



普通高等学校“十三五”数字化建设规划教材

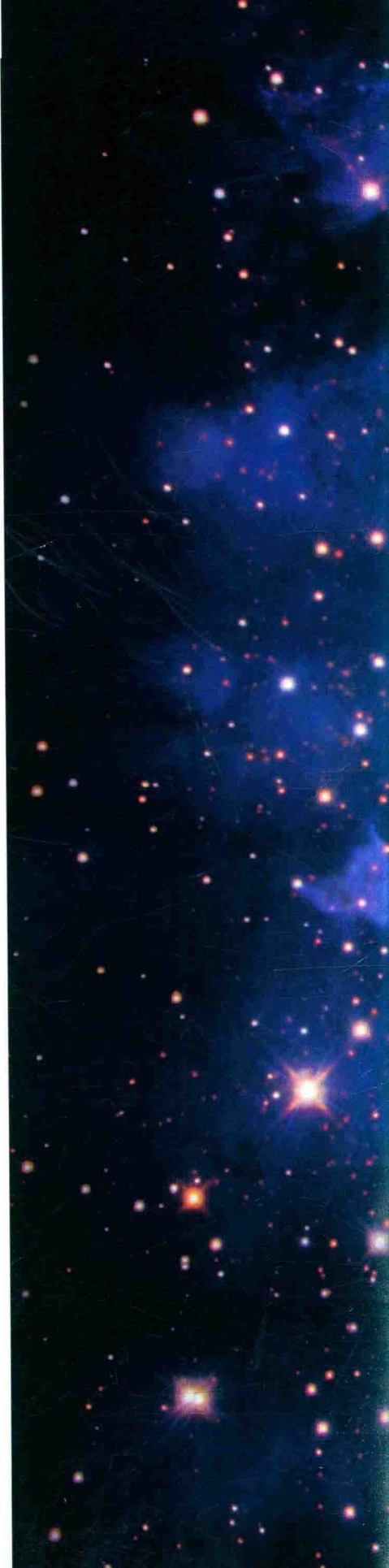
DAXUE
WULI

大学物理

(下)

匡乐满 / 主编

科学出版社
SCIENCE UNIVERSITY PRESS





普通高等学校“十三五”数字化建设规划教材

大学物理

(下)

主 编 匡乐满
副主编 曾浩生 吴 焯



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下 / 匡乐满主编. —北京: 北京大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-301-29704-9

I. ①大… II. ①匡… 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(2018)第 167143 号

- 书 名 大学物理(下)
DAXUE WULI
- 著作责任者 匡乐满 主编
- 责任编辑 王剑飞
- 标准书号 ISBN 978-7-301-29704-9
- 出版发行 北京大学出版社
- 地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871
- 网 址 <http://www.pup.cn>
- 电子信箱 zpup@pup.cn
- 新浪微博 @北京大学出版社
- 电 话 邮购部 010-62752015 发行部 010-62750672 编辑部 010-62765014
- 印 刷 者 长沙超峰印刷有限公司
- 经 销 者 新华书店
- 787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 383 千字
- 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷
- 定 价 48.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

内 容 简 介

本教材是为适应当前教学改革的需要,根据国家教育事业发展第十三个五年规划提出的要求,以及教育部高等学校《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),结合编者多年的教学实践和教学改革经验编写而成。

全书共分两册,上册包括力学基础及热物理学,下册包括电磁学、波动光学和量子物理基础。教材编写力求简明凝练,内容的深度、难度适中,理论讲解追求够用、实用。同时,本教材针对各类学校及不同专业对物理知识要求的差异做了适当的安排,以适合他们不同的要求。

本教材适用于高等学校非物理专业理工科类大学物理课程。

本书配套云资源使用说明

本书配有网络云资源,资源类型包括:阅读材料、名家简介、动画视频和应用拓展.

一、资源说明

1. 阅读材料:介绍一些高新技术所蕴含的基础物理原理,对一些相关知识进一步阐述,有利于学生开阔视野、了解物理学与科学技术的紧密联系,激发学生的求知欲.

2. 名家简介:提供相关科学家的简介,加强学生对科学发展史的了解,从而提高学生对物理的认识,以及学习物理的兴趣.

3. 动画视频:针对重要知识点、抽象内容,提供相关演示动画,便于学生理解和掌握.

4. 应用拓展:结合具体应用场景,针对应用物理知识进行拓展.

二、使用方法

1. 打开微信的“扫一扫”功能,扫描关注公众号(公众号二维码见封底).

2. 点击公众号页面内的“激活课程”.

3. 刮开激活码涂层,扫描激活云资源(激活码见封底).

4. 激活成功后,扫描书中的二维码,即可直接访问对应的云资源.

注:1. 每本书的激活码都是唯一的,不能重复激活使用.

2. 非正版图书无法使用本书配套云资源.

前言

本教材是为适应当前教学改革的需要,根据国家教育事业发展第十三个五年规划提出的要求,以及教育部高等学校《理工科类大学物理课程教学基本要求》,结合编者多年的教学实践和教学改革经验编写而成的,具有如下四个特点.

1. 简明

本教材力求文字简明凝练,内容精细紧凑.对某些专业需要的教学内容可单独自行增补,而大多数学校又没有时间讲授的内容,例如,非线性物理、电磁场的边界条件、电磁场的相对性、色散、波包等,则没有编入教材.这样处理,并不影响普通物理知识内容和体系的完整性.

2. 适中

与其他同类教材相比,本教材在内容的深度、难度上也做了适当的调整.一是在对矢量性和相对性的要求上做了适中的选择.例如,在力学中,我们仍然引入“相对运动”以描述运动的相对性,但并不在动力学中的相关部分深化该问题的讨论;对“矢量性”,只是作为物理概念讲述清楚,而不是刻意用矢量的方法去求解一些偏难的习题.二是对于数学工具的运用,在保证基本要求的前提下,尽量避免繁杂的数学推演.例如,在量子物理部分,教材不要求解算二元偏微分方程,而重在讨论方程的解题思路和理解计算结果的物理意义;对于例题和习题则尽量少编入偏难、偏深和思路奇特的内容.

3. 实用

本教材的编写原则是精讲经典,加强近代,选讲现代.经典物理是工科各专业后续课程的必备基础知识,必须讲透、讲够.以篇幅而言,教材共 18 章,其中经典内容占 14 章.例题和习题的训练也集中在经典部分.对于近代物理部分,主要是突出相对论的时空观和量子思想.除了讲清这些物理理论知识、注重启迪思维外,还引导学生学习前辈科学家勇于创新的进取精神.对于现代物理部分,采取专题选讲的形式,重点在为高新技术的生长点打基础,突出物理理论与高新技术的结合.总之,教材编写的目标是围绕基础,加粗主干,重在实用,重在基本训练,重在为后续课程打基础.本教材还配有学习指导,以帮助学生学习和巩固所学知识.

4. 兼容

在本教材的编写中,既考虑到物理体系的完整性和系统性,又要尽量考虑到各类学校及不同专业对物理知识要求的差异.因此在某些章节的内容前面加有“*”号,教师可以根据学校课程设置、教学专业特点和教学时数进行取舍,也可以跳过这些带“*”号的内容,而不会影响整个体系

的完整性和系统性.教材即“一剧之本”,既满足教师在授课“舞台”有据可依的需要,又为教师提供了个性发挥的空间.

本教材由匡乐满教授主编,参与编写的人员有曾浩生、杨友田、郑小娟、吴焜、吴松安、贾冬义、谷海红、曹玉瑞等.全书编写得到了中南大学、武汉理工大学、湖南师范大学、湘潭大学、长沙理工大学、广东工业大学、重庆邮电大学、辽宁工业大学等高校物理老师的帮助和指导.苏文华构思并设计了全书在线课程教学资源的结构与配置,余燕编辑了教学资源内容,并编写了相关动画文字材料,胡锐、邓之豪组织并参与了动画制作及教学资源的信息化实现,苏文春、陈平提供了版式和装帧设计方案.在此一并表示衷心的感谢.

由于我们水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正.

编者

2017年8月

目 录

第3篇 电 磁 学

第8章 真空中的静电场	3
8.1 电场强度	3
8.2 静电场中的高斯定理	10
8.3 静电场的环路定理 电势	17
8.4 等势面 电场强度和电势梯度的关系	23
思考题	25
习题	25
第9章 静电场中的导体和电介质	27
9.1 静电场中的导体	27
9.2 静电场中的电介质	32
9.3 电位移矢量 电介质中的高斯定理	35
9.4 电容 电容器	37
9.5 静电场的能量	40
9.6 压电效应 铁电体 驻极体	43
思考题	45
习题	46
第10章 稳恒磁场	48
10.1 电流 电流密度	48
10.2 磁场 磁感应强度 磁场中的高斯定理	49
10.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用	52
10.4 安培环路定理	58
10.5 磁场对运动电荷和载流导线的作用	61
10.6 磁力的功	72
思考题	74
习题	74
第11章 磁场中的磁介质	77
11.1 磁介质的分类	77
11.2 顺磁质与抗磁质的磁化	78
11.3 磁场强度 磁介质中的安培环路定理	79
11.4 铁磁质	82
思考题	85
习题	85

第 12 章 电磁感应 电磁场	86
12.1 电磁感应的基本定律	86
12.2 动生电动势	89
12.3 感生电动势和感生电场	91
12.4 自感应 互感应	96
12.5 磁场的能量	99
12.6 位移电流和全电流定律	101
12.7 麦克斯韦方程组	104
12.8 电磁波	106
12.9 电磁场的物质性	110
思考题	112
习题	113

第 4 篇 波动光学

第 13 章 光的干涉	119
13.1 光源 光的相干性	119
13.2 分波阵面干涉	122
13.3 分振幅干涉	126
13.4 迈克耳孙干涉仪	132
* 13.5 光的时间相干性和空间相干性	134
思考题	137
习题	137
第 14 章 光的衍射	139
14.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	139
14.2 单缝夫琅禾费衍射	141
14.3 衍射光栅	144
14.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	148
14.5 X 射线的衍射	150
* 14.6 全息照相	151
思考题	154
习题	155
第 15 章 光的偏振	156
15.1 自然光和偏振光	156
15.2 起偏和检偏 马吕斯定律	158
15.3 反射光与折射光的偏振 布儒斯特定律	160
15.4 光的双折射	162
* 15.5 偏振光的干涉	163
* 15.6 旋光现象	165
思考题	166
习题	166

第 5 篇 量子物理基础

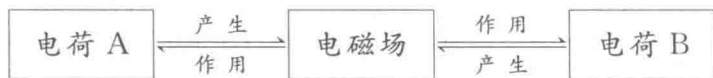
第 16 章 量子力学基础	169
16.1 热辐射和普朗克量子假设	169

16.2	光电效应 爱因斯坦光子假设	172
16.3	康普顿效应	175
16.4	玻尔的氢原子理论	177
16.5	德布罗意的物质波假设 不确定关系	180
16.6	波函数及其统计意义 薛定谔方程	185
16.7	一维无限深势阱 一维谐振子 一维势垒 隧道效应	188
16.8	氢原子的量子理论	192
16.9	电子自旋 原子的壳层结构	195
	思考题	197
	习题	198
第 17 章	激光和固体物理简介	199
17.1	激光原理	199
17.2	固体的能带结构	204
17.3	半导体	207
17.4	超导电性	211
	思考题	216
第 18 章	原子核物理与粒子物理简介	217
18.1	原子核的一般性质	217
18.2	原子核的放射性衰变	221
18.3	核衰变规律	225
18.4	原子核的裂变与聚变	228
18.5	粒子物理简介	230
	习题	233
附录 I	常用基本物理常量(2006 年)	234
附录 II	空气、水、地球、太阳系的一些常用数据	235
附录 III	元素周期表	236
	习题参考答案	237

电 磁 学

电磁运动是物质的一种重要运动形式,电磁相互作用是物质间四种基本相互作用之一,电磁力是原子得以存在的基础,研究电磁现象及其规律的学科称为电磁学.电磁学理论不仅普遍应用于科学技术各个领域,而且已日益成为新技术的理论基础.

两个静止电荷之间存在电力,两个运动电荷间存在电力和磁力.关于这些相互作用力的产生机制,历史上曾有过“超距作用”的观点,即认为电磁力可以超越空间任何距离,无需中间传递介质,也不需要传递时间.然而,随着科学技术的发展,这种观点逐步为近距作用观点所代替.近距作用观点认为:电磁相互作用力和其他相互作用力一样,既需要传递介质,也需要传递时间.电荷在其周围空间激发电磁场,以电磁场为介质和周围空间的其他电荷发生相互作用,这种相互作用以光速在电磁场中传播,其作用方式如下:



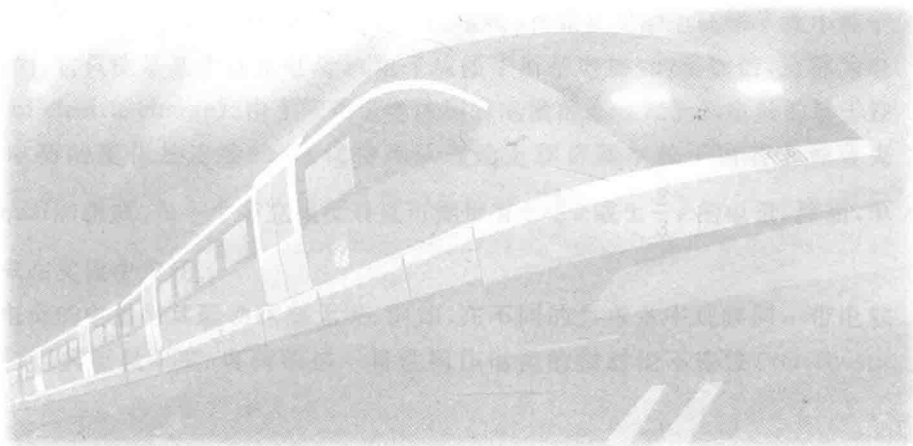
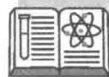
本篇将在实验事实的基础上,分别建立静电场、稳恒磁场和交变电磁场的描述体系,研究电磁场的产生、传播和相互作用规律.



科学家



阅读材料





真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷所产生的电场称为静电场 (electrostatic field), 电场强度和电势是描述电场性质的两个物理量, 库仑定律是静电场的基本实验定律. 本章从库仑定律出发, 导出静电场的高斯定理和环路定理, 并阐明静电场是有源场和保守场 (无旋场). 其主要内容有: 库仑定律, 电场及电场强度, 高斯定理, 环路定理, 电势, 电场强度和电势梯度的关系等.

8.1 电场强度

一、电荷及其性质

自然界只存在两种电荷——正电荷和负电荷, 同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引. 在正常状态下, 物体内部正负电荷量值相等, 对外不显电性, 称为电中性 (electric neutrality). 使物体带电的过程就是使它获得或失去电子 (electron) 的过程, 获得电子的物体带负电, 失去电子的物体带正电. 因此, 物体带电的过程实际上就是把电子从一个物体 (或物体的一部分) 转移到另一个物体 (或物体的另一部分) 的过程.

实验表明, 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保持不变, 称为电荷守恒定律 (conservation of electric charge). 它是物理学中最普遍的规律之一. 电荷守恒定律表明, 电荷既不能被创造, 也不能被消灭.

1913 年, 密立根 (R. A. Millikan) 用油滴法测定了电子的电荷, 首先从实验上证明了微小粒子带电量的变化是不连续的, 它只能是某个基元电荷 e (电子或质子所带电量) 的整数倍, 这称为电荷量子化 (quantization of electric charge). 由于宏观带电体所带电量都远远大于 e , 电荷的量子性显现不出来, 故可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夸克 (quark) 或反夸克 (antiquark) 组成, 每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量. 然而, 单独存在的夸克, 至今尚未在实验中发现.

实验还表明: 一个电荷的电量与其运动状态无关. 例如, 在不同的参考系中观察同一带电粒子的运动速度可能不同, 但其电量不变. 电荷的这一特性叫作电荷的相对论不变性 (relativistic invariance of electric charge).

二、库仑定律

点电荷间相互作用的基本规律,称为库仑定律(Coulomb's law),可表述如下:真空中两个静止的点电荷之间的作用力(称为静电力),与它们所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着这两个点电荷的连线.其数学表达式为

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0,$$

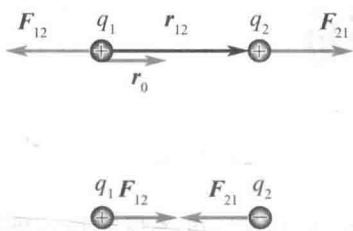


图 8-1 两个点电荷之间的作用力

式中 k 为比例系数, $\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}$ 为 q_1 和 q_2 连线方向上的单位矢量(见图 8-1), \mathbf{F}_{12} 表示 q_2 对 q_1 的静电力, \mathbf{F}_{21} 表示 q_1 对 q_2 的静电力. 在国际单位制中, $k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$. 通常引入另一常数 ϵ_0 代替 k , 两者关系为

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

ϵ_0 称为真空中的介电常量(permittivity of free space)或真空电容率. 于是,真空中的库仑定律可写成

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0.$$

若 q_1 和 q_2 同号,则 \mathbf{F}_{21} 与 \mathbf{r}_0 的方向相同,说明同种电荷互相排斥;若 q_1 与 q_2 异号,则 \mathbf{F}_{21} 与 \mathbf{r}_0 方向相反,说明异种电荷互相吸引.

点电荷 q_1 和 q_2 间的静电力实质上是电场力,传递静电力的中间物质即为静电场. 由 q_1 产生的电场对 q_2 施加电场力 \mathbf{F}_{21} , 由 q_2 产生的电场对 q_1 施加电场力 \mathbf{F}_{12} . 通常,略去下标,而将库仑定律写为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}. \quad (8-1)$$

在库仑定律中以 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 代替 k , 虽然库仑定律的形式因出现 4π 因子而略显复杂,但可使由库仑定律导出的其他公式(如高斯定理)不含 4π 而变得简单.

三、电场强度

1. 电场强度的定义

电荷的周围存在电场,电场有强弱、方向的不同. 为定量地描述电场,需要引入一个物理量,该物理量能同时反映电场的强弱和方向.

把电量足够小的试验点电荷 q_0 放在电场中不同位置,比值 \mathbf{F}/q_0 是一个确定的常矢量. 一般说来,当 q_0 的位置改变时,该矢量的大小和方向也随之改变. 我们用矢量 \mathbf{F}/q_0 来定量描述电场的性质,称为电场中某点的电场强度(electric field intensity),用 \mathbf{E} 表示,即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}. \quad (8-2)$$

由(8-2)式可知,在电场中每一点,可引入一个可观测量——电场强度 \mathbf{E} , 其量值等于单位电荷在该处所受到的电场力,方向与正电荷在该处所受的电场力方向相同.

如果电场中各点电场强度大小和方向都相同,则该电场称为匀强电场.一般情况下,电场中的不同点,其电场强度的大小和方向各不相同,要整体地描述电场,必须知道空间各点的电场强度分布,即 $\mathbf{E}=\mathbf{E}(x, y, z)$,故电场强度 \mathbf{E} 是空间的点函数.

2. 电场强度叠加原理

若空间电场是由 n 个分立的点电荷激发的,将试验电荷 q_0 放在电场中的任一点,根据力的叠加性,它所受到的电场力 \mathbf{F} 可表示为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i,$$

式中 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \cdots, \mathbf{F}_n$ 分别是 q_1, q_2, \cdots, q_n 单独存在时施于 q_0 的电场力. 根据电场强度的定义, q_0 所在处的电场强度

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{F}_i}{q_0}.$$

上式右边各项分别为各点电荷单独存在时在 q_0 所在处产生的电场强度 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \cdots, \mathbf{E}_n$, 故

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i. \quad (8-3)$$

(8-3)式表明:一组点电荷所激发的电场中某点的电场强度等于各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(superposition principle of electric field).

3. 电场强度的计算

如果已知电荷的分布,根据电场强度叠加原理,从点电荷的电场强度公式出发,原则上可求出电场中各点的电场强度分布. 下面讨论几种不同的情况.

(1) 点电荷的电场强度

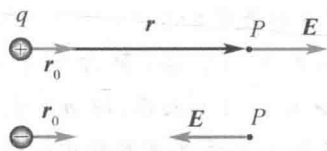
在真空中有一点电荷 q ,在该电荷产生的电场中的任意位置 P 处放置一试验电荷 q_0 ,按照库仑定律, q_0 所受的力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r}_0.$$

根据(8-2)式, q_0 处的电场强度为

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

若 $q > 0$, \mathbf{E} 与 \mathbf{r}_0 同向;若 $q < 0$, \mathbf{E} 与 \mathbf{r}_0 反向,如图8-2 图8-2 点电荷电场中电场强度的方向所示.



由(8-4)式可知, r 相同的点, \mathbf{E} 的大小相等,说明点电荷的电场具有球对称性,方向沿半径方向.

(2) 点电荷系的电场强度

若真空中电场强度是由 n 个点电荷所共同产生的, P 点为电场中的任一点,各点电荷到 P 点的矢径分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \cdots, \mathbf{r}_n$, 根据电场强度叠加原理,可得 P 点电场强度

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i. \quad (8-5)$$

上式为矢量求和,计算较为复杂,具体运算时,通常采用分量式

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix}, \quad E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy}, \quad E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz}. \quad (8-6)$$

(3) 任意带电体的电场强度

若不能将带电体视为点电荷时,我们可以认为该带电体是由许多无限小的电荷元组成的,每个电荷元都可当作点电荷处理.

电荷元 dq 在场中任一点 P 产生的电场强度为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r},$$

P 点处总电场强度为组成该带电体的所有 dq 在该点产生的电场强度矢量和,即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r}. \quad (8-7)$$

上式为矢量积分,具体运算时,通常采用投影的方式,先求得 \mathbf{E} 的各方向分量

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

最后得总电场强度为

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

(8-7)式中, dq 的计算视电荷分布而定.若电荷连续分布在一体积内,其体密度为 ρ ,则 $dq = \rho dV$.同理,若电荷连续分布在一平面或曲面上,则 $dq = \sigma dS$;若电荷连续分布在一条细长线上,则 $dq = \lambda dl$,其中 σ, λ 分别为电荷面密度和线密度.

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 比所讨论问题中涉及的距离小得多时,这一对点电荷称为电偶极子(electric dipole),由负电荷 $-q$ 到正电荷 $+q$ 的矢量 \mathbf{l} 称为电偶极子的轴. q 与 \mathbf{l} 的乘积称为电偶极矩,简称电矩(electric dipole moment),用 \mathbf{p} 表示,即 $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$.计算电偶极子轴延长线上的 A 点和轴中垂线上的 B 点的电场强度.

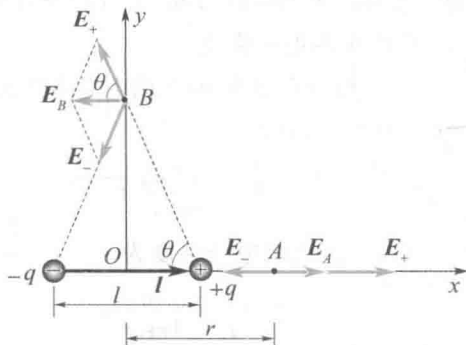


图 8-3 电偶极子的电场强度

解 选取如图 8-3 所示的坐标, O 为电偶极子轴的中点,先计算 A 点的电场强度,设由 O 到 A 的距离为 r ,点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 A 点产生的电场强度大小分别为

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

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

\mathbf{E}_+ 的方向沿 x 轴正向, \mathbf{E}_- 的方向沿 x 轴负向,所以 A 点的总电场强度大小为

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

因为 $r \gg l$, 有 $1 \pm \frac{l}{2r} \approx 1$, 所以

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}.$$

E_A 的方向沿 x 轴正向, 与电矩 p 的方向相同, 故上式可用矢量表示为

$$\mathbf{E}_A = \frac{p}{2\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (8-8)$$

下面计算 B 点的电场强度. 由 O 到 B 的距离仍用 r 表示, 则点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 B 点产生的电场强度大小分别为

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

其方向如图 8-3 所示, 根据电场强度叠加原理, B 点的总电场强度 $\mathbf{E}_B = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$. 因 \mathbf{E}_+ , \mathbf{E}_- 方向不同, 可先将 \mathbf{E}_+ 和 \mathbf{E}_- 分别投影到 x , y 轴方向后再叠加. 由于对称性, \mathbf{E}_+ 和 \mathbf{E}_- 的 y 轴方向分量大小相等、方向相反, 故 B 点总电场强度在 x 和 y 轴方向的分量值分别为

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

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

式中 θ 是 B 点与电荷连线和电偶极子轴的夹角, 且

$$\cos \theta = \frac{l/2}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}},$$

所以

$$E_B = E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{3/2}} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}.$$

考虑到 \mathbf{E}_B 的方向沿 x 轴负向, 即与电矩 p 的方向相反, 可将上式写成以下矢量式:

$$\mathbf{E}_B = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (8-9)$$

以上计算表明, 电偶极子的电场强度与电矩 p 的大小成正比, 与距离 r 的三次方成反比.

电偶极子的物理模型, 在后面研究电介质极化、电磁波发射时都要用到.

例 8-2

真空中有一均匀带电直线长为 L , 总电量为 q , 试计算距直线距离为 a 的 P 点的电场强度. 已知 P 点和直线两端的连线与直线之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 如图 8-4 所示.

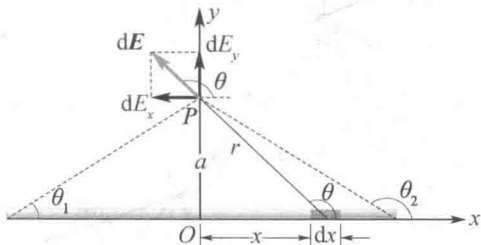


图 8-4 均匀带电直线外任一点的电场强度

解 选取如图 8-4 所示的坐标轴, 在直线上距原点 O 为 x 处取一线元 dx , dx 上的电荷元 $dq = \lambda dx$, $\lambda = q/L$. 设 P 点到 dq 的距离为 r , 则 dq 在 P 点产生的电场强度 dE 的大小为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2}.$$

dE 的方向如图 8-4 所示, dE 与 x 轴正向夹角为 θ , 直线上各 dq 在 P 点产生的 dE 的方向不同, dE 沿 x 轴和 y 轴方向的分量分别为

$$dE_x = dE \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2} \cos \theta,$$

$$dE_y = dE \sin \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2} \sin \theta,$$

式中 r, θ, x 都是变量, 为便于积分, 统一选取 θ 为变量. 由图中几何关系可知

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

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

$$r^2 = a^2 + x^2 = a^2 (1 + \cot^2 \theta) = a^2 \csc^2 \theta,$$

所以

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

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

将以上两式分别积分得