



高等学校公共基础课“十二五”规划教材

大学物理

(下册)

主 编	王智晓		
副主编	杜慧秋	王平建	高法金
	林忠海	闫 龙	



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校公共基础课“十二五”规划教材

大学物理(下册)

主 编 王智晓

副主编 杜慧秋 王平建 高法金

林忠海 闫 龙

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

为适应教学改革的新形势,根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会“2011 年大学物理和大学物理实验课程教学基本要求”的主要精神,结合编者多年的教学经验以及当前国内外物理教材改革的动态,经集体讨论编写了本书。

本书内容紧紧围绕大学物理课程的基本要求,难度适中,物理概念清晰,论述深入浅出,例题丰富。全书分上、下两册。下册包括稳恒磁场,电磁感应、电磁场,振动,波动,光学,相对论,量子物理等。每章除包括基本内容外,还包括本章小结和习题。全书联系实际,特别注意介绍物理知识和物理思想在实际中的应用。

本书可作为一般理工类专业的大学物理本科生教材,也可作为各类工程技术院校有关专业的自主学习教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(下册)/王智晓主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.1
高等学校公共基础课“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5606-3270-4

I. ① 大… II. ① 王… III. ① 物理学—高等学校—教材 IV. ① O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 012590 号

策 划 毛红兵 刘玉芳

责任编辑 许青青 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 16

字 数 376 千字

印 数 1~3000 册

定 价 28.00 元

ISBN 978-7-5606-3270-4/O

XDUP 3562001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

物理学是一切自然科学的基础，处于诸多自然科学学科的核心地位。进入21世纪，科学技术的飞速发展对人才培养提出了新的要求，高等教育从“精英教育”走向普及，为适应市场经济对人才普适性的要求，高等教育强化基础课程，实施通才教育已是大势所趋。

大学物理是工程技术类专业一门十分重要的基础课。为适应教学改革的新形势，根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会“2011年大学物理和大学物理实验课程教学基本要求”的主要精神，结合编写者多年的教学经验以及当前国内外物理教材改革的动态，经集体讨论编写了本书。

本书内容紧紧围绕大学物理课程的基本要求，并以工程技术，特别是新技术中广泛应用的基本物理原理为依据，力求做到“经典物理现代化，物理前沿普物化”，尽量做到科学性和思想性相统一，理论联系实际，将知识的应用性、启发性和趣味性相结合。为此，在编写过程中，适量引用了相关的物理学史资料，其中包括重要的物理实验与有关科学家的思想和贡献。这样可增强物理学理论的真实感和生动感，有助于学生形成科学的学习方法和研究方法，有利于激发学生的学习兴趣和培养学生的创新能力。

本书努力体现如下特点：

(1) 充分利用高等数学这一重要工具求解物理学问题，通过本课程的学习，帮助和引导学生学会使用高等数学，将“物”与“理”密切结合。

(2) 精选内容，尽量做到“少课时”，既减轻学生负担，又保证为后续课程提供必要的基础。

(3) 注重从实验规律引出概念，适当介绍物理学发展史上的重大事件，使学生了解科学发展的规律、科学研究的方法以及科学家的精神。

(4) 充分利用物理学与前沿课题、高新技术、现代生活的联系，适当介绍相关科学研究的新成果，以使学生开阔眼界，启迪思维，提高科学素质。

本书内容相对完整，授课教师在讲解时可以根据大纲要求选择相应的内容，或者选择与本专业关联度大的部分作为教学内容，容易做到学时与内容相对应，具有一定的灵活性。

全书分为上、下两册。王智晓任本书主编，杜慧秋、王平建、高法金、林忠海、闫龙任副主编。其中，王智晓编写力学，林忠海编写热学，高法金、闫龙编

写电磁学，杜慧秋编写光学，王平建编写近代物理，最后由杜慧秋负责全书的修改和定稿工作。编写过程中，许多老师提出了建议和要求，西安电子科技大学出版社有关人员在本书的出版过程中付出了辛勤的劳动，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月

目 录

第 10 章 稳恒磁场	1	11.2.1 概念	29
10.1 磁场与磁感应强度	1	11.2.2 能量转换	31
10.1.1 磁场力	1	11.2.3 动生电动势的计算	31
10.1.2 磁感应强度	2	11.3 感生电动势	33
10.2 毕奥-萨伐尔定律及应用	3	11.3.1 电磁感应定律的普遍形式	33
10.2.1 电流元	3	11.3.2 感生电场的应用	35
10.2.2 毕奥-萨伐尔定律	4	11.4 自感和互感	35
10.2.3 磁感应强度叠加原理	4	11.4.1 自感	36
10.2.4 运动电荷的磁场	7	11.4.2 互感	37
10.3 磁场的高斯定理和安培环路定理	8	11.5 磁场的能量	38
10.3.1 磁通量	8	11.5.1 自感中的能量转换	38
10.3.2 磁场的高斯定理	9	11.5.2 磁场能量密度	39
10.3.3 安培环路定理	10	11.5.3 磁能的计算	39
10.4 带电粒子在磁场中的运动	13	11.6 麦克斯韦电磁场理论简介	40
10.4.1 洛仑兹公式	13	11.6.1 位移电流	40
10.4.2 带电粒子在均匀磁场中的运动	13	11.6.2 麦克斯韦方程组	42
10.4.3 霍尔效应	14	本章小结	44
10.5 磁场对电流的作用	15	习题	45
10.5.1 安培定律	15	第 12 章 振动	50
10.5.2 安培定律的应用	16	12.1 简谐振动的描述	50
10.6 磁介质中的磁场	16	12.1.1 简谐振动	50
10.6.1 磁介质及磁介质的磁化	17	12.1.2 简谐振动的表达式	50
10.6.2 磁介质的磁导率	18	12.1.3 简谐振动的速度和加速度	52
10.6.3 磁场强度、磁介质中的 安培环路定理	18	12.1.4 简谐振动的旋转矢量表示	52
10.6.4 铁磁质	20	12.2 几种常见的简谐振动	54
本章小结	22	12.2.1 单摆	54
习题	23	12.2.2 复摆	55
第 11 章 电磁感应、电磁场	27	12.3 简谐振动的能量	55
11.1 电磁感应的基本规律	27	12.4 简谐振动的合成	57
11.1.1 电磁感应现象	27	12.4.1 两个同方向同频率简谐 振动的合成	57
11.1.2 法拉第电磁感应定律	27	12.4.2 两个同方向不同频率简谐 振动的合成	58
11.1.3 楞次定律	28	12.4.3 相互垂直的简谐振动的合成	58
11.2 动生电动势	29		

12.5 阻尼振动、受迫振动、共振	59	第 14 章 光学	91
12.5.1 阻尼振动	59	14.1 几何光学简介	92
12.5.2 受迫振动和共振	60	14.1.1 光的传播规律	92
12.6 电磁振荡	61	14.1.2 全反射	94
12.6.1 振荡电路和无阻尼自由 电磁振荡	61	14.1.3 光在平面上的反射和折射	94
12.6.2 无阻尼自由电磁振荡的 振荡方程	62	14.1.4 光在球面上的反射和折射	95
12.6.3 无阻尼自由电磁振荡的能量	63	14.1.5 薄透镜	102
本章小结	65	14.1.6 光学仪器	107
习题	65	14.2 光源与光的相干性	110
第 13 章 波动	68	14.2.1 光源、光的颜色、 光谱和光强	110
13.1 波动的基本概念	68	14.2.2 光的相干性	111
13.1.1 机械波的形成	68	14.2.3 相干光的获得方法	112
13.1.2 波动的分类	69	14.3 双缝干涉	113
13.1.3 描述波动的物理量	69	14.3.1 杨氏双缝实验	113
13.2 平面简谐波的波函数	70	14.3.2 杨氏双缝干涉的光强分布	114
13.2.1 波函数概述	70	14.3.3 缝宽对干涉条纹的影响与 空间相干性	115
13.2.2 波函数的物理意义	71	14.3.4 双镜	116
13.3 波的能量	73	14.3.5 洛埃镜	116
13.3.1 波的能量分布	73	14.3.6 光源的相干长度	118
13.3.2 平均能流和能流密度	74	14.4 光程与光程差	119
13.4 波的叠加、干涉和驻波	74	14.4.1 光程	119
13.4.1 波的叠加原理	74	14.4.2 光程差	120
13.4.2 波的干涉	75	14.4.3 物像之间的等光程性	120
13.4.3 驻波	76	14.4.4 反射光的相位突变和 附加光程差	121
13.5 惠更斯原理和波的衍射	79	14.5 薄膜干涉	121
13.5.1 惠更斯原理	79	14.5.1 等倾干涉	122
13.5.2 用惠更斯原理解释波的 衍射现象	79	14.5.2 增透膜与增反膜	124
13.6 多普勒效应	80	14.5.3 等厚干涉条纹	125
13.7 平面电磁波	83	14.6 迈克尔逊干涉仪	129
13.7.1 电磁波的产生与传播	83	14.7 光的衍射	132
13.7.2 平面电磁波的特性	85	14.7.1 光的衍射现象	132
13.7.3 电磁波的能量	86	14.7.2 惠更斯-菲涅耳原理	132
13.7.4 电磁波谱	87	14.7.3 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	133
本章小结	88	14.8 单缝衍射	133
习题	89	14.9 圆孔衍射与光学仪器的分辨率	138
		14.10 光栅衍射	139
		14.10.1 光栅衍射的形成	139

14.10.2	光栅方程	140	15.4	相对论的时空观	185
14.10.3	光栅衍射的强度分布	140	15.4.1	同时的相对性	185
14.10.4	缺级	142	15.4.2	时间延迟	186
14.10.5	光栅光谱	143	15.4.3	长度收缩	187
* 14.10.6	光栅的分辨本领	145	15.5	相对论动力学	188
14.10.7	干涉和衍射的区别与联系	146	15.5.1	动量与质量	188
14.11	X射线的衍射	147	15.5.2	动能和能量	189
14.12	光的偏振性与马吕斯定律	149	15.5.3	能量和动量的关系	191
14.12.1	自然光与偏振光	149	* 15.6	广义相对论简介	191
14.12.2	偏振片、起偏与检偏	150	15.6.1	广义相对论的等效原理	192
14.12.3	马吕斯定律	151	15.6.2	广义相对性原理	193
14.13	反射光和折射光的偏振	152	15.6.3	广义相对论时空特性的 几个例子	193
14.14	光的双折射	154	本章小结		195
14.14.1	寻常光和非常光	154	习题		196
14.14.2	光轴与主平面	155			
14.14.3	单轴晶体的子波波阵面	155			
14.14.4	惠更斯原理在双折射现象中的 应用	156	第 16 章 量子物理		200
14.14.5	晶体的二向色性和偏振片	157	16.1	黑体辐射与普朗克量子假设	200
14.15	偏振光的干涉与人为双折射	158	16.1.1	黑体与黑体辐射	200
14.15.1	偏振光的干涉	158	16.1.2	黑体辐射的实验规律	201
14.15.2	人为双折射	159	16.1.3	黑体辐射的理论解释	202
14.16	旋光性	162	16.2	光电效应、爱因斯坦光子量子假设	205
14.17	现代光学简介	164	16.2.1	光电效应的实验规律	205
14.17.1	傅里叶光学	164	16.2.2	光子与爱因斯坦方程	206
14.17.2	全息照相	165	16.2.3	光的波粒二象性	207
14.17.3	非线性光学	167	16.3	康普顿效应	208
本章小结		168	16.3.1	康普顿效应的实验规律	208
习题		170	16.3.2	康普顿效应的量子解释	209
			16.4	氢原子的量子理论	211
第 15 章 相对论		177	16.4.1	氢原子光谱的规律	211
15.1	伽利略时空变换与 牛顿力学时空观	178	16.4.2	卢瑟福的有核模型	212
15.1.1	伽利略时空变换	178	16.4.3	玻尔的氢原子理论	213
15.1.2	牛顿力学时空观	179	16.5	德布罗意波	215
15.2	迈克尔逊-莫雷实验	180	16.5.1	德布罗意假设	215
15.3	相对论的基本原理和洛伦兹变换	182	16.5.2	德布罗意波的实验验证	217
15.3.1	相对论的基本原理	182	16.6	不确定关系	218
15.3.2	洛伦兹时空变换	182	16.7	量子力学简介	219
15.3.3	洛伦兹速度变换	184	16.7.1	波函数与概率密度	219
			16.7.2	薛定谔方程	220
			16.7.3	一维无限深方势阱	222

16.7.4 一维方势垒、隧道效应	223	16.10.4 激光器的特性和应用	234
16.8 氢原子的量子理论	225	* 16.11 固体物理简介	235
16.8.1 氢原子的定态薛定谔方程	225	16.11.1 固体的能带	235
16.8.2 三个量子数	226	16.11.2 半导体	236
16.8.3 基态波函数	227	16.11.3 PN 结	238
16.9 电子的自旋及电子分布	228	* 16.12 超导体	238
16.9.1 电子的自旋	228	16.12.1 超导体的基本电磁学性质	239
16.9.2 电子在原子中的分布	229	16.12.2 超导体电性的 BCS 理论	239
* 16.10 激光	230	16.12.3 超导体的应用	240
16.10.1 自发辐射和受激辐射	231	本章小结	241
16.10.2 激光原理	231	习题	245
16.10.3 激光器	233		

第10章 稳恒磁场

《大学物理(上册)》已经研究了相对于观察者静止的电荷所激发的电场的性质与规律。在自然界中,运动电荷的周围不仅存在着电场而且还存在着磁场。磁场和电场一样,也是物质的一种形态。

丹麦的奥斯特在1820年发现了电流的磁效应,即导线中通过电流时,导线附近的小磁针会发生偏转,从此开拓了电磁学研究的新纪元,打开了电磁应用的新领域。现在,无论科学技术、工程应用还是人类生活,都与电磁学有着密切的关系。电磁学给人们开辟了一条广阔地认识自然规律和应用自然规律的道路。

10.1 磁场与磁感应强度

磁现象的发现要比电现象早得多。人们很早就已经知道磁石能吸引铁。11世纪我国就发明了指南针,但是直到19世纪人们发现了电流的磁场和磁场对电流的作用以后,才逐渐认识到磁现象和电现象的本质以及它们之间的联系,并扩大了磁现象的应用范围。到20世纪初,基于科学技术的进步与原子结构理论的建立和发展,人们进一步认识到磁现象起源于运动电荷,磁场也是物质的一种形式。为了说明磁力的作用,引入了磁场的概念——产生磁力的场叫做磁场。一个运动电荷在它的周围除了产生电场之外,还产生磁场。

10.1.1 磁场力

人们通过大量的实验,发现了以下两种现象。

(1) 磁场力之间的相互作用:同极性(N与N、S与S)相斥,异极性(N与S)相吸。如图10.1所示,两根指南针间会出现相斥和相吸的现象。

(2) 磁场力与通电(电荷的运动)导线之间的相互作用:通电导线在磁场中会发生运动,如图10.2所示。

实验表明:在某一惯性系S中观察一个电荷 q_0 在另外的运动电荷周围运动时,它所受到的作用力 $\mathbf{F}$ 一般总可以表示为两个矢量的和:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m \quad (10-1)$$

式中, $\mathbf{F}_e$ 为与 q_0 的运动无关的电场力,且

$$\mathbf{F}_e = q_0 \mathbf{E} \quad (10-2)$$

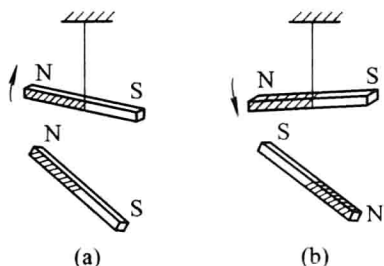


图 10.1 磁场力之间的相互作用

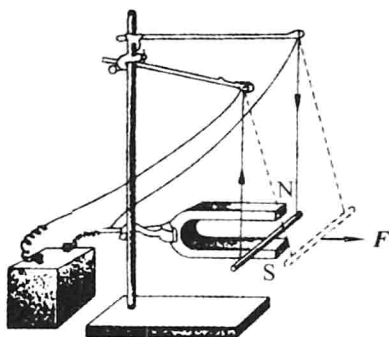


图 10.2 磁场力与通电导线的相互作用

$\mathbf{F}_m$ 与电荷 q_0 相对于惯性系 S 的运动速度 $\mathbf{v}$ 有直接关系, 它来源于磁场力的作用, 称为磁场力或磁力, 可表示为

$$\mathbf{F}_m = q_0 \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (10-3)$$

通常把式(10-3)中的 $\mathbf{F}_m$ 叫做洛伦兹力。

一个电荷 q_0 在另外的运动电荷的周围运动时所受到的作用力的一般表达式, 叫做洛伦兹力公式, 可写为

$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{E} + q_0 \mathbf{v} \times \mathbf{B} = q_0 (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (10-4)$$

10.1.2 磁感应强度

在研究静电场时, 曾根据电荷 q_0 在电场中受力的性质, 引入了描述静电场性质的物理量——电场强度。与此类似, 可用运动电荷在磁场中受到的磁力来定义描述磁场力性质的物理量——磁感应强度。

根据洛伦兹力公式, 原则上可以设计以下实验步骤来确定空间任何一点 P 处磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的大小和方向。

(1) 将一检验电荷 q_0 置于运动电荷(或电流、永磁体)周围某点 P , 并保持静止, 测出这时它所受的力 $\mathbf{F}_e$ 。然后测出 q_0 以某一速度 $\mathbf{v}$ 通过 P 点时所受的力 $\mathbf{F}$, 由式(10-3)得出 $\mathbf{F}_m$ 。

(2) 令 q_0 沿其他不同方向运动通过 P 点, 重复上述方法测出 $\mathbf{F}_m$ 。这时可发现当 q_0 沿某一特定的方向(或反方向)运动时, 不受磁力, 如图 10.3(a)所示, 这一方向或它的反方向就定义为 $\mathbf{B}$ 的方向。

(3) q_0 沿其他不同方向运动时, 它所受的磁力 $\mathbf{F}_m$ 的方向总与上述 $\mathbf{B}$ 的方向垂直, 也与 q_0 的速度 $\mathbf{v}$ 的方向垂直。我们可以根据任一次 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{F}_m$ 的方向进一步规定 $\mathbf{B}$ 的指向, 使它满足式(10-3)所表示的矢量矢积关系的要求。

(4) 以 φ 表示 q_0 运动速度 $\mathbf{v}$ 的方向和 $\mathbf{B}$ 的方向的夹角, 可以发现, 磁力的大小 F_m 和 $qv \sin\varphi$ 这一乘积成正比, $\mathbf{B}$ 的大小为

$$B = \frac{F_m}{qv \sin\varphi}$$

若设 $\mathbf{F}_{\max}$ 为运动电荷所受的最大磁场力, 如图 10.3(b)所示, 则

$$B = \frac{F_{\max}}{qv} \quad (10-5)$$

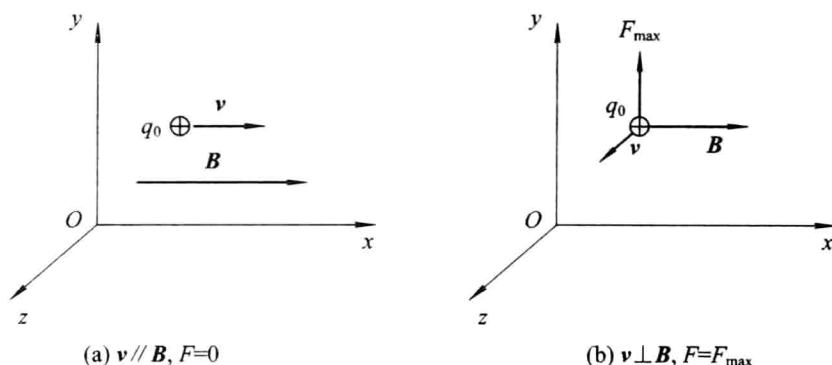


图 10.3 运动电荷在磁场中受到的磁力

这样就可以完全确定磁场中各处的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 。

运动电荷在磁场中受到磁场力为: $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 。

在国际单位制中,力的单位是牛顿(N),电流的单位是安培(A),长度单位是米(m),磁感应强度的单位是特斯拉(T)。在工程中常用高斯表示磁感应强度的单位,它与特斯拉的关系为: $1\text{T(特斯拉)} = 10^4\text{G(高斯)}$ 。

10.2 毕奥-萨伐尔定律及应用

1820年,丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应之后,同年10月毕奥(Biot)和萨伐尔(Savart)两人通过大量的实验,总结出电流在其周围产生磁场的基本规律。

10.2.1 电流元

通电导体中的电流在其周围产生磁场,电流对磁针的作用是横向力,而沿电流方向无作用力,垂直电流方向作用力最大。闭合导线中的电流是连续的,按微分思想,无限分割载流导线为电流元 $I\mathrm{d}\mathbf{l}$, 求出电流元 $I\mathrm{d}\mathbf{l}$ 产生的磁感应强度 $\mathrm{d}\mathbf{B}$, 以 $\mathbf{r}$ 表示从该电流元 $I\mathrm{d}\mathbf{l}$ 指向某一场点 P 的位矢(如图 10.4 所示), 通过积分可以得到总电流产生的空间各位置的磁感应强度。电流是标量, 电流元 $I\mathrm{d}\mathbf{l}$ 是矢量, $\mathrm{d}\mathbf{l}$ 是导线上的线元, 即导线中电流流过的方向。

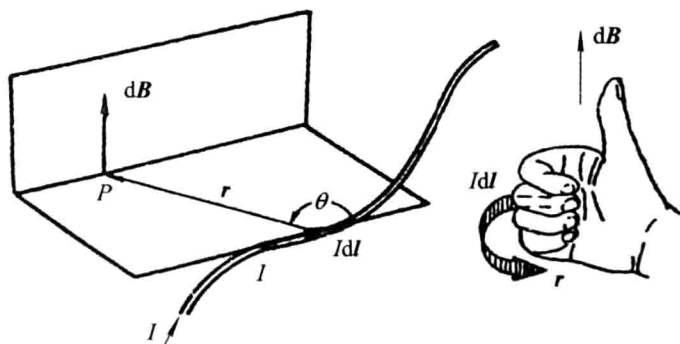


图 10.4 电流元产生磁场的规律

10.2.2 毕奥-萨伐尔定律

在毕奥和萨伐尔两人大量的实验基础上, 数学家拉普拉斯(Laplace)将他们的实验结果归纳为数学公式, 总结出电流元 $I d\mathbf{l}$ 产生磁场的基本规律: 毕奥-萨伐尔定律。

毕奥-萨伐尔定律: 电流元 $I d\mathbf{l}$ 在空间某点 P 产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的大小与 $I d\mathbf{l}$ 的大小成正比, 与 $I d\mathbf{l}$ 到 P 点处的位矢 $\mathbf{r}$ 之间夹角的正弦成正比, 而与 r^2 成反比, 即

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (10-6)$$

式中, μ_0 为真空中的磁导率, 其值为

$$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 C^2} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2 \quad (10-7)$$

$d\mathbf{B}$ 的方向垂直于电流元 $I d\mathbf{l}$ 与矢径 $\mathbf{r}$ 所组成的平面, 并沿 $I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}$ 的方向, 即遵守右手螺旋法则: 右手弯曲, 四指从 $I d\mathbf{l}$ 沿小于 π 的方向转向 $\mathbf{r}$ 时, 伸直的大拇指所指的方向就是 $d\mathbf{B}$ 的方向, 如图 10.4 所示。

10.2.3 磁感应强度叠加原理

磁感应强度叠加原理: 磁场中某点的总磁感应强度 $\mathbf{B}$ (或称磁感) 等于所有电流元 $I d\mathbf{l}$ 各自在该点产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的矢量和, 即

$$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (10-8)$$

毕奥-萨伐尔定律和磁感应强度叠加原理是在实验基础上总结出来的, 由于电流元不能单独存在, 因此不能由实验直接加以证明。但是由此定律出发得出的结论与实验结果相符, 这就间接地证明了该定律的正确性。

【例 10.1】 如图 10.5 所示, 求载流直导线在 P 点的磁感应强度 $\mathbf{B}_P$ 。

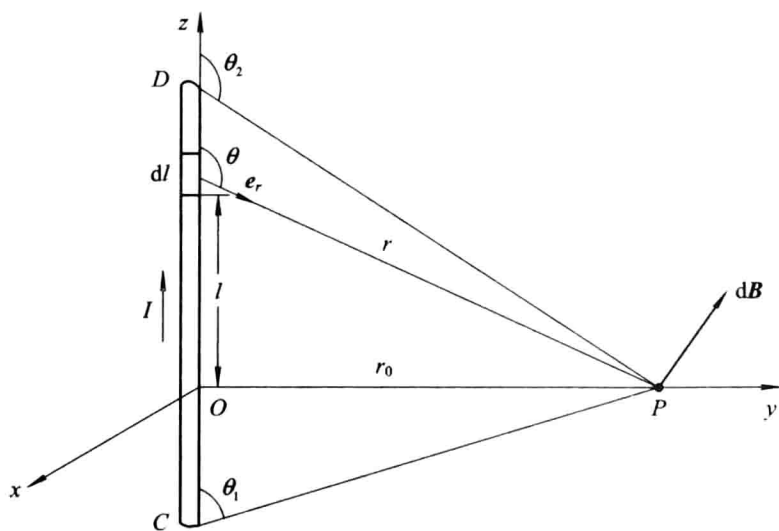


图 10.5 载流直导线的磁感应强度

【解】 式(10-8)中有两个变量 $d\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{r}$, 只有借助于几何和三角的知识, 才能进行积分, 求出 $\mathbf{B}_P$ 。

在直角三角形 DOP 中, $r_0 = r \sin(\pi - \theta)$, $r = \frac{r_0}{\sin\theta}$, $dl = d(-r_0 \cot\theta) = \frac{r_0 d\theta}{\sin^2\theta}$, 将 dl 和 r 变量转换为角度 θ 的变量, 由 $\frac{dl \times r}{r^3} = \frac{dlr \sin\theta}{r^3} e_r = \frac{\sin\theta d\theta}{r_0} e_r$ 和 $\int \sin\alpha d\alpha = -\cos\alpha$, 得

$$B_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{Idl \sin\theta}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (10-9)$$

下面进行具体讨论:

(1) 距离载流(I)直导线为 r 处 P 点的磁感应强度的大小为

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (10-10)$$

(2) 对于“无限长”直导线, $\theta_1 \rightarrow 0$, $\theta_2 \rightarrow \pi$, 则有

$$B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (10-11)$$

(3) 对于“半无限长”直导线, $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 \rightarrow \pi$, 则有

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

【例 10.2】 设 O 为载流圆线圈的圆心, R 为线圈半径, 如图 10.6 所示, 求线圈中心轴上与 O 距离为 x 的 P 点的磁感应强度 B 。

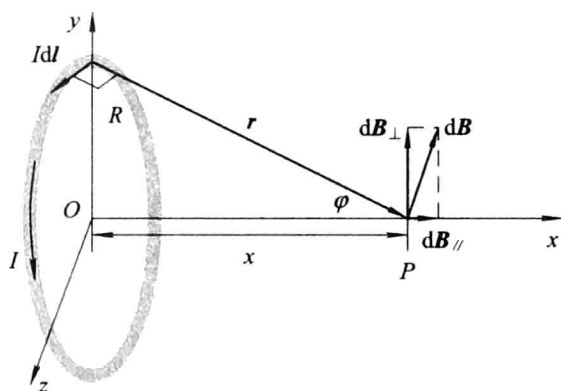


图 10.6 载流线圈轴线上的磁场

【解】 在线圈上任取一电流元 Idl , 由毕奥-萨伐尔定律可知, 它在 P 点处形成的磁感应强度大小为

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \sin\alpha}{r^2} = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2} \quad \left(\alpha = \frac{\pi}{2}\right)$$

由于载流圆线圈关于 x 轴对称, 所有的电流元产生的元磁场在 y 轴上的分量 $dB_{\perp}$ 相互抵消, 形成的磁感应强度实际上只是 x 轴上分量 $dB_{\parallel}$ 的叠加, 方向沿 x 轴正方向。

$$dB_{\parallel} = dB \sin\theta = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 IR dl}{4\pi r^3}$$

$$B = \oint dB = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \oint dl = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \times 2\pi R = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 IR^2}{2\sqrt{(R^2 + x^2)^3}}$$

所以, 载流圆线圈中心轴上距 O 点 x 处的磁感应强度的大小为

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

下面分几种情况进行讨论:

(1) 当 $x=0$ 时, O 点处的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (10-14)$$

(2) 当 $x \gg R$ 时, $R+x \approx R$, 则有

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2x^3} \quad (10-15)$$

(3) 当 $x=0$, $\frac{1}{n}$ 圆线圈在圆心处的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2nR} \quad (10-16)$$

【例 10.3】 载流螺线管的半径为 R , 总长度为 L , 单位长度内的匝数为 n , 如图 10.7 所示。求螺线管中心轴上任一点 P 的磁感应强度。

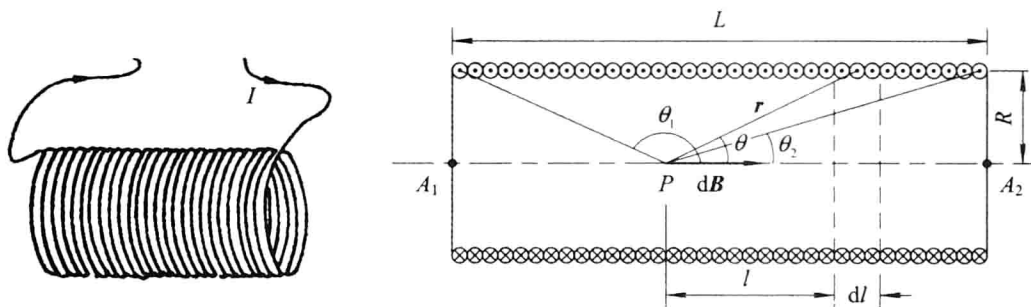


图 10.7 载流螺线管中的磁场

【解】 利用式(10-13)再积分, 按以下步骤解答此题。

(1) 载流圆线圈轴线上的磁场: $B_1 = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{\sqrt{(R^2 + l^2)^3}}$ 。

(2) $dB = n dl B_1$, $B = \frac{\mu_0}{2} \int_l \frac{R^2 I n dl}{\sqrt{(R^2 + l^2)^3}}$, $\frac{R^2}{R^2 + l^2} = \frac{1}{\csc^2 \theta}$ 。

(3) 将 dl 转换为 $d\theta$, 如图 10.7 所示, $l = R \tan \theta$, 则有

$$dl = R \csc^2 \theta d\theta$$

最后得

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)$$

磁感应强度的方向由右手螺旋法则确定。

下面讨论两种特殊情况:

(1) 无限长螺线管—— $L \rightarrow \infty$, $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = 0$, 则 $B = \mu_0 n I$, 即 B 的大小与 P 点在轴线上的位置无关, 轴线上各点的磁感应强度是均匀的。

(2) 半无限长螺线管端点处—— $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = 0$, $B = \frac{n \mu_0 I}{2}$, 即半无限长螺线管端点处 B 的大小比轴线上中点处减小一半。

10.2.4 运动电荷的磁场

我们知道,导体中的电流是由导体中大量自由电子作定向运动形成的,因此可以认为电流所激发的磁场其实是由运动电荷所激发的。运动电荷能激发起磁场已经为许多实验所证实。

至于运动电荷所建立的磁感应强度,可以由毕奥-萨伐尔定律求出。

有一电流元 Idl , 其截面积为 S , 设此电流元中单位体积内有 n 个定向运动的正电荷, 每个电荷均为 q , 且定向运动速度均为 v , 可知此电流元中的电流密度为 $J = nqv$, 故

$$Idl = J S dl = n S dl qv$$

于是, 根据毕奥-萨伐尔定律可以写出

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{n S dl qv \times e_r}{r^2}$$

其中, e_r 为矢量 r 的单位矢量, $Sdl = dV$ 为电流元的体积, $n dV = dN$ 为电流元中作定向运动的电荷数, 那么一个以速度 v 运动的电荷, 在距离它为 r 处所建立的磁感应强度为

$$B = \frac{dB}{dN} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times e_r}{r^2}$$

显然, B 的方向垂直于 v 和 r 所在的平面。

【例 10.4】 半径为 R 的带电薄圆盘的电荷面密度为 σ , 并以角速率 ω 绕通过盘心垂直于盘面的轴转动, 求圆盘中心处的磁感应强度。

【解法一】 设圆盘带正电荷, 绕轴逆时针旋转, 利用微元法, 在圆盘上取一半径从 r 到 $r + dr$ 的细圆环带, 此环带的电荷为 $dq = \sigma dS = \sigma 2\pi r dr$, 考虑到转盘以角速度 ω 旋转, 即转速为 $n = \frac{\omega}{2\pi}$, 于是此转动的环带相当的圆电流为

$$dI = n dq = \frac{\omega}{2\pi} \sigma 2\pi r dr = \sigma \omega r dr$$

由例 10.2 可知, 圆电流在圆心处的磁感应强度为 $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$, 因此圆盘上的环带在盘心处的磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0}{2r} dI = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{2} dr$$

于是整个圆盘转动时, 在盘心处的磁感应强度为

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{2} \int_0^R dr = \frac{\mu_0 \sigma \omega R}{2}$$

【解法二】 运动电荷产生的磁感应强度为

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

其中 $dq = \sigma 2\pi r dr$, $v = r\omega$, 代入上式, 可得

$$dB = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{2} dr$$

对上式积分可得到与解法一相同的结果。

10.3 磁场的高斯定理和安培环路定理

根据毕奥-萨伐尔定律表示的电流和它的磁场的关系,可以导出恒定电流磁场的两条基本规律——安培环路定理和高斯定理。

10.3.1 磁通量

1. 磁感应线

在研究电场时,曾经用电场线形象地描述电场的分布。同样,在研究磁场时,我们引入图 10.8 所示的磁感应线来形象地描绘磁场的分布。磁感应线有如下性质:

(1) 磁感应线上任一点的切线方向与该点磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 的方向一致。

(2) 磁感应线永远没有端点,无论磁场是由什么形状的导线激发的。

(3) 磁感应线是与激发磁场的电流相互套连的闭合线,磁感应线的绕行方向和电流流向形成右螺旋的关系。

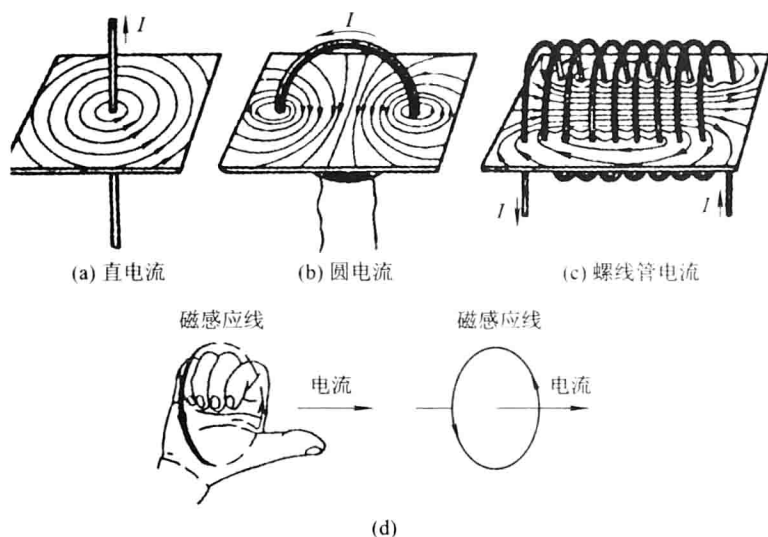


图 10.8 常见的磁感应线(图(a)、(b)、(c))及磁感应线和电流间的方向关系(图(d))

【说明】

图 10.8 中的磁感应线是人为引入的理想线。图 10.9 显示了磁粉在磁场作用下形成的线,它们与磁感应线吻合得很好。这说明,用磁感应线可以形象、直观、生动和真实地描述磁场的分布。

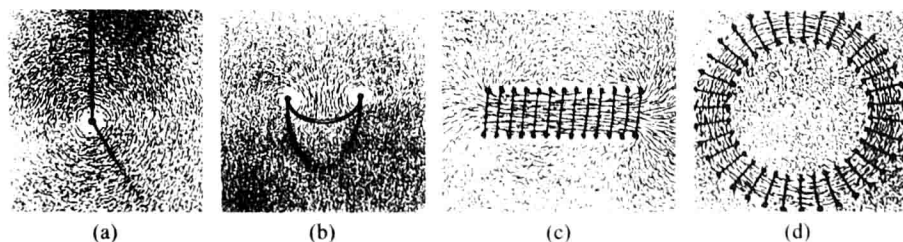


图 10.9 磁粉在磁场作用下形成的线