



“十三五”普通高等教育规划教材

GONGKE DAXUE WULIXUE

工科大学物理学 (下)

主 编 鲁 刚



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

工科大学物理学

(下)

主 编 鲁 刚

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

《工科大学物理学》分上、下两册,共5篇16章。涵盖力学、热学、电磁学、光学、量子论和量子力学简介等内容。每章开头介绍一些背景知识和物理学发展史等内容,便于学生深入理解有关物理概念和物理定律,有助于提高学生对自然科学的兴趣和热情。本书简洁、明晰地介绍了物理学的基本概念和基本规律,融入了一些物理方法和物理思想等内容,以期帮助学生在在学习物理知识的同时,了解物理学的基本方法和思想,提高学生的逻辑思维能力。书中设置了一些与实际联系密切的例题、思考题和习题,以帮助学生加深对物理知识的理解,提高他们对物理知识的应用能力。

本书可作为高等学校理工科类有关专业的大学物理教材或参考书,也可供高等职业技术学院工科类相关专业的学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

工科大学物理学. 下/鲁刚主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2017.7

ISBN 978-7-5635-5122-4

I. ①工… II. ①鲁… 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(2017)第 114837 号

-
- | | |
|------|--|
| 书 名 | 工科大学物理学(下) |
| 主 编 | 鲁 刚 |
| 责任编辑 | 付小霞 |
| 出版发行 | 北京邮电大学出版社 |
| 社 址 | 北京市海淀区西土城路 10 号(100876) |
| 电话传真 | 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真) |
| 网 址 | www3.buptpress.com |
| 电子信箱 | ctrd@buptpress.com |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 印 刷 | 北京时捷印刷有限公司 |
| 开 本 | 787 mm×960 mm 1/16 |
| 印 张 | 13 |
| 字 数 | 280 千字 |
| 版 次 | 2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷 |
-

ISBN 978-7-5635-5122-4

定价: 32.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

前 言

物理学是一门基础自然科学,在实验与理论所及的范围内,研究物质的基本结构和基本组分之间的相互作用。其目标是以最一般的方式概括物理现象,并用最简洁而又准确的数学语言表达物理规律。它涉及的运动有机械运动和物理运动,其中,物理运动包括分子热运动、电磁运动和微观粒子运动等。

《工科大学物理学》分上、下两册,上册分 2 篇 8 章,下册分 3 篇 8 章。第一篇为力学,包括质点运动学、质点动力学、刚体定轴转动、振动、波动和狭义相对论简介,共 6 章。第二篇为热学,有气体动理论和热力学基础,共 2 章。第三篇为电磁学,由静电场、稳恒磁场和电磁感应 3 章组成。第四篇为光学,涵盖光的干涉、光的衍射和光的偏振 3 章。第五篇为量子物理学,共 2 章,分别为量子论和量子力学简介。

本书简洁、明晰地介绍了物理学的基本概念和基本规律,融入了一些物理方法和物理思想等内容,以期帮助学生在在学习物理知识的同时,了解物理学的基本方法和思想,受到物理思想和方法的积极影响,提高学生的逻辑思维能力。每章开头介绍一些背景知识和物理学发展史等内容,便于学生深入理解有关物理概念和物理定律,提高学生对自然科学的兴趣和热情。

本书例题、思考题和习题的选取,注重基本概念与实际的联系,强调基本训练,贴近应用实际,有助于学生对物理知识的理解,提高他们对物理知识的应用能力。

本书总结了编者多年教学的经验与教研成果,并借鉴了其他物理教材和相关参考书,在此,谨向他们表示衷心的感谢。

编 者
2017 年 4 月

目 录

第三篇 电 磁 学

第 9 章 静电场	3
9.1 库仑定律	3
9.2 电场强度	5
9.3 高斯定理	9
9.4 高斯定理的应用	13
9.5 电势	18
9.6 电场强度与等势面的关系	23
9.7 电场的能量	24
思考题 9	28
习题 9	29
第 10 章 稳恒磁场	31
10.1 稳恒电流 电动势	31
10.2 磁场与磁感应强度	35
10.3 毕奥-萨伐尔定律	37
10.4 磁通量	41
10.5 安培环路定律	43
10.6 磁场对运动电荷的作用	47
10.7 磁场对载流导线的作用	51
思考题 10	54
习题 10	56
第 11 章 电磁感应	59
11.1 电磁感应的发现	59
11.2 电磁感应定律	64
11.3 动生电动势和感生电动势	67

11.4 互感与自感	71
11.5 磁场能量	73
思考题 11	76
习题 11	78

第四篇 光 学

第 12 章 光的干涉	84
12.1 相干光源与光程	84
12.2 分波阵面的双光束干涉	86
12.3 分振幅的双光束干涉	91
思考题 12	97
习题 12	99
第 13 章 光的衍射	101
13.1 惠更斯-菲涅耳原理	101
13.2 单缝的夫琅禾费衍射	102
13.3 光栅衍射	105
13.4 光学仪器的分辨本领	111
13.5 X 射线衍射	114
思考题 13	116
习题 13	118
第 14 章 光的偏振	119
14.1 光的偏振状态	119
14.2 偏振光的产生	121
14.3 光的双折射	125
思考题 14	126
习题 14	127

第五篇 量子物理学

第 15 章 量子论	130
15.1 黑体辐射与量子假说	131
15.2 光电效应与光量子假说	135
15.3 康普顿散射	140
15.4 原子模型	143
15.5 氢原子光谱的规律性	146

15.6 玻尔的氢原子理论.....	149
15.7 玻尔氢原子理论的意义和困难.....	156
思考题 15	157
习题 15	158
第 16 章 量子力学简介.....	159
16.1 物质波.....	159
16.2 概率波.....	167
16.3 不确定关系.....	171
16.4 量子力学简介.....	177
16.5 薛定谔方程应用举例.....	183
16.6 电子的自旋.....	191
16.7 原子的壳层结构.....	194
思考题 16	196
习题 16	197
参考文献	199

第三篇

电 磁 学

人类很早就注意到磁和电的现象,如磁石吸铁、磁针指南、摩擦生电等。1600年,英国医生吉尔伯特(Gilbert)出版了《论磁、磁体和地球作为一个巨大的磁体》,书中的结论都是建立在观察与实验基础上的。他记录了磁石之间的吸引与排斥、磁针指向南北的性质、烧热的磁铁磁性消失、用铁片遮住磁石使其磁性减弱等现象。他仔细研究了磁针与球形磁体之间的相互作用,发现磁针在球形磁体上的指向和磁针在地面上的指向类似,还发现了球形磁体的极,并断定地球本身是一个大磁体,提出了“磁轴”“磁子午线”等概念。

1660年,盖里克(Guericke)发明摩擦起电机,开始对电现象进行详细的研究。这种摩擦起电机实际上是一个可以绕中心轴旋转的大硫黄球,用人手或布帛摩擦转动球体表面,球面上就产生大量的电荷。1705年,豪克斯比(Hauksbee)用空心玻璃壳代替硫黄球。后来,其他实验家又陆续予以改进,直到18世纪末,摩擦起电机一直是研究电现象的基本工具。1720年,格雷(Gray)研究了电的传导现象,发现了导体与绝缘体的区别。随后,他又发现了导体的静电感应现象。

1733年,杜菲(Dufay)经过实验区分出两种电荷,分别称之为松脂电(负电)和玻璃电(正电),并由此总结出静电作用的基本特性:同性相斥、异性相吸。莱顿瓶的发明使电得到更深入的研究,这是克莱斯特(Kleist)和马森布洛克(Musschen Brock)于1745—1746年分别独立做出的。富兰克林(Franklin)对放电现象进行了研究,他发现了尖端放电,研究了雷电现象,并发明了避雷针,从对莱顿瓶的研究中,提出了电荷守恒原理。1747年,富兰克林用电流体假说阐述了这一思想。接下来,康顿(Canton)在1754年用电流体假说解释了静电感应现象。

至此,静电学三条基本原理:静电力基本特性、电荷守恒和静电感应原理,都已经建立,对电的研究有了初步的成果。然而,如果不建立定量的规律,电的知识就不能形成严密的知识体系。

从1766年到1773年期间,富兰克林、普利斯特利(Priestley)、罗宾森(Robinson)和卡文迪什(Cavendish)等人先后对电现象进行了实验研究,逐渐认识到电荷之间的相互作用力遵从与万有引力相似的平方反比定律。

1750年,米切尔(Michell)提出了磁极之间的作用力服从平方反比定律。1785年,库仑(Coulomb)公布了通过扭秤实验得到的静电力的平方反比定律。这使电学与磁学进入了定量研究的阶段。

1780年,伽伐尼(Galvani)发现动物电。1800年,伏打(Volta)发明电堆,使稳恒电流成为可能。电学由静电走向动电,导致1820年奥斯特(Ørsted)发现电流的磁效应。从此,电学与磁学彼此隔绝的情况有了明显改变,电磁学的新阶段开始了。

19世纪上半叶,电磁学得到迅猛发展。首先对电磁作用力进行研究的是法国科学家安培(Ampère),他得知奥斯特的发现后,重复了奥斯特的实验,提出了右手螺旋定则,并用电流绕地球内部的流动解释地磁的起因。他研究了载流导线之间的相互作用,建立了电流元之间的相互作用规律——安培定律。同时,毕奥(Biot)-萨伐尔(Savart)定律也被发现。

英国物理学家法拉第(Faraday)对电磁学的贡献尤为突出。他于1831年发现了电磁感应现象,进一步证实了电现象与磁现象的统一性。法拉第坚信电磁的近距离作用,认为物质之间的电力和磁力都需要媒介传递,这些媒介就是电场和磁场。

电流磁效应的发现,使电流的测量成为可能。1826年,欧姆(Ohm)确定了电路的基本规律——欧姆定律。

1865年,麦克斯韦(Maxwell)将法拉第的电磁近距离作用思想和安培开创的电动力学规律结合在一起,用一套方程组概括了电磁规律,建立了电磁场理论,预测了光的电磁性质,实现了物理学史上的第二次大综合。

电是实物的一种属性。在古代,人们从“摩擦起电”“动物电”“闪电”等现象中,逐渐认识到,电有正、负两种;同种相斥,异种相吸。因不明了电的本质,认为电是附着在物体上的,因而将它称为**电荷**,并将显示出这种斥力或吸力的物体称为**带电体**。习惯上,有时也将带电体本身简称为电荷,如自由电荷、运动电荷等,这些名称沿用已久。

现代物理学指出:构成实物的许多基本粒子都带有一定的电,有的是正的(如质子),有的是负的(如电子);电子与质子所带电荷的绝对量值相等,是电量的最小单元,即一个质子所带的电量。任何一个带电体所具有的电量都是电量最小单元的整数倍。一切物体都由大量的原子构成,原子由带正电的原子核与带负电的电子组成。在正常情况下,同一个原子中正、负电量相等,因而整个物体被认为是不带电的或电中性的。当它们由于某种原因(如摩擦、受热、化学变化等)而失去一部分电子时,就带正电;获得额外电子时,就带负电。

在一个与外界无电荷交换的孤立系统中,所有正、负电荷的代数和保持不变,这就是**电荷守恒定律**。例如,正、负电荷代数和为零的两个中性物体互相摩擦而一个物体带正电时,另一个物体必然带等量的负电荷。又如,一个电子与一个正电子在适当条件下相遇时,会发生湮灭而转化为两个光子,电子与正电子所带的电等量异号,光子则不带电,所以在湮灭过程中,正、负电荷的代数和依然不变。

传递电荷与电荷之间相互作用的物理场称为**电场**。电荷周围总存在着电场;电场对置于场中的其他电荷发生作用。观察者相对于电荷静止时所观察到的场称为**静电场**。如果电荷与观察者有相对运动时,则除静电场外,同时还伴随着**磁场**。变化的磁场也会引起电场。运动电荷或电流之间的作用是通过**电磁场**实现的。可见,电场只是统一的电磁场的一个方面。

9.1 库仑定律

1. 库仑定律

1785年,法国物理学家库仑设计制作了一台精密的扭秤,做了测定静电力的实验。如图
此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

9.1 所示,在一个玻璃圆缸上端安装一根银质悬丝,悬丝下挂一横杆,横杆一端有一个金属小球 A,另一端为平衡小球 B,A 的旁边还有一个固定小球 C.使 A、C 带同种电荷,A 受到 C 的斥力使得横杆偏转,转动悬丝上端的旋钮 M,使横杆回到原来位置,此时悬丝的扭力矩等于 C 施于 A 的电力力矩。如果悬丝的扭力矩与偏转角度之间的关系已事先校准、标定,则由旋钮上指针转过的角度读数和已知的横杆长度,可以得知在此距离下 A、C 之间的电力。保持 A 与 C 上的电量不变,改变 A 与 C 之间的距离 r ,库仑从实验结果中得出,静电电力的大小与距离的平方成反比,即 $F \propto 1/r^2$ 。

为了找到静电力与电量的关系,库仑使用了一个巧妙的方法。他从对称性的考虑断定,使一个带电金属球与另一个半径、材料完全相同的不带电的金属球接触后再分开,每个球的带电量应是原带电球电量的一半。库仑用这个方法证实了静电电力的大小与电量成正比的关系,从而完整地得出库仑定律的数学表达式

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9.1)$$

式(9.1)表明:真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小,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,作用力的方向沿着它们的连线方向,电荷同号时为斥力,异号时为引力。这就是库仑定律。它还可用于表示为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (9.2)$$

式中, q_1 和 q_2 分别为两个点电荷的电量, \mathbf{r} 表示从电荷 q_1 指向电荷 q_2 的径矢, \mathbf{F} 表示 q_1 和 q_2 之间的作用力, k 为比例常量。

当 q_1 与 q_2 同号时, \mathbf{F} 与 \mathbf{r} 同方向,表明电荷 q_1 与 q_2 之间是排斥力;当 q_1 与 q_2 反号时, \mathbf{F} 与 \mathbf{r} 反方向,表明电荷 q_1 与 q_2 之间是吸引力。由式(9.2)还可以看出,两个静止点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律,即

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$$

式中, \mathbf{F}_{21} 为 q_1 作用于 q_2 的力, \mathbf{F}_{12} 为 q_2 作用于 q_1 的力。

电量的单位为库[仑](C),距离的单位为米(m),力的单位为牛[顿](N),经实验测定的比例常量为

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

通常引入另一个常量——真空电容率 ϵ_0 ,令

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

于是,真空中库仑定律的形式可表为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (9.3)$$

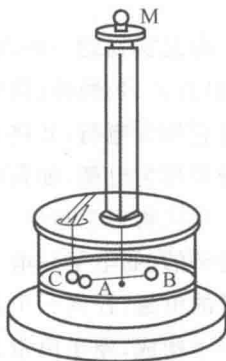


图 9.1 库仑扭秤实验

2. 静电力的叠加原理

两个点电荷之间的静电力可由库仑定律描述,当空间有两个以上的点电荷时,就需要另一个实验事实——**静电力的叠加原理**,即作用于每一个点电荷上总的静电力等于其他点电荷单独存在时作用于该点电荷的静电力的矢量和。如图 9.2 所示,点电荷 q_1 和 q_2 作用在点电荷 q_0 上的力分别为 F_1 和 F_2 ,因而 q_0 受到的合力为

$$F = F_1 + F_2$$

对于由 n 个静止的点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 组成的点电荷系,若以 F_1, F_2, \dots, F_n 分别表示它们单独存在时施于另一个静止点电荷 q_0 的静电力,则由静电力的叠加原理可知, q_0 受到的总静电力为

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

由式(9.3)得

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_{0i}^3} r_{0i} \quad (9.4)$$

式中, r_{0i} 为 q_0 与 q_i 之间的距离, r_{0i} 是从点电荷 q_i 指向 q_0 的径矢。

库仑定律与静电力的叠加原理是描述静止点电荷相互作用的两个基本实验定律,原则上,应用它们可以解决静电学中的全部问题。

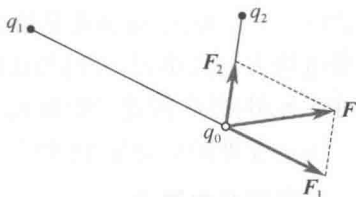


图 9.2 静电力的叠加原理

9.2 电场强度

1. 电场强度的界定

电场的一个重要性质是它对电荷施加作用力,这是定量描述电场的依据。为此引用试验电荷 q_0 来研究电场的性质。试验电荷 q_0 应该满足两个条件:① 其线度必须小到可被视为点电荷,以便确定电场中各点的性质;② 其电量足够小,使得由于它的引入不引起原有电荷的重新分布,即不会对原有电场产生明显的影响。实验指出,将试验电荷 q_0 置于电场中不同位置时, q_0 所受静电力的大小和方向逐点不同,见图 9.3。但在电场中每一个确定点, q_0 所受静电力的大小和方向是完全确定的。如果在电场中某给定点,改变试验电荷 q_0 的量值,则 q_0 所受静电力的方向仍然不变,但力的大小会随 q_0 成正比地变化。比值

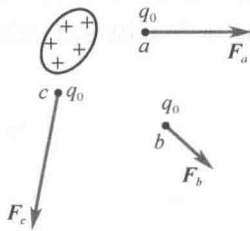


图 9.3 试验电荷 q_0 在电场中的受力情况

F/q_0 是一个确定的矢量,是只与场点有关而与 q_0 无关的矢量。 F/q_0 表示电场中各点的强度,称为**电场强度**,简称**场强**。以 E 表示电场强度,则

$$E = F/q_0 \quad (9.5)$$

由式(9.5)可知,电场强度是描述电场中某点性质的矢量,其大小等于单位试验电荷在该点所受电场力的大小,其方向与正的试验电荷在该点所受电场力的方向一致。在电场中各点的 E 可能各不相同。因此一般地说, E 是空间坐标的矢量函数。

电场强度的单位是牛[顿] 每库[仑](N/C)。

2. 场强叠加原理

实验指出,将试验电荷 q_0 置于若干个点电荷所产生的电场中, q_0 所受的静电力等于各个点电荷各自对 q_0 作用的静电力的矢量和,即

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

等号两边除以 q_0 ,得

$$\frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \dots + \frac{F_n}{q_0}$$

由式(9.5),等号左边为总场强,右边为各个点电荷产生的场强之和,即

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i \quad (9.6)$$

式(9.6)表明,电场中任一点的电场强度等于各个点电荷在该点各自产生的场强的矢量和——**场强叠加原理**,它是电场的基本性质之一。利用场强叠加原理,可以计算任意带电体所产生的场强,因为任何带电体都可被视为许多点电荷的集合。

3. 电场强度的计算

(1) 点电荷电场中的场强

由场强定义式(9.5)和库仑定律式(9.3)可得

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (9.7)$$

式中, E 为点电荷 q 在场点 P 产生的电场强度, r 表示从点电荷 q 到场点 P 的径矢, r 是 q 与 P 点的距离。上式表明,点电荷 q 的场强大小与 r^2 成反比,方向沿该点与 q 点的连线。当 $q > 0$ 时, E 与 r 同方向,如图 9.4(a) 所示;当 $q < 0$ 时, E 与 r 反方向,如图 9.4(b) 所示。

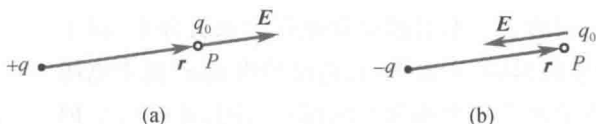


图 9.4 静止点电荷的电场

(2) 点电荷系电场中的场强

若电场是若干个点电荷 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 共同产生的,由场强叠加原理, P 点的总场强就

是这些点电荷各自在 P 点所产生的场强的矢量和,即

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i \quad (9.8)$$

式中, r_i 为从 q_i 到场点 P 的距离, \mathbf{r}_i 为从 q_i 到场点 P 的径矢。

若一个带电体的电荷是连续分布的,可将该带电体的电荷视为由许多无限小的电荷元 dq 所组成,而每个电荷元都可以当作点电荷处理。设其中任一个电荷元 dq 在 P 点产生的场强为 $d\mathbf{E}$,由式(9.7)有

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (9.9)$$

式中, r 是从电荷元 dq 到场点 P 的距离, \mathbf{r} 表示从电荷元 dq 到场点 P 的径矢。整个带电体在 P 点产生的场强是所有 $d\mathbf{E}$ 的矢量和,即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (9.10)$$

式(9.10)是矢量的积分形式。在计算场强的积分时,通常将 $d\mathbf{E}$ 在坐标轴方向的分量式写出,然后再积分。

例 9.1 由两个距离为 l 、等量异号的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的系统,当 l 远小于它们到场点的距离时,该电荷系统称为电偶极子,如图 9.5 所示。以 l 表示从负电荷到正电荷的线段矢量,电量 q 与 l 的乘积称为电偶极矩或电矩,用 \mathbf{p} 表示,即 $\mathbf{p} = ql$ 。求电偶极子中垂线上任一点的电场强度。

解 设 $+q$ 和 $-q$ 到电偶极子中垂线上任一点 P 的线段矢量分别为 \mathbf{r}_+ 和 \mathbf{r}_- ,由式(9.7)可知, $+q$ 与 $-q$ 在 P 点的场强 \mathbf{E}_+ 与 \mathbf{E}_- 分别为

$$\mathbf{E}_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r}_+}{r_+^3} \quad \text{和} \quad \mathbf{E}_- = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r}_-}{r_-^3}$$

该处的总场强为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\mathbf{r}_+}{r_+^3} - \frac{\mathbf{r}_-}{r_-^3} \right)$$

如图 9.5 所示,距离电偶极子甚远处,即 $r \gg l$ 处(r 等于从电偶极子中心到 P 点的距离),有 $r_+ = r_- = r$,而且 $\mathbf{r}_+ - \mathbf{r}_- = -l$ 。由此,上式可简化为

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

由上述电矩的定义 $\mathbf{p} = ql$,上式又可表为

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

此结果表明,电偶极子中垂线上距离电偶极子中心较远处的电场强度与电偶极子的电

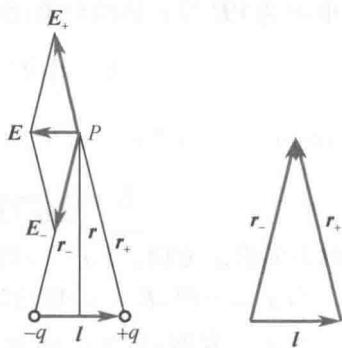


图 9.5 电偶极子的电场

矩成正比,与该点距离电偶极子中心的距离的三次方成反比,方向与电矩的方向相反。

例 9.2 一个均匀带电细圆环,半径为 R ,所带电量为 q (设 $q > 0$)。求该圆环轴线上任一点的电场强度。

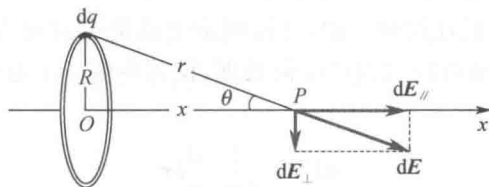


图 9.6 均匀带电细圆环轴线上的电场

解 如图 9.6 所示,将圆环分割为许多小段,任取一小段 dL ,其上带电量为 dq 。设此电荷元 dq 在 P 点的场强为 dE ,并设 P 点到 dq 的距离为 r 。 dE 沿平行和垂直于轴线 x 的两个方向的分量分别为 $dE_{//}$ 和 dE_{\perp} 。由于圆环电荷分布是轴对称的,所以,圆环上全部电荷的 dE_{\perp} 分量的矢量和为零,因而 P 点的场强沿轴线方向。 $dE_{//}$ 的大小等于

$$dE_{//} = dE \cos \theta = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta$$

其中, θ 为 dE 与 x 轴的夹角,所以

$$E = \int dE_{//} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta = \frac{\cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} \int dq = \frac{q \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

因 $\cos \theta = x/r$,且 $r = \sqrt{R^2 + x^2}$,则上式可表为

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

E 的方向沿 x 方向。当 $q > 0$ 时,沿 x 正方向;当 $q < 0$ 时,沿 x 负方向。

当 $x = 0$ 时, $E = 0$,即均匀带电圆环中心处的场强为零。

当 $x \gg R$ 时, $E \approx q/(4\pi\epsilon_0 x^2)$ 。此式表明,远离环心处的电场强度与电荷集中在环心上的点电荷的场强相同。

例 9.3 一个半径为 R 、面电荷密度为 σ 的均匀带电圆盘,如图 9.7 所示。求圆盘轴线上任一点的场强。

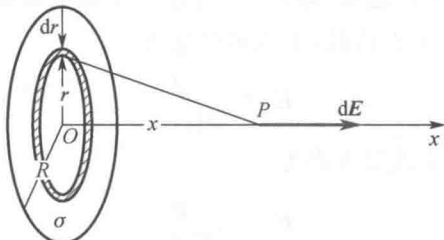


图 9.7 均匀带电圆盘轴线上的电场

解 将带电圆盘视为由许多带电细圆环组成的系统,取一半径为 r 、宽度为 dr 的细圆环,其上带有电荷 $dq = \sigma 2\pi r dr$,由例 9.2 可知,此带电圆环电荷在 P 点的场强大小为

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

场强方向沿着轴线指向远方。由于各圆环的场强 dE 的方向都相同,所以 P 点的场强大小为

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

其方向也沿着轴线指向远方。

当 $x \ll R$, 即 $x \rightarrow 0$ 时,圆盘中心附近的场强大小为

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (9.11)$$

此时可将该带电圆盘视为“无限大”带电平面,因此,在无限大均匀带电平面附近的电场是一个匀强电场,其大小由式(9.11)给出。

当 $x \gg R$ 时,

$$E \approx \frac{\pi R^2 \sigma}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

式中, $q = \sigma\pi R^2$, 为圆盘所带的总电量。上式表明,在远离带电圆盘处的电场相当于一个点电荷的电场。

9.3 高斯定理

1. 电场线

为了形象地表示电场中场强的方向和大小,可以在电场中描绘一系列曲线,使得曲线上每一点的切线方向与该点场强的方向一致,这些曲线叫作**电场线**(也称**电力线**)。图 9.8(a)、(b) 所示分别为正、负点电荷产生的电场的电场线示意图。

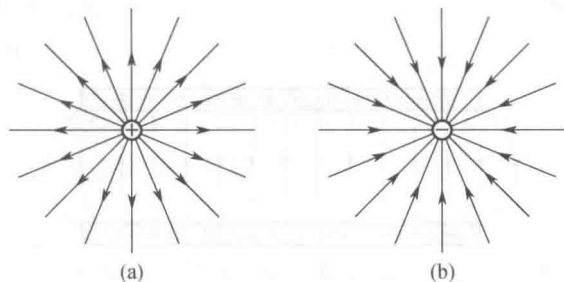


图 9.8 点电荷的电场线示意图

电场线不仅表示电场中场强的方向,还可表示场强的大小。用电场中任一点通过垂直于场强 E 的单位面积的电场线数目表示该点场强的大小。通过该点画一个垂直于电场方向的面元 dS_{\perp} ,如图 9.9 所示,通过此面元画 $d\Phi_e$ 条电场线,使得

$$E = \frac{d\Phi_e}{dS_{\perp}} \quad (9.12)$$

式(9.12)表明,电场线稀疏的地方场强小,电场线稠密的地方场强大。这种描述电场的方法,其优点是空间各点场强的方向和大小一目了然。

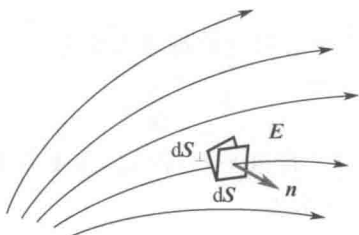
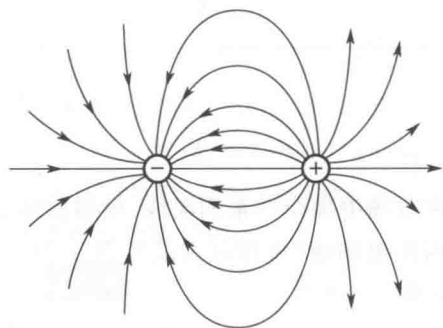
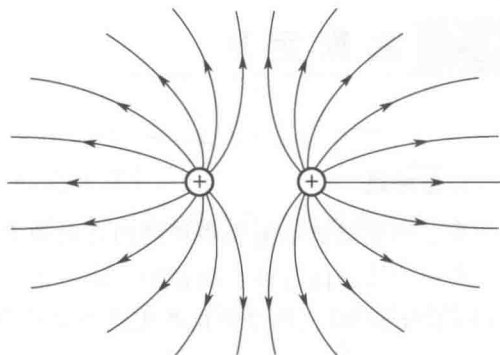


图 9.9 电场线密度与场强大小的关系

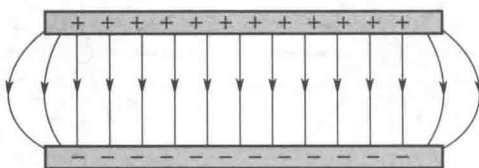
电场线可以通过实验方法显示出来。例如,在水平玻璃板上撒些细小的石膏晶粒,或在油上浮些草籽,它们就会沿电场线排列起来。图 9.10 给出了一些带电体系的电场线示意图。图 9.10(a) 为一对等量异号电荷的电场线,图 9.10(b) 为一对等量同号电荷的电场线,图 9.10(c) 为一对带有等量异号电荷的平行板的电场线。



(a)



(b)



(c)

图 9.10 几种带电体系的电场线