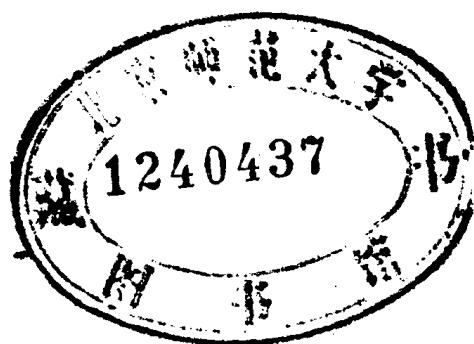


普通物理学讲义

第 二 册

李 椿 阎金铎 王殖东 编

541/240/10



中央广播电视大学出版社

目 录

第三篇 电磁学

第七章 静电场	(2)
§ 7-1 静电的基本现象	(2)
§ 7-2 库仑定律	(5)
§ 7-3 电场 电场强度矢量	(10)
§ 7-4 电通量 高斯定理	(27)
§ 7-5 电场力的功 电势	(45)
小结	(61)
习题	(68)
第八章 静电场中的导体和电介质	(74)
§ 8-1 静电场中的导体	(74)
§ 8-2 电容和电容器	(88)
§ 8-3 静电场中的电介质	(98)
§ 8-4 电位移矢量 有介质存在时的高斯定理	(110)
§ 8-5 静电场的能量	(120)
小结	(126)
习题	(128)
第九章 稳恒电流	(134)
§ 9-1 电流强度和电流密度矢量	(134)
§ 9-2 欧姆定律及其微分形式	(139)
§ 9-3 电功率 焦耳定律	(143)
§ 9-4 电源及其电动势	(147)

§ 9-5 基尔霍夫定则	(161)
§ 9-6 温差电现象及其应用	(166)
小 结	(173)
习 题	(174)
第十章 稳恒磁场	(180)
§ 10-1 磁性的起源	(180)
§ 10-2 磁感应强度矢量	(185)
§ 10-3 毕奥-萨伐尔定律	(190)
§ 10-4 磁场的高斯定理和安培环路定理	(200)
小 结	(213)
习 题	(214)
第十一章 磁场对电流和运动电荷的作用	(219)
§ 11-1 磁场对载流导线的作用力	(219)
§ 11-2 磁场对运动电荷的作用力——洛伦兹力	(230)
§ 11-3 带电粒子在均匀磁场中的运动	(233)
小 结	(250)
习 题	(251)
第十二章 电磁感应	(258)
§ 12-1 获得感应电流的方法	(258)
§ 12-2 感应电流的方向	(261)
§ 12-3 法拉第电磁感应定律	(265)
§ 12-4 动生电动势	(271)
§ 12-5 感生电动势 感生电场	(283)
§ 12-6 自感现象	(295)
§ 12-7 互感现象	(300)
§ 12-8 涡电流	(306)
小 结	(308)
习 题	(312)
第十三章 物质的磁性	(319)

§ 13-1 磁介质的磁化	(319)
§ 13-2 磁化电流	(327)
§ 13-3 有介质时的安培环路定理	(329)
§ 13-4 铁磁质	(337)
小结	(342)
习题	(344)
第十四章 电磁场理论的基本概念和电磁波	(347)
§ 14-1 麦克斯韦方程组	(347)
§ 14-2 电磁场的传播——电磁波	(360)
§ 14-3 LC 振荡 赫兹实验	(367)
§ 14-4 电磁波谱	(374)
小结	(377)
习题	(380)
习题答案	(383)

第三篇 电磁学

电磁学的研究对象是电磁场的规律以及物质的电学和磁学性质。

电磁学作为一门基础科学，也是从实验事实出发，抽象出概念，总结出基本规律；再在这个基础上经过严密的逻辑推理证明基本定理；然后将规律和定理应用于一些具体的实例。从这一方面来说，它和力学、热学是相同的。但力学的研究对象主要是质点和刚体，它们一般是孤立的和离散的，而电磁场往往是连续分布在三维空间里的矢量场。因此，在电磁学中所遇到的物理量和物理规律，所使用研究方法，就具有不同的特点。首先，在力学中遇到的问题，往往是给定了力求加速度，或给定了加速度求力等等，要求的物理量都有一个确定的值。而在电磁学中遇到的问题则比较复杂，如给定了电荷分布求电场，不是求某一点的场，而是求连续分布的矢量场。其次，在电磁学中用到的高等数学比力学和热学部分多，主要用到的是微积分和矢量分析。对于微积分，在普通物理的力学和热学部分主要用于表达公式，是作为一种描述物理规律的语言出现的；而在电磁学部分，则把微积分作为一种工具，运用来解决具体问题。对于矢量分析，在力学和热学部分用得很少，而在电磁学中经常作为语言来运用。

本篇内容共分为八章。我们先讨论电现象，然后讨论磁

现象以及电现象与磁现象间的联系，最后介绍一下统一的电磁运动规律。

第七章 静电场

静电场是相对于观察者静止的电荷所产生的电场。在本章及下一章中，我们研究静电场的基本性质和规律，静电场与导体和电介质(绝缘体)的相互作用，导体和电介质的静电特性等。本章研究真空中的静电场。我们从静电场的两条最基本的实验规律——库仑定律和场强迭加原理出发，推导出反映静电场性质的两条基本定理——高斯定理和环路定理；为了描述静电场的分布，从电荷在电场中受力和电场力对电荷作功两方面，引入了电场强度和电势这两个基本物理量。

§ 7-1 静电的基本现象

一、摩擦起电

大家知道，用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的胶木棒都具有吸引轻小物体的性质，我们说它们带了电，或有了电荷。带电的物体叫带电体。使物体带电叫做起电。用摩擦的方法使物体带电叫做摩擦起电。人们对于电的认识就是从摩擦起电的实验开始的。

实验证明，自然界中只存在两种电荷；而且，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。这两种电荷分别叫正电荷（以“+”号表示）和负电荷（以“-”号表示）。

物体所带电荷数量的多少，叫做电量。可以用验电器或静电计测量电量。如图 7-1 所示，当带电体和金属杆上端的金属小球接触时，就有一部分电荷传到金属杆的下端和金属指针上，它们就会因带同种电荷而互相排斥，使金属指针发生偏转，所带电荷越多，偏转角度越大。

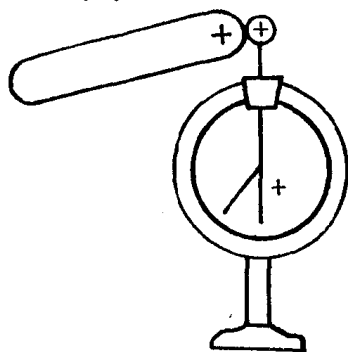


图 7-1

把用毛皮摩擦过的塑料棒支撑在针尖上，再把另一根同样用毛皮摩擦过的胶木棒去靠近它的一端。由于它们都是带负电，所以塑料棒被排斥而转动(如图 7-2 所示)。如果把一

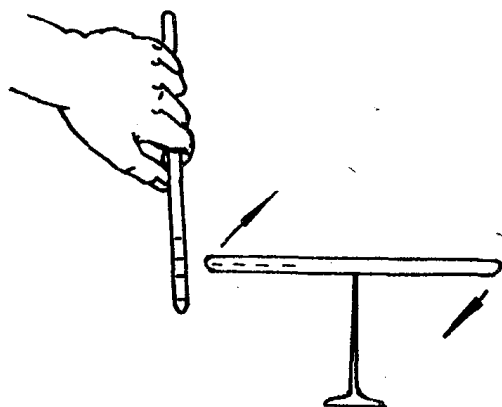


图 7-2

根用塑料布摩擦过的有机玻璃棒去靠近塑料棒的一端，由于有机玻璃棒带正电，所以塑料棒被吸引而转动。

二、感应起电 电荷守恒定律

另一种重要的起电方法是感应起电。如果把带正电的有

机玻璃棒靠近静电计的金属球，则静电计的指针也会发生偏转(如图 7-3 所示)；移走有机玻璃棒后，指针复原。这是因为，当有机玻璃棒靠近静电计的金属小球时，小球上将带负电，金属杆的下端和指针将带正电；等移走有机玻璃棒以后，正负电荷中和，指针就复原了。如果在移走有机玻璃棒之前，用手指接触一下静电计的小球，则小球上的负电荷将转移到人体上(或通过人体转移到地球上)。这样，在取走有机玻璃棒以后，静电计上的感应电荷不能中和，指针仍然偏转。

取两个带绝缘支柱的导体 A 和 B ，它们都不带电荷，将它们靠在一起接近带电体 C 时，会发现 A 、 B 都带了电[图 7-4 (a)]。如果将它们立即分开，可以测得，靠近 C 的导体 A 带的电荷与 C 上的电荷异号，较远的导体 B 带的电荷与 C 上的电荷同号[图 7-4(b)]。最后，

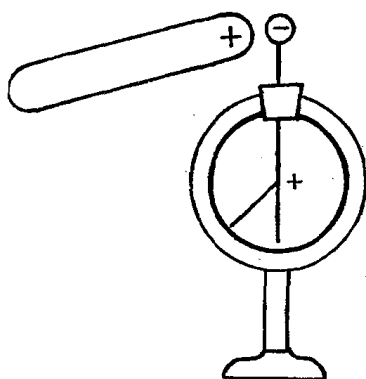
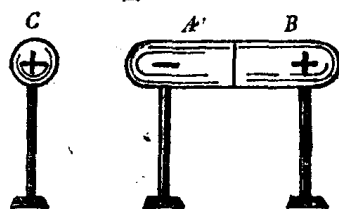
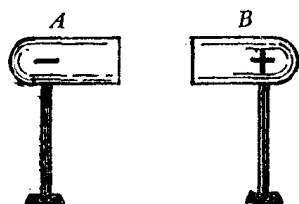


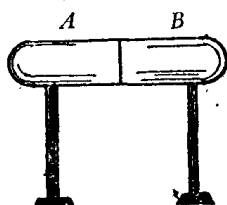
图 7-3



(a)



(b)



(c)

图 7-4

如果让 A 、 B 重新接触，它们所带的电荷就会全部消失 [图 7-4(c)]。这表明， A 、 B 在重新接触前所带的电荷是等量异号的。

摩擦起电和静电感应的实验表明，起电过程是电荷从一个物体(或物体的一部分)转移到另一物体(或同一物体的另一部分)的过程。摩擦起电时，某种电荷从一物体转移到另一物体，从而使两物体的中和状态都遭到破坏，各显电性。例如在负电荷转移的过程中，失去它的一方带上正电，获得它的一方带上负电，因此两物体带上等量异号的电荷。在静电感应的现象里也是一样，把带电体 C 移近时，导体 A 和 B 中与 C 同号的电荷被排斥，异号电荷被吸引，于是在 A 、 B 之间发生了电荷的转移，使它们带上等量异号的电荷。

从以上事实可以总结出如下的定律：电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分，也就是说，在任何物理过程中，电荷的代数和是守恒的。这个定律叫做电荷守恒定律。电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，近代科学实践证明，它也是一切微观过程(如核反应和基本粒子过程)所普遍遵守的。它是物理学中重要的基本定律之一。

§ 7-2 库仑定律

由以上的静电实验可以了解到，电荷最基本的性质就是它们之间有相互作用力(静止的电荷之间的相互作用力叫做静电力)。电荷之间相互作用力的基本规律叫做库仑定律，它是由法国物理学家库仑通过实验总结出来的点电荷间相互作

用的规律。

一、点电荷

根据实验知道,对于任意两个带电体,它们之间的静电力的大小和方向不仅与它们所带的电量以及它们之间的距离有关,而且还与它们的大小、形状及电荷在它们上面的分布情况有关。因此,影响静电力的因素是复杂的。但是,当带电体本身的线度比起它们之间的距离来充分小时,相互作用力的大小只决定于它们所带的电量以及相互之间的距离。也就是说,带电体的几何形状以及电荷在其中的分布情况的影响可以忽略不计,即可以把带电体所带的电量看成是集中在一点上。根据这一事实,我们抽象出点电荷的概念。即:当带电体的线度比起它与其他带电体之间的距离来充分小时,则称带电体为点带电体,简称点电荷。

所谓“充分小”是指在测量的精度范围之内,带电体的大小和几何形状的任意改变,都不会引起相互作用力的改变。因此,点电荷是一个抽象的模型,它类似于力学中质点、刚体的概念。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。

二、库仑定律

库仑定律是关于点电荷之间相互作用力的规律。库仑定律可表述如下:

两个点电荷之间相互作用力的大小与它们的带电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间距离 r 的平方成反比;作用力的方向沿着它们的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

如图7-5所示,电量分别为 q_1 和 q_2 的两个点电荷,它们

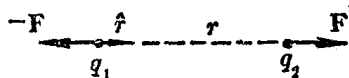


图 7-5

之间的距离为 r 。由实验知道, 两电荷间存在相互作用力, 若 q_1 给 q_2 的作用力为 F , 则 q_2 给 q_1 的作用力就是 $-F$, 这是一对作用力和反作用力, 并且

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

写成等式有

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

若以 $\hat{r}$ 表示由 q_1 到 q_2 方向的单位矢量, 则可将库仑定律内容用矢量形式表示为:

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (7-1)$$

$\hat{r}$ 的大小为 1, 即 $r=1$ 。无论 q_1 、 q_2 的正负如何, 上式都适用。当 q_1 、 q_2 同号时, F 与 $\hat{r}$ 同向, 为排斥力; 当 q_1 、 q_2 异号时, q_1 与 q_2 的乘积为负, F 与 $\hat{r}$ 反向, 为吸引力。

k 为比例系数, 其数值和单位决定于式中各量采用什么单位, 可由实验确定。

在国际单位制(SI 制, 在电磁学中也叫 MKSA 制)中有四个基本量: 长度、质量、时间和电流强度。长度以米(m)为单位, 质量以公斤(kg)为单位, 时间以秒(s)为单位, 电流强度以安培(A)为单位。其它各物理量的单位都可以从这些单位导出。例如力的单位 1 牛顿 = 1 公斤·米/秒², 功的单位 1 焦

耳=1 牛顿·米，等等。电量的单位是库仑 (C)。电流强度等于单位时间内通过导线横截面的电量，而库仑的定义是：当导线中通有 1A 的稳恒电流时，1 秒内通过导线横截面的电量为 1C，即 1 库仑=1 安培·秒。

在式(7-1)中，如果力的单位用牛顿，电量的单位用库仑，距离的单位用米，则由于其中所有物理量的单位都已选定，比例系数 k 的数值可以通过实验测定为

$$\begin{aligned} k &= 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \\ &\approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \end{aligned}$$

通常令 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ， ϵ_0 称为真空中的介电系数。将测定的 k 值代入，可以得到：

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

这样，库仑定律的数学形式就可以写成：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (7-2)$$

从形式上看，由于因子 4π 的引入，使得式(7-2)比式(7-1)复杂，但它会使得由库仑定律导出的定理和一些常用公式的形式简化。这一点，在以后的学习过程中将会逐步认识到。

虽然库仑定律是通过对宏观带电体的实验研究总结出来的规律，但物理学进一步的研究表明：对质子、电子等微观粒子，库仑定律也适用。

例 1 试比较氢原子中电子和原子核之间的静电力和万有引力。

解 在氢原子中，电子和原子核之间的距离 $r = 0.529 \times$

10^{-10}m , 而原子核和电子的直径在 10^{-15}m 以下, 因此可以把电子和氢原子核看作是点电荷。

电子带的电荷为 $-e$, 氢原子核带的电荷为 $+e$, $e=1.6 \times 10^{-19}\text{C}$, 故它们之间的静电力为引力, 其大小等于:

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 8.2 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

电子的质量 $m_e=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 氢原子核的质量为 $M=1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 故它们之间的万有引力的大小为:

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_e M}{r^2} \\ &= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 3.6 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

故静电力和万有引力之比为:

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.3 \times 10^{39}$$

由此可见, 在原子内部静电力远大于万有引力。此外, 在原子结合成分子, 原子或分子组成液体或固体等问题中, 万有引力的作用都是十分微小的。

三、力的迭加原理

库仑定律讨论的是两个点电荷之间的相互作用规律。下面我们进一步研究, 当空间同时存在三个或三个以上的点电荷时, 它们之间的相互作用规律。

如图 7-6 所示, 在空间同时存在三个点电荷: q, q_1, q_2 。我们来讨论 q 所受静电力 F 的大小和方向。设当 q_2 不存在,

q_1 单独存在时, q_1 施于 q 的静电力为 F_1 ; 再设当 q_1 不存在, q_2 单独存在时, q_2 施于 q 的力为 F_2 . 则实验表明,

$$F = F_1 + F_2$$

即: 当几个点电荷同时存在时施于某一电荷的力, 等于各点电荷单独存在时施于该电荷静电力的矢量和. 这叫做静电力的迭加原理. 它是独立于库仑定律的实验定律, 因为它证明了, 两个点电荷之间的相互作用力不受周围电荷的影响.

用库仑定律和静电力的迭加原理, 原则上可以求出任意两个带电体之间的相互作用力. 因为我们可以把一个带电体分成很多很多足够小的小块, 以致每一小块都可以看成是点电荷; 这样, 整个带电体就可以看成是很多很多点电荷的集合体, 两个带电体间的相互作用力也就等于相应的两组点电荷之间总的相互作用力.

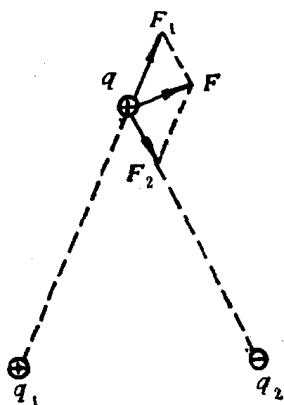


图 7-6

§ 7-3 电场 电场强度矢量

一、电场

我们用手推桌子时, 通过手和桌子直接接触, 把力作用在桌子上; 马拉车时, 通过绳子和车直接接触, 把力作用在车上. 在这些例子里, 力都是发生在直接接触的物体之间的. 这种力的作用, 叫做接触作用或近距作用. 但是, 电力却可以发

生在两个相隔一定距离的带电体之间，而在两个带电体之间并不需要有任何由原子、分子组成的物质作媒介。那么电力究竟是怎样传递的呢？围绕着这个问题，历史上曾有过长期的争论。一种观点叫超距作用观点，其主要内容是：电力不需任何媒介，也不需时间就能由一个带电体作用到相隔一定距离的另一个带电体上。另一种观点认为电力也是近距作用的。十九世纪中认为电力是通过一种充满空间的弹性媒质——“以太”来传递的。

近代物理学的发展证明，“超距作用”的观点是错误的。电力传递的速度虽然很快（等于光速即 $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ），但并非不需要时间。而历史上主张“近距作用”的人所假定的那种“弹性以太”也是不存在的。实际上，电荷是通过电场来作用的。

近代物理学的发展告诉我们，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；而电场的基本性质是，它对于处在其中的任何其他电荷都有作用力，称为电场力。因此，电荷与电荷之间是通过电场相互作用的。具体地讲，在图 7-7 中，当物体 1 带电时，1 上的电荷就



图 7-7

在周围的空间激发一个电场；当物体 2 带电时，2 上的电荷也在周围的空间激发一个电场。带电体 2 所受的力 F_{21} 是 1 的场施加给它的，带电体 1 所受的力 F_{12} 是 2 的场施加给它的。因此，电荷之间的相互作用力就是电场力。

电场虽然不象由原子、分子组成的实物那样看得见、摸得着,但近代科学的发展证明,它具有一系列物质属性,如具有能量、动量,能施于电荷作用力等等,因而能被我们所感觉。因此,电场是一种客观存在,是物质存在的一种形式。电场只是普遍存在的电磁场的一种特殊情形。电磁场的物质性在它处于迅速变化的情况下才能更明显地表现出来。关于这个问题,我们将在第五篇中详细讨论。本章只讨论相对于观察者静止的电荷在其周围空间激发的电场,即静电场。

二、电场强度矢量

下面对电场进行定量的研究。若空间存在一个带电体,如图 7-8 所示,则它将在周围空间激发电场。上面提到,电场的基本性质是它对电荷施加作用力。因此我们可以引进一个试探电荷 q_0 ,通过观察 q_0 在场中不同点的受力情况来研究电场的性质。

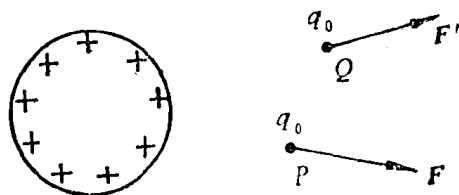


图 7-8

为了保证测量的准确性,试探电荷所带电量 q_0 必须充分小,以至引进它之后,几乎不会影响原来场的分布;同时要求试探电荷的几何线度必须充分小,以保证反映场中某一点的性质。

实验表明,在电场中不同点, q_0 所受电场力的大小和方向

一般是不同的;在电场中任一固定点 P ,试探电荷 q_0 所受的电场力 F 的大小与试探电荷的带电量 q_0 成正比,即

$$F \propto q_0$$

q_0 增加几倍, F 的大小也增加几倍,而 F 的方向不变.若把 q_0 换成等量异号的电荷,则力的大小不变,方向相反.因此,对于电场中任一固定点 P , $\frac{F}{q_0}$ 的大小和方向都与 q_0 无关.可见它反映了电场在 P 点的性质.我们把它定义为电场强度矢量,简称场强,用 E 来表示,即:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (7-3)$$

因为当 $q_0 = +1$ 时, $E = F$,所以可以把电场强度矢量的定义用文字表述为:静电场中任一点的电场强度是一矢量,其大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小,其方向与正电荷在该处所受电场力的方向一致.

在国际单位制中,力的单位是牛顿(N),电量的单位是库仑(C).所以由式(7-3)可以看出,电场强度矢量的单位应是牛顿/库仑($N \cdot C^{-1}$).以后将看到,场强的单位也可以写作伏特/米($V \cdot m^{-1}$).

一般说来,电场中空间不同点的场强,其大小和方向都可以是不同的.场强是空间坐标的矢量函数,电场是矢量场.如果电场中空间各点的场强,其大小和方向都相同,这种电场就叫做均匀电场,它是一种特殊情况.

例1 求点电荷 q 所激发的电场中各点的电场强度矢量.