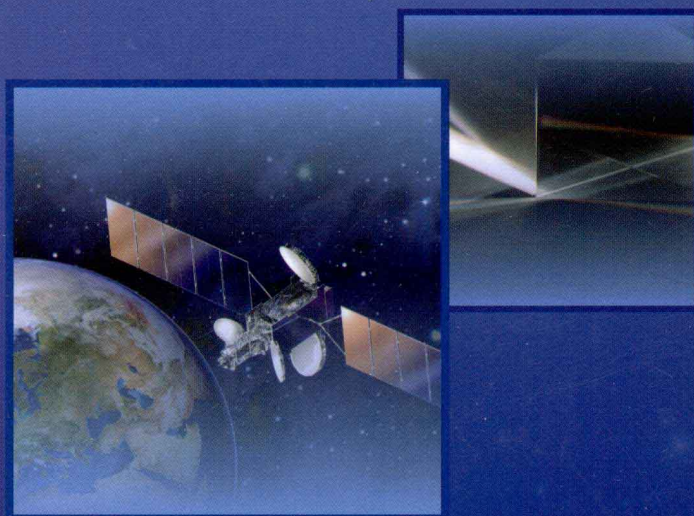


大学物理教程 下册

(第二版)

主编 宋 青 万桂新



科学出版社

大学物理教程

(第二版)

(下册)

主 编 宋 青 万桂新
副主编 常文利 张 磊

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书依据物理学与天文学教学指导委员会颁发的“非物理类工科大学物理课程教学基本要求”,结合编者多年的教学实践和教改经验编写而成.在编写上没有沿袭传统的思路,而是采用一种新的知识体系(以物质世界的层次和存在形式为主线,按照由经典到近代、由少体问题到多体问题、由线性系统到复杂系统的思路)来介绍大学物理的教学内容.

全书分为上、下两册.上册内容包括宏观低速物质的运动规律、宏观高速物质的运动规律及振动和经典波等.下册内容包括电磁场和相互作用、多粒子体系的热物理及量子物理学基础等.

本书可用作普通高等院校各专业学生的教材,也可作为教师或相关人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程.下册/宋青,万桂新主编.—2版.—北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034223-2

I. ①大… II. ①宋…②万… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 085525 号

责任编辑:郝泽满 / 责任校对:刘小梅
责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 6 月第 二 版 印张:17 1/2

2012 年 6 月第四次印刷 字数:380 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第四篇 电磁场和相互作用

第 9 章 静电场	3
9.1 电荷 库仑定律	3
9.1.1 电荷及电荷守恒定律	3
9.1.2 库仑定律	4
9.2 电场 电场强度	5
9.2.1 电场	5
9.2.2 电场强度	6
9.2.3 场强叠加原理	7
9.3 静电场的高斯定理及其应用	12
9.3.1 电场线	12
9.3.2 电通量	13
9.3.3 静电场的高斯定理	15
9.3.4 高斯定理的应用	17
9.4 静电场的环路定理 电势	22
9.4.1 静电场的环路定理	22
9.4.2 电势能	23
9.4.3 电势 电势差	24
9.4.4 电势的计算	25
9.5 电场强度与电势的关系	28
9.5.1 等势面	28
9.5.2 场强与电势的梯度关系	29
9.6 静电场中的导体	31
9.6.1 导体的静电平衡	31
9.6.2 空腔导体和静电屏蔽	33
9.7 静电场中的电介质	35
9.7.1 电介质的极化	35
9.7.2 电介质中的场强 极化电荷面密度	37
9.7.3 电介质中的高斯定理 电位移矢量	38
9.8 电容 电容器	40
9.8.1 孤立导体的电容	40
9.8.2 电容器的电容	40
9.8.3 电容器的串联和并联	42

9.9 静电场的能量	44
9.9.1 电容器的能量	44
9.9.2 电场能量 电场能量密度	45
本章提要	47
习题	49
第10章 稳恒电流的磁场	52
10.1 稳恒电流 电动势	52
10.1.1 电流强度和电流密度	52
10.1.2 稳恒电流和稳恒电场	54
10.1.3 电源电动势	56
10.2 磁场 磁感应强度	57
10.2.1 磁现象	57
10.2.2 磁场	59
10.2.3 磁感应强度	60
10.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用	61
10.3.1 电流元	61
10.3.2 毕奥-萨伐尔定律	62
10.3.3 典型电流的磁场计算——毕-萨定律的应用	63
10.3.4 圆电流的磁矩	68
10.3.5 运动电荷激发的磁场	69
10.4 磁场的高斯定理和安培环路定理	72
10.4.1 高斯定理	72
10.4.2 安培环路定理	76
10.5 磁场对运动电荷及载流体的作用	84
10.5.1 带电粒子在磁场中的运动	85
10.5.2 霍尔效应	88
10.5.3 磁场对载流导线的作用 安培定律	90
10.5.4 磁场对载流线圈的作用	95
10.5.5 磁力的功	97
10.6 磁介质	99
10.6.1 磁介质的分类	99
10.6.2 弱磁介质的磁化	101
10.6.3 磁介质磁场的基本定理	102
10.6.4 铁磁质	105
本章提要	108
习题	110
第11章 变化的电磁场	113
11.1 电磁感应的基本规律	113
11.1.1 电磁感应实验现象	113

11.1.2 楞次定律	115
11.1.3 法拉第电磁感应定律	116
11.2 动生电动势	120
11.3 感生电动势 感生电场	125
11.3.1 感生电动势	125
11.3.2 感生电场	126
11.3.3 电子感应加速器——用感生电场来加速电子	128
11.3.4 涡电流	130
11.4 自感和互感	132
11.4.1 自感现象和自感系数	132
11.4.2 互感现象和互感电动势	134
11.5 磁场能量	137
11.5.1 自感磁能	137
11.5.2 磁场的能量密度	138
11.6 位移电流	141
11.6.1 位移电流	141
11.6.2 全电流定律	143
11.7 麦克斯韦方程组的积分形式	145
本章提要	148
习题	150

第五篇 多粒子体系的热物理

第12章 气体动理论	155
12.1 物质的微观模型 统计规律性	155
12.1.1 宏观物体由大量分子或原子组成	155
12.1.2 分子在永不停息地做无规则运动	155
12.1.3 分子之间存在相互作用力	156
12.1.4 统计规律性	157
12.2 状态参量 平衡态 准静态过程	159
12.2.1 状态参量	159
12.2.2 平衡态	160
12.2.3 准静态过程	161
12.3 理想气体的状态方程	162
12.4 理想气体的压强和温度公式	164
12.4.1 理想气体的微观模型	164
12.4.2 理想气体的压强公式	165
12.4.3 理想气体的温度公式	168
12.4.4 气体分子的方均根速率	169
12.5 能量均分定理 理想气体的内能	171

12.5.1 自由度	171
12.5.2 能量均分定理	173
12.5.3 理想气体的内能	174
12.6 麦克斯韦速率分布律	177
12.6.1 测定气体分子速率分布的实验	177
12.6.2 气体分子的速率分布	179
12.6.3 三种统计速率	181
12.7 分子的平均自由程和平均碰撞频率	185
12.7.1 分子间的碰撞	185
12.7.2 平均自由程和平均碰撞频率	186
本章提要	189
习题	190
第 13 章 热力学基础	192
13.1 内能 功 热量与热容	192
13.1.1 内能	192
13.1.2 功	192
13.1.3 热量与热容	194
13.2 热力学第一定律及其应用	195
13.2.1 热力学第一定律	195
13.2.2 热力学第一定律在各种等值过程中的应用	197
13.3 绝热过程	205
13.3.1 准静态绝热过程	206
13.3.2 绝热线与等温线	207
* 13.3.3 多方过程	208
13.4 循环过程 卡诺循环	211
13.4.1 循环过程	211
13.4.2 卡诺循环	214
13.5 热力学第二定律及其统计意义	221
13.5.1 热力学第二定律	221
* 13.5.2 两种表述的等价性	222
13.5.3 可逆过程与不可逆过程	223
* 13.5.4 卡诺定理	224
13.5.5 热力学第二定律的统计意义	225
本章提要	226
习题	227

第六篇 量子物理基础

第 14 章 量子力学基础	233
14.1 黑体辐射和普朗克量子化	233

14.1.1 黑体辐射现象	233
14.1.2 黑体辐射的实验结果	234
14.1.3 普朗克的能量量子化	235
14.2 光电效应和爱因斯坦光子说	237
14.2.1 光电效应实验	237
14.2.2 爱因斯坦光子说	238
14.2.3 康普顿散射	240
14.3 玻尔的氢原子理论	243
14.3.1 氢原子光谱	243
14.3.2 原子结构模型	243
14.3.3 玻尔的三点基本假设	244
14.3.4 氢原子的能级和光谱公式	245
14.4 德布罗意物质波	247
14.5 不确定关系	251
14.6 波函数 薛定谔方程	252
14.6.1 波函数	252
14.6.2 薛定谔方程	254
14.6.3 定态薛定谔方程	255
14.7 一维势场	256
14.7.1 一维无限深方势阱	256
14.7.2 隧道效应	258
14.8 氢原子结构的量子力学解释	259
14.8.1 氢原子的薛定谔方程	259
14.8.2 三个量子数	260
14.8.3 电子的概率分布	261
14.9 电子自旋和多电子原子结构	261
14.9.1 自旋	261
14.9.2 多电子原子	262
本章提要	264
习题	265
习题答案	267
参考文献	272

第四篇 电磁场和相互作用

第9章 静 电 场

电磁学是研究电磁现象及其规律的学科,是自然科学和现代工程技术的基础,被广泛应用于日常生活、国防科技、工农业生产电气化与自动化及生物学等各个领域。

本章从库仑定律和相对于观察者静止的点电荷模型出发引出“场”的基本概念,主要研究静电场的基本性质和规律,及其与导体和电介质的相互作用规律。

9.1 电荷 库仑定律

9.1.1 电荷及电荷守恒定律

早在古希腊时期,哲学家泰勒斯就发现被摩擦过的琥珀能吸引细谷壳,我国西汉末年也记载有摩擦过的玳瑁能够吸引微小的物体。这种绝缘体经过摩擦具有能够吸引微小物体的性质,称之为带电,并把带电体所带的电称为电荷。

通过对电荷的各种相互作用和效应的研究,人们认识到自然界中只存在两种电荷,美国物理学家富兰克林将其中的一种命名为正电荷,另一种命名为负电荷。同号电荷互相排斥,异号电荷互相吸引。电量是定量描述电荷多少的物理量,在国际单位制中,电量的单位为库仑(C)。

近代物理的发展使我们对带电现象的本质有了深入的了解。物质是由原子、分子组成的,而原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。原子核由质子和中子组成,质子带正电,中子不带电。一个质子和一个电子所带的电量在数值上相等。正常情况下,物体中任何一部分所含的电子总数和质子总数相等,对外不显示电性。但是在一定外因作用下,物体(或其中的一部分)得到或失去一定数量的电子,使得电子的总数和质子的总数不再相等,物体就呈现出电性。

实验证明,自然界中带电体所带的电量总是一个基本单元的整数倍。物体所带的电荷不是以连续的方式出现,而是以一个个不连续的量值出现的,电荷的这种特性叫做电荷的量子性。电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,通常用 e 表示。1913 年密立根通过油滴实验首先测定了 e 的量值,现代测量值为

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

电荷的最小单元如此之小,以致在研究宏观现象的绝大多数实验中,电荷的量子性表现不出来。

由摩擦起电和其他起电过程的大量实验表明,一切起电过程其实都是使物体上正、负电荷分离或转移的过程,在这个过程中,电荷既不能被创造也不能被消灭,即在一个孤立的系统中,无论发生怎样的物理过程,系统中所有正、负电荷的代数和始终保持不变,这就是电荷守恒定律。电荷守恒定律不仅适用于宏观领域,在微观领域也是成立的。

9.1.2 库仑定律

虽然电现象发现的很早,但是对电现象的系统定量研究是从18世纪末开始的,1785年法国物理学家库仑通过扭秤实验,首先对两个静止点电荷之间的电力作了定量研究,总结出了点电荷之间的相互作用规律——库仑定律。

“点电荷”是一个理想模型,当带电体本身的几何线度远小于它到其他带电体的距离时,该带电体就可以被看作点电荷。由于这种带电体的形状、大小及电荷的分布对相互作用力的影响可忽略,因而我们可以把它抽象成一个带电的几何点。

库仑定律可表述为:真空中两个静止的点电荷之间存在有相互作用力,作用力的大小与这两个点电荷的电量之积成正比,与两个点电荷之间的距离的平方成反比,作用力的方向沿着两点电荷的连线,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。其数学表达式为

$$\boldsymbol{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r$$

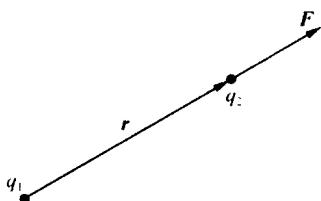


图 9-1 点电荷的相互作用

式中比例系数 k 由实验测定, $\boldsymbol{F}$ 表示 q_1 对 q_2 的作用力, r 为 q_1 、 q_2 之间的距离, $\boldsymbol{e}_r$ 为 q_2 相对于 q_1 的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的单位向量,如图 9-1 所示。当 q_1 、 q_2 为同号时, $\boldsymbol{F}$ 的方向与 $\boldsymbol{e}_r$ 的方向一致;当 q_1 、 q_2 为异号时, $\boldsymbol{F}$ 的方向与 $\boldsymbol{e}_r$ 的方向相反。在国际单位制中

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为了使库仑定律推导出的一些常用公式简化,比例系数 k 通常写成

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

式中 ϵ_0 称为真空介电常量,也称为真空电容率。在国际单位制中,其值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

则库仑定律又可以写成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-1)$$

或

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (9-2)$$

库仑定律讨论的是两个点电荷之间的静电力,当空间有两个以上的点电荷时,实验表明,其中每个点电荷所受到的总静电力等于其他点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和,这就是静电力的叠加原理。

库仑定律和静电力的叠加原理是关于静止电荷相互作用的两个基本实验定律,原则上,应用它们可以求出任意带电体之间的相互作用力。

例 9-1 已知带电粒子 a, b, c , 其所在位置如图 9-2 所示,带电量分别为 $q_a = 3.0\mu\text{C}, q_b = -6.0\mu\text{C}, q_c = -2.0\mu\text{C}$, 求带电粒子 a, b 对 c 的作用力。

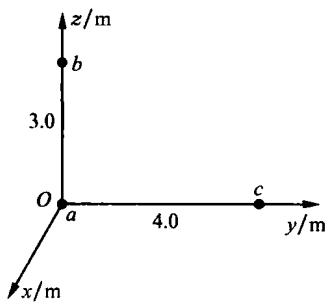


图 9-2

解 a 对 c 的作用力为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 &= \frac{q_a q_c}{4\pi \cdot \epsilon_0 r_{ac}^3} \mathbf{r}_{ac} \\ &= \frac{3.0 \times 10^{-6} \times (-2.0 \times 10^{-6})}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 4.0^3} \times 4\mathbf{j} = -3.4 \times 10^{-3} \mathbf{j} (\text{N}) \end{aligned}$$

b 对 c 的作用力为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_2 &= \frac{q_b q_c}{4\pi \cdot \epsilon_0 r_{bc}^3} \mathbf{r}_{bc} \\ &= \frac{(-6.0 \times 10^{-6}) \times (-2.0 \times 10^{-6})}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 5.0^3} \times (4\mathbf{j} - 3\mathbf{k}) \\ &= 3.5 \times 10^{-3} \mathbf{j} - 2.6 \times 10^{-3} \mathbf{k} (\text{N}) \end{aligned}$$

则 a, b 对 c 的作用力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = 0.1 \times 10^{-3} \mathbf{j} - 2.6 \times 10^{-3} \mathbf{k} (\text{N})$$

思考

1. 根据库仑定律,两点电荷间的作用力 F 与它们所带电荷量的乘积成正比,与它们之间距离 r 的平方成反比. 当 $r \rightarrow 0$ 时, $F \rightarrow \infty$, 对吗? 为什么?

2. 真空中两个点电荷间的相互作用力,是否会因为其他电荷的移近而改变?

9.2 电场 电场强度

9.2.1 电场

电荷之间的相互作用力是怎样实现的呢? 在科学发展史上曾经有

过超距作用和近距作用之争. 超距作用的观点认为, 一个电荷对另一个电荷的作用力是直接给予的, 不需要中间物质传递, 也不需要时间. 而近距作用的观点则认为, 电荷之间的相互作用是通过“以太”这种介质来传递的.

近代物理的理论和实验证明, “超距作用”的观点是错误的, 电力的传递虽然很快(约 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 但并非不需要时间; 而“近距作用”观点中的“以太”也是不存在的. 实际上, 电荷之间的相互作用是通过电场来传递的, 即

电荷 $\Leftrightarrow$ 电场 $\Leftrightarrow$ 电荷

场是物质存在的一种形式, 它与分子、原子所组成的实物一样具有质量、动量和能量等属性. 相对于观察者静止的电荷产生的电场称为静电场. 虽然静电场不能像一般实物那样看得见、摸得着, 但是我们可以从它的对外表现来发现它的存在. 静电场存在的重要表现有

- (1) 位于静电场中的任何带电体都会受到电场的作用力;
- (2) 当带电体在静电场中运动时, 电场力会对它做功.

以上两种重要表现是我们研究静电场的基础, 根据静电场的第一种表现, 我们将从力的观点出发引入, 引入电场强度; 根据静电场的第二种表现, 我们从功、能的观点出发, 引入电势.

9.2.2 电场强度

为了定量描述电场, 我们在电场中放入试验电荷 q_0 , 来观察它的受力情况. 作为试验电荷应符合下列要求: 首先, 它所带的电量足够小, 以致将其引入电场时, 在实验精度范围内不会对原有电场产生显著影响; 其次, 它的几何尺寸足够小, 可以看作点电荷, 因此在电场中它有确定的位置.

如图 9-3 所示, 在带电体周围的空间里用挂在丝线下端的带点小球作为试验电荷, 把它先后挂在 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 等位置上, 测量电场对它的作用力 F . F 的大小可由丝线偏离铅垂线的角度来确定. 实验发现, 在 a 、 b 、 c 位置处, 试验电荷受到的作用力依次减小, 而在 d 、 e 、 f 位置处, 试验电荷所受到的作用力也依次减弱, 但方向却与前者不同, 表明电场对位于不同点的试验电荷所施加的电力大小和方向都有可能不同——即电场是位置的函数.

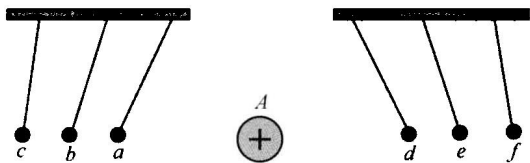


图 9-3 试验电荷在场中不同位置的受力情况

如果在某一固定点 P 处先后放置不同电量的试验电荷 $q_0, 2q_0$,

$3q_0, \dots$, 实验发现, 试验电荷受力的方向相同而大小不同, 分别为 F 、 $2F$ 、 $3F$, $\dots$, 如果把试验电荷换成 $-q_0$, 我们发现它所受的力变为 $-F$, 显然在同一点处有

$$\frac{F}{q_0} = \frac{2F}{2q_0} = \frac{3F}{3q_0} = \frac{-F}{-q_0} = \dots = \text{恒矢量}$$

可见, 在电场中某一固定点上, 比值 F/q_0 是大小和方向都与试验电荷无关的矢量, 反映了电场本身的性质. 由此我们定义电场中某点的电场强度 E (简称场强) 等于单位正电荷在该点所受的电场力, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9-3)$$

在国际单位制(SI)中, 电场强度的单位为 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$ 或 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$.

由式(9-3)可知, 当电场中任意点的场强 E 已知时, 则任一点电荷在该点受到的电场力为

$$F = qE \quad (9-4)$$

式中, 若 q 为正电荷, 其所受电场力的方向与场强方向一致; 若 q 为负电荷, 其所受电场力的方向与场强方向相反.

例 9-2 设真空中有一点电荷 q , 求该电荷所产生的电场强度分布.

解 如图 9-4 所示, 以点电荷所在处为原点 O , 在距离点电荷为 r 的任意一点 P 处放入一试验电荷 q_0 , 根据库仑定律, 其所受的作用力为

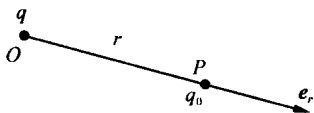


图 9-4 例 9-2 图

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} e_r$$

式中 e_r 为 OP 方向的单位矢量, 根据定义式(9-4), P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \quad (9-5)$$

本题未指明 q 的正负, 式(9-5)对两种情况都适用. 如果 q 为正电荷, E 的方向与 e_r 相同; 如果 q 为负电荷, E 的方向与 e_r 相反. 由结果式(9-5)可见, E 的大小只与距离 r 有关, 在以点电荷 q 为中心、以 r 为半径的球面上各点的场强大小相同, 而 E 的方向沿半径向外($q > 0$)或指向中心($q < 0$). 通常说这样的电场是球对称的.

9.2.3 场强叠加原理

如果电场是由点电荷系 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 共同产生的, 则根据静电力的叠加原理, 试验电荷 q_0 在电场中任一点 P 处所受到的静电力等于各个点电荷 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 单独存在时所受力 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 的矢

思考

电场强度的

定义为 $E = \frac{F}{q_0}$,

是否可以这样认为: 电场中某点的电场强度与试验电荷 q_0 在电场中所受的电场力 F 成正比, 与试验电荷量成反比, 为什么?

量和,即

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

则由电场强度的定义可得 P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_3}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$$

按照场强的定义,上式中 $\mathbf{E}_1 = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0}, \mathbf{E}_2 = \frac{\mathbf{F}_2}{q_0}, \cdots, \mathbf{E}_n = \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$ 分别为点电荷为 $q_1, q_2, \cdots, q_n$ 单独存在时在 P 点产生的场强,于是有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_i \mathbf{E}_i \quad (9-6)$$

上式表明,在点电荷系的电场中,某点的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点所产生的电场强度的矢量和. 这叫做电场强度叠加原理(简称场强叠加原理).

如果电荷连续分布在任意形状的带电体上时,我们可以将带电体看作无数多电荷元 dq 的集合,每个 dq 可看作点电荷,由式(9-5)可知,任一电荷元在 P 点产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r$$

带电体在 P 点产生的场强是所有电荷元在 P 点产生的场强的矢量和,即

$$\mathbf{E} = \int_V d\mathbf{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-7)$$

上式中的 V 表示带电体. 当电荷连续分布在某一体积内时,用 ρ 表示电荷体密度,则 $dq = \rho dV$; 当电荷连续分布在某一曲面上时,用 σ 表示电荷面密度,则 $dq = \sigma dS$; 当电荷连续分布在某一曲线上时,用 λ 表示电荷线密度,则 $dq = \lambda dl$. 另外,式(9-7)为矢量积分,计算时通常要利用分量式转化为标量积分.

例 9-3 两个相距为 l ($l \ll r$) 的等量异号点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的系统称为电偶极子. 若取 $-q$ 到 $+q$ 的矢径为 $\mathbf{l}$, 则电量 q 与 $\mathbf{l}$ 的乘积称为电偶极矩,简称电矩,用 $\mathbf{P}_e$ 表示, $\mathbf{P}_e = q\mathbf{l}$. 试计算电偶极子连线中垂线上任一点 P 处的场强.

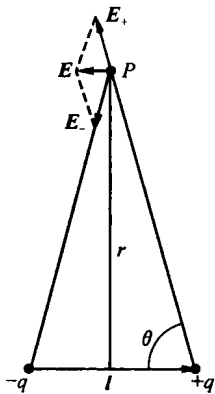


图 9-5

解 如图 9-5 所示设电偶极子中垂线上的 P 点到电偶极子中心的距离为 r , 且 $r \gg l$, 那么 $+q$ 和 $-q$ 在 P 点产生的场强大小相等,即

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + l^2/4}$$

思考

什么样的电荷系统称为电偶极子? 电偶极矩的方向如何规定?

方向分别在 $+q$ 和 $-q$ 与 P 点的连线上, E_+ 背离 $+q$, E_- 指向 $-q$,由于 E_+ 和 E_- 在竖直方向的分量互相抵消,则 P 点合场强的大小为

$$\begin{aligned} E &= E_+ \cos\theta + E_- \cos\theta \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + l^2/4} \cdot \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2/4}} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r^2 + l^2/4)^{3/2}} \end{aligned}$$

方向与 l 的方向相反.考虑到 $r \gg l$, $P_e = ql$,得

$$E = -\frac{P_e}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

由上述结果可知,电偶极子的场强与电矩 P_e 的大小成正比,所以,电矩 P_e 是表征电偶极子性质的重要物理量.

例 9-4 真空中一均匀带电直线,电荷线密度为 λ .现有一点 P ,离开直线的垂直距离为 a , P 点和直线两端连线的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,如图 9-6 所示.求 P 点的场强.

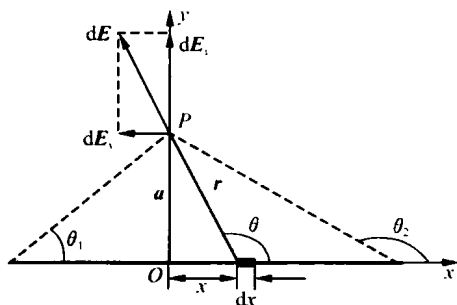


图 9-6

解 如图 9-6 所示,以 P 点到带电直线的垂足为原点,建立直角坐标系.在带电直线上取一线元 dx , dx 到 O 点的距离为 x ,到 P 点的距离为 r , dx 所带电量为 dq ,则 dq 在 P 点产生的场强的大小为

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

场强的方向如图 9-6 所示,由于带电直线上不同线元在 P 点产生的场强方向不同,故应先将 dE 分解后才能积分, dE 在 x 、 y 轴上的分量为

$$dE_x = dE \cos\theta = \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta = \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin\theta$$

在 dE_x 和 dE_y 中包含的变量有 x 、 r 、 θ ,这三个变量是相互关联的,可统一用 θ 来表示,其中

思考

电偶极子延长线上任意点的场强为多少?