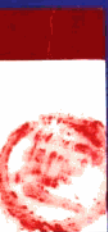
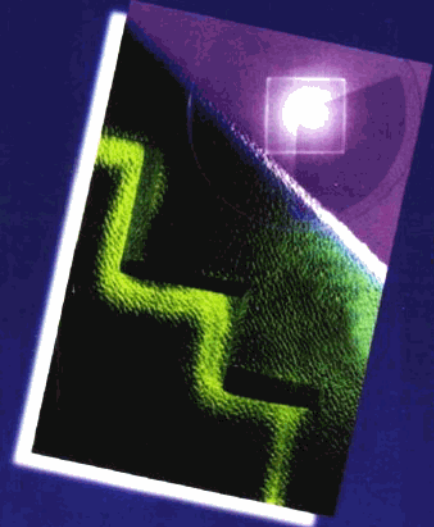


简明基础物理学

第二卷 电磁学

全书主编 刘宏清 赵有伦 尹邦勇

本卷主编 张少平



第二版

武汉大学出版社
WUHAN UNIVERSITY PRESS

第一版 编者的话

本书是武汉大学物理系第二基础物理教研室的教师根据多年的教学经验,参考教学大纲的要求,集体编写而成的。此书可作为综合性大学、师范院校、工科院校非物理专业的普通物理学教材。全书共分四卷,各卷自成体系,内容分别为:

第一卷 力学与热学

第二卷 电磁学

第三卷 光学与近代物理学

第四卷 实验物理学

在编写过程中,我们力求做到以下几点:首先,在高中物理和大学物理间跨一个较大的台阶,能引起读者对学习大学物理学的兴趣。其次,在系统编写经典物理的基础上,适当增加近代物理和现代物理的内容,使本书能反映时代性,其中,特别注意我国目前在物理学方面的发展和应用。同时,为了把大学物理的讲授和实验结合起来,特编辑实验物理卷,使本书能有较完善的体系。最后,为使一部分读者在学习普通物理学的基本内容时,还有兴趣深入学习,我们编辑了部分较难的内容,在书中用“*”号表示,以供参考与选用。

担任全书各卷的编写人员有:

全书主编 刘宏清 胡修愚 周武光

第一卷主编 杨宣东

第二卷主编 赵有伦 张少平

第三卷主编 徐斌富 马莉

第四卷主编 尹邦勇 黄兴鼎 李守源

全卷各章的编者分别是:

- 杨宣东 (第一卷 第1~7章)
胡修愚
周武光 (第一卷 第8~10章)
刘宏清 (第二卷 第1~2章)
张少平 (第二卷 第4~5章)
赵有伦 (第二卷 第3,6~7章)
马 莉 (第三卷 第1~3章)
徐斌富 (第三卷 第4~8章)
黄兴鼎 (第四卷 实验1~10,26~27)
李守源 (第四卷 实验11~19,28)
尹邦勇 (第四卷 实验20~25,29~34)

全书各卷特请有关教师审阅:石展之教授(第一卷),李琪副教授(第二卷),刘福庆教授(第三卷),周孝安副教授(第四卷)。本书出版过程中,得到武汉大学教务处、物理系和武汉大学出版社领导的关心和支持,我们在此表示衷心的感谢。

全书由于编写时间较紧,不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

于武昌珞珈山

1992.4

前 言

人类对电、磁现象的认识、研究以及应用可以追溯到两千多年以前。在我国殷商时代遗留下来的甲骨文中,就已有“雷”字的记载,西周时代的青铜器上已有“电”字的记载,中国古代实际上就已区分了导体与绝缘体。沈括在《梦溪笔谈》中记载了李舜家被雷击的情形:“及雷止,其舍宛然,墙壁窗纸皆黔。有一木格,其中杂处诸器,其漆器银钹者,银悉熔流在地,漆器曾不焦灼。有一宝刀,极坚钢,就刀室中熔为汁,而室亦俨然。人必谓火当先焚草木,然后流金石。今乃金皆铄,而草木无一毁者。”沈括通过雷电对金石和草木作用的不同效果,实际上描述了导体和绝缘体的区别。

关于尖端放电,我国在公元前后已有记载,《汉书·西域传》中记载道:“元始中(公元3年)……于端生火。”即尖端放电现象。

早在汉代,我国就发现了琥珀和玳瑁的静电吸引现象。

在磁学方面,我国早在春秋战国时期就已发现了磁石吸铁性,并已开始用于找矿。沈括在《梦溪笔谈》中记载道:“方家以磁石磨针锋,则能指南,然常微偏东,不全南也……”说明我国古代早已发明了指南针。

直到19世纪初,1785年库仑(Charles Augustin Coulomb)总结了前人的经验,并通过实验确定了电荷之间的相互作用力服从库仑定律,从而奠定了静电学的基础。1820年,奥斯特(Hans Christian Oersted)在他的著名实验中发现,导线中的电流可以引起其附近磁针的偏转,从此人们认识到电和磁之间的联系。不久,安培(Andre Marie. Ampere)、法拉第(Michael Faraday)等人便对电流

的磁效应作出了比较完整和正确的描述。1820年10月30日毕奥(J. B. Biot)和萨伐尔(F. Savart)报告了发现直线电流对磁针的作用定律。1821年1月安培提出了著名的分子电流假说。1821年9月法拉第发现了电磁感应现象。1851年12月法拉第在他的《论磁力线》一文中明确提出了磁力线的概念。1855~1856年杰出的理论物理学家麦克斯韦提出了关于电磁学的第一篇重要论文——《论法拉第的力线》，1862年他又发表了《论物理的力线》这篇著名论文，并明确引入了“位移电流”的概念。1864~1865年间，麦克斯韦又发表了重要论文《电磁场的动力理论》，并建立了电磁场方程组——麦克斯韦方程组，同时预言了电磁波的存在。1887年11月5日赫兹宣布他用实验的方法证明了电磁波的存在，1888年3月他测量出了电磁波的传播速度。到此为止电磁学已发展成为一门完整的学科。

电磁学是研究电磁运动的基本规律及其应用的科学，电磁运动和机械运动及热运动一样是物质运动的一种基本形式，许多重要的学科(物质结构理论，光的波动学说，量子场论，基本粒子)都是在电磁学理论的基础上发展起来的。掌握电磁运动的规律对于人类认识物质世界有着重要的意义，掌握电磁学基本规律，对于学习其他课程及今后的工作都是必不可少的。

第二版 编者的话

本书在第一版基础上作了较大幅度的修改,加强理论物理、近代物理、物理前沿、高新技术在普通物理学中的渗透,目的在于反映物理学的发展。本书为适应综合性大学非物理专业普通物理学教学需要,仍以简明为主,以便于使用此教材的数学、计算机科学、化学、环境科学、分析测试科学、生物学、医学、图书情报等学科的教师和学生有较普遍的适应性。对于本教材与各学科结合不到之处,敬请各位教师结合各专业学科的实际情况,予以补充讲授。

本书仍然保持原来四卷不变,各卷自成体系,以便分卷单独使用。

担任全书各卷编写与审稿的有关人员如下:

全书主编:刘宏清 赵有伦 尹邦勇

全书主审:刘觉平

第一卷主编:杨宣东 余祖兴 邹 勇

第二卷主编:张少平

第三卷主编:徐斌富 马 莉

第四卷主编:王承彦 周殿清 黄兴鼎

全书各章(实验)的编者分别为:

刘觉平 绪论

杨宣东 第一卷 第1~5章

邹 勇 第一卷 第6~7章

余祖兴 第一卷 第8~10章

刘宏清 第二卷 第1~2章

赵有伦 第二卷 第3,6~8章
张少平 第二卷 第4~5章
马 莉 第三卷 第1~3章
徐斌富 第三卷 第4~8章
王承彦 第四卷 实验1,3~7,10~11,13~15
尹邦勇 第四卷 绪论 实验16~29
黄兴鼎 第四卷 实验2,8~9,12,30~32
周殿清 第四卷 实验33~44

本书插图由陈宝联绘制。

本书再版过程中得到武汉大学教务处、理学院、出版社的关心和大力支持,编者在此表示衷心感谢!

全书有不当之处,敬请批评指正。

编 者

于武昌珞珈山

1998年11月

目 录

第一章 真空中的静电场	1
§ 1-1 电荷守恒和库仑定律	1
§ 1-2 电场 电场强度	4
§ 1-3 电通量	12
§ 1-4 高斯定理	16
§ 1-5 静电力做功 电势能	26
§ 1-6 电势	29
§ 1-7 场强和电势的关系	35
* § 1-8 泊松方程和拉普拉斯方程	39
* § 1-9 旋度 静电场的无旋性	44
* § 1-10 静电场的基本方程式	49
习题	50
第二章 静电场中的导体和介质	55
§ 2-1 静电场中的导体	55
§ 2-2 导体的电容和电容器	63
§ 2-3 电介质中的电场	68
§ 2-4 有介质时的高斯定理	76
§ 2-5 静电场的能量 能量密度	81
* § 2-6 有介质的静电场方程	84
* § 2-7 镜像法	88

习题	90
第三章 恒定电流	96
§ 3-1 电流和它的效应 电动势	96
§ 3-2 电流强度 电流密度矢量	98
§ 3-3 基尔霍夫第一定律	100
§ 3-4 欧姆定律及其微分形式	102
§ 3-5 焦耳-楞次定律	106
§ 3-6 基尔霍夫第二定律	110
* § 3-7 电容器的充电和放电	118
习题	120
第四章 稳恒磁场	127
§ 4-1 磁场 磁感应强度	127
§ 4-2 毕奥-萨伐尔定律	131
§ 4-3 运动电荷的磁场	140
§ 4-4 磁场的高斯定理和安培环路定理	142
§ 4-5 磁场对运动电荷的作用	151
§ 4-6 磁场对载流导线的作用	164
* § 4-7 稳恒电流的磁场的基本方程式	170
习题	171
第五章 磁介质	177
§ 5-1 磁介质的磁化	177
§ 5-2 磁化强度和磁化电流	181
§ 5-3 有磁介质存在时的安培环路定理 磁场强度	185
§ 5-4 铁磁质	190
§ 5-5 磁场的边界条件	196
* § 5-6 超导体	198
习题	206

第六章 电磁感应 电磁场	209
§ 6-1 电磁感应的基本定律	209
§ 6-2 动生电动势	217
§ 6-3 感生电动势 涡旋电场	220
§ 6-4 自感和互感	225
§ 6-5 磁场的能量和磁能密度	231
* § 6-6 RL 电路.....	234
§ 6-7 电磁感应现象的应用	237
习题.....	240
 第七章 电磁场和电磁波	245
§ 7-1 位移电流	245
§ 7-2 麦克斯韦方程组	250
§ 7-3 电磁波的产生	252
§ 7-4 平面电磁波	255
* § 7-5 电磁场的对称性和统一性	264
习题.....	270
 *第八章 交流电	272
§ 8-1 交变电流的基本概念	272
§ 8-2 正弦交流电的平均值与有效值	277
§ 8-3 正弦函数的矢量图示法	279
§ 8-4 交流电的复数表示法	281
§ 8-5 交流电路中的电阻、电感和电容	286
§ 8-6 交流电路欧姆定律在串并联电路中的应用	293
§ 8-7 谐振电路	302
§ 8-8 交流电的功率 功率因素	307
§ 8-9 交流电路的基尔霍夫定律 交流电桥	312
习题.....	318

附录一.....	322
(一) 常用单位的换算因子和常用的物理常数	322
(二) 电磁学国际制(SI)单位	326
附录二.....	327
附表 1 基本物理常量 1986 年的推荐值	327
附表 2 保留单位和标准值	328
附表 3 太阳系的基本数据(I)	328
附表 4 太阳系的基本数据(II)	329
习题答案.....	330

第一章 真空中的静电场

电磁现象是一种极为普遍的自然现象,与工农业生产和日常生活有着密切的联系,电磁学就是研究电磁现象及其规律的一门科学。为了便于了解和掌握电磁运动的规律,先讨论电磁场中最简单的情况——静电场。静电场为相对于观察者是静止的电荷在其周围所激发的电场。

本章主要内容为真空中静电场的基本原理和规律。从点电荷间相互作用的库仑定律出发,引入描写静电场的两个基本物理量:电场强度和电势;以及静电场的两个基本定律:高斯定理和电场强度的环路定律;以及电势和场强的关系等。本章是电磁学各章的基础,在学习时必须给予充分的重视。

§1-1 电荷守恒和库仑定律

一、电荷守恒定律

我们可以用摩擦或其他办法使物体带电,这种带电体所带的电叫做电荷,有时候也把小的带电体本身称为电荷。实验指出:电荷有正、负两种,一个电子所带的电荷是负电荷的最小自然单位,等于 -1.6×10^{-19} 库。把电子的电荷符号记作“负”完全是由于历史的原因。

一个中性原子,含有一个(或若干个)电子和一个(或若干个)带有等值正电荷的原子核。正常原子所带的总电荷(净电荷)为

零。如果移去一个或若干个外层电子,原子即被电离,移去一个电子的电离原子,带有净电荷 $+1.6 \times 10^{-19}$ 库仑,移去两个电子的电离原子,带有净电荷 $+3.2 \times 10^{-19}$ 库仑,其余类推。因而,带有多余电子的物体带负电荷,而失去电子的物体带正电荷。总结各类电现象,可得出物理学中最普遍的规律之一——电荷守恒定律:电荷既不能产生,也不能消灭,只能从一个物体转移到另一个物体上。在任何物理过程中,一个孤立系统内电荷的代数和是守恒的。

二、电荷的量子化

物体所带电荷的量值叫电量,记为 Q 或 q ,单位为库仑(C)。例如,电子带负电,表示为 $e = -1.602 \times 10^{-19}$ 库仑,质子带 1 个电子的电量,表示为 $Q = e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑。一个物体总是得到多少个电子的电量,或者失掉多少个电子的电量,因此,宏观带电体所带电量 Q 总是某一基本电荷的整数倍(常以电子电量为基本电荷),可表示为:

$$Q = \pm ne \quad (1.1)$$

这种电量不能连续变化,只能取基本电荷的整数倍的值,电荷这种只能取分立的、不连续的量值的性质叫做电荷的量子化,是近代物理学的基本概念。

20 世纪 60 年代,由美国物理学家盖尔曼提出了有关粒子结构的夸克模型,认为还存在具有 $\pm \frac{1}{3}e$, $\pm \frac{2}{3}e$ 电荷的带电粒子,这些粒子称为夸克。但由于夸克的禁闭现象,在通常实验上不会发现单个具有分数电荷的粒子。因此,在经典电磁学范围内,可以认为 e 是基本电荷。

三、库仑定律

当带电体的线度远小于带电体间的距离时,这些带电体称为点电荷。点电荷与力学中的质点相似,是从实际带电体中抽象出

来的。正像力学中可把任何物体看作质点的集合一样,任何带电体都可以看作是点电荷的集合。

1785年,库仑从实验总结出两点电荷之间的相互作用的规律,称为库仑定律,它可表述为:真空中两点电荷 q_1 、 q_2 之间的相互作用力 F 的大小与两电量 q_1 、 q_2 的乘积成正比,而与它们的距离 r_{12} 的平方成反比,力的方向沿它们的连线;两点电荷同号时为斥力,异号时为吸力。即

$$F_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \quad (1.2)$$

式中 K 是比例系数,其值决定于式中各量的单位,为了计算方便,

对 K 实行有理化,令 $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$,故有

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

在国际单位制中, F 、 q 、 r 单位分别为 N、C、m, ϵ_0 称为真空的介电常数,其值为 8.854×10^{-12} 法/米。常取 K 值为 9.0×10^9 米/法。为了在公式中将力的方向也表示出来,采用矢量表示, q_1 作用于 q_2 的力写为:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.3)$$

式中: $\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}$ 为单位矢量,其方向

由 q_1 指向 q_2 。由 (1.3) 式知道,当 q_1 和 q_2 具有相同符号时,乘积 $q_1 q_2$ 为正, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 方向相同,表示 $\mathbf{F}_{12}$ 为斥力;反之,如果 q_1 和 q_2

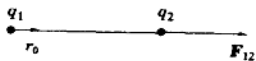


图 1-1

的符号相反时,乘积 $q_1 q_2$ 为负, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 方向相反,表示 $\mathbf{F}_{12}$ 为吸力。由此可知,库仑定律的矢量形式同时给出了作用力的大小和方向(图 1-1)。

§ 1-2 电场 电场强度

一、电场

库仑定律说明了两个点电荷相互作用的定量关系,但这个作用是通过什么机构来进行的呢?在法拉第时代以前,很多人主张为超距作用。他们认为,相隔一定距离的两个电荷的作用力是不需要任何媒质,也不需要时间,就能由一个电荷作用到另一个电荷上。后来,法拉第提出近距作用,认为电荷的相互作用不可能超越距离,而应该是通过一种充满空间的弹性媒质(以太)来传递。麦克斯韦发展了法拉第的学说,提出完整的电磁场理论,但他也没有放弃以太的概念,直到爱因斯坦提出相对论之后,才否定了以太的存在。

近代物理发展证明,超距作用的观点是错误的,电力和磁力的传递速度虽然很快(约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$),但并非不需要时间;但近距作用观点所假定的那种“弹性以太”也是不存在的。实际上,电荷间的

相互作用是通过一种特殊的媒介物——电场来作用的,电场是一种物质,每当电荷出现时,在它的周围就会激发起电场来,任何置

于其中的其他电荷都将受到电场对它的作用力(电场力)。用图示来概括,如图 1-2 所示。

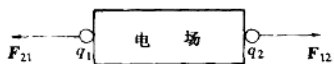


图 1-2

静电场只是电磁场中的一种特殊情况,电磁场和实物一样具有质量、能量、动量等属性,而且电磁场一经产生就能脱离电荷和电流而独立存在。但是,电磁场不同于实物物质,实物分子或原子所占的空间不能同时为另一分子或原子所占据,而几个电磁场可以同时占据同一空间,即场是可以叠加的。因此场和实物虽然都是物质,但它们又有区别,是物质存在的两种不同形式。

要认识电场必须解决如下两个问题:

- (1) 由已知电荷的分布情况,计算其产生的电场。
- (2) 由已知的电场,计算在场中某点另一电荷所受的力。

二、电场强度矢量

电场的一个重要性质是它对电荷施加作用力,下面就以这个性质来定量地描述电场。为此,必须在电场中引入一试探电荷。首先,试探电荷的电量要充分小,因为引入该电荷是为了研究空间原来存在的电场的性质,如果试探电荷的电量太大,它自己的影响就会显著地改变原有的电荷分布,从而改变了原来的电场分布情况。其次,电荷的几何线度也要充分小,可以把它看作是点电荷,这样才可以用它来确定空间各点的电场性质。满足这样条件的电荷 q ,叫做试探电荷。

当电荷 Q 有一定的分布时,它周围的电场也是一定的。如果在电场中的某定点,放一个电量为 q_0 的正试探电荷,则这个点电荷受力为 F ;如果这个试探电荷的电量增加两倍等于 $2q_0$,则这个试探电荷受的力等于 $2F$;如此类推,在电场的某定点的力与电量的比值 F/q 总为一定值。实验表明,同一个试探电荷所受到的电场力的大小和方向随着它在电场中位置的变化而变化。 F/q_0 这个量与试探电荷无关,只决定于电场的强弱程度,是反映电场本身性质的一个矢量,故把它定义为电场强度,简称场强,用字母 E 表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.4)$$

由上式可知,电场中某点的电场强度,在数值上等于放在该点的单位正电荷所受的电场力,其方向与正电荷受力的方向相同,如图 1-3

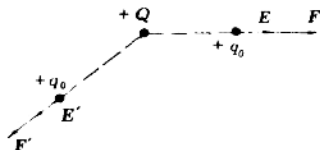


图 1-3

所示。电场强度的单位是牛/库,或为伏/米。

三、电场强度的计算

下面根据定义式计算几种场强。

1. 点电荷的场强

在距离点电荷 q 为 r 处的电场强度是十分重要的,为了计算距离点电荷 q 为 r 处的 E ,在该点放置某正试探电荷 q_0 ,依库仑定律,试探电荷所受的力为:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r}_0$$

由定义式 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$ 得:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.5)$$

上式是一个点电荷在其周围所产生的电场,可从此式推导出一些重要的结果。

2. 点电荷系的电场和

场强叠加原理(图 1-4)

若场强是由若干个电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 所产生的,这些电荷称为电荷系。因为库仑力满足力的独立作用原理。所以作用在场中某点 P 处试探电荷 q_0 上的 $\mathbf{F}$,等于各个电荷所产生的力的矢量和,即

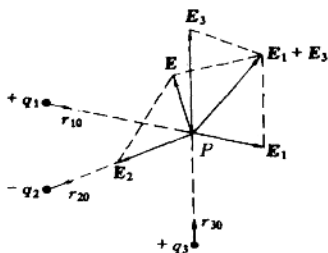


图 1-4

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$$

对上式两边同时除以 q_0 , 得

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$$