

大学物理学 (下册)

Physics

游荣义 黄晓菁 徐恭勤 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

大学物理学

Daxue Wulixue

(下册)

游荣义 黄晓菁 徐恭勤 主编



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会制订的《理工科大学物理课程教学基本要求》(2010年版)(以下简称“基本要求”)编写的。本书分上、下两册。上册包括质点运动学、质点动力学、刚体、相对论、气体动理论、热力学基础、静电场、静电场中的导体与电介质。下册包括恒定磁场、电磁感应、振动、波动、光学、量子物理基础和新技术物理基础。每章配有习题并附有答案,此外,各章还配有计算机模拟实例和实验题。全书涵盖了“基本要求”的核心内容,并适当选择了部分扩展内容。在新技术物理基础的选材上注重物理前沿和应用热点。

本书理论系统难度适宜,可供普通高等学校用作120~140学时的非物理类专业“大学物理”课程的教材或参考书,也可供相关专业的师生选用或参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/游荣义,黄晓菁,徐恭勤主编
—北京:高等教育出版社,2012.2
ISBN 978-7-04-034012-9

I. ①大… II. ①游…②黄…③徐… 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(2012)第000054号

策划编辑 陶 铮	责任编辑 胡凯飞	封面设计 于文燕	版式设计 马敬茹
插图绘制 尹 莉	责任校对 杨凤玲	责任印制 刘思涵	

出版发行 高等教育出版社	咨询电话 400-810-0598
社 址 北京市西城区德外大街4号	网 址 http://www.hep.edu.cn
邮政编码 100120	http://www.hep.com.cn
印 刷 唐山市润丰印务有限公司	网上订购 http://www.landaco.com
开 本 787mm×960mm 1/16	http://www.landaco.com.cn
印 张 16.5	版 次 2012年2月第1版
字 数 300千字	印 次 2012年2月第1次印刷
购书热线 010-58581118	定 价 22.80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 34012-00

目 录

第九章 恒定磁场	1
9.1 恒定电流 电动势	1
9.1.1 电流 电流密度	1
9.1.2 电源 电动势	2
9.2 磁场 磁感应强度	4
9.2.1 基本磁现象	4
9.2.2 磁感应强度	5
9.2.3 毕奥 - 萨伐尔定律	7
9.2.4 毕奥 - 萨伐尔定律的应用	7
9.3 磁通量 磁场中的高斯定理	12
9.3.1 磁感应线	12
9.3.2 磁通量	12
9.3.3 磁场中的高斯定理	13
9.4 安培环路定理	13
9.4.1 安培环路定理	13
9.4.2 安培环路定理的应用	14
9.5 磁场对运动电荷的作用	17
9.5.1 洛伦兹力	17
9.5.2 带电粒子在磁场中的运动	17
9.5.3 霍尔效应	19
9.6 磁场对载流导线的作用	20
9.6.1 安培定律	20
9.6.2 磁场对载流线圈的作用	22
9.7 磁介质	24
9.7.1 物质的磁性	24
9.7.2 顺磁质和抗磁质的磁化	25
9.7.3 磁化强度	26
9.7.4 磁介质中的安培环路定理 磁场强度	27

9.7.5 铁磁质	30
计算机模拟(九)	32
习题	34
第十章 电磁感应	38
10.1 电磁感应定律	38
10.1.1 法拉第电磁感应定律	38
10.1.2 楞次定律	40
10.2 动生电动势和感生电动势	41
10.2.1 动生电动势	41
10.2.2 感生电动势	43
10.2.3 涡电流	44
10.3 自感和互感	45
10.3.1 自感	45
10.3.2 互感	46
10.4 磁场的能量	49
10.4.1 自感磁能	49
10.4.2 磁场能量	49
10.5 位移电流 麦克斯韦方程组	50
10.5.1 位移电流	51
10.5.2 全电流定律	52
10.5.3 麦克斯韦方程组	53
计算机模拟(十)	54
习题	55
第十一章 振动	58
11.1 简谐运动的描述	58
11.1.1 简谐运动的特征	58
11.1.2 描述简谐运动的物理量	60
11.1.3 单摆和复摆	62
11.2 旋转矢量法	65
11.3 简谐运动的能量	67
11.4 简谐运动的合成	69
11.4.1 两个同方向同频率简谐运动的合成	69

11.4.2 两个同方向不同频率简谐运动的合成 拍	71
11.4.3 两个相互垂直的简谐运动的合成	73
11.5 阻尼振动 受迫振动 共振	75
11.5.1 阻尼振动	75
11.5.2 受迫振动	76
11.5.3 共振	77
11.6 电磁振荡	78
11.6.1 LC 振荡电路	78
11.6.2 无阻尼电磁振荡方程	79
计算机模拟(十一)	81
习题	82
第十二章 波动	87
12.1 机械波的产生和传播	87
12.1.1 机械波产生的条件	87
12.1.2 横波和纵波	88
12.1.3 机械波的描述	88
12.2 平面简谐波的波函数	90
12.2.1 平面简谐波的波函数	90
12.2.2 波函数的物理意义	92
12.3 波的能量 能流密度	94
12.3.1 波的能量传播	95
12.3.2 能流和能流密度	96
12.4 波的干涉和衍射	98
12.4.1 波的叠加原理	98
12.4.2 波的干涉	98
12.4.3 惠更斯原理	102
12.4.4 波的衍射	103
12.5 驻波	104
12.5.1 驻波的产生	104
12.5.2 驻波方程	105
12.5.3 相位跃变	107
* 12.5.4 驻波的能量	108
* 12.5.5 振动的简正模式	108

* 12.6 多普勒效应	110
12.6.1 波源静止 观察者相对介质运动	110
12.6.2 观察者静止 波源相对介质运动	111
12.6.3 波源和观察者同时相对介质运动	111
* 12.7 声波 超声波和次声波	112
12.7.1 声波	112
12.7.2 超声波和次声波	113
12.7.3 超声波的应用	114
12.8 电磁波	115
12.8.1 电磁波的产生与传播	115
12.8.2 平面电磁波的特性	117
12.8.3 电磁波的能量	118
12.8.4 电磁波谱	119
计算机模拟(十二)	120
习题	122
第十三章 波动光学	126
13.1 光源 光的相干性	127
13.1.1 光源	127
13.1.2 光的相干性	128
13.2 杨氏双缝干涉 光程	129
13.2.1 杨氏双缝干涉	129
13.2.2 光程 光程差	132
13.3 薄膜干涉	134
13.4 劈尖 牛顿环	138
13.4.1 劈尖	138
13.4.2 牛顿环	140
13.5 迈克耳孙干涉仪	142
13.6 光的衍射	144
13.6.1 光的衍射现象	144
13.6.2 惠更斯-菲涅耳原理	145
13.6.3 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	145
13.7 单缝衍射	146
13.8 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	152

13.8.1 圆孔衍射	152
13.8.2 光学仪器的分辨本领	153
13.9 光栅衍射	154
13.9.1 光栅	154
13.9.2 光栅衍射	155
13.10 X射线的衍射	159
13.11 光的偏振 马吕斯定律	161
13.11.1 自然光 偏振光	162
13.11.2 偏振片 起偏与检偏	163
13.11.3 马吕斯定律	164
13.12 反射光和折射光的偏振	165
13.13 双折射	167
13.13.1 双折射的寻常光和非常光	167
* 13.13.2 $1/4$ 波片和半波片	170
* 13.14 旋光现象	171
13.14.1 自然旋光	171
13.14.2 磁致旋光	172
计算机模拟(十三)	172
习题	174
第十四章 量子物理基础	180
14.1 黑体辐射 普朗克量子假设	180
14.1.1 黑体辐射定律	181
14.1.2 普朗克量子假设	182
14.2 光电效应 光的波粒二象性	184
14.2.1 光电效应实验规律	185
14.2.2 爱因斯坦方程	186
14.2.3 光的波粒二象性	187
* 14.2.4 光电效应的应用	189
14.3 康普顿效应	190
14.4 玻尔的氢原子理论	193
14.4.1 氢原子光谱的规律	194
14.4.2 玻尔的氢原子理论	195
14.4.3 玻尔氢原子理论的局限性	197

14.5 实物粒子的二象性	198
14.5.1 德布罗意波	199
*14.5.2 德布罗意波的统计解释	201
14.6 不确定关系	201
14.7 波函数 薛定谔方程	203
14.7.1 波函数	203
14.7.2 薛定谔方程	204
14.8 一维定态问题	206
14.8.1 一维无限深势阱	206
14.8.2 一维势垒 隧道效应	208
14.9 氢原子的量子力学描述	210
14.9.1 氢原子的薛定谔方程	210
14.9.2 三个量子数	211
*14.9.3 氢原子中电子的概率分布	212
14.10 电子自旋 原子的壳层结构	213
14.10.1 电子自旋	214
14.10.2 原子的壳层结构	215
计算机模拟(十四)	218
习题	219
第十五章 新技术物理基础	222
15.1 半导体	222
15.1.1 晶体的能带	223
15.1.2 半导体的特性	224
15.1.3 pn 结	226
15.1.4 半导体器件	227
15.2 激光	229
15.2.1 激光原理	230
15.2.2 激光器	233
15.2.3 激光的特性	234
15.3 光纤	235
15.3.1 光纤的结构	235
15.3.2 光纤的种类	235
15.3.3 光纤的导光原理	236

15.3.4 光纤的传输模式	236
15.3.5 光纤的损耗	237
15.3.6 光纤的色散	237
15.4 纳米科技简介	238
15.4.1 纳米效应	238
15.4.2 纳米固体	239
15.4.3 纳米材料的制备	240
15.4.4 纳米材料的应用	240
15.5 LED 技术简介	240
15.5.1 LED 的发光原理	241
15.5.2 LED 的内部结构	241
15.5.3 LED 的分类	242
15.5.4 LED 的特点	243
15.5.5 LED 的主要参数	244
习题	245
习题参考答案	246

第九章 恒定磁场

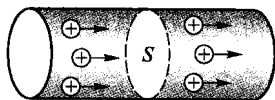
本章讨论恒定磁场的产生和基本性质、磁场与电流或运动电荷的相互作用、磁介质等内容。由于恒定磁场由电流或运动电荷产生，因此，本章首先对电流作必要的介绍。

9.1 恒定电流 电动势

9.1.1 电流 电流密度

大量电荷的定向运动形成电流。电荷的携带者可以是导体中的自由电子，电解液中的正、负离子，也可以是半导体中的载流子（电子和空穴）。以金属导体为例，导体内部存在大量的自由电子，这些电子总是在不停地作无规则热运动，电子沿任何方向运动的可能性都相同，不能产生宏观上的电流。此外，导体处在静电平衡时，其内部电场强度处处为零，没有电荷作定向运动而形成电流。但如果设法让导体两端存在电势差，使导体内部维持稳定的电场，导体内部的自由电子将在电场力的作用下作宏观上的定向运动，从而形成电流。可见，导体中产生电流必须满足两个基本条件：其一是导体内部存在自由电荷，其二是导体内部要维持一定的电场。通常，把由带电粒子定向运动形成的电流称为**传导电流**，而由带电物体作机械运动时形成的电流称为**运流电流**。

单位时间内通过导体某一横截面的电荷量为电流。如图 9.1 所示，若在 dt 时间内，通过导体截面 S 的电荷量为 dq ，则电流为



$$I = \frac{dq}{dt} \quad (9.1) \quad \text{图 9.1 导体中的电流}$$

电流的单位为安培，用符号 A 表示。1 A = 1 C · s⁻¹。常用的电流单位还有毫安 (mA) 和微安 (μA)。

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

如果导体中的电流 I 不随时间变化，则这种电流称为**恒定电流**。

电流是标量，所谓电流方向是指正电荷定向运动的方向。导体中的电流方向总是沿着内部电场的方向，从高电势处流到低电势处，与自由电子定向运动

的方向相反,如图 9.1 所示.

电流只能反映导体内部电流的整体大小,当电流在不均匀的导体中流动时,导体内部各处的电流分布是不均匀的,即各处电流的大小和方向都可能不相同.为了详细地描述导体内各处电流的分布情况,我们引入**电流密度矢量** $\mathbf{j}$,并规定:导体中任意点电流密度 $\mathbf{j}$ 的方向为该点电流的方向,其大小等于通过该点附近垂直于电流方向的单位面积的电流.

如图 9.2 所示,设想在导体内部任一点处取一面元 dS ,其法线方向与该处电流方向的夹角为 θ .面元 dS 在垂直于电流方向上的投影面积为 $dS_{\perp} = dS \cos \theta$.若流过面元 dS 的电流为 dI ,则面元 dS 处电流密度 $\mathbf{j}$ 的大小为

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} = \frac{dI}{dS \cos \theta}$$

上式可写成

$$dI = j dS \cos \theta = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (9.2)$$

则通过导体任一有限面积 S 的电流为

$$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (9.3)$$

从金属导体的导电机制来看,当金属中的自由电子受到外电场力的作用时,自由电子除了热运动外,还将沿着与外电场相反的方向作定向运动,称为**漂移运动**.常温下漂移速率 u 约为 $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.假设导体中每单位体积中自由电子的个数即电子数密度为 n ,在导体内取一与漂移运动垂直的面元 dS ,则在时间间隔 dt 内,在长度为 $u dt$,截面积为 dS 的柱体内的自由电子都要通过截面 dS ,即共有 $n u dt dS$ 个电子通过 dS .若电子电荷量为 e ,则 dt 时间内通过面元 dS 的总电荷量为 $dq = e n u dt dS$.根据式(9.1)和(9.2),可得金属导体内部电流密度的大小为

$$\mathbf{j} = e n \mathbf{u} \quad (9.4)$$

式(9.4)对一般导体或半导体也适用,其中 e 表示载流子的电荷量, u 表示载流子的平均定向运动速率.

9.1.2 电源 电动势

我们已经知道,要在导体中维持恒定电流,就必须在其两端维持恒定电势差,使导体内部维持恒定的电场,这一条件是如何满足的呢?我们以带电电容器放电时产生的电流为例来加以说明.如图 9.3 所示,当带电的极板 A 和 B 用导体连接后,由于两极板间有电势差,导体内部就有电场,在电场力的作用

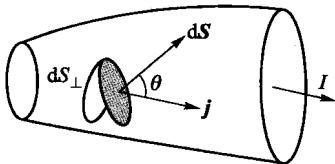


图 9.2 电流密度矢量

下, 负极板 B 上的自由电子将流向正极板 A, 相当于 A 极板上的正电荷流向 B 极板, 并与 B 极板上的电子中和. 需要强调的是, 这种放电电流是不恒定的, 随着两极板上的电荷逐渐减少, 电流最终将减为零. 因此, 仅依靠静电力的作用, 在导体两端无法维持恒定的电势差, 也不可能获得恒定的电流.

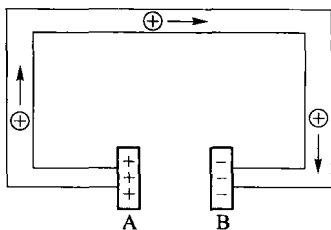


图 9.3 电容器放电

为了获得恒定电流, 必须设法将流向 B 极板的正电荷按闭合回路的要求再送到极板 A. 显然, 这必须借助于另外一种力来反抗正电荷由极板 B 到达极板 A 所受到的静电力才行. 这种能将正电荷从电势较低处移送到电势较高处的作用力本质上完全不同于静电力, 称为**非静电力**, 用符号 F_k 表示, 如图 9.4 所示. 我们把能够提供非静电力, 从而将其他形式的能量转化为电能的装置称为**电源**. 正是依靠电源内部提供的非静电力 F_k 克服了静电力对正电荷做功, 才使正电荷可以源源不断地通过电源的内部从负极板 B 输送到正极板 A, 从而维持了恒定的电流. 常见的电源有干电池、蓄电池、太阳能电池和发电机等.

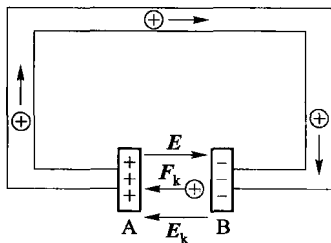


图 9.4 电源的内外电路

我们可以像静电场中电场强度的定义那样, 定义非静电电场强度为作用在单位正电荷上的非静电力, 即

$$E_k = \frac{F_k}{q} \quad (9.5)$$

为了定量描述电源转化能量的本领, 引入电源**电动势**这一物理量, 并定义: 将单位正电荷沿闭合回路移动一周的过程中, 非静电力所做的功为电源的电动势, 用符号 E 表示. 若用 W 表示非静电力所做的功, 则电动势表示为

$$E = \frac{W}{q} = \oint E_k \cdot dl \quad (9.6)$$

由于非静电场强 E_k 通常只在电源的内部不为零, 而在电源的外部为零, 因此式(9.6)也可以写为

$$E = \oint E_k \cdot dl = \int_{\text{内}} E_k \cdot dl \quad (9.7)$$

式(9.7)表明电源电动势的大小等于把单位正电荷经电源内部从负极移到正极过程中, 非静电力所做的功.

电动势是标量, 但为了便于区分电路通电时非静电力是做正功还是做负功

(对应于电源是放电还是被充电), 和电流一样也规定有“方向”, 通常把电源内部电势升高的方向, 即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的单位相同, 为伏特(V). 电源电动势的大小只取决于电源本身的性质, 反映电源中非静电力做功的本领.

9.2 磁场 磁感应强度

我国是世界上最早发现磁现象并应用磁性的国家. 从春秋战国时期开始, 在《管子·地数》、《吕氏春秋·精通》等古籍中就有关于慈(磁)石能吸铁的记载. 我国使用天然磁石来指示南北的历史可追溯到公元前 4 世纪. 当时一部名为《鬼谷子》的书中记载了磁石罗盘(司南), 这是世界公认的最早磁性指南器具. 在古代思想家韩非(公元前 280 年—前 233 年)所写的《韩非子》一书中即有“故先王立司南, 以端朝夕”的文字记载, 意思是说古代君王创造司南来确定南北方向. 我国宋代航海者首先将指南针装到了船上. 到南宋时期, 海船上已普遍装有原始的罗盘导航“针盘”, 这是世界海运史上空前的进步, 标志着人类从此获得了在海洋中全天候、远距离航行的能力, 对发展海上交通、推进世界各地人民的交往起了巨大的作用. 与中国在海路上贸易往来频繁的阿拉伯人, 于 12 世纪 80 年代在其船上安装了指南针. 后来欧洲人从阿拉伯人那里认识并在船上安装了指南针.

9.2.1 基本磁现象

人们认识磁现象是从观察磁体之间的相互作用开始的. 通常把物体能够吸引铁、钴、镍等物质的性质叫做**磁性**. 具有磁性的物体叫**磁体**, 如具有永久磁性的天然磁石(主要成分是四氧化三铁)或人造磁铁. 人造磁铁通常用金属合金制成, 具有强磁性, 可分为“永久性磁铁”与“非永久性磁铁”. 非永久性磁铁加热到一定的温度会突然失去磁性. 磁铁不存在单一的磁极, 磁铁的两个磁极总是成对出现的, 不可能被分割为独立存在的 N 极和 S 极, 这一点和有独立存在的正电荷和负电荷完全不同. 尽管近代理论曾预言存在**磁单极**, 但迄今为止, 人们依然无法从实验上找到磁单极. 磁极之间的相互作用力称为**磁力**. 同种磁极相互排斥, 异种磁极相互吸引.

地球本身是一块巨大的磁铁, 它的 N 极在地理的南极附近, 而 S 极在地理的北极附近. 这样, 如果把一条形的磁铁用细线从中间水平地悬挂起来, 让它自由转动, 那么磁铁的 N 极就会和地球的 S 极互相吸引, 磁铁的 S 极和地球的 N 极互相吸引, 直到磁铁的 N 极和 S 极分别指向地球的北极和南极为止,

这就是指南针的原理.

在相当长的一段历史时期内,人们都把磁现象和电现象看成本质上毫不相干的两种自然现象,对其研究也是彼此独立进行的. 1820 年丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted)发现,放在通有电流的导线附近的磁针,会受到磁力的作用而发生偏转,如图 9.5 所示. 奥斯特的“电流磁效应”揭开了磁现象与电现象的内在联系. 同年,法国科学家安培(A. M. Ampere)受奥斯特实验的启发,进一步实验发现:放在磁铁附近的载流导线或载流线圈也会受到磁力的作用而发生运动. 实验还发现,载流导线之间或载流线圈之间也有相互作用,并且受力方向都跟电流的方向有关. 1869 年德国科学家希托夫(J. M. Hittorf)用磁场使阴

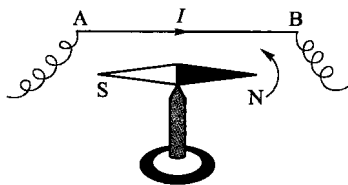


图 9.5 奥斯特实验

极射线(即电子射线)发生偏转. 这一实验说明了运动电荷在磁场中同样会受到力的作用.

上述各种实验现象启发了人们去探索磁现象的物理本质. 1822 年,安培在大量实验事实的基础上,提出了关于物质磁性本质的分子电流假说. 他认为一切磁现象的根源都是电流. 构成磁体的分子内部存在一种环形电流,称为**分子电流**. 由于分子电流的存在,每个磁性物质分子成为一个小磁体(基元磁铁),两侧相当于两个磁极. 物质对外是否显示出磁性,取决于物质中分子电流对外界产生磁效应的总和.

现代理论研究表明,分子电流实际上是由物质原子中核外电子绕核运动和电子自旋所形成的. 因此,无论是磁体还是电流,磁现象的本质都源于电荷的运动,这就是磁现象的电本质.

9.2.2 磁感应强度

在静电学中我们知道,电荷之间的相互作用是通过电场来传递的. 那么,磁体与磁体之间、电流与电流之间、磁体与电流之间的相互作用则是通过另一种称为**磁场**的特殊物质来传递的,即运动电荷能激发磁场,而磁场对位于其中的运动电荷有力的作用,其相互作用关系可简单地表示为

$$\text{运动电荷} \xrightleftharpoons[\text{作用}]{\text{激发}} \text{磁场} \xrightleftharpoons[\text{作用}]{\text{激发}} \text{运动电荷}$$

磁体和恒定电流激发的磁场不会随时间发生变化,称为**恒定磁场**.

在静电学中,为了描述电场对电荷作用力的性质,我们引入电场强度矢量 E 来描述电场的强弱和方向. 同样,为了描述磁场对运动电荷作用力的性质,

我们引入**磁感应强度**矢量 $\boldsymbol{B}$ 来描述磁场的强弱和方向. 但是, 磁场对运动电荷的作用力不仅与电荷的带电荷量有关, 还与电荷运动速度的大小及方向有关. 从电荷在磁场中运动的大量实验结果可以得出如下结论:

(1) 当电荷 q 的速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向与磁场方向平行时, 电荷不受磁场力的作用, 即 $\boldsymbol{F} = 0$.

(2) 当电荷 q 的速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向与磁场方向不平行时, 它所受到的磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的大小与电荷 q 和速度 $\boldsymbol{v}$ 的大小成正比, 并和 $\boldsymbol{v}$ 与磁场方向夹角有关. 而磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的方向总是垂直于运动速度 $\boldsymbol{v}$ 方向与磁场方向所构成的平面. 改变电荷 q 的符号, 则磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的方向相反.

(3) 当电荷 q 的速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向与磁场方向垂直时, 它所受到的磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的大小最大, 即 $F = F_{\max}$, 如图 9.6 所示. 对磁场任一点来说, $F_{\max}$ 的大小正比于电荷 q 和速度 $\boldsymbol{v}$ 的大小, 但比值 $F_{\max}/qv$ 是一个确定值, 与 qv 的大小无关, 只由磁场本身决定, 它反映了该点磁场的强弱.

为此, 我们定义磁场中某点的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的大小为

$$B = \frac{F_{\max}}{qv} \quad (9.8)$$

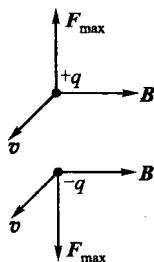


图 9.6

磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的方向为正电荷受力时 $\boldsymbol{F}_{\max} \times \boldsymbol{v}$ 的方向, 与小磁针在该点静止时 N 极所指的方向相同. 空间某点磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的方向即为该点磁场的方向.

根据上述结论及式(9.8), 可以得出磁场力 $\boldsymbol{F}$ 、电荷运动速度 $\boldsymbol{v}$ 和磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 三者之间的矢量关系为

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \quad (9.9)$$

如果 $\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 之间的夹角为 θ , 则 $\boldsymbol{F}$ 的大小 $F = qvB\sin\theta$.

在国际单位制中, 磁感应强度 B 的单位为特斯拉, 用符号 T 表示, 有

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

工程上还常用一种非国际单位制单位叫高斯(G), 换算关系为 $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$.

表 9.1 几种磁感应强度的比较(单位:T)

原子核表面	约 10^{12}	中子星表面	约 10^8
地球两极附近平均	约 6×10^{-5}	太阳黑子	0.1 ~ 0.4
磁悬浮列车	约 10^{-4}	手机拨通瞬间	约 7×10^{-4}
彩色电视机内	约 5×10^{-4}	微波炉	约 3×10^{-5}
电磁炉	约 2×10^{-4}	人的头颅表面	约 10^{-10}

9.2.3 毕奥 - 萨伐尔定律

在静电场中, 任意带电体在空间所产生的电场强度 $\mathbf{E}$, 可看成是许多电荷元 dq 所产生的电场强度 $d\mathbf{E}$ 的叠加. 同样, 任意载流导线在空间产生的磁感应强度 $\mathbf{B}$, 也可看成是许多电流元 $I d\mathbf{l}$ 所产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的叠加. 其中 $d\mathbf{l}$ 是导线上的线元矢量, 方向与电流方向相同.

1820 年, 法国物理学家毕奥 (J. B. Biot) 和萨伐尔 (F. Savart) 通过实验测量得到了载流导线周围磁场与电流的定量关系. 他们发现载流导线上的电流元 $I d\mathbf{l}$ 在空间任一场点 P 处产生的磁感应强度 $d\mathbf{B}$ 的大小 dB 和电流元的大小 $I d\mathbf{l}$ 成正比, 和电流元 $I d\mathbf{l}$ 与场点的位置矢量 $\mathbf{r}$ 间的夹角 θ 的正弦成正比, 并和 r 的大小 r 的平方

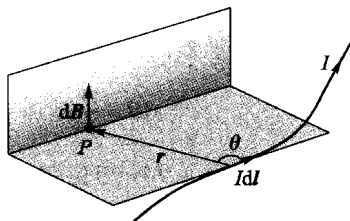


图 9.7 电流元产生的磁场

成反比, $d\mathbf{B}$ 的方向总是垂直于 $d\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{r}$ 所构成的平面, 如图 9.7 所示. 后来, 法国物理学家拉普拉斯 (P. S. Laplace) 根据毕奥 - 萨伐尔的实验结论, 得出电流元产生磁场的磁感应强度大小 dB 的数学表达式, 即

$$dB = k \frac{Idl \sin \theta}{r^2} \quad (9.10)$$

上式中的 k 为比例系数, 其值取决于磁场中的磁介质和各量采用的单位制. 对于真空中的磁场, 如式中各量采用国际单位制, 则有 $k = \mu_0 / 4\pi$, 其中 μ_0 称为真空磁导率, 其值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$.

考虑 $d\mathbf{B}$ 的方向, 式 (9.10) 可以写成矢量形式:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{r^2} \quad (9.11)$$

上式就是著名的毕奥 - 萨伐尔定律的数学表达式. 在式 (9.11) 中, $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$ 为位置矢量 $\mathbf{r}$ 方向的单位矢量.

根据场的叠加原理, 任意形状的载流导线在给定的场点 P 处产生的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 等于所有电流元在该点产生的磁感应强度的矢量和, 即有

$$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{r^2} \quad (9.12)$$

9.2.4 毕奥 - 萨伐尔定律的应用

为更好地掌握毕奥 - 萨伐尔定律的应用, 下面举例计算几种常见线电流产生的磁场分布.