

目 录

《新世纪科学史系列》出版弁言·····	刘 钝 俞晓群
小 引·····	8
第一部分 科学技术发展的历史回顾 ·····	9
第一节 科学在人类文明中的地位·····	12
一、科学与宗教·····	12
二、科学与人文主义·····	17
三、科学与技术·····	23
第二节 科学发展的历史脉络·····	31
一、希腊科学的兴起·····	32
二、希腊科学的衰微与传播·····	48
三、近代科学的诞生·····	64
四、现代科学发展概述·····	86
第三节 近现代科学技术在中国的传播和发展·····	104
一、中国接受近现代科技的文化基础·····	105
二、近代科学技术传入中国的三部曲·····	107
三、中国科学的体制化进程·····	110
四、中国科学的现代化转变·····	112
五、国家科技创新体系与知识创新工程·····	114
六、中国科学家的贡献·····	116
七、中国科技的若干最新进展·····	119
第二部分 现代科学技术的进展与前瞻 ·····	125
第一节 现代科学的基本特征·····	125

一、科学的社会化与社会的科学化·····	127
二、科学体系内部结构的分化、交叉与综合·····	129
第二节 现代科学的进展及展望·····	134
一、数学·····	134
二、物理科学·····	137
三、化学·····	145
四、宇宙科学·····	148
五、地球与环境科学·····	157
六、生命科学·····	164
七、脑与认知科学·····	169
第三节 现代技术的发展及展望·····	172
一、工业革命：人类历史的分水岭·····	172
二、机械制造与能源技术·····	179
三、化工与材料技术·····	184
四、信息技术·····	193
五、生物技术·····	206
六、空间技术·····	213
七、海洋技术·····	222
第三部分 当代科学技术面临的挑战·····	230
第一节 科学与人文传统之间的隔阂·····	230
一、科学的工具价值和精神价值·····	230
二、科学、反科学和伪科学·····	233
三、近代科学与中国文化的碰撞·····	239
第二节 科学技术与当代政治经济·····	249
一、科学的社会功能·····	249
二、知识经济与科教兴国·····	255
三、知识经济时代的国家创新体系·····	261

第三节 科学技术发展对人类环境的影响·····	262
一、工业化与城市化的后果·····	262
二、人类社会的可持续发展·····	265
三、科学：永无止境的探索·····	270
主要参考文献·····	273
后 记·····	275

《新世纪科学史系列》

出版弁言

科学史的源头可以远溯得同历史学一样久远，尽管近代意义上“科学”的出现只是在西方文艺复兴之后。试想一下，假如没有古希腊学者关于他们当时和他们前辈有关现实世界和理念世界思辨的那些记录，后人对西方文化中理性主义传统的来源又能有多少认识呢？同样，如果没有浩瀚的中文历史文献和司马迁以降的编史传统，今日我们对古代先哲关于自然现象的哲学解说和种种技术工艺的探索就成雾中看花了。

然而只是到了近代，科学的发展对人类和社会才产生关键的影响，科学史¹作为一门独立的成熟学科不过是20世纪的事情。1913年比利时人萨顿创办了科学史杂志ISIS。1928年8月，7位科学史家在奥斯陆召开的第7届国际历史科学大会上，决定成立一个自己的组织并定期举行会议，这7位学者就成了国际科学史研究院的创始人²。首届国际科学史大会则于次年5月在巴黎召开。经过80多年来世界各地科学史家的努力，科学史已发展成一项蔚为可观的学术事业，其建制化的水平并不比历史学中其他任何一个分支逊色，而其沟通自然科学与人文社会科学等特殊作用正在为越来越多的有识之士所认识。

¹. 这里和下文说的都是广义的科学史，包括技术史、医学史以及思想史和社会史取向的科学历史题材的研究。

². 他们是:Aldo Mieli (意, 1879 - 1950)、Abel Rey (法, 1873 - 1940)、George Sarton (比, 1884 - 1956)、Henry Sigerist (法, 1891 - 1957)、Charles Singer (英, 1876 - 1960)、Karl Sudhoff (德, 1853 - 1938) 和Lynn Thorndike (美, 1882 - 1965)。

在实现建制化的同时，20世纪的科学史相继经历了逻辑实证主义、新人文主义、马克思主义和科学哲学的历史主义等多种思想流派的冲击，从而获得学科发展不可或缺的内在动力。科学史又从人文社会科学的不同分支汲取养料，特别是与相邻的学科如科学社会学和科学哲学互相渗透影响，从而构成一个研究元科学的新兴边缘学科群。今日的科学史已成为研究科学、技术和医学的发展过程及其规律，以及它们与社会互动关系的一门学问。当代的科学史家应以全面理解科学在社会中的发生与成长、促进科学文化与人文文化的整合为自己的使命；从事科学史写作的目的也不仅仅是描述相关知识的演进脉络，更应以促进民众具备符合时代要求的均衡的文化素质为更高的目标。

大约与科学史在西方建制化起步同时，受到“五四”精神启蒙的一批中国知识分子开始以现代的科学知识整理和研究不同学科领域中的历史题材，他们自然成为中国科学史事业的开拓者¹。1956年9月以竺可桢为团长的中国科学史代表团前往佛罗伦萨出席第8届国际科学史大会，这是中国学者第一次以科学史家的身份在国际科学史界正式地集体亮相。1957年元旦则有中国第一个科学史机构中国科学院自然科学史研究室的建立。

但是就建制化这盘棋而言，建立国家级研究机构仅仅是其中的一步；大规模局面的出现，除了自身研究水准的提高外，还取决于学科生存其中的社会环境的改善，这里包括学科点的建设与繁衍、学术资源的增长、权威部门的支持、公众的理解、后续队伍的培养、国际间高水准的对话和交流，以及相关出版物的繁荣等。

令人感到欣慰的是，经过几十年数代人的努力，科学史作为一项学术事业在中国正呈现良好的发展态势，其主要表现在：

¹ 其代表人物有竺可桢、李俨、钱宝琮、朱文鑫、高平子、叶企孙、钱临照、张子高、袁翰青、刘仙洲、梁思成、张鸿钊、王庸、李涛、陈邦贤等。参见席泽宗《科学史八讲·中国科技史研究的回顾与前瞻》，台北：联经，1994年，第20页。

(1) 已在若干科研院所和高等院校建成一批博士点与硕士点，并培养了一批在自然科学与人文学科两方面均接受过正规训练的科学史专业人才；在国务院学位委员会颁布的自然科学学科规划中，科学史被定为理学类一级学科，可授理、工、农、医等博士学位。

(2) 1999年在若干高校出现了系一级的科学史机构，如上海交通大学的科学史与科学哲学系和中国科技大学的科学史与科技考古系；其他高校特别是一些研究型大学中的科学史中心也呈现良好的发展势头，以相关科研院所与高校为中坚的科学史学术共同体已在中国出现。

(3) 今日中国科学战略的决策者，已对科学史所特有的社会文化功能，及其在国家科技创新体系建设中可能发挥的作用有了清醒的认识；在中国科学院率先实施的知识创新工程中，将考虑设置与科学史有关的国家级研究平台。

(4) 通过中国科学技术史学会、《自然科学史研究》等多种学术期刊、各类大众传媒、大量科学史专著和工具书的出版，科学史图书和论文的评奖等诸多渠道，科学史研究已赢得一定程度的社会认同。

(5) 中国科学史的研究已引起国外同行的充分注意，随着国际交流的深化和一些中青年科学史工作者从国外学成归来，中国科学史研究和学科建设的国际化正在加速进行。

所有这些都表明，科学史在中国正步入一个再建制化的阶段。这一进程的发生与发展，必将有力地提升中国科学史研究的整体水平，也必将使科学史在中国科学事业的发展与中国文化的复兴中发挥重要作用。

由中国科学院自然科学史研究所和辽宁教育出版社共同策划的《新世纪科学史系列》，就希望对科学史学科在中国的再建制发挥一点推波助澜的作用。

本系列旨在鼓励科学史、技术史、医学史及相关领域内有创意

的专题研究，接受海内外的合格书稿，是一项具有前瞻性的学术出版计划。系列由两单位的法人全权负责，不组织编委会，不邀请名人搞应酬活动，成熟一本出版一本，希望借此为学术界和出版界协力建设21世纪的新文化作一探索。

人类社会的政治、经济结构发生重大变化的时代，往往就是文明形态成型和学术纲领重建的时代。在被雅斯贝斯称为“轴心时代”的公元前6世纪至公元前2世纪的近400年间，人类的精神生活几乎同时独立地在中国、印度、波斯、巴勒斯坦和希腊得到质的飞跃，人类文明的早期格局由此而奠定。如今，21世纪已经悄然降临我们身边，在全球经济一体化和科技日新月异的炫目光辉中，环顾那些曾在“轴心时代”荣耀过的土地，任何一个不带政治或种族偏见的人都会承认，中国今天仍然是地球上最具活力的一个地区。中国的科学史事业能否在新世纪走向辉煌呢？我们将为此努力并怀着真诚企盼着。

中国科学院自然科学史研究所 所长 刘 钝
辽 宁 教 育 出 版 社 社长 俞晓群
2000年新春

小 引

人类这样快就来到了21世纪。昨日还是“人猿相揖”，今日足迹已上月球；昨日还在“茹毛饮血”，今日却在谈论“克隆”和“转基因”；昨日还在“结绳记事”，今日已在研制超大型计算机。

在传统的历史学家眼中，人类历史就如同一条漂着血污燃着烈焰向前流动的大河，血色火光中映照着王朝兴废与宫闱秘闻；但是他们当中很少有人将目光移向大河流经的两岸，那里有数不清的学校、博物馆、工厂和实验室，在苍茫原野中悄然而起。

我们关注两岸：随着星移斗转，河道渐宽，河水渐清，两岸风光美不胜收。“丰盈的海洋，清新的空气，湛蓝的天空和人的心灵，一种精神在推动着一切有思想的对象，周而复始，生生不息。”这里借用英国诗人华兹华斯的诗句来表达我们欣赏两岸变化时的喜悦心情。

科学技术促进了人类社会的发展，科学技术的进步是人类文明演进的主脉。科学征服蒙昧的斗争比帝国间的征战更为惊心动魄，科学发现与技术创新的过程比英雄美人的故事更加曲折感人；当然科学家有时也会迷路，科学与技术带给人类的也不全是流溢着蜂蜜和牛奶的沃土。

在新世纪开始的时候，我愿将这本小书奉献给亲爱的读者，让我们一同泛舟于历史的长河。通过以下的文字，我们将回顾科学技术发展的历史脉络，它们在人类文明中的位置，以及近代科学技术在中国的演变过程；对现代科学技术的方方面面进行描述和展望，同时对科学技术面临的挑战作一探索性的讨论。

第一部分

科学技术发展的历史回顾

今天，中国公众几乎没有人不知道科学这个词，尽管对其含义的理解五花八门。然而从历史上讲，科学这个词在汉语中不过百年之久。现代汉语中的科学一词，借自日文对英文词science的翻译¹。在英语中，science乃natural science的简称，甚至不包括数学。我们知道，英语的历史也就500年左右，因此，science的本意乃是指近代科学，尽管它的拉丁词源scientia是一般的分科学问或知识的意思。但近代科学并不是从天上掉下来的，也不是一成不变的。我们知道，近代科学诞生于16至17世纪的西欧，但早在两千年前，人们就在摸索建造这座大厦的基本原则，寻找建造这座大厦的基本素材，那时现代西欧人的祖先还在过着茹毛饮血的日子。古代世界的各大文明，包括希腊文明，都没有严格意义上的科学，但它们都为现代科学的诞生作出了程度不等的贡献。因此，当我们回顾科学的历史，特别是谈论古代科学的时候，我们总是自觉或不自觉地以近代科学为参照系的。

近代科学从它的诞生之日算起，至今已有400余年的历史了。17世纪以来，科学本身经历了一次又一次的巨大变革。近百年来，科学的发展更是突飞猛进：量子论和相对论的创立，彻底推翻了牛顿力学关于空间、时间和物质的认识；DNA双螺旋结构的发现和遗传密码的破译，使人类在分子层面上窥见到生命的奥秘；板块学说和大爆炸理论的提出，全面革新了人们心目中的宇宙图像。现代科

¹. 19世纪末，日本学者首先将science译成“科学”，意即分科知识的汇总，以便与中国不分科的儒学相对应。这个日文译名随后为康有为、梁启超等人所采用，遂在中国流传开来。“科”字在汉语中有“异别分类”之义，这倒与science一词的拉丁词源scientia不谋而合。

学的发展，不仅表现在基础理论的突破上，而且表现在它的社会影响方面。近代科学的社会影响，主要发生在思想层面上，特别对基督教神学和人文学科的冲击。现代科学的社会影响，则突出表现在它的工具价值方面。19世纪中叶以来，人类在技术上的重大突破，大都是在科学指导下取得的。今天，科学与技术，进而与人类的日常生活，已变得密不可分。科学已变成一个庞大的体系，自然科学、社会科学、管理科学和技术科学等各大门类的发展与分类愈来愈复杂。

这也就是人们对科学一词的理解五花八门的原因。在一般大众的心目之中，科学不外是技术，因为科学往往通过技术才与他们的生活发生关系。对那些不了解科学的发展历程和研究方法的人们而言，科学往往意味着真理，他们眼中的科学也就限于书本报刊所载的当代科学知识。科学当然不能等同于技术，技术的任务是改造世界，科学的目标则是理解世界。科学在技术上的应用只是科学的工具价值，但科学本身有着严肃的伦理价值。科学是人类精神生活不可分割的一部分，它的目的是揭示，或者说，是认识世界的规律。倘若人类觉得自身生活在一个没有秩序的世界之中，人类或许早已因绝望而失去生存的勇气。科学虽然怀有这一崇高的理想，它的步伐却是谦逊而务实的。它并不自称自己所揭示的秩序就是终极真理，相反，它一再否定业已取得的成就，以求更接近大自然的本来面目。

科学是依据人类的理性和经验来揭示世界的秩序。所谓理性思维，也就是从若干公认的原则出发，经过合理的论证和推导，把相关的命题和观点组织成一个科学体系。理性思维的楷模自然是数学演绎系统，其最早的版本就是欧几里德（Euclide，前330？-前275？）的几何学。在古代世界，运用人类的理性来探索世界的秩序所取得的最伟大的成就，要数希腊的数理天文学，它力图只用一个基本原则，也就是完美的圆形和球体，来理解星体的构造和运动规律。科学的经验方法是一种系统的观测和试验方法，这些观测和

试验都离不开理论思想的指导。科学不是简单的经验积累，只靠零碎的实践和经验产生不了科学。科学这座大厦，是由理性来设计由经验来建筑的，当经验发现原来的设计所需的材料在实际世界中并不存在，而现实世界又有原设计不能采用的材料时，人们就变更科学的图样。近代科学的诞生和发展，得力于这两种方法的融合，演化下来就是今日科学的宏伟大厦。今天，每个中学生都要学习欧几里德几何学和阿基米德（Archimedes，前287？-前212）的静力学，不仅因为它们是学习高等理论的基础，更因为它们体现了科学研究的基本方法。

近代科学的某些分支，比如数学和天文学，在古代各文明中已经相当发达；但另外一些分支，如物理学、化学和生物学，主要依附于哲学和工艺传统。因此，科学的源流可以无限远溯，这里我只想从人类文明的轴心时代谈起。人类的文明从轴心时代¹到今日已经走过了2500余年的漫长历程。在这25个世纪中，科学的道路并不是一帆风顺的，只是在近500年，它才雄姿英发所向披靡。近500年来，科学先是夺取了宗教和形而上学的地盘，进而对人文领域产生了重大的影响，最后它又把技术纳入科学体系从而渗透到人类生活的各个方面。因此，回顾科学的历史，我们不仅要看到科学理论本身的发展，同时也要看到科学在人类整个文明中地位的演化。有鉴如此，我将首先考察一下西方历史上科学与宗教、人文以及技术的关系，进而试图为西方科学本身的发展勾勒出一个历史脉络。关于中国科学的历史与现状，将单独探讨。

¹. 借用雅斯贝斯的说法，系指公元前5世纪前后希腊、中国等几大轴心文明同时勃兴的时代。

第一节 科学在人类文明中的地位

无论何种文明，都离不开理性、人伦和信仰这三大支柱。科学是与宗教和人文主义并列的三大传统之一，是理性主义的卓越代表和根本体现。在西方文明史上，科学的社会影响，首先是与宗教的冲突，其次是对人文主义的贡献，最后才是在技术上的应用。

一、科学与宗教

谈起科学与宗教的关系，人们首先会想到伽利略（Galilei Galileo, 1564-1642）和布鲁诺（Giordano Bruno, 1548-1600）。布鲁诺因为坚持无限宇宙思想，1600年被活活烧死在罗马的鲜花广场；伽利略因为宣扬日心学说，1633年被罗马教廷宣布为异端，并且判处终身监禁。但如果我们仅仅把他们看作近代科学的殉难者，就过分简化了历史上科学与宗教之间的复杂关系。事实上，布鲁诺的思想不能算是近代科学思想，他的无限宇宙理论是哥白尼日心说与中世纪神学家多重世界理论的融合，他的死乃是为思想自由而死；伽利略所批判的，也不是基督教的基本教义，而是为基督教神学家所采纳的古代科学理论——亚里士多德（Aristotle, 前384-前322）的学说。科学与宗教之间的冲突与融合，是一幅波澜壮阔的巨型历史画卷。

在人类的早期历史上，科学和理性思想有过一段辉煌的岁月，那就是希腊文明时代。希腊虽然只有哲学家（爱智者）、教师和医生，并没有今天意义上的专业科学家，但正是希腊人首先运用理性和经验的方法来研究自然界。米利都学派对于后世科学意义，并不在于他们有何精致的理论，而是在于他们的发问方式和解答途径：他们发现了自然，也就是区分了自然与超自然，认识到自然现象受因果链条支配，而不是某个超自然力影响的结果；他们确立了理性批判的传统，这个批判的传统要求人们注重论证的一致性和合理性，促使人们追求系统化的知识，由此造就了科学表述的逻辑演

绎系统。希腊科学惠予后人最为丰富的知识遗产，要数数理天文学和描述生物学。这两门科学分别为柏拉图（Platon，前427-前347）和亚里士多德所开创，进而由希腊化时代一小批专业科学家发扬光大。虽然今天再也没有人去讲授托勒密（Cladius Ptolemy，90-168?）的天文学和盖伦（Galen，130? -200?）的医学，但这两门科学所依据的方法，也即数学方法和经验方法，却是今日科学研究的基石。所谓实验方法，不外是把这两种方法结合起来。实验方法在近代和现代科学中的地位是不言而喻的，但它也不是近代科学的发明，希腊化时代的几何光学和静力学就是明证。希腊化时代（前320-前30）是希腊科学离开本土向四周传播的时代，也是专业科学家初次出现的时代。但希腊化时代科学的社会基础相当脆弱，也就一小批研究人员和若干个国王庇护的研究中心。罗马帝国崛起之后，由于罗马人的务实精神，就连昔日的几个科研中心也难以维持。罗马人对科学的贡献，充其量不过是编纂一些介绍希腊科学的大型通俗读物。

公元3世纪末，罗马政治和经济状况不断恶化，社会不稳定因素变得越来越难以控制，致使罗马皇帝戴克里先（Diocletian，285-305在位）采用了专制制度，并把罗马帝国分为东西两半。这种恶劣的政治形势，加上畅通的罗马大道，为各种神秘教义提供了孳生的温床。这些神秘的教派，如爱西斯（Isis）、密斯拉（Mithra）、诺斯替（Gnostics）和基督教（Christ），一方面相互倾轧，另一方面又相互借鉴。它们共有一些基本的教义：这个世界充满了罪恶，最终将要毁灭；人本有罪，要想获得永恒的幸福，惟有抛弃眼前的这个世界，通过苦行赎清自己的原罪，才能进入永恒的天国；在永恒的天国，有一位拯救者，他降临人间经受磨难，并用自己肉身的死亡来洗涤人类的罪孽。基督教的胜利，是希腊化时代以来各种神秘教义相互倾轧的顶峰，同时也标志着科学和理性思想逐步衰微时代的到来。

科学的衰微同时也伴随着理性的没落。如果说罗马人在帝国的

早期阶段还相当重视理性，这突出表现在罗马法上，到了帝国的晚期阶段，他们已不再诉诸理性来解决人类生活中的重大问题。3世纪新柏拉图主义的兴起和各种神秘教义的泛滥，事实上已否定了理性的力量。新柏拉图主义的创始人是亚历山大里亚的普罗提诺

(Plotinus, 204-270)，按照这种学说，最高的存在是超验的、不可言说的太一或上帝，从太一中流射出世界灵魂，世界灵魂中又流射出个别灵魂，最后流出的是没有精神的物质，整个过程就像太阳放光一样，光线的尽头是黑暗和邪恶；人的灵魂原是世界灵魂的一部分，因与肉体结合而堕落了，人生的目标，就是要通过沉思从感性生活转向世界灵魂，进而在冥想中与上帝合一。这种哲学显然与希腊的科学和理性思想背道而驰，超自然取代了自然，沉思冥想取代了逻辑论证，事实上离宗教已只有一步之遥了。公元4世纪是基督教大获全胜的时代：313年，君士坦丁一世 (Constantine I) 给予基督教徒以信仰自由；380年，狄奥多西一世 (Theodosius I) 宣布基督教为惟一合法的信仰。

基督徒获胜之后，便对其他一切教派和世俗学术采取了疯狂的迫害行动，希腊科学和哲学在他们眼中显得尤其肮脏，亚历山大里亚女数学家希帕西亚 (Hypatia, 370? -415) 因不愿放弃希腊宗教而被狂热的基督徒在大街上撕成碎片，塞拉披 (Serapis) 神庙所藏的 30万种希腊手稿被焚之一炬，大批写在羊皮纸上的著作被基督徒洗刷一净，随之用来书写经文。希腊思想对基督教义的威胁是不言而喻的，可以想像，基督教在获胜之初对希腊哲学和希腊科学怀着何等的恐惧与猜忌：教会该如何解释上帝在6天之内的创世行为呢？是故，在一阵狂热的迫害之后，教会不得不修改自己的立场，借以招揽社会精英，希腊科学和哲学由此成了神学的婢女。头一个明确地把哲学作为神学婢女的思想家是圣奥古斯丁

(St. Augustine, 354-430)，他的目的就是要调和希腊思想与《圣经》中的创世内容。按照希腊思想，无中不能生有，即使是柏拉图的“造物主”也只是依据形式将现有的无定形物质塑造成个体。但

《圣经》中的上帝却能从无中创造一切。奥古斯丁利用了新柏拉图主义的思想，他把上帝看成一个独立于因果关系和历史模式的永恒存在，形式或理念是上帝的思想，上帝的思想是无限的，因而可以创造出任何他想创造的东西。

现代欧洲文明是在罗马帝国的废墟上建立起来的，而罗马留给入侵蛮族的最大遗产便是基督教，现代欧洲人的祖先最初是通过基督教接触到希腊科学的：奥古斯丁的神学含有一些柏拉图的思想，寺院教育所用的几部拉丁百科全书也含有一些粗浅的数学和天文学知识。欧洲的觉醒是在11至12世纪，正值中国和阿拉伯文明的巅峰。阿拉伯的崛起在世界文明史上可谓奇迹，自632年穆罕默德

（Muhammad，570-632）死后不到30年的时间，阿拉伯人先后占领了波斯、叙利亚、巴勒斯坦和埃及这些希腊化文明的重镇。幸运的是，当时的穆斯林教徒不像基督徒那样狂热，他们对希腊的科学和哲学有着浓厚的兴趣。公元828年，阿拔斯王朝第7任哈里法马蒙

（Al-Mamun）在巴格达设立了一座“智慧宫”，专门搜集和翻译希腊的科学和哲学著作。对于希腊思想与伊斯兰教义之间的冲突，他们采用了一种灵活的调和态度，其代表人物是阿维森纳（Ibn Sina，980-1072）。阿维森纳的思想是柏拉图哲学、亚里士多德学说和伊斯兰教义三者调和的产物：宇宙是永恒的，是源自上帝的一系列流射物，除上帝之外没有离开物质的纯粹精神；上帝是所有事物的第一推动力，但它不是全能的，它的权力囿于正义与善行；宗教教义与理性知识并无冲突，理性是自然知识的源泉。这一思想随后又被西班牙穆斯林学者阿维罗伊（Ibn Rushd，拉丁化为Averroes，1126-1198）所发展。阿维罗伊主张，除天启的信条外，一切事务都取决于理性的判决，宇宙中的一切事务都是上帝预先严格决定的，每一事件都是完整的因果链条中的一环，没有任何奇迹，自然过程是规则的、不可变更的。这样，阿维罗伊就为理性划定了不受教义控制的独立地盘。穆斯林学者对于后世科学的贡献是双重的：首先，他们保存并发展了希腊科学，并将它们传到欧洲人的手中；

其次，他们强调了理性的功能，进而促使了基督教的进一步理性化。

11-12世纪是欧洲觉醒的世纪，此时欧洲人开始对真实的物理世界感到好奇，对隐藏在自然背后的神秘力量想入非非，同时对神学上的歧义深感失望。这股强烈的求知欲，随着基督徒对西班牙和西西里的征服，引发了一场规模宏大的翻译运动。欧洲各地的学者云集托莱多和西西里，将大批希腊-阿拉伯科学和哲学著作译成拉丁文。在此之前，欧洲人只知道亚里士多德是一位逻辑学家，随着这批经典的翻译，亚里士多德的地位如日中天，拉丁学者称他为大写的哲学家，称阿维罗伊为大写的亚氏注释家，亚里士多德的学说几乎完全主宰了欧洲大学的讲坛。13世纪，拉丁学者对亚氏学说的讨论，很快就引起了基督教神学家的不安，因为亚里士多德的理论含有颠覆基督教义的论点。按照亚里士多德的理论，（1）世界是永恒的，这等于否定了上帝的创世活动；（2）自然是按不可变更的规则运行的，这排除了上帝创造奇迹的可能；（3）属性不能离开实体而存在，这与圣餐学说相抵触；（4）灵魂随肉体的死亡而消亡，这就否定了灵魂不朽这一根本教义。1210年，桑斯地方宗教会议就禁止巴黎大学阅读刚刚出现的亚氏著作拉丁译本。1231年，教皇格里高利一世（Gregory I）在《教牧法规》中明确要求清除亚氏著作中与教义冲突的观点。但这些禁令并未真正贯彻下去，1255年巴黎大学的教材囊括了全部已译的亚氏著作。在这种局面下，正面的冲突已在所难免。1270年，巴黎主教明确禁止讨论来自亚里士多德著作和阿维罗伊注释中的13个命题。1277年，教皇约翰21世（John XXI）指示巴黎主教坦皮尔（Etienne Tempier）着手调查巴黎大学的思想风潮，为此坦皮尔在巴黎大学神学家的帮助下用3周时间搜集了219个命题，凡是接受或赞成这219个命题中的任何一个观点者，都将受到革除教籍的惩罚。13世纪宗教和科学的冲突，引发了两股强大的思潮，其一是神学家大量吸收亚里士多德的物理学和宇宙论来建立更为理性的神学体系，最著名的是圣托玛斯·阿奎那（St. Thomas Aquinas, 1225? -1274）的体系；其二

是部分学者开始对亚里士多德体系中的某些理论产生了怀疑和批判的态度，这是背离亚里士多德转而朝向哥白尼（Nikolaus Copernicus, 1473-1543）和伽利略这一伟大航程的起点。

近代科学的诞生，导致了科学与宗教之间的第三次大冲突。16至17世纪的科学革命，不仅指天文学、物理学和生物学上的突破，同时也意味着世界观的变革：机械论自然观取代了目的论自然观，无限的均一的世界取代了封闭的等级化的宇宙。按照这种新的世界观，一切事件都被抽象为质点在无限时空中的运动。在近代科学的冲击下，基于亚里士多德物理学和宇宙论的中世纪神学体系再也站不住脚了。在此情形下，有些神学家和科学家，其中最突出的要数牛顿（IssacNewton, 1642-1727），试图把上帝的遍在性与空间的无限性联系起来，但这种观点遭到了莱布尼兹（G. W. Leibniz, 1646-1716）的猛烈反击。到18世纪末，空间与上帝的关系终于被斩断，留下的只是一个三维的无限的物理空间，而上帝充其量不过是一位数学家或立法者¹。作为创世者的上帝概念，随着启蒙时代地质学和生物学的发展，也慢慢变得靠不住了。物种不再是固定不变的，也不是上帝的创造，而是自然的演化结果，这一点最终由达尔文的自然选择理论加以阐明。现代科学已经将全知全能的上帝驱逐出自然的领域，即使某些科学家经常谈到上帝，这个上帝也只是宇宙秩序或自然规律的代名词。1979年梵蒂冈教皇给伽利略平反，在人们的心目中留下的不过是人类文明史曲折的一幕和宗教愚昧迷信的悲剧。

二、科学与人文主义

人文主义（humanism）一词，实际上是19世纪初的发明，但人文学者（humanista）和人文学科（studia humanitatis）这两个词在15世纪后期就有了明确的含义。15世纪的人文学科包括语法、修辞（主要包括书信和演说这两类散文）、诗歌、历史和道德哲学

¹. 对莱布尼兹来讲，上帝主要是一位逻辑学家，而不是一位单纯的数学家。

五个科目，教授和学习这些学科的人当时被人们称为人文学者。所以说，严格意义上的人文学科，正如严格意义上的科学一样，都是近代的发明。科学的各个分支都有古代的源流，人文学科也是如此，但只是到文艺复兴时期人们才把这五个科目作为一个学科群。罗马虽然有人文学科（liberal arts）一词，但它是指为贵族子弟而设的普通高等教育，也就是通常所说的“七艺”，包括语法、修辞、逻辑、天文、算术、几何和音乐。而自文艺复兴之后，人文学科的含义基本没有变化，也就是国内简称的文史哲，德语中的

Wissenschaft一词则把natural science和humanities合为一体。人文主义这个词，无非是对人文学者所怀有的理想、观念和兴趣的概括。更明确地说，人文主义以人中心，重视人生经验，并且强调人类自身拥有的潜在能力，包括语言、交流、观察、推理、想像和创造的能力。人文主义与科学和宗教并列为西方三大思想传统，但科学和宗教分别把人看作自然的和神的秩序的一部分。人文主义并不排斥科学和宗教，它只是强调，我们的价值观以及我们的全部知识都是来源于人类的经验和潜能。

在人类文明史上，自然的发现与人的发现，对外在世界广泛的探索与对内心世界细腻的体察，总是相伴而行的。近代科学要溯源于希腊，西方人文主义传统也要溯源于希腊。希腊文明在前苏格拉底时代主要关注世界的本原和宇宙的变化问题，泰勒斯（Thales，前624？-前547？）、阿那克西米尼（Anaximenes，前585-前528）、阿那克西曼德（Anaximander，前611？-前547？）、赫拉克利特（Heraclitus，前533？-前475？）、巴门尼德（Parmenides，前500？-？）、毕达哥拉斯（Pythagoras，前584？-前497？）、恩培多克勒（Empedocles，前493？-前433？）、阿那克萨哥拉（Anaxagoras，前500？-前428？）、留基伯（Leucippus，前500-前440）和德谟克利特（Democritus，前460-前370），所有这些人皆属于科学或者说自然哲学传统。到雅典时代希腊人的注意力转向了伦理道德的探讨和心灵世界的刻画，普罗塔哥拉（Protagoras，

前 500? -前 411?)、苏格拉底 (Socrates, 前 469-前399)、埃斯库罗斯 (Aeschylus, 前525-前456)、索福克勒斯 (Sophocles, 前496? -前406)、欧里庇得斯 (Euripides, 前485? -前406?) 和修昔底德 (Thucydides, 前471? -前400?)，可以说都是人文主义的先驱。在希腊文明中，这两大传统之间的互惠是非常明显的。希腊伦理学开篇就问，是否存在超越民族、国家和时代的普遍而有效的法律？这与米利都学派询问世界本原一脉相承。在希腊悲剧作家的作品中，自然的秩序与人类的命运休戚相关。另一方面，人文的探讨不仅赋予自然研究以严肃的伦理学意义，同时为科学理论立下了更坚固的知识论标准：在柏拉图看来，理想的科学，就是从流变世界上升到形式世界的科学，也即数学化的科学，研究流变世界所潜现的秩序，有助于将灵魂引向不可见的实在；在亚里士多德看来，宇宙万物皆有自己的终极目的，人是有理性的动物，他的最高目标就是理性的生活，就是利用理性来认识宇宙的秩序和奥秘，认识的起点是他的感官经验，进而依靠理性发现万物的原因，而最终达到的则是永恒的、必然的、普遍的知识。柏拉图和亚里士多德都是身跨两大传统的思想家，柏拉图是从伦理学出发来建立自己的宇宙论和知识论，亚里士多德则是从自己的知识论和宇宙论引申出伦理学。

近代科学诞生于文艺复兴之后，这一点绝非偶然。以前，有些史学家看到文艺复兴时期的科学研究反不及中世纪晚期活跃，就冒昧地断言人文主义阻碍了科学的发展。这真是绝大的误解。我们知道，文艺复兴时期人文主义的发展经历了两个阶段，在第一阶段人文主义者主要是阅读拉丁文学作品和参观罗马古迹，到第二个阶段，也就是从15世纪中叶起，他们则把目光投向了古希腊文明。在整个中世纪，西欧没有任何地方讲授希腊文，并且除意大利南部和西西里外几乎没有希腊文的书籍。文艺复兴时期的人文主义者把希腊文教育引入西欧的中学和大学，随之开始了对整个古希腊文献的校勘、翻译、诠释和传播。在12至14世纪，西欧所了解的希腊科学

局限于阿拉伯人所了解的那些内容，主要是亚里士多德的物理学和宇宙论，其他如阿利斯塔克（Aristarchus，前315？-前230？）的日心说、德谟克利特的原子论、斯多葛学派的宇宙论、欧几里德的几何学和公理化方法，特别是阿基米德的穷竭法和静力学理论，在中世纪几乎不为人知。要是没有人文学者的精心努力，西欧的科学就总体而言尚达不到公元2世纪希腊科学的水平。人文主义者对柏拉图的推崇，更为世人提供了一种崭新的价值标准。按照该时代的精神，亚里士多德主义和柏拉图主义的分野非常清晰：如果你拥护数学的优越地位，并且赋予它在探讨物理实在时以指导的价值，那么你就是一位柏拉图主义者；如果你仅仅把数学视为一门抽象科学，其价值尚不及建立在经验基础上的物理学和形而上学，那么你就是一位亚里士多德主义者。这里关键不在于数学命题的确定性和可应用性，而是牵涉到物理实在的本质结构：柏拉图主义者把一切都纳入几何比例的和谐这一观念之下。古代世界的发现，并不单纯是一个历史发现，而是寻找指导人们探索现实世界的楷模。柏拉图传统的新生活力，为近代科学先驱提供了推翻亚里士多德体系的思想工具，哥白尼、伽利略、开普勒（Johannes Kepler，1571-1630）、笛卡儿（René Descartes，1596-1650）和牛顿，所有这些都相信大自然这本书是用数学语言写成的。除了思想工具之外，人文主义者还为近代科学先驱提供了精神支柱。人文主义者重新发现了世界，重新发现了人。他们把人作为思考的焦点，颂扬人类自身具有的各种能力，强调从人的经验出发来思考自然的秩序和人类的命运，并以一种前所未有的热情去探索自然和心灵两大世界。达·芬奇（Leonardo da Vinci，1452-1519）就是这一精神的化身。正是依靠这种精神，开普勒坚信第谷（Tycho Brahe，1546-1601）的观测数据，伽利略利用望远镜中的天空图像来驳斥月上界完美不变的观点。

近代科学的成功，反过来又扩大了人文主义的胸襟和视野。18世纪启蒙哲学家的目标，就是要在人类社会领域建立牛顿式动力学

理论。他们把理性应用于道德、风俗、信仰、法律、制度等各个领域，力图将人类社会的发展引向一个合理的方向。像文艺复兴时期的人文学者一样，他们也崇拜古典遗产，尽管不再那样兴奋；他们同样颂扬人的潜在能力，特别是理性思考的能力。对于理性，他们更重视它的批判功能，而不是它在建构体系方面的功能。为了解放人的理性，他们把教育和个人自由置于核心地位。为此，狄德罗（Denis Diderot，1713-1784）穷毕生精力编纂大百科全书，力图扫除历代权威所散布的蒙昧主义；伏尔泰（Voltaire，1694-1778）极讽刺挖苦之能事，大力鞭挞基督教的妄自尊大以及教会对教育的垄断。在人类历史上，从未有过一个时代赋予以理性在处理人生实际问题上以如此显赫的地位。现代社会科学诸如社会学、政治学和经济学的诞生，都是启蒙运动的结果。历史学这一传统的人文学科，如今也获得了新生的活力：人们开始寻找隐藏在历史事件背后的发展动力。“人是自己命运的建筑师”，作为文艺复兴人文主义的主题，在此得到了更明确的表达：人的道德是自主的，人类的希望不是源于人性的善恶，而是建立在人的潜在能力之上；只要人类充分地解放自己，享有思想和言论的自由，人类就能运用自己的经验和才智改善自身的道德状况和生活条件。

自19世纪中叶以降，随着专业化的发展，科学与人文传统之间的相互影响日渐式微。专业化的教育，虽然可以加快个别部门的发展，却减弱了人类理智在把握总体方面的指导能力。把物质世界设想为僵死的机械世界，使得人们对自然和艺术缺乏应有的尊敬；把精神看作独立的实体，引导出个人私有的道德世界和内心经验世界。笛卡尔双实体理论赢得了各自的信徒，纯粹的物质实体导致了实证主义的偏狭见解，独立的精神实体化育出存在主义这类怪胎。实证主义背离了人文主义的核心思想，忘记了人类所有的知识都是人类心智构建而成的。忘记了这一点，事实上也就等于否定了人的尊严和价值，因为人的尊严和价值来自只有人才有的各种潜在能力。正是依靠这些能力，人类建造了科学的大厦，开辟了改善自

己命运的可能性。另一方面，正当量子力学开辟人类生活的崭新前景之时，存在主义者却沉溺于个人的神秘精神体验之中，把非理性的放纵状态当做自由状态，并声称现实世界是个人自由的障碍。在他们看来，人类已是在劫难逃。这是对人的尊严和价值的彻底否定。

当代普遍流传着一种误解，以为科学的迅猛发展导致了人文精神的萎缩。人们之所以有这样的误解，部分是因为科学技术已经渗透到人类生活的各个角落。今天，我们完全生活在一个技术化的世界中，出门是汽车飞机，进门是电视网络，离开了技术产品我们几乎不知道该如何生活，这很容易造成人是技术的奴隶这种印象。技术的飞速发展，同时还加剧了社会分工的专业化和组织管理的官僚化倾向，并且过分强化了生存竞争意识，所有这些都在一定程度上妨碍了个人心智的自由发展。造成这种误解还有一个重要原因，那就是现代教育的专业化倾向。隔行如隔山，这是人们常有的感叹。18世纪的人文学者大都把牛顿的《原理》和布丰（Comte de Buffon，1707-1788）的《自然史》摆在案头，今天的人文学者至多不过是通过一些科普作品来了解当代科学的基本概念。他们一方面接受了近代科学的机械论自然观，另一方面又对这种决定论的世界观抱着怀疑甚至反感的心理。

所幸的是，20世纪一批人文学者对科学的历史、哲学和社会学的研究，正在重新消融两大传统之间的隔阂。怀特海

（A. N. Whitehead，1861-1947）一方面称颂近300年的科学发展“是一次理智显示的史诗”¹，与之相比“宗教改革虽然重要，但只能认为是欧洲民族内部的事情”²；另一方面，他又对近代科学运用抽象概念来把握物理实在的局限性作出了精辟的分析。怀特海指出，“把注意力局限于抽象概念群上有一个好处，这就是思想可以集中在界限和关系都十分明确的事物上。……但把注意力集中在

¹ A. M. 怀特海（何钦译），《科学与近代世界》，商务印书馆，1989。

² 同上，第1页。

一群概念上，不论这群概念的基础如何可靠，由于这种作法的局限性，总是会有弊端的，那就是你把别的东西全部抽绎掉了。如果被抽绎掉的东西在你的经验中很重要，那么你的思想方式便不宜于处理它们了。思想总是不能没有抽象概念的，因此最重要的是，要经常以批判的态度检查你的抽象方式。”¹ 20世纪科学上的突破，本身就是对17世纪经典理论及其哲学基础的批判：哥德尔不完全定理揭示了形式系统无法回避的局限性，爱因斯坦相对论推翻了牛顿的绝对空间概念，经典的决定论图像业已被量子力学的几率幅概念取而代之。量子力学的非决定论特征，是波普尔（Karl Popper，1902-1994）为自由、理性和创造性辩护的起点。他声明：人类理性预言未来的能力是有限的，而其批判的能力是无限的，因此未来是开放的、有待于我们去探索的广阔领域²。这无疑是人文主义在当代的回音。人文主义拒绝任何关于人的决定论或简化论的观点，坚持认为人虽然并不享有完全的自由，但只要充分发挥自身的潜在能力，仍能在一定程度上掌握着选择的自由。科学上的成功，正是人的尊严和价值的显现。

三、科学与技术

谈到科学与技术的关系，我们总会想到培根（Francis Bacon，1561-1626）。“知识就是力量”，培根的这句名言，在今天几乎是家喻户晓。由于培根的巨大影响，许多历史学家常常把近代科学的成功归结为人类力图驾驭自然的欲望。事实上，培根只是近代科学的鼓吹者，并不是其奠基者之一。在科学思想史上，培根与伽利略和笛卡儿不在同一量级。尽管他非常关心科学，实际上却忽略了同时代最重要的科学进展，包括开普勒和哈维（William Harvey，1578-1657）的工作在内。培根所倡导的科学方法，所谓归纳法，也不像人们所想像的那样卓有成效。举例来说，无论你怎么应用归

¹. 同上，第56-57页。

². Karl Popper, *The Open Universe*, London: Hutchinson, 1982.

纳法，都不可能从伽利略和开普勒的理论导出牛顿理论¹。在知识的进化过程中，最重要的是人的创造力。16至17世纪的科学革命，首先是一场心智上的或理智上的观念变革，伽利略和笛卡儿所完成的无非是理论构建。毋庸置疑，文艺复兴时期的艺术家、建筑师和工程师在反对亚里士多德的斗争中发挥了重大作用，但这种作用主要是破坏性的而不是建设性的。另一方面，近代科学成功之后，也没有立即带来一场技术革命。迟至18世纪，人类在技术上的突破主要是靠经验的积累。工业革命的核心技术，蒸汽机和煤气照明，都是人类从长期实践中摸索出来的。当然，这不是说近代科学与技术之间没有相互促进作用。举例来说，要是没有望远镜，伽利略也不可能发现月球山、木星卫星和太阳黑子，从而推翻亚里士多德月上界完美无缺的宇宙论。另一方面，伽利略的弹道研究，以及后来的真空实验，对于军械和热机的改进，都曾起过指导作用。但就总体而言，近代科学与技术之间的关系，并不十分密切。近代科学的社会影响，首先发生在思想（包括宗教和人文）领域，其在技术上的大规模应用，还是19世纪的事。

但我们也不能由此就低估培根的贡献。尽管培根在科学思想上没有什么重大发明，尽管培根的口号并未立即落到实处，培根的号召力和影响力仍然是巨大的。近代科学区别于古代科学，不单是在思想层面上，更有社会的一面。古希腊的科学研究只能靠私人庇护，近代科学研究则以学会和大学作为依托。培根的贡献，正在于其大力推进了科学的社会化，为近代科学争取了一大批信徒，也就是新兴的市民阶级。17世纪英国皇家学会和法国科学院的建立，皆以培根主义为宗旨。18世纪的科学，人们常称之为培根科学，以别于17世纪的伽利略或笛卡儿科学。伽利略和笛卡儿的科学革新了希腊的

¹. 按照伽利略理论，抛射体的运动轨迹是抛物线，而不是牛顿理论所断言的椭圆；同样，开普勒第三定律只有在忽略行星之间的摄动，并假定所有行星质量相等的情形下才成立。

理论，培根科学则开辟了希腊人不太重视的经验科学领域，从声光化电到化石胚胎，莫不在人们的关注之列。当然，这些领域内的理论构建，仍是循着伽利略和笛卡儿的路线，但由此建立起来的现代科学理论，从19世纪的热力学、原子论和电磁理论到20世纪的量子论和遗传学，彻底改变了人类的生活面貌。

所以说，只是到19世纪，科学才开始真正指导技术的发展。而在此之前，科学与技术各自保持着自己的独立性。近代，也就是从文艺复兴到启蒙运动这段时间，科学与技术之间的关系与希腊化时代（前320至前30年）颇为相像。希腊化时代的科学家也从工程技术传统中汲取了有益的成分，他们勤于动手，敏于观察，特别重视数量和空间位置的变化，由此开创了两门数学化的实验科学：几何光学和静力学。与此同时，科学的进步又反过来促进了技术的发展。阿基米德就曾利用杠杆原理发明了巨型投石机，据说还曾运用抛物镜聚焦原理烧毁过围攻叙拉古的罗马战舰。尽管如此，科学与技术仍然保持着各自的独立性。在世人心目中，阿基米德是一位机械发明的天才，但他自己对这些实用的发明非常轻视。阿基米德尽管有着工程师一样的双手和双眼，他的心灵与工程师迥然不同：他的目标是寻找自然现象背后的数学法则，为此他利用了一切可用的方法，特别是技术传统的实验方法，来解决他所关注的数学问题。人们常说，希腊人在技术上的成就恰如罗马人在科学上的贡献，两者都近乎为零。这种说法未免过于夸张，但也反映了一个基本事实，那就是，在古希腊和古罗马，科学与技术基本上是脱节的。介于期间的希腊化时代可以说是一个例外。希腊化时代是人类历史上的第一个科学时代，也是专业科学家初次出现、科学与技术之间的开始相互渗透的时代。这个时代的特征，单就科学技术而言，倒与近代有几分相似。

近代科学，伽利略、开普勒、笛卡儿和牛顿的科学，无论其所用的方法和所要解决的问题，都是与希腊科学一脉相承的。近代科学的诞生，源自于科学的内在价值，也就是揭示或曰构建世界的秩

序。长期以来，科学对其成果的实际应用漠不关心，技术又是在没有科学指导下独立发展起来的，这种状况到17世纪仍然没有变化。但在17世纪初，已开始有少数人，特别是弗兰西斯·培根，认识到科学与技术有可能合为一体，并对此大加宣传。17世纪，正是西方社会中贵族阶级开始没落、市民阶级开始成长的时代，培根等人的宣传投合了这个新兴阶级急于改善自身福利的心理。科学，昔日的贵族文化，也由此获得了市民阶级的青睐。到18世纪，培根的主张开始付诸实践。发端于18世纪的现代科学，先是侧面推动了以蒸汽机为动力的工业革命，进而正面指导了电力与化学工业的发展，最后以人们意想不到的方式带来了信息技术革命。

工业革命在18世纪中叶的英国已初露端倪，但直到1830年它才在欧洲大陆蓬勃发展。工业革命的核心技术，钢铁、煤炭和蒸汽机，前面我们曾说过，是人们在长期实践中摸索出来的，但18世纪新的热学理论和应用力学的兴起，有力地推动了这场革命。18世纪新成立的一些研究机构，比如法国国立工艺博物馆和英国皇家学会，为科学的门外汉举办过大量通俗演讲和示范表演。银行家和企业家不但给予这类演讲和示范以大量资助，还专门就一些重大理论或实际问题设奖悬赏。约翰·伯努里（Johann Bernoulli, 1667-1748）和欧拉（Leonhard Euler, 1707-1783）建立的固体弹性力学理论，现在被用来检验各种材料的拉伸、弯曲和断裂的强度。瓦特（James Watt, 1736-1819）本是一个仪表制造行的学徒，他对纽可门机的改进要归功于他在爱丁堡大学的听讲，当时的爱丁堡大学正在详尽地阐述新的热学理论以及蒸发冷凝现象和温度热量的测量方法。瓦特发现，纽可门机的汽缸中喷射蒸汽加热再喷射冷水冷凝浪费了大量的热量，为此他设计了一种在分离的冷凝器中产生冷凝作用的发动机，也就是后来所称的瓦特机，其输出功率是纽可门机的4倍。到1830年，蒸汽机已成为优异的机动能源，而依赖巨大能源的工业革命也随之勃兴。19世纪热学和力学的迅猛发展，不单为进一步改进蒸汽机提供了指导原则，同时还指导了新型发动机的设计和生

产。本世纪20年代之后，汽轮机、内燃机（汽油机和柴油机）、喷气和火箭发动机已经逐步取代了19世纪中叶蒸汽机的地位。随着这些新型发动机的完善，轮船、汽车、火车以及后来的航空与航天工业日益壮大。

电力工业的崛起为这几种新型发动机的发展铺平了道路，发动机和电动机共同支撑起我们的机械工业文明。今天，电能是人类掌握的各种形式的能量中占有独特的地位。电能是二次能源，它的开发和利用是与电磁学的研究密不可分的。18世纪对静电的研究已导致了伏打电堆和蓄电池的产生，但19世纪上半叶投入市场的蓄电池只是一些微弱的能源。电能的广泛应用有赖于安培（André M. Ampère, 1775-1836）、奥斯特（Hans C. Oersted, 1777-1851）、法拉第（Michael Faraday, 1791-1867）和麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831-1879）对电磁本性的揭示。1832年4月，法拉第在皇家协会演示感应电流时，一个参观者曾问这种新玩意儿有何用处，法拉第反问道：“新生婴儿有何用处？”。法拉第的回答，恰如其分地道出了现代科学与技术之间的关系：新生婴儿具有强大的生命力，但他并不是为着有何用处才来到世间。电能有两大优点，其一是适合远距离传输，其二是与机械能的转换效率高。电动机和发电机的原理是建立在奥斯特和法拉第研究基础之上的，其转换效率可高达80%-90%，而内燃机只有26%-40%，蒸汽机就更低了。1880年前后，发电机和电动机已经相当完善，往昔的电弧灯也开始被爱迪生（T. A. Edison, 1847-1931）发明的白炽灯所取代，电能由此获得了大规模的应用，世界各国普遍将煤炭、石油、水力、原子能等各种形式的能源转化成电能。

化学工业与现代化学可以说是平行发展起来的。工业革命发轫之初，化学商业与纺织工业的关系变得特别密切，布匹的漂白与染色迫使人们开始大规模地制造硫酸和苏打来弥补天然酸（酸牛奶）和天然碱（草木灰）的不足。1775年，巴黎科学院悬赏12000法郎征求从食盐制造苏打的方法。法国大革命期间，法国政府要求化学

家尽可能研究和改进当时的化学工业，由此发明了多种更经济更简便的硫酸和苏打制备法。法国的化学家还专门研究了植物生长的化学，他们发现了二氧化碳的自然循环。法国人的这些研究成果，后来被法国多种工艺学院毕业的德国化学家李比希（Freiherr von Liebig, 1803-1873）应用到农业上去。李比希用化学方法分析了植物灰的无机物含量，并制造出与植物灰成分相同的化学肥料，钾盐和磷酸盐。1837年，他在英国科学促进会举办的利物浦大会上演讲“化学及其在农业和生理学上的应用”，获得了时人的热烈欢迎。1842年，李比希重访英国，与英国首相及好几个大庄园主商议筹建伦敦皇家化学学院。这个学院于1845年建成，李比希还推荐了自己的高足冯·霍夫曼（A. W. von Hofmann, 1818-1892）任该院教授。这个学院的初衷是改进土地产量，但由于霍夫曼的兴趣在煤气和煤焦油的分析方面，结果导致了精细化学工业的建立。由霍夫曼协助设计的波恩和柏林大学的大型化学实验室，于1869年建成。19世纪下半叶，德国的有机化学理论与精细化学工业同步并进，由这些地方培养出来的化学家成了德国化学工业的支柱。上千种染料，诸如品红、苯胺蓝、茜素和靛蓝，以及药物、香料和糖精，都先后从煤焦油的衍生物中提取或制备出来。有机结构理论把种类繁多的有机化合物纳入一个统一的体系，为有机合成开辟了广阔的道路。到20世纪，人们先后合成了橡胶、塑料、化学纤维以及多肽类物质，包括各类激素、维生素和蛋白质，由此给我们的日常生活带来了巨大的影响。

20世纪的信息技术革命与生物技术革命，几乎超出了19世纪科学大师的想像力。而这场技术革命所依赖的理论基础，量子力学和分子生物学，却是19世纪物理学、化学和生物学理论发展的自然结果。量子力学的创立，不仅揭开了物质科学崭新的一页，为人类带来了新型的能源和材料，而且为微电子和光电子信息技术奠定了科学基础。早期电子技术的理论基础是麦克斯韦的电磁理论（1864年）。早在19世纪初，人们就在寻求利用电流传递信息的方法。经

过将近一个世纪的理论和实验探索，人们先后发明了电报（1836，莫尔斯（S. F. B. Morse, 1791-1872））、电话（1876，贝尔（A. G. Bell, 1847-1922））和无线电报（1896，马可尼（G. Marconi, 1874-1937））。1897年，J. J. 汤姆逊（J. J. Thomson, 1856-1940）发现了电子，早期的电子技术也由此达到顶峰，这就是三极电子管放大器的发明（1906，德福雷斯特（L. de Forest, 1873-1961））。三极管对电信号的放大能力，使得无线电远程通讯成为可能。本世纪20年代之后，随着量子力学的建立和固体物理学的发展，电子技术进入了微电子和光电子阶段。1947年，贝尔实验室的物理学家发明了以半导体为材料、以固体能带理论为工作原理的新型电子放大器件——晶体管。晶体管的发明，为电子电路的集成化和数字化提供了物理基础，从而点燃了信息技术革命的火花。集成电路自1958年问世以来，相继越过小规模和大规模阶段，一直朝向超大规模方向发展。集成电路的出现为电子计算机的发展开辟了新的天地。电子计算机自从1945年ENIAC问世之后，也先后经历了电子管、晶体管、集成电路和超大规模集成电路阶段，而今计算机网络交流已走入千家万户。就在微电子技术高速发展的同时，光电子技术也在量子理论的指导下突飞猛进。激光器诞生于1960年，它是将1954年研制成功的微波激射器放大原理应用于光波阶段，其理论基础则是1916年爱因斯坦提出的受激辐射概念。如果说没有电子管和晶体管就没有收音机、电视机、计算机和通讯卫星，没有激光器我们也无从得到全息摄影、激光制导和光纤通讯。

从古典遗传学到分子生物学，20世纪生物学理论的进展在生命领域造就了另一场信息技术革命。20世纪30年代，摩尔根

（T. H. Morgan, 1866-1945）提出了基因理论，但基因只是交换、重组和突变时无法再分的单位因子，其物理化学基础仍然是个谜团。1953年DNA双螺旋结构模型的建立和60年代遗传密码的破译，最终引发了一场生物技术革命。生物信息技术的核心是以DNA重组为中心的基因工程。基因工程就是根据人类的需要，对DNA进行人

工剪切、拼接和组合，然后把重组的DNA转入受体进行复制和传代，从而使外来基因高效表达，产生出人类所需的生物物资资源。第一个基因工程成功的实例是1976年在美国使大肠杆菌产生人脑分泌的生长抑制素。20世纪70年代以来，转基因动植物、转基因药物、以及天然蛋白质的基因改造日益受到人们的重视。在转基因生物工程方面，自1983年首次获得转基因烟草和马铃薯以来，世界上已有百种以上的转基因植物。与基因工程密切相关的细胞工程近30年也取得了巨大的成就，1978年首例试管婴儿的诞生、1996年克隆羊多利的问世，可谓是惊世骇俗的生物技术杰作。

从19世纪热机的改进和电力的使用，到20世纪信息技术和生物技术革命，近一个半世纪重大的技术突破，几乎都是在科学理论的指导之下完成的。除了上面提到的五个方面外，我们还可以加上微生物学对抗生素的生产、哥德尔定理和图灵机理论对计算机程序概念的指导性作用。反过来，现代技术的进步又推动了现代科学的发展，这突出表现在科学仪器的革新和发明上。科学总离不开观测和试验，现代技术的进步，不仅提高了实验测量的精度，同时也拓展了实验观测的广度。加速器和对撞机的发明，开创了粒子物理学的新纪元；激光器的出现，有力地推动了一批基础学科的进展；电子显微镜使人类首次看到病毒的图像；射电望远镜预启了全波天文学的到来；卫星和遥感技术开辟了空间探测的新时代；电子计算机的应用，得以使我们能够处理来自对撞机、基因组、遥感卫星和空间探测器的巨量信息。现代的科学与技术已经变得密不可分，以致我们常常用“科技”或“理工”二字来并称二者。

但我们不能由此就否认现代科学与技术各自的相对独立性。技术上的重大创新，固然离不开基础理论方面的突破，但若是没有社会与市场需求的刺激，人们也不会投入大量的人力和物力去开发。原子能的利用，晶体管的发明，青霉素的研制，都是明显的例证。而科学上的重大突破，主要来自科学体系内部的矛盾，包括同一理论自身、不同理论之间、以及既有理论与新近实验之间的矛盾，相

对论和量子力学的奠立，正是这类矛盾推动的结果。科学关注的是世界的秩序，自然的规律。天体是如何运行的？恒星乃至整个宇宙是何面目？大陆和海洋又是如何形成的？生命的本质是什么？宇宙万物源自何处？有没有统一的基元？这些问题在科学发展的历史长河中是亘古常新的话题。科学的初衷就是要回答这些问题，科学理论上的每一步重大进展，都是对这些问题的全新解答。科学始终如同一个新生的婴儿，其在技术上的应用只是其强大生命力的一部分。现代科学的工具价值业已为科学争取了巨大的生存空间，但一个婴儿并不单单为了生存才来到这个世界。科学本身有其严肃的伦理价值，这种伦理价值和道德使命是其内在生命力的源泉。科学与宗教和人文主义的冲突与融合，正是其内在活力的表现，而在技术上的应用则是其内在活力的发展与转化。

第二节 科学发展的历史脉络

科学一直致力于理解我们生活于其中的这个宇宙，科学上的每一步重大进展都导致我们对于整个宇宙的全新认识。因此，当我们谈到近代或现代科学时，我们并不是单纯地指称近代的或现代的科学。笼统地谈论古代科学更没有意义，因为中国与希腊文明就有着迥然不同的宇宙图像。那我们有什么理由使用“西方科学”这个词呢？希腊科学与近代和现代科学之间的渊源何在？

毫无疑问，近代科学的兴起，世界各大文明都发挥了一定的作用。中国的印刷术，有力地促进了知识的传播；印度的三角学和阿拉伯人的代数学，是现代数学以及数学化的科学不可或缺的一部分。文艺复兴时期的西欧，可谓世界各大文明的精华荟萃之地，但我们不能因此就否认近代科学与希腊科学之间的密切关系。近代科学所发端的一些基本问题，如变化问题、行星运动、落体运动、血液循环，无不是希腊人的遗产。近代科学的基本方法，无论是数学方法还是经验方法，也都是希腊人的发明。更重要的是，希腊人为

后世奠定了宇宙秩序的信念和理性批判主义的传统。因此，我们在讨论科学发展的历史脉络时，不能不从西方科学的主要源头——希腊科学的兴起谈起。

一、希腊科学的兴起

前面我们曾提到过，在古典希腊时代，只有哲学家（所谓爱智者）、诡辩家、教师和医生，并没有专业的科学家群体，究竟是什么力量推动他们从事有关自然的研究的？要回答这个问题，只要看看希腊科学的鼻祖泰勒斯的故事。柏拉图在《蒂迈欧篇》中说，泰勒斯有一次因为思考天空入了神而失足落入井中。可同一个泰勒斯，在亚里士多德的《政治学》中却被描述为一个睿智的商人：因为别人笑他穷，他便利用自己的天文知识，预见到来年的橄榄油丰收，随即以极低的价格租下了当地的所有油榨机。在希腊人看来，这两个形象之间并无矛盾，欧里庇得斯就是用“财富”来描述人们所获得的神圣知识——对自然的永恒秩序的认识。希腊人认为，知识本身就是财富，柏拉图和亚里士多德只是为这个观点提供了一个理论基础。柏拉图认为，在流变不居的自然现象背后，有一个永恒的形式世界；研究流变世界所显现的秩序，有助于将人类的灵魂引向完美的理念世界。在亚里士多德看来，万物皆有自身的终极目的，人作为有理性的动物，他的最高目标就是理性的生活，运用理性来认识宇宙的秩序和奥妙。

揭示宇宙的秩序，首先要有“自然”这个概念。今天，我们总是把泰勒斯及其米利都学派称为第一批哲人科学家，正是因为他们发现了自然，认识到自然现象是受因果链条支配的，而不是某个超自然力作用的结果。对泰勒斯来讲，地震不再是海神波塞冬的发怒，而是载负地球的水体波动所致。米利都学派哲学家不仅就地震、雷电、天体和生命等各类特异现象给予了自然的解释，而且对一般宇宙论问题，也即万物的起源和构成问题提出了自然的理论：泰勒斯认为是水，阿那克西曼德认为是无限，阿那克西美尼认为是气。米利都学派关于世界本原的理论是相当幼稚的，不消说我们今天看来

是如此，在亚里士多德眼中就已显得相当孩子气。但他们抓住了问题，摈弃了超自然因，并认识到自然的解释可以对纷纭万象作出普遍的说明。

理性批判传统的确立：希腊宇宙论

从米利都学派的水和气，到今天的夸克和超弦，人类对自然的认识是逐步深化的。当代许多科学哲学家都致力于理解知识进化的动力，但无论是库恩的范式理论还是波普尔的证伪理论，都不能对此作出很好的说明。如果我们用历史的透视来取代逻辑的分析，我们就会发现，科学的进展，主要得力于理性的批判主义。

米利都学派的功绩，不单在于他们发现了自然，他们还确立了理性批判主义的传统。米利都学派三代哲学家对世界的本原提出了三种不同的理论，并且后来者是在反驳前人的基础上创立自己的学说的。这三位哲学家发问的问题，事实上是逐层推进的，并不是同一问题的单纯重复。泰勒斯所问的是，世界上最初出现的是什么？他的回答是水。但如果初始物质是水，火又怎么能产生呢？如何解决初始物质与万物的关系，正是阿那克西曼德所欲解决的核心问题。阿那克西曼德认为，初始物质必定是一种不同于万物的、更为基本的东西，不可能是我们所熟悉的普通物质。他称这种东西为“无限”，“无限”就像树干，而宇宙万物就像裹着树干而生长的树皮。借用这个生物学模型，他成功地绕开了泰勒斯理论的困难，但树皮到底是初始物质还是初始物质的变化？米利都学派的第三位哲学家阿那克西美尼正是从这儿着手的。阿那克西美尼认为，初始物质是气。这看似是一场倒退，阿那克西曼德的绚丽理论被一种平淡无奇的学说取而代之。但这个平淡无奇的思想，不仅把人们引回到可见的现象世界，同时把万物的本原和万物如何来自本原这两大问题结合起来。气聚而为水凝而为冰，水又散而为气，气的聚散为初始物质的变化作出了更清楚的说明。米利都学派对初始物质的

探讨，向我们明确展示了理性批判与理论发展之间的关系。理性批判是思想的交流，是不同理论之间的竞争与较量，它迫使人们思考立论的基础、证据和论证的有效性。

希腊科学以万物的本原问题开篇，到前5世纪早期，宇宙的变化问题几乎占据了所有哲学家的心灵，首先提出这个问题的哲学家是赫拉克利特和巴门尼德。赫拉克利特也是爱奥尼亚人，由他来提出变化问题也就毫不奇怪了。赫拉克利特认为，万物皆处在永恒的变化之中，同时又保持着自身的同一性，这就是对立的和谐。变化，是为了确保事物之间的平衡；世界有如一团永生之火，万物与火的转化有如货物与金子的兑换，一切变化皆不能越出平衡的限度。赫拉克利特把眼前的世界及其变化当做理所当然的事实，巴门尼德却不这么看。巴门尼德从“无”（不存在）中不能生“有”（存在）出发，进而断言一切生成、变化和消亡都是不可能的，整个宇宙是一个绝对均一、永恒不变的实体，一切变化都只是幻象。巴门尼德无疑混淆了存在与思维或语言的关系，但他的论证给予“常识”以毁灭性的打击，同时迫使人们思考知识的基础问题。

巴门尼德的“一”与赫拉克利特的“流变”决然对立，但两人都以最尖锐的形式提出了变化问题。5世纪下半叶，希腊哲学家的中心任务就是调和这两大传统。无论是恩培多克勒和阿那克萨哥拉，还是留基伯和赫拉克利特，都不能不面对“无中不能生有”的论点，同时又无法否认现实世界的变化和多样性。恩培多克勒承认无中不能生有，但他否认存在的惟一性。他认为水土气火所谓“四根”都是永恒的存在，它们既是初始物质又是基本物质，在“爱恋”和“斗争”两种相左的力量推动下相互混合和分离，纷纭万物都是这四根按不同的比例合成的。利用元素和比例这两个概念，恩培多克勒第一次明确阐述了物质构成理论。阿那克萨哥拉的基本思想与恩培多克勒相似，但他没有元素或基本物质这一概念。他认为任意一物皆是万物的混合，最初是万物一体，随后是一含万物，所谓变化不过是存在物的混合与分离。在我们今天看来，由变化问题

所引出的最有成果的思想，当推原子论。留基伯对变化问题的解答，比阿那克萨哥拉和恩培多克勒更接近于巴门尼德。留基伯的原子与巴门尼德的“一”一样，是均一的、不变的、不可分的永恒存在，两者的关系正是无限与单一的关系。所不同的是，留基伯并不否认真空的存在。他认为，世界就是原子在无限的虚空中永无休止的随机运动，变化则是原子之间的钩合和弹离。原子数量无限，形态各异，万物之间的差异，皆源于原子形状和排列上的不同。后来，德谟克利特进一步用原子论来说明物质的感觉属性，诸如颜色、气味、温度等等。

毕达哥拉斯-柏拉图的数学原则：数学天文学

由变化问题所导出的各种不同的终极构成理论，都离不开一个核心思想——比例与和谐的观念，这无疑要归功于毕达哥拉斯

（Pythagoras，前584？-前497？）学派。毕达哥拉斯学派在公元前6世纪晚期还是希腊各城邦的重要政治力量，其科学活动主要在公元前5世纪至4世纪初。毕达哥拉斯学派对科学最突出的贡献，是开启了科学的数学传统，他们宣称“万物皆数”。所以，亚里士多德认为，米利都学派探讨了万物的物质因，毕达哥拉斯学派则探讨了形式因。万物皆数的思想，得力于毕达哥拉斯学派在音乐上的发现：将琴弦长度减半，音程提高8度；缩短 $2/3$ ，升高5度；缩短 $3/4$ ，高4度； $2/3 \times 3/4$ 恰好是 $1/2$ 。他们声称，天球的运动也发出和谐的音乐，只是我们一生下来就熟悉而变得充耳不闻。毕达哥拉斯学派对科学的影响是双重的，一方面他们是第一批力图为自然知识提供一个数学基础的理论家，另一方面，他们带有数字神秘论的色彩。万物皆数，不仅指现象之间的关系可用数来表示，同时它把数看成是存在的本原。

继承和发扬这个数学主义传统的，正是雅典哲学家柏拉图。理念论的思想，与变化问题一脉相承：相对于现象，它是永恒的；相

对于个体，它是普遍的；相对于“意见”，它是真正的知识。不过，这个概念本身还是来自毕达哥拉斯学派。“理念”在希腊文中的本意就是形式，毕达哥拉斯学派借用这个词来指称理想的几何图形，以区别于纸面上画出的几何图形，后来苏格拉底将这一思想推广到伦理范畴，以区别理论上的善与实际的善行，柏拉图则将这一思想推及整个宇宙。柏拉图的宇宙论包括三个要素：形式、个体和造物主，造物主只是依据形式利用无定形的基质造作万物，因此流变的现实世界只是永恒的形式世界的一个不完善的摹本。科学的目标，就是要揭示出流变世界所显现的秩序，从而将人类的灵魂引向永恒的形式世界。因此，理想的科学，其命题不是观察的陈述，而必须是不可反驳的，也即数学化的。柏拉图对科学的影响也是双重的：从消极的一面看，他贬低经验研究的价值，只注意那些能够比较明显地展现出宇宙秩序和合理性的自然现象（天文和音乐现象）；从积极的一面看，他树立了科学研究的目标——发现经验资料背后的抽象数学法则。他把存在的终极构成归结为数学客体¹，并且第一个提出用均匀的圆周运动来说明行星的各种表现不规则运动。

用理想的、数学的天文学来代替观察天文学，确实是一项激进的观念变革。行星运动问题，几个世纪以来一直盘旋在天文学家的脑海之中，柏拉图第一次为此给出了明确的目标：如何组合各种均匀的圆周运动，使其结果对应于所观测到的行星运动？第一个试图解决该问题的天文学家是柏拉图的年轻友人欧多克索（Eudoxus，前408？-前355？）。欧多克索共用了27个绕地球均匀转动的同心球壳，其中恒星1个，每颗行星4个，日月各3个。凭借着自己的非凡数学技巧，欧多克索成功地用均匀圆周运动合成了闭合曲线运

¹ 柏拉图认为，水土气火并不是稳定不变的物体，而只是四种正多面体的摹本，分别对应正20面体、正6面体、正8面体和正4面体。他选取（半）等腰直角三角形作为最基本的数学客体，由此构成正方形和等边三角形以及各种立体图形。柏拉图的基本三角形与物质性的原子之间的关系，颇有点像现代物理学中的基本粒子概念与经典的化学原子概念之间的关系。

动，从而对行星逆行的闭合路径，包括趋近和离开滞留点的视运动变化，做出了良好的解释。

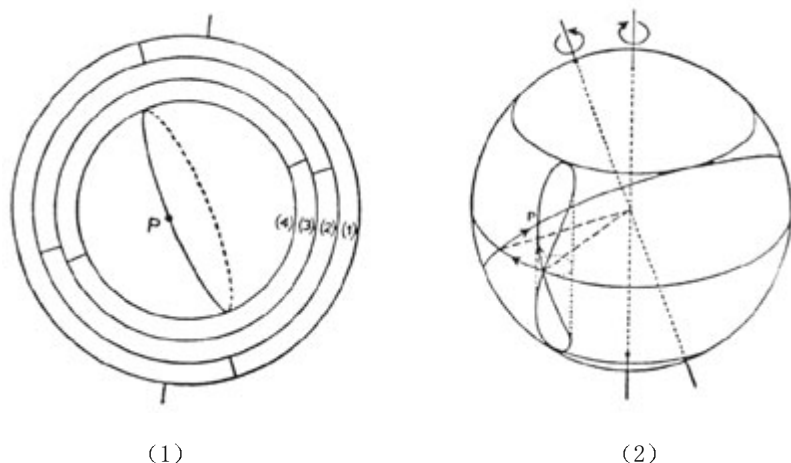


图1 欧多克索的同心球体系

(1) 欧多克索为每颗行星指派了4个球壳，行星位于最内层球壳的赤道上。这4个球壳，最外层代表与恒星一起绕南北轴自东向西的周日转动，实际上就是地球的自转；次外层代表沿黄道带自西向东的表观运动，旋转速度因行星而异；(2) 次内层与最内层同速反向转动，次内层的转轴位于黄道圈内，最内层的转轴与它有一倾角，大小随行星而异，这两个圆周运动合成一个马蹄形的闭合曲线。该闭曲线运动与次外层运动合成，能较好地说明行星的逆行和滞留现象。月亮和太阳都没有逆留现象，所以只用了3个球壳。

这是希腊数理天文学的发端。欧多克索的理论诚然取得了一定的成功，但对当时所知的许多重要事实尚不能给出令人满意的说明。首先，它无法解释月球视直径和行星亮度的变化；其次，该理论不能说明季节不等长现象；再者，每个行星逆行轨迹的形状、尺度各不相同，欧多克索的曲线对火星和金星完全不适用。因此，如

何修正欧多克索的理论，使之能够“挽救现象”，便成为后继天文学家的中心任务。头一个重大的修正是卡利普斯（Callipus，生活于前330年前后）给出的。他将同心球的数目从27个增加到34个，以便更好地逼近所观察到的季节不等长和逆行不规则现象。但这个修正对行星亮度变化这一事实仍然无力作出解释，所以到希腊化时代同心球体系被本轮和偏心轮体系所取代。在这个演变过程中，日心说和地动说起了居间作用。地动的观点在希腊并不新鲜，头一个明确阐述地球自转的天文学家是赫拉克利德（Heraclides，前388？-前315）。赫拉克利德还提出，金星和水星绕太阳转动，太阳绕地球转动，这无疑是要改进同心球理论的缺点，以便说明水星和金星的逆行及亮度变化现象。完整的日心学说是阿利斯塔克提出来的。阿利斯塔克认为，太阳和恒星固定不动，其表观运动是地球自转所产生的假象；地球不仅绕轴自转，而且绕太阳公转，而月亮则绕地球转动。这个理论同样是要克服欧多克索体系的局限，当时之所以不为人们所接受，主要因为日心说与亚里士多德的物理学不相容，而非出于教会或政府的压力。亚里士多德是希腊科学的集大成者，日心说要想为人们所接受，首先得创立一套崭新的力学来取代亚里士多德的物理学。

赫拉克利德的日心理论是从欧多克索同心球体系过渡到阿波罗尼本轮体系的关键一环。阿波罗尼（Apollonius，前247？-前205？）认为，所有行星包括月亮都围绕一个中心转动，这个中心又绕地球转动，前者称为行星运动的本轮，后者称为均输轮。这个中心，对某些行星比如水星和金星而言就是太阳，对于其他行星只是一个假想的数学点。阿波罗尼的理论用圆周取代了欧多克索的球壳，它不仅能更好地说明逆行现象，还可以解释行星与地球距离的变化。希腊天文学的顶峰是喜帕恰斯（Hipparchus，前161？-前126？）和托勒密的工作。喜帕恰斯沿袭了阿波罗尼的本轮与均轮方案，他根据自己的观测资料来选取本轮和均轮的半径与转速，大大改进了该理论的精度。托勒密是希腊天文学的集大成者，他引进

了两种新的均输轮，偏心轮和对峙点，进一步完善了喜帕恰斯的本轮体系。

托勒密的理论是对如何用圆周运动来解释各类天体现象这一问题的最后解答。自从柏拉图提出这个问题，希腊天文学家经过了500多年的漫长摸索。在这500多年中，希腊天文学家坚持用圆周运动来说明天体运行的各类不规则现象，诸如四季长度的不等、行星亮度的变化、特别是日月行星的不规则周期运动。他们坚信大自然的设计是合理的，是人类的理性能够认识的，但他们对待理论的态度逐步趋向现代的观点。柏拉图和欧多克索相信数学形式就是终极实在，后期的天文学家把这种宇宙论当做方法论接受下来，对于何谓终极实在则不太关注。但他们的理论蕴含着宇宙秩序这一根本信念，他们的目标是要对自然现象作出严整的数学说明，这个说明要尽可能简洁、尽可能与观测数据相符、尽可能对异常现象作出解释和预测。

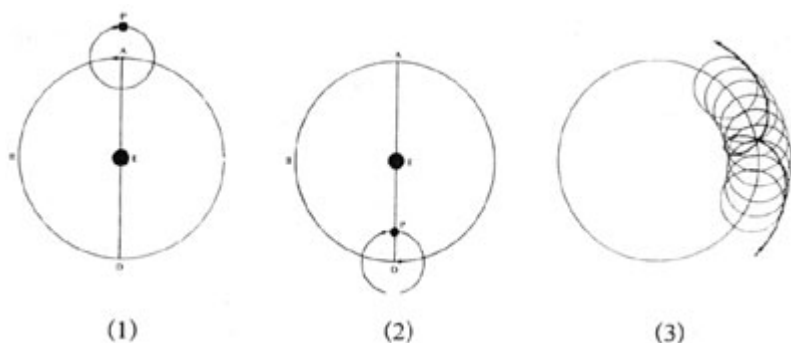


图2 托勒密-喜帕恰斯的本轮 (epicycle) 与均输轮 (deferent) 模型，图中本轮和均输轮皆逆时针均匀旋转

(1) 行星位于本轮的外侧：对地球观测者来说，两个转动的合成，给出最大表观速度；(2) 的内侧：在E点看来，两者合成最小的表观速度；(3) 行星的表观逆行运动，行星位于本轮逆行轨迹的形状有赖于本轮与均输轮的相对半径以及相对运动的方向和速度。

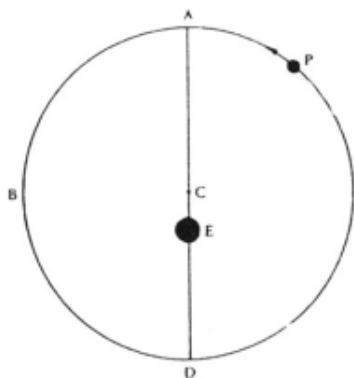


图3 托勒密的偏心轮 (eccentric circle) 模型

行星P绕中心点C作均匀圆周运动，C是一个假想的数学点。地球E与这个中心C并不重合，因此，在地面观测者看来，行星在近地点D运动较快，在远地点A显得较慢。该模型可用来说明太阳绕黄道的不均匀运动以及由此产生的四季不等长现象。

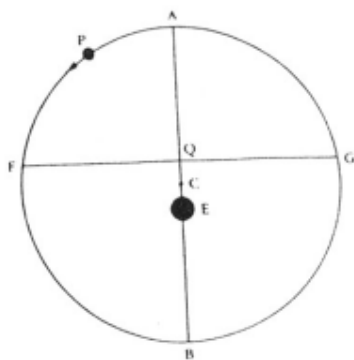


图4 托勒密的对峙点 (equant) 模型

行星P绕中心点C作圆周运动，但该运动相对于C不是均匀的；P关于Q作匀角速运动，而不是匀线速运动，它通过AF的时间与通过FB的时间相等；Q是地球E的对峙点， $CQ = CE$ 。

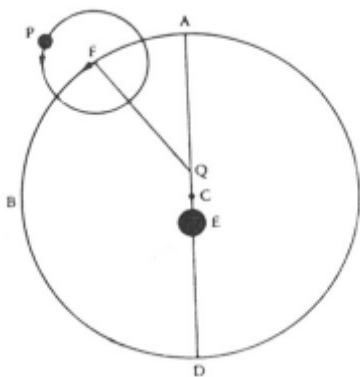


图5 典型的行星运动模型

行星P绕F作均匀的本轮运动，F绕中心C周转，相对于偏心等距点Q作匀角速的对峙点运动。该模型适用于金星、火星、木星和土星。

希波克拉底-亚里士多德的经验方法：物理学和生物学

希腊科学惠予后人最为丰富的遗产，在知识上要数数理天文学和描述生物学，在方法上，当推毕达哥拉斯-柏拉图的数学解释纲领和希波克拉底-亚里士多德的经验探究。人们常说希腊人不重视实验方法，这也是事实，但我们不能忘记，方法是用来解决问题的。希腊人所探讨的主要问题，比如变化问题和行星运动问题，无法借助于实验，而只能依靠抽象论证和观察。实验，无非是在受控条件下对某些量的测量，这意味着大自然是能够数学化的，意味着数学语言是我们与大自然交流的语言。实验方法固然受益于工程传统，但它的核心还是数学方法和经验方法。对自然进行经验研究，并不是罗列观察资料，而是要揭示出自然现象产生的原因。在希腊，首先系统地运用经验方法探究原因的，当推希波克拉底

(Hippocrates, 前460? -前375?) 学派。对于疾病的成因，希波克拉底学派不但摈弃了超自然因，而且抱着比较激进的经验主义态

度，总是尽可能地诉诸经验证据来支持自己的观点。

如果说希波克拉底学派的经验研究多半是为了实用，亚里士多德的经验研究则纯粹是出于理论目的。亚里士多德明确区分了理论与技艺，理论是更高级的智慧，是对原理和原因的认识。亚里士多德认为，知识，在严格的意义上，必须是永恒的、必然的，是经过逻辑证明的全称命题，但不必都是数学命题，这是与柏拉图的数学实在论根本不同的地方。知识论上的这种区别，导源于宇宙论上的区别。在柏拉图那里，形式与个体、存在与流变处于一种割裂状态，亚里士多德的目标就是要消除这种割裂。亚里士多德认为，个体不是形式的摹本，相反，形式是从大量个体中抽象出来的；那个不可见的存在世界，只是流变的终极目标。这样，亚里士多德就用一般与特殊的关系和从潜能到现实的发展这两个概念回答了希腊宇宙论的根本问题。作为希腊科学的集大成者，亚里士多德接受了前人关于物质因和形式因的观点。关于物质因，他认为地面上的一切事物都是有水土气火四种基本物质构成的；关于形式因，也就是每个个体事物的特征形式，他认为只是我们思想的抽象产物，而不是什么永恒不变的存在。亚里士多德的创见，是他为一切个体事物赋予了动力因和终极因。

动力因和终极因是用来说明运动和变化的。动力因和终极因的区别，只是在人为事件中才有必要：用木料做成饭桌，动力因是木匠；向天空中抛掷石块，动力因是人的推力。对于自然的运动和变化而言，二者事实上不可区分：种子自然地长成大树，石块自然地下落，其动力因就是朝向各自的自然目标和自然位置。亚里士多德认为，宇宙作为一个整体，并没有从外部控制其变化的心智，但宇宙中的每一事物在没有外来干扰的情况下，都朝向一个自然的目标。水和土总是自然地下落，而气和火总是自然地上升，每一种基本物质的终极目标就是它在宇宙中的自然位置。基本物质的运动，如同植物的生长，也是一个实现和达成的过程。亚里士多德对运动的论述，是动力学理论的开篇。亚里士多德认为，任何违背自然的

运动，都必须有一个外部的、与受动物体接触的推动者持续地作用。所有的运动都是接触传递的，不是推就是拉，没有任何超距作用。但一个石块脱手之后靠什么维持其运动呢？亚里士多德的解释是空气的反作用：石块在脱手之后排挤前面的空气反过来从后面推动它。这个解释过于牵强，人们就此争论了2000年之久，而最终的答案直接宣告了近代物理学的诞生。

亚里士多德的理论是一个严整的体系，其中物理原理与宇宙图像相互支撑。亚里士多德把宇宙分为月上界和月下界，月下界的一切物质都由水土气火四种元素构成，月下界的变化包括位置的变化（运动）、数量的增减、性质的转变、以及繁殖、生长和死亡（生灭）。而在月上界，除了天体的运动外没有任何其他变化。天体的运动也与地面不同：恒星只作规则的圆周运动，行星的不规则运动可归约为圆周运动的组合，但地面上的四种基本物质的自然运动都是直线运动（上升或下降）。所以亚里士多德认为，天体是由第五种元素以太构成的，以太的自然运动就是圆周运动。宇宙是一个有限的封闭球体，如果它是无限的，那么万物的自然运动，无论是月下界的直线运动还是月上界的圆周运动，都不可能令物体回归其自然位置。出于同一理由，亚里士多德否认真空的存在，因为真空中一切位置和方向都处于同等地位，自然位置也就失去了意义¹。宇宙的秩序，就是来自万物的终极因，同时也是万物运动和变化的终极目标。任何一个变化，都意味着秩序已被扰乱，同时也意味着秩序正在恢复。整个宇宙的终极目标是平衡或静止，水土气火回归自然位置、动植物生长发育、天体以太循环往复地回到起点，都是这个终极因的表现。这个自身不动、却能推动万物的终极因，亚里士多德称为第一推动者或上帝。17世纪科学革命的核心任务，就是要毁灭亚里士多德的宇宙大厦。

¹ 否定真空的另一理由是，真空中因为没有空气的阻力，自然运动就会以无穷大的速度发生，而强制运动根本就不可能发生。

亚里士多德和柏拉图在知识论和宇宙论上的分野，导致两人在方法论上的重大区别。柏拉图把一切质的差异转化为几何或数量的差异，因此他强调数学而贬低经验。对亚里士多德而言，形式是从个体中抽象出来的，个体事物除形式因外还有物质因、动变因和终极因，况且此四因在事实上难以区别，单单数学上的量的差异不足以说明逻辑上的质的不同。科学研究始于认识个体事物的原因，进而从特殊到一般，从单称陈述上升到全称陈述，最终以演绎系统的形式表述出来。这自然要把经验研究放在极为重要的地位。如果说柏拉图启动了数理天文学的传统，亚里士多德则开辟了物理学和生物学的研究¹。

生物总比无生命的物体更能展现自然设计的终极因，亚里士多德的生物学论述，占其全部著作篇幅的五分之一。他的动物学研究范围极其广泛，共有520多种，其中鱼类约120种，昆虫60多种。其资料来源，一是走访各类与动物有密切关系的人们，包括渔民、养蜂人、驯马师，再就是他本人的实际考察。他对动物的描述和分类，并不是一种常识的观点，而是立基于各种动物的物质属性、形态结构、运动方式、特别是生殖模式，分类的意图是确立某种动物在宏大的生物阶梯中的位置。他首先根据有无红色血液（物质因）将动物分为两大类群，这相当于今天的脊椎动物和无脊椎动物。在他的生物阶梯略图中，顶端是哺乳类，接下来是卵在母体内发育成熟的动物，再下来是卵在母体外发育而成的动物（如鸟类和爬行类），沿着这个阶梯往下便是无性生殖动物（如海星和贝类），最低等的是自然发生的动物（如虱子、蚊子、跳蚤）²。这个分类与他的宇宙论是一致的。按照他的理论，动物的物质因来自雌性的月经，雄

¹ 物理天文学是亚里士多德思想的产物。亚里士多德认为，欧多克索的理论没有说明同心球的性质以及运动的传递机制。亚里士多德只承认接触作用，为了使运动能够从最外层地球传向月下界，他共用了56个紧密相邻的同心球壳。

² 亚里士多德接受了同时代关于动物自然发生的观点。

性的“种子”则提供形式因、动力因和终极因，将雌性的质料塑造成型。植物的分类体系是亚里士多德的弟子狄奥弗拉斯图

(Theophrastus, 前372? -前287?) 给出的，他把植物分为乔木、灌木、草本、一年生、二年生和多年生植物，这个体系一直沿用到林耐(Linné, Carl von, 1707-1778) 那个时代。

亚里士多德共解剖过50多种不同的动物。解剖的动机，当然是要查明动物各部分的形式因与终极因，也就是今天所讲的结构与功能。解剖的成就，则是一系列的专著：《论动物的各个部分》、《论动物的运动》、《论动物的行走》、《论动物的生殖》。他对一种有脐带的胎生软骨鱼的描述，清楚地表明他是一个敏锐的观察者；他对偶因论的批判，则显示出一个卓越理论家的犀利本色。原子论者把世界看成原子随机运动的偶然结果，对此亚里士多德反驳道，自然物种总是只繁殖自己的同类，不可能是偶然变异的产物，像怪胎这类现象只是一般规则的例外，决不能因此就无视正常的繁殖模式，正如不能因为行星有逆留就否认圆周运动一样。

亚里士多德没有解剖过人体，历史上第一次公开解剖人体的生物学家是亚历山大里亚的希罗菲洛斯(Herophilus, 前3世纪-前4世纪)。亚里士多德的吕克昂学园在斯特拉托之后便衰落了，其时科学的重心转到了埃及的亚历山大里亚。托勒密王朝的创始人仿吕克昂学园修建了缪司学园，该学园拥有上百个享受国家薪金的教师和一个藏书50万卷的图书馆，并附设一座天文台、一个动物园、一个植物园和许多解剖室。希罗菲洛斯的研究特别关注神经和血液系统。他第一次区分了动脉和静脉，对神经系统有了一个全面的看法，包括大脑与脊椎之间的联系以及运动神经和感觉神经之间的区别。这些成就是骄人的，因为亚里士多德还认为心脏是智力的来源。希罗菲洛斯之后，埃拉希斯特拉托(Erasistratus, 前304? -前250?) 进一步扩展了人体的解剖学和生理学研究。埃氏是第一个精确描述心脏的科学家，他把心脏设想为一个泵，把瓣视为单向泵的活动阀门。但他认为动脉和静脉是两个分离的系统，前者发源于心脏，后

者发源于肝；静脉中流动的是血，而动脉内流动的是所谓生命的精气，因为他发现死去动物的动脉管是空的。关于神经系统，埃氏特别重视大脑解剖，并且把大脑沟回的复杂性与人类的高级智慧联系起来。

缪司学园到公元前2世纪便已开始衰落，其时的托勒密王朝越来越埃及化，希腊人在那里甚至受到迫害，以致当时最伟大的天文学家喜帕恰斯不得不避难于罗得斯岛。希腊化文明的重镇，除亚历山大里亚之外便数柏加蒙了，希腊生物学和医学的集大成者是柏加蒙的盖伦。盖伦共撰写了131部医学著作，流传下来的有83部。他在生物学上的地位，正如托勒密在天文学上的地位。盖伦解剖过大量的动物，包括与人相近的猴子。他证明活体动物动脉管内流动的是血液，并且明确指出神经起源于大脑和脊椎。但盖伦没有解剖过人体，当时人体解剖受到禁止，所以他的人体解剖知识包含着大量的错误，比如讲，大脑基部的迷网只存在于反刍动物体内。他的人体生理学，基本上是调和前人的诸说，包括希波克拉底的四体液说、亚里士多德的三魂说、埃拉希斯特拉托的气血运行理论和当代斯多葛的元气说。他把心房视为静脉的扩张，以为心脏仅由左右两个心室构成，并把心脏中隔上的密布小坑视为血液从右心室流入左心室的通道。盖伦没有认识到血液的循环运行，或许与亚里士多德的教导有关，因为按照亚氏理论，只有天体的自然运动是圆周运动。无独有偶，17世纪科学革命在推翻亚里士多德物理学的同时，也推翻了盖伦的血液运动理论。

近代科学的萌芽：欧几里德与阿基米德

无论是托勒密的天文学还是盖伦的解剖学，今天的教科书再也不会去讲授了，它们已经成了古董。与此形成鲜明对照的是，欧几里德和阿基米德依然光芒四射。在今日中学的数理教材中，他们的成就占了相当大的篇幅。欧几里德的几何学和阿基米德的静力学是

近现代科学的基石，这块基石不仅是知识层面的，而且是思想和方法层面的：前者是逻辑演绎体系的样板，后者是实验科学数学化的起点。

欧几里德本人就是一位大数学家，但他最杰出的成就不在于发现或证明了某个数学定理，而是他综合大量数学命题的陈述方式。

《几何原本》是古典希腊时代近200年的数学成果的汇综，一共包括467个命题，欧几里德用一种非凡的创造力将它们组织成一个条理分明的体系。《原本》分13篇，每一篇的开头都给出该篇所需的定义、公设和公理，接着依据这些定义、公设和公理逐条证明各个定理。这种组织命题的方式，无疑是亚里士多德的逻辑思想在数学上的应用和发展。欧几里德还采纳了亚里士多德关于公理与公设的区别：公理适用于一切科学，公设只适用于几何学。他对公设的选择极为严格，整部著作只用了第一篇提出的5个公设。在今天看来，欧几里德用到了上百个没有明确阐述的假定，我们也只是到19世纪才看清这一点。《原本》的成功是无法估量的，它不仅是后代数学著作的典范，而且是科学乃至哲学著作的楷模，17世纪牛顿的《原理》和斯宾诺莎的《伦理学》都是按这种方式撰述的。逻辑演绎体系的深远影响，根源于它自身所蕴含的希腊理性精神：在纷纭变幻的万物背后，在怪异偶然的特例背后，在大量孤立的命题背后，存在着易于为人们所理解的基本秩序、法则和原理。特例从属于通则，这就是希腊人的“逻各斯”。逻辑演绎体系既是希腊理性精神的展现，也是后来一切唯理主义的源头。

阿基米德的所有力学著作，诸如《论杠杆》、《论平面体的平衡》、《论浮力》等，都是按照演绎体系编排的。静力学是阿基米德研究的核心，也是他作出数学发现和机械发明的基础。阿基米德在数学上的最大成就是用穷竭法来求面积和体积，包括圆和抛物线弓形的面积，圆柱、球缺、三角锥、旋转抛物面、旋转双曲面和椭圆球面所围的体积。他的大多数数学成果，都是先通过力学方法来发现，进而采用穷竭法按照严格的逻辑步骤来证明。他的各种机械发

明，也是其力学和几何光学成果的应用。阿基米德在力学上的贡献，是给出了两个精确的数学定律：杠杆定律和浮体定律，这两个定律的发现和证明标志着数学物理学的诞生，标志着数学化的实验科学的创立。

在希腊，没有任何一个学者像阿基米德那样把数学（几何学）与物理学（力学）、把柏拉图的思想与亚里士多德的理论结合得如此紧密。静力学问题，就像抛射体运动问题一样，固然与工程问题有关，但实质上则是亚里士多德遗留下来的纯理论问题。按照亚里士多德的理论，运动分为两类，一类是自然的，比如天体的圆周运动、水土气火的下落和上升运动；另一类是强制的，如抛射体的运动。物体的自然运动就是趋向它的自然位置，强制运动则是背离其自然位置。运动意味着秩序的扰乱，而秩序不是别的，正是万物回归到自然位置而达成的平衡和静止。阿基米德没有研究运动问题，他关注的恰恰是平衡和静止。这个力学问题，到阿基米德手中，完全变成了一个数学问题。这需要有高度的数学抽象能力，换句话说，必须接受，至少是部分地接受柏拉图的思想。拿杠杆定律来说，你必须忽略杠杆本身的重量、支点的磨擦、空气的阻力，同时把重物当做质点（重心）、把杠杆上的位置作为理想的数学点来处理，这无疑是对现实世界的理想化、形式化，或者说柏拉图化。1800年后，伽利略为解决落体运动问题，抛弃了常识的、定性的冲力理论，重新返回到阿基米德。

二、腊科学的衰微与传播

阿基米德之死，预告了整个希腊世界即将遭受的命运。公元前212年，与伽太基结盟的叙拉古被罗马占领。据说阿基米德当时正在炭灰地上作图，一个罗马士兵踩在他的图形上，阿基米德冲他怒喝“别弄乱了我的图形”，于是那个士兵就刺死了这位时年75岁的科学家。公元前264年至前146年的布匿战争，是罗马与伽太基之间的殊死搏斗。到布匿战争结束，罗马已经占领了西班牙、迦太基、马其顿和希腊本土。前146至前30年，在罗马史上是一个内部极其

动荡外部急剧扩张的时期，北部的高卢、地中海沿岸的柏加蒙、叙利亚和埃及先后并入罗马版图。从此罗马进入了帝国时代。罗马帝国的崛起，宣告了希腊化时代的结束。希腊化时代，是希腊科学离开本土，而在亚历山大里亚、叙拉古、柏加蒙和安条克等地落户的时代。随着罗马的崛起，这些科学中心日渐萧条。尽管在公元头三个世纪这些地方仍然产生了一些出色的科学家，如2世纪的托勒密和盖伦，但与往日的辉煌已无法相比。罗马人是世俗的、务实的，西塞罗就明确地说：“希腊人对几何学家推崇备至，是故他们的任何工作都没有数学出色；但我们则把这项技术限定在有用的度量和计算范围之内”。事实上，到公元初，希腊科学已经失去了发展的温床，昔日的几个中心也在风雨飘摇中日渐破败。4世纪基督教的兴起，更宣告了黑暗时代的来临。希腊科学从衰落到复兴，经过了1500余年的漫长岁月。在这千余年的历史长河中，罗马、拜占庭和阿拉伯这三大文明先后为保存和传播希腊科学作出了自己的贡献，贡献大小则刚好与时间顺序相反。通过这三条渠道，希腊典籍最终在1200年至1500年间一并汇集到新兴的西欧文明手中。

希腊科学的衰落：罗马与拜占庭

正如一切落后民族征服先进民族一样，罗马征服希腊后随即成为希腊文明的学生。但希腊学术毕竟不是罗马民间的产物，罗马人没有希腊人的那种理性批判精神，没有探究自然的崇高激情，在他们眼中希腊学问只是贵族教养的标志。所以，罗马人在科学上几乎没有建树，他们所作的只是吸收、保存和传播希腊知识。帝国的早期阶段（前30—280），是罗马人对希腊学术兴趣最浓的时期。当时的贵族教育包括九艺，即文法、修辞、逻辑、几何、算术、音乐、天文、医学和建筑，其中后七艺基本上是讲授希腊科学的基础知识。

对于从希腊传下来的知识，罗马人有一种编撰大型类书的嗜好。这些类书，事实上也是导源于希腊化时代的百科全书。希腊科

学推进到喜帕恰斯和埃拉希斯特拉托的水平，必定有一大批受过教育的读者，他们无力在这一水平上工作，但对物理世界又不乏盎然的兴趣。正是为了满足这群人的要求，百科全书应运而生。奠定这一传统的关键人物是希腊天文学和地理学家埃拉托色尼

（Eratosthenes，前276？-前196？）和波昔东（Posidonius，前135？-前51？）。公元2世纪，狄翁（Theon，生活于370年前后）编写过一部非常有名的百科全书《理解柏拉图所需的数学知识》。这部著作采用为《蒂迈欧篇》作注的方式，大量征引了希腊化时代的数学、天文和地理学知识。这类百科全书正好投合了罗马人的口味。他们无需去深究那些索然寡味的理论科学，同时又能对那些令人敬畏的智力成就获得一知半解。罗马本身没有产生一个伟大的科学家，只是在一般的自然知识方面有过一些作者，其中最出名的要数塞涅卡（Seneca，2-66）和老普林尼（Pliny the elder，23-79）。塞涅卡主要关心地理和气象现象，其《自然问题》多取材于亚里士多德的《气象学》。普林尼在公元77年编成了一部37卷的《自然史》，征引了473位作者（其中326位是希腊人）的2000多种著作，内容囊括宇宙志、区域地理、人类的繁衍、以及各种动植物和矿物的描述，其中夹杂着大量荒诞不经的传说。不过，他的知识中最薄弱的一环还是希腊的理论科学。

百科全书传统在罗马一直没有中断，但后来的作者就干脆抄袭普林尼的著作了。到帝国的晚期阶段（280-476），随着基督教的胜利，希腊学术一度遭到了毁灭性的打击。基督教地位稳固之后，教会的政策逐渐有所松动，圣奥古斯丁还一度想要编撰一部包括几何、算术、天文和音乐的百科全书。5世纪是罗马帝国解体的世纪，倒是出了几个有名的百科全书作家，如卡配拉（Martianus Capella，生活于470年前后）、波依修斯（Boethius，480？-？524）、卡西奥多斯（Cassiodorus，490？-？583）。卡配拉编了一部说明七艺（文法、修辞、逻辑、几何、算术、天文和音乐）的通俗小百科，书名叫《语言学与信使之神的联姻》，我们今天关于赫拉克利

德的日心理论就是根据这部著作重构的。波依修斯是罗马最优秀的百科全书作家，他写过一部《四艺》，今已只存音乐和算术两部分。他的宏伟计划是将柏拉图和亚里士多德的全部著作译成拉丁文，但他未能实现这一目标，仅仅译出了亚氏的部分逻辑论著。波依修斯死后没几年，罗马的国家教育制度便崩溃了，此时出现了一位对后世影响较大的人物卡西奥多斯。卡西奥多斯一度是东哥特国王的主要秘书，辞职后在自己的领地上修建了一座寺院，并坚持僧侣应像学者一样接收受七艺的教育，为此还编了一部小百科《简论神圣的与世俗的知识》。卡氏的寺院和教学计划后来为本尼狄克修道院所模仿，修道院由此成为西欧的教育中心，七艺也成了僧侣的学习科目。通过罗马传给入侵蛮族的希腊遗产，也就是这些百科全书了；至于希腊原著，大抵只有柏拉图的《蒂迈欧篇》（由4世纪的百科全书作者哈尔西狄乌斯译成拉丁文）和亚里士多德的一些逻辑论著。

当5世纪西罗马帝国逐步瓦解时，东罗马却成功地抵御了蛮族的入侵，并一直延续到1453年，后来人们就把它称为拜占庭帝国。在其千余年的漫长历史中，拜占庭帝国采用了政教合一的皇权制度。帝国的通用语言是希腊语，帝国的版图基本上就是原来的希腊化世界。尽管是旧学故土，希腊学术也未能逃出厄运。公元529年，东罗马皇帝查士丁尼（Justinian，527-565在位）关闭了所有的希腊学园，包括阿卡德美和吕克昂。拜占庭学者的主要精力放在神学和文法方面，他们对基督本性的讨论如同希腊人讨论变化问题一般热烈。这些讨论势必要求助于希腊思想，特别是新柏拉图主义。因此之故，希腊典籍，特别是柏拉图的著作，得以完整地保存下来。亚里士多德的著作，总的来讲不太受人重视，不过也有一些有名的学者对其作过注释，这里我们至少要提到两个人：辛普利丘

（Simplicus，卒于533年后）和菲诺波诺（John Philoponus，卒于570年）。辛普利丘是雅典的一位新柏拉图主义者，他对亚里士多德的《物理学》、《论天》、《论灵魂》这三部著作的注释对

后代影响甚大，伽利略在《对话》中就把他作为亚里士多德的代言人。菲诺波诺是亚历山大里亚的一位基督教新柏拉图主义者，也就上述三部著作作过注释，其目的旨在指出亚氏理论的重大错误，比如世界永恒的思想。他对亚里士多德运动理论的批判，在科学史上有着一席之地。按亚氏物理学，抛射体脱手之后是由受扰的空气推动的。但菲诺波诺反驳道，若是这样，那么仅仅扇动石头后面的空气就可以使它运动了。他提出，强制运动的动力来自推动者输入石头内的一种无形的力，所谓“冲力”，而空气并无多大作用；天体的运动，也是依靠上帝一开始就赋予的冲力。菲诺波诺的冲力理论是后来穆斯林和拉丁学者批判亚里士多德学说的出发点，但在当时被教会视为异端，因为它否认天体是由神灵推动的。在拜占庭学者保存的希腊典籍中，特别值得一提的是由他们编辑和注释的阿基米德和阿波罗尼等人的著作。由于拜占庭学者的积极努力，阿基米德的数学、力学和光学著作，基本上完整地保存下来，这些著作可以说是近代科学的基础。

穆斯林的庇护：波斯-埃及-西班牙

拜占庭学者不仅将大量希腊典籍传到文艺复兴时期的人文主义者手中，同时还对希腊文化的东迁作出了重大贡献。从雅典驱逐的异教哲学家（如辛普利丘），以及从君士但丁堡驱逐的异端教派，大都避难于波斯帝国，波斯也由此成为希腊文化的避难所。7世纪早期，拜占庭卷入了与波斯的一场大战，结果是两败俱伤，帝国的领土任凭阿拉伯人掠夺。7世纪末，阿拉伯已经占领了波斯、叙利亚、巴勒斯坦和埃及，到750年，整个北非、西班牙和印度西北部都在他们的控制之下。阿拉伯人在征服这些土地之后，很快就与当地民族同化了。我们今天所讲的阿拉伯人，是指所有信奉伊斯兰教会讲阿拉伯语的人，包括波斯人、叙利亚人、埃及人和西班牙人，正宗的阿拉伯人倒不多；所谓阿拉伯科学，也是指用阿拉伯文写作的科学著作。公元749年，阿跋斯（Abbasids）家族夺得了哈里发政权，并于762年将帝国的首都从大马士革迁到巴格达。巴格达本

是波斯故土，而波斯乃希腊文化和印度文化的交汇之地，阿拉伯人的科学事业正是从这儿开始的。阿拉伯人原来索居广漠，万里黄沙莫辨东西，是故对星象观察十分重视。阿跋斯王朝的第二任哈里发曼苏尔（Al-Mansur）本人就是一位星象家，771年还专门召见了印度天文学家曼卡（Manka）。印度天文学和数学由此进入了阿拉伯世界，并启发了他们对希腊科学的浓厚兴趣。

8世纪下半叶，阿跋斯哈里发已将希腊典籍的翻译列为一项严肃的文化事业。到第七任哈里发马蒙（Al-Mamun，813-833在位）时代，阿拉伯翻译运动达到顶峰。马蒙本人还致书拜占庭皇帝，请求协助巴格达学者在君士但丁堡搜寻古籍。828年，马蒙在巴格达建立了一座综合性学术机构“智慧宫”，包括研究院、译书馆和图书馆，这是缪司学园之后最大的学术机构。译书馆由大翻译家胡那因（Hunayn ibn Ishaq，808-873）主持，他首先将希腊文译成叙利亚文，再由他的90多个门生译成阿拉伯文。胡那因的译著主要集中于医学方面，希腊数学和天文学著作主要由另一位大翻译家库拉（Thabit ibn Qurra，836-901）完成。这场规模宏大的翻译运动，持续了将近两个世纪。到1000年，差不多所有的希腊哲学和科学文献都有了阿拉伯文译本。伴随翻译运动，阿跋斯王朝出现了许多有名的哲学家、医学家、天文学家，如肯迪（Al-Kindi，801-873）、法拉比（Al-Farabi，870？-950）、拉兹（Al-Razi，即Rhazes，865-925）、希纳（Ibn Sina，即阿维森纳）、法罕尼（Al-Farghani，卒于861年后）和贝塔尼（Al-Battani，卒于929年）等。希腊科学从希腊化时代的高度跌落以来，至此才开始回升。阿跋斯的学者算得上是亚里士多德、托勒密和盖伦的私淑弟子，在基本理论方面他们没有什么突破，但不等于说没有进展，托勒密模型中各项常数的修正，以及关于眼睛构造的解剖研究，都是明显的例证。更重要的是，他们为希腊科学引进了一项崭新的工具——印度的代数学。

公元1055年，塞尔柱突厥人占领了巴格达，大部分穆斯林学者都西迁到埃及的开罗。开罗的法提玛王朝在中国史书上称为绿衣大

食，它在第五任哈里发阿齐兹统治期间（975-996）达于极盛。1006年，第六任哈里发哈基木（996-1021在位）在开罗设立了一座智慧馆，讲授伊斯兰教义以及天文和医学。哈基木本人也是一个占星迷，常常在黎明时分骑着灰驴前往山上的观象台。开罗的科学研究总体上不能与巴格达相比，但至少有两入属于阿拉伯科学的英杰，一是编成哈基木星表的尤尼斯（Ibn Yunis, ? -1009），另一位是建立完整视觉理论的哈森（Al-Hazen, 965-1038）¹。开罗的智慧馆兴盛时间不长，1109年被指控为异端而关闭。11-12世纪，希腊科学的中心转到了阿拉伯人统治下的西班牙。

西班牙的伍麦叶王朝定都科尔多瓦，共持续了275年（756-1031），中国史书称之为白衣大食。伍麦叶王朝在10世纪中叶最为强盛，当时的科尔多瓦与巴格达和拜占庭同列西方文明的三大中心。然而就科学而言，西班牙当时远远落后于巴格达。西班牙的居民，无论是罗马人的后裔还是5-6世纪入主的哥特人，在学术方面远不及叙利亚人和波斯人，因此许多西班牙学者远游波斯、埃及，西亚的学术就这样源源不断地流入安达卢西亚。到10世纪下半叶，西班牙各地如科尔多瓦、托莱多、塞尔维亚的统治者，纷纷赞助这类研究。11世纪伍麦叶王朝的瓦解，并未影响这一进程。西班牙学者在天文观测和医用植物方面都取得了一定的成就，扎卡里（Al-Zarkli，约卒于1087年）编制的托莱多星表还是哥白尼的数据来源之一。不过，西班牙穆斯林学者的最大成就还是对亚里士多

¹ 光学的早期历史我们一直没有介绍，其实光学像静力学一样，属最早数学化的试验科学。当希腊人转向用数学方法研究自然问题时，几何光学便诞生了。希腊人知道光线在镜面上的折射角与反射角相等，托勒密还根据试验确立了入射角与折射角大体成正比的关系。视觉问题，当时有各种理论，几何学家一般认为光线是眼睛发出的，亚里士多德则认为视觉是发光体扰动媒质而作用于视觉器官引起的。哈森第一次把视觉理论与几何光学联系起来。他认为，发光体的每一点都发出一个光锥，每一光锥进入眼睛时只有垂直于眼睛的那条光线为眼睛所接受，其他光线因折射而削弱了。他的《光学汇编》直到17世纪仍是重要的光学著作。

德著作的注释，其中最著名的要数阿维罗伊。早期的穆斯林学者把好几种带有新柏拉图主义特征的著作归于亚里士多德，阿维罗伊则旨在恢复纯粹的亚里士多德主义。他接受了亚里士多德的一些基本论点，从而在哲学和神学之间画出了一条清晰的界限。

从阿波斯王朝的翻译，下迄阿维罗伊的注释，阿拉伯科学经历了400年的持续发展。阿拉伯人的贡献，归纳起来，至少有四个方面：首先，他们复兴了希腊科学，并将其传到拉丁学者手中。拉丁欧洲从罗马那儿接受的遗产非常有限，他们的科学，主要是在阿拉伯科学，特别是西班牙学者的亚里士多德主义基础上发展出来的。其二，阿拉伯人为希腊科学添加了许多新的工具，诸如印度代数学和三角学，以及改进的天文观测仪器。其三，他们积累了大量观察资料，并对希腊理论作了若干重大改进，突出的实例有贝塔尼关于太阳拱点线进动的发现和哈森的光学理论。最后，他们为理性划定了不受教义控制的地盘，从而为科学研究提供了保护伞，这就是阿维罗伊的亚里士多德主义。

希腊科学的新家园：大翻译运动与大学的建立

从阿拉伯世界到欧洲的科学转移运动，与基督教重新征服西班牙是同步而行的。11世纪伍麦叶王朝解体之后，基督徒的再征服事业便已开始：1085年攻陷托莱多，到13世纪中叶整个西班牙除格拉纳达之外全部落入基督徒手中。阿拉伯学术中心的相继陷落，迎来了科学史上的第二次大翻译运动。最重要的翻译中心是托莱多，参加翻译的人员来自西欧各地，其中最著名的是克莱莫纳的热拉尔（Gerard of Cremona，？-1187），仅他一人就译了90多部著作，包括亚里士多德的《物理学》、《气象学》、《论天》、《论生灭》、托勒密的《天文学大成》和盖伦的《医术》。与巴格达的翻译相比，这次翻译很少直接依据原始希腊文献，主要是从阿拉伯文到拉丁文，中间往往经过希伯来语和西班牙语的转译。直接从希腊文译成拉丁文的著作，多是在西西里完成的。西西里岛与拜占庭的联系一直没有中断，902-1091年处在阿拉伯人控制之下，这里希腊语、阿

拉伯语和拉丁语都是官方语言。直接依据希腊文献的大翻译家是莫比克的威廉（William of Moerbeke，约 1215-1286），他大约译出了49部著作，包括亚里士多德的所有哲学和科学著作、晚古作家对亚氏著作的注释、以及大量阿基米德的重要著作。

11-12世纪是欧洲的觉醒世纪。我们知道，随着罗马帝国的崩溃，国家教育制度和城市生活也从这片土地上消失了，留给入侵蛮族的便只有基督教和基督教会。6-10世纪，寺院已成了西欧教育和文化的中心，所用的教材也就那么几部粗浅的百科全书。希腊原典，为人所知的大概只有柏拉图的《蒂迈欧篇》和亚里士多德的若干逻辑论著。直到11世纪，西欧封建制度鼎盛之时，西欧人才开始对周围的世界发生兴趣，对阿拉伯和拜占庭文明的繁荣羡慕不已，对隐藏在自然背后的神秘力量想入非非，对历代教皇《圣经》注释之间的矛盾感到不安。1085年托莱多和1091年西西里的陷落，为欧洲人不断增长的求知热情提供了两条通道。从阿拉伯传入欧洲的科学哲学知识，在一个世纪之内便从涓涓细水汇成了汹涌的急流。

大学的自发出现，与12世纪的大翻译运动密不可分。大学是吸收、消化、传播和发展新学术的组织机构。1200年，巴黎大学和牛津大学已是科学和哲学的中心，波洛尼亚大学则以法学和医学而闻名，这三所大学确立了持续至今的大学模式。中世纪的大学是硕士和学者的联合体，分文科、法学、医学和神学，其中法学、医学和神学的博士必须先获得文科的硕士。13世纪中叶，文科硕士课程几乎完全集中于逻辑、科学和哲学，所用的教材就是亚里士多德的各种著作及其注释。亚里士多德的理论体系，几乎完全主宰了中世纪科学的基本概念。13世纪大学里对亚里士多德的讨论，很快就引起了神学家的不安，最终导致了1277年的教皇禁令。这份禁令规定，凡属所列的219个命题，诸如“没有任何事情的发生是偶然的”（第21条），“第一因（上帝）不可能创造多个世界”（第34条），“上帝不可能使宇宙（即天空和整个世界）做直线运动，因为这会留下真空”（第49条），一概不允许讨论。

这份禁单所欲达到的目的，最终还是依靠奥康的哲学论证来完成的。奥康（William of Ockham，约1280-约1349）把上帝的全能作为出发点。他提出，世界完全依靠上帝的意愿，所有的存在都是偶然的，偶然的事物之间没有任何必然联系，因此超越“直觉认知”的任何推论都没有保障，一切哲学和科学命题都没有终极的确定性。奥康的唯名论对14世纪思想界的冲击是广泛而又深刻的，神学家利用它来限制甚至否定科学与哲学的可靠性，而文科硕士虽然崇拜亚里士多德，但也不可能不受这种怀疑论的影响。事实上，它促使文科硕士摈弃了一大批不可观察的实体和形式，刺激他们去寻找与亚氏理论同等可信的替代解释，并使得他们只关注逻辑上的严格性而不顾及物理上的实在性。

晚古拜占庭作家以及后来穆斯林学者对亚里士多德理论的批判，如今在唯名论的冲击下，得到了进一步的发展。我们知道，亚氏理论有几个基本难点，首先是强制运动的动力问题，其二是落体的加速现象。早在6世纪，菲诺波诺就对亚里士多德关于抛射体运动的解释提出过质疑。菲诺波诺的观点，在9-12世纪得到了穆斯林作家的补充和修正。阿维森纳提出，授入物体的冲力是不会衰减的，除非被外部阻力所消耗，一个物体所受的冲力与其重量成正比。14世纪，巴黎大学唯名论者布里丹（Jean Buridan，卒于1358年后）和奥里斯姆（Nicole Oresme，约1323-1382）将此学说进一步精致化。布里丹提出用物体的速度和质量来度量冲力的强度。至此，冲力概念有了现代动量概念的模糊身影，所不同的是，冲力是运动的原因，而动量是运动的效果。在某种程度上，永恒冲力概念还是惯性概念的先驱。布里丹还用冲力理论对落体的加速现象作了一个说明：恒定的重力产生冲力增量，冲力增量产生加速度。中世纪学者在物理学上的最大成就是定义了匀速和匀加速运动，这得力于牛津大学梅顿学院的一批学者。他们把性质的变化（如温度的高低和颜色的深浅）与运动的变化（速度的大小）进行类比，从而精确地定义了匀速和匀加速运动，并证明了平均速度定理。

14世纪文科硕士争论的另一个热点是真空的存在性和地球运动的可能性。他们关于真空的讨论，主要是考虑逻辑上的可能性：假如真空存在……假如真空存在，他们论证道，只要假定投入的冲力是衰减的，那么强制运动就能以有限的速度穿过虚空。中世纪学者一般并不真的相信月下界存在真空，但天外的虚空则是完全可能的，因为上帝凭着自己的全能，可以创造出多个用虚空隔开的世界，也可以让整个宇宙作直线运动，尽管这会留下真空。奥里斯姆就把天外虚空看成上帝的无限广延，甚至等同于上帝本身。一般来讲，中世纪学者把天外虚空理解为一个想像的超越存在，缺乏任何真实的物理维度和实证特性。直接把上帝与无限的三维物理虚空联系起来，则是17世纪科学革命的产物。奥里斯姆还在《论天》的注释中专门考虑过地球转动的可能性。希腊人不接受地球自转的观点，主要是它与亚里士多德的力学不能相容。托勒密固然认识到地球的自转可以说明天体的日运动，但不能解释地球正上方所观察到的现象：如果地球确实绕自轴向东转动，那么地面之上的所有物体，包括空气和云层都会滞后，因而看起来在向西运动。奥里斯姆认识到这是一个相对运动问题。他指出，在一艘自西向东航行的船内，若将手臂放下以与船桅平行，我们只看到手臂的垂直运动，尽管手臂实际上同时也在水平运动。同样，假定所有月下界的物体都在作自西向东的日运动，那么垂直向上射出的箭同时在作两个分量运动——垂直的和水平圆周的，而观察者只能看到垂直方向的运动。奥里斯姆还进一步说明了地球日运动假说的经济性：日月行星都在同一方向转动，并且离地球越远越高贵的天体运动越慢，上帝则处于永恒的静止状态。尽管有这些精致的论证，奥里斯姆最终还是拒绝了地动说，理由是单靠经验和理性不可能对自然界作出终极的断言。这里可以看出奥康激进经验论的强大影响。

中世纪科学史的意义，过去人们经常低估，这里有必要强调一下。欧洲中世纪的科学，其真正的意义在于为希腊科学提供了一个新的家园。希腊科学到公元1世纪，事实上已无栖身之所，后来穆

斯林的庇护也不过是为其提供了几间陋室，远远不能与拉丁欧洲修建的辉煌大厦——大学——相提并论。西欧这片土地，在阿拉伯化的希腊科学传入之前，在科学上几乎是空白，就是西罗马时代也只触及希腊科学的皮毛。大翻译运动和大学的建立，为欧洲日后科学的发展奠定了一个理性的思想传统，这就是亚里士多德主义。亚里士多德的理论，作为保守落后的象征，是近代科学成功的结果。在文艺复兴之前，该理论乃是最完备最严整的理论体系。中世纪拉丁学者没有在具体科学上作出重大发现，但他们在吸收、消化希腊—阿拉伯科学的基础上，将晚古和伊斯兰注释家对亚里士多德的批判和讨论推进到一个新的高度。这场批判运动，在一定程度上得益于科学与神学的冲突。奥康的唯名论导致了对亚里士多德体系的普遍怀疑态度，在这种氛围之下，14世纪的拉丁学者特别关注亚氏理论的薄弱环节，诸如强制运动的动力问题、落体的加速现象、真空中有限运动的可能性、地球自转的可能性以及天外虚空的存在性。奥康的影响是双重的，因为它宣称我们不可能得到关于物理实在的确定真理，这导致中世纪学者普遍忽视物理实在，而只考虑逻辑上的可能性。尽管如此，他们的理性思辨毕竟抓住了运动的动力这个核心问题，他们的某些论点甚至可以说是哥白尼和伽利略思想的先驱。

向近代科学的过渡：哥白尼与维萨里

14世纪中叶，当巴黎唯名论者对亚里士多德学说的批判进入高潮时，另一场不同性质的贬低亚里士多德的运动在意大利悄然兴起，这就是人文主义运动。人文主义的第一个伟大代表是意大利人文主义之父彼得拉克（Petrarch，1304-1374）。彼得拉克并没有一套完整成熟的思想，有的只是与其广博学识和丰富感情联系在一起 的倾向和愿望。他对中世纪的亚里士多德学说抱有一股敌视态度，但他的攻击带有强烈的主观色彩，远没有深入亚里士多德理论的核心

心。他最欣赏的作家是罗马诗人维吉尔（Virgil，前 70-前19）和散文作家塞涅卡和西塞罗（Cicero，前106-前43）。通过罗马作家的引述，他相信柏拉图是最伟大的哲学家，因为柏拉图总是为伟大的人物所赞颂，而亚里士多德只是为数量较多的人所称赞。彼得拉克对柏拉图的推崇，为15世纪人文主义者以及佛罗伦萨学园的柏拉图主义者指明了方向。人文主义者对柏拉图的偏爱是有情可原的。亚里士多德的世界是一个封闭的、等级分明的、由终极因支配的宇宙，柏拉图的著作则展现了一个完全开放的世界，是人与人之间的对话。这些对话既有迷人的形象，又有对敏感问题的强烈冲击。它能够容忍各种分歧，并不固守某一僵硬的体系，而是在持续不断的探索中向某种体系接近。

柏拉图主义是人文主义者与大学里的亚里士多德主义者分庭抗礼的一面旗帜，他们的抱负不是建立某种宇宙体系和自然哲学，而是用优雅的词句表达自己内心的细腻感受。为了实现这一抱负，他们把目光投向了罗马和希腊世界。15世纪中叶，拜占庭学者将大批珍贵的希腊文学和哲学文献带到意大利，人文主义者随之应用语法和历史的方法来校勘、注释希腊著作。对人文主义者来讲，古典研究只是其文学抱负的婢女，但由此却给拉丁欧洲增添了大批中世纪闻所未闻的希腊遗产。希腊的哲学著作，过去所知道的，比如亚里士多德的作品，现在人们用新的术语和文体予以重译；过去不为人知的，比如柏拉图的大部分著作、晚古作家对亚里士多德的注释、以及斯多葛主义、伊壁鸠鲁主义和怀疑论者的著作，现在有了拉丁译本。古代各派哲学和科学思想的全面复兴，特别是柏拉图传统的复活，为文艺复兴晚期的科学提供了新的精神指南。

哥白尼的理论，正是诞生于这种新的思想氛围之中。《天体运行论》在出版之时，附有一篇前言，内中声明该理论只是一种数学假设，而与物理实在无涉。后来人们发现，这篇前言出自神学家奥西安德（Andreas Osiander，1498-1552）之手。事实上，哥白尼本人坚信自己的理论是关于我们这个世界的真实理论，而不仅仅是

一套数学理论。这种将物理实在纳入数学结构之下的观点，正是柏拉图主义者的标志。不单如此，哥白尼对托勒密体系的诘难，以及他对自己理论的辩护，都是托庇于柏拉图的思想。

托勒密体系的缺点，15世纪中叶的天文学家已经普遍认识到了。15世纪是西欧天文学复兴的世纪，这与当时航海技术的发展、历法改革的需要以及占星术的兴盛有着密切的关系。但要制定星历表，就离不开托勒密体系，16世纪之前还没有任何其他理论能够推导出星历表。欧洲中世纪所用的星历表是阿拉伯人编制的托莱多星表和阿方索星表，随着时间的推移和观察的进步，误差越来越明显。在此形势下，人们开始深入钻研托勒密的《天文学大成》，新的译本也于1515年在威尼斯出版（旧译本是热拉尔1175年完成的）。托勒密体系的繁复，以及它在预测精度上的不足，日渐使人们感到有作彻底变革的需要，只是不知从何处入手。哥白尼的诘难是，托勒密没有恪守匀速圆周运动这个基本假设，他的偏心轮和对峙点事实上已经背离了柏拉图的核心思想。

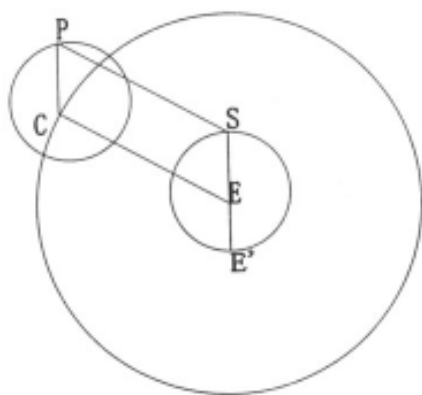


图6 从托勒密体系向哥白尼体系的转变

根据托勒密理论，外行星P绕中心为C的本轮运行，其矢径永远平行于从地球E到太阳S的矢径。不妨假定CP等于ES，这样ESPC就是一个平行四边形。假定EC绕E作匀速圆周运动，那么SP绕S匀速转动，从而

描绘出一个以E为中心的圆周。哥白尼的修正在于，将S置于E的位置，P和E置于C和E'的位置，这样一来地球和行星皆绕太阳匀速旋转。对于一颗内行星，修正更为简单：按托勒密理论，内行星本轮的中心位于地球-太阳的连线上，这时只需将内行星移至原体系中的本轮中心，地球和太阳位置变动如前，内行星即描绘出绕日的圆周轨道。对于托勒密体系中的偏心轮和对峙点，转换成新体系要比本轮复杂得多，这里不予介绍。从托勒密体系到哥白尼体系，所需的圆周从80个减少到34个。

为了严格坚持圆周运动的假设，哥白尼求助于一个比托勒密体系更古老的思想，即阿利斯塔克的日心说。哥白尼又是如何解答日心说所面临的困难的呢？譬如说，如果地球在自转，为什么垂直射出的飞矢会落回原地？哥白尼事实上借用了奥里斯姆关于运动合成的论证。另一个问题是，为什么地球不会因离心力而碎裂？他的回答是亚里士多德式的：离心力只对强制运动起作用，地球和天体的运动是一种自然运动。但为什么地球和天体能作圆周运动？他的回答则完全是柏拉图式的：所有物体都像水滴一样渴望成为球体，球体是最完美的形态；一切球形物体都有引力，无论是地球还是日月星辰，这也是该物体聚集成球的缘由。球形的天体既有自发的圆周运动，亚里士多德的原动者以及中世纪的各级天使也就成为多余的了，宇宙的权威让位给处于万物中心并照亮万物的太阳。太阳统帅着星体家族，地球和行星皆因自身的球形而具有引力和自发的圆周运动。哥白尼的物理解释无疑是谬误的，可同时又预示了现代的引力理论。新天文学呼唤着新物理学的诞生，这还得等待伽利略的到来。但就哥白尼本人而言，柏拉图主义的回答是足够有力的。《天体运行论》这部著作完全以古希腊风格写成，它对柏拉图问题给出了最简洁的回答，人们完全可以把它当做公元2世纪的著作。

古代世界的发现与现实世界的发现是并肩而行的，在天文学上如此，在解剖学上也是如此。16世纪意大利帕多瓦大学的医学学者，

如维萨里（Andreas Vesalius, 1514-1564）、哥伦布（Realdo Colombo, 1516-1559）和法布里克斯（Fabricius, 1537-1619）等人，一方面接过人文主义者的工具，重新校订和出版了古代医学著作，另一方面又接受了艺术家解剖和描绘人体的传统，将亲眼所见与古代著作两相对照。维萨里是一个忠实的盖伦信徒，但他亲自从事解剖，并规劝学生要从人体这本书中学习解剖学。1543年，他在帕多瓦出版了《人体的构造》。这部著作图文并茂，对于解剖学的复兴和发展产生了深刻的影响。维萨里在生理学上的观点，没有超出亚里士多德和盖伦的思想。关于生殖与胚胎，他接受了亚里士多德的看法；关于呼吸与消化，他的观点与盖伦了无分别。但他的亲手解剖，使他对盖伦的学说产生了怀疑态度：他在心脏中隔没有找到盖伦所说的小孔，也知道人的尸体中并无“神奇的迷网”，但他没有抓住这些反常来反驳盖伦。只在该著的第二版（1555年）中，维萨里才明确地提出血液不可能从右心室通过中隔进入左心室。文艺复兴晚期的解剖学还有两个重大发现为革新盖伦理论做好了准备，其一是肺循环的发现，其二是静脉瓣的确认。血液从右心室经肺流向左心室，塞尔维特（Michael serveto, 1509-1553）这位正统神学的反叛者在《基督的复兴》（1553年）一书中作过简要说明。肺循环的正确描述，是维萨里的学生哥伦布1559年在《论解剖学》中给出的。关于静脉瓣，16世纪许多解剖学家都看到了，但没有一个人的描述像法布里克斯那样清晰和严密。但法布里克斯仅把静脉瓣看作调节流量的阀门，而不是调节流向的阀门，因而没有认识到静脉瓣阻止静脉血从心脏流向体表四肢的作用。以上这些重大发现，已经表明盖伦生理学存在重大缺陷，必须用新的理论取而代之。

新生理学必须抛弃盖伦的精气概念和气血运动理论，必须重新认识心脏与肺的结构与功能，正如新天文学必须抛弃水晶球概念和匀速圆周运动假说，必须重新认识太阳和地球的空间与动力关系。

《论人体的构造》在解剖学上的地位，正如《天体运行论》在天文学上的地位。这两部著作同年出版，标志着希腊科学的真正复兴。

希腊科学从希腊化时代的高度跌落以来，经过1500余年的漫长旅程，如今终于达到了一个新的高度。1543年，在科学史上有着非同寻常的意义，哥白尼的《天体运行论》和维萨里的《人体的构造》同于这一年出版。也就是在这一年，阿基米德著作的拉丁译本首次出版。阿基米德地位的上升，预示着数学物理学的复兴和伽利略的来临。新天文学和新生理学所需要的理论基础，一种全新的自然观和宇宙论，伴随着伽利略力学的诞生而来到世间。

三、近代科学的诞生

在17世纪之前，哥白尼理论的影响并不大。《天体运行论》是一部写给专家看的著作，在具体计算上还得经常回到托勒密的方法。哥白尼所用的资料，也主要是来自古代和阿拉伯天文学家的著作，依据这些资料尚不足以分别两大体系在预言行星方位上的优劣。当时最受欢迎的理论是第谷的折衷体系：太阳绕地球转动，各行星绕太阳转动。第谷是一个伟大的观测天文学家，1576至1596年间，他一直在哥本哈根海峡赫芬岛上观测日月行星的位置。由他所设计的大型观测仪器，成功地把观测精度提高到 $2'$ ，而托勒密和哥白尼所用资料的精度只及 $10'$ 。哥白尼体系未能即刻产生强烈反响的另一个缘由是，该理论与亚里士多德的物理学和宇宙论不能相容。作为一个数学理论，它固然比托勒密理论简洁和优美；但作为一个物理理论，它的基础是不稳固的。哥白尼理论的广泛影响，离不开伽利略和开普勒的革命性成就。

旧秩序的毁灭：伽利略和开普勒

16、17世纪之交观测天文学上的长足进步，逐渐改变了人们对哥白尼理论的怀疑态度。1572年新星的出现，清楚地告诉人们，月上界并不是完美不变的。1577年，第谷等人对新彗星的行踪进行了精确的测量，结果发现其轨迹径直穿过假想的水晶球体，而亚里士多德认为彗星是月下界的事件。更激动人心的发现还是伽利略的观

察结果。1609年至1612年间，伽利略利用自制的望远镜先后发现了月球上的山脉、木星的卫星、金星的位相和太阳表面的黑子。月亮，如今再也不是完美的球体了，木星的四颗卫星显然也像地球系统的月亮一样绕自己的中心旋转，金星的位相只能用日心体系来说明，太阳黑子还表明太阳有自转运动。所有这些发现，都促使伽利略坚信，亚里士多德的宇宙论和托勒密的天文学存在着重大的错误，哥白尼的理论不仅是简化天文学计算的数学假设，而且是关于物理实在的真实陈述。1616年，红衣主教会议宣布哥白尼理论为异端邪说，并未能阻止伽利略对该理论的信仰。1632年，伽利略出版了《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，公开宣传哥白尼的学说，并由此遭到了次年宗教法庭的审判。

摧毁托勒密的体系，必须同时摧毁亚里士多德的物理学。新的天文学必须与新的力学联合起来，才能让人们接受它的真理性，单单天文学上的发现是不足的。伽利略为哥白尼理论的辩护，主要立基于他自己所创立的力学原理：惯性定律和落体定律。按照伽利略的惯性定律，一个运动着的物体，只要没有外来干扰，将会以不变的速度持续运动下去。云层与地球一起转动，并不像亚里士多德理论所要求的那样需要一个与之接触的持久推动力。同样，物体从高处下落不会掉向西面，它的运动是惯性运动和落体运动的合成。落体和抛射体的运动规律，伽利略在《关于两门新科学的谈话》（1638年）中给予了更明确的阐述。伽利略没有去追究运动的动力学，他关注的焦点是运动过程的精确数学描述。对于落体运动，他从匀加速假设出发，运用数学推导证明了距离与时间平方之间的正比关系：物体在连续相等的时间间隔内通过的距离成连续的奇数比。为了验证其理论的正确性，他还设计了斜面试验。抛射体的运动是惯性运动（以不变的水平初速度而作的水平运动）与落体运动的合成，水平距离与时间成正比，垂直距离与时间的平方成正比，因此抛射体的轨迹是一条抛物线。

伽利略为哥白尼理论的辩护，侧重于宣传该理论的思想革命，

而开普勒则利用自己的专业天文学，为哥白尼学说提供了最强有力的证据。开普勒本是第谷的助手，1601年第谷去世后，便倾其全部精力来处理第谷的火星观测资料。一开始，他也是按照圆周运动来处理，不过他不像哥白尼那样反对使用偏心圆。但当他把自己的计算与第谷的观测资料相比较时，发现二者相差 $8'$ 弧度。这 $8'$ 弧度当然不会使哥白尼苦恼，但开普勒坚信第谷的观测精度，最终他抛弃经典的匀速圆周运动假说，得出了行星运动的两条定律：（1）行星的运动轨道是一个椭圆，太阳位于它的一个焦点之上；（2）连接太阳和行星的矢径在相等的时间内扫过相等的面积。这两条定律发表于1609年出版的《新天文学》一书中，第三定律（行星公转周期的平方与该行星离日平均距离的立方成正比）是9年后发表的。

《新天文学》的副标题是《天体物理学》，显然开普勒还试图确立行星运动的动力问题。对他来讲，这个问题极端重要，因为他的轨道是椭圆，何况他还不了解伽利略的惯性概念。开普勒的引力思想，实质上来自吉尔伯特（Gilbert, William, 1544-1603）在《论磁石》（1600）中的论述，即用磁吸引力来解释太阳系的引力现象。这个解释固然是错误的，但在旧体系分崩离析的时代，它为人们带来了一丝安慰。

机械论自然观的形成：笛卡儿和惠更斯

伽利略对运动的处理，完全遵循着阿基米德处理平衡问题的传统，把力学问题抽象为一个纯数学问题。伽利略相信，宇宙这部大书是用数学语言写成的，它的印刷符号就是三角形、圆以及其他几何图形。物体的几何性质是物体的本质属性，而第二性质如颜色、气味等等则依赖于人的感官。伽利略的这种观点，随后被笛卡儿所继承和发展。笛卡儿把世界劈裂为物质和心灵两大实体，物质的本质就是广延的数量和几何特征，心灵的本质就是能够理解这些数学特征。

因此，按照笛卡儿的理论，物理学不过是几何学的延伸：几何学是研究静止的空间形式的学问，而物理学是研究运动的空间形式的学问。将物质等同于空间，这就意味着：（1）世界是无限的，并且到处都充满了相同的物质，真空则不可能存在；（2）物质无限可分，上帝在创造世界时把空间分割成了千差万别的形状和大小，再让各部分相互作用各种各样的运动。笛卡儿把物质，也就是空间要素，分为三类：最初的微粒，由微粒碰碾而成的小球，以及由微粒聚合而成的粗块。小球由于自己的离心力产生巨大的旋涡，并带动周围的微粒旋转而形成恒星，行星和地球则由粗块构成。自然界的一切变化，都要归结于这三类空间元素的运动。运动的初因是上帝，所以运动一旦发生便会持续下去。上帝是永恒的，自然界的根本规律，就是运动的总量，质量与速度的乘积，保持不变。在动量守恒这个总原理之下，笛卡儿阐述了三条定律：（1）没有外来原因，空间元素不会有任何运动和变化；（2）运动一旦发生，便会以原初的速度作永恒的匀速直线运动；（3）两个物体碰撞时，运动的总量不变。

在今人看来，笛卡儿的理论近乎玄想，但我们不能由此否定其巨大的历史功绩。笛卡儿的学说，是旧体系分崩离析之后建立起来的第一个完整的理论体系，它以一系列显著的特征区别与亚里士多德的理论。笛卡儿将物质因等同于形式因，同时取消了亚里士多德的终极因，从而确立了宇宙的机械论图像。在笛卡儿的理论中，所有的物质都是同质的，受同样的力学法则所支配。月上界和月下界的区别业已消失，亚里士多德的等级结构也不复存在。运动不再是一个实现或达成的过程，而只是大小和形状的变化。笛卡儿对运动和广延的论述，进一步扩展了伽利略的力学理论。伽利略的惯性运动，实际上是指匀速圆周运动，而现代概念上的惯性运动，匀速直线运动，则是笛卡儿首次阐明的。物体在没有外来干扰的情况下会保持其静止或匀速直线运动，蕴含了无限空间的概念，这是将物理空间等同于欧几里德空间的结果。

笛卡儿虽然勾画了大自然机械论解释的总纲，但他本人并没有为具体的物理现象建立精确的力学定律。真正在一系列具体研究中朝向这个纲领的，是荷兰物理学家惠更斯（Christiaan Huygens, 1629-1695）。光的机械论解释，是由惠更斯完成的。惠更斯受笛卡儿思想的启发，把光的传播理解为以太媒质所传播的机械脉冲，该脉冲向一切方向传播，每一个受扰的微粒都是新的脉冲源。在此基础上，他对费马关系式和冰洲石的双折射现象给出了数学证明和解释。¹在笛卡儿的宇宙图像中，碰撞和离心力可以说起着核心作用。关于碰撞运动，惠更斯指出，笛卡儿的动量守恒必须把动量看作矢量的情况下才能成立。向心力是产生笛卡儿旋涡的动力，惠更斯在其关于钟摆的试验研究基础之上，于1659年建立了向心力定律。将这条定律与开普勒第三定律结合起来，就能推出引力的平方反比定律。但惠更斯从未想到要把自己的成果用到行星运动问题上。他一直被笛卡儿那种宏大不经的宇宙图像所迷惑，1669年还试图把重力解释为物质旋涡的吞噬效应。

值得一提的是，笛卡儿的机械论自然观与开普勒的引力思想和伽桑狄（Pierre Gassendi, 1592-1655）的原子论是不相容的。机械论本指借助机械，也就是杠杆、时钟这类东西来理解自然的观点，现在笛卡儿为它赋予了碰撞、旋涡这类图像，但超距作用对笛卡儿来讲仍是神秘的、非机械的。笛卡儿把原子论排斥在机械图像之外，一则因为他否认真空，二来原子论意味着随机的无规运动。将原子

¹ 值得指出的是，惠更斯的理论虽然比较接近纵波理论，但波长和频率的概念是不存在的。光的波动学说是意大利科学家格里马迪 1655 年首先提出的。他让光线通过一个小孔进入暗室，并用一个不透明的障碍物遮挡，结果发现屏幕上障碍物的宽度比光线直线行进所形成的阴影要宽，阴影的外侧还有色带。他把这种现象称为衍射，并把光设想为能够作波浪运动的流体，不同的颜色是波动频率不同所致。牛顿的光学理论是微粒说与振动说的结合：光线是发光体向四面八方发出的微粒流，这些微粒在接触任何表面时就像石头击水一样激起以太振动。1666 年，牛顿成功地完成了三棱镜分光试验，建立了用折射率表示分立颜色的方法，并证明白光是有色光的混合。

论添加到机械论图像之中，主要归功于伽桑狄的工作。伽桑狄恢复了古代原子论的荣誉，力图依据原子的形状、大小、排列和运动来解释整个自然界。17世纪的科学家，特别是英国科学家，往往对笛卡儿的微粒与伽桑狄的原子不加区别，统称为微粒论，并利用它作为试验研究的理论基础。

实验科学的兴起：培根和波义尔

17世纪的实验研究，大体可分为三类，一类是定量的力学实验，如伽利略的斜面实验，托里拆利（E. Torricelli, 1608-1647）和帕斯卡（B. Pascal, 1623-1662）的真空和气压实验；第二类是定性和定量相结合的光学实验，如格里马迪的小孔实验和牛顿的分光实验；第三类是定性的磁学、电学和化学实验，如吉尔伯特的磁石实验和波义尔的化学实验。这三类实验的目的和作用是很不相同的。在力学领域，实验的目的是验证理论，近代力学上的重大成就，如惯性定律、落体定律、单摆理论以及牛顿的引力定律，都不是依靠实验来发现的，只有真空的存在是由实验来回答的。第三类实验的目的是试图依据实验来建立理论，这些领域没有多少古典传统，因此实验的收获也不大。实验作用比较突出的是在光学和气体力学领域，这里理论与实验的关系比较密切。

所以，总体来讲，在17世纪科学革命的进程中，实验的地位并不像人们所想像的那么重要。科学革命的主战场是力学和天文学，这场革命所完成的是一场思想转变，自然观和宇宙论的变革；这场革命得以完成的，也是依靠思想转变，即把自然界完全数学化。但我们也不应就此低估17世纪的实验研究，它同样是科学革命的一部分，虽然没有带来多少重大发现，却扩大了科学探索的视野，促进了实验科学诸如气体力学、光学和化学的发展，同时也改变了科学在人们心目中的形象。17世纪实验研究的风气是相当盛行的，这与培根的宣传有着莫大干系。培根不是近代科学的奠基者之一，但他

的号角却激励着各个领域的自然研究者。科学是人类征服自然的工具，要征服自然，就得从经验和实验出发去了解自然，排除一切先入为主的观念。他的这些思想，赢得了当代学者的普遍赞赏，包括笛卡儿和惠更斯这样的伟大人物。

培根的极端经验主义无疑是相当片面的，他的归纳法，正如笛卡儿的演绎法一样，从未获得过任何有价值的成果，这一点像惠更斯这样的学者不可能不注意到，这就值得我们深思。培根本质上是一个亚里士多德主义者，他所反对的只是亚里士多德的三段论以及中世纪学者的冗长注释。按照他的见解，科学，也就是自然哲学，包括三个部分：追究形式因和终极因的形而上学，探讨物质因和动力因的物理学，以及广泛搜集资料的自然史研究。自然的复杂性，源自数目有限的形式的各种结合方式。科学的目标，就是确立人类对自然的把握。科学的方法，第一步是详尽无遗地搜集例证，然后通过列表比较进行分类，以确定数目有限的各种形式。培根强烈反对仅仅依靠少数例证就匆忙作出结论的作法，为了得到尽可能多的资料，他倡导组织化的协作研究。在《大西洋岛》中，他虚构了一个科学技术高度发达的国家，由所罗门宫中分工协作的科学家进行管理。

培根对科学合作研究的设想、对经验和实验工作的强调、以及对科学与技术密切合作的提倡，对17世纪英国实验科学的发展影响至为巨大。就在《大西洋岛》出版不到半个世纪，英国科学家就仿照所罗门宫成立了一个“无形学院”，这个“无形学院”就是1663年成立的皇家学会的前身。皇家学会的早期会员都深受培根思想的影响，皇家学会的任务和宗旨，正如1663年学会干事虎克

（Robert Hooke, 1635-1703）在起草学会章程的建议中所述，就是增进关于自然事物和一切实用技艺、制造、机械和工程方面的知识，并利用实验来从事发明和发现，以期建立一个理解自然和指导技艺的实验哲学体系。培根的著作，通过惠更斯的介绍，还对巴黎科学院的早期活动产生了广泛的影响。巴黎科学院对动植物自然史

的收集、机械工艺发明的整理、法兰西地图的编制、以及实验物理学的开展，都是培根思想渗透的结果。在培根思想的影响下，惠更斯本人在17世纪50年代之后也转向科学应用研究，他的摆钟研究正是为了解决海上经度测量问题。要知道，惠更斯是以阿基米德的追随者开始其学术生涯的，他的科学成就，与伽利略一样，都是循着阿基米德的方法而取得的，伽利略曾被他的友人称之为“新时代的阿基米德”。

17世纪科学与技术虽然仍是两大独立的传统，但已有一些迹象表明，只要联起手来双方都会有收益的，这只要看看17世纪科学仪器诸如望远镜、显微镜、气压计、空吸泵、起电机、温度计和摆钟的发明和改进就够了¹。同样，17世纪的实验科学也取得了许多重大的成就，其中突出的有：托里拆利和帕斯卡等人的真空和气压理论、波义尔和马略特的气体定律、胡克的弹性定律、斯涅尔的折射定律、格里马迪的衍射概念和波动思想、以及牛顿的颜色理论，所有这些成就都已进入了今日中学的教科书。我不打算在这里进一步探讨17世纪科学与技术的关系，也不准备详细介绍该世纪在气体力学、光学、化学等方面

的成就，只想围绕波义尔（Robert Boyle, 1627-1691）这位17世纪实验科学的中心人物来看看实验科学的一般状况。

波义尔与培根的关系，颇有点像惠更斯与笛卡儿的关系。波义尔实验研究的范围非常广泛，涉及气体力学、化学、生理学、光学各个领域。在气体力学方面，他和助手虎克一起改进了冯·盖里克（Ottovon Guericke, 1602-1686）发明的空吸泵，并利用它来作了大量实验。在他自己所创造的真空中，他验证了伽利略关于重物和轻物同时下落的论点，并证实声音在真空中不能传播，而电吸引力却可以穿透真空。波义尔还发现，动物放进空吸泵内很快就会死

¹ 17世纪光学研究的主要目的是要改进光学仪器。牛顿从事光学研究，就是为了消除望远镜的色差。

亡，由此推论暗红色的静脉血在肺内变成鲜红色的动脉血类似化学燃烧过程，是摄取一部分空气的结果。波义尔最著名的工作是有关气体压力的实验。气体压力，波义尔称之为空气弹力，当时还不知道是气体分子对器壁的碰撞效应。根据这些实验，他证实了封闭的空气体积与压强互成反比的假设。空气弹力的起因，波义尔提出过两种解释，其一是解释为微粒运动的效果，其二解释为微粒本身的弹性。波义尔意识到，用这种粒子论难以说明物质的化学特性，比如盐能溶于水而不能溶于油，硫则溶于油但不溶于水。为此他设想构成物质的基本粒子有各种不同的大小和形状，在空间中以不同的方式运动，并以不同的位型组合。作为培根的信徒，波义尔要求化学必须建立在观察经验基础之上。他自己曾作过大量的燃烧实验，结果发现物质加热后并不是一律分解为所谓的水土气火四种元素，而是分解为十分不同的复杂化合物。波义尔怀疑仅仅这四种元素能否说明实验现象，但未能列出能够说明这些现象的元素表；他提出了元素的概念，但没有说明怎样才能确定某个物体是一种元素；他设想过原子的簇团在化学反应后仍保持原有的特性，但没有形成分子的概念。总的说来，他对旧理论的抨击是有力的，但未能提出一个新的理论。

惠更斯曾嘲笑波义尔，说他作过大量踏实的实验研究，却没有一个重大发现。这种说法未免过于刻薄。实验科学所探索的领域没有多少古典遗产，所以必须有一个摸索和积累的过程，一个世纪之后注定会开花结果。何况这种说法也不符实，事实上对牛顿影响最大的科学家，一个是笛卡儿，另一个就是波义尔。牛顿对笛卡儿的反驳，是重新回到伽利略的数学路线，而牛顿对于引力来源、光的本性、以及物质构成的推测，基本上承自波义尔的思想。

新科学世界观的建立：牛顿

自从亚里士多德式体系崩溃以来，行星运动的动力问题一直没

有得到解决。对于伽利略来讲，这个问题当然不存在，因为天体的匀速圆周运动只是一种惯性运动。可对开普勒而言，这个问题就极为重要，否则天体就会在天空中无规律地飘荡。太阳系的存在是有目共睹的事实，究竟是什么力量将它们绾为一体？在17世纪上半叶，最流行的思想是吉尔伯特的磁力说。吉尔伯特根据他的磁石球试验，进而设想太阳、地球、月亮和诸行星都是磁性物体，磁体的自定向使得它们保持在一个平面上运动。开普勒为解释行星的椭圆轨道，进一步发展了吉尔伯特的思想。他把太阳设想为只有一个极的庞大磁石，行星则是有南北两极的磁石，其在轨道上运转因其朝向太阳的磁极不同而受到太阳磁流的吸引和排斥，力的大小视物体大小和远近而定。开普勒的引力思想，在笛卡儿学说流行的岁月，没有多大的吸引力。笛卡儿像伽利略一样相信行星的匀速圆周运动，行星的圆形轨道是旋涡的吸引效果干扰其惯性运动（匀速直线运动）所致。1669年，惠更斯还专门作了一个实验，来演示笛卡儿的旋涡理论：在一碗水里搅起一个旋涡，碗内的卵石就被拉向碗底正中的旋涡中心。笛卡儿的旋涡理论乍一看来非常迷人，但本质上却是模糊的和错误的：从该理论中既不能得出彗星的运动轨迹，也不能得出与开普勒理论一致的椭圆轨道。

引力确实普遍存在，落体运动和行星运动都是它的表现，17世纪60年代之后已成为人们的共识。现在的问题是，引力的本质是什么？引力能否提供约束行星沿闭合轨道运动的向心力？对前一个问题，人们只能求助于类比和思辨。回答后一个问题，意味着建立精确的引力定律。开普勒已经知道，引力与物质质量的多寡有关，并且，距离越远，引力越弱。但引力与距离的关系究竟是几次幂？当时英国科学家虎克试图通过测量地面不同高度上重力的大小来确定这一关系。他没有获得成功，回答这个问题所需要的是数学推理而不是实验测量：只要我们知道了离心力公式，就能从开普勒第三定律推导出平方反比关系。虎克认识到这一点，是在惠更斯于1673年发表其离心力公式之后。这个推导结果事实上仅适用于行星

的匀速圆周运动，能否用来说明开普勒的椭圆轨迹还成问题。正是牛顿对引力问题作出了完整的、普遍的解答。

牛顿的这一伟大成就，包含在《自然哲学的数学原理》第三篇“世界体系的数学分析”之中。1687年出版的《原理》，包括三篇，外加一个导言和一个总释。在导言中，牛顿运用欧几里德的公理化方法，系统地总结了伽利略以来运动学研究的成就。这里，牛顿首先定义了质量、动量、向心力等基本概念，接着阐明了三条公理（运动定律）：惯性定律、第二定律（力与动量变化成正比）和作用与反作用相等定律，最后一个定律是牛顿对于力学的独特贡献。《原理》第一篇就是利用这些定义和公理来研究行星运动，对于中心力与距离平方成反比的情形，牛顿利用自己独立发现的离心力公式，证明其运动轨迹为椭圆（开普勒第一定律），该证明的关键是把球体作为质点来处理。《原理》第二篇讨论物体在阻力介质中的运动，与天文学无直接关系。牛顿最伟大的发现，万有引力定律，在第三篇卷首。引力定律断言，所有的物体都相互吸引，两物体彼此间引力的大小与二者的质量成正比，与二者距离的平方成反比。根据这个定律，牛顿成功地确立了地面与天上物理学的统一：行星绕太阳的运动、卫星绕行星的运动、地球上的落体运动和潮汐运动，都是万有引力的表现。“总释”放在《原理》的结尾，作者在这里披露了自己的内心世界：牛顿首先论证了旋涡理论的错误，这表明整部著作的目的之一就是要驳斥笛卡儿理论；接着，他试图依据太阳系的精美结构来论证上帝的存在；最后，牛顿讨论了引力的来源问题。牛顿一方面强调，知道引力确实存在并且按照已发现的定律起作用，就已经足够了；另一方面他还是忍不住诱惑，试图借助微粒论假说来想像和理解诸如引力、电、光和神经传导等自然现象。

牛顿的新的科学世界观，是一个与希腊人的宇宙迥然不同的世界。这个世界是无限的，同质的，一切事件都被抽象为质点在绝对时空中按照精确的数学定律运动。这个世界除了人和上帝的心灵之外别无目的，而只有动力，尽管动力的来源尚不清楚，但动力的数

学规律已然确立。无限宇宙论和机械自然观，是这个新世界的两大基本特征。机械论这个词，随着《原理》的出版，也获得了新的含义。但在笛卡儿那里，机械论和超距作用是不相容的，因为超距作用意味着神秘和不可理解。牛顿的引力概念，在当时还被惠更斯和莱布尼兹指责为非机械的。由于牛顿理论的巨大成功，引力模型到18世纪也被人们添加到机械图像之中。1687年《原理》的出版，是17世纪科学革命的顶峰。

生理学的革新和多样性的发现：哈维与列文虎克

17世纪生命科学的进展，是不能离开科学革命的总体进程来加以考察的。血液循环的发现，并不单纯是一个解剖发现。这里的关键是要把心脏和血液系统从整个人体中分离出来，并用一种机械论的观点来考察这个系统。按照盖伦的观点，心脏和呼吸是同一个系统：静脉从肝脏出发向身体各部分输送营养，动脉从心脏出发运载生命的精气，两者的联系是通过心脏中隔上的小孔实现的：暗红色的静脉血经心脏中隔从右心室进入左心室后，与经气管和静脉样的动脉（肺静脉）进入左心室的宇宙精气混合，从而产生携带生命精气的鲜红色动脉血。维萨里并没有放弃这种观点，他没有找到中隔上的小孔，遂求助于全能上帝的奇迹。哥伦布等人对血液小循环的认识，只是对盖伦理论的细微修正：静脉血与空气的混合不是在左心室完成的，而是经动脉样的静脉（肺动脉）流入肺中与空气混合后，再由静脉样的动脉（肺静脉）送入左心室。这个修正仍然把血液与空气混为一体，丝毫没有触及盖伦的生理学理论。哈维为此迷惑不已：为什么结构上如此相似的两个心室在功能上会如此不同？再说，静脉血与动脉血除了颜色不同外，看不出有任何重大差别。

这样的疑惑显然带有新时代的特征，即忽视第二性质而强调几何性质。更能显示机械论色彩的，还是哈维提出的一个极简单的问题：心脏每次搏动向全身输送多少血液？关于心脏，盖伦认为，它

并不是一块肌肉，心脏的功能是为身体加热，心脏的瓣膜是加热的壁炉，肺则为心脏通气使之冷却，心脏的运动是由肺带动的，与呼吸运动完全同步。哈维的尸体解剖证明，心脏是肌肉质的。他通过追踪冷血动物和濒死动物的心脏跳动，进而把心脏的收缩比作机器的运动。在医疗实践中，病人手腕、太阳穴和颈部动脉的跳动也向他暗示有一个中心泵存在。有了这些思想，哈维进一步求助于实验测量，以求出每次心跳喷出的血量，结果发现，一小时内由心脏泵出的血量就超过了体重。任何屠夫都知道，动物血液总量是有限的，因此，血液必定通过全身而循环运动。

认识到这一点，静脉瓣的作用就十分明显：它控制着血液流动的方向，阻止静脉血倒流向体表四肢。1628年，盖伦发表了自己的研究成果《论心脏和血液的运动》。为了使他的学说显得更有说服力，他把心脏比作人体这个微型宇宙的太阳，并且罗列了许多地面循环运动的事例，比如地球上的水循环，来表明地上物体也在模仿星体的运动。哈维没有看到连接动脉与静脉的毛细血管，尽管他对此坚信不疑。毛细血管的发现，有赖于显微镜的使用。1660年，马尔比基（Marcello Malpighi，1628-1694）用显微镜来研究青蛙的肺部，成功地观察到连接肺动脉和肺静脉的毛细血管网。1688年，列文虎克（Antoni vanLeeuwenhoek，1632-1723）在蝌蚪的尾巴和青蛙的脚部观察到血液通过毛细血管的实际循环过程。利用自制的显微镜，列文虎克还发现了血液中的红血球、原生动物和细菌。正如望远镜为我们带来了一个崭新的天空图像一样，现在，显微镜为我们打开了一个全新的生命世界。

科学革命与启蒙运动

17世纪科学革命所取得的重大成就，并不为一般大众所了解，但是教会敏感地意识到自己正在丧失精神的领导权。成功地将新科学转化为一种新的世界观和生活态度，正是启蒙作家的根本贡

献。18世纪法国的启蒙运动，发端于丰特涅尔（Bernard le Bovier de Fontenelle, 1657-1757）对笛卡儿哲学的宣传，继之以伏尔泰对牛顿体系的介绍，而造极于狄德罗主编的囊括科学、技术和艺术的大型普及著作《百科全书》。

在法国，直至17世纪后期，笛卡儿的学说仍然受到人们的歧视。1699年，丰特涅尔当选为巴黎科学院的秘书，情形才发生急剧的转变。丰特涅尔是笛卡儿哲学的忠实信徒，1686年，他发表了第一部普及笛卡儿学说的对话体著作《世界的多元性》。在这部对话中，丰特涅尔把世界比作一个大舞台，而哲学家如同观众席里一个琢磨场景变换机制的技工。丰特涅尔是一位出色的科普作家，在他的影响下，科学进入了上流社会的沙龙、娱乐圈和时髦女士的卧室，笛卡儿的机械论哲学也开始波及道德、政治和文艺批判等人文领域的探讨。

由丰特涅尔开始的启蒙运动，随后被伏尔泰所继承和发展。1726-1729年，伏尔泰避居英国期间，深切认识到英国思想和制度的优越性，1727年牛顿那倍极哀荣的葬礼，更令他感慨万分。归国之后，伏尔泰出版了著名的《哲学通信》，用四章的篇幅讨论牛顿的自然哲学。伏尔泰对牛顿的介绍，采用了与笛卡儿学说对比的方式，当时法国学术界仍然沉溺于笛卡儿的旋涡之中。伏尔泰的大力宣传，以及巴黎科学院对牛顿关于地球在赤道部位凸出的论点的证实，使得笛卡儿的影响在30至40年代期间日渐消退。40年代之后，一大批卓越的数学家，如克雷洛（Alexis Claude Clairaut, 1713-1765）、莫泊图（P. L. Moreau de Maupertuis）、达兰贝尔（Jean d' Alembert, 1717-1783）、伯努里兄弟和欧拉，将牛顿的力学发展成一个完全演绎的体系，并应用到固体弹性、流体运动和太阳系结构之中。达兰贝尔之后，拉格朗日和拉普拉斯（P. S. de Laplace, 1749-1827）分别将分析力学和天体力学推向顶峰。牛顿地位的上升，不仅推动了牛顿力学的进一步发展，同时导致了社会科学的诞生。1748年，孟德斯鸠（Montesquieu, 1689-1755）发表

《论法的精神》，企图从地理气候、法律制度、宗教道德和风俗惯例中寻找影响人类生活的非人格化力量。在英国，亚当·斯密（Adam Smith, 1723-1790）1776年发表了《国富论》，通过分析价值、资本和劳动而提出了供求法则。

1751年至1777年法国《百科全书》的出版，是启蒙运动的高潮，同时也是一个思想的转折点，即从牛顿的思想转向培根的思想。这个转折也是很自然的，牛顿说他不杜撰假说，达兰贝尔等人也就放弃了关于绝对物性以及事物的形而上学根源的探讨。这么一来，我们关于自然的数学描述也就是唯象的描述，物理学最高原理的真理性的有赖于我们的经验和行动。造成这种转变的另一个因素是，18世纪上半叶科学上没有根本性的进展。狄德罗敏锐地认识到这一点，他说：“抽象科学占据优秀心灵的时间太长而结果太少了。……理性哲学在把它所占有事实加以对照比较和联系方面所做的事情，不幸比在搜集新的事实方面所做的多得多。”¹在《关于自然解释的思考》中，狄德罗反复强调，任何思想体系都是局限的、偏狭的，终有一天要坍塌，我们应当把目光投向无限丰富的流变世界，探究它进而征服它，不管它能否还原为数量或大小。

狄德罗不仅是法国百科全书派的领袖，同时也是这股新思潮的导师。作为《百科全书》的主编，他所约请的撰稿人几乎囊括了所有在世的启蒙思想家，其中有笛卡儿思想的追随者霍尔巴赫

（Baron, d' Holbach, 1723-1789），有牛顿思想的继承人达朗贝尔和孟德斯鸠，也有受莱布尼兹思想影响的作家布丰。但狄德罗的真正价值不在于汇集和普及已有的科学成就，而是他对业已取得的成就的反思，这导致他回到培根的立场。科学的出发点是人的经验，终点是人类的福利。狄德罗对数学科学的攻击虽有矫枉过正之嫌，

¹. 狄德罗，《对自然的解释》，《狄德罗选集》，第62-63页，商务印书馆，1979。

但18世纪中下叶实验物理学（特别是电学和热学）、化学和博物学（地层学和生物分类学）研究的繁荣，确实得益于他对实验和观察的强调。

科学革命的延续：拉瓦锡与拉马克

17世纪的科学革命，并没有完全实现自己的目标。培根所设想的科学与技术的统一并没有实现：17世纪科学家致力于解决的两大技术问题，海上经度测量问题和矿井排水问题，最终都是工匠们自己解决的。培根所提倡的实验哲学，也只在气体力学和光学领域取得了一定的成就。18世纪中下叶，由于狄德罗的影响和英国工业革命的发轫，实验和观察科学开始出现繁荣景象。这里我将重点探讨化学和自然史这两个领域的进展，因为这两个领域的进展是革命性的，也是对17世纪科学革命的补充：前者推翻了古老的四元素学说，后者动摇了生物直线阶梯的概念和物种不变的思想。

不过，在论述这两大革命性进展之前，我还是先简单地介绍一下18世纪在观测天文学和实验物理学两方面所取得的成就。18世纪观测天文学的核心问题，是要发现恒星的周年视差（较近恒星相对于较远恒星的周期性位移）。这是一个非常古老的问题，托勒密反对日心说，一个重要理由就是观测不到恒星视差。哥白尼在为日心说辩护时，也只能说恒星距我们太远。1725年，英国天文学家布拉德雷（James

Bradley, 1693-1762）发现了恒星的微小周期性视位移，但该位移与日地轨道向径垂直，不是人们所要找的周年视差，但它确实证明了地球的公转运动。布拉德雷称这个位移为光行差，并利用它来测量光速大小。18世纪最伟大的观测天文学家赫歇尔（Sir William Herschel, 1738-1822）最初目标也是力图发现恒星的周年视差。他采用了伽利略的建议，即观察亮度不同的成对恒星之间的相对运动，这项工作使他无意中发现了太阳的第七颗行星——天王星

(1781年)。赫歇尔观测和记录了数百对恒星，均未发现周年视差，相反倒是发现许多成对的恒星就是一个双星系统，遵循牛顿的万有引力相互转动。在观测双星的同时，赫歇尔还开展了恒星的分区计数工作，推测出银河系的扁平圆盘结构、恒星团的存在、以及太阳的自行运动，这是恒星天文学的开端。

18世纪试验物理学的重点是电学，正如17世纪的重点是光学一样。磨擦起电机是17世纪盖里克发明的，18世纪初，人们对磨擦电进行了大量实验研究，进而提出了导体与绝缘体、阳电与阴电的概念，并且认识到所有物体都能通过磨擦而带电。磨擦电研究的高潮是莱顿瓶的发明，这要归功于荷兰莱顿大学物理学教授马森布洛克 (Pieter van Musschenbroek, 1692-1761) 1745年的试验研究。莱顿瓶的发明，轰动了整个欧洲，人们争相演示莱顿瓶放电的电击效果，并促使人们联想到天空中的闪电现象。1752年，富兰克林用风筝试验，成功地证明雷电与磨擦电的同一性，并利用尖端放电原理发明了避雷针。在这些定性研究基础之上，库仑 (C. -A. de Coulomb, 1736-1806) 和卡文迪许 (Henry Cavendish, 1731-1810) 各自独立地开展了静电感应的定量实验研究，建立了静电吸引或排斥的平方反比定律。卡文迪许的试验建立一个数学推论之上：如果电作用力遵循平方反比关系，那么电荷均匀分布的球壳对其内的任意电荷的合力为零。库仑则是依据扭秤实验来验证平方反比的推测的，此前卡文迪许曾用扭秤试验测定了万有引力常数。电流的发现纯属偶然。1780年，伽伐尼 (Luigi Galvani, 1737-1798) 在解剖青蛙时，解剖刀无意中碰到了一只蛙腿的神经，结果引起四只蛙腿的抽搐，他认为这是来自动物体内的电作用。伽伐尼的发现轰动一时，但他的解释伏打 (Alessandro Volta, 1745-1827) 不能完全接受。18世纪末，伏打通过一系列实验证明，伽伐尼电是两种不同金属与湿的生物组织连接而产生的，生物组织主要起验电器的作用，可用盐水或碱液代替。伏打电堆即是根据这一原理制成的，持续而又稳定的电流有力地推动了19世纪流电和电化学的研究。

电的本性，当时有两种观点，一是迪费的双电流质理论（阳电和阴电），一是富兰克林（Benjamin Franklin, 1706-1790）的单电流质理论（过剩为正电，不足为负电）。18世纪，人们为解释光、电、磁、热和燃烧现象发明了许多流质，如热质、燃素等等。热质概念是苏格兰化学家布莱克（Joseph Black, 1728-1799）提出的。18世纪热学上的成就，一是该世纪上叶对温度计的改进，其二是布莱克对温度与热量的区别以及对潜热的认识。布莱克的潜热概念是瓦特改进蒸汽机的基础，但他的热质说到该世纪末遭到了伦福德的有力反驳。作为一个化学家，布莱克是气体化学的先驱。在燃烧研究中，他发现石灰石等固体物质加热后放出一种不同于普通空气的气体，他称之为“固定空气”（即二氧化碳），并认识到燃烧和呼吸时放出的气体一定包含“固定空气”。布莱克的化学研究引起了英国化学家，特别是卡文迪许和普里斯特利（Joseph Priestley, 1733-1804）等人，对气体化学性质的密切关注。这些化学家普遍接受了燃素学说，但他们的实验工作注定要推翻燃素学说和古希腊的四元素理论。

人们或许觉得奇怪，像金属冶炼、陶器和玻璃制造、染料、药物和炸药的生产，莫不涉及化学知识，同时像蒸馏、燃烧、化合与分解的作用早已为人们所熟知，为什么化学上的变革姗姗来迟？这就是我们前面反复强调的，仅仅有实验和工艺实践并不能奠定科学的基础：我们需要的是一个合适的思想框架，它既能容纳已有的经验资料，同时又能指导下一步的探索方向。自从恩培多克勒以来，我们的化学知识无疑有了长足的进步，但他的物质构成理论2000年来一直占据着支配地位，16-17世纪医疗化学家的硫、汞、盐或油土、汞土、石土三元素说，也不过是四元素理论的变体。千百年来，气、水和火如同“以太”一般神秘，让人琢磨不透也把握不住。17世纪，波义尔等人遵循培根主义，对燃烧、煅烧和气体进行了大量的实验研究，并且朦胧感到问题所在——从实验上识别化学元素，但微粒论却把他引向另一个方向——气体力学的思辨。事实上，

直到18世纪中叶，人们一直把空气和水视为元素，而把金属视为化合物。因此，要完成一场化学革命，首先得对空气和水的化学性质以及燃烧过程有一个合理的理解。

燃烧、呼吸和空气之间的联系，人们早就注意到了，17世纪波义尔在这方面作了大量的实验研究，比如动物在真空中会死亡，蜡烛在真空中会熄灭，但他企图用空气压力来解释，并没有认识到不同气体的存在。18世纪上半叶，人们对燃烧的解释事实上回到了亚里士多德的理论，燃烧就是火元素的释放，只不过给火改了一个名字，叫做“燃素”。1731年，德国化学家斯塔耳（Georg E. Stahl, 1660-1734）对燃素说作了详细的阐发，到该世纪中叶，它已成为化学领域的正统理论。但燃素说不能解释一个基本事实：金属煅烧后其残渣的重量反而增加了。1660年之后，这个问题引起了英国皇家学会的注意。面对这个反常，人们提出了许多特设性解释，诸如燃素有负质量、火微粒透过玻璃器皿进入燃烧物的微孔之中等等。也就在这个时候，拉瓦锡（Antonie Laurent Lavoisier, 1743-1794）出现了。1772年，28岁的拉瓦锡对近代的燃烧和气体研究作了一个历史述评，并且感到需要用一种全新的思路来梳理这个错综复杂的局面。

拉瓦锡重复了煅烧实验，但他称量了：在密闭器皿内煅烧金属锡，其残渣重量并未增加，而打开瓶子后重量就增加了。这就否定了火微粒透过器壁之说。他还发现，红铅（氧化铅）加碳与不加碳燃烧，产生的不同气体都不可能是空气整体。当时拉瓦锡只知道“固体空气”是惟一与空气密度不同却能被化合物吸收的气体。18世纪中叶以前，人们从未想到可能存在性质完全不同的气体，空气是如此微妙以致难以想像会把它“固定”下来。集气槽是赫尔斯（Stephen Hales, 1679-1761）于1727年发明的，但他仍然把颜色、气味、可燃性和可溶性十分不同的气体视为单一空气的变体。1754年，布莱克利用集气槽和天平发现了“固定气体”，也倾向于解释为燃素作用产生的空气变种。1771年，普里斯特利进一步改进了集

气槽，并且实际上发现了氧气，认识到它对燃烧和呼吸特别重要。一开始，他认为这是“燃素化的亚硝空气”，到1775年又认为是“脱燃素空气”。但在此之前几年，瑞典药剂师席勒（Carl W. Scheele, 1742-1786）已经发现了氧气，并且认识到空气中有两种独立的气体，“火空气”（即氧）和“浊空气”（即氮），比例约1：3，前者的功用是吸收燃烧物质释放出来的燃素。拉瓦锡在思想上的飞跃，是在听说普利斯特列游离出一种新的气体之后。1775年，拉瓦锡发表了《论煅烧中与金属结合并使其重量增加之要素的性质》。这里，拉瓦锡明确认识到“固定空气”是碳与“空气中显著可呼吸的部分”的化合物，而普通空气由两种“弹性流体”组成，所有的酸都是一种“氧化要素”与“空气中显著可呼吸部分”的结合。

水呢？1781年，普利斯特列用火花放电令氢和氧爆炸，注意到玻璃瓶内壁带有露水。氢气是卡文迪许1776年把锌、铁、锡溶解在硫酸和盐酸中制备出来的，他称之为“可燃空气”，并测定了它的比重。卡文迪许还进一步证实了露水的产生，但他无法相信水不是一种元素，所以他认为氢是含燃素过多的水，而氧是脱燃素的水。拉瓦锡又一次看出了这一实验的意义。1783年，他明确地宣布水是一种化合物，并用之来作为反驳燃素说的有力武器。随着四元素以及燃素说的推翻，新化学的基础也随之建立起来。从1782年起，拉瓦锡与德莫维（L. G. de Morveau, 1737-1816）合作，制定了一套崭新的化学术语。1789年，拉瓦锡出版了《化学纲要》，为化学元素下了一个精确的定义：化学分析所达到的终点，同时还列出了23种元素物质，其中包括一种无重量的元素“卡路里”（热质）。将卡路里从元素表中清除，有赖于对热和光的本性的认识，但这不会影响到新化学的基础。

18世纪下半叶另一个革命性的进展，是将进化和发展的概念引入生物多样性之中。生物分类学源于亚里士多德，他依据动物的生殖方式等若干特征将动物分为11个等级，这种分类方法比较实用，

但它无形中突出了物种之间的差异和物种的稳定性。另一种分类法是所谓自然分类法，其理论根据是各种动植物形成一个巨大的连续序列，这种分类法强调物种之间的连续性和亲缘关系。18世纪，这两种分类法各擅胜场。瑞典的林耐（Carl Linnaeus, 1707-1778）主要采用了人为分类法，依据植物雄蕊的数目将已知的植物分为24个纲，进而根据雌蕊的数目划分为不同的目。但在法国，人们强烈反对人为分类法。布丰认为，一切人为的分类都是形而上学的错误，自然界只有个别的物种，物种之间的过渡是极其细微的，纲、目、属、种都是思想的创造，生物之间的亲缘关系可以根据比较解剖学来确定。在这种思想影响下，许多博物学者致力于寻找植物与动物以及动物与人类之间的过渡环节。

将历史的概念引入这个连续的生物序列之中，要归功于近代对于化石和地球史的研究。17世纪，丹麦医生斯坦诺（Niels Steno, 1638-1886）应用比较解剖学的方法，将现代鲨鱼和狗鱼与化石比较，证明后者是动物遗迹。他还提出，化石生物与现代生物生存方式相同，因此含有化石的地层是该区域环境变迁的见证。但在17世纪，这种观点并不风行，即使接受，也是企图用诺亚洪水来解释高山上的化石。18世纪下半叶，随着地质旅行的兴起，人们把岩石的垂直系列看成历史的递续，同时对岩石和地层的成因也展开了激烈的辩论。以德国地质学家维纳（Abraham G. Werner, 1750-1817）为代表水成论者认为，所有的岩层都来自原始海洋中的结晶作用、化学沉淀和机械沉积；以英国地质学家霍顿（James Hutton, 1726-1797）为代表的火成论者认为，岩石是火山喷发熔岩的结晶，结晶岩表面的沉积岩是内热与地表压力共同作用的产物。水成论在解释火成岩上的失败，最终导致了维纳学派的衰落，同时也宣告了依据岩石学建立地层层序的失败。在此同时，英国和法国学者致力于用化石来建立地层层序。巴黎盆地是新生代化石的聚宝盆，它吸引了像拉瓦锡和布丰这样的知名学者。

从1749年开始，布丰用了近 40年的时间来撰写 36卷的巨著

《自然史》，企图对整个自然界，特别是地球的形成和动物的生活习性，作一广泛的综合。他把地球的历史划分为七个阶段：彗星撞击太阳分离出地球、地壳冷却形成山脉和海洋、大气水分凝结形成覆盖地球的海洋、海水侵蚀形成含有海洋生物化石的沉积岩、最后是陆地植物和动物的形成和人类的诞生。他推测地球的历史至少有75 000年，而生命早在4万年前就有了。布丰关于地球形成和生命起源的观点，大概受到莱布尼兹思想的影响。按照莱布尼兹的单子论，每一个单子都映射出其他的单子，低级单子包含了整个个体的信息，因此生命的起源无需创世行为。布丰特别强调物种之间的连续性，通过研究动物之间的相似形他逐渐看出不同物种可能是从一个共同的祖先传递下来的，尽管杂交种的不育性使他有点犹豫。

但布丰不是一个进化论者，相反，他相信不同的物种可能是少数完善的原始物种退化的结果，比如猿是人的退化。退化的原因，他认为是环境变迁造成的。向进化思想的过渡，一方面得益于启蒙运动对于人类进步的信念，另一方面得益于莱布尼兹有机自然观的影响。莱布尼兹反对牛顿的惰性粒子概念，认为一切粒子，所谓单子，都有能动的一面。单子论的若干特征可在罗比内的《论自然》（1761-1768）中找到。罗比内（Jean B. Robinet, 1735-1820）相信，整个地球史就是大自然学习造人的历史，最低级的生命都预示着未来人类的形象，进化的动力乃是自我完善的内在力量。

18世纪末，拉马克（Chevalie de Lamarck, 1744-1829）依据自己的无脊椎古生物研究，将罗比内的进化观点推向高峰。拉马克起初是巴黎皇家植物园的植物学家，1794年才转向无脊椎动物研究。1800年，他把无脊椎动物分成10个纲，并按照构造特征排成一个序列，上续脊椎动物的4个纲，然后把这个阶梯看成是从单细胞生物到人类的进化序列。1809年，拉马克发表了《动物哲学》，内中交代了自己对进化的认识。他认为，进化的主动力是生物内在力量的推动，但环境因素常常干扰这个直线上升的序列，以致造成该序列的中断（物种灭绝）和偏离（用进废退产生的物种永久性变化）。

拉马克最初的目标是将全部动物纳入一个直线序列之中，但随着分类研究的进展，他不得不画出许多条平行的进化线，到最后，他进一步打破了平行分支路线，直到整个体系变得像一棵家谱树。按照达尔文的理论，拉马克的内在动力和获得性状的遗传都是不能成立的，但拉马克对进化思想的系统阐述，特别是对直线序列的否定，已经奠定了进化论的基础。事实上，新的进化论只需要进一步强调分离群体的独立发展、同时引进马尔萨斯的生存竞争概念就行了。

四、现代科学发展概述

将近代科学与现代科学区分开来，并不是完全依据一般文明史的考虑。首先，近代科学与现代科学的目标不同。近代科学所要解决的基本问题，诸如落体问题、行星运动问题、血液运行问题、四元素理论和生物直线阶梯概念，无一不是来自古希腊，但现代科学都是针对近代科学发难的。其二，现代科学的专业化，是近代科学革命的产物。在17世纪，各门科学皆隶属于自然哲学。启蒙运动时期，百科全书派仍遵循培根的立场，将科学分为两类：理性的和历史的。理性科学是研究原因的科学，包括所有的数学和实验科学，生理学和医学也在其内，历史科学则专门收集事实，包括文明史和自然史——描述一切自然现象的博物学。只是到18世纪末，物理、化学、地质学和生物学之间的分野才慢慢变得清晰。其三，现代科学彻底革新了近代科学所确立的自然观或宇宙论，尽管这一点还没有为一般大众所理解。在现代物理科学中，力的概念逐渐让位于能量的概念，超距作用被场的媒递作用取代，决定论和绝对时空观分别为量子力学和相对论所推翻。在生命科学领域，我们已接近认识生命的本质，同时在着手刻画理性思维的特征。展现在我们面前的宇宙图像，个再是无限真空中的小小世界。我们的视野早已拓展到河外星系，我们的触角已伸入大洋海底。最后，近代科学与现代科学的社会功能和影响范围大不相同。近代科学对社会的冲击，主要发生在思想层面：先是对教会权威的挑战，随后是扫除盛行的迷信和蒙昧。培根的梦想，科学与技术的统一，是由现代科学来实现的。

内燃机、电动机、无线电、晶体管、激光器、原子能、超导体、合成橡胶、合成多肽物质、抗生素、杂交水稻、试管婴儿、克隆羊，所有这些重大技术突破，都离不开现代科学的理论指导。19世纪中叶以来，科学已经渗透到人类生活的各个方面，大到国民经济和国际政治，小到饮食起居和社会交流。

强调近代与现代的差异，并不等于否认两者之间的连续性。事实上，现代科学正是近代试验和经验科学进一步发展的产物。叙述历史，我们不得不立定一些界标，否则只能给人一团模糊的印象。通常，人们按世纪来划分，这倒是比较方便，但不适合我们这种长时段的考察。过分突出19与20世纪的差别，无形中就把19世纪置于一个遥远的背景，反而显不出历史透视的真正价值。历史的意义，就在于让人们认识到现在不过是从过去通往未来的一个瞬间，让人们珍视现在同时又超越现在。在本书的第二部分，我将比较详细地讨论现代科学的历史以及它的未来前景，这里我仅满足于概述一下现代科学发展的基本脉络，以便让人们看到近代与现代的连续性和差异性。

粒子与场理论

现代物理科学最伟大的成就，是确立了原子与场这一对实体性的概念。场理论导源于电磁学和光学研究。电学与磁学在18世纪末还是两个分立的领域，1799年伏打电堆的发明为人们发现两者之间的联系提供了有力的工具。1820年，德国物理学家奥斯特

(H. C. Oersted, 1777-1851) 利用伏打电堆产生的连续电流，成功地发现了电流的磁效应：通电导线附近的磁针会发生偏转。这一现象令人迷惑不已，在此之前人们都是按照牛顿力学模型来理解电磁作用的：电和磁的作用是瞬时的，不是推就是拉，且满足平方反比关系。而现在却发现了一种旋转力。1820年末，安培发现，通有电流的圆形线圈会像普通磁铁一样产生吸引和排斥作用，据此他于

1825年提出了磁性的环形电流假说，并且仿照牛顿力学建立了电流元之间相互作用的安培定律。电磁现象之间更普遍的联系是法拉第发现的。1831年，法拉第（M. Farady, 1791-1867）发现，当一个金属线圈中电流强弱发生变化时，邻近线圈就感应出一个瞬时电流，通有恒定电流的金属线圈的机械运动同样可以产生感应电流。正如奥斯特建立了电动机的基本原理一样，法拉第建立了发电机的基本原理。为了解释已知的电磁现象，法拉第提出了“电紧张状态”这一概念，并用“磁力线”的疏密来表示“电紧张状态”的强度。法拉第认为，电流或磁体在物质和空间中产生一种张力状态，它的变化导致感生电流，粒子不过是这种张力的结合点，因此物质就是充满张力的空间。场的概念便由此诞生：电磁作用是通过遍布空间的力网来实现的。

电磁场的数学描述得力于拉格朗日（J. L. Lagrange, 1736-1813）、拉普拉斯、泊松（S. D. Poisson, 1781-1840）、格林（G. Green, 1793-1841）和高斯（C. F. Gauss, 1777-1855）等人所发展的引力位势理论。19世纪40年代，汤姆逊（William Thomson, 1824-1907）、亥姆霍茨（H. von Helmholtz, 1821-1894）和诺曼（F. E. Neumann, 1798-1875）仿照引力势引入了电位势和电矢势，麦克斯韦（J. C. Maxwell, 1831-1879）则进一步将电势与“电紧张状态”联系起来，同时借助电力线与流体的流线的类比，建立了电动力学的基本方程组。1865年，麦克斯韦发表了《电磁场动力学理论》，第一次明确使用了“场”这个术语，并且从数学上表述了能量局域性概念。但麦克斯韦企图用连续的以太和分立的微粒来建立一个电磁场的力学模型，以便理解电磁波的传播。麦克斯韦证明，电磁波在电磁以太中的传播速度等于光速，在物质内部的传播速度等于光速与该物质电容率平方根的乘积，由此他把光看成电磁以太中的横向波动，而物质的电容率等于光的折射率的平方。19世纪光的波动说的复兴，始于杨氏的单缝衍射和双缝干涉试验。杨氏（Thomas

Young, 1773-1829) 给出了干涉条件的简单公式, 并且在1817年用横波假说定性地解释了衍射和折射现象。1818年, 菲涅尔

(A. -J. Fresnel, 1788-1827) 仿照弹性力学的数学理论, 将惠更斯的波前原理和杨氏理论统一起来, 建立了波动光学的数学理论。1849年, 斐索 (A. -H. Fizeau, 1819-1896) 测定了光在空气中的速度, 1862年傅科 (B. Foucault, 1819-1868) 进一步测定了光在水中的速度, 并且表明光在水中比在空气中行进得慢, 且其比值等于折射率之比, 从而确立了波动说的稳固地位。麦克斯韦提出的光的电磁理论, 最终为赫兹的试验所证实。1886年, 赫兹

(H. Hertz, 1857-1894) 将一个导线回路放在一只放电的莱顿瓶附近, 观察到越过回路两端间隙的电火花。1888年, 赫兹进一步证明, 电磁波像光波一样有反射、折射、衍射和偏振现象, 其直线传播速度与光速处于同一量级。

19世纪下半叶, 物理学家对电磁或光以太的力学性质作了大量的推测, 迈克尔逊-莫雷试验的目的就是要检测地球和以太之间的相对运动。1887年, 迈克尔逊 (A. Michelson, 1852-1931) 和莫雷 (E. Morley, 1838-1923) 检测了光在通过以太沿地球运动方向与垂直于地球运动方向的光行差效应, 结果没有发现预期的干涉条纹。面对这一结果, 菲兹杰拉德 (FitzGerald, George Francis, 1851-1901) 于1889年提出, 干涉仪的臂长沿运动方向收缩。1904年, 洛伦兹 (H. Lorentz, 1853-1928) 得出了麦克斯韦方程在相对于以太静止和运动的坐标系之间的变换方程, 次年彭加勒

(H. Poincaré, 1854-1912) 将其命名为“洛伦兹变换”。就在这一年, 爱因斯坦 (A. Einstein, 1879-1955) 开始设想光速在真空中不变, 并且物理定律在一切惯性系中保持不变。从这两条原理出发, 爱因斯坦成功地导出了洛伦兹变换。至此, 麦克斯韦方程的真正含义才为人们所认识: 电磁场的时空结构不同于无场的时空结构, 前者满足洛伦兹变换, 后者满足伽利略变换。随着狭义相对论的建立, 场本身获得了物理实在的地位, 千奇百怪的以太也就失去

了任何意义。为了使牛顿引力理论也满足洛伦兹变换，爱因斯坦在1915年引进了等价原理，即把局部的引力场等价于一个匀加速系，从而建立了引力的场理论——广义相对论，同时彻底推翻了超距作用和绝对时空概念。

现代原子理论导源于近代的气体力学和气体化学研究。18世纪末，拉瓦锡的新理论导致了两条经验定律：一是李希特(J. Richter, 1762-1807) 1791年提出的当量比例定律，其二是普鲁斯特

(J. Proust, 1754-1826) 1797年提出的定比组成定律。这些定律使得化学家鉴别出了许多新的元素和化合物，但如何用原子论来解释这些定律呢？1801年，道尔顿(J. Dalton, 1766-1844)对氧、氮、氢等气体进行了受热膨胀实验，结果发现气体膨胀与温度成正比(查理定律)，并且膨胀量与气体无关，这使得他接受了牛顿的原子论：气体由相互排斥的原子组成，热就是原子之间的斥力。但牛顿的原子论不能解释混合气体的均匀性，为此道尔顿假设不同化学元素的原子并不相同，只有同种原子才相互排斥，进而建立了气体分压定律。1804年，道尔顿提出了倍比定律，因为他发现两种元素的化合，其重量总是成简单的整数比。根据倍比定律，可以从实验上确定各种元素的当量重量，即对于确定化合物化合时的重量。但要全面推算和测量所有元素的当量(以氢为单位就是原子量)，还得知道相应化合物的化学式。1808年，盖-吕萨克

(J. L. Gay-Lussac, 1778-1850)发现，两种气体化合时，其体积成简单的整数比。按道尔顿的倍比定律，两种气体化合时其原子数成简单的整数比。这样，同温同压下相同体积的不同气体包含相同的原子数，但道尔顿发现水蒸气的密度小于氧气或氢气的密度，因而怀疑盖-吕萨克试验的精确性。为了调和这两个实验的矛盾，阿伏伽德罗(A. Avogadro, 1776-1856)于1811年提出了分子假说：任何气体都是由分子构成的，而分子又由原子构成，同温同压下相同体积的不同气体所含分子数相同。阿伏伽德罗假说为测定元素原子的化合数提供了一个普遍而有效的方法，但它直到半个世纪后才

被化学家普遍接受，其根本原因是它要求同一元素的原子结合成分子。按照柏采留斯 (J. Berzelius, 1779-1848) 和戴维 (H. Davy, 1778-1829) 的电化学二元论，化合就是正电性元素与负电性元素之间的静电吸引。

但电化学二元论在有机化学领域遇到了巨大的困难。1832年，李比希 (J. von Liebig, 1803-1873) 和沃勒 (F. Wöhler, 1800-1882) 用苦杏仁制成了一整系列的有机物，这些有机物共有一个相同的有机基团，该有机基团可以与正电性的氢和负电性的氧同样好地化合。1834年，杜马发现，有机基团中的氢可用负电性的氯取代，而且基本上不改变化合物的化学性质，由此他提出了结构类型理论：有机化合物的化学性质是由其特殊的结构排列决定的。为了确定结构类型，就得计算原子的化合数。1852年，弗兰克兰德

(E. Frankland, 1825-1890) 发现，每一种金属原子只能和确定数目的有机基团结合，他称这个数目为元素的原子价，并看出可根据原子价来划分元素族。1857年，凯库勒 (F. A. Kekule, 1829-1896) 指出，每一个碳原子可以和四个别的原子或基团化合。但这种原子价概念并非普遍有效，随着有机化学的发展，各种化合物的化学式表示极其混乱，醋酸就有19个不同的化学式。1860年，欧洲各国化学家云集德国卡尔斯鲁厄，企图解决原子价问题。会议结束时，意大利化学家康尼查罗 (S. Cannizzaro, 1826-1910) 散发了自己两年前的一篇论文，文中指出，只要接受50年前的阿伏伽德罗假说，就可以通过测量化合物的蒸汽密度一举解决化合物的分子量，元素的原子量是该元素在一系列化合物中的最低重量和最小公差。康尼查罗的论证很快就为化学界普遍接受了。原子-分子理论的确立，不仅有力地推动了有机化学的发展，更导致了元素周期律的发现。在有机化学方面，凯库勒提出了苯的环状结构，同分异构现象也得到了说明。元素分类方面，迈尔 (J. L. Meyer, 1830-1895) 和门捷列夫 (Д. И. Менделеев, 1834-1907) 于1869年各自独立地提出了元素周期律，门捷列夫还根据周期律大胆地预言

了十几种未知元素的存在及其性质。

19世纪发展起来的热力学、气体分子运动论和统计力学，把粒子与能量和几率这两个概念紧密地结合起来。热力学的奠基性工作是卡诺关于热机的研究。卡诺（N. L. Sadi Carnot）构想了一台理想热机，并从“热质恢复平衡”出发，论证了理想热机的工作效率。他的论证尽管基于热质学说，事实上蕴含了后来明确定义的所有热力学基本定律。卡诺的研究发表于1824年，直到1843年经克拉珀龙（E. Clapeyron, 1799-1864）的介绍才广为人知。19世纪40年代，由于德国自然哲学中各种力互相转化思想的影响、电磁感应、电解作用和热电现象的发现、以及蒸汽机的发展，十多位科学家从不同的角度提出了能量守恒与转化原理，其中迈尔和焦耳分别计算和测量了热功当量值，亥姆霍兹通过定义引力势能和各种电磁能，全面论证了这一原理的普遍性。热力学第二定律是通过修正卡诺理论而获得的。1848年，汤姆逊注意到卡诺的不消耗热质产生动力的说法与焦耳热功当量试验之间的矛盾。1850年，克劳修斯（R. Clausius, 1822-1888）根据热的运动论修正了卡诺命题，并在此基础上明确表述了热力学第二定律。

气体分子运动论是用气体的分子运动来解释气体的一切物理性质，包括气体的热现象在内。1857年，克劳修斯运用几率概念计算理想气体单位时间内的碰撞次数，导出了波义尔和盖-吕萨克定律以及单质气体的比热。1860年，麦克斯韦借助于分子平均自由程概念，建立了气体扩散、内摩擦和热传导的统一理论，并得出了能量均分定理。1866年，玻尔兹曼（L. Boltzmann, 1844-1906）开始致力于热力学定律的力学解释，为此他用原子的平均动能来定义单个原子的温度，导出了熵的表达式。1877年，他进一步表明，熵是状态概率的量度。在这些研究的基础上，吉布斯（J. W. Gibbs, 1839-1903）于19世纪末提出了系综理论，从而奠定了统计力学的基础。

普朗克（M. Planck, 1858-1947）的量子论正是来自对热辐射

的统计物理研究。19世纪末，黑体辐射问题吸引了许多试验和理论物理学家的注意。试验表明，黑体辐射的能量分布形式仅取决于黑体的温度，而与其形状和组成物质无关。如何从理论上解释它呢？1893年，维恩（W. Wien, 1864-1928）根据热力学和麦克斯韦理论得出了位移定律（黑体温度与最大能量的波长成反比），并于1896年建立了一个辐射分布公式。1900年，瑞利（Rayleigh, 1842-1919）将能量均分定理用于以太振动模型，导出了一个新的辐射公式。维恩公式在短波部分与试验符合较好，瑞利公式仅在长波部分与试验相符。1900年，普朗克用内插法建立了一个新的公式，与试验完全相符，这就进一步推动他从理论上推导出自己的新公式。为此，他把空腔看成一个谐振子集合，并用统计力学的方法，但回避了能量均分定理，来推导振子平衡时的能量分布。结果发现，欲使理论推导与经验公式相符，就必须假定每个谐振子发射和吸收的能量是最小能量值 $\varepsilon = h\nu$ 的整数倍。这就是量子理论的诞生。能量的变化竟然是不连续的！大多数物理学家觉得难以接受，但爱因斯坦却深信不疑。1905年，爱因斯坦提出，不仅光的发射和吸收是不连续的，光的传播也是量子化的，光波只是统计平均现象。作为光量子论的推论，爱因斯坦成功地解释了光电效应和低温固体比热问题。

量子论的进一步发展——量子力学的建立，与原子结构的研究密切相关。原子的实在性，随着19世纪中叶化学原子论的确立和分子运动论的发展，大多数科学家都乐于接受，并把它看成物质的最小单元。但19世纪末X射线、放射性和电子的发现，却向人们表明原子仍有复杂的结构。1911年，卢瑟福（E. Rutherford, 1871-1937）在 α 粒子大角散射试验基础上提出了原子的有核模型，但该模型若根据电动力学是不稳定的：绕核旋转的高速电子很快就会因为辐射损失而陷落到原子核中。为了挽救这个模型，玻尔（N. Bohr, 1885-1962）于1913年将普朗克的量子论推广到原子结构问题上，提出了电子角动量的量子化理论。1923年，德布罗意（L. de

Broglie, 1892-1987) 受爱因斯坦光量子概念的启发, 提出一切粒子都有波动性质, 其波长就是动量的倒数 (以 h 为单位), 这就为玻尔-索末菲的定态概念给出了一个自然的解释。但玻尔理论尽管能对氢原子光谱作出很好的解释, 却难以应用到多于一个电子的原子。革命性的突破发生在1925至1927年。1925年, 海森堡

(W. Heisenberg, 1901-1976) 以玻尔的对应原理为工具, 摒弃了轨道这类不可观测的力学概念, 代之以辐射频率和强度这类光学量, 并在玻恩 (M. Born, 1882-1970) 和约尔丹 (P. Jordan, 1902-1980) 的协助下建立了矩阵力学。1926年, 薛定谔

(E. Schrödinger, 1887-1961) 循着德布罗意的物质波设想, 建立了波动力学, 并且证明波动力学与矩阵力学在数学上完全等价。1927年, 玻恩依据散射实验, 提出了波函数的几率解释。量子力学革命至此完成。

正如电磁场和引力场理论是场理论的高峰一样, 量子力学是粒子理论发展的高峰。场理论推翻了牛顿力学的绝对时空观和超距作用概念, 量子力学则摧毁了牛顿力学的决定论特征, 同时用能量的概念取代了力的概念。经典的统计力学只能解释气体的部分性质, 随着量子力学的建立, 我们对凝聚态的知识获得了长足的进步。原子价概念、元素周期表和原子光谱, 如今也由量子力学给出了完整的说明。量子力学的建立, 还为我们进一步探索原子核和基本粒子提供了基本理论框架。所谓量子场论, 就是将量子力学的能量结构与经典场论的时空结构结合在几率幅这个概念框架之下。在一定程度上, 这个理论实现了粒子与场的统一。

天体物理学与大地构造学

1846年海王星的发现, 标志着天体力学的顶峰。从该世纪中叶起, 随着照相术、光度学和光谱学的应用, 天体物理学开始进入天文学的舞台。照相术于 1839年发明后, 随即用于天文观测, 特别

是用它来进行天体的光度测量和光谱分析。1859年，德国天文学家泽内尔（F. Zöllner, 1834-1882）发明了偏振光度计，并用它来系统地观测恒星，从而使人类获得了大量变星的知识。光谱仪是夫琅和费（J. von Fraunhofer, 1787-1826）1814年发明的，他还用这台光谱观测到太阳光谱的许多暗线。1859年，基尔霍夫

（G. R. Kirchhoff, 1824-1887）认识到，这些暗线是太阳发出的连续光谱被大气吸收所致。他把这些暗线与试验室里各种元素的谱线加以对比，进而确认出太阳有许多地球上的常见元素，如钠、铁、钙等。基尔霍夫的研究发表以后，意大利天文学家塞奇（A. Secchi, 1818-1878）和英国天文学家哈金斯（W. Huggins, 1824-1910）于1863年同时开展了恒星光谱的研究。1868年，哈金斯开创了根据多普勒效应从恒星光谱线的位移来推算恒星视向速度的方法。塞奇的研究偏重于按光谱特征来分类恒星，这项工作是恒星演化理论的基础。进入20世纪，天体物理学已经成为天文学的主流。1924年，美国天文学家哈勃（E. P. Hubble, 1889-1953）以造父变星作为光度标准，计算出仙女座星云距离地球超过70万光年，终于证认了河外星系的存在。1929年，他又根据斯莱福（V. M. Slipher, 1875-1969）和自己对河外星云红移量的观测，提出了哈勃定律。二战之后，射电天文学迅速兴起，天文学开始进入全波时代。60年代，人们相继发现了星际分子、类星体、微波背景辐射和脉冲星。

天体物理学在理论方面最重要的进展，首先是对太阳能源的认识，其二是恒星演化规律的研究，其三是宇宙学的兴起。太阳的巨大能量，19世纪中叶亥姆霍茨就认识到不可能是化学反应产生的，为此他提出了引力收缩假说：太阳收缩使得引力势能转变为光和热。他估计这种能源可维持3000万年，可地质学家表明地球至少有几亿年了。太阳能源的现代理论——热核聚变理论，是贝特

（H. A. Bethe, 1906-）和魏扎克（C. F. von Weizsäcker, 1912-）于1938年各自独立地提出的。恒星演化理论，正如生物进化论一样，是建立在恒星光谱分类基础上的。本世纪初，赫茨普龙

(E. Hertzsprung, 1873-1967) 和罗素 (H. N. Russell, 1877-1957) 通过绘制光谱-光度图, 独立发现了恒星光谱与光度之间的统计关联, 并提出了主星序的概念。50年代, 美国物理学家史瓦西

(M. Schwarzschild, 1912-) 等人把恒星能源和恒星演化进程结合起来, 对赫-罗图上恒星分布规律作出了理论说明: 恒星化学成分不同造成赫-罗图上的不同序列; 同一序列的恒星可看成是恒星演化的不同阶段; 主星序阶段占整个恒星寿命的90%, 恒星度过主星序阶段后先是变成红巨星, 最后演变成白矮星、中子星或黑洞。宇宙学的研究对象是宇宙整体。1917年爱因斯坦将广义相对论应用于宇宙问题, 建立了一个有限无边的宇宙模型。爱因斯坦当时相信, 宇宙整体上应是静态的, 为此他引入了一个宇宙常数, 以维持宇宙的稳定。同年, 荷兰天文学家德西特 (W. de Sitter, 1872-1934) 根据广义相对论建立了一个膨胀宇宙模型, 该模型中物质平均密度为零, 人们称之为“德西特宇宙”。1922年, 苏联数学家弗里德曼

(H. Friedman, 1916-) 重新讨论了爱因斯坦的方程, 得出了非静态的宇宙模型。后来人们发现, 基于爱因斯坦的引力场方程所得出的宇宙模型不是膨胀就是收缩。1929年哈勃的发现发表后, 爱丁顿

(A. S. Eddington, 1852-1944) 就认为这是对宇宙膨胀理论的证实。1948年, 伽莫夫 (G. Gamov, 1904-1968) 把核物理知识同宇宙膨胀理论结合起来提出了大爆炸理论, 并且预言大爆炸的残余辐射温度约为5K。1965年, 彭齐亚斯 (A. A. Penzias, 1933-) 和威尔逊 (R. W. Wilson, 1936-) 无意中发现了宇宙背景辐射, 量值为3.5K, 刚好符合伽莫夫的预测。为了证实这一看法, 射电天文学家探测了0.5毫米至30厘米波段的辐射谱, 结果发现完全符合温度为2.7K的黑体辐射谱。这样, 宇宙背景辐射就成了大爆炸宇宙论的有力证据, 大爆炸理论也因此成为宇宙学的标准模型。

大地构造学的基本问题, 就是地球面貌的基本轮廓是如何形成的。从维尔纳 (Werner, Abraham Gottlob, 1749-1817) 与霍顿的水成论与火成论之争, 到居维叶与赖尔的突变论与渐变论之争,

地质学研究的主要对象是河谷与盆地。1780至1830年，在地质学上被称为英雄时代，其最突出的成就就是生物地层学的建立。地层学的奠基人是英国科学家史密斯（W. Smith, 1769-1839），他不但提出了化石鉴别原则和地层层序律，而且确定了英国中生代地层的层序。19世纪初，法国生物学家居维叶（G. C. Cuvier, 1769-1832）和布隆尼亚（A. Brongniart, 1770-1847）运用史密斯的方法研究了巴黎盆地的新生代地层。古生代地层是英国地质学家塞奇维克（A. Sedgwick, 1785-1873）和默奇森（R. I. Murchison, 1792-1871）稍后建立的。1830年，赖尔（C. Lyell, 1797-1875）出版《地质学原理》，运用渐变的观点和将今证古的原则，综合整理了前人的研究成果和自己的观察资料，从而为日后构造学的研究打下了坚实的基础。

19世纪中下叶，地质科学的重点已从河谷盆地的地层系统转向山脉的构造和发展史，特别是阿尔卑斯山的构造和历史。为了阐明阿尔卑斯的构造，几代地质学家付出了辛勤的努力。其中海姆（A. Heim）等人对逆掩断层、平卧褶皱和推覆体的论述，使人们认识到侧压作用和抗压地带的存在。在阿尔卑斯构造阐明之后，人们便开始重建褶皱山脉的形成过程。这一工作充分利用了地层学的成果，并引入了得自阿巴拉契山脉研究的地槽学说。阿尔卑斯地质史表明，地壳运动有着突变与渐变相间的造山与造陆旋回，这是赖尔从未料到的。19世纪末，奥地利地质学家休斯（E. Suess, 1831-1914）出版的《地球的面貌》，总结了赖尔以来的地质学成就。

19世纪大地构造学的基本理论是美国地质学家达纳（J. D. Dana, 1813-1895）提出的地槽学说。按照该学说，地球面貌是地球冷缩的结果：地球的冷缩始于大陆腹地（因而形成大陆的胚胎），继而使洋壳收缩而塌陷，其派生的侧压引起洋陆边界弯曲，下弯处的沉积盆地形成地槽，上弯处的剥蚀区形成地台。地槽学说虽然承认地壳的水平运动，但它把水平运动解释为地球径向收

缩的侧压效果，大陆和大洋盆地本身是不能作水平运动的。这种大陆固定论观念，在20世纪初遭到了魏格纳(A. L. Wegner, 1880-1930)的有力反击。大陆漂移本不是什么崭新的观念，但魏格纳运用地层、岩相、冰川、构造、古气候、动植物区系等资料，对此给予了全面的论证。1915年，魏格纳发表《海陆起源》，引发了地质学史上的第三次大辩论：固定论与活动论之争。

魏格纳的大陆漂移说不能解释漂移的机制，在20世纪50年代之前只有少数地质学家接受这一观点，其中包括霍姆斯(A. Holmes, 1890-1965)和迈尼兹(F. A. Vening-Meinesz, 1887-1966)。1928年，霍姆斯为了解决漂移机制，提出了地幔对流说：地幔中含有微量放射性的物质，其释放的原子能转变为热能，使得地幔作热对流运动，并牵引地壳作水平运动。但当时人们无从了解地幔的情况，所以这个假说也无法得到人们的认可。大陆漂移学说的复兴，得益于古地磁的研究。1957年，布莱克特和朗康(S. R. Runcorn, 1922-)通过测定欧洲和美国岩石标本的磁化方向，绘出了地质时期中地磁极移动的轨迹。该图表明，欧洲和美国地磁极移动的轨迹并不一致，若将北美相对于欧洲向东旋转30度，两者便重合在一起。这就表明，在地质史的某个时期，大西洋并不存在，欧洲北美是连在一起的。50年代以来，随着一系列大规模的国际考察，特别是对洋底的考察，大陆漂移说获得了飞速的发展。60年代初，赫斯(H. H. Hess, 1906-)和迪茨(R. S. Dietz, 1914-1995)根据三大海底发现(全球裂谷系、海底热流异常和海底磁条带)，提出了海底扩张学说。60年代末，勒皮雄(X. le Pichon)、摩根(W. J. Morgan, 1935-)和麦肯奇(D. P. McKenzie)等人在大陆漂移、地幔对流和海底扩张等概念的基础上，综合已有的海底发现和地球物理资料，建立了板块构造学说。

进化论与遗传学

现代生物学中最核心的一对概念是遗传与变异，遗传保证了物种的稳定性，变异则导致进化与多样性。19世纪生物学最伟大的成就，就是达尔文(C. R. Darwin, 1809-1882)和华莱士(A. R. Wallace, 1823-1913)创立的进化理论。进化的概念，18世纪后期的博物学家并不陌生，达尔文和华莱士的贡献在于进化机制的阐述。对拉马克来讲，进化的主动力来自物种自我完善的倾向，环境的作用是次要的。达尔文则认为，进化是偶然变异和自然选择共同作用的结果。关于环境的作用，达尔文也不同意拉马克提出的用进废退观点和获得性状遗传理论。长颈鹿脖子很长，不是因为长颈易于吃树叶的结果，而是那些通过偶然变异获得长颈的鹿更适于生存的缘故。

从拉马克的进化论过渡到达尔文的进化论，不能不提到居维叶和赖尔的影响。居维叶最大的成就，还不是巴黎盆地新生代地层层序的划分，而是他在比较解剖学方面的工作。居维叶不满足于研究动物躯体的某一部分，而是强调各部分彼此协调的方式。根据动物内部结构的相似性，他将动物分为不同的类群。这个分类系统既突出了动物之间的亲缘关系，又暗示着不同群体平行发展的思想。居维叶并不承认进化，他相信化石乃大洪水的遗迹，这种观点后来遭到了地质学家的有力反驳。1830年，赖尔发表《地质学原理》，逐渐使人们接受了地质渐变的思想。达尔文的科学研究，实际上是从地质学开始的。1831年至1836年，达尔文以一个博物学家的身份，随贝格尔号广泛考察了南美和太平洋群岛。在航海期间，赖尔的渐变思想令他产生了强烈的共鸣：在南美的东海岸，物种之间的亲缘关系随地理距离的增大而变远；在南美西海岸的加拉帕戈斯群岛，同一物种呈现出细微而又独特的差异。面对物种的巨大丰富性和连续性，达尔文逐渐相信，物种是在漫长的地质历史时期逐渐进化而来的。

1838年，达尔文偶然翻阅马尔萨斯(T. R. Malthus, 1766-1834)的《人口论》，进化的机制问题在他心中豁然明朗起来。在《人口论》中，马尔萨斯令人信服地证明，人口按几何级数增长，而粮食

仅按算术级数增长，因此为了调整二者之间的平衡，势必发生战争、瘟疫或饥荒。这自然使达尔文联想到自然界中的生存竞争。在此之后，达尔文花费了20年的时间来搜集资料，特别是动植物在人工选择下的变异现象、动植物在地理上的分布以及化石动物在时间上的连续性，来充实自己的自然选择理论。与此同时，另一位英国博物学家华莱士独立地得出了与达尔文相同的观点，并于1858年将论文寄给了达尔文，从而促使达尔文尽快发表自己的专著。1859年，《论通过自然选择或生存斗争中保持良种的物种起源》终于在伦敦出版。

达尔文是第一个明确草拟出进化系谱树的作家。变异，在他看来，是一个当然的事实。在众多反对进化论的声音中，最有力的一种就是针对变异问题的。按照当时盛行的遗传理论，变种与正常物种交配，将融合成一种中间状态。这样一来，任何有利的变异在漫长的自然选择作用发生之前早已消失了。因此，要使自然选择学说成立，我们必须建立新的遗传理论。达尔文不知道，此时一位奥地利的修士正在着手这一工作。这位修士就是孟德尔（G. Mendel，1822-1884）。

现代遗传学经历了三个阶段，首先是孟德尔的性状遗传学，随之是摩尔根的细胞遗传学，最后是在分子水平上探讨遗传的机制。1854年，孟德尔在修道院的花园里种植了34个珠系的豌豆，专门考察植株的高矮这一对性状。豌豆通常是自花授粉的，但孟德尔将高株与矮株杂交，得到了只产生高株的种子。他让这些种子与矮株杂交，结果发现杂交的第一代全是高株的。若再让杂交的高株种自花授粉，其后代的高矮之比为3：1。进一步让第二代杂交种自花授粉，矮株种只产生矮株，而高株种中只有1 / 3是纯种，其他2 / 3高株种的后代高矮之比仍为3：1。这种神奇的现象，使得孟德尔认识到，豌豆的高矮这一对性状有显性与隐性之别。这种性状遗传是否有普遍性呢？为此孟德尔进一步考察了圆皮豌豆与皱皮豌豆、紫花豌豆与白花豌豆等性状的遗传规律，进一步证实了性状因子的显性与隐

性之分。1865年，孟德尔写出了植物杂交试验的报告。在这篇论文中，孟德尔指出，植物种内有控制性状的稳定遗传因子，植物的每一性状由一对分别来自父本和母本的因子所控制，这对因子中只有显性的一方表现出来。

孟德尔的遗传理论在19世纪并未产生影响。孟德尔理论的复兴，与细胞遗传学的兴起是同步而行的。细胞学说的建立，是19世纪生物学上的一件大事。早在17世纪显微镜刚刚问世之时，虎克就发现植物切片中布满了大大小小的盒子形气孔，并将它命名为细胞。1831年，英国植物学家布朗（R. Brown, 1773-1858）发现细胞内有小坚果仁状的细胞核。1838年，德国植物学家施莱顿

（M. J. Schleiden, 1804-1839）发表《植物发生论》，明确提出一切植物皆由细胞构成，所有的细胞都含有细胞核。次年，德国生理学家施望（T. Schwann, 1810-1882）将细胞学说推广到动物界，从而推倒了动植物之间的屏障。施望指出，细胞是生命的基本构成单元，任何细胞都由细胞膜、细胞质和细胞核组成。19世纪70年代，随着消色差显微镜的发展和苯胺染料的发现，得以使人们进一步观察细胞核和细胞的分裂过程。1879年，德国解剖学家弗莱明（W. Flemming, 1843-1905）将细胞核内吸收苯胺染料的网状物质称为染色质。在细胞分裂过程中，人们发现，一开始染色质形成若干条分立的丝，称之为染色体。染色体总是成对的，并且各物种的细胞中染色体数目恒定。细胞即将分裂时，核膜消失，同时染色体发生有丝分裂，形成两个子细胞核。1887年，比利时生物学家范贝纳登（Van Beneden, 1846-1910）发现，卵细胞的分裂不是染色体沿纵长分裂，而是成对染色体的分离，子细胞的染色体数目减半。精子的分裂也是如此，但性细胞结合后物种的染色体数目又恢复了，其中一半来自精子，另一半来自卵细胞。

1900年，三位从事植物杂交试验的生物学家，荷兰的德弗里斯（de Vries, 1848-1935）、德国的科林斯（C. Correns, 1864-1933）和奥地利的切马克（E. von Tschermak, 1871-1962），不约而同

地发现，孟德尔早已发现了他们所得出的结论。1901年，英国生物学家贝特森（W. Bateson, 1861-1926）将孟德尔的论文译成英文，并在英国大力宣传孟德尔的理论。随着孟德尔学说的复兴，许多生物学家如美国的萨顿（W. Sutton, 1877-1916）和荷兰的德弗里斯立即指出，孟德尔因子的行为相当于性细胞结合时染色体的行为。这一见解与魏斯曼的种质遗传学不谋而合。19世纪后半叶，魏斯曼（A. Weismann, 1834-1914）循着德国自然哲学的思路，强调每一有机体都有不同于体质的种质，体质是从种质生长出来的，体质的变化不会影响种质，因此获得性状遗传是不可能的。1887年，魏斯曼假定，两性结合是每个亲体的一半种质相互结合。减数分裂阐明之后，他进一步将种质与染色体等同起来。

将遗传因子与染色体联系起来，马上就面临一个问题：遗传因子数比染色体数要大得多。为此，萨顿提出，每条染色体上带有多个遗传因子。1906年，贝特森和庞尼特确实在豌豆试验中发现了遗传因子的连锁现象。用基因一词来代替遗传因子，是丹麦植物学家约翰森（W. L. Johannsen, 1857-1927）1909年建议的。基因在染色体内部如何排列的呢？本世纪初美国以摩尔根为首的遗传学派对此展开了深入的研究。1909年，摩尔根学派开始用果蝇来做试验。果蝇只有4对染色体，且其生活周期不到两周，因而特别适合于研究遗传问题。1910年，摩尔根发现，白眼基因与性别基因总是连锁在一起，从而直接证实了染色体是基因的载体，因为人们已知性别是由染色体控制的。在此后的10余年中，摩尔根学派通过大量试验，不但找到了测定基因相对位置的方法，而且成功地绘出了果蝇染色体上的基因连锁图。20年代前后，摩尔根相继出版了《孟德尔遗传学原理》（1915年）、《遗传的物质基础》（1919年）和《基因论》（1926年），从而将遗传学推进到细胞水平。摩尔根认为，基因并不是虚构的，它就是染色体上念珠状的微粒。

摩尔根学派虽然指出基因是变换、重组和突变时无法再分的单位，但基因的物理化学本质在30年代仍然是一个谜。打开这一局面

的是关于肺炎双球菌和噬菌体的研究。谈到细菌，我们不能不提到19世纪巴斯德（L. Pasteur, 1822-1895）的伟大工作。巴斯德起初是一位有机化学家，其后为解决葡萄酒变酸问题而开创了微生物学。1863年，他发现发酵与变酸都是酵母菌引起的，将葡萄酒加热到55度即可杀死使酒变酸的乳酸杆菌。次年他发现了导致丝蚕病的微生物。十年之后，他又研究了牲口的炭疽病和鸡的霍乱病，并且在细菌水平上发现了免疫学原理。巴斯德的工作在农业和医疗上的意义极为巨大，单就生物学理论来讲，主要是否定了自然发生论。在巴斯德的开创性工作之后，微生物学便蓬勃发展起来。有关微生物遗传的研究，始于本世纪40年代。正是这项研究，成功地将遗传学从细胞水平推进到分子水平。

早在19世纪70年代，生物化学家已经发现了脱氧核糖核酸（DNA）和核糖核酸（RNA）。1896年，美国细胞学家威尔逊（E. B. Wilson, 1856-1939）推测，染色体的主要物质就是脱氧核糖核酸。DNA是遗传物质的证据首先来自肺炎球菌的研究。肺炎球菌有两类，S型和R型，前者有荚膜有毒，后者无荚膜无毒。1928年，英国生物学家格里菲斯（F. Griffith, 1877-1941）将加热杀死的S型细菌和活的R型细菌混合注入小白鼠体内，结果小白鼠死亡，从其尸体中可分离出带有荚膜的肺炎球菌。1944年，美国细菌学家艾弗里（O. T. Avery, 1877-1955）从S型细胞浸出物中分离出一种物质，提纯后发现就是DNA。如果事先用酶将S型的DNA分解掉，荚膜性状就不会转移给活细菌。这就证明DNA就是转化因子。1952年，美国噬菌体学家赫尔希（A. D. Hershey, 1908-）分别用放射性同位素 P^{32} 和 S^{35} 标记噬菌体的头部DNA和蛋白质外壳。结果发现噬菌体只有头部DNA进入细菌细胞，蛋白质外壳则留在细胞外。噬菌体DNA进入细菌细胞后，细菌便开始合成噬菌体DNA，并为它包上蛋白质外壳。这是DNA作为遗传物质最直接的证据。在此之后，人们便开始了DNA分子结构的研究。1953年，英国的维尔金斯（M. Wilkins, 1916-）和弗兰克林（R. Franklin, 1920-1958）

给出了DNA的X射线衍射图，维尔金斯、弗兰克林、还有美国著名化学家鲍林（Pauling, 1901-）事实上已经知道了DNA的螺旋结构。DNA的双螺旋模型是沃森（J. Watson, 1928-）和克里克（P. H. C. Crick, 1916-）于1953年建立的，这是生物学史上划时代的发现。DNA结构清楚之后，接下来便是遗传信息的传递问题。1954年，伽莫夫提出了三联密码假说。这个假说随后被试验证实，从而导致了遗传密码的破译和基因工程的兴起。

第三节 近现代科学技术在中国的传播和发展

由于中国传统科学自身现代化趋势的泯没，使中国科学近代化的主流特征成为源于自欧洲的近代科学技术在中国的传播，因而中国近现代科学技术事业可以看做是科学世界化过程的一个组成部分。我们以明清之际的西学东渐为界把中国科学技术史划分为古代和近现代，而近现代又可以两个标志性时间点将其大致划分为三个时期，这两个标志点是1928年中央研究院的设立和1956年十二年远景规划的制定。1582-1928年这段漫长的时间是中国近现代科学技术启蒙时期，1928-1956年是现代科学技术在中国的奠基时期，1956年以来是国家计划指导下的现代科学技术的发展时期，因而中国近现代科学技术事业的发展主要在20世纪。

20世纪是世界科学技术空前辉煌和人类科学理性走向成熟的世纪。伴随着世界科技发展的浪潮和中华民族的三次历史巨变，近百年来的中国科学技术事业也经历了三次历史性的转变：从新文化运动的科学启蒙到中央研究院的建立基本上完成了从传统到现代的心态转变，从中央研究院建立到十二年科学规划的制定实现了从自由研究到规划科学的模式转变，十二年科学规划以来的实践和探索导致从国防到经济的动力转变。今天中国的科技界已形成一种共识，为中华民族的振兴，中国的科技体制必须尽快进行新的整合，

加速建设国家科技创新体系的步伐。

一、中国接受现代科技的文化基础

虽然中国的现代科学技术主要是形成于17世纪欧洲的科学技术世界化的一部分，但它也是我们对中华五千年文明的一种承继。在追溯历史的意义上，不仅现代科学技术的产生有其古代的渊源，中国之所以能接受并发展现代科学技术也自有其历史根据。我们今天所理解的科学，即逻辑推理、数学描述和实验检验相结合的自然科学，形成于17世纪的欧洲，在此之前没有这种严格意义上的科学，不仅在古代中国没有，在古代希腊也没有。因为直到14世纪末，东方人和西方人大体一样，都各自企图解决同样性质的问题，而又都未能达到很好领悟和自觉掌握我们今天所熟悉的科学精神和科学方法的水平。在我们今天的认识水平上，科学已被理解作为一种历史的进程，每一古老的文明中都有某种科学成分成长的历史，而且在希腊科学繁荣期和现代科学诞生之间的千余年中间，西方科学衰退而阿拉伯科学和中国科学兴盛发达，正是希腊科学传统和中国技术传统在阿拉伯汇合并渐次传往西欧，才诞生了我们今天所理解的现代科学。

早在公元前2500年的帝尧时代，中国古人就开始了有组织地“观象授时”的科学活动。夏代产生了“五行”观念，殷周之际形成了“阴阳”观念，西周末年又产生了“气”的观念。到公元前6世纪前后，春秋战国时期的理性重建区分了“天道”和“人道”，“仰观天文，俯察地理”的“观察”精神通过《易传》的传播而得以发扬。于是子产（？—前522）的“则天说”、子思（战国时期）的“助天说”、荀子（约前325—前238）的“制天说”随之而出，“人性”和“物理”亦开始分途而治，“生成论”、“感应论”、“循环论”等宇宙秩序原理亦被提出。在秦汉时期，以阴阳五行学说和气论为哲学基础，数学、天文学、地学、农学和医学五大学科各自形成了自己的科学范式，并且联合开辟了宇宙图像之历法模式、数学模式和物理模式之先河。在儒道互补推进的文化背景下，

赖班固（31-91）的“实事求是”精神和王充（17-97）的“实验”思想之发扬，中国不仅技术很发达而且也有不同于西方的科学传统，成为后人接受现代科学技术的基础。

中国传统科学的积累以其三次高峰展示自己的心路历程和行动轨迹。每一次高峰期都是明星灿烂、巨著迭出，在不及百年之内出现数名世界科学技术史上数得着的大家。以魏晋玄学为特征的新道家思想解放运动，催生了南北朝时期中国传统科学的第一高峰：数学家祖冲之（429-500）父子著《缀术》（成书年不详），医药学家陶弘景（456-536）著《神农本草集注》（成书年不详），地理学家酈道元（？-527）著《水经注》（成书年不详），农学家贾思勰（？-544）著《齐民要术》（544年）。以理学为旗帜的新儒学的理性精神，把中国传统科学推向最高峰：医学领域的刘（完素）、张（从正）、李（果）、朱（震亨）金元四学派和数学领域的贾（宪）、秦（九韶）、李（治）、杨（辉）、朱（世杰）宋元五大家最为突出；以学科代表计，法医学宋慈（1186-1149）著《洗冤集录》（1247年），数学家秦九韶（1202-1161）著《数书九章》（1147年），天文学家郭守敬（1231-1316）制造了大量天文仪器，农学家王桢（1271-1330）著《农书》（成书年不详），机械学家薛景石（生卒年不详）著《粹人造志》（1261年），天文、物理学家赵友钦（生卒年不详）著《革象新书》（1281年）。晚明时期出现的以综合为特征的科技著作是在实证实学影响下产生的，它放出了中国传统科学的最后一道光彩，是为第三高峰期：医药学家李时珍（1518-1593）著《本草纲目》（1578年），数学家、物理学家朱载堉（1653-1610）著《律学新说》（1584年），水利学家潘季训（1521-1593）著《河防一览》（1590年），天文家、农学家徐光启（1561-1633）著《农政全书》（1633年），工程技术著作家宋应星（1586-1641）著《天工开物》（1637年），地理学家徐弘祖（1586-1641）著《徐霞客游记》（1640年）。

中国传统科学也曾经有过自身现代化的三次倾向：第一次伴随

中国思想家胡适（1891-1962）所称宋代的“文艺复兴”而发生，主要表现为科学知识的理性化，由于“靖康之难”而中断；第二次伴随中国经济史家们所称的明中叶的“资本主义萌芽”而发生，主要表现为科学技术的社会化，由于“甲申鼎革”而夭折；第三次伴随乾嘉时期的考据学而发生，主要表现为在西学的影响下的天文学、数学复兴，由于“虎门销烟”而转向，最终以引进西学的方式走向现代化。培根（1561-1626）和马克思（K. Marx, 1818-1883）曾先后对中国的四大发明对西欧近代化意义作出著名的评断，而李约瑟（J. Needham, 1900-1995）通过对中国的科学与文明的详尽研究阐释了中国传统文化的未来的意义，所有这些都越来越受到科学史家们的重视。

二、近代科学技术传入中国的三部曲

从明清之际的“西学东渐”到中央研究院建立是中国现代科学技术的启蒙期，在这漫长的时期内基本上完成了从传统到近代的心态转变。这一转变是通过明清之际传教士的科学输入、同光新政时期的科学技术引进和“五四”新文化运动“三部曲”实现的。传教士带来了科学技术的新鲜空气，洋务运动的示范作用造成引进近代科学技术不可逆转的局面，知识分子的科学文化运动对扫除妨碍科学技术发展的反科学的文化环境起了重大的历史作用。

产生于欧洲的近代科学和技术在中国的传播，首先是由基督教传教士以渗透的方式输入进来的。以利玛窦（M. Ricci, 1552-1610）、汤若望（J. A. Schall von Bell 1591-1666）和南怀仁（F. Verbiest, 1623-1688）为代表的耶稣会士们以科学作为传教的手段，在传教的同时也向中国的学者传授了一些西方的天文学、数学、地理学、生物学等方面的科学知识，还帮助中国官方编修历法、制造装备观象台的仪器和测绘中国地理全图。尽管他们的科学活动主要在宫廷范围内，并且内容也主要限于历法领域，但正是他们的这种科学传教活动使中国人接触了西方的科学技术。不同文化的交流和融合是文化发展动力之一，但接触之初往往会发生这样或那样的冲突。当

骄傲的耶稣会士以其“欧洲文化中心论”向具有悠久文化传统的中国传授西学时，中国儒士阶层就以其根深蒂固的“中国文化中心论”来对抗。但这种对抗并非两种不同类型的科学之间的冲突，而是文化传统惯性造成的心态失衡。中国的优秀科学遗产不但不与现代科学相悖，而且是接受和吸收它的基础，实际上中国儒士阶层就是在“格物致知”延伸的意义上开始接受西方科学技术的。但是，不仅折中主义的“中西会通”并不成功，虚幻的“西学中源”说又把儒士们引向以经学治科学的错误道路，而“中体西用”的官方文化政策错误地把西学置于中学的从属地位。

虽然早在明清之际徐光启领导的历法改革就采用了西方近代天文学和数学知识，但是由政府推动的有目的的现代科学技术事业则是伴随着兴办洋务工业而开始的。在洋务运动期间，以官办和官督商办的形式，兴办了50多个近代工矿企业，与同期外国人在中国办的100余家工厂的资本相当。这些以军事工业为主并且是官僚资本垄断性的洋务工业在中国现代科技史上的重要意义在于，它对中国发展现代科学技术起了一种示范作用。伴随着这些洋务工业的兴办，现代科技教育和现代出版事业也开始创办，清政府除为外交需要办外语学校和为强兵而设的近代军事学堂以外，还兴办了机械、电气、铁路、测绘等实业学校10多所，官派出国留学生和实习生近200名。以同文馆和江南制造局译书馆为中心的出版事业取代了教士们在这个领域的工作，中国读书人中出现了李善兰（1811-1882）、徐寿（1818-1884）、华蘅芳（1833-1902）等科学技术专家。甲午战争后外国资本家纷纷在中国设厂，资本输出逐渐成为掠夺中国人民的主要形式。战争的消耗和赔款使清政府无力再垄断，遂提倡和奖励私人资本办工业，私人资本经济获得了合法的地位。到1911年中国的工业资本已约达13亿银元，使用机器的行业率也达到90%以上，并已呈现在全国意义上改变传统经济结构的趋向。同时通过颁布学堂章程和废科举等教育改革，又给予西学以合法的地位，学校教育得以迅速发展，到1911年大专院校已达100余所，在校学

生 4 万余人，数万人出国留学。光绪帝钦定的《宪法大纲》给臣民集会结社的自由，又使学会迅速发展，到清末一度发展到 600 多个。虽然这些学会大多是会党性的，但其中也有少量科学技术学会，如算学会、农学会、测量学会、医学会、地理学会等。

自戊戌变法起中国就进入了政治大动荡时期，在辛亥革命到南京政府成立的 15 年间，旧政权解体而新政权尚未巩固，国家政权在军阀手中辗转。这种“权力真空”状态为智力潜力的发挥提供了前所未有的有利条件，包括文学革命、观念更新和科学启蒙三位一体的“五四”新文化运动发生了。启蒙先驱严复（1854-1921）着手改造京师大学堂，任鸿隽（1886-1961）等一群留学美国的学生在美国创办《科学》杂志，陈独秀（1879-1942）等在上海创办《青年》杂志，以民主和科学为旗帜的新文化运动拉开了序幕，一场比戊戌变法和辛亥革命影响更为广泛和深刻的思想解放运动开始了。北京大学校长蔡元培（1868-1940）以“兼容并包”的方针汇流各种新思潮，使北京大学成为新文化运动和“五四”运动的策源地。老一辈学者的呼吁和年轻一代的响应形成了席卷整个文化界的新文化运动，从消极、保守、闭塞等思想中解放出来的青年人，以积极、进取和科学的精神同腐朽的封建意识作斗争。黄炎培

（1878-1965）等发起在上海成立的中华职业教育会（1919 年）出版《职业与教育》，倡导技术教育。蒋梦麟（1886-1964）等组织的教育共进社（1918 年）出版《新教育》，宣扬杜威（J. Dewey, 1859-1952）的实用主义教育思想。1923 年开始的以丁文江

（1887-1936）为代表的科学派与以张君勱（1887-1969）为代表的玄学派之间的“科学与玄学”（又称“科学与人生观”）的大论战，无疑有益于中国人科学文化意识的养成。这一时期科学思潮十分浓厚，对科技团体的创立起到良好的催化作用。一批有历史影响的科学技术学会和研究机构在这期间设立。著名的学会有 1913 年在广州成立的中华工程师学会、1915 年在美国成立的中国科学社、1916 年在日本成立的丙辰学社；有重要影响的研究机构有 1916 年将工

商部 1906年成立的农事试验场改称中央农事试验场、1916年成立的中央地质学调查所、1922年成立的中国科学社生物研究所、1923年成立的黄海化学工业研究所、1926年国立交通大学设立的工业研究所和1927年由14个文化团体和机关联合成立的西北科学考察团。美国洛克菲勒基金会的“中国医学委员会”（1914年设立）和由美国退还的第二批庚子赔款设立的“中华教育文化基金会”（1924年设立）等基金组织，对于推动中国科学事业的起步功不可没。所有这一切都为中国的科学技术事业进入体制化的发展时期奠定了基础。“五四”新文化运动本质上是一场改变中国人的思想和行为方式，从儒学文化传统中解放出来的思想启蒙运动。

三、中国科学的体制化进程

国际环境和国内的政治格局以及工业经济结构等约束条件，使得中国现代科技体制的形成期经历了从中央研究院创设到中国科学院建立学部约20年的时间，并且表现出明显不同的三个阶段和三种形态。第一阶段是国民政府在其不稳定的统一10年间，近代科学技术得以在中国立足，并形成欧美模式科技体制的雏形。第二阶段是抗日战争和国内战争时期，无情的战火中断了中国科技事业的正常发展，国统区的欧美模式、解放区的苏联模式和日占区的殖民模式各不相同。第三阶段是中华人民共和国成立，科技体制的欧美模式转变为苏联模式，完成了中国科学技术事业的奠基。

作为国家最高学术机构中央研究院的设立，是以结束军阀混战、实现国家的稳定为条件的。1928年 11月张学良的东北军“易帜”，国民政府完成全中国名义上的统一。国民政府着手收回治外法权，恢复关税自主权，废除不平等条约，许多发展中国经济文化事业的方案被提出。1928年国家建设委员会成立并颁布了《奖励工业品暂行条例》，1929年设中央农业推广委员会，1932年公布《奖励工业技术暂行条例》，1933年设立全国经济委员会作为顾问机构协调各种经济发展计划，1935年国防设计委员会改组为资源委员会专事重工业的筹划并于翌年拟定了《重工业建设五年计划》。在教

育和文化方面也作出了种种努力，中央研究院（1928年）、北平研究院（1929年）、中央工业试验所（1930年）、中央农业试验所（1931年）等研究机构相继建立。通过《大学组织法》（1929年）、《大学规程》（1929年）和《学位授予法》（1935年）等措施，特别是政府“提倡理工，限制文法”的政策，使科学技术教育有了明显的进步。

抗日战争时期是中国人民最苦难的时期，中华民族为争取民族独立最后决战的胜利，付出了2100万生灵和巨大的经济损失的代价。中国科学技术事业的发展，一方面由于日本的侵略而遭受严重损害，另一方面侵略与反侵略的战争又造成在正常情况下难以一时达到的特殊效果。这主要指如下三方面：第一，战争期间国民政府偏寓重庆，部分工业设施和文化机构内迁西南和西北地区，迅速改变了中国的工业和文化设施的分布；第二，中国共产党在陕北建立的抗日民主政权，初步实行了马克思主义的科学技术政策；第三，日本侵略者出于侵略战争的需要和永久霸占的考虑，在中国东北地区发展了较为完善的工业体系和科学文化设施。抗战时期重要的工厂和科学文化设施内迁，使西南地区一时成为工业和文化中心。川、湘、桂、陕、黔、滇、甘七省的工厂、资本和工人总数占全国的份额分别从抗战前的6.3%、4.4%和7.3%上升为国统区的88.6%、93.5%和85.6%。在中国共产党领导的陕甘宁边区设立的延安自然科学研究院和陕甘宁边区自然科学研究会，配合边区经济建设改造和新建了一批工矿企业，这些实践对尔后中华人民共和国的科技政策具有不可忽视的潜在影响。日本军国主义者不仅妄图永久霸占中国的东北，而且想把它变为武力征服整个中国 and 对抗俄国的基地。通过在那里建立的南满铁路株式会社、满洲重工业开发株式会社、伪满大陆科学院和若干理工科大学等，企图长期殖民统治，掠夺东北资源。但是，不仅在当时受益的是日本军国主义集团而不是中国人民，而且这些工业设施也未能成为战后发展中国工业的基础，因为它的40%毁坏于战后，又40%作为苏军的战利品被拆走。抗日战

争胜利后的辽沈、平津、淮海三大战役，迫使国民党政府溃逃到海岛台湾，中华人民共和国的成立，标志着中国建设复兴时代的开始。

八年抗战和三年内战结束后，人民共和国就开始有计划地发展经济和科学文化事业。尽管科学技术领域的骨干科学家大多是欧美文化教育出来的，但是社会主义的政治制度决定了中国的科技体制从自由研究模式转变成规划科学的模式。这一转变是通过以苏联科学院为参照的中国科学院建设、以苏联高等院校为样板的院系调整和以苏联援建的156项重点工程这三项主要措施实现的。1949年成立的中国科学院，通过接收原中央研究院和北平研究院等研究机构，很快组建了包括自然科学和社会科学两方面的20个研究机构，共200余名研究人员，开始进行工作。在教育方面，1952年进行的全国范围的高等院校大调整，按照苏联依专业培养人才经验，通过拆并相同的系、院而组建了一批新的专门学院。华北和华东两大文化中心地区是这次调整的重点，以北京和天津为重点的华北地区调整为41所院校，以南京和上海为中心的华东地区调整为54所院校，针对国家建设需要共设置了215种专业。通过这次院系调整，基本上把民国时期欧美式的通才教育体制转变为专业教育。由于政府把科学技术事业纳入发展国民经济的第一个五年计划，科学研究、科技教育和经济产业在发展中有计划的配合，为中国科学技术事业的发展提供了历史上前所未有的有利条件。到1955年，全国有科学研究机构380个、高等院校229所、专门研究人员9000人，科学研究、工程技术、文教卫生三大系统中的高级知识分子已达10万人。

四、中国科学的现代化转变

十二年科学远景规划的制定和国家科委的建立使中国科学技术事业进入国家计划下的现代发展时期。第二次世界大战后成长起来的新科学和新技术部门一个个逐渐建立起来。在中华人民共和国成立后的20多年里，由于国家安全受到严重威胁，国防需要是科学技术发展的主要动力。文化大革命后，由于国际环境趋于缓和，国家工作重点也转向以经济建设为中心，经济建设与社会发展自然成

为发展科学技术的主要目标，1978年的全国科学大会成为中国科学技术发展的一个新的转折点。

中国最初引进近代科学技术的洋务运动就是以增强国防能力为目的，甲午海战中国败北于日本更加增强了这种意识。国民政府的注意力也主要在国防方面，1932年设国防设计委员会（后改组为资源委员会），抗日战争时期中国的科学技术事业很大程度上被国防化了。人民共和国成立之初形势严峻，朝鲜战争的战火烧到中朝边境，美国第七舰队游弋台湾海峡，美国协防条约国从海上形成对中国的包围态势，接着又有中印边界上的武装冲突和中苏边界上兵戎相见。在这种情况下中国不得不以巨大的开支用于维护国家的安全，即使在三年经济困难和十年“文化大革命”动乱时期都没有放松国防科学技术的研究，终于完全依靠自己的力量制造出了原子弹、火箭和导弹。通过这些科学尖端武器的研制，国防科技系统的科学家和工程师掌握了一批尖端技术，但是民用工业的设备和技术直到1970年末还基本停留在苏联援建项目及其更新的水平上。中华人民共和国进入联合国、中美复交和中苏和解使得国际孤立的境况基本改变。“文化大革命”的结束、国际关系和海峡两岸关系的缓和、以及国内政治的稳定，1978年12月中国共产党中央全会遂决定把国家的战略重点转到社会主义现代化建设上来，适应新时期的中国科学技术发展战略也适时地被提出来。

1980年12月25日至1981年1月5日，国家科学技术委员会召开全国科学技术工作会议，讨论科学技术发展的方针问题。这次会议确定的发展科学技术的新方针包括五个方面：第一是科学技术与经济、社会应当协调发展，并且把促进经济发展作为首要任务；第二是着重加强生产技术的研究，正确选择技术，形成合理的技术结构；第三是加强工农业生产第一线的技术开发和研究成果的推广工作；第四是保证基础研究在稳定的基础上逐步发展；第五是把学习、消化、吸收国外技术成就作为加速发展中国科学技术的重要途径。这个新方针的确立标志着中国科学技术的动力从国防向经济的转移，

或者说发展科学技术的动力向着发展国家经济实力和改善人民生活水平转移。

这个新方针，以“科学技术是生产力”的宣传为先导，通过第六个五年计划的六项措施的实施，在中国形成强烈的科技经济结合的气氛。1981年4月16日中共中央和国务院转发了国家科委党组《关于我国科学技术发展方针的汇报提纲》。这个《提纲》的第一部分内容就是前面提到的新方针的五点要求，而第二部分内容就是六项措施：在“六五”期间，科学技术要为国民经济的发展解决几个重要问题；研究和制定重大技术政策；加强科技成果的应用推广，实行有偿转让；组织好技术引进和消化吸收工作；改革体制和整顿机构；搞好学术、技术交流和科学普及活动。于是有关的计划、政策、法律相继产生，一直到技术创新体系和国家创新体系的提出。

五、国家科技创新体系与知识创新工程

中国科学从传统向近代的演变可以早溯到16世纪末耶稣会士的来华，1928年中央研究院的建立是中国科技事业进入建制化阶段的标志，但真正全国规模科研体制的建设应该从20世纪50年代中华人民共和国成立和中国科学院建院之后开始。知识创新工程是这一历史进程的逻辑发展，其核心是建设与知识经济时代相适应的国家科技创新体系。

1912年，出生于摩拉维亚的美国经济学家熊彼得

(J. A. Schumpeter, 1883-1950) 在其名著《经济发展理论》中首先提出“创新”理论。各国的历史和传统不同，国家规模和发展水平也有差异，创新体系应是多样化的，但共同的目标是建设适应全球化、知识化、可持续发展时代的知识创新体系。

1997年，针对国内外政治经济形势和科技发展趋势，中国科学院向国家决策机构提出《迎接知识经济时代，建设国家创新体系》的研究报告。1998年中国国家主席江泽民在报告上作了重要批示，要求中国科学院率先进行试点，搞出中国自己的科技创新体系来。同年6月9日，国家科教领导小组正式决定由中国科学院实施知识创

新工程。这是中国政府面向21世纪经济全球化和知识经济时代的到来作出的一个战略性政治决策，是落实国家科教兴国战略的重大举措，其目的是将中国科学院建设成为瞄准国家战略目标和国际科技前沿、具有强大而持久创新能力的科学研究基地、培养和造就高级科技人才的基地和促进高技术产业发展的基地，成为具有国际影响的国家科技知识库、科学思想库和科技人才库。

1998年11月24日，国家主席江泽民在俄罗斯新西伯利亚科学城会见科技界人士时讲到：“要迎接科学技术突飞猛进和知识经济迅速兴起的挑战，最重要的是坚持创新。创新是一个民族的灵魂，是一个国家兴旺发达的不竭动力。”中国政府支持中国科学院进行知识创新工程试点，对于建设面向21世纪的中国国家创新体系具有重要意义。

由中国科学院启动实施的知识创新工程试点工作计划分为三个阶段历时13年完成，现在已从试点启动阶段（1998.6-2000.12）进入全面推进阶段。在过去的三年里，知识创新工程的主要进展是：

1. 瞄准世界科技发展前沿，围绕国家目标和社会经济战略需求，凝练科技目标；
2. 进行新的学科布局和调整，开展深层次的体制机制改革；
3. 遴选优秀人才，建设跨世纪的科技创新队伍。

现在知识创新工程已进入第二期阶段（2001.1-2005.12）。在未来五年内，中国科学院面向国家战略需求和世界科学前沿，加强原始性科学创新，加强战略性技术集成，在全院营造竞争向上的科研环境和学术气氛，将原有123个研究所整合成80个左右园区优美、队伍精干、具有强大创新能力和鲜明特色的国家级科学研究所，其中约30个将成为世界公认的高水平研究机构，3-5个达到国际一流水平，为中国在21世界的经济发展、国防建设和社会作出基础性、战略性和前瞻性的贡献。

六、中国科学家的贡献

中国科学家对中国科学事业的贡献可概括为四个方面：建立科学技术专业培养人才；建立研究机构从事科学研究和技术发明；为解决国防和经济建设问题尽心竭力；与国际同行合作研究为科学事业承担国际义务。在中国科学事业的百年历史中，中国科学家们为中国的现代化所进行的艰辛的努力，造就了二三十年代的“初创时代”和六七十年代的“奠基时代”，改革开放以来不仅为中国经济地位的提升和综合国力的增强作出了重要贡献，而且策划“创新时代”的到来。但是我们也应当对自己科学现状有清醒的认识，中国目前还少有开拓新领域和与国际同行并驾齐驱的原创性工作。

中国现代科学技术事业主要是由海外归来的学子们具体开创的，他们建学会、出学刊、教科学，成为中国科学事业的奠基人。到30年代，理、工、农、医各科的学系、学会和研究所都建立起来了，到1949年中国有了200多所大学、60几个科研机构和近40个学术团体，在这些大学和研究所从事自然科学研究的科学家约700多人。生物学和人类考古学发展较早且成绩较大，而作为现代科学基础的数理化，由于缺乏工业基础，发展相对缓慢。

20世纪前半叶，中国科学家不仅在地质学、生物学和古人类学等“本土”科学方面作出了较大的成绩，而且还有一批中国科学家在科学前沿领域作出了重要贡献。

中国地质图的绘制、中国植物图谱的编撰、水杉植物的发现、北京猿人的发现以及传统科学遗产的整理等科学成果，不仅对于中国有重要价值，而且也具有世界意义，关于中国资源分布和文化遗产的研究对于了解全球演化和人类历史是不可或缺的重要部分。

中国科学家在20世纪上半叶取得了一些具有世界影响的成果，特别是在物理学前沿有诸如叶企孙（1898-1977）测定普朗克常数、吴有训（1897-1977）验证康普顿散射理论、赵忠尧（1902-1998）发现早期的正负电子对产生和湮没的现象、钱三强（1913-1992）发现原子核三分裂现象、张文裕（1910-1992）发现 μ 原子等实验

工作和吴大猷（1907-2000）预言铀元素系、王淦昌（1907-1998）提出中微子的实验方案、黄昆（1919-）提出固体的“黄散射”等理论工作。此外值得一提的还有华罗庚（1910-1985）在解析数论和复分析方面的工作、许玉驷（1910-1970）在数理统计和概率论方面的工作、吴文俊（1919-）在拓扑学方面的示性类研究、侯德榜（1890-1974）发明的联合制碱法、吴仲华（1917-1992）在叶轮机械方面的三元流动理论等。

中华人民共和国成立以后，从1949年到1966年“文化大革命”以前，中国的科学技术得到了快速的发展。中国科学院在1949年建院的时候只有20个研究所200名研究人员，到1956年就发展到44个研究所2500多名研究人员，而到1965年已经发展为106个研究所24714名科技人员，基本上形成了学科比较齐全的自然科学综合研究中心。中国在1956年制定了12年科学发展规划，随之而来像分子生物、核物理、高能物理、高分子化学、半导体物理、计算机、自动化、生态环境、空间技术等方面的研究也都开展起来。60年代中期以后，中国科学家在基本被封锁的条件下取得一批重要的成果。比如陈景润（1933-1996）在哥德巴赫猜想问题上的重大贡献，冯康（1920-1993）开创的有限元方法，粒子物理学中的层子模型；再如在世界上首次人工合成了有生物活性的牛胰岛素，在陆相生油的理论指导下发现并开发了大庆油田，首创优选法并大规模地推广这种计算方法的工业应用，特别是成功地实现了原子弹爆炸、导弹发射成功和人造地球卫星上天。他们在整个过程中，经受了思想改造的困惑、“反右扩大化”的伤害、三年自然灾害的困苦、苏联反目的艰难以及文化大革命的动乱，以其坚忍不拔的毅力和崇高的民族责任感，实现了国家和人民的宏愿。所有这些都大大提高了中国国力和国际的地位，彰显了中国科学创业者们不可磨灭的奠基性贡献。在中国发生的那场史无前例“文化大革命”，不仅由于十年停顿而使中国科学落后至少20年，而且丧失了一代青年科学家。

改革开放的社会条件和社会主义市场机制的确立为中国科技

的发展带来了新的活力。从1984年开始中国进行了科技体制改革的诸多探索，建立了国家自然科学基金会，实施了863计划、国家重大基础研究和1998年开始启动的知识创新工程。

1986年3月，王大珩（1915-）、王淦昌、杨家骥（1919-）、陈芳允（1916-）等四位“两弹一星”功臣联名上书中央，提出“关于跟踪世界战略性高技术发展”的建议。两天之后国家最高领导人邓小平就作出了“此事宜速作决断，不可拖延”的重要批示。国务院立即组织200位专家讨论，制定了包括七大领域17个主题的“高技术发展计划纲要”，这就是863计划。

中国科学家不但在应用科学技术服务于国民经济方面取得了显著的成就，并且在若干科学前沿领域取得了重要成果，如在定理机器证明和自动推理、杂交水稻培育、水稻基因图谱、高能对撞机研制、高温超导研究、纳米材料的制作等方面；在高技术领域，“神舟”号载人飞船的试验和长征系列火箭的发射升空，“银河”、“曙光”系列大型计算机的研制，6000米水下机器人的制造，基因工程药物研究等，都是令人瞩目的成就。

北京大学王选（1937-）和他创建的北大方正集团是促进科学技术成果向应用转化的代表。从1975年开始，作为技术总负责人，王选领导了中国计算机汉字激光照排系统和后来的电子出版系统的研制工作。他大胆越过当时日本流行的光机式二代机和欧美流行的阴极射线管式三代机，直接研制当时国外尚无商品的第四代激光照排系统。以此为核心研制的华光和方正中文电子出版系统处于国内外领先地位，引起了中国乃至亚洲报业及印刷业一场“告别铅与火、迈入光与电”的技术革命，使沿用了上百年的铅字印刷得到了彻底改造。这一技术占领了中国国内报业99%和书刊（黑白）出版业90%的市场，以及80%的海外华文报业市场，方正日文、韩文出版系统进入国外市场后也取得了巨大的经济效益和社会效益。近年来方正出版系统的技术优势和市场占有率仍在不断持续上升。目前方正集团已拥有3个控股上市公司，在香港上市的有方正（控股）

有限公司和方正数码（控股）有限公司；在上海上市的有上海方正延中科技集团股份有限公司；另有17家独资、合资企业，员工总数约6000人，总资产50亿元，2000年销售规模超过100亿元。

近年末，中国科技工作者的研究条件和生活水平得到了较大的改善，科学技术在中国已成为一项令人羡慕与得到尊重的事业。最近中共中央、国务院在北京隆重举行国家科学技术奖励大会，将2000年度国家最高科学技术奖授予中国科学院院士吴文俊和中国工程院院士袁隆平（1930-）。前者在代数拓扑学领域的奠基性工作，半个世纪以来对国际数学领域的发展一直产生着广泛而积极的影响。他运用计算机进行数学定理证明和非线性方程组求解，彻底改变了数学机械化领域的面貌，为信息时代数学发展开辟了新途径。后者突破经典遗传理论的禁区，提出水稻杂交新理论，实现了水稻育种的历史性突破。现在我国杂交水稻的优良品种已占全国水稻种植面积的50%，平均增产20%，从推广种植杂交水稻以来，已累计增产稻谷3500亿公斤，产生了巨大的经济和社会效益。

人类已经进入新的世纪，世界正处在历史性的转折时期，这是一个充满着机遇和挑战的时代，它将为一切有信心有潜力的发展中国家提供一个后来居上的机会。对于开始向第三步战略目标迈进的中国，科学技术必须先行提升到一个新的水平。现代企业制度和市场经济体系的建立，综合国力的提高为中国科学技术的发展提供了有利的社会条件，进入创新时期的中国科技事业将面临三项艰巨的任务：建设国家创新体系、提高国家的科技创新能力和探索适合国情的发展道路。只要认真总结百余年来经验教训，在实现国家第三步战略目标的过程中，完全可以把中国科学技术推进到一个新时期，开创中国科学技术创新的时代，为中国的经济建设、社会发展和国防安全提供强有力的支撑。

七、中国科技的若干最新进展

物理学和化学

1. 中国学者潘建伟在奥地利著名物理学家塞林格教授的指导下完成了“量子态隐形传输实验研究”，在国际上首次从实验上成功地实现了未知量子态从一个光子到另一个光子的转换，即量子态的远程传送。这一成果使原则上完全保密的密码通信手段在实验上成为可能，也使进行快速量子计算所必须的基本单元操作成为现实。

2. 中国科技大学侯建国、杨金龙小组将碳60分子置于硅表面，利用低温扫描隧道显微镜获得了样品正偏压条件下不同取向碳60分子内部的电子云分布状态，并通过量子力学第一性原理的图像计算模拟，惟一地确定了分子的取向状态。

3. 南京大学固体微结构物理国家重点实验室在国际上首次开展了介电超晶格中耦合物理过程的研究，揭示了超晶格与电磁场作用的物理规律，发现了超晶格振动与电磁波存在强烈耦合，从理论和实验两个方面证实了在离子型声子晶体这类微结构材料中存在着电磁波吸收、极化激元模等原先存在于离子晶体中的长波光学性质，阐明了超晶格与晶格在物理上的对应性。

4. 中国科学院大连化学物理研究所的一个研究小组发展了一种新的高灵敏激光光谱方法来测量一氧化碳分子碰撞传能的截面，最终证明了量子干涉效应对分子碰撞传能的重要影响。

5. 中国科学院近代物理研究所徐树威小组利用兰州重离子加速器，采用自己提出的分离鉴别方法，通过一次实验，在轻稀土元素区理论预言的质子滴线附近，首次合成了半衰期仅为1秒左右的六种新核素，另外还首次观测到了只知其存在，但从未测定过任何性质的核素钷-89的缓发质子衰变。

地球与环境科学

1. 中国南极冰盖考察队在海拔3700多米高的南极内陆冰盖上，

利用自行研制的钻机进行钻探，钻取到冰盖表面100米以下的冰芯，标志着中国极地考察的新进展。

2. 中国科学院兰州冰川冻土研究所按国际冰川编目规范，应用航测和地形图，对逐条冰川的面积、长度和储量等34项指标进行量算和登记，于1999年完成《中国冰川编目》，出版了冰川目录 8卷18册。另外，雅鲁藏布江等3卷3册在出版中，并建成冰川目录数据库，使中国成为世界上少数开展冰川编目的国家。

3. 通过卫星资料和实地调查，中国科学家发现青藏高原上空夏季存在一个“臭氧低谷”。这是继1985年发现南极臭氧空洞以来首次在地球中低纬度上空揭示出大气臭氧损耗的事实，已引起全球科技界的广泛关注。中国气象科学研究院和中国科学院大气所等单位进一步研究后认为，热力和动力作用是导致青藏高原上空出现臭氧低谷的重要原因。

4. 中国政府于1999年 7月至 9月组织了对北极的首次科学考察。主要研究内容是围绕北极地区在全球变化中的作用和对中国气候的影响、北冰洋与北太平洋水团交换对北太平洋环流的变异影响、北冰洋及其临近海域生态系统与生物资源对中国渔业发展的影响等。中国现已成为世界上少数几个能涉及地球两极进行考察的国家之一。

生命科学与医学

1. 人类基因组测序工作于2000年6月26日宣告完成。中国科学家与美、英、日、德、法等国科学家一道参与了这一国际合作计划，完成了 1%人类基因组的测序任务，绘出 3号染色体短臂上3000万对碱基的草图。

2. 中国科学院发育生物学研究所、扬州大学利用转基因山羊体细胞克隆两头羔羊。上海市儿童医院上海医学遗传研究所综合应用试管牛技术、受精卵的外原基因显微注射、外原基因整合胚胎的

体外培养和移植等技术，在国际上首次培育成功了一头携带有人血清白蛋白基因的转基因试管牛。中国科学院动物研究所和福州大熊猫研究中心合作，通过将大熊猫细胞植入去核后的兔子卵细胞中，成功地克隆出大熊猫胚胎，开创了异种克隆技术拯救濒危动物的途径。

3. 北京凯正生物工程发展公司以动物血红蛋白为基质进行血液代用品研究获得成功，建立了拥有自主知识产权的技术路线，并迅速实现商品化和产业化。

4. 中国科学家近年来在古生物领域的重要发现有：地质博物馆季强等人在辽宁北票发现三尖齿兽哺乳动物“金氏热河兽”化石，确定为生存于大约1.45亿年前的一种大小与小老鼠相当的食虫哺乳动物，其保存极好的骨骼包含着早期哺乳动物进化方面的重要信息；中国科学院古脊椎动物与古人类研究所徐星及其合作者在鸟类起源方面取得了重要成果，提出进步的兽脚类恐龙早在始祖鸟出现之前已经开始分化、羽毛的起源和飞行无关、羽毛的发育早于鸟类的起源等理论；中国科学院古脊椎动物与古人类研究所王原等人在辽宁北票市发现了三燕丽瞻化石，其时代为距今大约1.2亿年，是我国发现的最古老的无尾两栖类；由西北大学早期生命研究所所长舒德干等人发现的昆明鱼和海口鱼化石，中国科学院南京地质古生物所陈均远研究员的研究小组发现的海口虫化石，据考证距今约5.3亿年，是迄今为止世界上已知最古老的脊椎动物，这些化石的发现个仅为寒武纪生命大爆发理论提供了证据，也将改写脊椎动物起源的历史。

信息科学和计算机技术

1. 由计算机工程技术研究中心牵头研制成功的大规模并行计算机系统“神威Ⅰ”于2000年投入运行，其峰值运算速度为每秒3840亿次，在世界已投入商业运行的前500台高性能计算机中排名

第48位，其主要技术指标和性能达到国际先进水平，标志着中国成为继美国、日本之后，世界上第三个具备研制高性能计算机能力的国家。

2. 由中国网络通信有限公司承担建设与运营的中国高速互联网络示范工程——中国网通宽带高速互联网于2000年正式开通。该公司是由中国科学院、广播电影电视总局、铁道部和上海市政府四方联合成立的。一期工程全长8490公里，网络总传输带宽高达4万兆，贯通了东南部17个重点城市，总体水平处于国际电信网络领先地位。

3. 中国科技大学郭金灿领导的量子通信和量子计算开放实验室，在量子信息技术基础研究上推出三项重大原创性成果，从而为中国的量子信息科学跻身国际前沿作出了重大贡献。这三项成果是：在国际上首次提出概率量子克隆原理；在国际上首次建立量子避错编码理论；提出一种能有效地克服光腔相干影响的新型量子处理器设计思路。

纳米技术和制造技术

1. 中国科学院金属研究所成会明领导的先进碳材料研究小组率先开展一维纳米碳材料储氢特性的实验研究，并大量制备出储氢量较高的纳米碳纤维。该小组与快速凝固非平衡合全国家重点实验室和美国麻省理工学院合作，采用与众不同的等离子体氢电弧法，连续大批量制备出纯度较高、平均直径为1.85纳米的单壁纳米碳管。

卢柯领导的中科院金属研究所的科研小组，在世界上首次直接观察到纳米金属材料具备“奇异”性能——室温下的超塑延展性。

由中国科学院纳米中心、中国科学院化学研究所江雷领导的功能界面研究组在2000年相继研发出超亲水亲油和超疏水疏油等功能界面纳米材料后，最近又对纳米管膜的浸润性进行研究，并在此

基础上制作出具有超双疏特性的阵列碳纳米管膜。

2. 清华大学程京小组采用新的技术路径, 研制成功了具有自主知识产权的电磁式生物芯片, 其中可单点选通的电磁阵列技术、电旋转检测技术等均为世界首创, 使国际上利用生物芯片对核酸作杂交分析的研究迈上了新台阶, 也使中国在生物芯片研究及产业化上开始拥有自主知识产权。

3. 国防科技大学研制成功我国第一台类人型机器人, 该机器人身高1.4米, 体重20公斤, 具有类同人一样的身躯、脖子、头部、眼睛、双臂与双足, 具备了一定的语言功能, 其行走频率达每秒2步, 动态步行快速自如, 并可在小偏差、不确定环境中行走。在机械结构、控制系统结构、协调运动规划和控制方法等关键技术方面取得一系列突破。

航天技术

1. 截至2000年10月, 中国依靠自己的力量已成功地发射了15种类型的47颗卫星, 卫星回收技术达到世界领先水平, 中国成功地研制了12种不同类型的长征系列运载火箭, 进行了63次发射, 将27颗国外卫星升入预定轨道。在不久的将来, 中国将在无人实验飞船成功飞行的基础上实现载人航天飞行, 并将探测月球和火星。中国现有的运载火箭和发射场已具备发射月球探测器的条件, 相关的空间技术和遥感技术都已达到开展月球探测的水平。

2. 1999年11月20日, 中国第一艘可载人航天试验飞船“神州”一号在酒泉航天发射场升空并顺利回收, 标志着中国航天技术发展到一个新的阶段。

3. 1999年10月14日, 中国成功地将中国和巴西联合研制的“资源一号”地球资源遥感卫星送入预定轨道, 巴西的一颗小型科学应用卫星也同时搭载升空。这是在高技术领域南南合作的范例。

第二部分

现代科学技术的进展与前瞻

第一节 现代科学的基本特征

进入20世纪，科学技术显示了更强大的力量，从各个方面改变了人类社会和自然界的面貌。与19世纪相比，20世纪的科学有几个突出的特点：

科学和技术经历了全面的空前的革命。从1900年普朗克提出量子论开始，物理学就进入了长达30年的革命时期。从古典物理学的危机中诞生出20世纪物理学的两大重要成果，量子力学和相对论。相对论否定了牛顿物理学的绝对时空；量子力学则否定了牛顿物理学的决定论的因果律，代之以概率论的因果论。人类对物质与能量、时间与空间、自然观与真理观的认识都发生了巨大的变化，对于本世纪的各个思想领域都产生了深远的影响。相对论和量子力学又分别是原子能技术和微电子及计算机技术的物理基础，这两项技术对于人类生存状态产生的影响也是不可估量的。与物理学的革命相呼应，其他学科也发生了众多革命性的突破。生物学领域有分子生物学的创建，DNA分子结构模型的建立使生物学的基础从19世纪的细胞进入到分子层次。宇宙学有大爆炸理论的提出，第一次对宇宙的创生提出了新的解释。地学领域有大陆漂移说和板块学说，对于地球的演变给出了一个科学的描述。

科学开始成为一个多层次的综合的整体。各门学科不断扩展自己的领域，相关学科开始在中间地段相遇，它们相互交迭、相互融合、相互补充，学科之间的空隙逐渐被大量的新出现的交叉学科和边缘学科所填补。物理学成为所有学科的基础，物理学从分析物质和能量入手对于现实世界的描述为所有学科所遵从。科学研究的物质范围从微观的基本粒子到200亿光年尺度的宇宙，从基本粒子、

原子、分子，到细胞、生物个体，到地壳、天体直至宇宙总体，各个层次都有对应的学科，有了深入的研究。原子物理学对于原子内部的研究，建构了从基本粒子到原子到分子的理论框架，使得化学的理论建立在量子力学之上，分子生物学的出现又在物理学和生命科学之间建立了联系。高分子理论，固体物理学又为材料科学提供了进一步的理论。高能物理的新近成果与宇宙学理论相互印证，天体物理与地球物理互相补充，生物学、生态学、地球科学等又构成环境科学系统，等等。科学对自然界获得了一个整体的统一的图景。

科学与技术一体化。自工业革命之后，科学与技术的结合越来越紧密，在社会生产、技术和科学三者的关系中，科学逐渐成为第一位的因素，原来的社会生产—技术—科学模式已经转化为科学—技术—生产模式。从科学到技术的周期越来越短。电磁波理论预言到电磁波进入实际应用长达37年，而从原子弹的理论预言到实际应用却只用了6年，从激光原理的发现到激光器的应用只有2年。科学迅速转化为技术，进入生产领域，直接成为改造人类生存状况的巨大力量。反过来，新的技术又为科学探索提供了新的手段，大型粒子加速器、电子扫描探针、核磁共振成像、超高温、超低温、超高压、超高真空等设备都是服务于尖端科学的第一流技术。在尖端科学和高新技术领域，有时已经很难分清哪些成果是科学成就，哪些成果是技术成就。科学与技术已经达成一体。

科学进入大科学时代。19世纪之前的科学大多以求知为主要目的，科学研究的主要经济支持来自科学家的个人收入或者私人资助，科学家基本上是单兵作战，类似于私人作坊。19世纪，大的科学社会共同体开始形成，大的产业公司开始资助与行业相关的技术科学的研究，科学研究与社会生产开始了紧密的结合。到了本世纪，科学已经成为现代国家的重要事业，科学研究经费进入国家预算。科学活动也从分散的个人活动变成社会化的集体活动。研究规模越来越大，发展到国家规模乃至国际规模。一个大的科学项目要动用整个国家甚至几个国家的资源。科学技术成为一个国家发展至关重

要的因素，人类社会进入到科学文明时代。

一、科学的社会化与社会的科学化

大科学的概念最早由普赖斯提出，意在表明现代社会的社会性的科学研究状态。大科学时代的显著特征就是科学的社会化和社会的科学化。科学研究需要调动全社会的力量，而社会也形成以科学为中心的发展模式。

现代科研都是复杂的系统工程，组织科学研究已经成为政府的一项重要任务。为了取得某一项目标，有时需要政府主持，制定规划，调动全社会的力量，在短时期内取得巨大的科学与技术的成果，并带动全社会的科技发展。这种科学研究的方式就是科学工程。科学工程是科学社会化达到一定程度的产物，能否组织并完成一项科学工程，取决于一个国家科学发展的整体水平，取决于一个国家的综合实力。进入20世纪末，科学工程的规模已经扩展到国际范围。

本世纪的第一个典型的科学工程是以制造原子弹为目的的曼哈顿工程。整个工程汇集了美国及欧洲优秀的原子物理学家、化学家、冶金学家、数学家及相关的各种技术专家，前后调集了科学技术人员15万和职工50万，动用了全国三分之一的电力，耗资20亿美元，历时近6年终于完成了原子弹的设计和制造。

阿波罗工程是第二次世界大战之后，美国进行的又一项大型科技工程。1961年4月12日，苏联将人类第一位宇航员尤里·加加林（Yuri Gagarin，1934—1968）送上太空。这标志着人类从此进入空间时代。苏联的成功使美国深受刺激。1961年5月25日，美国总统肯尼迪以国家紧急需要为名致函国会，向全体美国人发出了呼吁：“我们这个国家应该痛下决心，在20世纪60年代结束前把人送上月球。”于是，美国开展了以登月为中心的一系列空间探索计划。原来的“水星”计划在几年后为“双子座”计划取代，最后，“阿波罗”登月计划成功，1969年7月20日人类登上了月球。

阿波罗计划先后共动员了120所大学，2万家企业，400万人参加，耗资达240亿美元。在如此短的时间，动用如此巨大的人力物

力，解决了如此多的技术问题，这是科技发展史上前所未有的。阿波罗计划的成功，同时也是科技管理上的巨大成功，有人把它叫做“管理工程上的革命”。政府、大学和工业部门结合起来，发明了新的系统工程管理和质量管理手段，并采用计算机，同时指挥50万人的活动。

阿波罗计划刺激并带动了一大批相关技术的发展，比如电子计算机科学和技术、自动控制技术、遥感遥测遥控技术、材料科学和技术、发动机技术、力学（包括空气动力学、固体力学、飞行力学）、能源科学和技术以及可靠性工程技术，等等。这些技术在阿波罗计划完成之后都迅速地转化为民用技术，取得了巨大的经济效益。

目前，最为世人瞩目的正在进行的大型科学计划是基因组工程。低等生物的基因组已经查清了几十个，将要对人类产生巨大影响的是“人类基因组计划”。

人类基因组计划（HGP）是20世纪末启动的最后一项庞大的跨国科学工程，其目标是测定含有30亿对碱基的人类基因组全序列，以求探明人类全部遗传信息。该计划的完成将从整体上破译人类遗传信息，使得人类能够在分子水平上全面地认识自我。这一计划的直接背景是研究癌症对人类的威胁，最早于1986年在美国开始，后逐渐波及五大洲110多个国家。1990年10月美国国立卫生院部署了《人工基因组作图和测序》的重大科学行动，标志着在国家层面上正式启动人类基因组计划。这是继曼哈顿原子弹和阿波罗登月两大计划之后的第三个庞大的科学行动。

1993年7月，中国国家自然科学基金会正式决定将“中华民族基因若干位点的研究”作为人类基因组计划的一部分列入国家重大项目。中国科学家在“863”计划和中国科学院及国家自然科学基金会的支持下，陆续开展了与人类基因组计划相关的研究。作为第六个参加这一工作的国家和惟一的发展中国家，中国承担了其中1%的测序任务，完成了3号染色体短臂上3000万对碱基草图的绘制。2000年6月26日，美、英、法国家领导人几乎同时向世界宣布

人类基因组草图绘制工作全部完成。美国总统克林顿在宣布这一消息时将这一工作与伽利略的天文发现相提并论，英国首相布莱尔则认为这是人类科学史上最重要的革命。

人类基因组计划的彻底完成，将对人类的先天遗传疾病的治疗和药物研究起到巨大的指导作用。在科学层面上，人类基因组计划将对人类智力的起源、意识在进化中的形成、人的记忆与衰老和死亡等问题的揭示起到巨大的推动作用。

当代科学与社会发展严密契合，已经形成了特定的内部结构，基础研究、战略研究 and 应用与发展，其发展趋势是相互联系更加紧密，转移更为迅速。基础研究的目的旨在增加新科学知识和开辟新的科学领域，并不直接考虑特定的应用目的，基础研究是科学应用的知识源泉；战略研究是近年来出现的概念，是指重大战略意义的研究与发展工作，包括重大定向基础研究、重大战略高技术研究与发展 and 重要公益性研究。基础研究与战略研究主要依靠国家的支持，由国家研究机构、大学和企业参与承担。应用与发展研究旨在开发科学知识的应用价值，以及用所获得的知识指导产生新的设计、建立新的工艺，并从本质上去改善和创新已经在应用的那些材料、产品的设计和工艺。应用与开发的主体是企业。

科学的社会化和科学的科学化，已经使得科学渗透到人类生活的各个方面。科学不仅仅在技术层面是人类社会须臾不可分离的物质力量，而且将成为国家、政府乃至国际间立法、行政和条约的依据，成为社会道德规范的基础，建立起更为公平、公正、民主、法治、协调的社会形态和相互关系。科学将为人类开创未来提供更加宏大的知识资源、坚定的自信心和巨大的精神动力。

二、科学体系内部结构的分化、交叉与综合

如果说科学的社会化是科学的外向拓展，科学体系内部结构的分化、交叉和综合则是科学的内向拓展。在20世纪上半叶以前，科学内部结构发展的主要方向是学科的分化。由于研究对象不同，从总体的科学分化出一个个具体研究某一领域的学科及学科群。总的

来说,可分为自然科学、社会科学、技术科学和思维科学。自然科学又分为物理学、化学、天文学、地球科学与生命科学。各门学科都在发展中形成了各具特点的科学方法和知识体系,同时,它们之间又是相互联系,相互补充的。数学属于思维科学,是其他科学的基础和方法。在某种程度上,一门科学是否充分发展,取决于这门学科对数学的应用程度。数学是科学的语言。

在自然科学各大门类中,物理学占有特殊的地位。物理学是所有自然科学的基础。物理学所研究的对象是从最微观的基本粒子到最宏观的宇宙,物理学规律是这个统一的物质世界的统一的规律。因此,物理学的规律成为其他自然科学学科进一步发展的基础,这种基础体现在两个方面,一方面,物理学提供了物质世界的最基本的规律,比如力学、电磁学、热力学以及量子力学等物理学规律等;另一方面,物理学为其他学科提供了最基本的物理单位,各门学科所采用的如时间、质量、长度、温度、电荷等基本单位都是由物理学给出的。

化学所研究的是原子和分子层面物质的相互作用和转化规律。现代化学的理论基础是量子化学,而量子化学实际上是量子力学在化学上的应用。因而现代化学是建立在物理学的基础之上的。

天文学各学科是研究天体运动规律的。作为一门古老的学科,天文学是独立于物理学的,甚至比物理学更古老,但是,自从牛顿引力理论提出之后,几何天文学发展为天体动力学,天文学开始建立在物理学的基础之上,对于天体的运动机制,天体的内部构成,都从物理学的角度予以解释。宇宙学而今也成为物理学的一个分支。

现代的地球科学和生命科学都是由复杂的综合学科构成的,它们起初并不直接以物理学为基础,但物理学定律对于它们仍是最基本的约束。

所有学科都以物理学为基础,并不意味着所有学科都可以转化为物理学,19世纪曾经有这样一种还原论的观念,这种观念已经被

20世纪整体论的思想所否定。从整体论的观点看，整体不等于部分之和。森林的生态特性不能还原为树木的植物学特性。系统每向上或者向下一个新的层次，就会有新的规律出现，这种新的规律与原来的层次同样复杂，并且不能简单从原来的层次中推导出来。

现代科学呈现出分科越来越细，知识越来越专的局面。人类对自然界和自身的认识在20世纪的发展可以用知识爆炸来形容。物理学的发展从最宏观的方面，已经开始探索整个宇宙的形成和历史过程；从最微观的方面，已经接近构成物质世界的最基本单元；从基础的方面，正力图统一物质世界的基本相互作用；从应用的方面，深入到所有学科、所有领域。地球科学已经对人类生存的大地的整体运动和演化做出了解释，并将从人类与环境关系的角度对人类行为给出具体的指导。生命科学已经揭示了遗传的奥秘，基因工程已经可以根据人的意愿直接对物种进行改造。脑与认知科学正在对思维本身进行研究，可望揭示出思维的机制，这对人工智能将起到巨大的推动作用。计算机与网络通讯的普及，已经使整个地球变成了一个“村落”。

但是，由于物质世界的统一性，同时由于科学的发展和深化，到了本世纪后半叶，科学在继续分化的同时，开始呈现出交叉和综合的趋势。不但在物理和化学之间，而且在物理科学与天文学、地球科学和生命科学之间发生了研究方法 with 知识体系的交叉，并由此产生了新的科学前沿和充满活力的新兴学科。由于客观世界的多样性和相关性，多门自然科学交叉，乃至自然科学与社会科学相互交叉的应用科学应运而生，例如：空间科学、能源科学、环境科学、心理与行为科学、信息科学等。研究人类认识规律的认知科学和以研究复杂系统为主要对象的系统科学等，都是自然、社会和思维科学的交叉和综合。这些交叉学科的研究对象不再是某一个狭小的领域，而是涉及到自然与社会各方面的复杂系统。然而许多复杂系统都遵循相同或相似的规律，可借助某些基础理论与方法进行分析与研究。比如信息理论的发展为20世纪的通信技术、计算机和智能机

器、公共工程、跨国公司经营、全球金融、生态环境、数字地球、生命与认知行为的研究乃至现代经济和社会学研究提供了理论基础。

可以肯定，未来的科学将在分化与综合两个方向得到进一步的发展。一方面，继续沿着本学科的结构进一步分化和深入：研究极端时空尺度的物质结构、相互作用及其运动规律；研究非常规条件下，以至极端条件下的物质性状和规律；向宇宙、海洋和地球深处进军，探索生命和宇宙的起源与演化，探索人类新的发展空间和资源。

另一方面，向着更加综合方向发展。如在生物科学研究中，以前的主流是从种群分类到个体，到细胞，到分子……，呈一种分化、还原的趋向；而另一个方向则是要弄清，一组原子何以构成有生命活性的大分子？分子又如何构成功能分化的细胞？细胞又何以分化发育成为性状不同的动植物个体？几十亿神经细胞在一起又如何构成大脑、产生感觉和认知思维？如此等等。分析和综合不是对立的，而是相辅相成的。分析是综合的基础，综合正是在分子原子水平上的系统和有机的综合，从而认识更高结构水平的生命组织和活动规律。这将是一个由微观到宏观，由静态到动态，由局部到整体，由简单到复杂，由确定到不确定，由线性到非线性的新的科学思维模式和认知机制。由于应用目标的多样性，由于海量的知识积累，以及新知识以空前的速度递增，由于通信和计算机技术的进展，将使应用科学呈现出结构多样性和高速发展的特点。应用科学与高技术将呈现出更多的创新机遇和途径。

未来科学与技术的结合、相互作用和转化，将变得更加紧密和迅速。新的科学发现将以更快的速度向应用技术开发和规模产业转移。许多科学新发现、科学新理论的验证将更加依赖于新技术手段的建立，依赖于重大科学装置和新的测量仪器。高技术和人类可持续发展也将不断提出新的科学命题。

21世纪将是自然科学发生重大变革，取得突破进展的时代。以

认识自然、发展知识为主要任务的基础科学，既是人类智慧的大成和结晶，又是未来科学技术进一步发展的坚实根基。近现代以来的科学成就已在人类发展史上构成一座辉煌壮丽的大厦，展望下一世纪，新的革命性的科学将为这座大厦再添新的光辉。可以预计，科学将从分化、深入、继续走向交叉、综合、统一，从简单走向复杂，给人类对自然界的观察再开一扇更真实的非线性的窗口，人类对物质相互作用及其规律的研究，将从常规走向非常的极端条件，从有序走向混沌，对新物质、新物种的研究与应用将从一般的化学反应、生物过程，发展到有效的结构设计、分子剪裁和修饰，以基因工程、分子工程的方法，获取预想的特定功能乃至生命性状；凭借人类的智慧，数学科学将继续在抽象的思维王国中创造奇迹，同时，将更加广泛地向自然科学、工程技术乃至经济与社会各个领域渗透，并与计算机技术结合起来，从数学物理方法的分析建模，走向数字化的综合的虚拟现实；以生命物质结构、功能及其运动规律为对象的研究将越来越受到重视，从以数理科学为核心，主要研究物质相互作用及运动规律，逐步走向以数理与信息科学为基础，以生命科学、经济与社会、环境与生态、脑与认知等复杂系统为主流，着重研究生命现象、脑与认知过程以及人与自然、社会相互作用的基本规律。可以预期，这些研究必然取得整体上的突破。

在下一个世纪，随着科学技术内部的交叉与联系，以及科学精神与社会相互作用的进一步加强，科学技术社会化的趋势将更加突出，科学精神与人文精神相互融合的需要将进一步加强，在人文学科与自然科学学科之间的科学史、科学哲学、科学社会学的研究将得到加强。当代科学技术不仅是国家目标的重要组成部分，需要国家的推动与组织；也是企业在全球市场中竞争与合作的最重要的资本与力量所在；是国家实现现代化的动力和基础，也是实现全球和平与发展的根本要素之一。科学技术的国际性交流、合作与竞争的潮流，必将呈现出更加波澜壮阔的局面。

第二节 现代科学的进展及展望

在本书的第一部分，作者曾就近代科学与现代科学之间的联系以及现代科学发展的基本脉络作过简要叙述。这里，我们将按照通行的数理化天地生的分类方式，对各门学科的现代发展逐一加以考察。重点放在20世纪，适当兼顾19世纪的历史背景，并在此基础上对21世纪的前景作一尝试性的分析。

一、数学

19世纪末到20世纪初，数学也和物理学一样，发生了一系列基础的危机，这些危机也引发了数学科学一系列革命性的变化。

19世纪70年代，德国数学家康托尔（G. Cantor, 1845-1918）创建了集合论，将数学统一在集合论的基础之上。到了19世纪末，集合论的内在矛盾逐渐显现出来。1901年，英国哲学家和数学家罗素（B. Russell, 1872—1970）发现了集合论悖论。罗素的悖论可以表述如下：将所有的集合分成两类，一类为集合A，A本身是自己一个元素；一类为集合B，B不是自身的一个元素。比如所有桌子的集合，这个集合本身不是桌子，所以不是自身的一个元素，这个集合就是B类集合。再如所有集合的集合，这个集合本身也是一个集合，所以此集合属于A类。现定义C为所有B类集合的集合C，问集合C本身是A类集合还是B类集合？如果集合C是A类集合，根据A的定义，是自身的一个元素，而C的元素是所有的B类集合，所有C是B类集合。但如C是B类集合，根据C定义，所有B类集合的集合为C，所以C是自身的一个元素，又应该是A类集合。这就产生了矛盾。

数学的基础出现了矛盾，引发了一系列问题：数学本身是否如我们曾经认为的那样可靠？以数学为工具的其他自然科学和技术科学还是否可靠？人类是否还能够获得确定性的知识？我们从前的知识的可靠性有多大？数学危机所引发的不只是数学问题，对于认识论也有大的冲击。在数学领域，对数学基础的激烈争论，产生了逻辑主义、直觉主义和形式主义三大流派。

罗素是逻辑主义的代表，逻辑主义解决悖论的办法是对集合进行分级，规定不同级别的集合不能互相缠绕，也就是说，集合不能成为自身的元素。逻辑主义企图将数学再建立在逻辑的基础之上，从逻辑中推出全部数学。这个目标过于宏大，以至于要用几十页才把这个定义讲清楚。这种烦琐的方式遭到了许多数学家的讥讽，但是，由于把逻辑数学化，罗素等人的工作推动了数理逻辑的发展。

直觉主义的先驱是19世纪的德国数学家克罗内克

(L. Kronecker, 1823-1891)，他坚持数学只能从整数中一步一步地构造出来，否定实在的无穷，甚至否定无理数的存在。1907年，荷兰数学家布劳威尔(J. Brouwer, 1881-1965)发表了《论数学基础》，正式建立了直觉主义数学。直觉主义否认排中律，认为可以存在既不能证明也不能否证的命题。所有的定义和命题必须通过构造来实现，所以不承认集合论，从而消除了悖论。

形式主义的代表人物是希尔伯特(D. Hilbert, 1862-1943)。希尔伯特开创了现代数学的主要方法——公理化方法。1900年，希尔伯特在第二届国际数学大会上提出著名的希尔伯特23个问题，这些问题成为本世纪数学家攀登的目标。希尔伯特认为数学之所以是真理就在于没有矛盾，而不在于能否构造出来。形式主义的主要论点是：数学本身是形式系统的集合，每个形式系统都包含自己的逻辑、概念、公理及推理规则，数学的任务就是发展出这样的演绎系统，在每一个这样的系统中，定理通过一系列程序得到，只要这种推演过程不自相矛盾。希尔伯特以数学证明为研究对象，提出希尔伯特纲领，奠定了元数学的基础。在这个纲领中，希尔伯特要求通过有限的构造步骤达到无矛盾的证明，并希望首先在初等算术系统中实现这一目标。

1931年，奥地利数学家哥德尔(K. Goedel, 1906-1978)证明了不完全性定理，对于初等算术这样的形式系统，总存在这样的命题，既不能证明，也不能否证。即算术系统的无矛盾性不可证明。为了证明不完全性定理，哥德尔把元数学表示为算术形式，发展出

原始递归函数理论。不完全性定理使人意识到，人类不可能通过理性建立起绝对可靠的知识。

1936年，美国数学家丘奇（A. Church, 1903-1995）发表丘奇论题，论证可计算数论函数与一般递归函数的同一性。同年，英国数学家图林（A. M. Turing, 1912-1954）提出图林机的概念，发展出递归论。图林机的思想对于计算机原理、人类思维的研究都具有开创性的意义。

在数学基础理论得到发展的同时，其他数学分支也有长足的进展，如发源于群论的抽象代数学、解析数论、拓扑学、微分几何学、泛函分析、概率论等等，构成了20世纪数学的繁荣景象。数学的领域急速扩大，出现了越来越多的新的分支，内容也不不断深化，也显示出统一化的趋向。30年代，法国一些青年数学家组成了布尔巴基学派，从1939年出版《数学原本》，以数学结构的观念统一数学。所谓数学结构是指一个集合元素之间的内在关系，比如顺序关系，代数运算关系，相邻关系等，通过公理描述成抽象的序结构、代数结构和拓扑结构，形成种种以过去的数学对象为模型的复杂体系。布尔巴基学派在纯粹数学领域发挥了巨大的作用。它带动了代数拓扑学、代数几何学、代数数论、群论、泛函分析等学科的发展，开拓了许多新的领域。

数学本身更加抽象和复杂，但它发展出来的观念和方法，为物理学、化学、生物学、天文学、地学、技术科学乃至人文科学提供了大量新的工具与方法。20世纪尤其是20世纪后半叶的应用数学呈现了许多新的特点。数学所应用范围大大超出了传统数理科学的范畴，几乎遍及人类所有活动领域，如经济学、管理科学、工程科学、社会学等；所应用的数学也大大超出了原来的初等数学、微积分等内容，几乎所有的数学分支，包括从前认为没有实用价值的所谓纯数学如拓扑学、代数几何学、算子代数乃至数论等，都有了实际应用，并对被应用的学科产生了巨大的推动作用，如黎曼几何之于相对论，希尔伯特空间之于量子力学，算子代数之于量子场论，群论

之于原子结构、核结构乃至基本粒子物理学，纤维丛理论之于规范场理论等。数学与技术的关系更加直接，这一点随着计算机技术的发展更为显著，比如数字模拟技术所提供的方法取代了耗资巨大的具体实验，许多重大的工程设计已经在很大程度上依赖着计算机模拟。数学方法成为与科学实验、科学理论和科学计算并列的第四个重要的科学方法。数学应用反过来对数学也产生影响，计算数学成为一门新的数学分支，一个成功的例子就是四色定理的证明，这个古老的悬而未决的问题于1976年用计算机得到了证明。

数学的边缘学科和综合学科开始对社会产生直接的影响。除了在上个世纪开始应用于社会生活的统计学得到进一步的发展外，还出现了运筹学，用定量模型来处理受人的决策影响的系统的运行问题，对工业、商业、政府、和军事等部门包括人力、财力、物力的管理予以指导。使得数学直接转变成为与国计民生相关的应用科学。

二、物理科学

物理学是最早形成体系的自然科学学科，物理学的每一次革命都给整个自然科学带来巨大的冲击。19世纪的物理学有两个重大成就。以能量守恒定律为标志，一门新的学科热力学发展起来，热力学第二定律的发现，使这门学科趋于成熟，这是一个与牛顿物理学迥然相异的物理学体系，它把时间的箭头引入到物理学之中。从今天的角度看，它对于20世纪的混沌科学的发展有着深远的影响。另一个重大成就就是电磁学的创立。电磁学的创立使电学、磁学和光学成为一个整体，麦克斯韦方程组是牛顿力学体系之后又一个辉煌的物理学理论体系。电磁学所预言的电磁波使人类的技术发展到一个新的历史阶段。从此，人类拥有了科学的技术——科学技术。19世纪物理学这两大重要成就促成了以蒸汽机和电动机为代表的两次技术革命，为20世纪人类文明的飞跃打下了基础。

牛顿物理学在19世纪显示了强大的威力，1846年海王星的发现使人们有足够的自信认为天体的运动已经在牛顿物理学的计算之

中，分子运动论成功地用牛顿力学解释了微观粒子的宏观现象。于是，物理学便囊括了从日月星辰到分子原子的整个自然界。能量守恒原理把热学、力学、电学以及化学等各种物质运动形式连成一体，使物理学达到了空前的综合与统一。到了19世纪末，经典物理学的力学、电磁学（光学）、热力学都各自形成了完整的成熟的体系，物理学的基本原理为所有自然科学所遵循，经典物理学的机械自然观成为所有自然科学学科的基本思想。物理学的成就如此辉煌，以至于当时优秀的物理学家都感到科学的新发现已经到了尽头，甚至断言未来的物理学发现要到小数点的第6位以后去找了。但是，此时经典物理学的万里晴空之中却飘来了两朵乌云——以太漂移和黑体辐射。这导致了从20世纪初开始的长达30余年的物理学革命。

事实上，当时物理学的天空上已经不止两朵乌云。不过如放射性、原子光谱等其他现象没有引起人们强烈的危机感，人们仍然认为可以在经典物理的范围内得到解决。物理学的突破是从黑体辐射开始的。

黑体辐射在红外和紫外区域有不同的经验公式，经典物理学无法将二者统一起来予以解释。不得已，普朗克提出能量的量子化概念，能量不是连续的，而是分立的，有最小单元的。这种观念同经典物理的概念完全不能相容。这是刚刚进入20世纪大门1900年的事。此后，经爱因斯坦1905年用量子论解释光电效应，波尔(N. Bohr, 1885-1962) 1913年用量子论解释氢原子光谱，量子论开始在物理学中有了立足之地。1923年，德布罗意把爱因斯坦的光量子理论推广到一切粒子，提出物质的波粒二象性，量子论取得了又一个重大突破。

1925年，海森堡、约尔丹等提出了矩阵力学。1926年，薛定谔在德布罗意的基础上建立了波动力学，并在此后不久证明了矩阵力学和波动力学的等值性。量子力学从此诞生。

19世纪末物理学的另一朵乌云“以太漂移”反映了经典物理学的基础矛盾，这一矛盾在19世纪就为马赫(E. Mach, 1838-1916)

和彭加勒所关注。以太这个概念来源于古希腊，19世纪，电磁学建立，光被确认为电磁波，人们用以太命名想象的真空中传递电磁波的介质。因为在经典物理学的观念里，所有的波都是在介质中传播的。但以太的物质属性却让人困惑。按照经典物理学观念，介质所传递的波的速度与介质的硬度有关，波速越高，硬度应该越大，电磁波的速度是人类已知的物质传递的最高速度，如此，以太应该坚硬无比。但是，天文观测从来没有发现过这种坚硬的物质，地球又怎样在这种坚硬的物质中毫无阻碍地穿行也是个问题。关于以太的另一个烦恼是相对运动。如果地球在以太中穿行，那么，地球上光的速度应该与地球的运动方向有关，然而，1887年美国物理学家迈克尔逊的著名实验表明，无法观测到地球与以太的相对运动。许多物理学家对此提出了解释。其中洛伦兹于1904年提出了洛伦兹变换，提出了关于相对运动的不同于伽利略变换的变换规则，解释迈克尔逊实验。伽利略认为，物理学规律对于所有的惯性参照系都是一致的，这就是相对性原理。在经典物理学中，只要做一个伽利略变换，就可能把在一个惯性参照系中对于一个物理事件的描述运用到另一个惯性参照系之中。洛伦兹的变换为后来的狭义相对论提供了数学上的前奏。但是，由于经典物理学思想的束缚，洛伦兹没有走到相对论。法国数学家彭加勒意识到洛伦兹变换的重要性，在1904年9月预言一种新的力学即将诞生。

9个月后，1905年6月，爱因斯坦发表了《论动体的电动力学》，提出狭义相对论。狭义相对论认为，时间和空间都不是绝对的，人对时间和空间的描述都与人的观察有关。时间和空间也不是毫无关联的，都与物质的运动有关。爱因斯坦从同时性入手，指出，在不同地点发生的两件事是否同时发生，取决于观察者所在的坐标系。因而绝对时间是不存在的，绝对空间当然也不存在，不同惯性参照系的观察者所观察到的同一物体的长度也是不同的。不同惯性系的时间量度也是不一样的。不同的惯性系之间遵从洛伦兹变换。光速是真空中速度恒定不变，与参照系无关。同时，真空中的光速也

是物质和信息传递的最高速度。而以太则是一个不必要的概念。以太漂移得到了彻底的解决。狭义相对论的诞生是20世纪物理学对人类思想产生巨大冲击的开始。

狭义相对论颠覆了传统的时空观，对建立在传统时空观基础上的牛顿力学也进行了改造。这时，牛顿力学成了狭义相对论在光速极低的极限条件下的特例。当然，在我们日常生活的宏观世界中，相对论效应极低，在大多数工程技术中，牛顿力学是充分适用的。但是，在与相对论平行的另一个物理学革命领域，相对论在微观世界发挥了它的作用。狭义相对论的一个直接推论质能相当性解决了放射性元素的能量来源问题，预示了原子能时代的到来。

1915年，爱因斯坦又提出了广义相对论。爱因斯坦把相对性原理又进一步推广到非惯性系。提出等效原理，认为引力场相当于加速度，因此，惯性质量与引力质量完全等价，可以用一个匀加速参照系代替一个均匀引力场。根据等效原理，可以预言，引力场中的空间要发生弯曲，时钟要变慢。1915年，爱因斯坦最后完成了广义相对论，提出了对任何坐标变换都协变的引力方程。把几何学与物理学统一起来，用空间的几何结构来解释引力场。非欧几何获得了实际的物理意义。在广义相对论中，不仅时间和空间是统一的，相对的，物质和时空之间也是相互联系的。不存在脱离了物质的绝对时空。用爱因斯坦的话说，不是物理客体存在于空间之中，而是空间是物理客体的广延。在牛顿物理学中，如果宇宙中物质统统消失，还会留下绝对的时空框架，可以填充新的物质。但是在广义相对论看来，如果物质消失了，时空也随之消失。

广义相对论在大多数情况下，它与牛顿引力理论的预言完全相同。但是，它们的观念有着本质的差异。爱因斯坦本人提出了三个与牛顿物理学不同的可供实验检验的推论。其一，对于水星近日点的进动，牛顿引力理论的计算与观测值有每百年43秒的误差，而广义相对论恰好找出了这43秒。其二，引力场中时钟会变慢，因此从引力巨大的恒星上发出光线的光谱会向红端移动，即所谓引力红

移。引力红移在1925年由美国天文学家亚当斯（W. S. Adams，1876–1956）给予了证实。第三，引力场中光线会发生偏转。从遥远太空传到地球的星光如果经过太阳，会被太阳的引力场所弯曲。这一点可以在日食的时候通过对太阳所掩盖的恒星的观测来检验。1919年5月29日，英国天文学家爱丁顿率队来到西非观测当日发生的日食，观测结果证实了爱因斯坦的预言。而广义相对论的理论值与牛顿力学相比，相差0.85秒，广义相对论一下子轰动了整个世界，爱因斯坦开始成为大众传媒的明星。

量子力学和相对论不仅是物理学的突破，也是人类思想的巨大飞跃。人类对宇宙和自然的基本看法都发生了深刻的改变。相对论打破了牛顿物理学的绝对时空，证明时间和空间是统一的，相对的。量子力学则把统计性的概率性的规律引入物理学，给人们提出了一种新的关于自然界的认识方式，测不准关系、波粒二象性、物理量的不可对易性以及互补性原理等，都与传统的思维模式格格不入，甚至科学规律也不再是高高在上的神圣的真理，而是人类对自然的一种描述方式。广义相对论是人类理性的产物，与量子力学和狭义相对论不同，它完全走在了实验的前面。它表明人类理性对自然的理解所能达到的深度。量子力学和相对论为20世纪的科学和技术提供了一个新的基础。本世纪物理学的各个分支也都在这个基础之上展开。

寻找物质构成的基本单元一直是人类的理想。19世纪之前，这个任务由化学家进行。19世纪的化学家道尔顿把古希腊的原子论引入到化学之中。到19世纪末期，放射性的发现已经使人意识到原子并不是不可分的物质基元，但是原子本身的存在与否尚未得到证实。到了20世纪30年代，人们所了解的物质世界已经与世纪初有着天渊之别。不仅原子的存在早已证实，甚至弄清了原子内部的结构。高能物理学或者粒子物理学成为理论物理学的前沿。除了预期的质子和中子外，对宇宙射线的探测和大规模粒子加速器的应用，高能物理学家发现了一个庞大的粒子家族。为了理顺这个粒子家族之间

的关系，1964年，盖尔曼（M. Gell-mann, 1929-）提出夸克理论，认为所有的基本粒子都由夸克构成。夸克分为6种，每种夸克又可能有三种“色”，共有18种，再加上反粒子，共有36种。所有的基本粒子都是由这36种夸克的不同组合构成的。夸克是现在普遍承认的物质世界最微小的单元。

物理学在寻找物质基本单元同时，也力图把这些基本单元的相互作用统一起来。爱因斯坦晚年一直从事统一场理论，试图实现各种相互作用的统一。到1934年，人类发现自然界共有四种相互作用。电磁相互作用，引力相互作用，强相互作用和弱相互作用。1970年，在格拉肖（S. Glashow, 1932-）、温伯格（S. Weinberg, 1933-）和萨拉姆（A. Salam, 1926-）等人的努力下，建立了弱电统一理论。在夸克—轻子模型的基础上，把强相互作用和弱相互作用结合起来。这成为粒子物理学的标准模型。迄今为止，人们对物质基始所达到的可靠认识，就是由这一标准模型描述的。标准模型理论仍存在很多基本疑难问题有待解决。为什么自然界中存在这么多种的轻子和夸克？为什么轻子和夸克在质量上有如此大的差别？它们在相互转化中所遵从的对称性和对称性破坏规律的根源是什么？对这些问题，标准模型理论都还不能做出回答。而且，标准模型理论预言的黑格斯粒子和质子衰变，至今也没有实验上的证实。这样的标准模型理论作为基本理论远不能令人满意，深入探讨标准模型理论存在的基本问题和发展标准模型理论，寻找超出标准模型的新的基本规律的努力正在进行中。

统一理论在数学的水平上也获得了很大的成功，这就是超弦理论。超弦模型用微小的能量环来代替点状粒子，用弦的振动来解释粒子，不同的振动模式对应不同的粒子，这样就绕开了物质基元问题。超弦理论认为空间共有10维，其中6维在一般情况下蜷曲起来，是无法观测的。超弦理论与物理学家的理想已经很接近了——从一个简单的基本原理出发，建造一座宏伟的理论大厦。然而，超弦模型尽管从数学的角度看是非常美的一个模型，但还没有获得充分

的实验支持。

固体物理学是20世纪新发展起来的一门物理学分支。有了量子力学，对物质的研究就有了新的武器。早在1905年，爱因斯坦就把量子概念用到固体通过点阵振动来解释固体的比热。1912年，劳厄（M. von Laue, 1879-1961）发现晶体的X射线衍射现象，这标志着固体物理学诞生。20年代末期，索末非（A. Sommerfeld, 1868-1951）提出金属的自由电子理论，布洛赫（F. Bloch, 1905-1983）提出能带理论，固体物理学趋于成熟。自30年代开始，固体物理学迅速发展起来，对固体的微观结构及其力学性质、光学性质、电学和磁学性质、热力学性质等物理性质进行了深入的研究。固体物理学加上70年代以后兴起的表面物理学和非晶态物理学，又被称为凝聚态物理学。

固体物理学与应用技术的关系十分密切，40年代末半导体晶体管的发现导致了半导体物理的诞生，半导体物理的发展对于20世纪后半叶电子技术的发展起了不可估量的作用。从晶体管到集成电路到超大规模集成电路，现在电子技术已经可以在面积不到1平方厘米的硅片上集成超过10万个电子元器件。它使人类社会进入电子时代，从工业社会进入到信息社会。

近几十年来，固体物理学的热点问题是超导理论。超导是低温物理的一个副产品。好奇心是科学发展的巨大的动力，对于已经发现的物理规律，人们想要知道它在极限条件下是否成立，同时，人们也想知道在极限条件下会有什么新的物理现象发生。于是，实现超低温、超高温、超高压、超强磁场等物理条件，研究这些条件下的物理性质，成为开拓物理学新领域的重要方向。首先被物理学家关注的是低温和高压。尤其是低温物理，在19世纪就已经有了很多成就。到了20世纪初，除了氦气，所有的气体都已经在低温及高压的条件下被液化甚至被凝固了。1908年，荷兰物理学家卡末林·昂内斯（H. Kamerlingh Onnes, 1853—1926）终于实现了氦气的液化，到了1910年，实现了绝对温度1.04K的低温。开始逼近绝对零

度。

1911年，昂内斯发现，汞的电阻在温度降到 4.2K的时候发生了奇导的变化，电阻迅速地降为零。这是超导电性的首次发现。1933年，德国物理学家迈斯纳（W. Meissner, 1882—1974）发现，超导体还具有完全的抗磁性。无穷小电阻和完全抗磁性是超导体的两大特征。

对超导微观机制的理论解释直到1957年才由美国物理学家巴丁（J. BADEEN, 1908-）、库珀（L. N. COOPER, 1930-）和施里弗（J. R. SCHRIEFFER, 1931-）所完成。这个理论被誉为量子论发展以来对理论物理学最重要的贡献之一。

超导现象被发现之后，各国科学家都极力提高转换温度，但效果并不理想，1957年，苏联科学家阿布里科索夫（A. A. ABRIKOSOV, 1928-）认为自然界还存在一类具有负的界面能的超导体，提出第二超导体概念，它主要包括超导合金和化合物，也包括几种纯金属。现在引起人们关注的超导体主要是第二类超导体。

60年代初期，英国物理学家约瑟夫森（B. D. JOSEPHSON, 1940—）在理论上预言了超导电子对以隧道效应通过超导势垒时将出现一些特殊现象，1963年，美国贝尔实验室等地从实验上证实了约瑟夫森效应。创立了超导电子学。根据约瑟夫森效应制成的超导量子干涉器件开创了超导体的另一大类应用，即弱电和弱磁的应用。

由于超导都是在超低温下实现的，为了真正使超导进入实际应用，提高超导体临界温度成了物理学家追求的一个目标。1941年，德国物理学家艾舍曼临界转变温度约为15K的NbN，是一个大的突破。1953年，美国物理学家哈迪和秀尔姆发现了Al₃Si结构材料，其中钒三硅的临界温度为17.1K，1953年，美国马梯阿斯

（B. T. MATTHIAS, 1919-1980）发现了临界温度为18K的铌三锡，并总结出一些规律。在这个理论的指导下，1973年，美国贝尔实验室发现了转变温度为23.2K的铌三锗，这一纪录保持了十几年。对金属氧化物超导体的研究也取得了成就。1986年初，德国物理学家

柏德诺兹(J. G. Bednorz, 1950-)和瑞士物理学家缪勒(K. A. Müller, 1927-)发现了临界温度30K左右的镧钡铜氧化合物, 12月, 美籍物理学家朱经武(1941-)在镧钡铜氧化合物中发现了52.5K的超导材料, 中国物理学家赵忠贤(1941-)发现了临界温度68.6K的超导材料。1987年, 朱经武小组达到了92K的临界温度, 赵忠贤(1941-)获得了起始转变温度100K以上, 零电阻温度为78.5K的钇钡铜氧, 在液氮温区之外实现了超导。

物理学已经成为所有自然科学学科的基础, 但是物理学自身还有许多问题没有解决。人们希望, 困扰20世纪物理学家的几大问题能够在21世纪得到解决。这些问题包括: 量子力学与相对论的协调性问题, 中微子问题, 宇宙暗物质问题等等。这些问题能否引发21世纪的物理学革命, 使21世纪的科学面貌发生如20世纪般的巨大改变, 不仅是科学家, 同时也是思想家关注的。

三、化学

化学源于中世纪的炼金术, 其最基础的理论在今天看来, 多是一些错误的玄想, 但是在这些玄想的观念下所做的实验和对实验的总结, 使得人们对物质之间的转化有了诸多正确的认识。19世纪, 道尔顿把古希腊的原子论引入化学之中, 使化学建立在原子的基础之上, 到19世纪末, 门捷列夫提出元素周期律, 暗示了原子之间的内在规律。但是对原子是否存在, 直到20世纪初仍有争论。对于构成物质世界基本单元的基本认识, 是20世纪物理学家和化学家联合完成的。随着原子物理的发展, 量子力学的出现, 使得物理学成为化学的基础。唯象的化学理论从物理学的角度得到了微观解释。

门捷列夫提出的元素周期律, 最初是简单地根据元素的原子量, 将元素排列起来, 发现了其中隐含的某种规律, 但元素之间为何会有如此规律, 它们之间的内在联系是怎样的, 人们并不清楚。1911年, 卢瑟福等人发现轻元素的核电荷数约为该元素原子量值的一半, 而元素的核电荷数恰好是该元素在周期表中的序数。1913年, 卢瑟福的助手莫斯莱进一步发现, 各种元素产生的特征X线的

波长，其顺序也与元素在周期表中的位置相一致。以原子量排列的元素周期表中有几组元素的位置是颠倒的，以原子序数排列，则不存在这个问题。这就意味着，是原子核所带的电荷决定元素在周期表中的位置，元素的性质是其原子序数的周期函数，决定元素化学性质的不是元素的原子量，而是元素的原子序数。1916年，德国化学家柯塞尔（W. Kassel, 1888-1956）首先以原子序数代替原子量重新排列了元素周期表。

在19世纪末期，J. J. 汤姆孙（J. J. Thomson, 1856-1940）就已经证实，原子中存在电子。1911年，卢瑟福提出了原子的原子核模型，在这个模型中，原子的中心是原子核，它包含了原子绝大部分质量，原子核外围绕着电子，原子核带正电，电子带负电。原子核所带的正电荷数等于核外电子数，使得原子保持电中性。因此，元素周期律必然反映着核外电子分布的某些规律。1913年丹麦物理学家玻尔提

出的原子结构理论和1925年奥地利物理学家泡利（W. Pauli, 1900-1958）提出的不相容原理对原子核外电子的分布做出了解释。根据这个理论，电子在原子核外是分层排列的，每层所排列的电子数目与该层的主量子数有关，最外层电子的数目决定元素的化学性质，相当于原子在周期表中的族数。这样就从微观的角度解释了元素周期表。量子力学发展起来之后，玻尔的电子轨道被电子云取代，由此发展出量子化学。

是什么力量使原子相互结合起来成为分子，成为化合物，是化学理论所要研究的一个重要问题，化学家曾经用唯象的“化学亲和力”、“化学价”和“化学键”来描述。原子核理论的提出使得化学家可以从微观的角度对化学价和化学键进行解释。现代化学键理论是建立在量子力学的基础上的。1927年，德国物理学家海特勒（W. Heitler, 1904-）和伦敦（F. London, 1900-1954）合作用量子力学的薛定谔方程对氢分子进行计算，后经美国化学家鲍林和美国物理学家斯莱特（J. C. Slater, 1900-1976）发展成价键理

论，在30年代，对大量分子进行了计算，得到了很好的结果。分子轨道理论是化学键理论的进一步发展，由德国物理学家洪德

(F. Hund, 1896-?) 所开创，经美国化学家莫立肯(R. S. Mulliken, 1896-1986) 完成。价键理论描述的是电子的集体行为，分子轨道理论则将分子看成一个整体，着重研究分子中某个电子的运动规律，用单电子波函数来描述化学键的本质。50年代，计算机应用之后，分子轨道理论得到了较快的发展。从前人工计算一个氢分子就需要一年，借助于计算机，计算一个电子数为80的分子也只需要几分钟。化学键理论为探索新反应、合成新材料提供了有效的理论指导。60年代，美国化学家伍德瓦德和霍夫曼提出分子轨道对称守恒原理，使现代化学从对分子的静态研究进入到动态研究的新阶段。在这一原理的指导下，来自几十个国家的数百位科学家共同合作，实现了维生素B₁₂的人工合成。

20世纪化学的理论成就有许多是将新的物理学理论应用到化学之中而得到的。也有对物理学的反馈。化学热力学是对热力学的化学应用，在20世纪初就已经得到了充分的发展，热力学第三定律就是从化学热力学的发展中建立起来的。1906年，德国物理化学家能斯特(H. W. Nernst, 1864-1941) 提出热力学第三定律，绝对零度时纯粹晶体之间的化学变化，熵的变化为零。这个理论的直接推论是，不可能通过有限的步骤达到绝对零度。

热力学的三个定律是从平衡态中得到的。50年代末期，比利时化学家普里戈金(I. Prigogine, 1917-) 通过对非平衡态热力学的长期研究，提出了耗散结构理论，指出在远离平衡态的地方，系统会从无序中自发地生出有序。耗散结构理论开创了一个新的广阔的领域，对于化学、物理学、生物学等领域都有重大的影响，解释了包括生物界在内的自然界的许多现象，是20世纪热力学对人类思想的一个重大贡献。

第二次世界大战以后，新技术的出现和应用使得化学和化学技术得到了巨大的发展，深入到多种学科和多种领域，在非常广的范

围内改变了人类的生存面貌。化工制品随处可见，已经成为人们不可缺少的一部分。近十几年来，化学的最大成就莫过于富勒烯家族的发现，这是碳元素除了石墨和金刚石外的又一类同素异形体。

四、宇宙科学

从远古时期，宇宙就是人类探索和思考的对象。天文学也是最早的系统的科学学科之一。早在古希腊时期，就有托勒密的天体几何学。在17世纪，天体力学随着牛顿物理学体系的发展而成熟起来。从18世纪到19世纪前半叶，近代天文学得到了飞速的发展，天体测量学和天体力学都取得了辉煌的成就。人类所知道的宇宙的范围也越来越大。19世纪后半叶，照相、光度测量和光谱分析等方法应用于天文学，使天文学家的思想开始进入天体的内部，研究天体的物理状态和物理过程，天体物理学诞生。这是现代天文学的开端。

太阳是距离地球最近的恒星，也是与人类关系最为密切的天体。太阳一直是科学家关注的对象。早在17世纪，牛顿就已经发现太阳光的光谱。1814年，德国物理学家夫琅和费对太阳光谱进行分析，将太阳光谱与地球上的元素光谱线相对比，认定太阳上也有许多地球上常见的元素。太阳光谱分析使人类第一次把自己的思想深入到天体内部，同时，继万有引力定律之后又一次证明了天与地之间的物质同一性。

20世纪对太阳研究的重大进展是关于太阳能源的认识。爱因斯坦的相对论诞生后，相对论提出的质能关系 $E=MC^2$ 给天文学家以新的思路。根据原子能物理学的新近成果，1938年，从德国流亡到美国的物理学家贝特和德国物理学家魏扎克各自独立地提出了太阳以及一般恒星的能量产生的一般理论。认为在恒星内部高温高压的条件下，恒星内的轻原子核不断地聚变成重原子核，同时释放出巨大的能量。这个能量比化学反应释放的能量要大百万倍。依据这个理论，太阳的寿命应该有100亿年，如今正当中年。

对太阳活动的认识也在丰富着。中国古代就已经观测到太阳黑子。20世纪对黑子的周期、黑子的磁效应、黑子活动及太阳耀斑与

地球磁场的关系进行了研究。对日食的研究也在新仪器的帮助下获得了丰富的成果，日珥、日冕等的性质得到基本的确认。

日食观测还检验到广义相对论所预言的引力弯曲效应，使广义相对论得到了普遍接受。

对于太阳系各天体的物理性质的认识是从20世纪20年代才开始的。1922年—1927年，法国天文学家利奥（B. Lyot, 1897—1952）用偏振方法研究月球表面的发射特性，推测月球表面覆盖着一层火山灰之类的尘土。1927年，美国天文学家佩蒂特（E. Pettit, 1889—1962）等人用测辐射热计测量月球表面的温度。行星照相也扩展到红外紫外和远紫外区域，从而获得了关于行星的表面温度、大气结构和化学组成等方面的知识。1957年，人类进入太空时代之后，对太阳系研究发生了革命性的飞跃。除了在地面上观测之外，还可以近距离观测甚至取样。人造卫星上天之后，对天体的观测就可以在大气层之外进行。1959年，苏联发射了第一颗月球探测器，获得了月球背面的照片。1962年，美国发射“水手2号”宇宙飞船，在距离金星35 000公里处飞过。这是人类第一次近距离观测太阳系行星。此后，各种探测器多次飞临水星、金星、火星、木星，获得了地面观测所无法得到的大量资料。1969年，美国“阿波罗号”载人宇宙飞船第一次登上了月球。人类对月球的研究从此进入了一个新的阶段。

火星是太阳系中除地球外人类最关心的一颗行星。从17世纪到19世纪，人们一直猜测火星上可能有智慧生命。19世纪意大利天文学家曾宣布在火星上发现了“运河”。20世纪20—30年代，美国天文学家亚当斯和邓纳姆（T. Dunham, 1897—）通过反复观测，证明火星大气中的水蒸汽和氧气只有地球上的千分之几，对火星生物的说法提出质疑。另外一些天文学家认为火星上的“运河”不过是光学错觉。60年代，苏联和美国先后向火星发射了多枚探测器。直到1972年，“火星”3号在火星上实现了首次软着陆，其飞船母体成了火星的第一个人造卫星。人类对火星才有了直接的认识。1975

年8月和9月，美国发射了两颗“海盗”探测器，在1976年的7月和9月，这两颗探测器在火星表面软着陆成功。“海盗”上携带的电视摄像机为地球送来了火星的全景式的图像资料。两颗“海盗”探测器在火星上分别工作了3年半和6年，对火星有了整体性的认识。这是火星探测的突破性成果。随后的研究表明，火星上既无海陆之分，也没有智慧生命，但是，火星已具有了生命存在的必要条件。

火星研究近年来最大的事件就是1996年底美国发射的“探路者”号宇宙飞船，它历时7个月，经过4.94亿公里的航行，在1997年7月4日登上了火星。“探路者”号装备了人类迄今为止最先进的科技成果。除了传统的照相、摄像设备外，还装备了一台质子射线仪，用来探测目标的化学组成。最为特殊的是，这次火星探测用上了虚拟现实技术。在地面控制中心，有一种以往没有的控制员，被称为“火星驾驶员”。火星驾驶员头戴三维VR视镜，接受火星车上传过来的信息，他能够看到火星车所能看到的一切，犹如身临其境。同时，他还可以用鼠标指引1.9亿公里之外的火星车在火星表面行动。这次火星探测是人类探测火星活动最成功的一次。火星干燥、寒冷，地表温度比地球低30度以上，昼夜温差超过100度。火星的天空总是灰蒙蒙，没有蓝天，黎明时天空有粉红色的云，而太阳一出来云就消散了。

探路者发回的数据表明，火星岩石的成分与地球很接近，主要由石英、长石和正辉石组成，这表明地球和火星在起源上有共同性。因为月球岩石中不含石英，因而火星的岩石成分为月球的俘获说提供了一个支持旁证。另外，在火星上还发现阿瑞斯平原曾经发生过特大洪水。这使人又激起了对火星生命的兴趣。

进入太空时代之后，人类对外太阳系天体的主要研究手段仍然是观测，但是观测的内容已经把传统的可见光波段延伸到从 γ 射线到无线电波的整个波段。同时，观测的地方也从地面延伸到太空。许多重要的观测结果都是通过设在太空的望远镜获得的。

19世纪，通过分析恒星光谱，天文学家就已经知道恒星是和太

阳一样的炽热天体，表面温度从3000度到10 000度。20年代，英国天文学家爱丁顿依照地面的理想气体的平衡条件，推测了恒星的质量、压强和密度从恒星中心到表面的变化。1939年，印度出生的美国天文学家钱德拉塞卡（H. S. Chandrasekhar, 1910-1995）根据流体静态平衡、质量、辐射、热平衡条件下的产能和物态等五个基本方程，进一步完善了恒星结构的理论。恒星的温度、光度、半径、质量、化学组成和内部结构都进入天文学家研究的范围。

19世纪末和20世纪初，《亨利·德雷珀星表》的发表和哈佛分类法的创立，使天文学家有可能运用统计的方法，研究各种类型的恒星的分布，为研究恒星的演化提供了线索。20世纪初，丹麦天文学家埃纳尔·赫茨普龙注意到恒星的光谱和光度之间有某种统计关系，得到一个以光谱和光度为坐标的恒星分布图，美国天文学家罗素也独立地得到了相同的结果。这个图就是赫罗图，是现代天文学的重要图表。

在赫罗图上，绝大多数恒星都分布在从左上方到右下方一个对角带上，这个带被称为主星序。光度大的巨星和超巨星位于图上部的水平线上，左下角散落着少量的光度小的白矮星。

赫罗图的发现者也曾利用赫罗图来解释恒星的演化。但是恒星的演化理论直到认识到热核反应是恒星的能源之后才建立起来。50年代，美国天文学家史瓦西描绘出了恒星的大致历史。相同化学成分的恒星，其质量、光度与温度之间存在一定的对应关系。所以，恒星化学成分不同时，在赫罗图上就出现不同的序列。随着时间的推移，恒星的内部结构发生演变，恒星在赫罗图上的位置就会沿着一定的路径移动。主星序是演化最慢的阶段，占恒星整个寿命的90%。恒星在度过主星序之后，恒星内部的氢燃烧完毕，亮度减小，氢聚变终止，开始坍塌。恒星收缩产生高温，压力增大，氦聚变开始。恒星重新膨胀，亮度增加，成为红巨星，到了生命的尽头。不同质量的恒星会有不同的结局，或者成为星云，或者成为三类天体之一：白矮星、中子星或黑洞。

最早被认证的白矮星是天狼星的伴星。19世纪就发现它的质量与太阳不相上下，但是到20世纪却发现它的直径只比地球大一倍。这颗星的密度将是铂的3000倍。这将是一种全新的物质状态。白矮星最终由量子力学得到了解释，在白矮星中，电子简并压与引力达到了平衡。

1932年，中子发现后，苏联物理学家朗道（Л. Д. Ландау，1908-1968）指出，如果恒星的物质压缩到原子核的密度，电子将与质子结合成中子，成为中子星。中子星的密度比白矮星还要高一亿倍以上。1967年，英国射电天文学家休伊什（A. Hewish, 1924-）的研究生贝尔（S. J. Bell, 1943-）发现了太空中的周期稳定的微波脉冲信号，把这种射电源命名为脉冲星。后来认证，这是高速自转的中子星。中子星的发现是20世纪天文学的又一重大成果。

中子星发现之后，另一种特殊天体——黑洞又成了热门的话题。恒星在核能耗尽之后，如果质量超过两个太阳质量，则平衡态不复存在。恒星将不断收缩，半径越来越小，密度越来越大，最后，其引力将强到足以使一切物质甚至辐射都不能逃脱。早在1798年，法国科学家拉普拉斯就根据牛顿理论预言存在黑洞这样的天体。1939年，奥本海默（J. R. Oppenheimer, 1904-1967）等人根据广义相对论推断，当大质量天体坍缩到某一临界大小之后，会形成一个封闭的边界，称为“视界”。视界之外的物质和辐射可以进入视界之内，但是视界之内的物质和辐射却不能跑出视界之外。这样黑洞将无法被观察到，故名黑洞。但是，黑洞并非绝对黑。1974年，英国物理学家霍金（S. Hawking, 1942-）证明，黑洞周围空间的量子涨落将产生正反粒子对，其中负能粒子穿过视界被黑洞吸收，正能粒子则逸出。于是，黑洞就会产生与其温度相对应的热辐射，甚至会出现剧烈的爆发。黑洞至今没有得到最后的证认。现在初步认为天鹅座X-1、天琴座 β 和御夫座 ϵ 等可能是黑洞。黑洞极有可能是未来天文学和物理学的突破口。

通过对赫罗图的分析，还得到了一个副产品——分光视差法。

这个方法能够推断从几百光年到几千光年的恒星距离，银河系内被求得距离的恒星数目大大增加。现在，天文学家已经可以对银河系做出整体的描述。银河系是一个扁平的圆盘，直径约8万光年，厚3000—6000光年，太阳位于银河系的边缘，距银河中心约3万光年。

1924年，美国天文学家哈勃利用当时世界上最大的望远镜，在仙女座大星云证认了几颗造父变星，利用造父变星的周光关系，推算出仙女座大星云的距离是90万光年，远在银河系之外。这把人类的视野又大大地推进了一步。星系天文学诞生。

在哈勃的发现之后，人们测定了更多的河外星系的距离。1912年，美国天文学家斯莱福发现了星系的光谱红移，证明星系在以巨大的速度远离我们。1929年，哈勃发现了星系的红移与星系的距离呈线性关系，星系距离越远，其红移就是退行速度越大。这就是哈勃定律。反过来，利用哈勃定律，也可以求出遥远星系的距离。现在，人类的视野已经向宇宙的深处伸展了100亿光年。

哈勃定律是大爆炸宇宙理论最重要的依据之一。宇宙学是研究宇宙的起源、结构和未来演化的学问。广义的宇宙学——宇宙论从哲学的意义上非常古老。牛顿的引力理论诞生后，有人据此对宇宙的整体性质进行科学判断，便有了科学意义上的宇宙学。

1917年爱因斯坦发表《根据广义相对论对宇宙学所作的考察》，这是现代宇宙学诞生的标志。爱因斯坦提出了一个有限、无边、静态的宇宙模型。这个模型克服了牛顿理论的无限、无边宇宙模型存在的困难。但这个静态的宇宙模型是不稳定的。如果某个时刻宇宙受到了一个微扰，宇宙就沿微扰的方向发生变化。假如微扰使宇宙略微变小一点，所有物体之间的距离就会顿刻缩短，从而使引力增强，使宇宙继续收缩，使引力更强，这种正反馈将使宇宙最终缩为一个点。反过来，如果这个微扰使宇宙略微胀大一点，宇宙也会一直膨胀下去。如果宇宙开始膨胀，就意味着它将一直膨胀下去，那么它应该是从一个点膨胀起来的。

1922年，弗里德曼（A. Friedman 1888—1925）、罗伯逊

(H. P. Robertson) 和沃克 (A. G. Walker) 对爱因斯坦的宇宙模型进行了动态分析, 对爱因斯坦的引力方程重新求解, 提出了三种可能的宇宙模型: 开放模型、封闭模型和平坦模型。对于开放模型, 宇宙是膨胀的, 并且将一直膨胀下去。对于封闭模型, 宇宙膨胀到一定程度, 将会转而收缩, 然后再膨胀, 再收缩。而平坦模型则是前两种的临界状态。现实宇宙究竟与哪一个模型更接近, 还要由观测的数据做最后的结论。但是, 无论哪一个模型, 都预示着, 宇宙有一个起点。在时间为零时, 宇宙半径为零。也就是说, 宇宙是从一个原始奇点发展起来的。奇点是一个很难想象的东西, 但是在广义相对论宇宙学中是不可避免的。

1948年, 美国物理学家伽莫夫 (G. Gamov, 1904—1968) 提出了大爆炸理论。伽莫夫假设宇宙的起点是一个高温高密的原始火球, 它相当于广义相对论中的奇点。火球中的物质以基本粒子和辐射的状态存在, 并发生剧烈的核聚变反应。火球爆炸, 向各方向迅速膨胀, 火球体积迅速增大, 辐射温度和物质密度急剧下降, 核反应停止, 期间所产生的各种元素保留下来, 成为构成今天宇宙中的各种物质。伽莫夫还预言, 大爆炸将会有残余的辐射遗留下来, 其温度只有绝对温度几K。

20世纪60年代初期, 美国贝尔电话实验室建造了一套巨型天线, 用以接受卫星的微波信号, 它的定向灵敏度超过了当时所有的射电望远镜。1964年, 贝尔实验室的两位工程师彭齐亚斯

(A. A. Penzias, 1933-) 和威尔逊 (R. W. Wilson, 1936-) 对这套天线进行测试。在波长7.35厘米处发现了绝对温度3K左右的微波噪声。经过分析认为这

种背景噪声来自深广的宇宙。正准备寻找微波背景辐射的狄克、皮伯斯、劳尔和威金森等人立即意识到其中的宇宙学意义, 指出彭齐亚斯和威尔逊所发现的就是大爆炸遗留下来的微波背景辐射。这就是著名的3K宇宙背景辐射。彭齐亚斯和威尔逊的偶然发现拯救了大爆炸宇宙论, 也使宇宙学成为显学。彭齐亚斯和威尔逊获得了1978

的诺贝尔物理学奖。

如果宇宙背景辐射是大爆炸的遗迹，那么它应该具有黑体辐射的特性，也就是说，它应该处于热平衡的熵最大状态。1989年11月，美国发射了一颗宇宙背景探索卫星（COBE），在没有地球大气干扰的地球轨道上对宇宙背景进行观测，卫星观测的大量数据表明，宇宙背景辐射谱与黑体辐射的理论值极其吻合。大爆炸理论模型被更多的人所接受。

把宇宙3K背景辐射和河外星系的红移结合起来，大爆炸就是一个自然的结论。随着宇宙的膨胀，背景辐射的温度会下降，半径增加一倍，温度降低一半。反过来推，宇宙早期不仅非常小，也非常热。回推到宇宙诞生的30亿年，宇宙温度是4000K，回推到宇宙诞生1秒钟的时候，宇宙温度是100亿K，根据高能物理，此时的宇宙成分只能是一些基本粒子。再“冷”一些的时候，核反应才能够出现，中子和质子先聚合在一起，进一步聚合成氦原子核。氦核的活动大约持续了3分钟，用完了所有的中子，剩下的质子就成了氢原子核。因而宇宙的主要成分应该是氢和氦，它们的比例为4：1，这一点与天文观测的结果极为吻合。宇宙中某一元素的量与氢元素之间的比例称为元素的丰度，迄今为止，大爆炸理论计算出来的各种元素的丰度与天文观测得到的结果符合得很好，这也是支持大爆炸理论的重要证据。

大爆炸理论的标准模型也有一些不能解释的问题。在谈论到大爆炸宇宙学时，需要指出宇宙和可见宇宙或者观测宇宙的区别。由于光的传播速度是有限的，我们所能看到的最大的宇宙尺度就是光速乘上宇宙的年龄。随着宇宙年龄的增大，我们所能看到的宇宙范围也随之增大。以此回推到宇宙诞生 10^{-35} 秒，温度为 3×10^{28} 开的时候，可见宇宙的半径为3毫米。今天宇宙中的所有物质和能量都在半径3毫米的三维球内。但是，从宇宙诞生到 10^{-35} 秒，光只能前进 3×10^{-27} 米，这被称为视界尺度，它远远小于反推出来的3毫米。由于早期宇宙视界过小，出现了一个磁单极问题。早期宇宙存在大量

的磁单极，而现在的宇宙并没有观测到磁单极。所以需要有一个使极性相反的磁单极综合的机制。1980年，美国青年粒子物理学家古斯（Alan Guth）提出了一个想法，可以解决上面两个问题。他认为在宇宙大爆炸的极早期从 10^{-35} 秒到 10^{-33} 秒宇宙经历了短暂的加速膨胀，这个膨胀幅度极为巨大，可以使宇宙从 10^{-27} 米的尺度膨胀到今天的可见宇宙的尺度。这个阶段称为暴胀。暴胀的原因是一种反引力的作用，其具体机制可由高能物理的新进展得到解释。暴胀之后，宇宙又进入“正常”的膨胀。暴胀的大爆炸宇宙模型很好地解释了今天的大多数天文观测。需要指出的是，暴胀理论并没有实验上的证据，它只是对大爆炸理论标准模型的理论补充的一种。

经过几十年发展，大爆炸学说已经成功得到公认的宇宙学模型。大爆炸模型描述了宇宙创生到现在从简单到复杂的演化过程，物理学家甚至已经能够回推出宇宙诞生 10^{-44} 秒的状态。包含了暴胀阶段的大爆炸宇宙模型所描述的宇宙演化过程大致如下：

创生期：这是物理学家所能推算出来的最早的宇宙时期，时空本身在这一阶段形成。相应的宇宙年龄为 10^{-44} 秒— 10^{-36} 秒，这一阶段的动力学应该用量子引力学或者量子宇宙学来描述。物质的相互作用形式为超统一和大统一。

暴胀期：这是宇宙的极早期，时间在 10^{-36} — 10^{-32} 秒，由于大统一相变，宇宙在这段时间里的膨胀大大超出了“正常的”大爆炸速度，所以称为暴胀。宇宙的不对称性开始形成，夸克、胶子等粒子在此期间产生。暴胀之后，宇宙又恢复了“正常的”膨胀速度。

核合成时期：这是宇宙的早期，年龄大约在100秒左右。这是各种轻元素的形成时期，氦、氘、锂等在此阶段形成。

近期：宇宙年龄到10万年时，宇宙温度下降到4000K，宇宙变得透明，从相当均匀的状态演化到有各种结构的状态，各种尺度的星体及星系在这一阶段形成。到现在，宇宙冷却到3K，已有约150亿年高寿。

大爆炸理论的重要理论支持除了星系光谱红移、3K宇宙背景辐

射和天体构成的元素丰度之外，还有一个旁证：已观测的所有天体的年龄都不超过200亿年。

物理学对最大客体宇宙的研究和对最小客体基本粒子的研究有着密切的关系。高能物理领域每一次进展都使大爆炸理论获得发展。按照大爆炸理论，宇宙的演化是从高温到低温，从高能到低能。物理学的发展则是从低温到高温，从低能到高能。牛顿物理学所处理的是能量最低，相互作用最弱的物理现象。要研究越早期的宇宙，就需要越高能的物理学。于是，对物质的基本构成及相互作用规律的研究，和对于宇宙的起源的研究就成了一个硬币的两面。人类的理智在最基本的问题上聚合在一起了。

五、地球与环境科学

1831年，地球上最后一块大陆——南极洲被发现，地理大发现时代真正地结束了。地球作为一个整体的存在进入到人类的视野之中。地球的大体框架已经清楚，人类开始了对地球的整体性理论研究和对地球内部及海洋的考察。如同生物界一样，地球自身也开始被认为存在一个演化的历史，且在进一步演化。宇宙万物都是处于演化之中。

20世纪地球科学中最伟大的成就是大陆漂移学说和地球板块构造理论。

从远古时起，人类就已经有大地变迁的设想。中国古代有沧海桑田之说。古希腊柏拉图也曾记载“大西洲神秘消亡”的传说。唐代的颜真卿曾根据今江西省南城县麻姑山有蚌壳认为，“高山石中犹有螺蚌壳，或以为桑田所变”。但对全球海陆结构格局的真实了解则是16世纪初环球航海以后的事，而对于人类所见的这种海陆格局是如何演变而来的思考还要晚一二百年，直至20世纪初大陆漂移说的提出及20世纪60年代海底扩张说和板块结构理论的提出，才算有了解决。

19世纪后半叶，随着航海业的发展和资本主义殖民地的扩张，全球性的科学探索活动逐步展开。人们开始发现被大洋隔开的不同

大陆上的生物种群、古生物化石，乃至地质地层结构有着惊人的相似。最直接的容易引起人们联想的是大西洋两岸非常相似的轮廓。自墨卡托（G. Mercator, 1512—1594）1569年把大西洋两岸绘成确切的地图以来，这个引人注意的特征不断为人发现，它们的可拼接性最终导致大陆漂移说的诞生。1912年，德国气象学家魏格纳发表了《大陆的生成》，提出大陆漂移学说，对大陆固定说提出挑战。1915年，他又出版了《海陆的起源》一书。魏格纳从四个方面给出了大陆漂移的证据：一是南大西洋东西两岸的岸线十分吻合；二是大西洋两岸的许多生物和古生物存在着明显的亲缘关系，包括运动十分缓慢的蚯蚓、蜗牛等，这不能通过跨洋“陆桥”迁徙扩散来解释；三是大西洋两岸的岩石、地质和皱褶构造也是互相吻合的，而且纪年也相同；四是在古气候研究中发现两极地区存在着热带沙漠的痕迹，而在赤道附近的热带森林中发现了古代冰盖的遗迹。对于这些现象，惟一可以解释的是大陆曾经漂移易位。但魏格纳未能解释大陆漂移的动力学问题，他为进一步寻找大陆漂移的证据，于1930年在格陵兰茫茫冰原考察中遇难身亡。

1928年，英国地质学家霍姆斯（A. Holmes, 1890—1965）提出了“地幔对流学说”。他认为岩石中的放射性元素释放的原子能使地幔保持塑性状态，而温度分布的不均匀又使地幔物质产生缓慢的对流运动，从而牵动大陆的漂移。到了50、60年代，海洋地质研究，尤其是海洋钻探的开展，证实了地幔对流和海底扩张的存在，并依靠无线电测距方法，测定了海底扩张和大陆漂移的速率。

1967年法国人勒皮雄、美国人摩根和英国人麦肯齐等人在大陆漂移、地幔对流、海底扩张等概念的基础上，概括了当时的洋底发现，建立了地球板块构造模型。他们将地球的岩石圈分为欧亚、美洲、非洲、太平洋、澳洲和南极洲等六大板块和若干小板块。板块间的分界是大洋中脊、俯冲带和转换断层，板块在大洋中脊继续增生扩张，而在俯冲带则下沉和消减。那正是构造动荡激烈的部位，是地震、火山活动的主要发生地。板块构造说诞生后，得到了越来越

越多的验证，特别是1968年以后的海洋地质学的支持。北美圣安德列斯大断层是说明板块整体运动的最好例证，近期精确的大地测量表明，断层两侧目前正以每年约5厘米的速度相对移动着。

板块构造说使大陆漂移说得到了复活。目前，建立在板块构造说上的大陆漂移理论尽管还存在不少争论，但是大陆的巨大漂移、海底的不断更新，已经是公认的事实。过去的大地构造理论，包括魏格纳的大陆漂移说，都是从对大陆的研究推广到海洋，对地球的了解并不完整。板块构造说则是在对海洋地壳和大陆地壳相结合的研究的基础上提出的全新的地壳运动模式，开创了人类对地球认识的新阶段。大陆漂移学说与板块构造学说不仅可以解释地球大陆的变迁历史，而且可以预测未来的发展，它对地震学、矿床学、古生物地质学、古气候学具有重要的指导作用，是20世纪地球科学最伟大的成就。

进入20世纪中叶，在全人类的生存条件和环境日益恶化的严重挑战面前，国际上不同学科的科学家的共同提出了“全球变化”的课题，以协调社会发展与生存环境的关系。这种对全球环境问题及对区域生存环境的研究，已经远远超出了传统学科的范围。

从全球尺度上看，可以把地球看做是由相互关联相互作用的地球核、地幔、地壳、水圈、气圈、生物圈、人类圈和地球空间诸圈层综合集成的、连续开放的、复杂的动力系统。正在形成中的地球系统科学，试图发展一种包括了地球系统各组成部分之间物理的、化学的、生物的和人工的相互作用的地球系统模式，并在地球系统模式和全球监测系统可提供的信息和资料基础上建立具有预测能力的全球和区域的环境模式，以对环境变化进行定量预测。

当前，全球变化是国际科学的一个前沿领域，已经设计了三个彼此独立又相互联系的重大国际计划：世界气候计划（W CRP），主要研究与全球气候有关的物理过程；国际地圈—生物圈计划

（IGBP），主要研究全球环境变化有关的生物地球化学过程及其与物理过程的相互作用；全球变化的人类影响（HDP），主要研究人

与环境的关系。正在设计和开始建立的全球气候观测系统（GCOS）、全球海洋观测系统（GOOS）和全球陆地生态观测系统（GTOS），将进一步建立完整的全球监测系统。有些科学家推测，21世纪初叶可望建立全球实时的高精度地球监测资料数据库，并利用巨型计算机进行地球环境演化的定量研究，在小尺度和中尺度时间过程中取得突破性进展。届时，人类可以预测100年时间尺度的地球环境的全球变化，可以将中期天气预报的水平提高到准确率达90%以上，可以及时预报台风的生成和发展，可以预报地球上的一些严重灾害性事件。

人类主要生活在大陆上，并主要从大陆上获取资源。固体地球系统研究涉及资源和能源的开拓、环境保护和减轻灾害等问题，直接关系到经济和社会的持续发展。这种研究将围绕着地球动力学展开，并向地球内部发展，把岩石圈的研究与地幔研究相结合，阐明大陆的形成、变形、裂解、迁移和控制它们的基本过程、壳幔相互作用、地块间的相互作用、流体的形成和动力学、超大成矿作用等问题。

在有关地球的众多学科发展的基础上，已经形成一门高层次的综合性基础学科——地球动力学。地球动力学正在以大跨度的学科交叉，紧密地结合社会的持续发展的资源、环境和灾害三大主题，从四个层次进行着实测和理论研究，包括地球形状动力学研究、地球表壳动力学研究、地球岩石圈动力学研究、地球整体动力学研究。

大陆动力学（亦称大陆地球化学动力学）的主要目标是揭示大陆岩石圈演化最本质的、深层次动力学过程和机制，并服务于人类关注的资源和环境问题。其基本科学问题是大陆岩石圈物质增长、消减和保存的演化过程，而其研究内容主要包括大陆地幔地球化学和壳幔分异作用、大陆地壳生长和再循环及其演化、岩石圈流体对物质和能量的输运与交换作用等三个相对独立的研究范畴。大陆动力学以大陆地质学为基础，与地球物理学相参照，应用元素、同位素和流体地球化学等方法研究大陆岩石圈成分、结构和演化过程，

特别是研究大陆物质在不同时间和空间的迁移、交换和循环的动力学速率、机制和过程，同步获得大陆物质成分、时间和空间“三维”坐标信息，从微观到宏观尺度以精细的、定量的和动态的方式来探讨和重塑大陆演化的历史过程。大陆地幔地球化学，大陆地壳生长、演化和地壳中流体这三者，在80年代已成为国际地学界上热烈讨论的主题。地幔地球化学不均一性的事实已被普遍承认，地幔的组成、结构与动力学的研究也取得了一些进展。大陆地壳生长演化问题的研究，在地壳物质的非均匀性、多阶段增长、增长机制的多样性等方面也取得了一些进展。地幔对流、流体运动和大陆演化这三大主题仍将是今后一个时期内的地球物质研究中的重点，将三者结合起来形成一个有机整体的学科也会逐步走向成熟。

地球表壳动力学是从天文学、地球物理学、地质学、地震学、大地测量学和海洋学等多学科交叉研究派生出的一门综合性的学科。它主要借助于空间技术研究地球外表100公里厚地壳的各种运动及其动力学机制。70年代末，由于卫星激光测距（SLR）、甚长基线射电干涉（VLBI）和全球卫星定位系统（GPS）等新空间观测技术的发展，已能以厘米级的精度测定地球的整体运动（地球的自转和极移）、区域性地壳形变，以每年几毫米的精度测定全球板块的相对运动以及地壳的垂直运动。与传统的地质方法不同，空间技术这种能实时而精确地测量地壳运动中微小动态变化的优点，可能发现地壳运动的非线性时变细节，进而能真正探索地震、火山爆发的成因过程与机制。近期由欧洲联盟牵头组织的东南亚GPS计划以及以中国为主倡议的亚太空间地球动力学计划，都旨在研究区域性的板块运动、地壳形变以及与自然灾害的关系。

早在1875年奥地利地质学家修斯（Eduard Suess, 1831—1934）就在对比地球的岩石圈、水圈、大气圈概念的基础上提出“生物圈”（biosphere）概念。1935年英国生物学家坦斯利（A.G. Tansley, 1871—1955）将特定区域的生物群落及其生存环境所组成的自然体系概括为“生态系统”（ecosystem）。现在人们所称的全球生态

系统作为地球系统的一个子系统,指由各类生态系统组成的地球生物圈的有机自然体系。生物圈不是各类生态系统的简单线性叠加。就分布在地球表面任一生态系统而言,其内部过程主要由局地气候、地表水文和土壤状况等综合的大环境背景所决定。而生物圈本身的空间分布格局与过程则是整个地球系统各圈层之间在全球时空尺度上相互作用、相互适应并达到动态平衡的结果。对生物圈演变规律的研究,一般既要在局地和区域尺度上考虑生态系统内部的过程以及生态系统之间的相互影响,又要在全球范围内、在相互耦合的动力学框架上考虑生物圈与其他物理圈层的相互作用。

国际全球变化研究的焦点和重心从90年代开始转向生态系统对全球变化的反应与反馈及其功能与过程方面。在国际地圈与生物圈计划中的核心项目“全球变化与地球生态系”(GCTE)已成为最活跃和不断扩展的研究领域。这类研究包括4种基本科学问题:生态生理学问题、生态系统的结构变化问题、全球变化对农林的影响问题、全球变化与生态复杂性问题。受大气环流模型的启发,生态学家们开始设计全球变化的生态模型。已经出台的有三种不同尺度的模型:生态系统水平上的板块尺度模型、由若干相邻板块构成的景观尺度的模型和由景观结合而成的区域模型。景观尺度和区域尺度的模型进而联合成大陆和全球尺度的模型,即全球植被模型(GVM)和全球动态植被模型(DGVM)。

地球系统的生物圈不仅代表了我们这个充满勃勃生机的地球上物质存在的高级形式—生命过程的时空延续性,而且还起到了联系其他物理圈层的纽带作用。生物圈的概念已经远远超出了生物学赋予它的最初含义。随着社会经济的大规模发展,人类正以大大超过生物圈自然演变过程的速率改变着全球生态系统的自然状态,其消极的后果已从全球增暖、土地退化、物种减少等方面逐渐反映出来。认识生物圈的演变规律以及其在地球系统中的基本功能,对于避害趋利地实现人类对于全球环境积极影响,具有十分重要的意义。

19世纪70年代,德国地理学家李特尔(C. Ritter, 1779—1859)曾提出人地关系的概念。20世纪初,法国学者沙而坚(T. de Sargen, 1881—1955)和勒鲁瓦(E. le Roy)等人引入“智慧圈”

(noosphere)的概念。1942年,苏联学者韦尔纳茨(В. И. Вернадский, 1863—1945)关于“智慧圈是地球的新的地质现象,在这里人首次成为巨大的地质力量”的说法,将智慧圈变成社会与自然相互关系的概念,包括人本身和人类活动改造的范围,相当人工生态系统总体。把自然生态的概念扩大到包括人工生态,就产生了人地系统的概念。人类对表层系统的作用导致环境变化,使人与其赖以生存和发展的自然界的越来越不协调,以致严重影响到社会生活质量、经济和社会的持续发展、人类未来的安全与生存。关心和维护“惟一的地球”,调整人与环境或人地关系,已成为人类的共识,并成为一种积极的力量。

人类(活动)体系与自然环境系统的相互作用是不可避免的。其结果是人类赖以生存和发展的环境和资源受到破坏,经济和社会的持续发展受到影响,社会生活质量的提高遭到扼制,安全与生存受到威胁。探索人地协调发展的调控机制和理论,从整体性、动态性的角度研究人口、经济、社会与环境、资源的相互作用,谋求它们之间的协调与统一,以形成相互依存、相互促进、和谐持续发展的动态平衡系统,这一复杂而艰巨的任务要求大跨度的学科交叉研究,涉及数学、地球科学,主要是地理学以及经济学、农业科学等。正在进行着的国际性的人类活动空间计划(HDP),就是从人文角度研究全球气候和环境变化与人类社会及经济的关系等方面的问题。人与环境系统或人地系统动力学将在这种研究中逐渐形成。

70年代以来,英国、美国、苏联、荷兰、德国、法国、日本等国先后在入地系统理论与应用方面进行了诸多研究。1970年英国区域学派以入地关系概念为指导,对英国的人口、资源、城市、经济、自然条件进行了综合研究,提出的区域发展对策由于政府的支持而获得实际效果。1972年美国麻省理工学院推出世界发展模型。国际

上先后开展了“人与生物圈计划”(MAB)、“国际地圈-生物圈计划”(IGBP)、“国际空间年”、“国际减灾10年”、“全球变化人类因素计划”等一系列研究。

从事人地系统研究的科学家们,正在筹划着如下重要问题的研究:人地相互作用与人地系统的调控研究、区域协调发展与优化模式的研究、全球资源与环境变化和入地系统宏观调控研究、人地信息系统与分析模型的研究。在这种研究中,中国生态科学家马世骏(1915—1991)提出的“社会—经济—自然复合生态系统”

(SENCE)可能为人地研究提供一种生态模式。复合生态系统的出发点是人工生态系统,即以人的行为为主导,以自然为依托,以资源流动为命脉,以社会体制为经络的人工生态系统。人地系统研究本质上属于人类生态学的范畴,而人类生态学的主要任务就是研究各种不同类型的复合系统及其与环境间的各种生态关系。马世骏复合生态系统为一个三圈层的结构:核心圈是人,包括人类的组织、技术和文化,称之为生态核;第二圈是复合系统内部活动的直接环境,称之为生态基;第三圈是复合系统的外部环境亦即支撑系统,称之为生态库。复合生态系统理论还包括四条生态控制原理:循环原理、生克原理、平衡原理和自适应原理。

六、生命科学

我们现在所说的生命科学包含许多方面,同许多自然科学学科一样,它的根源也可以从古希腊找到。从古希腊亚里士多德开始,就有对生物形态、行为等的研究。时至今日,已经发展出包括古生物学、系统分类学、进化论、生态学、遗传学、细胞学、分子生物学、生理学、生物化学、神经生物学等多种学科。

19世纪的生物学有两个重大成就,其一是细胞理论的提出,如同化学的原子—分子论一样,为生物学找到了最基本的理论单元;其二是达尔文的进化论,提出了对物种多样性的动态解释。其社会意义同样重大,如同哥白尼的日心说,把地球从神圣的宇宙中心变成九大行星中的一个,进化论把人也从宇宙的主宰、上帝的骄子变

成万千生物中的一员。

进入20世纪,生物学的的第一件大事便是孟德尔遗传定律的重新发现。早在1865年,奥地利的修道院院士孟德尔根据他对豌豆的实验,发现了遗传学的三个基本定律:显形定律、分离定律和独立分配定律。每一生物个体的一个性状都由一对因子决定,其中一个来自父方,一个来自母方。这个因子在体细胞中成对存在,在性细胞中单个存在。双亲都把自己的一个因子传给杂种第一代时,一个因子会遮盖另一个因子,在生物个体中表现出自己的性状,称显性因子。被遮盖的因子的性状只是被遮盖,并未消失,称隐性因子。杂种第二代交配时,雌雄配子中所携带的单个因子随机组合,独立分配到不同的个体中去,分配方式共有四种。从表现性状看,显性个体与隐性个体的比例为3比1。

孟德尔的思想远远超出了自己的时代。直到1900年,荷兰、德国和奥地利的三位植物学家分别重新发现了孟德尔的遗传规律。1906年,在英国胚胎学家贝特森(W. Bateson, 1861—1926)的倡导下,遗传学成为一门独立的学科。孟德尔被迫认为遗传学的创始人。

20世纪遗传学大致可分为三个阶段。从1900年到1939年,遗传学建立初期,开始与细胞学结合起来,在个体水平和细胞水平上进行研究。这一阶段的前十年是学科建制化过程,对孟德尔的工作进行验证,统一专有名词,并提出了突变理论和纯系理论。对遗传学和进化论都产生了巨大的影响。在遗传学从个体水平向分子水平过渡中,美国遗传学家摩尔根及其学派起了很大作用,摩尔根学派通过对果蝇的研究,将遗传学建立在染色体的基础上。

从1940年开始,遗传学向分子水平过渡,遗传学与微生物学和生物化学结合起来,以微生物为材料,用生化的方法,探索了基因的原初功能、化学本质以及基因重组的过程和机制。在这一阶段,通过对细菌和噬菌体等微生物的研究,发现了细菌的转化、接合、转导和噬菌体的重组,深入的对遗传的物质载体和传递机制的认

识，最后确立了遗传的物质载体是脱氧核糖核酸DNA，并认为，突变和传递是一切生物的共同特征。

1953年，以沃森和克里克提出DNA的双螺旋模型为标志，遗传学进入分子遗传学阶段，此时，无论研究方法，还是研究对象，都与传统遗传学有了很大不同。在实验室里，以电子显微镜为主要实验设备，对核酸、蛋白质等生物大分子进行研究，使得生物学家更像是化学家。此时，遗传学家已经能打破种属界限，在试管里操作基因了。当然，进入分子水平的遗传学研究之后，个体水平、群体水平和细胞水平的遗传学仍在继续和发展。

遗传学建立之后，对生物学的许多学科，尤其是进化论产生了巨大的影响。进化论是从宏观的角度解释物种的多样性和物种之间的演变，但是并没有找到说明这种演变的微观机制。而遗传学正是从微观机制上研究生物的遗传。但是，20世纪最初的遗传学成果从表面上看与达尔文的进化论是不相容的。在遗传学看来，物种的变化在于基因的突变，而突变是偶然的，随机的，并没有固定的方向。这与达尔文的渐进的连续的进化不符，物种个体随机的基因突变如何能使物种整体朝向一个方向进化，也是无法解释的。这使达尔文的进化论遭到了许多学者的反对。30年代末40年代初，10多个国家50多名学者通过对进化遗传学、表型遗传学、生态学、生物地理群落学、微分类学、生物地理学、进化形态学、胚胎学、古生物学等学科的综合研究，建立了现代的综合进化论。综合进化论重新肯定了自然选择的巨大作用，并用自然选择解释了古典达尔文主义无法解释的许多事实，推翻了获得性遗传、自体发生、外因发生、预先适应等陈旧的进化假说，以及用突变、遗传漂变、隔离等单一因素解释进化的种种理论。综合进化论是人类目前对生物进化所做出的最好的解释。

1953年，DNA双螺旋模型的提出，同时也是分子生物学诞生的标志。分子生物学主要研究在各种生命过程中生物大分子的结构及其功能之间的关系。生物大分子是指细胞成分中的高分子聚合物，

包括蛋白质、核酸、糖类、脂类和它们相互作用的产物，它们在分子水平上承担着重要的功能，如遗传、新陈代谢、光合作用、细胞增值和分化、发育、免疫等。分子生物学是多学科交叉的产物，除了化学和生物学的交叉，还有物理学和生物学的交叉。早在19世纪，物理学的基本原理就开始应用到生理学之中。1937年，曾在哥本哈根玻尔的理论物理研究所做过两年的理论物理研究的德尔布吕克（M. Delbrück, 1906-1981）来到美国遗传学中心，摩尔根所在的加州理工学院生物系，从事遗传学的研究。1943年，德尔布吕克与卢里亚（S. Luria, 1912-）和赫尔希结成著名的噬菌体研究小组，在1946年发现了噬菌体的基因重组现象，为解释基因自我复制的奥秘做出了重大贡献。

1944年，物理学家薛定谔出版了一个小册子《生命是什么》，用量子力学及热力学的观点论证基因的稳定性和突变发生的可能，用热力学中有序、无序和熵的概念分析生命现象，并提出了对遗传物质结构的预测。这个小册子启发了许多人把从前应用于无生命世界的物理学应用到生物学领域，一些物理学家投身于生物学，给生物学引入了物理学的思想方法。

1953年，曾在卢里亚实验室获得博士学位的沃森与学物理出身的克里克根据DNA晶体衍射的结果，提出了三维的DNA双螺旋模型，在这个模型里，两条DNA长链以右手螺旋方向围绕一个中心轴盘旋向上，两条螺旋链走向相反，每条链的外侧是磷酸集团，内侧为四种碱基，两条链上的碱基成对排列，腺嘌呤和胸嘧啶，鸟嘌呤和胞嘧啶，相互以氢键连接。在酶的作用下，两条长链分开，各以自己为模板，在酶的作用下，各自形成一条完整的双螺旋，使DNA实现自我复制。

DNA双螺旋结构发现后，引起了各学科科学家的兴趣，围绕DNA结构及其遗传含义，涌现出许多成果。

第一个提出具体设想的是提出大爆炸宇宙论的美国物理学家伽莫夫，他把双螺旋结构中由于氢键生成而形成的空穴用氨基酸填

补，就像钥匙和锁一样，每一个空穴的四角是四个碱基，四种碱基的排列组合形成了遗传密码。伽莫夫认为四种碱基每三个一组，构成一个密码，这样一共有 64 个遗传密码。1961 年，德国血统的美国生物化学家尼伦贝格（M. W. Nirenberg, 1927-）和德国科学家马太（H. Matthaei）在美国发现了苯丙氨酸的密码是 RNA 上的尿嘧啶，证实了伽莫夫的假说。到 1963 年，已知的 20 种氨基酸的遗传密码全部被测出，到 1969 年，全部 64 个遗传密码的含义都得到了解答。

对 DNA 的深入研究使传统的基因概念得到了微观构成上的意义。可以确认，基因就是 DNA 大分子上的一段多核苷酸序列，而基因的突变和重组是在核苷酸碱基对上的变化。过去必须在活细胞中才能进行的蛋白质生物合成得以在试管中重现，用简单明确的分子间具体的信息传递和结构的变化，表达出一直被认为神秘而复杂的遗传现象。遗传规律表现到所有生物上都是相同的。从最高等的生物人，到最微小的病毒，在蛋白质生物合成密码上几乎完全一致。这意味着，遗传密码代表生命现象所必须具备的基本条件。

60 年代，分子生物学家对遗传物质的生化过程有了逐渐深入的了解。到了 70 年代，找到在能够识别特定 DNA 片段的限制性内切酶；能够对特定的 DNA 片段进行切割，这使得人类可以直接控制遗传密码的传递，直接对物种进行改造。这种技术引起了伦理上的、政治上的以及科学上的一系列争论，这个争论一直延续到今天。目前，由 DNA 重组技术发展起来的生物工程在生物学、医学和农学等领域取得了广泛的成就，但是潜在的危险也十分巨大。比如生物武器对人类的危害性比原子弹还要厉害。

进入 80 年代，分子生物学家开始在分子水平上对人类基因的结构和功能进行研究，提出了人类基因组计划。人类细胞核中含有 23 对 46 个染色体，约有 5 万到 10 万个基因，约 30 亿个碱基对。人类基因组计划就是要把各条染色体上的基因全部定位，对全部碱基对的次序进行测定。这是 20 世纪启动的最后一项庞大的跨国科学工程，其目标是通过测定含有 30 亿对碱基的人类基因组全序列，以求探明

人类全部遗传信息。人类基因组计划的最早建议者是美国科学家辛梅尔(R. Sheimer)，他于1985年首先在一次会议上提出。接着杜尔贝克(Renato Dulbecco, 1914-)于1986年建议制定以阐明人类基因全部序列为目标的人类基因组计划，以便从整体上破译人类遗传信息，使得人类能够在分子水平上全面地认识自我。

人类基因组计划的意义不只在技术应用层面，在科学层面上人类智力之谜的揭示，正期待着它的成功。就作为地球上最高级的生物人来说，意识为什么能在进化中产生而不被淘汰？心理科学家们从猿到人的进化过程中去寻找答案。他们猜测在非人灵长类向人演化的过程中，大脑联合皮层、两半球功能的分化、个体发育速度等发生了促进智力产生的变化。但问题远没有解决，人类基因组DNA全序列的测定或许能提供新的思路。因为从遗传学的角度看，所有生命现象的机制，追根究底都会与基因的结构与功能相关，人的记忆与行为、衰老与死亡以及各种疾病大多由有关基因控制。而我们现在能够知道结构和功能的基因仅几千个，还不足10%。人类虽然可以遨游太空、潜入海底，但对人类自身的认识 and 了解还刚刚开始。

七、脑与认知科学

长期以来，有关思维问题的研究停留在哲学思辨式的讨论或局限于经验的观察之中，直到70年代诞生的认知科学才有所突破。认知科学发展了关于认知和智力研究所特有的基本概念和方法，它研究包括知觉、记忆、动作、语言、推理和思考乃至意识在内的各个层次人类的认知和智力活动，从而使对思维的研究进入到一个建立在现代科学基础上的新的历史阶段。来自计算机科学、神经科学和心理科学的三个浪潮还在对认知科学的核心概念不断发出巨大的冲击，激发和孕育着认知科学未来的更大发展。但是，有关人类智力起源的问题、精神和物质的关系问题，可能是人类认识自己的最后难题。

在宏观层次上，认知计算理论的提出是认知科学对智力研究的第一次突破。这个理论最基本的一个概念是图灵机意义下的“计算”，其中心论题是“认知即计算”，认为无论人脑和计算机在硬件和软件层次是如何的不同，但是在计算理论的层次，它们都具有产生、操作和处理抽象符号的能力。作

为信息处理系统，无论是人脑还是计算机都是操作处理离散符号的形式系统。这种离散符号的操作过程就是图灵机意义下的计算，认知和智力的任何一种状态都不外乎是图灵机的一种状态，都是由图灵机定义的可以一步步机械实现的计算。在计算理论指导和影响下，认知科学取得了诸多成果。

当然，把认知的本质看成计算的根本指导思想是不全面的。有众多实验支持初期知觉是一个从大范围性质到局部性质的过程，而大范围性质的拓扑性计算较之局部几何性的计算要复杂得多。这提示了一个深刻的矛盾，即计算的困难程度的次序与人的知觉的先后次序相反。看来，人脑信息处理方式与图灵定义的计算可能存在着根本的区别。

人们早已知道，包括大脑在内的神经系统是主管生物各种认知行为的物质载体，因此，单从唯象的角度对思维进行研究是不够的，还需要对神经系统本身进行充分的研究，将宏观和微观研究结合起来，才能得到对认知问题的总体认识。

19世纪对神经系统的研究主要是解剖学和生理学的一部分，进入20世纪，随着其他自然科学学科的发展，对神经系统的研究进入了生物学同化学、物理学、数学乃至工程技术相互交叉的广泛领域。尤其是神经递质的发现，使人们对神经系统信息传导的认识，从电性质深入到分子的水平上，发展了分子神经生物学。另一方面，对于大约100亿个神经细胞构成的大脑，它对信息的加工、存储以及认知行为的产生，除了从分子、细胞、核团等各级水平进行研究外，还与信息论和计算机理论与技术结合起来，从建立宏观模型入手，发展了神经网络和人工智能等研究领域。

对于认知和智力过程的神经基础的研究产生了认知神经科学。认知神经科学强调认知和智力是大脑的功能，精神和大脑关系的问题是最基本的核心问题。围绕着精神（智力）和大脑关系的问题，认知神经科学研究将一系列最富于挑战性的问题，包括意识问题、认知进化问题、智力模块问题乃至知识的先后天问题，都纳入到科学研究中来。认知神经科学的主要研究手段和实验技术包括：大脑损伤病人行为的心理学实验；非人类的灵长类认知实验；直接观察大脑认知活动（如知觉、言语和思考）的各种脑成像技术，包括高分辨率的脑电 / 诱发电脑电（EEG / EP）、功能磁共振成像（fMRI）、正电子

发射射线断层照相术（PET）等。运用这些技术，人们已经从生物学的角度对大脑皮层的功能区进行了比较准确的定位，关于中枢神经对外界感觉信息的加工机制也有了阶段性的成果，对于视知觉和听觉的研究则进入到分子水平上。

认识和知觉显然既是一个心理过程又是一个生物过程。然而至今还不清楚应当如何把心理描述和生物描述联系起来。神经科学对于在结构的最低层次上的神经系统的解剖学和生理学已经有了相当清楚的了解，但在知觉和认识过程得以发生的层次上则刚刚开始建立其结构和功能的详尽描述。行为主义心理学长期以来忽视精神或意识问题的研究。按照行为主义理论，人类的一切行为都能够用刺激-反应模式和强化原则加以说明。显然，对于那些与直接刺激关系并不密切的心理过程及其行为表现，这种学说不能提供合理的说明。行为主义的困难以及人们对精神现象的关注，使得心理学与神经科学、人工智能、语言学等结合起来，形成一门新的交叉学科——认知心理学，其中心任务就是运用心理学的实验手段，为知觉、注意、记忆、言语、学习和思维等各类认知心理活动建立适当的理论框架。

近30年来，由计算机与信息科学、认知神经科学和认知心理学三大支流汇集而成的认知科学，正在向人类自我认识的极限——对思维和理性自身的考察——发起挑战。认知科学力图发现认知活动的普遍规律，并假定这些定律与物理科学中的定律具有同样的普遍形式。当代认知科学的发展，按其哲学倾向和基本观点，大致可分为功能主义、物理主义和进化突现论三大流派。进化突现论坚持要把心理描述和生物描述联系起来，并主张意识或精神是在宇宙进化中突现的。虽然现代神经生物学的认识还未达到解释主观性的水平，我们仍然可以试图了解，在生物进化过程中具有的内在生命是如何产生的。尽管早期的生命有机体中并不存在意识，但也难以设想只有我们人才具有意识。因为主观经验是以神经系统为中介的，人们可能会认为，一切具有神经系统的有机体都具有精神生活。但事实上，意识不可能只是内观的神经活动，人类神经系统的大量活动也并不产生意识。意识不但涉及感觉和行为，而且涉及思维、记忆、期望这样的过程。突现论断言，意识是生命进化过程中的突然出现的一种性质。生命本身是突现的，意识也是突现的。意识的这种似

乎偶然的和不可预测的性质并不神秘，因为它能够由直觉直接地察知，甚至可以设想以自组织原理予以科学的说明。

认知科学中的物理主义则不考虑进化和历史问题。物理主义者强调，每一种或每一类精神状态都对应于神经系统的某一种或某一类特定的物理状态。物理主义所碰到的最严重的困难是，心理学向物理学还原缺乏学科间还原的必要条件，即不存在满足这种还原条件的心理—物理定律。

功能主义是当代认知科学的主流，它主张人的智能行为必须诉诸内在的认知过程来说明。功能主义者把大脑看作一个计算系统，以建立认知活动的信息处理模型为主要任务。他们只询问是什么类型的功能在大脑中得到实现，而不问哪些脑细胞参与了这种实现，或它们的生理学如何使这种实现成为可能。尽管他们并不否认精神的物质基础，本质上却把精神和智力活动看成与其物质载体大脑以及与之相互作用的物理环境没有必然联系的功能。功能分析与普遍图灵机概念和认知心理学理论的结合得出了一系列富于启发性的学说。

第三节 现代技术的发展及展望

近代以来的技术发展，按照公认的看法，先后经历了蒸汽机技术、电力技术和信息技术三次重大革命。人们将第一次技术革命和与之相关的社会转型称为工业革命或产业革命。这一重大的历史事件不仅是现代技术的起点，而且鲜明地体现出技术进步对社会发展的巨大影响。因此，在论述现代技术的发展之前，我们应该先了解一下这段历史。

一、工业革命：人类历史的分水岭

英国工业革命始于18世纪中叶，到19世纪上半叶开始向欧洲大陆和北美扩散，这一世界性的工业化进程，极大地改变了人类社会的面貌。正如马克思、恩格斯（F. Engels, 1820-1895）在《共产党宣言》中指出的，“资产阶级在它的不到一百年的阶级统治中所创造的生产力，比过去一切世代创造的全部生产力还要多，还要大。

自然力的征服，机器的采用，化学在工业和农业中的应用，轮船的行驶，铁路的通行，电报的使用，整个整个大陆的开垦，河川的通航，仿佛用法术从地下呼唤出来的神奇力量，过去哪一个世纪能够料想到有这样的生产力潜伏在社会劳动里呢？”

这场革命以工具机的诞生为起点，以机器代替手工工具、机器大工业代替工场手工业、工厂代替作坊为标志。它的发生和发展是多种因素作用的结果。其主要因素是：消除、废弃封建制度、封建割据和控制生产和财富分配的中世纪规则，建立自由竞争的市场制度，形成分工与专业化的合作机制，大力发展技术及配套的知识产权保障系统。正是这一系列的制度创新、组织创新和技术创新，创造了工业革命的奇迹。

机器的发明和应用是工业革命的显著特征，往往一个新机器的发明可以使生产效率成倍、成十几倍、甚至几十倍地提高，显示出技术进步的强大威力，这里我们就着重介绍这方面的情况。

纺织机

18世纪以来，纺织业是英国最重要的工业部门，毛纺织业是英国的传统优势项目，而棉纺织品则要从印度和中国进口，为了发展本国的棉纺织业，英国必须采用新技术，因为只要还用手工纺织，英国人就无法与手工艺精巧、工资又低的印度人和中国人竞争。1733年约翰·凯（John Kay，1704-1774）发明了飞梭，配备这种装置的织机，用推动手柄代替双手穿梭，简化了织工的操作。所织布匹的门幅也不再受织工伸开手臂长度的限制，织布效率提高一倍。与此同时，英国最早研究机械纺纱的怀亚特（J. Wyatt，1700-）于1733年发明了第一架纺纱机，后来他将改进过的发明卖给刘易斯·保罗（L. Paul），后者于1738年获得了该发明的专利。这种纺纱机可以将纺纱的三道工序同时进行，不仅提高了效率，而且使妇女、儿童都可以操作。它的出现是纺纱技术迈向机械化的重要一

步，为后来发明的纺机提供了原理性基础，受到马克思的高度评价。但是由于机件脆弱、捻线及动力等机器自身的不足和资金、管理等方面的问题，这种纺机没有推广开来。纺纱工业发展迟缓的局面没有改观。

另一方面，飞梭发明后，逐渐在英国棉纺织业推广应用，造成纺纱供不应求，急需高效实用的纺纱机。为此，伦敦皇家学会于1751年悬赏50英镑征集“发明一部最好的，能同时纺六根棉线、亚麻线或黄麻线，而只需一人操纵和照管的机器。”直到1764年，哈尔格里夫斯（J. Hargreaves, 1720-1778）发明了珍妮纺纱机，又称多轴纺纱机。操作这种机器，一个工人，即可照管8只纺锭，后来经不断改进，发展到80只纺锭。尽管这种机器还用手工操作，且不能连续工作，须周期性地停车和倒车，以便把纺好的纱摇在纤子上。但是，珍妮机占地小，制作简单，无需安排专门的作坊，甚至很少改变工人的习惯，因此它得以迅速推广。在英国棉纺织业中心兰开夏郡，几年的时间便到处取代了纺车，在哈尔格里夫斯死后十年的1788年，英国拥有的珍妮机已不少于2万台。

1769年阿克赖特（R. Arkwright, 1732-1793）取得水力纺纱机的发明专利，专利期限为14年。纺纱机体积大，需要安装在有流水落差的地方，建立工厂已势在必行。1771年阿克赖特创办了首家用水力作动力的机械纺纱厂。水力纺纱机制成的纱，比最熟练的纺纱工用手纺车纺出的纱要结实得多，耐用得多，用它织出的棉布质量不亚于印度的棉布。尽管阿克赖特不是发明家（是海斯发明了水力纺纱机），但是阿克赖特是最先懂得利用这些发明并把它们组成一个系统，他创办了真正意义上的近代工厂。18世纪末和19世纪初的兰开夏郡和得比郡的所有工厂都是按照他的工厂模式建造的，阿克赖特的工厂是英国当时规模最大、组织管理得最好的工厂，他还是第一个在纺织工业中用蒸汽机租为新动力以取代水力机。因其对纺织工业的贡献，英王封他为爵士，后又请他担任德比州州长。

水力纺纱机的发明和应用不仅是纺织技术的重大进步，而且还

催生了资本主义的工厂制度。恩格斯指出水力纺纱机和蒸汽机一样，也是18世纪机械方面最重要的发明。

随着纺织业的发展，纺织机不断得到改进，1779年，克朗普顿（S. Crompton, 1753-1827）综合珍妮纺纱机和水力纺纱机的优点，造出新的纺纱机-“骡机”，也称自动走锭精纺机，经过改进后，这种机器可装有三三百到四百个纺锭，它纺出的纱纤细、精美，品质超过了印度棉纱。到1812年，它已应用于几百个工厂之中，其纺锭总数多达四五十万。

克朗普顿的发明不仅完成了纺纱技术的变革，同时也再次打破纺与织之间的平衡。

对织布技术作出重大贡献的有卡特赖特（E. Cartwright, 1743-1823）和罗伯特（R. Roberts）等人，特别是罗伯特1822年发明的动力织机及其改进型，已经显著提高了织布效率。一个十五岁的孩子可以照料两架蒸汽织机，织出三匹半织物，而在同一时间里，一个熟练工人用飞梭织布，只能织出一匹。这种织机的推广应用有效地解决了织布能力与纺纱能力不相配的问题。

纺织技术的机械化推动了纺织业的迅速发展，也引起了纺织行业其他部门的技术革新。用机器取代手工劳动的情况不断发生。比如，1783年苏格兰人马斯·培尔（T. Baer）发明了滚筒印花机，它可以代替一百个工人的手工印花工作。1792年美国人惠特尼（E. Whitney, 1765-1825）发明轧棉机，实现了棉花脱籽的机械化。一人操作这种机器，每天可轧棉1000余磅，而一人手工轧棉，每天只轧棉五六磅。针织机的发明使针织效率提高6000倍。1850年美国人辛格（I. M. Singer, 1811-1875）发明了缝纫机，使缝纫和制衣技术发生了飞跃。

棉纺织业是最能体现英国工业革命特点的领域，它在各行业当中发展最快。技术与工厂管理的结合使1792年到1850年间，纺织厂的平均生产率提高了13倍。到1830年英国棉纺织业占世界总产量的57%。

蒸汽机

工业革命的另一个重要特征是把人力或畜力之外的动力应用于生产。没有新型动力，即使有机器，也不会有机械化，使用水力作为机器动力是相当普遍的。如上文提到的水力纺纱机，而且应用水力机的时间也很长。用水力机作为动力的突出问题是使企业局限在水流量大的山区，为了弥补水力不足，人们用抽水机把水抽到蓄水池中形成人工瀑布。这也是早期蒸汽机的一个用途。

1680年荷兰物理学家惠更斯（C. Huygens, 1629-1695）设计了带有汽缸、活塞和排气管的动力机，这可看作是蒸汽机的雏形。惠更斯的助手，法国的帕潘（D. Papin, 1647-1712）对其进行改进，1690年发表了这一设计方案，并且指出这种获得廉价动力的方法可用于矿井抽水和带动船桨等。萨夫里（T. Savery, 1650-1715）1698年发明的“矿工之友”蒸汽泵，开始用于矿井抽水，纽科门（T. Newcomen, 1663-1729）把汽缸和锅炉分开，使出力大为提高。1712年投入使用的首台纽科门蒸汽机标志着蒸汽机发展到了一个新阶段，但总的说来，这时的蒸汽机还很不完善，机件加工粗糙、漏气严重，热效率低。直到瓦特（J. Watt, 1736-1819）对其进行了重大革新，蒸汽机才成为普遍应用的动力机。

瓦特出生在苏格兰的格里诺克镇，他的祖父教授数学，其父是建筑师、造船师和市政官。瓦特从小就热爱学习，在格拉斯哥大学实验室任机械师期间结识了不少著名科学家，例如化学家布莱克（J. Black, 1728-1799），他讲授的潜热理论，是瓦特最爱学习的课程之一。为了阅读国外的科学著作，瓦特掌握了法语、意大利语和德语。从那时起，他便一直关注着科学的发展，他亲自参与过一些科学研究，并且他具有哲学、法学、诗学和音乐等广泛的兴趣和知识。因此并非传说的那样，决不是因为看到水在茶壶里沸腾，瓦特就发现了蒸汽的力量，得到发明蒸汽机的灵感。工业革命中许

多发明（如珍妮机等）是经验和想象力的产物，与科学理论关系不大。但是在蒸汽机的一系列改进过程中，科学理论发挥了不可或缺的作用。瓦特发明蒸汽机的过程就是如此。比如瓦特在分析蒸汽消耗量大的原因时，不仅运用潜热和比热的概念，而且进行了定量计算。科学理论对瓦特发明活动的影响不仅表现在设计原理与理论密切相关，而且还体现在研制工作是根据科学方法在实验室里作出来的。科学对于瓦特来说，既是目的又是手段。

瓦特对蒸汽机进行一系列革新和改进，其中最突出的贡献有两项：一是1765年发明了配有与气缸分离的冷凝器的蒸汽机，1769年获得“降低火力机的蒸汽和燃料消耗量的新方法”专利，它将热效率提高到2%-4%，比纽可门蒸汽机提高3-6倍；二是1783年发明实用的旋转式蒸汽机，次年获得专利，把蒸汽机发展成为“普遍适用于工业的万能的原动机”。

蒸汽机，特别是作为通用动力机的瓦特蒸汽机是18世纪机械方面最重要的发明。它的推广开始了工业革命最具有决定性的阶段。作为动力，蒸汽机不像水力机那样依赖地理位置，凡能获得合理价格的煤的地方都可以安装蒸汽机。英国恰好煤藏丰富。蒸汽机广泛应用于纺织、冶金、采矿、交通运输等几乎所有需要动力的领域，促成了工场手工业向工厂制的转变，到1821年英国已有1500台左右的蒸汽机投入使用，蒸汽机代表了先进技术，当时不少厂商的信笺上加盖“蒸汽企业”的字样，或印上配有浓烟滚滚烟囱的厂房的图形，这已成为享有盛誉的标志。工业时代从此开始了。

冶金技术

“机械化的开端，属于纺织工业的历史，它的最后胜利和普遍发展，只有通过冶金工业的发展才能实现”。法国历史学家保尔·芒图的这个论断是十分中肯的。

随着机器功能和性能的增加与提高，钢铁取代木材成为制造机

器的主要材料，对钢铁的需求量也随之增加，从而推动了冶金技术和冶金工业的发展。

18世纪之前，在英国木炭是冶炼矿石的惟一燃料，所以炼铁厂都设在英国南部的林区。通常炼一吨铁，需要四车木材烧成的两车炭。连年不断的砍木烧炭加上农田开垦与牧场的扩大，森林毁损日益严重，炭的产量逐年下降，价格也越来越高，导致铁的产量下降。这时急需代替炭的新型燃料。

早在1612年，英籍德国人西蒙·斯达蒂文特(S. Sturtervant)就获得了用煤炼铁矿石的专利权。他指出：“一个高炉每年花在木炭上是五百镑，用煤就可能把这项费用减到十分之一。”对用煤炼铁技术作出突破性贡献的是英国人达比父子。1709年，达比

(A. Darby I 1677-1717)在英格兰中部的科尔布洛克达尔设厂，采用焦炭炼铁获得成功。后经小达比(A. Darby II 1711-1763)不断革新，改进炼焦和去渣方法，采用功率强大的鼓风机，使冶金业进入大规模发展时期。1720年英国生铁年产量仅2.5万吨，1796年增加到12.5万吨，1852年达到270.1万吨。相应地，煤炭生产也突飞猛进。这一时期，大型冶金企业迅速崛起，除盛极一时的达比家族三代经营的炼铁厂外，威尔金森的钢铁企业更是富可敌国。他拥有铁矿、煤矿、锡矿、铁路、运河、仓库、码头、炼铁厂、锻造厂和铸币厂等，他自己铸的货币可以几十年内在英国许多郡自由流通，俨然是国中之国。由此可见当时英国企业的规模和影响。

工业革命被认为是人类历史的分水岭，在18世纪前的1000年里，欧洲人均收入的年增长率只有0.11%，也就是每630年才增长一倍，但是在工业革命期间，经济增长速度大大提高了，经过第一次工业革命到第三次工业革命，即从1820年到1990年的170年间，英、德、美、日的人均收入分别增长了10倍、15倍、18倍和25倍。同时贫富差距也在迅速拉大，到20世纪末，高度发达的工业化国家的人均收入是世界上其他国家平均人均收入的六倍，而在工业革命初期，各国之间的差距只有15%-20%。自然资源的过度消耗和环

境污染也是工业化的后果。

二、机械制造与能源技术

机械制造技术作为人类社会赖以生存和发展的物质产品的生产技术，是一切技术的基础。“制造”是技术最初的、也是最基本的含义。机械制造业被认为是工业中的工业。近代机械制造技术是在英国工业革命时期发展起来的。至今经历了机械化、自动化、综合自动化等三个阶段。

机械化时期（18世纪中期-19世纪末期）

工业革命时期，英国的纺织业和矿业发展迅速，多种新式机械相继问世，特别是蒸汽机的出现和应用，使得对机械加工的精度要求日益提高。为此，人们发明了各种专门用来制造机器的机器——工作母机。1775年，威尔金森（J. Wilkinson, 1728-1808）率先研制成误差不超过1毫米的加工内孔直径72英寸（1828.8毫米）的蒸汽机气缸的机床，随后又把它改制成具有更高加工精度的镗床。这项发明促成了瓦特蒸汽机的最终研制成功和推广应用。

1797年前后亨利·莫斯莱（H. Mauduslay, 1771-1831）发明、制造了著名的螺纹车床等几十种机床和装置，被称为英国“机床之父”。此后，克莱梅特（J. Clement, 1779-1884）发明了刨床，罗伯特（R. Robert, 1789-1864）设计了钻床，莱斯密斯（J. Nasmyth, 1808-1890）发明分度铣床和牛头刨床，并于1839年制造了蒸汽锻锤。到1851年伦敦举办第一届世界博览会时，已有车、铣、刨、磨、剪等23类机床参展。在同一时期与机械加工有关的技术规制和措施也逐渐完善。比如惠特沃思（J. Whitworth, 1803-1887）提出的标准螺纹、端面测量和精密测量原理被采纳，特别是1860年英国推行了“全国统一螺纹”，在机械零件生产的标准化道路上迈出了第一步。正是惠特沃思等人的努力，使英国的机床制造业在19世纪中叶居于世界领先地位。这些成就标志着各种工作母机和加工技术已

初步形成较完整的加工体系，为机械制造技术的发展奠定了基础。

进入19世纪中后期，自行车、摩托车、汽车、火车、轮船等交通工具，水泵、拖拉机等农业机械，蒸汽机、水力涡轮机、汽轮机、内燃机，特别是戴姆勒（G. Daimler, 1834-1900）发明的汽油机和狄塞尔（R. Dissel, 1858-1913）发明的柴油机等动力机械，打字机、缝纫机以及早已出现的纺织机等多种机器开始广泛应用。此外，为适应精确、经济地生产大量机器零部件的需要，各种机床的生产规模也不断扩大。互换性制造、切削工具的革新、变速齿轮箱的发明和机床的电气化等新因素的出现，显著提高了机床的性能和功能。标准化、通用化生产（即互换性制造）、泰勒制和福特生产流水线的相继实施，形成了“美国生产体系”，机械制造的效率和质量出现了一次飞跃，美国也因此取代英国成为世界机械制造业的中心。

自动化时期（20世纪初期-20世纪70年代）

自从瓦特于1788年发明离心式调速器以后，自动调节装置开始得到应用。后来陆续出现了电磁调速器（1854年），反馈调节器（1868年）等装置。从20世纪20年代开始，各种自动调节装置广泛应用于工业生产之中。例如在这一时期，人们把液压传动机构和电磁开关等电器元件用于铣床、刨床等机床，实现了机床的半自动化。

20世纪40年代中后期，随着电子、微电子技术、电子计算机和维纳（N. Wiener, 1894-1964）控制论的问世与应用，机械技术进入了新纪元。50年代，第一台数控铣床（1952年）和第一台被誉为加工中心的综合性数控机床（1959年）在美国相继问世。随后，日本、联邦德国等也加紧这方面的研制工作。到70年代，数控机床已从第一代电子管、第二代晶体管、第三代集成电路、第四代计算机数控（CNC）和群控系统，发展到第五代微机数控装置（MPCNC）。微机数控装置性能强、价格低、轻小灵活，便于机电一体化，因此

增大了数控装置的应用范围和数量，到1983年，全世界数控机床的总数已超过30万台。

综合自动化时期（20世纪70年代-）

为适应技术发展和产品更新换代的加快，人们开始研究制造小批量多品种的生产系统。1967年英国莫林公司首次提出柔性制造系统的概念和 Molin-24系统构想。随后美国K&T公司明确提出柔性生产系统（FMS, Flexible Manufacturing System），即没有固定加工顺序和生产节拍，适应多品种小批量生产的机械制造系统，它的基础是成组技术、数控机床、加工中心、群控和机器人等。1972年美国第一套柔性制造系统正式投产，到1982年10月在英国普赖顿召开首届柔性制造系统国际会议时，世界上已有200余套柔性制造系统。而且在80年代初柔性制造系统组成的无人工厂也投入生产。

机器人和智能机器人相继出现于20世纪60、70年代。在机械制造中有搬运机器人、装配机器人、极限作业机器人等，它们广泛应用于工业、农业、医学、军事、科研、环保等各个领域，实现了从“人-机器生产系统”到“人-机器人-机器生产系统”的重大转变。

80年代以后，柔性制造系统进一步发展成为计算机集成制造系统（CIMS），它依托于材料、器件、设计理论与方法、计算机技术和企业管理，它包括计算机辅助设计（CAD）、计算机工艺设计及编制工艺程序（CAPP）和计算机辅助调度与管理（CAPSC）等三大部分。在生产中应用自动化可编程序，把加工、装配等生产中的各个环节合为一个整体，通过调换程序就可以生产不同产品。随着计算机技术和大系统理论的发展，现在人们已经开始对智能集成制造系统和虚拟制造系统进行探索和研究。

能源技术发展至今经历了三次飞跃：一是18世纪中前期蒸汽机的发明，实现了热能向机械能的转换；二是19世纪中后期，发电机

和电动机的发明，实现了机械能与电能的互相转换，而且作为二次能源的电具有传输快捷、使用方便的特点，使能源利用不再受地形、地理和资源条件的限制；第三次飞跃发生在20世纪中后期，核能的受控释放使人类拥有利用非常态能源的能力，特别是将来核聚变发电站研制成功，就能够使人类满意地用上清洁、持久的能源。正是能源利用和转换及相关技术的进步引发了这三次飞跃。

煤炭、石油、天然气

人类在很久以前就开始利用煤炭，但直到18世纪工业革命，蒸汽机和冶金技术的发展，煤炭才取代薪柴成为主要燃料，到1900年世界所用能源的近五分之三是由煤提供的。那时，煤既是家庭和工业的热源，又是机车、轮船的动力源，由焦炭转变的煤气又成为光源。这一时期煤还是化工生产的基础原料。化学工业被称为煤化学工业。

随着汽油机、柴油机的推广应用，以及钻探、开采技术的发展，石油的需求和产量迅速增加，到20世纪30年代，石油已打破煤所占据的绝对优势。例如1937年，世界轮船总吨位中有一半以上是用石油作为燃料的。进入60年代，世界能源消费的结构中煤炭占48.9%，石油、天然气占49.2%。到石油危机爆发前的1973年，这个比例为煤占28%，石油、天然气占69.5%。由此可见，从60年代起，人类从煤炭时期进入以石油、天然气为主要能源时期。

电力技术革命

1820年奥斯特（H. C. Oersted, 1777-1851）对电流磁效应的发现，1831年法拉第对电磁感应现象的发现，并制成发电机原理模型，揭开了电力技术革命的序幕。怀尔德（Henry Wilde, 1833-1919）、瓦利（S. A. Varley, 1828-1883）和西门子

(E. W. Vonsoemens, 1816-1892) 等人在19世纪60年代发明自激式发电机,使发电机摆脱了对永久磁铁的依赖,为发电机实用化迈出了最重要的一步。接着,格喇姆(Z. T. Gramme, 1826-1901)电枢和旋转磁场原理及交流多相运行系统在19世纪70、80年代相继提出,使机械能与电能的互换均达到了实用阶段。发电机和电动机的发明是划时代的事件,对人类社会产生极其深远的影响。正如恩格斯所说“电的利用将为我们开辟一条道路,使一切形式的能-热、机械运动、电、磁、光-互相转化,并在工业中加以利用”。

电力技术革命给我们的启示主要有两点:一是科学革命可以成为技术革命的先导,科学理论和实验对技术发明有启发和指导作用;二是同时必须看到技术研究的特殊性和重要性,技术有自己的问题,而且并不一定比科学问题容易。比如自激式发电机的发明才是发电机实用化的关键,如果说法拉第电磁感应现象的发现及直流发电机的发明使机械能转换为电能成为可能,那么自激式发电机的出现则使发电机能够发出大量电能成为可能,对于电力技术革命来讲,两者缺一不可。

最早大规模生产电能的是火力发电和水力发电。19世纪70、80年代在法国和美国先后建成世界上最早的火力发电厂和水力发电厂,经过百余年的发展形成了世界上最庞大的二次能源供应系统。1998年全世界装机容量3 133 370千千瓦,总发电量136 156亿千瓦时。此外人们还开发了风力发电、潮汐发电、地热发电、太阳能发电、核能发电等多种发电技术。其中最引人瞩目的是核能发电。

核电

自从1954年世界上第一座联网送电的核电站在苏联诞生以来,核电技术已有了很大发展。到1998年底为止,全世界投入运行的核电站已达到434座,总发电量22 914亿千瓦时,有25个国家核电占

该国的总发电量的四分之一以上。

从80年代开始,我国开始核电建设,秦山核电站和大亚湾核电站于90年代初中期先后建成发电。清华大学于1989年建成一座5万千瓦低温供热堆。

核电站的可靠性和环境问题一直受到人们的关注,从1986年苏联切尔诺贝利核电站事故到1999年日本核电站事故,核泄漏不断发生,这说明核能利用任重道远,需要科学家与社会各界齐心协力,才能彻底解决。

未来的能源技术,主要是发展核聚变能发电、氢能利用、洁净煤技术和可再生能源技术等,使能源的开发和利用更加洁净、安全、高效,更加具有可再生、可储存与可分配的特点。

三、化工与材料技术

随着工业革命的深入和扩散,纺织、冶金和采煤等行业迅速发展,迫切需要染料等有关化工产品。近代化学的创立,为研制和开发化工产品提供理论依据和指导,尤其是一些化学家在应用研究和新产品开发方面发挥了重要的作用。这些都有力地推动了化工技术和化工产业的发展。

有机合成工业的兴起

1. 染料合成

从18世纪70年代开始,冶金工业发展很快,焦炭的产量日益增加,炼焦产生了煤气和煤焦油两种副产品。前者被用作燃料和照明,后者却一时找不到用途,成为令人头痛的环境污染物。如何处理和利用这些废物,成了许多化学家关心的问题。到19世纪上半叶,对煤焦油的研究取得了初步成果,从中分离出苯(C_6H_6)、萘($C_{10}H_8$)、苯胺($C_6H_5NH_2$)等芳香族化合物,但仍没有解决煤焦油用途的问题。真正认识到煤焦油巨大价值的是德国化学家霍夫曼(A. W. Von Hofmann, 1818-1892),1845年至1865年,霍夫曼应邀在英国工作,

先后担任过伦敦皇家化学学院院长、化学学会主席等职，为英国化学、化工事业做出了重要贡献。霍夫曼从煤焦油中分离苯，进而批量地制造苯胺。在对苯胺类似物之一的烯丙基-甲苯胺的分析中，霍夫曼想到用它制造奎宁（一种治疗疟疾病的特效药）的可能性，并指导他的研究生铂金（W. H. Perking, 1838-1907）做进一步研究。结果奎宁没有制造出来，铂金却意外发现了可用于染色的苯胺紫。在其染色效果和应用价值得到当时一家大染业公司认可的情况下，铂金放弃纯粹化学研究而开始从事这种人工合成染料的生产与销售。经过铂金等人不断改进和欧洲时装倡导者们的推重，人工合成染料得以普及，甚至流行到包括维多利亚女王和拿破仑三世的妻子欧仁尼皇后在内的上流社会之中。

铂金的成功促使化学家纷纷投身于人工合成染料研究的行列。霍夫曼于1858年和1860年分别合成了红色染料碱性品红和蓝色染料苯胺蓝。随着有机结构理论的建立，特别是1865年德国化学家凯库勒（F. A. Kekule, 1829-1869）对苯的环状结构的发现，使染料合成研制工作的偶然性减少、自觉性和理论依据增多，成功率也提高了。在60年代中，翡翠紫、碱性蓝、醛绿、霍夫曼紫、碘绿、藏红、甲基紫和喹啉蓝等一大批苯胺紫的衍生物被陆续研制出来，以至60年代被称为“苯胺紫十年”。差不多与此同时，人工合成天然染料的研制工作也获得了突破性进展，1869年，德国化学家格雷贝（K. Graebe, 1841-1927）和利贝曼（K. Liebermann, 1842-1914）首次人工合成了天然染料茜素，格雷贝和拜耳（J. F. W. A. Von Baeyer, 1835-1917）在1878年又人工合成了天然染料靛蓝。此外，硫化染料等其他染料品种也不断问世。

合成染料的兴起不仅满足了纺织业日益增长的需要，而且能够变废为宝，把炼焦的副产品煤焦油转化为巨大的财富。这种自我吸收、自我完善的技术发展模式值得后人思考和借鉴。

进入20世纪，合成染料技术继续发展，特别从50年代开始，石油化工的兴起为合成染料提供了新的原料，同时也提出了新的要

求。分散染料、活性染料、阳离子染料等适用于合成纤维、羊毛、丝绸、腈纶等的新型染料纷纷问世，它们品种繁多（比如到70年代中期，分散染料已有370余种），发展迅速，使染料技术和染料工业的发展进入到一个新阶段。

2. 药物合成

利用从煤焦油中提炼出的芳香族化合物，不仅可以合成染料，还可以合成水杨酸类药物。1859年德国化学家柯尔柏（H. Kolbe, 1818-1884）发明制取水杨酸的方法。1899年，霍夫曼成功地合成了乙酰水杨酸，即解热镇痛的好药阿司匹林（AsPirin）。此外，19世纪80年代还制成了“安替比林”（Antipyrinum）和“非那昔丁”（Phenacetin）两种退热药。20世纪以来，药物合成已成为发展最快的领域之一。德国生物化学家艾里希（P. Ehrlich, 1854-1915）于1909年研制出“六〇六”这一著名的化学合成药。此后，磺胺类药物被接二连三地研制出来。1956年第一个长效磺胺——磺胺甲氧嗪问世。磺胺药以其简单的合成工艺、低廉的成本和使用便利而广受欢迎，至今仍在使

用。抗菌素是更为常用的药物，自从第一种抗生素青霉素由英国化学家弗莱明（A. Fleming, 1881-1955）于1929年发明出来之后，链霉素（1944年）、氯霉素（1947年）、金霉素（1948年）、土霉素（1950年）、四环素（1952年）、红霉素（1952年）、卡那霉素（1958年）以及由我国研制成功的庆大霉素（1963年）等抗菌素纷纷问世，这些抗菌素用化学合成或生物合成法生产。20世纪20年代后，各种维生素也相继合成成功，到70年代末，用化学和生化法制造的药物已超过3000种。

3. 炸药的合成

作为现代工业用的基础炸药，火棉（硝化棉）和硝化甘油（甘油基三硝酸酯）在1845-1846年内相继发明。火棉是通过硝酸作用于棉花和其他纤维素形成的，硝化甘油则是由硝酸作用于甘油而形成的，两者都具有高度爆炸性和敏感性。瑞典化学家诺贝尔（Alfred

Nobel, 1833-1896) 在1859-1866年的研究表明, 用硅藻土吸收硝化甘油, 有效地减弱了它的敏感性, 与少量雷酸汞相接触才能爆炸。这样, 诺贝尔就制成了名为达那马特(dynamite)的安全炸药。1875年, 诺贝尔将硝化甘油与“火棉”混合, 制成了性能更好的炸药, 通过调整两者的比例, 可适用于不同用途。诺贝尔在炸药的生产 and 营销上同样取得了成功。他的遗嘱决定用他的大部分遗产作为基金, 奖励那些在物理、化学、生理和医学、文学、以及对和平事业有卓越贡献的人。这就是著名的诺贝尔奖金, 从1901年开始颁发, 有力地促进了科学的发展。

由于军事和工业上的需要, 进入20世纪后炸药技术又有长足进步。到20世纪中叶液体炸药、多相混合炸药、耐热炸药等新型炸药的出现表明炸药的爆炸性能和制造技术提高到了一个新的水平。

制酸工业

在近代化学工业中, 硫酸、硝酸是主要的化工基础原料, 甚至在很长一段时间里, 硫酸被誉为“工业之母”, 其产量成为衡量一个国家工业和化学工业的重要指标。比如, 美国在1952年的硫酸产量是第二大硫酸生产国苏联的3到4倍。从1900到1949年, 全世界的硫酸产量从405万吨增加到2130万吨。

18世纪40代, 英国出现了世界上最早的生产硫酸的工厂。1746年。英国人罗巴克(J. Roebuck, 1718-1794)发明了可以大规模生产硫酸的铅室法, 后几经改进, 特别是吸硝塔(盖吕萨克塔)(1827年)、脱硝塔(格罗弗塔)(1859年)的发明, 使铅室法趋于成熟。经过近半个世纪的生产实践, 人们又根据二氧化硫在脱硝塔中氧化更快的特点, 开始尝试放弃铅室, 用内部填充瓷环的塔式系统来生产硫酸。到20世纪30年代, 铅室法开始被品质优产量大的塔式法所取代。但是由于塔式法和铅室法一样不能直接生产浓硫酸和发烟硫酸, 越来越不能满足工业生产对硫酸日益增长的需要。因此, 萌发

于19世纪30年代的接触法得到了迅速发展，最终以其操作稳定、便于掌握的优势，成为生产高浓度硫酸和发烟硫酸的首要方法。

制碱工业

碱，特别是纯碱和烧碱也是极为重要的工业基础原料。近代制碱工业诞生于法国。1775年，法国科学院悬赏征集工业制碱法。18世纪80年代末、90年代初以吕布兰（N. Leblanc, 1742-1806）名字命名的纯碱制造法通过法国科学院的鉴定并获得专利。发展到19世纪80年代，吕布兰法已盛行于欧洲，年产量最高可达60万吨左右。

19世纪末、20世纪初，化学工业中一个引人注目的事件是吕布兰法被索尔维的改进型氨—苏打法所取代。苏打在工业上，特别是在纺织工业上十分重要。但长期以来所使用的吕布兰法却很不合理，它不仅废液多，生产1吨苏打就产生2吨废液，而且耗费大量燃料，氨—苏打法则没有遗留不溶解的残渣，且所需燃料不到吕布兰法的一半。由于吕布兰法借助于相关技术的改进使应用时间延长，而氨—苏打法的实用化也需要克服一系列困难。这样两者在相持30年后，由索尔维（E. Solvay, 1838-1922）不断改进的氨—苏打法，即索尔维法，才取得胜利。

与吕布兰法相比，索尔维法节省原料和劳力，产量和质量也有明显提高，因此成为20世纪上半叶制碱工业的主流方法。尽管如此，索尔维法仍有着食盐利用率低、废渣废液污染严重等缺点。对此，我国化学家和化工专家侯德榜（1890-1974）于1939年成功地将氨—苏打法与合成氨法结合起来，创造了闻名世界的联合制碱法，即侯氏制碱法。它可同时制造纯碱与氯化铵，与索尔维法相比，食盐利用率从75%提高到95%以上，成本降低40%。把制碱技术向前推进了一大步。

除纯碱外，烧碱（苛性钠）也是近现代工业所必需的原料。早期使用苛化法，到19世纪下半叶，则以电解法为主。进入20世纪70

年代，无污染的高纯度烧碱制造法——离子交换膜法的问世，为烧碱制取技术开辟了新的局面。

化肥生产

很久以来，凭借经验人们知道施用粪肥、草木灰等可以提高农作物的产量。19世纪以后，对土壤肥力的科学研究，才迅速发展起来。英国的劳斯（J. B. Lawes, 1814– 1900）于1838年发现生产过磷酸钙肥料的方法。5年后，与吉尔伯特（J. H. Gilbert, 1817–1901）合作，开展大规模的土壤肥力田间实验。1840年，德国化学家李比希（J. von Liebig, 1803–1873）提出植物矿物质营养说，经过十年的探索，1850年李比希在他人的启发下，终于成功地把化肥从不溶性盐类，改为可溶性盐类。经过广泛的研究，人们开始认识到氮、磷、钾及微量元素对农作物的增产作用，化肥的生产随之增加。1909年，德国在合成氨工业化生产方面取得重大突破，1920年开始大量生产尿素，并于1935年起作为肥料施用。在美国，人造肥料的消费增长很快，1900年为220万吨，1950年为1800万吨，1965年达到3100万吨，全世界的情况也类似，从1900年到1965年，化肥消费大约增长15倍。20世纪中期开始，复合肥料发展迅速，在氮、磷、钾之外，又增添了锰、锌、铜等微量元素的复合肥料。70年代以后，浓缩肥料、液体肥料、长效肥料、农药肥料及专用肥料等多种新型肥料陆续问世，以满足农业生产的不同需要。

金属材料的发展

1. 炼钢技术

工业革命中后期兴起的冶金业（主要是炼铁业），在19世纪继续得到发展。19世纪中叶以后，相继出现了贝塞麦转炉和西门子—马丁平炉两项炼钢技术的重大变革，钢产量大幅增长。在这两种炼

钢法占主导地位的20世纪前50年间,世界生铁和钢锭的年产量分别增长了5倍和7倍,即大致从4000万吨到2亿吨和从2800万吨到2亿零800万吨。二战结束后,世界经济开始恢复,钢铁需求随之增加,炼钢技术向着设备大型化、连续化、高速化发展。氧吹转炉的发明和推广,使炼钢的工艺水平、生产率和钢材质量都显著提高,氧气转炉容量高达450吨,平炉冶炼因此被大批淘汰,连续铸钢技术的出现,省去了钢锭模和初轧机。不仅使成材率提高10%以上,而且生产成本降低10%,基建投资节省约30%-40%。速轧机的不断改进和广泛使用,提高了薄钢板的质量和产量。此外,电炉炼钢也有进一步发展。计算机的应用使大型化、连续化、高速化的钢铁联合生产系统井然有序地高效运转。

目前人们继续对炼钢新工艺、新技术进行不懈地探索,比如被称为两大热点的“熔融还原”和“近终形铸造”工艺。前者是把高炉、烧结和焦化综合为一道工序,后者则是将连铸和热轧合在一起。

2. 合金与有色金属

自从19世纪末锰钢问世以来,硅钢、镍钢、镍铬合金、铜镍合金、铝合金等新型合金不断出现。与此同时,铝、镁、钛等有色金属和钨、钼、钒、锂、锆等稀有金属的提炼技术的发展也很迅速,产量日益增加。比如铝和铝合金已成为仅次于钢铁的金属材料。钛合金被大量用于航天、航空工业,波音707飞机构架中钛合金用量为816公斤,到波音747飞机则用3402公斤。至今为止,对50多种稀有金属,人们都找到了它们各自的用途。

高分子材料

高分子合成材料是用化学方法制造的一种新型材料,它在许多领域已取代了金属材料和天然材料,到20世纪90年代全世界高分子材料的年产量已超过1亿吨。在 高分子合成材料中,合成橡胶、合

成塑料、合成纤维是最重要的三项。

1. 橡胶

人们利用天然橡胶有很长的历史，但是橡胶工业却直到19世纪中叶才建立起来。当时美国人固特异（C. N. Goodyear, 1800-1860）发现了天然橡胶的硫化反应，并建厂生产硫化橡胶。固特异因此成为巨富。固特异公司至今还是世界上著名的橡胶公司。最早的合成橡胶是德国化学家霍夫曼于1912年研制成功的甲基橡胶，人们曾以月产150吨的速度生产这种橡胶，由此揭开了合成橡胶工业的序幕。经过各国科学家的研究和开发，丁钠、丁苯、丁腈、顺丁、乙丙橡胶等相继投入生产，液体橡胶、粉末橡胶、热塑橡胶等许多合成橡胶的新品种也纷纷问世。到60年代合成橡胶的产量超过了天然橡胶的产量。

2. 塑料

19世纪中叶，对硝酸纤维素的研究产生了最早的塑料。美国人海厄特（J. W. Hyatt, 1837-1920）于19世纪60年代末用硝酸纤维素和樟脑制造出赛璐璐（Celluloid），用它做照相底片、梳子、眼镜架等。其缺点是安全性差，容易燃烧。1907年美国化学家贝克兰（L. H. Beakeland, 1855-1944）首次发明了合成塑料-酚醛塑料，它由苯酚和甲醛缩合而成，添入木粉、云母粉和石棉粉以提高机械强度、绝缘性能和耐热性，用于电器等多种领域。到1939年，酚醛树脂的世界年产量已有20多吨。

大规模生产和应用的塑料是聚氯乙烯。20世纪30年代投产后，发展迅速，到60年代中期之前，产量长期居于各种塑料的首位。30年代还开发出一种重要的塑料高压聚乙烯，先后在英国、美国、联邦德国和日本等地投入生产，到1954年，世界产量已达113 200吨。1953年德国化学家齐格勒（K. Ziegler, 1898-1973）发明了四氯化钛和二乙基铝的催化体系，实现了常温常压下制取聚乙烯，生产成本大为下降，许多国家都争先引进这一技术。1960年世界的聚乙烯产量就达到了约100万吨。1955年，意大利化学家纳塔（G. Natta,

1903-1979) 在齐格勒工作的基础上进一步研究, 提出了聚丙烯的制造方法。由于聚丙烯的原料丰富、低廉, 且综合性能更好, 很快就成为风行世界的塑料品种。齐格勒与纳塔因催化体系方面的卓越贡献, 共同获得1963年度的诺贝尔化学奖。

随着化工技术的发展, 塑料制造技术和工艺不断获得改进和突破, 适应不同用途的新型塑料陆续被研制出来。如ABS工程塑料(40年代末)、聚甲醛(1956年)、聚碳酸酯(1957年)、聚酰亚胺(1965年)、聚砒(1965年)、聚苯醚砒(1968年)等。1969年问世的第二代催化剂, 把催化效率提高了几百倍。1978年聚合工艺又有重大突破。此外, 对现有品种进行共聚、共混、增强、填充等改性研究, 也是制造新材料的一个途径。这些技术进步推动了塑料工业的快速发展。1970年全世界的塑料产量为3000万吨, 1980年就达到1亿吨, 至今塑料已成为工业和民用广泛应用的重要材料。

3. 化学纤维

化学纤维的出现, 使一直在纺织业占主导地位的棉、毛、麻、丝等天然纤维的比例逐渐下降。人造纤维的制取可以追溯到19世纪中叶对硝酸纤维素的研究。1855年人造纤维问世。20世纪初, 粘胶纤维是主要的化学纤维产品, 1920年年产量达到1500吨。给社会和市场造成震撼的产品是合成纤维尼龙66。它是美国杜邦公司历时十年, 耗资2000万美元, 进行大量化学基础研究之后, 于1935年研制成功的。它的原料是煤、空气和水, 为合成纤维的研制开辟了新的道路。

锦纶是另一种聚酰胺纤维, 是1939年德国研制出来的耐用品。在70年代, 锦纶和尼龙是最重要的合成纤维。以涤纶为代表的聚酯纤维后来居上, 这种热稳定性高、强度大、褶皱性好、挺括美观的产品成为70年代合成纤维中发展最快、产量最大的品种。1950年问世的人造毛(聚丙烯腈纤维)因与羊毛相近的性能和低廉的价格, 广受欢迎, 也是70年代发展较快的一种合成纤维。

此外, 为适应航空、航天及军事等部门的需要, 一些具有特殊

性能的特种合成纤维在70年代以来得到很大的发展,比如具有抗燃性能的聚酚醛交联纤维、高强度、耐高温的碳纤维,可做防弹衣的Kevlar类纤维以及中空纤维、光学纤维、离子交换纤维等。

新材料

原料丰富、性能价格比较优越的无机非金属材料,如陶瓷、玻璃、水泥、砖瓦等一直是重要材料,进入20世纪,它们有了新的发展。使用化工合成和特殊制备方法,人们制成比重小、耐磨、耐蚀、耐高温的先进陶瓷材料,如 SiC 、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 等。更引人注目的是,功能陶瓷的种类繁多,在电子工业中发挥着日益重要的作用,以至有人说“新陶瓷时代”即将到来。

新能源材料、环境材料、纳米材料、高温超导材料、生物材料等都是近年发展起来的新型材料,有着很好的应用前景。复合材料则被认为更有发展前途,把不同类型材料复合在一起,确实可以成为综合性能更好的材料。玻璃钢、金属陶瓷就是已经广为应用的复合材料。今后,材料技术将朝着功能化、复合化、智能化、可再生和环境友好的方向发展。

四、信息技术

信息技术是能够扩展人的信息器官功能的技术。它包括感测技术、通信技术、智能技术和控制技术,其中以智能技术,即计算机技术为核心。信息技术有着悠久的历史,结绳记事、穿珠计数、语言、文字、印刷术、造纸术、邮政系统、电报、电话和无线电通讯等都是影响历史进程的信息技术。进入20世纪,随着晶体管、集成电路、计算机、卫星通信、光纤通信和国际互联网的出现,使信息技术成为发展最快的技术领域,对社会、经济、科技、政治、文化等诸领域产生巨大而深远的影响。这里仅对电子元件、计算机及互联网和通信技术的发展做一概述。

电子管、晶体管与集成电路

电子器件是电子设备的基本要素，在电子技术中占有核心地位。往往是电子器件的更新导致电子技术的换代。电子管、晶体管和集成电路的发明之于计算机就是如此。

1. 电子管

世界上第一只电子管是德国的布朗(K. F. Braun, 1850-1918)于1897年发明的阴极射线管。而产生重要影响的电子管则是1904年英国的弗莱明(J. A. Fleming, 1849-1945)发明的真空二极管，有学者指出，这一发明得益于爱迪生(“爱迪生效应”)和马可尼的工作。此后不久，美国的德福雷斯特(L. de Forest, 1873-1961)把二极管发展为三极管。并于1907年获得了三极管的发明专利。这一发明，使人们掌握了对电信号的放大能力。使无线电的远距离传送成为可能。四极管、五极管的发明进一步提高了电信号的放大性能。此外，光电摄像管、磁控管、调速管和行波管等器件的发明，成为电视、雷达和微波通信的重要基础。

2. 晶体管与集成电路

1947年世界上第一只晶体管诞生于美国贝尔实验室，它特有的工作原理为电子电路集成化和信息表达数字化提供了物理基础，导致了一场信息技术革命。

晶体管的发明是贝尔实验室一项广泛的半导体物理研究计划的一部分，继1945年成立了固体物理学、电子动力学和物理电子学等三个研究小组之后，1946年又成立了以肖克莱(W. Schokley, 1910-)为首，包括巴丁(J. Bardeen, 1908-)、布拉顿(W. H. Brattain, 1902-)等人在内的专门对硅和锗进行研究的小组。经过近两年的共同努力，于1947年12月23日成功地用半导体锗制成双极点接触型晶体管。1950年肖克莱等人又研制成单晶锗N-P-N结晶体三极管，并以此取代了双极点接触型晶体管。巴丁、布拉顿和肖克莱由于这方面的贡献，共同分享了1956年度诺贝尔物理学奖。

晶体管出现不久，晶体管电视机（1950年）和晶体管计算机（1956年）相继问世。与此同时，人们开始探索电子电路集成化的途径。1952年英国人达默（G. w. A. Dummer）提出集成电路的设计，1958和1959年美国人基尔比（J. Kilby, 1923-）和诺伊斯（R. Noyce, 1927-）各自独立制成了最早的集成电路。40年来，集成电路经历了从小规模集成，到中规模、大规模、超大规模，并正向极大规模集成发展。而且它的发展速度基本符合摩尔定律，即集成电路的集成度每18个月增长一倍，同时成本减半。这种变化带动了信息技术和信息产业的飞速发展。

计算机

计算机的发明是划时代的伟大事件，它不仅增强了人的智力，同时也更新了增强体力（如数控机床、机器人）和感官能力（如CT、全球卫星监测系统）的方式，使人类认识世界、改造世界的能力上了一个新的台阶。计算机技术涉及范围广泛，不仅包括基础理论、体系结构、硬件、软件、网络技术，还包括神经计算、人工智能、知识工程、计算机辅助设计、信息存储、人机交互、计算机可靠性和信息安全等。计算机的发展经历了机械计算机、机电计算机、电子计算机和新一代计算机等几个阶段。

1. 机械计算机

最早的计算工具是人的双手，10进制与十只手指的关系是不言而喻的，对于古人来说当用手指计数不够时，有时还会使用脚趾，20进制也曾经存在过。石子当然也是最早的一种计算工具，英语“计算”一词（calculate）就来源于罗马词汇“卵石”。最早的算盘就是排列有一些卵石的板框。筹算是以“筹”为主要计算工具的一种计算方法，它起源于中国的春秋战国之前，成熟于春秋战国时期。筹，就是一些小竹木棍，用横、纵的各种组合可以表示1-9个数，并可以进行四则运算。中国人还发明了竹条和滑珠构成的

算盘，它在很长时期内都是先进的计算工具，并且在中国沿用至今。

进入17世纪，航海活动日益频繁，人们迫切需要高效的新型计算工具。在这种背景下，计算尺被发明出来。随后出现了一系列机械计算器。现存最有名的早期机械式加法器，是由法国数学家帕斯卡于1642年发明的一种十进制加法器，它由与钟表类似的齿轮传动机构组成。其原理对后来的计算机的研制产生了深远的影响。受帕斯卡计算器的启发，德国数学家莱布尼兹于1673年制成了世界上第一台手动的可进行完整四则运算的通用计算器，并且还提出了二进制算术运算法则。但莱布尼兹认为中国人发明的八卦是世界上最早的二进制。或许因为这个缘故，据说他把自己的计算器的复制品赠送给了康熙皇帝。

至此这些机械计算器，还不会自动运算，也没有存储程序，只是计算机的萌芽。在计算机发展史上首次做出划时代意义工作的是英国数学家巴贝奇（C. Babbage, 1792-1871）。受到利用穿孔卡片来自动控制提线的提花机工作原理的启发，巴贝奇在1834到1835年间设计出了“分析机”，其设计思想几乎考虑到了现代计算机的全部基本功能，基本原理与现代通用数字计算机十分接近。此外，巴贝奇还提出一些现代程序设计的重要思想，例如将数据存贮在外存贮器内等。由于巴贝奇的设计思想太超前，也太复杂，而没有得到社会的理解和支持，终因财力等条件不足而告失败。

此外，模拟机的研制也是计算机发展过程中的一个重要方面，它是直接用物理过程来模拟计算，但由于模拟机在通用性和精确度方面的限制，使其没有发展起来。

真正产生社会影响的计算机是美国工程师霍勒里斯（H. Hollerith, 1860-1929）于1889年发明的电动制表机，它大大缩短了人口普查的统计时间。美国1880年的人口普查用了七年半的时间才得到最终结果，而1890年的人口普查，因使用了电动制表机，使统计工作在当年12月就全部完成了，朝野为之震惊，人们开

始感受到计算机的威力。这种计算机在20世纪上半叶得到较为广泛的应用。1911年霍勒里斯与他人合作创办了计算机-制表-记录公司, 13年后, 霍勒里斯已经退休了, 公司改名为美国国际商业机器公司。这就是当今世界上头号计算机制造商IBM。

2. 机电计算机

随着电工技术的发展, 特别是电话中电磁继电器的应用, 启发人们开始研制新型计算机。德国工程师朱赛 (K. Zuse, 1910-) 于1941年率先研制成功了全自动继电器计算机Z3, 它已具有浮点计数、二进制运算、数字存储地址的指令形式等现代计算机的特征。几乎在朱赛研究的同时, 美国哈佛大学的艾肯 (H. AiKen, 1900-1973) 也进行了这方面的探索。他在四位工程师的协助下于1944年制成了“自动程序控制计算机”, 即哈佛Mark I, 并在哈佛投入运行。两年后, 艾肯又领导研制了全部使用继电器的计算机哈佛Mark II。另外, 研制继电器计算机的还有美国贝尔实验室的科学家, 他们从40年代初开始研制Model系列的机电计算机, 于1946年制成通用型机电计算机Model5。

机电计算机与机械计算机相比, 运算速度快了几十倍, 而且借助于程序使计算过程完全自动化, 实现了一百年前巴贝奇的设想。尽管机电计算机的计算性能有了较大改善, 但是继电器的开关性能限制了计算机整体运算速度的进一步提高, 加上电子计算机的出现, 机电计算机问世不久就悄然退场了。

3. 电子计算机

现在一般认为世界上第一台电子计算机, 是美国宾夕法尼亚大学莫尔学院的物理学家莫希利 (J. W. Mauchly, 1907-1980) 和工程师埃克特 (J. P. Eckert, 1919-) 领导开发的电子数字积分计算机 (Electronic Numerical Integrator and Calculator) 即ENIAC。它的研制是为了满足军事上的需要。为尽快编制美国陆军急需的炮击表, 莫希利于1942年8月提出一份题为“高速电子管计算装置的使用”的报告, 几经周折, 方案终于在1943年4月得到陆

军的批准。2个月后ENIAC的试制工作正式启动，于1945年底完成，次年2月为它举行了揭幕典礼。ENIAC占地167平方米，重30吨，耗电150千瓦。机器中大约有18 800只电子管、1500个继电器、70 000只电阻、6000多个开关，以及其他各种电气元件。当然运算速度也是惊人的，比当时已有的计算机快1000倍。

但是ENIAC可靠性差，电子管时常烧坏，而且它所采用的十进制和外插型程序也与现代主流计算机结构有明显差别，因此ENIAC作为世界上第一台电子计算机是有争议的。

有人认为1943年在英国投入使用的电子式密码破译机Colossus（巨人）应该称为世界第一台电子计算机。图林参与了它的研制工作，它使用1500只电子管，并且采用二进制运算电路，能够处理1万亿个可能的密码组合。还有人认为1949年研制成功的EDSAC才是世界上第一台电子计算机。该机是英国剑桥大学的科学家依据冯·诺伊曼提出的“离散变量自动电子计算机”

（Electronic Discrete Variable Automatic Computer，简称EDVAC）方案研制而成的，这个方案由运算器、控制器、存储器、输入和输出等五部分组成，是现代电子计算机设计的基础，按此方案制成的计算机通称为冯·诺伊曼机。由于种种原因EDVAC本身却直到1952年才研制完成。

显然，哪台计算机是世界第一完全取决于对这个世界第一是如何定义的，定义不同，结果就不一样。重要的是，Colossus、ENIAC、EDSAC、EDVAC等的相继问世，使计算机发展翻开了新的篇章。考察从算盘到电子计算机的发展历程，使我们看到各种知识之间相互的借鉴与融合，看到社会需要对技术发展的推动作用。

自从第一台电子计算机ENIAC问世以来，计算机发展到今天已经历了第一代（1946年-1959年）电子管计算机，第二代（1959年-1964年）晶体管计算机，第三代（1964年-70年代初）集成电路计算机，第四代（70年代初-）大规模和超大规模集成电路计算机。80年代以来人们开始对人工智能、生物和集成光路等新一代计算机

进行探索。

1946年, ENIAC问世以及冯·诺伊曼的计算机设计方案的诞生, 标志着第一代计算机的开始。其特点是用电子管作为逻辑元件, 用磁鼓或汞延迟线作为主存储器, 主要用于科学计算, 运算速度一般是每秒几千到几万次, 存储器容量为几K。起初是用一条条机器指令编写程序, 后采用汇编语言编写。到1954年出现了能在不同机器上应用的高级语言。从那时起, 人们开始使用“硬件”和“软件”这两个术语。

在硬件当中, 存储器是计算机中的一个关键。1950年, 美籍华裔物理学家王安(1920-1989)提出了利用磁性材料制造存储器的设想, 1953年, 麻省理工学院和美国无线电公司同时发明了磁芯存储器, 它的可靠性、容量和速度都明显超过当时其他存储器, 从而显著提高了电子计算机的整体性能。直到70年代集成电路存储器出现之前, 磁芯一直被用作几乎所有计算机的主存储器。

有代表性的第一代计算机有1951年交付使用的UNIVAC (Universal Automatic Computer) I, 这是世界上第一台通用自动计算机, 它由ENIAC的主设计人莫希利和埃克特设计的。这种计算机在美国1950年全国人口普查的统计当中和1952年的美国总统选举的预测中大出风头, 在美国引起很大反响。美国国家标准局(NBS)生产的SWAC和SEAC两种计算机也是当时重要的计算机。1955年研制成功的IBM650到50年代末期, 销售了数万台。这时美国已有十几家电子计算机公司, 计算机开始服务于社会。

计算机逻辑元件的更新换代直接推动了计算机技术的进步, 晶体管的发明并取代电子管成为计算机的逻辑元件使计算机从第一代发展到第二代。晶体管是美国贝尔实验室于1947年12月23日研制成功的, 随后又得到不断地改进和完善。与电子管相比, 晶体管具有体积小、性能稳定可靠、价格低廉、转换速度快等特点。晶体管问世之后, 人们开始了应用晶体管的尝试。美国电气实验站于1956年率先制成了世界上最早的晶体管计算机。这是一台小型的军用计

算机。1959年菲尔克公司研制成功第一台大型通用晶体管计算机，标志着计算机进入了第二代。第二代计算机使用晶体管逻辑元件、快速磁心存储器和监控程序，运算速度从每秒几千次提高到上百万次，主存储器容量从几千字节提高到十万字节。FORTRAN, ALGOL, LOBOL等新的计算机程序设计语言的创编和应用，提高了计算机运行效率和管理水平。比如被誉为第二代计算机中的主导产品的IBM7000系列计算机采用了FORTRAN监控程序，作为计算机操作系统的雏形，它已经可以高效地进行连续批处理。第二代计算机不仅用于科技计算，而且开始广泛应用于事务处理领域，向着计算机综合应用方向发展。

集成电路的出现和应用使计算机的发展产生了一个飞跃。通常人们把1964年，IBM公司研制成功的集成电路计算机IBM360看做是计算机进入第三代的标志。IBM360是计算机发展史上获得最大成功的通用计算机系列，同时也是历史上民间企业规模最大的一次投资开发，它的研制与开发经费多达50亿美元，是美国研制第一颗原子弹的曼哈顿计划（20亿美元）的2.5倍。IBM360的成功有力地推动了计算机技术和计算机行业的发展。

第三代计算机的基本特征是在逻辑元件上采用中小规模的集成电路，主存储器仍以磁芯存储器为主，在体系结构上，具有系列兼容的特点，例如360系列的十几种机型几乎全部互相兼容。外部设备的种类增多发展迅速，特别是计算机与通信线路结合，出现了计算机网络。人们开始能够利用终端在办公室或家中远距离使用计算机。第三代计算机的运算速度和存储容量有了很大提高，分别达到每秒千万次和几百K字。而且价格性能比也有大幅度下降。第三代计算机的另一个特征是操作系统的应用，用户通过操作系统来使用计算机资源。这引起了对软件的进一步需求。BASIC、APL、SNOBOL、PL / 1、SIMVLA67和ALGOL68等适合于不同用途的计算机语言的出现拓展了计算机应用范围和水平。

继IBM360之后，1970年IBM公司又推出IBM370系列，它采取虚

拟存储结构并在该系列后期产品中用体积更小、速度更快、功耗更低、价格更便宜的大规模集成电路存储器，来代替磁芯存储器。

中小型机的发展是第三代计算机的另一个重要内容。它维护简单、可靠性高，广泛用于商业管理、过程控制、数据处理、教育和一般科学计算。美国 DEC公司于1965年制造的PDP-8型机是小型机中的代表作。到1970年美国小型机的生产就超过1万台，生产厂商达到六七十家。

第四代计算机用大规模集成电路和超大规模集成电路作为计算机的逻辑元件和存储器，在体系结构上具有虚拟机器、网络管理、数据库管理、多媒体信息综合处理等功能，采用面向终端用户的综合分布式处理方式，重视计算机系统的可靠性、可用性、可维修性、完整性和安全性。与第三代相比，第四代计算机还有两个突出的特点，即计算机向微型化和巨型化两个方向发展。

微型计算机的发展是计算机发展史上的一场革命。1971年英特尔公司的费金（F. Faggin, 1941-）领导的研发小组实现了该公司霍夫（M. E. Hoff, 1937-）提出的设想，生产出世界上第一台微处理器-4004四位微处理器。这只芯片上的晶体管数目约为两千多个，这是一次真正的历史性突破。这种把运算器与控制器做在一起的微处理器功能强、价格低，到1980年，全世界已有超过一亿台的微处理器，它们除作为计算机的核心之外，还嵌入到数控机床、机器人、汽车、电视、精密仪表、照相机、洗衣机等许多产品中。

1977年，美国苹果公司、Commodore公司和 Radio Shack公司开始销售个人计算机（PC），其售价为几千美元，而功能比第一代计算机还要强大。到1980年全世界已生产了50万台，到1998年微型计算机已超过亿台。90年代以来，国际互联网等计算机网络的兴起，更加推动了个人计算机的普及和应用。

运算速度最快、存储容量最大的巨型机代表着计算机的最高水平，它的发展历来备受关注。1976年，第一台获得成功的亿次巨型机Cray-1型计算机问世，它是由被誉为巨型机之父的美国人克雷

(S. Cray, 1929-1990)设计的。随着集成电路集成度的提高和计算机技术的发展,计算机的运算速度不断提高,现在已出现每秒万亿次计算机,IBM公司制造出了运算速度达到每秒3.9万亿次的计算机。这种万亿次计算机为极端条件下物理过程科学研究创造了条件。我国对巨型机的研制也很重视,1982年推出亿次超级计算机“银河1号”,1992年“银河2号”达到每秒10亿次。1995年曙光1000大规模并行机问世,运算速度每秒25亿次,1998年研制成功的曙光2000I型服务器达到每秒200亿次。

计算机发展进入第四代之后,软件发展迅速。从计算机系统成本来看,50年代中期,软件占总成本的20%以下,到70年代后期上升到50%以上。为克服复杂程度高、研制周期长、成本上涨和可靠性难于保证的所谓“软件危机”,70年代中期,软件工程应运而生。软件工程是借用工业工程的概念、方法和体系来研究软件,它既用于研究开发,又必须保证一般应用的可靠性和性能/价格比,提供说明书、设计、实施、调试、维护等环节的服务。软件工程兴起的二十多年间,软件开发和维护发生了一系列革新,显著改进了软件质量,提高了计算机整体性能。但是,作为信息时代的核心技术,软件系统还有不少问题亟待解决。目前人们正在对人机界面、信息智能处理、信息安全和软件的可生产性等问题进行探索。

新一代计算机泛指第四代计算机之后的新型计算机。日本政府推出的第五代计算机十年计划(1982-1991),可以看做是这方面最早的一项重要努力,与前四代计算机不同,这种计算机以人工智能为基础,采用非诺伊曼结构。虽然日本的第五代计算机计划没有实现,但是在知识处理系统、人工智能、并行处理技术、非冯诺伊曼结构、智能接口及软件工程等方面作出了有益的尝试。

当前计算机的主要发展方向是智能化、网络化和人性化,主要研究领域是精简指令系统计算机、大规模并行处理技术、多媒体技术(包括虚拟现实技术)、面向对象技术、网络技术、知识处理系统、信息安全及和谐的人机环境等。超大规模集成电路和极大规模

集成电路将在未来一段时间内仍作为计算机的关键元件。软件将继续得到优先发展。以有机体分子来取代半导体材料的生物集成块构成的生物计算机和以集成光路代替集成电路构成的光计算机等是人们目前正在研制的以新型材料为基础的新一代计算机，它们的研制成功将成为计算机发展的一次新的革命。

国际互联网：全球最大的信息资源利用系统

国际互联网（Internet）是目前世界上用户最多、发展最快、信息资源丰富、信息交流与利用极为便捷的全球计算机网络，它被看做是信息高速公路的雏形或前身。起源于1969年成立的阿帕网（ARPANET，ARPA是美国国防部高级研究规划署的简称）的国际互联网，是在一系列的重大技术突破的基础上发展起来的。这些技术突破包括：分布式网络、分组交换技术与中介信息处理器，传输控制协议（TCP）和网络间协议（IP）以及超文本标识语言（HTML）和万维网（WWW）及浏览器等。国际互联网可以提供电子邮件、远程登录、文件传送、WWW浏览、新闻组讨论、客户机 / 服务器和IP电话等多种服务。作为全球最大的信息资源利用系统，国际互联网还在不断地发展壮大。正如它的缔造者们所指出的那样：Internet的关键概念在于，它不是为某一种需求设计的，而是一种可以接受任何新需求的总的基础结构。国际互联网自诞生以来，发展异常迅速。

卫星通信与光纤通信

1. 卫星通信

1957年10月4日，苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星，揭开了空间时代的序幕。1964年8月19日，美国发射了第一颗地球同步静止轨道通讯卫星，标志着卫星通讯时代的到来。卫星通信的发

展经历了从无源到有源、从非同步到同步的过程，卫星通信的优势逐渐明显。与微波中继通信、对流层散射通信相比，卫星通信具有中继站少、通信质量高、射频带宽、通信容量大、覆盖地区广、通信灵活、性能可靠、系统运转率高、几乎不受气象、气候变化的影响，且价格低廉。尽管它还有寿命较短、信号微弱与延迟等不足之处，但从总体上看卫星通信的优越性是很突出的。1998年启用的由66颗卫星组成的铱星通信系统使地球上任何地点之间的联络易如反掌，虽然后来因财力和维护方面的困难而告夭折，但仍不失为卫星通信史上的一次有意义的尝试。

2. 光纤通信

1964年，时任英国标准电信实验室工作的华人工程师高锟（C. K. Kao, 1933-）提出在电话网络中以光代替电流，以玻璃纤维代替导线。1966年，高锟等人对光信号在玻璃纤维中的损耗问题进行了研究，发现光信号的损失是玻璃中含有的不良杂质所致。他们预测可以造出能使输入光的一半传输150米远的纤维。提出光纤可以用作通信媒介这一观点。1970年，美国康宁公司研制出了世界上第一根较低损耗的光纤，随之光纤技术迅速发展。光导纤维的出现和激光器的问世为光纤通信创造了条件。1973-1979年间，美国贝尔实验室在光纤通信的各种器件和通信系统的研制上取得了一系列重大成果。1976年，首次光纤通信在美国亚特兰大城试验成功。1979年，欧洲第一条光缆线路在西德建成。随后，光纤通信逐渐在社会上推广。光纤通信以其超大的通信容量、体积小、重量轻、寿命长、抗干扰性强、保密性好等特点，成为通信和网络建设的重要基础，并得到迅速发展，80年代以后，光纤通信开始被社会广泛接受。从1970年至今，光纤通信技术经历了五代的发展，通信容量增加了好几个数量级。毋庸置疑，随着网络时代的到来，卫星与光纤通信将发挥越来越重要的作用。

信息技术日新月异，其发展前景诱人遐想和憧憬，但真正的预测是十分困难的，以至不少大师在这里栽了跟头。例如，1943年，

IBM公司的董事长托马斯·沃森 (T. J. Watson, 1894-1956) 预测整个国家只需要5台计算机就足够了；图林在1950年相信50年后计算机在对问题的反应上几乎和人一样；1980年，贝尔实验室相信UNIX将会变成世界上最具优势的操作系统；甚至像比尔·盖茨这样精明的商人和软件专家，也曾在计算机发展趋势的判断上犯过错误。尽管如此，我们还是可以参考有关预测文献，大致勾画一下在可预见的未来信息技术发展的趋势。

晶体管的发明已有50余年的历史，至今这种技术已能在几个平方厘米的单个硅芯片上装有多达10亿只晶体管。1998年下半年，美国德州仪器公司 (TI) 宣布已掌握了0.07微米的互外金属氯化物半导体 (CMOS) 工艺技术，即可在指甲盖大小的芯片上制造出4亿只晶体管，从而朝着把整个系统做在一块芯片上的目标又前进了一步。这种0.07微米技术制造的产品速度更快、集成度更高、重量更轻，同时也更省电、价格更低，适用于数字信号处理系统。在减小半导体器件的过程中，会遇到诸如光刻设备、连线横截面电阻升高以及破坏绝缘作用的量子隧道效应等各种障碍。目前认为硅技术的极限是0.04微米。贝尔实验室总裁史德杨 (Dan Stanzione) 指出，问题并非是人们能否制造一个器件，而是能否以很高的成品率及合理的成本来制造10亿个器件，在今后15年里，在我们向这些基本极限攀登的进程中，必定会面临很多挑战。

各种信息形式的数字化是20世纪最引人注目的成就，随着因特网等各种计算机网络的发展和完善，所有数字化的信息都将被网络化和索引化，并且几乎所有人在几乎任何地方都可以不受时间限制地上网检索和利用这些信息。在不久的将来，随着计算机上网的普及化，网络计算机 (NC) 将成为人们主要处理信息的工具。计算机将通过网络与包括便携计算机和移动电话在内的各种通讯设备联结在一起，最大限度地把人与人联系起来。各国乃至全球的信息基础结构建成，实现社会网络化，这将对人类生存与发展产生极其深刻的影响，它不仅改变人们的生活、学习、工作和娱乐等的方式和

习惯，而且改变科技、经济、政治、文化等社会各领域的运作方式和发展模式，网络化与全球化将重组世界格局。

有专家指出，如果把计算机时代划分为三个时期，首先是大型机时期，计算机数量远比人数为少；且非常昂贵；其次是个人的计算机时期，计算机数量可以多得人手一台，接下来是正在向我们走来的无处不在的计算机时期，计算机的数目将远多于人的数目，计算机将变成许多事物的组成部分。据估计在五年之内将会出现一种新兴的微系统工业，它使许多产品和事物与计算机相结合，使之智能化。伴随语音识别和语音合成技术的发展，计算机的听、说能力将逐步提高，与计算机自由交谈的梦想有望实现。更令人期待的进展无疑还在人工智能领域。机器学习的障碍一旦突破，计算机和机器人不仅拥有智能，而且拥有了增长智能的智能，人类面临的挑战将是如何建立和谐的人机环境，与无处不在的计算机和智能化事物和谐相处，而不是被其所累，甚至成为机器的奴隶。人应该永远是机器的主人。

漫游仙境，这种令人神往的事情过去只有在小说和电影中实现，虚拟技术的出现，给人营造一个虚拟的现实环境，可以产生“身临其境”的沉浸感，从游戏、旅游、人际交往和各种接触，到医疗、办公、科研、教育，几乎所有的现实活动和场景都可以虚拟实现。随着技术的提高和完善，逼真程度会越来越高。这将是人类生存方式的一次史无前例的巨大变革。

总之，信息技术的发展将使微电子与光电子结合，多媒体与宽带网络技术结合，计算机与网络通信结合，超级并行计算机与虚拟现实结合，智能计算与认知、脑科学结合，日益显示出其应用领域的广泛性和多样性。

五、生物技术

生物技术有着悠久的历史。很久以前，人们就开始利用发酵来制造食物了。公元前2500年以前，埃及人就能酿造麦酒。在古罗马时代，葡萄酒已盛行于欧洲。至迟在公元前1000年，中国人已熟练

地掌握了发酵酿酒法,他们发明了高超的酒曲酿酒技术,复式发酵,提高了酿酒效率并流传到东亚地区,后来麦曲发酵技术又推广到制醋和作酱。在传统生物技术中,人们还不了解微生物与发酵的关系,凭借祖传技艺和实践经验生产了酒、醋、酱、面包、乳酪等来满足人们饮食需要。19世纪中期,法国科学家巴斯德发现了发酵现象与微生物之间的关系,以及微生物的一些特性。并且开创了工业微生物学等,引导后人利用微生物去创造财富。促成了生物技术从凭借经验到依据科学的转变。

现代生物技术更直接的起源是现代遗传学和分子生物学。1865年,奥地利牧师孟德尔提出了“分离定律”和“遗传因子”的概念,在埋没了35年之后,被再度发现,备受重视。随着遗传研究的深入,“基因”、“等位基因”、“表现型”等更清晰的概念相继问世。美胚胎学家摩尔根,于20世纪20、30年代提出完整的基因理论,确认了基因不“只是赋予物质含义的一种符号”,而且是物质的遗传单位,是排列在染色体上的念珠状的核蛋白分子的颗粒。40年代,美国的艾弗里首次用实验证明了DNA是遗传物质。1953年,DNA双螺旋结构模型问世,沃森和克里克所取得的这一杰出成就标志着分子生物学诞生。到60年代末遗传密码也被解开,64种遗传密码的含义全部得到确定,人们对遗传物质和遗传机制的认识有了质的飞跃。在这种条件下,现代生物技术正式登场了。

“生物技术”一词的英文是“Biological technology”的缩写“Biotechnology”,也译为“生物工程”。按照1982年国际经济合作和发展组织(OECD)的一个专家组的定义,生物技术是利用生物体系,应用先进的生物学和工程技术,加工或不加工底物原料,以提供所需的各种产品,或达到某种目的的一门新型的跨学科技术。一般认为,生物技术包括基因工程、细胞工程、酶工程、发酵工程以及蛋白质工程、胚胎工程、生化工程、糖工程和仿生技术、生物电子技术等,在此我们主要介绍基因工程、细胞工程、酶工程、发酵工程等的发展历程。

基因工程

基因工程是生物技术的核心技术，主要包括DNA重组技术。它可以按照要求对DNA进行人工“剪切”、“拼接”和“组合”，然后把重组的DNA转入受体进行复制和传代，并使外来基因高效表达，产生人类所需要的物质，创造性地利用生物资源。重新设计和生产生命的技术将对人类社会产生极其深远和难以预测的影响，如何安全、合理地发展和应用这一技术，是我们面临的巨大挑战。

基因工程是建立在一组相关技术之上的。这些技术包括60年代初发展起来的高速离心和电泳技术，60、70年代先后发现和完善的限制性核酸内切酶、连接酶、逆转录酶和修补工具酶等，它们提供了DNA的剪切和连接的手段，使基因重组成为可能。其中限制性核酸内切酶的发现具有特别重要的意义。

1968年，瑞士人阿尔伯（W. Arber，1929-）分离出脱氧核酸限制内切酶，尽管它还不能稳定、准确地进行剪切，但实现了从无到有的重大突破，因此人们将其列为内切酶Ⅰ型。2年后，美国的史密斯（H. O. Smith，1931-）对沙门氏菌P22噬菌体DNA引入到流感嗜血杆菌Rd8细胞里的情况进行了研究，并提纯、精制了限制性核酸内切酶Ⅱ型，从此有了实用的剪切DNA的手术刀。华盛顿大学的内森斯（D. Nathans，1928-）在1971-1972年首次把限制性核酸内切酶用于病毒基因结构的分析，绘出第一个脱氧核酸的物理图谱和核糖核酸的转录图谱。这些开创性的工作，使这三位科学家获得了1978年诺贝尔医学和生理奖。

有了DNA剪切和连接的手段，并不能实现DNA体外重组，因为还需要具有特殊功能的载体，以便和目的基因DNA的片断拼接后植入宿主细胞。1973年，斯坦福大学的科恩（S. N. Cohen，1935-）等将抗四环素质粒和抗链霉素质粒，进行拼接，组成嵌合质粒。将其导入大肠杆菌后能表达双亲质粒的遗传信息。这是DNA重组技术的

首例成功实验。次年，科恩和旧金山大学的博耶（H. W. Boyer，1936-）等人用大肠杆菌质粒作为载体与非洲爪蛙rRNA的结构基因拼接，送入大肠杆菌后，得到爪蛙rRNA，实现了真核基因在原核生物中的复制与表达。

在此基础上，博耶于1976年成功地运用 DNA重组技术制成人的生长激素，1983年，人的生长激素产品进入市场。此前，生长激素只能从死人脑子里提取，而治疗一个侏儒症儿童一年的药量，就需要50个人脑。1976年由博耶加盟的Genentech 公司成立，这是继成立于1971年的Cetus公司之后的世界第二家基因工程公司，从此引发了70年代末、80年代初的基因工程工业化的热潮。到1981年美国就成立了二百多家生物工程公司。

基因工程应用广泛，包括植物基因工程、动物基因工程等，涉及农业、制药、食品、化工、能源、环境等众多领域。例如，自1983年首次获得转基因烟草和马铃薯以来，世界上已获得百种以上的转基因植物。抗虫害、抗病毒的农作物已进入实用阶段。90年代中期，抗虫棉花、抗除锈剂大豆等投放市场。转基因动物的研究发展很快，转基因动物技术可以按照要求使动物的生长或快或慢，或大或小，哺乳动物的乳汁中可含有特定的药物等等。1983年，第一只转基因巨鼠问世，重量为普通鼠的五倍。中国科学院的科学家在80年代也研制成功“超级兔”和“超级鲤鱼”等转基因动物。利用DNA重组技术进行疾病防治的研究也取得重大进展，多种新型生物技术药物和疫苗面世，基因疗法在不远的将来可望在癌症、艾滋病等绝症的预防与治疗方面有所突破。人们预测随着生物技术的发展，农业与医药领域将发生一场革命。

细胞工程

细胞工程是大规模培养、繁殖生物组织和细胞，或按照人们的

意愿在细胞水平上改变细胞的生物学特性，以获得良种或创造新种的生物技术。它包括动植物的细胞和组织培养技术、细胞融合技术、染色体工程技术和细胞器移植技术。细胞工程应用广泛，经济效益显著，是发展迅速的新兴领域。

细胞工程最早的应用是在植物细胞和组织的培养方面。1920年，德国学者提出细胞是全能的，即高等植物体的细胞可以发育成完整个体。这一观点于1956年被美国学者证实，他们用野生胡萝卜的单个细胞培养出了完整的植株。此后植物组织和细胞培养技术得到重视和发展。1960年，法国的莫雷尔（Morel）首创花卉微繁殖技术，在兰花上取得成功。目前，已建立了数以百计的花卉快速繁殖厂，实现了名贵花卉生产的工业化。20世纪60年代末期，植物细胞发酵培养技术趋于成熟，人们可以像培养微生物那样，在发酵罐中大量、低成本地生产人参等贵重药材及香精和调味品等。此外，柑橘等的无病毒植株养育成功，标志着无病毒植物的培养进入实用阶段，开辟了增产的又一新途径。

细胞融合，又称细胞杂交，是利用生物学、化学或物理学方法，将两种不同种类的细胞互相融合，形成一个新细胞的技术。1957年，日本的冈田善雄把仙台病毒混在两种动物细胞中，观察到异种细胞之间的融合。1960年，法国古斯塔夫-露西研究所的科学家在进行两种小鼠肿瘤细胞的培养实验时，发现了细胞融合现象，后来这种融合扩大到其他非肿瘤小鼠细胞之间。融合后的细胞具有与亲本细胞不同的形态特征和生长方式。60年代，细胞融合技术逐渐发展起来，它对核质关系、基因的作用等基础研究和植物、微生物的改良、基因治疗及疾病防治等应用研究来说意义重大。特别是柯勒（G. J. F. Kohler, 1927-）和米尔斯坦（G. Milstein, 1927-）于1975年，成功地将小鼠骨髓瘤与取自经过免疫可抗绵羊红细胞的小鼠脾脏的淋巴细胞融合，获得一个杂交瘤，并将杂交瘤技术用于生产单克隆抗体。这一成就被认为是1970-1980年，这十年间最重要的发明之一。柯勒和米尔斯坦因此而获得1984年诺贝尔医学和生

理学奖。单克隆抗体广泛用于癌症等疾病诊治、预防和生物医学研究及发酵产物的分离提纯。是细胞融合方面发展最快的领域。

胚胎移植技术的发展，可追溯到19世纪末英国学者进行的安哥拉兔的早期胚胎移植实验。20世纪50年代牛的胚胎移植获得成功，胚胎移植技术开始迅速发展起来，应用范围从小型实验动物，到大型家畜，再扩展到人。1978年世界上首例试管婴儿在英国诞生，1985年我国也诞生了第一个试管婴儿。这项技术的出现为不育症患者带来了福音。

随着显微注射技术的发展，细胞器移植有了新的突破。70年代中国科学家童第周（1902-1979）等通过把鲫、鲤鱼的mRNA分别注入金鱼的受精卵中，使之发育成鲤金鱼和鲫金鱼，证明了mRNA也是遗传物质的载体。细胞器移植技术乃至整个生物技术中最引人注目的要算是克隆羊多莉的出现，这是英国爱丁堡罗斯林研究所的威尔穆特（Ian Wilmut，1944-）等科学家于1996年运用细胞核移植技术生产的世界第一只用体细胞克隆成功的动物。它被世界著名杂志《科学》评为1997年十大科学成就之首。同时它也引起了克隆震撼，在世界范围内掀起了一场关于克隆技术和克隆人的大讨论。国际科学界一致表示反对把这一技术应用到人类身上。世界卫生组织明确表示禁止利用“克隆选择”进行人类无性繁殖试验。许多国家也纷纷立法禁止克隆人的研究。克隆羊的出现再一次唤起人们对科学技术负面影响的强烈关注和不安。如何使科学造福人类而非遗害人类，是我们面临的巨大挑战。

酶工程及蛋白质工程

酶工程是在一定的生物反应装置中，利用酶的催化作用，将相应的原料转化为所需物质的技术。主要包括固定化酶技术、固定化细胞技术及酶反应器的研究和设计。

酶是由活细胞产生的具有催化功能的蛋白质。其催化效率极

高，在常温常压下催化效率比一般催化剂高 10^7 — 10^{13} 倍，并且还具有专一性。20世纪60年代初，以色列学者成功地装配了世界上第一个固定化酶，并发现固定化可以提高某些酶的稳定性，这为酶的工业应用提供了可能。随后，日本率先实现了酶在工业中的应用。70年代英国学者钱恩（E. B. Chain, 1906–1979）等通过研究溶菌酶，探明了酶的结构与作用机理，从理论上为酶工程的发展提供了条件。

到80年代，酶的生产已具规模。以1980年为例，全世界生产了530吨蛋白酶、350吨葡糖淀粉酶、320吨 α -淀粉酶和70吨葡糖异构酶。酶工程的应用已遍及食品业、制药业、轻工业、能源、环境保护、化学化工和基因工程等诸多领域，像加酶洗衣粉和嫩肉粉这样的日用品也是酶工程的产物。

近年来，在固定化技术基础上研制出的生物传感器发展迅速，作为一种测试分析工具广泛用于化学分析、临床诊断、环境监测、发酵工程控制等领域。生物反应器也在酶工程的开发过程中发展起来，目前人类已拥有固定化酶和固定化细胞反应器、活细胞反应器、游离酶反应器、细胞培养装置、生物污水处理装置等。

蛋白质工程是根据需要对天然蛋白质的基因进行改造，生产出新的、自然界不存在的优质蛋白质。1983年，蛋白质工程作为一个独立分支学科出现后，日益受到重视，被誉为第二代基因工程。

发酵工程

发酵工程又称微生物工程，它是在一定条件下，对微生物进行培养，利用微生物或它的某种独特功能，生产人类所需产品的技术。现代发酵工业始于青霉素的生产。20世纪40年代青霉素被提炼出来，继而采用工业化发酵方法制备青霉素。从此开始大规模利用发酵工程生产抗生素。50年代谷氨酸发酵成功，氨基酸、核苷酸发酵也加入了发酵工业的行列。到70年代，随着基因工程和固定化技术

的引入，发酵工程的发展进入一个新阶段。如今，发酵工程不仅能利用微生物，而且还可以利用动、植物细胞进行发酵生产，其产品种类繁多。除医药之外，还广泛应用于食品、能源、冶金、采矿、化工、环保等领域，前景广阔。

生物技术的发展将对人类社会产生深刻的影响。目前正在实施的人类基因组计划可以使我们明确地认识到这一点。该计划的完成能使遗传性疾病的治疗和有关的药物生产更加有的放矢，大大增加了人类在21世纪战胜癌症等绝症的信心和希望。

历史表明，生物技术的进步，一方面体现在基因工程、细胞工程、酶工程、蛋白质工程和发酵工程等自成体系地向纵深发展，另一方面也表现为它们之间交叉渗透、相互结合。正是这种纵横交织的运动，使生物技术及其产品覆盖到越来越多的领域，影响日益增加，因此有人断言21世纪是生物技术的世纪。

六、空间技术

自古以来，人类就有上天飞行的愿望。1783年首次气球载人飞行成功，由此揭开了人类空间飞行和探索的序幕。航空飞行大致经历了三个阶段：1. 从气球、飞艇到动力飞行；2. 活塞发动机螺旋桨飞机；3. 喷气飞机，航空飞行的范围是在地球上空的大气层内。航天飞行则是脱离大气层对太阳系以内或以外的星际空间进行探索的宇航活动，其运载工具从火箭到航天飞机，探测工具从人造地球卫星、宇宙飞船到空间站等。

航空技术

1. 从气球、飞艇到动力飞行

受烟囱中热烟气尘上升的启发，法国的蒙哥尔费兄弟

(J. M. Montgolfier, 1740—1810, E. J. Montgolfier, 1745—1799)发明了热气球，并于1783年成功地进行了首次气球载人飞行。同年，法国物理学教授查尔斯(J. A. Cesar, 1746—1823)设计的氢气球

也放飞成功。随后，气球很快成为人们旅游、探险的工具，而且还被用于军事和科学研究。与气球升空原理一样的飞艇也于1852年首先诞生在法国。

1888年配有汽油发动机的第一艘实用飞艇问世。真正形成系列产品的飞艇是由德国的齐伯林（Von Zeppelin, 1838-1917）设计的。1900年，第一艘硬式动力飞艇LZ-1型试飞成功。1910年，在德国设立了第一条飞艇的定期航线。一次大战期间，齐伯林飞艇还袭击过英国。1929年8月8日至29日，齐伯林飞艇环绕地球飞行成功。在20世纪30年代之前，飞艇风靡欧美。随着飞机技术的成熟，飞艇才逐渐被取代。

飞机的出现使人类的升空飞行活动进入一个新时期。飞机比空气重，其升空原理与气球、飞艇完全不同。扑翼机是人们早期摹仿飞鸟的产物，达·芬奇（L. davinci, 1452-1519）等人进行过这方面的研究和设计。尽管没有成功，但积累了不少机械设计和鸟类飞行的知识。使飞机研制走上正确道路的是英国人凯利（G. Cayley, 1773-1857）。他指出，鸟的翅膀的复杂结构和运动是难以模仿的，人类制造的飞行器必须实现升举和推进两种功能，并且应该用固定机翼来实现升举。这种定翼思想的出现，造成了航空史上的一次重大转折。

在凯利、奥托·李连达尔（Otto Lilienthal, 1849-1896）等人研究和实践的基础上，美国的莱特兄弟（W. Wright, 1867-1912, O. Wright, 1871-1948）成功地将空气动力学实验研究与飞机设计实践结合起来，初步解决了飞机空气动力稳定和操纵问题。于1903年12月17日，莱特兄弟分别驾驶“飞行者 I 号”试飞四次，第一次即告成功，最后一次留空59秒，空中飞行260米，首次实现了动力载人飞行，开创了航空史上动力飞行的新纪元。

1910年旅美华侨冯如（1883-1912）在美国设计制造并驾机飞行成功。次年归国报效祖国，不幸的是在1912年在广州飞行表演时失事牺牲。

2. 螺旋桨飞机的出现与盛行

莱特兄弟的飞机装备的是他们自己设计的水冷四缸活塞发动机。此后，活塞发动机和飞机都有很大的发展。两次世界大战对飞机技术的发展起到了积极的促进作用。到1918年一次大战结束的时候，飞机的设计、制造和性能种类都已达到一定水平和规模，飞机速度达到每小时180-220公里，升限提高到近8000米，航程440公里，发动机的功率达到420马力，是莱特兄弟的“飞行者1号”发动机功率的35倍。此外，侦察机、驱逐机、轰炸机和歼击机等军用飞机都已服役。一次大战期间，交战各国共建200个飞机厂和80个发动机厂，共生产183 877架飞机和235 000台活塞发动机。一次大战之后，飞机制造和航空运输受到重视，在政府积极资助下，一些欧洲国家成立了国家航空公司，最早成立的有荷兰皇家航空公司（1919年）和大英帝国航空公司（1924年）。大规模航空工业的建立和分工明确的飞机设计与制造体系的形成，为飞机技术的进一步发展奠定了基础。

二次大战（1939-1945）的六年中，航空工业又有了巨大发展。航空工业规模继续扩大，1944年一年生产的飞机数量几乎与一次大战生产的总数相等。飞机技术方面的进展是飞机的性能和结构有了很大改进，有些飞机装备了无线电通讯仪器和雷达瞄准器等，最突出的成就是发明了喷气发动机和喷气飞机。当然，二战期间的主要飞机还是活塞发动机螺旋桨飞机，其最大速度达到 700公里 / 小时以上，俯冲时接近音速，出现了“音障”现象。直到喷气飞机发展到一定阶段之后，才突破“音障”。

3. 喷气飞机的兴起和发展

喷气发动机的研制工作始于20世纪30年代。英国于1937年研制成功离心式涡轮喷气发动机，同年德国也研制成功喷气发动机，并制造出喷气式飞机，于1939年率先试飞成功。喷气式飞机的出现，使飞机的速度、升限（飞行高度）和航程（飞行距离）等性能有了明显提高，尤其是在速度方面更加突出。1947年美国制造的由液体

火箭发动机推进的研究机X-1突破音障，时速达到每小时1078公里，为音速的1.015倍（马赫数为1.015，即M1.015），在此基础上，苏联和美国于50年代初研究出第一代实用的超音速战斗机。美国的F-100A于1953年装备空军，其最大时速为1380公里（M1.3）。随着发动机技术的发展和机翼等飞机结构的改进，飞行速度不断提高，但过高的速度对机动性不利，到60年代速度调整到适于空战的M2-M2.5范围内。

在军用飞机发展的同时，民用飞机也有很大的进展。50年代开始，英国、苏联、美国先后研制成功民用喷气式飞机。美国第一架涡轮喷气民航飞机，波音707-120于1958年正式启用，次年波音707-321飞越大西洋首航成功。从此，喷气民航飞机做定期越洋飞行。至今为止，世界上著名的民航飞机有美国的波音系列（727、737、747、757、767、777）、麦道系列、欧洲的空中客车系列、苏联的伊尔系列、图系列。此外，英国、法国还合作研制了“协和”喷气飞机等。绝大部分民航飞机都是亚音速飞机，超音速民航飞机因技术上不够成熟而主要用于货运和邮运。

航空运输从1911年英国设立亨登（Hendon）至欣德索尔（Hindsor）的第一条空中邮路开始，至今已有很大发展。70年代以来，几乎所有远程客运都用飞机运送。飞机已成为人们日常使用的重要交通运输工具。此外飞机还广泛用于农业、探测、导航、救援、治安等许多领域，发挥着越来越重要的作用。

航天技术

人类对地球大气层以外的探索活动虽然只有40余年的历史，但取得的成就却格外引人注目，它向人类显示出科学技术的巨大力量。同时，它的发展也体现了一个国家的整体科技水平和综合国力。航天技术取得的成就主要体现在运载工具、地球卫星、空间探测器和载人航天等四个方面。

火箭与航天飞机

1. 火箭

世界上公认，火箭是中国最先发明的。公元969年，中国人就制成了原始火箭。而且中国也是最早试图用火箭载人升空的国家。公元1500年前后，一位名叫万户的人把几十只火箭捆在椅子上做了这方面的尝试。为了纪念这位先驱者，现代科学家把月球背面的一个环形山命名为“万户火山口”。

现代火箭直接起源于三位科学家的工作，他们是苏联科学家齐奥尔科夫斯基（К. Э. Циолковский, 1857-1935），美国的戈达德（H. Goddard, 1882-1945）和罗马尼亚的奥伯特（H. J. Oberth, 1894-1994）。齐奥尔科夫斯基于1903年提出著名的齐奥尔科夫斯基公式，建议建造多级火箭，他的工作至今仍是火箭设计的理论基础之一。把理论付诸实践是戈达德，1926年3月16日，戈达德在自己独立研究火箭工作原理的基础上，制造并发射成功了世界第一枚液体火箭。火箭飞行高度12.5米，水平距离56米。此后的20年间，戈达德等人继续对液体火箭进行研究和改进。奥伯特于1923年出版了他独立研究的成果——《深入星际太空的火箭》一书，他的工作推动了德国火箭技术的发展。

从20世纪30年代开始，火箭技术在德国受到高度重视。以冯·布劳恩（W. Von Braun, 1912-1977）为首的德国科学家，在进行了一系列火箭的研制和试验工作的基础上，于1942年10月3日成功发射了V-2飞弹，其飞行距离190公里，最大高度85公里。改进后，最大射程300公里，总推力27.2吨，可携带1吨弹头。纳粹德国向英国共发射4300多枚V-2，但也没改变失败的结局。不过V-2飞弹却成为二战之后各国火箭发展的基础和蓝本。

苏联在战后制定了尽快发展火箭技术的战略。终于在1957年3月3日，率先发射了洲际导弹。同年10月4日，又利用这一装置的改

进型成功发射了世界上第一颗人造地球卫星，以及后来的东方号宇宙飞船和联盟号宇宙飞船。

美国为苏联取得的巨大成就感到震惊，急起直追，于60年代初决定实施“阿波罗登月计划”。作为阿波罗航天器的运载工具，土星系列运载火箭被列为国家最重要的计划之一。结果造就出被誉为现代火箭技术最高成就的巨型火箭“土星—V”号，它是三级液体推进剂火箭，全长85米，直径10米，重2893吨，起飞推力3644吨，能把46吨重的“阿波罗”飞船送入月球轨道。

除美国、苏联（俄罗斯）外，法国、中国、日本、印度也都各自研制了大型火箭。

随着人类运载技术的发展，“空间”的概念也在不断变化。18世纪末放飞气球时“空间”是指地表以上几公里的范围，20世纪前期，探空火箭的发明，把“空间”界定为地表几十公里以上的高层大气区。50年代人造卫星上天之后，“空间”就主要指大气层以外的外层空间。

2. 航天飞机

航天飞机是能够多次使用的宇航运载工具，它集中了火箭、宇宙飞船和飞机的特点。1969年美国开始研制可重复使用的宇航运载器，试图降低发射成本。1981年4月12日，美国航天飞机“哥伦比亚”号，载着2名宇航员试飞成功。它绕地球飞行36圈，历时54.5小时后安全着陆。“哥伦比亚”航天飞机主要由3部分组成：轨道飞行器、助推火箭和推进剂外贮箱。总长56米，起飞重量2000吨。继“哥伦比亚号”之后，“挑战者号”、“发现号”和“亚特兰蒂斯号”等航天飞机共计进行了几十次的飞行，完成了发射卫星、空间实验室、俘获故障卫星，开展科学研究等多种任务。当然，在航天飞机发展过程中，也不是一帆风顺的。1986年1月28日，“挑战者号”第10次飞行发生爆炸，7名宇航员（包括2名妇女）不幸遇难，使美国航天飞机计划遭受挫折。此外，至今发射费用高居不下，降低发射成本的目的也未实现。现在美国航天飞机每飞行一次，1

千克的有效载荷花费1万美元以上，距当初设想每千克载荷400美元的目标还相差很远。除美国外，苏联也曾发展过航天飞机——暴风雪号，这还只是无人航天飞机。据称，欧洲和日本也曾有计划研制航天飞机。目前航天飞机还在不断改进和发展之中，它和大型空间站的出现，将标志着航天时代的到来。

人造地球卫星和空间探测器

1. 人造地球卫星

早在1954年，美国和苏联就宣布将在国际地球物理年（1957.7-1958.12）发射卫星。当时，苏联依仗在大型运载火箭方面的优势，率先于1957年10月4日发射了世界第一颗人造地球卫星——“卫星1号”，它直径0.58米、重83.6千克，每96分钟绕地球1周。紧接着在同年11月3日又成功发射了“卫星2号”，生物舱里还装了一只小狗。美国不甘落后，在1957年12月和1958年1月两次发射卫星失败之后，于1958年1月31日美国第一颗人造地球卫星“探险者1号”发射成功。此后，卫星技术不断发展，美国于1958年12月、1960年4月和1964年8月分别成功发射了第一颗通信卫星，第一颗气象卫星和第一颗地球同步静止轨道卫星，特别是发射高度达到了35 800公里的同步卫星的出现，标志着航天技术进入一个新阶段。由于卫星能对地球进行大面积覆盖，因此用途极为广泛，主要包括远距离通信、资源勘察、天气预报、导航定位、军事侦察与预警等。至今，全世界发射的卫星已超过4000颗。

2. 空间探测器

空间探测器是一种既可以沿着固定轨道围绕星体运行，又可以使用自身动力向其他星体游动的航天器。目前，它的探测范围从月球到太阳系的行星，将来可能会探访其他恒星。

第一颗飞越月球的探测器是苏联于1959年1月发射的“月球1号”。此后，苏联的“月球”系列、“探针”系列、美国的“先

驱者”系列、“测距者”系列、“勘测者”系列和“月球轨道器”系列等空间探测器进行了不断的探月飞行，其中包括：飞越月球、撞击月球、绕月飞行、沿月球轨道飞行和在月球上实现软着陆。此外，苏联和美国还对金星和火星进行了探测，尤其引人注目的是1972年和1973年美国发射“先驱者”10号和11号，各携带着金属问候卡，上面刻有男女地球人、氢分子结构、14颗脉冲星及太阳系的位置等信息。1977年8月和9月，美国又发射了“旅行者”2号和Ⅰ号，上面携带关于人类起源和发展的信息记录，有116张照片、35种自然界的聲音，近60种语言的问候语等。这些探测器在完成对木星、土星、冥王星、天王星的观测之后，就飞出太阳系，驶入茫茫无际的宇宙，去寻找地球外文明的踪迹。

载人航天器

载人航天是航天发展中的重要成就。1961年4月12日，苏联成功地发射了世界第一颗载人航天器“东方一号”，环绕地球一周，安全返回地面，加加林成为第一位飞上太空的宇航员。1962年2月20日美国的载人航天器“水星友谊7号”也发射成功。此后苏联和美国在载人航天领域展开了竞争，据统计，至今世界上共有400多人（航天员）次飞上太空。从总体上看，在近地载人航天方面，苏联略优于美国，进入太空的人数和停留时间均超过美国，在太空停留的最长时间达到1年以上。目前代表载人航天最高成就的还是美国的“阿波罗登月计划”，这一被称为现代科技史上第一大工程的计划，历时10年共耗资240亿美元，先后有120所大学、2万家企业的400余万人参加，共有6只登月舱载12人登上月球。1969年7月21日，美国宇航员阿姆斯特朗（N. A. Armstrong, 1930-）成为人类历史上实现登月壮举的第一人。阿波罗登月计划是迄今为止惟一对月球进行实地考察的航天活动。

在美国全力实施“阿波罗计划”之际，苏联选择了载人飞船→

载人轨道站→大型空间站的发展线路，而美国的发展线路是：载人飞船→航天飞机→永久性空间站。殊途同归，可见空间站的重要性。1971年4月19日苏联发射了世界上第一个空间站——“礼炮-1”号，其重约18吨，长约14米，最大直径4.2米，到1982年4月苏联共发射7个礼炮号空间站。1986年2月，苏联又发射了更先进的和平号空间站。美国利用大推力火箭“土星-V”号，于1973年5月14日把“太空实验室-1”送入太空，该空间站重82吨，长36米，最大直径6.7米，携带58种科学仪器，接纳过三批宇航员，进行了生物医学、太阳天文学、材料科学等270多项科学研究。到20世纪90年代，美国开始建造永久性空间站。1993年美国与俄罗斯签订一项航天合作协议，在各自已有的空间站计划的基础上，联合建造一个包括欧洲空间局、日本和加拿大参加的国际空间站，预计2002年全部建成。该空间站重380吨，提供110千瓦电力，可居住6名宇航员，能够长期载人。可以预见，随着空间运输系统的发展，空间站将日益发挥重要作用。

航空航天技术是综合性技术，它的发展与科学的关系极为密切，比如，空气动力学的发展对航空航天技术起着至关重要的作用。统计资料表明，一个典型飞行器的研制周期为10年左右，在3-4年的研究实验中，空气动力学问题约占一半。风洞是空气动力学实验的重要设备，从莱特兄弟的飞机到当代航天飞机都要依靠风洞做空气动力学实验。随着飞机速度和性能的提高，风洞实验的时间也随之增长。从40年代螺旋桨飞机所用的几百小时到70年代超音速巨型客机的4-5万小时，再到80年代航天飞机的6-10万个小时。

未来的航空航天技术将向着更高、更快、更远、更安全和更舒适的方向发展。目前正在研究的乘波飞机预计最高速度可达音速的12倍，乘波飞机的研制成功将引起航空技术领域的一场革命。航天技术的发展则有着更为广阔的前景，它不仅为通信、天气预报、地球资源、勘探、空间材料加工、星际航行、空间环境预报、空间科学研究等带来巨大的变化，而且可能开辟一个新的天地，利用地球

外行星系统的资源造福人类。

七、海洋技术

海洋总面积为3.61亿平方公里，占地球表面积的71%。海洋不仅是生命的摇篮、人类生存的环境保障系统，而且是尚待开发的巨大的自然资源宝库。在陆地资源匮乏、环境问题日益严重的今天，对海洋的保护与合理开发就变得更加重要和迫切。

人类接触海洋、利用海洋发展自己的历史，几乎与人类本身的历史一样久远。在旧石器时代，我国沿海地区已有人类居住。在距今18 000年前山顶洞人的遗址中，发掘出钻有小孔的贝壳。据研究，这些贝壳是当做项链等饰物的。公元前5世纪，人们就懂得潮汐与月亮升落的关系。在我国，航海与制盐活动已有3000多年的历史，《史记》中有兴渔盐之利的记载。对海洋的较系统的认识开始于19世纪，以英国“挑战者”号调查船的环球航行为代表的海洋考察活动，初步探查了海洋水文、气象、海洋生物和海底沉积物。

海洋技术作为一门为海洋科学调查和海洋开发提供手段与装备的新兴学科，是从20世纪60年代发展起来的，它是各种有关通用技术和最新科技成果在海洋领域的综合发展与应用。海洋技术体系包括海洋调查监测与探测技术、海洋生物技术和海洋资源开发技术等。

海洋调查与探测技术

认识海洋是保护海洋、开发海洋资源的基础。海洋调查与探测技术是最先发展起来的海洋技术，科学考察船、浮标站、潜水器和飞机、卫星等构成了从海面、海下与海面上空的全方位探测体系。

科学考察船与浮标站的功能是了解海洋水文、气象、生物、矿产、石油等各种资源和海洋物理、化学性质。1872年开始环球航行的英国“挑战者”号是第一艘专用的科学考察船，该船长68.93米（226英尺）、排水量2300吨，在4年（1872-1876）的环球航海考

察中，对洋流、水温、气象、海水成分进行调查，发现4700多种海洋生物，首次在太平洋底捞取锰结核。此后，从19世纪末到20世纪20年代美国、德国等国也先后开展了一系列海上科学考察，取得一批成果。第二次世界大战爆发，由于潜艇等海上作战的需要，促使海洋考察活动与科学考察船的数量增加，20世纪60年代之前，在世界上所获取的海洋资料中，90%以上是通过科学考察船取得的。为满足海洋考察的各种需要，科学考察船除装备各种先进的探测设备外，在船体结构、制船材料、防摇控制和机动性与灵敏性等方面都有别于一般航船，随着有关技术的发展和综合应用水平的提高，科学考察船的功能和性能在不断改进和增强。

海洋自动浮标站是应用电子技术与无线电通讯技术研制出的一种

海上水文气象站。从20世纪70年代初进入实用阶段以来，以其费用低、不受天气影响，连续工作时间长，而得到广泛应用。比如Swallow浮子的应用使海洋气象发现了占海洋动能99%的深海天气现象，目前广大海域已形成自动浮标观测网，成为获取水文气象资料的主要方式。

深潜技术是对深海进行探查、测绘、采集、打捞、安装、维护等深水作业的海洋高技术。它是自动控制、通讯、信息处理、微电子技术、光学、声学、新材料等多种高新技术的综合体。与航天技术相似，深潜技术不仅是国家综合实力的象征，而且是极具战略意义的高技术，

它关系到一个国家在获取和分配海洋资源——这一大自然给人类留下的最后一份遗产中是否有能力维护自己正当的权益。

利用潜水器进行科学考察迄今已有六七十年的历史。1934年第一个载人潜水器在美国问世，它可载人下潜906米。1960年1月23日，法国制造的“底里雅斯特”号载人潜水器，下潜10916米达到世界最深的太平洋马里亚纳海沟，创造了人类下潜最深的世界记

录。60年代中期，潜水器的研制和应用从单纯的探索下潜能力转移到对深海探测上来。尤其是70年代以来，在常压载人潜水器（ADS）、无人遥控潜水器（ROV）和自治潜水器（AUV）等的研制方面有了突破性进展。例如1989年日本建造的“深海6500”号载人潜水器，潜深6500米，配备三维声、光成像系统，对锰结核、热液矿床和海沟斜坡等海底地貌进行观测和探查。法国、苏联、芬兰等国也研制出潜深6千米的ADS。到90年代末，世界上的ADS大约有200艘。ROV和AUV是两种无人潜水器，主要用于深海作业。ROV最大下潜深度达到10千米以上，AUV则以其经济、安全的特点，而逐渐成为海底考察、搜索、打捞等水下作业的主要工具，它代表着深潜技术的未来发展方向。从1990年起，我国的“863”计划先后进行了1千米和6千米AUV的研制，6千米的AUV达到实用化水平。1997年5月我国自行研制的“CR—01”6千米AUV，参加了中国大洋协会组织的DY95-6航次，圆满完成了对太平洋多金属结构的调查。至90年代末，全世界的无人潜水器ROV和AUV共有1000艘左右，其中深潜达到6千米的则只有10多艘。海底的热液矿床、天然气水合物及高温环境中的海洋生物都是由先进的海底探测技术发现的。

人造地球卫星出现之后，很快就被用来进行海洋观测。1973年美国发射了“天空实验室”号试验卫星，它有摄影机、可见光及红外扫描仪、微波辐射计、高度仪等装置，专门用来观测海面温度、波高、风浪、大地水准面等参数。此后美国又发射了多颗海洋卫星，并形成了海洋卫星系统。苏联、欧洲、日本、印度也都先后发射了自己的海洋卫星。1988年9月7日，我国成功发射了第一颗海洋卫星——“风云”1号，它每昼夜绕地球飞行14圈，卫星上的扫描辐射仪以每分钟360转的速度对海陆表面2800公里宽的区域进行扫描探测，将获取的信号记录下来并传送到卫星地面接收站。

90年代以来，海洋卫星的发射进入高潮，ERS-1、ERS-2、TOREX、RADARSAT、DMSP、SeaStar和GFO等卫星相继发射成功、使海洋遥感应用进入一个新阶段。

目前海洋监测与探测技术已发展成为从沿岸、海面、海下到空中的对海洋进行全方位监测与探测的系统。实施中的“全球海洋环境观测系统（GOOS）”就是这一系统的代表。到21世纪，海洋监测与探测技术将朝着集成化、智能化、小型化、网络化方向进一步发展。

海洋生物技术

海洋生物技术是指生物技术应用与海洋生物资源开发而产生的高技术，包括海洋生物的基因工程、细胞工程、酶工程、发酵工程和海水养殖生物的遗传育种、健康养殖、海洋生物天然产物开发及海洋环境保护等生物技术。

20世纪80年代以来，随着生物技术的发展，世界上不少沿海国家开始将生物技术应用与海洋生物的研究，在基因工程方面，研究非常活跃。通过分离、克隆海洋天然产物的基因，转入高效、廉价表达系统进行生产，以获得大量高质量的海产品。我国科学家于1985年成功进行转基因鱼实验，其他一些国家也相继开展转基因鱼的研究，目前这类研究还处于实验室研究阶段。利用基因工程进行多肽、蛋白质类药物、单克隆抗体和新型诊断试剂等海洋药物的研究是90年代以来发展十分迅速的领域。在细胞工程方面，自1981年美国科学家斯坦利（J·G·Stanley）诱导牡蛎三倍体成功以来，多倍体技术在美国、日本等国得到很快发展，1989年牡蛎三倍体已实现产业化。我国在鲍鱼三倍体诱导技术的研制上也取得成功，并开始付诸应用。性控技术在大西洋鲑、虹鳟、牙鲆等的全雌培育方面已获得成功。多倍体技术和性控技术的进展和良好前景，又促进了诸如染色体快速鉴定、四倍体异源多倍体诱导、新型低毒诱导剂的筛选和细胞融合遗传育种等关键技术的研究和发展。开发海洋天然产物，是海洋生物技术的另一重要领域，80年代以来，日本、美国等国的科学家在对海洋活性物质的提取、分离、化学结构修饰方

面进行了大量研究，试制了多种抗菌素、抗病毒、抗癌、抗心脑血管药物，已付诸使用的海洋药物就有阿糖腺苷、海人草酸、头孢菌素等十多种。利用海洋生物多糖开发的可吸收缝合线、人造皮肤、人造肾膜等产品则有着更加广阔的应用前景。此外，在海洋污染防治领域，海洋生物技术也大有可为，美国、澳大利亚已开发出降解石油烃和苯的菌种。近年来，我国在应用生物降解技术处理工业废水和石油污染等方面也取得了可喜的成果。

海洋资源开发技术

《联合国海洋法公约》规定，海洋分为国家管辖海域、公海和国际海底三类区域。依据国际法发展海洋资源开发技术，从海洋中获取更多的资源，成为沿海国家发展战略的重点。海洋监测与探测技术是开发海洋资源的基础，海洋油气资源、矿物资源和能源的开发技术则是海洋资源开发技术的主体。

1. 海洋石油和天然气资源开发

海洋油气资源十分丰富，估计石油储量约为3000亿吨，天然气约为139 000亿立方米，许多国家都非常重视对它们的开采和利用。从1896年美国加利福尼亚的圣巴腊巴海峡首次出现向海上搭伸抽取石油的木质栈桥式采油井架算起，海洋石油开发至今已有 100 余年历史。在经历了六七十年的缓慢发展之后，海洋石油开发于20世纪70年代进入快速发展阶段，从事海洋石油勘探的国家和开采海洋石油的国家，从1960年的 23个和 7个增加到 1980年的 100个与 35个。同期，海洋原油产量从占世界总产量的11%上升到21%。由于海底勘探开发的复杂性和艰巨性，决定了海洋石油和天然气的开发是技术与资金的高度密集的产业，从勘探、钻探、开采到输送，几乎全部依靠当时先进的技术来支撑和实现。

海洋油气勘探技术的发展经历了从陆地向海洋的延伸法到地球物理勘探方法。早期的海洋油气勘探是根据海岸及沿岸岛屿的岩

性、成层和所含化石和地质构造等地质情况，推测沿岸海底的蕴涵油气的可能性，但这种方法的勘探范围只限于海岸附近，无法对整个大陆架和海底进行勘探。地球物理勘探法则弥补了延伸法的不足。地球物理勘探法是通过分析岩石密度、磁性、弹性等物理特性的差异来了解地下岩石的地质构造情况的。在对海洋油气的地球物理勘探中，常用地震勘探法。60年代之后，随着用气枪及套筒式气爆震源等非炸药震源取代炸药震源及卫星系统与计算机技术的普遍应用，使地震勘探法有了长足的进步。目前海上三维地震勘探技术已广泛用于海洋油气勘探。据估计，地震勘探从二维到三维，使油气储藏的发现率从25%-30%提高到40%-50%，四维地震勘探的实现将进一步提高到65%-75%。勘探只是寻找贮油气的构造，证实是否确有油气，还要依靠钻井勘探。为满足在不同深度、不同海况的海底钻井的需要，海上钻井装置也在不断改进、更新。最早是沿用陆地钻井的方法，在海岸边打斜井，显然这只是权宜之计，要开采海中油气，就必须在海上钻井，为此人们发展了海上钻井技术，钻井平台从木制、钢制发展到钢筋混凝土制重力平台。1933年在墨西哥湾建成的世界第一座木固定平台，水深为3.66米。40年代后期，钢制平台出现，到70年代水深记录已超过百米。1988年荷兰在北海安装的第一座三脚塔式无人操作钢质固定平台，适用水深达到了10-350米的范围。70年代开始，在北海、巴西、刚果路易斯安那等海域出现了大型混凝土重力平台，这种平台由底座（沉垫）、腿柱、钢质甲板及甲板上的组装模块构成。底座由若干大型圆柱体组成，可以用作贮油罐。与钢质平台相比，混凝土重力平台具有节省钢材多、防腐性能强、可多次转移使用等优点。

80年代以来，高新技术的迅速发展推动了海洋油气资源开发技术的更新换代。出现了深海工作平台、深海浮式生产装置、油气田的水下生产系统、大位移钻井技术和海洋数控成像测井技术等一批海洋新技术，使海洋油气资源开发水平迈上了一个新的台阶。

2. 海洋矿物资源开发技术

海洋矿物资源包括海滨砂矿、海水中溶解的物质、海底表面沉积的矿物和海底矿藏。据调查，海滨砂矿主要含金属砂矿，有钛铁矿、钛磁铁矿、磁铁矿、锆英石、独居石等，探明的钛铁矿储量为10.4万亿吨。海水中含有金、银、铂、锌等元素，每立方千米体积的海水中含有3750万吨矿物质，全球分布于4千米到6千米水深海底的多金属结核，总量约为3万亿吨。此外还有含有高品位的铜、锌、铅等金属的海底热液硫化物矿床。

海洋的矿物资源十分丰富，但要开发利用并不容易，虽然人类早在4千多年前就能够从海水中提取食盐，但是提取其他矿物的历史却只有几十年。1926年，美国人在处理日晒盐的盐卤过程中，首次从海水中提取了溴，到90年代，从海水中提取溴的年产量已超过百万吨，占世界上溴的总产量的70%。1941年，世界上第一座海水提镁工厂在美国建成并投产，经过大力发展，使得二战之后美国所需的几乎全部初级金属镁，都一直是从小海水中提取的。由于军事和能源的需要，早在20世纪40年代，英国就开展了海水提铀的研究。日本则后来居上，1986年，日本在香川县建成10千克级的海水提铀试验厂，1988年提取铀已多达10千克。成为世界上第一个成功开发海水铀资源的国家。近年来随着生物提铀等新方法的出现，海水提铀技术水平正在不断提高。我国在海水提铀方面也有30多年的历史，发展出了具有独到之处的技术。此外，人们在海水提钾、海水提碘等的研究中也取得许多进展。在海底采矿方面，由于锰结核矿物品位高，布于海底表面，开采成本低于陆地，所以受到重视，先后提出几十种开采技术方案。其中连续索斗式和泵式经过多年的实践改进和发展，成为较实用的技术，尤其是泵式技术在70年代末就取得日开采量300吨的成绩，达到商业开发的水平。另外，对海滨砂矿的开采，目前已实现了机械化和自动化，对于海滩上的砂矿，用各种挖掘机，对于水下砂矿则用链斗式、吸扬式、空气提升式、钢索式等各种采矿船和潜水式挖泥机等。选矿方面则用计算机控制的自动选矿系统。

3. 海洋能源开发技术

波涛汹涌的海洋蕴藏着巨大的能源，有人估计，理论计算潮汐能为14亿千瓦，可利用量为2亿千瓦左右，波浪能为100 000亿千瓦，可利用量约为10-100亿千瓦，温差能的可利用量约为100亿千瓦。海洋能源为可再生能源，又不污染环境，是比较理想的能源。在潮汐发电、波浪能利用、温差能利用等方面取得了许多重大成果，比如60年代法国建成的朗斯潮汐发电站就是一个成功的典范。

海洋环境的保护和海洋资源的开发影响着人类的未来，也影响着国家的发展。我国是一个海洋大国，陆地海岸线长18 000千米，岛屿海岸线长14 000千米，按《联合国海洋公约》我国管辖的海域面积约为300万平方千米。我国政府历来重视海洋科学技术的研究，江泽民总书记提出“要从战略的高度来认识海洋，增强全民族的海洋观念”要“开发蓝色国土”“振兴海业，繁荣经济”。1995年，国家出台了《中国海洋21世纪议程》，翌年，海洋高技术作为一个新的领域列入“863”计划。根据我国战略的需要在“863”计划中设置了海洋生物技术、海洋监测技术和海洋探测及资源开发技术，并已取得一系列成果。展望未来，人类对海洋的开发利用将取得巨大成就，据专家预测，到21世纪中叶，①海水淡化问题已初步解决，淡水短缺，靠天吃饭，将成为历史；②人类所需能源和电力将主要来自海洋；③全球渔业生产实现可持续发展；④通过大力发展淡水养殖业，年产2-3亿吨优质海产食品，全球食品短缺得到缓解，高水平的海洋药物开发使海洋成为保障人类健康的药库；⑤海洋城和人工岛可望成为现实；⑥海底资源进入规范化的商业性开采。海洋经济占全球经济的比重将达到或超过20%，人类社会进入海洋时代。

第三部分

当代科学技术面临的挑战

第一节 科学与人文传统之间的隔阂

科学与人文两种文化的隔阂是科学的社会化和知识的专业化所带来的后果。科学的社会化，突出表现为科学研究队伍的壮大、科学交流和国际合作的扩展、科学教育和科学世界观的普及、以及科学与技术进而与人们日常生活的紧密联系诸方面。科学地位的上升，使得一部分强调个性化和人格化的人文知识分子固守一隅，甚至简单地采取反科学的立场。

伴随科学的社会化，是知识的专业化。知识的专业化无疑会增进各个具体领域内知识的进步，但这里却潜伏着一种危险，那就是每一个人的思想都局限于一个角落。每个人在生活中所遇到的问题，都只能由一己专业所引申出来的不完整的思想来作狭隘的处理。现代西方马克思主义者马尔库塞指出，现代科技体制批量制造出来的技术专家，只是一些没有精神内涵的《单面人》。一个现代化学家可能对动物学方面的知识所知无几，对经典的文学艺术作品缺乏基本的鉴赏力，而其历史知识可能更是近于空白。数学家、工程师和古典学者的情形也复类似。一个人文学者充其量也只是听说过诸如能量守恒、熵和波粒二象性等概念，但对其内涵的理解始终停留在懵懂无知的水平上。当然，这里所说的是一般趋势，但这种趋势目前仍在有增无减地蔓延。所幸的是，20世纪中叶以来，一批从事科学史、科学哲学和科学社会学的学者正在试图弥合两大领域的鸿沟。

一、科学的工具价值和精神价值

科学与人文传统之间的隔阂，固然有科学的社会化和知识的专业化这两大客观因素，但我们也不能低估两大传统之间的误解所造

成的隔膜。人文学者思考的焦点是人类的活动和经验，强调人的各种能力和自主精神。他们往往只看到科学的工具价值，只看到在科学知识体系中人不过是自然秩序的一部分，而恰恰忘记了科学的精神价值，忘记了科学理论是人类创造性活动的产物。

科学的精神价值，是古希腊先哲的发明，也是基础科学得以发展的根本动力。在本书的第一部分，我们曾经提到，欧里庇得斯就是用“财富”一词来描述人们所获得的关于自然秩序的知识。希腊人把知识看成人类最宝贵的财富，苏格拉底、柏拉图和亚里士多德先后为这一观点提供了理论基础。苏格拉底曾说，世界上只有一样东西是美好的，那就是知识；只有一样东西是邪恶的，那就是愚昧。在苏格拉底看来，德行和知识是统一的。知识的目的在于成为力量，而在于知识本身是美好的，它能够使人的精神获得升华。“善即知识”的论点，在柏拉图那里表达得更为明确：科学的最高目标——认识流变世界背后的形式世界，就是伦理学的最高范畴——善。亚里士多德提出，人生的最高目标，就是运用理性来认识宇宙的秩序。

科学的工具价值，事实上，迟至17世纪才为一小批有识之士深刻地认识到，并大张旗鼓地加以宣传。这并不是说在此之前就没有人认识到科学的实用功能。比如说，在希腊化时代，阿基米德就曾利用自己的数学、力学和光学知识发明新颖的军事器械，但他本人并不重视这些机械发明。在人类历史上，弗朗西斯·培根是第一个颂扬科学的伟大力量、倡导科学与技术密切合作的思想家。但即使在17世纪，我们也不应忘记，科学家认识世界的最大的驱动力仍然是科学家本身的求知欲。培根所宣传的“应用科学”研究纲领，尽管有着巨大的感召力，并未立即变成现实。17世纪的科学革命，最终还是依靠牛顿的“基础科学”研究纲领而完成的。

如果说牛顿式研究纲领仍然以获得“全知”为最高目标，培根式研究纲领旨在寻求人类的“全能”。自从启蒙运动和工业革命以来，科学发展的这两个目标开始互相渗透。17和18世纪关于光、热、

电、磁和化学的广泛研究，无疑部分得力于培根关于认识自然、进而征服自然的号召。但另一方面，热力学、电磁学和量子力学的建立，则是在此基础上按照牛顿式研究纲领建立起来的。反过来，这些理论的建立，是人类获得了种种梦想不到的神奇力量，使我们从蒸汽技术时代进入了信息技术时代。

科学发展到今天，尽管其精神的、伦理的价值常常被掩盖，但是它仍然是科学精英执著追求自身事业的根本动力。现代科学的大厦是由一组建筑群体构成的。在这座大厦中忙碌的科学家，大部分也许是为了某种功利目的，但占据大厦正殿的那些科学家，他们从事科学研究主要还是出于对知识本身的渴望。这种知识追求的目标，就是建立一幅简洁、和谐、统一的世界图像。

科学家所建立的世界图像，只是人类所建立的各种世界图像之一。诗人、画家、哲学家和自然科学家都在以各自的方式建立自己的世界图像，借以超越个人的狭小天地，获得心灵的幸福和安宁。与诗人和画家所不同的是，科学家在建立世界图像时，把客观性和精确性放在首位。这种客观性要求科学家抛弃个人经验中独特的和想象的成分，反对将任何人或事物神圣化，同时容忍理性的批判和试验的检验。精确性则意味着，科学家必须从复杂的现实世界中抽绎出一个理想化的世界，进而将这个理想化世界的概念体系推广应用到一切实际的自然过程之中，以期获得一个和谐完满的世界图像。科学家对自然秩序和宇宙合理性的追求，其执着程度与教徒对上帝的追求和艺术家的审美追求无甚分别。换句话说，对科学家来讲，这种无止境的追求是其心灵和感情生活中不可或缺的成分。

科学的这种精神价值，正如深刻的宗教情感和审美体验一样，并不是每个人都能理解和接受的。这也就是科学在其显现巨大的工具价值之前，不能获得广泛社会支持的原因所在。阿基米德在时人的心目中只是一位机械发明的天才，而不是如他所自视的数学力学家。中世纪的宗教扩张和文艺复兴时期的艺术繁荣，都有独特的历史原因，而现代科学的社会化无疑要归功于科学自身所拥有的巨大

力量。现代科学的工具价值，业已为其精神价值挣得了广阔的生存空间，这突出表现在科研规模的扩大和科学教育的普及这两方面。我们的时代，可以当之无愧地称之为科学的时代。大凡受过教育的人，都或多或少接受了科学世界图像的某个局部。但这并不是说，所有的人都能领略科学的这种精神价值。真正乐意并且有能力去欣赏这种精神价值的人，正如从事创作的艺术家的情况一样，目前还只能是人群中的少数。

这种古典意义上的精神价值，并不能概括科学精神价值的全部内涵。随着科学的社会化和科学团体的建立，科学的精神价值已经越出了它的古典意义，并延伸到社会伦理范畴。科学的历史向我们展示，科学的进展得力于理性批判的推动。科学是一项集体性的事业，科学团体内的每一个成员既要尊重他人的劳动成果，同时又要有一种勇于批判的精神。一个科学理论若要为科学团体所接受，必须建立在严密的逻辑论证和充分的经验检验基础之上。判断理论的优劣，必须摆脱权威、种族和阶级的偏见。任何个人的科学成果，都必须在科学团体内公开交流，接受其他成员的批判和检验。科学上的每一步进展，哪怕是极细微的进展，都是经历千辛万苦方才取得的。一部科学思想史，甚至可以说是一部错误观念的历史，一部理智冒险的历史，一部勇于纠正自己错误、不断追求真理的历史。科学教育人们要学会理智上的谦逊，学会宽容他人的见解，同时学会对权威的质疑。科学的知识体系、科学的世界图像不仅是理性建构的产物，更是理性批判的结果。科学上这种理性批判的精神，极大地丰富了我们关于社会公正和个人自由的概念。

二、科学、反科学和伪科学

把科学的世界图像普及给大众，是启蒙运动作家最突出的贡献。18世纪的启蒙作家，一方面通过编撰百科全书向大众传授近代科学的世界图像，另一方面运用科学家建立世界图像的方法来考察人类社会，诸如制度、道德、权威、风俗等。启蒙运动的巨大影响，使得以科学为基础的现代世界观获得了大众的广泛认同。这种现代

世界观，以一系列显著的特征有别于古代或中世纪的世界观：首先，现代世界观把客观性放在首要地位，偏向定量的分析和非人格化的普遍结果。它带有强烈的反个人主义特征，强调理智而非情感，远离人们直接经验到的感官世界。其次，现代世界观立基于理性的批判和实验的检验，反对把任何人或事物神圣化，敢于怀疑权威，倾向于容纳相反的见解，并愿意接受证实或证伪的检验。它是问题取向的，而不是道德、目的或神秘取向的。第三，现代世界观承认知识领域中存在层次结构，基本层次上的知识是其他层次知识的基础。因此，它提倡专业化，寻求精英统治，并宣称知识导致权力，而不是权力先于知识。最后，现代世界观强调进化，既反对停滞又反对革命。它具有一种主动和积极的精神，并大力推行世界主义和全球主义。

18世纪的启蒙运动，在普及近代科学知识及其世界观、扫除盛行的愚昧和迷信的同时，也导致了唯科学主义的泛滥。唯科学主义者把科学知识看成绝对正确的客观真理，并主张科学是万能的，可以解决包括道德在内的一切人生问题。这本质上是对科学精神的误解。科学知识是一个开放的体系，它所处理的是一个高度简化的理想世界，有简化必然就有所遗漏。因此，科学的客观性只能建立在理性的批判和实验的检验基础之上。再者，科学由于其客观性的要求，不得不抛弃个人经验中独特性的成分。事实上，启蒙运动作家运用科学方法来考察人类社会时，成就最突出的是在经济学这类比较容易客观化的领域，在历史领域的成就并不那么显著，而在道德领域尽管探讨最为热烈，也最不能令人满意。尽管如此，由于现代科学的巨大成功，以及实证主义哲学的广泛影响，自19世纪中叶以来，唯科学主义日渐深入人心。

如果说唯科学把科学看成万能的天使，反科学则走向了另一个极端，即把科学看成万恶的魔鬼。反科学思潮包括各种各样的反科学思想，这些反科学思想来自不同的背景，但有许多共同之处，诸如以自我为中心、强调信仰和权威、鼓吹文化相对主义、宣传科学

即将终结等等。换句话说，反科学就是反对以科学为基础的现代世界观。首先，反科学思想把主观感受性放在第一位。它偏向于定性的、人格化的和感性化的描述，崇尚个人的独特性和事物的特殊魅力。单就此点而言，它与浪漫主义有着千丝万缕的联系。其次，反科学思想皆以迷信和权威为基础，带有明显的目的取向或神秘取向，而不是问题取向，拒绝接受理性的批判或证伪的检验。就此而言，它与宗教传统和道德哲学的渊源颇深。第三，反科学思想与文化相对主义一脉相承，拒不接受知识领域中的层次结构。在他们看来，所有知识在本质上具有平等的绝对性。他们主张权力先于知识，而不是知识导致权力。最后，反科学思想反对进化和进步的原则，转而信奉历史循环论。他们不把科学看成是自主的活动，而是依靠外界力量的推动。他们主张，科学只是“时代精神”的产物，甚至主张科学如同游戏规则一样，是“社会建构”的产物，带有种族、阶级、信仰和性别的烙印；随着文明的兴衰和历史的循环，科学的终结即将来临。

反科学思想的根源，固然可以追索到像浪漫主义、宗教影响和道德传统、历史循环论、文化相对论和社会建构论这类的思想文化背景。但我们必须把反科学思想与真正的人文主义精神区别开来。人文主义对个性的强调，是基于人的潜能发展而言的。人文主义高度重视人的理性，特别是理性的批判功能，而不是它在建构体系方面的功能。像历史循环论、文化相对论、社会建构论这类学说，人文主义者决不会轻易接受，而是从人的经验出发作批判性的分析。人文主义并不排斥信仰，但它反对任何形式的权威，而且把个人自由放在首要地位。当代反科学思潮的泛滥，正是人文主义精神衰落的表现。

同样，我们也必须把反科学思想与对科学技术的反思区分开来。反科学思想对大众的蛊惑力，部分来自于大众对科学技术真实的及想象的后果的担忧。原子弹的爆炸、全球核军备竞赛、切尔诺贝利核泄漏、大气和海洋污染、臭氧层的破坏、森林面积的减少、

不可再生资源的耗竭、生物物种的灭绝、试管婴儿的诞生、DNA重组技术的出现以及克隆技术的发明，所有这些重大事件都一度带来过全球性的恐慌。普通大众在看到这类真实的或想象的危险时，往往不相信科学团体和民主社会有能力遏制或消除这些威胁，从而很容易沦为反科学思想的俘虏。

反科学思想，一旦与政治野心、权力和群众运动结合起来，会对科学的发展乃至整个社会的稳定造成巨大的危害，因为反科学思想拒绝容纳异己，并主张权力先于知识。中世纪的宗教裁判所就是最突出的事例。中世纪的宗教裁判所对一切异端均采取严厉的惩罚手段，凡与教义和教会所采纳的学说相抵触的科学思想，都会成为宗教迫害的对象。哥白尼在身前不敢发表自己的著作，而布鲁诺和伽利略因为宣扬哥白尼的日心说，先后遭受了火刑和终生监禁的命运。科学与反科学的这场斗争，其实质就是追求真理还是因循权威的斗争，科学正是在这场斗争中获得了自己的独立地位。从这场斗争中，我们可以看出，反科学乃是运用科学之外的标准来衡量科学活动的结果，并动用科学之外的强制性力量来限制科学探索的范围，干涉、压制甚至破坏正常的科学活动。

20世纪常被人们称之为科学的世纪，但我们绝不能忘记20世纪反科学运动的巨大危害。就在伽利略被判处终生监禁的300年后，爱因斯坦的相对论遭到了纳粹分子的围剿，爱因斯坦本人也被迫流亡到美国。30年代，德国的纳粹分子把科学划分为雅利安人的科学和犹太人的科学，并且使用法西斯的手段清洗犹太人的科学和犹太科学家。50年代，苏联也发生了类似的情形，所不同的是苏联的权力机关是按阶级而不是按人种划分科学，相对论、量子力学和摩尔根遗传学都被视为资产阶级的科学而遭到批判和禁锢。在遗传学领域，李森科由于获得了斯大林的赏识，把持遗传学界达10年之久。米丘林的理论其实是通过伪造数据而获得的，但对米丘林理论的任何怀疑，都遭到了李森科利用政治手段的残酷打击。中国在文化大革命期间，也曾给相对论、量子力学和大爆炸宇宙论贴上了资产阶

级和唯心主义的标签，正常的科学活动几乎全被政治运动所取代。历史的教训，要求我们对当代的反科学活动决不能掉以轻心。即使在美国这样科技高度发达的国家，形形色色的反科学暗流仍很活跃。密西西比州反进化论的法律，直至1970年才被废除。美国的天主教团体，因为对避孕和堕胎持反对态度，总是通过种种手段干涉避孕技术的研究。

唯科学和反科学都有相当深厚的思想文化根源，与之相比，伪科学则谈不上任何系统的思想和坚定的主义。实际上，伪科学大多只是古代的交感巫术，诸如炼金术、占星术、占卜术、通灵术、招魂术、传心术、房中术、养生术和“特异功能”等等在当代的改头换面。这些法术本来只是与神秘主义相连的巫术，但随着科学地位的上升，它们便挂上科学的旗号进行社会活动。所以人们称之为伪科学。

交感巫术是一种非常古老的神秘主义思想，在世界各个古老的文明中都存在，就其力图通过人类的活动来控制自然界中种种神奇力量而言，倒与近代科学征服自然的目标相近。无怪乎科学在获得独立地位之前，在许多领域总是与伪科学混杂在一起。例子比比皆是。公元2世纪最伟大的占星著作《四部书》，出自托勒密的手笔。欧洲文艺复兴时期，神秘主义的巫术更是盛行。第谷的天文观测，与其对占星术的浓厚兴趣有着莫大干系。开普勒早年信奉数字神秘主义，并试图用此来解释太阳系的结构。在化学获得独立之前，炼金术一直是许多科学家热衷的实验领域，牛顿甚至将其一生的三分之一时间耗费在这上面。

无论是炼金术和占星术，还是房中术和通灵术，所有这类法术都是基于事物之间神秘的交互感应思想。随着近现代科学的诞生和发展，这种神秘主义业已失去了其生存的理论基础。识别伪科学并不困难。科学把客观性置于首位，而伪科学总是诉诸受试者的主观经验，所谓“心诚则灵”。科学追求的是一般法则，而伪科学总是强调特例，不具备可重复性的要求，并且一旦无法回避验证，就把

自己打扮成遭受科学团体迫害的形象。科学的知识体系具有复杂的层次结构，而伪科学根本没有知识体系可言。伪科学一方面明显违背科学知识体系中最基本层次上的理论，另一方面又直接盗用现代科学的基本概念为自己披上科学的外衣。科学基本层次上的规律都是一些否定性的和限制性的命题，诸如真空中光速有限、永动机不可能实现、量子过程的几率性等等，科学理论对于未来的预言能力也是有限的。伪科学却宣称自己是万能的科学、万能的良药，可以洞悉过去察知未来，可以遥感天体和他人的灵魂。

反科学是反理性的，伪科学本质上也是反理性的。反科学思想的泛滥，预示着理性精神的崩溃；而伪科学的昌盛，则是理性精神丧失的标志。这也说明了为什么伪科学活动往往与反科学运动孪生，并且紧随反科学运动而来。继中世纪宗教裁判所对异端的迫害，随之有文艺复兴时期伪科学的繁荣。继纳粹德国的法西斯运动，随之有战后大批德国青年转向神秘主义的现象。

如果我们把反科学比作人体中的恶性肿瘤，伪科学则是侵入人体的病菌。细菌我们是无法完全消灭的，但我们已有了各种疫苗，并知道如何去防范。提高大众的科学素质，无疑是最基本的防范措施。但病菌一旦侵入机体，防范已经无济于事，此时我们需要的是消灭病菌的手段。这不是单纯依靠科学教育就能解决的。伪科学之所以繁荣，正因为它宣称自己是万能的良药。在欧洲历史上，伪科学先后随着基督教的兴起和启蒙运动的发展而消歇，正因为宗教和启蒙思想中含有全能的概念。在基督教义中，上帝无所不在，无所不知，无所不能。惟科学主义则把科学看成是全能的化身，相信科学能够解决人类所面临的一切难题，不仅能够征服自然，而且能够改造社会，使之朝向更“合理”的方向发展。但科学并不是万能的，也从不宣称自己是万能的。惟科学主义在当代的破产，使得伪科学在一定程度上成了大众的一种替代性宗教。因此，要解决伪科学问题，必须有科学家和人文学者的共同努力。

法轮功就是一个例子。单纯从其“功理”来看，法轮功无疑是

十足的反科学、反社会、反人类伦理的，但若从其社会组织来看，又具备了传统邪教组织的某些特征，这也就是我们称其为邪教的原因。“邪”是指其反科学、反社会、反人类伦理，“教”则针对其社会活动和组织方式而言。法轮功的成员之中，并不乏一些受过某类科学训练之人，他们为何还信邪呢？答案并不难找。事实上，参与法轮功的成员，大多面临这样那样的社会心理问题，有些人下岗失业，有些人年老多病，有些人身患绝症，还有些人则是逃避社会变革的挑战却又心无所归；但是更重要的是我们的社会还缺乏一种足以充分沟通科学文化与人文文化的动力资源。这类社会心理问题早已超出了纯粹科学的职能范围，它反映出我们的社会制度和文化传统尚有诸多不完善之处。简单地采取行政手段并不能解决问题。欧洲在17世纪曾将女巫一律烧死，但女巫并没有因此绝迹。女巫的消失，最终还是依靠启蒙的力量和社会的进步。总而言之，我们必须消灭伪科学反科学滋生的温床，才能彻底解决伪科学反科学问题。这诚非一朝一夕之功，当前我们进行的政治经济改革和科学文化建设工作，正是朝向这一方面的努力。

三、近代科学与中国文化的碰撞

近代科学传入中国，前后经历了三个阶段，这三个阶段分别是由来华传教士、洋务官员和现代知识分子领导的。第一阶段的科学传播，是基督教传教士，特别是耶稣会士，采用科学传教的策略，以渗透的方式向中国传入的。如果我们从利玛窦1582年来华算起，直至1826年任职钦天监的最后一位天主教传教士告病归国，这一阶段历时将近两个半世纪。在这两个半世纪中，传播的高潮是前150年，后100年与之相比则显得黯然失色，其分水岭就是1720年康熙皇帝与罗马教廷之间的“礼仪之争”。“礼仪之争”之后，就只有少量供职钦天监和内务府的传教士仍在华活动。

明末清初是近代科学在西方兴起的时期，但通过传教士传入中国的科学知识，基本上是希腊化时代的成就（包括欧几里德几何学、阿基米德静力学、亚里士多德的宇宙论、托勒密天文学、地圆学说

和地理学、盖论人体解剖学等）及其在近代早期的某些修正（比如纳皮尔（J. Napier, 1550-1617）的对数法、代数和三角学、斯台文（S. Stevin, 1548-1620）的静力学、第谷的天文学体系、哥白尼计算行星位置的某些方法、伽利略对木卫的观测、地理大发现的资料以及哈维的血液循环理论等）。除这些理论之外，同时传入的还有一些“远西奇器”的样品或工作原理，其中有些是科学观测仪器，比如摆钟、望远镜、三棱镜和开普勒观测日月食的仪器等；另一些则是机械技术，比如杠杆、滑轮，西洋大炮。但哥白尼、伽利略、开普勒和牛顿理论体系的核心内容并没有介绍进来，因为这些学说在当时既遭到教会的抵制，也未被科学团体所一致接受，自然也就没有进入传播的渠道。罗马教廷取消对哥白尼学说的禁令是在1757年，其时光行差现象已于1727年由布拉德雷发现，地球是一椭圆体的推论也被法国大地测量学家所证实。因此之故，哥白尼的日心说，连同开普勒第一定律和牛顿理论的某些细节，也在18世纪中叶传入了清朝宫廷。1773年，罗马教是宣布解散耶稣会，近代科学传入中国的渠道也随之萎缩。

毋庸置疑，西方传教士来华传教，不仅是基督教文明与中国文明的第一次大碰撞，同时也包含着近代科学（至少是前近代科学）与中国文化的初次大碰撞。如果我们把这次碰撞看成是科学传播过程，这种传播一开始就患有先天不足的毛病。首先，耶稣会士来华的目的是传播基督教义，而不是传播科学和哲学。西方在科学和哲学上的成就，只是他们用来炫耀基督教文明的工具。换言之，科学知识是他们吸引中国文化精英接近基督教的手段。因此，他们不仅在传播新理论时受到基督教义和罗马教廷的限制，即使在介绍古典科学成就方面也显得相当零散。其二，这次科学传播活动，对于中国人来讲，完全是被动的接受，而不是积极主动的探求。如果我们把这次科学传播与佛教传入中国和希腊学术传入拉丁欧洲作一比较，就可以看出两者之间的巨大差别。佛教传入中国，源自中国民间的巨大宗教热情；同样，希腊科学和哲学传入西欧，要归因于拉

丁世界巨大的求知热情。相反，明清之际的中国社会，我们看不到这种大规模的民众热情。

因此之故，明清之际的科学传播，只能局限于中国社会的一个狭小空间之内，具体地讲，只能局限于与基督教士有所接触的士大夫和宫廷组成的小圈子之内。在这个小圈子之内，西方科学与中国文化的碰撞是非常强烈的，赞成者有之，拒绝者有之，依违其间、欲拒还迎者有之。现在我们要问，中国接受西方科学成就的文化基础是什么？拒斥西方科学成就的文化基础又是什么？这一次科学传播对中国思想和学术传统产生了哪些影响？

首先让我们来看看第一个问题——中国接受西方科学成就的文化基础。我们曾经强调，科学是多源的。科学本身没有中西之别，当我们说到中国科学或希腊科学时，我们指的是不同文明中的科学活动及其成就。明清之际传入中国的科学知识，其主体是希腊化时代以及近代早期在数学、天文学、地理学、解剖学等方面所取得的科学成就。倘若中国在这些学科上没有相应的基础，接受西方成果根本就是不可能之事。事实上，正是因为中国传统向来高度重视数学、天文、地理和医学知识，来华传教士才会采取科学传教方式。但中国古代科学知识相当发达这一事实，却不能掩盖另一事实，即科学本身没有获得独立的地位。科学获得独立和自足的地位，是近代科学革命的产物。在欧洲中世纪，科学是神学的婢女。而在中国明清时代，科学是依附于皇权制度和儒家文化这一框架之下的。

儒家文化的内核是脱胎于春秋时代封建制度的伦理规范。到秦汉大一统时代，这套伦理规范为适应专制皇权的现实，演变成了僵硬的纲常教条，同时又吸收了战国时代五行家的思想，为自己的伦理学添加了一套宇宙论的保护伞。汉帝国解体之后，汉儒理论失去了依傍，先秦的道家和名家学说一度复兴。随之是佛教征服中国思想界的历史。儒家学说的复兴，始于韩愈（768-824）的道统论。为了对抗道家和佛家的挑战，宋代兴起的新儒家相继为自己的伦理体系莫立了宇宙论（气或阴阳）和形而上学（理或道）的基础。理

学在明清两代被定为官方正统，并与皇权制度互为表里。中国古代科学发展的两大高峰，魏晋南北朝和两宋，都是中国历史上社会和思想控制相对松弛的时代，而明清则是中国专制制度恶性发展的时代。在这样的时代背景下，科学活动只能围绕皇权政治的实际需要（比如历法、水利）来展开。

不过，明代末年由于工商业的发展，一度出现了一场由王阳明（1472-1528）心学引发的思想解放运动。这场思想解放运动不仅导致了文学和艺术的繁荣，同时也为科学技术的发展创造了新的空间，从狭隘的皇权需要转向广阔的社会民生的需要。实学的思潮、李时珍的《本草纲目》和宋应星的《天工开物》都是在这个背景下产生的。明末西方科学的传入，则进一步激发了像徐光启这样的开明之士去发展理学框架内非常薄弱的知识论命题，将“格物致知”从心性修养方法拓展到科学认识活动，并在这个延伸的意义上吸纳西方的科学知识。后来的洋务官员在引进西方科技知识的时候，仍然沿用“格致”一词来指称各门科学。

但在满清一朝，格致学和实学最终还是未能脱离儒学的框架而成为独立发展的科学和技术体系。科学活动的最高目标，就是要用理性和客观的方法建立一幅简明、和谐、统一的宇宙图像。但迟至19世纪中下叶，中国的宇宙论仍然停留在阴阳五行这样简朴而又神秘的直观思辨水平之上。天象观测的目的，始终离不开“观象授时”和“观象以见吉凶”这两大功能，从未想到要像希腊人和欧洲人那样去建立世界体系。科学活动既然局限于皇权政治的需要，势必为拒斥西方科学成就提供了方便之门。1659年，杨光先以汤若望所修历法中有“依西洋新法”为理由，攻击其暗窃正朔之权，使中国奉西洋正朔而失体统，致使1665年五名钦天监官员被害，汤若望革职绞监候。历法问题，不单纯是一个天文学的问题，而是关涉政统与道统的大问题。

这场历法之争，最后还是通过梅文鼎（1633-1721）等人精心炮制的“西学中源论”而得到解决的。“西学中源”说固然淡化了

恪守“道统”、严“夷夏之防”的文化屏障，同时又为正统之士贬抑西学提供了理论根据。乾隆嘉庆时代，由于科学传播渠道的阻塞，虚构的“西学中源”论将大批学者引向了以经学治科学的道路。面向自然的科学研究，随之转变成钩索古籍中历算知识的考据工作。科学非但没有脱离儒家传统的框架，反而成了经学的附庸，所谓从名物、度数以通经义。这从乾嘉学派的治学之路可见一斑。将乾嘉学派与西欧中世纪经院学者的科学研究作一对比是非常有趣的，因为两者都是在正统的框架之内复兴古代科学遗产。但前者是在儒家框架之下复兴宋元的天算之学，后者是在基督教的框架之下复兴希腊的科学和哲学遗产。这种双重的差别便决定了结果的重大差别。欧洲中世纪的学术复兴为近代科学的诞生奠定了社会和思想基础，这就是大学的建立和亚里士多德学派的发展。与之相反，乾嘉学派则把科学引入了尊古崇古的死胡同。

何以如此呢？要把这个问题说清楚是不容易的。撇开社会经济背景不谈，单就思想层面而言，它也牵涉到儒学与基督教神学的差别、中国古代科学与希腊科学的差别、以及儒学同古代科学与基督教神学同希腊科学结合点的差别。基督教在获胜之后仍然面临着希腊学术的威胁，这就迫使基督教神学家吸收希腊哲学来发展自己的神学体系。我们知道，希腊化时代的专业科学是在希腊哲学、特别是亚里士多德哲学的背景之下发展起来的。如果说希腊哲学是基督教神学与希腊科学的联系中介，为汉儒和宋儒所采纳的阴阳学说则是儒家经典与中国传统科学的契合点。亚里士多德学说是一个严整的逻辑体系，阴阳学说不过是一个粗浅的“同构”式分类模型。前者以经验的探索为其立论的支柱，后者与经验的关系完全是想当然的比附对应。

李约瑟博士曾经问为什么近代科学没有在中国产生，看来更正确的问题应该是，为什么中国没有产生立足于理性和经验方法、力图解释整个世界的理论科学。中国古代科学知识在实用水平上与希腊化时代甚至前近代的科学相比并不逊色多少，但在理论水平上远

远落后于希腊科学：我们没有明确的地球概念，没有合理的宇宙结构图像，以致难以解释日食的发生；我们没有系统的动植物逻辑分类体系，也不清楚人体的血液和神经系统；我们更没有人询问为什么石头会下落，行星会作不规则的运行。理性的精神，特别是理性的批判精神，也就是说，按照逻辑上许可的论证公开讨论具体问题的精神，在中国传统文化中是相对贫乏的。儒家要你表现出温良恭谦让的儒雅风度，道家则要你抛弃智慧甚至抛弃语言。理性批判精神的贫乏，又导致了理性建构精神的贫乏，以致相关的知识始终停留在分散凌乱的状态，其间的关联只能求助于直观的思辨和想象，而不能组成一个逻辑上合理的体系。天文观测资料没有帮助我们改进宇宙模型，反倒为天人感应论者提供了解说的凭据。理性的贫乏，只能造成认识上的模糊和混乱，从而助长了神秘交感思想和不可知论的泛滥。在这样的文化背景下，要产生指导经验探索的理论科学是非常困难的。宋代是中国历史上关于自然的经验探索的高峰，并且对许多自然现象提出了高明的见解，但仍未能摆脱《易传》的阴阳框架而建立一套理性的宇宙论或自然哲学体系。

所以总体来讲，西方科学与中国文化的第一次碰撞，并没有给中国社会带来强大的精神震撼。西方前近代的科学成就，最终通过乾嘉学派的工作而与中国传统科学遗产发生了合流。1773年，乾隆皇帝设立四库全书馆，将明清之际的天文数学译著和中国传统数学典籍一同归入经史子集四部之中。“节取其技能而禁传其学术”，是四库馆编修对待西学的基本态度。那些同传统观念大相径庭的学说，要么被目之为离经叛道而直斥为谬论，比如五大洲的概念和地动学说，要么因有伤风化而深藏内府，比如人体解剖图说。事实上，近代科学思想直至19世纪中叶方才系统地输入中国。

从鸦片战争到清帝国的解体，是西方科学传入中国的第二大高峰。1840年的第一次鸦片战争，迫使中国政府开放了沿海的五个城市。与此同时，英国和美国的许多新教教派开始向中国各地渗透。与明清之际的耶稣会上相比，新教教士大多比较世俗。但为了扩大

自身的影响，他们汲取了耶稣会士的经验，在中国开办学校、医院和报馆等事业，从而在传播近代科学方面作出了一定的贡献。其中特别值得一提的有伦敦布道会传教士合信（B. Hobson, 1816-1873）编译的《博物新编》和墨海书馆伟烈亚力（A. Wylie, 1815-1887）与李善兰等人合译的《谈天》等数部科学著作。这些译著不仅将西方17世纪的经典成就，包括解析几何、微积分和牛顿力学，完整地引入到中国，同时还将西方18和19世纪的科学成就，诸如热学、声学、光学、电学、化学、地学、动植物学、解剖学和生理学，初次介绍到中国来。在译介这些科学知识的同时，伟烈亚力等人还向中国人传达了科学技术是国家富强之本这一崭新的观念，并在墨海书馆周围形成了一个主要由江浙学者组成的新知识群体，从而为洋务运动准备了思想和人才基础。

洋务运动的出发点是国防和军事的近代化，但近代化的国防和军事要求有近代化的工业和交通，近代化的工业和交通又进一步要求近代化的商业和财政，而所有这些近代化的事业都离不开近代化的教育和人才。因此，洋务运动将中国一步步拖上了不可逆转的近代化道路。中国人从认识西方坚船利炮的威力到认识到坚船利炮的基础在其天算格致之学，足足花了10多年的时间。最早认识这一点的就是在墨海书馆与传教士合译西书的新知识群体。1860年代，随着洋务运动的开展，这批新知识分子又加入到洋务运动中来，并在江南制造局设立了译书馆。江南制造局译书馆是我国19世纪下半叶译书最多、质量最高、影响最大的科技著作编译机构。通过笔述者徐寿、华蘅芳与口译者傅兰雅（J. Fryer, 1839-1928）等人的密切合作，西方近现代的数学、物理、化学和地学的各大分支，第一次被系统地介绍到中国来。中国近代先进的知识分子，从洋务时期的先知先觉着，到维新运动的康有为（1858-1927）、梁启超

（1873-1929）那一辈的人物，直至20世纪初追求新知的人们，在他们追求新知和放眼世界的过程中，都经历了一个学习江南制造局译书的过程。用梁启超的话说，这些译书为第二期（指甲午战后至

民国初年)“不懂外国话的西学家”开出了一条血路。

1894年甲午战争的失败,引发了全民族的震撼与觉醒。战后的中国知识阶层深切地认识到,中国的落后不仅是在军事技术方面,更在政治制度和教育制度方面。随着中华民族的觉醒,全国上下形成了一股革新的浪潮,并于1898年的戊戌变法运动中达到高潮。变法维新,旨在造就人才和振兴实业,因而也就离不开科学知识。与此相应,科学知识得到了更广泛的传播。出版界出现了西学丛书热,新兴的报刊业将科技内容作为刊载的热点。中国第一批专业性的科技刊物和科技协会也登上了社会的舞台。1898年的维新运动虽然只是昙花一现,但洋务时期的“中体西用”思想已经失去了作为中国文化发展的基本纲领的地位,儒家保守顽固势力最后只能求助于义和团的力量。1901年,西太后也被迫接过变法维新方略,明令废除八股、改制书院。1904年,清廷颁布《奏定学堂章程》。这是中国第一次在全国范围内推行的教育体制,史称“癸卯学制”。1905年,作为儒家文化的社会支柱、控制中国思想界近700年的科举制度终于被废除了。

科举制度的废除和“癸卯学制”的推行,标志着中国的科学教育开始独立于传统的儒家教育。中国的科学教育,创始于洋务时期的京师同文馆。但同文馆的科学教育计划,最终还是受挫于强大的保守顽固势力。癸卯学制是中国近代制度变革中意义最为重大的一项变革,它将科学教育真正纳入了中国的教育体制。这一学制分三段七级,长达近30年,其中初级教育分蒙养院(相当于幼儿园)、初小和高小三级共13年,中级教育5年,高级教育分大学预科、大学分科和通儒院(相当于研究生院)三级共11至12年。该学制实际上是日本学制的翻版,随之而来的是持续十余年的日本各级教科书的翻译运动。与洋务时期的翻译相比,这场大翻译运动不仅数量大、范围广、内容新、术语准,更重要的是,新的译本被各级学堂所采用,而不再像19世纪的译本那样局限于少数开明士绅和教会学校。随着科学教育纳入中国的基础教育体系,中国旧的士大夫阶层逐渐

消亡了，代之而起的是新型的知识分子阶层。中国五四新文化运动的新知识分子和中国20年代初留学归国的科学家，都是在这一新学制中接受基础训练和科学教育的。

癸卯学制的推行，事实上完成上近代科学知识在中国的传播。但科学不单是一套知识体系，同时也是一种文化形态和一项社会活动。癸卯学制虽然将科学知识纳入了基础教育，但并没有实现科学研究的建制化任务，也没有宣告科学是独立于人文或宗教传统的新文化。科学摆脱儒家思想框架而成为一种独立的文化形态，是“五四”新文化运动的巨大功绩。

在欧洲近代史上，科学与宗教发生了三次大论战：16至17世纪的天文学论战、17至18世纪的力学世界观论战和19世纪的进化论论战。随着近代科学在中国的传播，近代科学的世界图像，特别是这三大里程碑所确立的概念体系，也同中国传统思想发生了激烈的碰撞。明末清初之时，中国士大夫尚且对利玛窦传来的地圆学说惊讶不已。乾隆嘉庆时代，耶稣会士蒋友仁（M. Benoist, 1715-1774）将哥白尼学说传入中国，随后就被阮元（1764-1849）等人指斥为离经叛道不可为训。但近代的天文学革命只是触动了中国的少数士大夫，而达尔文的进化论则因甲午的战败触动了过渡时期的一代知识分子。1895年，严复着手翻译赫胥黎（T. H. Huxley, 1825-1895）的社会达尔文主义著作《进化论与伦理学》。1898年，严复的译著以《天演论》为名出版，“物竞天择，适者生存”的思想迅速波及中国大地，“适”、“竞”、“演”等字成为世纪之交国人取名的时髦用字。随着达尔文主义的普及，儒家传统的伦理和历史观念，诸如祖宗不变之法、三代圣贤之治等等，业以证明是向壁虚造的幻觉。进化思想的传播时期，正是中国新型知识分子开始形成的时期。到20世纪20年代，随着这批受过科学教育的知识分子的成长，一场规模宏大的新文化运动在中国大地上蔓延开来。

五四新文化运动本质上是一场以近代科学世界观为指导的思想启蒙运动。指导这场运动的科学世界观，不仅包括进化论的思想，

更包括机械论的自然观。把整个世界设想成一架走时精确的时钟，设想成粒子在无限时空中的机械运动，对于中国人思想的震撼，并不亚于进化的思想。由于采用了白话文体，五四新文化运动将启蒙的思想传播到每一个青年知识分子的心灵之中。在这种新世界观的面前，儒家经典失去了昔日的神圣光环。《诗经》不过是一部古典文学作品集，《尚书》和《春秋》被视为“断烂朝报”。至于《易》、《礼》，前者是卜筮基础上发展起来的神秘象数主义，后者则是茅塞人心的儒家政治理想和伦理规范。儒家思想体系的破产，最终导致了马克思主义在中国的传播和发展。马克思的经济决定论，对于年轻的中国知识分子来讲，就是人类社会发展的客观规律，人类社会领域中的牛顿力学原理。

正当五四新文化运动以近代科学的世界观重建中国传统文化之时，科学自身发生了一场可与牛顿革命相比的巨大变革，这就是相对论的创立和量子力学的诞生。相对论的创立，在推翻绝对时空观念的同时，实现了唯物主义的自我超越：建立在机械类比基础上的以太概念失去了效用，物质世界的统一性建立在抽象的能量概念基础之上。量子力学的诞生，则宣告了经典决定论的破产。在量子力学中，力和加速度的概念让位于能量和动量概念，而能量和动量又出现在量子力学几率振幅的相位之中。由于量子力学几率振幅的叠加给出量子事件发生的几率，量子力学严格说来就是量子信息学。从物质到能量再到信息，物理学一步步突破了经典的机械论自然观。

最后我们还要看到，现代科学革命爆发的时期正是中国大批青年知识分子奔赴欧美求学的时期。随着这批留学生的归国，科学在中国开始了建制化的过程。1928年中央研究院的建立，是中国在建制化道路上的一个转折点。伴随着科学的体制化的进程，科学基金会、专业科学团体和学术刊物也逐步在中国发展起来，中国的科学研究也从此汇入了世界现代科学发展的洪流。

第二节 科学技术与当代政治经济

一、科学的社会功能

科学技术是人类认识自然、改造自然和协调人与自然关系的创新活动的结晶，具有多种社会功能。如具有经济结构变革和生产力功能、社会变革功能和教化功能、以及认识 and 解决社会面临的各种问题的功能等，从而成为人类物质文明和精神文明的基石和源泉，并显现出时代的特点。科学技术的社会功能，早已为古今中外的学者所重视。自古以来，中国就是“诗书礼义”的知识之邦。东汉哲学家王充（公元27-约96）在《论衡·效力篇》中提出“人有知学，则有力矣”的警世名言，对知识的功能作出了精辟的概括。17世纪英国哲学家培根的“知识就是力量”更是振聋发聩，成为英国工业革命以来，世界巨大变化的凝练写照。培根看到了科学技术的社会功能，主张只有认识自然，拥有知识，依靠科学技术才能主宰自然，确立人类的统治地位。早期对科学技术的社会功能做出最深刻阐述的是马克思，他是世界公认的研究科学技术与社会相互关系的先驱。马克思和恩格斯亲身经历了工业革命给社会各领域带来的巨大而深刻的变化，对科学技术促进生产力、推动社会发展进行了深入的考察和研究。指出科学和工业一起变革了整个自然界，结束了人们对于自然界的幼稚态度和幼稚行为。马克思“把科学首先看成是历史的有力的杠杆，看成是最高意义上的革命力量，而且他正是把科学当做这种力量来加以利用，在他看来，他所掌握的渊博知识，特别是有关历史的一切领域的知识，用处就在这里”。（恩格斯《马克思墓前悼词草稿》，《马克思恩格斯全集》第19卷）马克思对中国古代技术成就的社会功能给予高度评价，把从中国传至欧洲的火药、指南针、印刷术誉为预告资产阶级社会到来的三大发明。恩格斯对18世纪科学的社会功能进行了高度概括：“各门科学在18世纪已经具有了科学形式，因此它们便一方面和哲学，另一方面和实践结合起来了。科学和哲学结合的结果是唯物主义（牛顿的

学说和洛克的学说同样是唯物主义所依据的前提）、启蒙时代和法国的政治革命。科学和实践结合的结果就是英国的社会革命。”（恩格斯：《英国状况》，《马克思恩格斯全集》第一卷）

科学技术发展到今天已成为规模庞大的知识系统、组织活动和社会建制。科学的目的在于认识世界，并具有真理性——发现和揭示客观规律，系统性——科学是系统化的知识，交叉性——各学科知识与方法具有相关性，发展性——科学是无止境的前沿，统一性——由于自然界本来就是统一整体，和可用性——知识就是力量。

技术的目的在于利用、改造和保护自然，造福人类，并具有功利性——满足特定的功利需求，科学性——符合科学原理，创造性——是科学知识的创造性应用，系统性——是或大或小的系统集成，社会性——符合社会需求、法规、道德和文明，经济性——经济上可行、有竞争力，生态性——符合生态环境要求，艺术性——符合文化与美学要求，进步性——不断进步与发展，二重性——同时对人类社会带来负面效应。

科学技术正是以这样的特点渗透到社会 and 人类生活的各个领域，左右着社会发展和人类的命运。就科学技术与生产的关系来说，19世纪中叶以前是生产—技术—科学的发展模式，到19世纪中叶以后，尤其是20世纪以后，则为生产—技术—科学—技术—生产并举的发展模式。科学技术与经济的结合愈趋紧密，科学技术与社会的关系更加密切，科学技术的社会功能也日益强大。知识经济的产生就是这种趋势的一个集中体现。

尽管科学的社会功能早已为思想敏锐的学者所注意和探讨，但是对它的系统研究却是从20世纪30年代才开始的。正如英国剑桥大学教授贝尔纳（J. D. Bernal, 1901-1971）所说：“什么是科学的社会功能呢？在100年或甚至在50年以前，即使对科学家自己来说，也是一个奇怪的，几乎没有意义的问题，对于行政官员或普通公民来说，更是如此。当时，很少有人考虑科学的社会功能。如果有人考虑这个问题的话，他们当时也认为，科学的功能便是普遍

造福于人类。”的确，科学作为“人类智慧的最高的成果”和“最有希望的物质福利的源泉”应该普遍造福于人类。但是要做到这一点，就必须搞清楚科学技术发展与经济、政治、文化、社会等的关系以及科学技术发挥正当功能的社会条件。这正是现已形成的以科学技术为研究对象的诸学1931年，在英国伦敦召开的国际第二届科学技术史大会上，苏联物理学家赫森（Hessen，1893-1938）递交了一篇题为《牛顿力学的社会经济根源》的著名论文，该文应用马克思所创立的辩证唯物主义及其关于历史发展过程的思想，把牛顿力学放到牛顿本身生活与工作时代的经济状况、物理学及技术问题的背景上，去分析牛顿工作的发生与发展。这项被称为“创建规范的研究工作”，成为科学史的研究从“内史”扩大到“外史”的开端。贝尔纳承认赫森的工作对他产生深刻的影响，并且认为，英国科学家对辩证唯物主义的兴趣，真正开始于1931年在伦敦举行的国际科学史大会。对英国来说，赫森的关于牛顿的文章，是科学史重新评价的起点。李约瑟也认为，这是“俄国人的杰出贡献”。美国科学史家默顿（R. K. Merton，1910-）也曾表示，赫森的思想对他撰写博士论文《十七世纪英国的科学、技术与社会》有启发作用。默顿的这篇论文于1938年出版，该文论述了英国17世纪的文化背景、意识形态、价值观念乃至经济和军事的需要等对科学技术的影响。1939年，贝尔纳《科学的社会功能》一书问世，更加系统、广泛地对科学发展与社会各个方面的相互关系、科学的社会功能以及科学的社会组织和科研投资等问题进行了深入的研究，提出应该根据现代科学发展的需要建立国家规模的科研组织、规划科学的进展和探讨科学发展的途径等一系列重要建议。1953年和1954年，贝尔纳又分别出版了《科学与社会》、《历史上的科学》等著作，对科学在社会中的地位 and 任务、科学的发展在历史上的作用等进行了概括性论述。他特别强调，科学作为社会的要素，只有在为人类服务时，它才能对社会的发展产生巨大的影响。贝尔纳认为应该从科学在社会中的地位和功能、从科学和社会的相互作用来把握科学的性

质和科学发展的规律。此外，李约瑟（著有《中国科学技术史》）、普赖斯（D. S. Price, 1922-）（著有《巴比伦以来的科学》、《小科学、大科学》）、本·大卫（J. Ben-David）（著有《科学家在社会中的地位》）和库恩（T. S. Kuhn, 1922-1996）（著有《科学革命的结构》、《必要的张力》）等学者也都从不同的角度探讨了科学与社会的关系和科学的社会功能。

面对科学技术的迅猛发展及其日益显著的社会影响，特别是核武器扩散、环境污染、生态破坏等负面影响，人们越来越重视科学技术与社会之间的关系的研究。20世纪60年代末70年代初诞生了一门新兴的交叉学科——科学技术与社会（STS），其宗旨是发挥科学技术的正面作用，克服负面作用，使科学技术真正造福于人类。这一学科的加入壮大了研究科学技术的社会功能的学术力量。此外，经济学中也研究科学技术的社会功能，而且它的研究从定性发展到定性 with 定量相结合。比如，美国麻省理工学院的经济学教授索洛（R. M. Solow, 1924-）在他1956年的模型中，引入一个反映技术进步作用的变量，运用计量经济学方法，分析美国1909年到1949年的经济增长，扣除资本和劳动力的贡献之后，得到40年间技术进步对美国经济增长的贡献为87.5%。从此在经济学中确立了科学技术在经济增长中的地位。由此可见，目前已形成了对科学的社会功能进行多学科多视角的研究态势。

现在人们一般从三个层次去理解科学。首先，科学是关于自然、社会和思维等各种事物的知识体系；其次，科学是创造和运用知识的社会活动；第三，科学是一种社会建制，是由职业科学家组成的学术团体和科研机构，是生产知识的社会组织。可见科学既是静态的又是动态的，既是知识体系又是生产知识的活动和组织。它是一个多层次的复合体。

科学的社会功能是极为广泛的，可以说凡是需要知识的地方，科学就在（能）发挥作用。这里我们从国家创新体系的实施来具体地看一看科学的社会功能。

国家创新体系分为知识创新系统、技术创新系统、知识传播系统和知识应用系统。它们体现了科学的知识生产功能、科学的生产力功能、科学的教育功能和科学的知识应用功能。国家创新体系的实施正是从总体上推动了科学的社会化。

科学的知识生产功能

生产知识或者说创造知识是科学最基本也是最重要的社会功能，在人类社会的发展过程中，知识尤其是科学知识起着至关重要的作用。人类的历史就是一部人类创造知识、传播（授）知识和应用知识的历史。20世纪以来，经济和军事的发展使社会对知识的需求急剧增加，全世界用于科研的经费，60年代末比20世纪初增加了400倍，现在已达每年4000亿美元。发达国家的研究与发展（R&D）经费通常约占国民生产总值的2.5%—3.0%。知识的生产者——科学家的人数，近两个世纪几乎是每隔50年就增加一个量级，其结果是知识的增长异常迅速。普赖斯根据科学杂志数和论文数的发展变化，提出科学知识按指数规律增长。19世纪大约每50年增长一倍，20世纪前半叶是每10年增加一倍，到80年代则是每隔6-7年增加一倍，目前是3-5年增加一倍。当然，严格地说，这只是知识载体的产量的增长情况，还不能算是对科学成果增量的描述，但它也足以说明当今世界知识生产的规模和声势。由此人们可以注意到科学之于社会的另一个重要的方面，即科学研究的产业化。昔日的“小科学”发展为今天的大科学，科学研究作为一种产业，影响着社会的各个领域。因此科学的知识生产功能的重要性不仅在于生产（创造）出的知识如何有用，还在于生产知识的组织规模和组织方式，在于这一新兴产业在社会结构中的地位和作用。

科学的生产力功能

关于科学在生产力中的作用，马克思早有明确的看法：“生产力中也包括科学”“社会劳动生产力，首先是科学的力量”。他在《资本论》中指出“劳动生产力是由多种情况决定的，其中包括：工人的平均熟练程度，科学的发展水平和它在工艺上的应用程度，生产过程的社会结合，生产资料的规模和效能，以及自然条件。”马克思还以手工织机被机械织机替代，早期机械织机又被新型机械织机所取代的过程，来说明技术进步是如何导致生产工具的变革，从而提高劳动生产力的。马克思强调科学是生产力中一个相对独立的因素，它对生产力的发展具有巨大的促进和变革的作用。对科学与生产的关系、科学转化为生产力的途径等问题，马克思也做了透彻的分析。

邓小平在1978年全国科学大会上，重申了“科学技术是生产力”这一马克思主义观点。1988年邓小平又进一步指出：“马克思说过，科学技术是生产力，事实证明这话讲得很对。依我看，科学技术是第一生产力。”这是邓小平对马克思主义科学观的新概括和新发展。

“科学技术是第一生产力”有着十分丰富的思想内涵，在科学的生产力功能方面，体现为：①提高全社会的科技意识，提高劳动者的科学素养，同时科技人员在劳动者中的比例也逐渐增大，劳动者的整体水平得以提高；②发展高新技术，增强科技实力，提高劳动资料（包括生产工具、机器设备、仪器仪表等）的技术水平，扩大劳动对象的范围，更多、更合理地把各种资源投入生产过程；③促进科技与经济的结合，形成知识和财富的良性循环，保持对科技的高投入；④提高科学管理水平，建立高效合理的生产结构和生产过程，优化生产力诸要素的关系，促进生产发展。

科学的教育功能

科学的教育功能有两层含义：一是科学提供新的知识来充实和

更新教育的内容；二是科学提供新的教育方式和手段。特别是信息技术的发展和普及使知识的传播和传授更加便捷，加之现在人们越来越重视学习和培训，所以科学的教育功能将会更加发达。

科学的知识应用功能

这是一个与科学的知识生产功能相对应的项目，其广泛性是不言而喻的。科学的知识应用功能也有两层含义：一是科学生产新的知识以供应用；二是科学提供如何应用知识的知识和手段。比较而言，我们更缺少如何应用知识的知识，缺少“影响和决定着关于应用技术的决策的那些知识”（A. 西蒙语），著名管理学家德鲁克（P. Drucker, 1909-）非常强调知识应用于知识的重要性，把它称为管理革命。他说：“提供知识以找出应用现有知识创造效益的最佳方法，事实上就是我们所说的管理”。知识已成为最重要的资源，如何利用这一资源（即如何应用知识）已成为当前人们迫切需要解决的问题。

二、知识与科教兴国

知识经济是以知识为基础的经济，这种经济建立在知识和信息的生产、分配和使用之上。现在，经济合作与发展组织（OECD）主要成员国的知识经济已经超过其国内生产总值的 50%，OECD 国家投入研究的经费占国内生产总值的 2.3%，教育经费占 OECD 国家政府支出的 12%。当代经济和社会的发展越来越依赖于知识创新和知识的创造性应用。而知识创新及创造性应用则要依靠人才，特别是要依靠高层次人才。因此，知识经济的一个主要特征就是人力资源成为最重要的资源，能够创造出经济和社会所需要的新知识的人才，是最重要的人才。发达国家与发展中国家相比最大的优势就在于拥有庞大、优质的人才资源和保证人才施展本领、发挥作用的体制。

知识经济对发达国家而言，是社会演进自发产生的结果，对发

展中国家来说，则是机遇和挑战。为迎接知识经济的挑战，发展中国家在加速工业化的同时，必将大力发展知识密集型产业和服务业，其经济发展将经历工业化为主、工业化和知识化并重、知识化为主三个阶段。与此同时，世界科技的发展将更加迅猛，科技成果向产业转化的周期和技术产品的市场生命周期将更短，发展中国家通过学习别国技术和经验而赶上发达国家的难度将加大，“后发优势”的作用将减弱。一些学者强调，随着知识经济时代在发达国家的现实化，全球经济系统将面临一次新的国际分工。在这次分工中，知识经济国家将进一步摆脱物质生产的拖累，而成为向全球经济提供知识、技术、智能和思想的“头脑国家”，而另一部分无法进入这一时代的国家，将成为利用这些知识、技术、智能、思想进行物质生产的“躯干国家”。在20世纪曾经极大地抑制发展中国家摆脱对发达国家依附地位的“技术壁垒”，将被进一步巩固和扩大，要缩短二者之间的差距，会变得更加艰巨和困难。在高度依赖创造和应用知识的能力和效率的时代，发展中国家的人才劣势对自身进步的制约作用将日益明显。一个缺少科学储备和创新能力的国家，不仅将失去国际市场竞争力和国内市场竞争优势，还将失去知识经济带来的机遇。而拥有持续创新能力和大量高素质人力资源的国家，则具备发展知识经济的巨大潜力和竞争力。

面对知识经济的挑战，党和国家已将科教兴国作为一项基本国策。科学与教育都是需要高投入的事业，要维持这种高投入，它必须提供高的回报。但是要能做到这一点，需要一套有效的运行机制和组织保障，否则高投入并不能换来高的产出。因此在科教兴国与国兴科教的关系中，关键就是要建立一个保证高投入与高产出的组织系统和运行机制，使知识和经济形成良性循环，否则对科教的高投入就难以为继。有学者指出我国科技进步与经济发展关系中矛盾的主导方面在于经济对科技的需求不足，或者说我国经济建设依靠科技不足，这都与不能形成良性循环有直接关系。

如何形成这种良性循环，如何建立这种组织系统和运行机制恰

恰也是知识经济所面临的核心问题。开始步入知识经济时代的发达国家，都在实现法制化的公平的市场经济竞争环境的基础上不同程度地实现了科技与经济的紧密结合，知识创新、技术创新与管理创新成为企业竞争优势的主要因素，形成了知识与经济相互促进的良性循环。知识经济是伴随着信息社会化、全球化经济时代到来的，它必然具有全球化竞争和合作的特征。知识全球范围的即时传播和应用、人才全球范围的流动与竞争、知识化产品全球性的合作生产、竞争和行销，全球性的知识产权保护公约和法规，全球化的宽带数字多媒体网络，科技与文化全球化的交流与合作，全球化已成为知识经济时代的特征。知识经济时代将是资本主义社会形态继续发展和演化的时代，也是我国探索和发展具有中国特色社会主义的新时代。这将是人类走向知识化、市场化、全球化、理性化与可持续发展、民主、法治、公正、公平、科学、文明的新时代。可以说，知识经济与科教兴国有着深刻的内在一致性。在社会主义市场经济条件下，在开放的全球化经济环境中，科教兴国战略是我国发展知识经济的重大战略。

经济学家一致认为，人力资本的投资收益率是最高的。但科学研究，特别是基础研究是否有应用前景和实用价值就不那么明确了。为此，美国总统科学技术政策办公室在题为《改变21世纪的科学与技术》的致国会的报告中，明确指出科学是无尽的资源，基础研究的成果是从本质上改善我们生活的先决条件。报告指出，当时没有人会料到：

——关于DNA分子的早期研究会导致能够开发出新型高效药物、高产作物以及更具营养的食物的基因工程；

——为验证物理定律而发明的超精确原子钟会成为全球定位系统的核心。这种系统现在是一个数十亿美元的产业，可用于导航、紧急救援、追踪商用运载工具，而且可能很快用于空中交通管制；

——关于液体流经孔洞方式的基础研究会导致改进汽车燃料注射系统、喷墨打印机和人造心脏瓣膜；

——在过去几十年中关于数千万军人态度与行为的基础研究会为许多现代高效的商业管理实践奠定基础；

——关于微电子机械系统的工程试验会创造一个为汽车安全气囊和许多其他产品提供加速传感器的数十亿美元的产业；

——磁学方面的基础研究会改变我们的社会，通过磁带录音机、录像机和其他任何可以记录并存储的东西而使我们的信息时代成为可能；

——在基础物理和化学方面数十年的研究会为分子生物学、基因排序及改进医学诊断和治疗提供必不可少的先进工具；

——信息高速公路的真正起源包括：40年代后期关于固体物理学的基础研究，导致了晶体管的出现；50年代初期大学里关于微波振子的研究，促成了激光器的发明；60年代中期的一篇学术论文，其推测性建议启发人们发明了光纤。这类研究即使在今天被提出，也很难从上百个类似的基础研究建议书中区分出来。然而它却成为一项革命性技术的种子，这项革命性技术很可能使家庭和工作场所一起得到彻底改造。

当然这个清单还可以继续罗列下去。这里我们要强调的是，基础研究对社会的贡献不仅有基础研究的科学成果及由它转化出来的实用技术，而且还有基础研究事业培养和造就的高水平人才。如果说基础研究能否转化为生产力是不具体、不可预测的话，那么，基础研究能够培养和造就出高水平人才却是具体的和必然的。从历史和现实上看，高水平人才的贡献是多方面的，往往涉及基础研究的多个领域和应用研究等多种部门，他们能够及时地为国家和社会解决各种难题。

对国家和企业这样的社会组织来讲，战略性研究的重要性并不下于基础与应用开发性研究。中国科学院进行的战略性研究主要包括国家中长期战略目标的战略性基础研究、与可持续发展相关的重大科技问题研究、战略性高技术创新研究等。战略研究要考虑科学、技术、经济、社会、环境等各种因素，是跨学科的综合性的研究，它

在大科学时代起着举足轻重的作用。在这方面的失误能造成巨大的经济损失与后果严重的社会影响。例如，日本在发展高清晰度电视上由于采用模拟技术而非数字技术，这个技术路线上的错误导致了二十多年来投入的大量经费和精力，付之东流。美国人类基因组计划在实施之前进行了4年论证，来评估其作用和影响，即使这样，人们至今对这个项目还深怀疑虑。

战略性研究的重要性就在于人们在重大事物的发展上离不开它，区别仅仅是采用短视的、粗糙的、低水平的发展战略，还是选取前瞻的、优质的、高水平发展战略，其结果无论是经济效益还是社会效益都将有天壤之别。战略性研究，特别是在国家组织层次上的战略研究的复杂性除了由于涉及因素多、综合性强之外，还在于对其评价的困难。大家知道，一个企业的发展战略的成败，市场很快就对其做出定量的评价，所以企业尤其是大型企业、大型高技术企业对战略研究和战略管理非常重视。现在，对于大型企业来说，惨重的损失往往主要不是由于技术落伍或质量欠佳，而是由于战略决策上的失误。据统计，IBM没有保住它在微机市场上的领导地位，结果损失了市场资本化资金高达900亿美元。苹果计算机公司董事长做出的不对麦金托什操作系统发放专卖许可证的决定，使苹果计算机公司损失了200亿到400亿美元的价值，微软公司的董事长盖茨（B. Gates，1955-）为避免遭到同样的命运，正在把他的战略转向国际互联网。

市场上具有相似情况的企业很多。由于采用不同的发展战略，导致结果不同，这样发展战略的作用就能显示出来。而世界上具有相似情况的国家，特别是相似情况的大国则极少或根本没有，又不可能同一个国家在同样条件下实施两种不同的发展战略来进行比较，因此往往对于国家层次上的发展战略，只有在出现明显重大失误时，人们才能感到它的重要性。孰不知一般水平的发展战略和高水平的发展战略的实施结果也有着巨大的差异，只是目前还没有一种有效的评价系统把这种差异显示出来而已。要想得到高水平的发

展战略，就必须加大对战略性研究的投入。由于战略性研究主要依靠具有综合研究能力的杰出学者和计算机、数据库等信息支持系统，有时战略性技术的研究开发也涉及价格昂贵的实验设备和平台，如航天技术的研究与发展、可控核聚变研究等。但相对而言，战略性研究是一种投入较低、回报却很高、见效很快的研究领域，非常值得放在优先地位予以考虑。

综上所述，基础研究和战略研究不仅是科技体系的基础和核心，而且与应用研究、技术开发一样，能够创造巨大的经济效益和社会效益，成为人类解决各种难题、迎接挑战的知识源泉和思想源泉。

知识经济的发展、科教兴国的实施，其核心是人才的合理培养和充分利用。知识与经济之间的良性循环在个人身上，表现为知识创造者拥有更多的财富，因此也就能够拥有更好的工作条件和生活条件。这又使得他们能更好地发展才能和施展本领，创造更多的财富。这样，发达国家的人才优势不断扩大，发展中国家人才劣势越发明显。缺少人才，没有保证人才发展才能、施展本领的合理体制，是发展中国家面临的最大困难。历史经验告诉我们，在和平年代，一流的工作条件、良好的生活条件和文化氛围，以及公正的评价系统，是吸引大量优秀人才的必要条件。也就是说没有这些条件，照样可以吸引到人才，但是很难吸引到足够数量的优秀人才。而“科学事业进步的快慢取决于第一流人才的数目”（前哈佛大学校长 J. B. Conant 语）。发达国家的优势就是能够提供这些条件，从而进入人才与财富的良性循环。发展中国家的劣势则是因为不能提供这些条件，吸引不到大量人才，创造不了大量财富，结果更加无力提供吸引人才的条件，因此进入恶性循环。显然这是导致“富国更富、穷国更穷”的一个重要原因。

邓小平同志指出：“人是生产力中最活跃的因素。”发展知识经济，实施科教兴国战略，人才及利于人才发挥作用的体制是关键。它关系到我们科教兴国大业的兴衰成败。我们必须认真研究培养、

吸引、凝聚并充分发挥他们作用的必要条件、政策和机制，下决心坚持实施，将中国丰富的人力资源转移到充分发挥人才创造能力的方向上来，从而最终将 13 亿人口的负担转变为取之不竭的发展动力。

三、知识经济时代的国家创新体系

国家创新体系是由知识创新和技术创新相关的机构和组织构成的网络系统，其骨干部分是企业（大型企业集团和高技术企业为主）、科研机构（包括国立科研机构和地方科研机构等）和高等院校等；广义的国家创新体系还包括政府部门、其他教育培训机构、中介机构和起支撑作用的基础设施等。国家创新体系的主要功能是知识创新、技术创新、知识传播和知识应用，具体包括创新活动的执行、创新资源（人力、财力和信息资源等）的配置、创新制度的建立和相关基础设施建设等。大力促进和广泛进行知识的生产、传播和应用，是国家创新体系的基本任务。为人才，为创新者提供发展才能、施展本领、发挥作用的条件、激励、组织支援和制度保障，是国家创新体系的基本功能。能否吸引到足够数量的人才，并使其充分发挥作用，是衡量国家创新体系成功与否的一个标志。这里所说的“足够数量的人才”是指使国家在国际上具有竞争优势所必需的人才数量。

国家创新体系可分为知识创新系统、技术创新系统、知识传播系统和知识应用系统。其中，知识创新系统是由与知识的生产、扩散和转移相关的机构和组织构成的网络系统（知识创新是指通过科学研究获得新的基础科学和技术科学知识的过程），其核心部分是国立科研机构（包括国家科研机构和部门科研机构）和教学科研型大学；技术创新系统是由与技术创新全过程相关的机构和组织构成的网络系统（技术创新是指学习、革新和创造新技术的过程），其核心部分是企业；知识传播系统主要指高等教育系统和职业培训系统，其主要作用是培养具有较高技能、最新知识和创新能力的人力资源；知识应用系统的主体是社会和企业，其主要功能是知识和技

术的实际应用。知识创新是技术创新的基础和源泉，技术创新是企业发展的根本，知识传播系统培养和输送高素质人才，知识应用促使科学知识和技术知识转变成现实生产力。国家创新体系的四个子系统，各有侧重，相互交叉，互相支持，构成一个开放的有机整体。

建设我国国家创新体系，不仅要把握国际经济和科技发展趋势，遵循经济和科技发展规律，更要瞄准国家战略目标，适应我国社会主义市场经济发展的需要，发挥市场行为和政府行为的合理作用。目前，我国正在实施的多项科技、教育计划和工程，为建设我国国家创新体系打下了良好基础。例如，“技术创新工程”旨在提高我国技术创新能力，形成符合社会主义市场经济和企业发展规律的技术创新体系及运行机制；“211工程”与“21世纪教育振兴计划”旨在提高我国高等院校的教育质量和科研水平，建立适应社会主义市场经济的高等教育新体制等。根据我国国家创新体系的总体构想，应在不断完善和继续推进“技术创新工程”、“211工程”与“21世纪教育振兴计划”和国家其他重点科技计划的同时，组织实施好“知识创新工程”，在国家宏观层面，形成建设国家创新体系完整的总体战略布局。

通过实施上述“三大工程”和有关政策措施，力争到2001年前后，基本形成适应社会主义市场经济体制和符合科技发展规律的国家创新体系及运行机制，基本具备能够支撑我国科技与经济可持续发展的国家创新能力，使我国国家创新实力达到世界中等发达国家水平，促使我国对识经济占国民经济的比例有较大提高，造就一批有国际影响的技术创新企业、国立科研机构 and 教学科研型大学。

第三节 科学技术发展对人类环境的影响

一、工业化与城市化的后果

英国工业革命始于18世纪中叶，到19世纪上半叶开始向欧洲大陆和北美扩散，这一世界性的工业化进程，极大地改变了人类社会

的面貌。工业化的一个严重后果是资源过度消耗与生态环境遭到污染和破坏。工业革命开始以后，化石燃料逐渐成为主要动力，滚滚浓烟污染了大气。1892年恩格斯在《英国工人阶级状况》一书中，就论述了英国工业城市曼彻斯特的污染危害，但环境问题并未引起人们普遍关注。直到20世纪中叶，在发达国家中发生了一系列严重的公害事件，环境问题才受到重视。在众多的公害事件中有八大事件最令人震惊：

(1) 马斯河谷事件 1930年12月发生于比利时的马斯河谷工业区，硫氧化物等几种有害气体和粉尘污染空气，导致60人死亡，几千人患呼吸道疾病。

(2) 多诺拉烟雾事件 1948年10月发生于美国宾夕法尼亚州的多诺拉镇，二氧化硫浓烟和“金属”硫酸铵等有害物质，在4天内使5511人患病，17人死亡。

(3) 洛杉矶光化学烟雾事件 40年代初发生于美国洛杉矶市，主要是汽车尾气在日光作用下形成毒害，引起人的眼病、咽炎、头痛，重者死亡。家畜也患病，妨碍农作物、植物生长，能见度降低，车祸和航空事故增多。

(4) 伦敦烟雾事件 1952年12月发生于英国伦敦，主要是燃煤产生一种特殊的煤烟毒雾，使4天内死亡人数较往年同期多4000人，事后两个月内还陆续有8000人病死。1956年、1957年、1962年又发生多起严重烟雾事件。最终查明是这种煤烟中含三氧化二铁，促使空气中的二氧化硫产生酸沫，附着在烟雾上，进入人的呼吸系统致病、致死。

(5) 四日市哮喘事件 1961年发生于日本四日市，主要是含有铅、锰、钛等重金属粉尘的工业废气和硫酸烟雾，人吸入肺后引起哮喘和癌症，1961年哮喘病发作，1964年重病者死亡。1967年有人因病痛自杀，到1972年共有6376人患病。

(6) 水俣病事件 1953-1956年发生于日本熊本县水俣市，主要是由于当地的化工厂采用低成本的水银催化剂工艺，把含有大量

甲基汞的废水、废渣排入水俣湾等水域，使其中的鱼、贝中毒，猫食用后跳海自杀，人食用后导致中枢神经受损，严重者死。1956年有96人患病，18人死亡，到1972年，仅水俣镇就有1万多人受害。

(7) 骨痛病事件 1955-1972年发生于日本富山县神通川流域，由于当地居民用被镉废水污染的河水灌溉农田，饮食了含镉的水和稻米中毒，患上骨痛病，到1968年有258人患病，128人死亡。

(8) 米糠油事件 1968年3月发生于日本九州、四国等地，由于一家食用油工厂为降低成本，用多氯联苯做热载体，因管理不善，使毒物污染了米糠油。这次事件中受害者13 000多人，死亡16人。

这一系列严重危害人类健康和生命安全的环境污染问题是工业化过程的一个负面影响。此外，伴随工业化进程，人口迅速增长，城市人口比例剧增，也是造成环境问题的一个原因。据统计，在1750-1950年间，欧洲、日本、北美和苏联的人口增加了4倍，在20世纪的一百年间，世界人口增加了4倍。发展中国家城市人口增加的更快，从1920年的约1亿人口增加到1980年的近10亿人口。而同期的乡村人口才增加1倍多。人口增长和城市化，给环境造成很大压力，尤其是在发展中国家里许多城市不能为迅速增长的居民提供必需的清洁用水、环境卫生、学校教育和交通运输。那里的房屋、道路和给排水系统等民用建筑常年失修、交通拥挤、环境污染、疾病流行。在不少城市中，贫穷居民的孩子在5岁之前4个中就有一个死于严重的营养不良，半数成年人患有肠道寄生虫病或严重的呼吸道传染病。例如在印度的3119个城镇中，仅有209个城镇具有部分的、8个城镇具有完整的排水与污水处理设施。在恒河流域，化工厂、造纸厂、制革厂等许多工厂把污水排入恒河。加尔各答旁边的河湾灌满了附近150多个大型工厂排放的未经处理的工业污水。加尔各答的60%人口患有与环境污染有关的疾病。在马来西亚，高度城市化的克兰流域（包括首都吉隆坡）的污染程度是美国主要城市的2到3倍，克兰河系严重污染。

20世纪60年代，工业化、城市化引发的环境问题，开始受到重

视，发达国家出现了大规模群众性的环境保护运动，科学家也开始对环境问题进行研究。1962年，美国女海洋生物学家卡逊

(R. Carson, 1907-1964) 出版了世界第一部有影响的环境科学著作《寂静的春天》。卡逊用四年时间对美国使用化学杀虫剂造成的危害及有关报告进行了广泛的调查研究，在此基础上写成此书。书中系统阐述了有机氯农药污染带来的危害，它不仅使欣欣向荣的春天“寂静”，而且威胁到人类的生存。1964年，国际科学联合会理事会设立国际生物圈方案，并于1968年设立环境问题科学委员会。同年，在意大利召开了由意大利、德国等10国学者参加的世界上第一次关于生态环境问题的国际学术会议，并在此基础上成立了著名的非官方国际组织——罗马俱乐部。该组织随后发表了关于人口、资源和环境问题的系列研究报告，产生了重要影响。

二、人类社会的可持续发展

1972年6月，联合国在瑞典斯德哥尔摩举办了首次世界人类环境会议，与会代表来自113个国家和一些国际组织。会议通过《人类环境宣言》和《人类行动计划》等文件，庄严宣告“为了人类的共同利益，必须应用科学和技术以鉴定、避免和控制环境变化并解决环境问题，从而促进经济和社会发展”“保护和改善人类环境已成为人类一个紧迫的目标”。作为大会背景材料和概念性纲要，一份大会报告产生了很大影响。该报告是英国经济学家沃德(B. Ward, 1914-1981) 和美国微生物学家杜博斯(R. Dubos, 1901-1982) 受联合国人类环境会议秘书长委托，在58个国家的152位专家的协助下编撰完成的。出版时的书名为《只有一个地球》，副标题《对一个小行星的关怀和维护》说明了它的主旨。作者从人口增长、资源滥用、技术的影响、社会发展不平衡、城市化以及发展与环境保护的关系等方面广泛深入地探讨了全球生态系统遭受破坏的原因和保护环境的措施。提出“人类生活的两个世界——他们所继承的生物圈和他们所创造的技术圈——已失去平衡……人类正生活在这种矛盾之中，这就是我们所面临的历史转折点。在这个历史时刻，

我们要关怀和维护行星地球，承担保护人类环境的责任，学会明智地管理地球。”作者在前言中还明确指出：“实际上联合国对这次会议的要求，显然是要确定我们应当干些什么，才能保持地球不仅成为现在适合人类生活的场所，而且将来也适合子孙后代居住。”

《增长的极限》是1972年出版的另一部讨论环境和发展的著作，它是罗马俱乐部的第一份研究报告。该书通过对人口增长、工业生产、农业生产、资源消耗和环境污染等五种因素之间关系的分析，指出增长将会达到极限，人类将面临全球性危机。只有具备现实主义的长远目标和达到这个目标的人类意志，才能创造一个完全新型的世代相传的社会。

由此可见，在70年代初环境保护已得到国际社会的普遍重视，可持续发展的思想也初步形成。但是认识到环境问题的重要性并不意味着就可以保护环境和改善环境。事实上，从70年代中期开始全球环境进一步恶化，又出现了一系列严重污染事故。其中包括意大利塞维索化学污染（1976年）、美国三里岛核电站泄漏（1979年）、墨西哥液化气爆炸（1984年）、印度博帕尔农药泄漏（1984年）、苏联切尔诺贝利核电站泄漏（1986年）和莱茵河污染事故（1986年）等多起恶性事故。概括起来，现在人类面临着八大环境问题：

（1）全球气候变暖，海平面上升

煤炭等化石燃料燃烧向大气排放大量二氧化碳等温室气体，导致全球气候变暖。全球温室气体的年增长量在1957年至1987年的30年间大约增长了2倍，预计到2030年，全球平均气温将上升1.5-4.5℃，全球平均海平面升高20-140厘米，气候异常变化将引起一系列自然灾害。

（2）臭氧层损耗

臭氧层吸收和过滤掉阳光中过多的有害的紫外线，是保护地球生命的天然屏障，由于制冷剂、氟化物的大量使用和排放，破坏了臭氧层，70年代后趋势加剧。1991年南极上空的臭氧空洞已经扩大到可容下珠穆朗玛山峰的程度，北极上空也出现臭氧空洞，臭氧

层的破坏严重地危害人类的健康。

(3) 森林日益减少与破坏

由于过度采伐，世界上几乎每年减少约1%热带雨林地，全球每年砍伐和焚烧的森林面积约为2000万公顷，平均每分钟就有40公顷森林消失。森林减少大大削弱了其调节气候，涵养水分，防风固土，养护生物，净化环境、维持生态平衡的重要功能。导致生态环境恶化，自然灾害频繁发生的严重后果。

(4) 水资源危机

近年来全球每年约有4.1万立方千米污水，携带数百亿吨污物，通过江河排入海洋，每年向海洋倾倒的工业废料和生活废物多达200亿吨，此外还有大量的石油、放射性废物、有毒化学品。海洋已成了蓝色“垃圾桶”。

(5) 空气污染

80年代后期，全世界约有13亿人居住在没有达到标准的空气中，过高的城市空气颗粒物水平是导致每年30-70万人提前死亡的原因。空气与我们息息相关。

(6) 土壤过分流失、土地沙漠化扩展

目前全球土壤流失量每年254亿吨，沙漠化以每年5-7万平方公里的速度扩展，“土之不存，人将焉活？”

(7) 生物物种加速灭绝

地球上约有1300-1400万种生物，它是宝贵的自然资源。据估计到2000年已有15%-20%物种灭绝，平均每天100消失多种，这种灭绝速度是自然灭绝速度的1000倍！联合国环境规划署的一份文件形象地指出，人类正在进行着一场空前的物种“大屠杀”。

(8) 有害废弃物日益增加

在全球每年产生33亿吨危险废物，整个工业化国家产生的危险废物，占全世界的90%-95%，美国是世界上生产危险废物最多的国家，人类正生活在有害废物的包围之中。

针对日益严重的环境问题，20世纪中叶一门涉及生态学、生物

学、地学、化学、物理学、医学、社会科学和工程技术等领域的综合性科学——环境科学诞生了。它主要有四项任务：一是探索全球范围内环境演化规律；二是揭示人类活动同自然生态之间的关系；三是探索环境变化对人类生存的影响；四是研究区域环境污染综合防治的技术措施和管理措施。环境科学经历了60-70年代形成分支学科体系（环境自然科学、环境社会科学和环境工程技术等）的第一阶段，和80年代以来从多学科到跨学科的整体化方向发展的第二阶段。作为一门新兴学科，环境科学发展十分迅速，社会地位日益提高，将是21世纪最有发展前途的学科之一。从1972年召开的联合国人类环境会议，1980年世界自然资源保护大纲的公布，到1992年里约热内卢国际环境与发展大会的召开，环境问题正日益受到重视，环境科学蓬勃兴起。

与环境科学相比，社会可持续发展研究是一个更广泛的学术领域，它不仅包括环境问题、资源问题，还包括与社会发展模式有关的诸多问题。这里我们着重讨论一下资源问题。工业化造成的一个突出的后果就是自然资源的过度消耗，发达国家把经济增长建立在自然资源的大量耗用之上，用“联合国环境方案”中的一句话说就是“我们不是继承父辈的地球，而是借用了子孙的地球”。发达国家在资源消耗上应该负有更多的责任。发达国家人口仅占世界总人口的四分之一，但其能源消费占世界消费总量的四分之三，其污染物排放量占世界总数的四分之三。美国则更为甚，美国人口不足世界总人口的5%，但却消耗着世界总能源的34%；美国平均每人每年消耗着相当于12英亩农田和林地提供的可再生资源。如果全世界的人都按这一标准消费，就会需要相当于4个地球的生产用地，也就是说人类还缺少3个地球。如果世界各国都按美国的数量向大气排放污染物，那我们还需要9个地球（或9个大气层）才能安全吸收由此产生的温室气体。

更令人担忧的是，对美国这种高消费状况，还有不少人在羡慕和模仿。照目前世界资源消耗的速度发展，则许多重要资源将在几

十年或更短的时间内消耗殆尽。显然这将严重影响到人类社会的继续发展。可持续发展（Sustainable development）就是针对这一问题提出的、能使人类子孙后代正常生活下去的新的社会发展思想和模式。经过二十多年的酝酿和探索，社会可持续发展的概念终于在1987年联合国所属的世界环境与发展委员会提交的题为《我们共同的未来》的报告中明确提出，可持续发展就是“人类有能力使发展持续下去，它能保证满足当前的需要，而不损害下一代满足其需要的能力”。该报告指出，世界各国政府和人民必须从现在起对经济发展和环境保护这两个重大问题负起自己的历史责任，制定正确的政策并付诸实施。《我们共同的未来》为世界各国采取一致行动提供了基础。

1992年6月，联合国环境与发展大会在巴西的里约热内卢举行。这是有史以来规模最大的一次国际会议，有183个国家和70个国际组织的代表出席了会议，其中还有102位国家元首或政府首脑莅会。李鹏总理率领中国代表团出席会议。会议的中心议题是可持续发展。会议发表了《关于环境与发展里约热内卢宣言》和《21世纪议程》。这次会议标志着国际社会对可持续发展的共识。《里约热内卢宣言》提出了可持续发展的27条原则，号召世界各国建立一种新的、公平的全球

伙伴关系。《21世纪议程》则探讨了人类与自然协调相处，获得可持续发展的条件和方式，具体阐述了有关可持续发展的40个领域的问题，提出120个实施项目。《21世纪议程》是一个全球性的行动计划，它要通过改革人类的生产方式和消费方式，来适应地球有限的承受力，使人类社会在21世纪可持续发展。

我国对可持续发展也非常重视，就在1992年联合国环境与发展大会之后，我国政府很快编制了《中国21世纪议程——中国21世纪人口、环境与发展白皮书》，并于1994年3月在国务院常务会议上讨论通过，随即正式颁布。《中国21世纪议程》是我国贯彻可持续发展战略的纲领性文件，是我国21世纪的发展蓝图。党和国家领导

人对可持续发展问题非常重视，1995年9月28日江泽民总书记在党的十四届五中全会的闭幕式上的讲话中指出：“在现代化建设中，必须把可持续发展作为一个重大战略。要把控制人口、节约资源、保护环境放到重要位置，使人口增长与社会生产力的发展相适应，使经济建设与资源、环境相协调，实现良性循环。”他还说：“必须切实保护好资源和环境，不仅要安排好当前的发展，还要为子孙后代着想，决不能吃祖宗饭，断子孙路，走浪费资源和先污染、后治理的路子。”

尽管我国目前还存在着严重的环境问题和资源消耗大及资源利用不当的问题，但是我们坚信，在党和政府的关怀和领导下，随着科学技术的发展和各国人民之间的相互支持与合作，我们一定能和世界人民一道把环境和资源问题解决好，让我们的后代在一个更适合生存和发展的地球上建设美好的家园。

三、科学：永无止境的探索

科学技术对于人类社会的作用并非完全是正面的，但是不能因此就否认科学技术的价值，而必须认识到，科学技术所产生的问题，最后只能通过科学的手段来解决。医疗技术的进步，带来了人口爆炸，而人口爆炸问题还得依靠医学技术的进步来加以控制。同样，机械、化工、材料、能源技术的进步，带来了环境与资源问题，为了解决这类问题，环境科学应运而生。科学的本质就是探索未知，在探索未知的过程中创造（生产）出各种各样的知识，这些知识被传播和运用，产生积极的或消极的甚至灾难性的结果。科学的探索性决定了科学结果的不可预测性，同时科学的探索性也决定了要对这种不可预测性尽可能加以控制，使其造福于人类。

科学活动的不可预测性，曾经给人类带来过很多好处。铂金在霍夫曼的指导下研究烯丙基——甲苯胺和奎宁制取方法时，谁也没想到铂金会发现可用于染色的苯胺紫，发明了世界上第一种合成染料，并且在铂金成功的带动下，一批化学家投入到人工合成染料研究的行列，创造了被经济史家誉为德国最伟大的工业成就的合成染

料工业。在基础研究活动中，出乎预料地得到有用的好结果的事例也很多，我们在本书“科教兴国与知识经济”一节中作了介绍。

当然，科学活动的不可预测性也给人类带来不少麻烦和危害。在探索物质结构的过程中，科学家发现了核能，并最终导致对世界产生巨大影响的核武器与核电站的发明。而当初即使像卢瑟福这样的在探索物质结构前沿的物理学大师，也认为核能是难以利用的。生物技术的兴起和发展是20世纪后期最引人注目的事件之一。作为生物技术的核心技术，DNA 重组技术及其应用——转基因植物和转基因动物的应用前景一直是人们争论的焦点。不少学者认为，DNA 重组技术已经深入到生命的核心层次，犹如核裂变在物理学中的地位，绝不能低估它对人类造成的正负两方面的影响。然而就像核裂变一经发现就被用于军事目的，DNA重组技术也可能被用于制造基因武器。这种武器是通过把致死的毒素基因插入本来不会致病的微生物体内，使受这种微生物感染的人死亡。还可以利用种群的生化特征，有选择地传染、杀伤或毁灭某些种群，而另一些种群则安然无事。人们担心，如果把艾滋病病毒与流感病毒进行基因重组，通过大面积传染，后果不堪设想。

在科学技术高速发展的今天，科技活动后果的不可预测性是科学乃至人类面临的一大挑战。科学固有的探索未知、解决难题的本性决定了科学必须迎接这一挑战。成功应战并不意味着可以预测科学活动的后果，而是能够合理地控制科技活动的后果，使科学技术造福于人类。这就要求我们改变把科学的社会应用视为科学之外的社会问题这一传统观念，而将它包括在科学探索和研究的范围之内。显然这种研究将涉及自然科学、社会科学、技术科学和交叉科学等广泛的知识领域。业已形成或正在形成的以科学技术为研究对象的诸学科，如科学技术史、科学技术社会学、科学技术哲学、科学技术与社会（STS）、科学技术管理学和科学技术伦理学等应该发挥自己综合研究的优势，在这一新的研究领域中做出重要的贡献。

科学是永无止境的探索，它代表人类日益增长的理性的力量。罗马俱乐部的“增长极限”论等种种悲观的态度，都因为在他们的“世界模型”中没有或不信任科学这一最重要的因素。科学不仅仅具有认识自然的精神价值，而且还有造福人类的工具价值。这两种不同的价值取向并不存在本质上的冲突。我们相信，只要我们把科学研究的重心放在未知领域和社会问题的交叉点上，致力于探讨那些具有全球影响的基础科学问题，完全可以肯定，科学也只有科学，才有能力推动人类社会健康持续地发展。

主要参考文献

[1] G. E. R. Lloyd, Early Greek Science: Thales to Aristotle, W. W. Norton & Company, London, 1970.

[2] 爱德华·格兰特(郝刘祥译),《中世纪的物理科学思想》,复旦大学出版社,2000年。

[3] Alexandre Koyré, From the Closed World to the Infinite Universe, The John Hopkins Press, 1957.

[4] Herbert Butterfield, Origins of Modern Science 1300-1800, The Free Press, New York, 1965.

[5] Richard Westfall, The Construction of Modern Science, Cambridge University Press, 1971.

[6] 托马斯·L. 汉金斯(任定成、张爱珍译),《科学与启蒙运动》,复旦大学出版社,2000年。

[7] P. M. Harman, Energy, Force and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth Century Physics, Cambridge University Press, 1982.

[8] 加兰·E. 艾伦(田沼译),《20世纪的生命科学史》,复旦大学出版社,2000年。

[9] A. N. 怀特海(何钦译),《科学与近代世界》,商务印书馆,1989年。

[10] 卡尔·波普尔(范景中、李本正译),《通过知识获得解放》,中国美术学院出版社,1996年。

[11] 杰拉尔德·霍耳顿(范岱年、陈养惠译),《科学与反科学》,江西教育出版社,1999年。

[12] 约翰·H. 布鲁克(苏贤贵译),《科学与宗教》,复旦大学出版社,2000年。

[13] J. D. 贝尔纳(陈体芳译),《科学的社会功能》,商务印书馆,1982年。

[14] 保尔·芒图（陈希秦等译），《18 世纪产业革命》，商务印书馆，1997 年。

[15] J.W.辛格、T. I.威廉斯等主编，《技术史》（中译本）等五至七卷，东北工学院等出版社。

[16] 世界环境与发展委员会（王之佳等译），《我们共同的未来》，吉林人民出版社，1997 年。

[17] 路甬祥，《创新与未来》，科学出版社，1998 年。

[18] 董光璧，《中国近现代科学技术史纲》，湖南教育出版社，1985 年。

[19] 樊洪业、王扬宗，《西学东渐——科学在中国的传播》，湖南科学技术出版社，2000 年。

[20] 杜石然等，《中国科学技术史稿》，科学出版社，1982 年。

[21] 许良英、李佩珊等，《20 世纪科学技术简史》，科学出版社，第二版，1999 年。

[22] 中国科学院，《科学发展报告》，科学出版社，1999 年，2000 年。

[23] 中国科学院，《高技术发展报告》，科学出版社，2000 年。

[24] 高达声、汪广仁，《近现代技术史简编》，科学技术出版社，1994 年。

后 记

本书是我和科学院自然科学史研究所与政策局的同志们的共同劳动成果。撰写计划最早是由我在1999年提议，拟在世纪之交来临之际，对科学技术的演进脉络作一全面的回顾，对未来科学技术的发展趋势作一粗线条的展望，以期引起公众对科学技术的兴趣和他们对社会作用的更多关注。

由于种种原因，这一计划未能在新世纪到来之前实现。但是这一计划中的主要观点和部分内容，我已在多种场合公开发表了。例如从1999年开始我就以“百年科技回顾与展望”为题作过一系列演讲，这一活动以中国科学院庆祝建院50周年，面向社会举办科学报告会为标志达到高潮。我对20世纪科学技术发展规律的一些思考，已经交由湖北教育出版社出版，不久就将以《百年科技话创新》为名面市。

相比于《百年科技话创新》，这本书的时间跨度更长一些，涉及的内容也更宽泛一些，因此难度也显得稍大一些。坦白地说，有些内容我也是在学习和思考中开始熟悉的。说它是集体劳动的成果绝非谦辞。

参加写作大纲讨论的有曹效业、刘钝、解源、刘逢松、董光璧、郝刘祥。

参加撰写工作的人员为，郝刘祥：第一部分第一、二节，第三部分第一节；董光璧：第一部分第三节；田松：第二部分第一、二节；刘益东：第二部分第三节、第三部分第二、三节；统稿为刘钝、郝刘祥。

我对全书的策划、校审和定稿负责，当然也包括错误和疏漏。

最后我要感谢自然科学史研究所和辽宁教育出版社将此书纳入他们的《新世纪科学史系列》，由于出版社领导和编辑的高效工作，使本书能在21世纪的第一个年头同广大读者见面。

中国科学院院长 路甬祥

2001年3月