



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书

主编 杨国桢 副主编 程福臻

电磁学与电动力学

[上册]

(第二版)

胡友秋 程福臻 叶邦角 刘之景 编著



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书
主 编 杨国桢 副主编 程福臻

电磁学与电动力学(上册)

(第二版)

胡友秋 程福臻 叶邦角 刘之景 编著



科学出版社

内 容 简 介

本书是作者在多年教学经验的基础上,将电磁学与电动力学的内容适当贯通,既分阶段,又平滑过渡,由此避免不必要的重复,以利于缩短学时,便于学生掌握.全书分为上、下两册,本书为上册,主要深入讲解电磁场的性质,研究电磁场和介质相互作用的本质和规律,并深入探讨了电磁场作为一种物质的运动状态的普遍量度——能量.书中应用实例和例题甚多,以便学生更好地掌握基本概念和基本理论.

本书可作为普通高等学校物理或应用物理专业本科生的电磁学课程的教材或参考书,也可供相关专业师生和科技工作者参考.

图书在版编目(CIP)数据

电磁学与电动力学.上册/胡友秋等编著.—2版.—北京:科学出版社,2014.6
中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书/杨国桢主编
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978-7-03-041175-4

I. ①电… II. ①胡… III. ①电磁学-高等学校-教材 ②电动力学-高等学校-教材 IV. ①O44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127714 号

责任编辑:窦京涛 王 刚 / 责任校对:李 影
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 6 月第 二 版 印张:21

2014 年 6 月第九次印刷 字数:420 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版丛书序

2008年这套丛书正式出版,至今使用已五年,回想当初编书动机,有一点值得一提.我初到中国科学技术大学理学院担任院长,一次拜访吴杭生先生,向他问起科大的特点在哪里,他回答在于它的本科教学,数理基础课教得认真,学生学得努力,特别体现在十年CUSPEA考试(中美联合招收赴美攻读物理博士生考试)中,科大学生表现突出.接着谈起一所大学对社会最重要的贡献是什么,他认为是培养出优秀的学生,当前特别是培养出优秀的本科生.这次交谈给了我深刻的印象和启示.后来一些参加过CUSPEA教学的老教师向我提出,编一套科大物理类本科生物理教材,我便欣然同意,并且在大家一致的请求下担任了主编.我的期望是,通过编写这套丛书将CUSPEA教学的一些成果能保留下来,进而发扬光大.

应该说这套书是在十年CUSPEA班的教学内容与经验基础上发展出来的,它所涵盖的内容有相当的深度与广度,系统性与科学的严谨性突出;另外,注重了普通物理与理论物理的关联与融合、各本书物理内容的相互呼应.但是,使用了五年后,经过教师的教学实践与学生的互动,发现了一些不尽如人意的地方和错误,这次能纳入“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材”是个很好的修改机会,同时大家也同意出版配套的习题解答,也许更便于校内外的教师选用.为大学本科生教学做一点贡献是我们的责任,也是我们的荣幸.盼望更多的使用本套书的老师和同学提出宝贵建议.

杨国桢

2013年10月于合肥

第一版丛书序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年,值此筹备校庆之际,由几位长年从事基础物理教学的老师建议,编著一套理科基础物理教程,向校庆五十周年献礼.这一建议在理学院很快达成了共识,并受到学校的高度重视和大力支持.随后,理学院立即组织了在理科基础物理教学方面有丰富教学经验的老师,组成了老、中、青相结合的班子,着手编著这套丛书,并以此进一步推动理科基础物理的教学改革与创新.

中国科学技术大学在老一辈物理学家、教育家吴有训先生、严济慈先生、钱临照先生、赵忠尧先生、施汝为先生的亲自带领和指导下,一贯重视基础物理教学,历经五十年如一日的坚持,现已形成良好的教学传统.特别是严济慈和钱临照两位先生在世时身体力行,多年讲授本科生的力学、理论力学、电磁学、电动力学等基础课.他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带领出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生.这套丛书的作者,应该说都直接或间接受到过两位先生的教诲.出版这套丛书也是表达作者对先生的深深感激和最好纪念.

这套丛书共九本:《力学与理论力学(上、下)》、《电磁学与电动力学(上、下)》、《光学》、《原子物理与量子力学(上、下)》、《热学 热力学与统计物理(上、下)》.每本约40万字,主要是为物理学相关专业本科生编写的,也可供工科专业物理教师参考.每本书的教学学时约为72学时.可以认为,这套丛书系列不仅是普通物理与理论物理横向关联、纵向自洽的基础物理教程,同时更加适合我校理科人才培养的教学安排,并充分考虑了与数学教学的相互配合.因此,在教材的设置上,《力学与理论力学(上、下)》、《电磁学与电动力学(上、下)》中,上册部分分别是普通物理内容,而下册部分为理论物理内容.还要指出的是,在《原子物理与量子力学(上、下)》、《热学 热力学与统计物理(上、下)》中,考虑到普通物理与理论物理内容的界限已不再那样泾渭分明,而比较直接地用现代的、实用的概念、物理图像和理论来阐述,这确实不失为一种有意义的尝试.

这套丛书在编著过程中,不仅广泛吸取了校内老师的经验,采纳了学生的意见,而且还征求了中国科学院许多相关专家的意见和建议,体现了“所系结合”的特点.同时,还聘请了兄弟院校及校内有丰富教学经验的教授进行双重审稿,期望将其错误概率降至最低.

历经几年,在科学出版社大力支持下,这套丛书终于面世,愿她能在理科教学改革与创新中起到一点作用,成为引玉之砖,一起来促进物理学教学水平的提高及其优秀人才的培养,并望广大师生及有关专家们继续提出宝贵意见和建议,以便改进.最后,对方方面面为这套丛书编著与出版的完成所付出艰辛努力及其给予关心、帮助的同志表示深切感谢!

中国科学技术大学理学院院长

杨国桢 院士

2007年10月

第二版前言

本书是在科学出版社 2008 年 7 月《电磁学与电动力学》上册(胡友秋、程福臻、叶邦角编著)第一版的基础上进行修订后再版的;第一版教材又是在高等教育出版社 1994 年 5 月出版的《电磁学》(胡友秋、程福臻、刘之景编)的基础上修改、补充而成的;此次再版教材补充作者刘之景。

《电磁学与电动力学》上册第一版自出版以来,一直作为中国科学技术大学所有本科生“电磁学”课程的教材,已经连续使用了 5 年.在使用过程中发现一些内容、概念、习题和答案中出现的笔误和欠妥之处.至 2012 年春季学期,“电磁学”课程组鼓励学生在学习“电磁学”的过程中,对教材的内容逐字逐句进行推敲,对习题答案进行一一核对,并安排一位助教专门收集和汇总学生提出的修改意见和建议.最后,本书的编者将这些意见和建议逐条进行核实,并作了相应修改.这次再版的书稿就是在这些修改的基础上完成的.

我们要特别感谢所有给本书提出修改意见和建议的中国科学技术大学物理学院 2011 级本科生和 2011 级少年班学院的本科生.感谢中国科学技术大学“电磁学”课程组所有为本书提出修改建议的老师和助教们.由于作者的知识和水平有限,错误和疏漏之处仍在所难免,期盼读者批评指正.

胡友秋 程福臻 叶邦角 刘之景

2013 年 12 月于合肥

第一版前言

首先应该说明的是,本书是在1994年5月高等教育出版社出版的《电磁学》(胡友秋、程福臻、刘之景编)的基础上修改、补充而成.原书经过十多年在中国科学技术大学理学院及一些兄弟院校物理系使用,得到广大师生的认可,也收到他们许多宝贵意见和建议.特别近十年来,“全国电磁学教学与教材研究会年会”的正常举行,为国内各高校教师之间的交流提供了平台,使我们从同行那里学到了许多经验,得到了丰富的教学信息.在我校五十年校庆之际,我们决定修改、补充原书.新书保留了原书的特点,即深入讲解电磁场的性质,研究电磁场和介质相互作用的本质和规律,仔细探讨了电磁场作为一种物质的运动状态的普遍量度——能量.删除了偏于电动力学的部分内容,如对缓慢运动介质、超导体和等离子体一类特殊介质中的电磁场的分析.适当增加了一些新的应用实例和例题,以便学生能更好地掌握基本概念和基本理论.将“单位制和单位制间的公式变换”编为附录,并在书末给出教学进度和作业布置,供任课教师参考.

本书共计10章,按72学时取材,但考虑到许多高校电磁学课程的总学时限制,我们在本书目录部分用“*”号标出可略去不讲或视需要部分讲授的内容.此外,对疑难习题标以“*”号,供使用本教材的教师参考.

最后,我们感谢中国科学技术大学电磁学教学组的全体同仁、清华大学物理系的安宇教授、中国科学技术大学张泰永教授,他们对我们的热情鼓励和对本书的反复研讨使得本书的质量不断提升.我们要特别感谢北京大学陈秉乾教授和中国科学技术大学张玉民教授,他们欣然地接受并仔细审阅书稿,提出了许多宝贵意见和建议,给本书增色不少.尽管如此,由于作者的知识水平和有限,错误和疏漏之处在所难免,期盼读者批评指正.

胡友秋 程福臻 叶邦角

2008年2月于合肥

目 录

第二版丛书序

第一版丛书序

第二版前言

第一版前言

第 1 章 真空中的静电场	1
1.1 电荷守恒	1
1.2 库仑定律	3
1.2.1 库仑扭秤实验	3
1.2.2 库仑定律	5
1.3 叠加原理	6
1.3.1 叠加原理的数学表述	6
1.3.2 带电体系对静止点电荷的作用力	6
1.3.3 带电体系之间的作用力	7
1.4 电场强度	8
1.4.1 电场强度的定义	8
1.4.2 各类带电体的电场强度	8
1.4.3 电场的物质性	9
1.4.4 电场强度计算举例	9
1.5 高斯定理	11
1.5.1 电通量	12
1.5.2 高斯定理	13
1.5.3 高斯定理与库仑定律的关系	15
1.5.4 高斯定理应用举例	16
1.5.5 电场线	18
1.6 环路定理	19
1.6.1 电场的环量	19
1.6.2 环路定理	20

1.7	电势	21
1.7.1	电势差与电势	21
1.7.2	电势的一般表达式	22
1.7.3	场强与电势的微分关系	23
1.7.4	等势面	24
1.7.5	应用举例	25
第2章	静电场中的导体和电介质	29
2.1	物质的电性质	29
2.1.1	物质的电性质	29
2.1.2	电场对电荷系统的作用	30
2.2	静电场中的导体	32
2.2.1	导体达到静电平衡的条件	32
2.2.2	处在静电平衡条件下导体的性质	33
2.2.3	导体在静电场中性质的应用	35
2.2.4	高斯定理和库仑定律的精确验证	38
2.3	电容和电容器	38
2.3.1	孤立导体的电容	39
2.3.2	电容器	39
2.3.3	电容器的连接	40
2.4	电介质	41
2.5	极化强度矢量 \mathbf{P}	43
2.5.1	\mathbf{P} 与极化电荷的关系	44
2.5.2	\mathbf{P} 与电场 \mathbf{E} 的关系	47
2.6	电介质中静电场的基本定理	50
2.6.1	高斯定理	50
2.6.2	环路定理	53
2.7	边值关系和唯一性定理	53
2.7.1	电场强度	53
2.7.2	电位移矢量	54
2.7.3	电势	55
2.7.4	静电场的唯一性定理	55

2.7.5 应用举例	57
* 2.8 电像法	61
第3章 静电能	66
3.1 真空中点电荷间的相互作用能	66
3.2 连续电荷分布的静电能	69
3.3 电荷体系在外电场中的静电能	75
3.4 电场的能量和能量密度	76
* 3.5 非线性介质及电滞损耗	78
* 3.6 利用静电能求静电力	80
第4章 稳恒电流	89
4.1 稳恒条件	89
4.1.1 电流强度和电流密度	89
4.1.2 电流连续方程	90
4.1.3 稳恒条件	91
4.2 欧姆定律	92
4.2.1 欧姆定律	93
4.2.2 焦耳定律	94
4.2.3 从经典电子论观点解释欧姆定律和焦耳定律	95
4.2.4 欧姆定律的失效问题	97
4.3 电源及电动势	97
4.3.1 电源及其电动势	97
4.3.2 常见的几种电源	99
4.3.3 路端电压、电动势和全电路欧姆定律	102
4.3.4 稳恒电路的特点	103
4.3.5 稳恒电路中静电场的作用	103
4.4 基尔霍夫定律	104
4.4.1 节点、支路和回路	104
4.4.2 基尔霍夫定律	105
4.4.3 支路电流法	105
4.4.4 回路电流法	106
* 4.5 稳恒电流和静电场的综合求解	107

4.5.1	基本方程	108
4.5.2	基本方程的闭合性	108
4.5.3	与纯静电场问题类比	111
第5章	真空中的静磁场	115
5.1	磁现象与磁场	115
5.1.1	磁的基本现象与磁的库仑定律	115
5.1.2	奥斯特实验——电流磁效应	116
5.1.3	磁感应强度	117
5.1.4	安培力公式与洛伦兹力公式	118
5.2	毕奥-萨伐尔定律	120
5.2.1	毕奥-萨伐尔定律	120
5.2.2	毕奥-萨伐尔定律应用举例	121
5.3	安培定律	126
5.3.1	四个示零实验	126
5.3.2	安培定律	128
5.3.3	安培力及其应用	129
5.4	静磁场的基本定理	130
5.4.1	磁场的高斯定理	130
5.4.2	安培环路定理	131
5.4.3	磁场的几何描述	132
5.4.4	两条定理与毕奥-萨伐尔定律的关系	133
5.4.5	安培环路定理的应用	134
5.5	带电粒子在磁场中的运动	136
5.5.1	运动特征	137
5.5.2	应用举例	139
5.5.3	宏观效应	143
第6章	静磁场中的磁介质	145
6.1	磁场对电流的作用	145
6.1.1	磁场对电流的力和力矩	145
6.1.2	电流受力和力矩的计算举例	146
6.2	磁介质及其磁化强度 \mathbf{M}	147

6.2.1	磁化强度	148
6.2.2	磁化电流	148
6.3	介质中的静磁场的基本定理	150
6.4	介质的磁化规律	152
6.4.1	介质按磁化规律的分类	152
6.4.2	介质磁化的微观机制	155
6.4.3	无限均匀线性各向同性介质中的静磁场	159
6.5	边值关系和唯一性定理	160
6.5.1	磁场在磁介质界面上的边值关系	160
6.5.2	静磁场的唯一性定理	161
6.5.3	分区均匀线性各向同性介质中的静磁场	162
* 6.6	磁像法	167
6.6.1	介质界面为无限平面	168
6.6.2	介质界面为无穷长圆柱面	171
6.7	磁路定理及其应用	172
6.7.1	磁路定理的基本方程	172
6.7.2	磁路定理的应用	173
* 6.8	磁荷法	176
6.8.1	磁荷观点下的静磁场规律	176
6.8.2	磁荷法和电流法的等效性	178
6.8.3	磁荷法的应用	179
第7章	电磁感应	182
7.1	电磁感应定律	182
7.1.1	电磁感应现象	182
7.1.2	法拉第电磁感应定律	184
7.1.3	感应电动势的计算	186
7.1.4	块状导体中的电磁感应现象	187
7.1.5	电磁感应定律和磁场的高斯定理	187
7.2	动生电动势和感生电动势	188
7.2.1	动生电动势	188
7.2.2	感生电动势	191

7.2.3	电子感应加速器	193
7.2.4	两种电动势引出的问题	194
7.3	互感和自感	194
7.3.1	互感现象和互感系数	194
7.3.2	自感现象和自感系数	196
7.3.3	两线圈的串联和并联	198
7.4	似稳电路和暂态过程	201
7.4.1	似稳条件	202
7.4.2	似稳电路方程	202
7.4.3	多回路电路的基尔霍夫定律	205
7.4.4	暂态过程	206
第8章	磁能	210
8.1	载流线圈的磁能	210
8.1.1	一个载流线圈的磁能	210
8.1.2	N 个载流线圈系统的磁能	211
8.2	载流线圈在外磁场中的磁能	212
8.3	磁场的能量和磁能密度	213
*8.4	非线性介质及磁滞损耗	215
*8.5	利用磁能求磁力	217
第9章	交流电路	222
9.1	基本概念和描述方法	222
9.1.1	基本概念	222
9.1.2	描述方法	223
9.2	交流电路的复数解法	228
9.2.1	交流电路的基本方程	228
9.2.2	电路方程的复数形式	229
9.2.3	交流电路元件的复阻抗	231
9.3	交流电的功率	232
9.3.1	瞬时功率	232
9.3.2	平均功率	233
9.3.3	视在功率和功率因素	233

9.3.4 由电压和电流复有效值计算平均功率	234
9.4 交流电路分析举例	234
9.4.1 串联谐振电路	234
9.4.2 并联谐振电路	236
9.4.3 变压器电路	238
第 10 章 麦克斯韦电磁理论	240
10.1 麦克斯韦方程组	240
10.1.1 两个大胆的推广	241
10.1.2 两个重要的假设	241
10.1.3 麦克斯韦方程组	245
10.1.4 边值关系	246
10.2 平面电磁波	246
10.2.1 电磁波的产生机制	246
10.2.2 平面电磁波的性质	248
10.2.3 赫兹实验	250
10.2.4 电磁波谱	252
10.3 电磁场的能量、动量和角动量	253
10.3.1 电磁场的能量、动量和角动量	253
10.3.2 平面电磁波的能量和动量	254
10.3.3 光压	254
10.3.4 电磁场具有角动量的验证	256
习题	257
习题参考答案	283
参考书目	291
名词索引	292
教学进度和作业布置	297
附录 I 科学家中英文姓名对照表	299
附录 II 单位制和单位制间的公式变换	301
附录 III 物理常数	311
附录 IV 矢量分析中的常用公式	312

第 1 章 真空中的静电场

1.1 电荷守恒

电学中最基本的概念是电荷. 早期人们是通过物质的力效应来定义它的. 人们发现许多物质, 如琥珀、玻璃棒、硬橡胶棒……经过毛皮或丝绸摩擦后, 能吸引轻小物质, 便说这些物质带了电荷.

近代物理学的实验揭示了电荷的物理本质. 电荷是基本粒子, 如电子、质子、 μ 子等的一种属性, 离开了这些基本粒子它便不能存在. 也就是说, 电荷是物质的基本属性, 不存在不依附物质的“单独电荷”. 1897 年, 英国物理学家汤姆孙测出了阴极射线带电粒子的荷质比约为氢离子(质子)的 2000 倍, 他指出这种带负电的粒子是一切原子的基本成员之一, 后来被称为电子, 他因此而荣获 1906 年诺贝尔物理学奖. 1909~1917 年, 密立根用油滴实验, 通过反复测量, 测定电荷的最小单位是 $1.59 \times 10^{-19} \text{C}$, 他因此荣获 1923 年诺贝尔物理学奖.

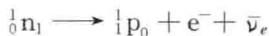
就我们现今所知, 电荷有如下的特点:

(1) 自然界中存在两种电荷, 分别称为正(+)电荷和负(-)电荷. 正如左和右一样, 它们的定义是任意的. 现在人们都习惯沿用美国物理学家富兰克林的定义, 即被丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷为“+”电荷, 被毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷为“-”电荷. 实验表明, 同号电荷相斥, 异号电荷相吸, 根据这一性质我们可以用实验来测出物体带有哪种电荷.

(2) 电荷是量子化的, 即在自然界里物质所带的电荷量不可能连续变化, 而只能一份一份地增加或减小. 如前所述, 这最小的一份电量是电子或正电子所带的电量, 我们把这电量的绝对值记为 e , e 就是自然界中电量的基本单元, 根据国际科技数据委员会 1986 年推荐值, $e = 1.602\ 177\ 33(49) \times 10^{-19} \text{C}$. 20 世纪 60 年代物理学家提出了一种更基本的粒子——夸克(quark), 夸克有 6 种, 分别带有 $-e/3$ 和 $2e/3$ 的电量. 30 多年来, 借助大型加速器, 采用了多种途径, 这 6 种夸克在实验上先后被科学家发现, 但至今还没有可靠的证据表明它们以自由状态存在, 即它们被禁闭在强子内部, 不能脱离强子自由运动. 带分数电荷的粒子的发现, 也不破坏电荷的量子性, 仅仅是将现在所能测到的最小的一份电量变得更小而已.

(3) 存在所谓“电荷对称性”. 1928 年, 狄拉克提出描写电子运动并且满足相对论不变性的波动方程, 并得到一个重要结论: 电子可以有负能值. 由此出发, 于 1930 年提出所谓“空穴”理论, 预言了带正电的电子(即正电子)的存在; 1931 年又预言了反粒子的存在, 电子-正电子对的产生和湮没. 我国物理学家赵忠尧先生(曾任中国科学技术大学近代物理系首任系主任, 他的导师就是密立根)于 1930 年在美国加利福尼亚州理工学院通过实验发现硬 γ 射线的反常吸收以及伴随出现的“特殊辐射”, 这就是最早观察到的正负电子对产生和湮没的现象. 1932 年, 安德逊在宇宙射线中发现正电子(e^+). 一系列近代高能物理实验表明, 对于每种带电的基本粒子, 必然存在与之对应的、带等量异号电荷的另一种基本粒子——反粒子. 例如, 我们有电子和正电子、质子和反质子、 π 介子和反 π 介子等.

(4) 电荷守恒. 一个孤立系统(与外界不发生电荷交换的系统)的电荷总量(代数和)是保持不变的, 它既不能创生, 也不会消灭. 电荷只能从系统内的一个物体转移到另一个物体, 系统的总电量既不随时间而变, 也与参考系的选取无关, 这就是电荷守恒定律. 例如, 原本都是中性的丝绸和玻璃棒组成的孤立系统, 电荷总量为零. 当用丝绸摩擦玻璃棒后, 玻璃棒上带正电, 而丝绸上带了与之等量的负电, 其系统的总电量仍为零. 又如, 任何化学反应前后系统的总电量相等. 电荷守恒作为自然界最普遍的规律之一, 它对核反应也是成立的. 如中子(n)经过 β 衰变产生一个质子、一个电子和一个反中微子:



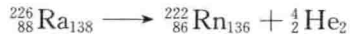
类似地, 有氦的 β 衰变反应式



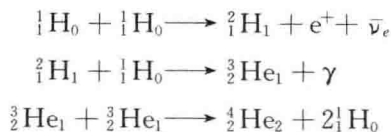
综合写出 β 衰变的一般反应式如下:



式中, A 为质量数, Z 为原子序数即电荷数, N 为中子数. 一个强放射性元素镭, 通过 α 衰变, 放出一个 α 粒子(${}_2^4He_2$)后转变为氡 ${}_{86}^{222}Rn_{136}$



对于太阳上核聚变反应的一种可能链式过程:



其中, 每一步反应都满足电荷守恒定律.