

物理学

中 册

南京工学院等七所工科院校编

高等教育出版社

物 理 学

中 册

南京工学院等七所工科院校编

人民教育出版社

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，上级同意恢复“高等教育出版社”。本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

物 理 学

中 册

南京工学院等七所工科院校 编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
山西新华印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 8 字数 192,000

1978年2月第1版 1986年3月第12次印刷

印数 1,481,231—1,513,780

书号 13010·082 定价 1.10 元

本书是在江苏省七所工科院校 73 年编写的《物理》的基础上，按照目前工科院校对物理基础的要求而改编的。

本书按讲授 130—150 学时编写，分上、中、下三册。上册内容为力学、分子物理和热力学；中册为电学；下册为振动与波、物理光学和近代物理基础。

本书可作为高等工科院校的教学用书，也可供理科非物理专业选用。

目 录

第十一章 静电场	1
11-1 电荷的量子化 电荷守恒定律	1
11-2 点电荷 真空中的库仑定律	3
11-3 电场 电场强度	7
11-4 场强迭加原理 电场强度的计算	13
11-5 电力线 电场强度通量	18
11-6 高斯定理及其应用	25
11-7 静电场力所作的功	31
11-8 电势 电势差	35
11-9 电势迭加原理 电势的计算	38
11-10 等势面 场强与电势的关系	41
本章小结	45
思考题	48
习题	50
第十二章 静电场中的导体和介质	54
12-1 静电场中的导体 静电感应 静电屏蔽	54
12-2 电容器的电容量	61
12-3 静电场中的电介质 电极化现象	69
12-4 电位移矢量 有介质时的高斯定理	74
12-5 电场的边界条件	80
12-6 电场的能量 能量密度	82
12-7 静电的一些应用	84
本章小结	87
思考题	89
习题	91

第十三章 直流电	95
13-1 电流 电流密度	95
13-2 电阻率 一段均匀电路的欧姆定律	97
13-3 电功率 焦耳-楞次定律	100
13-4 电源 电动势	103
13-5 闭合电路和不均匀电路的欧姆定律	107
13-6 基尔霍夫定律	113
13-7 电子的逸出功 温差电现象	120
13-8 气体中的电流	125
本章小结	128
思考题	130
习题	132
第十四章 磁场	135
14-1 基本磁现象 磁场 磁力线	135
14-2 磁感强度 磁通量	140
14-3 运动电荷在磁场中所受的力——洛伦兹力	145
14-4 带电粒子在电场和磁场中的运动	148
14-5 磁场对载流导线的作用——安培定律	157
14-6 磁场对载流线圈的作用	160
14-7 毕奥-萨伐尔定律	165
14-8 两无限长平行载流直导线间的相互作用	170
14-9 安培环路定律	172
本章小结	179
思考题	180
习题	185
第十五章 磁介质	190
15-1 磁介质 磁导率	190
15-2 磁场强度 磁介质中的安培环路定律	194
15-3 磁场的边界条件	196

15-4 铁磁质的基本特性	198
本章小结	203
思考题	204
习题	204
第十六章 电磁感应	205
16-1 电磁感应现象	205
16-2 电磁感应的基本定律	208
16-3 法拉第电磁感应定律应用实例	216
16-4 互感和自感	222
16-5 涡电流	231
16-6 磁场的能量	235
本章小结	238
思考题	240
习题	243
习题答案	248

第十一章 静 电 场

电磁现象是一种极为普遍的自然现象。“地球上几乎没有一种变化发生而不同时显示出电的现象。”从工农业生产到人们的日常生活,都与电磁现象有关,特别是在近代科学技术中,更是离不开电磁现象。研究电磁运动的规律不仅有助于我们更深入地认识周围的物质世界,而且更重要的是掌握电磁运动的规律,以便能动地改造自然,为社会主义建设事业服务。

为了便于掌握电磁运动的规律,我们先讨论电磁运动中最简单的情况——电荷静止时的情况。

本章讨论在真空中相对于观察者为静止的电荷周围的电场(即静电场)的性质,其主要内容有:从静电场对电荷有力的作用和电荷在电场中移动时电场力将对它做功这两个方面的性质,引入描述电场性质的两个重要物理量——电场强度和电势,以及静电场所遵循的一个基本规律——高斯定理。

11-1 电荷的量子化 电荷守恒定律

电荷是量子化的

根据大量实验和理论研究的结果,现在我们知道,自然界中只存在着两种性质不同的电荷,一种是负电荷,以“-”号表示,如电子带的电荷就是负电荷;另一种是正电荷,以“+”号表示,如质子(即氢原子核)带的电荷就是正电荷。电荷与电荷之间有相互作用力,同号电荷互相排斥,异号电荷互相吸引。

通常,物体都是由分子、原子构成的。原子由带正电的原子核和带负电的电子所组成,原子呈电中性时,原子核带的正电荷和电子带的负电荷是相等的。在正常状态下,平均来说,在物体的每个足够大的体积内部都存在着等量的正电荷和负电荷,对外呈现为电中性(即不带电)。当由于某种作用(如摩擦作用、光电作用等)破坏了物体的电中性状态,使物体内部电子过多或不足时,就说该物体带了电,或者说带了电荷。电子过多时,物体带负电荷;电子不足时,物体带正电荷。

物体所带电荷的量值叫做电量,常用符号 Q 或 q 表示。电量的单位名称为库仑,其代号为库,国际代号为C。例如,质子带的电量为 1.602×10^{-19} 库,电子带的电量为 -1.602×10^{-19} 库,正电子带的电量为 1.602×10^{-19} 库。

已有的实验表明,带电体所带的电量 q 总是某一基本电量的整数倍^①(这个基本电量的值为 1.602×10^{-19} 库,以 e 表示),亦即 $q = ne$,这里 n 为整数。换句话说,电量不能连续地变化,只能取基本电量整数倍的值。

电荷的这种只能取分立的、不连续的量值的性质,叫做电荷的量子化。电荷的量子就是 e 。量子化是近代物理中的一个基本概念,当研究的范围在原子线度大小时,很多物理量如质量、能量等也都是量子化的,这些将在光的量子性、原子结构等章节中加以介绍。

二 电荷守恒定律

在上面的讨论中已经指出,在正常状态下,物体是不带电的,

^① 在理论上早已有人提出存在分数电荷的可能性。1977年5月美国《物理评论快报》上刊载的一篇论文中谈到,在实验中,已发现有的带电体所带电荷为 $\left(\frac{1}{3} + n\right)e$ 或 $\left(-\frac{1}{3} + n\right)e$,但还没有把带分数电荷的粒子分离出来。如何进一步从实验来肯定这个工作,是一个值得重视的问题。

正负电荷电量的代数和为零。但若把一些电子从一个物体移到另一个物体上,则前者带正电,后者带负电,不过这两个物体的正负电量的代数和仍为零。相反,如果让两个带有等量异号电荷的导体互相接触,则带负电的导体上的多余电子将移到带正电的导体上去,从而使两个导体对外都不呈现带电的性质,在这个过程中,正负电荷电量的代数和始终不变,即总是为零。大量的实验表明:若把参与相互作用的几个物体或粒子叫做一个系统,而整个系统与外界没有电荷交换,那么不管在系统中发生了什么反应,整个系统的电量的代数和始终保持不变。这个结论叫做电荷守恒定律,这是物理学中的一条基本定律。直到现在为止,无论在宏观现象中,或者在原子、原子核和基本粒子范围中,都表明电荷守恒定律是正确的。在以后的章节中,我们还将举例说明这个基本定律的应用。

11-2 点电荷 真空中的库仑定律

一 点电荷

前面已经指出,带有同号电荷的带电体之间存在着斥力,带有异号电荷的带电体之间存在着引力,其作用力的大小,除了与带电体所带电量的多少以及它们之间的距离有关外,还与带电体的形状、大小及带电体所在的介质的性质有关。但是,在一些具体问题中,往往可以忽略带电体的大小和形状。例如,在讨论两个大小相同的带电球体 A 、 B 的相互作用时(图 11-1),如果球体的直径

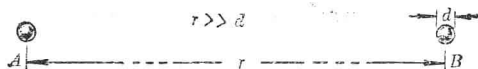


图 11-1 当 $r \gg d$ 时,可把带电球 A 、 B 看成点电荷

d 与两球间的距离 r 相比可以忽略, 即当 $r \gg d$ 时, 它们之间的作用力主要决定于它们之间的距离、所带的电量和介质的性质, 而可忽略它们的形状和大小, 把带电体所带的电量看成是集中在一点上, 从而把带电体看成一个点电荷。点电荷是抽象出来的一个模型, 一个带电体能否看成为一个点电荷, 必须根据具体情况来决定。例如上述的 A 、 B 带电球, 在研究它们的相互作用力时, 可把它们看成是点电荷, 但要研究每个球上的电荷的分布情况时, 就不能认为电荷是集中在一点上, 这时也就不能把它们看成是点电荷了。但是我们可以把带电体分成很多很多小块, 并使每一小块都足够小, 以致可以把它们看成是点电荷 (图 11-2, 其中第 i 个小块带的电量为 Δq_i), 这样, 整个带电体就可以看成是无限多个点电荷的集合体, 整个带电体的电性质就可由这些点电荷的电性质的总和来决定。所以, 从研究方法来讲, 要研究任意带电体的电性质, 首先就应对点电荷进行研究。

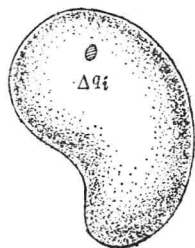


图 11-2 一个带电体可以看成是无限多个点电荷的集合体

二 真空中的库仑定律

假定在真空中有两个点电荷, 它们的电量分别为 q_1 和 q_2 , 它们之间的距离为 r 。实验表明: 两点电荷之间存在相互作用力, 其大小与两点电荷的电量的乘积成正比, 与两点电荷之间的距离的平方成反比, 作用力的方向在两点电荷的连线上。这就是真空中的库仑定律。

如果用 $\mathbf{r}$ 表示由 q_1 到 q_2 的位置矢量, 那么电荷 q_2 受到电荷 q_1 的作用力 $\mathbf{F}$ 的大小和方向可用下面的矢量式表示:

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \right) \quad (11-1)$$

式中的 $\mathbf{r}/r$ 是沿 $\mathbf{r}$ 方向的单位长度矢量, 以 $\mathbf{r}_0$ 表示, 即 $\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}}{r}$, k 为比例系数。 k 的数值和单位决定于式中各量的单位, 可由实验确定。在国际单位制中, 电量的单位为库仑, 距离的单位为米, 力的单位为牛顿, 这时 k 的数值和单位为

$$k = 8.98755 \times 10^9 \frac{\text{牛} \cdot \text{米}^2}{\text{库}^2} \approx 9 \times 10^9 \frac{\text{牛} \cdot \text{米}^2}{\text{库}^2} \quad (11-2)$$

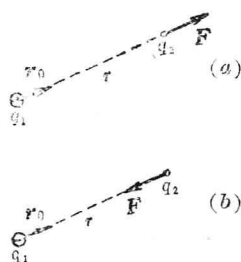


图 11-3 q_2 受到的作用力 $\mathbf{F}$
(a) q_1, q_2 同号
(b) q_1, q_2 异号

由于在实际问题中, 直接用到库仑定律的机会很少, 常用的却是从它推导出来的其他公式。为了简化以后常用的公式, 宁可把比例系数 k 表示为

$$k = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \quad (11-3)$$

式中 ϵ_0 叫做真空的介电常数, 是电学中常用到的一个常量, 它的大小和单位为

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{1}{4 \pi k} = 8.8542 \times 10^{-12} \frac{\text{库}^2}{\text{牛} \cdot \text{米}^2} \\ &= 8.8542 \times 10^{-12} \frac{\text{法}^{①}}{\text{米}} \end{aligned}$$

把 $k = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0}$ 代入式(11-1), 可得到真空中的库仑定律的数学表达式为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \right) = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (11-4)$$

由上式可以看出, 当 q_1 和 q_2 同号时, $q_1 q_2 > 0$, 表示 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{r}_0$ 同向, q_2 受到 q_1 的排斥, 即同号电荷相斥(图 11-3a), 当 q_1 和 q_2 异号

① “法”为电容单位的代号, 在节 12-2 中将讲到。

时, $q_1 q_2 < 0$, 表示 F 和 r_0 反向, 即异号电荷相吸(图 11-3b)。

必须指出, 真空中的库仑定律只能用于研究真空中点电荷之间的相互作用, 在计算任意带电体之间的相互作用时, 不能直接应用。

例 1 在氢原子中, 电子与质子的距离约为 5.3×10^{-11} 米。求它们之间电的相互作用力和万有引力, 并比较两种力的大小。

解 由于电子与质子之间的距离约为它们本身直径的 10^5 倍, 故可将电子与质子都看成为点电荷。质子带的电荷为 $+e$, 电子带的电荷为 $-e$, 故它们之间的电力为引力。根据式 (11-4), 引力的大小为

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|(+e) \cdot (-e)|}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \frac{\text{牛} \cdot \text{米}^2}{\text{库}^2} \cdot \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{库})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{米})^2} \\ &= 8.2 \times 10^{-8} \text{牛} \end{aligned}$$

由于电子的质量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ 千克, 质子的质量 $M = 1.67 \times 10^{-27}$ 千克。所以它们之间的万有引力的大小为

$$\begin{aligned} f_m &= G \frac{mM}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{牛} \cdot \text{米}^2}{\text{千克}^2} \\ &\times \frac{9.1 \times 10^{-31} \text{千克} \times 1.67 \times 10^{-27} \text{千克}}{(5.3 \times 10^{-11} \text{米})^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{牛} \end{aligned}$$

所以, 电力和万有引力的比值为

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

亦即电力要比万有引力大得多, 所以在原子中, 作用在电子上的力主要为电力, 而万有引力完全可以忽略不计。

例 2 在图 11-4 中, q_1 、 q_2 、 q_3 为处于真空中的三个点电荷,

$q_1 = -2.0 \times 10^{-8}$ 库, $q_2 = +4.0 \times 10^{-8}$ 库, $q_3 = -3.0 \times 10^{-8}$ 库, $r_{12} = 0.15$ 米, $r_{13} = 0.10$ 米, $\theta = 30^\circ$, 求作用于 q_1 上的力 F_1 。

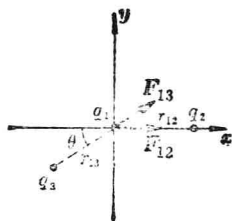


图 11-4

解 选坐标如图 11-4 所示, q_3 对 q_1 的作用力 F_{13} 为斥力, q_2 对 q_1 的作用力 F_{12} 为吸力, 由库仑定律可得

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r_{12}^2} \\ &= 9 \times 10^9 \frac{\text{牛} \cdot \text{米}^2}{\text{库}^2} \cdot \frac{2.0 \times 10^{-8} \times 4.0 \times 10^{-8}}{(0.15)^2} \cdot \frac{\text{库}^2}{\text{米}^2} \\ &= 3.2 \times 10^{-4} \text{牛} \\ F_{13} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_3|}{r_{13}^2} \\ &= 9 \times 10^9 \cdot \frac{2.0 \times 10^{-8} \times 3.0 \times 10^{-8}}{(0.10)^2} \text{牛} = 5.4 \times 10^{-4} \text{牛} \end{aligned}$$

作用在 q_1 上的合力 F_1 在 x 轴、 y 轴上的分量分别为

$$\begin{aligned} F_{1x} &= F_{12} + F_{13} \cos \theta = 3.2 \times 10^{-4} \text{牛} + 5.4 \times 10^{-4} \cos 30^\circ \text{牛} \\ &= 7.88 \times 10^{-4} \text{牛} \end{aligned}$$

$$F_{1y} = F_{13} \sin \theta = 5.4 \times 10^{-4} \sin 30^\circ \text{牛} = 2.7 \times 10^{-4} \text{牛}$$

所以 F_1 的大小为 $F_1 = \sqrt{F_{1x}^2 + F_{1y}^2} = 8.34 \times 10^{-4} \text{牛}$

F_1 与 x 轴的夹角为

$$\alpha = \arctg \frac{F_{1y}}{F_{1x}} = \arctg \frac{2.7 \times 10^{-4} \text{牛}}{7.88 \times 10^{-4} \text{牛}} = 18.9^\circ$$

11-3 电场 电场强度

一 电场

上一节讨论了点电荷间的相互作用力, 那么, 这种相互作用又

是怎样进行的呢？人们通过反复的实践，终于弄清了在任何电荷的周围都存在着特殊形态的物质——电场，电荷间的相互作用就是通过电场进行的。例如，甲、乙两电荷间的相互作用，是由于电荷甲周围存在的电场对电荷乙施加作用，同时电荷乙周围存在的电场也对电荷甲施加作用，即电荷之间的相互作用力是通过电场作用的。电场对电荷的作用力叫做电场力。

如果带电体相对于观察者来说是静止的，那么在它周围存在的电场就叫做静电场。

电场和其他物质一样，也是客观存在的。我们可以通过实验来认识它。如图11-5所示，在玻璃缸G内盛放蓖麻油，油里均匀散放一些剪短的头发的丝，然后放入两个极板A、B。把A、B分别接在高压电源的正、负极上，使它们分别带上正、负电荷，可以看到，两极板间原来杂乱无章的头发丝就有规则地排列起来了。这表明在带电极板的周围存在着电场，头发丝的有规则的排列就是由于电场作用的结果，通过头发丝的排列间接地表现出带电极板间存在着电场。

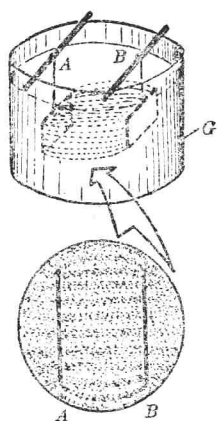


图 11-5 带有等量而异号电荷的平行板间的电场

电场的客观存在，由示波管中电子束的偏转也可以得到说明。图11-6是示波管的结构原理图。若在纵偏转极板的两板上加上电压，使两极板分别带正、负电荷，则偏转极板间就有电场存在，电子射进偏转极板间的空间时，就会受到电场的作用力，使电子运动方向发生偏转，从而使荧光屏上的亮点沿垂直方向偏移。当横偏转极板上加上电压后，就会使荧光屏上的亮点沿水平方向偏移。又如，在示波管的阴极和阳极间加上一定的电压，它们之间也存在着

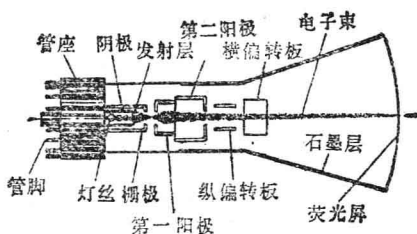


图 11-6 示波管结构原理图

电场，使从阴极射出的电子受到电场力的加速作用而获得很高的速度，因而具有足够的动能，当它投射到荧光屏上时，就能形成亮点。电子在运动中获得能量，是电场力对它作了功的缘故。

毛主席教导我们：“对于物质的每一种运动形式，必须注意它和其他各种运动形式的共同点。但是，尤其重要的，成为我们认识事物的基础的东西，则是必须注意它的特殊点，就是说，注意它和其他运动形式的质的区别。只有注意了这一点，才有可能区别事物。”在力学和分子物理学中，我们主要讨论了原子、分子和由它们所组成的宏观物体作机械运动和分子热运动的情形。在经典的情况下，这些粒子（或物体）在每一时刻，在空间都有一定的位置，同时具有一定的能量和动量。电场和原子、分子等这类物质一样，也具有能量和动量。但是我们必须注意，电场不同于原子、分子等“粒子”，电场是分布在一定范围的空间中的。因此，要描述电场，就必须知道电场在它存在的范围中每一点的情况。对于静电场来说，由于它对电场中的电荷有电场力的作用，并且当电荷在电场中运动时，电场力对它做功，因此，下面我们将从力和功这两个方面，分别引出描述电场性质的两个重要物理量——电场强度和电势。

二 电场强度

现在先来研究电荷在电场中受力作用的情况，从而引出描述

电场性质的一个物理量——电场强度。

取一个带有电量 Q 的球体，它周围存在着电场。今用一带有正电 q_0 的小球来测试电场，此小球叫试验电荷。试验电荷的电量 q_0 应很小，以致放入后对原来的电场几乎不产生任何影响。如图 11-7 所示，把用丝线悬挂着的试验电荷 q_0 分别放到电场中 a 、 b 、 c 三个不同位置，可以发现，在不同位置上，试验电荷偏离的方向和偏离的角度 θ 都不相同。这个现象说明什么问题呢？首先，使试

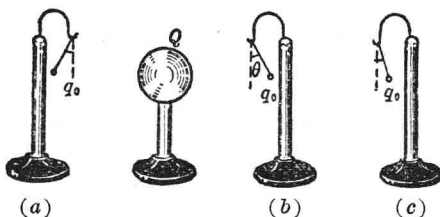


图 11-7 试验电荷在电场中不同位置受力的比较

验电荷发生偏离的原因，是由于电场对试验电荷有电场力的作用。距离 Q 越远，偏角 θ 越小，表明试验电荷 q_0 所受的力也越小，说明该处的电场越弱。其次，在空间的不同位置，试验电荷 q_0 偏离的方向是不相同的，这表明 q_0 受力的方向随位置而变化。

那么，我们是否可以直接用试验电荷在电场中所受的力来描述电场呢？实验告诉我们，即使在同一点上，如果放置不同电量的试验电荷，它们所受的电场力也不相同。设试验电荷的电量分别为 q_0 、 $2q_0$ 、 $3q_0$ ……，那么它们所受到的电场力相应地为 F 、 $2F$ 、 $3F$ ……，而

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

由此可见，在电场中某一点，试验电荷所受电场力 F 与它所带电量 q_0 的比值 F/q_0 与试验电荷的电量无关，而只与该点在电场中的位置有关。因此可以用 F/q_0 来描述电场。我们把比值 F/q_0 叫