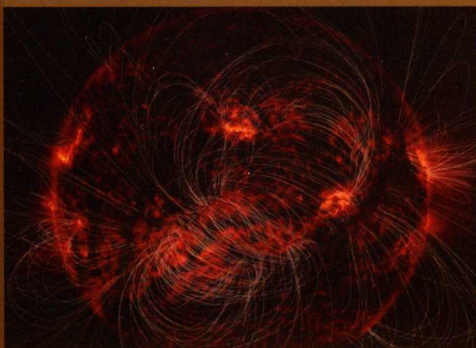


(第二版)

Fundamentals of Magnetism
and Magnetic Materials

磁学基础与磁性材料



严 密 彭晓领 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

磁学基础与磁性材料

(第二版)

严 密 彭晓领 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

磁学基础与磁性材料 / 严密, 彭晓领著. —2 版.

—杭州: 浙江大学出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-308-19117-3

I. ①磁… II. ①严… ②彭… III. ①磁学②磁性材料 IV. ①O441.2②TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 080354 号

内容简介

本书主要包含四部分内容:第一部分阐述铁磁学的基础理论和重要概念,包括原子磁矩、基本磁现象、磁畴结构、技术磁化和动态磁化理论等,共 6 章;第二部分介绍常用软磁材料,包括软磁材料性能参数、金属软磁材料、铁氧体软磁材料,共 3 章;第三部分介绍常用永磁材料,包括金属永磁材料、铁氧体永磁材料和稀土永磁材料,共 4 章;第四部分介绍其他磁性功能材料,包括磁性纳米材料、磁记录材料、磁性液体、磁致伸缩材料、磁热效应材料、自旋电子学材料,共 6 章。本书讨论的磁性材料既有已广泛应用的材料,也有正成为科学研究的热点、有望在将来获得重要应用的材料。

本书可作为高等学校磁学及磁性材料相关专业本科生及研究生的教学用书,也可作为从事磁性材料生产和研发的工程技术人员的参考书。

磁学基础与磁性材料(第二版)

严 密 彭晓领 著

责任编辑 杜希武

责任校对 陈静毅 汪志强

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州好友排版工作室

印 刷 杭州高腾印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 31.75

字 数 792 千

版 次 2019 年 5 月第 2 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-19117-3

定 价 89.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

自拙著《磁学基础与磁性材料》2006年出版以来,至2017年已重印15次,成为我国磁学和磁性材料领域销售量最大的著作之一,不仅成为我国高等院校材料专业本科生和研究生的教辅用书,也成为工程技术人员的重要参考书。十多年来,磁学和磁性材料领域诞生了大量新知识和新技术,磁性材料已成为国民经济和国防建设关键基础材料,我国已发展为全球磁性材料产业中心,若干领域达到国际先进水平。为反映磁性材料科学理论和实用技术的进步,本书著者对原书内容进行了重新组织,对原有章节进行更新与增补,增加了纳米磁性材料、自旋电子学材料等内容,补充了国内外新的研究成果,并将全书分为四个部分。第一部分阐述铁磁学基础理论和基本概念,包括原子磁矩、基本磁现象、磁畴结构、技术磁化和动态磁化理论等;第二部分介绍主要软磁材料,包括金属软磁、铁氧体软磁和软磁复合材料;第三部分介绍主要永磁材料,包括金属永磁、铁氧体永磁和稀土永磁;第四部分介绍其他磁性功能材料,包括磁记录材料、磁性液体、磁致伸缩材料、磁热效应材料、自旋电子学材料以及低维磁性材料。

著者希望能使读者在较短的篇幅中对磁学原理及磁性材料有较全面的认识,尽量避免复杂的数学推导和过深的理论描述。对部分重要材料的制备工艺也进行了介绍,方便读者理解并供工程技术人员参考。本书阐述的材料,部分已广泛应用,另有部分正成为研究热点,有望将来获得重要应用。全书仍采用国际通用的SI单位制,传统的CGS电磁单位诸如高斯、奥斯特等至今仍有很多应用,因此专门介绍了两种不同的单位制,并提供两种单位制的磁学量单位换算表和常用物理常数表,以方便读者查对。每章后面都附有习题和参考文献,以方便教学和研究人员查阅原始资料。由于篇幅限制,仍有部分文献未能一一列出,在此谨向文献作者表示歉意。

白国华博士、张玉晶博士、刘孝莲博士、吕慧鹏博士和郭婷硕士参与了部分章节的撰写,李静博士和陶姗博士参与了本书的校订工作,在此对他们的辛苦付出表示衷心感谢。

本书覆盖的领域和材料类型较广,加上作者水平有限,一定存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2018年3月于杭州

目 录

第一部分 铁磁学基础

第1章 导 论	3
1.1 静磁现象	3
1.2 材料的磁化	12
1.3 磁性和磁性材料的分类	15
1.4 单位制	22
1.5 磁测量	25
习 题	26
参考文献	27
第2章 磁性起源	31
2.1 原子磁矩	31
2.2 抗磁性	38
2.3 顺磁性	39
2.4 铁磁性	42
2.5 反铁磁性	48
2.6 亚铁磁性	53
习 题	65
参考文献	66
第3章 磁各向异性和磁致伸缩	71
3.1 磁各向异性基本概念	71
3.2 磁晶各向异性	71
3.3 感生各向异性	80

3.4	交换各向异性	82
3.5	表面和界面磁各向异性	83
3.6	磁致伸缩	85
	习 题	91
	参考文献	91
第 4 章	磁畴理论	94
4.1	磁畴成因	94
4.2	畴壁结构及性质	95
4.3	磁畴结构	100
4.4	磁畴观测技术	109
	习 题	113
	参考文献	113
第 5 章	技术磁化	115
5.1	起始磁化曲线	115
5.2	畴壁位移磁化过程	117
5.3	磁畴转动磁化过程	127
5.4	反磁化过程	131
5.5	静态磁参数	135
	习 题	142
	参考文献	142
第 6 章	动态磁化	146
6.1	动态磁化过程	146
6.2	磁化强度矢量的运动方程	148
6.3	磁畴和畴壁的动态特性	150
6.4	动态磁参数	157
6.5	动态磁化过程中的损耗	162
6.6	微波磁化	166
	习 题	168
	参考文献	168

第二部分 软磁材料

第 7 章	软磁材料性能参数	173
7.1	起始磁导率	173

7.2	有效磁导率	175
7.3	矫顽力 H_C	176
7.4	饱和磁感应强度 B_s	177
7.5	直流偏置特性	178
7.6	磁损耗	179
7.7	稳定性	181
	习 题	182
	参考文献	182
第 8 章	金属软磁材料	184
8.1	电工纯铁	185
8.2	硅钢	187
8.3	坡莫合金	195
8.4	其他传统软磁合金	203
8.5	非晶软磁材料	207
8.6	纳米晶软磁材料	209
8.7	软磁复合材料	213
	习 题	220
	参考文献	220
第 9 章	铁氧化物软磁材料	225
9.1	锰锌铁氧体	226
9.2	镍锌铁氧体	231
9.3	平面六角晶系铁氧体	236
9.4	铁氧化物软磁材料的制备	240
	习 题	241
	参考文献	241

第三部分 永磁材料

第 10 章	永磁材料性能参数	247
10.1	剩磁 B_r	247
10.2	矫顽力 H_C	248
10.3	最大磁能积 $(BH)_{\max}$	250
10.4	稳定性	251
	习 题	251

参考文献	253
第 11 章 金属永磁材料	253
11.1 Al-Ni-Co 永磁合金	254
11.2 Fe-Cr-Co 永磁合金	261
11.3 Fe-Pt 永磁合金	264
11.4 Mn-Bi 永磁合金	268
习 题	271
参考文献	271
第 12 章 铁氧体永磁材料	274
12.1 铁氧体永磁材料的晶体结构	274
12.2 铁氧体永磁材料的制备	275
12.3 铁氧体永磁材料的性能	279
习 题	280
参考文献	281
第 13 章 稀土永磁材料	285
13.1 稀土永磁材料概述	285
13.2 稀土钴系永磁材料	287
13.3 Nd-Fe-B 稀土永磁材料	291
13.4 双相纳米晶复合永磁材料	311
13.5 Sm-Fe-N 系永磁材料	317
习 题	321
参考文献	321

第四部分 其他功能磁性材料

第 14 章 磁性纳米材料	329
14.1 磁性纳米材料的矫顽力	329
14.2 磁畴转动主导的反磁化过程	331
14.3 畴壁位移主导的反磁化过程	335
14.4 超顺磁性	337
14.5 磁性纳米材料的典型应用	342
习 题	343
参考文献	343
第 15 章 磁记录材料	347
15.1 磁记录概述	348

15.2	磁头及磁头材料	357
15.3	磁记录介质及介质材料	362
15.4	磁光记录材料	371
15.5	磁泡及磁泡材料	382
	习 题	385
	参考文献	385
第 16 章	磁性液体	388
16.1	磁性液体的基本概念	389
16.2	磁性液体的基本特性	391
16.3	磁性液体的稳定性	396
16.4	磁性液体的分类	398
16.5	磁性液体制备方法	399
16.6	磁性液体应用	401
	习 题	405
	参考文献	405
第 17 章	磁致伸缩材料	409
17.1	磁致伸缩材料概述	409
17.2	稀土超磁致伸缩材料	410
17.3	非稀土磁致伸缩材料	416
17.4	磁致伸缩材料制备	423
17.5	磁致伸缩材料测试技术	424
17.6	磁致伸缩材料应用	426
	习 题	430
	参考文献	430
第 18 章	磁热效应材料	434
18.1	磁热效应	434
18.2	磁制冷技术	437
18.3	磁热效应材料	441
18.4	磁制冷应用	448
	习 题	449
	参考文献	449
第 19 章	自旋电子学材料	453
19.1	自旋电子学介绍	453
19.2	磁电阻材料	454

19.3 半金属材料.....	477
19.4 稀磁半导体.....	485
习 题.....	490
参考文献.....	491

第一部分 铁磁学基础

磁性是自然科学史上最古老的现象,磁性材料的应用也在人类文明中源远流长,对于推动人类文明的进步有着非常重要的作用。

最早的磁性材料是天然磁石,一种铁的氧化物(Fe_3O_4),被天然闪电产生的超大电流磁场磁化。在远古时代,苏美尔人、希腊人、中国人和美洲人就十分熟悉并且已经开始使用天然磁石。在北宋年间,工匠们发现将红热的钢针淬火,钢针会在地球磁场下被磁化,从而得到了最早的人工磁铁。在指南针传入欧洲后大航海时代开启了,接着哥伦布发现美洲大陆。

技术的进步很快带来电磁理论的发展。1820年丹麦科学家 Oersted 发现通电导线可以使旁边的磁针发生偏转,很快 Ampere 就进一步发现通电线圈等效于一个磁铁,开始将磁现象和电现象联系在一起。1821年法拉第认为电场力和磁场力都是由一种普遍存在的场引起的,接着他发现了电磁感应,并且采用磁钢设计出了电动机的原型。法拉第随后又发现在磁和光之间也存在着联系,进而发现了磁光效应。Maxwell 在前面理论和实践成果的启发下,将磁、电、光作为一个有机整体,提出了著名的 Maxwell 方程组。Maxwell 方程组的精妙之处在于其将空间中某一点的电场强度与磁场强度和空间中某一个范围内的电荷与电流密度的分布联系起来。

电磁理论的发展又进一步促进磁性材料的研究和开发。1900年研制出硅钢(Si-Fe合金),1920年研制出坡莫合金,1935年研制出尖晶石型软磁铁氧体,很快人类就进入了电气化时代。铝镍钴、钕钴等高温永磁,特别是具有高磁能积、高矫顽力的钕铁硼永磁材料的研制成功,更是极大地促进了电机、风力发电、电动汽车等环境友好型新技术的发展。今天,电动机、磁性传感器、电感器、变压器、磁带、音响、硬盘和风力发电机等大量民用及工业器件都大量使用永磁及软磁材料。而磁光记录材料、磁致伸缩材料、磁电阻材料、磁热效应材料和磁性液体等功能磁性材料的应用领域也正在不断扩大,这极大地提高了我们的生产力和生活水平。

本书的第一部分主要阐述磁学和材料磁性的基础理论和基本概念,主要包括物质的磁性起源、基本磁现象、磁结构、技术磁化和动态磁化理论等。

1.1 静磁现象

1.1.1 磁矩

在静电学中,物质带电的表现是电荷之间的相互作用。材料中的正电荷和负电荷彼此产生相对位移,生成一个电偶极矩 p , 电荷 $+q$ 和 $-q$, 距离 d , 产生的电偶极矩 $p_e = qd$, 材料宏观的电偶极矩由单位体积内的电偶极矩 $P = np_e$ 给出, n 为单位体积内的偶极矩数。 P 通过电极化率 χ_e 与电场 E 联系起来:

$$P = \chi_e E$$

电位移 D 则通过介电常数 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 与 E 和 P 相联系:

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E + \chi_e E = (\epsilon_0 + \chi_e) E = \epsilon E$$

其中, ϵ_r 、 ϵ_0 分别为相对介电常数和真空介电常数。

在静电学中,两个电荷之间的作用力 F 可以用库仑定律来描述:

$$F = \frac{kQ_1 Q_2}{r^2}$$

其中, k 为库仑常数, Q_1 、 Q_2 分别为电荷量, r 为两个电荷之间的距离。

与静电学相似,物质的磁性最直观的表现是两个磁体之间的吸引力或排斥力。磁体中受引力或排斥力最大的区域称为磁体的极,简称磁极,磁极可以类比于静电学中的正负电荷。这样,上述现象就可以用磁极之间的相互作用来描述,这种相互作用与静电荷之间的作用相类似。迄今为止,所发现的磁体上都有两个自由磁极的存在。考虑强度为 m_1 (单位 Wb) 和 m_2 (Wb), 距离为 r (m) 的两个磁极,相互之间的作用力 F (单位 N) 为:

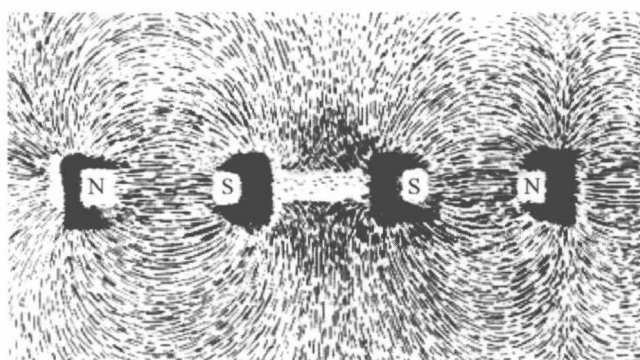
$$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi\mu_0 r^2} \quad (1.1)$$

其中, μ_0 称为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

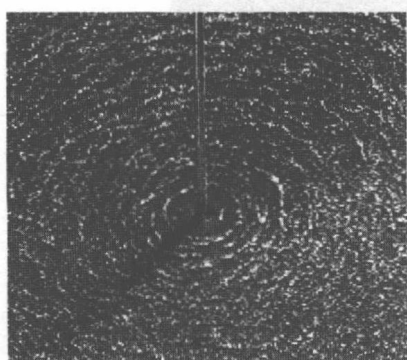
磁极之间能发生相互作用,是由于在磁极的周围存在着磁场。磁体周围磁场的分布可由磁力线表示,通常用磁体吸引铁屑的情况来表征磁力线的疏密,如图 1.1(a) 所示。从图 1.1(a) 中看到,磁极吸引的铁屑最多,说明磁极在空间散发的磁力线最密,磁场最强。磁力线具有以下特点:

磁力线总是从 N 极出发,进入与其最邻近的 S 极,并形成闭合回路;

磁力线总是走磁导率最大的路径,因此磁力线通常呈直线或曲线,不存在有直角拐弯的



(a) 由铁屑反映出的条形磁体的外部磁力线



(b) 通电直导线周围的磁力线

图 1.1

磁力线；

任意两条同向磁力线之间相互排斥，因此不存在相交的磁力线。

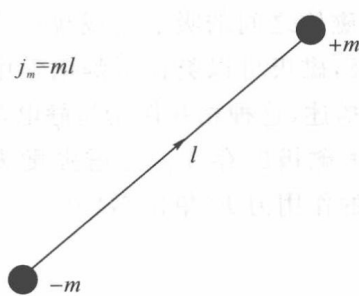
通电直导线的周围也会产生磁场，如图 1.1(b)所示。实际上，与静电学中的电偶极子相似，磁学中也引入了磁偶极子的概念。对于微小磁体所产生的磁场，可以由平面电流回路来产生。这种可以用无限小电流回路所表示的小磁体，定义为磁偶极子。设磁偶极子的磁极强度为 m ，磁极间距离为 l ，则用 $j_m = ml$ 来表示磁偶极子所具有的磁偶极矩。 j_m 的方向为由 S 极指向 N 极，如图 1.2(a)所示，单位是 $\text{Wb} \cdot \text{m}$ 。

虽然磁偶极子磁性的强弱可以由磁偶极矩来表示，但在实际上往往很难通过精确地确定磁极的位置，从而确定磁偶极矩的大小。

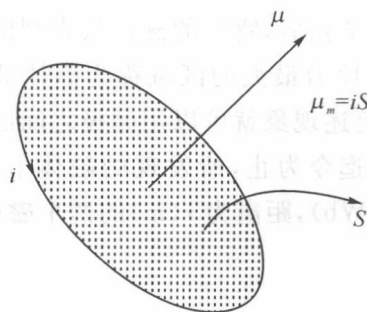
磁偶极子磁性的大小和方向可以用磁矩来表示。磁矩定义为磁偶极子等效平面回路的电流 i 和回路面积 S 的乘积，即

$$\mu_m = iS \quad (1.2)$$

μ_m 的方向由右手螺旋定则确定，如图 1.2(b)。 μ_m 的单位是 $\text{A} \cdot \text{m}^2$ 。



(a) 磁偶极矩



(b) 闭合电流产生的磁矩

图 1.2

j_m 和 μ_m 虽然有自己的单位和数值，却都是表征磁偶极子磁性强弱和方向的物理量，两者之间存在关系：

$$j_m = \mu_0 \mu_m \quad (1.3)$$

上式表明,磁偶极矩等于真空磁导率与磁矩的乘积。

在原子中,电子绕原子核做轨道运动。电子在原子壳层中的轨道运动是稳定的,因而,这种运动与通常的电流闭合回路比较,在磁性上是等效的。因此,原子中电子的轨道运动,同无限小尺寸的电流闭合回路一样,可以视为磁偶极子,其磁矩的大小由式(1.2)确定。

1.1.2 磁化强度 M

与电极化强度 P 用来描述物体带电强弱类似,磁化强度是描述宏观磁体磁性强弱程度的物理量。在磁体内取一个体积元 ΔV ,则在这个体积元内部包含了大量的磁偶极子。这些磁偶极子具有磁偶极矩 $j_{m1}, j_{m2}, \dots, j_{mi}, \dots, j_{mn}$ 或磁矩 $\mu_{m1}, \mu_{m2}, \dots, \mu_{mi}, \dots, \mu_{mn}$ 。

定义单位体积磁体内磁偶极矩矢量和为磁极化强度,用 J_m 表示:

$$J_m = \frac{\sum_{i=1}^n j_{mi}}{\Delta V} \quad (\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.4)$$

定义单位体积磁体内磁偶极子具有的磁矩矢量和为磁化强度,用 M 表示:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{mi}}{\Delta V} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (1.5)$$

J_m 和 M 虽然有各自的单位和数值,却都是用来描述磁体磁化的方向和强度。同样,它们之间存在关系:

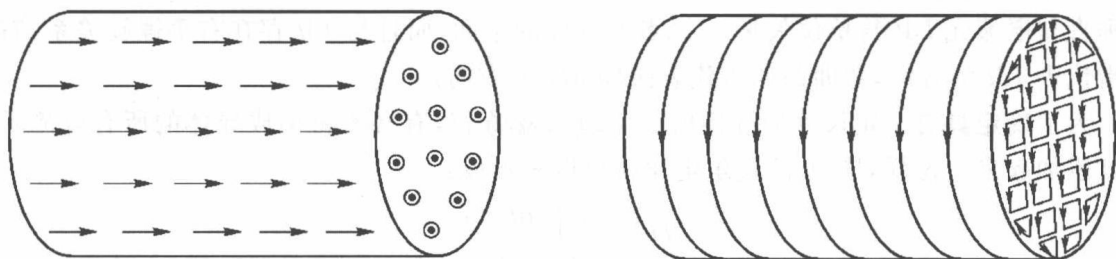
$$J_m = \mu_0 M \quad (1.6)$$

如果这些磁偶极子磁矩的大小相等且相互平行排列,如图 1.3(a)所示。则磁化强度简化为:

$$M = N\mu_m$$

其中, N 是单位体积内磁矩 μ_m 的总数。

磁偶极子又可以用微小电流回路来表示,这样磁体内部就由很多基本的闭合电流环充满,如图 1.3(b)所示。磁体内部相邻电流因方向相反而互相抵消,只有在表面一层上的电流未被抵消。



(a) 将磁化强度看成是磁偶极子的集合

(b) 将磁化强度看成是闭合电流环的集合

图 1.3 从两个角度理解磁化强度

1.1.3 磁场强度 H 和磁感应强度 B

人们一般将磁极受到作用力的空间称为磁场,导体中的电流或永磁体都会产生磁场。空间中的磁场可以用 H 或 B 两个参量来描述。 H 称为磁场强度, B 称为磁感应强度,也称磁通密度。

磁场对置于其中的磁极产生力的作用,该力与磁极强度和磁场强度的乘积成正比。设磁极强度为 m ,场强为 H ,磁极受到力的大小为 F ,有:

$$F = mH \quad (1.7)$$

比较式(1.1)和式(1.7),相距为 r 的两个磁极 m_1, m_2 ,其中每一个磁极均置于另外一个磁极所产生的磁场中,磁极 m_1, m_2 处磁场大小分别为:

$$H_{m_1} = \frac{m_2}{4\pi\mu_0 r^2}, \quad H_{m_2} = \frac{m_1}{4\pi\mu_0 r^2}$$

由式(1.7)给出磁场强度 H 的定义:单位强度的磁场对应于 1Wb 强度的磁极受到 1 牛顿的力。磁场强度的单位是 $A \cdot m^{-1}$ 。

虽然永磁体和电流都能产生磁场,但在实际应用中,常常用电流来产生磁场。法国物理学家毕奥和萨伐尔在实验的基础上得到了空间任意一点的磁场 H 同产生它的电流 I 之间的关系表达式,这就是毕奥-萨伐尔定律。任何载流导体都可以分成为多个无限小的电流元 Idl ,每个电流元对在它周围的每一场点上的磁场强度都将做出贡献。因此,我们可以先求出一个电流元在空间某场点产生的磁场强度 dH ,再根据场叠加原理,求得整个载流导体在该点产生的磁场强度。毕奥-萨伐尔定律指出,当恒定电流 I 流经微分长度为 dl 的导线时,其产生的微分磁场 dH 为:

$$dH = \frac{I dl \times e_r}{4\pi r^2}$$

其中, r 是电流元 Idl (看作是一点)与场点 P 的距离。 e_r 是从 Idl 指向 P 的单位矢量。可以看出,在任一点 P ,由微分电流产生的磁场强度的大小与电流强度、微分长度以及电流方向同电流元与点 P 连线之间夹角的正弦成正比,与微分电流元到点 P 之间的距离的平方成反比。磁场 H 的方向由电流元矢量 Idl 和距离单位 e_r 确定,根据矢量乘法运算规则,磁场 H 应垂直与电流元 Idl 与单位矢量 e_r 二者所构成的平面,而且与 Idl 存在右手螺旋关系:右手拇指代表 Idl 的方向,弯曲的四指代表磁场 dH 的方向。

为了确定具有一定尺寸的导体所产生的总磁场 H ,有必要将构成导体的所有电流元的贡献累加起来。这样,毕奥-萨伐尔定律就可以表示成:

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{dl \times e_r}{r^2}$$

其中, l 是沿着电流 I 的路径。该式为毕奥-萨伐尔定律的积分表达式,并且该式能够被实验所验证。

通过毕奥-萨伐尔定律,可以计算给定形状载流导线所产生的磁场。

(1) 先计算有限长载流直导线的磁场 H 。由毕奥-萨伐尔定律可知直导线上任意一电流元在任意一点 P 感生的磁场元 dH 都有相同方向,磁力线是躺在垂直于导线的平面内的、中心在导线上的一系列同心圆。于是 P 点处磁场 H 的大小可通过对磁场元的标量积分求得:

$$H = \int_0^L \frac{I}{4\pi} \frac{dl \sin \theta}{r^2}$$

其中, θ 是电流元 $I dl$ 与距离单位矢量 e_r 的夹角, L 为导线总长。如以 θ_1 和 θ_2 分别代表导线两端点所对应的 θ 值, 则上式可变为:

$$H = \frac{1}{4\pi r} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

无限长直导线是上述情况的一个特例, 此时 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$, 因此:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1.8)$$

说明无限长直导线的磁场取决于场点与导线的距离 r , 而且与 r 成反比, 越靠近导线处所产生的磁场强度越高, 如图 1.4(a) 所示。

(2) 同样, 根据毕奥-萨伐尔定律, 可以计算载流环形线圈圆心上的磁场强度, 其表示为:

$$H = \frac{I}{2r} \quad (1.9)$$

其中, I 为通过环形线圈的电流, r 为环形线圈的半径。 H 的方向按右手螺旋法则确定, 如图 1.4(b) 所示。

(3) 无限长载流螺线管的磁场强度为:

$$H = nI \quad (1.10)$$

其中, I 为流经环形线圈的电流, n 为螺线管上单位长度的线圈匝数。 H 的方向为螺线管的轴线方向, 如图 1.4(c) 所示。

如上所示, 随导体形状、尺寸不同, 磁场的性质、形态、场强分布都会发生变化。正是基于此, 实际应用中多采用各种各样导体形式的电磁铁, 根据用途不同还可以设计各种各样的磁场分布。

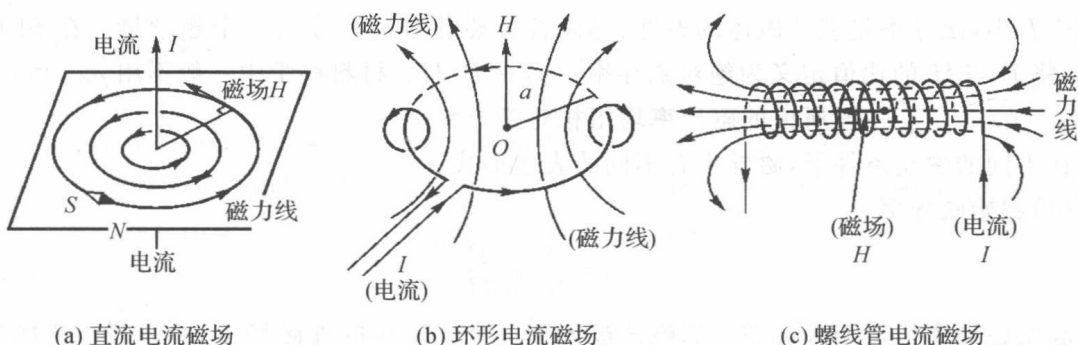


图 1.4 电流形成磁场的基本类型

在一些场合, 确定磁场效应的量是磁感应强度 B , 而不是磁场强度 H 。在 SI 单位制中, 磁感应强度的定义公式为:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.11)$$

B 的单位是 $[T]$ 或 $[Wb \cdot m^{-2}]$ 。

在真空中, $M = 0$, 则 $B = \mu_0 H$, B 和 H 始终是平行的, 数值上也呈比例, 两者的关系只由真空磁导率 μ_0 来联系。但在磁体内部, 两者的关系就复杂得多, 在 H 作用下, 磁体会发生磁化, 具有一定的磁化强度 M , 并且 M 不一定和 H 方向相同, 必须由式(1.11)来表示。