

385

0.4-43
Z 68(2)

高等工程专科及自考教材

物 理 学

(下 册)

(第二版)

钟亮佩 叶英模 黄月霞 编

华南理工大学出版社

• 广州 •

图书在版编目 (CIP) 数据

物理学(下册)/ 钟亮佩, 叶英模, 黄月霞编. —2 版. —广州:
华南理工大学出版社, 1996.3 (2001.12 重印)

ISBN 7-5623-0824-1

I. 物… II. ①钟…②叶…③黄… III. 物理学 IV. O4

总 发 行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

发行电话: 020-87113487 87111048 (传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn

http://www2.scut.edu.cn/press

责任编辑: 张巧巧 潘宜玲

印 刷 者: 广州市新明光印刷有限公司

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 10.25 **字数:** 258 千

版 次: 2001 年 12 月第 2 版第 5 次印刷

印 数: 26 501—29 500 册

定 价: 15.50 元

版权所有 盗版必究

目 录

第四篇 电 磁 学

第八章 静电场	1
§ 8-1 电荷 库仑定律	2
§ 8-2 电场 电场强度	6
§ 8-3 电场线 电通量	14
§ 8-4 高斯定理	18
§ 8-5 电场力的功 电势能	25
§ 8-6 电势 电势的图示法	28
§ 8-7 电场强度与电势的关系	37
§ 8-8 带电粒子在电场中的运动	40
思考题	43
习 题	46
第九章 静电场中的导体和电介质	50
§ 9-1 静电场中的导体	50
§ 9-2 静电场中的电介质	57
§ 9-3 电容 电容器	64
§ 9-4 静电场的能量	71
思考题	73
习 题	76
第十章 稳恒电流的磁场	78
§ 10-1 磁的基本现象	78
§ 10-2 磁场 磁感强度	82

§ 10-3 磁通量 磁场的高斯定理	84
§ 10-4 毕奥——萨伐尔定律	88
§ 10-5 安培环路定理	96
§ 10-6 磁场对载流导体的作用	102
§ 10-7 磁场对运动电荷的作用	111
§ 10-8 磁介质	120
思考题	127
习 题	130
第十一章 电磁感应 电磁场	134
§ 11-1 电磁感应的基本定律	134
§ 11-2 动生电动势	139
§ 11-3 感生电动势 感生电场	145
§ 11-4 自感 互感	150
§ 11-5 磁场能量	156
§ 11-6 电磁场与电磁波	159
思考题	165
习 题	169

第五篇 波动光学

第十二章 光的干涉	176
§ 12-1 光波干涉的原理	178
§ 12-2 光波干涉的几个实例	180
§ 12-3 光波干涉在工程技术上的应用	190
思考题	196
习 题	197
第十三章 光的衍射	200
§ 13-1 单缝衍射	200
§ 13-2 光栅衍射	207

§ 13-3 光波衍射在工程技术上的应用	211
思考题	216
习 题	217
第十四章 光的偏振	220
§ 14-1 自然光和偏振光	220
§ 14-2 获得偏振光的几种方法	224
§ 14-3 光波偏振在工程技术上的应用	229
思考题	232
习 题	233

第六篇 近代物理简介

第十五章 狭义相对论	237
§ 15-1 力学的相对性原理 伽利略变换	237
§ 15-2 狭义相对论的基本假设 洛伦兹变换	240
§ 15-3 狭义相对论的时空观	243
§ 15-4 狭义相对论的动力学基础	248
思考题	252
习 题	253
第十六章 光与实物粒子的波粒二象性	255
§ 16-1 热辐射 基尔霍夫定律	255
§ 16-2 绝对黑体辐射定律及辐射测温技术	258
§ 16-3 热辐射经典理论与量子假设	268
§ 16-4 光电效应实验规律与爱因斯坦光子理论	272
§ 16-5 光的波粒二象性与实物粒子的波粒二象性	281
思考题	285
习 题	285
第十七章 原子的量子理论	287
§ 17-1 原子光谱的规律性	287

§ 17-2 原子模型	290
§ 17-3 玻尔的氢原子理论	294
§ 17-4 量子力学的基本概念	301
§ 17-5 原子的电子壳层结构	306
思考题	313
习 题	314
附录 习题答案	315

第四篇 电 磁 学

电磁学是研究电磁现象及其基本规律的一门学科。现今,从日常生活到工农业生产,从尖端科学的研究到新技术的应用,人们已经离不开电与磁。发电机、电动机的发明;电能的输送;电话、电视、电脑及各种电子仪器的制造都是电磁学规律的具体应用。电工学、电化学、无线电电子学、遥控和自动控制学等学科都是在电磁学的基础上建立和发展起来的。许多物理现象的本质都要用电磁学的理论去解释,人们对物质各种性能(如弹性、导热性等)的认识也是以物质的电结构为基础。因此,电磁学是现代工程技术和自然科学的重要基础,在现代物理学中占有重要的地位。

第八章 静 电 场

本章和下一章我们将讨论静电学。静电学主要研究由静止电荷所产生的静电场的基本性质和规律,以及静电场与导体和电介质(绝缘体)的相互作用、相互影响,导体和电介质的静电特性等。

本章将先后从电场对电荷有力的作用,以及电荷在电场中移动时电场力对电荷作功这两个方面,引入描述静电场特性的两个物理量——电场强度和电势,并阐述反映静电场性质的两条重要规律:静电场的高斯定理和环路定理。

§ 8-1 电 荷 库仑定律

一、电荷

早在二千多年前,人们就已经知道摩擦起电的现象了。两种不同材料的物体互相摩擦后,都能吸引羽毛、纸片等轻微物体。具有这种特性的物体人们就说它带了电或有了电荷,并称之为带_电体。实验表明,物体所带的电有两种,而且只有两种,分别称为正_电和负_电。带同号电的物体互相排斥,带异号电的物体互相吸引。根据带_电体之间相互作用力的大小,能够确定物体所带电荷的多少。表示物体所带电荷多少的物理量称为电_量。在国际单位制中,电量的单位是库仑,简称库,其符号为C。至于电是什么?为什么摩擦能起电?在相当长的一个时期内是不很清楚的。直至19世纪90年代,物质电结构理论建立后,才使人们进一步认识到电现象的本质。

1. 物质的电结构

物质中的原子是由带正电荷的原子核和带负电的电子所组成的。原子核中含有带正电的质子和不带电的中子,原子核所带的正电就是核内全部质子所带正电的总和。一个质子所带电量的大小和一个电子所带电量的大小相等。质子的质量和中子的质量大致相等,约为电子质量的 1840 倍。据测定,电子电量的绝对值为 $e=1.60\times 10^{-19}\text{C}$,电子质量为 $m_e=9.11\times 10^{-31}\text{kg}$ 。

在正常状态下,一个原子核外的电子数等于原子核内的质子数,所以原子呈电中性。如果由于外来原因,原子失去一个或若干个电子,就会成为带正电的正离子;反之,如果原子从外界俘获一个或若干个电子,就会成为带负电的负离子。宏观物体是由大量原子组成的,因此从电学的角度来看,任何物体都是一个拥有大量正、负电荷的集合体。正常状态下,由于每个原子都呈电中性,因此整个物体对外界不显示电性。但如果用某种方法,使物体获得或失去一些电子,则物体就带电,即成为带电体。由此可见,摩擦起电的过程并不产生电荷,只不过是通过摩擦作用让两种不同质料的物体充分接触,而使电子从一物体迁移到另一物体上去。互相摩擦的两个物体总是同时带有等量而异号的电荷。

2. 电荷守恒定律

由物质的电结构可知,在不带电的物体中总有等量的正、负电荷同时存在,它们的电效应互相中和。一切起电过程,实质上是使物体中的正、负电荷分离或转移的过程,因此在起电过程中,正、负电荷总是同时出现,而且这两种电荷的量值一定是相等的。两个等量异号的电荷相遇时,虽然它们对外的电效应中和了,但这两种电荷仍然存在,并没有消失。由此我们可以得出如下结论:电荷只能被转移或被中和,但不能被创造或被消失。也就是说,在一个与外界无电荷交换的孤立系统内,无论发生怎样的物理、化学变化过程,该系统内电量的代数和总保持不变。这个结论称为电荷守恒定律。电荷守恒定律是物理学中基本定律之一,在宏观和微观领域中

普遍适用。

3. 电荷量子化

实验表明,电子是自然界具有最小电量的带电粒子,所有带电体或其他微观粒子的电量都是电子电量的整数倍。也就是说,物体所带的电荷是以一个个不连续的量值出现的。电荷这种只能取分立的、不连续量值的性质,叫做电荷的量子化。电子电荷的绝对值 e 就是电荷的量子。在宏观过程中,常见带电体的电量远比电子的电量大得多,电量的量子化显示不出来。这时,一般可以认为电荷是连续变化的。

二、库仑定律

电荷间有相互作用力存在。下面首先讨论在真空中两个点电荷相互作用的规律。所谓点电荷,是指这样的带电体,它本身的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多。点电荷本身不一定是体积很小的带电体,只是它本身的几何线度与它到其他带电体的距离相比,是微不足道的,因而它的形状和大小在所研究问题中可以不考虑,可用一个带有相同电量的几何点来代替。可见,点电荷与力学中的质点相似,也是一个从实际中抽象出来的理想模型。

1785年,法国物理学家库仑通过扭秤实验,总结出在真空中两个静止的点电荷间相互作用的规律,称为库仑定律。库仑定律可陈述如下:在真空中,两个静止的点电荷 q_1 及 q_2 之间的相互作用力的方向沿着它们的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸;作用力的大小与 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比。即

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8-1)$$

式中 k 是比例系数。根据实验测定,在国际单位制中

$$k \approx 9.00 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2})$$

若以 F_{12} 表示 q_2 对 q_1 的作用力, F_{21} 表示 q_1 对 q_2 的作用力, r_0 表示由 q_1 指向 q_2 的单位矢量, 则库仑定律可用矢量式表示如下:

$$F_{21} = -F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0$$

当 q_1 和 q_2 同号时, 如图 8-1a, F_{21} 沿 r_0 方向, 表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是斥力; q_1 和 q_2 异号时, 如图 8-1b, F_{21} 沿 $-r_0$ 方向, 表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是引力。所以, 上述矢量式同时给出作用力的大小和方向。

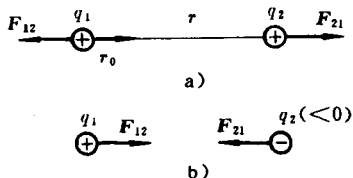


图 8-1

在国际单位制中, 为使公式“有理化”, 通常用新的恒量 ϵ_0 代替 k , 两者的关系为

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

ϵ_0 称为真空的介电常量。

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} \approx 8.85 \times 10^{-12} (\text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (8-2)$$

这样, 库仑定律便可表示为如下的常用形式:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0 \quad (8-3)$$

必须指出, 公式“有理化”后, 库仑定律的形式虽然变得复杂一些, 但以后将会看到, 由此而导出的一些常用公式会变得较为简单, 而且形式更为合理。

【例 8-1】 在氢原子中, 电子和质子之间的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{m}$ 。试计算它们之间的库仑力和万有引力, 并比较这两种力的大小。

解 由于在氢原子中电子和质子之间的距离远大于它们本身的直径, 所

以我们可以将电子和质子看作点电荷。由于质子所带的电荷为 $+e$,电子所带的电荷为 $-e$,故它们之间的库仑力为引力,其大小为:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.2 \times 10^{-8} (\text{N})$$

又由于电子质量 $m=9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$,质子质量 $M=1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$,万有引力常数 $G=6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$,所以电子和质子之间的万有引力大小为:

$$F_m = G \frac{mM}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \\ = 3.6 \times 10^{-47} (\text{N})$$

由此可得库仑力和万有引力的比值为

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{8.2 \times 10^{-8}}{3.6 \times 10^{-47}} = 2.3 \times 10^{39}$$

可见,在原子系统中,静电力远比万有引力为大。因此在讨论原子内部结构时,可以不必考虑万有引力。

§ 8-2 电场 电场强度

一、电场

力是物体间的相互作用。带电体之间的相互作用为什么可以不需要任何物质作媒介而直接发生呢?经过长期的研究,人们提出了一个新的观点,认为在带电体周围的空间存在着一种特殊形态的物质,这种物质是由带电体所激发的,称为电场。电场对处于其中的任何其他带电体都有力的作用,这种力称为电场力。带电体之间的相互作用力正是通过电场传递的。即



虽然电场并不像由原子、分子所组成的实物那样看得见,摸得着,但从它的对外表现仍能为人们所感知。近代物理已经证实,场也是物质存在的一种形式,也具有能量、动量和质量等物质的一系

列属性。我们非常熟悉的电磁波就是电磁场的传播过程。自从人们发现了电磁波并证实了光波就是电磁波以后,电磁场的存在已经是不容置疑的事实了。

相对于观察者为静止的带电体周围所存在的电场,称为静电场,静电场的对外表现主要有:

(1)对引入电场中的任何带电体都有力的作用;

(2)当带电体在电场中移动时,电场力将对带电体做功,这表示电场具有能量;

(3)能使引入电场中的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象。

在本章和下一章中,我们将从静电场的上述表现研究静电场的性质和规律。

二、电场强度

首先,我们根据静电场的第一种表现,从力的观点出发,研究静电场的性质。

电场中任一点处电场的性质,可利用试验电荷 q_0 来进行研究。所谓试验电荷,是一个足够小的点电荷,通常规定为正电荷。试验电荷还必须满足如下两个条件:①它所带的电量必须很小,当把它引入电场中时,不会对原有电场有任何显著的影响;②它的线度必须充分小,当引入电场中时,它的位置有确定意义。

把试验电荷 q_0 放在电场中不同位置时,它所受的力 F 的大小和方向一般是各不相同的。这表明,电场既有强弱,又有方向。如果在电场中某给定点处,改变试验电荷 q_0 的量值,则它受力的大小也将随之改变, q_0 增大多少倍, q_0 的受力也增大多少倍;如果改变 q_0 的符号,则 q_0 受力的大小不变,但方向相反。显然,比值 $\frac{F}{q_0}$ 是一个仅与试验电荷所在点处电场性质有关,而与试验电荷无关的

矢量。为描述电场各点的强弱与方向,我们把它定义为电场强度,简称场强,用 E 表示。即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8-4)$$

场强是矢量。由式(8-4)可知,电场中某点的场强,在数值上等于单位电荷在该点所受的电场力的大小,方向与该点处正电荷受力的方向一致。但必须指出:场强并非电场力,它是描述电场各点性质的物理量,与电场力是根本不同的。

在国际单位制中,场强的单位是牛顿每库仑(符号 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$),也可写成伏特每米(符号 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$),见(§ 8-7)。

三、场强叠加原理

实验指出,将试验电荷 q_0 放在由若干个点电荷所产生的电场中时,试验电荷 q_0 所受的电场力等于各个点电荷各自对 q_0 作用的力的矢量和,即

$$F = F_1 + F_2 + \cdots + F_n$$

两边除以 q_0 ,得

$$\frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \cdots + \frac{F_n}{q_0}$$

按场强的定义,右边各项分别是各个点电荷单独存在时所产生的场强,而左边为总场强,即

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_n \quad (8-5)$$

上式表明,电场中任一点的总场强等于各个点电荷在该点各自产生的场强的矢量和,这就是场强叠加原理。应用这一原理,可以计算任意形状带电体所产生的场强。

四、场强的计算

1. 点电荷电场中的场强

设在真空中有一个点电荷 q , 则点电荷电场中各点的场强, 可应用场强的定义公式计算。设想在距 q 为 r 的 P 点处放一试验电荷 q_0 , 据库仑定律, q_0 在 P 点处受到的电场力为

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

式中 $\mathbf{r}_0$ 表示从点电荷 q 指向场点 P 的单位矢量。根据场强的定义式, P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-6)$$

由上式可见, 点电荷电场中各点的场强与点电荷的电量 q 成正比, 并与点电荷到场点的距离 r 的平方成反比。如果 q 为正电荷, 则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 同向; 如果 q 为负电荷, 则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 反向, 如图 8-2 所示。

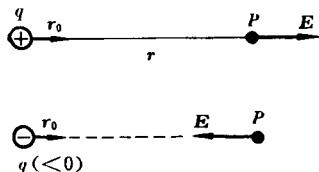


图 8-2

2. 点电荷系电场中的场强

设真空中的电场是由若干点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 所共同产生的。根据场强叠加原理, 这些点电荷各自在 P 点所产生的场强的矢量和就是 P 点的总场强, 用 $\mathbf{E}$ 表示, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n \\ &= \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \mathbf{r}_0 + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \mathbf{r}_0 + \dots + \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \mathbf{r}_0 \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_0 \end{aligned} \quad (8-7)$$

3. 带电体电场中的场强

如果电荷在带电体中是连续分布的, 则可以把这个带电体分

成许多极小的电荷元 dq , 并把每个电荷元 dq 看成是一个点电荷。按点电荷的场强公式, 在真空中, 每一电荷元 dq 在 P 点处的场强为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 r 为电荷元 dq 至场点 P 的距离。根据叠加原理, P 点的总场强就是所有电荷元单独存在时在该点产生的场强的矢量和。因电荷是连续分布的, 故可用积分的方法计算, 即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-8)$$

上式是矢量积分。在具体运算时, 首先要根据带电体电荷的分布情况, 选取适当的坐标系, 算出 $\mathbf{E}$ 在坐标轴上的三个分量:

$$E_x = \int dE_x; \quad E_y = \int dE_y; \quad E_z = \int dE_z$$

则合场强

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

E 的大小

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

$\mathbf{E}$ 的方向可用 $\mathbf{E}$ 与坐标轴的夹角表示。

五、带电粒子或带电体在外电场中所受作用的计算

1. 带电粒子在电场中所受的电场力

如果知道电场中某点的场强, 则放在该点处的点电荷 q 所受到的电场力应为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (8-9)$$

式中 $\mathbf{E}$ 是 q 以外的所有其他电荷在 q 所在处的场强。

根据式(8-9), 可以直接计算一个点电荷或一个带电粒子在外电场中所受的作用力。但对于一个带电体, 则要把它视为由无数多

无限小的电荷元 dq 组成,先计算带电体中各个电荷元所受的作用力 dF ,然后再用积分方法求带电体所受的合力,运算是比较复杂的。

2. 电偶极子在外电场中所受的作用

两个大小相等的正负电荷 $+q$ 和 $-q$,当它们的距离 l 较讨论中所涉及的距离小得多时,这个电荷系统就称为电偶极子。电偶极子是电学中的一个重要的物理模型。例如,当分子中正负电荷的中心不重合时,便构成一个电偶极子。连接 $+q$ 和 $-q$ 这两个电荷的直线 l ,称为电偶极子的轴线,从负电荷到正电荷的矢径 l 的方向为轴线的正向。电偶极子的电荷 q 与矢径 l 的乘积定义为电偶极子的电矩,用 P 表示,即

$$P = ql \quad (8-10)$$

以后将会看到,电偶极子的场强以及电偶极子在外电场中所受的作用,均与它的电矩 P 有关。因此,电矩是表征电偶极子性质的重要物理量。

当电偶极子处在外电场中时,由于 l 很小,电偶极子正负电荷所在处的场强可以看作是均匀的。设该处的场强为 E , l 与 E 的夹角为 θ ,如图 8-3 所示。此时,两个电荷所受的力分别为 $-qE$ 和 $+qE$ 。这两个力大

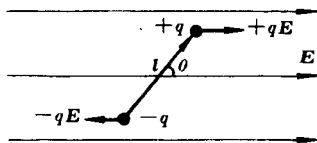


图 8-3

小相等,方向相反,但不在同一直线上,所以合力为零,而合力矩为

$$M = qEl\sin\theta = PE\sin\theta \quad (8-11)$$

上式表明,电偶极子在外电场中所受力矩与它的电矩 P 成正比。在力矩的作用下,电偶极子会发生转动,它的转向使 θ 减小,直到电偶极子的轴线的方向与外电场方向一致时,力矩便等于零。

【例 8-2】 设真空中有一电偶极子,试求电偶极子在轴线的中垂线上任