



高等院校物理类规划教材

新编大学物理

• 主 编 桑建平 丁么明 丁世学

• 本 册 主 编 张增常

• 本册副主编 杨正波 王军延 柯 璇

下册



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



高等院校物理类规划教材

新编大学物理

下册

- 主 编 桑建平 丁么明 丁世学
- 本 册 主 编 张增常
- 本册副主编 杨正波 王军延 柯 璇



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理. 下册/张增常本册主编;杨正波,王军延,柯璇本册副主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2012. 1

高等院校物理类规划教材

ISBN 978-7-307-09334-8

I. 新… II. ①张… ②杨… ③王… ④柯… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 238498 号

责任编辑:任仕元 责任校对:黄添生 版式设计:马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北金海印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 16.25 字数: 305 千字 插页: 1

版次: 2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-09334-8/O · 465 定价: 29.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的各个方面,是其他自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,在人才的科学素养培养中具有重要的地位。

以物理学基础为内容的大学物理课程,是高等学校理工科各专业学生一门重要的通识性必修基础课。该课程所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的。

大学物理课程在为学生系统地打好必要的物理基础,培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的探索精神和创新意识等方面,具有其他课程不能替代的重要作用。

本教材根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定的“理工科类大学物理课程教学基本要求”编写。教材注重陈述物理学的基本知识、基本概念、基本原理和定律,突出物理学的主要框架,在讲解经典物理和近代物理基础知识的同时,加强对物理原理在现代工程技术中应用的介绍;同时适度控制篇幅及内容的深度,以适应不同学校和专业在高等教育大众化的新形势下对大学物理课程改革的需要,为普通高等院校提供一套符合当前教学需求和便于实际教学的教材。

全书在编写过程中,主要突出了以下几个方面:

1. 表述力求简明易懂,并辅以生动有趣的事例,尽量避免繁琐的数学推导,以便激发学生的学习兴趣,提高学习效率。
2. 增加“物理沙龙”板块,主要介绍经典物理知识在工程技术中的最新应用以及近代物理发展前沿。
3. 例题和习题的选择以达到基本训练要求为度,避免难题和偏题,在例题选择上,加强了工程应用类及生活类题型的配置,以求加强应用能力的培养。

全书分上、下两册,共计 17 章。上册包括力学、热学、振动与波、狭义相对

论,下册包括电磁学、光学、量子物理初步。

全书还配有《新编大学物理学习指导》,学习指导书按上、下册教材目录的整体顺序,以章为单位编写。每章包括“基本要求”、“本章提要”、“重难点分析”、“典型题解”、“自测题”、“教材习题解答”等几个板块,以更好地方便教师教学和学生复习。

参加本教材编写工作的有吴铁山、张增常、卢金军、杨正波、柯璇、王军延、涂亚芳,全书的统稿工作由桑建平、丁么明和丁世学完成,武大出版社任仕元同志对全书进行编审并付出了辛勤劳动。

由于编者水平有限,加之时间紧迫,书中的疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2011年12月

于武昌珞珈山

目 录

第 4 篇 电磁学

第 9 章 静电场	(3)
9.1 库仑定律	(3)
9.2 电场 电场强度	(6)
9.3 静电场中的高斯定理.....	(12)
9.4 静电场的环路定理.....	(20)
9.5 电势.....	(23)
9.6 静电场中的导体.....	(28)
9.7 静电场中的电介质.....	(33)
9.8 电容 电容器 电场的能量.....	(38)
习题	(44)
第 10 章 稳恒电流的磁场	(48)
10.1 稳恒电流	(48)
10.2 磁场 磁感应强度	(51)
10.3 毕奥-萨伐尔定律	(54)
10.4 磁场中的高斯定理	(59)
10.5 磁场中的安培环路定理	(60)
10.6 磁场对运动电荷的作用	(65)
10.7 磁场对载流导线的作用	(72)
10.8 磁场中的磁介质	(75)
习题	(85)
第 11 章 电磁感应	(89)
11.1 法拉第电磁感应定律	(89)
11.2 动生电动势	(93)
11.3 感生电动势	(97)

11.4	自感与互感	(99)
11.5	磁场能量	(103)
11.6	位移电流 麦克斯韦方程组	(105)
11.7	电磁波	(108)
	习题	(115)

第5篇 光学

第12章	光的干涉	(121)
12.1	光源 相干光	(121)
12.2	光程 光程差	(124)
12.3	分波阵面干涉	(125)
12.4	薄膜干涉	(129)
12.5	迈克耳孙干涉仪	(136)
	习题	(138)
第13章	光的衍射	(143)
13.1	光的衍射	(143)
13.2	单缝的夫琅禾费衍射	(145)
13.3	衍射光栅	(149)
13.4	圆孔的夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领	(152)
* 13.5	X射线在晶体中的衍射	(155)
	习题	(160)
第14章	光的偏振	(162)
14.1	光的偏振性 马吕斯定律	(162)
14.2	反射光和折射光的偏振	(165)
14.3	光的双折射	(167)
14.4	偏振光的干涉 人为双折射	(170)
14.5	旋光现象	(172)
	习题	(174)
第15章	几何光学	(176)
15.1	几何光学的基本定律	(176)
15.2	光在球面上的折射和反射	(179)
15.3	薄透镜	(186)

* 15.4 成像光学仪器的基本原理	(188)
习题	(193)

第 6 篇 量子物理初步

第 16 章 早期量子论	(199)
16.1 热辐射 普朗克的量子假说	(199)
16.2 光电效应 爱因斯坦的光子理论	(206)
16.3 康普顿效应	(210)
16.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	(215)
习题	(222)
第 17 章 量子力学初步	(224)
17.1 德布罗意假设	(224)
17.2 不确定性关系	(228)
17.3 几率波 薛定谔方程	(230)
17.4 势阱中的粒子	(234)
* 17.5 谐振子	(237)
17.6 氢原子	(238)
习题	(242)
附录一	(244)
(一) 常用单位的换算因子和常用的物理常数	(244)
(二) 电磁学国际制(SI)单位	(248)
附录二	(249)
附表 1 基本物理常量	(249)
附表 2 保留单位和标准值	(249)
附表 3 太阳系的基本数据(I)	(250)
附表 4 太阳系的基本数据(II)	(250)
参考书目	(251)

第4篇 电磁学

电磁学作为物理学的一个重要分支,其理论发展大大推动了社会的进步。今天,电视、广播以及无线电通信在人们的生活中日益普及;电灯照明、家用电器等也早已进入寻常百姓家;在一切高科技及智能化领域中,计算机扮演了极其重要的角色……所有这些,无不以电磁学基本原理为核心。

人类有关电磁现象的认识可追溯到远古时期。早在公元前6世纪,希腊哲学家泰勒斯(Thales)就观察到摩擦过的琥珀能够吸引碎草等轻小物体的现象。在我国,春秋战国时期(公元前770—前221),已有“山上有慈石(即磁石)者,其下有铜金”,“慈石名铁,或引之也”等磁石吸引铁的记载。东汉已有指南针的前身司南。但在相当长的一个历史阶段,电和磁被看做两种完全不同的现象。直到1820年,丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted, 1777—1851)发现了电流的磁效应。很快,毕奥、萨伐尔、安培、拉普拉斯等人做了进一步的定量研究,人们这才认识到电和磁的相关性。1831年,法拉第(H. Faraday, 1791—1867)发现了电磁感应现象,并提出了场和力线的概念,进一步揭示了电和磁的内在联系。在历史上,法拉第还首先认为电场力和磁力都是通过“场”作为中间媒介来实现相互作用的。1865年,麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在前人工作的基础上,提出了感应电场和位移电流假说,总结出一套完整的电磁场理论,是继牛顿力学之后物理学理论的又一重要成果。

本篇分为三章,第9章学习静止电荷相互作用的规律以及静电场在有导体和电介质存在情况下的应用;第10章学习恒定电流产生的磁场的现象和规律;第11章学习电磁感应的现象和规律,并简要介绍电磁波的基本概念。

第9章 静电场

用塑料梳子梳头,为什么会越梳越乱呢?为什么冬天晚上脱毛衣时会出现火花?为什么在现代建筑物中,手机信号指示会减弱?为什么油罐车的尾部要拖着一根与地面接触的铁链?雷电是怎么发生的,为什么在高层建筑物上要安装避雷针?等等。要解决这些与生活有关的电学问题,就必须学好本章的内容。

本章主要讲解静止电荷相互作用的规律以及静电场在有导体和电介质存在情况下的应用。在简要地说明电荷的性质之后,介绍静电场的基本定律——库仑定律,静电场的两个基本定理——高斯定理和环路定理,以及描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势。

9.1 库仑定律

9.1.1 电荷

1. 电荷的种类

早在公元前 585 年,人们就发现了用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引碎草等轻小物体的现象。后来发现许多物质(如玻璃、硬橡胶、金刚石、蓝宝石和明矾等)经过毛皮或丝绸等摩擦后,都能吸引轻小物体,于是人们就说它们带了电,或者说它们有了电荷。

自然界中只有两种电荷,同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。1750 年,美国物理学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790)首先以正电荷、负电荷的名称来区分这两种电荷,这种命名方法一直延续到现在。人们把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为正电荷,把用毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷称为负电荷。

2. 电荷的量子化

物体所带电荷的多少称为电量或电荷量,常用 Q 或者 q 表示。正电荷的电量取正值,负电荷的电量取负值。电量的国际单位是库仑,简称库,用符号 C 表示。如图 9.1 所示的验电器,是检测电荷和电量的最简单的一种仪器。在玻璃瓶的外壳上绝缘地安装一根金属杆,杆的上端有一金属球,下端有一对悬挂着的金属

箔。一旦它们带电,根据“同种电荷互相排斥”的性质,就会使金属箔张开。所带的电量越大,张角就越大。

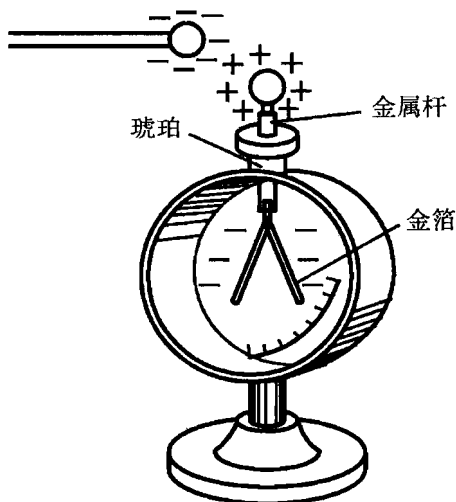


图 9.1 验电器

1909年,密立根(R. A. Millikan, 1868—1953)通过油滴实验发现,微小粒子所带电量是不连续的,总是以一个基本单元的整数倍出现。这个电量的基本单元就是电子所带电荷量的绝对值,用 e 表示,称为基本电荷,其值为

$$e = 1.60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

在通常的计算中,取它的近似值 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。物体由于失去电子而带正电,或得到额外的电子而带负电,其带电量必然是基本电荷的整数倍。物体所带电量的这种不连续性称为电荷的量子化。

尽管在1964年盖尔曼等人提出的夸克模型中,认为质子和中子等强子分别是由带电量为 $-\frac{1}{3}e$ 和 $\frac{2}{3}e$ 的夸克组成的,但这并不破坏电荷量子化的规律。况且,迄今实验上还没有发现处于自由状态的夸克。

3. 电荷守恒定律

两种不同材料的物体互相摩擦后之所以会带电,是因为通过摩擦,每个物体中都有一些电子脱离了原子束缚而转移到另一个物体上。一个物体失去了电子而带正电,另一个物体就得到了电子而带负电,这就是摩擦起电的原因。

当带负电的物体移近导体时,导体中的自由电子在负电荷的排斥力作用下向远离带电体一端移动,结果导体的这一端因电子过少而带正电,另一端则因电

子过多而带负电,这就是静电感应现象。因静电感应而在导体两侧表面上出现的电荷称为感应电荷。

摩擦起电和静电感应现象中的起电过程,都是电荷从一个物体转移到另一个物体,或从物体的一部分转移到另一部分的过程。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都保持不变,这就是电荷守恒定律。

近代科学实验证明,电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立,而且被一切微观过程(例如核反应和基本粒子过程)所普遍遵守,是物理学中的普遍基本定律之一。

9.1.2 库仑定律

在发现电现象后的两千多年里,人们对电的认识一直停留在定性阶段。从18世纪中叶开始,许多科学家有目的地进行了一些实验性的研究,以便找出静止电荷之间的相互作用力的规律。实验表明,对于任意两个带电体,它们之间的相互作用力的大小和方向不仅与它们所带的电量以及它们之间的距离有关,而且还与它们的大小、形状和电荷在它们上面的分布情况有关。1785年库仑(C. A. de Coulomb, 1736—1806)首先提出了点电荷的理想模型,认为当带电体的线度比起它与其他带电体之间的距离来充分小时,可以忽略其形状和大小,把它看做一个带电几何点,称为点电荷。库仑通过扭秤实验测定了两个带电体之间的相互作用力,并经过定量分析总结出了两个点电荷之间的相互作用的规律,即库仑定律。库仑定律可表述为:

在真空中,两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小,与它们的电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

如图9.2所示,用 F 表示 q_2 对 q_1 的作用力, r 表示由 q_2 指向 q_1 的矢量, e_r 表示其单位矢量,则库仑定律可以表示为

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

在国际单位制中,式(9.1)中的比例系数 k 的量值为

$$\begin{aligned} k &= 8.98755 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \\ &\approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \end{aligned}$$

通常引入另一个常量 ϵ_0 来代替 k ,使

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

于是,真空中的库仑定律可表示为

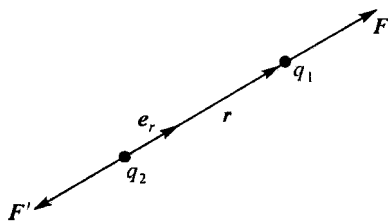


图 9.2 库仑定律

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{e}_r \quad (9.2)$$

式中, ϵ_0 称为真空介电常量, 又称真空电容率, 其量值为

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

其中, F(法拉) 为电容单位, $1\text{F} = 1\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。在库仑定律表达式中引入“ 4π ”因子的做法, 称为单位制的有理化。这样做的结果虽然使库仑定律的形式变得复杂些, 但却使得以后经常用到的电磁学规律的表达式因不出现“ 4π ”因子而变得简单些。这种做法的优越性, 在今后的学习中会逐步体会到。

由式(9.2)可以看出, 当 q_1 和 q_2 同号时, $\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{e}_r$ 同向, 表现为斥力; 当 q_1 和 q_2 异号时, $\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{e}_r$ 反向, 表现为引力。静止电荷间的相互作用力, 又称为库仑力。应当指出, 两个静止点电荷之间的库仑力遵守牛顿第三定律, 即 $\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{F}'$ 。

例 9.1 氢原子中电子和质子的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。此两粒子间的静电力和万有引力各为多大?

解 已知电子的电荷是 $-e$, 质子的电荷为 $+e$, 而电子的质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 质子的质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

根据库仑定律, 得两粒子间的静电力大小为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.1 \times 10^{-8} \text{ (N)}$$

根据万有引力定律, 得两粒子间的万有引力为

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 3.7 \times 10^{-47} \text{ (N)}$$

由计算结果可以看出, 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, 前者约为后者的 10^{39} 倍。这表明在微观粒子间的相互作用中, 与静电力相比较, 万有引力可以忽略不计, 但是在宏观领域内, 尤其是大质量天体之间的相互作用, 则万有引力起主导作用。

9.2 电场 电场强度

9.2.1 电场

库仑定律只给出了两个点电荷之间相互作用的定量关系, 并未指明这种作用是通过怎样的方式进行的。我们常说: 力是物体与物体之间的相互作用, 是一种直接接触作用。例如, 推车时, 通过手和车的直接接触把力作用在车子上。但是, 电力、磁力和重力却可以发生在两个相距一定距离的物体之间。那么, 这些力究竟是如何传递的呢? 早期的电磁理论是超距作用理论, 它认为相隔一定距离的

两个物体之间所存在的相互作用,既不需要传递介质,也不需要传递时间。后来,法拉第在大量实验研究的基础上,提出了以近距作用观点为基础的力线和场的概念,在此基础上麦克斯韦建立起完整的电磁理论。现在,场的概念已经成为近代物理学中最重要的基本概念之一。

凡是有电荷的地方,周围就存在着一种特殊形态的物质,称为电场。电荷与电荷之间的相互作用是通过电场来传递的,其作用可表示为:

$$\text{电荷} \rightleftharpoons \text{电场} \rightleftharpoons \text{电荷}$$

电场对电荷的作用力称为电场力,电场的特点就是对放入其中的电荷有电场力的作用。相对于观测者静止的电荷在其周围空间所激发的电场称为静电场。

9.2.2 电场强度

为了定量研究空间中电场的强弱,我们需要引入一个试探电荷 q_0 ,通过分析电场对试探电荷 q_0 的作用,可引入描述电场的物理量。为了使电场不致因测量而受到影响,试探电荷 q_0 应该满足两个条件:①它的线度必须小到可以看做点电荷,以便确定的是空间中各点的电场性质;②它所带的电荷量必须充分小,以免改变原有电荷的分布,从而影响原来的电场分布。为方便起见,我们不妨假设试探电荷带正电。

如图9.3所示, Q 为场源电荷,在其周围空间相应地激发一个电场。先将一个试探电荷 q_0 放在此电场不同地点(简称场点)。实验表明,在不同的场点, q_0 所受电场力的大小和方向不尽相同;若在任取的同一场点上,改变所放置的试探电荷 q_0 的电荷量大小,则 q_0 所受的电场力 F 的大小亦随之变化,然而,两者的比值 F/q_0 无论大小和方向都与试探电荷 q_0 无关,仅取决于场源电荷的分布和场点的位置。因此,它可以反映电场本身的性质,我们把这个比值定义为电场强度,简称场强,用 E 表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9.3)$$

在国际单位制中,电场强度的单位是牛顿每库仑($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$),也可以表示为伏特每米($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)。

式(9.3)表明,静电场中某一点的电场强度 E 是一个矢量,其大小等于单位电荷在该处所受到的电场力的大小,其方向与正电荷在该处所受到的电场力的方向一致。换言之,空间中某点的电场强度等于单位正电荷在该点所受的电场力。为了描绘电场的分

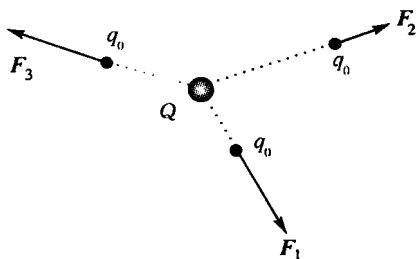


图9.3 试探电荷在不同场点所受的电场力

布,可以设想在空间的每一个点上都相应有一个矢量 E ,这些矢量的集合称为矢量场。也就是说,电场是矢量场。

如果已知空间某点处的电场强度 E ,则点电荷 q 在该点处受到的电场力 F 为

$$F = qE \quad (9.4)$$

9.2.3 电场强度的计算

1. 点电荷电场中的电场强度

若场源电荷为点电荷 q ,设想一个试探电荷 q_0 放在距离 q 为 r 的 P 点处,根据库仑定律, q_0 所受到的电场力为

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

式中的 e_r 是从 q 指向 P 点的位矢 r 的单位矢量。由定义式(9.3)可得 P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (9.5)$$

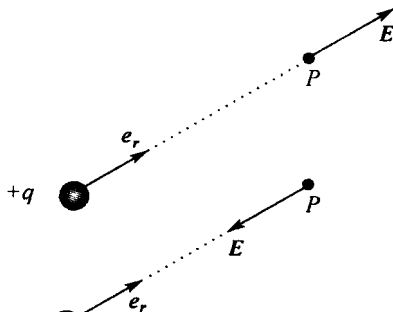


图 9.4 点电荷的电场

式(9.5)表明,在点电荷激发的电场中,任意一点的电场强度大小与场源电荷到场点距离的平方成反比,与场源电荷的电量成正比。电场强度的方向取决于场源电荷的符号。若 $q > 0$,则 E 与 e_r 同向;若 $q < 0$,则 E 与 e_r 反向,如图 9.4 所示。从式(9.5)还可以看出,在以场源电荷为球心的球面上,电场强度的大小处处相等,方向沿径向,我们把这种电场分布称为球对称性分布。所以,点电荷的电场分布具有球对称性分布的性质。

2. 点电荷系电场中的电场强度

设场源电荷是由若干个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的一个系统,每个点电荷周围都各自激发电场。把试探电荷 q_0 放在场点 P 处,根据力的独立作用原理,作用在 q_0 上的电场力的合力 F 应该等于各个点电荷分别作用于 q_0 上的电场力 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的矢量和,这个结论叫电场力的叠加原理。即

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

根据电场强度的定义式(9.3),可得 P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} e_r \quad (9.6)$$

即点电荷系在空间某点激发的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点激发的电场强度的矢量和,这一结论称为电场强度叠加原理。原则上来说,根据点电荷的电场强度公式(9.5)和电场强度叠加原理式(9.6)可以求解任何分布情况的电荷激发的电场强度。

3. 连续分布电荷电场中的电场强度

对于电荷连续分布的任意带电体,可以将它看成为无数电荷元 dq 的集合,

而每个电荷元 dq 又可视为点电荷, 因此 dq 产生的电场强度为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (9.7)$$

根据电场强度叠加原理, 整个带电体在该点产生的电场强度为

$$E = \int dE = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (9.8)$$

连续带电体一般有如下三种形式:

(1) 如果是一个带电体, 体电荷密度为 ρ , 取一体积元 dV , 则电荷元 $dq = \rho dV$;

(2) 如果是一个带电面, 面电荷密度为 σ , 取一面积元 dS , 则电荷元 $dq = \sigma dS$;

(3) 如果是一条带电线, 线电荷密度为 λ , 取一线元 dl , 则电荷元 $dq = \lambda dl$ 。

注意: 式(9.8) 是一个矢量积分, 在运算时需要首先将电荷元的电场强度矢量沿各坐标轴进行分解, 然后对电荷元沿各坐标方向的电场强度分量分别求其标量积分, 最后求出合电场强度。下面举几个典型例子。

例 9.2 求电偶极子中垂线上任一点的电场强度。

解 相隔一定距离的等量异号点电荷, 当点电荷 $+q$ 和 $-q$ 的距离 l 比从它们到所讨论的场点的距离 r 小得多时, 此电荷系统称为电偶极子, 如图 9.5 所示。 l 表示 $-q$ 到 $+q$ 的矢量线段。

设 $+q$ 和 $-q$ 到偶极子中垂线上任一点 A 处的位置矢量分别为 r_+ 和 r_- , A 点到电偶极子中心的距离为 r , 由几何知识可知 $|r_+| = |r_-|$, 根据点电荷在空间产生的场强公式(9.5), $+q$ 和 $-q$ 在 A 点处产生的场强 E_+ 和 E_- 分别为:

$$E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_+^2} e_{r_+} = \frac{qr_+}{4\pi\epsilon_0 r_+^3}$$

$$E_- = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_-^2} e_{r_-} = -\frac{qr_-}{4\pi\epsilon_0 r_-^3}$$

因为

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

当 A 点距离电偶极子很远, 即 $r \gg l$ 时, 取一级近似, 有 $r_+ = r_- = r$, 所以 A 点的场强为:

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

由于 $r_+ + r_- = -l$, 所以上式可写为:

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

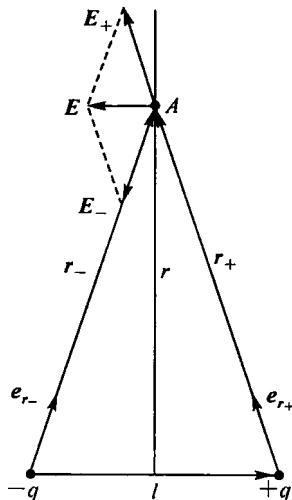


图 9.5 电偶极子中垂线上的电场强度