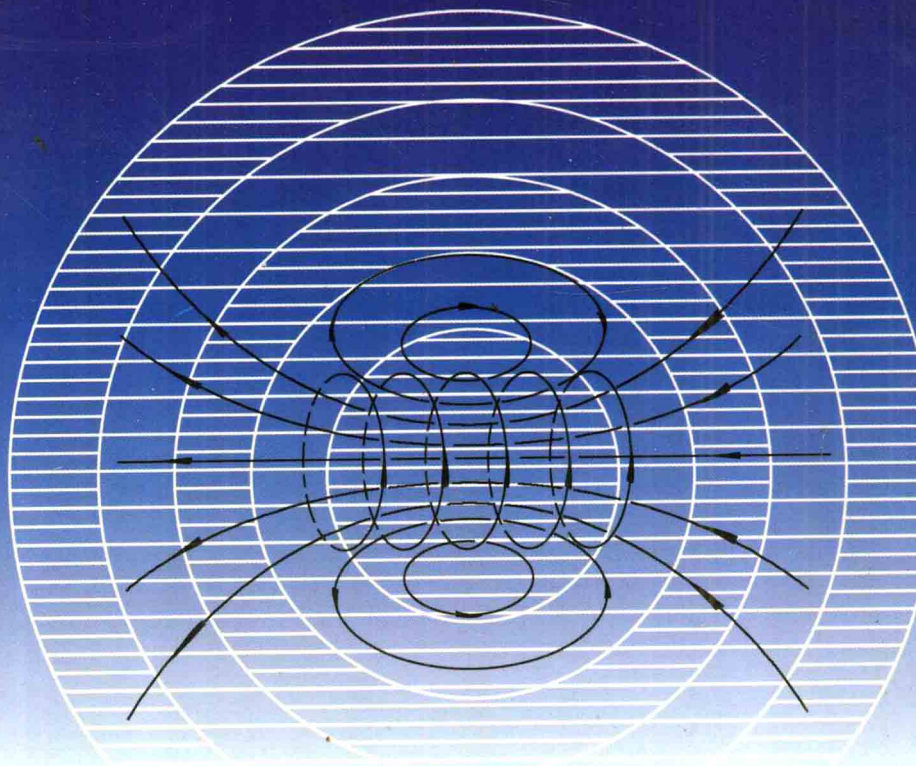


中学生物理高阶论坛丛书

大学物理学

(专科本)

甘承泰 谢兴盛 袁心平 编



(下册)



电子科技大学出版社

中学生物理高阶论坛丛书

大学物理学

(专科本)

(下册)

甘承泰 谢兴盛 袁心平 编

电子科技大学出版社

大学物理学

(专科本)

(下册)

甘承泰 谢兴盛 袁心平 编

出版:电子科技大学出版社(成都建设北路二段四号)

责任编辑:肖士璋 周敏

发行:电子科技大学出版社

印刷:北京市朝教印刷厂

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:8.875 字数:237千字

版次:1994年1月第一版

印次:2005年10月第二次印刷

书号:ISBN 7-81016-994-7/C·33

定价:23.50元

■版权所有 侵权必究■

◆本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

前 言

为适应工科专科各专业培养高级工程技术应用型人才的需要,本教材贯彻“以应用为目的,以必需、够用为度”的原则,内容简练,深广度适当,选材注重结合实际,加强了对新技术物理基础的介绍,力求突出应用特色。

本书是大学三年(或二年)制工科专科的物理教材,也可供专科层次的成人教育工科类各专业采用。考虑到某些学校第一学期开设物理课的教学计划需要,本书增编了第零章(数学预备知识),增用6~8学时即可基本满足物理课程对微积分知识的要求。

本书采用国际单位制(SI),并统一采用全国自然科学名词审定委员会1988年公布的物理学名词,如原气体分子运动论现订正为气体动理论等。

全书分上、下两册。上册内容有绪论、力学、机械振动和机械波、气体动理论和热力学基础;下册内容有电磁学、波动光学和新技术物理基础。其中绪论、第零~三章和第十三章由谢兴盛编写,第四~七章和第十二章由袁心平编写,甘承泰编写第八~十一章并负责全书的组织与统稿。

本教材在编写与试用中,得到了电子科技大学基础物理教研室老师们关心与协助,校教务处也给予了大力支持,在此向他们一并深表谢意。

本教材经四川大学物理系郭士堃教授审查,并对书稿提出了许多宝贵的意见,编者在此谨致以深切的谢意。

由于编者水平有限,本书难免有缺点和错误,诚恳希望使用本教材的师生提出宝贵意见,以便再版时修改。

编 者

目 录

第八章 静电场

§ 8-1 电荷 库仑定律	(1)
§ 8-2 电场 电场强度矢量 电场线	(5)
§ 8-3 电通量 高斯定理	(15)
§ 8-4 静电场力的功 电势 等势面	(24)
§ 8-5 电场强度与电势的关系	(35)
§ 8-6 静电场中的导体	(37)
§ 8-7 静电场中的电介质	(44)
§ 8-8 电容器及其电容	(49)
§ 8-9 电场的能量	(56)
§ 8-10 静电技术应用简介	(58)
本章内容提要	(62)
思考题	(65)
习题	(72)

第九章 稳恒磁场

§ 9-1 磁现象	(80)
§ 9-2 磁场 磁感(应)强度矢量	(81)
§ 9-3 毕奥-萨伐尔定律	(84)
§ 9-4 磁通量 磁场的高斯定理	(91)
§ 9-5 安培环路定律	(94)
§ 9-6 安培定律	(101)
§ 9-7 磁场对运动电荷的作用力	(107)

§ 9-8 磁介质中的磁场	(113)
本章内容提要	(120)
思考题	(122)
习题	(128)

第十章 电磁感应

§ 10-1 电磁感应现象 楞次定律	(134)
§ 10-2 电动势 法拉第电磁感应定律	(136)
§ 10-3 动生电动势	(140)
§ 10-4 涡旋电场 感生电动势	(144)
§ 10-5 自感和互感	(149)
§ 10-6 磁场的能量	(153)
本章内容提要	(156)
思考题	(157)
习题	(161)

第十一章 电磁场理论的基本概念

§ 11-1 位移电流	(167)
§ 11-2 麦克斯韦方程组	(170)
§ 11-3 电磁波的辐射和传播	(172)
本章内容提要	(175)
习题	(175)

第十二章 波动光学

§ 12-1 获得相干光的方法	(176)
§ 12-2 薄膜干涉	(186)
§ 12-3 光的衍射	(196)
§ 12-4 衍射光栅	(202)
§ 12-5 光的偏振	(207)
本章内容提要	(213)

思考题	(214)
习题	(219)

第十三章 新技术物理基础

§ 13-1 激光产生的原理	(225)
§ 13-2 激光器	(230)
§ 13-3 激光的特性及其应用	(231)
§ 13-4 等离子体	(233)
§ 13-5 等离子体的主要特征量	(235)
§ 13-6 等离子体的导电性和介电性	(241)
§ 13-7 等离子体的应用	(243)
§ 13-8 非电量转换为电量的典型方法及应用	(246)
§ 13-9 核辐射及其应用	(253)
习题	(263)

附 录

附录 I 国际单位制(SI)简介	(264)
附录 II 物理学名词订正	(266)
附录 III 常用物理基本常数表	(268)

思考题与习题答案

第八章 静 电 场

电磁学是研究电磁现象及其基本规律的一门学科。电磁学的研究对现代科学理论和生产技术的发展都起着十分重要的作用。

本章先研究电现象,下一章研究磁现象以及电现象和磁现象的联系,最后简单介绍统一的电磁运动的规律。

本章基本要求

1. 理解电场强度的概念和场强迭加原理,能用点电荷场的迭加法计算简单电荷分布的电场。
2. 理解电通量的概念和高斯定理的意义,能用高斯定理求解有特定对称性分布的电荷的电场。
3. 理解静电场环路定理的意义和电势的概念,会用电势迭加法和场强的线积分求简单电荷分布的电势。
4. 了解电势能、电势差、电场力和功之间的关系。了解电场的能量。
5. 了解静电技术的一些应用。

§ 8-1 电 荷 库仑定律

电荷 大家已经知道,任何物质都由分子、原子组成;原子由原子核和电子组成;原子核中包含有带正电的质子和不带电的中子。电子带负电,因受核的吸引而绕核旋转。质子和电子所带电量的绝对值是相等的,其电荷的最小单位是 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑(C),称为基本电荷。其他带电体所带的电量都是这个基本电荷的整数倍。电荷的这

种只能取分立的、不连续的值的性质叫做电荷的量子化。

使物体带电的起电过程(摩擦起电、感应起电和接触带电等)和电的中和过程都是电荷的转移过程。由于电荷的转移使原来不带电的物体或因失去一些电子而带上正电,或因获得多余的电子而带上负电。大量的实验证明:若把参与相互作用的几个物体或粒子叫做一个系统,而整个系统与外界没有电荷交换,那么不管在系统内发生了什么样的变化,整个系统电量的代数和始终保持不变。这个结论叫做电荷守恒定律。它是物理学中的一条基本定律,无论在宏观现象中,或者在原子、原子核和基本粒子范围内,电荷守恒定律都是正确的。

库仑定律 当带电体的线度比起它与其他带电体之间的距离来充分小,因而其大小和形状可以忽略时,则称该带电体为点带电体,简称点电荷。点电荷是抽象出来的一个模型,它类似于力学中质点和刚体的概念。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。

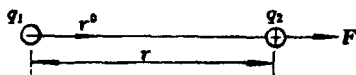


图 8-1 库仑定律

1785 年法国科学家库仑用扭称实验对两个点电荷间的相互作用力作了定量的测定,得出如下定律:在真空中,两个点电荷之间的相互作用力 F 的大小与两点电荷的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比;力的方向沿两个点电荷的连线,同性相斥,异性相吸。数学表达式为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} r^0$$

这就是库仑定律。式中 r^0 是沿 q_1 和 q_2 的连线由施力电荷指向受力电荷的单位矢量,如图 8-1 所示。 k 是比例系数,其值取决于单位制的选择。在国际单位制(SI)中,电量 q 的单位为库仑(C),距离 r 的单位为米(m),力 F 的单位为牛顿(N),这时 k 的数值和单位为

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

为了今后由库仑定律导出的常用公式具有简洁的形式,这里令

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

式中 $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ 叫做真空电容率。这样,库仑定律的表达式写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8-1)$$

必须指出,真空中的库仑定律只能用于研究真空中点电荷之间的相互作用。

例 8-1 已知 α 粒子(氦原子核)的质量 $m = 6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 所带电量 $q = 3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。试比较两个 α 粒子之间的库仑力(静电力)和万有引力的大小。

解 设两个 α 粒子之间的距离为 r , 则它们之间的相互作用的库仑力为

$$F_e = k \frac{q^2}{r^2} \quad (k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)$$

万有引力为

$$F_g = G \frac{m^2}{r^2} \quad (G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)$$

两力之比

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{kq^2}{Gm^2} = 3.1 \times 10^{35}$$

此例结果表明,在微观粒子的相互作用中,万有引力比静电力小几十个数量级。所以在今后的静电问题中,完全可以不考虑万有引力的影响。

例 8-2 有如图 8-2 所示的三个点电荷,求作用在电荷 q_2 上的合力。设 $q_1 = -2.5 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_2 = 0.5 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_3 = 0.2 \times 10^{-6} \text{ C}$; $r_1 = 1.2 \text{ m}$, $r_2 = 0.5 \text{ m}$ 。

解 取如图所示的坐标系, i, j 分别表示 x, y 方向的单位矢量。因电荷 q_1 与 q_2 异号,其相互作用力为引力, q_1 对 q_2 的引力 F_{12} 的大小

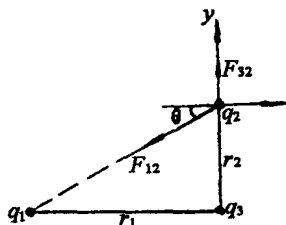


图 8-2 例 8-2 题图

为

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(r_1^2 + r_2^2)}$$

$$= \frac{2.5 \times 10^{-6} \times 0.5 \times 10^{-6}}{4 \times 3.14 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (1.2^2 + 0.5^2)} = 6.65 \times 10^{-3} \text{ N}$$

F_{12} 与 x 轴负方向的夹角为

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{r_2}{r_1} = \operatorname{arctg} \frac{0.5}{1.2} = 22^\circ 36'$$

所以 $F_{12} = -F_{12} \cos \theta i - F_{12} \sin \theta j = -6.14 \times 10^{-3} i - 2.56 \times 10^{-3} j$

电荷 q_3 与 q_2 同号, 其相互作用力为斥力, q_3 对 q_2 的斥力 F_{32} 的大小为

$$F_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_3 q_2}{r_2^2} = 3.60 \times 10^{-3} \text{ N}$$

F_{32} 的方向沿 y 轴方向, 则得

$$F_{32} = 3.60 \times 10^{-3} j$$

由上可得作用于 q_2 上的合力为

$$\begin{aligned} F &= F_{12} + F_{32} \\ &= (-6.14 \times 10^{-3} i - 2.56 \times 10^{-3} j) + 3.60 \times 10^{-3} j \\ &= -6.4 \times 10^{-3} i + 1.04 \times 10^{-3} j \end{aligned}$$

合力 F 的大小为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 6.23 \times 10^{-3} \text{ N}$$

合力方向与 x 轴正方向的夹角为

$$\alpha = \arctg \frac{F_y}{F_x} = \arctg \frac{1.04 \times 10^{-3}}{-6.14 \times 10^{-3}} = 170^\circ 24'$$

§ 8-2 电场 电场强度矢量 电场线

电场 库仑定律说明了两点电荷间相互作用的定量关系,但未指明这种相互作用力是怎样传递的?人们通过反复的研究得知,任何电荷的周围都存在一种特殊的物质,这种物质就是电场。一个电荷对另一个电荷的作用力是通过其电场来进行传递的,即

$$\text{电荷 } q_1 \xrightleftharpoons[\text{作用}]{\text{激发}} \boxed{\text{电 场}} \xrightleftharpoons[\text{激发}]{\text{作用}} \text{电荷 } q_2$$

电场是客观存在的物质,其物质性表现在除它对处在场中的电荷有力的作用外,电场还具有能量和动量。当然电场这种物质和一般实物粒子不同,例如,一个实物粒子所占据的空间不能再为其他粒子所占据,而几个电荷所激发的电场可以同时占据同一空间;又如在真空中电场的传播速度远远大于实物粒子的运动速度。

相对于观察者静止的电荷所激发的电场称为**静电场**。本章所研究的电场专指静电场。下面对电场进行定量研究。

电场强度矢量 若空间存在一个带电体,如图 8-3 所示,则它将在周围空间激发电场。上面已知,电场的基本性质是它对电荷施加作

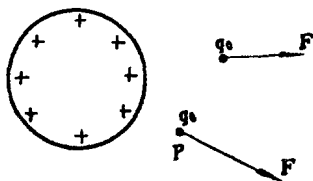


图 8-3 电场对电荷施力作用

用力。因此我们可以引进一个试验电荷 q_0 ,通过观察 q_0 在场中不同点的受力情况来研究电场的性质。

为了保证测量的准确性,试验电荷所带电量 q_0 必须充分小,以至

把它引入电场后几乎不影响原来电场的分布;同时要求试验电荷的几何线度充分小,以保证观测结果能反映它所在处的电场性质。

实验表明,在电场中不同点, q_0 所受电场力的大小和方向一般是不同的。在电场中任一给定点 p , 试验电荷 q_0 所受的电场力 F 的大小与 q_0 成正比(q_0 增加几倍, F 的大小也增加几倍), 而 F 的方向不变。可见, 对于电场中任一给定点 p , F/q_0 的大小和方向都与 q_0 无关。它反映了 p 点处电场的性质。因此我们把它定义为电场强度矢量, 简称场强, 用 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8-2)$$

因为 $q_0 = 1$ 时, $E = F$, 所以可以把电场强度矢量的定义用文字表述为:静电场中任一点的电场强度是一矢量, 其大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小, 其方向可以由 $E = F/q_0$ 定出, 其中 q_0 为试验电荷的电量, q_0 可正、可负, F 为试验电荷在该处所受的电场力。

在 SI 单位制中, 电场强度的单位由式(8-2)可以看出应是牛顿/库仑(N/C), 以后将看到, 场强的单位还可以写作伏特/米(V/m)。

一般说来, 电场中空间不同点的场强, 其大小和方向都可以是不同的。电场是矢量场, 场强是空间坐标的矢量函数。如果电场中空间各点场强的大小和方向都相同, 则这种电场就叫做均匀电场, 它只是一种特殊情况。

电场强度的计算 如果已知场源电荷的分布, 那么根据电场强度的定义式(8-2)及下面要介绍的场强迭加原理, 在原则上就可计算电场中各点的场强。

1. 点电荷的场强

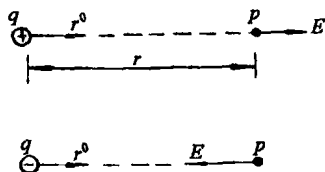
设在真空中有一点电荷 q 在其周围真空中激发电场, p 为电场中任意一点, 它到 q 的距离为 r 。若把一试验电荷 q_0 放到 p 点, 根据库仑定律, 作用在 q_0 上的电场力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} r^0$$

式中 r^0 是从电荷 q 指向 p 点方向上的单位矢量。再由电场强度的定

义式(8-2),就得到 p 点处的场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (8-3)$$



8-4 点电荷的场强方向

上式表明,在点电荷的电场图 8-4 点电荷的场强方向中,任一点的场强 E 的大小与场源电荷的电量 q 成正比,与观测点到点电荷的距离平方成反比。如果 q 为正电荷,场强 E 的方向与 $\mathbf{r}^0$ 的方向一致,即背离 q ;如果 q 为负电荷,场强 E 的方向与 $\mathbf{r}^0$ 的方向相反,即指向 q ,如图 8-4 所示。

2. 点电荷系的电场场强迭加原理

如果在真空中激发电场的不止一个点电荷,而是由多个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系。首先我们把试验电荷 q_0 放进电场中的观测点 p 处,由库仑定律可计算出各点电荷单独存在时作用于 q_0 上的力分别为 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 。实验证明,当这些点电荷同时存在时,作用在 q_0 上的合力为各力的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$$

根据电场强度的定义式(8-2)可得所有点电荷在观测点 p 处共同激发的合场强为

$$\begin{aligned} E &= \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} \mathbf{r}_1^0 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2^2} \mathbf{r}_2^0 + \dots + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_n}{r_n^2} \mathbf{r}_n^0 \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{r}_1^0, \mathbf{r}_2^0, \dots, \mathbf{r}_n^0$ 分别表示各点电荷指向 p 点方向上的单位矢量。由式(8-3)可将上式写为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i^0 \quad (8-4)$$

上式说明,在由点电荷系所激发的电场中某点 p 的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点所激发的场强的矢量和。这一结论称为场强的迭加原理。

例 8-3 试求电偶极子中垂线上一点 p 的场强。

两个等量异号点电荷相距 l 如图 8-5 所示,当 $r \gg l$ 时,这样的一对点电荷所构成的电荷系叫做电偶极子。从 $-q$ 到 $+q$ 的矢径 l 叫做电偶极子的轴,乘积 ql 叫做电偶极矩(简称电矩),用符号 p_e 表示,即

$$p_e = ql \quad (8-5)$$

按点电荷的场强公式(8-3), $+q$ 和 $-q$ 在 p 点处激发的场强分别为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_+^2} \mathbf{r}_+^0$$

$$E_- = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_-^2} \mathbf{r}_-^0$$

由场强迭加原理, p 点处的合场强 $E = E_+ + E_-$ 。因为 E_+ 和 E_- 方向不同,应按下述方法求其矢量和。

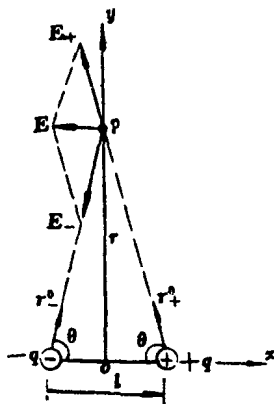


图 8-5 电偶极子的场分布

在 o 点建立图 8-5 所示坐标系,则 E_+ 和 E_- 的分量大小分别为 $E_{+,x} = E_{-,x} = E_+ \cos\theta$ 和 $E_{+,y} = E_{-,y} = E_+ \sin\theta$ 。注意到二者的 y 分量等

值反向,故 $E_y = E_{+y} - E_{-y} = 0$, 故得

$$E = E_x = E_{+x} + E_{-x} = 2E_{+x} = 2E_+ \cos\theta$$

而
$$\cos\theta = \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + (\frac{l}{2})^2}}$$

故有

$$E = 2 \times \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + (\frac{l}{2})^2} \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + (\frac{l}{2})^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r^2 + \frac{l^2}{4})^{\frac{3}{2}}}$$

因为 $r \gg l$, $\frac{l^2}{4}$ 项可略去, 因此

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{r^3}$$

E 的方向由图知与 p_e 的方向相反。

3. 连续分布电荷的场强

在实际问题中所遇到的电场,大多数是由电荷连续分布的带电体所激发。一般情况下,不能把整个带电体看作点电荷,这时要计算任意带电体所产生的场强,可把带电体分割成无穷多个电荷元 dq , 每一个电荷元可视为点电荷,它在某点处激发的场强为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}^0$$

式中 $\mathbf{r}^0$ 为由 dq 指向该点方向上的单位矢量。根据场强的迭加原理,带电体在给定点的场强是各 dq 在该点所激发的场强的矢量和,即

$$E = \int dE = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (8-6)$$

积分遍及整个场源电荷。

要求出上式的积分,还需要知道场源电荷分布的具体情况。一般说来,连续分布的电荷可分为线分布、面分布和体分布三种情况。所谓电荷的线分布,是电荷分布在一条不考虑粗细的线上或棒上,电荷

的面分布则是指电荷分布在不考虑厚度的面上。对于这三种分布,可分别引入线电荷密度 λ ——带电线或带电细棒的单位长度上带有的电荷;面电荷密度 σ ——带电面的单位面积上所带的电荷;体电荷密度 ρ ——带电体单位体积内所带的电荷。若三种电荷分布情况下,相应的电荷密度已知时,则可在带电线上取线元 dl ,所带电荷 $dq = \lambda dl$;在带电面上取面积元 dS ,所带电荷为 $dq = \sigma dS$;在带电体上取体积元 dV ,则有 $dq = \rho dV$ 。它们都可以视为点电荷,于是,根据场强迭加原理,电荷连续分布的带电体所激发的电场的场强可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{线分布 } E &= \int dE = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \mathbf{r}^0 \\ \text{面分布 } E &= \int dE = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dS}{r^2} \mathbf{r}^0 \\ \text{体分布 } E &= \int dE = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho dV}{r^2} \mathbf{r}^0 \end{aligned} \right\} \quad (8-7)$$

式中各 $\mathbf{r}^0$ 分别是从小元 dl , 面元 dS , 体元 dV 指向场中给定点方向上的单位矢量。然而式(8-7)是一些矢量积分式,一般不便于直接计算。可先将 dE 沿直角坐标轴分解成 dE_x 、 dE_y 、 dE_z , 然后分别对它们积分,得 E 的三个分量式

$$E_x = \int dE_x \quad E_y = \int dE_y \quad E_z = \int dE_z$$

最后对这三个分量求矢量和,得到场强 E 为

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

由此可得 E 的大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

E 的方向则用它的三个方向余弦表示。

必须指出,仅当各电荷元激发的诸 dE 同向时,才能由式(8-7)的矢量积分变为标量积分,用 $E = \int dE$ 求其总场强。

例 8-4 试求长度为 L , 带电量为 q 的均匀带电直线延长线上 p 点的场强, 设 p 点到线端的距离为 a 。

解 在直线上取线元 dr , 如图 8-6 所示, 它带的电荷为