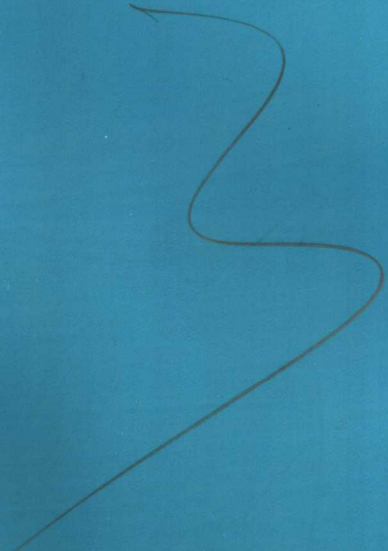


Theory of Magnetic Recording

磁记录理论

H. Neal Bertram 著

车晓东 廖嘉霖 金庆原 等译



 復旦大學出版社

TN646/45

2007

Theory of Magnetic Recording

磁记录理论

H. Neal Bertram 著

车晓东 廖嘉霖 金庆原 等译

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

磁记录理论/[美]伯纯著;车晓东等译. —上海:复旦大学出版社,2007.10
书名原文:Theory of Magnetic Recording
ISBN 978-7-309-05544-3

I. 磁… II. ①伯…②车… III. 磁记录-理论 IV. TN946.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 140323 号

磁记录理论

H. Neal Bertram 著 车晓东 等译

出版发行 复旦大学出版社 上海市国权路 579 号 邮编 200433
86-21-65642857(门市零售)
86-21-65100562(团体订购) 86-21-65109143(外埠邮购)
fupnet@fudanpress.com http://www.fudanpress.com

责任编辑 梁玲

总编辑 高若海

出品人 贺圣遂

印刷 同济大学印刷厂

开本 787×960 1/16

印张 20

字数 370 千

版次 2007 年 10 月第一版第一次印刷

印数 1—2 100

书号 ISBN 978-7-309-05544-3/T·313

定价 45.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

中文版前言

从本书出版到现在的 10 年多中,磁记录密度增加了 100 多倍。在 1994 年,磁记录密度在每平方英寸 1~2 千兆比特。到 2006 年,磁记录密度已在技术上达到每平方英寸 250 千兆比特,每平方英寸 150 千兆比特的硬盘已进入量产。磁记录技术取得了巨大的进步。在介质上磁薄膜从纵向磁化发展为垂直磁化。双层结构的垂直磁化介质由多层磁薄膜用最新的溅射技术制造而成。磁头技术的发展也十分惊人,与垂直磁化介质相应的录写磁头采用了复杂的结构以增加录写能力减小录写噪音。在读出磁头上,通过增加巨磁电阻效应,读出磁头的灵敏度迅速提高。近来,以电子自旋量子隧道效应为基础的读出磁头技术也将进入量产。

中文翻译版将提供学生和工程技术人员磁记录的基本概念和知识。本书将首先总结静磁场的起源和特性,而后讨论读出信号过程和磁电阻元件、录写过程和非线性作用。最后的 3 章将讨论介质噪声的基本概念。在中文版中,作者加入了展望和附录,将目前的技术领域加以总结,同时加入了从 1994 年到 2006 年的技术参考文献目录。参考文献包括垂直磁记录模拟、高等“斜率模型”等前沿领域。

作者感谢为中文翻译版工作的所有人员,特别感谢车晓东博士和金庆原教授发起并组织中文翻译版的工作。感谢复旦大学对此工作的支持。作者最后要感谢妻子 Ann 和儿子 Seth 的亲切鼓励和支持。

原 版 序 言

磁记录技术从它的诞生开始便一直保持着持续而迅猛的发展势头。特别在过去的 20 年间,电脑硬盘记录的面密度增长了两个数量级。磁记录的发展同时得益于磁头介质新材料的研究、先进的信号处理方案,还有磁头-介质界面的机械工程的发展。与此同时,人们对磁头、介质,或一般地讲磁记录过程的磁学过程理论也有了更深入的了解。对磁记录基本物理的理解,不仅是为了系统设计,更可以对系统局部的特性进行分析,无论是用解析方法还是数值求解,都可以大大节省实验的时间和花费。例如,如果要对不同的记录模式如纵向和垂直记录进行一系列完整的比较,要制备出所有符合要求的不同条件的介质是不现实的。

在最近这些年间已经有很多关于磁记录过程的物理和应用的出版物发表。这些书或者论文,或者是从技术应用出发讨论专门的主题,或者是就磁记录的基本概念给出一个初步的介绍。本书的宗旨在于提供磁记录物理研究的方法论的介绍。本书的程度较高,包含了磁记录的所有基本方面:磁头和介质的磁场,线性读取过程,非线性的写入过程包括互相干扰的效应,还有介质的噪声。我们会给出用于磁记录分析的数学手段,但书中并非仅简单地给出结果和公式,更重要的是通过这些数学手段令读者理解为何产生结果的原因,如何去建立模型,去设计实验,并了解现在文献中的一些深层次的理论分析。

因为本书着重于过程和现象的物理意义,所以在推导数学时往往更注重解析的表达式而非数值计算的结果。在每一章节的开始都会先给出一般表达式,随后给出的一些简单的例子更强调了磁记录过程的物理内涵。如果完整的解析表达式无法给出,这时我们将强调近似的方法,例如数字式记录的斜率模型,或者是薄膜磁头的场及其变换。在过去的 10 年中垂直记录的磁头和介质都有了可观的发展。尽管在高密度磁记录市场上还是传统的纵向记录占主导(这里不完全是磁学方面原因),但在书中我们都会给出两者的结果作为比较。这样的安排不仅仅有助于磁记录物理内涵的理解,更是为将来垂直记录的应用提供了一个知识背景,又或者有助于发展除了这两种之外的记录模式,例如在 8 mm 录像中使用的倾斜颗粒金属磁带。

在本书对记录过程的推导中,我们同时给出了时域和频域的分析。磁记录系统通常是在时域进行分析的。在数字式磁记录中,饱和磁化从一个方向转到另一

个方向的反转对应编码信号中一个比特单元中的“1”。在工作过程中会发生误码,例如利用简单的峰值探测机制时,噪声和干扰就有可能使得原本的零点或者脉冲峰值偏移 to 紧邻的比特单元中。因此记录现象中关于时间的分析十分重要,就例如上面提到的比特偏移。但是,记录信道的频率响应也很有用。方波记录频谱中的基频分量包络即系统的传递函数。频谱分析对于记录参数的分析也很有用。磁记录的读取过程涉及磁头场和介质磁化图样的卷积,因此,利用傅立叶变换或者频域分析,就可以很方便地把关于磁头的参数,如间隙长度、距碟间隔和介质的参数如反转参数等分离开来。

本书主要分为 4 个主要部分,外加一个总论部分。第一章回顾了这一技术的发展过程,包括制造磁头介质的材料。此外,还给出了 cgs 和 MKS 单位制的一个比较,尽管本书通篇使用 MKS 单位制。第二章到第四章对磁头和介质产生的磁场进行深度的讨论。这一部分为读者提供关于静磁场的基础知识,特别是跟介质磁化图样相关的静磁场。第二部分则包括第五章和第六章,给出了计算一般磁化图样的再生电压的线性理论。除了深入介绍再生过程的互易原理,还会推导单反转和多反转的读取电压的一般和特殊表达式。特别会比较方波记录的峰值响应(“roll-off 曲线”)和频谱分析。从第七章到第九章我们会讨论薄膜和磁带的写入过程,包括其中的非线性过程如比特偏移和覆写率问题。第十章到第十二章涵盖了各种介质噪声模型(附加型、调制型、反转型),还有各种关联效应,薄膜和厚的颗粒磁带都会考虑。最后一章将推导出不同的信噪比表达式,以及对于简单的零点探测机制下的误码率。在每章最后的题目可以用来测试读者对每章内容的掌握情况。

本书内容源自一年级研究生课程,作者在加州大学圣地亚哥分校的电子工程与计算机系任教多年,并且是磁记录研究中心的成员。书中的内容基本自成一体,但如果有关于静电磁场、数学方法如复变函数和傅立叶变换、随机过程分析的本科知识背景,将有助于读者阅读理解。

本书的写作时间主要在两段休假期间,分别在法国巴黎和麻省剑桥。感谢在这两段时间里接待我的主人,他们给我提供了一个很好的写作环境。我要感谢在我职业生涯这些年来的许多同事,他们鞭策并指导了我在磁记录物理许多方面的研究。没有这些互动,这本书不能写成。此外,还有许多人为了书中的图示以及终稿的准备提供了宝贵的时间。尤其感谢 Smauel Yuan 博士和 Betty Manoulian 女士,没有他们在手稿准备的最后几个月的细心协助,这本书恐怕无法完成。Neil Smith 博士仔细阅读了第七章并给出很多有用的建议。特别需要感谢他,不仅是因为和他的一些有启发性的讨论,而且他为这一章提供了许多有用的图。另外,需

要感谢 Yashwant Gupta 博士,他在本书写作的初期帮忙准备了许多图表。我也很感谢 Lineu Barbosa 博士和 Peng Qingzhi 博士仔细阅读了第十章到第十二章,还有 Herbert Lin 博士对第八章到第九章的校对。对 Giora Tarnopolsky 博士我要表示特别的谢意,在本书的最后准备阶段他给了我很大帮助。最后,我要感谢我的妻子 Ann,不仅因为她的精神支持和鼓励,还有她对手稿编辑的细心协助。

磁记录过程理论很大程度上是一般电磁场理论的一个应用。它是一个数学上、物理上都很美的学科,希望读者也能从本书中分享作者感受到的这种唯美主义的乐趣。

H. Neal Bertram

目 录

中文版前言	1
原版序言	1
第一章 概述	1
材料和磁化过程	2
磁记录信号通道	8
单位/量纲	12
第二章 静磁场的回顾	14
简介	14
场的基本表达式	14
退磁因子	19
平面引起的静磁场	21
二维场	22
镜像	25
矢量势和标量势	28
傅立叶和希尔伯特变换	30
自由空间场的积分关系	35
习题	37
第三章 感应式磁头场	38
简介	38
磁头效率和缝隙深处的磁化场	40
有限缝隙的磁化场	43
远场近似	44

中场近似(Karlqvist 近似)	46
近场表达式	50
近场解析近似	58
有限长度磁头——薄膜磁头	59
屏蔽的磁头	64
结论	67
习题	68
第四章 介质产生的磁场	70
简介	70
单个反转区	70
纵向磁化强度的最大场和场梯度	77
傅立叶变换的表达形式	79
习题	83
第五章 读取过程(上)——基本概念及单反转的读取	85
简介	85
读取电压的直接计算	85
互易原理	89
磁头定义	93
小结	94
读取电压的一般表达式	94
孤立反转	98
理想阶跃反转	99
展宽的反转-反正切例子	101
习题	106
第六章 读取过程(下)——多反转情况	109
简介	109
线性叠加	109

方波记录	110
“roll-off”曲线以及 D_{50}	115
薄膜磁头	115
频谱分析	117
频谱	120
Wallace 因子或“厚度损耗”	121
频谱的分析	122
“roll-off”曲线和频谱比较——简化的 D_{50} 分析	123
传递函数	126
线性比特偏移	127
习题	129
第七章 磁电阻读头	131
简介	131
磁化强度分布	134
磁电阻磁头的互易原理	140
对具有屏蔽层磁头的应用	144
读出电压的计算	148
傅立叶变换和精确的脉冲形状	152
双磁电阻读头	154
磁道偏移时的读出——有限磁道宽度	158
磁电阻电阻噪声和信噪比 SNR	161
习题	161
第八章 记录过程(上)——反转模型	163
简介	163
磁记录过程	165
纵向介质反转记录模型	169
电压-电流的关系	174
退磁化极限	177

厚介质磁带记录·····	178
垂直记录模型·····	184
薄膜介质模型·····	185
厚介质模型·····	188
习题·····	191
第九章 记录过程(下)——非线性和覆写率·····	194
简介·····	194
非线性反转偏移·····	194
非线性振幅损失·····	197
覆写率·····	200
习题·····	206
第十章 介质噪声机制(上)——一般概念、调制噪声·····	207
简介·····	207
噪声形式·····	210
磁带密度涨落·····	211
磁带非均匀磁膜和粗糙面·····	219
习题·····	222
第十一章 介质噪声机制(中)——颗粒噪声·····	224
简介·····	224
单颗粒再生信号表达式·····	224
颗粒噪声的普遍表达式·····	227
非关联噪声功率·····	229
关联项·····	231
信号对颗粒噪声比·····	232
情况一 厚磁带·····	232
情况二 薄膜介质·····	232
擦除噪声频谱及其关联·····	234

习题	239
第十二章 介质噪声机制(下)——反转区噪声	242
简介	242
反转位置扰动和电压振幅涨落模型	245
频谱分析	247
道宽的影响	249
反转相互作用	252
广义微观公式	254
均匀磁化介质	258
存在反转时候的噪声	260
习题	264
展望 当今磁记录系统及其记录密度极限	266
I. 绪论	266
II. 一般技术要求	267
III. 记录的物理性质	268
IV. 系统密度的技术要求	270
V. 先进的高密度记录介质	271
VI. 记录密度极限	273
VII. 磁头偏离磁道的分析	275
附录 垂直记录介质中的静磁场	277
I. 反转处的磁场梯度	277
II. 远离反转中心处的退磁场	277
参考文献	279
中文版附加文献(按论题)	295
后记	305

第一章 概 述

磁记录是信息存储的核心技术。硬盘驱动器、磁带及其磁盘系统的广泛应用,以其经济及可靠,提供了信息存储必备的所有特征。磁记录系统有极快的传输速率和寻址时间,可以方便地写入和读出数据。信息既可以被永久地保存,也可以很方便地用新数据覆写。数字记录是现今磁性存储的最主要方式,尽管视频记录的频率调制和模拟记录的交流偏置仍占据一定的消费市场,但信息记录的数字化已是大势所趋。现在,人们已经能够制造出具有极高信息存储面密度的磁盘驱动器和具有很高的存储体密度的磁带系统,并且能保证很低的错误率。在过去的10年,磁记录技术有长足的发展,现在的磁盘系统的存储密度和数据传输率已达到 60 Mbits/in^2 和 10 MHz (注:1994年的数据)。面密度为 $1\sim 2 \text{ Gbits/in}^2$ 的系统也将成为现实(Wood, 1990; Howell等, 1990; Takano等, 1991)。在磁带上涂覆极光滑的表面薄膜技术也使得高密度的螺旋扫描产品成为可能(S-VHS, 8 mm录像)(Mallinson, 1990)。数字音频螺旋式扫描记录系统(DAT)就是一种高密度磁带记录的代表,具有超过 60 kbit/in 的线性密度、 250 tpi 的道密度和 50 Gbits/in^3 量级的信息存储体密度(Ohtake等, 1986)。在传输率上,磁带记录系统也实现了接近 150 MHz 的高数据传输率(Ash等, 1990; Coleman等, 1984)。总之,磁记录系统的密度和数据传输率以少于3年就增加一倍的速度成长。

具有高磁化强度和极薄涂覆层的薄膜介质现在已应用在所有新计算机的硬盘驱动器里。对这些材料微磁过程的理解,有助于实验室制备出更低噪音和低磁化强度涨落的薄膜(Yogi等, 1990a, b)。改进的薄膜材料进一步促进了磁记录系统技术的发展。组成磁带的磁性微粒,尺寸上趋向于更小和更均匀化,而每一磁微粒具有很高的磁化强度和矫顽力。另外,金属蒸镀的薄膜磁带已应用在高级录像产品中(Chiba等, 1989; Luitjens, 1990)。真空薄膜技术也为制备磁头中的软磁材料提供了先进的工艺方法。目前先进的磁头或者全部利用薄膜制成,或者是在铁氧磁芯结构的间隙中加入薄膜。对于存储面密度达到 $1\sim 2 \text{ Gbits/in}^2$ 以上的先进系统,必须利用薄膜磁电阻磁头以获得良好的信噪比,最终使得信噪比仅受限于介质,而与磁头无关。薄膜磁电阻头的灵敏度很高,并且与磁头介质相对运动速度无关,最终必定广泛应用于所有的磁记录系统。薄膜磁电阻磁头首次在商业上的应

用是 IBM 的 1 千兆字节的硬盘驱动器(IBM Corsair)。一般而言,无论是制备还是优化记录介质或磁头,多层膜科学技术都起了重要的作用。关于磁记录材料的回顾,请参考 Berkowitz, 1990。

材料和磁化过程

所有先进的记录介质都由非常微小的颗粒组成。颗粒的磁性结构具有“硬”磁存储材料所要求的大矫顽力和永久磁化强度。这些性质连同颗粒的极小尺寸,使记录介质具有优异的信噪比,并有效减小由非线性、残留覆写或擦除,以及外部磁场带来的信号干扰。磁带是由一些细长的磁性颗粒组成,其典型尺度为 $250 \text{ \AA} \times 250 \text{ \AA} \times 1\,000 \text{ \AA}$, 各向异性主轴沿颗粒长轴方向。磁带材料包括 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、(表面钝化的) Fe 、 CrO_2 或 BaFe , 它们的微粒磁化强度在 $370 \sim 500 \text{ kA/m}$ ($370 \sim 500 \text{ emu/cc}$), 矫顽力范围在 $24 \sim 120 \text{ kA/m}$ ($300 \sim 1\,500 \text{ Oe}$) (Köester 和 Arnoldussen, 1989) 之间。磁带的涂覆层极其平整, 其表面粗糙度只有 50 nm 量级 (Wierenga 等, 1985; Robinson 等, 1985), 并且微粒的长轴通常沿着磁头介质的相对运动方向整齐排列(图 1.1)。磁带 $M-H$ 主迴线具有典型的矩形度 S, S^* 为 0.85。颗粒的体积荷载量为 30%, 饱和剩磁(B_r)对于氧化物材料为 0.15 T ($1\,500 \text{ Gs}$), 对于金属颗粒为 0.25 T ($2\,500 \text{ 高斯}$)。磁带介质是镀在一层“聚亚胺酯基膜”上, 后者厚度为 $10 \sim 12 \text{ }\mu\text{m}$ 。尽管磁性层通常为 $3 \sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ 厚, 对于优化的高密度数字记录应用, 记录时通常只用到表面 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 的厚度。

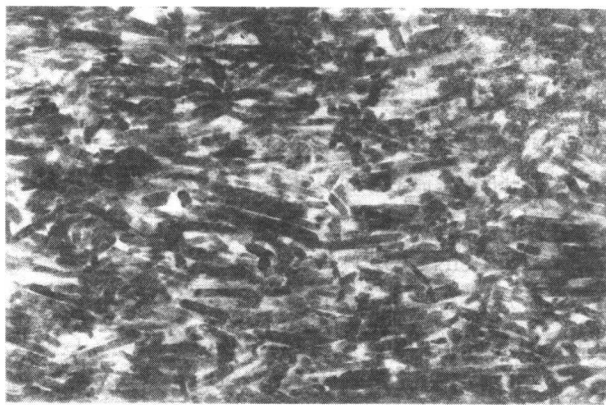


图 1.1 由取向 CrO_2 颗粒组成的磁带剖面的 TEM。(经 Eber-hard Köester, BASF, Ludwigshaven, Germany 允许。)

用作记录介质的高质量磁性薄膜,一般以富含 Co 的合金,通过溅射技术成膜在适合晶粒生长的衬底层上。溅射的薄膜为多晶。颗粒或“微粒”的直径在薄膜平面内为 $200\sim 500\text{ \AA}$ 量级(图 1.2)。对纵向薄膜,颗粒的易轴(Co hcp 轴)在平面内随机取向,或趋向沿着磁头-介质的运动方向。对于垂直薄膜,Co 颗粒的易轴基本垂直于膜面,分布在小于 5° 的锥角内。在蒸镀金属磁带中,颗粒生长方向与膜面成约 30° 角。在所有薄膜记录介质中,在薄膜厚度方向的颗粒是均匀分布的。对纵向磁介质薄膜而言,这一厚度约为 $200\sim 500\text{ \AA}$,垂直磁介质约为 $2\,000\sim 5\,000\text{ \AA}$,金属沉积磁带则为 $1\,500\text{ \AA}$ (Luitjens, 1990; Köester 和 Arnoldussen, 1989)。高质量磁介质中颗粒之间的磁性关联很小,特别是磁颗粒间的交换耦合作用很小(Bertram 和 Zhu, 1992)。

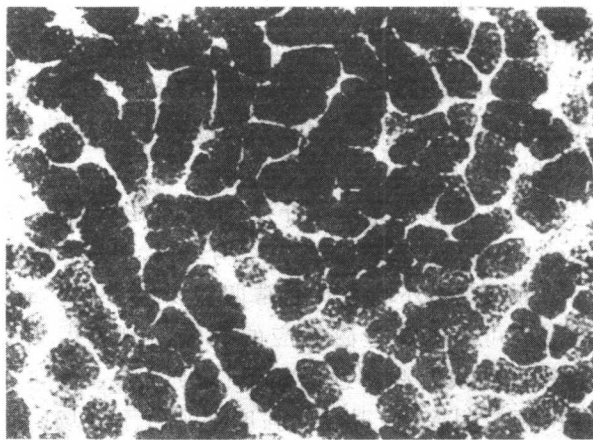


图 1.2 典型多晶薄膜记录介质的 TEM 图像。这个俯视图展现了一个清晰的、薄膜内连续的单晶颗粒体系。(取自 Johnson 等,1990。)

记录介质的平均磁化强度是对于包含许多颗粒的区域求平均,它与外加场的历史有矢量的关联。在均匀磁场下,介质的磁化强度是空间均匀分布的。但磁记录中,磁头场是在空间不均匀的,每个磁单元经过磁头时随磁头场的矢量转动。磁记录材料中每个颗粒可假设(设计)成一个单畴,晶粒磁化强度大小是一个饱和的常量,其方向依赖于外场的历史、晶粒各向异性和晶粒的磁相互作用。磁相互作用包括任意两个颗粒间的长程静磁作用和相邻两颗粒之间的交换耦合作用。薄膜中的应力也可能通过静磁作用引入各向异性。一般来讲,决定许多相互作用的颗粒的磁化状态是一个复杂的微磁多体问题,它涉及所有上述作用以及由温度产生的热扰动。由此得到的耦合方程也会由于颗粒晶格的磁化弛豫过程而受到阻尼影响

(Brown, 1962; Haas 和 Callen, 1963)。磁矩反向的时间在 10^{-9} s 量级。相比之下,目前数据存储时间单元在 10^{-7} s 量级(对应计算机硬盘驱动器是 30 Mbits/s, 对磁带存储则是 100 Mbits/s)。

对记录材料的磁化过程,数值模拟的困难在于对长程静磁作用的计算。由于每对颗粒的静磁作用都必须考虑,因此大范围内模拟的计算需要运用超级计算机。通常,这些材料的磁化过程,会因为颗粒间相互作用产生集体反转而变得非常复杂。这些过程依赖于相互作用的相对强度、颗粒各向异性的大小和分离程度。一般规律是颗粒要达到集体行为,相互作用的强度必须超过个体颗粒的能量分布。在磁带中,个体颗粒的各向异性大小和位置的分布都超过了平均静磁作用强度,因此可以认为磁化状态与颗粒间相互作用的关系不大(Parker 和 Berkowitz, 1990)。然而,在磁带中也无法达到颗粒间完全分离无关的理想状态,不仅是平均的相互作用场,更重要的是相互作用的磁性颗粒对的同步反转,造成了介质的矫顽力会比单个颗粒的矫顽力低(Sailing 等, 1991)。在薄膜介质中,由于微粒之间间隙小、磁晶各向异性的大小相对均匀,并且磁化强度相对比磁带中的大,集体反转过程更为重要(Zhu, Bertram, 1991b)。

磁性材料可由 VSM(振动样品磁强计)来测量其磁化强度、矫顽力和矩形度等基本量值(Monson, 1989)。对样品施加一均匀场,可以测量其沿磁场方向的净磁化强度分量。在测量中,外场方向通常取在易轴方向(如磁带中微粒取向的方向),如果需要,还可以去除退磁效应的影响。测量得到的结果如图 1.3 的一个“M—H”回线。回线的测量过程如下:首先,沿一方向加足够大的饱和场反转所有的颗粒、颗粒团簇,使得磁化强度都平行于外场,然后,降低磁场至零,再反方向增加至饱和。从另外一个方向开始扫描磁场也能得到同样的曲线。对“硬”颗粒记录介质,沿外加场方向的磁化强度分量 M_H 通常由下式给出:

$$M_H = \frac{1}{V} \sum_i M_i v_i \cos \theta_i \quad (1.1)$$

这里, M_i 和 v_i 分别是第 i 个颗粒的饱和磁化强度和体积, θ_i 是第 i 个颗粒磁化强度与外场方向的夹角。求和取遍体积为 V 的样品中的所有颗粒。每一颗粒的磁化强度 M_i 由测量温度下的饱和磁化强度给出,其大小通常对于所有颗粒都一样。

图 1.3 中,基本参量是饱和磁化强度 M_s 、饱和剩余磁化强度 M_r 、矫顽力 H_c 、剩磁矩形度 $S = M_r/M_s$ 和以矫顽态下的回线梯度定义的曲线矩形度 S^* :

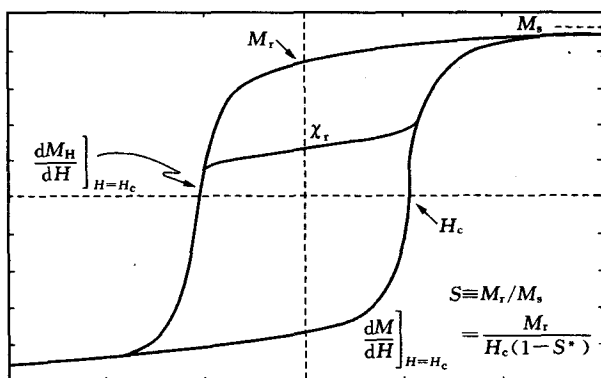


图 1.3 高密度记录介质的典型磁滞回线。 M_s , M_r , H_c , S , S^* 分别是介质饱和磁化强度、饱和剩磁、矫顽力、剩磁矩形度、回线矩形度。 χ_r 是沿小回线的反转磁化率。(经 Hewlett Packard 允许使用。)

$$\frac{dM_H}{dH} = \frac{M_r}{H_c(1 - S^*)} \quad (1.2)$$

图 1.3 是薄膜记录介质的 $M-H$ 回线。回线矩形度相当好, S , S^* 约为 0.85, 是薄膜介质以及特殊取向磁带的典型回线。在饱和态, 所有颗粒方向余弦都等于 1.0 ($\cos \theta_i = 1$), 故介质的饱和磁化强度由下式给出:

$$M_s = pM_{\text{grain}} \quad (1.3)$$

这里 p 是颗粒体积堆积比。当外场从饱和降低时, 晶粒的磁化强度朝最近的易轴方向可逆地回转, 但同时磁化强度方向也受到颗粒间相互作用的影响。在取向磁带的饱和剩磁态, 微粒的磁化强度近似地位于它们相应的易轴方向, 得到 $S \sim 0.85$ 。微粒间的静磁相互作用导致剩磁一定程度地增加 (Bertram 和 Bhatia, 1973)。具有易轴随机分布的薄膜介质, 由于强静磁耦合以及可能的近邻交换作用, 相当程度增加了剩磁矩形度, 使得 S 值从无相互作用时的 $S = 0.5$ 变为 $S = 0.85$ (Zhu 和 Bertram, 1988a)。静磁场与易轴随机分布导致剩磁的“波纹”图形, 其尺度依赖于交换耦合作用大小。

当磁场沿反方向增加时, 磁化强度沿外场的方向作可逆的转动。最后不可逆过程发生, 即颗粒磁化强度大角度反转到相反方向。对于一个“矩形”回线, 反转集中在很小的外场变化范围内完成, 即在矫顽力附近的回线变化梯度很大。对于取向型磁带, 微粒磁化方向的转变是沿最接近磁场方向 ($\cos \theta \sim 1$) 的易轴方向转到易轴相反的方向 ($\cos \theta \sim -1$)。反转过程主要由微粒各向异性场的大小分布决