

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

世界现代前期科技史

e-BOOK
内部资料 非卖品

内容提要

1870年—1918年，屈指算来不过48年的时间，但这48年却横跨了两个世纪。本书反映的是这一历史阶段世界科学技术发展的概貌。

世界现代前期科技史的主要内容包括：发生在这一历史时期的以电力技术为中心的第二次动力革命；发生在19世纪末至20世纪初的物理学革命与相对论的创立过程，并对世纪之交的化学、生物学、数学所取得的成就以及炼钢技术的发展等作了较为详尽的论述。

本书内容以史为主、史论结合，透视了作为科学技术这一特定文化现象的哲学内涵，对重要的人物和事件则作了专章介绍或着重论述。

一、概述

1870年—1918年,总算起来不过48年时间,可这48年时间却非同寻常。它在世界历史上占有重要的地位;它在人类的文明史上留下了辉煌灿烂的篇章。

有人把这一时期称作发明的英雄时代,绝非评价过高,在这近半个世纪的时间里,继英国、法国之后,德国、美国和日本也实现了产业革命,完成了工业化的历史任务,成为工业发达的国家。这段时间,恰处世纪之交,偏于此时爆发了第一次世界大战,后又发生了俄国十月革命,这些重大的历史事件和社会变革,自然会对世界范围内的科学技术发展产生影响。

1900年,在19世纪终结,20世纪开启之际,有两位科学巨人,在世界科学讲坛,分别作了关于物理学和数学发展前景的演讲,颇有辞旧迎新之感,昭示后人之意。他们一位是物理学泰斗开尔文勋爵(威廉·汤姆生),另一位是数学大师希尔伯特。开尔文勋爵总结了19世纪物理学取得的巨大成就,同时也忧心忡忡地指出了物理学上空出现的两朵乌云。恰恰是这两朵乌云形成了巨大的风暴,酿就了20世纪初物理学领域的革命。天才的爱因斯坦以其所创立的相对论,不仅包容了牛顿的经典力学体系,而且为以后物理学的发展指明了方向。希尔伯特值此世纪之交的当口归纳提出了数学领域有重大意义然而又尚未解决的23个问题,以期引起数学界的重视和研讨。孰不知这些问题竟对20世纪的数学研究发挥了巨大的指导作用。在解决这些问题的过程中,还获得了一系列与此相关的重大研究成果。其意义或许远远超过了这些问题本身。

关于物理学的情况,在此不妨作一点历史的回顾。在19世纪60年代,物理学的发展在当时说来,可谓达到了辉煌的顶点。经典物理学已经形成十分完备的理论体系。它所包含的经典力学和经典电磁学理论已达到“尽善尽美”的地步。牛顿以其创立的第一、第二、第三三条运动定律和万有引力定律构建了“坚不可摧”的经典力学大厦。麦克斯韦运用数学分析法建立了麦克斯韦方程组,从而把光、电、磁现象统一了起来。至此,很多人认为,经典物理学已经达到了顶峰,人类对自然的认识也已达到了尽头。因此,物理学从19世纪70年代起直至19世纪末,再没有取得显著进展(孕育着巨大变革)。当物理学家们送别19世纪,迎接20世纪的时候,英国享有盛名的科学家威廉·汤姆生(开尔文勋爵)于1900年4月27日发表了一篇历史总结性演讲。他概括了19世纪物理学取得的巨大成就。也指出了在古典物理学万里长空中还飘荡着两朵“乌云”。其中之一是同比热和热辐射有关的理论问题。汤姆生认为它还可望“在20世纪开头获得解决”;而另外一朵乌云即“以太漂移”实验的否定结果则看不到任何可解决的途径。汤姆生说“恐怕我们仍然必须把这一朵乌云看作是非常稠密的”。

乌云本是不祥之兆。处在世纪之交的物理学家们,以此坦露了他们感到困惑。因为“以太漂移”实验的否定结果,预示着经典物理学的理论根基发生了动摇。然而,正是这两朵乌云引发了20世纪的物理学革命,解除了人们的困惑,使经典物理学从山重水复疑无路,走进了柳暗花明又一村。在物理学这场伟大的变革中,科学巨匠爱因斯坦以其超人的智慧和独特的思维,创立了狭义相对论和广义相对论,其理论不仅囊括了经典物理学的理论体系,而且把物理学推进到现代科学的新阶段。狭义相对论以惯性参考系中的

“相对性原理”和“光速不变原理”否定了牛顿的绝对时空观，指出了仅仅在低速运动状态下经典力学的合理性，从而化解了以太之谜。在爱因斯坦完成狭义相对论之后，又向新的目标展开了进攻。他将相对性原理由惯性参考系进一步扩大到任意参考系，并把牛顿的引力理论作为一级近似包容其中，从而又创立了广义相对论。爱因斯坦在许多研究领域都取得了突破性的成果，在科学上为全人类作出了划时代的巨大贡献。

1880年以后，一场新的技术革命在世界范围内迅速展开。在这场革命中有三大技术发明带动了整个工业的发展。它们是法拉第发现电磁感应而导致的电力技术的发展和应；贝塞麦炼钢法的成功奠定了钢铁工业大发展的基础；焦油化学理论的突破带来了有机化学工业的繁荣。

1820年奥斯特发现了电流的磁效应，1831年法拉第发现了电磁感应。这些看似微不足道的发现却孕育着第二次技术革命的兴起，以电能为主要动力的电力革命从此揭开了序幕，使20世纪成为“电气化世纪”。发电机的研制成功，迅速形成了一个以汽轮机、水轮机等为原动力，以交流发电机为核心，以变压器等电器的输配电系统为动脉的变压输电网。电，可以为电报、电话、电灯提供能源，亦可通过电动机将电能转变成机械能以带动其他机械做功。电的发现和利用是人类自觉应用电学知识的伟大成果。从此，电取代了蒸汽，它所创造的生产力是蒸汽时代所不可比拟的。蒸汽机利用机械力代替人的体力，是扩展人类肢体功能的一次革命；电的应用，尤其是电报、电话、无线电的应用是扩展人类感官功能的一次革命。电的应用，是科学转化为技术、技术转化为社会生产力的最好证明。随着科学技术的发展，电的应用逐渐深入到人类生活、生产的各个领域，它不仅给经济生活带来了前所未有的大发展，而且给人们的文化生活增添了丰富多彩的新内容。

蒸汽机技术的发明和应用，引发了18世纪的产业革命。从此机器大生产逐渐代替了手工业的生产方式，生产效率十倍、百倍地增长，产品质量其精细和准确程度使手工制品望尘莫及，达到了近乎完美的地步。蒸汽机在其发明后的一百多年中，形成了极大的生产力，建立了极其宏伟的业绩。然而，随着时代的发展和科学技术的进步，蒸汽机不可克服的缺点（笨重、热效率低、不安全等），促使人们去研制新的动力装置。于是在蒸汽机不断改进的同时，在热力学等科学理论的指导下，一种新型热机——内燃机诞生了，作为内燃机产生的前提条件，当然是燃料的变革。在18世纪末英国人默多克（1754—1839）发现了用煤在炼制焦炭的过程中，同时有煤气生成，很快，这种可燃气体便在19世纪初被欧洲一些国家用于照明。1859年美国德莱克（1819—1880）用顿钻成功地打出了石油，到19世纪70年代石油生产进入了工业化时期。在煤气和石油能够充分供应的情况下，内燃机的发明才成为可能。法国人雷诺（1822—1900）发明了第一台二冲程煤气机，后由德国人奥托（1832—1891）、戴姆勒（1834—1900）和狄赛尔（1858—1913）对内燃机进行了重要改进，于是出现了四冲程煤气机、汽油机和柴油机。以后又出现了蒸汽涡轮机和燃气轮机。这一系列内燃机的改进、发展和应用，促进了交通事业的发展。其后出现了汽车、轮船、飞机等现代化的交通工具。

在这一时期，化学理论取得了重大进步，因而推动了化学工业的前进。俄国科学家门捷列夫关于元素周期律的发现和周期表的提出，是化学理论研究的巨大成果。从此，人们利用周期律和周期表可以掌握元素的基本化学性质，从而把握化学反应的过程，预见化学反应的结果，并可据此预见未知元

素的存在及其性质，在门捷列夫工作的基础上，英国的莫斯莱（1887—1915）和德国的柯塞尔（1888—1956）对元素周期律进行了科学的阐述，进一步完善了周期律理论。此后，一些新元素陆续被发现，如惰性气体、放射性元素、稀土元素等。当时，门捷列夫制出的周期表，列出了 66 个位置，找到了 63 种元素，而到 1945 年元素周期表列出的 92 个元素均已找到。在 20 世纪 40 年代，科学家们在寻找新元素的过程中，又发现了一系列超铀元素。于是突破了 92 号元素的界限，使元素周期表又一次得到修正和完善。科学家们在研究中发现，有些元素化学性质十分相似，它们总是紧密地相聚在一起，很难使它们分离。英国的索第（1877—1956）由此提出了“同位素”的概念，进一步丰富了元素周期律，完善了元素周期表。后来，物理化学、电化学、结构化学等一系列新的理论相继产生，对化学工业的发展产生了巨大的指导作用。

化学工业，包括无机化学工业和有机化学工业两部分。首先发展起来的是无机化学工业。无机化学工业的主要产品是酸和碱。在 19 世纪初期，酸、碱的制取都有了较为成熟的方法并逐渐形成一定的规模。而克尼奇的接触法制酸，和索尔维的氨碱法制碱，使酸、碱生产都进入现代化阶段。

有机化学工业的兴起始自维勒和李比希。维勒不仅合成了尿素打破了生命力论，而且和李比希一起提出了基团理论，开创了合成化学的新时代。在他们的带动下，德国出现了一大批杰出的科学家，如凯库勒、霍夫曼等。他们以煤焦油为原料，合成了一系列苯胺染料，其中最主要的是茜素和靛蓝，从而结束了由植物中提取茜素和靛蓝的历史。后来合成香料、合成药品、合成炸药均获成功。从此使煤化学成为化学的一个重要分支。合成化学取得的一系列巨大成就，使德国开始成为世界科学的中心。

电力技术的发展，化工技术的兴起，炼钢法的出现——这是第二次技术革命的重要成果和显著标志。

当人类社会步入铁器时代的时候，伴之而来的是铁器文化的兴起。世界著名的埃菲尔铁塔恰似一座历史的丰碑，成为钢铁时代的象征，钢铁冶炼技术的发展经历了从铁到钢的过程和炼钢法的一系列改进。高炉炼铁在 14 世纪就已出现，18 世纪随着焦炭冶炼代替木炭冶炼使炼铁技术进入了焦炭时代。铁器的使用，提高了生产力，改善了人们的物质生活条件。在此情况下，铁的需求量日益增加，但铁的弱点也越来越突出：生铁太脆，熟铁又太软。于是人们开始寻求新的冶炼方法，以期得到具有韧性的钢。在 19 世纪下半叶，由炼钢法的突破迎来了钢铁工业的新时代。

1856 年 8 月，英国的贝塞麦发表了《关于不使用燃料生产可锻铁和钢》的论文。在此之前，他发明了转炉炼钢新技术，使用了“吹气精炼法”。贝塞麦指出，这种炼钢法只需从炉底吹入空气，“除了铁水和空气什么也不需要”。人们对于贝塞麦的炼钢法疑惑不解，但贝塞麦的公开实验却使人们出乎预料，大开眼界。炼钢炉鼓入空气后，不但炉温没有降低反而升高，铁水中所含的锰、硅、磷等杂质在高温中氧化脱出，同时生铁中的碳也被氧化成二氧化碳，用了不到半个小时的时间，炼出一炉钢水。为了便于钢水倒出，贝塞麦把炼钢炉从固定式改为转动式结构，并获得了这一发明的专利。

贝塞麦炼钢法适用于冶炼含磷、硫量较低的矿石炼出的生铁，而对含磷、硫量较高的生铁则不适用。这一问题的解决是由英国的托马斯完成的。托马斯通过试验找到了理想的脱磷方法。他用向炉内添加石灰石的方法，使磷进

入矿渣，为避免石灰石和原来的酸性炉衬起化学反应，又把原来的酸性炉衬改为碱性炉衬，即由酸性硅酸质改变为碱性石灰质。托马斯对贝塞麦炼钢法的改革获得极大成功。

与贝塞麦炼钢法并驾齐驱的还有平炉炼钢法亦称西门子—马丁炼钢法。平炉有个较大的熔池，将经由下层蓄热室预热的空气和煤气送入上层，在熔池的铁水表面吹拂、燃烧，可较彻底地将铁水中的碳和其他杂质氧化。虽然平炉冶炼过程比转炉耗时要长，但平炉的容量大，产量高，原料广泛，炼出的钢质优良，因此适宜于大规模生产。

19 世纪末的后 30 年，由于现代钢铁技术体系的形成，钢铁工业发展迅猛，30 年钢产量增加了 120 倍，到 20 世纪初叶，钢铁仍在稳步发展，而且钢的品种也不断增加，并出现了各种合金钢和特种钢。

钢铁的发展，特别是钢铁材料的使用，引起了社会生活的巨大变化。在水泥发明之后，出现了钢筋混凝土建筑。其中有高层楼房、大型桥梁等。另外，铁路铺设，机械产品的生产，轮船、汽车的制造等，没有大量钢铁作支撑，是不可能发展起来的。19 世纪末至 20 世纪初，钢铁工业的大发展和钢铁材料的广泛应用，使世界进入钢铁时代。

如果说 18 世纪以前的科学史属于“力学的世纪”，19 世纪和 20 世纪上半叶属于“物理学的世纪”的话，那么从 20 世纪开始，生物学的地位越来越显示出它的重要性。在 19 世纪生物学领域就已取得两大成果——进化论和细胞学说，它们奠定了后来生命科学发展的基础。19 世纪下半叶，为了探索个体与群体之间，细胞与遗传现象之间的内在联系，遗传学应运而生并迅速得到发展。与此同时，微生物学也在应用中悄然兴起。至此，我们看到，随着生物学研究的不断深化，研究对象从宏观转向微观，即从生物的群体、个体、逐步深入到揭示生命现象的微观机制。当人们发现生物与生物之间、生物与环境之间存在着某种平衡关系时，一门新的学科——生态学诞生了，于是人们在科学研究中把个体与群体，宏观与微观，此种生物与彼种生物等因素统一在共同的环境中，进行共存研究。这时，生态学又使人们把对生物学的研究引向综合。在 19 世纪下半叶到 20 世纪上半叶，生物学的理论研究取得了一系列重大突破，在应用方面也开始取得实际效果。

达尔文这位进化论的集大成者，他的《物种起源》一书，成为 19 世纪最具影响的科学著作之一。他将自己 5 年环球航行，20 年研究、思考所形成的思想精华熔入其中。达尔文的进化论蕴涵着丰富的辩证法思想。它指出了生物的起源和进化问题，提出了自然选择的理论，有力地冲击了形而上学的世界观和物种不变的神创论。达尔文在提出进化论的同时已注意到了遗传现象。在《物种起源》一书中达尔文指出：“支配遗传的诸法则，大部分是未知的。没有人能够说明同种的不同个体间或者异种间的同一特性，为什么有时候能够遗传，有时候不能遗传；为什么子代常常重现祖父或祖母的某些性状，或者重现更远的祖先的性状；为什么一种特性常常从一性传给两性，或只传给一性……”。他认为，每一个能够各自独立变化的性状是与一种物质载体连接在一起的；组成身体的所有细胞都能产生微粒，即所谓的生殖微粒，这些微粒都能以不同的强度各自独立地繁殖，它们由循环系统带至生殖细胞，集中在一起，生殖细胞就是由来自各种器官的物质组成的。显然，达尔文没有把生殖细胞和体细胞加以严格区分。人们把达尔文对遗传现象的解释称为“泛生说”。

瑞士著名的植物学家耐格里(1817—1891),在1884年作出了细胞内有遗传物质——种质的推想。他认为,种质充满整个细胞,从而遍布全身;每一个可感知的性状,作为一种素质或遗传因子被包含在种质里。

19世纪末,德国生物学家魏斯曼(1834—1914)批判了泛生论,提出种质理论也称种质连续假说。他认为体细胞和生殖细胞有根本区别,从而把生殖细胞称作“种质”,试图用“种质论”来解释进化与发育的关系。魏斯曼的学说为遗传学的研究奠定了基础。

随着显微镜的发明和应用,人们对生物的认识开始深入到生物的细微结构。19世纪初,人们已经认识到细胞是植物和动物最基本的结构单位。德国生物学家施莱登和施旺建立了完整的细胞学说,并明确指出了细胞是由细胞生成的。19世纪40年代后,许多生物学家先后发现了细胞的分裂过程,到1879年,德国生物学家弗莱明(1843—1915)发现了染色质。在细胞进行有丝分裂时,染色质形成线状染色质丝,1888年,德国的瓦尔德尔将染色质丝命名为“染色体”。1885年比利时胚胎学家贝纳登(1845—1910)又发现了在形成配子时的“减数分裂”过程。随着细胞学说的建立和发展,许多鲜为人知的生物学的秘密相继被揭开了。这一切又都为遗传学的产生和发展创造了条件。

在19世纪末至20世纪初,遗传学的发展取得了重大突破。为遗传学作出卓越贡献的代表人物是孟德尔和摩尔根。孟德尔通过豌豆杂交试验预见遗传因子(基因)的存在,揭示了遗传的秘密,提出了“分离定律”和“自由组合定律”。分离定律被确定为遗传第一定律,系指一对遗传因子,其中一个为显性因子,另一个为隐性因子,在彼此结合的状态下,并不相互影响,相互沾染,而在形成配子时完全按原样分离到不同的配子中去。自由组合定律被确定为遗传第二定律,系指一对性状的分离与另一对性状的分离是相互独立的,它们可以自由组合,故又称独立分配律。遗憾的是,孟德尔超越时代的伟大发现,由于种种原因并没有被同时代的人所接受,竟至埋没达三十多年才被重新发现。孟德尔遗传定律的重新发现标志着一个绵延两千多年的关于生殖和遗传的臆想和猜测时代的终结。遗传学的进一步发展,使它与细胞学结合了起来。美国的萨顿(1877—1916)和德国的鲍维里是实现这一结合的先行者。他们在1902年利用显微镜证实了染色体行为和遗传因子的相似性。摩尔根利用著名的果蝇试验发现了“基因连锁”现象,即几个相邻的基因往往组成“连锁”一起遗传而不彼此分开,不同染色体上的基因可以自由组合,但在同一染色体上的基因却不能自由组合。这就是连锁遗传定律,亦称遗传第三定律。摩尔根和他的学生在研究工作中还发现了基因“交换”现象,提出了基因在染色体上直线排列的学说,说明了由杂交所引起的基因重组是使生物发生变异的原因,并指出基因重组的发生与外界环境没有必然的联系,因此获得性状是不遗传的等等。摩尔根提出了较完整的基因理论,发展了孟德尔的遗传学说。

在19世纪下半叶,就生物学而言,除了细胞学说和生物进化论两大发现之外,还有微生物学的研究和应用也取得了重大进展。尤其是法国的巴斯德(1822—1895)为微生物学的建立及揭示微生物的秘密,取得了令世人瞩目的功绩。巴斯德奠定了细菌致病学说,随后他不仅提出并且创造了细菌消毒法,他还发现了免疫作用,成为抗御细菌感染,造福人类的千秋功业。

1870—1918年,在这近半个世纪的时间内,科学技术的发展取得了惊人

的进步。首先是生活在这一历史时期的科学家们，他们的创造性劳动和对科学技术的献身精神是推动科学技术发展的主要动力。在这一历史时期，活跃着一大批出类拔萃的科学家和发明家，他们在各自的领域内都做出了不寻常的贡献。例如卓越的物理学家法拉第、麦克斯韦、爱因斯坦、玻尔、开尔文勋爵（汤姆生）、普朗克、德布罗意、薛定谔、海森堡；数学大师希尔伯特、彭加勒；化学家门捷列夫、凯库勒、霍夫曼、拜耳；生物学家孟德尔、摩尔根、巴斯德；炼钢专家贝塞麦、托马斯、马丁父子、西门子兄弟；为内燃机的发明和改进作出重大贡献的雷诺、奥托、戴姆勒、本茨、狄塞尔；为电力技术的发展和应用建立了不朽功勋的爱迪生、莫尔斯、贝尔、波波夫、马可尼，以及第一架飞机的制造者莱特兄弟和率先使汽车投入大规模生产的技师兼企业家福特……

在这一时期各国的科学家们相继建立了一批著名的实验室，并在科学研究中形成了多支享有盛名的学术流派。著名的实验室如贝尔实验室、爱迪生发明工厂、卡文迪许实验室、拜耳实验室、巴斯德研究所等。著名的学术流派有哥廷根学派、哥本哈根学派、摩尔根学派等。这些著名的实验室和学术流派为科学技术的发展和学术研究的争鸣发挥了重要作用。

在科学理论的指导下，技术发明获得成功，技术改进取得突破，技术成果又迅速投入应用，形成强大的社会生产力。这是 1870—1918 年这一历史时期的一个最显著的特点。如在电学理论的指导下，电力技术迅速发展起来，先后发明了发电机、电动机、电灯、电报、无线电等，这些技术发明投入应用以后，使人们的生产、生活发生了前所未有的变化。有机化学的发展是如此，炼钢技术的发展是如此，内燃机的发展亦是如此。科学技术能够产生强大的生产力，科学技术就是生产力，在当时科学技术发达的国家不仅形成了这样一种观念，而且成为活生生的现实。

二、热机变革及对交通事业的促进

蒸汽机作为一种强大的工业动力机械，自 18 世纪发明以来不断得到改进，对当时的工业革命产生了巨大的作用和影响，并导致了火车和轮船的发明。其后，在陆路和水路运输业中都迅速得到了应用。然而蒸汽机又存在着许多难以克服的缺点，诸如效率低（热效率一般在 5—8%）、速度慢、体积大、运转笨、安全性差（时常发生爆炸）。由于其在性能方面难以取得突破，因此不易在更大的范围推广，应用便受到了限制，因此，人们祈盼着发明理想的热机。1859 年 8 月 29 日，美国采矿工程师德莱克在宾夕法尼亚州利用地下取盐的钻机打出了世界上第一口油井，从此，石油成为化学工业的重要原料，亦为内燃机的发展提供了能源条件。在这种情况下，内燃机便应运而生了。

1. 内燃机的发明与发展

说起内燃机发明来，应当说首先是火炮给了人们重要启迪，甚至可以说火炮是内燃机的雏形。最早利用火炮原理进行动力机械研究的是著名物理学家惠更斯。由于发明内燃机的条件尚不具备，结果是尽管内燃机的设想在蒸汽机之前，而内燃机的诞生却在蒸汽机之后。

（1）从煤气机的问世到汽油机的成功

18—19 世纪随着煤炭、石油工业的发展，煤气的生成和石油的分馏使内燃机的发明成为可能。在内燃机的发展过程中，不少国家的工程师、发明家对内燃机的设计、改进做出了开拓性的贡献。而第一台可以实际应用并投入生产的内燃机是一部二冲程、无压缩、电点火的煤气机，其功劳当归法国人雷诺（1821—1900），制造成功时为 1860 年。虽然其热效率只有 4%，但它毕竟是一种非蒸汽动力的新型热机。其后，随着热力学理论的发展，法国工程师德·罗沙在 1862 年提出了制造高效率内燃机的四冲程循环原理。这一原理的实现是由德国人奥托（1832—1891）率先完成的。他研制出第一台四冲程活塞式内燃机并于 1876 年获得专利，1877 年在巴黎博览会上展出便很快得到推广。奥托内燃机是一种煤气机，其热效率达 14%。奥托在 35 年中，一直从事内燃机的研究，后来又把热效率提高到 20% 以上。他因此而获得了内燃机发明者的荣誉。

内燃机在其发展过程中不断改进和完善，但其向小型化、高速化转变则是在石油燃料出现之后，确切地说是采用汽油作燃料之后才实现的。在奥托成功地研制出四冲程活塞式内燃机之后，他创立了德意志煤气发动机股份公司，其合作者德国人戴姆勒（1834—1900）在奥托内燃机的基础上，改用汽油作燃料，于 1883 年成功地制造出第一台现代四冲程往复式汽油发动机。其中的关键部分是戴姆勒发明的汽化器。于是发动机的转数由煤气机的每分钟 200 转迅速提高到 900 转。1889 年，戴姆勒又制成了 V 型双缸汽油机，用于汽车并获得了专利。

（2）柴油发动机的诞生

在石油中的轻质部分——汽油，用来充当燃料驱动内燃机获得成功之后，人们自然想到了石油中的重油成份。于是许多人开始研制煤油机和柴油机。1886 年，滕特和卜雷斯特曼研制成功 100 马力的煤油机，并用于农业耕

作。1892年，德国机械工程师狄塞尔（1858—1913）研制成功了柴油机。这是一种不用点火装置的压燃式内燃机。它加长了燃烧过程前的压缩过程，增大了压缩比，使热效率大幅度提高到27—32%，取得了内燃机技术的重大突破。狄塞尔研制的第一台18马力的压燃式内燃机，1897年在慕尼黑展览会上展出，立即引起了人们的注目和赞赏。狄塞尔看到自己发明的商业价值之后，迅速申请了专利，并广为推销其发明，他还开办了自己的柴油机制造厂，于是很快成了百万富翁。由于这种新型的柴油机还不够成熟，狄塞尔又无暇进行继续研究和改进，于是他的柴油机制造厂所生产的第一批产品，由于运转不良，用户纷纷退货。狄塞尔和他的柴油机一下子弄得声名狼藉，在激烈的竞争中，不仅赔光了家产，而且负下了20万美元的债务。面对这一沉重打击，狄塞尔悲观之极自杀身亡。此后，狄塞尔柴油机经过30年的改进才日趋完善，并成为重型运转工具中无可替代的原动机。

（3）汽轮机的研制

在内燃机发展的同时，另外两种新型热机也在加紧研制之中。一种是蒸汽涡轮机。另一种是燃汽轮机。蒸汽涡轮机的运动部件是转子，转子在蒸汽反冲力的作用下发生转动，由此带动其他部件的运动。英国人查尔斯·帕森斯（1854—1931）在1884年取得了蒸汽涡轮机的专利。这部涡轮机的转子以每分钟750—18000转的转速高速旋转。1889年瑞典人拉瓦尔（1845—1913）制造的冲击式高速汽轮机的转速竟高达每分钟1000030000转。由于汽轮机较之蒸汽机具有明显的高速、强力、高效等优点，因此汽轮机成为更加理想的热机。

燃汽轮机的结构与蒸汽轮机类似，所不同的是使用燃料，通常是用煤油作燃料，使燃料与高压空气混合后，连续燃烧，产生的燃烧气体推动转子的涡轮叶片转动。在燃汽轮机的发明、改进过程中，不少人为此进行了不懈的探索，1872年德国人斯托兹第一个实际制造出具有现代特征的燃汽轮机，因其热效率很低，并未获得应用。进入20世纪后，几经改进燃汽轮机才达到实用阶段。由于燃汽轮机存在难以克服的缺点：热效率低、噪声大、成本高、寿命短、污染严重，因而仅用于发电、飞机、船舶等几个有限的方面。

2. 内燃机的应用和推广

内燃机发明之后，由于它和蒸汽机相比有着极大的优越性，因此很快投入应用并迅速得到推广。内燃机的应用和推广，使生产力发生了巨大变革，加速了社会生活现代化的进程。因此，其意义不逊于电的发现和应用。

（1）内燃机的应用和汽车工业的崛起

从内燃机能够实际使用起，人们就看到了它的发展前景，于是试图用之驱动车辆，以代替笨重的蒸汽机。内燃机的推广使用，使交通运输业产生了继火车之后的又一次革命。从19世纪开始，人们制出了最初的汽车，如蒸汽机汽车、蓄电池汽车和内燃机汽车，在20世纪初形成了世界的内燃机汽车工业。

汽车工业的前奏曲

法国军官居纽1769年将一台蒸汽机安装在三轮车上，用来拖运大炮，同时还可乘坐四人。这种新型的运输工具，开创了自带动力装置驱动的新纪元。这辆用蒸汽机驱动的车子堪称为世界上第一辆汽车。此后，蒸汽机汽车一度

得到发展，法国巴黎在 1790 年出现了蒸汽机公共汽车，英国城市之间在 19 世纪中叶出现了蒸汽机客车。在这一期间，法国、德国、丹麦、美国都发展了蒸汽机汽车。到 20 世纪初，美国汽车保有量中 40% 为蒸汽机汽车，38% 为蓄电池汽车，而内燃机汽车仅占 22%。当时，蒸汽机汽车的技术水平正处于优势，1906 年美国的一辆斯坦利牌蒸汽机汽车，创造了当时汽车时速 205 公里的世界纪录。但因蒸汽机汽车的产量小，故未能形成汽车工业。又因蒸汽机自身的笨重、污染、使用不便等缺点，不久蒸汽机汽车便被内燃机汽车所淘汰。

从 19 世纪 70 年代起，电力逐步取代了蒸汽机成为工业的主要能源和动力。1873 年，英国人罗伯特·戴维森研制成第一辆用蓄电池驱动的电动汽车。随后在法国和美国也出现了电动汽车。由于电动汽车便于操纵和使用，所以也曾有过一段辉煌发展的时期。在 1899 年美国的汽车大赛中，蓄电池电动汽车时速达到 106 公里，创造了当时的世界纪录。1915 年，美国生产的蓄电池汽车，年产达到 5000 辆。随着科学技术的发展，蓄电池汽车在竞争中亦逐渐被内燃机汽车所代替。

汽车的出现

1862 年诞生了第一部使用雷诺煤气机的汽车。1864 年奥地利人西格弗里德·马库斯曾将一台点燃式二冲程内燃机装在一辆四轮车上。后经改进，1875 年马库斯又制成第二辆装用内燃机的汽车。1883 年德国人戴姆勒在奥托四冲程煤气机的基础上，制出一台用汽油代替煤气作燃料的单缸小型汽油机，并于 1885 年 11 月装在自行车上，制成了第一部摩托车。同年戴姆勒又将一台小型汽油机装在一辆四轮车上。另一位德国发明家本茨（1844—1929）也成功地将奥托的煤气机改为汽油机，也在 1885 年将其研制的单缸、两冲程汽油机装在一辆三轮车上，成为最早的一部三轮汽车，其时速可达 20 公里。后来本茨又自己设计了专门用于汽车的四冲程汽油内燃机，在技术上对戴姆勒汽油机作了重大改进，如采用水循环冷却系统和齿轮传动变速装置。1899 年英国兽医丹洛甫（1840—1921）发明了充气轮胎，本茨迅即将其采用作为车轮，直到这时汽车才可称之为真正意义上的汽车了。1886 年 1 月 26 日为本茨的内燃机汽车正式取得专利的日子，为纪念本茨一生对汽车作出的贡献，这一天被作为内燃机汽车诞生之日。

为汽车的改进作出了重要贡献的还有法国人雷内·帕哈德和埃米尔·卢瓦瑟。他们将戴姆勒汽车改成为发动机前置、后轮驱动，通过离合器、变速器、链条驱动差速器、后半轴及后车轮的现代汽车的雏形。法国科学院于 1891 年确认该车为第一辆现代汽车，并于 1895 年正式将这种乘人的汽车定名为“automobile”，其中“auto”为希腊文“自己”，“mobile”为拉丁文“运动”。

汽油机的发明和汽油燃料的使用，成为汽车工业的开端。内燃机汽车后来又分为两种类型，即汽油机汽车和柴油机汽车。汽油机汽车发明较早，柴油机汽车则是在 20 世纪初才出现的。1921 年戴姆勒汽车制造公司制成了柴油机汽车。1925 年该公司又将柴油机载货汽车正式投产。在此之前，戴姆勒公司还于 1896 年研制成功第一辆汽油机载货汽车。

汽车工业的形成与发展

在汽车发明后的一段时间，人们想到的是乘坐汽车是一种娱乐和享受，因此设计和制造汽车都是围绕着轿车进行的。由于当时轿车售价高、产量少，

所以并未很快形成汽车工业。1906年德国、法国的汽车制造厂家宣称欧洲的汽车年产量占世界年产量的一半以上，但欧洲的年产量也仅有5万辆左右。

在汽车工业的形成和发展中，美国人亨利·福特是较早取得成功的企业家。亨利·福特（1863—1947）本是一位钟表匠，在汽车刚刚问世的时候，便看到了这种新型交通工具的极大优越性和未来发展的巨大潜力。于是福特改行从事汽车制造。他从1892年开始研制第一辆二缸汽车。这是一部结构简单，装有四个自行车轮，并有两个前进档的小型汽油机四轮车。该车时速可达20公里。1893年他将该车售出，经少量生产销售后，很受人们欢迎。福特在底特律市长的支持下，1899年集资成立了底特律汽车公司，开始批量生产豪华轿车，每辆售价高达2700美元。起初销路不错，1902年出现滞销。福特提出，要扩大汽车生产，就要将汽车由奢侈品变为人们的必需品；要使汽车成为必需品，就要改豪华型为普及型。由于公司合作者的反对，福特脱离了底特律汽车公司，并于1903年成立了福特汽车公司。他积极研制普及型轿车，广为吸收各种设计思想和先进技术，很快便使A型汽车投入大批量生产。1905年，A型汽车达到年产1700多辆。1907年，福特又将新研制的普及型T型轿车投入生产。1909年T型轿车年产超过一万辆，售价从1000美元以上降至950美元，销路很好。福特又将惠特尼枪枝零件标准化生产方法和钟表制造业采用的总装法应用于汽车制造过程中，于1913年创造了流水作业法，建成了世界上第一条汽车“装配线”，进行大规模生产。到1914年，T型汽车年产量达到30万辆，到1916年每辆售价降至360美元。在1926年，T型福特轿车停产前，年产达到200万辆，售价仅290美元，在20年的时间内，生产了T型轿车1500万辆，为汽车工业大生产创造了基本经验。从此，汽车开始成为人们日常交通的重要工具。

第一次世界大战，使欧洲工业受到很大影响，但却促进了美国工业的发展，加之美国政府对汽车消费的引导和许诺，以及对轿车生产的支持，使美国成为世界上第一个普及汽车的国家。由于各汽车生产公司相互竞争，致使美国的汽车生产成本大幅度降低，汽车质量不断提高，因而具备了进入国际市场进行竞争的优势。到1923年，美国福特、通用汽车公司汽车年产量达400多万辆，占世界汽车年产量的90%以上，汽车工业开始成为美国的支柱产业之一。在此期间福特公司和通用公司又代表了大规模生产的两种不同的组织模式。福特公司则代表了全能型的生产组织模式，即汽车的全部零部件，甚至包括轮胎、蓄电池都由本公司生产。而通用公司则代表了专业化的生产组织模式。它将一些汽车制造企业联合起来，分工协作，根据各个企业的条件，实行专业化生产。企业的竞争，也体现了这两种生产组织模式的竞争。1927年，通用汽车公司的年产量第一次超过福特公司，跃居世界汽车企业年产量排名榜首。

美国汽车在高速发展中打入了欧洲市场，随着汽车销售情况的发展和变化，美国的汽车厂商先后采取了两种新的生产方式。其一是就地装配，其二为投资办厂。福特公司和通用公司到1929年分别在21个国家和16个国家建立了总装厂。将美国生产的汽车零部件运往欧洲，再将这些零部件就地装配成车。这样与整车运输相比：一来可以降低成本，二来可避免长途运输对汽车外表的损伤。后来，欧洲各国政府，为了保护本国的汽车工业，开始对美国汽车进口增加关税，特别对零部件进口实行重税，于是美国又采取了向欧洲各国大量投资直接设厂的办法。但此举仍然遭到一些国家的反对，如法国

和意大利就拒绝美国厂家的建厂投资。欧洲各国的汽车厂家虽不能用降低售价的办法与美国厂家竞争，但他们充分利用欧洲的技术优势，使汽车的品种实现多样化，使汽车的性能更适应欧洲国家的自然条件、社会环境和生活习惯等不同要求，从而以新颖的汽车产品与美国厂家争夺市场。所以汽车在整体结构、整车布置方面的新式样，如发动机前置前驱动，后置后驱动，承载式车身、微型省油轿车等，都在欧洲首先出现。这些新技术的研究和采用为西欧各国汽车工业的发展，奠定了基础。随着石油工业的发展和公路网的建设，欧洲的汽车工业到二次大战后其总产量达到可与美国平分秋色的地步。

汽车的发展，为人们带来了方便，同时也带来了新的问题。如汽车保有量的增长，使交通事故的发生率相应上升；汽车发动机的废气排放，使空气污染日趋严重。在二次大战之后，各国政府积极采取措施，严格交通管理，不断完善公路交通安全法规，以减少交通事故的发生。同时对汽车废气的排放做出限制，以减轻由此造成的日益严重的空气污染。

主要汽车生产国概况

在 19 世纪末汽车诞生之后，到 1945 年第二次世界大战结束，汽车主要生产国有美国、德国、法国、意大利和苏联。

美国在这一期间，无论从汽车的年产量还是销售量，以及保有量与普及率均占世界首位。20 世纪初，福特汽车公司以物美价廉的 T 型轿车占领了国内市场，1924 年年产已达到 200 万辆以上。第一次世界大战之后，美国经济增长很快，人民生活水平提高，国内汽车市场出现了高档需求的倾向。通用汽车公司适应这一需求的变化，不失时机地以较高档次普及型轿车开辟了新的市场。通用汽车公司建立了大量销售体系，因此自 1931 年以来在汽车销售方面一直居于首席地位。美国政府有意识地引导人民购买轿车，强化了美国人民对汽车的需求，因而为美国的汽车工业提供了宏大的国内市场，也使美国的汽车厂家较早地具备了国际市场的竞争能力。在美国建立较早也是较大的三家汽车公司是福特汽车公司、通用汽车公司、克莱斯勒汽车公司，它们分别建立于 1903 年、1908 年、1925 年。这三家公司，被称为美国汽车工业的“三巨头”。在汽车工业急剧发展的 1903 年至 1926 年，美国先后建立了 181 家汽车厂，其中 137 家在 1927 年宣告撤销。20 世纪 30 年代，由于世界性的经济萧条，美国轿车的销售量大幅下降，1932 年只有 114 万辆，直到 1937 年才恢复到 392 万辆。而“三巨头”的销售量之和占了全国汽车总销售量的 90% 以上。在二次世界大战中，福特、通用等公司转向生产军用物资。战争结束之后，又出现了新一轮的汽车热，到 1950 年，美国国内的轿车需求量又上升到 500—600 万辆。同时，市场对轿车的需求趋向于大型化、豪华化。

德国的汽车工业是从 19 世纪 80 年代发展起来的。戴姆勒和本茨分别研制成功汽油机汽车，并各自成立了汽车制造公司。1926 年，这两个公司合并，成立了戴姆勒—本茨（奔驰）汽车公司。后来又有奥贝尔等汽车企业相继建立。1925 年美国福特公司在德国建厂，通用公司又于 1929 年收买了奥贝尔。于是福特公司和通用公司成为德国最早的两家外资企业。1932 年，戴姆勒—本茨公司与奥迪等四个公司结成汽车联合体。1937 年，专门生产小型轿车的大众汽车公司宣告成立。在第二次世界大战期间，德国的汽车工业基本毁于战争。战后的联邦德国汽车工业得到迅速发展，1950 年汽车产量就达到 30 多万辆，超过了战前德国汽车生产的最高水平。战后联邦德国的汽车生产，以国内的劳动阶层为目标，大量生产普及型轿车。由于联邦德国的汽车行业

生产成本较高，因此整车价格的竞争力不强。后来在联邦德国出现了多家汽车零部件公司。这些零部件公司在世界市场具有很强的竞争能力。

法国的汽车工业起于 19 世纪末，当时标致和雷诺汽车公司已开始了商业性生产。其后雪铁龙在 1916 年，西姆卡在 1935 年也相继投产。在 20 世纪初，法国还引进了英国和德国的技术以发展自己的汽车工业。在二次世界大战之前，法国的汽车生产规模已达到 20 万辆。战后，法国的汽车工业已处于本国支柱产业地位。

意大利是欧洲最大的汽车消费市场之一。它的汽车工业在 19 世纪末起步，菲亚特公司是意大利最大的汽车制造公司。自 1899 年该公司成立以来，便垄断了国内市场，其产量占全国总产量的 90% 以上。而国营的阿尔发·罗密欧公司和其他一些小公司其生产规模无法与之匹敌。因此意大利的汽车产业为菲亚特所控制和左右。1935 年，意大利的汽车年产量约 5 万辆，二次世界大战后，产量才有较大发展，到 1950 年，年产量已超过 12 万辆。

苏联在十月革命前，汽车的生产规模很小，当时仅有里加的俄罗斯一波罗车辆厂，于 1908—1915 年间生产了 9000 辆轿车和货车。1920 年苏联开始生产载货汽车，后来又从美国的福特公司引进了技术和设备，在二次世界大战前的 1938 年汽车年产量达到 20 万辆，战后迅速恢复并很快发展起来。1924 年莫斯科汽车制造厂开始生产轻型载货汽车，1931 年达到近 3 万辆的生产规模。1928 年苏联开始建设高尔基汽车厂，1932 年 IA3—A 型小轿车在该厂投入生产。后来，又有两个轿车厂建成，它们是莫斯科轿车厂和伏尔加轿车厂。莫斯科轿车厂在二次大战前生产过 KNM—10 型汽车，战后在 1947 年生产了莫斯科人轿车，伏尔加轿车厂专门生产拉达轿车，其生产能力可达年产 70 万辆。此外，在其他地方还建立了一些小型汽车厂。

（2）内燃机的应用与航空、航海事业的发展

除汽车外，内燃机在航空和航海方面也建立了勋业。1903 年，第一架飞机用汽油机驱动，由赖特兄弟驾驶试航成功。虽然这架用螺旋桨推进的滑翔机，留空时间仅有 59 秒种，飞行高度不过 260 米，但这次空中飞行却是人类千百年来美好向往的第一次胜利尝试。1909 年法国工程师布莱里奥特驾驶飞机飞越了英吉利海峡，从此飞机的发展引起了社会的广泛重视。飞机的制造技术和性能不断得到改进，并完全进入实用阶段。中国的冯如、谢纘泰等也于这一时期在国外各自独立地研究飞机，尤其是冯如的飞机性能良好，1911 年运回中国，遗憾的是在国内未能得到进一步发展。第一次世界大战期间，德国将飞机用于战争，给人类带来了灾难和恐惧，然而也使军用飞机获得飞快的发展。战争的需要使飞机的飞行速度、爬高能力和航行距离不断提高，而这又有赖于增压发动机、涡轮增压发动机和变螺距螺旋桨等技术突破。1927 年，林德伯格驾驶飞机从纽约直飞巴黎。此后，航空事业才获得大发展。内燃机在船舶制造中的应用，使航海事业出现了新的景象。1903 年，第一艘内燃机轮船建造成功；1908 年，柴油机成为潜水艇的动力机；1912 年，第一艘柴油机驱动的远洋货轮下水。此外，1910 年，拖拉机开始大批生产，使农业迈进机械化的新里程。1913 年，以柴油机为动力的内燃机车投入运行，揭开了铁路运输史的灿烂篇章。

三、第二次动力革命——电力的发展和应用

电，当人类感知到它的存在的时候，便以极大的好奇心展开了对电现象的观察与研究。电学，当其开始时仅仅是在静电学的范围内徘徊，而在 18 世纪的最后一年，意大利人伏打（1745—1827）发明了伏打电堆，使化学能转化为电能，电学才迈出了静电学的狭小区域。因此，伏打电堆可称为电学转变的一个重要标志。进入 19 世纪之后，电化学和电磁学的研究一度取得了惊人的成就，但随后又陷入了停滞不前的境地。恰在此时，英国人法拉第（1791—1867）开始了“转磁为电”的研究。1831 年 8 月 29 日，法拉第成功地进行了“电磁感应”的实验，10 月底又创制了第一部感应发电机的模型。真可谓一发而不可收，从此，电的研究和应用迅速发展起来，电作为一种新的强大的能源开始在人类的生产、生活中发挥着日益巨大的作用。

1. 电力技术的发展

（1）发电机、电动机的革新和应用

在生产需要的直接推动下，具有实用价值的发电机和电动机相继问世，并在应用户不断得到改进和完善。初始阶段的发电机是永磁式发电机，即用永久磁铁作为场磁铁。由于永久磁铁本身磁场强度有限，因而永磁式电机不能提供强大的电力，故缺乏实用性。要增大发电机的输出功率，使其达到实用要求，就要对发电机的各个组成部分进行改造。发电机的主要部件是场磁铁、电枢、集电环和电刷。首先用电磁铁取代永久磁铁取得了极大成功。1845 年，英国物理学家惠斯通（1802—1875）通过外加电源给线圈励磁，又改进了电枢绕组，从而制成了第一台电磁铁发电机。1866 年德国科学家西门子（1816—1892）制成了第一台使用电磁铁的自激式发电机。西门子发电机的成功标志着建造大容量电机，从而获得强大电力，在技术上已经取得突破。因此，西门子发电机在电学发展史上具有划时代的意义。

自激原理的发现是永磁式发电机向励磁式发电机发展的关键环节。自激是指直流发电机利用本身感应的电功率的一部分去激发场磁铁，从而形成电磁铁。在发电机的改进过程中，磁场的变化经历了从永磁到励磁；而电流励磁又经历了从他激到自激；自激又经历了从串激到并激，再到复激的发展过程。因此直流电机按其励磁方法的不同又可分为他激和自激两类，而自激电机又包括了串激、并激和复激三种形式。

1870 年比利时人格拉姆（1826—1901）依靠瓦利所提出的原理，并采用了意大利人帕契诺蒂（1841—1912）1865 年发明的齿状电枢结构，创造了环形无槽闭合电枢绕组，制成了环形电枢自激直流发电机。1873 年，德国电气工程师赫夫纳·阿尔特涅克（1845—1904）对直流电机的电枢又作了改进，研制成功鼓状电枢自激直流发电机。他吸取了格拉姆和帕契诺蒂电机转子的优点，简化了制造方法，因而大大提高了发电机的效率，降低了发电机的生产成本，使发电机进入到实用阶段。至此，直流发电机的基本结构已达到定型化。1880 年，美国的爱迪生（1847—1931）制造出了名为“巨象机”的大型直流发电机，并于 1881 年在巴黎博览会上展出。

与此同时，电动机的研制工作也在进行之中。19 世纪初叶，在法拉第制出电动机模型后不久，美国的一位机械工人达文波特（1802—1851）在 1836

年用电动机带动木工旋床,1840年又带动报纸印刷机。1834年俄国物理学家雅可比(1801—1874)发明了功率为15瓦的棒状铁心电动机,1839年他在涅瓦河上作了用电动机驱动船舶的实验。可以说发电机和电动机是同一种机器的两种不同的功能,用其作为电流输出装置就是发电机,用其作为动力供给装置就是电动机(又称马达)。电机的这一可逆原理偶然在1873年获得证明。是年,在维也纳的工业展览会上,由于一位工人的操作失误,竟把一对电线错接到一台正在运行的格拉姆发电机上,结果发现这台发电机的转子改变了方向,迅即向相反的方向转动,变成了一台电动机。在此以前,电动机和发电机是各自独立发展的。从此以后,人们认识到直流电机既可作发电机运行,也可作电动机运行的可逆现象,这意外之发现,对电机的设计制造产生了深刻的影响。

随着发电,供电技术的发展,电机的设计和制造也日趋完善和先进。1878年产生了铁心开槽法,把绕组的直线放入槽内,以加强绕组的稳固和减少导线内部的涡流损耗。那时出现的有槽铁心和鼓形绕组的结构一直沿用至今。1880年爱迪生提出了薄片叠集铁心法,马克西提出铁心径向通风道原理解决了铁心的散热问题。1882年韦斯通提出了双层电枢绕组。1883年克莱格提出了叠片磁极。1884年曼奇斯发明补偿绕组和换向极。1885年福勃斯提出用炭粉末制造电刷。1886年霍普金生兄弟确立了磁路计算方法。1891年阿诺德建立了直流电枢绕组的理论。到19世纪90年代,直流电机已具有了现代直流电机的一切结构的特点。

在资本主义迅速发展,商品竞争日益加剧的形势下,新技术的采用往往成为维持生计,藉以发展和出奇制胜的武器。19世纪后期电动机的使用已相当普遍。电锯、车床、起重机、压缩机、岩石钻等都已由电动机带动。甚至电磨、牙医电钻、家用吸尘器等也都用上了电动机。

尽管直流电机已被广泛使用,并在应用中产生了可观的经济效益,但其自身的缺点却制约了它的进一步发展。这就是它不能解决远距离输电,也不能解决电压高低的变换问题。这时,人们想到了曾被冷落的交流电。恰好交流电有解决这两个问题的本事,于是交流电机适逢其时获得了迅速发展。在此期间两相电动机和三相电动机相继问世。1878年俄国科学家亚布洛契可夫制成了一部多相交流发电机。1885年意大利物理学家加利莱奥·费拉里斯(1841—1897)提出了旋转磁场原理,并研制出了二相异步电动机模型。1886年美国的尼古拉·特斯拉也独立地研制出二相异步电动机。起初他们是把几个线圈按辐射状排成一圈,接通交流电,各个线圈中的交流电的频率相同,但其电压值和电流值有相移,于是,在线圈之间的空间就形成了旋转磁场,磁场带动金属使之产生旋转运动。据此他们研制成功两相异步电动机。俄国工程师多里沃—多勃罗沃尔斯基(1862—1919)于1889年研制成第一台实用的三相交流单鼠笼异步电动机,并发明第一台双鼠笼三相异步电动机。交流电机的研制和发展,特别是三相交流电机的研制成功为远距离输电创造了条件,同时把电工技术提高到一个新的阶段。

(2) 早期电站的建立及输电技术的发展

电机制造技术的发展和电能应用范围的扩大以及生产对电需要的迅速增长,都大大促进了发电厂和发电站的建设。这些电厂、电站最初都是从直流发电开始的。1875年法国巴黎火车站建立了世界最早的一座火力发电厂。1882年,“爱迪生电气照明公司”首先建成了电力站和电力网,能发电900

马力，可供 7200 个灯泡用电。1883 年，美国纽约和英国伦敦等大城市先后建成中心发电厂。1882 年，美国兴建第一座水力发电站，之后水力发电逐步发展起来。到 1898 年，纽约又建立了容量为 3 万千瓦的火力发电站，用 87 台锅炉推动 12 台大型蒸汽机为发电机提供动力。

直流电站的供电范围十分有限，从最初只能供应一栋房子或一条街道的“住户式”发电站逐步扩大到可供应几平方公里内用户用电的中心电站。但再扩大供电范围，直流电站已力不胜任了，于是代之而起的是交流电站的建立。

1885 年英国工程师菲尔安基设计的第一座交流单相发电站建成发电。这座电站建在距伦敦 12 公里的捷伯特弗尔得，发电机功率为 1000 千瓦，电压高达 2500 伏，经变压后升高到 1 万伏向伦敦输送，经过几次变压输入用户时为 100 伏。1888 年由费朗蒂（1864—1930）设计，建设在泰晤士河畔的伦敦大型交流发电站开始输电，其输出电压高达 10000 伏，经两级变压输送到用户。1894 年俄罗斯建成了当时最大的单相交流发电站，其功率为 800 千瓦，由四台蒸汽机提供动力发电。1892 年法国建成了第一座三相交流发电站。把交流电站的发展向前推进了一步。随后，美国于 1893 年建成了第一座三相交流发电站，并于 1895 年建成了尼亚加拉 5000 马力的交流水电站。

当电这种新的能源刚刚来到世界的时候，它的主要作用是作为照明的光源。把电发出来再把它输送给用户，当然输送的距离越远，经济价值越大，在远距离输电方面，直流电首先进行了尝试。第一条直流输电线路在 1873 年出现，长度仅有 2 公里。而世界第一条远距离直流输电实验线路是由法国人建立的。1882 年法国物理学家和电气工程师德普勒（1843—1918）由德国葛依吉工厂资助在慕尼黑国际博览会上展出了一条实验高压直流输电线路，把米斯巴赫一台容量为 3 马力的水轮发电机发出的电能输送到相距 57 公里的慕尼黑，驱动博览会上的一台水泵造成了一个人工喷泉。这一成功表现出电力的巨大潜力，证明了远距离输电的可能性。在这次实验中，线路始端电压为 1343 伏，末端降至 850 伏，输送功率不到 200 瓦，线损达 78%，说明效率较低。在直流输电的发展过程中，经过技术改进曾一度达到甚为可观的水平。直流电机能发出电压高达 57.6 千伏，功率 4650 千瓦的电，输送距离达到 180 公里。但这种势头很快达到了技术上的极限，难以再取得新的进展。从焦耳—楞次定律可知，输送相同容量的电能，电压愈高热损耗就愈小。要加长输电距离，增大输电容量，而又减少输电损失，最为有效的办法就是提高输电电压。由于当时的直流输电只能靠发电机的电压把电力输送给用户，因此，若使直流电大幅度地升压或降压在当时是难以想象的。而用户的电压一般又要求在 250 伏以下。直接使用高压既不安全也不经济。在这种情况下，交流输电显示了其优越性，因而导致了交流高压输电方式的发展。

交流输电技术最早获得成功的是俄国的亚布洛契可夫。他在 1876 至 1878 年试验成功了单相交流输电技术。1880 年前后，英国的费朗蒂改进了交流发电机，并力主采用交流高压输电方式。1882 年英国的高登制造了大型二相交流发电机。1882 年法国人高兰德（1850—1888）和英国人约翰·吉布斯获得了“照明和动力用电分配办法”的专利，并研制成功了第一台具有实用价值的变压器。可以说，它是交流输电系统中的主要设备或心脏部分。变压器的基本结构是铁心和绕组，以及油箱和绝缘套管等部件。它所依据的工作原理是法拉第在 1831 年发现的互感现象，即由于一个电路中电流变化，而在邻

近另一电路中引起感生电动势的现象。在同一铁心上绕上原线圈和副线圈，如在原线圈中通入交变电流，由于电流的不断变化，而使其产生的磁场也随之不断变化，在副线圈中也就感应出电动势来。变压器靠这一工作原理，把发电机输出的电压升高，而在用户那里又把电压降低。有了变压器可以说就具备了高压交流输电的基本条件。1884年英国人埃德瓦德、霍普金生（1859—1922）又发明了具有封闭磁路的变压器。1885年，威斯汀豪斯（1846—1914）对高拉德和吉布斯变压器的结构又进行了改进，使之成为一台具有现代性能的变压器。1891年布洛在瑞士制造出高压油浸变压器，后又研制出巨型高压变压器。由于变压器的不断改进，使远距离高压交流输电取得了长足的进步。

在采用直流输电还是交流输电的问题上曾产生过一场争论。当时在美国电气界最负盛名的大发明家爱迪生和对电气化作出了重要贡献的著名英国物理学家威廉·汤姆生（即开尔文勋爵）以及罗克斯·克隆普顿（1845—1940）等人都极力反对使用交流输电，主张发展直流输电方式；而英国的费朗蒂、高登等人和美国的威斯汀豪斯、特斯拉（1857—1943）、斯普拉戈（1857—1934）等人则力主采用交流输电。随着输电技术的发展，交流电很快取代了直流电。这场关于交、直流输电方式的争论，最终以力主交流输电派的取胜而告结束。

远距离输电问题的根本解决是三相交流理论的形成与技术发明的结果。1887—1891年德国电机制造公司取得了三相交流技术的成功。其主要发明者是在德国、瑞士工作的俄国电工学家多里沃—多勃罗沃尔斯基。他在1889年制成最早的一台功率为100瓦的三相交流异步发电机。1891年又制成了75千瓦的三相交流异步电动机和150千伏安的三相变压器。是他，在电能应用中首次采用了三相制。1891年，多里沃—多勃罗沃尔斯基在德国法兰克福的电气技术博览会上，成功地进行了远距离三相交流输电实验。他将180公里外三相交流发电机发出的电能用8500伏的高压送电，输电效率达到75%，在当时的条件下，如此高的传输效率是直流输电所不能办到的。从此，高压交流输电的有效性和优越性得到了公认。由于交流输电的发展和成功，美国当时正在准备建设的尼亚加拉水电站最终决定采用三相交流输电系统。威斯汀豪斯为其公司争得了这座水电站的承建合同，从1891年开始建设，1895年建成，1896年投入运行。这座发电站的总容量近10万千瓦。它将发出的5000伏电压的电用变压器升至11000伏，输送到距离40公里的巴法罗市。电力的作用已不仅仅是用于照明，而开始成为新兴工业的动力和能源。

电力的应用和输电技术的发展，促使一大批新的工业部门相继产生。首先是与电力生产有关的行业，如电机、变压器、绝缘材料、线路器材等电力设备的制造、安装、维修和运行等生产部门；其次是以电作为动力和能源的行业，如照明、电镀、电解、电车、电梯等工业交通部门；另外还有各种与生产、生活有关的新的电器生产部门也相继出现了。这种发展的结果，又反过来促进了发电和高压输电技术的提高。到1903年输电电压达到6万伏，第一次世界大战前夕，输电电压达到15万伏。

20世纪初，发电、输电、配电形成了以交流发电机为核心，以汽轮机（涡轮机）、水轮机等为动力，以变压器等组成的输配电系统为动脉的变压输电网，使电力的生产、应用达到较高的水平，并具有相当的规模。从此，电力取代了蒸汽，使人类历史迈进了电气化时代。电的应用，很快渗透到人类社

会生产、生活的各个领域，它不仅创造了极大的生产力，而且促进了人类文明的巨大进步，并导致了第二次动力革命，使 20 世纪成为“电气化世纪”。

2. 电力的应用

电，从它被发现的那一天起，科学家们就预见它的重大意义和广泛用途。英国科学家法拉第经过 9 年的努力，终于发现了感应电流，验证了他的磁可以生电的想法，迎来了电力时代的新曙光。此后随着电力技术的进步，电在各行各业的应用迅速发展起来。

(1) 电灯泡的发明和爱迪生的贡献

从钻木取火，到电灯照明，少说也经过了若干万年。在科学研究和技术发明的道路上，遍布着人类征服黑暗寻找光源的累累足迹。别的不说，只说电灯，看似小小的电灯泡，但其发展的历史却凝聚着几代发明者的智慧和心血。早在 1809 年，英国大化学家戴维发明了弧光灯。这虽是一种强光源灯具，但其在用上尚有不少缺陷。比如用来产生弧光的炭棒在点燃时必须经常移动因此操作不便；再有炭棒燃烧时会产生大量二氧化碳造成空气污染；还有弧光灯需用成本昂贵的大功率电池供电代价太高。因此，在英国弧光灯除了安装在沿海的灯塔上，没能在更大范围进行推广。后来，科学家们将电照明的研究重点集中在白炽灯方面。最初法国的德·拉·留在 1820 年制成了用白金线做灯丝的白炽灯，但因白金太贵无法实现大量生产。1854 年海因里希·戈贝尔（1818—1893）把碳化的竹子纤维放在玻璃管内抽去空气，通电时可以发亮，但这种灯寿命很短，制造也很困难。后来俄国人罗德维金于 1872 年发明了一种由细碳棒作发光体的白炽电灯。这种灯适用于街道照明，但对室内却不适用。在 1878 年，英国化学家斯旺发明了碳质灯丝，并点亮了一盏白炽灯，但他的碳丝灯泡寿命太短。当时，31 岁的爱迪生宣布立志要解决这个难题。在总结以往经验教训的基础上，为了找到一种理想的灯丝，爱迪生和他的助手，先后试验了 1600 多种耐热材料，经历了种种挫折和失败，终于找到了一种适用的灯丝材料，这就是碳化了的棉线。1879 年 10 月 21 日，爱迪生用这种灯丝做成灯泡，抽去空气，电灯发光持续了 45 个小时。到 1880 年 5 月，经他们实验过的植物纤维多达 6000 余种。后来爱迪生又试验成功用碳化后的竹丝作灯丝，这种灯泡竟能连续点燃 1200 个小时。随后这种灯泡开始投入大量生产，从此，电灯从试用阶段转入了实用阶段。然而白炽灯泡的改进仍在继续。1910 年美国通用电气公司的库利奇（1873—1975）采用耐热金属钨丝制造灯丝，代替了爱迪生的碳丝，效果更好。1913 年兰米尔（1881—1957）又首创在灯泡内充入惰性气体的氮气以避免灯丝在真空中蒸发烧断，从而大大延长了白炽灯的寿命。1920 年又采用氩气和氦气使灯丝能达到更高的温度，灯的亮度也更强，而灯丝的寿命并未缩短。

随着科学技术的发展，电力照明工具也在不断得到改进。在白炽灯的导引下，许多新的电光源相继来到世间。

在电力技术革命中，爱迪生可谓是功勋卓著的发明家。由于他的杰出贡献，而使其享有“发明大王”的美誉。

1847 年 2 月 11 日，托马斯·爱迪生出生在美国俄亥俄州的米兰镇，一个农民的家庭。由于家境贫困，爱迪生在 7 岁的时候，便随父母搬到密执安州的休伦。爱迪生从小怀有一颗强烈的好奇心。他时常被大自然和生活中的

种种现象引入冥思苦想之中，大凡新奇的东西，他都想看个究竟，对于不解的问题，他总要打破砂锅问到底。于是，在上小学时，他常常向老师提出一些稀奇古怪的问题，弄得老师莫名其妙却又无可奈何，有时甚至搞得老师极为难堪。由于爱迪生的心思不在学堂而另有所寄，因此每每考试倒数第一。有一天，老师请来了爱迪生的母亲向她说道，爱迪生是天生愚笨、不堪造就，干脆让他退学算了。母亲无奈，只好答应。爱迪生从此就离开了学堂。孰不知，好奇，是创造的先导；怪异的思索，往往蕴含着发明的火花。

爱迪生的母亲是一位受过良好教育的妇女，对小爱迪生怀着深深的母爱。她不相信自己的小汤姆是个庸才，决心把教育爱迪生的重担独自承担下来。在母亲的教导下，11岁的爱迪生就阅读了科普读物《博物教科书》和法拉第的电学著作，还阅读了其他许多书籍。爱迪生广为涉猎各方面的知识，并对科学实验产生了极大兴趣。后来爱迪生在自家的地窖里办起了“实验室”。对此，爱迪生的父母非但没有反对，反而被爱迪生的执着精神所感动，进而支持他的实验“工作”，使爱迪生在科学的道路上迈出了第一步。

爱迪生12岁的时候，迫于生计他当了报童。在从底特律到休伦的列车上，他一边卖报，一边在借用的行李车里（他的临时“实验室”）继续他的实验。由于不慎引起大火，烧坏了车厢，车长在暴怒之下狠狠打了他几记耳光，并将他赶下了列车，爱迪生的右耳从此变聋了。这意外的遭遇，并没有将他击倒，反而使他成熟了许多。在他16岁那年，有天早晨他曾冒着生命危险，从飞驰的火车前救出一个小孩。作为感激的回报，孩子的父亲毫无保留地把自己掌握的电报技术传授给了爱迪生，从此爱迪生就与电结下了不解之缘。后来爱迪生又当过报务员，并曾多次失业，饱受了颠沛流离之苦。但无论在何种险恶的情况下，他仍一如继往地坚持着他所钟爱的科学实验工作。

爱迪生在有生之年做出的贡献，可谓硕果累累，无比辉煌。他的发明创造之多堪称世界之最，雄居发明家之首。21岁时他发明了“二重记报机”，提高了电文的抄写速度和准确性。后来他又发明了“投票记录机”、“自动电报机”、“英文打字机”、“留声机”、“电灯”、“电影”、“麦克风”、“油印机”、“荧光镜”、“蓄电池”、“电车”等等，还提出并采用了直流三线配电方式，建立了发电、输电、供电、照明一条龙的电力系统。直到80岁过后还在研究从草类提取橡胶。爱迪生于1876年创办了实验室，他组织了一大批专门人才进行研究和实验，打破了过去科学家靠单枪匹马进行科学研究的习惯。他所创办的实验室是世界上第一个工业实验室。毫无疑问，爱迪生这种对人才的组织、使用方式也是一种新的发明。在他84岁告别人世的时候，爱迪生的发明达到2000多项，其中获得专利的就有1328种之多。由此观之，爱迪生获得“发明大王”的桂冠实属当然。

爱迪生为人类的文明竭尽了自己的聪明和智慧，但是知识的不足限制了他的进一步发展。由于他没有受过正规的学校教育，因而缺乏系统的科学知识。他的发明创造主要靠经验和在实践中摸索，而缺乏科学理论的指导。但他对人类的贡献仍然是巨大的，他留给后人的礼物是极其丰厚的。他的杰出的发明和顽强不息的进取精神，使他永远深受世人的崇敬和怀念。

（2）传播信息的“魔具”——电报、电话和无线电

信息传递，在发明电之前一直依靠古老的工具进行。我国古代和古希腊都曾使用烽火作为传递信息的信号，后来我国出现的驿站也具有信息传递的功能。这种原始的信息传递方式在历史上一直沿用了很长时间。可以说，自古

以来人们就期盼着这样的一天——出现先进技术，实现远距离快速通讯。特别是对军事和商业来说，及时、准确的信息，事关生死存亡，因此意义更加重大，需求更加迫切。随着电力的发展和应用，人类的梦想终于变成了现实。

电报机的发明

电讯时代的到来，首先是从电报机开始的。在电报机的研制上，真正取得实用价值的第一部电报机是美国的莫尔斯（1791—1872）发明的。在此之前，德、俄、英、美、法等国不少科学家和技术人员都投身于电报机的研究，并制出了各种类型的电报机。自莫尔斯电报机问世之后，便显示出比其他电报机有更多的优越性，因而能被普遍采用。说来带有戏剧性，本是画家的莫尔斯却成了电报机的发明家，一次偶然的会竟改变了他的职业方向，使他走上了技术发明的新道路，并成为实用电报机的奠基人。莫尔斯曾在法国学习了三年绘画。1832年他在乘船返美途中，听到一个名叫杰克逊的青年讲述电流通讯的知识，于是对此产生了极大兴趣。1835年，他在担任纽约市立大学美术教授的时候，就在自己的画室里进行电气通讯的实验，并用旧的画框制成了莫尔斯电报机，1837年编制了莫尔斯电讯号码，并进行了一次公开的表演实验，把由电流的断续所组成的符号信息成功地传递了500米的距离。1838年在纽约又进行了一次公开实验，在16公里的电讯通讯中获得成功。1840年，莫尔斯电报机获得了专利。

在莫尔斯电报机的发明过程中，美国的电工学家亨利（1797—1878）和威尔（1807—1859）也做出了重要贡献。亨利在1829年发明的电磁铁为莫尔斯电报机的诞生打下了基础，亨利还在电磁学知识等方面给了莫尔斯以无保留的帮助，并且又把发明的继电器应用到电报机上。威尔不但自己参加莫尔斯的研究工作，并说服父亲给莫尔斯以经济赞助，为莫尔斯的研究提供资金和设备。莫尔斯在威尔的协助下，对电报系统做了许多改进，如在远距离通讯中采用了继电器并使用中继电源补充能量，设计了用点、划表示的莫尔斯电码的最后形式，研制出电键，发明了音响器。

莫尔斯电报机的独创性贡献，就在于他发明了莫尔斯电码，这是其得以推广的基础。经过七八年的反复试验和宣传，1843年美国国会通过提案，由政府资助3万美元架设一条从华盛顿到巴尔的摩的试验性电报线路，长度为64公里。第二年线路建成并成功地投入使用。1844年5月24日，莫尔斯拍发了有名的电文“这是上帝创造的”，从而胜利完成了这条线路的重大试验。由于莫尔斯电报机的成功，美国政府用10万美元买下了这项发明。从此莫尔斯电报机和电讯号码便被各国普遍采用。1845年伦敦与高士堡之间的电报开始对公众开放，1846年英国成立了电报公司；1847年纽约与波士顿之间，纽约与布法罗、多伦多之间，纽约与蒙特利尔之间，费城与彼得斯堡之间的有线电报线路都已建成；1851年莫尔斯电报系统开始应用到铁路上。1856年莫尔斯和西伯雷（1807—1888）将65家电报公司合并成立了“威斯坦·埃尼翁电报公司”。

莫尔斯电报机很快传到欧洲，各国在应用中又使其不断得到改进和完善，如用打字机代替接收机的音响器，并直接打印出接收讯号，其速度可达每分钟30个字。1855年，美国人休兹（1831—1900）发明印刷电报机，使通报速度提高到每分钟250—300个字。1858年英国的惠斯通（1802—1875）发明了自动发报机，第二年又将莫尔斯符号的穿孔纸带用于发报机，使发报速度提高到每分钟500个字。法国电报服务公司的职员博多（1845—1903）

发明五单位电码，成功地实现了多路电传打字电报系统，可在一条线路上同时拍发5种电文。1877年，法国正式采用这个系统，它与改进了的莫尔斯电报机成为当时普遍使用的电报机类型。

后来，法莫尔（1837—1893）进行了增大线路通讯量的研究。从1852年起他开始了在一条线路上利用继电器从相反两个方向同时通讯的试验，到1858年美国入斯蒂安斯（1826—1897）的二路通讯试验成功。斯达克自1855年又开始进行同时同向的四路通讯研究，到1874年由爱迪生完成这项发明。至此，多路通讯技术亦取得可喜的成功。

短程电报成功之后，很快便成为人们生活中必不可少的通讯手段。随着垄断资本的发展，贸易范围的扩大和证券交易的需要，人们的眼光迅即又转向了远距离通讯。在一段时间内，为了沟通海洋两岸、大洋两岸的信息，敷设海底电缆遂形成了一般热潮。1849—1850年间，布莱特兄弟——布莱特·雅克比（1808—1898）和布莱特·约翰（1805—1888）敷设了穿越英吉利海峡的海底电缆。1852年，伦敦与巴黎间的有线电讯开通。随后英吉利与爱尔兰、德国间的海底有线电报线路也开辟成功。1854—1855年，敷设了贯穿地中海和黑海的海底电缆，就是通过这条电缆，英、法和土耳其三国之间进行联系，指挥其军队围攻俄国的塞瓦斯托波尔城。1856年美国造纸业巨头菲尔德（1819—1892）出面筹办敷设大西洋底电缆的浩大工程，耗资达300万美元。该项工程于1857年5月开始，1858年8月竣工。由于当时使用电压过高，致使电缆绝缘破坏而告失败。1865年继续敷设，亦无结果。1866年再次敷设，终获成功。接着又敷设了第三条电缆。这项规模宏大的工程，是在英国的汤姆生（1824—1907）领导下进行的。他为海底电缆敷设工程解决了不少理论难题，并发明了灵敏度更高的镜面电流计作为接受端的讯号接收器，因而解决了传输电压不必提高的问题。于是横跨大西洋、连接欧美两大洲的海底通讯线路揭开了人类信息往来的新篇章。接着，又一项巨大的电缆敷设工程于1869年宣告完成。它起于英国的伦敦，穿过欧洲大陆，然后部分沿着陆地、部分通过水下到达印度的卡里卡特城，全长达一万海里。19世纪末完成了从印度到澳大利亚的电缆敷设。1902年，电缆穿过太平洋，把加拿大和澳大利亚连在一起。从此，远距离通讯便迅速发展起来。

电报机的问世，给人类带来了极大的方便，同时推动了工业的发展，也加强了各国和各地区间的联系。

电话机的问世

在电报机发明之后，或许就在研究有线电报的同时，就有人在想：能用电直接传送有声语言该有多好。原因是随着资本主义工业化程度的提高，城市迅速得到发展，企业、办事机构和人际交往都迫切希望能实现快速、简便、准确的通讯，实现超距离的对话。在电报通讯成功之后，它确为人类提供了一种划时代的信息传递手段，但这种通讯方式要用编码作中介，把文字翻译成点、划符号拍发出去，接收之后还要再转译成原来的文字，所以使用起来不很方便。在研究用电传送声音方面，最早的涉足者要算是德国物理学家赖斯（1834—1874）。他用木头仿造人耳制造了一个发话器，上面固定有肠衣薄膜，薄膜上附有一块金属薄片，薄膜随声音振动时金属片就不断地和另一个金属片接触，通过电路接触电阻的变化引起电流大小的改变。受话器是一个绕上绝缘线的勾针，勾针用两个小支架固定在共鸣箱里，当断续的电流通过线圈时就会发出声音来。试验成功后，赖斯在1861年的法兰克福物理学会

上做过公开演示。由于这种装置通讯距离十分有限，声音效果又不甚理想，所以没有得到推广应用。但它确实是能直接传送声音的第一个装置，赖斯将这种声电转换装置称之为“电话”。

继赖斯之后，在实用电话研究中首先获得成功的是美国发明家葛拉汉·贝尔（1847—1922）。贝尔生于英国的爱丁堡，1870年移居加拿大，后又移居美国。贝尔一家三代都是研究语言学的。他的祖父安德鲁·贝尔具有演说才能，曾为电影配音解说。他的父亲梅尔维尔·贝尔从事对聋哑人的语言教育。贝尔本人也曾从事聋哑语言的教学和研究。当贝尔得知赫尔姆霍茨关于电磁铁能够引起音叉振动的实验以后，便开始考虑通过电线传递声音的可能性。1873年他移居美国后，曾在波士顿大学担任生理学教授。在此期间，他在年轻助手华特逊（1854—1934）的协助下，进行了利用电流传递声音的一系列实验。为了证明通过簧片在磁铁附近的振动可以引起电流强弱的改变，反之电流强弱的改变又会使磁铁附近的簧片发出声音，贝尔便在试验中把音叉放在带铁芯的线圈前面，音叉振动时，会在线圈中产生强度随声音变化的持续电流，如果把此电流输送到电线另一端的同样线圈内，就会使该线圈前面的音叉发出和前一个音叉同样的声音。于是贝尔在实验成功之后，便于1876年2月14日向美国政府申请了发明电话的专利。

此后，贝尔在华特逊的协助下继续对他的实验装置进行改进，尤其是将送话器端的线圈与受话器端同一装置的线圈相联，随着感生电流和磁场的变化，受话器的簧片就能发出与送话器端频率相同的声音。在1876年3月10日的一次实验中，华特逊通过上述装置清楚地听到了贝尔从另一房间发出的声音。这一天贝尔在写给母亲的信中说：“1876年3月10日，这一天对我而言，真是个值得纪念的日子，我终于解决了实验上的难题。在不久的将来，电话线将和自来水管、瓦斯管一样，普遍地被安装在每个家庭里，朋友们可以在自己的家中彼此通话。”贝尔发明的电话机于1876年在纪念美国独立一百周年的费城博览会上展出，并且进行了相距150米的通话表演，在参观者中引起了极大轰动。说来也巧，在1876年2月14日，和贝尔同一天向美国专利局提出发明电话专利申请的还有一人。他就是美国的格雷（1835—1910）。格雷发明了一种类似赖斯电话的装置，与赖斯电话不同的是利用溶液改变电阻，从而改变电流强度。由于其性能和声音传送效果远不如贝尔电话机，故其发明未能取胜于贝尔。

贝尔电话的话筒和听筒合为一体，既是发话器又是受话器，作为听筒使用效果很好，作为话筒使用效果却不理想。1877年爱迪生发明碳精话筒，送话声音显著清晰。根据爱迪生的建议，在话筒和线路之间再装上一个普通变压器，使贝尔电话进一步趋于完美。1878年，休兹（1831—1900）又发明了“麦克风”，送话质量得到进一步改善。

贝尔在电话的研究过程中，就已清楚地看到这一发明的社会需要和发展前景。在电话机问世之后，贝尔为其推广应用广为宣传。他到美国各地发表演说和进行表演，使更多的人了解了电话机的原理和功用。1877年，波士顿的《世界报》收到了第一份用电话发出的新闻电讯稿，这标志着电话已为公众所采用。1878年1月，美国建立了第一个电话交换台——中央电话局。同年，贝尔受英国政府之邀，赴英国协助架设电话线路。1879年巴黎电话交换台建成。此后欧洲许多城市相继建立了电话交换台和电话局。1884年，美国在波士顿和纽约之间架设了第一条实用电话线路，1886年，在纽约和费城之

间也架起了电话线。随着电话的推广和应用，电话机也不断得到改进和完善，通讯线路和电话交换装置也日趋先进。1891年美国的斯特罗齐尔（1847—1905）又发明了自动电话交换机，到1910年，世界上已有1000万个电话用户，电话这一新的通讯工具很快得到普及和广泛应用。

贝尔不仅是个发明家，而且颇具宣传鼓动才能，同时亦是个杰出的实业家。在发明电话后不久，于1880年成立了贝尔电话公司。1895年该公司已有职工15000人，垄断了美国的电话事业，到1905年职工超过90000人。贝尔为电话的发明和通讯事业的发展做出了重大贡献。

无线电的诞生

电报与电话的发明及应用给人类社会带来了方便和利益。但电报与电话这种通讯形式，最初都是靠电流的有线传导来传递信息的，因此必然要受到通讯线路的限制。无线电通讯的成功则打破了线路的局限，实现了通讯技术的又一次重大飞跃。无线电通讯的发明是科学向技术转化的又一成果，也是19世纪末最主要的技术成就之一。

无线电通讯的理论先驱是著名英国物理学家麦克斯韦（1831—1879）。麦克斯韦在理论研究中，以实验事实为基础，他把全部电磁现象归结为两组偏微分方程，即电磁场基本方程式（亦称麦克斯韦方程）。他的理论证实了电磁过程是在空间的一定速度（相当于光速）传播的，从而预见电磁波的存在。1873年麦克斯韦在他所著的《电磁学》一书中曾经预言：由于电磁波的存在，特别是电磁波以每秒30万公里的速度传播，不久的将来，在相距遥远的两地之间，建立起瞬时可达的通讯联络，已经不再是一种梦想。1888年德国物理学家赫兹（1857—1894）发现了电磁波，从而证实了麦克斯韦的预言。赫兹在研究过程中，证明了电磁波具有和光相类似的特性。如电磁波和光波一样，也具有反射、折射、干涉、衍射、偏振等性质，特别是从它的频率和波长直接确定了其传播速度等于光速。为了纪念赫兹在电磁波研究中的贡献，电磁波又被命名为“赫兹波”。电磁波的发现有着非同寻常的意义，它的发现导致了科学技术的又一次重大变革。特别是为有线电报向无线电报的发展开辟了道路。

电磁波的发现展示了极为诱人的前景，此后不少科学家、发明家把眼光投向了电磁波，把研究的方向转向了无线电。赫兹验证电磁波存在的实验说明，使用快速振荡的电火花产生极高频率的电磁波，可以使在远处的导线回路产生相同的电振荡。这一原理显示，无线电通讯的成功近在咫尺了。法国物理学家布朗利（1844—1940），1890年改进了赫兹的电波接收装置，可在140米外接收到赫兹电波。英国物理学家洛奇（1851—1940）对接收器又做了进一步改进，在800米外成功地接收到莫尔斯电码发送来的信号。在无线电接收器的改进过程中，检波器曾一度成了科学家们着力攻克的关键部件。然而攻克这一难关，在技术上取得突破，真正使无线电进入实用阶段的重要人物——意大利人马可尼（1874—1937）——当时仅是个名不见经传的20岁的年轻人。1894年马可尼在意大利的电气杂志上读到赫兹的实验和洛奇的报告以后，便立志献身于无线电技术的开拓事业。他把自己家里的阁楼作为实验室，带着不顾一切的执着投入了忘我的实验工作。父亲不理解马可尼的行动，更没有领悟到儿子“工作”的意义，他认为马可尼是在做一种毫无意义的游戏，盛怒之下，粗暴地毁坏了马可尼的实验设备。幸运的是，马可尼的哥哥亚比索给了弟弟极大的支持，才使马可尼的研究得以继续。马可尼在

实验中发现如果将发送器和接收器的一端接地，另一端接到天线上，就能有效地改进电波的发送和接收。1895年9月，马可尼在哥哥亚比索的协助下，终于成功地进行了第一次无线电传播实验。马可尼将一块铁皮用作发射机的天线，在密封的玻璃管中装入镍粉和少量银粉，并排除其中的空气，制成了较为理想的检波器。1896年，马可尼用功率较大的发送器成功地将电波信号传送到2—5英里的地方，当年便获得了发明专利权。马可尼无线电实验的成功，使他的父亲深受感动。父亲亲自陪伴他拜访意大利邮政部长，希望获得对这项发明的承认和支持，但他们得到的却是鄙视与冷落。因此马可尼又和母亲一起来到英国，在英国他得到了邮政部的热心支持，马可尼在索尔贝林平原上成功地进行了相距15公里的无线电通讯。1897年7月，马可尼获得了伦敦专利局批准的专利。同年又在伦敦建立了马可尼无线电信公司。由于马可尼在英国的成功和影响，意大利政府向他发出了回国工作的邀请。马可尼高兴地接受了邀请，并将自己的公司更名为“意大利无线电公司”。

对无线电通讯做出重要贡献的还有俄国物理学家波波夫(1859—1906)。他于1895年5月7日在彼得堡物理化学协会物理学部年会上，用他制成的世界上第一台无线电接收机成功地进行了无线电通讯的公开实验。波波夫曾任俄国水雷学校教官。在对无线电通讯系统的改进中，他也设置了天线。1896年波波夫又实现了海上船舶间的无线电联系。1897年俄国海军在克朗施塔得建立了无线电报局，波波夫所创造的无线电报设备在俄国军舰上获得了应用。1898年马可尼成功地实现了跨越英吉利海峡的无线电通讯。1901年12月12日，马可尼又将无线电信号发射到大西洋彼岸，即从英国的康瓦尔传播到加拿大的纽芬兰，其间相距2700公里，终于实现了越过大西洋的无线电联系。从此，无线电通讯进入实用阶段，使世界通讯事业出现了新的面貌。此后马可尼又研制出一套高效能的接收系统，进一步改进和完善了无线电通讯。由于他对无线电通讯的杰出贡献，在1909年和德国物理学家布劳恩共同获得诺贝尔物理学奖。

无线电报的发明和应用，引发了一系列重大的技术突破，开辟了无线电技术的新时代。继无线电报成功之后，无线电广播、雷达、电视等新技术相继出现、纷纷登场。

无线电能够准确地传播莫尔斯电码，自然人们就想到了能否用无线电直接传播人的声音。美国物理学家费辛登(1866—1932)早就萌生了这样的念头，并且成为率先实现传声无线电的科学家。费辛登原在爱迪生实验室工作，1900年又到美国气象局从事无线电实验。1902年他建立了专门的实验室，开始进行传声无线电的研究。费辛登历经4年顽强的奋斗，终于成功的设计制造了一套传播声音的无线电装置——人类历史上第一个无线电广播电台。在1906年圣诞节前进行了第一次播音。这一天，有些报务员从耳机中破天荒地听到了空中传来的节日祝福。

传声无线电的播音成功，又刺激了收音装置的迅速发展。1904年英国电气工程师弗莱明(1849—1945)发明了具有检波作用的二极管；美国的设计师浮来斯特(1873—1961)又于1907年发明了具有放大作用的三极管。后来美国电气工程师阿姆斯特朗又发明了超外差装置。于是收音机得以发展和推广的条件趋于成熟。

四、物理学革命与相对论的创立

19 世纪末到 20 世纪初是物理学发生巨大变革的年代，相对论（包括狭义相对论及广义相对论）和量子力学在这个世纪之交先后诞生，这一场对经典物理学的深刻革命使人们对自然界的认识深入到微观，扩大到宇观，并大大推进了 20 世纪人类社会和科学的进步。考虑到两个理论之主要成果产生的时间，相对论的创立将在本书中叙述，而量子理论的建立留待世界现代后期科技史中介绍。

1. 狭义相对论的创立

（1）经典物理学的内在矛盾和麦尔逊—莫雷实验的“零结果”

1687 年夏，牛顿（1643—1727）《自然科学的数学原理》的出版标志着物理学的第一次大综合。该著述集中了作者多年来潜心研究的成果，他天才地统一了伽利略（1564—1642）的力学成就和开普勒（1571—1630）等所揭示的星体运动规律，提出运动三定律和万有引力定律，形成了经典力学（也称牛顿力学或古典力学）的理论体系。后人为这个体系的进一步发展和完善又作了许多出色的工作，拉格朗日（1736—1813）的《分析力学》和拉普拉斯（1749—1827）的《天体力学》堪称经典力学的颠峰。到 19 世纪初，经典力学大厦几乎是“尽善尽美”、“坚不可摧”了。经典力学在各方面取得的举世公认的巨大成功使“所有的物理学家，都把古典力学看作是全部物理学的、甚至是全部自然科学的牢固的和最终的基础”。

19 世纪 60 年代，麦克斯韦（1831—1879）运用数学分析的方法，类比流体力学方程，建立了一组偏微分方程，概括了从库仑（1736—1806）、高斯（1777—1855）、奥斯特（H.C. Oersted, 1777—1851）、安培（A.M. Ampere, 1775—1836）到法拉第（M. Faraday, 1791—1867）的工作，把电磁运动的一系列基本规律统一在包含以下四个方程的麦克斯韦方程组中：

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \\ \nabla \times \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \end{cases}$$

他还证明了，光就是一种电磁波，从而把光、电、磁现象统一了起来，形成了经典电磁理论。麦克斯韦的电磁理论在电磁场的传播和光学现象的研究中取得了巨大的成功。

至此，许多人认为，经典物理学已经形成了一个十分完备的体系，人类对自然的认识也已走到了尽头。

后来成为世纪之交物理学革命先驱之一的德国物理学家普朗克（1858—1947）在德国慕尼黑大学求学时，曾向他的老师——物理学教授约里（1809—1884）表示了决心献身物理学事业的愿望。这位教授却不已为然，他说，“年轻人，为什么要断送自己的前途呢？要知道，理论物理学已经终结，微分方程已经确立，它们的解法已经制定，可供计算的只是个别的局部的情况。

可是，把自己的一生献给这一事业，值得吗？”约里的话代表了当时物理学界许多人的看法，即物理学是一个有才华的年轻人已经不可能有所作为的领域了。

19世纪物理学界的元老，声名显赫的威廉·汤姆生（1824—1907）即开尔文勋爵当时也认为，未来的物理学真理将不得不在小数点后第六位去寻找，也就是说，未来的物理学研究者只能做一些修修补补工作了。然而，随着20世纪的破晓而降临的物理学革命很快便否定了这种说法。这场革命的产生是由于与经典物理学矛盾的实验事实的出现，更由于经典物理学内部所存在的矛盾，即不统一性。

我们知道，任何自然过程总是发生在空间中的一定地点，并经历一定的时间。因此，表达物理规律必须有时间和空间的变量，时间和空间的概念则一直是物理学最根本和最重要的概念。

在牛顿力学中，时间和空间被视为是脱离物质运动而独立存在的框架，空间是绝对不变、不动的，时间则是绝对均匀的。这种绝对的时空观符合人们的日常经验，也被认为是天经地义的。

牛顿在他的名著《自然科学的数学原理》中写道：“绝对的、真的、数学的时间，是自身在那里流逝，它是匀速的，不与外界任何对象发生关系的”，“绝对的空间本身与任何客体无关，永远保持不变、且不动。”

牛顿的这种绝对时空概念似乎表明存在一个独特的、绝对的参考系。而伽利略则指出，一切取作机械运动的惯性参考系都是等价的，根据力学规律无法判断惯性系的优劣。所谓惯性参考系，是指牛顿第一定律（惯性定律）在其中成立的参考系。例如，地球就是一个近似程度很高的惯性参考系。相对地球作匀速直线运动的车船也是惯性系，在任何一个惯性系内的观察者不可能用力学方法来测定此惯性系的运动状态。这就是力学的相对性原理，也称伽利略相对性原理。伽利略把这种相对性原理用数学的方法表达出来，即给出了两个惯性系之间时间和空间坐标的如下变换关系式：

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

这个关系式称为伽利略变换。在伽利略变换下，牛顿的运动方程在一切惯性系中具有相同的形式。牛顿方程在伽利略变换下保持不变的这种性质称为伽利略协变性。因此力学相对性原理也可以表述为：描写力学规律的数学方程式在所有惯性系中都具有相同的形式。

伽利略相对性原理揭示了运动的相对性，否定了绝对运动，与牛顿绝对时空观之间存在着基本的内在矛盾，它实际上是现代相对论即相对性原理普遍性的一个重要思想根源，但是，它没有也不可能直接发展为相对论。相反，人们不但把相对性原理局限在力学范围内，而且很长一段时间仍苦苦寻找绝对静止的参考系。

经典力学的这些内在矛盾以及惯性系定义本身存在的循环定义等问题并未动摇牛顿大厦在人们心中的权威性，人们仍习惯用古典力学来解释一切自然现象。在声学领域，这种努力取得了成功，声音被解释为传声媒质中的纵波，传播的速度决定于媒质的弹性模量与媒质密度之商的开平方。声音不能

在真空中传播。力学几乎可以解释声学的一切现象，那么对光的现象呢？

光的波动说最早由胡克（1635—1703）提出，并为惠更斯（1629—1695）进一步发展。在很长的时间里（直到20世纪初）人们对波的理解只局限于某种媒质的力学振动。这种媒质就称为波的荷载体或载体。如水波的荷载体是水，声波的荷载体是气体、液体、固体等传声媒质。光与声音不同，它可以在真空中传播，那么，光波的荷载物是什么呢？惠更斯最早想到了“以太”。在古希腊，“以太”指青天或上层大气；在古宇宙学中，“以太”用来表示占据天体空间的物质。17世纪，笛卡儿（1596—1650）赋予它某种力学性质，用来解释任何物体之间相互作用力的传递媒质。惠更斯设想“以太”为荷载光波的媒介物质，并认为它应该充满包括真空在内的全部空间，并能渗透到通常的物质中。

随着麦克斯韦电磁理论的日臻完善和光、电、磁现象的统一，“以太”便自然地成为电磁作用的载体。

研究发现，在伽利略变换下，电磁理论的数学表达式——麦克斯韦方程组中的方程不再具有协变性。由麦克斯韦方程确定的真空中电磁波的传播速度为光速 C ，在另外的惯性参考系中，速度将不再是 C 。也就是说，伽利略协变性不适合于电磁理论。这似乎意味着，力学满足相对性原理而电磁学规律不满足相对性原理，对麦克斯韦方程而言，似乎存在一个特殊的惯性参考系，在这个优越的惯性参考系中，光的传播速度为 C ，而且，这个特殊参考系即绝对静止的坐标系，看来是非“以太”参考系莫属。

经典力学体系的内在矛盾竟促使人们把寻找绝对优越之惯性参考系的希望寄托在经典物理理论的内部矛盾上，寄托在力学现象以外的物理现象上，比如电磁现象，光的现象等。“以太”参考系显然给苦苦寻求绝对静止参考系的人们带来了希望。证实“以太”和“以太”参考系的存在，在物理学理论上便具有十分重要的意义。为此，许多物理学家设计了各种各样的实验，其中最著名的是迈克尔逊（1852—1931）—莫雷（1838—1923）实验。他们试图利用光学的方法借助灵敏的干涉仪来测定地球相对以太的绝对运动。

地球以每秒30公里的速度在其轨道上绕着太阳运动，整个太阳系以每秒20公里的速度在宇宙中飞驰，而我们的银河系也在以相当高的速度不停地运动着。如果以太是静止存在于“绝对空间”之中，那么，地球相对绝对静止的以太运动，地球上的实验者应能观测到“强劲的以太风”。

这个实验是根据麦克斯韦生前提出的设想设计的。麦克斯韦认为，若地球相对静止以太运动，那么，沿地球运动方向发出一个光信号到一定距离后反射回来，光信号往返所需要的时间应小于光信号沿垂直于地球运动方向发射到相等距离往返所需要的时间。

1881年，美国物理学家迈克尔逊用他自己发明的干涉仪进行了第一次实验。迈克尔逊出生于波兰，曾在柏林和波斯坦作过亥姆霍兹的奖学金研究生。1887年他与莫雷合作改进了这个实验，使用他亲自设计的高精度镜式干涉仪，大大提高了实验的精度。

下页右侧给出了该实验装置的示意图。

单色光源 S 发出的平行光束射到 45° 角放置于 O 处的半镀银分光板上，被分成互相垂直的反射和透射两股光束。透射光沿 OA 臂方向到达反射镜 A 后被反射回来；反射光沿 OB 臂方向到反射镜 B 后反射回来。这两股光束经 O 处分光板的透射和反射到达观测屏 D 处，两条光路上相差的光程由补偿板 L

补偿。实验时，先让干涉仪的 OA 臂与地球相对“以太”运动的方向平行，另一臂与之垂直。按经典的理论，光速各向是不等的。地球沿 OA 臂方向相对“以太”运动，地球上的观测者看来，以太沿 AO 方向流动，光从 O 传播到 A 如逆水行舟，速度应为 $C - V$ ，即光在静止的以太参考系中的速度减去地球运动的速度；光从 A 返回 O 则如顺水行舟，传播速度为 $C + V$ 。而沿 OB 臂传播的光束如横水行舟。由计算可得到，两束光传播的时间差为 T ，在观测屏上将会看到两股相干光束的干涉条纹。然后，将整个干涉仪转过 90° ，使 OA 臂垂直于地球运动的方向，由计算，可得此种情况下，两股相干光束传播的时间差为另一值 T' 。

前后两种情况下的时间差的变化量将会引起观测屏上干涉条纹的移动。迈克尔逊和莫雷当时用纳光作实验，并采用多次反射法增加干涉仪两臂的实验长度达 11 米。将有关数据代入干涉条纹移动值的计算公式后，求得干涉仪旋转前后，干涉条纹应移动将近半个条纹，也就是说，旋转前的明条纹应基本成暗条纹，而暗条纹变明。

但是，迈克尔逊和莫雷的实验并未观察到预期的干涉条纹的移动。他们在一天中的不同时间，一年中的不同季节并在地球上的不同地点多次重复了这一实验，而且实验本身的精度无可挑剔，但是，结果都是相同的。许多人重复了这个实验，也都观测不到预期的条纹移动。这个实验的结果被称为“零结果”。

实验的“零结果”振动了物理学界。人们提出了各种各样的假说试图解释这一“出人意料”的结果。会不会是地球正好静止于以太的海洋中，而使地球与以太之间的相对运动速度始终为零呢？如果接受这种设想，就意味着地球在整个宇宙中处于一种特别优越的地位，但是，这种地位从哥白尼时代便被否定了。

会不会是地球拖着“以太”一起运动，所以才没有“以太风”呢？但菲索实验等其他实验事实又否定了这一推断。

还有人提出光速与光源运动有关的理论，认为，运动光源发出的光的速度等于光相对于光源的速度与光源运动速度的矢量和，而光相对任何光源的速度总是 C 。这种理论尚可以解释用地面上的光源所作的迈克尔逊—莫雷实验，但后来用日光为光源进行迈克尔逊—莫雷实验，得出的“零结果”，也否定了这一理论。其他实验也证明了，光速与光源的运动速度无关。

斐兹杰勒(1851—1901)于 1889 年，荷兰物理学家洛伦兹(1853—1928)于 1892 年先后提出“长度收缩”的假说，认为以速度 V 相对“以太”

快速运动的物体在运动方向上将按照 $\sqrt{1 - V^2 / C^2}$ 的比例产生一定的机械收缩(“洛伦兹—斐兹杰勒收缩”)。这种设想可以十分巧妙地调和了静止以太理论和迈克尔逊—莫雷实验之间的矛盾，解释了迈克尔逊—莫雷实验，同时又保留了以太坐标系的特殊优越地位。洛伦兹在麦克斯韦电磁理论的发展中曾作过大量杰出的工作，这次提出“长度收缩”假说似乎又解决了电、磁、光载体的一大难题，但他的工作并未到此结束。他认为，要解决麦克斯韦方程在伽利略变换下不具有协变性的困难，必须寻求一种不同惯性系之间的数学变换。于是，在提出长度收缩因子后，他又进一步区分了对于优越坐标系直接可用的真正的绝对时间和适用于其他坐标系的“地方时间”，把伽利略变换公式改造为以下的变换公式：

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right.$$

这就是著名的洛伦兹变换式。由这种变换关系，可以保证麦克斯韦方程在所有惯性系中具有相同的形式。这样，经典理论所面临的矛盾、困难似乎基本得到解决了。但是，洛伦兹的“长度收缩因子”和“地方时间”的引进，是一种人为的设想和满足数学上需要的作法，带有明显的目的性假说的性质，从长远看，是不可能使理论物理学界感到满意的。

法国科学家彭加勒（1854—1912）全面研究了洛伦兹变换的数学内容，并进一步论证了在洛伦兹变换下麦克斯韦方程的协变性。他认为，解决电磁学所面临的困难应该找到一些基本的假设，而不是像洛伦兹那样引入包括“存在静止以太”在内的 11 种假设。他以迈克尔逊—莫雷实验为例来说明，无论观察者固定还是匀速运动，物理规律都是相同的，即不可能观察到绝对运动。1904 年，他把这一观点称为相对性原理。彭加勒敏锐指出，物理学正面临着—场危机，“应该建立一个全新的力学，关于它，我们还只能是见到了一点迹象。其中，惯性随着速度的增加而增加。光速将成为一个不可逾越的极限”，“较简单的普通力学，只是在速度不太高时成立，它保持着—级近似。所以在新的力学中，仍然可以找到旧的动力学”。

英国物理学家拉摩等和彭加勒—样，也提出了一些接近狭义相对论的重要思想。但是，他们均未能彻底摆脱牛顿绝对时空的传统观念的束缚，谁也没有像爱因斯坦那样意识到“整个物理学的基础可能需要从根本上加以改造”，因此，他们均未能作出根本性的理论突破。迈克尔逊—莫雷实验之后的几十年中，还有人设计了一些其他实验以测定地球相对以太的绝对运动，得到的也都是“零结果”。

另外，以太这种神秘的、不可捉摸的物质具有一系列令人费解的、相互矛盾的性质：遥远的星光可以传播到地球上，那么作为光的传播媒质的“以太”应当充满整个宇宙，包括真空和所有物质的分子和原子内部，整个宇宙也就是—个具有绝对透明性质的以太的海洋；宇宙中的天体，包括地球、太阳，运动中并未受到以太的阻力，因此，必须假定充满宇宙的“以太”极其稀疏，密度几乎为零；而光是横波，所以其载体，“以太”，应是具有固体的性质的弹性介质；光速非常大，以太的弹性系数应该极大，是绝对刚性的，其硬度应远远超过最优质的钢。这些相互矛盾的性质是很难统—起来的。

以太漂移实验的零结果以及以太必须具备的极其混乱、矛盾的性质使理论物理学家陷入难以自拔的思维困境。

1900 年 4 月 27 日，在科学界享有厚望的开尔文勋爵在英国皇家学会上发表了《热和光的动力理论上空的十九世纪乌云》的演讲，他满意地回顾 19 世纪物理学的成就后也不得不承认，物理学“晴空中还飘浮着两朵乌云”，—是与比热和热辐射有关的理论问题，他认为有望在 20 世纪的开头获得解决，另—则是迈克尔逊—莫雷实验的“零结果”，他认为尚看不到任何可能

解决的途径。开尔文勋爵眼光锐利地瞄准了这两朵乌云，但他和当时陶醉于经典物理学成就的其他人一样，都未能预见到，这两朵非同寻常的“乌云”正预示着以量子论和相对论为标志的物理学革命的风暴。

（2）狭义相对论的创立

迈克尔逊—莫雷实验在爱因斯坦（1879—1955）创立狭义相对论的过程中究竟起多大的作用，这个问题虽然在物理学史上仍有争论，但谁也不否认迈克尔逊—莫雷实验在由洛伦兹理论向狭义相对论的转变中起了重要的作用。爱因斯坦本人对迈克尔逊—莫雷的工作给予很高的评价，他认为迈克尔逊—莫雷实验“揭示了光以太理论的隐患”，“将物理学引向新的道路”，“铺平了狭义相对论发展的道路”。

爱因斯坦在1905年发表的第一篇关于相对论的文章《论动体的电动力学》中明确指出：“诸如此类的例子，以及企图证实地球相对于‘光媒质’运动的实验的失败，引起了这样一种猜想：绝对静止这个概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特性，倒是应当认为，凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学也一样适用，对于第一级微量来说，这是已经证明了的。”很明显。爱因斯坦认为，迈克尔逊—莫雷实验的结论只能是，根本就不存在什么“以太”，也就不存在什么“以太参考系”。

爱因斯坦曾读过洛伦兹的一篇关于迈克尔逊—莫雷实验的论文（文中提出了洛伦兹—斐兹杰勒收缩）。爱因斯坦在1907年发表的题为《相对论原理及其结论》的论文中写道，洛伦兹理论是以一种静止的、不动的光以太的假说为基础的，按照这个理论，地球相对以太的运动速度 V 与真空中的光速 C 之比的一次幂项 V/C ，不应该在实验中被观测到，“但是，迈克尔逊—莫雷实验的否定结果表明：在某种场合下，连二次幂效应（与 V^2/C^2 有关的项）也不存在，而按照洛伦兹的理论基础，它是必定可以在实验中观测到的。”

他认为，“理论同实践之间的那种矛盾，通过洛伦兹和斐兹杰勒的假说（根据这种假说，运动物体在运动方向发生一定的收缩）可以在形式上消除。但是，在这方面引进的这种假说，看来只是一种拯救理论的人为方法；迈克尔逊—莫雷实验正好证明，在根据洛伦兹理论看来相对性原理不成立的地方，现象却还是符合这个原理的。从而给人这样一种印象，似乎又必须抛弃洛伦兹理论，而代之以一个基础同相对性原理相适应的理论，因为，这样一个理论允许一下子预见到迈克尔逊—莫雷实验的否定结果。”这里所指的“这样一个理论”正是爱因斯坦在《论动体的电动力学》中系统提出的，后来被称为狭义相对论的理论。他以以下的两条基本原理作为狭义相对论的基础：

相对性原理：所有惯性参考系都是等价的。物理规律对于一切惯性参考系都可以表述为相同的形式。不论通过力学、光学、电学或其他实验，都不能觉察出所在参考系的“绝对运动”。

光速不变原理：真空中光速相对于任何惯性参考系沿任何方向均为 C ，且与光源的运动无关。

第一条原理是伽利略的力学相对性原理的直接推广。伽利略相对性原理肯定了一切惯性参考系的力学等价性，爱因斯坦则只是把这种等价性推广到电磁学、光学及一切物理规律。它是爱因斯坦所坚持的“不存在绝对运动”和“世界统一性”的自然观的体现。从理论的角度来看，相对性原理是容易接受的。

在肯定麦克斯韦电磁理论的基础上，把相对性原理推广到电磁学领域，就要假定麦克斯韦方程在一切惯性参考系中保持不变，而这样做必须解决两个问题。一是要假定真空中光速保持不变，二是在电磁学领域不能保留伽利略变换，因为，麦克斯韦方程在伽利略变换下将发生改变，也就是说，在不同惯性系中，电磁现象将呈现不同的规律。

对麦克斯韦电磁理论的正确性，爱因斯坦是坚信不移的，他认为全部力学、电动力学和光学的实验事实都支持相对性原理，而且全部电动力学和光学实验事实也都证明光速的不变性。因此，他认为，必须把“一切惯性系中光速不变的假定”上升到原理的地位上，才能使初看起来有矛盾的两条原理统一起来。

而提出光速不变的原理就意味着否定牛顿力学中的速度相加定律，即否定经典的时空观，“同时”的概念将失去其绝对的意义，两事件的时间间隔和空间间隔将随参考系的不同而不同。总之，在理论、观念上都是一大突破。对爱因斯坦来说“这个困难确实很难解决”。

1922年12月，在日本京都大学的一次演讲中，爱因斯坦曾详细介绍了解决这一难题的经过，将伯尔尼时的同事与好友贝索对他的帮助铭刻在了创立相对论的历史丰碑上。他回忆道：“我在伯尔尼的一位朋友贝索意外地帮助了我。那天天气很好，我带着上述问题访问他。开始，我告诉他：‘最近，我一直在钻研一个难题。今天到这儿来，请你和我一块攻攻它。’我俩讨论了问题的各个方面。后来，我突然找到了问题的关键。第二天，我再次访问他，甚至没有问候他一声，就直接对他说：‘谢谢你，我已经完满地把问题解决了。’我的解决办法是，分析时间这个概念。时间不能绝对定义，时间与信号速度之间有不可分的联系。使用这个新概念，我第一次完满地解决了整个困难。我用了五个星期完成了狭义相对论。”

爱因斯坦认为，要准确地表述时间概念需要认识的仅仅是，人们可以把洛伦兹引进的，称为‘当地时间’的这个辅助量直接定义为‘时间’。如果坚持这种时间的定义，并把前面伽利略变换方程用符合新的时间概念的变换方程来代替，那么洛伦兹理论的基本方程即洛伦兹变换方程就符合相对性原理了。这样，洛伦兹和斐兹杰勒的长度收缩假说就像是理论的必然结果。

爱因斯坦还对第二条原理的由来作过深刻的说明：“相对论常遭到指责，说它未加论证就把光的传播放到中心理论的地位，以光的传播定律作为时间概念的基础。然而，情形大致如下：为了赋予时间概念以物理意义，需要某种能建立不同地点之间的关系的过程。为这样的时间定义究竟选择哪一种过程是无关重要的。可是为了理论只选用那种已有某些肯定了解的过程是有好处的。由于麦克斯韦和洛伦兹的研究之赐，和任何其他考虑的过程相比，我们对于光在真空中的传播是了解得更为清楚的。”

爱因斯坦从上述两条基本原理出发，推导出了相对论的惯性系变换公式——洛伦兹变换公式，创立了狭义相对论。

这个公式所以仍称为洛伦兹变换式是因为它是由洛伦兹首先得出的。同样的公式，推导的理论出发点却大不相同。洛伦兹人为引进“长度收缩”和“地方时间”的假说给出了这个公式，目的在保留住以太的不动性。

爱因斯坦是从新理论的角度进行推导，赋予这个公式全新的革命的含义。在电磁理论中用这个公式代替了伽利略变换。在洛伦兹变换下，麦克斯韦在一切惯性系中保持了相同的形式，成功地将力学的相对性原理推广到了

电磁学领域。

洛伦兹变换在高速领域成功地替代了伽利略变换，但狭义相对论并没有否定伽利略变换在力学中的不可动摇的地位，没有否定力学相对性原理。在低速领域，即远小于光速的情况下，洛伦兹变换很自然地与伽利略变换相一致。

从狭义相对论的观点来分析，以太则是毫无用处的假说，迈克尔逊—莫雷实验也很容易解释：首先，一切惯性系都是等价的，迈克尔逊干涉仪所在的惯性系——地球也不例外；其次，光速在所有方向上都相同，那么，不论干涉仪如何转动，干涉条纹都不可能移动。迈克尔逊—莫雷实验也就自然是“零结果”了。于是，迈克尔逊—莫雷实验——物理学史上最著名的实验之一则成为狭义相对论的一个最基本的实验事实。

狭义相对论的核心内容及深刻的革命含义包含在它的两条基本原理以及由这两条原理导出的洛伦兹变换式中，更表现在由洛伦兹变换导出的一系列推论中。这些推论所描述的空间和时间的重要性质，从经典时空观看来是难以理解的，但却是客观存在，并得到实验的证实。

“同时”的相对性是洛伦兹变换的推论之一。由洛伦兹变换式可以很容易地证明，在某一惯性系中的不同地点同时发生的两个事件，在另一个惯性系的观察者看来，将是“不同时”发生的。光的传播需要时间即光速，不等于无穷大导致“同时”的相对性。如果依据经典力学所假定的，光速为无穷大，相互作用的传递不需要时间，“同时”便是绝对的了，并因而有绝对时间的概念。这里，“事件”是指空间某一地点发生的某一件事或某种现象。

“光速是物质运动的极限速度”是洛伦兹变换的另一个推论。从洛伦兹变换中可以导出，一个惯性参考系中先于B事件发生的A事件，在另一惯性参考系看来，可能在B事件之后发生，但这种情形只限于两个没有因果关系的两个事件。狭义相对论认为，对于两个有因果关系的事件来说，因果时序是绝对的，出生必先于死亡，播种必先于收获。基于此，可以导出惯性系之间的相对速度不能超过光速以及任何信号的传播速度也不可能超过光速的结论。狭义相对论的速度变换公式也可以证明，光速具有极限速度的特征。

“尺缩”效应是洛伦兹变换的又一个推论。洛伦兹和斐兹杰勒曾由经典力学的角度研究过“长度收缩”问题，他们认为运动物体是真地缩短了。狭义相对论认为，在静止参考系看来，以速度 v 运动着的物体，将沿运动方向按 $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 的比例收缩，但这是一种基于测量的效应。“尺子”将由于观察者或测量者所在的参考系的不同而不同。相对于“尺子”静止的测量者测得的“尺子”的长度称作静止长度或“原长”是最长的；而相对于“尺子”运动的任何测量者测得的长度总是小于原长，即“尺子收缩”了。这里，“尺子”可以是一段距离。

“钟慢”效应也是洛伦兹变换的一个重要推论。洛伦兹变换证明，运动惯性参考系中的一个物理过程，与静止参考系的同一过程相比要显得缓慢些。换句话说，运动的时钟变慢了。

“尺缩”和“钟慢”效应否定了经典力学中的“时间绝对性”和“长度绝对性”的概念。是对经典时空观的革命性否定。

狭义相对论还深刻揭示了时间与空间之间的相互关系。在传统的时空观中，时间与空间是互不相干的，这一点集中表现在伽利略的变换式中。而从洛伦兹变换式可见，时间和空间不再是相互独立的，“尺缩”和“钟慢”效

应是相伴发生的，二者有一种“互补”关系。

1952年的介子实验和之后对宇宙射线中大量高速粒子衰变过程的观测实验，都证实了“钟慢”效应以及与“钟慢”效应相关的“尺缩”效应。宇宙射线中含有许多能量极高的 μ 子，它们是在大气层上部产生的。静止 μ 子的平均寿命只有 2.1971×10^{-6} 秒，如果不存在相对论效应，这些以接近光速运动的 μ 子只能飞行约600米。但实际上大部分 μ 子都能穿透几公里的大气层到达其底部。从地面参考系看，这种现象正是狭义相对论的“钟慢”效应——运动 μ 子寿命延长效应；从 μ 子所在的参考系看，这种现象是狭义相对论的“尺缩”效应——是相对它作高速运动的大气层的厚度缩小了，因此，在 μ 子存活的时间里可以飞越变薄了的大气层。高速运动的粒子在其较短的固有寿命中能飞越大气层，是客观事实而不是主观感觉的产物，这表明时钟延缓和尺度缩短的效应都是运动着的物质相互之间的时空关系的反映。

1972年，原子钟绕地球的环行则证实了狭义相对论和广义相对论的总效应。

狭义相对论还给出了两个非常重要的结论：一是运动物体的质量随速度的增加而增加；另一是质能关系式 $E=MC^2$ ，它表示物体具有质量 M 的同时，也具有能量 E ，式中的 C 是光速。由于光速 C 是一数值巨大的常量（ 3×10^8 米/秒），这表示质量很小的物质蕴涵着巨大的能量，小的质量的变化，会伴随着巨大的能量变化。这一关系式为原子物理和基本粒子物理中的大量的实验所证实，它为人类寻求新的能源提供了理论依据，20世纪的原子能开发利用正是基于爱因斯坦的质能关系式。

爱因斯坦创立的狭义相对论通过闵可夫斯基的工作得到了新的发展。闵可夫斯基（1864—1909）曾是爱因斯坦在苏黎士时的老师，后来任哥廷根大学的数学教授。1907年，闵可夫斯基提出了四维时空理论，将爱因斯坦狭义相对论表述成非常简洁、优美的数学形式。他认为，应该把时间看作是“时空结合体”里的第四维，在通常的三个空间坐标的基础上，引进了第四个坐标 ict 。这样，就可以用四维坐标清楚地描述时空中发生的事件及事件的变化规律。

闵可夫斯基的工作从物理内容上看虽然没有新的内容，但它把洛伦兹变换的物理含义更清楚地表达了出来。1908年，闵可夫斯基在科隆召开的全德自然科学家与医生协会的第80次年会上，作了题为《空间与时间》的报告。他说：“我要给你们剖析的时空观，是在实验物理学的土壤里孕育长大的，它富有生命力，而且有激进的趋势。从此，空间和时间本身完全变得模糊不清，只有两者的统一体才是独立存在的。”时间和空间再也不像经典时空观所表述的那样互不关联、相互独立地存在着了，它们合成了一个极端重要的新概念——四维的“空间—时间”。这种“四维时空连续统”也被称为“闵可夫斯基世界”。闵氏的工作后来成为相对论不可分割的一部分。在新的“四维时空连续统”中，两个事件的时空间隔如三维空间中两点间的距离一样，是不随参考系的变化而变换的；一个参考系相对另一个参考系的运动可视为四维坐标架的转动。相对论中时空的统一，使得在非相对论中相互独立的不同物理量显示出它们蕴涵的统一性，例如动量与能量的统一，电流密度和电荷密度的统一等。

在《空间与时间》的报告中，闵可夫斯基非常有预见性地指出，爱因斯坦的思想对近代人们的思维将产生深远的影响。闵可夫斯基的报告引起科学

界对爱因斯坦工作的注意。

狭义相对论是对经典时空观的一次根本的变革，它否定了绝对空间和绝对时间，否定了“同时”的绝对性，揭示了时间和空间的不可分割性，并建立起时间和空间的依赖关系。整个物理学的理论因为狭义相对论而发生了巨大的变化，其成就是巨大的。但是，要人们真正认识爱因斯坦的科学研究成就，还需要较长的时间。当时，也只有个别的物理学家能够把他的理论看作是一个天才的发现。著名的理论物理学家普朗克就是其中的一位。他称赞爱因斯坦的《论动体的电动力学》一文具有划时代的意义，认为爱因斯坦时空观的“勇敢精神的确超乎自然科学研究和哲学认识论上至今所取得的一切大胆成果。”

2. 广义相对论的创立及其实验验证

(1) 广义相对论的基本原理和新的引力理论

狭义相对论揭示了高速领域中物体的运动规律，将力学的相对性原理推广到电磁学领域，从根本上改变了经典物理学，改变了人们对时间和空间的认知。但是，追崇“世界统一性”的爱因斯坦是不可能满足于狭义相对论的成就的，因为，狭义相对论虽然革命性地否定了静止以太参考系的特殊地位，但却保留着无限多个惯性参考系的特殊地位，而且严格的惯性系事实上并不存在。在爱因斯坦看来，“更为令人满意的应当是这样一种理论，它从一开始就不区别任何优越的运动状态。”他认为，狭义相对论把相对性原理限制在惯性系中，这是“固有的认识论上的缺陷”。因此，将相对性原理的适用范围扩大到非惯性系即加速运动系统，探求一种更普遍的物理论——广义相对论，便成为他的下一个目标。

爱因斯坦接受了奥地利物理学家、哲学家马赫（1838—1916）的观点，即非惯性系理论一定要包括引力理论。狭义相对论的建立几乎改变了整个经典力学的面貌，只有牛顿引力理论例外，而且以瞬时超距作用为基础的牛顿引力理论在速度极限的问题上与狭义相对论相抵触。狭义相对论证明，光速是一切物质自由运动的速度包括信号传递速度的极限速度，而牛顿引力理论认为引力是以无限大的速度传递的。这也进一步促使爱因斯坦把引力问题作为研究的目标。

牛顿第二定律中使用的质量是物体的惯性质量。在一定力的作用下，质量大的物体产生的加速度小，即不易改变原来的运动状态，质量大则惯性大。惯性质量是物体运动惯性的量度。牛顿引力定律中使用的质量是物体的引力质量。引力质量是一个物体受其他物体吸引及它吸引其他物体的状况的量度。

因此，惯性质量和引力质量是两个概念不同的物理量。但是，许多实验事实表明，任何物体的引力质量和惯性质量相等。牛顿本人对此持慎重的态度，他认为，引力质量和惯性质量分别描述物体的两种互不相关的性质即产生引力和保持原有运动状态的两种性质，二者可能只是近似相等。牛顿设计了牛顿摆实验；1889年，匈牙利的厄卓设计了著名的扭摆实验，都试图测定这二者的区别，而实验的结果却是在相当高的精度上证明了引力质量和惯性质量的等值性。

这样两种有本质区别的物理量相等，意味着什么呢？牛顿曾作过研究，

却没有得到理论上的解释。长期以来，人们一直认为，这两种质量相等是理所当然的，没有人探究其内涵。而爱因斯坦正是从这个人人们认为是很自然的事实入手，开始揭示引力问题的奥秘。爱因斯坦在《相对论发展简述》中说，“在引力场中一切物体都具有同一加速度。这条定律可以表述为惯性质量和引力质量相等的定律。它当时就使我认识到它的全部重要性。我为它的存在表示极为惊奇，并猜想其中必有一把更加深入地理解惯性和引力的钥匙。”

在狭义相对论的建立过程中，爱因斯坦曾设计了著名的“高速爱因斯坦火车”的理想实验来推证“同时相对性”。在广义相对论建立过程中，爱因斯坦又设计了另一个著名的理想实验，即“爱因斯坦电梯”或称“爱因斯坦密封舱”（如现代的宇宙飞船密封舱）以推证等效原理的合理性。如果将一个“爱因斯坦密封舱”放置于远离一切物体的宇宙空间中，舱内的实验人员将发现，自己和舱内的一切物品都失去重量，飘浮于舱中，作出的判断是，引力消失了，“密封舱”是一个不受任何力作用的惯性系。设想此时有一种“大力士生物”以地球的引力加速度（ $a=9.8 \text{ 米/S}^2$ ）向一个方向提升“密封舱”。这时，舱内实验人员感觉到好像回到了地球的表面，自己恢复了原有的重量，舱内物品也纷纷落下。对这突如其来的现象，舱内的实验人员有两种可能的分析：一种是“密封舱”本身仍是静止或匀速运动的（即为惯性系），舱下出现了和地球一样的星体，而使“密封舱”如置于地球引力场，物品下落、人感觉到重量只是引力作用的反映；另一种是舱下没有出现什么星体，即不存在任何引力场，只是舱因某种原因在加速上升，物品下落、人感觉到重量只不过是“密封舱”在加速上升的反映即惯性力作用的反映。

那么，舱内的实验人员能借助某种力学实验来断定是哪一种情况吗？回答是否定的。因为，如果是第一种情况，实验结果将与引力质量有关，如果是第二种情况，则实验结果将与惯性质量有关，但这两种质量是相等的。引力质量和惯性质量的等值性造成了引力和惯性力的等效，也就是说，一个不受引力作用的加速系统和一个受引力作用的惯性系统是无法通过任何力学实验加以区别的。

居里夫人的女儿在《居里夫人传》中有一段回忆谈到爱因斯坦。一次，爱因斯坦和居里夫人及她的女儿们在山坡上时，爱因斯坦曾问，如果一个“密封舱”在一大深谷中自由下落会怎么样？孩子们只是觉得这个问题很好玩，而居里夫人知道，爱因斯坦又在思考什么新的深邃的问题了。

“密封舱”在引力场中自由下落正是爱因斯坦考虑的另一个理想实验。“密封舱”以重力加速度自由下落，舱内的物体受到一种向上的惯性力的作用，而“密封舱”处于地球引力场中，舱内的所有物体又同时受到向下的引力的作用，引力质量和惯性质量的等值使所有物体受到的合力为零。舱内的物体将动者恒动，静者恒静，舱内实验者所作的任何力学实验都与在远离一切物体的太空中的惯性系中相同。因此，就力学实验而言，一个不受引力作用的匀加速系统（非惯性系）等效于均匀引力场中的惯性系。在均匀引力场中自由下落的系统（非惯性系）等效于太空中的惯性系。这也就是所谓的弱等效原理。

等效原理是爱因斯坦给出的广义相对论的一条基本原理。等效原理又分弱等效原理和强等效原理。弱等效原理又可表述为：引力和惯性力的动力学效应是局部不可分的。强等效原理是爱因斯坦在弱等效原理的基础上作出的假设性推广，即引力和惯性力对任何物理现象的影响都是局部不可分的。“局

部”意指有限的空间范围和短暂的时间间隔。

爱因斯坦认为，等效性原理的发现是他一生中最愉快的事，他说，“完全等效性这一假说，使我们不能说任何参考系有绝对加速度，正如通常的相对论（狭义相对论）使我们不能说任何系统有绝对速度一样，并且它使一切在引力场中等加速下落成为当然的事。”

基于等效原理，爱因斯坦用引力场来取代加速系统，或说用引力场来对付人们“甚感头疼”的加速系统，将加速系变为引力场中的惯性系，使加速系和惯性系都不再具有绝对的意义。而惯性系和加速系之间的界限的取消立即导致一种科学上和哲学上的美好愿望，即自然规律对宇宙中的一切系统等效，狭义相对性原理就可以进一步发展推广了。以下正是爱因斯坦在等效原理的基础上提出的广义相对性原理即广义协变原理：一切参考系都是等价的，物理规律在所有参考系中都应具有相同的形式，即在任意坐标（参考系）变换下，一切物理规律都是协变的。

等效原理和广义协变原理一起构成了广义相对论的基础。建筑在这个基础之上的广义相对论否定了惯性系的特殊地位，而在更广的范围内建立了物理学的理论构架。

洛伦兹变换显然不能满足物理规律的广义协变性。爱因斯坦发现，要建立新的引力理论的数学模型，他当时所掌握的数学知识已不够用。上大学时，他曾以为对一个物理学家来说，只要明晰地掌握数学的基本概念也就够了，因此在一定程度上忽略了数学。

1912年，爱因斯坦带着这个问题回到母校——苏黎士工业大学，求教当年的同班同学格罗斯曼。已成为数学教授的格罗斯曼对这个问题很感兴趣，他终于帮助爱因斯坦找到了适合的数学工具，那就是由德国的数学家黎曼（1826—1866）在半个世纪以前建立起来的曲面几何即黎曼几何以及里奇和列维·契维塔的微分学。经过两人的艰辛思考、摸索，终于在1913年，共同完成了《广义相对论和引力理论纲要》的论文，其中物理部分由爱因斯坦执笔，数学部分由格罗斯曼执笔。书中叙述了广义相对论产生所基于的一种信仰，详尽给出了广义相对论所需要的数学知识和推导新的引力场方程的过程。

1915年，爱因斯坦发表了《用广义相对论解释水星近日点运动》的论文，成功地解释了水星轨道近日点的进动超差问题，还给出了光线经过太阳表面时发生弯曲的修正值。11月，爱因斯坦完成了广义相对论的集大成论文《广义相对论的基础》，并发表于1916年。在这一篇被公认为是广义相对论“标准版本”的论文中，爱因斯坦全面、清晰地阐述了引入等效原理、扩充相对性原理和使用协变性的原由。至此，爱因斯坦完成了创立广义相对论的艰苦奋斗历程。

在寻求新的引力场方程中，爱因斯坦认为应以牛顿引力理论的泊松方程为范例，因为泊松方程描述了引力场的势与物质的密度分布间的关系，是以有质物质的密度引起引力场的观念为基础的，广义相对论也应该如此，即广义相对论给出的引力场方程应该描述引力势张量 $g_{\mu\nu}$ 与物质的能量动量张量 $T_{\mu\nu}$ 的关系。在推导新的引力场方程中，爱因斯坦依靠了数学和抽象的思维分析，最终得到的与泊松方程类似的爱因斯坦引力场方程如下：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \lambda g_{\mu\nu} = -KT_{\mu\nu}$$

式中， $R_{\mu\nu}$ 是黎曼曲率张量缩并后的里奇张量，描述空间的弯曲程度； R 是曲率标量； $g_{\mu\nu}$ 是宇宙因子项； K 是引力常数。若取 Λ 为零，上述方程的另一种形式如下：

$$R_{\mu\nu} = -K(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$

这一方程可以更清楚地表达出新的引力理论的内涵：描述时空弯曲的量 $R_{\mu\nu}$ 由物质的能量动量张量 $T_{\mu\nu}$ 所决定（ T 是 $T_{\mu\nu}$ 变换缩并后的量），即物质的分布决定了时间空间的度规性质。在这一几何化了的引力场方程中，引力场中的物理量与黎曼几何中有关的几何量建立了一一对应关系，如引力空间的弯曲程度由黎曼曲率张量描述；引力势张量是黎曼几何的度规张量；引力场的场强则与克里斯多夫符号对应。

根据新的引力理论，有物质存在的空间不是平直的欧几里德空间，而是弯曲的黎曼空间，点与点之间的最短距离将不再是直线，而是非欧几何的测地线（短程线）；空间弯曲的程度取决于物质的质量及分布状况，空间曲率体现为引力场的强度；空间各点的长度标准将随场的不同而不同，引力场中不同地点引力势的变化也将影响时钟的快慢，场越强，时间的流逝将越慢，而且，时间标准、空间标准的变化相互渗透。从广义相对论角度来看，“引力相互作用”，只不过是空间弯曲的效应，太阳的巨大质量使太阳周围的空间发生弯曲，地球绕太阳的运动就是这种空间弯曲的表现，而不是由于什么超距作用，于是也自然地解决了牛顿引力理论中的超距作用问题。广义相对论引导人们从一种新的角度去认识时空，认识引力作用。因此，人们也常常称广义相对论为新的引力理论。

可以证明，在弱场、静场、空间缓变的场等条件下，爱因斯坦引力场方程变为牛顿引力方程，也就是说，牛顿引力理论只是广义相对论的一种特例，在非强引力场等情况下，牛顿引力理论仍不失为正确的理论。

爱因斯坦由强等效原理给出了物理规律广义协变化的途径，即可以通过以下的步骤将惯性系中狭义相对论的物理规律改变为广义协变的物理规律：

把狭义相对论中各物理方程中的物理量换成黎曼空间的量；

把闵可夫斯基空间的度规换成黎曼空间的度规；

把方程中的普通微商换成协变微商。

广义相对论的建立过程特别是引力场方程的推导等过程是数学和物理学等自然科学之间相互有效结合的光辉范例，并且证明了，意义极其重大的物理学理论总是以运用新的、非同寻常的精深数学为特征的。如，牛顿力学理论之与微积分；麦克斯韦电磁理论之与矢量数学；狭义相对论之与四维空间的张量分析；广义相对论之与黎曼几何、张量运算以及后来的量子力学之与算符、矩阵。数学的发展推动了物理学研究的进一步深入，反过来，物理学提出的问题又促进数学方法的进一步完善，并进而促进数学的发展。爱因斯坦和格罗斯曼一起为解决广义相对论提出的新的物理问题就大大发展了张量的计算。

（2）广义相对论的实验验证

根据广义相对论的理论，爱因斯坦预言了三个重要的效应。这三个效应都陆续得到了实验的验证：

水星轨道近日点的进动

行星绕太阳的运行轨道问题就是粒子绕力心作束缚态运动时的轨道问题。根据牛顿理论可以求得行星绕太阳运行的椭圆轨道方程，作为力心的太阳处于行星椭圆轨道的一个焦点上，轨道上离太阳最近的点即近日点，焦点和近日点均在椭圆轨道的长轴上。考虑到其他行星的影响，每个行星绕太阳转动一个周期，运行轨道的长轴就会绕一个焦点（太阳）发生缓慢的转动，近日点也就不断前移。这种现象被称为“行星轨道近日点的进动”。

1845年，法国天文学家勒维列（1811—1877）在观测水星轨道近日点的进动时发现，考虑太阳系中所有其他行星对水星的影响后，轨道近日点进动的观测值与理论值每百年要相差38秒。1882年，美国天文学家纽康重新测定了这个差值为43秒。（现测值为42.6秒）

勒维列根据他发现海王星的经验预言，水星近日点的进动的差值是由于尚未发现的“火神星”的存在而引起的。但是，之后的数十年里，许多天文学家寻找“火神星”的努力都失败了。水星轨道近日点的差值问题成为一个谜。

爱因斯坦的广义相对论建立以后，行星绕力心太阳作束缚态运动的动力学方程考虑了因太阳引力场引起的时空背景的变化。由这样的动力学方程解得，行星的运行轨道将缓慢地在它自己的平面上旋转，轨道的长轴每个周期将发生一定的偏转，近日点和远日点的位置也不再是固定不动的了。理论计算得出，仅因这种广义相对论效应，每百年水星近日点的进动值约为43秒。这种广义相对论效应有力地解释了水星近日点进动的差值问题。勒维列的观测结果也成为广义相对论的有力实验验证之一。

理论还表明，不仅水星的轨道近日点有进动差值问题，金星、地球、小行星的轨道也有同样的差值问题，只是水星离太阳最近，差值效应最明显而最容易被观测到而已。人造卫星绕地球的运行也可以用来验证这种差值效应。虽然人造卫星的质量小，这种差值效应比较小，但是，卫星绕地球运行的周期短，也就比较容易在不太长的时间内观测到进动差值的累计效应。

光线在引力场中的偏折。

广义相对论的等效原理中，惯性质量是动质量 M 而不是静止质量 M_0 。因此，具有动质量的光子与其他静止质量不为零的粒子一样也应参与一切引力效应，光子要产生引力场也要受到引力场的作用。根据新的引力场理论，引力场中光的传播路径弯曲并不是光本身的新的性质，而是物质存在的空间的新的性质，即空间弯曲的性质，如果空间本身是弯曲的，那么，原来是直线的现象自然应纳入弯曲的“轨道”了。

1911年，爱因斯坦就预言了光线在太阳引力场中将要发生偏折的广义相对论效应，并给出0.83秒的偏折值。1914年8月，德国天文学家费罗因德利希带领观测队到俄国的克里米亚半岛，希望利用那里发生日全食的时机，验证爱因斯坦的预言。不巧，第一次世界大战爆发了，观测队被捉了起来，在交换战俘时被遣回德国，未能完成这次实验。

1915年，爱因斯坦改正了他预言的数值，提出，光线经过太阳边缘时将要偏折约1.7秒。1916年，英国天文学家爱丁顿（1882—1944）读了爱因斯坦的《广义相对论基础》，立刻认识到这一篇文章的伟大意义，决定利用1919年5月29日将要发生的日全食的机会来验证光线在引力场中的偏折效应，并推动英国皇家天文学会着手日全食观测的准备工作。是年，分别由爱丁顿和克罗姆林（1865—1939）率领的两支远征观测队到西非几内亚湾的普林西比

岛和巴西的索布拉耳拍摄日全食照片，以确定恒星发出的光经越太阳引力场时是否发生了偏折。1919年11月6日英国皇家天文学会公布了两队的观测结果，它们分别是 1.98 ± 0.12 秒和 1.61 ± 0.30 秒。

1922年9月21日，另一支观测队在澳大利亚又进行了一次定量观测，结果是 1.72 ± 0.25 秒。

1969年以后，科学工作者对类星体所作的观测实验，也都证实了这一广义相对论效应。

对400颗星的观测实验给出的偏折平均值是1.89秒。

1919年的观测是一次轰动全世界的科学观测，爱因斯坦预言被证实的消息使他一夜之间成为全球的著名人物，也极大地引起人们对广义相对论的重视和兴趣。爱因斯坦创立的这样一种理论不仅能解释人们长期以来无法解释的实验事实，而且能预言非同寻常的未知现象，不能不让人惊叹其巨大的成功。

引力红移（光谱线的红向移动）的实验验证

水星近日点的进动差值和光线在引力场中的偏折从不同角度反映了引力场对空间的影响，特别是后者，它表明了以有限速度传播的一切物理现象在引力场的强制下进入局部弯曲的路径。这种现象描述的不是光的什么新的性质，而是有物质分布的空间所具有的未被人们认识到的性质，即有物质分布的空间本身弯曲的性质。这种性质使原来是直线的现象都要强制纳入弯曲的轨道。

引力红移是广义相对论预言的另一个效应，体现了引力场对时间（频率）的影响。广义相对论的理论指出，光线在稳定引力场中传播时，频率要发生改变，从引力场强的地方向引力场弱的地方传播，光子频率将变小，相应的波长将增加，谱线红移。这种引力红移也称相对论红移。

1925年，美国天文学家亚当斯（1876—1956）通过对天狼星伴星的观测首先验证了相对论红移。天狼星伴星与白矮星相似，是一颗密度很大的星体。它的强引力场引起的引力红移量要比太阳引力场的强得多。

列布卡和庞德还通过地球引力场中的穆斯堡尔效应，验证相对论红移。他们利用一种人造同位素冷却后发出单一频率的射线，使射线逆着地球引力场前进，并通过分析器测定其频率的变化。观测结果与广义相对论的理论推断完全一致。

广义相对论的实验验证还有雷达回波延迟，行星自转轴的进动等。广义相对论还预言，加速运动的质量如加速运动的电荷激发电磁波一样将激发引力波。但是引力波非常微弱，在目前的实验条件下是很难探测到的。世界上的许多研究组为探测引力波而努力，1969年和1978年曾有两次探测到引力波的实验报道，但因为他们的实验结果没有能被重复获得，均未得到公认。因此，引力波探测目前仍是广义相对论实验研究的一项重要课题。

广义相对论是爱因斯坦在一种哲学思想的指引下对狭义相对论的逻辑推广，创立过程中，抽象和数学的思维分析的确发挥了巨大的作用，但是，广义相对论并不是纯思辩的产物。爱因斯坦曾反驳过这种说法，“从来没有一个真正有用的和深入的理论果真是由纯思辩去发现的，广义相对论的创立完全由于要想使物理理论尽可能适应于观察到的事实。”这些事实有引力质量和惯性质量的等价性，有实际上并不存在的惯性系以及惯性系概念循环定义的问题等。而牛顿引力理论的成就及表现出的局限性，相对性原理的发展以

及 1901 年就已经相当成熟的非欧几何和张量分析方法等都为广义相对论发展提供了坚实的基础。

广义相对论在哲学上的重要性还在于，验证了辩证唯物主义所主张的论点：空间和时间都是运动着的物质的“存在形式”。

狭义相对论把时间、空间与物质的运动联系起来，广义相对论则揭示了时间、空间和物质分布的关系，把物质、运动、时间、空间进一步统一了起来，把物体运动的物理本质和时间空间的几何描述统一了起来，这种现代的时空理论从新的高度上否定了牛顿的绝对时空观。爱因斯坦曾向一位记者开玩笑地解释了相对论的成果，他说，如果所有东西都从世界中远离出去的话，人们过去会认为，残留下来的便是空间和时间；而现在，人们知道了单独的时间和空间根本不存在。

1955 年的国际相对论会议上，德国著名物理学家玻恩(1882—1970)说：“对于广义相对论的提出，我过去和现在都认为是人类思索大自然的最伟大的成果，它把哲学的深奥、物理学的直观和数学的技艺令人惊叹地结合在一起。”

(3) 统一场论和宇宙学理论的早期发展

爱因斯坦与统一场论

爱因斯坦把相对论的发展分为三个阶段，即狭义相对论、广义相对论和统一场论。爱因斯坦坚信相对性原理的普遍性，创立了狭义相对论，把经典力学与电磁学理论统一了起来。广义相对论将相对性原理由惯性参考系进一步扩大到任意参考系，并把牛顿引力理论作为一级近似包容其中，使物理学的统一工作又取得了巨大进展。但是，已知的引力规律和电磁相互作用规律没能统一起来。

爱因斯坦在创立了广义相对论之后，便着手研究统一场论，试图进一步推广广义相对论把引力相互作用和电磁相互作用统一在一个理论体系中。广义相对论的魅力促使不少科学家和爱因斯坦一起为创立统一场论而奋斗。他们力图仿效黎曼几何描述引力场的成功作法。建立一种新的几何学，把各种场统一起来，并使物理学与几何学统一起来。1918 年，威尔试图用修改黎曼几何的方法建立一种“规范不变几何学”来统一描述引力场和电磁场，1921 年卡鲁查采用将黎曼几何的四维增加为五维的方法来统一这两种场的作用，但是，他们都失败了。

爱因斯坦最初设法推广卡鲁查的工作，但未成功，后来和他的学生柏格曼一起提出了一种不对称场论，这是爱因斯坦的最后一个统一场论模型。在此模型中，他试图用度规张量来统一描写两种作用，即用度规张量的对称部分描写引力场，不对称部分描写电磁场，但是，得到的方程无法求解。爱因斯坦去世之后，统一场论的研究几起几落，议论纷呈。人们后来发现，宇宙中不仅存在电磁和引力作用，还存在强相互作用和弱相互作用。必须先实现电磁相互作用和弱相互作用的统一，然后再将强相互作用统一，最后才能把引力相互作用统一起来。

50 年代之后产生的规范场论，为统一场论的研究开辟了一条正确的途径。人们首先提出了弱相互作用和电磁相互作用的统一理论，并得到了实验证实，现正在攻克电、弱、强三种作用的大统一，而且相信，包括引力作用在内的四种相互作用的超统一理论最终是能够实现的。从 1923 年至 1955 年去世前，爱因斯坦一直埋头研究统一场论，但由于当时历史条件的限制和缺

乏建立统一场论所需要的基本经验事实，因此他最终未能实现其建立统一场论的宏愿。爱因斯坦并不为他付出的代价而感到遗憾，他始终认为，他所做的探索是有意义的，而统一场论的发展也证明了这一点。

宇宙论的早期研究

牛顿由万有引力定律得出宇宙必定是无限的结论，即宇宙的图象是无数的天体均匀地分布在无限的三维欧氏几何空间中，空间向各方向一直延伸下去，没有一个方向是有终点的。1894年，德国物理学家西利格尔研究指出了牛顿的宇宙理论所存在的“引力佯谬”问题：物质分布均匀的无限宇宙中，牛顿的引力势不存在有限解；若物质分布不是严格均匀，那么，对每个星体而言，各方向物质引力贡献的总和将是非常可观的，但实际情况不是这样。

1826年，奥尔勃斯分析指出，如果宇宙是充满无限数目的星体的欧几里得宇宙，星体分布均匀而且过去未来都发光，那么将导致一条荒谬的结论：白天和夜晚应该一样明亮。这就是所谓的“光度佯谬”也称“奥尔勃斯佯谬”。以牛顿的万有引力规律和欧氏几何学为基础的宇宙模型是无法摆脱以上的两个疑难的。

1917年，爱因斯坦将广义相对论引力场方程用于研究宇宙学问题，发表了第一篇关于宇宙学的论文《根据广义相对论对宇宙学所做的考查》。文中，他也分析了牛顿无限宇宙理论中的矛盾和不自洽。

牛顿经典力学在讨论一个有限力学体系的运动时，总是假定可以选取一个参考系，使引力势在无限远处成为常数。在解决局部天体的运动问题时，这个条件是非常关键的。但是，按照牛顿的无限宇宙图象，物质是均匀分布在整个无限的空间中，那么，根据牛顿经典力学又将得出无限远处引力势不为常数的结论，这就是一种矛盾。如果，放弃物质均匀分布于整个空间的假设，认为物质主要集中在周围有限的范围，那么，可以保证无限远处的引力势是常数，但物质的宇宙确仍然是有限的。所以，牛顿的引力理论在原则上是无法描写宇宙这一物理体系的。

爱因斯坦利用广义相对论得出的引力场方程对宇宙体系进行了考察，并提出了两个假定，一是各向同性的假定，即宇宙从大尺度上来看，在任何给定的时刻，对各个方向观测的结果相同；另一是均匀性的假定，即宇宙从大尺度上看，天体的分布是均匀的，星系的平均密度、光度和相互间的距离都是一样的。这两个假定也称宇宙学原理。根据这一原理，他由引力场方程得出了一个静态的宇宙解，即物质在宇宙中总的分布不随时间变化的解，这个解表明，宇宙是闭合的、有限的，但又是无边的。这个宇宙模型虽然简单，而且后来的星系远离运动的观测事实也表明宇宙这个物理体系不是静态的，但它确是第一个科学的现代宇宙模型，为现代科学宇宙学的发展奠定了基础。

同年，荷兰天文学家德西特由引力场方程得出另一个静态的宇宙解。该解认为宇宙的物质有运动但平均密度趋于零。

1925年，苏联数学家弗里德曼由爱因斯坦的引力方程中得到一个非静态解，但当时未引起人们的重视，1927年，比利时天文学家勒梅特把这种动态时空解作为一个宇宙模型进行了考察，提出了弗里德曼—勒梅特宇宙模型和大尺度的空间会随时间而膨胀的观点。

1929年，美国天文学家哈勃（1889—1953）在研究河外星系光谱红移中发现，星系系统的退离速度与距离成正比，这表明，宇宙在膨胀，非静态宇

宙模型获得观测证实。

爱因斯坦起初对弗里德曼等人的动态宇宙模型持怀疑态度，认为非定态解是求解引力场方程时的数学错误所造成的，但在哈勃红移现象发现以后，爱因斯坦收回了对弗里德曼的批评，承认了自己的错误，并万分感慨地说，这是他“一生中最大的错事”。

1932年，勒梅特又在宇宙膨胀的基础上进一步提出宇宙起源于原始火球的大爆炸观点。1948年，美籍物理学家盖莫夫（1904—1968）把宇宙起源与化学元素起源联系起来，提出宇宙大爆炸学说。这一宇宙学模型认为，宇宙起始于一个密度极大、温度极高的炽热物质凝团，这个凝团快速并各向同性地爆炸，物质向外散开，在膨胀和冷却过程中形成了星系和恒星。现代天文学家观测到的大尺度天体的系统红移与这种宇宙学说是一致的。

关于宇宙的形成以及巨大宇宙物质如“塌缩恒星”、“黑洞”等的奇异性在现代理论天体物理学中是相当引人入胜的话题，但是，这一方面探索、研究的进展已超出了本书的范围。爱因斯坦创立的广义相对论为人们研究宇宙、开拓宇宙奠定了基础，而随着研究的深入，相对论也遇到了挑战，人们对自然的认识也随着一个个挑战的产生和解决而不断深入。

3. 科学巨匠爱因斯坦

(1) 爱因斯坦的科学贡献

科学巨匠爱因斯坦在现代科学技术史上占有极其重要的地位，他的一生对科学宝库作出了巨大的贡献，对物理学的贡献就有以下几个主要方面：

一是分子运动论方面。爱因斯坦用统计方法研究分析了原子、分子的热运动问题。1827年，英国的植物学家布朗（1773—1858）在显微镜下发现，浸泡在液滴中的花粉粒子在不停地作不规则的运动（后来以发现者的名字，命名这种运动为布朗运动），粒子越小，液体温度越高，运动就越激烈。布朗运动实际上是由液体分子的不规则热运动引起的。1905年春，爱因斯坦撰写的关于液体中悬浮粒子运动的两篇论文才真正从理论上完全解释了布朗运动，并以统计方法给出了悬浮粒子的运动状态与液体性质之间的数学关系式，还给出了测定分子大小的方法。1908年，法国物理学家裴兰用实验证实了“布朗运动的爱因斯坦定律”，并因此获得1926年的诺贝尔奖。爱因斯坦的研究证明，热是能量的一种形式，是由不规则的分子运动引起的，证明了物质是由分子、原子构成的。他的工作使原先对原子论抱怀疑和反对态度的人如马赫和奥斯特瓦尔德（1853—1932）也不得不宣称“改信原子学说”，对原子论的胜利作出了决定性的贡献。

二是量子论方面。1905年，爱因斯坦推广了普朗克的“量子假说”提出“光子假说”，以最简练、明晰的方式解释了1887年赫兹所发现的“光电效应”现象，并给出了光电效应的“爱因斯坦公式”。10年后，该公式在美国实验物理学家密立根（1868—1953）的实验中得到了证实。爱因斯坦关于光的这种新的理论，发展了普朗克在热辐射问题上阐明的量子思想，首次揭示了光的两重性，即光既有波动性，又有微粒性，使惠更斯和牛顿彼此对立的光学理论在新的概念、新的高度上得以统一。后来，德布罗意（1892—）和薛定谔（1887—1961）把爱因斯坦的这种观点又推广到电子，提出电子和光子一样具有波粒二重性，而波粒二重性则是量子力学和量子场论的支柱。

1906年，爱因斯坦把量子概念运用到物体内部的晶格振动问题中，解决了低温时固体比热同温度变化的关系问题；1912年，又把量子概念用于光化学现象，提出光化学当量定律；1916年，他从玻尔的基本假定出发导出了普朗克的辐射公式，并提出受激辐射的理论，这一理论对60年代激光技术的发展有重要意义；1924年，他利用刚刚提出的德布罗意物质波假说处理单原子理想气体，同玻色一起建立了玻色—爱因斯坦量子统计理论。由于爱因斯坦在量子论方面的贡献以及对量子力学产生的推动作用，他和玻尔一起被称为量子力学的两个“教父”。

三是相对论的创立和发展。包括前面所述的狭义相对论、广义相对论的创立，以及广义相对论创立之后在宇宙论和统一场论研究领域的开拓、发展。

被人们尊称为“相对论之父”的爱因斯坦，实际上在多学科领域中都是出类拔萃的理论研究家。1921年，爱因斯坦因在光电效应理论方面的贡献获得诺贝尔奖，而他的学生兰佐斯认为，爱因斯坦一生理应获得五个诺贝尔奖，即指布朗运动研究，提出光量子理论，创立狭义相对论，发现质能关系式和创立广义相对论。其中前四项涉及三个领域的重大成果是在1905年3月到9月这半年之内完成的。当时爱因斯坦年仅26岁，在瑞士伯尔尼专利局任技术员，一无名师指导，二无专门研究机构的条件，而他完全靠业余时间独立钻研取得这些成果。爱因斯坦的成就不能不说是科学技术史上的一大奇迹，也是人类科技史上最光彩夺目的一页。毫无疑问，爱因斯坦具有不同于常人的高度发达的“信息加工中心”——大脑，科学家们至今仍在努力揭开这个“信息加工中心”的奥秘，但从另一方面看，爱因斯坦的成就并不是偶然的。

(2) 从学生时代到就职于伯尔尼专利局

1879年3月14日，爱因斯坦出生于德国乌尔姆的一个犹太商人家庭。他和牛顿一样，并不早慧，但从小就有强烈的好奇心，酷爱大自然而且喜欢思索其中的奇妙现象。在树林里游玩，他琢磨阳光透过树叶在地上留下的美丽图案；在湖边，他会专注地观察湖面上起伏的波纹。四五岁时，从爸爸那里得到一枚指南针，面对总是在一个方向附近游动的指针，小爱因斯坦惊奇不已，竟呆呆地想个不停。上学后几年的某个学期，他拿到一本欧几里得几何学课本，书中对几何公理严谨、明晰的论证再次使他惊奇不已，并激发起他强烈的求知欲，他等不及听老师讲授，就一口气读完了它。

正如爱因斯坦后来所说的，这种种“惊奇”是经历的事情同我们的充分固定的概念世界有冲突时才会发生，每当我们尖锐而强烈地经历这种冲突时，它就会以一种决定性的方式反过来作用于我们的思维世界，思维世界的发展，在某种意义上说就是对“惊奇”的不断摆脱。

少年时代还有两本书对爱因斯坦的影响比较深。一本是伯恩斯坦的《自然科学通俗读本》。书中，光速问题被放在第一卷的最前列，作为所有自然观察的开端，作者用引人入胜的叙述引导读者去思索、理解自然现象。爱因斯坦在这里首次接触到光速的基本含义问题，而且，这个问题从此一直激励、引导着他，直至创立了相对论。另一本是布赫纳的《力和物质》，具有朴素的现实主义思想。这些自然科学启蒙著作较早地形成了爱因斯坦的怀疑主义思想。

从少年时代起，爱因斯坦就喜欢开诚布公，毫不掩饰自己的观点。他对学校那种死记硬背、因袭守旧的教学方式很不以为然，喜欢按自己的想法学

习，根据自己的思索和理解来寻求对任何问题的解答，表现出非凡的自学能力。

在苏黎士上大学时，他把主要精力充分利用于学习，但仍不注重学校的正规课程，而喜欢独立思考和自学。他为自己开列了长长的书单，并制定了严格的阅读计划。这些书中有基尔霍夫（1824—1887）、亥姆霍兹（1821—1894）赫兹、玻尔兹曼（1844—1906）及麦克斯韦等著名物理学家的重要著作。通过对这些著作的学习，爱因斯坦掌握了电磁理论，还从亥姆霍兹等人的著作中汲取了哲学和认识论方面的思想。

奥地利著名物理学家、哲学家马赫的《力学及其发展的批判历史概要》（以下简称《力学史》）则给他留下了深刻、持久的印象。19世纪中后期，当多数物理学家还陶醉于经典力学的完美无缺时，马赫就看出了经典力学理论框架的局限性，在1883年出版的历史性著作《力学史》中，他抨击了18至19世纪统治着物理学基础的教条主义，其中最为突出的是对牛顿绝对时空观的批判。这些对爱因斯坦创立相对论产生了深刻的影响。在狭义相对论对“同时性”问题和在广义相对论对“惯性”问题的思索中，爱因斯坦都从马赫的著作中受到了启示。爱因斯坦到晚年还赞颂《力学史》为一本“革命著作”。

大学毕业以后的两年时间里，爱因斯坦常为谋求职业而忧虑、奔波。后来，在朋友的帮助下，被伯尔尼的联邦专利局聘为技术员，半年后，爱因斯坦和大学时的同学米列娃结了婚。米列娃是塞尔维亚人，当时也是物理教师。

1902年7月到1909年10月，爱因斯坦在伯尔尼专利局工作了7年。这是他一生中科学研究最丰产的时间。为了胜任专利技术员的工作，他必须多方面思考物理问题、技术问题，还要有充裕的时间和精力来思索更多的学术问题。

在专利局工作的前3年里，他和他的两位朋友，哲学系的大学生索罗文及苏黎士时的学友哈比希特组成哲学小组，并命其名为“奥林匹亚科学院”。在“科学院”里，他们一起研读了许多哲学著作和科学研究论著，如马赫的《力学史》和《感觉分析》，对爱因斯坦来说是再次研读，还有皮尔逊的《科学法则》，弥尔的《逻辑学》，休谟（1711—1776）的《人性论》，斯宾诺莎（1632—1677）的《伦理学》，亥姆霍兹的《报告、演说集》和安培的自然哲学著作，还研读了黎曼的《几何学基础》和戴德金等的数学论著。对彭加勒的《科学与假设》，“科学院”的“院士们”讨论了几周时间，作者的科学思想和批判精神无疑给爱因斯坦留下深刻的启示和激励。

1905年，哈比希特离开了伯尔尼，索罗文到法国学习，“奥林匹亚科学院”也结束了它的使命。3年来广泛深入地集体自学哲学和科学著作的活动，使爱因斯坦在以后的科学研究道路上获益匪浅。

爱因斯坦从前人的著作中汲取了两方面的财富；一方面是对经典物理学理论及其内在矛盾的深刻理解，一方面是批判和分析的思想。对于各派思想家的哲学著作，爱因斯坦感兴趣的并不是他们的结论，而是他们提出的问题和对问题思索，是当他面临认识论困境而寻求出路时可从中获取的启迪。例如，爱因斯坦自己承认，“他曾直接或间接地特别从休谟和马赫那里受到很大启发”，他十分钦佩马赫那“坚如磐石的怀疑态度和独立性”。

（3）爱因斯坦的科学探索精神和风格

爱因斯坦在吸收前人思想精华的基础上，形成了他自己独特的科学探索

的精神和风格。

他不仅勇于摒弃一切“世俗的偏见”，倡导彻底的怀疑态度，还具有勇敢的创新开拓精神。这种精神贯穿于这位量子论和相对论创始人的整个科学探索活动中。这也许能解释，为什么是爱因斯坦而不是洛伦兹、彭加勒或别的人创立了狭义相对论。洛伦兹提出的“长度收缩”以及“地方时间”等假说已经严重动摇了经典力学的基础，但他未能从根本上摆脱静止以太理论和牛顿绝对时空观的束缚。对他自己推出的洛伦兹变换式，也一直未能揭示和解释其真正的含义。彭加勒提出了一些更为接近相对论的重要思想，甚至提出了相对性原理的普遍性，但也没有意识到，要从根本上改造整个物理学的基础，而始终未找到突破口。

爱因斯坦不仅具有犀利的批判力和创新开拓精神，更具有彻底的科学探索精神。狭义相对论的创建工作刚刚告一段落，许多人尚不能接受和理解狭义相对论的观点时，爱因斯坦已经开始了对广义相对论的研究。曾积极支持他创立狭义相对论的物理学家，这时对爱因斯坦不解地说：“现在一切都明白地解释了，您为什么又忙于另一个问题呢？”在广义相对论的10年探索中，他遇到了数学等方面的很大困难，但从未却步。1919年，广义相对论得到了天文观测实验的证实，爱因斯坦誉满天下。这时，他又选择了另一个更为艰难的新的探索目标——建立统一场论，直至临终前不久，仍在为这个目标而奋斗。

爱因斯坦具有敏锐的物理直觉和深邃的思维分析能力，善于从人们认为很平常的事实中发现问题，领悟出一般人认识不到的事物的本质。所以，也只有爱因斯坦才能创立包含着深邃思想的广义相对论。广义相对论的建立突出表现出了逻辑思维、直觉思维和哲学思维的能动作用。爱因斯坦本人也认为，“要是我没有发现狭义相对论，也会有别人发现的，问题已经成熟。但是我认为，广义相对论的情况不是这样。”爱因斯坦把广义相对论看作自己一生中最重要的科学成果。

善于设计理想实验在爱因斯坦的科学探索活动中是十分突出的。理想实验也称为思想实验，是科学研究人员源于自身的经验，但又超出自身经验的一种高级的思维活动。这种思维方法是针对研究过程中所出现的问题进行的辩证的、深入的、抽象的分析。因为这种思维活动是按照实验的特点进行的，所以被称为理想实验。和实际操作的实验不同，理想实验并不需要现实的仪器设备，但它所需要的“实验仪器”常常超越当时的科学技术发展的水平。

在爱因斯坦之前，许多自然科学家，如伽利略等，就曾运用过理想实验。但关于理想实验的提法最早见于爱因斯坦1921年的著述《我是怎样创立相对论的》，而且，在科技史上，最成功地、最多地应用理想实验的也当首推爱因斯坦。

16岁时，他就设计了一个理想实验，即所谓的“追光实验”，他设想，当光的接受器（如人的眼睛）跟随在光的后面飞奔，将会有有什么情景发生呢？会不会处于一个不随时间变化的波场中？相对论就孕育、萌芽于这样一个朴素的理想实验中。在狭义相对论的创立过程中，爱因斯坦设计了著名的“高速爱因斯坦火车”的理想实验来推证“同时相对性”；在广义相对论的探索过程中，爱因斯坦则设计了另一个著名的理想实验，即“爱因斯坦电梯”或称之为“爱因斯坦密封舱”以推证等效原理的合理性。

1927年10月，在布鲁塞尔第五届索尔维物理会议上，围绕着量子力学

理论的物理诠释，爱因斯坦和以玻尔为首的哥本哈根学派展开了激烈的论争，爱因斯坦认为，量子力学并不描述单个体系的行为，而描述许多相同的单个粒子所组成的系统的集体行为，因此，量子力学理论是不完备的。哥本哈根学派则认为，量子力学能描写单个体系的状态，是完备的理论。在会上，爱因斯坦设计了多个理想实验，例如“单缝衍射理想实验”、“多缝衍射理想实验”等，试图证明可以同时准确地测定粒子的位置和动量，以驳倒测不准关系。但是，这次的论争是以玻尔成功地捍卫了测不准关系和互补原理而结束。

1930年10月在布鲁塞尔召开的第六届索尔维会议上，爱因斯坦又精心设计了一个被称为“光子箱”的著名理想实验，向测不准关系发出了严峻挑战。虽然爱因斯坦最终并没有难倒哥本哈根学派，但他精巧构思和设计的理想实验仍令后人叹服。而且这场由爱因斯坦发起的学术论战，引导和促进了量子力学的发展，是科学史上最著名、最深入、最富有成效的学术论争。

理想实验可用于建立一种新的理论，但它并不能作为检验物理理论真理性的标准，只有真实实验，才能检验理论的正确与否。而爱因斯坦卓越的实验设计才能，不仅表现在理想实验的设计方面，他还常常为重大的理论研究直接提出惊人的真实实验验证方法，并预言实验的结果。例如，爱因斯坦就预言了光线在太阳引力场中将要发生偏折的广义相对论效应，并于1915年给出了约1.7秒的实验偏折值，1919年由英国科学家爱丁顿和克罗姆林率领的两支远征观测队分别证实了爱因斯坦的预言，同时也证明了广义相对论的正确性。

(4) 爱因斯坦的科学指导思想

在爱因斯坦的科学创造活动中，贯穿着他坚定的科学信念，或者说，一些明确的科学的哲学思想支配和引导着爱因斯坦的科学探索，成为他攻克一道道难关的锐利武器。这些科学指导思想有统一性思想、简单性思想和对称性思想等，而最突出的无疑是统一性思想，即对自然界和谐、统一的坚定信念。

统一性思想是人类思想领域里最早萌芽且最富有生命力的思想之一。开创自然科学的初期，人类就把将各种自然现象概括成一个统一的体系作为自己的目标。而探索这种统一性的伟业则激励着一代又一代的自然科学家。

爱因斯坦从青少年时代就追崇世界的统一性，对“自然界的神秘的和谐”怀着深深的敬仰和赞赏，他认为：“从那些看来同直接可见的真理十分不同的各种复杂的现象中认识到它们的统一性，那是一种壮丽的感觉”。探索这种“壮丽的统一性”的信念贯穿于爱因斯坦科学研究活动的始终，并体现于各个领域和不同阶段的成果中。

有人认为，爱因斯坦创立狭义相对论是为了解释迈克尔逊—莫雷实验和“以太”理论之间的矛盾，实际上，他是为了克服经典物理学体系的内在矛盾，即经典力学和经典电动力学之间的内在逻辑不统一性。因为，对经典力学来说，不存在一个特殊的惯性坐标系可以被认为是绝对静止的坐标系，也就是说经典力学满足相对性原理；而对经典电动力学来说，若存在“以太”静止参考系，那么经典电磁理论就不满足相对性原理。狭义相对论就是在解决这种不和谐、不统一，坚持相对性原理的普遍性，构造具有更高统一性的新理论的过程中诞生的。英国著名宇宙学家邦迪评述道：“任何主张，只要声言物理学的统一性是不可少的，都必然会推出狭义相对论，因为，它不容

忍所有的惯性系从动力学的观点看来是等效的，但根据光学测量又是可分辨的。”

也有人认为，爱因斯坦创立广义相对论是为了改造牛顿引力理论存在的问题，并将牛顿引力理论纳入狭义相对论的框架。事实上，爱因斯坦又是从克服物理体系内部的某些不统一性出发，这种不统一表现在惯性系和非惯性系之间，表现在速度的相对性和加速度的绝对性之间。

爱因斯坦对统一场论的探究，则是为了寻求自然界的一种更高的统一性，即电磁作用和引力相互作用的统一。

爱因斯坦的光量子假说，也主要是基于统一性思想。在提出这一假说的论文《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》的开头，爱因斯坦就指出：“在物理学家关于气体或其他有重物体所形成的理论观念同麦克斯韦关于所谓空虚空间中的电磁过程的理论之间，有着深刻的形式上的分歧。这就是，我们认为一个物体的状态是由数目很大但还是有限个数的原子和电子的坐标和速度来完全确定的；与此相反，为了确定一个空间的电磁状态，我们就需要用连续的空间函数，因此，为了完全确定一个空间的电磁状态，就不能认为有限个数的物理量就足够了。”可以看出，爱因斯坦正是为了消除分立的质点与连续的场之间的形式上的不统一性，而提出光量子假说的。

在爱因斯坦的其他研究成果中，如对原子、分子热运动的研究等，无一不闪耀着统一性思想的灿烂光华。

简单性思想也是爱因斯坦所追崇的科学思想之一。在爱因斯坦的简单性思想中，最重要和最深刻的是“逻辑简单性”思想。他指出，逻辑简单性就是努力把一切概念和一切相互关系归结为尽可能少的一些逻辑上独立的基本概念和公理。也就是说，逻辑简单性是指，一个科学理论具有尽可能少的逻辑上互相独立的基本概念和基本原理。他认为：“唯一事关重要的是基础的逻辑简单性”，也就是说，逻辑简单性的核心是基础结构的简单性。

狭义相对论的整个理论体系就是建立在相对性原理和光速不变原理上，这两条基本原理的文字叙述仅一百余字。正是由爱因斯坦用非常简单的形式所表达出来的原理思想中，引申出了人类时间空间观念的大变革，带来了思想的大飞跃。广义相对论的基本假设也只有两条。虽然，这一理论的数学形式令人生畏，但了解其内涵的数学和物理学家，无不赞美它的逻辑简单性和形式的完美性。

爱因斯坦的成功是正确的科学思想综合作用的结果。而爱因斯坦的伟大还在于，他不仅应用了这些思想，充分发挥了这些思想在探索中的武器作用，而且，通过他的科学探索活动，大大丰富或明确了这些思想的内涵。爱因斯坦的科学的探索过程还首创了物理几何化等思想，对丰富人类科学思想宝库，作出了重大贡献，这些重要思想对 20 世纪物理学与数学的发展产生了深远的影响。

(5) 品德高尚的伟大科学家

广义相对论取得巨大成功后，许多人赞扬爱因斯坦是“20 世纪的牛顿”。更多的人则认为，很难找到在业绩和品德上都能和爱因斯坦相媲美的人。

爱因斯坦在其一生中，淡薄名利，谦虚正直，追求真理，服从真理。著名物理学家劳厄称赞爱因斯坦说：“有幸能与爱因斯坦接近的人都知道，他从未对别人的精神财富打过主意。他是个谦虚而又反对浮夸的人。”

在长达半个世纪的科学创作活动中，爱因斯坦先后发表了很多自然科学

论文、学术著作和社会政治言论，40—50岁期间，他发表的专利论文数目甚至超过科学论文的数目。仅就物理学方面的成果看，他理应获得多次诺贝尔奖，但因种种原因，他只获得一次这种奖励。但他一生中从未陷入“争夺发明权”、“捍卫个人研究成果”等争名夺利的争端中。相对论的成功使爱因斯坦誉满天下，但他对名利、应酬和种种个人崇拜淡薄以对，仍然一如既往，在探索真理的道路上不畏艰难、孤独地行进着。

就相对论的创立，爱因斯坦曾谦虚地解释道：“怎么偏偏是我创立了‘相对论’呢？我认为原因在于，一个正常的成年人不见得会去思考空间—时间问题，他会认为这个问题早在童年时代就搞清楚了。我则正相反，智力发展得很慢，成年以后才开始思考空间和时间的问题。显然，我对这些问题比儿童时期发育正常的人就要想得深一些。”

两个美国大学生曾就“爱因斯坦名声之大”进行打赌，即从美国某地发出一封信，信封上只写“爱因斯坦收”，看是否能收到。爱因斯坦后来笑着说：“信收到了，而且是按时收到的，但这只能说明邮局工作得好。”

爱因斯坦具有自我批判尊重真理的正直态度。在宇宙学的早期研究活动中，爱因斯坦最先得出一个静态的宇宙模型，后来苏联科学家弗里德曼给出另一动态模型。爱因斯坦一开始不承认弗里德曼等人的成果，对动态宇宙模型持怀疑和批评态度。当支持动态模型的哈勃红移现象发现后，爱因斯坦承认了自己的错误，收回了对弗里德曼的批评。

爱因斯坦不仅是一个伟大的科学家，还是一个具有浓厚的和平主义与国际主义色彩的思想家。他热爱和平，反对侵略战争，不屈服于法西斯主义的强暴与迫害，一直为保卫世界和平而斗争。

1919年，广义相对论对太阳引力场的光线偏折的预言得到实验证实后，全世界都出现了“相对论热潮”，爱因斯坦成为享有很高国际威望的科学家，德国科学界的许多人士盛赞爱因斯坦“史无前例的思想深邃的工作”。由于爱因斯坦是犹太人，德国的一些热衷于迫害犹太人的极端民族主义者，对爱因斯坦发起了激烈的攻击。1920年8月，德国的一些极端民族主义分子和排犹主义分子搞起一个专门反对相对论和爱因斯坦的组织。这个组织中甚至有勒纳德（1826—1947）这样的诺贝尔奖金获得者。他们污蔑相对论是“犹太精神的江湖骗术”，是“理论上无法成立的虚构”，是“历史上的最大欺骗”。他们甚至主张把物理学分成两类，一类是“真正富有成果的德国人的物理学”，另一类是“破坏性的愚蠢的犹太人的物理学”。爱因斯坦称这个组织为“反相对论公司”。

纳粹分子上台后，对敢于不服从他们，甚至顶撞他们的爱因斯坦终于恼羞成怒。1933年春，持枪匪徒冲进爱因斯坦在柏林的住宅，掠走了所有财物，并没收了他在卡普特的别墅。同年4月，爱因斯坦愤离德国，并接受了美国普林斯顿高级研究所的一个职位，此后，便一直居住在普林斯顿，从事他的科学研究工作。

第二次世界大战前夕，科学家们获悉，原子裂变的实验已在德国取得成功，而且有情报证实，纳粹分子正积极组织人力进行核链式反应的研究。他们敏锐地预感到，如果法西斯把有关的核研究成果用于战争目的，将给世界文明带来十分可怕的后果。物理学家们采取了一些紧急措施，共同保守有关裂变和链式反应研究的全部秘密，并由匈牙利物理学家西拉德起草了一封给罗斯福总统的信，要求美国尽快研制原子弹。爱因斯坦在给罗斯福总统的信

上签了名，他说：“我的确感到这种可怕的危险，这个行动一旦得逞将给人类带来多么严重的后果。德国人在这一方面作了研究，预计会成功，这就迫使我走这一步。即便我一直是个坚定的和平主义者，也深感别无出路！”

后来，希特勒并没有抓紧时间把科学家们对裂变现象的研究用于研制战争武器，当急需这种“神奇武器”时，法西斯已日暮途穷。美国“曼哈顿工程”研制成功的原子弹，后来投放到了日本人口稠密的长崎和广岛，对大量无辜平民的伤亡，爱因斯坦感到十分震惊和愤怒。这以后，他坚定不移地投入反对原子屠杀和反对美国的“原子外交政策”的斗争，为谋求各国人民之间的和平和谅解作了大量工作。

1955年4月初，76岁高龄的爱因斯坦因健康原因，不得不住进医院。在此期间，他仍呼吁起草制止原子战争的文件。

爱因斯坦于1955年4月18日去世。临终前的遗嘱再一次表达了这位伟人的精神境界：生前的办公室要让别人使用，寓所不要成为“朝圣”的纪念馆，不要举行任何悼念活动，不要坟墓也不要树立纪念碑，骨灰风撒大地。

爱因斯坦走完了他的人生历程，但科学巨匠的丰碑将永远竖立在每个科学工作者的心中。

五、化学理论的发展与化学工业的勃兴

火及燃烧现象之本质是什么？在长达一个世纪之久的时间内，燃素说在化学领域中占据了统治地位。法国化学家拉瓦锡（1743—1794）在批判继承前人成果的基础上，通过实验验证，于1777年提出了氧化说。在水的化合和分解实验取得成功之后，氧化说获得了举世公认。从此，化学科学割断了与古代炼金术的联系，逐渐形成了一个科学知识的体系，开创了化学的新时代。

在19世纪初，英国的道尔顿（1766—1844）提出了原子论。他认为一切物质都是由原子组成的。1803年10月18日，道尔顿在曼彻斯特发表了关于原子论及原子量计算的论文，虽然结论难免有误，但它却是一项划时代的重要成就。原子论的建立，使化学与炼金术、燃素说等最终脱离，成为一门真正的科学，并使化学研究从定性描述阶段转入定量计算阶段，为化学理论研究提供了新的方法。

随着科学研究的发展，化学理论在19世纪取得了重大进步，而化学理论的变革又推动了化学工业的前进。

1. 元素周期律的发现与周期表的形成

俄国化学家门捷列夫（1834—1907）认为，元素的原子量与其化学特性之间，应该存在某种联系。并且他深信化学元素之间也一定存在着规律性的联系和相互依赖性。他在总结前人经验的基础上，作了大量核对、比较、验证和整理工作。他紧紧抓住原子量这个关键，把化学元素依原子量的大小及其性质进行排列和分类，从而发现了元素性质随原子量增加而呈周期性变化的规律。门捷列夫在1869年2月提出了周期律，并公布了他的第一个元素周期表。同年3月，他发表了《元素性质与其原子量的相互关系》的论文，论述了元素周期律的四个基本观点：（1）依照原子量大小排列起来的元素，在性质上呈现出明显的周期性；（2）原子量大小决定元素的性质；（3）可预见未知元素；（4）可判定或修正元素的原子量。1871年，门捷列夫公布了他的第二个元素周期表，更详尽地论述了元素周期律，大胆修正了一些元素的原子量，并在周期表中留出空格，先后预言了“类硼”、“类铝”、“类硅”等十五种未知元素的存在及其性质。周期律的发现如同其他新事物一样，在刚刚来到世间的时候，不可避免地遇到了种种指责和非难。但随着时间的推移，周期律的真理性终于得到了公认。1875年，法国的布瓦博德朗（1838—1912）在分析比里牛斯山的闪锌矿时，应用光谱分析法发现了一个新的元素——镓。这是门捷列夫所预言的“类铝”。1879年，瑞典的尼尔森（1840—1899）在对硅铍钒矿石和黑稀金矿进行研究时，发现了元素周期表中第二个待填补的元素——钪。门捷列夫曾称之为“类硼”。1886年，德国的温克勒（1838—1904）用光谱分析法发现了化学元素锗。这是周期表中第三个待填补的元素，即门捷列夫所预言的“类硅”。至此，元素周期律理论及周期表经受了实践的检验，并在实践中得到补充。它以无可辩驳的例证显示了其科学性和正确性。令学术界为之惊叹，而后成为无机化学和分析化学发展的重要基础。门捷列夫公布的第一个元素周期表（1869年）

					Ti	50	Zr	90	?	100
					V	51	Nb	94	Ta	182
					Cr	52	Mo	96	W	186
					Mn	55	rh	104.4	Pt	197.4
					Fe	56	Ru	104.4	Ir	198
					Ni=C0	59	Pd	106.6	Os	199
H1					Cu	63.4	Ag	108	Hg	200
	Be	9.4	Mg	24	Zn	65.2	Cd	112		
	B	11	Al	27.4	?	68	U	116	Au	197?
	C	12	Si	28	?	70	Sn	118		
	N	14	P	31	As	75	Sb	122	Bi	210
	O	16	S	32	Se	79.4	Te	128?		
	F	19	Cl	35.5	Br	80	I	127		
Li7	Na	23	K	39	Rb	85.4	Cs	133	Tl	204
			Ca	40	Sr	87.6	Ba	137	Pb	027
			?	45	Ce	92				
			Er?	56	La	94				
			Yt?	60	Di	95				
			In	75.6?	Th	188?				

注：？表示未知或未确定。

门捷列夫公布的第二个元素周期表（1871年）

列	- R ₂ O	- RO	- R ₂ O ₃	RH RO ₂	RH R ₂ O ₅	RH RO ₃	RH R ₂ O ₇	- RO ₄
1	H1							
2	Li7	Be9.4	B11	Cl2	N14	O16	F19	
3	Na23	Mg24	Al27.3	Si28	P31	S32	Cl35.5	
4	K39	Ca40	-44	Ti48	V51	Cr52	Mn55	Fe56Co59
5	(Cu63)	Zn65	-68	-72	As75	Se78	Br80	Ni59Cu63
6	Rb85	Sr87	?Yt88	Zr90	Nb94	Mo96	-100	Ru104Rh104
7	(Ag108)	Cd112	In113	Sn118	Sb122	Te125	I127	Pd106Ag108
8	Cs133	Ba137	?Di138	?Ce140	-	-	-	--
9	(-)	-	-	-	-	-	-	
10	-		?Er178	?La180	Ta182	W184	-	Os195Ir197
11	(Au199)	Hg200	Tl204	Pb207	Bi208	-	-	Pt198Au199
12	-	-	-	Th231	-	U240	-	

注：？表示未知或未确定。

元素周期律和周期表，是门捷列夫在科学研究中建立的不朽勋业。但他也有思想保守的一面，直到 1902 年，他还在否认原子的复杂性和电子的存在，强调原子的不变性，坚持认为元素不变是元素周期律得以成立的前提。因此，对元素周期律的科学阐述并不是由门捷列夫进一步完成的，而是由英国科学家莫斯莱（1887—1915）实现的。1913 年，莫斯莱在测定一系列元素的原子序数时，发现各种元素所产生的特征 X 射线的波长，其顺序恰好与元素在周期表内的次序一致，进而他把这个次序命名为元素的原子序数，于是提出了核内的单位电荷数是周期表中元素排列顺序的根本依据的假说，明确了决定元素基本化学性质的是原子序数，而不是原子量。德国化学家柯塞尔（1888—1956）于 1916 年在进行电价理论研究时，最先用原子序数代替原子量，对元素周期表进行了深入研究。柯塞尔提出金属元素的外层电子一般少于四个而容易失去电子，变成带正电的阳离子。非金属元素的外层电子一般多于四个，而容易得到电子，变成带负电的阴离子。失去电子的数目，是元素的正原子价数，得到电子的数目，是元素的负原子价数。通过对原子核电荷数的研究，使元素在周期表中的排列顺序得到了科学的解释。通过对原子核外电子状况的研究，则阐明了元素性质随原子序数变化而呈周期性变化的原因。

随着新元素的陆续发现，元素周期表不断得到补充和发展。1869 年门捷列夫公布的元素周期表共有 66 个位置，当时已发现了 63 种元素。到 1894 年，门捷列夫所预言的未知元素已先后发现，到此已发现的元素总数共达 75 种。当年，英国化学家拉姆塞（1852—1916）和瑞利（1842—1919）发现化学元素氩，确定它是元素周期表中最后一族——惰性元素族中的一个元素。1895 年，他们又各自独立发现化学元素氦。1898 年拉姆塞又发现化学元素

氦、氩、氙，并确定了它们在元素周期表中的位置。1897—1898年，法国的比埃尔·居里(1859—1906)和法籍波兰人玛丽·斯克罗多夫斯卡·居里(1867—1934)先后发现了放射性元素钋、钋和镭。1898年，法国的德比恩(1874—1949)从沥青铀矿石中分离出第三个放射性元素，即89号元素“锕”。后来德国的哈恩(1879—1968)等又分离出了第91号元素“镤”。1900年，德国的多恩发现当镭发生衰变时，周围的空气也有放射性，并证明是一种放射性惰性气体，这种气体元素被命名为“氡”。这是最后一个被发现的惰性气体。1907年，瑞典的莫桑特等发现了没有放射性的稀土元素十四种。它们是：镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、铈、钇、铟、铪、铌、钽。1923年，丹麦的科斯特等从锆英石中检测出第72号元素，并将其命名为铪。1925年，德国的贝尔格(1874—1939)等从铂矿中发现了第75号元素，并命名为铼。到20世纪30年代，从第1号元素氢到第92号元素铀所组成的元素周期表中有88个位置已填入被发现的元素。由于有四个元素尚未发现，故43、61、85、87四个位置依然空缺。1937年，美国的劳伦斯(1901—1958)等用以高速粒子轰击第42号元素钼的方法，在回旋加速器中产生了第43号元素，经分离和测定，命名其为锝。1939年，德国的佩雷在铀的衰变产物中分离出第87号元素，命名为钫。1940年，意大利的西格雷等在回旋加速器中，通过对83号元素铋进行轰击，分离出第85号元素，命名为砹。1945年，美国的马林斯基等在铀的裂变产物中，用中子轰击钕，分离出第61号元素，命名为钷。至此元素周期表中的92个元素均已找到。科学家们在寻找未被发现的元素时，都在思考：究竟在92号元素铀以后还会有新的元素？不断发展的科学实验做出了肯定的回答。1940年，美国的麦克米伦在用慢中子轰击铀时，发现第一个超铀元素，即第93号元素镎。同年，美国的西博格用回旋加速器加速的氘原子轰击铀，得到不稳定的93号元素镎，镎进行衰变，得到和93号元素混在一起的94号元素即钚。1944年，美国的西博格用亚原子粒子轰击钚而得到第95号和96号超铀元素，并分别命名为镅和锔(为纪念居里夫妇而命名为锔)。此后又有几种超铀元素被陆续发现。世界各国的科学家们，在元素周期律和周期表的指导下，对未知元素的研究和探索始终没有停止，并不断取得新的成果。

元素周期律的发现和元素周期表的问世具有重大的科学价值自不必说，此外，它所具有的哲学意义也是伟大而深刻的：其一，它从本质上揭示了各种化学元素之间的区别和联系，实现了对无机化学从感性认识到理性认识的飞跃；其二，元素周期律把原来认为是彼此孤立、各不相同的各种元素看成是有内在联系的整体，表明元素性质发展变化的过程是一个由量变到质变的过程。

周期律揭示了自然界各种元素间相互依赖的统一性及本质联系，又表明了自然界的元素从简单到复杂，既有各自独立的基本性质，又有相互间的转化趋势，不断地实现着从量变到质变的转化过程。周期律的建立不仅丰富了化学理论的宝库，而且对科学研究和工业生产都有着重要意义和巨大的指导作用。

2. 同位素的发现和命名

在研究化学元素性质及其排列规律的过程中，化学家们发现了一种现

象，就是有几种元素，它们的化学性质十分相似，在自然界中它们总是在一起，在实验室中也极难使它们分离。于是在 1910 年英国的索第(1877—1956) 提出同位素假说。他认为：存在有不同原子量和放射性但其物理化学性质完全一样的化学元素变种。这些变种应该处在周期表的同一位置上，因而命名为“同位素”。索第还将 37 种放射性元素分成十类放入周期表中，并将那些化学性质十分相似的元素放入周期表中的同一格子内。在索第提出同位素概念之后，人们对“化学元素”这一概念产生了新的认识，即某种化学元素不再是只代表一种元素，而是代表着一类元素。尽管这些元素的放射性和寿命不同，但它们的化学性质是相同的。同位素概念的提出，进一步丰富了元素周期律，也进一步完善了元素周期表。

1912 年，英国的汤姆生(1856—1940) 利用磁场的作用，测量极隧射线(带正电的气体离子) 的荷值比，发现质量为 22 的氦的稳定同位素。这是第一次发现稳定的同位素。1931 年，美国的尤里(1893—1981) 成功地进行从液体氢蒸发而提取浓缩重氢的实验，经对剩余物质进行光谱分析，首次发现了原子量为 2 的氢的同位素即重氢(氘)。1934 年，澳大利亚的奥利芬特和奥地利的哈泰克用氘核轰击氘核本身，发现了氢的又一种同位素即原子量为 3 的超重氢(氚)。对同位素的本质认识是在 1932 年中子发现之后。英国人查德威克在人工核反应的研究试验过程中，发现了与质子质量相同的不带电的中子，从而确认：原子核是由中子和质子组成的。从此，人们认识到，同位素的原子核是由具有相同数目的质子和不同数目的中子组成的。质子和中子的质量之和等于原子量。质子数目决定原子序数和核外电子数，它是决定元素化学性质的主要因素。而原子核内中子数目的多少只影响原子量的大小，并不影响元素的化学性质。1919 年，英国的阿斯顿(1877—1945) 用聚焦性能较高的质谱仪，对多种元素的同位素进行测量，从而肯定同位素的普遍存在，并第一次实现同位素的部分分离。同年，瑞典籍匈牙利化学家赫维西(1885—1966) 利用放射性同位素作为示踪原子，这是同位素的第一种用途，从而为化学反应机理和化工生产流程的研究开辟了新途径。后来，同位素在生物化学、植物生理学、医学、农学和地质学等方面得到广泛应用。

3. 化学理论的发展

我们说，元素周期律的发现和周期表的形成是无机化学发展过程中的理论结晶。同位素的发现及其理论阐述，使人们对物质结构的认识进一步得到深化。随着无机化学和有机合成化学的发展，理论研究也不断取得新成就，并在实践中日益发挥着巨大的指导作用。

19 世纪末，物理化学在原子—分子论、气体分子运动学说、元素周期律和古典热力学的影响下诞生了。早在 18 世纪中叶，俄国科学家罗蒙诺索夫就提出了“物理化学”的概念。德国的奥斯特瓦尔德和荷兰的范特霍夫在 1887 年合作创办了德文版的《物理化学杂志》，发表了有关物理化学方面的文章，从此使物理化学这门新学科发展起来。在物理化学中发展较早的一个分支是热化学。它是研究化学变化中热效应的科学。热化学所提供的数据对工业生产和科学研究都有重要意义。在热化学理论上取得突破并做出突出贡献的是美国的吉布斯(1839—1903)。他发表了《热力学的研究》和《关于复相物质的平衡》等重要文章，并在 1876 年把热力学单位的概念引进化学，从此使

热力学广泛应用于化学，为判断化学反应的方向和化学平衡提供了根据。

1800年，自从意大利人伏打发明电池之后，应当说电化学便从此产生了。当然，伏打电池是把化学能变成电能。那么，电解会不会反过来作用于化学变化呢？同年，英国的尼科尔森(1753—1815)和卡里斯尔(1768—1840)做了这样一个实验。他们把两根金属丝浸在水里通电，发现水很快分解为氢和氧两种气体，从阴极上得到氢，从阳极上得到氧。这就是我们所知道的水的电解。后来，英国的戴维在电解苛性碱时，分解出了两种从未见过的金属——钾和钠，从此，作为研究电运动和化学运动相互转化的电化学，开始引起了人们的重视。1832年，法拉第确定了电解定律。他在电解实验中发现，电解产物数量与通过电量成正比，相同电量产生的不同电解产物有固定的“当量”关系。至于电解原理，格罗杜斯以水的电解为例作出了正确的阐释。他认为水在电解时，分子是交替地分解和再化合的。在分解、化合连续发生之中，全部的水就逐渐被分解完毕。酸、碱、盐的电解亦同此理。1887年，瑞典的阿累尼乌斯(1859—1927)发表了《关于溶质在水中的离解》的论文。他认为电解质在水溶液中会部分离解成完全自由的离子，溶液愈稀，离解部分(离解度)就愈大。这一溶液理论的重大发展，当时却遭到了很多人的反对，直到20世纪初，在大量实验结果的支持下，电离理论才普遍为人们所接受。此后，电化学在实验中得到进一步发展，电解、电镀等在工业生产中得到普遍的应用。

19世纪60年代，俄国的布特列罗夫(1828—1886)和德国的肖莱马(1834—1892)为有机化学的结构理论作出了贡献。布特列罗夫，在1861年德国自然科学家和医生代表大会上，作了题为《论物质的化学结构》的报告，创用“化学结构”这一名词术语，并详细阐述了这一概念。他认为：有机化合物的化学性质与其化学结构之间存在着一定的依赖关系。根据这个化学结构理论，布特列罗夫合成了叔丁醇、异丁烯、乌洛托品和某些糖类化合物，并发现了异丁烯的聚合反应。布特列罗夫虽然提出了结构理论，但对碳原子的四个价是否相同的问题尚未解决。1864年，肖莱马发表了《论二甲基和氢化乙基的同—性》的著名论文，指出所谓“二甲基”和“氢化乙基”实为同一物，即乙烷 C_2H_6 ，从而排除了一个假设的烷烃系列，并证实了碳原子的四个化合价是相同的，从而使布特列罗夫所遗留的问题得到较完满的解决。1865年，布朗根据肖莱马的研究结论，列出了乙烷结构式。凯库勒也是在1865年提出苯分子的环状结构学说，指导了煤焦油的进一步利用和染料、医药、香料、炸药等有机产品的进一步合成。1874年，荷兰的范特霍夫在凯库勒苯分子环状结构学说的基础上，进一步提出碳结合是碳原子向四方伸出四只手的立体结构。可以看出，有机化学结构理论的提出有着极为重要的意义，它对深入科学研究和进行工业化生产都发挥了巨大的指导作用。

4. 化学工业的勃兴

(1) 早期的无机化学工业

化学工业，最初是在纺织工业的漂白粉技术和天然染料化学处理方法的基础上形成和发展起来的。当然，这时的化学工业仅仅是无机化学工业。当时纺织工业最发达的英国，需用大量的酸、碱，以对棉、麻织品进行漂白处理。因此，作为化学工业最基本材料的酸、碱便最先发展起来。

硫酸投入工业化生产最早采用的是 1746 年罗巴克(1718—1794) 发明的铅室法。后来在 19 世纪初法国化学家盖·吕萨克(1778—1850) 和英国人格拉瓦(1817—1902) 的技术发明使铅室硫酸法的生产工序实现了连续化。1870 年以后, 有机化学工业迅速发展起来, 茜素的合成实现工业化生产后, 需用大量硫酸, 这时, 落后的制酸方法使产量和质量都不能满足工业生产的需求。在此情况下, 接触法生产硫酸的技术获得成功, 遂使问题得到解决。接触法制造硫酸是法国莱胺制碱公司的技师克尼奇(1854—1903) 研究成功的。1867 年克尼奇开始研究接触法制造硫酸的技术, 他把二氧化硫与氧的混合气体通过白金石棉使之产生无水硫酸。由于整个过程在摄氏 400 以下进行, 于是很适宜工业生产。1898 年克尼奇的接触法制酸技术获得了专利。

化学工业的另一基本原料是碱。最初在工业生产中应用的制碱法是法国医生卢布兰发明的, 并在 1791 年获得了专利。卢布兰法真正实现工业化生产是在 1823 年由英国玛斯布拉特(1793—1886) 完成的, 此后迅速在欧洲各国获得推广。随着钢铁工业的发展, 炼焦过程中的副产品氨, 能否用来作为制碱的原料, 英国首先进行了这方面的探讨并付出了极大努力, 但是回收氨没有取得成功。与此同时, 比利时人索尔维也在进行这项研究, 并在 1865 年获得成功。索尔维的氨碱法与卢布兰法相比在工艺上作了较大改进, 氨可以循环使用, 二氧化碳能够回收一半, 化学反应又不要求高温, 燃料消耗也较少, 产品质量也很好。在此情况下, 技术人员蒙德和企业家布朗纳与索尔维协作, 于 1874 年在英国合建了最初的索尔维法制碱工厂。这个布朗纳—蒙德公司不久就成为 20 世纪世界最大的化工联合企业。在英国的港口城市利物浦, 制碱工业发展很快, 1815 年后年产量已达 50 万吨。1880 年以后, 卢布兰联合公司被采用索尔维法的布朗纳—蒙德公司吸收合并。后来德国的古瑞斯哈姆电气公司试验成功了电解食盐水制碱法。1870—1880 年, 氯气、苛性碱同时生产是以电机工业的发展为基础展开的。索尔维在这一时期组织了跨国公司, 本部设在比利时的布鲁塞尔, 在技术上对其他企业绝对保密, 以求垄断世界制碱市场。

作为无机化学工业重要组成部分的化肥工业, 始自德国的李比希。是李比希首创了化肥理论, 在他的影响下化肥工厂建立起来, 并得到很快发展。因此李比希堪称化肥工业的奠基人。在李比希化肥理论指导下, 最早建立磷肥厂的是英国(1843 年), 1855 年德国也建立了磷肥厂。

此外, 硅酸盐和水泥工业也是无机化学工业的重要组成部分。英国人威廉特在陶瓷技术上作出了贡献, 他不仅是科学家, 而且还是实业家和艺术家。他还发明了高温温度计。1780 年, 他与瓦特一起成为皇家学会的成员。水泥工业也是首先在英国发展起来的。技师斯密顿, 1756 年曾用水泥建筑灯塔。阿斯普丹发明了波特兰水泥, 并于 1824 年建成世界上第一座水泥厂。

(2) 有机化学研究的重大突破

谈到有机化学, 就必然要作一点历史的回顾。尤其不能忘记开拓者和创始人的贡献。1828 年, 德国化学家维勒(1800—1882) 用氰酸氨制成尿素, 并发表了《论尿素的人工合成》的论文。这一打破无机化学和有机化学界限的惊世创举, 叩开了有机化学的大门。维勒的这一成就, 证明了化学定律对有机物和无机物是同样适用的, 有机和无机具有统一性, 它们在一定条件下可以相互转化。维勒还和李比希合作研究, 发表了《关于安息酸基的研究》等论文。他们提出的基团理论为有机化学的发展铺平了道路。从此, 有机化

学迅速进入“合成化学的新时代”。

可以说，从维勒和李比希杰出的研究工作开始，德国逐渐成为世界化学科学的中心。

李比希青年时代曾留学法国，师从法国著名化学家盖·吕萨克。学成回国后，正值德国农业遭到自然灾害。李比希遂投身于农业化肥的研究，并成功地研制出钾肥和磷肥。1840年，李比希发表了《有机化学在农业及生理学上的应用》的著作，阐述了人造化肥对发展农业的重要性，因而促进了化肥工业的兴起和发展。李比希不但热衷于科学研究，而且注重人才培养。他是个出色的科学家，亦是个卓有成就的教育家。在先后30年的时间内，他为德国培养出一大批优秀的化学家，其中包括凯库勒和霍夫曼。李比希对化学的贡献使他获得“德国化学之父”的称誉，也使化学科学一度进入李比希时代。

凯库勒原学建筑专业，自听了李比希的报告后，对化学产生了浓厚兴趣，于是决心改换专业，拜李比希为师，从事化学研究。凯库勒最早提出原子价概念并最早建立有机化合物的结构式，这正是他对化学的重大贡献。凯库勒在1857年提出用“原子数”或“原子亲合力单位”来表示各种元素的化合力。他还指出，不同元素的原子在化合时总是倾向于遵循亲合力单位数量等价的原则。这是原子价概念的最初描述。后来，德国的迈尔于1864年在凯库勒研究的基础上，进一步提出了“原子价”这一名词术语，并建议用之代替“原子数”和“原子亲合力单位”，从此建立起原子价学说，各种元素在相互化合时所遵循的变化规律即被人们所认识。凯库勒还进一步根据原子价确定化学结构式。他确定碳原子为四价，并提出了碳链结构说，意指碳原子之间可以自行相连形成碳链，这一学说为有机结构理论的建立奠定了基础。或许是受建筑学形象思维的启发，凯库勒把建筑学中的“结构”概念引入了化学研究，于是1865年他推测苯分子为环形结构，并列出了苯的结构式：

凯库勒这一创造性的想象把人们对苯的认识提高到一个新水平，从而将苯的研究推进到一个高的阶段。

1866年，法国化学家拜特洛由乙炔合成苯： $3\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6$ 。维勒的一大贡献是实现了人工合成尿素，首开了有机化学的先河。但从化学反应的角度观之，尿素仅是氰酸氨分子内原子排列的改变。因此，严格来讲拜特洛的由乙炔合成苯的反应，才能称之为真正的有机合成。“合成化学”一说系由此而来。

霍夫曼本是法律专业的学生，因受李比希影响而转攻有机化学。后李比希应邀赴英讲学，霍夫曼随师前往，并在英国出任教授。因当时钢铁工业发展很快，急需大量焦炭，因而促进了炼焦工业的发展。在用煤炼焦时，分离出大量废弃物煤焦油。究竟煤焦油有没有用场，能不能做化工原料？这个问题引起人们的重视。尤其是霍夫曼对此极为关注。在客居英国的20年中，他一直致力于苯胺的研究。1850年，霍夫曼和德国化学家翁沃多本（1806—1873）从煤焦油中提取出苯胺（安尼林油），霍夫曼还证明在煤焦油里含有重要的化工原料——苯。从此煤焦油成为制造染料、医药和各种化工原料的宝库。也就在这一时期产生了以煤为主要原料的煤焦油系衍生物工业。霍夫曼在一个偶然的场合里结识了年仅18岁的大学生帕金。帕金当时虽是英国皇家理科学院化学专业的学生，但霍夫曼毅然启用帕金为助教，使帕金很快脱颖而出成为英国化学界的一颗明星和合成化学工业的先驱。霍夫曼正所谓慧

眼独具识帕金。 1856 年，霍夫曼提出，可用氧化苯胺衍生物制造疟疾特效药奎宁，并将这一研究任务交给了帕金。缺乏经验的帕金，根据老师霍夫曼的安排，在实践中谨慎地摸索。他把从煤焦油中提取的苯胺加入重铬酸钾后，与硫酸化合得到一种黑色物质，再加入酒精则变成一种紫红色的物质，试验后方知这是一种很好的染料——苯胺紫——第一种人造染料。这一歪打正着的发现，使帕金兴奋异常，并迅即申请了专利。当年帕金退学兴办实业，第二年创立了合成染料公司。帕金不但发展了人工合成颜料技术，并使之实现了工业化生产。帕金在 23 岁时已成为英国的著名企业家和染料权威。帕金的成功，使合成染料的研究出现了高潮。帕金后于 1868 年，由水杨醛合成香豆素，此为人工合成天然香料之始，从此开辟了合成香料工业的新领域。1858 年，霍夫曼研制成功红色染料——“碱性品红”。1860 年，他又研制成功蓝色染料——苯胺蓝，继之又使苯胺黄、“霍夫曼紫”等陆续问世。1863 年，德国的格里斯（1829—1888）制成具有偶氮基因的化合物，从中导出了一个新系的偶氮染料。1865 年后，化学家们受凯库勒研究方法的启发，开始从结构化学的角度去研究人造染料。这时对合成染料的研究开始集中在茜素和靛蓝这两大天然染料的人工合成上。茜素和靛蓝都是化学先进的德国研制成功的。更具体地说都是由柏林大学拜耳研究室完成的。曾在染料公司工作过的两位年轻人利伯曼和格雷贝，先后来到拜耳研究室工作，1866 年，他们运用分子结构概念，分析天然染料茜素，发现茜草中的茜素与煤焦油中的蒽的衍生物相同。这一发现表明茜素完全可以人工合成。他们把实践经验和良好的科研条件有机地结合起来，很快在 1869 年采用强碱共溶方法，从煤焦油中获得与天然茜素完全相同的产物，实现了茜素的人工合成。这也是第一次人工合成天然染料。之后，他们与巴登苯胺烧碱公司的总技师卡罗合作，于 1872 年使茜素成功地投入工业化生产，从此人工合成的茜素完全取代了天然茜素。1865 年，拜耳开始研究靛蓝的化学结构，1878 年拜耳研究成功由靛红还原得到靛蓝，后又实现了靛蓝的人工合成。1897 年巴登苯胺烧碱公司的郝依曼使靛蓝成功地实现了工业化生产。从而结束了由植物中提取靛蓝的历史。

霍夫曼 1863 年返回德国，在柏林大学建立了较大规模的有机化学实验室，并引进了英国人造染料的专利，后为德国染料、香料等有机合成制品迅速转入工业化生产发挥了作用。

在 19 世纪末叶，以煤焦油为原料的有机合成工业达到了相当的规模。德国人从煤焦油中提取出大量的芳香族化合物，以此为原料合成了染料、药品、香料、炸药等多种有机产品。1870—1900 年，靠煤化学起家的德国，其有机化学工业从品种、数量到质量，在世界上都占据了领先地位。1888 年，人们用焦炭做原料制成了电石。电石水解又可获得乙炔，乙炔又能用来合成苯及其他有机产品。19 世纪末到 20 世纪初，美国的“标准石油公司”取得了分解石油的方法，为汽车工业的发展创造了条件。在药物化学方面，有机化学药物的人工合成业已开始，并取得一定成效。1883 年合成了安替比林，1887 年合成非那西汀，1899 年合成阿斯匹林（水杨酸）。从此产生了一个化学药物学派。其主要创始人，德国生物化学家艾立希（1854—1915），1912 年合成了能杀灭梅毒螺旋菌的“六〇六”——盐酸二氨基联砷酚。

此外，用化学方法还人工合成了一些新材料。德国化学家帕克在 1865 年，美国海亚德在 1869 年分别人工合成第一种热塑性塑料赛璐璐。随后德、美、法等国相继建立了赛璐璐工厂。1872 年德国化学家拜耳提出，苯酚与甲

醛在酸存在下，能形成树脂状物质。1891年，克莱贝格用浓盐酸处理这种树脂状物质，得到既难溶又不熔的多孔性物质，但无法结晶提纯，以后又有许多人进行了这方面的研究工作，想制得不溶性虫胶代用品。1889年法国工程师查唐纳特（1839—1924）和德国化学家约斯特、卡多雷特首次制成硝酸纤维人造丝并投入生产。1893年德国化学家克劳斯（1865—1935）、贝范、毕德尔等人又发明了制造粘胶丝的化学方法，并且开始了工业化生产。

柏采留斯在1835年提出了催化和催化剂的概念并证明催化现象在化学反应过程中普遍存在。到1875年德国化学家温克勒（1838—1904）用铂石棉作催化剂制造硫酸，开始了硫酸接触法的工业化生产。更重要的是1897年—1900年间，法国化学家萨巴梯尔（1854—1941）又用还原镍粉催化乙炔及苯的加氢反应。这种催化方法在把劣质汽油改变为高率烷值汽油以及把低熔点脂肪改变为高熔点脂肪中应用成功，开辟了有机氢化催化工业的发展途径。19世纪中叶对天然高分子进行化学改性，而后发展到高分子合成。在这一历史时期，以煤、焦炭、石油为原料的有机化学工业得到迅速发展，人工合成技术取得了巨大进步。

六、炼钢技术的成熟和钢铁工业的发展

法国巴黎的埃菲尔铁塔，巍峨屹立耸入云霄，堪为当今世界的一大景观。这座高达 300 米的庞然大物，完全是用钢铁构筑而成。它建造于 1889 年，恰好成为 19 世纪末兴起的钢铁技术的象征。

1. 从铁到钢的变化

炼铁，在公元前就已有之。到了 14 世纪，欧洲已发展到高炉炼铁时代。18 世纪初，焦炭炼铁取得成功，木炭逐渐被焦炭所代替。18 世纪后期，炼铁中开始使用蒸汽动力鼓风，实现了高温操作，同时，高炉脱硫亦获得成功，炼铁技术遂进入了焦炭时代。

随着欧美产业革命的成功，工场手工业逐渐为机械大工业所代替。由于机器的大量制造和使用，铁便成为最基本的工业材料，需求量迅速增加。加之铁路铺设、轮船建造、武器制备和建筑材料的生产等，都需要用大量的铁，因此，铁的产量虽几经翻番，但仍不能满足社会的需求。

一方面铁的需要量日益增加，另一方面铁的弱点也越来越引起人们的重视。生铁太脆，熟铁太软，由于它们都缺少工业材料所要求的韧性，因此必然使铁的应用受到限制。在这种情况下，用铁炼钢，炼出大量的优质钢自然成了人们共同关注的问题和追求的目标。

在 19 世纪以前，已经有了使熟铁渗碳的“泡钢法”、用坩埚炼钢的“铸钢法”和用反射炉搅动铁水炼钢的“搅钢法”。这几种炼钢技术和高炉炼铁技术一起，形成当时较为完整的钢铁技术体系。

英国的本杰明·亨兹曼发明了铸钢法，实现了由铁到钢的重大技术转折。1740 年，本是钟表匠的亨兹曼开始了炼钢法的研究，其目的是要得到制造钟表的优质材料。他在“泡钢”的基础上发明了“铸钢”。他把“泡钢”放在坩埚内，再在坩埚内的金属里加入少量木炭和熔剂，用焦炭做燃料，在熔炉中进行高温熔化，除去杂质，然后将坩埚内的钢水倒在模子里铸成钢棒，“铸钢”因此而得名。使用时，将铸钢切成钢条，因其具有较高的机械性能和较好的韧性，故可做发条和刀具。1783，亨利·考特发明了搅钢法，是用烧煤的反射炉熔铁，用火中的氧脱碳，为了加快反应速度要不停地进行搅拌，故为“搅钢法”。用这种方法炼出的铁易熔化和锻打，因此相对于含碳量高的生铁来说，它被称之为“熟铁”。“泡钢法”的应用比“铸钢法”和“搅钢法”稍早一些，生产工艺和技术也比较简单。它是把熟铁条放在木炭上，加热 10 天左右，使之吸收一定量的碳质即成泡钢。这些方法效率都很低，产量也极其有限，因此无法满足社会生产对钢材的需求。要解决这一难题，必须研究先进高效的炼钢方法。

2. 炼钢方法的变革

在探索大规模炼钢技术的过程中，可谓经历了三个阶段。一是贝塞麦炼钢法首创转炉炼钢新技术；二是德国的西门子和法国的马丁发明了平炉炼钢法，炼出了优质钢；三是托马斯炼钢法脱磷成功，在欧洲各国得到迅速推广。由于平炉、转炉炼钢新技术的广泛采用，从而推动了钢铁工业的大发展。在

研究新的炼钢方法方面应当说最早的成功者是英国人威廉·凯利（1811—1888）。他在肯特郡开设了铁工厂。1847年的一天，他偶然发现一种现象，当精炼生铁时，如果少放一些木炭燃料而多向炉内鼓进空气，反而能使炉温升高。他把这种方法称作“空气沸腾法”。采用这种方法，不但可以节省燃料，还可把铁炼成钢。1851年，凯利根据这个方法建造了炼钢炉，但他严格保密达7年之久，直到1857年贝塞麦发明了“转炉炼钢法”，凯利才公布了自己的发明。

（1）贝塞麦与转炉炼钢法

转炉炼钢法的问世，给钢铁工业注入了新的活力，在欧美各国争相引进之后，贝塞麦发明的转炉炼钢法，迅速在全世界得到推广。说来也怪，本不是钢铁工业专家的贝塞麦，却为钢铁冶炼技术作出了重大贡献；在英国长大的贝塞麦，其技术发明却是在外国人支持下进行的。

1856年8月，贝塞麦（1813—1898）向英国科学促进协会提交了一篇题为《关于不使用燃料生产可锻铁和钢》的论文，并在有关的会议上做了贝塞麦新炼钢法的报告，受到与会者的欢迎和重视。精于学习、勤于钻研的贝塞麦是一位颇有名气的发明家。他在20岁时发明了印制邮票的新方法，后来还发明过制糖压榨机、金色涂料等。在军工技术方面他还有过不少新发明。导致他投入新炼钢法研究的契机，是军备和战争的需要，直接原因是在英、法、土耳其对俄国的克里米亚战争（1853—1856）期间，贝塞麦研制出一种新型炮弹，并发明了大炮炮筒的来复线结构。显然用生铁铸造的旧炮已不适用，为了得到合格的钢铁做炮筒，贝塞麦便开始探索新的炼钢方法。经过多次失败，贝塞麦发现：强化鼓风非但不会降低炉温，反而还会提高炉温，而且可以减少铁水中的杂质和降低含碳量。于是他发明了“吹气精炼法”，并于1855年10月取得专利。贝塞麦分析指出，充分供应空气可以使铁水中的碳、硅、磷、锰等杂质氧化，在它们氧化的过程中会放出热量，连续不断地进行高温反应，因而不需再加入燃料。贝塞麦在报告中讲到：“转炉熔铁只要从炉底吹20—30分钟空气（氧使铁中杂质氧化后除去，则减少了碳的氧化），虽然引起猛烈爆炸，但钢不变，杂质成为渣子浮在表面，或成为气体逸出，而后则可出钢，熔钢流出来，发出耀眼的强光。”同年，贝塞麦改装了一座炼钢炉，以进行新的炼钢法实验，即从炉底吹入空气，“除了铁水和空气什么也不需要”。对于这种实验，许多人都表现出疑惑和不解，甚至连参加实验的工匠们都警告他说，不加焦炭光吹空气是会使铁水在炉中凝固的。而实验结果完全出乎人们的预料：从炉底鼓进的空气，首先将铁水中的锰和硅氧化，形成褐色烟雾沸腾逸出，同时生铁中的碳也被氧化成二氧化碳。这时炉温没有下降，反而从倒入铁水时的1350上升到1600，炉料“燃烧”呈现白亮的光焰。大约10多分钟以后火焰消失，放出浓重的褐色三氧化二磷烟雾，表明铁水中的磷也被除去了。这样，用了不到半小时的时间就炼出一炉钢水，实验取得了完全成功。为使炼好的钢水易于倒出，贝塞麦将炼钢炉从固定式结构改为转动式结构，转炉由此诞生。1857年他取得了这一发明的专利权。

当时英国炼钢要从瑞典进口大量的棒状铁，冶炼方式仍然摆脱不了过去的“泡钢法”和“铸钢法”，而且要消耗大量的焦炭，因此和贝塞麦炼钢法相比，可以明显看出贝塞麦炼钢法的巨大优越性。一是它大大降低了生产成本；二是改进了生产工艺；三是形成了大规模生产；四是提高了钢的质量。

正因如此，所以它引起了欧洲工业界的轰动，随后便被引入法国。德国的阿尔福莱德·克虏伯（1812—1887）专门为该项技术建设了一座转炉炼钢厂并于1862年投入生产。尤其是美国大规模引进这一技术，并且在很多地方建立了以贝塞麦名字命名的钢铁厂。

贝塞麦炼钢法一度产生了轰动效应，但不久便遇到了麻烦。许多引进贝塞麦炼钢法专利的钢铁公司，接二连三地遭到失败。原因是他们用贝塞麦炼钢法生产出的钢制品质地很脆，于是贝塞麦招致了很多人的批评甚至是责骂。一时间搞得贝塞麦十分孤立和难堪。从1857年起，贝塞麦对自己炼钢法暴露出来的问题进行了认真的研究。结果发现，使钢质变脆的原因是磷、硫杂质脱除不好，其中磷又是主要因素；而问题的症结出在原料上。凡是发生问题的转炉，使用的生铁都是由含磷、硫量较高的矿石冶炼的。贝塞麦使用过的原料恰巧都是含磷、硫量较低的矿石，因此对这一问题他未曾发现。正当贝塞麦处于困难境地之时，瑞典企业家盖朗松大胆引进了贝塞麦炼钢法，并于1858年试生产取得成功。贝塞麦由此获得了启示和信心。他坚信自己的理论和方法完全正确，并于1860年自行建厂，用转炉炼钢法炼出了优质钢，成功地实现了工业化生产。1862年，贝塞麦在国际博览会上展出了用他的转炉钢制造的大量产品——从小小的刮脸刀片到威严的大炮。

1860年，贝塞麦炼钢法在英国取得成功之后，法国在同年引进该项技术并进行推广；1862年德国的炼钢业也采用了贝塞麦炼钢法；1864年美国也开始大规模引进转炉炼钢技术，于是贝塞麦炼钢法在经历了一段坎坷后重获生机，炼钢业也从此进入了一个新时代。

(2) 平炉炼钢法

在贝塞麦发明转炉炼钢法的同时，就有人开始了平炉炼钢法的探索。为此做出贡献并取得成功的是西门子兄弟和马丁父子。

1856年，刚刚加入英国籍的德国人弗里德利希·西门子（1826—1904）和哥哥威廉·西门子（1823—1883）曾设想用废气把蓄热室的耐火材料加热，再把热传给空气和燃料，他们将这一办法用于制造玻璃，提高了炉温，并因此发明了用废气预热的蓄热法专利。后来，他们试验把这种办法用在反射炉上，但试验并不成功。这使弗里德利希转面用这种办法去制造玻璃，威廉则继续进行研究。1861年，威廉改用发生炉煤气作燃料以代替燃用焦炭，并对炉体结构进行了改进，取得技术突破。1864年，法国人马丁（1824—1915）对反射炉炉体又进行了改造，在威廉·西门子的帮助下，把提高玻璃熔化温度的蓄热式气体炉技术应用到反射炉上，以提高炉内温度。起初采用酸性炉衬，后又改用碱性炉衬，使用生铁、废钢终于炼出了优质钢，发明了“平炉炼钢法”。1866年，威廉·西门子在伯明翰也建成了平炉，用生铁和铁矿石炼钢成功，并投入工业生产。后来，西门子兄弟与马丁父子之间为平炉炼钢的首创权问题发生了争执，但不久便达成统一。因此人们把平炉炼钢法又称之为“西门子—马丁炼钢法”。1867年，这一新的炼钢技术在法国巴黎万国博览会上获奖。

平炉，因其形状低平和有一个比较平展的熔池故而得名。将经由下层蓄热室预热的空气和煤气送入上层，在熔池的铁水表面吹拂、燃烧，可较彻底地将铁水中的碳和其他杂质氧化。虽然平炉冶炼过程比转炉要长，但平炉的容量大，一炉就可炼出上百吨甚至上千吨钢。1868年，美国引进了这项技术。1870年，俄国也引进了这项技术。1900年，平炉炼钢法已在世界各国得到普

遍推广。直到二次世界大战，平炉炼钢法一直成为钢铁企业普遍采用的冶炼方式，超过了贝塞麦炼钢法而占据主导地位。其重要原因是不仅它产量高，而且所用原料广泛（生铁、铁水、废钢、铁屑、熟铁、铁矿石均可用于炼钢），质量稳定，特别是又可使用劣质煤炼出优质钢，后来，由于制氧技术的发展，出现了纯氧顶吹转炉炼钢法，于是占据了近百年主导地位的平炉法，又开始让位于转炉炼钢法。平炉炼钢法和转炉炼钢法应该说各有长短，所以至今平炉和转炉仍是炼钢业的两大主要技术体系。

(3) 托马斯炼钢法

贝塞麦炼钢法适用于冶炼含磷少的铁，而对含磷较高的铁则不适用。他虽然找到了自己的症结，并显示了贝塞麦炼钢法成功和优越，但问题并没有因此而得到解决。因为当时英国钢铁企业所用的原料含磷、硫量都很高，欧洲 90% 的铁矿石都是含磷的，只有瑞典和意大利例外。1860 年以后，社会对钢铁的需求量继续大幅度增长。以铁路为例，全世界铺路总长度（按公里计算）1870 年是 1860 年的 2 倍，1880 年为 1870 年的 3 倍。因此要大幅度提高钢铁产量，必须尽快解决高磷铁矿石的冶炼问题，这已成为迫在眉睫的紧急任务。自然人们会想到这样一个问题：为什么贝塞麦炼钢法不能用含磷较高的矿石呢？这是因为贝塞麦炼钢法是酸性底吹转炉法，转炉内部的耐火材料是硅酸盐物质构成的，这种酸性冶炼法不能解决脱磷问题，在用坩埚冶炼“铸钢”的过程中铁水中的磷在 1300 左右的温度下可以自行变为气体逸出，所以不存在对矿石含磷量的苛求。然而在转炉冶炼过程中，铁水温度高达 1600，在这种高温条件下，变为气体逸出的磷，又会重新被铁水所吸收。所以要解决脱磷问题，必须另寻他途。而使这一问题得到解决的是英国人托马斯（1850—1885）。

托马斯幼年丧父，家里很穷。他在 17 岁时放弃了进大学的想法，到一个小法院当职员。但他上进心很强，每天坚持到夜校学习，主要学习化学知识。后来，他成了一名技师。1870 年的一天，托马斯在夜校上化学课时知道了使贝塞麦转炉脱磷的重要性，于是他下决心要解决这个问题。从此以后，他把业余时间都用来钻研化学、冶金学教科书，并在家里布置了一个极为简陋的实验室以进行研究工作。他首先研究了为什么搅钢法可以脱磷的问题，通过试验他发现，在 1300 的温度下，磷不留在铁水里，而是成为五氧化二磷进入钢渣之中。当在 1600 的高温时，五氧化二磷又被还原为磷，磷又回到钢中。要想使磷进入矿渣，必须寻找一种经济适用的材料。后来，他发现石灰石是一种较为理想的材料。但如要向转炉内添加石灰石，必须要把原来的酸性炉衬改为碱性炉衬，否则石灰石就会与酸性硅酸质炉衬发生化学反应而使之受到腐蚀。终于，托马斯找到了一种可做碱性炉衬的材料——白云石。他把含石灰和镁的白云石用高温烧制成熟料，然后再与焦油混合做成碱性耐火砖，砌在炉内。于是使原来的炉衬由酸性硅酸质改变为碱性石灰质。在这种改造过的转炉内倒入高磷铁水，在冶炼过程中吹入空气，同时添加石灰石，使炉渣变为高碱性炉渣，这时被氧化的磷与石灰结合在一起，留在炉渣内不再返回钢中，因而实现脱磷。这正是托马斯炼钢法原理。1877 年，托马斯在一个星期天到南威尔士炼钢厂与在该厂当化学技师的兄弟合作进行实验，结果脱磷喜获成功。

1878 年 3 月，托马斯向英国钢铁协会报告了他的研究工作，但是并未引起重视。后来，英国一个叫温萨·里恰兹的钢厂厂长知道了这件事，于是引

起了他对托马斯研究成果的关注。1879年4月，在他的支持下，托马斯进行了一次公开试验并获得极大成功。从此，托马斯炼钢法得到了社会公认。

冶金技术，在冶炼阶段本质上是属于化工技术。钢铁的冶炼过程也是化学反应的过程。托马斯正是从化学研究入手，探讨炼钢过程中的脱磷问题，才找到了通向成功之路的金钥匙。托马斯炼钢法，将钢水中的磷氧化后与石灰结合留在了炉渣内，故使炉渣含磷较高，经粉碎处理后还可作为很好的农业肥料。

托马斯炼钢法，化解了贝塞麦转炉存在的难题，无疑对转炉的推广应用起到了促进作用。同时，托马斯的发明对平炉亦可使用。平炉用碱性法炼钢，使用含磷较高的铁也能达到较好的脱磷效果。由于托马斯炼钢法的成功，而使高磷矿、褐铁矿成为炼铁的重要资源。于是托马斯炼钢法，在德国、法国、比利时、瑞典等盛产高磷矿石的欧洲各国迅速得到推广。

3. 钢铁时代的到来

在18世纪与19世纪之交的近百年时间内，钢铁技术实现了巨大变革。特别是19世纪中叶的十几年，贝塞麦炼钢法、托马斯炼钢法、西门子—马丁炼钢法，三大炼钢技术的发明，使转炉炼钢和平炉炼钢迅速发展起来，并与原有的高炉炼铁技术一起构成现代钢铁技术体系。1900年，法国人海罗尔特采用电弧炉炼钢成功，增添了用电炼钢的新技术。19世纪后30年，钢铁工业以惊人的速度发展。炼铁、炼钢、铸锭、轧制等一系列生产工艺也逐渐成龙配套。1870年—1900年，全世界钢产量从51万吨跃至2850万吨，30年增加了50倍以上；铁的产量从1400万吨提高到4100万吨，增加了2倍。在这一时期钢铁工业发展最快的是美国。美国抓紧时机，大规模引进欧洲的炼钢技术，到1889年，美国的钢产量超过欧洲各国，在世界排名榜上占据了头把交椅。1870年以前，英国的钢铁产量最高，占世界总产量的一半以上，有“世界的铁工厂”之称。1880年后，增长缓慢，占世界总产量的比例相对下降。尽管当时在英国有不少技术发明，但因企业界的保守而不能迅速投入使用，也就不能很快发挥应有的效益。1870年，美国进入垄断资本主义阶段，从1880年起，其钢铁产量占世界总产量的比例不断上升，到1890年，美国的钢铁产量已居世界第一位。1890—1900年，美国垄断资本逐渐形成，1901年，摩尔根财团建立了钢铁托拉斯，垄断了美国的钢铁生产。1919年，美国的钢产量已占世界总产量的59.2%。1870年，德国完成了产业革命，钢铁产量已超过法国。1873年后，在德国出现了钢铁企业联合组织——卡特尔，使德国的钢铁产量得到大幅度提高。

世界和主要产钢国历年钢产量一览表

(单位：万吨)

年度世界 英国 德国 法国 美国 俄国 日本

1875 190 72 37 26 401.3 0.1

1880 440 132 62 39 1273 10.2

1890 1240 364 216 90 435 380.2

1900 2850 498 665 159 1035 2210.1

参见《中国大百科全书》矿冶卷第569页，1984.9版。

191060506481370341265134425

随着炼钢技术的发展，逐步分化出炼制特种钢的技术。1856年，英国的马歇炼出了可用于制造刀具的高碳钨锰钢。1882年，哈德菲尔德（1859—1940）发明了具有良好耐磨性能的锰钢。1885年，德国的迈尼斯迈发明了无缝钢管。1898年和1906年美国泰勒（1856—1915）和怀特分别研制成功可用于制造高速金属切削刀具的以钨和铬为主要合金成分的现代高速钢。1900年前后又发明了可制造发电机、电动机和变压器的硅钢片。1913年美国布利尔利偶然发现镍铬合金钢不生锈，由此发明了不锈钢。

19世纪末，钢铁成为工业各方面最基本的生产材料。钢铁作为建筑材料，在18世纪就已开始，到19世纪有不少桥梁是用钢铁建造的。其中最具有代表性的铁桥有3座。一是美国人埃底设计的桑特·路易斯大桥。其中央跨度为158米，两端各为153米，是一座公路、铁路两用铁桥。二是宝尔克菱大桥，是美国的诺布菱设计的，是一座连结纽约的曼哈顿和布尔库林两区的钢丝斜拉吊桥。其独特的设计和施工技术被称之为“空中线法”。这种方法的跨度可达到500米以上。这座桥的建成用了13年时间，成为19世纪最大的工程之一。诺布菱父子为此作出了不寻常的贡献。第三座铁桥是英国东部的佛斯桥，全长2.5公里，桥长1000米，跨度超过500米，桥的中央有3座钢塔座落在岩礁上，每个塔高105米，每个桥基受力10万吨。此桥1890年3月4日建成，共用了7年时间，其规模之宏伟超过了美国的宝尔克菱大桥，位居当时世界之首。

钢铁用之于建筑，突破了传统的建筑材料，几千年的土、木、砖、石受到了挑战。1851年，在伦敦举行的第一届国际博览会，英国专门建筑了水晶宫。这座面积7.2万平方米的三层建筑，把玻璃和钢铁用作主要材料，仅铁柱就用了3300根，铁梁用了2300根，总计用铁7300吨。由于钢铁部件采用工厂预制，所以整个建筑工期用了不到半年。当巴黎举办1889年的国际博览会时，法国人以埃菲尔铁塔的建成，作为向博览会的献礼，迎接来自世界各地的宾客，显示了他们高超的建筑技术。

当最早的水泥——波特兰水泥问世之后，钢铁与水泥的结合，使建筑技术又发展到一个新阶段——钢筋混凝土结构阶段。法国园艺家莫尼埃（1828—1906）为增加混凝土的强度，以防止其破裂，采用了在混凝土中放置钢筋的作法。起初他用此法制做花盆，效果很好，后来又建造了贮水池和桥梁，于是他取得了这项发明的专利权。1884年，法国人对它详加研究，后广泛应用于建筑。其后，瑞士于1890年建造了跨度为40米的钢筋混凝土拱桥。法国巴黎在1894年，建造了一座钢筋混凝土结构的教堂。美国的辛辛那提在1903年建成了一座16层的混凝土建筑，以后美国又建成了228米高的摩天大楼。

钢铁不仅是工业的生产材料，而且成为重要的军用物资。历史上早就出现了用钢铁打制刀、枪、剑、戟，以作武器的情况，这里我们不去说它。我们只说火药发明之后，到了近现代在钢铁大发展的情况下，在现代战争中钢铁所占有的地位和重要作用。

火药的发明，枪、炮的出现，改变了以往近身搏杀战争的方式。美国的马克沁本是电气工程师，由于战争的需求他转而去研制速射武器。1887年他发明了速射机枪。当马克沁带着机枪到俄国表演试验时，俄国人不相信这种只有一根身管的怪异武器能达到600发/分的射速。当马克沁一扣扳机，未用

半分钟打光了 333 发子弹时，俄国人惊讶得目瞪口呆。马克沁发明的机枪在实战中获得了“陆战之王”的桂冠，成为现代战争中的常备武器。大炮也是近现代战争中出现的主要武器，从过去的铸铁炮到 1907 年法国发明的 155 毫米的加农炮，经过不断地改进，使现代战争由枪战过渡到了炮战。19 世纪末，由于内燃机的发明，出现了将矛与盾集于一身，攻与防二者皆能的新式作战武器——坦克。英国在 1915 年试制成功世界上第一辆坦克“小游民”，并很快生产出第一批坦克。当初的坦克是以内燃机为动力，采用了履带式拖拉机的底盘，钢铁装甲厚度为 5—10 毫米，并装配有两门 57 毫米口径的火炮和 4 挺轻机枪。在第一次世界大战中，坦克初上战场便大显威风。它造成了德军的恐惧，并使英军获得松姆河战役的胜利。在 1917 年，英法联军集中了 474 辆和 604 辆坦克，分别在“康布雷”和“亚眠”战役中对德军发起攻击，并取得重大胜利。可以说坦克是导致第一次世界大战结束的第一个因素。从此这种钢铁战车成为陆地战争的主要打击力量。19 世纪 60 年代，随着蒸汽机的推广使用，蒸汽军舰开始取代木帆战舰。这一变化，对钢铁工业是个极大的促进。火炮用于装备军舰后，相应要求提高战舰的装甲水平和使用大马力的蒸汽机。1860 年，英国第一艘蒸汽装甲舰下水。到 1864 年，英国已作好战斗准备的 22 艘军舰中，有一半是装甲舰。其他国家在海上优势的竞争中也不甘落后，相继使军舰披上了铁甲。在舰船的发展中，一面是火炮的威力不断增大，一面是装甲的厚度和防护性能在不断提高。在美国南北战争期间，交战双方的舰队在海战中炮弹都未能击穿对方的装甲，由此可见钢铁装甲的牢固。到 19 世纪 70 年代，蒸汽军舰达到了较高水平，动力达到 6000 至 8000 马力，装甲厚度达到 200 至 300 毫米，并装备有 75 吨至 100 吨重的线膛炮，能发射 300 至 2000 磅重的炮弹。在建造舰船的竞争中，大型战列舰于本世纪初投入现役。1905 年，英国造出了排水量达 18000 吨的“无畏”号战列舰。舰上装有 80 至 120 门大口径火炮，分 3 层安置在炮台甲板上，其中口径为 305 至 406 毫米的特大口径火炮就有 8—12 门，分别装在 3—4 个炮台上。在战斗中，它能以强大的火力攻击敌舰，又能以空前的厚度装甲保护自己，因而成为舰队的主力。德国紧随其后，也造出了可与“无畏”号匹敌的战列舰。后来，海上军事优势的争夺，使潜艇和航空母舰又成为竞相追逐的目标。虽然潜艇的出现较早，但真正能用于实战的潜艇是美国在 1899 年设计和制造的。当在水面行进时，靠汽油引擎驱动，当潜入水中时，靠蓄电池为马达供电驱动，而蓄电池必须在潜艇浮出水面后才能由汽油引擎为其充电。航空母舰的出现比潜艇要晚，1917 年英国海军建造了专载作战飞机的大型军舰——航空母舰。第二年美国也完成了第一艘航空母舰的设计工作，但由于国会的反对未能施工建造，因而在 1919 年将运煤船“富匹特”号改装成航空母舰，命名为“兰格利”号。在第一次世界大战爆发后，英德双方不可避免地发生了海上冲突。当时英国拥有战列舰 68 艘，巡洋舰 58 艘，驱逐舰和鱼雷艇 301 艘，潜艇 78 艘。德国拥有战列舰 40 艘，巡洋舰 7 艘，驱逐舰和鱼雷艇 144 艘，潜艇 28 艘。在 1916 年 5 月的日德兰海战中，英德双方共投入军舰 250 艘，在长达 10 海里的战线上，激战 6 个小时，双方发射的炮弹计达 5000 多吨，其中 280 至 380 毫米口径的重炮就发射了 8000 发炮弹。在这场规模空前的海战中，英国损失了 3 艘战斗巡洋舰，3 艘轻巡洋舰和 8 艘驱逐舰。德国则损失了 1 艘战列舰，1 艘战斗巡洋舰，4 艘轻巡洋舰和 5 艘驱逐舰。另在大战期间。德国的潜艇对协约国实施封锁，用鱼雷击沉协约国和中立国的军舰、

商船 5000 余艘。足见第一次世界大战的海上战争，是一场死拼钢铁的大炮战，是以钢铁作后盾的大搏杀。

除此之外。在铁路铺设、机械制造等方面也需要大量的钢铁。到 19 世纪末，钢铁生产不仅在数量上迅猛增长，而且品种日益增多，质量不断提高。钢铁开始在人类生活、生产的各个方面发挥巨大的作用，从此世界进入了“钢铁时代”。

钢铁技术的大发展，又反过来促进了钢铁冶炼的科学研究。19 世纪 40 年代，开始了对高炉原理的研究，同时出现了多种对钢铁材料进行化学分析的方法。60 年代以后，用于分析钢铁材料性质的物理方法也已发展起来。1864 年，英国冶金学家索比（1826—1908）首创了显微镜分析法，发现了钢铁的显微组织，并拍摄了许多金相照片，逐渐弄清了复杂的铁碳组织状态。1876 年，吉布斯从他的热力学方程建立了“相律”，发表了关于多相体系平衡的论文。1900 年鲁兹波姆把吉布斯的相率应用到冶金上，到 19 世纪末 20 世纪初，产生了一个新的学科——金相学。

七、生物学的发展及其成就

19 世纪生物学领域的两大成果是细胞学说和进化论。它们奠定了后来生命科学发展的基础。细胞学说阐述了个体成长发展的规律，进化论阐述了物种、群体的形成和发展的规律。起初两大理论之间并无直接的联系。19 世纪下半叶，为了探索个体和群体（物种）之间、细胞与遗传现象之间的内在联系，遗传学把这两大理论紧密联系在一起，并逐渐发展起来，取得了令人瞩目的成果，引起了全社会的重视。

1. 达尔文的贡献

著名博物学家、进化论的奠基人达尔文（1809—1882）1809 年 2 月 12 日出生在英国一个医生的家庭。周围环境对达尔文产生了深刻的影响。祖父是位著名的学者和医生，并对植物学很有研究，是进化论的先驱者之一。父亲也是一位出色的医生，后被选为英国皇家学会的委员。舅舅也是位博物学的爱好者。这种文化氛围，使达尔文从小便对大自然产生了浓厚的兴趣。他对鱼、虫、花、草等极为喜爱，并广为采集制作标本。父亲希望达尔文能子承父业，于是便把他送到爱丁堡大学学习医学。达尔文虽入医门，但非本意，因此兴趣不大，唯对生物学情有独钟。在此期间，他经常到海滨采集海洋动物标本。1828 年父亲又将达尔文送到剑桥大学学习神学，期盼他将来能做一名牧师。由于达尔文与生物学结下了不解之缘，因此他特别喜欢当时植物学教授亨斯罗的讲课，并从中受到亨斯罗的很大影响。在达尔文毕业时是亨斯罗推荐他参加了贝格尔号军舰的环球航行。对此达尔文曾说：“航行是极其重要的一件事，它决定了我的整个事业。”

达尔文很早就读过法国生物学家拉马克（1744—1829）的著作，并从中接受了进化论思想。在环球航行中他又读了莱尔（1797—1875）所著的《地质学原理》，并对其中的观点产生了认同。在长达 5 年的环球航行中，他对所到之地的动植物情况进行了仔细的观察和深入的研究，为莱尔《地质学原理》一书找到了可靠的证据。达尔文决心把自己的航行收获整理成书。在写作的过程中，他在一个偶然的时机看了马尔萨斯（1766—1834）写的《人口论》，其中生存竞争的思想对他产生了很大影响。达尔文的科学巨著《物种起源》一书经过 20 年的时间终于在 1859 年 11 月完成了。书中，达尔文系统阐述了他的进化论思想，其基本原理主要有 4 点：其一，世界上的事物是发展变化的，是处在进化过程之中并非静止不动的；其二，进化过程是逐渐的、连续的，不是突变的、间断的；其三，相似生物是起源于一个共同的祖先，一切生物最终起源是单一的；其四，生物发展变化是自然选择过程，普遍存在的变异是通过生存斗争（包括同类型生物的斗争、与异种生物的斗争和与自然环境条件的斗争）而实现自然选择的，适者生存，不适者淘汰。达尔文的进化论指出了“自然选择”规律，揭示了生物变异的秘密，指出了生物的起源和进化问题，否定了牛顿的形而上学世界观，冲击了宗教神学物种不变的神创论，成为 19 世纪自然科学的三大发现之一。从此，生物学才被置于真正科学的基础之上。

同时也应看到，达尔文过分夸大了生物界生存竞争和自然选择的作用，并不适当地把它看作是物种变化、发展的唯一原因。他承认进化中的渐变，

而否认“飞跃”，显然这有悖于量变到质变的辩证原理。这虽是达尔文的不足之处，但我们也不应因此而苛求于前人。

另外还有一件事有必要提及。当达尔文《物种起源》一书接近完成之时，他收到了侨居马来群岛的英国青年华莱士（1823—1913）寄来的一封信，并附有一篇论文。论文的题目是：《论变种无限离开原始型的倾向》。这使达尔文十分惊讶，因为他们研究的理论极其相似。究其原因，乃是华莱士与达尔文一样也看了马尔萨斯的《人口论》，从中受到启发而想到进化论。华莱士论文的首先完成，给达尔文造成了极大的困难，他20年艰苦劳动的成果，有可能变得毫无所值。达尔文毅然决定放弃自己发现的自然选择法则的优先权，建议并促使华莱士的论文尽早发表。由于莱尔和胡克等人对达尔文的工作情况十分了解，于是在他们的建议下，将达尔文和华莱士两个人的研究成果在林奈学会同时发表。达尔文随后用了一年多的时间于1859年11月24日出版了《物种起源》一书，对进化理论作了详尽的阐述。这部长达15章的巨著深受欢迎，极为畅销。当然他也未能幸免宗教势力的攻击和思想保守的人们的嘲讽。事后，华莱士在1889年写了《达尔文主义》一书，披露了当时的详情，于是达尔文的大家风范和高尚品质，深得世人的赞扬和推崇。

达尔文是位不辍耕耘的科学家。在《物种起源》问世之后，他又于1868年发表了用4年时间写成的《家畜和栽培植物的变异》，1871年发表了用3年时间完成的《人类的未来》，1876年又写了自传。在晚年他还发表了《人类原始及类择》、《植物行动的能力》等著作。在有生之年他共发表了22部著作和80多篇论文，他的进化论思想也进一步得到发展和深化。1882年4月19日这位成果卓著的科学家与世长辞，享年73岁。

2. 细胞的发现与细胞学说的发展

显微镜的发明，扩大了人类的视野，使过去无法分辨的东西借助显微镜可看个究竟。17世纪英国的胡克（1635—1703）和意大利的马尔比基（1628—1694）分别发现了植物细胞和动物细胞结构。1832年，英国的植物学家布朗（1773—1858）发现了植物的细胞核；捷克的生理学家普金叶（1787—1869）发现了动物细胞核。1835年德国的冯·摩尔（1805—1872）最先记载了细胞有丝分裂的过程。1839年德国植物学家施莱登（1804—1881）和动物学家施旺（1810—1882）共同提出完整的细胞学说，指出细胞是生命的基本单位，细胞是由细胞分裂出来的，生命现象是一个统一的整体，是由细胞组合后产生的。他们还认为细胞学说不仅仅是有机体构造的学说，而且是有机体发育的学说。

19世纪50年代德国的雷马克（1815—1865）和瑞士的寇力克（1817—1905）将细胞学说和胚胎学的研究结合起来，证明卵和精子也是细胞，指出胚胎发育的过程就是细胞分裂和分化的过程。德国的微尔荷（1821—1902）将细胞学说和病理学研究结合起来，指出病变细胞是由正常细胞变化来的，各种病变与细胞的形成和细胞结构的异常变化有关。

1880年，由于显微镜技术的不断提高，使人们清楚地看到了细胞分裂。细胞内先是形成两极，两极之间有许多细丝相连，而后，这些细丝在细胞中央拉断，于是就形成两个细胞。这就是“有丝分裂”现象。在有丝分裂中细胞核中的每一个染色体都分成两个，并被准确、均等地分配到两个子细胞中

去，这就是染色体分裂现象。

细胞的发现和细胞学说的形成，使生命现象的很多问题都可以归结为细胞的结构和功能，因此，细胞学说便成为整个生物界进化的科学基础。

3. 孟德尔的遗传定律

进化论和细胞学说把生物学的研究推进到一个新的阶段。在生物学的发展中，遗传问题尤其引起人们的重视。究竟遗传是怎样发展的？有没有规律可循？如何才能改良动植物的品种？诸如此类的问题，驱使着人们进一步去探索生命的奥秘。在遗传问题的研究中，捷足先登取得了辉煌成果的生物学家是现代遗传学说的创始人孟德尔（1822—1884）。孟德尔的家乡是奥地利的布隆镇（今捷克的布尔诺市）。他出身于贫苦农民家庭，年轻时，因贫病交困而进入天主教布隆修道院作修道士，后任院长。1851—1853年间他被派往维也纳大学学习数、理、化和生物学知识。著名的奥地利植物学家翁格讲授的《植物生理学及显微技术》，对他产生了深刻影响。回到布隆修道院后，从1856年起，他在修道院的花园里进行了长达8年的豌豆杂交遗传的试验。1865年在布隆博物学会上他宣读了论文，公布了他的杂交试验结果和他的理论概括。1866年在布隆自然历史学会的会刊上发表了她的论文《植物杂交的试验》。

在孟德尔以前，也有人进行过植物杂交试验，但并没有总结出遗传的规律。孟德尔总结了前人的经验和教训，精心地选择了试验材料——豌豆，在收集到的34个豌豆品种中，经过两年严格自花授粉的单独培育使之成为纯系，然后从中选出稳定保持自己性状的22个品种作为试验材料。他在各种复杂的遗传性状中共选用7对典型的区别明显的性状来进行试验。

在豌豆的杂交试验中，孟德尔每次试验只留心观察和研究其中的一对性状，并用数学统计方法研究处理试验所得资料。孟德尔把植物的高矮，花冠的颜色（红花、白花），豆粒表皮的光皱等稳定性状作为研究和观察的对象，经过试验都得出同样的结果。

以花冠颜色不同的豌豆为例。孟德尔将红花豌豆和白花豌豆作为原始亲本（ P_1 ）进行杂交。所得子一代（ F_1 ）都是开红花的，两个亲本的区别性状只有一个表现出来。将 F_1 自花授粉得到子二代（ F_2 ）。在 F_2 中，既有开红花的又有开白花的。开红花的植株与开白花的植株其比例为3:1。将 F_2 自花授粉产生子三代（ F_3 ）。 F_2 开白花的植株所得 F_3 全部开白花，表现为白花纯种。 F_2 开红花的植株中有1/3在 F_3 全部开红花，表现为红花纯种，另外2/3在 F_3 既有开红花的又有开白花的，红花与白花的比例仍为3:1。

在探索性状遗传规律中，孟德尔做了大量实验并在此基础上，提出了遗传因子假说，来解释杂种 F_1 的全显性和杂种 F_2 的分离现象。他用大写字母表示显性性状，用相应的小写字母表示隐性性状。红花亲本产生花粉（A）和卵（A）；白花亲本产生花粉（a）和卵（a）。红花亲本和白花亲本杂交产生 F_1 （Aa），由于A为显性，表现为红花。 F_1 （Aa）可以产生二种花粉和二种卵，即花粉（A）、花粉（a）和卵（A）、卵（a）。它们之间以同样的概率配合则可产生4种类型的 F_2 代，即：（AA）、（Aa），（aA）、（aa）（见图一）。

其中第一项 (AA) 为红花纯种, 第二项 (Aa)、第三项 (aA) 与 F_1 代相同, 为红花杂种, 第四项 (aa) 为白花纯种, 总计起来红花与白花的比例为 3 : 1。

孟德尔进一步对二对相对性状、三对相对性状乃至多对相对性状的传递规律进行了实验。他发现不同的两对相对性状, 例如花的颜色 (红花和白花) 和种子的颜色 (黄色和绿色), 在性状传递中是互不相关的、相互独立的, 这些性状在后代可以自由进行组合 (见图二)。在“子二代”中出现 4 种类型的种子 (红黄、红绿、白黄和白绿), 其株数比例 9 : 3 : 3 : 1。在“子二代”中就红花、白花这一相对性状来说, 应有 $3/4$ 开红花, $1/4$ 开白花; 若以种子黄色、绿色这一相对性状来说, 应有 $3/4$ 是黄色的, $1/4$ 是绿色的。把两者综合起来, 应有 $3/4 \times 3/4 = 9/16$ 是红黄的, $3/4 \times 1/4 = 3/16$ 是红绿的, $1/4 \times 3/4 = 3/16$ 是白黄的, $1/4 \times 1/4 = 1/16$ 是白绿的, 其比例恰为 9 : 3 : 3 : 1。孟德尔发现在三对以上的性状一起传递时, 都遵守同一规律。

经过多年的反复杂交试验, 孟德尔发现了生物性状传递的规律, 并在反复的实验中, 检查和验证自己得出的结论, 形成了科学的遗传学理论基础。孟德尔将自己的研究结论概括为 4 点:

第一、生物的每一性状都由一对遗传因子所决定。它们分别来自父本和母本, 在性细胞中单个出现, 而在体细胞中成对出现。

第二、“亲本”产生的两性配子经杂交形成“子一代”的合子。在子一代中, 含有父本和母本的各一个因子。其中一个因子会压抑或遮盖另一个因子的作用, 使受压抑或被遮盖的因子性状得不到显现。性状得到显现的称为显性因子, 反之称为隐性因子。

第三、生物在子二代发生性状分离。在子二代中, 由于显性、隐性因子分别进入不同的配子之中, 且相互结合的机会均等, 所以产生 4 种组合, 但其中只有 1 种组合是一对隐性因子的结合体, 这就使显性与隐性之比呈现出 3 : 1 的比例。

第四、如果是两对性状杂交, 即双亲各带有两对遗传因子, 在杂交子二代中一对性状的分离与另一对性状的分离是相互独立的互不干扰的, 它们可以自由组合。

孟德尔的上述结论经过后人验证概括为 3 条定律, 即显性定律、分离定律和独立分配定律。在孟德尔之前显性定律已被发现, 因此科学界公认后两条定律是由孟德尔发现的。孟德尔所说的“遗传因子”是从杂交实验中作出的推论。他认为遗传因子是颗粒性的、不能再分割的遗传单位, 而且是世代传递的。假定因子在性细胞中单个出现, 在体细胞中成对出现, 这是孟德尔超越时代的一种大胆而非凡的设想。它与其后细胞学发现的两种生殖细胞成熟分裂时染色体的数目减少一半的事实完全相符。孟德尔遗传定律第一次用数学方法定量地把生物遗传的规律表示出来, 在生物学发展史上有着重大的历史意义。以前, 关于生物的遗传存在着一种“混合”的概念。即是说生物的亲本性状在杂种后代中“混合”。孟德尔以自己的实验和所得结论否定了“混合”说。孟德尔提出的遗传“因子”, 在 1909 年经荷兰的遗传学家约翰逊 (1857—1927) 建议改称“基因”, 从此, 基因这一术语便为生物学界所采用。

孟德尔的遗传定律是生物遗传的普遍规律, 它是遗传学产生的标志, 并

为遗传学的发展奠定了实验和理论基础。

说来运气欠佳，由于当时科学技术的总体水平尚未发展到相应的高度，因此，孟德尔的伟大发现并没有为他同时代的人所接受，亦未引起生物学家们的重视与思考。当时达尔文的进化论成为最具轰动效应的生物学理论，因而使孟德尔的实验方法及其结论遭遇了漠视与排斥的命运。孟德尔把他的论文寄给当时著名的瑞士植物学家耐格里（1817—1891），请他审阅，但却被这位权威轻蔑而不加思索地打入了冷宫。孟德尔关于生物遗传理论的重大研究成果，达尔文竟不知晓，甚至连孟德尔的论文也没有读过。这确是遗传学史上的莫大憾事。

埋于泥土中的宝石终有被人发现的一天。它一旦被发掘出来，其光彩更加鲜艳。在时过 34 年之后，孟德尔的论文终于被重新发现。这一机缘是由 3 个国家的植物学家于同一年（1890 年）在各自独立的研究过程中查阅文献资料时偶然得之的。

这 3 位植物学家是荷兰的德弗里斯（1848—1935）、德国的柯伦斯（1864—1933）和奥地利的丘歇马克（1864—1933）。他们在杂交实验中，都发现了生物性状遗传的某些规律，而各人都不知道另外两人的情况，亦全然不知以前孟德尔所进行的研究工作。德弗里斯在荷兰阿姆斯特丹，用月见草、罌粟、曼陀罗等材料进行了杂交试验，发表了《论杂种分离的规律》，并首创了“突然变异”这一名词。柯伦斯在德国的耶纳用玉米进行了杂交试验，发表了《杂交分离的孟德尔定律》。丘歇马克在比利时的根特，用豌豆进行了杂交试验，发表了《豌豆人工杂交》的论文。他们三人都把自己的研究结果，看作是对孟德尔所发现的科学定律的验证，而把科学发现的荣誉归于孟德尔。从此孟德尔被公认为遗传学的创始人；遗传学也被确认为一门独立的学科。

4. 摩尔根的基因学说

孟德尔遗传定律的重新发现，引起了人们对遗传问题的进一步探索。如遗传因子（基因）是虚构还是客观实在？它究竟在哪里？在动物、植物体内，在生殖细胞中，遗传基因以何种形式存在？能否按一种确定的机理来促成遗传基因的分布等等，对这些问题的探索和研究，使遗传学从个体水平发展到细胞水平，因而使遗传学和细胞学结合了起来。

早在 19 世纪 70 年代，德国生物学家赫脱维奇（1849—1922）和瑞士生物学家福尔（1845—1892）通过对动物的研究；德国生物学家斯脱拉斯伯格（1844—1912）通过对植物的研究，已经发现有性生殖是通过两性细胞核的结合实现的，并在 1884 年提出了细胞核是遗传物质基础的见解。1879 年德国生物学家弗莱明（1843—1915）发现了细胞核中的“染色质”。他详细观察了染色质在细胞分裂时的变化。当细胞分裂时，染色质形成若干条分离的丝状物，它们一般是成对的，而且不同的生物都有恒定的条数。

在无性生殖的细胞分裂时，每条染色质丝都是准确地均等地分裂和分配的，从而形成两个细胞核。1888 年德国解剖学家瓦尔德尔将这种染色质丝命名为“染色体”。

1887 年以后比利时胚胎学家贝纳登（1845—1910）、斯特劳伯格（1844—1912）等人相继发现了减数分裂，即在有性生殖的细胞分裂过程中，当形

成配子时，性细胞的染色体数目减少一半，在受精作用中精核和卵核提供了等量的互补的染色体，两者结合，使染色体恢复到正常的数目。因此，体细胞中染色体套数是 2 倍数，配子中为 1 倍数。

与此同时，耐格里和德国生物学家魏斯曼（1834—1914）提出一个假设，认为每种生物都有特殊的遗传物质，称“种质”，它由不同单元所组成，每一单元决定生物一种性状。为避免种质单元在有性繁殖中倍增，魏斯曼在 1887 年假定种质在结合前都分裂为二，这恰好与贝纳登的发现吻合，魏斯曼认为染色体就是种质并可沿纵向分成单元。

1903 年，美国细胞学家萨顿（1877—1916）预见到孟德尔的因子与染色体的联系，于是指出细胞的染色体和孟德尔的因子之间存在着平行关系。因为两者都是成对存在，形成配子时分离，受精后又重新配对。但有一点是难于解释的，即每一个生物的细胞中的染色体数目远远少于它的遗传特征的数目，例如，人只有 23 对染色体，可遗传特征显然有成千上万种。由于当时把各种基因都看成是彼此独立的，这就使用染色体行为解释基因活动产生了极大困难。若假定遗传因子是在染色体上，染色体是遗传因子的载体，那么因子分离定律和独立分配定律的机制就可得到完美的解释。这个推论终于被美国遗传学家摩尔根（1866—1945）的研究工作所证实。

摩尔根是美国生物学家、遗传学家和胚胎学家。因其丰富和发展了孟德尔的遗传定律，建立了遗传的染色体理论，创立了比较完整的基因学说，故于 1933 年获得了诺贝尔生理学、医学奖。摩尔根原先是一个胚胎学家，1900—1928 年任美国纽约哥伦比亚大学实验动物学教授。在这里，摩尔根带领一批年轻人，其中有哥伦比亚大学的学生斯特蒂文特（1891—1971）、布里奇斯（1889—1938）和研究生缪勒（1890—1967），进行了富有成效的研究工作，创立了后来闻名世界的遗传学实验室，形成了所谓“美国遗传学派”（又称摩尔根学派），并建立了现代遗传学。1908 年，摩尔根开始进行果蝇的遗传实验，1910 年发表了关于果蝇性连锁遗传的论文。第一次将一个基因和一个具体的染色体的行为联系起来。

摩尔根之所以选用果蝇作为试验材料，是基于以下的考虑：果蝇体积小，占地少，繁殖期短，生产效率高，而且果蝇只有 4 对染色体，易于观察对比，能够简化细胞学的观察与性状表现之间的关系。它体现了实验材料经济、实用、效率高的优点，这也是摩尔根实验研究取得重要成果的原因之一。

1910 年，摩尔根在作果蝇试验时，在正常野生型的红眼果蝇群体里，发现了一只白眼雄蝇。这一明显的变异，引起了摩尔根的关注。他对这一新性状在遗传中的表现进行了仔细研究。他把白眼雄蝇与红眼雌蝇杂交，产生的杂交一代（ F_1 ）都是红眼果蝇。让 F_1 代红眼果蝇相互交配， F_2 代既有红眼果蝇又有白眼果蝇，白眼果蝇占 $1/4$ ，雌雄果蝇各占一半。这说明红眼和白眼受一对基因支配，红眼基因为显性。但奇怪的是， F_2 代的雌蝇都是红眼，雄蝇中有一半是红眼，一半是白眼，就是说，白眼雄蝇只把它的眼色特征传给隔代的雄蝇。摩尔根及其同事进一步研究发现，雌蝇的各对染色体，都由两条正常的“X 染色体”组成，而雄蝇却有一对染色体其中一条是正常的“X 染色体”，另一条则是在形状和所含基因上都与“X 染色体”不同的“Y 染色体”。在形成精子时这一对染色体分离，因此，半数精子具有 X 染色体、半数具有 Y 染色体，前者与卵结合，产生雌性个体，后者与卵结合，产生雄性个体。所以在遗传后代中雌雄比例为 1 : 1。摩尔根认为，如果假定白眼基因

位于X染色体上，而Y染色体上不带有白眼的正常对性，那么这种遗传现象就得到解释。白眼雄蝇和红眼雌蝇杂交后，在F₁代中，雌蝇的2个X染色体1个来自母本带红眼基因，1个来自父本带白眼基因，所以表现为红眼；雄蝇从母本得到1个带白眼基因的X染色体，从父本得到1个Y染色体，也表现为红眼。F₁代雄蝇和雌蝇杂交，产生4种后代：2个带红眼基因的X染色体配合；带红眼基因的X染色体和带白眼基因的X染色体配合；带红眼基因的X染色体和Y染色体配合；带白眼基因的X染色体和Y染色体配合。第一、第二种类型均为红眼雌蝇，第三种为红眼雄蝇，第四种为白眼雄蝇，白眼所占的比例恰为1/4。这一发现使某些“伴性疾病”的发生亦得到了很好的解释。

摩尔根在继续研究中发现几种基因位于同一染色体上，可一起遗传；不同染色体上的基因可以自由组合，但同一染色体上的基因却不能自由组合，只能排列成连锁群，这种性状连在一起遗传的现象叫做基因连锁。后称遗传学第三定律。基因连锁使染色体数目远远少于基因数目所造成的困难获得了解决。摩尔根还发现，许多基因在同一条染色体上形成连锁群。因此连锁群的个数和染色体的个数总是吻合的。例如，果蝇的染色体为4对，它的基因连锁群也是4个；豌豆的染色体为7对，它的基因连锁群也是7个。孟德尔在进行豌豆实验时，认为7对相对性状皆可独立分离，那是因为恰巧这7种基因都分布在不同的染色体上。后来，摩尔根又发现在细胞分裂时，不同染色体之间可以发生片段互换。片段的长度从携带1个基因到若干个基因不等。摩尔根推论，交换频率的大小和染色体上基因之间的距离有关，距离愈远，频率愈高。据此，摩尔根提出基因在染色体上直线排列的学说。

摩尔根在研究工作中获得了一系列重大发现，他带领自己的学生发表了多部具有划时代意义的著作。

1915年出版了《孟德尔遗传机理》，1919年出版了《遗传的物质基础》，1925年出版了《实验胚胎学》，1926年出版了《基因论》，1934年出版了《胚胎学与遗传学》等。

1927年，缪勒还发现强烈的X射线照射可能引起染色体断裂，然后又以改变了的组合重新结合起来，从而造成遗传基因的突变。1946年，缪勒因此发现而获诺贝尔奖。

摩尔根等人通过一系列的科学实验，取得了巨大成果：

发现了基因连锁现象、基因片段互换现象、基因的再生功能及其他多种功能。

明确了基因是客观存在的物质实体，是“染色体的物质微粒”。

证实了基因存在于染色体上，染色体是基因的载体，是遗传的物质基础。

阐明了染色体基因的性别决定说，从而亦使遗传性疾病的发病原因得到了解释。

预言了基因“代表着一个有机化学的实体”，从而为揭示遗传物质的本质指出了方向。

摩尔根的理论是遗传学和细胞学相结合的产物。其科学价值使它成为遗传学发展史上的里程碑。

5. 巴斯德与微生物学

巴斯德（1822—1895）是法国巴黎大学的教授。他一生从事微生物的研究，为人类作出了巨大贡献，成为微生物学和细菌学的奠基人。

（1）灭菌消毒法的产生和发展

法国的酿酒业十分兴隆，然而酒会变坏变酸，这一大难题困扰着酒商们，也给该行业造成了不小的经济损失。这一问题引起了巴斯德的注意和兴趣。他研究后发现，这是微生物作怪的结果。在探求解决方法的过程中，他将试液加热到 55℃ 时，发现有些微生物被杀死。于是这一简便的灭菌消毒法产生了。此后，这一方法被医药卫生、轻工、食品等部门广泛采用。

1864 年，法国南部养蚕区流行蚕病酿成灾难。巴斯德前往解决这一问题，费时 6 年终使蚕病得到根治。他发现蚕致病的原因又是微生物作祟。由此他受到启发，想到微生物会不会使人致病？巴斯德预言，人的传染病也是微生物造成的。

巴斯德的发现和预言，在医学界产生了重大影响。因为当时外科手术病人的死亡率很高，45% 的手术病人由于感染而死亡，手术的成功率最高不过 20%。英国医生李斯特（1827—1912）在巴斯德的启发下，决心找到一种消毒办法，杀灭造成感染的微生物（细菌）。经过 9 年的研究和试验，他终于发现煤焦油中的酸有防腐杀菌作用。把这种药水洒在手术室，情况大为好转，死亡率下降了，败血病减少了。这种消毒法普遍推广后，外科手术的死亡率由 45% 降到 15%。巴斯德的研究成果和李斯特的工作使医疗卫生事业发生了巨大的技术变革。

巴斯德在预言了微生物能使人传染疾病之后，德国病理学家科克（1842—1910）于 1875 年用实验证明了炭疽菌的存在及其形状。他还成功地培养出了炭疽菌并将它们染成红色和蓝色，以便于在显微镜下进行观察。1878 年科克发表了《关于创伤传染病病因的研究》的论文，并指出各种传染病均由一定的病原菌所引起。此后，科克不断改进自己的研究工作，于是相继发现了伤寒菌、淋菌、结核杆菌、霍乱菌等。随着病原菌的发现，相应地使人们逐步做到了对细菌的有效的抑制和对疾病的有效的预防与治疗。由于科克在医学上的重大贡献，1905 年他获得了诺贝尔医学与生理学奖。1883 年，德国病理学家克勒布斯分离出引起白喉病的细菌。1890 年，俄国的维诺格拉德斯基发现了另一大类微生物，即自养性微生物，并指出硝化作用是硝化细菌引起的。

细菌发现之后，人们又发现了一种不同于细菌的更小的微生物病原体，这就是“病毒”。最早发现病毒的是俄国人伊凡诺夫斯基。他观察了传染烟草花叶病的病原体，并确认它是不同于细菌的另一类微生物。1898 年，法国的雷弗勒通过细菌过滤器发现了牛的口蹄疫病原体。实验终于验证了病毒的存在。于是抑制、消灭病毒，治疗各种病毒引起的传染病又在实践中不断得到发展和完善。

（2）免疫学的诞生

1874 年，巴斯德在研究牲口的炭疽病和鸡霍乱病时，在病羊的血液中的找到了炭疽病菌，但一时找不到杀死这种病菌的办法。后来，他得知德国的科克发现了炭疽菌可以在肉汤培养液中生长繁殖的消息，于是他在 1881 年作了一次重要试验：把肉汤培养液中的细菌注射到动物体内，使之产生免疫性，于是他找到了预防炭疽病的免疫法。为防止感染而预先注射到体内的细菌便是疫苗。免疫学便从此诞生了。1884 年巴斯德又成功地接种了预防狂犬病的

疫苗。从此，免疫接种成为世界范围内普遍采用的极为有效的预防疾病的措施。

巴斯德在科学研究中倾注了毕生的心血。即使在他 45 岁因脑溢血患半身不遂重病的情况下，仍毅然坚持研究工作，并不断取得新的成果。他开创了微生物学的研究领域，并带动了细菌学、病毒学、免疫学以及生物化学等其他学科的发展。巴斯德的工作造福于全人类，他的贡献是极其巨大的。法国人因他而自豪，世界各国人民也永远怀念他。

6. 生态学的形成

随着生物学的发展，一个新的分支学科产生了。它就是研究生物与环境之间相互关系的科学——生态学。它研究的对象是生物个体、种群、群落、生态系统，以至生物圈，研究它们在局部地区、一定时间（年、季节）上的分布和变化；生物体、种群、群落之间的相互关系；它们对非生物环境的适应和调节机能等。生态学按生物的种类又可分为植物生态学、动物生态学、微生物生态学等；按栖息环境又可分为水生生物生态学、陆生生物生态学和寄生生物生态学等；按生物的组织水平又可分为个体生态学、种群生态学、群落生态学和生态系统生态学；按自然景观又可分为森林生态学、草原生态学、农田生态学、沼泽生态学、沙漠生态学、淡水生态学、海洋生态学等。生态学的研究为环境科学的兴起产生了重要作用，环境科学的研究又为生态学的普及和深化起了重大推动作用。在工业化迅速发展，人口骤然增加的形势下，生态学的研究有着十分重要的意义。

八、世纪之交的数学

19 世纪上半叶，数学取得了巨大进展，非欧几何的创立使几何学步入了“黄金时代”；代数由于伽罗瓦（1811—1832）的工作获得了全新的动力；数论发展成解析数论；分析学由于复变函数论的建立以及常微分方程和偏微分方程的研究而取得了重大发展。

19 世纪下半叶，数学分析建立了严格的极限理论并最终将它置于实数的严格基础之上，许多数学家如柯西（1789—1857）、外尔斯特拉斯（1815—1897）、戴德金（1831—1916）、康托（1845—1918）等为此作出了努力。1872 年，德国数学家克莱因（1845—1918）发表“爱尔兰根纲领”演讲，总结各种新几何学的发展，指出其结构上的一般原则，并用变换群的观点作为几何学分类的基础，带来了一次深刻的思想变革。次年，挪威数学家 M.S. 李（1842—1899）创立的李群即连续变换群，逐渐成为近代数学的一个重要分支，是理论物理的重要工具。

19 世纪末到 20 世纪初，数学更多地转向自身的基础，抽象代数、泛函、拓扑等现代数学分支，逐渐在此阶段产生并奠定了基础。彭加勒（1854—1912）、康托和希尔伯特是这一时期的数学代表人物，也是对 20 世纪的数学发展影响最大的人物。彭加勒首先是一个数学家，但他在物理学方面的成就更令人瞩目。他在数学方面的主要成就有，创始自守函数、微分方程定性理论以及拓扑学，研究则涉及非欧几何、分析力学、不变量理论、概率论等。物理方面同样涉及了许多研究领域，从力学、热学、光学、电学到宇宙学，都留下了他探索的足迹，对天体力学三体问题的研究则著称于世。康托和希尔伯特的研究工作则在很大程度上反映了这一时期数学的成就。

1. 康托和集合论

最先创立了一般集合论的德国数学家康托出生于俄国的一个丹麦—犹太血统家庭，后随父母迁居德国，1863 年进入柏林大学学工。在那里，受到外尔斯特拉斯的影响，转向研究纯粹数学。1867 年获柏林大学数学博士学位，博士论文是关于数论方面的。1869 年后到哈雷大学任教，1879 年任教授。

康托到哈雷大学后，开始对三角级数的研究，1870 年到 1872 年发表了 3 篇有关三角级数的论文。在 1872 年的论文中，他提出了以柯西序列定义无理数的实数理论，并初步提出以高阶导出集的性质作为对无穷集合的分类准则。三角级数的研究引发了康托进一步探讨无穷集和超穷序数的兴趣，并萌发了集合论的思想。

1872 年，康托结识了数学家戴德金，后者在“无穷”方面的思想和探索给他留下深刻印象，之后，他们保持通信联系，相互讨论问题。1874 年康托发表了《关于一切实代数数的一个性质》的论文，指出一切实代数数和正整数可以建立一一对应，并将一一对应关系作为对无穷集合分类的准则。这是关于集合论的第一篇革命性文章。1874 年至 1897 年，康托继续发表了多篇关于集合论和超限数的论文，阐述他的集合论，考虑、研究了各种无穷集合，并把无穷集合分成不同等级。

康托称集合为一些确定的、不同的东西的总体，这些东西人们能意识到，并且能判断一个给定的东西是否属于这个总体。他认为，如果一个集合能够

和它的一部分构成一一对应，它就是无穷的，那些认为只有潜无穷集合，反对实无穷的观点是错误的。

康托证明，在某种意义上，一小段线和一条无限长的线有同样多的点。比如，考虑一个半圆弧和它下面的一条直线，这条直线和连接圆弧两端点的直径平行。从半圆的圆心画一条直线，过半圆上的一个点，并交于无限长线上一点。圆上的每点，总能找到无限长直线上的一点与之对应，反之亦然。全直线不大于它的部分，至少就它们各自包含的点的数目而言是如此。全部能和真的一部分建立一一对应。这是无穷集合的一个特性。

他还给出了一个集合的例子——康托集：把区间 $[0, 1]$ 中间的三分之一挖去，即把 $(\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$ 挖去；然后从余下的两部分中再挖去它们各自中间的三分之一；再从余下的四部分中挖去各自中间的三分之一，以此类推，不断进行下去，留下部分的长度越来越小，而彼此分离部分的个数则成倍增加，重复“挖去”的过程无限多次后，仍有一些点还未被挖去，这些留下的点则形成了康托集。用几何级数求和方法可以证明，从区间 $[0, 1]$ 中挖去的部分总长为1，这意味着康托集的总长为零。还可以证明，康托集中的点，与整个区间 $[0, 1]$ 中的点一样多。康托通过证明指出，直线上的点不能与整数建立一一对应关系，说明了，任何一个无穷集合与另外一个无穷集合有同样多的点的看法是不正确的。

康托后来又证明了 n 维形体的点和线上的点可以有一一对应。这一似乎抹杀了维数的区别的论点遭到了克罗内克等数学家的反对。而戴德金早些时候也考虑到了，不同维空间的点可以建立不连续的一一对应。

1878年，康托提出了著名的连续统假设，即可数集合的基数和实数集合（连续统）的基数之间没有其他基数。但是，证明这一假设的工作，直到本世纪30年代后才有所突破。

集合论创立过程在数学界引起的反应是异常强烈的。当时的许多数学家只承认无穷事物的发展过程是无穷，无穷只是潜在的，是就发展而言的，而不承认已经完成的、客观存在着的无穷整体。集合论的工作触及了许多经久未决的问题，颠倒了前人的想法，肯定了作为完成整体的实无穷，自然要遭到许多人包括一些数学界权威的非难、攻击。因此，集合论创立者的境遇并不顺畅。康托曾希望进入当时著名的柏林大学任教，但对康托的“无穷”观持严厉批判态度的某些数学家挡住他的去路，甚至攻击他神经质、“神秘主义”，给他带来巨大的精神压力。1884年，康托患了精神分裂症，但1887年又恢复了工作。

任何一种新事物、新理论的诞生，总会遇到反对者，但也不乏慧眼识真金者。集合论也得到了不少卓越的数学家的极力支持，如戴德金、外尔斯特拉斯等。1897年，在第一次国际数学家会议上，赫尔维茨和阿达玛指出了超限数理论在分析中的重要作用；1902年，勒贝格成功地应用集合论于分析学，创立了测度论和积分论；1906年，弗雷歇利用集合论观点研究函数空间。

19世纪末，集合论暴露出了一些内在的矛盾。1901年，英国哲学家、数学家罗素（1870—1970）发现一悖论，即“所有不属于其自身的集合的集合，是属于该集合，还是不属于该集合，都导致矛盾”，对数学界震动颇大，并因此产生了数学基础的危机，引起长达多年的热烈争论。1908年，德国数学家策梅罗（1871—1953）为解决集合论悖论而把集合论公理化。经过后来的

多次修改，公理集合论得到了巨大发展。

数学大师希尔伯特（1862—1943）在德国传播了康托的思想，并于1926年宣称：“没有人能把我们从康托为我们创造的乐园中赶走。”至此，康托的理论已最终得到了数学界的一致认可。

经过20世纪中的发展，集合论已成为数学家最基本的语言，即数学语言更多地从直观描述转到集合论语言。数学中有自然数、有理数和无理数的集合，直线可视为点的集合，平面可以视为点的集合，也可以看成是直线的集合。某些函数也构成集合，所有的旋转变换也构成集合。

集合论深入到数学的每一个角落，成为各个学科的共同基础，是20世纪数学的一个重要特点。而且，现代数学不是孤立地研究集合，而是研究集合里的“结构”，即某个集合中的元素所满足的一些数学关系。

2. 希尔伯特对数学的贡献

数学大师希尔伯特的成长和成功的道路，是现代人才学的一个典型例子。他的故乡哥尼斯堡，建于13世纪，是一座著名的大学城，有古老的大学，有著名的哲学家康德的墓地，文化传统十分深厚。爱好哲学、天文和数学的母亲对他更有潜移默化的影响。

希尔伯特读小学时，适遇后来成为杰出数学家的闵科夫斯基（1864—1909）从俄罗斯搬到哥尼斯堡，并成为希尔伯特的邻居。觉得自己比较愚钝的小希尔伯特，在少年奇才闵科夫斯基等的激励下，学习十分的勤奋努力，并和闵科夫斯基成为挚友。在希尔伯特的学生时代，德国的小学教育十分注重基础知识和基本训练，中学和大学充满自由学习的空气。著名的数学家雅可比、魏伯等曾在希尔伯特就读的哥尼斯堡大学里任教，并使该校形成了数学研究中心，年轻人能经常接触到数学研究最前沿的课题。

1885年，希尔伯特获博士学位，1893年任哥尼斯堡大学教授，1895年赴哥廷根大学任教授。1902年后一直是德国《数学年刊》主编之一。

（1）希尔伯特涉及的主要数学领域

希尔伯特是20世纪最伟大的数学家之一，他常常直攻数学的重大问题，开拓新的研究领域，并努力寻求带普遍性的方法。他涉及的数学领域以及对数学的贡献是多方面的。从时间顺序上看，主要有以下几个方面。

他获得博士学位后，便开始研究果尔丹问题，即不变式系的有限整基的存在定理。希尔伯特独辟蹊径，采用了直接的、非算法的方法进行了证明，问题的彻底解决曾轰动数学界。他对代数不变式问题的研究工作，孕育了女数学家艾米·诺特为代表的抽象代数学派。

1894年后，希尔伯特主要研究代数数域论问题，1898年的论文《相对阿贝尔域理论》，是他在这一方面工作的顶峰。日本数学家高木贞治（1875—1960）和奥地利数学家阿廷（E. Artin, 1898—1962）在他工作的基础上发展了类域论。

1899年至1903年，希尔伯特的工作主要在几何基础方面。1899年，他发表了著名的《几何基础》一书。在此书中，他给出了几何学的一个清晰的、完备的公理化体系。全体公理按性质分为5组，即关联公理、次序公理、平行公理、六条全等公理和连续公理。希尔伯特对这些公理之间的逻辑关系作了深刻考察，精确提出了公理系统的相容性、独立性和完备性的要求，这一

方面工作的意义远远超出了几何基础的范畴。希尔伯特所奠基的公理化方法是 19 世纪数学发展的结晶，并为 20 世纪的数学家们起到了导航作用。

1904 年，希尔伯特证明了狄利克雷原理，解决了它的适用范围问题，从而拯救了这一原理，大大丰富了变分法的经典理论。

从 1904 年到 1912 年，希尔伯特发展了弗雷德霍姆积分方程论，综合运用分析、几何和代数的方法发展了特征函数与特征值理论。他将函数空间中的函数按正交基坐标化为数列，提出具有平方收敛和的数列空间的概念，即希尔伯特空间，他还发现并巧妙处理了“算子谱”理论。这些工作为泛函分析的发展奠定了基础。这一时期，希尔伯特还证明了数论中的华林（1734—1798）猜想。

此后的大约 10 年时间，希尔伯特专注于物理领域，他成功地将积分方程论用于空气动力学问题；研究了物质结构等理论的处理；探讨用公理化方法来推演近代物理学问题；在广义相对论方面的工作令人瞩目，他独立于爱因斯坦推导出了引力场方程，并为孕育统一场论的思想作出了贡献。

1918 年后，希尔伯特对数学基础的研究形成了“形式主义计划”的思想，并成为形式主义学派的创立者。按照形式主义计划，整个数学理论被表现为仅由符号、公式和公理组成的相容的形式系统。他提出证明论（也称元数学）作为证明形式系统相容性的途径，元数学坚持推理的有限性。希尔伯特和他的学派，确实证明了一些简单形式系统的相容性，而且相信，他们将实现证明算术和集合论的相容性的目标。然而，1931 年，哥德尔（1906—1976）证明用希尔伯特“元数学”证明算术公理的相容性是行不通的。尽管如此，希尔伯特的形式主义计划仍不失其重要性，它带动了 20 世纪有关数学基础的研究。

希尔伯特对 20 世纪数学发展影响最大的工作，乃是在本世纪初发表的关于 23 个数学问题的讲话。

（2）希尔伯特提出的 23 个数学问题

1900 年，关于物理和数学有两个著名的讲话。

一个是 19 世纪物理学界的元老威廉·汤姆逊（1824—1907），即开尔文勋爵于 1900 年 4 月 27 日在英国皇家学会上发表的《热和光的动力理论上空的 19 世纪乌云》的演讲。这个演讲的主要基调是，充分肯定 19 世纪物理学的成就，认为物理学大厦已经建成，余下的只是修修补补的事情了。这个讲话之所以著名，原因有两点。原因之一是研究科学技术史的人们经常引用此演讲作为科学保守派的例子，因为，就在此讲话发表之后不久，以相对论和量子力学为标志的物理学革命便完全改变了物理学的面貌；原因之二是开尔文勋爵能眼光锐利地指出了物理学“万里晴空”中还漂浮着的“两朵乌云”：一是与比热和热辐射有关的理论问题，另一则是迈克尔逊—莫雷实验的“零结果”。但他未能预料这“两朵乌云”正是即将来临的物理学革命风暴的前兆。

另一著名演讲则是 1900 年 8 月 8 日，德国著名数学大师希尔伯特在巴黎召开的国际数学家大会上，发表的“数学问题”的演说。1897 年，在瑞士的苏黎士召开的第一次国际数学家会议决定，1900 年在巴黎召开第二次国际数学家会议。1899 年，希尔伯特接到了会议筹备机构的邀请，要他在会上作主要发言。

为了准备一个与世纪交替之际相称的发言，希尔伯特前后用了 8 个月的

时间，就当时数学研究的最前沿的问题进行了仔细的准备，并与闵科夫斯基、赫尔维茨一起商量，向大会提出 23 个当时尚未解决的数学问题。这些问题从最一般的基础问题开始，以变分法和数理方程等接近实用的学科中的问题结束，涉及数学的各个具体分支。

和世纪之交的“物理学演讲”不同，希尔伯特提出的 23 个问题，列出在新世纪里数学家应当努力攻克的目标，为新世纪中的数学发展揭开了充满挑战性的、光辉的一页。这些问题在相当程度上左右和导引了 20 世纪数学的发展和研究方向。

后来被称为希尔伯特问题的 23 个问题，引起了数学界人士的广泛注意。20 世纪最著名的数学家几乎都为解决希尔伯特问题作出过贡献。

1975 年，交流、总结希尔伯特问题研究进展的国际会议，在美国伊利诺斯大学召开，大会论文汇编成《由希尔伯特问题引起的数学发展》一书。1936 年至 1974 年，获菲尔兹奖（数学界的诺贝尔奖）的 20 人中，有 12 人的工作与希尔伯特问题有关。以下列出希尔伯特 23 个数学问题，以及有关的进展情况。

康托的连续统基数问题。集合论的创立人康托于 1878 年作出“在可数集基数和实数集基数之间没有别的基数”的猜测，即著名的连续统假设。1938 年，侨居美国的奥地利数学家哥德尔（1906—1976）证明了连续统假设和集合论的 ZF 公理系统的无矛盾性。1963 年，美国数学家科恩证明连续统假设和 ZF 公理系统是彼此独立的。因此，连续统假设的对错不能在 ZF 公理系统内判明。希尔伯特第一问题在这一意义上已获解决。

算术公理的相容性。1931 年，哥德尔的“不完备性定理”指出用希尔伯特“元数学”证明算术公理的相容性是不可能的。1936 年，根茨（1909—1945）在使用超限归纳法的条件下，证明了算术公理的相容性。

两个等底等高四面体的体积相等的问题。1900 年，即问题提出的当年，希尔伯特的学生德恩对此问题给予了肯定解答。

直线作为两点间最短距离的问题。希尔伯特之后，在构造与探讨各种特殊度量几何方面有许多进展，但问题并未解决。1973 年，苏联数学家波格列洛夫宣布，在对称距离情况下，问题获得解决。

一个连续变换群的李氏概念，定义这个群的函数不假定是可微的。这一问题亦简称连续群的解析性。中间经过了冯·诺依曼（1933 年对紧群情形）、邦德里雅金（1939 年对变换群情形）和歇瓦来（1941 年对可解群情形）的努力。1952 年，由格利森、蒙哥马利和齐宾共同解决，得到了完全肯定的结果。

物理学的公理化。希尔伯特建议用数学的公理化方法推演出全部物理，首先是概率论和力学。1933 年，苏联数学家柯尔莫哥洛夫（1903—）实现了概率论公理化。后来在量子力学、量子场论等方面，公理化方法的努力也取得了很大成功。但许多人对物理学能否全盘公理化的问题表示怀疑。

某些数的物理性和超越性。1934 年和 1935 年，苏联数学家盖尔封特和德国数学家施奈德各自独立地解决了这一问题的后半部分。

素数问题。素数是一个古老的研究领域。希尔伯特在此提到黎曼（1826—1866）猜想、哥德巴赫猜想以及孪生素数问题。

黎曼猜想是黎曼于 1859 年的论文《在给定大小之下的素数个数》中作出的，至今未能解决。哥德巴赫猜想和孪生素数问题的最佳结果均属于中国数

学家陈景润。

哥德巴赫猜想是德国数学家哥德巴赫(1690—1764)于1742年提出的关于“大偶数可表为两个素数之和”的猜想。这一猜想被简称为“1+1”。许多数学家为解决这一猜想作出了努力,但直到本世纪20年代才有所进展。

1920年左右,挪威数学家希朗改进了古老的筛法,首先证明出了“9+9”,即“大偶数可表为两个素因子不超过9个的数”。接着,从1924年到1956年,陆续证明出了“7+7”,“6+6”,“5+5”,“4+4”,“3+3”。中国数学家王元于1958年证明出了“2+3”。

1948年,匈牙利数学家兰尼恩从另一角度出发,证明了“1+6”;1962年,中国数学家潘承洞证明了“1+5”;同年,王元、潘承洞等证明了“1+4”;1965年,意大利数学家庞皮爱黎等证明了“1+3”。

1966年,年仅33岁的中国青年数学家陈景润证明了“大偶数可表为一个素数及一个不超过两个素数的乘积之和”,即“1+2”,并于1973年发表了详细的论证。英国数学家哈勃斯和德国数学家理查德在伦敦出版的《筛法》,将陈景润的证明增为“陈氏定理”,并赞扬其为“构成筛法理论的光辉顶点”。这一突破性进展,离最后的结果“1+1”,还有一步之遥。数学界认为,要彻底解决哥德巴赫猜想,现在的方法已经用尽,必须在方法上有所突破和创新。

任意数领域中最一般的互反率的证明。该问题已分别由

日本数学家高木贞治(1875—1960)于1921年和奥地利数学家阿廷(1898—1962)于1927年解决。

丢番图方程可解性的判别。求出一个整数系数方程的整数根,称为丢番图(古希腊数学家,约210~290)方程可解。希尔伯特问,是否能用一种有限步构成的一般算法判断一个丢番图方程的可解性?1950年前后,美国数学家戴维斯、普特南、罗宾逊等取得关键性突破,1970年,苏联的马季亚谢维奇最终证明,第10问题的答案是否定的。尽管如此,该问题的探索过程产生了一系列很有价值的副产品,其中不少和计算机科学有密切联系。

(11)系数为任意代数数的二次型。德国人哈塞、西格尔和法国的魏依在此问题上均取得重要结果。

(12)阿贝尔域上的克罗内克定理推广到任意的代数有理域。该问题尚未解决。

(13)不可能用只有两个变数的函数解一般七次方程。1957年,苏联数学家阿诺尔德(V.I.Arnold)解决了连续函数的情形,1964年维土斯金(Vituskin)又推广到连续可微函数情形。解析函数情形则尚未解决。

(14)某些完备函数系的有限性的证明。这和代数不变量问题有关,1959年,日本数学家永田雅宣举出了反例,获得否定解决。

(15)舒伯特计数演算的严格基础。舒伯特曾对“有几条直线能和三维空间中的四条直线都相交”的典型问题,给出了一个直观解法。希尔伯特要求将问题一般化,并给以严格基础。其代数几何基础已由荷兰数学家范德瓦尔登(1905—)等所建立,但舒伯特演算的合理性仍待解决。

(16)代数曲线和曲面的拓扑问题。这个问题分为两部分。一部分涉及代数曲线含有闭的分支曲线的最大数目,一部分则要求讨论 $dy/dx = Y/X$ 的极限环的最大个数和相对位置,其中 X, Y 是 X, y 的 n 次多项式。苏联的彼德罗夫斯基院士曾证明了 $n = 2$ 时极限环的个数不超过3。1979年,中国的史松龄

和王明淑分别给出了 4 个极限环的反例。(17)正定形式的平方和表示。1927 年，由数学家 E. 阿廷解决。(18)用全等多面体构造空间。德国数学家比勃巴赫、莱因哈特分别于 1910 年和 1928 年分别对该问题作出部分解决。

(19)正则变分问题的解是否一定解析。苏联数学家伯恩斯坦和彼德罗夫斯基等得出了部分结果，前者证明了一个变元的解析非线性椭圆方程其解必定解析。该结果后又推广到多变元和椭圆组情况。

(20)一般边值问题。这一问题的研究还在蓬勃发展，已形成一个很大的数学分支。

(21)具有给定单值群的线性微分方程解的存在性。已由希尔伯特本人于 1905 年、勒尔于 1957 年和德利涅于 1970 年所解决。

(22)解析关系的单值化。问题涉及艰深的黎曼曲面论，1907 年德国的克伯解决了一个变数的情形，取得重要突破，其他方面尚未解决。

(23)变分法的进一步发展。希尔伯特在这个问题中，谈了对变分法的一般看法。20 世纪中变分法有了长足发展。

希尔伯特提出的 23 个问题，对 20 世纪数学发展的影响是巨大的。当然，本世纪中数学发展的广度和深度都远远超出世纪初的预测，这表现在代数拓扑、抽象代数、泛函分析、多复变量函数等方面，更表现在应用数学以及随计算机出现而蓬勃发展起来的计算数学和计算机科学方面。

在 21 世纪的脚步已清晰可闻的又一个世纪之交，23 个问题中仍有约三分之一的问题有待解决，而其中的大部分恐怕要留给新的世纪了。

这一时期，数学还发展了一个全新的、重要的分支——张量分析。它的创建只是迎合数学的某种特殊目的，是与黎曼几何相联系的微分不变量研究的一种变形。然而，相对论的诞生和爱因斯坦成功地应用张量分析于相对论，则大大促进了人们对这一分支的兴趣，也同时促进了这一分支的发展。

九、世纪之交的科技特点及其比较

1870年—1918年，这48年的时间跨越了两个世纪。处在世纪之交的这段时间，科学技术的发展，在当时的经济背景和文化背景下形成了鲜明的特点：

1. 经典科学理论向现代科学理论的转变

从19世纪后30年到20世纪20年代，科学的发展经历了从经典理论到现代理论的转变。这一变化最突出、最重要地表现在物理学方面。19世纪末，物理学的发展在力学方面有了牛顿的力学体系，在电磁学方面有了麦克斯韦的电磁理论。牛顿力学概括了从伽利略到开普勒的力学理论；麦克斯韦的电磁理论概括了从奥斯特到法拉第的研究成果。至此，古典物理学已经达到了自己的顶峰。许多物理学家认为，物理学的理论大厦已经建成，它甚至达到尽善尽美的程度，因此，剩下的问题只不过是些可有可无的修饰，总之，要做的事情已经不多了。但令物理学家们感到美中不足也放心不下的是经典物理学还有两个问题没有得到完满的解释，因此它们被称为物理学上空的两朵乌云。其一是黑体辐射的疑难，其二是“以太漂移”实验的“0”结果。人们试图揭开两朵乌云之谜，但又发现这将动摇经典物理学的理论根基。

两朵乌云引起了物理学的危机。面对危机，许多著名的物理学家表现了不同的态度，于是形成了“机械学派”和“批判学派”。机械学派极力维护经典物理学的基本理论纲领——以力学的基本概念和原理来解释一切物理现象；而批判学派则对经典物理学采取了大胆的批判态度。机械学派继承了物理学的传统，他们遵循了认识的唯物主义观点，但又把力学原理看作可以达到的绝对真理，从而把机械论和唯物论等同起来，他们又总是力图把新的发现纳入经典力学的体系之中。批判学派否定机械论中的形而上学，但他们只承认知识的相对性和坚持约定性，而忽视了知识的客观内容，因此陷入了实证主义和唯心主义的泥坑。机械学派和批判学派在哲学观念上的保守与偏执使他们在理论研究中无法走出科学的迷宫。

物理学上空的两朵乌云，看似成不了什么气候，然而却酿成了20世纪物理学革命的暴风骤雨。这场革命的伟大旗手便是相对论的创立者爱因斯坦。在狭义相对论中，爱因斯坦提出了“尺缩”和“钟慢”效应，否定了牛顿的绝对时空观，指出了牛顿力学在低速状态中的合理性，从而把物理学的理论从低速扩展到高速。在广义相对论中，爱因斯坦提出了等效原理和广义相对性原理，从而把物理学理论从宏观扩展到微观和宇观。物理学的新概念——相对论和量子力学，囊括了牛顿力学的理论体系，获得了理论研究的重大突破，从而使物理学发生了从经典科学理论向现代科学理论的转变。

科学的发展是辩证的否定，是在批判的基础上汲取前人成果中的合理部分并加以发展和创新。因此可以说，如果没有牛顿力学和那时其他科学家创立的科学理论，就不可能发生18世纪的产业革命；如果没有法拉第的电磁感应定律和麦克斯韦的电磁理论，电气化时代在19世纪就不可能出现；如果没有爱因斯坦的相对论、质能关系式和薛定谔的波动方程，那么，电子和原子时代的到来就不可能在20世纪变为现实。

化学也同样发生了从经典科学理论向现代科学理论的转变。经典化学的

最高成果是拉瓦锡的氧化说和道尔顿的原子论。拉瓦锡建立的燃烧的氧化说否定了燃素说，使化学从燃素说中解放出来，并迅速得到发展。拉瓦锡不仅建立了科学的燃烧理论，而且还建立了质量守恒定律。后来，道尔顿的原子论把化学理论提高到一个新的阶段。关于物质分割到最后的的最小单位，当时存在着几种不同的说法，如分子、粒子、原子等，是道尔顿使用了原子一词，将各种称谓归于一统。1803年，道尔顿提出了倍比定律。1808年，道尔顿发表了《化学哲学的新体系》的论著，确立了以质量不灭定律为武器的科学的元素观，与拉瓦锡的《化学的元素》一起奠定了近代化学的基础，成为古典化学的两大名著。

此后，粒子物理学的发展，进一步发现原子仍然是可分的，它包含电子、质子和中子。在门捷列夫发现元素周期律，列出了周期表之后，人们对元素的化学性质和化学反应有了质的认识 and 量的把握。从此，化学进入了现代化学阶段。

2. 以电气技术为主导，带动、促进其他领域的技术发展

如果说 18 世纪的技术是以蒸汽动力技术为主导而发展起来的，那么 19 世纪则是以电气技术为主导，电气技术的发展，带动和促进其他领域的技术发展。

由于电的使用，人类从此获得了极其便利的能源和动力。电力的使用和发展首先使电力系统很快发展起来，如使发电机、电动机、变压器、电线电缆、电子元件、绝缘材料、电工仪表等的制造和维修迅速建立起各自的生产部门，并逐渐成龙配套，形成庞大的工业技术体系。电的使用，仅电灯照明，就给各行各业带来了生机。从探索宇宙奥秘的射电天文学到进行微观研究的电子显微镜，都得益于电的应用。大大小小的发电机和电动机，从大的生产设备到小的精密仪器都需要电提供能源和动力。电的使用，还使电信技术迅速兴起，对人们来说至关重要的信息实现了快速传递，电报、电话、无线电从此使信息技术跨入了新时代。电的使用，使工厂落后的生产方式得以改变，原始的生产设备得到更新，因而使现代化生产和自动化操作成为可能。电的使用，又催生出一系列新兴的技术部门，如电解、电镀、电焊、电冶金技术、电加工技术……总之，由于电的使用，19 世纪产生的新技术几乎都转移到了利用电能的基础之上；电的使用，使 20 世纪成为电气化的世纪。

3. 技术受经济的制约，随经济的发展而发展

19 世纪 70 年代，资本主义从自由竞争开始走向垄断。在资本和生产集中的过程中，经济发展的需要刺激了技术的发展。美国经过独立战争和南北战争，为资本主义发展扫清了道路，并最先形成了垄断资本。在世界范围内，资本主义竞争和争夺的中心已开始从欧洲转向美国，因此在 19 世纪末的技术发展中，世界技术中心也开始从欧洲向美国转移。许多源于欧洲的技术成就，却最先在美国获得了推广和运用。如转炉和平炉炼钢法首先在英国和法国发明，美国却最先在生产中大规模采用；内燃机也首先是在欧洲发明的，美国却建立了第一座现代化的大型汽车制造厂；电力技术的实现和完善化也是在欧洲完成的，美国却最先建成了大型火力发电站和水力发电站。

历史表明，一个国家如果经济落后，那么这种落后的经济必然成为科学技术发展的障碍；如果经济发达，那么这种先进的经济往往能够促进科学技术的发展，并成为科学技术发展的保障。

4. 科学研究向群体化发展

随着科学的发展和技术的进步，以往科学研究的独立化倾向逐渐朝着群体联合的方向发展。这一现象可以说体现了科技发展的必然趋势，乃是一种历史的进步。科学家们在研究中体会到多学科的协作、智力的互补、相互的启发往往能够使疑难迅速化解，既获得了成果又赢得了时间，显然群体的力量和影响通常远比个人要大得多。当然，在有些情况下，个人进行独自研究仍然是需要的和不可替代的。

在遗传学的研究中，孟德尔几乎与世隔绝，在修道院的高墙里含辛茹苦地进行了 8 年试验，他所揭示的遗传定律竟被埋没达 34 年之久。摩尔根的基因理论，则是在他的带领下，由他和他的学生布里奇斯、斯特蒂文特和缪勒共同研究并在几年之内便取得了一系列突破性的成果。摩尔根和缪勒分别获得了诺贝尔奖，并在生物学界形成了著名的“摩尔根”学派。

化学在以往的研究中，基本上都是科学家各自独立地进行。在有机化学迅速发展的时代，群体研究较为多见。如合成染料——茜素和靛蓝，是在德国柏林大学的拜耳实验室取得成功的。在拜耳的领导下，格雷贝和利伯曼在实验室里合成了茜素。他们又和巴登苯胺烧碱公司的总技师卡罗合作，实现了茜素的工业化生产。拜耳后来又合成靛蓝，由巴登苯胺烧碱公司的郝依曼将其实现工业化生产。

聚会式的讨论也是一种群体化的研究方法。如爱因斯坦年轻时，喜欢利用晚上时间，约一些同事好友在一起，边喝茶边讨论学术问题，并把这种聚会称之为“奥林匹亚科学院”。爱因斯坦早年发表的一些论文，大都在这个“科学院”讨论过。在 20 世纪初，法国有一群十八九岁的年轻学生，组织了一个数学研究团体，他们激烈地争论和研究数学问题，被人们称之为“疯子集会”。然而，正是他们出版了可与欧几里得的《几何原理》相媲美的《数学原本》，形成了非欧几里得新学派之一。

5. 科学——技术——生产趋向紧密结合

18 世纪的蒸汽动力革命，虽有热力学理论的指导，但主要还是靠实践经验的积累，使蒸汽机逐步得到改进。到了 19 世纪下半叶，科学技术的一个显著特点就是在科学理论的指导下，技术逐渐成熟，迅速发展，并很快应用于生产，形成强大的生产力。如德国的合成染料即是如此。霍夫曼长期致力于苯胺的研究，因为苯胺是有机合成的基本原料。在钢铁工业大发展的形势下炼钢需要焦炭，炼焦需要大量的煤。在炼焦过程中生成了大量废弃物——煤焦油。如果能从煤焦油中提炼出化工原料，自然经济价值极其可观。1850 年霍夫曼成功地从煤焦油中提炼出苯胺。后来凯库勒提出了原子价的概念，并于 1858 年和英国的古柏分别确定了碳原子为 4 价，提出了碳链学说。1865 年凯库勒又提出了苯分子的环形结构理论。1874 年荷兰的范特霍夫进一步提出碳结合是其原子向四方伸出四只手的立体结构。在此期间，拜特洛也在“结

构化学”理论方面作出了杰出贡献。于是人们开始从结构化学观点出发，去合成人造染料，从而使有机化学进入“合成化学”新时代。在一系列科学理论的指导下，德国的煤化学研究很快合成了茜素、靛蓝等多种染料还合成了香料、药品和炸药，并迅速投入工业生产。

还有一种情况使科学——技术——生产实现了自然完美的有机结合。并亦成为这一历史时期的鲜明特征之一。如有的科学家取得研究成果，立即登记专利并马上转入实业。他们集科学家、工程师、企业家于一身，迅速将科研成果转化为产品。英国的帕金在霍夫曼门下首开纪录，合成了苯胺紫，他迅即转入实业并因此而致富。拜耳研究室的格雷贝和卡尔·利伯曼合成了茜素，并将其实现工业化生产亦属此列。

此外，转炉炼钢法的发明人贝塞麦也是将科学研究、设计制造、指导冶炼统一起来的专门家。至于大名鼎鼎的爱迪生、贝尔和电器西门子则更是将科学——技术——生产结合起来的典型人物。总之，在这一历史时期出现了一大批科学家兼工程师兼企业家式的人物，也可以说，这在当时代表了一种方向。

6. 研究机构的建立和科研团体的发展

研究机构的建立，必将推动科学技术的发展。成立专门的研究机构最早始于德国。1873年，德国建立了物理研究所，1877年建立了化工研究所，1879年又建立了机械研究所。在西门子的支持下，又于1884年正式建立了国立物理学研究所。同时德国还成立了一些规模较大的科学团体，如1886年成立的帝国物理技术研究院；1911年成立的威廉皇家学会，后改称马克斯·普朗克学会；1912年成立的德意志航空试验院。在德国的一些大学里也建立了科学实验室，如柏林大学的拜耳研究室在人工合成染料的研究中便获得了极大成功。

英国皇家学会，这是近代成立最早的科研团体。每届会长都由在科学上卓有建树、同时又能为人师表的科学家担任。自1878年以后，会长任期不超过5年，从1915年起，学会主席都是获得过诺贝尔奖的科学家。由于英国皇家学会的丰富经验和突出成就，因而使它在世界上享有很高的学术地位并赢得了极佳的信誉。到19世纪末，英国的科研团体达到100多个。在英国的一些著名大学都建立了实验室，因此大学不但是培养研究人才的基地，同时又是科学研究的基地。英国的剑桥大学有世界著名的实验室——卡文迪许实验室。

卡文迪许实验室1871年筹建，1874年建成，是为纪念卡文迪许由其家族捐款而建立的。主持这个实验室的历届主任，都是在科学上有杰出贡献的科学家，首届主任是麦克斯韦，第二届主任是瑞利，以后便是汤姆生、卢瑟福、布喇格等。这个实验室自建立以来，取得了一系列令人惊羡的成就，对物理学的发展起了十分出色的作用。卡文迪许实验室先后培养出26位诺贝尔奖金获得者。在20世纪30年代以前，英国、美国的著名物理学家大多出于这个实验室，此外还有很多其他国家的物理学家纷纷来此深造和工作。这个实验室有着优良的传统，它力求在新的领域中作出新的发现。在这里，领导精通业务，善于指挥，科研人员精明强干，并有自由讨论学术问题的空气。另一个好的传统就是艰苦奋斗、苦干实干。实验人员都要自己动手设计和制

造实验所用的关键性实验装置。于是许多非常有价值的物理实验用的仪器和设备，都是在这里产生的。因此，卡文迪许实验室不仅成为世界有名的科学研究实验室，而且成为最有声望的物理学研究和教育的中心之一。

在美国由于爱迪生的带动，工业实验室纷纷建立。1876年，爱迪生在门洛帕克建立了“发明工厂”这是美国也是世界巨大工业实验室的原型。在这里集中了上百个研究人员，获得了上千件的技术发明。随后美国于1901年建立了国家标准局。一些大企业、大财团开始建立了工业实验研究所，如洛克菲勒财团所属企业相继建立了研究所。贝尔在发明电话之后，为了解决通讯中的技术问题，也于1925年建立起贝尔电话实验室。

在这一时期还有一些著名的研究所建立起来。如1921年，在玻尔的倡议下成立了哥本哈根大学理论物理学研究所，在法国巴黎成立了巴斯德研究所等。

此外，诺贝尔成立了诺贝尔奖金委员会，索尔维首倡了索尔维物理学会议。在这一期间，国际数学界也组织起来，并使国际数学家大会定期召开形成制度。它们对科学技术的发现、发明予以奖励，为20世纪的科学技术发展作出了重大贡献。

7. 不同学科之间、不同技术之间相关发展日益突出

科学的各大学科之间不是彼此孤立的，技术的各部门之间也不是毫无联系的。如19世纪末20世纪初的物理学革命，导火索便是化学。1859年，德国的本生发现了各种元素都有自己特殊的光谱线。这项光谱技术不仅促进了化学的研究，同时也推动了物理学和天文学革命性的发展。后来人们开始用物理方法研究化学，于是出现了“物理化学”、“电化学”、“量子化学”、“分析化学”、“结构化学”等。许多交叉学科、边缘学科、新兴学科往往是各学科相互联系的产物。

电子技术的应用，为各行各业提供了充足而方便的能源和动力，促进了这些行业的发展。而各行各业的发展又必然会反作用于电力行业，或为其提供成套设备，或为其供应原材料。

炼钢技术的发展，使钢铁产量急剧增长。在此基础上建筑技术得到发展，出现了钢铁大厦、铁塔、桥梁、混凝土建筑等，不但改变了以往的建筑材料，而且形成了新的施工技术。

从煤焦油中提炼出苯胺，再将苯胺合成茜素和靛蓝，从而结束了由植物中提取染料的历史。染料合成技术于是发展起来。染料的大量生产，又推动了印染技术的进步。

18世纪的蒸汽动力革命导致了产业革命的发生。英国是最早发生产业革命的国家，继而扩展到欧洲、美洲。经过产业革命后，一批资本主义国家成为工业发达的国家，完成了工业化的历史任务。

英国的产业革命大约经历了70年（1760—1830年），法国的产业革命大约经历了30年（1830—1860年），德国的产业革命大约经历了35年（1840—1875年），美国的产业革命大约经历了25年（1865—1890年），日本的产业革命大约经历了32年（1868—1900年）。英国的产业革命首先从纺织工业开始，进而以纺织工业为中心扩展到其他行业，于是煤炭、钢铁、机械、无机化工等生产部门便迅速发展起来。法国的产业革命效法英国，首先从纺

织工业开始，但法国的铁路建设较早，所以在纺织业实现工业化时，钢铁、铁路、化工等生产部门都成为新兴工业。德国的产业革命始自铁路网的建设。铁路运输业的发达带动和促进了其他行业的发展。如机车制造、机器生产、通讯建设等。美国的产业革命在独立战争（1775—1783年）之后即已开始，但形成高潮是在南北战争（1861—1865年）之后。在此期间，首先发展起来的是钢铁工业、机器制造业和铁路运输业。日本的产业革命起于明治维新，日本政府在敞开国门、求知于世界的思想指导下，提出了“洋才和魂”、“殖产兴业”的口号。日本的产业革命也是从纺织工业开始的，然后扩大到机械生产、军工企业、铁路、电信等工业部门。这些国家的一个共同做法就是重视发展教育，包括各级各类的教育。因为科学技术的发展需要大量各方面的人才，尤其是高水平的人才。人才的获得只能通过教育来培养。1860年—1900年，美国、德国的经济实力之所以能后来居上超过英、法，是和大批人才的汇集紧密相关的。英国由产业革命后的霸主地位一再跌落，其中人才匮乏乃是主要原因之一。化学家帕金为找不到理想的助手而沮丧便是典型的一例。英国在17世纪中叶便成为欧洲科学技术的中心，到18世纪产业革命前后，英国集中了一大批杰出的科学家，其中有牛顿、戴维、道尔顿等，并出现发明家如瓦特等人，不仅使英国的科学技术居于世界首位，而且推动了英国产业革命的完成。1770—1830年间，法国涌现出众多的科技人才，其中有拉格朗日、拉普拉斯、库仑、拉瓦锡、盖·吕萨克、居维叶等，使法国的科学水平超过了英国，出现了空前的繁荣，巴黎成为当时世界科学活动的中心，法国这一时期的科技人才和科学研究为法国的产业革命奠定了基础。从19世纪70年代开始，德国迅速取得世界科技中心的地位。19世纪80年代德国的工业发展速度超过了英国。此时的德国可谓人才济济，有电气科学家维尔纳·西门子、有机化学工业的创始人霍夫曼、凯库勒以及拜耳等人。19世纪末，在科学技术的推动下，资本主义经济得到发展，其中美国在1900年工业经济规模已跃居排头。在此期间美国也出现了为数不少的科学家和发明家，如爱迪生、贝尔等人。在两次世界大战之间不少有声望的科学家和技术人才云集美国，世界科技中心也逐渐转移到美国。

中国，这个素有文明古国之称的东方大国，在1870—1918年这一段历史时期，它既不同于欧美，也不同于日本，在自己的历史进程中，它走着另外一条路——在封建主义的轨道上缓慢地爬行。在这一时期，可谓政局多变。仅在清末的51年中，光是皇帝就换了三个，依次是同治、光绪、宣统。随后又发生了戊戌变法，接着就爆发了辛亥革命，并于1912年成立了中华民国。但好景不长，袁世凯、张勋先后两次皇朝复辟，最后政权落入北洋军阀手中。

中国的科学技术曾有过辉煌的历史，但自明朝以后开始衰落，直到清朝后期1840年，终被帝国主义的大炮轰开了国门。这时统治阶级内部的一些有识人物开始领略了西方的科学技术，于是他们提出师法西洋的主张，并大力推行洋务“新政”，兴起洋务运动。在19世纪60年代至90年代，即同治、光绪两朝期间，洋务运动的代表人物上有恭亲王奕訢、军机大臣文祥等满族官僚权贵，下有曾国藩、左宗棠、李鸿章、张之洞等汉人督抚，而尤以李鸿章和张之洞在洋务派中的影响最大。洋务运动的发展，使一部分商人、买办和知识分子也加入到这一行列中来。“借法自强”和“中学为体，西学为用”成为洋务派共同的理论和口号。在兴办实业的过程中，军工企业最先上马，曾国藩于1861年创办了安庆军械所，1865年李鸿章在上海和南京创办了江

南制造总局和金陵机器局。1866 年左宗棠创建福州船政局，崇厚创建天津机器局，张之洞创建湖北枪炮厂。其后，民用企业也开始发展起来。1872 年，李鸿章在上海创立轮船招商局，1878 年又开办了开平矿物局、上海机器织布局 and 天津电报总局。张之洞在 1890 年创办汉阳铁厂。这类企业带有明显的封建属性，经营管理上亦带有浓重的官僚政治色彩。中国的官僚资产阶级从此出现。与此同时，民族资本主义也开始产生。1869 年，上海发昌机器厂以机床生产方式代替了传统手工业，1872 年华侨商人陈启源于广东开办了继昌隆缫丝厂。以后又有一批缫丝、火柴、印刷、面粉、轧花、采矿、运输等企业兴办起来。

尽管资本主义的生产方式在中国已经出现并获得了初步发展，但中国未能形成产业革命的高潮，更没有形成庞大完整的工业体系。对于世界性的科技发展而促成经济的腾飞这样一个绝好的机遇，中国未能把握。因此，到洋务运动破产之时，中国的科学技术大约落后于西方 400 年。造成中国科技落后、经济发展迟缓的原因，细细想来，主要有三：

一是封建统治势力和小农经济势力的强大，阻碍了科学技术的进步和经济的发展。在洋务运动中，清政府内部洋务派和顽固派之间围绕开设天文算学馆和兴筑铁路的斗争便极为典型。1866 年（同治五年），奕訢等人奏请在已创办的新式学堂——京师同文馆内设立天文算学馆，招收科甲正途人员入学，聘请洋员任教。以倭仁为首的顽固派坚决反对，其理由是：立国的根本不在权谋技艺，而在齐一人心、崇尚礼义。并认为古往今来，从无凭恃技术而能振起衰弱的。若为求得一点外国末技而令知书识礼之人师事夷人，将使正气不伸、邪气愈炽，用不了几年，中国人就会全部归心于外国，“变而从夷”。至于请洋人教习则反对更甚。天文算学馆虽最终建立，但实乃空有其名。洋务派倡修铁路，顽固派竭力阻止，他们说修铁路将破坏田园、庐墓、风水，于民不便。并认为铁路一旦修通，外国入寇就会朝发而夕至，很快深入中国腹地，这不啻开门揖盗。双方争论了近 10 年时间，直到 1881 年（光绪七年），李鸿章才修了一条长 11 公里的唐胥铁路（唐山到胥各庄）。通车时，顽固派竟要禁止使用机车牵引，说机车会震动山川龙脉，使诸神不宁。其理由之荒谬令人啼笑皆非。

长达两千多年的封建社会，使中国成为自给自足的小农经济占主导地位的社会。小农经济的封闭性扼制了商品市场的发展。封建社会长期的重农抑商政策，使人们对科学技术难以产生迫切的需求，因而科学技术发展也便失去了根本动力。

二是重仕轻技、重道轻器，成为科学技术发展的巨大障碍。自从隋朝首开科举制先河以来，直到 1906 年科举制废止，其间经历了 1300 多年。在这漫长的时间里，教育逐渐成为科举的附庸。虽然清朝的学校不少，有中央的国子监、八旗子弟的官学、各地的府学、州学、县学以及大小书院、私馆、经馆等。但各类学校都是以科举为方向，视做官为目标。这种开科取士的做法，使官本位制不断强化。而各类学校教习的内容皆是四书五经和八股文章。至于到了宋明时期，程朱理学对人们思想的禁锢更为厉害。封建社会的特点是“人治”，而封建官僚历来所重视的是“治人”，他们歧视那些研究科学技术的知识分子和各类工匠，“巫、医、乐师、百工之流，君子不齿”。对有独立思想的知识分子又大兴文字狱，横加迫害和摧残。于是在功名利禄的引诱面前和残酷迫害的淫威之下，迫使大批知识分子埋头研读儒家经典，为

步入仕途而熬煎。封建社会的文人，由于自幼受着重人文轻自然，重伦理轻科学，尚空谈轻实践的思想教育，因此对科学技术不感兴趣，于是也就不会有献身科学技术的热忱（纵然有之，实力寥寥），自然也就不会发生产业革命。

三是闭关锁国，不尚往来，阻碍了信息的传递和科学技术的交流。在清定都北京直到鸦片战争的近 200 年间，竟紧闭国门，与国外的贸易往来、科技联系和文化交流几乎断绝。清初实行“迁海令”意在镇压人民的抗清斗争和防御外国的侵略，但完全停止了沿海与外界的联系，因而丧失了学习西方加快发展的大好时机。康熙皇帝在 1683 年（康熙二十二年）废除了“迁海令”，开放沿海四口对外通商。到乾隆时于 1757 年（乾隆二十二年）又关闭三口，仅留广州一口通商。这种紧闭国门的举措根本起不到防御侵略的作用，然而适得其反，自我封闭只能加速落后，束缚经济的发展，将先进的科学技术拒于国门之外。恰在这时，欧洲的科学技术取得了一系列重大成果。如 1665 年（康熙四年）英国的胡克（1635—1703）首次用自制的显微镜发现了细胞。不久，荷兰的列文霍克（1632—1723）用显微镜首次观察到细菌。1666 年（康熙五年）牛顿提出了万有引力定律，其后又提出了牛顿力学三定律，建立了经典力学理论。18 世纪蒸汽机的发明和改进，引发了欧美的产业革命，导致了机器大工业的形成、轮船的问世、火车的诞生……这一切科学技术的巨大变革对当时的中国似乎并未产生多大的振动和影响，这无疑是一个极大的不幸和悲哀。溯观中外历史，没有一个国家是因为闭关锁国而富国强兵的。科学无国界，科技的发展依赖学术的交流和国家的开放。中国历史上的春秋战国是一个开放的时代，于是才有诸子百家；盛唐的文明也正是执行开放政策和政治贤明的结果；古希腊的文明，得益于没有国界的约束；正由于开放政策和思想自由才出现了欧洲的文艺复兴；亚洲的日本因明治维新实行了开放政策，才挤上了产业革命的末班车。

