



面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century

电磁学专题研究

陈秉乾 舒幼生 胡望雨



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

电磁学专题研究

陈秉乾 舒幼生 胡望雨



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材、“九五”国家教委重点教材和教育部高等学校理科物理学和天文学教学指导委员会“九五”规划教材。全书内容十分丰富,涵盖了电磁学及与之相关学科的各个方面。书中对教学主干内容的基本概念和基本规律的准确表述及其历史形成过程,关键性实验,各个时期物理学界大师们对揭示和认识自然规律的执著追求以及在新实验结果前修正甚至摒弃旧有观念的勇气和努力,都有翔实资料和恰如其分的评述。书中涉及到的不少与电磁学相关的近代物理专题,采取了突出物理图象避免过多数学手段的处理方法,有效地处理了如何在基础物理教学中介绍物理学前沿工作成果的问题。

本书是一本以大学物理教师为主要对象的教学参考书,也可供大学生和中学物理教师参阅。

图书在版编目(CIP)数据

电磁学专题研究/陈秉乾,舒幼生,胡望雨. —北京:高等教育出版社,2001.12

ISBN 7-04-010156-4

I. 电… II. ①陈…②舒…③胡… III. 电磁学—研究—高等学校—教学参考资料 IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 058005 号

电磁学专题研究

陈秉乾 舒幼生 胡望雨

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
电 话 010-64054588
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

邮政编码 100009
传 真 010-64014048



经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 44
字 数 830 000

版 次 2001 年 12 月第 1 版
印 次 2001 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



面向 21 世纪课程教材



普通高等教育“九五”
国家教委重点教材

前 言

一、电磁学是一门重要的基础课

如所周知,电磁现象的发现,电磁定律的确定,电磁场理论的建立,电子的发现以及物质微观电磁结构的揭示,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、光学的重要新领域——电磁学。

电磁学的形成和发展,使人们对电磁相互作用、物质的电磁性质、各种电磁过程等的认识有了极大的拓宽和加深。电磁相互作用是自然界中一种基本的相互作用,电磁相互作用对原子和分子的结构起着关键作用,因而在很大程度上决定着各种物质的物理性质和化学性质。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分支学科。19世纪, Faraday 和 Maxwell 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,成为物理学史中继 Newton 力学之后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讯为标志的第二次技术革命。电力、电子、电讯工业的发展,电磁材料的研制,电磁测量技术的应用等等,对人类的物质生产、技术进步和社会发展带来了难以估量的广泛深刻影响。

由此可见,电磁学是一门重要的基础课。它不仅是经典物理的基本组成部分之一,具有重要的历史地位与现实意义,而且与近代自然科学、技术科学的许多领域都有着密切的联系,成为理、工、农、医及师范院校不可缺少的基础课程之一。

二、继往开来,改革发展

1952年以来,在我国高等院校的物理教学中,电磁学与力学、热学、光
此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

学、原子物理(近代物理)一起构成普通物理(大学物理)课程。回顾近半个世纪以来普通物理课程曾经的历程,总结成熟的经验和基本的看法,对于进一步的改革发展是十分必要的。

作为低年级大学生的第一门基础物理课程,普通物理只能是入门的导论性课程,其目的在于使学生对物理学的内容与方法、工作语言、概念和物理图象、历史、现状与前沿,从整体上有比较广泛、全面、完整的了解,为今后的学习和工作打下扎实可靠的物理基础。根据对普通物理课程性质和任务的这种认识,经过几代人的辛勤耕耘,已经形成了涵盖 20 世纪前经典物理的主要方面、适当介绍近代发展、有针对性地结合专业需要的适合各类普通物理课程的教学内容和体系,集中反映在已经出版的有关教材中。由于普通物理课程内容广泛,接受对象基础薄弱,这就要求在讲授中善于提出问题,善于从现象揭示本质、从具体进入抽象、从特殊事例达到普遍规律。以北京大学为例,在长期的教学实践中,逐步形成了颇具特色的普通物理课程的讲授风格,我们尝试着把它概括为:立论严谨,物理图象清晰,深入浅出,溯源通今。所谓立论严谨,就是提出的问题要准确,概念、规律、理论的阐述要正确,评价要恰当。所谓物理图象清晰,就是要善于作物理分析,建立形象直观的物理图象。所谓深入浅出,就是既要抓住物理本质,又要尽可能地浅显易懂。所谓溯源通今,就是要从全局的高度,统观历史与前沿并努力揭示其间的内在联系,避免片面性和绝对化。

历史是连绵的长河。回顾与展望,继承与发展,传统与创新,是永恒的矛盾,也是永恒的课题。对普通物理课程的上述回顾,让我们更清楚当今的起点和改革的方向。为了进一步提高教学质量,培养高层次人才,就普通物理课程而言,我们认为应该着重解决以下三个问题。

首先,切实地加强基础。这似乎是老生常谈,却正是普通物理课程安身立命的根本,如同传世的艺术珍品具有不朽的价值一样。普通物理课程的基本内容汇集了几百年来物理学最重大的成果,是前辈大师创造性发现的结晶,在全面深刻理解的基础上,正确地阐述,恰当地评价,并随着时代的变迁加以诠释,是教师的神圣使命和艰巨任务,切切不可掉以轻心。

其次,有效地培养能力,提高素质。在讲授基本内容的同时,应该适当地、有选择地介绍重大发现的历史过程,说明当年的背景,怎样提出问题,遇到什么困难,如何作出突破,曾经有过什么曲折和争论,等等。这样,不仅能使学生有身临其境之感,而且能使学生领略前辈大师的研究方法、物理思想、科学精神,得其精髓,有所借鉴。授之以鱼,不如授之以渔,这是物理教师的共同追求。

再次,教学内容的现代化。当代科技发展一日千里。应该根据前沿进展对

基础提出的新要求,导致的新认识(这往往是深刻的变化),重新审核基础内容的含义与地位,决定对它的取舍、轻重与评价,不断充实更新.更应着力挖掘基础与前沿之间的内在有机联系,力求浑然一体,相得益彰.

显然,为了做到以上这些,关键在于提高师资水平.本书就是为教师提供的一本参考读物.

三、本书简介

《电磁学专题研究》共分 11 章.

第一、二章涉及电磁学的基本定律和电磁场理论,这是电磁学课程的主干.与通常教材中的阐述有所不同,本书着眼于定律和理论的“建立”,即根据原始文献和历史资料,详尽地阐明提出问题、作出突破、发现规律的真实历史过程,使读者有全面、生动、切实的了解.同时,在这两章的第一节中,我们分别对物理定律的内涵与外延,物理理论的结构与要素,从方法论的角度加以论述,希望能为提高课程的思想性和理论性提供帮助.另外,在第二章专辟了两节撰写 Faraday 和 Maxwell 的传略,介绍两位大师的生平、重要贡献和物理思想.

Lorentz 电子论是在 Maxwell 电磁场理论建立之后、Einstein 狭义相对论建立之前的重要研究成果. Lorentz 电子论弥补了 Maxwell 电磁场理论的缺陷与不足,融合了源论与场论两大派别的精华,把电磁场理论与气体动理论相结合,成为研究物质电磁性质、光和电磁作用的理论基础. Lorentz 电子论是经典电磁理论成熟的标志,同时,它的某些难以克服的根本内在矛盾也是引发狭义相对论诞生的契机. 尽管 Lorentz 电子论的许多重要成果与结论已经被纳入当今的电磁学课程或教材之中,但对其来龙去脉往往并不了然,从而成为俗称的“三不管”地区之一. 本书第三、四、五章全面系统地阐述 Lorentz 电子论及其对物质电磁性质、光和电磁作用的研究(都限于经典理论),旨在弥补这一空缺,勾画出完整的历史画卷.

第六章带电粒子在电磁场中的运动,第七章磁流体力学,这是等离子体物理的重要组成部分,也是电磁学近代发展的两个典型事例. 前者是电磁场理论与 Newton 力学相结合的产物,后者是电磁场理论与流体力学、热力学相结合的产物,都具有重要的理论意义和应用前景. 这两章的介绍当然是很初步的,并且采用便于电磁学课程引用的方式来阐述,但由此确实可以体会到基础理论的重要性和旺盛的生命力. 虽然从时间上说,这两章的理论是在相对论和量子论之后建立的,但因均属经典理论,所以放在前面.

在本书中,一般说来,有关实验是分散在各章之中的,但也有一些重要的实验,或因与各章内容的关系不很紧密,或因本身涉及的细节较多,显得累

赘，而未纳入各章。于是，把它们集中成第八章“电磁学的一些重要实验”，并大致按时间顺序排列，可结合相关章节阅读。

上世纪末和本世纪初，在经典电磁理论(以及其他经典理论)日趋成熟、完善的同时，也发现了一些新的重要的实验事实，它们与经典理论之间存在着难以调和的尖锐矛盾与冲突，表明经典理论存在着深刻的危机，促使人们重新审视经典理论赖以支撑的基础。如所周知，相对论和量子论由此应运而生，整个物理学达到了一个新的高度。在本书第九、十章中，我们并不专门讲相对论和量子论，而是从 Maxwell 电磁场理论和 Lorentz 电子论所遇到的某些根本困难和矛盾出发，围绕着电磁学的一些基本问题，从相对论和量子论两方面阐述电磁学的近代发展。

第十一章选择电磁学教学中一些典型的疑难问题，作出介绍和评述。这些疑难问题的解决是国内同行多年来教学研究的成果。

以上是本书的框架，在内容取舍和行文方式上，则主要考虑教学的需要。《电磁学专题研究》是一本教学参考书，以大学物理教师(特别是电磁学或普通物理课程的教师)为主要读者对象，也可供大学生和中学物理教师参阅。

蔡伯濂教授拨冗审阅全书，谨此致谢。

目 录

前言	1
第一章 电磁学基本实验定律的建立	1
§ 1. 概述	1
§ 2. Coulomb 定律	5
一、Coulomb 电斥力扭秤实验和电引力单摆实验	5
二、Cavendish 精确验证电力平方反比律的示零实验	10
三、Maxwell 精确验证电力平方反比律的理论和示零实验	14
四、近代的结果： $\delta < 10^{-16}$ ，电力平方反比律是最精确的物理定律之一	22
五、Coulomb 定律的三个主要内容及其由来	24
六、电荷与质量的比较	25
七、Coulomb 定律的成立条件，适用范围及理论地位	28
§ 3. Oersted 实验，Biot-Savart-Laplace 定律和 Ampere 定律	33
一、Oersted 实验的重大发现	33
二、弯折载流导线对磁极作用力的实验，Biot-Savart-Laplace 定律的建立	36
三、Ampere 的四个示零实验，原始的 Ampere 公式和 Ampere 定律的现代形式	41
§ 4. Ohm 定律	55
§ 5. Faraday 电磁感应定律	60
一、电磁感应现象的发现	60
二、Faraday 对电磁感应的研究	65
三、Neumann 和 Weber 先后给出电磁感应定律的定量表达式	68
四、Maxwell 提出涡旋电场概念来解释感生电动势	71
参考文献	73
第二章 Maxwell 电磁场理论的建立	75
§ 1. 概述	75

§ 2. 超距作用和近距作用观点的早期论争	79
§ 3. 静电学的势理论, Gauss 定理和 Stokes 定理	81
§ 4. Neumann 和 Weber 的超距作用电磁理论	83
一、Neumann 给出电磁感应定律的定量表达式	84
二、Weber 的超距作用电磁理论	87
附录 A 原始 Ampere 公式的两种等价形式	92
附录 B 由原始 Ampere 公式导出运动带电粒子之间的 Weber 力公式	93
附录 C 由 Weber 力公式导出 Neumann 的两载流线圈相互作用能公式	96
附录 D 由运动带电粒子之间的 Weber 力公式导出感应电动势公式	97
§ 5. Faraday 的学术成就和物理思想	99
一、生平	99
二、学术成就	101
三、Faraday 的物理思想	106
§ 6. Thomson 的类比研究	111
§ 7. Maxwell 的《论 Faraday 力线》(1855—1856)	112
一、《论 Faraday 力线》的纲目与要点	113
二、前言——研究对象: 力线, 研究方法: 类比	115
三、力线与流线的类比, 两类矢量	116
四、电紧张状态的数学表述, 涡旋电场	119
五、六条定律	123
§ 8. Maxwell 的《论物理力线》(1861—1862)	125
一、概述	125
二、《论物理力线》的纲目	127
三、分子涡旋(磁以太)和粒子(电以太), 电磁作用的力学模型	128
四、位移电流	132
五、电磁波	135
§ 9. Maxwell 的《电磁场的动力学理论》(1865)	139
一、《电磁场的动力学理论》的纲目	139
二、《电磁场的动力学理论》的引言	141
三、电磁动量	144
四、电磁场理论的完备方程组——Maxwell 方程组	146
五、光的电磁理论	153
六、Maxwell 电磁场理论的历史意义	155
七、启迪	156
§ 10. 建立 Maxwell 方程组的其他途径	160

一、根据能量原理和近距作用原理建立 Maxwell 方程组	161
二、根据 Coulomb 定律和 Lorentz 变换建立 Maxwell 方程组	165
三、根据变分原理建立 Maxwell 方程组	170
§ 11. Maxwell 传略	171
一、生平	171
二、创建电磁场理论和光的电磁理论	175
三、奠定气体分子运动论和统计物理的理论基础	176
四、其他贡献	182
五、筹建 Cavendish 实验室, 整理 Cavendish 遗稿	185
参考文献	187
第三章 Lorentz 电子论	188
§ 1. 两种观点, 两个学派	188
§ 2. Maxwell 电磁理论的局限和不足	193
§ 3. Lorentz 电子论的萌芽	195
一、以太作用与物质作用的分离	195
二、把分子论引入电磁学	198
§ 4. Lorentz 电子论的创立	204
一、从微观方程到宏观方程	204
二、运动媒质中的光速	211
§ 5. Lorentz 的“本地时间”和对应态原理	214
§ 6. 长度收缩假设	218
§ 7. 光行差现象和 Doppler 效应	222
§ 8. Poincare 的批评及 Lorentz 变换的最后形式	225
附录 A	232
附录 B	233
附录 C	237
附录 D	240
参考文献	242
第四章 物质的电磁性质	243
§ 1. 物质的磁性	244
一、简短的历史回顾	244
二、Faraday 和 Weber 等对抗磁性的研究	245
三、Curie 定律	249

四、Langevin 的抗磁性经典理论	250
五、Langevin 的顺磁性经典理论	253
六、Weiss 的铁磁性唯象理论	255
§ 2. 电介质的极化及相关性质	259
一、恒定电场引起的极化	259
二、交变电场引起的极化	262
三、电介质的特殊效应	267
§ 3. 金属电子论	268
一、简短的历史回顾	268
二、Drude 的自由电子模型	269
三、Lorentz 的理论	275
四、金属的复折射率, 吸收和趋肤效应	276
五、金属电导率与频率的依赖关系	280
附录 辐射阻尼力	282
参考文献	284
§ 4. 超导体	284
一、零电阻现象	284
二、Meissner 效应	286
三、磁通量子化和 Josephson 效应	289
四、二流体模型和 London 方程	290
五、BCS 理论简介	296
六、高 T_c 超导材料	299
七、超导体的应用	302
附录 超流动性	303
参考文献	306
第五章 光和电磁作用	307
§ 1. 磁致旋光效应	308
一、晶体的自然旋光性	308
二、Faraday 磁致旋光效应	310
三、Maxwell 的磁致旋光理论	311
四、Rowland 的磁致旋光理论	320
五、磁致旋光效应的应用	323
§ 2. Zeeman 效应	325
一、Zeeman 效应	325

二、Lorentz 对 Zeeman 效应的理论解释	327
三、Larmor 对 Zeeman 效应的理论解释	329
§ 3. 其他磁光效应	335
一、Kerr 磁光效应	335
二、Voigt 效应(磁致双折射效应)	335
三、Cotton - Mouton 效应(磁致双折射效应)	336
§ 4. 电光效应	336
一、Kerr 效应(二级电光效应)	336
二、Pockels 效应(一级电光效应)	340
三、Stark 效应	342
附录 A 流体旋涡运动的角速度	343
附录 B 用经典理论说明带电粒子在磁场作用下圆轨道半径保持不变	345
参考文献	347
第六章 带电粒子在电磁场中的运动	349
§ 1. 带电粒子在均匀、恒定磁场中的运动	350
§ 2. 带电粒子在均匀、恒定电磁场中的运动, 电漂移	352
§ 3. 带电粒子在弱非均匀、恒定磁场中的运动, 横向梯度漂移和 曲率漂移	357
§ 4. 浸渐不变量——磁矩 μ	365
§ 5. 磁镜效应, 等离子体的磁约束, Van Allen 带	369
参考文献	372
第七章 磁流体力学	373
§ 1. 何谓等离子体	374
§ 2. 等离子体的主要特征量: 等离子体振荡频率 ω_p 和 Debye 长度 λ_D	376
一、等离子体粒子密度	376
二、等离子体温度	376
三、等离子体振荡频率	378
四、Debye 长度	379
§ 3. 等离子体物理的研究方法	381
§ 4. 磁流体力学方程	383
一、流体力学方程	383
二、电磁场方程	385

三、各种形式的磁流体力学方程组	386
§ 5. 磁冻结和磁扩散效应	388
一、磁流体中, 磁场的动力学方程	388
二、磁冻结效应	389
三、磁扩散效应	390
四、磁 Reynolds (雷诺) 数 R_m	390
§ 6. 磁流体静力学——等离子体在磁场中的平衡	391
一、磁流体静力学方程, 磁应力	391
二、线箍缩(z -pinch)和角箍缩(θ -pinch)	393
三、磁力线的转动变换, 托卡马克装置	395
§ 7. 磁流体力学不稳定性	397
一、腊肠不稳定性	398
二、弯曲不稳定性	398
三、螺旋不稳定性	399
四、槽纹不稳定性	400
§ 8. 磁流体力学波	401
一、无磁场时的等离子体波	401
二、Alfven (阿尔文) 波	402
参考文献	403
 第八章 电磁学的一些重要实验	404
§ 1. 概述	404
§ 2. Arago 圆盘实验	407
§ 3. Hertz 电磁波实验——Maxwell 电磁场理论和光的电磁理论的 实验验证	409
一、Hertz 振子和谐振器, 首次实验证实存在电磁波	410
二、电磁波性质的实验研究	415
§ 4. Fresnel 曳引系数和 Fizeau 实验	418
一、Fresnel 的以太理论和曳引系数	418
二、Fizeau 实验	420
§ 5. Michelson - Morley 实验	422
§ 6. Trouton - Noble 实验	427
§ 7. J. J. Thomson 阴极射线实验—— $\frac{e}{m_e}$ 的测定, 电子的发现	433
一、Faraday 电解定律的启示, “电子” 一词的提出	435

二、J. J. Thomson 的阴极射线实验——荷质比 $\frac{e}{m_e}$ 的测定, 电子的发现	436
§ 8. Kaufmann 的 β 射线实验——电子质量 m_e 随速度的变化	440
§ 9. Millikan 油滴实验——电子电量 e 的测定	444
参考文献	450
第九章 相对论电磁场	451
§ 1. 狭义相对论的基础与 Einstein 时空观	451
一、经典理论的危机	451
二、狭义相对论基本原理的提出	453
三、Einstein 时空观	454
§ 2. 相对论的时空变换与电磁场方程的协变性	460
一、相对论的时空变换及其推论	460
二、电磁场的相对论变换	468
三、相对论物质方程	476
§ 3. 运动介质中的电磁波	478
一、静止介质中的电磁波	479
二、运动介质中的电磁波	483
三、运动介质的色散性质	498
§ 4. 运动介质界面上电磁波的反射与折射	499
一、边界条件	500
二、反射定律和折射定律	504
三、Fresnel 公式	512
参考文献	516
第十章 电磁学若干基本问题的近代研究	518
§ 1. 经典电磁理论的困难	518
一、电子质量发散的困难和电子运动“自行加速”的困难	518
二、黑体辐射与氢原子光谱	523
三、光电效应与 Compton 效应	528
§ 2. 电子运动的量子力学理论	531
一、电子运动的 Schrödinger 方程, Zeeman 效应与电子自旋, 固体能带结构, 量子 Hall 效应	531
二、电子运动的 Dirac 方程, 正电子	548
§ 3. 量子电动力学以及相互作用的统一	554

一、量子电动力学	554
二、电磁场的规范不变性, 光子静止质量, A-B 效应	560
三、相互作用的统一, 规范场理论, 电弱统一, 磁单极	571
参考文献	581
第十一章 电磁学教学中的一些疑难问题	582
§ 1. 迎接挑战——关于电磁场的教学	582
一、研究对象的重大变化, 必将引起一系列随之而来的深刻变化	582
二、场是在一定空间范围内连续分布的客体, 认识它要从 场的空间分布入手, 从整体上去把握它	583
三、矢量场整体分布特征的特殊描述方式——源与旋, 通 量与环量(环流), Gauss 定理与环路(环量)定理	584
四、从静止、恒定到运动、变化; 从孤立研究到寻找联系, 从局部规律 到统一理论	589
五、电磁场究竟是客观存在的特殊形式的物质, 还仅仅是一种描绘手段?	590
六、电磁场与实物的相互作用, 实物的电磁性质	590
参考文献	591
§ 2. 静电场电势零点的选择	591
一、静电场电势零点选择的任意性	592
二、为什么选择无穷远点为电势零点($U_{\infty}=0$)?	593
三、为什么选择 $U_{地}=0$, 它和 $U_{\infty}=0$ 是否相容?	595
四、零点不同的电势如何叠加?	597
参考文献	601
§ 3. 静电平衡条件下导体的面电荷分布	601
一、势函数 ϕ 可以严格求解的特殊例子	602
二、个别导体面电荷密度与表面曲率的关系	606
三、导体面电荷密度与表面曲率之间并不存在单一对应关系	608
附录 曲线坐标系	613
参考文献	616
§ 4. 稳态电磁场的动量和角动量	617
一、两个佯谬	617
二、稳态电磁场的动量和角动量	620
三、Feynman 圆盘实验的解释	624
附录 圆电流环的势矢分布	628
参考文献	629

§ 5. 载流直螺线管的磁场	630
一、密绕无穷长螺线管的磁场	630
二、非密绕螺线管的磁场	634
参考文献	644
§ 6. 感应电动势的两种表示法	644
一、两种表示法的一致性	646
二、通量法则的例外情形	648
三、确立“回路构成法”以消除矛盾	650
四、进一步的思考	651
参考文献	653
§ 7. 关于在教学中建立宏观 Maxwell 方程组和描述介质中电磁场的 若干讨论	653
一、各种电场、磁场性质的比较, 宏观 Maxwell 方程组的建立	654
二、电荷的划分, 电流的划分, 感应、极化、磁化	661
三、场源分解方式的多种可能, 非静场情形 P 、 M 、 D 、 H 的定义与物理意义, 宏观 Maxwell 方程的再建立	662
四、高频情形线性介质方程的各种形式	666
参考文献	674
人名索引	675