

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理学

下册

李文胜 刘国营 主编

University Physics



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理学

(下册)

主 编	李文胜	刘国营
副主编	张 琴	朱占武
	贺泽东	熊永臣



机械工业出版社

本书依据教育部高等学校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》，结合作者在多年的教学中所积累的经验编写而成。全书按 100 ~ 120 学时设计，分为上、下两册，共 18 章。上册共 9 章，内容包括质点力学、刚体力学、狭义相对论、分子动理论、热力学基础和静电场；下册共 9 章，内容包括稳恒电流的磁场、电磁感应、振动和波、物理光学和量子力学简介。本书是下册。

本书可作为普通高等学校工科各专业的教科书，也可供文理科有关专业选用和社会读者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学. 下册/李文胜, 刘国营主编. —北京:
机械工业出版社, 2015. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 48740 - 1

I. ①大… II. ①李…②刘… 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 (2014) 第 302002 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 任正一
版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀丽
责任印制: 刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2015 年 2 月第 1 版 · 第 1 次印刷
170mm × 227mm · 18 印张 · 244 千字
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 48740 - 1
定价: 32.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

物理学是整个自然科学和工程技术的基础，工科物理是高等院校工科各专业的重要基础课。它所阐述的基本思想、基本概念、基本规律和基本方法，不仅是学生学习后续课程的基础，更是全面培养和提高学生的科学素养、科学思维方法和科学研究能力的重要内容。

进入 21 世纪以来，我国的高等教育已从原来的“精英教育”逐步转向“大众教育”。为适应这种转变，高等教育强化基础课程，实施通才教育，已是大势所趋。为适应新形势下高等教育对大学物理课程改革和实际教学的需要，我们依据教育部高等学校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》的精神，结合教学实际编写了这本《大学物理》教材。

教材以大学物理的基本理论体系为主线，在突出工程应用、展示人文精神、彰显时代特色等方面作了有益的、积极的探讨。

为突出物理学基本原理在工程实际中的应用，我们选取了一些如离心铸造、摩擦式离合器、超级动能武器、空气能热水器、电磁炉、磁流体推进技术、差动变压器式位移传感器、涡电流缓速器、相控阵雷达、红外对抗技术、原子力显微镜、CT 和 STM 等案例。旨在引起读者更大的兴趣，展示物理学的强大生命力。

为展示物理学中所包含的人文思想，我们刻意地发掘了有关物理知识点中所隐含的人文思想。如在积累效应中所含的“锲而不舍”的思想；混沌“蝴蝶效应”中所含的“防微杜渐”的思想；熵增原理中所含的“啬”思想等。其目的是希望读者在学习有关物理知识的同时，还能感受到物理学中所蕴含的人文精神。

为彰显教材的时代特色，教材中引入数值计算，用 C 语言和 Matlab 编程求解有关的物理模型，如平抛运动、简谐振动、阻尼振动、受迫振动、拍、李萨如图、驻波、衍射光强分布、混沌等。其宗旨是希望读者在学习时能更进一步体会到建立物理模型的基本方法。

全书按 100 ~ 120 学时设计，分为上、下两册，共 18 章。上册共 9 章，内容包括质点力学、刚体力学、狭义相对论、分子动理论、热力学基础和静电场；下册包括稳恒电流的磁场、电磁感应、振动和波、物理光学和量子力学简介。

参加本书编写的有湖北汽车工业学院的李文胜及段正亚、刘国营、黄海铭、张琴、朱

占武、贺泽东、陈杰、杨俊涛、熊永臣、张传坤。湖北汽车工业学院的罗时军教授在本书的编写过程中给予了许多指导和帮助、并担任主审，湖北汽车工业学院的李伟、周原、李新克等演算了全部的习题，机械工业出版社的张金奎担任本书的责任编辑，为本书的出版付出了辛勤的劳动，并作了出色的工作，在此一并表示真诚的感谢。

由于编者水平所限，书中的疏漏和错误之处在所难免，恳请专家、同行和读者不吝赐教。

编 者

目 录

前言

第 10 章 稳恒电流及真空中的磁场 1

10.1 稳恒电流 1

10.2 稳恒电流的磁场 磁感应强度 5

10.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用 6

10.4 磁场中的高斯定理 11

10.5 真空中恒定磁场的环路定理及其应用 14

10.6 磁场对运动电荷和载流导线的作用 20

习题 10 28

第 11 章 磁场中的磁介质 31

11.1 磁介质及其磁化 31

11.2 磁场强度 磁介质中的安培环路定理 34

11.3 铁磁质 40

习题 11 43

第 12 章 电磁感应 45

12.1 电磁感应的基本定律 45

12.2 动生电动势与感生电动势 49

12.3 自感与互感 55

12.4 磁场的能量 能量密度 62

12.5 位移电流 电磁场基本方程的积分形式 65

习题 12 72

第 13 章 机械振动 77

13.1 简谐振动 77

13.2 旋转矢量法 81

13.3 简谐振动的能量 84

13.4 几种常见的简谐振动 86

13.5 简谐振动的合成 90

13.6 阻尼振动 受迫振动 共振 大角度摆 95

习题 13 102

第 14 章 机械波 107

14.1 机械波的基本概念 107

14.2 平面简谐波的波函数 110

14.3 波的能量 能流密度 118

14.4 惠更斯原理 波的衍射、反射和折射 122

14.5 波的干涉 125

14.6 驻波 129

14.7 多普勒效应 136

14.8 声波 超声波 次声波 139

习题 14 144

第 15 章 光的干涉 147

15.1 光源 光的相干性 148

15.2 杨氏双缝干涉 劳埃德镜 150

15.3 光程 薄膜干涉 153

15.4 劈尖干涉 牛顿环 159

15.5 迈克耳孙干涉仪 时间相干性 164

习题 15 167

第 16 章 光的衍射 171

16.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理 171

16.2 夫琅禾费单缝衍射 173

16.3 夫琅禾费圆孔衍射 光学仪器的分辨率 179

16.4 光栅衍射	181	第 18 章 量子物理简介	215
16.5 X 射线衍射	188	18.1 热辐射 普朗克能量子假设	216
16.6 全息照相	190	18.2 光电效应	221
习题 16	192	18.3 康普顿效应 光的波粒二象性	225
第 17 章 光的偏振	195	18.4 氢原子的玻尔理论	230
17.1 光的偏振状态	195	18.5 实物粒子的二象性	237
17.2 起偏和检偏 偏振片 马吕斯 定律	197	18.6 量子力学简介	244
17.3 光在反射和折射时的偏振	199	18.7 氢原子的量子理论	254
17.4 双折射现象	201	18.8 激光	263
17.5 椭圆偏振光和圆偏振光	205	18.9 固体能带简介	268
17.6 偏振光的干涉及其应用	208	习题 18	274
17.7 旋光现象及其应用	211	附录 习题参考答案	277
习题 17	213	参考文献	282

第 10 章 稳恒电流及真空中的磁场

从第 9 章我们已知,处于静电平衡状态下的导体,其内部电场强度恒为零,因而无带电粒子的宏观运动。但若导体内部的电场强度不为零,带电粒子就要在电场力的作用下发生定向运动,进而在导体内形成电流。本章我们将从电流形成的条件出发,引入电流强度、电流密度和电动势的概念,进而重点讨论稳恒电流在真空中所激发的磁场。其主要内容有:磁感应强度、毕奥-萨伐尔定律、磁场的高斯定理、安培环路定理以及磁场对运动电荷、载流导线的作用等。

10.1 稳恒电流

电流是由电荷的定向运动所形成的。要在导体中形成电流,必须同时满足如下两个条件:导体内部存在能自由运动的电荷;导体内部存在使电荷定向运动的电场。

10.1.1 电流 稳恒电流 电流密度

我们知道,在金属导体中存在大量的自由电子。当这些自由电子作定向运动时就形成电流。这种电流称为**传导电流**。

设想在通电导体内截取任一横截面 S ,如图 10-1 所示。若在 dt 的时间内通过此截面的电量为 dQ ,则定义电流为

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (10-1)$$

它表示单位时间通过该横截面的电量。从定义式 (10-1) 可见,电流是标量。为了说明电流的流向,通常规定正电荷的运动方向为电流的方向。

如果导体中的电流不随时间变化,这种电流称为**稳恒电流**。

在国际单位制中,电流的单位是安培,其符号是 A, $1\text{A} =$

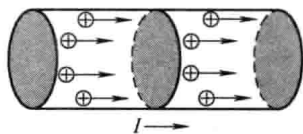


图 10-1 导体中的电流

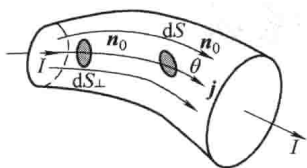


图 10-2 电流密度

$1\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。常用的单位还有毫安 (mA) 和微安 (μA)

$$1\mu\text{A} = 10^{-3}\text{mA} = 10^{-6}\text{A}$$

电流强度只能从整体上反映导体内电流的大小, 还不能具体说明导体内各处的电流分布情况, 而在许多实际问题中, 电流的分布往往是不均匀的, 如大块导体中的电流、同轴电缆中的漏电流等。为了描述导体中各点的电流分布, 引入一新的物理量——电流密度。设想在导体内某点取一与电流方向垂直的截面 $dS_{\perp}$, 其法线的单位矢量为 $\mathbf{n}_0$, 通过该面元的电流为 dI , 如图 10-2 所示。定义该点的电流密度为

$$\mathbf{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \mathbf{n}_0 \quad (10-2)$$

由式 (10-2) 可见, 电流密度是矢量, 其大小等于通过该点与电流方向垂直平面上单位面积的电流, 其方向就是该点正电荷的运动方向。如某点的面元 dS 的方向 (即其法线方向) 与该点正电荷的运动方向的夹角为 θ , 则通过该面元的电流为

$$dI = j dS \cos\theta = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

通过导体任一截面 S 的电流为

$$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (10-3)$$

电流密度矢量 $\mathbf{j}$ 在导体内各点有确定的大小和方向, 因而它们在导体内形成一矢量场, 我们称之为**电流场**。由式 (10-3) 可知, 在电流场中选任一曲面, 通过该曲面的电流 I 就是场矢量 $\mathbf{j}$ 对该曲面的通量, 这和电场中的电场强度 $\mathbf{E}$ 与其电通量 Φ_e 的关系一样。

在国际单位制中, 电流密度的单位为安培每平方米, 符号是 $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

我们已经知道, 电荷守恒定律是电磁学的一个基本定律。下面讨论电荷守恒定律在电流现象中的体现。

设想在电流场中有一封闭的曲面, 如图 10-3 所示。单位时间内从该曲面流出的总电量可表示为

$$I = \oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \frac{dQ}{dt} \quad (10-4)$$

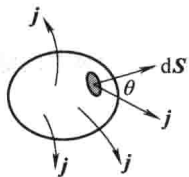


图 10-3 单位时间内从闭合曲面流出的总电量

式中, dS 的方向为该面元的正法向。如果用 Q_{int} 表示曲面内的电量, 根据电荷守恒定律, 单位时间从曲面内流出的电量等于单位时间此闭合曲面内减少的电量, 故 dQ_{int}/dt 为负值, 于是有

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{dQ_{\text{int}}}{dt}$$

因此, 式 (10-4) 可改写成

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dQ_{\text{int}}}{dt} \quad (10-5)$$

式 (10-5) 称为电流的连续性方程。它是电荷守恒定律在电流现象中的具体形式。

在一般情况下, 电流密度矢量是空间和时间的函数。但是在稳恒电流的情况下, 要求电荷的分布不随时间变化, 故式 (10-5) 变为

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (10-6)$$

这说明, 在稳恒电流的情况下, 电流密度矢量对任意闭合曲面的总通量为零。即在相等的时间内, 从闭合曲面外流入的电量, 等于从该曲面流出的电量。当电流的分布满足此条件时, 电流必然是稳恒的, 所以式 (10-6) 称为稳恒电流条件。

10.1.2 电源 电动势

要在导体中维持稳恒电流, 必须在其两端施加一恒定的电势差。那么, 怎样才能施加一恒定的电势差, 其性质又如何呢? 这是本小节要讨论的主要问题。

在图 10-4 中, A、B 是处于静电平衡的两个导体板, 它们之间存在电势差 $U_{AB} = U_A - U_B$, 且 A 板的电势比 B 板的高, 故 A、B 之间存在静电场。当用导线连接 A、B 时, 就会出现由 A 经导线流向 B 的瞬间电流, 导致 A 的电势逐渐降低, B 的电势逐渐升高, 当 A、B 和导线的电势相等时, 电流也就终止了。因此, 单纯依靠静电力的作用, 在导体任何两点之间都不可能维持恒定的电势差, 也就不可能获得稳恒的电流。

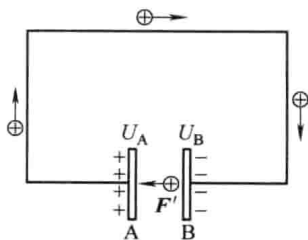


图 10-4 电源内的
非静电力

但是, 我们如果能把正电荷从负极板 B 沿两极板间的另一路径, 移至正极板 A 上, 并使 A、B 极板维持正、负电荷不变, 这样 A、B 间就有恒定的电势差, 导线中也就有稳恒电流通过。显然, 要把正电荷从极板 B 移至极板 A, 静电力是绝对不行的, 必须是非静电力 F' 作用才行。能够提供这种非静电力的装置称为电源, 如电池和发电机都是我们所熟悉的电源。电池中的非静电力是化学力, 而发电机的非静电力是磁场对运动电荷的作用力 (洛伦兹力)。

在电源内部, 依靠非静电力 F' 克服静电力 F 对正电荷做功, 方能使正电荷从极板 B 经电源内部输送到极板 A 上。由此可见, 电源中非静电力 F' 的做功过程, 就是把其他形式的能量转变成电能的过程。在不同的电源里, 电源将其他形式的能量转换为电能的本领一般是不同的。为了表征不同电源转化能量的本领, 我们引入一个物理量——电动势。为此定义: 把单位正电荷从电源负极经电源内部到正极绕闭合回路一周非静电力所做的功为电源的电动势。电荷所受到的非静电力, 可类比电荷在静电场中所受到的静电力, 设 E_k 是与非静电力对应的非静电场强, 则正电荷 q 所受到的非静电力为 qE_k , 按电源电动势的定义, 电源的电动势可表示为

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} = \oint_l E_k \cdot dl \quad (10-7)$$

必须指出, 在电路中, 有时非静电场强集中在部分区域中 (如电池、发电机), 有时又存在整个回路上 (如后续章节将要讨论的感应电动势)。无论哪一种情形, 式 (10-7) 都适用。而对于第一种情形, 式 (10-7) 也可表示为

$$\mathcal{E} = \int_{\text{int}} E_k \cdot dl \quad (10-8)$$

式 (10-8) 表明: 电源的电动势在数值上等于把单位正电荷从负极经电源内部移至正极非静电力所做的功。

在实际中, 电动势和电流一样, 也有规定的方向。我们把从负极经电源内部指向正极的方向规定为电动势的方向。电动势的单位与电势相同, 同为伏特, 符号为 V。

电源电动势的大小只取决于电源本身的性质，一定的电源具有一定的电动势，而与外电路无关。

10.2 稳恒电流的磁场 磁感应强度

人们对磁现象的认识可以追溯到很早。我国古代地理书籍《三辅黄图》一书中曾有这样的记载：秦始皇在公元前 221 年统一中国后，曾多次遭到政敌的谋刺。因此，在建造阿房宫时，特别命工匠用磁石筑砌阿房宫的北阙门。这是利用磁石吸铁的原理，防被刺客暗藏铁器进宫行刺。指南针是我国古代的伟大发明之一，11 世纪北宋科学家沈括在《梦溪笔谈》中就有关于指南针的记载。

人们对磁学的研究直到 19 世纪 20 年代才得到迅速发展。1820 年，丹麦物理学家奥斯特（H. C. Oersted, 1777—1851）发现，载流导线对放在附近的小磁针有力的作用；同年，法国物理学家安培（A. M. Ampere, 1775—1836）发现，放在磁铁附近的载流导线及载流线圈，同样会受到力的作用而运动，载流导线之间也有相互作用力。奥斯特和安培的发现揭示了磁和电的相互联系，使人们结束了把磁和电单独研究的历史，进而认识到磁性起源于电流（运动电荷），而电流（运动电荷）会受到磁力的作用。

大量实验说明，无论是永磁铁还是通电导线所显示的磁性，实质上都是运动电荷（电流）产生的，同时运动电荷（电流）又会受到磁力的作用。依近代物理的观点，与电荷周围会产生电场相似，运动电荷（电流）会在其周围激发磁场，磁场的性质则表现为对运动电荷（电流）有力的作用。根据场的观点，上述磁铁和磁铁、电流和磁铁、电流和电流之间的相互作用，都可统一归结为是通过磁场来传递的。

磁场和电场一样，具有质量、动量和能量，是客观存在的一种特殊物质。需要注意的是，无论电荷静止还是运动，它们之间都存在库仑相互作用，但只有运动电荷间才存在磁相互作用。所以研究磁场，必须和运动电荷一起来研究。

与描述电场相似,用运动电荷在磁场中所受的力来描述磁场,从而引入描述磁场性质的物理量——磁感应强度 B 。

我们用带不同电量的电荷来作探测磁力的实验,结果发现运动电荷所受的磁力有如下特点:在磁场中确定的点,运动电荷在该点的受力情况与电荷的运动方向、速度大小及所带电量有关,当电荷沿某一特殊方向运动时,该电荷受力为零;而当沿垂直此特殊方向运动时,该电荷受力最大;对于确定的点,运动电荷在该点所受的最大力 $F_{\max}$ 与电荷的电量 q 和速度大小 v 的乘积之比 $F_{\max}/qv$ 恒为常量。

根据运动电荷在磁场中的受力特点,仿照电场强度的定义,可定义磁感应强度的大小为

$$B = \frac{F_{\max}}{qv} \quad (10-9)$$

因磁场中各点都有一特殊方向(电荷沿该方向运动时受力为零),这预示着磁场具有方向性。为此人们规定:磁场中某的磁感应强度的方向,就是小磁针在该点旋转静止后其北极所指的方向。

从式(10-9)可见,磁感应强度 B 的单位,取决于 F 、 q 和 v 的单位。在国际单位制中, F 的单位是牛顿, q 的单位是库仑, v 的单位是米每秒,则 B 的单位是 $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 或 $\text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,称为特斯拉,符号为 T。即

$$1\text{T} = \text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

在实用中,磁感应强度还有另一个单位——高斯(Gs),它与特斯拉的换算关系是

$$1\text{T} = 10^4 \text{Gs}$$

10.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用

10.3.1 毕奥-萨伐尔定律

实验表明,稳恒电流产生的磁场是不随时间变化的,称为静磁场。在静电场中,研究任意带电体所产生的电场时,是先

把带电体分成许多电荷元, 首先找出电荷元激发电场的规律, 然后应用场的叠加原理, 求出整个带电体激发的电场。研究稳恒电流所激发的磁场也采用类似的方法, 先将任意形状的载流导线分割成许多线电流元, 找出电流元产生磁场的规律, 然后应用场的叠加原理, 原则上就可以求出任意形状载流导线产生的磁场。

线电流元在空间产生磁场的规律, 称为毕奥-萨伐尔定律: 电流元 Idl 在空间某点 P 产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的大小与 Idl 的大小成正比, 与 Idl 和由电流元指向场点 P 的矢径 $\mathbf{r}$ 之间夹角的正弦成正比, 与矢径 $\mathbf{r}$ 的长度成反比, 磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的方向与 $Idl \times \mathbf{r}$ 的方向一致。即

$$dB = k \frac{Idl \sin\theta}{r^2}$$

式中, k 是比例系数。考虑到磁感应强度的大小和方向, 并令 k

$= \frac{\mu_0}{4\pi}$, 则上式的矢量式为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 Idl \times \mathbf{r}^0}{4\pi r^2} \quad (10-10)$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$, 称为真空中的磁导率; $\mathbf{r}^0$ 是矢径 $\mathbf{r}$ 上的单位矢量。式 (10-10) 称为毕奥-萨伐尔定律的矢量式。

由叠加原理得知, 任意形状的载流导线在场点 P 产生的磁场, 等于各段电流元在该点产生的磁场的矢量和, 即

$$\mathbf{B} = \int_L \frac{\mu_0 Idl \times \mathbf{r}^0}{4\pi r^2} \quad (10-11)$$

积分号下的 L 表示对整个载流导线进行积分。对式 (10-11) 所示的矢量积分, 最基本的方法就是建立坐标取分量式进行计算。

10.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用

毕奥-萨伐尔定律是对大量实验事实进行分析抽象后得出的结果, 是计算任意电流的磁场依据。下面举例说明。

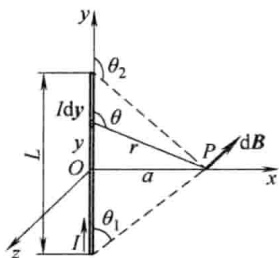


图 10-5 例 10-1 题图

【例 10-1】 载流长直导线的磁场。如图 10-5 所示, 一载流长直导线通过的电流为 I , 方向沿 y 轴正方向, 试计算距导线为 a 的 P 点处的磁感应强度 B 。

【解】 建立如图所示的坐标, 在长直导线上 y 处取电流元 $I dy$, 依式 (10-10) 该电流元在 P 点产生的磁感应强度的方向沿 z 轴负方向, 大小为

$$dB = \frac{\mu_0 I dy \sin \theta}{4\pi r^2}$$

因直导线上所有电流元在 P 点产生的磁感应强度的方向都相同, 因此, 对上式积分, 即可求得 B 的大小。上式中 y 、 r 和 θ 都是变量, 我们选 θ 作为积分变量, 从图中可见

$$r = \frac{a}{\sin(\pi - \theta)} = \frac{a}{\sin \theta}, \quad y = a \cot(\pi - \theta) = -a \cot \theta$$

把上面第二式两边微分得

$$dy = \frac{a d\theta}{\sin^2 \theta}$$

从而有

$$\begin{aligned} B &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I \sin \theta d\theta}{4\pi a} \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \end{aligned} \quad (10-12a)$$

写成矢量式为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \mathbf{k} \quad (10-12b)$$

讨论:

(1) 若 P 点到导线的距离 a 远小于导线的长度 l ($a \ll l$), 导线可视为无限长, 从图 10-5 可见: $\theta_1 \rightarrow 0$, $\theta_2 \rightarrow \pi$, 进而得到无限长载流直导线外距导线距离为 a 处磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (10-12c)$$

(2) 若 $a \ll l$ 仍满足, 但 P 点在导线的端点处, 则导线可

视为“半无限长”，对下端点有 $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 \rightarrow \pi$ (对上端点有 $\theta_1 \rightarrow 0$, $\theta_2 \rightarrow \frac{\pi}{2}$) 进而得到“半无限长”载流直导线外距导线距离为 a 处磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \quad (10-12d)$$

(3) 对载流长直导线的延长线上的任一点, 因 $\theta_1 = \theta_2 = \pi$ 或 $\theta_1 = \theta_2 = 0$, 所以

$$B = 0 \quad (10-12e)$$

【例 10-2】 通电圆线圈轴线上的磁场。如图 10-6 所示, 半径为 R 的圆线圈, 通入电流为 I , 试计算其轴线上任一点 P 的磁感应强度 B 。

【解】 在线圈上取任一电流元 Idl , 因 Idl 总是和矢径 r 垂直, 依式 (10-10) 该电流元在 P 点产生的磁感应强度的大小为

$$dB = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2}$$

方向为 $Idl \times r$, 如图所示。把 dB 分解成 dB_x 和 $dB_\perp$, 因圆载流线圈的对称性, 垂直于 x 轴各分量 $dB_\perp$ 将相互抵消, 而平行于 x 轴各分量 dB_x 将相互加强。所以, P 点的磁感应强度 B 的方向沿 x 轴方向, 大小为

$$B_x = \int_L dB_x = \int_L dB \sin\theta = \int_L \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2} \sin\theta$$

即

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \sin\theta \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} 2\pi R \sin\theta$$

因 $r^2 = R^2 + x^2$, $\sin\theta = x/r$, 所以圆载流线圈轴线上距圆心 x 处的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (10-13a)$$

讨论:

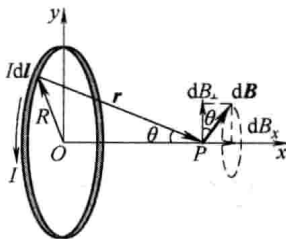


图 10-6 例 10-2 题图

(1) 圆心 O 处, 即 $x=0$, 由式 (10-13a) 得圆载流线圈圆心处的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (10-13b)$$

当线圈有 N 匝时

$$B = N \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (10-13c)$$

(2) 一段圆心角为 β 的通电圆弧在圆心处的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \cdot \frac{\beta}{2\pi} \quad (10-13d)$$

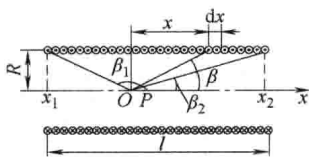


图 10-7 例 10-3 题图

【例 10-3】载流螺线管内的磁场。均匀绕在圆柱面上的螺旋线圈称为螺线管, 如图 10-7 所示。螺线管绕得很密时, 每匝线圈相当于一圆形线圈。若螺线管长为 l , 半径为 R , 通入的电流为 I , 单位长度上的匝数为 n , 试计算螺线管轴线上任一场点 P 处的磁感应强度 B 。

【解】由于直螺线管是密绕的, 所以每匝线圈可视为一圆形线圈。所以, 轴线上任一点 P 处的磁感应强度 B , 可以认为是 nl 个圆形线圈在该点各自产生的磁感应强度的叠加。建立如图所示的坐标, 并在 x 处取长度为 dx 微元, 该微元所含电流 $dI = nI dx$, 利用例 10-2 中的结果式 (10-13a) 可得微元所含电流 dI 在 Ox 轴上的 P 点处的磁感应强度 dB 的大小为

$$dB = \frac{\mu_0 R^2 n I dx}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}}$$

dB 的方向沿 x 轴正向。因各载流线圈在 P 点所激发的磁感应强度的方向均沿 x 轴正向。所以整个载流螺线管在 P 点的磁感应强度, 应为所有载流线圈在该点的磁感应强度之和, 即

$$B = \int dB = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\mu_0 R^2 n I dx}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}}$$

选 β 为积分变量, 从 10-7 图中可得

$$x = R \cot \beta, \quad dx = -R \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}, \quad R^2 + x^2 = \frac{R^2}{\sin^2 \beta}$$