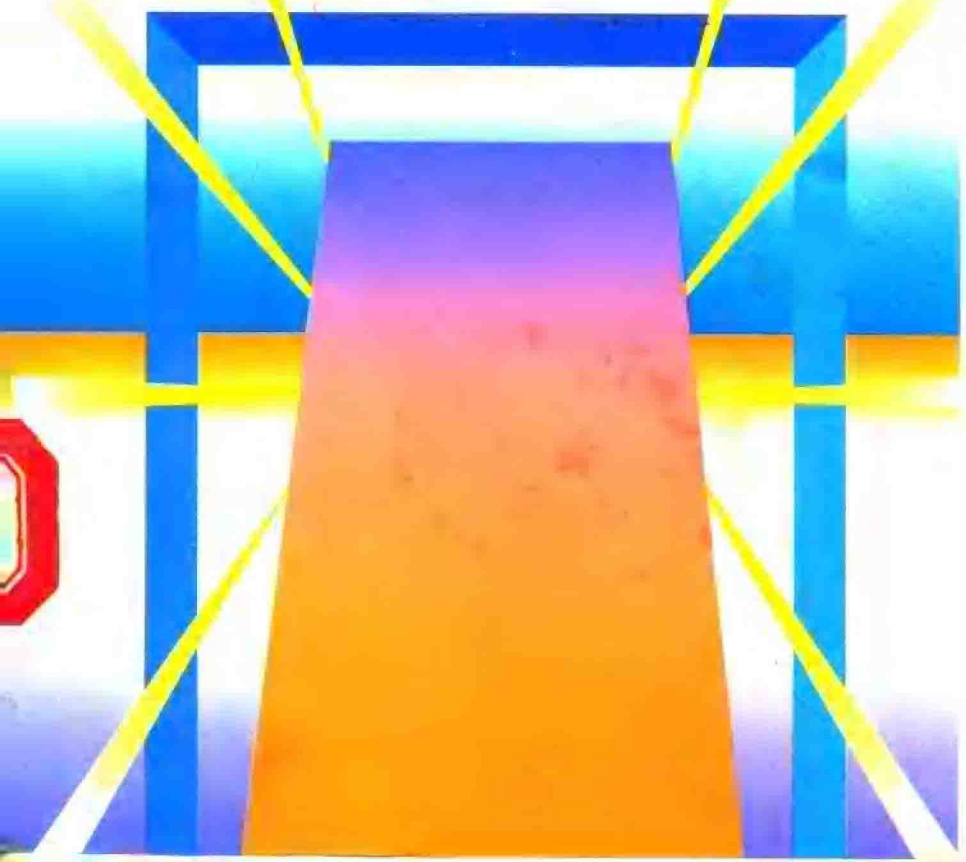


大学物理教程

电 磁 学

李铨 编著

G F G Y G B S



大学物理教程

电 磁 学

李 铨 编著

国防工业出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/李铨编著. —北京:国防工业出版社,1996. 1
(大学物理教程)

ISBN 7-118-01462-1

I. 电… II. 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(95)第 05336 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 13 $\frac{7}{8}$ 305 千字

1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1 -3000册 定价:16.20 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

SFE1/05

总 序

本书是根据国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材规划,结合作者多年来的教学实践编写的。按照各学校的实际情况和教材规划的要求,本教程的内容和深度介于物理系普通物理和工科普通物理之间。这一选择是为了使本教程能够适合应用物理专业,以及其他偏理的专业如技术物理、核物理、电子技术物理、材料科学、工程化学、生物科学等的需要。

本书注重对物理基本原理和概念的阐述,在注意严密性的同时,强调了借用现象、图象、比喻和实例来说明问题的本质,使内容更为丰富更具有吸引力。本书力求能够反映 20 世纪 90 年代物理学的面貌以及人们对物质世界的认识水平。在叙述方法上力求由简到繁、由表及里、便于启发、阅读,以利于引导读者积极思考和分析问题。

根据我们的教学经验,全书主要内容可用 180 学时讲完。本书作者曾多次研讨了全书的内容、结构和叙述方法,但为了方便读者,仍分册出版,包括力学、热学、电磁学、光学和原子物理学五个分册,它们既构成一个整体,又具有相对独立性,可以单独选用。

国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材建设组对本书进行了初审和复审;提出了极为宝贵的意见和建议。国防工业出版社的同志对本书的出版给予了热情的

支持和帮助,作者在此一并向他们表示衷心的感谢。

浙江大学李文铸教授主编了本教程,清华大学、北京工业大学、北京科技大学的几位教授担负了具体的编写工作。第一册《力学》由许崇桂、李铨编写,第二册《热学》由许崇桂编写,第三册电磁学由李铨编写,第四册《光学》由蔡峰怡编写,第五册《原子物理学》由史斌星编写。

在编写本书各册时,都参考了国内外若干教材和其他书籍,从中得到启发与教益。这些书籍无论在内容选择和安排,或对问题的分析、讨论,以及在插图、例题、习题等许多方面,都有各自的优点,其中有些地方无疑是值得借鉴和吸收的。这里难于一一指出,在此一并致谢。

作 者

前 言

本书是《大学物理教程》电磁学分册,其内容是系统地讨论电磁学的基本规律,并涉及到物质的最基本的电学性质和磁学性质。在内容安排上先从基本电磁现象出发,逐步深入到麦克斯韦的电磁场理论。在整个理论系统中突出了场的概念和场的研究方法,力图做到物理思想鲜明,物理图象清晰,简明扼要,并结合相对论,对某些问题作了进一步的分析,以利于读者更好地理解 and 掌握。

电磁学是物理学的重要组成部分,它具有广泛的应用价值。可以说,如果没有电磁学,就不可能有现代的先进科学技术。电磁学的建立和发展,也同样是基于对实验的观察、分析和归纳(包括“物理直觉”的猜想),并且不断地接受新的实验检验。在这个过程中,物理思想的提出,并进一步和数学演算相结合,则是非常重要的。因为只有这样才能得出定量的科学理论(包括有价值的科学预言)。所以说,物理学如果没有数学是不可想象的。然而,考虑到过于冗长的数学运算可能会给初学的读者带来困难,故有些数学知识(例如梯度、散度和旋度等)以及一些重要推证(例如电磁场的能量密度和动量密度等)均在附录中给出,以利于读者阅读。

作者考虑到交流电路这部分内容一般都放在电工学课程中讲授,故在本书中删去这部分内容。

本书的所有附录、各章习题和答案,是由张彬同志编写

的。全部书稿承蒙国家教委高等工业学校应用物理教材委员会陈纲教授、刘书声教授、徐亚伯教授、以及北京科技大学物理系高哲教授等学者专家审阅,并提出了很多宝贵意见,作者在此表示衷心的感谢。作者还要感谢李明同志、宋万秋同志等多方面的热情关怀。由于作者水平有限,一定会有不少的缺点和错误,请读者批评指正。

李 铨

于北京科技大学物理系

内 容 简 介

本书是《大学物理教程》电磁学分册。书中系统地讨论了电磁学的基本规律,从基本电磁现象出发,逐步深入到麦克斯韦电磁场理论。本书在论述中,充分突出场的概念及场的研究方法,融入了当今电磁学领域的新发展,是大学物理教材的革新之作。

目 录

第一篇 静电场及物质的电学性质

第一章 电荷和静电场	1
§ 1.1 电荷和电荷守恒定律	1
§ 1.2 库仑定律和叠加原理	6
§ 1.3 电场和电场强度	10
§ 1.4 静电场环路定理与电势概念	22
§ 1.5 关于电势零点的选择问题	32
§ 1.6 电场强度与电势的微分关系式	34
§ 1.7 静电场的几何描述	40
§ 1.8 电通量与高斯定理	44
§ 1.9 静电场基本方程	56
§ 1.10 静电学中的发散困难	59
习题	62
第二章 静电场中的导体	69
§ 2.1 电场在物质结构中的地位与作用	69
§ 2.2 金属导体的静电平衡状态	71
§ 2.3 静电场中的空心金属导体及其应用	79
§ 2.4 有导体存在时静电学问题的分析与计算	85
§ 2.5 导体的电容和电容器	90
§ 2.6 电容器的储能本领与电场的能量密度	98
习题	103

第三章	静电场中的电介质	109
§ 3.1	电介质的极化	109
§ 3.2	极化强度矢量与极化率	114
§ 3.3	极化电荷与极化强度的关系	116
§ 3.4	电位移矢量 D 的引入	120
§ 3.5	电介质在电容器中的作用	128
习题		130
第四章	电流	136
§ 4.1	电流密度矢量和连续性方程	136
§ 4.2	欧姆定律和导体的电阻	142
§ 4.3	欧姆定律的微观解释	148
§ 4.4	电功率与焦耳定律	158
§ 4.5	电源的电动势与能量转换	160
§ 4.6	一段含源电路的欧姆定律	168
§ 4.7	复杂电路与基尔霍夫方程组	171
§ 4.8	温差电现象及其应用	176
§ 4.9	金属的逸出功和热电子发射	183
习题		186

第二篇 磁场及物质的磁学性质

第五章	电流的磁场	193
§ 5.1	基本磁现象	193
§ 5.2	磁场和磁感应强度	199
§ 5.3	毕奥-沙伐尔定律及其应用	202
§ 5.4	磁通量和磁场的高斯定理	210
§ 5.5	安培环路定理	215
§ 5.6	安培环路定理的推导	221
§ 5.7	恒速运动电荷激发的电场和磁场	226
习题		232

第六章	磁场对运动电荷和电流的作用力	237
§ 6.1	带电粒子在均匀磁场中的运动	237
§ 6.2	回旋加速器的工作原理	242
§ 6.3	荷质比的测量和质谱仪	246
§ 6.4	磁约束及其在等离子体研究中的应用	250
§ 6.5	霍尔效应及其微观机制	254
§ 6.6	安培力及其微观机制	257
§ 6.7	均匀磁场对平面载流线圈的作用力矩	259
§ 6.8	磁矩和电矩的对比	262
习题		264
第七章	磁介质	271
§ 7.1	磁介质及其分类	271
§ 7.2	磁介质的磁化机制	272
§ 7.3	磁化强度矢量和磁化电流	281
§ 7.4	磁场强度 H 的引入	288
§ 7.5	超导体的完全抗磁性	294
§ 7.6	铁磁质	295
§ 7.7	磁介质的边界条件	303
§ 7.8	磁路和磁路定理	307
习题		313

第三篇 电磁场的普遍规律

第八章	电磁感应与电磁振荡	317
§ 8.1	电磁感应定律	317
§ 8.2	动生电动势与洛仑兹力	320
§ 8.3	感生电动势与感生电场	329
§ 8.4	涡电流与趋肤效应	336
§ 8.5	自感	339
§ 8.6	互感	342

§ 8.7	RL 电路中的电流	346
§ 8.8	磁场的能量和能量密度	351
§ 8.9	RLC 电路中的电磁振荡	353
§ 8.10	受迫电磁振荡	358
习题		361
第九章 电磁场和麦克斯韦方程组		369
§ 9.1	麦克斯韦方程组	369
§ 9.2	电场和磁场的相对性和相对论变换	376
§ 9.3	电磁场的波动性和物质性	381
§ 9.4	电磁波的辐射和传播	389
§ 9.5	电磁波谱	394
习题		395
附录		399
附录 I	立体角的概念	399
附录 II	标量场的梯度	402
附录 III	矢量场的散度和旋度	404
附录 IV	电磁场的能量密度和能流密度矢量	411
附录 V	电磁场的动量密度	414
习题答案		417

第一篇 静电场及物质的电学性质

本篇的主要内容包括：电荷和电场，静电场所遵从的基本规律，静电场中的导体和电介质，电流和电流密度，电流的连续性方程，欧姆定律和基尔霍夫定律等。

第一章 电荷和静电场

在这一章，我们首先讨论电荷的概念、电荷守恒定律、库仑定律和叠加原理。在这个基础上引入电场强度和电势的概念，并详细讨论静电场的环路定理和高斯定理。这是静电场所遵从的两条基本规律，是静电学的核心。关于电场强度和电势的计算，也是本章的重点。

§ 1.1 电荷和电荷守恒定律

(一) 电荷的量度和电荷的量子化

什么是电荷？按其原义电荷是电的同义词，那么什么是电呢？

所谓电,是指物质的一种固有属性。我们说电子是带电的,或者说电子带有电荷,其涵义就是指电子具有电这种属性。众所周知,物质的固有属性,总是通过物质之间的相互联系和相互制约才能表现出来。电这种属性当然也是这样。最早发现的电现象,是通过所谓“摩擦起电”而观察到的。一些经过摩擦的物体(例如用丝绸摩擦过的玻璃棒,或用毛皮摩擦过的胶木棒等),可以产生相互吸引或相互排斥的作用,人们正是通过对这种相互作用的研究,才逐步认识到电这种属性的。通过实验的观察和比较,人们发现有两种不同的电荷,分别称为正电荷和负电荷,而且同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引。当正负电荷聚集在一起时,它们的效应可以互相抵消,称为电荷中和。按照前人的规定,用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电称为正电,用毛皮摩擦过的胶木棒所带的电称为负电。这种规定一直沿用至今。

为了深入研究电现象的基本规律,我们必须对电荷作出定量的描述。为此,我们引入电量的概念。所谓电量就是电荷多少的量度。那么在电学中,对电荷又是怎样量度的呢?这只能根据电荷所产生的效应来作出规定。

起初,人们根据电荷之间存在作用力这一效应,来对电荷作出定量描述。设有三个可看作质点的带电体 a 、 b 和 c ,称它们为点电荷。先令 a 与 c 之间的距离为 r ,测出 a 所受的作用力 F_1 ,再令 b 与 c 之间相距同样的距离,测出 b 所受的作用力 F_2 ,记下这两个力的比值 F_1/F_2 。用其他点电荷代替 c 重复以上实验,发现 F_1 和 F_2 都有所不同,但它们的比值 F_1/F_2 却保持不变。表明这个比值只决定于点电荷 a 和 b ,而与 c 无关。改变距离 r 重复以上实验,发现 F_1 和 F_2 也都有所不同,但比值 F_1/F_2 仍保持不变。由此可见,比值 F_1/F_2 只反映 a 与 b 本身的

带电性质,因此可以把它用来表示 a 与 b 所带的电量 q_a 与 q_b 之比,亦即定义:

$$\frac{q_a}{q_b} = \frac{F_1}{F_2}$$

于是,只要测出 F_1 和 F_2 ,便可知道 q_a 是 q_b 的多少倍。如果指定 b 的电量为一个单位(即指定 $q_b=1$),则 a 的电量便是:

$$q_a = \frac{F_1}{F_2} \cdot 1$$

这样,我们就可以得到一个量度电荷的方法。

现在剩下的问题就是要明确规定其单位。为此,我们作如下的规定:在真空中,当两个点电荷所带的电量相同时,如果它们相距 1 厘米(cm)而各个电荷所受的作用力为 1 达因(dyn),则每个点电荷所带的电量,定义为 1“绝对静电单位”的电量。或称为 1“静库”。上述电量单位,是在 CGS 单位制基础上建立的,称为 CGSE 单位制。

现在国际上通用的单位制是 SI 单位制(即国际单位制)。在 SI 单位制中,电量是通过电流强度来量度的(电流强度的涵义就是单位时间内通过导线横截面的电量),而电流强度则是通过电流与电流之间存在作用力这一效应来量度的。设在真空中有两根截面积可以忽略、相距为 1 米(m)的无限长平行圆直导线,当两导线通以等量恒定的电流时,如果各导线在每米长度上所受的作用力为 2×10^{-7} 牛顿(N),则每根导线中的电流强度定义为 1 安培(A)。当电流强度为 1A 时,在 1s 内通过导线横截面的电量,定义为 1 库仑(用符号 C 表示)的电量。这就是 SI 单位制中的电量单位。库仑与静库的关系是:

$$1 \text{ 库仑} = 3 \times 10^9 \text{ 静库}$$

在近代物理学中,测定电子、质子、及其他一些粒子的电量是一项重要的工作。电子带负电,其电量的绝对值经测定为:

$$e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{C}$$

质子带正电,其电量与电子所带电量的绝对值相等。

值得注意的就是在粒子物理学研究中,人们发现带正电的粒子(例如质子、正电子、 π^+ 介子、 κ^+ 介子等),尽管它们的静质量以及其他性质有很大的不同,但它们所带的电量都等于 e ;而带负电的粒子(例如电子、 μ 子、 τ 子、 π^- 介子、 κ^- 介子等),它们的静质量以及其他性质也有很大的差别,但它们所带的电量也都等于 $-e$ 。人们已注意到其中可能有深刻的原因,但直到目前为止尚不清楚。

大量实验结果还证明,电量的变化总是以 e 为基元单位、以不连续的方式进行的。也就是说,电荷具有量子化的性质。 e 是电荷的最小基元单位。

应该指出,在近期的粒子物理学研究中,人们发现很多粒子(例如质子、中子、各种介子等)都具有内部结构,并从理论上建立了粒子结构的夸克模型(quark model)。这个模型认为,具有内部结构的粒子是由夸克组成的。夸克被认为是实体性的粒子,有六种夸克和六种反夸克。它们的电荷不是 $\pm e$,而是 $\pm \frac{1}{3}e$ 或者 $\pm \frac{2}{3}e$ 。夸克模型已取得了重要的成果,但迄今为止尚未在实验中发现单独存在的夸克(当然,也许夸克本来就不能单独存在,即所谓“夸克禁固”)。如果夸克模型被证实是正确的,那么电量 e 就不再是电量的最小基元单位了,但电荷仍然是量子化的,只是最小基元单位不同而已。

(二)电荷的相对论不变性

实验证明,粒子的电量是不受粒子运动状态影响的。例如它不像质量那样随速度的增大而增大。这个结论的最直接的证明,就是关于测定粒子的荷质比的实验。大家知道,根据相对论,当粒子以速率 v 运动时,它的质量应为:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

式中 m_0 是粒子的静质量, c 是真空中光速。如果粒子的电量 q 与粒子的运动状态无关,则它的荷质比应符合如下的规律:

$$\frac{q}{m} = \frac{q}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

果然,上式的正确性已得到实验的证实。

由此我们可以看出,当我们从不同的参照系对粒子的电荷进行观测时,所得的结果都是相同的。也就是说,电荷的数值具有绝对性,与参照系的选择无关。这个结论,称为电荷的相对论不变性。在电磁学中,电荷的相对论不变性是作为客观事实而被确认的。

(三)电荷守恒定律

对于电荷,有一条重要的规律称为电荷守恒定律。它是自然界最普遍和最精确成立的规律之一。

电荷守恒定律的内容可表述如下:在一个孤立体系中不论发生怎样的变化过程,整个体系的电量的代数和保持不变。

应当指出,电荷守恒定律所说的守恒,是指电量的代数和