大學物理學

第二册

高文渊　王华庆　主编

南京大學出版社

前　言

本书根据《高等工业学校物理课程基本要求》(1987年高等教育出版社)并参照高等师范院校和综合大学非物理专业《普通物理学教学大纲》(1980年人民教育出版社)编写而成。全书共分三册，第一册包括力学和分子物理及热力学，第二册为电磁学，第三册为光学和近代物理学。

大学物理学是理工科各专业的一门重要基础课。在编写本书时，我们既重视教材的科学性、系统性、先进性，也重视其可读性，力求深入浅出、语言精炼畅达；既重视知识的传授，也重视能力的培养，力求在讲清楚基本概念、基本规律的基础上，注意讲清楚分析问题的思路和解决问题的方法；既重视便于教师的讲授，也重视有利于学生的学习，力求符合认识过程和思维规律。

本书采用国际单位制(SI)，对于某些物理量的其它常用单位，仅给出它与相应的国际单位的换算关系。各章均配有习题，编排于各章的末尾，其答案一律附于各分册的最后。

本书的编写工作是在高文渊主持下进行的，参加本书编写的同志均长期从事于大学物理学的教学，书中自然反映了他们的部分教学经验。但由于我们的水平有限，时间仓促，谬误之处在所难免，敬请读者批评和指正，并深表谢意。

编　者

1990年元月

第二册　目　　录

第三篇　电　磁　学

第一章　真空中的静电场

§1　库 仑 定 律

正电和负电

早在公元前600多年前，，古希腊哲学家泰勒斯就已发现用毛皮摩擦过的琥珀能吸引轻微的物体。一个物体因摩擦而有了吸引轻微物体的能力，我们就说它带了电，或有了电荷，带电的物体叫带电体，表示物体带电多寡程度的物理量叫电量。今天，“电”这个词老幼皆知，但“电”到底是什么，却颇难回答。究其来历，“电”（*electricity*）源于泰勒斯的“琥珀力”一词，而电子（*electron*）在希腊文中即“琥珀”。因此，若一定要问“电”是什么，只好说“电”就是“琥珀力”了。

实验发现，自然界中电荷只有正、负两种，而且，同种电荷相斥，异种电荷相吸。美国物理学家、政治家富兰克林1747年首次把丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为正电荷，性能与之相反的电荷叫做负电荷，这个规定一直延用至今。

电荷的量子化

实验表明，电荷的量值是不连续的，它有个基本单元，即一个质子或一个电子所带电量的绝对值 e，任何带电粒子或带电体所带的电量都只能是基本电荷 e 的整数倍。电荷量值的这种不连续性叫做电荷的量子化，它是自然界中的一个普遍规律。近年来研究基本粒子的层子理论曾预言可能有1/3和2/3的

分数电荷存在，但迄今尚未被实验证实，仍然只是理论上的一种推测。

电荷守恒定律

人们从大量的实验发现，当一种电荷出现时，必然有等量异号的电荷同时出现；当一种电荷消失时，也必然有等量异号电荷同时消失。在一个与外界没有电荷交换的孤立系统内，无论进行怎样的物理过程，系统内的总电荷数始终不变，即任一时刻系统内的正电荷与负电荷的代数和总保持恒定，这一结论叫做**电荷守恒定律**。电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，在一切微观过程（如核反应和基本粒子过程）中也同样成立，因此，它是物理学中重要的基本规律之一。

现在来考察摩擦起电的实质。一个物体不带电，并不意味着物体内部没有电荷，而是物体中任一部分所包含的电子数和质子数相等，以致对外不呈现电性。两种不同质的不带电的物体相互摩擦后因其表面温度升高，每个物体中都有一些电子获得足够的动能而挣脱原子的束缚转移到另一物体上。不同质的物体中电子所受的束缚不同，因此彼此向对方转移的电子数不同，结果一个物体得到多余的电子而带负电，另一个因失去电子而带正电。可见，摩擦起电的实质是通过摩擦的作用而使电荷在两摩擦物体上进行的一种重新分布。任何起电方法，实际上都是物体内部固有的电子和质子这两种基本电荷的分离和转移过程。

点电荷

在所研究的问题中，形状和大小可以忽略不计的带电体叫做**点电荷**。象质点的概念一样，点电荷只有相对意义，一个实际的带电体能否视为点电荷，取决于在所研究的问题中所要求的精确度。点电荷是带电体的理想模型，当一个带电体可以视为

点电荷时，意味着这个带电体被抽象成一个带电的几何点，因此它在空间的位置可以被准确确定，也不必考虑电荷在带电体中的具体分布了，从而使问题简化，这正是引入点电荷概念的目的，

库仑定律

1785年法国物理学家库仑从实验得出点电荷之间的相互作用规律，称为库仑定律，其内容为：真空中两个点电荷q_1和q_2之间相互作用力的大小跟q_1和q_2的乘积成正比，而跟它们之间的距离r的平方成反比；作用力的方向沿着它们的联线，同号电荷相斥，异号电荷相吸（如图1-1-1所示）。

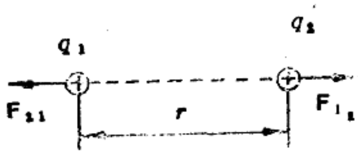

图 1-1-1

相互作用力的大小为

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{1-1-1}$$

式中k为比例系数，其数值取决于q F、r的单位。为了使许多由式（1-1-1）引出的公式具有简洁的形式，引入另一常数e_0，称为真空的介电常数，$k=\frac{1}{4\pi e_0}$，因此

$$F = \frac{1}{4\pi e_0}\frac{q_1 q_2}{r_2} \tag{1-1-2}$$

在SI中，电量的单位为库仑（C），力的单位为牛顿，距离的单位为米，用上式通过实验测出

$$e_0 = 8.85\times 10^{-12} C^2\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}$$

相应的k值为

$$k=\frac{1}{4\pi\times 8.85\times 10^{-12}}=8.99\times 10^{9}=9\times 10^{9}N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}$$

力是矢量，既有大小也有方向，如何用数学表达式同时表示点电荷之间相互作用力的大小和方向呢？如图1-1-2所示，研究 q 受到Q的作用力$\boldsymbol{F}$,用 $\boldsymbol{r}$ 表示由点电荷Q到点电荷 q 的矢径，当Q和 q 同号时，相斥，$\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{r}$ 同方向；二者异号时，相吸，$\boldsymbol{F}$和 $\boldsymbol{r}$ 方向相反，因此

图 1-1-2

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^3}\boldsymbol{r}$$

可以同时表示$\boldsymbol{F}$的大小和方向。令 $\hat{\boldsymbol{r}}=\frac{\boldsymbol{r}}{r}$，$\hat{\boldsymbol{r}}$是 $\boldsymbol{r}$ 方向上的单位矢量，上式可写为

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}} \qquad (1\text{-}1\text{-}3)$$

若研究 q 对Q的作用力，则 $\boldsymbol{r}$ 应为由点电荷 q 到点电荷Q的矢径，$\hat{\boldsymbol{r}}$ 即为该矢径 $\boldsymbol{r}$ 方向上的单位矢量，那么，q 对Q作用力仍可用上式表示。因此，式（1-1-3）是库仑定律的矢量式，它完整地表示出点电荷间的作用力——既表示力的大小，又表明了力的方向。

应该注意，库仑定律只适用于点电荷，而任何实际的带电体都可视为许多点电荷组成的带电体系，每对点电荷间的作用力都可用式（1-1-3）计算，然后按力的迭加原理再求出所有这些力的矢量和，即原则上用式（1-1-3）和力的迭加原理能够求解任何两个带电体之间的库仑力。我们将会看到库仑定律绝非仅仅是解决带电体间的互相作用力的问题，它是研究

静电场的基础，因此它是电磁学的一个基本定律。

§2　电 场 强 度

电场

关于电荷之间作用力的性质问题，历史上有两种观点。一种观点认为电荷之间的作用是“超距离作用”。这种作用既不需要媒介，也不需要时间，而是由一个电荷直接作用在另一个电荷上。另一种观点认为，任何电荷都在其周围空间激发电场，电场的基本属性是，电场对属于其中的其他电荷都有力的作用，这种力叫电场力。因此，电荷之间的作用力实际上是通过电荷激发的电场进行的，电场是作用的媒介，这就是“近距作用”的观点，可以用图式表示为

$$电荷 \rightleftarrows 电场 \rightleftarrows 电荷$$

相对于观察者静止的电荷激发的电场不随时间而变化，称之为静电场，静电场是电磁场的一种特殊状态。对于静止电荷间的相互作用，无法判断上述两种观点哪一种是正确的，但对于变化的电磁场，可以脱离电荷和电流而独立存在，并以有限的速度—光速—在真空中传播，从而证明场的观点是正确的。实验和理论都证明，电磁场和实物一样具有能量、动量和质量，因此，场也是物质的一种形态。

电场强度

电场的基本属性是它对电荷有力的作用，这为定量地描述静电场提供了一种可能。为此，引入一个电荷，用以测量电场对它的作用力。这个电荷应满足两个条件：它所带的电量必须足够小，把它引入待测电场时不会对原有电场有任何明显的影响；它的线度必须足够小，可以视为点电荷，以便能准确测定研究点的位置，这样的电荷叫做试探电荷，记作q_0。

可以做这样的试验：把同一个试探电荷 q_0 置于某带电体 Q 的电场中的不同点，则 q_0 所受的电场力$\boldsymbol{F}$的大小和方向逐点变化，对每一点，比值$\boldsymbol{F}/q_0$ 都不同；对场中同一点而放置不同的试探电荷 q_0，则比值$\boldsymbol{F}/q_0$ 都相同，即这个比值与 q_0 的大小和符号无关。由此可见，矢量$\boldsymbol{F}/q_0$ 是反映静电场本身性质的物理量，叫做电场强度，简称场强，用$\boldsymbol{E}$表示，即

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \qquad (1\text{-}2\text{-}1)$$

上式表明：静电场中某点的电场强度是表征该点电场性能的一个矢量，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点所受电场力的方向一致。

在SI中，场强的单位是牛顿·库仑$^{-1}$（$N \cdot C^{-1}$），这个单位和伏特·米$^{-1}$（$V \cdot m^{-1}$）相同(见本章§4)。

场强迭加原理

由力的迭加原理可知，把试探电荷q_0置于由几个点电荷所产生的电场中时，则q_0所受的力$\boldsymbol{F}$是各个点电荷单独存在时对q_0作用力$\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$……$\boldsymbol{F}_n$的矢量和，即

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\cdots+\boldsymbol{F}_n$$

两边除以q_0，根据场强的定义则得

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2+\cdots+\boldsymbol{E}_n \qquad (1\text{-}2\text{-}2)$$

式中$\boldsymbol{E}_1=\boldsymbol{F}_1/q_0$，$\boldsymbol{E}_2=\boldsymbol{F}_2/q_0$，…，$\boldsymbol{E}_n=\boldsymbol{F}_n/q_0$ 分别是各个点电荷单独存在时产生的场强。上式说明，点电荷系在某点所产生的总场强等于各点电荷单独存在时在该点所产生场强的矢量和，这就是场强的迭加原理。

场强的计算

1．点电荷的场强

设想把一试探电荷q_0放置在距点电荷 q 为 r 的点上，q_0所

受的库仑力为

$$F=\frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{r}$$

由场强的定义知，P点的场强为

$$E=\frac{F}{q_0}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{r} \tag{1-2-3}$$

$\hat{r}$是从q到P点的单位矢量。上式表明，点电荷的场强只与场源q和场点的位置有关，它是客观存在的，与q_0的放入与否无关，E的方向沿q与场点的联线，当$q>0$时，E与$\hat{r}$同向，当$q<0$时，E与$\hat{r}$反向，如图1-2-1所示。

图 1-2-1

2．点电荷系的场强

由式（1-2-2）和（1-2-3）可知，n个点电荷在空间任一点所产生的总场强为

$$E=\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 r_i^2}\hat{r}_i \tag{1-2-4}$$

3．连续分布电荷的场强

任何一个实际的带电体都可视为许多点电荷的集合，它在某点所产生的场强是所有这些点电荷单独存在时在该点产生场强的矢量和。在带电体内任取一电荷元dq，dq的线度很小，可视为点电荷，它在任一点P处产生的场强为

$$dE=\frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{r}$$

因而，整个带电体在P点产生的场强是

$$\boldsymbol{E}=\int d\boldsymbol{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r^2}\hat{r} \qquad (1\text{-}2\text{-}5)$$

这是一个矢量积分，计算时通常须把$d\boldsymbol{E}$分解为X、Y、Z方向上的分量，再进行积分而求得E_x、E_y、E_z，然后求出$\boldsymbol{E}$。式中“$\int$”表示积分遍及电荷分布的全部区域，可能是面积分或体积分，但也用单积分号表示。原则上由式（1-2-5）可以求解任何电荷分布的场强。

例1-2-1 一对等量异号的点电荷$+q$和$-q$，当两者间的距离l比起讨论中所涉及的距离r小得多时，这对点电荷组成的系统就叫做电偶极子。电偶极子是一个重要的物理模型，后面要多次用到它。现在计算两点电荷联线的延长线上某点P和中垂线上某点P'的场强，P和P'到两电荷联线中点O的距离都是r，如图1-2-2所示。

【解】（1）、延长线上的场强

由附图知，$+q$和$-q$到P点的距离分别为$r-\frac{l}{2}$和$r+\frac{l}{2}$，在P点产生的场强大小分别为

$$E_+=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q}{(r-l/2)^2}$$

$$E_-=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q}{(r+l/2)^2}$$

$\boldsymbol{E}_+$和$\boldsymbol{E}_-$同在一直线上而方向相反，故P点总场强的大小为

$$E_p=E_+-E_-=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{(r-l/2)^2}-\frac{1}{(r+l/2)^2}\right]$$

$$=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{2qrl}{(r^2-l^2/4)^2}$$

因为$r\gg l$，所以

$$E_P = \frac{2ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \tag{1}$$

E_p 的方向向右。

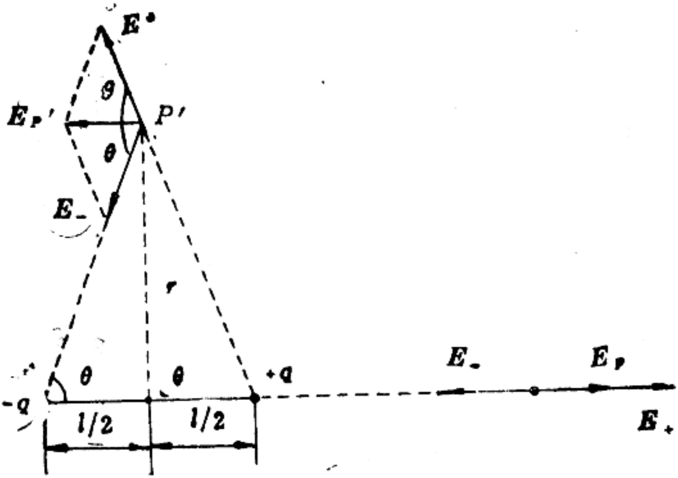

图 1-2-2

（2）、中垂线上的场强

由附图可得

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\ \frac{q}{r^2 + l^2/4}$$

但E_+和E_-方向不同，由图 1-2-2 知，P' 点总场强大小为

$$E_P' = E_+\cos\theta + E_-\cos\theta = \frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 (r^2 + l^2/4)^{3/2}}$$

因$r>>l$，所以

$$E_P' = \frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \tag{2}$$

E_P'的方向向左。

由式（1）和（2）可见，电偶极子的场强与q和l的乘积成正比（这是电偶极子和通常的两个等量异号电荷之间的区别），这表明q和l的乘积是描述电偶极子本身性质的物理量。若用$\boldsymbol{l}$表示从$-q$到$+q$的矢径，则$q\boldsymbol{l}$叫电偶极子的电偶极矩，简称电矩，用$\boldsymbol{p}$表示。由上面的讨论可知，$\boldsymbol{E}_P$与电矩$\boldsymbol{p}$同向，而$\boldsymbol{E}_P'$与$\boldsymbol{p}$反向，因此，式（1）和（2）可分别写成矢量式

$$\boldsymbol{E}_P = \frac{2\boldsymbol{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E}_P' = -\frac{\boldsymbol{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \tag{4}$$

若把电偶极子放入均匀的分电场中，如图1-2-3所示，则它的两个点电荷所受的电场力分别为$+q\boldsymbol{E}$和$-q\boldsymbol{E}$，这两个力等值而反向，因为不在同一直线上，故电偶极子所受的合力为零，而合力矩的大小为

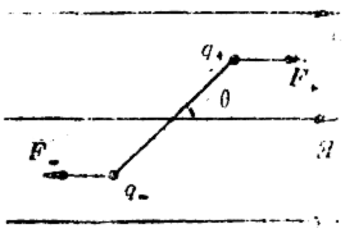

图 1-2-3

$$M = qEl\sin\theta = pE\sin\theta \tag{5}$$

可见，力矩$\boldsymbol{M}$力图使偶极子的电矩$\boldsymbol{p}$转到与外电场$\boldsymbol{E}$相同的方向上，当$\boldsymbol{p} \parallel \boldsymbol{E}$时，力矩$\boldsymbol{M}$为零。

例 1-2-2　求均匀带电细直棒中垂线上的场强，棒长为$2l$，带电量为q。

【解】　建立如图1-2-4的坐标系，原点O为棒之中点。线元dy上的电量为dq，它在P点产生的场强大小为

$$dE=\frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=\frac{\frac{q}{2l}dy}{4\pi\varepsilon_0(x^2+y^2)}$$

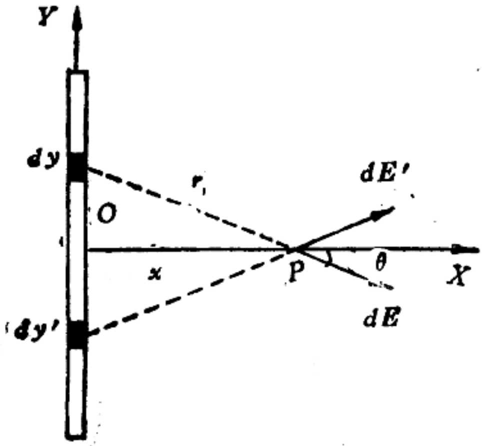

图 1-2-4

可以把细棒分割成若干对对称的线元，线元 dy' 与 dy 相对称，dy' 上的电荷在P点产生的场强为 dE'，dE_y 和 dE'_y 等值而反向，对积分无贡献，dE_x 和 dE'_x 等值且同向，因此有

$$E=E_x=\int 2dE\cos\theta=\int\frac{(q/2l)\cdot dy}{4\pi\varepsilon_0(x^2+y^2)}\cdot\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

$$=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 x\sqrt{x^2+l^2}}=\frac{\lambda l}{2\pi\varepsilon_0 x\sqrt{x^2+l^2}} \qquad (1)$$

式中 $\lambda=q/2l$，是细棒单位长度上的带电量，叫做**线电荷密度**。当 $l\to\infty$，由上式得

$$E=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 x} \qquad (2)$$

式（2）为无限长均匀带电细直棒的场强公式，对于有限长均匀带电细棒，在靠近棒中部的区域 $x \ll l$，故上式也成立。

例1-2-3 求均匀带电圆环轴线上的场强，已知圆环半径为R，带电量为 q 。

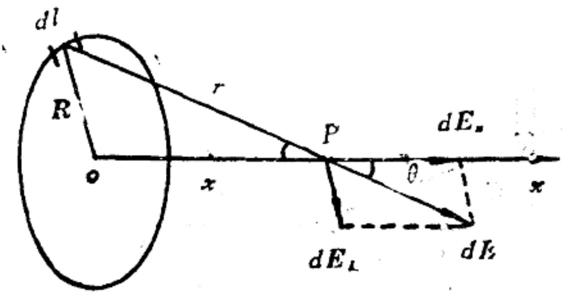

图 1-2-5

【解】 如图1-2-5，在环上取一线元 dl，其上电量 dq 在 P 点产生的场强大小为

$$E=\frac{dq}{4\pi e_0 r^2}=\frac{\frac{q}{2\pi R}dl}{4\pi e_0 r^2}$$

把 dE 分解为 X 方向上的分量 dE_x 和垂直于 X 方向上的分量 dE 。任一直径两端的一对线电荷元在 P 点产生场强的垂直分量等值而反向，相互抵消，故轴线上的场强只有X分量，因此有

$$E=\int dE\cos\theta=\frac{q\cos\theta}{4\pi e_0 Rr^2}\int_0^{2\pi R}dl=\frac{q\cos\theta}{4\pi e_0 r^2}$$

注意到$\cos\theta=\frac{x}{r}$，$r=\sqrt{R^2+x^2}$，且 q 为正时E沿X轴正方向