

吴泽华 陈治中 黄正东 编著

大学物理

(中册)

(第三版)



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

大学物理

(中册)

(第三版)

吴泽华 陈治中 黄正东 编著

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 中册 / 吴泽华等编著. —3 版. —杭州: 浙江大学出版社, 2001. 12 (2007 重印)

ISBN 987-7-308-02857-8

I. 大… II. 吴… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 085626 号

编 著: 吴泽华 陈治中 黄正东

责任编辑: 孙海荣

出版发行: 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

排 版: 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷: 杭州杭新印务有限公司

开 本: 850mm×1168mm 1/32

印 张: 10.25

字 数: 276 千

版 次: 2001 年 12 月第 2 版 2006 年 8 月第 3 版

印 次: 2007 年 3 月第 10 次印刷

印 数: 43001—48000

书 号: ISBN 978-7-308-02857-8

定 价: 15.50 元

内容简介

本书是以教育部颁布的《高等工业学校物理课程教学基本要求》为依据编写的。全书共分三册,第一册力学、机械振动和机械波、热学,第二册电磁学,第三册光学、量子物理学。各章均配有思考题和习题。各篇还增加了适量的扩展性内容,编写成阅读材料供教学中选用。

本书可作为高等理工科大学非物理专业教材或参考书,也可供其他类型学校的学生和教师使用或参考。

物理量名称、符号和单位

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
电量	Q, q	库[仑]	C
电流	I, i	安[培]	A
电荷线密度	λ	库[仑] 每米	C/m
电荷面密度	σ	库[仑] 每平方米	C/m ²
电荷体密度	ρ	库[仑] 每立方米	C/m ³
电场强度	E	伏[特] 每米	V/m
电势	U	伏[特]	V
电势差, 电压	$U_1 - U_2, U_{12}$	伏[特]	V
介电常数	ϵ	法[拉] 每米	F/m
真空介电常数	ϵ_0	法[拉] 每米	F/m
相对介电常数	ϵ_r	—	—
电偶极矩	p, p_e	库[仑]米	C · m
电极化强度	P	库[仑]每平方米	C/m ²
电极化率	χ_e	—	—
电位移	D	库[仑]每平方米	C/m ²
电通量	Φ_e, Ψ_e	伏[特]米	V · m
电容	C	法[拉]	F
电流密度	j	安[培]每平方米	A/m ²
电动势	$\mathcal{E}$	伏[特]	V
电阻	R	欧[姆]	Ω
电导	G	西[门子]	S
电阻率	ρ	欧[姆]米	$\Omega \cdot m$
电导率	γ	西[门子]每米	S/m
电功率	P	瓦[特]	W
磁感应强度	B	特[斯拉]	T
磁通量	Φ_B	韦[伯]	W _b
磁矩	p_m	安[培]平方米	A · m ²
磁化强度	M	安[培]每米	A/m

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
磁化率	χ_m	—	—
磁场强度	H	安[培]每米	A/m
磁导率	μ	享[利]每米	H/m
真空磁导率	μ_0	享[利]每米	H/m
相对磁导率	μ_r	—	—
自感	L	亨[利]	H
互感	M	亨[利]	H
电场能量	W_e	焦[耳]	J
磁场能量	W_m	焦[耳]	J
电磁能密度	w	焦[耳]每立方米	J/m ³
坡印亭矢量	S	瓦[特]每平方米	W/m ²
电磁波在真空中的 传播速度	c	3×10 ⁸ 米每秒	m/s
折射率	n	—	—

目 录

第四篇 电磁学

第九章 真空中的静电场	(3)
§ 9.1 电荷	(3)
§ 9.2 库仑定律	(5)
§ 9.3 电场 电场强度	(8)
§ 9.4 电场线 电通量	(18)
§ 9.5 高斯定理及其应用	(21)
§ 9.6 静电场的环路定理	(30)
§ 9.7 电势	(33)
§ 9.8 电场强度与电势的关系	(41)
思考题	(45)
习 题	(46)
第十章 静电场中的导体和电介质	(52)
§ 10.1 静电场中的金属导体	(52)
§ 10.2 电容 电容器	(61)
§ 10.3 静电场中的电介质	(66)
§ 10.4 电介质中静电场的基本定理	(73)
* § 10.5 电场的边界条件	(79)
§ 10.6 静电场的能量	(81)
思考题	(87)
习 题	(88)
第十一章 稳恒电流	(94)
§ 11.1 稳恒电流	(94)
§ 11.2 欧姆定律和焦耳定律的微分形式	(99)
§ 11.3 电动势	(104)
* § 11.4 基尔霍夫定律	(108)
§ 11.5 电容器的充电和放电	(110)

思考题	(112)
习 题	(113)
第十二章 稳恒磁场	(116)
§ 12.1 磁场 磁感应强度	(116)
§ 12.2 毕奥—萨伐尔定律	(121)
§ 12.3 磁场的高斯定理 安培环路定理	(131)
§ 12.4 磁场对电流的作用	(141)
§ 12.5 带电粒子在电场和磁场中的运动	(150)
§ 12.6 电场和磁场的统一性与相对性	(161)
思考题	(165)
习 题	(168)
第十三章 磁场中的磁介质	(177)
§ 13.1 磁介质的分类	(177)
§ 13.2 顺磁质和抗磁质的磁化	(178)
§ 13.3 存在磁介质时磁场的基本规律	(185)
§ 13.4 铁磁质	(190)
* § 13.5 磁场的边界条件	(197)
思考题	(199)
习 题	(200)
第十四章 电磁感应	(203)
§ 14.1 电磁感应的基本定律	(203)
§ 14.2 动生电动势	(209)
§ 14.3 感生电动势 涡旋电场	(215)
§ 14.4 自感和互感	(223)
§ 14.5 磁场的能量	(231)
思考题	(236)
习 题	(238)
第十五章 电磁场与电磁波	(245)
§ 15.1 位移电流	(245)
§ 15.2 电磁场 麦克斯韦方程组	(251)
§ 15.3 电磁波	(255)

§ 15.4 电磁波的辐射	(263)
§ 15.5 电磁振荡 赫芝实验	(267)
§ 15.6 电磁波谱	(273)
思考题	(276)
习 题	(277)
阅读材料 4.A 静电的应用	(280)
阅读材料 4.B 超导电性	(287)
阅读材料 4.C 同步辐射及其应用	(302)
习题答案	(309)

第四篇 电磁学

电磁学是物理学的一个重要分支,是研究电磁现象及其运动规律的一门学科。

早在公元前几百年,人类就已经观察到电现象和磁现象,然而对电磁现象的系统研究却是近两百年的事。按照近代物理观点,电磁现象和物质结构密切相关,电磁相互作用是物质间四种基本相互作用之一,在决定原子和分子的结构上起着关键性的作用。因此,研究电磁现象已成为认识物质微观构造和性质的重要基础和途径,电磁学理论在现代物理学中占有重要的地位。电磁相互作用的规律也是其他许多学科的基础,如电工学、无线电电子学、自动控制学、电化学、固态电子学等都是以电磁学为基础发展起来的。电磁学又是应用最广泛的物理知识之一,从科学研究、工农业生产乃至日常生活无不有它涉足之处。随着时代的进步,以及人们对电磁现象认识的不断深化,电磁学理论及其应用正日益完善和普及。

本篇共分七章,首先分别讲述电现象和磁现象,然后考虑它们与其他物质的相互作用,电现象与磁现象的相互联系,以及电磁场理论的初步知识。

第九章 真空中的静电场

本章和下一章的内容属于静电学范围,主要讨论静止于惯性参照系中的电荷所具有的性质及其相互作用规律。本章首先说明电荷的基本性质,以及真空中静止电荷之间相互作用的基本实验规律——库仑定律,然后引入静电场的基本概念,以说明这种相互作用是如何进行的,并导出静电场的两个基本定理,即高斯定理和环路定理,以反映静电场的基本性质。

§ 9.1 电 荷

人类对于电现象的观察和认识有着悠久的历史。早在公元前600年,古希腊哲学家已经记载了琥珀经过摩擦后有吸引干草屑的现象。我国西汉末年(公元20年前)也有“玳瑁吸裙”的记载。自16世纪起,对电现象开始了系统的研究,人们将物体经过摩擦后具有吸引轻小物体的性质,称该物体带了电,或有了电荷。带有电荷的物体称为带电体,其所带电荷的量值称为电量。并且认识到,电荷是某些基本粒子,如电子、质子、 μ 子等的基本属性,它与质量一样,不能离开这些基本粒子而单独存在。通过对电荷间各种相互作用及其电效应的研究,人们认识到电荷有以下基本性质:

一、两种电荷

自然界只存在两种电荷,分别称为正电荷和负电荷,这是电荷的一种基本属性。18世纪中期,美国科学家富兰克林(B. Franklin)将被丝绸摩擦过的玻璃棒带的电荷称为正电荷,被毛皮摩擦过的硬橡皮棒带的电荷称为负电荷。这种定义一直沿用至今。实验表明,同种

电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。

近代物理学的发展使人们逐渐认识到电荷之所以只有两种,是因为自然界中实物形式的物质(包括固、液、气体)都由原子组成,原子则由带正电的核和核外电子^①组成,而原子核又是由质子和中子组成。原子中的质子带正电,电子带负电,中子不带电,质子与电子所带电量的绝对值相等。物质内部固有地存在电子和质子,正是各种物质带电过程的内在根据。在正常情况下,物质内部的正、负电荷数量相等,呈电中性。物体的带电过程,实际上是正负电荷的分离过程。

二、电荷守恒

大量实验证明,一个孤立系统(即与外界无电荷交换的系统)的总电荷数(正负电荷的代数和)保持不变,电荷既不能被创造,也不能被消灭,它只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一个部分转移到物体的另一部分。这个定律称为电荷守恒定律。例如,电中性的丝绸和玻璃棒组成一孤立系统,电荷总量为零,摩擦后两者分别带有等量异号的电荷,系统的总电量仍为零。电荷守恒是自然界最普遍的规律之一,它不仅在一切实观过程中成立,而且在任何微观过程中也都被严格遵守。例如电子和正电子彼此靠近时,发生湮没前后的电荷代数和均为零,即

$$e^{-} + e^{+} \longrightarrow 2\gamma(\text{光子})$$

又如中子衰变,产生一个质子、一个电子和一个反中微子的过程:

$$n_1^0 \longrightarrow p_1^+ + e^{-} + \bar{\nu}^0$$

其衰变前后的总电量也都是零。

三、电荷是量子化的

密立根(R. A. Milliken)油滴实验和大量其他实验表明,在自然界中,任何可被观测到的电荷,总是以一个基本的电荷单元 e 的整数

^① 汤姆孙(J. J. Thomson, 公元 1856—1940 年)英国物理学家,1897 年,首次用实验证实了一种基本粒子——电子的存在,所以人们称他是“一位最先打开通向基本粒子物理大门的伟人”。由于在气体放电的理论和实验研究方面作出卓越的贡献,汤姆孙于 1906 年获诺贝尔物理学奖。

倍出现的,即 $q=ne$ ($n=0, \pm 1, \pm 2 \cdots$), 这个基本电荷单元 e 称为**电荷量子**。根据 1986 年实验公布的数据, $e=1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$ 。它是自然界的普适常数。电荷只能取一份一份不连续的量值的性质称为**电荷量子化**。近代实验已精确地验证, 电子和质子带有异号等量的基本单元电量, 分别为 $-e$ 和 $+e$ 。

1964 年, 物理学家在理论上预言, 一些基本粒子, 如质子和中子是由更小的粒子组成, 这种粒子称为**夸克**, 它们的带电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 。此后, 在电子对核的散射实验中发现了核子中存在夸克。由于这一杰出贡献, 美国物理学家泰勒 (R. E. Taylor), 弗里德曼 (J. I. Friedman) 和肯德尔 (H. N. Kendall) 荣获 1990 年度诺贝尔物理学奖。但是, 至今尚未在实验中发现以自由状态存在的夸克。即使发现了带分数电荷的夸克, 电荷仍取不连续值, 也不会改变电荷的量子性, 只是使最小的一份电量变得更小而已。

电荷量子化只在微观领域才需考虑, 在宏观电现象中涉及的基本电荷数是如此之多 (例如 1 库仑 $= 6.242 \times 10^{18}$ 个电子电量), 增加或减少几个基本电荷单元是无足轻重的, 因此一般可将带电体上的电荷分布和电荷变化看作是连续的。

四、电荷的运动不变性

实验证明, 一个电荷的电量与其运动状态无关, 在不同参照系中对电荷进行测量, 测得的量值都相同。电荷的这一性质称为**电荷的运动不变性**。

§ 9.2 库仑定律

一般来说, 带电体之间的相互作用力与许多因素有关, 它不仅取决于电荷的正负, 电量的多少, 而且还与带电体的大小和形状, 以及周围介质的性质有关, 情况比较复杂。为了使问题简化, 本节先讨论

点电荷在真空中的相互作用。

点电荷是电学中引进的一个理想模型,与力学中的质点概念类似。所谓点电荷,是指带电体的线度与它到其他带电体之间的距离相比很小,以致该带电体本身的形状和大小可以忽略。尽管有时不能将带电体作为点电荷处理,但是总可以将带电体看成是大量点电荷的集合。因此,研究点电荷之间的相互作用规律是研究带电体相互作用规律的基础。

一、库仑定律

法国科学家库仑(C. A. Coulomb)^①通过扭秤实验的定量研究,于1785年总结出两个静止点电荷之间相互作用的基本规律,现称之为库仑定律,它表述为:在真空中,两个静止的点电荷 q_1 与 q_2 之间的相互作用力的大小和 q_1 和 q_2 的乘积成正比,和它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着两点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。库仑定律的数学表述式是:

$$\boxed{F_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{12}} \quad (9.1)$$

式中 F_{21} 表示 q_1 对 q_2 的作用力,我们规定 r_{12} 是从 q_1 指向 q_2 的矢径,其单位矢量为 $\mathbf{e}_{12}$

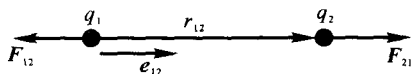


图 9.1 两点电荷间的作用力

(图 9.1)。根据牛顿第三定律,

q_2 施于 q_1 的力 F_{12} 与 F_{21} 在数值上相等,但方向相反。若 q_1 与 q_2 同号,则作用于 q_2 的力 F_{21} 沿 $\mathbf{e}_{12}$ 方向,作用于 q_1 的力 F_{12} 沿 $-\mathbf{e}_{12}$ 方向,

^① 库仑(C. A. Coulomb, 公元1736—1806年) 法国物理学家,法国科学院院士。库仑在物理学上有许多重要贡献。他通过对滑动摩擦和滚动摩擦的研究提出摩擦定律;他证明地磁场对磁铁的作用,相当于与偏差角正弦成正比的一力偶;他建立了磁体在磁场中的运动方程式;他发现了电力与电量成正比;静电平衡时导体上的电荷都分布在外表面。库仑最重要的成就是自行设计制造了一台精度很高的扭秤,用来测量电荷之间的作用力,于1785年发现了库仑定律。这个定律是电学史上第一个定量规律,电学研究从此由定性进入定量阶段,完成了电学发展中的一次飞跃。

表示斥力;若 q_1 与 q_2 异号,则 F_{21} 与 e_{12} 反向, F_{12} 与 e_{12} 同向,表示引力。式中 k 是比例系数,由实验测定,并与所取的单位制有关。

在国际单位制中,电学的基本量是电流强度,其单位是安(A),而电量是导出量,其单位是库(C)。1C=1A·s,即1库[仑]等于电流强度为1安[培]时,1秒内流过导线中任一截面的电量。

采用国际单位制时,库仑定律中的比例系数应通过实验确定,数值为

$$k=8.99 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

为了简化电学基本定理的表达式,进一步取 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 称为真空中的介电常数,其值为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

于是,在国际单位制中,库仑定律又可表示为

$$\boxed{F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} e_{12}} \quad (9.2)$$

库仑定律的精确程度不是只以库仑实验为基础的。库仑当年根据扭秤实验确定了库仑定律中距离 r 的幂指数为整数2,但是扭秤测量的精度不可能很高,误差在百分之几的范围。之后,随着实验方法的改进,测量结果越来越精确,1971年的实验测量证实,这个幂指数2的误差小于 10^{-16} 。

库仑定律有很大的适用范围。近代的有关实验指出,在大到几千米,小到 10^{-15}m 的巨大范围内,库仑定律都准确无误。因而我们将它作为描述电磁学的基础之一。

例 9.1 库仑定律与万有引力都是平方反比定律,在形式上十分相似。试比较氢原子中的电子与原子核(质子)间的库仑力与万有引力的大小。

解 电子和质子的电量相同,均为 $e=1.60 \times 10^{-19}\text{C}$;电子质量 $m_e=9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$,质子质量 $m_p=1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$,电子与原子核之

间的万有引力和静电力分别为 $F_G = G \frac{m_e m_p}{r^2}$ 和 $F_e = k \frac{e^2}{r^2}$, 因此

$$\frac{F_G}{F_e} = \frac{G m_e m_p}{k e^2} = \frac{(6.67 \times 10^{-11})(9.11 \times 10^{-31})(1.67 \times 10^{-27})}{(8.99 \times 10^9)(1.60 \times 10^{-19})^2} = 4.41 \times 10^{-40}$$

可见万有引力与库仑力相比是十分微小的, 完全可以略去不计。

二、电力叠加原理

假若空间存在两个以上的点电荷, 实验证明, 任意两个点电荷之间的相互作用力仍然遵循库仑定律, 并不因为有其他点电荷的存在而改变。因此, 当空间存在几个静止点电荷时, 作用在任一点电荷 q_1 上的静电力, 应等于各点电荷单独存在时作用于该电荷的静电力的矢量和, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 &= \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \cdots + \mathbf{F}_{1n} = \sum_{i=2}^n \mathbf{F}_{1i} \\ &= \sum_{i=2}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_i}{r_{1i}^2} \mathbf{e}_{1i} \end{aligned} \quad (9.3)$$

这就是**电力叠加原理**。式中 r_{1i} 和 $\mathbf{e}_{1i}$ 为第 i 个点电荷到第 1 个点电荷的距离和单位矢量。应该注意的是, 上述叠加原理并非对任何情况都成立, 特别在极强电力作用时, 需要用实验确定此原理是否还能适用。

库仑定律的公式只适用于点电荷, 如果这个条件不满足, 那么必须把带电体看成是许多点电荷的集合, 应用上述公式分别计算每一对点电荷之间的相互作用力, 再按叠加原理求静电力的矢量和。

§ 9.3 电场 电场强度

一、电场

库仑定律描述了两个点电荷之间相互作用的定量关系, 但并没有说明这种相互作用是怎样传递的。关于电力传递的问题, 历史上有