教育科学“十五”国家规划课题研究成果

物理学

（第二版）

下　册

祝之光　编
易正湘　李佐周　修订

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

物理学.下册/祝之光编.—2版.—北京:高等教育出版社,2004.7
ISBN 7-04-014438-7

Ⅰ.物… Ⅱ.祝… Ⅲ.物理学-高等学校-教材
Ⅳ.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第044900号

策划编辑 胡凯飞 责任编辑 王文颖 封面设计 王凌波
责任绘图 吴文信 版式设计 张 岚 责任校对 朱惠芳 责任印制

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 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16
印 张 18.25
字 数 340 000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 http://www.hep.edu.cn
http://www.hep.com.cn

版 次 1988年5月 第1版
年 月 第2版
印 次 年 月 第 次印刷
定 价 19.40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

内容简介

本书是教育科学“十五”国家规划课题的子课题“应用型人才培养的创新与实践”项目的成果，是在第一版的基础上修订而成的。第一版曾获国家教委优秀教材二等奖。署名祝之光是本书编写组（包括李迺伯、李佐周、王子大、柯金星、曾庆福、陈灵草、曾毅、庄梅英、易正湘、方强等）的集体笔名。受祝之光委托，本版由易正湘、李佐周负责修订。修订版保存了原书的优点。

本书内容包括：质点运动、时间和空间，力、动量和能量，刚体定轴转动，气体分子动理论，热力学基础，静电场，稳恒磁场，电磁感应和电磁场，振动学基础，波动学基础，波动光学、波和粒子等共十二章及附录。

本书选材恰当，内容简练，深广度要求适度，物理概念清晰，教学体系安排有一定特色。书中各节前有预习要点，节后有习题，在各大部分之后编有讨论参考题和自我检测题。此外，还配套编写了本书的教师用书、音像教学光盘和学生学习指导书（另版），在教师用书中给出了本书各类题目的全部详细参考解答，更方便教和学。

本书编写了一些学生课外阅读材料，介绍与现代高新科技联系紧密的物理前沿知识，以开拓学生视野和激发学生的学习兴趣。

本书可作为高等学校理工科各专业70～90学时的大学物理课程的教材，也可供高职、高专、成人高校等选用及有关科技人员参考。

目　　录

第六章　静电场 …… 1

§ 6 - 1　电场强度 …… 1

§ 6 - 2　高斯定理 …… 12

§ 6 - 3　电势 …… 19

§ 6 - 4　静电场中的导体和电介质 …… 31

§ 6 - 5　电容　电场的能量 …… 41

讨论参考题之四 …… 48

自我检测题之三 …… 49

第七章　稳恒磁场 …… 55

§ 7 - 1　磁感应强度　磁场的高斯定理 …… 55

§ 7 - 2　安培定律 …… 65

§ 7 - 3　毕奥 - 萨伐尔定律 …… 71

§ 7 - 4　安培环路定律 …… 79

§ 7 - 5　介质中的磁场 …… 85

第八章　电磁感应　电磁场 …… 94

§ 8 - 1　电磁感应的基本定律 …… 94

§ 8 - 2　动生电动势　* 涡旋电场 …… 101

§ 8 - 3　自感　* 互感　磁场的能量 …… 108

* § 8 - 4　位移电流　麦克斯韦方程组 …… 116

讨论参考题之五 …… 120

自我检测题之四 …… 122

第九章　振动学基础 …… 129

§ 9 - 1　简谐振动的规律 …… 129

§ 9 - 2　简谐振动的描述 …… 137

§ 9 - 3　简谐振动的合成 …… 146

阅读材料之五　混沌 …… 152

第十章　波动学基础 …… 157

§ 10 - 1　波动的基本概念 …… 157

§ 10 - 2 平面简谐波波动方程 …… 163
§ 10 - 3 波的能量 …… 170
§ 10 - 4 波的叠加 …… 173
讨论参考题之六 …… 179
自我检测题之五 …… 181
第十一章 波动光学 …… 184
§ 11 - 1 光的相干性 光程 …… 185
§ 11 - 2 分波面干涉 …… 191
§ 11 - 3 分振幅干涉 …… 197
§ 11 - 4 光的衍射 …… 206
§ 11 - 5 衍射光栅 …… 214
§ 11 - 6 光的偏振 …… 221
讨论参考题之七 …… 227
自我检测题之六 …… 228
阅读材料之六 激光 …… 230
阅读材料之七 光通信 …… 234
第十二章 波和粒子 …… 237
§ 12 - 1 量子论的出现 …… 237
§ 12 - 2 物质波 不确定关系 …… 249
* § 12 - 3 波函数 薛定谔方程及简单应用 …… 256
讨论参考题之八 …… 263
自我检测题之七 …… 264
阅读材料之八 从电子显微镜到扫描隧道显微镜 …… 265
阅读材料之九 纳米科技 …… 270
阅读材料之十 对称性与守恒定律 …… 273
习题答案 …… 277
参考文献 …… 284

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第六章

静 电 场

电磁运动是物质的基本运动形式之一．电磁运动的规律，不仅是人类深入探索自然的理论武器，而且在工程技术中有着广泛的应用．

19 世纪人们在电磁现象的研究中，提出了电场和磁场的概念，此后逐步认识到场是物质存在的一种形式，这是人类认识上的一次质的飞跃．场的研究今天已成为自然科学的前沿，这方面新的突破，无疑将对工程技术的发展产生深远的影响．

本章主要研究静电场的基本性质和规律，这是学习整个电磁场理论的基础．

§6-1 电场强度

预习要点

1．认识物质的电结构和电荷守恒定律．

2．初步了解真空中库仑定律及其矢量表达式．

3．领会电场的概念和电场强度的定义．

4．点电荷电场强度分布的规律如何?

5．什么是电场强度叠加原理，怎样应用它求电场强度分布．

电荷 人们对于电的认识最初来自摩擦起电．美国的富兰克林（B. Franklin，1706—1790）在实验的基础上指出：自然界只存在正负两种电荷，并且同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引．

组成任何物质的原子，都具有带正电的质子和带负电的电子．质子集中在原子核内，电子在核外绕核运动．每一个质子所带的电荷和每一个电子所带的电荷的数值相等．在正常状态下，一个原子中的质子数和电子数相等，因此，原子呈电中性，整个宏观物体也呈电中性．如果原子或分子由于某种原因失去或获得电子，就会成为带正电或带负电的离子．如果宏观物体（或物体的一部分）由于某种原因失去或获得一定数量的电子，使电子的总数和质子的总数不再相等，就将改变物体的电中性，而使物体带正电或带负电．

摩擦起电、感应起电等事实表明，任何使物体带电的过程，都是使物体中原有的正、负电荷分离或转移的过程．一个物体失去一些电子，必有其他物体获得这些电子．于是人们总结出电荷守恒定律:

在一个与外界没有电荷交换的系统内，正负电荷的代数和在任何物理过程中始终保持不变.

电荷守恒定律，在宏观过程和微观过程中都适用，它是物理学中的基本定律之一.

电子是自然界具有最小电荷 - e 的粒子，所有带电体或其他微观粒子的电荷都是电子电荷绝对值的整数倍①．即物体所带电荷是不连续的．这称为电荷的量子化．因此，可将电子的电荷 - e 的绝对值即 e 作为电荷的单位，称为元电荷．SI 中电荷的单位是库仑，符号是 C．经实验测定 $e = 1.602\times 10^{-19}$ C．在宏观过程中，我们遇到的电荷要比电子的电荷大得多．例如，额定电压为 220 V、功率为 25 W 的灯泡正常工作时，每秒钟就有大约 7×10^{17} 个电子通过灯丝的横截面．对于这样大量的电荷，电荷的量子化是显示不出来的，这时，一般可以认为电荷是连续变化的.

库仑定律　1785 年，法国物理学家库仑（C. A. Coulomb，1736—1806）利用扭秤对真空中静止的点电荷间的相互作用进行了定量研究，总结出真空中点电荷间相互作用的规律，即库仑定律:

在真空中，两个静止的、电荷量为 q_1 和 q_2 的点电荷之间的相互作用力的大小，与 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；作用力的方向沿着这两个点电荷的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸.

点电荷是一个理想模型，是静电研究中的重要概念．所谓点电荷，是指这样的带电体，它的线度比它与其他带电体的距离小得多.

如图 6 - 1 所示，用 F_{12} 表示 q_2 对 q_1 的作用力，F_{21} 表示 q_1 对 q_2 的作用力，e_r 表示由 q_1 指向 q_2 的单位矢量，则库仑定律可用矢量式表示如下:

$$\boxed{F_{21} = -F_{12} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}e_r} \qquad (6-1)$$

在 SI 中，式中比例系数　$k \approx 9.00\times 10^{9}$　$N\cdot m^2\cdot C^{-2}$．通常引入 ε_0，令

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

① 近代物理从理论上预言：自然界存在电荷为分数（如 $\pm\frac{1}{3}e$ 或 $\pm\frac{2}{3}e$）的粒子（称为夸克或层子）．中子和质子等是由夸克组成的.

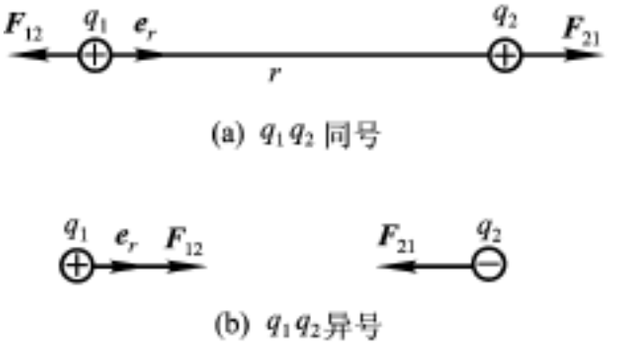


图 6-1 库仑定律

于是真空中的库仑定律可写为

$$F_{21} = -F_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}e_r$$

ε_0 称为真空介电常数或称真空电容率. $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} \approx 8.85\times 10^{-12} C^2\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}$.

我们将在后面看到，把式 (6-1) 中比例系数 k 写成 $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$，可以简化由式 (6-1) 所导出的一些常用的公式. 在以后的讨论中，凡未指明介质时，均为真空中情况.

电场 在法拉第 (M. Faraday, 1791—1867) 之前，人们认为两个相隔一定距离的带电体、磁体或电流之间的相互作用是所谓超距作用，即这些作用的传递既不需要媒介，也不需要时间. 从法拉第开始到麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879)，许多科学家经过深入的分析研究，逐步形成了电场和磁场的概念，认识到电磁相互作用是以电场和磁场来传递的，这种传递的速度与光速相同. 现代科学和实践已经证明，场是物质存在的一种形式. 在一定条件下，电磁场可以脱离电荷和电流独立存在，具有自己的运动规律. 电磁场和实物 (即由原子、分子等组成的物质) 一样具有能量、动量等属性. 不同的是电磁场的静质量为零，而且若干电磁场可以同时占据同一空间，也就是说，场是可叠加的.

根据场的观点，任何电荷都将在自己周围的空间激发电场. 电场对处于其中的任何其他带电体都有力的作用，这种力称为电场力. 也就是说，电荷之间的相互作用力是通过电场实现的. 即

$$\text{电荷} \overset{\text{激发}}{\underset{\text{作用}}{\Longrightarrow}} \boxed{\text{电 场}} \overset{\text{作用}}{\underset{\text{激发}}{\Longrightarrow}} \text{电荷}$$

本章讨论一种简单的情况，即相对于观察者为静止的电荷在其周围空间激发的电场，这种电场称为静电场，简称为电场.

电场强度 为了从力的方面描述电场的特性，人们引入了电场强度的概念.

电场中各点处场的特性，可利用试验电荷进行研究. 为确定起见，通常规

定试验电荷带正电. 试验电荷还应满足两个条件: (1) 它所带电荷 q_0 足够小, 把它引入被测电场中, 在实验精度范围内, 不会影响原有电场的分布; (2) 它的线度很小, 可以视为点电荷. 这样, 我们说点电荷位于电场中某点才有意义.

研究的结果表明, 把试验电荷放在电场中任一给定点 (称为场点) 处, 改变试验电荷所带电荷 q_0 的量值, 各试验电荷所受电场力 F 的大小将与电荷量成正比地改变, 力的方向不变. 即对给定的场点, 比值 F/q_0 具有确定的大小和方向. 但是, 在不同的场点, 比值 F/q_0 的大小和方向一般不同. 这说明比值 F/q_0 只与试验电荷所在场点的位置有关, 而与试验电荷的量值无关, 即只是场点位置的函数. 这一函数, 从力的方面反映了电场本身所具有的客观性质. 因此, 我们将比值 F/q_0 定义为电场强度, 简称场强, 用 E 表示. 于是得场强的定义式为

$$E \xrightarrow{\text{def}} \frac{F}{q_0} \tag{6-2}$$

场强是矢量. 由式 (6-2) 可知, 在电场中某点处, 场强的大小等于单位正电荷在该点所受电场力的大小; 场强的方向与该单位正电荷在该点所受电场力的方向相同. 在 SI 中, 场强的单位是牛顿每库仑 ($N \cdot C^{-1}$).

根据场强的定义, 单位正电荷在场中某点受力为 E, 那么一个具有电荷 q 的点电荷在该场点所受电场力为

$$F = qE \tag{6-2a}$$

显然, 正电荷所受电场力方向与场强方向相同, 负电荷所受电场力方向与场强方向相反.

点电荷的场强 如图 6-2 所示, 将试验电荷 q_0 引入由点电荷 Q 所激发的电场中的某点 P. 用 r 表示 Q 与 P 间的距离, e_r 表示由 Q 指向 P 的单位矢量. 根据库仑定律, q_0 在 P 点受到的电场力为

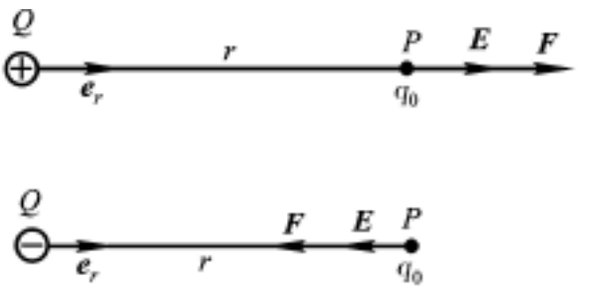


图 6-2 点电荷的场强

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq_0}{r^2}e_r$$

将上式代入场强定义式 (6-2) 得 P 点处的场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}e_r \qquad (6-3)$$

由于 P 点是任意的，所以式 (6-3) 所表示的是点电荷电场中任一点的电场强度. 它反映了点电荷电场的场强分布规律: 点电荷电场中某点的场强 E 的大小与场源电荷所带电荷量 Q 成正比，与该点到场源电荷的距离 r 的平方成反比; 场强 E 的方向沿该点与场源电荷所在点的连线，Q 为正时，与 e_r 方向相同，E 背离 Q; Q 为负时，与 e_r 方向相反，E 指向 Q. 显然，在点电荷的电场中，位于以场源电荷 Q 所在点为球心的同一球面上的各点，场强的大小是相同的，但各点场强的方向不同，分别沿各点所在的球径. 可见，点电荷的场是球对称的非均匀电场.

场强叠加原理　在 n 个点电荷 q_1、q_2、…、q_n 共同激发的电场中，根据力的叠加原理，试验电荷 q_0 在某场点 P 所受电场力为

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

式中 F_1、F_2、…、F_n 为 q_1、q_2、…、q_n 单独存在时 q_0 所受的力.

将上式除以 q_0 得

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_n = \sum_{i=1}^{n} E_i \qquad (6-4)$$

式中 E_1、E_2、…、E_n 分别代表 q_1、q_2、…、q_n 单独存在时 P 点的场强，而 E 代表它们同时存在时 P 点的合场强. 由此得到场强叠加原理:

点电荷系所激发的电场中某点的场强等于各点电荷单独存在时各自激发的电场在该点的场强的矢量和. 即

$$E = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i}{r_i^2}e_{ri} \qquad (6-4a)$$

式 (6-4a) 是对点电荷系中每一电荷应用式 (6-3)，并代入到式 (6-4) 中得到的. 式中 r_i 表示第 i 个场源电荷 q_i 到所研究的场点 P 的距离，e_{ri} 表示由 q_i 所在点指向 P 点的单位矢量.

应当注意，场强叠加是矢量叠加，要用矢量加法计算.

任意带电体电场的场强　任意带电体的电荷分布从宏观看是连续的. 根据不同情况，有时把电荷看成在一定体积内连续分布 (体分布)，有时把电荷看成在一定面积上连续分布 (面分布)，有时把电荷看成在一定曲线上连续分布

(线分布). 相应地可引入电荷的体密度 ρ、面密度 σ和线密度 λ:

$$\rho=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta V}=\frac{dq}{dV}$$
$$\sigma=\lim_{\Delta S\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta S}=\frac{dq}{dS} \qquad (6-5)$$
$$\lambda=\lim_{\Delta l\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta l}=\frac{dq}{dl}$$

式 (6 - 5) 中 ΔV、ΔS 和 Δl 分别为将带电体分割得到的体积元、面元和线元, 各 Δq 分别为 ΔV、ΔS 或 Δl 中的电荷. 当 ΔV、ΔS 或 Δl 取为无限小时, 相应地电荷元 dq 可视为点电荷, 整个带电体可视为由无穷多个点电荷 dq 组成的点电荷系. 这样就可以利用场强叠加原理来计算任意带电体电场的场强了, 不过应将式 (6 - 4) 或式 (6 - 4a) 中的求和换成积分. 计算步骤如下:

1. 分割连续带电体, 取电荷元 $dq=\rho dV$ (体分布), 或 $dq=\sigma dS$ (面分布), 或 $dq=\lambda dl$ (线分布).

2. 写出电荷元 dq 在所研究的场点 P 激发的场强 dE, 当 dq 可视为点电荷时, $dE=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}e_r$. 式中 r 为 dq 到点 P 的距离, e_r 为由 dq 指向点 P 的单位矢量.

3. 根据场强叠加原理, P 点的场强为

$$E=\int dE \qquad (6-6)$$

当 dq 可视为点电荷时,

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r^2}e_r \qquad (6-6a)$$

注意, 式 (6 - 6) 和式 (6 - 6a) 都为矢量积分. 只有当带电体的所有电荷元 dq 在场点 P 激发的场强 dE 的方向相同时, 才有 $E=\int dE$ 和 $E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r^2}$. 如果各电荷元 dq 在点 P 激发的 dE 方向不同, 则 $E\neq\int dE$ 或 $E\neq\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r^2}$! 这时应根据所研究的问题适当选择坐标轴的方向, 建立坐标系. 将 dE 沿坐标轴投影为 dE_x、dE_y 和 dE_z, 先计算出 E 在坐标轴上的投影 E_x、E_y 和 E_z:

$$E_x=\int dE_x,\quad E_y=\int dE_y,\quad E_z=\int dE_z \qquad (6-6b)$$

再由矢量合成求得 E. 即

$$E=E_x i+E_y j+E_z k \qquad (6-6c)$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

E 的大小是

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \tag{6-6d}$$

式 (6-6)、(6-6a) 和 (6-6b) 中的积分区域由激发场的电荷分布范围确定.

在多个带电体共同激发的电场中，可先求各个带电体在场点的场强，然后按场强叠加原理式 (6-4) 求合场强.

例 6-1 有两个大小相等的正负电荷 +q 和 -q，当两者之间的距离比所考察的场点到它们的距离小得多时，此电荷系统就称为电偶极子. 如图 6-3所示，+q 和 -q 两电荷连线 l 的中垂面上一点 P，与 l 的中点 O 的距离为 y，$l \ll y$，求电偶极子在 P 点的场强.

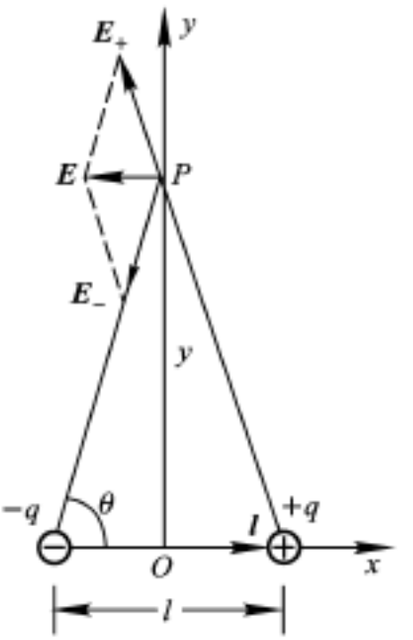


图 6-3 电偶极子的场强

解 建立如图 6-3 所示的坐标系 Oxy，用 E_+ 和 E_- 分别表示 +q 和 -q 在 P 点产生的场强，根据场强叠加原理式 (6-4)，P 点的合场强为

$$E = E_+ + E_-$$

由图 6-3 可判知，E_+ 和 E_- 在 x 轴上的分量大小相等，方向一致，都沿 x 轴负向；在 y 轴上的分量大小相等，方向相反. 故

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

$$E_y = E_{+y} + E_{-y} = 0$$

由图可见，$E_+ = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0(y^2 + l^2/4)}$，$\cos\theta = \dfrac{l}{2(y^2 + l^2/4)^{1/2}}$，故 E 的大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = |E_x| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ql}{(y^2 + l^2/4)^{3/2}}$$

E 的方向沿 x 轴的负向.

由于 $l \ll y$，故有

$$E \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ql}{y^3}$$

连接 +q 和 -q 两个电荷的直线，称为电偶极子的轴线. 规定从 -q 到 +q 的矢径 l 的方向为轴线的正方向. 定义电荷 q 与矢径 l 的乘积为电偶极矩，即 $p \overset{\text{def}}{\Longrightarrow} ql$. 则电偶极子轴线中垂面上距轴线中点 O 为 y ($y \gg l$) 的点的场强公式可记为

$$E = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{y^3}$$

实际问题中，许多带电系统可以等效为一个电偶极子或其组合．例如，组成物质的分子或原子都带有等量异号电荷，当正负电荷的中心不完全重合时，就可以等效为一个电偶极子．

例 6 - 2 求均匀带电细棒中垂面上的场强分布，设棒长为 2l，总电荷量为 q（q > 0），棒在纸面上．

解 可以想见，在包含细棒的所有平面内，如图 6 - 4（a）中的平面Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等，电场的分布情况都是相同的（具有轴对称），因此，我们只需研究纸面上的电场分布．如图 6 - 4（b）所示，取细棒中点 O 为原点，建立坐标系 Oxz.

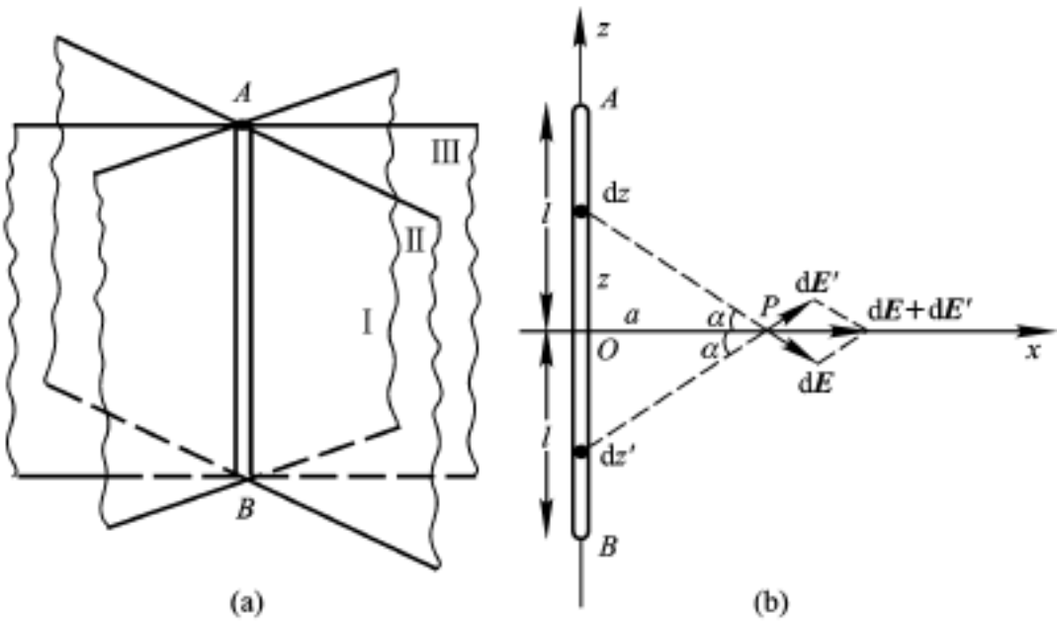


图 6 - 4 均匀带电细棒中垂面上的场强

细棒均匀带电，电荷的线密度 $\lambda = \frac{q}{2l}$，λ 为一常量．将细棒分割为许多对相等的无限小线元 dz 和 dz′，相应的无限小电荷元 $dq = dq' = \lambda dz$．它们的分布对称于中垂线 Ox 轴，它们在中垂线上任一点 P 产生的场强 dE 和 dE′ 也对称于中垂线．因此，所有 dE 的 z 分量的总和为零，即 $E_z = 0$．合场强 E 的方向应沿 x 轴方向，且 $E = \sqrt{E_x^2 + E_z^2} = E_x$．可见，只需求 E_x．

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{a^2 + z^2} = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dz}{a^2 + z^2}$$

$$dE_x = dE\cos\alpha = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dz}{a^2 + z^2}\frac{a}{(a^2 + z^2)^{1/2}}$$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{a\,dz}{(a^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$E = E_x = \int_B^A dE_x = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-l}^{l}\frac{a\,dz}{(a^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{\lambda l}{2\pi\varepsilon_0 a(a^2 + l^2)^{1/2}}$$

当细棒为无限长时，任何垂直于它的平面都可看成是中垂面．所以，无限长带电细棒周围任何点的场强都与棒垂直．并且由于 $l\to\infty$，所以有

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 a}$$

即无限长带电细棒周围任一点的场强大小 E，都与该场点到细棒的距离 a 成反比．对于有限长细棒而言，在靠近其中部附近的区域（$a \ll l$），这一结果也近似成立．

由上面两个例题可见，利用场强叠加原理计算场强时，注意电荷分布和电场分布的对称性往往能使我们立即看出合成矢量 E 的某些分量等于零，从而容易判断出合成矢量 E 的方向，并简化计算．

例 6-3　如图 6-5 所示，计算电偶极子在均匀电场 E 中所受的力矩．

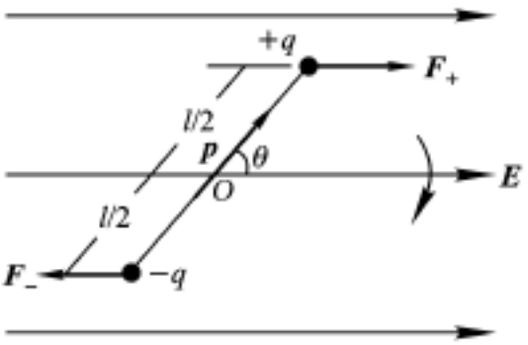


图 6-5　均匀电场中电偶极子所受力矩

解　如图 6-5 所示，$F_+ = F_- = qE$，力 F_+ 和 F_- 对于 l 的中点 O 的力臂都是 $\frac{l}{2}\sin\theta$ 对于中点 O，它们的力矩的方向也相同（都垂直纸面指向纸内）．因此，电偶极子所受合力矩为

$$M = (F_+)\frac{l}{2}\sin\theta + (F_-)\frac{l}{2}\sin\theta = qlE\sin\theta$$

上式可写成矢量式：

$$M = ql \times E = p \times E$$

在这一力矩作用下，电偶极子将发生转向．当 p 与 E 垂直时，力矩 M 最大；当 p 与 E 方向相同或相反时，力矩 $M = 0$．p 与 E 方向相同时，电偶极子在电场中达到稳定平衡．可见，电偶极子在电场中所受力矩的作用总是使它的电偶极矩 p 的取向趋于和场强 E 的方向相一致．

例 6-4　试计算均匀带电圆环轴线上任一给定点 P 处的场强．设圆环的半径为 R，圆环所带的电荷量为 q，P 点与环心的距离为 x．

解 如图 6 - 6 所示，在圆环上任取线元 dl，圆环上线电荷密度 $\lambda = \frac{q}{2\pi R}$，dl 所带电荷量为 $dq = \lambda dl$.

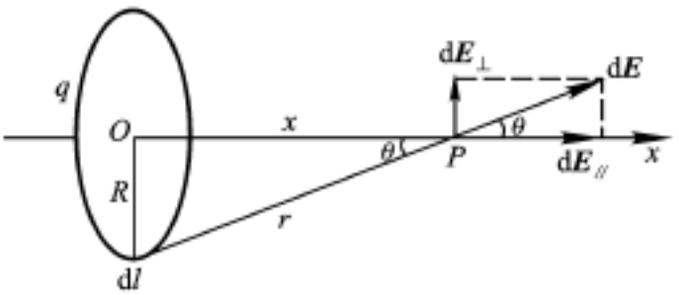


图 6 - 6 均匀带电圆环轴线上一点处的场强

设 P 点与 dq 的距离为 r，dq 在 P 点处产生的场强为 dE，其大小

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}$$

dE 的方向如图. 各电荷元 dq 在 P 点激发的场强，方向各不相同. 根据对称性，各电荷元的场强在垂直于 x 轴方向上的分量 $dE_\perp$ 相互抵消. 所以 P 点的合场强是平行于 x 轴的那些分量 $dE_{/\!/}$ 的总和，即

$$E = \int_L dE_{/\!/} = \int_L dE\cos\theta$$

式中 θ是 dE 与 x 轴的夹角. 上式积分遍及整个圆环. 给定点 P 与所有电荷元的距离相同，都是 r，角 θ也具有相同的值. 即 r 和 θ都不是变量. 所以

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_L \frac{dq}{r^2}\cos\theta$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r^2}\cos\theta\oint_0^{2\pi R} dl = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\theta$$

由图 6 - 6 可知:

$$\cos\theta = \frac{x}{r},\quad r^2 = R^2 + x^2$$

代入上式后得

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qx}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

当 $x \gg R$ 时，$(R^2 + x^2)^{3/2} \approx x^3$，则有

$$E \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{x^2}$$

即在远离环心的地方，带电环的场强可视为电荷全部集中在环心处所产生的场强.

习 题

6-1 根据库仑定律 $F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}$，当 $r\to0$ 时，$F\to\infty$，这样推理对吗？为什么？

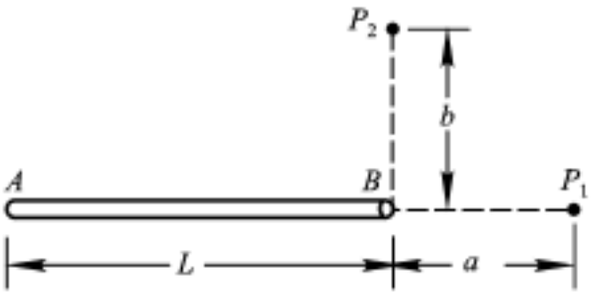
6-2 有人断言：无限大均匀带电平薄板外两侧各点场强 E 的方向必与薄板垂直，并且至少与薄板两侧等距离的各点场强的大小相等．试分析这种看法是否合理．有限大均匀带电薄板在什么情况下可以视作“无限大”？

6-3 在坐标原点及 $(\sqrt{3},\ 0)$ 点分别放置电荷 $Q_1=-2.0\times10^{-8}$ C 及 $Q_2=1.0\times10^{-6}$ C 的点电荷，求点 P $(\sqrt{3},\ -1)$ 处的场强（坐标单位为 m）．

6-4 如图所示，长为 L 的均匀带电细棒 AB．设电荷的线密度为 λ 求

(1) AB 棒延长线上 P_1 点的场强（P_1 点到 B 点的距离为 a）；

*(2) 棒端点 B 正上方的 P_2 点的场强（P_2 到 B 点的距离为 b）．



题 6-4 图

6-5 一根玻璃棒被弯成半径为 R 的半圆形，其上电荷均匀分布，总电荷量为 q．求半圆中心 O 点的场强．

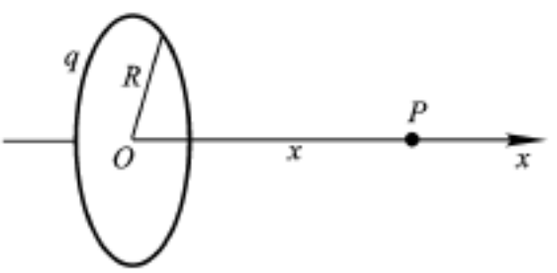
6-6 如图所示，有一半径为 R 的均匀带电圆环，总电荷量为 q．利用例 6-4 所得结果，

(1) 求环心处的场强；

(2) 轴线上什么地方场强最大？它的数值是多少？

*(3) 画出轴线上的 E-x 曲线；

*(4) 若是均匀带电的圆盘（半径为 R，电荷面密度为 σ），你能否利用例 6-4 的结论提出计算此圆盘轴线上离盘心 x 处的场强的方法？



题 6-6 图

§6-2 高斯定理

预习要点

1. 引入电场线的意义是什么？电场线有哪些性质？

2. 领会电场强度通量这个概念及计算公式.

3. 高斯定理的内容是什么？其数学表达式如何？高斯定理反映静电场具有什么性质？

4. 如何应用高斯定理计算某些特殊分布电荷的场强？

电场线 为了形象地描述电场中场强的分布情况，我们在电场中作出一些假想的线——电场线. 这些电场线应该反映电场的特征，描述场中各点场强 E 的方向和大小. 为此，对电场线作如下规定：

1. 电场线上每一点的切线方向与该点场强 E 的方向一致. 这样，电场线的方向就反映了场强方向的分布情况.

2. 在任一场点，使通过垂直于 E 的单位面积的电场线数目(称电场线密度)，正比于该点处场强 E 的大小. 设通过电场中某点垂直于该点场强方向的无限小面元 $dS_\perp$ 的电场线数为 $d\Psi_E$，那么，该点处的电场线密度就是 $\frac{d\Psi_E}{dS_\perp}$. 按上述规定

$$E \propto \frac{d\Psi_E}{dS_\perp}$$

在 SI 中，场强的大小 E 等于电场线密度，即

$$E = \frac{d\Psi_E}{dS_\perp} \qquad (1)$$

于是，电场线的疏密就描述了场强大小的分布情况. 电场中，电场线稀疏处场强小，电场线密集处场强大.

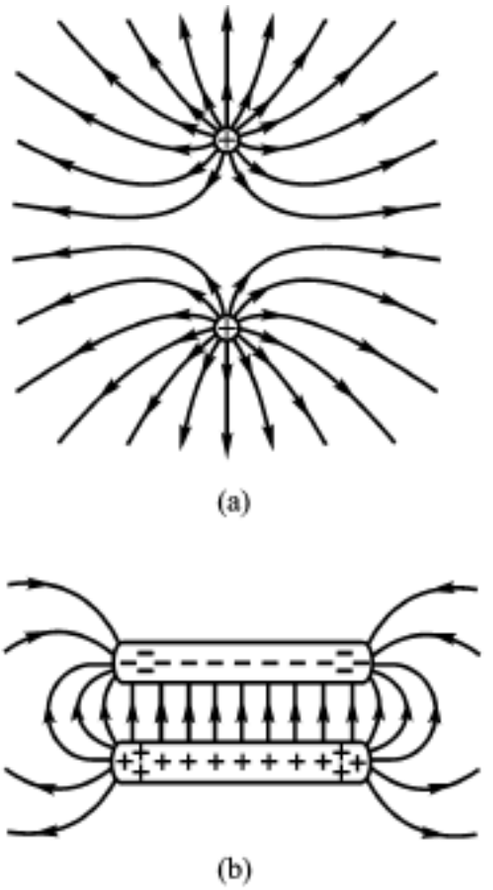


图 6-7 常见的电场线图

电场线只是形象描述场强分布的一种手段. 电场线实际是不存在的，但借助于实验可将电场线模拟出来. 例如在水平玻璃板上撒些细小的石膏晶粒，或在油上浮些草籽，置于电场中，它们就会沿电场线排列. 图 6-7 是根据实验模拟结果和关于电场线的规定所作的两种常见的电场线图. 从中可以看出电场线有下列基本性质：

需要全本请访问 www.ertongbook.com