



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



21世纪物理规划教材

基础课系列

电磁学

Electromagnetism

陈秉乾 编著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



21世纪物理规划教材

基础课系列



电磁学

Electromagnetism

陈秉乾 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/陈秉乾编著. —北京:北京大学出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-301-24592-7

(21 世纪物理规划教材. 基础课系列)

I. ①电… II. ①陈… III. ①电磁学—高等学校—教材 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 176467 号

书 名: 电磁学

著作责任者: 陈秉乾 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-24592-7/O · 0992

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021 出版部 62754962

印刷者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×960 毫米 16 开本 27.5 印张 640 千字

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 55.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

目 录

绪论	(1)
第一章 静电场	(12)
§ 1.1 库仑定律	(12)
§ 1.1.1 库仑的电斥力扭秤实验和电引力单摆实验,电力平方反比律	(13)
§ 1.1.2 库仑定律的表述和物理内涵,电力叠加原理	(17)
§ 1.1.3 库仑定律的成立条件、适用范围和理论地位	(19)
§ 1.1.4 电荷的基本性质,电荷守恒定律	(21)
§ 1.1.5 卡文迪什-麦克斯韦精确验证电力平方反比律的示零实验和理论分析	(24)
§ 1.2 电场,电场强度,场强叠加原理	(31)
§ 1.2.1 超距作用和近距作用	(31)
§ 1.2.2 电场,电场强度,场强叠加原理	(33)
§ 1.2.3 用场强叠加原理求场强	(34)
§ 1.3 静电场的高斯定理	(40)
§ 1.3.1 矢量场的性质,源与旋,通量与环流,高斯定理与环路定理	(40)
§ 1.3.2 静电场的高斯定理	(41)
§ 1.3.3 用高斯定理计算场强	(45)
§ 1.4 静电场的环路定理,电势	(52)
§ 1.4.1 静电场的环路定理	(52)
§ 1.4.2 电势	(54)
§ 1.4.3 电势叠加原理	(57)
§ 1.4.4 电势的计算	(58)
§ 1.4.5 电势的梯度,场强和电势的微分关系	(61)
本章小结	(66)
习题	(68)
第二章 静电场中的导体和电介质	(73)
§ 2.1 概述	(73)
§ 2.2 静电场中的导体	(74)
§ 2.2.1 导体的静电平衡条件,静电平衡导体的基本性质	(74)
§ 2.2.2 导体空腔与静电屏蔽	(77)

§ 2.2.3 静电场边值问题的唯一性定理	(81)
§ 2.3 电容和电容器	(82)
§ 2.3.1 孤立导体的电容	(83)
§ 2.3.2 电容器及其电容	(83)
§ 2.3.3 电容器的串并联	(87)
§ 2.4 电介质的极化	(88)
§ 2.4.1 极化现象	(88)
§ 2.4.2 极化的微观机制:分子电偶极子模型,有极分子和无极分子,取向极化 和位移极化	(89)
§ 2.4.3 极化的定量描绘——极化强度矢量 $\mathbf{P}$,极化电荷 q' ,退极化场 $\mathbf{E}'$	(91)
§ 2.4.4 极化强度矢量和极化电荷分布的关系	(92)
§ 2.4.5 极化强度矢量 $\mathbf{P}$ 和总场强 $\mathbf{E}$ 的关系——极化规律	(95)
§ 2.5 有电介质存在时的静电场	(96)
§ 2.5.1 电位移矢量 $\mathbf{D}$,有电介质时静电场的完备方程组	(96)
§ 2.5.2 有电介质时静电场的计算	(99)
§ 2.6 静电能	(104)
§ 2.6.1 带电体系的静电势能	(105)
§ 2.6.2 电容器储存的静电能	(109)
§ 2.6.3 静电场的能量	(110)
§ 2.6.4 静电能的计算	(111)
本章小结	(114)
习题	(117)
第三章 直流电	(121)
§ 3.1 电流,电流强度,电流密度,电流的连续方程,电流的恒定条件	(121)
§ 3.1.1 电流,电流强度,电流密度矢量	(121)
§ 3.1.2 电流的连续方程,电流的恒定条件	(123)
§ 3.2 欧姆定律,焦耳定律,德鲁德金属导电的经典电子论	(124)
§ 3.2.1 欧姆定律,电阻	(124)
§ 3.2.2 焦耳定律	(127)
§ 3.2.3 德鲁德的金属导电经典电子论	(128)
§ 3.3 电源	(131)
§ 3.3.1 电源的电动势	(131)
§ 3.3.2 电源的路端电压,全电路欧姆定律	(133)
§ 3.3.3 电源的功率	(134)
§ 3.3.4 直流电路中恒定电场的作用	(135)
§ 3.3.5 各种直流电源	(137)

§ 3.4 直流电路,基尔霍夫方程组	(141)
§ 3.4.1 简单电路——串并联电路	(141)
§ 3.4.2 复杂电路,基尔霍夫方程组	(144)
本章小结	(147)
习题	(148)
第四章 恒定磁场	(152)
§ 4.1 指南针——中国古代的伟大发明	(152)
§ 4.2 奥斯特实验	(155)
§ 4.2.1 奥斯特实验	(155)
§ 4.2.2 相关实验和研究课题	(156)
§ 4.3 毕奥-萨伐尔定律	(159)
§ 4.3.1 毕奥-萨伐尔定律的建立	(159)
§ 4.3.2 磁感应强度 B	(163)
§ 4.3.3 载流回路的磁场(用毕-萨定律计算磁场)	(164)
§ 4.3.4 极矢量与轴矢量	(171)
§ 4.4 恒定磁场的高斯定理	(172)
§ 4.4.1 磁感应线(磁场线)	(172)
§ 4.4.2 恒定磁场的高斯定理	(173)
§ 4.4.3 磁矢势, A-B 效应	(175)
§ 4.4.4 磁单极子	(177)
§ 4.5 恒定磁场的安培环路定理	(178)
§ 4.5.1 恒定磁场的安培环路定理	(178)
§ 4.5.2 用安培环路定理计算磁场	(181)
§ 4.6 安培定律	(184)
§ 4.6.1 安培定律的建立	(184)
§ 4.6.2 安培定律=毕萨定律+安培力公式	(192)
§ 4.6.3 磁场对载流线圈的作用,磁矩,磁电式电流计,直流发电机	(194)
§ 4.7 洛伦兹力	(202)
§ 4.7.1 洛伦兹力	(202)
§ 4.7.2 带电粒子在均匀、恒定磁场中的运动,回旋加速器,质谱仪	(206)
§ 4.7.3 电子的发现及其基本性质的实验测量——J. J. 汤姆孙阴极射线实验, 考夫曼 β 射线实验,密立根油滴实验	(214)
§ 4.7.4 霍尔效应,量子霍尔效应	(219)
§ 4.7.5 带电粒子在非均匀磁场中的运动——漂移,浸渐不变量, 等离子体的磁约束,逃逸锥	(221)
本章小结	(225)

习题	(228)
第五章 磁介质	(233)
§ 5.1 物质磁性的来源,磁荷观点与分子电流观点	(233)
§ 5.2 顺磁质和抗磁质	(235)
§ 5.2.1 顺磁质	(235)
§ 5.2.2 抗磁质	(235)
§ 5.3 磁化的规律	(238)
§ 5.3.1 磁化的描绘——磁化强度矢量 $\mathbf{M}$, 磁化电流 I_M , 附加磁场 $\mathbf{B}'$	(238)
§ 5.3.2 磁化强度矢量 $\mathbf{M}$ 与磁化电流 I_M 的关系	(239)
§ 5.3.3 磁化强度矢量 $\mathbf{M}$ 与总磁场 $\mathbf{B}$ 的关系——磁化的规律	(242)
§ 5.4 有磁介质存在时,磁场的高斯定理和安培环路定理	(243)
§ 5.5 磁荷观点	(247)
§ 5.6 铁磁质	(250)
§ 5.6.1 铁磁质的磁化规律	(250)
§ 5.6.2 铁磁质的磁滞损耗	(253)
§ 5.6.3 铁磁质的分类及其应用	(254)
§ 5.6.4 铁磁质的磁化机制	(256)
§ 5.7 磁场的边界条件	(257)
本章小结	(258)
习题	(259)
第六章 电磁感应	(261)
§ 6.1 法拉第电磁感应定律	(261)
§ 6.1.1 电磁感应现象的发现	(261)
§ 6.1.2 法拉第对电磁感应的研究,法拉第的场论思想,法拉第寻找联系 追求统一解释的不懈努力	(263)
§ 6.1.3 法拉第电磁感应定律	(267)
§ 6.1.4 楞次定律	(270)
§ 6.1.5 涡电流,电磁阻尼与电磁驱动	(271)
§ 6.2 动生电动势与感生电动势,洛伦兹力与涡旋电场	(272)
§ 6.2.1 动生电动势,交流发电机	(273)
§ 6.2.2 感生电动势,涡旋电场,电子感应加速器	(277)
§ 6.3 自感与互感	(284)
§ 6.3.1 自感系数和互感系数	(284)
§ 6.3.2 自感磁能和互感磁能	(292)
§ 6.3.3 磁场的能量和能量密度	(294)

§ 6.4 暂态过程	(295)
§ 6.4.1 RL 电路的暂态过程	(295)
§ 6.4.2 RC 电路的暂态过程	(297)
§ 6.4.3 RLC 电路的暂态过程	(299)
§ 6.4.4 灵敏电流计	(300)
§ 6.5 超导体	(303)
§ 6.5.1 零电阻现象	(303)
§ 6.5.2 迈斯纳效应	(304)
§ 6.5.3 磁通量子化,约瑟夫森效应	(306)
§ 6.5.4 超导体的唯象理论——二流体模型和伦敦方程	(306)
§ 6.5.5 BCS 理论介绍	(311)
§ 6.5.6 高 T_c 超导材料	(312)
本章小结	(312)
习题	(315)
第七章 交流电	(319)
§ 7.1 交流电概述	(319)
§ 7.1.1 交流电的基本形式是简谐交流电	(319)
§ 7.1.2 简谐交流电的特征量	(321)
§ 7.1.3 交流电路的基本假设	(323)
§ 7.2 交流电路中的元件	(325)
§ 7.2.1 交流电路中的电阻元件	(325)
§ 7.2.2 交流电路中的电感元件	(326)
§ 7.2.3 交流电路中的电容元件	(327)
§ 7.3 元件的串并联——矢量图解法	(328)
§ 7.3.1 一维同频简谐量的叠加——三角函数法	(328)
§ 7.3.2 串并联交流电路的矢量图解法	(329)
§ 7.4 交流电路的复数解法	(335)
§ 7.4.1 复数的基本知识	(335)
§ 7.4.2 交流电的复数表示	(337)
§ 7.4.3 串并联交流电路的复数解法	(338)
§ 7.4.4 串并联交流电路的应用	(340)
§ 7.4.5 交流电路的基尔霍夫方程组及其复数形式	(342)
§ 7.4.6 交流电桥	(343)
§ 7.4.7 有互感的电路计算	(346)
§ 7.5 谐振电路	(346)
§ 7.5.1 RLC 串联谐振电路	(346)

§ 7.5.2 频率选择性,通频带宽度	(348)
§ 7.5.3 Q 值的物理意义	(350)
§ 7.5.4 RLC 并联谐振电路	(351)
§ 7.6 交流电的功率	(352)
§ 7.6.1 瞬时功率和平均功率	(352)
§ 7.6.2 功率因数 $\cos \varphi$	(354)
§ 7.7 变压器原理	(356)
§ 7.7.1 理想变压器	(356)
§ 7.7.2 电压变比公式	(357)
§ 7.7.3 电流变比公式	(358)
§ 7.7.4 阻抗变比公式	(359)
§ 7.7.5 功率传输效率	(359)
§ 7.7.6 各种变压器	(359)
§ 7.8 三相交流电	(360)
§ 7.8.1 三相交流电,相电压与线电压	(360)
§ 7.8.2 三相电路中负载的连接	(361)
§ 7.8.3 三相交流电的功率	(362)
§ 7.8.4 三相感应电动机的基本原理	(362)
本章小结	(364)
习题	(366)
第八章 麦克斯韦电磁场理论	(370)
§ 8.1 简要的历史回顾	(370)
§ 8.1.1 两个基本问题,两种不同观点,两类理论探索,两个学派	(370)
§ 8.1.2 韦伯的基本电磁力公式——超距作用的电磁理论	(372)
§ 8.1.3 麦克斯韦建立电磁场理论的三篇论文	(374)
§ 8.1.4 洛伦兹力公式——基本的电磁力公式	(379)
§ 8.2 麦克斯韦电磁场方程组	(380)
§ 8.2.1 对象,目标,方法,数学手段	(380)
§ 8.2.2 位移电流、安培环路定理的推广	(380)
§ 8.2.3 麦克斯韦电磁场方程组	(383)
§ 8.3 电磁波,赫兹实验	(387)
§ 8.3.1 电磁波及其性质	(387)
§ 8.3.2 赫兹电磁波实验	(390)
§ 8.3.3 电磁辐射	(394)
§ 8.3.4 电磁波谱	(396)
§ 8.4 几点说明	(397)

本章小结	(399)
习题	(400)
第九章 匀速运动点电荷的电场与磁场	(401)
§ 9.1 狭义相对论的基本概念,主要结论和相关公式	(401)
§ 9.2 匀速运动点电荷的电场	(404)
§ 9.2.1 狭义相对论与电磁学	(404)
§ 9.2.2 匀速运动点电荷对静止检测点电荷的作用力	(405)
§ 9.2.3 匀速运动点电荷的电场	(408)
§ 9.3 匀速运动点电荷的磁场	(409)
§ 9.3.1 两运动点电荷之间的作用力	(409)
§ 9.3.2 匀速运动点电荷的磁场	(412)
§ 9.4 电场与磁场的相对论变换	(413)
本章小结	(413)
附录	(415)
附录一 电磁学单位制	(415)
附录二 矢量分析	(418)
习题答案	(422)
参考书目	(430)

绪 论^{①②}

伴随着电磁现象的观测、电磁相互作用规律的发现、物质电磁性质的研究、电磁场理论的建立以及电磁技术的广泛应用等等,在物理学中开辟了一个区别于力学、热学、光学的新领域——电磁学。

物质由分子、原子组成,原子由带正电的原子核和带负电的电子组成,电子和核都在不断运动,物质的电磁结构是物质的基本组成形式。带电物体之间、载流物体之间存在着电磁力,在原子、分子的尺度范围内电磁力特别重要(万有引力可略,强相互作用和弱相互作用是短程力,只在原子核内起重要作用),对原子、分子的结构起着关键作用,在很大程度上决定了物质的物理性质和化学性质。实际上,宏观范围内的各种接触力,如摩擦力、弹性力、黏滞力等都是原子之间电磁作用的结果。电磁过程是自然界的基本过程之一,带电粒子因受电磁作用在各种特定条件下的运动,形成了电工学、电子学、等离子体物理学和磁流体力学等等许多蓬勃发展的分支学科。19世纪,法拉第和麦克斯韦建立的电磁场理论及其实验验证,深刻地揭示了电磁作用的机制和本质,证实了电磁场是区别于实物的又一种客观存在,得出了光是电磁波的重要结论,完成了电、磁、光现象的理论大综合,成为物理学中继牛顿力学之后的又一划时代的伟大贡献。

与此同时,在热机应用导致的第一次全球性技术革命之后,电磁技术的应用迎来了以电气化和无线电通信为标志的全球性技术革命。由于电磁技术具有转化效能高、传递迅速准确、便于控制等优点,使得电磁技术在能源的开发、输送、使用,机电控制和自动化,信息传递以及各种电磁测量等方面都具有重要意义。电力、电子、信息等产业的发展,电磁材料的研制,电磁测量技术的应用等等,对物质生产、技术进步、社会发展乃至人类文明带来了难以估量的广泛深刻影响。

由此可见,作为经典物理的基本组成部分之一,电磁学具有重要的历史地位和现实意义,与近代自然科学、技术科学的许多领域都有着密切的联系,电磁学是一门重要的基础课程。

古代,对电现象的观察始于雷电和摩擦起电,对磁现象的观察始于磁石吸铁和磁针指南。

中国古代^②,早在商晚期武丁时代(公元前1250—前1192年)的甲骨文中,就有“𠩺,𠩺,𠩺”三字,它们逐步演变成现今的“电,雷,磁”三字,这是我国留存至今的对电、雷、磁的最早

① 参看,赵凯华、陈熙谋,《电磁学》“绪论”部分,高等教育出版社,1986年。

② 参看,陈秉乾:中国古代在电学和磁学方面的成就,《物理教学》,2005年12月。

文字记载.

我国古籍中对雷击伤人毁物有生动的描绘. 如“雷者, 火也. 以人中雷而死, 即询其身, 中火则须发烧焦, 中雷则皮肤灼烧”(东汉王充[公元 27—97 年]《论衡》). “内侍李舜举家曾为暴雷所震. ……及雷止, 其舍宛然, 墙壁窗纸皆黔. 有一木格, 其中杂贮诸器, 其漆器银钹者, 银悉熔流在地, 漆器曾不焦灼. 有一宝刀, 极坚钢, 就刀室中熔为汁, 而室亦俨然”(北宋沈括[公元 1031—1095 年]《梦溪笔谈》). “雷火所及, 金石销熔, 而漆器不坏”(明末方以智). 已经注意到导体(银, 铜)与绝缘体(漆, 木)受雷击后的不同遭遇. 为了避雷, 早在三国、南北朝的古籍中就有“避雷室”的记载. 在我国的一些古塔或殿宇中, 尖顶涂以金属膜, 经导电材料制成的塔心柱(称为“雷公柱”)直达基底贮藏金属的“龙窟”, 构成有效的避雷装置.

关于绝缘体摩擦后能吸引轻小物体的静电现象, 早在西汉末年《春秋考异邮》(约公元前 20 年)中就有“瑇瑁吸褚”的记载(“瑇瑁”, 玳瑁; “褚”, 芥也, 草屑). 此后, 又有“顿牟掇芥, 磁石引针”(王充《论衡》)(“顿牟”, 玳瑁); “今人梳头, 脱著衣时, 有随梳解结有光者, 亦有咤声”(西晋张华《博物志·杂说》, 公元 290 年); “琥珀, 惟以手心摩热拾芥为真”(南北朝陶弘景[公元 452—536 年]《名医别录》); “猫……黑者, 暗中逆循其毛, 即若火星”(唐段成式《酉阳杂俎》, 公元 863 年); 等等, 记述了静电现象的种种表现.

我国古代对磁石吸铁的认识比静电现象要早得多, 散见于古籍之中. 如春秋《管子·地数》(公元前 600 多年)“上有慈石者, 其下有铜金”(先秦古籍中称磁石为慈石); 战国末期《吕氏春秋·精通》(约公元前 239 年)“慈石召铁, 或引之也”; 西汉刘安(公元前 179—前 122 年)《淮南子》“若以慈石之能连铁也, 而求其引瓦则难矣”, “磁石能引铁, 及其于铜则不行也”, 等等.

魏邨道元《水经注》中提到, 秦始皇建阿房宫时, 用磁石造北阙门, 便身怀刀刃者入门被吸, 以防刺客. 汉司马迁《史记·扁鹊仓古列传》中说, “齐王侍医遂病, 自炼五石服之”, 五石中包括磁石. 东汉《神农本草经》指出“慈石味辛酸寒”, 可以入药. 宋、明还有利用磁石治小儿误吞针和进行外科手术的记载. 这些就是磁石最早的应用.

指南针是我国古代四大发明之一, 应用广泛, 影响深远. 关于指南针的发明与应用以及人工磁化的方法、地磁倾角和地磁偏角的发现等等, 详见第四章 § 4.1.

西方, 早在公元前 585 年, 希腊哲学家泰勒斯(Thales)就记载了用木块摩擦过的琥珀能吸引碎草等轻小物体, 以及天然磁矿石能吸引铁的现象.

1600 年, 英国女王御医吉尔伯特(W. Gilbert)出版《磁石论》一书, 他发现, 不仅琥珀和煤玉经摩擦后能吸引轻小物体, 而且金刚石、蓝宝石、硫黄、硬树脂、明矾等经摩擦后也都能吸引轻小物体, 但是它们与磁石不同, 不具有吸铁和指南北的性质. 为了表明与磁性的不同, 他把这种性质用琥珀的希腊文表示, 这就是西文中“电”(electric)的来源. 西文中的“磁”则来源于发现磁矿的小亚细亚的一个地名. 吉尔伯特制作了第一只验电器, 这是一根中心固定可转动的金属细棒, 当摩擦后带电的琥珀靠近时, 金属细棒可转向琥珀. 吉尔伯特还认识到地球是个大磁体.

第一台摩擦起电机是德国物理学家、著名的马德堡半球实验的表演者盖利克(O. von Guericke)在1660年发明的。这是一个可以绕垂直中心轴旋转的大硫黄球,用干燥的手掌摩擦转动的球体,就会在球面上产生大量电荷。1675年牛顿用玻璃球代替硫黄球,1705年豪克斯比(F. Hauksbee)用空心玻璃球代替实心玻璃球,并将起电机的垂直轴改成水平轴。

1729年英国的格雷(S. Gray)发现,插在带电玻璃管端部的软木塞也能吸引羽毛,他意识到木塞不是靠摩擦而是靠传导带电的。于是,他用金属线、细丝线等进行试验,结果发现有的能将电传到远处,有的则完全不行,从而发现了导体和绝缘体的区别:金属可导电,丝绸不导电。格雷曾用导体将电传到约24米远处。格雷还做了第一次人体带电实验。

1733年法国的杜菲(C. F. du Fay)发现绝缘的金属也可摩擦起电,从而得出所有物体都可摩擦起电。杜菲甚至以自己的身体来做实验,他让助手把自己用绝缘的丝质绳吊起来,使自己身体带电,当助手靠近他时,杜菲突然感到针刺般的放电袭击,并产生噼啪声,暗处还可以看到放电的火花。杜菲最重要的发现是电有两种。杜菲改进了吉尔伯特的验电器,用金箔代替金属细棒。杜菲观察到摩擦过的玻璃棒接触金箔后对金箔的排斥作用,而摩擦过的硬树脂对此金箔却产生明显的吸引。杜菲意识到不同材料经摩擦后产生的电不同,分别称之为玻璃电(即正电)和松脂电(即负电),并由此总结出静电作用的基本特性:同性相斥,异性相吸。杜菲把电想象为二元流体,当它们结合时,彼此中和。

1745年荷兰莱顿大学的穆欣布罗克(P. von Musschenbroek)发明了贮存电的莱顿瓶。莱顿瓶是在玻璃瓶内、外各贴一层金属箔,形成以玻璃为电介质的电容器,另有一金属棒从瓶栓插入,棒上端附金属球,棒下端附金属链,链与瓶内层的金属箔接触。莱顿瓶的电容量不大,但可承受的电压很高。法国的诺莱(J. A. Noilet)用莱顿瓶在巴黎大教堂前做了一个当时最为壮观的演示实验,在路易十五的皇室成员面前,令七百个修道士手拉手排成一条九百英尺^①长的队伍,一端的人接触带电莱顿瓶的外部,当另一端的人接触莱顿瓶的另一极时,七百个修道士因电击全部跳了起来,令人信服地演示了电的威力。

1750年前后,法国的埃皮努斯(F. U. T. Aepinus)在实验中发现了静电感应现象。

1747年美国物理学家富兰克林(B. Franklin)根据自己的实验提出了单元电流体理论,他认为,在正常条件下电是以一定量存在于所有物体之中的一种流体,可以流动,摩擦使电流体从一物体转移到另一物体,缺少电流体的物体带负电,多余电流体的物体带正电,电流体可以从一物体转移到另一物体,正电、负电可以相互抵消,但不能创造,任何孤立物体的电流体的总量是不变的,这就是通常所说的电荷守恒。尽管从现代的观点看,电流体并不存在,单元电流体理论并不正确,但富兰克林提出的正、负电概念(用以取代杜菲的玻璃电和松脂电)以及电荷守恒的观点是合理的内核,沿用至今。富兰克林还观察到导体的尖端更容易放电。

富兰克林的另一个贡献是统一了天电和地电,彻底破除了人们对雷电的迷信。早在1749年,他就注意到雷闪和放电有许多类似之处。此后某日,正当富兰克林将几只莱顿瓶连

^① 1英尺(ft)=0.3048 m.

起来做实验之时,夫人进来观看,不慎触及莱顿瓶,突见飞出一团电火,伴随一声轰鸣,夫人被电击倒地,后经抢救幸免脱险.这起事故给富兰克林留下了深刻的印象,更加深了他研究的决心.1752年富兰克林做了著名的“风筝实验”,他在风筝的骨架上固定一根尖细的铁丝,使它伸出1尺有余,风筝的拉线是一根粗糙的麻绳,麻绳与手拉的丝绳(非导体)经一把金属钥匙相连.在阴云密布、雷电交加的日子,他跑到郊外,把风筝放入云层,他发现,当闪电时,被雨打湿的麻绳上的纤维向四周翘起,用指关节靠近钥匙,火花向手上飞来,他确认这就是电.进而,富兰克林用钥匙上的电给莱顿瓶充电、使酒精燃烧等等,证实天电与地电相同.但是,雷电实验十分危险,1753年圣彼得堡的里曼(G. W. Richmann)在做大气闪电实验时就不幸被雷击而亡,以身殉职.后来,富兰克林提出了用避雷针保护建筑物的建议,1759年捷克的狄维施(P. Divisch)创制了第一根避雷针,1760年富兰克林在费城一座大楼上立起避雷针.

至此,静电的基本现象(摩擦起电,正电与负电的区分,导体与绝缘体的区分,天电与地电的统一,以及静电感应等)已经发现,静电作用的基本特征(同性相斥,异性相吸)已经揭示,静电基本仪器(验电器,摩擦起电机,贮电器——莱顿瓶)已经发明,电荷守恒的观点已经提出,人们期待着以这些初步的成果为基础,进一步揭示电作用的定量规律,逐步建立严密的电科学.

18世纪后期,在较好实验设备的条件下,开始了对静止电荷相互作用规律的定量研究.1760年伯努利猜测电力与万有引力一样,服从平方反比定律.1755年富兰克林观察到一个重要现象:将细线悬挂的带电软木小球放在带电金属筒外时,小球明显地受电力作用,细线倾斜,将带电软木小球放入筒内时则几乎不受电力作用,细线竖直下垂.1760年普里斯特利(J. Priestley)重复了富兰克林的实验,确定带电金属筒内表面没有电荷、对内部不产生电力,并由此判断电力应与距离平方成反比,但未能予以证明.1769年罗宾孙(J. Robinson)设计了一个杠杆装置,利用活动杆所受重力与电力的平衡,从支架的平衡角度,得出两个同号电荷的作用力与距离平方成反比,即 $f \propto 1/r^{2+\delta}$,实验得出 $\delta = 0.06$,这是电力的第一次直接测量.1773年卡文迪什(H. Cavendish)将两同心金属球用导线相连充电,然后取走导线打开外球壳,检测内球是否带电,结果为零,根据实验的精度推算出 $\delta < 0.02$,但没有发表,不为人知.1873年麦克斯韦(J. C. Maxwell)整理卡文迪什的遗稿时才发现有关资料,重新进行了详尽的理论分析和实验工作,得出 $\delta < 5 \times 10^{-5}$,并公之于世(详见 § 1.1.5).1785年库仑(C. A. Coulomb)设计了精巧的扭秤实验,直接测量得出两同号静止点电荷之间的排斥力与其间距离的平方成反比, $\delta < 0.04$.关于两异号静止点电荷之间的吸引力,因用扭秤测量时的平衡不稳定,库仑设计了电引力单摆实验,得出电引力也与距离的平方成反比.库仑的实验得到了举世的公认,库仑定律成为电磁学中第一个基本定律,从此电学的研究开始进入科学行列(详见 § 1.1.1).

库仑定律建立之后,静电学的解析理论也有了重要进展.1777年拉格朗日(J. L. Lagrange)用引力势 V 描述引力场, V 的负梯度就是引力.1789年拉普拉斯(P. S. M. Laplace)给出引力势方程 $\nabla^2 V = 0$,称为拉普拉斯方程.1813年泊松(S. D. Poisson)把引力势理论移

植到静电学,并给出泊松方程 $\nabla^2 V = -4\pi\rho$,其中 V 是电势, ρ 是体电荷密度.1828年给出了格林(G. Green)定理.1831年给出了矢量分析的高斯(C. F. Gauss)定理,1839年高斯证明了静电学的高斯定理.1854年给出了矢量分析的斯托克斯(G. G. Stokes)定理,同年,麦克斯韦予以证明.

18世纪后期电学的另一个重要发展是意大利物理学家伏打(A. G. Volta)发明电池.此前,电学实验都采用摩擦起电机或莱顿瓶,它们只能提供短暂的电流脉冲.1780年意大利解剖学家伽伐尼(L. Galvani)偶然观察到,在放电火花附近与金属相接触的蛙腿发生抽动.进一步的实验发现,当相连接的两种金属的两端跨接在蛙腿两侧时,也会使之抽动.伽伐尼把这种接触电现象误认为是“动物电”,认为蛙腿的肌肉和神经起到了莱顿瓶外箔和内箔的作用,当两极与金属相连时放电使肌肉收缩.1792年伏打仔细研究后认为,产生电流的先决条件是两种不同金属插在溶液中并构成回路,蛙腿既是“溶液”又是“检流计”.据此,1799年伏打制造了第一个能产生持续电流的化学电池,这是一系列按同样顺序叠起来的银片和锌片,其间夹了用盐水浸泡过的硬纸板,组成一根柱体,叫做伏打电堆,当导线连接两端时,导线中产生持续的电流.为了进一步阐明电流来自两种金属的接触而非来自动物的肌肉和神经,伏打比较了各种金属,按金属间相互的接触电动势把各种金属排列成表,如锌—铅—锡—铁—铜—银—金—石墨等,只要将其中任意两种金属接触,排在前面的金属必带正电,排在后面的必带负电.此后,在伏打工作的推动下,各种化学电源蓬勃发展起来.1822年泽贝克(J. J. Seebeck)发现,甚至不用导电溶液,只要把铜线的两端和一根别种金属(如铋)线的两端牢固地连接起来构成回路,并维持两个接头于不同温度,也可获得微弱的电流,这就是温差电效应(详见§3.3.5).

化学电源的发明为科学实验和技术应用提供了有效的手段,一系列重要成果接踵而至.1800年尼科耳森(W. Nicholson)和卡莱色耳(A. Carlisle)用低压电流分解水.同年,里脱(J. W. Ritter)成功地从水的电解中分别搜集两种气体:氢和氧,并从硫酸铜溶液中电解出金属铜.1807年戴维(H. Davy)利用庞大的电池组先后首次电解得到钾、钠、钙、镁等金属.1871年戴维用2000个电池组成电源,在碳极间产生电弧.从19世纪50年代起碳极电弧一直是灯塔、剧院等场所使用的强烈电光源,直到70年代才逐渐被爱迪生(T. A. Edison)发明的白炽灯所代替,时至今日电弧在冶炼和焊接中仍有重要应用.此外,伏打电池还促进了电镀业的发展,它是1839年雅可比(K. Jacobi)和西门子(W. Siemens)发明的.

在漫长的岁月中,电学和磁学始终是两门独立发展、彼此无关的学科.虽然早在1750年富兰克林已经观察到莱顿瓶放电可使钢针磁化,甚至更早在1640年已有人观察到闪电使罗盘磁针倒转,虽然电作用和磁作用都是非接触、隔真空的相互作用,并且都遵循平方反比律,但是,直到19世纪初科学界仍普遍认为电和磁是两种独立的作用.然而,奥斯特(A. C. Oersted)与众不同,他深受康德哲学关于各种“自然力”统一观点的影响,相信电与磁之间可能存在着某种联系,经过努力寻找,终于在1820年7月发现了电流的磁效应:长直载流导线使与之平行放置的磁针受力偏转(详见§4.2).奥斯特实验揭示了电现象与磁现象的联系,宣告了电磁学作为统一学科的诞生,由此,一系列新的实验接踵而至,许多重大的研究成果应

运而生,开拓了电磁学研究的新纪元.例如,同年,安培的两平行长直载流导线相互作用的实验,电流方向相同时相互排斥,相反时相互吸引;安培的磁铁对电流作用的实验;阿喇果(D. F. Arago)的钢和铁在电流作用下磁化的实验.例如,安培的载流直螺线管与磁棒等效性的实验,据此,安培摒弃了“磁荷”观点,提出磁现象的本质是电流,物质的磁性来源于其中的“分子电流”,从根本上揭示了电磁现象的内在联系.例如,毕奥(J. B. Biot)和萨伐尔(F. Savart)的长直载流导线以及弯折载流导线对磁极作用的实验,根据实验结果,经过理论分析,得出了任意电流元对磁极作用力的公式,现代理解为任意电流元产生的磁场的公式——毕奥-萨伐尔定律(详见 § 4.3).例如,安培认为,涉及电流与磁的种种相互作用均应归结为电流与电流之间的相互作用,为了寻找定量规律,安培精心设计了四个电流相互作用的示零实验,根据实验的“零”结果,经过理论分析,得出了任意两电流元之间相互作用力的公式——安培定律(详见 § 4.6).安培的上述观点以及毕萨定律和安培定律的建立为磁学的发展奠定了坚实的基础.

电流磁效应的发现开辟了电磁应用的新领域.1825年斯图金(W. Sturgen)发明电磁铁,为电磁的广泛应用创造了条件.早在1821年安培就建议可用电磁仪器传输信号.1833年高斯(C. F. Gauss)和韦伯(W. Weber)制造了第一台简陋的单线电报,控制电磁铁的吸引可在远距离产生听得清楚的声响.1837年惠斯通(C. Wheatstone)和莫尔斯(H. M. Morse)独立地发明了电报机.莫尔斯发明了一套电码,利用他制作的电报机,可在移动的纸带上打上点和划来传递信息,在这时期,越洋海底电报的实验研究也在进行.1855年威廉·汤姆孙(W. Thomson)解决了水下电缆信号传递速度慢的问题.1866年按汤姆孙设计的大西洋电缆铺设成功.另一方面的发展是1854年法国电报家布瑟耳(C. Bourseul)提出用电来传递语言的设想,但未变成现实;赖斯(P. Reiss)于1861年首次实验成功,但未引起重视.1876年美国的贝尔(A. G. Bell)发明了电话.作为收话机,它仍用于现代,而其发话机则被爱迪生(T. A. Edison)的发明(炭发话机)以及休斯(D. E. Hughes)的发明(传声器)所改进.

1826年,欧姆(G. S. Ohm)受到傅里叶(J. B. J. Fourier)关于固体中热传导理论的启发,认为电的传导和热的传导很相似,电流好像热流,电源的作用好像热传导中的温差.为了研究电路定律,欧姆开始采用伏打电堆做实验,但性能不稳定,后改用两个接触点温度恒定的温差电偶做电源,确保了电源电动势的恒定.同时,欧姆把电流磁效应和库仑扭秤相结合,设计了一个电流扭秤,解决了测量电流强度的难题.欧姆的实验是,将一根铋棒的两端分别与两根镀铜铁线相连构成回路,两端分别插入盛有冰雪和沸水的容器中,构成温差电偶的两极,回路中产生稳定的电流.当铜线中有电流通过时,与之平行放置的磁针受力偏转,由与磁针悬线相连的扭秤测出的偏转角度就是电流强度.欧姆配置了粗细相同、长度为 x 的不同的8根镀铜铁线,依次分别接入电路中,测出相应的电流强度 X ,根据实验数据得出 $X = \frac{a}{b+x}$,式中 a, b 是依赖于电路的两个参数, a 由温差决定,相当于电动势, b 由不变的导体决定,相当于电池内阻,这样,欧姆就用实验方法建立了全电路电流强度的公式,即欧姆定律.欧姆定律是电路规律,又是描绘导电性能的介质方程,意义重大.但由于当时所用名词含混

不清(如把电动势称为验电力)等原因,欧姆的研究成果并未立即得到确认,直到1841年英国皇家学会才授予欧姆科学界最高荣誉的科普里奖章.1848年基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)从能量角度考虑,澄清了电势差、电动势、电流强度等概念,使得欧姆定律与静电学概念协调起来,在此基础上,基尔霍夫还解决了分支电路的问题.

杰出的英国物理学家法拉第(M. Faraday)从事电磁现象的实验研究,对电磁学的发展作出了极重要的贡献.1831年法拉第发现了电磁感应现象(美国物理学家亨利[J. Henry]于1829年发现自感现象,但发表较晚些),归纳了产生感应电流的各种条件,提出了感应电动势的概念,指出了“形成电流的力(即感应电动势)正比于切割的磁力线数”,并设计了第一台原理性的圆盘发电机(详见§6.1).此前,1821年法拉第根据电流的磁效应设计了第一台原理性的电磁旋转装置——电动机.电磁感应是电磁学史中具有里程碑意义的重大发现,法拉第的开创性工作居功至伟.1834年楞次(H. F. E. Lenz)给出了确定感应电流方向的方法——楞次定律.1845年诺埃曼(F. E. Neumann)和韦伯(W. E. Weber)先后给出了电磁感应定律的定量表达式.电磁感应的发现为能源的开发和广泛利用提供了崭新的前景.1866年西门子发明了可供实用的自激发电机,19世纪末实现了电能的远距离输送,电动机在生产和交通运输中得到广泛使用,从而极大地改变了工业生产的面貌.

1832年法拉第根据静电和电流的各种效应,用实验证明伏打电、摩擦电、磁感应电、温差电、动物电等不同来源的电具有“同一性”,实现了电的统一,1834年法拉第发现电解定律,揭示了电现象与化学现象的联系,指出电荷具有量子性(详见§1.1.4).1843年法拉第的冰桶实验为电荷守恒提供了第一个实验证据(详见§1.1.4).1845年法拉第发现磁致旋光效应:线偏振光经过磁场后,其振动面旋转了一个角度,揭示了光现象与磁现象的联系.法拉第还通过实验提出了顺磁体和抗磁体的区分,并详细研究了极化和静电感应现象.

法拉第是一位具有深刻物理思想的实验物理学家,物理学中的场观点就是他首先提出并倡导的.法拉第认为,带电体以及电流或磁体的周围空间存在着某种特殊的状态,他用电力线和磁力线来描绘这种状态.法拉第认为,力线或场是独立于物体的另一种物质,弥漫在空间,并把相反的电荷和相反的磁极联系起来,电力和磁力并非超越空间的超距作用,而是以电力线和磁力线为媒介物传递的近距离作用.法拉第认为,电磁作用通过力线的传播需要时间,尽管这个时间非常短暂.为了解释电磁感应现象,法拉第认为,在磁体或电流周围存在着一种电紧张状态,磁体或电流运动、变化导致的电紧张状态的变化,正是产生感应电动势的原因,从而把力线图象由静态扩展到动态,并把电力线和磁力线联系了起来.法拉第甚至猜测,力线的传播是以波动的形式进行的,类似于水面的波动或空气粒子的声振动.法拉第认为,力线是认识电磁现象必不可少的组成部分,力线比产生或汇集它们的“源”更具有研究的价值.法拉第的场论观点是以他广泛、深入的实验研究为根据的,是他毕生最重要的贡献,但是法拉第没有给出定量的表述(详见§6.1.2).法拉第的另一个重要观点是坚信各种“自然力”的统一,孜孜不倦地致力于寻找各种不同自然现象之间的联系,上述电磁感应、电解定律、磁光效应,以及各种电的同一性等等就是典型的例证.

麦克斯韦(J. C. Maxwell)继承了法拉第的场观点,进一步揭示了电场与磁场的内在联