

中国科学技术大学  教材

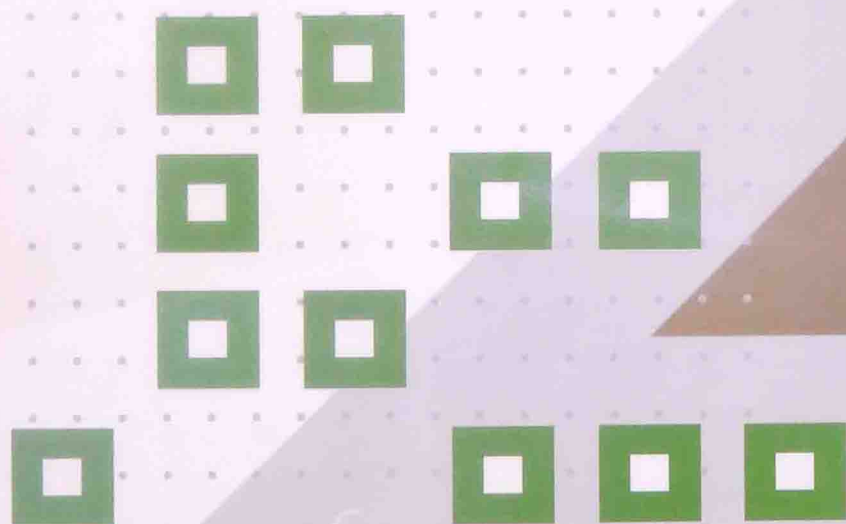
“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

电磁学

叶邦角 编著



中国科学技术大学出版社

第1版 (2006年12月第1次印刷)

ISBN 7-03-018888-8

中国科学技术大学

电磁学讲义及随堂练习

陈熙远 编著

电磁学

—— 讲义 ——



中国科学技术大学出版社

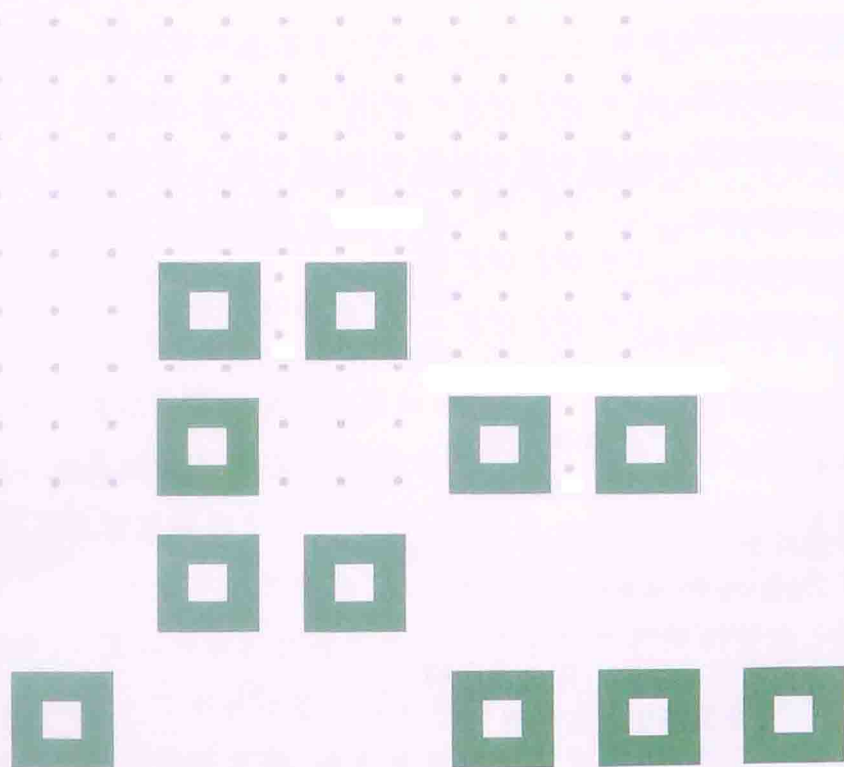
中国科学技术大学
“十二五”国家重点图书出版项目

中国科学技术大学 交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

电磁学

叶邦角 编著



中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/叶邦角编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014.8
(中国科学技术大学交叉学科基础物理教程)
中国科学技术大学精品教材
“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-312-03526-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 144419 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:880 mm×1230 mm 1/16 印张:31 字数:702 千

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

定价:99.00 元

序 ■

物理学从17世纪牛顿创立经典力学开始兴起,最初被称为自然哲学,探索的是物质世界普遍而基本的规律,是自然科学的一门基础学科。19世纪末20世纪初,麦克斯韦创立电磁理论,爱因斯坦创立相对论,普朗克、波尔、海森堡等人创立量子力学,物理学取得了一系列重大进展,在推动其他自然学科发展的同时,也极大地提升了人类利用自然的能力。今天,物理学作为自然科学的基础学科之一,仍然在众多科学与工程领域的突破中、在交叉学科的前沿研究中发挥着重要的作用。

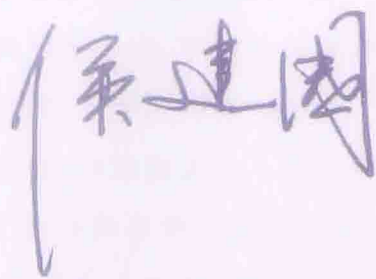
大学的物理课程不仅仅是物理知识的学习与掌握,更是提升学生科学素养的一种基础训练,有助于培养学生的逻辑思维和分析与解决问题的能力,而且这种思维和能力的训练,对学生一生的影响也是潜移默化的。中国科学技术大学始终坚持“基础宽厚实,专业精新活”的教育传统和培养特色,一直以来都把物理和数学作为最重要的通识课程。非物理专业的本科生在一二年级也要学习基础物理课程,注重在这种数理训练过程中培养学生的逻辑思维、批判意识与科学精神,这也是我校通识教育的主要内容。

结合我校的教育教学改革实践,我们组织编写了这套“中国科学技术大学交叉学科基础物理教程”丛书,将其定位为非物理专业的本科生

物理教学用书,力求基本理论严谨、语言生动浅显,使老师好教、学生好学。丛书的特点有:从学生见到的问题入手,引导出科学的思维和实验,再获得基本的规律,重在启发学生的兴趣;注意各块知识的纵向贯通和各门课程的横向联系,避免重复和遗漏,同时与前沿研究相结合,显示学科的发展和开放性;注重培养学生提出新问题、建立模型、解决问题、作合理近似的能力;尽量作好数学与物理的配合,物理上必需的数学内容而数学书上难以安排的部分,则在物理书中予以考虑安排等。

这套丛书的编者队伍汇集了中国科学技术大学一批老、中、青骨干教师,其中既有经验丰富的国家教学名师,也有年富力强的教学骨干,还有活跃在教学一线的青年教师,他们把自己对物理教学的热爱、感悟和心得都融入教材的字里行间。这套丛书从2010年9月立项启动,期间经过编委会多次研讨、广泛征求意见和反复修改完善。在丛书陆续出版之际,我谨向所有参与教材研讨和编写的同志,向所有关心和支持教材编写工作的朋友表示衷心的感谢。

教材是学校实践教育理念、达到教学培养目标的基础,好的教材是保证教学质量的第一环节。我们衷心地希望,这套倾注了编者们的心血和汗水的教材,能得到广大师生的喜爱,并让更多的学生受益。



2014年1月于中国科学技术大学

前 言 ■

电磁学是一门实验科学,电磁学的规律经过人类几百年的实验研究,才逐渐地形成了一个系统的科学规律体系。电磁学又是一门应用十分广泛的科学,科学研究各个领域都或多或少地要用到电磁学基本理论。很多在科研上有成就的人回顾大学普通物理,普遍认为电磁学是一门最接近科学研究和实际应用的课程,很多一线的科技工作者最常用到的仍是电磁学中的基本原理。目前高等学校理工科涉及物理学与其他学科交叉的院系的普通物理的教学中,电磁学仍是基本的主干课程,尽管授课内容和学时已经压缩了不少。但是作为交叉科学领域的本科生,通常会出现两种情况:一是不知道为什么学习电磁学,也就是不知道学了有什么用;二是电磁学的内容要学多少才合适。编写本书的目的就是希望能解决这两个问题。

目前国内外电磁学教材主要有两种类型:第一种主要适用于大学物理院系的本科生,强调电磁学基本规律的发现和电磁理论体系的建立;第二种主要适用于非物理院系的理工科本科生,注重电磁现象的简单规律和少量应用。作为交叉科学领域的电磁学教材,本教材编写的主要宗旨是,既要保持电磁学基本规律的完整性,同时又尽量结合实际应用。本教材的编写原则是:第一要体现交叉,即要把各个学科涉及的电磁现

象和应用在本书中体现出来;第二需要把电磁学基本规律的发现和电磁学理论体系的形成过程尽量做详细介绍,因为这是一个人类发现自然科学规律的妙趣横生和激动人心的历程;第三尽可能把电磁学中的各个物理概念讲清楚,避免概念学习的“夹生饭”、似是而非;第四是把最基本、最前沿、最有用的东西交待给学生,即要充分考虑到学生学的内容是将来可能有用的;第五是尽量把“场”的概念贯穿在全书中,因为现代物理学中“场”的概念就是从电磁学开始的。在物理内容的选择上,作者主要选择电磁学的最基本规律和最基本应用,同时也在教材中出现一些较新的和现在还在探索的问题,主要是为了整个电磁学知识的系统性并体现电磁学的发展。本教材是一本介于物理类本科生和非物理类本科生之间的教材,物理类和非物理类本科生都可以选择其作为教材和参考书。教学过程中可以根据授课对象而选择相关的内容,有些章节可以让学生自己阅读。

本书共分为8章。第1章主要介绍电力和电场的基本概念;主要介绍库仑定律、电场强度和高斯定理,电场中的导体作为静电场的一个应用内容安排在本章。第2章是电势和电场能量;把电势概念放在这一章的主要原因,是电势概念的引进是通过做功和电势能关系,与力学中引进重力势能类似;电容器作为储存电场能量的器件也放在这一章中,而电介质是作为电容器内部的介质而引出概念,同时极化过程也是与电场相互作用的过程,体现的也是能量的概念;作为应用,本章还介绍了介观体系的电学特性及生物和医学中的电现象。第3章主要是电流与电路:从前面的静止电荷到本章的运动电荷,逐渐形成电流的概念以及电路的基本方程;除基尔霍夫定律外,本章还介绍了直流电路的另外一些基本规律;作为应用,本章还介绍了地球的电环境。第4章主要介绍磁力与磁场,从人类对磁现象的认识对磁学基本规律逐渐发现,一直到磁场概念的引进;由于磁现象的特殊性,磁场的高斯定理和安培环路定律都在本章描述,这可以加深学生对运动电荷形成电流、电流形成磁场的理解;本章对带电粒子在磁场中的运动介绍较为详细,此外还专门介绍了天体的磁场与强磁场。第5章主要介绍材料的磁性和磁性材料;本章主要描述材料在磁场中磁化的基本规律,同时介绍了目前最常见的几种磁性材料,对磁场的测量本章也做了较为详细的介绍。第6章主要介绍电磁感



应和磁场能量:从法拉第电磁感应现象的发现到感应线圈,再从感应线圈引出互感与自感概念,再从储能的角度来讨论磁场的能量。第7章主要介绍交流电和电力输送:重点介绍交流电路的复数解法,也介绍交流和直流两种输电方式。第8章是对整个电磁学理论体系的总结和提高:从静态的电场和磁场到随时间变化的电场和磁场,再到麦克斯韦方程组;泊松方程和拉普拉斯方程在这章做简单介绍,同时也介绍解静电场的一种特殊方法——电像法;本章还从麦克斯韦方程组出发导出电磁波方程以及电磁学基本规律;对电路中能量的传输过程描述较为详细。

本书的编写是对基础物理课程教学的一种探索。尽管内容在难度上要稍微低于物理类电磁学教材,但是其对概念的描述和对电磁现象规律的描述更加详细,更注重交叉和应用;在习题选择上也保持数量不多的特点,但是尽量采用以实际应用为背景的习题,以及将研究中遇到的问题做习题,难度适中;本书也有收集少量的较难题目供教学中使用。

本书是基于作者在十几年的教学过程中逐渐产生的一种想法而形成的一本教材,在编写过程中得到了中国科学技术大学电磁学教学组各位前辈和老师的帮助和指导,在这里表示感谢。本书能编辑出版,特别要感谢清华大学安宇教授、中山大学黄迺本教授和中国科学技术大学胡友秋教授在评审本书过程中所做的细致的修改工作,并提出了宝贵的修改意见和建议。此外,还要感谢中国科学技术大学2012级物理学院、严济慈班、少年班学院和核科学技术学院的本科生在本教材使用过程中提出的建议和意见。感谢物理学院2013级本科生对本书习题解答做出的贡献。

由于编者水平有限,本书如有错误,敬请读者提出批评和建议。

叶邦角

2013年5月24日

目 次

序	(i)
前 言	(iii)
绪论 电磁科学的发展以及在近代科学技术中的应用	(1)
0.1 电磁科学体系的建立与“场”理论的诞生	(2)
0.2 电磁科学与电气化	(4)
0.3 电磁科学与通讯	(6)
0.4 电磁科学与现代科学与技术	(9)
第 1 章 电力与电场	(15)
1.1 电力起源	(16)
1.1.1 电现象研究简史	(16)
1.1.2 摩擦起电	(17)
1.1.3 物质结构和电荷	(18)
1.1.4 电荷守恒定律	(20)
1.2 材料的电性质	(23)
1.2.1 物质导电性能	(23)
1.2.2 接触带电和感应带电	(27)
1.3 库仑定律	(28)
1.3.1 库仑定律	(28)
1.3.2 叠加原理	(32)
1.4 电场强度	(33)

1.4.1	电场	(33)
1.4.2	电场强度	(35)
1.5	高斯定理	(39)
1.5.1	电场线与电通量	(39)
1.5.2	高斯定理	(40)
1.6	静电场中的导体	(47)
1.6.1	静电平衡	(47)
1.6.2	静电屏蔽	(51)
1.6.3	静电的应用和测量	(52)
第 2 章 电势与电场能量		(59)
2.1	电势能	(60)
2.1.1	静电场做功	(60)
2.1.2	静电场的环路定理	(60)
2.1.3	电势能	(61)
2.2	电势与电势差	(62)
2.2.1	电势与电势差	(62)
2.2.2	等势面	(65)
2.2.3	带电粒子在电场中运动	(71)
2.3	电容与电容器	(77)
2.3.1	导体的电容	(77)
2.3.2	电容器的联结	(82)
2.3.3	超级电容器	(85)
2.4	介质材料的电学特性	(87)
2.4.1	电介质材料	(87)
2.4.2	电介质的极化	(88)
2.4.3	电介质的基本电学特性	(95)
2.4.4	低介电常数与高介电常数材料	(98)
2.4.5	铁电体介质和压电效应	(102)
2.5	静电场的能量	(104)
2.5.1	点电荷系统的静电相互作用能	(104)
2.5.2	带电体的静电能	(106)
2.5.3	电容器的储能	(109)



2.5.4 电场的能量	(110)
2.6 介观体系的电学特性	(112)
2.6.1 量子化电导(量子点接触)	(112)
2.6.2 库仑阻塞和单电子隧穿	(113)
2.6.3 单电子存储器	(115)
2.7 生物和医学中的电现象	(117)
2.7.1 细胞的生物电现象	(117)
2.7.2 心电图原理	(120)
第3章 电流与电路	(123)
3.1 电流与电流密度	(124)
3.1.1 电流的形成	(124)
3.1.2 电流强度与电流密度	(126)
3.1.3 电流连续性方程	(128)
3.1.4 稳恒条件	(129)
3.2 欧姆定律	(129)
3.2.1 欧姆与欧姆定律	(129)
3.2.2 电流的功和功率	(134)
3.2.3 不同导体分界面电流的关系	(135)
3.2.4 金属导电的德鲁特模型	(136)
3.2.5 半导体的导电机制	(138)
3.2.6 导电介质	(141)
3.2.7 欧姆定律的失效问题	(145)
3.3 电源及电动势	(146)
3.3.1 电源与电动势	(146)
3.3.2 常见的几种稳恒电源	(147)
3.3.3 全电路欧姆定律	(153)
3.4 直流电路的基本规律	(155)
3.4.1 基尔霍夫定律	(155)
3.4.2 叠加原理	(160)
3.4.3 电容的充电和放电	(161)
3.5 电压源和电流源	(162)
3.5.1 电压源	(162)

3.5.2 电流源	(164)
3.5.3 戴维宁定理和诺顿定理	(166)
3.5.4 电压源与电流源的等效变换	(167)
3.5.5 安全用电	(168)
3.6 地球的电环境	(170)
3.6.1 大气电场和电流	(170)
3.6.2 雷电形成机制与雷电的控制	(173)

第4章 磁力与磁场

(179)

4.1 磁现象与磁力	(180)
4.1.1 磁现象研究历史和磁性的起源	(180)
4.1.2 安培定律	(186)
4.2 电流的磁场	(188)
4.2.1 磁感应强度	(188)
4.2.2 通电导线在磁场中所受的力与力矩	(196)
4.3 静磁场的基本定理	(197)
4.3.1 磁感应线与磁通量	(197)
4.3.2 磁场高斯定理	(198)
4.3.3 安培环路定理	(201)
4.4 带电粒子在磁场中的运动	(206)
4.4.1 带电粒子在均匀磁场中的运动	(206)
4.4.2 带电粒子在非均匀磁场中的运动	(210)
4.5 霍尔效应	(223)
4.5.1 霍尔效应	(223)
4.5.2 量子霍尔效应	(225)
4.5.3 电阻单位欧姆和精细结构常数的标准	(226)
4.6 天体的磁场和强磁场产生	(228)
4.6.1 天体的磁场	(228)
4.6.2 强磁场的产生	(234)

第5章 物质中的磁场与磁性材料

(237)

5.1 磁介质及其磁化	(238)
5.1.1 磁化强度	(238)



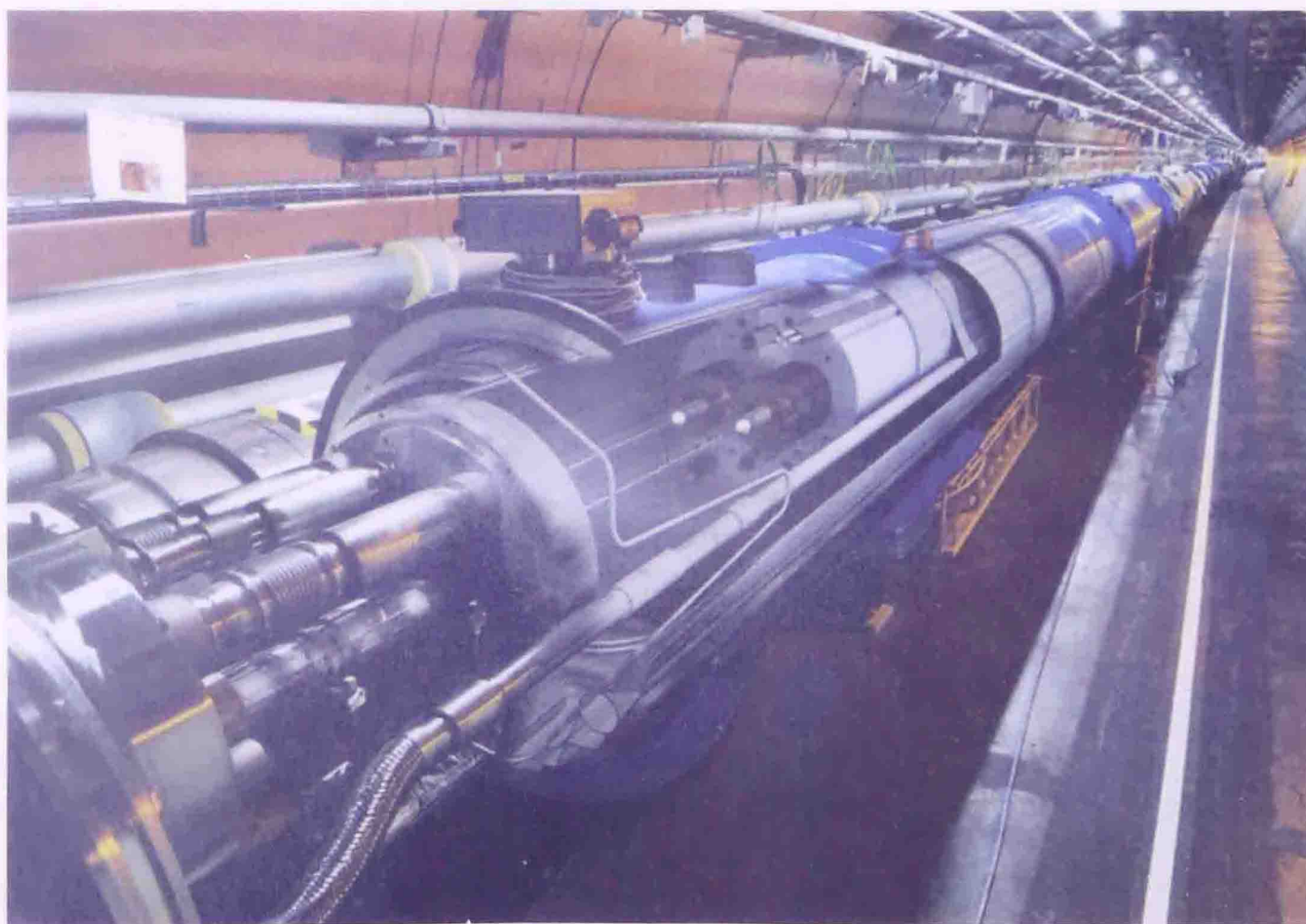
5.1.2	磁化电流	(242)
5.1.3	磁介质存在时的高斯定理和环路定理	(245)
5.1.4	磁化规律	(247)
5.1.5	磁介质的边值关系	(248)
5.2	磁性材料	(249)
5.2.1	抗磁性、顺磁性和铁磁性	(250)
5.2.2	磁路定律与磁屏蔽	(259)
5.2.3	特殊材料的磁性	(265)
5.3	新型材料中的磁现象	(270)
5.3.1	纳米材料中的磁性	(270)
5.3.2	巨磁电阻材料	(273)
5.3.3	超导体的磁性	(276)
5.4	磁场的测量	(284)
5.4.1	高磁场的测量	(286)
5.4.2	低磁场的测量	(288)
第6章 电磁感应与磁场的能量		(291)
6.1	电磁感应定律	(292)
6.1.1	电磁感应现象	(292)
6.1.2	法拉第电磁感应定律	(294)
6.2	动生电动势和感生电动势	(297)
6.2.1	动生电动势	(297)
6.2.2	感生电动势和涡旋电场	(302)
6.2.3	电磁感应的相对性	(304)
6.2.4	涡电流和趋肤效应	(307)
6.2.5	电子感应加速器	(310)
6.3	互感与自感	(313)
6.3.1	互感与互感系数	(313)
6.3.2	自感与自感系数	(315)
6.3.3	自感系数与互感系数的关系	(318)
6.3.4	电感的串联与并联	(319)
6.4	似稳电路和暂态过程	(325)
6.4.1	似稳过程与似稳电路	(325)

6.4.2	暂态过程	(326)
6.5	磁场的能量	(328)
6.5.1	载流线圈系统的磁能	(328)
6.5.2	载流线圈在外磁场中的磁能	(331)
6.5.3	磁场的能量和磁能密度	(333)
第 7 章	交流电路与电力输送	(337)
7.1	交流电的产生和基本特性	(338)
7.1.1	交流电的产生	(338)
7.1.2	交流电的类型	(339)
7.1.3	简谐交流电的表述和特征量	(341)
7.1.4	交流电路中的元件	(341)
7.1.5	交流电路的三角函数和矢量图解法简介	(345)
7.2	交流电路的复数解法	(350)
7.2.1	电阻、电容和电感的复数表示	(350)
7.2.2	交流电路的复数解法	(351)
7.3	交流电的功率	(356)
7.3.1	交流电的功率	(356)
7.3.2	功率因数	(357)
7.3.3	品质因数	(360)
7.3.4	交流电桥	(364)
7.4	变压器与电力输送	(365)
7.4.1	变压器原理	(366)
7.4.2	高压输电技术	(371)
7.4.3	特斯拉线圈	(374)
第 8 章	电磁现象的基本规律与电磁波	(377)
8.1	静态电场和磁场的基本规律	(380)
8.1.1	静电场的泊松方程和拉普拉斯方程	(380)
8.1.2	边值问题和静电场的唯一性定律	(381)
8.1.3	电像法	(383)
8.1.4	静态磁场的基本规律	(391)
8.2	时变的电场与磁场的基本规律	(392)



8.2.1 时变情况下的电场环路定律	(393)
8.2.2 时变情况下的电场高斯定理	(393)
8.2.3 时变情况下的磁场高斯定理	(393)
8.2.4 时变情况下的磁场安培环路定理	(394)
8.3 麦克斯韦方程组	(399)
8.3.1 麦克斯韦方程组	(399)
8.3.2 其他形式的麦克斯韦方程组	(401)
8.4 平面电磁波	(403)
8.4.1 真空中自由空间的电磁波	(403)
8.4.2 赫兹实验	(404)
8.4.3 平面电磁波的性质	(406)
8.4.4 电磁波在导体中的传播	(407)
8.4.5 电磁波谱	(409)
8.5 电磁场能量和能量传输	(416)
8.5.1 电磁场的能量	(416)
8.5.2 电磁场的能流	(418)
8.5.3 太阳光的能量传输	(425)
8.5.4 无线输电技术	(428)
习题	(431)
部分习题参考答案	(459)
附录 I 物理学常用常数表	(465)
附录 II 矢量分析与场论初步	(466)
附录 III 名词索引	(470)
附录 IV 教学计划参考方案	(474)

绪论 电磁科学的发展以及在近代科学技术中的应用



世界上最大的加速器 CERN-LHC, 是电磁科学应用的一部百科全书