速、准确地找到最优的方案。这种观点在 20 世纪 40 年代冯·诺依曼的主观期望效用值理论和 20 世纪 70 年代卢卡斯的理性预期理论中得到了进一步的发展,被称为“全面理性论”。不难看出,“全面理性论”实际上是一种理想的、极端的假说,如果在经济行为尚不发达的时期还能给人们以一定的“理性光辉”,从而为经济分析提供一个不甚稳固的基础的话,那么,在经济活动越来越频繁、社会系统高度复杂的现代,它的局限性就日益暴露了出来。于是,自 19 世纪后半叶以来,就有人提出了与“全面理性论”相反的“有限理性论”。

有限理性论的早期发展与马克思对资本主义的分析有一定的关系。马克思指出,商品经济中存在着四大脱节现象,是“全面理性论”无法解释的。后来奈特进一步对经济中的不确定性及由此带来的风险进行了分析。20世纪40年代以来,美国著名心理与智能学家、1978年诺贝尔经济学奖获得者赫伯特·西蒙对人类决策过程中的有限理性作了深刻发展和全面总结,使之成为现代经济分析中的主流观点。西蒙1949年首先在《管理行为》一书中提出,后来在《理性的定义》和《理性选择的行为模型》中作了形式化的概括,他认为,社会系统的一个基本特征就是它是由具有有限理性或智能的个人或群体所组成的。

3) 作为理论出发点的有限理性:从系统科学的观点来看,理性有限是作为开放的复杂巨系统的社会系统自身有限性的一个表现。与人具有不可忽视的生物性一样,人的理性有限性也是客观存在、不可回避的。

① 理性的有限性在个体层次上表现为认识上的“片面理性”(即人的观察思维和认识总是非全面的);实践上的“间接理性”(即人在实践上总不能事事经历,而主要是间接知识);预测上的“短期理性”(即人只能做出“短期”预测而不能预见无限久远后的事情)。

理性的有限性在群体层次表现为:(a)个体理性与群体理性的矛盾,如囚徒悖论、军备竞赛、搭便车现象、“劳埃德共有牧场问题”等都是这种矛盾的具体体现;(b)流行与传统偏见对个体理性的限制,如股票和期货市场心理对正确判断的影响;(c)社会经济结构的不良和社会不可长期预测等。

② 理性的有限性来自系统的有限性和认识的有限性。具体表现为社会活动者在信息获取与处理能力方面的有限性。由于社会环境中广泛存在不确定性和风险,根据有限性的信息,活动者无法对自己所处的环境条件和约束做出正确的分析判断,而信息处理能力的有限性意味着他仅仅具备有关备选方案的不完全信息。这就使他不能迅速确定自己切实可行的行为目标,并找到通达这一目标的有效途径。

③ 关于理性的探讨实际上是对人的本性探讨的一个重要组

成。既然人的理性从本质上讲是有限的,一切社会与经济的理论,包括我们现在讨论的社会系统理论都必须正视它,并从这基本事实出发建立自己的理论和模型。

根据有限理性,人们没有必要片面追求事物的完美和最优,重要的是要根据实际情况确定什么是可行的,在给定的环境条件约束下尽可能做到“满意”。从建立在完全理性基础上追求最优,到建立在有限理性基础上追求满意,这是理论上一个根本性的“立场”的转变。看似后退了一步,实际上是找到了真正可行的出发点,从此才可以大踏步前进。

10.1.2 人类社会

(1) 人的社会性:如果说生物性、智能和理性还只是从个体的角度来研究人的话,那么,我们更应从人类和社会系统整体的角度研究人。因为正如一个人只有当他加入了军队之后才具有战士的属性一样,人只有当他属于人类社会的一部分时他才真正具有了人的特征。

人的社会性是社会赋予的,那么,社会又是什么呢?

社会是地球生命系统发展到高级阶段后产生的一种特殊的组织形式和生活方式。社会一词,原意是指人们为祭奠祖先和祈拜神灵的聚会活动,以后又被演绎和拓广为泛指人类所有的公众活动。这些活动因所涉及的范围不同而具有不同的性质,如国务活动,企业活动,家庭活动以及个人的活动等。对植物生态群落和动物的群体行为的研究表明,社会现象并非是人类独有的,这种新的生命活动形态在许多群居性生物,以至原始的生态中就有所萌芽,并且随着群体中个体的智能发展而越来越充分和明显。例如,在一些原始的、低等的生物那里就有群居的习惯,并表现出某种群体内部的合作与竞争。如蚂蚁和蜜蜂的社会中,分工的明确、个体对这种分工的“恪尽职守”已经到了令人惊叹的地步。在灵长目动物中,社会性更显得复杂有趣,人们经常提到狼群、象群、猴群的社会,在那里社会结构精巧而“科学”,以至几乎可以找到人类社会所有互助行为、政治斗争乃至阴谋诡计的影子。

作为生命体的一种特殊组织形式与生活方式,社会的特殊

性主要表现在两个方面:一是由具有某种程度的智能生物个体组成和参与(这一点前面已作了详细讨论);二是具有群居与群体活动的形式。

某种意义上社会性是生物群体性的高级表现,不是以独立个体形式而是以群体的形式生存发展的。因而个体不仅要与外部的“大环境”发生关系,而且要与群体内部的“小环境”发生关系,许多情况下个体的行为主要由群体内部的关系所决定。

首先,通常群体是由相同或相近的个体组成的,因而作为个体的成员就具有两重身份:一是作为一个单独的个体,他(她)除了有与其他个体相同的特征和需求之外,还有个体特殊的需求;二是作为群体中的一个成员,他要在群体中“扮演”自己的角色,遵守群体的规则,承担义务,并获得自己的权利。

其次,群体的行为与个体的行为也有很大的不同。人们可以按群体内部关系的密切程度不同来对群体进行分类。在相对松散的群体中的个体可以暂时单独生活和存在,但行为也有变化。比如,群居中的狼和独处的狼,家庭中的人和独身的人。比较有代表性的是昆虫世界,昆虫学家对蝗虫就有如下生动的描述:“单个蝗虫是安静的,若有所思的,固着的,东西。但当一些蝗虫聚集另一些蝗虫时,它们就变得激动、变色、内分泌显著改变,加剧活动,直到足够多的蝗虫比肩接踵,紧挤在一起时,它们就会振动,嗡嗡叫,能量赶得上一架喷气式飞机,于是轰然起飞。”

群居性强的动物往往只能适应群体生活,比如蜜蜂和白蚁,它们一旦离开群体,就只有死路一条。这种情况就像我们前面研究中的系统部件。

如果说在生物的群居与群体活动已经有了“社会”性的萌芽,那么,真正高度发展的形态则是在人类社会才集中地表现出来。

(2) 人类社会

系统科学强调事物的整体性,但是,由于地域的遥远、种族的隔离以及不同历史、文化的巨大差异,人类社会的整体性长期以来体现得并不明显,甚至难以把地球上的人类作为一个整体来看待。直到今天,一方面,随着全球性的环境问题、资源问题、人口问题日

趋严重,使得人们越来越意识到人类作为一个整体所受到的威胁越来越大。另一方面,由于科学技术的高度发展,特别是全球高速信息网络的建成,人与人以及各种社会系统之间的联系方式发生了根本性变化,使人类社会内部的联系越来越紧密,人类社会的整体性才逐渐体现出来,人类社会的整体意识才逐渐形成,这时从整体的角度研究人类社会才有了现实的基础。

与动物的社会相比,人类社会又有自己新的特征和属性,这主要体现在个体层次上的智能和理性,群体层次上的社会关系和文化层次的意识形态三个方面。

1) 人类社会是由具有高度智能和理性的个人以及人的集团所构成的。系统理论表明,尽管构成系统的元素并不唯一地决定系统的性质,但元素自身的性质对系统仍然有极其重要的作用。在系统构成方面,人类社会与其他生物的“社会”相比,根本的区别在于,人类社会是人和人的集团的“公众活动”,而社会系统是由人及人的集团所组成的。人性和人的行为特征在最基本的层次上决定着人类社会的基本性质和运动规律。

2) 人类社会内部具有多层次的复杂关联,表现出社会系统复杂的内部结构。社会活动是群体活动,群体活动不同于个体行为,而是有多个个体参加,它的行为主体是群体而不是个体。这一特点使得它比以往研究的系统行为要复杂得多。

与其他生物的群体活动相比,人类社会不仅是动物群体中最高级的一类,而且有质的不同。这主要体现在以下方面:

① 群居动物的行为是由先天的遗传基因决定的,而人类却具有后天的学习与适应能力,并且这些学习和适应主要是针对人群内部进行的。人们通过向自己的前人和同伴学习,适应自己所处的社会环境,把自己从一个生物的人变成了一个社会的人。可见,人类有两方面的遗传基因,一类是生物遗传基因,另一类是社会遗传基因。人类社会主要是通过社会文化系统来保持和发展自己的遗传信息的。正是在这种基础上,人类才发展出不同于动物的新行为模式。

② 从“纵向”看群体又是一个具有层次结构的系统。在动物的

社会中,特别是高等动物的社会中,层次的划分已经比较明显,例如,蜂群、羊群、猴群中的等级性,但这些等级性总是与它们的“社会分工”紧密联系在一起。在人类社会中,等级与层次的划分就更加精细、明确,被赋予超出简单社会分工的意义。例如,在政治经济领域中,层次性集中体现为阶级和阶层的划分,在管理领域中体现为决策层、管理层和操作层的划分。这种划分的基础除了分工外,还包含不同的利益、控制与被控制等方面的含义。

③ 群体中的个体实际上处在两种关系之中,即个体与外界自然环境的关系和群体内部关系。动物群体也可以进一步划分,从“横向”看,在一个大的群体中可能分出各种小的集团,集团大小规模不同,行为规律也不同。但人类群体活动的层次划分更加精细,变化也更为迅速复杂。与动物的群体内部关系相比,个体与集体、小集体与大集体的关系对人类社会结构的影响更为举足轻重。

作为社会活动的最小单元(细胞)是什么?这是人类群体活动中一个基本问题。前面把个人作为构成人类社会的基本元素,这是和动物社会相比时提出的。但单个的个人却并不能成为一个独立的社会系统,因为一个独立的社会系统除了作为构成社会的部分外,还要具有独立的社会属性(这一观点在系统层次理论中已经作了详细的论述,就如同原子、分子是一切宏观实物的组成部分,但不能一概说成是它们的基本单元一样)。许多社会学家,包括马克思主义的经典作家都论述了这个问题。通常认为“家庭”才是构成社会的基本单元,因为家庭具有独立的社会再生产,包括物质和非物质产品的再生产和人自身的再生产(自复制)。这种观点无疑是正确的。但是,社会的基本单元是一个动态的概念,它的划分会随着社会生产方式的发展而发展,在市场经济中社会的基本单元已经多样化,为各种形式的社会法人,它可以是家庭,也可以是家族,更多的情况则是一个个的企业。从这种观点出发,我们认为,一个社会系统应该具有两方面的条件:一是具有独立法人地位,能够独立活动和存在(包括自我发展、完善及自我复制);二是具有独立的社会功能,成为社会所需要的部分。因此,我们主张现代社会研究应该更多地重视具有独立法人地位的企业和社会集团。

3) 人类社会不仅具有物质方面的特点,更具有精神方面的特点,后者以社会的文化与意识形态集中表现出人类社会的特点。前面在个体和群体层次上讨论了人类社会的特点,此外,人类社会还有一个动物社会所没有的层次,那就是精神层次。对于一个特定的社会来讲,精神层次主要体现在它所具有的文化和意识形态上。根据唯物主义“存在决定意识”的基本原理:一定文化和意识形态与它们所处的特定的自然环境、历史环境和人文环境密切相关,是前人与这些环境长期相互作用所“沉积”下来的东西。但对后人来说,它却又实实在在是不以个人意志为转移的“客观存在”。因此,与动物只生活在一个世界——物质世界不同,人同时生活在三个世界之中,即不仅生活在物质世界、群体社会,而且生活在精神世界之中,人的精神世界很大程度上决定了人们的行为和思想。这种特点主要体现在人的需求和对社会的贡献之上。人不仅需要从外界,包括自然界和社会中获取物质资料,而且需要精神“粮食”,人对社会的贡献也表现在这两个方面。

10.2 社会系统的特征

10.2.1 社会系统的定义

显然,社会和社会系统是两个相互联系,但又有着本质不同的概念。人们通常把社会看作是由各种社会系统参与活动的场所或活动本身。社会系统指的是:为某种共同的目的,或完成某项独立的社会功能而结合在一起的群体、集团或组织,如家庭、企业、党派、国家、联合国等等。当然,随着人类社会的进步,以及人类对自身认识的加深,我们开始认识到应当把整个人类社会看成一个整体(这种思想越来越具有理论和现实意义),这时人类社会系统的整体性就具体体现在它与自然的关系上。

根据系统划分只涉及“下一个层次”的原则,除了少数特殊情况外,我们把作为人类社会基本成员的单个个人只作为社会系统的成员(元素,要素),而不是一个完整的社会系统来看待。因为即使在最基本、最底层组织,如简单的家庭、简单的企业或其他尚未明确划分层次的组织中,个人只能承担起元素或要素的作用,而不

能独立完成一项完整的社会功能。例如,最简单的生产经营活动、繁衍后代的功能等都需要至少两个或两个以上个人参加。而在较为复杂一些的社会系统,如企事业单位、群众团体、政治党派以至国家中,层次的划分和社会的分工则更是不可避免的。在这些社会系统中,个人往往归属于一定的“部门组织”,由部门来承担系统内部各种相对独立的功能,这时“部门”作为系统的元素、要素,而不再把个人作为元素。

正因为个人不是一个独立的社会系统,而只是社会系统的一个成员,因此,便产生了社会系统中的一对基本矛盾——个人与集体间的矛盾。虽然这对矛盾只是系统中整体与部分间矛盾的特殊表现,但它却贯串了社会活动的始终,成为所有社会矛盾以及社会进化发展的基础。

10.2.2 社会系统的开放性

按照系统科学的一般理论,开放就是与外界交换物质、能量和信息。社会系统不仅是一种开放系统,而且具有“耗散结构”的特征,即社会系统总是通过与外界交换物质、能量、信息来保持和发展自己的结构有序性。但是,每个社会系统都有自己特定的结构与功能,对什么开放,怎样开放,开放到什么程度,都有严格的限定,不能简单地认为只要开放系统就能生存,只要耗散系统就能“有序程度增加”,向高级阶段发展。因此,在研究社会系统的开放与耗散时,必须具体问题具体分析。这里主要涉及以下几方面的问题。

(1) 开放的内容、种类和性质:不同的社会系统对外开放的内容各不相同,即与外界交换的物质、能量、信息的具体内容、性质不同。对一个企业来说,与外界的交流主要体现在物资设备、原材料、资金、人员以及各种与企业经营有关的信息等。对一个学校来说,则主要是学生的进出(招生、毕业)、教职员工的进出、经费,以及与办学有关的各种信息的往来。对于一个政治团体则主要关注团体成员的变动、活动经费的往来等。

在研究这些系统的对外开放时,要考虑哪些东西对系统生存发展是必需的,这些东西从哪里能够获得。在资源短缺的情况下,

“世界上没有免费的午餐”,要获得自己所需要的东西,就必须付出相应的代价。这些代价主要包括自己的“劳动”和劳动成果,以及自己已经拥有的资源,如果这些劳动和资源同时也是环境中其他系统所需要的话,系统就以此来和其他系统进行交换。对一个有起码“理智”的社会系统来说,上述道理是不难理解的。然而,在一些具体问题上,仍然会产生问题和困难。比如,当某种资源既是自己需要,又是其他系统需要的时候,如何判定是否拿出去与外界交换,交换的数量是多少等。再者,能与外界交换的东西必须是其他系统所需要的东西,系统为了获得自己所需要的东西而制造市场(别人)所需要的商品(东西),这就是一个企业经常要考虑的适应市场需要的问题。

(2) 开放的程度、时机和方位 对外开放有一个度的问题,并不是对什么都开放,也并不是无限制地开放和交换,而是有条件限制的,根据系统不同时期和阶段的需要来决定与外界交换的种类与数量。

系统与外界交换物质、能量、信息的数量原则上包括以下几方面:①输入量,即系统要从外界获取的需求量;②输出量,即与外界进行交换的数量和需要排除的废物的数量;③库存量,即为保证系统正常活动需要备用的数量,以及为预防突然出现的问题和困难所需备用的数量。

例如,对一个生产制造业的计划调度部门来说,有必要经常考虑原材料进货的数量,每天、每周或每月、每季度各类产品或半成品出厂的数量和质量、原料的库存量、产品的库存量、废物排放量等。对一个现代企业来说,除了要考虑在原料、设备等物资方面的对外交换外,更重要的是要考虑资金、人员、信息等多方面的交换。这通常体现在企业与社会其他系统间人(人员)、财(资金、债务、股票、证券、信贷等)、信(情报、数据、来自各个渠道的各种消息、指令等)、事务(项目、业务)等的交换上。

企业要能在变幻不定的市场环境中立于不败之地,求得生存和发展,就要适应市场的变化。这就要求企业领导至少具备以下四个方面的能力:①实时了解市场变化,获取和主动收集各种内部和外部信息的能力;②评价和处理市场信息及内部信息的能

力,做出正确的预测和决策的能力;③足够的自我调节的能力,包括人力、物力、财力、时间及内部结构等;④足够的对外作用与应变能力。

一个社会经济系统与外界交换的数量需要满足一定约束条件。其中最基本的约束条件就是要保持系统规模的稳定或适当发展。例如,在经过创生阶段的规模扩展后,系统总会在一个相当长的时间内保持规模的稳定。这时就要求输入、输出与库存三者取得平衡,输入量基本上等于输出量,过多或过少的输入输出都会破坏这种平衡,从而影响系统的生存发展。

此外,开放的时机和方位选择同样十分重要,系统在演化的不同阶段会有不同的需求,与外界交换的角度、方位以及方式的不同,将会产生不同的作用和影响。例如,企业在什么时候、从哪里进货、向哪里发货等,都是一个精明的企业家要进行精心选择的。

(3) 通过什么样的方式来控制对外开放:正如一个“不设防”的国家是无法存在的一样,任何没有边界控制的社会系统都是无法生存的。设防就是对系统的边界进行控制和管理。用什么样的方式来控制管理自己的边界,需要根据系统的需求和问题的性质来确定。例如,一个政党不可能有物质的边界,它的边界是通过其组织条例来确定的。而一个国家则有明确的地理边界,在这一点上往往“寸土不让”。控制管理边界的目的是确定系统与外界交换内容和数量,多了不行,少了不可。而方式方法则可以多种多样,如一个国家不仅有自己的边境哨所,还通过相应的关税、汇率、进出配额等政策进行具体控制。制定这些标准属于一个国家主权,一点也随便不得。一个学校是通过一定的录取、毕业标准,用人制度等来控制人员的进出,它对学校的水平、声誉有极大的影响。一个企业也有自己产品的出厂标准和进货标准,严格把关是每个企业家的职责。

10.2.3 社会系统的亚稳定性与临界稳定性

和其他系统一样,社会系统也存在结构稳定性问题,只不过它的稳定性具有更丰富、更复杂的含义,其中最突出的特点是它的亚稳定性和临界稳定性。

什么是亚稳定?亚稳定是介于绝对稳定和不稳定之间的一种状态,它能够经受一定范围和程度的扰动而保持其结构不变。但扰动一旦超出了某个阈值,就会引起系统状态发生不可逆转的变化,从而不再回到原来的状态。亚稳定的典型例子是“激光”,处在低能级的电子受到外来光辐射的激发后可以“跃迁”到高能级,但高能级往往是不稳定的,一经扰动就会“跳回”到低能级,同时对外放射出“光子”。但在通常情况下,电子并非一下子跳到最低的能级,而是先在某个比高能级低的“亚稳”能级上“集合”,等到在这里聚集了大量电子后,一旦接到某个“指令”,就以“雪崩”的形式,一齐跳到低能级,从而对外发出强度极大的单色光。激光在物理领域是比较罕见的,人们至今无法确定自然界中是否有自发的激光存在,通常只能通过精密的设备和严格的人为控制才能发生。但是在社会领域,这种情况却十分普遍,甚至可以说几乎所有的社会系统都处在“亚稳状态”。例如,即使最成功的企业也不能总是处在最高效益的状态之下,当然,最不景气的企业也不能长期处在“不景气”的状态,否则,它将失去生存的权力。这说明所有企业的稳定都是亚稳定的,既有向“高能级”跃迁的机会,又有向“低能级”滑落的潜在危险。因此,一个成功的企业家总是需要既具有“忧患意识”,又具有“进取的勇气”。

所谓“临界稳定”,在第八章中已经作过详细讨论,并且指出自组织临界态(SOC)作为自组织的一种新形式出现在真正的“多体”系统中。但是,那里讨论的主要是针对自然界中的物质系统。其实,在社会领域中自组织的临界态更为普遍,自组织临界态的典型模型——沙堆模型在社会系统中有着更为广阔的用处。

将任何一个社会系统与“沙堆”作一番比较,很快会发现其中的相似性。仍以企业作为例子。谁都知道,企业的生存是建立在市场需求的基础之上的,市场就像“沙堆”的底盘一样,因此,即使在最顺利的情况下,也是市场需求的大小和具体内容决定着企业的活动范围。但是,就像沙堆的形状取决于“沙粒”间的相互作用一样,在特定的市场基础上,企业的发展水平则取决于企业内部的结构和各部门及人员间的关系。因此,企业经营者可以从两个方

面来使企业逼近自组织的临界态,即对应于特定市场的“理想”状态:一是扩大和改变市场的需求;二是革新企业的经营方式和内部结构。这里可以做许多工作,如开发新的产品,做广告等。

沙堆模型给我们的另一个启示是,处在临界态上的社会系统不可避免地会受到各种各样的外界和内部扰动,使系统发生或大或小的“坍塌”,只有不断从外界吸取适当的物质、能量和信息,系统才能保持原来的临界态。

社会系统的稳定性问题在经济学中已经有所涉及。作为以往经济学基础的“均衡”和“帕累托最优”,其实质就是一种绝对的“稳态”。人们总是希望通过“市场机制”来保证这种稳态的出现,并积极追求“最优”。后来才发现那不过是一种“理想状态”,实际情况总是不均衡的。而且正是因为有了不均衡,才产生出各种各样的经济活动的动力。但是,对一个具体的社会系统来说,结构(各种经济关系是社会结构的一部分)必须相对稳定,才能实现它自己的社会功能,才有它存在的理由。所以,它只能处在非绝对均衡的“亚稳”状态上。

10.2.4 社会系统的复杂性

如前所述,系统的复杂性表现在多元性和不确定性两个方面。下面就从这两个方面来讨论社会系统的复杂性。

(1) 社会系统的多重性与多元性:多重性和多元性体现于纵横两个方面。纵向多重性表现为系统可以隶属于它以上层次的多个系统,这不足为奇,例如,在生物领域,一个个体可以属于小的群体,如家庭或小的群落,还可以属于由多个家庭组成的更大群体和群落。但它往往并不自觉自己身份的多重性。而人类的社会系统则不同,其多重性主要体现于横向,即可以同时充当多种社会角色,参与多项社会活动,体现多种社会功能。例如,一个个体可以属于多个团体,扮演不同的角色。一个社团、企业、组织也可以在政治、经济、文化等方面发挥多种作用,如企业既是买方又是卖方,一个国家也可以加入多个国际组织等。正是因为有了这些横向的多重性,使得人类的社会系统在与环境和其他系统的相互作用中呈现出极其复杂的社会关系。

社会系统角色的多元性产生了行动目标的多元性,价值评价的多元性,思想意识的多元性,文化艺术的多元性,历史的多元性等人和人类的各种多元性。因此,在全面研究一个社会系统时,就必须选择多个角度,应用多重标准。

(2) 社会系统的不确定性与风险性:不确定性是系统复杂的另一表现,作为复杂系统的社会系统的不确定性自然就是它的一个基本方面。有人甚至以此作为社会经济的一条“公理”(见汪丁丁等的论文),这是有一定道理的。

与其他系统相比,社会系统的不确定性更以其独特的形式表现出来,那就是社会事件的不确定性和风险性。很早以来,人们就想出各种办法来避开社会事务中的风险,防范难以预见的灾害的发生,即使一旦发生,也希望尽量减少损失。随着社会的进步,这种社会保障职能已由多种专门机构如商业保险、社会慈善机构等来承担。

一个完善的社会,其社会保障体系也是相对完善的。但是,应该看到,再完善的社会保障也只能减少而不能完全避免风险和损失。一个社会系统总是处在变化不定的社会环境和自然环境之中,大量的不确定性使得它对信息和智能提出了更多更高的要求。例如,在对企业进行研究初期,人们往往只注意企业与外界的物质与业务联系,但是,在这些联系背后起主导作用和控制作用的却是信息。笔者曾经到过一个大化工企业集团,它占地很大,人员好几万,产值几十亿。在计划经济时代曾经一度非常辉煌,但在市场经济中却陷于被动,甚至面临倒闭。我们具体考察的结果认为,与它强大的生产能力相比,信息获取与处理能力显得十分弱。例如,他们有着很健全的组织,各部门分工细,而且庞大,但唯独缺少专门的市场信息部门和技术情报部门,这些方面的工作仅仅由一些基层工作人员担任,或由其他部门兼管。因此,集团对市场的行情不了解,不能及时调整自己的产品结构。结果生产的产品卖不出去,好卖的产品不能生产,包括技术和情报人员都不知道生产什么产品好。针对这种情况,我们建议由能力很强的专门人员组成市场部 and 情报部,并给予足够的财政支持。这些部门作为企业首脑

机关进行决策的“智囊团”,将使企业面貌发生巨大变化。

总之,不确定性与风险性是社会本性的一部分,人们只有正视不确定性的客观存在,研究各种随机事件背后的必然规律,运用各种信息手段来减少(消除)不确定性,特别是运用概率统计方法进行预测和决策,才能更好地使自己的社会系统存在下去,发展起来。

10.3 社会的三大子系统

社会系统千差万别,种类繁多,所以研究社会系统往往先要对它进行分类。对社会系统进行分类的方法也很多,如按人与人的关系可分为正式与非正式组织系统。

正式组织是指那些建立了明确社会关系的社会系统。如正式的党团组织、签订合约的双方、分工明确的集体等等。正式组织有三大特点:

(1) 成员(个人或集团)间的权力与义务用明确的条款加以规定,如果违反将受到惩罚或付出相应的代价。

(2) 条款往往以书面“合约”形式出现,具有严格的时间、空间及功能范围的界定。

(3) 系统有明确的边界。

非正式组织与正式组织的区别在于系统内部没有明确的约定,成员间的关系和约束相对松散、灵活,但它仍然具有某种整体性。和前者相比,在人类社会中非正式组织是大量的。有些非正式组织是形成正式组织的前期阶段,而另一些则可能永远以非正式的形式存在。

在对社会系统进行分类时,有一种分法比较能体现不同系统的基本特征,即按社会关系和功能把所有的社会系统分为三类:经济系统、政治系统(党派)、文化系统(团体及学术机构)。这三类系统分别体现了人类社会三个方面的基本活动:经济活动,这是社会存在与发展的基础;政治活动,这是人类社会活动的调控层次的活动;文化活动,这是人类社会所独有的信息层次的活动。社会的发展是相对于这三个层次的发展。就像在三维坐标系中的运动一样,社会的发展是在政治、经济、文化这三维坐标系中的不可逆运

动。本节就来讨论这三类系统。

10.3.1 经济系统

(1) 什么是经济:经济一词,在西方,源于希腊文 *oikonomia*,原意为家计管理。在中国古代,则是指“经世济民”,“治国平天下”的意思。经济有两方面的含义:一是为生活而进行生产、交换、分配,二是对上述活动进行控制管理。后一方面所指范围甚广,包含政治、法律、教育、军事等内容。可见后者多是从生产、交换、分配的活动中发展派生出来的。到了近代,对经济活动出现了不同的理解。西方比较流行的观点是,认为它是指人们在特定约束条件下追求各自最大效用的社会行为。在我国,通常的理解是:“经济活动是人们在一定经济关系的前提下进行生产、交换、分配、消费以及与此有关联的活动”。所谓经济关系,即人们在从事上述活动时所结成的相互关系,其中占主导地位的是生产关系。从所涉及的范围讲,上述观点似乎并无重大分歧,但侧重点和对若干基本事实的看法上则分歧甚大。

系统科学把经济活动看成是人类社会的一种基本活动,它由具有有限理性的个人参加,在特定的社会条件下为追求各自的利益而生产、交换、分配,并结成特定的社会关系。这种关系包含两个层面:一是相对紧密的社会集团中的关系,它表现为经济系统内部的结构;二是各社会集团之间的相互关系,它表现为全社会或一定地域范围内的社会经济关系。

(2) 什么是经济系统:经济系统是参与社会经济活动的系统,作为一个相对独立的社会子系统,可以从活动与人员两个方面来对它的结构进行分析。比如,按经济活动的过程可将其分为生产子系统、消费子系统、流通子系统、交换子系统等。按生产的社会分工,即产业内容也可以分为农业、工业、服务、信息等产业。而按参与这些活动的人员来分,可分为各种社会经济集团,如阶级社会中不同的阶级与阶层,市场经济中各种独立的经济法人,管理中的决策层、管理层(狭义的)和操作层等。

经济系统存在于一定的社会环境之中,通过与其他经济或社会子系统的相互关系来体现出自己的社会功能与价值,同时,也通

过这些关系来体现整个社会的经济结构。社会的经济结构又可以分为微观与宏观两个层次,前者指的是作为个体的经济系统的输入(投入)、输出(产出)、效益的关系,后者是作为全社会或地区的生产、消费、流通的总水平及其相互关系。

经济系统同样是一个动态系统,它的运动表现在状态变化和结构演化两个方面,它们从经济这个角度反映了社会的运动、发展和演化。

以上是经济系统所要研究的主要内容,下面分别进行讨论。

(3) 经济系统的状态描述:状态描述是系统描述的基础和出发点。但是,状态描述不是对系统现象的简单罗列,而是要从一定的目标出发,运用理论分析,选择若干指标,进而构成一个能反映对象本质的指标体系。状态描述也是进行定性和定量描述研究系统的基础。定性描述就是要对系统的性质进行研究,按不同的标准进行分类,找出不同类别的异同。定量描述首先就要选择适当的评价指标,并在此基础上建立能全面反映系统特性的指标体系。

按照通常的观点,人们把经济学分为宏观经济学与微观经济学,与此对应,就有一套着眼于整个社会的评价宏观经济的经济指标和一套评价微观经济的指标。具体地说,宏观经济指标是针对一个国家或地区的总体经济状态的;而微观经济指标是针对一个相对独立的经济实体而言的,如农业社会中的家庭,市场经济的企业、企业集团。这些内容在几乎所有的经济学教科书中都有相当详细的讨论,为从系统科学的角度研究,下面先对有关的内容作一个简单的概括,然后作专门分析。

国民经济指标体系分宏观和微观两方面:微观类指标是针对一个相对独立的经济实体而言的,如农业社会中的家庭,市场经济中的企业、企业集团,反映它们的经济活动状态,其中又包括企业投入、产出和效益三大类指标体系;宏观类指标是相对一个国家或地区的总体经济状态而言的,按社会再生产可分为生产、流通、分配、使用四个环节,如果从宏观调控的角度看,可分为生产、财政、金融、分配使用、对外贸易等指标体系。虽然这些内容在许多经济学教科书中都有相当详细的讨论,但系统科学对此有自己的观点

和看法,下面先对微观经济指标进行讨论,然后分析全社会的宏观经济指标。

(4) 微观(企业)经济指标体系:经济系统是一个开放系统,它从外界(自然界和其他社会系统)吸收资源(物质、能量、信息)以维持自己的生存与发展,同时向外界输出(贡献、提供)自己的产品(物质、精神、服务),从中获得或实现自己的社会价值。因此,可以用投入、产出和转换效益三个经济指标来描述一个经济系统的行为,分别对应了三大指标体系:

1) 投入指标体系:一个企业的投入主要表现人力、财力、物力三方面的资源投入,相应的指标体系为:

①人力投入指标体系,其中包括职工总人数、工资总量与配额、人员结构、人力资源的利用等;②财力投入指标体系,其中包括流动资产、长期投入、固定资产等;③物力投入指标体系,其中包括劳动手段—厂房设备、劳动对象—原材料等。

2) 产出指标体系:包括①总产值;②净产值和最终产值;③销售额。

3) 效益指标体系。

(5) 宏观经济指标体系:宏观经济活动是一个包括生产、流通、消费、积累等环节的复杂过程。由于活动的内容存在着质的区别而不可能使用同一个经济指标。但是,一个相对发达的社会,可以用货币来作为计量单位,用以进行综合计算,这就是人们通常所说的“国民经济核算”。一个比较完整的国民经济核算体系包括:国民收入核算;投入产出核算;国际收支平衡核算;资金流量核算;国民资产负债核算。其中国民收入核算是经济核算的核心。1965年,联合国委托英国剑桥大学应用经济系主任理查德·斯通主持了一项研究,1968年他们提出《国民经济核算体系》(A SYSTEM OF NATIONAL ACCOUNTS),即新SNA。系统地记录了国民经济中流量和存量,包括国民收入和国际收支平衡的全部账户,也包括投入产出表、资金流量表、国民资产负债表等综合程度不同的数据,组成一个清晰的体系。

从宏观上看一个系统,通常使用如下指标体系:

1) 生产指标体系 :① 国民生产指标体系 ;② 居民收入指标体系。

2) 财政指标体系。

3) 金融指标体系。

4) 分配与使用指标体系。

5) 对外经贸指标体系。

10.3.2 政治系统

(1) 什么是政治 :政治一词 ,在古代是指国家事务 ,即理国治民之事 ,在现代是指处理“阶级之间、民族之间、社会团体之间基于各自根本利益所发生的相互关系 ,以及与此有关的活动”。在以往的教科书中 ,曾把阶级斗争作为政治的主要内容 ,夺取政权、维护政权和行使国家政权是政治的核心 ,而国家、政权、军队、政党及其他政治团体是实现政治的主要组织形式。从政治与经济的关系看 ,它们是对立统一的 ,经济是一定政治的根源和基础 ,它决定着政治的形态 ,但政治反过来集中体现了经济的要求 ,为经济服务 ,保证经济的发展。列宁指出 :“政治是经济的最集中的表现”。人们对政治已经有过许多专门的研究 ,以至发展成一门专门的学科——政治学。本节不准备讨论政治的所有方面 ,而只是试图从系统科学的角度来研究一些具有代表性的政治系统 ,如国家机器、法律制度等。

(2) 政治系统的特点和功能 :与其他的社会子系统相比 ,政治子系统具有如下特点和功能。

1) 约定性与阶级性 :从系统科学的角度来看 ,政治既是用来处理和调节各种社会关系的工具和准则 ,又是各种社会关系约束的具体体现。政治系统的存在 ,相当于为社会关系的稳定和社会的正常发展提供一个适当的“容器”。因为在由各种人和集团所组成的社会中 ,他们为了各自利益 ,不可避免地发生各式各样的矛盾和冲突 ,这些矛盾和冲突如果不加限制地任其发展 ,就会危及社会的稳定以及矛盾双方的存在。因此 ,需要有一些调节和约束社会关系的约定和机构。从这个意义上讲 ,政治制度与政治机构原应“超脱”于各派政治力量的利益之上 ,发挥“公平”的协调作用(几乎所

有掌握国家政权和政治机构的统治者都是这样宣称的),但是,在阶级社会中,政权掌握在少数人手中,总是要使用政权来为自己的阶级利益或集团利益服务,所以,政治往往成了统治者进行阶级斗争的工具。

2) 制度性:社会关系一旦被相对固定化,就成为一定的规范,这些规范可以被表现为一定的社会制度、法律以及各种道德观念与意识形态。

社会制度的形成实际上就是社会系统形成的过程。这个问题在许多社会学理论中都有所涉及。例如,在本世纪影响最大的社会学家塔尔科德·帕森斯那里,社会制度化的过程被描述为五步:“①不同取向的行动者进入他们必然要相互交往的情景中去;②行动者取向的方式反映了他们的需求结构,也反映了这个需求结构怎样被文化模式的内化而替换掉;③通过具体的互动过程(尚不能明确指明,但涉及到角色的扮演、角色协议和交换)形成了规范,行动者据此相互调整他们的取向;④这种规范是作为调整行动者相互之间取向的一种方式,但同时它又受到总的文化模式的制约;⑤这些规范规定了随后的互动,使之稳定地进行”。

同样的观点在西蒙那里有着更清晰的表述。1967年,当他再版其名著《管理行为》时专门增加了“组织的诞生”一章,把组织的诞生与制度的确立联系起来,指出:“组织在其形成阶段,很大程度上是由不同人头脑中的各种图景所构成的。这些图景彼此远非和合一致。组织化的过程,很大程度上就是达成一幅具有一定共同性的图景的过程”。

不难看出,上述过程就是在第五章中讨论的自组织过程在社会环境中的体现。必须要强调的是,在互动和相互调整行动取向的过程中,多种行动模式的竞争协同是主要的内容。协同学中的支配原理(伺服原理)在这里得到了充分的体现。但与无生命界和一般的生命体相比,社会竞争协同具有更为复杂的场面,所涉及的方面和表现的形态也和前者不能同日而语,这正是社会系统在本质上不同于其他系统的地方。

显然,社会关系还可以从功能上进行划分,例如 B. 马林诺夫就

将它分为三个等级层次:最下面是生物学层次,中间是社会结构层次,它通过一定的社会制度来体现,因而也称为制度层,上面是符号性的文化层次。B. 马林诺夫特别强调制度层和符号层的研究,他认为,每个层次都对应了相应的社会需要。在社会制度层次上,作为一种形成社会结构的工具,它所需要满足的需求是:①要求生产和分配消费品,以满足人们生存的需求;②要求对社会行为进行控制,并作出规定,以便人们生活在一个稳定有序的社会环境中,不让某些人的个别行动而导致社会结构的解体;③要求对人们进行传统教育和技能教育;④要求权力关系的组织和执行。总之,在他看来,所有的社会结构,以及各种社会元素都是为了某种特定的功能和需求而存在的。

(3) 政治系统的种类与构成:政治系统的种类很多,主要有:

1) 政治党派与团体:一个政治党派总是集中代表某部分社会成员的利益,并为获得这些利益而结合成一个相对固定的社会组织。而社会团体则要广泛得多,它们是为了某种社会目标而结合的组织。这里应该指出的是,我们不倾向于把阶级作为一个社会系统,原因是它不具有内部固定的组织结构。

2) 国家机器和政权机构:作为政治集中代表的国家机器并不是从来就有的,也不会永远存在下去,它是社会发展到一定阶段的产物。国家的军队、警察、监狱等都是具有强制性的系统或机构。它对社会之所以必要是因为在处理国家内部和国家之间的关系时往往需要一定的强制性的力量。

政治系统在构成方面也有自己的特点,如人们经常提到的政治体制就是在特定地域和历史环境中提出,并构成政治系统的准则。政治体制表现一定的政体和国体,即按什么模式来建立国家和国家的政治制度。政治体制在不同的国家、地区和不同的历史发展时期都不同。在现今世界中,它是指管理国家或地区的基本模式,如共和制还是君主立宪制,国家的最高权力机构是什么等。

法律制度(成文法)则规定了一个国家中人们社会行为的基本准则,它本身也构成一类特殊的社会系统。此外,还有道德规范,

作为一种不成文法,它也是在特定的处理人文环境中逐渐形成的,是一种规范人们社会行为的体系。

10.3.3 文化系统

“文化”一词在西方起源于拉丁文,原意是对土地的耕耘和植物的栽培,以后引申为对人的身体和精神的培养。在中国,文化原来的含义是“文治”与“教化”。到现代,文化的含义极其广泛也极其含混,似乎可以把所有与人有关的东西,从文化人,到饮食文化等都可以包含于文化的范畴之中。但是,在对文化的各种理解中也有一些共同的东西,如认为它是“人类在社会实践过程中所获得的能力和创造成果”,“狭义的文化指精神生产能力和精神产品,包括一切社会意识形态……”,“是人类社会历史发展中创造的物质财富与精神财富的总和”,“也专指社会的意识形态,以及与之相适应的制度和组织机构”,“是一种历史现象,每个社会都有与之相适应的文化”(辞海)等。本书不打算对文化作专门的探讨,而是从社会系统的角度把文化作为人类社会特有的现象和基本活动来加以研究,把与这方面活动有关的系统称为文化系统。

文化是人类社会特有的现象,从社会功能和结构上讲,属于上层建筑和意识形态的范畴,这是大家公认的。本节把文化作为人类社会的一个基本方面来研究,并把与这方面活动的有关系统称为文化系统。

和社会的其他方面一样,文化也可以从活动与机构两个方面来进行研究。因而不妨把人们的文化活动也看成是一个特殊的系统。通常认为,人类的文化活动包括科学技术、教育、文学艺术,以及与地区、场合、时代、民族等有关的各种特定的文化活动,如社区文化、企业文化、民俗活动等。

(1) 文化系统的社会功能:文化系统无疑属于人为事物的范畴,所以首先对它的社会功能发生兴趣。从系统科学的角度看,文化系统或文化具有以下功能:

1) 文化是社会特定的表现形式:广义的文化包括科学技术、文学艺术、民情风俗、意识形态等。这些都是特定社会的产物,它们从不同的方面反映了不同历史时期的社会形态。但是,文化对社

会形态的反映又不是被动的、表面的和单纯照相式的,它不同程度地反映了社会的本质,因而为人们理解社会、研究社会提供了一把“钥匙”。下面仅以文学艺术为例进行讨论。

文化对社会的反映功能可以由文学艺术来承担,因此,可以把它们看作是社会思想的载体。只要稍微留心比较一下各国家、地区和各个不同历史时期的文学艺术作品,如小说、故事、歌曲、戏剧、绘画以及不同风格的建筑等,人们很快就会发现,它们总是深深地打上特定地区与时代人们的社会活动的烙印。例如,从蒙古草原的牧歌到江南水乡的小调,从三峡船夫的号子到苗岭山上的对唱,一听就会感受到当地民俗的气息。这是为什么呢?我们认为,其中既有偶然的成分,又有必然的因素。必然因素表现在一个地区与时代人们的社会活动总是需要一定的“形态”作为自己的象征和标识,用以抒发个人对生活的追求与感受,达到引起同伴的呼应和共识,这些表面看来是个人行为,其实是构成一个特定社会必不可少的条件。在一个稳定的社会中,家庭又是最基本的、具有自复制功能的独立单位,因此,建立家庭必不可少的爱情就自然成了歌唱的主要内容。说它具有一定的偶然性,是指不同地区与时代的文艺表现形式,除了自然地融入地理环境的影响外,很可能与第一个人偶然的运用有关。当他偶尔使用了某种方式,例如,某个唱法后引起了有些人模仿与借用,从而逐渐传播开来,或者因某些原因而与其他的形式融合、变通以至转变,并在这些转变中记录下一段新的历史。

2) 文化是人类社会特有的遗传基因:人类社会和其他动物的社会不同,其他动物只能通过遗传基因在代际间传递信息,而社会除了具有生物遗传功能之外,还具有个体之外的文化遗传功能。这样遗传的效率就更高,对有利变异的选择性也越强。这就是人类社会的发展速度大大高于其他动物群体的基本原因。

文化是人类社会特有的巨大信息库,其中储存了人类历代社会实践的经验、教训以及对这些经验教训的思考,从而成为社会发展的巨大财富和动力。

在所有的文化活动中,教育活动是社会遗传的主要承担者。

教育通过一系列有组织、有计划的活动来培养和教育人,完成一个把人从生物人变为成熟的社会人的过程,也就是将社会发展的成果以文化的形式“复制”到新的成员头脑之中。

3) 文化是社会的稳定机制和催化剂:文化对社会的稳定与激励作用是通过科学技术和文化教育来实现的。现在,人们越来越认识到科学技术和文化教育对社会发展的巨大作用,并且把科学技术称为社会发展的“第一推动力”。

4) 一种人类特有的符号系统:按照 B. 马林诺夫的观点,文化(符号)层次需要满足的需求有:①提供必要的信息,使人们能据此了解并适应社会环境;②提供一种支配感,控制人们的命运和处理种种机缘事件;③为社会成员提供一种日常生活和活动的“共谐”感,使他们在精神上得到某种稳定、和谐的感觉。

(2) 文化系统的种类与构成:文化系统的种类很多,如各种文化团体、机构、组织等。甚至可以把一些体育组织也划归到文化系统的范畴。随着社会的不断进步,文化系统所起的作用会越来越大,组织形式也会越来越多。对文化及其机构的研究已经超出本书范围,这里就不再赘述。

10.4 社会系统的发展

如果说前面的讨论主要是对社会与社会系统进行静态分析的话,本节则是从运动发展的角度对社会和社会系统进行动态分析,包括发展的判据、标度、阶段、动力、条件、环境、规律等方面。

社会与社会系统的发展涉及微观、中观、宏观三个层次。微观层次指个人的发展,包括个人的生理、心理、活动能力、生活水平等的发展。中观层次指人的群体、人的集团的发展,也包括地区、民族的发展。宏观层次指整个人类社会总体的发展。显然,属于不同层次的系统发展的判据、标度、条件、动力、环境、机制等都十分不同。对此,各个领域都有专门的研究,有着各自不同的理论和标准。例如,评价个人的成长,往往以他的身体素质、智力水平、工作能力、对集体的贡献作为标度;对一个企业,则通常以它的规模、效益、对社会的贡献等作为发展的标度。对一个国家或地区的发展,

则涉及政治、经济、文化等多个方面,往往以该地区(国家)的国民经济生产总值、人均 GDP 等为衡量标准;而对整个人类社会,则主要从历史的角度看人类社会的生产力、生产关系及人的意识、生活水平等。这里,不可能全面讨论,但是,只要是人类社会的社会系统就会有某些共同的性质,人们关心的正是作为一般社会系统的发展判据、标度、条件、动力、环境、机制。

10.4.1 社会进化的判据与标度

根据前面关于系统演化的一般理论,研究一个系统的演化发展,首先要确定演化的判据与标度。要做好以下三件事:

第一,选择一个恰当的评价指标体系。所谓“恰当”就是要集中地体现系统在社会活动中的整体性(社会功能)和特殊性,因为这是一个社会系统赖以存在的根本理由。众所周知,一个社会系统往往十分复杂,可以从各个不同的方面来体现和衡量它的发展。但只有其中少数几个方面能直接、真实、明确地反映该系统整体上的发展。例如,一个从事环境监测的公共事业单位,它的根本任务或它赖以存在的社会功能就是对地区环境的质量及影响环境的各种因素进行严密地监视,并及时向那里的公众和政府提供准确的数据。随着时间的推移,它可能在人员的数量、活动的规模、获得的经费、内部的结构等许多方面发生变化,这些方面虽然与该单位社会功能的发挥有一定联系,但都不是根本性的,也不一定与它的社会功能成正比,只有它对地区环境监测的深度、广度、力度(表现在它所提供的数据量、准确性、针对性等方面)以及它对地区环境保护的贡献才是它发展的根本标志,只有从这些方面才能真正衡量它的发展。

第二,规定一个方向作为“进化”的方向。社会系统可以在不同的方面发展,即使在同一方面也可有不同的发展路线和方向。在对社会系统的进化进行考察时,选定一个方向作为进化的方向,用相应的判据来判定系统的进与退,否则就会造成混乱和不必要的争论。显然,方向、判据的选取是从一定的“价值判断”出发的,不同立场的人对同一事物会有不同的判断,“被敌人反对的就是我们欢迎的”,就是两个完全相反的判据。所以判据的选定要根据问

题的性质、要求(目标)来进行,而且还要考虑到发展阶段的不同有所变化。例如,企业在初创期人员的增加、规模的扩大是进化的标志,而在相对稳定之后,继续增加人员和扩大规模就会影响其效率和效益。

第三,选择正确的衡量尺度。在前面两点都确定之后,还需要有一个恰当的测量尺度。这是衡量系统进化“可操作性”和定量研究的关键。不同的社会系统尺度当然不同,不同的发展阶段尺度也需要进行必要的调整。

对一个具体社会系统来说,演化判据、标度的选取,一般都具有很强的技术性,需要具体问题具体分析。

下面从系统角度对人类社会和社会系统的进化作一般性的考察:

(1) 社会发展的本质是人类智能的发展。智能是人类区别于一切其他生物最根本的特征,正是因为有着远远高出其他生物的智能,人类社会才具有生产活动、经济往来、文化交流、政治斗争等自己独特的社会活动形式,因此,可以把智能水平作为人类社会进步的基本尺度。

人类的智能是人类整体性的体现。作为一个整体(尽管如前所说,这种整体性还在逐渐形成之中),人类社会一方面面对着各种自然环境,另一方面面对着复杂多样的社会关系。因此,人类智能虽然与个体智能有着密切关系,但它在本质上是不同于个体智能的,可以从两个方面反映出来:一是从人类与自然的关系中;二是从社会内部的关系和一系列共同的社会活动之中。前者主要体现于人类的生产水平、科学技术发展水平、文化素质和人类的平均生活水平;后者主要体现于人与人、地区与地区、国家与国家的经济、政治、文化关系及其交往水平。

(2) 经济发达程度是社会进化的基本标度:经济活动包括生产、流通、消费三个基本环节。因此,社会的经济发展可以从生产力、生产关系的发达程度,产品流通、分配、消费的效率、效益与合理程度来衡量。与此有关的内容人们已作了许多研究,有很多通用的标准和理论。但因为一切经济活动的最终目的是满足人们的

物质、文化需求,为“用户”提供充足满意的产品和服务,所以,衡量经济发达程度的根本标志是人们的满足与满意水平。

一谈到满足与满意自然会涉及许多难以度量的问题。如需求因人而异,各人有自己独特的偏好,感觉也因人因时而异,各人有自己的预期目的等,所以,为了促进经济发展,作为经济活动主体的企业越来越重视对满意度的研究。

(3) 政治民主与开放及控制管理效率是社会发展的集中标度:如前所述,政治是经济的集中体现,它通过对社会有效的控制与管理来保障和促进经济、文化等方面的发展。因此,政治发展水平可以从两个主要方面来衡量:一是政治的民主与开放水平;二是政治管理控制的效率。一般情况下,这两个方面会发生一些矛盾,所以政治发展水平往往还要看两者关系的处理水平。

政治对社会的控制与管理主要是通过政权来实现的,因此,应从掌握政权的政党或社会集团的能力、方式和水平来看。比如,政党主要是从事政治活动的,其发展水平也就根据它对社会的控制、管理能力或社会影响力来衡量。如果在一定时期它能体现社会发展的方向和大多数人民的需求,能带领大多数人从事政治、经济、文化活动,这个政党就处在高发展水平上。相反,它如果失去了对社会的影响能力,即使掌握着政权,它也会走下坡路。同样,法律也是这样,它的发展程度要看它对社会的控制管理能力和促进作用。如果一项法律的颁布与制订仅仅对社会的少数人有利,而对社会的大多数人不利,特别是当它对承担社会发展主要功能的劳动者(不同社会劳动者的成分和主体是不同的)不利时,这样的法律就是反动的,即使一时具有一定的约束能力,也会逐级走向消亡。

(4) 文化发展水平是社会发展的总体标度:文化是社会的一个基本方面,社会发展的水平可以通过文化发展的水平来加以表现。但文化发展的程度通过什么来衡量呢?这是一个十分复杂的问题,因此,可以研究不同地区、不同民族文化的特点,却很难对它们进行比较,更难以判定哪个发展水平更高。比如,古代的玛雅文化与现代的西方文化,东方文化与西方文化。要解决这个问题,就需

要研究社会文化的本质特征以及它对社会的基本功能。

从系统科学的角度来看,文化是社会在政治、经济、意识形态等各方面活动长期积累的产物,是社会发展的总体表征。文化从社会精神财富的积累、物质财富的积累、人民整体的素质等方面反映了社会的发展水平,具体表现在:

1) 社会信息总量:它综合地反映了社会的科技水平、通讯能力、文明程度、知识积累。

2) 社会财富总量:综合地反映了人们现实的生活水平,人均收入。社会的可发展余地,人的存在空间的扩大,生产率,国民经济总产值等。

3) 人民素质的“总量”:它综合反映了民族精神在个人身上的积累,与人们对历史优秀传统的认同和人均受教育程度有着密切关系。

10.4.2 社会系统发展的阶段和路线

系统的发展总是沿着特定的路线进行的,其中必然划分出多个阶段。社会和社会系统也是如此,历史上许多国家、企业、集团成败的经验教训都说明,能否找到正确的发展路线,确定不同阶段的任务和对策,就成了社会能否发展、系统能否生存下去的关键。

理论上,社会系统发展的阶段与路线问题属于系统演化的范畴,实践上,它是系统领导者、决策者和设计者的根本任务,历史上许多重大问题都与此密切相关。近代中国历史上许多志士仁人多次提出“中国向何处去?”“为什么只有社会主义才能救中国?”而当正确地认识了当代中国的国情,明确提出“我们正处在社会主义初级阶段”,“科教兴国和可持续发展是我们的两项基本国策”之后,我们的事业就大踏步前进。这些都说明社会发展阶段与路线研究的重要现实意义。

(1) 关于社会发展阶段的几种重要学说:社会发展是分阶段的,关于社会发展阶段人们已经作了许多研究。马克思主义将人类社会划分为原始社会、封建社会、资本主义社会、社会主义社会、共产主义社会等五种形态,认为人类的历史大体沿此顺序发展,这种划分的基础是所有制。在马克思主义看来,尽管所有制是建立

在一定生产方式基础上的,但所有制一旦确立,就反过来决定了产品的分配方式,人们的社会地位、生活方式,以及人与人、人与物的关系,从而使历史的发展呈现出明显的阶段性。这样的划分使人们集中关注于社会内部的关系,用系统科学的话来说,就是社会的结构。社会的进步从内部来讲,就是社会结构的变革,这无疑具有重大的指导意义。

西方许多社会学家,包括奈斯比特、托夫勒等人则从社会生产方式作为划分社会发展阶段的出发点,把社会的发展分为农业社会、工业社会和信息社会(即后工业社会)。这样的划分,使人们集中关注于社会生产方式的变革,预示了未来社会以智能劳动为中心的特点,同样具有十分重要的理论和现实意义。

此外,由于经济是社会基础,发展经济学自然成为经济学家研究的主要内容,这方面较有影响的有罗斯托的经济成长阶段论。他把经济发展分为六个阶段:①传统社会;②为起飞创造前提;③起飞;④成熟;⑤高额群众消费;⑥追求生活质量。这种划分考虑的主要是社会商品的流通与消费,它反映了人类社会物质与精神产品需求与消费水平的提高过程。罗斯托认为,投资率的提高是经济高速增长的重要条件,但非充分条件,如果没有制度和适当的文化和心理因素的保证,经济也难高速发展。

从以上学说可以看出,社会的发展是经济、政治、文化发展的综合表现,可以从不同的角度来进行考察,并且划分为若干阶段。而社会系统的发展,则是特定社会历史环境中系统的个体发展,它同时也存在方向和路线问题。

(2) 社会系统演化的路线:路线问题通常有两方面的含义:首先指的是运动的具体路线,如交通路线、通信路线,其次指的是工作行动的次序、方法、技巧或人们常说的思想路线、政治路线、干部路线等。对于社会系统的演化来说,路线则是指系统从创生到消亡,如何一步步发展,经历了哪些阶段,每个阶段的具体情况又是怎样。由于系统所处的环境和它自身结构的不同,系统的演化必然存在多种途径,每一途径又可以划分为多个不同的阶段,沿着不同的途径系统所付出的代价、所需要的时间等也有很大的不同。

因此,要将一个社会系统发展成它的决策者、所有者和参与者所希望的“理想状态”,就需要寻找最优的发展路线。例如,一个处在激烈的市场竞争中的企业,它可以通过内部挖潜的方式降低成本,也可以寻找替代材料来降低成本。一个国家,可以单单依靠自己的力量“自力更生”,也可以设法争取外援。当然,通常情况下人们不会单纯运用某一种发展策略,而是将各种策略有机地组合起来,以取得效率与效益的结合。下面以贵州为例,探讨地区经济发展的路线问题。

对于以经济发展相对滞后的贵州来说,人们往往只看到物质方面的困难,如交通不便,通信路线不畅通等。但调查发现,问题的关键在于领导干部的思想路线问题,“靠什么来发展贵州”这个问题不解决,像以前那样总认为自己贫穷落后,把发展的希望寄托在中央和其他地区的援助上,就永远难以走出困境。因此,贵州要发展,最终要靠自己的人,靠那些有智力、有干劲、愿意献身贵州发展的人才。有了人,就能想出好的办法,就能找到资金。这样的人才省内,省外也有。关键是如何引进来,并调动他们的积极性。其实,找到恰当的办法和正确的路线并不难,难的是去实现这些想法,这就需把内部的动力和外部的支援结合起来。

当然,如果只有好的干部和正确的思想路线,而缺乏具体的办法,改变面貌就是一句空话。比如交通,从地图上看,贵州省内铁路纵横,南通广西,北达四川,东连湖南,西进云南。航线也是如此。但贵州的经济却在许多方面比不上周围四省,原因何在?我们发现,贵州交通问题出在省内的公路网上,这好比有了“主动脉”而没有“毛细血管”一样,下面的地区供不上“血”,所以下面的地区,特别是边远地区的人民在物资、资金等方面都十分缺乏,人民生活极其艰苦。与此同时,由于通信线路不发达,与外界信息的交流少,人们的知识水平和受教育程度相对也低,更进一步制约了经济的发展。用什么办法来改变这种状态?在资金和人才都短缺的情况下,是先修物质的路,还是先修通信息之路,对此,我们建议优先修筑信息之路,让人们了解世界,也让世界了解贵州,只有当贵州人不仅看到自己与外界的差距,而且学到外面先进的思想方法

后,才能解放思想,调动起巨大的积极性,利用好本地的资源优势,快速发展贵州经济。

10.4.3 社会系统发展的动力与机制

在第五章中对系统演化的动力与机制进行了一般性的讨论,这是所有系统在演化中所要遵循的普遍原理。对一个社会经济系统来说,它的运动发展还有许多特殊的规律和具体的因素需要加以研究。其实,这方面的问题在经济学中早已形成了一个相对独立的分支——发展经济学,提出了不少有创见的理论和观点。然而,由于长期以来人们受均衡思想的影响,总希望能通过完全的市场竞争来达到帕累托最优均衡,因而研究主要集中于如何通过“负反馈”来达到均衡,这些负反馈包括市场内部的控制调节与市场之上的政府制度的控制管理。但是,社会经济领域的一个基本事实是,各国的经济都在不同程度地发展,并表现出丰富多彩的特征。如近500年来,前300年发展速度极其缓慢,而后200年则呈加速度发展,这些都与社会经济中的正反馈激励有着密切关系。可见,社会经济系统的发展中既有负反馈机制在起稳定作用,又有正反馈机制在起激励作用,两者是密不可分的。

社会经济系统发展中的另一个明显特点是,不同地区发展不平衡,并且发达地区与相对落后地区的两极分化越来越严重。但随着全球一体化进程的日益加速,另一种新的倾向开始出现,后发展地区面临着新的机遇,即“后发优势”,这一现象正引起人们的关注。

面对如此复杂的局面,系统科学能做些什么呢?社会系统演化的动力和机制是一个核心的问题,这样的问题必须从不同的层次来加以讨论。首先要在微观层次上搞清演化的“原动力”,然后在中观层次上搞清其自组织的动力机制,再在宏观层次上研究各种外部环境和系统对系统共同作用的影响。为避免重复,本节将只研究与社会经济系统有关的动力和机制。

(1) 社会演化的动力:一个社会系统朝着某个方向演化总有其具体的原因,用物理学的话来说,总是受到某种作用力的推动。那么,原因是什么?动力从哪里来?

前面提到过普里高津关于“非平衡是有序之源”的命题,指出

宏观层次的“非平衡”的确是系统演化的基本前提,因为它代表了某种差异、差距和“梯度”,为系统演化提供了“势场”。不过它还要和其他几个方面结合起来才能真正变成社会经济演化的宏观动力,这几个方面包括:

1) 差异:“有差异才有次序”(或秩序),但形成秩序的条件是差异相对稳定。

2) 次序:“有秩序才有势场”,“势场”一词是从物理学中借来的,秩序与势场的区别在于前者是相对于某个方向或线路的,而势场则是全局性的。从某种意义上讲,秩序表征了差异,而势场是全局相对稳定的秩序。

3) 势场:“有势场才有动力”,动力的大小总是依赖势场的强度。如果用梯度来量度势场的强度的话,动力就是势场的函数。

4) 动力:“有动力才有流动”,这是很显然的。但有了动力和势场,还只是具有了流动的可能性,要变成实际的流动,还需要一个重要的条件,那就是流动的通道或路线。

5) 流动:“有流动才有演化”,因为演化就是向某个方向的不可逆运动变化和发展。

当然,不同的社会系统、差异、次序、势场、力量、流动都各不相同,特别是要使它沿着人们所希望的方向,形成定向流动时,更要作具体的解释。

从系统观点来看,推动社会和社会系统发展的动力主要来自人们日益增长的各种物质和精神需求,以及为满足这些需求所进行的各种努力。

关于社会经济系统演化的动力,许多学者都对之作过研究和论述。从经济学的角度来看,每个人都根据自己的偏好,追求个人效用函数的最大化。如果从生命系统的理论来看,人类社会作为一种高级的生命系统,首先需要为保持“生命”而去适应环境;其次,为扩大“生存空间”即获得更多的“资源”而相互竞争。同时,因受某些共同的作用或在某些共同的需求驱使作用而聚集在一起,力图通过集体的力量来获得更大的个体收益。最后,特定环境与条件下系统的自行“展开”或自我实现,以求达到完美与极限的状

态(即系统功能的保持与扩展)。

不难看出,以上论述都是从社会系统的微观层次来进行讨论的。它从不同的方面表现了社会经济系统演化的一个基本原理,即从根本上讲,社会系统演化的原始动能存在于民众之中,存在于那些为保持和发展自己的生命而奔忙、为满足人们日益增长的物质与精神需求而奋斗的活动之中。而这种需求越强烈,奋斗得越厉害,越起劲,微观层次上的动能也越大。

当然,上述说法并不是演化动力的全部,重要的是要对需求产生和满足需求的方式作更深入具体的分析。

首先,无论是市场的需求或是其他的需求,都不是一个固定的东西,任何需求都有一个产生与发展的过程,也有一个展开和认识的过程。例如,即使是生物体最基本的需求,如对食物的需求也是如此,古人在饥饿时没吃麦当劳的欲望和需求,一名有现代环保意识的人也不会有吃珍稀野生动物的需求。对于个人来说,尽管各人的偏好不同,但却有共同的层次划分,心理学家马斯洛把它从低到高分为基础的生理需求、安全需求、爱与尊重的需求和自我实现的需求等五个层次,认为只有当低层次的需求得到满足后才会去追求更高层次的需求。

对于整个社会来说,需求也是随着社会系统的发展而逐步展开的。换言之,只有当社会发展到一定水平之后新的需求才会提出,并为人们所追求。例如,现代人会为获得舒适、安全、高速的交通工具而探索,而以往的社会,人们则以骏马而满足,怎么也不会产生乘坐“豪华轿车”的需求;一个发展中国家和一个发达国家相比,在需求上是很不相同的。

人们甚至可以说,在许多场合,需求是人为制造出来的。现在日益铺张的广告就在制造各种各样的需求。因为大多数人只有当他认识到某种东西对他本人、家族或所属的系统是真正有用时才会产生需求,而只有当他看到这种需求有可能达到时才会“实际地”去追求它。

如果以上分析不错的话,可以从中得出以下推论:一是在需求方面“短视”行为不可避免;二是“需求”是需要制造的。制造一种

新的需求即创造一种新的希望。当新需求得到满足后会激发出更多、更新的需求。这些正是开拓新市场的基本出发点。

应该指出的是,对物质和精神资源的需求还只是推动社会进步的必要前提,有了这个前提,还要找到满足需求的适当途径和方式,而这种对新途径、新方式的追求,才是推动社会发展与进化的真正动力。然而,在人类历史发展的进程中,还有两种因素在起重要作用:

第一,人类社会总是处在自然资源相对短缺的环境之中,有限的资源总是不能满足所有人的需求,更何况这种需求还在一天天无限制地增长着,这就决定了任何个人与集团在追求和满足自己需求的同时,不可避免地引起系统之外的合作与竞争。这就进一步形成社会系统演化中的复杂局面。

第二,为了不致引起整个社会混乱和系统的崩溃,微观层次上个人或系统对各自利益的追求、竞争都必须受到中观层次的限制与约束。这些限制与约束通常通过社会的法律、制度、续约、道德等来加以体现。

但是,微观层次的动能还只是社会进步与系统发展的必要条件,而不是充分条件。那些为满足各自需求而进行的活动,在宏观层次看来还只是一种微观的无序运动,要使社会经济系统朝着某个特定方向演化(进化),还需要对这些运动进行引导、管理、控制,才能将它们整合成一种宏观层次的定向运动的动力。

下面就以地区经济的发展为例进行一些比较分析。

深圳、珠海地区是我国沿海经济高速发展的典型,十多年前,这里还是一个人口较少,经济落后的边境小镇,今天,这里成了一个初具规模的新型工业和科技城市。人民的生活水平大大提高,经济实力也在全国名列前茅,并且已经和正在吸引大批优秀人才。人们把深圳、珠海经济特区的发展视作一个奇迹,将它高速发展的动力和原因归纳为:①地区优势,这里离香港、澳门很近,又处在大陆到香港的必经路上,国内外巨大的经济差在这里特别明显;②政策特区,这里首先作为改革开放政策的试点,与内地相比有巨大的政策差;③人才高地,这里是一个新兴城市,吸收了大批外来年轻

人,特别是青年知识分子在这里找到了发展的用武之地,和内地相比,有着巨大的智能差;④特定机遇,这里的经济高速发展在很大程度上是处在中国社会经济转轨期中央的政治经济需要和深圳人自身需求结合的产物。

由上述分析可以看出,社会发展的原始动能来自人们对“幸福生活的追求”。这和其他地方的人们没有什么两样,但关键是他们经济差异有了深刻感受,并用这种差异去激发改变社会的力量。深圳、珠海的人们正是在特定的位置和时代环境下获得这种感受和认识,并且在正确的政策(秩序)引导下将分散在民众之中的动力“汇聚”成了一股改造社会的巨大动力。

与深圳、珠海形成鲜明对比的是,我国中西部地区,仍以贵州为例,作为一个拥有17万多平方千米面积,3000多万人口的大省,无疑既有劣势又有优势。这些优势和劣势本身就是差异,具体地可以指省内外各种经济指标的差异,人们生活水平间的差异等等。这些差异都是客观存在的现实,问题是要正视它,有效地利用它。例如,生活水平、收入水平的巨大差异,既可能导致“穷则思变”的巨大动力,又可能产生巨大的“怨气”。同样,是否正视这种差异也十分关键。据笔者所知,有些地区长期落后,生活极其艰苦,却并不“思变”,而是得过且过,等待上面的救济。这种心理状态正是经济长期停滞不前的基本原因。要改变这种心理状态,唯一的办法就是加强与外界的信息交流,进行分析比较,看到差异,正视差异,激发改变落后的动力。

(2) 演化的机制:演化机制问题是系统演化的核心问题,对于社会系统更是如此。

什么是机制?这个问题虽然经常被人们提到,但却时常和动力问题混为一谈,其原因是人们往往把复杂系统的演化简单地看成了在外力作用下的一般运动,而没有注意到其内部的原因。因为在牛顿力学中物体运动的动力总是来自外部,即外力推动了物体位置的变化,并不需要特殊的内部机制。但对于像国家、地区、企业、集团等这样的复杂社会系统来说,靠外部推动直接达到系统自身的理想状态,如果不是绝无仅有也是极其罕见的。实际情况

经常是在一个相当长的历史时期内外部自然环境都不会发生巨大变化,而社会的形态、国家的经济、政治、文化等都可能发生天翻地覆的巨大变化。这说明环境虽然对社会进步有一定的影响,但主要的动力还是在社会内部,需要从社会经济系统内部找出其发展的动力根源。道理很简单,外部环境的变化以及其他系统的发展在方向和目标上都不可能与系统的目标完全一致。这就需要系统通过各种方式和途径调动、利用一切外部和内部资源,来实现自己的目标。这些具体方式与途径就是系统演化的动力机制。

演化的机制就是演化的“发动机”,它的实质就是系统内部的“一套”特殊关联或结构,其作用就是将微观层次的无序运动的“动能”整合为宏观层次定向运动的动力,所以又称演化的内部机制。

为了理解机制,不妨看一下人们熟悉的蒸汽机、汽车发动机、电动机或者核反应堆等“发动机”的结构。尽管它们具体结构和原理各不相同,但都包含以下基本“部件”:

1) 燃料(汽油等能源)的输入、储存和废物排放系统,它们在发动机内部形成一个“温度梯度场”,以便在“热源”和“冷源”间形成“非平衡”。

2) 引导、控制、调节内部“工作物质”的“管道”、“线路或电路”。它们的作用就是约束微观层次的无序运动,使得整个系统保持稳定,不因为个别方向上的运动而导致系统的崩溃。它们的实质是负反馈。

3) “点火、激励、放大”系统。其作用一方面是将分散在各个不同方向上的动能整合到一个方向上,起到“同步”的作用,另一方面又使得某个宏观上有用的“微观”运动得以激励放大。它们实际上是一种正反馈。

4) 动力传输系统。将发动机所产生的动力传送到系统上,用来推动系统前进。

社会经济系统演化的内部机制虽然不像汽车发动机那样明显,但内部结构基本上是相同的。简单的类比就能发现,社会系统中的“冷、热源”可以由国民收入、资源分配的不均衡来体现;控制调节系统由社会的各种制度、法规和公众管理机构等来体现;而正

反馈系统则可以由各种社会激励机制来体现。

不难看出,在整个演化机制中核心的部分是正反馈激励机制和负反馈调控机制。关于社会系统中的负反馈,人们已经谈得很多,甚至被过分强调。例如,自马歇尔以来,经济均衡的思想一直占主导地位,人们关注和强调的大多是以“报酬递减”为代表的负反馈,而把“报酬递增”、“外部性”等正反馈思想视为异端,以至著名经济学家 Hicks 警告说“承认报酬递增会导致毁灭经济学理论中最伟大的部分”,因为它们破坏了经济学分析中关于“生产可能性集合或消费(效用)集合的凸性假设”,而在非凸性情况下,瓦格拉式均衡很容易丧失存在性,均衡核心的可证实性受到严峻挑战。

下面结合经济增长问题重点讨论社会演化的正反馈机制。

通过正反馈促使系统离开原来状态,向新的稳态演化这本是系统演化极普遍的原理,尽管在西方经济学领域中受到一定程度的轻视,但却是当代社会经济发展中一个不容忽视、必须引起高度重视的事实。社会的正反馈主要体现于以下几个方面:

1) 经济上的报酬递增。这一思想来源于亚当·斯密关于“专业分工促进经济增长”的观点。1928年,Young 重新强调这一观点,并把它和被许多人忽视的马歇尔“外部经济”的概念联系起来,指出“随着产业规模的扩大而产生的劳动分工是不断深化的过程”。也就是说,专业分工和产出规模的扩大将引起“报酬递增”,激励了这一过程的加速进行,这是一种典型的正反馈。

2) 劳动成果的循环积累。1957年,诺贝尔经济学奖得主缪尔达尔(Myrdal)提出,市场运行是一个连续过程,其中有很多相互作用会构成一种互为因果的循环关系,推动系统离开原来的状态。另一位剑桥学派著名的经济学家 Kaldor 在 Myrdal 的基础上指出凡登(Verdon)定理(一些国家劳动生产率的提高与工业产出的增长之间在统计数量上存在显著关系)的重要意义。从我们的角度看,它所体现的正是经济学上的正反馈。

3) 知识与技术的创新。自约瑟夫·熊彼特以来,人们早就注意到知识技术创新的重要作用,但是一直苦于无法对它给经济增长的贡献作一个定量的刻画,所以长期以来一直采取所谓“排除

法”来计算,即将其他经济增长因素的贡献排除以后,剩余的就是技术创新的贡献。这样的计算方法当然不能反映创新活动的本质。实际上,难于计算的原因之一在于,创新对经济增长的作用是非线性的(有人把它称为是“乘性”的,这不确切)。因为知识与技术虽然都是劳动的成果,但它不会像其他资源那样因使用而消耗,相反,创新像“放大器”一样,在直接导致经济增长的同时还会激发更多的创新。这是一种非常强烈的正反馈。

4) 垄断与规模效应。人们普遍认为,规模效应的作用是积极的,而垄断则因其对市场竞争的阻碍而应该加以限制。但是,应该看到,垄断与规模效应之间也有互为因果的联系,在一定的约束条件下,“垄断”是有其积极正面作用的。因为,除非依靠经济之外的力量(如强权,或政府为组织力量参与国际竞争),一个企业之所以能不断扩大规模而形成垄断,自有其优越于其他同行的地方,一个最普遍的原因就是它对资源(包括劳动力)的高效利用。这样,它实际上是在以低于社会一般劳动时间来进行生产。从这个意义上讲,它在其成长过程中就有可能把社会引向高效率的方向。

实际上,正负反馈是不可分割的。在许多情况下,系统内部并不需要将正负反馈回路分开,而只要对反馈信号的“相位、数量和滞后(反馈总是有滞后的)”加以适当地选择和调节就行。

总之,社会系统演化的动力机制就是一种使个体功能充分发挥的组织形式。其中包括:

1) 尊重个人权利的社会生活准则和相对丰富的物质生活资源,使得个人的物质需求得到充分地满足。这种需求其实是社会最基本的需求,即使在个人自由很少的社会也是如此。社会发展的历史已经证明,行动和思想的自由是个人能力发挥的基本条件,也是激励个人积极性的动力所在。

2) 促进个人能力和潜能得到充分发挥的社会文化环境。

3) 相互协调的社会组织形式,这种组织形式一定是动态的,不断发展的。要做到这一点,一个基本前提是群体中的个人之间充分地了解和信息渠道的畅通。

4) 为了使群体更好地适应它的生存环境,还要充分利用和开

发环境资源。这就要求群体对自己行为的后果和未来有足够长远的认识。

不难看出,上述过程就是自组织过程在社会环境中的体现。需要强调的是,在互动和相互调整行动取向的过程中,多种行动模式的竞争协同是主要的内容。协同学中的支配原理(伺服原理)在这里得到了充分的体现。但与无生命界和一般的生命体相比,社会竞争协同具有更为复杂的场面,所涉及的方面和表现的形态也和前者不能同日而语,这正是社会系统在本质上不同于其他系统的地方。

案例:地区经济发展的分析

下面是1994年我们对贵州经济发展的分析和对策建议,虽然已经过去了多年,但在我国将经济建设的战略重点转向中西部的今天,这一案例仍有一定的参考价值。

(1) 贵州现状:贵州的现状被有些资料称为“贵州”现象,作为我国经济欠发达地区的典型,可以从以下几方面来看:

1) 经济发展相对滞后。最主要体现在人均GDP水平低,长期处于全国倒数第一(1978年、1991年),仅占全国平均水平的50%左右;其次,是资金投入严重不足,仅为全国平均数的30%左右;再次,是经济结构不合理,第一产业所占比例过大,就业人口占78%,GDP比重占36.9%,还处在工业化的初期。

经济滞后必然导致人民生活水平的低下。1992年贵州人均储蓄额为全国平均水平的39%;人均财政收入为全国平均的40%;人均GDP比上海低7.8~14.3个百分点;1978年比上海纯差2332元,1991年相差数增至5785元,到2000年达到10400元。

2) 自然条件恶劣。经济的滞后与自然条件的恶劣关系甚大。从地理条件看,全省几乎没有平原,而山地占78%,丘陵占10%,坝子仅占3%。全省人均耕地520平方米(约0.87亩),一个农业劳动力仅有耕地1300平方米(约2亩)。自然条件中最为突出的特点是熔岩面积大,分布广。水土流失严重,生态失调,给发展农业、交通、矿山带来巨大困难。

3) 精神不振,缺乏办法。如果说前面两个方面是客观现实的话,那么,主观上也有两条,即精神不振和办法不多。反映在情绪上要么是“夜郎自大”,要么是“怨气甚多”,埋怨自然地理环境,埋怨中央领导和政策,埋怨历史等等。这种思想状态往往会束缚人们的聪明才智,从而在面对困难时缺乏办法。

4) 资源丰富,有待开发。贵州地处云贵高原,地理、气候环境有其巨大的优势。如这里矿产、能源、水资源非常丰富,尤其是以黄果树瀑布为代表的旅游资源更是名扬中外。此外,在我国特定的历史时期中贵州作为“三线建设”的重点,发展了一大批军工生产基地,军工生产是强项,同时也储备了相当数量的技术力量(包括设备和技术骨干)。但这些地区优势由于种种原因一直没有得到很好发挥。

(2) 基本对策:根据实地考察和历史分析,专家们对贵州地区的经济发展提出了以下对策建议:

1) 转变观念:贵州经济要发展,转变人的观念是关键。首先要解决以下几个问题:

① 改变面貌靠什么:贵州的经济发展究竟依靠谁,是依靠中央援助,还是依靠地方自己的力量?这本应是十分明确的,特别是在市场经济中,怜悯、同情、救济总不会长久。有部电影《莫斯科不相信眼泪》,市场经济中更是如此。而互通往来的友谊则会天长地久,原因就在于相互间有互利的往来。别人需要你,就在于你能拿出多少别人需要的东西(商品)去进行交换。当然,我们是在中央的领导下,不能脱离中央另搞一套。但是,中央的正确政策从哪里来?还得更根据本省本地的情况。所以让中央及时了解这里的情况是十分重要的,而帮助中央想办法,制定合乎本省发展实际情况的政策更为重要。说到底这些都要靠自己。

② 首先发展什么产业:传统的想法是先发展农业,再发展工业,最后发展第三产业,因为农业是基础。但是,贵州的实际情况是岩溶山丘多而平原土壤少,发展农业困难重重。按有些人的观点早该放弃,采取移民政策。而要发展工业,除了有丰富的矿产和能源外,资金十分缺乏,投入少,自然产出也少。加上科技不发达,

效率又低下,所以同样困难不少。相比之下,发展以信息为主体的信息产业所需要的自然条件要少得多。这里主要需要的是信息和人才。我们从一份资料中看到,贵州城市地区的大学以上人员比例在全国处在前列。这是一笔极大的财富。所以,从贵州的实际情况出发,从某些已具备一定条件的地区开始,逐步扩大,优先发展信息产业,以此带动其他产业应是一条可行之路。

③ 主要缺什么:贵州现在缺什么?摆在眼前的就是缺资金。但进一步想,资金不会无缘无故地从天上掉下来,得想办法引进来。看来又是缺办法。但是,办法是人想出来的,所以最终是缺人才。人才从哪里来?有两个途径:一是自己培养;二是从外面引进。自己培养是基础建设,要抓教育。但教育是“期货”,十年栽树,百年树人,100年才见成效未免远水难救近火,不过总得先有投入才会有产出。从外面引进来得快,但人才想来,这里得有吸引力,对知识分子的吸引力无非是事业、信息和生活条件。现在贵州这三方面的条件都较差,人家不愿来。不过吸引人才的办法应该是有的,从总的来讲,晓之以理,动之以情,诱之以利;先引进“帅才”,后引进“将才”,再引进“工匠”等。好在从目前我国及发展中国家的情況看,有一个有趣的现象,在各种物价都涨价的情况下,知识和知识分子的“价格”涨得较少,较慢。所以,现在花钱“买”知识和知识分子是合算的,“性能价格比”也最高的。

④ 优势在哪里:看不到自己的劣势会使人盲目自大,看不到优势有时让人失去信心。同时应该看到,优势和劣势在一定条件下是可以转化的。贵州的劣势不少,但也有自己的优势。这里不妨列举几点:

贵州人穷,经济欠发达,这是劣势,但只要人穷志不穷,就可以转化为“治穷”的动力。而且,现在穷,起点低,真正发展起来变化的速度就快。由于穷,自然地理条件差,生活艰苦,就具有比别人更能吃苦耐劳的能力。所谓穷,主要反映在平均收入低,劳动力就便宜,外商投资效率就高,可以更有力地吸引外资。

贵州地貌以石灰岩、熔岩为主,对发展农业、工业不利,但地形复杂必然有好的旅游去处,在世人眼中黄果树瀑布就很有名气,还

有贵州的茅台酒,就是因为山好、水好才会酒好。这些世界著名的景点和物产是得天独厚的自然资源,而它们的“名气”是巨大的“无形资源”,就看如何开发、利用它。

除了上面的劣势可以转化为优势外,贵州还有一些其他省所不具有的优势。如矿产、能源、水资源、旅游资源、人力资源等等。为了经济起飞,走出低谷,牺牲些资源是必要的,值得的。在工业方面,贵州总体上比较落后,但贵州的军工生产却在全国占有重要位置。20世纪六七十年代大搞“三线建设”,建了不少军工厂、军工企业,调来了不少高科技人员,形成了贵州工业的骨干。现在天下似乎比较太平,对军工的需求也就不那么强烈了,原来那些军工方面的科技人员,老的老了,走的走了,优势在慢慢丧失。但是,在当今的世界中,一个国家的国力仍然由军事实力和经济实力两大部分所组成。贵州有强大的军事工业,国家需要,人民也需要,这一点既要向中央讲,又要向人民宣传,让大家重视起来,贵州就有了自己“筹码”。另一方面,有效地借助于军事工业的高科技,可以较快地把电子通讯、机械制造、交通运输、能源等工业带动起来。用贵州的军工产品与国内外交换,用军转民的高科技产品去打开销路,占领市场,换回自己所需要的东西。当然,把这些优势发挥出来还受到一些因素的制约,其中主要是资金不足、信息不通、市场意识不强。

2) 引进什么外援:一个地区要发展,外援不可少。问题是需要什么外援和怎样获得外援。需要什么外援取决于首先发展什么,如果首先发展农业和工业,所要的外援是原料、资金、技术,如果把信息产业放在发展的首位,就需先引进人才、信息。当今的世界,正处在“信息社会”的关口。发展信息产业的投资往往比发展工农业的投资少。而且,天上有卫星通信,地上有电缆光缆。架天线、铺光缆比凿岩洞、铺铁轨总要容易些。而且信息通道和物质、人员的交流在一定程度上是可以互补的,人员的往来大都是为了交流信息。当信息高速公路把人们联系起来的时候,地球就会相应缩小。

10.4.4 社会系统的可持续发展

20世纪后半叶以来,随着西方社会的高速发展,在繁荣的经济

景象后面,一些负面影响也逐渐显现了出来,生态、环境和资源问题日渐突出。1968年以来,一群不任公职但具有卓识远见、对人类未来充满忧患意识的学者组成了一个“无形学院”——罗马俱乐部。1972年,他们发表了著名的研究报告《增长的极限》。作为一个里程碑,社会开始对自身的前景表现出越来越大的关注和忧虑。一股貌似悲观但却具有“警世”意义的思潮很快从学者传向政府机关和人民群众。于是,环境问题、生态问题、资源问题和人口问题成了人们谈论的中心。1974年的里约热内卢会议和近年来多次召开的世界环境发展会议便是一个反映。我国政府也把可持续发展作为两大基本国策之一。与环境、生态、资源、人口等有关的政策相继制定,措施不断出台,相应的研究成果也大量涌现。人类似乎重又看到了光明的未来。上述问题涉及到各种因素。环境因素固然重要,但毕竟只是外因,外因必须通过内因来起作用,也就是说,问题的最终解决仍需依靠社会内部的力量。因此,在重视环境等因素的同时,必须高度重视可持续发展的根本动力和内部机制。那么,可持续发展的标志是什么?动力在哪里?需要什么样的内部机制?这就是本节所要讨论的问题。

系统科学如何看待社会系统的可持续发展呢?前面我们研究了系统个体的演化,指出创生、发展、消亡是系统演化的三部曲。系统在创生之后经过一个发展阶段,从而走向成熟,达到它个体“生命”的顶点,然后逐渐走向消亡。这是任何系统演化的必由之路,是谁也逃脱不了的“命运”。但是,这个历史的必然性并没有具体地规定每个系统的生命周期(寿命)究竟有多长,因为后者完全是由系统自身的元素、结构以及周围的环境所决定的。因此,对与人们的生活密切相关的社会系统来说,人们往往希望它的发展阶段长一些,发展得更加符合人们的利益一些。于是,系统在经历了一些发展之后,还能否继续发展,如何实现持续发展,就成了社会系统需要研究的一个特殊问题。

(1) 可持续发展的三种基本形态:从系统科学的角度来看,可持续发展实际上是社会系统发展的一种特殊形式。根据不同的发展特征,可以把持续发展分为线性的、非线性的和种群

的三种类型,可持续发展只能在第三种形式中才有可能实现。下面作简单说明。

1) 线性(简单)持续发展:它要求继续保持原有的发展趋势与势头,不断在数量上、规模上“线性”(随时间按一定比例)扩展。由于它是以量的增加为主,基本上没有质的飞跃,所以这是一种简单的、比较低级、单一和局部的可持续发展。

线性持续发展可以用一个简单的数学式子来描述:

设 x_i 为系统在 i 方面的状态变量, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。 X 对时间的变化率(一阶导数) $y = dx/dt$ 表示系统在该方面的发展。

线性可持续发展要求 y 在一段时间内保持常数。例如 $y = a$, 即 $y = dx/dt = a$, 积分得 $x_t = at + x_0$, 其中 t 为时间, a 为发展的比例, x_0 为初始状态。在图像上为一直线,它表明状态变量将随时间而按比例 a 无限增加下去。显然,在资源和发展空间有限的情况下,线性发展是不可能持久的。因此

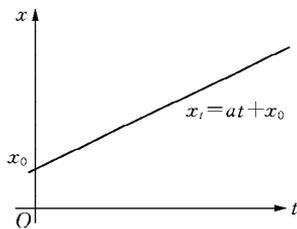


图 10-1 线性持续发展

线性持续发展只可能在系统发展的某个片段上表现出来,其范围通常是很小的。

2) 非线性可持续发展:它要求在保持系统“个体”基本结构与功能不变的前提下,超越原来的发展阶段,通过系统的部分质变,开拓更广阔的前景,将系统的发展提高到一个新的阶段。和线性可持续发展相比,非线性可持续发展是一种新的、更具本质意义的持续发展。现实生活中非线性可持续发展的例子也不少,如作物在不同生长阶段的发展,经济增长方式的改变等等。它们的特点是必须“跨越”原来的阶段,并且部分地产生新质,但又不改变系统的总体特征。在系统状态量的变化上,后期的发展显然得依赖于前期的基础,这就形成了一种反馈机制,数学上可用非线性微分方程来描述。

根据第五章对非线性方程的分析,可以看出系统的发展将呈现出极其复杂的局面,如呈指数增长或出现混沌现象。显然,在现

实社会经济系统的发展中,由于时空的限制和资源的稀缺,任何状态变量的指数增长是不能持久的。系统的发展必然由量变引起质变,从而跨入新的发展阶段。在这个意义上,可以把非线性可持续发展看成是对“发展的发展”(形象地说是发展的二次方)。

社会经济系统的发展具有更为复杂的形式,其非线性程度也更加强烈,难以用简单的方程来加以描述。数学上通常对它们进行分段处理(在不容许分段的情况下则需要应用更复杂的方法),如将它们划分为线性段和非线性段,希望用已知的解析函数曲线来对非线性段逼近。这方面的一个典型例子就是所谓“生长曲线”。

为反映技术增长和产品市场的发展,人们常用到具有 S 形的生长曲线,其方程为:

$$Y = K / (1 + be^{-at})$$

其中 K 表示“市场饱和”时的极限值,如产品占有全部市场时 $K = 1$, b 和 a 为与 k 相关的参数, t 为时间。曲线可分为四段:

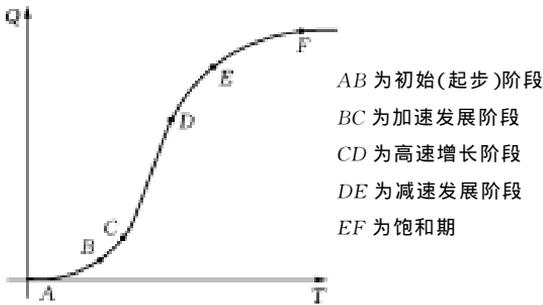


图 10-2 非线性发展——生长曲线

3) 种群可持续发展:如果说前两种可持续发展仅仅涉及系统个体发展的话,种群可持续发展则关系到一个由多个同类个体组成的群体的发展。这种发展具有极其丰富的内容,除了在局部或个别变量的发展上和种群内部个体系统的发展上包含第一、第二层次的可持续发展外,还要求在保持系统“群体”原有属性不变的前提下,通过推陈出新,使群体的发展进入一个新的阶段。与非

线性可持续发展相比,它又更进了一层,可以看成是“发展的发展的发展”(形象地说是多个个体生命周期首尾相连)。

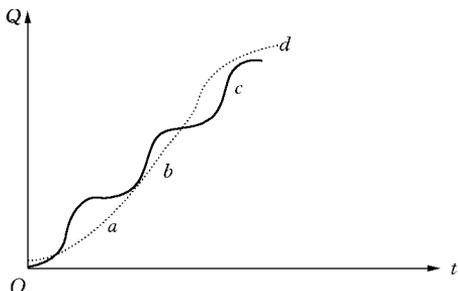


图 10-3 群体的可持续发展

不难看出,社会系统的可持续发展总体上是属于第三层次,即种群层次的可持续发展,它的特点是要“跨越”一个发展阶段并“超越”一个生命周期,由前后相继的“几代”系统来完成。如果在第二个或后代系统的生命周期中能保持第一个系统生命周期的发展速度与态势,就称它们是可持续发展,反之,为不可持续发展。

(2) 社会系统可持续发展的条件与标志:一个社会系统是不是可持续发展,很大程度上看它是不是有丰富的资源和有利的环境(包括自然的、社会的、经济的环境)。这很容易理解,也是大家公认的。但是,环境好、资源丰富就一定可持续发展?环境差、资源贫乏就一定不可持续发展?近代世界的历史却经常提供反例。南美洲和大洋洲不是环境优美资源丰富吗?发展却远远不如资源贫乏的日本和德国;我国东部的资源远不如西部丰富,但东部的发展远比西部快。这又是什么原因呢?为什么资源贫乏、人口密集的地区反而比资源丰富、人口稀少的地区更具有发展潜力?看来可持续发展的问題不能单看资源和环境,而需要考虑资源与环境利用开发的效率,以及影响效率的各种因素。

1) 可持续发展的条件:通常认为一个社会系统要可持续发展必须满足如下条件:

① 能不断获取发展所需要的资源(与外界进行物质能量信息

的交流、开放,但有度),这是摆在各国人民和领导人面前最重大的问题之一。例如,某方面的发展需要某种资源,如果这种资源被消耗完了,这方面就不可再持续发展了。因此,要做到可持续发展,就必须合理地分配和有效地利用这种资源,同时,要及时开发新的替代资源,这样才能保证可持续发展。相反,如果一个企业或地区不能及时获取生存发展所必需的资源(包括资金、资源、人员等),就像一些自然条件恶劣、不适宜人类的地区那样,唯一的出路只有迁移到别的地方去,另图生路,否则就只有让原来的系统消亡。其实,受资源限制不能继续发展而死亡的例子在生物界和社会领域是很普遍的。俗话说“旧的不去,新的不来”,旧系统的消亡将为新系统的发展让开道路,提供资源,这也是种群可持续发展的基本形式。

② 能在一定程度上保持系统结构与功能的相对稳定性、协调性和有序性(有效的控制调节中心),不断开发新资源(包括材料、能源等),不断降低污染程度,使产出与污染的比值保持在1或1以上(保持在1表示污染程度不变,1以上表示污染水平降低)。

③ 系统内部存在良好的物资、能量、信息转化机制(将外来的或其他部分的物资、能量、信息转换为适合自身需要的形式);相反,如果系统内耗太大或内部混乱,将使系统无力持续发展。

④ 系统内部存在激励机制、触发机制、新的生长点。

⑤ 系统内部存在畅通的物资、能量、信息传输渠道。

2) 可持续发展的判据与测度:社会系统能否可持续发展,不仅涉及系统的个体发展,而且关键在于是否能处理好两“代”系统间的衔接问题。它要求第二代不低于第一代的发展水平和速度。而要做到这一点,首先必须做到“不吃邻居的饭,不断子孙的路”,即不要因为自身的发展而破坏周围的环境,也不要因现时的发展而影响后代(未来)的发展。

由于可持续发展的问题来源于环境问题,所以人们比较注意发展的外部环境,发展中的资源分配。现在的问题是要把它变成一种具有可操作性的判据和测度。

可持续发展能否实现,关键在于发展的收益是否可以大于发

展成本。任何发展在带来收益的同时都必需付出代价,即需要成本。社会发展的收益可以从各种经济指标和社会指标中看出。这里不打算具体涉及这些指标(人们可以很容易从有关资料中找到),而只是指出任何社会发展都必须落实到人的发展上,即不断满足人们日益增长的物质与精神需求,让生活在其中的人日子过得越来越好。

一个社会系统可否持续发展,基本标志就是要看它发展的收益是否大于发展成本(即所谓性能价格比),大于的可以从发展中不断得到“纯收益”,以支持后期的发展,而小于的则会因发展而使环境恶化,资源枯竭,总的社会指标实际上在下降,这就不是发展而是倒退,谈不上可持续发展。

$$P_p = P_t - C_t$$

其中 P_p 表示发展的纯收益, $P_p = \sum P_{pi} \quad i = 1, 2, \dots, n$, n 表示收益种类;

$$P_t \text{ 表示发展收益, } P_t = \sum P_{ti} \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

C_t 表示发展成本, $C_t = \sum C_{ti} \quad i = 1, 2, \dots, m$, m 表示成本种类;

$$\text{可持续发展度 } K = P_t / C_t;$$

当 $K > 1$ (即 $P_p > 0$) 时系统是可持续发展的;当 $K < 1$ (即 $P_p < 0$) 时,系统是可持续发展的。

当然,具体计算社会系统发展收益与发展成本是件十分复杂的事情,涉及许多方面的因素和评价指标,要考虑系统边界的划分和发展阶段的划分。例如,长期以来一些发达地区和国家就采取了转嫁污染的政策,在获取发展收益的同时将本地区的污染排放到其他地区,实际上是让其他地区(特别是不发达地区和发展中地区)承担了发展成本,这是一种缺乏全球观念和极不道德的政策,同样,一代人对下一代人采取类似的政策也是不道德的。

发展的代价可以通过环境的破坏、资源的消耗和人们生活水平的下降程度反映出来。社会发展必然耗费资源,为使人们的生

活水平不断提高或维持原有水平,需要开发新的能源,把环境的破坏控制在一定限度之内。为此,就要有相应的开发成本和控制成本。比如,一个城市每天都要消耗能源,现在大部分能源来自煤炭,烧煤必然要排出二氧化硫,从而污染大气。要降低由此带来的污染,只有两条出路:一是改用别的能源以及相应的设备;二是控制排污量并逐步将污染程度降下来。无论使用哪种办法,都要付出巨大的代价。对一个地区、一个城市来说,污染指标每降低一个百分点,都将付出几亿、几十上百个亿,甚至更高的代价。

10.5 网络社会

信息化是当今社会发展的基本趋势,随着以因特网为代表的全球高速信息网络的发展和普及,人类历史迎来了网络社会的新时代。网络社会刚刚露出“冰山的一角”,就立即引起了各国识之士的高度重视。1998年1月在瑞士沃达斯召开的国际“网络社会”大会,不仅表明了人们对它的关注,还掀起了一个研究网络社会的高潮。本节把网络社会作为未来社会的一种形式来进行探讨,主要关注:①网络社会有哪些特点;②网络社会运行的基本规律是什么;③它将怎样改变社会的结构、生产方式、生活方式和思维方式;④网络社会将带来哪些新的社会问题,出现哪些新的发展机遇。

10.5.1 社会网络

网络社会是社会信息化达到一定阶段后的产物。社会的信息化其本意就是将社会生活与社会发展从以物质(材料)、能量(能源)为基础,转到以信息、信息技术、智能和智能技术为基础。虽然社会的信息化是一个长期过程,但何时进入信息社会,何时达到网络社会,却有一定的标志和判据。按照托夫勒的说法,社会的信息化早在20世纪中期就已经开始,1956年,美国白领工人人数超过蓝领工人人数是美国进入信息社会的标志。在我们看来,这不仅是一个人数的变化,其意义有点像物理学中的“粒子数反转”,由此必将引起社会的根本性变革。

20世纪80年代以来,世界范围内的信息化进程大大加快。90年代初,美国又刮起了一股信息高速公路的旋风,接着是因特网在

全世界的迅速发展。最近,人们在此基础上提出了网络社会的概念。网络社会对所有的人来说都是一个全新的概念,这里的网络当然主要是指信息网络,网络社会就是建立在全球高速信息网络基础之上的。但是,广义地讲,不妨把已经存在和正在迅速发展的全球公路网、铁路网、航空网、电力网、输油输气网也作为网络社会的一部分,因为网络的特点就是流通、传输和联系,至于以什么作为传输的对象或“工作物质”则是次要的。同时,我们认为,作为一种新的社会形态,除了通信线路的网络化和信息技术的高度发展外,主要应有一个全新的社会结构和观念形态(包括生产方式、生活方式、思维方式和管理模式等)。

从技术的角度上讲,只有社会信息化具有以下三方面的特征之后,人类才开始跨进了网络社会的大门:

(1) 网络上信息、物质(材料)、能量(能源)的高速流通,其具体表现为高流量和高“带宽”。

(2) 网络遍布社会,以至全球各个角落。它是建立在各国信息高速公路(国家信息基础设施)基础上的全球高速信息网。

(3) 强大的计算机技术作为社会信息处理与管理的基础。

10.5.2 网络社会的新特征

作为一种新的形态,网络社会的特征主要表现在以下几个方面:

(1) 全球一体化:如果把地球作为一个广义的生命体的话,那么,可以把全球高速信息网看成是地球的神经网络。神经网络的出现,对于生命进化的意义是不言而喻的。当地球上的人类社会有了自己的神经网络后,社会的发展就进入了一个全新阶段,整个社会的结构将发生根本的变革。例如,市场经济中“网上商业或空中市场”将逐渐取代原有以商场为特征的商业活动模式;政府的职能也会因指令(政令、法规等)形成、发布、贯彻的方式不同而发生彻底的变化;人们将更多地工作和生活在网络、多媒体和虚拟现实之中,具有另一种情趣。

全球一体化并不是简单的“世界大同”,而是具有极其复杂的“图式”。用非线性科学的语言来说,社会混沌、社会分形、社会复

杂图形将是正常的、健康的景象。

(2) 社会系统生命周期的变化 :由于网络社会中信息交流的频繁、迅速和交流范围的扩大 ,组织过程自然会大大加速 ,其结果既可能导致某些系统生命周期的缩短 ,又可能因加快了系统内部调整效率而使系统更加稳定 ,从而延长系统的生命周期。

生命周期的缩短主要表现在系统的个体层次上 ,典型例子是某些具有特定功能的社会集团 ,如公司、企业的聚散、更迭的加快以及产品生命周期的缩短等等 ,所以网络社会中将是一个新事物层出不穷、大量涌现的时代 ,从而使旧事物很快被淘汰。生命周期的延长则主要表现在群体层次上。群体生命周期是指某类个体生命周期的总和 ,个体系统的生命信息通过世代相传而延长了群体的生命周期。在网络社会中 ,社会系统——个体的“生命信息”将会受到更加严格筛选后 ,以社会文化的形式保留下来 ,成为全社会的精神财富。

(3) 社会系统边界的变化及边界控制作用的加强 :网络社会的基本特征是全球一体化 ,其结果是许多原来社会系统的界限将被打破或形式上保留 ,发生质的改变。如国家的界限 ,地区的界限 ,供应商和用户的界限 ,企业间的界限 ,家庭的界限等。由于原有界限的打破 ,使得原来组织对象如人员、物质等的归属性质也将发生变化 ,一个组织对象可以同时属于或参加到更多的系统组织中去 ,从而使它具有更为丰富的属性。

但是 ,全球一体化并非一朝一夕的事情 ,从以国界划分的区域社会走向一体化社会需要相当长的时间 ,其中边界的作用也将不断发生变化。虽然边界最终将会消失 ,但开始时其控制作用反而还会得到相应的加强。其原因是 ,原来各区域间的政治、经济、文化等都存在很大的差别 ,这些差别必须通过相当长时间的控制才能消除。

(4) 社会混沌的出现 :前面指出 ,混沌是复杂系统的一种典型存在形式 ,它的基本特点是对初始条件的敏感性。混沌运动虽然具有表现上的无序性 ,但它却具有深层次的有序性和规律性(有人甚至认为 ,混沌是一种高级的有序态)。对于复杂系统来说 ,无论

秩序还是混沌都是系统的“正常”状态。

发达的网络社会必然是一个混沌的社会,这种社会混沌的根本原因来自两个方面:一是人机智能系统(人脑智能系统与人工智能系统有机结合的产物)中的混沌,二是由高速全球信息网络所带来的社会关系中的混沌。从因特网的发展历史可以看出,全球一体化的网络社会,不是政府行为的产物,而是民间自发行为的结果。不难想像,在未来的网络社会中,自下而上的自组织行为将大大加强,自上而下的他组织的成分,即由政府实施的调控行为将有所减少。当作为社会的基本成员的个人和社会集团具有了更多的自由度和更大的灵活性,社会个体的能动性、创造性以及理性得到更为充分而全面地发挥之后,原有的社会结构和秩序将会被打破,社会将呈现一种混沌的局面。

混沌作为社会系统的一种特殊运动形态本身无所谓是好、是坏,关键看人们如何对其进行控制和管理。在第五章中已经对混沌的控制与同步作了专门讨论,那里所提到的一些方法很多可以用到网络社会之中。

(5) 网络社会中将产生一种新的“全球智能”:现代社会中个体智能和集体智能是人们已经见到和感受到了的,这些智能的产生依赖于一个个体和集体中的神经系统。可想而知,当全球高速信息网成为地球社会的神经系统之后,必然产生全球的智能。现在来刻画全球智能还为时过早,但不难推测,它是一种与个体智能、集体智能处在不同层次,具有十分不同性质和表现的新的智能形式。如何理解这种全新的全球智能,它具有什么样的结构和功能,是网络社会中需要研究的重要课题。可以设想,全球智能从结构上讲,它是原有的人的个体智能、集体智能、人工智能、人机智能的有机结合,从功能上讲,它将主要处理全球范围内人们共同关心的那些难题,如建立全球社会经济新秩序的问题、人类社会可持续发展的问题等等。最近我国有些学者提出“大成智慧”的问题,也许正是全球智能的一部分。

10.5.3 网络社会中社会关系的变化

网络社会中的混沌不是简单的混乱无序,而是具有高层次上

的有序性。这种有序性集中表现为网络社会结构中出现新的层次划分,把社会分为全球、地区和个体三个基本层次。社会活动的主要内容也将是处理这三个层次之内和之间的关系。

(1) 在人与人之间的关系中,物与能的供求关系的地位将下降,而智能服务和信息服务将成为主要的商品。目前对于服务,以及服务行业的两大误区将被消除,把服务作为低级的、次要的、无偿的劳动的观点将被纠正,各种形式的智能服务将成为社会的最大产业。

(2) 个人与集体(地区与全球)的关系是网络社会中社会关系的核心部分。现在经济学中的一些基本假设作根本性修正,如把人抽象为从各自的偏好出发,在一定约束条件下,追求效用最大化的理性经济人假设,已不再适用。在网络社会中,由于个人智能高度发展和全球智能的出现,一些管理科学、行为科学、社会科学中的基本模式也随之改变。许多现代社会中的问题,如公与私的关系,个人权力与对集体义务的关系问题等,将会有新的解决办法。

(3) 在国家的关系中,国家机器的作用,未来战争(如果发生的话)的形式和目标都将会发生根本变化。例如,以瓜分世界物质与能量资源而发动的战争,将让位于争夺信息和智能的新型战争。

10.5.4 网络社会的发展

网络社会在演化发展上同样具有自己的特点,它将表现在:

(1) 网络社会发展的根本动力来自知识创新:尽管和所有的社会一样,发展的原始动力来自对人们不断增长的各种需求的满足,但不同的时代、不同的国家,解决这些需求的方式却极不相同。在农业社会,人们主要靠的是自然力和人的体力;在工业社会,主要靠的是人所发明的各种机械,其中已经包含相当数量的智能;到了网络社会,就主要靠人机智能了。在这里,人的智能主要表现为对知识的创新能力。

(2) 网络社会中可持续发展将主要依靠智能劳动和智能劳动者:前面讨论了社会系统的可持续发展,和其他社会相比,这一问题对网络社会更有其深刻的意义。因为在农业社会,由于人口相对较少,生产与生活的水平都比较低下,可持续发展的问题既不突

出,又比较容易解决。比如,单靠自然界的自身就可以消除环境污染,通过人口迁移也可以解决资源问题。到了以大规模生产为特征的工业社会,由于国与国之间、地区与地区之间经济、政治、军事发展的不平衡,使得发达国家和地区的可持续发展可能通过掠夺不发达国家和地区资源,向它们转嫁污染的方式来实现,因而弱肉强食的“炮舰政策”和殖民政策就成了某些发达国家解决可持续发展问题的基本手段。从这个意义上讲,20世纪发生的两次世界大战都是某些国家可持续发展的产物。

发展中国的经济在现代社会得到了较快的发展,世界力量对比发生了根本变化,强权政治越来越行不通了。人们一方面为自己的持续发展而争夺生存空间,另一方面依靠科技的力量来开拓新的资源和能源。不管哪个方面,人们开始认识到社会可持续发展的最根本的力量还是人类自身的智能,因此,可持续发展的问题将集中在智能开发上。如前所述,在人类的智能中,由网络社会所带来的“全球智能”将对网络社会的可持续发展起决定性的作用。

社会的可持续发展最终得依靠人,网络社会中占劳动者主要成分的将是智能劳动者,即脑力劳动者或“知识分子”(尽管意义不完全相同)。网络社会一方面大大扩展了智能劳动者的队伍,另一方面又为智能劳动者提供更为优越的工作与生活环境。根据政治经济学的原理,正如工业社会的基本秩序是按体力劳动(者)的“面貌”来建立的一样,在网络社会中,社会的基本秩序也会按照智能劳动者的面貌和生存方式来加以改造。

第十一章 | 系统原理与方法

一门完整的学科总是包括三个基本方面：观念、理论和方法。学科的观念为人们提供观察世界的一个独特的视角和思路，学科的理论用来刻画研究对象的运行规律，学科的方法是观念与理论见之于实践的东西，是为实现具体目的与目标服务的，因此，系统方法与方法论是系统科学的一个重要方面。

“方法对头事半功倍，方法不对事倍功半”，越是讲效率讲方法的人，越是重视方法。什么是方法？好的方法从哪里来？每一种方法有何特点？方法之间又有什么关系？使用方法时有什么条件和约束？要回答这些问题，就需要进行方法论的研究。

什么是方法？方法就是人们看事物、想问题、办事情的思路、原则、程序、步骤和技巧。一个好方法的第一个特点是要提供一个明确的逻辑思路和切实可行的工作程序。人们熟悉一个叫作锦囊妙计的例子。诸葛亮是位聪明人，他的办法又多又好，在赵云护送刘备过江时他给了赵云三个锦囊，告诉他什么时候打开某个锦囊，按锦囊妙计行事。用现代的话来说，就是给赵云编了三条程序，即一个命令的序列。

好方法的第二个特点是要有具体的操作技巧，即指出解决具体问题的关键和方式。因为，对于不同的对象，往往需要使用不同的方式和方法。大家知道一个叫《庖丁解牛》的故事，庖丁对解剖牛是很有办法的，因为他了解牛的身体结构以及分解它的技巧。

好方法的第三个特点是指明思考和操作的原则，包括条件、限度和界线，即哪些是可行的，哪些是不可行的，操作中有哪些约束条件，可能得到什么结果等。总之，方法是相对于思考、操作或行动而言的，是见之于行动或表现于操作之中的。研究方法必然涉及三个方面：①操作的对象；②操作的主体；③主体的目的与对

象之间的关系。这就是说,要获得好的方法,就必须对这三个方面进行研究。

方法论则与方法不同,它表现为一系列方法论原则,是比方法高一个层次的东西,方法论要回答的问题是方法的客观基础,以及各种方法的相互关系等等。

干任何一件事都有一定的方法。不过方法有好有坏,方法论研究的一个直接目的就是要获得好的方法。如果把方法比作是艺术的话,那么,方法论就是关于艺术的理论。现实生活中的问题总是复杂的,要解决一个实际问题,往往不能用单一的方法,而要用多种方法进行“综合治理”。所以评定一种方法的好与坏,往往并不容易。在许多情况下,事情办不好,原因有多种,方法不对头并不能怪方法本身,而只能从使用方法的人那里寻找原因。

方法论研究的另一个重要方面是各种方法的相互关系,即体系结构。在科学技术领域,人们通常把方法分为三个层次:最上面的是哲学层次的方法,它几乎适应于世界上的一切事物,是“放之四海而皆准”的,如辩证唯物论中的对立统一原理、质量互变原理、否定之否定原理等。中间是科学层次的方法,它主要适应于科学研究领域,即以认识事物的规律为出发点的若干种方法,如分析综合方法、逻辑方法、归纳演绎方法、科学抽象方法等。系统科学方法也属于这一层次。下面就是技术层次的方法,它是针对某个具体的问题或任务(事情、工程)等的方法。

方法的上述结构同样可以用来针对某一个专门的领域或某一类型的问题。例如,在社会领域,在某个经济活动领域,甚至某一工业领域,如汽车工业的发展,同样存在三个层次,最上面的是战略层次的方法,它要确定活动的总体目标和为达到总目标的所有方法的相互关系;中间是战术层次的方法,它要解决总体目标下面某一方面或局部的问题;再下面才是解决具体问题的技巧、手段,以及种种措施。

那么,系统科学的方法和方法论原则是什么呢?

在系统科学领域也有三个层次的方法,最上面的是在系统观指导下的系统科学方法论原则,它包括整体性原则、有序性原则、

演化性原则、价值性原则等四大方法论原则。中间是以各种系统理论为出发点的各种认识系统规律性的方法,处理系统一般问题的方法,这一层次的方法很多,按其作用,可以分为系统描述的方法、系统分析与模拟的方法、系统综合方法。每一类方法还可以继续往下分,如系统分析方法又包括系统的组分分析与要素分析,结构分析,属性、功能、价值分析,环境分析,系统综合,系统开发等等。再下面就是针对某类具体的系统问题的方法,如系统建模、系统仿真、系统建构、控制、管理的方法,以及虚拟现实技术、结构与组织重构方法、系统工程方法、系统诊断与调控方法、预测决策方法、管理的技术与方法、信息技术与控制手段等。

从应用的角度来看,将某种方法划到哪个层次并不重要,问题的关键是要对症下药,具体问题具体分析。下面从对一般系统的系统科学方法原则开始。

11.1 系统科学的方法论原则

系统科学的方法论原则是所有系统科学方法的基础,而它本身的基础就是系统概念。下面简单地回顾一下系统定义中的几个要点:①系统是一个由各种元素或部件组成的有机整体;②系统内部各要素间具有相对稳定的关联或结构;③系统处在不断发展变化之中;④系统具有自己特定的属性、功能和价值。正是在上述四个基本点的基础上,才产生了下面四条方法论原则。

11.1.1 整体性原则

整体性原则可以简单表述为:全面考虑,发挥整体优势,追求整体最优。

整体性原则要求看问题从全局出发,通过调节整体系统内部和对外界的关系,来发挥系统最大效能。

这里要处理好以下几方面的关系。

(1) 整体与部分的关系,也就是全局与局部的关系:总的原则是局部服从整体,个人服从集体。这个服从主要体现在让整体发挥最大效能的原则来处理局部的行为,追求整体最优而不是局部的最优。必要时,为了整体的利益牺牲局部的利益。

然而,整体又是由局部所组成的,整体离不开局部。特别是代表整体利益的领导必须随时关心局部的利益,只有让各个局部都各得其所,协同活动才能有最优的整体效能。这里一个典型的例子是国家与人民的关系,领导与群众的关系。人们常把人民群众比作“水”,领导比作船,水能载船,也能将船打翻。

在“形象”上这种关系也体现得十分明显。整体的形象可以通过局部来体现,这叫“以小见大”的全息性。相反,整体的面貌也从另一方面反映了局部的运转情况,所谓“强将手下无弱兵”。

整体与部分的关系讲起来简单,一碰到实际问题就十分复杂。比如,社会经济理论中有人专门研究集体行为,如何处理集体中的“搭便车”问题和利益分配问题等。

(2) 部分与部分的关系:从前面的分析中知道,组成系统的元素不仅有多个,而且有多样,在一个复杂的系统中还会出现局部的分层或成团的情况。这就是说,系统中的每个成员都有自己独特的地位和作用,这些又往往是不可或缺和不可替代的。因此,为了整体的利益,总是要求各个部分都“各司其职”,安分守己。

处理部分与部分关系的最高原则是分工合作,协同作战。由于每个局部都会有自己特殊的地位和作用,因此,它们的关系又总是不平衡的。社会科学中花了许多力气来研究如何协调人与人、集团与集团间的关系问题,这些关系的协调与控制总是在一个更高层次上进行的。在简单系统中是由代表整体的领导来进行协调,在复杂的系统中还可以通过中间层次来进行协调。

(3) 系统与环境的关系:关于系统的环境问题将在下面作详细讨论,这里主要强调系统的整体性不仅取决于它内部元素间的关系,而且与系统所处的环境和时机有密切关系,要最大限度地发挥系统整体功能,就要考虑环境和时机。这种情况在人造系统和人为事物中体现得特别明显。现在人们特别重视人才,而要让一位知识渊博、才能出众的人才充分发挥其才能,就必需为他创造适当的环境和时机。其实,正如我国古代伟大的诗人李白所说“天生我才必有用”,对每一个人来说,多少有一些自己的特长,如果善于寻找,都可以找到发挥自己才能的环境和机会。反过来,应该承认,

正是由于种种社会大环境或单位小环境的原因,时代的、时机的原因,才埋没了大量的人才。所以一个健全的社会,一个好的领导,要特别注意人才成才的环境和人才发挥才能的环境。

综合发挥系统整体的最大功能,可以从以下几方面考虑:①元素的质量;②内部的构架;③环境和外部条件;④时机和节奏。

系统的整体性如何显示,可以从系统的目标、系统发展的态势、系统的稳定性、系统的独特性等方面来看。

11.1.2 有序性原则

有序性原则可以简单表述为协调关系,保持稳定和优化结构。

任何一个系统都是有序的,具体表现为每个系统都有自己相对稳定的结构,在系统存在的全过程中保持系统内部秩序的相对稳定是至关重要的。这就需要利用各种条件,建立有利于发挥系统最大功能的内外秩序。

前面已经对系统“序”的含义作了充分讨论,从方法论角度看,要在系统内部保持相对稳定的差异结构,这表现在它的结构上。一个系统可以有各种序,不同的序都会在系统的属性上表现出来。人们总是希望通过对序的调整和建构来得到最佳功能和价值。

为此,要注意以下几点:①有差异才能有序;②有序才能有势;③有势才能有力;④有力才能有流;⑤有流才能达到目的。

11.1.3 演化性原则

演化性原则可以简单表述为把握规律,抓紧时机,促进发展。

从发展的眼光看待系统,把握系统演化的客观规律,抓住有利时机,使系统朝着人们希望的方向发展。

凡系统都是演化的,不过演化的方向、进程和速率依条件不同而异,因此,可以通过对条件的选择来控制系统的演化。

这里需要注意以下问题:①演化方向的确定;②演化条件与动力机制;③演化的结果对环境与自身的影响。

11.1.4 价值性(目的性)原则

价值性原则又称为目的性原则,可以简单表述为各尽其能,为我所用,共同发展。

人们研究、控制、建构与改造系统都出自一定的目的。从最一

般的意义上讲,目的就是要求得系统功能的最优,但要得到效益就必须付出代价,因此,从经济上讲,价值是效益与成本之比。

与其他科学相比,系统科学一个突出的特点就是强调目的、价值和最优化。

什么是系统的目的,从数学的角度来看,就是奇怪吸引子。

价值性原则要求人们考虑整个系统的以下几个方面:①系统演化的终极状态与目的;②对于特定的目标,系统具有何种价值与性能价格比;③从本质上讲,所有的价值判断都是围绕人们的某种目的,因此,正如古希腊哲人所说“人是万物的尺度”,系统科学的价值性原则说到底也是以人为本的原则。

11.2 系统的分析与诊断

系统诊断的目的在于判断一个系统运行是否正常,功能是否能发挥,然后找出“病因”,对症下药。对于一个复杂的社会经济系统,这些事情往往讲起来容易做起来难,难就难在社会中存在许多不确定因素,使得情况不明,难以断定。但是我们认为,情况再复杂也会有一定的规律性,这个规律从大范围讲就是复杂系统演化的一般规律。本文先就系统诊断的基本原则和方法进行讨论,然后结合具体的例子进行分析。

一个社会经济系统运行是否正常,总是相对于一个“正常”的系统而言的。因此,要判定这两个问题,先要确定被诊断系统目前所处的状态,然后将它和一个“正常”系统的正常状态进行比较。为了做到心中有数,这种比较应该包括定性的和定量的两个方面。以上是系统诊断的第一部分,称为观象定位。接下来就要寻找“病因”。如果一个系统运行不正常,功能没有充分发挥,就要寻找原因。

通常“病因”可从系统的内部结构、外部环境以及时机等方面来寻找。这是系统诊断的第二阶段,叫作寻根确诊。最后,要寻找对策,设法让系统恢复正常。当然,让一个“病态”的系统恢复正常也不容易,往往要对各种方案进行分析、选择、模拟,这就是“治疗”。本节重点介绍系统的诊断。

11.2.1 目标功能分析

对社会经济系统进行诊断的根本目的,看它能否发挥预期的功能、具有人们所需要的价值。所以首先要对系统的目标进行分析,即回答以下问题:①对系统有什么期望?这些期望是否合理、可行?②系统的目标是什么?达到系统目标的基本条件是什么?③系统现状离目标还有多少距离?④从现在开始要达到目标还有哪些事情要做?有哪些具体困难?需要付出多大代价?⑤经过努力最多能做到哪一步?⑥最坏的情况是什么?哪些情况和因素可能导致计划失败?

(1) 现象与定位:现象定位是系统诊断的基础。主要是确定系统目前的运行状态、功能情况及所处的演化阶段。从系统理论来看,现象定位就是要对系统进行全面描述,以便为进一步找出问题的症结和制订对策提供基础。

对一个系统的状态进行全面的描述,至少包括以下几个方面:从静止状态来看,它包括系统的外部表现、功能特点、系统的内部组分、元素间的相互关系和整体构型;从运动状态来看,包括系统的演化进程、变化动力和与环境的相互作用。下面分别加以讨论。

(2) 状态描述:这里的状态描述是指从外部观察系统时,系统所表现出来的外部特征和功能属性。但在进行这些描述之前,先要选择适当的状态参量。

1) 状态参量的选择:一个系统,特别是复杂系统往往有许多方面,每一个方面又可以用不同的参量来加以描述。例如,人们可以从政治、经济、文化等方面来考察一个地区,如果要考察该地区的经济状况,又会有许多经济指标,如人均GDP(国内生产总值)和人均收入等。要考察一个人,可以从他的身体状况、工作能力、政治态度、文化素质等方面来考察。在身体状况方面,又可以有身高、体重、血压、体温等许多参量。可见描述复杂系统总要考虑多个方面、多个维度。不过,在研究某些具体问题时,并不需要也不可能面面俱到地把系统的所有方面,所有参数都列举出来,这样一来就需要对状态参量进行认真的选择。在选择状态参量时,要遵循以下原则:一是客观主导性原则,即选择系统运行中代表其本质

和主流的方面 ;二是主观需求原则 ,即选择那些对研究者关系最为密切、解决特定问题时所必不可少的方面和参量。只有通过反复的调查研究 and 反复调整 ,才能找到和确定少数几个基本的状态参量。例如 ,在研究一个地区的经济时 ,总值和各种人均值很多 ,应特别重视能源和信息的“消费”。

2) 静态描述 :状态分为静态和动态。静态描述之所以必要 ,是因为人们研究问题时总是需要对研究对象进行“定格” ,从某一时刻的状态中对它进行仔细分析 ,这就像在研究生物体时要进行解剖和切片一样。作为一种方法 ,“静止地 ,孤立地”看问题是必要的 ,否则就难以将它和其他时刻、其他事物区分开来 ,但这并不等于就是“形而上学”。形而上学之所以不对 ,在于它错误地认为客观事物本来就是静止地、孤立地“存在”着。

静止状态 ,也就是某一特定时刻的状态。这一“时刻”如何选取 ,取决于对象本身 ,也取决于所要研究的问题。在考察一个企业的经营状况时 ,人们感兴趣的是它的月平均销售额 ,年度总利润 ,而对它某一天的盈利或亏损并不在意。在考察一个人或一个国家的政治态度时 ,则往往要看其在某些“关键”时刻的表现。

对于一个复杂的社会系统 ,某一段时间内的平均功能状态是重要的。这种功能状态总是可以从它的“输入”与“输出”两个方面及其比例中看出。特别是在市场经济中 ,系统的功能主要体现在商品的交换上。你能对外界提供哪些商品 ,外界需要你哪些商品 ,你又需要从外界购进哪些商品 ,外界能为你提供哪些商品 ,这是至关重要的。

3) 动态描述 :动态描述是相对静止描述而言的。这里主要考虑状态对时间的变化 ,即不同时刻的状态差。它包括 :一是随时间变化出现了多少差值 ;二是差值对时间的比值 ;三是从什么状态变到什么状态 ,即差值、速率和方向。可见 ,任何动态参量都是一个矢量。这里特别要注意的是变化的起点(初始状态)、终点(目标状态)以及变化的周围环境(边界条件)。一个发达国家和一个发展中国家的差异往往在于起点不同(而且当一个系统从某个起点出发后 ,它往往不允许另一个系统从同一个地

方开始发展)。

11.2.2 结构分析

(1) 组分分析

也称为元素(要素)分析或部件分析。一个系统要发挥其正常功能,必须包括一组“缺一不可”的基本组成部分。所以组分分析要分析以下问题:

1) 基本要素是否齐全:什么是基本要素,只讲“缺一不可”还不行,还要加上“至关重要”。因为只要是一个有机的整体,所有的元素或部件都是“缺一不可”的,否则它就是一个残缺不全的系统。但并不是每一个元素都在系统中起同等重要的作用。实际上,任何一个复杂的经济系统都会有这样或那样的缺陷。“金无足赤,人无完人”就是这个道理。小的缺陷无关大局,关键是重要的元素才是必不可少的。

不同系统的基本要素也各不相同。但作为具有“生命力”的社会经济系统至少需要包含下列基本元素:①对整体起调控作用的“核心”元素(如人的大脑、神经,政府的首脑机关);②起支撑作用的“骨干”或“基础”元素;③与外界联系和分割系统内外的“边界”元素;④起内部联络作用的“关键”元素;⑤起再生和繁殖作用的“自复制”元素;⑥起推动作用的“动力”元素。

2) 基本功能是否发挥:上述六种元素缺一不可,否则就会影响系统功能的正常发挥。但是并不是说这六种元素必须具有“独立”的实体。在许多具体系统中“兼职”是允许的,关键是这六方面的基本功能必须要有相应的元素来承担。如果你仔细观察一个搞得不好的企业或地区、社会,会发现往往就是缺少了这些元素,要不就是“形同虚设”,导致这六方面的功能发挥不好。

3) 分工是否明确:即使基本要素齐全,各自的功能发挥也正常,可能还是存在问题。这是因为它们是处在一个有机的整体之中,分工和整体的配合尤为重要。如果没有明确的分工和良好的配合,就可能出现下列情况:要么一样工作大家都去做,都来管,政出多门,使人无所适从,结果反而事情作不好,谁也负不了责;要么出现“空档”,一件事你以为我会做,我以为你会做,结

果谁也没去做。

(2) 关联分析

结构分析是从系统内部来分析各元素和要素间的相互关系以及元素间的整体配合。

系统内部各元素间总是存在各种各样的联系,其中有些联系是必要的,这种必要性主要体现在对于系统整体功能的发挥上。例如,任何实物元素之间总是存在万有引力的作用,但这种力学联系并不是所有系统研究中要加以考察的。为了区别一般的联系和必要的联系,把后者称为“关联”。对系统进行结构分析,实际上是对“关联”进行分析,这种分析包括关联数量、关联性质、关联强度、关联构型。下面分别加以讨论。

1) 关联数:元素间的关联是否建立,对系统整体功能的发挥意义重大。一种常见的情况是缺少某种关联,例如,领导和群众的联系,消费者与生产者的联系,计划法律的制定者与实施者、执行者的联系等。

另一种情况是关联不全。出现这种情况是因为通常的关联总是双向的、成对发生的,是一种相互作用。所谓关联不全就是把原来应该是双向的联系变成了单方面的作用。比如,只有领导的发号施令,没有群众的积极响应,事情就办不好。

2) 关联度:建立了关联还需要达到一定强度,关联强度往往可以用相互间物质、能量、信息的交流数量来加以刻画。人们常说要加强联系,指的就是强度问题,要把握关联的“度”不是件容易的事。关系淡漠,起不到应起的作用;关系过密,也未必是好事。人与人之间,国与国之间“君子之交淡如水”才是适度的。

所谓“度”是指不发生“质变”。因为任何关联对系统结构的保持和功能的发挥都会起到相应的作用。过少、过多都可能改变作用的性质。性质发生变化的关联就不是原来那种关联了。人们常常用“亲密无间”来形容关系的密切,实际上总是要亲密“有间”,没有界限,也就“合二为一”,变成了同一个东西,性质就变了。20世纪50~60年代,国际上搞“社会主义大家庭”,国内刮“共产风”,都是太“亲密无间”了,结果大家不愿意,反而导致“四分无裂”。这就

是过度的为害。现在的市场经济中情况也是如此,地区与地区之间,地区与中央之间的关联也需要有个“度”。

3) 关联性:关联的性质如何,对系统的整体而言具有重大意义。前面讲“度”,关键是保持关联的性质不变。元素的关联究竟应该具有什么样的性质,一方面取决于元素自身的性质,另一方面取决于系统对它的需求。性质的种类多种多样,但从相互作用的数理性质来看只有两类,一类是线性相互作用,另一类是非线性的相互作用。一般在系统内部起关键作用的是元素间的非线性相互作用。对非线性相互作用的研究,包含着极其丰富的内容,因此产生了一门新兴的学科——非线性科学。

从社会经济系统来看关联性的种类更多。人与人、地区与地区、集团与集团之间可以有金钱关系、感情关系、政治关系、业务关系、工作关系、亲缘关系等。这些关系往往是客观存在,是很难说哪些是必要的,哪些是不必要的。但不同种类的关联在系统中起什么作用则可以搞清,也必须搞清,因为它将告诉人们哪些关系要发展,哪些关系要避免,以及应该控制在什么范围之内。

(3) 构型分析

上面的关联分析还仅仅局限在一个元素与另一个元素的对偶关系之中。对于整个系统来说,它还只是结构的基础。结构的核心层次是关联的整体布局和内部构型。

内部构型一般可分为星型结构、环型结构、网状结构、嵌套结构。每一种结构都具有不同的特征。例如,在星型结构中存在中心点,“纲”、“目”等;而在环型结构中却没有中心,也不存在纲与目;在嵌套结构中可以分为许多个层次;在网状结构中有平面网的片状结构,立体网的多种立方结构等。由于这些内部结构的不同,使得系统整体的性质也有很大的区别。限于篇幅,这里不作详细讨论。对于系统诊断来说,人们关心的是布局是否合理?搭配是否恰当?关系是否和谐?要记住的是,这里讨论的布局问题已经不再是元素间的关系,而是它们关系的的关系,即上一层次的关系和全局的关系网络。大家熟悉的石墨和金刚石都是由碳原子构成的,但因为一个是片状构型,一个是立方体构型,它们对外的性质

相差极大。一个经济实体也是一样,从控制角度看,有集中控制、分散控制和多级递阶控制,它们分别适应于不同的经济系统。

11.2.3 进程分析

上面讨论的组分、关联、结构基本上都是从相对静止的角度来研究的。从动态角度看,还可以分为两个方面:一是前面提到的动态描述,二是动力学(因果)分析。系统的发展变化可以看作是可逆运动。对一个复杂系统而言,更重要的是它的不可逆运动,即系统的演化。系统演化的内容很多,这里不作详细讨论。为了说明系统的行为特征,只研究以下几个问题:系统处在哪个发展阶段,系统发展的方向和态势如何,系统演化的路线是怎样的。

(1) 系统演化的阶段:任何系统的“寿命”都是有限的,在系统的“一生”中都要经历创生、发展和消亡三个阶段。不同阶段的系统会有不同的表现和需求,而相同的表现和需求(数据)在不同的发展阶段有些是正常的,有些则是不正常的。所以在对系统进行诊断时,先要分辨它正处在哪一个发展阶段。

怎样确定一个系统目前所处的发展阶段呢?单纯从现象和计算时间是难以作出准确判断的。因为不同的系统有不同的“生命周期”,一年的时间对人来说是已足够长了,但对地球来说是微不足道的,而对某种昆虫来说恐怕就是它的一生。判断一个系统所处的发展阶段的基本方法:一是和同类的系统进行比较;二是根据系统发展的一般规律和在不同阶段的共同表现。这些在《复杂系统演化论》一书中有较全面的论述。在对系统进行诊断时,可以将上述两种方法结合起来,再参照系统发展的历史资料,通常是能作出准确判断的。

对于复杂的社会经济系统,要搞清发展阶段远比一般的系统困难。因为复杂的社会经济系统总是包含诸多方面,每个方面又往往构成一些相对独立的系统,每个系统都有自己的发展阶段。这样,许多处在不同发展阶段的系统交织在一起,就很难分辨该社会经济系统所处的阶段。正如一个人的身体发育与智能发育往往并不同步,即使到了老年,他的心仍然可能是年轻的。

(2) 系统发展的方向:系统的运动可以朝着各种方向,这可以

通过系统参量的变化来描述。变化有可逆的和不可逆的,不可逆的运动就称为演化。系统的发展方向主要是指它的演化方向。

在确定了演化路线后,演化的方向只可能有“进”和“退”。至于把哪个方向确定为进(退),这完全是相对的,主要是根据研究的问题和通常的习惯。例如,体重的增加对孩子来说可能是件好事,说他进步了,而对中年人来说,则可能是件坏事,它意味着身体状态的退步。

(3) 系统经历的路径:系统沿什么路线演化往往决定系统演化的效率,这在具有竞争性的场合有着重大意义,如市场竞争。考察系统演化路线是相对多个系统的多种演化路线而言。整个演化路线又可以划分为多个阶段来进行。

从工程意义上讲,演化路线直接与所选取的方案有关,因此,选择路线也就是选择方案。

11.2.4 动力分析

一个系统发展了,前进了,它的动力从何而来?这是系统演化研究所要回答的一个重要问题。在牛顿力学体系中,系统前进的动力总是来自系统之外,是外力推动了事物的前进。但是,在系统理论中,系统前进的主要动力来自系统的内部。比如一个国家,一个社会,在一个相当长的历史时期中,它的外部自然环境是不太会发生巨大变化的,而社会的形态,国家的经济和政治状态,都有可能发生巨大的变化。对社会经济系统进行诊断总是需要从社会经济系统内部找出其发展的动力。

(1) 动力来源:从理论上讲,“非平衡是有序之源”,非平衡就是有差距,有差距才能有力量。人与人在经济生活待遇上的差异能激发改变社会的力量。比如,在原始社会内部,即使酋长们的“绝对生活水平”远低于现代的普通人,但总是感到很满足,不太会有改变社会、争取经济进步的推动力。但是,一旦他们了解了在世界的其他地方还有比他们好得多的地方,他们再也难以安于现状了。所以,要推动社会的发展,首先是生活在其中的人要对现实强烈不满,要不安于现状,找到与理想境界的差距。

(2) 阻力何在:有动力就会有阻力,简单地看,动力与阻力只是

方向相反,但实际上它们各自都是由许多因素所构成的。对于复杂的问题,阻力和动力往往可以在一定条件下发生转化,所以应该动态地看待这个问题。

11.2.5 确诊与对策

通过以上分析,可以确定阻碍演化朝人们希望方向发展的症状,即问题主要表现在哪里?故障在哪里?

所谓故障,就是指某种功能的丧失。对故障进行诊断先要对系统进行测量,然后对测量结果进行分析,找出原因,提出相应的策略,将故障加以排除,这就是系统故障诊断的基本过程。

故障诊断是一件十分复杂、困难的工作。其原因在于:①社会经济系统往往具有多方面的功能,要判定功能是否正常,运行是否正常,并不容易;②正确选取衡量社会经济系统的参数比较困难,对这些参数进行测量更加困难;③有很多社会的假象会引起人们的错误判断;④由于社会经济系统由人和人的集团组成,人可以对未来进行一定程度的预测,并且根据预测的结果调整自己的行为,所以故障的出现会受到人的这种预测行为的影响。

故障通常可以分为:软故障,指系统参数偏离正常值,超出元素许可的范围;硬故障,指故障元素的参数突然发生大的变化;单故障,指单个元素的故障;多故障;独立故障;从属故障;永久故障;间歇故障;偶然故障等。

一个理想的故障诊断方法应具有如下功能:适应性广,功能强,在线计算量小,所需的测试点少,具有较强的容错能力和鲁棒性,采用标准系统模型,满足其他要求,如并行性等。

故障诊断理论是故障诊断方法的基础,故障诊断方法的选择涉及到故障特性的表征,被测系统的描述与建模及测量的方法。

测定故障特征与正常状态的表征,方法有:设计决定法(由设计师定);软件模拟法:由系统的数学模型导出故障特征,优点是准确,适用范围广,缺点是数学模型难建立,计算量大;硬件模拟法:在正常工作条件下测出系统的故障特征,其优点是代价小,但缺乏通用性,不能提供更多的容错性。

故障诊断方法可分为故障分析法和故障字典法。

(1) 现象 :①功能不全 ;②运转不正常 ;③进展缓慢 ,停滞不前 ,倒退 ;④不适应环境。

(2) 实质 :①不正常 ;②不合适 ,方法不对 ;③不应该。

(3) 根源 :①部件不全 ;②内部关系不协调 ;③缺乏统一领导 ,内部调节不好 ,方法不对 ,不合适 ,不应该 ;④没有激励机制 ,缺乏控制手段和控制能力 ;⑤外部支持不够 ;⑥不能满足环境需求。

经过以上故障分析和诊断 ,可以对系统的问题进行确诊 ,然后寻找解决问题的对策。下面是一些人们常用的对策。

(1) 元素增补 :①补足所缺元素 ;②发挥部件的正常功能 ,调动元素积极性 ;③减少不必要的环节。

(2) 关系调整 :①明确相互关系 ;②改善相互关系 ;③合理分配 ,统筹安排 ;④调整结构。

(3) 对外调整 :①尽力满足外界需要 ;②找到所需资源 ;③借用外部力量 ;④改善自我形象。

(4) 改变行为 :①改变行为方式 ;②改变行动路线 ;③抓住有利时机。

11.3 系统工程方法

广义地说 ,刻画物质运行规律的理论叫物理学 ,刻画事情运行规律的理论叫事理学。比较而言 ,事理比物理更为复杂 ,因为物理学主要关心事物的存在状态和运行规律 ,并不关心目的性的问题 ,而事理学的出发点就是干事情的目的 ,是按一定的客观规律办事。做一件事就是做一系列工作 ,就是干一项工程 ,只不过事情有大有小 ,工作有多有少 ,工程就是服务于某个目的的各种工作构成的总体。一项工程总会涉及物质与能量、精神与思想等方面 ,可以分别称为工程的硬件和软件。在现代工程中 ,人的工作主要不是花力气而是动脑筋 ,解决五个 W 方面的问题 ,即干什么 (What) ,怎么干 (How) ,何时干 (When) ,何地干 (Where) ,谁来干 (Who)。用科学的话来说叫作组织和管理。干一件小事涉及面小 ,一个人动动脑筋就行了 ;干一桩大事 ,一件复杂的事 ,如一项建设工程 ,一项大型水利工程 ,一项复杂的社会系统工程 (教育 ,

社会治安、军事等),就不是一个人或几个人拍脑袋所能解决的,这时系统科学的观点和理论就可以体现和发挥其优越性与独到之处了。但是,无论观点如何高超,理论如何完美,都只能起到启迪和指导的作用,具体问题需要用工程的方法才能加以解决,本节就讨论系统工程的方法。

11.3.1 人造系统的建构

(1) 系统工程的由来:从系统科学的体系来讲,系统工程属系统科学的第四个层次,即工程技术层次。它的主要特点是为解决复杂的系统组建与重构提供了一整套工作程序和逻辑思路,并对与此相关的资源配备,特别是知识与智能资源的配备提出了一种安排。但是从学科发展的历史来看,它却几乎与一般系统论同时在20世纪40年代首先在美国产生。下面是系统工程发展历史上几件值得一提的事情,从中可以看出一些系统工程的特点和发展轨迹。

20世纪40年代,美国贝尔电话公司为筹建全国无线电微波通信系统时,首先提出了系统的概念。

1949年,美国道格拉斯飞机公司为向空军提出“洲际战争”的技术设备建议,搞了一个“研究与开发”计划部(research and development),随后该部独立成为著名的兰德(RAND)公司。

1957年,美国 H. Goode 和 R. Machol 合著了第一本《系统工程》的专著。

20世纪60年代美国电工电子工程学会(IEEE)设立系统工程学科委员会,1965年出版《系统工程手册》。

1969年,美国工程师霍尔提出一个三维模型,用形象的方法描述了系统工程中的三个主要方面及其相互关系,后被称为“霍尔三维模型”,并被人们作为系统工程方法论的代表而广泛使用。随后,日本学者对其中的行动步骤方面作了进一步具体化,也提出了如“行动步骤模型”等类似方法。

20世纪70年代前后逐渐推广到欧洲及日本等国。我国学者钱学森等人也很早看出了系统工程对解决复杂的社会经济问题具有重大意义,从70年代起,在中国大力推广,不仅在国内外学术界

产生了巨大影响,而且在理论和实践两个方面都作出了中国学者的独特贡献。

然而,由于种种原因,人们对系统工程的作用和意义一直存在不同看法,许多人大力肯定,积极推动,但也有人却心存疑虑,甚至否定,认为系统工程并没有实际价值。产生这些不同看法的主要原因是,对系统工程的特点和作用并不了解。当然,一时间过热和夸大的宣传也造成了对系统工程的负面影响,使人们产生了一种错觉,以为单靠系统工程就能解决复杂的社会难题,以致要求它完成一些并不是它能单独完成的任务。那么,应该怎样界定系统工程并准确把握和运用系统工程呢?先从搞清系统工程的定义开始。

(2) 系统工程的定义:其实,和系统的定义一样,关于系统工程的定义很多,但基本意思都大同小异,这里只引用钱学森的说法,“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法”,是“按系统科学的思想方法,用计算机为工具对复杂的人造系统的规划、研究、分析、设计、制造、试验和使用进行组织管理的工程技术”。

从以上定义可以看出,系统工程的核心是为处理复杂事务,达到某个特定的目标提供一整套工作程序、逻辑思路、行为规范、组织方法和决策原则。它属于软科学的范畴,在某种意义上也许可以将它形象地比作人的聪明才智,龙身上的眼睛,菜中的盐和味精。尽管它不能单独完成某项工程,但对所有复杂的工程都具有很强的指导作用。

作为一种方法论,系统工程的软方法可以和各种硬工程结合起来,成为不同的专业系统工程,如人们常常提到的系统工程有:工程系统工程、教育系统工程、科研系统工程、社会系统工程、企业系统工程、军事系统工程、经济系统工程、农业系统工程、环境系统工程、法制系统工程、信息系统工程、计量系统工程等。

(3) 霍尔三维模型:系统工程有一套完整的工程程序和思维逻辑,这些都能在前面提到的“霍尔三维模型”中体现出来。

1969年,美国工程师霍尔用一个三维结构来表示系统工程中时间顺序、逻辑步骤和知识结构间的关系。如果只考虑时间与逻

辑之间的关系,就可以看成是一种“管理矩阵”,矩阵中的每个单元对应了管理活动中特定的时间阶段和逻辑步骤。

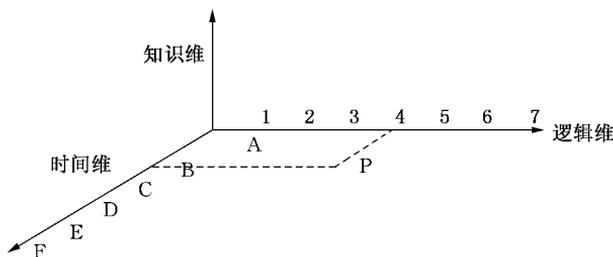


图 11-1 霍尔三维模型

下面主要利用霍尔的观点来阐述系统工程的时间顺序和逻辑步骤。至于知识维的问题,在霍尔三维模型中其实并没有很好展开,它只是要求在系统工程中考虑管理所需的各种知识,并按重要程度作一个排序。

11.3.2 系统的生命周期

一般一项工程在时间顺序上可以划分为以下阶段:①规划阶段;②方案形成阶段;③研制阶段;④生产阶段;⑤运行阶段;⑥更新阶段。

如果再“粗”一点,可以大体分为系统开发、系统制造和系统运行三个大的阶段,也称系统工程的“粗结构”。

(1) 系统开发:系统开发的目的是根据“客户”需要解决的问题,对整个工程进行规划、设计和研制,产生出能够解决问题或达到目的的整体构想和设计方案。

在系统规划阶段要做的工作是:

1) 对系统的情况和客户的需求进行全面调研,首先要收集大量资料、信息,然后对它们进行分类处理,明确本工程项目所要解决的具体问题和目标。

2) 明确研究的目标,需要指出的是,这里的研究是指设计阶段所要进行的研究,而不是直接指工程所要解决的目标。

3) 在以上研究的基础上确定本工程项目的规模、方针、原则、

政策等。

4) 提出系统的设计思想和若干初步方案或候选方案。

5) 根据系统所处环境和承担人的具体条件,对其进行社会、经济、技术上的可行性研究。

6) 对各候选方案的条件、成本、效益等进行定量分析,必要时,还需建立相应的数学模型,进行模拟。

7) 在以上工作的基础上进行比较,选择一个最优或最理想的可行方案。

8) 对选定的方案及候补方案进行具体设计,包括任务分解、部件设计及整体设计等。

总之,系统开发是工程规划、构思、设计的阶段,特点是进行“务虚”,它对后面的实际行动的成败起着决定性的作用。

(2) 系统建构:系统建构的目的就是根据上面的设计制造出一个能达到既定目的的具体系统,它包括时间维的研制与产生阶段。具体工作是:

1) 按前面的设计对系统的部件进行试制和测试,提出部件生产的计划。

2) 生产部件。

3) 对系统进行整合及进行总装,使之成为一个有机整体。

4) 对整体进行试验和测试,在确定真正能符合工程设计要求之后才能投入使用。

5) 通常,作为一个具体的工程项目,在系统制造完成之后,就可交付使用,这里包括工程鉴定与验收。

(3) 系统运行:系统运行阶段广义地说就是系统的使用阶段。它包括系统的试运行、运行和系统维护、更新三个阶段。在这个阶段应随时观察和记录运行情况,及时发现运行中的问题,听取客户对系统的意见、建议,对系统进行维护和改进。

应该指出的是,许多人常常把上面的通过鉴定、验收完毕作为工程的结束,这是不对的。因为那只是工程“承包人”的工作告一段落,而系统工程的最终目的是解决“客户”所提出的问题和要求,并且为工程的进一步扩展提供基础。所以,系统工程只有达到了客户满意,

才能算真正结束,即完成一个具体的系统工程生命周期。

11.3.3 系统工程的逻辑

根据霍尔三维模型,对于一项工程从逻辑上讲可以分为以下几步:①明确问题;②目标确定;③系统综合;④系统分析;⑤方案优化;⑥做出决策;⑦付诸实施。

(1) 问题给定:开展一项工程就是要解决一个或一些相互关联的问题,所以第一步要给定问题,即“摆明问题”,弄清问题的实质和要害。对于复杂的实际问题,它的实质和要害往往并不是明摆着的,需要进行深入的研究和探讨。例如,有一家生产手表的工厂,需要解决女式表的销售问题,开始以为可以通过降低价格来进行促销,结果不好,后来又希望通过提高走时的准确性来扩大销售量,结果仍然不行,最后通过对市场进行分析,发觉销售不好的原因在于式样陈旧,于是改进了式样,手表的销量增加了很多。这个例子说明,要在深入分析的基础上把问题提得准确,切中要害,而不能泛泛而论。

问题给定,就是要明确提出问题和准确表达问题。问题有两类:一类与不确定性有关,比如情况不明时不能确定究竟选择哪个方案为好;另一类与实现差距有关,明确问题就是要明确系统的现状状态和目标状态之间的具体差距。准确地表达问题,就是要抓住问题的实质、要害和关键。其要求是:

1) 收集和掌握有关的信息、数据和资料,包括历史的、现状的、反映系统发展规律和动态的以及环境的资料和数据。

2) 明确用户的需求,这个用户可以是提供经费的客户,也可以是自己。明确需求就是要搞清需求的具体数量和质量,要有一个确切的指标体系来刻画这些需求,同时明确需求往往有一个过程,这就是对问题层层分析的过程,这样才能找到需求的根源,一步步接近问题的实质和要害,抓住问题的关键。

3) 把问题用某种简明的方式,如语言、文字、图表等明确地表达出来,明确表达不能被看作是一个简单的过程,它是建筑在深入分析了解实质和关键的基础之上的,讲不清楚的问题往往是因为没有想清楚。反过来,表达问题的过程中也使原来在头脑中思考

的问题变得更加明确化和条理化。

(2) 目标确定 :给定问题并不等于确定了目标。因为与该问题相联系的可以有多个目标。比如,现在的生产效率太低,不能满足经济发展的需要,但笼统地说要提高生产效率是不能作为一个系统工程的目标的,必须明确究竟在多长时间提高多少。再具体一点,比如工厂计划开发新产品,生产大屏幕电视机,这样的目标就不明确。对于一个具体的系统工程来说,必须明确与此相关的技术指标,是74厘米(29英寸)还是86厘米(34英寸),是超平面的还是纯平面的等。

从一定意义上说,确定目标就是要明确一个系统工程工作的具体方向和目的。从研究的角度看,它已经不是一个一般意义上的问题,而是一个可以在规定期限内,在特定的环境与约束条件下能够完成的“课题”。

具体来说,要明确目标需要做以下工作:①总目标的提出与论证,以及定量表达;②目标体系的建立(分目标的确定,分目标与总目标间的关系,分目标之间的关系);③目标可行性分析:包括理论可行性,实际可行性,具体可行性。

(3) 系统综合——收集和提出各种能达到目标的方案:系统综合的过程就是综合各种资源和有利条件,构造出种种能够实现目标的方案,即“出主意,提办法,想点子”的过程。点子要好,办法要妙,就特别需要具有发散性思维,不仅设想出常规的办法,而且能提出超常规的办法,做到出奇制胜。在系统工程和决策领域,人们经常谈到“头脑风暴法”,实质上就是让大家一起想办法。为了广开言路,头脑风暴法还特地规定对别人提出的方案“暂时”只容许支持和补充,不许否定和批评。因为一个主意在开始提出时总是不那么完善,容易被否定掉,所以需要先保护一段时间,等它成长后再作严格评比和筛选。

系统综合阶段可以提出各种各样的方案,但所有的方案都是可行性的。因为不可行的方案是没有意义的(当然,有时一个方案不可行,而综合几个方案也许就可行了,这就特别需要“综合”)。

为了检验方案的可行性,就要对其进行“方案可行性分析”。现

在可行性分析已经成了一种专门的技术,并有许多理论支撑,这里不作详细讨论。需要指出的是,可行性研究包含三个层次,即:

1) 理论上的可行性:即要求所提的方案不能违背客观规律。例如,违背能量守恒定律的方案,即使设计再巧妙也不行。

2) 技术上的可行性:理论上可行的东西往往并不一定能够实现,因为任何一个方案都要受到各种各样的环境、资源、技术条件等方面的限制。例如,有些问题在理论或原则上证明是可行的,但实际上需要太多的资源和时间,对于特定的工程来说就行不通。这种方案当然应该放弃。

3) 个人的可行性:这里的个人是指具体的工程项目“承办人”,不同的承办人都有自己的长处和短处,很多情况下对别人能行的,对该承办人也许就是不行。当然,也会有相反的情况,别人不行的对某人就行,那是再好不过了。

(4) 系统分析:系统工程中的系统分析阶段与一般的系统分析不同,具体是指对上述各种可行方案的系统分析。其目的在于通过分析,分清各方案的具体情况,然后对这些方案进行比较或者进行综合成新的方案。

关于系统分析的内容前面已作了讨论,主要包括:①元素与要素分析;②关联分析;③构型分析与反馈机制(反馈回路,回路间的关系,主回路);④层次划分(整体,子系统,单元,个体)。

系统分析是一件十分复杂的工作,为了全面认识不同方案的特点,仅有定性分析是不够的,各个方案间的比较总是需要有确切的数据作为基础,所以往往需要建立相应的模型,应用仿真技术进行模拟和定量分析。这正是现代系统工程与传统分析方法最大的不同点。

系统分析的对象是各种具体方案,而每一个方案本身又构成一个系统,因此,对每个方案都要确定其行为模式,并进行系统建模与仿真。这一过程包括:①变量选择(状态变量、控制参量、边界条件、初始状态)与赋值状态向量、速率向量、辅助向量、转移矩阵、关系矩阵的确定;②方程(模型)的建立;③模型参数估计。

通常把方程或模型类型的选择变成“模式”选择,而把变量和

参量的估计和确定称为模型建立,简称建模,即确定方程中各种变量、参量间的具体的、定量的关系。

(5) 方案的优化:从理论上对各种方案进行系统分析之后,就可对已有的可行方案按一定指标进行排队,从中选出最优的。但是,实际情况远比这复杂。其中一个重要原因是一个系统工程往往是多目标的,还必须根据情况协调各种目标,使之达到整体最优。

(6) 做出决策:做出决定与最优化有何不同,简单地说,前者是“司令”的事,后者是“参谋”的事。司令考虑与参谋的不同是因为做出决策不单纯是一个排队选优的过程,因为很多情况下并不存在“最优解”,这往往要将最优化转化为“满意度”研究。不去盲目追求最优方案,而是积极求得最满意方案,包括客户和承包人自己的满意。

(7) 实施:要让实施达到预期效果,进一步达到“客户满意”,要做以下工作:①实施已经决定的方案(计划);②对运行进行监察,及时发现问题;③进行调整;④最后进行总结。

11.4 控制系统的方法

11.4.1 反馈方法

(1) 反馈控制四要素

1) 反馈相位:反馈分为两大类,即正反馈和负反馈。当反馈信号的相位与输入信号的相位相同时为正反馈,反之称为负反馈。正反馈起着加强输入的作用,负反馈起着抵消或减少输入的作用。但是,从更一般的角度来看,上述两类仅仅是反馈相位为 0 和 180 度的特殊情况。此外,反馈信号与输入信号相位间的夹角可以为从 $0\sim 360$ 度,而只有需要进行“投影”时才化为正、负反馈来处理。

2) 反馈量(反馈变量):这里把回输到输入端的反馈作用用反馈信号来表示,显然,反馈信号存在种类、性质和强度问题。反馈量不是单指系统输出中回输到输入端的那一部分,而且包括了反馈回路对它处理的结果。在许多工程问题中对反馈信号种类、性质和强度的选择往往是十分关键的。无论过强或者过弱,都不能达到反馈控制的作用,而反馈信号实际上是反馈回路对部分输出

进行处理的结果。

3) 反馈的滞后:从时间的角度看,无论怎样快速的反馈都是有滞后的,即所谓“马后炮”。因为从输入到输出需要时间,从输出到反馈回来也需要时间,反馈滞后的总时间为两者之和。考虑反馈滞后时间的目的主要是因为在在这段时间内反馈信号会发生相应的变化,如相位、强度、性质的变化等,因此,反馈滞后时间的掌握和控制往往十分重要。

4) 反馈中的畸变:由于反馈信号是经过反馈回路处理后的结果,发生一定的变化是必要的。所谓畸变仅仅是指当输入端需要“如实地了解”输出端的情况时所发生的信号失真。例如,监督部门不能如实地向领导部门反映政策执行的后果。

尽管反馈是元素相互作用最简单的形式,但也是最基本的形式,所有两元素耦合的问题都可以在反馈基础上进行分析。作为一个实例,让我们看一看两个社会系统耦合后所出现的种种情况,有人把它们称为社会控制论中的反馈原理。

(2) 社会控制反馈定理

如图 11-2,设 x 和 y 两个系统进行耦合,组成一个对偶系统, x 与 y 互为反馈回路,其中 x_1, y_1 分别是系统 x 和系统 y 的输入, x_2, y_2 分别是输出。

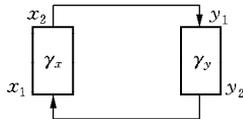


图 11-2 反馈系统

又设每个系统都有自己的“反应率” γ ,为简单起见,只考虑 γ 为输出与输入的比值

$$\gamma = \frac{\text{输出}}{\text{输入}}$$

x 和 y 的反应率分别由 γ_x 和 γ_y 表示。

把 $k = \gamma_x \cdot \gamma_y$ 称为对偶系统的行为,它由 γ_x 和 γ_y 共同决定。

根据耦合的假定,显然 $x_2 = y_1$; $y_2 = x_1$ 下面是几条关于对偶模型的定理。

$$\text{定理 1} \quad \gamma_y = \frac{y_1}{x_1} \quad \gamma_x = \frac{x_2}{y_1} \quad \gamma_y = \frac{y_2}{x_2}$$

$$\text{由此} \quad y_1 = \gamma_y x_1$$

$$x_2 = \gamma_x y_1$$

$$y_2 = \gamma_y x_2$$

这说明任何系统的动作是由该系统的反应率和另一系统的前一动作决定,所以要注意这两个方面,不能单方面指责另一方。如学生学习不好,不能单怪先生教得不好,也要考虑自己的反应能力和接受能力。

定理 2 $x_2 = \gamma_x \gamma_y x_1$

$$y_2 = \gamma_y \gamma_x y_1$$

各系统的动作依赖于该系统先前的动作, y_2 依赖于 y_1 。如战争的初因是自己的行动激怒了对方,所以要注意自己的初始行为。

定理 3 $\frac{x_2}{x_1} = \gamma_x \gamma_y = \frac{y_2}{y_1} = \gamma_x \gamma_y$

$\gamma_x \gamma_y$ 称为总系统(耦合系统)的行为。

对偶系统的行为由两个子系统的反应率方程所决定,如家庭的面貌,国家的关系都是与成员的反应率共同决定。

定理 4 $\frac{x_2}{x_1} = \frac{y_2}{y_1}$

两系统的行为是一致的(即使 $\gamma_x = \gamma_y$ 也是如此),即耦合中的两系统,一方的行为总与另一方的行为相适应,不存在协调与不协调的问题。

定理 5 $\frac{x_2}{x_1} = k \gamma_x = \frac{\gamma_y}{k}$

$$\frac{y_2}{y_1} = k \gamma_x = \frac{\gamma_y}{k}$$

如要保持对偶系统总的行为不变,当一系统的反应率变化时,另一系统的反应率也要发生相应的变化,它们的数值成反比。例如,要保持某种关系,一方的热情冷却下来,另一方的热情就要提高,但由于维持关系要花的能量有限,一方可以冷淡到零,另一方却不能无限热情,这时关系只好破裂。

定理 6 $\gamma_y = 1$ 则 $x_2 = \gamma_x x_1$, 为自耦合。

这样有趣的定理还可以推出很多,人们可以从中体会对偶模型的特点。

11.4.2 黑箱方法与功能模拟方法

控制论产生以后,一种与分析解剖方法完全不同的方法类型引起了人们的重视,即黑箱方法和功能模拟方法。

简单地说,黑箱方法就是把系统当成一个不能打开或不必要打开的黑箱来看待,即不考虑或不关心系统内部的组成成分和结构形式,仅仅从系统的输入与输出间的关系中考察并发现系统运用的规律,然后利用模拟或类比的方式来实现某种目的。

黑箱方法看似简单,实际上可以适用于所有的系统,对于内部结构复杂并且不能打开来进行研究的系统,更有不可替代的功效,而这类系统在生命领域和社会领域都是广泛存在的。对于那些貌似简单其实也很复杂的系统,黑箱方法同样也很实用。控制论的创始人阿什比就曾举了一个自行车的例子,看上去它的结构一目了然,不是什么黑箱,但如果要问它究竟如何才能运动,就需要一定的力学知识,要进一步回答人与车之间如何相互作用,则需要更多的专门知识。而对于一般的使用者来说,只要骑自行车能走就行,并不需要关于它内部构造的知识。任何事物总有不为人知晓的方面,也就是结构未知的层面,都可以看成是一个黑箱。

认识黑箱的途径就是了解它输入与输出间的关系,具体的做法是与被研究的系统进行耦合,对它进行某种输入,然后观察相应的输出,通过建立输入—输出对的序列,找出它们间的转化关系,即控制论中的传递函数(标准表达式),进而推导其内部联系。

黑箱方法的成功运用使它得到了进一步推广,从而形成了三个与此有关的方法:

(1) 灰箱、白箱方法:所谓灰箱,指人们对其内部结构有一定的了解,但又不完全了解,因而可以将已经了解或认知的部分看成是“白色”元素,将未知的部分作为黑色元素,这样按一定比例混合起来就成了灰箱。而白箱则对应那种结构完全知道的系统。显然,灰箱方法是符合人们认识的实际情况的,因为在研究一个系统之前多少会对它有一定的了解。

(2) 功能模拟方法:功能模拟的目的是用不同内部结构的系统

在功能上进行互换,这是我们经常使用的一种方法,例如,用机器人替代人的某些工作。

(3) 模式识别或系统辨识:这种方法的目的是通过对系统输出与输入关系的类比来认识未知系统的功能属性和内部构造。例如,通过标准试题来测验不同学员或应试者的知识和能力。

11.4.3 系统模型与模型方法

模型方法是在定性、定量描述系统的基础上刻画和研究系统的最主要方法之一。系统模型与其他物理、数学模型有许多共同之处,但它的特点是要在系统建模时突出系统的特征。这里所强调的是系统模型的种类和特点。

首先,系统模型是模型而不是原型,模型是原型的某种替代物,一个原型身上有着许多不同方面的属性和特征,因而可以用许多不同的模型来刻画它的那些不同方面。而模型则要求集中地反映原型在某个方面的特征,这种特征不一定要是原型的主要的或本质的特征,而更多的时候它只是研究者所关心的方面,只要它能把这些特征集中地体现出来就行了。例如,系统模型就是如此。但是,反过来,由于模型体现了事物某个方面的共同特征,它也可以对应许多的原型。因此,它总有一定的“普适性”,人们可以通过对一种模型的研究来认识多个事物在某个共同方面的特性。

其次,系统模型是一类特殊模型,它既具有模型的一般属性,又要体现系统的特征。前面对系统的特征进行了详细的分析,对应系统整体性的四个基本方面,可以有四类系统模型,它们是:①系统的结构模型;②系统的性态模型;③系统的演化模型;④系统的价值模型。

用模型的研究来替代和深化对原型的研究已经成为现代科学的一个重要方法。在系统科学中,模型方法具有特殊重要的地位和作用,模型方法与模拟方法的出发点就是用—个模型去替代原型。它们必须具有以下关系:

(1) 相似性:模型与原型必须是相似的,根据相似的不同程度可以用“同态关系”和“同构关系”来描述。

(2) 代表性:模型必须代表和体现原型的主要特征,这些特征

可以表现在物理性质和构造上,也可以表现在运动规律的数学形式上,从而可以将模型分为物理模型和数学模型。后者常常是用一定的公式或关系式来表达。

(3) 简单性:模型必须是对原型一定程度的简化,而这种简化是相对于不同的问题来进行的,即模型可以根据问题性质的不同来保留原型的某些方面,忽略另一些方面。

系统的模型与其他模型不同,它根据系统科学所关心的主要方面对原型进行模拟。系统模型主要关心的是对象的整体性(全局,全过程)、结构特征、演化特征和价值特征。

现代科学的发展为对系统进行模型方法的研究提供了有力武器。现代系统科学之所以能取得目前这种引人注目的成果,一定程度上是与计算机技术的广泛应用分不开的。近年来,这方面最重要的进展之一是运用计算机技术构造一个“虚拟的对象”,并运用交互技术对它进行各种研究。

11.5 处理复杂社会问题的科学方法

11.5.1 综合集成法

20世纪80年代以来,在著名科学家钱学森的倡导下,思维科学的研究在我国引起广泛兴趣,并在不同程度上取得了成果。其中比较重要的成果是90年代提出的处理开放的复杂巨系统的方法,“从定性到定量的综合集成法”,以及从定性到定量的综合集成研讨体系,为组织管理提供了有效的方法。

对于钱学森综合集成法,它的提出者作了这样的描述:“人对实践经验的总结先在大脑中形成感性认识,那是点滴零碎的,然后再进一步分析综合,运用过去积累的知识,加工成理性认识。但这不过是一次认识的循环,还要把得到的理性认识运用于实践,开始第二个循环……,无穷无尽。这一构思与现代信息技术的成就结合起来,以人的智慧与计算机的高性能有机地结合起来,产生了综合集成法”。

这个方法体现了形象思维与逻辑思维的有机结合,从而产生创造性思维。专家群体的感受与经验是形象思维的结晶,而计算机则可以有效地模拟逻辑思维与实现各种算法,并利用科

学知识与各种信息,激发创造性,所以综合集成法是思维科学的一项应用技术。

从定性到定量的综合集成法充分发挥与体现了人机结合的思想,在综合集成的过程中,人始终起主导作用。另外,专家在错综复杂的情况下做出判断、提出的假设,以及专家的某些点子是专家经验积累而形成的知识,是人的“心智”的一种体现。可以认为,综合集成是人用计算机的软、硬件来综合专家群体的定性认识及大量专家系统提供的结论和各种数据、信息,经过加工处理,而上升为对总体的定量的认识。

用综合集成法解决开放复杂巨系统的问题,大致可分为以下步骤。

(1) 明确任务、目的。

(2) 尽可能多地请有关专家提出意见和建议。专家的意见是一种定性的认识,肯定不完全一样,此外,还要搜集大量有关的文献资料,认真了解情况。

(3) 通过上述两个步骤,有了定性的认识,在此基础上建立一个系统模型。在建立模型过程中,必须注意与实际调查数据相结合,统计数据有多少个就需要多少个参数。然后用计算机进行建模工作。

(4) 模型建立后,通过计算机运行得出结果。但结果可靠性如何,需要把专家请来,对结果反复进行检验、修改,直到专家认为满意,这个模型才算完成。

该方法综合了许多专家的意见和大量书本资料的内容,是专家群体的意见,把定性的、不全面的感性认识加以综合集成,达到定量的认识。

11.5.2 从定性到定量的综合集成研讨厅体系

开放的复杂巨系统的有关问题,不能用人们熟悉的“还原论”的方法解决,从定性到定量的综合集成法的提出,冲破了还原论思想的束缚。

1992年,“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的学术思想形成了。其构思是:把专家们和知识库信息系统、各种人工智能系

统、快速巨型计算机,像作战指挥演示厅那样组织起来,成为巨型人-机结合的智能系统,用语言和符号表达联接起来的知识体系(包括信息网络)来提高人的意识与思维,把逻辑、理性与非逻辑、非理性智能结合起来(专家们高明的经验判断代表了以实践为基础的非逻辑、非理性智能),把今天世界上成千上万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都结合起来。这样的“厅”是 21 世纪的民主集中制工作厅,是辩证思维的体现。

在工作厅中,核心还是人,即专家们。整个体系的成效有赖于人的精神状态,在处于高度激发状态下,才能使体系高效运转。研讨厅体系,体现了它的构思者在长期的科研实践过程中受益于“讨论班”(workshop)的心得与经验,以及越来越强大的当代计算机软、硬件环境。

研讨厅体系中的人并不是未加训练的普通人,而是具有高度创新意识、高度组织性纪律性、高度科学性的人;研讨厅体系中的“厅”也可有高低之分,随着技术的发展,可以是由计算机软硬件与现代化通信设备构成的、使人们共同讨论与解决问题时有身临其境的灵境技术(virtual reality,又译虚拟现实)环境。通过研讨厅体系,一方面,把以往只能体现出“个体”的经验知识上升为能体现出“群体”的经验知识;另一方面,用语言和符号来表达联接起来的知识体系,提高人的意识,并把意识提高到思维。

这些观点的形成并非仅仅来源于系统科学,还有比系统科学本身的发展更为重要的原因,那就是当代信息技术的发展。简言之,综合集成技术(“法”也就是“技术”)及研讨厅体系,是思维科学的一项应用技术。

宏观层次上的管理以及政治经济等领域的决策,由于涉及到人以及人的行为等因素,往往十分复杂。从系统及其发展的角度来观察,系统科学发展到今天,已经形成了开放的复杂巨系统的概念,而从部分与整体、局部与全局、微观与宏观的角度,去研究社会、经济等人为事物的社会经济系统,也是一类开放的复杂巨系统所要求解决的问题。人们可以根据不同的目的、途径以及不同的角度进行研究和探索。

参考文献

1. [美] Compbell. 非线性科学——从范例到实用(中译本). 中国科学院力学研究所主办, 1991. 21
2. Nonlinear Science. The Next Decade. North-Holland, 1991
3. 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论. 上海科技教育出版社, 1993
4. G. 尼科利斯, J. 普里高津. 非平衡系统的自组织. 科学出版社, 1986
5. 湛垦华, 沈小峰等. 普里高津与耗散结构理论. 陕西科学技术出版社, 1982
6. 颜泽贤, 陈忠等. 复杂系统演化论. 人民出版社, 1993
7. 吴祥兴, 陈忠等. 混沌学导论. 上海科学技术文献出版社, 1996
8. 陈忠. 人脑智能系统中的混沌与自组织. 科学技术与辩证法, 1997. 3
9. H. 哈肯. 高等协. 科学出版社, 1983
10. M. 沃尔德罗普. 复杂·科学·读书. 生活三联出版社, 1997
11. M. 盖尔曼. 夸克与美洲豹. 湖南科学技术出版社, 2002
12. T. Casti. Complexification. Harker collins, 1994
13. J. Holland. Hidden Order. Addison-Wesley, 1994
14. From Complexity to Perplexity. Scientific America, 1997
15. J. Casti and others ed. Boundaries and Barriers—on the limit to Scientific Knowledge. Addison-Wesley, 1996
16. J. H. Holland. Emergence From Chaos to Order, 1998
17. 赫伯特·A. 西蒙. 人工科学. 商务印书馆, 1987
18. 陈式刚. 映象与混沌. 国防工业出版社, 1992
19. Reichl L. E. A modern course in statistical physics. Austin: University of Texas, 1990

20. Chirikov B. V. A universal instability of many-dimensional oscillator systems. Phys. Reports ,1979. 52(5)
21. Lichtenberg A J and Lieberman M A. Regular and stochastic motion. New York : Springer-Verlag ,1983
22. D. G. Aronson et al. Commun. Math. Phys. 1982. 83
23. Wisdom J. The origin of the Kirkwood gaps : a mapping for a steroidal motion near the 3/1 commensurability ,Astron. J , 1982. 87(3)
24. BMS. Chaotic orbits and spins in the solar system. Phys. Today ,1985. 38(9)
25. Greene J. M A. Method for determining a stochastic transition ,J. Math. Phys , 1979. 20(6)
26. 刘曾荣. 混沌的微扰判据. 上海科技教育出版社 ,1994
27. 杨维明. 时空混沌和耦合映象格子. 上海科技教育出版社 ,1994
28. B. B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman and Company San Francisco , 1982
29. 陈忠. 混沌运动的哲学启示. 中国社会科学 ,1987
30. 李后强 ,汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用. 科学出版社 ,1993
31. 郝柏林. 分岔混沌. 奇怪吸引子. 湍流及其他. 物理学进展 ,1983
32. 陈忠. 系统自组织中的分形生长. 上海机械学院学报 ,1991
33. Kenneth Falconer ,Fractal Geometry—Mathematical Foundations and Application(中译本). 东北工学院出版社 ,1991
34. [比]I. 普利高津. 从存在到演化. 上海科学技术出版社 ,1986
35. 尼科利斯等. 探索复杂性. 四川教育出版社 ,1986
36. [德]H. 哈肯. 协同学讲座. 陕西科学技术出版社 ,1987
37. 郝柏林. 分岔混沌 ,奇怪吸引子 ,湍流及其他. 物理学进展(3) , 1983
38. 陈忠. 信息究竟是什么. 哲学研究 ,1984(11)
39. [美]L. 惠勒. 物理学和质朴学——没有定律的定律. 安徽科学技术出版社 ,1982

40. 钱学森. 关于思维科学. 上海人民出版社, 1986
41. [德] H. 哈肯. 协同学引论. 原子能出版社, 1984
42. [比] J. 普利高津. 从混沌到有序. 上海译文出版社, 1987
43. 朱水林. 哥德尔不完备性定理. 辽宁教育出版社, 1987
44. 乐秀成. GEB——一条永恒的金带. 四川人民出版社, 1983
45. J. H. Holland. Emergence From Chaos to Order, 1998
46. [美] 赫伯特·西蒙. 现代决策理论的基石(中译本). 北京经济学院出版社, 1989
47. [美] 赫伯特·西蒙. 管理行为. 北京经济学院出版社, 1988
48. 陈忠. 复杂系统自组织中的智能介入. 系统辩证学报, 1993, 1
49. 钱学森, 于景元等. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990

后 记

拙

作即将付印,笔者感慨尤多。首先,本书是作者多年学习研究系统科学的结晶,有关内容已在给大学,包括博士、硕士、本科以及 MBA 等学生讲授多年,现在,一旦出版即成过去,如卸重担的同时也留下了许多遗憾。例如,虽然本书名前冠有“现代”两字,虽然在成书的这些年中进行了不断补充和完善,但还发现有许多新的内容却未能包含进去,其中尤其值得提及的是没有将复杂网络研究的最新进展包含进去,而这些新的突破又必将揭开现代系统科学新的一章。其次,尽管本书在写作过程中不断补充新的内容和调整自己的观点,但现在看来书中还是有许多论述和观点需要深化和精炼,一些不甚准确的地方也有待进一步推敲,所以在一定意义上讲,本书只能算是一个“历史”的记录。最后,系统科学和其他真正的科学一样,其作用和力量不仅表现于它对真理的揭示,更在于它对实践的指导,这正是笔者所期待的。