大学物理

第二册

王锡祉
杨松林 主编

DAXUEWULI

大连理工大学出版社

大学物理

第二册

王锡祉　杨松林　主编

大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书可作为理工科大学非物理系各专业的大学物理课程的教材或教学参考书。参考学时为130—140。

全书分三册。第一册包括力学和热学，第二册为电磁学，第三册包括振动和波动、波动光学、近代物理。近代物理中增加了"自选内容"可由教师自行选定。

大 学 物 理

Daxue Wuli

第 二 册

王锡祉　杨松林　主编

大连理工大学出版社出版发行（大连市凌水河）
大连市科技干部进修学院综合经销处印刷厂印刷

开本：787×1092　1/32　印张：7 1/2　字数：168千字
1989年2月第一版　　1989年2月第一次印刷
印数：0001—6000册

责任编辑：许芳春　　责任校对：玉　洁
封面设计：羊　戈

ISBN 7-5611-0123-6/O·22　　定价：1.29元

目　　录

第七章　静　电　场

电磁运动是物质的又一种基本运动形式。历史上，电磁学研究所取得的成就，使许多工程技术部门得到了高速度发展，在理论领域使人们对物质世界的本质有了更深入的认识。

大家在中学已经学过电学和磁学的初步知识，对基本的电磁现象及电场、磁场等概念有一定了解。在此基础上，我们将对电场、磁场的性质及其运动规律作进一步讨论，使大家对统一的电磁场有较全面的认识。

本章讨论相对观察者为静止的电荷在其周围空间形成的电场，即**静电场**。在电荷周围，通常还有导体和电介质存在，情况比较复杂。因此，为了弄清静电场的基本性质，我们首先研究真空中的静电场，最后讨论导体和电介质对电场的影响。

§7—1　电荷守恒定律　库仑定律

一、电荷及电量

自然界很多物体可以通过某种方法使它带电，我们把处于带电状态的物体叫做带电体，电荷的存在体现在两个带电体之间有相互作用。实验发现，自然界存在两种电荷，通常称之为正电荷和负电荷。带同号电荷的物体互相排斥，带异

号电荷的物体互相吸引。带电体之间的这种相互作用力称为**电性力**。

电性力的大小，反映物体所带电荷的多少，定量描述电荷多少的物理量叫做电量。在国际单位制中，电量的单位是**库仑**（C）。

近代物理研究告诉我们，电荷是“基本”粒子的重要属性之一。目前所发现的基本粒子的电荷（不带电荷的除外）其电量绝对值都相同，称为**“基本”电荷**，用符号 e 表示。实验测得：

$$e=1.602\times10^{-19}\mathrm{C}$$

这是到目前为止实验能观测到的最小电量*。普通物质的原子和分子都是由电子（带负电荷 $-e$）、质子（带正电荷 $+e$）和中子（不带电荷）组成的。因此，任一物体都包含有等量的异号电荷，而且均匀地分布着，因而对外不显示电性。如果用某种方法使得物体中带某种符号的粒子过剩或缺少，或者使物体中带相反符号电荷的粒子分布不均匀，物体就会呈现电性。

物体的电荷是由基本电荷构成的，因而其电量 q 应为 e 的整数倍，即

$$q=\pm Ne$$

由此可见，电量 q 是以一系列不连续的量值出现的，叫做**电荷的量子化**。但由于基本电荷非常小，对一个由大量基本电荷所形成的宏观电荷来说，可以认为它具有连续值。

---

* 近代理论推测，可能存在电荷为 $\pm e/3$ 和 $\pm 2e/3$ 的更基本的粒子，但到目前为止，实验尚未观测到。

二、电荷守恒定律

电荷是物质的固有属性。电荷既不能被创造，也不能被消灭。在宏观上，物体的带电过程或带电体的电荷被中和的过程，无非是电荷从一个物体转移到另一物体，或从物体的一部分转移到物体的另一部分的过程。在微观过程中，例如电子和正电子的淹没转化为一个光子，或相反地一个光子进入原子核内转化为电子偶的过程中，两种相反符号的电荷也总是等量地同时出现或同时消失的。

以上事实表明，一个电绝缘系统，其电荷的代数和是守恒的，这一规律叫做**电荷守恒定律**，它是物理学中的基本定律之一。

三、库仑定律

在中学学过真空中两个点电荷之间相互作用的**库仑定律**，它的数学表示式为

$$F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$$

式中 q_1、q_2分别表示两个点电荷的电量，r 是它们之间的距离，F 是点电荷间的相互作用力。k 是比例系数，其值由所选用的单位制决定。当采用国际单位制时，

$$k\approx9.00\times10^9\mathrm{Nm^2/C^2}$$

以后我们要从库仑定律出发，推导许多电学公式。为了使那些公式简洁、合理，在这里引入一常数 ε_0，并令

$$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

由此

$$\varepsilon_0=\frac{1}{4\pi k}=\frac{1}{4\pi\times 9\times 10^9}=8.85\times 10^{-12}C^2/Nm^2$$

于是，库仑定律成为下面的形式：

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2} \qquad (7—1)$$

式（7—1）称为库仑定律的有理化形式。这样做，虽然使库仑定律本身形式复杂一些，但在由它导出的一些常用公式中，可不出现 4π 因子，而常数 ε_0 也可赋予一定的物理名称，这就显示出“有理化”的优越性。

为了同时表达作用力的大小和方向，采用矢量表示。点电荷 q_1 对点电荷 q_2 的作用力应表示为

$$\boldsymbol{F}=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r} \qquad (7—2)$$

式中 $\boldsymbol{r}$ 为从 q_1 到 q_2 的矢径。当 q_1、q_2 同号时，$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 同向，表示斥力；q_1、q_2 异号时，$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 反向，表示引力。

§7—2 电场 电场强度 场强叠加原理

一、电场

历史上长时期曾认为两个电荷间的相互作用是“超距的”，即它们之间不需要通过任何中间媒介，也不需要经历任何时间就可直接作用，这种“超距”作用观点后来被人们否定了。

到上世纪初，人们认识到在任何电荷的周围空间里总是伴随有一定的电场。如果将另一电荷放到该电场中去，这电

荷将会受到电场的作用力。上节所讲到的库仑力，实际就是电场的作用力，**两个电荷之间的相互作用是通过电场进行传递的**。

许多实验事实证明，电场是物质的一种特殊形态，它同实物一样具有一定的质量、能量、动量和角动量。对静电场来说，这些方面表现并不明显。

静电场对外的表现有如下两点：

（1）对引入电场中的电荷有施力作用；

（2）电荷在电场中移动时电场力作功（这表明电场具有能量）。

下面，我们将从上述两点出发，逐步揭示电场的特性，使大家对电场的本质有所认识。

二、电场强度

首先，我们研究电场对电荷有作用力的性质。为了定量描述电场的这种性质，引入试验电荷 q_0。**试验电荷 q_0 必须是一个电量足够小的点电荷**，这样，当试验电荷引入时不致对原有电场产生明显影响，并且试验电荷具有确定的位置。通常规定用正电荷作试验电荷。

通过实验知道，一般情况下，把试验电荷放在电场中不同位置，其受力大小和方向都是不相同的，但在电场中每一给定点上，受力大小和方向都是一定的（图7—1）。

在电场某给定点上，当改变 q_0 的量值时，其受力方向不变，而力的大小随 q_0 的量值成比例地变化。可见，电荷在电场中某点受到的力，不仅与电荷所在点的电场性质有关，而且还涉及电荷的电量，因此，不能直接用电场力来描述电场的施力性质，而应当用电场力与试验电荷电量的比

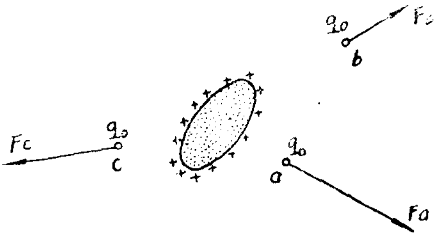

图7—1　试验电荷q_0在电场中受力

值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 描述，因为它不随试验电荷电量变化。我们定义：

$$E=\frac{F}{q_0} \tag{7—3}$$

称为**电场强度**，简称**场强**。电场强度是矢量。场中某点场强的大小和方向等于把单位正电荷置于该点时电场所施的力。

在国际单位制中，场强的单位是牛顿每库仑（N/C）

三、场强叠加原理

试验电荷 q_0 放在由若干个点电荷所产生的电场中时，实验指出，任一点电荷对 q_0 作用的力不因周围有其它电荷存在而有所改变，而 q_0 所受的合力等于各点电荷各自对 q_0 作用的力的矢量和，即

$$F=F_1+F_2+\cdots+F_n$$

将上式两边各除以 q_0，得

$$\frac{F}{q_0}=\frac{F_1}{q_0}+\frac{F_2}{q_0}+\cdots+\frac{F_n}{q_0}$$

按场强定义，上式右边各项分别是各点电荷产生的场强，左边为总场强，即

$$E=E_1+E_2+\cdots+E_n \tag{7—4}$$

上式说明，**电场中任一点的总场强等于各点电荷在该点单独产生的场强的矢量和**。这就是**场强叠加原理**，它是电场的基本性质之一。利用这一原理，原则上可以计算任意带电体所产生的场强，因为任何带电体都是许多个点电荷的集合。

四、场强的计算

如果电荷分布已知，应用库仑定律和场强叠加原理，就能计算各种电场的场强。下面分别讨论三种不同类型电场的场强计算公式。

（1）点电荷电场的场强

设真空中有一点电荷 q，则其周围空间有一电场，设想在与点电荷 q 距离为 r 的 P 点放一试验电荷 q_0，由库仑定律知，q_0 受到的力为

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^3}\boldsymbol{r}$$

式中 $\boldsymbol{r}$ 是从点电荷 q 到 P 点的矢径。由场强定义式，P点场强为

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r} \qquad (7—5)$$

上式即为点电荷的场强公式。从（7—5）式可见，在点电荷电场中，任一点的场强大小，与点电荷的电量 q 成正比，与点电荷到该点距离 r 的平方成反比，若 q 为正电荷，$\boldsymbol{E}$ 的方

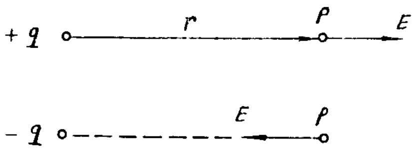

图7—2 点电荷电场的场强方向

向与矢径 $\boldsymbol{r}$ 的方向一致，若 q 为负电荷，则 $\boldsymbol{E}$ 的方向与矢径 $\boldsymbol{r}$ 的方向相反（图7—2）。

（2）点电荷系电场中的场强

设电场是由 n 个点电荷共同产生的。根据场强叠加原理，P 点的总场强应为

$$\boldsymbol{E}=\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 r_i^3}\boldsymbol{r}_i \tag{7—6}$$

式中 $\boldsymbol{r}_i$ 为从第 i 个点电荷到 P 点的矢径。

（3）连续分布电荷电场中的场强

任意带电体上的电荷分布，可以看成是许多微小电荷元 dq 的集合，电荷元 dq 作为点电荷对电场中任一点 P 处产生的场强为

$$d\boldsymbol{E}=\frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r}$$

式中 $\boldsymbol{r}$ 是从 dq 所在点到 P 点的矢径。整个带电体对 P 点产生的场强为

$$\boldsymbol{E}=\int d\boldsymbol{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r^3}\boldsymbol{r} \tag{7—7}$$

积分遍及电荷分布区域。（7—7）式是一个矢量积分，具体计算时，必须写出上述矢量积分式在 X、Y、Z 三个坐标轴方向上的分量式，将各式分别积分后再求合场强。

在电荷连续分布的情况下，要引入电荷密度的概念。当电荷连续分布在细长的线上时，定义电荷的线密度 λ 为

$$\lambda=\frac{dq}{dl}$$

式中 dq 为线元 dl 上的电量，λ 的单位为库仑每米(C/m)。

若电荷连续分布在一个平面或曲面上时，定义电荷的面密度σ为

$$\sigma=\frac{dq}{dS}$$

式中dq为面积元dS上的电量。σ的单位为库仑每米二次方(C/m^2)。

电荷连续分布在一个体积内，则定义电荷的体密度ρ为

$$\rho=\frac{dq}{dV}$$

式中dq是体积元dV内的电量，ρ的单位为库仑每米三次方(C/m^3)。

这样，(7—6)式积分号内的电荷元dq可根据不同的电荷分布情况写成

$$dq=\begin{cases}\lambda dl & (\text{线分布})\\ \sigma dS & (\text{面分布})\\ \rho dV & (\text{体分布})\end{cases}$$

〔**例题7—1**〕长度为L的均匀带电直线总电量为q，线外一点P到直线的距离为a，P点同直线两端的连线与直线间夹角分别为θ_1和θ_2(图7—3)，计算P点处的场强。

〔**解**〕取P点到直线的垂足O为原点，选坐标轴OX、OY如图。在带电直线上离原点为l处取线元dl，其电量$dq=\lambda dl$，其中$\lambda=q/L$。

从dl到P点的矢径为$\mathbf{r}$，则dq在P点处产生的场强为

$$d\mathbf{E}=\frac{\lambda dl}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\mathbf{r}$$

$d\mathbf{E}$沿X和Y轴方向的两个分量为

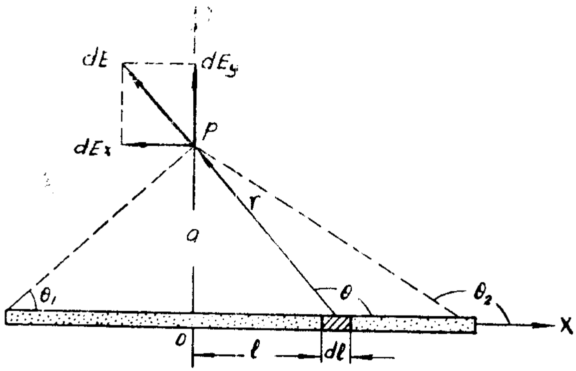

图7—3　均匀带电直线外的场强

$$dE_x = dE\cos\theta,\ \ dE_y = dE\sin\theta$$

从图可知

$$l = a\operatorname{ctg}(\pi-\theta) = -a\operatorname{ctg}\theta$$

$$dl = a\csc^2\theta d\theta$$

$$r^2 = a^2\csc^2\theta$$

所以

$$dE_x = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\cos\theta d\theta$$

$$dE_y = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\sin d\theta$$

将上列两式积分，得

$$E_x = \int_L dE_x = \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

$$E_y = \int_L dE_y = \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\sin\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

最后可由 E_x 和 E_y 来确定 E 的大小和方向。

如果这一均匀带电直线是无限长的，即 $\theta_1=0, \theta_2=\pi$，那么

$$E_x=0,\quad E_y=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 a}$$

可以看到，此时 $E=E_y$，其大小与线密度 λ 成正比，与该点离直线的距离 a 成反比。

〔**例题7—2**〕半径为 R 的均匀带电圆环，总电量为 q。计算其轴线上一点 P 处的场强。

〔**解**〕以环心 O 为原点，坐标轴 X 沿轴线方向，如图7—4所示，在环上任取线元 dl，其电量为

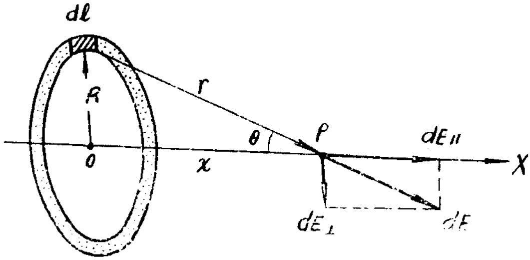

图7—4　均匀带电圆环轴线上的场强

$$dq=\frac{q}{2\pi R}dl$$

设 P 点距离环心为 x，从 dq 到 P 点的矢径为 $\mathbf{r}$，则 dq 在 P 点处所产生的场强为

$$d\mathbf{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^3}\mathbf{r}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\,dl}{2\pi R}\frac{1}{r^3}\mathbf{r}$$

环上各电荷元在P点产生的场强大小相等但方向各不相同。考虑到圆环对轴线的对称性，各电荷元的场强在垂直于X轴方向上的分矢量$d\boldsymbol{E}$相互抵消。所以P点的合场强是平行于X轴的那些分矢量$d\boldsymbol{E}_{/\!/}$的总和，

$$E=\int_L dE_{/\!/}=\int_L dE\cos\theta$$

式中θ是$d\boldsymbol{E}$与X轴的夹角。P点与各电荷元间的距离r和θ角都相同，故

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\cos\theta}{2\pi Rr^2}\int_L dl$$

上式中的积分，等于圆环周长$2\pi R$，于是得到

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\cos\theta}{r^2}$$

由图7—4可知

$$\cos\theta=\frac{x}{r},\quad r^2=R^2+x^2$$

代入上式后得

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qx}{(R^2+x^2)^{3/2}}$$

当$x\gg a$时，$(R^2+x^2)^{3/2}\approx x^3$，则有

$$E\approx\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 x^2}$$

这结果与点电荷的场强公式一致，即在远离环心的地方，带电圆环可作点电荷。

上面两个例题中的带电体，一为直线，一为圆环，这是最简单的情形，许多带电体可以看成是由这两种简单形状的