

绪 论

江泽民总书记在中共十五大报告中曾经明确提出“要深化人事制度改革，引入竞争机制，完善公务员制度，建立一支高素质的专业化的国家行政管理干部队伍”其实江泽民同志的这些思想大约十年前就已经在国家行政部门得以贯彻并部署实施。早在 1994 年 6 月，国家人事部就颁发了《国家公务员录用暂行规定》，《国家公务员暂行条例》也早已开始试行。所有这些，都标志着我国公务员制度开始走上了正规化，法制化的轨道。公务员制度的全面建立，开阔了行政部门选拔人才的视野，给予了具有真才实学、立志为国家效力的有为青年平等竞争的机会。

按照我国《国家公务员录用暂行规定》的要求，应试人员不但应该具备优良的政治素质，还应该具有很高的能力水平。而在诸多能力水平的要求中，学习能力无疑是非常重要的方面。当今时代，是一个变革的时代，社会发展一日千里，日新月异。而在这样一个变动的时代中，科学技术所起的作用不容忽视。邓小平同志早在 20 年前就明确提出“科学技术是第一生产力”。

纵观人类社会的发展，科学技术的每一次重大突破，都会引起生产力的深刻变革和人类社会的巨大进步。这样，学习并了解当今科学技术的发展及其作用，就成为每一个公务员的必须。1994 年，在江泽民同志的建议下，由当时的国家科委主任宋健同志亲自挂帅担任主编，编写了一本供党政领导干部学习的《现代科学技术基础知识》，江泽民同志在百忙之中，亲自执笔为该书撰写了序言，这充分反映了党和国家领导人对学习科学技术知识的重视程度。为了提高公务员的素质，培养公务员的能力，我们根据国家人事部门的建议，为全国公务员编写了这本《公务员科技知识读本》，帮助大家了解什么是科学与技术以及当今科学与技术的主要成就和社会影响。

第一节 科学及其发展模式

科学，对于生活在 21 世纪的人们来说，绝对不是一个陌生的字眼。人们之所以如此熟悉科学，不仅是因为科学已广泛地渗透到我们的生活之中，影响到我们的衣食住行，更因为科学已经深刻地影响到了整个人类社会的发展，它甚至已经成为人们世界观的一个重要组成部分。如果说，1872 年当马克思在《共产党宣言》中惊叹

由于工业革命的到来、而使得大量的人口和巨大的生产力仿佛被法术从地下将其唤出的话，那么生活在今天的人们将会更加真切地感受到科学的神奇力量不管是我们把科学看作是可以带来幸福和欢乐的天使，还是看作是悬在人们头上的达摩克利斯剑，科学已经彻底改变了人类的生存方式并将继续深刻地影响着人类，这已是不争的事实。然而，当我们认真地询问究竟什么是科学的话，也许很多人会突然感到困惑，会突然发现，原来如此熟悉的概念，蓦然间变得有些恍惚，一时竟然无法讲得清楚那么，究竟什么是科学呢？

一、关于科学的定义

非常遗憾，关于科学的定义，目前乃至将来，都注定是一个很难取得一致意见的问题。为什么呢？英国著名的科学社会学家贝尔纳在《历史上的科学》一书中有一段非常好的阐述。他认为之所以很难为科学下一个准确的定义是因为：“科学的形象是多方面的。它可以作为一种建制、一种方法，一种积累的知识传统；一种维持或发展生产的主要因素；一种构成我们诸信仰和对宇宙和人类诸态度的最强大的势力。”因此，用我们传统定义的方法就变得异常困难。恩格斯从唯物辩证法的独特视角出发，则对难以定义有另一番见解，以至于他竟认为给我们所研究的对象下定义是不准确甚至是毫无意义的。理由很简单，因为事物都是在发展着的

当然，为了研究问题的方便，给我们所研究的对象下定义的方法在理论界仍普遍采用。就我们所知道的，目前理论界为科学所下的定义至少有十几种之多，但大致归纳一下，无非是两类定义。

其一，是将科学作为人们探索自然的现象、性质及其规律性的认识活动，这是一种从动态、变化的角度来考察科学的观点。历史上称之为科学活动论的观点。其二，是将科学作为一种累积而存在的知识体系，是一种既成的东西，是人类进行科学活动的成果，这是一种从静态的角度来考察科学的观点，历史上称之为科学成果论的观点。在我们看来，这两种观念各执一端，都有偏颇之嫌。如何全面、科学地认识科学，乃是理论界仍需认真研究的课题。

二、科学发展的模式

自然科学在历史上是怎么发展的，科学家的思想方法是如何产生的，科学的成果是如何形成的？这些都是自然科学概论中亟待解决的重要理论问题。按照不同的科

学发展模式理论，会有对科学发展的不同描述和理解因此我们非常有必要了解一下历史上关于科学发展模式问题据我们所知，国外关于科学发展模式主要观点大体上有三种：

1. 归纳主义的观点

这是一种传统的，经典的观点，代表人物是宣传“知识就是力量”的培根归纳主义的基本观点有：

- 科学的基础是经验科学来源于经验，经验是全部科学的基础。科学理论是在观察和实验中得来的经验事实的基础上建立起来的，是已经被证实了的知识。

- 科学的方法是归纳从经验事实上升到科学理论靠的是归纳，归纳法是最主要也是最可靠的科学方法。科学发展靠归纳，科学论证靠归纳，科学理论不过是对观察和实验中得来的事实材料进行归纳的结果用培根的话说，只要“及时采集无数成熟的葡萄”，科学的酒浆就会源源而来

- 科学的历史是累进科学的发展是积累渐进科学知识对于人类来说，就像货栈里堆放的货物一样，随着时间的推移，人类获得的经验事实越多，人类知识宝库中堆放的“货物”就愈多，如此递进，永无止境。

- 科学的发展模式是直线。在归纳定义者看来，作为科学既成成果的定律或理论，可以直接从归纳中得出，而通过归纳总结出来的理论又可以通过演绎去解释已经发生的科学事实和预见尚未发生的科学现象。它们之间的关系是线性的，如下图所示：

观察——归纳——定律或理论——演绎——解释和预见

归纳论的观点，在 1543 年科学革命之后，直到 19 世纪中叶之前，在科学史上曾经起过极大的思想解放的作用。在反对中世纪宗教神学和经院哲学的斗争中有很大的历史功绩。它强调科学理论要建立在实践经验的基础之上，要从思辨的王国回到人世人间来。其作用是积极的，进步的。同时，由于这种观点同人们的日常经验相符合，与近代自然科学发展初期的水平相适应，因此在相当长一段时期内，它作为一种常识被大多数科学家所接受。但“常识”的东西是正确的吗？德国著名的哲学家黑格尔曾经有过一段精辟的论述。他在《小逻辑》里说：“人的常识是某一时代的这样一种思想方式，在它里面包含着那个时代的一切偏见。”列宁在《哲学笔记》中引用这段话时加了一个批语：“常识 = 当时的偏见”归纳主义的偏见就在于他片面夸大经验的作用，轻视理性思维，片面夸大归纳的作用，轻视演绎的方法，片面夸大渐进积累，忽视了科学的革命。

这种归纳主义的科学史观有它产生的历史原因，爱因斯坦认为这是科学幼年时期“原始”状态下容易产生的一种幻觉，自文艺复兴以来直到 19 世纪的 300—400 年间，自然科学主要处于收集材料，积累材料、归纳整理材料的阶段，这就容易使人产生幻觉，似乎科学理论仅仅是经验的归纳，而看不到超越经验的理性创造活动。

随着科学的发展，特别是进入 20 世纪以来，人们对归纳主义产生了越来越多的怀疑，这种怀疑主要集中在两点：

第一、科学是始于观察吗？

人的发现并非如此

首先，观察总是依赖于观察者过去的知识，经验和文化，著名科学哲学家查尔默斯曾经在其名著《科学究竟是什么》一书中指出“视觉经验不决定于视网膜上的映像”。美国著名的科学哲学家汉森也曾写过一篇著名论文《观察渗透理论》详细地分析了这种现象。

其次，观察总是有目的、有意识的进行，盲目的，无意识的观察是不能引发科学的。弗莱明 1928 年 9 月发现青霉素，并获 1945 年诺贝尔奖。而其实在此之前日本细菌学家古在由直也发现了这种青霉菌。而他只是作为生物实验器皿被污染而放弃研究。直到弗莱明宣布成果之后，他才懊悔不已。伦琴 1896 年发现 X 射线并拍下第一张 X 光照片，并由此荣获第一届诺贝尔物理学奖。而早在 6 年前，宾夕法尼亚大学的物理学家克鲁克斯就无意中拍下过一张类似的阴极射线照片，而他只是觉得很有趣。把它压在桌子上，直到伦琴的结果宣布后，他才明白自己与一项伟大的发现失之交臂。这些都说明，无目的的观察不能形成科学。

第二，归纳得出的科学知识不能保证可靠，归纳原则本身是不能证明的。不仅经验上得不到证明，逻辑上也得不到证明。从经验上讲，所有的归纳都是一种不完全归纳，而不完全归纳是不能得出全称陈述的。英国著名科学哲学家波普尔曾经举过这样一个例子：他说：欧洲人在很长一个时期观察到的天鹅都是白的。于是他们归纳出“凡是天鹅都是白的”。这也许是经过无数次归纳才得出的全称陈述。但后来澳大利亚发现黑天鹅，归纳结果就归于错误。

面对波普尔的质疑，归纳论者也曾做出了让步。比如，逻辑实证主义者赖欣巴哈在《科学哲学的兴起》一书中，就坦然承认，归纳法的确不能推知未来知识的必然性。但他同时又进一步辩解，归纳虽然不能得出必然真理，但可以得出或然真理而且随着观察数目的增多，或然率必然增大。比如，我们每天都观察到“太阳从东方升起”，归纳虽然不能证明明天太阳一定从东方升起，但却可以得出“太阳从东方升起”的概率是大的。所以，他把归纳推理解释为“概率推理”。但波普尔并没有轻易放过归

纳主义，他毫不客气地指出，归纳既不能获得必然真理，也不能获得或然真理在他看来，以观察到的有限的经验事实和未来可能发生的无穷多的现象相比。正确的概率为零。英国科学哲学家波普尔的零概率理论，再一次粉碎了归纳主义者的梦想。面对归纳主义面临的重重矛盾，波普提出了自己证伪主义的崭新见解。

2. 证伪主义的观点

这是一种典型的反归纳主义的观点，代表人物是英国著名科学哲学家波普尔。证伪主义一反传统教义，整个理论给人以清新的感觉它的基本观点是：

· 科学开始于问题

科学不仅开始于问题，而且只能开始于科学的问题在波普尔看来：第一、问题促使理论的产生，第二，问题促进科学的发展波普尔正确指出了问题产生有各种类型，“有的产生于一个理论内部，有的产生于两种不同理论之间，有的产生于问题与观察的冲突之中”波普尔明确地把“问题”解释为矛盾，并认为“矛盾是科学发展的动力”。这种观点对于马克思认识论而言，当然毫无新奇之处，但出自一位西方哲学家之口，是十分难能可贵的

· 理论是大胆的猜测

波普尔认为，科学知识具有普遍性和无限性而人不可能终极地掌握这种无限的知识。因此，科学只能是“理智的猜测”，而这种猜测随时有可能被否定。

· 科学方法是试错

波普尔认为，科学家为了解决问题，必须设想出各种试探性理论来进行试错。波普尔试错法的与众不同之处在于，他认为实验的目的不是为了证明一个理论的正确，而是为了证伪除错，通过对理论的反驳，对推测的否定来发展科学。他主张通过错误学习，通过证伪进步，通过发现错误，找出好理论，推动科学前进。

· 科学划界的证伪原则

证伪原则包括两个：一个是经验证伪原则，波普尔认为科学理论或命题，不可能被经验所证实，只能被经验所证伪。第二个是科学的划界标准。波普尔认为科学之所以成其为科学，不在于科学的可证实性而在于可证伪性。不能被证伪的科学不是真正的科学，而是伪科学。科学只有在不断的被证伪中才能前进、发展。

· 科学发现的模式

P1 —— TT —— EE —— P2 (Problem)

即：问题——假设——证伪——新问题

波普尔认为，一切科学理论都是有待证伪的推测性假说，真理只能追求，永远

不能占有

证伪主义的出现是与 19 世纪至 20 世纪初的物理学革命以来的现代自然科学发展状况相适应的，他的特点是反对经验主义，提倡理论思维和革命批判精神。但他在大胆批判的同时却从一个极端走到了另一个极端轻视经验反对归纳。尤其是他的“一次证伪”的做法过于绝对、不符合科学家科学实践的实际。历史上从来没有哪一个大科学家，在建立一个理论时，遇到一个反例就轻易放弃研究。恰恰相反，他们总是耐心地研究产生反例的原因、不屈不挠的探寻真理针对波普尔证伪主义的缺陷，波普尔的学生 匈牙利籍英国 哲学家拉卡托斯提出了精致证伪主义，主张科学理论是个有结构的科学研究纲领这种理论的基本思想和波普尔是一致的

3. 历史学派的观点

归纳定义的科学发展观认为，科学知识是一个直线式的，累积的过程，证伪主义发展观则强调科学发展不是简单的知识积累，而是科学理论的更替，是一个旧理论不断被推翻，新理论不断取而代之的过程。库恩从科学史的研究出发，认为两种发展观都不符合科学发展的实际过程，他们分别从静态和动态的角度各执一端为了克服这两种发展观的片面性，库恩提出了自己对科学发展的新看法：

• 科学与 非科学的分界

库恩认为，区分科学与 非科学的标准，与其说是可检验性，还不如说是解决疑难的活动。按照库恩的观点，由幼稚的原始科学向成熟科学的转变，同时也就由批评议论方式向解决疑难方式的转变。一个领域一旦形成具备一定基础的理论或好的理论，待续批评和理论繁殖的时期就过去了。科学家不再像原始科学的从业者那样专门寻找理论的弱点，而且力图在弱点周围建立其他理论。库恩反对用可证伪性或可检验性作为区分科学与非科学（包括哲学、艺术等）的标准（如占星术也是可检验的）。而解决疑难的标准不存在把占星术也可以归之于科学之类的困难和问题

• 科学发展的模式

在库恩看来，科学发展的模式就是由 一个常规科学传统转变到另一个常规科学传统。常规科学传统由一个公认的理论决定，这个理论包含着研究方法和技术，它指定什么疑难问题要加以研究并且 什么样的解决是可以接受的，库恩把这样的理论叫做范式范式就是一个学派所接受的科学理论。库恩认为，科学的发展要经过如下几个不节：

原科学 —— 常规科学 —— 私学革命 —— 新的常规科学

库恩对这几个环节的解释是：原始科学时期是各学派互相争论、批评议论的时期，常规科学则是由于某一显著的科学成就而形成的解决疑难的传统，如17世纪的经典力学、20世纪的相对论、量子力学等。常规科学的出现，目的就是阐明和发展一个范式，而范式此时就成为一个科学家集团的共同信念。科学革命时期则是一个范式不再充分地支持一个解决疑难的传统，批评议论代替解决疑难再次成为研究中的正常方式。而新的常规科学时期则是危机已经过去，新的范式普遍被接受，批评议论又让位于疑难问题的解决周而复始，科学不断向前发展。

综观以上三种不同观点，我们认为：归纳主义者重视经验，重视事实，从本质上讲是属于唯物主义的观点。这种从事实出发，把科学建立在观察基础上的做法并没有错，归纳主义者的错误在于他们过分地强调了归纳的作用，忽视了演绎的理性力量。波普尔虽然正确指出归纳主义者问题之所在，但他却错误地将归纳和演绎分离，忽视了归纳法是从个别中归纳出一般，他没有认识到个别与一般是辩证的统一。他不懂得一般寓于个别之中，个别中存在一般。正如恩格斯所说：“归纳和演绎正如分析和综合一样是必然相互联系着的，不应当牺牲一个而把另一个捧到天上，应当把每一个都用到应该用的地方。”

历史主义学派和归纳主义、经验批判主义的最大区别是，他一改过去从逻辑的角度，静态地研究科学发展的传统，从动态的，历史的角度来考察科学，因此，历史主义学派所提出的科学发展的模式，最接近于科学发展的实际。

第二节 技术及其发展模式

科学和技术是人们认识自然和改造自然过程中密切相关的两个不同领域。科学反映的是人们对自然的认识，通常以知识形态表现出来。技术反映的是人们对自然的改造，通常以物质形态表现出来。科学从其职能来讲，解决的是自然界中的“是什么”和“为什么”，而技术则解决的是“做什么”和“怎么做”。科学提供物化的可能，技术提供物化的现实。科学是发现，技术是发明。由此看来，似乎技术是相当清楚的一个概念。然而，当我们认真去探究什么是技术的时候，又突然发现，我们对技术的认识并不十分清楚。究竟什么是技术呢？

一、技术的含义

关于技术的含义，不同的人，从不同的角度出发，有着不尽相同的认识早在古希腊时期，著名先哲亚里士多德就对技术有过专门论述，他把技术看作是“制作的智慧”。17世纪培根也提出要把技术作为可操作性学问来研究，到了18世纪末，法国著名的唯物主义哲学家狄德罗在他主编的《百科全书》条目中开始列入“技术”的条目他认为：“技术是为了同一目标而共同协作完成的各种工具和规则的体系”。狄德罗的这一定义包括两个方面的内容：其一，技术是物质形态的东西。通常是和工具相联系的。其二，技术是关于规则的“体系”这就意味着，孤立的操作技能尚不足以称为技术，所谓技术，是指为完成某项改造自然的任务而设计的一整套的技能系统，即所谓“规则的体系”技术是经验、方法和技能的综合

狄德罗的这一观点，基本上反映了19世纪中叶之前人们关于什么是技术的理解。由于从16世纪以来，科学一直处于搜集材料阶段，科学对技术的前导作用尚不明显，人们普遍认为，技术来源于生产实践和科学实验生产实践产生生产技术，科学实验产生实验技术，技术就是经验和技能的总结和系统化

19世纪中叶之后，随着自然科学的迅猛发展，科学已开始从搜集材料进入整理材料的阶段，科学对技术的指导作用开始显现就科学、技术、生产者三者关系而言长期以来所表现出来的“生产技术科学”的单一发展模式被打破，又出现了“科学——技术——生产”的发展模式，进入二十世纪以来，更出现了下述的互动模式：



以上模式表明，人们从观念上已经开始有所转变，即从传统的认为技术来源于生产，是技术的集合的观念，转变为科学理论的应用同样可以产生技术的新观念，对此，邓小平同志也有精辟的论述，邓小平同志正确指出“大量的历史事实已经说明：理论研究一旦获得重大突破，迟早会给生产和技术带来极其巨大的进步”²正是这种新观念的产生，激发了人们对技术的新的思考人们开始认识到了技术的多元性，开始从技术的来源，目的性和功能的不同角度出发去反思技术，从而提出了现代意义上的技

术定义。但我们认为，正如作为概念层次的“科学”无法确定一样，作为概论层次的“技术”，同样无法确定技术的发展与关于技术的认识本身就是一个动态的过程，这个过程是一个永无止境的历史过程“技术”本身作为一种历史的产物处于永恒的变动之中

二、技术的发展模式

技术作为一种特殊的客观实在的物质运动，它的产生与发展是有规律的，技术发展的各种模式是其成长发育的客观规律的体现就技术本身的发展而言，我们认为主要有互为补充的两种发展模式

1 渐进式发展模式

技术的发展，从大的方面讲，又可划分为时间渐进模式和空间渐进模式两类：

· 时间渐进模式

所谓时间渐进模式，指的是技术在时间序列上的分布及其演化

众所周知，人类的产生与发展是与制造工具的劳动密切相关的。恩格斯在《劳动在从猿到人转变过程中的作用》中使用了“猿类”、“正在形成中的人”和“完全形成的人”三个概念，概括了人类起源过程中的三个基本阶段猿类是指生活在千百万年以前的古代猿类，严格意义上讲，他们和一般的动物没有什么区别。“正在形成中的人”则不同，他们此时已能直立行走，并能使用木棍、石块等天然工具，但还没有进行真正意义上劳动而“完全形成的人”就不同了他们此时已能够制造出最粗糙、简单的工具，他们已从动物界完全脱离出来

工具的制造，意味着人类主动改造自然活动的开始。从使用天然工具到制造工具，这是一个漫长的过程。考古工作者在北京山顶洞人的居住地发现了大量石器，这些石器有着明显的人工打制的痕迹这就说明北京猿人已会使用不同的方法制造工具。旧石器时代早期，人们使用火和简单的工具的水平是很低的，而到了旧石器时代中期，石器的打制技术已相当完善。不仅器形精巧美观，而且开始使用了钻孔、磨尖等技法。到了旧石器时代晚期，人们除使用石器外，开始大量使用骨器，并发明了鱼叉等捕鱼工具。随着人类进入新石器时代，工具的使用有了飞跃式发展，人们已不仅能够制造出利用多种材料的复合工具，更发明了弓、箭等新一代工具。新石器时代中期以后，随着农业、畜牧业的发展，农业生产工具和载重运输工具的产生，特别是原始社会末期冶金技术的出现，标志着人类已开始进入技术发展的新时代。我们的祖先正是利用这些伟大的技术，在改造自然的同时也改造了人类自身，人类获得了从自然界的第一

次提升，这种提升又成为原始社会以后技术继续进步的新起点最近几千年来人类技术的发展，正是在历史基础上的一种延续，而随着时间的不断推移，人类的技术将会取得更大的突破。

· 空间渐进模式

所谓空间渐进模式，是指技术在空间上的分布及其演化

由于各国、各地区政治、经济、文化、资源等背景的不同，造成国家与国家之间、地区与地区之间生产力发展水平的不平衡，空间的技术差异或曰技术梯度就成就成为不以人的意志为转移的客观存在。以我国为例，改革开放以来，由于地理状况的差异，经济基础的差异以及政策的差异等因素，逐步形成了东部沿海地区，北京、天津等优势地区拥有较为先进的技术，这些地区的技术水平不仅位于全国前列，有些地区某些技术的水平甚至与国际先进水平相比也相差不多。广大中部地区和湖南、湖北、河南、河北、安徽、江西等地区，则处于技术的中间状态，而广大西部地区及边远地区则技术相对落后，发展较慢，从技术水平的分布上，我国从空间上形成了高、中、低三个明显的技术梯度级。就世界范围而言，也有这种现象，比如美国、日本及欧洲大部分国家技术水平居世界前列，中国、埃及、巴西、墨西哥等一批国家则处于中间层次，非洲及亚洲的许多国家则相对落后

然而，技术的开发与利用并非在空间上一成不变，在一定的条件，也会发生迁移。这种梯度递进的迁移模式通常是先进地区，先进国家逐步向落后地区、落后国家转移、扩散。这种扩散转移通常采用两种形式，其一是技术以学术信息的形式按技术梯度层次向外传递，其二是技术原理，设计等软件以及设备、仪器等硬件技术，按可接受的技术梯度进行有偿转让。值得注意的是，这种梯度转移在一定条件下也会发生逆向传递，包括美国、日本等许多发达国家不断从发展中国家汲取技术营养就是一个明证

技术梯度转移的速度取决于两个条件：其一是技术源中的保密程度，比如美国等一些发达国家为达到某种技术垄断的目的，故意捏造一些耸人听闻的谎言对中国等一些发展中国家实施技术封锁，人为地导致了技术转移速度减慢，也有一些企业为了企业自身的利益，对某些先进技术暂时密置，也导致技术转移速度的延缓。其二是输入人技术一方的技术环境和适应程度。但有一点是肯定的，即只要有社会的需求，技术的梯度转移就会或迟或早地发生，不以人的意志为转移。

2 突变发展模式

所谓突变模式，是指某些国家和地区，以较短的时间，快速跃过技术先进国家和地区长时间发展的进程，技术水平在短时间内达到一个新的高度的发展模式。

突变发展模式在世界几千年的技术发展史上，特别是近三百年的技术发展史上，典型事例比比皆是以德国为例，德国 19 世纪 50~60 年代才开始大规模的工业革命，1871 年，普法战争后才成一个统一的国家但短短 30 年时间，德国就一跃而超过英法等老牌资本主义国家而成为当时全世界技术的中心。美国 16 世纪还是印地安人的氏族公社阶段，独立战争之后的 1776 年 7 月，才正式宣告脱离英国而成立美利坚合众国，而到了 20 世纪初，它居然超过全世界所有发达国家而成为现代科学技术技术的中心

技术的突变发展模式以及这些成功的案例，对中国今天的改革开放具有十分重要的借鉴意义

中国古代的技术曾经处于世界领先水平，但近代资本主义崛起后，特别是英国资产阶级革命胜利后，广泛展开的蒸汽机技术和产业革命，使英国的技术水平跳跃式前进，突变式发展，一跃超过封建的中华帝国，成为当时科学技术的中心自此以后，中国的科学技术水平就每况愈下，距世界先进水平差距越来越大。新中国建立以后，特别是改革开放以后我们国家在部分领域的技术水平正与世界先进水平逐步缩小，但大部分领域，特别是制约一个国家发展的关键技术领域仍与世界先进水平有相当距离，怎样在短时期内一跃而赶上甚至超过世界先进水平，已成为摆在全国科学技术工作者面前的首要任务

对于如何在短时间内以跳跃方式赶超世界科学技术的先进水平，我们首先应对我国国情有一个清醒的认识。我们国家是一个人口众多，国民素质急待提高而教育又不够发达的国家，我们国家是一个幅员广阔但人均资源相对贫乏的、发展极不平衡的国家。我们国家是一个科技水平长期滞后于世界先进发展水平的国家。因此，急于求成、期望在短期内全面超越世界先进技术水平不是现实的但短期内在部分领域迎头赶上世界先进水平并一并奠定我国在世界科技发展进程中的领先地位甚至成为世界科学技术发展的中心，又不是不可能的

日本学者汤浅光朝早在 20 世纪 60 年代就发现了科技发展历史中一个非常有意思的现象，即所谓的汤浅现象。汤浅光朝用重大科学成果的数目，成功地说明了近代 5 次科学中心转移的现象。他认为，一个国家如果其科学成果的总数超过同期世界科学成果总数的 25%，则谓之“科学中心”，保持在 25% 以上的时间，谓之“科学兴隆周期”汤浅发现，近代科学中心转移的顺序大致为：

意大利（1540 年 ~ 1610 年）

英国（1660 年 ~ 1730 年）

法国（1770 年 ~ 1830 年）

德国（1840 年 ~ 1920 年）

美国（1920年~至今）

由以上数据可以发现，每个国家保持科学兴隆的平均周期为 80 年

其实，当我们再深入研究一下汤浅现象，就会发现每个“科学中心”国家在一定时期内其科学成果多集中在某一个或几个领域，而不是全面领先。对此，前苏联学者凯德罗夫提出了一个重要的“带头学科理论”。他认为自然科学的发展并不总是齐头并进的，一个时期内，总有一门或几门学科作为主导学科带头向前发展，它们对整个自然科学的发展产生着重大的影响。按照这一理论，1986年3月，我们国家一批优秀的科学家联名给邓小平同志写信阐述了我们国家应放弃“全面赶超”计划，有针对性地，集中有限的财力、物力、人力，在几个重要的学科领域取得突破，“迎头赶超世界发达国家”。这一建议很快获得国家批准，并启动了著名的“863”计划。863计划就是我国试图实施突变发展战略的重大决策，我们设想如果我们能充分发挥社会主义国家调控的优势，短时间内，以跳跃式前进的步伐，赶超世界先进国家是完全可能的。

三、技术革命及技术发展趋势

纵观技术发展的历史，技术作为人类生产劳动技能的体系，是一个不断丰富、发展的过程，这过程表现为技术创新和技术革命两种形式。

技术创新是美国经济学家熊彼得最早提出的一个概念，他认为此概念至少应包涵三项内容，第一，由于技术的创新应能导致新产品的出现。第二，由于技术的创新能导致方法的产生。第三，由于技术的创新导致市场的开发。技术创新相对于整个技术领域而言，只是局部的改良。

技术革命则不同，它指的是由于一项新的技术或一群新的技术的出现，而导致整个技术原理的根本改变和整个人类改造自然的能力的划时代的提高。比如蒸汽机技术的出现导致了欧洲工业革命的出现，电力技术的出现从根本上改变了人类的能源机制。半导体技术的出现，使通讯领域产生了翻天覆地的变化……一场技术革命的到来，必然带来社会生产力的大解放和经济的大繁荣。自1543年自然科学革命以来，人类历史上曾发生过三次伟大的技术革命。

18世纪70年代，以英国工业革命为代表，开始了人类历史上的第一次技术革命，这场革命的主要标志是蒸汽机技术在工业生产中的广泛应用。从1783年瓦特第一台旋转式蒸汽机制造成功之后，蒸汽机技术被迅速应用到了纺织、运输、制造、煤炭、冶金等领域，形成了个以蒸汽机动力为核心的近代工业群，从而使工业生产十倍、百倍地增长。很短的时间内就完成了工场手工业向机器大工业的过渡。

第二次技术革命的标志是电力技术在工业生产中的广泛应用。从1820年丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应到1831年法拉第发现电磁感应现象并总结出电磁感应定律，电力应用的可能性已经展示在了人们面前。1873年麦克斯韦提电磁理论，将光、电、磁统一起来，更开辟了电力应用的广阔前景。

第二次技术革命与第一次技术革命相比，明显表现出了技术对科学的依赖性。第一次技术革命中蒸汽机的发明和改造，虽然也一定程度上运用了热力学知识，但总体来讲，它依然依赖发明者本身所掌握的生产经验和技術经验。而第二次技术革命则开始摆脱其经验形态，建立在理论基础之上。电力技术的应用完全依赖于电学理论的发展。第二次技术革命不仅为人类创造了巨大的物质财富，改变着人们的生产、生活方式，而且还进一步改变着人们的世界观。

人类的第三次技术革命又称之为新技术革命，它发端于20世纪40~50年代，是以原子能、空间技术和电子计算机技术为核心的更广泛、更深刻的革命。

第三次技术革命的直接导因是19世纪末、20世纪初的物理学革命。x射线、电子、放射性元素等三项伟大的发现，揭开了物理学革命的序幕，同时也奠定了第三次技术革命的科學基础。相对论、量子力学的出现，不仅使人们对物质世界的认识由宏观进入到微观，由低速进入到高速，而且有力地促进了技术科学的发展，为新的技术领域开辟提供了理论的依据。没有微观物理学的发展，就不可能有原子技术的产生，也不可能有无綫电电子学的发展。在第三次技术革命中，电子计算机技术出现，对人类的影响最为巨大，因为它不仅从根本上改变了人们的生产方式，而且从根本上改变了人们的生存方式。以至于许多学者更倾向于把这场技术革命称之为“新工业革命”、“第二次浪潮”等，甚至有人认为，第三次技术革命的意义已经远远超出技术的领域，称之为—场伟大的社会变革亦不过分。因为这场革命至少从两方面对社会经济产生了重大影响，其一，它使许多国家经济结构发生了重大改变，传统的第一产业（主要是农业）、第二产业（主要是制造业等工业）在社会生产中所占比重下降，第三产业（各种服务性行业）、第四产业（信息工业）蓬勃兴起。其二，它使许多国家社会阶级结构发生了重大改变。在技术发达国家，随着农业在国民经济中比重的下降以及工业比重的调整，农民和蓝领阶级已不占社会主体地位，第三、四产业的发展，调整了工人阶级的人员构成。我们多年来梦想的“劳动人民知识论”已经成为现实，从目前来看，第二次技术革命正方兴未艾，我们对它的评价也许应该在未来一段时间内才能准确做出。

第一章

科学皇冠上的明珠——数学

在现代社会，数学扮演着极其重要的角色。它和全部自然科学享有同等地位，在哲学、社会科学、人文事务和公务活动等诸多领域也越来越多地发挥出重要作用。数学同时具有服务社会实践的实用价值和丰富人类精神和智慧的文化价值，是衡量一个国家和民族科学文化水平的重要尺度。

作为一名现代公务员，掌握必要的数学知识，进而通过数学的原理和方法培养锻炼并利用理性的思辨能力来分析问题和解决问题——尤其是那些政策性强、牵涉面广、错综复杂的重大问题，对于科学决策和科学行政都是极其有益的，甚至是不可或缺的。马克思曾说过：一门科学，只有当它利用数学来表示时，才能真正称之为科学。

第一节 数学概观

一、数学的定义

数学的定义，是一个既简单又不容易明确回答的问题。古今数学家，主要是从数学的研究对象为出发点进行多方探讨：古希腊的毕达哥拉斯把“数”看成万物的本原，因此“数”、与然也是数学的本原而所谓的“数”是先验的，是属于“理念世界”的，由此，柏拉图把数学看成是“心智的产物”亚里士多德反对柏拉图的先验论，认为数学只研究存在的部分属性，即存在物的数量性和连续性他认为，数学的研究对象是剥去了事物的一切可感的质（如轻重、软硬、冷热等）之后所留下的数量性和连续性他进一步认为数是离散的量，而线是连续的量，同时指出，研究离散量及其属性的学科称为算术，研究连续量及其属性的学科称为几何学。由于这两个学科的研究对象有某些共同的性质，因而归结为一门科学：数学所以，数学是研究数量的科学。这一定义为大多数学者所认同但如同数学本身的博大精深一样，对于数学的定义不可能是唯一的和恒定的例如，17世纪法国数学家B帕斯卡提出“本身已如此一目了然以致没有任何词汇能把它解说得更清楚的事物 绝不要试图给它下定义，……以免被所使用的含混不清的词汇所欺骗。”对于数学定义，就是这样的问题。

数学发展的历史表明，在19世纪以前，古典数学的主要成就是算术、几何学、代数学和微积分。这些数学所研究的都是客观事物的形式和数量。恩格斯对此概括为“数学的研究对象是现实世界的空间形式和数量关系”在此论断的基础上，我国数学家丁石孙提出，“数学的研究对象是客观世界的和逻辑可能的数量关系和结构关系”我们认为，这一提法较好地揭示了数学的本质，即数学是研究事物的数量关系和空间形式的一门科学。

二、数学的特征

数学具有高度的抽象性、逻辑的严格性、系统地使用符号和广泛的应用等特征

抽象性和严格性是其基本特征，表现在其研究对象（无论是数量还是几何元素）都是现实社会的抽象。数学命题的成立不是靠实验证明而是靠逻辑证明。数学的符号体系是其抽象性和严格性的需要，是抽象的数学概念的具体化和逻辑证明的物质承担者。而广泛的应用性是抽象性和严格性的结果。

数学还有其独特的美学意义，主要表现在数学的简洁性、对称性、和谐性和奇异性。“如果说自然美是由视觉、听觉等感官所接受的美感，数学美则是大脑思考所产生的思想结构上的精神美”^[1]

三、数学的意义

在现代社会，数学扮演着极其重要的角色，它和全部自然科学享有同等地位；在哲学、社会科学、人文事务和公务活动等的诸多领域也越来越多地发挥出重要作用；数学同时具有服务社会实践的实用价值和丰富人类精神和智慧的文化价值，是衡量一个国家和民族科学文化水平的重要尺度。

第二节 数学的产生与发展历程

一般认为，数学的发展经历了四个重要阶段，即萌芽时期（公元前600年以前）、常量数学时期（公元前6世纪~公元17世纪初）、变量数学时期（17世纪~19世纪）和现代数学时期（19世纪末以后）。数学从萌芽发展到现代水平，绝非某一个民族、一个地域的产物，而是全世界许多民族和地域经验和智慧的结晶。

一、数学萌芽时期

人类文明起源于中国的黄河、巴比伦的底格里斯河与幼发拉底河、印度的印度河与恒河和埃及的尼罗河等大河流域，数学也萌生于这些地区。

（一）东方数学萌芽

生活在两河流域的苏美尔人在公元前4000年就创造和使用文字，即史称“楔形

[1] 引自周述岐《数学思想和数学哲学》，中国人民大学出版社，1993年版，第8页

文字”在这些楔形文字中，人们发现了世界上最早的以文字记录的“数字”以及加、减、乘、除等算术运算，并发现他们主要使用数表进行运算。

大约在公元前 2900 年，古埃及人建造了著名的奇阿普斯金字塔。塔高 146.5 米，基底正方形的边长 233 米，而且底边的相对误差不超过 $1/14000$ ，基底直角相对误差不超过 $1/27000$ ，成为 1889 年法国埃菲尔铁塔（高 300 米）落成以前几千年来世界上最高的建筑物，充分反映了古埃及人的聪明才智以及他们掌握数学、建筑学等知识的程度

通过 19 世纪发现的两本纸草书，我们可以窥见古埃及的数学成就一书中记载了公元前 2200 年以来的一些数学问题，共有算术、几何和杂题等三章、85 个实用数学题的解法另一本书中载有 25 个数学题。

这两本纸草书都是用象形文字写成的，书中的数字符号体系采用以 10 为基底的十进“累进制”记数法（它与今天的十进制是有本质区别的，现代十进制称为“位值制”，最先被中国人在公元前 1600 年发明使用）。

大约在公元前 1000 年前印度人研究出一种求解圆面积的方法：一个圆的面积等于一个矩形的面积，这个矩形的底等于半个圆周长，高等于圆半径。按照这种算法，圆周率约等于 3.09。

（二）中国古代数学

考古发现，中国人对“数”与“形”的认识和理解可追溯到石器时代。在殷墟出土的甲骨文卜辞中有很多记数的文字，其中有十进制的记数法。出土的石器和陶器已可见多种多样的几何图形和代表数字的符号。春秋战国时期，我国已经广泛使用“算筹”作为计算工具进行运算

这种记数方法简明方便，易于使用，与现行通用的十进位值记数法完全一致，这一记数和运算方法一直沿用 2000 多年，到 15 世纪中叶才逐渐被算盘所代替。由此，可见我国这一发明的先进性。马克思曾高度评价说：“这是最妙的发明之一”。

在几何学方面，《史记·夏本记》中说夏禹治水时已使用了规、矩、准、绳等作图和测量工具，并早已发现“勾三股四弦五”的勾股定理战国时期，齐国人著的《考工记》汇总了当时手工业技术的规范，包含了一些测量的内容，并涉及到一些几何知识，例如角的概念。

《易经》及“河图、洛书”中蕴含着丰富的哲学和数学知识。

秦汉唐时期是中国古代数学体系的形成时期。为使不断丰富的数学知识系统化、理论化，数学方面的专门书籍陆续出现。西汉时修订的早在战国时代就已经问世的

《九章算术》，标志着中国初等数学理论体系形成

《九章算术》注重应用，形成了以筹算为中心的数学体系，对中国古代数学影响深远。它的些成就如十进制位值制、今有术、盈不足术等还传到印度和阿拉伯，并通过这些国家传到欧洲，促进了世界数学的发展

从 14 世纪中叶明王朝建立到 20 世纪清代结束共 500 多年，中国数学除珠算外出现全面衰弱的局面 16 世纪末，西方初等数学开始传入中国，使中国数学开始与西方数学融合

从古巴比伦、古埃及及古印度以及中国古代数学出现的情况可以看到，处于萌芽时期的数学是直接与实践和（或）宗教活动相联系的当时的数学问题都是人们从实践经验中提出的具体方法的汇集。萌芽时期的数学已经注意到“数”与“形”这两个根本对象，但尚未形成抽象的理论，也没有系统的符号体系。

二、古典数学的产生

古代希腊从地理疆域上讲，包括巴尔干半岛南部、小亚细亚半岛西部、意大利半岛南部、西西里岛及爱琴海诸岛等地区。由于毗邻埃及与巴比伦，很容易吸收这两个文明古国的文化成果。古希腊人无论在人文科学还是自然科学方面，都创造了史无前例的辉煌成就。数学是其中非常突出的一个方面，现代数学中“算术”、“几何”和“三角学”等学科词汇均源自古希腊。

在古希腊时期，涌现出一批著名的思想家和科学家，如泰勒斯、毕达哥拉斯、柏拉图、亚里士多德和欧几里得等。他们围绕世界本原问题提出了不同的学说并长期争论。这些学术问题，大多包含了数学问题。

（一）爱奥尼亚学派的自然哲学与数学研究

爱奥尼亚学派始创于米利都。学派的代表人物泰勒斯（Thales，约公元前 640 年—前 546 年）被后人誉为“科学之父”和“希腊数学的鼻祖”。他曾游学巴比伦和埃及，深受东方文化的影响，在哲学、数学和天文学等领域有高深造诣。在关于世界本原的争论中，以泰勒斯为代表的爱奥尼亚学派不依赖于宗教信条来理解和解释自然，而是主张从自然现象中寻求真理，认为水是万物之本原。这种朴素的唯物主义观点显然有利于数学研究。因此，泰勒斯被称之为古典数学的开创者，是不难理解的。据说泰勒斯发现了如下几何命题：

1. 圆可以被任一直径平分；
2. 等腰三角形的两个底角相等；
3. 两直线相交，对顶角相等；
4. 两个三角形的两个角和一条对边相等，则两个三角形全等；
5. 半圆所对应的圆周角是直角；
6. 相似三角形的边成正比例；
7. 三角形的三个内角和等于两个直角。

泰勒斯证明了其中的（1）—（5）个命题。泰勒斯的证明方法尽管可能是不严格的，但他开创了应用逻辑方式推证命题的实践。这件事本身是极不寻常的——它导致了演绎证明方法的形成，为后来的哲学家和数学家提供了理论概括的科学方法

（二）毕达哥拉斯与“唯数论”

毕达哥拉斯(Pythagoras, 约公元前572年—前497年)年轻时也曾去过埃及和巴比伦,据说还去过印度。受东方文化和神学的影响,他于公元前530年创建了一个兼

独特的宗教神秘主义、唯心主义哲学以及哲学科学思想的奇特结合的体系。¹

古希腊哲学家中最先探讨万物本原的是泰勒斯,稍后但影响更大的却是毕达哥拉斯学派。该学派认为,数是先于作为整体的自然界的,是先于种种自然的事物的。因为没有数,就根本没有什么东西能够存在,能够被认识;反之,撇开其他事物是可以认识数的。因此,毕达哥拉斯学派断定,数的元素和本原也就是万物的元素和本原。这种“万物皆数”的观点被称为“唯数论”。

显然,“唯数论”颠倒了“数源自客观事物的抽象”这一根本事实但毕氏学派的理论有力地促进了对于(自然)数及其性质的研究,从而使数学更接近于一门纯理性的学科,从客观上推动了数学的发展。

毕氏学派用平面上的点来代表自然数,将这些点排成不同的几何图形(即点阵),从而形成所谓的形数,如三角形数、四(五、六)角形数等。进而通过这种数形结合的方法研究了整数的一些性质。如得出:

$$1+2+3+\cdots+n=n(n+1)/2$$

1 引自袁小明等著,《数学思想发展简史》高等教育出版社,1992年版,第25页

$$1+3+5+\cdots+(2n-1)=n^2$$

他们还提出了奇数、偶数、质数、合数等概念

在几何学方面，毕氏学派证明了泰勒斯提出的“三角形三个内角和等于两直角”的命题，并证明了多边形内角和定理；证明了勾股定理；研究了黄金分割；建立了正多面体的概念

（三）柏拉图与亚里士多德的数学思想

柏拉图（Plato，公元前427年—前347年）是古希腊唯心主义的代表人物，其核心学说是“理念论”这种理论认为存在着“两种世界”：经验世界和理念世界。前者是变化的、复合的、不真实的，而后者则是永恒的、唯一的、真实的，即所谓“理念”。按照他的理论，数学是理念世界的知识，数学对象就是理念世界中的存在。在柏拉图看来，理念高于相应可感知的具体事物。他强调把事物的抽象共性作为认识的起点，十分重视数学研究中的抽象定义与演绎推理，因而极大地推动了数学的抽象化和演绎推理体系的形成。在柏拉图时代，“不懂数学的人”同“不懂哲学的人”几乎是同义语。在他创办的柏拉图学院门口高悬“不懂几何学（数学）者不准入内”警示语，反映了柏拉图对数学的高度欣赏和重视。

亚里士多德（Aristotle，约公元前384年—前322年）是柏拉图的学生和亚历山大帝老师的老师，作为古希腊伟大的思想家，他首次提出“数学是研究数量的科学”，对后世有重要影响。他认为，数学研究的对象，是从可感之物中分离出来的不可感之物，这种分离是通过剥离物体的一切可感觉的质而只留下量性和连续性。也就是说，数学是研究抽象物的，抽象物是人类思维的结果。亚里士多德的重要贡献，在于他将逻辑规则系统化和规范化，从而创建了形式逻辑学，其逻辑思想为日后将几何学整理在严密的逻辑体系之中开辟了道路。

（四）欧几里得几何学

从公元前6世纪起，希腊人历经近300年的努力，终于在数学上建立了比较定型的公理演绎体系，这是希腊数学的最大成就之一。欧几里得《原本》的问世，是公理化演绎体系正式形成的标志，同时也就是古典数学形成的标志。

欧几里得（Euclid，公元前330年—前275年）生于雅典，在柏拉图学院受过教育，是亚历山大时期第一位大数学家和教育家。他的《原本》（后被译为《几何原本》）被后人誉为“数学家的圣经”而影响深远，流芳后世。

《几何原本》是欧几里得对前人著述进行汇编的基础上，重新做的整理和证明。

此书是一部在定义、公设和公理基础上按演绎方法建立起来的命题系统，所以定义、公设和公理起着基础作用书中先讲了23个预备性定义，如：“点是没有部分那种东西”、“线有长度而没有宽度”等，然后给出5个公设和5个公理

5个公设为：

1. 从任一点到另外一点能作一条直线；
2. 任何一条有限直线能循直线不断延长；
3. 以任一点为中心、任一距离为半径能作一圆；
4. 所有的直角彼此相等；
5. 若一条直线与两直线相交，在同侧的两个内角之和小于两直角，那么不加限制地延长这两条直线后，必在该侧相交于一点。

5个公理为：

1. 和同一量相等的诸量彼此相等；
2. 等量加等量，其和相等；（等量公理）
3. 等量减等量，其差相等；（等量公理）
4. 可以叠合的量，彼此相等；（叠合公理）
5. 全体大于部分

第5公设比前面4个来得复杂，引起了人们的怀疑在以后的两千年间，不断有人想将其作为定理来证明。直到19世纪，人们才认识到这种想法是不能实现的，从而导致非欧几何的产生

《几何原本》共13卷，总计含有460多个命题。分为4部分内容，分别属于平面几何、初等数论、无理量理论和立体几何。

在欧几里得之后，阿基米德（Archimedes）和阿波洛尼乌斯（Appollonius）也以其各自的杰出成就而闻名

阿基米德是古代最伟大的数学家、力学家和机械师他将实验的经验研究方法和几何学的演绎推理方法有机地结合起来，使力学科学化，既有定性分析，又有定量计算。阿基米德在纯数学领域涉及的范围也很广，其中一项重大贡献是建立多种平面图形面积和旋转体体积的精密求积法，蕴含着微积分的思想。

三、阿拉伯的数学

自从公元7世纪初伊斯兰教创立后，很快形成了强大的势力，迅速扩展到阿拉伯半岛以外的广大地区，跨越欧、亚、非三大洲。从8世纪起，巴格达成为学术中

心，建有科学宫、观象台、图书馆和一个学院这个时期被称作翻译时期，来自各地的学者把希腊、印度和波斯的古典著作大量地译成阿拉伯文，其中的古代数学遗产获得了新生。从9世纪开始，数学发展的中心转向拉伯和中亚细亚，一直鼎盛到15世纪。阿拉伯数学最主要的成就是对三角知识的研究，并最终使三角学成为数学的一个独立学科

但总的来看，阿拉伯数学比较缺少创造性，由于当时世界大多数地区正处于科学上的贫瘠时期，其成绩相对显得突出起来。值得称赞的是他们充当了世界上大量精神财富的保存者，在黑暗的中世纪过去后，这些精神财富在欧洲迅速蔓延。欧洲人主要是通过阿拉伯的译著，才了解到古希腊、印度和中国数学的成就的。

四、文艺复兴时期的欧洲数学

从西罗马帝国灭亡，公元476年，到11世纪，称为欧洲黑暗时期西方文化处于低潮，基督教的绝对统治严重地破坏了科学的发展

12世纪是数学史上的大翻译时期，是知识传播的世纪，由穆斯林保存下来的希腊科学和数学经典著作，以及阿拉伯学者的著作开始被大量翻译为拉丁文，并传入西欧之后，欧洲各地出现了许多从原教会学校基础上转变而来的大学。13世纪上半叶，巴黎、牛津、剑桥、帕多瓦和那不勒斯等地的一些大学里，数学教育开始兴起，这些大学成为后世数学发展的重要基地

14至16世纪，在欧洲历史上是从中世纪向近代过渡的时期，史称文艺复兴时期。中世纪束缚人们思想的宗教观、神学和经院哲学逐步被摧毁，出现了复兴古代科学和艺术的文化运动。在自然科学方面，如哥伦布地理上的大发现、哥白尼的日心说，伽利略在数学、物理上的创造发明等革命性事件相继发生

艺术家们把描述现实世界作为绘画的目标，研究如何把三维的现实世界绘制在二维的画布上。他们研究绘画的数学理论，建立了早期的数学透视法思想，这些工作成为18世纪射影几何的起点。其中最著名的代表人物有：意大利的达·芬奇、阿尔贝蒂、弗朗西斯卡、德国的丢勒等。

代数学在文艺复兴时期获得了重要发展，最杰出的成果是意大利学者列昂那多建立的三、四次方程的解法

符号代数学的最终确立，是由16世纪最著名的法国数学家韦达完成的。他在前人工作的基础上，于1591年出版了《分析方法入门》，第一次自觉地使用字母来表示未知数和已知数，使代数学的形式更抽象，应用更广泛。韦达在他的另一部著作

《论方程的识别与订正》中，改进了三、四次方程的解法，建立了方程根与系数之间的关系，现代称之为韦达定理。

文艺复兴时期在文学、绘画、建筑、天文学等各领域都取得了巨大的成就，数学方面则主要是在中世纪大翻译运动的基础上。吸收古希腊和阿拉伯的数学成果，从而建立了数学与科学技术的密切联系，为以后两个世纪数学的大发展作了准备。

古代数学——从萌芽时期到初等数学（又称常量数学）形成，在世界几个古老文明地区独立或相继地得到发展。形成了以《九章算术》为代表的中国古代数学体系和以《几何原本》为代表的西方数学体系。前者着重应用与计算，其成果往往以算法形式表达这种机械的构造性思维方式恰恰与现代计算机的处理模式相吻合。而古希腊数学的伟大成就在于，使数学成为一门抽象的演绎性科学，为现代科学奠定了基础。其坚持符合逻辑的演绎推理，建立完备的公理体系的思维方式，代表了古代数学追求可证刊这一显著特征。

第三节 数学学科内容

从数学科学体系结构的形成到逐步充实，经历了一个漫长的过程。上节介绍的初等代数与欧几里得几何学是本学科的基本内容，也就是现代小学和初中学生应当学习和掌握的内容。本节将要介绍的内容是在初等代数和欧氏几何基础上派生出来的，其中，对数、解析几何等内容基本上属于高中学习内容，微积分、非欧几何等内容则基本上属于大学课程的内容。

初等数学的研究对象是静止的数量关系，又称为常量数学，本节所介绍的内容则属于变量数学。

一、对数及其意义

对数的建立是数学从常量到变量迈出的第一大步。发明对数运算的直接价值是将乘方、开方运算变化为乘法运算，将乘除运算变化为加减运算。运算的简化使天文学和航海中的大量复杂计算受益匪浅。

1614年，苏格兰数学家耐普尔出版了《对数规范》一书，首先创立了对数。他可能是受到德国数学家施蒂费尔的影响。施蒂费尔曾发现：几何数列 $r^0, r^1, r^2, r^3, \dots$ 各项与算术数列 $0, 1, 2, 3, \dots$ 各项之间存在着一种奇特的对应关系：

几何数列两项相乘除，其指数等于算术中相应项相加减。1617年，牛津大学数学教授布里格斯与耐普尔共同研究和完善了对数的计算规则，成书为《一千个数的对数》。这与现代的对数概念已基本相同。即：若 $A=10^a$ ， $B=10^b$ ，那么 $A \times B=10^{a+b}$ 。今称 a 是以 10 为底的 A 的对数，记作 $\log_{10}A=a$ ， $\log_{10}B=b$ 。这样 $\log_{10}(A \times B)=a+b$ 。 A 的对数 a 和 B 的对数 b 可由对数表查得，算得 $a+b$ 再查反对数表便得到 $A \times B$ 了。这就把乘法运算转化为较为简单的加法运算。后来，人们根据对数运算原理和规则，设计了计算尺。这是电子计算机出现之前，在科技和工程领域广泛应用的廉价而高效的计算工具。

二、解析几何及其意义

16 世纪以后，由于生产和科学技术的发展，天文、力学、航海等方面都对几何学提出了新的需要。比如，德国天文学家开普勒发现行星是绕着太阳沿着椭圆轨道运行的，太阳处在这个椭圆的一个焦点上；意大利科学家伽利略发现投掷物体是沿着抛物线运动的。这些发现都涉及到圆锥曲线，要研究这些比较复杂的曲线，原先的一套方法显然已经不适应了，这就导致了解析几何的出现。

（一）笛卡尔和费马的贡献

笛卡尔 (Descartes, 1596 — 1661) 是法国的哲学家和数学家，是西方哲学史上第一个近代哲学家，科学方法论的创立者之一。1637年，发表了他的著作《方法论》。这本书的后面有三篇附录，一篇叫《折光学》，一篇叫《流星学》，一篇叫《几何学》。

从笛卡尔的《几何学》中可以看出，他的基本思想是建立起一种“普遍”的数学，把算术、代数与几何统一起来。他设想，把任何数学问题都化为代数问题，再把任何代数问题归结到解方程式。

为了实现上述的设想，笛卡尔从天文和地理的经纬制出发，指出平面上的点和实数对 (x,y) 的对应关系。 x,y 的不同数值可以确定平面上许多不同的点，这样就可以用代数的方法研究曲线的性质。这就是解析几何的基本思想。

具体地说，平面解析几何的基本思想有两个要点：第一，在平面建立坐标系，一点的坐标与一组有序的实数对相对应；第二，在平面上建立了坐标系后，平面上的一条曲线就可由带两个变数的一个代数方程来表示了。从这里可以看到，运用坐标法不仅可以把几何问题通过代数的方法解决，而且还把变量、函数以及数和形等

重要概念密切联系起来了

费马研究解析几何，是从曲线的轨迹入手的。1629年，费马撰写的《平面和立体轨迹引论》一书中，通过研究圆锥被平面截得的椭圆，给出了椭圆方程，即：

$$y^2 = kx(a-x)$$

这里， x 、 y 脱离了单纯的几何中的线段的意义，另被赋予代数符号的意义。这样，对几何曲线特征的研究，通过引进变量（坐标）以普遍的方式成功地译成代数的语言费马接着按照这种思路，对各种不同的曲线找出相应的代数方程，并使之成为一般的和统一的研究手段——这也就是解析几何的核心思想之所在

（二）解析几何的基本内容

在解析几何中，首先是建立坐标系取定两条相互垂直的、具有一定方向和度量单位的直线，叫做平面上的一个直角坐标系 $o_x y$ 。利用坐标系可以把平面内的点和一对实数 (x, y) 建立起一一对应的关系除了直角坐标系外，还有斜坐标系、极坐标系、空间直角坐标系等等。在空间坐标系中还有球坐标和柱面坐标。

坐标系将几何对象与数、几何关系和函数之间建立了密切的联系，这样就可以对空间形式的研究归结成比较成熟也容易驾驭的数量关系的研究了。用这种方法研究几何学，通常就叫做解析法。这种解析法不但对于解析几何是重要的，就是对于几何学各个分支的研究也是十分重要的

同时，曲线与方程的关系是双向的，即借助于曲线来研究方程和考察方程所定义的曲线。

解析几何的创立，不仅将代数和几何联系起来，同时把变量的概念引入数学，使数学进入了新的、划时代的发展时期，这就是变量数学时期。解析几何在数学发展中起了推动作用。恩格斯对此曾经作过这样的评价“数学中的转折点是笛卡尔的变数，有了变数，运动进入了数学；有了变数，辩证法进入了数学；有了变数，微分和积分也就立刻成为必要的了，……”

（三）解析几何的意义

解析几何又分为平面解析几何和空间解析几何两个学科。

在平面解析几何中，除了研究直线的有关性质外，主要是研究圆锥曲线（圆、椭圆、抛物线、双曲线）的性质。

在空间解析几何中，除了研究平面和直线的有关性质外，主要研究柱面、锥面和旋转曲面。

椭圆、双曲线、抛物线的有些性质，在生产或生活中被广泛应用。比如电影放映机的聚光灯泡的反射面是椭圆面，灯丝在一个焦点上，影片门在另一个焦点上；探照灯、聚光灯、太阳灶、雷达天线、卫星天线、射电望远镜等都是利用抛物线的原理制成的。

总的来说，解析几何运用坐标法可以解决两类基本问题：一类是满足给定条件点的轨迹，通过坐标系建立它的方程；另一类是通过方程的讨论，研究方程所表示的曲线性质

运用坐标法解决问题的步骤是：首先在平面上建立坐标系，把已知点的轨迹的几何条件“翻译”成代数方程；然后运用代数工具对方程进行研究；最后把代数方程的性质用几何语言表达出来，从而得到原来几何问题的答案。

坐标法的思想，促使人们运用各种代数方法解决几何问题。原来被看作几何学中的难题，一旦运用代数方法后就变得平淡无奇了坐标法对近代数学的机械化证明也提供了有力的工具。

三、微积分

微积分学是微分学和积分学的总称。微积分的创建，是经过大约一个世纪的酝酿而在 17 世纪末叶由英国科学家牛顿和德国数学家莱布尼兹二人分别独立完成的。

（一）微积分的背景知识

微积分的产生，主要是为了解决当时的科学应用问题，包括力学和天文学等。这些问题被归纳为 4 个类型：

第一类问题是求运动物体的瞬时速度。对于匀速直线运动的物体，这一问题可由常量数学方法求解，但在变速运动情况下，常量数学就无能为力了。这是因为 $s/\Delta t=0/0$ 这在初等数学中是无意义的。

第二类问题是求曲线的切线。这个看似几何学的问题，在 17 世纪主要是解决光学问题。当时费马、笛卡尔、惠更斯、牛顿等人都在热衷于研究光学现象和透镜设计，显然，需要解决曲线及其法线和切线的相关问题。同时，研究沿曲线运动的物体的瞬时运动方向，也需要求解曲线的切线。

第三类问题是最大值和最小值问题。这一代数学问题主要是解决行星运动中的最值，如求某行星离开太阳的最远或最近距离。

第四类问题是求曲线长度、曲线围成的面积、曲面围成的体积、物体的重心、

一个体积相当大的物体(如行星)作用于另一物体上的引力。

客观世界的一切事物，小至粒子，大至宇宙，始终都在运动和变化着。因此，在数学中引入了变量的概念后，才有可能把运动现象用数学来加以描述。由于函数概念的产生和运用的加深，也由于科学技术发展的需要，一门新的数学分支——微积分学诞生了，这就是微积分学。微积分学这门学科，在数学发展中的地位是十分重要的，可以说它是继欧氏几何后全部数学知识门类中的最大创造。

17世纪下半叶，在前人工作的基础上，英国大科学家牛顿和德国数学家莱布尼茨分别在自己的国家独自研究和完成了微积分的创立工作，虽然这只是十分初步的工作，他们的最大功绩是把两个貌似毫不相关的问题联系在一起，一个是切线问题（微分学的中心问题），一个是求积问题（积分学的中心问题）。

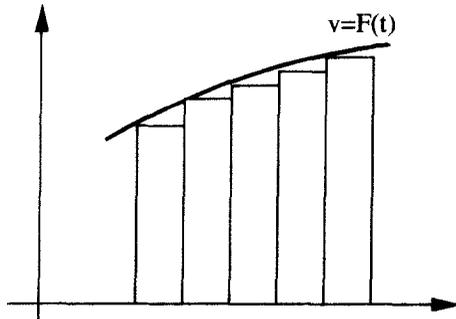


图 1-1

（二）微积分的基本内容与意义

研究函数，从量的方面研究事物运动变化是微积分的基本思想和方法。

关于微分，假定我们已知一物体运动的时间（ t ）与距离（ s ）的函数关系，即 $s=f(t)$ ，根据解析几何的知识，该函数关系可得到一条曲线，如图 1-1。

设在 t_1 时物体到达的距离为 s_1 （即 P 点），经过 Δt 一段时间后，物体到达 Q 点（此时 s 为 $s_1 + \Delta s$ ）。如果 Δt 的数值很小，则 Δs 的值也很小，物体在这一小段时间内的运动可以看作是匀速的，即在此很短的时间内速度 $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ 。

如果 Δt 趋向于无穷小，则 Δs 也趋于无穷小，亦即 Q 点无限地接近于 P 点，那么速度 v_1 就是物体在 P 点时的速度。假设 s 和 t 的函数关系为

$$s=at^2 + bt + c \quad (a,b,c \text{ 为常数}) \quad (1)$$

$$\text{则 } s + \Delta s = a(t + \Delta t)^2 + b(t + \Delta t) + c$$

$$=at^2+2at \cdot \Delta t+a \Delta t^2+bt+b \Delta t+c \quad (2)$$

$$(2) \times (1), \text{得 } \Delta s=2at \cdot \Delta t+a \Delta t^2+b \Delta t \quad (3)$$

因为 Δt 非常小，比较起来， Δt^2 就更小，所以(3)中的项 Δt^2 可以略去，得

$$\Delta s=2at \cdot \Delta t+b \Delta t \quad (4)$$

$$\text{两边除以 } \Delta t: \frac{\Delta s}{\Delta t}=2at+b \quad (5)$$

当 Δs 和 Δt 趋向于无穷小时，(5)式可写为：

$$\frac{ds}{dt}=2at+b \quad (h)$$

由上面推导可知， $\frac{ds}{dt}=2at+b$ 即为运动物体在 t 时刻的瞬时速度 v ，

这就是微分的方法。

从图中还可以看出，当 Q 点无限接近 P 点时 $\frac{ds}{dt}$ 就是通过 P 点的切线的斜率。因此，通过微分法亦可求出曲线上任意一点的斜率，即确定曲线上任意点的切线确定曲线上某点的切线即可求出该点的法线，这对于几何光学的研究是十分重要的。

积分的思想和方法也源自实际应用。例如，求已知曲线所围的面积问题就是莱布尼兹研究积分的切入点。

假如已知一变速运动的速度 V 与时间 t 的函数关系为 $V=f(t)$ ，要求得某一时间间隔 (t_1 至 t_2) 中物体所经过的距离。可以把 t_1 至 t_2 这段时间分为许多很小的时间间隔 Δt ，这样，物体自 t_1 至 t_2 所经过的距离就等于图中各小矩形面积之和。若 Δt 趋于无穷小，这些面积之和即是自 t_1 至 t_2 间曲线下的面积（即所经过的距离）。用积分表示为：

$$S = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt$$

用积分的方法也可以求出曲面所围的体积。

微积分的这种通过函数研究变化量的方法叫做数学分析。本来从广义上说，数学分析包括微积分、函数论等许多分支学科，但是现在一般已习惯于把数学分析和微积分等同起来，数学分析成了微积分的同义词。

微积分学的创立，极大地推动了数学的发展，过去很多初等数学束手无策的问题，运用微积分往往迎刃而解，显示出微积分学的非凡威力。它的出现源自于力学与天文学等实际应用的需要，又反过来极大地促进了这些领域的研究进展。现在，微积分的应用早已超出上述基本应用而推广至诸多自然科学和社会科学学科。

应当指出的是，和历史上任何一项重大理论的完成都要经历一段时间一样，牛顿和莱布尼茨的工作也都是很不完善的。他们在无穷和无穷小量这个问题上，其说不

十分含糊。牛顿的无穷小量，有时候是零，有时候不是零而是有限的小量；莱布尼茨也不能自圆其说这些基础方面的缺陷，最终导致了第二次数学危机的产生。

直到 19 世纪初，法国科学学院的科学家以柯西为首，对微积分的理论进行了认真研究，建立了极限理论，后来又经过德国数学家维尔斯特拉斯进一步的严格化，使极限理论成为微积分的坚实基础，才使微积分进一步完善、成熟和发展起来。

17 世纪的数学，是在西方资产阶级夺取政权以及资本主义生产方式得到发展的时期，由于科学实验和生产实践的实际需要而取得重大突破的时期。以解析几何的产生为标志，数学进入变量数学时期微积分的创建，则是变量观点和方法的系统运用。微积分的产生，是数学冲破（以古希腊为代表的）古典传统的逻辑严格性的束缚而面向力学、物理学和天文学等应用领域，重视解决实际问题的最显著的表现。这一事实表明，数学进入近代时期所具有的可用性特征。

从柯西 1821 年发表《分析教程》至 1945 年第二次世界大战结束，为近代数学时期。在这一时期，数学发生了一系列本质性的变化。代数方面突破了以方程为中心的代数学，产生了近世代数系统；极限理论对微积分的完善丰富了分析学。而几何学更是突破了两千多年一成不变的欧氏几何体系，产生了非欧几何理论、黎曼空间理论和“希尔伯特公理系统”。有人将 19 世纪称为几何复兴的时期，是不为过的。

四、非欧几何

从公元前 3 世纪到公元 18 世纪的很长一段时间里，欧几里得几何学被认为是在逻辑上很严密的经典之作人们把《几何原本》作为衡量其他数学论证是否严密的比较标准。但是随着历史的发展，特别是逻辑学的发展，逐渐发现《几何原本》中存在着不少不严密的地方，最严重的就是关于第五公设的表述。对第五公设的研究导致非欧几何的诞生。

（一）非欧几何的背景知识

首先让我们回顾一下欧氏几何的第五公设：

一条直线与另外两条直线相交，如果在同侧的两个内角之和小于两直角那么不加限制地延长这两条直线，则这两条直线就在这一侧相交。

第五公设又称为平行公设，不仅语言描述模糊，而且文字冗长，其所肯定的事实也不明显，即缺乏自明性和说服力为此，第5公设被当作欧氏几何的“污点”，人们曾经从两种途径对此进行研究：一是试图用欧氏几何学的其他9条公理，合乎逻辑地推导出平行公理来；一是试图用更为自明的命题来取代平行公理。

许多数学家都尝试过第5公设的证明，但都失败了实际上，第五公设是不可证明的，它是独立于其他假设的！由于两千多年来传统偏见的束缚，要认识到这一点，必须要有非同寻常的勇气和想象力。

到了19世纪20年代，一个数学家几乎同时提出了新的公理体系的思想。他们是德国的高斯、匈牙利的波耶和俄国的罗巴切夫斯基。最终由罗巴切夫斯基完成了这一学说创立了非欧几何学，又称罗氏几何。

罗巴切夫斯基（N.I.Lobachevsky, 1793—1856）于1816年前后开始研究第五公设，起初他也试图证明它，后来他果断地放弃了这种尝试，而用其他另外的公设来代替它。

他提出了一个和欧式平行公理相矛盾的命题，用它来代替第五公设，然后与欧式几何的前四个公设结合成一个新的公理系统，展开一系列的推理他认为如果以这个系统为基础的推理中出现矛盾，就等于证明了第五公设这其实就是反正法的运用。

但是，在他极为细致深入的推理过程中，得出了一个又一个在直觉上匪夷所思，但在逻辑上毫无矛盾的命题最后，罗巴切夫斯基得出两个重要的结论：

首先，第五公设不能被证明。

其次，在新的公理体系中展开的一连串推理，得到了一系列在逻辑上无矛盾的新的定理，并形成了新的理论。这个理论像欧式几何一样是完善的、严密的几何学。

这就是第一个被系统地提出的非欧几何学，世称罗巴切夫斯基几何，简称罗氏几何。

从罗巴切夫斯基创立的非欧几何学中，可以得出一个极为重要的、具有普遍意义的结论：逻辑上互不矛盾的一组假设都有可能提供一种几何学。

（二）罗氏几何

罗氏几何学的公理系统和欧式几何学不同的地方仅仅是把欧式几何平行公理用一个新的公理来代替：

过直线外一点，至少可以做两条直线和这条直线平行。

其他公理基本与欧氏几何基本相同由于平行公理不同，经过演绎推理却引出

了一连串和欧式几何内容不同的新的几何命题。

因此，凡是不涉及到平行公理的几何命题，在欧式几何中如果是正确的，在罗式几何中也同样是正确的。在欧式几何中，凡涉及到平行公理的命题，在罗式几何中都不成立，他们都相应地含有新的意义。下表举几个例子加以说明：

表 1-1 欧氏几何与罗氏几何比较

| 欧氏几何 | 罗氏几何 |
|------------------------|-------------------------------|
| ◆同一直线的垂线和斜线相交。 | ◆同一直线的垂线和斜线不一定相交。 |
| ◆垂直于同一直线的两条直线互相平行。 | ◆垂直于同一直线的两条直线，当两端延长的時候，离散到无穷。 |
| ◆存在相似的多边形。 | ◆不存在相似的多边形。 |
| ◆过不在同一直线上的三点可以做且仅能做个圆。 | ◆过不在同一直线上的三点，不一定能做一个圆。 |

从上表所列举的罗氏几何的一些命题可以看到，这些命题和我们所习惯的直观形象相矛盾。所以罗氏几何中的一些几何事实没有欧氏几何那样容易被人接受。但是，数学家们经过研究，提出可以用我们习惯的欧式几何中的事实作一个直观“模型”来解释罗氏几何是正确的。

1868年，意大利数学家贝特拉米发表了一篇著名论文《非欧几何解释的尝试》，证明非欧几何可以在欧几里得空间的曲面（例如拟球曲面）上实现。这就是说，非欧几何命题可以“翻译”成相应的欧几里得几何命题，如果欧几里得几何没有矛盾，非欧几何也就自然没有矛盾。人们既然承认欧几里得几何是没有矛盾的，所以也就自然承认非欧几何没有矛盾了。直到这时，长期无人问津的非欧几何才开始获得学术界的普遍注意和深入研究，罗巴切夫斯基的独创性研究也就由此得到学术界的高度评价和一致赞誉，他本人则被人们称为“几何学中的哥白尼”。^①

（三）黎曼几何

以罗氏几何为代表的非欧几何诞生二十多年后，德国数学家黎曼又在此领域做出了新的贡献。有趣的是，黎曼也是从平行公理入手的

欧氏几何与罗氏几何中关于结合公理、顺序公理、连续公理及合同公理都是相同的，只是平行公理不同。欧式几何讲“过直线外一点有且只有一条直线与已知直

线平行”罗氏几何讲“过直线外一点至少有两条直线和已知直线平行”。那么是否存在这样的几何“过直线外一点，没有一条直线与已知直线平行”？黎曼几何回答了这个问题。

黎曼在 1851 年所作的一篇论文《论几何学作为基础的假设》中明确地提出另一种几何学的存在，开创了几何学的一片新的广阔领域

黎曼几何中的一条基本规定是：

在同一平面内，任何两条直线都有公共点（即相交）

即在黎曼几何学中不承认平行线的存在它的另一条公设为：

直线可以无限延长，但总的长度是有限的

黎曼几何的空间模型是一个经过适当“改进”的球面。黎曼几何在爱因斯坦的广义相对论中得到了重要的应用和推广，广义相对论中的空间就是黎曼几何空间。在广义相对论里，爱因斯坦放弃了关于时空均匀性的观念，他认为时空只是在充分小的空间里以一种近似性而均匀的，但是整个时空却是不均匀的。物理学中的这种解释，恰恰和黎曼空间的观念相似，即：

在一般的黎曼空间中，每一点的曲率是不同的，在特殊的情况下黎曼空间可以是均匀的，即具有恒常曲率。

恒常曲率的空间有三种类型：

零曲率空间，即欧氏空间；

负曲率空间，即罗氏空间；

正曲率空间，即狭义的黎曼空间。

不同的空间满足不同的几何公理体系。这样，黎曼几何就把欧氏几何与非欧几何相统一了，欧氏几何和罗氏几何是更一般的黎曼几何的特例。

黎曼几何的创建显然具有非常广泛和深远的意义同时，黎曼几何在数学中也是一个重要的工具。它不仅是微分几何的基础，也应用在微分方程、变分法和复变函数论等学科领域。

（四）三种几何的比较

欧氏几何、罗氏几何和黎曼几何是三种各有区别的几何。这三种几何各自所有

的命题都构成一个严密的公理体系，各公理之间满足和谐性、完备性和独立性。因此，这三种几何都是正确的。在我们现实生活的这个“不大不小、不远不近”的空间里，欧式几何是适用的；在宇宙空间或原子核世界，罗氏几何更符合客观实际；在地球表面研究航海、航空等实际问题中，黎曼几何则更合适一些。

（五）非欧几何的意义

以罗氏几何和黎曼几何为代表的非欧几何的产生和发展，结束了欧氏空间一统天下的时期，成为近代数学向现代数学转折的标志。

非欧几何的产生也是数学从以直观为基础的时代进入以理性（抽象）为基础的标志，同时表明数学世界可以独立于现实物理世界。尽管非欧几何所揭示的事实与我们的现实经验有巨大差异，但它在逻辑上同欧氏几何一样是完美无缺的。正因为如此，以非欧几何为数学模型和基本工具而产生的相对论和量子论得以确立并逐步为人们所理解

非欧几何的产生催生出一系列新的学科，如数学哲学、微分几何学、射影几何学等，促进了哲学与自然科学的发展。

非欧几何的发现，是几何学的一次解放，也是数学思想的一次解放。数学家们可以随心所欲地选取公设，建立公理体系。数学从一种绝对的真理变成了人类思想的自由创造，而不是受我们自己生活于其中的世界摆布的事物正如康托所说：“数学的本质在于其自由！”非欧几何的出现，昭示着现代数学多元化时代的到来。

五、数理逻辑与集合论

数理逻辑与集合论是现代数学的基础。数理逻辑又称符号逻辑，是用符号表示命题和推理、研究前提和结论之间形式关系与推理过程的学科。数理逻辑由莱布尼兹首创，英国数学家 G.布尔实际完成了逻辑数学化的过程。

（一）背景知识

20 世纪初，德国数学家弗雷格、意大利数学家皮亚诺、英国数学家怀特海和罗素共同完成了现代数理逻辑的奠基工作。弗雷格首先建立了量词理论和一阶谓词演算规则，从而给出了第一个严格的公理系统，他在《算术的基本规律》中首先从逻辑出发来定义基数，并推导出一系列算术定理。皮亚诺的杰出工作是给出了关于自然数的五条公理，被称为皮亚诺公理。在他们工作的基础上，罗素和怀特海于 1910

1913 年间发表了影响深远的名著 《数学原理》 这部著作，对于数理逻辑的确立和发展起到了重要作用

（二）数理逻辑的内容与意义

现代数理逻辑的内容可大致分为三个层次：

（1）狭义的数理逻辑也称经典谓词逻辑它是数理逻辑中最基础的部分，是传统演绎逻辑基本内容的精密化、精确化和完善化，也是在证明数学定理时所用的最基本的逻辑推理规律。

（2）较广义的数理逻辑始创于 20 世纪初对数学基础的研究而形成四个数理逻辑分支，即模型论、公理集合论、递归论和证明论，简称四论。这四论构成了现代数理逻辑的四个支柱，有时也统称为数学逻辑。

（3）最广义的数理逻辑除上述内容外，还包括归纳逻辑、模态逻辑，时态逻辑、多值逻辑等等尽管范围广泛，它们仍然是用数学方法研究的逻辑。

随着计算机的发展，研究数理逻辑的重要性更加明显了。莱布尼兹早就怀有这样的理想：数理逻辑、数学与计算机三者出于一个统一的目标，即思维过程的演算化、计算化，以至于在计算机上实现思维的过程。他本人先后研究符号逻辑和机械计算机就是为了实现这个理想。20 世纪 40 年代以来，经过数学家冯·诺伊曼、图灵和哥德尔等人的卓越奋斗，莱布尼兹的理想逐步得到具体的实现

数理逻辑和集合论的产生带来了数学的公理化运动正当人们认为数学的严格性时代已经来临之时，英国哲学家、数学家罗素提出了著名的“理发师悖论”¹而震惊了整个数学界，带来了所谓的“第三次数学危机”。

六、拓扑学

拓扑学原本是几何学的一个分支，是研究图形在连续变形下保持不变的性质的学科所谓连续变形，形象地说就是对其进行弯曲、拉大与缩小，但不允许断裂或粘合的变形。现在已发展成为研究连续现象的数学，是超出几何学而独立存在的数学分支。拓扑学酝酿于 19 世纪末，成形于 20 世纪两次大战期间，其后有重大发展。现已渗透到自然科学和社会科学的诸多领域。

¹某村唯一理发师约定，他只给村中不为自己理发的人理发。那么理发师本人属于哪一类人，无论答案如何都会引起矛盾

七、泛函分析

(一) 背景知识

泛函分析是研究拓扑线性空间到拓扑线性空间之间满足各种拓扑和代数条件的映射的分支学科它是在 20 世纪 30 年代形成的。是从变分法、微分方程、积分方程、函数论以及量子物理等的研究中发展起来的，它运用几何学、代数学的观点和方法研究分析学的课题，可看作无限维的分析学。

由于分析学中许多新分支的形成，揭示出分析、代数、集合的许多概念和方法常常存在相似的地方。比如 代数方程求根和微分方程求解都可以应用逐次逼近法 并且解的存在和唯一性条件也极其相似。这种相似在积分方程论中表现得就更为突出了。泛函分析的产生正是和这种情况有关，有些乍看起来很不相干的东西，都存在着类似的地方。因此它启发人们从这些类似的东西中探寻一般的真正属于本质的东西。

非欧几何的确立拓广了人们对空间的认知， n 维空间几何的产生允许我们把多变函数用几何学的语言解释成多维空间的影响。这样，就显示出了分析和几何之间相似的地方，同时存在着把分析几何化的一种可能性。这种可能性要求把几何概念进一步推广，以至最后把欧氏空间扩充成无穷维数的空间。

这时候，函数概念被赋予了更为一般的意义，古典分析中的函数概念是指两个数集之间所建立的一种对应关系。现代数学的发展却是要求建立两个任意集合之间的某种对应关系。

在数学上，把无限维空间到无限维空间的变换叫做算子。研究无限维线性空间上的泛函数和算子理论，就产生了一门新的分析数学，叫做泛函分析。在 20 世纪 30 年代，泛函分析就已经成为数学中一门独立的学科了。

(二) 泛函分析的内容与意义

泛函分析的特点是它不但把古典分析的基本概念和方法一般化了，而且还把这些概念和方法几何化了。比如，不同类型的函数可以看作是“函数空间”的点或矢量，这样最后得到了“抽象空间”这个一般的概念。它既包含了以前讨论过的几何对象，也包括了不同的函数空间。

泛函分析对于研究现代物理学是一个有力的工具。 n 维空间可以用来描述具有 n 个自由度的力学系统的运动，实际上需要有新的数学工具来描述具有无穷多自由度的

力学系统。比如梁的震动问题就是无穷多自由度力学系统的例子。一般来说，从质点力学过渡到连续介质力学，就要由有穷自由度系统过渡到无穷自由度系统—现代物理学中的量子场理论就属于无穷自由度系统

正如研究有穷自由度系统要求 n 维空间的几何学和微积分学作为工具一样，研究无穷自由度的系统需要无穷维空间的几何学和分析学 这正是泛函分析的基本内容因此，泛函分析也可以通俗地叫作无穷维空间的几何学和微积分学。古典分析中的基本方法，也就是用线性的对象去逼近非线性的对象，完全可以运用到泛函分析这门学科

半个多世纪以来，泛函分析一方面以其他诸多学科所提供的素材来提取自己研究的对象，和某些研究手段，并形成了自己的许多重要分支。例如算子谱理论、巴拿赫代数、拓扑线性空间理论、广义函数论等等；另一方面，它也强有力地推动着其他不少分析学科的发展它在微分方程、概率论、函数论、连续介质力学、量子物理、计算数学、控制论、最优化理论等学科中都有重要的应用，还是建立群上调和分析理论的基本工具，也是研究无限个自由度物理系统的重要而自然的工具之一。今天，它的观点和方法已经渗入到不少工程技术性的学科之中，成为近代分析的基础之一

八、模糊数学

1965年，美国控制论专家、数学家查德发表了一论文《模糊集合》。标志着模糊数学这门学科的诞生。

（一）背景知识

现代数学建立在集合论的基础上。集合论的重要意义就一个侧面看，在于它把数学的抽象能力延伸到人类认识过程的深处。一组对象确定组属性，人们可以通过说明属性来说明概念（内涵），也可以通过指明对象来说明它。符合概念的那些对象的全体叫作这个概念的外延，外延其实就是集合。从这个意义上讲，集合可以表现概念，而集合论中的关系和运算又可以表现判断和推理，一切现实的理论系统都可能纳入集合描述的数学框架

在较长时间里，精确数学及随机数学在描述自然界多种事物的运动规律中，获得了显著效果。但是，在客观世界中还普遍存在着大量的模糊现象。以前人们回避它，但是，由于现代科技所面对的系统日益复杂，模糊性总是伴随着复杂性出现。

各门学科，尤其是人文、社会学科及其他“软科学”的数学化、定量化趋向，

把模糊性的数学处理问题推向中心地位。更重要的是，随着电子计算机、控制论、系统科学的迅速发展，要使计算机能像人脑那样对复杂事物具有识别能力，就必须研究和处理模糊性

与计算机相比，人的大脑具有处理模糊信息的能力，更善于判断和处理模糊现象但计算机对模糊现象识别能力较差，为了提高计算机识别模糊现象的能力，就需要把人们常用的模糊语言设计成机器能接受的指令和程序，以便机器能像人脑那样简洁灵活地做出相应的判断，从而提高自动识别和控制模糊现象的效率。这样，就需要寻找一种描述和加工模糊信息的数学工具，这就推动了数学家深入研究模糊数学。所以，模糊数学的产生有着科学技术与数学发展的必然性

（二）模糊数学的内容与意义

模糊数学的研究内容主要有以下三个方面：

第一，研究模糊数学的理论，以及它和精确数学、随机数学的关系。查德以精确数学集合论为基础，并考虑到对数学的集合概念进行修改和推广。他提出用“模糊集合”作为表现模糊事物的数学模型。并在“模糊集合”上逐步建立运算、变换规律，开展有关的理论研究，就有可能构造出研究现实世界中的大量模糊的数学基础，能够对看来相当复杂的模糊系统进行定量的描述和处理的数学方法。

在模糊集合中，给定范围内元素对它的隶属关系不一定只有“是”或“否”两种情况，而是用介于0和1之间的实数来表示隶属程度，还存在中间过渡状态。比如“老人”是个模糊概念，70岁的肯定属于老人，它的从属程度是1；40岁的人肯定不算老人，它的从属程度为0。按照查德给出的公式，55岁属于“老”的程度为0.5，即“半老”，60岁属于“老”的程度0.8。查德认为，指明各个元素的隶属集合，就等于指定了一个集合。当隶属于0和1之间值时，就是模糊集合。

第二，研究模糊语言学 and 模糊逻辑人类自然语言具有模糊性，人们经常接受模糊语言与模糊信息，并能做出正确的识别和判断。

为了实现用自然语言跟计算机进行直接对话，就必须把人类的语言和思维过程提炼成数学模型，才能给计算机输入指令，建立合适的模糊数学模型，这是运用数学方法的关键。查德采用模糊集合理论来建立模糊语言的数学模型，使人类语言数量化、形式化。

如果我们把合乎语法的标准句子的从属函数值定为1，那么，其他语法稍有错误，但尚能表达相仿思想的句子，就可以用以0到1之间的连续数来表示它从属于“正确句子”的隶属程度。这样，就能对模糊语言进行定量描述，并定出一套运

算、变换规则目前，模糊语言还很不成熟，语言学家正在深入研究

人们的思维活动常常要求概念的确定性和精确性，采用形式逻辑的排中律。既非真即假，然后进行判断和推理，得出结论。现有的计算机都是建立在二值逻辑基础上的，它在处理客观事物的确定性方面，发挥了巨大的作用，但是却不具备处理事物和概念的不确定性或模糊性的能力

为了使计算机能够模拟人脑高级智能的特点，就必须把计算机转到多值逻辑基础上，研究模糊逻辑目前，模糊逻辑还很不成熟，尚需继续研究

第三，研究模糊数学的应用模糊数学是以不确定性的事物为其研究对象的模糊集合的出现是数学适应描述复杂事物的需要，查德的功绩在于用模糊集合的理论找到了解决模糊性对象加以确切化，从而使研究确定性对象的数学与不确定性对象的数学沟通起来、过去精确数学、随机数学描述感到的不足之处，就能得到弥补。在模糊数学中，目前已有模糊拓扑学、模糊群论、模糊图论、模糊概率、模糊语言学、模糊逻辑学等分支

作为一门新兴学科，模糊数学已初步应用于模糊识别模糊决策、模糊评判、系统理论、信息检索、医学、生物学等各个领域。在气象、结构力学、控制、心理学等方面已有具体的研究成果然而，模糊数学最重要的应用领域是计算机智能，人们普遍看好它与新一代计算机的密切联系。目前世界上发达国家正积极研究试制具有智能化的模糊计算机，并取得了一些阶段性成果

九、运筹学

(一) 背景知识

运筹学兴起于 20 世纪 40 年代。在第二次世界大战期间，由于战争的需要，英、美等国家组织了一些学者，包括数学家、物理学家、心理学家和指挥作战的军官等，从事研究包括兵员、武器后勤保障等战争因素的合理调度和综合应用，以期实现高效利用人力物力而取胜的目的。他们的工作主要是用数学来表达和研究有关运用、筹划和管理等方面的问题，通过数学的分析和运算方法得出指导性结论这一工作取得了著的效果。战后，人们把这些经验应用到经济建设以及其他领域，运筹学作为一门学科便形成了

（二）运筹学的几个分支

短短的几十年来，运筹学的理论和应用得到了很快发展，形成了规划论、对策论、排队论和优选法等分支。

1 规划论。主要研究计划管理工作中有关安排和估值等问题，如物资调运、巡回路线、最大通过能力等。这些问题在数学上都可归纳为：在满足既定条件要求下，按某一衡量指标寻求最优方案。应用规划论的典型例子是“运输问题”：假定货物数量和运输费用为定值，规划该货物从仓库到各战场，在要求供需平衡的条件下，定出货物的流量和流向，并使总运费最少这里，要求满足的条件称为约束条件，衡量指标称为目标函数，规划论就是研究某一目标函数在一定约束条件下的最大（或最小）值的问题。

2 对策论与排队论。对策论是从策略的观点出发，研究竞赛性、斗争性活动怎样取胜的学科。如在飞机侦察、兵力布置以及体育竞赛等活动中根据对手情况来研究对策。“田忌赛马”的故事就是一个典型的例子。排队论主要研究随机性的拥护现象，用概率论、理论和方法建立各种排队系统模型，从而研究怎样改进系统的设计和控制，以提高系统的效率如“电话交换台设置”就是排队论解决的典型问题。

3 优选法。就是寻求最好的方法来解决最优化问题优选法不仅要找出问题的最优解，而且要提高求解的效率。优选法分为单因素优选法和多因素优选法。“0.618法”和“爬山法”，分别是两种优选法的典型算法。

第四节 数学的发展趋势

一、研究的深入性和学科的统一性

数学研究是一种严谨的思维活动。数学研究的实质可以分为三个层次，这就是数学问题的抽象、寻找解决问题的方法和途径以及对数学问题本质的理解。这种理解就是将问题及解决的方法纳入公理化的理论体系。数学的发展趋势与数学研究不断深入的情形极为相似，经历了从现实到理性的变迁，正在继续走向深入和抽象。从数学研究的方法论来看，数学研究经历了分析法和综合法等传统方法，到了 20 世纪中

叶，出现了系统论、信息论、控制论等系统科学以及电子计算机应用技术，这些系统科学和技术一方面引入了数学的研究成果，但反过来对数学研究又产生巨大影响，使得数学研究从理论方法和技术手段上向研究的深入性更大步地迈进。同时，随着数学研究的日益深入，新的理论体系和学科分支不断形成（上述数学研究的第三个层次就表现为新的数学理论体系开始创建），而新的理论体系和学科分支无不以现有的数学理论为基础并包容其他相关学科和体系的内容因此，数学的理论体系必将向内容更加丰富、体系更为庞大、分支众多，且互相交叉、渗透的学科群方向发展。

二、理论的抽象性和应用的广泛性

数学研究的深入必将导致数学理论更加远离现实问题而显得更加抽象。这是由数学的本质所决定的所谓抽象，就其行为来讲，是指在认识上把事物的某种属性从整体中抽取出来客观存在的任何事物都有其现象与本质，本质往往隐藏在其现象背后而不易为人所感知由于数学是研究量的科学，所以需要且必须把握客观事物本质的量及量之间的关系，而撇开其他无关紧要的东西，即把量和量的关系抽取出来，专门研究数学中的一切概念、关系和原理都是抽象的结果。现代数学更是在抽象的基础上再经过多次抽象而成为高度抽象的理论

是不是随着数学的抽象，使其更加远离现实社会，或者说在现实社会中的应用越来越少了呢？答案是否定的恰恰相反，随着数学理论的高度抽象，其应用范围更加广泛这是因为数学的抽象是去粗取精、去伪存真、由表及里、由此及彼的过程。数学抽象的结果是更加深刻、更加准确地反应客观事物，这首先在理论上肯定了抽象的数学在现实社会中广泛应用的可能性。

在实际生产和生活中，这样的例子也是俯拾皆是、不胜枚举非常典型的例子就是关于计算机的应用数千年以前，人们发现了事物的数量关系并引入数字符号进行运算，可以认为是对计算问题的第一次抽象。20世纪30年代，英国数学家图灵运用抽象分析法，舍弃计算工具、符号等与运算实质无关的因素，建立了“线性”数学运算模型，并证明一切可计算问题都可以机械地进行图灵的卓越工作，可以认为是对计算问题的第二次抽象。在寻求计算机的过程中，人们发现采用二进制比原来常用的十进制更具优势，尽管它看起来更为抽象结果，采用二进制运算的电子计算机取得了成功，只使用0和1两个数码的电子计算机可以解决众多复杂的数学计算问题。紧接着，人们发现除了数值运算以外，字符、图形、图像、视频信号和音频信号甚

至温度、压力、气味等信息，都可以通过一定的编码方法抽象为只有二进制数码来表示的信息也就是说，以处理二进制数码信息为基本原理的电子计算机可以处理上述各种媒体的信息。由于这一信息处理技术应用的日益广泛而引发了一场信息革命正在研发的新一代计算机，如量子计算机，所运用的数学模型较电子计算机更为抽象，但不难想象，其应用将会更加广泛和深入。

（三）向其他学科渗透

马克思曾经指出，一门科学只有在成功地运用数学时，才算达到了真正完善的地步^①这是对数学不断加速向其他学科渗透的科学预见

从理论上讲，客观世界的一切事物都是质和量的统一体，而数学是研究数量关系与空间结构关系的科学，这就决定了数学和它的方法可以普遍应用于任何一门科学。但数学是对客观事物的高度抽象，一门科学只有发展到一定程度才具备应用数学（来解决实际问题）的条件科学认识的规律是，先对事物进行定性的研究，进而对事物的量、量的关系及发展演变规律进行研究，即定量的研究。只有进行精确的定量研究，才能深刻认识和正确把握事物的本质及其发展变化的规律。反过来说，一门科学发展到一定程度势必运用数学才可能达到完善的进步。

在自然科学和技术科学诸领域，运用数学的情形已经非常普遍，在社会科学诸学科和领域，建立数学模型、应用数学方法的情况也正日益增多。随着系统科学和计算机技术应用的普及，各学科对数学的应用会越来越多，数学向各学科的渗透会更加广泛和深入

^① 引自关上续主编：《科学技术史教程》，高等教育出版社，1989年版，第435页。

第二章

自然科学的领头羊——物理学

物理学研究有关物质的结构、相互作用及其运动的最基本、最普遍的规律它的研究范围从已知最小的微粒夸克，到无所不包的宇宙物理学是整个自然科学和技术的基础，在科技发展史上常扮演着领头羊的角色

物理学的发展经历了从古代萌芽时期、到近代经典物理学、再到现代物理学三个阶段在古代，人类的生产实践活动已经孕育着物理学知识的萌芽，如几十万年前我们的祖先使用的石斧、石刀，已经蕴含着斜面这种简单机械可以省力的原理但直到 16 世纪之前，科学和技术还常常混杂在一起，物理学并未形成独立的学科它主要是人们对自然界的观察和实践经验的总结，还常常带有猜侧和思辨的成分，实验的方法只在某些科学家（如古希腊的阿基米德、中国的墨子、沈括等）中得到了初步的应用

古代物理学的成就在物质的本原和组成方面，有古希腊德谟克利特等人提出的最早的原子论、水上火气四元素说、中国的元气说、阴阳五行说等在力学方面，阿基米德发现了浮力原理、杠杆原理、物体的重心。中国古代的《墨经》、《考工记》、《论衡》、《天工开物》等著作对力的概念、杠杆原理、滚动摩擦、功的概念、材料的强度等许多方面均有相当多的论述。在光学方面，已经积累了有关光的直进、折射、反射、小孔成像，平、凹、凸面镜和透镜成像等知识。在电磁学方面，发现了摩擦起电、磁石吸铁等现象，发明了指南针。在声学方面，已掌握了音律、共鸣等知识。

到了16世纪，由于采用了系统的实验方法和严密的数学推理，物理学才逐渐发展成独立的学科。至19世纪末期，牛顿力学、热力学和统计物理学、电动力学等分支学科相继建立，形成了经典物理学（或称古典物理学）完整的理论体系，对科学和生产的发展发挥了巨大的推动作用。

19世纪末20世纪初，人们又发现了一系列新的实验事实，从而导致了物理学上一场深刻的革命，诞生了现代物理学的两大基础理论——相对论和量子力学，而原子核物理学、粒子物理学、凝聚态物理学等是现代物理学最活跃的分支学科。现代物理学的发展不仅带动了其他学科的发展（如产生了量子化学、分子生物学等），也促进了原子能、电子计算机、自动化、航空航天、激光、现代通信等高新技术的产生和发展，使人类进入了高度文明的新时代。

第一节 经典物理学

一、经典力学

力学研究物质最简单的运动形式——机械运动的规律，是物理学中最早建立起来的分支。16世纪，意大利著名科学家伽利略把观察、实验同数学及逻辑推理相结合，开创了近代科学的经典研究方法，并以落体定律、惯性定律、抛体运动和力学相对性原理等的研究，成为近代物理学的开山鼻祖。他首先用逻辑推理的方法推翻了古希腊哲学家亚里士多德关于“重物比轻物先落地”的错误说法，然后用黄铜球沿铺有羊皮纸的光滑斜面滚下的实验加逻辑推理得出了自由落体定律： $s = \frac{1}{2}gt^2$ 。他又在第一个斜面的后面放上另一个斜面，让黄铜球从第一个斜面滚下后再滚上第二个斜面，发现其上升的最大高度几乎等于下降的高度，因此随着第二个斜面倾角的

减小而滚得更远，推而广之，若第二个斜面水平放置且没有摩擦，则球就可以一直滚下去。于是，伽利略就得到了惯性定律的原始形式：沿水平面运动的物体当不受阻力时作匀速运动。

在惯性定律和自由落体定律的基础上，伽利略很容易地证明了抛体的运动轨迹是条抛物线，其证明中包含了动叠加（合成）原理。伽利略还提出了以他的名字命名的相对性原理：在一切惯性参照系（互相之间可作匀速直线运动）中，力学规律是相同的。或曰：无法通过力学实验来判定一个参照系（如车、船）相对于另一个参照系（如地面）是作匀速直线运动还是静止。他在上大学的时候还发现了摆的等时性

荷兰物理学家惠更斯设计了用摆调节的摆钟，测定了摆长和振动周期的关系，并发现了圆周运动的向心力定律。德国天文学家开普勒利用其老师、丹麦天文学家第谷·布拉赫丰富的天文观测资料，推得行星运动三定律

英国物理学家、数学家牛顿是经典力学的集大成者，他在伽利略、惠更斯、笛子儿、开普勒等人研究的基础上，通过理论概括和实验研究，运用他本人发明的微积分，建立了适用于地上物体和天上星体的统一的力学体系。他的理论集中在1687年出版的《自然哲学的数学原理》一书中，在书中，牛顿首先严格定义了当时人们常常混淆的质量、动量、惯性、外力、向心力等概念，然后给出了后人以他的名字命名的运动三定律：第一定律即惯性定律，第二定律即牛顿运动方程： $F=ma$ ，第三定律是作用力和反作用力定律。牛顿在三个定律的推论中谈到了力的合成和分解的平行四边形法则、运动叠加原理和伽利略相对性原理，并由第二和第三定律导出了自然界一个重要的守恒定律——动量守恒定律：任何物质系统在所受外力之和为零时，总动量保持不变。它最初是由笛卡儿在运动不变的思想指导下提出来的，是研究碰撞、火箭发射等的理论基础

在书中，牛顿在开普勒行星运动三定律和惠更斯向心力定律的基础上，运用微积分的方法，给出并证明了万有引力定律：任何两个物体之间都有引力存在，引力的大小与两物体的质量的乘积成正比，而与它们之间的距离的平方成反比，写成式子即： $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ ，其中G为万有引力常数。牛顿建立起了整个经典力学体系的基础，完成了物理学史上的第一次大综合，使人类对物质运动的认识大大前进了一步。牛顿还用他的理论科学地解释了开普勒定律、地球的扁球形、潮汐现象等，后来人们又用牛顿力学理论通过计算预测了哈雷慧星，发现了海王星和冥王星等，从而树立起科学在人们心目中的威信

后来，人们又发现了能量转化和守恒定律（见热力学）和角动量（或称动量矩）守恒定律：当物体系统所受的合外力矩为零时，系统的角动量（每个质点的

动量与它到转轴的距离的乘积之和)保持不变例如冰上舞蹈和芭蕾舞演员,先张开双臂旋转,然后迅速将双臂收拢,由于到转轴的距离变小,而总角动量近似不变,所以旋转速度明显加快经典力学经过后人的不断发展完善,成为研究自然界宏观物体低速(相对光速而言)运动规律的系统而成熟的理论直到今天,它仍是机械、土木建筑、交通运输等工程技术的理论基础。

二、热力学和统计物理学

热力学和统计物理学统称热学,都是研究热现象的学科,其对象都是由大量分子或原子组成的物质系统。只不过热力学的方法是从宏观上进行研究,不涉及物质的微观结构,而统计物理学则从物质是由大量分子、原子所组成的观点出发,运用数理统计和概率论的方法得出其规律

(一)热力学的发展

早在远古时期,人们就在劳动中发现了摩擦生热等热现象,中国史书上还有物体热胀冷缩的记载但直到18世纪,人们才发明了温度计和温标(包括沿用至今的摄氏温标和华氏温标),建立起测温术。后来,人们又建立了另一种温标——热力学热标或称绝对温标,它的单位是开(K),0K相当于 -273.15 与此同时,热量、比热等概念,也通过实验建立起来,产生了量热学,并对蒸汽机的发明产生了积极的影响。

由于受当时流行的机械唯物主义的影响,18世纪的人们把热看作一种特殊的物质——热质,认为物体温度高是因为含热质多,它还可以从高温物体流向低温物体,从而解释了热传导的一些规律18世纪末到19世纪初,由于伦福德、戴维等人用实验证明热可由机械运动转化而来,人们才逐渐摒弃了热质说,接受了热是物质内部大量分子或原子无序运动(称热运动)的宏观表现的观点。

由于不同运动形式之间的相互联系和转化的事实越来越多地被揭示,到19世纪40年代,由不同国家、不同职业的十几位科学家从不同的角度提出了能量转化和守恒定律。其中英国的焦耳(他是一位啤酒厂主)通过在40年中做的400多个实验确定了热(用卡表示)和功(用千克米表示)之间的当量关系的数值,和现代测得的数值只差一点点。英国著名物理学家开尔文勋爵给出了能量转化和守恒定律在热力学中的表达形式,即热力学第一定律: $Q = \Delta U + A$ 其中 Q 是系统从外界吸收的热量, ΔU 是系统的内能(系统内分子或原子无规则热运动的动能及它们之间相互作用的势能之和)的增加量, A 是系统对外界作的功。能量转化和守恒定律是自然界最普遍、最基本的

规律之一，它为辩证唯物主义提供了重要的自然科学依据，并彻底否定了制造第一类永动机（不消耗能量而能够持续做功的机器）的幻想

热力学第一定律说明了不同形式的能量可以互相转化，在量上是守恒的，但没有回答在与热有关的过程中能量转化的方向问题，这一问题是由热力学第二定律解决的。在法国工程师卡诺对热机的循环过程进行的研究基础，德国物理学家克劳修斯和开尔文勋爵分别提出了热力学第二定律的两种表述。克劳修斯的表述为：热不可能自发地从低温物体传向高温物体；开尔文的表述为：不可能从单一热源吸取热量，使之完全变为有用功而不产生其它影响。热力学第二定律指明了一个孤立系统（与外界没有物质和能量交换的系统）的自发过程（如上述的热传导或热功之间的转化）可以进行的方向，或称与热现象有关的宏观过程的不可逆性。这两个定律奠定了经典热力学的理论基础

后来，德国物理、化学家能斯特又发现了热力学第三定律：绝对温度的零度（0K）不可能达到表明热运动不能完全停止，或热运动向其它运动形式的转化有一个极限

（二）统计物理学的发展

19世纪中叶，科学家通过对布朗运动（悬浮在液体中的固体微粒的无规则运动）的研究，认识到组成物质的分子或原子处于永不停息的无序运动之中。在此基础上，克劳修斯用理想气体模型（把气体分子看成自由运动的弹性小球。小球之间的距离远大于它们自身的线度）阐明了气体的压强、温度、扩散等宏观性质的微观机制。麦克斯韦和玻尔兹曼把统计方法和几率的概念引进热学，分别提出了麦克斯韦分子速率分布定律和气体分子在保守力场中的玻尔兹曼分布律。后来美国科学家吉布斯推广了麦克斯韦和玻尔兹曼的统计方法，发展为系统的理论，经典统计物理学就逐步建立起来了

克劳修斯还引进了熵的概念。熵是表示系统无序程度的物理量，分子运动愈混乱，系统的熵值就愈大。所以，热力学第二定律也可称为熵增加原理，即孤立系统的自发过程总是沿着熵增加的方向进行的。后来玻尔兹曼又给出了熵与系统热力学状态的几率（即包含的微观状态的数目）的关系：熵与热力学几率的对数成正比。从而表明熵增加原理的微观实质是：孤立系统内部发生的过程，总是从几率小的状态向几率大的状态变化，从而把宏观热现象同状态几率联系起来

统计物理学引入统计的概念，把热运动的宏观表现同分子的微观运动联系起来，用对大量分子运动状态的几率描述（可能性是多大）代表了对个别粒子运动状态

牛顿力学的决定性描述（肯定怎样怎样），这是物理学观念和方法的一个重要突破。后来，统计物理的方法在涉及多体问题的多个领域得到了应用，如固体物理、原子核物理、物理化学和天体物理等。

三、电磁学

电磁学是研究电磁现象的规律和应用的科学。在古代的中国和希腊，人们已对电现象和磁现象有了初步的了解。但较系统的实验研究是从近代开始的。16世纪末，英国女王伊丽莎白的御医希尔伯特，作了许多有关电和磁的实验，其中最有名的是所谓“小地球”实验：他把一块大的天然磁石磨制成一个大磁石球，把小磁针放在它周围的不同位置上，发现小磁针的行为同地球上的指南针的行为完全一样，从而证明了地球是一个大磁体球。

17、18世纪，人们又进行了一系列的观察和实验，并发明了一些实验仪器如起电机、莱顿瓶（一种原始的电容器）等，因而发现了更多的电磁现象，如同号电荷或磁极相斥，异号电荷或磁极相吸，物质分为导体和绝缘体，以及电流通过人体时的电击现象等等。1750年美国政治家和科学家富兰克林作了著名的风筝实验，他在雷雨天用风筝把云中的电引下来作实验，发现天上的电和实验室中产生出来的电是完全一样的，破除了人们对雷电的迷信，并进而发明了避雷针，将电学研究成果用来为人类服务。1785年，法国物理学家库仑用扭秤实验得到了电学第一个定量的规律——库仑定律：两个电荷之间的作用力与两个电荷电量的乘积成正比，与两个电荷之间距离平方成反比。1786年，意大利医生和解剖学家伽伐尼偶然发现用铜钩挂在铁栏杆上的蛙腿在碰到铁栏杆时发生抽搐，他的朋友、物理学家伏打在此基础上，经过深入的研究，于1800年发明了伏打电堆（电池），使人们对电的研究和应用由静电发展到电流。后来，德国物理学家塞贝克又制成了利用两个接头温度的不同产生电流的温差电偶。稳恒电流的产生，在实际应用（电光源、电解电镀等电化学）和理论研究方面都开辟了广阔的天地。

19世纪初期，一些数学家也为电磁学理论的发展作出了贡献。德国的高斯确定了电量和磁矩等电学量和磁学量的单位，完成了第一个合理的电磁学单位制。高斯还由库仑定律推导出了关于通过任一闭合曲面的电通量与其所包围的电量之间关系的高斯定理。法国的泊松、英国的格林和高斯都为电势理论的建立作出了贡献。数学家的加盟加快了电磁学研究理论化的步伐。

1827年，法国物理学家欧姆引入电流强度和电阻的概念，用实验的方法得出了

欧姆定律，并证明了导线的电阻与其长度成正比、与其横截面积成反比的结论。1847年，法国另一位物理学家基尔霍夫发展了欧姆定律，建立了用于复杂电路的基尔霍夫第一定律（节点电流定律）和第二定律（回路电压定律），阐明了电荷流动时的电量守恒和能量守恒。

在很长时期内电学和磁学都是被分别研究的但也有人猜想电和磁之间应该有某种联系。1920年，丹麦物理学家奥斯特在一次讲课中偶然发现通电导线附近的小磁针发生了偏转，从而发现了电流的磁效应。这一发现引起了法国思想敏锐的科学家安培的重视，他通过实验仅用7天就得到了确定磁针受电流作用偏转方向的右手定则。安培还研究了两条载流导线之间的相互作用和载流螺线管的磁性，提出了确定两个电流元之间相互作用力的安培定律和解释磁铁磁性来源的“分子电流”假说。

与此同时法国的物理学家毕奥、沙伐尔在数学家拉普拉斯的帮助下，得出了关于电流元磁作用的毕奥-沙伐尔-拉普拉斯定律。

奥斯特的发现公布后一些人开始思考：既然电能够生磁，那么反过来磁能不能生出电来呢？原来研究化学的英国科学家法拉第。1822年在日记中写下了自己的想法：“磁能转化成电”，并开始了长期的实验探索。经过近十年的努力，终于发现了磁场变化在线圈中感应出电流的电磁感应现象，和以他的名字命名的电磁感应定律。

为了解释电和磁的作用机制，法拉第受铁屑在磁铁周围排列成的图像的启发，用他所喜欢的空间想象的方式（法拉第是从一个报童成长起来的科学家，数学基础较差，但也许正是由于这一点，使他做出了下面的贡献），通过与流体力学中的流线、流管作类比，提出了力线、力管和场的概念。场的概念的建立打破了长期以来力的超距作用（不需要时间和媒介物）的观念，表明任何两个不相接触的物体之间相互作用都是通过场（如电磁场、引力场）来实现的，在物理学上是一个划时代的进步。

但当时接受了法拉第的场的概念的人几乎只有英国青年理论物理学家麦克斯韦。受过良好教育的麦克斯韦把法拉第的场的思想用数学形式（矢量函数和微分方程）表示出来，并提出了磁场变化感应出电场的感应电场（或称涡旋电场）假说和电场变化产生磁场的位移电流假说（这两个假说现已被证明是正确的）。在此基础上，麦克斯韦将前人发现的电磁学规律加以概括总结，写成一组方程——麦克斯韦方程组，从而宣告了电磁学或称经典电动力学理论体系的建立。按照这一理论，电场和磁场互相激发，形成统一的电磁场。因为麦氏方程组可以改写成波动方程的形式，其中的波速值恰好等于已知的光速值，所以麦克斯韦大胆地预言了电磁波的存在，并断言光也是一种电磁波。

麦克斯韦的理论提出后，遭到一些人的怀疑和反对。17年后（1887年）德国

物理学家赫兹在实验室产生出了电磁波，并用实验证明它具有反射、折射、干涉、偏振等波动的一般特征及传播速度与光速同数量级，从而证明了麦克斯韦电磁场理论的正确性，并为无线电的应用奠定了实验基础

现在我们已经知道，电磁场也是一种物质，它同由分子、原子组成的实物物质一样，也有能量、质量、动量和角动量，并遵循能量、动量、角动量守恒定律。电磁场理论是现代电工、无线电等科学技术的基础，对第二次技术革命——电力革命和新技术革命都发挥了极大的推动作用。

第二节 伟大的物理学革命

一、山雨欲来风满楼

19世纪物理学的各个分支都取得了辉煌的成就，经典物理学达到了完整、系统和成熟的阶段。但19世纪末、20世纪初的一些物理新发现却无法用经典物理理论解释，于是揭开了一场伟大的物理学革命的序幕。

（一）电子、X射线、放射性的发现

19世纪中期，为了寻找新光源，人们制成了低压气体放电管（霓虹灯就是由此管发展而来的）。在进行实验时发现，正对着阴极（负极）的玻璃管壁上产生了绿色的荧光。1876年，德国物理学家戈德斯坦指出，这荧光是由阴极产生的某种射线（阴极射线）引起的。1879年，英国物理学家克鲁克斯提高了放电管的真空度，制成“真空管”，观察到阴极射线在磁场中发生了偏转，从而发现阴极射线是一种带负电的粒子流，但他认为是分子流。1897年，英国物理学家汤姆逊用两种不同的方法测出了阴极射线中的粒子的电荷与质量之比（称荷质比）约为氢离子的上千倍。经过理论分析，汤姆逊断定这种粒子是质量比氢离子（即质子）小得多的带负电的粒子，并称它为“电子”。当时和以后的一系列实验还证明电子是所有原子的组成部分，于是，千百年来认为原子是组成物质的最小单元、原子不可分的观念被打破了。

1895年，德国维尔茨堡大学的物理学教授兼校长伦琴在研究阴极射线时，意外地发现1米开外被黑纸板隔开的荧光屏上发出了荧光，因为当时已经知道阴极射线是透不出玻璃的，所以伦琴认为还存在一种看不见的射线，他称这种穿透力很强的射

线为 X 射线 因为 X 射线是从阴极射线撞击玻璃管壁的地方发出来的，说明原子内部仍有复杂的结构

1896 年，德国物理学家贝克勒尔在研究哪些物质可以产生 X 射线时，偶然发现铀盐中会自发地放出穿透力很强的射线。使黑纸包裹着的照相底片感光居里夫人和她的丈夫、法国科学家皮埃尔·居里经过进一步的实验研究，发现钍、钋（音“po”，居里夫人为纪念她的祖国波兰而命名）和镭也有这种“放射性”后来，科学家又用强磁场将镭放出的射线分为 α 、 β 、 γ 三种射线，并用实验证明 α 射线粒子是氦的原子核， β 射线粒子是电子，而 γ 射线是从原子核内发出的波长比 X 射线更短的电磁波，而 X 射线是原子核外的电子从高能级跃迁到低能级时所发出的电磁波人们还发现，放射性元素在放出射线后会衰变为另一种元素，这就使元素不可改变的传统观念受到了巨大的冲击。

（二）迈克尔逊—莫雷实验

经典物理学的时空观是绝对时空观，认为时间和空间与物质的存在及其运动无关，就像一个容纳物质和过程的容器空间绝对静止，时间均匀流逝、且空间和时间各自独立，互不相干在 17 世纪，笛卡儿为了解释光的传播，借用了古希腊亚里士多德提出的“以太”（一种充满宇宙但看不见摸不着的物质）作为光传播的媒质，以后“以太”又被人们认为是传播电磁波的媒质和绝对空间的物质背景为了证实“以太”的存在，人们进行了许多实验和观测。其中最有名的是迈克尔逊和莫雷所作的“以太漂移”实验。因为“以太”是静止的，所以当地球在其中穿行时应能探测到以太相对地球的运动，即“以太漂移”或“以太风”。美国物理学家迈克尔逊用他发明的干涉仪先于 1881 年，后来又和莫雷合作，于 1887 年做了探测“以太风”的实验，但不管是白天还是黑夜，春夏还是秋冬，都未探测到“以太”相对地球的运动，于是“以太”和绝对参照系的存在就受到了严重的挑战

但传统的绝对时空观在老一辈物理学家的思想中是根深蒂固的，为了既保留静止的“以太”又能解释迈克尔逊—莫雷实验的结果，爱尔兰物理学家斐兹杰诺和荷兰物理学家洛伦兹先后提出了长度收缩的假设，即一个以速度 v 相对“以太”运动的物体在运动方向上的长度缩短为静止时长度的 $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 倍（ c 为光速），而垂直于运动方向上的长度不变洛伦兹还引入了“局部时间”的概念，提出物体在相对“以太”运动的参照系中的时间 $t' = (t - vx / c^2) / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ （其中 t 为绝对时间）利用长度收缩和“局部时间”，可以得到从“以太”参照系（绝对参照系）变换到运动参照系时相应点的时空坐标 (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') 之间的变换关系，

即著名的洛伦兹变换该变换的数学公式在相对论中也是适用的。但洛伦兹受到传统观念的束缚，千方百计维持旧的理论，因此认为“局部时间”的引进只是数学上的需要，而非真正的时间，所以未能做出理论上的突破。

二、对时空的新认识——相对论

相对论是关于时间和空间的理论，分为狭义相对论和广义相对论，是由著名物理学家爱因斯坦创立的

（一）狭义相对论

在经典力学中有一个伽利略相对性原理：力学规律在所有的惯性参照系（以下简称惯性系）中都是相同的爱因斯坦认为，因有大量事实说明，人们在不同的惯性系中做相同的光学和电磁学实验时所观察到的现象也都是一样的，这就意味着光学和电磁学也满足相对性原理。于是，爱因斯坦推广了伽利略相对性原理，建立了狭义相对论的第一个基本原理——相对性原理：一切物理规律在所有惯性系中都是相同的。根据这个原理，一切惯性系都是平等的，所以绝对时空观就不再成立了。

爱因斯坦还依据其他一些经验事实提出了狭义相对论的第二个基本原理——光速不变原理：在所有的惯性系中，光在真空中的传播速度是个定值，而不依赖于发光物体的速度。这个结论与迈克尔逊—莫雷实验的结果一致。

从上述两条基本原理出发，爱因斯坦很自然地得到了不同惯性系中时空坐标之间的变换关系，这正是洛伦兹变换。由基本原理和洛伦兹变换，他又得出了狭义相对论的一系列结论：

（1）同时的相对性：在一个惯性系中观察是同时（但不同地点）发生的事件，在另一个有相对运动的惯性系中观察并不是同时发生的。

（2）运动的时钟变慢，运动的尺子缩短（数学公式同洛伦兹的假设）。例如，一种粒子 μ 子在静止时的寿命约为 2.197×10^{-6} 秒，但来自宇宙射线中的高速 μ 子所穿过的地球大气层的厚度远超过它在该寿命期间所能（即使以光速飞行）穿过的距离，这说明运动 μ 子的寿命延长了，或者说，在 μ 子“看”来（即置身于随 μ 子一起运动的参照系中）， μ 子的寿命并没有延长，而是相对于它高速运动的大气层并没有地球人看到的那么厚（距离缩短了）

（3）物体的质量随速度的增加而变大。如一个静止质量为 m_0 的物体，以 v 运动时的质量变为 $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 。

(4) 光速是一切物体运动的极限速度

(5) 物体的质量 (m) 与能量 (E) 有确定的关系： $E=mc^2$ 其中 c 是真空中的光速，它揭示了物质和运动永远不可分割的关系

在以上 (2)、(3) 条的比例系数中都有因子 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 。在物体的速度 v 比光速 c 小得多的情况下， $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 约等于 1，即时空和质量随速度的变化可忽略，此时相对论力学还原为牛顿力学。所以，牛顿力学是相对论力学的近似和 (当 $v \ll c$ 时) 的极限情况，而相对论力学是普遍适用的理论。以上内容 (除第 (5) 条外) 包含在爱因斯坦 1905 年发表的论文《论运动物体的电动力学》中除了当时已发现的实验证据 (如电子被发现后即有实验证明电子质量随速度而改变) 外，以后又不断有实验证明它的正确性，其中包括：不同速度的 π 介子衰变为光子 (速度均为 c) 的实验，宇宙线中及粒子加速器中高速 μ 子寿命延长的现测和实验，核反应 (包括原子弹、氢弹) 实验 (证明质能关系) 等

狭义相对论取消了经典物理学的绝对时间和绝对空间的观念，把时间空间与物质的运动联系起来。这是人类时空观发展史上一次根本性的变革，对整个自然科学和哲学都产生了重大的影响

(二) 广义相对论

狭义相对论把相对性原理限制在惯性系中，爱因斯坦深刻地意识到这是经典力学和狭义相对论所“固有的认识论上的缺陷”，他相信相对论原理的普遍性为了把相对性原理推广到加速运动的系统，他接受了马赫关于非惯性系理论一定要包括引力理论的观点。通过对“电梯实验” (以重力加速度自由下落的电梯内的一切物体不再显示出受到地球引力的迹象) 等假想实验的思索，提出了著名的“等效原理”：

一个加速度为 a 的非惯性系，等效于含有均匀 g 力场的惯性系在“等效原理”的基础上，爱因斯坦又进一步提出了“广义协变原理”：在任何参考系中，物理学规律的数学形式都是相同的这样，他就把相对性原理从惯性系中推广到了非惯性系。正因为“广义协变原理”是狭义相对论的相对性原理的推广，所以爱因斯坦把他的新理论称为“广义相对论”。

广义相对论需要新的数学工具。爱因斯坦经过长时间艰难的探索，在他大学时代的同学、数学家格罗斯曼的帮助下，终于借助 19 世纪德国数学家黎曼所创立的椭圆几何 (非欧几里得几何的一种) 建立了引力场的方程。1915 年 8 月，他完成了广义相对论的研究。1916 年初，发表了一篇完整的总结性论文《广义相对论基础》

广义相对论实质上是一种引力理论，在有引力场的区域，空间不是平直的欧几

里得空间，而是弯曲的黎曼空间，空间各点的弯曲程度取决于物质在空间的分布：物质密度大的地方，引力场的强度也大，空间弯曲得越厉害，时间流逝越慢。显然，广义相对论所揭示的物质同时空的关系，比狭义相对论更为深刻。因为时空的结构和性质不仅取决于物质的运动，而且更重要的是取决于物质本身的分布，这就从新的高度彻底否定了牛顿的绝对时空观

按照广义相对论，爱因斯坦预言了三个重要效应并都得到了实验的证实。

水星轨道近日点的进动天文学家发现，水星绕太阳运行的椭圆轨道近日点不是固定的，而是缓慢地绕太阳变换位置，这种运动称进动。但每一百年移动的角度与按牛顿的引力理论的计算值相差 $43''$ ，而按广义相对论所作的计算与实测值非常吻合。

光线在引力场中的偏转因为有引力场的地方空间是弯曲的，所以光线穿过引力场时路径要偏转。1915年爱因斯坦预言，光线经过太阳表面时要偏转 $1.7''$ 。四年后，这一预言被英国天体物理学家爱丁顿和克罗姆林分别率领的两支日食观测队所证实，立即在欧美引起了轰动爱因斯坦几乎是在一夜之间成了家喻户晓的人物，而其相对论也才开始产生广泛的影响

引力红移。按照广义相对论，在强引力场中时钟要变慢，所以，在强引力场中的原子发出的光频率变低，波长变长，即光谱线向长波方向（光谱“红橙黄绿青蓝紫”中“红”的一端）移动，称引力红移。1925年，美国天文学家亚当斯通过对天狼星一颗密度很大的伴星的光谱观测，证实了这一点

根据爱因斯坦的引力理论，当两个具有一定质量的物体作振荡或其它的相对运动时，应当发射引力波，就像两个带电体作振荡时发射电磁波一样，例如地球绕太阳运行时就应当发射引力波。但是，在通常情况下引力波的量值是如此之小，以致直接观测引力波的实验在很长时间内一直没有获得明确的结果。1978年，美国的泰勒等人观察到了PSR1931+16双致密星体系的周期稳定地变短的现象，理论分析表明，这是由于引力辐射阻尼引起的，从而间接证明了引力波的存在。另外，爱因斯坦所预言的黑洞的存在，也已被现代天文学的研究所证实。

爱因斯坦一直把广义相对论看做是自己一生中最重要的科学成果。他说：“要是我没有发现狭义相对论，也会有别人发现的，问题已经成熟。但是我认为，广义相对论的情况不是这样”汤姆逊曾把广义相对论称为人类思想史上最伟大的成就之一。广义相对论是人类认识微观和宏观世界的有力武器，是现代宇宙学理论的基础。

三、进入微观世界的金钥匙——量子力学

（一）普朗克量子假说的提出

20世纪初，物理学革命的另一项伟大成就是量子理论的建立。量子理论是从研究黑体辐射的能量分布问题开始的。黑体也称绝对黑体，是指能够全部吸收投射到它上面的辐射能而无反射的物体。它的模型是一个空腔上开的小孔，就象大房间开的小窗户，射进去的光线只能在屋内来回反射，而很难再从窗户出去。1900年6月，英国物理学家瑞利发表了从统计力学与经典电磁理论出发导出的一个黑体辐射公式，这个公式在低频部分与实验相符合，但高频部分则与实验结果相差甚远，而且随频率的增加，辐射能量趋于无限大，即在频率较高的紫外一端发散这个结果显然是荒唐的。人们把它称为“紫外灾难”。因为瑞利的公式是严格按经典理论推导出的，所以“紫外灾难”实际上表明了经典物理学理论本身的缺陷在此之前，德国物理学家维恩也曾推得一个黑体辐射的公式，在高频部分与实验符合，低频部分有明显偏差。1900年10月，德国著名物理学家普朗克应用数学上的内插法得到一个新的公式，它在低频部分渐近于瑞利公式，在高频部分渐近于维恩公式，与实验符合得很好。接下来普朗克试图从物理学理论上推出这一公式。他假定黑体模型中的空腔是由线性简谐振子组成的，但他惊异地发现，要想推出他的公式，每个简谐振子的能量取值就不能是任意的，即不能是连续的，而只能取一些分立的数值。普朗克推得：频率为 ν 的线谐振子所可能取的能量值，必须是一个最小能量 ε 的整数倍，这个不可再分的能量最小单元 ε ，普朗克称之为“能量子”或“量子”。在数值上， $\varepsilon = h\nu$ ，其中 h 是一个常数，后来称为普朗克常数。1900年12月24日，他在德国物理学会上宣读了题为《关于正常光谱的能量分布定律的理论》的论文，提出了他的能量子假说。后来人们就把这一天看作是量子理论的誕生日。

普朗克提出的量子概念，是现代物理学中最重要和最基本的概念之一，是对传统观念的重大突破。在经典物理学中，能量和其它些物理量是可以连续取值的，普朗克第一次把能量不连续的思想引入了物理学，使得经典物理学所无法解决的许多疑难问题迎刃而解，从而开创了物理学的新时代。

（二）爱因斯坦的光量子理论

爱因斯坦意识到，量子概念带来的将是整个物理学理论基础的根本变革，而不

是对个别定律的局部修改 1905年春天，爱因斯坦发表了《关于光的产生与转化的一个启发性观点》一文，指出：普朗克把能量的不连续性只限于辐射的发射与吸收过程，这是不彻底的，即使在空中传播的过程中，辐射能量也不是连续分布的，而是由一个个的能量子组成的。它们在运动中并不瓦解，并且只能整个地被吸收或发射他把这些能量子称为“光子”（后来被改称光子），还推出了光量子的能量表示式： $E = h\nu$ 其中 ν 是光的频率， h 是普朗克常数

爱因斯坦在这篇论文中用光量子的观点研究了黑体辐射、光致发光和光电效应。光电效应即光（包括紫外光）照射金属时有电子逸出金属表面的现象。它的实验规律有些是光的波动说所无法解释的，而爱因斯坦用他从光子理论出发导出的光电效应方程： $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W$ ，轻而易举地解释了光电效应的实验规律。爱因斯坦的光量子假说以后被密立根 1915 年对光电效应的精确实验和康普顿 1923 年对康普顿效应（X 射线被原子散射后有波长变长的现象）的实验研究所证实，爱因斯坦为此获得了 1921 年度的诺贝尔物理学奖：

光子说使人们重新认识了光的粒子性 1909 年，爱因斯坦进一步明确地提出，光不仅具有粒子性，而且具有波动性，从而使人们对光的本性的认识产生了一次飞跃。

（三）玻尔的氢原子理论

X 射线、放射性和电子的发现，使人们认识到原子也是有结构的。1909 年到 1911 年，卢瑟福通过对 α 粒子散射实验的分析研究提出了原子的有核模型：在原子中心有一个体积很小的原子核，它集中了原子的全部正电荷和几乎全部质量，而带负电荷的电子在核外空间绕核旋转这一模型能很好地解释 α 粒子散射实验，但与经典理论发生了尖锐的矛盾。按照经典电磁理论，作加速运动（旋转运动有向心加速度）的电子将向外辐射能量，这使电子运动的轨道不断变小，在极短的时间内（约亿万分之一秒）就会落到原子核上，也就是说，原子是不可能以这种模型稳定存在的另一方面，根据经典理论原子发光的光谱应是连续谱，而实验得到的原子光谱却都是分立的线状谱。

1913 年，出身于科学世家的丹麦物理学家玻尔创造性地把普朗克和爱因斯坦的量子理论引入原子的有核结构，解决了上述矛盾。玻尔从原子只具有特定频率的光谱线出发，提出了两个与经典理论相违背的重要假设：一个是定态假设，即电子只能在特定的轨道上运动，而不能在任意的轨道上运动，电子在这些特定轨道活动时并不发射电磁波，因而原子是稳定的。另一个是跃迁假设，即当电子从能量为 E_n 的定

态跃迁到能量为 E 的定态时，发射或吸收一个频率为 ν 的光子，其能量为：

$$h\nu = |E_n - E_m|$$

玻子的原子理论突破了经典理论的框架，是量子理论发展的一个重要的里程碑。但玻尔的理论仍然将电子看成是经典物理所描述的粒子，保留了轨道等经典概念，因此他的理论实际上是经典理论与量子理论的混合体，但它是通向新理论——量子力学的重要台阶。

（四）德布罗意的物质波假说

爱因斯坦提出的光既有波动性又有粒子性的思想，引起了法国年轻的研究生德布罗意的极大兴趣。他大胆地提出了一个假设：一切实物粒子也具有波动性。例如，一个自由运动的粒子，就相当于一个沿粒子运动方向传播的平面波。这种波称为物质波或德布罗意波。粒子的能量 E 、动量 p 与相应波的频率 ν 、波长 λ 之间有如下关系： $E = h\nu$, $p = \frac{h}{\lambda}$ 。几年后，物质波及其公式被实验证实。德布罗意的物质波将粒子和波这两个过去认为是对立的概念统一起来，而且综合于一切物理现象之中，这不仅是在科学史上而且在人类思想史上都是极为重要的成果。

（五）量子力学的建立

1926年，奥地利物理学家薛定谔发展了德布罗意的思想，找到了物质波所满足的方程，这就是薛定谔方程。这个方程是反映微观粒子运动的基本方程，该方程的解称为波函数，微观粒子的运动状态就用波函数来描述。这种从波动性入手描述微观粒子运动的方法通常称为波动力学。同年，德国物理学家玻恩对波函数作出了统计解释。他认为，微观粒子在原则上不同于宏观物体的地方就在于它没有固定的轨道，我们不可能确定地预言一个粒子某一时刻定在什么地方，而只能描述一个粒子在某个时刻到达某处的可能性的大小即几率，或描述一群粒子的几率分布。波函数的物理意义在于，这一函数在空间某点的强度（绝对值的平方）和在该点找到粒子的几率成正比，所以描述粒子的波是几率波，这样就统一了波粒二象性。

1925年，德国物理学家海森伯沿另一条途径为量子力学的创立奠定了基础。他和玻恩、约尔丹等采用代数中的矩阵运算方法，创立了描述电子运动规律的力学体系，通常称为矩阵力学。1926年，薛定谔证明了矩阵力学与波动力学的等价性，两种理论实际上是同一种理论的两种不同的表述，现在统称为量子力学。

（六）海森伯的不确定度关系

因为粒子具有波动性，在某位置上仅以一定的几率出现，但如果基本上不超出

某个区域，如 Δx （一维情形）的范围，我们就称 Δx 为粒子位置的不确定量。同样，粒子的动量也有一定的不确定量 Δp_x （一维情形）。1927年，海森伯提出了不确定度关系（过去称测不准关系或准不准原理）：粒子的位置的不确定量与动量的不确定量的乘积不小于 $h/4\pi$ ，即 $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$ （ h 为普朗克常数）它说明：微观粒子不可能同时具有确定的位置和动量，粒子位置的不确定量越小，动量的不确定量就越大。对于时间和能量这一对物理量也存在类似的关系： $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ 。不确定度关系是由粒子的波粒二象性所造成的。

在经典力学中，物体的位置和动量（或者能量和时间）被认为是可以同时准确确定的。其实，这只是因为普朗克常数 h （约为 6.63×10^{-34} 焦耳秒）是一个很小的数，而经典力学所研究的宏观物体的线度比其不确定量（按照不确定度关系所算出的）要大得多得多因此，是不确定量完全可以忽略的缘故。也就是说，量子力学是普遍适用的理论（不管是宏观还是微观），而经典力学是当不确定量可以忽略、即认为 $h=0$ 时，量子力学的极限或近似，因此只适用于宏观的情况。

量子力学的建立，是人类思想史上的一次大的飞跃。它使人们的认识进入到空前深入的微观领域，而且揭示了波动性和粒子性、连续性和间断性、必然性和偶然性之间的辩证关系，结束了机械自然观对物理学的长期统治，丰富和发展了辩证唯物主义。相对论和量子理论不仅是现代物理学的两大支柱，也为现代自然科学和现代技术革命提供了理论基础，引起了现代科学技术面貌的根本改变。

第三节 物质结构研究的再深入

量子力学和相对论的建立，为现代物理学奠定了新的理论基础。加之两次技术革命和生产发展带来的实验设备和技术的改进、学科之间的相互渗透，使得20世纪的物理学取得了突飞猛进的发展和一系列令人瞩目的成就。

一、原子物理学

物理学革命以来，人们对物质结构的认识逐步深入，从原子到原子核再到“基本”粒子，相应建立的学科即原子物理学、核物理学和粒子物理学。

(一) 原子的结构和大小

由卢瑟福的原子有核模型我们知道，原子由原子核和绕核旋转的电子组成，原子核集中了原子绝大部分的质量如最简单的氢原子。它的原子核（只有一个质子）的质量是核外电子（也只有一个）质量的 1836 倍。但原子核的体积很小如果把原子看成球形的，它的半径的数量级是 10^{-10} 米（指在 1×10^{-10} 米到 9×10^{-10} 米之间，当然不同的原子大小不同），而原子核（也视为球形）的半径的数量级是 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ 米，二者相差数万倍打个比方，如果把原子放大到地球那么大，原子核充其量像一座大楼。

(二) 原子中电子的分布

原子中核外电子的数目与该元素在周期表中的原子序数相同（常用 Z 表示），它们分布在不同的壳层上根据奥地利物理学家泡利 1925 年总结出的不相容原理在一个原子中不能有两个或两个以上的电子具有完全相同的状态（电子的微观状态在量子力学中用 4 个量子数来表征）、由量子力学理论可以推得：从内向外，每个主壳层上可以容纳的电子数最多为 $2n^2$ （ n 为电子的主量子数）这样，第一个主壳层上最多有 $2 \times 1^2 = 2$ 个电子，第二个主壳层上最多有 $2 \times 2^2 = 8$ 个电子，……又根据能量最小原理：系统的总能量越小越稳定，所以原子系统在正常状态下，各个电子总是趋向于占据尽可能低的能级（能量的“台阶”），因为离核越近，能级越低，因而电子是从内壳层开始向外逐层排列的如氢（一个核外电子）氦两个核外电子中的电子都分布在第一主壳层，锂中的三个电子两个在第一主壳层、一个在第二主壳层的第一个次壳层上……这一排列、特别是最外层的电子数与元素的化学、物理性质有密切的对应关系由此、19 世纪发现的元素周期表，可由核外电子的周期性排列得到彻底阐明。比如，当核外电子问一个新的壳层填入时，就是周期表上一个新周期的开始；最外层电子填满的元素化学性质最稳定，是惰性气体；最外层电子越少，越容易失去，使原子带正电，所以元素的正电性（金属性）越强；最外层电子越接近填满，越容易俘获其它原子的电子成为满壳层（稳定结构），因此负电性越强……所以说，元素的性质完全是原子结构的反映

根据海森伯的不确定度关系，电子的位置是不能准确确定的，只能说它在某处出现的几率有多大根据量子力学算出电子在原子内的几率分布。我们就可以用“电子云”图（出现几率大的地方颜色浓些，几率小的地方颜色淡些）来形象地表示电子在原子内的分布情况（注：并非每一个电子都散开成云状分布在原子内）。

(三) 原子结构与原子光谱

原子可以发光，通过分光镜或光栅可将原子发的光按波长或频率分开形成一条谱带，称光谱。各种元素的原子光谱有一定的特征和规律性，它反映了原子中核外电子的分布状况。因为电子的每个状态都有确定的能量值，或者说都位于某一能级上。当低能级（内壳层）上的电子由于某种原因失去时，高能级（外壳层）上的电子“跃迁”下来填充，二能级的能量之差（ $E_m - E_n$ ）以光子的形式放出，就是原子发光。因为能级是不连续的，所以光子的能量（ $h\nu = E_m - E_n$ ）及频率 ν 也是不连续的。因此，原子发出的光谱是分立谱或称线光谱。因为不同元素原子的能级分布各不相同，所以发出的光谱也不相同。我们可以根据某种物质的光谱确定它是（或含有）什么元素，根据谱线的颜色的轻重还可以确定各种元素的相对含量，这就是现在常用的光谱分析。

二、原子核物理学

(一) 原子核的电荷和质量

原子核由质子和中子组成，所以质子和中子统称核子。质子常用符号 P 表示，带正电，电量绝对值同电子；质子的数目同核外电子数，即原子序数 Z ，因为中子不带电，所以 Z 也表示原子核的电荷数（以电子电量的绝对值为单位）。

质子的质量 $m_p = 1.6726 \times 10^{-27}$ 千克 = 1.007276 原子质量单位，中子（常用 n 表示）的质量比质子稍大一点， $m_n = 1.6749 \times 10^{-27}$ 千克 = 1.008665 原子质量单位。因为质子和中子的质量都约等于 1 个原子质量单位，而且电子的质量比它们小得多，所以质子和中子的总数等于元素的原子量（以原子质量单位为单位的原子质量）最接近的整数，我们称该整数为原子核的质量数，用 A 表示，所以核的中子数为 $(A - Z)$ 个。电荷数和质量数是表示原子核特征的两个重要物理量，所以常用 ${}_Z^A X$ （或 ${}_Z X^A$ 或 X_Z^A ）来标记不同的原子核，其中 X 是与 Z 相应的元素符号。

(二) 放射性衰变和人工核反应

对某一种元素来说，质子数是确定的，但中子数可以不同，因而质量数可以不同，称该元素的同位素（因都处于周期表中的同一位置）。例如氢有三种同位素 ${}_1^1 H$ （氢）、 ${}_1^2 H$ （氘）和 ${}_1^3 H$ （氚）。在各种元素的同位素中，有些是稳定的，有些是不稳定的，可以自发地放出射线，衰变成另一种元素，称放射性同位素。放射

性同位素在工业、农业、医疗、国防和科研等方面都有重要的应用核的转变也可以用人工的方法产生，它是用各种不同的粒子（ α 粒子、质子、中子等）轰击某一种元素的核，使之变为另一种或两种原子核。往往还同时放出某种粒子，称人工核反应

无论是放射性衰变还是人工核反应，都遵守电荷数守恒和质量数守恒。如铀²³⁸的原子核放射一个 α 粒子（氦核）衰变为钍²³⁴的反应，写成式子为： ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{90}^{234}\text{Th}$ 。

（三）原子核的结合能、核裂变和核聚变

实验发现，原子核的质量并不等于组成它的质子和中子在单独存在时的质量（即前面写出的质量）之和，而是要小一点，二者之差称质量亏损。由爱因斯坦的质能关系式： $E=mc^2$ 可知，单独的核子在组成原子核时，放出一部分能量，这部分能量称核的结合能。这个结合能也等于把原子核分开成单独的质子和中子时所必须提供的能量。所以结合能越大，原子核（元素）越稳定

核物理学中将组成某种原子核时平均每个核子的结合能称为比结合能实验发现，不同的核的比结合能不同，大多数中等质量的核的比结合能较大（核子结合成核时平均每个核子放出的能量较多），而轻核和重核的比结合能较小（核子结合成核时放出的能量较少，或核分散成核子时需要的能量较少）这说明，使重核分裂成两个中等质量的核，或把两个轻核聚合成一个较重的核时，都将释放一定的核能。前者称重核裂变，后者称轻核聚变，是我们利用核能的两个主要途径。

重核裂变的应用包括原子弹和原子反应堆，它们都利用了链式反应的原理：每个核核发生裂变需要吸收一个中子，但裂变后会放出更多（2-3）个中子，这些中子被附近的铀核吸收后发生裂变，产生第二代中子，这些中子又导致更多的铀核裂变，产生第三代中子……因为这一过程进行得极快（约 10^{-12} 秒），如果不加以控制，反应就是爆炸性的，这就是原子弹爆炸。在原子反应堆中，用镉或硼钢制成的控制棒来吸收释放出的中子，可使反应按人要求的速度进行反应堆可作为动力源用于发电、推动舰船等，还可以生产放射性同位素做各种用途，提供中子源进行科学实验等。

轻核聚变是使氢的同位素氘或氚（或其他轻核）聚合成较重的原子核，同时放出能量的过程，如 ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ ， ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + {}_0^1\text{n}$ ， ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_1^1\text{H}$ 等。每克氘聚变放出10万千瓦/小时的能量，是每克铀²³⁸裂变能量的4倍左右。聚变反应是太阳和其他恒星能量的来源。因为聚变反应在极高的温度下（上亿度）才能发生，所以又称热核反应。爆炸性核聚变的装置是氢弹，也称热核武器，它是利用其内部的一个原子弹爆炸所产生的高温高压来激发聚变反应的人工控制的聚变反应即受控热核反应是一种

理想的能源，所以受到人们的重视和研究。因为在如此高温下，聚变物质的原子要电离成等离子态（大量正离子和相等电量的电子并存的状态），没有任何容器可以耐受如此高温，所以核科学家在实验中发展了两种约束高温等离子体的方法。一种是磁性约束法，是通过选取适当的磁场位形，把等离子体限制在一定的空间区域，采用这种方法的装置有磁瓶、磁镜、仿星器和环流器（托卡马克）等；另一种是惯性约束法，是用激光束从各个方向同时照射一个含有聚变物质的小丸，其外层受热膨胀，挤压内部的聚变物质，使其密度和温度升高而发生热核反应。这两种方法都在研究之中

小资料：原子弹和氢弹的制造

1939年3月到4月间 费米、约里奥·居里夫妇（居里夫人的女儿、女婿）以及逃亡到美国的匈牙利物理学家西拉德等各自独立地论证了铀核裂变的链式反应的可能性 同时意识到利用这一反应有可能制造出威力巨大的杀伤性武器。当人们听说纳粹德国也正在加紧链式反应的研究 并已禁止所侵占的捷克对外出口铀矿石的情况后 纷纷要求美国赶在德国之前制造出原子弹。1939年的夏天，西拉德等说服爱因斯坦在给美国总统的信上签了名，通过总统顾问转交给了罗斯福。1941年12月6日，即日本人偷袭珍珠港的前一天，罗斯福正式批准了制造原子弹的“曼哈顿工程”计划。整个工程耗资20亿美元，投入了几千名科学家和几十万工人，动用了全美国1/3的电力。1945年7月，美国在新墨西哥州的荒漠上试爆了第一颗原子弹 爆炸力相当于二万吨TNT炸药 在半径400米的范围内，砂石都熔化成了黄绿色的玻璃状物。此时德国已投降 但美国总统杜鲁门不顾多数科学家的反对，下令于8月6日和9日在日本的广岛和长崎投下了两颗原子弹 使两地的10万6千人当场死亡，12万8千人受伤，一半左右的建筑被毁。惨重的后果使全世界为之震惊 遭到爱好和平的人们和有人道主义精神的科学家的谴责。

此后，前苏联于1949年、英国于1952年、法国于1960年、我国于1964年 分别试爆成功了本国的第一颗原子弹。后来，印度和巴基斯坦等国也拥有了原子弹。

1952年10月31日，美国在马绍尔群岛的一个珊瑚岛上试爆了第一颗氢弹，爆炸力约为1千万吨TNT，即为第一颗原子弹的500倍，使那个珊瑚岛一扫而光。接着前苏联于1953年也试爆成功了第一颗氢弹。此后英、法等国也相继研制成功本国的氢弹。我国的第一颗氢弹是1967年爆炸成功的。

当前，世界上拥有的各种类型、各种规格的核弹头已多达5万枚，TNT当量已达世界总人口人均4吨，足以毁灭地球数百次，对人类自身的生存构成了极大的威胁。

三、粒子物理学

粒子曾被称为基本粒子，意即组成物质的最基本、最小（不可分）的单元但后来发现有些所谓的基本粒子仍有复杂的内部结构，所以改称粒子，泛指小于原子核的物质微粒。

（一）粒子的性质

质量：根据相对论，物体的质量与速度有关，所以粒子的质量指粒子静止时的质量这样，光子的质量就是零，后来发现的中微子质量可能是零，也可能是一个极小的数值。其它粒子中电子的质量最小，别的粒子的质量至少是电子的几百倍。

电荷：有的粒子是不带电的，如光子、中微子、中子、 π^0 介子、 J/ψ 粒子、 Λ 。超子等带电粒子的电荷可正可负，但绝对值都是质子电量的整数倍，通常为1倍，最大为2倍。

寿命：粒子中只有光子、电子、质子和中微子是稳定的，其它粒子在产生之后经过很短的一段时间就会自发衰变成其它质量较小的粒子。其中，寿命最长的是自由中子（注：原子核中的中子是稳定的），静止时的平均寿命为918秒。别的都远小于万分之一秒，共振态粒子（强子的激发态，即二、三个粒子短时结合在一起，成为一个粒子）的寿命只有 $10^{-23}\sim 10^{-24}$ 秒

自旋：粒子都有确定的自旋角动量，通常用其与 $\frac{h}{2\pi}$ 的比值（倍数）——自旋量子数来表示，它的值都是整数或半整数0, 1/2, 1, 3/2, ……其中，自旋为整数的粒子称玻色子，自旋为半整数的粒子称费米子。

反粒子：一切粒子都有其反粒子粒子和其反粒子有相同的质量、寿命和自旋，只是电荷等值异号（对带电粒子），磁矩方向相反或有其它不同。也有些粒子（如光子）的反粒子就是它本身。粒子和它的反粒子碰到一起会发生湮灭转变为其它粒子。从理论上说，还应该有这些反粒子组成的反原子核、反原子、反物质、反星体等。

（二）粒子的相互作用

相互作用从通俗的意义上讲就是力。自然界已知有四种相互作用，分别是万有引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。其中引力和电磁力是长程力，没有距离的限制（但与距离的平方成反比），弱相互作用和强相互作用是短程力，力程都在 10^{-15}m 以内（弱作用更短些）。四种相互作用的强度差别很大。比如，两个质子在相距 10^{-15}m 时，强、电磁、弱、引力相互作用的大小的数量级之比为： $1: 10^{-2}: 10^{-6}: 10^{-38}$ 。因为万有引力作用相对来说小得多，所以在粒子物理学

中一般不予考虑

相互作用需要有媒介粒子来传递。传递电磁相互作用的媒介粒子就是光子，传递万有引力作用的是尚未观测到的引力子，传递强相互作用的粒子称胶子。1979年，丁肇中小组发现的著名的三喷注现象被认为是胶子存在的实验证据。传递弱作用的是中间矢量玻色子 W^+ 、 W^- 和 Z^0 ，它们是上个世纪 60 年代格拉肖、温伯格和萨拉姆为建立弱、电统一理论而提出来的，于 1983 年在欧洲核子研究中心的高能质子—反质子对撞机上被一一找到

自然界的四种相互作用有没有共同的起源、共同的本质呢？能不能找到一种可以同时描述几种相互作用的统一理论呢？这是很多人的想法。早在广义相对论建立之后，爱因斯坦就用了几乎整个后半生的时间研究把引力作用和电磁作用统一起来的统一场论，但未获成功。到了 1961 年，美国青年物理学家格拉肖建立了一个统一电磁作用和弱作用的理论模型在此基础上，美国物理学家温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆在 1967 年各自独立地提出了弱电统一的规范理论，被称为温格伯—萨拉姆模型。1973 年，欧洲核子研究中心最先发现了该模型所预言的中性流事例，随后世界各地的实验室测得 50 多项实验数据均与其理论相符。于是，温、萨和格拉肖共同获得了 1979 年的诺贝尔物理学奖。

弱电统一的成功，鼓舞着物理学家向更大的统一进军，目前已有多个把弱、电、强三种作用统一起来的理论其中，影响最大的是 1974 年美国哈佛大学的乔奇和格拉肖提出的 $SU(5)$ 模型的大统一理论，但因都还存在一些问题，所以尚未有一个大家公认的理论另外，把所有四种相互作用统一起来的理论也在探索之中。

(三) 粒子的分类

现已发现并确认的粒子数目已超过 400 种。一般根据它们主要参与的相互作用等性质，把粒子分为 3 类

(1) 规范粒子：包括光子和 W^+ 、 W^- 、 Z^0 4 种粒子。

(2) 轻子：直接参与弱相互作用，但不直接参与强相互作用。包括电子 (e^-)、 μ 子 (μ^-)、重轻子 τ (τ^-)、电子中微子 (ν_e)、 μ 子中微子 (ν_μ)、 τ 子中微子 (ν_τ) 和它们的反粒子共 12 种。

(3) 强子：直接参与强相互作用（但也参与弱相互作用和电磁相互作用），又分为介子和重子。介子的自旋为整数（0 或 1），是玻色子，重子的自旋为半整数（ $1/2$ 或 $3/2$ ），是费米子介子包括 π 介子 (π^+ 、 π^-)、 K 介子 (K^+ 、 K^0)、 η 介子 (η^0 、 η')、 J/ψ 介子、 Υ 介子等和它们的反粒子。重子包括核子（质子和中子）、

超子和它们的反粒子，已发现的超子有 Λ 超子 (Λ^0)、 Σ 超子 (Σ^+ 、 Σ^- 、 Σ^0)、 Ξ 超子 (Ξ^0 、 Ξ^-) 和 Ω 超子 (Ω^-) 等。

(四) 强子的结构

由于发现的粒子越来越多，而且有实验证明，强子内部是有复杂结构的，于是人们开始探讨组成粒子的下一个层次物质微粒。1964年，美国物理学家盖尔曼在日本理论物理学家坂田昌一于1956年提出的“坂田模型”基础上，提出了著名的“夸克模型”(我国物理学家于1965年独立提出的“层子模型”与其类似)经过不断发展，现在的“夸克模型”认为强子是由夸克(quark)组成的夸克共有6种，分别是u(上)夸克、d(下)夸克、s(奇异)夸克、c(粲)夸克、b(底)夸克和t(顶)夸克，每种夸克还有自己的反夸克。介子由夸克和反夸克组成，重子由三个夸克(可以是夸克和反夸克)组成。如 K^0 介子由一个下夸克和一个反奇异夸克($d\bar{s}$)组成，中子由一个上夸克和两个下夸克(udd)组成。夸克具有分数电荷(电子电荷的正、负 $1/3$ 或 $2/3$)。夸克之间靠交换胶子(强相互作用)结合成强子。

以上6种夸克被称为夸克的“味”，此外人们认为每种夸克都还有红、绿、蓝三种“色”(“味”和“色”在这里都是借用，并非我们通常理解的“味道”和“颜色”)，并建立起一种被称为量子色动力学的理论，能解释不少实验现象，是目前公认的较好的强作用理论。

虽然夸克模型取得了很大的成功，但人们至今没有观察到独立存在的“自由夸克”。因此，物理学家们认为夸克可能是被囚禁的，称为“夸克囚禁”或“夸克禁闭”，并提出了各种各样的解释但一般都认为，夸克之间的相互作用随距离的增加而增大。

夸克和轻子是不是“最基本”的粒子，即夸克和轻子还有没有内部结构呢？这也是一部分物理学家感兴趣的问题，并进行了一些理论上的研究，提出了很多可能的模型。但目前还没有任何实验迹象表明，夸克或轻子有内部结构。

(五) 宇称守恒定律的修正

粒子之间的转变(或相互作用)遵守一系列的守恒定律。除了物理学上普遍成立的能量(质量)守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律和电量守恒定律外，还有一些粒子所特有的守恒定律，如重子数守恒、轻子数守恒、奇异数守恒、同位旋守恒、宇称守恒等。其中，强相互作用遵守所有这些守恒定律，电磁相互作用遵守除同位旋守恒律以外的所有守恒律，而弱相互作用只遵守某些守恒律，不遵

守另外的守恒律其中，宇称守恒定律在弱相互作用下不成立，是李政道和杨振宁发现的

宇称是反映空间〔左、右〕对称性的物理量，宇称守恒可以解释为“左、右交换不变”。1927年，美籍匈牙利物理学家维格纳以电磁作用的左右对称性为基础，提出了宇称守恒定律认为自然界的一切物质运动都是镜面对称的，即物体的运动规律和它在镜中的运动规律是完全一样的。但是在发现弱相互作用以后不久的 1954~1956 年间，人们碰到了一个十分尖锐的问题，这就是“ $\tau - \theta$ ”之谜。 τ 和 θ 同是介子，且质量、电荷、自旋、寿命等都相同，使人不得不怀疑它们是同一种粒子；但 θ 衰变为2个 π 介子，宇称为偶， τ 衰变为3个 π 介子，宇称为奇，如果坚信宇称守恒，它们又不是同一种粒子

在美国工作的中国物理学家李政道和杨振宁（当时二人尚未加入美国国籍）仔细分析了关于宇称守恒的所有实验基础，发现并没有任何实验证据证明在弱相互作用过程中宇称守恒。于是，在 1956 年 4 月提出可能在弱相互作用下宇称不守恒，并设想了一些对宇称敏感的实验。同年美籍中国女物理学家吴健雄等做了极化钴⁶⁰的 β 衰变实验，在强磁场和低温条件下观察到发射出的电子在空间分布不对称，证明了在弱作用下宇称守恒定律不成立，也证明了 τ 和 θ 是同一种粒子，现称为 K 介子。由于此项发现对粒子物理学和对称性研究的重大意义，李政道和杨振宁同获 1957 年的诺贝尔物理学奖。

四、万马奔腾的凝聚态物理学

凝聚态指固态和液态。从历史上看凝聚态物理学是从固体物理学发展而来的，但现已发展为物理学中最庞大的一个部分，包括了很多分支学科，并向化学、生物等学科渗透，研究领域十分广阔。它既是一门基础学科，又与技术联系密切，是应用性很强的学科。

（一）固体物理学的形成和发展

固体物理学包括金属物理学、晶体物理学、非晶态物理学、表面物理学等。它的渊源可追溯到 18 世纪末（1784 年）法国矿物学家奥伊所著《晶体结构理论》。19 世纪，固体物理学已有初步发展，但尚未形成独立的学科。1900 年，德国物理学家特鲁德为了解释金属的导电和导热性质，提出了经典的自由电子理论，可以说是现代固体物理学的理论起点。1905 年，爱因斯坦最先把量子概念引入固体物理学，用

晶格振动的量子理论成功地解决了经典电子论在解释低温下固体比热下降时所遇到的困难。1928年，德国物理学家索末菲用量子统计方法改造了特鲁德的经典电子论，建立起以量子力学为基础的金属电子论。在实验方面，1912年德国物理学家劳厄发现了晶体对X射线的衍射现象，为研究固体的微观结构提供了一个直接的实验观测方法，被爱因斯坦誉为20世纪“物理学中最漂亮的发现之一”接着英国的布拉格父子对晶体的X射线衍射进行了定量研究，建立了X射线的晶体结构分析这一新的学科分支

固体物理学的理论体系建立的标志，是固体的能带理论。1928年，美籍瑞士物理学家布洛赫在利用量子力学中的薛定谔方程求解固体中的电子运动规律时，建立了固体的能带（有一定宽度的能级）理论，为固体物理学打下了理论基础。1931年，英国物理学家威尔逊利用能带理论给出了区分导体、半导体和绝缘体的微观判据。

二战后，固体物理学有了显著的发展在实验手段方面，超低温（接近绝对零度）超高压（几十万个大气压）强磁场（超过十万高斯）等极端条件下的实验技术及电子顺磁共振、核磁共振等新兴实验技术被引入固体物理的实验研究之中，使材料制备和工艺技术等方面都有了显著的进步和发展现在，固体物理学的研究范围已经从晶体发展到非晶态和无定型材料，从二维发展到二维和一维，从对固体内部的研究发展到对表面的研究，从稳态研究发展到动态研究，从宏观和微观发展到介观，并与化学等学科综合形成了材料科学这一新的科学，产生了并将继续产生影响人类生活的重大成果。

（二）半导体科学技术的兴起

在固体的能带理论提出并完善之后，从1906年三极管发明后发展起来的电子管技术的局限性已日渐明显。1939年，美国贝尔实验室成立了由巴丁、肖克利、布拉顿等组成的半导体物理学研究小组，经过近8年的努力，终于在1947年研制成功世界上第一只点接触型的锗晶体三极管，并于1949~1950年间提出了以半导体电子理论为基本内容的P-N结理论，奠定了半导体物理学的直接理论基础。后来，他们又于1950年发明了第一只面结型的锗三极管。1952年第一台晶体管收音机在美国面世。两年后，硅晶体管 and 第一台晶体管计算机问世。随着晶体纯度的不断提高和掺杂工艺的改进，晶体管的性能越来越好。到了上个世纪50年代中后期，由于半导体电子产品的高速发展，又产生了以集成电路为核心内容的微电子技术。

集成电路是利用光刻等技术在不足 1cm^2 的小块半导体材料（芯片）上做出包括很多晶体管、电阻、电容等元件在内的具有一定功能的电路，与分立电路相比，具有容量大、体积小、组装快、成本低、运行速度快等优点。1959年~1960年间，美国得克

萨斯公司的工程师基尔比和仙童公司的经理诺伊斯各自独立地研制成功集成电路，1961年即在美国实现了商品化生产。之后，半导体芯片的集成度以每三年翻两番的惊人速度发展，经过了小规模、中规模、大规模、超大规模四个发展阶段今天，人们已经能在一片芯片上集成上亿个元件。元件或连接线的最细尺寸（称特征尺寸）已达0.25微米，单晶硅的纯度已达12个9（即99.999999999%），加工场所的净度达到了每立方英尺空气中0.5微米以下的尘粒不超过10粒，即实现了超精细、超纯、超净加工技术。

微电子技术是计算机、互联网络、智能机器人、数控机床等高新技术的基础，对当今信息社会的形成和发展作出了巨大的贡献。但目前的集成电路技术可能有一极限，所以人们正在努力把微电子学同近年发展起来的光子学综合成一门光电子学，开发光电集成技术，以大幅度提高集成度和运行速度（见15章）另外科学家还在研究单电子电子学器件，以及探索把微电子技术同生物工程技术结合起来，制成一种能够模仿人脑细胞工作过程的蛋白质分子电路。如果能取得突破，也将从根本上改变微电子技术的面貌。此外，人们还进行了其它半导体材料，如有机半导体的研究，制出了有机晶体管、有机发光管等新型光电子器件。

（三）超导体物理学的发展

1911年，荷兰莱顿大学的实验物理学家卡麦林-昂纳斯发现，在液氦温度下（4.2K），汞的电阻突然消失，电子可以在其中无阻力、无能量损耗地运动，他把这种现象称为超导电现象。以后人们又陆续发现铅、锡和许多其它金属、合金也有这种现象，只是变为零电阻的温度（称超导转变温度或临界温度）不同。后来，昂纳斯等还发现，这种超导态能被足够强的磁场（称临界磁场）所破坏。1933年，荷兰实验物理学家迈斯纳及其助手发现超导体具有完全抗磁性（称迈斯纳效应），即超导体内完全没有磁场（磁感应强度为零）1950年，美国的马克斯韦和英国的雷诺分别发现了超导体的同位素效应，即超导体的转变温度与组成该物体的同位素的平均质量有关，揭示了超导电性与原子结构的内在联系。

在建立超导的微观理论方面，1950年，美籍德国物理学家弗罗里赫和美国物理学家巴丁提出：超导电性是在电子与晶格振动的相互作用下产生的。在上述理论的基础上，美国物理学家巴丁、库珀和斯里弗一道，于1958年提出了第一个较为系统的超导量子理论——巴库斯理论或称BCS理论。该理论认为：在超导态金属中，电子通过与声子（振动着的晶格）的相互作用而相互吸引形成电子对（称库珀对），无数电子对在运动中相互重叠并互相搭配对象形成整体流动即超电流。这一理论预言有能隙存在，1961年被贾埃瓦在实验中证实。1962年，一些物理学家在BCS理论的基础上进一

步提出了强耦合超导理论，初步克服了BCS理论的某些理论局限，较为成功地对一些实验事实作了定量分析

1962年，剑桥大学年仅22岁的实验物理研究生约瑟夫森在研究超导体能隙性质时，从理论上提出了超导隧道效应（超导电子对能够穿过两个超导体之间的极薄绝缘层的现象，也称约瑟夫森效应）并作出了一系列深刻揭示超导本质的预言。几年后，预言全部被实验证实

超导物理学研究的另一成就，是高温超导材料的发现。开始发现的汞、铅等金属材料的临界温度都很低，不便实用经过数年的努力，1986年4月，瑞士科学家缪勒和他的学生柏诺兹发现陶瓷材料钡铜氧系化合物在30K时存在超导电性的可能性，从而掀起了一场研制高临界温度超导体的国际竞赛。同年12月23日，日本东京大学获得了超导转变温度为37.5K的钡铜氧化合物。3天后，我国科学院物理研究所的赵忠贤、陈立泉等人获得转变温度为48.6K的钡铜氧化合物。4天后，美籍华裔物理学家朱经武等人获得40.2K和36K的钡铜氧系超导材料。次年2月15日，美全国科学基金会宣布，朱经武等人获得起始转变温度为98K的超导体，9天后中国科学院再次宣布赵忠贤等人获得了起始转变温度在100K以上，转变温度为92.8K的钡铜氧化合物材料。至此人们终于实现了液氮温区（77K）的超导转变，为超导的应用打开了方便之门。接着，北京大学、中国科技大学以及日本、美国、德国、前苏联等国的实验室也相继研制成功起始转变温度在100K以上的超导材料。1990年初，中国科技大学用掺铋铋系材料获得了132K的超导转变温度，这是当时公认的最高转变温度，表明我国在超导材料的研究方面居于世界领先地位。目前最高的转变温度是133.5K，但科学家们仍在继续努力，希望有朝日能制出在室温条件下工作的超导材料。

与此同时，超导元件、超导线材及其它应用研究也取得了可喜的进展。用超导线绕制的超导强磁体能产生20万高斯以上的超强磁场，已被广泛应用于各种大型粒子加速器和受控热核反应研究装置，节省了大量电力和金属材料。超导磁悬浮列车的样车已达到了500公里时速，在1000公里旅程内的实际运营速度已高于普通民航飞机。不用螺旋桨的超导磁流体推进船（其原理也可用于潜艇）已在上世纪90年代顺利进行了海上试验。用于陀螺仪和其它高速旋转机器上的超导无摩擦轴承也在研究之中。在电力工业方面，几千米长可载电流上万安培的高温超导电缆已问世，超导发电机和电动机已有样机，超导飞轮储能正在研究开发，超导限流器已投入使用，世界上第一台630千伏安的超导变压器已于1997年在日内瓦并网运行。超导磁流体发电可将燃煤电站的效率提高到50%以上，且污染低，用水少，目前的试验功率已达几万千瓦、持续数百小时，估计二三十年后可实现商业化。超导在电子学方面的应用

首推超导量子干涉器件，它作为新一代计算机元件可制成速度极快的计算机，还可利用它制做高灵敏度的电压计和磁强计，后者可用来寻找弱磁矿和研究人体心脏跳动的微弱磁场，作出与心电图类似的心磁图。超导在医学上的另一项应用超导核磁共振谱仪和磁成象装置也已实现了商品化因此有人认为高温超导体是 20 世纪最后一项重大的科技革命

第三章

人类进步的催化剂——化学

节日里，绚丽多彩的焰火把城市装扮得多姿多彩；中国五十六个民族的节日服装鲜艳夺目；挂在隔音保温墙壁上的液晶超薄彩电，正在播报世界新闻；由纳米材料制成的保鲜杀菌冰箱，储藏着各种各样的新鲜食物，超静音可控温的空调，使室内四季如春；用现代生物技术栽培的鲜花，四季盛开；人类由于医疗保健水平的提高，平均寿命已达到七十五岁；人们坐在计算机前得心应手地在炒股；由于现代化交通和通信工具的使用，地球村的公民在享受着现代的高度物质文明。现代科学技术的高速发展，在改变着人类生活的各个方面。化学作为研究物质变化的实用性很强的一门科学，在上面描述的各种现象中都渗透着它的作用化学与人类的衣食住行、健康长寿息息相关，与社会的发展、人类的进步密切相连。

在化学家的眼中，构成物质世界的数万种化合物是由几十种常见的元素组成的它们之间的差别，仅仅是元素的种类、原子的数目及原子结合成分子时的方式不同，由此形成了世界物质的千变万化，千差万别那么，数万种化合物相互反应遵循哪些规律？在我们的物质生活中又各自扮演着什么样的角色呢？

第一节 化学反应的基本定律与实质

一、化学物质与古代文明

万年以前，地球上的人和狮子在数量上差不多，两方的力量势均力敌，但是人最终获得了优势。原因是人学会了使用几种化学元素在与恶劣的自然环境斗争中，人类发现了火，树枝的燃烧得到了炭，在使用火的过程中人类烧制出了原始的陶器，用炭冶炼出了金属铜、铁，这就大大推进了人类的发展进程，使人类从石器时代进入金石并用的时代、接着进入了铁器时代。例如化学上的防腐剂，在公元前2000年的埃及就十分精通，公元前1300年的干尸保存的十分完备。化学元素在帮助人类战胜恶劣的自然环境的同时，也在改善着人类的生活公元前2200年，中国的禹王时代已有人造酒，公元前2000年已制出葡萄酒，公元前1800年已能制啤酒。醋酸是古时发现最早的酸，而且认为果汁中都含有醋酸，食盐、糖、蛋白、淀粉、动物脂肪、樟脑、珍珠等很早就为人类的生活服务了染料最早在公元前2500年就开始使用了，而且知道用白矾、蓝矾做定色剂。上古最有名的染料是公元前1600前从地中海两种贝类动物中提取的“泰埃紫”（主要化学成分是二溴靛青），天然的茜草、石蕊也都做过染料古代亚洲、欧洲的女士已经会用白铅（化学成分是碱式碳酸铅或硫化铅）、朱砂（主要化学成分为硫化汞）画眉涂脸，以求美观，用金银制作漂亮的装饰品。用烟炱和胶制成写字用的墨。为了战胜疾病已开始用硫化汞、硫化铅、硫化砷等作为药物治疗疾病。用硫磺燃烧制得的二氧化硫气体杀菌消毒，用松香做防腐剂。用石灰将生皮鞣制成熟皮制作衣服。正是这些物质的发现和利用，为人类创造了生存和发展的基本物质条件，尽管人类当时还没有认识这些物质的内部结构

二、物质的性质

为什么不同的物质具有不同的用途呢？这是它们的性质所决定的。性质是一事物区别于其它事物的本质属性特征在化学科学中将物质的性质分为两大类：一类是物质在变化的过程中没有新物质生成，例如，水的固、液、气“三态”的变化，

并没有变成其它的新物质。这种变化叫做物理变化。平时我们说的物质的存在状态、颜色、气味、熔点、沸点、密度、溶解度等都属于物理性质。另一类是物质在变化过程中有新物质生成，如水在通电的条件下，产生了氢气和氧气两种气体，像这种产生了新的物质的变化叫化学变化。像生活中的铁钉生锈、酸雨对环境的危害、食物在人体中的一系列变化都属于化学变化。物质在化学变化中所表现出来的性质叫化学性质。有些物质还能表现出一些典型特征的性质，例如碘遇到淀粉变蓝，利用这种性质可以鉴别面粉、土豆中的淀粉。化学上利用这些特征的反应鉴别和分离一些混合物。例如医疗上糖尿病的检验，就是利用糖与银氨溶液发生银镜反应这种特征反应诊断病情的。日放的烟花礼炮是利用一些金属物质易燃烧，且燃烧时放出鲜艳的色彩的特征制作的。总之物质在化学变化中表现出来的化学性质许多都是对人类有用的，正是物质化学性质上的千差万别才使人类的物质生活丰富多彩。化学就是在分子、原子层次上研究物质的性质与变化的一门科学。如果要分清一种变化属于何种化学变化，有时候还要进一步做化学分析。有时化学反应放出大量的热量，就成为人类的能源，像现代生活中使用的天然气、煤气、携带方便的固体燃料等都是利用化学反应的热能为人类服务的。有些化学反应是吸收热量的，利用这一特点可以降低环境的温度为人类的生产和生活服务。

三、元素与原子

(一) 原子的组成及质量

19世纪初英国的庶民科学家道耳顿提出了他的原子学说，为原子描绘出了最初的模型，从物质结构的微观角度揭示了宏观化学现象的本质，因此具有重要的科学意义。随着科学技术的进步，特别是物理学上电子、X射线和放射性的发现，对原子的组成和结构有了进步的认识。1911年英国物理学家卢瑟福提出了原子的有核模型：原子由原子核和核外电子组成，原子核带正电荷，位于原子中心，电子带负电荷，在原子核周围空间做高速运动，就像行星绕太阳运转一样。原子核带的正电荷与电子带的负电荷总量相等，所以整个原子是中性的。原子核很小，但却集中了几乎全部原子的质量。原子核也具有复杂的结构，它由带正电荷的质子和不带电荷的中子组成。质子的电量与电子电量的绝对值相同，约为 1.6×10^{-19} 库仑，如以该电量为电量的单位，则原子的核电荷数与质子数或电子数相同。

由于电子、质子、中子、原子的质量都很小，为了使用方便，一般用原子质

量单位来计量，称为相对质量国际上规定：以一个 C_{12} 原子的 $1/12$ 为一个原子质量单位，用 u 表示，这样质子和中子的相对质量都约等于 1，而一个电子的质量是一个质子质量的 $1/1836$ 。如果忽略电子的质量，取质子和中子的相对质量的整数部分相加，这个数值就叫做原子的质量数，用符号 A 表示。所以 A_ZX 就代表一个质量数为 A ，核电荷数为 Z 的原子。

具有相同的质子数（核电荷数）的同一类原子的总称为元素

（二）人类最早认识的元素

古代人对于元素的观念与现代不同，但现代人所认识的很多元素，自有历史以来，就被古人发现和利用。古代人所认识的化学元素有金、银、铜、铁、锡、铅、水银等金属以及硫磺、碳等非金属。从石器时代的埃及人的坟墓里就挖掘出了黄金制造的装饰品。银在自然界以化合物的形式存在，比金难开采，公元前 13 世纪 ~ 15 世纪间埃及产银很少，价格比黄金还贵，用银作为交换的媒介物人类开采铜矿至少已有 5000 年的历史，在自然界中，纯铜的产地较多，并可用较简单的工艺从孔雀石中提炼得到。大约在 4000 年前安纳脱利亚的赫梯人已开始使用铁器，大约在 3000 年前人类已逐步过渡到铁器时代。世界上铅的分布较广，冶炼也较容易。古代巴比伦人用金属铅片镌刻铭文。成风古罗马人用铅管输水，用铅制写字板和货币等，因古罗马人惯用铅制餐具烹调，所以当时铅中毒的人较多。大约在五千年前已能制出锡铜合金，古罗马人称锡为白铅，称铅为黑铅并且有用镀锡的方法防止铜器腐蚀的记载。中国和印度自古就认识水银，而且有记载水银是从辰砂（硫化汞）中提取得到的，并且知道水银具有毒性。世界许多地方都有硫磺和炭存在，古代各民族很早就认识了它们。据记载，人们采取成块的硫磺治疗疾病，用硫磺蒸汽漂白布匹，用硫磺末制造火柴和火药。人类对碳的认识更早，用过木炭和烟炱两种碳素，木炭的制法是用泥密封木堆，隔绝空气加热。1772 年，拉瓦锡通过燃烧金刚石产生二氧化碳，证明了金刚石是碳的另一种单质。人类发现和使用的这些元素改变了人类的生活、生存环境，促进了人类社会的发展。

（三）化学元素与人体健康

元素与人类生命密切相关，这些元素被称为生命元素，共有 27 种，其中 13 种非金属，14 种金属。它们在人体中维持着平衡。平衡一旦被破坏，影响人体健康，甚至发生疾病。人体中含量低于 0.01% 的元素称为微量元素，现已确认的微量元素有 16 种，分别是锌（Zn）、铜（Cu）、钴（Co）、镍（Ni）、铬（Cr）、锰（Mn）、钼（Mo）、铁（Fe）、碘（I）、砷（As）、硼（B）、硒（Se）。

锡 (Sn)、硅 (Si)、氟 (F)、钒 (V) 以碘为例，碘极容易被吸收。整个消化道都可以吸收，碘由血液进入到人体中的各组织，甲状腺含碘比其它组织高 10 倍以上。甲状腺将碘和氨基酸组成甲状腺素，由血液送到全身，刺激组织细胞、发生正常活动。人如果缺碘，就会得单纯性甲状腺病俗称大脖子病。得了这种疾病，就必须补充碘，如吃加碘盐或多吃海产动植物——鱼或海带，这就是现在的食盐中为什么加碘的原因。硒对人体健康有着极为重要的作用，因为人体内有种保护细胞膜的谷胱甘肽过氧化酶，硒是它的重要组成部分，它使人体内的细胞不受损害，维持细胞的正常功能。硒可抑制癌症的发生和发展，动物实验表明，在饲料中加入亚硒酸钠可降低肝癌的发病率。人体缺乏硒，表现在视力减退，严重的出现大骨节病、肝坏死。人体中所需的微量元素，对于食普广、饮食正常的人，每天从食物中摄取的微量元素是可以维持人体的需要的，婴儿、老人、有挑食习惯的人才会导致微量元素缺乏症，才需要人为补充一些微量元素，如服用特别的微量元素制剂构成人体中的化学物质，含量最多的为碳、氢、氧，约占全部成分的 90%，其中氢氧结合为水占 65%（人体中的水 70% 在细胞内，20% 在组织体内，10% 在血浆中），35% 是固体物质。

钙、磷是除了碳、氢、氧外人体中含量较多的元素，钙是牙齿和骨骼的重要成分，细胞的磷脂、核酸都含有磷。磷在人体中，是以磷酸盐的形式存在，起着维持体内酸碱平衡的作用；二是以磷酸和磷脂的形式存在，是糖和脂肪吸收和代谢过程中必须的物质。钙、磷在血液中有一定的比例，钙盐需要转变为磷酸盐而被肠吸收。人体在补充这两种元素时，要注意保持食物中钙磷的平衡，骨、蛋、豆、乳含钙和磷较多，肉、鱼含磷丰富。硬水中含有钙，喝井水和泉水可以从饮水中得到相当量的钙；食物中以乳状的钙最易吸收。酸、脂肪、胆盐、维生素 D 能帮助钙和磷的吸收。酸使钙溶解，便于人体的吸收，乳糖和产酸食物使肠内趋回酸性，抑制肠内生产碱性物质的细菌生长，使肠内的钙、磷易进入血液，进入血液的不至于排泄掉。成人每日需钙量约为 0.7g，发育的儿童每天则需要 1g，需磷量为钙的 2 倍。同时食物中必须有充足的维生素 D，或者常晒太阳，保证钙和磷的吸收。钾、钠、氯是生理上重要的元素，分别是维持体内渗透压、酸碱度和肌肉及神经细胞的应激性物质，细胞内由钾维持，细胞外有钠维持，氯是胃液盐酸的成分。1988 年 5 月在斯德哥尔摩召开的“食盐与疾病”国际研讨会上有报告指出：人体内随钠盐摄取量的增加，骨癌、食道癌、膀胱癌的发病率增加；如果增加钾盐的摄取量，胃、肠癌的发病率下降；在饮食中摄入部分钾盐和镁盐以取代钠盐，对糖尿病、高血压和骨质疏松症等都有一定疗效。目前市场上出现的低钠盐就是根据这种需要而生产的。钠还和人体水肿有关，人体水肿组织中由于含过多的钠盐，水量由外向内渗透，造成水肿，水肿病人应少吃食盐，使体内钠、氯减

少，水存不住，水肿也就消失了人体缺钠会感到头晕乏力，这种情况出现在人体大量失水后，高温作业者暑天的饮料中要加入食盐，水泻病人静脉注射生理盐水也是为了补充体内流失过多的钠盐。一般正常成年人食盐摄取量以每天 $4\text{g} \sim 10\text{g}$ 为宜，高血压患者以 $1\text{g} \sim 3\text{g}$ 为宜

（四）人类发现元素的方法

人类发现元素的方法，除了直接观察以外，还有：

1 古典化学分析方法

从 17 世纪下半叶到十九世纪初，由波义耳、普里斯特列、拉瓦锡以及贝采里乌斯等化学家创立了古典化学分析方法这时期，玻璃仪器和化学试剂的使用，使过去不易识别的元素被识别出来，难以分解的化合物被分解，天平的使用使分析工作从定性走向定量从而发现了钴等 13 种元素

2 电解法

1799 年，伏打制成了伏打电池（电堆）1800 年～1844 年间，出现了发现新元素的高潮，44 年间发现了 31 种元素，电解法在这里起了主要作用

3 光谱分析法

盏平常的酒精灯的灯芯上洒上钠盐，火焰呈黄色，放上钾的盐类，则呈现紫色，这是因为不同的元素有不同的光谱所致应用光谱分析法可以研究极遥远（如太阳或恒星）或地壳中极微量的物质的成分 1860 年，德国化学家本生和物理学家基尔霍夫合作研制成第一台光谱分析仪。用光谱法先后发现了铷、铯、铊、铟、氦、氖、氩、氟、氙等元素。化学元素在人类的生产、生活和科学研究中逐步被认识

四、化学反应的基本定律

（一）质量守恒定律

1760 年，苏联化学家罗蒙诺索夫在《论物体的固性和液性》中指出，在自然界中发生的一切变化：若某一物体的某种东西消失若干，便有若干这种东西加到另一物体上。这就是说，若在某处有一定量的物质减少，则在其他地方就有相同量的物质增加 1774 年，拉瓦锡用定量实验研究了氧化汞分解中质量的变化关系：他将 45 份氧化汞加热分解，得到 41.5 份重的汞和 3.5 份重的氧。拉瓦锡在综合大

量的化学实验的基础上，于1789年出版的《化学大纲》一书中，正式提出了质量守恒定律：在化学反应中不仅物质的总质量在反应前后不变，而且物质中所含的任一元素的质量也保持不变。质量守恒定律的建立为深入物质内部的结构、研究化学反应的实质奠定了理论基础，为哲学上的物质不灭原理提供了坚实的自然科学基础。

（二）当量定律与定比定律

在地球上，亚洲与欧洲的海洋中的水的化学组成是否相同？如果从中国出发，环球一周，每天在不同的国家食用的食盐的化学组成是否发生变化？化学家的回答是不发生变化为什么呢？因为化合物组成遵循另一条自然规律。1792年，德国数学家兼化学家李希特在他的《化学计算法纲要》一书中明确提出了以下的观点：（1）化合物都有确定的组成，化学反应中，反应物之间存在定量关系。（2）两种物质发生化学反应，一定量的物质总是需要确定量的另一种物质，这种性质是恒定的。可以根据各反应物的组成来计算生成物的化学组成。这样，李希特提出了各物质相互化合时彼此之间存在着固定质量比的当量定律，同时还提出了组成化合物的元素在发生化学反应时比例不变的定比定律。1802年，法国化学家费歇尔把李希特的当量关系加以发展，选择100份硫酸作为酸碱中和反应的基准，得到了酸碱中和反应的第一张当量表（所需的不同碱的份数）为道耳顿论证原子的性质奠定了基础。当量定律和定比定律在揭示化合物的组成及反应过程中量的变化规律方面向前迈进了一大步。1781年卡文迪许测定水的组成，1799年拉瓦锡对氧化汞组成的测定，都是在此基础上进行的。

（三）倍比定律

18世纪末到19世纪初，许多化学家发现，两种元素可以按不同的比例反应，生成不止一种化合物。1800年英国气体研究所的青年化学家戴维研究了三种氮的氧化物（ N_2O 、 NO 、 NO_2 ）的重量组成，发现三种气体之间，与相同量的氮化合需要的氧的重量比为1:2:4。1803年，英国化学家道耳顿分析碳的两种氧化物（ CO 、 CO_2 ）时，发现两种气体中，与相同量的碳化合需要的氧的质量比为1:2。当时道耳顿正在研究原子学说，他意识到倍比定律应当是原子学说推理产生的必然结果，而倍比定律的确立，可以成为原子学说的一个重要证明。他通过许多实验，明确提出了倍比定律：当两种元素化合生成一种以上的化合物时，与一定质量某种元素化合的另一元素的质量之间成简单整数比。

(四) 化合价

20世纪20年代公认的化合价概念是指某元素一个原子与一定数目的其他元素的原子相结合的个数比，即某一个原子能结合几个其他元素的原子的能力。这个概念是1852年由凯库勒提出的

五、单质、化合物、混合物

目前已发现的化学元素有114种，这些元素的原子组成了大约五百万种不同的物质。

(一) 单质

由同种元素构成的物质称为单质例如：，空气中的氧气、氮气、有毒但少量却可以杀菌漂白的氯气、冬天带给人类温暖的炭、似水如银的汞、埋在地下千年也能闪闪发光的金子、能用小刀切割的金属钠、具有半导体性能的硅、易产生美丽紫烟的碘、在人类历史长河中立下功劳的铜、铁、铝、钛、镍，等等。

(二) 化合物

由不同的元素形成的物质称为化合物，像我们喝的水(H_2O)、做馒头用的小苏打($NaHCO_3$)农田中施的氮肥「 $(NH_4)_2CO_3$ 或 $(NH_4)_2SO_4$ 」、做红色油漆的三氧化二铁、用于人工降雨的干冰(即二氧化碳的固体)、杀灭害虫的农药、保证人类生命健康的药物等，都是化合物

(三) 混合物

自然界存在的各种物质往往不是以单纯的一种物质的形式存在，而是两种或两种以上的物质混合在一起存在。例如空气是由氮气、氧气、二氧化碳气、水蒸气和和其他一些气体混合而成的，但是氧气仍表现出可以助燃、可以呼吸的性质，像这种由两种或两种以上的物质混合而成、每种物质仍保持各自原有的化学性质的物质叫混合物。例如：白糖溶解在水中形成的白糖溶液，白糖仍保持具有甜味的特性。中国的四大发明之一的黑火药是由炭、硫、硝酸钾组成的混合物。与混合物不同，化合物是两种或两种以上的元素依一定规律化合生成与原来单质的性质不同的新物质。例如：具有明亮金属光泽的钠在有毒气体氯气中燃烧，生成人类每天使用的食盐，

食盐已不具有钠的金属性和氯气的毒性单质、化合物、混合物一起构成了千变万化、千姿百态的神奇物质世界

第二节 原子 — 分子理论与元素周期表

原子 — 分子论

(一) 道尔顿的原子论

道尔顿是英国庶民科学家。1787年，21岁的道尔顿在对大气的成分，蒸汽压、混合气体分压、气体扩散和溶解度等问题的研究过程中，在借鉴古希腊的自然哲学和牛顿的机械微粒论的基础上，通过长时间的实验观察和思考，逐渐形成了他最初的原子论观点：物质是由原子构成的，原子具有重量。到了19世纪初，道尔顿就把他的原子论的观点引进了化学学科，用于解释元素相互化合的质量关系的规律，认为不同元素的化合，就是不同原子间的结合。1803年，他对碳的两种氧化物（CO和CO₂）进行分析，发现这两种化合物中，氧的质量比恰恰是简单整数比1:2，这正是相同原子的个数比的一种表现，这使他确信，物质都是以原子微粒为单位结合而成的，而不同元素的原子又不相同，所以相互结合后就产生出不同的物质。他还进行了测定原子量的工作。他规定氢的原子量为1，依据当量定律和定比定律提供的大量实验数据和他掌握的一些分析结果进行了计算，初步测出了氢、氧、氮、硫、磷、碳的原子量（实际是当量），为他的原子论提供了依据。经过了近20年的研究，道尔顿的原子论在1803年基本定型。

1808年，这一理论的基本观点在他的《化学哲学新体系》中发表，主要观点是：

1、元素（单质）的最终粒子称为简单原子；一切物质都是由看不见、小可分割的原子组成。原子不能自生自灭，它们在一切化学变化中保持不变。

2、同一种元素的原子，其形状、质量、性质（如亲和力）都是相同的，不同元素的原子在形状、质量、性质上各有不同。每一种物质都是由它自己的原子组成。单质是由简单原子组成的，化合物是由复杂原子组成的。而复杂原子又是由为数不多的简单原子组成，复杂原子的质量等于所含各种元素原子的质量之和。同一化合物的复杂原子，其质量、形状、性质必然相同。

道尔顿的原子论，合理地解释了当时已知的质量守恒定律、定比定律和倍比定律等化学基本定律。从微观物质结构的角​​度揭示了化学现象的本质，所以得到了化学界的承认和重视，同时开始了测定原子量的工作〔恩格斯在《自然辩证法》中这样评价道尔顿的工作：“道尔顿的发现”是“能给整个科学创造一个中心并给其它工作打下巩固基础的发现”。道尔顿的原子论标志着近代化学的开端。

（二）分子理论

由于科学技术条件的限制和人们的认识受到的历史局限，道尔顿的原子论存在着有待完善的地方例如道尔顿在原子论中复杂原子的概念很含糊，简单原子和复杂原子在本质上有什么区别是道尔顿的原子论不能回答的

1804年~1808年期间，法国物理学家兼化学家盖-吕萨克在研究氢气与氧气反应合成水的过程中，发现氢和氧相互反应时的体积比几乎为2:1。他又进一步研究了其他气体间反应。发现反应气体体积之间都存在简单的整数比关系，于是得到了气体反应体积简比定律他想用道尔顿的原子论加以解释，认为可能正是由于化合时原子的整数比造成了体积的整数比，又提出了如下的假说：同温、同压、同体积的不同气体中含有相同数目的原子（简单原子或复杂原子）。但道尔顿却认为这将导致复杂原子中有半个原子存在而加以反对。

意大利物理学家阿佛加德罗敏锐地看出，只要在物质和原子这两种物质层次之间引入一个新的层次——分子，认为同温、同压下，同体积的任何气体都含有相同数目的分子，便可解决原子论与气体简比定律之间的矛盾。如果假设各种单质气体分子中可以含有多个原子，就不至于发生化合物分子中出现半个原子的困境。阿佛加德罗分别于1811年和1814年发表了两篇文章，论述了他的分子学说：

1. 无论是单质还是化合物，在不断分割的过程中都有一个分子阶段。分子是具有定特性的物质组成的最小单位，分子是由原子组成的
2. 单质分子可以由多个原子组成。
3. 同温、同压、同体积的气体，无论单质还是化合物，都含有相同数目的分子

因为气体分子间的距离比分子本身的大小大得多，所以气体体积几乎不受分子大小的影响，而仅决定于分子数目。从这一假说可以通过测定气体物质的比重求得分子量，还可以确定化合物分子中各种原子的数目，开辟了确定化合物分子式的途径。但阿佛加德罗的分子假说却没有被当时的化学界和物理学界所承认，几乎被埋没了半个世纪主要原因是他的分子假说中提出的有些观点与当时流行的观点发生了冲突。

例如他提出单质分子是由相同原子组成的，与当时化学界流行的“电化二元论”（认为只有带相反电荷的两种原子才能相互吸引而结合成复杂原子）相悖。直到1860年第一次国际化学会议在德国的卡尔斯鲁厄召开，意大利的化学教授康尼查罗关于分子理论及测定原子量的报告得到了与会的大多数青年化学家的欢迎，分子学说才很快被化学界接受。1908年~1917年，有几十位物理学家对阿佛加德罗常数（1摩尔任何物质中的分子数目）采用不同的方法进行了测定，得到了基本一致的结果，假说从此被尊称为阿佛加德罗定律，原子—分子学说也成了19世纪化学发展史上最重要的里程碑。

二、元素周期律

在元素周期律发现之前，人们已经发现了63种元素元素之间是否存在联系？能否把它们排列成一张表？成了科学家研究的课题

（一）欧德林和迈耶尔的工作

1864年，德国化学家欧德林以“原子量和元素符号”为标题，发表了他的“元素表”，这个表基本上按原子量来排列元素的顺序，只对碘和碲在顾及原子量同时按性质排列，部分地找到了元素性质随原子量递增出现周期性变化的规律，并在适当的位置留下了空格，说明意识到了未被发现的元素，但在表中只列出47种元素，对元素的性质也未做实质性说明。德国化学家迈耶尔在1864年出版的《现代化学原理》一书中明晰地论述了化学科学的基本原理，包括按照原子量的顺序排列元素的初步方案，并讨论了原子量、原子价和元素性质之间的关系。1868年，又发表了著名的“原子体积周期性图解”，以显示各元素的原子量和体积之间的关系。这个图表已精彩地体现出化学元素所具有的周期性，图解的曲线呈现五个波谷，五个波峰，已呈现出化学元素的五个周期，但是迈耶尔未对曲线加以说明。1869年10月，他又制作了一个化学元素周期表，明确指出元素的性质是原子量的函数，在表中形成了一个明显的过渡元素族，并给未被发现的元素留下了空位。迈耶尔的研究偏重于元素的物理性质，注意到相似元素周期性出现的情况，已有了族和周期的划分。迈耶尔周期表不足的地方是把锰错误地列在铁族元素中，把镍、钴放在同一位置上，对未知元素也没有做出大胆的推测。

（二）门捷列夫的周期律和周期表

门捷列夫是俄国圣彼得堡大学化学教授，为系统讲好无机化学课程，着手编写

《化学原理》教科书，需要对元素的性质进行深入的研究他研究了原子学说的科学基础及测定原子量的各种方法，发现原子量是各种元素的最基本特征，所以对一些有疑问的原子量值根据化学性质、原子价、当量、原子量之间的关系作了修订；在对元素的各种分类法进行研究的过程中，他发现有些元素具有相同的原子价，化学性质非常相似，如一价元素都是典型的金属，七价元素都是典型的非金属，而四价元素的性质介于金属与非金属之间，这就使他坚信各种元素间一定存在着统一的规律性；他将元素按原子量大小排列，发现氯和钾原子量相近，性质却截然不同；而钾和钠原子量相差很大，性质却很相近；在钾以后的元素随原子量的增加又显示出从钠到氯的相似变化，这些有规律的现象多次出现，使他坚信各种元素性质间存在周期性的变化规律。1869年，门捷列夫发表了关于元素周期律的图表，在俄罗斯化学学会上宣读了《元素属性与原子量的关系》的论文，阐述了他关于元素周期律的基本论点：第一、按照原子量的大小排列起来的元素，在性质上呈现出明显的周期性第二、原子量的数值决定元素的特征。第三、应该预料到还有许多未被发现的元素例如，性质类似硅和类似铝、原子量介于65到75之间的两个元素。第四、当我们掌握了某元素的同类元素的原子量之后，有时可借此来修正该元素的原子量。1871年，门捷列夫又发表了《化学元素的周期性依赖关系》一文，修订了第一个元素周期表，制作了第二个元素周期表，首先将周期表由竖行改为横行，同族元素处于同一竖行中，更突出了元素化学性质的周期性；在同组元素中划分出主族和副族；预言元素的空格由四个增加到六个，并且预言了它们的性质；根据一些元素在周期表中的位置，大胆修订了它们的原子量；给元素周期律下了定义：“元素（以及由元素所形成的单质或化合物）的性质周期地随着它们的原子量而改变。”门捷列夫第二张元素周期表的公布，预示着化学元素周期律的发现工作基本完成。

（三）化学元素周期律的证实及历史作用

门捷列夫的工作与同时代的科学家相比，有两点相当出色：一是应用研究的成果指导自己的实践。例如他运用化学性质与原子量之间的关系修正了铟的原子量。二是根据元素周期律科学地预言了一些未知元素，1871年他曾对表中的三个空位，预言了性质，并分别称为“类铝”、“类硼”、“类硅”。1875年，法国科学家布瓦斯博德朗在利用光谱法分析比里牛斯山的闪锌矿时，发现了一个新元素，他命名为“镓”。并把测到的一些主要性质在《巴黎科学院院报》上发表。可是不久，他收到了门捷列夫的来信，在信中门捷列夫指出他测得镓（类铝）的比重有错误，不应是4.7，而是5.96.0之间。布瓦斯博德朗很疑惑，因为当时他是独一无二拥有镓的人，于是他

再一次提纯了镓，重新测定了比重，结果为 5.94，这使他大为惊讶和叹服。他在另一篇文章中写到：“我以为已经没有必要再来说门捷列夫这一理论的伟大意义了”后来门捷列夫预言的“类硼”、“类硅”、“类磷”、“类钪”、“类铯”等元素被一一发现元素周期律的建立，奠定了现代无机化学的基础，极大地推动了化学学科的发展。1882年门捷列夫与迈耶尔共同接受了英国皇家学会的最高荣誉——戴维奖章。

三、放射性与同位素

19世纪，原子作为不可分的粒子庄严地跨入科学殿堂，道尔顿的原子论和阿佛加得罗的分子学说使化学科学得到了极大的发展。但是，到了19世纪末20世纪初，随着对电子、X射线与放射性三大发现的研究，原子不可分、元素不能变的传统的化学观被打破了人们认识到原子内部仍有复杂的结构（见第二章第二节）。

（一）元素蜕变与同位素的发现

通过对放射性的研究，人们发现具有放射性的元素在放出射线后，变成了另一种元素，于是提出了元素蜕变假说：放射性的产生是由于原子本身分裂或者叫蜕变成另一种元素而引起的。这种变化与化学反应截然不同，它不是原子间或分子间的重新组合，也不受外界温度、压力等的影响，而是原子本身的变化。到了1910年，被分离和加以研究的放射性元素已达30种。化学家对这些放射性元素进行对比研究，发现有些放射性不同的元素，化学性质却完全一样，例如钍²³²与其蜕变成钍²²⁸ 钍²³²的 α 衰变半衰期为 1.65×10^{10} 年，钍²²⁸为1.9年，二者混合后用化学方法分离不开。于是英国化学家索第根据大量的实验事实提出了同位素假说：存在有原子量和放射性不同，但化学性质完全一样的化学元素变种，这些变种在周期表中应处于同一位置，因而可命名为同位素。1912年汤姆逊在他设计的磁分离器中，发现了原子量为22的氦的同位素的存在，从而第一次发现了稳定同位素。为了进一步证实氦同位素的存在，英国剑桥大学的物理学家阿斯顿将天然氦气进行反复扩散，最后得到了两种氦气，测定了原子量分别为20.15和20.28，首次实现了同位素的分离。1919年，阿斯顿制成了质谱仪，发现了氦、氩、氪、氙等元素都有同位素。在当时已知的71种元素中，他发现了212种核素。由于研制成质谱仪并用以准确测定原子和分子质量及发现众多的核素等卓越贡献，他获得了1919年诺贝尔化学奖。1927~1929年，人们又利用光谱分析发现了¹³C、⁵N、¹⁷O、¹⁸O等同位素，其他的同位素也通过不同方法发现了。

(二) 对元素认识的升华

同位素的原子量不同，化学性质完全相同，而门捷列夫的周期律认为：原子量决定各种元素在周期表中的位置，同种元素具有相同的原子量。如果同位素的概念是正确的，那么从道尔顿到门捷列夫的元素学说就要作重大修正。卢瑟福的原子核模型与莫斯莱对各种元素的特征 X 射线的观测和研究较好地回答了以上的问题。1910年，卢瑟福等人的研究发现：当一束 α 粒子轰击一片金箔时，绝大部分可以穿过去，飞行方向基本不发生变化，这说明原子不是实体球，有很大空隙；但有少数 α 粒子穿过金箔时发生了偏转，个别 α 粒子甚至被反弹回来。卢瑟福就设想 α 粒子的飞行方向有很大改变，不可能是与金原子中的电子发生了碰撞，而肯定是受了原子内部一个带正电的核的作用，因为 α 粒子的质量比电子大 7000 倍，两者相撞时，一定是轻的被推开、重的通行；要使 α 粒子发生偏转，原子中必然有一个质量很大、集中了正电荷的核。1911 年，卢瑟福提出了原子的有核模型：原子存在一个极小的核，直径在 10^{-12}cm 左右；这个核几乎集中了原子的全部质量并带有 Z 个正电荷；原子半径约为 10^{-8}cm 左右，相应有 Z 个电子绕核作圆周运动。一种元素的原子核里的正电荷数就是该元素在周期表中的座位号。1913 年，卢瑟福的学生莫斯莱从研究 X 射线入手，把各种元素的 X 射线的最短波长按由大到小的顺序排列，发现排列出的次序与元素在周期表中的座位号一致，他把这一次序称为原子序数，即原子核的电荷数 Z 。他把自己的实验结果与卢瑟福的 α 粒子散射实验结果相结合，提出了以下结论：1、周期表从某一元素到下一个元素，原子有一个基本数量很有规则地增加，就是原子核中的正电荷数，原子序数 Z 恰好是原子核中的正电荷数；2、周期表中的元素座次是正确的，基本是按 Z 值排列的；3 一种物质中的原子，只要 Z 值完全相同，这种物质就是元素单质，原子量是否一样，不是必要条件。莫斯莱的重大发现，揭示了元素周期律的实质，使索弟的同位素假说得到证实和进一步解释。

现在已知的元素有 114 种。同种元素的原子质子数相同，中子数不一定相同，因此质量数可以不同，具有相同质子数（核电荷数）不同质量数的原子称为同位素。例如：铀元素有 ${}_{92}^{234}\text{U}$ 、 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 、 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 三种天然同位素，平常所用的元素原子量，是按各种天然同位素原子所占的一定百分比算出的平均值。所以当以质谱法测定原子量时，必须同时测定同位素的丰度（各种同位素的百分比）。有些元素的同位素组成因元素来源不同而有涨落，所以实际测定的这些元素的原子量并不是固定不变的，因此每两年要修订一次原子量表。

（三）放射性同位素的应用

放射性同位素在很多领域有了广泛的应用。1947年，美国化学家利比根据 ^{14}C 在物质中含量的变化、推算出岩石、植物及其它物质的年龄，这个方法已广泛用于考古、地质、地球物理等利用放射性同位素作为标记原子，还广泛应用于研究化学反应历程、化学结构、键的极性、化学反应、扩散现象、医学检验等领域。常用的放射性同位素要求放射性易测定、较稳定、半衰期适中，平时常用到的同位素是D、 ^{15}N 、 ^{18}O 、 ^{13}C 、 ^{14}C 等。例如水在人体中究竟停留多少时间？这一问题的解决，必须使现在饮人的水和人体中原有的水有所区别，同位素恰好能够满足这一要求。如果饮人稀的重水，比如说1% D_2O 的水后开始记时，只要检验排出的尿中到什么时候没有重水了，这段时间就意味着水在人体内停留的时间。实验结果确定它是两星期在这个实验中，氘就扮演着标记原子的角色。因为它比氢重，可以从水的密度加以精密测定以上是使用稳定同位素的一个例子。标记原子有着显示踪迹的作用，因此也叫做示踪原子利用放射性同位素作为标记原子更为便利，因为放射性的测量比较灵敏而方便用放射性磷作为标记原了，经过实验得出结论：磷在骨骼中停留的时间是1个月

四、晶体与无机材料

（一）晶体

“晶体”是一个非常古老的名词。在我国周口店猿人遗址中就有用水晶等晶体制成的工具随着时间的推移，人们发现晶体有的细如针，有的薄如纸，更多的具有立方体、八面体、长方体等多面体的外形。晶体的颜色绚丽多彩，即便是同一种晶体也可有不同的颜色，例如水晶(SiO_2)可为无色、乳白色、紫色、浅红色、黄褐色乃至黑色；柱状的电气石(工艺名为碧玺，成分为复杂的硼铝硅酸盐)有的一端为红色、一端为绿色；甚至同一晶体在不同照明条件下也可呈现不同的颜色，如变石属金绿宝石(含Cr的 Al_2BeO_4)，白天日照下为翠绿色，夜间白炽灯照射时为紫红色。晶体真可谓五光十色、千变万化。晶体为什么具有规则的外形？1855年法国科学家布拉威提出空间点阵理论，认为在晶体内部，原子、离子或分子的排列是有规则的，它们像士兵列队一样排成一定的阵形。1912年X射线衍射法证实了晶体是由原子、离子或分子在空间按周期性规律排列而成的物质。无论是天然的还是人工合成的绝大多数固体物质都是晶体，例如所有的金属、各种岩石、各种食用的糖、盐、味精、

药物、食品中的淀粉、纤维素、各种维生素、人和动物的毛发、骨骼、构成生命的物质基础—蛋白质、核酸、手表中的石英晶体、各种电器中的半导体材料、电视屏幕用的荧光粉以及高科技中的各种晶体

(二) 晶体材料

1. 石英晶体与压电材料

把晶体切成薄片受压后在两个面上分别产生正电荷和负电荷，这就是晶体的压电效应。什么样的晶体才会产生压电效应呢？由实验可知：晶片加压后两个面上带有相反的电荷，说明晶体一定没有对称中心。没有对称中心的晶体叫非中心对称晶体，只有非中心对称晶体有压电效应。石英是非中心对称晶体，是很好的压电材料，把石英晶体切成薄片，取代钟表中的摆和游丝，就是石英钟表。

2. 钛酸钡与非线性光学材料

在传统的线性光学范围内，一束光通过晶体后，光的频率不会改变。但是当光通过某种晶体后产生频率为入射光两倍的光，这种现象被称为非线性光学效应。产生非线性光学效应的晶体叫非线性光学晶体，这种晶体必须是非中心对称晶体。钛酸钡的化学式是 BaTiO_3 ，低温时，由立方晶系变为四方晶系，没有对称中心，是非线性光学晶体。它能对高强度的激光光源进行调频、调相等技术处理，是优良的压电、铁电、电光等重要功能晶体材料。

3. 蓝色荧光粉与晶体缺陷

晶体中的原子、分子等粒子完全按照严格的周期性，重复排列得到的晶体是理想晶体，而实际晶体中或多或少总会存在空位、位错、杂质原子等缺陷，促使实际晶体偏离理想的周期性重复排列，这种现象称为晶体缺陷。晶体缺陷使晶体的性质发生变化，造就各种性能的晶体材料，满足五彩缤纷的物质世界的需要。蓝色荧光粉的主要原料是白色的硫化锌晶体，往硫化锌晶体中加入约 0.0001% 的氯化银。银离子和氯离子分别占据硫化锌晶体中锌离子和硫离子的位置，造成晶体缺陷，使得杂质原子周围的电子能量与锌离子和硫离子周围的不同，这种掺杂了的硫化锌晶体，在阴极射线激发下，放出波长为 450nm 的荧光，可做彩色电视荧光屏的蓝色荧光粉。

4. 单晶硅、锗和信息材料

高纯度的单晶硅是很好的半导体材料。单晶硅是金刚石结构，每个硅原子的外层有 8 个电子。如果往单晶硅中掺杂质 (Ga(镓))，镓原子最外层只有 3 个电子；当取代了硅原子的位置后，镓原子外层只有 7 个电子，即产生一个空穴。相邻的硅原子最

外层电子可移动到空穴，又产生另一个空穴，这相当于空穴在移动，这种由空穴迁移导电的半导体称为 P 型半导体若在单晶硅中掺入杂质 As（砷），由于砷原子外层有 5 个电子，取代硅原子位置后，成键的砷原子最外层有 9 个电子，多出一个电子因而可以导电，称为 N 型半导体若将单晶硅的一端掺入镓形成 P 型半导体，另一端掺砷形成 N 型半导体，二者的结合处称为 P—N 结，只能单向导通（电流只能从 P 区流向 N 区），这样就做成了一个整流器，可将交流电转变为直流电。利用 P—N 结可做晶体管，把许多的晶体管集成在硅芯片上就是集成电路，它是现代计算机技术、通信技术、遥控技术、自动化技术的基础

（三）液晶

液晶是介于固、液态之间、各向异性的流体，是新发现的一种物质状态。液晶态的发现，打破了人们关于物质三态（固态、液态、气态）的常规概念。现在已发现有数千种以上的有机化合物具有液晶态。有一类有机化合物当其晶体加热到温度 T_1 时，熔解成粘稠状而稍微有些浑浊的液体，但当继续加热到温度 T_2 时，则变为透明的液体。用偏光显微镜观察 $T_1 \sim T_2$ 温度之间所形成的浑浊液体，发现为光学各向异性人们称温度 $T_1 \sim T_2$ 之间形成的显示光学各向异性的液体为液晶已知液晶有 3000 多种，20 世纪 70 年代已广泛用于显示、软件复制、检测器、感受器、分析化学、合成化学等。液晶与生命现象也有密切联系。

第三节 有机化学与有机物

有机化学作为一门科学产生于 19 世纪初。有机化合物是人类的生活一刻也离不开的物质。早期的有机化合物是从动物、植物有机体中提取分离而得到的在古代，人们已能通过酿造制出醋酸、乙醇（酒精）、白糖，已能将自然界存在的茜草、靛蓝作成染料，利用一些植物制出治病的中草药。例如甘露醇，俗称“柿霜”，制取方法是将柿子去皮压扁，日晒夜露至干，放到罐中，直至生成白霜。所以世界上几个文明古国很早就掌握了酿酒造醋、制作饴糖的技术人们很早就把自然界分成动物、植物、矿物三类。把从动植物器官中分泌出来的物质称为有机物。

一、有机物的人工合成

法国化学家拉瓦锡认为，有机化学是化学整体的一部分，不能因为有机化合物是从生命体中直接或间接取得的就断言仅与有生命的有机体有关。1806年，瑞典化学家贝采里乌斯把物质组成元素主要是氢、氧、氮的作为有机化合物，认为有机物是来自生物有机体的化合物，人工合成是不可能的因为有机化合物虽然组成元素少，但种类和性质的多样性是很难理解的这种说法流行了几十年。19世纪初，在生物学和有机化学领域中便广泛流行起“生命力论”生命力论者认为动植物有机体具有一种生命力（又称活力），只有依赖这种生命力，才能制造出有机物质在实验室里，人们只能合成无机物，或只能使用有机物通过化学反应变成其它有机物，但不能从无机物出发人工合成有机物。这样，在有机物与无机物之间出现了一条不可跨越的界限，有机物的产生只能等待自然界的恩赐，对有机化学的发展相当不利。19世纪30年代，开始出现转机。1824年，德国化学家维勒用人工方法合成出了尿素，这是有机化学发展过程中的一大突破，它打破了无机化合物和有机化合物之间的绝对界限。动摇了生命力论的基础，1845年，德国化学家柯尔柏又利用木炭、硫磺、氯及水为原料合成了醋酸，这是一个从单质出发实现的完全的有机合成。随后，化学家又合成了葡萄糖、柠檬酸、琥珀酸、苹果酸等一系列的有机酸。1854年，法国的贝特罗合成了油脂类物质。1861年，俄国的有机化学家布特列洛夫用多聚甲醛与石灰水合成了属于糖类的物质。油脂和糖类在生命过程中，是起着非常重要作用的物质。1860年，贝特罗写了《合成有机化学》，指出各种有机化合物完全可能从碳、氢、氧、氮合成，从此，生命力论才逐步被人们摒弃。

二、同系列的概念

1841年~1842年期间，法国化学家日拉尔提出了一个根据经验公式来分类有机化合物的方案，1843年他再次强调对各类化合物分类中的同系列的概念，即有机化合物的每个系列都有自己的代数组成式。在同一系列中，相邻的两个化合物分子之差为 CH_2 ，任意两个化合物的分子之差为 CH_2 的整数倍他举出了同系列化合物的实例，其中有烷烃系列、醇系列、脂肪酸系列：

| 通式 | n=1 | n=2 | n=16 |
|--|------------------------------|--|---|
| $(\text{CH}_2)_n$ | | C_2H_4 (乙烯) | $\text{C}_{16}\text{H}_{32}$ |
| $(\text{CH}_2)_n\text{H}_2$ | CH_4 (甲烷) | C_2H_6 (乙烷) | |
| $(\text{CH}_2)_n\text{OH}_2$ | CH_4O (甲醇) | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (乙醇即酒精) | |
| $(\text{CH}_2)_n\text{O}_2$ | CH_2O_2 (甲酸) | $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ (乙酸即醋酸) | |
| $(\text{CH}_2)_n\text{H}_2\text{SO}_4$ | CH_4SO_4 | $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}_4$ | $\text{C}_{16}\text{H}_{34}\text{SO}_4$ |
| $(\text{CH}_2)_n\text{HCl}$ | CH_3Cl | $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ | $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{Cl}$ |

日拉尔指出：在同系列中，各化合物的化学性质相似，物理性质呈有规律的递变，例如，蚁酸（即甲酸， CH_2O_2 ）是液体，易挥发，与水互溶；醋酸（乙酸， $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ）初油酸（丙酸， $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ ）；酪酸（丁酸， $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ ）；缬草酸（戊酸， $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$ ）；随着碳原子数目的增加，挥发性逐渐降低，水中的溶解度逐渐减小，到硬脂酸（十八烷酸）就是固体，不易溶于水。对脂肪类化合物的分类，日拉尔的分类与现代有机化学的分类已经一致同系列的概念在有机化学上非常重要。马克思在论述“单纯的量的变化到一定时就转化为质的区别”时指出：“现代化学上应用的，最早有罗朗和日拉尔科学地阐明的分子说，正是以这个规律作基础的”（马克思《资本论》）恩格斯在《自然辩证法》、《反杜林论》中，在论述量变转化为质变的规律时，都引用了同系列这个概念。

三、苯的化学结构

化学结构这一概念，在十九世纪上半叶叶已为化学家所采用，到了六十年代，又有了新的发展。1861年，俄国化学家布特列洛夫在德国举行的“自然科学家和医生代表大会”上，作了“论物质的化学结构”的报告指出：“假定一个化学原子具有一定的和有限的化学亲和力值，化学原子借这种亲和力来参加形成物质。将这种关系或者说在所组成的化合物中各原子间的相互连接，用化学结构这个词来表示。”1864年，他在《有机化学综合研究导论》一书中，运用碳四价的概念处理有机化合物的结构，提出了分子中原子相互影响的观点，强调一种化合物只能有一种确定的结构，也只能有一种结构式。依据分子的化学结构可以推测化学性质，也可以依据性质估计化学结构。研究有机化合物的结构是理论有机化学发展的一项重要任务。在有机化学发展的初期，研究的对象主要来自动植物，称为脂肪族化合物。后来人们在煤焦油中发现了与脂肪族化合物性质完全不同的一系列化合物，由于它们大多有特殊香味，称为芳香族化合

物 1818 年发现了萘, 1825 年法拉第发现了苯, 1832 年杜马和罗郎发现了蒽。通过分析发现, 在所有的芳香族化合物中最简单的就是苯, 为了说明当时发现的一系列芳香族化合物的性质, 阐明苯的结构成了摆在化学家面前的一项紧迫的研究课题。日拉尔确定了苯的分子量为 78, 化学式为 C_6H_6 , 但在确定它的结构式时却出现了难题 1861 年, 瑞士科学家劳斯密特首先提出了“苯核”的概念凯库勒在提出原子价和碳链概念时, 主要是以脂肪烃化合物为基础, 当把这个概念用于解决苯的结构问题时, 无论怎样排布苯的分子。用链式结构都不能说明苯的结构问题 1865 年, 他在“论芳香化合物的结构”一文中, 提出了香肠式结构, 已经悟出闭合链的形式是解决苯结构的关键 1866 年, 凯库勒明确指出了苯分子是一个由六个碳原子以单双键相交替构成的环状的六角平面结构, 这就是所谓的凯库勒式。如图所示:

凯库勒究竟是怎样想出苯的这种环状结构的呢? 据他自己说是来自一个梦他说“有一次在书房打瞌睡, 梦见碳原子的长链象蛇一样盘绕卷曲, 忽见一个抓住自己的尾巴, 这副图像在我的眼前嘲弄般地旋转不已”。由于苯的结构问题终日在他的头脑里萦绕着, 以至产生这种梦幻是完全可能的, 这说明研究科学要专心致志。凯库勒的单双键交替的正六角形的苯环结构使得碳能够保持四价, 并且使芳香族化合物都可以从这种结构中推导出来, 这是十九世纪经典结构理论的最高成就

四、有机化学反应的类型

(一) 均裂和异裂

有机化合物分子中原子间绝大多数以共价键结合, 在有机反应中, 共价键断裂的方式有两种: 均裂和异裂。

均裂是共价键断裂时, 公用电子对被两个成键原子平均分享, 一般需要在光照和加热的条件下进行, 所产生的带有未成对电子的活性原子或基团称为自由基(或游离基), 通过自由基进行的有机反应称为自由基反应。如果共价键断裂时, 公用电子对为成键的某个原子独占, 称为异裂, 一般需要在酸或碱的催化下进行, 生成正负离子) 通过这种离子进行的有机反应称为离子型反应。而通过分子轨道对称守恒规律直接完成的反应叫协同反应有机反应根据反应过程可以分为以上三种情况。

(二) 有机反应的类型

基本的重要的有机反应分为以下几种：

1. 取代反应：

有机化合物中的氢原子被其它原子或原子团取代的化学反应称为取代反应。根据共价键断裂的方式，又分为两种情况：一种是自由基取代反应，例如：烷烃中的氢原子被氯原子取代，是在光或加热的条件下引发的自由基取代反应；另一种是离子型取代反应，例如：苯烃的取代反应，在酸及催化剂的存在下发生。

2. 氧化还原反应

有机化学中常把有机物与氧结合或失去氢的反应叫氧化反应，把与氢结合或失去氧的反应称为还原反应。常用的氧化剂有 O_2 、 O_3 、 H_2O_2 、 $KMnO_4$ 等

还原反应包括用催化加氢的方法把烯烃、炔烃还原为烷烃，把醛、酮还原为醇常用的金属催化剂为： Pt 、 Pd 、 Ni 、 Cu 等

3. 加成反应和加聚反应

加成反应指含有不饱和键的有机物，在试剂作用下不饱和键断裂形成新的共价单键。例如：烯烃与氢、卤素、氯化氢、硫酸、水发生加成反应，生成卤代烃和醇等化合物。这类反应属于离子型反应

加聚反应指在催化剂和引发剂的作用下，烯烃的不饱和键断开，自身相互加成，生成长链高分子化合物的反应，也称聚合反应，在聚合反应中，发生反应的相对分子量低的化合物称为单体，生成的相对分子量高的化合物称为聚合物或高聚物利用加聚反应得到的高聚物往往有很多优良的性能，如聚乙烯耐酸，耐碱、耐腐蚀，有优良的电绝缘性聚丙烯可制薄膜、纤维。尼龙-66 就是以酰胺基连接起来的高聚物，是一种合成纤维，有强的韧性、耐磨、耐碱和抗有机溶剂的性质，可制降落伞、鱼网、衣袜等，具有弹性好、拉力强、比天然纤维经久耐用的特点。由两种不同的烯烃单体加聚，称为共聚反应，例如：乙烯和丙烯共聚可得到一种合成橡胶——乙丙橡胶

五、高分子材料及其应用

高分子化合物又称为高聚物，相对分子质量很大，一般在 1×10^4 ，但组成并不复杂，它们的分子大多由相同的基本结构单元以共价键相连多次重复而成例如：聚乙烯分子 $[CH_2CH_2]_n$ ，重复结构单元是 $-CH_2-CH_2-$ ，称为聚乙烯的链节： n 为链节的数目，称为聚合度。高分子化合物的相对分子质量是链节分子式的相对分

子质量与聚合度的乘积同一种高分子化合物中各个分子的聚合度不完全相同，所以高分子化合物是由链节相同但聚合度不同的分子组成的混合物，因此高分子化合物的聚合度是指平均聚合度，相对分子质量指平均相对分子质量，这一性质称为多分散性。不同的高分子化合物其结构单元不同，构成结构单元的低分子化合物称为单体，例如：聚乙烯的单体是乙烯（ $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ ），聚丙烯的单体是丙烯（ $\text{CH}_2 = \text{CH}-\text{CH}_3$ ）高分子化合物由于相对分子质量很大，就表现出低分子化合物所没有的物理特性：（1）通常以固态或凝胶态存在，不易挥发，不能蒸馏；（2）具有较好的绝缘性和耐腐蚀性，因为分子中的主链以共价键相连；（3）具有一定的韧性和耐磨性，因为分子链很长，分子间的作用力很大；（4）具有较好的可塑性和高弹性，因为高分子化合物的长链呈卷曲的线团状；（5）溶解过程缓慢，溶解得到的高分子溶液有较大的粘度

（一）人类对高分子材料的认识

高分子化合物包括天然高分子和合成高分子天然高分子存在于棉、麻、毛、丝、角、革、胶等天然材料以及动植物细胞中，基本物质统称为生物高分子。合成高分子包括通用高分子（常用的塑料、合成纤维、合成橡胶、涂料、粘合剂）、特殊高分子（具有耐高温、高强度、高模量等特性）、功能高分子（具有光电磁等物理特性以及催化、螯合等化学性能）、仿生高分子（具有模拟生物生理特性）以及高分子复合材料。高分子科学建立于20世纪30年代，但人类对天然高分子化合物的认识和利用与人类的文明史几乎同时。因为天然高分子化合物与人类的物质生活密不可分，作为食物的蛋白质、淀粉，作为织物的棉、毛、丝，作为涂料用的油漆与天然树脂，作为人类文化传播不可缺少的造纸技术等广泛地应用在人类生活的各个方面。就合成高分子而言，世界上的三大合成材料（塑料、合成纤维、合成橡胶）的产量增长十分迅速，从1970年到2000年的30年间，塑料增长6.5倍，达到一亿七千五百万吨；合成纤维增长7倍，达到三千五百万吨；合成橡胶增长8倍，达到四千四百万吨。

人类对高分子化合物的认识经过了从对天然高分子的认识和利用、到对天然高分子化合物进行化学改性、最后人工合成高分子化合物的过程。19世纪中叶，为了适应工业生产、生活的需要，开始了对天然高分子化合物的化学改性；20世纪30年代进入了人工合成高分子的时代，于是高分子化学逐步形成一门相对独立的学科，并成为20世纪发展最迅速、应用最广泛的新兴学科之一。

（二）橡胶工业

橡胶是中美洲的土著人最早开始利用的。1735年法国科学院考察队在南美的亚马逊河谷发现了野生的橡胶树，当地人称这种树为“caoutchouc”意思是“木头流泪”。1876年橡胶树被移植到英国、锡兰、马来西亚、泰国、越南等国，得到了大发展。20世纪70年代种植橡胶的产量达300万吨，50%产于马来西亚，30%产于印度尼西亚。橡胶加工工业中随着汽车工业的发展，迫切需要大量橡胶，于是提出了人工合成橡胶的课题。这项研究是从天然橡胶的化学成分和结构分析开始的。1826年英国化学家法拉第对橡胶的成分进行了分析：化学组成为 C_5H_{88} 。1892年，才确定了天然橡胶是异戊二烯的聚合物。橡胶链状结构学说是通过对橡胶衍生物的性质和化学组成的研究而确立起来的，完成这一理论研究的是德国的施陶丁格。1908年，他研究出人造橡胶的合成方法“异戊二烯法”，还发现异戊二烯、乙烯酮等物质不但易和其它物质发生加成反应，还能自身加成，生成的物质化学成分与原来的单体相同，但化学性质、物理机械性能表现出极大的差异。于是他得出这是一类新型的反应，是由低分子单体物质经过化学键的重复连接聚合而成，所以是加成聚合反应。并且指出这类聚合物的微粒是真正的分子，而不是小分子的物理集合体，不可能用别的任何试剂使它们变成通常的典型的低分子溶液。他的这一重要发现，导致高分子理论的诞生。1922年他研究了橡胶的加氢反应，提出了橡胶分子是链状结构的观点，即橡胶是由异戊二烯聚合物的同系物组成的高分子化合物。1937年橡胶分子的线型结构被实验证实。施陶丁格由于对高分子化学的开创性贡献，获得了1953年的诺贝尔化学奖。天然橡胶是由分子量很大的异戊二烯聚合物构成的，于是人们开始转入不饱和有机化合物的合成和聚合反应的研究。随着研究的不断深入，发现凡是有共轭双键的二烯烃化合物都可能聚合成橡胶类似物，由于异戊二烯不易制得，各国的研究都转移到了二烯的制取上。1927年，苏联设计了世界第一个制造丁二烯的工厂，开始了大规模的丁钠橡胶生产。1925年美国科学家纽兰德等人研制出氯丁橡胶。1932年，杜邦公司实现了它的工业化。这种橡胶具有耐臭氧性和耐候性，在高空气球等制品方面有重要意义。1930年，德国化学家用过氧化物作引发剂在水乳液中反应，丁二烯与苯共聚合制得丁苯橡胶（SBR），丁二烯与丙烯腈共聚合制得丁腈橡胶。至今仍是合成橡胶中的最大品种。1924年，美国研制出特种橡胶——聚硫橡胶，这种橡胶有优异的耐油性，由于没有不饱和双键而具有优良的抗老化作用，密封性能也好。同时，还合成出既能硫化、气密性能又好的丁基橡胶。目前，全世界所用橡胶70%是人工合成的橡胶。

(三) 合成纤维工业

合成纤维工业是在对天然纤维改性的研究中发展起来的。1846年,瑞士化学家申拜恩用硝酸—硫酸的混合物处理纯净纤维素得到了火药棉,即硝化纤维。硝化纤维溶于有机溶剂中就可以用来制造人造丝。人造丝的想法是受自然界生物的启示:一些动物学家曾研究过吐丝的蝶、蛾类的生理构造,发现它们的体内有许多粘稠状液体,通过它们的小口吐出,遇到空气便会凝结成丝。英国物理学家胡克就曾设想:用人工的方法仿制出类似的粘液,然后通过小孔进行抽丝。1890年,德国的弗雷梅里等人利用这个原理,先制成铜氨溶液,将它喷射到碱或酸中,就会凝固成为细丝,进一步用酸或碱中和后,纤维素就会再生出来,称为再生人造丝,这种纤维称为铜氨人造丝。1890~1900年德国开始生产这种人造丝,这种丝纤细、柔软、强度高,适宜做高级丝织物,后被质量好、价格便宜的粘胶人造丝取代。1892年英国的克劳斯等人发现用从廉价木材浆中提取的纤维素代替棉纤维,用烧碱浸渍得到碱纤维,让它与 CS_2 反应,生成纤维素磺酸钠,纤维素大分子中引进了磺酸基,削弱了纤维素分子中的氢键,使它溶解在碱溶液中成为粘液,当这种溶液的细流接触到稀硫酸时,就凝固成丝,同时纤维素磺酸钠发生分解,于是生成人造丝。由于纤维素磺酸钠溶液的粘度很大,称为“粘胶”,所得到的人造丝称为“粘胶人造丝”。1900年英国建成年产1000吨的粘胶人造丝厂,20世纪50年代是这种纤维素生产的黄金时期,产量超过天然羊毛的产量。用它做轮胎帘子线,性能超过优质棉纤维。合成纤维工业的真正突破点是聚酰胺纤维的合成,商业名叫“尼龙”(Nylon),中国商品名为锦纶。1930年美国化学教授卡罗瑟斯研制出用己二胺和己二酸生成的聚合物,命名为Nylon-66(两个“6”分别代表二胺、二酸中的碳原子数目)尼龙-66生产规模发展很快,美国的杜邦公司用“我们生产和钢丝一样结实、象蜘蛛网那样纤细的具有美丽光泽的尼龙丝”的广告吸引顾客,各国纷纷建厂投产,其它类型的聚酰胺纤维也迅速发展起来。1941年英国的化学家温费尔德等人,用苯二甲酸和乙二醇为原料进行缩聚,得到了强度、弹性都很好的聚酯纤维,1950年杜邦公司购得专利权并投产,命名“Dacron”,中国商品名为“涤纶”。由于聚酯纤维织品形状稳定性好,洗后能保持原形,产品主要作为衣着用的短纤维。赖恩研究用聚丙烯腈制取纤维,1950年投入工业生产。聚丙烯纤维的优点是蓬松,酷似羊毛,但强度比羊毛大,比重比羊毛小,被广泛用于与羊毛混纺。20世纪50年代又有了更多品种的合成纤维问世。目前,世界各种纤维制品中三分之一是合成纤维。

(四) 合成塑料工业

世界产量最大的合成塑料之一是聚乙烯，是利用乙烯在 1500 ~ 3000 个大气压下通过自由基聚合而得到的高分子化合物。1935 年派林等人在进行乙烯高压实验时，由于密封不好引入了空气，结果却得到了乙烯聚合物粉末，于是发现了氧催化剂。1938 年，派林得到了生产高压聚乙烯的专利权。由于它具有优良的电绝缘性，很快用做高压电缆的绝缘材料。二次世界大战期间，又用来做高频雷达电缆，很快得到大发展。1943 年，世界产量是 900 吨，1953 年已达 113 200 吨。另一种聚乙烯塑料是聚氯乙烯。1872 年德国化学家鲍曼发现氯乙烯在日光照射下会得到白色粉末状固体，1910 年德国和美国都研究出氯乙烯在紫外线和过氧化物存在的条件下的聚合反应，但是这种塑料难于加工。1920 年，美国的瓦克尔公司制得了聚醋酸乙烯酯，它是与聚乙烯共聚后的产物易于加工，1935 年 ~ 1937 年美、德等国将其生产实现工业化。1937 年英国卜内门公司用高沸点液体磷酸酯类增塑剂生产聚氯乙烯得到类似橡胶的物质，用它代替钢材制备化工设备，很快成为产量最大的热塑性塑料。1927 年，德国的罗姆 - 赫斯公司生产了聚甲基丙烯酸甲酯，这就是有机玻璃塑料中的另一大类是聚苯乙烯，早在 15 世纪它的天然产品“香脂”树脂就为人们利用。1836 年德国化学家齐蒙将香脂加以蒸馏，得到了苯乙烯单体。二次世界大战后用于生产丁苯橡胶的苯乙烯转为民用，聚苯乙烯得到发展，在美国成为热塑性塑料的第二大产品。1947 年，美国科学家达勒留与孔宁成功地合成了聚苯乙烯的阳型与阴型树脂。1938 年又发现了四氟乙烯的聚合，是一种线型高分子，以耐高温和耐化学腐蚀著称又有很好的电绝缘性能，1950 年，美国的杜邦公司实现了这种塑料的工业化生产。进入 20 世纪 60 年代，化学家们已经能生产耐 300 ~ 500 的高温高分子材料，如 B-纤维、对位耐纶，能耐 500 ~ 600 高温的粘接剂，耐超高温的碳纤维。70 年代以后高分子合成工业向着大型化和联合化方向发展，合成出用于超音速飞机和宇宙火箭的高强度的高分子材料，对于高分子酶的研究也取得了较大进展。

(五) 功能高分子材料

功能高分子是指具有光、电、磁、生物等性能的高分子材料，20 世纪 70 年代开始发展，形成了一个重要领域。

1. 高分子分离膜材料

由于环境保护工作的开展，促使离子交换树脂发展，使离子交换膜和反渗透膜有效用于快速分析及分离过程。如海水淡化、废水处理、溶液浓缩、海水提铀等。在

薄膜反渗透技术中，中空纤维反渗透膜的发明是薄膜分离技术中的一项突出成果。1967年，美国的杜邦公司研制出了第一个工业化的海水淡化尼龙-66中空纤维装置B-5；1968年，又制成使合成气中的一氧化碳与氢气分离浓缩的聚酯中空纤维分离器工业装置；1970年，制成芳香族聚酰胺-酰睛类中空纤维反渗透器B-9，分离效率高，体积小；1973年制成中空纤维反渗透器B-10，经过一级反渗透处理，可使苦咸的海水淡化为饮用水。

2 光导纤维

20世纪30年代，一些科学家提出利用光导纤维传递图像的设想，50年代开始研究。1970年康宁公司制成每千米20分贝的低损耗的光纤；1972年日本电子技术综合研究所研制出用石英做芯子的光纤；1976年，日本电器通信研究所制成对波长为12微米的红外光波每千米损耗0.47分贝的超低损耗光纤。后来发展的塑料光导纤维是由两种不同折射率的聚合物制成的芯-鞘形复合丝，使光线在芯部沿聚合物界面折射前进的光学复合材料。根据选用聚合物材料的种类不同，可以分为两类：一类是芯部采用聚甲基丙烯酸甲酯，鞘部采用低折射率的含氟透明聚合物；另一类是芯部采用聚苯乙烯，鞘部采用聚甲基丙烯酸甲酯。美国最早生产出这种纤维，1970年展出了这类光学纤维的通讯装置，1974年研究出实用光导纤维制造法。1975年日本也研究出独特的光纤制造法，使光导通讯技术受到各国重视。

3. 导电高分子材料

这是在保持高分子具有的重量轻、强度大、易加工等特性的基础上，改变高分子化合物的绝缘性为导电性的一类高分子材料，主要是导电涂料、导电塑料、导电橡胶，这类材料应用于电子工业中。

4. 生物功能高分子材料

合成高分子的人造皮肤已经能够完全代替真皮的移植，人体的其它器官、软骨、肌肉、键、角膜、心瓣、肾、心脏等也能用高分子材料来代替。例如美国用醋酸中空纤维制成人工肾，它是一种血液透析器，可以从肾功能不全病人的血液里除去尿素、尿酸等有害物质。1984年瑞典已有人进行了人工心脏的移植手术。据预测，将来人体的大部分器官都可以用功能高分子材料来制造。

第四章

观之神奇、思而奥妙的天文学

什么是“天文”？《淮南子·天文训》中把天文定义为“文者象也”是说天文就是天象，即天空中的现象。天空中的现象可以分为两大类；一类是关于日、月、星、辰的现象，即星象；另一类是地球大气层内所发生的现象，即气象。我国古代的天文学实际上包括星象和气象这两门学科的知识，而西方天文学主要是指星象知识。

天文学是一门古老而又尖端的科学，它的发展经历了早期古典天文学阶段，中世纪托勒密地心说盛行阶段，16、17世纪的哥白尼日心说阶段和18、19世纪的经典天文学阶段。20世纪初，是近代天文学兴起、天体物理学诞生并迅速发展，分光术、测光术和照相术在天文观测研究中被广泛应用，开创了恒星天文学和太阳、太阳系物理学的新局面。进入20世纪，大型光学望远镜的出现、电子技术和自动化技术的广泛应用，促进了天文学的发展，并成功地建立了恒星演化理论，这是继天体力学后人们对天体认识的第二次飞跃。银河系和河外星系天文学、宇宙学等方面的观测和研究都取得了丰硕成果。

20世纪下半叶，人类进入了太空时代，天文学也进入了空间探测宇宙的阶段。人们不但可以在地面上观测天体，还可以飞到大气层外进行观测，不但可以用可见光波段观测，还可以用射电、红外、紫外、 χ 射线和 γ 射线波段观测天体，空间天文学和全波段天文学因此诞生，天体物理学成为当代最活跃的学科领域之一。

第一节 概说天文学

天文学是研究天体和宇宙的学科什么是宇宙?古人说:“四方上下曰宇,古往今来曰宙。”即宇宙是时间和空间的无限。从哲学角度看,宇宙应是时间、空间、物质和运动的统一和永恒但目前人类认识的宇宙是有限的

一、常见的天文现象

晴朗无月的夜晚,我们仰首望天,可以看到晶莹的群星像珍珠般地挂满整个天穹。繁星点点,放射出白金似的光芒,美丽的星空给人以宁静、宽广、舒畅的情感。这星空,是一幅优美的画册,一卷高雅的抒情诗集、一部田园式的交响乐章,一本深奥的天书,它激起了我们无限的遐想,它向我们提出了许多“为什么”。而人类总是在不断地思考与探求着天空的奥秘,并产生了各种解释天空奥秘的理论和实践,这些理论和实践的综合就是天文学

(一)天球和天穹

我们在广阔的田野上仰望,就会看到蓝色的天空好像半个球面盖在大地上,人们把这个半球形的天空及其背景叫做天穹,日月星辰每天都在这个半球形的天穹里东升西落,永不停息。我们把地面上和以下的两个半球形的天穹合起来就称为天球。天穹和天球都不是真正存在的,而是人们的视觉造成的现象。我们看到的蔚蓝色的天空是地球大气散射阳光造成的视现象。蓝色天空只是天球背景前面的帷幕。当我们离开大气层来到宇宙空间时,由于没有大气及其对阳光的散射,天空漆黑一团,尽管红日高照阳光灿烂,但照样满天星斗,白天和晚上的区别只是天空中多了一个太阳。由于天体离我们很远,它们发出的光线来到地球几乎都成了平行光线,即使月球也是这样。例如:在月光下当我们从一处走到另一处看月亮时,它都在相同的方向上,说明月光也近于平行光,因而月亮好像跟着我们走。

(二)天体

肉眼所见的天体主要有以下几种:太阳、月亮,行星,行星的卫星,流星,彗星,恒星及少数星云。地球也是一个天体,因为在别的星球上看,地球也在天上。长

时间在天空运行的人造卫星宇宙飞船等飞行器叫人造天体。

1. 地球地球是太阳系的一个行星，同其它行星一起绕太阳转动地球的自转和公转分别引起昼夜交替和四季变化

2. 月球月球是地球惟的天然卫星，是离地球最近的天体。它反射太阳光，且有盈亏圆缺现象，有时会发生日食和月食现象

3. 太阳太阳是太阳系的中心天体，它是发光的气态球体，是地球上能量的源泉

4. 行星、卫星及小行星环绕太阳转动的较大行星有九个，按离太阳的距离，从近到远依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星及冥王星。行星不能发光，只能反射太阳光。肉眼只能看到水星、金星、火星、木星、土星。太阳系中还有许多小行星，其中已经编号的有 6 000 多个。它们大都分布在火星和木星轨道之间。许多小行星也有自己的卫星

5. 彗星只有彗星离太阳很近时，我们才能看到它。大多数彗星出现时拖着一条长长的尾巴，像一把扫帚挂在天空，故彗星俗称“扫帚星”彗星一般也绕太阳转动

6. 流星体晴朗的夜晚我们有时看到一道道亮光划破天空，那就是流星流星是小天体，绕太阳转动，其轨道多种多样流星体闯入地球大气层，因与大气分子碰撞生热发光而化为气体，来不及烧尽的便落到地上成为陨星。流星、陨星和彗星是天象观测的重要内容。

7. 恒星我们所见到的星星，除少数是行星外，几乎全为恒星。恒星都是自己发光的炽热气体球。太阳是千千万万颗恒星中的一个太阳看起来比星星大得多、亮得多，那是因为太阳距地球比其它星星近得多恒星，顾名思义是“永久不动”的星。这里所说的不动，并不是说它们没有东升西落，而是指星星之间的相对位置几乎不变。如我们熟悉的北斗七星组成一个勺形，这图形在短的天文年代中几乎不变，总是如此。恒星的亮度一般是不变的，一些亮度有很大变化的变星、新星和超新星的爆发现象，向来被人们所重视。

8. 星云有时我们借助于望远镜可以看到一些云雾状的天体，它们或者是由气体或质点尘埃组成，体积庞大，密度较低而质量很大的银河系内的天体，或者是银河系外的星系——河外星系。

9 其它天体 20 世纪人们又发现许多新的天体种类，它们以发射不可见光为特点，如红外天体，射电天体，紫外天体， γ 射线和 r 射线天体等等。按宇宙物质的空间分布和运动特点，天体可分成恒星及其行星系、星系、星系团、超星系团

等不同层次地球处在银河系的太阳系中，银河系外有大量类似于银河系的河外星系，它们与银河系一起组成本星系群和本超星系团目前观测到的所有星系和星系团叫总星系。这就是地球人类所处的宇宙环境

(三) 天体的周日视运动

我们直接或间接观测到的天体视位置的变化叫做天体的视运动日月星辰的东升西落就是最明显的视运动因为这不是天体的真实运动，故称“视”运动由于日月星辰的东升西落是以“日”为周期的，故称为周日视运动周日视运动时，恒星之间的相对位置一般不发生变化，而总是从地平线上升起后越来越高，到最高点以后又慢慢降低，直至降到地平线以下。天体周日视运动的路线叫周日圈。周日圈都是平行于天赤道的圆弧，并不相交周日视运动完全是由于地球自转所造成的现象。由于离地球两极距离的差异，各地所看到的天体周日视运动，特别是周日圈的倾斜情况不同（如图 4-1）。例如，在赤道地区天体垂直于地面升起和落下，在南北两极天体平行于地面每天绕行一周；在两极和赤道之间的地区天体斜升斜落，周日圈与地平线的倾角为 $90^\circ - \phi$ ，其中 ϕ 为该地的地理纬度

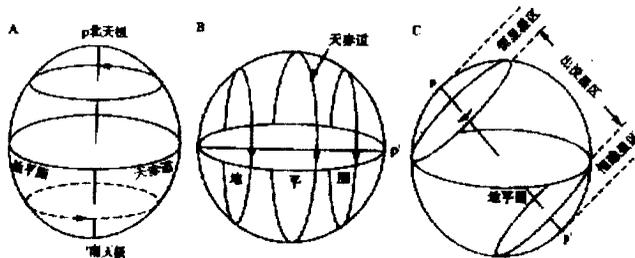


图4-1 不同纬度的天体周日视运动

天体的周日圈都有一个共同的轴线，这就是地轴及其延长线。连接地球南北两极的线就是地轴，它是地球自转的轴线。地轴向两端空间无限延长，与天球的交点就是天极，北极上空的叫北天极，南极上空的叫南天极。天体的周日视运动可以想象为镶嵌在天球内表面上的天体随天球一起绕极轴旋转的结果。由于北极星小熊座 α 几乎在北天极上(离北天极约 1°)，故它几乎没有东升西落的周日视运动，而总是在某地北方天空的一定高度上(北半球)其高度 $h_p = \phi$ 。在北天极附近的天体总是绕着北极星转圈子，一天转动一周。离南、北天极越近，恒星的周日圈越小，离南、北天极越远，周日圈越大，且它们是一组同心圆。这些周日圈中，只有一个是天赤道，它实际上是地球赤道面无限扩大与天球面的

交线

(四) 太阳的周年视运动与黄道

太阳除了每天东升西落以外，它每天还在恒星之间向东移动大约 1° ，一年之后又回到原来的恒星之间。太阳的这种以年为周期的视运动是地球绕太阳公转的反映，故称之为太阳周年视运动（如图 4-2）。太阳周年视运动的路线（在天球上的轨迹）叫黄道实际上黄道是地球公转轨道面无限扩展与天球面的交线。由于地球公转的轨道平面与其自转的赤道平面不重合，有一个 $23^\circ 26' 21.448''$ 的交角，故黄道与天赤道也有一个交角，叫黄赤交角，其值也是 $23^\circ 26' 21.448''$ 。由于这一夹角的存在，太阳并不总是垂直照耀在赤道地区，而是时而直射北半球，时而直射南半球，造成了地球上的四季变化和昼夜长短的变化。

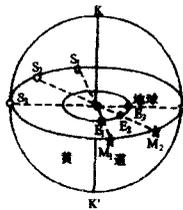


图4-2 太阳的周年视运动

何以证明太阳的周年视运动呢？这可以从一年四季星空的不断变化来说明。太阳所在的星空是不可见的，人们只能看到与之相对的那半个天球上的星星如果太阳没有周年视运动，即太阳所在的星空位置不变，那么我们一年四季所见的星空也不变。显然这是不符合事实的。由于太阳每天向东移，原来傍晚上升的星星应比前一天提前升起，其提前的时间恰好等于太阳东移的角度所对应的时间，大约为 4 分钟。天文上经常用角度、角分、角秒来表示天体的角位移大小，又用地球自转所对应的小时、时分、时秒数来表示时间，如 $1h=15^\circ$ ， $1min=15'$ ， $1s=15''$ 。

(五) 月亮往东的视运动与白道

月亮围绕地球公转，它的公转轨道面与黄道面有一个 5° 左右的交角（变化在 $4^\circ 57' \sim 5^\circ 19'$ 之间）。月亮公转轨道面无限扩展与天球的交线称为白道白道是月亮围绕地球公转而在天球上作视运动的轨迹。这就是说，月亮除了东升西落的运动外，每天还在恒星间东移大约 $13^\circ 10'$ 。1 个月之后，又基本回到原来的星座附近月亮的这种视运动是以月为周期的由于月亮受太阳引力的摄动较大，故月亮的视运动要比上面所说的更为复杂。一般说，由于月亮每天东移，它升起的时间每日平均推迟

约 40 分钟此外，日月食和海洋潮汐均是同月球运动密切相关的现象

（六）行星视运动的复杂性

相对于太阳来说，水星、金星不是在太阳以东就是在太阳以西，其范围为一个不大的角度，所以我们常在黄昏或黎明前看见它们。但是火星、木星、土星相对于太阳的位置可以取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的任意值，因此可以在夜里的不同时段里见到它们。但是无论是什么行星，它们相对于恒星的视位置都表现为复杂的轨迹，有时从西向东“顺行”，有时从东向西“逆行”，而在顺行和逆行的转变时又停留在恒星间不动，我们称之为“留”，这完全是由于行星绕日公转和地球绕日公转两者视运动合成的结果。

行星视位置在不断变化，它们有时可以运行到太阳同一侧不大的扇形区内，形成“九星联珠”现象，有时又可列成“十”字形如 1982 年 3 月 10 日，九大行星运行至太阳的一侧，处在 96° 的扇形区，从地球上看去，大行星同时出现在星空中 5 月 16 日又再次聚会，扇形夹角 104° ，这就是九星联珠下次九星联珠将出现在 2357 年若不算冥王星，从公元元年迄今的 2 000 年间，行星处在 90° 内的八星联珠已有 18 次，分别出现在 117、310、408、410、449、626、628、768、949、987、989、1126、1128、1130、1166、1307、1666 和 1817 年，其中 449 和 949 年的还是九星联珠下次八星联珠在 2161 年的 4~6 月间。

1999 年 8 月 18 日前后，从地球上看去，水星、金星、日与天王星、海王星基本处于天球上的相反方向；冥王星、火星、月亮又与木星、土星基本处于相反的方向；而这两组方向又基本垂直它们的分布近似为以地球为中心的十字形，故有人称之为“大十字”或“十字架”。这是众行星绕日公转出现的必然现象。

观测行星的位置是我国古代天文学的主要内容当水星或金星在离黄道面很近时运行到日地之间，从地球上看去，有时有一个黑点穿过日面，这种现象叫“水星凌日”或“金星凌日”水星凌日平均百年 13 次，金星凌日 243 年发生 4 次，它们都是罕见的天象。最近的一次水星凌日发生于 1993 年 11 月 6 日和 1999 年 11 月 15 日；上次金星凌日在 1882 年 12 月 6 日发生，下次将在 2004 年 6 月 8 日和 2012 年 6 月 6 日发生

二二、天文观测

天文学首先是一门观测科学，离开天文观测就不可能得到天体的任何信息，面对茫茫太空，我们将两眼漆黑，一事无成

（一）光学观测

光学观测是用望远镜接收天体的可见光辐射的方法。一般天体都是发可见光的。最早的望远镜是手携的单筒光管，后来又发展成双筒的观剧镜、航海和军用的望远镜等，它们也能观天，特别是作为认星和观测彗星、流星的工具，还是不错的。专门用于天文观测的光学望远镜，据其成像光路的不同可分成反射式、折射式和折反射式三类，其中折射式的镜筒较长，焦距受镜筒长度的限制；反射式镜筒较短，焦距可以很长。一般说来焦距越长（目视放大倍数越大）但可见天区（视场）就越小。天文望远镜能否看得远、看得清和看到更暗的天体，主要取决于其口径的大小，其次才是放大倍数等性能。因为看不见、看不清的天体再放大也是看不见、看不清的，人眼之所以看不远，就是因为其瞳孔直径只有5~7毫米，接受来自天体的光子数太少。望远镜能把比眼睛接受的多得多的光子会聚后再射入眼中，再加上视角的放大，因而能使人眼看得更远，看清更暗的天体。

光学望远镜除目视观测外，还需配备各种终端和附属设备，并建有专门的观测室，以避风挡雨和遮掩杂光，观测室的房顶一般是球形或半球形的，可以活动的，这种结构叫圆顶，天文圆顶成为天文台、站、馆的重要标志。由于观测目的的不同，望远镜终端的辐射接收器也不同，因而就有不同的光学观测方法。

目视法：是通过望远镜终端的目镜而用人眼观测的方法，可观测天体的位置、形状、视亮度颜色及其变化和天体的显著运动、较大太阳系天体的细部等。

照相机法：是终端加照相机并使用专用底片照相记录的方法。由于天体大多很暗，应长时间曝光。由于天体的东升西落运动，长时间曝光需配备跟踪天体的装置——转仪钟。

天体物理方法：为了观测天体的物理性质，望远镜终端需使用相应的天体物理仪器，如测光要装光度计、分光要装分光摄谱仪等。观测结果的显示方式除照相底片外，还可用光电法。光电法是通过光电器件，把光信号转变为电压、电流信号的方法。例如要使天体成像，可使用光电像转换器。光电法已广泛应用于当今天体物理和天文观测之中。

（二）射电观测

许多天体除辐射可见光外，还发射无线电波或以辐射无线电波为主，这些发射无线电波的天体叫射电天体。光学望远镜不能接收天体的无线电辐射，只有射电望远镜才能接收射电望远镜的主体是由接收天线和射电信号接收、处理系统组成的，

故它与电视、通讯设备样，完全是一种无线电接收装置，外表已看不出光学望远镜的影子。射电望远镜的出现打开了接收天体辐射的又一个窗口，推动了射电天文学的发展，使人类对天体的认识产生了飞跃。

（三）空间探测

地球大气层对天文观测十分不利。一是某些波长的天体辐射不能通过大气层，二是能通过的天体辐射也因大气吸收、反射等而减弱了许多。因此，到地球大气层外进行天文观测，是很理想的方法。人们先用高空气球、火箭、高空飞机等作为载体进行外层大气的天文观测。人造卫星上天后，空间天文观测才成为现实。一方面许多国家发射专门的天文卫星或探测器，探测地面上观测不到的各类天体的全波段辐射和其它辐射，考察行星际空间和进行太阳物理方面的研究；另一方面，美国和前苏联发射许多飞行探测器，对月亮和大行星进行近距离探测，或干脆把探测器发射到金星、火星上进行直接观测，美国人还登上月球进行考察。空间探测要求先进的科学技术水平和经济实力来支撑，一般国家是不易办到的。但空间探测手段的应用，推动了空间天文学的发展，使人类对天体和宇宙的认识又一次产生了飞跃。

（四）天文台（站）

专门从事天文观测的机构和场所叫天文台或天文站。天文台的_{光学天文望远镜}一般安装在远离城市灯光的山上，要求视野广阔，大气洁净污染小，空气宁静度好，可供观测的晴天数多。天文台上装置的其他观测仪器，也需要相应的自然环境和观测条件。天文台观测各类天体及其辐射时，还需知道天体的空间位置和相应的时刻，因此天文观测中专门有一种时间测量工作，由专业天文台负责，以保证提供准确、科学、统一的时间系统。

我国现有 5 个天文台，它们是北京天文台、上海天文台、南京紫金山天文台、云南天文台和陕西天文台，其中陕西天文台就是以时间测量为主要任务的。

三、研究天文学的意义

天文学发展的历史说明，天文学产生于人类的生产和生活的社会实践，并随着社会生产力的发展而发展，天文学研究对于人类的生存、社会的发展和文明的进步具有重要意义，天文学与人类的关系非常密切。例如：

1. 时间服务

人人都使用时间准确的时间从何而来？应该说是由天文台测量出来的，并由世界时间管理机构提供统一的服务高度精确的时间对于测绘、航海、航天、国防、科研以及其它部门极为重要

2. 编制年历和星表

大地测量、重力测量、航空导航等许多工作都必须使用天文年历和星表精确的星表和年历需要天文工作者进行大量的天体测量工作，包括甚长基线干涉测量甚至空间技术测量，要花费巨大的代价才能完成

3. 航天服务

人造卫星已广泛应用于军事、通信、气象、测绘、资源等方面，而人造卫星的发射、跟踪、入轨、定点等轨道计算，都离不开天文部门的合作

4. 太阳活动预报

太阳活动是太阳大气中各种活动现象的总称。太阳活动剧烈时，它所发出的强紫外辐射和粒子流到达地球附近，能引起地球磁场和电离层的剧烈变化，影响日地空间环境，导致地面短波通讯中断，危及航天、航空的安全，甚至影响天气过程，这对国民经济建设和国防建设都会产生较大的影响。因此，做好太阳活动的预报，具有直接的现实意义。

5 与其它学科的交叉

天文学的发展离不开其它学科的发展，如经典天文学是以数理学科为直接动力的，近代天文学更依赖于物理学的光、力、量子、热、电磁学和原子物理、核物理和相对论等等，其理论和方法都在物理学的研究范围之内。而天文学的新发现、新课题又推动着数学、物理学去开辟新的研究领域。如天体力学促进了分析数学的发展；对太阳光谱的研究，首次在太阳上发现了氦元素；对恒星光谱的研究，发现了原子禁线理论的线索；对太阳能源的研究，又促进了核聚变理论的发展。

天文学同哲学有着密切的联系，天文学的发展曾经对于人类的自然观产生过重大影响，如哥白尼的日心说把自然科学从神学中解放出来，康德·拉普拉斯的太阳系起源假说，打开了推翻18世纪形而上学自然观的缺口。天文学的每一次重大发现和进展，都极大地丰富了唯物辩证法的内容。

天文学与其它学科交叉，为其它学科的发展提供了支持，并共同解决各学科相关的实际应用问题和各种研究课题。天文学与国民经济各个部门的联系越来越显得重要，它涉及未来的能源、交通、技术、环境、生命等方面，涉及宇宙航行、向宇宙空间扩张等领域。如我国天文工作者利用日出时发生日食而产生的“天再旦”

现象，与史学、考古学等学科的工作者一起，成功地解决了夏商周的断代问题，把我国的纪年史前推了半个世纪。即由原来的公元前 841 年前推到公元前 899 年。

6. 天文学面临大挑战

随着观测手段和探测技术的现代化，天文学的研究成果和新的课题已对现代科学构成挑战特别是宇宙天体有地球上无法达到的极端的物理条件，如有接近光速的运动；有达到 10^{-18} 托以上的星际空间高真空，有超新星爆发瞬时的 10^{13} K 以上的超高温；有中子星高达 10^{18} 大气压的超高压和 10^{18} 千克/米³ 的高密度；有能量达 3×10^{20} 电子伏特的宇宙线超高能粒子，等等在这些极端的物理条件下，可能会产生用已有的物理定律或理论不能解释的新发现和奇特的天文现象，需要进一步修正现有理论甚至创造新的理论去解释它，故天体物理学已经成为当代基础科学的前沿和交叉点

由于原子核物理、粒子物理、等离子体物理、凝聚态物理、分子物理、原子物理、理论物理、量子力学、量子化学和分子生物学等多学科的发展，大大推动了天体物理学的进展，当代天体物理学已有了坚实的理论基础。但一些问题的理论预言尚待观测证实，如大统一理论预言的单极子和质子衰变，至今尚未找到证据；广义相对论预言的引力波至今仍未真正测到；天体物理中的重大课题之一的黑洞尚未被最后证实等等 21 世纪，正在蕴酿着理论和观测的重大突破，当代天体物理学将是突破口。

诺贝尔奖虽然没有设立天文学奖，但 1964 年以来已有 7 次物理学奖属于天文学研究成果它们是：(1) 1964 年汤斯(美)的星际分子研究；1967 年贝特(美)的恒星核反应的能源理论；1970 年阿尔文(瑞典)对磁流体力学的研究并应用于太阳磁场和行星际等离子体等问题；1974 年休伊特(英)发现脉冲星和赖尔(美)创建综合孔径射电望远镜；1978 年威尔逊和彭齐亚斯(美)发现宇宙微波背景辐射；1983 年钱德拉塞卡对恒星结构和演化理论的研究，发现白矮星质量上限，福勒(美)创建化学元素形成理论；1993 年泰勒和赫尔斯发现第一例验证广义相对论关于引力波辐射的预言的证据，它是双星中的射电脉冲星 PSR1913+16。可以断言，新的诺贝尔物理学奖也必将会光顾天体物理学的研究领域。

目前天文学家对太阳、太阳系内天体和恒星的物质结构、物理状态及物理过程的研究比较活跃，对高能天体物理学中有关宇宙和天体上的高能过程和现象(如超新星爆发、中子星、星系核、类星体等)的研究也很活跃。

天文学是一门昂贵的科学，现代空间天文观测的人造卫星和航天工程，是高新技术的结晶。其中所使用的各种探测仪器和设备，涉及远距离信号的传输和图像处理，以及自动控制技术等许多方面，研制成本和造价都极高，每颗卫星或每艘飞船连同所携带的仪器设备，需耗资数十亿美元，因此天文学的发展还受到国民经济

发展的约束。

天文学是研究天体的起源和演化、宇宙的结构和演化这些最根本、最宏观的问题的，这对于人类正确认识自身的宇宙环境，正确处理人和环境的关系，正确认识人类的未来，有着直接的意义；对于人类解决生命起源等根本问题，认识宏观世界和微观世界的统一规律，更具有深远的意义

第二节 地球的保护屏障——磁层和辐射带

地球是迄今人们知道的惟一有生命活动的天体，它是人类和至少 100 万种生物繁衍生息的美丽家园。地球上有适宜的温度、富氧的空气、充足的水资源和能源。及生命生存所必须的条件，还有适中的日地距离和适度的自转和公转，特别是有严密的宇宙保护屏障；地球确是人类和其他生物的“天堂”。

地球有较强的磁场，它包含偶极磁场和非偶极磁场两种成分。地磁场是变化的，据此可将其分为有长期变化的基本磁场和有短期变化的变化磁场两部分，但变化磁场只占 10%。长期变化是指地磁极每 10 年纬度增加 0.04° 和经度增加 0.07° 的向西漂移，以及无偏线的西移。据人造卫星观测，地磁强度平均每年减小 0.1%，这就意味着经过 1 000 年后，地磁强度为零，地磁场消失，磁极要发生倒转。古地磁研究表明，地磁极有大幅度的漂移和突然的极性突然倒转，这种倒转“事件”的周期约为 50 ~ 10 万年，近 500 万年间地磁场已倒转数十次。

高空地磁场由于受太阳风带电粒子的作用而被限制在一定的区域，这就是地球磁层。地球磁层始于地表以上 600 ~ 1 000 千米处，向空间延伸到磁层边缘。朝向太阳的一方磁力线被压缩形成一个很扁的磁层头部，此处磁层边界顶离地球中心约 8 ~ 11 个地球半径。在太阳活动激烈时可压缩到 5 ~ 7 个地球半径，背着太阳的一方。磁力线被拉长，形成一个很长的尾部，可延伸至几百甚至上千个地球半径之外。磁尾截面直径约 40 个地球半径。同样，地球磁层也改变了太阳风的流向。

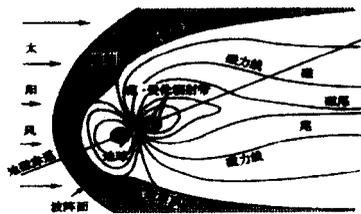


图 4-3 地球磁层示意图

少数太阳风粒子因闯入地球磁层而被地球磁场所俘获，它们沿着磁力线做螺旋运动，同时不断辐射电磁波，并被约束在一定的区域，在高空形成两个著名的辐射带——范爱伦辐射带。辐射带分内外两层（如图 4-3）：内辐射带位于离地心 1.5 个地球半径处，范围限于地磁场北纬 40° 以内的高空，主要粒子是高能质子（50MeV）和电子（大于 30MeV）；外带离地心 3~4 个地球半径，延伸到磁纬 $50^\circ \sim 60^\circ$ 范围，比较稀薄，其中主要是能量较低的质子和电子。

磁层像一道天然屏障，护卫着地球上的生物免遭太阳风高能粒子的轰击。

第三节 月球与天文潮汐

月球俗称月亮，是地球的天然卫星和离地球最近的天体。我国古代很早就传说着嫦娥和后羿的故事。这表达出人们对月亮的美好向往。

一、名副其实的广寒宫——月球

1966年至1972年，美国的“阿波罗”号系列宇宙飞船共发射17次，目的是登上月球，其中11~17号是载人登月的，除13号外有六次各把两个宇航员送到月球上，然后返回地面，并取回数百公斤月岩石样品。其中11号宇宙飞船的指令长阿姆斯特朗在月亮上踏下了人类的第一个脚印。昔日飞向月球的幻想已经变成了现实。人们对月球的了解已经到了脚踏实地和实验室阶段了。

月球半径1738公里，满月亮度—12.5等。现已测出月球到地球的平均距离为384400公里。20世纪40年代开始用雷达测月距，60年代进而用激光测月距，理论误差已缩小到8厘米。近来发现月球每年远离地球5厘米，月地距离在增大。

月球平均视半径为 $15' 32.6''$ ，略小于太阳平均角半径 $15' 59.6''$ ，因此地面上看日月，有相同的视大小。由月地距和视半径可求得月球半径的平均值是1738.2公里，约为地半径的1/4。月球质量是 7.35×10^{25} 次克，相当于地球质量的八十分之一，它的质量在太阳系行星的68颗卫星中居第7位，但与本行星相比却是相对最大的，月球的密度 3.341 克/厘米^3 ，重力是地面重力的六分之一。

（一）月球的面貌

从1610年伽利略用他的30倍望远镜观测，画出第一幅月面图至今，至少已有

150 多幅月面图问世，最大的直径达 7.5 米。由于宇航员多次登月实地考察，对月面的了解还是比较清楚的

月面山岭起伏，峰峦密布、表面复盖一层棕灰色的尘土和多孔性的火山土壤，其中夹杂着“玻璃碎屑”肉眼看到的黑色区域称之为“海”，月海共有 22 个，最大的是面积 50() 万平方公里的“风暴洋”，它的深度只比月球平均球面低 1 千米。

月亮上最亮的部分是“月陆”，这是高出月海的高原，它的形成已有 46 亿年，主要由斜长岩组成，反照率高，故显得明亮。月面上最突出的地貌是“环形山”，据统计，直径超过 1 千米的有 3.3 万个之多，而飞船照相鉴别出的已有 30 万个以上，直径最大的是贝利环形山，直径为 295 千米，年轻的环形山周围有放射状的辐射纹，至少有 60 座环形山四周有这种明亮带纹，其中以第谷环形山的辐射纹最为明显和美丽，共有上百条，12 条特别清晰，最长的一条达 2000 来千米，它翻山越岭，最宽处达 20 千米。环形山的成因，一说是火山活动，一说陨石撞击，大部分是陨击形成。月球上还有长长的山脉，最长的是亚平宁山脉，达 1000 公里长。最高峰是莱布尼兹山脉的 9000 来高峰。此外，月面上还有许多陡峭壁，弯曲延绵的裂缝，即“月谷”和“月溪”之类，最长的月谷长 500 千米，宽 20~30 千米。月球背面环形山更多，其中有 4 座以中国古天文学家石申、张衡、祖冲之和郭守敬命名。月球总以同一面朝向地球，直到 1959 年第一艘宇宙飞船绕月飞行，才拍回那 41% 的从未见过的背面照片。

20 世纪 50 年代以来，在月球表面已多次观测到雾气、辉光、彩斑等暂时现象，持续时间几十分钟至 1—2 天，这种月球表面突然变亮、变暗、变红、变蓝及闪光等现象，总称月球瞬变现象（LTP），目前它还是个谜。

（二）月球的物理性质

月球上既无空气又无水，没有大气和四季变化，总是静悄悄的没有一点声音，是一个荒凉静寂的世界——名副其实的广寒宫。宇航员实地考察月球上只有微量的氦和氩，其密度不过每立方厘米 30 个原子到 6 万个原子（夜间多些）。在月球上由于缺乏调节温度的大气和水，加上月面物质的热容量和导热率都低，以及昼夜交替周期长达一个朔望月，故温差很大，温度变化在 127 ~ -183 之间，这种条件不可能存在任何形式的生命，但在月岩分析中已找到多种氨基酸，这是向有机物和生命转变的标志

月球没有明显的磁场，月面磁场只有 36 伽玛，月岩样品显示的微弱磁性，说明月球曾经有过较强的磁场月面长期受太阳风的作用而聚集了不少的氦³。宇航员测定月球的热流量特别大，表明月球内部有热源，月岩样品富含放射性元素，说明热能是由放射性元素的衰变能提供的。热能以每平方厘米 0.75 微卡/秒的速度外流。

空间探测器曾探测到月球正面有 11 个、背面有 2 个重力瘤或叫质量瘤，这是月幔中的质量异常集中处，它们大多位于月海中央，可能是密度较大的陨石的遗骸。

宇航员在月球上安置过 4 台月震仪，测得月球一年中可发生月震 300 次以上，仪器工作 8 年，共记录到 1000 多次月震，但能量都很小，仅为地球地震能量的 10^{-10} 且震源多在 700 千米以下

（三）内部结构和演化

月球内部可以分成月亮、月幔和月核 3 层 表面以下 65 千米是月亮，其间 0~2 千米是表层，由岩石碎块、月屑和月壤组成，65~1000 千米是月幔，表面 1000 千米以下至中心是月核，其中 1000 千米~1400 千米是软流层。月球中心有一个半径 350 千米的核芯，其成分接近 Fe—Ni—S 的榴辉岩，月核温度约 1000~1200℃

月球演化大样可分为 5 个阶段：月球形成；壳层分离；早期火山活动和巨大陨星撞击；频繁火山活动和熔岩溢流；31 亿年以来的冷却和宁静阶段等。46 亿年前，月球由许多像陨石似的细微天体碎片粘附聚集而成，距今 42~39 亿年间，遭到强烈的陨击，形成许多环形山和月海盆地，距今 39~31 亿年间，发生了频繁的火山活动，它们喷发的岩浆流向各处盆地而形成月海。

关于月球的起源尚无定论，大体上可分成三种学说：（1）分裂说认为，月球物质曾是地球的一部分是在地球形成的初期（尚处于部分熔融状态）在自转离心力和太阳起潮力作用下，从赤道处分离出的物质形成的，但计算表明，地月系的角动量不足以使地球分裂；（2）俘获说认为，月球原是在地球轨道附近的小行星或火星区域的独立天体，后被地球俘获成卫星，这可解释月球在密度和化学组成上与地球的较大区别；（3）月地共同形成说认为，它们出自同一块太阳星云，只是月球形成比地球晚，故由残余在地球周围的非金属物聚集而成，而地球则先聚集了较多的金属元素物质。

二、天文潮汐

天文潮汐也叫引力潮，它是由太阳系内的天体（主要是日、月）对地球的引力造成的，是地球物质有规律的变形、运动现象。天文潮有海潮、固体潮和大气潮三种。其中最明显的是海洋潮汐。

1. 海洋潮汐

海水有一种周期性的涨落现象。海面上升叫涨潮，下降叫落潮。涨落潮具有周期性，在一个太阴日内有两次涨潮两次落潮相间，故涨潮和落潮的周期都是半个太阴

日,约为 12 时 25 分钟。由此可见,潮汐受月球的影响最大,但它是日月引力共同作用的结果。由于地球中心所受太阳或月球的引力,无论大小或方向,都是整个地球各处所受太阳或月亮引力的平均值,而地球上各处所受到的太阳或月球的引力与这个平均值都有一差值,这个差值(即合力),即是潮汐的原因,我们称之为“引潮力”,或“起潮力”。计算表明,月球的引潮力大,是太阳的 2.2 倍

太阳月亮都对地球有万有引力的作用,都会产生潮汐现象,我们把太阳的引潮力产生的潮汐叫太阳潮,月球引潮力产生的潮汐叫太阴潮。由于日月会合周期是朔望月,每逢朔望两日,日、月引潮力的方向一致,太阳潮和太阴潮同时叠加,故潮涨潮落达到最大值,这就是大潮。每逢上弦和下弦时,太阳和月亮的引潮力的方向互相垂直,涨潮和落潮互相抵减,使海水涨不高也落不低,这就是小潮每太阴日有两次高潮和低潮,每朔望月有两次大潮和小潮,这就是海洋潮汐的基本周期

2. 潮汐作用

由于地球自转和海水的粘滞性及海底摩擦,月球对地球的引力中心总是偏向近月半球和垂点以东,这使地球自转受到阻力,称为“潮汐摩擦”。它的长期作用使地球自转减慢,自转周期更长。据观测,由于此项作用,地球自转周期每百年增加 0.0016 秒钟,4 亿年前一年有 420 日,一日只有 21 小时。同样,地球对月球亦有潮汐作用,结果,“潮汐摩擦”使月球自转变慢。因此,可能很久以前,月球自转周期比现在短,只是由于潮汐摩擦才达到今天的稳定状态,自转周期不再增加,月球以同面朝向地球,潮汐摩擦也随之失去作用。但潮汐摩擦不只影响自转,也会影响公转

经精确测量表明,大潮时地壳表面可比平常隆起半米多高,这就是固体潮效应

潮汐在天体演化中有着重要的影响,当围绕中心天体运动的小天体(如卫星)的距离小到一定限度时,由于起潮力与距离的 3 次方成反比而迅速增大,小天体不仅在正、反两个方向上被拉长,而且可以由于起潮力大于其内部物质间的引力而被粉碎。显然这个距离极限应与中心天体的质量和小天体的密度有关,法国的洛希首先求得这个极限距离,这个距离被称为洛希极限。如果绕转天体(卫星)处在中心行星的洛希极限内,它要么被起潮力拉碎,要么就形不成大的卫星,太阳系许多行星具有环带,就是因为环带物质处在洛希极限内,不能形成卫星的缘故,大的卫星总距行星较远,而洛希极限附近却只有众多的小卫星。

天文学中,潮汐作用是普遍现象,如密近双星间的物质交流,银河系对星团的瓦解作用,河外星系的物质桥等,都与起潮力的作用有关

第四节 熊熊燃烧的太阳

对于人类来说，太阳是最重要的天体。太阳给地球以光和热，才使地面活跃起来，充满生机；没有太阳，地球便沉沦于永恒的黑暗之中，变成一个冷寂的毫无生气的不毛之地；温度将降到绝对零度（ -273°C ），人类便无法生存。太阳上的许多变化，对人类的生产和生活有着较大的影响，因而人类非常重视对这种影响的研究。对地球而言，宇宙间没有比太阳更为重要的天体了。

一、太阳概况

近代对太阳的研究表明，太阳是一个熊熊燃烧的大火球，是巨大的物理实验室，它的温度、压力、密度等物理性质和大尺度物质的运动和变化现象，是地球上所没有的。它是众多恒星天体的典型，故人类对太阳科学的研究，开拓了人们的视野，促进了许多重要学科如原子物理、核物理、等离子体物理等的发展，并为进一步研究恒星世界打下了基础

（一）太阳的距离、大小和质量

根据天体力学的理论，常利用行星的周日地平视差来求太阳的周日地平视差。1930~1931年小行星爱神星离地最近，只有2600万千米，国际上组织14个国家的24个天文台联合观测它，并由美国人琼斯花了10年时间处理观测数据，得出太阳视差为 $8''.790 \pm 0''.001$ 。1976年国际天文协会决定采取的数据是： $P_{\odot} = 8''.794148$ ，日地平均距离 $a = 149597870.5$ 公里。

用子午仪和其它仪器可以测得太阳圆面的平均视直径，根据日地平均距离就可推算它的线半径。太阳视半径变化于 $15' 44'' \sim 16' 16''$ ，平均为 $15' 59''.93$ ，约为 $16'$ 。太阳线半径约为70万千米，相当于地球平均半径6371千米的109.3倍，

当把地球公转看做绕太阳匀速圆周运动时，可求得太阳的质量， $M = 1.989 \times 10^{30}$ 千克，这个数值等于所有行星质量总和的745倍，是地球质量的333400倍。由此可见，太阳系质量的99.86%都集中在太阳上。

（二）太阳的热能和温度

从太阳光谱可知，太阳辐射的波长范围是 0.15 ~ 4 微米，为紫外线、可见光和红外线。太阳辐射能量主要集中于波长较短的可见光部分，其中 0.3 ~ 3.0 微米波段占总能量的 97%，0.2 ~ 10 微米波段的能量占 99.9%

究竟太阳能够发出多少热能和光能？地球又获得多少太阳能？为此就需要测量太阳的包括所有波长的总辐射能量测量的仪器叫做太阳热量计，用其测定在离太阳 1 个日地平均距离处，假使没有大气吸收，在与太阳光线垂直的一平方厘米面积上，每分钟所接收到的太阳辐射能量值，这个数值叫做太阳常数，综合各种观测资料，国际上规定 1981 年起，太阳常数采用 1.97 卡 / 厘米² · 分钟，即 1.374 千瓦 / 米²。从太阳常数容易求出整个太阳每秒钟发出的辐射能，即太阳的光度为 3.86×10^{26} 瓦。

被太阳照射的半个地球上每分钟得到的热量，相当于以地球半径为半径的圆面积上所接收的热量。这个数值为 2.50×10^{18} 卡 / 分钟。地球得到的太阳辐射能占太阳总辐射能的 22 亿分之一。太阳每分钟输送给地球的热量约是 250×10^{16} 卡，每年给予地球的热量相当于 100×10^{16} 亿度的电力由此可见，太阳本身的温度一定非常高。

太阳表面的温度，可以利用物理学中的黑体辐射定律和其它方法算得。太阳表面的有效温度(T)为 5 780° K。有效温度是指太阳表面光球层的某种平均温度。

（三）太阳能来源

据观测，太阳在相当长时间内，既不膨胀又不收缩，既不升温又不降温，处于比较稳定的状态。因此，太阳内的任一块物质，必须处于力学平衡和能量平衡的状态之中。根据这些考虑得出，太阳内部的温度是随深度的增加而增加的，推得太阳中心的温度高达 1 500 万 K。

在这种高温下，原子将几乎失去核外的全部电子而处于高度电离状态，太阳上的一切物质都化为熊熊燃烧着的等离子气体。

由于太阳的质量很大，太阳中心气体必然受到巨大的压力。高度电离的原子和自由电子即等离子体的“直径”比中性原子小得多，在强大的压力下，它们挤得更加紧密，从而使太阳内部的密度增加到 160 克 / 厘米³，这相当于水银密度的 12 倍；太阳内部的压力可达 3.4×10^{12} 牛顿 / 厘米²，相当于 3 000 亿个大气压。所以太阳内部是一个高温、高压，高密度的区域。

根据太阳光谱的分析，在波长 2 935 ~ 13 495 埃之间存在 26 000 条吸收线已证明太阳光球中存在着 69 种元素，氢和氦占了太阳大气物质的绝大部分。按质量计

算，氢占 78.4%、氦占 19.8%，其它元素仅占 1.8%，其中金属元素含量较多的是镁、铁、钠、铝、钙、镍等。太阳能量的来源正是氢在高温、高密、高压下的热核反应。

在太阳中心区域 1 500 万 K 的高温条件下，含量丰富的氢原子失去了仅有的电子而成为氢原子核——质子。4 个氢原子核可以进行热核反应，而聚变成一个氦原子核。其反应主要有质子-质子反应（占 90%）和碳氮循环两种方式，根据相对论，核能的取得是以质量的消耗为代价的。1 克氢聚变成氦时质量亏损 0.00724 克，利用 $E=mc^2$ 算得所放出的能量约为 1 500 亿卡，这相当于燃烧 15 吨石油或 2 700 吨煤所产生的热量。

假设太阳最初全部由氢构成，那么全部氢都聚变成氦时所放出的能量为 $1500 \times 10^8 \text{ 卡} \times M_{\odot} = 2.98 \times 10^{44} \text{ 卡}$ 。太阳目前每秒钟辐射出来的总能量为 $9.12 \times 10^{25} \text{ 卡/秒}$ ，所以全部氢变成氦所需要的时间是 1 000 亿年。考虑其他因素，太阳的实际寿命约 100 亿年。当太阳的氢大部分转变成氦以后，太阳会熄灭吗？还不会。这时它的内部结构将发生激烈的变化，中心部分的气体收缩，内部温度因此要升高，反应区半径扩大，使太阳不稳定地膨胀，表面温度要降低，直到太阳进入另一个演化阶段——红巨星，靠 3 个氦原子聚变成一个碳原子来维持它的巨大的辐射。

当氢和氦全部烧完之后，太阳再经过其它演化过程而成为不发光的的天体。

（四）太阳的内部结构

宁静模型的太阳从里到外是由同心圈层组成的（如图 4-4）。用肉眼看太阳，看到的是一个光耀刺目的圆面，这实际上是太阳表面大气的底层，这一层叫光球，其厚度约 300~500 千米。光球以下属于太阳内部，从外到里依次是对流区，辐射区和核反应区。核反应区又叫日核，集中了太阳质量的一半。辐射区范围在 $14R_{\odot}$ 以上、 $45R_{\odot}$ 以下，它以辐射的方式向外传播太阳核心区产生的能量，核心区的能量辐射主要是波长小于 10 埃的高能光子，这些光子在辐射区与浓密的物质粒子相碰撞，经过无数次的吸收和反射，光子能量逐渐降低，并随着传播过程中温度的降低而逐渐转化为硬 x 射线、软 x 射线、远紫外和紫外辐射，最后转化为可见光光子和其它形式的辐射。因此，如果没有辐射区物质的作用，太阳将成为发射高能射线的不可见天体。据推测，太阳内部光子的平均自由程仅几厘米，尽管是以光速运动，但从太阳内部到达表面也需经过几百年。

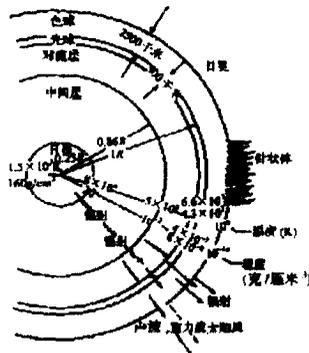


图4-4 太阳球体的分层结构

对流区主要以对流的方式向外传播能量。由于辐射区以外温度下降很快，物质的透明度大大减低，内外温差很大，便产生了上上下下的物质对流运动，形成对流层。此外，对流区中还存在湍流，它能产生低频噪声波，当它传到太阳高层稀薄大气中时，它所具有的机械能因耗散作用而把高层大气加热到 100 万度以上，这个结论可用来解释太阳高层大气温度非常高的原因。

二、太阳大气

太阳表面的大气除光球层以外，还有色球层和日冕层，色球层厚 2 000 千米左右，但色球物质的喷射高度达 1 万千米，日珥高达几万到几百万千米。日冕厚 700 ~ 800 万千米。

(一) 光球与黑子

一般我们说的太阳表面就是指光球，用望远镜观测太阳，最显著的是经常在太阳圆面上看到一些黑斑点，叫太阳黑子。

我国史书曾记下春秋时代出现的大黑子（“日中有三足鸟”），这是世界上最早的黑子纪录。发明望远镜以来，从使用赫歇耳目镜目视观测，到用太阳相机进行白光照相，人们对黑子的观测研究逐步深入。黑子之所以黑，是因为黑子的温度比光球其它部分低些，约为 $4\ 500^{\circ}\text{K}$ 。黑子的大小很不相同，小的刚刚可以看到，大的黑子面积达 166 亿平方千米，相当于地球总面积的 32 倍。这样大的黑子，常在几天甚至几小时内就经历了出现、发展和消失的过程，这是太阳大气大规模活动的标志。

分析黑子的长期观测资料发现，黑子有的年份出现多，有的年份出现少，相对数为 45 - 190，但有一个平均周期为 11.10 年的变化，变化周期长的 17.1 年，短的

7.3年 这11年周期常被称之为沃尔夫周期或施瓦贝周期研究表明，11年周期的包络线也具有90年的周期，称为世纪周期。此外还有60年和250年左右的长周期

黑子都具有磁场且有极性。在一个黑子周期内，各个半球上的黑子磁极情况保持不变但在下一周期，整个极性正好全部倒过来因此黑子的磁周期为22年，称为海耳周期

道续观测太阳黑子发现，它们都朝同一方向自西向东移动，这说明太阳也在自西向东地自转。自转轴与黄轴的夹角为 $7^{\circ}15'$ 但是太阳自转速度随纬度不同而改变，在太阳赤道部分自转1周需25.4天，相对于地球来说是27.3天

黑子到底是什么？它的本质如何？目前认为，它是太阳的强磁场区，磁场强度达1000~4000高斯由于黑子区域磁场相对很强，故黑子里的物质密度比周围光球要稀薄些。

（二）色球与耀斑

光球之上的太阳大气为色球层，这是充满磁场的等离子体层，它的亮度仅及光球的1‰，因此平常不能看到它，只有日全食时，月球把整个太阳圆面盖起来的时候，才能看到紧靠太阳边缘好像镶嵌着一条狭窄的玫瑰色的花边。它实际上是由上升气流形成的无数的火舌。这些针状火舌喷射物的高度从三四千到一万多千米，寿命约5分钟，因此看起来太阳边缘呈锯齿状。

色球层的物质密度和压力比光球低，它的底层温度与光球层差不多，上部温度则较高，且越往上越高。根据温度变化，可把色球层分为低、中、高三层，如果要在无日食时观测色球层，需利用单色光观测，一般用狭缝或窄波段滤光器可得到单色光氢 α 、电离钙Ca II的H线和K线等。常用的观测仪器有太阳单色光相机和色球望远镜。

有时色球层上出现一个亮点，在几秒到几分钟内面积和亮度突然增加到最大，然后减弱至消失。这种局部亮度骤增的现象叫“耀斑”，也叫“色球爆发”。当大耀斑出现时，太阳向外发射出强烈的可见光、红外线、远紫外线、 x 射线、射电辐射，以及高能粒子流、激波和宇宙线。耀斑是太阳大气色球到日冕过渡区中的巨大能量突然释放的过程，是最激烈的太阳活动现象。一般耀斑释放的能量可达 $10^{32} \sim 10^{33}$ 尔格，所需时间只100~1000秒钟。这个能量比整个太阳大气蕴藏的能量总和还多，相当于太阳平常1秒钟辐射的总能量。耀斑爆发时，光度增加2~3倍，局部可增亮10倍，增亮面积达3亿平方千米，爆发物的高度达10万千米。面积小于3亿平方公里的叫亚耀斑。耀斑的面积越大，寿命越长。

一般耀斑只能通过某些谱线如 H、 α 或电离钙的 H、K 谱线才能看到，用白光观测到的白光耀斑比较少见。1859 年 9 月 1 日，英国人卡林顿在望远镜中看到，太阳的大群黑子附近有一大片新月形的明亮闪光，以 100 公里/秒的速度掠过黑子，然后很快消失，这就是白光耀斑。至今人们只观测到 30 多次白光耀斑。

根据耀斑辐射成分可分耀斑为三类：① 质子耀斑，发射能量为 1 千万 ~ 100 亿 keV 的质子和 α 粒子；② 电子耀斑，发射能量在 40keV 以上的高能电子；③ 非质子耀斑，不发射高能粒子。

(三) 日冕和太阳风

日全食时能看到另一奇景——日冕。它呈淡黄色或灰白色，亮度很低，只有地球辐射的百万分之一，是太阳最外层大气，也是最厚的一层。它可以延伸到 20 倍太阳直径那样的空间，愈往外大气愈稀薄，并逐渐向行星际空间过渡。日冕由高温低密度的等离子体组成，它可分为三层：内冕平均高度 1.02 ~ 1.3 倍太阳半径，电子密度为 10 亿个/厘米³；中冕平均高 1.3 ~ 2.3 倍太阳半径，电子密度 10 亿个/厘米³；外冕平均高度在 2.3 倍太阳半径以上，可延伸到地球轨道附近，电子密度 1 百万个/厘米³。日冕的结构和物理性质，主要是通过光谱观测获得，日冕光谱由两部分组成：即内、中冕的弱连续谱以及外冕的夫朗和费光谱，前者无吸收线，但有 20 多条发射线。19 世纪 60 年代观测日全食时首次发现日冕光谱中有几条发射线，与已知元素的谱线对不上号，有人认出它们来自一种新的元素，称之为“mian”。直到 1941 年，瑞典的艾德伦才证认出这些谱线分别属于铁、镍、钙的高度电离的离子禁线。如日冕光谱中有一条 5306 埃的绿色发射线，就是 13 度电离铁的谱线。这说明日冕温度从过渡层开始即可达到 100 万 K。由于日冕的热导率极大，故日冕层的温度基本上保持一致，即使在地球轨道附近，日冕降温也不大。

日冕的高温使日冕物质成为多次电离的离子和自由电子、质子的混合物，并以极高的速度运动着，速度达 220 千米/秒。这使一部分物质能够脱离太阳引力而奔向四面八方，形成外冕膨胀。

从太阳飞奔出来的这种超音速的粒子流，主要是质子（占 95%）和电子。我们称这种粒子流叫“太阳风”。据测定，高速粒子流一般速度是 300 ~ 400 千米/秒。人造卫星观测到，太阳风在距日面 13 倍太阳半径处可加速到 2400 千米/秒；在 13 ~ 75 倍太阳半径处近似匀速运动；在 75 ~ 215 倍太阳半径处减速，到地球附近太阳风平均速度为 450 千米/秒。最高时可达 800 千米/秒，最小时也有 200 千米/秒，从太阳到地球轨道只需 5 ~ 6 天。太阳风可以一直吹到冥王星以外日冥距离 2 倍处，离

太阳表面有 80 个日地距离处太阳风才被星际气体制止住而与恒星风相混合。可见，整个太阳系全部处在太阳风的控制之中

（四）太阳大气的反常增温和太阳射电、太阳磁场

太阳大气的温度从光球的 4 600 ~ 6 600K 到色球的 4 600 ~ 50 000K 和日冕的几十万至 200 万 K。如何理解外层温度高于内层这一反常现象呢？一般认为，太阳内部的对流层产生压力波，当压力波带着机械能向太阳大气中传播时，由于周围大气压强越来越小而使波幅增大，当大气密度很小时压力波被耗散，从而将能量转化为热能，使外层太阳大气被加热另外，前面提及的对流层中产生的低频声波加热、微波加热以及波与粒子的非共振湍动加热机制等，也都是反常增温的原因。

太阳大气的不同温度对应不同的辐射，可见光辐射主要来自光球，紫外、远紫外和 x 射线辐射等主要来自色球层和日冕层。太阳射电包括宁静太阳射电、太阳缓变射电以及射电爆发三种。

太阳磁场由三部分组成，一是太阳局部磁场增强区，这是指太阳活动区磁场，如黑子、光斑、活动日珥和宁静日珥等的磁场；另一部分是太阳普遍磁场，即太阳宁静区磁场，该磁场较弱，一般在两极区比较明显，只有 1-2 高斯，强度和极性都会变化；第三部分是太阳整体磁场，是日面各部分经向磁场的平均值，它的强度有规则地变化，极性交替地为 N 和 S

这是因为整个日面的磁场可分为 4 个区域，相邻两区极性相反，极性分界线（面）大致平行于日面经线，随着太阳自转，便观测到不同极性的交替出现和强度的规则变化。目前人们对太阳磁场的认识还很不够，它是重要的研究课题。

1960 年美国科学家发现太阳大气有脉动式运动，脉动周期约 5 分钟，这意味着日面气体有忽升忽降的运动，振荡速度的最大值是 1 公里 / 秒，太阳振荡是怎样产生的？这方面的研究工作正形成一门新的学科——日震学。

三、太阳活动及其对地球的影响

太阳光球层的黑子和光斑，色球层的日珥和耀斑、日冕凝聚区和日冕膨胀，太阳风，以及短时间内太阳局部电磁辐射的突然增强等现象，都说明太阳物质和太阳大气物质在运动和变化，所有这些变化，总称为太阳活动。太阳活动有强有弱，一般按 11 年的平均周期而变化

太阳活动最主要的表现是耀斑，一个大耀斑的出现，能量相当于百万吨级氢弹的

100 亿倍，同时辐射出大量的远紫外线、X 射线、 γ 射线、宇宙射线和高能粒子。这些辐射到达地球，就会产生一系列地球物理现象，如磁暴、电离层扰动、短波和中波通讯中断产生极光使中性高层大气的密度、温度发生变化等。这会对人类的活动造成严重的影响，如太阳爆发时喷出的质子流，对航天器的人员和仪器的危害极大，还可造成导航失灵、导弹失控等严重后果。1859 年 9 月 1 日耀斑爆发所引起的地磁暴，使正在拍发的电报突然中断，造成混乱，整个欧洲都看到了绚丽多姿的北极光。1972 年 8 月 7 日的耀斑爆发开始后的 5 小时内，有一直径 16 千米，长 7000 多万千米的带电粒子流，以 6500 千米/秒的速度冲向地球，引起地磁场的剧烈变化，使当时几乎所有的飞机、轮船的罗盘指针失灵，全世界的短波通讯中断，一些地区的电力线路也受到影响，电灯忽明忽暗，弱电仪器和电子设备不能正常工作。1989 年 3 月 10 日的大耀斑，导致出现了 1932 年以来最大的地磁暴，人造卫星的运行受到障碍，加拿大魁北克省的电力网停电数小时另外，耀斑对天气过程和地震的发生也有定的影响；极光出现的强度和频率也与太阳活动的强度密切相关。

太阳活动直接或间接地影响着地球的空间环境和人类生存的条件，因此研究太阳活动及其对地球的影响，是十分迫切和重要的课题，这就是新的分支学科——日地物理（俗称日地关系学）所担当的任务。

第五节 太阳系及其小天体

一、太阳系的认识过程

在牛顿时代，人们心目中的太阳系就是以太阳为中心，以上星轨道为半径的这块空间，而且只知道有水、金、地、火、木、土星，月亮以及木星的四个卫星直到冥王星的发现，才确定了太阳系的范围，从哥白尼时算起，这经过了三百多年。现在都以冥王星与太阳的平均距离作为太阳系的半径，约 39.87 天文单位，即 60 亿公里。如果以彗星的远地点的“彗星云”为边界，那末太阳系的直径可达 15 万亿公里，光走完这段距离需 1.58 年。太阳有足够强大的引力吸引着它的成员：九大行星及其卫星，小行星及许多彗星、流星体。此外，太阳系空间还存在着行星际物质，它们都在各自的轨道上以不同的速度绕日运行。空间探测表明，太阳系空间还存在微粒辐射，电磁辐射、电场和磁场。尽管如此，太阳系仍近乎空荡的空间，犹如在一个半径为 590 米

的场地内，中心的太阳只有一个柚子那么大，而九大行星仿佛是四个大头针的头，两颗葡萄粒和两个豌豆粒及一粒沙子的大小

（一）提丢斯定则

开普勒时代只知道行星和太阳的相对距离而不知绝对距离。相对距离是以地球与太阳的距离为 1，那末水星离太阳为 0.389，金星为 0.7233，火星为 1.5237，木星为 5.2028，土星为 9.5388。德国的一位数学教师提丢斯在 1766 年发现，诸行星到太阳的相对距离有一条有趣的规律，这就是在数列 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96 ……的每一项上加 4 除以 10，便得到相对距离数 0.4, 0.7, 1.0, 1.6, 2.8, 5.2, 10……。这个巧妙的表达距离的方法当时没有传开。1772 年，德国柏林天文台台学长波德也发现了类似的规律，后来人们称上述规律为“提丢斯-波德”定则其内在的物理学含义，至今尚无定论，但它在人们认识太阳系的过程中起过很大的历史使用。

（二）小行星带的发现

以定则与实际距离相对照，除去 2.8 这个数外，其余 6 个全能较好地符合为了寻找 2.8 处的行星，1800 年，奥伯斯等六位天文学家决定联手，把黄道带分成 24 个区域，分工负责，沿黄道带搜索这颗未知的行星一年过去了，他们一无所获。1801 年元旦之夜，从意大利传来了好消息，一位非联手成员，西西里天文台台长皮亚齐发现了一颗新的行星。后来，算出这颗新行星到太阳的平均相对距离数是 2.77，正好符合了提丢斯定则这颗行星后来被命名为“谷神星”。

至此，提丢斯定则似乎完整无缺了但奥伯斯等联手成员反对这种看法，他们从谷神星的亮度估计出它的直径不超过一千公里，只有月亮的 1/4，称不上大行星。于是他们又继续搜索果然，1802 年 3 月 28 日奥伯斯发现了智神星，直径 560 千米；1804 年 9 月 1 日哈丁发现了婚神星，直径 225 千米；1807 年 3 月 29 日奥伯斯又发现了灶神星，直径 515 千米。这三颗星到太阳的平均相对距离数都同谷神星差不多，而体积一颗比一颗更小，于是便称它们为小行星。1884 年天文爱好者亨克发现了第五个小行星，到 1887 年被发现的小行星增到 264 个。从沃尔夫开始，又用照相方法找小行星，到 1987 年，被正式定名编号的小行星达 3630 个，它们成为一个小行星带，都分布在距日 2.8 天文单位附近，而始终没有一个大行星被发现。

为什么在火星和木星轨道间有小行星带？是原来有个大行星爆炸后形成的？还是尚未形成的大行星的原料呢？这个问题目前仍未完全解决。

（三）寻找第八颗行星

天王星的发现把太阳系的边界一下扩大了一倍。但是 1821 年，法国天文学家布瓦德发现，根据 1781 年以前的观测资料算得的天王星的轨道同 1781 年后算得的不同；到 1830 年，新的观测资料又与 1821 年的计算差 20 角秒以上。天王星的轨道老是与理论计算不符，是否可能还有一个未知行星在更远的地方对天王星产生摄动，因而使它偏离预算的轨道呢？天文学家决定先从理论上推算未知行星的位置，然后再找这个推算工作由法国年轻的天文学家勒维耶和英国剑桥大学的亚当斯担当。这是个由天王星受到的“摄动”反摄动行星的位置和质量的天体力学问题。1845 年 9 月，亚当斯算出这颗未知行星的位置和质量，并报告了剑桥大学天文台台长查利斯和格林威治天文台台长艾里，但并未引起他们的重视。1846 年 9 月，勒维耶发表了他独立计算的结果，并请柏林天文台的加勒寻找，1846 年 9 月 23 日终于在宝瓶座内找到了这颗未知行星，它偏离预报位置不到 1° 。这就是海王星。

海王星的发现是牛顿万有引力定律的胜利，证明天体力学的理论是正确的，说明科学理论对实践的正确指导作用。

（四）发现冥王星

为了发现冥王星，不少人想从天王星和海王星的摄动去反推它的位置，由于这第九颗行星太小太远，因而摄动也很小，加上它只有 15 等，很暗，“行动”又太慢，即使预告了位置要找到它也十分困难，因为 15 等星的数目比 9 等星要多三百倍以上，此法不能奏效。20 世纪初，皮克林主张用照相方法去搜索这个未知行星，若某天体有移动，就可从前后两张底片上找出来于是沿黄道带照相搜索的任务由年仅 23 岁的汤博主动担当，他利用“闪现比较仪”，对几万甚至几十万个星像逐个核实，终于在 1930 年 2 月 18 日下午四时从底片上找到了冥王星。

（五）太阳系天体的运动轨道

太阳系天体的运动除大行星具有同向性、近圆性和共面性外，还都遵从开普勒三定律，第一，行星绕日公转的轨道是椭圆，太阳位于其一个焦点上；第二，行星与太阳的连线（向径）在相同的时间内扫过相等的面积，即面积速度保持不变；第三，行星绕日公转周期平方同它们与太阳平均距离（轨道半径）的立方成正比，即离太阳越远的行星公转周期越长。开普勒三个定律只说明了行星运动轨道的几何形式，后来英国科学家牛顿在此基础上发现了万有引力定律，找到了开普勒运动规律的力学原因。牛

顿从二体问题出发对开普勒的三个定律进行了修正和补充，第一定律可以普遍地叙述为：太阳系天体围绕太阳运动的轨道是圆锥曲线，包括椭圆、抛物线和双曲线三种轨道；第二定律可表述为太阳系的动量矩守恒定律，以致行星运动的面积速度相等；第三定律包含天体的质量而更加完善

修正后的开普勒定律表明了支配行星运动的力学特性，即行星所受的力是一种有心力，行星绕转的角动量保持守恒开普勒定律适用于一切在引力作用下互相绕转的天体系统，不仅适合于太阳—行星系统和行星—卫星系统，也适合恒星世界的双星系统等

（六）行星的视运动

行星相对于太阳的视位置可分为两类，一类是外行星处在与太阳在同一方向上的“合”和与太阳在相反方向的“冲”以及外行星与太阳方向相差 90° 的“方照”；一类是内行星处在太阳后方的“上合”和在太阳前边的“下合”以及内行星与太阳角距离最大的“大距”。水星大距角为 $18^\circ \sim 28^\circ$ 之间，金星大距角为 $45^\circ \sim 48^\circ$ 之间

行星连续两次与太阳相合的时间间隔叫会合周期，在一个会合周期里，地内行星的视运动经历上合（不见）→东大距（昏星）→下合（不见）→西大距（晨星）→上合的过程；外行星经历合（不见）→西方照（子夜升起）→冲（整夜可见）→东方照（午夜落下）→合的过程，并将距离地球最近的冲称为“大冲”。

二、九大行星比较及冥王星

行星本身不发可见光，但能反射太阳光而发亮，行星有一定的视圆面，在大气抖动下，不像恒星那样有闪烁现象。行星在恒星背景上还有明显的相对移动，这是区别行星和恒星的主要特征九大行星的轨道要素及物理参数见下表。

由表上的数据可见，除冥王星外，行星公转的轨道偏心率 e 和倾角 i 都很小，故行星运动具有近圆性和共面性，它们都自西向东绕日公转，因而还具有同向性离太阳较近的四个行星水、金、地、火星的物理性质与地球相似，叫类地行星。它们的质量较小，体积较小，但平均密度大，卫星少，公转周期较短，自转周期较长由于离太阳较近，故表面温度较高。化学组成以重物质为主。离太阳较远的木、土、天王、海王星的物理性质与木星相似，叫类木行星。它们的质量大，体积大，但平均密度较小，卫星数目多，公转周期长，自转周期短，表面温度低，化学组成以轻物质为主。离太阳最远的冥王星体积小，但自转周期长，是个例外。

行星的亮度，决定了行星本身反射太阳光的本领和行星、太阳、地球三者的距离及相对位置因此，行星的视亮度在经常变化。通常又把地球轨道以内的水、金星叫内行星、其它的叫外行星，现在一般按演化特征分为类地行星（水、金、火、地）、巨行星（木、土）和远日行星（天王、海王、冥王）三类。

| 名称 | 与太阳平均距离 | 公转周期 (恒年) | 自转周期 (恒时) | 平均半径 (地球=1) | 体积 (地球=1) | 质量 (地球=1) | 卫星数 | 密度 (克/厘米 ³) | 轨道倾角 | 偏心率 |
|----|---------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|-----|----------------------------|-------|-------|
| 水星 | 0.387 | 0.241(88日) | 58.7日 | 0.382 | 0.056 | 0.0554 | 0 | 5.46 | 7° .0 | 0.206 |
| 金星 | 0.723 | 0.615(225日) | 243日 | 0.950 | 0.88 | 0.815 | 0 | 5.26 | 3° .4 | 0.007 |
| 地球 | 1.000 | 1.0(365.26日) | 23时56分 | 1.000 | 1 | 1.00 | 1 | 5.52 | 0° | 0.017 |
| 火星 | 1.524 | 1.881(686.98日) | 24时37分 | 0.533 | 0.149 | 0.1075 | 2 | 3.96 | 1° .9 | 0.093 |
| 木星 | 5.203 | 11.862 | 9 时50分 | 1.190 | 1316 | 317.94 | 16 | 以上 | 1° .3 | 0.048 |
| 土星 | 9.554 | 29.458 | 10 时14分 | 9.459 | 740 | 95.18 | 23 | 0.70 | 2° .5 | 0.056 |
| 天王 | 19.267 | 84.013 | 15.5时 | 3.989 | 61 | 4.63 | 15 | 1.24 | 0° .8 | 0.047 |
| 海王 | 30.240 | 64.788 | 15.8时 | 3.810 | 60 | 7.22 | 10 | 1.66 | 1° .8 | 0.009 |
| 冥王 | 39.553 | 247.686 | 6.39日 | 1150 公里 | 0.006 | 0.0026 | 1 | 2.0 | 7° .2 | 0.248 |

冥王星是太阳系天体中最远的行星，它绕日公转的轨道很扁，偏心率达0.25，近日点43亿公里，在海王星轨道以内，这使它公转一周中有40年的时间不是离太阳最远的行星，1989年冥王星过近日点，1999年它才跑出海王星轨道以远。它的轨道平面有17° 6′的倾角，因此它不是处在其它行星轨道面以下就是处在以上；它自转很慢，达6.387天。为什么如此慢？不可理解，它没有像水星和金星那样受太阳潮汐力的作用而自转变慢的条件。

冥王星表面的平均反射率比其它行星高，说明它的表面被一层甲烷冰霜所复盖，因它离太阳遥远，阳光照射面温度50K，背日面20K，只有氢和氦、氖仍可能为气态，绝大部分气体已凝结成固态或液态但它的大气延伸至3200千米的高空，大气层分为二层，外层透明内层不透明因此冥王星上的白天比地球上的白天要暗得多，但比满月的夜晚地面要亮得多。

1978年6月22日，美国人克里斯在冥王星照片上发现了它的卫星叫“卡戎”，后来它得到哈勃空间望远镜的观测证实。冥王星直径2300千米，而冥卫直径约1200千米，两者似乎是双行星。冥卫由固态水组成，有稀薄的氮大气。轨道半径19000千米，是一颗同步卫星，公转周期和自转周期约为6.3867天，也与冥王星本身的自转周期相等。

冥王星的质量、体积都太小，不及土星和土星的大卫星。故有人认为它可能原

来并非行星，而是海王星的一颗卫星，在太阳系早期的一次灾变爆炸中，从原卫星轨道上抛了出来，成为一颗独立的行星。

三、太阳的小天体

彗星、流星和陨星、小行星又称太阳系的小天体，它们都在太阳引力作用下绕日公转。由于小天体没有经历过大行星那样的地质演化过程，故保留了较多形成之初的原始状态。它们是研究太阳系的起源和演化的有价值的重要领域。

（一）彗星

俗称“扫帚星”，它的出现使古人非常不安，认为它是不祥之物。真正对它进行研究的是英国天文学家哈雷。他认真计算了 24 个彗星的轨道，其中 23 个是抛物线，只有一个是椭圆，哈雷发现 1682 年出现的这个椭圆轨道彗星与 1531 年、1607 年的轨道相同，其时间间隔是 75 年 ~ 76 年，哈雷依据牛顿万有引力大胆预言，这颗彗星在 1758 年底或 1759 年还会出现。就在哈雷逝世后的 1759 年，他的预言成了现实，这就是有名的哈雷彗星。哈雷彗星的轨道扁长，近日距 8800 万公里，远日距达 53 亿公里，彗尾的长度可达几千万甚至一亿公里；彗头部分的密度约 1 克/厘米³，总质量十万吨，聚集在半径 15 公里的范围内，它每次回归大约要失去 20 亿吨的物质。

（1）彗头的结构：彗星是质量很小，体积很大的云雾状天体，它的外貌和亮度随着离太阳的远近而变化，远离太阳时，呈现为朦胧的星状斑点，其中较亮部分的中心，是含尘埃的水冰冻结的固态物质，叫彗核；核外云雾层叫彗发。彗发是在太阳辐射作用下，由彗核中固态水合物离解、蒸发出来的气体和微小尘粒组成的，彗核和彗发外边还包着氢云，直径达 100 万—1000 万公里，氢云是发射紫外线的氢原子云，大部分氢可能是太阳光离解羟基 OH 产生的。彗核、彗发和氢云合称为彗头。

光谱分析得知彗核中 30% 是水，20% 是复杂的有机物，40% 包括 CO₁、CO₂ 和 H₂CO 分子、HCO 之类的基团。其中许多分子还是地球或其它行星上没有发现过的奇异分子，如 CN、CH、NH、C₂、NH₃ 和 OH 的冰冻物等。

（2）彗尾：当彗星靠近太阳时，在太阳光的压力和太阳风的作用下，把彗发的气体和尘埃推向与太阳相反的方向，形成一条或几条很长的尾巴，叫做彗尾。有的彗尾由 CO⁺ 离子组成，外形平直，呈兰色，是 CO⁺ 发射的荧光。这种彗尾称为离子彗尾，也称 I 类彗尾；有的彗尾由尘埃组成，外形弯曲，呈黄色，是反射太

阳光的结果，称之为尘粒彗尾或 II 类彗尾。

观测表明，在距太阳 3 个天文单位时，彗星呈现为先点，2 个天文单位时才觉察到彗尾出现，以后随着离太阳距离的减小，彗尾越来越长和越亮。过了近日点，彗尾又逐渐缩短到消失。不同彗星的彗尾长短不一，1843I 的彗尾长约 3 亿 2 千万千米，超过火星轨道；1910 年 5 月 18 日哈雷彗星从太阳和地球之间通过，离地只有 2400 万千米，两亿千米长的彗尾扫过地球，对地球没有发生任何影响。因为彗尾物质太稀薄了，透过彗发和彗尾，可以看到后面恒星，且星光并不减弱。彗星或者清晨出现在东方，或者黄昏时出现在西方天空。有的亮彗星白昼也是可见的，被称作“白日彗星”。

(3) 运动周期：彗星绕太阳公转的周期各不相同，短的只有三、四年，长的达几十年或几百年以上，有的彗星出现后一去不复返，这是因为其轨道是抛物线或双曲线，它们是非周期彗星，约占总数的 60%。公转周期小于 200 年的彗星称“短周期彗星”。

(4) 彗星的起源：1973 年 11 月—1974 年元月，美国“天空实验室”发现彗尾中的水蒸汽离子，表明彗头应是一团“脏雪球”，且必在低温下形成，又在低温中存在。

1950 年荷兰的奥尔特根据轨道统计结果，提出了彗星的“原云假说”，认为太阳系边远离太阳 1~2 光年左右的的地方有个彗星仓库——“彗星云”那里大约有几万亿颗彗星，总质量比地球质量小，由于其处在太阳和其它恒星之间，邻近恒星的引力摄动，可使某些彗星的轨道发生改变而进入太阳系，而且可以任何一个方向进入，也可顺行，也可逆行。如果它们又再受到大行星的摄动作用，还可变为短周期彗星，另一些则可能被抛出太阳系。

1951 年柯伊柏就提出，太阳系形成时留下的彗星物质，在海王星轨道以外的圆盘里距日 35~50 天文单位，这些物质仅是几个地球质量，由它们形成了短周期彗星。但这些彗星如何进入内太阳系并不清楚。

由于彗星通过彗发、彗尾发射出去的气体和尘埃物质有去无回，故彗星从太阳附近通过几次后，它的质量将越来越少，越来越不显眼，直至消亡瓦解。

现被观测到的彗星已超过 1500 颗。1983 年国际天文联合会发表载有 1109 个彗星的轨道要素新总表，1992 年出版第 7 版《彗星轨道根数表》，1993 年又发表该表的第 8 版，载有 1392 次出现过的彗星轨道数。

（二）流星体和陨星

流星的出现通常是单个的、零星的，出现的时间和方位是随机的，这样的流星叫偶发流星，它们是流星体的燃烧发光现象。在太阳系空间里，有大量的固体物块和尘粒，这就是流星体它们大多只有米粒或豆粒那么大，少数的可有十几到几百吨重。它们沿一定轨道绕太阳公转，速度为每秒三、四十千米。这些轨道有的与地球轨道相交，因而流星体可与地球相遇而落向地球，大多数闯入地球大气层的流星体因摩擦升温而气化，因分子相撞而燃烧、发光和电离。该过程在 80~120 千米的高空进行。质量大于数百克的流星体，来不及在高空全部气化而坠入稠密大气层内，猛烈的燃烧、发光、发声，便成为火流星，其余迹如云雾状带子，可持续较长的时间。没有来得及烧尽的大质量火流星，在地球引力作用下落到地面上，便成为陨星。

陨星表面一般都留有高温熔蚀的痕迹：黑色或褐色的薄层——熔壳和小凹坑——气印陨星可按成分分成石陨石、铁陨石和铁石陨石三大类，其中石陨石占 92%

有的大陨星在高空爆炸成碎块落向地面，能形成陨石雨，发生在 1976 年 3 月 8 日下午 3 点的吉林陨石雨就是这样形成的。陨石样品总重 2700 千克，其中最大的一块陨石重 1770 公斤，是世界上第一大的石陨石。

1898 年降落在我国新疆准噶尔盆地的大陨铁，重 30 吨，是世界上第 3 大陨铁世界第一大陨铁是纳米比亚的戈巴陨铁，重 60 吨；第 2 大陨铁是格陵兰的约克角 1 号，重 30 吨~36.5 吨。最古老的“克拉恩贝格”陨星年龄 $45 \text{ 亿} \pm 2 \text{ 千万年}$ ，它把太阳系的诞生时间提前了 7 千万年

有时可以看到许多流星从星空中某一点向外辐射散开发光，这种现象叫流星雨。它是成群结队平行运行的流星体群奔向地球而形成的。实际上是流星群的绕日公转轨道与地球轨道相交，地球一年一度经过这空间交点的结果（如图 4-5）故流星雨是周期性的。流星雨通常以其辐射点所在的星座命名，或用形成流星群的彗星来命名。

彗星瓦解后可成为原轨道上的流星体群，如 1826 年发现的比拉彗星，周期 6.6 年在 1846 年回归时发生分裂，几天内有许多人目睹了这个场面，1852 年再次回归时，分裂的两块已相距很远，六年半的一个周期过去了，彗星再没出现，但是 1872 年 11 月 27 日夜，人们看到一场流星雨，持续几个小时，经久不息，流星总数达 16 万颗经计算这正是比拉彗星应该经过的天区位置。至今，每年 11 月底在仙女座中还会出现这样的流星雨，只是数量减少了。类似的流星雨还有很多，如四月下旬的天琴座流星雨，八月中旬的英仙座和十一月中旬的狮子座流星雨等。英仙座流星群已发现近二千年，相

应的 1862II 彗星周期为 130 年，英仙座流星雨在 1992 年进入活动极盛期，是年 8 月 12 日出现的流星雨如钢花四溅，形成它的彗星也在该年 9 月 26 日被发现。狮子座流星雨的形成彗星是 1866I，周期 33 年。所以彗星与流星体之间有着明显的演化联系



图4-5 流星雨及成因示意

已经查明的陨星坑全球有 130 个，最老的陨击构造是位于南非的乌雷德否特（Vre-defort）陨坑，直径 140 千米，年龄 20 亿年。世界上最大的陨石坑可能在南极威尔克斯冰原之下，坑的直径 251 千米，深 805 米，估计是六七十万年前的一颗 130 亿吨的陨石撞击而成。

据观测资料估计，每年降落到地球上亮度大于 10 等星的流星物质共约 2000 吨，而暗于 10 等的流星以及微陨石尘的降落总量可达 20 万吨。微陨石直径不到 1 毫米，主要成分是铁和镍，它们一般都有磁性。除微陨石外，陨冰也属于陨石范畴

还有一种由天然玻璃物质构成的玻璃陨石，一般只有几厘米大小，深褐色、黑色、绿色都有。1000 多年前雷州半岛发现的雷公墨就是这种陨石，陨龄 70 万年左右，主要成分是二氧化碳。玻璃陨石与一般陨石大不相同，它与砂岩接近，是熔融物在高空迅速冷却形成的。

1981 年在南极陨冰上采集到一块陨石，1983 年被证认为 154 万年前从月球上落下来的，说明陨石不仅能由小行星之类的小天体形成，也能由行星或卫星抛向地球的物质形成。研究表明，大约有 40% 的月球抛出物质和火星喷发物的 4% 来到地球，预计火星每百万年发射一个大流星体到地球，迄今在南极已发现 12 个这样的陨星 最老的陨龄为 13 亿年。火星物质到达地球约需 70 万 ~ 150 万年。

多数学者认为陨石起源于 46 亿年前的小行星带区附近，由同球粒陨石相当的陨石母体熔融分异成三类陨石，由于火星、木星的摄动使其互相碰撞而破碎，而行星摄动又使它们进入了地球轨道附近。

陨石是地球上可以直接化验的天体样品，它保留太阳系形成之初的原始状态，特别是碳 I 型球粒陨石中各元素的丰度同太阳大气相近似，说明宇宙物质的同一性

（三）不可忽视的小行星

迄今用照相机已发现 50 多万颗小行星，总质量为地球的万分之四，直径从 100 米至几百千米不等。最大的小行星是谷神星，直径 770 千米。半径大于 50 千米的仅有 200 个。截止 1997 年 4 月 22 日，临时编号的小行星有 112163 个，永久编号的已增至 7625 颗。在已编号的小行星中，有以我国的人名、地名命名的，我国紫金山天文台已发现小行星 940 多颗，获得永久编号的、有命名权的约 150 颗，正式命名的有 56 颗。

小行星绕太阳运行的轨道和大行星相似，轨道半长径在 2.17 ~ 3.64 天文单位之间，公转方向自西向东，但轨道偏心率和倾角比大行星大，平均 $e=0.15$ ， $i=9.^\circ 4$ ，公转周期各不相同，有的是 3 年多，有的是 6 年多或更长。小行星虽然在带内集中分布，但并不均匀，有密集区，也有“禁区”和“狭缝”，且“禁区”和“狭缝”的分布是有规律的，总是分布在公转平均角速度与木星公转平均角速度之比为简单整数比的地方，如比值为 1/2、2/5、1/3 的地方为“狭缝”，在比值为 1/1、3/4、2/3 的地方是密集区。比值为 1/1 的轨道与木星轨道重合，其上有两群小行星分布，一群在木星前 60° ，一群在木星后 60° ，运行中的相对位置保持不变，这就是“脱洛央”小行星群。

在小行星带外也分布了少量的小行星，它们有的在木星轨道外，有的还能够到离太阳很近的水星轨道内。1949 年发现的伊卡鲁斯小行星的近日距只有 0.187 天文单位。这一类近日距在 1 个天文单位左右的小行星叫阿波罗型或阿摩尔型小行星。有极少数小行星可以到达离地球很近的地方，1937 年 10 月 30 日，赫米斯小行星离地球只有 70 万千米，1932 年发现的“阿波罗”小行星与地球最近时为 0.076 天文单位（约 1 千万千米）特别是阿摩尔型小行星的轨道几乎与地球轨道相近交，如 1991BA 距地最近时为 0.0011 天文单位（约 16 万千米），只有月地距的一半。这类小行星可能撞击地球，但发生碰撞的几率很小，估计为每百万年 3 次。尽管如此，它们是人类“太空警戒计划”的重要对象，决不可等闲视之。

小行星的形状很不规则且多种多样。有的小行星也有卫星。

研究小行星除对太阳系起源的研究具有直接意义外，在天体测量中它也扮演重要角色，如利用小行星受到的摄动，可测量大行星或其它较大小行星的质量，利用它们曾测过日地距离，春分点的位置，还可测定相关的天文常数，研究太阳系动力结构和演化，了解太空的物质环境以保持宇航安全等，甚至将来可把小行星作为飞出太阳系的跳板。近年来对小行星采矿的资源研究也已开始进行。

第六节 缤纷的恒星世界

在无边的宇宙空间，物质以各种形式存在着，恒星和星云是最主要的天体。恒星由稠密的物质组成，星云由稀薄的物质组成恒星和星云都拥有巨大的质量；相比之下，行星、卫星、彗星和流星体的质量是微不足道的。大量的恒星和星云组成各种星系。

从恒星的分布看，恒星也是群居的多，单颗的恒星为数较少，具有聚集性。某些星成对成双；另外一些恒星是三个一伙四个一帮，更有几十个和数百个乃至几千个恒星互相吸引，一起运行而形成整体的恒星集团——星团。从溶化和物理特性等方面看，还有特殊的恒星。

一、双星

这是空间视位置比接近的两颗恒星。双星分为视双星和物质双星两类。视双星是两个恒星在同一视线方向上，看起来很靠近实际上彼此相距很远，没有物理联系，所以这种双星叫光学双星。物理双星是一对具有物理联系的两颗恒星，组成星团有引力彼此相吸引并互相绕转，组成一个运动系统。这是真正的双星。双星占已知恒星总数的 $1/3$ 如全天最亮的恒星——天狼星就有一颗肉眼看不见的伴星。肉眼可见的双星是大熊座开阳星（ ξ 星）和开阳的“辅星”（ θ 星）它们相距的角度达 $12'$ 这是双星中距离最大者。

物理双星又可分为目视双星，分光双星和交食双星三种类型。

当双星绕转的轨道面与视线平行时，两子星在轨道运动中还将互相掩食，造成亮度的周期变化。这类双星即为交食双星，也是食变星。

除可见光双星外，还存在非可见光辐射的双星，如射电双星、爆发双星、X射线双星和脉冲双星等。

二、巨星和矮星

通常把绝对星等亮于 -2 等星的恒星称为巨星。巨星是光度大，体积大，密度小，表面温度较低的一类恒星。其中光谱型为 K 或 M 的称为红巨星。红巨星的红色

表明温度低，但它的光度特别大，只能说明它的体积特别大如猎户座的参宿四，直径约是太阳的 350 倍，故表面积应是太阳的 120000 倍，尽管每平方公里的太阳表面发的光比它多，但它的总光度比太阳强得多。除了红巨星外，还有红外巨星和黄巨星等著名的巨星还有心宿三、大角、毕宿五等。比巨星光度、体积更大的叫超巨星，超巨星的温度高低不，高温的叫蓝超巨星，低温的叫红超巨星后者是体积最大，密度最小的恒星。

矮星，是光度小，体积小而密度特大的恒星。其中高温、高密的叫白矮星，光谱为 A 型，天狼星的伴星就是最早发现的一个白矮星。其视星等为 8.68，绝对星等 11.3 等。它的半径是太阳半径的 0.0073，而质量几乎等于太阳的质量，这样，天狼伴星的密度是一立方厘米的物质重达 3660 多公斤。以后又发现了密度高达几十吨每立方厘米的白矮星。

一般白矮星的质量小，只有太阳质量的 0.3 ~ 1.2 倍，半径通常小于一万千米，故白矮星光度一般很低，直至不发光。平均密度 1 亿 ~ 1 万亿 (千克 / 米³)，表面重力可达 100 ~ 1 百万 (米 / 秒²)，因而使白矮星的光谱具有引力红移现象。在白矮星内，温度 5000 ~ 5 万 K，压力高达 10 的 18 次方个大气压数量级。在此条件下，物质原子结构已不复存在，电子运动的壳层挤得粉碎，电子成为自由电子，并被压缩成密度很大的电子气体，叫简并电子气。此时原子核之间几乎挨个排列，这就是白矮星体积小、密度极高的缘故，白矮星内部正是依靠简并电子气的压力与强大的引力作用相抗衡的。由于白矮星没有能源，不再产生热量，它的表面温度将不断下降。

1932 年，美国人昌德拉塞卡利用完全简并电子气的物态方程，建立了白矮星的理论模型，并导出其质量上限为太阳质量的 1.44 倍，因此他获得了 1983 年诺贝尔物理奖

白矮星在宇宙中可能有很多，但由于其光度低，很难观测到，已经确定的白矮星大多在太阳附近。

三、变星

大多数恒星的亮度变化不大，但有少数恒星的亮度变化是显著的，这类恒星叫变星。变星的亮度变化一般具有周期性，且每个周期内亮度和光谱的变化是一致的亮度连续两次极大或极小之间的时间间隔叫光度周期，周期短的几小时，长的可达几年甚至更长。不仅变星的光变周期可以相差很大，而且视星等变幅大到十几个星等，小到千分之几等以下；它们有老年星，也有青年星；光变周期大部分是规则

的，如金牛座 RV 变星，也有不规则的，如金牛座 T 型变星，这是一类爆发变星

变星可分为三类：一类是几何变星。由几何原因造成其亮度的变化，除交食双星以外，还有由于自转或公转而使我们所见的发光面积和光度不同而形成光变的另一类是脉动变星，由于其本身体积的膨胀或缩小或非形变脉动，使光度、颜色、光谱型、视向速度都随之变化，但光变幅度一般不大已知脉动变星一万六千多颗，占变星总数的一半以上。典型的脉动变星是仙王座 δ 星，中名造父一，造父是古代周朝的一位驾车能手。后来把这类变星统称造父变星，它们是高光度的，光谱型为 F 型和 G 型，星等变化幅度 0.1~0.2 等，属于巨星和超巨星一类。造父变星可分为长周期的和短周期的。

1912 年勒维特发现长周期造父变星的周光关系；其绝对星等与光变周期的对数之间存在线性关系，即光变周期越长，其光度就越大，因此可以根据球状星团或河外星系中的长周期造父变星的光变周期，得到它的光度。从而推测球状星团或河外星系的距离，所以，造父变星被称为“量天尺”

有一类脉动变星叫 α 型长周期变星，光变周期 80-1000 天，为晚型星，它的周光关系与长周期造父变星相反，光变周期越长，光度越小，这类变星的代表是鲸鱼座 O 星，中名 α 增二，是一颗红巨星。

第三类变星是爆发变星，又称激变变星，这是一种在短时间内亮度突然增亮几万倍甚至几百万倍的变星。亮度的突然增亮是因为星体本身的爆发，主要有“新星”和“超新星”两类。超新星又叫灾变变星。除此以外，根据爆发的激烈程度，爆发变星还有突变变星、不规则快变星和耀星等类型

1596 年，德国的法布里修斯发现鲸鱼座有一个三等星不见了，半年之后又可见，因而它被称为“怪星”、“魔星”，这是最早发现的变星之一，即鲸鱼座 O 星。但是真正对变星做研究的第一个人是英国的古德里克，他是一位聋哑青年，虽然只活了 22 岁，但他研究出大陵五（英仙 β ）的光变周期是 2 天 20 小时 49 分 9 秒，并认为它变光的原因是“交食”。由于他的观测和研究，天文学又开辟了一个新的研究领域，变星数逐渐增加。1985 年《变星总表》第四版问世，载有 1982 年底前发现的变星或变光天体 28450 个

四、新星和超新星

新星是原来看似很微弱的恒星，由于爆发突然变亮，视星等可增加七到十六等，视亮度增加 600 倍到 300 万倍，释放能量 10^{38} 次方焦耳，新星爆发以后，亮度

慢慢减弱，在几年或几十年后才恢复到原来的亮度。这时，新星仍然是一颗恒星。新星在我国古代称为“客星”，《汉书·天文志》所记载的元光元年六月（公元前134年）“客星见于房”是史书中最早的新星记录。

新星变亮的原因是由于恒星突然膨胀了几千倍，辐射表面增大了几万倍，因此亮度突然增大当光度达到极大时，膨胀着的气壳以每秒几百公里到两千公里的速度向外抛射物质，抛射质量为太阳质量的千分之一。有些新星的膨胀气壳可以观测到，如1918年天鹅座新星的气壳圆面每年增加2"，对应的物质膨胀速度为1700~2300千米/秒在1901年英仙座新星、1919年蛇夫座新星、1920年天鹅座新星、1925年绘架座新星和1934年武仙座新星附近，都可观测到这种气壳形成的星云。

爆发规模超过新星的叫超新星，它爆发时的光度超过17个星等，亮度增加1千万倍甚至几亿倍，极大平均绝对星等达-15等。爆发能量相当几十亿个太阳的辐射能，其气壳抛出的速度达5000千米/秒以上，抛出的质量可达太阳的30倍。大部分物质都抛射掉。这种强烈爆发的结果，使恒星彻底瓦解成星云，其外围可有星云物质的遗迹。遗迹中可有射电源或X射线源或γ射线源。最后遗留下来的物质可收缩为白矮星、或中子星或黑洞，从而进入恒星演化的终了阶段。金牛座蟹状星云就是1054年超新星爆发的遗迹，这次金牛座超新星的爆发以我国《宋会要》中的记录最为完整、准确：“嘉佑元年三月，司天监言：‘客星没，客去之兆也’。初，至和元年五月晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十一日。”650天后肉眼方不可见。可见，这颗1054年的超新星爆发是前所未有的强烈，它的遗迹金牛座蟹状星云，目前正以1300千米/秒的速度在膨胀，星云的中心是一个强射电源、X射线源和中子星。

银河系每年大约爆发新星50颗以上，但观测到的新星很少。现已观测记录并被证认为银河系新星约200个，超新星有8颗，其中最著名的4颗分别于1006年、1054年、1572年、1604年爆发，银河系内平均300年出现一颗超新星。目前已发现的河外星系中的超新星1100多颗。1987年2月23日，在大麦哲伦星云中爆发的超新星命名为1987A，它最亮时相当于几亿颗恒星的总亮度。

通常根据爆发光变曲线和光谱的不同，将超新星分为I型和II型两大类。超新星的爆发机制尚未完全清楚，一般认为是引力塌缩的结果，爆发形式为整体爆发，不像新星那样是局部爆发。故超新星不能再爆发。

五、脉冲星和中子星

脉冲星就是中子星，它们是大质量恒星演化到晚期的归缩，由于种种原因，大质量恒星产生了最后的引力塌缩，在塌缩过程中，恒星中心压力猛增，以至于电子简并态压力也不足以抵抗，电子被压到原子核内，同质子结合为中子，原子核被压碎，中子成为自由中子进入中子简并态，这时恒星核心部分的密度升高到原子核的密度，约为 10 的 14~15 次方克/厘米³，而直径塌缩到只有数十公里的量级，形成了个由中子构成的高密的核心——“中子核”。同时核心外围物质在很短的时间内释放出惊人的能量，使恒星的外壳爆炸碎裂，形成超新星爆发，大部分物质被抛到宇宙空间，以后形成稀薄的星云，中间留下了爆炸后的残骸——一个裸露的中子核——中子星。

1967 年，英国天文学家休伊什和他的研究生贝尔，发现一个奇怪的射电源它的射电辐射是脉冲式的，每隔 1.337 秒发出一个脉冲，脉冲宽度只有 0.025 秒，简直像只标准的石英钟那样稳定，人们把这样的射电源叫做脉冲星。脉冲星的能量很大，一次脉冲的能量相当于目前全世界全年用电量的 1 亿倍。

科学家们对所有资料进行分析，确认脉冲星就是快速自转的中子星。因为要发出间隔如此短而且稳定的脉冲辐射，既不可能是双星的轨道运动，也不可能是恒星的脉动产生，而只有高速自转着的中子星才有可能，而且是中子星上局部区域发射出来的辐射，脉冲周期就是中子自转的周期。由于中子星的自转轴不与磁轴重合，故这种辐射锥便随自转而周期性地扫过空间，从一个方向看去，如同灯塔闪亮，这就是脉冲星的脉冲灯塔效应。

研究表明有些中子星有脉冲辐射，而有些中子星没有脉冲辐射，所以脉冲星是中子星，但中子星不一定是脉冲星。至今已发现射电脉冲星约 600 颗，脉冲周期从毫秒到几秒的都有。休伊什等对脉冲星的发现成为 20 世纪 60 年代的四大天文发现之一。

中子星半径约为 10 千米，而磁场强度可达 10 万亿高斯，这是加强宇宙线的主要场所。中子星外层可能有 0.01 米量级的致密的等离子体大气，其下为固体外壳，厚约 100~1000 米，具有晶体的点阵结构，再下面是中子流体区，中子流体具有超流性质，流动时无摩擦。中子星内部不再有核反应，随着脉冲的发射，必定带走大量的能量而使中子星的自转变慢。故中子星的脉冲辐射实际消耗的是自身的自转能。

关于中子星，早在中子刚发现的 1932 年，前苏物理学家朗道尔就预言过它的存在。1967 年意大利的帕西尼预言：“在蟹状星云中存在一个由中子组成的星，它每秒自转多次，有很强的磁场，磁偶极辐射给星云以能量”。这些理论预言在当时曾

遭到了嘲笑，但第颗脉冲星发现以后，预言成了现实

白矮星、中子星和后面要讲到的黑洞，都属致密星一类。它们的特点是自身不能进行核反应，不能依靠向外辐射的压力来对抗自身的引力塌缩，故它们的体积越来越小，密度达到极大，表面引力场极强。在此物理条件下，引力、电磁、强相互、弱相互作用都在起着重要作用，需要用广义相对论来研究它们。

六、黑洞

黑洞和白洞是根据广义相对论预言的两种天体，虽由同种理论推得，但基本特性不同。黑洞最主要的就是“黑”，它只吸收物质而不能向外发光，因此远处的观测者无法看见它的存在而且它像一个深不可测的陷阱，任何物质落到它上面都要被它吞没，这些吞没的物质一般是不能再出来的。白洞则与此相反，它只发射不吸收，因此具有“白”的特征，即它的内部物质可以跑到外面来，但外部物质却不能进入它的内部。白洞可以看成是宇宙中的物质和辐射的“源泉”。

（一）黑洞概念的形成

广义相对论中关于黑洞的图像最初是由奥本海默等人在 1939 年确定的，奥本海默认为，稳定的中子星有一个质量上限，否则中子星将是不稳定的，现已证明这个质量上限为 $3.2M_{\odot}$ 。超过这个数值，中子简并压力就无法与自引力抗衡。这时中子星将继续塌缩下去，随着体积的缩小，温度的升高，能量被中微子带走，收缩将不可抗拒地进行下去，一泻千里，这种收缩称之为“完全引力收缩”。遭遇完全引力塌缩的恒星，其表面引力场将不断增强，其表面物体的逃逸速度将越来越大，当恒星塌缩到它的引力半径时，逃逸速度增至光速，由于任何粒子的速度又不能超过光速，故强大引力场必将把它拉回，光子也不能发射到远处，结果恒星便成了黑洞。（不旋转、不带电、球对称，叫史瓦西黑洞）

（二）黑洞的特性

星体一旦坍成黑洞，几乎所有性质都不能被观测到，只要用质量、角动量和电荷三个参数，它就完全确定了。如果两个黑洞的这三个参数一样，这两个黑洞就完全一样。此结论称为黑洞的“无毛定理”。这种黑洞叫克尔黑洞。（旋转、轴对称、可带电）除了上述晚期恒星因引力坍缩会形成黑洞外，更大质量的天体也可经坍缩变成巨型黑洞。它们可能存在于星团、类星体及活动星系核中。另外，如果天体是由超密物质演

化而来，非引力坍缩也可使其成为小黑洞。

黑洞只能向着表面增大的方向演化，要想使它分裂、解体是不可能的。黑洞合并时要释放巨大的能量，以至比强烈的核反应还高 100 倍以上。黑洞的密度反比于质量的平方，质量愈大，密度愈小，因此，黑洞不都是密集的天体由于质量上的差异，黑洞密度差别很大，太阳若转化为黑洞，密度将达 200 亿吨/厘米³；一个质子大小的小黑洞，密度将超过 4 万亿吨/厘米³。黑洞的质量不仅可以通过吸引增加，还可通过发射减小。由于黑洞的热谱所对应的温度反比于质量，故小黑洞可以有高温，达 1200 亿 K，有很强的辐射，也可以有爆发，一个 10 亿吨的小黑洞，从诞生到爆炸约需 100 亿年，且爆炸时的能量可能比一千万颗百万吨级的氢弹大得多。近来发现不少天体的高能现象用热核反应理论是无法解释的，特别是高能爆发，它们很可能与黑洞爆发有关

（三）寻找黑洞

黑洞是一种理论上预言的、但尚未最终确认的天体，这种奇妙的大体究竟是否存在？人们正致力于它的搜索，寻找的线索只有根据它与外部世界的联系去找。目前，已经找到一些尚待进一步确认的对象。

第七节 宇宙汪洋中的岛屿——星系

太阳系处于银河系中，而银河系外的广袤空间里，大大小小的天体系统星罗棋布，犹如无边无际的海洋中漂浮着众多的岛屿，成群成团，不可胜数，天文学家们形象地称它们为宇宙岛或岛宇宙。人们是怎样认识这个问题的呢？首先，必须搞清两个问题：一是众多的恒星和银河是否是同一个独立的天体系统？二是在这系统之外是否还存在其它类似的系统？

为了证明第一个问题，最早由威廉·赫歇耳父子完成了两项艰巨的任务。一项是分区数星，沿银河带分若干天区计数每一区的星数。从 1776 年开始，威廉·赫歇耳抽样观测 683 个天区，总共统计了 117600 颗星，将全天观测三遍，他发现离银河面越近星数越密集，离银极越近星数越少。这表明银河和其它恒星是一个扁平集团，不是均匀分布的。后来他的儿子约翰也统计了南天 3 千个天区的 68948 颗星，证实了他的结论。另一任务是按星等计数恒星，他们发现距离越远暗星数不是无限多，星数之和应是收敛的，银河及其它恒星是一个独立的有限的天体系统。

为了证实第二个问题，只需分解出星云中的恒星就行了赫歇尔声称用它的大望远镜做到了这一点。因此他断言星云皆由恒星组成，它们即是银河系外的宇宙岛。但是，星云到底是否就是宇宙岛？宇宙岛即河外星系是否存在，人们仍经历了曲折的认识过程。

观测事实证明，星云并非都是恒星集团，确有分不出恒星的真正的云状物存在，这便是银河星云，即使分解出恒星，它也可能是银河系内的星团。看来最终确定宇宙岛存在的关键是测定银河系的大小和星云的距离。若星云距离大于银河系范围，该星云既是恒星吸收光谱，又可分解出单个恒星，则它是银河系外的宇宙岛，否则即是银河系的成员。

问题是明确的，但在当时要确定银河系的大小和测定河外星系的远距离，绝非易事。1917年里奇在星云 NGC6946 中发现一颗 15 等的新星，后又在仙女座大星云中找到两颗新星，其他人也在一些河外星云中找到了新星美国人柯蒂斯假定这些新星亮度极大时的绝对星等值与银河系新星一样，由此可估计出新星及所在河外星云的距离，证明仙女座大星云远在银河系之外。直到造父视差法测量天体距离诞生后，人们才有可能最终确认宇宙岛的存在。1923 年，美国天文学家哈勃用当时最大的 2.5 米反射望远镜成功地将仙女座大星云的外围分解为恒星，并证认出其中的造父变星，翌年又在三角星云 M33 和人马星云 NGC6822 中发出了造父变星，他利用周光关系定出了三个星云的造父视差，证明它们远在银河系之外。人类经过 170 多年的探索，宇宙岛理论才得以确认。以后，人们才逐步认识到星系是普遍存在的，它占据几千至几十万光年的空间，是一个庞大的天体系统，在宇宙大尺度结构中，星系是基本单元，占有重要地位，我们的银河系即是一个普通星系。

银河系

在下半年晴朗无月的夜晚，中纬度地区可以看见一条银白色的光带浩浩荡荡地横贯整个天空，人们称它为“银河”用天文望远镜能看到“银河”里是密密麻麻的恒星，可见银河是恒星密集的区域，因肉眼分不出单个的星星，看起来便成了白茫茫的一片。我国古称银河为天河、星汉、银汉等，8~10 月银河大致为东北—西南走向，12—2 月大致南北—东南流贯，它经过的星座有天鹅、天鹰、人马、天蝎、半人马、南船、御夫、英仙、仙后等，其中经过天鹅、天鹰座的银河比较明亮，从天鹅到半人马这一段分为两叉。银河的宽窄不一，有的地方 4—5°，有的地方宽 30°。天空中的一颗颗恒星和银河里的恒星，以及银河星云、星团、星

际物质等，构成了庞大的运动着的恒星系统——银河系。据计算，银河系里大约有1500亿个以上的恒星，太阳就是其中之一

（一）银河系的结构

银河系是恒星和星际物质的巨大集合体。恒星占总质量的90%，银河系恒星分布的主体部分是一个又圆又扁的圆盘体，叫银盘，由高光度星、银河星团和星云等组成的旋涡结构叠加其上。银河系中恒星分布很不均匀，大致是中心区域密集，离中心越远分布越稀，中心区形成核球，核球长约16000光年、厚约13000光年，核球的中心部分是恒星分布的致密核心叫银核（如图4-6）银核半径为数十光年，但拥有相当1000万个太阳的质量并放射出很强的射电、红外和X射线等。银核的中心叫银心，银心在人马座方向，银盘的直径8万光年，中间厚6500光年，边缘厚约1千光年，形似“铁饼”，其质量为太阳的800亿倍

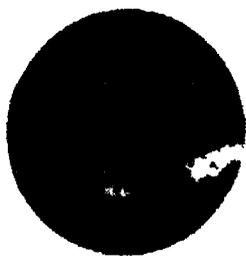


图4-6 左为银河照片，右为银河系结构示意图

银河系是旋涡星系，从银核的对称的两端伸出4条旋臂，其中1条是射电方法发现的中性氢流膨胀臂，叫三千秒差距臂。太阳附近有三条旋臂，它们是人马臂、猎户臂和英仙臂，猎户臂离银心10.4千秒差距，太阳位于猎户臂的内侧几十秒差距处，太阳附近的物质密度为 8.8×10^{-21} 千克/米³，也是极高的真空。猎户臂之外是英仙臂，离银心12.3千秒差距，人马臂在太阳内侧，距银心8.7千秒差距。研究表明，旋臂是一种物质分布的密度花样，是一种密度波。

在银盘和旋臂以外的其它区域，在一个近似球形的范围内稀疏地分布着其它恒星，这就是银晕，其直径约10万光年，质量为太阳的1万亿倍，超过可见部分的质量。

（二）银河系的运动

整个银河系的天体围绕银心轴线不停地转动，这是银河系的自转。它的旋转轴

线在天球上指向两点，这就是银极。银河系的恒星除了各自的运动外，它们围绕银心转动的速度是变化的，即是一种较差自转，不是刚体自转。1927年，荷兰的奥尔特等从理论上证实了这种较差自转，并推导出银河系自转对恒星视向速度和银核自行影响的公式，这就是奥尔特公式。

1985年国际天文学联合会根据近几十年来的研究成果，对银河系模型的常数作了修订。银河系的总体印象是：

银盘直径（修订值） 8万光年或 25千秒差距

银晕直径 10万光年或 30千秒差距

银盘中央厚 1万光年。

太阳附近银盘厚 5千光年。

盘总质量 1.4×1000 亿太阳质量，绝对星等—20.5，年龄约 100 亿年

太阳到银心距离（修订值） 27700 光年或 8.5千秒差距。

太阳离银道面距离以北 8秒差距或 26 光年

太阳附近银河系转速（修订值） 220 公里/秒。

太阳附近银河系转动的周期 2 亿 5 千万年。

太阳附近恒星和星际物质的总密度 8.8×10^{-24} 克/厘米³

奥尔特常数 A 和 B 的差值 25.9 千米/秒·千秒差距

在修订后的银河系模型中，银盘比以前小 15%，银河系自转慢 10%，太阳和银心之间的范围所包围的质量减少了 1/3。但新建立的银河系自转曲线说明，银盘外围延伸更远，其物质质量不可忽视，可能隐藏着大量的不发光物质，根据银河系存在“银冕”其半径延伸到 30 万光年处，估计银河系的质量可达到 2.1×10^{12} 的 12 次方倍太阳质量，即比原来大了 14 倍多。

（三）太阳在银河系中的位置

在银河系中，我们的太阳处于怎样的位置呢？第一，太阳位于银道面附近，距银道面仅 26 光年。第二，太阳并不在银河系的中心。如果太阳位于银河系的中心，通过地球或太阳的平面会把整个银河系分成星数大致相等的两半球，而且银河各部分的明暗程度应该大体相同。事实是，银河各部分的明暗程度大大不同，特别广阔和特别明亮的部分位于人马座的方向，也就是银心所在的方向，而且这半个银河环带远比另半个银河环带来得明亮。第三，据观测计算，太阳距银心大约 3 万光年。因此银心所在的半个天球上恒星特别多，球状星团也占总数的 90%。而反银心方向（御夫座）的半个天球，恒星较少，银河较暗些。

由于太阳不在银心，所以太阳绕银心转动，其速度若按 250 公里 / 秒计，可以计算得它绕银心一周需 2.5 亿年。自从太阳形成 50 亿年以来，已率领太阳系成员绕银心转过 20 周了。

值得注意的是，在太阳系绕银心过程中，若通过银河星云或暗云，由于它们的物质密度比太阳系现在所在的空间密度大 1000 ~ 10 万倍，故必然对太阳系产生巨大影响。在太阳绕银心转动二周的过程中，要穿过 4 条旋臂，因为旋臂的同向绕转速度只有恒星的半，故太阳系大约 1.25 亿年通过一条旋臂，这时将使太阳系的宇宙环境发生较大的变化。

太阳和太阳系除有绕银心的转动外，它们还有垂直银道面的往返南北的周期运动，半周期为 26 ~ 37 百万年，距银道面最大距离为 150 ~ 300 光年，在最近 300 年内，太阳由南往北穿过银道面，处于银道面以北 65 光年之处。太阳的这种运动又叫 Z 运动。

二、河外星系

1924 年当银河系的大小和仙女座大星云的距离初步确定以后，河外星系的存在已确定无疑。1944 年，巴德又成功地把仙女座大量云的核心部分分辨出单个的恒星，证明河外星系确是由恒星密集分布而组成的类似银河系的天体系统。河外星系的确定和发现是 20 世纪天文学的重大事件。

（一）河外星系概况

靠近银河系的河外星系有 20 多个，离地球最近的是大麦哲伦星云和小麦哲伦星云。它们的距离分别是 16 万和 19 万光年，都是不规则星系，旋涡结构很不清晰。星系通常由几十亿至几千亿颗恒星成员以及星际气体、尘埃物质组成。目前探测到的视星等亮于 23 等的河外星系 10 亿个之多，它们的距离近则几十光年，远到数百亿光年。在可观测宇宙中估计约有 100 亿个星系。

1910-1920 年美国天文学家斯莱弗发现星系的光谱都有红移现象，如果用多普勒效应解释，说明星系都在后退，远离我们而去，同时星系间的距离也在不断增大，这就是星系的宇宙膨胀运动。天文观测表明，绝大多数河外星系的光谱线有红移，而且红移量相当大，紫移的是极少数，它们是离我们较近的星系。

星系的形态各异，性质也各不相同，有的含尘埃多而有的少；有的表面亮度小，有的表面亮度较平均，不表现为亮度向中心增大，有的在微弱背景上有亮而小

的核；有的星系核平静，光度也比星系的总光度小，有的星系核十分活跃，光度可超过总光度的一半以上。星系中的恒星既有各自的运动，又有绕星系核的转动，形成星系的较差自转。而星系作为一个整体也在向某一个方向运动，同时又有绕多重星系的公共质心的转动。因此可根据星系的形态、物理性质和演化特征的不同将其分类。首先是按形态分类比较简单，星系形态多种多样，按哈勃分类法，大体可分为椭圆、透镜形星系，旋涡星系、棒旋星系和不规则星系五大类，银河系属旋涡星系（如图 4-7）

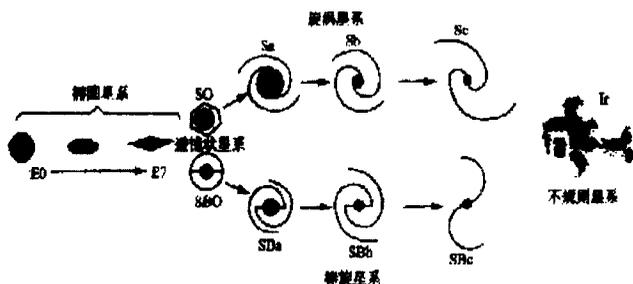


图4-7 星系的哈勃分类

(二) 星系种种

河外星系的绝大部分属正常星系，它们在上百亿年的演化中基本上是平静的，成员恒星的运动速度为每秒几十公里的量级。正常星系基本上处于引力平衡状态，因而可用引力平衡理论去分析研究；同时它们的辐射基本上是热辐射，因而可用热辐射定律去讨论。银河系就属于正常星系但从五十年代开始，由于射电、紫外、红外、X射线天文学的发展，发现了一些特殊的星系，它们不处于引力平衡状态，表现为有比正常演化尺度快得多的变化，或显示有每秒数千公里的膨胀、抛射或爆炸现象等，这种星系称之为活动星系，又称扰动星系，它们占星系总数的 0.1 以下

1. 活动星系

星系家族中的活动星系，主要类型有塞佛特星系、N型星系（即蓝核红星系）、射电星系、马卡良星系、哈罗星系、致密星系、蝎壳 BL 天体和类星体等。它们的形态、结构和特性都不同于正常星系。主要表现在：都存在着激烈活动的明亮的星系核，一般呈恒星状，有的有模糊的外围包层，有非热连续光谱，核光谱出现高激发态的发射明线；核心区有气团以 500 千米/秒 ~ 8000 千米/秒的速度运动和爆发遗留下来的痕迹；致密核不仅有很高的光度，也有很强的射电、紫外、红外和 X 辐射；这些非热辐射功率巨大，可达 10 的 40 次方瓦。能量都从星系核内极其狭

窄的区域发射出来；光学和射电波段的亮度常出现快变化，波长越短，变幅越大。多数光变周期为年，也观测到周期为十几分钟的星系核活动期内有多次巨大的爆发，有些核还抛出大量的物质和粒子流它们所放出的总能量比银河系整个生存期所释放的总能量还要大得多。

2. 特殊形态的星系

除了正常星系和活动星系之外，近年来又发现不少种星系。

(1) 红外星系，是具有强红外辐射的星系，它的全部辐射能量 99% 处于红外波段。

(2) 星系和星系之间存在着相互作用，从而产生了特殊形态的星系，这是对星系形态完全由初始条件决定论的补充。星系间若是远距离相互作用，星系核区的活动增加，恒星呈爆发式地形成；若是近距离作用，或是以小于 100 千米/秒数量级的相对速度相撞，星系就合二而一，导致一个吞并另一个。曾经观测到一个不规则星系，它既具有椭圆星系的特点，又具有旋涡星系的特点，实际上它是两个正在相撞的星系的结合体，碰撞使一个剥离另一个星系的恒星和星际物质。现在普遍认为，特大星系是靠吞食与它们相撞的星系后壮大起来的，随着其质量的增加，吞食能力增强，会导致一个星系团中的大部分物质被它吸纳，形成超巨椭圆星系。

(3) 近年来发现大多数旋涡星系具有双重结构，而且是一主一伴，有人认为这伴星系是主星系抛射出来的物质形成的。我们把这种由于星系处于引力不稳定状态，主伴星系互相干扰和作用，破坏了星系的正常形态，甚至出现星系际桥状结构的二重或多重星系叫互扰星系。

(4) 星爆星系是 IRAS 卫星发现的，共发现这类星系数千个，这也是一类活动星系。它们具有强红外辐射和射电辐射，非热辐射大于光辐射，有的高出 50 多倍。其能量来自星系核。研究表明许多对碰撞星系中，大部分有星爆现象，恒星的诞生率极高，这对解释活动星系的形成具有意义。

(5) 低表面亮度星系，随着望远镜探测本领的增强和新摄像技术的应用，可以探测到更暗更多的低表面亮度星系，从而使其成为宇宙中最丰富的星系品种。它们的表面亮度只及正常旋涡星系表面亮度的 $1/10 \sim 1/25$ ，需使用英国人马林发明的摄像技术和 CCD 照相机，才能拍摄到它们的清晰照片。

低表面亮度星系除暗巨星系一类外，还有一大类是弥散的矮星系。矮星系是光度和质量都很小的星系，绝对星等 $-18 \sim -16$ 等，质量一般为 100 万 \sim 10 亿倍太阳质量。低表面亮度星系的发现，对现代宇宙学模型和星系形成和演化学说，提出了新的课题：因为它们应有不同的形成过程。

三、星系团和宇宙

（一）星系分布的成团现象

据星系的计数统计表明，全天球面上亮于 20 等的星系有 2000 万个，每平方度有 500 个星系。如果考虑星系在三维空间的远距离深空中的分布，显然是星等越暗，星系数就越多，23 等以上的星系总数可达 10 亿以上观测表明，星等亮于 13.5 等的近距离小范围内，亮星系在天球上的分布是相当不均匀的，这是星系成团现象的反映

星系常以三重或多重星系的结构存在，大约有半数以上的亮星系是这种结构，单个星系似不多见，这种分布与其起源演化有关。由这些双重或多重星系结构，使几十个、几百个甚至上千的星系彼此依靠引力而聚成更大的集团，形成星系群或星系团。例如大小麦哲伦星云构成双重星系，它与银河系又构成三重星系，1975 年发现了离银河系 5.5 万光年的比邻星系，又构成为四重星系，并与玉夫座星系等构成多重星系，这个多重星系又与以仙女座星系为中心的另一个多重星系构成“本星系群”，星系群含星系一般不超过 100 个，而星系团可含河外星系几百到几千个，最少 500 个。星系的尺度一般为 3 万光年，多重星系尺度为 30 万光年，星系群和星系团的尺度可达 1600 万光年。85% 的星系属于星系群或星系团

（二）本星系群、本超星系团和总星系

银河系所在的本星系群可能有 40 个左右的成员星系，它们分布在半径 326 万光年的范围内，由万有引力结合，不参与宇宙普遍膨胀，结构松散，其几何中心没有星系聚集。三个质量最大、最亮的星系 M31 即仙女座大星云、银河系和三角星系 M33 位于本星系群的两边。估计本星系群的质量大于太阳的 6500 亿倍。

据观测，银河系周围 1 亿光年的范围内大约有 54 个星系群（团），每个星系群（团）的直径在 100 万至 800 万光年，相邻星系群（团）的平均距离 2300 万光年。

本星系群和其它星系群（团）与室女星系团组成本超星系团。这是法国人沃库勒于 20 世纪 50 年代仔细分析 1000 多个亮星系后得出的结论。它的直径约 1.25 亿光年，其中心就在室女星系团附近，银河系恰在本超星系团的边缘部分。其成员还有大熊星系团等 50 个左右的星系团。由亮星系的视向速度的分析表明，本超星系团存在自转和膨胀运动，银河系绕本超星系团中心旋转的周期是 1000 亿年，这种绕转即为本

超星系团的自转、本超星系团以外还有其它超星系团，有的认为约有 50 个，每个超星系团包含 10 个左右的星系团

当今观测工具所能涉及的最大范围是 150~200 亿光年，它包含约十亿个星系一万个星系团，它们都属于更高一级的天体系统——总星系。

一般地说，宇宙是物质的，在空间上应是无限的，没有边界的，没有形态和中心的；在时间上应是无始无终的。但无限宇宙是由具体的天体系统构成的，如地月系、太阳系、银河系、本星系群、本超星系团、总星系等，无数有限的系统组成了宇宙的无限性

第八节 天体的起源及演化

新陈代谢是宇宙间普遍存在的、不可抗拒的自然规律，天体也不例外，不可避免地有它的生成、发展和消亡的过程。古代人虽然也在谈论天体的起源和演化，但科学地讨论这个问题，特别是研究太阳系的起源和演化，是从康德开始的，他是第一个以变化和发展的观点看待太阳系演化的哲学家。200 多年来，太阳系起源和演化的研究已取得不小的成就，提出了 40 多种假说，但至今还没有一个学说被人们普遍接受。

一、太阳系的由来

任何一个科学的太阳系起源和演化的假说，都应能从正确的理论出发，说明太阳系的结构和各种运动特征。

1755 年，德国哲学家康德发表《自然通史和天体论》一书，其中提出了太阳系起源的星云假说，产生了巨大影响。1796 年，法国著名数学家拉普拉斯出版了《宇宙体系论》一书。他认为，太阳系由一块气体星云收缩形成。康德-拉普拉斯星云说是能够说明行星运动的一些特征的。他们以自然界本身的运动规律来解释自然，牛顿的上帝一次推动在此不再存在，代之以本来自转的星云。这是继哥白尼学说之后，人类认识史上的又一次飞跃。限于当时的科学水平，人们认为太阳系的起源问题已经解决，康德和拉普拉斯的星云说统治着整个 19 世纪

太阳系起源的假说中，还有一类灾变假说，其主要论点是太阳系在一次灾变中形成。灾变说的主要困难在于恒星相撞和接近的几率太小。宇宙间的恒星密度，犹

如中国大陆上空只有·只蜜蜂一样稀，它们相碰的几率是 10^{17} 年一次，接近几率 10^{15} 年一次，而银河系的寿命才百亿年，且其中的行星系统的数目估计很大，这意味着碰撞的频繁，故灾变说无法成立现代已现测到恒星周围有气体尘埃盘在形成行星，这是灾变说的有力反证

20 世纪的星云说不仅考虑了力学问题，而且还应用了电磁作用、等离子体过程、原子过程、化学过程和流体、湍流、辐射、挥发等现代物理学理论，形成了当今的太阳系起源假说

按照比较共同的观点，从星云到太阳系的过程，首先是在银河星云中产生太阳星云，然后变成星云盘、最后在星云盘内产生太阳和行星及卫星

(一) 大约在五十亿年前，在银河系中有一总质量比今天的太阳系大上几千倍的，由气体和尘埃混合组成的星云这块星云一方面在其自身的引力作用下逐渐收缩，另一方面在内部出现了许多湍流、涡流，旋涡使星云碎裂成许多块，其中形成太阳系的碎块称“太阳星云”当这块旋涡星云的气体密度达到足够的大小，它便会在本身引力的作用下，自行收缩起来，且由于收缩而越转越快，具有很大的角动量，约为太阳系角动量的百倍以上，自转加快使形状变得越来越扁当收缩到一定大小时，赤道面外缘的物质便不再收缩，而太阳星云的其它部分仍继续收缩，这样，逐渐在赤道面上形成一个连续的薄薄的圆盘。

太阳星云中心部分在收缩过程中密度变大，温度升高，形成昏暗无光的原太阳，进而表面温度增高至 $3000-4000\text{K}$ 时，发出可见的红光。原太阳在内部温度增高到 700万 K 时，就开始发生热核反应，由引力收缩阶段转入核反应阶段而发热发光。

(二) 太阳角动量转移的“沙兹曼机制”是，原始太阳在慢引力收缩时，由于自转加快，发生强烈的对流导致磁场加强和星面强烈的磁活动，因而从太阳内抛出大量的带电物质，这些物质被磁力线制约，随着太阳的自转而转动，距离越远，角动量越大，并以太阳角动量的减少为代价。当距离超过一定值时，带电物质就不再被磁场拖着转动，而是脱离太阳制约，进入星际空间，带走大量的角动量。大约经历 $1\sim 2$ 亿年，抛射出 20% 的原太阳质量的带电物质，并形成强烈的太阳风，导致原太阳角动量流失 80% 以上，而太阳本身自转变慢，逐步进入比较平衡的阶段原太阳抛射活动仅在日面中纬度进行，太阳的角动量不会转移给星云盘，星云盘本身具有足够的角动量

(三) 行星形成的过程是集聚和吸积作用的过程。星云盘内的尘埃颗粒和小冰粒沉降到赤道面形成“尘层”，当尘层密度足够大时，尘层中通过微粒的彼此吸引，在运动中发生碰撞而互相结合，由小而大，从尘粒到团块，从团块到“星子”，从“星子”到“星胚”，逐渐形成为九大行星的前身。“星胚”在日益壮大的过程

中，它的引力愈来愈大，引力吸积最终代替碰撞吸积，逐渐形成行星

以上太阳系起源的学说为许多天文学家所接受它突出了太阳角动量转移的电磁力的作用

二、恒星的一生

由于现代天文学和物理学的发展，近几十年来恒星演化的理论已经发展到相当成熟的阶段多数认为，恒星是由庞大而稀薄的星云物质经过引力收缩凝聚而成。太阳是一颗恒星，它的起源和一般恒星的起源问题联系在一起，因此现代恒星演化理论有力的支持了太阳系起源于星云的假说虽然对太阳系起源和演化问题的研究比恒星开始得早，但是没有恒星演化研究取得的成就大

(一)、赫罗图和恒星演化的理论基础

19世纪末，美国哈佛天文台的女天文学家莫里提出恒星谱分类法：她把光谱仔细地分成 22型，每型又细分为 a、b、c 等许多次型丹麦天文学家赫兹普龙对此很感兴趣，做了大量的光谱型——自行——光度之间对应关系的统计工作。他的研究发现，同在晚型光谱中，有一类恒星的光度特别大，被称之为巨星，另一类光度小的称为矮星，且巨星比矮星少得多

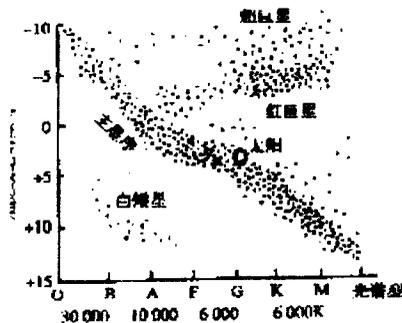


图4-8 赫罗图

美国天文学家罗索也独立作出了同样的发现。他以恒星的光度和光谱为座标轴作图，出人意料地发现，由各个恒星的光度和温度决定的点子，分布在沿左上方到右下方的对角线条带上，多而密集，占总数的 90% 处在这些位置的一类恒星叫主序星 (如图 4-8)。主序星表明，温度高的恒星光度强，温度低的光度弱，且体积相差不大。但在图上对角线的右上方，有一个比较密集的区域，这区域里的星的光度大，

是太阳的几百倍或几万倍，它们的温度低，正说明其表面积大、体积大，这类恒星就是巨星和超巨星，超巨星分布在巨星的上方，并一直延伸到图的左侧，温度稍高的超巨星，叫蓝超巨星或白超巨星图中对角线的左下方也有一比较密集的分布区域，这些星的温度高，呈蓝色或白色，但光度很小，只有太阳的千分之几或万分之几，说明它的表面积小、体积小这类恒星就是白矮星。

1924年，英国的爱丁顿从理论上证明了由哈姆提出的、经赫兹普龙 1919年观测证实的质光关系，质光关系说明恒星的光度随其质量的 2.8 次方（光度小于太阳时）或 4 次方（光度大于太阳时）的增加而增加。这表明，位于主星序上不同位置恒星的质量是截然不同的，即是说，是质量的大小造成恒星光度和温度的很大差别。主星序上端质量高达 $15M_{\odot}$ ，下端只有 $0.1M_{\odot}$ 。

1 恒星的质量、光度和寿命

统计表明，恒星的光度可以分成不同的等级，每一级光度的恒星数目的分布是不均匀的，暗星的数目显然比亮星多得多，在邻近太阳的恒星中，有 $2/3$ 的恒星光度小于太阳光度的 $1/100$ 。另一方面，也不是光度越小恒星数目越多，光度大约是太阳的千分之一的恒星数目最多。

如何解释这个统计规律呢？根据质光关系，恒星的质量越大，自身的引力就越大，恒星为处于力学平衡状态，内部必须有更高的温度与引力抗衡，更高的温度来自更大的光度，更强的辐射能，只要它们的化学组成一定。另外恒星的寿命主要决定于它的能量消耗，若它的能量枯竭，则意味着恒星死亡的来临，因此大质量恒星虽然具有较多的能量，但它的能量消耗更大，即恒星的能量消耗越大寿命能越短。例如质量为太阳的 $1/4$ 的恒星的寿命，将是太阳寿命的 32 倍。因此在恒星统计中，看到大光度、大质量的恒星的机会少，看到暗弱光度的恒星的几率大，暗星必然占多数

2 恒星演化理论的诞生

恒星的结构理论是恒星演化学的基础，在建立恒星结构的基本方程、确定恒星的巨大能量来自核反应等理论后，建立在赫罗国基础上的恒星演化理论日趋成熟。

由于恒星的质量和化学组成，决定了恒星内部核反应的不同，产能率和能量输送、辐射的不同，因而使恒星处于不同的演化阶段。根据上述不同的变化，就可推算出恒星在各演化阶段停留的时间。例如如果氢聚变成氦是主序星的能源，那末由任何一颗主序星的氢含量和反应速率，就不难确定其处在主星序阶段的时间。综合各演化阶段的时间，便可得到恒星演化的路径。

1961年，日本的林忠四郎进一步研究了恒星早期由慢引力收缩，从赫罗图的右上方下降进入主星序的演化程。经过许多人的研究，到 20 世纪 60 年代，恒星一生

在赫罗图上的理论演化曲线已相当清晰了。60年代后，有关元素的合成理论同恒星的起源和演化理论的研究结合在一起，更推动了恒星演化学的发展。

（二）恒星演化的几个阶段

目前多数人认为，恒星是由庞大的星际物质云收缩形成，恒星的形成和演化一般经过以下阶段：

1. 早期引力收缩阶段

这是气体星际云在引力作用下形成原恒星的过程。

2. 中期阶段——热核反应阶段，包括主星序和红巨星阶段

(1) 主星序阶段是一个相对稳定的阶段。由于核反应能量巨大，传递到表面，使表面温度升高，向外辐射很强的可见光，此时引力与辐射压力平衡，能量收支平衡。

质量大的恒星产生的热量大，故亮度也大且温度高；质量小的星亮度小，温度低。因此在赫罗图上，按照质量从大到小的顺序分布在从左上角到右下角的一条对角线上，不同质量的恒星到达主星序的位置不同，质量大的位置较高些，这就是主星序。

(2) 主星序后阶段。主序恒星中心部分核反应进行得最快，当中心部分绝大部分氢转变成氦时，中心便形成一个等温的氦核。此时，氢聚变释放能量不足，中心部分失去了足以与引力相抗衡的压力，使中心氦核收缩收缩的结果，一方面使对流氦核的温度升高和密度升高，另一方面也使核外围的氢壳层不断增温，当此温度升至 1000 万 K 时，核外围氢层开始核反应，并继续释放巨大的能量。新生成的氦又不断涌向中心，使氦核越来越大，产能区不断地由内向外转移，氢燃烧层也不断向外转移。最后，由于产生的能量不断涌向恒星最外层，外层的温度升高，使星体外壳急剧膨胀，体积急剧增大几千倍以上。但表面积增大，使表面温度下降，而总光度仍然是增强的。这样恒星就成为一颗表层温度低、颜色红、体积大、光度高的红巨星。赫罗图上，恒星脱离主星序面向红巨星演化，但不同质量恒星的演化程不同。

(3) 红巨星阶段。红巨星的核心继续收缩升温。当中心温度增高到 1 亿度时，中心部分的氦核开始发生聚变成碳核的反应(3 α 反应)再度提供极大的能量，使中心压力增高，温度可达几亿度，密度超过 10 万克/厘米³，巨大的压力又足以同引力相平衡，恒星又相对稳定下来。像太阳这样的恒星在红巨星阶段可以停留约 10 亿年。

(4) 红巨后阶段。经过红巨星阶段，恒星进入晚期，在赫罗图上离开红巨星区，向左穿过主星序移动，表现为恒星体积减小，表面温度增加，开始了脉动不稳定的变化状态。大质量恒星还可能来回几次穿过脉动不稳定的变星区域。

红巨星阶段后，恒星的结构越来越复杂，平衡理论已不再适用。它可能有两种

演化，一是缓变方式演化为脉动变星，另一种是突变方式，即恒星经历突然爆发的新星或超新星阶段，也可以先脉动后爆发式地演化。恒星处在此阶段的时间很短，故脉动变星在恒星总数中所占比例不大

3 晚期阶段——恒星的归宿

恒星的归宿与本身质量有很大关系，(1)原质量为4~8倍有的认为是30倍太阳质量的恒星，演化后期为超新星爆发超新星爆发后，90%的物质以1万公里/秒的速度飞散，并合成了许多重元素与超重元素，这些喷发形成了新的星际物质云，参加新一轮恒星演化的循环

爆发后恒星剩余质量若大于太阳的1.44倍中心部分会留下一个残骸中子星若剩余物质超过太阳的3.2倍——中子星质量的上限，中子简并力也不能与引力抗衡，平衡状态不能存在，恒星还会收缩下去，由于再没有任何物质状态的压力能抵挡收缩力，故恒星的塌缩不可遏制，最终恒星形成为黑洞

老年中子星还能吸积星际物质，产生 γ 射线脉冲和 γ 射线爆发；如果吸积物质后，它的质量大于太阳的3.2倍，则可能通过一次相变塌缩为夸克星或黑洞。

如果恒星原有质量小，也可不经过爆发直接演化为中子星。

关于超新星爆发，可以分成I型和II型两类。

(2)原有质量小于4倍(有的认为是10倍以下)太阳质量的恒星经过主星序阶段后，先后经过氢、碳、氧等核燃烧阶段，其核心部分将形成一个简并态的碳氧核，核外层是氢燃烧层、氢未燃烧层，再外边是氢氧混合的气包层。在简并核收缩形成的同时，内部的辐射压使包层一直在向外膨胀，最终喷出一个红巨星或红超巨星的外壳，并逐步逸散为行星状星云。

核心部分的质量如果小于太阳质量的1.44倍——白矮星的钱德拉塞卡质量上限，最后则留下一个炽热而致密的白矮星，这时它已烧掉了自己的氢壳层，失去了包层，在行星状星云充分膨胀扩散后而被显露出来，由于它没有核反应，只能靠引力收缩提供能量。白矮星中的原子核与电子处于简并态。如果简并电子气体的压力与引力平衡，它就处于暂时不收缩的相对稳定阶段，并只能靠余热而发光。若恒星原有质量小，也可直接演化成白矮星。

如果白矮星质量较小或没有吸积物质，由于没有能源补充，表面温度将不断下降，它就逐步演化为几乎不发光的黑矮星而冷却死亡，地球上也无法观测到它。

(3)质量与太阳相近的恒星演化为红巨星后，由于质量小不能引起爆发，在脉动中不断抛出冷外壳而形成行星状星云，核心部分可能留下白矮星残骸。质量更小的也可能不留下残骸。

白矮星、中子星内部没有核能源，故寿命很短，最终都演化成黑矮星，恒星的一生结束

白矮星、中子星和黑洞等致密天体被认为是恒星的归宿。恒星的死亡不是物质的消灭，是恒星由发光转化成不发光一批批恒星毁灭了，千千万万的恒星又燃烧起来宇宙间的天体生生不息，构成了永恒的物质循环。

第九节 大爆炸宇宙学说

银河系外有许多河外星系，那“无限远”的地方有什么？宇宙到底有多大？有限还是无限？如果有限，中心和边界在何处？这些关于宇宙形成之初和宇宙的未来问题，不知吸引了多少人。许多科学家为之耗尽了毕生的智慧和精力，同时出现了许多关于宇宙的论说。然而1917年爱因斯坦创立广义相对论前的宇宙理论，基本上，是哲学的思辩，缺少具体的观测和理论基础。

一、时空观的革命

1905年和1915年，爱因斯坦创立了狭义和广义相对论，从根本上改变了人们的时空观。牛顿的时空观是绝对的，他把时间看成是独立的、与外界无任何联系的、不断流逝的长河，把空间看成是独立于任何事物以外的、永恒不变的容器，时间、空间和物质及运动之间没有任何内在的联系，物质间的相互作用是超距的。这样的宇宙空间是三维的、“平直”的欧几里得空间

爱因斯坦在建立广义相对论后的1917年，他对宇宙作了人类科学史上的第一次伟大的阐明，建立了爱因斯坦的宇宙模型，发表了《根据广义相对论对宇宙学所作的考察》一文，这篇论文成为现代宇宙学的奠基作。爱因斯坦指出，我们可能生活一个有限无边的空间内，这是一个非欧几里得几何空间，它可看作四维空间中的一个三维超球面，可比喻成三维空间中的二维球面，面积、体积有限，但球面无边界，无中心，且是静止的。但是这个模型并不是1916年爱因斯坦引力场方程的解，根据他的场方程，根本得不到静态的解因为广义相对论与牛顿理论中只有引力没有斥力，故解应是动态的，即宇宙的大小应是时间的函数。

星系的红移发现后，证明宇宙不可能是静态的，爱因斯坦的静态模型被否定他本人也认为，为了得到静态模型而在场方程中引入“宇宙常数”斥力项，是

生中最大的错事 1922年，前苏联数学家弗里德曼通过解爱因斯坦的引力场方程，得到个均匀的各向同性的动态宇宙时空解，他建立的宇宙模型可分为开放、临界和闭合模型三类，在，前时刻，一种宇宙都是膨胀着的，但演化下去，结果各不相同，开放模型对应的是一直膨胀下去、开放无限的宇宙；闭合模型对应的是有限的、封闭宇宙，即宇宙膨胀到一定时刻就有条件地转为收缩；临界模型的宇宙膨胀速度减小为零时就停止膨胀了弗里德曼的宇宙模型成为后来许多模型的基础。

二、膨胀的宇宙

任何一种宇宙模型必须与宇宙大尺度的观测特性相符合，必须建立在观测特征的基础上，观测宇宙学方面的事实又是如何呢？

1910年至1920年间，美国天文学家斯莱弗在测量星系距离和研究星系光谱时发现，许多星系光谱有红移现象，若用多普勒效应来解释，则意味着这些星系向着远离我们的方向而去。使人迷惑的是，飞离速度特别大。如1917年，斯莱弗已测出了15个旋涡星系的视向速度，其中12个的平均退行速度达每秒640公里，这个数值远大于银河系中普通恒星的视向速度后来，他又测量了许多旋涡星系，退行速度一个比一个大，而且没有一个是趋近的，只有后退不久发现，天空各方向上的星系都有红移，而且射电方法测定的红移也与可见光波段一致，这就是说河外天体都在离开我们而去，这不是一幅宇宙膨胀的图像吗？

1929年，在现代宇宙学进展中具有划时代意义的事件是，哈勃发表了有名的哈勃定律（关系），他指出星系的红移和退行速度与星系和我们的距离成正比例关系。如果一个星系距离我们是另一个的2倍，它离开的速度就是另一个的2倍若距离是3倍，退行速度就是3倍等等，这正是弗里德曼和莱梅特宇宙膨胀时空的证明。可以这样形象地来理解这个问题。把我们的时空设想为一个两维球面，如同一个可吹大的气球一样，假定有许多蚂蚁趴在气球上不动，随着气球被吹大，蚂蚁将看到它们的同伴离自己越来越远，而且原来离自己远的离开的速度会更大（如图4-9）

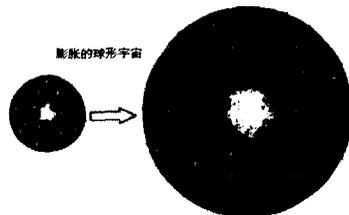


图4-9 膨胀宇宙的示意图

由宇宙膨胀可考虑宇宙大小的问题，即我们所能观测到的宇宙应存在一个最远的界限——“可观测宇宙”的界限。当星系足够的远，它退行的速度越来越大，以至最后接近光速，处在这个距离上以及以外的星系发出的光就不能到达我们这里，任何形式的幅射都不能到达，这个距离就是可观测宇宙的半径，而有关宇宙无限大的谈论就毫无意义了

这个不可逾越的半径有多大？根据哈勃定律，若用 D 表示星系距离，以百万秒差距为单位， v 表示退行速度，以每秒公里为单位，则 $v=HD$ ， H 叫做哈勃常数， $v=299792$ 公里 / 秒——真空中的光速度，哈勃常数经过长期的校核，目前取值 $50 \sim 60$ 公里 / 秒 / 百万秒差距，若取 $H=60$ ，可求得可观测宇宙的半径是 165 亿光年

三、宇宙起源于热大爆炸

哈勃定律经历了几十年的考验，使宇宙论这门学科更加蓬勃发展，各种宇宙模型相继建立，但都必须同时涉及宇宙演化的问题。莱梅特进一步追溯宇宙起源和元素起源，认为一切元素都是由某种重元素分裂而成。他说“天体演化学的最简单的出发点不再是或多或少均匀的星云了，而应该是一个单独的原子”。他 1932 年首先提出了宇宙起于一个极端高温、极端压缩状态的“原始原子”的学说

莱梅特的思想为伽莫夫接收，他把宇宙起源与化学元素的起源联系在一起，把核物理引进了宇宙论，运用粒子物理学知识，在 1948 年提出了宇宙起源于“原始火球”的大爆炸学说他认为，原始火球里的物质是高温高密的基本粒子状态，由于基本粒子的相互作用，使原始火球发生了爆炸，并向四面八方均匀地膨胀

20 世纪 40 年代末，伽莫夫和他的同事阿尔弗尔 (R.A.Alpher) 和赫尔曼 (R.Herman) 进一步研究宇宙膨胀论中的早期密集状态取得成功。后来苏联的泽尔多维奇、英国的霍伊尔及泰勒、美国的皮伯尔斯又在 1964 年前后，分别独立地研究这个问题，逐渐形成了热大爆炸宇宙学派。

(一) 大爆炸宇宙学说

热大爆炸学说的主要观点是：我们的宇宙经历了一个由热到冷，由密到疏，由小到大的演化过程。

(1) 宇宙早期，具有上万亿度以上的温度和比水的密度大百万倍的密度，其物质只有 γ 光子、正负电子和 μ 介子，中微子和反中微子、少量的质子和中子等基本粒子形态，且正负电子、中微子和光子三者数量相等，主宰宇宙，宇宙处于“轻子时代”

随着迅猛爆炸后的膨胀降温，密度随之迅速下降，经历 1 秒钟，温度降至 100 亿度粒子平均动能为 1MeV，这时产生正负电子以及与之平衡的湮灭反应仍能继续进行故正负电子数目与光子数目保持相等，但稍后，温度下降到正负电子不能再产生而湮灭过程仍在继续时，所有的正负电子便几乎从宇宙中消失（剩下的负电子假设比正电子稍多），同时，正反 μ 介子湮灭，3 对中微子脱离平衡状态，它们及光子和极少量的电子、中子和质子一直保存至今以后在膨胀降温过程中，所有尺度均按同一比例增长，光子的波长也在增长约在第 10 秒时，宇宙进入了辐射时期，主要成分只有光子和中微子

(2) 爆炸后 3 分钟，温度降至 10 亿度，相应的能量为 100KeV，重要的事件发生了，核合成开始，但效率不高，新形成的原子核可随即因碰撞而分裂，只能形成氦、氘和少量的锂核，由于宇宙冷得太快，不能形成更重的原子核。这段结合成轻元素的过程叫“核合成时代”

(3) 当温度降至 100 万度时，化学元素的形成结束到宇宙年龄为 1 小时左右时，宇宙中的物质主要是氢核占 75%、氦核占 25% 和电子

温度从 100 亿度降到 4000K 这一段时间内，是辐射为主的时期。由于此时温度仍高，物质以等离子状态存在，各种粒子进行频繁的碰撞、掺合和能量交换，宇宙处于热动平衡状态，辐射的均匀和各向同性使物质的分布也是均匀和各向同性的。由于光子和电子不断碰撞，故光子无法顺利穿过宇宙，从大爆炸至此，宇宙一直是不透明的。

(4) 当温度下降到 4000K 后，宇宙的能密度以核子、电子的能密度为主，由于电子等的平均动能不到 1eV，电子便能绕裸原子核运行并稳定在其周围，不会因碰撞而弹出。电子与核子才得以复合成中性氢和氦等中性物质，宇宙中的自由电子很快减少。故此过程为物质为主的时期

复合发生后，光子与电子的碰撞大大减少，辐射与实物粒子间的相互作用减弱，辐射与物质脱离耦合，开始各自独立演化，光子也变成自由光子，此时宇宙透明。这个时期称为退耦时期。脱耦出来的光子的能量继续随着宇宙的膨胀而下降，辐射的波长继续增长，有效温度随之降低，一直到形成今天的微波背景辐射的主要成分。但物质的能量并不下降。等离子体复合为中性物质的这段过程称为“复合时代”。

(5) 宇宙继续膨胀，温度从 4000K 继续下降，大约在宇宙年龄 100 万年时，中性物质成为气体，由于物质密度出现分布的不均匀性，它们逐渐凝成星云，形成星系、星系团、恒星，历经 100 ~ 200 亿年，演化成今天的宇宙。

由上可见，大爆炸宇宙学说把宇宙膨胀和基本粒子的运动联系在一起，把宇宙

的起源与化学元素的形成联系在一起，并预言了有大爆炸遗留下来的背景辐射，因而引起人们的高度注视

（二）微波背景辐射的发现

根据 1948 年伽莫夫提出的理论预言，如果宇宙起源于原始火球的大爆炸，那末至今还应该约有 5K 左右的剩余幅射。1965 年，现代宇宙学的另一划时代意义的事件发生了，人们果真发现了宇宙 3K 微波背景辐射！宇宙空间有各种波长的电磁波背景辐射，来自越远的辐射，其分布就越均匀。微波背景辐射是指波长从 1 毫米到小于 1 米的微波波段宇宙背景所发出的各向同性的辐射，其它波长的背景辐射能量的总和，仅为微波波段的 1%。

这个发现相当偶然，1964 年美国贝尔电话实验室安装了一座使用“回声号”卫星进行通讯的天线，其口径 6 米，呈喇叭状，它的性能极好，有极低的噪声。彭齐斯(A. A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)两人想用它测量低银纬上的 21 厘米射电发射。他们先在 7.35 厘米的波长上检验设备的性能，力图达到最小的噪声，奇怪的是在 7.35cm 上总有相当强的噪声不能消除，这噪声相当于 3.5K 的温度。消息传到普林斯顿，皮伯尔斯认为这就是他们正在设法测量的宇宙背景辐射。

从 1965 年以来，对微波段的背景幅射进行了许多测量，证实它是各向同性的、均匀的、无偏振的，也无季节变化。并具有黑体幅射谱，温度大约为 2.7K，并且在各种波段测量都有相当好的各向同性和一致性。

所有这些，都同热大爆炸的预言相当符合，这个结果带来了现代宇宙学发展史上的第二次高潮。20 世纪 60 年代是天文学史上最辉煌的时代，在这 10 年中，天体物理有 4 项重大发现，其中 3 项获得了诺贝尔奖金，发现 3K 微波背景辐射就是其中之一，它的发现是现代宇宙学大爆炸理论的最大成功之一。

宇宙大爆炸与一般爆炸不同，它不是物质飞向虚无的空间，而是空间同物质一起爆炸和膨胀，而且每时每刻都保持着均匀地各向同性的膨胀。

大爆炸宇宙理论也有不能很好解释的观测事实，因此它仍是一种假说。但它是目前最成功的宇宙假说。除大爆炸宇宙外，还有其它宇宙模型，但不管哪一种模型的建立，必须要求它逻辑地解释大宇宙中已确定的观测事实。后来大爆炸宇宙学的研究又进入了宇宙的极早期。氢产生在宇宙年龄约为几分钟的时代，称为宇宙的早期。极早期是宇宙年龄小于 1 秒的时代。

1980 年美国人古斯等三人对大爆炸宇宙说的最初一刹那进行了理论修正，经修正后的新模型叫“暴胀模型”。暴胀模型还在发展中，又出现了“新暴胀宇宙”和

“ 混胀宇宙 ” 学说等

第十节 现代天文学的惊人成就

第二次世界大战后，科学技术突飞猛进，我们面临着新的技术革命和工业革命的浪潮。在等离子体物理的理论和技术的促进下产生的射电天文学，表现出极大的活力，天文学有了新的进展，取得了新的成果，从而导致了 20 世纪 60 年代四大天文发现。

一、射电天文学与四大发现

射电天文学是用射电望远镜接收天体的无线电辐射，来研究天体的一门学科。射电望远镜使人们看到了与光学天空完全不同的景象。射电方法有光学方法不具备的优点，无线电波能通过云雾尘埃，故可不分昼夜、雨晴进行观测，而光波不行。又如密集星际物质背后的广大空间，难以用光学方法观测到，而用射电方法可作广泛的研究。20 世纪 60 年代天体物理的四大发现，几乎都是用射电方法发现的。它们是：微波背景辐射、脉冲星、类星体和星际分子。有关脉冲星和微波背景辐射的发现情况，已在前面作了介绍它们的发现意义重大，正如瑞典科学院在对微波背景辐射的发现所作颁奖决定中指出的那样：“彭齐亚斯和威尔逊的发现是一项带有根本意义的发现；它使我们能够获得很久以前，在宇宙创生时期所发生的宇宙过程的信息。”

脉冲星的发现证明了中子星的存在。小小的中子星具有超高密、超高温、超高压、超强磁和超辐射的极端物理条件。这些条件在地球上无法实现。因此，对脉冲星的研究，无疑会极大地推动天体演化理论以及极端条件下的物理过程和技术研究的发展

1. 类星体的挑战

1960 年，美国的马修斯和桑德奇用 5 米反射望远镜发现射电源 3C48 对应于一颗 16 等的暗星，其紫外辐射很强，光谱中有一些莫名其妙的又宽又亮的发射线。1963 年后发现，那些莫名其妙的谱线原来是红移量达 0.367 的已知谱线。像 3C48 这样的有巨大红移的强射电源，此后陆续被发现。这些射电源在照相底片上类似恒星，因而叫类星射电源，是类星体的一种。

我们把紫外辐射强，在照相底片上具有类似恒星的像，光谱具有很大红移的天

体统称类星体，其中有强射电的就是类星射电源，但更多的是没有射电或射电很弱，这称为蓝星体所以类星体才具有“类星”和“大红移”两个最重要的特点。迄至 1983 年，已发现类星体 2400 多颗

类星体大红移的本质是什么？通常用多普勒效应解释。即认为它在飞快地退离我们若是如此，红移为 3.53 的 OQ172 的退行速度是 27 万千米 / 秒，是光速的 91%，据哈勃定律，这是极遥远的天体，它离我们 160 亿光年；而 3C273 的退行速度 4.7 万千米 / 秒，是光速的 1/6，距离 28 亿光年，因它的视星等为 13 等，故它的光度是 2×10^{39} 瓦，这超过银河系总辐射的 200 倍，后来测定它在红外辐射的光度达 4×10^{40} 瓦，比最亮的巨椭圆星系的总辐射还多出 400 倍。其它类星体都比 3c273 距离远得多。这么远的天体竟能观测到它的如此强的辐射，说明其辐射大得惊人。这是目前任何能源理论所无法解释的。

一般认为，类星体的中心是一个黑洞，它不断吞噬着周围物质，而释放出巨大的能量。类星体是宇宙早期诞生的天体，故它是研究宇宙起源和结构的重要对象。

2 星际分子的发现

星际分子是指存在于星际空间的无机分子和有机分子。20 世纪 30 年代，美国的邓哈姆和亚当斯就已在恒星可见光光谱中发现了甲川 CH、CH₊、氰基分子 CN 的紫外吸收谱线经分析断定这些分子谱线不是来自恒星本身而是来源于星际物质。1949 年，苏联的什克洛夫斯基预言可通过射电方法来探测星际空间是否存在羟基分子 (OH)。1959 年美国的汤斯等人在实验室中精确测定了羟基的射电跃迁频率。在此基础上，温雷伯等人在 1963 年利用射电望远镜，并采用傅立叶变换等新技术，在仙后座 A 射电源处发现了波长为 18 厘米的 OH 分子吸收线，首创以射电方法搜寻星际分子的新开端。

1968 ~ 1969 年，美国的琼斯奈德等人又在人马座 A、人马座 B2、猎户座 A 和 W49 等处，用 43 米的射电望远镜找到了波长 1.26 厘米 NH₃(氨) 和 H₂O(水) H₂CO(甲醛) 分子和 CO 分子等，甲醛分子是发现的第一个有机分子。20 世纪 70 年代有机分子的发现捷报频传，1980 年 2 月，星际分子总表发表，共编入 1979 年 9 月前发现的星际分子及同位素 90 多种，现已达百余种。

星际分子的发现具有很大的意义。通过对它的射电谱线的探测，可以了解星际物质的分布和物理性质、银河系和河外星系的构造，及恒星的形成过程等。利用星际分子谱线可探索诸如星际冷尘埃云、球状体、红外源、氢 II 区、巨星周围气体的理化特性，增进我们对天体形成初期的认识。

有机分子存在于银河系的事实，为宇宙环境中生命起源问题和宇宙化学的研究提供了重要线索。

为表彰星际分子领域的科学成就，它的开拓者美国人汤斯获得 1964 年诺贝尔物理学奖但星际分子的许多理论问题尚未解决。如星际分子是如何形成的？星际物质是那么稀薄温度又那么低，分子、原子何以结合到一起等等，都还须做大量的研究工作

二、空间探测太阳系

第一颗人造卫星的上天，标志着空间探测时代的到来，空间技术的发展使人们得以进入太空观测天体。人类已六次登上月球进行实地考察，在金星、火星上实现了软着陆，并近距离探测过水星、木星、土星、天王星和海王星，以及哈雷卫星等

(一) 自 20 世纪 60 年代以来，美、前苏等各国发射了一系列的轨道天文台以及小型天文卫星、行星和行星际空间探测器、天文实验室等，在第一阶段致力于探明地球的辐射环境 探测地球外层空间的静态结构 在第二阶段进一步探索太阳、行星、行星际空间以及月球等；第三阶段探测银河辐射源，并向探测河外辐射源迈进。

至 1979 年，共发射天文观测的系列卫星约 125 个，用以观测行星际空间、太阳辐射、 x 射线和 γ 射线、紫外线、射电辐射及宇宙线等在近距探测太阳系方面，美国探测月球和为登月准备发射的主要飞行器有 38 个（含失败数）；前苏发射探测月球的“月球号”系列 24 个，以及其它与探月有关的探测器 8 个。

80 年代的太阳系探测研究以“旅行者 2 号”的行星际空间旅行达到高潮，成为这 10 年天文学成就的标志。“旅行者”1 号和 2 号共同新发现 3 个木卫、9 个土卫，单独探测到新天王卫星 10 个，海卫 6 个，使太阳系的天然卫星从 33 个增加到 68 个，而太空时代 1957 年前只观测到 31 颗卫星。发现或证实了土星和海王星的光环；考察并实测 4 个类木行星的磁场和磁活动；发现木卫一和海卫一的火山活动；近距离探测了木、土、天王、海王 4 大行星的星际环境等，取得了地面观测无法得到的资料，极大地丰富了对太阳系天体的认识。

空间天文学从 20 世纪 40 年代后期算起，不足半个世纪，但它发展神速，硕果累累。正如美国天文学家萨根在评价太阳系的空间探测的成果时所说，“取得的成就就是惊人的，我从未想象人类能在短短的 20 年中对天体的探索达到这样深的程度”。现代行星知识几乎全部来自行星探测器的直接探测，仅一个“旅行者 2 号”所取得的成果，胜过以往所有对行星的观测。

(二) 进入 90 年代，共发射各种探测器 30 多个，其中探测太阳和行星际空间的有 6 个，但探测大行星及卫星的并不多。

1990 年 10 月美国发射的“尤利西斯”号探测器，在 1992 年 2 月首先考察木星

后，于1994年6月，开始了对太阳南极的探测，这是飞行器首次沿垂直黄道面的轨道飞行，也是人类对太阳极区的首次考察。日本于1993年4月1日发射了一颗月亮探测卫星。1993年10月美国发射“卡西尼—惠更斯”土星探测器。探测火星的主要有4个探测器，它们是1992年9月25日至1993年12月美法发射的“火星观察者”，1996年法、俄发射的“火星94”号

1996年11月7日和12月4日，美国相继发射了两个火星探测器“火星全球勘测者”和“火星探路者”，分别于1997年9月和1997年7月4日抵达火星，由此开始了美国新一轮的火星探测计划，

1. 重返月球

阿波罗登月计划完成20多年后，美国人又要重返月球，据统计，参加阿波罗计划的工作人员前后牵涉达400万人，总耗资250亿美元，为什么不惜花费如此大的人力、物力去探测月球呢？归根到底，其目的在于了解、开发和利用月球，月球上有丰富的资源，是移民和开发宇宙的基地。

因此，美国宇航局(NASA)1993年制定了一项重返月球的计划。1994年美国空军发射了“克莱门汀”号无人驾驶试验飞船，“克莱门汀”号探测到月球地壳厚度及月球地面的硬度都存在很大差异，有人认为盆地内可能存在“冰湖”，可能是36亿年前的一颗彗星撞击月球后释放出来的水积累而致。月球南极有“冰湖”吗？其中的水是否来自撞月彗星呢？如果月球上真有水，月球移民便可成为现实，且用水制造氢和氧气作火箭燃料，建成月球宇航基地也可成为现实

为了揭开“冰湖”之谜，NASA于1998年元月7日，用“雅典-2”火箭在佛罗里达的卡纳维拉尔角航天中心发射了“月球勘探者”号无人驾驶飞船，探测月球到底有没有水的存在。这是1972年以来人类进行的首次月球飞行器探测活动

月球勘探者的中子谱的探测结果初步证实，在阴暗严寒的月球南北两极地区的月壤中，发现其中混有大量的水冰，按含水月壤0.5米厚计算，则两极含有1100万~3亿吨冰，因月壤应有2米左右厚，故算得的水冰达5亿吨。按地球上的用水量估算，3~5亿吨的水可供几万人用上100多年，且不需循环使用。

2. “卡西尼”号奔向土星

1997年10月15日，“卡西尼”号上星探测器由“大力神”火箭送入太空，开始了其奔向土星的漫漫旅程，这是人类继海盗号、先驱者号、旅行者号和伽利略号探测器之后，又一次宏伟的太阳系探测活动，是NASA和ESA为主的大型国际合作项目。该探测飞船直径3米，高7米，重6.4吨，携带不同功能的仪器27种，耗资34亿美元，它采用放射性元素钚为飞船的核动力(共带钚32公斤 因此遭到非议)，而

且采用“借力入轨”技术，即利用金星、地球和木星对它的巨大引力而一次次地获得加速，最终进入环土星轨道。1998年4月和6月，它二次飞经金星附近，1999年8月飞经地球，2001年飞经木星，2004年7月飞抵土星，然后对土星及其卫星进行4年的探测。

3 太阳观测卫星 SOHO

1995年12月2日上天的欧美“太阳及日球层观测平台”SOHO在联系中断一个半月后，于1998年8月5日恢复了联系它是迄今最精密的太阳观测卫星，重1850千克，带12种仪器。由15国的研究所和公司协作完成

SOHO上天两年多中全球12国的36个研究所进行了5万多次观测，得到了两大成果：(1)已经获得直接证据，说明有足够的磁能从太阳表面向上输入到日冕产生高温。高分辨率的仪器已观测到日面上有成千上万个零星磁场时现时灭和不断变化着——科学家称之为“磁毯”。它们形成的磁回路间的相互作用，造成电和磁的短路而释放磁能，日冕中炽热气体的增亮正是由日面众多的零星磁场变化而来。

(2)SOHO发现了太阳活动的一个新类型，即在太阳超米粒结构间，有一种短暂的闪烁亮斑，这就是太阳大气中的较小爆发。每个亮斑约有地球大小，发出的能量只有耀斑的百万分之一，但它们布满整个太阳，每个亮斑可持续几分钟。科学家们相信这有助于解释太阳连续不断喷发太阳风粒子流的原因。这些闪烁爆发也许就是等离子体加热、加速的地方，因而也可解释日冕高温。

三、全波段天文学

空间探测的第三个阶段是探测太阳系外天体发射的红外、紫外、 x 射线和 γ 射线辐射，打开了电磁波的各段窗口。太空观测不仅可得到清晰的光学观测结果，而且形成了射线、 x 射线、(远)紫外和红外天文学等新分支学科，发现了大量新的天体，获得了许多令人惊异的结果，展现了许多难以理解和极待进一步探讨的物理过程。

(一) 红外天文学

红外源是指那些辐射能量集中在红外波段，温度小于3000度的天体，它们在宇宙中存在应是比较普遍的

尽管各类天体都发射红外线，且太阳的红外线1800年就已发现，但由于没有灵敏的红外接收传感器和探测器，在150年中对天体的红外线辐射探测进展甚微。二战

后，随着各种红外天文望远镜及红外探测器和硫化铅光电导探测器、铋化镉光伏探测器、锗测辐射热计等的问世，用飞机、气球、火箭和人造卫星探测天体的红外辐射的红外天文学迅速发展，红外探测成为观测各类天体特别是恒星的早期和晚期演化、各种行星、星云及宇宙物质尘埃的强有力的手段。

用卫星红外探测可完全摆脱地球大气的影响，困难是很难使整套探测系统处于液氮温度。直到 1983 年 1 月 25 日，才由荷兰、美国和英国共同发射第一颗红外天文卫星 IRAS，上面装有一台液氮致冷的口径 60 厘米的望远镜，分别在 8-15 微米（用碲化硅探测器）、15-30 微米（用铋化硅探测器）、30-60 微米（用锗掺杂探测器）和 60-120 微米（用锗掺杂探测器）的 4 个波段上进行红外探测 10 个月，巡天观测复盖 96% 的天区，取得了惊人的成果：例如在火星和木星的轨道间发现 3 个绕日公转的尘埃粒子带；发现行星际空间的巨大漂浮尘埃云；发现 2455839 个红外源，其中 23 与银河系恒星相对应，65000 个与 H II 区、分子云、冷尘埃聚集物相对应，22000 个与河外星系相对应；获取大量正在形成新恒星的证据；观测到 5 个新彗星和 50 个太阳系外的行星候选者；测量了 3000 多颗小行星的红外反射光谱；直接观测到一个彗星与小行星相撞而化成一团烟尘的奇观等。1984 年，美国出版了《红外源总表》共载 1 ~ 1000 微米波段的一万个宇宙源的 85000 条观测资料和文献。

（二）紫外天文学和 γ 射线天文学

天体也有辐射紫外线的，但地球大气层只允许波长大于 3000 埃的近紫外线通过，而波长小于 3000 埃的紫外辐射必须在大气层外才能观测，所以直到 20 世纪 40 年代才用 V-2 火箭探测太阳的近紫外辐射。发射紫外辐射的天体与发射红外辐射的天体相反，它们都是温度极高、极为明亮的年轻恒星，2 万度以上的恒星辐射几乎全在紫外波段。空间探测除发现早型星有很强的连续谱和共振线谱外，对晚型星也观测到发射线，推测它们与太阳相似，具有色球和日冕大气结构。超新星遗迹也存在紫外辐射和线谱。

波长短于 0.1 埃，对应光子能量大于 10 万电子伏特的电磁辐射为 γ 射线。1958 年莫里森首先从理论上预言某些天体的强 γ 射线辐射，并最早提出了 γ 射线天文学的概念。太阳就是一个 γ 射线源。

1973 年美国的“维拉” 11、12 号卫星发现了 γ 射线爆发，它在极短时间内发出的能量高达 10 的 33 次方焦耳，其本质至今尚不知道，这是 20 世纪 70 年代天体物理学的重大发现。到 1978 年共发现这种 γ 射线爆发 89 次，每次爆发历时只有几秒到几十秒，没有重复性，没有对应体。

1975年8月，欧洲空间局发射“宇宙线卫星”B(COS-B)，在六年多的探测中，系统地对宇宙进行了 γ 射线探测，测出宇宙 γ 射线背景辐射，获得10万次 γ 射线记录，新发现20多个 γ 射线源。

1979年9月“高能天文台”HEAO-3号发射成功，它以探测天体的 γ 辐射和宇宙线为任务。宇宙中许多过程都能产生 γ 射线，例如宇宙线粒子同星际介质发生相互作用，宇宙中重元素的合成反应等，对 γ 射线的探测可以得到这些过程的信息，因此 γ 射线天文学的发展前途是美好的，但由于大部分天体 γ 射线流量低，并缺乏准确定位的 γ 射线探测器，因此目前 γ 射线天文学的发展不如x射线天文学快。

(3) 射线天文学

x射线源是发射x射线的天体，x射线波长0.1埃~100埃。1948年美国海军实验室首次发现太阳的强x辐射，1960年获得太阳的第一张x射线照片。1962年用“空蜂”火箭探测月球的萤光x射线时，意外地发现了天蝎座x-1这是探测到的第一个太阳系外的x射线源，从此开创了x射线天文学。20世纪60年代共发现x射线源约30个，以后又利用卫星进行探测。主要有：

——“自由号”卫星

第一个专门从事天体x射线辐射并取得丰硕成果的天文卫星是1970年12月美国的“自由号”(Uhuru)，在历时三年的探测中，完成了x射线波段的巡天观测和全天x射线源的分布图，发布了四个自由号x射线源表，其中最后一个4u表汇集231个x射线源。“自由号”还发现银河系中的许多x射线双星和第一个黑洞候选者天鹅x-1。

——高能天文台

1977年美国发射的“高能天文台”1号共有4个探测器。1978年11月，美国发射的“高能天文台”2号。

在高能天文台之后，还有一些x射线探测器上天，如前苏联的“量子1”、日本的“天鹅”“天马”“星系”“银河”和欧洲的EXOSAT卫星、美国的“天文”号卫星等。

1990年6月1日，德、美、英联合发射了“伦琴”卫星ROSAT，1996年发布伦琴卫星的巡天亮源表，包括18000多个位置精度在10"左右的x射线源，这给活动星系核、白矮星、激变变星等的找寻和光学证认提供了重要依据。

由日、美、英共同发射的“阳光”卫星(Solar-A)于1991年8月用日本火箭送入轨道，它也是x射线卫星，主要用于太阳耀斑的研究

20世纪90年代发射的重要的空间探测器，除哈勃空间望远镜(HST)外，还有1991

年 4 月 5 日美国宇航局 (NASA) 的康普顿 γ 射线天文台和 1995 年 11 月 11 日欧洲空间局 (ESA) 的红外天文台 (ISO) 卫星；“飞鸟” x 射线天文卫星 (ASCA) , 罗西 x 射线时变探测器 (RXTE) 和彼博 x 射线天文卫星 (BeppoSAX) 等。这些卫星的综合性能与以往的任何一个卫星相比, 有了数量级上的提高, 如红外天文台 (ISO) 是继 IRAS 以后的重要红外线探测器, 但它比 IRAS 有许多重要改进, 为了探测红外辐射, 航天器的仪器用液氮冷却到 -270°C 以下, 它可以检测出 100Km 距离上的冰块释放出来的热量, 分辨率更高, 工作波长范围更广。

1987 年国际天文联合会提出, 要对各种天体进行多波段的综合研究。因此全波段空间探测和全波天文学的前景广阔

四、星系和宇宙的新发现

20 世纪 80 年代天文学有许多重要发现, 举例如下:

1. 大红移现象

由于探测的广度和深度的不断扩大, 大红移的星系和类星体不断突破其红移记录。在星系方面, 1980 年最大红移是 3C180 的 $Z=0.99$, 1988 年的 4C41.17 的红移达 3.8。红移 3.8 所对应的星系退行速度是光速的 92%, 若取哈勃常数 $H_0=50$ 它所对应的宇宙年龄为现在的 10%。目前已发现第一个红移超过 5 的遥远星系, 在类星体红移方面, 1982 年以前认为类星体红移最大值在 3.5 附近, 但后来的观测结果却一再突破此记录。1986 年开始发现红移大于 4 的类星体, 1989 年 PG1158+4635 的 $Z=4.73$, 它所对应的类星体的年龄只有现在年龄的 7%, 是宇宙早期的天体。已发现红移大于 4 小于 5 的类星体 20 个。

2. 引力透镜

在河外天体的探测中, 发现一种“引力透镜”效应。这是指遥远的、往往是

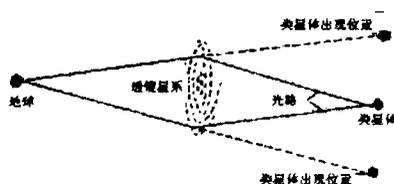


图 4-10 引力透镜示意

暗弱得不可见的前景星系，在其强大的引力作用下，把处在它后面的、更为遥远的、但光强可见的背景类星体的光波折射，产生透镜聚焦作用，将背景的单一类星体的像，聚焦为双重、三重像，甚至多重像或环形象(如图 4-10)的现象。环形像又称爱因斯坦环，前景星系一般具有强大的引力场，可能是大质量天体，如黑洞、夸克星之类。从 1979 年韦曼等 3 人发现第一个双重像的类星体 Q0957+561 以来，至 1989 年，共发现引力透镜(效应)至少 14 个。

引力透镜现象是了解宇宙的工具，诸如星系距离的确定和星系团中暗物质的分布、宇宙膨胀速率、类星体的演化等等，都可通过引力透镜现象的研究来解决，故天文学家希望找到更多的引力透镜。

3 毫秒级脉冲星

20 世纪 80 年代在脉冲星领域连续取得进展，发现脉冲星的总数超过 500 个，1982 年 9 月至 11 月，发现狐狸座射电源 4C21.53 (PSR1937+214)是一个脉冲周期只有 1.56 毫秒的射电脉冲星，该致密天体以每秒 642 次高速自转。1983 年判明它是密近双星的一个子星。这是发现的首例毫秒级脉冲星，是另一类脉冲星。80 年代发现毫秒级脉冲星后，人们认识到大多数毫秒级脉冲星是双星系统，射电双星和单星的比例达 10%。球状星团脉冲星的发现是 80 年代的重大成就，至 1990 年已在 M4、M5、NGC6760 等 12 个球状星团中用射电手段探测到 32 个脉冲星。在这 32 个脉冲星中，只有 2 个的脉冲周期是秒级，其余 30 个均是毫秒级周期，最短周期是 1.7858 毫秒。这就意味着发射脉冲的中子星在一秒钟内需自旋 560 圈。

4. 宇宙大尺度结构

20 世纪 80 年代以前，大爆炸宇宙学说和暴胀宇宙模型预言宇宙物质分布在整体上是各向同性的、均匀的，星系的成团现象——宇宙的不均匀性只是小范围的情景，这种范围和物质结构的规模不会超过 1 亿光年。但是最近十几年来的观测结果表明，也须对上述看法予以修正。

(1) 宇宙空洞：

第一个观测事实是，既然星系是成团的，那么一定存在没有星系分布的地方。1981 年 4 个美国人宣布他们在牧夫和大熊座之间的辽阔天区发现一个直径 3 亿光年的巨大宇宙“空洞”，在这个空洞里观测不到星系，此空洞距离我们 6 亿光年。后来发现宇宙中的空洞很多，到处皆是。

(2) 长纤维微结构：

第二个观测事实是 1983 年发现天猫—大熊狭长超星系团横跨天空 45° ，但在地球上的投影的宽度平均为 1.7° ，它还与另一侧的链状双鱼—英仙超星系团有隐带相

连，隐带长 35° ，这样我们看到的是从东到西横跨近 180° 的项圈式狭长星系团链，长达 7 亿光年，它们距太阳 2 亿光年，含有 10 万个星系。这种大尺度长纤维结构的星系分布，在武仙座和巨蟹座星系团中也存在。

(3) 宇宙长城和泡状结构：

第三个观测事实揭示星系都分布在一 条不规则的环形周界上，周界围着一个空洞，星系的结构呈纤维状和薄片状，分布呈泡沫状；盖勒和赫恰拉又测量了其它 8 个天区，测量结果仍然是星系绵延 3 亿光年以上，显示宇宙中存在至少长 5.5 亿光年、宽 1.96 亿光年、高仅 1600 万光年的“宇宙长城”众多的星系组成的“长城”，构成了“宇宙空洞”的洞壁

到 1992 年初，在“长城”领域内已发现 4000 多个星系。由此可见星系只是分布在空洞与空洞的交界面上，这样从大范围看来，宇宙是一个个泡状结构构成。空洞周围由众多星系组成的纤维状超星系团包围，构成了宇宙大尺度结构的基本格局

5. 1987A 超新星

离我们最近的河外星系大麦哲伦云中，1987 年 2 月 23 日出现了一颗超新星 1987A。这是自 1609 年望远镜诞生后在地球上所见的最亮的超新星，最亮时由原 12 等达 3.6 等，是难得一见的天象。正因为距离近，天文学家运用多种波段探测器进行了三年多的光度、光谱、偏振、红外和射电跟踪探测和研究，取得了初步成果。

6. 太阳系外的行星系

1983 年，IRAS 在连续 10 个月的红外巡天中，对太阳系外行星系的探索取得突破性的进展，估计在银河系中 10 的 11 次方个成员星中具有星周盘、环或星周晕的恒星不少于 1 亿个，能演化为行星系的也有 1 百万个。进入 20 世纪 90 年代，终于传来了好消息，1995 年 10 月 16 日，瑞士的梅厄和奎洛兹宣布，发现飞马座 51 星有一颗相当于半颗木星质量的行星；继梅厄和奎洛兹发现飞马座 51 的行星 51B 后，1996 年初，马西和巴特勒又宣布发现两颗太阳系外行星，大熊座 47B 和室女座 70B 这些发现都有待于进一步确认

太阳系外行星发现的信息令人鼓舞。随着计算机技术和观测手段的提高，发现地外生命也只是个时间问题，乐观地估计不超过 25 年。

第五章

研究人类家园的唯一科学 ——地球科学

地球是浩瀚的宇宙中一颗璀璨的行星，是亿万种生命的摇篮，是唯一适合人类生存的美好家园，地球不是一颗简单单一的星球，而是一个由固体地球、水圈、生物圈和大气圈等一系列同心圈层构成的地球系统，给人类提供了空间、环境、资源等一切赖以生存与发展的条件。

据现有资料，地球已有 46 亿年的演化历史。自有人类以来，人类为了保证自身的生存与繁衍，不断探索地球的奥秘，人类的智慧、文明和科学技术正是从这样无穷无尽的探索中产生出来的。长期以来，人类在发展自身的历程中，对地球的索取远远超过了对它的关爱与保护。这种人地关系的失衡导致了今天的资源、环境、生态和人口等问题，并对人类生存与发展构成了威胁。这些问题的解决，人地关系的调整，有赖于地球科学的发展。因此，地球科学已成为保障人类生存的科学，发展和普及地球科学是关系到中华民族乃至全人类繁荣昌盛的意义深远的战略。只有使全社会每个公民，特别是决策层了解地球，懂得人类只有和地球和谐共处，使关爱与保护地球成为行为的准则时，人类才能真正摆脱愚昧和无知，创建最美好的文明生活。

第一节 什么是地球科学

一、地球科学的学科分类体系

地球科学以地球的整体为研究对象，包括自地心至地球外层空间十分广阔的范围，是由固体地圈（包括岩石圈、地幔和地核）、大气圈、水圈和生物圈（包括人类本身）组成的一个开放的复杂的巨大系统，称为地球系统。地球系统内部既存在不同圈层（子系统）之间的相互作用，也存在人与地球系统之间的相互作用。因此，地球科学是一个庞大的超级学科体系群，根据实际研究的不同圈层范围、内容特色和服务目的，传统上划分出众多的一级和二级学科分类体系（见表 5-1）

表 5-1 地球科学的学科分类体系

| 按圈层范围 | | 按学科交叉 | | 按服务目的 |
|-------|------------------------------------|-------|------------------------------|---|
| 大气科学 | 大气物理学 气象学 天气动力学 | 地球物理学 | 固体地球物理学 地磁与高空物理学 地震学 | 环境地学 经济地学 工程地学 水文地学 遥感地学 航空地学 城市地学 农业地学 旅游地学 军事地学 火山学 天气预报 地震预报 灾害学等 |
| 海洋科学 | 物理海洋学 生物海洋学 环境海洋学 | 地球化学 | 元素地球化学 同位素地球化学 生物地球化学等 | |
| 地理科学 | 自然地理学 经济地理学 人文地理学 区域地理学等 | 地生物学 | 生态学 生物地理学 古生物学 | |
| 地质科学 | 地球物质成分学 动力地质学 历史地质学 区域地质学 | 天文地学 | 天文地球动力学 行星地理学 天文地质学等 | |
| | | 数学地学 | 数学地质 数字地球等 | |

二、地球科学主要分支学科简介

（一）地质学简介

1 地质学的研究对象

地质学的研究对象是庞大的地球及其悠远的历史，地质学是关于地球的物质组成、内部构造、外部特征、各层圈之间的相互作用和演变历史的知识体系。地球自形成以来，经历了约 46 亿年的演化过程，各个层圈均在不断演变。约在 35 亿年前地球上出现了生命现象。最晚在距今 200~300 万年前，开始有人类出现。地球的平均半径为 6371 千米，其核心是以铁、镍为主的金属，称为地核，半径约 3400 千米。在地核之外，是厚度近 2900 公里的地幔。地幔之外是薄厚不一的地壳，已知最厚处为 75 千米，最薄处仅 5 千米左右，平均厚度约 35 千米。地壳表面的海洋、湖泊、河流等水体约占地表总面积的 74%。成液态的地表水与冻结在两极地区和高山上的冰川，以及土壤、岩石中的地下水，组成地球的水圈。地球的外层是大气圈，大气主要集中于高度不超过 16 千米的近地面中，成分以氮和氧为主。离地越远，大气越稀薄，成份也随之有变化。地球的水圈和大气圈通过水的蒸发、凝结、降水和气体的溶解、挥发等方式互相渗透和影响。固体的地球界面上下，是大气和水活动的场所，岩石圈的物质也不断运动，并通过火山喷发的形式进入水圈和大气圈。地球各圈层的相互作用不断改变着地球的面貌。

2. 地质学的研究方法

地质学的研究方法主要是通过一定比重的野外实际调查，但也要配合相应的室内研究。随着生产和科学技术的发展，20 世纪中叶以来地质学的研究中引入了大量的新技术、新方法，如不同的地球物理勘探方法、地球化学勘察方法、科学深钻技术、同位素地质方法、航空以及遥感地质方法、现代电子计算机技术、高温高压模拟试验等的采用。物理、化学等基础科学新的成就的引用 地球物理、地球化学、数学地质、宇宙地质学等地质科学中边缘学科的进一步发展，推动了地质学的发展，同时使地质学的研究方法不断地革新。

（二）地理学简介

地球是人类在宇宙中生存、发展的唯一家园，人类一直都十分关心自己赖以生存和发展的地球表面的状况，从而萌生出各种地理概念。随着人类社会的发展，地

理知识的积累，逐步形成一门研究地球表面自然现象和人文现象，以及它们之间的相互关系和区域分异的学科，这就是地理学。简单地说，地理学就是研究人与地理环境关系的学科，研究的目的是为了更好的开发和保护地球表面的自然资源，协调自然与人类的关系。

1. 地理学的发展历程

地理学是一门既古老又年轻的学科。在其发展过程中，明显地形成了古代地理学、近代地理学和现代地理学三个时期。

自远古至 18 世纪末，是古代地理学时期，主要以描述性记载地理知识为主，而且这些记载多是片断性的，缺乏理论体系，地理学内部尚未出现学科分化，各国的地理学基本上是在本国封闭的条件下发展起来的。在早期，以中国和古希腊的成果最显著。中国的《尚书·禹贡》、《管子·地员》、《山海经》、《水经注》等著作，都是世界上比较早的地理学史料。到了后期，欧洲地理大发现涌现出了哥伦布、达伽马、麦哲伦等地理探险家，他们的发现极大地推动了地理学的发展

从 19 世纪初到 20 世纪 50 年代，是近代地理学时期。近代地理学形成的标志是德国洪堡德的《宇宙》和李特尔的《地学通论》两书的问世。近代地理学是产业革命的产物，是随着工业社会的发展而成熟起来的这一时期，各种学说分起、学派林立。地理学的各部门学科几乎都在这个时期出现和建立，因此也是部门地理学蓬勃发展的时期。洪堡德为自然地理学、植物地理学奠定了基础，以后德国的李希霍芬、法国的德马东为自然地理学的发展做出了重要的贡献；美国的戴维斯和德国的彭克分别创立了侵蚀轮回学说和山坡平行后退理论，标志着地貌学的建立；奥地利沃汉恩的《气候学手册》、俄国沃耶伊科夫的《全球气候及俄国气候》、德国柯本的世界气候分类，为气候学奠定了基础；英国的华莱士对世界动物区划分为动物地理学奠定了基础；俄国道库恰耶夫的土壤地带学说为土壤地理学奠定了基础；李特尔和德国的拉采尔建立了人文地理学，等等。

从 20 世纪 60 年代至今是现代地理学时期。现代地理学是现代科学技术革命的产物，并随着科学技术的进步而发展，其标志是地理数量方法、理论地理学的诞生和计算机制图、地理信息系统、卫星等应用的出现。现代地理学强调地理的统一性、理论化、数量化、行为化和生态化。随着科学技术的进步、各国各地区经济开发和建设以及环境管理和保护的需要，地理学将成为一门有坚实的理论基础、应用理论的基础性学科，也是一门与生产实际紧密联系的应用性学科

2. 地理学的研究对象

地理学研究的是地球表面这个同人类息息相关的地理环境，地理学者曾用地理

壳、景观壳、地球表层等术语称呼地球表面。它是地球各个层圈大气圈、岩石圈、水圈、生物圈和人类圈相互交接的界面，具有一定的面积和厚度。在地球表面，各种自然现象和人文现象组成一个宏大的地表综合体，它具有以下的特征：

一方面，地球表面是由五个同心圈层组成的整体，它们分别是大气对流层、岩石圈上部、水圈、生物圈和人类圈。大气对流层主要由气态物质组成，也包括部分液态水和固体颗粒。由于对流层同地面和水面接触，因此大气中各种要素都受到下垫面的强烈影响；岩石圈上部主要由固体物质组成，包含部分气态、液态物质和微生物，它是生物和人类所依附的场所，也是各种圈层相互影响、相互作用最集中的地方；水圈主要由液态水组成，以海洋为主还有陆地地表水和地下水。水圈在地球表面物质和能量循环中起着十分重要的作用，它是生物圈和人类圈得以生存和发展的基础；生物圈是有生命活动的圈层，包括植物、动物和微生物。生物圈同大气对流层、岩石圈上部、水圈相互交错，组成一个巨大的复杂的自然综合体；人类的出现是地球表面形成和发展过程中的一个重要转折，人类以其特有的智慧和劳动，通过社会生产和生活的各个方面对地球表面施加影响，创造了一个新世界，并发展成为一个新的层圈——人类圈。上述各层圈所组成的地球表面综合体，是自然历史发展的结果，各层圈的形成在实践上亦有一定的顺序：岩石圈、大气圈和水全是无机的物质，首先出现；有机的生物圈及其相关的土壤，是在无机圈层基础上发展起来的；人类则是生物圈发展到一定阶段的产物。这种发展的动力来自于地球内部和外部力量——太阳能。

另一方面，地球表面是一个不均一的层面，存在着明显的区域分异。造成地球表面不均一和区域分异的主要原因，是太阳能在地球表面分布的不均匀性和地球内能分布的不均匀性。人类是在一定的自然地理环境中生存和发展的，因此人类的体制和社会、政治、经济、文化等活动都存在着明显的区域差异。比如人种的差异、生活方式的差异等等。并且，地球表面也是在不断变化的。在地球表面形成过程中，大陆与海洋的面积和位置几经变迁，气候历经了炎热与寒冷、湿润与干旱的多次交替，生物由海洋发展到陆地，有简单到复杂、由低级到高级……。自然地理的变化影响人文地理、人文地理也反作用于自然地理。特别是在现代工业化时期，人类的活动是地球表面发生深刻的变化，一方面控制或减轻了某些自然灾害，另一方面诸如森林的砍伐、污染、荒漠化等等情况的出现，破坏了自然生态系统的平衡。随着人口的急剧增加、资源的大量消耗，人类的影响程度还在加剧。

3 地理学研究的特点

地理学是在研究地球表面的过程中逐渐形成的，并不断完善其理论、方法和手

段作为研究对象的地球表面是一个多种要素相互作用的综合体，这决定了地理学研究的综合性特点。地理学不限于研究地球表面的各个要素，更重要的是把它作为统一的整体，综合地研究其组成要素及它们的空间组合。它着重于研究各要素之间的相互作用、相互关系以及地表综合体的特征和时、空变化规律。地理学的综合性研究分为不同的层次，层次不同，综合的复杂程度也不同。高层次的综合研究，即人地相关性的研究，是地理学所特有的。综合性的特点决定了地理学是一个横断学科，它与研究地球表面某一个层圈或某个层圈中部分要素的学科都有密切的关系，如研究大气的大气物理、研究岩石圈的地质学、研究人类圈的政治学、心理学等等。地理学从这些学科中吸取有关各种要素的专门知识，反过来又为这些学科提供关于各种要素及与其它现象间联系的知识。

地球表面自然现象和人文现象空间分布不均匀的特点，决定了地理学研究又有区域性的特点。由于不同的地区存在不同的自然现象和人文现象，一种要素在一个地区呈现出的变化规律在另一个地区可能完全不同，因此研究地理区域就要剖析不同区域内部的结构，包括不同要素之间的关系及其在区域整体中的作用，区域之间的联系，以及它们之间发展变化的制约关系。地理区域性研究的内容包括区域内部结构和区际关系两个方面。地理学的区域研究根据研究对象的范围分为三个尺度：大尺度区域着重探讨全球或全大陆范围内的分异规律和内部结构特征，从而揭示全球或全大陆的总特征；中尺度区域研究是分析国家或大地区范围内区域总特征和地域分异规律，以及该地区对大尺度区域分异的作用；小尺度区域是揭示局部地区区域特征和分异规律，以及该地区对中尺度区域分异的作用。

地球表面不断变化的特点，决定了地理学必须用动态的观点进行研究。地理学研究及注重空间的变化，也注意时间的变化。这种变化既有周期性的又有随意性的；有长周期的，也又短周期的。用动态的观点研究地理学，就要求把现代地理现象作为历史发展的结果和未来发展的起点，研究不同发展时期和不同历史阶段地理现象的规律。现在现代地理学已经有可能对于某些区域的未来发展提出预测，并根据预测结果进行控制和管理，以满足人们对区域发展的要求。因此，时间和空间统一的概念，在地理学研究中越来越受到重视。

地球表面的复杂性决定了地理研究方法的多样性。现代地理研究主要采用野外考察与室内实验、模拟相结合的研究方法。地理学的研究对象是地球表面，关于地球表面的属性和特征的资料主要来自于野外考察，随着航空遥感、气象卫星、地球资源卫星、航天技术的成果广泛应用于地理学研究，提高了野外考察的速度和精度。地理数据的处理、各种地理现象的实验室模拟等也迅速地发展起来，这不仅大大提

高了工作效率，也促进了地理学的快速发展。

(三) 大气学简介

大气圈，特别是地球表面的低层大气，以及和它相关的水圈、岩石圈、生物圈是人类赖以生存的主要环境。如何认识大气中的各种现象，如何及时而又正确地预报未来的天气、气候，并对不利的天气、气候条件进行人工调节和防御，是人类自古以来一直不断探索的领域。

大气科学是研究大气的各种现象及其演变规律，以及如何利用这些规律为人类服务的一门学科。它的研究对象主要是覆盖整个地球的大气圈，此外也研究太阳系其他行星的大气随着科学技术和生产的迅速发展，大气科学在国民经济和社会生活中的巨大作用日益显著。

1. 大气科学简史

大气科学是一门古老的学科，有关天气、气候知识起源于长久的生产劳动和社会生活的经验之中。早在渔猎时代和农业时代，人们就逐渐积累起有关天气、气候变化的知识。

17世纪以前，人们对大气以及大气中各种现象的认识是直觉的、经验性的。17~18世纪，由于物理学和化学的发展，温度、气压、风和湿度等测量仪器的陆续发明，氮、氧等元素的相继发现，为人类定量地认识大气的组成、大气的运动等创造了条件。于是，大气科学研究开始由单纯定性的描述进入了可以定量分析的阶段。这是大气科学发展进程中的一次飞跃。

1820年，在气压、温度、湿度、风等气象要素的测定和气象观测站网逐步建立条件下，布兰德斯绘制了历史上第一张天气图，开创了近代天气分析和天气预报方法，为大气科学向理论研究发展开辟了途径。这是大气科学发展史上的又一次飞跃。

1835年科里奥利力的概念和1857年白贝罗提出的风和气压的关系，成为地球大气动力学和天气分析的基石。1920年前后，气象学家皮耶克尼斯、索尔贝格和伯杰龙等提出的锋面、气旋和气团学说，为天气分析和预报1~2天以后的天气变化奠定了理论基础。

20世纪30年代无线电探空仪开始普遍使用，这就能够了解大气的铅直结构，真正三度空间的大气科学研究从此开始。根据探空资料绘制的高空天气图，发现了大气长波。1939年气象学家罗斯比提出了长波动力学，并由此引出了位势涡度理论。这不仅使有理论依据的天气预报期限延伸到3~4天，而且为后来的数值天气预报和大

气环流的数值模拟开辟了道路

1946年朗缪尔、谢弗和冯内古特的“播云”试验，探明了在过冷云中播撒固体二氧化碳或碘化银，可以使云中的过冷水滴冰晶化，增加云中的冰晶数目，促进降水，从此进入了人工影响天气的试验阶段。

20世纪50年代以前，大气科学虽然取得了很大的进展，但因受海洋、沙漠等人烟稀少地区缺乏资料的限制以及计算上的困难，还不能摆脱定性或半定性的研究状态。50年代以后由于各种新技术特别是电子计算机和气象卫星的采用，大气科学有了突飞猛进的发展。由于采用气象卫星、气象火箭和激光、微波、红外等遥感探测手段以及各种化学痕量分析手段等新技术，对大气的观测能力增强了，观测空间扩展了。

气象卫星、新型气象雷达、飞机等探测手段联合应用，为开展各种规模的综合观测试验，为早期发现和追踪台风及生命史短至几小时的小尺度灾害性天气系统，为提高短期和短时预报水平，以及改进中期预报提供了条件。气象卫星在大气层外探测大气，不仅加大了观测范围，而且极大地丰富了观测内容，如广阔洋面的温度、云的微观结构、大气的辐射平衡等。气象卫星已成为现代大气科学发展的支柱之一。

电子计算机的使用，使大气科学研究进入了定量和试验研究的新阶段。大气的各种现象，大至全球的大气环流，小至雨滴的形成过程，都可以依照物理和化学原理以数学形式表达，然而只有用电子计算机才可能进行运算并模拟这些现象的发生、发展和消亡的过程。此外，科学技术的发展，人类往往需要了解几星期、几个月甚至一年以上大气可能出现的状态。这也需依靠高速计算机获取和处理全球资料，以全球模式来进行天气预报和气候预报。电子计算机是现代大气科学发展的另一个支柱。可以预期下一代甚至再下一代最大的电子计算机将首先用于大气科学。

2. 大气科学的内容

大气科学的研究对象——地球大气，无论它的组分，它的结构，还是它的运动，都存在着确定性和不确定性两个方面，这正是大气科学研究复杂性的一面。

覆盖整个地球的大气，质量约五千三百万亿吨，约占地球总质量的百万分之一。由于地心引力的作用，大气质量的90%聚集在离地表15公里高度以下的大气层内，99.9%在48公里以内。2000公里高度以上，大气极其稀薄，逐渐向星际空间过渡，无明显上界。

地球大气的组分以氮、氧、氩为主，它们占大气总体积的99.96%。其他气体含量甚微，有二氧化碳、氟、氖、氦、甲烷、氢、一氧化碳、氙、臭氧、氦水汽等。大气中还悬浮着水滴、冰晶、尘埃、孢子、花粉等液态、固态微粒。

太阳系的九大行星，都存在大气

大气中的二氧化碳含量受植物的光合作用、动物的呼吸作用、含碳物质的燃烧以及海水对二氧化碳的吸收作用所影响，化石燃料(如煤、石油、天然气) 燃量增加，森林覆盖面积减少的情况下，已观测到二氧化碳含量与年俱增。大气中本来没有或极少存在的如甲烷、氧化二氮等气体，由于人类活动的影响，近年来它们的含量也迅速增加。这些有温室效应的气体含量的变化对大气温度的重要影响，已成为研究现代气候变化的一个前沿课题

大气中臭氧的含量极少，即使在离地表 20~30 公里的浓度最大处，其含量也不到这层大气的十万分之一，然而大气臭氧层能够大量吸收太阳紫外辐射中对生命有害的部分，对人类起着十分重要的保护作用。另外，大气臭氧层的存在，对平流层大气的温度也有重要作用由于人类活动对高空光化学过程的影响会引起臭氧含量的变化，人类活动对臭氧含量影响的研究，已成为医学界和气象学界共同关注的问题

整个大气圈通过各种机制相互紧密地联系在一起，形成了空间尺度小至几米以下、大至几千公里甚至上万公里，时间尺度短至几秒、长至数十天或更长时间的多种大气运动系统。在影响大气运动的因素中，人为的因素在变化着(如工农业生产引起大气中有温室效应的气体增加，大面积森林砍伐等)，自然的因素也在变化着(如火山爆发等引起辐射能的变化，地球自转轴方向的变化等)，大气的运动也就呈现出既有规律性又有随机性的特点。

大气圈以外，还存在着水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈这些圈层组成一个综合系统。大气圈中发生的各种变化都受其他圈层的影响；反之，大气圈也影响着其他圈层的变化。研究大气运动的能源，大气中的物质循环、能量转换和变化过程，大气环流及天气、气候的分布和变化，都必须考虑大气圈同水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈之间的相互影响和相互作用

大气圈不是孤立的，在空间和时间上具有宽广尺度谱的各种大气现象也不是孤立的它们种类繁多，相互叠加又相互影响。即使同一类现象，其结构也不尽相同。影响这些大气现象的因素非常复杂，人类至今还很难在实验室内用人工控制的方法对它们进行完整的实验和研究。只能以大自然为实验室，组织从局地到全球的气象观测网，运用多种观测手段对大气现象进行长期的连续的观测，特别是定量的观测，以获取资料；对有关气候现象还需搜集地质考查、考古发掘和历史文献等资料

大气科学家们通过对大量资料的综合，提炼出量与量之间的定性的或定量的关系，归纳出典型现象的模式特征，如锋面、气旋、大气长波等。在模式的基础上运用已知的物理学和化学的基本原理，以及数学工具和计算技术进行理论上的演

绎和模拟，导出新的结论理论模式是否合理，还需回到大自然的实验室中进行检验，有些理论模式还有待于新的观测资料加以证实

全球大气在不停地运动着，而且是一个整体为掌握大气运动变化快、范围广、形式多的特征，就必须对大气进行连续的、高频率的、全球性的观测全球数以万计的为天气预报进行观测的气象站，要在相同的时间、用接近相同的仪器和观测方法，在全球各地进行同步观测；由气象卫星、气象雷达等探测手段观测的大量资料，凡用于天气预报业务的资料还要作同步处理

所有资料都要在观测完毕后的短短数十分钟内迅速集中到世界气象中心和各国的气象中心，再加上为数更多的水文气象站的观测资料。资料的范围之大、数量之多、传递之快是惊人的，这是自然科学中的奇观。这一切只有通过国际间的密切合作才能实现。

（四）海洋学简介

在太阳系的行星中，地球处于“得天独厚”的位置。地球的大小和质量、地球与太阳的距离、地球的绕日运行轨道以及自转周期等因素相互的作用和良好配合，使得地球表面大部分区域的平均温度适中，以致它的表面同时存在着三种状态(液态、固态和气态)的水，且绝大部分是以液态海水的形式形成一个全球规模的含盐水体——世界大洋。因此，我们的地球又称为“水的行星”。全球海洋总面积约 3.6 亿平方千米，约占地表总面积的 71% 全球海洋的平均深度约 3800 米，最大深度 11034 米。全球海洋的容积约为 13.7 亿立方千米，占地球总水量的 97% 以上。如果地球的地壳是一个平坦光滑的球面，那么就会是一个表面被 2600 多米深的海水所覆盖的“水球”。

海洋科学是研究海洋的自然现象、性质及其变化规律，以及与开发利用海洋有关的知识体系它的研究对象是占地球表面 71% 的海洋，包括海水、溶解和悬浮于海水中的物质、海洋中的生物、海底沉积和海底岩石圈，以及海面上的大气边界层和河口海岸带等。海洋科学的研究领域十分广泛，其主要内容包括对海洋的物理、化学、生物和地质过程的基础研究，海洋资源开发利用，以及海上军事活动等的应用研究。由于海洋本身的整体性、海洋中各种自然过程相互作用的复杂性和主要研究方法、手段的共同性而统一起来，使海洋科学成为一门综合性很强的科学。

1. 海洋学简史

人类认识海洋的历史，是在沿海地区和海上从事生产活动开始的。古代人类已具有关于海洋的一些地理知识。但直到 19 世纪 70 年代，英国皇家学会组织的“挑

战者’号完成首次环球海洋科学考察之后，海洋学才开始逐渐形成一门独立的学科。20世纪50~60年代以后，海洋学获得大发展，形成为一门综合性很强的海洋科学。

从古代到18世纪末是海洋知识的积累时期，也是海洋学萌芽时期。在科学不发达的古代，人们对海洋自然现象的认识和探索，主要依靠很不充分的观察和简单的逻辑推理。虽然当时只限于直观地、笼统地把握海洋的一些性质，但也提出了不少精彩的见解。

从15世纪到18世纪末，自然科学和航海事业的发展，促进了海洋知识的积累。这时的海洋知识以远航探险等活动所记述的全球海陆分布和海洋自然地理概况为主。1405~1433年中国明朝郑和率领船队七次横渡印度洋；1492~1504年意大利航海家哥伦布4次横渡大西洋，并到达美洲；1519~1522年葡萄牙航海家麦哲伦等完成了人类历史上第一次环球航行；1768~1779年英国库克在海洋探险中最早进行科学考察，取得了第一批关于大洋表层水温、海流和海深以及珊瑚礁等资料。这些活动和成果，不仅使人们弄清了地球的形状和海陆分布的大体形势，而且直接推动了近代自然科学的发展，为海洋学各个主要分支学科的形成奠定了基础。

19世纪初到20世纪中叶，机器大工业的产生和发展，有力地促进了海洋学的建立和发展。英国科学家、生物进化论的创始人达尔文在1831~1836年随“贝格尔”号环球航行，对海洋生物、珊瑚礁进行了大量研究，于1842年出版《珊瑚礁的构造和分布》，提出了珊瑚礁成因的沉降说；于1859年出版《物种起源》，建立了生物进化理论。

1872~1876年，英国“挑战者”号考察被认为是现代海洋学研究的真正开始。“挑战者”号在12万多公里航程中，作了多学科综合性的海洋观测，在海洋气象、海流、水温、海水化学成分、海洋生物和海底沉积物等方面取得大量成果，使海洋学从传统的自然地理学领域中分化出来，逐渐形成独立的学科。1925~1927年，德国“流星”号在南大西洋的科学考察，第一次采用电子回声测深法，测得七万多个海洋深度数据等资料，揭示了大洋底部并不是平坦的，它像陆地地貌一样变化多端。同时，海洋物理学、海洋化学、海洋地质学和海洋生物学等各基础分支学科的研究也取得显著进展，发现和证实了一些海洋自然规律。

1957年，海洋研究科学委员会(SCOR)和1960年政府间海洋学委员会(IOC)的成立，促进了海洋科学的迅速发展。美国的深潜器“的里雅斯特2”号1960年曾深潜到10919米的海洋深处，美国核潜艇“鸚鵡螺”号1950年从冰下穿越北极，表明海洋的任何部分都能为人类所征服。但是，1963年美国潜艇“脱粒机”号和1960

年“蝎子”号失事，全体乘员丧生，又从反面证明海洋环境仍然是难以掌握的。事实上，从技术的角度来说，人类要在深海海底上行走比在月球上漫步还要困难。

海洋科学各分支学科之间、海洋科学和相邻基础科学之间的相互结合、相互渗透，并逐步形成了一系列跨学科的有高度综合性的研究课题。例如，海洋 - 大气相互作用和长期气候预报、海洋生态系统、海洋中的物质循环和转化、洋底构造以及有关海洋与地球的起源、海洋生命起源这样一些根本问题。

20世纪60年代以来海洋科学中所有的重大进展都同新的观测仪器、研究手段和方法的研制成功，以及广泛而密切的国际合作有关例如，卓有成效的海洋观测，数据传输、处理系统的应用，航天遥感、遥测技术和水声技术的应用，国际地球物理年、国际印度洋考察、黑潮及邻近水域的合作研究、国际海洋考察十年、全球大气研究计划大西洋热带实验、深海钻探计划，以及世界（海洋科学）资料中心的建立等国际性海洋科学合作研究。

2. 海洋学研究的特点

海洋科学具有明显的区域性特征，即使是同一区域，海洋、水文、化学要素及生物分布也是互相各异、多层次性的。因此，很难在实验室里对各类海洋现象和过程，以及它们之间的相互作用进行精细的实验，也不能只靠数学分析和数学模拟来进行研究，而是要充分利用科学设备在自然条件下进行观察研究。

直接的观察研究，既为实验室研究和数学研究的模式提供确切的可靠资料，又可以验证实验室和数学方法研究结论的可靠性。因此，在自然条件下进行长期的、周密的、系统的海洋考察是海洋科学研究的基本方法。

在海洋科学研究中，海洋观测仪器和技术设备起着重要的作用，有时甚至是决定性的作用。海水深而广，具有大密度和流动性，给人们的直接观测带来极大困难。从海面向下大约每增加10米，压力就要增加一个大气压，在万米深处，海水的压力作用可以把潜水钢球的直径压缩几个厘米，人类很难在这样大的深处活动。即使在海洋上层，海水处于不断的流动和波动状态，依靠一个点上的观测资料，也很难说明面上的情况。因此，只有大力发展海洋观测仪器和技术设备，才能取得所需要的大量海洋资料，以推动海洋科学的发展。

20世纪60年代以来，海洋科学的发展表明，几乎所有主要的重大进展都和新的观察实验仪器、装备的建造，新的技术的发明和应用，观察实验的精度，以及数据处理能力的提高有紧密关系。例如，浮标观测技术、航天遥感技术和计算技术的应用，促成了关于海洋环流结构、海 - 气相互作用、中尺度涡旋、锋区、上升流、内波和海洋表面现象等理论和数值模型的建立；回声测深、深海钻探、放射性同位

素和古地磁的年龄测定、海底地震和地热测量等新技术的兴起和发展，对海底扩张说和板块构造说的建立作出了重要贡献。

海洋科学的观察主要是在自然条件下进行的，因而受到自然条件的限制。各种海洋现象和过程，有的“时过境迁”，有的“浩瀚无际”，有的因时间尺度太长，短时间的观测资料不足以揭示其历史演变规律。加之其中各种作用相互交叉、随机起伏，因此在自然条件下的观察只能获得关于海况的一些片断的、局部的信息。即使获得某一海区近百年的海况和海洋生物种群动态的观测序列，那也只是整个海洋生态环境和生物种群动态总体中的一个小小的样本。所以在海洋科学研究中比较着重于从信息论、控制论和系统论的观点，研究海洋现象和过程的行为与动态，并根据已有的信息，通过系统功能模拟模型进行研究，对未来海况作出预测。

第二节 地球科学撷英

在地球科学的发展过程中，有很多大家感兴趣的问题，由于篇幅所限，在这里只能介绍几个世人瞩目的重要焦点问题。

一、地理大发现与南极探险

（一）地理大发现

地理大发现是指 15~17 世纪，欧洲航海者开辟新航路和“发现”新大陆的通称，它是地理学发展史中的重大事件。

应该说，任何一个文明民族的代表人物首次到达地球表面某个前所未有的部分，或者确定了地表各已知部分之间的空间联系，因而加深人类对地球地理特征的科学认识，促进了地理学的发展，均可以称为地理发现。

在 15 世纪之前，只有南极洲这样的无人居住的大陆和某些岛屿、海域为人类所未知。而居住着未开化民族的陆地和岛屿，则只对“文明民族”而言是前所未有的。从各文明古国的产生到 15 世纪的漫长时期，各文明民族在古代文化发源地以外的广大区域已完成了许多发现，积累了丰富的地理知识，其中最重要的是形成了大地球形的概念。

1409年，湮没了1000多年的托勒密《地理学指南》被译为拉丁文后，大地球形说广泛传播。但是古代学者没有可能直接验证地球的形状，也很少可能精确地测定地球的大小和海洋陆地的分布。15~17世纪，由欧洲通往印度新航路的发现、美洲的发现、环球航行的成功以及其他航海探险活动，圆满地解决了这个问题，使人类对地球的认识产生飞跃，这些事件被通称为地理大发现。

在西欧，葡萄牙首先发起了大规模的航海探险活动。15世纪早期，航海家亨利亲王创办地理研究机构，为取得黄金、象牙和奴隶，组织了多次非洲西岸的探险活动，先后发现了马德拉岛、佛得角群岛，并从直布罗陀沿非洲西海岸到达几内亚湾。

1473年，葡萄牙船只驶过赤道，后达到刚果河口；1487年，迪亚斯的探险队到达非洲南端，发现好望角，并进入印度洋；1497年，以达伽马为首的船队沿迪亚斯航线继续向前，经非洲东岸的莫桑比克、肯尼亚，于1498年到印度西南部的卡利卡特，开辟了从大西洋绕非洲南端到印度的航线，从而打破了阿拉伯人控制印度洋航路的局面。葡萄牙通过新航路，垄断了欧洲对东亚、南亚的贸易，成为海上强国。

与葡萄牙人探寻新航路的同时，西班牙统治者也极力从事海外扩张。哥伦布发现美洲，就是这种扩张的最重要收获。

哥伦布相信大地球形说，认为从欧洲西航可达东方的印度和中国。哥伦布的西航计划得到西班牙国王和王后的支持。1492年，他携带着西班牙国王和王后致中国皇帝的国书，率领船队从帕洛斯港出发，经加那利群岛后向西航行，先后到达巴哈马群岛和古巴、海地等岛。但是，哥伦布误以为巴哈马群岛是印度的辖地，把当地土著居民称为印第安人，并误认为古巴是中国的一个省。

1493~1496、1498~1500和1502~1504年，哥伦布又进行了第二、第三和第四次航行，先后发现了多米尼加、波多黎各、牙买加、特立尼达等岛屿，以及由洪都拉斯到巴拿马的海岸。第三次航行中在帕里亚湾首次登上美洲大陆。哥伦布至死也没意识到，他发现的这些地方并非中国和印度，而是一块新大陆。后来，意大利探险家亚美利哥·韦斯普奇到达美洲，才认识到这是一个新大陆。

在人们认识到大西洋西岸的陆地并非亚洲，而是一个新大陆后，人们的地理视野扩大了。1513年，西班牙探险家巴尔鲍亚越过巴拿马地峡，看到了西南面的大海，他把这片海域称为“南海”（今太平洋）。

为了到达亚洲，人们努力寻找沟通大西洋和“南海”的海峡，或者像好望角

开始了新的航海探险活动。麦哲伦曾经参加葡萄牙远征队，到过非洲、印度、苏门答腊、爪哇、班达群岛和马六甲海峡等地。他相信大地球形说。

1519年麦哲伦率船队，从西班牙的桑卢卡尔港出发，经加那利群岛，到达南美东岸以后，即沿海南下，在南美大陆和火地岛之间，穿过后来以他的名字命名的海峡，进入“南海”起初向西北，后转向西航。船队在航行中从未遇到风暴，即把该海域称为太平洋。1521年船队到达菲律宾群岛，麦哲伦在与当地土著人的冲突中被杀。1522年麦哲伦船队剩下的“维多利亚”号返回桑卢卡尔港，完成环球航行。

发现新大陆后，欧洲至印度、印度尼西亚、中国和美洲的最有利的通商航路都被西班牙和葡萄牙所占据。荷兰、英国等为发展海上贸易，开始在高纬度地区寻找通往印度和中国的新航路，并探险世界其他地区。

16世纪，荷兰的巴伦支为探寻一条由北方通向中国和印度的航线，曾三次航行北冰洋地区，先后发现熊岛、斯匹次卑尔根岛，并到达新地岛最北端、喀拉海和瓦加奇岛；17世纪初，英国的哈得逊曾屡次探索经北冰洋通向中国的航路；斯霍特于1616年到达美洲南端的合恩角；荷兰的塔斯曼于1642~1643年环航澳大利亚，发现新西兰和塔斯马尼亚岛。

这些航海探险进一步扩大了人类的地理知识，并进行了一些有关洋流、风系等的科学考察以及岛屿和陆地的实测工作。到了18世纪，库克的海洋探险已属于科学考察的范畴。

14、15世纪时，欧洲各国已有资本主义萌芽。15世纪末，葡萄牙、西班牙、荷兰和英国等，迫切要求向海外寻找市场和原料产地。但是奥斯曼帝国牢固控制了东西方贸易通道，从地中海经埃及出红海，向印度洋的航路又在阿拉伯人手中。在这种情况下，这些国家为了扩展商业和民活动，积极鼓励航海事业，开辟新航路。这是促成地理大发现的主要原因。

其次，欧洲商人和航海家对黄金的贪欲是促成地理大发现的另一原因。此外，西班牙和葡萄牙都位于欧洲突出于大西洋中的地区，地理位置也有利于航海业的发展。

地理大发现引起了人们思想上的变革，对地球科学的进步和欧洲资本主义的发展都起了很大促进作用。古代学者关于大地球形的猜测，通过地理大发现，特别是环球航行得到了证实，宗教迷信关于地球形状的种种说法最终被否定；证明了地球上存在着一个统一的世界大洋，海洋与陆地相比较，海洋占据了地球表面的大部分，推动了全球海洋和陆地的考察研究；促进了地球科学的进步，也促进了天文学、航海

学、天气预报学的发展及造船技术等科学技术的近代化过程；促进了欧洲的资本原始积累和世界市场的出现，开始了殖民掠夺，同时也促进了西欧各国经济的发展

（二）南极探险与我国南极考察

1 南极大陆探险史与南极条约

南极大陆被人类发现已 100 多年了。但是，向南极腹地进军，则是近七八十年的事情

1907 年，美国探险家恩斯特·歇克勒顿首次向南极腹地进军虽然，他未能到达南极点，但是他的考察队带回许多化石，这些化石的研究成果对当时许多学科的产生与完善起了重要作用

1911 年，英国探险家罗伯特·斯科特和挪威人阿蒙森上尉之间展开了向南极腹地探险的竞赛阿蒙森上尉率领的挪威南极探险队，于 12 月 14 日胜利踏上地轴南端；罗伯特·斯科特率领的英国探险队比挪威探险队晚 1 个月踏上南极，在归途中遭遇暴风雪，全部遇难。

从 1913 年到 1943 年的 30 年间，新西兰、法国、澳大利亚、挪威、智利、阿根廷等国的探险队纷纷登上了南极。在此期间，美国海军上将理查德·贝尔对南极进行了 4 次重大考察，1929 年驾机飞越南极上空，使人类对南极的考察进入了航空时代。

随着南极丰富矿产资源的发现和对其地理位置战略价值认识的提高，关于南极的政治纠纷也日益加剧，一些国家对南极资源的争夺也开始激化。

自 19 世纪初以来，英、法、新西兰、澳大利亚、阿根廷、智利、挪威、巴西、秘鲁、乌拉圭等国纷纷对南极洲部分土地提出主权要求。美国和原苏联虽不承认任何国家对南极地区的领土要求，但均声明保留自己提出领土要求的权利。第二次世界大战以后，这些矛盾曾一度激化。

由于一些国家对南极地区的领土要求，使南极土地的归属成为一个重大的国际性政治问题。人们开始感到，有必要订立一项国际条约，以约束各国的行动，保护这块地球上最后一块净土。1955 年 7 月，美、英等 12 个国家在巴黎举行首次南极国际会议，于 1959 年 10 月在美国的倡议下，再次在华盛顿召开了南极国际会议，同年 12 月 1 日澳大利亚、阿根廷、比利时、智利、法国、日本、新西兰、挪威、南非、原苏联、英国、美国等 12 国签署了《南极条约》目前《南极条约》缔约国已有 39 个，南极条约协商国 26 个，非协商国 13 个

迄今为止，已有 30 多个国家和地区在南极建立了 40 多个常年考察站和 100 多个

夏季站已建常年站的国家和地区有俄罗斯、美国、英国、阿根廷、澳大利亚、智利、南非、新西兰、日本、法国、波兰、乌拉圭、德国、巴西、印度、中国及韩国等。此外，挪威、比利时、印度、秘鲁、古巴、西班牙等国也先后派出科学考察站或科学家到南极考察。近年来，许多国家出于长远考虑都越来越重视对南极的考察工作，有些非缔约国也积极开展或筹备对南极的考察。

2 我国南极考察

中国首批南极考察队于 1984 年 12 月 25 日胜利登上了南极洲，并于 1985 年 2 月 20 日在南极半岛附近的南设得兰群岛中最大的岛屿——乔治王岛上，建立了中国第一个南极考察站——长城站。并且，还在当年把原计划的夏季站转变为常年站，进行了卓有成效的越冬科学考察。从此，我国成为在南极洲建站的第 17 个国家。

1988 年，为了进一步扩大我国南极科学考察的成果，我国政府决定在极圈内的南极洲大陆上建立我国第二座科学考察站——中国南极中山站。这是我国第一次在南极大陆和南极圈内建立的科学考察站。它对于全面开展有南极特色的科学考察，维护我国在南极的权益，造福后代，为人类和平利用南极做出贡献等方面具有重大意义。

二、大陆漂移、海底扩张与板块构造学说

展开世界地图，明眼人一看就会惊异地发现，某些大陆边缘存在着惊人的吻合性：非洲西部和南美东部海岸线惊人的一致，如果将非洲大陆向北推一推，与西欧陆缘、格陵兰、美洲东海岸也可以连成一体。

其实这个问题早在几个世纪以前就被人们注意到了，15 世纪末至 16 世纪初的航海发现就已对大西洋海盆和大陆沿岸进行了较为详细的测绘，上述特征亦没有逃脱人们对它的早期关注，但是没有人能够解释：如果这些大陆原来是连成一体的，那么后来又是怎样分离的呢？促成“大陆分家”的机制是什么？为寻求这一问题的答案，人们困惑了几百年。作为一个科学命题来研究也经历了近百年，成为二十世纪最热门的科学话题之一，随着这一谜底的不断揭示，带来了地球科学的革命性变革。人类对地壳运动的认识经过了三次大的飞跃，而每一次飞跃都伴随着实践中新的发现和新的研究手段的进步。

（一）第一次飞跃——大陆漂移假说

上世纪初，德国学者魏格纳（A. Wegener）提出了较为系统的大陆漂移学说。

1912年魏格纳在《彼得曼地理文摘》和《地质杂志》上发表了最初看法，1915年又经过全面、系统的论证写成了《海陆的起源》一书并发表，形成了著名的“大陆漂移假说”

“大陆漂移假说”认为，地壳最初形成时为很薄的花岗岩质硬壳，像冰块浮于水面一样，均衡地漂浮在玄武岩基质上，由于地球自转，产生自东向西的潮汐摩擦力和离心力，导出从两极向赤道方向的力，使地壳聚集起来形成较厚的由若干锯齿状大小破块镶嵌在一起的原始联合古陆（即泛大陆），海洋也只有一个泛海洋。在二亿年前的中生代初，由同样力量使原始联合古陆漂移开来，自东向西漂流。美洲最快，亚洲、澳大利亚漂得最慢。先是在美洲和欧、非洲之间形成大西洋，而后在澳大利亚和南极洲之间形成印度洋，到第四纪初期形成现代海陆分布轮廓。地球上的山脉也是大陆漂移的产物，如纵贯南北美大陆西岸的科迪勒拉和安第斯山脉就是南北美大陆向西漂移过程中，受太平洋玄武岩基底阻挡而挤压褶皱形成的。亚洲东缘的岛弧群是陆地向西漂移留下的残块。东西向各大山脉，如阿尔卑斯山、喜马拉雅山，是大陆从两极向赤道挤压的结果。“大陆漂移假说”不仅因其指出的非洲东海岸与南美西海岸酷似这一事实而令人叹服，两处相似的地层、地质构造、古生物群落也对这一假说给予了有力的证明

“大陆漂移假说”问世后，立即引起了学术界的轰动，支持者认为它如同哥白尼的“日心说”、达尔文的“进化论”，将引起科学发展的飞跃。反对者则斥之为地质学上的无稽之谈。学者们对魏格纳指出的事实都比较认同，但解释事实的机制却不那么令人信服：地球自转产生的离心力和潮汐摩擦力推动巨大陆块移动的“神话”得不到普遍支持。

（二）第二次飞跃——海底扩张学说

“大陆漂移假说”随着魏格纳的逝世、销声匿迹了20多年，但人类探索大陆漂移之谜的努力并没有停止。到20世纪60年代初，又出现了用新机制解释大陆漂移的学说——海底扩张学说。

随着第二次世界大战期间技术的发展和1957—1958国际地球物理年（IGY）的组织实施，地球科学研究开始了一个崭新的时期，一些新的发现使人们对大陆漂移机制的认识有了新的改观

第一个发现是各大陆岩石的古地磁极与现在地磁极的位置变动。古地磁的特性表明，岩石，尤其是岩浆岩，形成时都按地磁场方向被磁化，据其剩余磁性可以测出不同地质时期和不同地区岩石形成时的磁纬度和地磁极。大量测定表明，各大陆

岩石的古地磁极与现在地磁极的位置发生了明显变动，而且各大陆有不同的磁极变化轨迹。这只能有两种解释，要么地磁极和地轴发生了明显的位移，要么大陆发生了漂移，而前者事实上变化是极其微小的，只能用被磁化了的岩石与大陆一起移动加以解释。

第二个发现是大洋中脊。通过大量的测量，人们发现各大洋中部都有一条高峻的脊岭，它们虽然走向曲折，但彼此相接，全长 80000 公里，贯通四大洋，这是陆地上任何一条山脊所无法比拟的它的位置居中，距东西两岸大体相等，山脉走向 S 形与两岸轮廓一致。最壮观的大西洋中脊宽达 1500 - 2000 公里，约占大西洋面积的 $1/3$ ，其相对高度为 1000 - 3000 米，巍然耸立于洋底之上。

海底勘探进一步证明了大洋中脊有裂谷系列存在。从海底任何地方挖掘的岩石，其年龄都不超过 2 亿年，从深处的沉积岩芯可以确认当今的海底的地质年龄是相当年轻的与此同时，已积累的地震证据表明，深层地震的震中总是和全球裂谷系相关联，裂谷上发现枕状熔岩和“黑烟囱”热液喷口。上述事实为大陆漂移的探因提供了新的思考。

1961 - 1962 年赫斯 (H.H.Hess) 等人根据上述发现的事实提出了“海底扩张学说”该学说认为，大洋中脊裂谷体系是地幔物质上升的涌出口，涌出的岩浆冷凝成新的洋底，由于不断涌出和冷凝，导致洋底不断向两侧扩张，较早形成的海底，被推至海沟处时，向下潜入地幔中，构成地幔物质循环。海底扩张的速度每年约数厘米，经过 $1 \times 10^8 - 2 \times 10^8$ 年，扩张幅度可达几千公里，整个洋底即可更换一次，因此洋底没有发现侏罗纪以前的地层。与魏格纳的看法相反，“海底扩张学说”认为，大陆不是孤立、主动地漂移，而是被洋壳载运着在地幔对流体上移动。这一学说虽然对地壳运动机制作出了新的解释，但是对地壳水平方向的构造和运动形式尚缺乏系统认识。

(三) 第三次飞跃——板块运动学说

1967 - 1968 年间是科学界对地壳运动认识创新思维的跃发时期，麦肯齐、摩根、勒皮雄等学者，总结分析了 60 年代大量发现的科学事实，将海洋、陆地地壳联系起来分析，各自对地壳的结构和运动机制提出了新的理论，形成了“板块运动学说”经过几十年的发展和验证，已逐步发展成一门严密的科学理论。板块运动学说要点如下：

1. 固体地球上层在垂直方向上分为物理性质截然不同的两个圈层，即上部是刚性的岩石圈，下部是塑性软流圈。

2. 上部的刚性岩石圈不是整体一块，而是被一些活动的构造带——海岭、岛弧、平移断层割裂成的若干板块。板块内部是比较稳定的区域，各板块接合处则是相对活动的地带

3. 岩石圈板块横跨地球表面的大规模水平运动是一种球面上的绕轴旋转运动。在全球范围内，板块沿分离型边界的扩张增生，与沿汇聚型边界的压缩消亡相互补偿抵消，从而使地球半径保持不变。

4. 岩石圈板块运动的趋动力来自地球内部，即地幔中的物质对流

（四）大洋的发展与大陆的分合

大洋的发展与大陆的分合是相辅相成的。如前所述，洋壳一面在大洋中脊裂谷增生新的，一面在海沟处消亡旧的，大约两亿年就更新一次，所以洋壳是年轻的。在地幔对流推动海底扩张和板块相互水平推移的过程中，大洋从无到有、从小到大，或从大到小、从小到无；大陆同时分而又合，合而又分。我们的地球表面，就是由若干变动着（张开和闭合）的洋盆和漂移着的大陆组成的

大洋的发展可分为胚胎期、幼年期、成年期、衰退期、终了期、遗痕（地缝合线）等阶段大陆裂谷如东非大裂谷、莱茵裂谷、贝加尔裂谷等被视为大洋发展的胚胎期，它们正处于产生新地壳、两侧陆块将要外移的前夕当大陆岩石圈完全断开，大洋地壳在其间涌出，并成为两侧岩石圈板块之间的离散型边界，迎进了海水，这就进入了大洋发展的幼年期，如同红海、亚丁湾一样，它们的洋壳年龄不超过二、三千万年，最年轻的具有标准洋壳的洋盆是加利福尼亚湾，它的年龄不过几百万年幼年洋进一步扩张，两侧大陆愈漂愈远，其间逐渐形成开阔的深海平原和宏伟的大洋中脊，大洋的发展遂进入成年期，如大西洋、印度洋和北冰洋。其中大西洋已经历了上古生代张开、中生代闭合的历史过程，中生代初再度张开，目前还在向两边扩展。太平洋在各大洋中年龄最大，为过去泛大洋的收缩，估计面积已减少了 1/3，这是大西洋和印度洋产生并扩展的必然结果，说明太平洋已处于大洋发展的衰退期地中海则被认为是大洋发展到终了期的典型，它是昔日辽阔的古地中海（特提斯洋）经过长期变化、逐渐闭合的残留部分在两个板块相撞、合为一体的地缝合线上，便是大洋发展的遗痕阶段

三、大气科学与海洋科学未解之谜——厄尔尼诺

今天的人们怕是没有多少不知道“厄尔尼诺”的含义，最简单的了解便是它与

某些异常天气有关 1997—1998 年的那次事件，至今还让人们记忆犹新，暴雨、洪水、高温干旱使受灾国家蒙难惨重、人们对“厄尔尼诺”的恐惧，加大了对它的关注实际上，厄尔尼诺造成的天气异常因地区不同变化很大：对居住在印度尼西亚、澳大利亚、东南非的人来说，厄尔尼诺意味着严重的干旱和致命的森林火灾；厄瓜多尔、秘鲁、加利福尼亚的人则认为厄尔尼诺会带来暴风雨，然后引发严重洪水和泥石流；而在美洲东北沿岸的居民认为厄尔尼诺会使冬天变得更温暖（可节省取暖费），飓风季节相对平静。在全世界范围内，强厄尔尼诺事件不但造成几千人的丧生，还会使成千上万人流离失所、数十亿美元损失。

（一）什么是厄尔尼诺

在南美厄瓜多尔和秘鲁沿岸，由于暖水从北边涌入，每年圣诞节前后海水都会出现季节性的增暖现象海水增暖期间，渔民捕不到鱼，常利用这段时间在家休息。因为这种现象发生在圣诞节前后，渔民就把它称为“El Nino”，音译“厄尔尼诺”，是西班牙语“圣婴（上帝之子）”的意思。后来，科学家发现有些年份海水增暖异常激烈，暖水区一直发展到赤道中太平洋，持续的时间也很长，它不仅严重扰乱了渔民的正常生活，引起当地气候反常，还会给全球气候带来重大影响。现在，厄尔尼诺一词已被气象和海洋学家用来专门指这些发生在赤道太平洋东部和中部的海水大范围持续的异常偏暖现象。厄尔尼诺现象的出现，已经被看成是海气作用，并进一步引起全球气候异常的重要信息。

与之相关联的另外几个科学名词有拉尼娜、南方涛动和 ENSO（音“恩索”）。拉尼娜是西班牙语“La Nina”的音译，是“小女孩”的意思；与厄尔尼诺相反，它是指赤道太平洋东部和中部海水大范围持续异常偏冷的现象，也可称反厄尔尼诺现象。厄尔尼诺和拉尼娜现象与全球大气环流尤其是热带大气环流异常紧密相联，其中最直接的联系就是东南太平洋与西太平洋—印度洋上的海平面气压之间翘翘板式的反相关关系，即南方涛动现象。鉴于厄尔尼诺与南方涛动之间的密切关系，气象上把两者合称为 ENSO

（二）为何会发生厄尔尼诺

目前科学家还没有完全弄清楚厄尔尼诺发生的原因和机制问题。但比较一致的认识是：厄尔尼诺并非是孤立的海洋现象，它们是热带海洋和大气相互作用的产物。由海洋和大气构成的耦合系统内部的动力学过程决定了厄尔尼诺的爆发与结束。

在太平洋洋面，大气低层风驱动着表层海水的流动。在南美北部的太平洋沿岸，

盛行偏东风，风向与海岸线相平行，海水的流动是离开海岸的，而沿岸表层没有海水来补充，则迫使表层以下温度较低的海水上升，以替代流走的较暖的海水，因此在这个地区生成巨大的涌升流，称为冷水上翻区在赤道附近，沿赤道南、北两侧分别为东南信风和东北信风，风驱动着表层海水也向两侧分流，沿东太平洋赤道地区，也会产生冷水上翻，以补充流走的海水。通常，从南美沿岸到东太平洋的海面水温比周围要低，这就是赤道太平洋的冷水区

由于赤道太平洋海面盛行偏东风，大洋表层暖的海水被输送到西太平洋，西太平洋水位不断上升，热量也不断积蓄，使得西部海平面通常比东部偏高 40 厘米，年平均海温西部约为 29℃，称为暖池区，而东部沿岸仅 24℃ 左右，东西两侧海温差异在 3-6℃ 之间

但是，当某种原因引起信风减弱或转为西风时，维持赤道太平洋海面东高西低的支柱被破坏，西太平洋暖的海水迅速向东蔓延，原先覆盖在热带西太平洋海域的暖水层变薄，海温在太平洋西侧下降，东侧上升。同时，赤道东太平洋的涌升流也随信风减弱而减弱，暖水逐步占据了赤道中、东太平洋地区，并从海面一直可以到达 100 米深处。赤道中、东太平洋的海温升高，使得东太平洋的气压进一步下降，赤道信风更为削弱，更有利于海温上升。当赤道中、东太平洋海温异常偏高持续 6 个月以上时，被称为一次厄尔尼诺事件

（三）厄尔尼诺的未解之谜

到目前为至，人们对这支形迹不定，出现无常的厄尔尼诺现象进行了种种尝试，仍然是众说纷纭，难以定论。厄尔尼诺这种海气之间的相互作用和影响又直接扰乱全球的气候于是，人们认为厄尔尼诺现象是反映大洋海水温度和气候异常变化的重要信息，只要掌握认识了厄尔尼诺海流的产生和发展规律，才有可能弄清全球气候变化规律。但是，科学家们的良好愿望和目前海洋科技发展有较大的差距。因为在一望无际的大洋里，仅用目前的海洋调查手段所获取的资料，真可以说是寥寥无几，远不能满足海洋研究的需要。由于缺乏热带太平洋较为系统的资料特别是西太平洋方面的资料，加之这支海流有时不见踪影有时又极度发展，又给调查和研究带来困难。因此，厄尔尼诺的很多问题，便成为 20 世纪 90 年代海洋、大气科学的研究热点。发生厄尔尼诺现象时它是如何形成的 那巨大的暖水是从何处来的 它的热源在那里？过去，科学家们曾提出各种各样假说，有的说是海底火山爆发；有人认为，热源来自地心等等。不管哪种解释，都拿不出令人信服的依据，这是未解谜之一。

其二，太平洋发生厄尔尼诺现象有没有其自身的规律，例如，它发生周期的长短受什么制约；它的发生、生长与消衰以及强度有哪些代表性的信号等等。

未解谜之三，无论是厄尔尼诺现象或是反厄尔尼诺现象的发生，都是大洋内暖水的大范围运动，那么，这种暖水的运动和北太平洋发生的顺时针大洋环流，及在南太平洋中发生的逆时针大洋环流是什么关系？特别引起海洋、大气科学家们注意的是，厄尔尼诺与黑潮的大弯曲摆动有联系吗？

难解谜之四，在大洋中发生厄尔尼诺的特点之一是，发生范围大，时间长，这给我们监视、监测带来了极大的困难。如何确定反映厄尔尼诺过程的发生时间，结束时间，以及监测位置等，以达到用有限的观测点上的资料来预报厄尔尼诺的目的。

难解谜之五 大洋中出现厄尔尼诺现象为什么能影响全球气候？人们能不能通过预测厄尔尼诺现象的发生，来预报异常气候？今天，人们对厄尔尼诺现象的认识比过去深入多了，随着海洋科学技术的发展，特别是卫星遥感技术的应用，人们有理由相信，在今后十年内，将会对厄尔尼诺现象的生成机理有深刻认识，实现对厄尔尼诺的预报。

第三节 数字地球

一、数字地球的提出与含义

1 数字地球的提出

数字地球 (Digital Earth) 最早出现于 1997 年下半年。1998 年 1 月 31 日，美国副总统阿尔·戈尔 (AL·Gore) 在美国加利福尼亚科学中心发表的题为“数字地球：二十一世纪认识地球的方式”的演讲中把数字地球正式提了出来。戈尔的演讲引起了世界各国的高度重视，1998 年 6 月 1 日，江泽民主席在中国科学院第九次院士大会和中国工程院第四次院士大会上的演讲中指出：“前几年提出了‘信息高速公路’，随后又提出‘知识经济’，最近美国副总统戈尔又提出‘数字地球’的概念。真是日新月异啊！”这充分显示出数字地球的重要性和权威性。目前，数字地球的概念以及一些观点已经引起了世界各国政治界、科学界和文化界等多方面的高度重视。

2 数字地球的含义

目前，学术界尚没有关于数字地球的确切的学术定义，戈尔在他的演讲中把数字地球描述为“能嵌入海量地理数据的，对我们的地球进行多分辨率、三维的一种再现”；美国有关专家在1998年6月23日举行的数字地球研讨会上认为，数字地球就是虚拟地球；我国学者认为数字地球是对真实地球及其相关现象的统一性的数字化重现和认识，其核心思想是用数字化手段来处理整个地球方面的问题

从本质上说，数字地球不是一个孤立的项目，而是一项整体性的、导向性的国家战略目标。数字地球包括三个重要的组成部分：信息的获取、信息的处理、信息的应用。其中信息的获取主要是地球科学的任务，并需要地球科学与其他技术领域，例如空间技术的合作；信息的处理需要地球科学和信息科学技术的共同努力；信息的应用则是地球科学服务于社会的主要内容。这里，我们从地球科学发展战略的角度探讨有关数字地球的一些问题

二、发展“中国数字地球”的必要性

美国提出数字地球的概念，主要是由于美国的国家目标和全球性战略的需要。同样，中国是否应该发展数字地球，主要不是取决于数字地球的概念本身，而是取决于中国的国家目标。在中国跨世纪的发展中，实现经济和社会的可持续发展，形成科学技术的自主创新能力，是两项带有基本国策性质的战略目标。从我国的国家目标出发，我们需要一个“中国数字地球”或“数字中国”

如何养活十几亿人口，是中国需要首先考虑的问题人口多、土地资源有限，农业生产仍以传统的生产方式为主、自然灾害频繁都是我国的基本国情。发展精细农业，逐步实现农业产业化，加强土地资源和水资源的监测和保护，加强自然灾害、尤其是洪涝灾害的预测、监测和防御，是非常迫切的工作。数字地球在这方面可以发挥巨大的作用

城市发展如何避免第三世界国家和一些发达国家走过的弯路，是目前中国面临的一个紧迫的社会问题。其中管理、监测和规划具有关键性的意义数字地球作为地球信息系统的一个发展，可以在城市规划，社区管理，打击犯罪活动，以及城市灾害紧急事务管理方面发挥巨大的作用。

人类在日常生活中所接触和利用的信息，有80%与地理空间信息有关在经济的发展中，劳动力、资金、生产、市场的空间分布、动态变化和合理布局具有重要的意义。通过数字地球这样的政府行为来促进经济信息的进程，将有力地促进我

社会主义市场经济的发展。而知识经济或以知识为基础的经济在我国发挥效益，数字地球可能是一个合适的突破口

如何一方面抓住国际经济一体化所带来的历史性的机遇，另一方面在国家经济安全面临严峻挑战的情况下，在国际经济竞争中拥有更多的主动权，这是每个国家在制订发展战略时都必须优先考虑的问题。数字地球在这方面具有无可比拟的优势，而忽视数字地球的机遇，将导致国家经济安全方面的全面被动。

不论真正意义上的数字地球是否可以成为一个现实的目标，发展数字地球的过程本身都将极大地促进信息科学技术、环境科学技术和地球科学的发展。数字地球所提供的巨大市场在经济发展中具有重要意义。事实上，美国提出数字地球的概念，在相当程度上是出于发展经济，增加就业机会，以及保持美国科学技术（尤其是高新技术）的领先地位的需要。

数字地球中的很多思路，例如数据共享、大型仪器设备共享、跨学科合作等等，是我们早已进行过许多讨论、并至少是一部分付诸实施的思路。数字地球中的很多工作，例如建立统一的地学数据库、依靠信息技术来进行地学数据的集成和一体化等等，是我们很久以来就一直在做、但仍差强人意的。数字地球试图解决的很多问题，也正是我们所试图解决、但在解决过程中遇到很多困难的问题。这方面的工作不够理想，原因之一是缺少一个像数字地球这样统一的、高层次的战略；这样的战略在以往之所以没有形成，主要是科学技术的发展还不具备这样的条件。现在，数字地球的提出给我们提供一个从国家层次整合地球科学、发展信息科学技术的机遇。我们应当因势利导，通过数字地球战略的实施，促进我国科学创新体系的形成和发展，使我国在现代科学技术的国际竞争中处于有利的地位。

三、迎接数字地球的挑战

在我国跨世纪的历史发展中，我国政府高瞻远瞩，提出科教兴国、可持续发展的战略，强调发展我国的自主创新能力，迎接知识经济的挑战。江泽民主席很早就注意到了数字地球这一概念和它的战略意义。这就为发展“中国数字地球”创造了有利的条件。

数字地球不是一个孤立的项目，而是一项整体性、导向性的战略目标。因此，需要从战略的高度，通过“中国数字地球”这样一个总体性的国家目标来整合地球科学，促进信息科学技术的发展，并以科技发展为基础，形成新的产业。目前重要的是把“中国数字地球”作为一个国家战略目标，用它来引导地球科学、信息

科学技术及其产业的发展

数字地球是个挑战性的国家目标几乎所有现存的技术基础，目前都还不足以支撑这样一个综合性的战略目标的实现，正如戈尔所指出的：“显然，没有任何一个政府企业或学术团体能够单独从事这项工作”。这就使得数字地球这一目标的实现成为一种政府行为，一种综合国力的竞争，一种发展机遇的争夺战。

1998年，中国科学院地学部针对跨世纪我国地球科学发展的实际，提出“把中国从地学大国变成地学强国”的发展战略，并确定下世纪的最初十年“把中国变成一个中等地学强国”的阶段性目标。与此相应，提出了建立资源环境与地球科学委员会以从全局层面协调地球科学的发展，发展地学新技术，解决地学数据共享问题，解决地学大型仪器设备共享问题，提高研究工作的质量，加强地学教育和地学科普等六项重要工作。“中国数字地球”的发展可以作为这一战略性目标的具体化。在实现这一目标的过程中，同样要坚持“统观全局、突出重点、有所为、有所不为”的方针，科学地部署研究领域的配置，谨慎地控制研究队伍的规模，充分地保证研究经费的合理利用

中国地球科学在建国以来的近半个世纪时间里，主要是以普查的形式为国家建设服务的。这种服务在中国的发展和现代化进程中发挥了重要的作用。现在，随着国家经济和社会的发展以及科学本身的发展。普查阶段作为一个必不可少的历史阶段，已经接近结束。寻找新的发展，为国家做出更大的贡献，是地球科学面临的一个跨世纪的课题。看来，“中国数字地球”可能是一个合适的发展方向。

在“中国数字地球”的发展战略的框架下，要像建设铁路和公路那样加强地学基础设施的建设，具体说来，需要从国家的层次制订统一的对地观测规划，大幅度地改善通讯基础设施。加快“国家地理空间信息基础实施(NSDI)”的建设是实现“中国数字地球”的一个必要条件。此外以“中国数字地球”为基本目标通过政府行为以“抓应用、促发展”的方式普及地理信息系统统一地学信息的规范标准也是非常重要的工作

第六章

关于芸芸众生的学问—生物学

生物学的产生与发展历史源远流长。纵观生物学发展史，有许多巨大成就这些成就包括：进化论、细胞学说、孟德尔的遗传定律、摩尔根基因论、DNA 双螺旋结构模型、破译遗传密码、基因重组及基因工程、基因组计划和克隆技术等我们可以把生物学的历史粗略地划分为经典生物学和分子生物学两个阶段

在经典生物学阶段，人类主要是在群体、个体、细胞和亚细胞水平上研究和描述生物体的结构与功能，由于生命现象太复杂，难能像物理、化学等自然科学那样作出定量解释，基本上仍停留在非精确地描述生命所表现的各种现象的初级阶段在很多方面，知其然而不知所以然，学术争论不断。本章将主要介绍经典生物学的主要成就

20 世纪以来，物理学和化学有了飞跃发展，并开始向生物学渗透应用化学和物理学的原理和方法研究生命现象，产生了新的边缘学科—生物化学和生物物理学世纪中叶，许多物理学家、化学家转向生物学领域，把现代物理学的思想和方法应用于生命科学研究，推动了生物学迅猛发展在生命信息的载体 DNA 的化学组成、化学结构和更高级的双螺旋结构得到阐明的基础上诞生的分子生物学诞生，使生命科学进入分子生物学时代

第一节 进化论的建立和发展

一、进化论的先驱—拉马克

早在 1802 年拉马克采用“生物学”(Biology)这一术语,把动物学和植物学合并为一门科学,反映了他把动植物视为同一体系的观点拉马克在《动物哲学》和《无脊椎动物自然史》第一册的导言中详细论述了他的进化论观点他最先将进化论列为第一级独立的科学理论,确立了整个生物学的自然哲学基础在这些论著中,拉马克明确指出:许多分类系统的划分及命名都是人类任意所为。生物的各个物种都是从远古时期连续进化而形成的,其固定性不过是相对的、暂时的;各物种都来自变种生活状态的巨大差异对动物的组织、形态及各部分引起变异,各机体器官的使用与不使用也同样引起变异。地球上居住的所有生物的进化永远在继续,不因大灾变而有所间断。最简单的动物和最简单的植物位居生物进化阶段的最低层,均出自自然发生过程,既是在今日也依然如此。一切活体或有机体都服从统一的自然定律,与所有非活体或无机物一样,不能违背自然规律在作出生物物种是进化而来的结论之后,必须讲清楚进化的方式和原因。拉马克提出了两个法则:一个是用进废退;一个是获得性遗传。他认为这是使物种产生变异的原因,也是适应形成的过程。如果一种动物历经世代代偏重于使用某一器官,就会使该器官得到突出的发展;反之,少用或甚至完全不用某一器官,就会使该器官日益退化以致完全消失这就是用进废退法则拉马克认为物种的稳定性是相对的,是可以变化的,环境条件对生物体的直接影响和用进废退是生物进化的原因,该原因所引起的变异,可以通过繁殖过程遗传给后代,这就是获得性遗传法则。后人把这个理论叫做“拉马克进化学说”或叫做“种源论”

拉马克第一次从生物与环境的相互关系方面探讨了生物进化的动力,其思路是正确的,为后来达尔文的进化论提供了理论基础但由于历史的局限,拉马克的进化论还缺乏科学依据,不完善他的获得性遗传的观点是错误的另外,所谓动物有意识和欲望,存在着一种固有的趋向完善的动力,也是错误的。

二、达尔文进化论的形成

达尔文是英国生物学家，出生于进化论的先驱——拉马克的著作《动物哲学》一书问世那一年。19世纪初，那是生物科学还在种种超自然创造论的笼罩下，虽然生物进化的证据愈来愈多，许多学者开始主张生物是进化的观点，但又不能抗衡超自然创造论的权威，因而有些思想家期盼有机自然科学界出现新牛顿的时代。1825年，达尔文进爱丁堡大学学习，两年后转学于剑桥基督学院。1830年，他作为自然学者参加英国皇家海军贝格尔号环球科学考察，历时五年。主要考察南美洲南部和南太平洋一些岛屿，此次考察与达尔文的全部发展有极大关系。第一年他初到南美洲考察时，有关物种起源的思想已开始萌芽，随后渐趋完善。在南美洲有三种现象使达尔文特别关注，（1）由北往南看到近似物种出现及代替方式；（2）南美洲附近各海岛物种与南美大陆固有物种的相似性；（3）现存物种与已灭绝物种的亲缘关系。达尔文在给海克尔的信中说，“……我沉思这些事实，而且与相似的几种现象加以比较，我以为相近似的各物种似乎同出于一种共同祖先形式。深思数年之久，我不解每一种形式为什么能与其特殊的生活条件如此巧妙地相适应，于是我就开始对家养动物和园艺植物作系统研究，发现人工选择的力……确实具有重要的改造力量。我就动物的生活方式及习惯详细研究，正准备正式提出‘生存竞争’的时候，偶然读到马尔萨斯的《人口论》从而获得‘自然选择’思想”。由此可见达尔文的以自然选择为基础的进化论思想的形成过程。1844年，达尔文曾就自然选择写过一篇摘要，14年过去了，未发表，他想搜集更切实可靠的实验证据，使该理论更完善。1858年，当时在马来西亚考察的华莱斯独立地建立自然选择论，写了大纲寄给达尔文托他转交给莱伊尔（Charles Lyell, 1797—1875）叫他在一家英国杂志上发表。达尔文随即转交给了莱伊尔。莱伊尔和霍克早已了解达尔文的工作，霍克还曾读过达尔文于1844年所草拟的纲要，他们两个人见了华莱斯的论文发现竟与达尔文的观点完全一致，于是他们劝达尔文把早已写成草稿的摘要与华莱斯的论文一起发表。1858年8月，林耐学会杂志将两个人的文稿一起刊载。这是在生物学史上自然选择理论的首次记载。华莱斯是当时很勇敢很有成就的自然科学家，多年来，他独身一人游历南美洲荒原和印度半岛的原始森林，对自然界丰富多彩的动物及植物直接地大规模地进行研究，获得了与达尔文一样的认识，独立地提出了自然选择理论，功不可没。

三、达尔文进化论的要点

1859年，达尔文发表了他的惊世之作《物种起源》，全面阐述和论证了他关于该命题的见解和理论。在这里，我们只能简单概括达尔文进化论的基本要点。

（一）变异性

达尔文认为，一切生物都有产生变异的特性，引起变异的根本原因是生活条件的改变。有的变异不能遗传，有的则能遗传，只有可遗传的变异才是选择的主要对象。

（二）生存竞争

达尔文认为任何生物都有对环境条件趋利避害、争取生存的生物学特性。每种生物或每一个体在生活过程中都必须为生存（其中包括繁殖其类）而斗争，其中包括同环境条件的斗争、种间斗争和种内斗争。种间斗争是不同物种之间为争夺食物和空间等进行的斗争；种内斗争是同种个体之间争夺生活空间、食物、配偶等而进行的斗争。达尔文认为地球上各种生物普遍具有高繁殖力，所以繁殖过剩引起种内激烈的斗争。他还认为，繁殖过剩引起的种内斗争是生物进化的动力。

（三）自然选择

达尔文认为，在生存竞争中有利于生存的那些变异得到保留，而有害于生存的变异被淘汰，这就是自然选择，或适者生存。凡能够生存下来的生物就具有适应的性状。适应是自然选择的结果。适应是相对的，一旦环境条件发生改变，原来的适应就可能变成不适应。

（四）新物种形成过程

自然选择是长期的，漫长的过程。在一定的环境条件下，生物的变异总是朝着一定的方向进行，通过长期许许多多世代s的自然选择，对生存有利的变异逐渐积累，出现显著的变异，产生彼此有所区别的变种。变种再经历上述过程，就出现性状分歧，形成新的物种。由于生物居住的环境是多种多样的，生物的适应方式也是多种多样的，加上生物进化史长达几十亿年，就形成了生物的多样性。

（五）达尔文进化论的评价

达尔文在他的《物种起源》一书开头的历史概述中说，“有关物种起源的见解的发展……应首推拉马克”，达尔文接受和发展了拉马克的观点。达尔文从家养动植物经人工选择产生新的优良品种，联想推理得出自然选择对自然界物种形成过程中的作用；又从马尔萨斯的“人口论”中引入“生存竞争”从而建立了他独到的进化论。这是以自然选择——适者生存形成了已

达经灭绝的和现在还在生存着的形形色色，五彩缤纷的生物世界达尔文的进化论问世之后对达尔文功绩的评价有错误的和客观的两种错误的评又有两个相反其过重视其轻视前一种倾向认为达尔文是物种起源理论和全部进化论的创始人这是错误的如上述物种起源理论简称物种起源的达尔文在把它充实、发展和论证的同时建立了自然选择理论所以海克尔说：“拉马克理当被尊为种源论的创立者”；自然选择论或淘汰论可名为达尔文主义”。现在把达尔文的进化论叫做以自然选择为基础的进化论，这是最客观的

白尼学说的贡献一样

1854—1921

达尔文的进化论思想很早传入我国，中国近代启蒙思想家严复（向中国人介绍达尔文的进化论时，概括其意为物竞、天择，认为“物竞者，物争

第二节 细胞学说及其发展

一、细胞的发现

竞争和自然选择。

在生物学史上，细胞学说的提出是生物学史上划时代的1665年，英国科学家罗伯特·虎克他原是从事物理学和天文学实验研究的科学家 致力于显微镜、望远镜等仪器的制造他

学应用价值的显微镜。胡克在试验该显微镜的性能时，观察了软木（栎树皮）薄片及其他植物组织，发现其中有许多小空洞，状如蜂窝。他把这些观察结果写成《显微图谱》一书，该书于1665年出版。在书中，他把所见微小孔洞叫做 cell，原意为小室，汉译为细胞。这是意外的发现，胡克兴奋不已，他说“我看到这些图像就认为是我的发现。因为这的确是我第一次见到的微小孔洞，也可能是历史上的第一次发现。这显然使我理解了软木为什么这样轻的原因”生物学家们没有放过这一发现，认识到在生物学上有着重要的意义。因此，生物学家和史学家们把胡克作为细胞的发现者载入生物学发展史册。其实，当时胡克所见到的实际上是植物死细胞的细胞壁，尽管如此，生物学家们仍然接受胡克所用来描述小孔洞的“cell”一词来指生物体的基本结构单位—细胞，而且沿用至今。当时，胡克也曾在显微镜下观察过其他活体材料，并发现“cell”内含有“汁液”。但是，在当时，显微镜的性能还很差，又由于细胞壁远比细胞内含物明显得多，因此，对细胞内含物的观察研究受到了限制，此后100多年中，进展十分缓慢。

与胡克同一时代的荷兰科学家列文虎克早年学会琢磨玻璃制造透镜的技术，一生装配了247架显微镜，至今保存下来的还有9架。其中一架现保存在荷兰乌德勒支大学博物馆，该显微镜的放大倍数已经达到270倍，分辨力达到 $1.4\ \mu\text{m}$ ，与胡克的显微镜相比有较大提高。列文虎克利用自制的显微镜，在1675-1683年间，发现池塘水里的原生动物、人和哺乳动物的精子、鲑鱼红细胞核和生长在牙垢中的细菌等，而且把他所观察到的现象详细记录下来，以通讯的方式报告给英国皇家学会。列文虎克所发现的也都是细胞，这些成就为生物学做出了卓越的贡献，与胡克相比也毫不逊色因而英国皇家学会于1680年接纳列文虎克为会员；后又当选为法国巴黎科学院通讯院士。列文虎克原是布店学徒，一生刻苦奋斗，终成为著名的学者，为后人树立了一个自学成才的光辉典范。在这里，不能不提一提列文虎克在科学界的朋友解剖学家格拉夫，他编辑校订了列文虎克用荷兰文写的给英国皇家学会的372封信件，并译成英文和拉丁文节选，发表于《哲学学报》，并于他一生的最后一年写信给皇家学会，介绍列文虎克的成就，使世人了解和重视列文虎克。

二、细胞学说的建立

发现细胞之后170多年间，人类对细胞的认识进展缓慢。主要有两个方面的原因：一是许多学者的研究工作都着眼于一细胞形态描述，而对于各种生物有机体中都出现细胞的现象，一直没有做出理论上的概括。二是因为研究细胞不可缺少的显微镜那

时还比较原始，分辨力还不高，限制了人们对细胞的深入认识。

1838年，德国一位年轻的植物学家施莱登发表一篇题为“植物发生论”的论文，论证了所有植物体都由细胞组合而成的观点。他认为细胞是“植物中普遍存在的基本结构”，不论怎样复杂的植物体都是“各具特色的、独立的、分离的个体（细胞）的集合体”。在植物体内，每个细胞一方面都是独立的，进行自身发展的生活；另一方面则都是附属的，是作为植物整体的一个组分而生活着”。所以，他认为植物的一切生理现象都是细胞生命活动的表现形式。在说明了细胞是植物结构的基本单位后，自然而然地要回答细胞的来源问题。遗憾的是，施莱登在他的“植物发生论”和以后的“植物学概论”中详细论述了“细胞游离形成”的错误观点。施莱登将他尚未发表的观点告诉了动物学家施旺，由此可见，施莱登已经把他的细胞理论的覆盖范围从植物界扩大到了动物界，推测到在动物中也会有类似的发现。

时隔一年，青年动物学家施旺根据他自己独立的研究证实所有动物体也是由细胞组成的。他在“关于动物、植物的结构和生长的一致性的显微研究”一文中，陈述他的研究目的是“证明两大有机界最本质的联系”，并首次提出“细胞学说”（Cell Theory）一词，同时阐述了该学说的基本要点，明确提出了一切生物体都是由细胞组成的理论。施旺认为动物组织和植物组织一样，都由细胞组成；动物细胞和植物细胞一样，都有“细胞膜、细胞内含物、细胞核及核仁”。施旺做出结论：“现在我们已推倒了分割动、植物界的巨大屏障”。施旺在脊索标本中已经观察到细胞核，但与施莱登讨论之前，显然没有意识到其重要意义。后来在描述细胞学说产生过程时，他说：“一天，当我和施莱登一起进餐时，这位著名的植物学家向我指出，细胞核在细胞的发生中起着重要作用。我立刻回想起曾经在脊索细胞中看见过同样的‘器官’。在着一瞬间，我领悟到，如果我能够成功地证明脊索细胞中的细胞核起着和植物细胞核相同的作用，这个发现将是极其重要的”。说明施莱登使施旺得到启发，回头去关注动物细胞的统一性。对施旺来说，假如没有施莱登的启发，有可能他把自己的重要观察结果束之高阁而忽视其重要意义，或许失去建立细胞理论的机遇。

关于细胞的来源，施旺和施莱登一样，认为细胞从无结构的液体或者“成胞原浆”中通过结晶过程产生。他们错误地认为，细胞是通过“自由细胞形成过程中产生，新细胞是由连续的，无定性的细胞形成质结晶而成”。

细胞学说的建立，明确了动物和植物之间的统一性，因此为上述生物进化论的产生奠定了基础。恩格斯对该学说曾给予很高的评价，把它与进化论、能量守恒定律并列为19世纪的自然科学三大发现。

三、“细胞”来自细胞

细胞学说一经建立，把生物学家们的注意力引导到细胞内部结构上来了，于是进展很快。19世纪下半叶是细胞学研究的繁荣时期，相继发现了许多细胞内部的重要结构和细胞的生命现象。他们关注细胞究竟是怎么形成的？现在我们所知道的细胞分裂的三种方式：有丝分裂、无丝分裂和减数分裂相继被发现，分裂是产生细胞的唯一方式，而且动、植物细胞都一样。1855年，德国病理学家维尔和提出了著名的论断：细胞只能由细胞分裂而来，这就是“一切细胞来自细胞”的原理，它补充和发展了细胞学说现今所说的细胞学说，经过补充和完善，包括如下三点（1）细胞是多细胞生物的最小结构单位，对单细胞生物来说，一个细胞就是一个个体；（2）多细胞生物的每一个细胞为一个代谢活动的单位，执行特定的功能；（3）细胞只能通过细胞分裂而来。

第三节 遗传学的兴起和发展

一、植物杂交试验

在孟德尔以前，很早就有关于植物杂交的试验和由此产生的见解。现在看来，很多都是错误的而且是很幼稚的见解。但为了纵观遗传理论发展的历史进程，先来简单地了解一下曾经提出过的陈旧的假说。18世纪，林耐曾经提出过离奇的概念，他简单地假设，任何具有两个已知物种中间特征的植物必然是杂交种，并且做了不少没有成功的试验。林耐认为雌雄亲本对子代的贡献十分不同。在动物杂交中，子代的外表和脉管系统来自雄性；而身体的内部，包括神经系统，是从雌性衍生而来。在植物杂种中，同样分内外两层系统，子代的叶子、茎的表皮来自父本；而花的中心部分、果实的中心及茎杆的髓部则得自母本。这显然是毫无根据的武断猜测。可是林耐的名望极高，是权威植物学家，所以他提出的假说是有一定影响的。

比林耐稍晚，18世纪德国植物学家科尔柳特是第一个系统的进行植物杂交试验的学者。他用烟草进行植物杂交实验，获得了第一个杂种，并在“植物有性生殖的试验及其观察初探”的论文中用自己所得结果向林耐发起了挑战。他用130多份材料做了

500 次以上不同的杂交试验，并且研究了上千种植物的花粉粒的形状、大小和颜色。他做实验非常细致，小心地去掉雄蕊的花药，进行人工授粉，然后把花罩起来，以防止外源花粉的干扰。他认为杂种虽然更像亲本的某一方，但在一般情况下，杂种的性状通常介于两个亲本之间。如果把亲本的雌雄对换一下，仍将得到同样的结果。科尔柳特注意到了亲本差别很大的杂种往往不育，但有些杂种活力比亲本更强；有些杂交组合产生变异很大的后代。他观察到雄性不育的现象，即某些杂种的花粉虽然不育，但雌蕊仍具有接受亲本的花粉而受精的能力。到了 20 世纪，农学家们应用雄性不育和杂种优势现象，发展了很有用的作物育种技术，提高了产量。但是科尔柳特坚信新的物种不可能产生，所以他关注植物如何防止杂交，而不去深入研究杂交的规律。例如，他观察到子一代（ F_1 ）相当均匀地介于两个亲本之间，而子二代（ F_2 ）的性状则极其多样化，这与孟德尔研究的现象很相似，但科尔柳特并没有认识到这种现象的重要性。孟德尔和达尔文都引用过科尔柳特的工作成果。

在孟德尔以前，植物杂交试验的植物学家还有格特纳父子。小格特纳为了整理出版他父亲关于《植物种子与果实》的笔记，用 20 多个属 700 种植物进行了很多实验。把研究成果写成《植物界杂交的实验和观察》，1849 年出版。达尔文和孟德尔都曾细致地阅读过它。孟德尔认为这本著作理论性不强，并指出他的错误在于比较 F_2 与 F_1 时只强调 F_2 的巨大变异性，并把所有子代作为整体处理，而没有具体分析在杂种中发现的各种个别性状及其出现的规律。

发现性状分离现象的植物学家诺丁常被誉为孟德尔的先驱，但由于他也把子代看作一个整体，没有去寻找性状分离的规律。诺丁观察到杂种报春花的子代几乎恢复到亲本状态的现象，使他认识到了在杂交后代中可能发生亲本性状分离的现象，这就是说，两个亲本的性状分别出现在子代的不同个体上。这与孟德尔在豌豆杂交试验中的发现是一样的，但诺丁却认为，自然界“渴望毁灭杂交形式”，通过“分离两个物种的要素”这种方式来实现。诺丁提出的“物种的要素”与后来孟德尔的“遗传因子”是相同的概念。在科学史上，不同的人发现同一种现象是常有的事，但并不是所有的人都能从中提出新理论。诺丁发现分离现象比孟德尔还早，但他对所观察的现象作出了错误的解释。达尔文很熟悉诺丁的工作，并同他有过通信来往（1862 年和 1882 年）。达尔文也无法解释分离现象，对孟德尔的试验结果也没有理解。

二、孟德尔的遗传学定律

1851—1853年，孟德尔进维也纳大学学习物理学、化学、数学、动物学和植物学，在那里受到物理学家多普勒的数学和统计学的熏陶，又受到植物学家翁格尔（F. Unger）的物种可变和植物通过杂交可能产生新种观点的影响。1853年大学毕业回修道院。翌年被委派到布隆（今捷克的布尔诺）技术学校任物理学和植物学的代理教师，在这里工作了14年之久，并完成了著名的豌豆杂交试验。他于1856—1864年进行了8年豌豆杂交试验，精心选择不同性状的亲本经杂交得后代，对后代的性状作了统计分析。1865年，在布隆自然科学协会上报告了他的研究成果。1866年，在该会会刊上发表“植物杂交试验”的论文，首次提出分离和独立分配两个遗传学定律，认为性状遗传是受细胞里的“遗传因子”所控制的。至于什么是遗传因子，当时无法回答，这是个假设因子，后来称为的基因（gene），再后来则称作是染色体上的一个点，现在则被证明是DNA分子上的一个片断。先简单介绍一下孟德尔遗传学定律。

豌豆有开红花和开白花的。孟德尔把它们作为亲本（P）进行杂交，得到第一代杂种种子（F₁），第二年长成第一代植株，它们都开红花。让杂种第一代进行自花授粉，得第二代种子（F₂），又把它们种下去长出第二代植株，结果开的花有红的又有白的。如前所述，这种现象别人也发现过，但他们都没有关注第二代中出现红白花的规律。孟德尔与他们不同，也可以说孟德尔高明就高明在他数一数有多少植株开红花，又有多少植株开白花？结果发现红花与白花的比例是3:1。孟德尔又选择具有另外两种形状的豌豆作亲本，豆粒圆与皱、子叶黄色与绿色、植株高与矮等豌豆进行杂交，同样得到3:1。显然这个比例不是偶然的，那么，这是为什么？或者说如何解释这种现象？孟德尔提出了“遗传因子”决定性状的学说，决定红花的和白花的因子分别用英文字母大写的“C”和小写的“c”来表示。开红花的亲本的遗传因子用两个大写字母“CC”、开白花的亲本用两个小写字母“cc”来表示。亲本植株产生两种配子，其遗传因子分别为“C”和“c”，雌雄配子结合产生的F₁的遗传因子则是“Cc”。F₁都开红花，所以“C”为显性因子；“c”为隐性因子。F₁自交时，将产生“C”和“c”两种雌配子，也应产生“C”和“c”两种雄配子。它们自由组合产生的F₂的遗传因子有“CC”1个，“Cc”2个，“cc”1个，“CC”和“Cc”都开红花，只有“cc”开白花。其比例为3:1。这就是性状分离现象及其解释，

也叫做孟德尔分离定律

分离定律只论述了某一对性状的遗传表现，如果有两对相对性状则在杂交时将有什么样的遗传表现？孟德尔用具有黄色子叶和圆粒种子两个性状的亲本同另一个具有绿色子叶和皱粒种子两个性状的亲本进行杂交结果 F₁ 都是黄色子叶和圆粒种子，在 F₂ 中出现：黄色圆粒，黄色皱粒，绿色圆粒和绿色皱粒四种，其比例为 9:3:3:1，这就是独立分配定律，又称自由组合定律。孟德尔的遗传定律在逻辑上是完美的，它来自实验，可用实验证明，又可以预测试验结果，所以孟德尔是关于生物遗传现象的科学理论的创始人。

三、孟德尔被冷落

孟德尔发现了非常重要的遗传规律，然而当时未被重视，埋没了 35 年之久。那末，为什么孟德尔的成就被人忽视那么久？长期以来有一种说法，因为他的论文刊登在不被人重视的杂志上，所以湮没无闻然而事实不完全如此，有些史学家核查过布隆自然科学协会会刊发行情况。该刊“在许多大学和学术团体（例如伦敦皇家学会和林耐学会）的图书馆都有，另有 4 本还送往美国”。另外“孟德尔自己也有 40 本该论文的单行本，似乎他把这些单行本分发给其他植物学家们，现在只发现了 4 本”。我们无从了解当初总共发行了多少？不过伦敦皇家学会和林耐学会倒是当时信息交流的中心。应该说不会没有人阅读过一个学生埃尔泰斯（H. Ilits）阅读过所有过期的“会议录”。1899 年，他发现了孟德尔的论文，而且激动地拿给他的教授看。这个教授说：“呵！这篇论文我全知道，它无关紧要。除了数字和比例、比例和数字外，别无它物。它是纯粹毕达哥拉（古希腊唯心主义哲学家，以‘灵魂轮回’说为其特点——编者注）式的东西；不要为它浪费时间，把他忘了吧！”埃尔泰斯后来写了一本孟德尔的传记，以弥补他当时听信了那位教授的话所造成的严重的过失。显然，这位教授对孟德尔的论文曾经研究过，看来他很讨厌统计学方法。孟德尔开了用统计学方法研究遗传学的先例。

1881 年，德国植物学家福克在“植物杂种”一文中提到孟德尔论文 15 次之多，福克提到了孟德尔豌豆杂交试验和他在杂交类型中发现的恒定比例。后来，这篇文章启发很多学者去查阅了孟德尔的论文，为重新发现孟德尔做出了贡献。另外，在贝利（Bailey）的《植物育种》（1894）和皇家学会的《科学论文目录》里也都提到孟德尔的论文。还有，达尔文曾把福克文章的副本给过牛津的生物学家罗曼斯，但他们因翻译外语太费事，没有读过孟德尔的论文。很遗憾，罗曼斯为《大英百科全书》第

九版撰写“植物杂交”条目也不去研究孟德尔的论文。恐怕这不仅仅是语言文字上的障碍，他们都不能理解孟德尔所发现的现象和推理的方法及其结论，可能是忽视孟德尔论文的主要原因。后来的历史表明，只有那些在自己的研究中曾注意到与孟德尔所发现的类似现象的人，才对孟德尔的论文大为震惊，感叹不已

四、孟德尔论文的重新发现

下面，分别介绍三位植物学家重新发现孟德尔论文的经过。

1892年，荷兰植物学家德弗里斯在植物杂交实验中，观察到性状分离现象，和孟德尔在豌豆杂交试验中所见相似。德弗里斯分析这些现象的思路似乎也与孟德尔一样，也是先假设存在着单位因子，而且由于这些因子在重组时，各自独立地组合，从而产生各种类型之间的比例。此后，德弗里斯又做了更多的实验，得到大量数据来验证自己的假设。但是德弗里斯迟迟没有发表自己的研究成果。按照玛格纳的说法，德弗里斯在1899年已经见过孟德尔的论文，但他想以隐瞒来保护自己研究成果的优先权。但他太晚了，学术界已经不少人接受了孟德尔遗传因子的分离和重组的定律，把孟德尔誉为遗传学的奠基人。对此德弗里斯觉得不公平，也无可奈何，他勉强承认孟德尔的工作“在当时是非常优秀的”。这种情绪持续好多年，到1906年学术界出《孟德尔纪念册》时他拒绝了签名；一年后在他论述植物繁殖的著作中，德弗里斯连孟德尔的名字都没有提一下。相比之下，另外两个植物学家则显得宽宏大量，令人尊敬。

19世纪末，德国植物学家柯灵斯种植玉米和豌豆，把杂交种连续种植好几代，四年后，他也观察到分离现象。他在阅读福克著作中有关豌豆的章节时，受到启发，立刻去查阅孟德尔的论文。在读完了孟德尔论文，柯灵斯发现自己比孟德尔晚了30多年。1900年4月21日他收到了德弗里斯寄来的论文抽印本，得知德弗里斯最近的发现也比他早。第二天他就起草完介绍“格里高·孟德尔定律”的论文，并立即寄给了德国植物学会，并预定于5月发表。文中他在叙述自己的杂交实验结果之后，这样说：“为这些研究找出了一种解释后，我，如同德弗里斯相信他自己一样，也相信自己是一个创新者。然而，后来我发现，在布隆，六十年代的孟德尔院长，许多年来投身于最广泛的豌豆试验，不仅得到了同德弗里斯和我自己的相同结果，实际上还做出了与我们十分相同的、1866年时可能做出的最好解释。孟德尔的论文……在所有已知的关于杂交种的论文中是最优秀的”。

丘歇马克对植物繁殖的实际应用具有浓厚兴趣，发现豌豆杂种中黄色子叶和绿色

子叶、光滑种子和皱皮种子的比例都是 3 : 1 和柯灵斯一样，丘歇马克也是在福克的书本中才知道孟德尔的论文，从而去查找这篇论文阅读的。丘歇马克非常震惊，孟德尔早就做了那样广泛的试验，而且对性状分离作了如此精湛的解释。虽然实验还没有做完，但他赶紧完成自己的论文：《论豌豆的人工杂交》，并于 1900 年 1 月 17 日交给了学院杂志的编辑到 3 月，丘歇马克又一次感到惊讶，他意外地收到了德弗里斯寄来的论文：《论杂交种的分离定律》的单行本，他迅速翻阅之后发现文中有显性、隐性等术语。丘歇马克推测德弗里斯虽然没有提到孟德尔那篇论文，但他能猜得到德弗里斯读过。后来，丘歇马克回忆当时情景时说，就在同一天他急忙赶到出版社，催促《奥地利农业研究杂志》赶紧发表他的论文；同时安排在 5 月份提前印出单行本不久，他的论文还在校对的时候，又发生意外的事情，他收到了柯灵斯的论文，题为《孟德尔定律》。于是，丘歇马克决定先发表摘要，抢点时间，以示他也是重新发现孟德尔定律过程的参与者。

总之，1900 年，德弗里斯、柯灵斯和丘歇马克等三人各自独立地发现了孟德尔的遗传定律。后来柯灵斯和丘歇马克的建议用“孟德尔定律”或“孟德尔主义”一词，以纪念孟德尔的伟大发现，学术界接受了。当时还有其他人也已经非常接近这一发现，由此可见，如果当时他们不这样做的话，别人也会发现的。这个发现开创了遗传学作为一门独立的学科而迅速发展的历史。

五、连续变异与不连续变异

在 1900—1920 年间，孟德尔定律在生物学界广为接受，意味着遗传学作为生物学的一门独立的分支学科而兴起。德弗里斯在把他的论文单行本寄给了英国动物学家贝特森，这就促使贝特森去查阅孟德尔的论文。贝特森对该论文赞不绝口，他为孟德尔的精彩工作和文章清晰透彻而惊奇，并称之为“清晰性和叙述技艺的楷模”。他立即修改自己已经写好的在园艺学会学术会议上的讲演稿，把介绍孟德尔工作的说明增加进去。贝特森在会议上发言时说，孟德尔原理“将在今后所有进化问题的讨论上都会起到显著的作用”。从此，贝特森便成了孟德尔遗传学热情的支持者和有效的传播者，并把孟德尔的论文翻译成英文，使世界更多的人了解孟德尔理论。同时，他开始用不同的动植物来检验孟德尔学说。他通过香豌豆、牵牛花和一些家禽的实验结果，指出孟德尔的原理直接或略加修改，是很有普遍意义的。

那末，贝特森为什么对孟德尔如此感兴趣呢？这与他的以前的研究有关。在 19 世纪 80 年代，年轻的贝特森曾长途跋涉去现在的哈萨克斯坦研究内陆湖泊中的动物

群，尤其关注水生贝类，在那里他发现，盐浓度的变化并不引起相应比例的生物性状的逐渐变化换句话说，虽然环境提供了一个平稳而逐渐变化的物质条件，但是，生物的变异却是不连续的。贝特森由此得出结论，使这些水生贝类动物彼此差别如此大的变异，从一开始产生时一定是不连续的，而且受到遗传的控制，而不是受环境的控制这些观察支持了可遗传的变异是不连续的观点，自然选择只能作用于不连续变异上，因为只有这种变异可以遗传。贝特森的这些研究从方法到分析推理的思路与孟德尔很一致，所以他特别赞赏孟德尔的工作及其论文。

微小的、连续的变异经过自然选择导致生物进化的理论源于达尔文（见第一篇第六章达尔文进化论要点第4条），是正统的达尔文主义学派的基本观点。在孟德尔学说得到肯定和发展时期，有一部分科学家对孟德尔学说发起了一场激烈的论战，于是贝特森等人就成了他们攻击的对象贝特森的最有力的反对者正是他原来的朋友韦尔登，他们曾在圣约翰学院共事过。韦尔登是生物统计学家，忠实的达尔文主义者，以他为首的学派坚持融合遗传理论。争论双方反目成仇，口诛笔伐，进行无为的学术论战。

事实上，孟德尔的理论所涉及到的的是杂交问题和杂交规律，是应用统计学方法，按照杂交的类型来预测子代的种类。从事实际育种的人很早熟悉某种“比例”，虽然知道孟德尔定律以前，并没有哪个育种家真正地关注过这种比例，但是他们在生产实践中却经常接触到类似的比例。孟德尔定律为这些从事育种实践的人们长期以来就熟悉的现象赋予了理论意义，使育种家们第一次能够从单纯工作中获得一些学术理论，还能提高育种的效率。例如，他们从孟德尔理论中得知，表现出显性性状的生物并不一定（这种性状的）是纯种；此外，孟德尔的回交试验（具有显性性状的子代与具有隐性性状的亲代杂交）提供了检验生物基因型的方法，以便选出纯种和杂种。因此，他们对孟德尔特别崇拜。1902年，当贝特森到美国访问并参加一些农业会议时，他受到了特别热情的欢迎，他在给他妻子的情洋溢的信中写道：他每到一处都受到了那些手握孟德尔论文的农业专家们的欢迎。贝特森激动地说，“孟德尔，到处都是孟德尔”。贝特森亲眼见到了，注重实际效果的动植物育种家们比学院派的生物学家们更容易接受孟德尔的理论。我们可以想象，这个经历无疑使贝特森更加坚定地捍卫孟德尔学说。

六、遗传因子的定位

如前所述，19世纪80、90年代，细胞学已经积累了许多关于染色体、有丝分

裂和减数分裂的研究成果这些进展不仅在细胞学自身发展上是重要成就，而且还帮助遗传学家走出了引用“遗传因子”等假设概念来建立理论的困境；反过来细胞学家们认识了这些亚细胞结构及其行为的生物学意义。但是要把两个分支学科的发现圆满地统一起来也不那么容易在新的突破即将到来之际，历史上总是出现那种思维敏捷敢干提出超前预见的学者，然后是一阵反对的呼声，经过争论逐渐建立大家都能够接受的新理论

萨顿对染色体与遗传的关系具有浓厚兴趣早在哥伦比亚大学攻读硕士学位的研究生时期，他发表了题为“遗传中的染色体”的论文（1903）认为孟德尔假设的遗传因子的分离与有丝分裂和减数分裂期间同源染色体的分离非常相似。他提出了一个预言，认为进一步的研究将证明：“父本和母本的染色体联合成对及它们以后在减数分裂时的分离……将构成孟德尔遗传定律的物质基础”；他还认为，不同“染色体对”的随机分组可以解释成对基因的独立分离在萨顿以前，鲍维里做胚胎学实

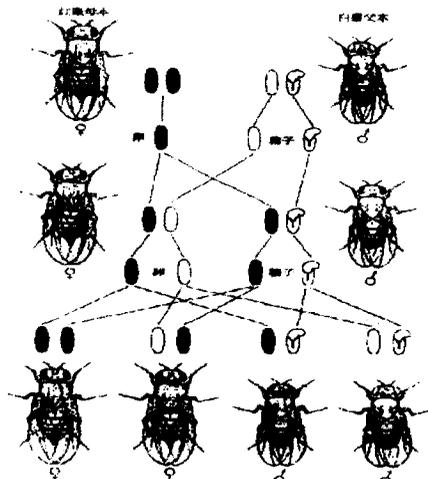


图 3-4 果蝇白眼性状的遗传(源自康内特《孟德尔主义》，经克米特公司允许使用)

图 6-1 果蝇白眼性状的遗传

验时发现受精卵发生畸变，追索其原因，原来是染色体的异常配对组合所致这就意味着每一个染色体可能携带有生长和发育的因子。鲍维里的实验结果可作为萨顿预言的证据，这些工作终于把细胞学和遗传学结合起来了后来他们的工作得到了肯定，于是把这种理解称作“萨顿—鲍维里假说”。在 20 世纪头十年里，这类证据已经不少，可以说染色体很有资格做遗传因子的载体；但还不能证明孟德尔的“因子”与染色体这样的作为细胞结构的物质实体有直接的关系。

因此，把孟德尔因子与染色体相联系的观点还是遭到了猛烈的批评。最典型的批评来自美国的摩尔根。1909年，他曾作过如下措辞严厉的批评：“按照现代孟德尔主义的观点，许多事实被迅速用因子来解释。如果一个因子不行，那么就用两个因子；如果两个因子还不行，有时就用三个因子。为了解释一些结果不得不用的那些超级把戏，常常解释得很圆满，因为那些‘解释’就是专门发明出来解释那些结果的，然后转眼间又发明出许多别的因子来解释它们……我们正在迅速发展一种孟德尔主义的教条”。摩尔根作为胚胎学家，对已被否定的“预成论”或“渐成论”成分特别敏感。如果他接受了孟德尔的“因子”是配子细胞中真实存在的颗粒，那就有被指责为预成论者的危险。所以他引用当时一位学者批评孟德尔学说的一段话，以表示他的观点：“当今孟德尔主义……实质上是一个形态学概念……只看到颗粒，只谈论它们，这样不可能研究过程……孟德尔认为有因子存在于配子细胞中，现在正是我们推翻这种看法的时候了”。

摩尔根反对孟德尔学说的观点归结起来就是批评该学说是凭着假定而构建的，缺乏实在的基础。可是，当孟德尔主义者把遗传因子与染色体联系起来，寻找假定因子的物质基础的时候，他又担心“预成论”的嫌疑而不敢接受。摩尔根发表论文(1910)提出明确的结论，孟德尔因子不可能由染色体所携带。若干年后，还是同一个摩尔根由于把孟德尔的理论确立为遗传的普遍规律而获得1933年的诺贝尔奖。从此，以后的遗传学便被称为“孟德尔—摩尔根遗传学”。贝特森和摩尔根一样是实验胚胎学家，他也认为染色体携带孟德尔的遗传因子的论点比较接近旧的预成论，因而反对，而且很顽固。这是因为他受剑桥大学唯心主义物理学家宗派的强烈影响，对任何形式的唯物主义都感到反感。甚至摩尔根从反对的立场转变，并找到遗传因子在染色体上的位置，绘制了染色体图的时候，贝特森仍然拒绝接受染色体理论，顽固地认为没有直接的证据证明“基因”或孟德尔所说的因子在细胞结构中具有物质基础，导致他在遗传学领域里的发展就此停滞不前。于是遗传学研究中心从英国跨越大西洋转移到美国去了。

摩尔根毕竟是实验生物学家，既然他已经公开发表了反对的见解，就应当通过实验验证他和孟德尔两者之间，究竟谁是正确的，谁是错误的？孟德尔因子到底是人为假设，还是客观存在？他曾考虑过用什么做实验材料，采用一年只收获一次的豌豆，周期太长，费事又费时，很不合适，必须找到一种合适的实验材料才行。究竟应该选择什么样的生物，他心里没有底。正在这时，有人给他推荐果蝇。于是摩尔根从1908年开始在哥伦比亚大学的实验室里培养果蝇，他很快发现果蝇作为实验材料有许多优点，使他真是喜出望外。得到这样的实验材料，启动了他攀登科学

金字塔的历程。

摩尔根充分利用了果蝇所具有的所有优点：它的生活周期很短，一年可以繁殖30代左右；在实验室里一年四季均可培养；而且繁殖力很强，一对雌雄果蝇一次可以产出几百个后代它如此之小，只有几个毫米长，因此在几个牛奶瓶里可以培养几千只；它又如此之大，在低倍数显微镜下就可以观察研究。更重要的是，这种果蝇每个细胞里只有4对染色体；每对的形状、大小都不一样，非常适合染色体观察；果蝇的个体很容易发生突变，还具有易于识别的遗传性状，雌雄个体也很好识别。果蝇的确是细胞学和遗传学研究的理想材料。摩尔根用它做实验，取得了许多惊人的成就，他也爱不释手。所以人们开玩笑地说，这种果蝇是上帝专门为摩尔根创造的，又把他的实验室戏称为“蝇室”。

1910年初，摩尔根在一个培养瓶中发现了一只奇特的白眼雄果蝇。他用这种白眼雄果蝇和正常的（红眼）雌果蝇交配，结果产生的后代都是正常的红眼；然而，当这些子一代彼此互相交配时，他发现白眼性状又出现了，而且白眼总是出现在雄性中，很少甚至没有出现在雌性中。摩尔根继续往下做实验，白眼雄果蝇与子一代雌果蝇交配，后代中雌雄果蝇的一半都是白眼（图6-1）。他认识到这种现象可以用孟德尔的理论加以解释。这一结果促使摩尔根改变了对孟德尔学说的态度，从一个严厉批判的反对者迅速转变为该理论的热情支持者。摩尔根的实验结果证实了遗传因子确实存在于染色体上；“萨顿—鲍维里假设”和萨顿的预言也得到了依据。另外，该实验结果还证实了孟德尔理论不仅适用于植物，而且还适用于动物。

七、连锁现象与染色体图

“基因由染色体携带”的见解被遗传学界接受了，孟德尔的性状分离与细胞分裂过程中染色体的行为之间的关系也得到了令人信服的解释，这的确是在遗传学发展史上的又一步跨越。然而，新的难题也随之而来了，生物的性状很多，而染色体的数目却很有限，也就是说，决定这些性状的基因的数量远远超过细胞核内染色体对的数目。而且在繁殖实验中研究的性状愈多，偏离独立分配规律的现象也就愈多，似乎独立分配不是一种普遍规律。贝特森等人早就发现（1905）在香豌豆中某些基因始终在一起传递，他证明在植物中存在着“连锁群”。就是说，两个或两个以上的性状连在一起遗传给后代，或者说，两个或两个以上的基因连锁在一起参加分离和分配过程。因此，子二代中出现偏离孟德尔独立分配的比例很大，后来这种遗传方式被称为遗传学第三定律。连锁现象的发现圆满地解决了生物的性状多、基

多而染色体数量有限的难题。至此，基因存在于染色体上，每一对染色体可以携带许多个基因，已经是事实，毋庸置疑了。

1911年，摩尔根提出了“染色体遗传理论”，认为在同一染色体上基因之间空间分隔距离和相对位置可用某种方法绘制染色体上基因的分布图来表示，两个基因在染色体上距离愈远，它们之间发生交换的频率就愈高。摩尔根指导他的学生斯特蒂文特(A. H. Sturtevant, 1891-1971)绘制了第一张果蝇染色体图，1913年发表在《实验动物学杂志》上。以此为开端，在后来的几年中，他们建立了一套绘制染色体图的详细步骤后来“染色体图”这种新概念引起了活跃的实验热潮，推动了遗传学的发展。

八、基因论

摩尔根的“蝇室”迎来了几个热情而且聪颖的自愿来的大学生，就是前已提过的斯特蒂文特、穆勒和布利基。摩尔根善于分析结果，并提出需要解决的问题；穆勒擅长于设计精确的杂交实验，来检验他或其他人提出的假说；摩尔根和穆勒都擅长思考一些广阔而综合性问题。1915年，“蝇室”研究小组已经积累了足够的实验结果，可以加以总结出新的理论成果了。摩尔根、斯特蒂文特和布利基三人合著出版了《孟德尔式遗传的机制》，他们认为孟德尔因子是物质单位，并位于染色体一定位置或位点上；每一个因子可以视为一个独立的单位，与其他相邻的因子通过染色体断裂和重组过程而分离。斯特蒂文特后来回忆他们的早期合作情景时说，他们这个工作小组，每个人都在做自己的实验，但谁都确切地知道别人在做什么，而且大家自由讨论每一个新的结果。大家都不太关注优先权和新思想、新解释究竟先出自谁。大家关心的只是如何推进工作。而且摩尔根及其小组很注重实验，除了杂交和统计方法之外，还采用在严格控制环境条件的情况下，进行人工杂交的实验方法。他们特别重视物理学和化学的类比方法、实验的方法，特别重视定量的价值。因此，果蝇研究小组的成果层出不穷，例如，1919年出版的《遗传的物质基础》、1928年的《基因论》等。摩尔根把他们经过20年艰苦不懈的努力所取得的成果作了如下概述：“基因论认为：个体的种种性状起源于生殖组织内联在一起、形成若干连锁群的成对的要素(基因)；生殖细胞成熟时，每一对的两个基因依孟德尔第一定律而彼此分离，于是每个生殖细胞只含一组基因；不同连锁群内的基因依孟德尔第二定律而自由组合；相应的连锁群内的成员基因之间有时也发生有秩序的交流；交换的频率可以提供有关每个连锁群内成员间线性排列的证据，同时也能表明成员相互

之间的相对位置”

摩尔根及其小组提出的理论远比贝特森或其他学者提出的理论高深得多。《基因论》把孟德尔学说从个体水平深入到细胞和亚细胞水平上，而且把杂交结果与细胞分裂过程中染色体的行为结合起来，使人们再也不能忽视孟德尔理论的普遍意义，无法否认孟德尔原来假设的“因子”确实是在配子细胞中具有结构的物质。1922年，贝特森访问摩尔根实验室之后，他放弃了对染色体理论的怀疑，并写信对“已在西方升起的新星”表示敬意

第七章

系统科学

在 20 世纪下半叶的理论思维中，系统性正以各种不同的形式“进入”现代世界观，片面分析的线性因果研究方式逐渐被抛弃，重点转向对客体整体性综合性的研究，转向对客体联系多样性和客体结构的揭示，正在发生和继续发生的科学技术革命程度不同地在新的思维中得到反映。现代科学基于新的思维方法和新的视角，给出一个新的世界图景。它所发生的改变，不仅是从现象到本质、从局部到全局、从简单到复杂的，还是从存在到演化的，这种新的思维方式就是系统方式

在这一道路上最早以科学理论形式进行探索的是美籍奥地利科学家贝塔朗菲，他创立了一般系统论。在他之后，有关系统的研究日益深入，与申农创立的信息论和维纳的控制理论一起，逐渐发展为一个学科群，出现了系统科学，从而极大地改变了我们以往所了解的世界图景。

第一节 朗菲的一般系统理论

一、关于系统的概念

系统思想源远流长，系统概念是人们在历经许多世代的实践和认识活动之后形成的。从词源上说，系统（system）一词源出于古希腊语，有“共同”和“给以位置”的含义。^①作为一门横向交叉学科的术语，它是在本世纪20年代以后才进入科学领域的。40年代，在美国贝尔电话实验研究所的工程设计中，系统概念首次被正式使用。50年代以后，系统概念的科学内涵逐步明确，渐渐获得了相对确定的学术含义。但是，由于系统是一个有着广泛的涉及面的和丰富的内涵概念，由于主体的出发点、目的、角度和思维方式的不同，对系统所作的定义和理解也就有所不同。正如苏联学者萨多夫斯基（B·H·Cagobckuu）所指出的那样：“在探讨系统研究问题的著作中，我们会遇到这种情形，人们用各种各样的方式来给‘系统’概念下定义。”^②在1974年出版的《一般系统论原理》中，萨多夫斯基整理了34种定义。到现在为止，关于系统的定义已经远不止34种。这些彼此不同的定义，各自都有一定的视角，意见不一，纷然杂陈。较有代表性的，有如下几种：

美籍奥地利学者、系统论的创始人贝塔朗菲认为：“系统是处于一定相互联系中的与环境发生关系的各组成部分的总体。”

美国的罗道夫·J·阿奎拉教授认为：“一个系统实质上是由许多相互影响的分量组成，每个分量可适合或不适合于不同的函数，但皆服从于一个共同的目的。”

日本学者秋山穰和西川智登认为：“相互间具有有机联系的组成部分结合起来，成为一个能完成特定功能的整体，这种各组成部分的有机结合体就称为系统。”

在webster大词典中，系统被定义为“有组织的或被组织化的整体，结合着整体所形成的各种概念和原理的综合，由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素的集合等等”。

1967年日本的JIS工业规范（Z8121），将系统定义为“许多构成要素保持有机的秩序，向同一目的前进的一个整体。”

^{①②} 萧南槐：《大系统论——预测决策管理方法》，广东人民出版社1986年版，第13页，14页
瓦·尼·萨多夫斯基：《般系统论原理》，人民出版社，1984年版，第83页。

中国 1979 年版《辞海》这样解释系统：“自成体系的组织，相同或相类的事物按定秩序和内部联系组合而成的整体”

钱学森认为，系统即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体，而且这个系统本身又是它们从属的更大系统的组成部分。^①

从以上分析比较，我们可以这样来定义系统，系统是由两个以上有所不同而又相互联系相互作用的要素所组成的、具有一定的结构的适应特定环境功能的有机整体，它从属于更大的系统。这样，在最一般的意义上，可以从三个方面反映出不同性质系统的特点。第一，它指明系统是由两个以上要素组成的整体。第二，它指明在要素、整体、环境之间存在着有机联系，从而系统内部和外部形成一定的结构，环境就是系统所从属的更大系统。第三，整体具有不同于各个要素的系统质或新功能，具有非加和性。一般系统的特点，在这个定义中得到反映。当然，任何关于系统的定义都不是绝对的，都具有相对性。作为人们认识的一种中介手段，它不是封闭的而是开放的。具体揭示和分析各类系统本身的丰富蕴涵和多样联系，是主体认识和实践的更为重要的目的。

二、系统的特性

系统概念，广义地讲，应当包含着系统的性质和系统的分类。这是我们在把握世界图景时所不能忽略的。

系统的性质，是抽去了实际存在的物质系统或观念系统的具体属性，对系统的共同特性和性质的考察。以系统基本性质不同的分析从目前的研究所达到的成果看，是指整体性、结构性、等级性、目的性、相关性、环境适应性、协调性等。

整体性又称全局性、系统性，是系统的一个最基本的，最重要的性质，是系统的核心。任何系统都不只是各个要素或部分的简单相加或机械拼凑，而是有机结合。由若干个要素或部分组成的系统，都具有特定的整体性功能。一方面，它呈现出各个要素或部分在孤立状态下所没有的新特性的新质；另一方面，新特性新质的出现使系统整体在特定量度上的功能增大。所以，“整体大于部分之和”，不是 $1+1=2$ ，而是 $1+1 >$ 当然，如果各要素或部分之间组成彼此冲突的结构，其整体性功能也可能小于各要素或部分功能之和。“三个和尚没水吃”就是如此。当构成系统的要素或部分从整体中割离出来时，不可能完全地保存原来在系统中的性质、特征和意义。整体性是对系统特性在更高层次上的概括。不同的系统，其整体性的具

体形态和内容也有所不同。但任何系统的整体性都只有各个要素或部分按特定的方式组合成系统时才出现

结构性是系统的另一个固有的属性结构性，或系统内部的组织和排列次序，是在一定时间和空间范围内组成系统的内在形式。一定的组成部分、它们的时空秩序和联系规则，是结构的三要素。一切系统，都具有本身特定的结构。系统的特征和规律总由两方面因素所决定，一是组成系统的要素或部分，一是系统的结构。相同的要素不同的结构，可以组建出不同的系统，相同的词汇可以组成不同的文章，相同的分子可以形成同分异构体。在一定意义上，系统的特征和规律主要因结构的不同而不同。许多情况下，系统的要素可以不断更新，但由于结构没有发生变化，系统更依然保持其自身。一般地说，结构规定和制约着系统功能的性质与水平，限制着系统功能的范围和大小。由系统结构决定的功能，可以大于、小于、等于系统内部各要素功能的和，关键在于结构是否合理。结构也受到功能的反作用，可在一定条件下改变结构。

等级性又称层次性，是系统结构和功能层次性的总称。作为系统的基本性质之一，它表明系统的每一个组元都可视为一个系统，我们研究的系统也可视为更大系统的一个组元。任何系统都具有多层次级结构和功能。结构的层次性源于结构与要素之间的相对独立性及其转化，功能层次性源于功能与要素活动之间的相对独立性及其转化，系统层次是结构层次与功能层次的有机的统一。层次的多少，因系统而异。等级层次性是系统客体的一种客观性质，可以按照系统中各要素的联系方式，系统运动规律的类似性 能量变化的范围和功能特点 把复杂的客体系统划分为若干等级层次。究竟作出怎样的划分 又与主体的抽象区间和认识尺度有关。从物质世界结构层次看 可有机械——物理——化学——生物等结构层次，其中每一层次又可细分若干层次，如生物结构层次分为亚细胞——细胞——器官——机体——群体种——群落——生物等七个层次。就不同等级层次之间的关系而言，决非毫不相干地并存，而是排成由低而高、由简而繁的阶梯，呈现为不同层次等级之间的联系和转化。高级系统由低级系统组成，低级系统的规律渗透到高级系统中受着高级系统规律的制约，高级系统有低级系统所没有的特性和规律，不能完全地还原为低级系统规律。

环境适应性。任何系统都是在环境中存在的，都要受到环境的作用和对环境发生反作用，即发生物质、能量、信息的双向输运过程。因此，系统不仅存在着要素、要素与系统的关系，还要处理系统与环境的关系。环境是系统整体存在和发展的全部外界条件的总和。它是一组变量，经常处于变动之中，从而引起系统的变化。系统适应环境的变化，通过调节和控制机制保持和恢复原有功能的性质，就是

系统的环境适应性。英国科学家阿什比（W·R·Ashby）曾模拟生物系统的适应性的能力极限。环境急剧变化时，系统的稳定性有可能因此失稳，可能过渡到一种新的稳定性，但也可可能使系统解体。当然，环境的缓慢变化，系统也有可能改变自己的结构。

相关性是指系统中各要素间联系的相互依存性和相互性制约性。系统的结构，通常由若干要素或部分构成，结构内某一要素或部分的改变，虽然要素是系统的基础，但系统并不是由它的要素本身来维持自身，而是靠要素之间的稳定联系的不持续，是各要素相互联系的发展结果。系统的结构越合理，相磁度就越大，其整体性功能就越好。在相关性中，不仅在要素间会出现对立或竞争，而且要强调其协同性或协调性，使系统达到整体优化。协调性是复杂系统内若干相互关联的简单子系统同相互化合的方式各自发挥其功能的性质。

系统的目的性是系统的主要特性之一。目的性是系统行为的特性，是系统在一定环境条件下所必然具有的达到最终状态的特征。系统过程的事件不只由它现实状况所决定，而且还取决于系统本身的将来状态——即系统所要到达的终态，这就显示出一种果决性。目的性体现着系统的发展趋向，贯彻于系统发展的全过程。控制论的创始人维纳（N·Wiener）曾对目的性作出科学解释。他认为以往目的论被解释为暗含着目的，其中常常加进了“终极因”这一暧昧观念，终极因这个概念导致了目的论和决定论之间的对立。实际上，所谓目的性就是作为行为客体的一种反应或效应，这种反应或效应受有关行为结果的信息的制约，在客体和环境发生作用时，不断通过反馈调整自己的行为，使之逐渐趋近某一目标。因此，在控制系统中，一切有目的的行为都是需要反馈的行为，或者凡有反馈行为的系统都是有目的的。例如鹰抓兔这一过程，当鹰发现兔并向仓皇逃跑的兔俯冲时，为了抓到兔，它要不断地随着兔逃跑的方向和速度而改变自己的飞行路线，多次反馈之后最终抓到兔子。在这种反馈机制中，呈现出鹰抓兔的目的性由此，因果性逆转这一现象便可脱去其玄秘的外衣，单义决定的因果关系不承认结果对原因的反作用，是它罩上玄秘之光的根源。在反馈机制或协同力作用下，维持或趋近一个特定的稳定状态，以保持系统内部与外部环境协调的行为特性，就是一般系统的目的性。当代自组织论进一步揭示出不动点、吸引子、极限环、奇怪吸引子均具有相应的目的性。

三、系统的分类

世界是系统和系统的集合，它的复杂性通过系统的复杂性表现出来，各种各样

的具体系统，一方面有其共同性，另一方面又都各有其质的特殊规定。面对这种情况，系统分类学应运而生它的任务是为系统分类提供理论根据，为系统分类建立科学标准，并对现实世界中的各种具体系统进行分类，从而为深入研究各类具体系统及其相互关系，为深入研究系统进化奠定基础立足于系统分类学，会使我们对世界图景的把握更加全面而细致。统观已有的各种分类方法，参照朴昌根的《系统分类学初探》，①系统可以有如下多种划分：

从一切系统的共性上，可以有系统等级层次的划分和子系统或分系统的划分。系统的等级层次划分，表现为从系统开始的两个方向相反的等级序列，一个是向下的等级序列，一个是向上的等级序列：

总系统←第n级超系统←第2级超系统←第1级超系统←系统→第1级子系统→第2级子系统→第n级子系统→要素。总系统是在认识中不能或不必要再与其它系统结合构成更大系统的总体系统。子系统、系统与超系统的关系，子系统与分系统的划分，可以从对系统的两种不同定义出发得到。当把系统定义为相互作用的各要素的集合时，可以推知系统的等级，每一等级都包含着多个各自的子系统，系统就是众多于系统相互联系中产生出来的整体。当把系统定义为抽象集上的关系时，即 $S \in X \{V_i | i \in I\}$ 其中S为系统，X为笛卡尔乘积， V_i 表示诸关系，I为指标集。分系统是各子系统或要素在某些侧面具有重要意义的某些关系，这样，系统被看作是相互联系的分系统的集合。

一个分系统也可分成若干等级，成为分系统的多级子系统。同时兼顾的对子系统和分系统进行研究，会有一种互补的作用。由此可得子系统分系统矩阵图。

除了上述适用于一切系统的划分，还有其它多样的分类标准，从中呈现着世界的纵横交错、彼此作用的系统网络。

按存在范围分，可以有微观系统、宏观系统、宇观系统。通常把能直接为我们感官所把握的客体系统称为宏观系统，把不能为我们的感官所直接把握，而需要借助于仪器作用显微放大的微观粒子客体系统称为微观系统；把只能被我们感官部分地直接把握的大尺度天体系统称为宇观系统。在宏观系统、微观系统、宇观系统中，又可分为若干个等级。例如：天体星系的空间尺度 $10^{20} - 10^{23} \text{cm}$ 。

| | |
|------|-------------------------------|
| 恒星 | $10^6 - 10^{14} \text{cm}$ |
| 行星 | $10^8 - 10^{10} \text{cm}$ |
| 地上物体 | $10^{-9} - 10^7 \text{cm}$ |
| 分子 | $10^{-5} - 10^{-6} \text{cm}$ |

①朴昌根：“系统分类学初探”，载《系统工程》，1987年，第一期。

| | |
|------|---------------------------------|
| 原子 | $10^{-8} - 10^{-7} \text{cm}$ |
| 原子核 | $10^{-13} - 10^{-12} \text{cm}$ |
| 基本粒子 | 10^{-13}cm |

按自然发展层次分，可以有无机系统、有机系统、社会系统。无机系统是具
有机械、物理、化学反应性质的自然客体系统，有机系统是包括动植物在内的生命
客体系统。社会系统是以人的存在为基础的，具有政治、军事、宗教、管理、科
学文化体系的复杂大系统。在社会系统的运行中，主要遵循社会系统自身的规律，
同时渗透着无机系统和有机系统规律的作用。

按科学领域分，有自然系统、社会系统、思维系统。自然系统是由矿物、植
物、动物等天然物质自然组成的系统，它的产生与存在与人的活动无根源性关系，
如太阳系，生态系统，它们的存在对人而言都是时间在先的，并不由人的活动所建
立。思维系统是由人的神、心理、语言、文字、逻辑、思维方法及其它思维工
具组成的系统

按人与自然的关系分，有自然系统、人工系统、复合系统。人工系统是人工
制造的各种元素所组成的系统，它的产生与存在与人的活动有根源性关系，是在从
事实实践活动的过程中由人建构起来的，如工程技术系统、人类文化系统。复合系统
是由自然系统与人工系统共同构成的系统，既有自然物的成分又有人造物的成分，
例如人——机系统、社会生产系统

按系统与环境关系分，有“开放系统、封闭系统和孤立系统。开放系统是通过输
入——输出、组建——破坏等行为而同环境不断地进行物质、信息交换的系统。封
闭系统是与环境间虽然没有物质交换但可以有能量交换的客体系统。孤立系统与环
境间没有任何相互作用，是即无物质交换又无能量交换的系统。严格地说，并不真
存在这样的系统。但在研究中，当系统与环境间的作用小到可以忽略不计时，就把
系统近似地视为孤立系统。

按主体对系统认知程度分，可以有“黑色”系统、“灰色”和“白色”系
统。黑色系统是那些我们只能知其输入——输出关系，而不知道实现输入——输出
关系的结构与过程的系统。白色系统是指那些关系的结构与过程的系统。灰色系统
介于黑白系统之间，指我们对于它的输入——输出关系的结构与过程部分地知道，
部分不知道，还没有全面了解。灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授首次提出的
它以灰色参数、灰色方程、灰色矩阵等来刻画系统，对应着很多的客体系统，得
到广泛应用

按运动形式，有静态系统和动态系统。动态系统在任何一时刻的输出，都不
只与该时刻的输入有关，而且与该时刻以前的输入有关，是有记忆、有历史的系
统。

静态系统在任一时刻的输出都只与该时刻的输入有关，与前此时刻的历史无关，是无记忆的系统。

按系统的状态分，有平衡系统和非平衡系统。平衡系统是其状态下随时间变化的系统，如热力学平衡系统，其特征是熵趋于最大。由于平衡系统紊乱度最大，无序性最高，组织程度最差，信息量最小，因而它不能飞跃到另一新质态。只有打破了它的闭锁性，引入负熵流，它才可能转向新质态。非平衡系统，其状态随着时间发生不断的变化，与环境发生着能流和物流的双向输运。非平衡系统有两种情况，一种是线性非平衡态系统，一种是非线性平衡态系统即远离平衡系统。线性非平衡态系统，只与平衡态系统有微小的差别，它有与外界交换物质能量等引起的熵流。不过这类系统，即便在开始时存在一些有序结构，最终也会由于系统内部的熵产生作用趋于平衡远离平衡态系统，与环境交换时所产生的熵流远远小于零，给系统带入了负值熵流，从而能使系统的有序性增加大于无序性的增加，形成新的结构。

系统的分类多种多样，不可能在这里一一列举。根据实践的要求，主体可依某种分类标准去做具体划分。

四、贝塔朗菲的一般系统理论

在系统科学史上，贝塔朗菲占有极为重要的位置。作为一般系统论的主要创始人和 20 世纪杰出的科学家和哲学家，贝塔朗菲早在 20 年代就提出了机体系统理论。1937 年他首先从口头上提出了一般系统论的基本思想，并于 1945 年发表一般系统论的创立宣言“关于一般系统论”一文。此后他陆续发表了大量有关的论文和著作，对现代系统论产生很大影响。

“一般系统”一词，在系统科学中是一个专用术语，它与各种具有实际内容的具体系统相对照，专指从各种现实系统中抽去其特殊内容而得到的抽象物，即各类具体系统的共性，也就是在元理论意义上的“系统本身”。因而，凡是从元理论水平对系统进行共性研究的系统理论，都可称为一般系统论，贝塔朗菲的一般系统论，乌耶莫夫的参量型系统论。还可在一定条件下包括普利高津的耗散结构理论，哈肯(H·Haken)的协同学。贝塔朗菲一般系统论的内容十分丰富，便就主要内容而言，他重点研究的是三种理论：即机体系统理论、开放系统理论、动态系统理论。它们同属于一般系统论的内容。

（一）机体系统理论

如前所述，机体系统理论的提出与 20 年代生物学领域的机械论与活力论的争论有关。虽然机械论正确地指出了使生命现象得以发生的机械、物理、化学过程对于揭开生命之谜的意义，但是它不能说明生物有机体的秩序、组织、自调节性和统一性，而活力论在克服机械论的这种局限性时，仍然是建立在分析和相加的观点上和以机器理论为前提，走向了新的片面性。这两种片面性，都没有指示一个解决生命本质问题的正确方向。贝塔朗菲的机体系统理论，则着力于作这两种片面性所未能作好的工作。

贝塔朗菲的机体系统理论，从内容上可以概括如下：第一，把生物体看作在时空中存在的结构复杂的整体自然物。作为一个活的开放的系统，生物体既有自身内部各不同组份的相互作用，又有生物有机体整体与环境的相互作用。作为整体的生物有机体，其内部任一组份都不能在离开整体时仍能保持其原有功能作用。部分的行为与整体行为有很大区别。第二，是把生物体视为具有动态结构的系统，一切生命现象都处于积极活动之中。生物体以其组成的静态结构系统生物体中不断地发生着代谢过程。生物体中任何一个层次，都是以次级层次生长、衰老和死亡为前提，它不象静态结构那样只有被动的更换性，而是具有自调节性。第三，生物体首先是一个能动的系统。虽然也具有刺激感应性，但是它的主要特征不在被动性的刺激感应上，而是能动性，它的机能不只是对外界刺激作出反应，而在于维持生存的内在冲动的实现。第四，生物体的组织具有等级性。一切有机体，都是按照严格的等级和层次组织起来的，因而，生命现象的本质可以通过对生物组织的物理化学层次、基因层次、细胞层次、多细胞组织层次、器官层次、个体层次和群体层次的研究而综合把握。贝塔朗菲的机体系统理论进一步贯穿在开放系统理论和动态系统理论中。

（二）开放系统理论

经典热力学所描述的是处于平衡态和经受可逆过程的系统，以近似孤立的系统为研究对象。但是严格地说，在现实性上，系统与环境之间存在着极其复杂的双向输运过程，物流，能流，信息流的交换不可能处于绝对为零的情况。尽管经典热力学所研究的是热力学和热力学流为零时的状况，但它只不过是开放系统的一种近似，环境对系统的作用仍然存在。因而，开放系统比孤立系统具有更大的普遍性和现实性。贝塔朗菲的“一般系统”观念就是作为对开放系统原则的综合而产生的。

贝塔朗菲在《一般系统论——基础、发展和应用》一书中指出，在这个理解下，开放系统表现出一系列值得注意的特征：其一是稳态。在一定的条件下，开放系统趋近于一个与时间无关的稳态（贝塔朗菲使用德文为 *Fließgleich gewicht* 相当于英文中 *Stead state* 意为流动平衡）。这种稳态与孤立系统所达到的平衡态不同，平衡态虽然也是一种不依赖于时间而保持系统组份比不变的状态，但是平衡态系统的组份比是在系统内部物质运动中保持恒定的，并且不需要通过耗散能量来维持其平衡态，在宏观行为上不具备做功的能力。由于与这种真正平衡态保持一定的距离，稳态能够做功，例如生命系统稳态的系统尽管不断进行着不可逆过程，有输入和输出，发生着组建和破坏，但其构成的组份比能保持不变，显示出值得注意的自调节特性。系统到达稳定，不必象平衡态系统那样取决于初始条件，而是取决于系统的参数，即取决于反应和输运的速率，由此引出开放系统的第二个特征：它可以不同的初始条件出发，在演化过程中经历扰动之后仍然达到相同的最终状态，呈现出“异因同果性”或“等终极性”。在孤立闭锁的系统中终态是由初态决定的，初态或过程的变化会引起终态的变化。在开放中达到的稳态，则不依赖于初态或过程，只取决于反应和输运的速率。等终极性这一性质，在生物有机过程中具有特别重要的意义。贝塔朗菲曾使用一个图式说明：新生幼鼠在正常生长50天后，用减少维生素的方法使其停止生长，在恢复正常的营养后，幼鼠照样能达到正常的最终体重。当然，开放系统也可能发生调节过度 and 起动不及现象，这时系统会沿着与稳定相反的方向进行，但在最后它又趋向于稳态。

开放系统的第三个特征是序增熵减。用热力学语言来表达，就是开放系统能把自己维持在正常不可几的统计状态和有序有组织的状态上。贝塔朗菲指出，根据热力学第二定律，孤立系统中的物理化学过程一般趋势是熵增序减，可几性增大，有序性减小，而生命这一开放系统能把自身维持在高度有序和不可几状态，甚至于进一步朝着增强分化和组织性的方向演化。贝塔朗菲晚年吸收了普利高津的广义熵理论并把它作为开放系统理论的重要成份，广义熵函数是对熵增加原理的扩展，这一理论导致不可逆过程热力学的建立。在克劳修斯（*Clausius*）那里，孤立系统中的熵总是增大的， $ds \geq 0$ 。根据普利高津的耗散结构理论，开放系统中熵的总变化量可以写成 $ds = des + dis$ 。 des 是由于输入而引起的熵的变化， dis 是由于系统内不可逆过程而产生的熵。 dis 恒定为正， des 可正可负可为零。孤立系统熵的变化可视为 des 为零时的状况，负熵是由于输入携带自由能的物质的数量超额补偿系统内部熵产生而引起，这恰是薛定谔“生物以负熵为食”的根据，生物系统既有秩序的维持和增加，都是系统开放的结果。

开放系统理论既是一般系统论的渊源，又是一般系统论的重要组成部分。虽然

开放系统论后来在普利高津和哈肯等人的研究中取得了巨大的进展，贝塔朗菲的工作仍不能减其首创奠基的意义

（三）动态系统理论

根据系统状态与时间的关系，可以划分出静态系统和动态系统。对于静态系统而言，其状态变量与时间的变化无关而能独自决定系统的状态特征；对于动态系统，情形就大不相同，系统的状态变量是时间的函数。对静态系统可视为动态系统的一种近似，从而，动态系统是系统的一般情形。贝塔朗菲用一组联立微分方程来定义动态系统，进而在设立各种约束条件的情况下，对系统的整体性、加和性、增长、竞争、机械化、集中化、终极性、等终极性作出数学上的表述。

除了在一般系统的基本性质，若干概念及其初步的数学描述上有卓越的贡献外，贝塔朗菲还力图把一般系统论原理应用于物理学、生物、心理学、精神病学和社会科学，实现科学的统一

五、贝塔朗菲一般系统论的局限性

贝塔朗菲的一般系统理论，在某些方面是过于简单的，例如他关于动态系统理论的数学描述。由于他所从事的工作具有首创性质，因而不可避免地会存在很多不足，在局限性问题上，存在两种情况：一是贝塔朗菲自己所察觉到的局限，一是来自各个方面的批评。由贝塔朗菲自己觉察到的，他作了主动克服这些局限的努力，那些来自各方面的批评，更多的是由后来系统科学的发展解决了

贝塔朗菲曾认为机体系统理论可以拓广为具有普遍适用性和世界观意义的一般系统论。因此，他运用类比同构的思想方法，建立了 类比型的一般系统论，提出了生命现象的有组织性、有序性和目的性，但他并没有对有序性、目的性作出令人满意的回答，也未能深入探讨有关复杂系统的演化道路、演化条件和演化规律问题。这些问题后来在普利高津、哈肯等人的理论中得到较好的解释。乌耶莫夫批评了贝塔朗菲的类比型的一般系统论仅用了同构同态的类比，而在事实上，类比的形式不只限于同构同态。依据现有的物理学史和数学史给出的材料，至少有 50 多种独立的类比形式，其中许多可以用于发展类比型一般系统论。何况，类比型系统论借助于类比只能发现系统中的一般系统论而不能确定一般系统特征的其余规律。乌耶莫夫主张引进参量型系统论，以便确定出系统的全部规律

贝塔朗菲晚年注意到仅从技术上和数学上来理解一般系统论是不够的，因而试图

突破这一局限，对它重新加以定义，重新确定其研究范围，并进而给予系统论以哲学方法论的地位。1968年，他在专著《一般系统论——基础，发展和应用》一书中，说系统论远远超出了技术课题和技术上的需要这种重新定向成了科学领域总的必然的趋势，贯穿于所有学科，最后到哲学。它在不同的领域内激荡着，达到不同程度的成功和精确性，并宣告一种有强大推动力的新世界观的来临。1972年，他去世的前一年，发表了《一般系统论的历史和现状》一文在文中，他试图对一般系统论重新下定义他说，一般系统论可以作为一个新的科学规范，广泛地应用于各个学科的研究领域中去。它的内容可以包括三个方面：一是关于系统的科学和数学系统，即对各种同不的具体科学例如物理、生物、心理、社会科学系统进行科学理论研究，并要求用精确的数学语言描述各类系统。二是系统技术，着重研究系统的思想在现代科学技术和社会各系统中的应用三是系统哲学，研究系统哲学，研究系统的本体论、认识论以及人与世界的关系、价值观贝塔朗菲的目的是想填平社会科学与自然科学之间的鸿沟，但他还没有来得及完成这项工作就去世了

一般系统论在贝塔朗菲的脑海里，从孕育达诞生到发展，时间长达四五十年在这中间，贝塔朗菲对自己的理论作了部分改变。对开放性系统的稳定性的条件和定义是否只能用熵函数作唯一的表述，对于进化论与热力学第二定律的统一问题，以及有些系统的性质不能依靠数学工具表述等问题，他都有所认识。

贝塔朗菲的一般系统论，对现代系统理论的产生与发展产生了重要的影响。不过不应当产生这样一种误解以为它可以详细地给出客体系统在微观结构和系统属性方面的一切情形事实上这是各种具体系统研究理论的任务。同时应当注意这样一种倾向在工具和研究手段实际上不发生改变的情况下随着时间的流逝“一般系统论”的任务在不断扩大。^①例如，苏联的萨多夫斯基认为，一般系统论应当是关于系统研究方法论的元理论它不仅应当对各类具体系统进行理论上的概括还应该进一步对制定各种系统论所依据的诸原则进行概括，这种看法是很有道理的。但在萨多夫斯基看来，贝塔朗菲的一般系统论、麦萨洛维奇数字一般系统论、乌耶莫夫的参量型一般系统论，都不够元理论水平。^②至少，对贝塔朗菲而言，萨多夫斯基是有些苛刻了。因为萨多夫斯基忘记了贝塔朗菲所在的位置——奠基、开创。不过，一般系统论也不应该因此受到原有理论的局限的束缚只停留在初级水平它必须向更高阶段、更深刻的方面进步，这体现在后来有关系统论研究的进展中。

①② 瓦·尼·萨多夫斯基：《一般系统论原理》，人民出版社，1984年版，第197页，译者说明第3页

第二节 与 论

世界是运动、变化、发展的物质世界。任何物质的运动过程都离不开信息的运动过程，都必然伴随着信息的获取，传递、变换与存贮等过程，信息是物质系统本身具有的普遍属性

一、信息和现实物质世界的运动

一切物质都在运动，从微观世界的基本粒子到宏观世界的宇宙天体，从无机物到有机物，从生物界到人类社会，无一不在运动着，无时不在变化、发展着。整个物质世界又都处于普遍的相互联系之中。严格说，不存在相互间完全孤立、毫无联系的两件事物，不过联系的情形不所不同罢了

任何物质的相互联系与运动过程，都必然伴随着信息的获取、传递、交换与存贮过程。在通信领域，信息是信源与信宿之间相互联系的内容。从控制论的角度看，信息是控制系统进行调节活动时，与外界发生相互联系，相互交往的内容。运动着的物质是信息的载体，信息是物质系统本身具有的一种属性，它反映了物质世界的普遍联系和关系的特定本质特性。

宇宙间的事物，不是单一的，孤立静止的，而是处于相互联系，相互作用，永不停息的运动变化状态之中，表征这种联系、变化、差异的就是信息。例如，报纸、电台、电视每天所报导的新闻、消息，反映了国内外形势的各种动态，每天都有变化，都有新的内容，才为人们提供了信息。如果天天如此，没有任何变化，当人们再听到它时，就不可能获得任何信息。

一般说来，物质和信息传播总是随载体而流动的。知识（信息）可以从书本流向教师、流向学生。人类的文化成果（信息）可以超越生命有限的个体，一代代（流动）传下去。但是，一定层次范围内的信息，还可以在载体相对静止的情况下，通过反映过程而转移或变换。并且在此前后，不同载体所承载的可以是同一信息。这是信息的一个重要性质反映过程可看作是信息的某种传播过程。

总之，信息表现了物质系统的运动状态、物质系统运动变化的方向性。任何物质的运动过程都离不开信息的运动过程，信息的传输是载体的一种特运动方式。

二、日常用语中的信息概念

信息这概念虽然比较抽象，但人们每时每刻都在同它打交道。现在我们看报纸、看电视、听广播，与别人交谈等等，都被看作是在接收信息“信息”这一名词已经渗透到人们日常生活的各个角落中了。

那么，究竟什么是信息呢？我们通常所说的信息就是指对接收者来说预先不知道的知识内容牛津字典解释说，“信息就是谈论的事情，新闻和知识。”韦氏字典说：“信息，就是在观察或研究过程中获得的数据，新闻的知识”1953年，苏联大百科全书第二版，把信息看成是新闻工作的一个概念：“信息确定为新闻界的一个概念，是报纸进行报导的一种特殊体裁，借助它，可以使读者知道国内或国际之间的事件或新闻”^①

我国上海辞书出版社1980年出版的《辞海》缩印本认为：“信息是对消息接收者来说预先不知道的报道。”并解释说：“如广播天气预报时，收听者预先不知道明天是阴、雨或晴，则这报道对收听者来说具有信息。假如所广播的是已知的昨天天气，那就没有信息了。天气预报愈详细，则信息的分量愈多”^②

由此可见，在人们的日常用语中，信息是指具有新内容，新知识的消息也就是说，一切情报，资料、数据、指令、信号、图片、书籍、信件中都包含着信息，它们都是信息的具体表现形式。

三、信息的概念的几种定义

信息作为现代科学技术的一个基本概念，最早出现于通信领域。在信息论中，信息源发出信息经过信道传送给信宿，信息是系统确定程度（组织程度）的标志。

本世纪20年代，哈特莱在探讨信息传输问题时，提出了信息和消息在概念上的差异；信息是包含在消息中的抽象量，消息是具体的，其中载荷着信息。到了40年代，申农从通信角度，维纳从控制的角度分别给出了信息的概念。此后，由于信息概念广泛渗入各门科学领域，而各个学科又有自身的特殊性，因而出现了从不同的侧面对信息概念予以解释或定义的情况。关于信息的科学概念，目前学术界尚

^① А·п·Сухонов: 《Информация человек》 Москва, 《Советская Россия》, 1980, стр20
《辞海》缩印本，上海辞书出版社，1980年第一版，第248

无定论，已发表的定义大约有几十种之多。现仅就几种典型的定义作一初步介绍：

(一) 信息是实现事物间联系的一种形式；是人们对事物了解的不确定性的减少或消除

现代信息论的创始人申农认为：信息就是“两次不定性之差”，“能否定义一个量，这个量在某种意义上能度量这个过程所‘产生’的信息是多少？”‘量 $H = -\sum P_i \log P_i$ 在信息论中起着非常重要的作用，它作为信息，选择和不确定性的度量 H 的公式与统计力学的所谓熵的公式是一样的’^①

在这里，申农把信息的公式称之为不确定性的度量，把信息看作是不定性减少的量。我们用符号表示就是：

$$I = S(Q) - S(Q|X')$$

I 代表信息， Q 表示某件事的疑问， S 表示不确定性， X 为收到消息前关于 Q 的知识， X' 为收到消息后关于 Q 的知识。

如果，收信人原来拥有这一消息所传达的知识，那么这则消息就不会引起收信人知识的变化 ($X=X'$)，不确定性没有减少或消除，收信人就没有获得任何信息，如果消息所传达的内容是收信人事先所不知道的，那么收信人收到消息后就引起知识上的变化，收信人就获得了信息，不确定性就有所减少或消除。

从通信的角度看，信息就是通信的内容，通信的作用就是消除通信者的某种不确定性。所谓不确定性是指人们对某些客观事物缺乏必要知识，从而表现出对这些对象的了解是“不确定的”这样一种状态。如对天体演化，地下矿藏的分布不清楚，对工业生产的状况，农业收成好坏不了解，这就表示我们对这类事物缺乏知识，即存在不确定性。当人们通过各种方法和手段了解到这些事物的有关情况之后，对它们的认识就由不清楚变为清楚或完全清楚，不确定性就减少或消除了

(二) 信息是生物、社会等各种控制系统进行调节活动时，与外界相互作用、相互交换的内容

控制论的奠基者维纳说：“信息就是我们在适应外部世界和控制外部世界的过程中，同外部进行交换的内容名称”^②

年版，第 9 页。例如，蜜蜂这种群体活动的昆虫，就可以看作是有严密组织的控制系

申农：《通信的数学理论》上海市科学技术编译馆版，第 7 页

② 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆 1978 年版 第 9 页

统，为了生存，它们通过特有的方式来协调系统内部的活动。

当一只侦察蜂发现了蜜源后，就会立即飞回蜂巢，并通过舞蹈动作把这一消息传给工蜂，工蜂接受信息后，就会按照侦察蜂的舞蹈动作所表明的（距离、方向）信息去采蜂蜜。蜂在采集花蜜，调节群体的活动过程中，蜜蜂个体之间，以及蜂群与自然环境之间需要交换一种东西，以便相互告知。而这种相互交换、相互作用的东西就是信息。

人类社会是一个更高级、更复杂的控制系统，人们是通过语言、文字、图像等等，彼此交换信息，以调节人类社会的活动的。自动控制系统的机器要正常的运转，管理系统要发挥自己的职能，等等，都必须利用信息来进行调节，都必须进行一定的信息交换

所以，信息就是各种控制系统进行调节活动时，与外界相互联系，相互作用，相互交换的一种内容。

（三）信息表现了物质和能量在时间、空间上的不均匀的分布

维纳指出：“信息是分布在时间上可量事件的离散的或连续的序列——确切地说，就是统计学家的所谓时间序列”^①

冯·诺意曼 1958 年在《计算机和人脑》一书中提出：“用来传送信息的信息，它的唯一统计性质，就是脉冲的频率（每秒钟的脉冲数），……消息是一种周期性或近似周期性的脉冲序列。”^②

例如，广播电台广播的节目，电视台播放的电视图像，侦察、气象卫星传送的情报、资料，都是由通信系统所发射的电磁波（伴随一定的能量）表现在时间、空间上的一系列的均匀分布。由于电磁波和能量在时间、空间上的不均匀分布，才能从收音机中听到音调高低不同，速度快慢有别的各种声音，才能从电视机的荧光屏上看到色彩不同，深浅有别的各种图像，才能从空中获得种种各样的情报和数据资料。

物质和能量在时间、空间上的不均匀的分布，给我们送来了各种各样的信息。信息就是在通讯存储和控制系统中，物质和能量在空间和时间上分布的不均匀度的度量。

（四）信息是组织程度，

苏联学者茹科夫在 1976 年出版的《控制论哲学原理》一书中，把信息分为两种

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社，1963年版，第 8—9页。

② 冯·诺意曼：《计算机和人脑》，商务印书馆 1979年版第 58页

基本类型，一种叫做自由信息或相对信息，这种信息依赖于具体的控制系统，是控制系统为了实现控制和调节的作用与被控制客体之间发生的特殊关系或联系。另一种叫做结构信息，是指“客体的组织结构和物质基础。”他说：“信息——这是组织的一种尺度，是控制系统及其作用的有目的地调整了的结构……”^①

这就是说信息是任何一个系统的组织性，复杂性的量度，是有序化程度的标志。例如，在生物的遗传过程中，DNA（脱氧核糖核酸）是生物遗传的物质基础，它是由磷酸，脱氧核糖和碱基按照顺序首尾相接而联系起来的，关键是碱基，碱基共有四种：腺嘌呤（A）、鸟嘌呤（G）、胞嘧啶（T）、胸腺嘧啶（C）这四种碱基就是将遗传信息编成“密码”的4个字母，遗传密码是三联码，其中每三个字母组成一个“密码子”。由于“密码子”中三个字母的排列次序不同，结构不同，而形成不同的DNA。遗传密码就是记载在亲代DNA分子核苷酸顺序上的遗传信息。DNA分子中特定的核苷酸排列顺序就决定了生物体的遗传性状，在遗传信息的指挥下，结构不同，排列不同的碱基的各种组合，形成了生命所需的1000多种蛋白质。可见，信息是系统的组织程度，有序程度的标志

（五）信息是由物理载体与语义构成的统一整体。

前东德学者克劳斯（G·Klaus）在《从哲学看控制论》一书中说：“什么是信息呢？纯粹从物理学方面看，信息就是按一定方式排列起来的信号序列。但光说这一点还不足以构成一个定义。毋宁说，信息必须有一定的意义，必须是意义的载体”^②

例如：体育教员在教学生上体育课时，很多具体动作光靠语言是不够的，要使学生完全理解自己的要求，往往需要做示范。体育教员所做的示范动作，就具有信息的意义（语义）信号兵联系用的旗语动作，蜜蜂传递信息的舞蹈动作等，同样都具有意义（语义）。所以他又说：“信息的语义能够产生心理效果，只有在这个时候，我们才能说信息有语义”^③

由此可以得出结论：信息是由物理载体与语义构成的统一整体。

除此之外，还有人把信息理解为：“集合的变异度”“事物的差异或关系”“事物存在，运动，发展，变化等特征的表象”“从客观存在到主观认识的媒介和桥梁”“由物质到精神的转化物”。“信息是自然界普遍联系，相互

① H·茹科夫：《控制的哲学原理》，上海译文出版社，1981年版，第129页

②③ G·克劳斯：《从哲学看控制论》中国社会科学出版社1981版，第68-69页

作用的形式。信息、（形式）和物质（内容）是作为一个自然界的两个侧面，二者是对立统一和不可分割的。”等等。

以上这些关于信息的各种定义，都是从不同侧面提出的；虽然也有不少材料并非严格意义上的定义，但它多少反映了人们在探索信息本质属性时的某些观点，在某些方面触及了信息的本质，有一定的道理。

四、申农的信息理论

（一）申农信息的产生

人们关于通信问题，关于信息的使用以及关于信息的传递和贮存的研究却有悠久的历史。这个过程可以追溯到人类语言的产生。人们，为了互通信息协调的行动，产生了语言。语言就是人类为了通信、为了交流信息而进行的一种创造。文字、图形的出现，是信息传输、贮存的一个更新的阶段。人们使用文字、图形不仅可以表述人们的思想，而且有利于信息的传输。通过文字和图形，各种信息可以贮存起来，流传下去，这使人们对信息的加工处理能力大大提高。人们不仅利用各种语言、文字图形，而且还使用其他方式去传递信息。非洲一些部落曾还在使用。中国人在古代则发明了烽火通信这一特殊的通信形式。一旦敌人来犯，就点燃烽火报警，烽火就意味着敌情。这实际上就是一个具有两种状态的可能性空间。总之，人类有与人的历史一样长的使用信息的历史。

但长期以来，虽然人们接收、传递、使用信息，却还只是停留在感性阶段，并没有达到理性认识的水平——没有认识到信息的本质，没有形成关于信息的理论。这个工作直到近代，才由申农、维纳等人完成。他们在逐步完善的技术科学和日益成熟的通信理论基础上，创立了信息论。

从技术方面看，在18世纪，随着电磁学的发展，使电信信号沿传输线路传播成为可能。1858年第一次横跨大西洋的电报通信试验成功，开创了有线电通信的第一阶段。在第二次世界大战中，通信技术有很大的发展，雷达技术和脉冲技术的迅速发展，产生了各种脉冲通信方法，这为信息论的诞生创造了良好的技术基础。

同时，技术的发展还提出了一系列的问题让通信工作者解决。比如在通信过程中，一个突出的问题就是如何提高通信系统传输信息的能力和通信的质量问题。也就是既要提高通信的经济性，又要提高它的可靠性的问题，这些问题为研究者提出了进一步研究的课题，促进了信息论的诞生和发展。

申农信息论的诞生还有着一定的理论前提。比如在关于信息量概念问题上，1877年左右，波尔兹曼就导出了熵同状态概率之间的数学关系，提出了“熵是关于物理系统状态的不定性的测度”的思想。1918年，统计学家费歇因为需要一个标准来估计实验数据内的信息被某一给定的统计方法所利用的程度，也探讨了关于信息的度量问题。1928年，哈特莱明确提出了关于信息量的设想。他认为，电报通信的本质是传输送信者所选择的信息，而收信方面是把那个信息再现出来，这时如不考虑信息、所表达的具体内容，即排除与通信技术无关的语义方面的因素，那么所谓“通信”可以认为是从可能的信息、的全体集合中选择一个信息。哈特莱假设可能的信息来源为有限个（用M表示），则从可能的集合中选出一个信息所带来的信息量（用H表示）可以用下式表示： $H = \text{Log}M$ ，哈特莱的这一思想是申农信息量概念的理论基础。申农说：“奈魁斯特和哈特莱的有关文章已奠定了这一理论的基础”。

除了信息量的概念之外，在申农之前早已有人对噪声进行了研究。1936年和1941年，兰顿就讨论过噪声的波形，发现了噪声峰值与效率之间的数量关系。1940年，弗朗兹从数学上讨论了用检波器滤除射频接收机噪声的问题，1943年，曼恩及1947年沈保夫分别用数学方法对噪声波形作了细致的讨论。1944年和1948年，赖特在《贝尔电讯技术杂志》上，发表了《随机噪声的数学》和随机噪声迭加正弦的统计特征两篇论文，这些成果对信息论中的“有噪声通道”理论具有十分直接的影响。

另一方面，申农之所以能创立信息论，与哲学方面和数学方面的思想上的创新也是分不开的。在17世纪至19世纪，科学领域中是机械的自然观占据统治地位，这种观点否认偶然性因素，企图用拉普拉斯的机械决定论思想去解释一切。绝大多数自然科学家在这种形而上学思想束缚下，按照机械决定论思考问题的时候，美国物理学家吉布斯和奥地利物理学家波尔兹曼却首先把统计学引入物理领域，使物理学对客观世界中存在的不确定性和偶然性不得不加以考虑。吉布斯把偶然性作为一种科学方法引入物理学。这在物理领域对机械决定论给予了猛烈的冲击。波尔兹曼则把熵函数引入统计物理学，对熵作出了微观解释，并把熵和信息联系起来。偶然性和熵函数引入自然科学领域，为信息论产生提供了哲学的和数学的思想前提。

正是在这样的基础上，申农创立了信息论。他提出了信息量的概念，用概率论和数理统计为工具，定量的描绘了信息的传输和提取方面的问题，还提出了通信系统模型和编码定律等有关信息的理论。

① 申农：《通信的数学理论》，转引自《系统论、控制论、信息论经典文编》，出版社，1989年版，第508页

与此同时，控制论的创始人维纳则从控制和通信的角度研究了信息问题。他把人、动物、机器的行为控制问题与通信过程联系起来，把信息概念推广到控制领域，并从自动控制的角度研究了信号被噪声干扰时的信号处理问题，建立起维纳“滤波理论”

而费希尔则从古典力学角度研究了信息的量度问题。正是在申农和许多科学家的努力下，信息论诞生了，可以说，信息论产生是时代的产物，是科学发展的必然结果。

（二）信息论的基本内容

1 申农的通信系统模型

在《通信的数学理论》一文中，申农提出了一个通信系统模型，在申农看来，通信就是由信源发出消息，经过编码形成一种适合于发出的信号，这种信号与传输中的噪声一起被传输到接收端，然后经译码识别变成消息而为信宿所接收的过程。任何一种通信都可以被看成这样的一个过程，也都可以抽象成如下的模型：

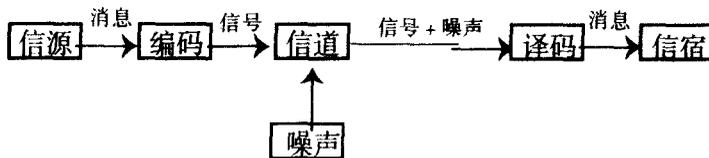


图 7-1

对模型所涉及的各有关概念，可分别作如下表述：

(1) 信源：信源是信息的来源。当天空中的一颗超新星爆发时，其耀眼的亮光给我们带来了关于这个超新星的信息。我们说这个超新星就是信源。某人给我们写了一封信，带来了某种信息。信息是从那个人那里来的，那个人就是一个信源。信源可以是世界上的任何一种东西。对具体的信息过程来说，信源可以有无穷多样的形态。但归结起来，大体上有四大类：自然事物、人造物、人以及客观事件

信源向外发出信息的过程是一个随机过程。某人来信所谈的是什么，不是什么，是不可能预先确定的，否则就不能带来任何信息根据信源随机变量可能取值范围和信息输出的状态，信源又可被分为连续信源和离散信源连续信源是给出连续变化输出的信源，随机变量的取值范围是一个连续区间例如，当对着话筒讲话或演奏音乐时，话筒输出的信号在任何时刻，在某个范围内能取无穷多个数值。离散信源是只能输出有限数量消息的信源，其随机变量的取值不是一个连续区间而是一个离散集合。比如书本上接连出现的印刷符号，抛掷硬币时接连出现的正面、反面、正

面....等等

信源发出的信息在其传输时必须依附于一定的载体从信源向外传输的，实际上是包含着某种信息的信息，这种信息或者是某种符号（文字、图象）或者某种信号（语言、电磁波信号）等等。消息一般可以被认为是信息的载体，它载荷着信息

信源的核心问题是它所包含的信息到底有多少的问题，信源的平均信息量以 $H(x)$ 值来表示

（2）编码和译码

编码就是把信息变换成发送的信号，并对信号进行加工处理的措施码就是一定规律排列起来的符号序列。编码的过程就是符号排列起来的符号序列编码的过程就是符号排列的过程。打电报就是这样的过程。我们的思想必须首先用语言或者文字表述出来，但这无法直接以电报的形式把它传输出去，还必须由译电员译码，这其实就是在编码、然后通过一定的设备才能转换成脉冲信号，通过信道反它传输出去。

编码分为两部分，一是信源编码，就是把信源输出的符号序列，用某个给定的字母表中组成最佳字母（又称为码字）如把要传输的信息用语言文字的形式表现出来的过程。二是信道编码。把输入的消息成适合于在信息中传输的信号，使经过编码后的信息成为不容易为干扰所弄错的形式。如现代的通信中，把消息编成二元码形式的做法。在通信过程中，消息常常不是只经过一次编码就能送于信息进行传输的，而往往经过多次编码才能在信道中进行传输。

译码和编码的过程正好相反，它其实是编码过程的反变换。信源所发出的信息，在信息传输时就成了信号。这个信号并不能为信宿所理解，因而在信源和信宿之间，还必须有个译码过程，把所接收到信号还原成消息，即用一定的文字、图象把这个信号表示出来，所以译码也就是译成语言所能表达的思想内容、变成原来的信息比如，在发电报时，在接收端所收到的是一组长短不同的电脉冲信号，把它表示出来，就成了一组组阿拉伯数字，而要想为收信者所理解，还要把它们按译码规则变成日常的语言文字

（3）信道和噪声

信道是信息传递的通道。一个信息从信源发出后，必须经过一定的信道才能传到信宿。比如当外地一个朋友想把他情况告诉你时，可以打电话，可以写信，也可以捎口信。这里的电话、书信、捎口信的人就成为特定的通信系统的信道没有这样的信道，信息就无法传输。可见，信道是构成信息流通系统的最重要部分之

具体的信道多种多样，但从总体上划分为两大类：一是有线信道如同轴电缆、光导纤维等，二是无线信道如自由空间、电离层等等当然在具体传递某个信息时，不定只用一种信道，而往往是多种信道联用

信道的主要问题是它最多能传递多少信息，即信道的容量问题。它要求以最大的速率传递最大的信息量这就要求在单位时间内，要传递一定数量的信息，选择的通信容量既不能太小又不能太大如要太小，信息就不能及时传递出去而造成耽误；如果太大，则造成浪费，二则随信道容量的不断增大，传递中的干扰就会越来越大，以致而影响信息传输的可靠性因此其大小应有一个合理的限度。

信道的任务主要是为了传递信息，但是在信息传输过程中，从一定意义上看这种传输过程又变成了信息的储存过程。信通也就成了信息的贮存所。比如，用书信传递消息，写信人把信息用文字形式写在纸上，然后通过邮寄到收信人手里，这既是一个信息传输过程，又是一个信息的贮存过程，信息被贮存在纸上

信息在信道传输的过程中，必然要受到噪声的干扰这就使得接收端收到消息中不仅有信号，而且还有噪声即实际收到的是信号和噪声的合成。由于这种情况，客观上在接收与发送的消息之间就出现了差别。噪声影响通信效果，因此，为了保证通信的可靠性，必须尽量减少通信系统中的噪声干扰千百年来，人们积累了许多抗干扰的经验，在现代通信中，也形成了一整套滤波理论比如，我们平时采用的提高通信的通信的剩余度，让信息沿着同一通道重复传递或者用完全不同的通道来传递同一个信息，再把各种结果拿来对比、分析的做法。现代通信技术中，抗干扰信号常常采用阻抗滤波法。所谓阻抗滤波，广义讲也就是找到干扰和携带信息的信号之间的本质差别，通过使用一种装置或手段，让干扰信号过不去，而使携带信息的信号能顺利通过的方法。如不同的无线电台利用不同频率的无线电波把信号发送出去，收音机的天线虽然把这些节目都接收下来，但收音机中的滤波器和使其他相应的装置，利用不同节目的无线电的频率不同，某一节目相应的无线电频率得以通过，而拒绝其他频率的节目通过另外还有反馈滤波法，同步滤波法，以及为了排除信息传递中的主观干扰而把信息和它的重要性放在一起，即让信息带上“情调”一起传递出去的滤波法等等

总之，为了保证通信的可靠性，必须千方百计降低干扰，滤波就是降低干扰主要措施。

(4) 信宿

信宿指的是信息的接收者，它是组成通信系统基本要素之一。通信的目的就是要解除接收端对发送的消息的不确定性要达到这个目的，不仅依赖于信源可能发

出的各种消息概率分布，取决于信道是滞能把消息准确及时送出，而且还依赖于信宿的状态。对信宿而言，信源发出的消息或符号是不确定的，收到一个消息后，人们获得了信息，消除了原有的不确定性。但是，如果传输过去的信息的内容是接收端预先就知道的那就没有起到消除不确定性的作用。如果在信源和信宿间没有公共信息库，也不能消除终端的不确定性，也不能获得信息。就像一个人用英语对另一个不懂英语的人讲述某个事情，虽然其中包含许多信息，但由于没有共同语言，对方仍然没有从中获得应有的信息

信宿在实际生活中是多种多样的，可以是人，也可以是机器。一般意义上能够接收信息的一切东西，在一定条件下，都可视为信宿

申农的这一通信系统模型具有一般的意义。一方面，它适合于通信系统，任何通信系统都可以看成由这几部分所组成，无论是复杂的还是简单的系统。另一方面，也可以推广到其他一些非通信有信息活动的系统。任何一个信息系统，要发出信息、传递信息、接收信息，就必须相应地有信源、信宿和信道等要素构成一个信息系统。这一通信系统模型适合于一切有信息活动的地方

第三节 与 论

在上一节“申农与信息论”中，我们已经初步了解了信息论的基本问题。但仅此是不够的，因为“控制工程的问题和通讯工程的问题是不能区分开来的”事实上，任何信息运动都存在于控制系统之中。当然，一切控制系统也都离不开信息的运动。从信息的观点看，可以认为控制系统是一种信息系统，二者密不可分。整体地把握客观自然界从存在到演化的发展图景，就不但要了解其信息运动变化过程，还要掌握信息运动过程赖以实现的控制过程

一、信息过程与控制过程

所谓信息过程，指的乃是从信息产生（信源）到信息接收（信宿）的信息运动全过程。这一过程可以用如下广框图来表示。（图 7-2

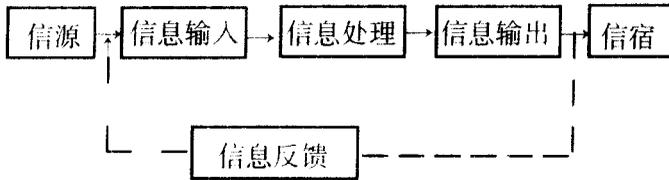


图 7-2

所谓控制过程，指的乃是个具有特定组织系统中，为达到某一目的而进行的选择、调整过程其方框图如（图 7-3）所示

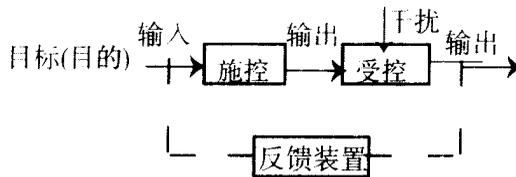


图 7-3

无论是从控制的抑或信息的观点看，上述两类系统其实是 一致的信息过程必须依靠控制系统来完成，控制过程又必须仰赖信息过程来实现我们从信息的观点把图（7-2）与图（7-3）结合起来，就可以得到一个表征两类系统的新的方框图：

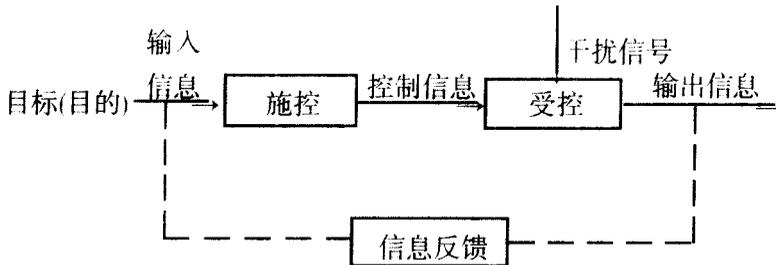


图 7-4

在 7-4 中，控制目的相当于信源，施控装置相当于信息、系统中的信息处理与输出受控装置相当于信宿，其输出信息大致和信息系统中经过译码后所收到的消息一样。反馈信息的出现是为了保证控制系统在干扰信号影响下仍能正常、可靠地运行，其作用和信息系统中信息反馈可以保证信息传输的有效和可靠是一样的。

用信息的观点来分析这一作为信息系统的控制论系统，可以发现控制过程中控制系统的输入最主要的是信息的输入，而不是物质或能量的输入在控制过程中，受控对象所完成的物质和能量的传递和改变，是通过带有信息的极小的物质和能量来控

制的，信息的控制与转换，是实现控制过程的基础至于在传递信息中采用什么控制方式以及耗费了多少物质和能量则是次要的。

为什么我们要把一个控制过程同时又看作是一个信息过程呢？原因主要有两个：其一信息过程和控制过程从本质上讲是一致的，根本就无法将它们人为地分开。控制论和信息论分别从不同侧面去研究完全是基于方法上的考虑，是为了更方便、更容易地处理问题而作为我们全面认识这两个过程，就不能不把它们结合在一起其二就是可以更方便地对控制论进行定量研究我们知道，信息论在某种意义上可以被视为是一门应用数学的理论。信息论作为统计数学与通讯理论相结合的产物，具有相当高的数量化水平，如果我们能把任一控制系统作为信息来看待，就完全可能把控制过程作为一个信息过程而用信息论的方法进行量化处理。一旦控制理论的研究突破技术层次上的自动控制理论而发展到具有形式化、数量化水平的更一般的控制理论，就标志着控制理论获得了突破性进展。

二、维纳的控制理论

（一）什么叫控制论

控制论（Cybernetics）一词是从希腊文 κυβερνηπτη 演变而来的在古希腊有些文献中用这个词表示掌舵人，在柏拉图的《高尔吉亚》篇中，又用来指驾船术或操舵术有时，柏拉图也用这个词来表示管理人的艺术。柏拉图的学生亚里士多德在其《政治学》第五册中进一步发展了柏拉图的思想，他认为管理一个政治团体或一个国家就如同驾驶一艘航船一样，必须实行控制。近代著名的法国物理学家安培，也认为“控制论”就是管理国家的科学。维纳在创立控制论之初就提出控制论不仅应该是一种机器理论，而且应该能够运用于社会领域。而控制论一词，恰好贴切地反映了维纳的这一思想，于是，维纳在为他所创立的这门学科命名时，就选择了控制论一词

从1948年控制论诞生到现在，已经四十年过去了，但始终没有一个公认的控制论的定义。在国际上，目前已经提出了控制论的定义就达几十种之多，而其中最经典的、带有权权威性的定义是维纳关于控制论的定义

我们知道，维纳《控制论》一书的副标题就是“或关于在动物和机器中控制和通讯的科学”这里，维纳已经明确的表示了控制论的研究对象，就是生物领域和技术领域中都存在的控制和通讯过程。从维纳所给出的这个定义中，我们可以看

到他主要是从两个方面来理解控制论的第一，从通讯的角度来理论控制论维纳认为通讯和控制系统的共同特点在于都包含着一个信息处理和变换的能动过程，反过来，一切通讯系统也都是控制系统。第二，从人——机关系方面来看控制论维纳认为，控制论的主要任务是要研究生物系统和技术系统间的控制功能

1951年，维纳在《人当做人来使用》一书中又进一步指出控制论是对机械、生物体和社会消息中某种同构性的分析研究。维纳这个定义的出发点就在于他承认了电子计算机、生物体、人类社会和思维之间存在有相似性，即他们之间遵循着某种共同的规律，这种规律性集中地表现在控制与通讯过程之中。控制论就是研究关于自然、社会和人类思维的控制和通讯的共同规律的科学。

维纳关于控制论的定义，是一个最基本的、经典的定义，后来的许多控制论定义，都与这一定义相似如著名科学家李雅普诺夫在其《关于控制论的一些普遍问题》一文中就指出：“通常，我们是把研究机器和生命有机体中控制过程和操纵过程的科学领域称为控制论”^①前苏联和东欧在60年代所持有的流行观点认为控制论“是关于技术设备、生命机体以及人类组织中控制过程 and 控制系统的一般特征的科学”是“关于自动机器与生物体中控制与通讯方面一些共同问题的各种理论，假说和观点的总和”。^②这些定义和维纳的定义是基本一致的

关于控制论的另一经典定义是控制论的另一创始人艾什比提出的。艾什比认为控制论就是一种机器的理论。这里必须注意，艾什比认为控制论虽然是作为种“机器的理论”而存在着，但它实际研究的是一切“可能的机器”，至于其中有的机器是否被人或自然界创造出来，对它倒是次要的”，^③换言之，控制论研究的“不是物体而是动作方式，它并不深究‘这是什么东西’，而要研究它做什么……控制论本质上是研究机能和动态的。”^④正因为如此，控制论才能够超脱于具体机器、生物体以及社会的具体构造性，能够突破工程与非工程的界线，甚至跨越自然科学和社会科学两大领域，为人们对这些系统的研究提供了一种横断的方法

与艾什比的定义相类似的还有一些。如苏联学者茹科夫就认为控制论不是一门普通的专门科学，它是研究物质运动某种形式范围内科学发展的一种新的方法，甚至“应该首先把功能方法本身当作控制论对象”。即控制论是研究组织界的各种功能系统的科学。前民主德国的哲学家克劳斯在其《从哲学看控制论》一书中也认为“控

^① 《自机》，科学出版社，1963年版，第358页
《国自科学集》，第四辑，第41页
艾：《控制论》，科学出版社，1965年版，第1页

制论不仅研究现存的和已知的机器的行为方式，而且要成为关于可能的机器的行为方式的理论”。^①

从维纳和艾什比的定义中可以看出，它们在总的方面是并不矛盾的，但其侧重点不一样。维纳等人的定义基本上具体的控制系统的控制形式上来考虑问题，他们认为控制论的研究重点在于控制系统的控制和调节的一般规律。艾什比等人则把控制论理解为研究某种过程的方法，从方法论的角度，它们首先把功能方法本身当作了控制论的研究对象。他们认为，控制论，“应该不仅是，显然主要不是，沿着把它作为独立学科进行教学的路线进行，而应当是在生物科学、社会科学和技术科学中揭示和考虑控制论的方法”。^②

当我们把上述看法综合起来看待，就基本上可以获得一个关于控制论的大概认识。当然，要想真正了解什么是控制论，还需要在系统学习的基础上逐步加深理解。

（二）控制论产生的历史条件

控制论的产生有着其深刻的历史性必然性这可以从它产生的技术前提、理论背景及其社会条件三个方面来加以说明。

从历史上来看，早在 2000 多年前的古代，人类就已经发明并使用了一些简单的自动控制装置据古埃及流传下来的《气体力学》一书记载，早在公元前 2 世纪左右，古埃及的亚历山大城的祭司为了向虔诚的人们证明上帝就在他们身边，曾利用自动装置显示各种“圣迹”。比如当时亚历山大城的著名发明家海隆就制造了圣火点燃后，教堂大门会自动打开的自动启门装置以及向一个箱子投掷硬币，箱子会自动打开的自动向朝拜者发放圣水的自售装置。中国秦汉时期发明的指南车，是一种更早的、依靠齿轮系统作用实行自控制的方向装置指南车上立着的木人，只要开始行车时手臂向南指，那么以后不管车子向任何方向转弯，木人的手臂始终指南。最早创造并使用自动控制装置的也许是古希腊人。据传说，古希腊人当时不但在某些剧院中使用了自动设置、改变舞台布景、开关剧院大门的自动装置，而且已经能制造出简单的机器人并登台表演。

尽管古人已经可以制造出几乎令现代人也瞠目结舌的自动控制装置，但当时的自动控制技术并没有得到普及和应用则是肯定的。这种现状直到中世纪仍未根本改观，

克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社，1981年版，第2页

② 尼·茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社，1981年版，第30页

人们对自动控制装置依然感到神秘莫测。13世纪德国自然科学家大阿尔伯特制造了一个可以自动开门、关门的铁人竟惹恼了著名神学家托马斯·阿奎那，他一时冲动，用锤子把这具有“妖术”的铁人砸个粉碎。文艺复兴时期伟大的工程师达·芬奇制造了一头机器狮。当这头狮子在富丽堂皇的金銮殿上自由走动，并在路易十二的宝座前停下，用爪子打开自己的胸膛，把路易王朝世代相传国徽的象征——白百合花——洒落在国王脚下时，竟使举朝哗动。这都说明了当时的自动控制技术，并不为一般人所了解和掌握。文艺复兴以后，自动控制技术开始获得较广泛的运用，人们已经能制造出诸如吹长笛的演奏者、拉风琴的女音乐家、唱歌的小鸟、喝水的鸭子以及能写字的机器人等非常复杂的、按严格程序设计的自动控制装置，但这些装置主要是供百无聊赖的显贵们取乐的玩物真正对控制理论产生影响的技术装置，是随着资本主义生产方式的形成和发展，尤其是第一次工业革命的出现而出现的生产领域中的自动控制装置。

资本主义的生产方式大致经历了三个时期：简单协作、工场手工业和机器大工业。在机器大工业时期，随着生产工具的改进，自动装置也取得了相应的进展，最有代表性的是钟表和磨。马克思对当时的这种状况曾有一个很好的分析，他说：“从十六世纪到十八世纪中叶，即工场手工业一直发展到真正的大工业时期，在工场手工业内部为机器工业做好准备的两种物质基础，即钟表和磨……钟表是应用于实际目的的自动机器”。^①

钟表实际上是一种利用齿轮系传递发条动力，利用擒纵机构来控制摆轮的周期性摆动的自动控制装置。维纳认为，一切形式的自动机实际上都是以封闭式的钟表为基础的。风磨和水磨的自动控制则是利用振动器来控制进入磨盘中的谷粒数量从而达到稳定磨盘转速的一种自控制装置。这些都属于最简单的按偏差进行补偿的自动控制系统。

在生产技术中具有典型意义的自动控制装置，是詹姆斯·瓦特1787年发明的安装在蒸汽机上的离心式调速器。这种调速器已经体现了初步的反馈思想。

在瓦特的这种调速器上装两个球，球的运动与从锅炉中放出蒸汽的阀门相联系。当蒸汽机转数增大，调速器亦随之加快旋转，小球在离心力作用下向外分开，阀门趋向关闭，蒸汽供应减少。当蒸汽量减少时，蒸汽机转数减小，调速器亦随之转动放慢，两小球接近阀门趋向开放，蒸汽供应增多。蒸汽机的速度就这样通过调节器而自动调节。

^① 《马克思、恩格斯书信集》，人民出版社，第145页

瓦特调速器的发明，标志着控制论思想已经进入了一个重要时期。现代自动控制装置，在具体结构和自动控制的物理过程方面尽管和瓦特的调速器有很大差别，但基本思想和控制方式都和 200 年前瓦特的基本思想是一致的。当然，瓦特的调速器并不像人们期望的那样，果真能将蒸汽机稳定在一定值上，而是忽大忽小剧烈振动。著名物理学家麦克斯韦 1868 年发表了一篇关于调速器的文章，首先从理论上解释了这种不稳定现象，他用微分方程来描写蒸汽机的运动，发现了不稳定原因，于是他提出了一个如何判定稳定性的代数判据。这一判据后来被数学家罗斯和赫维茨推广到多阶微分方程中，成了经典控制论中很有实用价值的判据。麦克斯韦对反馈所作的理论阐述以及数学上进行的探讨是控制论发展史上的一件大事。因而，包括维纳在内的很多控制论学者，都认为麦克斯韦是控制论的先驱者。维纳在其《控制论》一书的导言中说道：“我们决定把这个关于既是机器中又是动物中的控制和通信理论的整个理论叫做 (Cybernetics) … 是想用它来纪念关于反馈机构的第一篇重要论文。这是麦克斯韦在 1868 年发表的一篇关于调速器的文章。”^①

对控制论产生的直接影响的技术成就，应该是无线电电子学和通讯工程技术的进展，特别是电子计算机的发明和应用。

电子计算机的出现，是人类智力解放的重要标志之一，1945 年第一台通用电子计算“埃隆阿克”（ENIAC）研制成功，1949 年，第一台“程序内存”型电子计算机问世。“程序内存”使得计算机的全部运算成为真正的自动过程，为控制论以后提出的任务的实现准备了技术上的条件。

通信技术的发展也深刻地影响到了控制论的产生，特别是通信中的滤波问题，受到维纳的高度重视。他后来提出的维纳滤波理论开创了线性控制理论的研究。尤其是他研究了控制论与通信理论的内在联系紧紧抓住了通信技术中最本质的东西——信息，用统计的观点来说明通信和控制问题。这一思想成为控制论建立的重要基础之一。

控制论的产生，除了得力于当时的技术条件之外，还和当时数学、物理学以及神经生理学等学科的理论成就有关。这些学科的发展成为了控制论重要的理论前提。

对于一个机器理论来讲，保持其严格科学性和通用性最有力的工具是数学。“控制论本身就是一门十分接近数学的学科”，^②早在控制论形成之前的伺服机构理论就已经广泛用了微分方程，理论控制论的形成及其发展自始至终与数学分析密不可分。此外，像经典数学中的勒贝格积分、变分法、泛函分析等都曾为控制论描述和处理

①) 拉文 从文控制论引的

②) 编：《控制论·信息论·系统科学哲学》，中国人民大学出版社，1986 年版，第 25 页

比较复杂的控制论系统提供了有效的工具。这里最值得一提的是统计数学对控制论的建立所起的巨大作用。“统计数学对于控制论之所以重要，是由自动控制装置本身的特点所决定的。任意一个自动装置都处于不断变化的环境之中，它的自动性表现在它具有自动适应这种不断变化着的外界环境的能力。外界环境和自动装置所采取的对策，都是具有多种可能而不确定的。可是，这种不确定性与可能情况选择又不是完全没有规律的，而是在一定条件下具有一定概率分布，因而服从于一定的统计规律，这就不能不运用统计数学。”^①

19世纪末20世纪初，由吉布斯建立起来的物理学的重要理论之一的统计力学，对于控制论的建立同样起了决定性的作用。

吉布斯是一个数学家，但他对物理学问题很有研究。他在研究牛顿力学时发现：牛顿力学所处理的系统都是具有已知初始速度和初始动量的单个系统，这一系统按照牛顿力学规律精确地运用着，只要我们知道了运动的初始状态就能肯定地预见到它在今后某一确定状态。而事实上在绝大多数情况下要满足这种条件是不容易的。吉布斯看到了牛顿力学所表现出的极大局限性，毅然将统计数学引入物理学，打破了牛顿机械决定论对物理学的统治。在这方面作出突出贡献的还有著名物理学家波尔兹曼。把统计数学引入物理学这一工作，早在麦克斯韦时代就已经考虑过了，“吉布斯和波尔兹曼的贡献在于把统计学更彻底地引入物理学，使统计方法不仅对极其复杂的系统有效，而且对于像力场中的单个粒子这样的简单系统有效。”^②

维纳在自己的研究中同样发现了控制论所面对的问题，也是无法用基于牛顿力学的传统力学来解决的。自动控制的特点就在于它能根据周围环境的某些变化来决定和调整自己的运动，而这种调节只能在一定的可能性空间内完成。显然，要建立关于自动控制的理论，不突破传统的力学方法，不摆脱机械决定论的束缚是绝对不可能的。维纳为了给控制论提供一个坚实的物理学基础就转向研究物理学中的统计理论。维纳在1919年研究勒贝尔积分时，就已经开始酝酿控制论的思想。他在研究随机现象中的布朗运动以及大批的统计力学问题中，找到了吉布斯统计力学作为从几率观点来研究随机物理现象的工具。当然，经典的统计力学本身还不完全能够满足控制论的需要，正如维纳所说的：“吉布斯的工作虽然想法很好，但做得很差，因此他所开创的工作还有待其他人来完成”。维纳甚至认为：“这样的统计力学是不能直接用来研究控制论的”。于是，维纳就着手批判并改造了吉布斯的经典统计力学。

① 编：《控制论·信息论·系统科学哲学》，中国人民大学出版社，1986年版，第26页

② 《维纳》，上海译文出版社，1978年版，第4页。

吉布斯力学处理的是那种自发的趋向平衡的系统 and 过程，而维纳认为一个控制系统不是一个孤立的系统，而是一个与周围环境密切联系的系统。因此，在控制系统中经常发生熵减少的过程正是为了解决这一问题，维纳在其《控制论》中提出了时间系列的统计力学问题，从而成功地把控制论建立在了统计理论的基础之上，使得关于自动控制的研究进入了一个更高阶段

除了数学物理学之外，控制论在建立之初，还有一个重要的理论前提，这就是神经生理学

经典的神经生理学与心理学，主要是用反身概念来解释人的心理活动和生理机制的由笛卡尔、谢灵顿、谢灵顿、谢切诺夫、巴甫洛夫等人逐步建立起来的反射概念，尤其是巴甫洛夫的高级神经活动学说，为控制论提供了描述人类某些智能生理机制的理论前提本世纪 30 年代坎农等人提出的稳态概念，更直接为控制论的诞生奠定了基础

除了上述理论外，作为人类研究的思维重要成果之一的数理逻辑，同样与控制论的建立密切相关。数理逻辑是由 17 世纪的莱布尼兹首先提出，经布尔创立以及弗雷格、哥德尔、塔斯基、罗素等人发展完善，到本世纪 30 年代初具规模的一门学科。早期数理逻辑的发展与实际应用之间的联系不是十分明显，直到 40 年代，人们将命题演算、布尔代数运用于线路设计，才开了数理逻辑应用的先河。由于控制论所研究的问题，既涉及连续量，又涉及离散量，因而数理逻辑的理论对于控制论，尤其对控制论中的智能模研究具有十分重要的意义。数理逻辑很自然就构成了控制论的理论基础中的一个重要部分。

这里还有一个重要的理论背景就是：自然科学进入 20 世纪以来，从整个科学发展的趋势看，有一个质的变化，自然科学已经由分散独立的研究，逐步走向一体化，呈现出一种既高度分化又高度综合的整体化发展趋势。那么，作为各学科相互渗透、相互吸引而产生的控制论这门横断科学，它超脱于各门具体学科之上，因而适应了这一理论综合趋势的需要，这种各学科相互作用而产生的理论大背景，正好成为控制论产生与发展的得天独厚的条件。

控制论的产生，除了有其直接的理论背景和技术前提之外，社会条件的影响作用也是不容忽视的。

从整个社会的发展来看，进入 20 世纪以来，人机之间的矛盾日益突出一方面，人们希望从技术操作上最大限度的挖掘人的潜力，生产的发展日趋系列化、精确化、高速化另一方面，由于人机之间的关系在本世纪之前还基本上是一种简单的线性相互作用，（如图 7-5）随着机器的不断改进、复杂化、精密化程度的不断

提高，以及要求人们在快速生产过程中保证不出误差，人们就很难适应这种要求。人们对机器的控制 阈值愈来愈多，如生理阈值、心理阈值、社会阈值……这种线性控制的局限性就暴露出来。为了克服这种控制 阈值，提高劳动生产率，人类很自然的期望现代生产向自动化发展，希望对机器实行一种自动控制。（如图 7-6）人们希望能够用一种技术装置不仅减轻以至代替人的体力劳动，而且在某种程度上使智力劳动得以解放，由机器来承担控制的功能。这种对技术装置的自动化要求，成为控制论产生的重要的社会条件。

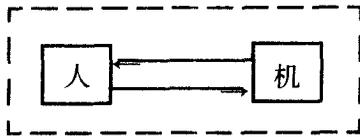


图 7-5

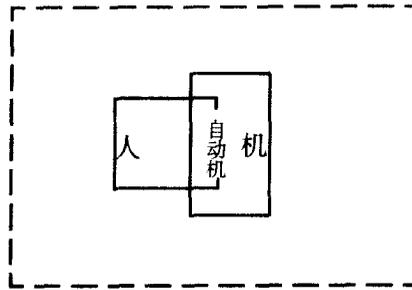


图 7-6

（三）控制论的形成

控制论的形成和发展大致可分为三个阶段：1942年以前的酝酿阶段；1943年——1948年的形成阶段；1948年以后的发展阶段。这里我们重点介绍前两上阶段，1948年以后的发展情况将在本章第四节详细介绍。

如前所述，控制论的创始人维纳早在 1919 年就萌发了控制论的思想。从 20 年代到 30 年代，他在与万涅瓦·布希博士共同进行计算机方面的研究以及和中国学者李郁荣博士合作进行电网络设计的研究时，接触到许多问题引起了他对机器运算的兴趣。但真正形成控制论思想并着手加以研究，则是第二次世界大战时期他从事设计防空火力自动控制装置的理论工作时开始的。

在战争期间，德国的空军优势和同盟军的防御劣势使科学家的注意力转向改进防空武器的工作。当时德国先进的战斗机的进速已提高到 600 公里以上，飞行的高速度使得古老的火力瞄准方法变得陈旧无用，战争迫切要求人们尽快研制一种能自动跟踪和准确打击高速飞行物的防空武器装置。1940 年前后，美国政府专门委托维纳和工程师别格罗负责研究并解决这个问题。从现在来看，维纳当时参加的火炮自动控制系统的研制工作，对控制论的诞生具有决定性意义。

维纳当时研究了随机过程预测，滤波理论在自动火炮上的运用，为控制理论提

供了数学方法维纳的高明之处就在于他并没有把自己局限在自动装置的具体构造性上，他把火炮自动打飞机的动作与人的拣铅笔的动作作了类比，从而发现了重要的反馈概念他进而猜测反馈也是神经系统的重要特征，负反馈有可能在人的控制机制中起着重要作用为了证实这个设想，他请教了他的老朋友，当时在哈佛医学学校工作的生理学家罗森勃吕特。他“向罗森勃吕特博士提出了一个特殊问题：‘有没有这样一种病理条件’，在这种病理条件下，病人在试图去实现象拣铅笔那样的随意动作时，超过了目的物，然后发生了一种控制的摆动？罗森勃吕特博士立即回答我们说，确有这样一种大家熟知的情况，它叫做目的震颤，常常因小脑受伤而引起。罗森勃吕特的回答使维纳欣喜若狂，因为人拣铅笔的行为和火炮自动跟踪的相似性，说明了人的目的性行为可以用反馈概念来予以说明，从而突破了生命与非生命的界限，把目的行为这个生物所特有的概念赋于机器。维纳充分认识到了这个课题的重要性，于是他和别格罗、罗森勃吕特三个人在1943年就这一问题合作发表了题为《行为、目的和目的论》的文章。文章从反馈角度研究了目的性行为，找出了神经系统和自动机之间的一致性，这一文章被后人公认为控制论的第一篇奠基性文章。维纳后来在控制论的一书中曾回忆了这篇文章写作的经过，他说：“我们三个人觉得这个新观点值得写成一篇论文，我们就写出来并且发表了。罗森勃吕特博士和我预见到这篇论文只能够是一个宏大的实验工作计划的开头，我们想，如果我们建立一个介乎各门科学之间的科学部门的计划得以实现，这个题目就会成为我们研究活动的几乎是理想的中心。”^①从控制论的发展历史看，这篇论文表述了控制论的基本思想，从而成为控制论发展史上的重要里程碑。

控制论的真正诞生是在40年代末的1947年的春天，维纳参加了在法国南锡举行的讨论调和分析的数学会议。在法国逗留期间，经麻省理工学院特兰纳教授介绍，维纳结识了法国赫曼书店的弗里曼。弗里曼直接了当的要求维纳把他的关于控制论的思想写出来，而在此之前美国竟然没有一家书店愿意出版维纳有关控制论的著作。维纳接受了这一请求，于1947年底完成了《控制论》一书的写作，并于1948年正式出版，《控制论》一书的出版，标志着控制论作为一门崭新学科诞生了。《控制论》一书尽管还包含了不少未解决的问题，甚至不完备和错误的思想，但在现代科学方法论研究上却实现了真正的突破，它预示了“建立一个介乎各门科学之间的科学部门的计划”就要得以实现了。

三、控制论的进展

自1948年控制论作为一门新兴科学诞生以来，无论在理论上还是在应用上都有很大的进展。从理论上讲，维纳1961年出了第二版的《控制论》。在再版中，维纳新补充了两章，内容主要涉及自学习，自生殖机器和自组织系统。1962年他发表的《上帝和高兰合股公司》，又一次讨论了自组织系统问题。这些新增内容充分反映了控制论在理论上的进展。当然，从控制论诞生以来的40多年来看，控制论的进展更突出地表现在应用领域。按照现在的一般观点，控制论在应用领域主要有四个分支，即工程控制论，生物控制论，智能控制论和社会控制论，下面我们分别作一介绍。

（一）工程控制论

究竟什么叫工程控制论？目前国内外尚无统一的看法。从历史的角度看，1945年前后形成的自动控制理论也许已可算作工程控制论的雏形，虽然它与后来形成的工程控制论有比较大的区别。当然，作为学术界比较一致的看法，是认为我国学者钱学森1954年在美国发表的《工程控制论》应作为工程控制论的奠基性著作。

1954年以后逐步发展起来的工程控制论与1945年前后形成的自动控制理论的重要区别之一是它的建立基础不同。工程控制论是将控制论运用于工程技术方面而形成的自动控制理论，而1945年前后形成的自动控制理论则是以伺服机构理论为核心。工程控制论虽然借鉴和吸收了许多伺服机构理论的成果，但在基本理论和方法的运用上又有创造性的突破。

从工程控制论自身的发展来看，近四十年来，内容也是在不断地丰富着的。按照工程控制论的研究对象、提出任务、分析方法和工具的不同，我们通常将工程控制论划分为三个阶段，即50年代前后的经典控制理论、60至70年代的现代控制理论以及70年代以后的大系统控制理论。

（二）现代控制理论

60年代前后，主要由于空间技术、导弹系统、人造卫星、航天系统等科学技术迅速发展，对自动控制提出了高性能、高精密度的要求，由此，工程控制论的研究对象发生了变化它必须从理论上要求，由此，工程控制论的研究对象发生了变化。它必须从理论上与方法上研究和解决多输入、多输出的控制系统，参量随时

间变化的时变系统以及非线性系统，而且还要解决最优化以及如何适应环境变化的问题，为了解决这些问题，不仅传递函数这种时域方法不够用了，而且频域方法也不适用了。新的问题要求控制论有新的概念与方法

现代控制理论研究的对象是多因素控制系统，时变系统，分析方法是状态方程，时域法，重点研究最优化，随机自适应控制，核心装置是电子数字计算机，适用于机组自动化现代控制理论形成主要标志是卡尔曼（Karman）提出了状态空间方法和能控性与能观测性等新概念，以及与最优控制有关的庞特里雅金等人提出的“极大值原理”和贝尔曼的“动态规划”方法等这里只简略地说明状态空间方法和能控性，能观测性这些基本概念。

状态空间方法在经典控制理论中也就使用了，但还不是一种主要的方法，在现代控制理论中，这种方法被加以推广和发展，并成为一种主要的有效的方法。

在现代控制理论中引入“状态概念”，实际就是说，不再把系统看作是一个黑箱，而是要考虑系统的内部状态，即把状态变量考虑在内。对于这一点，我们用黑箱——灰箱——白箱的理论是不难理解的。从数学方面来说，对于多输入、多输出的系统，由于关系复杂，只有导入状态变量才能使方程的阶数降低，如果我们用数学技巧，适当地选择变量，就能将高阶微分方程表示出来，阶数越高则微分方程的个数越多，在数学上就可以用矢量与矩阵表示。在控制理论中，就便于描述多输入与多输出的多变量系统。它不仅适用于复杂的线性系统，而且可以推广应用于非线性系统、时变系统以及与稳定性的分析与研究，并且便于计算机的应用。所以，它是一种很重要的方法。

状态空间方法与能观测性、能控性的分析和研究也是密切相关的。对于一个控制系统来说，如果我们已知其状态方程与输出方程，那么，就会产生出这样的问题，在对输出经过一段适当时间的观测之后，能否得知这个系统的状态？其次，如果知道了系统的状态，当我们加入适当的输入之后，这个系统能不能达到我们所预期的状态？前一个问题是能观测性问题，后一个问题是能控性问题。能观测性与能控性是一个控制系统的必要条件，否则就难以控制，对于一个控制系统，在求得其状态方程后，就要根据这个方程确定其能观测性与能控性，只有解决这两个条件后，才谈得上这个系统是否具有稳定性的问题。

能观测性是根据系统在适当期间的输出，是否能以所需要的精度来测定系统内部的状态或反应的问题。而能控性则是用现有的控制手段，能否对系统施加影响到所需要的程度问题，也就是能否通过控制使系统达到预定目标的问题。在现代控制理论中，给出系统的状态方程以后，可以推导出完全能观测和能控制的充分必要条件，

根据能观测性和能控性的功能，可以证明任意一个线性系统都可以分解为能控又能观、能控不能观、不能控能观、不能控又不能观的四个子系统。其余三种子系统中的隐蔽振荡现象用传递函数来分析 & 处理就很困难，只能用判别的方法处理。

总之，状态空间方法可揭示许多系统内在的更深刻的方法处理。计算机为手段，运用状态空间方法研究多变量复杂系统，是现代控制理论的重要特点，为实现多变量控制和对复杂系统的最优设计指出了新的方向。

（三）大系统控制理论

70 年代以来，人们已不再满足现代控制理论中对一般的多变量系统的研究，而希望解决数目更大的多变量系统所涉及的问题。这样，现代控制理论发展到大系统理论就成为历史的必然。一般的控制理论都是在总目标下对某一关键因素或几个因素实行控制，而大系统控制理论要控制的是整个体系的总体性能指标，可以包括整个工厂、城市或国家。1975 年，在罗马尼亚召开了第三届国际控制论与系统论会议，主题是经济问题，与会者一致认为，用反馈来调节行为的研究适用于经济控制系统。1978 年，在荷兰的阿姆斯特丹召开了第四届国际控制论与系统会议，对人类社会各种系统进行管理，即社会控制是这次会议讨论的中心议题。现在已经可以看到以电子计算机为技术工具，运用现代控制论的概念和方法来研究大型工业企业的管理系统以至于生态系统，经济系统和社会系统，已成为可能。正是大系统理论的出现，使工程控制研究扩展到生物领域，进而深入到社会领域和思维领域。

大系统是规模巨大的系统。其特点是：其一，规模庞大，主要指元件、部件多，包含着许多系统。其二，结构复杂，主要指各元件、部件、子系统之间的联系复杂。其三，功能综合，表现为大系统往往具有多个目标，其中的某些目标之间还可以是相互克制或矛盾的。其四，因素众多，主要指大系统所处的内外环境十分复杂，受到的干扰与影响多，所以大系统往往是多输入、多输出、多干扰的多变量的系统。在有的大系统中，不仅包含“物”的因素，而且包含“人”的因素。其五，大系统在控制与管理之间很难找出一条明确的界限。它既可以从控制的角度来分析 & 处理，也可以从管理科学的角度来分析 & 处理。

大系统的控制结构。无论任何一个大系统的元件、部件与子系统，都要为了实现一定的控制功能而构成一定的控制结构。它们大体上可以分为三类：第一种类型是多级控制或递阶控制，即对不同的递阶实行不同的控制。一个大的控制系统分为三级递阶结构，一级是运用一些调节装置进行局部控制级，二是实现过程的最优化进行递阶控制级，三级是协调与组织管理称为协调控制级。第二种类型是多层控制。

即按任务或功能分层，在各层次之间存在着不同的分工，一般来说，层次越高，任务或功能越复杂，干扰的变化也较慢；反之，低层的任务或功能较单纯，干扰的变化也较快。例如电子系统为了保证安全供电，其任务往往分为预防层，恢复层和紧急层，以对付各种影响安全的扰动第三种类型是多段控制，即按被控制对象的时序分段。例如，导弹的弹道可以分解为主动段、惯性飞段和末制导段。

大系统理论所运动用的主要是模型化方法对于一个大系统来说，尽管因素众多、结构复杂，也必须进行定性与定量的研究，这就要建立大系统模型。首先要建立它的数学模型，用数学表达或来规划系统的各种性能其次，还要建立它的网络模型。为此，要作出必要的网络图、流程图、程序框图和计划评审图等最后还要建立物理模型。这是因为大系统往往与技术指标、经济效益和社会影响有关，分析与设计一个大系统，通过建立物理模型，以便进行大系统仿真。在建立模型的过程中，逻辑方法起着很重要的作用。从控制论方法来看，一个大系统可能是黑箱、灰箱或白箱在建立模型时，要根据不同的情况，运用演绎和归纳相结合的方法求出模型。

关于大系统的数学模型，由于因素众多和结构复杂使得即使是确定型的数学模型，其方程的阶数一般也是较高的，大大超过经典控制理论所常见到的二阶或三阶的范围，甚至可能达到几十、几百甚至上千阶的高度。同时出现的方程个数也可能是大量的。这些情况甚至使得高速度的计算机都无能为力。这就是大系统数学模型的维数灾。因此，从60年代末开始，现代控制理论与大系统理论研究模型的降阶问题，或称为模型简化的问题，就成了大系统控制理论研究的一个重要问题。从目前来看，模型简化的数学方法主要有两种：一种是集结法（Aggregation），另一种是摄动法（Perturbation）。集结法只能适用于线性系统，而摄动法则不仅适用于线性系统，还能应用于非线性系统，因而是一种更有用的数学工具

（四）生物控制论

生物控制论主要研究生物系统的控制过程和信息运动规律，它涉及神经系统、生理调节系统、内分泌系统、肌肉运动系统等。它是从生物系统的各个部分及其与外部环境的相互联系和相互制约中研究对象的运动运动规律由于存在各种不同类型的生物，存在不同结构层次和不同功能的生物系统，所以生物控制论研究的具体课题是十分广泛的

（五）社会控制论

社会控制论就是把控制论应用于社会的各方面，诸如生产管理、交通运输、电力网络、能源管理、通信工程、环境保护、城市建筑，以至整个社会的管理。社会控制论认为，社会是个活的自组织系统，有信息反馈；社会控制系统的决策能力和作用在社会系统的发展过程中具有重要地位。即在许多方案中进行综合选择、不断优化

社会控制论的形成是一个比工程控制论，生物控制论要晚的过程。在这个过程中，系统工程与运筹学对社会系统工程的研究起了重要的作用。

社会控制论将人类社会这一系统看作一个动态的自我调节系统，通过研究结构、行为、功能、揭示出各子系统之间的物质、信息传递及其发展演化规律。并力图运用有关数学模型将复杂的社会过程模型化、形式化，以求得对社会现象的精确描述和仿真，达到最优控制之目的

就现在情况来说，控制论已应用于社会学、国家管理、行政管理、法与法律、经济学、企业管理等各个不同的社会领域。在现代社会学的研究中，引入了社会调节、社会控制、社会管理这样一些重要概念，涉及到政治、经济、伦理、道德、法与法律等多种因素对人的行为与社会效应的影响。在国家和法的研究中，把国家管理看作一种特殊的控制论系统，是为实现一定的社会目的而进行最优化或次优化控制和信息处理的过程。控制论广泛地运用于社会，不仅进行定性分析，而且可能予以定量的、优化的研究它与系统工程、运筹学一道，已成为研究与处理社会系统的一种有效的工具。

社会控制论是本世纪 70 年代在现代控制论发展的基础上诞生的一门新兴学科。尽管作为一门系统的理论，目前尚不成熟，但它为人类研究复杂的社会大系统，提供了崭新的方法。

下 篇

蓬勃兴起的 高新技术

，错过了得奖的良机。美国加州的科学家们，最近刚刚才进入了这一领域。他们从一种特殊的材料中，发现了一种新的材料，这种材料具有超导性，而且可以在室温下工作。这种材料的发现，为超导材料的研究开辟了新的途径。科学家们正在努力研究这种材料的性质，以期在超导材料的应用方面取得突破。

我国在超导材料的研究方面也取得了长足的进步。中国科学院物理研究所的科学家们，在超导材料的研究方面取得了重要的成果。他们发现了一种新的超导材料，这种材料具有更高的超导转变温度。这一发现对于超导材料的应用具有重要意义。科学家们正在进一步研究这种材料的性质，以期在超导材料的应用方面取得突破。

— 文欣 供稿

第八章

时代骄子——信息科学技术

信息与信息交流是与人类共生的。在人类历史上，信息交流的方式经历了五个发展阶段第一阶段是在远古时期，人类用手势和语言传达思想。第二阶段始于公元前5000年，发明了文字，人类用文字记载和传播信息与知识并传至后世。第三阶段是发明了印刷技术，出现了报纸，图书和期刊，扩大了信息交流的范围，促进了人类文明的发展第四阶段是19世纪发明了电报、电话、无线电通讯、传真和电视等一系列现代技术，人类的信息交流突破了时空限制第五阶段是20世纪中叶发明了电子计算机、人造卫星、光纤通信技术，使人类的信息交流发生了深刻变化。

信息科学和技术的发展极大地促进了社会形态的改变，使人类从农业社会、工业社会而步入信息社会一般认为“信息社会”始于1956年和1957年的两大事件：1956年，美国历史上第一次出现了从事技术、管理和事务性工作的白领工人人数超过了蓝领工人，标志着大多数人的工作是处理信息；1957年，前苏联发射了第一颗人造地球卫星，开创了全球性的卫星通信时代，标志着全球性信息革命的开始40多年来的发展变化，使人们越来越深刻地认识到：信息是社会变化发展的重要源泉和动力之一。

第一节 信息和信息技术： 人类文明的源泉与动力

信息是对客观世界中各种事物的变化和特征的反映，是客观事物之间联系的显示，是客观事物经过感知或认识后的再现不同物质和事物有不同的特征，不同的特征就会通过不同的物质形式（如：声波、电磁波、文字、图像、颜色和符号等）发出不同的消息。通俗地讲，信息是各种事物发出的消息中有意义的知识内容。当一条消息告诉人们原来不知道的新知识内容越多，它所含的信息量就越大，这条消息的意义也越大。

信息与物质和能源一样，是一种重要的资源信息具有以下特征：

载体依附性各种信息都必须依附于某种载体我们说信息有多种不同的形式，实际上也就是指承载信息的载体的形式电磁波、字符、图像以及纸张、胶片、磁盘、光盘乃至人的大脑都是信息技术载体

可处理性信息是可以加工处理的，包括压缩处理、存储处理、转换处理和传输处理等例如，卫星地面站接收到大气数据信号后，可（通过计算机）将其转换为云图，然后再进行压缩、存储和传播处理。

共享性除非人为因素，信息是可以无损耗共享的例如，存在于 Internet 上的信息可供多人平等共享，其内容不会因用户不同而变化，其质量也不会因使用而改变

渗透性信息总是力图冲破非自然因素的束缚，通过各种渠道和方式向周边扩散和渗透扩散渗透的范围和速率因载体不同而异。

信息与物质、能源被称为现代社会的三大支柱信息是人类认识世界和改造世界的知识源泉敏锐地捕捉和认识信息，有效地利用信息，是人类文明、社会发展和科学进步的驱动力量。20 世纪中叶以后，随着电子计算机技术、卫星通信和光通信技术带来的信息技术的极大改善，极大促进了科技和社会的发展。因此，从某种意义上讲，人类社会发展的速度，在一定程度上取决于信息技术的发展和人们对信息利用的水平

第二节 现代信息技术的理论基础和核心支撑技术

一、信息技术的理论基础

信息技术的理论基础是信息科学。信息科学是适应信息社会的发展需要而迅速发展起来的一门新兴边缘学科。它的任务是研究信息的性质，信息的取得，信息的传输、检测、存储、处理和控制的基本原理和方法，为人类在信息的海洋中查找所需要的信息时提供理论和技术上的帮助。而它的理论基础，则是从通信科学发展起来的信息论。即研究信息量、编码和通信的科学技术

信息科学的核心是维纳创立的信息论。本书第 7 章已经详细介绍了信息论的主要内容。

根据这一理论，信息系统由编码器、信道和译码器组成。其中，编码器的作用是把来自信源的信息经过两次编码和一次调制后转变为在信道上传送的信号；信道由电缆、微波以及光路等传输介质组成，信道的主要作用是传送信号，如电话、电视广播以及计算机网络等都是典型信道；译码器则将接收到的信号与噪声的混合物，经过解调、解码而再现与输入信息尽可能接近的复制品供接收者认知和使用。

一个信息系统主要包括人员、机器、网络和数据库四个要素。数据库是信息源。信息的载体形式多样，可以是书刊纸张，也可以是胶片、磁带、磁盘、光盘、屏幕等。因此，作为信息源的数据库可以是数字化的图书馆、档案馆、博物馆，也可以是机读文本文件、电子系统等。它们为信息高速公路、互联网络提供信息。网络主要指各种信息系统所构成的信息网络体系以及必要的网络标准、通信协议、操作规程和传输编码等，网络起着信息传输通道的作用。信息高速公路是一种大的信息传输的通道。目前在信息高速公路上已经有大量的英语数据在运行，今后应该逐渐加大中文数据在信息高速公路上的流通量。信息系统中的机器是信息设施，主要包括用来获取、传输、处理和利用信息的各种物理设备，例如电子计算机终端、传真机、扫描机、打印机等。信息系统中的人员是信息主体，应包括各种各样的信息资源的开发者、提供者、管理者和使用者人（员）、机（器）、网（络）、数据（库）构成一个有机的整体，由信息生产部门研制信息产品，建立各种类型的数据库，信息高速公路、互联网络和数据库相互联系在一起，信息使用者通过计算机终

二、信息技术的核心支撑技术

（一）计算机技术

计算机技术是现代信息处理最基本的核心技术计算机具有处理速度快、运算精度高、存储容量大、可靠性强、运行成本低、效益明显等特性，是信息处理的理想工具现代电子计算机以数学方式处理信息，即先将要处理的信息数字化，数字化是将客观现实中的某种（模拟）信息媒体（如图片）编码为只有 0 和 1 组成的二进制数字信息，然后输入到计算机进行各种处理；然后再将数码信息结果转换为模拟形式输出从理论上讲，任何信息媒体都可转化为数字信息，也就是说任何信息都可由计算机进行处理；另一方面，计算机处理信息的速度、精度、容量等指标可无止境提高这就是计算机应用越来越广泛和深入的根本原因。

（二）计算机网络技术

计算机网络是将两台及两台以上计算机，通过网络硬件、软件与通信介质互联而组成的计算机系统传递信息和共享资源是计算机网络的基本任务和本质特征。根据网络联接的区域大小，可分为局域网、城域网和广域网。接入局域网的计算机可联入城域网和广域网。目前联接最为广泛的广域网就是人们所熟知的 Internet，尽管它尚处于很不成熟的起步阶段，但已在信息传播中显现出巨大作用，已成为十分重要的信息传输通道，被称为第四传播媒体。

（三）计算机多媒体技术

计算机多媒体技术是将文字、图形、图像、视频与音频等信息媒体与计算集成在一起综合处理，使计算机应用由单纯的文字处理进入文、图、声、像集成处理的技术事实上，其他信息媒体如温度、气味、压力（触觉信息）等，也可（通过特定的传感装置）由计算机综合处理，因此，广义的多媒体技术应当包括各种媒体处理技术多媒体技术的核心特征是信息媒体的多样性、集成性和交互性

虚拟现实是采用多媒体计算机技术来生成一个逼真的三维空间甚至四维时空感觉环境，并使人类可用自然的视觉、听觉、嗅觉、触觉等感官机能和效应器官进行实时参与和实时交互由于这种信息交流方式与真实情境十分接近，很容易产生学

习的迁移，使人们接受信息的时间大大缩短虚拟现实实际上是一种高级用户界面的多媒体技术，它使用户不仅可以进行信息交互，而且可以从外到内或从内到外地观察信息空间的属性和特征。目前的虚拟现实技术需要在多媒体计算机的基础上，再利用些经过特别设计的外部装置和技术，如数字头盔(headmount display)、数据手套(data glove)、座舱、全方位监视器或计算机辅助虚拟现实环境(CAVE)等，为使用者构建一个感觉上真实、但实际上并不存在的一种情境。

(四) 人工智能技术 (AI: Artificial Intelligence)

研究的目的是要使计算机逐步具有类似人脑的某些智能，即能理解外部环境，提出概念，建立方法，进行演绎、归纳、推理，做出科学的判断和决策，具备自学习、自适应功能等。可以说，人工智能技术代表着未来信息处理技术的发展方向。

实现人工智能有两种途径：一是以传统计算机硬件技术为基础，在一些知识比较完备且可形式化表达的领域里，通过软件在一定程度上实现类似人脑智能活动的效果，即面向功能模拟的专家系统。这是比较现实的方法。二是采用全新的硬件技术和软件方法研制具有类似于人脑结构、能像人脑一样思维的计算机，即面向结构模拟的神经计算机

专家系统 (expert system)，是一个能在特定领域内以人类专家水平去解决困难问题的计算机程序。人类专家之所以成为专家，其主要原因在于他们拥有大量的专门知识，特别是那些从实践中长期摸索出来的、鲜为人知的经验性知识。这就是说，要想使计算机工作得像人类那样好，首先必须为它提供人类专家所具有的那些专门知识

神经计算机，人类的思维可以概括为逻辑思维和形象思维两大类。基于冯·诺依曼计算机的传统 AI 系统适合模拟人左脑的逻辑思维功能，而神经计算机适合模拟人右脑的形象思维功能

(五) 光纤通信技术

光纤通信具有频率高、损耗低、频带宽、容量大的特点。一根细细的光纤理论上可通上亿路电话或 10 万路电视 相当于 1 千万对架空明线或 2 万根直径 6.5 厘米的中同轴电缆。实际上，由于器件和光纤的传输特性等问题，目前还达不到理论的通信容量。光缆结构紧、体积小、重量轻、寿命长，性能比电缆要好得多；用光缆取代电缆，不仅能节省大量的金属资源，而且光缆的线路损耗低、传送距离远、速度快、耐腐蚀。因此，光缆是数字通信理想的传输介质。

（六）卫星通信技术

同步通信卫星一般在地球赤道上空 35800 千米的轨道上从西向东移动，方向和速度恰与地球自转同步，圆形轨道平面与赤道平面重合，这时的卫星从地面上看来是相对静止不动的，所以又称同步静止卫星。由于每一颗通信卫星可俯视地球三分之一的面积，所以利用在同步静止轨道上等距离分布的 3 颗卫星，就能组成全球通信网。

目前世界范围内的信息工程建设大都是围绕上述理论基础和核心技术而展开当然，各国进展情况以及具体技术的实施又各有不同。我国的国家信息化建设是从“三金工程”开始的

第三节 从“三金工程”到“电子政务”

继美国提出信息高速公路计划之后，世界各国掀起信息高速公路建设的热潮，中国迅速做出反应。1993 年底，中国正式启动了国民经济信息化的起步工程——“三金工程”。

一、三金工程

所谓“三金工程”，即金桥工程、金关工程和金卡工程。“三金工程”的目标，是建设中国的“信息高速公路”

（一）金桥工程

金桥工程属于信息化的基础设施，是中国信息高速公路的主体，在“三金工程”中占有非常重要的地位和基础的作用。金桥工程是为各类数据资源网络提供联网的桥梁，并为“金”系列工程提供通信平台。金桥网是国家经济信息网，它以光纤、微波、程控交换、卫星、无线移动等多种方式形成空、地一体的网络结构，建立起国家公用信息平台其目标是：覆盖全国，与国务院部委专用网相联，并与 31 个省、市、自治区及 500 个中心城市、1.2 万个大中型企业、100 个计划单列的重要企业集团以及国家重点工程联接，最终形成电子信息高速公路的主干线，并与全球信息高速公路互联

（二）金关工程

金关工程是我国的国家经济贸易信息网络工程，其建设目标是延伸到用计算机对整个国家的物资市场流动实施高效管理。它还将对外贸企业的信息系统实行联网，推广电子数据交换（EDI）业务，通过网络交换信息取代磁介质信息，消除进出口统计不及时、不准确，以及在许可证、产地证、税额、收汇结汇、出口退税等方面存在的弊端。通过网络通信，使海关、商务、税务、外贸、统计、外汇管理、银行以及进出口企业间的信息能及时准确地交流，达到减少损失，实现通关自动化。经过几年努力，这项工程已取得实质性进展，国家对外经贸部以计算机中心为中枢的三级网络已基本覆盖全国，已开发出一批应用项目，其中电子数据交换自动通关系统已通过国家验收，并在北京、天津、上海等多个主要进出口岸试行，并与国际EDI通关业务接轨。

（三）金卡工程

金卡工程即电子货币工程，是我国实现金融电子化和商业流通现代化建设的重要组成部分。它是以计算机、通信、金融和商业专用电脑等现代化科技为基础，以各种金融卡（信用卡、转账卡、现金卡等）为介质，通过电子信息转账形式实现货币流通的一项效益明显、涉及面广、影响巨大的社会系统工程。其总体目标是用10数年的时间在我国400余城市的3亿多人口中推广普及金融交易卡，实现“一卡在手，走遍神州”的目标，使我国支付手段发生革命性变化，从而跨入电子货币时代。并逐步将信用卡发展成为个人与社会的全面信息凭证，如个人身份、经历、储蓄记录、刑事记录等。

近几年来，我国各商业银行在推行金融卡方面做了大量工作，仅发行的各类信用卡就多达几十种。但由于银行系统缺乏统一规划，全国范围的金融卡网络尚未建成，网络支持功能差，导致金融卡难以跨行使用、持卡交易手续繁杂等问题，严重影响金融卡的流通使用。众所周知，我国是一个使用现金大国，每天流通的现金高达万亿计。这些大量现金在民间流通，不仅减少国家的可利用资金，而且容易孳生腐败和犯罪。金卡工程的实施将会大大改善这一局面。

经过短短几年的建设，“三金工程”已取得明显的效益，金桥工程建成卫星站70个，主干网覆盖30多个大中城市。金卡工程的12个试点城市全部实现了同城跨行的自动取款机联网，全国电子联行系统每天处理5万多笔业务，金额达800亿至1000亿元，每天为国家增加可使用资金500亿元。由“三金工程”派生的金税工

程稽核系统投入运行，据不完全统计，3年多来查出利用假发票违法违纪案件3万多起，追缴税款1.5亿元。金关工程制定并实施了进出口企业代码、进出口商品代码两项标准，建设了配额许可证管理系统、进出口统计管理系统、出口退税管理系统、出口收汇和进口付汇核销系统等4个应用系统，提高了对外经济贸易的现代化管理水平。

二、其他“金字工程”

除“三金工程”外，其他信息化建设的“金字工程”还有：

金智工程，正式名称为“国家教育与科研计算机网络”(CERNET)，1994年12月由国家计委正式批复立项实施。CERNET由教育部主持，清华大学、北京大学、上海交通大学等10所高校承担建设任务，包括全国主干网、地区网和校园网三级网络层次结构，网络中心设在清华大学。金智工程的最终目的，是实现世界范围内的资源共享、科学计算、学术交流和科技合作。目前全国大学、主要科研机构及部分中小学的校园网已接入该网络并与Internet实现互联。

金企工程，由国家经贸委所属的经济信息中心规划的“全国工业生产与流通信息系统”的简称，于1994年底正式启动建设。

金通工程，交通信息系统网络工程

金农工程，农业信息系统网络工程

金图工程，中国图书馆计算机网络工程

金卫工程，中国医疗和卫生保健信息网络工程

三、电子政务

(一) 我国电子政务的发展概况

我国电子政务可以分为初期缓慢发展和近几年来快速发展两个阶段。

初期发展主要表现在两个方面：一是20世纪80年代末期，中央和地方党政机关所开展的办公自动化(OA)工程，建立了各种纵向和横向内部信息办公网络，为利用计算机和通信网络技术奠定了基础；二是1993年底启动的“三金工程”，即金桥工程、金关工程和金卡工程，这是中央政府主导的以政府信息化为特征的系统工程，重点是建设信息化的基础设施，为重点行业 and 部门传输数据和信息。但是，

这些都还是电子政务发展的雏形，是电子政务发展的初级阶段

到 20 世纪 90 年代末期，由于信息网络技术的快速发展和信息基础设施的不断完善，电子政务的发展进入快车道，突破了部门和地域限制，向交互性和互联网方向发展。1998 年 4 月，青岛市在互联网上建立了我国第一个严格意义上的政府网站“青岛政务信息公众网”。1999 年 1 月，40 多个部委（局、办）的信息主管部门共同倡议发起了“政府上网工程”，其目标是在 1999 年实现 60% 以上的部委和各级政府部门上网，在 2000 年实现 80% 以上的部委和各级政府部门上网。1999 年 5 月，gov.cn 下注册的政府域名猛增至 1470 个。截止 2001 年 1 月底，以 gov.cn 为结尾注册的域名总数达到 4722 个，占国内域名总数的 4%。已经建成的 WWW 下的政府网站达 3200 多个，70% 以上的地市级政府在网上设立了办事窗口。

（二）我国电子政务的发展

近年来，电子政务开始向更高层次发展，主要表现在以下三个方面：

首先，许多地方政府都将国民经济和社会信息化作为“十五”规划的重要内容，上海、深圳、广州、天津等沿海城市纷纷提出建设数字化城市或数码港计划，其中电子政务的建设是数字城市建设的核心内容之一。有些地方明确地提出了建设电子政务的时间表，如北京市的具体目标是：力争用两年时间，到 2002 年底初步实现政府面向企业和市民的审批、管理和业务在网上进行，政府内部初步实现电子化和网络化办公。在此基础上，再经过 3 年的时间，到 2005 年底建成体系完整、结构合理、高速宽带、互联互通的电子政务网络体系，最终建成北京市政务系统共建共享的信息资源库，全面开展网上交互式办公。

其次，专业化的政府服务网站日益增多，服务内容更加丰富，功能不断增强，互动性得到很大提高。中央与地方的工商、海关、国税和地税等部门纷纷推出各种网上办公业务。例如，北京市工商行政管理局建立了网上办公平台——红盾 315 网站 (www.hd315.gov.cn)，开办了网上专项审批、网上注册与年检、网上经营者身分及经营行为合法性认证、经营性网站备案核准、域名备案登记等业务。2001 年 6 月 1 日，海关总署、对外经济贸易合作部、国家税务总局、中国人民银行、国家外汇管理局、国家出入境检验检疫局、国家工商行政管理局、公安部、交通部、铁道部、民航总局、信息产业部等 12 个部委共同参与的“中国电子口岸” (www.chinaport.gov.cn) 在全国各口岸推广实施。“中国电子口岸”将上述部门分别管理的进出口业务信息流、资金流、物流等电子底账数据集中存放到公共数据中心，在统一、安全、高效的计算机物理平台上实现数据共享和数据交换。国家各行政管理部门可根据执法和管理需要进行跨部门、跨

行业的联网数据核查，企业也可在网上办理各种进出口相关手续。

第三，电子政务的发展极大地促进了我国软件业的发展，安全性不断提高电子政务的特殊性为民族软件企业的发展提供了一个难得的机遇。目前，联想、北大方正、首信公司等国内主要 IT 企业都在纷纷推出各自的电子政务解决方案，与各级政府和部门合作，积极地推进有中国特色的电子政务办公系统的发展与完善。与此同时，电子政务也为众多中小软件企业的生存与发展创造了有利的条件，一批有竞争力的中小软件企业脱颖而出。像北京美髯公科技发展公司（该公司是海淀园“数字园区”的技术开发单位）、书生公司（该公司开发的“书生电子公文系统”已为中国人民银行、中国银行、中国农业银行、国家开发银行等在全国范围内全面采用，国务院办公厅也已试用多时，并决定在近期正式开通使用）等电子政务成为当前促进我国软件企业发展的一个新的重要领域。

（三）当前我国电子政务建设中存在的主要问题

在充分肯定我国电子政务取得重要进展的同时，还要清楚地看到其中存在的问题。这些问题有主观和客观两个方面

从主观方面看，主要有四个问题：

一是政府公务员的观念有待提高因为电子政务的发展，必然对传统行政权力的行使提出了更高的要求，如透明度要高、更加规范等，这势必对公共权力的行使和运用起到一定的限制和监督作用正是这一点，也容易引起少数公务员的抵触情绪。从这个意义上说，更新观念，主动接受电子政务这一新的管理手段，将是对公务员的权力观、利益观的一个严峻的考验。

二是传统政府运作机制的障碍。我们知道，目前我国政府管理运作体制及机制，多数都是在计划经济体制下形成和确立起来的随着市场经济的发展，这方面的问题虽然有了很大改变，但一些深层次的问题并没有解决，如机构设置不合理，政府各部门职能交叉、重叠，审批过多、过滥，办事没有严格的程序，行政流程不合理，透明度低、暗箱操作等，所有这些问题都会成为推动政府信息化的重要障碍，换句话说，只有这些问题得到有效解决，电子政务的推进才真正具有意义

三是缺乏整体规划和统一标准。推动政府信息化和电子政务，关键要搞好整体规划，制定统一的技术标准，这是国外发展电子政务普遍的一条经验我国虽然在这方面作出过一些具体规定，但至今还没有制定出政府信息化的中长期总体规划，特

别是有关统一的技术标准方面，几乎还处于各自为战的状态。有的专家甚至认为，如果继续让这种各搞一套的局面发展下去，将来政府间、部门间的互联互通势必难以实现，以至于给国家造成巨大的浪费与此相联系，由于我国的地区分割、部门分割现象严重，还导致了大量的重复建设，如基础网络等，如何在统一的规划和标准下，整合现有资源，防止重复建设和各自为战，成为政府信息化和电子政务发展中的关键所在

四是公务人员的信息知识和运用信息工具的水平较低，难以适应电子政务发展的要求。近年来我国在加强公务员的知识培训、提高公务员的管理能力和水平方面进行了一系列卓有成效的工作，包括公务员的计算机知识等方面都有了显著提高。但从整体上看，仍然不能适应政府信息化发展的需要从公务员的文化知识来看，经过1998年的机构改革，国务院近1.7万名公务员虽然有65%以上的人具有大学本科学历，但在地方政府，则相对较低，近500万公务员拥有本科以上学历的人只占10%。即使一些学历较高的公务员，计算机操作方面的技能仍较欠缺。据国家行政学院对司局长培训班的一项调查，大体有20%的公务员对计算机操作几乎处于空白的状态，这说明在推进政府信息化的过程中，提高公务员的整体素质、特别是计算机应用方面的能力，将是一项艰巨的任务。

从客观方面来说，主要是三个问题：

一是政府管理本身的复杂性，决定电子政务结构的复杂性。因为未来的电子政务，要实现的是“一站式”的办理和不受时间空间限制的“在线服务”，这就需要实现政府各部门之间进行交互式办公和处理大量为公众服务的事项；而每一个部门的管理业务本身又是一个相对独立的系统，业务差别很大，要使这些不同业务部门的政府机构之间实现互通互联，做到“一线式服务”，是一个非常复杂的问题。在实施中，只有高度重视统一规划、统一标准，才能稳步推进，取得良好的效果。要作到这一点并不容易这就意味着，我国电子政务的推进，必须建立在分步实施，有选择地重点突破的基础之上，否则，就有可能走许多弯路。

二是我国社会整体的信息化水平低，包括电子商务发展也较缓慢，也在一定程度上会制约电子政务的发展。从国家的角度来看，政府信息化的推进，必须建立在社会信息化的基础之上。因为政府信息化很难孤立地进行，离开企业、社会乃至个人信息化，政府信息化就将失去基础。从目前我国实际情况看，不仅整个社会的信息化水平较低，即使企业，电子商务发展的水平也比较低，这在一定程度上必然对我国的电子政务发展产生某些制约因素。

三是信息安全成为当前政府信息化中的关键问题。与电子商务相比，电子政务

对信息的安全有着更高的要求特别是美国 9·11 事件后，这个问题显得更加突出。目前的实际状况是，我国在信息技术方面的整体研发能力还有待提高，而政府的信息安全技术又必须由我们自主开发，这在一定程度上也对我国的电子政务的发展提出了严峻挑战。我们只有下决心自主地研制保障信息安全的产品，掌握这方面的世界先进技术，才能为政府信息化提供安全保障。很显然，这方面我国目前与世界发达国家还有较大差距。

（四）我国推动电子政务实施的策略选择

政府信息化与电子政务公共管理目标的确立所谓政府的公共管理目标模式，是指政府在市场经济条件下的角色定位按照公共行政的一般理论，政府在整个社会中扮演的角色，主要涉及的是社会的公共领域，即：行使公共权力，代表公共利益，管理公共事务，提供公共服务，维护公共秩序，承担公共责任。从国外 20 年来行政改革的实践看，传统的公共行政已发生了很大的变化即由公共行政发展到公共管理其主要标志是：政府一改过去对社会过多包揽的做法，而是更注重发挥市场的力量，政府的职责主要集中在公共领域；公共事务管理主体，由过去的政府独家垄断，逐步向多元化方向发展；政府管理方式，大量地引入市场机制，推行公共管理社会化和公共服务市场化，并把现代企业管理的方法如成本效益、投入产出等引入政府管理中来。

我国政府在加入世贸组织前所进行的一系列改革，如打破政府垄断，注重发挥市场机制的作用，以及政府有计划地从一些竞争性行业中退出等，也反映了这一改革的潮流和发展趋势。这说明，公共行政所发生的上述变化，不可避免地会对政府的公共管理目标产生深刻的影响。

在推动电子政务的过程中，政府的公共管理目标选择尤为重要。发达国家发展电子政务主要是围绕增强政府的服务功能进行的。我国是发展中国家，当前发展电子政务应适当偏重规范管理行为，强化行政监督这方面的内容，以促进廉政建设和转变作风。从长远来看，按照我国的国情，电子政务的公共管理目标可定位为：“规模适度、管理科学、不断追求行政管理的廉洁和规范化、公共服务的高效和最大化”。所谓规模适度，是指对政府的规模要进行严格地控制，防止政府规模的过度膨胀。所谓管理科学，就是指政府在对社会实施管理的过程中，要遵循管理规律，尽量简化环节，提高公共管理的科学化水平。所谓不断追求行政管理的廉洁和规范化、公共服务的高效和最大化，是指通过电子政务的发展，制约政府行为的随意性和暗箱操作，促进政府廉政建设和制度创新，不断拓展政府对社会、公众提供公共服务的领域和项目，提高

公共服务的质量，提高社会和公众的满意度^①

第四节 国家信息化建设

20世纪90年代以后，知识经济初见端倪，全球信息化浪潮一浪高过一浪，尤其是发达国家更是不惜投入巨资构建国家信息化基础设施。什么是国家信息化，为什么要搞国家信息化建设呢？

一、国家信息化建设及其意义

1997年4月，全国信息化工作会议确定我国国家信息化的定义为：

在国家统一规划和组织下，在农业、工业、科学技术、国防及社会生活各个方面应用现代信息技术，深入开发、广泛利用信息资源，加速实现国家现代化的进程这个定义概括了中国信息化建设的广泛内涵，既包括了经济领域的信息化，也包括了科技、国防以及社会生活的广阔方面；既与全球信息化一致，又体现了中国信息化的特色。

这一定义的推出，是我国的信息化建设从以“三金工程”为代表的国民经济信息化进入国家信息化的标志。

众所周知，推行国家信息化建设需要投入大量的人力和财力，而我国是一个发展中国家，经济实力不强，在国家工业化尚未完成，一些地区人民温饱问题没有解决的情况下，是否有必要进行国家信息化建设呢？

让我们先来回顾一下美国国家信息化建设的背景，或许可以得到一些启发。

1955年，美国田纳西州参议员阿尔伯特·戈尔根据当时美国经济发展的需要，在国会提出建立州际高速公路的法案。这个法案要求美国联邦政府和州政府共同努力，在全美建设当时在世界上效率最高、技术最先进、纵横北美的高速公路网。这一法案获准并实施后，迅速产生了巨大效益：高速公路网的建设开通刺激了汽车工业，进而带动一系列相关产业产生发展，加速了全美物资、资源、劳务和人员的流通，从而促进

① 资料来源：中国行政管理学会政府信息化建设课题组：《中国电子政务发展研究报告》

了美国经济、社会的发展和综合国力的提升。1991年，阿尔伯特·戈尔的儿子、时任美国副总统的阿尔·戈尔又提出一个重要法案：建立类似于高速公路网的国家信息高速公路网络。这个法案要求美国联邦政府引导产业界集资建设以计算机网络、电子通信技术为基础，以光缆为骨干的跨越化美的大容量、高速度的信息传递系统。小戈尔的提案同样得到国会和政府的批准，也同样产生的巨大效益：国家信息化的建设极大促进了美国信息产业的发展并催生出一系列新的经济增长点，极大地推动了美国经济和社会的发展，同时也更加确立了美国在全球信息产业的霸主地位。

在这样一个新的产业革命蓬勃兴起的时代，对于我国的现代化建设既是一个挑战，又是一个机遇。世界格局的发展变化没有给我们补足工业化这一课的时间，只有迎头赶上，在进行工业化的同时，推行信息化建设。

令人鼓舞的是，我国两代领导人高瞻远瞩，准确和及时把握住了信息化建设的时机。早在1986年3月，针对包括信息技术在内的高新技术开发的问题，邓小平同志亲自批示“宜速作决断，不可延误”，启动了国家高技术研究发展计划，即“863”计划。该计划投资100亿元，其中，信息技术相关项目的投资约占投资总额的三分之二。江泽民同志强调：“四个现代化，哪一样也离不开信息化。要进一步把大力推广应用电子信息技术提高到战略高度，充分发挥电子信息技术对经济的倍增作用。”两代领导核心从战略高度，为我国信息化建设指明了方向。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十个五年计划的建议》指出：信息化是当今世界经济和社会发展的趋势，也是我国产业优化升级和实现工业化、现代化的关键环节。要把推进国民经济和社会信息化放在优先位置，大力推进国民经济和社会信息化，是覆盖现代化建设全局的战略举措。以信息化带动工业化，发挥后发优势，实现社会生产力的跨越式发展。

《建议》站在历史的新高度，深刻剖析了近年来信息技术的突飞猛进给全世界带来的巨变。信息化从一场技术革命转化为一场产业革命，并成为世界经济和社会发展不可逆转的大趋势。正如朱总理在《建议》说明中阐述的：“我们讲抓住机遇，很重要的就是要抓住信息化这个机遇，发展以电子信息技术为代表的高新技术产业，同时用高新科技和先进适用技术改造传统产业，努力提高工业的整体素质和国际竞争力，使信息化与工业化融为一体，互相促进，共同发展。”

事实表明，党中央确立的“以信息化带动工业化”的战略方针是果断、英明和正确的。为加速现代化的进程，提高综合国力，使我国由经济大国变成经济强国，必须加快国家信息化建设。

二、我国国家信息化建设情况

（一）建设过程

我国信息化建设的起步可追溯到 20 世纪 80 年代初期，从国家大力推动电子信息技术应用开始，经历了 4 个阶段，即：

1993 年以前的准备阶段，开展了一系列信息化建设的基础工作。

1993 年 3 月—1997 年 4 月的启动阶段，启动了以“三金工程”为代表的金字工程；成立了以国务院副总理邹家华任主席的“国家经济信息化联席会议”，拉开了经济信息化的序幕

1997 年 4 月—2000 年 10 月的展开阶段，提出了“统筹规划、国家主导，统一标准、联合建设、互联互通、资源共享”的二十四字指导方针；组建了国家信息产业部，负责推进国民经济和社会服务信息化建设工作；进行电信体制改革，初步形成多家电信运营商开展市场竞争的格局

2000 年 10 月以后的发展阶段，党的十五届五中全会提出“以信息化带动工业化”的战略方针；组建国家信息化领导小组，国家信息化建设全面展开。

（二）国家信息化建设思路

我国信息化建设经过“八五”、“九五”的实践到“十五”指导思想的确立，逐步形成了具有中国特色的、行之有效的信息化发展思路，可以概括为 3 个方面：

第一，以信息化推动工业化。我国的信息化建设不能走西方国家先工业化后信息化的老路，必须处理好工业化与信息化的关系，二者结合起来，齐头并进以工业化支持信息化，以信息化促进产业改造升级，推动工业化。发挥“后发优势”，通过信息化建设实现经济的跨越式发展。

第二，政府推动与市场驱动并进。政府推动体现国家的意志，市场驱动则可以调动一切积极因素，使信息化建设充满活力，良性发展。在政府的宏观调控下由市场配置资源，并按照国际化市场机制，大力培育和发展市场，拓展信息化的发展空间和新的经济增长点，调动全社会的力量，形成领域信息化、区域信息化、社区信息化以及电子政务、电子商务等竞相发展的局面

第三，以经济信息化带动国家信息化。从党的十一届三中全会以来，我国一直奉行以经济建设为中心的发展战略，国家信息化以经济信息化为起点是非常自然的，

事实证明也是完全正确的经济信息化需要全社会信息化的环境支持，因而从客观上带动全社会的信息化

三、国家信息化建设的中心任务

目前和今后个时期，我国信息化建设面临的主要任务是：

首先，要大力开发利用信息资源，如：大力组织具有民族优良文化传统的信息资源上网，促进信息资源网络化、社会化和商品化

其次，加强国家信息网络建设和管理，积极发展电信网、广播电视网和计算机网，并逐步促进其相互融合，实现资源共享

第三，加快国家信息化重大工程的建设，已经启动的“金”字工程、财税金贸联网工程等，都是国家急需的跨部门、跨地区的重大项目，必须集中力量，抓紧抓好；同时以信息化建设带动信息产业的发展，使信息产业成为国民经济发展的支柱产业和新的经济增长点；大力发展信息服务业，促进信息服务的社会化和市场化，使公众能够及时获得所需信息

第四，加快国民经济重点领域，特别是农业、工业、国家宏观经济管理、政府决策等方面的信息化建设

第五，促进科技和教育领域的信息化，提高科技教育水平，促进科教兴国战略的实施，同时也为国家信息化建设培养大批人才

第六，研究制定必要的法律法规和标准，规范社会信息行为，保障信息系统安全，确保国家信息化建设的健康发展

第九章

当代的重大课题

——能源科学技术

能源问题，是人类面临的重大问题之一。当今世界人口已从 1900 年的 16 亿增加到约 60 亿，净增加 2 倍多，而能源消费却增加了 16 倍多。目前人类使用的常规能源（煤、石油、天然气）已探明的储量按照现在的消耗水平估算，煤还能用 250 年，天然气够用 40 年，而石油仅够用 35 年。而且，大量使用这些碳氢化石燃料的结果，使得环境污染、温室效应加剧、生态平衡被破坏。更不要说，这些能源本身也是重要的化工原料资源，把它们都烧掉以后，子孙后代拿什么来生产化纤、塑料……因此，除了研究推广常规能源的高效节能技术（如煤的气化和液化）外，开发和使用新的低污染乃至无污染、可再生的新能源已刻不容缓。可喜的是，经过人类的不懈努力，新世纪能源革命的曙光已经出现。

第一节 能源的分类

能源的分类根据不同的原则可以有多种分类方法：

一、按形成原因分类，可分为一次能源和二次能源

1、次能源或称初级能源，是指自然界中以天然形式存在的能量资源，如原煤、原油、天然气、核燃料（铀矿、钍矿等）、生物质能（植物秸秆等）、水能、风能、太阳能、地热能、海洋能等其中有些可以不断地“再生”，称为再生能源，如水能、太阳能、风能、海洋能、地热能等；有些在相当长的时间内不能再生，称为非再生能源，像煤炭、石油、天然气、铀矿等，其中前三种由古生物沉积演变而成，也称化石能源再生能源可以说是用之不竭的，而非再生能源却是用一点就少一点

2、二次能源是指人类利用一次能源转换成的便于利用的能源，如煤气、焦炭、汽油、柴油、煤油、电力、蒸汽、压缩空气、酒精、氢气、激光等我们下面谈的主要是一次能源

二、按性质分类，可分为燃料能源和非燃料能源

燃料能源包括矿物燃料（煤、石油、天然气等）、生物燃料（植物秸秆、沼气、藻类、各种有机废物等）和核燃料；而非燃料能源是指水能、风能、太阳能、海洋能、地热能等

三、按使用状况分类，可分为常规能源和新能源

常规能源主要指使用时间长久且使用范围广泛的煤、石油、天然气和水能

四、按对环境污染的程度划分，可分为清洁能源和不清洁能源

第二节 常规能源的高效节能技术

一、煤炭的液化、气化和综合利用

煤炭资源在常规能源中是最丰富的。全世界的总蕴藏量估计有十一亿万吨，其中有开采价值的约为六千亿吨我国是煤炭资源比较丰富的国家，已探明的储量有

六千多亿吨，现在和将来相当长的一段时间内，都会在我国能源结构中居于首位。煤炭除了可直接燃烧产生热能外，还可用于炼焦、制成煤气和作为化学工业的原料，生产人造石油、化肥、药品、塑料、化学纤维、合成橡胶、涂料、香精、炸药等几百种化工产品。因此，如果不加以综合利用，直接烧掉就太可惜了。近些年来，能源科学家积极研究煤炭的液化、气化和综合利用的技术，取得了不少重要的成果。

煤炭的液化和气化是以流体形式的煤代替固体的煤。流体燃料不仅易于燃烧，同时还具有便于运输、储存、容易调节控制以及效率高、投资少等优点，例如每吨石油用管道运输比用铁路运输，运输成本可降低 50% 以上。煤炭的液化和气化除了可以获得以上的好处外，还为煤炭的综合利用创造了条件，液化、气化后的煤炭流体产品不仅可以生产出高质量的汽油、柴油、润滑油、石蜡等产品，还可以提取苯、酚等重要化工原料。

早在上世纪 50 年代，世界上的发达国家为了合理利用煤炭，就发展了煤炭洗选加工工艺，并且对各种工业用煤的质量如水分、灰分、硫分、粘结性、发热量等，制定了严格的标准，这对合理利用煤炭资源、提高热能利用效率、减少运输量、改善环境都带来了明显的效果。而我国目前还处于主要是烧用原煤的落后状态，每年原煤洗选量只有百分之二十左右。据估算，我国因为煤炭质量水平低所造成的浪费每年就相当于上千万吨的煤炭，由此浪费的运输力就有一亿吨公里。因此，除了煤的液化、气化以外，改变现行的落后方式，推广煤炭的洗选加工，提高煤炭质量，实行用煤标准化，也是节省能源的重要措施之一。

二、石油的海上勘探和多采多收

石油是一种高效、方便和廉价的能源，世界上的发达国家在很大程度上是依靠广泛使用廉价的石油发展起来的。近年来由于石油储量的迅速减少，石油危机的显现，不少国家除了寻找替代能源外，在石油勘探方面投入了更大的力量，特别是在海洋石油勘探方面。现在近海石油的产量已占世界石油总产量的 1/4 左右。此外，提高石油的采收率也是摆脱石油资源短缺的一条重要途径。目前，石油采收率平均为 30%，最高为 40%。如果我们能把采收率提高一倍，那就意味着石油的可采储量增加一倍，即石油的开采期限可以延长一倍。现在，世界上很多国家都在为达到这一目的而努力。

三、加紧开发水力资源

水力是可再生有能源，一经开发，便可川流不息地为人类提供能量。水力又是一种廉价的能源，一般来说，水电站运行三、四年所获得的收入，就可收回建站的投资。同时水力又是最干净的能源，不像矿物能源燃烧的同时排出大量的粉尘、二氧化硫等有害气体和灰渣，另外，开发水力资源除可发电以外，还可满足防洪、灌溉、航运、养鱼、工业和生活用水等需要。当然，也要综合考虑由于兴建水电站而对自然环境等造成的不利影响。

正因为水力较其它能源有以上优点，所以世界上很多国家都十分重视水力资源的开发，像美国、日本、德国、英国、法国、意大利等国已利用的水力资源已达到可开发量的 40% ~ 95%，但仍不惜花费较大的代价开发剩余的水力资源。我国是一个水力资源得天独厚的国家，水力的理论蕴藏量达到 6 亿 8 千万千瓦，居世界第一位。如果我们把其中可以利用的水力资源都开发利用起来，每年就相当于十几亿吨的煤产量。但到目前为止，我国水力发电还只占全国发电量的 17%，仅利用了我国可开发水力资源的 2.5%。因而，我国巨大的水能潜力，还有待我们进一步去开发和利用。

第三节 新能源的开发和利用

一、核能的和平利用

核裂变的研究除了导致原子弹的产生外，从 20 世纪 50 年代开始也逐步用于生产建设方面。1951 年美国利用生产钚的反应堆的余热试验发电，电功率为 2000 千瓦。1954 年，前苏联建成世界上第一座核电站，电功率为 5000 千瓦。之后，英国和法国相继建成一批生产钚和发电两用的核电站，一时间各有核国家在展开核武器竞赛的同时也竞相建造核电站。但由于受 1979 年美国三里岛核电站事故和 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站严重事故的影响，核电站的建设从 80 年代开始进入了低潮，但法国、日本、韩国等仍坚持以发展核电为主的方针，截止 1990 年底，各国建成并投入运行的核电站已达 424 座，核电在世界总发电量中所占比例已达 17%。我国从 80 年代开始发展核电，自行设计建造的 30 万千瓦秦山核电站于 1991 年并网发电，进口的 2×90 万千瓦大亚湾

核电站也于 1994 年并网发电，上述二核电站的二期工程也在积极进行中

另外，核能也被用作舰船的动力，除核潜艇、核动力航空母舰外，1957 年前苏联建造的核动力推动的“列宁号”破冰船，可航行 2~5 年不补充燃料。

除了裂变能以外，可控热核聚变由于其能量来源氘和氚几乎是用之不竭的（据测算，海水中所含的氘和氚可供人类用数百亿年），以及它的生成物无放射性，一直吸引着人们做不懈的努力。目前，世界各国建造的各种类型的试验装置已达 200 多台。其中欧洲共同体的托卡马克反应堆 1991 年 10 月已达到了亿摄氏度的高温，并产生了 1.8 兆瓦电力的聚变功率。我国也于 1997 年 6 月建成受控热核聚变试验装置。虽然核聚变能的利用仍处于基础研究阶段，但估计到 2050 年前后能够实现原型示范的可控聚变反应堆。尽管发展到经济实用阶段还有一段艰辛的路程，但它的前景是光明的。

二、太阳能的转化和利用

太阳能是蕴藏量巨大的天然能源。虽然地球所获得的太阳能仅为太阳的总辐射能的 22 亿分之一，但每秒钟到达地球的能量仍达 8.4×10^{16} 焦耳，而全年到达地球的能量约为世界煤炭开采总储量 6369 亿吨的 270 倍。20 世纪以来，人类在太阳能的利用方面主要开发了三项新技术：

首先是将太阳能转化为热能的技术，如太阳能热水器、取暖器、炊事器等。第二种是把太阳能转化为电能的技术，即太阳能电池和太阳能电站。第一块实用型的单晶硅太阳能电池是 1954 年在美国贝尔实验室诞生的，到了今天，单晶硅、多晶硅、非晶硅、砷化镓、硫化镉等多种太阳能电池均已进入实用发展阶段，已被用作卫星和空间站、手表、收音机、灯塔、边防哨所电源。美国 1973 年发射的地球轨道空间站“太空实验室 1 号”就装有功率为 24 千瓦的单晶硅太阳能电池。此外，使用太阳能的汽车、飞机、游艇、住宅也在开发之中。太阳能电站，一种是利用太阳能电池的，如座落在美国加利福尼亚州的太阳能电池发电站，将 100 多万个硅太阳能电池安装在 108 个帆板阵列上，自动跟踪太阳，最大发电功率 1000 千瓦。另一种是利用大面积的反射镜直接把太阳光反射到设在高塔顶端的锅炉上，如美国建造的一座太阳能电站塔高 300 米、反射镜多达 1 万块，发电功率为 10 万千瓦。第三种正在进行可行性研究的技术是太阳能卫星或称太空电站。它是一个地球同步卫星，利用安装在上面的太阳能电池把太阳能转化为电能后，再以微波的形式发送到地面。

三、洁净优质的理想能源——氢能

法国科幻作家凡尔纳的《海底两万里》中的潜艇是以海水做能源的，随着时间的推移，凡尔纳的幻想有望成真，人类大规模地用水制氢，让氢提供无穷无尽的光和热的时代已经临近在众多新能源中，氢以其重量轻、无污染（生成物是水）、热值高（是同等质量汽油的 3 倍）等优势而独占鳌头。

氢能的利用需要解决氢的制备和贮存两个问题传统的制氢技术是水煤气法和电解水法，都需要消耗大量的能源，因而不太划算。目前最有前途的方法是太阳光分解水制氢，其中一种是光电化学电池分解法，是将用某些半导体晶体制成的电极浸在水里，受太阳光照射时，因光电效应产生的电流将水分解，释放出氢气。另一种生物制氢法是模拟植物叶绿素的光合作用，但使其仅停留在分解水的阶段。另外人们还发现某些藻类低等植物，也具有通过阳光和细菌的作用把水转变为氢气的的能力，正在研究如何利用

氢的贮存最被人们看好的方法是金属贮氢。如镧镍合金和铁钛合金，可以像海绵吸水一样吸收比自身体积大几千倍的氢气，只要稍稍加热，又会将氢气放出

氢做动力燃料最早是用在太空火箭上，时间是 1960 年而后美国的“阿波罗”登月火箭和航天飞机也用液氢做动力燃料另外，美、俄的空间轨道站是用氢氧为燃料的燃料电池做电源的。氢在汽车的应用方面，德国、日本、我国等都已研制成功以氢作燃料的汽车，但氢能的大规模应用还需要一段时日

四、高效率的新型能源——燃料电池

被誉为改变世界未来的十大新科技之一的燃料电池是一种新型的无污染、无噪音、高效率的汽车动力和发电设备。它不经燃烧，直接把燃料（氢气、甲醇、天然气、石油、煤等）的化学能转换成电能这种发电技术早在 19 世纪就已经发明了，但直到 20 世纪 60 年代才开始实际用于航天飞行器和深水潜水器。

燃料电池是利用燃料与兼有催化剂作用的负极材料发生反应，生成电子和正离子，电子通过外电路流向正极产生电流，正离子则通过电解质流向正极，与正极区的氧化剂（氧气或空气）结合燃料电池因没有燃烧过程及相关的传动部件等，没有巨大的热量和摩擦损耗，因此效率可达内燃机的 2~3 倍

燃料电池的应用主要是发电和做汽车的动力。除了做航天器的电源外，80 年代

在日本千叶县建造了世界上第一座燃料电池发电站，功率为 4800 千瓦。如今在欧美和日本，燃料电池已被用做大型建筑物（医院、机场、数据中心、军用设施等）的独立电源。并联入地区电网做为补充电源。由于燃料电池在工作中还会产生大量的热水、热蒸气，因此多采取“热电联用”，热电综合效率最高可达 87%。

燃料电池技术进入汽车工业是近年的新发展。在美国和加拿大的一些城市街头，可以看到营运中的燃料电池公共汽车。使用燃料电池驱动的小轿车的样车也于 1996 年和 1998 年分别由德国的奔驰、日本的丰田和美国的通用汽车公司推出，21 世纪初可望正式投放市场。

五、绿色能源繁花满园

（一）青春焕发的生物质能

生物质能是指生物体物质的化学能，燃烧木柴、秸秆等就是传统的利用生物质能的方法，只不过利用率低又污染环境。新兴技术是将生物质能转化为可燃性液体或气体。如巴西每年大量种植甘蔗、番薯树，从纤维素中提取乙醇，巴西的汽车约有一半使用的是这样生产出来的乙醇。巴西的一种“柴油树”，能像橡胶树分泌橡胶那样分泌与柴油成分相似的胶质，每年每株能生产 50 千克这种“柴油”。美国人工种植的黄鼠草，每年每公顷可提炼 6000 千克人造石油，美国西海岸的巨型海藻，可用来生产类似柴油的燃料油。

垃圾能也主要是生物质能。英格兰推出了一种使家庭垃圾快速转变成无污染的燃油的方法，法国开发成功一种垃圾沼气化装置，我国农村约有 500 万个小型沼气池在做为家庭能源。1998 年我国首座千吨级生活垃圾焚烧发电厂在上海浦东新区开工建设，建成后每年可提供 1.1 亿千瓦时电力。

（二）天然清洁的风能

全球可利用的风能约有 200 亿千瓦，是人类的巨大能源。目前在风力发电方面，丹麦做得最好，其次是美国和荷兰。我国截止 1992 年已建成 10 座小型风电场，其中规模最大的新疆达坂城风电场总装机容量为 4450 千瓦。

（三）地下宝藏——地热能

地球本身是一座巨大的天然储热库。平均每深入地下 100 米，温度升高 3℃。

了利用温泉水洗浴等外，目前世界上已有十多个国家的 100 多座地热发电站在运行，我国也有多座，其中最大的是西藏羊八井地热电站水温约 150℃，1997 年建成 1000 千瓦的实验电站，1983 年总容量为 6000 千瓦的实验机组又投入运行，“地热之光”普照“世界屋脊”上的明珠拉萨

（四）急待开发的海洋能

海洋能包括潮汐能、波浪能、温差能、海流能等，据估计全球海洋能总量为 766 亿千瓦，利用的主要途径是发电。人类最早利用的是潮汐能，法国于 1967 年建成的朗斯潮汐发电站已安全运行 30 余年，总装机容量为 24 万千瓦，年发电量 5 亿多千瓦时。现在国际上潮汐发电的发展趋势是向中型、大型发展，据第十届世界动力会议估计到 2020 年全世界潮汐发电量将达到 1000 亿 ~ 3000 亿千瓦时。我国也在沿海建造了数十座中小型潮汐电站。

在波浪能的利用方面，英国经过 5 年的努力，于 1995 年建成了世界上第一座商业性海洋波浪能发电站，装机容量为 20 万千瓦。现在全世界已建成的波浪发电设施有近 2000 个，总装机容量达 1500 万千瓦。我国从 20 世纪 70 年代开始研究，1995 年建成一座装机容量为 20 千瓦的波浪能试验电站。

在利用海水温差（海水表面温度可达 25 ~ 35℃，而海底接近 4℃）发电方面，早在 1930 年就由克劳德在古巴海滨建造了世界上第一座海水温差发电站，获得了 10 千瓦的功率。后来，美、日等国也开始了海洋热能发电的开发和研究。目前世界上最大的实用型海洋温差发电装置是日本建在鹿儿岛的 1000 千瓦级海洋热能电站。我国从 20 世纪 80 年代开始这方面的研究，1986 年在中科院广州能源研究所建立了开式循环的海水温差转换实验室模拟系统

综上所述，21 世纪将是“复合能源时代”，世界能源的多元化为人类展示了充满希望的美好前景

第四节 能源的合理利用

在能源问题上，除了开发利用新能源和常规能源的高效节能技术以外，搞好能源的有效、合理利用也是一个重要的方面。它是依据对能源的科学认识，对各部门、各行业的能量需求和供应进行全盘考虑、全面规划、合理调配、综合利用，从而使一定数量的能源发挥出最大的效能。

为了充分利用能源，必须对能量有正确的认识根据能量守恒和转化定律，能量在数量上是守恒的，但在质量上仍有高质能量和低质能量之分。高质能量是指有序度高、转化为功的能力强（即转换效率高）的能量，而低质能量是指有序度低、转化为功的能力差的能量如发电厂使用的蒸汽温度越高、压力越大，发电的效率越高，所以高温高压的气体所具有的能量就是高质能量，而做过功的废汽温度降低，相对来说就是低质能量但低质能量并非不能利用，如发电机排出的废汽温度仍很高，而现在这部分能量（约占燃料燃烧放出的能量的一半左右）一般都在发电厂的凉水塔中白白散失掉，实在可惜，如果把它们送给使用低温蒸汽的企业或用于冬季住房采暖，则总效率可提高到 70% ~ 80%（所以现在多建集发电及供热于一体的热电厂）。因此在能量的使用上要实行梯级开发，使高质能量逐次降级，从整体上多做有用功。为了做到这一点，我们必须遵循“按质供能、按质用能、能尽其用”的原则，在具体做法上，可以建立总体能量系统，即把许多用能单位看成一个整体，建成一个有序的系统，综合使用能源，从而使能源的利用合理、有效。

能源利用要从节能角度全盘认真考虑，不能想当然。比如有限的天然气是供给工厂还是供给居民使用，从表面看，因为工业锅炉较家用煤炉设计合理，热效率高，似乎应该给工厂用。但是经过计算，一台 20 吨工业锅炉一天要烧掉 5~6 万立方米天然气，只顶替了 70 吨标准煤，如果把这些天然气供给居民，可以供应 7~8 万户（30 万人口），一天可以顶替 200 多吨煤，还可大大减轻城市污染，节省煤炭运输费用，显然给居民使用更合理。又如建设坑口电站，可以省去运输煤炭的费用，但输电也是存在损耗的。所以要确定最佳供能方案，必须用工程热物理等学科的理论 and 系统工程的方法深入研究，全面规划。

第十章

现代技术的重要支柱 ——材料科学技术

能源、材料和信息，是人类物质文明的三要素，人类的文明史，从某种意义上来说也是材料发展史如石器时代、青铜器时代、铁器时代、钢铁时代……就是按照人类所使用的材料划分的材料是人类赖以生存和生活的物质基础之一，现代社会尤为如此例如，没有半导体材料的工业化生产，就没有集成电路和现代计算机技术；没有耐高温、高强度的结构材料，就没有今天的航天技术；没有低能耗的光导纤维，就没有光通信技术。反过来，正是因为人类还未开发出低成本、高效率、长寿命的光电转换材料（太阳能电池），所以人们在大多数情况下还只能“望阳兴叹”

目前，世界上已有几十万种材料，且仍在以每年约 5% 的速度不断增加。材料的分类有多种方法，根据物质内部的微观结构和化学组成，可分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料四大类；根据材料的用途可分为结构材料和功能材料。结构材料主要是利用其强度、韧性等力学性质，构筑起物体的结构主体，如建筑物中的钢筋水泥等；功能材料主要是利用它们的电、光、声、磁、热等效应，制成具备某种功能的物品，如各种敏感材料本章将着重介绍近年涌现出来的新型材料和材料研制方法上的新进展——材料设计。

第一节 五彩缤纷的新材料

一、扬长避短的复合材料

复合材料是指两种或两种以上不同的材料复合而成的材料，建筑用的钢筋混凝土就是典型的例子复合材料的组成包括基材和增强材料，种类很多，按其基材可分为三类

（一）树脂基复合材料

最常用的是纤维做增强材料，如用玻璃纤维和树脂复合而成的“玻璃钢”，因其质轻、价廉、易成形、不反射电磁波等优点，已被广泛用于制做热交换器、飞机上的雷达罩等。碳纤维增强酚醛树脂的耐热性好，可做宇宙飞行器外表面的防热层、火箭喷嘴等。碳纤维增强环氧树脂强度高，多用于飞机和宇宙飞行器的结构材料，如制成的无人驾驶飞机重量减轻 18% 成本降低 20%。20 世纪 70 年代以来，普遍采用强度高、密度小、耐热性好的聚芳酰胺纤维代替玻璃纤维做增强材料，制做火箭发动机壳体、高压容器、航天飞机和飞机的机身和机翼。

（二）金属基复合材料

金属基复合材料在耐热、导电、导热等方面优于树脂基复合材料，因此成为各国竞相发展的新材料。金属铝、镁、钛、铜、锌、铅等及某些合金加入各种纤维、晶须（由晶体生长形成的针状短纤维）颗粒或陶瓷后可大幅度提高强度、硬度、耐磨性等，还可以减轻重量，因此已被大量用于航天、军事和汽车工业等领域，如制做发动机及构件（活塞等）、高速旋转机械、电子设备（如机器人部件、计算机部件）、运动器材等。

（三）陶瓷基复合材料

用碳纤维、碳化硅纤维和碳化硅晶须增强的陶瓷，其强度和韧性大大增加，且更耐摩擦损耗和高温，已用于刀具、滑动部件、发动机构件、能源构件和制动件等。

用纤维增强陶瓷做的瓦片粘贴在航天飞机的机身上，可保护航天飞机在返回大气层时不会被摩擦所产生的高温所烧毁

二、“多才多艺”的功能材料

所谓功能材料，是指可利用它们特殊的记忆、贮能、贮物或对温度、湿度、气体等敏感的特性，制造出各种不同用途产品的材料，其中有些神奇的更被称为智能材料

（一）奇妙的形状记忆合金

用这种合金材料（如镍钛合金等）在较低的温度下制成某种形状的器具，然后在某一较高温度（称转变温度）下保持几到几十分钟，该合金就“记住”了自己的形状，一旦在外力的作用下发生了形变，只要再次加热到转变温度以上，它就会立刻自动恢复原形。如阿波罗登月飞船带到月亮上的直径达数米的半球形天线，就是用这种合金在地球上制成并让它“记”住自己的形状后，再降温压成一团装入飞船的冷藏箱。带上月球后拿出来，经太阳一晒就自动展开成半球形天线。用这种合金制成的眼镜架、汽车外壳等若被撞变形，只需用暖风机一吹就会恢复原状。形状记忆合金已被用于航空工业、核工业、海底输油管等的管道接头和紧固件上，还可用于火灾报警器，小型固体热机，以及医学美容领域中制作脊柱矫形棒，牙齿矫形弓丝、接骨板、人工关节及妇女的文胸等

（二）高吸水性树脂

高吸水性树脂能吸收相当于自身重量数百倍乃至上千倍的水分，且吸水后即使加压也“滴水不漏”近年来，这种树脂已广泛应用于卫生材料（卫生护垫、纸尿裤、绷带、人造皮肤、人造软骨等）、农业材料（土壤保水剂、苗木移植保水剂等）工业材料（油中水分清除，蔬菜、水果保鲜袋，食品脱水处理等）、居室材料（墙壁、天花板的防露水剂，芳香剂，除臭剂等）……如日本一公司推出的纸尿裤，可吸收1000毫升尿液，且通气性好，对皮肤无刺激。若添加一些显色物质，吸湿后能显示明显的颜色变化；若加上电极层和仪表或报警器，还能显示吸水量和提醒人们及时更换尿布呢。日本通产省从1988年起研究把高吸水性树脂用做干燥地区的保水剂，如能大面积试验成功，在个球防止沙漠化、绿化沙漠的美好理想就可实现了。

（三）敏感材料

敏感材料包括光敏、声敏、热敏、湿敏、气敏、电敏、磁敏、力敏等多种材料，按材质划分有半导体、陶瓷、有机膜及金属间充化合物等它们是制做各种传感器的材料，既是信息获取和转换所必须的元件，也是自动控制、遥感遥测的关键

光敏材料如半导体材料砷化镓、锗、硫化镉、硫化锌等，又称光电晶体，其电阻随入射光的增强而减小，导致光电流增大。利用此种材料可制成路灯控制器、施工警灯、报警器等还有一种光敏变色玻璃，含有磷、铝、银等光敏材料，做成窗玻璃，当光线强烈时会自动降低透明度，使室内光线柔和，而当室内光线太弱时又会自动提高透明度，让更多的室外光线透入有一种光敏玻璃能随电流大小改变颜色，所以只要按按电钮，就能达到改变室内光照的目的。

热敏材料主要是一些电阻值对温度极为敏感的半导体材料，如用钛酸钡陶瓷加微量稀土元素制成的正温度系数热敏半导体，用多晶金属氧化物或硅、锗、玻璃等制成的负温度系数热敏半导体。热敏半导体广泛用于温度测量（从超低温至高温）、温度控制、火灾报警、气象探空、过荷保护一直到空间技术、火箭导弹等军事技术。还有一种感温磁钢，当温度升到某一界限（称“居里点”）时磁性消失，电饭煲中就用了它做自动限温元件，当温度超过了 100 时电路自动断开，饭就不会烧糊了。而英国英克化学公司推出的热敏液晶染料，可随温度改变颜色，如 28 时呈红色，33 呈蓝色。不仅有望为工业、医学等领域提供崭新的研究和应用手段，而且用它染成的时装穿在模特儿身上，会因身体各部位温度不同，呈现出如同彩虹般的迷人色彩。

气敏材料一般是指吸收某种气体后发生氧化或还原反应，引起电阻率变化的半导体材料，如三氧化二锑、氧化锌、氧化亚镍、氯化亚铜等。用他们制做的传感器可检出氧、氢、氯、一氧化碳、二氧化氮、甲烷等气体，做成一氧化碳或煤气泄漏的报警器，就可避免一氧化碳中毒或煤气爆炸等事故。

力敏（含声敏）材料通常是一些能产生压电效应的材料，如压电陶瓷、石英晶体、硅、硒锑合金及新发展起来的压电高分子聚合物，能将压力（包括声波振动所产生的压力）转化成电能。制成的力敏传感器可测量受力时工件内部的应力分布情况，或用来测量人的血压、脑压及心音，还可用做地震探头预报地震等。最近，科学家还研制出一种由硅、金属和橡胶组成的极敏感的力敏材料，可用在机器人身上，比如机器人拿起一个苹果，苹果重量产生的压力所引起的电流信号能使机器人判断出：“这是一个苹果”，于是使用适当的力将苹果握住。

第二节 神奇的纳米材料与纳米科技

一、纳米材料——新世纪材料科学的辉煌

纳米(nm)是一个长度单位,一纳米等于 10^{-9} 米(十亿分之一米),约为人的头发丝直径的几万分之纳米材料的物质微粒的大小或薄层的厚度为1~100纳米,仅为原子半径(在 10^{-10} 米量级)的几到几百倍普通固体材料的颗粒大小一般在微米(10^{-6} 米)级,一个颗粒包含无数个原子和分子,这时材料显示的是大量分子的宏观性质而当颗粒的尺寸是纳米级时,一个颗粒所含分子(原子)数急剧减少,颗粒总表面积急剧增大,再加上由于尺寸减小引起的量子尺寸效应、量子限域、介电限域等效应,使得纳米材料在化学、光、电、磁、热、力学等多方面显示出与宏观材料迥然不同的奇异的性质。如原来是良导体的某种金属,当颗粒尺寸减小到几个纳米时就变成了绝缘体;原来是绝缘体的某些氧化物达到纳米级时电阻大大减少,甚至可能导电;原为铁磁性的金属在颗粒尺寸小于10nm时变为超顺磁性(矫顽力为零);原来的P型半导体在纳米状态下变为N型半导体;原来不发光的半导体氧化物在纳米态下变得能够发光,用稀土元素掺杂的纳米硅也有电致发光现象,可望在新兴的光电子学中大显身手……正是这些奇异的特性,使纳米材料展现出十分诱人的应用前景,将对21世纪的信息科学、生命科学、材料科学和生态科学等带来一系列重大改变,甚至会引起一场产业革命(估计到2010年,全世界纳米技术市场的总产值将达400亿英镑)。

纳米材料包括金属、合金、离子晶体、陶瓷、半导体以及复合材料等多种材料,可划分为两个层次:纳米颗粒和纳米固体(包括薄膜)自然界中也存在天然的纳米材料,如人和动物的牙齿、天体的陨石碎片,蜜蜂、海龟等动物体内也有磁性的纳米粒子,正是这种小“指南针”才使蜜蜂、海龟能够辨别方向,不管离开多远也能回到蜂巢或产卵的地方。人工制备纳米材料的历史至少可以追溯到1千多年前,中国古代用燃烧的蜡烛的烟雾制成碳黑作为墨的原料和颜料19世纪下半叶建立起来的胶体化学的研究对象胶体也是直径为1~100nm的粒子系统然而,人们首次有意识地制造纳米颗粒是在1963年,Rvozi Uveda及其合作者发展了所谓的气体冷凝法,即通过将熔融的某种物质在纯净的惰性气体或真空中的蒸发和冷凝过程获得较纯净的纳米微粒。而最早制备纳米固体的是德国的格拉特教授,他于1984年将

用上法得到的超微粒通过原位加压制成了纳米晶体。同时在单个原子的层次上对物质进行精确地观测、识别与控制，用单个原子进行制造的科学技术也迅速发展起来了。1989年，IBM公司的科学家用隧道扫描显微镜的探针移动氙原子，把它们拼成了“IBM”三个字母，后来又用48个铁原子排列成汉字“原子”两字。1990年7月在美国的巴尔的摩召开了第一届纳米科学技术学术会议，使纳米科技成为科学家关注的对象，成为材料科学研究的热点。1991年IBM的科学家又制造出了速度为二百分之一秒的氙原子开关。1996年该公司设在瑞士的苏黎世研究所研制成世界上最小的“算盘”，其“算珠”是由60个碳原子规则连接成的笼状分子“碳60”。日本科学家也已成功地将硅原子做了三维空间立体搬迁。

纳米技术为人们按照自己的意图设计新型材料大开方便之门。如原来不相溶的两种元素在纳米状态下可以合成在一起，据此已制出铁铝合金、银铁合金和铜铁合金等纳米陶瓷或掺入金属纳米颗粒的常规陶瓷表现出良好的韧性，可以经受弯曲而不断裂，使人们100多年来为增加陶瓷韧性所作的努力终于有了收获。纳米金属氧化物颗粒放入橡胶中可提高橡胶的耐磨性，加入玻璃中既不影响透明度又提高了抗冲击韧性。将纳米铁粉和铜粉按一定比例掺入环氧树脂制成的类金刚石刀具具有极高的硬度。在化纤织物中加入少量金属纳米颗粒可解决令人头痛的织物产生静电的问题。改性粘土纳米复合材料是一种极好的防污、阻燃材料。加入纳米颗粒的涂层具有抑菌防腐的功能，这就是现今某些家用电器标榜为“纳米洗衣机”、“纳米冰箱”的原因。纳米涂层还具有很强的吸收电磁波的能力，因此不被雷达发现，是飞机、军舰等的“隐身法宝”。

有纳米材料之王称誉的碳纳米管是由碳原子规则排列而成的细管管的外径一般在几纳米到几十纳米，内径最小可达0.4纳米左右，而长度可达微米甚至毫米级。管壁碳原子排列成正六边形的网状结构，管端是正五边形结构。它是继1985年发现碳60后，于1991年由日本科学家饭岛澄男发现的碳纳米管具有较强的宽带微波吸收性能，可用于制造隐形材料、电磁屏蔽材料或暗室吸波材料。它还是很好的催化剂载体，气体通过碳纳米管的扩散速度比通常情况下要快上千倍。它还可能成为一种优异的储氢材料。碳纳米管的强度是钢的100倍，其它纤维的200倍，而密度却只有钢的1/6，做防弹背心是最好不过的了，用碳纳米管做成的绳索，是唯一可以从月球挂到地球，而不会被自身重量所拉断的绳索，如果要制造地球至月球间的太空电梯，当然非它莫属。

碳纳米管可以是金属性的，也可以是半导体性的，当把一个金属性的纳米管与一个半导体性纳米管同轴套构形成一个双层碳纳米管时，因电流只能从半导体管流向金属管，所以就做成了一个分子二极管。将来碳纳米管有可能替代硅芯片，在纳米芯片和纳米电子学中扮演极重要的角色，甚至引发一场计算机行业革命。纳米电子

学用量子元件代替微电子器件，将出现可装人口里的巨型（指运算速度）计算机，可将美国国会图书馆的个部藏书存储在一个直径仅为 0.3 米的芯片上

二、纳米技术和微电子技术的结合——微米 - 纳米微机电系统

纳米技术和微电子技术结合的产物——微米 - 纳米微机电系统把微电路、微电机、微传感器、微动作器等集成在芯片上，制成成本低而可靠性高的微型机器。1988 年美国一个研究小组发表了转子直径为 60 ~ 100 微米（几根头发丝粗细）的硅静电马达，已见诸报道的还有微泵、微涡轮、微麦克风、微型相机、微光纤开关、微光谱仪，以及用微阀、微管道和微泵组成的微化学分析系统和 DNA 反应室等。已形成产业或即将投入大批量生产的包括微加速度计和微陀螺。用于汽车防撞的微加速度计，芯片尺寸为 3mm × 3mm，售价仅为几美元。而由微加速度计、微陀螺等组成的微惯性测量组合，可用于各种运载工具如汽车、飞机、卫星、导弹、炮弹等的导航与制导，5 至 7 年内一个完整的导航系统将从人的手掌那么大减小到芯片尺寸，价格从 1 万美元降到 100 美元。近几年汽车采用微加速度计和微压力传感器等微机电器件，已在节油和安全方面取得了明显效果。目前，利用微机电技术已能将一台小型地震仪做成只有 25 美分硬币大小。安装微喷嘴的喷墨打印机喷嘴密度可增加四倍，具有 2400dpi 分辨率，装有微控制器件的磁头运行精度大大提高，可使磁盘的磁道密度从现在的 5000 道 / 英寸提高到 25000 道 / 英寸。不久的将来将出现一粒米大小的汽车、肉眼看不见的发动机、大小只有常规车床万分之一的车床。再配以微型探测器和微型收发报机就可造出只有几毫米大小的机器人，用它可以在核电厂拐弯抹角的管道中爬行探寻裂缝，或在温室中传播花粉和杀死害虫。在军事上可制成昆虫、树叶、沙粒等形状的机器人“士兵”，从投到敌人后方的伪装成砖头或石块的母机中爬出来，通过建筑物的缝隙钻进去进行侦察或破坏；还可造出苍蝇大小的飞机、麻雀大小的卫星，一枚小型运载火箭就能发射几百乃至上千颗这样的卫星上天，即使被敌人打掉几个也没关系。

在医疗卫生方面，医生将可以利用尖头尺寸只有几微米的镊子操作血球、DNA 等大分子。出诊医生随身携带的袖珍检查仪，可进行当时即能出结果的各项检查，还可以让微型机器人进入人的血管清除血管壁上的沉积物，打通被血栓堵塞的血管，深入人的大脑进行外科手术。在糖尿病人的肌肉内植入一个由血糖微传感器与微药物泵组成的系统，可根据病人的血糖水平实时、自动地进行微量药物注入在磁性纳米粒子表面涂覆一层高分子，再裹上药物后就成了药物导弹，注入血管后在外加磁场的指引下可自动准确到达病变部位，从而大大提高局部的药物浓度，避免对其他

器官的损害如果让纳米粒子带上只与癌细胞结合的抗体等，则可直接针对癌细胞发起攻击，而不伤害正常细胞。纳米粒子还可以做核磁共振成像的增强显示材料。医用纱布中加入纳米银粒子有消毒杀菌作用，加入袜子中则可去除脚臭

第三节 新材料研制的曙光 材料设计

由于物理学、化学、数学和计算机技术等的发展，材料的研制方法也正在经历一场新的变革，这就是由过去较为盲目的“炒菜配料”式的方法朝着按人的需要和意图设计和制造新材料的方向发展，即“材料设计”方法的兴起。

材料设计的方法主要是分子设计，它建立在量子力学和化学的交叉学科——量子化学的理论基础之上，应用“分子轨道法”等方法，通过求解分子间电子运动的薛定谔方程，来解决种种化学课题。研究表明，物质的很多特性，如半导体性、超导电性等电学性质，热导等热学性质，磁性转变温度等磁学性质，吸收光谱等光学性质以及几乎所有化学性质，都和原子的外层电子运动有关。因此，分子设计方法的应用可以减少盲目性，增加新材料研制时的预见性和主动性，更快地研制出具有人们要求性能的新材料。

比如，由于半导体实验要求高纯度、拉单晶等复杂技术，单靠摸索的方法寻找新半导体既费时又费钱，而用材料设计就可大大加快新半导体研制的步伐，甚至有可能制成低成本的太阳能电池，使太阳能发电能够代替火力发电。材料设计也可能为高临界温度超导体的研制提供线索。

药物及农药的研制也是材料设计可以大有作为的领域。过去药物的研制是靠配方、实验的方法，周期很长，且由于容易制造的化合物都已试验过了，所以新药物的合成越来越难，而“药物设计”开辟了一条新的光明大道，已引起制药业的高度重视。

第十一章

与人类命运攸关的环境科学技术

古希腊神话中有这样一个传说：大臣达摩克利斯时常做当帝王的美梦。国王知道后，决定成全他，让他过一天帝王瘾。然而就在他登上国王宝座时，突然发现宝座上空悬挂着一柄用极细的马鬃吊着的利剑。这利剑随时可能掉下来刺穿他的头颅，吓得他一跃而起，大喊“这样的宝座一刻也坐不得”。20世纪的人类，还没有登上大自然主宰者的宝座，就已经受到了掌握在大自然手中达摩克利斯剑的威胁。一方面是人类拼命地改造自然环境，另一方面是大自然对人类改造活动的否定，将一个解人类生存难题的联立方程摆在人类面前。保护人类生存的环境，实施可持续发展的战略，已成为21世纪国际社会极为重要的课题之一。

第一节 环境与环境污染

人类社会的发展主要是以经济发展满足人类自身的需要，且常常以损害环境的方式实现人类的需要特别是产业革命后的 200 多年来，人类依靠先进的科学技术发展起来的强大生产力，无节制地开发自然资源，损害了地球的基本生态过程；不断向环境排放废弃物，超越了大自然自身的净化能力，从而出现了大气污染、水源污染、土壤污染、生物污染等系列全球环境问题人类在地球上的持续生存出现了危机

一、环境及环境问题的分类

（一）环境

环境指与主体事物有关的外部世界环境科学中的环境指围绕人群的空间以及直接或间接影响人类生活和发展的各种自然和社会因素的综合。世界各国的一些环境保护法规把环境中应该保护的自然资源如大气、土地、水、矿藏、森林、草原、植物、野生动物、名胜古迹、温泉、风景游览区、自然保护区、生活居住区都称为环境。

（二）环境问题的分类

按引起环境问题的根源划分，分为两类：由自然力引起的原生环境问题称为第一环境问题，主要指地震、洪涝、海啸、火山爆发等自然灾害；由人类引起的次生环境问题称为第二环境问题，又分为环境污染和生态破坏两类。由于人为的因素使环境的构成或状态发生了变化，导致环境质量下降，扰乱和破坏了人们正常的生产和生活就是环境污染，如工业三废对大气、水体、土壤和生物的污染，又如声污染、热污染、放射性污染、电磁辐射污染等。生态破坏是指由于人类直接作用于自然环境引起的对自然生态系统的不良影响，例如乱砍乱伐引起的森林植被破坏、植被破坏引起水土流失等。按环境问题的影响和作用范围划分，有全球、区域、局部等不同等级。全球环境问题，包括全球变暖、臭氧层破坏、酸雨危害、有毒、有害垃圾越境转移和扩散、生物多样性锐减、海洋污染等全球污染具有综合性、广泛性、复杂性和跨国界的特点，只有世界各国携手合作，才能保护全球环境

二、环境污染物的类别

环境污染物按受污染物影响的环境要素划分，可分为大气污染物、水体污染物、土壤污染物等；按污染物的形态划分，可分为气体污染物、液体污染物和固体污染物；按污染物的性质可分为化学污染物和生物污染物下面让我们了解一下人类社会不同功能产生的污染物，主要包括工业、农业、交通运输和生活四个方面：

1、工业方面

工业生产对环境造成污染主要是由于对自然资源的过量开采，造成多种化学元素在生态系统中的超量循环；能源和水资源的过度消耗；生产过程中产生的“三废”

2、农业方面

农业对环境产生污染主要是由于使用农药、化肥、农业机械等工业品，农业本身造成的水土流失和农业废弃物农家肥料中常含有细菌和微生物。

3 交通运输方面

汽车、火车、飞机、船舶等交通工具的污染主要是噪声、汽油等的燃烧产物的排放和有毒有害物的泄露、清洗、扬尘和污水等汽油、柴油燃烧排放的废气中含有一氧化碳、氮氧化物、碳氢化合物、铅硫氧化物等对环境有害的成分。

4 生活方面

生活活动也能产生物理的、化学的和生物的污染，排放“三废”分散取暖和生活燃煤是城市主要的大气污染源之生活污水主要包括洗涤和粪便污水，它含有耗氧有机物和病菌、病毒与寄生虫等病原体。城市垃圾中含有大量废纸、玻璃、塑料、金属、动植物食品等废弃物

三、地球的自然生态环境

（一）生态圈及结构

人类能在地球上生存繁衍依赖的是地球的四大生态圈：大气圈、水圈、岩石及土壤圈、生物圈

1.大气圈

地球表面包围着厚厚的大气层，它随着地球旋转大气层分为均质层（0~90km）

和非均质层。均质层是生物生存的空气大气层，在此层中大气成分为： N_2 ：78%， O_2 ：21% 其他气体约为 1%。均质层又可分为对流层（0~10 km）、平流层（10~18 km）、中间层（18~80 km）和热成层（80~90 km）。地球上的生物及人类主要生活在对流层中的近地层（0~1 km）以下的空间平流层和中间层也称为同温层，大名鼎鼎的臭氧（ O_3 ）在此层约 20~30 km 内有薄薄的一层（仅 3mm）但起着保护生物和人类的作用，被称为地球的宇宙服

2. 水圈

水和太阳光是地球生命的动力源泉，虽然包围地球表面的 70% 是水圈，但其中 97% 是海洋咸水，仅有 3% 是我们可以饮用的淡水。这些淡水分布在江、河、湖、地下及冰川而南北极冰川集中了 2% 的淡水，真正能利用的淡水不到 1%，水资源的供应成为生物与人类生存的关键因素之

3. 岩石及土壤圈

地球环境中供给生物及人类生存的物质除空气及水外，还有生物与人类需要的食物营养物质，这些物质则来自于地壳层（土壤及岩石）。这一厚度仅为 16~40km 的地壳层，虽然对于地球来说，犹如鸡蛋壳样薄，但它却是生命的源泉，养育了地球上的生物、人类，也形成了地球生物的主要物质结构。

4 生物圈

我们生存的地球的历史据地质考证大约为 46 亿年，而人类的历史不过 200 万~300 万年，有文字记载的历史只有 6000 多年。地球在形成初期，只是一个混沌的星体，没有生命。地球表面大气环境中的雾气，只包括 N_2 、 CO_2 、 CO 和 H_2O ，没有 O_2 和 O_3 。高能紫外线可以无障碍地直射地球表面，大气圈内的无机物成分经过数亿年的照射生成了简单的有机物，这些有机物在原始的海洋中汇聚起来，经过漫长的岁月，大约在 34 亿年前出现了最初的地球生命——原始菌类大约在 27 亿年前左右在光合作用下，由水和二氧化碳合成了有机蓝绿藻类，同时产生了氧气由于游离的氧气产生，进步促进生命进化，出现了真核细胞有性繁殖的多核细胞生物。又经过数亿年的进化，才形成各种各样的生物物种。生命的演变是生物圈及其他生态环境相互影响、相互制约、转化统一的结果。地球从有生命以来，曾形成 2500 万~5000 万种的生物物种，但由于地球自然环境（地质、气候）的变迁以及人类活动的影响，许多生物物种灭绝或者濒临灭绝现在地球上的生物物种，已知的动物大约仅有 200 万~300 万种，植物 20~30 万种，微生物 10 万种左右。人类在保护生存环境中，应保护与人类共存与地球上的各种生物物种

（二）生态系统

生态系统这一概念最初是由英国植物学家坦斯莱 1935 年提出的生态系统是指一定空间范围内，生物群落与其所处的环境所形成的相互作用的统一体，是生态学的基本功能单位。生态系统的大小可由研究的需要来确定，它可以被划分为若干个子系统，也可以和周围的其他系统组成一个更大的系统来研究，一滴有生命存在的水、一块草地、一片森林、一个城市都是一个生态系统，整个地球就是一个巨大的生态系统。当前，人类与环境的关系问题如人口增长、资源的合理开发与利用等已成为生态学研究的核心课题，而所有这些问题的解决都有赖于生态系统的研究。

任何一个生态系统都由生物与非生物环境两大部分组成。生态系统的各种生物，按照它们在生态系统中所处的位置及作用的不同，可以分为生产者、消费者和分解者三大类群。生产者主要是指绿色植物，它们能进行光合作用将太阳能转化为化学能，将无机物转化为有机物，不仅供给自身生长发育的需要，也是其他生物类群的食物和能源的提供者。还有一些能利用化学能将无机物转化为有机物的，如自养微生物也是生产者，虽然它们合成的有机物数量不大，但它们对自然界的物质循环具有重要意义。消费者是指直接或者间接利用生产者所制造的有机物质为食物和能量来源的生物，主要指动物，也包括某些寄生的菌类等。根据食性的不同可分为一级消费者、二级消费者……。分解者又称为还原者，它们是具有分解有机物能力的微生物，也包括某些以有机碎屑为食的动物，如白蚁、蚯蚓等。分解者以动植物残体和排泄物中的有机物质为能量来源，把复杂的有机物分解为简单的无机物复归环境、供生产者重新利用。分解者在生态系统中的作用非常重要，假若没有分解者将死亡的有机体和排泄物分解转化为生产者可利用的营养物质，那么，可供生产者利用的营养元素总有一天会被用尽，而死亡的有机体和废弃物将会堆满整个地球，导致所有生物难以生存。

（三）生物地球循环

生物为了满足机体生长发育、新陈代谢的需要，需不断地从环境中获取营养物质，这些物质进入有机体后经传递、代谢和分解后，又重新回到环境中，这一过程即为物质循环。自然界中约有 92 种天然元素，其中约有 40 种为生物正常生命活动所必需，生物体中常见的元素约 29 种，而其中碳、氢、磷、硫是构成生命体的主要元素。这些元素在生态系统中经历着从环境到生物再到环境……的循环往复的过程，这种运动模式称为生物地球化学循环。物质在循环中、有毒物质也在能级传递中富集起来。

水循环、碳循环、氮循环和磷循环都是对生命具有重要意义的生物地球循环

水是最重要的生命物质之一，水也是生物圈中最丰富的物质，地球上的水约有 $14.6 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，但只有不到 1% 的靠近地表的水能被植物根系吸收利用，而云雾、空气中气态水仅占总水量的 0.001%。水在生物圈中的循环运动是靠太阳能和重力而带动的海洋、湖泊、河流和地表水不断蒸发，形成水蒸汽进入大气；植物吸收到体内的水分通过叶表面的蒸腾作用进入大气。大气中的水汽遇冷形成雨、雪、雹等降水重返地球表面，一部分直接落入海洋、湖泊河流等水域中，一部分落到陆地上，在地表形成径流，流入海洋、湖泊、或渗入地下，供植物根等吸收。如此往复，这就是水循环

碳是构成生命体的主要元素，有机干物质的 50% 由碳构成。地球上碳的总量约为 26×10^{15} 吨，绝大多数以无机形态存在于岩石圈中，约有 32% 以有机残体的形式沉积在土壤和水中，在活的有机体中的碳元素只占有机形态碳的 4%。大气中的 CO_2 约含碳 7×10^{11} 吨，生物有机体中的碳元素主要来源于 CO ，地球上的碳循环的主要形式是从 CO_2 经生物物质再回到 CO_2 。大气中的 CO_2 每年约有 $2 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{10}$ 吨被陆地上的绿色植物通过光合作用固定到有机物中，然后通过生物的呼吸、分解作用又被释放回大气中。此外，风化和火山活动以及石灰岩的分解，也把部分碳以 CO_2 的方式送入大气。工业发展过程中，大量化石燃料的利用，也使得固定在化石中的有机态碳被氧化成 CO_2 重返大气，造成近一百年来大气中 CO_2 浓度的显著增加，其后果必将对地球生态带来重要影响，需要全面、深入地进行研究

第二节 全球大气变化

一、温室效应

如我们上面所讲的，臭氧层对我们的生活起着非常重要的作用，它除了能保护地球生物不受紫外线的伤害以外，还具有稳定地面与大气温度的重要作用。对流层不但会受到地球表面的辐射而温度升高，而且在某种程度上也会受到来自同温层的红外辐射而升温。臭氧在吸收紫外线辐射的过程中，温度也会升高，所以臭氧具有加热同温层的作用。因此，如果同温层中的臭氧浓度一旦有变化，同温层的温度也会相应地发生变化。因为同温层的温度变化最后会影响对流层，使对流层温度发生变

化，从而影响天气与气候同温层中臭氧浓度降低涉及到两种相反的效应。如果同温层中臭氧浓度降低，在这里吸收掉的紫外辐射就会相应减少，到达地球表面的紫外辐射会增加从而使地球变暖；另一方面，如果同温层中吸收掉的紫外辐射减少，同温层自身会变冷，这样释放出来的红外辐射即会减少，就会使地球变冷。如果整个同温层中降低的臭氧浓度是一致的，则上述两种效应大致可以相互抵消。但如果同温层不同区域臭氧浓度降低得不一样，两种效应就不会相互抵消。地球的温度与对流层上部及同温层下部的臭氧浓度都有密切关系。对流层中的臭氧对地球温度的作用，与同温层中的臭氧的作用不同。臭氧与二氧化碳一样，都是温室气体，它的存在可因温室效应使地面上空的大气层与地球温度上升。

二、臭氧层及臭氧层损耗

（一）臭氧层

在地球大气层 20~30km 的高空中，有一层脆弱的遮盖物保护着地球上的生存环境不受太阳紫外线的直接袭击，这一层遮盖物就是臭氧层，它的积累厚度仅 3mm，总重 3.0×10^9 吨比一层纱布还薄，而且十分脆弱。臭氧层对地球上生命的重要性就像氧气与水一样。如果没有臭氧层保护，地面上的紫外线辐射就会达到使人致死的强度，地球上的生命就会像完全失去空气一样遭到毁灭。这是因为臭氧具有非常强烈的吸收紫外线的功能，它能把波长为 200~300nm 的紫外线吸收掉，而紫外线，尤其是 260~340nm 的紫外线，对生物具有极强的杀伤力。然而，正如我们所知道的那样，臭氧层正在遭到严重的破坏。20 世纪 70 年代初，美国环境学家最先观察到臭氧层的受损。1985 年，英国科学家证实南极上空的臭氧层出现了“空洞”（即臭氧层被破坏，浓度极稀薄）。到 1994 年，南极上空的臭氧层破坏面积达到两千六百万平方公里，比以往任何时候都薄。欧洲和北美上空的臭氧层平均减少了 10%~15%，西伯利亚上空甚至减少了 35%。氟氯烃（氟里昂）的存在是臭氧层遭到破坏的主要原因，氟里昂被广泛用来做制冷剂、发泡剂和清洗剂，火箭推进器发出的废气，也是平流层中氟里昂的一大来源。进入平流层的氟里昂在紫外线的作用下释放出氯原子，立即与臭氧发生连续反应形成氧原子，一个氯原子可以破坏一万个臭氧分子。据分析，南极大陆上空大气在冬季非常寒冷，形成很多冰粒物质，这些物质表面的反应使氟里昂极易释放出氯原子，致使在春季大气中出现一大批活泼的氯原子。因此，南极大陆上空春季臭氧含量大大减少。由于平流层空气很少上下对流，没有雨雪的冲洗，污染物可以在平流层停留。

很长时间，对臭氧层的破坏很大

（二）臭氧层损耗的危害

1、臭氧的减少使皮肤癌和角膜炎患者增加，也会损害人的免疫系统。

2、破坏地球上的生态系统。过量的紫外线影响植物的光合作用，使农作物减产。紫外线还可能导致某些生物物种的突变

3引起新的环境问题。过量的紫外线能使塑料等高分子材料更容易老化和分解，又会引起大气光化学污染

三、酸雨

大气污染的一个重大表现为酸雨现象。降雨虽属气象现象，但它涉及环境中化学物质的循环，大气中的物质往往是通过雨雪又降到地球表面。自然界中的正常雨雪呈弱酸性，其 pH 值（酸碱度）约为 5.6。这是因为大气中的二氧化碳溶于洁净雨水中而形成碳酸的缘故。但随着大气污染的日益严重，世界各地出现了酸雨现象，西欧、北美尤为严重，我国南方城市也普遍发现酸雨现象，重庆地区甚至出现过 pH 为 3 的酸雨，这样对自然生态就要产生不良影响。我国政府对此十分重视，1983 年 3 月国务院曾发出《关于开展全国酸雨普查的通知》。

酸雨的危害大致有如下几个方面：

1 对人体健康的危害：硫酸雾和硫酸盐雾的毒性非常大，甚至会引起肺水肿和肺硬化等疾病而导致死亡。

2 使水体酸化，严重影响水生动植物的生长。

3、破坏土壤、植被。

4 腐蚀金属、油漆、皮革、纺织品和含碳酸钙的建筑材料（如大理石）。

酸雨的成因是因为雨水中含有一定数量的稀硫酸和稀硝酸以及少部分其他弱酸。从我国情况来看，硫酸又多于硝酸，因此我国的酸雨呈硫酸型，所以应该着重研究向大气中人为排放 SO_2 的情况，以便抑制和消除酸雨。

第三节 海洋与淡水环境

一、海洋的功能

具有稳定全球环境机能的海洋，其资源也是地球生物生存的重要源泉。海洋占地球表面积的70%以上，是多种资源的供给源。很多人为起源的物质最终流入大海，因此大海又有容纳废弃物的机能。由于海洋的广阔无垠，海洋的这两个机能似乎给人以永远无限的印象。但近年来世界各地已经开始对海产品资源的枯竭、有害化学物质、漂浮的废弃物原油等海洋污染问题给予关注，保护海洋环境变得日趋必要。由于海洋的总容量非常大，因此不容易很快发现问题，但一旦出现问题，可能就非人类的力量所能解决的了。另一方面，海洋并非单纯被动地起作用，它还具有使地球环境稳定的机能。首先，海水的总容量非常大，故此海洋起着调节气候的作用，此外，海洋生态系统的生物化学反应非常重要，这种作用保证了地球环境的安定。海水中溶解着包括认为是生命起源的多种物质，其中浓度主要是由陆地流入且扣除了经化学反应沉降并堆积于海底的部分，另外，也有些物质从地壳通过岩浆进入海洋，因而，海水溶解着什么物质是由生物化学反应及沉降等内部机理所决定的。在这些反应中，射入海洋的太阳光作用是基本的物理条件。海水的环流及涌升现象也决定了物质的分布。由氮、磷等营养元素组成的化合物，本身并非有害物质，然而其循环与海洋生态系统密切相关，赤潮与黑潮现象即为一种信号，它反映了城市排水、化肥使用的增加等人类活动介入自然界的循环，使得环境发生了变化。

二、海洋污染

海洋污染是由于人类的活动改变了海洋的原来状态，使人类和生物在海洋中各种活动受到不利影响。海洋状态包括温度、含盐量和透明度等物理因素，海水的化学组成、pH值、溶解氧、氧化还原电位等化学因素，以及海洋生物种类、数量、分布状况等生物因素。

（一）赤潮

赤潮是指水中浮游植物数量增加，使海水变色的现象，颜色通常在暗红~茶色之间变化居多。赤潮不仅使鱼类（特别是无处逃难的养殖鱼）因鳃塞而致死，而且在某些赤潮发生时，生物体内的有毒物质经食物链被贝类富集，成为贝类中毒的原因。赤潮现象早在圣经旧约全书的埃及篇和续日本篇中就有记载，是很久以前就为人所知的现象，但近年来伴随着海洋富营养化而频繁发生，成为社会问题引起人们的关注。有“赤潮银座”之称的日本濑户内海，自1965年富营养化以后，赤潮发生次数激增，而在80年代后对磷的排放的限制产生了效果，发生次数逐渐减少。赤潮的特征通常是海域中为数不多的特定种类赤潮生物的爆发性增殖，而在特定的营养环境条件下，氮、磷负荷增大而促使赤潮形成。

（二）黑潮

海面上有时会出现黑白或黑绿白色的浑浊现象，这一海水变色现象称为黑潮。黑潮发生时，在缺氧水的影响下，鱼类因不能有效呼吸而致死，这不仅影响海洋生物生存也给渔业生产、海洋经济造成重大损失。为防止黑潮发生，必须降低沿海岸的有机物的负荷，了解与氧消耗相关的深层浮游植物增殖的机制与沿海海域富营养化的对策，使水质保持在适于生物生长的水平，保护沿岸海域的环境。

三、地球上的淡水

水是人类生活和生产不可缺少的资源。尤其是淡水，是人类的生命之源。人在断食时，尚可生活较长时间，但如果3天不喝水，身体就无法支持。当人体内的水分减少15%~20%时，就会发生脱水症状，如果断水一周，就会死亡。

（一）水污染与水质评价指标

水受到污染时，首先要知道受污染的程度，水的分析测定概括起来有化学、物理、生物学性质三个方面，并通过不同的指标定性定量地反映，这些指标称为水质评价指标。一般的水质评价指标如下：

1. pH值

在水中pH值的允许范围一般在6.5~8.5之间。就天然水域而言，一般认为鱼能正常生存的酸碱度就是pH值的允许范围。如当降雨时，鲑鱼在pH值为5.5的条

件下就会全部死亡，显然，pH 值为 5.5 就不是允许范围了。

2. 浊度和透明度

所谓浊度，就是用来表示水质浑浊程度的单位当 1 升水中含有 1 毫克直径为 62~74 微米的白陶土时，被称为浊度 1 度。使用浊度计的方法通常是把水的吸光度与标准液进行比较测定所谓透明度，在日本用 5 号活字印刷成文字，置于被测液的底部，然后通过液层垂直看底部的文字，以刚能辨认出文字的水层高度的厘米数来表示进行废水浊度和透明度的测定，水的污浊程度就基本上知道了。

3. 悬浮物 (SS)

多数废水含有不溶解性的悬浮物

4. 溶解氧 (DO)

当废水含有还原性有机物质时，这些还原性物质与水中的溶解氧反应，往往引起水中溶解氧不足所以，当水中有机物多时，溶解氧就少。因此，测定水中的溶解氧就能知道水的污染程度。

5. 化学需氧量 (COD)

COD 表示水中的有机物被氧化分解时，所消耗氧化剂 KMnO_4 (COD_{Mn}) 或 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (COD_{Cr}) 的氧的当量，这个氧的当量与有机物的量是有一定比例关系的。在我国一般采用 COD_{Mn} 评价地面水环境和自来水水质

6. 生物化学需氧量 (BOD)

BOD 表示水中的有机物在好氧条件下，经微生物分解时，所需的氧的当量。然而 COD 和 BOD 两个指标，都不能完全反映水中有机物的含量，只相当于有机物氧化率的 60%~70%，况且 COD 和 BOD 在不同的条件下所测的结果又不一致，但目前这两种指标仍被采用。现在对于 COD、BOD 的测定在很多地方已经被所谓的 TOC、YOD 测定器所代替。

(二) 饮用水污染的对策

发达国家保证饮用水安全的做法：一是保护饮用水水源，二是不断实施与最新水质要求相适应的饮用水处理新技术。由于卫生学研究的进步，为保证安全供水，饮用水水质标准会不断修订和严格化。在这种情况下，为保证满足新的水质要求，饮用水处理工艺也要不断进步。

就人均水资源而言，中国是一个贫水国，人均水资源量只有世界平均水平的四分之一稍强。水资源本来就短缺，水质污染造成很多水体功能的丧失又极大地加剧了水资源的短缺。当前，水质型和资源型的水资源危机已经开始明显制约我国国民经

济的发展。因此，合理地利用水资源，有效地保护好水环境，实行经济、社会与环境同步发展的方针，即贯彻可持续发展的战略，是我们今后必须始终坚持的。

第四节 环境管理

一、有害废物的越境转移

城市的发展，人口的集中，各种废弃物大量增加，在当地范围内处理废弃物已感困难，因此希望将废物转移到临近的城市、村镇以至临国，以及更容易处理的地方，就称为有害废物的越境转移。现在，在欧洲多个国家接壤且商业往来频繁的地方，废物的越境转移已变成国际性的问题有害废物的问题，是所有发达国家共同面临的问题，随着发展中国家的工业化和有害废物的越境转移，已开始在全球各地引起重视。现在，就连曾被认为与工业生产毫无瓜葛的北极熊体内，已查明受到了 DDT、HCH、PCB、氯丹等的污染。南极企鹅也是如此命运。

二、放射性废物

原子能的和平利用给人类带来了极大的利益，然而，随之而来的放射性废物的处理管制问题（废物管理）却成为一个大课题。近年来，各国开始研究并实施对放射性废物的处置，而大部分放射性废物仅处于必要的管理阶段。放射性废物的定义是“被核原料及核燃料物质（放射性同位素）污染，因而准备废弃掉的物品”。为了使放射性废物中所含的放射性物质对人类健康和环境不产生影响，必须要对它们进行管理。为此，使放射性废物在化学上、物理上都处于稳定的形态进行保管，这样的过程叫“处理”，这些被处理过的废物处于不再需要进行管理的状态。把它们从生活环境中隔离出去的过程叫“处置”

三、巴塞尔公约

巴塞尔公约是为了防止有害废物非法越境转移的国际性公约，它规定的对象——废物是“有害废物及其他废物”。“有害废物”，是以废物产生过程和对环境的危

害性为着眼点，按所含成分划定的 45 种废弃物（公约附件 III）所谓“其他废物”，是指从家庭收集的废物及其他焚烧残留物，但在公约中通常与有害废物同等对待。公约中提到要“处置”废物，并定义了要求“处置”的物质和物体，但因处置的定义也包括了回收资源、再生等的操作（公约附件 IV），所以，公约的有关规定也适用于以循环利用为目的的物质越境转移为对有害废物进行恰当的管理，需要采取如下措施： 1、当发生越境转移时，附加装箱（转移文件）和签名的义务 2、当发生越境转移时，附加保险和其他保证措施 3、从事越境转移的运输者、处置者的资格制度 4、有害废物的环境污染事前防范措施该公约还制定了对非法越境转移行为的处罚制度和再进口制度，以及有关越境转移的国际技术交流及国家间合作的条款。该公约有 53 个国家签字，已于 1992 年 5 月 5 日正式生效

第十二章

揭开生命奥秘的分子生物学

分子生物学，是从分子水平上研究生物大分子的结构与功能，从而阐明生命现象的本质的科学；其主要研究范围是蛋白质分子体系、核酸分子体系和生物膜体系（蛋白质-脂质体系）它是从生物化学、生物物理学和遗传学中孕育和发展起来的分支学科，和其他分支学科一样，最早的萌芽可以追溯到很久以前。早在19世纪末20世纪初人类就认识到生命的第一特征——新陈代谢是细胞内进行的化学过程，该过程遵循自然界的普遍规律。分子生物学的诞生使人类认识生命的第二特征——遗传现象的分子机理，而且可以人为地控制生物的遗传过程从而开辟了人类利用和改造生物的广阔前景，生物技术产业蓬勃兴起，正在创造巨大财富，生物技术已经成为使21世纪人类社会生产力发展的高新技术之一，受到广泛重视。生命科学将为人类解决文明社会发展中遇到的人口、粮食、生态环境污染等难题提供新的技术途径。下面分别介绍人类对蛋白质、核酸、遗传信息的载体——DNA结构的研究和认识过程；简要介绍基因工程、基因组克隆技术和干细胞研究的进程。

第一节 揭开生物大分子面纱 —— 生物化学

一、 蛋白质分子结构研究

现在我们都知道蛋白质是由 20 种氨基酸组成的生物大分子。但在人们还不知道它的化学组成时，就像瞎子摸大象一样，从其某一方面的性质认识它，长期以来始终难以认识蛋白质的真面目。虽然在有机界蛋白质无处不在，但它的种类繁多，性质各异，分子大小相差甚远，分离提纯又十分难。有机化学在 19 世纪中叶已经认识到，所有分子都有一定的组成而且具有一定的几何结构，这种分子结构与物质的性质密切相关可是蛋白质的结构就无从着手研究，蛋白质的水解产物是由不同大小碎片组成的混合物；而且每次处理所产生的碎片并不一样，即使处理同一种蛋白质也是如此。1820-1922 年期间，组成蛋白质的 20 种氨基酸全部分离得到并确定了分子结构，所以蛋白质的深入研究到了 20 世纪才有较大进展。19 世纪，人们已经认识到蛋白质是在生命系统中发现的最重要物质，似乎提示人们要研究生命现象就必须先了解蛋白质，因此生理学家们也对蛋白质产生了浓厚的兴趣。在这样的历史背景下，1878 年恩格斯在《反杜林论》中指出：“生命是蛋白体存在的方式，这种存在方式本质上就在于这些蛋白体化学组成部分的不断的自我更新。”

关于蛋白质分子结构的研究，德国化学家费歇尔(Emil Fischer, 1852-1919)做出了重要贡献，他本是天然单糖化学专家。1899 年，费歇尔受生理学家的影响而转向蛋白质研究，并开创了一些从天然蛋白质水解物中分离氨基酸的实验方法，测定蛋白质分子中各种氨基酸的组成比例。同时，证明在蛋白质分子中氨基酸之间以肽键相连，建立了蛋白质的多肽链学说，把形形色色的蛋白质归纳为一类特殊的有机化合物。1902 年，费歇尔由于糖和蛋白质化学结构方面的研究成果，获得了诺贝尔化学奖。有机结构化学早已采用化学合成待确定结构的化合物的方法作为最终确定该化合物分子结构的手段。因此，费歇尔致力于蛋白质的化学合成，终于 1907 年合成了由 18 个氨基酸残基组成的多肽，然后比较这种化学合成的多肽与天然蛋白质的性质，以验证蛋白质的多肽链结构理论。他指出：“人们无法回避这样一种印象，即这个产物（十八肽）与蛋白质有很密切的联系；而且我相信，这种合成继续下去的

话……人们便会合成蛋白质”可见，他确信蛋白质像其他分子一样，具有精确的组成和几何排列，并非像胶体学派所说那样是结构不定的物质的确，人们发现从一种特定的蛋白质水解产物中总是可以分离出种类大致相同的氨基酸，而且各种氨基酸的相对含量基本上是固定的。可以说，蛋白质具有确定的化学组成和分子结构。这是费歇尔对蛋白质化学所做出的贡献

然而费歇尔的十八肽只有两种氨基酸，3个亮氨酸和15个甘氨酸，仍然与天然蛋白质有较大差异因此，费歇尔理论及其支持者还需要解决几个问题首先是需要改进天然蛋白质的分离、提纯和鉴定的技术，以便提高样品的纯度，能保证得到单一蛋白质样品；其次需要建立蛋白质降解产物氨基酸和部分降解产物寡肽（两个或两个以上十个以下氨基酸单位形成的短肽链）的分离技术；再者要探索替代繁琐的化学合成来确定蛋白质分子结构的方法。

1926年，美国化学家萨姆纳成功地从刀豆中分离和提纯脲酶，得到了结晶化学家们都知道，把物质提纯到几乎没有杂质，非常纯净才能形成结晶。所以萨姆纳的工作告诉人们生物催化剂酶原来就是蛋白质，使人们更深入地认识了蛋白质的重要性，认识到要研究生命的化学过程必须先研究蛋白质；必须先攻克蛋白质研究中的难关。这就吸引了大批化学家和生物化学家投入到蛋白质研究，有力地推动了蛋白质化学的研究工作，因此，萨姆纳获得了1948年诺贝尔化学奖

在20世纪40年代初，英国学者马丁和辛格发明了一种用于蛋白质分析的实验技术，开创了叫做“纸层析”的新方法，解决了蛋白质水解混合物的分离鉴定工作上的难题。他们两个人由于在蛋白质化学研究工作上做出实验技术的创造性改革而获得了1952年的诺贝尔化学奖

在上述进展的影响下，从40年代中期到50年代中期，桑格领导的研究小组首次完成了一种天然蛋白质—牛胰岛素的肽链中全部51个氨基酸排列顺序的测定。这项研究前后进行了10年之久，而且创造了肽链两端标记法等创新的实验技术。首次揭示了蛋白质分子不仅是由氨基酸组成的线性分子，而且具有固定的氨基酸排列顺序，各种蛋白质化学结构的区别在于氨基酸的排列顺序。这是在蛋白质研究史上一项重大突破，因而桑格博士获得了1958年的诺贝尔化学奖。胰岛素是最小的蛋白质之一，尽管如此，要测定其分子中51个氨基酸的排列顺序非常难，需要付出繁重的劳动！

艾德曼(Edman)创建更有效的分析肽链中氨基酸排列顺序的方法，就是把肽链的一端固定在载体上，从游离端逐个降解的新技术不久把这种操作加以自动化，产生了叫做氨基酸顺序自动分析仪的成套仪器。80年代以来，这种仪器设备不断改进，性能愈来愈好，与电脑连机，实现自动化，操作愈来愈简便；而且这种仪器

得到广泛普及，进入大学和研究所的普通实验室，测定氨基酸顺序已经不是那些蛋白质结构化学大师们的专利了因此，已经测定数以千计的蛋白质的一级结构，其中肽链长度达几百个氨基酸单位，而且一个分子不止一条肽链，甚至多达几十条。

然而桑格的^[1]作只是确定了蛋白质线形分子中氨基酸单位的排列顺序，即蛋白质分子的一级结构。可是蛋白质分子并不都是线状的，很多蛋白质分子是球状的，所以肯定还有三维结构线状链进一步折叠和缠绕形成立体结构，生物化学家们又把它分成二级和三级结构进行研究。美国化学家鲍林在20世纪40年代应用X-射线衍射法研究角蛋白（即毛发类蛋白）的结构，根据X-射线衍射图，提出著名的 α -螺旋结构模型；同时，从丝蛋白₁（如蚕丝）中发现 β -折叠构造。以后许多研究证明这两种结构要素广泛存在于天然蛋白质分子复杂的立体结构之中鲍林因该项成果获得1954年诺贝尔化学奖在这里顺便提一下，后来鲍林反对核武器，于1963年获得诺贝尔和平奖及甘地和平奖，1973年又获得列宁和平奖，是世界上唯一的既获得诺贝尔和平奖又获得列宁和平奖的科学家

鲍林的理论提供了更清晰的证据，说明蛋白质分子具有排列精致的三维结构；除此之外，为生物大分子空间结构的研究提供了一种新的方法，就是建立化学模型的抽象思维方法。这就是用直观模型表示微观世界的，把无法直接观察的看不见的状态用模型来表达的方法。后来这种方法在DNA双螺旋结构模型的建立过程中得到创造性地应用，成为研究生物大分子的一种有效方法

佩鲁兹和肯德鲁和鲍林一样也是应用X-射线衍射技术研究蛋白质分子结构，但所不同的是研究对象蛋白质：佩鲁兹研究马血红蛋白结晶，这是水溶性的球状蛋白，这种蛋白质分子空间结构更复杂，他摸索了25年，才完成；肯德鲁则选择鲸肌红蛋白，研究了14年他们先后于1957年和1959年阐述了这两种蛋白质分子的空间结构。1962年他们两个人共同获得了诺贝尔化学奖由于这些开创性工作的影响，推动了蛋白质结构的研究。20世纪70年代以来，引进计算机技术、电镜低密度成像方法、高分辨力二维核磁共振光谱学技术等，X-射线晶体衍射的结果都在电脑中处理，现在已经不需要那么费力，不需要那么长的时间，到90年代初，已经研究了数百种天然蛋白质的三维结构，极大地推动了三维结构与蛋白质功能关系的研究

1958年，北京大学邢其毅（1911--）教授提议和开始组织胰岛素的人工合成工作，北京大学化学系和生物系高年级学生参与该项工作生物系在国内首先合成具有生物活性的八肽-催产素。1960年，胰岛素的合成工作转移到上海，由中国科学院上海有机化学研究所汪猷（1910--）教授负责组织领导，并与北京大学化学系协作。1965年9月，世界上首次人工合成了具有生物活性的结晶牛胰岛素。与此同时，

美国和德国也合成了胰岛素这标志着人类在研究生命科学的历程中迈出了一大步。20世纪70年代初，中国科学院生物物理研究所测定了胰岛素三维结构；80年代相继完成天花粉、磷酸甘油醛脱氢酶及胰蛋白酶抑制剂等蛋白质结构的测定，使我国在该领域的研究赶上世界水平。

（一）核酸化学的发展

1868年，米歇尔获得医学博士学位，然后继续学习生理化学，研究细胞核的组成物质。他为了获得大量细胞核，从医院的垃圾箱中把丢弃的外科绷带拣回来，收集绿脓杆菌，因为这种细菌的细胞核特别大，是研究细胞核理想的实验材料。米歇尔观察到细胞核中的物质富含磷，且酸性很高，不溶于稀酸，但能溶于稀碱，与当时已知的细胞成分不一样。他的老师霍佩-赛勒对米歇尔的观察结果半信半疑，但不久，他自己从酵母和其他细胞中也发现类似的物质。霍佩-赛勒认为，这种新发现的物质“可能在细胞发育中发挥着极为重要的作用”，并把这种物质叫做“核素”。1871-1873年间，米歇尔继续对鲑鱼精子进行研究，因为精子的头部基本上是细胞核，是很好的细胞核来源。在米歇尔发现“核素”20年之后，阿尔特曼制备得到不含杂质的“核素”，命名为核酸。这就是现在众所周知的脱氧核糖核酸，即DNA。当时，米歇尔的遭遇与孟德尔相似，甚至更糟。米歇尔遭到同时代的许多人的粗暴攻击，连他的老师也受到批评，因而他的许多研究结果在他去世以后才得以发表。米歇尔对核素的作用不太清楚，在同一篇文章中提出自相矛盾的见解，这也难怪，当时连细胞学家们还搞不清楚精子的细胞核在受精中所起的作用。在细胞学界惯用染色质这样模糊的概念，而不愿意接受核素这样具有具体的化学性质的新概念。在那个时代，人们对蛋白质了解得更多一些。19世纪末-20世纪初，由于费歇尔的研究，已经知道蛋白质是线性分子，所以人们通过简单的计算就能了解蛋白质分子的多样性¹。何况蛋白质分子中氨基酸单位的数量很大，很容易让人们相信，作为遗传物质蛋白质是更为合理的化学物质。

在同一时期，把核素看作遗传物质的主张也在发展。1882年，弗莱明认为应该用化学的手段来阐明染色质和核素的关系；1885年，赫特维希提出，核素可能负责受精和传递遗传性状。但是这些主张都是根据受精过程的细胞学研究进展提出来的，缺乏生物化学实验证据。

1902-1903年间，德国生物化学家科塞尔在研究来源不同的核酸时发现有两种核

1 仅仅具有30个氨基酸单位的蛋白质分子通过氨基酸残基的排列组合，可以产生 2.635×10^9 种不同的蛋白质。

酸：从胸腺分离的核酸和从酵母分离的核酸，在还没有弄清其化学结构的时期里，一度分别被叫做“胸腺核酸”和“酵母核酸”不久，有机化学和生物化学家们提供了核酸化学性质及其结构的知识现在，脱氧核糖核酸，即 DNA 和核糖核酸，即 RNA 这两个术语分别代替了胸腺核酸和酵母核酸。

在 1910-1930 年间，发现细胞周期的某一阶段染色质仿佛消失了，这好像与遗传物质应该具有稳定性不相符另外，根据当时所了解的核酸的化学知识看来，核酸的化学组成也过于简单，不足以携带生物特征的遗传信息，使人们对染色质也罢、核素也罢产生了怀疑，对核酸失去了兴趣尤其是莱文在 20 世纪初提出“四核苷酸假说”指出 DNA 中四种核苷酸是等量的，而且这种错误结论在生物化学中变成了一种定论这就是所谓 DNA 的“黑暗时期”，人们期待提出一种新的学说推翻这种错误的假说

20 世纪 40 年代，许多学者有意无意中作了 DNA 是不是遗传物质的试验英国细菌学家格里菲斯自 1920 年以来一直在进行肺炎球菌的研究。肺炎球菌有两个变种：一是有毒性的（S），导致肺炎；另一个不引起肺炎（R）格里菲斯把前者（S）杀死，并与后者混合在一起，注射到老鼠体内，结果从老鼠的血液中分离出了活的有毒肺炎球菌（S）。他不知道这究竟是因为什么？当然我们现在知道这就是遗传转化现象。不幸的是于 1941 年，在一次纳粹空袭伦敦的时候，格里菲斯和他的助手同他们的实验室一起被摧毁了。1944 年，美国细菌学家埃夫里进行了同样的肺炎球菌的转化试验，并从 S-型肺炎球菌中分离得到有活性的转化因子，经鉴定是“一种高度聚合的、粘性的 DNA 的钠盐”。但他在分析 DNA 是不是遗传物质时，却过于谨慎，做出了好像是肯定、似乎又否定的冗长的叙述一直到 1947-1950 年间，DNA 化学组成的研究才有了突破性进展。奥地利出生的美国生物化学家查加夫发现 DNA 分子中嘌呤和嘧啶之间的摩尔关系，腺嘌呤（A）与胸腺嘧啶（T）鸟嘌呤（G）与胞嘧啶（C）的摩尔数相等即 $[A]=[T]$ $[G]=[C]$ ，因此，嘌呤的总摩尔数与嘧啶的总摩尔数相等，即 $[A]+[G]=[C]+[T]$ 。这一规律的发现为将来建立碱基互补定律奠定了基础，也推翻了莱文的“四核苷酸假说”这就是“查加夫规律”

查加夫还发现 DNA 的碱基组成具有物种的特征，这就是说，不同生物物种的 DNA 具有独特的碱基组成；至于一个物种来说，DNA 不管来自什么器官，不管生长发育的什么阶段、营养状态和环境条件如何，DNA 碱基组成的物种特征是固定不变的。

1955 年，英国化学家 A.托德证明 DNA 和 RNA 分子中相邻核苷酸之间通过磷酸二酯键连接，核酸分子是线性分子，主链是糖基和磷酸基相间排列形成的，碱基则构成多核苷酸的侧链。所以碱基顺序代表核酸分子中核苷酸的排列顺序。因此，他获

得了 1957 年的诺贝尔化学奖

英国生物化学家桑格在 20 世纪 40 年代中期完成蛋白质的氨基酸排列顺序而成功以后，转而研究 DNA 分子中核苷酸的排列顺序。1975 年，桑格改进原先建立的物理图谱法，设计了一种新的测序方法，叫做加减法，以后的各种方法是以该原理为基础发展起来的。桑格的该项成果获得了 1980 年诺贝尔化学奖，这是他第二次获得此项殊荣。1982 年，在桑格实验室留学的中国生物化学家、中科院院士洪国藩（1939—）改进原有的随机测定法，提出了“DNA 顺序连续测定法”，用这种方法完成了 2300 碱基对（bp）的 DNA 的测序工作。

（二）病毒学派的贡献

20 世纪 30 年代，德国理论物理学家德尔布吕克于 1929—1932 年间曾游学欧洲各国，扩大了视野，他在丹麦结识量子论的先驱者之一的波尔（N. Bohr）并受到波尔关于不同学科之间相互渗透协同发展的思想影响。回国以后，德尔布吕克逐渐向生物学靠拢，利用业余时间参加遗传学家们的讨论会，了解生物学。1937 年，德尔布吕克到美国摩尔根实验室游学，从此跨入了遗传学门槛。如前所述，摩尔根实验室是专门研究果蝇的。作为一个物理学家，德尔布吕克无法理解有关果蝇基因型的描述，他说，“太可怕了，我简直无法读懂它”。德尔布吕克认为应当选择最简单的实验模型，于是同摩尔根实验室的埃利斯合作，选择噬菌体作为实验材料，并设计了“噬菌体一步生长试验”，从此他与同事们合作进行长达十年的噬菌体研究。噬菌体是感染细菌的病毒。他作为理论物理学家对生命科学基本问题有着与众不同的观点，他认为“我们要把病毒的复制看成是一种特殊形式的对基因的原始复制”，并认为噬菌体是研究基因自我复制的最理想的实验模型。1939 年 9 月，德尔布吕克在美国的游学期满，但此时欧洲战争已经爆发，他就留在了美国。

1940 年，德尔布吕克和美国遗传学家卢里亚在次物理学年会上认识，他们一见如故，发现彼此都关心共同的课题——遗传的原理。会后他们一起赶到印第安纳大学，在卢里亚的实验室进行交流，他们合作开始研究噬菌体的自我复制机理，并以自己的研究组为基础创立了遐迩闻名的美国“噬菌体学派”，为分子生物学的前期研究做出了重要贡献。赫尔希（Alfred Hershey, 1908—）加入这个小组，成为第一批成员之一。后来发展到十几个人，这是松散的组织，不定期地举办学术讨论会，共同商定研究课题，尽量减少不必要的重复，增加研究结果的可比性，还建立了信息交流刊物：《信使》和《内部议论》。1944 年，在冷泉港共同商定集中精力专攻 7 个噬菌体株，后来习惯地称之为“噬菌体条约”；第二次世界大战结束，德尔布吕克和卢里亚在冷泉港第一次举

办了噬菌体学习班各国学者闻风而至。一边学习技术和理论，一边互相切磋琢磨。这样的学习班以后每年举办一次，最盛时竟有数百人参加这就是有名的噬菌体学派，戏称“噬菌体教派”，德尔布吕克被人们推崇为“噬菌体教派中的教皇”

德尔布吕克小组首先取得了噬菌体的电镜照片。赫尔希和德尔布吕克各自发现了噬菌体的遗传重组；1952年，赫尔希和蔡斯成功地进行了融合试验，证明进入宿主细胞的仅仅是噬菌体的DNA，从而证明了DNA才是真正的遗传物质，而不是蛋白质。他们两个用放射性硫标记噬菌体的蛋白质，然后让这种标记的噬菌体去感染细菌，果然蛋白质没有进入细菌细胞中去，留在细菌细胞外面。如果用放射性磷标记噬菌体的DNA，它便进入细菌细胞中。他们两个人提供了DNA是遗传物质的确凿证据。噬菌体小组认为这一成果是DNA是主要遗传物质的强有力的新证据。1952年4月，当时已经在英国的沃森受噬菌体小组委托参加在英国牛津举行的普通生物学学术会议，介绍了赫尔希和蔡斯的成果。这无疑是对沃森建立双螺旋模型工作的有力支持。德尔布吕克、卢里亚和赫尔希三人由于“发现了病毒的复制机理和遗传结构”而获得了1969年诺贝尔生理学奖。对他们的奖励不是因为他们有突破性发现，而是因为他们学术的组织活动方面，也就是在形成噬菌体学派的发起方面所起到的杰出作用。后来，美国著名分子生物学家斯坦特(G. Stent)评价了他们的贡献，“30年前，他们开始将传统的孟德尔遗传学转化为后来的分子水平的沃森-克里克学说”。的确，噬菌体在过去和现在都是分子生物学研究的不可或缺的实验材料，许多突破性研究工作是以噬菌体或病毒为实验材料进行的。在德尔布吕克60寿辰时，他的学生和朋友们出版了一本传记性文集，由凯恩斯、斯坦特和沃森等三人主编，书名就是《噬菌体和分子生物学的起源》，这些朋友和学生从不同角度叙述了德尔布吕克在奠定分子生物学基础方面所做出的巨大贡献。

1935年，美国学者斯坦利分离纯化烟草花叶病毒(TMV)首次得到结晶，他不知这种病毒含有核酸，后来其他学者发现TMV含有5%的核糖核酸，而且RNA才是致病的因素。斯坦利获得了1946年诺贝尔化学奖。

噬菌体和病毒多数由DNA或RNA和蛋白质两种成分组成，后来还发现不含蛋白质的裸露的RNA病毒；20世纪90年代又发现不含核酸的，仅由蛋白质组成的致病因子。美国化学家普鲁西诺(Stanley B. Prusiner)发现感染型蛋白质颗粒即属此例，被命名为“Prion”，中文译名尚未确定，有叫做“蛋白病毒”的，也有人建议译为“朊病毒”。这个发现具有重要的理论意义，因此获得了1997年诺贝尔化学奖。

第二节 分子生物学的诞生

一、DNA 的双螺旋结构模型

1953年，美国生物学家沃森和英国物理学家克里克阐明了 DNA 的立体结构，形象地称作“双螺旋结构”模型，这是 20 世纪最伟大的生物学成就，这个成就的意义可以说超过了 19 世纪的进化论和孟德尔学说，甚至可以认为是在迄今为止的生物学发展史上最伟大的成就。根据 DNA 双螺旋结构模型，人们可以解释许多遗传现象。例如 DNA 在细胞分裂过程中怎样自我复制，分裂产生的两个子细胞都含有相同的 DNA；作为遗传物质 DNA 在生物的个体发育和机体功能上如何起作用；基因突变究竟是怎样发生的等等。

沃森 - 克里克的模型是综合利用 DNA 结晶的 X 射线衍射数据、查加夫规律、化学键理论及嘌呤和嘧啶的平面结构等化学知识，结合他们富有想象力的推理而提出来的理论，它反映了客观存在的事实。沃森和克里克之间微妙的合作在该模型的产生和建立过程中起了至关重要的作用。正如克里克所说，“沃森和我没有‘发明’这个结构，它就在那里，等待着人们去发现。我似乎觉得，我们两人中无论是谁都不能独立地发现它，但富兰克林已经非常接近这一点了……威尔金斯在富兰克林去世以后，应该在他某一个凑巧的时刻也会达到这一步。……其他生物化学家们是否也会最后征服它呢？如果是这样，其结果又会有什么不同呢？”他们两个人都把成功归因于他们之间的特殊合作。那末，我们先了解一下他们是怎样走到一起来的。

沃森在印第安那大学卢里亚的指导下，作噬菌体遗传学方面的博士研究，获得博士学位（1950）以后靠美国小儿麻痹症国家基金会的奖学金到欧洲游学。首先在丹麦的哥本哈根做博士后工作，研究病毒。但是，早在芝加哥大学作学生时期，沃森阅读了薛定谔的著作：《生命是什么？》一书以后，就产生了探索基因秘密的志向，兴趣在基因如何发挥作用的问题上。他在《双螺旋 - 发现 DNA 结构的故事》中，谈到他在欧洲时的经历时说，“传统的生物化学不能告诉我基因是如何起作用的”，所以他放弃了在丹麦的学习，于 1951 年来到了英国。在剑桥，沃森来到佩鲁兹和肯德鲁的实验室继续他的博士后研究。如前所述，这两人都是在蛋白质分子结构的研究上赫

赫有名的学者在这里，沃森幸运地与克里克相遇，他说：“我发觉和克里克谈的很投机，在佩鲁兹的实验室里居然能找到一位懂得 DNA 比蛋白质更重要的人，真是三生有幸”

在 20 世纪 30 年代，克里克在伦敦大学学习物理学，以后又在那里攻读博士学位，但由于二战中断了学业。战争即将结束时，他也阅读了薛定锷的那本影响深远的《生命是什么？》一书。从而对生物学发生了浓厚兴趣，确信书中提出的“如果使用物理学和化学的概念，那么生物学的基本问题就完全可以应用精确的术语来思考。”1946 年，克里克在剑桥找到工作，参与佩鲁兹的血红蛋白 X 射线结晶学研究，所以他熟悉 X 射线分析技术，而不懂生物学；克里克发现沃森是一位对遗传学很有造诣的生物学家，而且急于想了解基因是如何起作用的问题两个人都发现需要对方，他们之间长短互补的搭配为后来的合作成功奠定了基础克里克比沃森年长 12 岁，可是那时他还是在读博士研究生。他一边继续作着他的博士论文，一边与沃森合作进行 DNA 结构的研究。由于他们思想上都受到了薛定锷的影响，所以，尽管他们的经历不同，但是他们却以相似的观点来探讨生物学问题

在使他们获得成功的诸多因素中，伦敦大学金氏学院的威尔金斯和他的助手富兰克林的帮助起了关键作用。他们提供了 X 射线衍射图和数据资料，没有这些资料双螺旋模型就不可能产生。威尔金斯对沃森的影响也很大，虽然他并不是沃森的直接合作者，但他是在双螺旋结构模型建立的整个过程中不可或缺的人物，沃森说：“威尔金斯首先激励了我关心 DNA 的 X 射线工作”他们是在意大利那不勒斯举行的 X 射线学术会议上相识的富兰克林的 DNA 的 X 射线技术特别好，她提供了最好的 DNA X 射线衍射图，而且已经认识到 DNA 分子由许多亚单位堆积而组成，这些亚单位具有规则的螺旋状几何形状威尔金斯也在进行 DNA 分子结构研究；富兰克林也已经有了把碱基放在螺旋的内部，把核苷酸链的骨架放在外面的设想。只是她对“建造模型不感兴趣”，把精力放在了分析 X 射线衍射图上。

沃森和克里克与他们不同，非常重视建立分子模型，所以很重视鲍林建立蛋白质 α -螺旋结构模型的经验，用金属和硬纸片制作模型，反复摸索，力图构建一种能够圆满地解释 X 射线衍射图，又能说明遗传过程的分子模型。他们曾经失败过，至放弃过。1952 年冬天，他们知道，在大西洋彼岸的鲍林也在加紧研究同一课题，已经提出了三股链螺旋模型。沃森发现鲍林的模型与他们早已否定的模型几乎一样，而且存在严重错误，他意识到恐怕鲍林很快会发现自己所犯错误，不久会提出更正确的模型来。谁都想率先建立新的理论，竞争显然很激烈。已经到了 1953 年 3 月，沃森不敢稍有松懈，构思出“双股链”，以此为基础考虑碱基是究竟如何配对的问题，他整

天摆弄模型，进行通过氢键维系的碱基配对试验，起初他抱着“同类配对”的偏见不放，浪费了许多日子其实，克里克在一年以前已经认识到不同碱基之间的配对可能是 DNA 分子结构的基础。1952 年 6 月，查加夫到剑桥来访问，克里克知道那个 1:1 的比例但克里克没有明确提出碱基配对方案；还是沃森先想出 A-T、G-C 配对的想法，他回忆那激动人心的时刻时说，“……又继续摆弄起碱基模型来，我把碱基移来移去寻找各种配对的可能性突然之间，我发现一个由两个氢键维系的‘腺嘌呤-胸腺嘧啶’碱基对竟然和一个至少有两个氢键维系的‘鸟嘌呤-胞嘧啶’碱基对有着相同的形状……这样一来，查加夫规律也就一下子成了 DNA 双螺旋结构的必然结果”沃森迫不及待地把他的想法告诉了克里克，他认真地摆弄碱基模型，试试看还有没有其他可能性，几分钟后克里克发现，每个碱基对的平面与螺旋轴垂直，两条链的方向相反。问题全都解决了，沃森和克里克制作了用金属焊接的双螺旋模型。他们把模型告诉了佩鲁兹，又请来伦敦的威尔金斯和富兰克林，他们都很高兴。威尔金斯和富兰克林回到伦敦仅用两天功夫就打电话来告诉沃森和克里克，他们的“X 射线数据为双螺旋结构提供了强有力的佐证”；又说他们“正在抓紧时间把这些结果整理成文”，准备与沃森和克里克的论文同时发表。1953 年 5 月 30 日，沃森和克里克的论文：“脱氧核糖核酸结构的遗传学意义”在《自然》（《Nature》，May 30, 1953, pp964-967）杂志上发表这就是 20 世纪最伟大的生物学成就诞生的经过，它宣告了分子生物学的诞生。

二、半保留复制和中心法则

双螺旋模型很好地解释了 DNA 的复制，但这需要用实验来证明。1956 年，美国生物化学家梅赛尔森和斯塔尔做了设计得非常出色的实验，证明了细胞中的 DNA 确实按照沃森-克里克模型所提示的半保留原则进行自我复制。

梅赛尔森和斯塔尔把大肠杆菌在以氮的同位素 ^{15}N 的氯化铵作唯一氮源的培养基上连续培养许多代，使大肠杆菌 DNA 都含 ^{15}N ，DNA 含氮 16%，所以 ^{15}N -DNA 的分子量明显增加， ^{15}N -DNA 比普通 ^{14}N -DNA 密度大，在等密度梯度离心时，这两种 DNA 形成位置明显不同的区带。如果把 ^{15}N 标记的大肠杆菌转移到普通培养基上培养，经过一代之后，应产生 DNA 双链中一条单链含 ^{15}N 另一条新合成的单链含 ^{14}N ，形成杂和分子。因而这种 DNA 的密度应介于 ^{14}N -DNA 和 ^{15}N -DNA 之间，实验结果的确如此这就证实 DNA 确实进行半保留复制。

众所周知，任何生物化学反应都是酶催化的，既然 DNA 按照半保留原则进行复

制，那么就应当有专门催化 DNA 聚合反应的酶，于是生物化学家们开始寻找这种酶。1956 年，科恩伯格从大肠杆菌中分离得到一种催化 DNA 合成的酶，叫做 DNA 聚合酶。他从 100 千克大肠杆菌中分离得到 500 毫克纯化的酶。它由一条单一的多肽链组成。这种酶在体外也能合成 DNA，但需要加入单链 DNA 作模板，新合成的正是模板的互补链。这样，科恩伯格又一次证明了 DNA 的半保留复制，开创了酶促合成 DNA 的研究，从而推动了后来的分子生物学领域的一系列研究。因此，科恩伯格和他的以前的导师奥乔亚分享了 1959 年诺贝尔生理学奖。1967 年，不同实验室同时发现 DNA 连接酶，后来从其他生物中也发现这种酶。DNA 聚合酶把单核苷酸聚合生成多核苷酸链片段；DNA 连接酶则把后者连接成更长的 DNA 单链。20 世纪 70 年代初，德鲁夏和蔡恩斯从大肠杆菌变异株中先后分离出另外两种 DNA 聚合酶，并阐明了它们的结构及功能至此关于 DNA 的复制过程基本上搞清楚了，DNA 分子的两条链分开各自作为模板合成新的互补链，先把单核苷酸聚合生成多核苷酸链，然后把后者连接成 DNA 长链，在两个子代双链 DNA 分子中一条链是从原来的 DNA 保留下来的，另一条是新合成的。

从孟德尔提出假设的“遗传因子”（1865 年），经过摩尔根提出基因论（1928 年），到沃森 - 克里克建立双螺旋结构模型（1953 年），人类用了差不多一个世纪，回答了“基因是什么？”双螺旋模型为找到下一个问题的答案奠定了理论基础。那就是“基因是如何起作用的？”

1956 年，克里克提出了“中心法则”，指出遗传信息从 DNA 传递到 RNA 后者指导蛋白质的合成，即“DNA → RNA → 蛋白质”，他认为信息的流动按照单向路线进行的，不能颠倒。根据这个法则可以推测应该存在以 DNA 为模板的 RNA 的合成过程。在细胞中 DNA 存在于细胞核里，而蛋白质的生物合成在核外细胞质中进行。DNA 分子中的遗传信息如何从核内向核外传递？

1959 年，维斯首先从鼠肝无细胞提取液中发现以 DNA 为模板的 RNA 聚合酶；20 世纪 60 年代，很多实验室从原核细胞和真核细胞中分离得到多种不同的 RNA 聚合酶，它们都以 DNA 分子上的一小段为模板合成 RNA，按照碱基互补原则（A-U, T-A, G-C, C-G）DNA 分子上的碱基排列顺序转变成 RNA 分子上的碱基顺序，叫做转录。DNA 分子比 RNA 分子大得多，转录的起点和终点都有特殊标记。

糖体是细胞内专门合成蛋白质的亚细胞结构，是由美国细胞学家 K·梅塞伦和 R·B·罗伯茨于 1959 年发现的。随后证明这是细胞内合成蛋白质的场所。在细胞核内合成的 RNA 转移到细胞质中的核糖体上指导蛋白质的合成，这种 RNA 叫做信使 RNA，用符号“mRNA”表示。法国生物学家雅格布和莫诺于 1961 年提出了 mRNA 的概念。他

们认为既然蛋白质是细胞质中合成的，而编码蛋白质的信息载体 DNA 却存在于细胞核内所以必定有一种中间体用来传递 DNA 上的信息随后他们设计很复杂的实验证明了确实存在这种传递信息的 RNA。至此，“中心法则”得到了大量实验的证明，人们终于明白了基因是如何起作用的。

自然界真是异彩缤纷，中心法则说信息流动的方向是 DNA → RNA → 蛋白质，克里克认为这个方向不能逆转，可是后来的研究表明不尽然众所周知，病毒由 DNA 和蛋白质组成，但在自然界还有不含 DNA 的病毒仅由 RNA 组成，没有蛋白质，叫做类病毒。这种致癌病毒在被感染的宿主细胞中复制时需要经过一个 DNA 中间体，即“前病毒”这就是特明和巴尔的摩于 1964 年提出的“前病毒假说”其基本点是遗传信息可以由 RNA 传递给 DNA，关键是要找到催化这种反应的酶。1970 年，特明的助手 S·Mizutani 终于发现了具有这种功能的酶，即以 RNA 为模板合成 DNA 的酶。因为与上述转录过程相反，所以叫做“逆转录酶”。这一发现具有重要的理论意义，它补充和发展了中心法则，也说明不能把“中心法则”绝对化。不过逆转录是生物界极少数的特殊例子，并不影响分子生物学中心法则的普遍性另外，这种“逆转录酶”后来成为克隆基因的重要工具，在分子生物学研究中发挥了重要作用。

因此，特敏、巴尔的摩和杜尔贝克三人获得了 1975 年的诺贝尔生理学奖。此外，还有一种病毒具有以 RNA 为模板合成 RNA 的功能，叫做 RNA 的复制这样，现在的中心法则的公式如图 5-2 所示，图中圆弧形箭头表示复制。

三、遗传密码

如上所述 遗传信息是在 DNA 分子上以碱基排列顺序的形式存在，转录成 mRNA 分子上的碱基顺序，然后经过蛋白质的生物合成过程转变为蛋白质分子上的氨基酸的排列顺序。那么，在 mRNA 分子上遗传密码是怎样纪录的呢？1956 年，俄国出生的美国天体物理学家 G. 伽莫夫提出“三连体密码”假说，他根据当时所提供的核酸和蛋白质化学知识，即核酸由 4 种核苷酸组成和蛋白质由 20 种氨基酸组成，从理论上推理，指出每种氨基酸都有一个 3 个核苷酸组成的密码，并列出了可能的 64 种密码，为以后破译遗传密码的实验研究给予了很大启发。

1962 年，美国生物化学家尼伦伯格在大肠杆菌无细胞体系中加入用同位素标记的 20 种氨基酸的混合物，再加入单一核普酸的多聚物如多聚尿嘧啶核苷酸 (PolyU) 起信使 RNA 的作用，予以保温，使体系进行蛋白质的生物合成反应。结果从多肽类产物中发现苯丙氨酸的多聚物，这说明苯丙氨酸的遗传密码应该是 UUU。尼伦伯格、

科拉纳和霍利等进步用 PolyUG PolyAC 重复上述实验，发现标记氨基酸掺入新合成的肽链的频率与推算出的三连体密码出现的频率相一致。1964年，尼伦伯格等又设计更复杂的实验，确定了解读密码的方向科拉纳则人工合成具有重复序列的多聚核苷酸，例如，CUCUCUCUC…… 它可能产生三连体密码的形式有以下两种：CUC-UCU-……或UCU-CUC-……，科拉纳把这种多聚核苷酸加入到蛋白质合成体系，发现产物是亮氨酸和丝氨酸交替出现的肽链他们利用上述多种方法于1965年确定了20种氨基酸的全部遗传密码，而且后来的研究证明整个生物界通用同一种遗传密码。这是分子生物学发展史上又一个重大成就因此他们获得了1968年诺贝尔生理学奖

克里克曾预测在RNA和蛋白质之间存在氨基酸的受体。果然霍利等人在20世纪60年代初发现了把氨基酸带到蛋白质合成的部位，并且能识别遗传密码的受体，叫做转移RNA用符号tRNA来表示。每种氨基酸都有自己的tRNA，它是氨基酸的专用运输工具，氨基酸本身不能识别自己的位置，但氨基酸连接在tRNA上，被带到它该去的位置上，即遗传密码所决定的位置上。1965年，霍利等首先测定了酵母丙氨酸tRNA的核苷酸排列顺序。到80年代中期，发现大约250种tRNA，而且与氨基酸的对应关系也搞清楚了。酵母细胞中转移丙氨酸的tRNA是最早发现并阐明一级结构、二级结构和三级结构的tRNA，它由77个核苷酸组成，其二级结构像三叶草的形状。1980年，我国学者王应睐、汪猷和王德宝等在上世界上首次完成了具有生物活性的酵母丙氨酸tRNA的人工合成。这是继人工合成胰岛素之后，人工合成的第二种生命物质。

在破译遗传密码的时期，霍利和另一些学者进行tRNA的研究，一个氨基酸和它的专一tRNA之间的结合由专一的酶催化，而且在各类生物的细胞内都存在使每一种氨基酸和对应的tRNA连接的专一酶。在tRNA分子上有与三连体密码按照碱基互补原理识别遗传密码的三核苷酸顺序，叫做反密码子氨基酸与tRNA的结合产物叫做氨酰-tRNA，如丙氨酸与丙氨酸tRNA结合的产物叫做丙氨酰-tRNA。氨酰-tRNA遵循碱基配对和反平行原则识别遗传密码。从mRNA到肽链形成的生物合成过程叫做翻译这样通过转录步骤DNA分子上的遗传信息转变成RNA分子上的遗传密码，再经过翻译步骤转化为蛋白质分子中氨基酸的排列顺序；最后产生具有特定功能的蛋白质。20世纪60-70年代，蛋白质生物合成的生物化学途径已经基本清楚，整个过程由mRNA的生物合成即转录、肽链合成即翻译和翻译后加工等步骤来完成。值得注意的是上述复制、转录和翻译的基本步骤和生化途径，在整个生物界基本类同，从生物大分子水平及其代谢的生物化学途径上反映着整个生物界的统一性。

第三节 基因工程

1970年，基因重组或称DNA重组技术的开创标志着分子生物学发展史上一个新时代的开始，即分子生物学从基础理论研究发展到了开发可供应用的高新技术的时代，宣告产业化时代已经来到。下面，简述这项研究的发展过程

这项工作是由瑞士微生物遗传学家阿尔伯从20世纪60年代初开始的。细菌易发生变异，所以一种细菌有很多株系；一种噬菌体在细菌某一株系中繁殖，分离后对同一株系感染率很高；但对另一株系不能感染或感染率很低，叫做噬菌体的“寄主修饰控制现象”在微生物学上是老大难问题。阿尔伯知难而上，决心研究噬菌体和细菌关系的分子基础，1962-1968年间，他和他的学生发现在细菌和噬菌体之间有一种对各自的DNA予以化学加工的作用，科学家叫做修饰和限制作用。换言之，在细菌中存在一种限制性酶对外来噬菌体的DNA有破坏作用使之不能存活；另一种酶对自身的DNA加以修饰，使自身DNA不受限制性酶的分解作用之害。同样，噬菌体的DNA也能被修饰，从而得到保护，能正常地感染同一株系。这中关系与昆虫利用保护色、拟态来防止天敌的侵害相似。1968年，阿尔伯和他的学生分离出一种限制性酶，但这种酶的“限制性”较差。叫做Hind I。

1970年，美国微生物学家史密斯受阿尔伯的启发，和他的学生一起分离和纯化具有限制性内切作用的另一种酶，经鉴定这个酶具有惊人的识别和专一地切割噬菌体DNA分子中特殊部位，即特殊碱基排列顺序的能力，而自身的DNA则不被降解，把它命名为Hind II。自那时以后，发现了几百种限制性内切酶，成为基因工程的“手术刀”，用于各种生物基因组研究，推动基因组研究迅速进展。

史密斯写信告知远在以色列的朋友内森斯，他在那里正在进行SV40病毒的研究，内森斯带着他的试验材料SV40病毒回到美国，利用史密斯的Hind II进行病毒基因组的结构分析。内森斯成功地切割了病毒DNA；然后指导研究生凯恩琳·塔纳继续深入研究。1971年，把所切割的SV40的DNA用电泳方法分离出11个片段，并确定了各片段在SV40基因组中的排列顺序，同时分析了该病毒DNA的复制起点和终点，从而首次检测了一种DNA中基因的排列顺序。1972年，内森斯和他的同事们分离出SV40病毒感染宿主不同时期转录产生的mRNA，然后将上述DNA片段和mRNA进行分子杂交。这样，内森斯又建立了第一个RNA的转录图谱。

阿尔伯、史密斯和内森斯三个人彼此接力，一步一步推进，把限制性内切酶这

个“手术刀”应用到基因结构的研究，给人们展现出了广阔的前景首先在 DNA 分子上“动手术”，可以用这把“刀”从 DNA 分子上，将某一基因切割下来，把它拼接到另外的 DNA 分子上去，这使 DNA 重组成为可能所以人们说他们仨的接力好像一部小说的“三部曲”，编写了一部完整的故事从此分子生物学进入了基因工程阶段，并宣告基因工程学或遗传工程学一门新学科的诞生，因此他们三个人获得了 1978 年的诺贝尔生理学奖。

基因工程指的是人为的 DNA 重组。第一个成功的 DNA 重组就是把人胰岛素基因重组到细菌 DNA 上，然后通过发酵工程技术大量培养细菌，从发酵液中分离得到人的胰岛素 1980 年，美国的 Ely-Lily 公司首先实现了人胰岛素的工业化生产；同年，Charles -Weissman 公司利用同样的原理生产了干扰素，即专门破坏外来 DNA 的生物活性物质。随着通过基因工程产业化生产的人胰岛素投放市场，从猪的胰脏中提取的猪胰岛素的生化制药产品逐渐地被淘汰了直到 20 世纪 80 年代初，我国是猪胰岛素的生产大国，居世界第一位，大量出口，当时美国是最大进口国基因工程改变了这种传统工业，形成了崭新的产业。80 年代后期，我国也开发了应用基因工程原理生产人胰岛素的技术

后来，基因工程技术迅猛发展，提供的产品愈来愈多，例如，生长激素、多种转基因水果、蔬菜产品等等，使这些农产品的品质大为改善，或增强抗病虫害的能力，或产量显著提高微生物发酵工程是早已成熟的技术，人们利用基因工程技术把药物的基因重组到微生物细胞中，通过发酵工程大量生产药物，使之形成规模，从而产生了经济效益显著的高新技术产业，展示了诱人前景。

第四节 基因组学

一、基因组

分子生物学家们把生物细胞中整套染色体包含的全部基因称为“基因组”，不同生物的基因组大小差别很大，最简单的病毒只有几个基因，其 DNA 由几千个核苷酸组成；人类的基因就有约 3—4 万个，原来估计有 10 万个基因。关于基因组的研究是从 20 世纪 80 年代开始的，英国生物化学家桑格开创了这一领域的研究他选择了最简单的材料，一种病毒， ϕ X174 病毒，它的 DNA 分子很小而且是单链，整个分子共

有 5375 个核苷酸 1977 年，桑格首创 DNA 序列分析方法，而且完成了该病毒 DNA 的全部核苷酸顺序的测定工作。因而获得 1980 年诺贝尔化学奖这项成果鼓舞和激励很多实验室进行各种生物 DNA 的测序工作，积累了大量资料例如，各种生物细胞中 DNA 总量的测定，这项工作现在也一直在进行着已经知道与人类关系密切的很多生物基因组的基本数据。例如，人的细胞中 DNA 总量为 $5 \sim 7 \times 10^9$ 、果蝇为 8×10^7 、大肠杆菌为 3.8×10^6 等等

对基因的认识愈来愈深入，测定 DNA 分子碱基序列的方法愈来愈改进，已有可能测定一种生物的基因组全部 DNA 序列，因此启动了测定某种生物全部基因的工作例如，1989 年 1 月，开始酵母染色体 DNA 的测序工作，历时 7 年，于 1996 年 1 月完成酿酒酵母 16 条染色体 DNA 全部 12,068 kb 核苷酸的序列，总共有 6000 多个基因其中确定了 5885 个蛋白质的基因、455 个 RNA 的基因。到 2000 年底，已经测定了 599 种病毒与类病毒、31 种细菌、1 种真菌、两种动物和 1 种植物这个 1 种植物就是水稻，是我国科学家完成的

1992 年 8 月，中国宣布开始实施水稻基因组计划，1996 年完成水稻基因组 BAC 物理图；并开始了水稻 DNA 的测序工作。水稻的基因组在禾本科作物中是最小的基因组，只有小麦的 1/40。水稻基因组的研究将成为整个禾本科作物的研究模型，因此引起了世界各国的重视，从 1998 年开始，亚、美、欧许多国家和地区均已启动了各自的水稻基因 DNA 的测序计划

二、基因组计划人类

启动：1985 年，美国率先提出“人类基因组计划”（HGP）的设想，预算的所需经费约为 30 亿美元，需要政府拨款提供经费。这就需要说服政府和公众，因此进行了 5 年的酝酿、宣传和辩论。1989 年，终于成立了“国家人类基因组研究中心”，诺贝尔奖得主沃森出任第一任主任。1990 年，经国会批准，于同年 10 月 1 日正式启动，预定以 15 年的时间确定人的全部基因。英国于 1989 年成立“英国人类基因资源中心”启动了 HGP；法国于 1990 年 6 月宣布开始实施国家 HGP；日本在美国的推动下也在 1990 年启动国家 HGP；德国稍晚，1995 年开始实施国家 HGP。因为 HGP 具有深远的政治、军事和经济意义，许多国家的政府都很关注，加拿大、澳大利亚、丹麦、瑞典、芬兰、新加坡和俄罗斯等国家也都开始了不同规模、各有特色的 HGP 的研究工作

我国的贡献：1999 年 9 月 1 日，“人类基因组测序战略第五次会议”在英国伦

敦召开，中国科学院人类基因组中心被接受为国际“人类基因组计划”组织的新成员，成为世界上第16个人类基因组研究机构；因而我国成为参加该组织的第六个国家，是唯一参加该组织的发展中国家我国承担3号染色体上3千万个碱基对的测序任务，占全部任务的1%。我国参加很晚，科技人员夜以继日，用半年时间完成，共发现122个基因，其中36个是新发现的基因；测序精确度达到99.99%

进展：“人类基因组计划”原来预定15年完成，即到2005年完成30亿碱基对的序列测定，但进展很快。1998年修改原订计划提前两年到2003年完成，后又提前两年，将完成时间提前到2001年6月。由于企业加入基因测序竞争和各国科学家的努力，更加快了进展，于2000年6月26日，美国国家HGP研究中心和私营塞莱拉基因公司（Celera Genomics Corp.）的代表共同出席由美国总统主持的新闻发布会，同时宣布完成了人类基因组工作草图的绘制。2001年2月15日，英国《自然》杂志发表了人类基因组图谱的“完整板”，比前一年的“草图”更为完整、准确。分子生物学家原先估计人类基因组有10万个基因，由30亿碱基对组成，如果印成书，以每一页3000个印刷符号计，将有100万页，这将超过现有的任何一种大百科全书的篇幅。解读这样浩瀚的“巨著”确实是非常伟大的工程，是生物学领域中的第一项伟大科学工程。这是人类历史上又一里程碑式的成果，它的重要性绝不亚于生物学发展史上其他划时代的成就。美国《科学》杂志把这项成就列入了2001年的十大科学成就，人类基因组工作草图的公布成为全年的第二件大事。

初步成果：地球上所有人的基因信息99.99%相同，个体之间的差异仅仅为0.01%。即在整个基因组中只有1250个信息符号不同，与不同民族外部特征相比基因组的差异略显得少了一些。基因组的35.3%包含重复序列，有些染色体重复序列更多，它们的功能需要进一步深入研究。通过定位克隆方法，已经确定了至少30种疾病的基因位置。

测序方法：人类基因组的测序和分析方法大致分为两大系列，一种被称为“霰弹法”，另一种叫做“克隆法”。霰弹法首先把基因组的整个DNA随机分割成不同长度的片段，如2000 bp、10,000 bp、50,000 bp。分析各片段的序列，然后在计算机上把各个片段组装成毗邻的大片段，并确定后者在基因组中的正确位置。这种方法在后期需要进行大量的计算工作，赛莱拉公司采用该法。

克隆法则先大量复制出DNA大片段并确定其序列，然后将它们绘制到基因组草图的适当区域，这种方法在早期需要把精力和时间放在克隆和绘制草图上。美、英、法、德、日和我国HGP研究中心采用的就是此法。

两种方法所测定的结果虽然有些差异，但在大部分区域都有极高吻合度。

未来研究方向：人类基因组的基因数量为原来估计数量的 1/3 左右，而蛋白质按保守的估计也有十几万种，甚至有人估计几十万或上百万种，所以一段 DNA 链上基因与基因之间有着重叠序列，换言之一个基因产生一个以上的蛋白质。基因组专家们认为生命科学已经步入“后基因组”时代，理论上主要的研究重点是基因的表达机制把精力集中在基因结构与功能的研究上在应用方面，将兴起开发具有特异功能的蛋白质和药物的高新技术。

三、干细胞

干细胞的“干”字译自英语的“stem”，意思是“树”、“干”和“起源”。干字加在细胞前面，表示像一棵树上长出枝、叶，并开花结果一样，这种细胞可以分化形成其他器官的意思。1981年，首先分离得到实验动物小鼠胚胎的干细胞；1998年，美国威斯康辛大学的生物学家汤姆逊及其同事首次分离出人类胚胎干细胞，并建立了“人类胚胎干细胞系”，即从同一个细胞产生的后代细胞系列人类胚胎发育的早期，受精卵通过细胞分裂形成囊胚，其中含有未分化的细胞，外表是一层扁平的细胞，称为滋养层，可发育成胚胎的支持组织如胎盘等；中心腔称为囊胚腔，腔内侧未分化的内细胞群进一步分裂、分化发育成个体因此，这一层具有全能性细胞叫做胚胎干细胞内细胞群在形成内、中、外三层时开始分化，每层将分别分化形成人体的各种组织和器官。如果在囊胚时期，分离出胚胎干细胞加以人工培养，并控制条件，可以让其按照人为方向分化形成某种器官成人身上在骨髓、血液、大脑、胰腺和骨骼肌等组织中也有干细胞，但都是命运基本上确定的非全能干细胞，而且在体外很难扩增胚胎干细胞则在体外人工培养的条件下，能使其分裂扩增达三、四百年代。

这种胚胎干细胞或成年干细胞有诱人的应用前景，所以受到广泛的重视近几年，出现将干细胞植入受损伤的组织中可使其修复的研究，由此也产生了新的名词——“细胞治疗”显示出令人鼓舞的应用前景。2000年5月，河南医科大学神经干细胞课题组将实验动物的脊髓横断，使其后肢完全瘫痪，然后把人工培养的神经干细胞移植到该动物身上，发现瘫痪的后肢肌肉逐渐恢复功能，并能够爬行，表明神经细胞已经开始再生。20世纪90年代，上海第一人民医院为一个被诊断为再生障碍性贫血症的患者移植其哥哥的造血干细胞而治愈，还能正常工作。因此，美国怀特海生物医学研究中心的生物学家戴利预言，21世纪将是“细胞治疗的年代”，就是说，干细胞移植可能为治疗迄今无法治愈的难症带来新的希望，如老年痴呆症、帕金森氏病、糖尿病、慢性心

脏病，甚至癌症等

四、克隆技术与克隆人

“克隆”一词是从英语中的 clone 一字音译而来的，是无性扩增、无性繁殖的意思。1997年初，英国首先宣布克隆羊“多利”诞生；2000年6月，美国马里兰州的细胞技术公司克隆出首例人类胚胎。最近几年，世界不少研究机构克隆出其他动物，这类报道屡见不鲜从此克隆技术这样的生物学尖端技术术语为世人熟悉，不仅在学术界而且在民间和媒体中沸沸扬扬，成了当今世界的热门话题。至于动物的克隆，世人不那么敏感，但对人的克隆反映十分强烈，超出了生命科学的范畴，要求制定有关法律的呼声愈来愈高，以至于政府和立法机构再也不能保持沉默了，许多国家相继发表声明反对克隆人

克隆技术是在胚胎培养和胚胎移植技术的基础上发展起来的，20世纪30年代已经有胚胎培养的报道；1956年，美国学者怀廷（Whitten）找到了体外培养小鼠胚胎的培养液的配方，从而开辟了体外培养哺乳动物胚胎的一条通路。随后培养液的配制不断改进，体外培养延续的时间愈来愈长；1983年，Y. C. Hsu 和 L. T. Chen把受精后3.5天的鼠胚胎培养到第10天，在动物胚胎体外培养的历史上前进了一大步。

取出卵进行体外受精，把受精卵培养成早期胚胎，然后移植到第二个母体，叫做胚胎移植。试管婴儿、试管动物就是应用这种技术实现的。到了20世纪90年代，生物学家们在进一步发展这些技术的基础上从动物身上取出卵细胞去掉其细胞核植入体细胞核，然后移植到第二个母体的子宫中使其受孕，产下幼仔。这就是克隆动物，克隆羊“多利”就是用这种方法产生的。克隆人也是如此。然而克隆人有许多科学和技术以外的道德、伦理和法律等问题，所以在胚胎早期把它焚毁，而没有把实验继续下去

第十三章

前程无量的空间和海洋科学技术

人类总是不满足于现状，总想不断地扩张自身的活动空间和势力范围。人们想上天、想下海、想入地、想到他们能够到达的一切地方，为的是生存和发展，为的是财富和资源由此，人类经历了长期的追求和探索奋斗历程，推动了科学技术的发展，特别是二次大战后，空间技术终于取得了实质性的突破，取得了令人瞩目的成就，海洋科学技术也得到了迅速的发展。

空间科技是十大新兴科技之一。它是伴随着巨大的政治和军事需要而发展起来的，当今，它已成为一个国家综合国力强弱，国际威望高低的重要标志。因此空间科技成了政治家和大众支持的热点，各国都争相把自己的人力、物力、财力、智力投入到空间科技研究上去。迄今约有5千多个太空飞行器上天，如俄罗斯1997年就进行29次航天发射，有48颗卫星上天，6次货运飞船飞向“和平”号轨道站，其中6月18日是一箭七星，9月14日“质子-K”火箭分两批把“彗”系列14颗通讯卫星送入近地轨道。

从1957年~1993年9月，世界各国成功的空间发射有3548次，其中美国占27.5%，苏俄占68%，日本占1.3%，欧洲空间局占1.5%，中国占0.3%，共发射航天器4500多个，其中科学航天器841个，载人飞船164个。全世界用于航天方面的经费约12000~15000亿美元；美国至1993年的航天开支4074亿美元，欧空局1993年的预算为2亿美元可以说，没有一项科技事业的规模和投资能超过空间科学的，空间科学已成为现代科学的前沿和热点

第一节 空间技术的突破 飞天梦想变现实

自古以来，人们就幻想着飞离地球，自由地翱翔在太空，无论是西方长翅膀的天使、还是东方的飞天和嫦娥，都反映出人类的这种愿望。直到 18 世纪，人们才真正开始了自己的飞天尝试。

1783 年，法国的蒙哥尔费兄弟研制成热空气气球首次升上了天空，以后又用氢和氦代替热空气，使气球越升越高。1863 年法国的凡尔纳出版了著名的科幻小说《从地球到月球》后又出版《环绕月球》书中描述了乘炮弹去月球探险的故事。1903 年，俄国的齐奥尔科夫斯基指出，炮弹不可能成为航天飞行器，只有用液态燃料的火箭才行，他还提出了著名的齐奥尔科夫斯基公式和多级火箭逐级加速的设计思想。1923 年奥伯特的《飞往行星空间的火箭》一书出版书中论述了火箭飞行的数学原理。1926 年美国戈达德以汽油和液氧混合液体为燃料发射了世界上第一枚液态燃料火箭，飞行 2.5 秒，12 米高，56 米远；后经不断改进，到 1935 年，他研制的火箭已升到 2.5 千米的高空，飞行距离达 20 千米。

20 世纪 30 年代，气球下的密闭铝制吊舱出现，40 年代塑料膜气球发放成功，现代气球充以 3000 ~ 80 万米³的氢或氦，最高可升到 52 千米高空，载重可达 5 吨，飞行时间长达 10 年。因此，可以进行高能宇宙线、 γ 射线和硬 x 射线、紫外及红外等多种天文观测，高空气球成为天文、气象、大气物理研究的有力武器。

二次大战期间，德国研制成用于战争的 V-2 火箭，能升到 160 千米的高度，飞到 320 千米以远。二次大战后，美苏两国加快了火箭技术的发展步伐，1949 年苏联的 P-2A 火箭可升到 212 千米高空探测而美国则以 V-2 火箭为第一级“女兵下土”火箭为第二级组成“丰收”号探空火箭，可升到 393 千米的高度。

1957 年 10 月 4 日，苏联在总设计师科罗廖夫领导下首先发射了第一颗人造卫星“斯普特尼克卫星”1 号，一个月后又发射了“卫星”2 号；1958 年元月 31 日，美国也发射它的第一颗人造卫星“探险者”1 号。人造卫星的上天，使飞天梦想变成现实，人类进入了宇宙航行时代，标志着空间科学技术高速发展的新时期开始。

一、人造卫星和运载火箭

要使人造卫星环绕行星转动，必须使其具有足够的初速度和环绕速度，维持卫

星作圆轨道运动的向心力即行星和卫星之间的万有引力故环绕速度至少应为 \sqrt{RG} 。对于近地卫星来说，该速度至少为 7.9KM/S （但不大于 11.2KM/S ）

要使卫星得到初速度和入轨、环绕速度，只有借助于运载工具——火箭，用火箭把卫星带到预定高度火箭速度随着其喷射气体速度的增大而增大，也决定其总重量与燃烧后剩余质量的比。一般一级火箭只能加速到 4.5KM/S （现在最大速度达 7KM/S ），为了达到 7.9KM/S 的第一宇宙速度，只有采用多级火箭来接力推动。目前一般是三级推动。为了使火箭燃烧气体有足够的喷射速度，都使用高能液体燃料或高能固体燃料，而不用火药除燃料外，还必须同时使用助燃的氧化剂，如纯氧或硝酸等。氧化剂的贮存要求零下几百度的低温，此时许多材料变得很脆，即使是钢铁也很易受震破裂故火箭上氧化剂的贮存是个高技术的难点。同样，燃烧室必须耐高温高压，还要有冷却设备。

作为一个独立单位，每一级火箭都由发动机、制导系统、结构和有效载荷组成。发动机是火箭的心脏和动力，制导系统用来保证对火箭飞行中的姿态、高度、速度和方向及轨道，进行及时的控制和校正。

火箭的发射过程虽然只有几分钟、十几分钟，但它要经受高温、高压和剧烈震动的严峻考验。一开始它要通过稠密的大气层，要求火箭头部必须安上整流罩，它的外壳既轻又耐高温，形状适当，表面光滑，外壳上若有一点皱纹，就会导致火箭的破裂。对于一枚几十米长的火箭，其喷气方向必须正确，若偏离一角分，都可能使火箭歪斜，甚至翻跟斗，或达不到预定高度。

火箭和卫星发射时，一般向偏东方向加速，以借助于地球自转的速度。轨道倾角越大，借助的速度越少，要求火箭自身的推力和能量就越大第一级火箭离地时，先垂直发射，以尽快通过 55 千米厚的稠密大气层，然后开始斜向上飞行，二级火箭逐渐转为水平，此时高度在 200KM 左右，然后火箭靠本身的惯性沿椭圆轨道滑行，到达与运行轨道相切的位置滑行结束，末级火箭点火加速，加速至入轨速度，便把人造卫星弹射到正确的轨道上。其间，各级火箭的连接，脱落和点火控制等，也是高难度的控制技术。而卫星的安全分离是重要环节，分离失灵而导致失效是屡见不鲜的。分离卫星的方法有压缩弹簧弹射，或用卫星上的小火箭把卫星推出去，或用反推火箭拉拽运载系统后退来实现分离。

多级火箭接力原理虽然简单，但是实践起来并非易事。二次大战期间，战争的需要促进了火箭技术的空前发展。德国的布劳恩等人在希特勒的控制下，在佩纳明德工作站疯狂地研制 V—2 火箭，并曾用它袭击了英国等国。希特勒灭亡前夕，布劳恩带着成捆资料逃亡美国，而苏联则俘虏了工作站上数百名德国火箭工程师，缴

获了大量火箭零配件。二次大战后，美苏两国为称霸世界，展开了空间科技的角逐。前苏联的科罗廖夫用 V—2 火箭资料成功地设计出第 1 枚导弹，1957 年 8 月，苏联试射了第 1 颗洲际导弹，速度已达 $6 \sim 7\text{km/s}$ ，这预示着人类冲刺太空的最后阶段的到来。为了抢时间，美苏都采用将远程导弹改装和中程导弹加一级的方法组成运载火箭，并于 20 世纪 50 年代末先后发射了人造地球卫星。

随着空间技术的发展，火箭的发射能力和可靠性日益提高，各种应用火箭相继出世，并且转入了“一箭多星”的发射阶段。这比单星发射要复杂得多，不仅要解决多颗卫星同时安装的问题，还要掌握复杂的多颗卫星分离技术。例如：由于运载火箭飞行时对无线电波发射的限制，子卫星一般不能发射电波，一颗子星射出后，要继续精确控制火箭进入下一轨道是很困难的。子卫星在入轨道前的各种空间环境条件下，要求不变形、不损坏，整个系统应协调一致地工作，否则一星“卡壳”，前功尽弃

经常使用的运载火箭有苏联的宇宙 C-1、联盟号 A-2、质子 D-1e，美国的德尔它 3914、宇宙神一人马座，大力神-III C，和欧洲空间局的阿里亚娜 1 和 2 号等。

二、人造卫星的轨道设计

运载工具（火箭或航天飞机）把卫星送入运行轨道叫入轨，入轨的地方叫入轨点。卫星的轨道由其入轨时间、入轨点和入轨速度决定。由于卫星环绕地球所需的水平速度随卫星高度增大而减小，故不同高度的轨道上卫星的环绕速度是不同的，如在 35860 千米的高度的环绕速度为 3.1 千米 / 秒，大于这个速度，卫星的轨道就是椭圆，如果此速度为 11.1 千米 / 秒，椭圆的长轴可超过月地距离，向月球发射飞行器就需要具有这种速度。当速度达到 11.2 千米 / 秒，飞行器的轨道就成为以太阳为焦点的椭圆轨道，它摆脱了地球的引力束缚，故 11.2 千米 / 秒叫“逃逸速度”，又称第二宇宙速度。

根据人造卫星的轨道平面与地球赤道面的倾角的不同，人卫轨道有顺行、逆行、同步赤道轨道和极地轨道等，它们的倾角分别为 $0 \sim 90$ 度、 $90 \sim 180$ 度、接近 0 度和 90 度，其中极地轨道的地面复查范围最大，逆行和极地轨道需要火箭具有的能量最大。

人造卫星基本上摆脱了大气层的影响，除用于对天体、太阳风、日地空间物理场等天文观测研究外，还广泛应用于通讯、气象、资源、军事侦察、大地测量、海洋、地球物理环境监视、预报、导航定位系统及太空警戒等许多科技领域。其中通讯卫星一般定点在赤道上空，是运行周期为 23 时 56 分的同步卫星，其地面高度

3.5860 万千米。故卫星相对于地面是静止的，这种轨道又叫静止轨道，它非常有利于无线电传播。3 颗等距分布的同步卫星就能覆盖全球。为了达到这样的预定高度，卫星需先进入中间轨道，再转移到定点轨道上去（如图 13-1）。

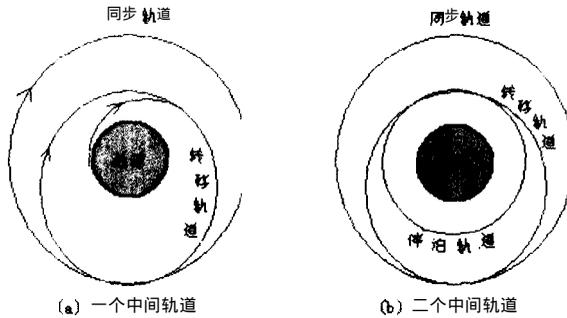


图 13-1 赤道上同步卫星的发射轨道

发射静止卫星的常规程序是，运载火箭先把卫星送入高度为 200 千米的圆形停泊轨道，在此轨道的近地点再次点燃火箭，使卫星进入大椭圆转移轨道，其远地点的高度接近同步轨道高度，卫星到转移轨道的远地点时，再启动发动机加速，进入近同步轨道，最后采用小推力喷咀进一步修正误差，经过 10 天左右的调整而到达运行轨道。此外，自旋卫星还应调整自转轴，使其垂直于赤道面；使通讯天线对准规定的服务区。由于转移轨道都有一定的倾角，所以在变轨过程中还要改变轨道倾角。在远地点点火前，还要先进行卫星的姿态控制，才能得到静止轨道上所需的火箭推力与卫星轨道速度的合成速度。卫星入轨后，会产生轨道漂移，故还需定期启动轨道维持系统，把卫星拉回到原来正确的轨道上。

地球卫星除受地球引力外，还受到地球的非球性摄动力、大气阻力、太阳辐射压力，以及日月摄动力等的影响，它们虽然是地引力的千分之一以下，但在实际轨道计算时，是不能忽略的。这样，人造卫星在运行中的能量在不断消耗，若得不到补充，时间长了，轨道就会发生变化，就会缩小，一般 500 ~ 6000 公里高的卫星受到的大气阻力与大气密度成反比，也与卫星的面积、质量成正比，与环绕速度的平方成反比。最后人造卫星因轨道的日益变化而坠回地球。

三、空间飞行器

广义的空间飞行器包括所有在空间飞行的航天器。除气球、飞机、火箭外，还有人造卫星和载人飞船、空间站和航天飞机、以及月球、行星探测器等。

1. 人造卫星通常由服务舱、仪器舱两部分组成，载人飞船和空间轨道站增加一个供宇航员工作、活动的工作舱（或货舱）部分。服务舱的任务是：（1）控制卫星运行姿态；（2）与地面通讯联系和卫星上的数据管理；（3）调整轨道；（4）星内各种仪器工作状态的资料；（5）电源供应仪器舱是卫星的主要部分，安装各种传感器、实验装置。载人飞船还应有生命保障、应急求生、返回着落的支持系统 增加返回舱、着落舱等。

至 1982 年，世界上已有 17 个国家或组织发射了卫星， 7 个国家拥有运载火箭，飞行在空间的人造天体总共约 13317 个（包括卫星碎片和末级火箭、火箭保护帽等）其中人造卫星占 99%

2. 载人宇宙飞船是指可以载宇航员上天，在空间操纵仪器、或把人送上其它天体进行实地考察的航天器 第一艘载人飞船是 1961 年苏联的“东方号”1 号，宇航员加加林是第一个环绕地球飞行的人。苏联除有东方号宇宙飞船（1~6）外，以后又发射了“上升”号 1、2，“联盟号”（1~40）和“联盟 T”（1~12）；美国先后发射了“水星”（1~9）、“双子座”（1~12）“阿波罗”（1~17）和“空间实验室”等宇宙飞船。至 1983 年，有 178 人进入了太空，他们为人类在空间生存和活动积累了丰富的资料和经验。如“联盟 19”号宇航员经历 3 星期的空间失重后回到地球，需经过训练才能正常走路，有的要训练 3 个星期时间。

3. 此后，在太空设立“空间站”的计划付之实施。苏联于 1971 年开始发射第一个空间站“礼炮 1 号”前后共发射 7 个“礼炮号”空间站。空间站两头各有对接的门，一头对接运送宇航员的“联盟号”飞船，一头对接运送物品的“进步号”货船，它们组成“太空列车”，长 30 米，重 32 吨。1973 年 5 月美国发射的“天空实验室”由轨道工作舱和阿波罗飞船组成，飞船负责运送宇航员并与工作舱对接，使宇航员进入工作舱工作。“天空实验室”运行 2249 天于 1979 年坠落。到 1984 年，苏、美两国载人航天 102 次，个人连续在太空工作和生活最长的时间为 237 天，他们是“礼炮 7 号”的宇航员。两国载人航天活动总时间是，苏联 62000 小时，美国 24000 小时。

空间站对人类发展，开发空间，对于一个国家的国防、工农业生产的科技和发展都具有重大意义，如在零重力环境下的空间制药生产，可提高纯度 5 倍 生产效率可比地面高 400~800 倍，可制造如尿激素、胰腺中的 B 细胞等心脏、糖尿病的特效药。同样空间环境可提取高纯度的晶体——晶片，这是微电子技术的重要材料。还有奇特的泡沫钢、泡沫陶瓷等；空间站在卫星修理、探测宇宙方面也大有用武之地。

4. 耗费巨大的卫星或飞船只能一次性使用，为改变这种况，可供长期使用的空间站和航天飞机应运而生。航天飞机兼有火箭、飞船和飞机三者的特点，并能多次

使用，是空间探测的高科技结晶，标志着航天飞行的新时期的来临。从 1981 年开始，美国便利用航天飞机，来往于地面和空间站之间，如：奋进号、挑战者号、发现号、哥伦比亚号和亚特兰蒂号等至 1993 年，“哥伦比亚号”已发射 48 次。

5 空间探测开始于 20 世纪 40 年代，目前广泛使用的运载工具是高空飞机、平流层气球、探空火箭、人造卫星和各种空间飞行器

从 1962 年美国发射水手 2 号近距离探测金星以来，已有 41 个探测器探测了除冥王星以外的 8 大行星。行星探测器飞向大行星，常采取逼近飞行或软着陆的方式，它们围绕目标行星或在行星际空间飞行，同时使用飞向、绕转或击中行星的各种火箭或软着陆飞船，以及发射行星的卫星等月球探测，就是以逼近飞行、硬着陆、轨道环行、软着陆、取样和载人登月等方式进行的，包括采用飞月火箭、绕月火箭、击中月球火箭、登月飞船和月球卫星等

四、空间飞行的技术保障

人造卫星、宇宙飞船和空间飞行器等，无论在发射系统、信息、控制和接收系统等方面，在卫星技术、姿态控制和稳定性方面，在探测分辨率、空间环境预测和轨道精度方面等，都体现出它是高科技的综合技术的系统工程。必须应用遥感、遥控、遥测等技术，以及其它专门工程技术，为卫星定向系统的准确、三轴稳定的姿态控制系统的可靠、高速信息采样和地面回收系统正常工作，以及任意选择运行轨道，提供万无一失的保证。

其中地面系统是整个卫星系统的中枢，从卫星发射开始，一直需要地面系统指挥、控制、保障和配合地面系统通常由（1）跟踪、接收网站（2）空间控制中心（OCC）、（3）遥感数据处理与资料管理中心组成跟踪站对卫星进行长期观测和监视，把测得的卫星轨道数据及时提供给 OCC，用以计算轨道状况，保证定轨的精度。接收站有两项任务，一是指挥、控制卫星工作，传送来自 OCC 的指令，如命令星上仪器启闭，接收有关卫星工作状态的遥测数据等二是接收卫星发来的遥感图像信息及有关数据（如卫星姿态参数）并记录、存储后送到 OCC 控制中心。空间控制中心是整个卫星系统的大脑，它指挥和监视卫星运行、控制和协调全系统的正常工作，制定卫星的工作日程等，这些工作全部由电子计算机技术完成。卫星和地面系统构成一个准确、高效、协调的有机整体。

1. 遥感技术是利用光学、电子学和电子光学的技术和方法，对地面或其它天体的目标物体和现象在吸收、反散、辐射电磁波能量上的特性，进行远距离的探测、记

录、分析的新技术，它能使我们识别被探测物体和现象的差别。广义的遥感包括地面遥感、航空遥感和航大遥感三类。航天飞行器为各种遥感仪器提供了广阔的视野、上分稳定的工作平台，具有探测速度快的优点。现代遥感技术的“传感器”使我们看到了肉眼看不到的、处在紫外、红外和微波波段的物体信号，帮我们识别它们的特征，不管是白天黑夜，不管是云层和地表阻挡，许多现象和物体的特征都可“尽收眼底”

“传感器”分为成像和非成像两大类。成像传感器主要有使用胶片的彩色红外摄影(CIR)，多波段光谱摄影等，现代的许多传感器已采用作摄影方式的扫描成像和视频信息传输新技术。如红外扫描、微波雷达、RBV电视摄像机和MSS及CCD多光谱扫描等成像系统。非成像传感器多种多样，主要由卫星执行的任务决定，如定位系统、测高系统、计时系统等

遥感技术还包括对传感器探到的庞大的图像数据进行处理的技术，主要有以光学模拟和电子光学为基础的图像处理设备，但它们的能力有限。现代的处理手段主要是“数字图像处理技术”，它非常适合处理视频图像信息

除电磁波遥感技术外，还有声学和各种物理场遥感技术

2. 空间探测技术除解决飞行运载器以外，还需装备各类仪器和设备。太空中除进行可见光观测外，还需进行各种波段即全波天文观测，因此各种高技术的探测器被研制出来，主要有红外探测器，包括热探测器和半导体探测器，紫外、 x 射线、 γ 射线探测器及其它粒子探测器。因为在整个电磁波谱中，有的射线可直接通过玻璃或金属，故不能用棱镜或反射镜会聚射线，必须采用各种核辐射探测技术，利用电磁辐射的光电、光敏、光致电离、 γ -电子对转换等效应来测量辐射通量和能谱等。例如，按能量的高低，广泛使用各种光电倍增管，主要用于探测紫外线；有各种光子计数器，如正比计数器，闪烁计数器、契仑库夫计数器等，有证认辐射源并确定其方位的各种准直器，多通道脉冲幅度分析仪，火花室、核乳胶电离室等，可用于探测 x 射线和 γ 射线。还有各种偏振计、自动记录显微光度计和各种粒子望远镜等。

空间技术、航天技术为人类在更广阔的范围内认识世界和改造世界开辟了新途径。由于它提高了人们观察自然界的位置，扩展了人类认识自然的眼力和手段，因此它一方面广泛地应用于工业、农业、军事和科学技术领域内，并展示着无量的前景；另一方面它使太阳系内的空间航行成为现实

第二节 遨游太空探宇宙

空间科学技术的发展为人类进入太空，探索宇宙创造了绝对的条件。而天文学又是空间科学的必要基础，特别是航天事业的发展更离不开近代天文学。空间天文学是集军事、政治、空间技术、物理学、天文学五个方面的共同事业，因而具有综合性、战略性的特点，所以它在空间科技发展中的独特作用是其它基础学科所不具备的。空间天文学又总以开拓者的姿态出现，它有独具魅力的显示度和层出不穷的新发现和新边界，它的一系列重大发现，大大丰富了人类的宇宙知识，把人类的视野拓展到了宇宙的最深处，其影响和意义已大大超出了天文学本身的范畴。

一、登上月球

月球是太阳系内空间探测的第一个目标。作为“阿波罗”登月计划的准备，共有5个系列。美国的“徘徊者”系列实现了在月球上的硬着陆，并在下降过程中拍摄照片17000余张，清楚地看到月表小到直径1米的坑穴和直径几十厘米的岩石。月表许多地区较为平坦，巨大岩石很少，大型喷火口也少，这些地区应被选择为飞船降落区，但还不清楚能否承受15吨重的登月舱。因此，“勘测者”系列又实现了月面上的软着陆，通过分析月球土壤的性质，证明表面强度足以支撑飞船降落；“月球轨道环形器”由5艘绕月飞船组成，通过拍摄月面各部分照片，选择阿波罗飞船的具体降落点，它们共拍摄照片1千余张，复盖月面的99%以上，因此能作出精密的月面地图。另外根据飞船对飞行轨道的偏离可获得月球内部结构的资料。美国为实现阿波罗登月计划除执行这3个辅助探测外，还进行了载人太空飞行的试验，以了解人在宇宙太空中的适应能力，这就是“水星”计划和“双子座”计划。

1966年，美国的阿波罗登月计划开始实施，前六次飞行是试验性的，阿波罗1-3号发射3个模拟体，4-6号发射不载人座舱，7-10号分别载有3名宇航员，7号在绕地轨道上载人飞行，8号在距月面100千米高处鸟瞰月面，9号在绕地轨道上试验登月舱，10号做环月和登月模拟试验，这需将登月舱降到距月面15千米以内试验。

人类首次登月成功是在1969年7月21日，这次飞行的11号飞船由登月舱、指令舱和设备舱组成。7月16日升空，飞行61小时多，飞船到达离地32万千米的地月等引力处；飞行99小时，登月舱和指令舱分离并开始向月面降落，此时登月舱离月面

110千米；飞离地球 109 个多小时，两名宇航员在环月飞行中乘坐的登月舱降落在月球静海基地；另一名宇航员继续留在指令舱内等待，登月舱完成登陆后飞离月球，并与指令舱对接，当 2 名宇航员返回指令舱后，即抛掉登月舱。当返回途中接近地球时，飞船又分离掉设备舱而降落到地面。这次登月活动历时 8 天多，3 位宇航员在 7 月 24 日返回地球，溅落在南太平洋上，由航空母舰打捞上来。

登月成功是人类历史上划时代的事件，正如阿姆斯特朗第一个从登月舱一步踏上月面时所说：“这一步对我来说是很小的一步，但对整个人类来说是巨大的一步”。

前后共有阿波罗 11、12、14 至 17 号 6 艘飞船 12 名宇航员登上月球，他们在月球上安装了一些仪器，如测震仪，激光测距反射镜、磁强计、太阳风能谱仪、离子探测器、x 射线望远镜、 γ 射线和紫外线频谱仪、宇宙线探测仪等，建立 5 座核动力科学实验站，以进行热流、月震、大气成分、电离层环、磁场等几十项相关课题的探测研究。

阿波罗飞行获得大量关于月表结构特征、化学成分、物理特性、重力、磁场、月震等新资料。1975 年埃耳巴兹综合分析阿波罗系列空间探测的资料后指出：月球无水和生命；月岩中难熔元素含量比地球高，而金属和易挥发元素的含量比地球少；月球有过频繁而激烈的遭受小行星和流星体撞击的历史；月球背面高正面低，在其内部存在圈层结构等等。

二、空间望远镜

光学望远镜一旦没有大气干扰，其威力无比，以口径 5 米的海耳望远镜为例，它在地面上只能分辨月球上 900 米大小的物体特征，如果放在太空上，可使分辨能力提高 30 倍即分辨 30 米大小的物体特征，观测的距离也从地面上观测的 20 亿光年延伸到太空观测的 140 亿光年之遥。

1990 年 4 月 25 日，美国把与欧洲空间局联合研制 13 年，耗资 21 亿美元的哈勃望远镜用航天飞机“发现号”送入太空，该望远镜的主体是一个长 13 米、直径 4.3 米的圆筒，重 12.5 吨。主镜口径 2.4 米，它在离地面 500 千米高度的围绕地球的轨道上进行天文观测，自动扫描天空，24 小时连续工作，其瞄准精度达 0.01 弧秒，稳定度优于 7 毫米弧秒，这种精度相当于用激光打中 320 公里以外的一枚硬币，最暗能观测到 28 等星，能看到比地面上看去暗 50 倍、远达 150 亿光年的天体，这接近可观测宇宙的边缘。为了克服哈勃太空镜的缺陷，1993 年 12 月 2 日美国宇航局发射“奋进号”航天飞机，带着 7 名宇航员和 7 吨器材进入太空修复 HST，这次修复的成功，充分显示

出人类在太空中从事高难度操作的能力 1997年2月13~16日又有7名宇航员上天对其进行了第二次修复

头几年,HST就已拍摄10万余张天体照片,平均每月1389张,第10万张照片拍摄的是一个90亿光年远的类星体。哈勃空间望远镜的上天,是光学望远镜发展史上的新的里程碑

第三节 未来是海洋科学技术发展的时代

地球表面积的70.8%为海水所覆盖,且海水占地球总储水量的97.25%,因此人类居住的地球才是名副其实的“水行星”。海洋面积3.6亿万平方千米,体积13.7立方千米,全部海水总量13亿亿吨海洋在地球表面积的分布是不均匀的,但它相对于陆地分布有对称现象,如南极的洲和北极的洋,欧亚大陆和南太平洋,北半球大陆的环状分布与南半球海洋的环状分布等。世界大洋主要有太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋,前3个洋在大陆以南是相连的,又称为南大洋。海洋平均深度3800米,是陆地平均海拔的4.5倍。洋中最深的马利亚纳海沟深达11034米,超过陆地最高峰珠峰的8848.13米。

一、海洋是人类丰富的资源宝库

海洋是生命的摇篮。海洋中蕴藏着极为丰富的生物资源。据统计,海洋中生物已达20多万种,其中动物18万种,植物10万种。在18万动物中,有鱼类2.5万种,贝类10多万种。许多海洋生物可供人类利用。据估计,在不被破坏生态平衡的情况下,海洋每年可向人类提供2亿万吨鱼类,而目前世界渔业产量才每年7千万吨左右,且这些捕量的80%来自水深不到180米的大陆架海区。在可利用的海洋植物中,有4500种固着藻类,其中只有50种被利用。为开发海洋资源,渔业技术、调查勘探技术、深海捕捞技术、以及利用卫星、遥感、声学 and 光学诱捕技术首先发展起来。同时,海水养殖技术迅速发展,这是海洋开发由捕捞转为“海洋放牧”的伟大转折。例如,为使放养有良好的聚集、生长,繁殖场所和成为诱集其它鱼类生物的隐蔽所,许多国家进行了人工鱼礁实验和应用

海洋的矿物资源极其丰富。海洋矿物的勘探和采掘技术的研究,是目前海洋研究中投入人力、物力、财力的重点项目之一。海洋矿物主要有石油和锰-结核。

初步查明，大陆架海底石油可采量约有 2500 亿吨（含天然气），相当陆地储量的 3 倍。目前世界石油总产量的一半来自海洋。20 世纪 80 年代，已有一百多个国家在海上寻找油田，近 40 个国家在开采海底石油。有人预测，世界石油主要埋藏在深海底。

锰结核又叫锰团块，是经济价值很高的海底矿产。形状似马铃薯，直径 1 毫米 ~ 20 厘米，估计洋底总储量 3 万亿吨。其中以含锰为主，并含有镍、铜、钴、铁等多种金属和稀有元素。锰结核矿在 1872 年由英国的“挑战者”号调查船所发现，二次大战后开始正式对其调查研究。1957 ~ 1958 年国际地球物理年间，美国首先查清了锰结核在大洋底的分布，20 世纪 60 年代对其成因和开采技术进行研究实验，70 年代进入商业化开采准备阶段。如日本在 1978 年采用气吸式和气压式方法，在北太平洋低纬度 5 千米水深的海域开采锰结核矿，最高开采量每小时 40 吨。

海洋资源中，利用潜力最大的是海水中的化学资源，在已发现的 100 多种元素中，在海水中就找到了 80 多种，其中 70 多种可提取。目前用海水生产淡水、重水、食盐和镁、钾、溴等单质和化合物，都已达到工业化水平。海水中化学元素虽然总含量巨大，但单位海水中含量稀少，因此该资源的利用首先面临的是如何使化学元素富集起来的问题。如铀在海水中总含量达 40 多亿吨，是陆地上 100 ~ 200 万吨储量的几千倍，而 1 升海水中仅含铀 0.003 毫克。日本在 20 世纪七八十年代，利用水球藻作吸附剂来提取海水中的铀。试验中，年产只有 10 克左右。

海水本身具有动能、势能和热能，如海浪能、海流能、潮汐能、温差能、盐度差能等，总称海洋能。这种能源藏量大、清洁、不易枯竭，越来越为人们所重视。例如潮汐能约有 10 亿多千瓦，主要集中在浅海和狭窄的海湾地带，像英吉利海峡约有 8000 万千瓦，黄海约有 5500 万千瓦，但需要找到大规模开发的技术和方法。有人测试，海浪对海岸的冲击力达 20 吨 ~ 30 吨每平方米，大的可达 60 吨每平方米。巨大的海浪可把 13 吨重的岩石抛到 20 米高处。海浪在 1 平方千米的海面上能产生 20 万千瓦的能量。全世界的海洋波能约为 10 ~ 100 亿千瓦。利用波浪能发电已经实现。海流是海水连续向同一方向的运动。海流有表层流，表层以下有上层流、中层流、深层流和底层流。利用海流的动能亦可发电。另外潮流虽然在大洋中不显著，但在海峡或海湾处的流速达 10 里 / 时，具有巨大的能量可供利用。

海水温度增高的主要原因是太阳辐射能的输入。因此海水温度随纬度而变化，纬度越低，水温越高；深度越大，水温越低，到 200 米以下的深层，太阳辐射的影响甚微，水温常年很低，变幅也不大。据推算，20° S ~ 30° N 之间的海水表层温度全年平均为 25° ~ 29° C。红海可达 35° C。而海深 500 米处，温度可保持在 5° ~ 7° C 之间，

这种表层和深层的温差热能，可发电 600 亿千瓦。温差发电 1889 年提出，1929 年开始试验，1956 年在西非首先建成这种发电站，在温差 20°C 的条件下，可发电 7500 千瓦。

当前，世界性的淡水资源短缺是人类面临的威胁，因此海水淡化技术尤为重要。现在世界上有几十个国家在研究这项技术。到 1979 年 已建成日产淡水 95 吨以上的装置 1498 台 生产淡水总量约每日 571 万吨，科威特日产 12 万吨。我国已研制出日产 200 吨的电渗析海水淡化器，已在南沙群岛投入使用，它技术先进，能耗低，操作简便，水质较好，成本只有用船运水的 1/5。

面对世界范围出现的粮食、能源和资源短缺问题，人们寄希望于海洋。因此，海洋科学技术正经历着战略性的深刻变化和发展的时代。随着海洋资源开发利用的科学研究和国防力量的发展，海洋学在经济、政治、军事、科技上的位置日益突出。许多国家都十分重视海洋问题。美国继 20 世纪 50 年代发展原子能技术，60 年代发展空间技术之后，把海洋列为 20 世纪 70 年代的重大科技之一；在组织近千名海洋学家对海洋进行考察研究后认为，充分利用海洋，将深刻影响到美国的安全和经济发展，海洋是未来世界斗争的中心。其他国家也不甘落后，纷纷向海洋进军，一个探索研究海洋，开发利用海洋的潮流已经形成。

二、谁控制海洋 谁就控制世界

海洋是国防前沿，它与军事历来密不可分。如沿海军事设施、舰艇及其武器装备的设计、海上军事活动等都必须了解和掌握海洋环境要素的分布及变化规律。现代海战包括海空战场、海面、水下和海底战场。二战期间被击沉的潜水艇，60% 是利用海洋声波传播规律被发现的，而海洋温度、盐度的微小变化，都会影响声波的传播。海洋中的（温度、密度）跃层和内波，可以隐蔽潜艇，使声纳难以发现它，为此必须了解海水的混合及海空能量交换情况。又如海流，不仅对反潜作战重要，对水雷布设，登陆作战、海上救生和补给等都很重要。二战期间，德国潜艇正是利用对英国某海军基地的地形、潮流和气象方面的了解，巧妙的击沉了该港近三万吨的海军舰艇。此外，海浪、潮汐、海洋环境噪声、海底地形对军事活动的影响，都要求对海洋科学的深入研究和了解。

20 世纪 60 年代以后，大国争霸海洋，加强了全球性的海洋军事力量。卫星技术的发展，陆基已无军事秘密可保，核武器系统也转入了水下基地，建立了水下部队，它们的全球性、全天候的海上活动能力大大发展。为达到控制海洋的目的，海

洋科学技术的研究飞速发展，作为第一步，是加紧对海洋进行全面的考察和调查

(一) 海洋考察是人们认识和掌握海洋获取各种资源的最基本、最经常的工作，是海洋科学研究资源开发利用，海洋工程技术和环境保护的基础，在科学上和生产实践中具有重要意义。因此，各国对海洋考察调查都十分重视。一个国家海洋调查的规模 and 水平，已是其国力强弱的高度反映。

国际上首次海洋调查以 1872 年 12 月至 1876 年 5 月“挑战者”号军舰在太平洋、大西洋和南极洲附近海域的调查为代表。该军舰是 2300 吨三桅蒸汽动力船，它绕地球一周，航程 12.6 万千米，进行了测深、测温、测流、采水、生物和底层取样等综合科学考察，其调查取得的资料经 76 位科学家花费 23 年整理分析后，写成 50 卷调查报告，取得了丰硕的成果如在海洋生物方面，发现 715 个新属，4717 个新种。发现海洋深处不仅有低等动物，还有脊椎动物（原来认为没有）在海洋化学方面，负责分析的迪特玛选择了有代表性的 77 个海水样品，测定了其中各种主要元素的浓度，证明这些元素的组分比是恒定的，他的工作为现代海洋学奠定了基础。到 20 世纪 40 年代，发现溶解于海水中的元素有 44 种，加上溶解气体有 49 种在海洋地质方面，“挑战者”号采集了各大洋不同纬度的底质样品 12000 个，由默莱负责分析，后来出版了“海洋沉积”一书，为海洋地质学建立了基础。在海洋物理方面，对大洋温度、盐度的垂直与水平分布规律已有了比较全面的概念。

此后许多国家如德、俄、挪威、丹麦、瑞典、荷兰、意大利和美国等，都竞相派调查船考察，并开始了国际合作调查活动。1902 年成立了国际海洋研究委员会 ICES，以共同改进调查仪器和方法，制定标准海水指标等，促进了海洋学的发展。其重点是在海洋渔业方面，由于海洋生物分布与海流及水团的理化性质密切相关，由此推动了海水理化性质及海流理论的研究。

一次大战后，海洋调查又迅速活跃起来，但调查方法已不相同。德国的“流星”号在 1925~1927 年对南大西洋的调查，不是采用单一航线，而是在 20° N 到 65° S 之间布设了 13 条横贯大洋的断面，对大西洋海底形态和水团结构、深层环流的研究作出了宝贵贡献。在调查技术上已开始使用回声探深仪，30 年代使用无线电一声学测距仪定位，管状采泥器已成为主要的采样工具，可采到深 5 米以上的底样。

二次大战后，1947~1948 年瑞典的“信之翁”号热带大洋调查已使用真空式取样管，可取到深 20 米的沉积柱样。1950 年阿克斯设计出电磁海流计，航行中便可以测海流。1956 年制成地质剖面仪，能显示沿航线的海底沉积层的垂直结构。

到 20 世纪中叶，大洋调查的大的空白已经填补，积累了大量的、全面的、综合性资料，海洋科学的各学科，已经形成独立体系，并已认识到只有把各门学科结

合起来，才能研究各海洋现象之间的和全球范围的海洋问题的本质和规律。

近几十年来，海洋调查转向对海洋进行系统的、大面积调查和多艘船重复对特定海区进行系统的同步式或准同步式的调查考察，20世纪60年代发展成大规模的国际合作调查，标志着海洋科学技术进入了新的发展阶段。如1959~1965年的国际印度洋考察计划(IIOE)，1965~1968年的国际黑潮联合调查(CSKC)，1968~1975年的加勒比海及邻近海区联合调查，1963~1964年的热带大西洋联合调查和1971~1980年的国际海洋考察十年来，在考察技术方面有了很大提高，调查方法发生了根本性的变革，如美、苏、法、英、日等已开始使用观测浮标、飞机和卫星，同时建立了调查潜艇和海底实验室

20世纪70年代，海洋调查的显著特点是：(1)开始形成全球海洋的立体调查体系，如1974年6月至9月全球研究计划在大西洋热带海区，用40艘调查船和13架飞机及浮标、卫星进行现场立体探测；(2)建造各种专业性的调查船；(3)建立区域性的海洋浮标观测网；(4)卫星和遥感技术的应用是海洋科学高水平发展的重要标志。1960年，美国发射了第一颗气象卫星“泰勒斯”，此后卫星越来越多，它们都兼测海洋研究项目。美国1978年发射了第一颗海洋卫星A。目前航天海洋遥感项目主要包括：水温、海冰分布、海流边界、海洋峰、波高、内波、中尺度涡流、平均海平面、海面风向、风速、上升流、海水透明度、盐度和海洋污染等项目。卫星还可作海洋浮标传输信息的中继站，以及用于导航定位技术等。

(二)海洋调查的类型基本上有三类。一是基础调查，一般用于未调查过的新海区，且是综合考察，采用大面积普查、断面调查和定点、连续观测相结合的方法；二是应用调查，是针对具体任务如海底电缆线路而进行的专题考察；三是科研调查。调查船仍是海洋考察的主要工具，它取得的资料占一半以上。全世界大约有1千多艘调查船，其中美、俄各有300艘以上。调查船是高科技产品，有完备的试验室，优良的航行性能和稳定性，有精密的定位和探测、通讯设备，较远的续航能力等。

1. 观测浮标是海洋调查的另一类重要工具；浮标体上装备各种仪器，可长期、连续、定点观测，进行自记或遥感测量，具有全天候观测能力。全球浮标网分七个海区和六个近岸带，共设540个站，其中有260个深海站。浮标有锚定、漂流、潜水浮标三种。

2. 飞机和卫星视野广阔、速度快，有着调查船不可超过的优点。一架2000米高度的飞机，可获得1200海里范围的波浪资料，相当于120艘船8小时的工作量。卫星的覆盖范围达整个地球的1/3，超过2千艘船的工作范围，是空间研究海洋的主要手段，它能展现整体和宏观特征。各种气象卫星、资源和载人科学卫星都进行海洋观

侧，到 1978 年共发射 50 颗，包括观测海洋的有 38 颗，包括轨道卫星 22、静止卫星 4、载人卫星 8 等。卫星上都安装微波、可见光和红外遥感仪器

3. 深潜器（潜艇）调查具有可直接观察和现场研究的特点，还可从事海底工程勘查，石油开采作业、海底电缆、管道敷设等作业。水下居住实验室主要应解决人存水下所受的高压问题。目前常用饱和潜水技术，即让潜水员呼吸相应海深的高压、氧-氦或氧氦氮混合气体，使其身上的细胞对惰性气体的吸收达到饱和状态，以适应水下的高压。水下居住实验室为人在海底活动提供了基地。在军事方面有着特殊作用，如建立水下军事基地、反潜监视站、水下补给、运输、通讯等实验室由补给系统、安全救生系统和压载平衡系统构成至 20 世纪 80 年代，全球约有 50 多个水下居住实验室，它的前景广阔

现代海洋现测仪器都利用最新的科学技术，如电子遥感、雷达、声控、激光、红外线、微波遥感和计算机技术，生产各种取样工具和海洋现代仪器、地质和生物、气象仪器、遥感仪器等，基本上实现了走航、自记、遥测的自动化，并向 6000 米以下的深海和远洋发展

三、海洋是科学实验的广阔领域

人类最早是在海岸线接触海洋的，为的是寻找食品。起初是利用海洋运输，目的是贸易和战争。人类对海洋的认识大致可分为三个阶段：第一阶段以地理探险和发现为主，了解海洋的大小、地理位置和海陆分布，积累了对海洋的感性认识；第二阶段是主动认识和研究海洋，其标志是 19 世纪 70 年代兴起的以“挑战者”号为代表的综合海洋考察活动，以及对海洋现象的理论研究，逐渐形成了海洋学；第三阶段是近 40 年来海洋科学高速发展时期

海洋学是研究海洋现象和过程的发生、发展和演变规律的科学。根据研究对象的不同可分为海洋物理学、海洋化学、海洋地质学和海洋生物学四门基本学科。由于海洋的一体性，决定了海洋是一门综合性学科；由于海洋和陆地都是地球环境的组成部分，故它又从描述性学科发展为开发利用海洋的理工结合的技术性学科。海洋学研究水平及其技术水平，已成为衡量个国家科学技术水平的标志之一

人类认识海洋的第一阶段，经历了从 15 世纪到 18 世纪的漫长岁月，其中以哥伦布发现美洲和麦哲伦环球航行最为突出。此后的大洋探险并未停歇，如 1768 年—1779 年英国人库克率领的 3 次航行；1823~1826 年伦茨参与的俄国“企业”号航行；1831~1836 年达尔文随“贝格尔”号的南半球航行；1839~1843

的环南极洲航行等他们都对海洋进行了初步考察，到 19 世纪中叶，世界大洋的地理形态轮廓以大致清楚这一时期有许多航海技术成就，如 1600 年杰波特发明磁倾针可测船只所在纬度，1759 年哈里森的航海天文钟可测定船只所在经度等

19 世纪 70 年代开始，是人类认识海洋的第二阶段在理论方面，以海流研究成果最为突出。1822 年，纳维得出流体分子的粘性公式后，一个用于旋转粘性流体的运动方程建立起来了。但风生海流的分子过程在风与海水、以及在海洋内部动量传输中的作用，主要是通过湍流过程实现的，为此人们花费了大半个世纪的认识过程。1894 年，雷诺建立了湍流的运动方程。1896 年，波辛纳斯得出了风对海面切应力的公式，1905 年，艾克曼提出了著名的漂流理论，建立了在均匀无限深广海洋中，正常均匀风场下的海流模式从理论上解释了风生海流的流向及体积运输、实际上与风向并不一致的原因，风海流只限于大洋上层，风产生表层海水的辐散、辐聚和上升流等现象艾克曼的漂流理论，为海洋风生环流理论奠定了基础。1908 年，艾克曼又完成了海水的压缩系数与温度、盐度和压力关系的研究。

20 世纪初在海流理论上的另一成就，是海流与海洋中质量场和压力场关系的建立。1903 年，桑德斯脱朗和海伦一汉生建立了可以通过两个测站的密及分布，计算与断面垂直的流速公式，这是海流的动力计算方法，至今仍是计算深海流的重要方法。

20 世纪 20 年代，海洋科学中以大洋水团结构及深层环流的研究成果最为重要。由于水团结构形成的基本原因是大洋环流，故深层海水是互相交流的。研究方法是作盐温要素的断面图。1916 年海伦一汉生又用作 T-S 图的方法，即用位温分布来研究大洋深层水团的运动在海洋表层以下，由于混合作用较弱，具有一定保守浓度极值的水团，在传播过程中，总长期保持这种特征。在混合过程可以忽略的深层，下沉水团应沿等熵面散布，或大致沿等位面运动。1938 年，蒙哥马利首先使用等位密面上的保守浓度分布来研究大洋水团的传播问题，后来又用等 δt (标准密度) 面代替等位密面。

二次大战中，一些与战争有关的海洋学技术得到迅速发展，尤以海洋声学和水深技术最快。与此相联系的海水温盐分布调查被格外重视。1939 年，史匹尔哈斯发明的温度—深度仪 (BT) 能连续记录海洋上层几百米内的温度垂直分布。到大战结束时，已有 BT 几千架。此外，海浪和涌的预测方法、无线电导航技术在战时也有了新的发展。1942 年，斯费尔德鲁普等发表巨著《海洋》，对几十年来的海洋学发展作一全面系统的总结。

二次大战后在海洋物理方面，尤以风生大洋环流的研究最为活跃。1946 年，世托克曼提出了全流方法，即用深度积分求单位时间内通过单位截面上的体积运输；

1947年，斯费尔德鲁普发展了艾克曼的漂流理论；1950年，蒙克在考查侧向混合效应的前提下，研究了大洋大面积的风生环流的粘性理论。

1946年，美、苏分别发现水下声道（声速在海水中随深度增加而减小，但到某一深度后由于压力增加，声速迅速增加的水层），进入声道的声波可传送到数千海里之遥。1952年，发现太平洋赤道潜流，后来命名为克伦威尔海流，总长度达8千海里，宽120~250海里之间，深度不大，流速2.5~3节（1节=1海里/时）。1957~1959年国际地球物理年的海洋调查，标注了各大洋中的规模海底山脉是相互连接的统一系统——洋中脊系统。20世纪50年代，波谱理论用于海浪研究，并用电子计算机分析预报海洋潮汐，汉生提出了潮波的数值计算方法。

近40年来，海洋学的发展进入了新的阶段（第三阶段）新仪器、新方法、新理论不断出现，海洋科学技术的面貌日新月异。地球大气能量的一半直接来自海洋，水汽更是直接来自海洋，故海洋对大气行为有着举足轻重的影响。海洋是地球气候最重要的调节器，它既能使气候正常，又能使气候反常，造成严重灾害。如近代由于工业化程度的极大提高，大气中的CO₂浓度不断升高，严重影响地球气候的长期变化。据计算，海洋可吸收掉40%的CO₂，起到缓和和调节的作用。但海气系统的CO₂循环有什么规律，是迫切需要研究的课题；长期以来，海洋被当作垃圾箱和污物桶，造成海洋环境的严重污染，这是对人类生存的严重威胁。因此，种种原因推动着人们去研究、去调查、去开发海洋。

海洋科学发展的新阶段的第一个标志，是各国政府向海洋科学的投资大幅度增加。第二个标志是计算机技术进入海洋科学领域，使资料处理、储存、数值模拟等大大加快了速度。以前不敢问津的研究课题，诸如世界大洋的潮波系统，整个大洋乃至全球海—气耦合系统的数值模拟等成为可能，人类认识海洋的能力空前提高。

微电子技术、声学 and 光学技术以及与此相关的遥感技术的应用，已使海洋仪器更加精确、灵敏、长期和高效。如20世纪60年代使用的相当精密的温、盐、深度记录仪 STD，发展成 CTD 和自动降落式温盐微结构仪，使深度分辨率分别达到1米和几厘米量级。现用声学方法可测每秒毫米量级的弱流和测量湍流的微结构。又如锚定浮标已是多参数、长期连续观测设备，它的传感器，可上测近海面大气的风速、风向、气温、温度、气压等气象要素，下可测各层海水的物理、化学要素，有的可自动升降作海洋剖面观测。70年代后，由于采用低功耗的微处理机等设备，使海洋浮标可连续作业几年，低代价地获取长期资料，使研究海洋的低频和超低频过程成为可能。

在海洋地质勘探技术方面，继1956年的地层剖面仪后，又使用了旁视声纳，向两侧发射声脉冲，可测绘航线两侧的海底地貌，甚至能分辨海底砂堤，岩石露头、

锰结核矿体等 1968年投入使用的“格格玛·挑战者”号钻探船，钻探深度达8000米左右，可穿透沿积层到达基岩，它的重返井口装置可准确地找到原来的井口面继续工作

至20世纪80年代，海洋学研究方面的成果主要有：

1. 由于对世界洋中脊系统的全面考察，特别是海洋古地磁的研究和其他地球物理的成果，使大陆漂移说获得了新的证据 60年代初提出的海底扩张说，由于“格格玛·挑战者”号15年的三大洋考察，取得上千次的深钻资料，为板块构造学说奠定了基础。这使地壳的构造运动和基本特征得到了有力的说明，更好地解释了海洋的形成和演变过程，把海底形态统一了起来

2. 海洋深潜器（深水潜艇）在深海底的地质和生物调查中发挥了作用。它的调查考察成果不仅获得了海底扩张的新证据，在太平洋调查中还发现了多处洋底热泉，热泉中心温度高达 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，发现热泉周围居然存在旺盛的生物群落，其中有长达4米的巨型管虫这里没有阳光，且地壳裂缝中冒出了高温地幔物质，使海水充满有毒的硫化氢据研究，这里生态系统的能量输入靠细菌而不是太阳，巨型管虫靠硫化细菌分解硫化氢释放的能量，把 CO_2 和水结合成碳水化合物来营养。在热泉周围还发现许多品位很高的热液矿物，含有铜、锌、镍、钴、锡和铂族金属成分，这是继锰结核后发现的深海矿物资源据初步研究，热泉的高温来自岩石缝下岩浆房处被加热而引起的对流，加热了的海水与玄武岩发生化学作用，形成各种金属矿物，同时被热泉带出，并在海底沉淀

3. 高分辨率的温盐深测试仪，揭示了海洋热盐结构的复杂性在大洋中，从表层到深层，普遍存在着1~3米以及小于1米的热盐层细微结构，而不是平均分布。

4. 70年代的专题海洋调查发现大洋中普遍存在中尺度涡流。这是现代海洋物理学的突出成就中尺度涡最初发现在北大西洋中部弱流区的深层流中，它有很强的低频扰动，最大速度 41cm/s ，时间尺度为40尺。对它的能量来源和形成机制，尚待进一步研究。

四、海洋是21世纪人类开发海洋的重点

应该说近几十年来，海洋科学技术发展的成就是巨大的，一方面原有学科不断分化，另一方面它同其他地球学科的结合更加紧密了。海洋生物学的系统生态学的出现便是一例它把系统理论应用于海洋生态学的研究，通过建立模型，进行数值模拟，以研究各生态因子的作用和相互关系，并对系统的未来进行预测等。这样的

结合使海洋学的分支学科、边缘学科和横段学科不断涌现

但是，海洋科学的研究课题还很多，开发利用海洋的许多问题尚未解决，人类尚未真正征服海洋、掌握海洋任重而道远因此，未来是海洋科学技术大发展、大变革、大提高的年代就海洋生物学的研究课题来说，首先是海洋生物资源的保护，改变掠夺式开发对资源的破坏；第二是探索新开发的资源，把那些可被利用而尚待开发的资源开发出来。例如已知有药用价值的海洋生物种类繁多，药用成分很广，如各种有毒蛋白的多肽类、酶和激素、核酸衍生物、多糖类、芳香溴化物、脂肪酸和其他酸类等，可以制取麻醉剂、止血剂、降压、抗生物物质、抗菌甚至抗癌药物

近代工业和城市的发展，使有机、无机化合物及重金属大量排放，农药自然流夫，海底石油开发和抛、冒、漏、放射性垃圾的投放等都空前规模地污染着海洋。但污染物有的可以降解，有的不可降解。海洋污染的危害很大，它使经济鱼类的捕获量大幅下降，使海洋天然生物培养场和产卵场消失，赤潮频繁发生。如何利用海洋微生物降解污染，是很有意义的研究课题。

未来人类的活动空间将要向海洋上下发展，许多工程技术问题提到了日程上。如，舰艇、水上、水下建筑物甚至动物躯体上都可能被海洋附着生物所附着，附着物可使航灯、航标及军事设备失效，管道断塞，负荷加重，增大阻力等。据统计，每年用于消除生物附着费用高达百亿美元。因此，如何从附着生物本身的生理机制和环境要求出发，找到综合治理附着的方法，是人们面临的难题。另外如，由海洋生物密集形成的“声散射层”，对水声作业破坏性大，如何找到解决的办法？又如发光生物的开发利用具有很大的经济意义。据统计，已查明的发光海洋生物有 800 种，发光的本质是化学能发光的特殊形式，它的光场传播距离很远，不一定服从物理光场的距离平方反比衰减规律，只是传播速度较慢

近几十年来，仿生学异军突起，如哈壳式的房顶、乌贼喷水式的轮船，“苍蝇眼电子模型”加工照片可获得清晰图像，依据海豚体形、皮肤结构特点设计的潜艇、鱼雷等可减小阻力 20~50% 等。但海洋动物的许多海洋生活能力，都是人类仿生探索研究的课题

从长远看，为了人类的生存和发展，人类必须进一步开发地球，而不仅是局限于现在居住的陆地，如开发南极洲、开发沙漠、开发地下，特别是开发岛屿和广阔的海洋，充分利用其丰富的资源。未来是海洋科学技术高度发展的时代，建设海上机场、海上公园、海上居民区、海上城市和海下城市，进行海下运输等已是指日可待的了。

第十四章

发展中的激光和光电子科学技术

激光被誉为 20 世纪最伟大、最实用的发明之一它以其神奇的性能，一经发明即被迅速应用于各种行业，对许多学科的发展产生了革命性的影响它与微电子技术相结合的产物——光电技术，更为蒸蒸日上的信息产业插上了翅膀光纤、光碟现已成为信息传输和存储的主力军，一门崭新的学科——光子学和以其为基础的光子集成技术，将继电子集成技术之后，成为 21 世纪信息高技术的关键支柱，集成“光”路将像 20 世纪的集成那样大显神通。

第一节 方兴未艾的激光技术

一、激光技术的产生和发展

激光即受激辐射放大光波。普通光源的发光是自发辐射，即处在高能态的微观粒子（一般是原子）自发地跃迁到低能态并发射出个光子，而受激辐射是处于高能态的粒子因受到一个外来光子（其能量恰等于粒子两个能态之间的能量差）的作用（称激发）跃迁到低能态，同时发射出一个与外来光子具有相同的频率（及能量）位相、偏振和传播方向的光子受激辐射的概念最早是1916年爱因斯坦在《关于辐射的量子理论》文中提出来的如果处于高能态的粒子数大于处于低能态的粒子数（称粒子数反转），这个过程就可以像滚雪球一样继续下去，即同样的光子一变二、二变四、四变八……于是就实现了光波放大但在通常情况下，总是低能态的粒子数大于高能态的粒子数，所以当时未能引起人们的重视

第二次世界大战中由于军用雷达的研究，大大促进了微波技术和微波波谱学的发展。战后在量子力学、电子学等学科发展的基础上，出现了量子电子学，它主要研究电磁辐射与各种微观粒子系统的相互作用。1951年美国物理学家珀塞尔等人在做核感应实验时有意识地让磁场突然反向，造成了粒子数反转，观察到了50000Hz的受激辐射信号。同年，一些科学家在美国华盛顿聚会讨论了此方面的问题。又经过几年的努力，1954年美国物理学家汤斯和前苏联列别捷夫物理研究所的巴索夫、普罗霍洛夫各自独立地发明了世界上最早的微波激射器，随后人们又研制成功多种微波激射器并加以实际应用

1960年美国青年科学家梅曼在肖洛、汤斯等人的启发下，创造性地使用强脉冲氙灯作光激励源，用红宝石晶体作工作物质，制成了世界上第一台激光器，获得了波长为694.3nm的红色脉冲激光。随后各类激光器如雨后春笋相继诞生。1961年美国贝尔实验室的贾万等研制成功连续发光的气体激光器——氦氖激光器，1962年有三组科学家几乎同时发明了半导体激光器，1964年高效率的CO₂激光器和掺铒钇铝石榴石激光器研制成功，1966年研制成功波长连续可调的有机染料激光器，1977年研制成功自由电子激光器

经过数年的发展，目前研制成功的激光器已有上千种，输出频谱范围从红外到X射线输出功率小到微瓦级，大至 10^{14} 瓦以上（脉冲式），脉冲时间最短达到几个飞秒（ 10^{-15} 秒）

二、激光——魔光

激光因其独特的发光机制和激光器的设计，性质与普通光波有很大差别、首先，激光的方向性好，发散角极小，因而能量集中，亮度高，经聚焦后能量更加集中。脉冲激光因脉冲时间可以很短，所以功率极大，因此可使被照处产生高达几千万度的高温，被用于受控热核反应及激光武器的研究当中在工业上激光被用于在极硬的材料（如手表中的“钻石”）制作的轴承、生产化学纤维的喷头上打出精度极高的小孔，切割硬而脆的材料，焊接金属和非金属，表面淬火处理等用激光进行光刻的刻痕可细达零点几个微米，使得制造超大规模集成电路成为现实用激光冷却和俘获原子的方法曾获得1997年诺贝尔物理学奖

在医疗方面，细小的激光束被作为手术刀用于各种手术，如精细的眼科手术（“焊接”脱落的视网膜 治疗青光眼、虹膜粘连等）肝脏手术、脑外科、口腔科、皮肤科手术及美容等激光束不仅可以切割各种组织，而且手术过程中因激光的高热可起到止血和杀菌作用利用激光的多种生物效应，还制成了多种激光治疗仪（如激光针灸仪等），可起到消炎、改善血液循环、促进伤口愈合等作用。

在军事上，激光雷达不仅可以确定目标的距离、方位、运动速度等，还可以自动跟踪，引导激光制导炸弹将目标摧毁装在飞机上的激光雷达还能使低空飞行的飞机及时回避前面的障碍物。而利用激光能量集中的特性制成的激光武器，有的可使敌人致盲或烧伤，破坏敌方的夜视仪器与摄影装置，有的可击毁敌人的坦克和装甲车辆，而最受关注的激光太空武器，可在大气层外击毁敌人的导弹和卫星

另外，激光的单色性好（各光子的频率相同少，相干性也好（光子的位相也相同），因此激光的应用使检测技术上升到一个新的水平，并实现了许多原来无法进行的检验和测量。如激光可用来精确测定距离、角度、速度、角速度，并能定位、测震动、测形变、测材料内部的应力分布、测产品表面和内部的缺陷、测建筑和坑道的垂直度和水平度等。据计算，用单色性极好的激光测量38万公里（相当于绕地球9圈半）的距离，误差还不到1厘米

激光的高相干性还产生了光全息技术。全息照相记录下的不仅有物体反射光的强度，还有反射光的位相信息，因此可以再现物体的立体形象和运动形象。激光彩虹

全息已广泛用于产品的防伪标记、装饰物品的制科、全息立体电影、电视的研究也已取得了很大的进展。全息术也开辟了利用光学方法存储信息的新领域，其信息存储在立体的介质中，据估算，1cm的介质可存储 10^{12} 位信息，相当于1000部10万字的书籍。

在化学上，利用激光可以“催化”一些通常不易发生的化学反应；激光光谱分析可简便快速地确定物质的化学成分；激光分离同位素比传统的扩散法节省投资近30%且分离系数高。

在生物学方面，激光已成为生命过程研究和遗传工程的有力工具。如利用激光光谱的高分辨率技术研究生物体中大量快速变化的复杂过程，用紫外激光束对人类染色体进行切割等。激光育种已培育出包括粮食作物、油料作物、蔬菜、水果、棉花家蚕在内的一大批优良品种，对家禽、家畜、鱼类品种发微生物菌株的改良也发挥了十分有效的作用。

激光通信是通信技术的一次革命。光纤通信已成为通信的主力军（详见下节）。在太空中利用激光代替微波进行卫星通信也已成为可能，由于激光的波长短、方向性强，发射天线的直径只需要几十厘米。而微波通信卫星的多个庞大天线，每个的直径在十几米至几十米，重量达几十吨至上百吨，因此发射的难度很大。而且，对于同样的发射功率，激光通信天线接收到的能量比微波天线要大100万倍。

第二节 大有前途的光电子技术

激光器问世后，一门新的学科——光子学也应运而生。它是关于光子及其应用的科学，研究作为能量和信息载体的光子的产生、吸收、运动以及光子与其它物质的相互作用等规律。它可能会继电子时代之后，为我们开拓一个新的光子时代。光子学（目前主要指激光）的应用除了上面已提到的军事、医疗、工业生产等方面外，最主要的应用还是在信息领域，包括通信、信息处理、信息存储、图文显示等信息技术，因为必须与电子技术相辅相成，所以合称光电子技术。

一、光纤通信与激光存储

光纤通信是光子技术诞生后对社会影响最大的一项成就，已成为通信领域的主力军。激光问世后，人们就想到用光作为信息传输的手段，经过不懈的努力，1970

年美国康宁公司研究成功可供应用的光导纤维，使激光通信得以实现光导纤维是一根头发丝粗细、由玻璃拉制成的细丝，外包一层折射率较低的材料，利用激光在光纤中的全反射传向远方一般将几十或更多条光纤束在一起作成光缆与传统的通讯相比，光纤通信有很多优点首先是信道容量大，日前所用的红外激光频率高达 10^{14} Hz，比无线电波高几十亿倍，比微波高上万倍，理论上可同时传输 100 亿路电话或 1000 万套电视节目，是微波通信的 1000 倍，利用多种波长的复用等手段还可进一步提高容量。二是抗干扰能力强，因光子不带电荷、不受电场和磁场影响，所以连雷电对它也无多大影响三是成本低，制作光纤的材料主要是取自砂石的硅，资源丰富，可节省下大量的铜、铝等有色金属。四是轻便，包含近百根光纤的光缆直径只有 1 厘米左右；

光电子技术在信息域的另一重大成就是激光存储。目前已在很多场合（多媒体计算机、CD、VCD、DVD 等）代替了磁盘和磁带的激光具有存储密度高、容量大、寿命长（一般 10 年以上，远超过磁存储的 3~5 年）、音质好、图像清晰度高且经多次读写不降低（因系非接触式读/写和擦）、存取时间快（20~100ms 之间）信息位的价格低等优点，因此在个人和小型计算机上已成为主要的存储手段据估计，全球 2000 年光盘技术产值高达 490 亿美元。

二、光电集成技术的发展

在信息处理方面，以半导体光子学为基础的光子集成技术已经悄然兴起。半导体光子学是用半导体材料制造激光器、光探测器和各种有源、无源光子器件，并进步实现光子集成——把众多不同功能的光子器件优化集成在一个芯片上。在目前使用的集成电路中，对信息传输与处理的速度受到回路分布延迟效应的限制，因而有一个极限，而光子的运动不会受到回路分布延迟的影响，所以可以大大提高信息系统的传输与处理速度，单机运算速度有可能较目前提高三个数量级，达到每秒 1000 亿次以上。在电子技术中两根导线交叉时必须互相隔开，这也是限制信息速率与容量的主要因素之一，而光波遵从独立传播原理，因此可实现高密度三维交叉互连。另外，在电子技术中，信息只能串行提取、传输和处理，如对二维的图像信号只能采取扫描一类的手段变成一维串行信号来处理，而人和动物的大脑一般是用并行方式处理信息的。激光良好的相干性会大大促进计算机实时并行处理技术的发展，这不仅可以进一步提高计算机的速度和容量，并且对于正在发展中的第六代计算机、人工智能的硬件基础——神经网络计算机有重大意义。神经网络计算机模拟人的大脑的工作原理，需要超大规模

模的群并行性处理和极高密度的交叉互连，在电子技术上难度极大，恐怕只能靠“光子”了。

把光子集成与电子集成结合起来的光电子集成的研究是从20世纪80年代初开始的。80年代后期 Honeywell 公司研制成功200个逻辑门与4个半导体激光器的多路复用集成芯片，90年代初 IBM 公司制成8000个逻辑门与4个光子探测器所组成的光电子集成芯片。随着技术的进一步发展，在 1cm^2 的芯片上制作100万个微激光器是完全可能的。已经面世的二维面发射激光二极管阵列，其单个激光器的直径只有几微米大，故称微激光器光电集成具有广阔的应用前景，在光通信、图像信息处理、模式识别和神经网络计算机激光打印、光存储、光显示等方面将会起到从根本上改变面貌的重大作用。

光电子学的其他应用还有薄膜发光技术，无灯丝的大面积薄膜作为高效、节能、可调色度的冷光源将代替目前的灯泡、灯管，引发照明技术的革命。在深入到分子层次的基因研究中，光子不仅是传递分子内部信息的使者，还将是对基因施加无损人工改性的重要手段。

第十五章

实施可持续发展战略， 迎接新技术革命的挑战

综上所述，从上个世纪特别是二次大战以后，涌现出一系列高新技术，形成了汹涌澎湃的新技术革命浪潮它是继 18 世纪下半叶至 19 世纪中叶的第一次技术革命（蒸汽革命）和 19 世纪 70 年代开始的第二次技术革命（电气革命）之后的第三次技术革命这次新技术革命浪潮不光是在技术领域，而且在生产、经济、政治、文化等领域都产生了巨大的影响，极大地推动了社会的发展和进步。但与此同时，一些过去不太明显的问题，如资源短缺、环境污染、生态失衡等也逐步凸现出来，引起了世人的重视和忧虑经过长期探索和深刻反思，在付出了巨大的代价之后，终于产生了今天的共识——必须实施可持续发展战略

第一节 方兴未艾的新技术革命

一、新技术革命的由来

新技术革命兴起于二次世界大战后的 20 世纪 40 到 50 年代，当时有代表性的新技术是半导体技术。电子计算机的发明、原子能技术和人造卫星的发射。到了 60 年代末 70 年代初，这些新技术逐渐成熟并获得广泛应用，而且出现了一系列新兴科学技术，如以微电子技术、计算机技术和现代通信技术为主要内容的信息技术（IT）、激光和光电子科学技术、新能源和新材料技术、生物工程技术、空间和海洋科学技术、环境科学技术等，形成了一个范围广泛的新兴科学技术群，汇成席卷全球的新技术革命的浪潮，对人类社会产生了前所未有的影响。

新技术革命的爆发首先缘于现代自然科学的发展。例如根据量子力学原理建立起来的固体能带理论，为半导体技术（包括晶体管和集成电路）、进而为电子计算机的研制奠定了理论基础，而原子能技术的基础显然是原子核裂变的发现和狭义相对论中的质能关系。当然，新技术革命也极大地推动了现代自然科学的发展。二者互相促进，才带来当今科学技术的空前繁荣。

新技术革命的到来，也是资本主义工业化危机的结果。经过前两次技术革命以后，资本主义工业取得了迅猛发展，资本家为了追求高额利润，毫无顾忌地滥用廉价获得的原料和石油、煤等化石能源。正如日本的星野芳郎所说：“我们什么都让机器去做，于是能源和资源的消耗就每十年翻一番，从而形成了人类以几何级数的速率去消耗自然资源的局面。”到了上世纪中期以后，这样做的恶果逐渐显现出来。

一方面是不可再生资源 and 能源越来越接近枯竭，价格上涨，如 1973 年的“石油危机”就造成美国 500 万辆汽车停驶、欧洲众多能源消耗大户关闭，出现了 1974 ~ 1976 年席卷资本主义世界的经济危机。另一方面是使人类生活的环境受到严重污染，生态平衡被破坏，激起人民的强烈反对。这两个方面就像两股汹涌澎湃的洪水，冲击着西方的工业文明，迫使西方国家不得不寻找新的能源、资源和生产方式。于是，新技术革命就首先在美国、接着在各工业化强国爆发了，而后又发展到世界上其他国家。

二、新技术革命的特点

这场技术革命的规模之大、范围之广、发展速度之快、受重视程度之深，都是前两次技术革命所无法比拟的。首先，它不是一两种新技术发明，而是一组新技术群。这些新技术互为犄角，互相依托，互相促进，共同发展，因此可以说，这场革命是人类知识的大检阅、大综合、大应用、大发展。其中作为核心的技术是信息技术，它的迅速发展使当今社会步入“信息时代”，使信息成为除原料、能源之外的又一种重要资源，对其掌握的程度往往成为成功与否的关键。

其次，这场革命带来的是人类智力的大解放，而不像前两次技术革命主要解放的是人的体力。在新技术基础上产生的新兴产业，都是知识和技术密集型产业，这样就使得科学技术或曰智力因素在生产中的作用空前增强，靠充分利用智力资源（而不是主要靠矿产资源和能源）来赢得竞争的胜利。这样，也使劳动者由过去以体力型为主向知识型和技术型过渡（据统计，早在1956年美国的所谓“白领工人”的总数就已超过“蓝领工人”）。所以说新技术革命归根结底是智力的革命，人才和智力就是新的战略资源。

另外，这场革命受到了各国政府的普遍重视，而不像前两次技术革命，主要是个人和企业的行为。各国政府纷纷提出“科技立国”的口号，增加科技投资，大力发展教育，提高科技、工程人员的社会地位，开辟如美国的“硅谷”、日本的“筑波”那样的高新技术园区。我国政府对这场技术革命也十分重视，早在1978年就制定了五年、八年、二十三年的科学技术发展规划，明确提出“科学技术是第一生产力”，把科学技术现代化作为基本国策，提到了四个现代化建设的关键地位。

三、新技术革命对社会的巨大影响

这场新技术革命正在迅速地改变着人类生产、生活的方方面面，正像一位法国社会学家所说：“今天的社会在三年内所发生的变化，相当于本世纪（指20世纪——编者）初30年内的变化、牛顿以前时代的300年的变化、石器时代的3000年的变化”。具体地讲，它对社会主要有以下影响：

（一）极大地提高劳动生产率，带来产业结构、生产方式的改变

新技术的广泛应用大大提高了劳动生产率。如英国的一家保险公司采用全国性的

电子终端网络后，提高工作效率一万倍，而费用节省42%。德国的印刷业使用计算机和激光排版后，削减印刷工人21.3%，而劳动生产率提高43.5%。新技术也改变了传统的生产方式。由于采用了计算机设计和制图、数控机床等技术，加上信息传递的快捷，生产程序更加灵活，就可以由过去的生产者生产出产品拿到市场上去卖，变成生产者按照用户的订单和要求（甚至是用户的设计）来生产，变大批量少品种为小批量多品种，有的品种可能只生产几件甚至一两件（如科研仪器）。过去以手工生产为主的服装工业，也能用先进的录相设备和激光工具来量体裁衣，用微处理机控制缝纫机实现单件生产，不仅提高了劳动生产率，也满足了人们的不同需求。

这场技术革命也是一场产业革命，引起了社会产业结构的大调整。资本主义传统的“大烟囱”工业（如钢铁机械制造等）开始萎缩和衰落，代之而起的是信息产业等高新技术密集型产业。如美国的机械加工业在1920年占整个工业的53%，1976年降为29%，上世纪末约为22%。1982年美国钢铁工业开工率只有42%，因此西方些人惊呼传统工业已成“夕阳工业”。而美国的电子工业每年增长10%~20%，1981年产值已达1138亿美元，企业6000家，雇员157万，1990年产值更超过6000亿美元。

因为一片极小的微电子芯片就可以取代成百个机械或电气零件，所以制造厂商对劳动力的需求急剧下降，造成传统工业的大幅度减员。反过来，信息产业等高新技术产业的就业人数大大增加。二者相抵后，净就业人数仍然大为减少，造成所谓的“结构性失业”，将来直接从事商品生产的人可能只占到就业者的1%~2%，大量的人要转入第三产业和从事教育、科研、文化等精神产品的生产活动。

由于计算机网络把千家万户和公司连接起来，所以很多职工可以在家里上班，甚至发展到以“电子家庭”为单位的生产方式。这样可以减少交通拥挤和交通工具的能源消耗，减少浪费在上班路途上的时间和租用办公室的租金，从而降低生产成本，提高劳动效率。而现在在欧美出现的灵活工时制，可能就是这种生产方式的前奏。

（二）带来思想领域的深刻变革，促进教育、文化的发展

在新技术革命的大潮中人的思想观念也不可避免地受到冲击。由于新技术革命的产物系统理论（即上章讲的横断科学）的发展，“系统”的概念更加深入人心，使人们考虑问题更全面、更注意事物间的有机联系。电脑特别是人工智能的出现，理所当然地引起人们关于“电脑（或机器人）会不会比人更聪明”和“将来人类会不会受制于机器人”的忧虑。遗传基因的发展和克隆技术引起了对“克隆人是否合乎伦理”、“转基因食品对人是否安全”等一系列问题的争论。治而不止

的环境污染和生态失衡又使人重提关于热力学第二定律实质的争论：这种趋势是大自然规律所决定的还是可以逆转。宇宙学和分子生物学的新发现，迫使人们重新审视宇宙起源、生命起源和达尔文的进化论等理论……这些新的课题无疑将在人类思想领域引起巨大的震动和变革，它们的解决将是对辩证唯物主义进一步的丰富和发展。

由于新技术革命需要高素质的人才，所以它极大地推动了教育的发展。很多国家、企业、家庭、个人都增加了对教育的投资，使人的受教育程度空间提高。新技术革命带来了教育的几个方面的变革。首先是教育思想的变革，由于知识的更新越来越快，未来的教育将是终身教育；中等教育在一些国家已经普及，高等教育也不再是精英教育，而是大众化的教育。其次在培养人才的规格上，不光要求掌握一定的知识，更重要的是有强烈的竞争意识和学习、工作能力，成为能够接受新挑战的创新人才。第三是教学内容包括教师的知识结构需要不断地更新。第四是教学方法的改革，除了更强调个性化、启发式以外，新的教学工具和手段，如计算机辅助教学、网络远程教育等将极大地改变教育的面貌。

新技术革命对文化的影响也是不可低估的。由于只需要一小部分人进行物质产品的生产即能满足人类的需要，所以就有更多的人从事文学、美术、音乐、戏剧、电影、电视等精神和文化产品的生产，而且由于网络文学、电脑绘画等的出现，人人都可创作出自己的作品供人欣赏。由于业余时间的增多和人的生活水平的提高，人们对精神和文化生活的要求越来越高，而文化产品的制作和传播技术的提高，使制作过程大大缩短，数量大大增加。这一切决定了新技术革命时代文化的多样性、个性化、高效化和全球性。当然，在这些精神产品中不可避免地会有颓废的、低级趣味的甚至是反动的东西，需要加以正确地引导和恰当地管理。

第二节 可持续发展战略

一、可持续发展战略的由来

二战以后，随着各国经济的复苏与高速发展，人们开始深入地讨论和认识在社会发展中遇到的各种问题，即加速发展的工业化、人口剧增、粮食短缺、不可再生资源的枯竭、生物多样性的丧失和环境的日益恶化等，这些问题在二战以前已经

存在，但尚不严重。20世纪中叶，各种社会问题纷纷出现，特别是随着环境污染的日趋加重，西方国家公害事件的不断发生，环境问题频频困扰人类，已不再仅仅局限于专家学者们坐而论道的话题，引起了世人的广泛关注。

美国海洋生物学家蕾切尔·卡逊于1962年发表了环境保护科普著作《寂静的春天》，阐明了人类同大气、海洋、河流、土壤、动植物之间的密切关系，初步揭示了污染对生态系统的影响在世界范围内，引发了人类对自身的传统行为和观念进行比较系统和深入地反思。

1968年，世界各国的几十位科学家、教育家和经济学家等学者成立了一个非正式的国际协会——罗马俱乐部。1972年俱乐部成立后的第一份研究报告——《增长的极限》，深刻阐明了环境的重要性以及资源与人口之间的基本联系。该报告在促使人们密切关注人口、资源和环境问题的同时，因其反增长情绪而遭受到尖锐的批评和责难，引发了一场激烈的、旷日持久的学术之争。一般认为，尽管该报告的结论和观点存在十分明显的缺陷，但是，报告所表现出的对人类前途的“严肃的忧虑”以及试图唤起人类自身的觉醒却具有积极意义，它所阐述的“合理的、持久的均衡发展”，为孕育可持续发展的思想萌芽提供了土壤。

1972年6月，在斯德哥尔摩召开了第一次联合国人类环境会议，通过了《人类环境宣言》、《人类环境行动计划》等文件，确定6月5日为“世界环境日”，并建议成立了联合国环境规划署。以此为契机，世界各国日益重视保护和改善人类生存环境，并开始对环境与发展相协调的社会模式进行探索。

1983年，联合国成立了以挪威首相布伦特兰夫人任主席的世界环境与发展委员会（WCED），负责制订长期的环境对策，研究能使国际社会更有效地解决环境问题的途径和方法。经过三年多的深入研究和充分论证，该委员会于1987年向联合国大会提交了研究报告《我们共同的未来》。该报告提出了“可持续发展”的科学观点，把人们从单纯考虑环境保护引导到把环境保护与人类的发展切实结合起来，实现了人类有关环境与发展思想的重要飞跃。

1992年6月，联合国在巴西又召开了一次有各国政府首脑参与的环境与发展大会。会议通过了《里约环境与发展宣言》（又名《地球宪章》）、《21世纪议程》、《关于森林问题的原则声明》等重要文件，签署了《气候变化框架公约》、《生物多样性公约》、《荒漠化公约》、《湿地公约》等一系列国际协议。以这次大会为标志，人类对环境与发展的认识提高到了一个崭新的阶段，可持续发展得到世界最广泛和最高级别的政治承诺。大会为人类高举可持续发展旗帜、走可持续发展之路发出了总动员，使人类迈出了跨向新的文明时代的关键性一步，为人类的

环境与发展矗立了一座重要的里程碑

二、可持续发展战略的内涵与特征

可持续发展战略作为一个全新的理论体系，正在逐步形成和完善，其内涵与特征也引起了全球范围的广泛关注和探讨各个学科从各自的角度对可持续发展进行了不同的阐述，至今尚未形成比较一致的定义和公认的理论模式。尽管如此，其基本含义和思想内涵却是相一致的

（一）可持续发展的定义

《我们共同的未来》定义可持续发展为：“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展”。即可持续发展是指满足当前需要，而又不削弱子孙后代满足其需要之能力的发展，而且绝不包含侵犯国家主权的含义。它包括了两个重要概念，一是人类要发展，要满足人类的发展需求；二是不能损害自然界支持当代人和后代的生存能力。

1991年，国际生态学联合会（INTECOL）和国际生物科学联合会（IUBS）深入探讨了可持续发展的自然属性，将可持续发展定义为“保护和加强环境系统的生产更新能力”。即可持续发展是不超越环境系统再生能力的发展。从自然属性方面定义的另一代表是从生物圈概念出发，认为可持续发展是寻求一种最佳的生态系统以支持生态的完整性和人类愿望的实现，使人类的生存环境得以持续。

1991年，由世界自然保护同盟、联合国环境规划署和世界野生生物基金会共同发表了《保护地球——可持续生存战略》。其中提出的可持续发展定义是：“在生存不超出维持生态系统涵容能力的情况下，提高人类的生活质量”。报告着重论述了可持续发展的最终目标是人类社会的进步，即改善人类生活质量，创造美好的生活环境报告认为，各国可以根据自己的国情制定各自的发展目标，真正的发展必须包括提高人类健康水平，改善人类生活质量，合理开发、利用自然资源，必须创造一个保障人们平等、自由、人权的发展环境。

经济学家把可持续发展的核心看成是经济发展，定义可持续发展为：“在保护自然资源的质量和其所提供服务的前提下，使经济发展的净利益增加到最大限度。”或“为全世界而不是为少数人的特权所提供公平机会的经济增长，不进一步消耗自然资源的绝对量和涵容能力”。当然，这里的经济发展已不是传统意义上的以牺牲资源和环境为代价的经济发展，而是不降低环境质量和不破坏世界自然资源基础的经

济发展。

有的学者更着重于可持续发展的科技属性，认为：“可持续发展就是转向更清洁、更有效的技术，尽可能接近‘零排放’或‘密闭式’的工艺方法，尽可能减少能源和其它自然资源的消耗”还有的学者提出：“可持续发展就是建立极少产生废料和污染物的工艺或技术系统”他们认为污染并不是工业活动不可避免的结果，而是技术水平差、效率低的表现，主张发达国家与发展中国家之间进行技术合作，缩短技术差距，提高发展中国家的经济生产能力

（二）可持续发展战略的基本思想

可持续发展是一个涉及经济、社会、文化、技术及自然环境的综合概念，是一种立足于环境和自然资源角度提出的关于人类长期发展的战略和模式。这并不是—般意义上所指的在时间和空间上的连续，而是特别强调环境承载能力和资源的永续利用对发展进程的重要性和必要性它的基本思想主要包括三个方面：

1 可持续发展鼓励经济增长

它强调经济增长的必要性，必须通过经济增长提高当代人福利水平，增强国家实力和社会财富但可持续发展不仅要重视经济增长的数量，更要追求经济增长的质量。这就是说经济发展包括数量增长和质量提高两部分数量的增长是有限的，而依靠科学技术进步，提高经济活动中的效益和质量，采取科学的经济增长方式才是可持续的因此，可持续发展要求重新审视如何实现经济增长。

要达到具有可持续意义的经济增长，必须审计使用能源和原料的方式，改变传统的以“高投入、高消耗、高污染”为特征的生产模式和消费模式，实施清洁生产和文明消费，从而减少每单位经济活动造成的环境压力。环境退化的原因产生于经济活动，其解决的办法也必须依靠于经济过程

2. 可持续发展的标志是资源的永续利用和良好的生态环境

经济和社会发展不能超越资源和环境的承载能力。可持续发展以自然资源为基础，同生态环境相协调。它要求在严格控制人口增长、提高人口素质和保护环境、资源永续利用的条件下，进行经济建设，保证以可持续的方式使用自然资源和环境成本，使人类的发展控制在地球的承载力之内。可持续发展强调发展是有限制条件的，没有限制就没有可持续发展要实现可持续发展，必须使自然资源的耗竭速率低于资源的再生速率，必须通过转变发展模式，从根本上解决环境问题。如果经济决策中能够将环境影响全面系统地考虑进去，这一目的是能够达到的。但如果处理不当，环境退化和资源破坏的成本就非常巨大，甚至会抵消经济增长的成果而适得

其反

3 可持续发展的目标是谋求社会的全面进步

发展不仅仅是经济问题，单纯追求产值的经济增长不能体现发展的内涵可持续发展的观念认为，世界各国的发展阶段和发展目标可以不同，但发展的本质应当包括改善人类生活质量，提高人类健康水平，创造一个保障人们平等、自由、教育和免受暴力的社会环境。这就是说，在人类可持续发展系统中，经济发展是基础，自然生态保护是条件，社会进步才是目的而这三者又是一个相互影响的综合体，只要社会在每一个时间段内都能保持与经济、资源和环境的协调，这个社会就符合可持续发展的要求显然，在新的世纪里，人类共同追求的目标，是以人为本的自然——经济——社会复合系统的持续、稳定、健康的发展。

（三）可持续发展的基本原则

可持续发展作为全人类共同追求的目标，具有十分丰富的内涵，体现了人与自然的协调、统一。就其社会观而言，主张公平分配，既满足当代人又满足后代人的基本需求；就其经济观而言，主张建立在保护地球自然系统基础上的持续经济发展；就其自然观而言，主张人类与自然和谐相处。从中所体现的基本原则有：

1. 公平性原则

所谓公平是指机会选择的平等性。可持续发展的公平性原则包括三个方面：一是本代人的公平即代内之间的横向公平，当今世界一部分人富足，而另一部分处于贫困状态，这种贫富悬殊、两极分化的情况不可能实现可持续发展，因此，要给世界以公平的分配和公平的发展权，将消除贫困作为可持续发展进程中特别优先的问题来对待；二是代际间的公平即世代的纵向公平，人类赖以生存的自然资源是有限的，当代人不能因为自己的发展与需求而损害后代人满足其发展需求的条件——自然资源与环境，要给后代人以公平利用自然资源的权利；三是公平分配有限的资源，发达国家在利用地球资源上有优势，取代了发展中国家利用地球资源的合理一部分来达到他们自己经济增长的机会，因此，要给世界各国以公平的发展权、公平的资源使用权，各国拥有按其本国的环境与发展政策开发本国自然资源的主权，并负有确保在其管辖范围内或在其控制下的活动不致损害其他国家或在各国管理范围以外地区的环境责任。

2. 持续性原则

持续性原则的核心是指人类的经济和社会发展不能超越资源与环境的承载能力资源与环境是可持续发展的主要限制因素，也是人类生存与发展的基础和条件，离

开了这一基础和条件，人类的生存和发展就无从谈起因此，资源的永续利用和生态环境的可持续性是可可持续发展的重要保证人类发展必须以不损害支持地球生命的大气、水、土壤、生物等自然条件为前提，必须充分考虑资源的临界性，必须适应资源与环境的承载能力

3. 共同性原则

鉴于世界各国历史、经济、文化和发展水平的差异，可持续发展的具体目标、政策和实施步骤不可能是唯一的，但是，可持续发展作为全球发展的总目标，关系到全球的发展，所体现的公平性和持续性原则却是共同的。要实现可持续发展的总目标，必须争取全球共同的配合行动因此，要实现可持续发展，人类必须共同促进自身之间、自身与自然之间的协调，这是人类共同的道义和责任

（四）可持续发展的意义

1. 使人们重新认识人类与自然的关系

21世纪，人类面临着人口、资源、环境和发展一系列重大问题可持续发展战略是在人类深刻认识环境与资源的可持续能力基础上提出的，它源于环境保护却又是人类对传统发展模式的反思可持续发展要求人类树立这样的认识：人类是自然的一部分，与自然界共同构成一个不可分割的整体，必须与自然协调才能持续生存，要改变人与自然的对立的观点，承认自然的价值和权利

2 使人类改变旧的思维方式和生产生活方式

全球环境恶化的最重要原因之一，就是人类不适当的生产和生活方式。二战以后，西方国家竞相追求经济的高速发展，通过大量消耗不可再生资源，促进经济的快速增长和维持较高消费水平的需要。工业生产虽然增长了几十倍，但却出现人口膨胀、资源短缺、环境恶化、生态破坏、贫困加剧和各国发展失衡的社会矛盾可持续发展战略从理论上结束了长期以来把发展经济和保护环境资源相对立的错误观点，呼吁人们放弃高消耗、高增长、高污染的粗放型生产方式和高消费、高浪费的生活方式，把保护环境与发展经济看作相辅相成、不可分割的两个方面，并明确提出它们是相互联系、互为因果的关系。可持续发展思想作为人类面对未来发展建立的具有划时代意义的新概念、新思想和新意识，不但设计人类未来的前途和命运，而且对人类的思维方式、生产方式、生活方式都将产生深刻的转变和影响

3. 重新建立新的人地协调发展模式

可持续发展战略将自然界普遍存在的物质不灭和能量守恒定律应用到作为有机整体的人与自然地理系统，要求人类在尽量减少资源消耗的基础上提高资源的利用率，

做到少投入多产出，促进可再生资源的生长，使系统内部在相互协调的情况下，物质能量的转化率达到最佳效果，以满足人们的需求。同时要求人们在消费时，尽可能地多利用少排放，以减少自然的负荷，使系统的结构和功能保持良好状态，成为人类与自然地理环境相互协调的可持续发展的新模式。

第三节 《21 世纪议程》

全球《21 世纪议程》

1992 年 6 月，全世界百余位国家首脑参与联合国环境与发展大会，通过了为解决人类面临的经济和生态问题所制定的一份最重要的全球性计划——《21 世纪议程》。该计划旨在强调持续高效地利用自然资源、有效地治理环境污染、重视废物利用以达到全人类生活水平的普遍提高。其最终目标就是扭转全球环境恶化的局面，促进世界各国合理地利用资源和环境，从而达到持续发展的目的。全球《21 世纪议程》虽然不具有法律的约束力，但作为贯彻实施可持续发展战略的人类活动计划，反映了环境与发展领域的全球共识和最高级别的政治承诺，提供了全球推进可持续发展的行动准则。

（一）全球《21 世纪议程》的基本思想

全球《21 世纪议程》深刻指出，人类正处于一个历史的关键时刻，世界面对国家之间和各国内部长期存在的经济悬殊现象，贫困、饥荒、疾病和文盲有增无减，赖以维持生命的地球生态系统继续恶化。如果人类不想进入这个不可持续的绝境，就必须改变现行的政策，综合处理环境与发展问题，提高所有人特别是穷人的生活水平，在全球范围更好地保护和管理生态系统。要争取一个更为安全、更为繁荣、更为平等的未来，任何一个国家不可能仅依靠自己的力量取得成功，必须联合起来，建立促进可持续发展全球伙伴关系，只有这样才能实现可持续发展的长远目标。

《21 世纪议程》的目的是为了促使全世界为下一世纪的挑战做好准备。它强调圆满实施议程是各国政府必须首先负起的责任。为了实现议程的目标，各国的战略、计划、政策和程序至关重要，国际合作需要相互支持和各国的努力。同时，要特

别注重转型经济阶段许多国家所面临的特殊情况和挑战。它还指出，议程是一个能动的方案，应该根据各国和各个地区的不同情况、能力和优先次序来实施，并视需要和情况的变化不断调整

（二）全球《21世纪议程》的主要内容

《21世纪议程》涉及人类可持续发展的所有领域，提供了21世纪如何使经济、社会与环境协调发展的行动纲领和行动蓝图。它共计40多万字，整个文件分4个部分。

第一部分，经济与社会的可持续发展。包括加速发展中国家可持续发展的国际合作和有关的国内政策、消除贫困、改变消费方式、人口动态与可持续发展、保护和促进人类健康、促进人类住区的可持续发展、将环境与发展问题纳入决策进程。

第二部分，资源保护与管理。包括保护大气层；统筹规划和管理陆地资源的方式；禁止砍伐森林、脆弱生态系统的管理和山区发展；促进可持续农业和农村的发展；生物多样性保护；对生物技术的环境无害化管理；保护海洋，包括封闭和半封闭沿海区，保护、合理利用和开发其生物资源；保护淡水资源的质量和供应——对水资源的开发、管理和利用；有毒化学品的环境无害化管理，包括防止在国际上非法贩运有毒废料、危险废料的环境无害化管理；对放射性废料实行安全和环境无害化管理。

第三部分，加强主要群体的作用。包括采取全球性行动促进妇女的发展；青年和儿童参与可持续发展、确认和加强土著人民及其社区的作用；加强非政府组织作为可持续发展合作者的作用、支持《21世纪议程》的地方当局的倡议；加强工人及工会的作用、加强工商界的作用、加强科学和技术界的作用、加强农民的作用。

第四部分，实施手段。包括财政资源及其机制；环境无害化（和安全化）技术的转让；促进教育、公众意识和培训、促进发展中国家的能力建设、国际体制安排；完善国际法律文书及其机制等。

二、《中国21世纪议程》

1992年6月联合国环境与发展大会通过了《21世纪议程》，并且号召各国根据本国的情况，制定各自的可持续发展战略、计划和对策。1992年8月，国家计委、国家科委组织国务院57个部门、300多名专家，在联合国开发计划署的支持下，着手编写《中国21世纪议程》。于1994年3月编制完成。1994年3月25日，国务

院第 16 次常务会议讨论通过了《中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》

《中国 21 世纪议程》为中国 21 世纪的发展描绘了一幅宏伟蓝图，是中国实施可持续发展战略的行动纲领，是制定国民经济和社会发展中长期计划的指导性文件，同时也是中国政府认真履行 1992 年联合国环境与发展大会的原则立场和实际行动，表明了中国在解决环境与发展问题上的决心和信心

（一）《中国 21 世纪议程》的基本思想

制定和实施《中国 21 世纪议程》，走可持续发展之路，是我国在 21 世纪发展的需要和必然选择中国是发展中国家，要提高社会生产力，增强综合国力和不断提高人民生活水平，就必须毫不动摇地把发展国民经济放在第一位，各项工作都要紧紧围绕经济建设这个中心来开展中国是在人口基数大、人均资源少、经济和科技水平都比较落后的条件下实现经济快速发展的，这使本来就已经短缺的资源和脆弱的环境面临更大的压力在这种形势下，我国政府认识到，只有遵循可持续发展的战略思想，从国家整体的高度协调和组织各部门、各地方、各社会阶层和全体人民的行动，才能顺利完成预期的经济发展目标，才能保护好自然资源和改善生态环境，实现国家长期、稳定的发展

（二）《中国 21 世纪议程》主要内容

《中国 21 世纪议程》共 20 章，78 个方案领域，主要内容分为四大部分

第一部分，可持续发展总体战略与政策论述了实施中国可持续发展战略的背景和必要性，提出了中国可持续发展战略目标、战略重点和重大行动，可持续发展的立法和实施，制订促进可持续发展的经济政策，参与国际环境与发展领域合作的意义、原则立场和主要行动领域。其中特别强调了可持续发展能力建设，包括建立健全可持续发展管理体系，建立费用与资金机制，加强教育，发展科学技术，建立可持续发展信息系统，促使妇女、青少年、少数民族、工人和科学界人士及团体参与可持续发展

第二部分，社会可持续发展包括人口、居民消费与社会服务、消除贫困、卫生与健康、人类住区可持续发展和防灾减灾等。其中最重要的是实行计划生育、控制人口数量和提高人口素质，包括引导建立适度和健康消费的生活体系；强调尽快消除贫困；提高中国人民的卫生和健康水平；通过正确引导城市化，加强城镇用地规划和管理，加快城镇基础设施建设，促进建筑业发展，向所有的人提供适当住

房，改善住区环境，完善住区功能；建立与社会主义经济发展相适应的自然灾害防治体系。

第三部分，经济可持续发展把促进经济快速增长作为消除贫困、提高人民生活水平、增强综合国力的必要条件，其中包括可持续发展的经济政策、农业与农村经济的可持续发展、工业与交通、通信业的可持续发展、可持续能源和生产消费等部分。着重强调利用市场机制和经济手段推动可持续发展，提供新的就业机会，在工业活动中积极推广清洁生产，尽快发展环保产业，提高能源效率与节能，开发利用新能源和可再生能源。

第四部分，资源的合理利用与环境保护。包括水、土等自然资源保护与可持续利用，还包括生物多样性保护、防治土地荒漠化、防灾减灾、保护大气层（如控制大气污染和防治酸雨）、固体废物无害化管理等着重强调在自然资源管理决策中推行可持续发展影响评价制度，对重点区域和流域进行综合开发整治，完善生物多样性保护法规体系，建立和扩大国家自然保护区网络，建立全国土地荒漠化的监测和信息系统，开发消耗臭氧层物质的替代产品和替代技术，大面积造林，建立有害废物处置、利用的新法规和技术标准等。

（三）《中国 21 世纪议程》的特点

《中国 21 世纪议程》具有以下几方面的独特之处：

第一方面：突出体现了新的发展观

《中国 21 世纪议程》把经济、社会、资源与环境视为密不可分的整体，不仅仅论及在发展中如何解决环境保护问题，还系统地论及经济可持续发展和社会可持续发展的相互关系问题，构筑了一个综合性的、长期的、渐进的可持续发展战略的框架，并提出了相应的对策。

《中国 21 世纪议程》的主题是发展，体现了新的发展观。中国是发展中国家，摆在第一位的任务是要把经济建设搞上去，这是历史赋予的重任。实施可持续发展战略的关键是在经济、社会发展中，实现资源持续利用和环境保护相协调。要结合中国国情，有计划、有重点、分阶段摆脱传统的发展模式，逐步由粗放型经济增长方式过渡到集约型经济增长方式。

第二方面：注重处理好人口与发展的关系

长期以来，庞大的人口基数给我国经济、社会、资源和环境带来了巨大压力。尽管我国人口的自然增长率呈下降趋势，但人口增长的绝对数仍很大，社会保障、卫生保健、教育、就业等远跟不上人口增长的需求。《中国 21 世纪议程》根据这

一严峻的现实，着重提出了要继续进行计划生育，在控制人口增长的同时，通过大力发展教育事业、健全城乡三级医疗卫生和妇幼保健系统、完善社会保障制度等措施，提高人口素质、改善人口结构；同时大力发展第三产业，扩大就业容量，充分发挥中国人力资源的优势。

第三方面：充分认识我国资源所面临的挑战

《中国 21 世纪议程》充分认识到中国资源短缺和人口激增对经济发展的制约，强调从现在起必须要有资源危机感，建立资源节约型经济体系，将水、土地、矿产、森林、草原、生物、海洋等各种自然资源的管理，纳入国民经济和社会发展规划，建立自然资源核算体系，运用市场机制和政府宏观调控相结合的手段，促进资源合理配置，充分运用经济、法律、行政手段实行资源的保护、利用与增值，不断提高资源的利用率

第四方面：积极承担国际责任和义务

《中国 21 世纪议程》充分注意到中国的环境与发展战略与全球环境与发展战略的协调。对诸如全球气候变化问题、防止平流层臭氧耗损问题、生物多样性保护问题、防止有害废物越境转移问题，以及水土流失和荒漠化问题等，都提出了相应的战略对策和行动方案，以强烈的历史使命感和责任感去履行对国际社会应尽的责任和义务。

（四）《中国 21 世纪议程》的实施

《中国 21 世纪议程》的实施，将为逐步解决中国的环境与发展问题奠定基础，有力地推动中国走上可持续发展的道路。自《中国 21 世纪议程》颁布以来，中国各级政府分别从计划、法规、政策、宣传、公众参与等不同方面，加以推动实施。主要包括以下四个方面：

第一方面，结合经济增长方式的转变推进《中国 21 世纪议程》的实施

在实施《中国 21 世纪议程》过程中，要促进形成有利于节约资源、降低消耗、增加效益、改善环境的企业经营机制，有利于自主创新的技术进步机制，有利于市场公平竞争和资源优化配置的经济运行机制；加速科技成果转化，大力发展清洁生产技术、清洁能源技术、资源和能源有效利用技术以及资源合理开发和环境保护技术等；结合农业、林业、水利基础设施建设“高产、高效、低耗、优质”工程和生态农业的推广，调整农业结构，优化资源和生产要素组合，加大科技兴农的力度，保护农业生态环境；研究、制定和改进可持续发展的相关法规、政策和管理制度，研究可持续发展的理论体系，建立与国际接轨的信息系统，以保证《中国 21 世纪议程》的顺利实施。

第二方面，通过国民经济和社会发展规划实施《中国 21 世纪议程》

根据国务院决定，《中国 21 世纪议程》将作为各级政府制定国民经济和社会发展中长期计划的指导性文件，其基本思想和内容要在计划里得以体现。国务院要求各有关部门和地方政府要按照计划管理的层次，通过国民经济和社会发展规划分阶段地实施《中国 21 世纪议程》主要是创造条件，优先安排对可持续发展有重大影响的项目，对建设项目进行是否符合可持续发展战略的评估，对不符合可持续发展要求的项目，坚决予以修改和完善。特别是按照可持续发展的思想，对经济和社会发展的政策和计划进行评估，以避免重大失误。

第三方面，大力提高全民可持续发展意识

加强可持续发展教育，各级教育部门要逐步将可持续发展思想贯穿于从初等到高等教育全过程中；加强可持续发展宣传和科学技术普及活动，充分利用电视、电影、广播、报刊、书籍等大众传媒，积极宣传可持续发展思想；加强可持续发展培训，《中国 21 世纪议程》的实施需要群众的广泛参与，各级领导干部担负着组织实施的重任，因此，应把各级管理干部，特别是各级决策层干部的可持续发展培训，放在突出重要的位置

第四方面，利用国际合作实施《中国 21 世纪议程》

为了加强中国可持续发展能力建设和实施示范工程。国家从各地方、各部门实施可持续发展战略的优先项目计划中，选择有代表性的适合于国际合作的项目，列入中国 21 世纪议程优先项目计划，以争取国际社会的支持与合作。1994 年和 1997 年，中国政府和联合国开发计划署，先后在北京联合召开了中国 21 世纪议程高级国际圆桌会议，推出了一批《中国 21 世纪议程》优先项目。许多国际组织、外国政府和企业，以及非政府组织对优先项目表示了不同程度的合作意向，有的正在进行实质性的合作。此外，中国本着“新的全球伙伴关系的精神”，充分利用可持续发展是当今国际合作热点的有利时机，通过广泛宣传，引进资金、技术和管理经验，拓宽国际合作渠道。

第四节 中国可持续发展战略的实施

中国对实施可持续发展战略给予了高度重视。在联合国环境与发展大会之后，中国政府认真履行自己的承诺，在各种场合，以各种形式表示了中国走可持续发展之路的决心和信心，并将可持续发展战略与科教兴国战略一起确定为我国的两大发展战略

实施可持续发展战略的有利因素和面临的困难

（一）主要的有利因素

中国进一步实施可持续发展战略具有一定的有利因素，主要包括：

1、中国政府把实施可持续发展作为国家经济、社会发展的总体战略，纳入到《中华人民共和国国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标纲要》之中。这是中国实施可持续发展战略的根本保证。

2、国民经济持续健康快速增长，经济实力和综合国力显著增强，为中国未来的可持续发展奠定了初步的经济、物质和技术基础。

3、经济体制改革取得突破性进展，社会主义市场经济体制正在逐步建立，国民经济的市场化、社会化程度明显提高

4、对外开放总体格局基本形成，封闭半封闭状态已经根本改变，为中国大规模利用国际市场、国外资金、技术和资源，创造了良好的环境

5、各项社会事业全面发展科技和教育事业在改革中继续前进；计划生育成绩显著，人口增长速度过快的势头得到控制；各项社会保障制度正在建立和完善

6、环境保护工作取得较大进展。环境保护的国策地位进一步强化。环境法制建设全面加强，各项管理制度不断完善。污染防治和生态环境保护工作已在全国范围内大规模地展开。环境领域的国际合作取得重大进展

7、城乡人民生活显著改善，生活质量得到很大提高，正在向小康目标前进。

（二）面临的主要困难

中国在实施可持续发展战略方面仍然面临着诸多的困难和挑战，主要有：

1、庞大的人口压力。中国从20世纪70年代实施计划生育政策以来，育龄妇女的生育率持续下降，但由于人口基数很大，每年净增人口仍在1400万左右，人口过多，不仅给资源和环境造成很大的压力，而且严重制约经济和社会的发展，制约着人民生活水平的提高。

2 资源相对紧缺中国许多重要资源、能源储量丰富，位居世界前列，但人均拥有量远远低于世界平均水平；随着人口总量的增大，人均拥有的耕地、水、森林资源和一些重要的矿产资源将进一步下降；同时，中国能源、水资源等重要资源的分布极不平衡，加剧了供求的地区性和结构性矛盾

3 国民经济整体素质仍然较低。中国的经济产业结构还不尽合理，经济发展

还没有摆脱粗放型增长方式，经济增长的质量和效益不高，参与国际竞争的能力不强；在这种情况下，经济增长与资金、资源、环境的矛盾相当突出。

4、农业发展滞后。引导农业顺利进入社会主义市场经济轨道的问题尚未很好解决，农业投入不足，基础设施薄弱，抗灾能力不强，粮、棉种植面积下降，导致生产出现新的徘徊，乡镇企业的发展使农业环境不断恶化。如何加强对农业的保护、支持和引导，克服小生产与大市场的矛盾，仍是亟待解决的问题。

5、地区间经济发展不平衡，支持不发达地区的财力不足。环境污染和生态破坏仍处于恶化的趋势，由于粗放型的经济增长方式，很多工业生产消耗高，“三废”排放量大，资源回收综合利用率低，对大气、海洋和水的污染程度不断加重；西南、华南部分地区和城市酸雨污染较为严重且具有扩大的趋势多数城市基础设施特别是污染治理设施严重不足；国家治理环境污染和保护生态环境的任务仍十分艰巨。

二、实施可持续发展战略的具体措施

根据中国国情和实践经验，中国政府为进一步推进可持续发展战略，将着手采取以下具体措施

（一）继续推动地方和部门实施《中国 21 世纪议程》

1、目前，中国各级政府和有关部门对实施可持续发展战略的必要性有了初步认识，也开展了不少工作。下一步重点是推进地方可持续发展战略的实施。在一些有基础的省、自治区和直辖市，将继续扩大实施《议程》的试点，积极支持各地方各部门进行的可持续发展行动计划的实施，并选择具有典型性、代表性和推广意义的中小城镇和大城市行政区作为可持续发展实验区，探索一条有中国特色的将城市引向可持续发展的道路，逐步加以推广。

2、在广大的农村地区，将按照可持续发展的思想，进一步推进具有中国特色的生态农业。把贯彻实施《议程》作为转变农业生产方式的重要措施，结合农业、林业水利等基础设施建设，调整农业结构，优化生产要素组合，实施“高产、优质、高效”的农业工程促进农业生产的发展。加大科技兴农力度 保护农业生态环境 促进农业资源持续利用，提高农业综合生产力，将农业引向可持续发展轨道。

3、在工业污染防治上重点推行清洁生产，大力发展清洁生产技术，实施污染物排放总量控制。在国家已有的清洁生产示范工程的基础上，继续扩大和推动企业开展清洁生产

（二）加强计划生育工作，综合解决人口问题

1、把计划生育和发展经济、扶贫开发、资源合理利用、环境保护、普及教育、妇幼保健、完善社会保障、增进家庭福利提高妇女地位等结合起来，广泛开展人口与经济社会协调发展和可持续发展的宣传教育，制定相应的政策措施，协调有关部门对人口问题实行综合治理。

2、加强避孕节育、生殖保健、优生优育的技术咨询和优质服务，健全网络，增加投入加强对流动人口的管理和服务。在提高避孕节育有效率，提高出生人口素质，对解决人口老龄化带来的相关问题等领域进行重点研究。

3、提高整个中华民族的科学文化素质。为此，要全面实施九年制义务教育；积极发展多形式、多层次的职业技术教育和成人教育，使城乡新增劳动力上岗前都能得到必需的职业技术培训，使广大从业人员的文化素质、职业技能和职业道德得到普遍提高；以提高教育质量和办学效益为重点发展高等教育，注重培养广大农村、中小企业以及乡镇企业所需要的人才。

（三）选择重点地区，开展生态环境整治

1、开展以淮河、辽河、海河、滇池、太湖、巢湖，以及晋陕蒙接壤地区、内蒙古阿拉善盟等流域和地区为重点的环境整治。在城市污水处理、大气环境治理、固体废物处置、工业污染治理方面建设一批工程项目，加大环境污染治理力度。

2、继续进行生态环境整治，加快生态工程建设重点加强长江上中游、黄河中游等地区的水土保持工程建设；加强珠江、松花江、淮河、海河、辽河等流域的综合治理；加强生态防护林工程建设、防沙治沙工程建设、森林动植物资源保护工程建设以及草原改良、草场建设与保护工程建设等。

（四）加强资源节约和综合利用，保护好自然资源

在经济社会发展中，坚持资源开发与节约并举的方针。在生产、建设、流通、消费等各项活动中，努力做到节地、节水、节能、节材、节粮，千方百计减少资源的占有与消耗，大幅度提高资源、能源和原材料的利用率，减少生产过程中的污染大力开展资源的综合利用，重点推广清洁能源技术，特别是洁净煤的开发和利用。在满足总量控制前提下，支持利用余热、余压、城市垃圾和煤矸石、煤泥等低热值燃料及煤层气生产电力、热力。在低硫煤矿地区，充分利用矿区煤矸石、煤泥中煤、油页岩等低热值燃料，建设坑口电站；推广高效、低污染炼焦技术，

充分回收生产过程中的副产品，限制和淘汰土法炼焦，节约煤炭；研究开发和引进消化煤炭液化技术，逐步做到煤炭的清洁利用加强环境管理的力度，努力减少二氧化硫和烟尘等污染物的排放，防治大气污染。

（五）依靠科技进步，促进可持续发展

充分发挥科技是第一生产力的作用，努力探索资源、环境与发展相协调的生产和消费模式实施《议程》和社会发展科技行动计划，积极推进科技成果向生产力的转化

开发环境无害化的资源、能源利用和环境污染控制技术，如清洁生产技术、清洁能源、资源综合利用和再生技术，以及水污染、燃煤二氧化硫控制技术等；开展可持续发展城市及可持续发展社区的示范研究，包括最小排放社区和最小排放工业体系的示范研究等；开展可持续发展理论、可持续发展指标体系研究，国家重点区域如西北干旱、半干旱地区可持续发展研究，环境管理、政策体系研究，全球气候变化研究，以及环保产业、资源综合利用产业研究

（六）加强可持续发展的能力建设

1、加强法制建设。根据可持续发展的原则，修改和制定有关环境保护、资源管理的法律、法规，加强执法力度；研究、制定、改进和完善一系列的管理制度，包括使可持续发展的战略思想进入有关决策程序的制度、对经济和社会发展的政策和项目进行可持续评价的制度等，以保证可持续发展战略及《议程》的顺利实施

2、提高公众可持续发展意识，使公众自觉地保护环境，节约资源，改变不可持续的生产与消费方式。中国将长期开展各种形式的可持续发展的宣传、教育和培训
工作，不断增进广大公众和社会各界对可持续发展战略思想的理解和认识

03001



1. 《公务员写作》 定价：36.00元

写作是公务员必备的基本能力。本书全面系统地介绍了公务员必须掌握的各类公文的写作方法与技能，包括公务写作的基础知识、行政性公文、党的机关公文、机关事务文书、社交礼仪文书、常用财经文书和法律文书等内容。

2. 《公务员口才》 定价：36.00元

本书针对党政机关对公务员口语表达能力的基本要求，根据科学的口才理论体系和训练体系编制而成。本书包括表达、演讲、交谈、谈判、电话艺术和主持艺术等丰富的内容，旨在全面提高广大公务员的口语表达能力和水平。

3. 《公务员礼仪》 定价：36.00元

仪表举止是公务员形象的直接反映，也是国家行政机关和社会文明进步水平的反映。本书旨在为国家公务员良好仪表仪态、言谈举止的形成提供指导和帮助。本书涉及公务员日常工作、生活所需礼仪的方方面面，力求通俗易懂，因而更具实用性。

4. 《公务员英语》 定价：36.00元

本书涵括公务员工作中所必需的多种英语知识，既有不同场合的实用英语情景会话，又有英语写作知识、英语演讲和公务写作范文。阅读本书不仅能够巩固和提高英语交流能力，同时还可了解世界范围内公务活动的一般知识。

5. 《公务员计算机应用》 定价：36.00元

随着电子政务和“数字政府”等信息化建设的迅速展开，学习掌握计算机应用技术，已不仅仅是国家公务员应付工作的权宜之计，更是时代赋予的责任和要求。本书涵盖了现代办公知识和技能，既可系统阅读，又可作为实用手册随时查阅。

6. 《公务员政治读本》 定价：36.00元

本书立足马克思主义政治的基本理论和基本思想，从学科角度讲解阶级、国家、政府、政党、民族等基本理论，以及当代国际政治的格局、形成背景与变化趋势。全书体系结构完整合理，内容新颖活泼，论述深入浅出，适合广大公务员阅读学习。

7.《公务员经济读本》定价：36.00元

本书主要讲述国家经济体制改革和社会主义市场经济体系的知识，介绍我国现行的最基本的经济制度，以及公务员需要熟知的工商管理、投资金融、财务会计、多边贸易、经济谈判等知识。全书内容丰富 重点突出 有很强的针对性和实用性。

8.《公务员商贸读本》定价：36.00元

国家公务员担负着世贸规则的组织、宣传、实施和监管的重任。为便于国家公务员掌握 WTO 商贸类知识 本书不仅内容丰富翔实，而且语言通俗易懂，以更好地帮助广大公务员较快地熟悉世界贸易组织基本知识，并在实践中灵活运用。

9.《公务员管理读本》定价：36.00元

我国新世纪新阶段的奋斗目标要求公务员具有更高的管理素质和管理水平。本书将管理科学、行政管理和领导科学与领导艺术三大学科融为一体 选材贴近实际 极富现实意义 具有较强的创新性、权威性与指导性。

10.《公务员法律读本》定价：36.00元

国家公务员在依法治国方略的实施中处于关键地位，国家公务员既是执法主体 又是群众守法的示范。因此 国家公务员一定要带头学好法律知识。本书深入浅出 力避枯燥的理论分析 使读者在轻松愉快的阅读中获得丰富的法律知识。

11.《公务员道德读本》定价：36.00元

本书全面系统地介绍了国家公务员在工作、生活、学习中所涉及的道德规范。为使本书更具实用价值，每章中都融入了现实生活中鲜活的正反两方面的案例，寓理论于实践中，是一部贴近生活、贴近现实、贴近国家公务员的理想教材。

12.《公务员科技读本》定价：36.00元

本书概括地介绍了自然科学诸学科的基本知识，重点展示了近年来在新技术革命中涌现出来的一系列高新科学技术的主要内容、发展前景以及对国计民生的巨大影响，是广大公务员开阔视野、丰富知识的理想读物。

前言

当今世界，正经历着一场前所未有的新技术革命的浪潮我们每个人都能真切地感受到它的影响：几乎每个办公室都有计算机，以轻点鼠标代替了过去的很多劳动；坐在计算机或电视机屏幕前，天下大事可一览无余；发个电子邮件、打手机，代替了跑商店、跑邮局；上街购物、吃饭甚至坐汽车，都可以一刷（卡）了之。蔬菜、水果新品种的模样、口味、上市时间都不同往常；商场里琳琅满目的日用品、小家电、服装面料，有些连名字都没听说过；打开电视机和报纸，上面有很多诸如宇宙飞船正向某星球进发，又一项新科技用于某种武器，又一种动物克隆成功，某项高新技术帮助运动员提高了成绩等最新科技信息……，科学技术不仅极大地推动了社会生产力的发展，而且带来了经济、政治、军事、文化、教育以及人们生活、精神面貌的巨大变化。科学从来没有像今天这样鲜明突出地显示出它对于社会的兴衰、国家的存亡、企业的盈亏、个人的前途所具有的举足轻重的作用。几在美国，科学技术已成为企业发展战略的关键。在日本，很多尖端产品部门提拔技术干部做企业的总经理，否则就得不到银行的信任，使许多过去常以“我不懂科学”或“我不善于摆弄机器”引为自豪的文科出身的管理干部、经营人员要么去进修科技，要么不被重用。

在我国，早在上个世纪 50 年代，毛泽东同志就要求全党认真学习自然科学，重视原子技术的研究，否则就有被开除地球“球籍”的危险。“两弹一星”的研制成功，确立了我国在国际上的重要地位。党的十一届三中全会以后，随着全党的工作重心转向经济建设，邓小平同志又明确指出“科学技术是第一生产力”。近年来，江泽民总书记在不同场合多次强调全党全国各级干部都要努力学习科学技术和现代管理知识，提高全民族的科学文化素质，迎接知识经济的到来。中央政治局和书记处多次请科学家作报告，为全党全国人民做出了榜样。现在，广大干部、企业管理人员甚至普通职工都已认识到四个现代化的关键是科学技术现代化，掀起了学习现代科学技术和

管理知识、学外语、学电脑的热潮

为了满足广大公务员、企业管理人员、文科大学生和其他人员学习现代科学技术知识的需要，我们编写了这本《公务员科技读本》，奉献给广大读者

本书概括地讲述了自然科学的六大基础学科：数学、物理、化学、天文学、地球科学、生物学的基本知识，介绍了近几十年兴起的、适用于多种学科（包括管理等社会科学）、带有方法论性质的横断学科（或称系统科学），并叙述了在新技术革命中涌现出来的一系列高新科学技术的主要内容和发展前景在内容上，我们尽量做到既全面系统，又简明扼要；在讲述的方法上，既注意到科学的严谨和准确，又力求通俗易懂，不用或少用艰难高深的数学；在结构上，各章之间既有一定联系，又相对独立，自成体系

参加本书编写的有张明正（绪论）张明正、张玉娇（第七章），孟杰（第二章、第九章、第十章、第十四章），张东生（第一章），张东生、张玉娇（第八章），孙锦龙（第四章、第十三章），蔡兴元（第六章、第十二章），白新瑞（第三章，第十一章），郭志永（第五章、第十五章）

由于现代科技发展迅速及我们的水平所限，本书难免有挂一漏万、用语笨拙和表述不确切的地方，敬请广大读者提出宝贵的批评意见，以便再版时修正

编 著 者