

上

磁性体手册

〔日〕近角聪信 等编 黄锡成 金龙焕 译 冶金工业出版社

磁 性 体 手 册

上 册

〔日〕近角聪信 等编

黄锡成 金龙焕 译

杨伏明 詹文山 校

冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

《磁性体手册》系译自日本朝仓书店1975年出版的、近角聪信教授等编的《磁性体ハンドブック》一书。中译本分上、中、下三册出版，本册为《手册》的上册，即“基础篇”。书中内容包括：概论、磁性理论、静磁现象、磁共振、核磁以及中子衍射共六章。本册以附录形式附有常用公式和数表以及MKSA和CGS单位的换算表。

磁性体ハンドブック

近角聪信 等 編集

磁性体手册

上 册

〔日〕近角聪信 等编

黄锡成 金龙焕 译

杨伏明 詹文山 校

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 12 5/8 字数 332 千字

1984年 4 月第一版 1984年 4 月第一次印刷

印数00,001~4,300册

统一书号：15062·4022 定价1.60元

中译本前言

本书是根据日本朝仓书店 1975 年出版的、近角聪信教授等编的《磁性体ハンドブック》一书翻译的。全书包括磁性物理概论、基础理论和基础实验、各种磁性体的磁性、磁化过程及磁化的附随现象、磁性体的应用等，共四篇二十六章。内容全面，是一部磁学百科全书。因篇幅甚大，本书中译本分上、中、下三册陆续出版。

近年来，磁学研究和磁性材料的科研与生产不断发展，在理论和应用方面都取得了很多成果。我国磁学的研究和磁性材料的生产在实现四个现代化中发挥着巨大的作用。各种磁性材料和器件广泛应用于科学研究、工农业生产、国防、医疗卫生和人民生活的各个方面。随着科学技术的发展，磁性材料和器件的应用将不断地扩大。

我国磁学研究和磁性材料的科研与生产，已经具备了相当大的规模。广大科学工作者和工程技术人员在发展磁学的基础理论，探索新的磁性材料，发展磁性材料新应用的科学研究和生产活动中，迫切希望得到一本适用的参考书，以便能从中迅速地找到所需要的迄今为止人们已经知道的详细资料和数据。这样可以少走弯路，加快工作的进展。本书的作者们正是根据这种实际需要而编辑的。参加撰写的人大都是日本在各个领域中从事研究工作多年，享有一定威望的专家。我们翻译此书的目的是希望将这样一本有价值的工具书提供给我国磁学及磁性材料工作者，满足他们工作中的实际需要。

作为一本手册，本书提纲挈领地介绍了磁学中的各种基本概念和这个领域中的最新研究成果。载有必要图、表，列举了大量的数据为使不大熟悉磁学这一专门学问的人也能了解这些数据的意义，各章节中用通俗的语言阐述了有关的基础知识。本书可供

从事磁学和磁性材料的科研人员、生产、使用部门的工程技术人员以及大专院校的有关师生参考。

在翻译本书时，我们力图保持原文的风格，但是由于我们水平有限，译文中错误和不妥之处，请读者批评指正。

译 者

一九八二年五月

序

近年来，固体物理获得了惊人的发展，特别是磁性物理研究的进展尤为显著，有关这方面的论文每年都在1000篇以上。磁性材料及其应用在广度和数量上也逐年增加，除软磁、硬磁材料外，关于磁录音、磁存储方面的应用，完全改变了过去关于磁的应用的概念。

二十年前，如果想编写一部关于磁性体的教科书，必须留意收集全部资料，留心是否有遗漏，而现在做这项工作时，费心思的却是从堆积如山的资料中如何选择的问题。因此，在今后的磁性体的教科书中，期望包罗全部资料是办不到的。

然而，不论是继续进行磁性物理的研究，或是进行磁性材料的研究，还是仅仅作为用户使用磁性材料，以及进而探索发展新的磁性应用装置的可能性，都希望能够很容易地得到迄今为止人们已经知道的关于磁性体的详细资料。如果有一部介绍有关磁性体的重要资料的手册，应该说是非常有益的。可是，这样的手册在世界上尚未见到。因此，试编一本这样的《手册》就是我们着手编辑本《手册》的动机。

不过，如果只是堆砌一些数据，那将是一部难以使用的书。这是因为磁性领域是一个比较特殊的领域，磁性物理和应用技术，除专家之外许多人不大了解，如果不对这些问题进行说明，就难于理解各种数据的意义。

为了使初学者也能理解，同时又能作为教科书使用，本书各章均载有各有关现象的简单说明，以表或图的形式给出专门数据，与此同时，努力介绍当前研究的最尖端的成果。执笔者求助了各领域的专家，对各部分均做了精湛的概括。资料是从1968年以前的主要文献中收录的，但由于执笔者写作进度不同，有的也包括了1969年的文献。

本手册的内容由 I、基础篇, II、物质篇, III、物性篇, IV、应用篇等四篇构成。基础篇叙述了磁性物理的概论、基础理论和基础实验;物质篇详尽地叙述了从金属、合金到化合物、氧化物的各种磁性体的磁性;物性篇叙述了磁各向异性、磁致伸缩、磁畴、磁化过程、磁共振、磁光等磁性诸现象;应用篇除叙述了软磁、硬磁以外,还记述了磁录音、磁存储以及磁泡存储器等。通观全篇是一部由26章构成的著作。

如果此手册能对初学者学习磁性体有所帮助,对磁性研究者能成为一本常用的工具书,在他们研究新的磁性时有所裨益,对磁性材料的使用者能作为一本数据手册而有所用处的话,全体编者将为之而感到由衷的高兴。

读者发现本书的叙述上有不妥之处,或者得到了更新的数据,请告知编者,以便在修订本书时予以考虑。谨在这里表示我们衷心的希望。

近角聡信 太田恵造 安達健五
津 屋 昇 石川義和
一九七五年五月

目 录

第1篇 基础篇

第1章 概论	1
1.1 电磁现象	1
1.2 磁性体的种类	9
1.2.1 载磁子	9
1.2.2 有序排列	11
1.2.3 无序排列	17
1.3 磁性实验	19
1.3.1 静态磁性实验	19
1.3.2 动态磁性实验	20
1.3.3 微观磁性实验	20
1.3.4 伴随磁化的实验	21
1.4 磁性和应用	22
1.4.1 软磁材料	22
1.4.2 硬磁材料	23
1.4.3 其他	24
第2章 磁性理论	25
2.1 磁性原子的电子状态	25
2.1.1 过渡金属、稀土金属和铜系金属的定义	25
2.1.2 磁性原子（或离子）的轨道和自旋	34
2.1.3 磁性原子（离子）的磁矩	42
2.2 晶场和电子状态，分子场近似	47
2.2.1 晶体内过渡金属原子（离子）的各种相互作用	47
2.2.2 晶场和d电子的能态	49
2.2.3 晶场中过渡金属d电子的能级	51
2.2.4 d电子的最低项的能级和轨道角动量的冻结	52
2.2.5 自旋轨道相互作用和外磁场的影响	59

2.2.6 强晶场的情形	63
2.2.7 闭壳层(离子实)的抗磁性	66
2.2.8 铁磁性和反铁磁性的分子场理论	67
2.2.9 朗道-贝洛夫的二级相变理论	77
2.3 局域模型(绝缘体)的磁性	78
2.3.1 交换相互作用	78
2.3.2 超交换相互作用	80
2.3.3 齐亚洛欣斯基-守谷相互作用	89
2.3.4 二重交换相互作用	91
2.4 局域系统的统计力学	94
2.4.1 点阵类型	94
2.4.2 海森伯模型, 伊辛模型	97
2.4.3 伊辛模型的严格解	99
2.4.4 伊辛模型的近似解	101
2.4.5 海森伯模型的近似解	103
2.4.6 高温展开法	104
2.4.7 临界指数	107
2.4.8 稀释铁磁性	108
2.4.9 自旋波理论	109
2.4.10 格临函数法	111
2.5 金属磁性的能带理论	111
2.5.1 过渡金属的能带和状态密度	111
2.5.2 自旋顺磁磁化率	122
2.5.3 轨道(顺磁)磁化率	125
2.5.4 斯托纳模型及其一般金属铁磁性	127
2.5.5 弱铁磁性	131
2.5.6 交换劲度和自旋波	132
2.5.7 高磁场自旋磁化率	134
2.5.8 能带内电子的交换能	136
2.5.9 自旋密度波	138
2.5.10 合金的电子状态密度	140
2.6 金属中的局域磁矩	141

2.6.1	杂质势和夫里德耳的求和定则	142
2.6.2	局域磁矩的发生	143
2.6.3	s-d相互作用—杂质自旋间的相互作用——传导电子 的自旋极化	146
2.6.4	稀释合金中的电阻极小现象（近藤效应）	149
2.6.5	局域自旋的基态	151
第 3 章	静磁现象	154
3.1	磁场的产生	154
3.1.1	空心线圈	154
3.1.2	超导线圈	157
3.1.3	电磁铁	158
3.1.4	永久磁铁	162
3.1.5	磁屏蔽	163
3.1.6	脉冲磁场	163
3.2	磁场的测量	166
3.2.1	利用旋转力的方法	166
3.2.2	利用电磁感应的方法	166
3.2.3	利用磁化特性的非直线性方法	167
3.2.4	利用由磁场引起的物理变化的方法	167
3.2.5	利用磁共振的方法	169
3.3	磁化强度的测量	169
3.3.1	利用电磁感应的方法	169
3.3.2	利用作用于样品的力的方法	172
3.3.3	利用测量磁化了的样品所产生的磁场的方法	175
第4章	磁共振	177
4.1	磁共振现象	177
4.1.1	磁共振原理	177
4.1.2	自旋运动	178
4.1.3	布洛赫方程	181
4.2	顺磁共振	183
4.2.1	测量	183
4.2.2	克喇末-克朗尼格关系	184

4.2.3	吸收线强度	185
4.2.4	吸收线宽	196
4.2.5	金属内的特殊效应	201
4.3	铁磁共振	202
4.3.1	各向异性的影响	204
4.3.2	弛豫现象	205
4.3.3	张量磁导率	205
4.3.4	铁氧体的g因子	206
4.3.5	巨大各向异性	207
4.3.6	交换相互作用和偶极子相互作用对铁磁共振谱的影响 ...	207
4.3.7	静磁模 (Walker模)	209
4.3.8	共振吸收线宽的起源	210
4.3.9	金属的铁磁共振	211
4.3.10	电子跳移导致的 Fe^{2+} , Fe^{3+} 转变及与此有关的 弛豫现象	211
4.3.11	慢弛豫	212
4.3.12	快弛豫	214
4.3.13	样品表面粗糙产生的线宽	214
4.3.14	多晶材料的铁磁共振线宽	214
4.3.15	铁磁共振实验中应注意的几个问题	216
4.3.16	磁性薄膜的自旋波共振	218
4.4	反铁磁共振	223
4.4.1	理论	223
4.4.2	磁各向异性强的情形	225
4.4.3	反铁磁体内杂质的自旋共振	226
4.4.4	反铁磁共振实验	226
4.4.5	反铁磁共振的弛豫现象	227
4.5	磁共振的非线性效应	228
4.5.1	顺磁共振饱和现象	228
4.5.2	脉塞	229
4.5.3	脉伐	230
第5章	核磁	235

5.1 原子核与周围电磁场的相互作用	235
5.2 核磁共振原理, 测量法	243
5.2.1 原理	243
5.2.2 物质中的核磁共振	243
5.2.3 核磁共振的测量方法	248
5.3 穆斯堡尔效应的原理和测量法	254
5.4 利用穆斯堡尔效应测内磁场和四极矩相互作用	262
5.5 内磁场	270
5.6 其他手段	273
5.6.1 放射线角分布	273
5.6.2 角相关及其他手段	275
5.7 核磁弛豫	277
5.7.1 核磁弛豫	277
5.7.2 核磁弛豫时间测量法	279
5.7.3 核磁弛豫研究的实例	281
第6章 中子衍射	293
6.1 中子衍射的原理和测量法	293
6.2 相干弹性散射	297
6.3 非相干弹性散射	313
6.4 相干准弹性散射	315
6.5 相干非弹性散射	322
6.6 非相干非弹性散射	333
6.7 极化中子散射	337
6.7.1 不测量散射中子偏振度的情形	338
6.7.2 测量偏振度的情形	339
6.7.3 极化中子实验法	341
附录1 公式和数表	343
附录2 MKSA单位和CGS单位的换算表	370
参考文献	372

第1篇 基础篇

第1章 概 论

1.1 电 磁 现 象

磁性体是由于磁场的作用，在某种意义上产生磁化的物质。广义而言，也可以说是一种电磁现象。一般，电磁现象可用麦克斯韦方程式 (Maxwell's equation) 归纳。在〔米-公斤-秒-安培 (MKSA)〕单位制中，麦克斯韦方程式可以写成如下形式：

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{i} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (\text{MKSA表示法})$$

(1-1)

式中 $\mathbf{E}$ 为电场； $\mathbf{H}$ 为磁场； $\mathbf{D}$ 为电通量密度； $\mathbf{B}$ 为磁通量密度； $\mathbf{i}$ 为电流密度； ρ 为电荷密度； ε 为电容率； μ 为磁导率； σ 为电导率。

在 (1-1) 式中，最上面的四式是严格成立的，它们表达了电磁现象的基本规律。与此相反，下面的三式只是近似地表达物质介电的、磁的、电的性质。对某些物质来说，这样的比例关系并不成立。特别是 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 或 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 的关系，在一般情形下可以表

示如下:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{I} \end{aligned} \right\} \text{(E-H对应的表示法)} \quad (1-2)$$

式中 $\mathbf{P}$ 为电极化强度; $\mathbf{I}$ 为磁化强度; ε_0 为真空电容率; μ_0 为真空磁导率。

其值为:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

它们与真空中电磁波的传播速度 c 的关系是:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1-4)$$

(1-3) 式中, μ_0 值是精确的, 而 ε_0 值则是采用光速公式 (1-4) 式中所给出的简单值时的近似值。

(1-2) 式是使 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$, $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{B}$ 相对应的表示法, 通常称为 E-H 对应表示法。与此相反, 也有将作用于电荷的场 $\mathbf{E}$ 和作用于电流的场 $\mathbf{B}$ 进行对比的 E-B 对应表示法。在这种表示法中, (1-2) 式可以写成:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{I} \end{aligned} \right\} \text{(E-B对应的表示法)} \quad (1-5)$$

在 (1-2) 式中所见到的那种电和磁在形式上的对称性在这里被破坏了。在这种表示法中, $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{H}$ 具有相同的量纲。这对那些习惯了 CGS 高斯单位制的人也许不以为然, 但对那些在 MKSA 单位制 E-H 对应系中, $\mathbf{H}$ 作为有源量 (例如相当于力学中的“力”的量), $\mathbf{B}$ 作为无源量 (例如相当于力学中的“位移”的量) 的概念已经明确, 搞清了 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{B}$ 在概念上的差异的人, 则就不满足了。所以, 在本书中, 我们专门采用 E-H 对应的表示法。

另外, 因为读者中也有习惯了厘米·克·秒 (CGS) 高斯单位制的人, 所以我们首先叙述一下 CGS 单位制与 MKSA E-H 对应系

单位制的关系。用CGS高斯单位制表示的麦克斯韦基础方程式为：

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{i} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= 4\pi \rho \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{CGS高斯制}) \quad (1-6)$$

式中 c 为光速。在CGS单位制中， c 的数值为：

$$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s} \quad (1-7)$$

又，相当于 (1-2) 式的公式是：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{I} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

在CGS (高斯) 制中，如在 (1-6)、(1-8) 式中所看到的那样，系数 4π 到处出现。与此相反，把用MKSA单位制表示的那些公式中不出现系数 4π 的单位制叫做有理化单位制。

表1-1是MKSA E—H对应、MKSA E—B对应与CGS高斯制的各个量的单位制及单位大小的比较表。CGS高斯制存在着各单位的名称不完备以及单位的大小不合实用等种种缺点。表1-2是各单位制中的主要方程式。

这里，我们就本书所用的MKSA单位制E—H对应系的单位名称特作若干说明。在MKSA单位制中，如其单位制的名称那样，基本单位有下列四个：

长度	米 (m)
质量	公斤 (kg)
时间	秒 (s)
电流	安培 (A)

由此导出的单位在力学领域内有：

速度	米/秒 (m/s)
加速度	米/秒 ² (m/s ²)
力	牛顿(N) = (kg·m/s ²)

表 1-1 各电磁量的单位比较表

量	符 号	MKSA单位	CGS高斯单位
长度	l	1m	$= 10^2 \text{ cm}$
质量	m	1kg	$= 10^3 \text{ g}$
时间	t	1s	$= 1 \text{ s}$
频率	f	1Hz	$= 1 \text{ Hz}$
力	F	1N	$= 10^5 \text{ dyn}$
能量	U	1J	$= 10^7 \text{ erg}$
功率	P	1W	$= 10^7 \text{ erg/s}$
电荷	q	1C	$= c \cdot 10^{-1} \text{ 静电C}$
电通量密度	D	1C/m ²	$= 4\pi c \cdot 10^{-5} \text{ 静电C/cm}^2$
电极化强度	P	1C/m ²	$= c \cdot 10^{-5} \text{ 静电C/cm}^2$
电流	I	1A	$= c \cdot 10^{-1} \text{ 静电A}$
电位	ϕ	1V	$= 1/c \cdot 10^8 \text{ 静电V}$
电位差, 电动势	V	1V	$= 1/c \cdot 10^8 \text{ 静电V}$
电场	E	1V/m	$= 1/c \cdot 10^6 \text{ 静电V/cm}$
电阻	R	1 Ω	$= 1/c^2 \cdot 10^9 \text{ 静电}\Omega$
电容	C	1F	$= c^2 \cdot 10^{-9} \text{ 静电F或cm}$
电容率	ϵ	1F/m	$= 4\pi c^2 \cdot 10^{-11}$
磁极	m	1Wb	$= 1/4\pi \cdot 10^8 \text{ 电磁单位}$
磁通量	Φ	1Wb	$= 10^8 \text{ Mx}$
磁通量密度	B	1Wb/m ²	$= 10^4 \text{ G}$
磁化强度	I	1Wb/m ²	$= 1/4\pi \cdot 10^4 \text{ G}$
磁位	ϕ_m	} 1A	$= 4\pi \cdot 10^{-1} \text{ gilbert}$
磁通势	V_m		
磁场	H	1A/m	$= 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$
电感	L	1H	$= 10^9 \text{ 电磁H}$
磁阻	R_m	1H ⁻¹	$= 4\pi \cdot 10^9 \text{ 电磁单位}$
磁导率	μ	1H/m	$= 1/4\pi \cdot 10^7 \text{ 电磁单位}$

能量	焦耳 (J) = (N·m)
功率	瓦特 (W) = (J/s)
在电磁学范围内有:	
电 荷	库仑 (C) = (A·S)
电 位	伏特 (V) = (J/C)
电功率	瓦特 (W) = (V·A) = (J/s)
电 阻	欧姆 (Ω) = (V/A)
电 容	法拉第 (F) = (c/V)
电 感	亨利 (H) = (V·s/A)
磁通量, 磁极	韦伯 (Wb) = (H·A) = (V·s)
磁通量密度,	韦伯/米 ² (Wb/m ²) *
磁化强度	
磁 场	安培/米 (A/m)
磁化率, 磁导率	亨利/米 (H/m)
磁 位	安培 (A)
磁 矩	韦伯·米(Wb·m)

我们这样对所有的量规定单位名称, 虽然有的单位名称对应着几个物理量 (如安培(A)表示电流和磁位), 但多数情况, 根据单位名称就大体可以知道它表示什么物理量。

在CGS高斯制中常用的磁学量有以下四种:

磁通量	麦克斯韦 (Mx)
磁通量密度, 磁化强度	高斯 (G)
磁 场	奥斯特 (Oe)
磁化率	(无量纲)

当用这些量进行计算时, 尽量按表1-1把这些量进行换算, 用MKSA单位表示, 然后用MKSA制的公式进行计算, 必要时再将计算的结果换算为CGS单位, 这样做比较简单。这不仅是因为CGS制的公式因没有有理化而存在复杂的系数, 而且还在于CGS的公式存在着不能直接使用安培、伏特等实用电学单位等缺点。

虽然在表1-1中已列出CGS制和MKSA制的换算公式, 但如

* 此单位也叫特斯拉 (T) 。