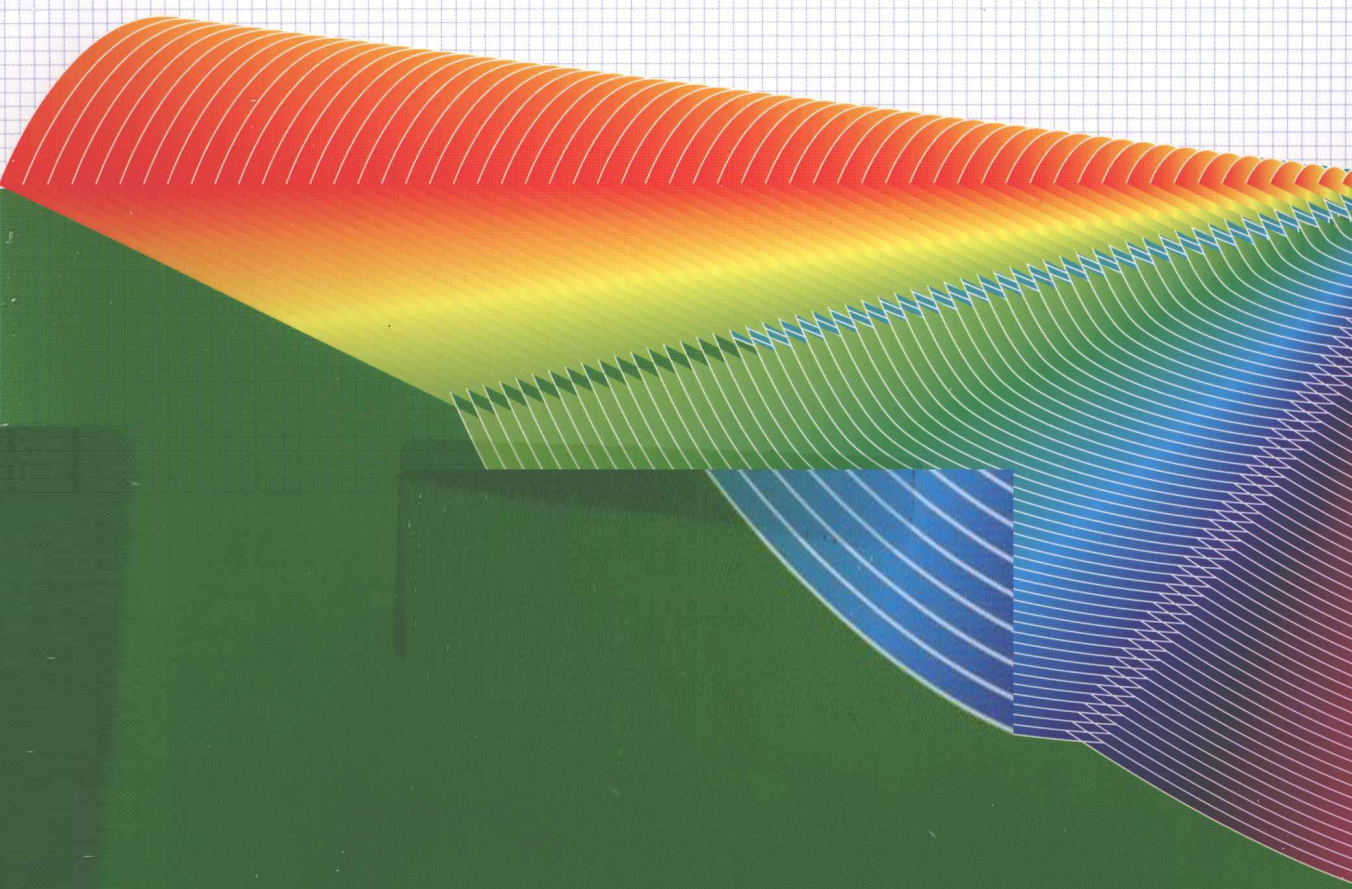


工科 基础物理学

(下)

周雨青 主编

张玉萍 张道宇 黄宏彬 副主编



清华大学出版社

工科 **基础物理学**
(下)

周雨青 主编

张玉萍 张道宇 黄宏彬 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书内容以经典物理的力、热、电磁和光,以及近、现代物理的相对论、量子物理和非线性物理构成,全书以教学基本要求为指导,内容覆盖除“几何光学”之外的所有 A 部分的知识点,并在近、现代物理部分增加了篇幅,加强了深度。同时,用“引子”的形式开启每一章。

本书适用于非物理专业理工科各专业的大学物理课程,亦可用于非课程学习者学习物理之用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

工科基础物理学.下/周雨青主编. —北京:清华大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-302-25385-3

I. ①工… II. ①周… 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(2011)第 066618 号

责任编辑:朱红莲

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:14

字 数:336千字

版 次:2010年12月第1版

印 次:2010年12月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:23.00元

产品编号:037472-01



物理学对人类的科学发展和进步,以及对其他学科的基础作用和意义,再怎么强调也不为过。科学史告诉我们,物理学是科学发展的火车头,当今乃至未来仍将是科学发展的助力器。

本书根据教学基本要求,选择了除“几何光学”之外的所有 A 类知识点。考虑到物理学的成熟(完善)、系统和发展,本教材仍以物理学系统分类,以经典物理内容(力、热、电磁、光)为主线,阐述物理概念、方法、工具和发展。但是,如果我们只讲传统不讲现代,只讲线性不讲非线性,只讲内容不分层次,那么就体现不出物理的发展和时代的需要。因此,强化近、现代物理内容,特别是强化非线性物理的内容变得非常重要,这部分内容在本书中既独立成章(第 16 章),又穿插于经典之中(第 5、14 章)。这样做可以保证学时的“弹性”,如学时较多,可以全面介绍非线性(第 16 章);学时不足,只要在相应章节中选讲非线性即可。

在强化近、现代物理内容的同时,本书在传统内容部分加强了以下内容:

- (1) 非惯性力(2-6 节);
- (2) 固体的弹性(3-2 节)和流体力学(3-3 节);
- (3) 相对论中的“视觉形象”(4-2 节)和“四维动量-能量、力”(4-3 节);
- (4) 振动和波中的“复杂振动的处理理论”(5-1 节)、“耦合振子”(5-3 节)和“非线性波简介”(5-7 节);
- (5) 光学中的“光的色散”(14-8 节)和“非线性光学”(14-9 节);
- (6) 在量子物理中,有关“量子力学基本问题的争论”(15-3 节)。

本书在内容编排次序上做了如下安排:

(1) 将相对论和振动与波分别放在牛顿力学之后的第 4 章和第 5 章,而大多数同类教材的相应内容是分别放在光学之后和电磁学之后的。我们的这种做法是考虑:一方面,从系统上来说,相对论和振动与波仍属于力学范畴;另一方面,从本质上说,相对论是时空变换问题,仍属相对运动范畴,而振动与波就是机械运动的一种形式。

(2) 将光学放在量子物理之前的第 14 章,而同类教材大多把光学内容放在机械振动机械波之后。我们的考虑是,光本质上属于量子 and 近代物理范畴。

本书在每一章的开头,以“引子”的形式引入各章主题。“引子”不是一个问题,而是一个现象、一段历史、一种发展趋势或一段猜想,比如,“从 Tocama 大桥的坍塌看防震减灾技术”、“地球磁场是否会再次发生惊天大倒转”就分别是第 5 章“振动和波”及第 9 章“稳恒磁场”开头的“引子”,既切题、有趣,又能帮助读者理解相关内容,具有画龙点

睛之效果。

本教材的梯度较大、内容相对较深。例如,在力学部分,减少了运动学、动力学的描述,增加了坐标系的表述(直角坐标、极坐标、自然坐标和柱坐标)和例题分析(质点运、动力学部分共15道例题);在相对论部分,不仅介绍若干实验基础(布拉德雷实验、斐索流水实验、迈克耳孙-莫雷实验),而且给出了洛伦兹变换的推导,还引进了相对论视觉形象;在近代物理部分,加强了物质结构的固体理论;此外,全书多处提到了非线性物理内容。纵观全书,明显加大、加深了近现代物理内容,其内容皆在可教、可学的范围内。

总之,我们觉得,教材是为学生和老服务。培养目标和学生的基础决定了教材的起点及其内容的深浅,科学的发展决定了教材的扩展。因此,教材一定要分层次。为此我们在这方面做了一些努力,尽管还存在着许多不足,但明确地传导了我们编写教材的思路。

教材编写分工如下:张玉萍负责第1、2、3章和第14章一部分;黄宏彬负责第4、15、16章;周雨青负责第5、6章和第12、13、14章的引言部分;张道宇负责第7、8、10章;朱明负责第9章;董科负责第11章;王勇刚负责第12、13章;范吉阳负责第14章一部分。周雨青负责全书的策划与统稿工作。

书稿自2006年开始编写,历时4年,经多次修改并试用,终于在2010年收笔。在这期间,叶善专老师一如既往地关心和支持着我们,可以这样说,是叶老师的倡导,才有了我们完成这本书稿的动力。在此向叶老师表示深深的谢意!同时感谢清华大学出版社的朱红莲编辑,她耐心细致的工作为本书增色不少。夏桂红老师为本书出版前做最后一次校稿,感谢他为此付出的辛劳。

因编著者经验有限,书稿中错误难免,还请读者多提宝贵意见,在此预先向你们表示感谢!

编者

2010年9月于东南大学



第 9 章 稳恒磁场	1
引子：地球磁场是否会再次发生惊天大倒转	1
9-1 磁力、磁场和磁感应强度	2
9-1-1 磁力	2
9-1-2 磁场	3
9-2 毕奥-萨伐尔定律	4
9-2-1 稳恒电流的磁场	4
9-2-2 毕奥-萨伐尔定律的应用	6
9-2-3 运动电荷的磁场	10
9-3 磁场中的高斯定理和安培环路定理	12
9-3-1 磁感应线、磁通量、高斯定理	12
9-3-2 安培环路定理	15
9-3-3 安培环路定理的应用	17
9-4 磁场对载流线圈和运动电荷的作用	19
9-4-1 安培力	19
9-4-2 载流线圈在均匀外磁场中的安培力矩	21
9-4-3 安培力与洛伦兹力的关系	21
9-4-4 电磁的相对性	22
习题	25
第 10 章 磁介质	29
引子：你知道磁性薄膜的作用吗	29
10-1 磁介质的磁化规律	30
10-2 磁化强度、磁化电流	31
10-3 磁介质中的高斯定理和安培环路定理	33
10-3-1 高斯定理	33
10-3-2 环路定理	33
10-3-3 磁场强度	34
10-4 铁磁质	35
习题	37

第 11 章 电磁感应	38
引子: 超导电性	38
11-1 法拉第电磁感应定律	39
11-2 动生电动势	41
11-3 感生电动势和涡旋电场	43
11-4 自感、自感磁能以及磁场中的能量	44
11-5 互感和互感磁能	47
11-6 LCR 串联电路的暂态过程	49
11-6-1 LC 电路	50
11-6-2 RC 电路	51
11-6-3 LR 电路	51
11-6-4 LCR 电路	51
11-7 位移电流	52
11-8 真空中的麦克斯韦方程组	55
习题	57
第 12 章 热力学基础	59
引子: 生命能够重来吗——浅谈自然界的不可逆现象	59
12-1 热力学平衡态及其描述	60
12-2 功、内能、热量和热力学过程	63
12-3 循环过程 卡诺循环	69
12-4 热力学第二定律	70
12-5 熵与熵增加原理	72
习题	75
第 13 章 气体动理论	78
引子: 从一滴墨水的扩散看自然界的有序和无序	78
13-1 气体分子运动规律	79
13-2 理想气体的微观模型、压强和温度的统计意义	80
13-3 能量均分定理	82
13-4 麦克斯韦速率和速度分布	84
13-5 玻耳兹曼分布	86
13-6 气体分子平均碰撞频率和平均自由程	87
13-7 实际气体	88
13-8 输运过程	89
13-9 热力学第二定律的统计解释	90

13-10 耗散现象	91
习题	92
第 14 章 光学	94
引子: 超光速存在吗? 光速能降至多少	94
14-1 光的相干性	95
14-1-1 原子的发光机理	95
14-1-2 获得相干光的方法	96
14-2 光的干涉	97
14-2-1 分波阵面干涉	97
14-2-2 分振幅干涉	101
14-2-3 干涉的应用	106
14-3 光的衍射	108
14-3-1 惠更斯-菲涅耳原理	108
14-3-2 单缝和圆孔的夫琅禾费衍射	109
14-3-3 光栅衍射	114
14-4 X 射线衍射	117
14-4-1 X 射线的产生	117
14-4-2 X 射线在晶体上的衍射	117
14-4-3 劳厄相、德拜相及其应用	119
14-5 光的偏振	119
14-5-1 光的偏振态	119
14-5-2 光的起偏与检验	121
14-6 偏振光的干涉	125
14-6-1 偏振光干涉的实现	125
* 14-6-2 人为双折射	126
* 14-7 旋光	128
14-7-1 晶体和液体的旋光性	128
14-7-2 旋光的理论解释	128
14-7-3 磁致旋光	129
* 14-8 光的色散	129
14-9 非线性光学	130
14-9-1 非线性光学	130
14-9-2 二倍频	131
习题	132
第 15 章 量子物理	134
引子: 从崂山道士之术到量子贯穿	134

15-1	辐射量子性(光的粒子性)	135
15-1-1	黑体辐射、普朗克能量量子假说	135
15-1-2	光电效应、爱因斯坦光量子论	138
15-2	粒子波动性	143
15-2-1	德布罗意波	143
15-2-2	不确定关系	146
15-3	量子力学简介	149
15-3-1	波函数的统计解释	149
15-3-2	薛定谔方程	151
15-3-3	一维定态问题	152
15-3-4	量子力学基本问题的争论	156
15-4	原子结构理论	157
15-4-1	原子有核模型	157
15-4-2	氢原子玻尔模型	158
15-4-3	氢原子的量子理论	163
15-4-4	多电子原子	168
15-5	固体量子理论	172
15-5-1	晶体的结构	172
15-5-2	晶体电子能带	174
15-5-3	导体、绝缘体和半导体	177
15-5-4	半导体激光器	180
15-5-5	超导物理基础	182
15-5-6	A-B 效应	186
	习题	188
第 16 章 非线性物理简介		191
	引子: 英国的海岸线有多长——浅谈分形理论	191
16-1	非线性系统	192
16-1-1	非线性系统的主要特征	192
16-1-2	非线性系统的动力学方程	193
16-1-3	相空间分析	196
16-2	孤波和孤子	198
16-2-1	孤波的发现	198
16-2-2	KdV 方程	199
16-2-3	孤子的性质	201
16-3	确定性混沌	202
16-3-1	混沌的发现	202

16-3-2	通向混沌之路	203
16-3-3	费根包姆常数、李雅普诺夫指数	205
16-4	分形和标度不变性	206
16-4-1	分形及分维	206
16-4-2	逾渗模型	208
16-4-3	标度不变性	209
	习题	211
	参考文献	212

稳恒磁场

引子：地球磁场是否会再次发生惊天大倒转

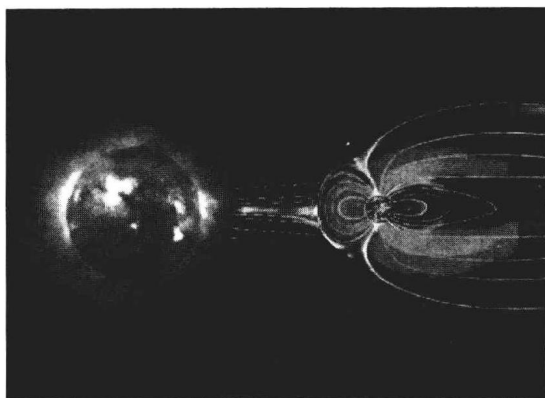


图1 科学家勾画出一幅精致的近日地空间的地球磁层图

地球磁极变化的最激动人心的一幕是“磁极倒转”事件。在地球演化史中，“磁极倒转”事件经常发生。美国《国家地理杂志》发表文章解释了地球磁场“南北颠倒”的原因。

仅在近450万年里，就可以分出四个磁场极性不同的时期。有两次和现在基本一样的“正向期”，有两次和现在正好相反的“反向期”。而且，在每一个时期里，有时还会发生短暂的磁极倒转现象。地球磁场的这种磁极变化，同样存在于更古老的年代里。从大约6亿年前的前寒武纪末期，到约5.4亿年前的中寒武世，是反向磁性为主的时期；从中寒武世到约3.8亿年前的中泥盆世，是正向磁性为主的时期；中泥盆世到约0.7亿年前的白垩纪末，还是以正向极性为主。如果把地球的历史缩短成一天，在这期间你会发现手上的指南针像疯了似地乱转，一会儿指南一会儿指北。地球磁极倒转造成的后果相当严重，将影响整个自然界。

专家们指出，最大的灾难莫过于强烈的太阳辐射。平时，宇宙射线在太空中就被地球磁场吞没了。然而地球两极倒转过程中一旦地球磁场消失，这些太阳粒子风暴将会猛击地球大气层，对地球气候和人类命运产生致命的影响。这一天如果真的到来，一些低轨道人造卫星也将完全暴露在太阳电磁风暴的吹打中，不久就会被完全摧毁。另外，许多靠地球磁场导航的生物，诸如燕子、羚羊、鲸鱼、鸽子和趋磁性细菌等，都会迷失方向。有的科学家甚至因

此怀疑,地球磁极倒转曾是古人类文明覆灭的原因。

英国《自然》杂志刊登了关于“磁极倒转周期”的文章,再次引起了人们对这一话题的关注。“磁极倒转”是灾难逼近,还是杞人忧“地”?

9-1 磁力、磁场和磁感应强度

在第6章中我们曾研究了静电荷产生的静电场的性质和规律,磁力与电力一样,服从库仑定律的事实以及其他一些考虑促使人们猜想磁现象与电现象之间存在某种联系。

9-1-1 磁力

中国是世界上最早发现并利用磁现象的国家。传说我国在上古时代就发现了天然磁铁,人们在战国末年时期就已会使用古代四大发明之一的指南针的前身——司南来判断方向了。英国人吉尔伯特于1600年发表的著名的《论磁体》(*on the magnet*)被公认为是人类第一部有关磁学的论著。

人们最初是从天然永磁体(Fe_3O_4)上观察到磁力的。早年的观察得到以下结论:①永磁体能吸引铁质物质;②条形磁体的两端吸引铁屑最多,表明这些区域的磁性最强,称为磁极;③可自由转动的水平放置的条形永磁体在达到平衡时总是大致沿南北极取向,指南的磁极称为南极(S极),指北的磁极称为北极(N极);④同性磁极相互排斥,异性磁极相互吸引;⑤将一个条形磁体作1/2分割,仍具有N、S极,说明永磁体不存在独立的N极或S极。人们曾经认为存在一种类似电荷的“磁荷”,磁力的起源就是磁荷,磁极就是磁荷集中的区域,所以在历史上很长一段时间里,电学和磁学一直是彼此独立地发展着。直到19世纪初,一系列重要的发现打破了这种局面,人们开始认识到电现象与磁现象之间存在着不可分割的联系。

一般情况下磁力是指电流和磁体之间的相互作用力。磁力很容易用两磁铁棒来进行演示。1819年,丹麦科学家奥斯特(H. C. Oersted)发现通电导线周围的小磁针会发生偏转(如图9-1所示),奥斯特实验表明了电流可以对磁铁施作用力。反过来,当把通电导线悬挂在蹄形磁铁的两极之间,导线会被吸入或排开(如图9-2所示),说明通电导线受到了磁铁的作用力。

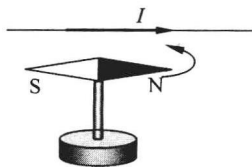


图 9-1 奥斯特实验

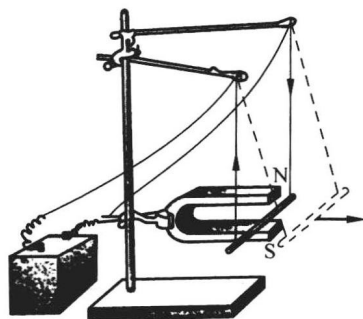


图 9-2 磁体对电流的作用

此外,还有一些实验可以演示磁力(如图9-3所示)。

在这些实验中,图9-3(a)说明了磁体对运动电子的作用,图9-3(b)说明了平行电流间

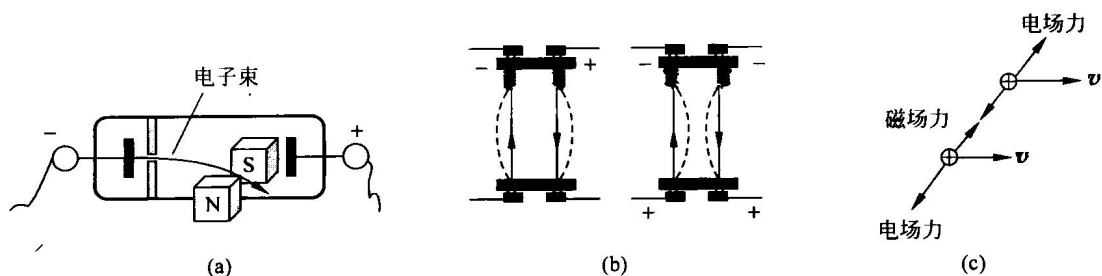


图 9-3 磁力

的作用,图 9-3(c)说明了运动电荷间的作用。这些实验无一例外都说明了自然界的一切磁力都起源于电荷的运动。虽然在图 9-1、图 9-2 和图 9-3(a)的实验中涉及的是永磁体,但是在组成永磁体的分子或原子的内部,电子和质子等带电粒子的运动也可以形成微小的电流,叫分子电流。目前已经很清楚,当成为磁体时,这些分子电流的方向按照一定的方式排列起来。一个永磁体与另一个永磁体或者电流间的相互作用,实际上是排列好的分子电流之间或它们与导线中定向运动的电荷之间的相互作用。因此永磁体之间或永磁体与电流之间的相互作用都是运动电荷间的相互作用。

总之,磁力都是运动电荷之间相互作用的表现。

9-1-2 磁场

在静电场的研究中我们已经知道,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。电流间(包括运动电荷间)的相互作用也是通过场来传递的,产生磁力的场叫磁场。运动电荷(包括传导电流和永磁体)在其周围空间激发磁场,磁场再作用于运动电荷(或传导电流、永久磁体)。磁场可以脱离产生它的“源”而独立存在于空间中。磁场是存在于运动电荷周围空间除电场之外的另一种特殊物质。

要定量研究磁场就要找到一个描写磁场的适当的物理量。我们可以从电场的定义取得借鉴。第 6 章中用 $F=qE$ 对静电场 E 下了定义,与此类似,可以对磁场定义一个与静电场的 E 对应的物理量,国际上统一记做 B ,称为磁感应强度。由于磁场对运动电荷施力,所以定义 B 时可以用运动电荷作为试探工具。实验表明,运动电荷在磁场中的受力,不仅与其电荷种类和电量多少有关,而且还与速度的大小和方向密切相关。实验中发现:

(1) 正电荷 $+q$ 以速度 v 经过磁场中某点,可以发现当沿某一特定方向(或反方向)运动时,不受磁力作用。规定此时正电荷的速度方向即为磁感应强度 B 的方向(见图 9-4)。这个方向与将小磁针置于此处小磁针 N 极的指向一致。

(2) 正电荷沿其他方向运动时,所受的磁场力 F_m 的方向总是与 B 的方向垂直,也与 $+q$ 的速度 v 的方向垂直。因此由 v 和相应的 F_m 的方向可以进一步规定 B 的指向满足式(9-1)的矢量乘积关系式:

$$F_m = qv \times B \quad (9-1)$$

这个表示磁场作用于运动电荷的磁力又称之为

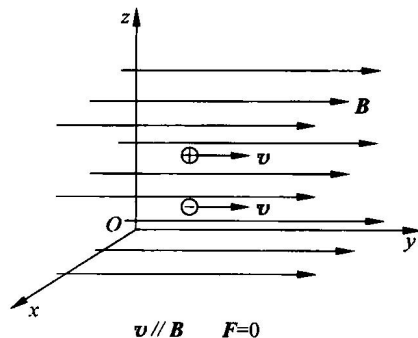


图 9-4

洛伦兹力。式中矢量 \mathbf{B} 是由此式定义的描述磁场本身性质的矢量——磁感应强度。在磁场中的不同处,磁感应强度的大小和方向可以不同。

(3) 以 α 表示 $+q$ 的速度 \mathbf{v} 的方向与 \mathbf{B} 的方向之间的夹角,可以发现,磁力的大小 F_m 和 $qv \sin \alpha$ 成正比,且比值 $\frac{F}{qv \sin \alpha}$ 对于确定的场点有唯一的量值。

由此可见,比值 $\frac{F}{qv \sin \alpha}$ 表明了在该场点处磁场的强弱,因此定义:

$$B = \frac{F}{qv \sin \alpha} \quad (9-2)$$

磁场作用于运动电荷 q 的磁力大小:

$$F = qvB \sin \alpha$$

对于以速度 \mathbf{v} 运动的负电荷来说,其所受的磁力与正电荷所受的磁力大小相等,方向正好相反。

由上述讨论可知,磁力 F 、运动电荷的速度 \mathbf{v} 和磁感应强度 \mathbf{B} 相互构成右手螺旋关系。

在国际单位制中,磁感应强度 \mathbf{B} 的单位为 $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 或 $\text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,其名称叫特[斯拉],符号为 T。即:

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

几种典型的磁感应强度的大小如表 9-1 所示。

表 9-1 一些磁感应强度的大小

单位: T

原子核表面	约 10^{12}	大型电磁铁	1~2
中子星表面	约 10^8	小型条形磁铁	约 10^{-2}
太阳表面	约 10^{-2}	人体磁场	10^{-12}
星际空间	10^{-10}	地球两极附近	6×10^{-5}
超导电磁铁	5~40	地球赤道附近	3×10^{-5}

(目前还常见的)磁感应强度的一种非国际单位制的单位名称叫高斯,符号为 Gs,它与 T 在数值上的关系是

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

在电磁学中,表示同一规律的数学形式常常随所采用的单位制不同而不同,式(9-1)只适用于国际单位制。

产生磁场的运动电荷或电流可以称为磁场源。实验指出,在有若干个磁场源的情况下,它们产生的磁场服从叠加原理。以 \mathbf{B}_i 表示第 i 个磁场源在某处产生的磁场,则在该处的总磁场大小为

$$\mathbf{B} = \sum \mathbf{B}_i \quad (9-3)$$

9-2 毕奥-萨伐尔定律

9-2-1 稳恒电流的磁场

恒定电流激发的磁场称为恒定电流的磁场,也可以称为静磁场或恒定磁场。在静磁场中,空间任意一点处的磁感应强度 \mathbf{B} 仅是坐标的函数,而与时间无关。

毕奥-萨伐尔定律

第6章中求解由若干个点电荷组成的点电荷系中空间某点的电场强度时,采用的方法是首先求出每个点电荷单独存在时在该处的电场强度,然后利用场强叠加原理,即可求出若干个点电荷同时存在时的电场强度。

磁场是由电流产生的,类似于点电荷的概念和它在定义电场强度 E 中的作用,引入电流元 $I dl$ 的概念。其中, I 为回路导线中的电流, dl 是闭合回路导线中沿电流方向所取的一个长为 dl 的矢量线元,电流元中电流的流向就作为线元矢量的方向。这样,就可以将一载流导线看成是由许多个电流元 $I dl$ 连接而成的。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在该点的 dB 的叠加。

电流在其周围所产生的磁场,其规律的基本形式是电流元产生的磁场和该电流元的关系。1820年毕奥(J. B. Biot)和萨伐尔(F. Savart)等人根据对电流的磁作用的实验结果分析得出电流元所产生的磁场的规律,称为毕奥-萨伐尔定律。其内容如下:

(1) 电流元 $I dl$ 在空间某点 P 处产生的磁感应强度 dB 的大小与 P 点相对于电流元 $I dl$ 的大小成正比,与 P 点相对于电流元 $I dl$ 的位矢 r 和电流元 $I dl$ 之间的夹角 θ 的正弦成正比,而与 P 点到电流元距离 r 的平方成反比。

(2) dB 垂直于 $I dl$ 与 r 组成的平面,方向用右手螺旋法则确定。

以 $I dl$ 表示一恒定电流的电流元,以 r 表示从此电流元指向某一场点 P 的矢径(见图 9-5),则此电流元在 P 点产生的磁场 dB 由下式决定

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times e_r}{r^2} \quad (9-4)$$

式中, $\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 C^2} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率。由于电流元不能孤立地存在,所以式(9-4)不是直接对实验数据的总结。

有了电流元的磁场公式(9-4),根据叠加原理,任意有限长的线电流的磁场在场点 P 的磁感应强度 B 等于线电流上各个电流元在该场点的磁感应强度 dB 的矢量和,即可通过积分求得

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I dl \times e_r}{r^2} \quad (9-5)$$

如果是体分布电流或者是面分布电流,则可以将它们看成是由许多线电流的集合,再作进一步的计算。

由于电流元本身是矢量,给定一个电流元就相当于给出了一个特殊的方向,因而电流元的磁场与点电荷的电场不同,点电荷的电场具有球对称性而电流元的磁场却没有球对称性。但我们不难想象出,电流元的磁场具有轴对称性,且对称轴应该是把 $I dl$ 延长所得的直线。设 N 是任一与 $I dl$ 延长线正交的平面(图 9-6), O 为平面与 $I dl$ 延长线的交点,则平面上以

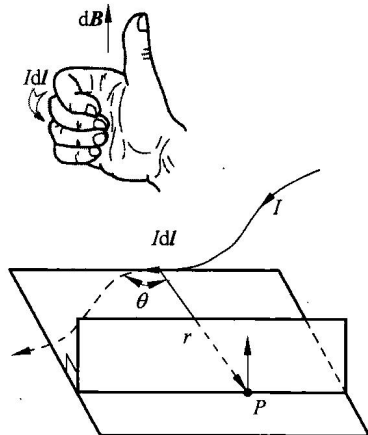


图 9-5

O 点为圆心的任一圆周上各点的 dB 大小相同,方向沿切向,而且与 Idl 有右手螺旋关系。令右手拇指代表 Idl 的指向,则弯曲的四指代表 dB 的方向(见图 9-6),由此可知电流元的所有的磁感应线都是同心圆周。

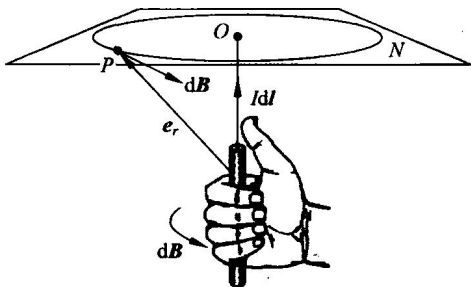


图 9-6

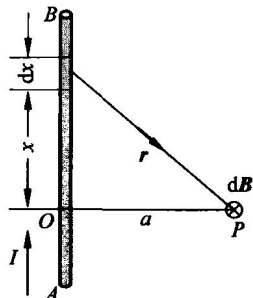


图 9-7

9-2-2 毕奥-萨伐尔定律的应用

应用毕奥-萨伐尔定律原则上可以计算任意电流系统产生的磁场,但在具体计算时应注意式(9-5)中的被积函数是矢量,应对各分量进行积分。现举几个简单的例子如下。

1. 直线电流的磁场

例 1 如图 9-7 所示,直导线中通以电流 I ,求长度为 L 的直导线段的电流在它周围某点 P 处的磁感应强度, P 点到导线的垂直距离为 a 。

解 以 P 点在直导线上的垂足为原点 O ,选取坐标如图所示。由毕奥-萨伐尔定律可知,线段 L 上任意一电流元 Idl 在 P 点所产生的磁场为

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

式中, r 为从 Idl 到 P 点的矢径。用右手螺旋法则可以判断出 dB 的方向垂直于纸面向里,大小为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idx}{r^2} \cdot \frac{a}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{aI dx}{(x^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

由于此直导线各电流元在 P 点所激发的磁场方向都相同,所以整根导线在 P 点激发的磁感应强度为

$$B = \int_A^B \frac{\mu_0 a I}{4\pi} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

设 A 点的坐标为 x_1 , B 点的坐标为 x_2 ,则由上式可得

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 a I}{4\pi} \frac{x}{a^2 (x^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} \Big|_{x_1}^{x_2} \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left[\frac{x_2}{(x_2^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{x_1}{(x_1^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned}$$

如果导线无限长,则 $x_1 \rightarrow -\infty$, $x_2 \rightarrow \infty$,上式变为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (9-6)$$

因而,无限长载流导线周围的磁感应线是一系列以导线为中心的同心圆,且与电流成右手螺旋关系。

将一个带孔圆盘水平悬挂在一根竖直的长导线上,沿盘的某一直径对称地放置两个相同的永磁棒,如图 9-8 所示。当直导线通有电流时,每一磁棒的两极都受到导线磁场的磁力,分别记作 F_1, F_2 和 F'_1, F'_2 。设两极与中心的距离分别为 a_1, a_2 , 则圆盘受到两个方向相反的力偶矩,其大小各为 $2F_1 a_1, 2F_2 a_2$ 。实验表明圆盘不因导线通电而出现任何转动迹象,说明圆盘所受总力矩为零,即 $F_1 a_1 = F_2 a_2$ 。如果直长导线的 B 反比于距离,这一现象就能得到解释。毕奥和萨伐尔最初就是利用这种装置得到直长导线的 B 反比于距离的结论。在圆盘上放置两个磁棒而不是一个磁棒的好处是:(1)使重力得以平衡。(2)按照图 9-8 的方式放置的一对磁棒实际上是一个无定向磁棒,可以消除地磁的影响。(3)与用一根磁棒相比有较高的灵敏度。

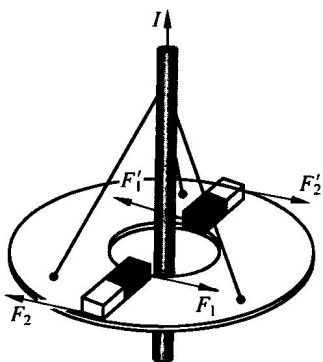


图 9-8 毕奥-萨伐尔实验

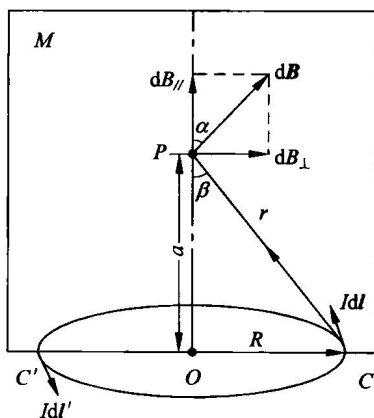


图 9-9 圆形电流轴线上的磁场

2. 圆形载流导线的磁场

例 2 如图 9-9 所示,一半径为 R 的圆形载流导线中电流强度为 I ,求圆形导线轴线上的磁场分布。

解 在圆周上任取一点 C , M 为由半径 OC 与轴线决定的平面,则从 C 点到轴线上任一点 P 的矢量 $r = r e_r$, 必在 M 内(见图 9-9)。 C 点的电流元 $I dl$ 垂直于 M , 所以也垂直于 r , 于是由毕奥-萨伐尔定律知轴线上任一点 P 的 dB 大小为

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

设 dB 与轴的夹角为 α , 将 dB 分解为轴向分量 $dB_{//}$ 和横向分量 dB_{\perp} 。将半径 OC 反向延长交圆周于 C' , 可见 C' 的电流元 $I dl'$ 贡献的 dB'_{\perp} 满足 $dB'_{\perp} = -dB_{\perp}$ 。由此不难知道整个圆周在 P 点的磁场 B 只有轴向分量, 大小为

$$B = \oint dB_{//}$$

而

$$dB_{//} = dB \cos \alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \cos \alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \sin \beta$$

由