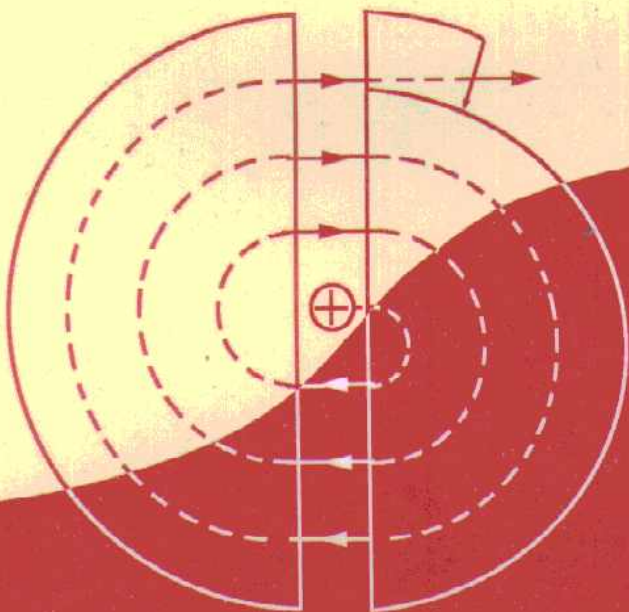


高等学校教材

# 电 磁 学

吕长荣 刘晓军 高红 主编

王冶金 主审



哈尔滨工业大学出版社

# 电 磁 学

吕长荣 刘晓军 高 红 主编  
王治金 主审

哈尔滨工业大学出版社

哈 尔 滨

## 内容提要

本书系统地阐述了电磁现象的基本规律和基本概念。主要内容包括:真空中静电场的基本规律、静电场中的导体和电介质、恒定电流、恒定电流的磁场、恒定磁场与磁介质、匀速运动电荷的电场和磁场、电磁感应和暂态过程、单相交流电路、电磁场和电磁波,共计九章。并附有习题参考答案、物理学常数和名词索引。

本书可作为高等学校物理专业电磁学课程教材,也可供各类理工院校有关专业师生及中学物理教师参考。

## 电 磁 学

Diancixue

吕长荣 刘晓军 高 红 主编  
王冶金 主审

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行  
哈尔滨市工大节能印刷厂印刷

\*

开本 850×1168 1/16 印张 12.125 字数 330 千字  
2000年4月第1版 2000年4月第1次印刷  
印数 1-1 000

ISBN 7-5603-1522-4/TM·27 定价 18.00 元

## 前 言

电磁学是物理专业一门十分重要的基础课。为适应教学改革的新形势,本书参照原国家教委普通物理教材建设组制定的“普通物理学课程建设”意见(第三部分 电磁学),依据 1980 年高等学校理科物理教材编审委员会审订的高等师范院校“电磁学”教学大纲,结合编审人员多年的教学经验以及当前国内外物理教材改革的动态,经集体讨论编写而成。

在编写过程中,大致采用传统的学科体系,全书采用国际单位制,所有物理名词均以 1996 年全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》为标准。在广泛介绍电磁现象的基础上,着重于基本概念、基本规律和基本方法的系统阐述,努力体现如下特点:(1)充分利用高等数学这一重要工具求解电磁学问题,通过电磁学的学习,帮助和引导学生学会使用高等数学,把“物”与“理”密切结合;(2)精选内容,尽量做到“多课少时”,切实减轻学生负担,既还学生以时间和空间,又保证为后继课程提供必要的基础;(3)注重从实验规律引出概念,加入一些演示实验内容,适当介绍物理学发展史上的重大事件,使学生了解科学发展的规律、科学研究的方法以及科学家的精神;(4)充分利用电磁学与物理学许多近代和前沿课题、高新技术、现代生活的联系,适当介绍相关的科学研究和教学研究的新成果,开阔学生的眼界,启迪他们的思维,提高学生的科学素质。

本书在编写过程中参阅了大量国内外著作和文献,并仿制了部分插图,选取了一些习题,谨致谢意。

李英华先生对本书初稿提出了非常宝贵的意见和建议。编者对

李英华先生及在本书编写过程中一切给予我们帮助和支持的同志，一并表示衷心的感谢。

由于编者学术水平和教学经验有限，加之时间仓促，缺点和疏漏一定不少，恳请广大老师和读者批评指正。

编者  
2000年1月

## 绪 论

自然界无比巨大,异常复杂,像一个变化万千的大舞台,电磁现象是这个舞台上最基本、最重要的角色之一。电磁学研究的内容就是电磁相互作用现象及其规律。它主要研究电荷、电流产生的电场和磁场的规律,电场与磁场的相互联系,电磁场对电荷、电流的作用规律,电磁场与物质的相互作用以及电磁场的性质,等等。

人类对电磁现象的认识已有两千多年的历史,但电磁学理论却是近二百年内形成的。电磁学的发展主要经历了三个阶段。第一阶段从公元前 600 年到 18 世纪中期。最早人们偶然发现了磁石吸铁和摩擦起电等简单的电磁现象。16 世纪以后才开始有目的的实验研究,制成了摩擦起电机,发现了导体和绝缘体的区别,制成储电设备——莱顿瓶,发现了尖端放电等现象。

第二阶段由 18 世纪后期到 19 世纪前期,对电磁现象进行了系统的定量研究,发现了电磁现象的基本实验规律,揭示了电与磁的转化与统一。在此期间,相关的重大事件有:

1785 年,法国的库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736 ~ 1806)设计了精巧的扭秤实验,发现了库仑定律,为静电学发展奠定了基础。

1800 年,意大利的伏打(A. Volta, 1745 ~ 1827)发明了伏打电池,为研究动电现象提供了技术基础。

1820 年初,丹麦的奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777 ~ 1851)发现了电流的磁效应,终于从实验上找到电与磁的联系,这是电磁学发展史上又一里程碑,在此后极短的时间内电磁学的研究成果雨后春笋般地涌现出来。

1820年10月31日,法国的毕奥(Jean Baptiste Biot,1774~1862)和萨伐尔(Felix Savart,1791~1841)发现了电流产生磁场的规律;几乎与此同时,法国的安培(Andre Marie Ampere,1775~1836)发现了载流导线间的相互作用规律。

1827年,德国的欧姆(Georg Simon Ohm,1787~1854)发表了简单而又极有用的欧姆定律。

1831年,英国的法拉第(Michael Faraday,1791~1867)经过10年求索发现了电磁感应现象,证实磁也能转化成电。同时法拉第摒弃当时占统治地位的“超距作用”观点,坚持“近距作用”观点,并提出了场的观念,这是物理学中一个开创性的见解。

第三阶段从19世纪60年代到20世纪初,对电磁现象的基本规律进行了总结、补充和统一,使电磁学成为能够解释各种电磁相互作用现象的物理学中独立的、完善的学科。英国的物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831~1879)于1862年提出了涡旋电场和位移电流的概念,1865年提出电磁现象的普遍规律——麦克斯韦方程组,完成了完整、统一的电磁理论。并由此预言了电磁波的存在,大胆提出光是电磁波的看法。1888年,德国的赫兹(Heinrich Rudolf Hertz,1857~1894)通过实验证实了电磁波的存在,并开创了无线电电子技术的新时代。1896年荷兰的洛仑兹(Hendrik Antoon Lorentz,1853~1928)提出“电子论”,将麦克斯韦方程组应用到微观领域,解释了物质的电磁性质。1905年爱因斯坦(Albert Einstein,1879~1955,德国人)建立了狭义相对论,进一步实现了电场和磁场、电力和磁力的统一,使经典电磁理论达到了完善的地步。

由于课程性质的限制,本书只讨论宏观电磁现象的经典电磁理论。

电磁相互作用对原子和分子的结构起着关键作用,在很大程度上决定着各种物质的物理性质和化学性质,是一种最基本的作用,电磁现象渗透到自然现象的各个领域。因此,在理论方面,电磁学是很

多自然科学的基础,如电路学、电工学、电子学、电动力学、等离子体物理学等。在技术方面,19世纪70年代,它的发展曾导致了电力的广泛应用和无线电通信的实现,推进了第二次技术革命。在今天这个高新技术迅猛发展的信息时代,由于电技术控制方便、测量准确,电能输送简便、转化效能高等一系列优点,使任何技术学科都离不开有关电的技术。电磁学知识对推动生产发展、改变人类生活方式、促进人类文明进步起着巨大作用,所以电磁学是大学物理学中重要的基础学科,必须很好掌握。



# 第一章 真空中静电场的基本规律

相对于观察者静止的电荷在其周围激发的电场,称为静电场。静电场对其他电荷的作用力,称为静电力。本章我们研究真空中静电场的基本特性,并从电荷在电场中受力和电场力对电荷做功两个方面,分别引入描述电场的两个重要物理量:电场强度和电势。同时介绍反映静电场基本性质的场强叠加原理、高斯定理和静电场的环路定理,从而建立起静电场的理论基础。

## 1.1 电 荷

人们对于电的认识,最初来自人为的摩擦起电现象和自然界的雷电现象,最早的观察记录可追溯到公元前6世纪。物体之所以能产生电磁现象,现在都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动。通过对电荷的各种相互作用的研究,目前人们所认识到的电荷的基本性质有以下几方面:

### 1. 电荷的种类

电荷有两种,同种电荷相斥,异种电荷相吸。美国物理学家富兰克林首先以正、负电荷的名称来区分两种电荷,用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的那种电荷,被称为正电荷,这种命名法一直延续到现在。宏观带电体所带电荷种类的不同,源于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同:电子带负电荷;质子带正电荷;中子不带电荷。现代物理实验证实,电子的电荷集中在半径小于  $10^{-18}\text{m}$  的小体积内,质子中只有正电荷,都集中在半径为  $10^{-15}\text{m}$  的体积内。中子内部也有电

荷,靠近中心为正电荷,靠外为负电荷,正负电荷电量相等,所以对外不显带电。

带电体所带电荷的多少叫电量,一个带电体所带总电量为其所带正负电量的代数和。电量用  $Q$  或  $q$  表示,在国际单位制(SI)中,它的单位为库仑,简记作 C。

## 2. 电荷的量子性

实验证明,自然界中物质所带的电荷量不能连续地变化,而只能一份一份地增加或减少。电荷总是以一个基本单元的整数倍出现的特性叫电荷的量子性。迄今所知,这个基本单元是一个电子所带电量的绝对值,用  $e$  表示

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

尽管 1964 年物理学家提出的夸克模型中认为中子和质子等粒子是由分别具有  $-\frac{1}{3}e$  和  $\frac{2}{3}e$  电荷的夸克组成,但迄今还没有在实验上发现处于自由状态的夸克。即使发现了带分数电荷的粒子,也不破坏电荷的量子性,仅是基本单元变得更小而已。

## 3. “电荷对称性”

基本粒子物理研究发现,对每种带正电荷的基本粒子,必然存在与之对应的、带等量负电荷的另一种基本粒子,称为“电荷对称性”。例如,电子和正电子,质子和反质子, $\pi^+$ 介子和 $\pi^-$ 介子等。

## 4. 电荷的相对论不变性

电荷的电量与运动状态无关,或者说,在不同的参照系观察,同一带电粒子的电量不变,这一性质叫电荷的相对论不变性。

## 5. 电荷守恒

大量事实表明,在一个与外界没有电荷交换的系统(电的孤立系统)内,在任何物理过程中,电荷的代数和保持不变。这就是电荷守恒定律。

近代科学实验证明,电荷守恒定律是物理学中普遍的基本定律

之一。不仅在一切宏观过程中成立,而且被一切微观过程(如核反应)所普遍遵守。

## 1.2 库仑定律

### 1.2.1 库仑定律

在发现电现象 2 000 多年之后,人们才开始对电现象进行定量的研究。1785 年,库仑通过扭秤实验(图 1-1)建立了库仑定律,可定量描述两带电体间的相互作用力。

带电体之间的相互作用力,与带电体所带电量以及相互之间的距离有关,还与它们的大小、形状、电荷在其上的分布情况有关。当带电体的线度比它到其他带电体的距离小得多时,可以忽略该带电体的形状、大小及其电荷分布对相互作用力的影响,把它看成是一个点电荷。

点电荷是从实际带电体中抽象出来的理想模型,与力学中的质点的概念类似,只具有相对的意义。点电荷本身不一定是一个非常小的带电体,只要在所研究的问题中,它的几何线度可忽略,就可看作一个几何的点。

库仑定律内容如下:

真空中两个静止点电荷  $q_1$  和  $q_2$  之间的相互作用力  $F$  的大小与  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比,与它们之间距离  $r$  的平方成反比,作用力的方向沿着它们的连线;同号电荷相斥,异号电荷相吸。

用公式表示为

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

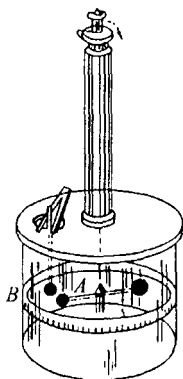


图 1-1 库仑扭秤

式中,  $k$  为比例系数,  $k$  的数值、量纲与单位制的选取有关, 在国际单位制(SI)中, 将比例系数写成

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

其中,  $\epsilon_0$  称为真空电容率或真空介电常数, 它是物理学中一个基本常数, 其 1986 年推荐值为

$$\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

式(1-1)可改写为矢量形式,  $q_1$  对  $q_2$  的作用力用  $F_{12}$  表示,  $\hat{r}_{12}$  表示由  $q_1$  指向  $q_2$  的单位矢量(见图 1-2(a)), 则可得

$$F_{12} = kq_1q_2 \hat{r}_{12}/r^2 \quad (1-2)$$

同理,  $q_2$  对  $q_1$  的作用力为  $F_{21}$ , 则

$$F_{21} = kq_1q_2 \hat{r}_{21}/r^2 \quad (1-3)$$

式中,  $\hat{r}_{21}$  是由  $q_2$  指向  $q_1$  的单位矢量(见图 1-2(b))。

由式(1-2)可知, 当  $q_1$ 、 $q_2$  同号时,  $q_1q_2 > 0$ ,  $F_{12}$  与  $\hat{r}_{12}$  同向,  $q_1$ 、 $q_2$  之间是排斥力, 当  $q_1$ 、 $q_2$  异号时,  $q_1q_2 < 0$ ,  $F_{12}$  与  $\hat{r}_{12}$  反向,  $q_1$ 、 $q_2$  之间是吸引力。

比较式(1-2)和式(1-3), 由于  $\hat{r}_{12} = -\hat{r}_{21}$ , 所以  $F_{21} = -F_{12}$ , 说明静止点电荷之间的相互作用满足牛顿第三定律。

### 1.2.2 静电力的叠加原理

两个静止点电荷之间的相互作用遵循库仑定律, 实验证明, 当空间存在多个静止点电荷时, 作用于每个点电荷上的总静电力等于其他点电荷单独存在时, 作用于该电荷的静电力的矢量和。这称为静电力的叠加原理, 也叫力的独立作用原理。用数学公式表示为

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (1-4)$$

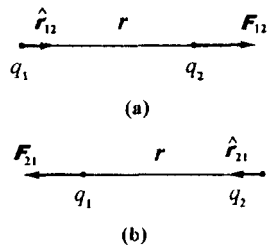


图 1-2 库仑定律( $q_1$ 、 $q_2$  同号的情况)

这说明任意两个静止点电荷之间的作用力,不论周围是否存在其他电荷,总是符合库仑定律的。

## 1.3 电场 电场强度

### 1.3.1 电 场

两个点电荷之间的相互作用力是如何传递的呢?历史上围绕这个问题有过长期的争论。一种观点认为,电荷之间的作用是“超距作用”,即带电体之间的作用力,不需要任何媒质,也不需要时间,而是直接地、瞬时地发生,传递速度为无限大;另一种观点认为,静止电荷之间的作用是近距离作用,即带电体之间的作用力是通过空间某种媒质来传递的,传递的速度是有限的。曾有人认为这种媒质类似弹性媒质——称为以太。近代物理学发展证实了“以太”并不存在,电荷之间的相互作用是通过电荷周围的一种特殊物质——电场来传递的,即电荷能在其周围产生电场(运动电荷还能产生磁场),电场的基本性质是对于处在其中的其他电荷有力的作用,这种力称为电场力。电场力以极快的速度传递(光速),但传递是需要时间的,说明了近距离观点是正确的。电荷之间的相互作用可概括为

电荷  $\longleftrightarrow$  电场  $\longleftrightarrow$  电荷

电场是一种特殊物质。它与实物粒子一样,具有质量、能量和动量,而且可以与实物粒子相互转化,它能够离开电荷而独立存在,以有限速度(光速)在空间传播,几种电磁场可共同占有同一空间。

### 1.3.2 电场强度

电场对处于其中的电荷的作用力与该处电场的强弱有关。在电场中放入一个试探电荷  $q_0$  来研究电场的强弱,试探电荷的几何线度要小到足以被看作一个点电荷,因而可用它检测电场中某点的性质,

试探电荷的电量也必须充分小,不至于因为它而影响原电场的分布。把产生电场的电荷又叫做源电荷,把电场中所要研究的点  $P$  叫做场点。

将试探电荷  $q_0$  放在电荷  $Q$  产生的电场中  $P$  点处,根据库仑定律,  $q_0$  所受的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{Qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1-5)$$

从式(1-5)可看出,  $q_0$  所受的力  $\mathbf{F}$  不仅与场源电荷  $Q$ 、场点位矢  $\mathbf{r}$  有关,还与试探电荷  $q_0$  有关,若在电场同一处分别放入试探电荷  $2q_0$ 、 $3q_0$ ... ,则电场力  $\mathbf{F}$  也相继变为  $2\mathbf{F}$ 、 $3\mathbf{F}$ ... ,可见,  $\mathbf{F}$  不能唯一确定电场中各点的性质。若考虑比值  $\mathbf{F}/q_0$ ,由式(1-5)可知,它的大小和方向唯一地由  $Q$  和  $\mathbf{r}$  确定,与试探电荷  $q_0$  无关,它反映了电场本身的性质,用它来描述电场是合适的。我们称它为电场强度,简称场强,用  $\mathbf{E}$  表示,即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (1-6)$$

用文字表述为:电场强度是表征空间每一点电场特性的物理量,其大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小,其方向是正电荷在该点所受电场力的方向。

电场中,空间不同点的场强,其大小和方向一般都是不同的,场强是空间坐标的矢量函数,电场是矢量场。如果电场中各点的场强其大小和方向都相同,则称此电场为匀强电场。

电场强度的单位是牛顿/库仑,以后可知,场强的单位也可是伏特/米。

### 1.3.3 电场强度的计算

#### 1. 点电荷的场强

如图 1-3 所示,在点电荷  $q$  的电场中,距离  $q$  为  $r$  的  $P$  点处放一

试探电荷  $q_0$ , 由库仑定律可得  $q_0$  所受电场力为

$$F = \frac{qq_0 \hat{r}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

由场强定义式(1-6)得  $P$  点场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (1-7)$$

由上式可知, 当  $q > 0$  时,  $E$  与  $\hat{r}$  同向; 当  $q < 0$  时,  $E$  与  $\hat{r}$  反向, 如图 1-3(b) 所示。式中  $\hat{r}$  是源点到场点方向的单位矢量。

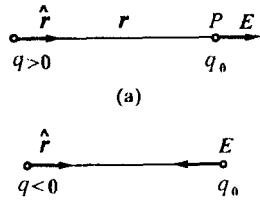


图 1-3 点电荷的场强

## 2. 点电荷系的场强 场强的叠加原理

在多个点电荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  产生的电场中,  $P$  点处放一试探电荷  $q_0$ , 根据静电力叠加原理,  $q_0$  所受的合力为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$$

由场强定义式可得

$$E = \frac{F}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{q_0} = \sum E_i \quad (1-8)$$

$E_i$  表示  $q_i$  单独存在时在  $P$  点产生的场强。

式(1-8)表示: 点电荷系在某点产生的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。这就是场强的叠加原理。

把式(1-7)代入式(1-8)可得点电荷系场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \quad (1-9)$$

式中,  $r_i$  是  $q_i$  到  $P$  点的距离,  $\hat{r}_i$  是  $q_i$  到  $P$  点的单位矢量。

### 例题 1.1 计算电偶极子的电场强度

设两个相距很近等量异号的点电荷之间的距离为  $l$ , 场点到  $l$  中点  $O$  的距离为  $r, l \ll r. l$  由  $-q$  指向  $+q$ , 则由这两点电荷组成的点

电荷系称为电偶极子。定义电偶极子的电偶极矩为

$$\mathbf{p} = ql \tag{1-10}$$

它是表征电偶极子整体特性的物理量。电偶极子是电磁学中的一个重要模型，在研究电介质的极化和电磁波辐射等问题时，都要用到它。

下面计算电偶极子在  $l$  的延长线上一点  $P$  的场强和在  $l$  中垂线上一点  $Q$  的场强，见图 1-4。

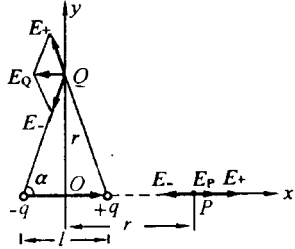


图 1-4 电偶极子的场强

$P$  点的场强

$$\begin{aligned} E_p &= E_+ + E_- = \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(r - \frac{l}{2})^2} - \frac{1}{(r + \frac{l}{2})^2} \right] \mathbf{i} = \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2rl}{[r^2 - (\frac{l}{2})^2]^2} \mathbf{i} \end{aligned}$$

式中， $E_+$  为  $+q$  在  $P$  点产生的场强， $(r - \frac{l}{2})$  为  $+q$  到  $P$  点的距离， $E_-$  为  $-q$  在  $P$  点产生的场强， $(r + \frac{l}{2})$  为  $-q$  到  $P$  点的距离。坐标系如图 1-4 所示。

考虑到  $l \ll r$ ， $2rl/[r^2 - (\frac{l}{2})^2]^2 \approx 2l/r^3$ ， $\mathbf{p} = ql \mathbf{i}$

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3} \tag{1-11}$$

$Q$  点的场强

$\pm q$  在  $Q$  点的场强大小相等，方向分别沿  $\pm q$  与  $Q$  的连线，如图 1-4 所示。由对称性分析可知  $E_+$  和  $E_-$  在  $y$  方向的分量大小相等，方向相反，相互抵消，合场强的大小为  $2E^+ \cos\alpha$ ，方向沿  $x$  轴反方向， $\alpha$  为连线与电偶极子轴的夹角。



$$E_Q = E^+ + E^- = -2E^+ \cos\alpha$$

$$\text{其中, } E^+ = E^- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + (\frac{l}{2})^2}, \quad \cos\alpha = \frac{l}{2[r^2 + (\frac{l}{2})^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{可得} \quad E_Q = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{l}{[r^2 + (\frac{l}{2})^2]^{\frac{3}{2}}} i$$

考虑到  $l \ll r$ ,  $l/[r^2 + (\frac{l}{2})^2]^{\frac{3}{2}} \approx l/r^3$ , 可得

$$E_Q = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \quad (1-12)$$

上述结果表明,电偶极子在远处的场强取决于  $q$  和  $l$  的乘积,并与距离  $r$  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。

### 3. 电荷连续分布带电体的场强

任何电荷连续分布的带电体可看成是许多电荷元的集合,每一个电荷元可看成一个点电荷,电荷元  $dq$  在场点  $P$  的场强为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$$

式中,  $\hat{r}$  是电荷元指向场点的单位矢量。由场强叠加原理,可求得带电体在  $P$  点的场强

$$E = \int dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (1-13)$$

电荷的分布一般有三种模型。

(1) 体分布 电荷分布在带电体内。引入电荷体密度的概念,定义

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV} \quad (1-14)$$

为电荷体密度。其物理意义为单位体积内的电量。电荷元的电量可表示为

$$dq = \rho dV$$