



普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理教程

下 册

钟韶 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理教程

下 册

钟 韶 主 编

高等教育出版社

内容简介

本书是根据教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2004 年制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》,吸取了国内外同类教材的优点,着重针对地方本科院校教学实际,在总结编者长期教学经验的基础上编写的.全书不要求有较高的数学内容.力图将最基本的物理概念讲清楚,使学生能在较少的学时内学到物理学的精髓.本书在体系上与传统教材相比变化不大,但在内容选取上有一定创新,在例题习题的选取中则尽可能反映工程实际和科技成就.全书分上、下两册,上册包括力学(含狭义相对论)、热学、波动学;下册包括电磁学、量子物理基础、现代科学与高新技术物理基础专题.本教材的学习指导书及习题解答将另册出版.

本书可作为地方本科院校理工科各专业的大学物理课程的教材,也可作为各类普通高等学校非物理类专业、各类成人高校物理课程的教材或教学参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程.下册 / 钟韶主编. —北京:高等教育出版社, 2005.7

ISBN 7-04-016764-6

I. 大... II. 钟... III. 物理学 - 高等学校 - 教材
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 029758 号

策划编辑 胡凯飞 责任编辑 王文颖 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱 静
版式设计 胡志萍 责任校对 殷 然 责任印制 杨 明

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 国防工业出版社印刷厂

网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>

开 本 787×960 1/16
印 张 18
字 数 330 000

版 次 2005 年 7 月第 1 版
印 次 2005 年 7 月第 1 次印刷
定 价 19.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 16764-00

目 录

◎第四篇 电 磁 学

第 13 章	真空中的静电场	2
13.1	电荷	2
13.2	真空中的库仑定律	3
13.3	电场	5
13.4	真空中的高斯定理	11
13.5	电势和电势差 静电场的环路定理	19
13.6	电势梯度和等势面	28
第 14 章	静电场中的导体和电介质	37
14.1	静电场中的导体	37
14.2	电场中的电介质	46
14.3	电容与电容器	50
14.4	电场的能量	54
第 15 章	稳恒电流的磁场	63
15.1	稳恒电流 电动势	63
15.2	真空中的磁场	66
15.3	磁场的性质	81
15.4	磁力	90
15.5	磁场中的磁介质	101
第 16 章	电磁感应及电磁场	115
16.1	电磁感应定律	115
16.2	动生电动势与感生电动势	120
16.3	自感与互感	130
16.4	磁场的能量	135
16.5	麦克斯韦电磁场理论	139
16.6	电磁波	145

◎第五篇 量子物理基础

第 17 章	量子化	161
17.1	黑体辐射	161
17.2	光子	164

17.3 玻尔的氢原子模型	168
第 18 章 概率波	175
18.1 德布罗意波	175
18.2 波函数 薛定谔方程	178
18.3 海森伯不确定性原理	185
第 19 章 原子和固体的量子理论	191
19.1 氢原子	191
19.2 多电子原子	198
19.3 固体	201

◎第六篇 现代科学与高新技术物理基础专题

专题 1 混沌及其应用	208
专题 2 计算物理学简介	220
专题 3 超声波	227
专题 4 激光	230
专题 5 红外与遥感	236
专题 6 光学信息处理	242
专题 7 纳米材料	251
专题 8 宇宙学简介	256
附录 1 国际单位制	270
附录 2 常用物理常量的值	272
习题答案	277

第四篇

电磁学

电磁运动是物质的一种基本运动形式,电磁相互作用是自然界已知的四种相互作用之一,电磁场也是物质存在的一种形式.电磁学主要介绍宏观电磁场的基本规律,与力学、光学和热学一样,电磁学的研究方法也是从实验事实出发,建立基本概念,总结基本规律,然后把规律和定理应用于一些典型的实例.电磁学研究的对象是分布在空间的场,研究电磁场的性质、场与场源的关系以及电场与磁场的联系.这一研究对象决定了本篇特有的研究方法、规律表述方式、分析解决问题的思路等.

第 13 章 真空中的静电场

本章研究的对象是真空中相对于观察者静止的电荷产生的电场. 主要从电荷对外表现的两方面来讨论静电场的性质, 一方面是放入电场中的电荷要受到电场的作用力, 另一方面是电荷在电场中移动时, 电场对它的作用力就对它做功, 从而引入描述电场的两个重要物理量电场强度和电势, 同时给出静电场的两个基本规律高斯定理和环路定理.

13.1 电荷

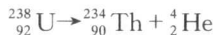
1. 两种电荷

为了说明宏观带电体间相互作用力的起源, 我们从讨论原子系统开始. 原子由原子核和绕核运动的电子组成, 原子核由质子和中子组成. 质子和电子相互吸引, 而两个电子将相互排斥, 同样两个质子也相互排斥. 这些现象说明有两种不同的电荷, 同种电荷相互排斥, 异种电荷相互吸引. 质子所带电荷称为正电荷, 电子所带电荷称为负电荷, 而中子不带电. 物质由原子组成, 正常情况下物体不显电性, 因为原子中正负电荷相等. 宏观带电体所带电荷种类的不同, 根源在于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同, 如摩擦起电, 是由于物体摩擦时, 一方失去电子而带正电, 一方获得电子而带负电.

我们用电荷量这个物理量表征物体所带电荷的多少, 通常用 Q 或 q 表示, 在国际单位制中它的单位名称为库仑, 符号为 C. 正电荷电荷量取正值, 负电荷电荷量取负值. 一个带电体所带电荷量为其所带正负电荷量的代数和.

2. 电荷守恒

在一个孤立系统中总电荷量是不变的, 即在任何时刻孤立系统中正电荷和负电荷的代数和保持不变, 这称为电荷守恒定律. 电荷守恒定律说明一个与外界无电荷交换的系统, 无论其内部发生什么变化, 系统中正、负电荷的代数和保持不变, 正、负电荷总是成对出现, 成对消失. 例如 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 放射 α 粒子蜕变为 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 的过程:



系统电荷的代数和保持不变; 正、负电子的“湮没”过程:



系统电荷的代数和也保持不变. 电荷守恒定律是从大量实验事实出发总结出来的, 直到现在为止, 在一切已经发现的宏观过程和微观过程中都是成立的.

3. 电荷的量子性

一般来说, 自然界中, 任何带电体所带电荷量都是某一基本单位的整数倍, 这个基本单位就是一个电子所带电荷量的绝对值, 叫做元电荷, 记作 e , 这叫电荷的量子性. 密立根测得一个电子所带电荷量的绝对值即电子的电荷量大小为

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

这说明带电体所带电荷量并非取任何数值, 即是不连续的. 虽然美国科学家提出“基本粒子”的夸克模型, 每一个夸克和反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电荷量, 且这一模型对粒子物理中的许多现象的解释获得很大成功. 然而, 至今在实验中仍未观测到夸克, 电荷的量子性依然不变.

由于我们的大部分章节讨论电磁现象的宏观规律, 而电荷的基本单元 e 非常小, 通常问题中涉及的电荷量非常大 ($Q \gg e$), 因此, 电荷的量子性就表现不出来, 往往可认为带电体上电荷量改变是连续的.

4. 电荷的运动不变性

实验证明, 带电粒子的电荷量与其运动状态无关. 也就是说, 在不同的参考系内所测得的带电粒子的电荷量是相同的. 这就是电荷的运动不变性.

13.2 真空中的库仑定律

1. 真空中的库仑定律

真空中两个静止点电荷的相互作用力的大小和方向服从库仑定律. 定律的内容为:

- (1) 同号电荷相互排斥, 异号电荷相互吸引.
- (2) 相互作用力的方向沿着它们的连线.
- (3) 相互作用力的大小正比于每个粒子所带的电荷量, 而与它们的距离的平方成反比.

用 $\mathbf{F}$ 表示两点电荷之间的相互作用力, 通常称为库仑力, 表示式为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (13-1)$$

或

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (13-2)$$

式中 k 为比例系数, 取决于式中各个量的单位, $\mathbf{r}$ 为从施力者指向受力者的矢量, $\mathbf{e}_r$ 为 $\mathbf{r}$ 的单位矢量, 即 $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$, 如图 13-1 所示.

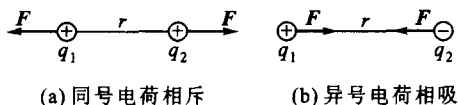


图 13-1 库仑定律

2. 点电荷及库仑定律的适用条件

库仑定律是在实验基础上总结出来的关于真空中两个静止的点电荷间的相互作用力的定律. 所谓点电荷就是指当一个带电体本身的线度比所研究的问题中所涉及的距离小得多时, 该带电体的形状与电荷在其上的分布均无关紧要, 而可看做一个带电的点. 点电荷是一个理想模型, 它是一个相对的概念, 视问题所要求的精度而定.

物理实验和地球物理实验表明, 两点电荷之间的距离的数量级在 $10^{-14} \text{ m} \sim 10^7 \text{ m}$ 的范围内, 库仑定律都是极其精确的.

3. 关于真空中的介电常数

在国际单位制中, 库仑定律的比例常数由实验测得

$$k = 8.988\,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

通常还引入另一常数 ϵ_0 来替代 k , 使

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

于是, 真空中的库仑定律的形式可写成

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (13-3)$$

或

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (13-4)$$

这里 ϵ_0 称为真空中的介电常数. 在国际单位制中它的数值和单位是

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

在库仑定律中引入“ 4π ”因子的作法, 称为单位制的有理化, 这对以后经常用到的电磁学规律的表示式中由于不出现“ 4π ”因子而变得简单些.

例 13-1 氢原子中电子和质子的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$. 求此二粒子的静电力和引力各为多少?

解 由库仑定律知, 它们之间的静电力大小为

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.1 \times 10^{-8} \text{ N}$$

由万有引力定律, 它们之间的万有引力大小为

$$\begin{aligned}
 F_g &= G \frac{m_e m_p}{r^2} \\
 &= \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{N} \\
 &= 3.7 \times 10^{-47} \text{N} \\
 \frac{F_e}{F_g} &= \frac{8.1 \times 10^{-8}}{3.7 \times 10^{-47}} \approx 2 \times 10^{39}
 \end{aligned}$$

可见氢原子中电子和质子的相互作用的静电力远大于万有引力。

4. 静电力的叠加原理

库仑定律只讨论两个静止的点电荷间的作用力,如果真空中同时存在若干个静止的点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ (称点电荷系),实验表明放在它们之中的静止的点电荷 q_0 所受的静电力 F 为点电荷系中每个点电荷单独存在时,对 q_0 的静电力 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的矢量和,即

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_i^n F_i \quad (13-5)$$

例 13-2 在边长为 a 的正方形的四角,依次放置点电荷 $q, 2q, 4q$ 和 $2q$,它的正中放着一个单位正电荷 q_0 ,求这个电荷受力的大小和方向。

解 如图 13-2 所示,两个 $2q$ 和 q_0 的作用力相抵消, q_0 所受到的只是 q 和 $-4q$ 对它的合力,其大小为

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{4qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{5qq_0}{2\pi\epsilon_0 a^2} = \frac{5q}{2\pi\epsilon_0 a^2}$$

方向如图示,指向 $-4q$ 。

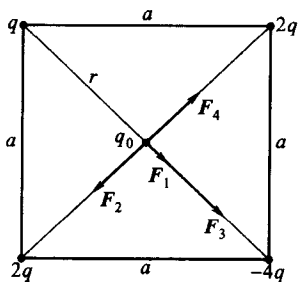


图 13-2 例 13-2 用图

13.3 电场

1. 电场

力是物体间的相互作用,不能脱离物质而存在.在力学中我们遇到的拉力、压力、摩擦力等,是物体间直接接触的作用力.那么带电体之间的静电力是靠什么传递的呢?相互作用力与距离平方成反比的库仑定律说明了静电力就像万有引力一样是一种“超距作用”力,这种不需要物体进行力传递的思想对 18 世纪到 19 世纪初的许多科学家来说都是难以接受的,尽管同样的想法在潜意识里已在牛顿的万有引力中形成.直到 19 世纪中期,法拉第引入电场的概念后,这种困境才得到解决.人们逐渐认识到电荷之间的相互作用是通过一种不同于原子、分子

组成的实物那样的物质来传递的,这种物质称为电场.电荷周围存在电场,其他电荷受到的电性力是电场给予的,即电场是一种特殊的物质.电场具有物质的一系列属性,如具有能量、动量,对电荷有力的作用等.然而,场与实物物质相比,又不尽相同.如原子、分子占据的空间就不能再被其他原子、分子同时占据,但几个电场却可以同时占据同一空间,即场是可以叠加的.也就是说场是一个与实物物质不同的物质形态.具体说,甲电荷周围存在由它激发的电场,乙电荷放在其中将受到电场的作用力,反过来也一样.即

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

电场对电荷的作用力称为电场力.前面提及的电性力(或静电力、库仑力)本质上就是电场力.

静止电荷激发的电场称为静电场.静电场是电磁场的一种简单的特例,它的重要对外表现有:

(1) 力的表现 放入电场中的电荷要受到电场的作用力.

(2) 功的表现 电荷在静电场中移动时,电场对它的作用力就对它作功.

人们正是根据这些对外表现在实验的基础上总结、归纳出静电场的性质和规律.

2. 电场强度

电场对外的重要表现之一是放入电场中的电荷将受到电场力的作用.为此,我们将一个试验电荷 q_0 放入电场中,观察对它的作用力,总结出反映电场性质的物理量.为使 q_0 的引入不改变原来电场的分布且能确定场中各点的性质, q_0 必须满足两个条件:

(1) 几何线度足够小,可以看作一个点电荷.

(2) 电荷量足够小.

实验发现:

(1) 在电场中同一点,当 q_0 大小改变时, q_0 所受的电场力 F 也随之改变,但 $F/q_0 =$ 常矢量,即与 q_0 无关.

(2) 对电场中不同点,一般 F/q_0 的大小不同,方向也不同.由此可见, F/q_0 是与试验电荷无关的,仅决定于电场性质的物理量.我们把量 F/q_0 定义为电场强度,用 E 表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (13-6)$$

上式表明,电场强度是矢量,电场中某场点的电场强度在数值上等于单位正电荷在该点所受的电场力的大小,方向与该点处正电荷受力的方向一致.电场强度是从力的角度来描述电场性质的,但它与电场力又有根本的区别.在国际单位制中,电场强度的单位是 N/C .

由于试验电荷在电场中不同点受到的电场力一般是不同的,所以 $\mathbf{F}$ 是空间坐标的矢量函数,因而电场强度 $\mathbf{E}$ 也是空间坐标的矢量函数,它是除 q_0 之外空间中所有其他电荷共同激发的,是表征静电场中给定点电场性质的物理量,与 q_0 存在与否无关.

3. 电场的叠加原理

若电场是由若干个电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ (称为点电荷系)共同产生的,则由静电力的叠加原理可得电场中某点的电场强度

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} \\ &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n \\ &= \sum_i^n \mathbf{E}_i\end{aligned}\quad (13-7)$$

上式说明,点电荷系中任一场点的电场强度等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和.这称为电场的叠加原理,是静电场的基本性质之一.根据这一原理,可求出任一带电系统产生的电场.

4. 电场强度的计算

(1) 点电荷的场强

设真空中有一电荷 q ,若将试验电荷 q_0 放在距离 q 为 r 的 P 点,则 q_0 所受的电场力为

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

式中 $\mathbf{e}_r$ 是由 q 到 P 的单位矢径,由电场强度的定义式可以得到 P 点的场强

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \mathbf{r} \quad (13-8)$$

显然, $q > 0$ 时, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}$ 同方向; $q < 0$ 时, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}$ 反方向,如图 13-3 所示.

(2) 点电荷系的场强

例 13-3 求电偶极子中垂线上任一点的电场强度.

解 一对等量异号点电荷,其距离 l 远小于所讨论的场点到它们的距离时,此电荷系统称电偶极子,如图 13-4 示.用 l 表示的负电荷到正电荷的矢量线段,则定义 $\mathbf{p} = ql$, $\mathbf{p}$ 称为电偶极矩(简称电矩),它是表示电偶极子性质的物理量.电偶极子是一个重要的物理模型,在研究电介质极化、电磁场的发射等问题中都要用到.

设 $+q$ 和 $-q$ 到偶极子中垂线上任一点 P 处的位置矢量分别为 $\mathbf{r}_+$ 和 $\mathbf{r}_-$, 且 $r_+ = r_-$. 由 (13-8) 式, $+q$ 和 $-q$ 在 P 点处的场强 $\mathbf{E}_+$ 、 $\mathbf{E}_-$ 分别为

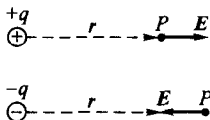


图 13-3 点电荷的电场

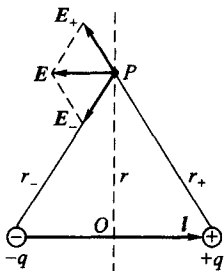


图 13-4 电偶极子中垂线上的电场

$$E_+ = \frac{qr_+}{4\pi\epsilon_0 r_+^3}$$

$$E_- = \frac{-qr_-}{4\pi\epsilon_0 r_-^3}$$

则
$$r_+ = r_- = \sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}} = r \sqrt{1 + \frac{l^2}{4r^2}} = r \left(1 + \frac{l^2}{8r^2} + \dots \right)$$

因为 $r \gg l$, 则 $r_+ = r_- = r$, 因此

$$E = E_+ + E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} (r_+ - r_-) = \frac{-ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{-p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

式中负号表示场强 E 的方向与电偶极矩 p 的方向相反。

(3) 任意带电体的场强

设真空中有一任意带电体, 其电荷连续分布, 该带电体可以看成是由许多无限小的电荷元 dq 组成, 每个电荷元 dq 都可视为点电荷, 它在任一场点 P 产生的场强为 dE , 由(13-8)式有

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} r$$

根据场强叠加原理, 整个带电体在场 P 点产生的场强为

$$E = \int dE = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} r$$

例 13-4 如图 13-5 所示, 设真空中有一均匀带电棒, 长为 l , 所带电荷为 q , 求带电棒中垂线上一点的场强。

解 取如图所示的坐标系, 在细棒上任意取电荷元 dq , $dq = \lambda dx$, $\lambda = \frac{q}{l}$ 为电荷线密度, dq 在场点 P 产生的场强 dE 的大小为

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

dE 的方向如图 13-5 所示, 由电荷分布对 Oy 轴的对称性可知

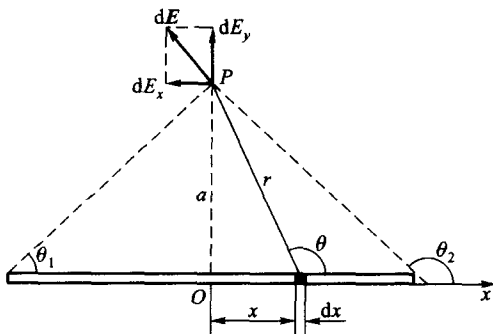


图 13-5 均匀带电细棒的电场

$$E_x = \int dE_x = 0$$

故

$$E = E_y = \int dE_y$$

又

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

统一变量有

$$r = \frac{a}{\sin \theta}, \quad \cot \theta = -\frac{x}{a}, \quad dx = \frac{a d\theta}{\sin^2 \theta}$$

$$dE_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda a d\theta}{\sin^2 \theta} \sin \theta / \left(\frac{a}{\sin \theta} \right)^2 = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sin \theta}{a} d\theta$$

$$\text{则} \quad E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (-\cos \theta) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

所以

$$E = E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2),$$

E 的方向沿 y 轴方向。

若这一均匀带电棒为“无限长”时, 即 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$, 那么

$$E_x = 0, \quad E = E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a} \quad (13-9)$$

例 13-5 如图 13-6 所示, 电荷 q 均匀分布在以 R 为半径的圆环上, 求环的轴线上任意一点 P 的场强。

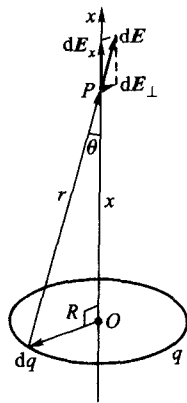


图 13-6 均匀带电圆环轴线上的电场

解 取坐标轴 Ox 如图所示, 电荷元 dq 在环的轴线上 P 点的场强 dE 大小为 $dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, 方向如图所示, 将 dE 沿平行和垂直于 x 方向分解为 dE_x , $dE_\perp$. 由于电荷分布的对称性, 同一直径两端电荷元在 P 产生的场强 $dE_\perp$ 分量相互抵消, 故 P 的总场强等于所有电荷元在 P 产生的场强 dE_x 分量之和:

$$E = \int dE_x = \int dE \cos \theta$$

又 $\cos \theta = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}}$, 则

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

E 的方向沿轴线方向.

在以上三例中, 我们都是依据电场的叠加原理, 以点电荷(或电荷元)产生的电场为基础, 求出带电体系的电场分布, 这种方法通常称为场强叠加法. 这是计算电场强度的一种常用方法.

5. 带电体在电场中所受到的力

在已知静电场中各点电场强度的条件下, 由电场强度定义, 可以求点电荷 q 在电场中各点受到的电场力, 即

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

例 13-6 求电偶极子在均匀电场中受到的力矩.

解 如图 13-7 所示, 电偶极子处在均匀电场 E 中, 正、负电荷所受的力分别为 $\mathbf{F}_+ = q\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{F}_- = -q\mathbf{E}$, 它们的大小相等, 方向相反, 矢量和为零. 但它们对 O 点的力矩之和不为零, 即

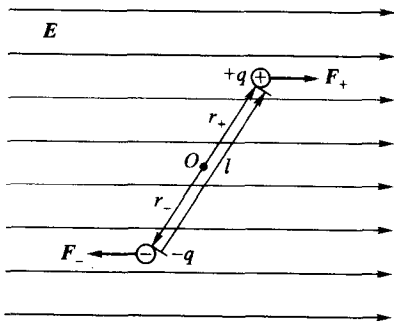


图 13-7 电偶极子在外电场中的受力情况

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{M}_+ + \mathbf{M}_- = \mathbf{r}_+ \times \mathbf{F}_+ + \mathbf{r}_- \times \mathbf{F}_- = q\mathbf{r}_+ \times \mathbf{E} - q\mathbf{r}_- \times \mathbf{E} \\ &= q(\mathbf{r}_+ - \mathbf{r}_-) \times \mathbf{E} = q\mathbf{l} \times \mathbf{E} \end{aligned}$$

由 $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$, 有 $\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$, 即力矩的作用总是使电偶极子转向电场 $\mathbf{E}$ 的方向, $\mathbf{M}$ 的大小为

$$M = pE \sin \theta$$

θ 为 $\mathbf{p}$ 与 $\mathbf{E}$ 小于 180° 的角.

对电荷分布是连续的带电体, 可将其看成是由许多电荷元组成的系统, 把这些电荷元当作点电荷, 这个带电体所受的静电力为这些电荷元所受的静电力的叠加.

13.4 真空中的高斯定理

1. 电场线

为了形象地描绘电场在空间中的分布, 我们可以在电场中画一系列假想的曲线, 这些假想的曲线可以使我们对电场的分布一目了然, 这些假想的曲线称为电场线(旧称电力线).

为了使这些电场线能够反映电场在空间的分布, 即可以直观地看出它的方向和大小, 我们规定所画的电场线上任一点的切线方向表示该点的电场强度 $\mathbf{E}$ 的方向, 如图 13-8 示, 曲线的疏密表示场强的大小. 设想通过该点画一个垂直于电场方向的面元 $dS_\perp$, 通过此面元画 $d\Psi$ 条电场线, 使得

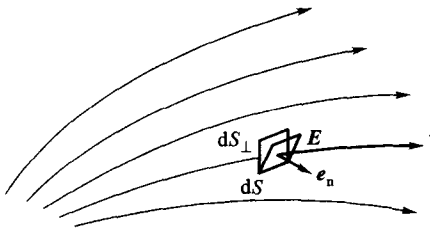


图 13-8 电场线密度与场强大小的关系

$$E = \frac{d\Psi}{dS_\perp} \quad (13-10)$$

它表明电场中某点电场强度的大小等于该处的电场线数密度, 即该点附近垂直于电场方向的单位面积所通过的电场线条数. 图 13-9 画出了几种不同分布的电荷产生的电场的电场线.

静电场的电场线有两个性质:

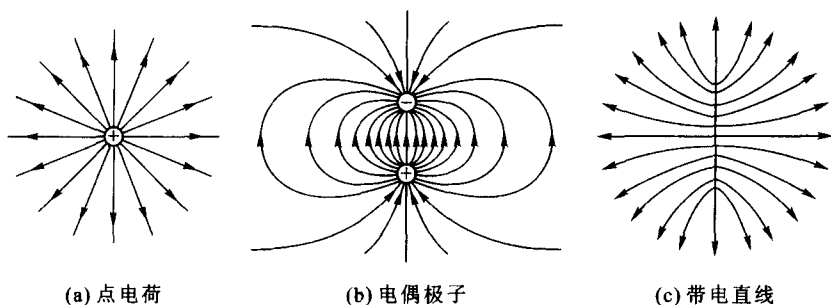


图 13-9 几种静电电荷的电场线

(1) 不形成闭合回线, 在没有电荷时, 任意两条电场线不会相交, 即静电场中每一点的场强只有一个方向.

(2) 电场线起自正电荷, 终止于负电荷 (或从正电荷起伸向无限远, 或来自无限远到负电荷止), 不会在没有电荷的地方中断.

注意: 描绘电场线的目的在于能形象反映电场中场强的分布情况, 并非电场中真有这些真实的线.

2. 电通量

由式(13-10)可看出, 如果知道通过电场中某一面元的电场线条数, 也就可以知道该处的场强大小. 因此, 知道通过电场中某一面积的电场线条数是很有用的, 穿过电场中任意曲面的电场线条数称穿过该面的电通量, 用符号 Ψ 表示. 下面分几种情况来说明计算电通量 Ψ 的方法.

(1) 在均匀电场 E 中, 穿过垂直于电场方向的任意平面 S (如图 13-10(a) 所示) 的电通量 $\Psi = ES$.

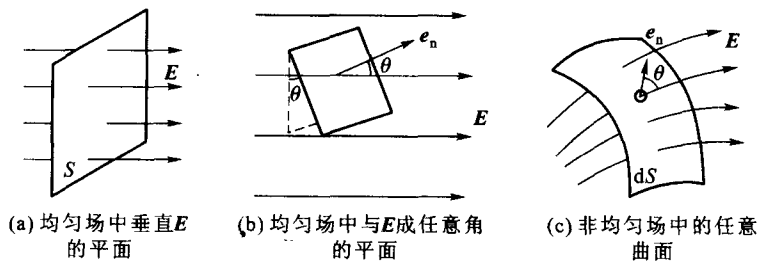


图 13-10 电通量计算用图

(2) 如果平面 S 与场强 E 不垂直, 它的法线 e_n 与 E 成 θ 角, 如图 13-10(b) 所示, 则通过 S 的电通量为