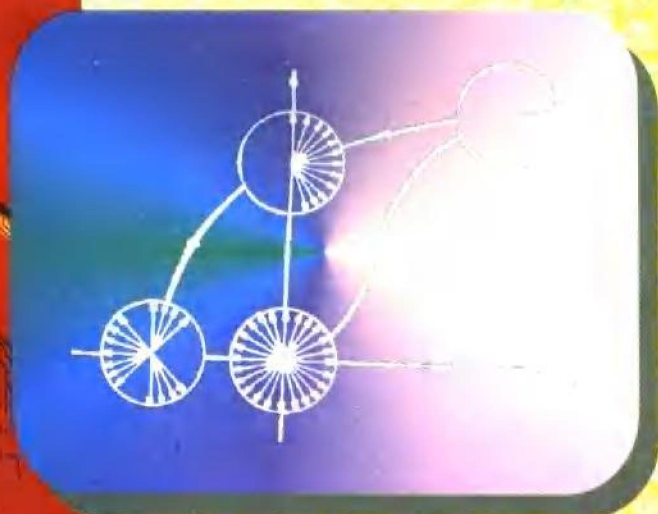


凝聚态物理学丛书

# 铁磁学

(中册)

钟文定 著



科学出版社

1765068

000000

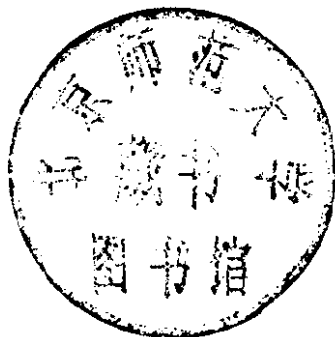
凝聚态物理学丛书

# 铁 磁 学

中 册

钟 文 定 著

70/167/08



科 学 出 版 社

1 9 9 8



北师大图书 B1385775

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了铁磁学的物理图象和基本理论,全书贯穿理论和实际相结合的思想。全书分上、中、下三册出版。上册专门讨论物质磁性的起源及其随温度的变化;中册介绍技术磁化理论与磁路设计原理;下册论述交流磁化理论和磁共振理论。本书为中册,共分五章(即第七章至第十一章),前四章主要从磁畴理论角度出发,论述磁性材料的静态技术特性,最后一章介绍永磁体磁路的设计及应用。关于磁晶各向异性的微观理论、低温下的特异磁性和非晶态磁性等亦有所论述。本书末尾还附有参考文献和附录。

本书可作为大专院校铁磁学课程的教材,也可供从事磁性材料研究和生产及其他有关专业的科技人员参考。

凝聚态物理学丛书

铁 磁 学

中 册

钟文定 著

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年8月第一版 开本:850×1168 1/32

1998年5月第三次印刷 印张:17 3/4

印数:2641—4140 字数:465 000

ISBN 7-03-002848-1/O·534

定价:36.00 元

## 《凝聚态物理学丛书》出版说明

以固体物理学为主干的凝聚态物理学，通过半个世纪以来的迅速发展，已经成为当今物理学中内容最丰富、应用最广泛、集中人力最多的分支学科。从历史的发展来看，凝聚态物理学无非是固体物理学的向外延拓。由于近年来固体物理学的基本概念和实验技术在许多非固体材料中的应用也卓有成效，所以人们乐于采用范围更加广泛的“凝聚态物理学”这一名称。

凝聚态物理学是研究凝聚态物质的微观结构、运动状态、物理性质及其相互关系的科学。诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学以及近期发展起来的表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等都是属于它的分支学科，而且新的分支尚在不断进发。还有，凝聚态物理学的概念、方法和技术还在向相邻的学科渗透，有力地促进了材料科学、化学物理学、生物物理学和地球物理学等有关学科的发展。

研究凝聚态物质本身的性质和它在各种外界条件（如力、热、光、气、电、磁、各种微观粒子束的辐照乃至处于各种极端条件）下发生的变化，常常可以发现多种多样的物理现象和效应，揭示出新的规律，形成新的概念，彼此层出不穷，内容丰富多彩，这些既体现了多粒子体系的复杂性，又反映了物质结构概念上的统一性。所有这一切不仅对人们的智力提出了强有力的挑战，更重要的是，这些规律往往和生产实践有着密切的联系，在应用、开发上富有潜力，有可能开辟出新的技术领域，为新材料、元件、器件的研制和发展，提供牢固的物理基础。凝聚态物理学的发展，导致了一系列重要的技术突破和变革，对社会和科学技术的发展将发生深远的影响。

为了适应世界正在兴起的新技术革命的需要,促进凝聚态物理学的发展,并为这一领域的科技人员提供必要的参考书,我们特组织了这套《凝聚态物理学丛书》,希望它的出版将有助于推动我国凝聚态物理学的发展,为我国的四化建设做出贡献。

主 编: 葛庭燧

副主编: 冯 端

# 前 言

我们在 1976 年编写出版了《铁磁学》，目的是使中专以上水平的、有实践经验的读者通过学习该书，能对一些与生产实践有密切联系的基本理论有一个初步的全面的了解，并用来指导实践。所以重点讨论了磁化的基本机制及其物理概念，略去了复杂的数学推导。由于铁磁学是研究物质磁性的来源及在外界因素(如磁场、温度、应力等)作用下、磁性发生变化的基本规律的学科。因此，《铁磁学》应以阐述铁磁体磁性的实验基础、基本理论和磁化机制为主，并在物理图象和概念上，以及主要理论分析上给予简明的叙述和数学推导。考虑到近几年来教学、科研和生产水平的提高，以及社会上对本学科的需求，我们在多次教学实践的基础上，对 1976 年出版的《铁磁学》一书进行了全面的修改。在修改时注意保留了原书的一些特点，同时加深和增补了较大的篇幅，希望做到在内容上能反映近代比较成熟的理论和实验结果。

修改后的内容分三部分，即自发磁化的基本现象和理论、技术磁化的机制和理论、交流磁化与磁共振的基本现象和理论。这三部分内容互有联系，又具有相对独立性，而且各自都有相当大的篇幅，所以分为上、中、下、三册出版。

上册专门讨论物质磁性的起源及其随温度的变化。分别从经典和量子力学原理、由浅入深地讨论了铁磁物质自发磁化的原因。详细地分析了局域电子模型和巡游电子模型的物理基础，并给出了各种理论结果的具体推导。最后介绍了格林函数方法及其对铁磁性的讨论。

中册主要介绍技术磁化理论与磁路设计原理。前者主要是在

磁畴理论\*的框架内、论述磁性材料的静态磁化和反磁化过程，即从唯象理论的角度对磁性材料的技术特性给予阐述；后者属于磁性材料的应用问题。将磁性材料技术性能的理论阐述与材料的使用设计放在铁磁学内，这是一种尝试，也是希望促使研制与设计的人员更好地结合。此外，磁晶各向异性的微观理论、矫顽力新理论、低温下的特异磁性和非晶态磁性等磁学和磁性材料方面的一些新进展，在中册也有所论述。

下册主要介绍交流磁化理论和磁共振理论。在交流磁化部分，主要阐述铁磁物质在交变电磁场中的性质、磁化机制和理论分析方法。在磁共振部分，对磁矩一致进动为基础的铁磁共振理论、磁矩非一致进动为基础的自旋波激发和共振理论、以及亚铁磁共振和反铁磁共振理论均有详细讨论。最后阐述了在雷达技术中广泛应用的主要器件的工作原理。

书中均采用国际通用的米、千克、秒、安培(SI)单位制。为了便于对比，有些公式还列出了在 C. G. S. 电磁单位制中的表示。书末还附有两种单位制中一些磁学量的数值关系表、磁学公式对照表和常用的物理常数表，以便查对。

本书上册由戴道生、钱昆明执笔；中册由钟文定执笔；下册由廖绍彬执笔。全书由郭贻诚教授审阅、提出了许多宝贵意见，特此致谢。此外，北京大学物理系的部分同志对中册的出版曾给予大力的支持和帮助，在此表示感谢。

此外，我们还感谢天津磁性材料总厂对本书第二次印刷的大力支持。

著者

---

\* 从前，技术磁化理论只有磁畴理论；现在，却有另一分支，叫做磁学 (Micromagnetics)。后者在原则上比前者进了一步，但许多实际问题仍无法处理。因此，就目前情况而言，它们是相互补充的。

# 目 录

## 上 册

绪论	
第一章	物质的抗磁性和顺磁性
第二章	自发磁化的唯象理论
第三章	自发磁化的交换作用理论
第四章	自旋波理论
第五章	金属磁性的能带模型理论
第六章	格林函数方法

## 中 册

绪论 .....	1
第七章 铁磁性的基本特点和基本现象 .....	3
§7.1 铁磁(亚铁磁)性的基本特点——自发磁化和磁畴 .....	3
§7.2 磁性材料中的基本现象及能量表述 .....	7
7.2.1 磁晶各向异性 .....	7
7.2.1.1 六角晶体的磁晶各向异性 .....	9
7.2.1.2 立方晶体的磁晶各向异性 .....	10
7.2.1.3 用转矩磁强计测量磁晶各向异性的原理 .....	15
7.2.1.4 磁晶各向异性的等效场——各向异性场 .....	17
7.2.2 磁致伸缩 .....	21
7.2.2.1 磁致伸缩的测量原理 .....	22
7.2.2.2 磁致伸缩的理论说明 .....	26
7.2.2.3 立方晶系中磁致伸缩的唯象表述 .....	28
7.2.2.4 立方晶系中的磁弹性能、弹性能和应力能 .....	37



7.2.3	磁荷(极)与退磁 .....	44
7.2.3.1	退磁场的产生 .....	44
7.2.3.2	运用磁荷观点计算球体的退磁场 .....	48
7.2.3.3	外场能和退磁能 .....	53
§7.3	磁晶各向异性的微观理论 .....	55
7.3.1	巡游电子模型 .....	56
7.3.2	单离子模型 .....	60
7.3.2.1	3d 磁性离子微观各向异性性能的计算 .....	62
7.3.2.2	4f 磁性离子微观各向异性性能的计算 .....	79
习题	.....	87
<b>第八章</b>	<b>磁畴结构</b> .....	<b>89</b>
§8.1	畴壁 .....	90
8.1.1	单轴晶体内的 180° 畴壁 .....	93
8.1.2	三轴晶体内的 180° 畴壁 .....	99
8.1.3	考虑磁弹性能后三轴晶体内的 180° 畴壁 .....	102
§8.2	铁磁薄膜内的畴壁 .....	106
§8.3	从能量观点说明大块材料分成磁畴的原因 .....	113
§8.4	单轴晶体的理论畴结构 .....	115
8.4.1	片形畴 .....	116
8.4.2	封闭畴 .....	118
8.4.3	片形畴的变异——棋盘结构、蜂窝结构、波纹畴壁 和片形-楔形畴结构 .....	120
8.4.4	封闭畴的变异——匕首封闭畴 .....	127
8.4.5	半封闭的畴结构 .....	132
§8.5	立方晶体的理论畴结构 .....	134
8.5.1	三轴晶体[100](001)面上的畴结构 .....	134
8.5.2	三轴晶体[110](001)面上的畴结构 .....	136
8.5.3	四轴晶体[111](110)面上的畴结构 .....	136
§8.6	树枝状磁畴 .....	139
§8.7	不均匀物质中的磁畴 .....	141
§8.8	单畴颗粒 .....	144
8.8.1	磁晶各向异性较弱的颗粒的临界半径 .....	145

8.8.2	立方晶体单畴颗粒的临界半径 .....	147
8.8.3	单轴晶体单畴颗粒的临界半径 .....	147
§8.9	磁泡 .....	150
8.9.1	引言 .....	150
8.9.2	圆柱形磁畴的静态理论 .....	151
8.9.3	产生磁泡的材料 .....	160
§8.10	观察磁畴的实验方法概要粉纹法的理论条件 .....	162
§8.11	磁畴照片剪辑 .....	171
	习题 .....	179
<b>第九章</b>	<b>磁性材料的磁化过程 .....</b>	<b>180</b>
§9.1	磁化和反磁化的概况 .....	180
§9.2	单轴单晶体的磁化过程 .....	187
9.2.1	片形畴的运动变化 .....	188
9.2.2	片形畴运动变化的理论分析 .....	190
§9.3	三轴单晶体的磁化过程 .....	203
§9.4	单晶体磁化过程的普遍理论 .....	214
9.4.1	计算单晶体磁化曲线的理论原则 .....	214
9.4.2	Fe 单晶体的(001)面上的磁化曲线 .....	216
9.4.3	Ni 单晶体的(110)面上的磁化曲线 .....	221
§9.5	多晶体的磁化,畴壁运动的阻力 .....	230
§9.6	可逆壁移过程决定的起始磁化率 .....	238
9.6.1	参杂阻碍畴壁运动的壁移磁化(参杂理论) .....	238
9.6.2	应力阻碍畴壁运动的壁移磁化(应力理论) .....	242
9.6.2.1	180° 壁的可逆位移 .....	242
9.6.2.2	不可逆的 180° 壁移磁化 .....	245
9.6.2.3	应力阻碍 90° 壁的运动 .....	247
§9.7	可逆畴转过程决定的起始磁化率 .....	251
9.7.1	外磁场对各类磁畴对称取向的恒导磁材料 .....	252
9.7.1.1	恒导磁材料的性能 .....	252
9.7.1.2	恒导磁材料内的转动磁化过程 .....	253
9.7.2	由磁晶各向异性控制的可逆转动磁化 .....	257
9.7.3	应力作用下的可逆转动磁化 .....	260

§9.8	磁化过程的理论在实践中的应用—— $\mu_i$ 的提高	…262
9.8.1	铁镍合金起始磁导率的提高	…263
9.8.2	软磁铁氧体起始磁导率的提高和温度稳定性	…267
9.8.2.1	提高起始磁导率的几个途径	…267
9.8.2.2	起始磁导率的温度系数问题	…273
§9.9	多晶磁性材料在强磁场下的磁化曲线——趋 近饱和定律	…276
§9.10	不可逆磁化过程	…283
9.10.1	不可逆壁移磁化	…284
9.10.1.1	内应力作用下的不可逆壁移	…285
9.10.1.2	参杂物作用下的不可逆壁移	…287
9.10.2	不可逆转动磁化	…289
§9.11	磁畴理论在大功率软磁材料中的应用——硅 钢片磁性的提高	…298
9.11.1	硅钢的性能	…300
9.11.2	晶粒定向	…303
9.11.3	硅钢片磁性与磁畴结构	…305
9.11.3.1	主畴运动引起的损耗	…306
9.11.3.2	附加畴运动引起的损耗	…313
习题		…317
<b>第十章</b>	<b>磁性材料的反磁化过程</b>	…319
§10.1	引言	…319
§10.2	应力和参杂阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力	…323
10.2.1	应力阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力	…323
10.2.2	参杂阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力	…326
§10.3	磁矩不可逆转动决定的矫顽力	…327
10.3.1	磁晶各向异性控制的矫顽力	…329
10.3.2	形状各向异性控制的矫顽力	…335
10.3.3	单畴颗粒集合体的矫顽力	…338
§10.4	由反磁化核的形成和长大决定的矫顽力	…343
§10.5	矫顽力新理论简介	…354
10.5.1	点缺陷对畴壁的钉扎	…356

10.5.2	面缺陷对畴壁的钉扎 .....	360
10.5.3	在脱溶物或晶体表面上反磁化核的成长 .....	372
10.5.3.1	脱溶薄片上的形核场 .....	372
10.5.3.2	晶粒表面上的形核场 .....	375
10.5.3.3	反磁化核长大的挣脱钉扎场 .....	377
10.5.4	窄畴壁与低温下的特大矫顽力 .....	381
10.5.4.1	低温磁硬(度)材料的特征 .....	382
10.5.4.2	窄畴壁的特点 .....	390
10.5.4.3	窄畴壁与缺陷的相互作用 .....	392
10.5.4.4	在 $R_m T_m$ 金属互化物中, 无序置换对窄畴壁的钉扎 ...	395
10.5.4.5	窄畴壁的热激活 .....	398
§10.6	多晶磁性物质内自发磁化强度在空间的分布 及剩余磁化强度的计算 .....	400
10.6.1	在四种关键的磁化状态下, 多晶体的自发磁化强 度在空间的分布 .....	400
10.6.2	多晶磁性材料中剩余磁化强度的计算 .....	404
§10.7	永磁性 .....	414
10.7.1	标志永磁性能好坏的几个参量 .....	414
10.7.2	最大磁能积 $(B \cdot H)_m$ 的理论估计和实际测定 .....	417
10.7.3	永磁材料概要 .....	421
§10.8	矩磁性 .....	430
10.8.1	矩磁的一般特性 .....	430
10.8.2	提高矩磁材料主要特性的原则 .....	433
10.8.2.1	提高剩磁比 $R_r$ 的原则 .....	433
10.8.2.2	缩短开关时间的原则 .....	440
10.8.3	矩磁材料概要 .....	445
§10.9	非晶态合金的技术磁性 .....	450
10.9.1	非晶合金条带的技术磁性 .....	450
10.9.2	非晶合金的磁畴结构和磁化过程 .....	452
习题	.....	460
<b>第十一章</b>	<b>永磁体磁路设计原理</b> .....	<b>461</b>
§11.1	引言 .....	461
§11.2	静态磁路中永磁体的设计 .....	464

11.2.1	静态磁路对永磁体的要求 .....	464
11.2.2	静态磁路的基本方程 .....	466
11.2.3	漏磁系数 $k_l$ 的计算 .....	468
11.2.4	静态磁路的设计实例 .....	484
11.2.4.1	扬声器磁路中磁体的计算.....	484
11.2.4.2	内磁式电表磁路中磁体的计算.....	501
11.2.4.3	自屏蔽式核磁共振仪磁铁中磁路的计算.....	505
11.2.4.4	磁悬浮轴承中磁体的计算.....	515
§11.3	动态磁路中永磁体的设计 .....	523
11.3.1	回复曲线、回复磁导率与有用回复能量 .....	523
11.3.2	有用回复能量与机械功的关系 .....	528
11.3.3	动态磁路的设计举例 .....	529
11.3.3.1	牵引磁体和磁力吸盘.....	529
11.3.3.2	磁性偶合器.....	535
习题	.....	542
参考文献	.....	543
附录 I	磁学基本公式在 MKSA 制和 C G S 制 中的表示 .....	547
附录 II	主要磁学量在两种单位制中的换算表 .....	548
附录 III	常用物理常数表 .....	549
索引	.....	550

## 下 册

第十二章	各向同性的铁磁物质在交变电磁场作用下的电磁 性质
第十三章	磁化强度的一致进动和铁磁共振
第十四章	磁化强度的非一致进动
第十五章	亚铁磁共振和反铁磁共振
第十六章	微波铁氧体器件原理

## 绪 论

技术磁化理论通常称为磁畴理论，它是研究磁性材料技术性能的理论基础。这一理论着重讨论的问题是：磁性材料中与技术性能相关的基本现象、磁畴的成因和结构、磁畴在各种条件(外磁场、应力、温度、成分等)下的运动与变化等。理论的目的是在阐明这些问题的基础上，为提高磁性材料性能和研制新的材料指出大致明确的方向。

磁性材料的技术特性，往往集中表现在磁化曲线和磁滞回线的形状和面积上。不同的磁化曲线和磁滞回线可以满足应用上的不同需要。磁性现象的利用是从天然磁石开始的，年代可以追溯到两千多年前，我国在这方面曾有过许多重要的贡献(如制造了最早的指南器“司南”、发明了指南针，并最早用于航海，最早用天然磁石治病等等)。磁化曲线和磁滞回线的测定则较晚(1871年斯托列托夫(A. Г. Столетов)测定了铁的磁化曲线，1880年瓦堡(E. G. Warburg)测量了铁丝的磁滞回线)，这是一类比较复杂的现象，直到目前为止，磁滞回线的形状大体有六种形式(图1)：①狭长型；②肥胖型；③长方型；④退化型(近似平行线)；⑤蜂腰型；⑥不对称型。这六种形式的回线，其形状虽然不同，应用范围也有所差别，但它们却有一个共同的特点，即随着磁场的往复变化，磁化强度的变化是按图2(a)的箭头方向进行的。可是最近在Gd-Co的非晶态薄膜中，却发现有一种磁滞回线是颠倒了的<sup>[1]</sup>，即随着磁场的往复变化，其磁化强度的变化如图2(b)所示，恰好与图2(a)相反。如果把图2(a)的回线看成是正规的回线，则图2(b)的回线便是颠倒的回线了。

由此可见，磁滞回线的形状是比较复杂的，在普遍情况下，欲从理论上算出某种材料的磁滞回线，目前仍不可能。但是，在某些

特定情况下,理论计算仍是可能的。处理这类问题的方法是“自由能极小原理”,即从体系的自由能极小中,求各物理量之间的关系。为此,在这一部分理论里,我们首先研究各种基本现象的能量表述,然后再讨论各种特性。最后为了合理地利用磁性材料,讨论了磁路设计原理。

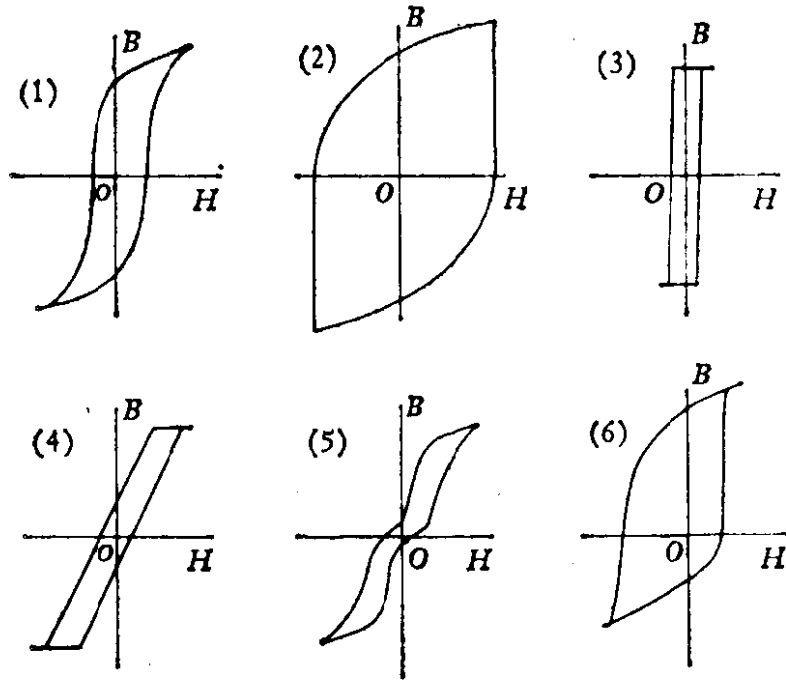


图1 六种不同类型的磁滞回线:  
 (1)狭长型; (2)肥胖型; (3)长方型;  
 (4)退化型; (5)蜂腰型; (6)不对称型。

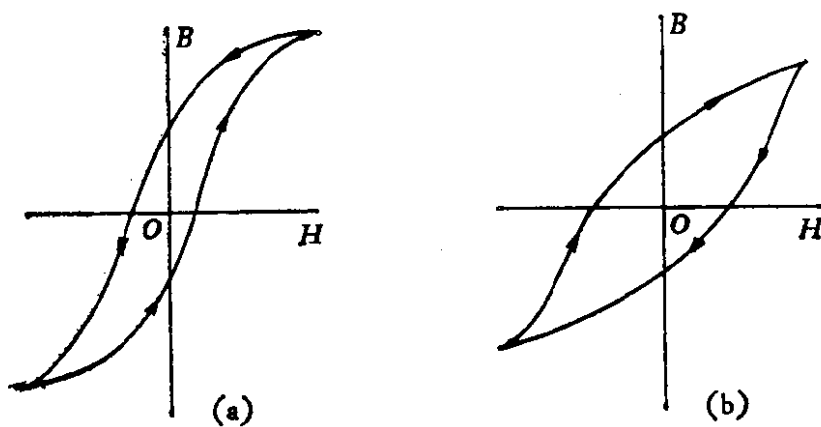


图2 (a)正规的磁滞回线;  
 (b)颠倒的磁滞回线。

## 第七章 铁磁性的基本特点和基本现象

磁性材料和器件的应用非常广泛，在国民经济的各个部门和日常生活中，几乎都离不开它。磁性材料及器件的应用，就其本质而言，是利用它的铁磁性(包括亚铁磁性)；因此，需要深入理解铁磁性的基本特点和基本现象。

我们认识事物的方法是由表及里，从现象到本质，从具体到抽象。这里最重要的是把握事物的特点，分析事物的特殊矛盾。铁磁性物质大都是固体，从物质的气、液、固三态来说，它与其他固体并没有什么区别。铁磁性物质可以是导体(如金属或合金的磁性材料)，也可以是电介质(如铁氧体)；从电导的角度来说，它与其他导体或电介质没有什么质的区别。铁磁性物质的每一个原子或分子都具有磁矩，从这一点上来看，它与顺磁性物质又没有什么区别。还可以举出一些铁磁性物质与其他物质的共同点来，但这些都说明不了他们之间的区别。只有注意了铁磁性的特点，就是说，抓住了它与其他运动形式的质的区别，才能认识铁磁性。铁磁性的特点是什么呢？简言之，就是**自发磁化**和**磁畴**。有关于它们的物理内容，将在下节中阐述。

### § 7.1 铁磁(亚铁磁)性的基本特点 ——自发磁化和磁畴

当你在寻找细微的物体而感到困惑时，常会浮现海底捞针的念头。当你把细小的钢珠掉在地上时，马上用一块磁铁(吸铁石)在地面上来回转动一下，小钢珠便会附着在磁铁上，“针”也就从“海底”捞上来了。这种磁石吸铁的现象，虽然在三千多年前就知



道,但对其本质的认识,只有在本世纪的三十年代,「对铁磁性的特点搞清楚以后,才真正达到。

下面从微观的尺度来阐述铁磁性的特点。大家知道,物质是由原子组成的。原子又是由原子核和围绕原子核运动的电子组成的。正象电流能够产生磁场一样,原子内部电子的运动也要产生磁矩<sup>1)</sup>。如果原子内部,不同电子产生的磁矩叠加起来,不等于零,则该原子便具有磁矩  $\mu$  (忽略原子核的磁矩,下同)。如果原子内部,不同电子产生的磁矩叠加起来,等于零,则该原子便没有磁矩 ( $\mu = 0$ )。尽管某种物质的原子磁矩不等于零,但各原子磁矩的方向仍是紊乱的话,这种物质的任一小区内还是不会具有磁矩的,这就是顺磁性的图象(图 7.1(a))。只有原子的磁矩既不为零,又能在任一小区内使所有原子的磁矩都按一定的规则排列起来的话,这个小区域才具有磁矩。

因此,由于物质内部自身的力量,使任一小区内所有原子磁矩,都按一定的规则排列起来的现象,称为**自发磁化**。

设箭头表示原子磁矩的方向,其长度代表原子磁矩的数量。那么,在某一小区内,由于物质内部自身的力量,使所有原子磁矩都朝一个方向排列的现象,便称为铁磁性(图 7.1(b))。如果相邻的原子磁矩,排列的方向相反,但由于它们的数量不同,不能相互抵消,结果在某一方向仍显示了原子磁矩同向排列的效果,这种现象称为亚铁磁性(图 7.1(d))。如果相邻原子磁矩的数值相等,排列的方向又相反,则原子间的磁矩完全抵消,这种现象便称为反铁磁性(图 7.1(c))。

由此可见,在铁磁性物质、亚铁磁性物质和反铁磁性物质内,都存在着**自发磁化**,只不过相邻原子的磁矩,排列方式不同罢了。

导致自发磁化的力量是非常强大的,相当于数百万奥斯特的磁场强度。

---

1) 一个靠近原子核的电子,绕原子核运动时,约相当于形成 38 安培的环形电流。这个环形电流的磁矩称为玻尔磁子  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9.274 \times 10^{-24}$  安·米<sup>2</sup>。(焦耳/特斯拉)