

大学物理

简明教程

(下册)

DAXUE WULI
JIANMING JIAOCHENG

主编 朱 浩 马小娟 周勋秀 黄代绘



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

大学物理简明教程

(下册)

主编 朱 浩 马小娟 周勋秀 黄代绘

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本教材以物理学的发展为主线,力求物理图像清晰,物理概念和基本规律表述明确;注重对物理过程的认知、分析和解决;锻炼学生的科学思维方式,将物理基础知识融入生活、高新科技和前沿课题之中。全书分为上、下两册,上册包括力学(含相对论基础)、热学、振动和波动;下册包括电磁学、光学和量子力学基础。

本书可作为高等学校非物理类专业的大学物理课程教材,也可作为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

大学物理简明教程. 下册 / 朱浩等主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2010.8
ISBN 978-7-5643-0808-7

I. ①大… II. ①朱… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 162044 号

大学物理简明教程

(下册)

主编 朱浩 马小娟 周勋秀 黄代绘

*

责任编辑 牛君

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×230 mm 印张: 13.875

字数: 301 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0808-7

定价: 25.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

物理学是研究物质世界固有性质及其运动规律的一门科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域，应用于生产技术的许多部门；它是一切自然科学和工程技术的基础，也是高新技术发展的源泉和先导。

“大学物理”是理工科低年级学生的一门重要基础理论课，其作用在于使学生对物理学的基本概念、基本理论和基本方法有比较系统的认识 and 正确的理解，为以后的学习和工作打下必要的基础；同时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。

本书从大众化教育和我国目前工科大学物理教学实际出发，注重与高中物理知识的衔接，力求物理图像清晰，基本概念和基本规律表述明确。本书在考虑物理学的完整性和系统性的同时，将物理学方法论、物理学史、生活中的物理现象等寓于教材之中，既便于教，也便于学。

本书分上、下两册，适用于 90~110 学时或更少学时的教学。上册的具体分工为第 1 篇力学：周勋秀，第 2 篇热学：黄代绘，第 3 篇振动和波动：马小娟；下册的具体分工为第 4 篇电磁学：朱浩，第 5 篇光学：马小娟，第 6 篇量子力学基础：周勋秀。全书由黄泉保教授审阅。

本书在编写和出版过程中，吴平教授、张晓副教授自始至终都给予了极大的关心、支持与帮助，徐行可教授对本书的样章作了非常精细的审视，提出了许多有价值的意见，黄泉保教授花了大量时间对本书进行了逐字逐句的审阅，提出了具体的修改意见，王莉教授对书中内容也提出了许多宝贵的意见和建议；本书在出版过程中，得到了西南交通大学出版社的关注与支持，他们的热心帮助，为编者提供了良好的条件和机会，使本书顺利完成并出版，在此，对他们一并表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，参考了国内外很多优秀教材，还借用了一些习题和网络上的少量插图，谨此致谢。

由于编者自身水平和教学经验的局限，书中难免存在不少疏漏和不妥之处，希望使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

2010 年 6 月

目 录

第 4 篇 电磁学

9 静电场	3
9.1 电荷和库仑定律	4
9.2 电场和电场强度	5
9.3 静电场的高斯定理及其应用	12
9.4 静电场的环路定理 电势	18
9.5 电场强度与电势的关系	24
9.6 静电场和物质的相互作用	26
9.7 导体的电容	32
9.8 静电场的能量	35
本章小结	38
习 题	41
10 稳恒磁场	45
10.1 磁场和磁感应强度	46
10.2 毕奥-萨伐尔定律	49
10.3 稳恒磁场的安培环路定理及其应用	53
10.4 磁场对运动电荷及载流导线的作用	56
10.5 磁介质	62
本章小结	66
习 题	67
11 电磁感应与电磁理论	72
11.1 电动势的概念	73
11.2 电磁感应及其基本规律	74
11.3 自感和互感现象	81
11.4 磁场的能量	85
11.5 麦克斯韦电磁理论	87

本章小结	92
习 题	94

第 5 篇 光 学

12 光的干涉	101
12.1 光源和光的相干性	102
12.2 杨氏双缝干涉	107
12.3 薄膜干涉	113
本章小结	124
习 题	126
13 光的衍射	129
13.1 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	130
13.2 单缝夫琅禾费衍射	132
13.3 光栅夫琅禾费衍射	139
*13.4 X 射线在晶体上的衍射	146
*13.5 光学仪器的像分辨本领	148
本章小结	151
习 题	153
14 光的偏振	156
14.1 光的横波性与偏振态	157
14.2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	159
14.3 反射和折射 起偏 布儒斯特定律	161
*14.4 双折射	163
本章小结	165
习 题	166

第 6 篇 量子力学基础

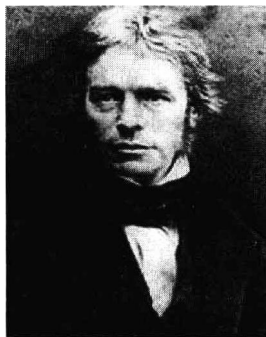
15 量子力学基础	171
15.1 黑体辐射 普朗克能量子假说	172
15.2 光电效应 爱因斯坦的光子理论	174

15.3 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	180
15.4 实物粒子的波粒二象性 不确定关系	185
15.5 波函数 薛定谔方程	189
15.6 薛定谔方程的简单应用	194
*15.7 扫描隧穿显微镜	202
本章小结	205
习 题	207
 习题参考答案	 210
 参考文献	 214

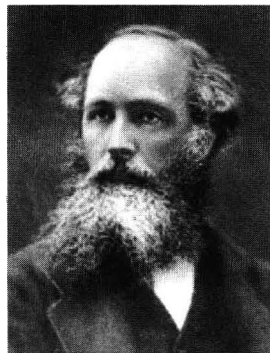
第 4 篇 电磁学



库仑 (Charlse-Augustin de Coulomb, 1736—1806), 法国工程师、物理学家。他于 1777 年开始研究静电和磁力问题, 在研究指南针的磁针问题时, 发现丝线扭转时的扭力和针转过的角度成一定比例关系, 从而可利用这种关系测出静电力和磁力的大小, 这导致他发明了扭秤; 1785—1789 年, 他用扭秤测量静电力和磁力, 导出了著名的库仑定律。库仑定律使电磁学的研究从定性进入定量阶段, 为电磁学的发展、电磁场理论的建立开拓了道路, 是电磁学史上一块重要的里程碑。库仑于 1782 年当选为法国科学院院士, 1785—1789 年先后公开出版发行其学说著作《电气与磁性》。电量的单位就是为了纪念他的卓越贡献而命名的。



法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867), 英国著名物理学家、化学家, 在化学、电化学、电磁学等领域都作出过杰出贡献。他家境贫寒, 未受过系统的正规教育, 但在众多领域中作出惊人成就, 堪称刻苦勤奋、探索真理、不计个人名利的典范, 对于青少年富有教育意义。他最出色的工作是电磁感应的发现和场的概念的提出。他经过 10 年探索发现了电磁感应现象, 创制出世界上第一台感应发电机, 宣告了电气时代的到来; 引入场的概念, 被爱因斯坦誉为继牛顿之后最重要的发现, 也对后来麦克斯韦产生了巨大的科学影响。法拉第于 1824 年当选为皇家学会会员, 1825 年任皇家研究所实验室主任, 1833 年任皇家研究所化学终身教授, 1846 年荣获伦福德奖章和皇家勋章。为了纪念法拉第, 电容的国际单位被命名为法拉, 1 mol 电子所含的电量也被称为法拉第常量。



麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879), 是继法拉第之后集电磁学大成的伟大科学家, 主要从事电磁理论、分子物理学、统计物理学、光学、力学、弹性理论方面的研究。在前人成就的基础上, 他凭借高深的数学造诣和丰富的想象力对整个电磁现象作了系统、全面的研究, 将电、磁、光现象统一, 并用简洁、对称、完美的数学形式表示出来, 是 19 世纪物理学发展的最光辉的成果, 是科学史上最伟大的综合之一。麦克斯韦于 1856 年在苏格兰阿伯丁的马里沙耳任自然哲学教授, 1860 年到伦敦国王学院任自然哲学和天文学教授, 1861 年当选为伦敦皇家学会会员, 1873 年出版了电磁场理论的经典巨著《电磁学通论》, 系统、全面、完美地阐述了电磁场理论, 1871 年受聘为剑桥大学新设立的卡文迪许实验物理学教授, 负责筹建该实验室, 1874 年建成后担任实验室的第一任主任。在热力学与统计物理学方面, 麦克斯韦也作出了重要贡献, 成为气体动理论的创始人之一。

电磁学是研究电磁现象、电磁相互作用规律和应用的物理学分支学科。电磁现象是自然界存在的一种极为普遍的现象，电磁相互作用是物质的四种相互作用之一，传递电磁相互作用的是电磁场。

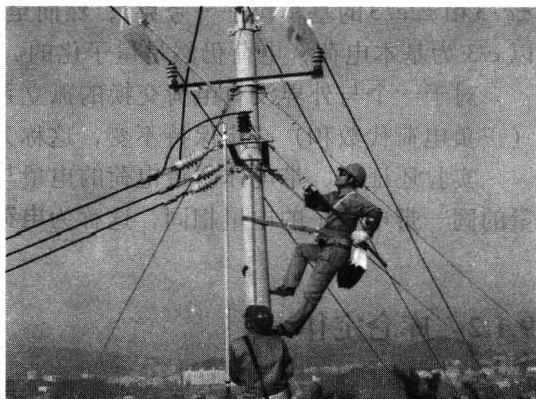
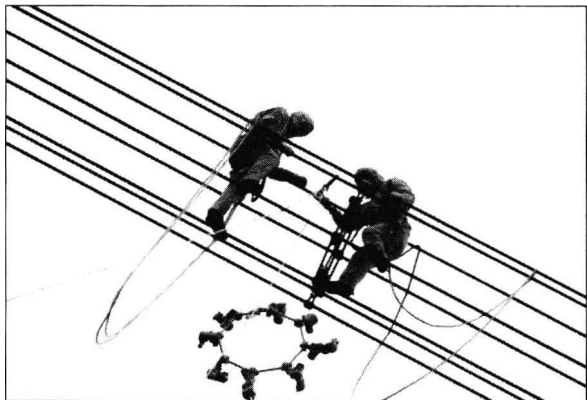
电磁学从原来互相独立的两门科学（电学、磁学）发展成为物理学中一个完整的分支学科，主要是基于两个重要的实验发现，即电流的磁效应和变化的磁场的电效应。这两个实验现象，加上麦克斯韦关于变化电场产生磁场的假设，奠定了电磁学的整个理论体系，发展了对现代文明起重大影响的电工和电子技术。因此，对于未来工程师而言，学好电磁学的重要性也就不言而喻了。麦克斯韦电磁理论的重大意义，不仅在于这个理论支配着一切宏观电磁现象（包括静电、稳恒磁场、电磁感应、电路、电磁波等），而且在于它将光学现象统一在这个理论框架之内，深刻地影响着人们认识物质世界的思想。

在本篇里，我们不仅仅是要重点学习电磁场的性质和电磁相互作用的规律，而且要通过它们的学习掌握研究场的一般方法：用空间位置函数即场量来描述场，用场量的通量和环流来揭示场的性质。

9 静电场

从本章开始我们将研究物质运动的另一种形式,即电磁运动。电磁运动和机械运动一样,是自然界中普遍存在的运动形式之一。自然界中一切的电磁现象都起源于物质具有电荷属性,电现象起源于电荷,而磁现象起源于运动电荷(电流),所以“电荷”的概念是电磁学中的第一个重要概念。

通过本章的学习,要求能了解电荷的基本性质;掌握库仑定律的内容;掌握场的叠加原理和基本计算方法;理解电场强度和电势的概念,掌握二者的计算方法以及它们之间的联系;牢固掌握高斯定理和静电场的环路定理的内容,会用高斯定理计算电场强度分布;掌握静电平衡时导体的性质,了解电介质的极化机理;理解电容的物理意义,能对电容器的静电能进行计算。



高压带电是一种高压线路检修技术。该技术可以在不停电、不停产的条件下对几十万伏的高压线路进行检修,因而对提高劳动生产率有重要价值。

那么,作业人员怎样才能进入几十万伏的高压区呢?金属屏蔽服对人体能起到很好的保护作用。当作业人员抓住高压线瞬间,会听到火花放电的声音(高压线与人体之间存在着极高的电势差),但这种放电是在高压线与屏蔽服外表之间进行的,不会危及作业人员的生命安全。当人体与高压线实现这种“触电”之后,人与高压线就成为等势体,人即可进行高压带电作业,等电势操作是很安全的。这里,蕴涵着本章要学习的静电学相关知识。

9.1 电荷和库仑定律

9.1.1 电荷的基本性质

电荷是物质的一种基本属性。

自然界中只存在正负两种电荷，同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。带电体上所带电荷的数量称为电量，用符号 Q 或者 q 表示，在 SI 中，其单位为库仑 (C)。正电荷电量取正值，负电荷电量取负值。

到目前为止，所有实验表明，电子是自然界具有最小电量的粒子，电荷的一个基本单元就是一个电子所带电量的绝对值，常以 e 表示，即 $e=1.62\times 10^{-19}\text{ C}$ ；所有带电体或其他微观粒子的电量都是电子电量的整数倍。这说明，物体所带的电荷不是以连续方式出现的，而是以一个个不连续的量值出现的，这称为**电荷的量子化**。近代物理从理论上认为存在着电荷为 $\pm e/3$ 和 $\pm 2e/3$ 的基本粒子（夸克），然而至今尚未在实验中发现单独存在的夸克，即使发现，以 $e/3$ 为基本电荷，电荷仍然是量子化的。

对于一个与外界没有电荷交换的孤立系统，无论发生了什么变化，整个系统的电荷总量（正负电荷代数和）必定保持不变，这称为**电荷守恒定律**。

实验还证明，带电体所带电荷的电量与带电体的运动速度无关，即在不同的参考系中测量的同一带电粒子的电量相同，这称为**电荷的相对论不变性**。

9.1.2 库仑定律

任意两个带电体之间都有相互作用力。实验表明，两个静止的带电体之间的相互作用力，一般与带电体之间的距离和所带电量有关，也与带电体的大小、形状以及电荷在带电体上的分布情形相关。当带电体自身的大小与带电体之间的距离相比很小时，我们可以把这种带电体看做点电荷。

1784—1785 年，法国科学家库仑通过扭秤实验总结出：真空中两个静止的点电荷之间的作用力与这两个电荷所带电量的乘积成正比，和它们之间距离的平方成反比，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。这就是我们所说的**库仑定律**。这种静止电荷之间的作用力称为**静电力**（或**库仑力**）。

如图 9.1.1 所示, 电荷 q_2 受到 q_1 的作用力为

$$\boldsymbol{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \boldsymbol{r}_0 = k \frac{q_1 q_2 \boldsymbol{r}}{r^3} \quad (9.1.1)$$

式中: $\boldsymbol{r}_0$ 为 r 方向上的单位矢量, 方向由 q_1 指向 q_2 ; $\boldsymbol{r} = r \cdot \boldsymbol{r}_0$; k 为静电力恒量, 经实验测定, 在国际单位制中

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \quad (9.1.2)$$

式中: $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 称为真空电容率 (又

称真空介电常数)。实际应用中, 常使用 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 来代替 k , 这样, 库仑定律又可表示为

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 \boldsymbol{r}}{r^3} \quad (9.1.3)$$

注意: ① 库仑定律只适用于两个相对于观察者为静止的点电荷之间的相互作用; ② 空气对电荷之间的作用影响较小, 可看成是真空。

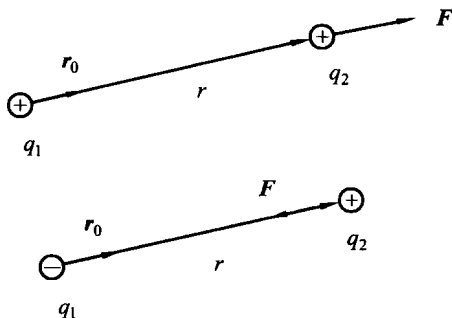


图 9.1.1 电荷之间的相互作用力

思考题

- (1) 点电荷是否一定是很小的带电体? 一个带电体被视为点电荷的条件是什么?
- (2) 库仑定律适用的条件是什么?

9.2 电场和电场强度

9.2.1 电 场

既然电荷间存在相互作用力, 那么这种相互作用力是通过什么媒介来传递的呢?

历史上曾经有过两种对立的观点: 一种认为两个电荷之间的作用是不需要中间媒介而直接作用的, 其作用也不需要时间, 而是即时的, 即“超距”作用理论; 另一种则认为电荷之间的作用是要通过中间媒介的, 作用力的传递也需要一定的时间。

近代科学实验证明, “超距作用”的观点是错误的, 任何带电体周围都存在一种“特殊”的物质, 这种物质称为**电场**。电场的特性之一是对位于其中的电荷会施以力的作用。电荷与

电荷之间正是通过电场发生相互作用的。我们首先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产生的电场，这种电场称为**静电场**，产生电场的电荷称为**场源电荷**。

9.2.2 电场强度

我们把电场对进入其中的电荷施加的力称为**电场力**，为了定量描述电场对场中电荷施力这一性质，可引入一个物理量——**电场强度**。

将一个电量和尺寸都足够小的检验电荷 q_0 放入电场中，受到的电场力为 $\mathbf{F}$ 。实验发现，在场中一个确定的空间位置，比值 $\mathbf{F}/q_0$ 是一个恒矢量，与检验电荷 q_0 的性质无关，而只反映了该空间位置处原电场的性质。于是我们定义 $\mathbf{F}/q_0$ 为电场强度，用 $\mathbf{E}$ 表示，即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (9.2.1)$$

电场强度 $\mathbf{E}$ 为矢量。电场中某点电场强度的大小，等于单位电荷在该点所受电场力的大小，其方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致。

电场强度的单位 (SI) 为伏每米 ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)， $1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$ 。

注意：一般来说，在空间不同位置处，场强的大小和方向都是不同的，如果电场中空间各点的场强大小和方向都相同，这种电场叫做匀强电场，它是一种特殊情况。

由于电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 是随着空间位置 $\mathbf{r}$ 而变化的。因此，我们称 $\mathbf{E}$ 为空间矢量函数，电场就是一种随空间位置变化的矢量场。对矢量场的研究，我们一般采用求其通量和环流的方法来加以讨论，这对应着我们后面将要重点学习的高斯定理和环路定理。

9.2.3 电场线

为了形象地表示电场在空间的分布情况，我们按照下面的规定在电场中画一系列曲线：曲线上每点的切线方向与该点的电场强度的方向一致；在与电场强度垂直的单位面积上，穿过曲线的条数与该处电场强度的大小成正比，即曲线分布稠密的地方电场强度大，曲线分布稀疏的地方电场强度小。这样的曲线就称为**电场线**（又称**电力线**）。

图 9.2.1 画出了几种常见电荷的电场线。从图中所表示的电场线分布情形，可以看出静电场的电场线具有如下性质：

- (1) 起于正电荷（或无限远），止于负电荷（或无限远）；
- (2) 不闭合，也不在无电荷的地方中断；
- (3) 任意两条电场线在没有电荷的地方不会相交。

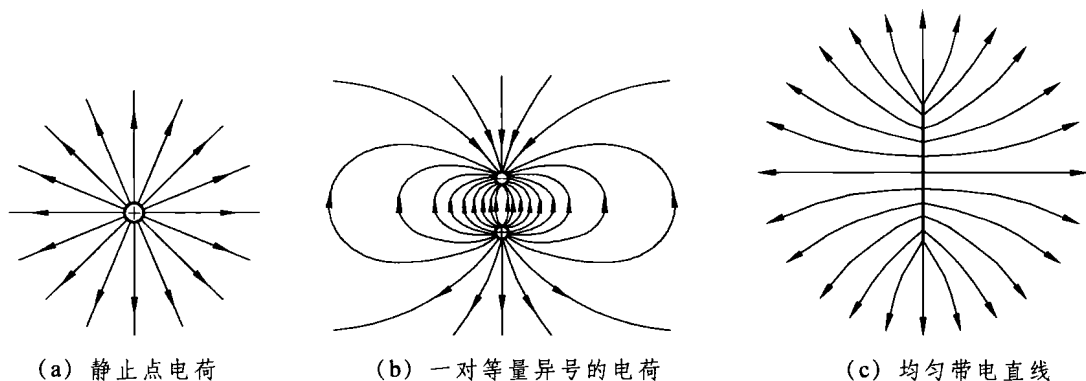


图 9.2.1 几种常见电荷的电场线

注意：电场线不是客观存在的，而是对物理现象的一种形象描述，是我们假想的。

9.2.4 电场强度的计算

可以想象，如果电荷在空间的电场分布知道了，进入场中的电荷受到的电场力也就知道了，电荷的受力知道了，那电荷的运动状态我们也就可以讨论了。从这个角度来说，研究电场，就是要研究已知电荷在空间的电场分布。

下面我们来学习如何计算各种不同的场源电荷在空间的电场分布。

1. 点电荷产生的电场

设场源电荷为点电荷 q ，将检验电荷 q_0 放入场中任一点 P 处。由库仑定律式 (9.1.3)， q_0 所受电场力

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0\mathbf{r}}{r^3}$$

由电场强度的定义式 (9.2.1)，可知点电荷的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{q_0} \cdot \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (9.2.2)$$

设场源电荷 q 位于坐标原点，当 q 为正电荷时，电场强度与场点的位矢 $\mathbf{r}$ 同向，否则相反，如图 9.2.2 所示。

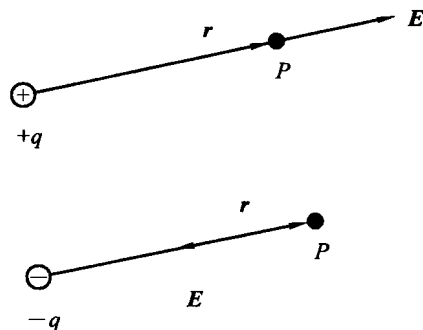


图 9.2.2 电场强度方向与场源电荷的关系

式 (9.2.2) 表明, 点电荷产生的电场强度分布具有球对称性, 如图 9.2.1 (a) 所示。

2. 电荷系产生的电场

实验表明, 如果在空间同时存在多个电荷, 则在任意两个电荷之间的相互作用, 不会因为其他电荷的存在而改变。

将检验电荷 q_0 置于由静止点电荷系 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 共同激发的电场中某点, 它受到的电场力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \dots + \mathbf{F}_n$$

由电场强度的定义式 (9.2.1) 和点电荷的电场强度公式 (9.2.2), 该场点的电场强度为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_3}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} \\ &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_i \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i \mathbf{r}_i}{r_i^3} \end{aligned} \quad (9.2.3)$$

式中: $\mathbf{r}_i$ 为第 i 个点电荷到场点的位置矢量。

由式 (9.2.3) 可以看出, 点电荷系电场中某点总场强等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和。这就是**场强叠加原理**。

如果场源电荷不能视为点电荷系, 即电场是由电荷连续分布的带电体产生的, 可将其分割为许多小的电荷元 dq , 每个电荷元足够小, 可视为点电荷。则由式 (9.2.2) 可得电荷元 dq 在场中某点产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (9.2.4)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为电荷元 dq 到场点的位置矢量。

由场强叠加原理, 整个带电体在该场点产生的场强等于所有电荷元在该点产生场强的矢量和, 即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (9.2.5)$$

注意: 式 (9.2.5) 为矢量积分, 在具体计算时, 如遇到各电荷元在场点的场强方向不一致, 应选择合适的坐标系, 将场强在坐标轴上投影成分量, 然后对各分量积分。

例如, 在直角坐标系中, 将 $d\mathbf{E}$ 沿坐标轴方向分解为 dE_x, dE_y 与 dE_z , 然后分量积分

$$E_x = \int dE_x, \quad E_y = \int dE_y, \quad E_z = \int dE_z$$

则

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

例题 9.2.1 电偶极子的电场如图 9.2.3 所示, 等量异号点电荷相距为 l , 这样一对点电荷称为电偶极子。由 $-q \rightarrow +q$ 的矢量 l 叫做电偶极子的**极轴**, $p = ql$ 叫做电偶极子的**电偶极矩**。

已知电偶极子电矩为 p , 求:

(1) 电偶极子在它轴线的延长线上一点 A 的 E_A ;

(2) 电偶极子在它轴线的中垂线上一点 B 的 E_B 。

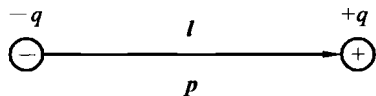


图 9.2.3 电偶极子的电场

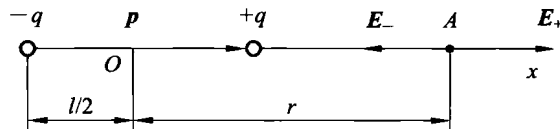


图 9.2.4 一维坐标系

解: (1) 如图 9.2.4 所示建立坐标系:

$$E_A = E_+ + E_-$$

$$\begin{cases} E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r - \frac{l}{2}\right)^2} \\ E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E_A = E_+ - E_- &= \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2lr}{r^4 \left(1 - \frac{l}{2r}\right)^2 \left(1 + \frac{l}{2r}\right)^2} \end{aligned}$$

由于 $r \gg l$,

则

$$\frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

可得

$$E_A = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (E_A \text{ 与 } p \text{ 同向})$$

(2) 如图 9.2.5 所示建立坐标系:

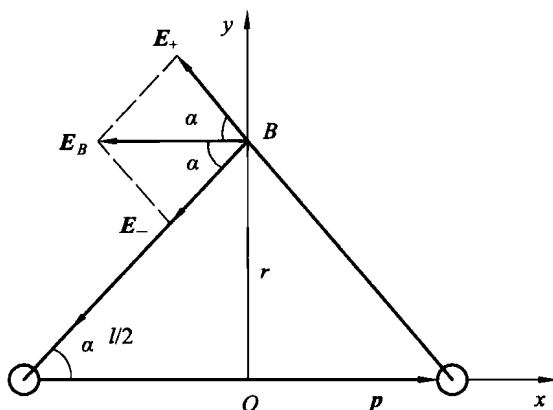


图 9.2.5 二维坐标系

$$\mathbf{E}_B = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$$

$$\begin{cases} E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \\ E_- = E_+ \end{cases}$$

$$E_{Bx} = -(E_+ \cos \alpha + E_- \cos \alpha) = -2E_+ \cos \alpha$$

$$= -2 \cdot \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \cdot \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} = \frac{-ql}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

由于 $r \gg l$,

$$\text{则} \quad \frac{-gl}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{-p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

又因为 $E_{By} = 0$,

$$\text{可得} \quad \mathbf{E}_B = \mathbf{E}_{Bx} = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

注意：电偶极子是一种非常重要的理想模型。由于分子中有相等的正负电荷，在研究有些问题时，如电介质的极化，就可以把分子看成是一个电偶极子模型。

例题 9.2.2 设电荷 q 均匀分布在半径为 R 的圆环上，如图 9.2.6 所示。计算在环的轴线上与环心相距 x 的 P 点的场强。

解：如图 9.2.6 所示建立坐标系， x 轴在圆环轴线上，把圆环分成一系列小段，任取一小段 dl ，带电量 $dq = \lambda dl$ ，则 dq 在 P 点产生的电场为