



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理

(下册)

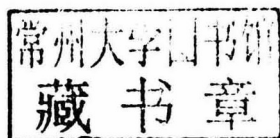
主编 方华为 薛霞

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理

(下册)

方华为 薛霞 主编



华中师范大学出版社

内 容 简 介

本书的编写参照了教育部理工类物理基础课程教学基本要求,内容包括电磁学和波动光学等内容。此书吸取了许多同类教材的优点,采纳了大量教学实践中的建议,简单明了、难度适中,注重学生科学思维方法的培养及分析、解决问题能力的提高。

本书可作为普通高等学校、独立学院、应用技术型民办高校的本科教学用书,或作为自学或自考用书。

新出图证(鄂)字 10 号

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/方华为,薛霞主编.一武汉:华中师范大学出版社,2019.1

(普通高等教育“十三五”规划教材)

ISBN 978-7-5622-8461-1

I. ①大… II. ①方… ②薛… 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(2019)第 002489 号

大学物理(下册)

© 方华为 薛霞 主编

编辑室:第二编辑室

责任编辑:苏睿

出版发行:华中师范大学出版社

邮 编:430079

邮购电话:027-67861321

网址:<http://press.ccnu.edu.cn>

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

版次:2019年3月第1版

印数:1—3000

电 话:027-67867362

责任校对:刘 峥 封面设计:罗明波

社址:湖北省武汉市珞喻路152号

销售电话:027-67863426/67861549

传 真:027-67863291

电子信箱:press@mail.ccnu.edu.cn

督印:王兴平

印 张:12.25 字数:250千字

印 次:2019年3月第1次印刷

定 价:32.00元

敬告读者:欢迎举报盗版,请拨打举报电话 027-67861321

前 言

物理学是研究物质结构、性质、运动和相互作用基本规律的科学,是人类认识自然、改造自然和推动社会进步的动力和源泉。物理学作为一门基础科学,可以使人们很好地认识世界、了解自然。同时,它对人们改造自然、推动社会发展也起着极其重要的作用。

物理学的发展密切影响着工业、农业等领域的发展,也同人类文明的进步息息相关。从电话的发明到当代互联网的实时通信,从蒸汽机车的成功制造到磁悬浮列车的投入运行,从晶体管的发明到高速计算机技术的成熟等,这些无不体现着物理学对社会进步与人类文明的贡献。

大学物理是高等院校理工科各专业的重要基础课,掌握一点物理学知识是大学生综合素质培养的重要组成部分。基于国家对新时代高等院校培养应用型人才的基本要求和民办院校教学的现状,我们编写了这套《大学物理》教材。

本套教材内容体系简明清晰,基本概念透彻易懂,原理公式准确明了,避免了艰深、晦涩的内容。编写时,在保证物理学理论体系的科学性、完整性、系统性的前提下,我们还着重凸显了“加强基础,提高能力,削枝强干,突出主线”等特点,具体表现为:

1. 内容选取尽量照顾不同专业的需求,广而不深,与民办高校应用型人才的培养目标相契合。
2. 内容呈现由浅入深,由易到难,由具体到抽象,图文结合,注重直观性,通俗易懂,便于自学。
3. 论述和演练力求简洁明了,尽量避免或简化复杂的数学推导,尽可能地凸显物理学本质。
4. 强化对物理学概念、定律和定理的理解,着重对解决问题的思路和方法的阐述。
5. 实例丰富,不仅向学生传授物理学知识,还强调对学生学习兴趣、学习能力、思维方式的培养。

本套教材分上、下两册,上册包括力学、机械振动、机械波和热学等内容,下册包

括电学、磁学、光学等内容。

本套教材由武汉华夏理工学院组织编写。在编写过程中,我们参考了市场上大量的优质资料和相关文献,在许多方面深受启发;王金凤、朱凌、陶波林、向馗、王国标、潘麒祺、陈庆晓、方小为在编写过程中也给我们提供了很大的支持和帮助;在此,对这些文献资料的作者,对所有参与这项编写工作的人员一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,加之时间仓促,教材中难免存在诸多不妥之处,恳请广大专家、读者批评指正。

编 者
2019年1月

目 录

第 10 章 静电场	1
10.1 电荷	1
10.1.1 电荷的种类	1
10.1.2 电荷的量子化	1
10.1.3 电荷守恒定律	2
10.2 库仑定律	2
10.2.1 库仑定律	2
10.2.2 静电力的叠加原理	3
10.3 电场 电场强度	4
10.3.1 电场 电场强度	4
10.3.2 电场强度的计算	5
10.4 高斯定理	11
10.4.1 电场线	11
10.4.2 电通量	12
10.4.3 高斯定理	13
10.4.4 高斯定理的应用	15
10.5 静电场的环路定理 电势	20
10.5.1 静电场的环路定理	20
10.5.2 电势能	21
10.5.3 电势 电势差	22
10.5.4 电势的计算	23
10.6 电场强度与电势梯度	26
10.6.1 等势面	26
10.6.2 电势梯度	27
10.7 静电场中的导体	29
10.7.1 导体的静电平衡条件	29
10.7.2 处于静电平衡状态导体上的电荷分布	31
10.7.3 静电屏蔽	34

10.8 静电场中的电介质	37
10.8.1 极化的微观机制	37
10.8.2 电介质的极化	38
10.8.3 电介质中的高斯定理	39
10.8.4 电介质中的环路定理	42
10.9 电容和电容器	42
10.9.1 孤立导体的电容	42
10.9.2 电容器和它的电容	43
10.9.3 电容器的串联和并联	46
10.10 静电场的能量	48
10.10.1 电容器储存的静电能	48
10.10.2 静电场的能量	49
习题 10	50
第 11 章 稳恒磁场	54
11.1 稳恒电流	54
11.1.1 电流强度 电流密度	54
11.1.2 恒定电流与恒定电场	56
11.1.3 电动势	57
11.2 磁场 磁感应强度	58
11.2.1 基本磁现象	58
11.2.2 磁场 磁感应强度	60
11.3 毕奥-萨伐尔定律	61
11.3.1 磁场的叠加原理	61
11.3.2 毕奥-萨伐尔定律	61
11.3.3 毕奥-萨伐尔定律的应用	62
11.3.4 运动电荷的磁场	67
11.4 磁场的高斯定理	68
11.4.1 磁感应线	68
11.4.2 磁通量	69
11.4.3 磁场的高斯定理	70
11.5 安培环路定理	72
11.5.1 安培环路定理	72
11.5.2 安培环路定理的证明	72
11.5.3 安培环路定理的应用	73

11.6 洛伦兹力	77
11.6.1 洛伦兹力	77
11.6.2 带电粒子在均匀磁场中的运动	78
11.6.3 带电粒子在均匀电场和磁场中的运动	79
11.6.4 霍尔效应	83
11.7 安培定律	84
11.7.1 安培定律	84
11.7.2 安培定律的应用	85
11.8 磁场对载流线圈的作用	88
11.9 磁介质存在时的磁场	91
11.9.1 磁介质的磁化 磁化强度 磁化电流	91
11.9.2 磁介质中的安培环路定理 磁场强度	93
11.9.3 铁磁质	97
习题 11	101
第 12 章 电磁感应	105
12.1 电磁感应的基本定律	105
12.1.1 电磁感应现象	105
12.1.2 楞次定律	105
12.1.3 法拉第电磁感应定律	107
12.2 动生电动势与感生电动势	111
12.2.1 动生电动势	111
12.2.2 感生电动势 感生电场	115
12.2.3 涡电流	119
12.3 自感和互感	119
12.3.1 自感	120
12.3.2 互感	121
12.4 磁场的能量	125
12.4.1 通电螺线管中的磁能	125
12.4.2 磁场的能量	126
习题 12	127
第 13 章 光的干涉	131
13.1 光的干涉的基础理论	131
13.1.1 光波与光源	131

13.1.2	光的相干性及相干条件	132
13.1.3	获得相干光的方法	132
13.1.4	光程与光程差	133
13.1.5	反射的半波损失与薄透镜的等光程性	134
13.1.6	光干涉极值条件	135
13.2	杨氏双缝干涉	135
13.2.1	杨氏双缝干涉实验装置	136
13.2.2	实验光路分析与计算	136
13.2.3	条纹特征分析	137
13.3	薄膜干涉	139
13.3.1	平行薄膜干涉光路	139
13.3.2	光程差的计算	140
13.3.3	等倾干涉条纹	141
13.4	非平行膜干涉	142
13.4.1	劈尖干涉	142
13.4.2	牛顿环干涉	145
13.5	迈克尔逊干涉仪	147
13.5.1	迈克尔逊干涉仪的结构	147
13.5.2	光路分析与光程差的计算	148
	习题 13	149
第 14 章 光的衍射		151
14.1	光的衍射基础知识	151
14.1.1	光的衍射现象	151
14.1.2	惠更斯-菲涅耳(Huygens-Fresnel)原理	151
14.1.3	光的衍射分类	152
14.2	单缝夫琅禾费衍射	153
14.2.1	单缝夫琅禾费衍射实验光路	153
14.2.2	单缝夫琅禾费衍射条纹图样和光强分布	153
14.2.3	半波带分析法	154
14.2.4	单缝夫琅禾费衍射条纹条件	155
14.2.5	单缝夫琅禾费衍射条纹特征	155
14.3	圆孔衍射与光学仪器的分辨率	157
14.3.1	圆孔的夫琅禾费衍射	157
14.3.2	光学仪器的分辨率	158

14.4 光栅衍射	160
14.4.1 光栅	160
14.4.2 光栅(衍射)方程	161
14.4.3 光栅衍射缺级现象	162
14.4.4 光栅光谱	162
习题 14	163
第 15 章 光的偏振	165
15.1 自然光与偏振光	165
15.1.1 自然光与偏振光的定义	165
15.1.2 自然光与偏振光的表示	166
15.2 起偏与检偏 马吕斯定律	166
15.2.1 偏振片	167
15.2.2 起偏与检偏	167
15.2.3 马吕斯定律	168
15.3 反射光和折射光的偏振	170
15.3.1 布儒斯特定律	170
15.3.2 玻璃堆法(获得偏振光方法)	172
15.4 光的双折射现象	173
15.4.1 光的双折射现象	173
15.4.2 惠更斯原理在双折射中的应用	174
15.4.3 尼科耳棱镜	175
15.5 偏振光的干涉及应用	177
15.5.1 偏振光的干涉	177
15.5.2 偏振光干涉的应用	178
习题 15	179
习题参考答案	181
参考文献	185

第 10 章 静 电 场

电磁运动是物质的一种基本运动形式。电磁运动的规律,是人类探索自然规律的理论武器,在日常生产和生活中都有着广泛的应用。

作为电磁学的开始,本章讨论静电场的相关问题。相对于观察者静止的电荷称为静电荷,由静电荷产生的电场称为静电场。本章首先研究真空中静电场的基本性质,从电场对电荷产生力的作用以及电荷在电场中移动时电场力对电荷做功两方面出发,引入描述电场的两个基本物理量——电场强度和电势,介绍了静电场的高斯定理和环路定理。接着讨论了非真空中的静电场,阐述了静电场与场中导体和电介质的相互作用的规律。最后介绍了静电场的能量。

10.1 电 荷

早在古希腊时期人们就发现,两种不同物体相互摩擦后,有吸引轻小物体的性质。这种现象称为起电,即使物体带了电,或者说物体具有了电荷。物体能产生电磁现象,现在都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动。

10.1.1 电荷的种类

实验发现:自然界中的电荷有两种,同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。美国物理学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790)最先以正电荷、负电荷为两种电荷命名:用丝绸摩擦过的玻璃棒带正电,用毛皮摩擦过的橡胶棒带负电。宏观带电体所带电荷种类的不同,源于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同:电子带负电荷,质子带正电荷,中子不带电荷。

10.1.2 电荷的量子化

带电体所带电荷的多少称为电量,通常用符号 q 或 Q 表示。在国际单位制(SI)中,电量的单位为库仑,符号为 C。一个带电体所带电量为其所带正、负电荷量的代数和。

实验表明,自然界中存在最小的基元电荷 e ,其大小等于电子或质子所带电荷量的绝对值。经测定

$$e \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}.$$

任何带电体或微观粒子所带电量都是基元电荷 e 的整数倍,即

$$Q = ne \quad (n \text{ 为整数}),$$

电荷的这种只能取分立的、不连续量值的性质称为电荷的量子化效应。当然,在近代

物理的理论研究中,曾有对基元电荷新的预言。1964年盖尔曼等人曾经提出,构成强子的夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量。然而迄今为止,尚未在实验室中找到单独存在的夸克,即使找到了,电荷量子化效应的结论仍然不会改变,只不过基元电荷的数值有了新变化。

后面几章大部分内容讨论的是电磁现象的宏观规律,带电体所带的电量往往是基元电荷的许多倍。在这种情况下,我们可以忽略电荷的量子化效应,认为带电体所带电量是连续变化的。如果要阐述宏观现象的微观本质,仍然要从电荷的量子性出发。

10.1.3 电荷守恒定律

在一个孤立系统(即与外界没有电荷交换的系统)中,不管系统中发生了什么变化,在任一时刻,系统中正、负电荷的代数和保持不变,这一规律称为**电荷守恒定律**。大量的近代物理实验表明,电荷守恒定律不仅在宏观过程中成立,在微观过程中也成立,如在各种核反应过程中,反应前、后的电荷代数和维持不变。电荷守恒定律是自然界基本守恒定律之一。

10.2 库仑定律

发现电现象后的 2000 多年的漫长时间里,人们对电的认识一直停留在定性阶段。直到 18 世纪中叶,随着各种精密测量仪器的出现,人们才开始研究电荷之间作用力的定量规律。最先研究的是静止电荷之间的作用力,与之相关的理论称为静电学。1785 年,法国物理学家库仑通过扭秤实验总结出两个点电荷之间相互作用的静电力的规律,即库仑定律。库仑定律是静电学的基础。所谓点电荷,是我们在研究带电体之间的相互作用时,为了使问题简化,引入的一个理想的物理模型:当带电体本身的几何线度比它与其他带电体之间的距离小得多时,我们可以忽略带电体的大小和形状,把它当成一个几何点来处理。

10.2.1 库仑定律

库仑定律: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电量的乘积成正比,与这两个电荷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。其数学表达式为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r,$$

式中, k 为比例系数,在 SI 中,实验测得,在真空中, k 的数值和单位为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2},$$

q_1 、 q_2 分别表示两个点电荷的电量(带有正、负号), r 表示两个点电荷之间的距离, \mathbf{e}_r 表示由施力电荷指向受力电荷的单位矢量。通常还引入另一常量 ϵ_0 来代替 k ,使得

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

于是,真空中的库仑定律又可写成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}, \quad (10-1)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数(或真空中的电容率),在 SI 中它的数值和单位为

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

\mathbf{r} 为由施力电荷指向受力电荷的有向线段, $\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$ 。

从库仑定律的矢量式不难看出,当两个点电荷同号时, \mathbf{F} 与单位矢量 \mathbf{e}_r 的方向相同,表现为斥力;当两个点电荷异号时, \mathbf{F} 与 \mathbf{e}_r 的方向相反,表现为引力。且有,两个静止点电荷之间的相互作用力满足牛顿第三定律,即

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

式中, \mathbf{F}_{12} 为 q_1 受到 q_2 的作用力, \mathbf{F}_{21} 为 q_2 受到 q_1 的作用力。

10.2.2 静电力的叠加原理

实验表明:两个静止点电荷之间的相互作用力不会因为其他点电荷的存在而改变。因此,当空间存在 N 个静止点电荷时,该点电荷系作用在某一静止点电荷 q_0 上的静电力为这 N 个静止点电荷单独存在时对 q_0 作用力的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i = \sum \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_0}{r_i^2} \mathbf{r}_i, \quad (10-2)$$

这就是静电力的叠加原理,它是计算点电荷系或带电体之间相互作用力的基础。

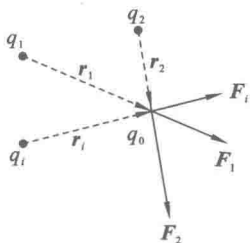


图 10-1 静电力的叠加

例 10-1 氢原子中电子和质子的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$,求此两粒子间的静电作用力和万有引力。

解 两粒子间的静电作用力大小为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N},$$

这相当于大约 10^{-8} kg 物体所受到的重力。两粒子间的万有引力大小为

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

由此可见,万有引力比起静电作用力来说是很小的。所以,在研究带电粒子的相互作用时,它们之间的万有引力通常是可以忽略不计的。

10.3 电场 电场强度

10.3.1 电场 电场强度

1. 电场

库仑定律给出了两个点电荷之间相互作用力的定量计算规律。那么这种作用力是如何传递的呢?早期的电磁理论是超距作用理论,认为电荷之间的相互作用不需要任何的传递介质,也不需要传递时间,即

电荷 \longleftrightarrow 电荷。

近代物理学的发展证明超距作用的观点是错误的,19世纪初,英国物理学家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场的概念,认为任何电荷在它的周围都产生电场。电场的基本性质是,它对处在其中的其他电荷产生力的作用,这种力称为电场力。也就是说,电荷与电荷之间的相互作用是通过电场来传递的,即

电荷 \longleftrightarrow 电场 \longleftrightarrow 电荷。

这种传递也是需要时间的,场的传递速度约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

电场是一种特殊的物质,它具有通常物质所具有的动量和能量等客观属性。电场的物质性主要体现在:

- (1) 能对电场中其他的带电体施加力的作用。
- (2) 当带电体在电场中移动时,电场力做功,这表明电场具有能量。
- (3) 变化的电场以光速在空间传播,表明电场具有动量。

本章主要研究的是静电场,即相对于观察者为静止的电荷所激发的电场。这种电场分布不随时间发生变化。后面对静电场的阐述,主要围绕上述(1)、(2)两条性质展开。

2. 电场强度

为了定量地描述电场的力学性质,下面引入电场强度的概念。把一个试验电荷 q_0 放入电场中,观察 q_0 在电场中不同位置受电场力的情况。试验电荷必须满足以下条件:首先,必须是一个带电量很小的正电荷,以致其放入电场后,对原电场的影响足够小,可以忽略不计;其次,试验电荷必须是一个点电荷,这样它测量的才是空间某一点的电场的性质。

实验发现,在固定的场点(电场中的任意点简称场点)处,当 q_0 的电量按其倍数

变化时,它所受到的电场力 F 也按同样的倍数变化,但 F 与 q_0 的比值为一定值,其大小与 q_0 无关;场点不同,该比值则不同。我们将这一比值定义为电场强度,简称场强 E ,即

$$E = \frac{F}{q_0}, \quad (10-3)$$

式(10-3)表明,电场中某一点的电场强度 E 在数值上等于该点处单位正电荷所受到的电场力,方向与正电荷受力的方向相同。在 SI 中,电场强度的单位为牛顿 / 库仑(N/C) 或伏特 / 米(V/m)。

10.3.2 电场强度的计算

1. 点电荷的电场

若电场由一个点电荷 q 产生,现计算空间任一点 P 点的场强。将检验电荷 q_0 放在 P 处,由库仑定律可得检验电荷 q_0 在该点所受的电场力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} e_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^3} r,$$

式中, e_r 是从场源电荷 q 指向 P 点的单位矢量, r 是从场源电荷 q 指向场点 P 的矢量。由电场强度的定义式(10-3) 可得场点 P 处的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} r, \quad (10-4)$$

式(10-4)是真空中点电荷的电场强度分布公式,从此式可以看出,如果 $q > 0$,则场强 E 的方向与 r 的方向相同;如果 $q < 0$,则场强 E 的方向与 r 的方向相反,如图 10-2 所示。上式还表明,点电荷的电场具有球对称性。

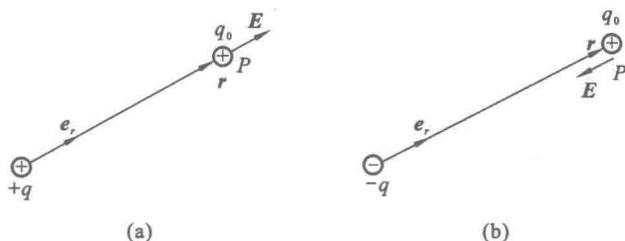


图 10-2 静止的点电荷的电场

2. 点电荷系的电场 场强叠加原理

若电场是由 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 组成的点电荷系,将检验电荷 q_0 放在电场中某点 P 处,由静电力的叠加原理可得检验电荷 q_0 在该点所受的力 F 等于 q_1, q_2, \dots, q_n 分别单独存在时作用于 q_0 的电场力 F_1, F_2, \dots, F_n 的矢量和,即

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

由电场强度的定义式,可得场点 P 处的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n,$$

即

$$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_{ri} = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^3} \mathbf{r}_i, \quad (10-5)$$

式(10-5)中, r_i 表示点电荷 q_i 到场点 P 的距离, \mathbf{e}_{ri} 表示从 q_i 指向场点 P 的单位矢量, \mathbf{r}_i 表示由 q_i 指向场点 P 的矢量。式(10-5)表明, 在点电荷系激发的电场中, 任一点处的电场强度等于各点电荷分别单独存在时, 在该点产生的电场强度的矢量和, 这就是场强的叠加原理。

3. 带电体(电荷连续分布)的场强

若带电体所带的电荷是连续分布的, 可认为该带电体的电荷由许多无限小的电荷元 dq 组成, 每个电荷元都可以看成一个点电荷, 则任一电荷元 dq 在 P 点产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r},$$

式中, r 表示电荷元 dq 到场点 P 的距离, \mathbf{e}_r 表示从 dq 指向场点 P 的单位矢量, \mathbf{r} 表示由 dq 指向场点 P 的矢量。由场强的叠加原理, 可得整个带电体在 P 点产生的场强为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r}. \quad (10-6)$$

连续带电体可以是一维的、二维的、三维的, 带电体不同, 电荷元的表达形式也不同。对于一维的带电体, 电荷是线分布的, 设电荷分布的线密度是 λ , 则电荷元的电荷

$$dq = \lambda dl.$$

对于二维的带电体, 电荷是面分布的, 设电荷分布的面密度是 σ , 则电荷元的电荷

$$dq = \sigma dS.$$

对于三维的带电体, 电荷是体分布的, 设电荷分布的体密度是 ρ , 则电荷元的电荷

$$dq = \rho dV.$$

综上所述, 如果电荷的分布已知, 那么根据场强的叠加原理, 并利用点电荷的场强公式(10-4), 可以求得任意带电体产生的电场的空间分布。下面举例来说明。

例 10-2 如图 10-3 所示为电偶极子, 即电量相等、符号相反、相隔某一微小距离 l 的两点电荷组成的系统, 求在其中垂面上任意一点 A 产生的电场强度。

解 取直角坐标系 Oxy , O 为电偶极子的中点, Oy 轴过 A 点, 如图 10-3 所示, OA 长为 r , \mathbf{E}_- 、 \mathbf{E}_+ 分别表示 $-q$ 和 $+q$ 在 A 点产生的电场强度。由图中几何关系知

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

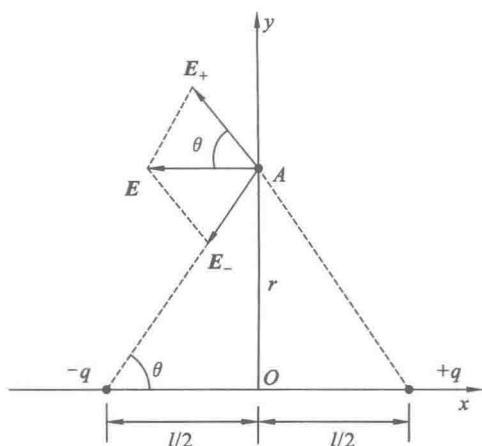


图 10-3 电偶极子的电场

$$\begin{aligned}
 E_y &= E_{+y} + E_{-y} = 0, \\
 E_x &= E_{+x} + E_{-x} = -2E_+ \cos\theta \\
 &= -2E_+ \frac{l/2}{(r^2 + l^2/4)^{1/2}} \\
 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r^2 + l^2/4)^{3/2}},
 \end{aligned}$$

由题意可知,有 $r \gg l$,此不等式意味着要做近似计算,这时

$$E_x \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3},$$

这里定义电偶极矩矢量 \mathbf{p} ,简称电矩,其大小 $p = ql$,其方向是由 $-q$ 指向 $+q$ 。 \mathbf{p} 是描述这一电荷系统特征的物理量。于是得到离 O 点距离为 r 的 A 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}}{r^3}.$$

例 10-3 如图 10-4 所示,设真空中一均匀带电细棒 AB 的线电荷密度为 λ , P 为 AB 外的一点,它到 AB 的距离为 a , AP 、 BP 与 y 轴间的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 ,求带电棒在 P 点产生的场强。

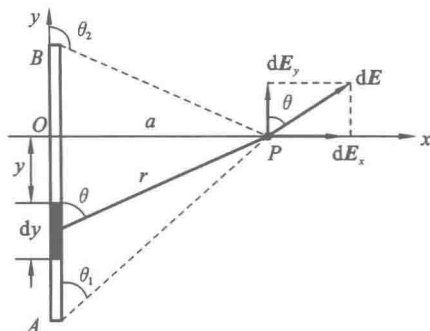


图 10-4 均匀带电细棒的场强