普通物理简明教程

下册

主编　蒋修业

成都科技大学出版社

下册编委

朱代强　贾利群　方见树　李雄辉

苟现奎　杜学能　张增常　曹江陵

第十四章 光的干涉

第十五章 光的衍射

第十六章 光的偏振

第十七章 原子 原子核物理基础

第十八章 近代物理简介

第三篇　电磁学

物质的电结构是物质的基本组成形式；电磁场是物质世界的重要组成部分；电磁过程是自然界的基本过程；电磁作用是物质的基本相互作用之一；因此电与磁的研究渗透到物理学的各个领域，成为研究物质必不可少的基础。电与磁同其它运动形态有着广泛联系，并且电技术具有精密、准确、传递迅速、转化方便，便于控制等一系列的优点，因此电磁学成为自然科学和技术应用的重要基础。电磁学研究电磁场物质运动规律以及电磁场与带电粒子的相互作用规律，是大学普通物理课程最重要的组成部份。

第九章　静电场

静电场是我们学习电磁学遇到的第一个场，掌握静电场的性质和规律，学会场的描述和研究方法，是学好整个电磁学的关键。库仑定律和叠加原理是研究静电场性质和规律的两个基本实验定律，由此导出的高斯定理和环路定理是研究一切形式的静电场的理论基础。静电场部分的基本问题是由

已知的电荷分布求解场分布，即求解场强和电势这两个空间函数。

§9.1 电荷 库仑定律

一、电荷

原子可以看成是由电子、质子和中子组成的，这些粒子的内禀特性之一，是它们的电荷。电为物质的一种基本特性，电不能离开物质而存在。大量的实验和理论研究表明：自然界中只存在两种性质不同的电荷，一种是负电荷（$-q$）；如电子带的电荷；另一种是正电荷（$+q$），如质子（即氢原子核）带的电荷；电荷与电荷之间有相互作用力，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。

各种实物都是由分子、原子构成的。原子由带正电的原子核和带负电的电子所组成，其中原子核又是由带正电的质子和不带电的中子构成，通常原子核带的正电荷和电子带的负电荷相等，因而整个原子呈电中性。由于电子和质子是电荷的携带者，故电现象只能伴随着带电的基本粒子（电子和质子）的转移而发生，而原子核中的质子不易发生迁移，所以带电现象通常由电子的转移而引起。

物体所带电荷的量值叫电量，常用符号Q或q表示，单位为库仑（C）。例如电子带的电量为 -1.602×10^{-19}C，质子带的电量为 $+1.602\times10^{-19}$C。

实验表明，带电体上的电荷取决于物体中电子数目的增减，因此物体所带电只能且一定是电子电量的整数倍，而不可能是任意值，即

$$Q = ne \qquad (9.1)$$

这里 n 为整数，我们把电荷的这种只能取分立的、不连续的量值的性质叫电荷的量子化。电荷的量子就是电子所带电量，它是电量的最小单元，用e表示其值为：1.602×10^{-19}。

二、电荷守恒定律

大量实验表明，物体带电不过是电荷从一个物体转移到另一个物体。就是说，电荷既不能创生，也不能消灭，只能由一个物体转移到另一个物体，或从物体的一处转移到他处。"在一个与外界无电荷交换的系统内，无论进行什么物理过程，其正、负电荷的代数和始终保持不变"，这叫做电荷守恒定律。它是物理学的基本定律之一，在一切宏观过程和微观过程中都是成立的。化学反应、放射性衰变和核反应等过程都满足电荷守恒定律。

三、库仑定律

1785年库仑通过扭秤实验总结出了真空中两个静止点电荷之间的相互作用力的规律，它包括如下两个内容：

（1）两个点电荷间的静电力大小相等而方向相反，并且沿着它们的联线；同号电荷相斥，异号电荷相吸。

（2）静电力的大小与各自的电量q_1及q_2成正比，与距离r的平方成反比，所以库仑定律可写成

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (9.2)$$

其中k是比例系数，依赖于各量单位的选取。

在静电现象的研究中，当带电体本身的线度和形状比起

它到其它带电体的距离小得多时，则可把它看作一个带电的几何点，并称为点电荷。

如图9.1示，和讨论任何其它力一样，库仑定律中的力也是一个矢量，为反映力的大小和方向库仑定律的矢量形式可写为：

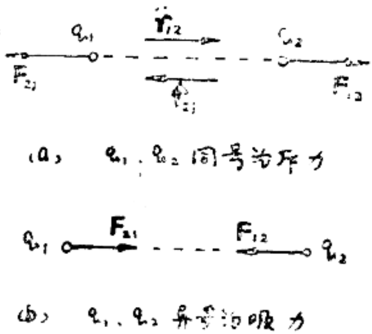

图9.1

$$\mathbf{F}_{12}=k\frac{q_1\cdot q_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} \qquad (9.3)$$

其中$\mathbf{F}_{12}$表示点电荷1对点电荷2的作用力，$\hat{\mathbf{r}}_{12}$表示由q_1指向q_2的单位矢。显然（9.1）式可同时反映静电力的大小和方向。例如：

设q_1与q_2同号，则$q_1q_2>0$，矢量$\mathbf{F}_{12}$等于一个正数乘矢量$\hat{\mathbf{r}}_{12}$，故$\mathbf{F}_{12}$与$\hat{\mathbf{r}}_{12}$同向，即点电荷1对点电荷2的静电力沿两者联线且由q_1指向q_2，这就是斥力；反之当q_1与q_2异号，即$q_1q_2<0$，$\mathbf{F}_{12}$与$\hat{\mathbf{r}}_{12}$反向，q_1对q_2的力为吸力。同理，点电荷2对点电荷1的作用力为：

$$\mathbf{F}_{21}=k\frac{q_1q_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}}_{21}$$

综合上两式得到：$\mathbf{F}_{12}=-\mathbf{F}_{21}$

如果用$\hat{\mathbf{r}}_1$表示施力点指向受力点的单位矢，则可去掉上面式中的脚标，库仑定律的矢量式简化为：

$$\mathbf{F}=k\frac{q_1q_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (9.4)$$

（9.4）式中k的数值和单位，取决于式中各量所采用的单位。在国际单位制中，力的单位是牛顿，长度的单位是米，电学量的基本单位是安培。电量的单位是库仑（它由安培导出。即1库仑＝1安培×1秒）。根据实验测定，在国际单位制中

9.0×10^{9}

$$k = \cancel{8.98\times10^{9}}\ \text{牛顿}\cdot\text{米}^2/\text{库仑}^2$$

在国际单位制中电磁学部份的单位采用了MKSA有理制。通常引入新的常数来代替k，令

$$k = 1/4\pi\varepsilon_0$$

式中的ε_0称为真空中的介电常数：

$$\varepsilon_0 = 1/4\pi k \approx 8.85\times10^{-12}\ \text{库仑}^2/\text{牛顿}\cdot\text{米}^2$$

于是，在国际单位制中，完整写出库仑定律：

$$\boxed{\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}}} \qquad (9.5)$$

式（9.5）不仅说明了两点电荷相互作用力的大小，也说明了力的方向，它表达了库仑定律的全部内容。另外，4π因子的引入，虽使（9.1）式形式变得复杂，但由此导出的一些式子形式却很简洁。

四、静电力叠加原理

库仑定律是两个点电荷之间相互作用力的规律。实验表明，当空间有两个以上的点电荷时，任意一个点电荷作用于另外一个点电荷的静电力仍满足库仑定律，并不因为有其它电荷存在而改变。作用于每一个点电荷上的总的静电力等

于其它点电荷单独存在时对它作用力的矢量和。这叫做**静电力叠加原理**。用数学式表示，则有

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\mathbf{F}_3+\cdots+\mathbf{F}_n \tag{9.6}$$

任意带电体都可看作点电荷的集合。因此，运用库仑定律和叠加原理，原则上可以求解任意带电体之间静电作用问题。

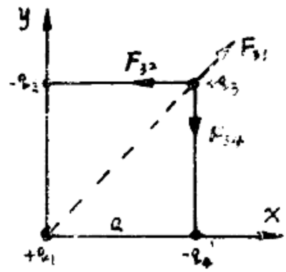

图9.2

例题9.1 设有四个电荷放在正方形的四个角顶上，如图9.2示，$q_1=2\mu c$，$q_3=5\mu c$，$q_2=q_4=-2\mu c$ （$1\ \mu c==10^{-6}c$），$a=0.1m$，试问作用在q_3上的合力是多少？

解 首先标出q_1、q_2和q_4作用在q_3上各力的方向，

由于 $F_{32}=F_{34}=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_3\cdot q_2}{a^2}=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_3q_4}{a^2}$

$$=8.98\times10^9\times\frac{(5\times10^{-6})(2\times10^{-6})}{(0.1)^2}\approx9N$$

q_1和q_3之间作用力的大小为

$$F_{31}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_3q_1}{(\sqrt{2}a)^2}\approx4.5N$$

将以上结果写成如下矢量形式

$\mathbf{F}_{32}=-9\vec{i}N$，$\mathbf{F}=-9\vec{j}N$，

$$\mathbf{F}_{31}=F_{31x}\vec{i}+F_{31y}\vec{j}=(3.2\vec{i}+3.2\vec{j})N$$

所以作用在q_3上的合力为

$$\mathbf{F}_3=\mathbf{F}_{32}+\mathbf{F}_{34}+\mathbf{F}_{31}=-(5.8\vec{i}+5.8\vec{j})N$$

$\mathbf{F}_3$的大小为8.2N，其指向为自$+x$轴偏转225°。

§9.2 电场 电场强度

一、电场

库仑定律说明了两个点电荷之间的相互作用力，但这两个点电荷并未直接接触，其间的相互作用力又是怎样发生和传递的呢？法拉第认为：电荷周围存在着电场，其他带电体所受到的电力（即电场力）是由电场给予的。用一图式来概括，则为

$$\text{电荷 1} \rightleftarrows \boxed{\text{电场}} \rightleftarrows \text{电荷 2}$$

此种看法正确性得到近代物理证明。

场和其他物质相互作用时表现出来的性质反映了场作为一种物质而真实存在。例如静电场对置于其中的电荷有作用力，在静电场中移动电荷电场力要做功。

二、电场强度

要确定电场中某一点场的性质，可利用试探电荷来作测定。试探电荷的几何形状必须足够小，使它置于场中某一点时，它的位置具有确定的意义；它所带的电量q_0必须足够小，使它引入到电场后不会对原来的电场发生任何显著的影响。把试探电荷放在场中某一点，它受到的力的大小和方向是一定的。如果我们改变它的电量的数值而不变符号，则它所受的力的方向不变，但力的大小改变。若研究一下，当q_0取不同的值时所受的力F与相应的q_0的比值F/q_0，我们就会发现这个比值具有确定的大小，换言之，比值F/q_0的大

小和F的方向（包括它的反方向）都只与这一点的电场性质有关，而与试探电荷q_0无关。我们把比值F/q_0和F的方向作为描述静电场中给定点的客观性质的一个物理量，并称为电场强度或简称场强，它是一个矢量用**E**表示，即

$$\mathbf{E}=\frac{\mathbf{F}}{q_0} \qquad (9.7)$$

在国际单位制中，场强的单位是牛顿／库仑，也可以表示为伏特／米。

由（9.7）式可见，电场强度**E**是从受力的角度来反映电场对外作用的强弱程度的，它数值上等于单位电荷在电场中某点所受的力，方向与该点处正电荷受力的方向一致。一般来说**E**是空间各点的函数，是矢量函数。如果在电场中**E**的大小和方向均不变，这个电场就叫匀强电场。

如果已知某电场**E**（x，y，z）的函数形式，那么由上述定义式可以得到点电荷q在电场中某点所受的力为

$$\mathbf{F}=q\mathbf{E} \qquad (9.8)$$

由场强定义及库仑定律可得点电荷Q产生的场强：

$$\mathbf{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (9.9)$$

$\hat{\mathbf{r}}$是由电荷Q指向场点P的单位矢（图9.3）。由上式可以看出，当$Q>0$，**E**与$\hat{\mathbf{r}}$同向；$Q<0$，**E**与$\hat{\mathbf{r}}$反向。

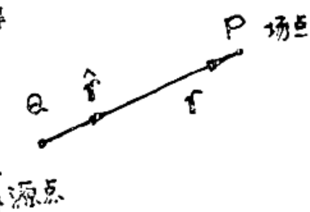

图9.3

三、场强叠加原理

如果电场是由n个点电荷q_1，$q_2\cdots q_n$共同激发的，并设

各个点电荷到某一点P的矢径为$\mathbf{r}_1$，$\mathbf{r}_2$，$\cdots\mathbf{r}_n$，若在P点放一试探电荷q_0，根据力的叠加原理，应有

$$\mathbf{F}=\frac{q_0q_1}{4\pi\varepsilon_0r_1{}^2}\hat{\mathbf{r}}_1+\frac{q_0q_2}{4\pi\varepsilon_0r_2{}^2}\hat{\mathbf{r}}_2+\cdots+\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0q_n}{r_n{}^2}\hat{\mathbf{r}}_n$$

因此，P点场强是

$$\mathbf{E}=\frac{\mathbf{E}}{q_0}=\frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0r_1{}^2}\hat{\mathbf{r}}_1+\frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0r_2{}^2}\hat{\mathbf{r}}_2+\cdots+\frac{q_n}{4\pi\varepsilon_0r_n{}^2}\hat{\mathbf{r}}_n$$

$$=\mathbf{E}_1+\mathbf{E}_2+\cdots+\mathbf{E}_n \qquad (9.10)$$

等于各个点电荷单独在该点所激发的场强的矢量和，此为**场强的叠加原理**。

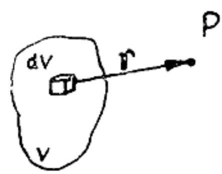

图9.4

利用场强叠加原理，可以计算任意带电体所激发的场强。为此，我们可把带电体看成许多电荷微元dq的集合，每一电荷元dq在距离r处的P点所激发的场强为

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

所以整个带电体所激发的场强为

$$\mathbf{E}=\int_v d\mathbf{E}=\int_v\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2}dq \qquad (9.11)$$

式中积分是对整个带电体系求积分。

如果以ρ代表以带电体的电荷体密度，dv为电荷元dq的体积元，则dq＝ρdv，于是（9.11）式可写为

$$\mathbf{E}=\int_v\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2}\rho dv \qquad (9.12)$$

顺便指出，对于电荷连续分布的线带电体和面带电体来

说，电荷元dq分别为：$dq=\lambda dl$ 和 $dq=\sigma ds$，λ为电荷线密度，σ为电荷面密度，由式（9.11）可分别得：

$$\mathbf{E}=\int_L \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda\hat{\mathbf{r}}}{r^2}dl,\quad \mathbf{E}=\int_s \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma\hat{\mathbf{r}}}{r^2}ds \qquad (9.13)$$

四、叠加原理的应用

在普通物理阶段，静电场的基本问题是由已知电荷分布求电场分布，其方法是根据场强定义和场强叠加原理。下面我们以电荷作点、线、面、体分布为例，说明求**E**的一般方法。

1. 几个点电荷产生的总场强**E**

求几个点电荷在场点产生的总**E**，一般是选好坐标系，用点电荷场强公式及叠加原理求**E**，但需注意各个点电荷在场点所产生场强的方向。

例题9.2 一对等量异号点电荷 ±q，其间距离为l。当所考察的场点到它们的距离远大于l时，这种带电体系叫做**电偶极子**。从−q到+q的矢径**l**叫做电偶极子的轴线，q**l**叫做电偶极子的**电偶极矩**，用**p**表示，即$\mathbf{p}=q\mathbf{l}$。试求电偶极子在l的中垂线上任一点P和延长线上P′的场强。

解 （1）中垂线上P点的场强。P点到±q的距离都是$\sqrt{r^2+(l/2)^2}$，它们在P点产生的场强大小相等

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

方向如图9.5示，由对称性可知，$\mathbf{E}_+$和$\mathbf{E}_-$在x轴上的分量等大同向，而在y轴的分量等大反向，所以

$$E_x=E_{x+}+E_{x-}=-2E_+\cos\theta,\quad E_y=E_{y+}+E_{y-}=0$$

上述结果表明，电偶极子的场强与P成正比，而与距离r的三次方成反比，它比点电荷的场强随r递减的速度快得多

2、连续分布的电荷产生的场强**E**

电荷作线、面、体分布时，求它在场点产生的**E**的一般步骤为：

（1）**分析带电体或场强分布的对称性**，选择合适的坐标系；

（2）将连续分布的带电体分割为无限小电荷元 dq，每一个dq可看成一个点电荷，写出dq在场点产生的元场强表示式d**E**；

（3）根据场强叠加原理，写出dE分量的积分表示式，选择合适的积分变量，统一积分变量，确定积分上、下限；最后，计算积分，对计算结果进行物理分析，并确定总场强的大小和方向。

例题9.3　求均匀带电细棒中垂面上的场强分布，设棒为2l，带电总量为q。

解　建立如图9.6示坐标系，由于带电细棒具有轴对称

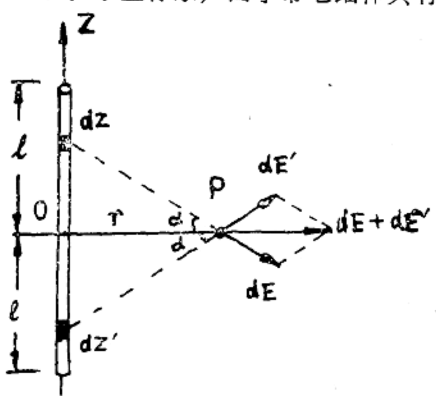

图9.6

性，即包含x轴的每一平面内情况都相同。这细棒中点O为原点，求中垂面上任一点P的场强。

因为整个细棒可分割成一对一对的线元，其中每对线元dz和dz′对于中垂线OP对称，这一对线电荷元在P点产生的元场强dE和dE′也对中垂线对称，由式（9.11）可知，电荷元$dq=\lambda dl$对电场贡献的大小dE为

$$dE=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{n^2}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda dz}{r^2+z^2}$$

由于场强的对称性，垂直于OP方向的分量互相抵消，而合矢量沿中垂线方向，其大小为：$2dE\cos\alpha$，方向沿r方向，因此P点合场强应是积分

$$E=E_r=\int_0^l 2dE\cos\alpha=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_0^l\frac{2\lambda dz}{r^2+z^2}\cos\alpha$$

$$=\frac{2\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\int_0^l\frac{r dz}{(r^2+z^2)^{3/2}}=\frac{\lambda l}{2\pi\varepsilon_0 r\sqrt{r^2+l^2}}$$

其中 $\cos\alpha=\frac{r}{\sqrt{r^2+z^2}}$，当细棒为无限长时，任何垂直于它的平面都可看成是中垂面，因此，无限长带电细棒周围任何地方的电场都与棒垂直，取$l\to\infty$时的极限，上述结果变成：

$$E=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\qquad(9.14)$$

式（9.14）表明，E与r成反比，对于有限长细棒，在靠近其中部附近的区域（$r\ll l$）也近似成立

例题9.4 如图9.7所示，一均匀带电棒看成半径为R的半圆环。假定棒上的总电荷为+q，求半圆环圆心处的场强。

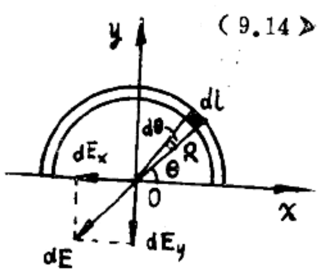

图9.7