

高等学校教材

物理学原理 简明教程

下册

A concise course
for principle
of Physics

许丽萍 魏天杰 主编

高等学校教材

物理学原理 简明教程

下册

Wulixue Yuanli Jianming Jiaocheng

许丽萍 魏天杰 主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本教材根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)而编写。全书分为上、下两册。上册内容包括:第一篇 力学;第二篇 振动与波;第三篇 热学;第四篇 电磁学(电学部分)。下册内容包括:第四篇 电磁学(磁学部分及电磁场理论);第五篇 波动光学;第六篇 近代物理学。

本书可作为高等学校工科各专业的大学物理课程教材,也可供理科非物理专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

物理学原理简明教程. 下册/许丽萍, 魏天杰主编.
—北京: 高等教育出版社, 2013. 2
ISBN 978 - 7 - 04 - 036847 - 5

I. ①物… II. ①许…②魏… 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(2013)第 009043 号

策划编辑 马天魁
插图绘制 尹 莉

责任编辑 马天魁
责任校对 刘丽娟

封面设计 于 涛
责任印制 刘思涵

版式设计 余 杨

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 唐山市润丰印务有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 15.5
字 数 260 千字
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013 年 2 月第 1 版
印 次 2013 年 2 月第 1 次印刷
定 价 21.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 36847 - 00

常用物理量和单位

物理量		单位	
名称	符号	名称	符号
电 流	I	安培	A
电 流 密 度	j	安培每平方米	$A \cdot m^{-2}$
电 阻	R	欧 姆	Ω
电 阻 率	ρ	欧 姆 米	$\Omega \cdot m$
电 动 势	$\mathcal{E}$	伏 特	V
磁 感 强 度	B	特 斯 拉	T
磁 矩	m	安培平方米	$A \cdot m^2$
磁 化 强 度	M	安培每米	$A \cdot m^{-1}$
磁 化 率	χ_m	—	1
磁 导 率	μ	亨利每米	$H \cdot m^{-1}$
真空磁导率	μ_0	亨利每米	$H \cdot m^{-1}$
相对磁导率	μ_r	—	1
磁 场 强 度	H	安培每米	$A \cdot m^{-1}$
磁 通 量	Φ	韦 伯	Wb
自感系数	L	亨 利	H
互感系数	M	亨 利	H
磁 场 能 量	W_m	焦 耳	J
磁场能量密度	w_m	焦耳每立方米	$J \cdot m^{-3}$
位移电流	I_d	安培	A
波 长	λ	米	m
频 率	ν	赫 兹	Hz
角 频 率	ω	弧度每秒	$rad \cdot s^{-1}$
光 速	c	米每秒	$m \cdot s^{-1}$
折 射 率	n	—	1
光程差	δ	米	m

续表

物理量		单位	
名称	符号	名称	符号
辐出度	M	瓦特每平方米	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
单色辐出度	M_λ	瓦特每立方米	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$
斯特潘 - 玻耳兹曼常量	σ	瓦特每平方米 每四次方开尔文	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
维恩常量	b	米开尔文	$\text{m} \cdot \text{K}$
普朗克常量	h	焦耳秒	$\text{J} \cdot \text{s}$
原子序数	Z	—	1
中子数	N	—	1
核子数	A	—	1
电子静质量	m_e	千克	kg
质子静质量	m_p	千克	kg
中子静质量	m_n	千克	kg
元电荷	e	库仑	C
里德伯常量	R	每米	m^{-1}
轨道角动量量子数	l	—	1
自旋角动量量子数	m_s	—	1
主量子数	n	—	1
轨道角动量磁量子数	m_l	—	1
波函数	ψ	—	1

基本物理常量

物理量	符号	数值	单位	相对标准不确定度
光速	c	299 792 458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	精确
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	精确
		$= 12.566\,370\,614\cdots \times 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	精确
真空电容率	ε_0	$8.854\,187\,817\cdots \times 10^{-12}$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	精确
引力常量	G	$6.673\,84(80) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	1.2×10^{-4}
普朗克常量	h	$6.626\,069\,57(29) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	4.4×10^{-8}
约化普朗克常量	$\hbar/2\pi$	$1.054\,571\,726(47) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	4.4×10^{-8}
元电荷	e	$1.602\,176\,565(35) \times 10^{-19}$	C	2.2×10^{-8}
电子静质量	m_e	$9.109\,382\,91(40) \times 10^{-31}$	kg	4.4×10^{-8}
质子静质量	m_p	$1.672\,621\,777(74) \times 10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}
中子静质量	m_n	$1.674\,927\,351(74) \times 10^{-27}$	kg	4.4×10^{-8}
精细结构常数	α	$7.297\,352\,569\,8(24) \times 10^{-3}$		3.2×10^{-10}
里德伯常量	R_∞	$10\,973\,731.568\,539(55)$	m^{-1}	5.0×10^{-12}
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.022\,141\,29(27) \times 10^{23}$	mol^{-1}	4.4×10^{-8}
法拉第常量	F	$96\,485.336\,5(21)$	$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$	2.2×10^{-8}
摩尔气体常量	R	$8.314\,462\,1(75)$	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	9.1×10^{-7}
玻耳兹曼常量	k	$1.380\,648\,8(13) \times 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	9.1×10^{-7}
斯特藩-玻耳兹曼常量	σ	$5.670\,373(21) \times 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	3.6×10^{-6}
气体摩尔体积	V_m	$22.413\,968(20) \times 10^{-3}$	$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	9.1×10^{-7}

注:表中数据为国际科学联合会理事会科学技术数据委员会(CODATA)2010年国际推荐值。

目 录

第四篇 电磁学(磁学部分及电磁场理论)

第 12 章 恒定磁场	3	13.1.3 法拉第电磁感定律	37
12.1 基本磁现象	3	13.1.4 感应电动势的正负	38
12.2 磁场 磁感应强度	4	13.1.5 其他相关问题	38
12.3 毕奥 - 萨伐尔定律	6	13.2 在磁场中运动的导体内的感应 电动势——动生电动势	40
12.3.1 毕奥 - 萨伐尔定律	6	13.2.1 动生电动势	40
12.3.2 应用	7	13.2.2 用洛伦兹力解释动生 电动势	40
12.4 运动电荷的磁场	10	13.2.3 计算动生电动势的公式	41
12.5 磁场的高斯定理	11	* 13.2.4 洛伦兹力不做功	41
12.5.1 磁感应线	11	13.3 感生电动势与感生电场	44
12.5.2 磁通量	12	13.3.1 问题的提出	44
12.5.3 磁场的高斯定理	13	13.3.2 感生电场与感生电动势	45
12.6 安培环路定理	13	13.3.3 电子感应加速器	47
12.6.1 安培环路定理	13	13.4 涡电流	48
12.6.2 安培环路定理的应用	15	13.4.1 涡电流	48
12.7 带电粒子在磁场中的运动	18	13.4.2 涡电流的有效利用	48
12.7.1 带电粒子在均匀磁场中的运动 规律	18	13.5 自感应和自感系数	51
12.7.2 应用	20	13.5.1 自感现象	51
12.8 载流导线在磁场中的受力	24	13.5.2 自感系数与自感 电动势	51
12.8.1 载流导线在磁场中的受力 安培定律	24	13.6 互感应和互感现象	53
12.8.2 电流单位安培的定义	25	13.6.1 互感现象	53
12.8.3 闭合载流线圈在均匀磁场中 受力、力矩及其应用	26	13.6.2 互感系数与互感电动势	53
思考题	30	13.7 磁场的能量	56
习题	30	13.7.1 自感磁能	56
第 13 章 电磁感应	35	13.7.2 磁能密度	57
13.1 法拉第电磁感应定律	35	13.7.3 互感磁能	59
13.1.1 电磁感应现象	35	思考题	60
13.1.2 楞次定律	36	习题	60

II 目录

第 14 章 物质的磁性	64	习题	75
14.1 磁介质的分类与磁介质的 磁化	64	第 15 章 麦克斯韦方程组 电磁场与 电磁波	78
14.1.1 磁介质及其磁化	64	15.1 麦克斯韦电磁场理论	78
14.1.2 磁介质的分类	64	15.1.1 涡旋电场假说	78
14.2 磁化强度 磁化电流	66	15.1.2 位移电流假说	79
14.2.1 分子磁矩	66	15.1.3 麦克斯韦-安培环路 定理	81
14.2.2 附加磁矩 Δm	66	15.2 麦克斯韦方程组	82
14.2.3 磁化强度	67	15.2.1 普遍情况下的高斯定理	82
14.2.4 磁化电流	67	15.2.2 麦克斯韦方程组	83
14.3 有介质存在时的安培环路 定理	68	* 15.2.3 电磁场的边界条件	84
14.3.1 磁场强度 有介质存在时的 安培环路定理	68	15.3 电磁场与电磁波	84
14.3.2 磁场强度、磁感应强度、磁化 强度之间的关系	69	15.3.1 电磁场与电磁波	84
14.4 铁磁质	69	15.3.2 电磁振荡 无阻尼自由电磁 振荡方程	85
14.4.1 铁磁质的磁化规律—— 磁滞回线	70	15.3.3 电磁辐射	87
14.4.2 铁磁质的分类	71	15.3.4 平面电磁波	89
14.4.3 铁磁质的磁化机理	72	15.3.5 电磁场的能量 坡印亭 矢量	89
14.4.4 2007 年诺贝尔物理学奖 简介	73	15.4 赫兹实验 电磁波谱	92
14.4.5 地磁场	74	15.4.1 赫兹实验	92
思考题	75	15.4.2 电磁波谱	93
		思考题	94
		习题	94

第五篇 波动光学

引言	100	16.3.2 菲涅耳双面镜实验	107
第 16 章 光的干涉	101	16.3.3 劳埃德镜实验	107
16.1 光是电磁波 光源	101	16.4 薄膜干涉	107
16.1.1 光的电磁特性	101	16.4.1 平行薄膜的干涉	108
16.1.2 光源	102	16.4.2 薄膜干涉的应用 增透膜和 增反膜	109
16.2 光的相干性 光程	102	16.5 劈尖干涉 牛顿环	112
16.2.1 相干光	102	16.5.1 劈尖干涉	112
16.2.2 光程与光程差	103	16.5.2 牛顿环	114
16.2.3 相干光的获得	104	16.6 迈克耳孙干涉仪	115
16.3 杨氏双缝实验	104	16.6.1 干涉仪结构及分析	116
16.3.1 杨氏双缝实验	105		

16.6.2 干涉图样的讨论	116	17.6.3 布拉格方程	135
16.6.3 迈克耳孙干涉仪的应用 ...	118	思考题	135
思考题	119	习题	136
习题	119	第 18 章 光的偏振	139
第 17 章 光的衍射	123	18.1 光的偏振态 起偏与检偏	139
17.1 光的衍射现象	123	18.1.1 光的偏振态	139
17.2 惠更斯-菲涅耳原理	123	18.1.2 起偏与检偏	140
17.2.1 惠更斯-菲涅耳原理	123	18.2 马吕斯定律	140
17.2.2 菲涅耳衍射和夫琅禾费 衍射	124	18.3 反射和折射时光的偏振	142
17.3 单缝的夫琅禾费衍射	125	18.3.1 反射起偏 布儒斯特 定律	142
17.3.1 衍射装置和现象	125	18.3.2 折射起偏 玻璃堆	143
17.3.2 单缝衍射图样分析	125	18.4 光的双折射	144
17.3.3 分析与讨论	126	18.4.1 双折射现象	144
17.4 圆孔的夫琅禾费衍射 光学仪器 分辨率	128	18.4.2 晶体的有关概念	144
17.5 光栅衍射	130	*18.4.3 惠更斯原理在双折射中的 应用	145
17.5.1 光栅	130	18.4.4 晶体双折射应用	146
17.5.2 光栅衍射条纹的形成	131	18.5 偏振光的干涉及应用	147
17.5.3 光栅衍射的讨论	132	18.5.1 波片	147
17.6 X 射线的衍射	134	*18.5.2 偏振光的干涉及应用	148
17.6.1 X 射线	134	思考题	149
17.6.2 劳厄实验	135	习题	150

第六篇 近代物理学

引言	154	19.3.3 洛伦兹变换	162
第 19 章 狭义相对论	155	19.3.4 洛伦兹速度变换	163
19.1 相对性原理	155	19.4 狭义相对论时空观	163
19.1.1 牛顿力学满足相对性 原理	155	19.4.1 时间延缓	164
19.1.2 伽利略变换	156	19.4.2 长度收缩	165
19.1.3 电磁学规律“不”满足 相对性原理	157	19.4.3 同时性的相对性	166
19.2 迈克耳孙-莫雷实验	159	19.4.4 一般情形下的时空	167
19.3 狭义相对论的基本原理 洛伦兹 变换式	160	19.5 相对论动力学	167
19.3.1 物理学面临的困境	160	19.5.1 相对论的动量、质量	167
19.3.2 狭义相对论的基本原理 ...	161	19.5.2 狭义相对论力学的基本 方程	168
		19.5.3 质量与能量的关系	169
		19.5.4 动量与能量的关系	170

IV 目录

19.6 质能相当关系在核物理方面的应用	170	20.6.2 玻尔氢原子理论	199
19.6.1 原子核的结合能	170	20.6.3 玻尔理论的局限和意义 ...	201
19.6.2 重核裂变	172	20.7 弗兰克-赫兹实验	201
19.6.3 热核聚变	173	思考题	202
思考题	174	习题	203
习题	175	第 21 章 量子物理学基础	206
第 20 章 光的量子性	178	21.1 德布罗意波 实物粒子的波粒二象性	206
20.1 热辐射	178	21.1.1 德布罗意假说	206
20.1.1 热辐射现象	178	21.1.2 德布罗意波的实验证实 ...	208
20.1.2 绝对黑体 基尔霍夫辐射定律	179	21.1.3 电子波动性的实际应用 ...	208
20.2 黑体辐射实验及理论困难 普朗克的能量量子假设	180	21.2 海森伯不确定关系	210
20.2.1 黑体辐射实验定律	180	21.3 波函数及其统计学诠释 薛定谔方程	214
20.2.2 经典理论对黑体辐射的解释	181	21.3.1 物质波波函数及其统计学诠释	214
20.2.3 普朗克的能量量子假说 普朗克黑体辐射公式	182	21.3.2 薛定谔方程	215
20.3 光电效应	184	21.4 一维定态薛定谔方程的应用 ...	218
20.3.1 光电效应的实验规律	184	21.4.1 一维无限深势阱问题	219
20.3.2 爱因斯坦的光子假说与光电效应的解释	186	21.4.2 一维势垒 隧道效应	220
20.3.3 光的波粒二象性	188	21.5 氢原子结构	223
20.4 康普顿效应	189	21.5.1 氢原子的薛定谔方程	223
20.4.1 实验现象	189	21.5.2 三个量子数	224
20.4.2 康普顿效应的理论解释 ...	190	21.6 空间量子化的进一步讨论: 空间量子化实验验证 施特恩-格拉赫实验	228
20.5 原子概念发展的历史 原子结构	191	21.6.1 电子的轨道磁矩	228
20.5.1 早期的原子理论	191	21.6.2 空间量子化的表现	229
20.5.2 支持原子理论的实验证据	192	21.6.3 施特恩-格拉赫实验	230
20.5.3 物质的原子结构	194	21.7 电子的自旋 原子的壳层结构	231
20.5.4 卢瑟福原子模型	195	21.7.1 电子自旋	231
20.6 玻尔氢原子理论	196	21.7.2 原子的壳层结构	232
20.6.1 原子光谱及其规律	196	21.7.3 能量最低原理	233
		思考题	234
		习题	235

第四篇 电磁学（磁学部分及电磁场理论）

第12章 恒定磁场

本章主要研究由恒定电流产生的磁场、恒定磁场的性质、磁场对电流和运动电荷的作用等。

磁感应强度是描述磁场性质的物理量。毕奥-萨伐尔定律给出了由任意电流分布计算磁感应强度的理论。磁感应线具有不同于电场线的显著特点,这反映在磁场的高斯定理与安培环路定理中。

磁场对运动电荷的作用(洛伦兹力)以及磁场对载流导线的作用(安培力)是很多实际应用的理论基础。

12.1 基本磁现象

天然磁现象远在春秋战国时期即为中国人所发现。“司南勺”是公认的世界上最早的指南器具。指南针作为四大发明之一,更是作为中国古代文明的标志,而令国人骄傲。其他的文明古国,如古代印度、希腊等,对磁现象也有文字记载。

真正对磁现象进行科学方面的探索和研究,始于13世纪的欧洲。人们发现任何磁铁都存在南北两极:一个悬于空中的磁铁,南极总是指向地球的南极,北极指向地球的北极。1600年,吉尔伯特研究了不同物质的磁性,根据磁针总是指向地球南北极这一现象,他提出地球本身就是一个大的永久磁体。两块磁铁的相同极总是相互排斥的,而相异极是相互吸引的;测量磁铁相互作用力的大小,发现作用力与它们的距离平方成反比关系,这一点与电荷的相互作用相似。电荷总是可以分为独立的正负电荷,但是磁极是无法分离的。不论将磁铁如何分割,南北极总是成对出现的。

以上磁现象的研究与电学现象很相似,但两者的研究也一直是各自独立进行的。1819年,丹麦物理学家奥斯特(图12-1)的一项研究引起科学界的轰动。他发现载流导线能够像磁铁一样引起附近的磁针发生偏转,使得人们第一次认识到磁和电可能有密切的联系。得知此消息的几位法国科学家,进行了进一步的研究,使得磁现象的研究步入快车道。安培通过几个精巧的实验获得了两个载流导线之间磁相互作用的定量关系。他还进一步提出假设,认为物质的磁性来自于分子电流环产生的磁场。几乎在同一时刻,毕奥、萨伐尔、拉普拉斯等人获得了由电流分布计算磁场的

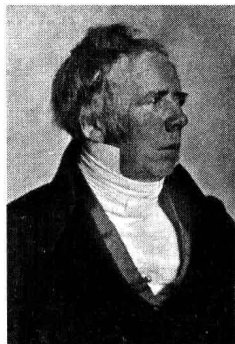


图12-1 丹麦物理学家
奥斯特(1777—1851)

公式。

由法拉第发现的变化磁场产生电场的规律,不仅是一项重大的科学发现,同时也是场观念的巨大胜利。之后,麦克斯韦从理论上假设,变化的电场也可以产生磁场,并且建立了电磁场理论的基本方程,而该方程的一个重要结论是:光是一种电磁波。19 世纪末,赫兹通过实验验证了电磁波的存在。至此电磁场理论完全建立起来。

12.2 磁场 磁感应强度

通过静电场一章的学习,我们已经对场的概念习以为常。比如电荷能够产生电场,表现是电场中的电荷会受到电场力。而当电荷运动起来,除了电场外,还会产生磁场,因而运动的电荷之间还会产生磁相互作用。磁场既可以由运动电荷或电流产生(第 12.4 节),也可以由磁性物质产生(第 13 章),还可以来自于变化的磁场(第 15 章)。

恒定磁场是空间分布不随时间变化的磁场。这样的磁场可以由恒定电流或永久磁铁产生,变化的电场一般产生非恒定磁场。

如图 12-2 所示,当带电粒子通过磁铁 N、S 极之间时,其运动方向会发生改变,说明磁场对其施加了力。如果置于磁铁之间的电荷是静止的,电荷不受力,说明这磁铁之间没有静电场。实验还表明,在恒定磁场中,磁场力不但与粒子的所带电荷量有关,而且与粒子的运动速度有密切的关系。

为了研究带电粒子受磁场作用的性质,让带正电荷的粒子沿不同方向进入均匀恒定磁场,观察其运动,进而获得磁场对带电粒子作用的精确关系。均匀磁场是指在空间各处大小、方向都相同的磁场。

如图 12-3(a)所示,当带电粒子沿某一方向运动时,不论所带电荷大小,运动速度大小,其受力均为零。我们将该方向定义为磁场的方向(正、反未定)。再让粒子沿垂直于磁场的方向进入,此时其受力最大,而且粒子所带电荷量越大,速度越大,则受力也越大,且受力方向垂直于磁场和粒子速度方向,如图 12-3(b)所示。经测量发现,若粒子所带电荷为 q ,运动速度大小为 v ,受力大小为 $F_{\max}$,则 $F_{\max}/qv$ 为常量。与电场强度的定义比较,显然这个量可以用来描写磁场的强弱。这个描述磁场强弱的量称为磁感应强度,用 B 表示,则其大小为

$$B = \frac{F_{\max}}{|q|v}$$

(12-1)

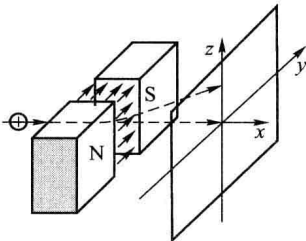


图 12-2 磁场导致带电粒子运动方向改变

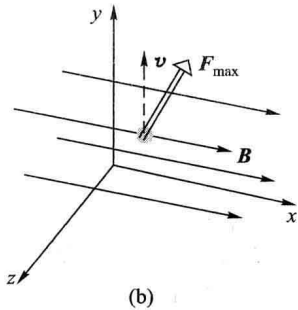
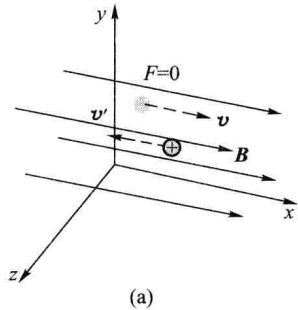


图 12-3 带电粒子沿磁场方向运动受力为零;垂直于磁场的方向运动,受力最大

即磁感应强度的大小等于该处磁场力的极大值除以粒子的电荷量和速率。

磁感应强度的国际单位制单位为特斯拉,用 T 表示:

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

另一个常用的表示磁感应强度的单位是高斯,用 Gs 表示,两者的换算关系为

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

表 12-1 中是一些常见的磁场的磁感应强度。

表 12-1 一些典型磁场的磁感应强度

大型超导电磁铁	30 T
医学核磁共振成像 NMI	1 ~ 2 T
钕铁硼永久磁铁	1 T
普通条形永久磁铁	10^{-2} T
地球表面磁场	10^{-5} T
人体内部磁场	10^{-13} T

当粒子沿任意方向进入磁场时,受力情况较为复杂,如图 12-4(a) 所示。研究表明,粒子的受力大小除了与所带电荷量 q 、磁感应强度 B 成正比外,还与速度在垂直于磁场方向的投影 $v_{\perp}$ 成正比,如图 12-4(b) 所示,即

$$F = qv_{\perp} B = qvB \sin \theta$$

其中 θ 为粒子速度与磁场方向的夹角,而且所受力的方向垂直于磁场和粒子速度方向。考虑到磁场、速度及力的矢量性质,定义磁感应强度的方向满足:

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \tag{12-2}$$

此式表明,一个带正电粒子的速度、磁感应强度和粒子受力方向成右手螺旋关系,如图 12-4(c) 所示,据此可以将磁场的方向唯一地确定下来。

显然,当 $\boldsymbol{v} // \boldsymbol{B}$ 时, $\theta = 0$, $\sin \theta = 0$, 则 $\boldsymbol{F} = 0$; 当 $\boldsymbol{v} \perp \boldsymbol{B}$ 时, $\theta = \pi/2$, $\sin \theta = 1$, $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_{\max} = q\boldsymbol{v} \boldsymbol{B}$ 。该式包含了前述三个实验的结果。

电荷所受磁场的作用力称为洛伦兹力。(12-2) 式具有普遍意义,在非均匀、非恒定磁场情况下,仍然成立。

当正、负电荷在磁场中运动时,除两者受力方向相反以外,受力大小相同,因此只要将 (12-2) 式中的 q 视为粒子所带电荷量的代数值,就可表示任意带电粒子在任意磁场中的洛伦兹力。

比较电场力和磁场力,两者有以下区别:

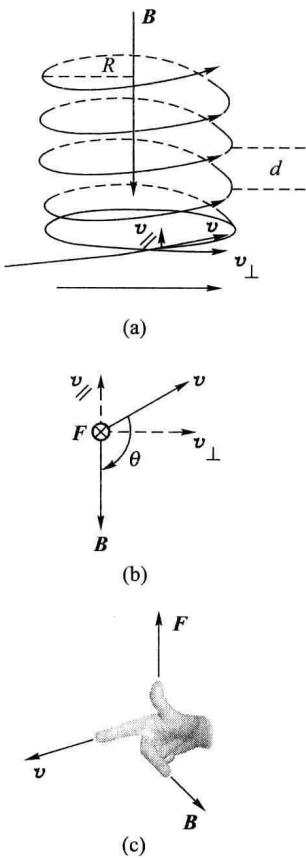


图 12-4 带正电粒子沿任意方向进入均匀磁场的受力情况

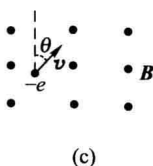
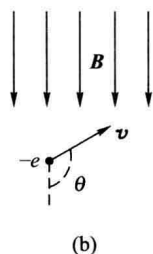
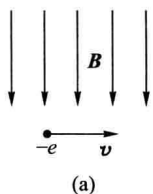


图 12-5 带电粒子由不同方向进入磁场

(1) 电场力沿着电场的方向或反方向;磁场力垂直于磁场方向。

(2) 电场力作用于任意电荷,不论其运动与否;磁场力只作用于运动电荷上。

B 被称为磁感应强度而非磁场强度有历史原因,磁学中磁场强度用 H 表示,其含义不同于磁感应强度,当然它们有联系。

如果还存在电场,可以想见带电粒子所受力为

$$F = q(E + v \times B) \quad (12-3)$$

有时,该表达式也被称为洛伦兹力公式。

例 12-1 如图 12-5 所示,电子由不同方向进入均匀磁场,判断电子所受磁场力的方向,用 e 、 B 、 v 表示力的大小。

解 根据运动带电粒子所受磁场力(12-1)式,使用右手定则。

图 12-5(a)中 v 与 B 相互垂直,受力为 $F = evB$ 。 $v \times B$ 方向为垂直纸面向内,但是电子带负电荷,所以所受的力指向纸面向外。

图 12-5(b)受力方向同图 12-5(a)。但 v 与 B 夹角为 θ ,因此受力大小为 $F = evB \sin \theta$ 。

以上两种情形表明,受力总是垂直于 v 与 B 两个方向构成的平面。

图 12-5(c)中 v 与 B 垂直,受力大小仍为 $F = evB$ 。力的方向为在纸面内由速度 v 方向逆时针旋转 90° 。

12.3 毕奥 - 萨伐尔定律

12.3.1 毕奥 - 萨伐尔定律

通过研究运动的带电粒子受磁场的作用,我们引入了磁感应强度这样一个描述磁场的物理量,那么磁场是怎样产生的,其规律如何呢?

1820 年法国科学家毕奥和萨伐尔在奥斯特实验结果的启发下,定量研究了载流导线对磁针施加的作用,间接地得到了一个有关电流元在空间产生磁场的表达式,即毕奥 - 萨伐尔定律。如图 12-6 所示,真空中一个电流元 Idl 在空间 P 点处产生的磁场由下式给出:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (12-4)$$

式中 Idl 为电流元,表示在电流为 I 的导线上沿着电流方向截取一段长为 $|dl|$ 的导线, r 为 P 点相对于电流元处的位置矢量, dB 是该

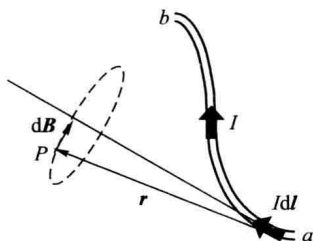


图 12-6 毕奥 - 萨伐尔定律

电流元在 P 点产生的磁感应强度, 常量 μ_0 是真空磁导率:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

磁场也满足叠加原理, 即多个电流元在场中某点产生的磁场等于各个电流元在该场点的磁场的矢量和。因此要计算整段载流导线在 P 点的磁感应强度, 需将所有电流元的贡献求和, 即作积分运算, 有

$$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \int_a^b \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (12-5)$$

比较毕奥 - 萨伐尔定律和点电荷电场的电场强度, 两者有相似之处: 点电荷产生静电场, 而电流元产生磁场; 场的大小都与场点至源的距离平方成反比。但是磁感应强度与电流元的方向有密切的关系, 且磁场与电流元 $I d\mathbf{l}$ 及 $\mathbf{r}$ 满足右手螺旋关系, 而电场沿着 $\mathbf{r}$ 的方向。另外孤立点电荷是客观存在的, 可以用实验手段直接测量; 而电流元实际并不存在, 它总是属于某一闭合电流回路, 只能根据全电路产生的磁场来验证该结论的正确性。

显然, 毕奥 - 萨伐尔定律的使用比库仑定律更为复杂。要计算电流分布的磁场, 先将电流置于某个坐标系中, 任意选取一个电流元, 分析该电流元在待计算的场点处的磁场的方向及大小, 经过对称性分析一般可以写出该电流元产生磁场的各个分量的解析式, 然后对各分量进行积分运算。在积分运算时, 要注意各个变量的依赖关系, 一般要统一变量, 只做单变量积分计算。

12.3.2 应用

以下我们通过几个例子说明毕奥 - 萨伐尔定律的应用。

例 12-2 计算一段细长直载流导线产生的磁场。

解 如图 12-7 所示, 细长直导线置于 x 轴上, 计算 y 轴上 P 点 $(0, r_0)$ 处的磁感应强度。

取电流元 $I d\mathbf{l} = I dx \mathbf{i}$, 离开原点的距离为 x , 至 P 点距离为 r , 根据毕奥 - 萨伐尔定律, 在 P 点的磁感应强度大小为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dx \mathbf{i} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

其中 $\mathbf{i} \times \mathbf{r} = \mathbf{i} \times (r \cos \alpha \mathbf{i} + r \sin \alpha \mathbf{j}) = r \sin \alpha \mathbf{k}$, 指向 z 轴正方向, 所以:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin \alpha dx}{r^2} \mathbf{k}$$

由于此电流元是任意的, 所以所有电流元产生磁场都沿着 z 轴正方向, 只需进行数值积分。当沿着导线取尽所有电流元, 即 dx 变化时, 式中 r 、 α 都随之变化, 因此积分前要统一变量。

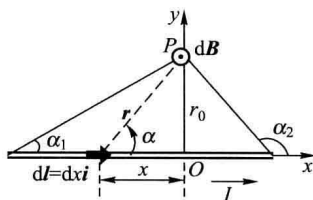


图 12-7 细长直载流导线的磁场