

高等教育 21 世纪课程教材

GAODENG JIAOYU 21 SHIJI KECHENG JIAOCAI

# 大学物理学

COLLEGE PHYSICS

(下册)

主 编 赵近芳

主 审 颜晓红



北京邮电大学出版社

[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

# 大学物理学

下册

主编 赵近芳  
编著 黎培德 黄克立  
杨友田 崔洪农  
主审 颜晓红

北京邮电大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下册/赵近芳主编. —北京:北京邮电大学出版社, 2002

ISBN 7-5635-0633-0

I. 大... II. 赵... III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 061538 号

---

书 名: 大学物理学(下)

编 著: 赵近芳

责任编辑: 陈露晓

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: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

E-mail: [publish@bupt.edu.cn](mailto:publish@bupt.edu.cn)

经 销: 各地新华书店

印 刷: 国防科技大学印刷厂印刷

开 本: 787mm×960mm 1/16

印 张: 22.25

字 数: 483 千字

版 次: 2002 年 8 月第 1 版 2002 年 11 月第 2 次印刷

---

ISBN 7-5635-0633-0/O · 39

定 价: 26.00 元

如有质量问题请与发行部联系  
版权所有 侵权必究

## 前 言

本书是为适应当前教学改革的要求,根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,在总结我们多年教材改革实践的基础上,汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写的.教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容,又特别加强了近代物理知识和新科技物理基础的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要,这套教材的主要特点是:

1. **高视点选择经典内容,更新了教学体系** 如力学中删去了直线运动、抛体运动、碰撞等内容,加强了矢量性、能量及守恒定律等重要概念的阐述,使学生对大学物理有新鲜感.教材把相对论纳入力学篇,使牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野.同时把振动与波和波动光学归入一类,是为了强调波动这种运动形式的普遍性,波动的概念可以延伸到量子力学领域,以此沟通经典内容和近代内容的联系.

2. **大力使内容现代化** 教材介绍了当前新技术领域中的基础性物理原理,如熵与信息、全息、光纤通信、能带理论、激光、超导、纳米科学技术等,还引入了非线性物理的一些基本概念,如混沌、孤波、耗散结构、非线性光学等内容;同时大力加强了现代物理学的重要观念,如相对论时空观、微观粒子的波粒二象性、量子论以及时空对称性与守恒定律的关系等,使读者尽早接触现代高新科技的发展脉搏和现代物理的前沿课题,具有鲜明的时代特色.

3. **加强从全局观点掌握、运用知识的综合能力** 教材力求突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,力求对物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于学生阅读和理解.加强重要概念在各部分内容中的联系,如势能概念在力学、热学和电学中一直互相呼应,一脉相承,使学生整体把握知识的能力受到必要的训练,有利于从全局观点掌握、运用知识和综合思考.

4. **开“窗口”、重视科学素质训练** 在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息及开一定的非线性物理“窗口”.尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于培养学生的求知欲望和独立思考能力,而求知欲和独立思考是科学素质和创造能力的基本要素.

说明:

- (1)教材中打\*号的章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;
- (2)书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;
- (3)若将打\*号的章节和小字部分除去,仍不影响教材的整体性.

本书由黎培德编写力学、振动与波、超导电性,黄克立编写电磁学、激光原理,杨友田编写热学,赵近芳编写波动光学、固体的能带结构、纳米科学技术,崔洪农编写相对论、量子物理基础、原子核物理和粒子物理.学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由赵近芳负责全书的修改和定稿工作.在编写过程中,许多学校的老师提出了一些很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、华北工学院、武汉理工大学、江汉大学、湘潭大学、中南大学、长沙交通学院、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,教育部物理教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书并提出了许多宝贵意见,北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢.

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编 者  
2002年5月

## 内 容 简 介

本书是根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神编写的. 全书分上、下两册, 上册: 力学基础、相对论、振动与波和热学; 下册: 电磁学、波动光学和量子论. 与之配套的还有《大学物理学学习指导》书. 两者既可彼此独立, 又可相互配套使用. 本书作为非物理专业大学物理教材的改革尝试, 采取了“高、宽、新、活、宜”的原则, 即高视点选择经典内容, 努力拓宽知识面, 尽力反映新科技发展概况, 注意各部分知识之间的活化联系, 同时内容的难度较适宜.

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材, 也可作为综合大学和师范学院非物理专业的教材或参考书, 并配有光盘.

## 目 录

## 第四篇 电磁学

|   |       |
|---|-------|
| 第八章 静电场和稳恒电场 .....  | (2)   |
| § 8-1 电场 电场强度 .....   | (2)   |
| § 8-2 电通量 高斯定理 .....  | (10)  |
| § 8-3 电场力的功 电势 .....  | (16)  |
| § 8-4 场强与电势的关系 .....  | (21)  |
| § 8-5 静电场中的导体和电介质 .....   | (25)  |
| § 8-6 电容 电容器 .....  | (35)  |
| § 8-7 电流 稳恒电场 电动势 .....   | (39)  |
| § 8-8 电场的能量 .....   | (42)  |
| 习题八 .....   | (44)  |
| 第九章 稳恒磁场与电磁场的相对性 .....  | (49)  |
| § 9-1 磁场 磁感应强度[磁通量 磁场中的高斯定理 毕-萨定律] .....                        | (49)  |
| § 9-2 安培环路定理 .....  | (61)  |
| § 9-3 磁场对载流导线的作用[安培定律 磁力的功] .....                               | (66)  |
| § 9-4 磁场对运动电荷的作用[洛仑兹力 霍耳效应 *磁流体发电] .....                        | (73)  |
| *§ 9-5 回旋加速器 磁聚焦 等离子体磁约束 .....                                  | (79)  |
| § 9-6 磁介质[磁化强度 有磁介质时的安培环路定理 铁磁质] .....                          | (84)  |
| *§ 9-7 电磁场的相对论性变换[运动电荷的电场和磁场(非<br>相对论的)、运动电荷的电场和磁场(相对论的)] ..... | (96)  |
| 习题九 .....   | (103) |
| 第十章 电磁感应 .....  | (109) |
| § 10-1 电磁感应定律 .....   | (109) |
| § 10-2 动生电动势与感生电动势 .....  | (112) |
| § 10-3 电子感应加速器 涡电流 .....  | (119) |
| § 10-4 自感应与互感应 .....  | (121) |
| § 10-5 磁场能量 .....   | (124) |
| 习题十 .....   | (125) |
| 第十一章 电磁场和电磁波 .....  | (130) |
| § 11-1 位移电流 麦克斯韦方程组 .....                                       | (130) |
| § 11-2 *加速运动电荷的电磁场 电磁波 .....                                    | (136) |

## 2 目 录

|                   |       |
|-------------------|-------|
| *§ 11-3 电磁场的能量与动量 | (144) |
| 习题十一              | (147) |

### 第五篇 波动光学

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 第十二章 光的干涉       | (150) |
| § 12-1 光源 光的相干性 | (150) |
| § 12-2 杨氏双缝干涉实验 | (154) |
| § 12-3 光程与光程差   | (158) |
| § 12-4 薄膜干涉     | (161) |
| § 12-5 劈尖干涉 牛顿环 | (163) |
| § 12-6 迈克耳逊干涉仪  | (168) |
| 习题十二            | (172) |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第十三章 光的衍射             | (175) |
| § 13-1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理 | (175) |
| § 13-2 单缝夫琅禾费衍射       | (177) |
| § 13-3 衍射光栅           | (181) |
| § 13-4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率  | (188) |
| § 13-5 X射线的衍射         | (191) |
| 习题十三                  | (193) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第十四章 光的偏振              | (195) |
| § 14-1 自然光和偏振光         | (195) |
| § 14-2 起偏和检偏 马吕斯定律     | (198) |
| § 14-3 反射与折射时光的偏振      | (200) |
| § 14-4 光的双折射           | (203) |
| *§ 14-5 偏振光的干涉 人为双折射现象 | (205) |
| *§ 14-6 旋光现象           | (208) |
| 习题十四                   | (209) |

|                |       |
|----------------|-------|
| *第十五章 现代光学简介   | (211) |
| § 15-1 全息照相    | (211) |
| § 15-2 非线性光学简介 | (215) |
| § 15-3 光纤通讯    | (218) |
| 习题十五           | (225) |

### 第六篇 量子论

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 第十六章 量子物理基础         | (228) |
| § 16-1 黑体辐射 普朗克量子假设 | (228) |
| § 16-2 光的量子性        | (232) |
| § 16-3 玻尔的氢原子理论     | (239) |
| § 16-4 粒子的波动性       | (245) |
| § 16-5 测不准关系        | (248) |



|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| § 16-6 波函数 薛定谔方程·····          | (251)        |
| § 16-7 薛定谔方程在几个一维问题中的应用·····   | (255)        |
| § 16-8 量子力学对氢原子的应用·····        | (263)        |
| § 16-9 斯特恩—盖拉赫实验·····          | (269)        |
| § 16-10 电子自旋·····              | (272)        |
| § 16-11 原子的壳层结构·····           | (273)        |
| 习题十六·····                      | (279)        |
| <b>*第十七章 原子核物理和粒子物理简介·····</b> | <b>(282)</b> |
| § 17-1 原子核的基本性质·····           | (282)        |
| § 17-2 原子核的放射性衰变·····          | (287)        |
| § 17-3 原子核能的利用·····            | (291)        |
| § 17-4 粒子物理简介·····             | (295)        |
| 习题十七·····                      | (301)        |
| <b>第十八章 新技术的物理基础·····</b>      | <b>(303)</b> |
| § 18-1 固体的能带结构·····            | (303)        |
| § 18-2 激光原理·····               | (315)        |
| *§ 18-3 超导电性·····              | (323)        |
| *§ 18-4 纳米科学技术简介·····          | (334)        |
| 习题十八·····                      | (339)        |
| <b>习题答案·····</b>               | <b>(341)</b> |

## 第四篇 电磁学

电磁学的知识是许多工程技术和科学研究的基础.本篇主要研究电磁场的规律以及物质的电磁性质.

电能是应用最广泛的能源,电磁波的传播实现了信息传递.显然,电磁学与工程技术各个领域有十分密切的联系.

电磁学的研究在理论方面也很重要.物质的各种性能是由物质的电结构决定的,在分子和原子等微观领域中,电磁力起主要作用.许多物理现象,如物质的弹性、金属的导热性、光学的折射率等都可从物质的电结构中得到解释.所以,电磁学理论在现代物理学中也占有重要地位.

## 第八章 静电场和稳恒电场

本章主要研究静电场和稳恒电场的基本性质及电场与导体、电介质的相互作用。

电场强度和电势是描述电场特性的两个重要物理量。高斯定理和场强环流定理是反映静电场和稳恒电场性质的基本规律。

已知场源电荷分布求解场强分布和电势分布是本章要解决的主要问题之一。

在电场的作用下,导体和电介质的电荷分布会发生变化。这种变化了的电荷分布又会反过来影响电场分布,最后达到静电平衡。我们还将讨论电场与物质的这种相互作用规律,以及电容器和电场的能量。

静电场和稳恒电场是电磁学的入门。本章介绍的一些概念、规律,研究和处理问题的方法贯穿在整个电磁学中。在学习过程中应注意提高这方面的能力。

### § 8 - 1 电场 电场强度

#### 一、电荷

电荷的概念是从物体带电的现象中产生的。两种不同质料的物体,如丝绸与玻璃棒相互摩擦后,它们都能吸引小纸片等轻微物体。这时,我们说丝绸和玻璃棒处于带电状态,它们分别带有电荷。可见,电荷是物体状态的一种属性。宏观物体或微观粒子处于带电状态就说他们带有电荷。

物体或微观粒子所带的电荷有两种,称为正电荷和负电荷。带同种电荷的物体(简称同号电荷)互相排斥,带异种电荷的物体(简称异号电荷)互相吸引。静止电荷之间的相互作用力称为静电力。根据带电体之间相互作用力的大小能够确定物体所带电荷的多少。表示电荷多少的量叫做电量。在国际单位制(SI)中,电量的单位是库仑,代号为C。

现代物理实验证实,电子的电荷集中在半径小于 $10^{-18}$  m的小体积内。因此,常把电子看成一个无内部结构而有有限质量和电量的“点”。质子只有正电荷,都集中在半径约为 $10^{-15}$  m的体积内。中子内部也有电荷,靠近中心是正电荷,靠

外为负电荷;正负电荷电量相等,所以对外不显带电。

由物质的分子结构知识可知,在正常状态下,物体内部的正电荷和负电荷量值相等,物体处于中性状态.使物体带电的过程就是使它获得或失去电子的过程.在一孤立系统内,无论发生怎样的物理过程,该系统电荷的代数和保持不变,这就是**电荷守恒定律**.在粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和消失的.例如,一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的“产生”);而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(这叫电子对的“湮灭”).在已观察到的各种过程中,正、负电荷总是成对出现或成对消失.由于光子不带电,正、负电子又各带着等量异号电荷,所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中电荷的代数和,电荷守恒定律仍然保持有效.

迄今为止,所有实验表明,任何带电体所带电量都是基本电量  $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$  的整数倍.这种电量只能取分立的、不连续的量值的性质称为**电荷的量子化**.因为  $e$  如此之小,以至使电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中未能表现出来.因此常把带电体当作电荷连续分布的带电体来处理,并认为电荷的变化是连续的.近代物理从理论上预言,基本粒子由若干种电量为  $\pm \frac{1}{3}e$ ,  $\pm \frac{2}{3}e$  的夸克或反夸克组成.然而单独存在的夸克尚未在实验中发现.

实验还证明,一个电荷的电量与它的运动状态无关.例如加速器将电子或质子加速时,随着粒子速度的变化,电量没有任何变化.再如氢气分子和氦原子都有两个电子,它们在核外的运动状态差别不大,电子电量应该相同.但是氢气分子的两个质子是作为两个原子核在保持相对距离约为  $0.07 \text{ nm}$  的情况下转动的;氦原子中的两个质子却紧密地束缚在一起运动.氦原子中的两个质子的能量比氢分子的两个质子的能量大到一百万倍的数量级,因而两者的运动状态有显著差别.如果电荷的电量与运动状态有关,氢分子中质子的电量就应该和氦原子中质子的电量不同,但两者的电子电量是相同的,因此就不可能两者都是电中性的.但是实验证实,氢分子和氦原子都精确地是电中性的.这就说明,质子的电量也是与其运动状态无关的.大量事实证明,电荷的电量是与其运动状态无关的.所以,在不同的参考系观察,同一带电粒子的电量不变.电荷的这一性质叫**电荷的相对论不变性**.

## 二、库仑定律

两个静止带电体之间的作用力(通常简称为两个静止电荷之间的作用力)即静电力,不仅与它们所带电量及它们之间的距离有关,而且还与它们的大小、

形状及电荷分布情况有关.当带电体本身的线度与它们之间的距离相比足够小时,带电体可以看成点电荷.即带电体的形状、大小可以忽略,而把带电体所带电量集中到一个“点”上.

真空中两个静止点电荷之间相互作用力的大小与这两个点电荷所带电量  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比,与它们之间的距离  $r$  的平方成反比.作用力的方向沿着两个点电荷的连线,同号电荷相互排斥、异号电荷相互吸引.这就是库仑定律.它是 1785 年由法国物理学家库仑首先指出的.相互作用力  $F$  的大小可表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8-1)$$

式中  $k$  为比例系数,其数值和单位取决于各量所采用的单位.在(SI)制中, $k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

为了使由库仑定律推导出的一些常用公式简化,我们引入新的常数  $\epsilon_0$  来代替  $k$ ,两者的关系为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (8-2)$$

$\epsilon_0$  称为真空中的介电常数.以  $\epsilon_0$  代入(8-1)式得

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8-3)$$

为了表示力的方向,可采用矢量式表示库仑定律

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-4)$$

式中  $\mathbf{r}_0$  是由施力电荷指向受力电荷的矢径方向的单位矢量.近代物理实验表明,当两个点电荷之间的距离在  $10^{-17} \sim 10^7 \text{ m}$  范围内,库仑定律是极其准确的.

库仑定律只适用于两个点电荷之间的作用.当空间同时存在几个点电荷时,它们共同作用于某一点电荷的静电力等于其他各点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和.这就是**静电力的叠加原理**.

### 三、电场强度

静电力同样是物质之间的相互作用.这种特殊的物质,叫做**电场**.电荷和电荷之间是通过电场这种物质传递相互作用的,这种作用可以表示为

电荷  $\rightleftarrows$  电场  $\rightleftarrows$  电荷

近代物理证实这种看法是正确的.同时还证实电场和一切实物一样,也具有能量、动量和质量等重要性质.因此,电场也是一种物质.但场与其他实物不同,几个电场可以同时占有同一空间,所以电场是一种特殊形式的物质.

相对于观察者为静止的带电体周围存在的电场称为**静电场**. 静电场对外表现主要有:

1. 处于电场中的任何带电体都受到电场所作用的力
2. 当带电体在电场中移动时, 电场所作用的力将对带电体作功

电场中任一点处电场的性质, 可从电荷在电场中受力的特点来定量描述. 用电量很小的点电荷  $q_0$  作为试验电荷, 当试验电荷  $q_0$  放在电场中一给定点处时, 它所受到的电场力的大小和方向是一定的; 放在电场中的不同点处, 其受到的电场力的大小和方向一般是不相同的. 实验电荷  $q_0$  放在电场中一固定点处, 当  $q_0$  的电量改变时它所受的力方向不变, 但力的大小将随电量的改变而改变. 然而始终保持力  $F$  和  $q_0$  的比值  $\frac{F}{q_0}$  为一恒矢量. 因此,  $\frac{F}{q_0}$  反映了  $q_0$  所在点处电场的性质, 称为**电场强度**, 用  $E$  表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8-5)$$

当  $q_0$  为一个单位正电荷时,  $E = F$ , 即电场中任一点的电场强度等于单位正电荷在该点所受的电场力. 在 SI 制中, 场强  $E$  的单位是牛顿每库仑 ( $N \cdot C^{-1}$ ), 也可以写成伏特每米 ( $V \cdot m^{-1}$ ).

一般情况下, 电场中的不同点, 其场强的大小和方向是各不相同的. 要完整地描述整个电场, 必须知道空间各点的场强分布, 即求出矢量场函数  $E = E(r)$ .

#### 四、场强叠加原理

将试验电荷  $q_0$  放在点电荷系  $q_1, q_2, \dots, q_n$  所产生的电场中时,  $q_0$  将受到各点电荷静电力的作用. 由静电力的叠加原理知,  $q_0$  受到的总静电力

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

两边除以  $q_0$ , 得

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

按场强定义  $E = \frac{F}{q_0}$ , 有

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{n=1}^n E_n \quad (8-6)$$

上式表明, 电场中任一场点处的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点各自产生的场强的矢量和. 这就是**场强叠加原理**. 任何带电体都可以看作许多点电荷的集合, 由该原理可计算任意带电体产生的场强.

## 五、场强的计算

如果场源电荷分布状况已知,那么根据场强叠加原理,原则上可以求得电场分布.

### 1. 点电荷的电场

设真空中有一点电荷  $q$ ,  $P$  为空间一点(称为场点).  $r$  为从  $q$  到  $P$  点的矢径. 当试验电荷  $q_0$  放在  $P$  点时,  $q_0$  所受电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中  $\mathbf{r}_0$  为矢径  $r$  方向的单位矢量. 则  $P$  点场强

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-7)$$

$q$  为正电荷时,  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{r}$  同方向;  $q$  为负电荷时,  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{r}$  反方向. (8-7) 式表明, 点电荷的电场具有球对称性: 在以  $q$  为中心的每一个球面上, 各点场强的大小相等; 正点电荷的场强方向垂直球面向外, 负点电荷的场强方向垂直球面向里.

### 2. 点电荷系的电场

设真空中有点电荷系  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , 用  $\mathbf{r}_{i0}$  表示第  $i$  个点电荷  $q_i$  到任意场点  $P$  的矢径  $r_i$  方向的单位矢量,  $\mathbf{E}_i$  为  $q_i$  单独存在时在  $P$  点产生的电场的场强. 则

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0}$$

根据场强叠加原理, 可得  $P$  点总场强

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \quad (8-8)$$

在直角坐标系中式(8-8)的分量式分别为

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix}$$

$$E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy}$$

$$E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz}$$

**例 8-1** 两个等值异号的点电荷  $+q$  和  $-q$  组成的点电荷系, 当它们之间的距离  $l$  比起所讨论问题中涉及的距离  $r$  小得多时, 这一对点电荷系称为电偶极子. 由负电荷  $-q$  指向正电荷  $+q$  的矢径  $l$  称为电偶极子的轴.  $ql$  为电偶极矩, 简称电矩, 用  $\mathbf{p}$  表示. 即  $\mathbf{p} = ql$ , 试计算电偶极子轴线延长线上的一点  $A$  和轴的中垂面上的一点  $B$  的场强.

解 选取如图 8-1 所示的坐标,  $O$  为电偶极子轴的中点. 点电荷  $+q$  和  $-q$  在  $A$  点产生的场强大小为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r - \frac{l}{2})^2}$$

$$E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r + \frac{l}{2})^2}$$

$E_+$  沿  $x$  轴正向,  $E_-$  沿  $x$  轴负方向. 所以  $A$  点总场强大小为

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

因为  $r \gg l$ , 故

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

$E_A$  沿  $x$  轴正向, 与电矩  $p$  同方向. 所以

$$E_A \approx \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (8-9)$$

类似计算可得

$$E_B = E_x = -2E_+ \cos\theta = -2 \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{(r^2 + \frac{l^2}{4})} \frac{\frac{l}{2}}{(r^2 + \frac{l^2}{4})^{\frac{1}{2}}} \approx -\frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

$E_B$  沿  $x$  轴负方向, 与电矩  $p$  方向相反. 所以

$$E_B \approx -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (8-10)$$

对于  $r \gg l$  的其他场点的场强, 可以把电偶极矩  $p$  分解为沿  $r$  方向和垂直于  $r$  方向的两个分量, 利用公式 (8-9) 和 (8-10) 来叠加.

电偶极子的物理模型在研究电介质的极化以及电磁波的辐射时都要用到.

### 3. 电荷连续分布的带电体的电场

可以把带电体分割成无限多个电荷元  $dq$ .  $dq$  在场点  $P$  产生的场强  $dE$  与点电荷场强相同, 由 (8-7) 式知

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0$$

$r_0$  为电荷元  $dq$  到  $P$  点的矢径  $r$  方向的单位矢量. 根据场强叠加原理, 带电体在  $P$

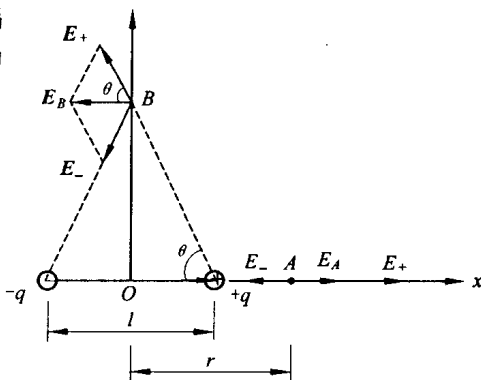


图 8-1 电偶极子的场强



点的总场强为

$$\mathbf{E} = \int_V d\mathbf{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-11)$$

若电荷连续分布在一体积内,用  $\rho$  表示电荷体密度,则(8-11)式中  $dq = \rho dV$ ;若电荷连续分布在一曲面或平面上,用  $\sigma$  表示电荷面密度,则  $dq = \sigma ds$ ;若电荷连续分布在一曲线或直线上,用  $\lambda$  表示电荷线密度,则  $dq = \lambda dl$ .相应地计算  $\mathbf{E}$  的积分分别为体积分、面积分和线积分.具体计算时,更多地是进行分量的积分而求出  $\mathbf{E}$  的各个分量.

例 8-2 真空中有一均匀带电直线,长为  $L$ ,总电量  $q$ ,试求距直线上距离为  $a$  的  $P$  点的场强.

解 见图 8-2,取  $P$  点到  $L$  的垂足  $O$  点为坐标原点,  $x$  轴与  $y$  轴正向如图所示.  $P$  点到  $L$  两端的连线与  $x$  轴正方向的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ .线元  $dx$  位于  $x$  处,则  $dq = \lambda dx = \frac{q}{L} dx$ ,  $dq$  在  $P$  点产生的场强  $d\mathbf{E}$  方向如图,大小为

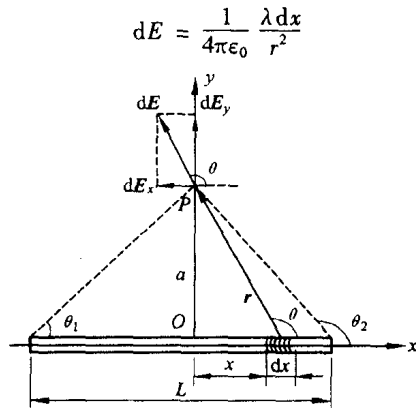


图 8-2 均匀带电直线外任一点的场强

$r$  为  $P$  点到  $dx$  的距离,  $r$  与  $x$  正向的夹角为  $\theta$ , 则

$$dE_x = dE \cos\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta$$

因为

$$x = a \tan(\theta - \frac{\pi}{2}) = -a \cot\theta$$

$$dx = a \csc^2 \theta d\theta$$

$$r^2 = a^2 \csc^2 \theta$$

所以

$$dE_x = dE \cos\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta$$