

第二版

大学物理学 中册

University Physics

彭长德 罗灵芝 编著



中国矿业大学出版社

PDG

大学物理学

(第二版)

(中册)

吕华平 编著
潘苏东

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本套教材是为高等师范院校理科非物理类专业的学生学习物理课程而编写的。全书分上、中、下三册。上册为力学和热学；中册为电磁学；下册为光学和近代物理学。编者在为适应 21 世纪物理教学知识现代化方面作了尝试，并选编了一些与现代科学技术密切相关的阅读材料。本套教材也可作为理工科有关专业大学物理课程、中学物理教师和自学考试者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学/吕华平等编著. —2 版. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2002. 8

ISBN 7-81070-033-2

I. 大… II. 吕… III. 物理学—高等学校: 一教材
IV. (M)

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 060429 号

书 名	大学物理学
编 著	吕华平 潘苏东
责任编辑	朱明华
出版发行	中国矿业大学出版社 (江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
排 版	中国矿业大学印刷厂照排中心
印 刷	中国矿业大学印刷厂
经 销	新华书店
开 本	850×1168 1/32 印张 8.875 字数 228 千字
版次印次	2002 年 8 月第 2 版 2002 年 8 月第 1 次印刷
印数	1~2050 册
总 定 价	39.80 元(共三册)

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

目 录

第三篇 电磁学

第九章 静电场	2
§ 9-1 库仑定律	3
§ 9-2 电场 电场强度	9
§ 9-3 电通量 高斯定理	24
§ 9-4 静电场环路定理 电势	36
§ 9-5 电场强度与电势的微分关系	46
阅读材料五 静电的应用	52
思考题	55
习题	55
第十章 静电场中的导体和电介质	58
§ 10-1 静电场中的金属导体	59
§ 10-2 静电场中的电介质	68
§ 10-3 有电介质存在时的静电场和高斯定理	73
§ 10-4 电容 电容器	81
§ 10-5 静电场的能量	87
思考题	91
习题	92
第十一章 稳恒电流	96
§ 11-1 电流的稳恒条件和基本规律	97
§ 11-2 电动势	107
§ 11-3 基尔霍夫定律	111
§ 11-4 气体导电性与等离子体	116

阅读材料六 超导电性·····	122
思考题·····	132
习题·····	133
第十二章 稳恒磁场 ·····	136
§ 12-1 磁场·····	137
§ 12-2 毕奥-萨伐尔定律及其应用 ·····	143
§ 12-3 磁场的高斯定理·····	150
§ 12-4 安培环路定理·····	153
§ 12-5 磁场对载流导线的作用·····	160
§ 12-6 带电粒子在磁场中的运动·····	166
§ 12-7 磁介质及其磁化·····	175
阅读材料七 世界何处没有磁·····	182
思考题·····	186
习题·····	189
第十三章 电磁感应 ·····	193
§ 13-1 电磁感应现象·····	194
§ 13-2 电磁感应基本定律·····	198
§ 13-3 动生电动势·····	202
§ 13-4 感生电动势 涡旋电场·····	210
§ 13-5 电磁感应的应用·····	214
§ 13-6 自感和互感·····	217
§ 13-7 磁场的能量·····	225
思考题·····	229
习题·····	231
第十四章 电磁场与电磁波 ·····	235
§ 14-1 位移电流·····	236
§ 14-2 麦克斯韦方程组的积分形式·····	241
§ 14-3 电磁波的辐射和传播·····	244
§ 14-4 电磁场的能量及其物质性·····	253
阅读材料八 无线电波及其应用·····	256
思考题·····	265

习题.....	265
习题答案.....	267
附录一 常用物理常数.....	273
附录二 常用物理量.....	274

第三篇 电磁学

电磁学是物理学中研究电、磁和电磁相互作用规律的分支学科,它所涉及的范围很广,从人们的衣、食、住、行到工农业生产和社会文化生活,从物质的微观结构到宇宙星系的组成和演化,都与电磁学规律有关,近代蓬勃发展起来的电工学、无线电学、遥控遥测、自动控制、电视、电脑等,都是以电磁学的研究为基础的。

研究电磁运动的规律,不仅有助于人们更深入地认识世界,而且更重要的是可以据此而能动地改造世界,在社会主义现代化建设中,劳动生产率的不断提高和生产过程自动化的推广等,都需要创造性地运用电磁运动规律的知识,事实上,电之所以被广泛利用,是因为它具有很多特点。例如电能很容易转换为化学能、热能、光能、机械能等,而且转换效率较高,转换过程清洁。电能还便于远距离输送,损耗小;而以电磁形式在空间传播的电磁能,就从根本上消除了空间阻隔的障碍。此外,电学仪表的灵敏度很高,便于对各种物理过程进行检测和监控。

电磁学是涉及范围很广的知识领域,在理论和应用两个方面都具有十分重要的意义,已成为许多科技门类的基础。本篇主要研究电磁场的规律及物质的电磁性质。

第九章 静电场

§ 9-1 库仑定律

§ 9-2 电场 电场强度

§ 9-3 电通量 高斯定理

§ 9-4 静电场环路定理 电势

§ 9-5 电场强度与电势的微分关系

智慧生出三种果实：善于思考、善于言谈、善于行动。

—— 德漠克利特

相对于观察者为静止的电荷所激发的电场称为静电场。本章主要研究处于真空中的静止电荷所激发的电场。我们由库仑定律出发,导出静电场的高斯定理和环路定理,从而阐明静电场是有源场,保守场。引入了电势能及电势的概念。电场强度和电势是描述静电场的两个重要物理量,在学习过程中一定要注意它们的区别和联系。

§ 9-1 库仑定律

一、电荷

人们早就知道,把两种质料不同的物体,例如丝绸和玻璃棒相互摩擦后,它们都能吸引羽毛、小纸片等轻微物体。这时,我们就说丝绸和玻璃棒这两个物体都已处于带电状态,它们分别带了电或有了电荷。处于带电状态的物体,称为带电体。使物体带电,叫做起电,上述用摩擦方法使物体带电,叫做摩擦起电。也可以用其它方法使物体带电,如接触起电,静电感应起电等方法。物体所带电荷的多少称为电量,并以 q 或 Q 表示。在国际单位制中,电量的单位是库仑,其符号为 C 。

通过研究,人们认识到电荷的基本性质有以下几个方面:

1. 两种电荷

归纳大量的实验证明,自然界的电荷只有两种,即正电荷和负电荷。按照规定,用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为正电荷;用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷称为负电荷,不论用什么方式使物体带电,物体上所带的电荷要么与玻璃棒上所带的电荷相同,要么与硬橡胶棒上所带的电荷相同。同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。电荷间的这种互相作用叫库仑力或静电力。

2. 电荷是量子化的

实验证明,电荷是不连续的,由元电荷组成。元电荷用 e 表示,是一个质子的电荷,一个电子的电荷等于 $-e$ 。一切带电体所带的电荷都是元电荷的整数倍。即任何一个带电体所带的电荷 Q 可表示为

$$Q = \pm ne \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中的 e 为

$$e = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电荷的这种只能取分立的,不连续的量值性质,叫做电荷的量子化。

美国物理学家密立根(R. A. Millikan)通过油滴实验首先证明了电荷的量子化,并测量了元电荷的电量。由此获得了1923年的诺贝尔物理学奖。现在已经知道,许多基本粒子都带有正的或负的元电荷。例如电子、反质子等各带一个负的元电荷,质子、反电子等各带一个正的元电荷。由基本粒子组成的粒子可以具有 $2e, 3e, \dots$ 的电荷。然而现代物理从理论上预言,自然界中应存在具有 $\frac{1}{3}e$ 和 $\frac{2}{3}e$ 电荷的基本粒子,这种基本粒子称为夸克;但至今尚未在实验中找到自由的夸克。

由于元电荷极小,宏观物体带电时一般又都含有大量的元电荷,所以在描述宏观物体的带电分布时,完全可以不考虑电荷的量子性,而将电荷看作是连续分布的。

3. 电荷守恒定律

根据物质的原子结构理论,任何化学元素的原子是由带正电荷的原子核和绕核旋转且带负电荷的电子所组成,而原子核所带正电荷和核外电子所带负电荷的总和相等。原子内的净电量为零(即正、负电荷的代数和为零),因而每个原子都呈电中性。这时,整个物体对外界不显示电性。

原子核所带的正电荷和核外电子所带的负电荷之间相互作用的电力,随物质的不同而有强弱。在两种质料不同的物体相互摩擦而起电的过程中,因摩擦而使每个物体中都有一些电子摆脱了带正电的原子核的束缚,转移到另一个物体上,由于不同质料的物体,彼此向对方转移的电子个数往往不相等,结果必然是一个物体因失去一部分电子而带正电,另一个物体因得到这部分电子而带负电。所以,摩擦起电时,两个物体总是同时带异种等量的电荷。亦即,摩擦并不产生电荷,只不过是把电荷从一物体迁移到另一物体上去,改变了物体的电中性状态。

由摩擦起电和其他起电过程的大量实验事实证明,一切起电过程实质上都是使物体上正、负电荷分离或转移的过程,在这种过程中,电荷既不能消失,也不能创生,只能使原有的电荷重新分布。由此可总结出电荷守恒定律:一个孤立系统的总电量(即系统中所有正、负电荷的代数和)在任何物理过程中始终保持不变。所谓孤立系统,就是指它与外界没有电荷的交换。电荷守恒定律是自然界中一条基本的守恒定律,在宏观和微观领域中普遍适用。

二、库仑定律

带电物体相互间有力的作用,它是电荷的一种性质。一般地说,两个带电体间的相互作用,除了和它们所带的电量有关外,还和它们本身的大小、形状、电荷在带电体上的分布以及周围介质的性质等有关,情况相当复杂。为此,下面我们先讨论最简单的,也是最基本的问题,即两个相对静止的点电荷在真空中相互作用的规律。

1. 点电荷

在静电学中,经常要用到“点电荷”的概念,这是从实际带电体中抽象出来的一个理想模型。当所研究的带电体之间的距离比它们本身的线度大得多时,这些带电体就可以当作点电荷。静电学中

“点电荷”这个概念与力学中“质点”这个概念同样重要。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可以不必考虑,可用一个具有带电体全部电量的几何点来表示。必须指出,能否把带电体当作点电荷,这要由具体问题来决定。

2. 库仑定律

1785年,库仑通过扭秤实验,首先发现了点电荷之间的相互作用力的规律,这就是著名的库仑定律。它是静电学中的基本定律,可表述如下:真空中两个静止点电荷间的作用力的大小,与这两个点电荷所带电量 q_1 、 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r_{21} 的二次方成反比;作用力的方向沿着两个点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。即

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \right) = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (9-1)$$

式中, $\mathbf{r}$ 表示由 q_1 到 q_2 的矢径,其大小为: $r = |\mathbf{r}|$, 方向从 q_1 指向 q_2 , $\mathbf{F}_{21}$ 表示 q_2 受到 q_1 的作用力。 $\hat{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}}{r}$ 是单位矢量,方向与 $\mathbf{r}$ 方向相同。在(9-1)式中,若 q_1 与 q_2 是同号电荷, $q_1 q_2 > 0$, $\mathbf{F}_{21}$ 沿 $\mathbf{r}$ 方向,表示为斥力,如图 9-1 所示;若 q_1 与 q_2 是异号电荷, $q_1 q_2 < 0$, $\mathbf{F}_{21}$ 沿 $-\mathbf{r}$ 方向,表示为引力,如图 9-2 所示。

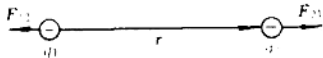


图 9-1 同号电荷相互作用

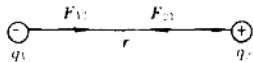


图 9-2 异号电荷相互作用

q_1 同时也受到 q_2 的作用,它们之间符合牛顿第三定律,即 q_1 受到 q_2 的作用力 $\mathbf{F}_{12}$ 为

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

(9-1)式中 k 为比例系数,与单位的选择有关。在 SI 中,电量

的单位为库仑(C),距离的单位为米(m),力的单位为牛顿(N),这时 k 的大小和单位为

$$\begin{aligned} k &= 8.98776 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \\ &\approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \end{aligned}$$

令比例系数

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (9-2)$$

于是,真空中库仑定律的形式可写成

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (9-3)$$

这里引入的新常数 ϵ_0 称为真空电容率,显然

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

库仑定律的适用范围,经实验证明,当电荷之间的距离小到 10^{-15} m ,大到 10^7 m 的范围内,库仑定律仍能精确地适用。对更大距离范围,库仑定律应该仍然适用。

【例 9-1】 计算氢原子内电子和原子核间的静电作用力与万有引力之比值。

【解】 在氢原子中,假想电子和原子核间的距离为 r ,并且由于电子和原子核所带的电荷等量异号,电量的大小均为 e ,故电子和原子核间的静电力(吸引力)大小为

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

设电子的质量为 m_1 ,氢原子核的质量为 m_2 ,则电子与原子核间的万有引力大小为

$$F_m = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2)$$

式中 G 为万有引力常数。比较(1)和(2)式,有

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} e^2}{G m_1 m_2} \quad (3)$$

$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_1 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $m_2 = 1840 m_1$, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$, 代入(3)式, 可得静电力与万有引力的比值为

$$\begin{aligned} \frac{F_e}{F_m} &= \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}) \times (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}) \times 1840 \times (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})^2} \\ &= 2.26 \times 10^{39} \end{aligned}$$

由此可知, 在物质原子内, 电子和原子核之间的静电力远比它们之间的万有引力大, 因此在处理原子内电子与原子核之间相互作用时, 它们之间的万有引力可以忽略不计。

三、静电力叠加原理

库仑定律表达了两个静止点电荷间的作用力, 对于两个以上静止点电荷之间的作用, 由实验证明满足静电力叠加原理: 两个以上点电荷对另一个点电荷的作用力, 等于各个点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和。设 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 分别为点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时对点电荷 q_0 的静电力, 则 q_0 所受静电力的合力 F 为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (9-4)$$

由式(9-4)可得

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_0}{r_{0i}^2} \hat{r}_{0i} \quad (9-5)$$

式中 r_{0i} 为 q_i, q_0 之间的距离, $\hat{r}_{0i}$ 为从 q_i 指向 q_0 单位矢量。

库仑定律和静电力叠加原理是静电学中的两个基本实验定律, 应用它们, 原则上可以解决静电学中的一切问题。

§ 9-2 电场 电场强度

一、电场

在机械运动中,物体与物体的相互作用力,一是通过物体间的直接接触产生的,如人推小车;二是通过介质来传递的,如机械波的传播。那么,库仑定律中两个静止点电荷之间的静电力是怎样实现的呢?围绕着这个问题,历史上曾有过长期的争论。一种观点认为静电力之间不需要任何介质,也不需要时间,就能够由一个点电荷立即作用到相隔一定距离的另一个点电荷上,这种观点叫做超距作用观点。另一种观点认为静电力是通过一种充满在空间的弹性介质——“以太”来传递的。

近代物理学的发展证明,这两种观点都是错误的,静电力的传递

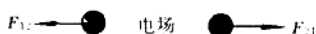


图 9-3 两电荷间的相互作用
是通过电场传递的

是需要时间的,它的传递速度是光速;而且“以太”也是不存在的。实际上,

静电力是通过电场来作用的。19 世纪初,法拉第根据自己对电磁现象的研究,提出了“场”的观点,或近距作用的观点。他认为,电荷周围存在着一种特殊物质,法拉第称这种物质为“电场”。凡是有电荷的地方,四周就存在着电场,即任何电荷都在自己周围的空间激发电场。如图 9-3 中的两个电荷 q_1 与 q_2 间的相互作用,是由于电荷 q_1 (q_1 称为场源电场电荷)在其周围空间激发的电场对 q_2 有力的作用;同时,电荷 q_2 (q_2 称为场源电场电荷)在其周围空间激发的电场对 q_1 有力的作用。这情景可用图式表示如下

近代物理学的发展以及大量的科学实验完全肯定了场的观点,而且还证实了电场和一切实物一样,也具有能量、动量和质量等重要性质。因此,电场也是一种物质。关于电磁场的物质性,我们将在第十四章中讨论。

二、静电场及其性质

由上面的讨论可总结出:当有带电体存在时,其周围就伴随有一个电场。如果带电体相对于观察者来说是静止的,那么在这带电体周围存在的电场称为静电场。静电场虽然不能像一般实物那样直接看得见,摸得到,但是可以从它的基本性质来证实它的存在。

静电场的基本性质:

(1) 电场对处于其中的电荷有作用力。电场对电荷的作用力叫做电场力。

(2) 电场中的带电体在电场中移动时,电场力对带电体作功。

三、电场强度

在静电场中,电场是由电荷激发的,处于电场中的电荷受到电场力的作用。为此,通过电场对电荷的作用力,可以定量地表述电场的性质。

设在电荷为 q 的带电体所激发的电场中,引入一电量为 q_0 的试验电荷,以测量电场对它的作用力。试验电荷必须符合下列要求:(1) 它必须是点电荷,这样才能用它来确定空间各点处电场的性质;(2) q_0 所带电量必须很小,使得它本身激发的电场对原有的电场分布几乎不产生影响。综上所述,试验电荷必须是电量很小的点电荷。实验发现,当用一带正电的试验电荷 q_0 放在电场中不同位置 P_1 、 P_2 ...处时,它受到的电场力 F 的大小和方向一般来说是不同的。如图 9-4 所示。

如果在电场中某一定点 P 上,放上正试验电荷 q_0 , q_0 受到的

电场力为 F 。如果在 P 点换上电量不同的试验电荷, 如 $2q_0$ 、 $3q_0$ 、 $\dots$, 实验指出, 试验电荷受到的电场力为 $2F$ 、 $3F$ 、 $\dots$ 。显然在同一点 P 上有

$$\frac{F}{q_0} = \frac{2F}{2q_0} = \frac{3F}{3q_0} = \dots = \text{常矢量}$$

由此可见, 矢量 F/q_0 只和试验电荷 q_0 所在点的电场性质有关, 而与 q_0 的大小无关。因此, 对电场中每一点所测出的作用于该点试验电荷 q_0 上

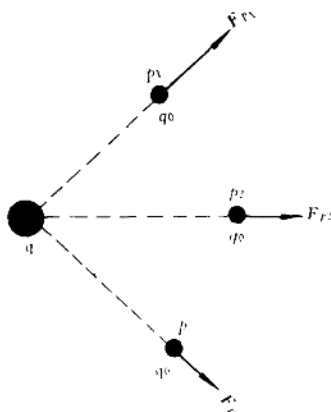


图 9-4 电荷 q 激发的电场中试验电荷受力图

的力 F 与 q_0 之比 F/q_0 , 便可作为描述静电场性质的一个物理量, 称为电场中给点处的电场强度, 用符号 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9-6)$$

从上述电场强度的定义式可知, 电场中某点的电场强度矢量 E , 其大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小, 其方向是正电荷在该点所受电场力的方向。

必须指出, 只要有电荷存在, 就有电场存在, 电场的存在与否是客观的, 与是否引入试验电荷无关。如果知道了电场中某点的电场强度 E , 则放在该点的点电荷 q 所受的电场力为

$$F = qE \quad (9-7)$$

一般说来, 电场中空间各点的 E 是不同的。如果电场中空间各点的 E 相同, 这种电场叫做均匀电场, 这是一种特殊情况。

电场强度的单位是伏特 $\cdot$ 米 $^{-1}$, 符号为 $V \cdot m^{-1}$ 。