



面向21世纪课程教材

基 / 础 / 物 / 理 / 教 / 程

DIAN CI XUE

电 磁 学

王 楚 李 椿 周乐柱 编



北京大学出版社

PEKING
UNIVERSITY
PRESS

0001
2215
461533

面向 21 世纪 课程教材

基础物理教程

电 磁 学

王 楚 李 椿 周乐柱 编



00461533

北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

D451/66

电磁学/王楚等编. —北京: 北京大学出版社, 2000. 2

面向 21 世纪课程教材·基础物理教程

ISBN 7-301-04447-X

I. 电… II. ①王…②李… III. 电磁学-高等学校-教材
IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 77237 号

书 名: 电磁学

著作责任者: 王 楚 李 椿 周乐柱

责任编辑: 李采华

标准书号: ISBN 7-301-04447-X/O · 0456

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑室 62752021

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 北京因温特有限公司

印 刷 者: 北京大学印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787×1092 18 开本 18.75 印张 325 千字

2000 年 2 月第一版 2000 年 2 月第一次印刷

定 价: 26.5 元

内 容 提 要

本书是《基础物理教程》丛书的第二卷,该教程丛书为教育部批准的面向 21 世纪课程教材。

本书阐述了电磁场的基本概念和基本规律。第一章介绍基本的电磁现象;第二至第四章详细地介绍了麦克斯韦对基本概念的发展与电磁感应定律;第五、六章阐述了极化和磁化现象,说明了电位移矢量 D 和磁场强度 H 的物理意义;第七章总结了电磁场的基本概念和基本规律,完整地展示了麦克斯韦的理论,导出了电磁波的概念。最后两章介绍了线性电路的分析方法,可作为后读课程的基础。本书以经典电磁学为主,但注意引进现代物理知识和物理思想,读者可以从书中正文,特别是附录和思考题中,了解电磁学的最新进展,发现其中仍未解决的问题,体会到了联系实际、思索问题、解决问题的乐趣。

本书可作为综合大学理工科的基础物理教材,也可作为其他高等院校和中学物理教师的教学或自学参考读物。

《基础物理教程》总序

物理学是其他各自然学科和技术学科的基础,在过去几十年中物理学日益成为新技术的一个重要的支柱,因而《基础物理》已成为大学理、工、农、医各专业重要的基础课,而且各国的高等学校都为改进物理教学作了长期的探索.新技术的飞速发展,要求学生较全面地掌握物理学的基本知识,并在思维方法方面得到锻炼,从而能适应他们一生在事业中将遇到的不断变化和发展的情况.然而,要把近代物理学的成就和应用,组织成基础课的教学体系,并不单纯是材料的取舍和拼接,而是一个知识再加工的研究课题,需要经过长期持之以恒的研究和实践,才可能逐步有所改进.课程改革是一个永无止境的难题.

在写这套书时,我们着重考虑了以下三个问题:

1. 按基本原理组织内容,适当调整某些素材的区划范围

对于教学改革的一个共识是如何精选内容,使教材不至过分庞杂.经过考虑,我们认为宜以物理学的基本概念与基本规律为主题,并应联系现代的应用实例.由于物理学的基本规律具有普遍性,所以在论述上和素材的选取上与传统的区划范围可以有所不同.例如,在力学中可以涉及洛伦兹力;在分子运动论中可以讨论带电粒子的随机运动.这样做有助于阐明基本规律的意义,并使线索更加明晰.

2. 注重论述的科学性并加强思维能力训练

对于物理课程改革的另一个共识,就是应提高学生的理解能力和理论联系实际的能力.这是又一个难题.我们认为在过去的教材中,某些命题的论述欠深入;对实际应用的介绍未能着重于体现基本原理,而是较多地描述具体的技术过程;习题偏重于“代公式型”或“技巧型”.这些急于求成的做法,往往使学生不自觉地养成注重记忆结论、但是忽视理解和思考的习惯.在这套书中,我们力图使论述比较深入,体现物理学的思辨,用基本原理来概括各种可能的应用.我们认为习题是课程教学的一个重要环节,习题能引导学生运用基本原理分析和解决实际问题.这套书中除习题外,每一章还编入能引导学生深入思考的思考题.

习题和思考题数量较多,不可能要求学生全做.有些习题涉及较深入的课题,可作为课堂讨论或课外研究的命题.学生即使不做,只要看一遍

并略加思索,作为自我检查的“镜子”也是有益的。

3. 《基础物理》是供学生反复阅读的书

物理课的教学环节,包括讲授、实验、自习、习题、复习考试等。许多教学组织者,常希望教师能把学生“讲明白”,但往往是事与愿违。困难在于任何课程和教材,都只能按“直线式”的顺序来安排内容。但在一门课中介绍的概念或规律,又必须综合其他课程的内容才能理解。真正的理解和消化有赖于学生的反复钻研。我们不希望这套书,是一套学生在考试后可永不再翻阅的书。因此,书中的材料可能比授课时的教学要求高一些,有些论点也比教学基本要求深入一些。总之,对大学的主要课程,学生不能只学教师的讲稿内容,也不宜只看一本教材。学生应通过对几本教材的比较,通过自己的研究,才能做到逐步消化和理解。

本书是参照理工科大学的教学基本要求编写的,但又不局限于此。希望对学生的钻研和进取,有一定的引导作用。为了便于使用,本书将有关内容分为若干层次。打“*”号的章节可有选择地讲授或不讲;有些为扩展知识面的或常识性的材料则写在附录中。

《基础物理教程》包括《力学》、《电磁学》、《光学》、《热学》、《原子物理》五本书。本书所需的数学知识是矢量代数、空间解析几何及简单的微积分运算,这些都是中学毕业生可以掌握的知识。鉴于当前一些中学的教学受“应试教育”的影响,不少中学生未能系统地掌握应具备的知识,尤其缺乏思辨能力和通过自学进取的意识。为弥补中学生数学知识的不足,作者还编写了《基础物理中的数学方法》,这本书可作为大学一年级学生的参考书。

《基础物理教程》是作者长期从事教学研究和实践的总结,也是一次教学改革试验。作者欢迎广大教师和读者提出自己的见解、指出本书的缺点和错误,以期进一步改进。

王 楚

序

《电磁学》是理工科大学学生的一门基础课,国内外已出版了一些优秀教材.作为大学生,对任何重要的课程不应只阅读一本书.要通过阅读几本不同风格的书,比较不同的论述,提出问题并经过自己的钻研,消化整理形成自己的认识,才能提高自身的物理素养.

在已有的教材中,包含了与电磁现象有关的各种命题,大致可划分为:基本电磁现象及其应用;带电粒子的随机运动;麦克斯韦理论的建立,以及线性电路.这几部分都是不可缺少的.由于课程包含几类不同的命题,许多作者都在研究建立一个简明的《电磁学》课程体系.自60年代以来,一些作者提出应重新研究基础物理中各门课程的区划,及《电磁学》应侧重于麦克斯韦的电磁场理论.本书是按这种认识编写的.

作者认为,基础物理宜按物理学的基本规律来划分.尤其是高中物理已对电磁现象及其应用作了初步介绍之后,可不必把所有的涉及电磁现象的命题全部划在《电磁学》中.电磁力是一种基本的相互作用,把一些与电磁力乃至电势的概念在《力学》中引入,是合乎逻辑的,也有助于学生对《力学》的理解.带电粒子的随机运动是与现代应用技术密切相关的课题,但就其基本规律而言,宜作为《热学》的命题.《电磁学》的主题,宜定位于论述电磁场是一种形态的物质,及这种物质的运动规律.即:介绍与论述关于电磁场的基本概念与麦克斯韦的理论.线性电路的分析方法宜作入门介绍.本书是按这一思路编写的.

本书按下述三个层次介绍电磁场的概念与规律:

1. 第一章——基本的电磁现象

这一章介绍稳恒电磁场的实验定律与洛伦兹力公式,初次提出电磁场的概念.希望读者注意到电与磁的对偶性,及由电磁学向经典的时空观提出的质疑.洛伦兹力的应用可体现在各领域.在这一章中,把洛伦兹力的应用归结为“起电”与“驱动”两方面.希望读者能对已有的知识作一次整理,使较有序地消化已有的知识,并作为认识新技术与新概念的起点.

2. 第二章至第四章——真空中的电磁场

这三章较详细地介绍了麦克斯韦对基本概念的发展与电磁感应定律,实际上是对电磁场理论作一次介绍.读者宜着重于与已有的认识比

较,认识哪些是新概念,它们是怎样提出、论证和验证的.这三章也介绍了用矢量场论描述电磁场的方法,希望读者在数学上有所准备.

3. 第五章与第六章——电介质与磁介质

这两章描述了极化与磁化现象,提出宏观电磁场与介质的分子状态的关系,从而进一步说明了电位移矢量 D 和磁场强度 H 的物理意义.

以上六章已全面地阐明了关于电磁场的基本概念与基本规律.在第七章把这些规律综合在一起,完整地展示了麦克斯韦的理论,并导出了电磁波的概念.限于课程的基本要求,本书不对电磁波作深入的讨论.对电磁波的进一步的研究,则属于《光学》和《电动力学》的命题.在第七章中,只是定性地说明,电磁波的传播方式有辐射与有线传输两种.

第八章与第九章介绍线性电路的分析方法.这两章的特点在于用算符定义阻抗,简明地介绍线性电路的基本原理,说明电路的规律是电磁场基本规律的体现.这两章是进一步学习《电路分析》或《电子线路》的基础,也蕴含了线性系统的普遍规律.这两章不是《电磁学》的主体,可与后续课程作统一的安排来组织教学.

以上扼要地介绍了本书的组成与特点.作者的意图在于给学生提供一本可供阅读,并能引起思考的书.其中一些命题的论述可能与常见的教材不同,其目的是希望读者注意到,在《基础物理》中仍有值得思考和研究的问题,这是大学生学习物理的基本方法.由这一点出发,本书不是面面俱到的.作者也不希望学生追求简单的记忆,或简单地接受某一种说法.

本书的初稿经清华大学夏学江教授、南京大学吴培亨教授和南开大学王朝英教授精心审阅.三位教授热情地支持了作者的工作,并指出了其中的错误和欠准确之处,作者特在此致谢.作者也欢迎读者对本书提出宝贵的意见,以便于作进一步的改进.

王 楚

目 录

第一章 基本的电磁现象	(1)
§ 1.1 电荷与电场	(1)
1.1.1 电荷	(1)
1.1.2 库仑定律	(2)
1.1.3 电场	(6)
1.1.4 电场线	(9)
1.1.5 电偶极子与电偶极矩	(10)
1.1.6 分布在小区域内的电荷组	(12)
§ 1.2 导体与电介质	(14)
1.2.1 导体	(14)
1.2.2 电介质与极化	(15)
§ 1.3 电流场的描述	(17)
1.3.1 电流	(17)
1.3.2 电流密度矢量	(17)
1.3.3 电流场的通量	(18)
1.3.4 点电荷的电流元	(20)
§ 1.4 磁场	(21)
1.4.1 电流的磁效应	(21)
1.4.2 磁感应强度矢量	(22)
1.4.3 磁场对运动电荷及通电导线的作用	(23)
1.4.4 毕奥-萨伐尔定律	(29)
1.4.5 平行长直通电细导线间的相互作用	(32)
§ 1.5 磁矩	(32)
1.5.1 通电线圈的磁场	(32)
1.5.2 磁场对通电线圈的作用	(35)
1.5.3 微观粒子的磁矩	(37)
附录 A 常用的数学公式	(38)
思考题	(40)
习题	(41)

第二章 电场	(46)
§ 2.1 高斯定理	(46)
2.1.1 电场的通量	(46)
2.1.2 高斯定理	(47)
2.1.3 应用举例	(50)
*2.1.4 高斯定理的意义	(52)
§ 2.2 电场的散度	(54)
2.2.1 电场的散度	(54)
*2.2.2 面散度	(55)
§ 2.3 静电场的电势	(56)
2.3.1 电场的环量	(56)
2.3.2 静电场的电势	(58)
2.3.3 电势梯度	(65)
*2.3.4 泊松方程	(67)
§ 2.4 静电势能和电场的能量	(69)
2.4.1 电荷在外电场中的静电势能	(69)
2.4.2 带电体系的静电能	(72)
2.4.3 电场的能量	(75)
*2.4.4 电子的经典半径	(77)
§ 2.5 导体的静电平衡与电子发射	(78)
2.5.1 导体中的自由电荷	(78)
2.5.2 孤立导体的静电平衡	(80)
2.5.3 自由电荷穿过势垒——隧道效应	(82)
附录 B 常用的电真空器件	(83)
思考题	(86)
习题	(88)
第三章 电流场	(91)
§ 3.1 导体中的传导电流	(91)
3.1.1 欧姆定律	(91)
3.1.2 电阻器	(93)
*3.1.3 线性电阻与非线性电阻	(95)
*3.1.4 电场对传导电流的功	(95)
§ 3.2 电源及其电动势	(97)
3.2.1 电源的作用	(97)
3.2.2 电源的电动势	(98)

3.2.3 电源的端电压	(99)
3.2.4 理想电源	(101)
§ 3.3 电容	(102)
3.3.1 孤立导体的电容	(102)
3.3.2 电容器	(104)
3.3.3 电容的电路方程	(105)
§ 3.4 电流场的连续性	(109)
3.4.1 位移电流	(109)
3.4.2 电流场的连续性	(111)
附录 C 气体导电	(113)
思考题	(116)
习题	(117)
第四章 磁场与电磁感应	(120)
§ 4.1 磁场的通量和环量	(120)
4.1.1 磁场的通量——磁场的高斯定理	(120)
4.1.2 磁场的环量——安培环路定理	(121)
4.1.3 面电流的磁场	(123)
4.1.4 柱电流面的磁场	(125)
§ 4.2 通电螺线管的磁场	(127)
4.2.1 细长通电螺线管的磁场	(127)
4.2.2 通电螺绕环的磁场	(127)
§ 4.3 电磁感应定律与涡旋电场	(128)
4.3.1 法拉第定律	(128)
4.3.2 楞次定律	(130)
4.3.3 动生电动势与感生电动势	(131)
*4.3.4 关于洛伦兹力的思考	(134)
§ 4.4 几种电磁感应现象	(135)
4.4.1 涡流	(135)
4.4.2 物质的抗磁性	(136)
4.4.3 电磁阻尼和感应电动机	(138)
§ 4.5 磁场的能量	(140)
4.5.1 改变磁场的功	(140)
4.5.2 磁场的能量	(141)
§ 4.6 电路中的电磁感应——自感与互感	(141)
4.6.1 自感	(141)

4.6.2	线圈的自感	(143)
4.6.3	含自感的电路	(144)
4.6.4	互感	(147)
4.6.5	线圈的串联	(149)
附录 D	四维空间的洛伦兹力公式	(151)
思考题		(153)
习题		(154)
第五章	电介质	(159)
§ 5.1	极化强度矢量和电位移矢量	(159)
5.1.1	电介质及其极化	(159)
5.1.2	极化强度矢量	(160)
5.1.3	电介质中的位移电流	(161)
5.1.4	电位移矢量场的高斯定理	(163)
§ 5.2	电介质的极化规律	(165)
5.2.1	各向同性线性电介质	(165)
5.2.2	各向异性线性电介质	(166)
5.2.3	铁电体的极化特性	(167)
§ 5.3	电介质中的电场	(169)
5.3.1	电介质的边界条件	(169)
5.3.2	有均匀各向同性线性介质的静电场	(170)
§ 5.4	电介质中的能量	(173)
5.4.1	改变电介质状态所做的功	(173)
5.4.2	线性电介质中的能量密度	(174)
5.4.3	铁电体中的损耗	(175)
§ 5.5	充填电介质的电容器	(176)
5.5.1	充填均匀各向同性线性电介质的电容器	(176)
5.5.2	电解质电容器	(177)
思考题		(178)
习题		(179)
第六章	磁介质	(182)
§ 6.1	磁化强度矢量和磁场强度矢量	(182)
6.1.1	磁介质及其磁化	(182)
6.1.2	抗磁性的经典模型	(183)
6.1.3	磁化强度矢量	(185)

6.1.4 磁场强度矢量	(187)
§ 6.2 磁介质的磁化规律	(189)
6.2.1 磁化率和磁导率——线性介质	(189)
6.2.2 铁磁质的磁化特性	(190)
* 6.2.3 磁畴	(192)
6.2.4 软磁材料与硬磁材料	(193)
§ 6.3 磁介质中的能量	(195)
6.3.1 改变磁介质状态所做的功	(195)
6.3.2 线性磁介质中的磁能密度	(197)
6.3.3 铁磁质的磁滞损耗	(197)
6.3.4 电磁能的输运—— H 的物理意义	(198)
§ 6.4 边界条件 磁路定理	(200)
6.4.1 磁场的边界条件	(200)
6.4.2 高磁导率材料的边界效应	(202)
6.4.3 磁路定理	(202)
* 6.4.4 磁分流	(205)
6.4.5 电感器中的磁路	(205)
思考题	(206)
习题	(207)
第七章 电磁场与电磁波	(209)
§ 7.1 电磁场的基本方程	(209)
7.1.1 电磁场	(209)
7.1.2 麦克斯韦方程组	(209)
§ 7.2 电磁波的基本概念	(211)
7.2.1 电磁场的运动——电磁波	(211)
7.2.2 能流密度矢量	(213)
7.2.3 平面简谐电磁波的基本性质	(215)
* 7.2.4 电磁波的动量	(218)
§ 7.3 电磁波的传输与辐射	(219)
7.3.1 电磁波的有线传输	(219)
7.3.2 电磁波的辐射	(220)
* 7.3.3 天线	(222)
* 7.3.4 运动电荷的辐射	(223)
附录 E 电磁兼容性	(224)
思考题	(225)

习题	(226)
第八章 线性电路与简谐交流电	(228)
§ 8.1 二端线性电路	(228)
8.1.1 二端电路的阻抗和导纳	(228)
8.1.2 串联与分压	(230)
8.1.3 并联与分流	(233)
8.1.4 LC 电路的固有特性	(235)
§ 8.2 简谐交流电	(238)
8.2.1 复阻抗与复导纳	(238)
8.2.2 简谐交流电的功率与有效值	(240)
8.2.3 储能元件与储能电路的品质因数	(242)
§ 8.3 电路的频率特性	(245)
8.3.1 阻抗和导纳的频率特性	(245)
8.3.2 LC 谐振电路	(248)
8.3.3 电路的通频带	(250)
§ 8.4 互感器	(254)
8.4.1 互感器的耦合系数	(254)
8.4.2 电压互感器——变压器	(255)
8.4.3 电流互感器	(257)
8.4.4 理想变压器	(258)
附录 F 微分方程的算符解法	(259)
思考题	(260)
习题	(261)
第九章 线性电路的基本分析方法	(265)
§ 9.1 电路的基本方程	(265)
9.1.1 基尔霍夫定理	(265)
9.1.2 线性电路	(266)
9.1.3 回路分析法	(267)
9.1.4 节点分析法	(269)
9.1.5 阻抗矩阵与导纳矩阵	(270)
§ 9.2 二端有源电路——等效电源原理	(271)
9.2.1 等效电压源原理——戴文宁定理	(271)
9.2.2 等效电流源原理——诺顿定理	(274)
9.2.3 电桥	(276)

*9.2.4 最大功率输出条件	(279)
§ 9.3 线性电路的叠加原理	(280)
思考题	(282)
习题	(283)

第一章 基本的电磁现象

本章介绍关于静电场和稳恒磁场的基本实验定律,阐明电磁场与电荷及电流相互伴存和相互作用的规律.本章涉及的内容主要是对读者已有的基础知识作一回顾,以使读者对有关知识能获得更确切的理解.本章在介绍基本实验定律时,还指出了一些对电磁场的认识有待深入的问题,这些问题将在以后几章中讨论.

§ 1.1 电荷与电场

1.1.1 电荷

早在公元前六百年,人们就发现了用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、纸片等轻小物体.例如,在我国的古书上就有“琥珀拾芥”的记载.后来发现,摩擦后能吸引轻小物体的性质并不是琥珀所独有.像玻璃棒、火漆棒、硬橡胶棒、有机玻璃棒等,用毛皮或丝绸摩擦后也都能吸引轻小物体(图 1-1).

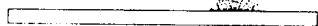
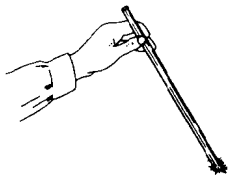


图 1-1 带电棒吸引轻小物体

物体有了这种吸引轻小物体的性质,就说它带了电,或者说有了电荷.带电的物体叫做带电体,使物体带电叫做起电.带电体所带电荷数量的多少叫做电量.英文中 electricity(电)这个字是人们根据希腊字 electron(原意琥珀)创造出来的.所以,带电原本是“琥珀化”了的意思,表示物体处在一种特殊的物理状态.

实验指出,两根用毛皮摩擦过的硬橡胶棒互相排斥;两根用丝绸摩擦过的玻璃棒也互相排斥.可是,用毛皮摩擦过的硬橡胶棒与用丝绸摩擦过的玻璃棒却互相吸引.这表明硬橡胶棒上的电荷和玻璃棒上的电荷是不同的.实验证明,所有其他物体,不论用什么方法起电,所带的电荷或者与玻璃棒上的电荷相同,或者与硬橡胶棒上的电荷相同.这说明,自然界只存在两种电荷,而且,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引.历史上,美国科学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706~1790)首先用正电荷和负

电荷的名称来区分这两种电荷. 这种命名法一直沿用到现在.

电荷的一个重要性质是它遵从电荷守恒定律, 即: 一个孤立系统中正、负电荷的代数和是不变的. 所谓孤立系统, 指的是没有任何代数和不为零的电荷通过其边界的系统. 电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立, 近代科学实践证明它也是一切微观过程所普遍遵守的.

电荷守恒定律是依据对静止或低速运动电荷的观测而确立的. 在相对论建立后, 人们认识到质量与速率有关, 或者说与参照系有关, 质量不是相对论不变量. 但大量实践证明, 电量却不依赖于参照系, 或者说, 电量是相对论不变量.

电荷的另一个重要特征是它的量子性, 即任何带电体的电量都只能是某一基本单元的整数倍, 而不可能连续地变化.

电荷的这个基本单元就是电子所带电荷的绝对值, 叫做电子电荷, 其量值用 e 表示. 根据精确测量的结果

$$e = 1.60210 \times 10^{-19} \text{ C (库仑)}$$

在研究宏观电磁现象时, 所涉及的电荷通常总是电子电荷的许许多多倍. 在这种情况下, 我们可以认为电荷连续分布在带电体上, 而忽略电荷的量子性.

1.1.2 库仑定律

电荷最基本的性质是与其他电荷相互作用, 因而电荷之间相互作用的规律是电现象的基本的规律. 这方面的规律是由法国工程师库仑 (Charles A. de Coulomb, 1736~1806) 通过实验确定的, 叫做库仑定律. 库仑定律直接给出的是点电荷与点电荷之间相互作用的规律.

1. 点电荷

静止的带电体之间的相互作用力, 叫做静电力. 根据实验知道, 对于任意两个带电体, 它们之间静电力的大小和方向, 不但与它们所带的电量以及相互之间的距离有关, 而且还与它们的形状有关. 具体地讲, 当任一带电体的形状稍有变化时, 静电力的大小和方向就会改变. 这实际上反映出, 静电力与电荷在带电体上的分布状况有关. 因此, 影响静电力的因素是复杂的.

但是, 进一步的实验指出, 当两个带电体相距足够远, 以致带电体本身的几何线度比起两者之间的距离来可以忽略不计时, 静电力的大小和方向与带电体的形状无关, 仅由两者的电量以及相互间的距离决定. 根据这一事实, 我们抽象出点电荷的概念, 即: 当带电体的几何线度比起它与