大学物理

（第二册）

王言福 吕维本 吴正邦 主编

国防科技大学出版社

大学物理

（第二册）

王言福　吕维本　吴正邦　主编

国防科技大学出版社

［湘］新登字009号

内 容 简 介

本书第二册的内容为真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、恒定电流、磁场、磁场对电流的作用、电磁感应、麦克斯韦电磁理论和电磁波共七章。参加各章编写的有田富林、杨建光、吴正邦、刘学麟、谢伯林、蔡贤明、刘永年、万世保、吴忠国。由王言福执笔统稿。由王言福、吕维本、吴正邦、刘向群、罗友仁讨论定稿。

大 学 物 理

（第二册）

王言福　吕维本　吴正邦　主编

责任编辑：戴东宁
封面设计：陆荣斌
责任校对：唐卫威

*

国防科技大学出版社出版发行
国防科技大学印刷厂印装

*

开本：850×1168　1/32　印张：6.25　字数：157千
1992年7月第一版第一次印刷　印数：1～5050册

ISBN 7-81024-200-8
O·20　全套三册共9.80元

新审定的部分物理学名词

汉文名	英 文 名	注 释
体电荷密度	volume charge density	
面电荷密度	surface charge density	
线电荷密度	linear charge density	
电场线	electric field line	又称“电力线”
电容率	permittivity	又称“介电常量”
相对电容率	relative permittivity	又称“相对介电常量”
真空电容率	permittivity of vacuum	又称“真空介电常量”
电流	electric current	
电流[强度]	electric current[strength]	
电流密度	current density	
面电流密度	surface current density	
恒定电流	steady current	
端[电]压	terminal voltage	
电势降[落]	potential drop	
电流线	electric streamline	
经典金属电子论	classical electron theory of metal	
超导[电]性	superconductivity	
磁感[应]强度	magnetic induction	
磁感[应]线	magnetic induction line	又称“磁力线”
磁场强度	magnetic field strength magnetic field intensitg	
磁场线	magnetic field line	
比荷	specific charge	又称“荷质比”

右手螺旋定则	right-hand[ed]screw rule	
螺绕环	torus	曾用名“罗兰环”
安培[分子电流]假说	Ampere hypothesis	
有旋电场	cure electric field	
涡[电]流	eddy current	
交[变电]流	alternating current,ac	
电偶极辐射	electric dipole radiation	
灵敏电流计	galvanometer	又称“检流计”
电势差计	potentiometer	曾用名“电位差计”

注　我国物理学名词审定委员会在1988年完成基础物理学部分的物理学名词的审定工作，并已公布。本书采用审定后的物理学名词。表内条目中的[ ]内为可省略部分；注释中的“又称”为不推荐用名，“曾用名”为被淘汰用名。

目　　录

第九章　真空中的静电场

电磁学是研究电磁现象及其规律的科学，它与生产技术、国防建设以及人们的日常生活有着密切的关系，它是电工学、无线电电子学、电子计算技术、自动控制以及物质结构的研究等近代科学技术必要的基础理论之一。在物理学中，主要研究电磁场的规律及物质的电磁性质。

本章只讨论真空中相对观察者静止的电荷在其周围空间所激发的电场，即静电场。着重讨论电场强度和电势这两个描述电场性质的重要物理量，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。

§9-1　电荷　库仑定律

一　电　荷

电荷的量子化　大量实验和理论研究结果表明，自然界中只存在两种性质不同的电荷，一种是负电荷，如电子所带的电荷；另一种是正电荷，如质子所带的电荷。物体所带电荷的量值叫电量，常用符号Q或q表示。一个电子与一个质子所带电量的绝对值相等，其值为：

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

实验证明，带电体的电量总是基本电量e的整数倍，即$q=ne$，n为整数。电荷这种只能取离散的、不连续量值的性质，叫做电荷的量子化。电荷的量子就是e。然而在讨论宏观

现象时，由于涉及的带电量常比基本电量大许多倍，因此可以认为宏观带电体的电量变化是连续的。

电荷守恒定律 实验表明，若把参与相互作用的几个物体或粒子看作一个系统，而整个系统与外界没有电荷交换，那么不论在系统中发生什么样的变化，整个系统的电荷代数和始终保持不变，此结论称为电荷守恒定律。它是自然界中基本定律之一。

二 库仑定律

电荷之间存在着相互作用力，一般地说，两个带电体之间作用力的大小除与带电体所带的电量以及它们的相对位置有关外，还与带电体的大小、形状、电荷在带电体上的分布以及带电体所处的介质性质有关。

在一些具体问题中，当所研究的带电体之间的距离比它们本身的线度大得多时，因而其几何形状和大小对研究的问题的影响很小可忽略不计，就可把带电体看成一个点电荷。点电荷这个概念是抽象出来的一个理想模型。一个带电体能否看成一个点电荷，必须根据具体情况来决定。1785年法国物理学家库仑通过精确的实验，总结出点电荷之间的相互作用所遵从的基本规律——库仑定律。

库仑定律：在真空中，两个点电荷之间的相互作用力的大小与两个点电荷电量q_1和q_2的乘积成正比，与它们之间的距离的平方成反比，力的方向沿两点电荷的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸引。如果用$\vec{F}$表示电荷q_2受到电荷q_1的作用力，则库仑定律可写成

$$\vec{F}=k\frac{q_1q_2}{r^2}\vec{r}_0 \qquad (9\text{-}1a)$$

式中r表示由q_1到q_2的径矢$\vec{r}$的大小，$\vec{r}_0$是沿$\vec{r}$方向的单位矢量

$(\vec{r}_0=\vec{r}/r)$，k为比例系数，它的数值和单位决定于单位制的选择。在SI中，电量的单位为库仑，长度的单位为米，力的单位为牛顿，则

$$k=8.98755\times10^{9}\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}}\approx9\times10^{9}\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}}$$

为了使以后导出的公式简化，通常将k表示为

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

ε_0叫真空电容率。

$$\varepsilon_0=8.8542\times10^{-12}\mathrm{C^{2}\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}}\approx8.85\times10^{-12}\mathrm{C^{2}\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}}$$

由此得真空中库仑定律为

$$\vec{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}\vec{r}_0 \tag{9-1b}$$

由上式看出，当q_1与q_2同号时，$\vec{F}$和$\vec{r}_0$同向，即同号电荷相斥，如图9-1(a)所示；当q_1与q_2异号时，$\vec{F}$和$\vec{r}_0$反向，即异号电荷相吸引，如图9-1(b)所示。同理，由式(9-1b)也可计算电荷q_1受电荷q_2的作用力，这时$\vec{r}$应为由q_2到q_1的径矢。

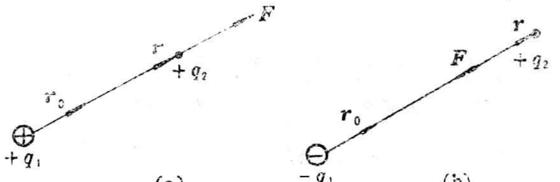

图 9-1

例 9-1 氢原子中，设电子与质子之间的距离$r=5.29\times10^{-11}$m．电子电量$e=1.6\times10^{-19}$C、质量$m=9.11\times10^{-31}$kg，质子质量$M=1.67\times10^{-27}$kg．试比较它们之间静电力$\vec{F}_e$和万有引力$\vec{F}_m$的大小。

解 由于电子与质子间的距离远大于它们本身的大小（约

为10^5倍)，故二者均可视为点电荷。根据库仑定律二者间的静电力的大小为

$$F_e=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$$

$$=\frac{1}{4\pi\times8.85\times10^{-12}}\frac{(1.6\times10^{-19})^2}{(5.29\times10^{-11})^2}$$

$$=8.23\times10^{-8}(\mathrm{N})$$

根据万有引力定律，二者间的万有引力的大小为

$$F_m=G\frac{mM}{r^2}$$

$$=6.67\times10^{-11}\frac{9.11\times10^{-31}\times1.67\times10^{-27}}{(5.29\times10^{-11})^2}$$

$$=3.64\times10^{-47}(\mathrm{N})$$

二者之比为 $$\frac{F_e}{F_m}=2.27\times10^{39}$$

可见，电子与原子核之间的静电力远大于其间的万有引力，故在处理电子与原子核之间的相互作用时，万有引力可以忽略不计。

应该指出，库仑定律适用于点电荷的相互作用。如果所研究的问题，涉及到两个以上点电荷的相互作用，例如有 n 个点电荷组成的点电荷系，则系统中作用于其中某一点电荷q_i上的静电力$\vec{F}_i$等于其它$(n-1)$个点电荷单独存在时，作用在该电荷上静电力的矢量和，这一结论表明静电力满足力的迭加原理。

§9-2 电场 电场強度

一 电 场

库仑定律说明了两个点电荷之间存在作用力，并没有说明

它们之间的作用是怎样实现的。关于这一问题，历史上曾有两种不同的观点，一种是“超距作用”观点，即认为一个带电体所受到的电力是由另一个带电体直接给予的，这种作用既不需要中间物质进行传递，也不需要时间，而是从一个带电体立即达到另一带电体。这种作用可表示如下：

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

另一种是“近距作用”的观点，认为带电体之间的相互作用是通过各自产生的电场来实现的。即认为在带电体的周围存在着电场，只要其它带电体处于电场中某点时，就受到该点电场的作用。这种作用可表示如下：

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

近代物理学证明后一种观点是正确的。和其它物质一样，场也是客观存在的，它不仅有质量而且还有动量和能量。静止电荷周围有静电场，产生电场的电荷一般称为场源电荷。

二　电场强度

同一电荷在电场中的不同位置，所受的电场力的大小和方向一般不同。为了定量研究电场这一性质，常借助于试验电荷q_0. 试验电荷必须是点电荷，当它放在场中某点时，它的位置可用确定的坐标来描述；而且电量必须充分小，以致使它的引入对原来电场的影响可以忽略。实验指出，把试验电荷q_0放入电场中的不同位置，其所受电场力的大小和方向一般是不相同的，但在给定点其受力的大小和方向是完全确定的，并且试验电荷所受电场力的大小与试验电荷的电量成正比。即在电场中给定点，试验电荷所受电场力$\vec{F}$与它所带电量q_0的比值$\vec{F}/q_0$是一个与试验电荷电量无关的常矢量，只与该点电场的性质有关。因此，我们可以用比值$\vec{F}/q_0$来描述电场中各点的性质，并把它叫作电场强度，简称场强，用符号$\vec{E}$表示，即

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q_0} \tag{9-2}$$

上式表明，电场中某点的电场强度的大小等于位于该点的单位电荷所受的电场力的大小，电场强度的方向就是该点正电荷所受的电场力的方向。场点不同，试验电荷所受电场力一般不同。可以从试验电荷受力情况得知电场中各点的强弱。可见，电场强度是从力的角度描述电场各点强弱性质的物理量。应该指出，电场是客观存在的，电场的性质仅由场源电荷的分布所决定，与是否引入试验电荷无关。在SI中，场强的单位是牛顿/库仑($N\cdot C^{-1}$)或伏特/米($V\cdot m^{-1}$)．

如果电场中某点的场强 $\vec{E}$ 已知，根据式(9-2)可以计算出置于该点的电荷 q 所受的电场力，即

$$\vec{F}=q\vec{E} \tag{9-3}$$

式(9-3)表明，当$q>0$时，$\vec{F}$与$\vec{E}$同号，即电场力与电场强度的方向相同；当 $q<0$ 时，$\vec{F}$与$\vec{E}$异号，即电场力与电场强度的方向相反。

三　电场强度的计算

如果已知场源电荷的分布，则可根据场强的定义式(9-2)计算场强。

1. 点电荷的场强　场源电荷为真空中一点电荷 q ．把一试验电荷q_0放在电场中任一点 P ，根据库仑定律，作用在q_0上的电场力为：

$$\vec{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^2}\vec{r}_0$$

由式(9-2)，可将 P 点的电场强度为

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{r}_0 \tag{9-4}$$

式中$\vec{r}_0$是从点电荷q指向观测点P的单位矢量。上式表明，在真空中，点电荷的电场中某点的场强与点电荷的电量q成正比，与点电荷到该点的距离r的平方成反比。若q为正电荷，场强$\vec{E}$的方向与$\vec{r}_0$的方向一致；若q为负电荷，场强$\vec{E}$的方向与$\vec{r}_0$的方向相反。如图9-2所示。

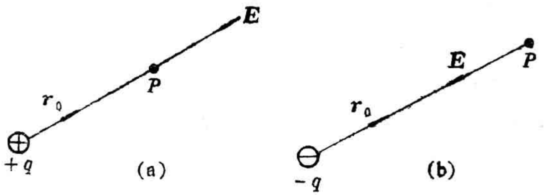

图 9-2

2. 点电荷系的场强　设场源电荷是由若干点电荷q_1、q_2 $\cdots q_n$所组成的点电荷系，各点电荷到电场中的任一点P的径矢分别为$\vec{r}_1$、$\vec{r}_2\cdots\vec{r}_n$，在P点放一试验电荷q_0，根据力的迭加原理，则q_0所受合力$\vec{F}$等于各个点电荷单独存在时对q_0的作用力$\vec{F}_1$，$\vec{F}_2\cdots\vec{F}_n$的矢量和，即

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

等式两边除以q_0，得

$$\frac{\vec{F}}{q_0}=\frac{\vec{F}_1}{q_0}+\frac{\vec{F}_2}{q_0}+\cdots+\frac{\vec{F}_n}{q_0}$$

根据场强定义，上式右边各项分别为各点电荷单独存在时所产生的场强，上式左边为总场强。即

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\cdots+\vec{E}_n=\sum\vec{E}_i \qquad (9\text{-}5)$$

由点电荷的场强公式，上式又可写成

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum\frac{q_i}{r_i^2}\vec{r}_{i0} \qquad (9\text{-}6)$$

上式表明，电场中任一点的总场强等于各点电荷单独存在时在

该点产生的场强的矢量和。此结论称为场强的迭加原理，它是电场的基本性质之一。因为任何带电体都可以看作许多点电荷的集合，所以根据点电荷的场强公式和场强迭加原理，可以计算任意带电体所产生的场强。

3. 连续分布电荷的场强　场源电荷是电荷连续分布的带电体，这时可以把带电体分割成无数个电荷元dq，每个电荷元均视为点电荷。如图 9-3 所示，dq在P点的场强为

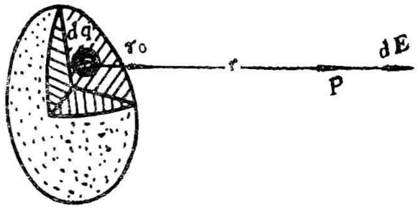

图 9-3

$$d\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{r}_0$$

根据场强的迭加原理，即可得带电体在P点的场强为

$$\vec{E}=\int d\vec{E}=\int\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{r}_0 \qquad (9\text{-}7)$$

如果电荷连续分布在某一体积内，体电荷密度为$\rho=dq/dV$，则$dq=\rho dV$，dV是电荷元所占据的体积元，于是式(9-7)可写成

$$\vec{E}=\int_V\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho dV}{r^2}\vec{r}_0$$

同理，如果电荷连续分布在某一曲面上，面电荷密度为$\sigma=dq/ds$，则$dq=\sigma ds$，ds是电荷元dq所占据的面积元，于是有

$$\vec{E}=\int_s\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma ds}{r^2}\vec{r}_0$$

如果电荷连续分布在某一曲线上，线电荷密度为$\lambda=dq/dl$，则$dq=\lambda dl$，dl是电荷元dq所占据的线元，于是有

$$\vec{E}=\int_l \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda dl}{r^2}\vec{r}_0$$

式(9-7)是一个矢量积分式，计算时一般应将场强 $d\vec{E}$沿选定的坐标轴方向分解，然后分别对各分量进行积分。

例 9-2 如图 9-4 所示，有两个电量相等的正、负点电荷$+q$和$-q$，相距 l．若两电荷连线中点 O 到观测点的距离 r 远大于 l 时，则这对电荷称为电偶极子。从$-q$到$+q$的径矢为$\vec{l}$，电量 q 与$\vec{l}$的乘积为电偶极子的电矩，用$\vec{p}_e$表示，则 $\vec{p}_e=q\vec{l}$．试求电偶极子的中垂线上任一点的场强。

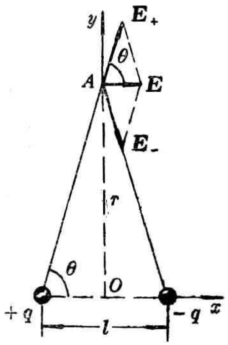

图 9-4

解 以O为原点，取直角坐标系xoy，以O点到观测点A的距离为 r．由点电荷场强公式可得$+q$和$-q$在A点的场强大小分别为

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

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

方向如图所示。

$$\because\quad (E_+)_x=(E_-)_x=E_+\cos\theta$$

$$(E_+)_y=-(E_-)_y=E_+\sin\theta$$

则A点场强的两个分量为

$$E_x=(E_+)_x+(E_-)_x=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}\frac{l}{\sqrt{r^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}}$$

$$E_y=(E_+)_y+(E_-)_y=0$$

故 A 处场强大小为

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ql}{\left[r^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{3/2}}$$

由于 $r\gg l$，则

$$\left[r^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^{3/2}\approx r^3$$

故 A 点的场强大小为

$$E=\frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

可见电偶极子的场强大小与 r 的三次方成反比，与电矩的大小成正比。由图看出，电矩 $\vec{p}_e$ 与场强 $\vec{E}$ 的方向相反，故有

$$\vec{E}=-\frac{\vec{p}_e}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

电偶极子是一个重要的物理模型，在研究电介质的极化、电磁波的发射和吸收等问题中都用到这个模型。电矩 $\vec{p}_e$ 是电偶极子的一个重要特征量。

例 9-3 有一长为 l，带电量为 q 的均匀带电直线，求线外一点 P 处的场强。P 点到直线的垂直距离为 a，它与直线两端的连线和直线之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2，如图9-5所示。

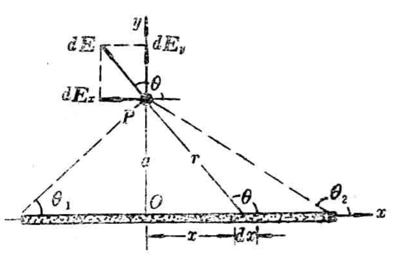

图 9-5

解 场源是均匀带电直线，线电荷密度 $\lambda=q/l$. 在带电直线上任取一电荷元 $dq=\lambda dx$，它在 P 点处的场强为

$$d\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{r}_0=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dx}{r^2}\vec{r}_0$$