

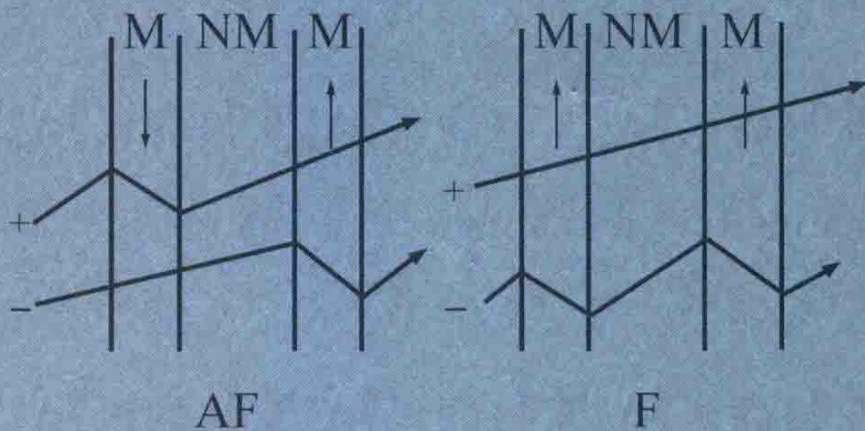


FERROMAGNETISM

铁磁学 (第二版)

(下册)

钟文定 著



 科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

铁磁学(第二版)

(下册)

钟文定 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

《铁磁学》(第二版)下册共七章(第7~13章),系统论述了静态和动态的技术磁化理论。从分析影响强磁性的五种物理现象和磁畴的各种形态出发,根据总能量极小原理,对强磁性的各类现象作出公式化的处理。书中详细讨论了磁导率和矫顽力的各种理论、低温下的巨大矫顽力、动态过程的能量损耗和旋磁效应的机制以及磁性的时间效应等。对一块畴壁移动和一个单畴内磁矩转向的电磁性质、磁宏观量子效应、纳米磁性、巨磁电阻效应、交换(作用)长度、无规各向异性、自旋电子学、巨磁性、磁记录等近期的进展也作了评述和说明。

书中结合常用的磁性材料,在相关章节论述了理论与实际的联系及在研制和生产中的指导作用,以期触发创新思维,提出新的方案。最后一章为磁路设计,以便合理利用磁性材料,发挥各产品的最大优势。

本书可供大专院校、工矿、研发单位等从事磁学和磁性材料以及相关领域的人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁磁学.下册 / 钟文定著. —2版. —北京: 科学出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-03-053040-0

I. ①铁… II. ①钟… III. ①铁磁学 IV. ①TG111.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 117779 号

责任编辑: 钱 俊/责任校对: 邹慧卿
责任印制: 张 伟/封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1987年6月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年10月第 二 版 印张: 43 1/4

2017年10月第一次印刷 字数: 846 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

谨呈本书纪念叶企孙先生诞辰
120周年和逝世40周年！

第二版前言

叶企孙 (1898. 7. 16—1977. 1. 13) 先生是我国开展现代磁学研究的第一位学者, 是北京大学磁学学科的奠基人^①。他指导的我国第一位磁学毕业的研究生 (钟文定) 谨呈《铁磁学》(第二版) 下册纪念叶企孙老师诞辰 120 周年和逝世 40 周年!

《铁磁学》的初版分上、中、下三册于 1987 年发行, 距今已三十年。期间上册和中册已重印了五次, 特别是中册, 是《磁性材料和器件》期刊论文作者引用最多的专著 (该刊 1993~1997 年统计)。由于高等院校学制的变化, 专业的调整和学科内容的发展, 《铁磁学》内容需作必要的调整和补充。第二版的《铁磁学》分上、下两册发行。

上册内容除保留全部原有的章节和极少量文字修改外, 增加了三方面的内容。一是比较系统地从微观角度分析磁晶各向异性的机制; 二是基于分子场理论, 讨论非晶态金属合金具有自发磁化的可能和随温度变化的特点; 三是基于能带理论, 讨论半金属合金和氧化物铁磁体的能带结构和磁性。比初版上册的篇幅增加 1/4 左右。考虑到便于读者扩大对本学科基本理论和实验技术的了解, 在第二版书上册的前言之后列出了不同时期的重要专著。本书最后列出了“几个常用磁学单位的由来和换算”。有关“磁晶各向异性的微观机制”部分与李伯臧教授作了详细讨论。

下册的内容为静态和动态的技术磁化理论, 以及磁路设计。与初版的中册相比, 除了将磁晶各向异性的微观理论移到第二版的上册以外, 保留了原有的内容和初版下册的动态磁性的基本内容, 同时增加了三十年来发现的新现象、新原理和新数据、新材料, 因此内容和篇幅都有较大的变化, 就篇幅的数字而言比初版的中册增加了 3/4, 详细内容请看第二版的内容简介。

欢迎读者对书中的不足和遗漏之处批评指正。

《铁磁学》第二版的出版得到“国家科学技术学术著作出版基金”的资助, 以及责任编辑钱俊的辛勤付出, 在此深表感谢。

作者

2016 年 9 月

^① 钟文定, 北京磁学学科的奠基人——叶企孙, 见萧超然主编《巍巍上痒百年星辰——名人与北大》, 北京大学出版社, 1998 年, 694 页。

初 版 前 言

我们在 1976 年编写出版了《铁磁学》，目的是使具有中专以上水平的、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，本书应以阐述铁磁体磁性的实验规律、基本理论和磁化机制为主，并在物理图像和概念上，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磁性理论和实验结果。

修改后的内容分为三部分，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^①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，其目的就是为使研制与设计人员都能掌握这两部分内容。此外，关于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，在本书中也有所论述。

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，对以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

^① 从前，技术磁化理论只有磁畴理论；现在，却有另一分支，称为微磁学（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。

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（SI）单位制：米、千克、秒、安培。为了便于对比，有些公式还列出了在 CGS 电磁单位制中的表示式。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。全书经郭贻诚教授审阅，并提出了许多宝贵意见，特此致谢。

《铁磁学》上册分工如下：第四、六章由钱昆明执笔，并经章立源同志读了手稿；其余四章由戴道生执笔，并经李伯臧、方瑞宜读了手稿；钟文定同志允许采用其编写的“铁磁性和反铁磁性唯象理论”讲义的部分内容；此外，有关的同志对本书的内容提出了许多宝贵的意见，在此一并表示感谢。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

目 录

下 册

第二版前言

初版前言

绪论	1
第7章 铁磁(亚铁磁)性的特点和基本现象	5
7.1 铁磁(亚铁磁)性的特点——自发磁化和磁畴	5
7.1.1 自发磁化和磁矩排列的多样性	5
7.1.2 交换作用能量	7
7.2 磁性材料中的基本现象及能量表述	8
7.2.1 磁晶各向异性及其他磁各向异性	9
7.2.1.1 六角晶体的磁晶各向异性	10
7.2.1.2 立方晶体的磁晶各向异性	11
7.2.1.3 用转矩磁强计测量磁晶各向异性的原理	14
7.2.1.4 磁晶各向异性的等效场——各向异性场	17
7.2.1.5 磁场感生的磁各向异性	19
7.2.1.6 应力和轧制感生的各向异性	21
7.2.1.7 交换各向异性	22
7.2.1.8 表面和界面磁各向异性	23
7.2.1.9 无规各向异性	26
7.2.1.10 磁晶各向异性常数与温度的关系	27
7.2.1.11 磁晶各向异性的微观机制	28
7.2.2 磁致伸缩及磁弹性能量表述	31
7.2.2.1 磁致伸缩的测量原理	33
7.2.2.2 磁致伸缩的唯象理论说明	34
7.2.2.3 立方晶系中磁致伸缩的唯象表述	36
7.2.2.4 立方晶系中的磁弹性能量、弹性能量和应力能量	43
7.2.2.5 磁弹性耦合系数 K_c 和强制磁致伸缩系数 d_{33}	48

7.2.2.6 磁致伸缩优质材料 Terfenol-D 的应用与设计要点	48
7.2.3 磁荷(极)与自退磁及退磁能量表述	51
7.2.3.1 退磁场的产生	51
7.2.3.2 运用磁荷观点计算球体的退磁场	53
7.2.3.3 外磁场能量和退磁场能	56
习题	58
附录 术语和单位制	59
参考文献	61
第8章 磁畴结构	63
8.1 畴壁	63
8.1.1 单轴晶体内的 180° 畴壁	66
8.1.2 三轴晶体内的 180° 壁	70
8.1.3 考虑磁弹性能量后三轴晶体内的 180° 畴壁	72
8.2 铁磁薄膜内的畴壁和畴壁的新类型	75
8.3 从能量观点说明磁畴的成因	82
8.4 单轴晶体的理论畴结构	83
8.4.1 片形畴	84
8.4.2 封闭畴	85
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	86
8.4.4 封闭畴的变异——匕首封闭畴	91
8.4.5 半封闭的畴结构	94
8.5 立方晶体的理论畴结构	96
8.5.1 三轴晶体 $[100]$ (001) 面上的畴结构	96
8.5.2 三轴晶体 $[110]$ (001) 面上的畴结构	97
8.5.3 四轴晶体 $[111]$ $(\bar{1}\bar{1}0)$ 面上的畴结构	98
8.6 树枝状磁畴	99
8.7 不均匀物质中的磁畴	100
8.8 单畴颗粒	103
8.8.1 磁晶各向异性较弱的单畴颗粒的临界半径	104
8.8.2 立方晶体单畴颗粒的临界半径	105
8.8.3 单轴晶体单畴颗粒的临界半径	105
8.9 磁泡	107
8.9.1 引言	107

8.9.2	圆柱形磁畴的静态理论	108
8.9.3	产生磁泡的材料	114
8.10	观察磁畴的实验方法概要和粉纹法的理论条件	115
8.10.1	粉纹法观察磁畴的理论条件以及粉纹法和磁光效应法的实验	117
8.10.2	磁力显微镜 (Magnetic force microscope, MFM) 观察 磁力图和形貌图的原理	123
8.10.2.1	基本原理	123
8.10.2.2	针尖和样品相互作用的探测	123
8.10.2.3	作用在磁探针上的磁相互作用力	125
8.10.2.4	作用在磁针尖上的非磁性相互作用	125
8.10.2.5	磁力图和形貌图的分离	127
8.10.2.6	磁探针	127
8.10.3	观测磁畴方法的综合比较	128
8.11	磁畴照片剪辑	131
	习题	139
	参考文献	139
第9章	磁化过程	142
9.1	磁化和反磁化的概况	142
9.1.1	磁化过程的四个阶段	143
9.1.2	各种磁化曲线、磁滞回线和磁导率等的定义	145
9.1.3	磁化条件	147
9.2	单轴单晶体的磁化过程	150
9.2.1	片形畴的运动变化	150
9.2.2	片形畴运动变化的理论分析	152
9.3	三轴单晶体的磁化过程	161
9.3.1	磁畴磁矩的转向决定的磁化曲线	161
9.3.2	封闭畴对磁化曲线的影响	163
9.4	单晶体磁化过程的普遍理论	170
9.4.1	计算单晶体磁化曲线的理论原则	170
9.4.2	Fe单晶体的(001)面上的磁化曲线	171
9.4.3	Ni单晶体的(110)面上的磁化曲线	175
9.5	多晶体的磁化, 畴壁移动的阻力(钉扎)	182
9.5.1	内应力阻碍畴壁的运动	182

9.5.2	掺杂阻碍畴壁的运动	183
9.5.3	弥散磁场阻碍畴壁的运动	183
9.5.4	材料的非均匀区阻碍畴壁的运动	184
9.5.5	畴壁移动的平衡条件	185
9.6	可逆壁移过程决定的起始磁化率	188
9.6.1	掺杂阻碍畴壁运动的壁移磁化(掺杂理论)	188
9.6.2	应力阻碍畴壁运动的壁移磁化(应力理论)	191
9.6.2.1	应力阻碍 180° 壁的可逆位移	191
9.6.2.2	应力阻碍不可逆的 180° 壁移	193
9.6.2.3	应力阻碍 90° 壁的移动	194
9.7	可逆畴转过程决定的起始磁化率	197
9.7.1	外磁场对各类磁畴对称取向的恒导磁材料	197
9.7.1.1	恒导磁材料的性能	197
9.7.1.2	恒导磁材料内的转动磁化过程	199
9.7.2	由磁晶各向异性控制的可逆转动磁化	201
9.7.3	应力作用下的可逆转动磁化	203
9.8	180° 畴壁的弯曲导致的起始磁化率	204
9.9	磁化过程理论在实践中的作用	205
9.9.1	提高软磁材料技术磁性的思路	205
9.9.1.1	铁镍合金起始磁导率的提高	206
9.9.1.2	软磁铁氧体起始磁导率的提高和温度稳定性	208
9.9.1.3	硅钢片磁性的提高	215
9.9.2	纳米晶合金软磁的磁性和组织结构	219
9.9.2.1	纳米晶软磁合金的磁特性	219
9.9.2.2	纳米晶软磁合金的组织结构	221
9.9.2.3	纳米晶软磁合金优异磁性的理论解释	222
9.10	不可逆磁化过程	227
9.10.1	不可逆壁移磁化	227
9.10.1.1	内应力作用下的不可逆壁移	228
9.10.1.2	掺杂物作用下的不可逆壁移	230
9.10.2	不可逆转动磁化	232
9.11	多晶磁性材料在强磁场下的磁化曲线——趋近饱和定律	238
	习题	243

参考文献	245
第 10 章 反磁化过程	246
10.1 引言	246
10.2 应力和掺杂阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力	249
10.2.1 应力阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力	249
10.2.2 掺杂阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力	252
10.2.3 内应力和掺杂引起的弥散磁场对矫顽力的贡献	253
10.3 磁矩不可逆转向决定的矫顽力	255
10.3.1 磁晶各向异性控制的矫顽力	255
10.3.2 形状各向异性控制的矫顽力	260
10.3.3 单畴颗粒集合体的矫顽力	262
10.3.4 单畴颗粒内磁矩的一致和非一致转向	266
10.4 由反磁化核的形成和长大决定的矫顽力	270
10.4.1 观测反磁化核成长的装置	271
10.4.2 发动场理论	273
10.5 考虑缺陷作用的矫顽力新理论	278
10.5.1 点缺陷对畴壁的钉扎决定的矫顽力	280
10.5.2 面缺陷对畴壁的钉扎决定的矫顽力	283
10.5.3 在脱溶物或晶体表面上反磁化核的成长对矫顽力的影响	291
10.6 永磁体内禀矫顽力的经验公式和晶粒间的相互作用	298
10.7 窄畴壁与低温下的特大矫顽力	300
10.7.1 低温磁硬(度)材料的特征	301
10.7.2 窄畴壁的特点	306
10.7.3 窄畴壁与缺陷的相互作用	308
10.7.4 在 $R_n T_m$ 金属互化物中, 无序置换对窄畴壁的钉扎	310
10.7.5 窄畴壁的热激活	312
10.8 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和永磁粉易轴的取向度	314
10.8.1 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	314
10.8.2 磁性材料中剩余磁化强度的计算	316
10.8.3 永磁粉易磁化轴的取向度	323
10.9 永磁性	323
10.9.1 永磁体的特性和应用要求	324

10.9.2	获得最佳永磁性能的理论 and 思路	327
10.9.3	最佳永磁的一种研制方案——交换耦合(自生复合)磁体	331
10.10	技术磁化理论在材料生产中的运用	338
10.10.1	理论对永磁铁氧体性能改进的指导	338
10.10.2	理论对烧结 NdFeB 永磁合金性能提高和工艺改进的指导	349
	习题	361
	参考文献	362
第 11 章 动态磁性、旋磁性及磁性的时间效应、磁有序与其他		
	物性的耦合现象、巨磁电阻	365
11.1	动态磁化过程的现象与本质	365
11.2	动态磁化过程中的损耗	366
11.2.1	损耗的经验公式和三种损耗的分离	366
11.2.2	涡流损耗和集(趋)肤效应	371
11.2.3	畴结构对损耗的影响	375
11.3	复数磁导率及电感线圈的品质	382
11.3.1	复数磁导率、损耗因数	382
11.3.2	线圈的品质因数 Q	384
11.3.3	磁导率的频散、截止频率、 $\mu'f_0 = \text{常数}$	385
11.3.4	失真因数(波形变形系数)	386
11.4	畴壁的动态性质	388
11.4.1	畴壁的运动方程及壁移导致的复数磁化率	389
11.4.2	畴壁动态移动导致的磁谱、畴壁共振	392
11.5	旋磁性及铁磁共振	394
11.5.1	磁矩一致进动的运动方程	395
11.5.2	张量磁导(化)率	396
11.5.3	铁磁共振	398
11.6	磁黏滞性	401
11.6.1	磁黏滞性的唯象理论	402
11.6.2	磁黏滞性唯象理论的发展	407
11.6.3	目前的理论无法说明的特例	410
11.6.4	磁黏滞性机理的简要说明	411
11.7	磁导率的减落	412
11.8	磁有序与其他物性的耦合现象	415

11.8.1	磁热效应	415
11.8.2	磁弹效应	418
11.8.3	磁光效应	420
11.8.4	磁电效应	421
11.9	强磁金属合金及多层结构中的巨磁电阻	423
11.9.1	引言	423
11.9.2	正常磁电阻	423
11.9.3	铁磁金属的电阻率与磁电阻	424
11.9.4	多层结构中的巨磁电阻	427
11.9.5	自旋相关散射, 双电流模型	439
11.9.6	多层膜巨磁电阻的机制	441
	习题	445
	参考文献	446
第 12 章 铁磁性的元磁化、磁宏观量子效应、纳米磁性、物质磁性		
	和磁性材料的分类	451
12.1	元磁化: 一块畴壁和一个单畴的电磁特性	451
12.1.1	导言	451
12.1.2	一块畴壁移动的特性	453
12.1.3	一个单畴粒子内磁状态变化的特性	463
12.2	磁性的宏观量子效应	469
12.2.1	概述	469
12.2.2	磁宏观量子效应的实验现象	471
12.2.3	磁宏观量子效应的理论简介	478
12.2.4	结语	483
12.3	纳米磁性	483
12.3.1	界面上的交换耦合	484
12.3.2	薄膜	490
12.3.3	纳米粒子、纳米线	493
12.3.4	纳米磁性材料举例	495
12.3.5	量子点和分子磁体	498
12.4	物质磁性的分类简介	499
12.4.1	抗磁性	501
12.4.2	顺磁性和超顺磁性	503

12.4.3	反铁磁性	506
12.4.4	亚铁磁性	507
12.4.5	铁磁性	508
12.5	磁性材料的分类及其他	509
12.5.1	磁性材料的类别	511
12.5.2	软磁金属(合金)材料的结构	512
12.5.3	软磁铁氧体的分类	515
12.5.4	永磁材料实例	517
12.5.5	矩磁性	524
12.5.6	磁记录	538
	习题	547
	参考文献	548
第 13 章	磁路设计原理	552
13.0	导言	552
13.0.1	磁路与电路的异同、磁力应用工程	552
13.0.2	磁路与电路术语、定律、公式的对比	553
13.0.3	磁路设计和计算的任务	553
13.0.4	磁路结构与磁体性能的关系	553
13.0.5	磁路的欧姆定律	554
13.0.6	退磁曲线和回复曲线的近似计算	555
13.1	理想的静态磁路及永磁体的选择	558
13.1.1	用漏磁系数法的设计原则	558
13.1.2	磁路设计的两个基本方程	558
13.1.3	从磁体性能、尺寸和气隙尺寸求气隙磁通	559
13.1.4	磁路结构的利用系数	560
13.1.5	根据设计要求选择磁体性能、尺寸及在磁路中的位置、方式的原则	560
13.2	实际的静态磁路	562
13.2.1	实际磁路的两个基本方程	562
13.2.2	用磁导法计算漏磁系数	562
13.2.3	计算磁导的原理	563
13.2.4	磁系统的结构	567
13.2.5	静态磁路设计的一般步骤	568
13.2.6	用磁导法设计静态磁路实例	573

13.2.7 用漏磁系数设计磁路的另外方法	576
13.2.8 用自退磁现象设计磁路	584
13.3 磁的吸引力与排斥力	592
13.3.1 磁力的计算	593
13.3.2 两块永磁体的吸引力	594
13.3.3 两块永磁体的排斥力	596
13.3.4 磁悬浮轴承中磁体的排斥力的计算	596
13.4 动态磁路	602
13.4.1 回复曲线、回复磁导率与有用回复能量	602
13.4.2 有用回复能量与机械功的关系	607
13.4.3 动态磁路的设计举例	607
13.5 空心线圈和铁芯线圈的磁路设计	619
13.5.1 引言	619
13.5.2 空心单个线圈的具体设计	624
13.5.3 空心组合线圈的设计	629
13.5.4 铁芯线圈的设计	635
习题	647
参考文献	648
附录	650
附表 I 磁学基本公式在 SI (MKSA) 制和 CGS 制中的表示	650
附表 II 主要磁学量在两种单位制中的换算表	651
附表 III 常用物理常数表	652
附表 IV 一些磁性物质 (材料) 的结构、属性、交换作用、磁性电子 和内禀磁性	653
名词索引	655

上 册

绪论

第 1 章 物质的抗磁性和顺磁性

- 1.1 原子的壳层结构及其磁性
- 1.2 物质的抗磁性
- 1.3 物质的顺磁性

- 1.4 顺磁性量子理论
- 1.5 晶场作用和轨道角动量冻结
- 1.6 磁晶各向异性微观机制简介

第2章 自发磁化的唯象理论

- 2.1 铁磁性的基本特点和基本现象
- 2.2 铁磁性自发磁化的唯象理论
- 2.3 “分子场”理论的改进和发展
- 2.4 反铁磁性“分子场”理论
- 2.5 亚铁磁性唯象理论
- 2.6 磁结构的多样性

第3章 自发磁化的交换作用理论

- 3.1 交换作用的物理图像
- 3.2 海森伯交换模型
- 3.3 间接交换作用
- 3.4 稀土金属自发磁化理论
- 3.5 非晶态金属合金的自发磁化

第4章 自旋波理论

- 4.1 自旋波的物理图像
- 4.2 自旋波的半经典理论
- 4.3 自旋波的量子力学处理
- 4.4 铁磁体在低温下的热力学性质
- 4.5 H-P 自旋波理论与自旋波相互作用
- 4.6 反铁磁体和亚铁磁体中的自旋波
- 4.7 磁偶极作用下的自旋波色散谱
- 4.8 体非均匀体系中的自旋波
- 4.9 自旋波的实验研究
- 4.10 非晶态合金的自旋波

第5章 金属磁性的能带模型理论

- 5.1 能带模型的物理图像
- 5.2 能带(巡游电子)模型和磁性解
- 5.3 过渡金属合金的磁性
- 5.4 半金属能带结构和磁性