



普通高等教育基础课规划教材

大学物理

COLLEGE PHYSICS

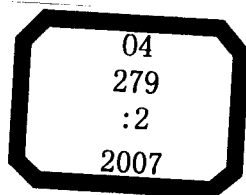
下册

许瑞珍 贾谊明 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





普通高等教育基础课规划教材

大学物理

下 册

许瑞珍 贾谊明 编著

吕团孙 主审



机械工业出版社

本书是福建师范大学教材建设基金资助项目,分上下两册,本书是下册。

本书是在深入调研了非物理类本科理工科各专业的大学物理教材情况、教改情况、培养模式、现代教学需求的基础上,融入编者长期从事大学物理教学的经验和体会编写而成的。本书充分考虑到学生理解和掌握物理基本概念和定律的实际需要,以及目前普通高校每年扩大招生的实际情况,尽量采用较基础的数学语言与基础理论来分析、推导物理原理、定理和引入物理定律,注重加强基本现象、概念、原理的阐述,讲述深入浅出;为了增强经典物理中的现代观点和气息,书中适度介绍了近代物理学的成就和新技术。精选的例题既注意避免应用到较繁、较深的数学理论,又能较好地配合理解核心内容。本书内容包括磁学、振动和波、光学、近代物理基础等。每章设有思考题和习题、阅读材料、相关著名物理学家简介。

本书是普通高校非物理专业理工科学生用教材,也可作为文科和高等职业学校相关专业学生的教材或中学物理教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/许瑞珍,贾谊明编著.一北京:机械工业出版社,2006.12

普通高等教育基础课规划教材

ISBN 7-111-20409-3

I. 大... II. ①许...②贾... III. 物理学-高等学校-教材
IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第140147号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:李永联 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.625印张·452千字

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是作者根据教育部最新的《重点高等学校物理课程教学改革指南》及教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2004 年《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》(正式报告稿)的精神,从培养 21 世纪工程技术人才在物理知识、能力和素质方面的要求这一目标出发,在对各种教学资源进行整合,并融入多年的教学经验,努力把握教材内容的难度、广度、深度的基础上编著而成的,以使其能更好地满足各类理工科非物理专业学生的使用。

本书为了做到实用、好用,加强了基本现象、基本概念、基本原理的阐述,且讲述深入浅出,增加了典型例题,并在部分例题后给出了相应的思考题,以拓展思路。每章后还围绕教学要求精选了数量和难度适中的思考题、习题。

为适应教学内容现代化的要求,本书在阐述经典物理的同时,渗透、穿插部分近、现代物理内容,如高新技术中的物理原理及最新的科技进展等,以增强教材的现代气息。

为落实能力与素质培养的要求,书中突出强调了“物理模型”的地位和作用,并相应安排了较多的相关插图,还在每章后面提供了适量的、与教材内容相关的阅读材料和相应著名物理学家的简介,以利于学生掌握科学方法,培养他们的创新精神,提高其综合素质和思维能力。

书中带“*”号的内容可根据各专业的实际课时酌情安排选用。

本书由许瑞珍、贾谊明编著。具体分工是:第 13、14、20 章由贾谊明(福建师范大学)编著;第 10~12、15~19 章由许瑞珍(福建师范大学)编著。全书由许瑞珍统稿。

本书由吕团孙教授主审。同时,福建师范大学物理与光电信息科技学院吕团孙、黄志高、李述华等多位教授,李山东、林秀敏等多位博士和老师们通过会议的形式对本书进行了讨论审阅,其间提出了许多宝贵的意见和建议,特在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了中国地质大学陈刚教授的大力支持和热心指导,也在此一并表示由衷的谢意。

由于编者的水平有限,书中的缺点和错误在所难免。衷心希望使用本书的老师、同学多提宝贵意见和建议。

编 者

2006 年 5 月

目 录

前言

第 10 章 稳恒磁场 1

10.1 磁场 磁感应强度	2
10.2 毕奥-萨伐尔定律 磁场 线	6
10.3 磁通量 磁场的高斯定 理	14
10.4 安培环路定理及其应 用	16
10.5 带电粒子在电磁场中的运 动	21
10.6 霍尔效应	30
10.7 载流导线在磁场中受的 力	32
思考题	39
习题	41
阅读材料	45
地磁场	45
物理学家简介	49
一、奥斯特	49
二、安培	49

第 11 章 磁场中的磁介质 51

11.1 磁介质 磁化强度	51
11.2 磁介质中的安培环路定理 磁场 强度	54
11.3 铁磁质	60
思考题	66
习题	66
阅读材料	67

一、磁表面存储器的读写原理简

介	67
---------	----

二、生物磁学 68

第 12 章 电磁感应 70

12.1 电磁感应及法拉第电磁感应 定律	70
12.2 动生电动势和感生电动 势	75
12.3 互感	88
12.4 自感	92
12.5 RL 电路的暂态过程	94
12.6 自感磁能 磁场的能量密 度	96
12.7 位移电流 电磁场基本方 程的积分形式	99
思考题	105
习题	107
阅读材料	110

一、汽车车速表——电磁感应原理的

应用	110
----------	-----

二、超导现象的发现和超导技术

的应用简介	111
-------------	-----

物理学家简介	113
--------------	-----

一、法拉第

二、麦克斯韦

第 13 章 振动 118

13.1 简谐振动动力学	118
13.2 简谐振动运动学	121
13.3 简谐振动的能量	125

13.4 简谐振动的合成	127	思考题	215
13.5 阻尼振动 受迫振动		习题	217
共振	133	阅读材料	219
思考题	136	一、激光技术简介	219
习题	137	二、全息照片的拍摄简介	220
阅读材料	138	物理学家简介	223
非线性振动	138	托马斯·杨	223
第 14 章 波动	144	第 17 章 光的衍射	225
14.1 波的基本概念	144	17.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	225
14.2 平面简谐波	147	17.2 单缝的夫琅禾费衍射	227
14.3 波的能量	151	17.3 圆孔衍射 光学仪器的分辨	233
14.4 惠更斯原理 波的衍射、反	154	率	238
射和折射	154	17.4 光栅衍射	248
14.5 波的叠加原理 波的干涉	156	17.5 X 射线衍射	251
驻波	163	思考题	252
14.6 声波 超声波 次声波	167	习题	254
14.7 多普勒效应	169	阅读材料	254
思考题	171	光导纤维	255
习题	171	物理学家简介	255
物理学家简介	173	一、惠更斯	257
一、多普勒	173	二、菲涅耳	258
二、马赫	173	三、伦琴	
第 15 章 电磁振荡和电磁波	175	第 18 章 光的偏振	259
15.1 LC 振荡电路 电磁振荡	175	18.1 光的偏振状态	259
15.2 电磁波的产生和辐射	177	18.2 偏振片 起偏与检偏	261
思考题	187	马吕斯定律	264
习题	187	18.3 反射光和折射光的偏振	265
阅读材料	188	18.4 光的双折射现象	272
物理学家简介	188	18.5 偏振光的干涉	277
赫兹	188	思考题	278
第 16 章 光的干涉	190	习题	279
16.1 相干光	191	阅读材料	279
16.2 光程	194	旋光现象	281
16.3 分波阵面法的干涉	196	第 19 章 狭义相对论基础	281
16.4 分振幅法的干涉	202	19.1 狭义相对论基本原理	281

19.2 洛伦兹坐标变换式	283	20.5 微观粒子的波动性	325
19.3 相对论速度变换公式	287	20.6 不确定关系	328
19.4 狭义相对论时空观	289	20.7 波函数 薛定谔方程	330
19.5 狭义相对论动力学基础	293	20.8 量子力学对氢原子的处 理	335
思考题	301	思考题	343
习题	302	习题	344
阅读材料	303	阅读材料	346
广义相对论简介	303	纳米科学技术与扫描隧道显 微镜	346
物理学家简介	307	物理学家简介	353
一、洛伦兹	307	一、卢瑟福	353
二、爱因斯坦	308	二、普朗克	353
第 20 章 量子物理基础	311	三、薛定谔	354
20.1 黑体辐射 普朗克能量子 假设	311	习题参考答案	355
20.2 光电效应	315	参考文献	365
20.3 康普顿效应	318		
20.4 氢原子的玻尔理论	320		

第10章 稳恒磁场

第9章讨论了恒定电流产生的条件及其基本规律。大家都已知道电流是电荷规则运动产生的，而运动电荷或者说电流有何基本特性呢？我们说，电荷运动时，在它周围除了产生电场外，还要产生磁场，可以说，磁现象的本质就是电荷的运动。本章首先简要介绍磁学发展史，分析磁现象的本质，然后讨论真空中恒定电流（或相对参考系以恒定速度运动的电荷）产生磁场的规律。

可以说人们发现磁现象要比发现电现象早得多。早在公元前数百年，古书籍中就有了磁石（ Fe_3O_4 ）能吸引铁的现象记述。我国东汉时期的王充就已经指出古代的“司南勺”是个指南器，并在11世纪的《武经总要》（成书于1044年）中叙述了制造指南针的方法。12世纪初，我国已经将指南针用于航海船上，而指南针传入欧洲则是12世纪末（1190年）的事情。

以前，人们虽然也曾经在自然现象中观察到闪电能使钢针磁化或使磁针退磁等电磁现象，但是却没能把电现象与磁现象联系起来。因此，长期以来，人们普遍认为电现象和磁现象是互不相关的。在电磁学发展史上，1820年是值得纪念的一年，这年电磁学取得的成就是辉煌的。那年4月，丹麦物理学家奥斯特（Hans Christian Oersted, 1777 - 1851）在一次实验中发现了在通电直导线附近的小磁针会偏转。不久，他又发现磁铁也可使通电导线发生偏转。奥斯特的电流与磁体间相互作用的实验于同年7月21日以论文形式发表后，在欧洲物理学界引起了极大的关注。随后，安培受奥斯特实验的启发，于同年9月18日进而发现圆电流与磁针有相似的作用，并于9月25日又报告了两平行通电直导线间和两圆电流间也都存在相互作用，还发现了直流电附近小磁针取向的右手定则，而所有这些都是在一个星期里完成的。这一年的12月，毕奥（J.B. Biot, 1774 - 1862）和萨伐尔（F. Severt, 1791 - 1841）（两人均为法国物理学家）发表了长直载流导线所激发的磁场正比于电流 I ，反比于至导线的垂直距离 r 的实验结果。虽然不久在这个实验的基础上拉普拉斯（Pierre Simon M. de Laplace, 1749 - 1827，法国数学家和天文学家）又从数学上找出了电流元磁场的公式，但由于主要的实验工作是毕奥和萨伐尔完成的，所以通常称该公式为毕奥-萨伐尔定律。法国物理学家关于电流磁效应的实验和理论研究成果传到了英国以后，英国同行备受鼓舞和启发。法拉第认为，既然“电能生磁”，那么“磁也应能生电”。于是从1821年开始，法拉第就从事“磁变电”的探索，他坚持不懈地致力于实验研究，终于在10年后的1831年8月发现了电磁感应现象，从而为现代电磁理论和

现代无线电、电工学的发展和应用奠定了基础。

本章讨论的主要内容有：描述磁场的物理量——磁感应强度 B ；电流激发磁场的规律——毕奥-萨代尔定律；反映磁场性质的基本定理——磁场的高斯定理和安培环路定理；磁场对运动电荷的作用力——洛伦兹力和磁场对电流的作用力——安培力。

10.1 磁场 磁感应强度

10.1.1 基本磁现象 安培假说

1. 几种基本磁现象

下面是几种基本磁现象，列举出来用以说明磁现象的本质。

1) 磁铁不但能吸引铁，而且还能吸引镍和钴，磁铁的这种性质称为磁性。把一根条形磁铁插入铁屑中然后取出，可以看见靠近条形磁铁的两端处吸引的铁屑最多，中间部分基本没有铁屑被吸引，这说明在靠近磁铁两端处磁性最强，中间部分基本没有磁性，磁性最强处称为**磁极**。如果把一根条形磁铁水平悬挂起来或把磁针支起来，使它能够在水平面内自由转动，那么，当条形磁铁或磁针静止时，它总是指向一定的方向，这个方向虽然因地区不同而稍有差异，但大约都是指向南北方向。将指向北方的磁极称为**北极**，用 N 表示，指向南方的磁极称为**南极**，用 S 表示。同性磁极相斥，异性磁极相吸（见图 10-1）。

2) 一可以在水平面内自由转动的磁针置于通电导线 AB 的下方，当电流沿 AB 方向通过时，如果我们从上向下看，磁针将沿顺时针方向转动，如果磁针放在 AB 的上面，则它沿反时针方向转动。当电流沿相反方向通过时，磁针也向相反方向转动。这个实验表明，**电流对磁铁有作用力**（见图 10-2）。

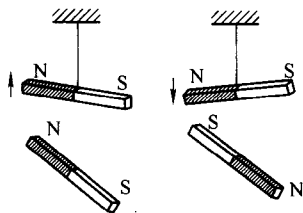


图 10-1 磁铁与磁铁相互作用

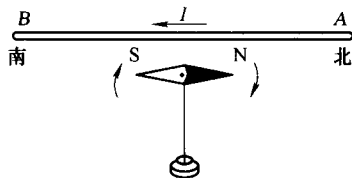


图 10-2 电流与磁针相互作用

3) 把一段直导线放在蹄形磁铁的两磁极之间，给它通以电流，当电流 I 通过时，导线受到力 F 的作用而运动，当电流沿相反方向通过时，导线的运动方向也随之改变（见图 10-3）。这表明，**磁铁对电流也有作用力**，即磁铁对运动电

荷有力的作用。在图 10-4 中, 没有磁铁时, 从阴极射线管的阴极射出的电子将沿直线运动, 如果放置磁铁, 电子就会发生偏转, 这说明**磁铁对运动电荷有作用力**。

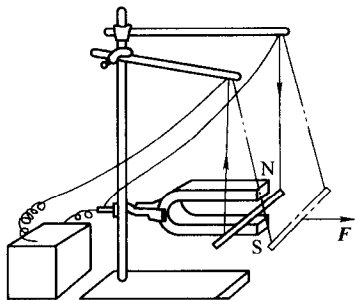


图 10-3 磁铁与电流相互作用

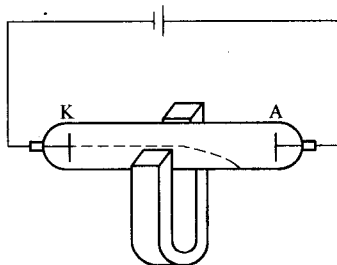
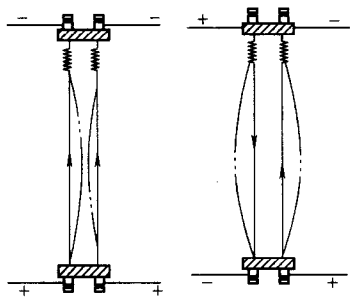
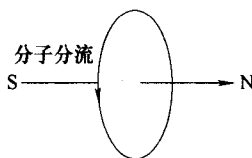


图 10-4 磁铁与运动电荷相互作用

4) 如图 10-5 所示, 在两根平行直导线中, 当通以方向相同的电流时, 两根导线相互吸引; 当通以方向相反的电流时, 两根导线相互排斥。电流与电流之间也有相互作用力, 也就是**运动电荷与运动电荷之间有力的相互作用**。

上述几种基本磁现象可以说都是由运动电荷产生的。

图 10-5 电流与电流
间相互作用图 10-6 一个分子电流相
当于一个基元磁铁

2. 安培假说

电流是电荷运动形成的, 磁铁与运动电荷的相互作用为何也说为运动电荷之间的相互作用呢? 为了说明物质的磁性, 1822 年安培提出了有关物质磁性的本质的假说, 他认为, 一切磁现象的根源是电流, 任何物体的分子中都存在着回路电流, 称为“分子电流”。一个“分子电流”相当于一个基元磁铁, 这基元磁铁的 N、S 极对应于“分子电流”的两个面, N、S 极与电流方向的关系如图 10-6 所示, 每一“分子电流”都要产生磁效应, 整个物体的磁效应就是所有“分子电流”对外界的磁效应的总和。当物体中所有“分子电流”的取向毫无规

则时它们的磁效应互相抵消，整个物体就不显示磁性；当物体受到磁铁或电流作用时，物体中的分子电流就比较有规则地排列，整个物体对外界就显示磁性，这时我们说物体被磁化了。如把一根没有磁性的铁钉放在磁铁上后，它也能吸引别的铁钉，这就是铁钉在磁铁作用下被磁化的结果。

理论和实验都证实安培假说与现代物质的电结构理论是相符合的。现在我们都清楚，分子中的电子除绕原子核运动外，本身还有自旋运动，原子核自身也同样作自旋运动，分子中这些微观带电粒子的回旋运动等效于一回路电流，即“分子电流”。

电流的磁现象是运动电荷产生的，从以上的分析可知，按照安培假说和现代理论，磁铁的磁现象也是运动电荷产生的。所以可以说，一切磁现象都是运动电荷产生的，磁现象的本质是电荷的运动。

10.1.2 磁场 磁感应强度

从静电场的讨论中我们已经知道，在静止电荷周围的空间存在着电场，静止电荷间的相互作用是通过电场来传递的。运动电荷周围的空间除了存在电场外，还存在磁场。电流间（即运动电荷间）的相互作用也是通过磁场来传递的。磁场是存在于运动电荷周围空间除电场以外的一种特殊物质，磁场对位于其中的运动电荷有力的作用。因此，运动电荷与运动电荷之间、电流与电流之间、电流（或运动电荷）与磁铁之间的相互作用，都可以看成是它们中任意一个所激发的磁场对另一个施加作用力的结果，其作用的形式为

$$\text{运动电荷} \longleftrightarrow \text{磁场} \longleftrightarrow \text{运动电荷}$$

回顾在静电学中，我们为了考查空间某处是否有电场存在，就在该处放一静止试验电荷 q_0 ，若 q_0 受到力 F 的作用，我们就可以说该处存在电场，并以电场强度 $E = F/q_0$ 来定量地描述该处的电场。与此类似，我们将从磁场对运动电荷的作用力，引出磁感应强度 B 来定量地描述磁场。但是，磁场作用在运动电荷上的力不仅与电荷的多少有关，而且还与电荷运动速度的大小及方向有关。所以，磁场作用在运动电荷上的力比电场作用在静止电荷上的力要复杂得多。因此，对 B 的定义比对 E 的定义也要烦琐些。下面我们从运动电荷在磁场力的作用下会发生偏转这一实验现象来进行分析讨论。

在图 10-7 所示的实验装置示意图中，1 与 2 为两组匝数较多的平行线圈。当两线圈内通以流向相同的电流时，在两线圈轴线中心附近的区域就可获得比较均匀的磁场（这种在局部区域产生均匀磁场的平行通电线圈称为亥姆霍兹线圈，下节内容将介绍），在均匀磁场间放置一个充有少量氩气的圆形玻璃泡，泡内有电子枪 M，可发射不同速率的电子束，而在电子束所经过的路径上，由于氩气被电离发出辉光，从而可显示出电子束的偏转情况。此外，玻璃泡也能绕水平

轴 OO' 旋转, 使电子的运动方向随之改变, 这样, 通过分析电子束的偏转情况就可知道电子所受磁场力的大小和方向了。

上面叙述的是电子束在磁场中运动的情况。对于带正电的运动电荷, 它们所受磁场力的方向与负电荷所受磁场力的方向相反。

从大量实验可得出如下实验结果:

1) 电荷 q 的速度 v 的方向与某一特定方向平行 (或反平行) 时, 电荷不受磁场力的作用, 电荷作匀速直线运动。

2) 电荷 q 的速度 v 与上述该特定方向垂直时, 电荷 q 所受的磁场力最大, 且磁场力的方向总是垂直于该特定方向与电荷速度 v 构成的平面, 磁场力的大小与电荷的速率及电荷量 q 成正比, 改变电荷 q 的符号, 则磁场力反向。

3) 电荷速度与上述该特定方向成任意夹角 θ 时, 磁场力以 $F = F_{\max} \sin \theta$ 的规律变化。

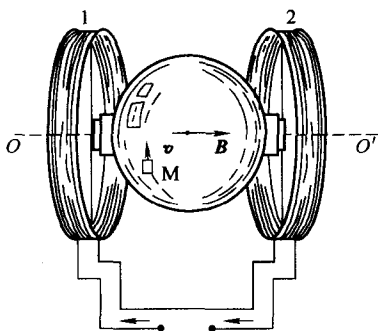


图 10-7 运动电荷在磁场中运动

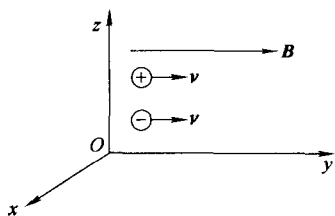


图 10-8 电荷的速度 v 平行于磁场 B , 不受磁场力

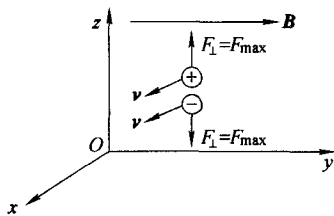


图 10-9 电荷的速度 v 垂直于磁场 B , 所受磁场力最大

总结以上实验结果, 可以定义磁感应强度 B 的方向和大小如下:

1) 当电荷 q 经过磁场中某处时不受磁场力作用 (即 $F=0$) 时, 该电荷的运动方向与该处磁感应强度 B 的方向平行, 如图 10-8 所示, B 的方向与置于此处的小磁针 N 极的指向一致。

2) 当正电荷 $+q$ 经过磁场中某点其速度 v 的方向与磁感应强度 B 的方向垂直时 (见图 10-9), 它所受的磁场力最大为 $F_{\max}$, 而 $F_{\max}$ 则与乘积 qv 成正比。对磁场中某一定点来说, 比值 $F_{\max}/qv$ 是一定的, 这种比值在磁场中不同位置处有不同的量值, 它如实地反映了磁场的空间分布。我们把这个比值规定为磁场中某点的磁感应强度 B 的大小, 即

$$B = \frac{F_{\perp}}{qv} = \frac{F_{\max}}{qv} \quad (10-1)$$

这就如同用 $E = F/q_0$ 来描述电场的强弱一样, 现在我们用 $B = F_{\max}/qv$ 来描述磁场的强弱。磁场力 F 既与运动电荷的速度 v 垂直, 又与磁感应强度 B 垂直, 且相互构成右手螺旋关系, 它们间的矢量关系式可写成

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (10-2)$$

由式 (10-1) 可知磁感强度 B 的单位。在国际单位制中, B 的单位便是 T ($\text{N}\cdot\text{s}/(\text{C}\cdot\text{m})$), 称为特斯拉 (Nikola Tesla, 1856—1943, 美籍南斯拉夫电气工程师。他于 1888 年设计出旋转磁场, 并于 1889~1890 年制成交流发电机, 此后还研制成多相发电机、电动机、变压器以及输变电系统, 为人类广泛而安全地进入电气时代作出了杰出贡献。为此, 磁感应强度以他的姓氏命名)。表 10-1 列出了一些自然界中磁场的近似值。

表 10-1 自然界中一些磁场的磁感应强度近似值

地球赤道附近	$3 \times 10^{-5} \text{T}$	人体磁场	10^{-12}T
地球两极附近	$6 \times 10^{-5} \text{T}$	超导电磁铁	$5 \sim 40 \text{T}$
太阳在地球轨道上的磁场	$3 \times 10^{-9} \text{T}$	大型电磁铁	$1 \sim 2 \text{T}$

顺便指出, 如果磁场中某一区域内各点的磁感应强度 B 都相同, 即该区域内各点 B 的方向一致, 大小相等, 那么, 该区域内的磁场就叫做均匀磁场, 否则就是非均匀磁场。长直密绕螺线管中部的磁场就是常见的均匀磁场。

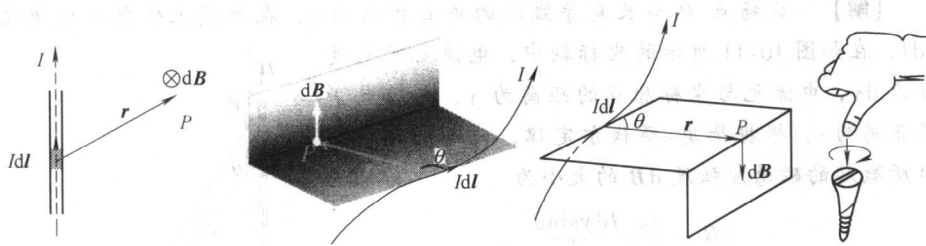
10.2 毕奥-萨伐尔定律 磁场线

这一节我们将介绍恒定电流激发磁场的规律。恒定电流的磁场亦称为静磁场或稳恒磁场。在静磁场中, 任意一点的磁感应强度 B 仅是空间坐标的函数, 与时间无关。

10.2.1 毕奥-萨伐尔定律

在静电场中, 当要计算任意带电体在某点的电场强度 E 时, 是把带电体先分成无限多个电荷元 dq , 先分析每个电荷元在该点的电场强度 dE , 而所有电荷元在该点的 dE 的叠加, 即为此带电体在该点的电场强度 E 。将这一思路迁移, 对于载流导线来说, 我们首先定义电流元, 就是把流过某一矢量线元 $d\mathbf{l}$ 的电流 I 与 $d\mathbf{l}$ 的乘积 $I d\mathbf{l}$ 作为电流元, 电流元中电流的流向就是线元矢量的方向。那么, 我们就可以把整条载流导线看成是由无数多个电流元 $I d\mathbf{l}$ 连接而成的。这样, 载流导线在磁场中某点所激发的磁感应强度 B , 就是由这导线的所有电流元 $I d\mathbf{l}$ 在该点激起的 $d\mathbf{B}$ 的叠加。电流元 $I d\mathbf{l}$ 所激发的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的规律就是毕奥-萨伐尔定律, 下面我们将作进一步讨论。

如图 10-10 所示, 载流导线上的任意电流元 $I d\mathbf{l}$ 在真空中某点 P 处的磁感应

图 10-10 电流元 Idl 在 P 点产生的磁场 $d\mathbf{B}$

强度 $d\mathbf{B}$ 的大小与电流元的大小 Idl 成正比, 与电流元 Idl 到点 P 的矢径 $\mathbf{r}$ 间的夹角 θ 的正弦成正比, 并与电流元到点 P 的距离 r 的二次方成反比, 即

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \mathbf{e}_r}{r^2} \quad (10-3)$$

式中, $\mu_0/4\pi$ 为比例系数, 它的大小和单位取决于磁场中的磁介质和所选用的单位制。对于真空中的磁场, 如果式中各物理量均采用国际单位制, μ_0 叫做真空磁导率, 其值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。 $d\mathbf{B}$ 的方向垂直于 $d\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{r}$ 所组成的平面, 并沿矢积 $d\mathbf{l} \times \mathbf{r}$ 的方向, 即由 Idl 经小于 180° 的角转向 $\mathbf{r}$ 时的右螺旋前进方向, 如图 10-4 所示。式 (10-3) 就是毕奥-萨伐尔定律。这样, 任意长为 L 的载流导线在空间任意点 P 处的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 就可以由式 (10-3) 积分而得, 即

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

毕奥-萨伐尔定律是以毕奥和萨伐尔的实验为基础, 又由拉普拉斯经过数学理论得到证实的, 所以有的书也将该定律称为毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律, 本书采用比较通用的名称, 即毕奥-萨伐尔定律。

10.2.2 磁场线

在第七章中, 为了形象地描绘静电场, 我们引入了电场线。同样地, 为了对磁场有整体的了解, 仿效电场线的方法引入磁场线来描绘磁场。在磁场中画出一系列曲线, 这些曲线上任一点的切线方向都和该点的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的方向一致, 这些曲线就称为磁场线。当然, 磁场线也是用来描绘磁场的一种假想曲线, 和电场线不同, 磁场线一定是闭合曲线。

下面应用毕奥-萨伐尔定律来讨论几种载流导线所激发的磁场及电流和磁场线的回旋关系。

10.2.3 毕奥-萨伐尔定律的应用举例

【例 10-1】 求真空中长为 L 、通有电流 I 的直导线的磁场。

【解】 设场点 P 与长直导线间的垂直距离为 x ，在导线上任取一电流元 Idl ，在如图 10-11 所示的坐标轴中，电流元的长度即为 dy ，电流元与坐标原点的距离为 y ，与场点 P 的距离为 r ，根据毕奥-萨伐尔定律，此电流元在点 P 所激起的磁感应强度 dB 的大小为

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

因为 $y = x \cot(\pi - \theta) = -x \cot\theta$ ，所以 $dy = \frac{x d\theta}{\sin^2\theta}$ ， $r =$

$$\frac{x}{\sin(\pi - \theta)} = \frac{x}{\sin\theta}$$

将上面 dy 、 r 的表达式代入 dB 中得

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \sin\theta d\theta$$

积分得整条载流导线在 P 点产生的总磁感应强度为

$$\begin{aligned} B &= \int_l dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi x} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \end{aligned} \quad (10-5)$$

磁感应强度 B 的方向垂直纸面向内（见图 10-11）。

式 (10-5) 是有限长的载有电流 I 的导线产生的磁场分布式，式中 x 是场点与载流导线的垂直距离。

思考：边长为 a 的正方形回路，载有顺时针流动的电流 I ，回路几何中心处的磁感应强度为多少？方向如何？

如果载流直导线可视为一“无限长”直导线，那么，式 (10-5) 中 $\theta_1 = 0$ ， $\theta_2 = \pi$ 可得

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (10-6)$$

式 (10-6) 是无限长载有电流 I 的导线产生的磁场的分布式，它表明，其磁感应强度与电流 I 成正比，与场点到导线的垂直距离 x 成反比。无限长载流导线产生磁场的磁场线如图 10-12 所示。

上图 10-12a 是用铁屑显示的磁场线，图 10-12b 铁屑磁化后看成为小磁针显示的磁场线，图 10-12c 表示电流和磁场线满足右手螺旋关系。

【例 10-2】 求真空中半径为 R 、载有电流 I 的圆形导线的轴线（通过圆电流中心 O ，垂直圆平面）上任意点的磁场。

【解】 设场点 P 与长直导线间的垂直距离为 x ，在导线上任取一电流元

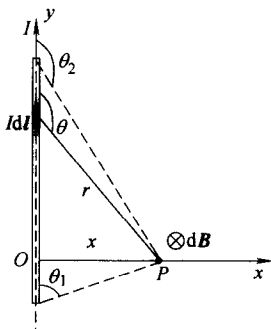


图 10-11 例 10-1 图

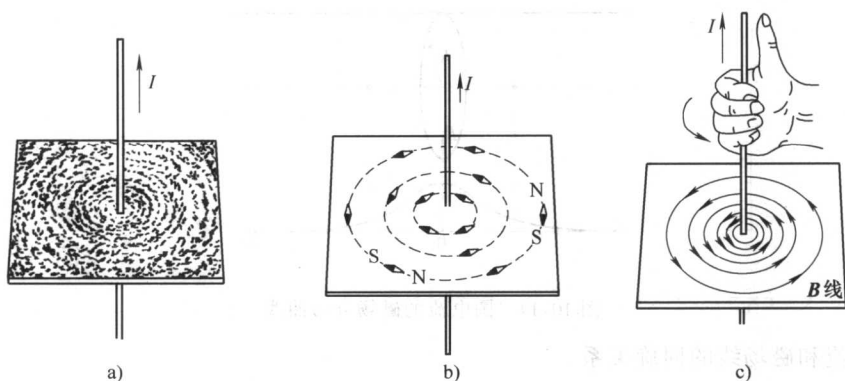


图 10-12 无限长载流导线产生磁场的磁场线

Idl , 如图 10-13 所示的坐标轴, 电流元的长度即为 dl , 电流元与坐标原点的距离为 R , 与场点 P 的距离为 r , 根据毕奥-萨伐尔定律, 此电流元在点 P 所激起的磁感应强度 dB 的大小为

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

圆电流上各个电流元 Idl 在 P 点产生的磁感应强度 dB 应分布在以 P 点为顶点的圆锥面上。由对称性分析可知, 圆电流上的所有电流元产生的各个 dB 在垂直于 x 轴方向的所有分量逐一抵消, 只存在沿着 x 轴方向的分量。对整个圆电流积分可得轴线上任意点 P 的磁感应强度为

$$\begin{aligned} B &= \int dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \cos\alpha}{r^2} \\ &= \frac{\mu_0 I \cos\alpha}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi R} dl \\ &= \frac{\mu_0 IR^2}{2r^2} = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (10-7) \end{aligned}$$

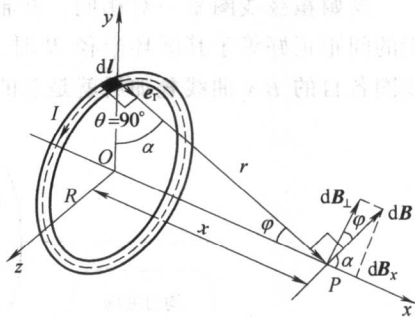


图 10-13 例 10-2 图

磁场的分布如图 10-4 所示。在 O 点, $x = 0$, 圆心处磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (10-8)$$

如果有 N 匝密绕的圆电流, 则圆心处磁感应强度的大小为

$$B = \frac{N\mu_0 I}{2R}$$

圆电流产生磁场的磁场线如图 10-15 所示。左图是用铁屑显示的磁场线, 右图表

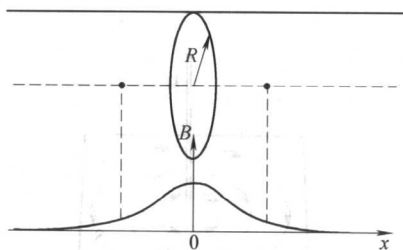


图 10-14 圆电流的磁场分布曲线

示电流和磁场线的回旋关系。

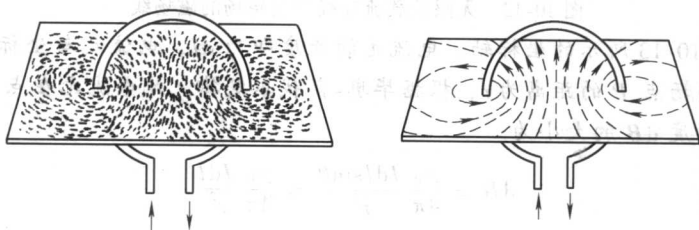
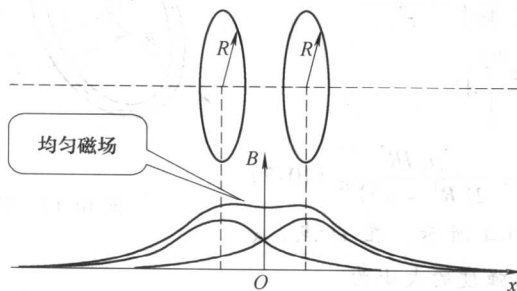


图 10-15 圆电流产生磁场的磁场线

亥姆霍兹线圈是一对相同、共轴、彼此平行、各有 N 匝的圆环电流。当它们的间距正好等于其圆环半径 R 时，称这对圆线圈为亥姆霍兹线圈。亥姆霍兹线圈各自的 $B-x$ 曲线叠加后就是总的 $B-x$ 曲线，如图 10-16 所示。

图 10-16 亥姆霍兹线圈的 $B-x$ 曲线

【例 10-3】 求真空中半径为 R 、总长度为 L 、单位长度上的匝数为 n 、线圈中通有电流 I 的密绕螺线管内轴线上任一点的磁感应强度。

【解】 由于直螺线管上线圈是密绕的，所以每匝线圈可近似当作是闭合的圆形电流。于是，轴线上任意点 P 处的磁感应强度 B 可以认为是 N 个圆电流在