



(日) 内山 晋等著

应用磁学

Yingyong
cixue

天津科学技术出版社

044.2
4022

应 用 磁 学

〔日〕内山 晋 等著
姜 恩 永 译

天津科学技术出版社

应用化学

〔日〕内山 晋 等著

姜 恩 永 译

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷二厂印刷

天津市新华书店发行

*

开本 850×1168毫米 1/32 印张 9.125 字数 209,000

一九八三年七月第一版

一九八三年七月第一次印刷

印数：1—7,000

书号：15212·87 定价：1.16元

内 容 简 介

本书为《应用磁学》，讲述铁磁性基本理论、铁磁性材料及其应用，作者试图立足于新型磁性材料的开发，在第一、第二、第三、第四章中讲述了铁磁性物理，与传统讲法不同，去掉了一些作者认为无关紧要的物理内容；在第五章中，以较大篇幅讲述了各种磁性材料，重点是近年来新研制成功的磁性材料与性质；在第六章里，作者扬弃了一般磁学或磁性材料的专门教科书的传统写法，着重讲述了近年来出现的磁性材料的各种新应用。各章后面附有一定量的练习题，不但可以加深对物理概念的理解，而且对进一步使理论同实际结合起来，以及开拓新课题，也颇有启发。

本书可供高等院校理工科磁学、磁性材料以及相近的应用物理专业师生参考，也可供从事应用磁学研究工作的科技工作者参考。

序 言

随着现代工业的发展，越发显示出了计算机软件的重要作用，然而作为软件基础的计算机硬件是和材料密切相关的。过去电工学的主要课程是电工仪表，而现在，电工学专业却以导体、绝缘体、磁性材料等为主要内容了。由于电工材料的研究是金属学和应用化学学科的任务，所以电类专业均以讲解电工材料为主，即除基础理论之外，又增添了材料的性质及用途等方面的内容。

自从发明晶体管之后，出现了半导体工业。这样一来无可非议地必须从根本上改革以往大学中有关电工材料方面的教学计划。众所周知，结型晶体管的问世，是由于人们从量子力学中导出了空穴的概念，即纯属受到理论上启示之后的产物，而并非当时日本国的电工技术人员头脑里的凭空所得。可以说，后来的各种发明，如约瑟夫逊器件^①和磁泡装置等，都是在充分掌握了物性物理学的基本规律之后出现的。

基于这种崭新的思想认识，随着作者所在的名古屋大学电子学专业和电气第二专业的建立，原电工学专业课程计划，经过了两次大的变动之后，开设出了与物性有关的新课程，即物性基本理论、固体电子学、半导体、电介质以及磁性材料等。作者承担了磁性材料的教学任务，并将经过十几年反复修改的讲义，送交三重大学增田教授，经他修改以后，完成本书。

然而，该书能够获得出版发行，还同东京大学近角聘信教

① 借助于Josephson效应制成的一种器件（译者注）

授的热情支持和鼓励分不开。因此，我想就这方面的情况作一点说明。大约在两年前，作者的讲义印刷稿经コロナ社电气·电子工学大系的编辑人员过目，并要求作者对该讲义进行归纳整理。但是，这个印刷稿的要点似已包括在近角教授所著的“铁磁质物理”一书中，因此本书作者对稿件的具体情况未加考虑，曾断然决定收回。可是，由于各种因素所致，废弃该稿件尚存一定困难，于是将印刷稿又进行了修改，随后转请近角教授审阅，立即取得了出版权。与此同时，近角教授还给了我很大的鼓励。在此记述这一经过，目的在于表达作者对近角教授的深厚谢意。

该书尽管定名为《应用磁学》，但和以前的同类书籍相比，在内容上有所不同。以记忆或记录方式为代表的功能器件，所出现的突破，摆脱了磁性材料只起传导磁通作用的被动地位。我坚信这种突破必须是建立在清楚地了解磁性材料本质的基础之上的，为此，本书在物理内容上，增加了约占全书一半以上的篇幅。另外，为了适合于工程技术人员阅读，同《铁磁质物理》一书相比，与工程关系不大的物理内容，作了大幅度的削减；相反，与工程方面有密切关系的物理内容却得到了加强。这样处理后，如果无损于已有名著的话，那将是太好了。再则，每年我在讲授该课程中，总有一、二名学生要求对交换相互作用作更加详细的讲解。因此，尽管这个内容已超出了本书的物理范围，也还是不得不把它补写在第二章里。近来，由于磁泡存储器的进展，使畴壁和磁畴的运动物理学得到了很大的发展，因此，把这方面的内容放在第四章里了。这部分内容和饱和磁化理论，如果在理解上有困难，可以自行删减。一般电磁材料教科书，有时宁可精简一些，而只取第五章的内容，这当然也是可以的。此外，第五章和前四章，在内容和风格上均有不同。对于常用的材料，与物理常数相比较，着重写了工业

规格方面的内容。至于磁学上更详尽的常数，我想还是请读者参考其他更好的书籍。目前正在大量进行研究的非晶态磁性材料，是以入门的程度撰写的。为了满足磁工学方面的读者要求，在最后的第六章中，着重叙述了最新的和有趣味的应用方面的内容。其中所提到的课题，都是根据作者的兴趣和专长归纳整理的，如果能够和电工·电子大系中的《磁性装置设计》、《磁性材料工学》两本书的内容形成有机衔接的话，那将是再好不过了。

最后，对承担本书出版，并在校对、索引和目录的编排、图片引用手续的办理等方面给予大力帮助的コロナ社の富田敏夫先生，表示深切的谢意。

昭和55年2月

内山 晋

译者的话

六十年代末七十年代初，日本国的一些大学，在专业教学体制和教学内容上，试行了重大改革，旨在适应现代科学技术蓬勃发展的需要。《应用磁学》是全卷共七十二册电气·电工学大系中的第三十册。该书是在作者经过十多年专业和课程改革试行教材基础上，经过重新修改而成的。该书少而精，理论与实际并重，统筹了铁磁理论、磁性材料和磁性材料应用三大部分内容，取材较新。鉴于该书在取材、编排和写法上有一些特色，对如何利用新的科学技术成就，以改革和充实应用磁学专业教学内容，具备可供借鉴之处，因此将其译成中文出版，供我国高等院校师生和有关科技人员参考。

译者尚未完全脱稿，契机赴日研修，因此部分章节的翻译及全文初校，是在日本国研修期间进行的。但由于精力所限，书中全部表格内容、图注的翻译和全文译稿的整理以及统筹、清稿工作是由钱淑荣同志完成的。部分章节的清稿工作是由曲绵芳同志协助完成的，该书译本出版，承蒙天津科学技术出版社的大力协助，另外全书图表的绘制也是由出版社的同志完成的，谨此致谢。

我的老师李金镒教授对全书进行了审阅，并提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。

由于译者水平所限，缺点、错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

姜恩永

一九八二年三月于天津大学

目 录

第一章 物质的磁性	1
1.1 磁与电磁现象	1
1.2 磁场和磁通密度的关系 磁导率	6
1.3 磁质的分类	8
1.3.1 抗磁性	8
1.3.2 顺磁性	8
1.3.3 铁磁性	9
1.3.4 准铁磁性	11
1.4 铁磁材料的磁化曲线.....	12
1.4.1 退磁和初始磁化曲线	12
1.4.2 磁滞回线	15
1.4.3 各种铁磁材料的磁化性质概述	16
1.5 有效磁场和退磁系数 偏差修正	17
1.6 磁路	21
练习题.....	22
第二章 铁磁性基本理论	29
2.1 抗磁性和顺磁性	29
2.2 铁磁性理论	34
2.3 反铁磁性和亚铁磁性.....	37
2.4 原子磁矩	44
2.4.1 原子磁矩的来源	44
2.4.2 单个原子的磁矩	46
2.4.3 稀土族元素的原子磁矩	47
2.4.4 铁族过渡金属元素的原子磁矩	49

2.4.5 绝缘晶体(强磁性物质)的分子磁矩	51
2.4.6 金属及合金的磁矩	54
2.4.7 非晶态合金的原子磁矩	57
2.5 交换相互作用	58
练习题	67
第三章 铁磁性物质的静态磁化过程	68
3.1 磁畴结构	69
3.1.1 磁畴和技术磁化过程	69
3.1.2 决定磁畴结构的各种要素	70
3.1.3 静磁能	72
3.1.4 各向异性能	76
3.1.5 磁致伸缩和磁弹性能	78
3.1.6 畴壁结构和畴壁能	82
3.1.7 计算磁畴结构的实例	87
3.1.8 微粒子的磁畴结构	90
3.2 转动磁化过程	91
3.2.1 单轴各向异性材料	92
3.2.2 开关临界磁场	95
3.2.3 立方对称各向异性材料	96
3.3 畴壁移动引起的磁化过程	98
3.3.1 可逆畴壁移动和初始磁化率	98
3.3.2 不可逆畴壁移动和畴壁矫顽力	101
3.3.3 磁畴形成的过程	102
3.3.4 薄膜材料的磁化过程	104
3.4 各向异性材料的磁化曲线——理论和实验 的比较	107
3.4.1 铁单晶的磁化曲线	107
3.4.2 单轴性坡莫合金薄膜的磁化曲线	108
3.4.3 垂直型磁化强度的薄膜	109
3.5 各向同性材料的磁化特性	110

3.5.1	初始磁导率	111
3.5.2	磁化曲线和磁畴方向的分布	113
3.5.3	剩余磁化强度	114
3.5.4	矫顽力	115
3.5.5	矫顽力和初始磁化率的积	116
3.5.6	趋近磁化饱和阶段	118
	练习题	118
第四章	动态磁化过程	120
4.1	动态磁化过程中的损耗	121
4.1.1	磁滞损耗	121
4.1.2	涡流损耗	123
4.1.3	剩余损耗	125
4.1.4	磁后效及其损耗	126
4.1.5	共振损耗	129
4.2	磁化的动力学过程	133
4.2.1	磁化强度的运动方程式	133
4.2.2	瞬态(暂态)磁化过程	136
4.2.3	张量磁化率	139
4.2.4	铁磁共振	141
4.3	畴壁运动	143
4.3.1	运动状态下的畴壁构造	144
4.3.2	畴壁的运动方程式	146
4.3.3	平面型畴壁的移动	148
4.3.4	磁畴的传递过程	149
	练习题	156
第五章	磁性材料	157
5.1	金属铁芯材料	158
5.1.1	概述	158
5.1.2	纯铁	160
5.1.3	硅钢	162

5.1.4	铁-镍合金 (坡莫合金)	168
5.1.5	铁-钴合金	178
5.1.6	铁粉芯	179
5.1.7	其他合金	184
5.2	氧化物磁芯材料	186
5.2.1	概述	186
5.2.2	高磁导率磁芯材料	186
5.2.3	用于通信技术中的低损耗材料	188
5.2.4	收音机、电视机用的材料	190
5.2.5	用于超高频段的磁芯材料	192
5.3	矩磁材料	193
5.4	磁记录材料	196
5.4.1	磁记录介质	196
5.4.2	磁头材料	198
5.5	特殊磁性材料	199
5.5.1	磁致伸缩材料	199
5.5.2	整磁材料	199
5.5.3	非磁性材料	200
5.5.4	恒范性、恒弹性镍铬弹簧钢材料	201
5.5.5	磁屏蔽材料	202
5.5.6	树脂胶基铁粉	203
5.5.7	磁流体	203
5.5.8	磁光存储材料	204
5.5.9	磁泡材料	205
5.6	非晶磁性材料	208
5.6.1	过渡族金属和类金属组成的铁磁性合金材料	208
5.6.2	过渡族金属-稀土族金属的非晶态薄膜	213
5.7	永磁材料	215
5.7.1	概述	215
5.7.2	半硬磁材料	218

5.7.3 高矫顽力磁铁	221
5.7.4 高性能磁铁	225
5.7.5 粉末磁铁	227
5.7.6 橡胶磁铁	231
练习题	231
第六章 磁性材料的应用	232
6.1 磁性记忆装置	233
6.1.1 概述	233
6.1.2 磁芯存储器	236
6.1.3 薄膜存储器	237
6.2 磁记录	239
6.3 磁放大器	243
6.4 变感元件	245
6.5 高次谐波发生器	246
6.6 微波器件	246
6.7 磁光存储器	248
6.8 磁致伸缩谐振子	250
6.9 磁畴的应用	252
6.10 磁泡的应用	253
6.10.1 磁泡	253
6.10.2 磁泡回路	258
6.10.3 磁泡存储片	263
6.11 在测量仪表方面的应用	265
6.12 电子技术以外的新应用	268
6.12.1 在医疗方面的应用	269
6.12.2 磁分离	269
6.12.3 超导磁铁的应用	272
6.13 磁芯材料、永久磁铁材料应用一览表	273
练习题	275

第一章 物质的磁性

1.1 磁与电磁现象

在所有物理现象中，磁是最早被人类认识和利用的现象之一。大约在公元前几个世纪，人们就发现了自然界中存在的天然磁体。由于在小亚细亚的Magnesia地方盛产天然磁石——磁铁矿，Magnetism（磁性）这个名词就是从这个地名而来的。在公元十一世纪左右，人们就知道了针状磁铁可以指示南北，并且已把它用到航海事业上了。公元十七世纪，人们发现了磁铁的很多性质，并由吉尔伯特（Gilbert）归纳整理成书。然而我们今天所学习的定量形式的定律，主要是在十九世纪以后发现的。这些内容已在电磁学中学过了，下面想用一些篇幅复习一下所学过的内容。

实际上人类并未发现过所谓点磁荷，由于和点电荷相对应，在考虑和记忆一些问题时很方便，所以长期以来，人们就假设它是存在的。如果在真空中存在一个点磁荷 q_m （韦伯），那么在它的周围就形成一个磁场 $\vec{H}$ ，其表示式为

$$\vec{H} = \frac{q_m}{4\pi\mu_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (\text{安培/米}) \quad (1.1)$$

式中 μ_0 为真空磁导率，其值为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{亨利/米}) \quad (1.2)$$

另外 $\vec{r}$ 是从点磁荷到某一点的位移矢量， r 表示它的大小。如果在某一考察点上，再放入另外一个点磁荷 q_m' ，则 q_m' 所受的力 $\vec{F}$ （牛顿）为

$$\vec{F} = q_m' \vec{H} = \frac{q_m q_m'}{4\pi\mu_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (\text{牛顿}) \quad (1.3)$$

这就是众所周知的库仑定律。

然而事实上，成为磁源的并不是点磁荷，而是磁偶极子或是圆电流，如图1.1所示。所谓磁偶极子，是由两个相距很近、

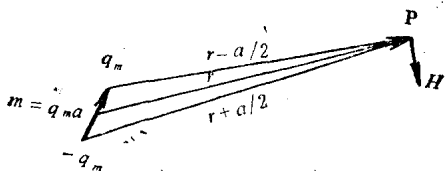


图1.1 磁偶极子及其特性

符号相反的等量点磁荷组成，该磁偶极子的磁偶极矩 $\vec{m}$ 定义为

$$\vec{m} = \lim_{\substack{a \rightarrow 0 \\ q_m \rightarrow \infty}} q_m \vec{a} \quad (\text{韦伯} \cdot \text{米}) \quad (1.4)$$

式中 $\vec{a}$ 是由 $-q_m$ 到 $+q_m$ 的位移矢量， a 是它的大小。磁偶极子形成的磁场可由式(1.1)归纳整理、并参照图1.1求得

$$\begin{aligned} \vec{H} &= \lim_{\substack{a \rightarrow 0 \\ m = \text{一定}}} \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \left\{ \frac{\frac{\vec{r} - \vec{a}/2}{|\vec{r} - \vec{a}/2|^3} - \frac{\frac{\vec{r} + \vec{a}/2}{|\vec{r} + \vec{a}/2|^3}} \right\} \\ &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right\} \quad (\text{安培/米}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

当把磁偶极矩 $\vec{m}$ 放到磁场 $\vec{H}$ 中时，所受到的力由图1.2可清楚看出，其结果在下面给出。即 $+q_m$ 所受的力 $\vec{F}^+$ 和 $-q_m$ 所受的力 $\vec{F}^-$ ，大小相等、方向相反，就其整体来看，形成一个转动力矩 $\vec{T}$ ， $\vec{T}$ 的方向既垂直于 $\vec{m}$ 又垂直于 $\vec{H}$ 。如用公式表示则为

$$\vec{T} = \vec{a} \times q_m \vec{H} = \vec{m} \times \vec{H} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \quad (1.6)$$

因此一个自由磁偶极子，将首先转到平行于磁场的方向上。如果磁场不均匀，磁偶极子还要受到一个使之发生移动的力：

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q_m \vec{H} \left(\vec{r} + \frac{\vec{a}}{2} \right) - q_m \vec{H} \left(\vec{r} - \frac{\vec{a}}{2} \right) \\ &= \nabla (\vec{m} \cdot \vec{H})\end{aligned}\quad (1.7)$$

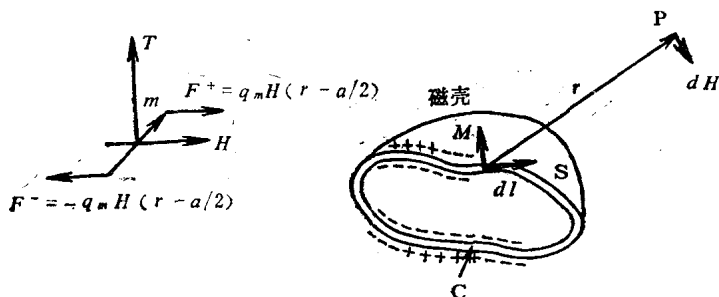


图1.2 磁偶极子所受的力

图1.3 磁壳及其磁场

其中 ∇ 是拉普拉斯算符。(1.7)式给出了处于磁场中的磁偶极子的位能

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{H} \quad (\text{焦耳}) \quad (1.8)$$

不难理解，如果存在两个偶极子 $\vec{m}_1$ 和 $\vec{m}_2$ ，从(1.5)式和(1.8)式可以得出两个偶极子相互作用的位能

$$U = \frac{1}{4\pi\mu_0 r^3} \left\{ (\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2) - \frac{3}{r^2} (\vec{m}_1 \cdot \vec{r})(\vec{m}_2 \cdot \vec{r}) \right\} \quad (1.9)$$

实际磁铁所形成的磁场，可以通过对(1.5)式进行空间积分求得。在实际应用中，如图1.3所示，大小均匀的偶极子，多数情况下是近似于分布在某个S面上。这种磁壳所形成的磁场很容易用下式进行计算：

$$\vec{H} = \frac{m}{4\pi\mu_0} \oint_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1.10)$$

其中, m 是单位平面上的磁偶极矩的大小, 也称为磁壳强度, C 是 S 面的周边, $d\vec{l}$ 是 C 上的线元, 其方向与 $\vec{M}$ 成右螺旋关系, $\vec{r}$ 是从 $d\vec{l}$ 处指向考察点 P 的位移矢量。

不只是磁偶极子, 电流也能产生磁场。如果是在电流的情况下, 可以用安培定律

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (1 \cdot 11)$$

或者毕奥-萨伐尔定律

$$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \oint_{C'} \frac{d\vec{l}' \times \vec{r}}{r^3} \quad (1 \cdot 12)$$

进行计算。如图1.4所示, C' 是电流 I 流动的回路, $d\vec{l}'$ 是和 I 方向一致的线元, $\vec{r}$ 是从 $d\vec{l}'$ 到考察点 P 的位移矢量。另外在式

(1.11) 中, C 是同 C' 只有一次交连的任意回路, $d\vec{l}$ 是 C 上的线元。比较 (1.10) 和 (1.12) 两式时, 不难发现, 均匀磁壳和环形电流之间有明显的相似性。运用电流产生磁场的方法中, 有长直螺线管和亥姆霍兹 (Helmholtz) 线圈法。对无限长的长直螺线管, 单位长度上的圈数为 n , 电流为 I , 螺线管内部的磁场为

$$H = nI \quad (\text{安/米}) \quad (1 \cdot 13)$$

对有限长螺线管的详细说明, 请参看电磁学教科书。

所谓亥姆霍兹线圈, 是由两个圈数为 N , 半径为 a 的圆形线圈组成, 这两个线圈平行放置, 且相隔距离为 a , 如图1.5所示。其特点是在两线圈中心连线的中点附近, 形成一个非常均匀的磁场, 磁场强度可以用下式计算:

$$H = (4/5)^{3/2} (NI/a)$$

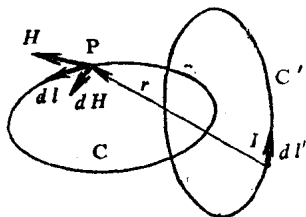


图1.4 电流的磁场 (安培定律和毕-沙定律)