

铁磁学

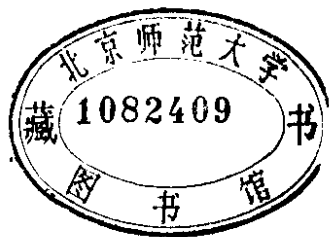
郭贻诚 编著



人民教育出版社

铁 磁 学

郭贻诚 编 著



人民教育出版社

本书对现代铁磁学的基础理论和重要实验结果作了较全面的综合介绍。本书基本上是从实验事实出发，然后介绍理论解释和计算，并适当介绍各方面的近代研究的重要发展。各章附有习题。

本书可作为高等学校磁学专门组铁磁学课程的教学参考书，亦可供高等工业院校的相近专业以及从事磁学工作的科学技术人员参考。

铁 磁 学

郭贻诚 编著

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市西城区丰盛印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 15.25 字数 443,000

1965年12月第1版 1982年11月第2次印刷

印数 2,301—5,300

书号 13012·0766 定价 1.50 元

序

本书是根据作者在山东大学物理系所编写的铁磁学讲义修改补充而成的。编写本书的目的，本来是作为磁学专门组课程的教材。全书的体系和章次，大致参考了过去常用的几种铁磁学专著，如 R. Becker, W. Döring: *Ferromagnetismus* 和 С. В. Вонсовский, Я. С. Шур: *Ферромагнетизм*，而对内容则作了较大的变动，适当介绍了这一学科的新发展。

近年来，铁磁学在实验和理论各方面的发展都很快，内容范围愈来愈广。某些部分如铁氧体物理学已逐渐形成磁学与固体物理学的一个分支；另一些部分如磁性分析和磁化学等则成为重要的边缘学科。这些内容不可能在一个课程内全部讲述。本书在选择内容时，是以铁磁性的基础理论为纲，系统地讨论铁磁物质的磁化过程和各种基本性质，并引证较多的实验事实作为理论的依据与证明。至于具体应用方面，只是在说明原理或方法时，作为例子，略加引述。关于磁性测量的各种方法和仪器，以及磁性材料的性质和用途，因另有课程讲授，不在本书内介绍。

本书所介绍的铁磁性理论只限于最基础的部分，放在第二章。由于铁磁性理论的各学派目前还有若干争论的问题未解决，本书只能介绍海森伯-布洛赫理论模型和能带理论模型的要点作为进一步学习的准备。书中某些章节内容较深或涉及较专门性的问题，均冠以*号，初学时可以略去。为了教学方便，每章末并附以部分习题，作为练习。

由于专门组课程目前尚无统一的教学大纲，本书内容的选择、叙述和编排次序等，只是凭作者个人的讲课经验决定的。由于学识水平的限制，书中一定会有许多缺点甚至错误，作者诚恳地希望各方面随时予

以批评、指正和建议。

山大磁学教研室的教师们曾对本书提出了不少修改意见。张连生、刘丽珠和谢荣华同志为本书绘制了部分插图。作者谨向他们深致谢意。

郭贻诚

1964年11月

符号凡例

- A* 原子量。交换积分。
- B* 磁感应强度(B_s , 饱和磁感强度; B_r , 剩余磁感强度)。
- C* 居里常数。
- c* 比热(c_p , 定压比热; c_H , 定磁场比热; c_J , 定磁化比热)。
- D* 电(位)移。
- E* 杨氏模量。
- E* 电场强度。
- F* 自由能(单位体积)。
- H* 磁场强度(H_c , 矫顽力; H_m , 最大磁场)。
- I* 磁化强度(I_s , 饱和磁化强度或自发磁化强度; I_0 , 绝对饱和磁化强度; I_r , 剩余磁化强度)。
- J* 总动量矩。量子数。
- K_1, K_2 磁晶各向异性常数。
- L* 自感。总轨道矩。量子数。
- M* 磁矩。磁化强度。
- N* 退磁因数。
- N_0 阿伏伽德罗数目。
- P* 压强。功率。动量矩。
- Q* 吸收的热量(单位体积)。品质因数。
- R* 气体常数(克分子)。电阻。
- S* 总自旋。量子数。
- s* 熵(单位体积)。电子自旋量子数。
- T* 绝对温度。
- T_N 涅耳转变点。
- U* 内能(单位体积)。
- V* 体积。
- W* 损耗功率(单位体积)。外斯分子场系数。

- Z 状态总和或配分函数。原子序数。
 α 磁滞损耗系数。晶格常数。
 c 剩余损耗系数。光速。
 d 密度。
 e 电子电荷。涡流损耗系数。
 f 频率(每秒周数)。
 g 光谱分裂因数或朗德因数。磁力比率。
 g' 回转磁比率。
 h 普朗克常数。交变磁场。
 \hbar $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 。
 i 电流。
 k 玻耳兹曼常数。
 l 长度。
 m 电子质量。
 n_f, n_p 克原子的有效磁子数。
 p 动量矩。
 t 时间。
 y 相对磁化强度 $\left(\frac{I}{I_0}\right)$ 。
 z 最近邻原子数。
 α 吉耳伯特(Gilbert)阻尼力矩系数。
 α_i 方向余弦。
 β 玻尔磁子 $\left(\frac{he}{4\pi mc}\right)$ 。
 γ 畴壁能密度。
 δ 畴壁厚度。位相差。损耗角。
 ϵ 介电常数。
 η 斯坦因麦茨(Steinmetz)系数。
 θ_C 居里温度。
 θ 涡流参数。渐近居里点。
 k 准动量。
 λ 朗道-栗弗席兹阻尼力矩系数。

- λ_s 饱和磁致伸缩系数。
- μ 磁导率(μ_0 , 起始磁导率; μ_m , 最大磁导率; μ_r , 可逆磁导率)。
- $\bar{\mu}$ 复磁导率。
- μ_{ij} 张量磁导率。
- μ_B 玻尔磁子。
- ρ 密度。电阻率。角度。
- σ 应力(张力)。自旋矩。
- τ 弛子时间。
- ϕ 磁通量。角度。
- Φ 热力学势能函数(单位体积)。
- χ 磁化率(χ_0 , 起始磁化率; χ_r , 可逆磁化率; χ_D , 不可逆磁化率)。
- ω 圆频率。体积磁致伸缩。

目 录

序	viii
符号凡例	x
第一章 物质的磁性	1
§ 1-1. 引言	1
§ 1-2. 原子磁性	2
§ 1-3. 原子核的磁性	7
§ 1-4. 宏观物体的磁性	9
§ 1-5. 磁性体的热力学关系	10
§ 1-6. 抗磁性的经典理论	14
§ 1-7. 抗磁性的量子力学理论	16
§ 1-8. 顺磁性——郎之万顺磁性理论	19
§ 1-9. 顺磁性的量子力学理论	22
§ 1-10. 顺磁性离子的基本实验数据	28
§ 1-11. 金属的抗磁性	31
§ 1-12. 金属的顺磁性	34
§ 1-13. 铁磁性物质的基本实验事实	36
§ 1-14. 铁磁物体的回转磁效应	45
习题	49
参考文献	51
附录 I-1	51
第二章 现代铁磁性理论的基础	54
§ 2-1. 引言	54
§ 2-2. “分子场”的唯象理论	54
§ 2-3. 弗仑克耳-海森伯铁磁性理论	58
§ 2-4. 布洛赫自旋波理论——自发磁化的 $T^{3/2}$ 定律	67
§ 2-5. 铁磁元素的原子结构——能带理论模型	76
§ 2-6. $s-d$ 电子的交换作用	80

§ 2-7. 铁磁性转变与居里温度	85
§ 2-8. 合金的铁磁性质	93
§ 2-9. 铁磁性合金的简单理论	104
习题	109
参考文献	110
附录 I-1	111
第三章 反铁磁性及亚铁磁性	112
§ 3-1. 反铁磁性——基本实验事实	112
§ 3-2. 反铁磁物质的交换作用	117
§ 3-3. 反铁磁性的简单理论——“分子场”理论	118
§ 3-4. 亚铁磁性	124
§ 3-5. 单铁氧体的晶格结构	125
§ 3-6. 铁氧体的分子饱和磁矩	132
§ 3-7. 复合铁氧体的饱和磁矩	135
§ 3-8. 亚铁磁性的分子场简单理论	142
§ 3-9. 三角形亚铁磁性结构	155
习题	157
参考文献	158
附录 II-1	160
第四章 技术磁化曲线	162
§ 4-1. 引言	162
§ 4-2. 磁化曲线和磁滞回线(一般简介)	164
§ 4-3. 铁磁晶体内各种相互作用的能量	166
§ 4-4. 磁晶各向异性能	168
* § 4-5. 磁晶各向异性的理论解释	175
§ 4-6. 磁弹性能和磁致伸缩	178
§ 4-7. 外磁场和退磁场的能量	184
§ 4-8. 铁磁体中自发磁化区域的分布	188
§ 4-9. 磁畴界壁	192
§ 4-10. 铁晶体中平行于(100)面的 180° 畴壁	194
§ 4-11. 布洛赫畴壁的一般计算	200

* § 4-12. 涅耳畴壁	201
§ 4-13. 磁畴结构的观测(1)粉纹图示法	204
§ 4-14. 磁畴结构的观测(2)克尔磁光效应法和电子显微镜法	215
§ 4-15. 铁磁微粒	217
* § 4-16. 超顺磁性	222
§ 4-17. 畴壁位移过程	224
§ 4-18. 畴壁位移的两种理论	227
§ 4-19. 起始磁化率的计算	229
§ 4-20. 对于起始磁化率理论的评论——提高材料的起始磁化率的 途径	235
§ 4-21. 在磁晶各向异性性能作用下的可逆转动磁化过程	239
§ 4-22. 单晶磁化曲线的计算(转动磁化过程)	242
§ 4-23. 在应力作用下的可逆转动磁化过程	249
§ 4-24. 多晶的磁化曲线——趋近饱和定律	252
* § 4-25. 不可逆畴壁位移过程——巴克豪生跳跃	250
§ 4-26. 磁滞——反磁化过程	265
§ 4-27. 由反磁化核的成长所引起的磁滞	271
* § 4-28. 反磁化核的起源	278
§ 4-29. 由磁畴不可逆转动所引起的磁滞——单畴粒子	281
* § 4-30. 非一致转动的反磁化过程	292
* § 4-31. 磁性薄膜	291
§ 4-32. 剩余磁化和剩余磁感	300
* § 4-33. 微磁化理论	304
* § 4-34. 圆柱体的磁化问题	307
* § 4-35. 交换各向异性	313
* § 4-36. 感生各向异性(扩散各向异性)	316
习题	319
参考文献	322
第五章 铁磁物质在交变磁场中的磁化过程·时间效应	325
§ 5-1. 引言	325
§ 5-2. 铁磁物质在交变磁场中的复磁导率	327

§ 5-3. 磁频率的频散和磁化弛豫过程	329
§ 5-4. 磁谱(简介)	331
§ 5-5. 由畴壁位移所引起的频散和损耗	333
§ 5-6. 畴壁的动态性质	336
§ 5-7. 磁化矢量的运动方程——朗道-栗弗席兹理论	338
§ 5-8. 由磁畴的自然共振所引起的频散和损耗	340
§ 5-9. 理论和实验的比较	343
§ 5-10. 由铁磁体的尺寸共振及磁力共振所引起的频散	346
§ 5-11. 磁损耗的分析	348
§ 5-12. 涡流——趋肤效应	350
§ 5-13. 磁滞损耗	353
§ 5-14. 剩余损耗与磁后效	355
§ 5-15. 金属材料中的剩余损耗	358
§ 5-16. 微观涡流所引起的损耗	360
§ 5-17. 铁氧体中的李希特后效损耗	363
§ 5-18. 由热起伏引起的弛豫损耗	366
习题	367
参考文献	368
第六章 铁磁共振	370
§ 6-1. 引言	370
§ 6-2. 张量磁导率·运动方程式的线性解	371
§ 6-3. 共振吸收·共振峰宽度	375
§ 6-4. 单晶体的铁磁共振	378
§ 6-5. 铁磁共振问题的一般处理方法	380
* § 6-6. 磁畴结构对于共振峰的影响	384
§ 6-7. 自然共振	387
§ 6-8. 由铁磁共振实验测定磁力比率 g	388
* § 6-9. 静磁型共振	390
§ 6-10. 电磁波在旋磁介质中的传播	396
* § 6-11. 亚铁磁共振	401
* § 6-12. 自旋波频谱	404

§ 6-13. 高功率现象	409
* § 6-14. 高功率现象的理论	412
§ 6-15. 关于共振峰宽度的基本实验事实	425
* § 6-16. 铁磁物质内的弛豫机理——共振峰宽理论	432
习题	436
参考文献	436
第七章 磁致伸缩	439
§ 7-1. 引言	439
§ 7-2. 磁致伸缩的热力学关系	441
§ 7-3. 线性磁致伸缩	443
§ 7-4. 在技术磁化过程中的磁致伸缩	451
§ 7-5. 顺磁磁化过程中的磁致伸缩	453
§ 7-6. 铁磁物质的反常体积变化和膨胀系数	458
§ 7-7. 磁致伸缩的理论概念	461
§ 7-8. 磁弹性效应(力致伸缩)	463
§ 7-9. ΔE 效应的理论公式	467
* § 7-10. 磁弹性内耗	470
* § 7-11. 影响弹性磁滞衰减的因素	472
参考文献	474
第八章 铁磁物质的电性质·磁场电现象·热电现象	476
§ 8-1. 引言	476
§ 8-2. 铁磁物质的电性质	477
§ 8-3. 磁电阻效应	483
§ 8-4. 单晶的磁电阻效应	486
§ 8-5. 电弹性效应	489
§ 8-6. 热磁效应与热弹性效应	492
* § 8-7. 铁磁物质的霍尔效应	494
参考文献	498
主要参考书	500
附录	502
索引	503

第一章 物质的磁性

§ 1-1. 引言

物质磁性的研究是近代物理学的重要部门之一。磁性现象的范围是很广泛的,从微观粒子到宏观物体,以至宇宙天体,都具有某种程度的磁性。磁性材料在近代技术的各部门中特别是电工技术及无线电技术中,获得了日益广泛的应用。

磁性现象的发现起源于遥远的古代。我国古代史册关于天然磁铁矿 Fe_3O_4 磁性的记载,大约在公元前四世纪,关于指南器(司南)的发明,则在公元前三世纪左右。这些,可以说是对磁性现象的应用的最早记录了。

安培首先提出了“分子电流”是物质磁性的起因,但当时只是一种假设而已。随着近代原子物理学的发展,这个假设才得到了实验的证明。按照现代原子物理学的观念,物质内部的磁性元负荷者(元磁性体)有以下两种:

1. 组成物质的基本粒子(电子、质子、中子等)都具有本征磁矩(自旋磁矩)。

2. 由于电子在原子内运动而产生的微观电流的磁矩(轨道磁矩),以及质子和中子在原子核内的运动所产生的磁矩。

当大量原子和分子集团组成宏观物体时,原子内的这些元磁性体之间有各种相互作用(磁性的或静电的)。这些相互作用就是宏观物体的磁性的起源。

应用量子力学统计理论,可以较严密地建立物质的不同类型的磁性理论。应用量子力学理论也有可能建立物质的磁性现象和非磁性现

象之间的连系。

§ 1-2. 原子磁性

1. 电子的本征磁矩(自旋磁矩)和轨道磁矩

在研究各种原子的线状光谱时,发现了光谱线的精细结构,例如类氢原子的光谱线具有双重线的结构。为了解释这种结构,除了依照玻尔的原子模型,假设类氢原子中的价电子环绕原子核运动而具有轨道动量矩和轨道磁矩外,还必须假设电子具有本征动量矩 σ (自旋)。这种自旋矩 σ 在任意方向的外加磁场中,只可能有两种取向,换言之,在外场方向(作为 Z 轴方向)的投影只可能有大小相等而符号相反两种,即

$$\sigma_z = \pm \frac{\hbar}{4\pi} = \pm \frac{1}{2} \hbar, \quad (2-1)$$

式中 $2\pi\hbar = h = 6.624 \times 10^{-27}$ 尔格·秒,是普朗克常数。电子的自旋产生了磁矩,它在外磁场方向的两个可能投影是

$$\mu_z^s = \pm \frac{e\hbar}{2mc} = \mp \frac{e}{mc} \sigma_z, \quad (2-2)$$

式中 $e = 4.8025 \times 10^{-10}$ C. G. S. 静电单位, $m = 9.1066 \times 10^{-28}$ 克,为电子的静止质量; $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒为光速。它的绝对值等于一个玻尔磁子 μ_B :

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} = 0.9273 \times 10^{-20} \text{ 尔格/高斯。} \quad (2-2a)$$

证明电子具有自旋磁矩的最清楚而直接的实验是斯特恩和格拉赫所做的使原子束在不均匀磁场中偏转的实验(读者可参考原子物理学,这里不详述)。

1927年,泡利建立了电子自旋的近似的量子理论。根据上面的假设和量子力学的一般规律,可以证明:假如电子自旋的分量 σ_z 等于 $\frac{\hbar}{2}$,

则自旋矢量本身的数值应为

$$|\sigma| = \sqrt{s(s+1)}\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2}\hbar; \quad (2-3)$$

式中 $s = \frac{1}{2}$, 为自旋量子数。而自旋磁矩矢量的数值应为:

$$|\mu_s| = \frac{e}{mc}\sqrt{s(s+1)}\hbar = \sqrt{3}\mu_B. \quad (2-4)$$

电子自旋及其磁矩存在的理论根据, 是由狄喇克的相对论性量子理论建立的。从这理论可以自然地得到电子具有自旋及磁矩的结果。

电子的轨道磁矩是由电子环绕原子核的运动所产生的。按照纯粹经典的轨道模型, 以周期 T 沿椭圆轨道而运动的电子(见图 1-1), 相当于一个圆电流 $i = \frac{e}{cT}$, 这圆电流的磁矩即是电子的轨道磁矩:

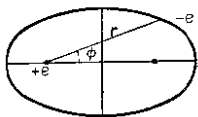


图 1-1 电子的椭圆轨道

$$\mu_{\text{轨道}} = iA = \frac{eA}{cT}, \quad (2-5)$$

其中

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r^2 d\phi \quad (2-6)$$

为轨道面积。

电子的动量矩 p_ϕ 是运动恒量。依照电子轨道量子化规则

$$p_\phi = mr^2 \cdot \frac{d\phi}{dt} = l\hbar, \quad (2-7)$$

($l=1, 2, 3, \dots, n$, 为角量子数)

由(2-5)、(2-6)、(2-7)式可得

$$\mu_{\text{轨道}} = \frac{e}{2mc} p_\phi = l\mu_B. \quad (2-8)$$

量子力学证明原子中电子在稳定状态下的动量矩矢量的数值不是由(2-7)式表示, 而应为

$$p_{\phi} = \sqrt{l(l+1)}\hbar, \quad (2-9)$$

同时角量子数 l 的可能数值为

$$l = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

原子中电子的轨道磁矩(对应于动量矩的磁矩)则为

$$\mu_l = \sqrt{l(l+1)} \frac{e\hbar}{2mc} = \sqrt{l(l+1)} \mu_B. \quad (2-10)$$

原子的定态(即 $l=0$, 既没有动量矩, 又没有磁矩)是一种特殊的统计分布, 称为 S 态。

磁矩与动量矩的比率称为回转磁比率 g' 。由(2-2)和(2-8)式可知: 电子的轨道磁矩与其动量矩的比率为

$$g'_l = \frac{\mu_l}{p_{\phi}} = \frac{e}{2mc}; \quad (2-11)$$

而电子自旋磁矩与其动量矩的比率则为

$$g'_s = \frac{\mu_B}{\sigma} = \frac{e}{mc}. \quad (2-12)$$

量子力学的改正(2-3)和(2-10)不改变以上两个比率的数值。

由量子力学的方程式可以得出电子动量矩的空间量子化规则如下:

动量矩 l 矢量(以 \hbar 为单位)在空间任一指定方向(例如外磁场 H 的方向)的投影, 只能有 $2l+1$ 个不同的数值 m_l :

$$m_l = -l, -(l-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (l-1), l.$$

换言之, l 矢量在空间只能有 $2l+1$ 个不同的方位, 方位角(即 l 及 H 的夹角)由下式决定:

$$\cos(l, H) = \frac{m_l}{\sqrt{l(l+1)}}. \quad (2-13)$$

图 1-2 表示轨道动量矩 $l=3$ 的空间量子化。空间量子化规则也

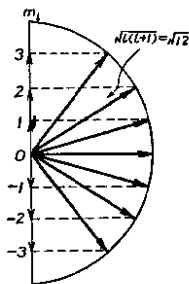


图 1-2 电子动量矩的
空间量子化