

高等学校试用教材

物理学

中 册

曹 萱 龄 等 编

人民教育出版社

高等学校试用教材

物 理 学

中 册

曹 董 龄 等 编

人 民 教 育 出 版 社

本书是在 1963 年王谟显改编的《物理学》基础上编写的,全书分上、中、下三册出版。上册包括力学、振动与波、分子物理和热力学基础,中册包括电磁学,下册包括波动光学基础、量子物理基础和原子核物理。全书采用国际单位制,并附有思考题、习题及习题答案。

本书为适应有些专业在第一学期开设物理课的需要,在数学运用上采取了逐步提高的方法,如在力学中,只应用极限、导数等概念;在分子物理和热力学基础中,开始运用微积分推导公式;在电磁学中,要求学生能用微积分解题。

本书可作为工科院校一般专业的试用教材,也可作为其他院校一些专业的参考书。

高等学校试用教材

物 理 学

中 册

曹 萱 龄 等 编

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

总发行所北京发行所发行

上海市印刷四厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 8/16 字数 228,000

1979 年 10 月第 1 版 1980 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—32,000

书号 13012·0391 定价 0.83 元

目 录

第四篇 电 磁 学

第一章 静电场	2
§ 4-1-1 电荷与物质	2
§ 4-1-2 库仑定律	5
§ 4-1-3 静电场 电场强度	13
§ 4-1-4 电力线	23
§ 4-1-5 高斯定理	26
§ 4-1-6 高斯定理的应用	30
§ 4-1-7 电场力的功	34
§ 4-1-8 电势能 电势	36
§ 4-1-9 电场强度与电势的关系	44
§ 4-1-10 带电粒子在电场中的运动	49
思考题	54
习题	56
第二章 静电场中的导体与电介质	62
§ 4-2-1 静电场中的导体	62
§ 4-2-2 电容 电容器	68
§ 4-2-3 静电场中的电介质	78
§ 4-2-4 电介质中的高斯定理	84
§ 4-2-5 电场的能量	91
§ 4-2-6 铁电体 压电现象	96
思考题	99
习题	101
第三章 直流电	105
§ 4-3-1 电流 欧姆定律	105
§ 4-3-2 电流的功与功率	113
§ 4-3-3 电动势	115

§ 4-3-4 一段含源电路和闭合电路的欧姆定律	120
§ 4-3-5 温差电现象	124
思考题	128
习题	129
第四章 磁场	132
§ 4-4-1 基本磁现象	132
§ 4-4-2 磁场	135
§ 4-4-3 洛伦兹力	142
§ 4-4-4 电流的磁场 毕奥-沙伐定律及其应用	151
§ 4-4-5 安培环路定律	159
§ 4-4-6 运动电荷的磁场	164
§ 4-4-7 磁场对电流的作用	166
§ 4-4-8 “安培”的定义	169
§ 4-4-9 磁场对载流线圈的作用	171
思考题	176
习题	178
第五章 物质的磁性	188
§ 4-5-1 物质的磁性 顺磁性和抗磁性 磁化强度	188
§ 4-5-2 磁场强度 磁介质中的安培环路定律	191
§ 4-5-3 铁磁性物质 磁畴	198
§ 4-5-4 超导电性及其应用	203
思考题	206
习题	207
第六章 电磁感应	210
§ 4-6-1 电磁感应现象	210
§ 4-6-2 楞次定律和法拉第电磁感应定律	212
§ 4-6-3 电磁感应现象和能量守恒与转换定律的关系	217
§ 4-6-4 动生电动势与电子理论	219
§ 4-6-5 随时间变化的磁场与电场的关系	223
§ 4-6-6 自感现象	228
§ 4-6-7 互感现象	234

§ 4-6-8 磁场的能量	237
思考题	242
习题	245
第七章 电磁场理论的基本概念 电磁波	252
§ 4-7-1 位移电流	252
§ 4-7-2 麦克斯韦电磁场理论的基本概念	255
§ 4-7-3 麦克斯韦方程	256
§ 4-7-4 电磁振荡	260
§ 4-7-5 电磁波的辐射和传播	266
§ 4-7-6 电磁波的能量	269
§ 4-7-7 电磁波谱	271
思考题	273
习题	274
附录	276
I 电磁量的单位制	276
II 希腊文字母表	287
III 常用物理常数	288
IV 习题答案	289

第四篇 电 磁 学

电磁学是物理学的一个分支，它是研究电磁现象的规律及其应用的学科。早在我国汉朝就有“琥珀拾芥”的记载，我国是最早发明指南针的国家。然而人类对于电磁现象系统地研究，却是近二百年的事。现在电磁学已成为许多物理理论和应用学科的基础，电工学与无线电电子学就是以电磁学为基础发展起来的。

今天，电能被广泛地应用在国防、科学技术、工农业生产和日常生活之中，因此，电能对一个国家的国民经济的发展起着极为重要的作用。电能之所以有如此广泛的应用是和它下述的各种特性分不开的。第一，电能可以很容易地转变为机械能、光能、化学能等其它形式的能量。第二，电能可以在瞬息之间从发电的地方，经过很长的距离，传送到另一地方去，功率大而能量耗散少。第三，电能可以电磁波的形式在空中传播，能够在极短的时间内把信号传送到遥远的地方。第四，电能便于远距离控制和自动控制，便于实现生产、生活各个方面的自动化。

对电磁现象的研究，使人类对物质世界的认识更加深入。电磁相互作用是物质之间四种基本相互作用之一。在研究物质的微观结构时，必须了解电磁力的作用。

本篇主要讲述电磁学的基础知识，如静电场、磁场的基本特性，电与磁的相互联系，电磁场理论的初步知识等，对直流电路仅作简单介绍，以免与电工学重复。

第一章 静 电 场

本章和下一章所讨论的内容属于静电学范围。静电学主要研究静止电荷所具有的性质及其相互作用的规律。所谓“静止”的意思，是指相对于在惯性参照系的观察者而言。本章主要阐明在真空中静止的电荷所产生的静电场的特性。首先说明电荷的本质及真空中静止电荷之间相互作用的规律——库仑定律，然后引入描述静电场特性的两个物理量——电场强度和电势，并讨论静电场的基本性质。

§ 4-1-1 电 荷 与 物 质

电荷 电性是物质的一种基本特性。两种不同性质的物体，例如干燥的丝绸和玻璃棒互相摩擦后，有吸引轻微物体，如纸片的现象。这是由于玻璃棒与丝绸因摩擦而带电的缘故，处于带电状态中的物体称为带电体。带电体吸引轻微物体能力的强弱和它所带电的多少有关。用来量度物体带电程度的量称为电量，以符号 q 表示之，并且常以“电荷”一词代表带电体及其所荷电量。

实验证明，物体所带的电荷有两种（而且也只有两种），一种是与丝绸摩擦过的玻璃棒所带电荷相同的，叫做正电荷；另一种是与玻璃棒摩擦过的丝绸所带电荷相同的，叫做负电荷。按下列顺序排列的物体中，取其中任意两个互相摩擦，则前面的物体带正电，后面的物体带负电（这个排列顺序往往要受温度和湿度的影响）：

毛皮、玻璃、纸、丝绸、木材、琥珀、树脂、金属、赛璐珞、橡胶。

实验发现带电体之间有相互作用，而且是带同号电荷的物体

相互排斥,带异号电荷的物体相互吸引,排斥力或吸引力的大小与物体所带电量有关。因此可根据带电体之间作用力的大小,来确定物体所带电量。验电器就是根据这个道理制成的。

电荷守恒定律 大量实验证明,两种不同物体摩擦后,一个带正电荷,另一个带负电荷,并且正负电荷总是同时出现,而数值相等。使物体带电,就是使物体正负电荷分离,或把一种电荷从一个物体移到另一个物体上,使前者失去该种电荷,后者得到等量的同种电荷,结果是一个物体带上正(负)电荷,另一个物体带上负(正)电荷。当这两个物体接触时,正负电荷相互中和,物体都不再显电性,但两物体的电荷总量不变。也就是说,电荷既不能产生,也不能消灭,它只能从一个物体转移到另一个物体上,或者在一物体内移动。简言之,在一孤立系统中的总电荷数(即正负电荷的代数和)保持不变。这就是自然界中守恒定律之一的电荷守恒定律。

电荷的量子化 电荷与物质 十九世纪末以前,电一直被认为是一种无重量的“流体”。随着实验的发展,人们逐渐认识到这种“流体”是不连续的,它是由荷载电荷的物质的基本单元组成。实验测定,任何物体所带的电量都为一基本电量值

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库仑}$$

的整数倍。荷载基本负电量的粒子称为电子,电子的质量 $m_e = 9.1095 \times 10^{-31}$ 千克。这种电量以一份一份不连续方式存在的性质就叫做电荷的量子化。

有一种荷载基本正电量的粒子叫质子(即氢原子核),它的质量 $m_p = 1.6726 \times 10^{-27}$ 千克。荷载基本电量的粒子还有正电子,它的质量与电子质量相同。在发现正电子后不久,还发现了一种质量几乎与质子质量相同的但不带电的粒子——中子。近代,还发现了不少带电的和不带电的基本粒子,而且所有带电的基本粒子的电量值都是基本电量值的整数倍。

物质由分子或原子组成。原子由原子核和核外的电子组成。原子核中含有若干质子和中子,核几乎集中了整个原子的质量。在正常状态下,原子中的质子数等于电子数,所以原子在电的方面呈中性。原子失去电子就成为带正电的正离子;若获得电子就成为带负电的负离子。因此,所谓物体带负电,就是物体比正常状态有过多的电子;物体带正电,就是物体比正常状态失去若干电子。这就是两物体互相摩擦时,总是分别带等值而异号电荷的缘故。

上面我们简单地阐述了电现象的本质及电现象与物质结构的关系。但在本章以后各节中,我们仅讨论宏观的电现象,而不涉及其微观本质。例如,我们把很多带电粒子组成的物体简单认为是带电体,而不涉及它们的结构;当我们说带电体带电多少时,也不去讨论电荷的量子化;当我们说静止的带电体时,也不去考虑带电粒子的微观运动。这正如在力学中讨论物体的机械运动时不涉及物体的微观结构一样。

导体和非导体 按导电性质物体可分为导体与非导体(或称绝缘体、电介质)。而导电能力介于导体和非导体之间的物质叫半导体。

在导体中,又可分成第一类导体和第二类导体。第一类导体的特性是:电荷在这类导体中移动时,并不引起导体化学性质的变化,也没有任何显著的质量迁移。金属就是属于这一类。在这类导体中,部分电子与原子核之间的引力很小,可以比较自由地在各个原子之间移动,这种电子称为自由电子。自由电子是这类导体的导电机构。由于所有电子都相同,而且电子的质量比原子核的质量小得多,所以电子移动时,并不引起任何化学性质的变化,也没有显著的质量迁移;第二类导体的特性是:电荷的移动和化学变化联系着。熔解了的盐、盐的溶液、酸和碱都属于这一类。在这类导体中,没有自由电子,但有缺少电子或电子过多的原子或原子集

团。这些带电的原子和原子集团称为离子。离子是第二类导体的导电机构。因为各种离子的化学成分和质量都不同,所以移动时,不仅有化学变化发生,同时还有质量的迁移。

与导体相反,在电介质的分子中,电子受到的束缚力很大,这使电子不能自由移动,因此在一般情况下,电介质是不导电的。玻璃、石英、瓷器、橡胶、空气和很多有机物质都是良好的电介质。但是在外加电场作用下,电介质将被极化(参看§4-2-3)。如果外加电场足够大,使得电介质中产生宏观的电荷移动,这时,电介质将失去绝缘性能,而在某种程度上成为“导体”。这一现象称为电介质的击穿。

关于半导体的性质将在第六篇讨论。

§ 4-1-2 库 仑 定 律

在我们了解了自然界存在两种电荷(正电荷和负电荷)及电荷之间的相互作用之后,现在开始介绍电的相互作用规律。

一般地说,带电体之间的相互作用力与它们的大小、形状以及周围电介质的性质等有关,情况较复杂。本节将先讨论最简单的也是最基本的情况,即两个点电荷在真空中的相互作用。

所谓点电荷是指这样的带电体,它的线度与它和其它带电体之间的距离相比很小,以致该带电体本身的形状和大小对于所研究的问题来说可以忽略。

库仑于1785年通过实验确立了两个静止点电荷之间相互作用的基本规律,即

在真空中,两个点电荷 q_1 和 q_2 之间相互作用力等值而反向,其方向沿着它们的连线,作用力的大小与电荷 q_1 和 q_2 的乘积成正比,而与它们之间距离 r 的平方成反比,数学表达式为

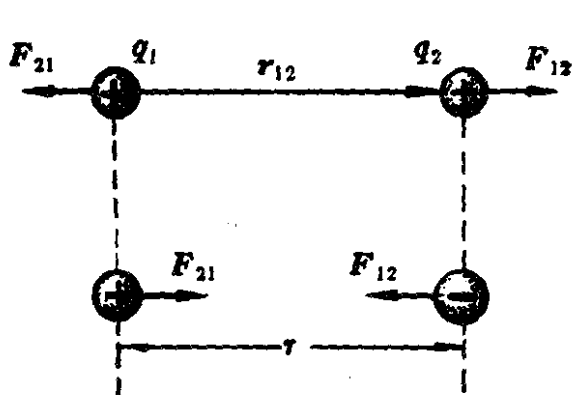


图 4-1-1 两点电荷的相互作用

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (4-1-1)$$

这就是著名的库仑定律。式中 k 是比例系数，其量纲和大小取决于式中各量的单位。

如以 “+” 号表示正电荷，“-” 号表示负电荷，则式 (4-1-1) 中 F 的正值表示斥力，负值表示引力（如图 4-1-1 所示）。

式 (4-1-1) 的矢量形式为

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} \quad (4-1-2)$$

式中 $\mathbf{F}_{12}$ 表示 q_1 对 q_2 的作用力， $\mathbf{r}_{12}$ 为 q_1 至 q_2 的矢径，其大小为 r_{12} ，方向从 q_1 指向 q_2 。若 q_1 与 q_2 同号， $\mathbf{F}_{12}$ 的方向即 $\mathbf{r}_{12}$ 的方向，表示斥力；若 q_1 与 q_2 异号， $\mathbf{F}_{12}$ 的方向为 $-\mathbf{r}_{12}$ 方向，表示引力（图 4-1-1）。

在国际单位制中，除长度 (L)、质量 (M)、时间 (T) 三个基本量外，电流强度 (I) 作为第四个基本量，其单位为安培（定义见上册附录）。电量的单位为导出单位，称为库仑，1 库仑的电量的定义为：若导线中电流为 1 安培时，每秒流过导线横截面的电量，即

$$1 \text{ 库仑} = 1 \text{ 安} \cdot \text{秒}$$

因此，电量的量纲为 $[q] = IT$ 。

由于在国际单位制中，式 (4-1-1) 中的 F ， r 和 q 的单位已经选定，因此 $k \neq 1$ ，根据实验测定，

$$k = 8.987776 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 \cdot \text{库}^{-2}$$

在计算中，一般采用近似值 $k = 9 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 \cdot \text{库}^{-2}$ 。这表示：真空中两个相距 1 米的各带电量为 1 库仑的点电荷，它们之间的作

用力为 9×10^9 牛顿。

通常为了使电磁学中的公式简化,把 k 表示成

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

其中 ϵ_0 称为真空中的介电常数。由上式可知

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{库}^2 \cdot \text{牛}^{-1} \cdot \text{米}^{-2}$$

ϵ_0 的量纲为

$$\begin{aligned} [\epsilon_0] &= [q^2][F]^{-1}[r]^{-2} = (IT)^2(MLT^{-2})^{-1}(L)^{-2} \\ &= L^{-3}M^{-1}T^4I^2 \end{aligned}$$

因此,在国际单位制中,库仑定律的形式为

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

例 1. 试计算氢原子中电子和原子核(质子)之间的静电作用力与万有引力,并比较之。已知氢原子中电子与原子核的距离为 $r = 0.529 \times 10^{-10}$ 米。

解: 根据库仑定律,电子与原子核之间的静电引力为

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 8.23 \times 10^{-8} \text{牛} \end{aligned}$$

电子与原子核之间的万有引力为

$$\begin{aligned} F_m &= G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \\ &= 3.64 \times 10^{-47} \text{牛} \end{aligned}$$

静电力与万有引力之间的比值为

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

由此可见,在一切原子内,电子与原子核之间的静电力要比万有引

力大得不可思议。因此在原子内部，万有引力与静电力比较起来是完全可以忽略的。

例 2. 在一原子核中两个质子之间的距离约为 5×10^{-15} 米。试计算这样两个质子间的静电斥力。在地球表面的重力场中，这样大的斥力能支撑一个多大质量的物体不掉下来。

解：两质子之间的静电斥力为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5 \times 10^{-15})^2} = 9.2 \text{ 牛}$$

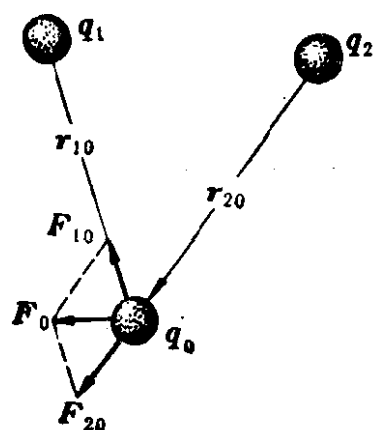
这样大的斥力所能支撑的物体，其质量 m 必须满足以下关系

$$mg = F_e$$

$$m = \frac{F_e}{g} = \frac{9.2}{9.8} = 0.94 \text{ 千克}$$

即质子间的斥力可大到支撑约 1 千克质量的物体，而质量为 1 千克的物体竟含有约 6×10^{26} 个质子和中子！可见，如果核中没有另外一种性质的力，核就不能稳定存在，这种力叫做核力，它的作用范围约在 10^{-15} 米以内。这种力既大于电力，也大于万有引力。核能的产生就是这种核力存在的有力证明。

静电力的可迭加性 在力学中我们学过力的迭加原理，这一



原理是否也适用于静电力呢？实验证明，两个点电荷之间的相互作用力并不因为有另外电荷的存在而改变。在图(4-1-2)所示的三个点电荷 q_0 、 q_1 和 q_2 中， q_1 对 q_0 的作用力 F_{10} ，并不因为 q_2 对 q_0 的作用力 F_{20} 的存在而改变其大小和方向，反之亦然。这时电荷 q_0 所受的静电力 F_0 为 F_{10} 与 F_{20} 的矢量和；

图 4-1-2 静电力的可迭加性

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{F}_{10} + \mathbf{F}_{20} \quad (4-1-4)$$

这就是静电力的可迭加性，或叫可加性。

一个由 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 等 n 个点电荷所组成的系统（称点电荷系），对电荷系外一点电荷 q_0 所施的合力，根据式(4-1-4)和库仑定律可得：

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_0 &= \mathbf{F}_{10} + \mathbf{F}_{20} + \dots + \mathbf{F}_{n0} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{i0} \\ &= \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_{i0}^3} \mathbf{r}_{i0} \end{aligned} \quad (4-1-5)$$

式中

$$\mathbf{F}_{i0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_{i0}^3} \mathbf{r}_{i0}$$

为第 i 个点电荷 q_i 对 q_0 所施的静电力， $\mathbf{r}_{i0}$ 为从第 i 个点电荷 q_i 至 q_0 的矢径。式(4-1-5)表明一点电荷系对电荷系外一点电荷所施的静电力等于该电荷系中各电荷分别所施静电力的矢量和。

例 3. 两个等值异号电荷放在水平方向上，分别带电为 $q_1 = +10^{-4}$ 库仑和 $q_2 = -10^{-4}$ 库仑，它们相距 1 米。若有一点电荷 $q_3 = +10^{-5}$ 库仑置于 q_1 与 q_2 连线的垂直平分线上的任一点处，求 q_3 所受的静电力。

解： 设 q_1 与 q_2 连线的中点为 O ， q_3 至 O 点的距离设为 y ， q_1 （或 q_2 ）至 q_3 的距离为 r ，且连线与 r 的夹角为 α （图 4-1-3）。

因为 q_1 与 q_2 等值异号，故它们分别对 q_3 的作用力 $\mathbf{F}_{13}$ 和 $\mathbf{F}_{23}$ 大小相等，方向如图所示。每个力都可分解为水平方向和垂直方向的分力，而在垂直方向的分力互相抵消，因此， q_3 所受 q_1 与 q_2 的合力平行于水平方向且指向左方（如图所示），其大小为

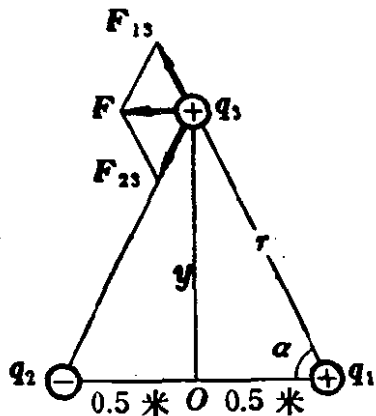


图 4-1-3 静电力迭加举例

$$\begin{aligned}
 F &= 2 \left(\frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_3}{r^2} \cos \alpha \right) \\
 &= 2 \times 9 \times 10^9 \times \frac{10^{-4} \times 10^{-5}}{r^2} \times \frac{0.5}{r} \\
 &= \frac{9}{r^3} \text{ 牛}
 \end{aligned}$$

或写为
$$F = \frac{9}{(y^2 + 0.5^2)^{3/2}} \text{ 牛}$$

若 $y \gg 0.5$ 米, 则有

$$F = \frac{9}{y^3} \text{ 牛}$$

电荷的连续分布 以上我们所讨论的都是静止点电荷间的相互作用力, 但往往在一些问题中, 带电体的线度与到其它带电体之间的距离比较起来并不很小, 在这种情况下, 就必须考虑带电体的大小和形状, 因而也就必须考虑电荷在带电体中的分布状况。电荷可以连续分布在带电体的整个体积中(体分布), 可以连续分布在带电体的表面(面分布), 也可以连续分布在一细长的棒上(线分布), 但不论是那种分布, 总可以把带电体分成很多足够小的带电荷的体积元(或面积元、或线元), 以致可以把每一体积元(面积元、线元)都看作为点电荷, 这样整个带电体就可认为是一连续分布的点电荷系统, 而它对另外电荷的作用, 根据静电力的可迭加性, 就可由积分求和的方法求得。

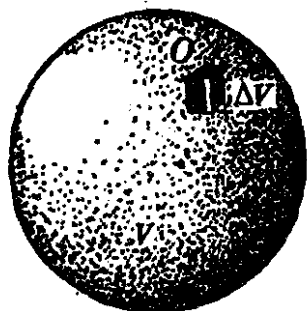


图 4-1-4 体电荷密度

一般来说, 带电体中电荷的分布不一定各处相同, 因此, 为了表示电荷在各处的分布情况, 我们还必须引入电荷密度的概念。

设有一电荷连续分布在整个体积 V 中的带电体(图 4-1-4), 我们可以把它分成很多

小体积元,每个体积元中当然就分布有一定的电荷。设在 V 中某点 O 附近,取一包含 O 点在内的体积元 ΔV ,其中包含的电荷为 Δq ,则定义比值 $\bar{\rho} = \frac{\Delta q}{\Delta V}$ 为 O 点的平均体电荷密度。若 ΔV 趋近于零时,平均体电荷密度 $\bar{\rho}$ 趋近于某一极限值,这一极限值便称为 O 点的体电荷密度 ρ :

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}$$

上式可写成 $dq = \rho dV$,正如用 q 代表带电体一样,也常用 dq 代表带电体中的电荷元。这里还必须指出, ΔV 无限小的意义不同于数学上的无限小,也就是说, ΔV 要取得在宏观上足够小,而使某一点的体电荷密度有确切的意义,但微观上 ΔV 又要足够大,使其中包含有足够数量的电荷。

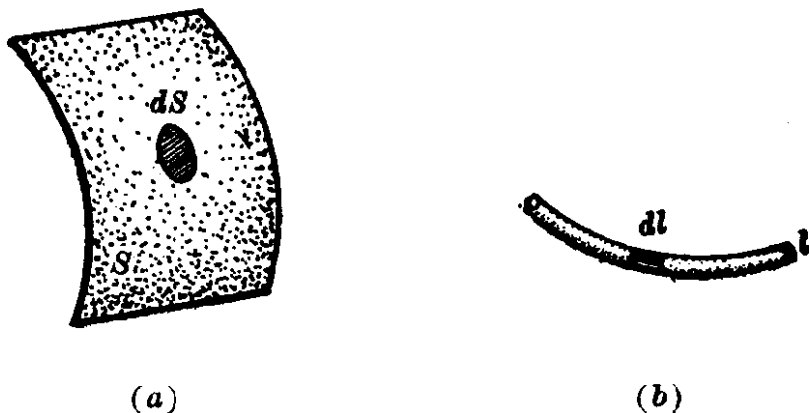


图 4-1-5 电荷面密度(a)和电荷线密度(b)

同样,对于电荷沿表面 S 连续分布的带电体(图 4-1-5a),可定义电荷面密度 σ :

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS}$$

对于电荷沿线 l 连续分布的带电体(图 4-1-5b),可定义电荷线密度 λ :