

★ 职工高等工业专科学校教材

物理学

【下册】 屠庆铭 主编



高等教育出版社

职工高等工业专科学校教材

物理学

(下册)

屠庆铭 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教育委员会颁发的《职工高等工业专科学校普通物理学教学大纲(草案)》编写的。编写中既考虑了职工大学、业余大学的教学特点,也兼顾了普通物理学课程的深广度,因此适合于成人教育使用。全书共分上、下两册。上册包括力学、机械振动和机械波,气体分子运动论和热力学基础三篇;下册包括电磁学、波动光学、近代物理简介三篇。各章均配有小结、问题和习题。

本书经国家教育委员会组织有关教师审订,可作为全国各类职工大学、业余大学普通物理学课程的教材,亦可供工厂、企业技术人员及广大自学者参考。

编 者

职工高等工业专科学校教材

物 理 学

(下册)

屠庆铭 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

祝桥新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.125 字数 339,000

1987年9月第1版 1987年9月第1次印刷

印数 00,001—11,400

ISBN7-04-000043-1/O·23

书号 13010·01438 定价 2.40 元

目 录

第四篇 电 磁 学

第十章 静电场	2
§10-1 电荷	2
§10-2 库仑定律	6
§10-3 电场 电场强度 电力线	12
§10-4 电场强度的计算	17
§10-5 高斯定理	25
§10-6 高斯定理的应用	30
§10-7 电介质中的静电场 电位移矢量	34
§10-8 电位	41
§10-9 电位的计算	48
§10-10 场强与电位的关系	53
§10-11 静电场中的导体	58
§10-12 电容 电容器	62
§10-13 静电场的能量	72
本章小结	76
问题十	80
习题十	82
第十一章 稳恒电流	89
§11-1 稳恒电流 电流密度	89
§11-2 欧姆定律及其微分形式	95
§11-3 电流的功和功率 焦耳-楞次定律的微分形式	99
§11-4 电源电动势 一段含源电路的欧姆定律	102
*§11-5 基尔霍夫定律	111
*§11-6 金属导电的经典电子论基本概念	113
本章小结	116

问题十一	118
习题十一	120
第十二章 电流与磁场	123
§12-1 磁现象的电本质	123
§12-2 磁场 磁感应强度 磁感应线	128
§12-3 毕奥-萨伐-拉普拉斯定律	133
§12-4 磁感应强度的计算	135
§12-5 安培环路定理 磁场强度	141
§12-6 安培环路定理的应用	145
§12-7 磁场对载流导线的作用力	151
§12-8 磁场对载流线圈的作用力矩	157
§12-9 运动的带电粒子	162
§12-10 物质的磁性	172
本章小结	180
问题十二	182
习题十二	186
第十三章 电磁感应	194
§13-1 电磁感应的基本现象	194
§13-2 电磁感应的基本规律	198
§13-3 动生电动势	204
§13-4 感生电动势	212
§13-5 自感和互感	217
§13-6 磁场的能量	225
本章小结	229
问题十三	231
习题十三	234
第十四章 电磁场和电磁波	239
§14-1 麦克斯韦电磁场理论的基本概念	239
§14-2 电磁波	247
本章小结	258
问题十四	230
习题十四	260

第五篇 波动光学

第十五章 光的干涉	203
§15-1 光波 相干光	203
§15-2 双缝干涉	268
§15-3 薄膜的等厚干涉	274
§15-4 劈尖 牛顿环	282
*§15-5 迈克耳孙干涉仪 等倾干涉	288
本章小结	292
问题十五	293
习题十五	294
第十六章 光的衍射	296
§16-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	296
§16-2 单缝衍射	299
§16-3 衍射光栅	305
本章小结	310
问题十六	311
习题十六	311
第十七章 光的偏振	313
§17-1 自然光和偏振光	313
§17-2 反射光和折射光的偏振	316
§17-3 光的双折射现象 马吕斯定律	320
*§17-4 人为双折射现象及其应用	328
本章小结	330
问题十七	331
习题十七	331

第六篇 近代物理简介

第十八章 狭义相对论	334
§18-1 经典时空观	334
§18-2 狭义相对论的基本原理	339

§18-3 相对论中的时间、同时性和长度	341
§18-4 相对论中的质量和能量	346
本章小结	349
问题十八	351
习题十八	351
第十九章 光的量子性	353
§19-1 热辐射简介	353
§19-2 绝单黑体的辐射 普朗克的量子假设	355
§19-3 光电效应	359
§19-4 光量子 爱因斯坦方程	364
*§19-5 康普顿效应	369
*§19-6 实物粒子的波粒二象性 德布罗意波	372
本章小结	375
问题十九	376
习题十九	377
第二十章 原子和原子核	378
§20-1 卢瑟福的原子有核模型	378
§20-2 原子光谱的规律性	381
§20-3 玻尔的氢原子理论	384
*§20-4 玻尔理论的发展	393
*§20-5 微观粒子运动的一些基本特征	398
*§20-6 元素周期律 原子的电子壳层结构	402
*§20-7 激光	406
*§20-8 半导体	412
*§20-9 原子核的基本性质	420
*§20-10 放射性衰变	425
*§20-11 核反应	428
*§20-12 基本粒子简介	432
本章小结	435
问题二十	434
习题二十	434
习题答案	438

第四篇 电 磁 学

电磁现象是自然界中存在的一种极为普遍的现象。人们在日常生活和工农业生产中，都会涉及到电磁现象。大家所熟悉的电灯、电炉、电话、电报、收音机、电视、电动机等等，都广泛地应用着电，电就是一种电磁现象。电之所以被广泛地应用是由于(1)电能便于转换为其它形式的能量，如机械能(电动机)、热能(电炉)、光能(电灯)、化学能(电镀)等；(2)电能便于远距离输送，功率较大而能量损耗较小；(3)电磁讯号以电磁波的形式在空间传播，可以在极短的时间内传送到远方；(4)电能便于自动控制和远距离控制。

电磁学是研究电磁现象的规律及其应用的一门科学。电磁学的知识范围很广，是许多工程技术和科学研究的基础。电磁学理论在现代物理学中占有重要地位。在分子、原子等微观领域中，电磁力是主要的相互作用之一。物质的许多性质都必须从物质的电结构来解释。此外，电磁学理论也是研究光学的基础。

第十章 静 电 场

相对于某一惯性参照系静止的电荷所产生的电场称为静·电·场。对静电场的研究是认识电磁运动规律的基础。

本章将从静止电荷之间相互作用的规律——库仑定律出发，研究描述静电场性质的两个基本的物理量：电场强度和电位，并进一步讨论静电场的一些基本性质。

此外，本章还将研究静电场中的导体和电容器。

§10-1 电 荷

一、电荷

两种不同质料的物体，例如丝绸和玻璃棒，相互摩擦后它们都能吸引羽毛、纸屑等轻小的物体，这表明丝绸和玻璃棒都进入了一种特殊的状态，这种状态叫做带电状态。我们把处于带电状态的物体称为带电体，或者说它带有电荷。因此，丝绸和玻璃棒相互摩擦后都变成了带电体，带有电荷。

物体所带的电荷只有两种：一种是正电荷，另一种是负电荷。我们规定，经过相互摩擦后，玻璃棒所带电荷为正电荷，丝绸所带的电荷为负电荷。电荷是物质的一种属性，它们不能脱离物质而单独存在。

实验表明，带电体之间具有相互作用力，这种相互作用力称为电性力。

两个带电体之间的相互作用力与它们所带的电荷多少有关，我们把带电体所带电荷的量值叫做电荷量也可简称为电荷。由于

电流强度表示单位时间里通过导体横截面电荷的多少，所以电荷量的单位可以从电流强度的单位导出。在国际单位制中，电流强度的单位是安培(A)，且规定一个安培的电流在一秒钟内所流过导体横截面的电荷量为单位电荷量，叫做一个库仑(C)，即

$$1 \text{ 库仑(C)} = 1 \text{ 安} \cdot \text{秒(A} \cdot \text{s)}$$

二、物质的电结构

物质为什么会带电？要解决这个问题必须认识物质的电结构。物质由原子组成，原子由原子核和电子所组成，电子绕原子核不断运转。氢原子的原子核最简单，只有一个质子；其它元素的原子核是由若干质子和中子所组成。电子带负电，质子带正电，中子不带电。每个质子所带的正电荷的电荷量与每个电子所带的负电荷的电荷量大小相等。在正常情形下，原子核中的质子数与原子核外的电子数相等，原子核所带的正电荷的电荷量与核外所有电子所带的负电荷的电荷量相等，原子作为一个整体所带的总电荷量为零。由于原子中电子与原子核之间的距离非常小（在 10^{-10}m 的数量级内），所以电子的负电荷和原子核的正电荷对外界的电性作用相互抵消，物体对外界不显示带电的性质，或者说处于电中性状态。因此，为了使物体处于带电状态，必须通过某些方法使处于中性状态物体里的原子失去电子，或者得到电子；物体若失去电子，就带有正电荷，若得到电子，就带有负电荷。

在丝绸和玻璃棒相互摩擦的过程中，由于摩擦力做功使丝绸和玻璃棒中的一些电子摆脱了原子核的束缚而发生相互转移，但从玻璃棒转移到丝绸中的电子数比从丝绸转移到玻璃棒的电子数多，所以玻璃棒失去了电子而带正电，相反丝绸却得到了多余的电子而带负电。显然，玻璃棒失去的电子就是丝绸得到的多余电子，因此，玻璃棒所带的正电荷与丝绸所带的负电荷是相等的。

三、电荷守恒定律

丝绸、玻璃棒在摩擦前都不带电，总电荷量为零；相互摩擦后分别带等量的异种电荷，总电荷量也为零。这表明，在丝绸和玻璃棒所组成的系统中电荷是守恒的，摩擦不能产生电荷，也不能消灭电荷，只是使正、负电荷分离并转移。我们进一步发现，一切起电的过程都不能产生或消灭电荷，只能使电荷重新分布而已。由此，得到电荷守恒定律：

在一个与外界没有电荷转移的孤立系统中，无论发生什么过程，总电荷量即所有正负电荷的代数和是个不变的守恒量。

大量实验证明电荷守恒定律是自然界中基本的守恒定律之一，它不仅适用于宏观的电现象，也适用于原子、原子核以及基本粒子等微观领域。例如， γ 射线穿过铅块时可产生一个负电子和一个正电子，这实际上是 γ 光子转换成正负电子对的反应过程。 γ 光子不带电，正、负电子带等量的异种电荷，因此这个微观反应同样遵从电荷守恒定律。

四、电荷量子化

除了电子、质子、中子外，自然界中还存在组成物质的许多其它基本粒子。它们有的带正电，有的带负电，有的不带电。但是，迄今为止发现的带电的基本粒子的电荷量一般都与质子或电子的电荷量相同。因此，电子或质子所带的电荷量的大小是一个基本的电荷量值，实验测得这个量值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C} \approx 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$$

电子的电荷量是 $-e$ ，质子的电荷量是 $+e$ ，一般带电基本粒子的电荷量或是 $+e$ ，或是 $-e$ 。

显然，由基本粒子所组成的任何带电体的电荷量只能是基本电荷量的整数倍，即

$$q = ne$$

n 可取正或负的整数。这样看来，带电体的电荷量是不能任意取

值的，而只能取基本电荷量的整数倍，这种现象叫做电荷的量子化。

当某一物理量不能取连续变化的数值，而只能取一些分立的数值时，我们就说这个物理量是“量子化”的。在近代物理中，“量子化”是个很基本的概念，量子化现象在微观领域中是普遍存在的。

由于电荷的基本量是 e （极其微小），而宏观带电体所带的电荷量远远大于基本电荷，因此电荷量子化在宏观现象中表现不出来。例如，在220伏、15瓦的灯泡中，每秒就有 4.3×10^{17} 个电子的电荷量通过灯丝，对于这一宏观电流来说，电荷量子化的事实完全被掩盖了。正如我们看到水管中的流水是连续的流体，而不会直接看到它们是由一个个水分子所组成的那样。在宏观电磁学的范围内不必考虑电荷量子化，可以认为带电体的电荷量可取任意连续变化的数值。事实上，物理学中的量子化现象在宏观领域中都表现不出，只有在微观领域中才能显示。

五、导体和电介质

物体按其导电性能可以分成两大类：一类为导体，可以通过电流；另一类为绝缘体，也叫做电介质，不能通过电流。金属和酸、碱、盐的溶液都是导体；玻璃、石英、橡胶、瓷器、塑料、空气和一些有机物质都是电介质。

在金属中，外层电子受原子核的吸引力较小，它们很容易摆脱原子核的束缚而在金属内部自由地运动，这些电子叫做自由电子；金属是通过自由电子在金属中定向移动而导电的。酸、碱、盐等电解质溶液中存在着大量的正、负离子，它们可以在溶液中自由移动；电解质导电就是依靠这些正、负离子的定向移动而实现的。所以，简单说来，金属的导电机理是自由电子的定向运动，而酸、碱、盐等溶液的导电机理是自由离子的定向运动。金属称为第一类导

体、酸、碱、盐溶液叫做第二类导体。

在绝缘体中，电子受到原子核的吸引力比较大，即使外层电子也很难摆脱原子核的束缚，所以它几乎没有自由电子，不能导电。

应当指出，上面的分类并不是绝对的。还有些物质就其导电性能而言是介于导体与绝缘体之间的，如硅、锗、硒等元素以及砷化镓、锑化铟等化合物，它们叫做半导体。半导体具有许多特殊的性质，它们在现代科技生产上有着广泛的应用。

§10-2 库仑定律

一、点电荷

静止的带电体之间的电性作用力称为静电力。一般情形下，决定带电体之间的静电力的因素很复杂，除了决定于它们的电荷与相对位置外，还与带电体的大小、形状有关。但是，实验发现：如果一个带电体的线度与它同其它带电体之间的距离相比小得多时，这个带电体的形状、大小对它所受的静电力的影响可以忽略，这时我们就把这个带电体叫做点电荷。对于点电荷我们可以简单地用一个点来表示它的位置，而认为在这个点上集中了带电体的全部电量。显然，“点电荷”的概念类似于力学中“质点”的概念，它是对实际带电体在一定条件下的抽象近似，这种近似给研究问题带来了方便。

必须指出，一个带电体是否可以简化为点电荷，需由所研究的问题来决定。

二、真空中的库仑定律

库仑 (Coulomb) 在 1785 年用扭秤实验测定了两个带电小圆球之间的静电力，并由此进一步研究得到了真空中两个静止点电荷之间静电力的基本规律。两个点电荷之间的静电力与它们各自

的电荷 q_1, q_2 成正比, 与它们之间距离 r 的平方成反比; 作用力的方向沿着点电荷的连线; 同种电荷是斥力, 异种电荷是吸力, 这个规律称为库仑定律。

如图 10-1 所示, 根据库仑定律我们可以把两个点电荷 q_1, q_2 的静电力的大小表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (10.1a)$$

式中 k 是比例系数, 其量值与力 F 、距离 r 、电荷 q 等单位的选择有关。

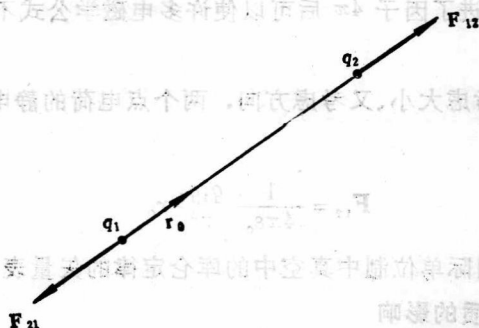


图 10-1 库 仑 定 律

用 $\mathbf{r}_0$ 表示从 q_1 指向 q_2 的矢径方向的单位矢量, 则点电荷 q_1 作用于点电荷 q_2 的静电力 $\mathbf{F}_{12}$ 可用矢量形式表示为

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0$$

如果 q_1, q_2 是同种电荷, $\mathbf{F}_{12}$ 沿矢径方向, 表明点电荷之间是斥力; 如果 q_1, q_2 是异种电荷, $\mathbf{F}_{12}$ 与矢径方向相反, 表明点电荷之间是吸力。

点电荷 q_2 作用于 q_1 上的静电力用 $\mathbf{F}_{21}$ 表示, 则

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$$

可见,静止电荷之间的作用力符合牛顿第三定律.

在国际单位制中,力的单位是牛顿(N),长度单位是米(m),电量单位是库仑(C),由实验测得式(10.1a)中的常数 k 为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为了使许多电磁学公式的形式简单一些,通常用另一个常数 ϵ_0 来表示 k ,它与 k 的关系是

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

$\epsilon_0 = 8.8538 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 叫做真空介电常数. 后面我们将看到,此处引进了因子 4π 后可以使许多电磁学公式不再出现这个因子.

因此,既考虑大小、又考虑方向,两个点电荷的静电力可表示为

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (10.1b)$$

式(10.1b)是国际单位制中真空中的库仑定律的矢量表示式.

三、电介质的影响

实验发现,把两个静止点电荷放在无限大的均匀电介质中,它们之间的作用力是该两点电荷在真空中作用力的 $\frac{1}{\epsilon_r}$ 倍,故有

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (10.2)$$

上式为无限大均匀介质中的库仑定律. 在不同的电介质中, ϵ_r 的值不同,我们把 ϵ_r 叫做电介质的相对介电常数. 显然, ϵ_r 是个无量纲的物理量,它描述了电介质的性质. 用实验可测得各种电介质的 ϵ_r 值. 实验发现,点电荷在电介质中的作用力都比真空中小,所以各种电介质的 $\epsilon_r > 1$. 我们可以把真空看作为一种特殊的电介质,它的 ϵ_r 等于 1. 所以,式(10.2)也包括了真空这一特殊情况

形。一般把 ϵ_0, ϵ_r 的乘积用 ϵ 表示,即

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

ϵ 称为电介质的介电常数。

表 1-1 列出了常见的各种电介质的相对介电常数 ϵ_r 。

表 1-1 各种电介质的相对介电常数

电 介 质	相对介电常数 (ϵ_r)
真 空	1
空气(1 atm)	1.00059
电 容 器 纸	3~5
硫	4.2
石 蜡	2.0~2.3
云 母	6~8
陶 瓷	6
聚 氯 乙 稀	3.1~3.5

为什么电介质中点电荷之间的作用力比真空中小呢?这是因为在点电荷的作用下,电介质中每个分子内的正、负电荷发生相对的微观位移,使点电荷周围出现符号相反的电荷,这些电荷产生的效果相当于减少了点电荷的一部分电量,使电介质中点电荷之间的相互作用力比真空中小,见图 10-2。

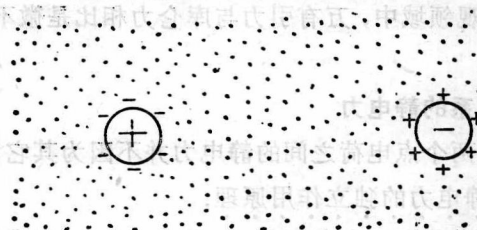


图 10-2 电介质对电荷间相互作用的影响

在应用库仑定律时,我们必须注意它的适用条件,它适用于放置在真空中或无限大的均匀电介质中的点电荷的情形。库仑定律是在宏观实验基础上得到的,但进一步研究发现它对微观领域,如

原子中电子与原子核之间的电力也适用。

[例 10-1] 试比较氢原子中电子与原子核之间的库仑力与万有引力。电子的质量为 $9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$, 原子核的质量为 $1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。

解: 氢原子的原子核是质子, 它的电荷为 $+e$; 电子的电量为 $-e$ 。设电子与原子核的距离为 r , 根据库仑定律得

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (1)$$

根据万有引力定律, 万有引力为

$$F_m = G \frac{m_e m_p}{r^2} \quad (2)$$

m_e 为电子的质量, m_p 为质子的质量。由式(1)、(2)得

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 G m_e m_p} \quad (3)$$

把 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$, $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$, $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 代入式(3), 得

$$\frac{F_e}{F_m} = 2.27 \times 10^{39}$$

可见, 在微观领域中, 万有引力与库仑力相比是微不足道的, 完全可以忽略。

四、点电荷系的静电力

实验表明, 两个点电荷之间的静电力并不因为其它电荷存在而改变, 这就是静电力独立作用原理。

如果空间存在着由 n 个点电荷 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 组成的点电荷系统, 那么它们对另一个点电荷 q_0 的静电力, 根据静电力独立作用原理, 就可以按照库仑定律先分别计算出 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 对 q_0 的作用力 $F_{10}, F_{20}, F_{30}, \dots, F_{n0}$, 然后用矢量迭加求出 q_0 所受到的合力 F_0 , 即