



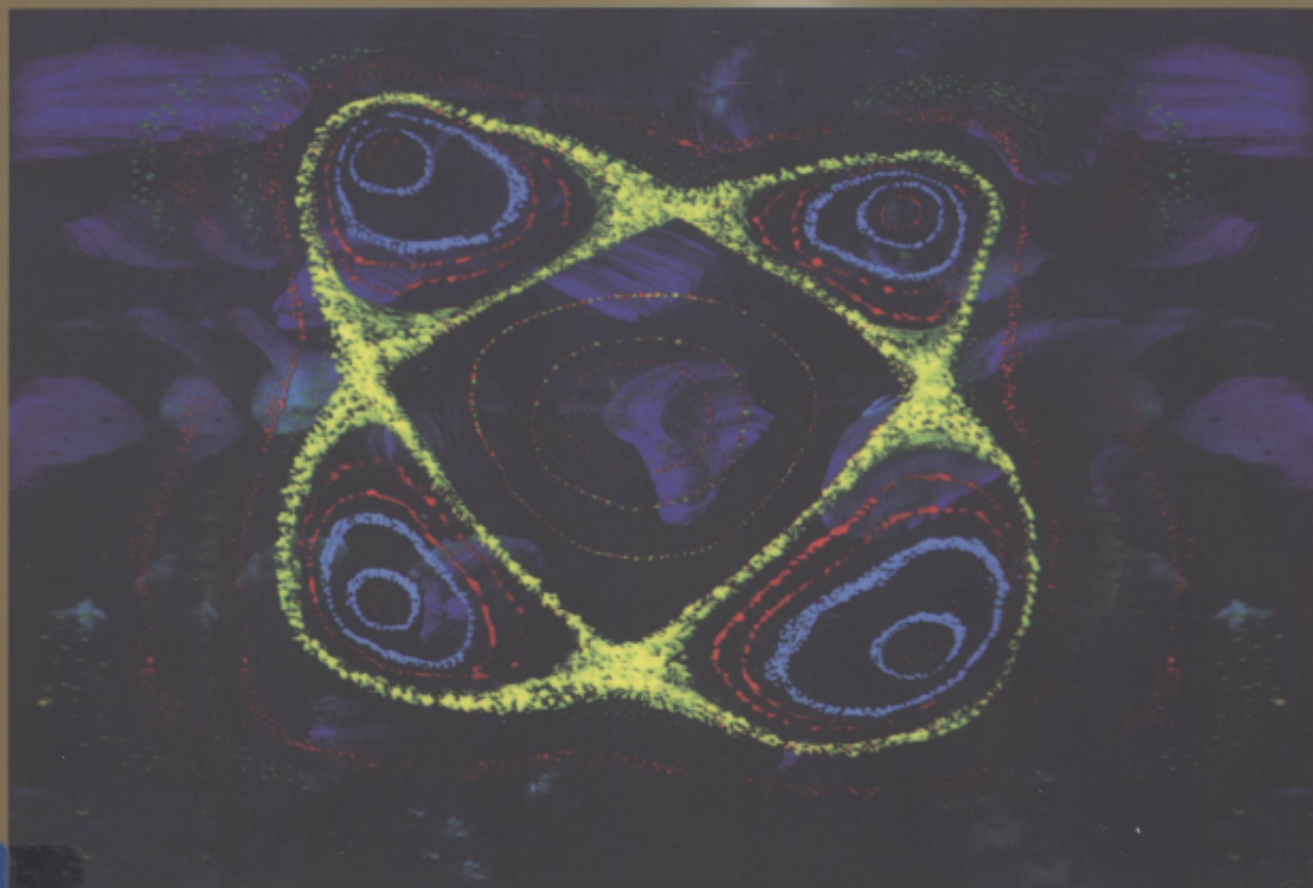
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大学物理

Physics (下册)

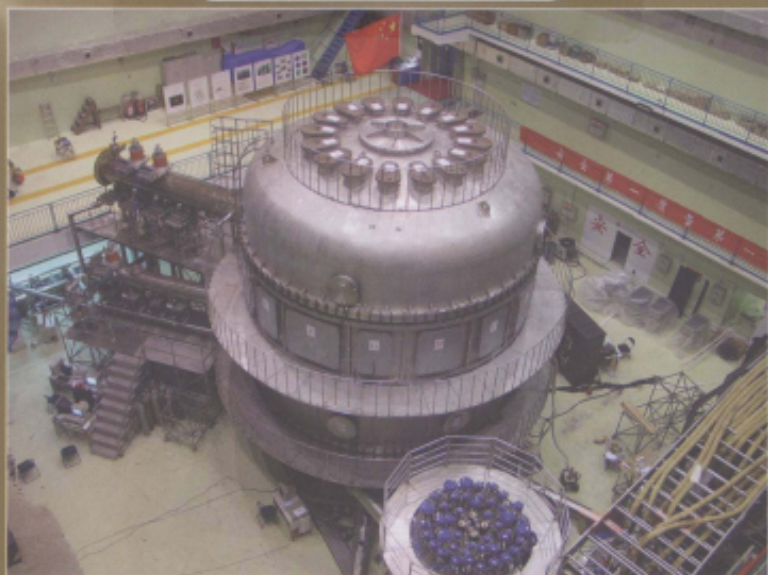
(第三次修订本 **B**)

吴百诗 主编



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

荣获国家教学优秀教材一等奖



全超导非圆截面托卡马克核聚变实验装置

责任编辑：叶涛 吴杰

版式设计：叶涛 李晶

绘图：李普选

装帧设计：伍胜

ISBN 978-7-5605-3260-8



9 787560 532608 >

定价：33.50元





普通高等教育“十一五”国家级规划教材

荣获国家教委优秀教材一等奖

(第三次修订本 B)

# 大学物理

# Physics

(下册)

主编 吴百诗

修订 焦兆焕 刘丹东



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



## 内 容 提 要

本书是在总结了初版和前两次修订编写的经验,吸收了使用过本教材师生们意见和建议,并考虑了当前多数工科院校教学实际的基础上修订而成的。全书力图在切实加强基础理论的同时,突出训练和培养学生科学思维方法和分析问题解决问题的能力!

下册包括电磁学、波动和波动光学、近代物理基础等内容。

本书可供工科各专业,理科、师范各非物理专业,以及成人教育相关专业作为大学物理教材,也可供自学者使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理:(第三次修订本 B)下册/吴百诗主编. —西安:  
西安交通大学出版社,2009.10  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5605-3260-8

I. 大... II. 吴... III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167641 号

书 名 大学物理(第三次修订本 B)下册  
主 编 吴百诗  
责任编辑 叶 涛 吴 杰

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>

电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280

印 刷 人民日报社西安印务中心

开 本 850mm×1168mm 1/16 印张 15.25 字数 447 千字

版次印次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5605-3260-8/O·304

定 价 33.50 元

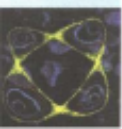
读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究





# 目 录

大学物理  
Physics

<b>第 10 章 静电场</b> .....	<b>1</b>
10.1 电荷 库仑定律	2
10.2 电场 电场强度 $E$	5
10.3 电通量 高斯定理	13
10.4 静电场的环路定理 电势能	19
10.5 电势 电势差	21
10.6 等势面 * 电势与电场强度的微分关系	27
10.7 静电场中的导体 电容	30
10.8 静电能	36
10.9 电介质的极化 束缚电荷	37
10.10 电介质内的电场强度	39
10.11 电介质中的高斯定理 电位移矢量 $D$	39
习题	43
<b>第 11 章 恒定电流的磁场</b> .....	<b>49</b>
11.1 磁感应强度 $B$	50
11.2 毕奥-萨伐尔定律	51
11.3 磁通量 磁场的高斯定理	57
11.4 安培环路定理	58
11.5 磁场对电流的作用	61
11.6 带电粒子在电场和磁场中的运动	67
11.7 磁介质	70
习题	78
<b>第 12 章 电磁感应与电磁场</b> .....	<b>83</b>
12.1 电磁感应的基本规律	84
12.2 动生电动势与感生电动势	88
12.3 自感和互感	94
12.4 磁能	98
12.5 麦克斯韦电磁场理论简介	101
习题	104

## 第 13 章 波动光学基础 ..... 109

- |       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 13.1  | 光是电磁波             | 110 |
| 13.2  | 光源 光的干涉           | 112 |
| 13.3  | 获得相干光的方法 杨氏双缝实验   | 114 |
| 13.4  | 光程与光程差            | 117 |
| 13.5  | 薄膜干涉              | 118 |
| 13.6  | 迈克耳孙干涉仪           | 124 |
| 13.7  | 惠更斯-菲涅耳原理         | 125 |
| 13.8  | 单缝的夫琅禾费衍射         | 127 |
| 13.9  | 衍射光栅及光栅光谱         | 131 |
| 13.10 | 线偏振光 自然光          | 136 |
| 13.11 | 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律   | 137 |
| 13.12 | 反射和折射产生的偏振 布儒斯特定律 | 138 |
| 13.13 | 双折射现象             | 139 |
| 13.14 | 椭圆偏振光 偏振光的干涉      | 142 |
| 13.15 | 旋光效应简介            | 145 |
|       | 习题                | 147 |

## 第 14 章 狭义相对论力学基础 ..... 151

- |      |                  |     |
|------|------------------|-----|
| 14.1 | 力学相对性原理 伽利略坐标变换式 | 152 |
| 14.2 | 狭义相对论的两个基本假设     | 153 |
| 14.3 | 狭义相对论的时空观        | 155 |
| 14.4 | 洛伦兹变换            | 159 |
| 14.5 | 狭义相对论质点动力学简介     | 164 |
|      | 习题               | 167 |

## 第 15 章 量子物理基础 ..... 169

- |      |                   |     |
|------|-------------------|-----|
| 15.1 | 量子物理学的诞生——普朗克量子假设 | 170 |
| 15.2 | 光电效应 爱因斯坦光子理论     | 172 |
| 15.3 | 康普顿效应及光子理论的解释     | 175 |
| 15.4 | 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论    | 177 |
| 15.5 | 微观粒子的波粒二象性 不确定关系  | 180 |
| 15.6 | 波函数 一维定态薛定谔方程     | 183 |
| 15.7 | 氢原子的量子力学描述 电子自旋   | 187 |
| 15.8 | 原子的电子壳层结构         | 190 |
|      | 习题                | 193 |





## 第 16 章 原子核物理和粒子物理简介 ..... 197

16.1	原子核的基本性质	198
16.2	核力和核结构	200
16.3	原子核的结合能 裂变和聚变	203
16.4	放射性衰变	205
16.5	粒子物理简介	207
	习题	213

## 第 17 章 固体物理简介 激光 ..... 215

17.1	固体的能带	216
17.2	绝缘体 导体 半导体	219
17.3	杂质半导体和 pn 结	221
17.4	光与原子的相互作用	223
17.5	激光器的基本构成 激光的形成	225
17.6	激光的纵模与横模	227
17.7	激光的特性及应用	228
	习题	230

## 索 引

## 参考书目

# 静电场

## 高压倍压加速器

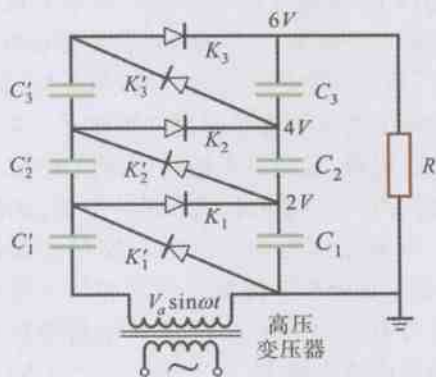
加速器是利用一定形态的电磁场将电子、质子或重粒子等带电粒子加速,以获得带有各种能量的带电粒子束的装置。加速器是人们研究物质深层结构的重要工具,在工业生产、医疗卫生、科学技术及国防工业等方面都有着广泛而重要的应用。

直流高压倍压加速器是一种低压静电加速器,它由高压发生器、粒子源、加速和聚焦系统、真空系统和分析器、靶室以及控制系统组成,若加速器提供的加速电压为  $V$ ,被加速粒子带的电量为  $q$ ,则通过加速,粒子获得的能量为  $E=qV$ 。

你知道这种加速器的加速高压是怎样获得的吗?加速高压是通过右下图所示倍压电路获得的。高压变压器通过整流元件  $K_1-K_3, K'_1-K'_3$  和辅助电容器  $C'_1-C'_3$ ,使主电容器  $C_1-C_3$  不断地充电。空载时,主电容器上的电压都将达到  $2V_0$ ,于是主电容器串上的电压达到了  $6V_0$ ,其中  $V_0$  是高压变压器次级的峰值电压。若倍加级数为  $n$ ,则主电容器串上的电压将为  $2nV_0$ 。



中科院高能物理研究所的北京质子直线加速器的注入器——750 keV 高压倍压加速器





## 10.1 电荷 库仑定律

### 10.1.1 电荷

我们知道物体所带的电荷只有两种：正电荷和负电荷。带同号电荷的物体相互排斥，带异号电荷的物体相互吸引。与外界绝缘的不带电的两个物体通过相互摩擦，一个物体带上正电荷，则另一个物体必定带上负电荷，而且这两个物体所带的正、负电荷的数量一定相等。当等量正、负电荷相遇后，对外不再呈现电性，这种现象称为电的中和。例如，两个带等量异号电荷的导体相互接触后，它们都变为不带电的中性导体，这就是一种电的中和现象；又如，在正负电子对的湮灭现象中，一对正负电子转化为两个不带电的光子（即  $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_0$ ），从电的角度看，这也是一种电的中和现象。

实践和实验都表明，当一种电荷“产生”时，必定有等量的异号电荷同时“产生”；当一种电荷“消失”时，也必定有等量的异号电荷同时“消失”。因此，在一个封闭系统内，不论进行怎样的变化过程，系统内正、负电荷量的代数和保持不变。这一规律称为电荷守恒定律。直到现在还没有发现与此规律不相符合的现象。电荷守恒定律是物理学中的一条基本定律。

当人们对物质结构有了进一步的研究后，对物体的带电现象也得到了更深入的认识。如果通过摩擦或其他方法使一物体中的部分原子失去一些外层电子，该物体上失去电子的原子，其原子核带的正电荷多于核外电子的负电荷，就使物体显示出带正电荷。物体失去的电子越多，它带的正电荷的量就越大。在一个物体上失去的电子转移到另一些不带电的物体上，就使获得电子的物体带上负电荷。物体得到的电子越多，它带的负电荷的量也就越大。由此可见，所谓在物体上“产生”或“消失”电荷，实际上是一物体上的电子转移到另一物体上。失去电子的物体带正电荷；得到电子的物体带负电荷。因此，在封闭系统内，电荷量的代数和保持不变，即电荷守恒。

电荷守恒定律不论是在处理宏观电磁学问题中，还是在处理微观粒子运动和相互作用过程中都是十分有用的。在图 10.1 所示为测量未知电阻的惠斯通电桥电路中，对于任何一个节点（几条支路的汇合点，如 A 点），单位时间内流入的电荷量（图中所示的电流  $I_1$ ），等于单位时间流出的电荷量（图中

的电流  $I_2 + I_3$ ）。换句话说，根据电荷守恒定律，在稳恒电路中，节点处各支路电流的代数和应等于零，这通常称为基尔霍夫第一定律。又如在原子核衰变过程中（例如  ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ ），衰变前后，电荷量的代数和保持不变，即电荷必须守恒。

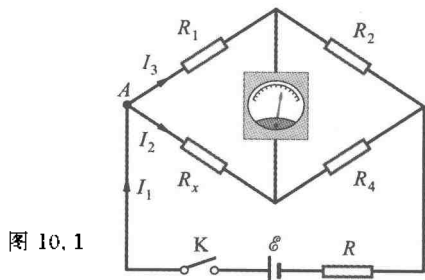


图 10.1

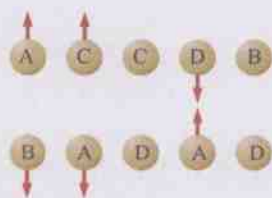
物体带电荷的数量称为电荷量（电量），常用  $q$  表示。电量的单位在 SI 中是库仑，记作 C。如果导线中通过 1 A（安培）的稳恒电流，则在 1 s（秒）内通过此导线横截面的电量等于 1 C（库仑）。安培是 SI 中的一个基本单位。所以，库仑的单位 C 等于  $\text{A} \cdot \text{s}$ （安培·秒）。

1 C 的电量约等于  $6.25 \times 10^{18}$  个电子所带的电量。电子带负电，质子带正电，电子和质子所带电量的绝对值相等。电子电量是目前从实验中发现的最小电量，常用  $e$  表示，且  $e = 1.602176462(63) \times 10^{-19} \text{ C}$ ，任何宏观物体所带的电量  $q$  都是  $e$  的整数倍。现代理论物理认为质子、中子等粒子是由具有  $\frac{1}{3}e$  或  $\frac{2}{3}e$  分数电荷的夸克组成的，但是夸克被束缚在质子、中子等粒子内部，不能被分离出来成为自由夸克。

宏观带电体都有一定的体积和形状，与力学中定义质点的方法类似，在我们所研究的问题中，涉及的距离比带电体本身的线度大得多时，带电体的大小、形状就可以忽略不计，这时带电体就可以看作一个带电的点，称为点电荷。点电荷也是一个物理模型。

#### 想想看

- 10.1 你是怎样理解电荷守恒定律中“在一个封闭系统内”和“系统内正负电荷量的代数和保持不变”的？
- 10.2 两导体球 A 和 B，分别带电荷  $-50e$  和  $+20e$ ，现让两球相接触，试问接触后 AB 系统带有电荷是多少？
- 10.3 图中的塑料带电球，已知三对球间的静电引力或斥力如图示，试确定剩下两对球间的静电力的性质。你是采取怎样的思路解决这一问题的？



想 10.3 图

### 10.1.2 库仑定律

实验证明:电荷与电荷间有相互作用力。1785年库仑总结了两个点电荷之间作用力的规律,提出了库仑定律:在真空中两个静止点电荷之间的静电作用力大小与这两个点电荷所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着两个点电荷的连线。在 SI 中,它的数学表达式为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (10.1a)$$

式中  $q_1$ 、 $q_2$  分别表示两个点电荷的电量,  $r$  为它们之间的距离,  $\epsilon_0$  是一个基本常量,称为真空电容率(也称为真空介电常量),其精确值和单位是

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \cdots \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

通常近似地取为

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

为了使上述表达式能表示出力的方向,可将上式改写为矢量式。例如,表示正电荷  $q_1$  对正电荷  $q_2$  的作用力  $F_{21}$ ,我们规定矢量  $r_{21}$  由  $q_1$  指向  $q_2$ ,其单位矢量为  $r_{21}^0$ ,如图 10.2 所示。那么

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} r_{21}^0 \quad (10.1b)$$

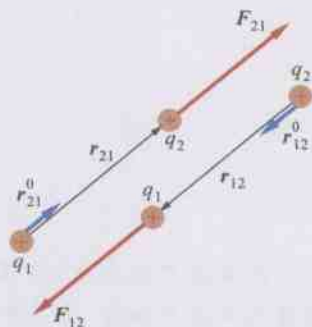


图 10.2

如果表示正电荷  $q_2$  对正电荷  $q_1$  的作用力  $F_{12}$ ,则规定矢量  $r_{12}$  由  $q_2$  指向  $q_1$ ,其单位矢量  $r_{12}^0$ 。那么

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} r_{12}^0 \quad (10.1c)$$

为了使式(10.1b)和(10.1c)能准确、全面地表示库仑定律,也为了便于对整个电磁学内容的研究和叙述,还要把电荷量视为代数数量。电量取正值表

示物体带正电荷;取负值表示物体带负电荷。从式(10.1b)和(10.1c)可以看出,当  $q_1 q_2 > 0$  ( $q_1$  与  $q_2$  同号)时,  $F_{21}$  与  $r_{21}^0$ 、 $F_{12}$  与  $r_{12}^0$  方向相同,表明同号电荷相斥;当  $q_1 q_2 < 0$  ( $q_1$  与  $q_2$  异号)时,  $F_{21}$  与  $r_{21}^0$ 、 $F_{12}$  与  $r_{12}^0$  方向相反,表明异号电荷相吸。这正是库仑定律所要表明的。

综上所述,只要规定矢量  $r$  的方向是由施力电荷指向受力电荷,且  $r^0$  为  $r$  方向的单位矢量,那么受力电荷所受到的库仑力  $F$  可表示为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r^0 \quad (10.1)$$

由式(10.1b)和式(10.1c)可以看出

$$F_{12} = -F_{21}$$

这说明两个静止点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律。应当指出,由于电磁相互作用传递速度有限等原因,因此对运动电荷间相互作用力不能简单地应用牛顿第三定律,对此情况本书不作进一步讨论。

观察与实验表明,两个静止点电荷之间距离的数量级在  $10^{-15} \sim 10^9$  cm 的范围内,库仑定律都是极其精确的。库仑定律以及后面将要讲到的高斯定理是静电学的基础。

### 想想看

10.4 库仑定律适用的条件是什么?在 SI 中,库仑定律中各量的单位应该是什么?

10.5 能否用库仑定律计算任意形状带电体对一点电荷的静电作用力?如果可以,试述求解的思路。

10.6 图示两个相距  $3R$  的带正电小球  $Q_1 = Q$ ,  $Q_2 = 2Q$ ,另一带电小球  $Q_3$  放置在  $Q_1$  和  $Q_2$  之间,距  $Q_1$  为  $R$ ,问下列三个选项哪个是正确的?

①如果  $Q_3$  是正的,则  $Q_1$  所受的静电力可以为零。

②如果  $Q_3$  是负的,则  $Q_2$  所受的静电力可以为零。

③不论  $Q_3$  ( $Q_3 \neq 0$ ) 等于多少,它受到的静电力都不可能为零。



想 10.6 图

**例 10.1** 假设两个  $\alpha$  粒子相距  $10^{-15}$  m,试计算它们之间的静电斥力大小,并和它们之间的万有引力大小相比较。已知  $\alpha$  粒子带电量为  $2e$ ,质量为  $6.68 \times 10^{-27}$  kg,万有引力常量为  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

**解** 将  $\alpha$  粒子视为点电荷。

先计算两个  $\alpha$  粒子间的静电斥力:根据库仑定律



$$\begin{aligned}
 F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \\
 &= 9 \times 10^9 \times \frac{(2 \times 1.6 \times 10^{-19})^2}{(10^{-13})^2} \\
 &= 9.22 \times 10^{-2} \text{ N}
 \end{aligned}$$

这相当于  $10^{-2}$  kg 物体所受到的重力。

再计算两个  $\alpha$  粒子间的万有引力: 根据万有引

力定律

$$\begin{aligned}
 f &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{(6.68 \times 10^{-27})^2}{(10^{-13})^2} \\
 &= 2.98 \times 10^{-37} \text{ N}
 \end{aligned}$$

可以看出, 万有引力比起静电作用力来说是很小很小的。所以, 在研究带电粒子的相互作用时, 它们之间的万有引力通常都可以忽略不计。

**例 10.2** 已知带电粒子  $a$ 、 $b$ 、 $c$ , 其所带电量分别为  $q_a = 3.0 \mu\text{C}$ ,  $q_b = -6.0 \mu\text{C}$ ,  $q_c = -2.0 \mu\text{C}$ , 如图所示。试求带电粒子  $a$  和  $b$  对  $c$  的作用力。

**解** 本题所求的是  $q_c$  受  $q_a$ 、 $q_b$  作用的静电力合力, 解题的步骤显然是用库仑定律分别计算  $q_a$ 、 $q_b$  对  $q_c$  作用的静电力  $F_{ca}$  和  $F_{cb}$ , 然后再根据力的叠加原理求二者和。在应用库仑定律计算静电力时, 可用式(10.1a)先计算二点电荷间静电力的大小, 这时不必计及  $q_a$ 、 $q_b$  的正负, 然后再考虑力的方向。

若用式(10.1b)、(10.1c)计算, 则不仅得到力的大小, 而且确定了力的方向, 这时需要注意  $q_a$ 、 $q_b$  是代数量, 有正有负, 正电荷取正, 负电荷取负; 还要正确地表示单位矢量。

现应用式(10.1b)、(10.1c)解本题。

由库仑定律知, 带电粒子  $a$  对  $c$  的作用力

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{ca} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_a q_c}{r_{ca}^2} \mathbf{r}_{ca}^0 \\
 &= 9.0 \times 10^9 \times \frac{(3.0 \times 10^{-6}) \times (-2.0 \times 10^{-6})}{(4.0)^2} \mathbf{j} \\
 &= -(3.4 \times 10^{-3} \text{ N}) \mathbf{j}
 \end{aligned}$$

带电粒子  $b$  对  $c$  的作用力

$$\mathbf{F}_{cb} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_b q_c}{r_{cb}^2} \mathbf{r}_{cb}^0$$

由图中几何关系知  $r_{cb} = \sqrt{(3.0)^2 + (4.0)^2} = 5.0 \text{ m}$

由  $b$  指向  $c$  的单位矢量

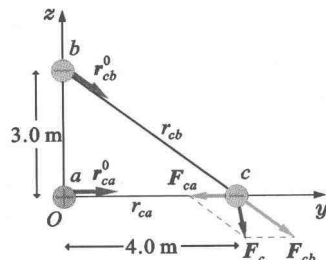
$$\mathbf{r}_{cb}^0 = \frac{\mathbf{r}_{cb}}{r_{cb}} = \frac{(4.0)\mathbf{j} + (-3.0)\mathbf{k}}{5.0} = (0.80 \text{ m})\mathbf{j} - (0.60 \text{ m})\mathbf{k}$$

代入  $F_{cb}$  的表达式得

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{cb} &= 9 \times 10^9 \times \frac{(-6.0 \times 10^{-6}) \times (-2.0 \times 10^{-6})}{(5.0)^2} \\
 &\quad \times [(0.80)\mathbf{j} - (0.60)\mathbf{k}] \\
 &= (3.5 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{j} - (2.6 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{k}
 \end{aligned}$$

作用在  $c$  点上的力为上述二力的矢量和

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_c &= \mathbf{F}_{ca} + \mathbf{F}_{cb} \\
 &= (-3.4 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{j} + (3.5 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{j} \\
 &\quad - (2.6 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{k} \\
 &= (0.1 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{j} - (2.6 \times 10^{-3} \text{ N})\mathbf{k}
 \end{aligned}$$



例 10.2 图

由本例可以看出, 要正确解题有几点需要注意: 一是要作出清楚的图, 并在图上标出已知各量至为重要; 本题通过图的示意, 帮助我们正确确定几何关系, 并根据单位矢量定义, 正确地表示出一个单位矢量。二是采用 SI 单位制, 正确选择各量的单位。

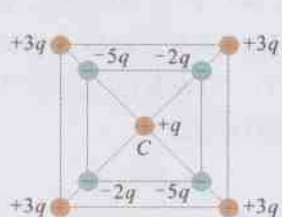
## 复习思考题

10.1 如图所示,在  $x$  轴原点和  $A$  点分别有  $+q$  和  $+4q$  点电荷,问在  $x$  轴何处,放置什么样电荷使得原点处点电荷所受合力为零?本题的答案是不是唯一的?

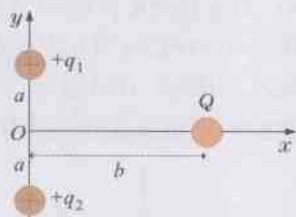


思 10.1 图

10.2  $+q$  点电荷处于两个边边平行、中心重合的正方形的中心  $C$ ,两正方形顶点有点电荷分布,如图所示。已知两正方形边长比为  $1:1.5$ ,问中心点  $C$  处的点电荷受到正方形顶点各点电荷的静电力的合力多大?你能在一分钟内回答出此问题吗?



思 10.2 图

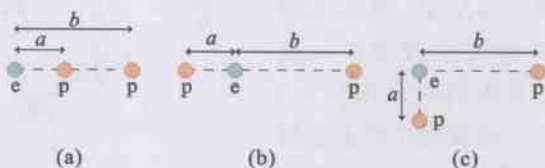


思 10.3 图

10.3 图中正点电荷  $q_1 = q_2$ ,它们对点电荷  $Q$  的静电作用力

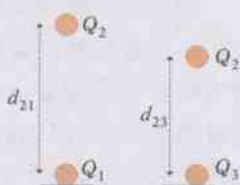
合力是沿  $x$  方向、 $y$  方向,还是不给定  $q_1$ 、 $q_2$  和  $Q$  具体大小,此方向不能确定?如果  $q_1$ 、 $q_2$  大小相等,但所带电荷异号,情况又如何?

10.4 一个电子和两个质子在图中有三种配置,①试按质子对电子静电力大小把三种配置由小到大排一顺序;②在情况(c)中,作用在电子的合静电力与竖直线之间的夹角是小于还是大于  $45^\circ$ ?



思 10.4 图

10.5 图示带电量  $Q_1$  的球固定在地面上,将有质量且带电量  $Q_2$  的球移到  $Q_1$  上方,处于平衡时  $Q_2$  距  $Q_1$  为  $d_{21}$ ;若  $Q_1$  换成  $Q_3$ ,平衡时  $Q_2$  距  $Q_3$  为  $d_{23}$ ,已知  $d_{23} < d_{21}$ ,问:①  $Q_1$  和  $Q_3$  是同号还是异号?②能否确定  $Q_1$  和  $Q_3$  哪个大?



思 10.5 图

10.2 电场 电场强度  $E$ 

## 10.2.1 电场

从上节的讨论看到,两个电荷在真空中相隔一段距离会有相互作用力,那么两个电荷之间的作用力是以什么为媒介的呢?关于这个问题,历史上曾经有两种学说:一种认为一个电荷对另一个电荷的作用力是不需要通过中间媒介而直接作用的,也不需要传递时间而即时作用的,即所谓“超距作用”学说;另一种则认为电荷之间的作用力是通过中间媒介——电场——相互作用的,作用力的传递也是需要一定时间的。

近代科学实验证明,“超距作用”的观点是错误的。实验表明,电荷周围空间都存在着一种“特殊”的物质,这种物质即为电场。电场的基本性质之一是对位于其中的电荷会施以力的作用。因此,电荷与电荷之间是通过电场发生相互作用的。当电荷  $q_1$  位于另一电荷  $q_2$  的电场中时, $q_1$  所受到的作用力就是通过  $q_2$  的电场施加给它的。同样, $q_2$  处于  $q_1$  的电场中时, $q_2$  所受到的作用力,是通过  $q_1$  的电场

施加给它的。需要说明的是,一个电荷在其周围产生的电场不会对其自身产生净的作用力。

当电荷发生变化时(包括电量的变化或电荷的运动等),其周围的电场也随之而变化。这个变化的电场是以光速在空间传播的,电荷之间的相互作用力也是以光速传递的。由于光速极快,在通常情况下,电场力传递所需的时间极短,是很难察觉的。但是,随着科学技术的发展,人们已有足够的手段来证明电场力的传递是需要时间的。关于变化的电场以及与之相关的问题将在本书第 12 章讨论,本章只讨论相对于观察者静止的电荷在其周围产生的静电场有关的规律性。

下面我们通过电场对电场中电荷的作用来介绍电场。放在电场中的电荷要受到电场的作用力;电荷在电场中运动时,电场力要对电荷做功。因此,我们可以从力和能量的角度来研究电场的性质和规律,并相应地引入电场强度和电势两个重要物理量。我们先从力的角度来研究电场。

10.2.2 电场强度  $E$ 

设有一带电量为  $Q$  的物体,在它周围空间产生电场。设想将一个电量为  $q_0$  的点电荷作为试验电



荷放到电场中,探测它在场中各点受到的电场力。对试验电荷要求体积很小(视为点电荷),从而可以研究电场中各点的性质;同时要求试验电荷的电量很小,这样当它放入电场中时,不影响原电场的分布,从而可以测定原电场的性质。实验发现,试验电荷  $q_0$  放在电场中不同位置  $a$ 、 $b$ 、 $c$  处,受到电场力  $F$  的大小和方向一般来说是不同的,如图 10.3 所示。这说明在带电体周围不同点,电场的强弱和方向一般不相同。

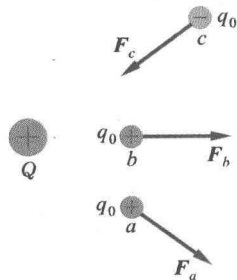


图 10.3

现在来研究给定电场中任一确定点  $a$  处电场的性质。先将正的试验电荷  $q_0$  放到  $a$  点,它受到的电场力将与它的电量  $q_0$  成正比。如果把试验电荷的电量增大  $n$  倍(但仍满足试验电荷的条件),电场力也将增大  $n$  倍,而力的方向不变。如果把试验电荷换成等量异号的负电荷,力的大小不变,而方向相反。可见,电场力的大小和方向不仅与试验电荷所在处的电场有关,而且与试验电荷本身电量的大小、正负有关。然而,对给定电场中的确定点来说,试验电荷所受到的作用力  $F$  与试验电荷  $q_0$  的比值是一个确定的矢量,这个矢量只与给定电场中各确定点的位置有关,而与试验电荷的大小、正负无关。因此,这个矢量反映了各确定点电场本身的性质。我们把这个矢量定义为电场中各确定点的电场强度,用  $E$  来表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (10.2)$$

由式(10.2)可知,电场中某点电场强度  $E$  的大小等于单位电荷在该点受力的大小,其方向为正电荷在该点受力的方向。

由于试验电荷在电场中不同点受力  $F$  一般不同,所以  $F$  是空间坐标的函数,因而电场强度  $E$  也是空间坐标的函数,即

$$E = E(x, y, z)$$

在静电场中,任一点只有一个电场强度  $E$  与之对应,也就是说静电场具有单值性。当产生电场的电荷分布已知时,应用库仑定律和下面将要讲到的电场强度叠加原理就可以确定电场强度的分布。

### 10.2.3 电场强度叠加原理

若电场是由一个点电荷  $q$  产生的,我们来计算与  $q$  相距为  $r$  处任一点  $P$  的电场强度。设想把一个试验电荷  $q_0$  放在  $P$  点,根据式(10.1), $q_0$  受力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} r^0$$

根据电场强度的定义式(10.2),则  $P$  点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} r^0 \quad (10.3)$$

这就是点电荷产生的电场的电场强度分布公式,式中  $r^0$  是矢量  $r$  的单位矢量,方向是由场源电荷  $q$  指向  $P$  点。当  $q$  是正电荷时, $E$  的方向与  $r^0$  的方向相同,如图 10.4(a)所示;当  $q$  为负电荷时, $E$  的方向与  $r^0$  方向相反,如图 10.4(b)所示。式(10.3)表明,点电荷产生的电场,电场强度分布具有球对称性。

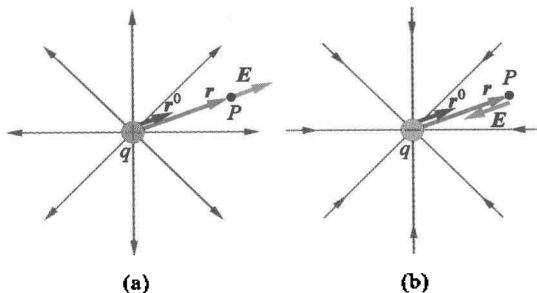


图 10.4

读者一定会注意到,按式(10.3),在点电荷所在处, $r=0$ ,因而  $E$  变为无穷大。这显然是不可能的。之所以会这样,可作如下解释:因为在此情况下,点电荷的理想模型已不再成立,所以按式(10.3)去求点电荷所在处的电场强度是没有意义的。

若电场是由点电荷系  $q_1, q_2, \dots, q_n$  产生的,为求合电场的电场强度,设  $P$  点相对于各点电荷的矢量分别为  $r_1, r_2, \dots, r_n$ ,则各点电荷单独在  $P$  点产生的电场的电场强度分别为

$$E_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_k}{r_k^2} r_k^0 \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

实验表明,试验电荷受到点电荷系的作用力遵守力的叠加原理,所以点电荷系在  $P$  点产生的电场的合电场强度为

$$E = \sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_k}{r_k^2} r_k^0 \quad (10.4)$$

即点电荷系在某点  $P$  产生的电场的电场强度等于各点电荷单独在该点产生的电场强度的矢量和。这

称为电场强度叠加原理。

**例 10.3** 两个大小相等的异号点电荷  $+q$  和  $-q$ , 相距为  $l$ , 如果要计算电场强度的各场点相对这一对电荷的距离  $r$  比  $l$  大很多 ( $r \gg l$ ), 这样一对点电荷称为电偶极子。定义

$$p = ql$$

为电偶极子的电偶极矩,  $l$  的方向规定为由负电荷指向正电荷。试求电偶极子中垂线上一点  $P$  的电场强度。

**解** 根据电场强度叠加原理, 分别计算二点电荷在场点  $P$  产生的电场强度, 然后求二者的矢量和。

设电偶极子连线的中点  $O$  到  $P$  点的距离为  $r$ 。根据式(10.3),  $+q$  和  $-q$  在  $P$  点产生的电场的电场强度大小为

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

方向分别沿着两个电荷与  $P$  的连线, 如图所示。显然  $P$  点的合电场强度与电偶极矩  $p$  的方向相反。  $P$  点的合电场强度  $E$  的大小为

$$E = E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha = 2E_+ \cos\alpha$$

因为  $\cos\alpha = \frac{l/2}{(r^2 + (l/2)^2)^{1/2}}$ , 所以

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r^2 + (l/2)^2)^{3/2}} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3 \left(1 + \frac{l^2}{4r^2}\right)^{3/2}} \end{aligned}$$

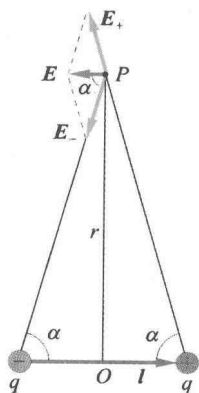
由于  $r \gg l$ , 因而  $\left(1 + \frac{l^2}{4r^2}\right) \approx 1$ , 故上式可简化为

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

考虑到  $E$  的方向与电偶极子的电偶极矩  $p$  的方向相反, 上式可改写为矢量式, 即

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}}{r^3}$$

从以上结果可见: 电偶极子在其中垂线上一点的电场强度与距离  $r$  的三次方成反比。而点电荷的电场强度与距离  $r$  的平方成反比。相比可见, 电偶极子的电场强度大小随距离的变化比点电荷的电场强度大小随距离的变化要快。



例 10.3 图

电偶极子是一个重要的物理模型, 在研究介质的极化、电磁波的发射等问题中, 都要用到这个模型。后面将会讲到, 有些电介质的分子, 正、负电荷中心不重合, 这类分子就可视为电偶极子。在电磁波发射中, 一段金属导线中的电子作周期性运动, 使导线两端交替地带正、负电荷, 形成所谓振荡偶极子等。

若电场是由电荷连续分布的带电体产生的, 在求解空间各点的电场强度分布时, 需要根据电场强度叠加原理, 用微积分的方法进行计算。可设想把带电体分割成许多微小的电荷元  $dq$ , 每个电荷元都可视为点电荷, 如图 10.5 所示。任一电荷元  $dq$  在  $P$  点产生的电场的电场强度为

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

整个带电体在  $P$  点产生的电场的电场强度, 等于所有电荷元产生的电场强度的矢量和。由于电荷是连续分布的, 求和要用积分

$$\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}^0 \quad (10.5)$$

式(10.5)为矢量积分, 在具体计算时, 可以找出它在各坐标轴方向上的投影式, 然后再求积分。

在计算带电体产生的电场强度时, 常需要引入电荷密度的概念。

若电荷连续分布在一条线上, 定义电荷线密度为

$$\lambda = \frac{dq}{dl}$$

式中  $dq$  为线元  $dl$  所带的电量, 见图 10.6(a)。

若电荷连续分布在一个面上, 定义电荷面密度为

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

式中  $dq$  为面积元  $dS$  所带的电量, 见图 10.6(b)。

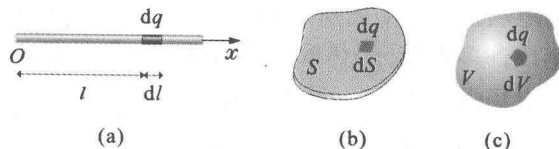


图 10.6



若电荷连续分布在一个立体内,定义电荷体密度为

$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

式中  $dq$  为体积元  $dV$  所带的电量,见图 10.6(c)。

应用电荷密度的概念,式(10.5)中的  $dq$  可根据不同的电荷分布写成

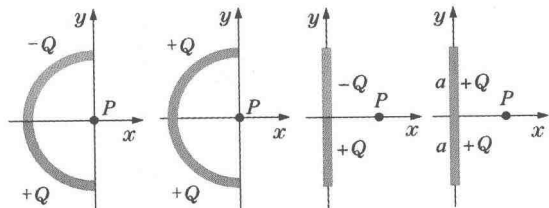
$$dq = \begin{cases} \lambda dl \\ \sigma dS \\ \rho dV \end{cases}$$

这时式(10.5)的积分则分别为线积分、面积分和体积分。

### 想想看

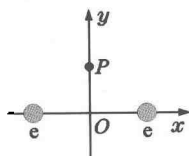
10.7 一半径为  $r$ , 均匀带电的圆环, 其中心处的电场强度等于多大? 如果是相同半径均匀带电的圆板, 求它中心处的电场强度大小的分析方法与圆环的是一样的吗?

10.8 如图所示, 均匀带电的两个半圆环、两根直杆, 上、下半部分所带电荷的正、负号标在图上, 问  $P$  点电场强度的方向分别是什么?



想 10.8 图

10.9 如图所示, 在  $x$  轴上有两个对称配置的电子, 问  $y$  轴上  $P$  点的电场强度①等于两个电子分别在  $P$  点产生的电场强度大小  $E$  之和 ( $2E$ ) 吗? ②沿什么方向? ③分别画出每个电子在  $P$  点产生的电场强度矢量。

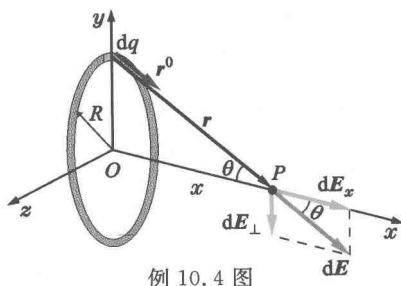


想 10.9 图

**例 10.4** 半径为  $R$  的均匀带电细圆环带电量为  $q$ , 试计算圆环轴线上任一点  $P$  的电场强度。

**解** 圆环系线密度为常量的带电体, 几何形状规则, 可应用式(10.5)直接计算其产生在轴线上一点的电场强度。如图所示, 取坐标轴  $Ox$ , 把细圆环分割成许多电荷元, 任取一电荷元  $dq$ , 它在  $P$  点产生的电场强度为  $dE$ 。设  $P$  点相对于电荷元  $dq$  的矢径为  $r$ , 且  $OP=x$ , 则

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



例 10.4 图

对圆环上所有电荷元在  $P$  点产生的电场强度求积分, 即得  $P$  点的电场强度

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

这是一矢量积分, 将  $dE$  向  $Ox$  轴和垂直于  $Ox$  轴方向投影, 得

$$dE_x = dE \cos\theta, \quad dE_{\perp} = dE \sin\theta$$

由于圆环上电荷分布相对  $x$  轴对称, 因此,  $dE_{\perp}$  分量之和为零。故  $P$  点的电场强度就等于分量  $dE_x$  之和, 即

$$\begin{aligned} E &= E_x = \int dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \cos\theta \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\cos\theta}{r^2} \int dq \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cos\theta \end{aligned}$$

从图中的几何关系可知  $\cos\theta = \frac{x}{r}$ ,  $r =$

$(R^2 + x^2)^{1/2}$ , 代入得

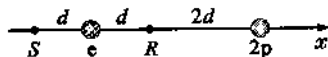
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

试问, 若圆环带的是正电荷,  $P$  点的电场强度是沿哪个方向? 若带负电荷, 电场强度又是沿哪个方向? 若  $P$  点位于圆环的另一侧时, 电场强度的方向又是如何?

从上述电场强度表达式看出, 当  $x=0$  时,  $E=0$ , 对此结果你是如何理解的? 又当  $x \gg R$  时, 你能得到什么结果, 又该怎样解释这一结果?

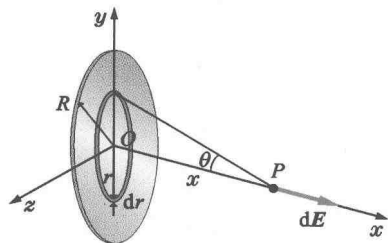
### 想想看

10.10 如图所示, 一个电子和两个质子沿  $x$  轴配置, 问: ①电子、质子在  $S$  点和  $R$  点产生的电场强度各沿什么方向? ②在  $S$  点和  $R$  点由电子和质子产生的合电场强度的大小和方向是什么?



想 10.10 图

**例 10.5** 计算半径为  $R$ , 均匀带电量为  $+q$  的圆形平板的轴线上任一点的电场强度。



例 10.5 图

**解** 计算带电体产生的电场强度通常有两种方法:一是根据电场强度的定义,直接应用式(10.5)进行计算,这是最基本的方法。按照这种方法,计算时要恰当地选择电荷元  $dq$ ,并代入式(10.5);还要根据带电体具体情况,恰当地选择坐标系;要注意式(10.5)是矢量积分,对不规则形状的带电体,严格地进行积分是很困难的,甚至于不可能,这时只能进行近似的数值积分。二是在已有结果的基础上(例如手册上查到的),进行延伸、补充计算求解。本题就可利用例 10.4 所讲的细圆环轴线上一点电场强度的结果来计算。

设想把圆形平板分割成无数个半径不同的同心均匀带电细圆环,每个带电细圆环在轴线上一点产生的电场强度都可应用例 10.4 所得的结果表示。如图所示,取半径为  $r$ ,宽度为  $dr$  的细圆环,其上带电量为

$$dq = 2\pi\sigma r dr \quad (\sigma = \frac{q}{\pi R^2})$$

该细圆环在轴线上一点  $P$  产生的电场强度大小为

$$\begin{aligned} dE &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{x dq}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \\ &= \frac{x\sigma}{2\epsilon_0} \frac{r dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

$dE$  的方向沿  $x$  轴。由于各细圆环在  $P$  点产生的电场强度方向都相同,所以整个带电圆形平板在  $P$  点产生的电场强度大小为

$$\begin{aligned} E &= \int dE = \frac{x\sigma}{2\epsilon_0} \int_0^R \frac{r dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \\ &= \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[ 1 - \frac{x}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right] \\ &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left[ 1 - \frac{x}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right] \end{aligned}$$

考虑到方向,以上结果还可以表示为

$$\mathbf{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left[ 1 - \frac{x}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right] \mathbf{i}$$

只要改变积分的上下限,就可以算得均匀带电的①有孔圆板(图 10.7(a)),②有圆孔无限大平板(图 10.7(b)),③无孔无限大平板(图 10.7(c)),在  $x$  轴上任一点  $P$  的电场强度(读者可以自己验算)。

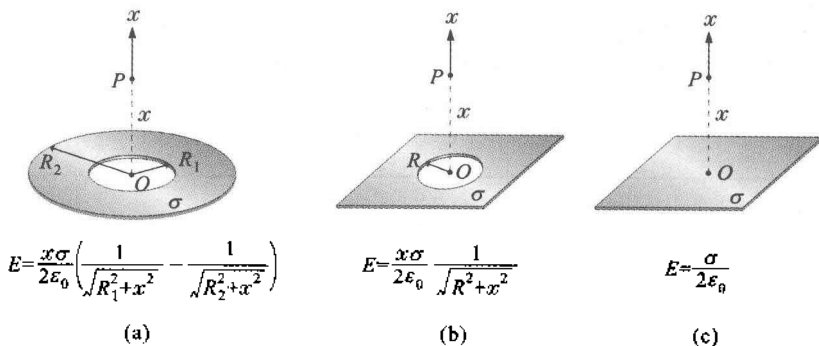
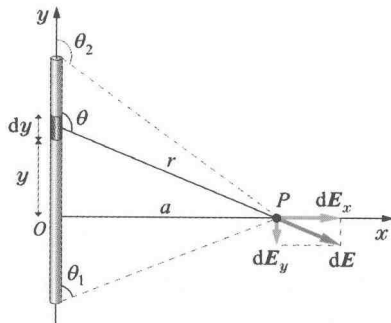


图 10.7

**例 10.6** 一均匀带正电直线段,长为  $L$ ,带电量为  $q_0$ 。线外一点  $P$  到直线的垂直距离为  $a$ ,  $P$  点与直线段两端的连线与  $y$  轴正方向的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ (如图所示)。试求  $P$  点的电场强度。

**解** 直接用式(10.5)积分解此题。

先确定坐标系,取  $P$  点到直线段的垂足  $O$  为原点,坐标轴如图;再确定电荷元,在带电直线段上,距原点  $O$  为  $y$  处取直线元  $dy$ ,其上带电量为  $dq = \lambda dy$ ,其中  $\lambda$  为电荷线密度,本题的  $\lambda$  为常量,  $\lambda = \frac{q_0}{L}$ 。设  $dy$  到  $P$  点的距离为  $r$ ,则电荷元  $dq$  在  $P$  点产生的电场强度  $dE$  的大小为



例 10.6 图

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dy}{r^2}$$

$dE$  的方向如图所示,它与  $y$  轴的夹角为  $\theta$ 。为变式(10.5)矢量积分为标量积分,将  $dE$  沿  $x$  轴、 $y$  轴分解为

$$dE_x = dE \sin\theta, \quad dE_y = dE \cos\theta$$

由图上的几何关系可知

$$y = a \tan(\theta - \frac{\pi}{2}) = -a \cot\theta, \quad dy = a \csc^2\theta d\theta$$

$$r^2 = a^2 + y^2 = a^2 \csc^2\theta$$

$$\text{所以 } dE_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta, \quad dE_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta$$

将以上二式积分,得

$$E_x = \int dE_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

$$E_y = \int dE_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

最后由  $E_x$  和  $E_y$  来确定  $E$  的大小和方向。

如果这一均匀带电直线为无限长时,即  $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$ ,那么

$$E_x = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}, \quad E_y = 0$$

可以看出,对于无限长的均匀带电直线,线外任一点  $P$  的电场强度大小与带电线密度  $\lambda$  成正比,与该点到直线的垂直距离  $a$  成反比。电场强度的方向垂直于带电直线,指向由  $\lambda$  的正负决定。这是一个常用的结果。

需要指出,利用例 10.5 的结果,并根据叠加原理可以较方便地求出如图 10.8、图 10.9 等在  $P$  点的电场强度。对此,后面将会讲到。

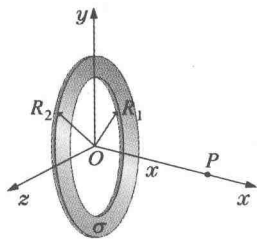


图 10.8

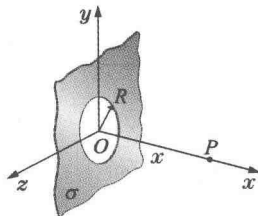


图 10.9

通过例 10.6 可以看出,在已知带电系统的电荷分布时,根据电场强度的定义,应用叠加原理求电场中任一点  $P$  电场强度的方法和步骤是:①根据给定的电荷分布,恰当地选择电荷元和坐标系;②应用点电荷电场强度的计算式,在选定的坐标系中写出电

荷元  $dq$  产生在  $P$  点的电场强度  $dE$ ;③应用电场强度叠加原理将每个电荷元产生的电场强度矢量相加或矢量积分,即可得到给定点  $P$  的电场强度。这里应该注意的是:①要将  $dE$  向坐标轴上投影,变矢量相加或矢量积分为标量相加或标量积分,同时还要重视对称性的分析,这样常可省去一些不必要的计算;②要熟悉在各种不同坐标系中,线元、面积元和体积元的表示方法;③有些问题还可以在已有的计算结果的基础上,应用叠加原理直接进行计算,如上面讲到的用已知的均匀带电圆环产生的电场分布结果直接叠加求出均匀带电圆板的电场分布等。

#### 想想看

10.11 图(a)中的半圆环上均匀分布有  $+q$  电荷,图(b)中上、下半圆各均匀分布有  $+q$  和  $-3q$  电荷,问两者在  $O$  点处产生的电场强度各沿什么方向?你能在一分钟内回答出此问题吗?

10.12 如图:①在边长为  $2a$  的正方形中心  $C$  处,由图示的三