

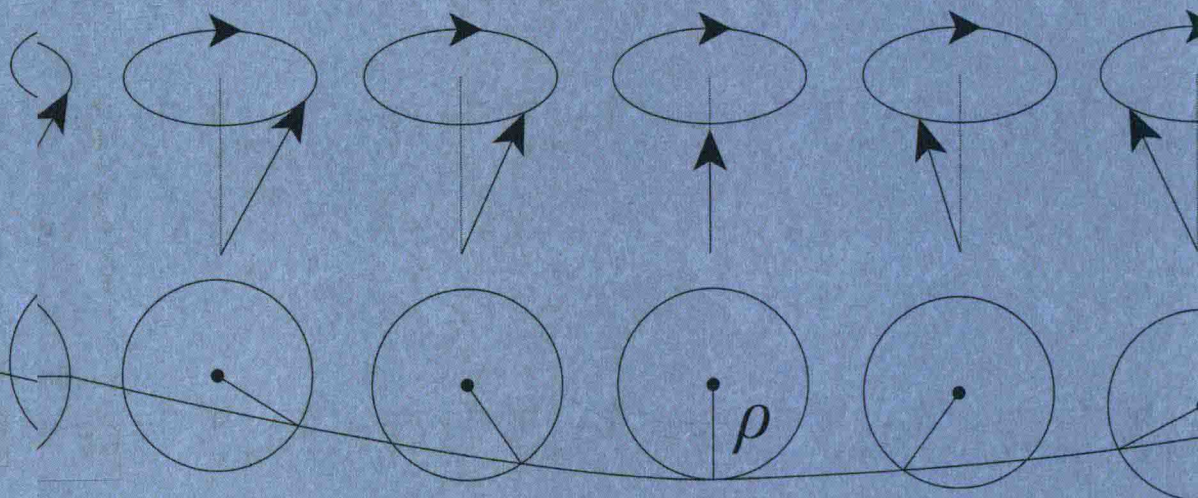


FERROMAGNETISM

# 铁磁学 (第二版)

(上册)

戴道生 钱昆明 编著



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)

(上册)

戴道生 钱昆明 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书基于理论和实际相结合的思想,系统地介绍铁磁学的物理图像和基本知识.全书分上、下两册出版.上册专门讨论物质磁性的起源及其随温度的变化;下册介绍技术磁化理论与磁路设计原理,交流磁化理论和磁共振理论.本书为上册,共分六章(即第1章至第6章),前两章主要介绍磁性的一般现象和理论,后四章介绍自发磁化的量子理论.每章之后附有参考文献.

本书可作为高等院校“铁磁学”课程本科生教材和研究生的参考书,也可供从事磁性材料研究和生产及有关专业的科技人员参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

铁磁学.上册/戴道生,钱昆明编著.—2版.—北京:科学出版社,2017.6

ISBN 978-7-03-053039-4

I. ①铁… II. ①戴…②钱… III. ①铁磁学 IV. ①TG111.92

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第117784号

责任编辑:钱俊周涵/责任校对:彭涛

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6月第二版 印张:25 1/4

2017年6月第一次印刷 字数:510 000

定价:128.00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, 是北京大学现代磁学学科的奠基人\*。作者戴道生是他执教的我国第一届磁学毕业的本科生之一 (第一届共五人), 谨呈本书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 年出版, 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。新版《铁磁学》分上、下两册出版。

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, 在本书的第一版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。

下册内容为静态和动态的技术磁化理论以及磁路设计。篇幅比初版中册要增加 3/4, 详细内容请看第二版内容简介。

虽然作者对书中的一些不妥之处作了改正, 但书中还会有错误和遗漏之处, 欢迎广大读者批评指正。

《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, 以及编辑钱俊的努力安排, 在此深表感谢。

作者  
2016 年 9 月

---

\* 钟文定: 北大磁学学科的奠基人——叶企孙, 见萧超然主编《巍巍上痒, 百里星辰——名人与北大》, 北京大学出版社, 1998 年, 第 694 页。

## 第一版前言

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\*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

---

\* 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，并经李伯芷、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

## 《铁磁学》《磁性理论》教科书和有关专著的参考书目

1. 铁磁学. 郭贻诚编著. 人民教育出版社, 1965; 北京大学出版社, 2015年重印
2. 铁磁学(上册). C. B. 冯索夫斯基, Я. C. 舒尔著. 廖莹译. 科学出版社, 1965
3. 金属磁性材料. 戴礼智编著. 上海人民出版社, 1973
4. 铁磁性物理. 近角聪信编著. 葛世慧译, 张寿恭校. 兰州大学出版社, 2002
5. 铁磁性理论. 姜寿亭编著. 科学出版社, 1993
6. 金属磁性. 翟宏如编著. 见《金属物理学》丛书第四卷《超导电性和磁性》. 科学出版社, 1998
7. 现代磁性材料原理和应用. R. C. O'Handley 编著. 周永洽等译. 化学工业出版社, 2002
8. 技术磁学(上、下册). 钟文定编著. 科学出版社, 2009
9. 磁性物理. 金汉民编著. 科学出版社, 2013
10. *Ferromagnetism*. R. M. Bozorth. Nostrand Company Inc. , 1951
11. *The Physical Principles of Magnetism*. A. H. Morrish. John Wiley & Sons Inc. , 1965
12. *Effective Field Theory of Magnetism*. J. S. Smart, W. B. Saunders Company. Philadelphia, 1966
13. *Magnetism*. S. V. Vonsovskii. John Wiley & Sons Inc. , 1974  
原书是俄文, 于1971年苏联莫斯科科学出版社出版, 由 Israel Program for Scientific Tranlations 翻译, 在 Jerusalem, London 出版
14. *Magnetic Interaction in Solids*. H. J. Zeiger, G. W. Pratt. Clarwndon Press, 1973
15. *The Theory of Magnetism I*. D. C. Mattis. Springer-Verlag, 1981
16. *Electron Correlation and Magnetism*. P. Fazekas. World Science, 1999
17. *Magnetism (I-Fundamentals, II-Materials and Applications)*. Edited by Etienne du Tremolet de Lacheisserie, Damien Gignoux, Mischel Schlenker, 2002



18. *Magnetism*. J. Stohr, H. C. Siegmann, Springer-Verlag, 2006
19. *Magnetism and magnetic Materials*. J. M. O. Coey. Cambridge University Press, 2006
20. *Quantum Theory of Magnetism*. W. Nolting, A. Ramakanth. Springer, 2009
21. 磁性测量原理. 周文生编. 电子工业出版社, 1988

# 目 录

## 上 册

绪论	1
参考文献	5
第 1 章 物质的抗磁性和顺磁性	6
1.1 原子的壳层结构及其磁性	6
1.1.1 原子的壳层结构	6
1.1.2 原子磁性及其磁矩的大小	12
1.1.3 洪德法则	16
1.2 物质的抗磁性	18
1.2.1 抗磁性的基本实验事实	19
1.2.2 正常抗磁性的理论解释	22
1.2.3 金属中电子的抗磁性	25
1.2.4 反常抗磁性的简单介绍	29
1.3 物质的顺磁性	31
1.3.1 顺磁性的实验规律和数据	31
1.3.2 顺磁性朗之万理论	34
1.3.3 顺磁盐中金属离子的磁性	37
1.3.4 金属中电子的顺磁性	40
1.4 顺磁性量子理论	44
1.4.1 哈密顿量	44
1.4.2 顺磁磁化率	45
1.4.3 与温度有关的顺磁磁化率	46
1.4.4 讨论三个具体情况下式 (1.82) 的结果	49
1.5 晶场作用和轨道角动量冻结	50
1.5.1 轨道角动量冻结的物理图像	50
1.5.2 晶体对称性和晶场类型	53
1.5.3 晶场作用下 3d 电子的能级分裂	60

1.5.4	轨道角动量冻结 .....	68
1.6	磁晶各向异性微观机制简介 .....	73
1.6.1	磁晶各向异性的宏观表述 .....	74
1.6.2	各种对称结构晶体电场的数学表示和能级分裂 .....	75
1.6.3	过渡金属中 d 电子的能级结构 .....	86
1.6.4	自旋-轨道耦合和自旋算符 .....	88
1.6.5	氧化物中 3d 金属 $\text{Fe}^{3+}$ 和合金中稀土离子的磁晶各向异性 .....	97
	习题 .....	106
	参考文献 .....	106
	附录 .....	108
<b>第 2 章</b>	<b>自发磁化的唯象理论</b> .....	<b>112</b>
2.1	铁磁性的基本特点和基本现象 .....	112
2.1.1	铁磁物质的基本特点 .....	112
2.1.2	铁磁物质中的基本现象 .....	118
2.2	铁磁性自发磁化的唯象理论 .....	124
2.2.1	铁磁性的“分子场”理论 .....	124
2.2.2	“分子场”的本质, 高、低温下自发磁化强度与温度的关系 .....	129
2.2.3	转变温度附近的比热反常现象 .....	134
2.3	“分子场”理论的改进和发展 .....	135
2.3.1	海森伯模型和外斯分子场 .....	136
2.3.2	小口理论 .....	137
2.4	反铁磁性“分子场”理论 .....	142
2.4.1	反铁磁性的定域分子场理论 .....	143
2.4.2	反铁磁性消失的温度——奈尔温度 $T_N$ 的求得 .....	145
2.4.3	温度高于奈尔温度时的性能 .....	146
2.4.4	温度低于奈尔温度时的性能 .....	148
2.4.5	定域分子场理论与实验的比较 .....	153
2.5	亚铁磁性唯象理论 .....	158
2.5.1	亚铁磁性的特点 .....	159
2.5.2	奈尔亚铁磁性分子场理论 .....	161
2.5.3	三角形亚铁磁性磁结构 .....	172
2.6	磁结构的多样性 .....	172
2.6.1	磁结构的几种类型 .....	172

2.6.2 非晶态稀土合金的非共线磁结构	174
习题	176
参考文献	177
<b>第3章 自发磁化的交换作用理论</b>	<b>180</b>
3.1 交换作用的物理图像	181
3.1.1 氢分子交换模型	181
3.1.2 基态能量和电子自旋取向的关系	184
3.2 海森伯交换模型	186
3.2.1 氢分子交换模型的推广	186
3.2.2 狄拉克矢量模型方法	188
3.2.3 讨论 $A > 0$ 的条件	189
3.2.4 自发磁化与温度的关系	191
3.3 间接交换作用	193
3.3.1 间接交换作用的物理图像	194
3.3.2 半定量分析	195
3.3.3 间接交换作用的理论简介	198
3.3.4 交换作用的半经验规则	205
3.3.5 亚铁磁性物质的间接交换作用	210
3.3.6 钙钛矿结构氧化物和双交换作用	213
3.4 稀土金属自发磁化理论	220
3.4.1 RKKY 理论的物理图像	221
3.4.2 RKKY 理论简介	221
3.4.3 稀土金属自发磁化的多样性	225
3.5 非晶态金属合金的自发磁化	228
3.5.1 非晶态合金自发磁化的实验结果	229
3.5.2 海森伯交换模型和分子场理论	230
3.5.3 Handrich 平均值近似理论	231
3.5.4 非晶态稀土合金的磁结构和磁性	234
习题	239
参考文献	239
<b>第4章 自旋波理论</b>	<b>243</b>
4.1 自旋波的物理图像	244
4.2 自旋波的半经典理论	246

4.3 自旋波的量子力学处理 .....	249
4.3.1 基态 .....	250
4.3.2 局域在一个格点上的自旋翻转态 .....	250
4.3.3 第一激发态的本征解 .....	251
4.3.4 几个简单的特例 .....	252
4.3.5 近独立近似下的自旋波总能量 .....	253
4.3.6 近饱和近似下自旋波的玻色性 .....	254
4.4 铁磁体在低温下的热力学性质 .....	254
4.4.1 自发磁化强度的 $T^{3/2}$ 定律 .....	255
4.4.2 铁磁体在低温下的比热 .....	257
4.4.3 对长波近似的修正 .....	258
4.5 H-P 自旋波理论与自旋波相互作用 .....	258
4.5.1 自旋偏差算符 .....	259
4.5.2 自旋偏差算符表象中的哈密顿量 .....	260
4.5.3 自旋波算符表象中的哈密顿量 .....	261
4.5.4 自旋偏差算符的玻色性 .....	262
4.5.5 自旋波的相互作用 .....	263
4.6 反铁磁体和亚铁磁体中的自旋波 .....	266
4.7 磁偶极作用下的自旋波色散谱 .....	272
4.8 体非均匀体系中的自旋波 .....	279
4.9 自旋波的实验研究 .....	283
4.9.1 用共振方法研究自旋波 .....	283
4.9.2 散射方法测量自旋波 .....	287
4.10 非晶态合金的自旋波 .....	293
4.10.1 非晶态金属合金的低温磁性 .....	293
4.10.2 非晶态金属合金的自旋波色散关系 .....	294
4.10.3 晶态和非晶态铁磁体中自旋波刚度系数实验结果的比较 .....	294
习题 .....	298
参考文献 .....	299
附录 .....	300
<b>第5章 金属磁性的能带模型理论</b> .....	<b>302</b>
5.1 能带模型的物理图像 .....	304
5.1.1 过渡金属 3d、4s 电子的能带结构 .....	304

5.1.2	能带理论对铁磁性自发磁化的解释	306
5.1.3	Fe, Co, Ni 能带的具体计算结果	307
5.2	能带(巡游电子)模型和磁性解	310
5.2.1	Hubband 能带模型(又称赫巴德哈密顿量)	311
5.2.2	斯托纳能带模型	313
5.2.3	磁性和非磁性的条件	314
5.2.4	自发磁化与温度的关系	321
5.2.5	电子交换-关联势 $\chi_a$	323
5.2.6	$d_i - d_j$ 交换极化模型	324
5.3	过渡金属合金的磁性	327
5.3.1	合金中基质元素能带的变化	328
5.3.2	基质元素中的费米能级	330
5.3.3	杂质原子对正、负带的影响	330
5.4	半金属能带结构和磁性	332
5.4.1	Heusler 磁性合金的能带结构	335
5.4.2	氧化物型半金属合金的磁性和能带结构	342
5.4.3	铁磁性半金属合金化合物特性的实验测量	347
	参考文献	350
<b>第 6 章</b>	<b>格林函数方法</b>	<b>354</b>
6.1	预备知识	355
6.1.1	系综	355
6.1.2	正则系综	356
6.1.3	狄拉克 $\delta$ 函数	356
6.1.4	阶跃函数 $\theta(t)$	358
6.1.5	三种绘景	359
6.2	格林函数与关联函数	361
6.2.1	问题的提出	361
6.2.2	格林函数	362
6.2.3	关联函数	362
6.2.4	傅里叶变换	363
6.2.5	谱定理和色散关系	364
6.2.6	格林函数的运动方程	365
6.3	$S = \frac{1}{2}$ 铁磁体系的磁化强度	365

6.3.1 运动方程 .....	366
6.3.2 时间傅里叶变换 .....	367
6.3.3 空间傅里叶变换 .....	367
6.3.4 计算关联函数 .....	368
6.3.5 自发磁化强度 .....	369
6.4 不同温度范围的磁特性 .....	370
6.4.1 实验规律 .....	370
6.4.2 低温下的自发磁化 .....	371
6.4.3 相变点附近的自发磁化 .....	371
6.4.4 顺磁相的磁化率 .....	373
6.4.5 任意自旋的铁磁体系 .....	375
参考文献 .....	376
附录 .....	377
一、几个常用磁学单位的由来和换算 .....	377
二、磁学中常用的磁学量单位和量纲 .....	379
三、常用磁学量 SI 单位和 CGS 单位的换算 .....	379
四、几种能量单位之间的换算 .....	380
名词索引 .....	381

## 下 册

### 绪论

#### 第 7 章 铁磁(亚铁磁)性的特点和基本现象

- 7.1 铁磁(亚铁磁)性的特点——自发磁化和磁畴
- 7.2 磁性材料中的基本现象及能量表述

#### 第 8 章 磁畴结构

- 8.1 畴壁
- 8.2 铁磁薄膜内的畴壁和畴壁的新类型
- 8.3 从能量观点说明磁畴的成因
- 8.4 单轴晶体的理论畴结构
- 8.5 立方晶体的理论畴结构
- 8.6 树枝状磁畴
- 8.7 不均匀物质中的磁畴
- 8.8 单畴颗粒

- 8.9 磁泡
- 8.10 观察磁畴的实验方法概要、粉纹法的理论条件
- 8.11 磁畴照片剪辑

## 第9章 磁化过程

- 9.1 磁化和反磁化的概况
- 9.2 单轴单晶体的磁化过程
- 9.3 三轴单晶体的磁化过程
- 9.4 单晶体磁化过程的普遍理论
- 9.5 多晶体的磁化, 畴壁移动的阻力(钉扎)
- 9.6 可逆壁移过程决定的起始磁化率
- 9.7 可逆畴转过程决定的起始磁化率
- 9.8  $180^\circ$ 畴壁的弯曲导致的起始磁化率
- 9.9 磁化过程理论在实践中的作用, 纳米晶合金软磁性能的理论
- 9.10 不可逆磁化过程
- 9.11 多晶磁性材料在强磁场下的磁化——趋近饱和定律

## 第10章 反磁化过程

- 10.1 引言
- 10.2 应力和参杂阻碍畴壁不可逆移动决定的矫顽力
- 10.3 磁矩不可逆转向决定的矫顽力
- 10.4 由反磁化核的形成和长大决定的矫顽力
- 10.5 考虑缺陷作用的矫顽力新理论
- 10.6 永磁体内禀矫顽力的经验公式和晶粒间的相互作用
- 10.7 窄畴壁与低温下的特大矫顽力
- 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
- 10.9 永磁性
- 10.10 技术磁化理论在材料生产中的运用

## 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

- 11.1 动态磁化过程的现象与本质
- 11.2 动态磁化过程中的损耗
- 11.3 复数磁导率及电感线圈的品质
- 11.4 畴壁的动态性质



11.5 旋磁性及铁磁共振

11.6 磁黏滞性

11.7 磁导率的减落

11.8 磁有序与其他物性的耦合现象

11.9 强磁金属合金及多层结构中的巨磁电阻

## 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

12.1 元磁化：一块畴壁和一个单畴的电磁特性

12.2 磁性的宏观量子效应

12.3 纳米磁性 (Nanoscale magnetism)

12.4 物质磁性的分类简介

12.5 磁性材料的分类及其他

## 第13章 磁路设计原理

13.0 导言

13.1 理想的静态磁路及永磁体的选择

13.2 实际的静态磁路

13.3 磁的吸引力与排斥力

13.4 动态磁路

13.5 空心线圈和铁芯线圈的磁路设计