

现代应用物理学丛书

磁电阻传感器

钟智勇 编著

张怀武 审



科学出版社

现代应用物理学丛书

磁电阻传感器

钟智勇 编著

张怀武 审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了三种磁电阻 (AMR、GMR 和 TMR) 传感器的工作原理以及使用要点, 共 5 章。第 1 章主要介绍与磁电阻传感器有关的磁学与磁性材料基础知识; 第 2 章在概述磁传感器的检测原理与应用的基础上, 系统地论述了各种磁电阻效应以及作为磁传感器的工作原理, 特别介绍了在应用中需要的转移特性曲线建模与特征; 第 3 章和第 4 章主要介绍磁电阻传感器设计与应用时涉及的关键技术, 第 3 章介绍作为磁通聚集器和屏蔽器的软磁体, 以及作为偏置磁体或辅助磁体的永磁体的设计; 第 4 章讨论磁电阻传感器的噪声来源与抑制技术; 第 5 章举例介绍磁电阻传感器在角度、转速、电流测量、无损检测与地磁探测等领域中的应用。

本书可作为磁电阻传感器领域的研究生和高年级本科生的教材, 也可作为相关领域的教学、科研和工程技术人员参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

磁电阻传感器 / 张 倩, 邹慧卿. — 北京: 科学出版社, 2015.3

(现代应用物理学丛书)

ISBN 978-7-03-043651-1

I. ①磁… II. ①张… III. ①磁性传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 045642 号

责任编辑: 鲁永芳 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

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

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 255 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

广义地说,磁传感器就是把磁场、电流、应力应变、温度、光等外界因素引起敏感元件磁性能变化转换成电信号的器件.狭义地讲,磁传感器仅指磁场传感器,即将各种磁场及其变化的量转变成电信号输出的器件.本书采用后一种说法,有时将磁传感器与磁场传感器混用.

磁传感器与人类的生活息息相关,已经广泛地应用在航空航天、汽车、工业、消费以及军事等许多领域.其中汽车领域是磁传感器应用的主要市场,大约有 70% 的份额,主要应用于车速、倾角、角度、距离、接近、位置等参数检测以及导航、定位等方面的应用,比如车速测量、踏板位置、变速箱位置、电机旋转、助力扭矩测量、曲轴位置、倾角测量、电子导航、防抱死检测等.最近,磁传感器的应用领域已迅速被拓展到物联网与智能电网领域.在物联网中,磁传感器已经被尝试应用于环境保护和智能交通,如在交通管制、道路的车流检测中;在智能电网中磁传感器可应用于电力系统的电压、电流、功率等参数的监测和交流变频调速器、逆变器、整流器、通信电源、信号监测、故障定位检测等许多方面.

世界范围内,磁传感器芯片及其次级产品的年产值超过千亿元人民币,并以 8% 的年增长速度持续增长.目前主流的磁传感器仍然是半导体霍尔器件,但其本身存在的灵敏度低、容易受应力和温度影响、响应频率低以及功耗大等缺点,使其主导地位正不断受到新型磁传感器的冲击.基于磁电阻效应的传感器由于其高灵敏度、小体积、低功耗及易集成等特点正在逐步进入磁传感器市场,其中各向异性磁电阻 (AMR) 传感器已经大规模应用,巨磁电阻 (GMR) 传感器方兴未艾,快速发展.隧道结磁电阻 (TMR) 传感技术集 AMR 的高灵敏度和 GMR 的宽动态范围优点于一体,得到广泛关注.

据 IHS iSuppli 公司估计,到 2016 年 70% 的磁性传感器市场营业收入将来自霍尔传感器,其余的 30% 将主要来自以磁电阻传感器为主的新型磁传感器.目前国内仅有由电子科技大学的过壁君教授编著、福建科技出版社于 1993 年出版的《薄膜磁阻传感器》一书,较系统介绍了各向异性磁电阻传感器的设计、指标与应用,而磁电阻传感器的新发展与应用,只是不系统地散见于有关磁电子学或自旋电子学方面的专著和文献.在这种情况下,撰写一部关于磁电阻传感器的专著,对相关教学、科研、工程技术人员了解磁电阻传感器的原理与应用就显得尤为必要.

本书尽可能避免从量子力学理论出发介绍相关效应与原理,力求从唯象理论角度以简练方式介绍相关效应与原理,拓展读者对象.本书的内容安排如下.第 1 章

主要介绍与磁电阻传感器有关的磁学与磁性材料基础;第2章在概述磁传感器的检测原理与应用的基础上,系统地论述了三种磁电阻(AMR、GMR和TMR)效应及作为磁传感器的工作原理,特别介绍了在应用中需要的转移特性曲线建模与特征;第3章和第4章主要介绍磁电阻传感器设计与应用时涉及的关键技术,第3章介绍作为磁通聚集器和屏蔽器的软磁体,以及作为偏置磁体或辅助磁体的永磁体的设计;第4章讨论磁电阻传感器的噪声来源与抑制技术;第5章主要举例介绍磁电阻传感器在角度、转速、电流测量、无损检测与地磁探测等领域中的应用。

本书由电子科技大学钟智勇教授编著,电子科技大学张怀武教授审阅了全文。作者感谢研究生,特别是博士研究生王棋,为本书的出版做了大量的工作。

尽管磁电阻传感器已经商品化,但远没有霍尔传感器技术成熟,而且许多新结构、新方法与新应用不断涌现,受作者学术水平的限制,书中取材难免挂一漏万,难免有错误或不妥之处,真诚地希望读者给予批评指正。

作 者

2014年10月

目 录

前言

第 1 章 磁学基础	1
1.1 基本磁学量	1
1.1.1 磁矩	1
1.1.2 磁化强度	1
1.1.3 磁场强度	2
1.1.4 磁感应强度	2
1.1.5 磁通	2
1.2 磁性材料的磁特性参数	2
1.2.1 饱和磁化强度	2
1.2.2 居里温度	2
1.2.3 磁晶各向异性常数	3
1.2.4 磁致伸缩系数	3
1.2.5 比饱和磁化强度	3
1.3 物质的磁性	3
1.3.1 铁磁性	4
1.3.2 反铁磁性	4
1.3.3 亚铁磁性	4
1.3.4 抗磁性	5
1.3.5 顺磁性	5
1.4 磁性材料的磁化	5
1.4.1 磁化曲线	5
1.4.2 磁滞回线	7
1.5 磁化状态下磁体中的能量与磁畴	8
1.5.1 自发磁化与磁畴	8
1.5.2 铁磁体及磁性薄膜系统中的能量	12
1.6 磁学单位值的转换关系	18
第 2 章 磁电阻传感器工作原理	20
2.1 磁场传感器概述	20

2.1.1	磁场测量的历史回顾	20
2.1.2	磁场测量的对象	22
2.1.3	常用的磁场测量方法	23
2.1.4	磁传感器的选择要点	32
2.2	磁电阻效应概述	33
2.3	各向异性磁电阻传感器原理	37
2.3.1	各向异性磁电阻效应	37
2.3.2	各向异性磁电阻效应的产生机理	38
2.3.3	各向异性磁电阻传感器的工作原理及转移特性曲线	41
2.3.4	各向异性磁电阻传感器的偏置技术	46
2.3.5	各向异性磁电阻传感器的置位与复位技术	51
2.3.6	各向异性磁电阻传感器的垂直轴效应	52
2.4	巨磁电阻传感器原理	55
2.4.1	巨磁电阻效应的发现	55
2.4.2	巨磁电阻效应的唯象解释	57
2.4.3	多层薄膜的巨磁电阻效应	62
2.4.4	自旋阀结构的巨磁电阻效应	68
2.4.5	颗粒膜的巨磁电阻效应	77
2.4.6	巨磁电阻传感器的转移特性曲线	80
2.4.7	多层膜 GMR 传感器的磁滞与减小措施	84
2.5	隧道结磁电阻传感器原理	89
2.5.1	自旋相关隧穿过程与隧穿磁电阻效应	89
2.5.2	隧穿磁电阻效应的理论模型	91
2.5.3	磁性隧道结传感单元的典型结构	93
2.5.4	TMR 的磁性层和势垒层材料	94
2.5.5	转移特性曲线	98
2.5.6	TMR 传感器的输出信号与偏压之间的关系	103
2.6	磁电阻传感器的性能指标	106
第 3 章	软/硬磁体在磁电阻传感器中的应用	110
3.1	高磁导率软磁材料	110
3.2	磁通聚集器	112
3.2.1	高磁导率磁体对磁通的聚集与导向作用	112
3.2.2	影响磁通聚集器增益因子的因素	114
3.2.3	磁通聚集器的应用举例	115
3.3	磁屏蔽体	117

3.4 永磁体的设计	119
3.4.1 永磁材料的退磁曲线	119
3.4.2 常见永磁体材料	120
3.4.3 永磁体在磁电阻传感器中的典型应用	124
第 4 章 磁电阻传感器的噪声	127
4.1 磁电阻传感器的噪声来源	127
4.1.1 热噪声	128
4.1.2 散粒噪声	128
4.1.3 $1/f$ 噪声	129
4.1.4 随机电报噪声	129
4.2 磁电阻传感器的 $1/f$ 噪声特征与影响因素	129
4.2.1 $1/f$ 噪声模型	130
4.2.2 磁电阻薄膜材料及影响 $1/f$ 噪声的因素	131
4.3 $1/f$ 噪声的抑制方法	134
4.4 $1/f$ 噪声的测量	138
第 5 章 磁电阻传感器的应用	141
5.1 角度测量	141
5.1.1 角度传感器概述	141
5.1.2 磁电阻角度传感器的工作原理	143
5.1.3 永磁体对磁电阻角度传感器性能的影响	149
5.2 转速测量	150
5.2.1 转速传感器概述	150
5.2.2 磁电阻转速传感器的测量原理与梯度磁电阻传感器	151
5.2.3 磁电阻转速传感器的装配	156
5.3 电流测量	157
5.3.1 电流传感器的分类与基本原理	157
5.3.2 XMR 传感器在电流测量中的应用	161
5.4 无损检测	166
5.4.1 基于磁电阻传感器的涡流检测技术的工作原理	166
5.4.2 基于磁电阻传感器的涡流检测技术的影响因素	168
5.4.3 磁电阻涡流传感器探头的设计	169
5.5 地磁测量	172
5.5.1 地磁场	172
5.5.2 磁电阻传感器在地磁测量中的应用举例	174
参考文献	180

附录 1 各种磁电阻传感器的性能及应用领域	187
附录 2 各种电流传感器性能比较与选型指南	188
附录 3 部分磁电阻传感器生产厂商的产品与性能	190
索引	201

第1章 磁学基础

1.1 基本磁学量

1.1.1 磁矩

电流之间或运动电荷之间的相互作用是磁现象的物理基础,例如电流或运动电荷可以在其周围空间产生磁场.从广义的角度来说,可以将产生磁场的“源”都称作磁体.从这种概念出发,磁体既可以是任何电流回路,也可以是原子中带电粒子的轨道运动或自旋运动,或者是它们的任意组合.从狭义的角度来看,磁体则是一个被外磁场磁化了的物体.一个磁体的两端具有极性相反而强度相等的两个磁极.磁极是磁体外部磁力线的出发点和汇集点.磁体可以分割成许多具有两个磁极的小磁体,当磁体被分割成无限小的单元时,就成为一个磁偶极子.它们产生的外磁场与同一位置上的一个无限小面积的电流回路产生的外磁场等效.因此,磁偶极子是一个可用无限小的电流回路来代表的磁体.

磁矩(或称磁面积矩) μ_m 是用来表征磁偶极子磁性强弱和方向的一个物理量,其值等于磁偶极子等效的平面回路的电流强度*i*(安[培])和回路面积*A*(米²)的乘积,即

$$\mu_m = iA \quad (1.1)$$

磁矩的方向按右手螺旋法则确定,并且垂直于电流回路的平面.磁矩的单位为安[培]·米²(A·m²).物质某一部分的合成磁矩是磁偶极子磁矩的矢量和,磁矩的大小可以直接用磁强计测量.

1.1.2 磁化强度

磁化强度*M*是表征描述宏观磁性体磁性强弱的物理量.它的定义是单位体积磁体内磁偶极子具有的磁矩矢量和,即

$$M = \frac{\sum \mu_m}{V} \quad (1.2)$$

对于一个不均匀磁化的物体,内部各点的磁化强度不相同,物体任一点的磁化强度可以通过对该点的一个微小体积求和而得到.磁化强度*M*的单位是安[培]/米(A/m).

1.1.3 磁场强度

磁场强度 H 是表示磁场中各点“磁力”大小和方向的物理量。单位是安 [培]/米 (A/m), 它是用两根载流导体之间产生的力来定义的。

1.1.4 磁感应强度

磁感应强度 B 是描述空间某点磁场的大小和方向的物理量。对于一个在磁化场中感应出磁化强度 M 的磁体, 它的磁感应强度可以看作由两个分量所组成。其一是由磁化场所产生的 $\mu_0 H$, 另一个是由磁体所引起的 $\mu_0 M$, 所以

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.3)$$

式中, μ_0 为真空中的磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ 。 B 的单位为韦 [伯]/米² (Wb/m²), 或特 [斯拉] (T)。

1.1.5 磁通

磁感应强度 B 及与之相垂直面积 A 的乘积称为该面积的磁通, 单位为韦 [伯] (Wb)。

$$\Phi = BA \quad (1.4)$$

1.2 磁性材料的磁特性参数

磁性材料的磁特性可以分为两大类, 其一是仅与材料的化学成分和微观晶体结构有关的本征特性, 另一类称为技术磁特性, 它除了与上述因素有关外, 还与晶粒大小、晶粒取向及应力分布等宏观结构因素有关。本征磁特性反映了关于与磁性材料的化学成分和结构转变有关的信息。对于各种类别的磁性材料, 它们都是非常重要的参数。本小节只介绍本征参数, 技术特性参数在 1.4 节中介绍。

1.2.1 饱和磁化强度

磁性体受到足够强的外磁场作用, 磁化强度基本上不再随外磁场而增加, 这种现象称为“磁饱和”。磁饱和状态下的磁化强度称为饱和磁化强度 M_s 。

1.2.2 居里温度

铁磁材料高于某一温度 T_c 时, 自发磁化强度为零。这一温度叫做居里温度, 亦称居里点, 即铁磁材料 (或亚铁磁材料) 由铁磁状态 (或亚铁磁状态) 转变为顺磁状态的临界温度。

1.2.3 磁晶各向异性常数

磁性单晶体由于晶体结构上的各向异性, 沿不同方向磁化时, 存在难易之分, 当沿着晶体的不同方向磁化而得到饱和磁化强度时, 需要不同的能量, 这种现象称为磁晶各向异性. 这种各向异性的强弱可以用一个常数来衡量, 这个常数叫磁晶各向异性常数. 单位为焦 [耳]/米³(J/m³).

1.2.4 磁致伸缩系数

磁性体由磁中性状态磁化到饱和时, 在磁化方向上的长度 L 将发生增长或缩短的纵向变化 ΔL , 这种长度的相对变化量即称为磁致伸缩纵向系数, 表示如下:

$$\lambda_s = \Delta L / L \quad (1.5)$$

1.2.5 比饱和磁化强度

磁性体的单位质量的磁矩称为比磁化强度, 即

$$\sigma = \frac{\sum \mu_m}{P} \quad (1.6)$$

式中, P 是磁性体的质量. 当磁性体磁化到饱和时的比磁化强度称为比饱和磁化强度 σ_s . 单位为安 [培]·米²/千克 (A·m²/kg).

从磁化强度 M 和比磁化强度 σ 的定义式可以得如下关系:

$$\sigma P = MV \quad (1.7)$$

所以

$$\sigma_s = M_s / d \quad (1.8)$$

式中, d 为磁性体的密度, 即 $d = P/V$ (kg/m³).

1.3 物质的磁性

磁性是物质的一种基本属性. 所谓磁性, 是指物质中相邻原子或离子的磁矩由于它们的相互作用而在某些区域中大致按同一方向排列, 当所施加的磁场强度增大时, 这些区域的合磁矩定向排列程度会随之增加到某一极限值的现象. 磁体被置于外磁场中, 它的磁化强度将发生变化, 磁化强度和磁场强度的关系为

$$M = \chi H \quad (1.9)$$

上式中 χ 称为磁体的磁化率. 磁化率是单位磁场强度在磁体中所感生的磁化强度, 是表征磁体磁性强弱的参量. 磁性可以按磁体的磁化率或磁导率 $\mu = 1 + \chi$ 大小和符号分类, 分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、亚铁磁性和反铁磁性等五种^[1,2].

1.3.1 铁磁性

铁磁性的物质只要在很小的磁场作用下就能磁化到饱和, 其磁化率大于零, 达到 $10^1 \sim 10^6$ 数量级, 其磁化强度 M 与磁场强度 H 之间的关系是非线性的复杂函数关系, 反复磁化时出现磁滞现象. 铁磁性物质内部的原子磁矩是按区域自发平行取向的. 当铁磁性物质的温度比居里温度高时, 铁磁性将转变为顺磁性.

铁磁性的元素有铁、镍、钴. 铁磁性物质中轨道磁矩 m_0 基本为零, 然而由于自旋磁矩 m_s 的作用, 铁磁性物质有大的磁矩. 因此在铁磁性材料中, $m_s \gg m_0$. 晶格中的磁畴的相邻磁矩之间存在一种特殊的量子效应, 即一种强的交换作用, 使磁矩平行排列. 这种作用促使了原子磁矩的线性排列, 在一个区域内磁矩成严格的平行结构. 因此, 铁磁材料具有很大的正的磁化率 $\chi = M/H$, 其范围从 1 到 1000000, 这使 $\mu_r \gg 1$. 铁磁材料中的自旋磁矩平行排列, 如图 1.1(a) 所示.

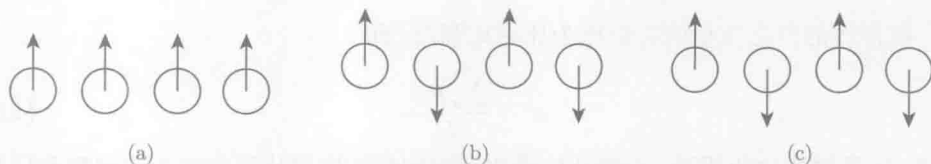


图 1.1 在无外加磁场下自旋磁矩的结构

(a) 铁磁性材料; (b) 反铁磁性材料; (c) 亚铁磁性材料

1.3.2 反铁磁性

由于电子自旋反向平行排列. 在同一子晶格中有自发磁化强度, 电子磁矩是同向排列的; 在不同子晶格中, 电子磁矩反向排列. 在无外加磁场下, 反铁磁性材料中, 相邻磁矩大小相等且反平行排列, 因此, 即使在外加磁场下净磁矩也几乎为零. 外加磁场对磁矩影响很小, 但是会导致相对磁化率 μ_r 略有增加. 图 1.1(b) 展示了反铁磁性中自旋磁矩的结构.

1.3.3 亚铁磁性

亚铁磁性的宏观磁性与铁磁性相同, 但磁化率的数量级低一些, 为 $10 \sim 10^3$ 数量级. 它们的内部磁结构与反铁磁性的相同, 但相反排列的磁矩不等量. 从这个角度可以认为亚铁磁性是未抵消的反铁磁性结构的铁磁性.

铁氧体是典型的亚铁性物质. 亚铁磁性元素有铬和锰, 在元素周期表中与铁元素相邻. 它们有相近的原子序数, 相邻原子偶极矩间的作用力强, 但是这种相互作用导致了电子自旋的反平行排列. 在无外加磁场时, 不同原子的自旋磁矩在数值上很大且不相等, 但从原子到原子的磁矩方向不同, 因此宏观上看没有净磁矩. 在外加磁场作用下, 大小不等的原子磁矩方向交替排列, 从而使净磁矩为非零, 如图 1.1(c) 所示.

所示. 由于磁矩之间部分的抵消, 因此亚铁磁性材料的磁感应强度远远低于铁磁材料. 相对磁导率远远大于 1 ($\mu_r \gg 1$). 当铁磁材料的温度超过居里温度时, 自旋方向将随机排列, 材料变成顺磁性.

1.3.4 抗磁性

当物质受到外磁场 H 作用后, 感生出与 H 方向相反的磁化强度, 这种物质称为抗磁性物质. 抗磁性元素有铍、铜、金刚石、金、铅、汞、银和硅. 抗磁性材料的磁性很弱, 在无外加磁场作用下, 轨道和自旋磁矩相互抵消净, 磁矩为零. 在外加磁场作用下, 自旋磁矩将略大于轨道磁矩 ($m_s > m_0$), 产生了一个很小的净磁矩. 小的磁矩将引起一个弱的偶极子, 偶极子产生一个很小的磁场, 方向与外加磁场方向相反. 如果将抗磁性材料放在棒状磁铁南极或北极, 它们之间将相互排斥.

抗磁性材料的磁化率很小且为负 $\chi = M/H \approx -10^{-5}$, 因此相对磁导率 $\mu_r < 1$. 例如铜的相对磁导率 $\mu_r = 0.99999$, 银的相对磁导率 $\mu_r = 0.99998$, 金的相对磁导率 $\mu_r = 0.99996$. 抗磁性材料的相对磁导率是一个与外加磁场无关的常数.

1.3.5 顺磁性

顺磁性物质的主要特征是, 不论外加磁场是否存在, 原子内部存在永久磁矩. 但在无外加磁场时, 由于顺磁物质的原子做无规则的热振动, 这些原子磁矩是杂乱分布的, 宏观看来, 没有磁性; 在外加磁场作用下, 这些原子磁矩比较规则地沿外磁场方向取向, 物质显示极弱的磁性.

顺磁性元素有铝、钙、铬、镁、铌、铂、钛和钨. 在顺磁性材料中, 磁化率主要有自旋磁矩引起 $m_s > m_0$. 电子只占据了部分的核外轨道. 由于自旋磁矩间相互作用较弱, 自旋电子没有完全平行排列. 在外加磁场下, 磁偶极子沿外加磁场方向平行排列. 高温时顺磁性材料中的自旋磁矩消失. 顺磁性物质会被强磁性的棒状磁铁吸引.

顺磁性物质磁化率为正且很小 $\chi = M/H \approx 10^{-5}$, 因此相对磁导率 $\mu_r > 1$. 例如铝的相对磁导率 $\mu_r = 1.00002$, 钛的相对磁导率 $\mu_r = 1.00002$, 铂的相对磁导率 $\mu_r = 1.00003$.

1.4 磁性材料的磁化

磁性材料对外磁场的响应过程称为磁化过程. 该过程可以由磁化曲线与磁滞回线来表征^[3,4].

1.4.1 磁化曲线

磁化曲线是表征物质磁化强度或磁感应强度与磁场强度的依赖关系的曲线. 处

于磁中性状态的样品在磁化时, 可以有下列几种磁化曲线:

(1) 初始磁化曲线: 处于磁中性状态的磁体, 当受到一方向不变数值做单调增大的磁场作用时得到的磁化曲线.

(2) 基本 (正常或换向) 磁化曲线: 从磁中性状态开始, 在由小到大, 不同大小的正负磁场的反复作用下, 可得到一系列由小到大的正常磁滞回线. 这些正常回线的顶点的轨迹称为基本 (或正常或换向) 磁化曲线, 如图 1.2 所示. 它和起始磁化曲线基本重合, 但略陡.

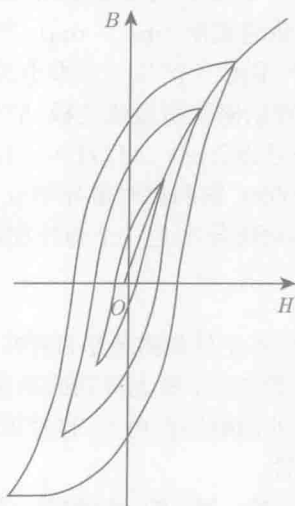


图 1.2 基本磁化曲线

初始磁化曲线受到许多偶然因素 (例如: 机械振动、温度变化、磁场强度 H 的大小等) 的影响是不稳定的. 正常磁化曲线是材料经过交替反复磁化过程而得到的, 所以它是最稳定的磁化曲线. 若不作特别说明, 磁化曲线就是基本磁化曲线.

上面提到, 测试磁化曲线是需要样品处于磁中性状态. 磁体的中性化, 一般采用两种方法: ①交流场退磁法, 即对磁体通过一个其峰值由相应的饱和值减至零的交流场, 使磁体处于磁中性状态; ②热退磁法, 即在任何外磁场的情况下, 使磁体从高温 (高于居里温度) 逐渐降低至室温, 而得到磁中性状态.

磁化曲线可以划分为四个区域, 如图 1.3 所示. I 为起始段, 这是在弱磁场范围内, 磁感应强度增长较缓慢, 磁化曲线基本上为直线, 在这部分曲线上 M 与 H 或 B 与 H 的关系为线性关系; II 为第二段, 曲线向上弯曲, 在这个区域内磁感应强度 B 随着磁场强度 H 的增加而很快上升, 但 B 与 H 的关系不再呈线性关系; III 为第三段, 当磁场的强度再增大, 磁化曲线的增势减小, 此阶段称为趋近饱和阶段; IV 为顺磁阶段, 在某一磁场强度下磁体被磁化到饱和以后, 磁场的强度增大到

很强的值, 磁化曲线将出现顺磁磁化部分.

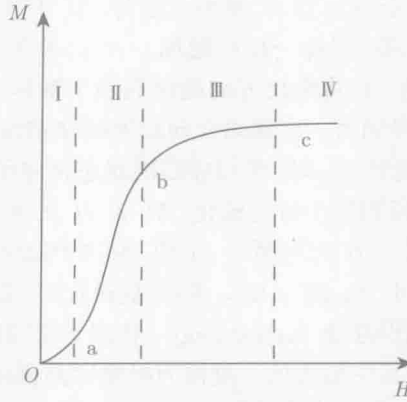


图 1.3 磁化曲线的分区

1.4.2 磁滞回线

当磁体达到磁饱和状态后, 如果减小磁化场 H , 磁体的磁化强度 M (或磁感应强度 B) 并不沿着起始磁化曲线减小, M (或 B) 的变化滞后于 H 的变化, 这种现象叫磁滞. 在磁场中, 铁磁体的磁感应强度与磁场强度的关系可用曲线来表示, 当磁化磁场作周期的变化时, 铁磁体中的磁感应强度与磁场强度的关系是一条闭合线, 这条闭合线叫做磁滞回线, 如图 1.4 所示.

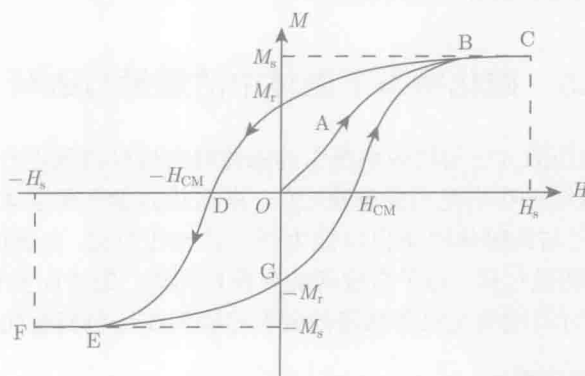


图 1.4 磁滞回线

一般说来, 铁磁体等强磁物质的磁化强度 M 或磁感应强度 B 不是磁场强度 H 的单值函数而依赖于其所经历的磁状态的历史. 以磁中性状态 ($H = M = B = 0$) 为起始态, 当磁状态沿起始磁化曲线 $OABC$ 磁化到 C 点附近 (图 1.4) 时, 此时磁化强度趋于饱和, 曲线几乎与 H 轴平行. 将此时磁场强度记为 H_s , 磁化强度记为

M_s . 此后若减小磁场, 则从某一磁场 (B 点) 开始, M 随 H 的变化偏离原先的起始磁化曲线, M 的变化落后于 H . 当 H 减小至零时, M 不减小到零, 而等于剩余磁化强度 M_r . 为使 M 减至零, 需加一反向磁场 $-H_{CM}$ 称为矫顽力. 反向磁场继续增大到 $-H_s$ 时, 强磁体的 M 将沿反方向磁化到趋于饱和 $-M_s$, 反向磁场减小并再反向时, 按相似的规律得到另一支偏离反向起始磁化曲线的曲线. 于是当磁场从 H_s 变为 $-H_s$ 再从 $-H_s$ 变到 H_s 时, 强磁体的磁状态将由闭合回线 CBDEFEGBC 描述, 其中 BC 及 EF 两段相应于可逆磁化, M 为 H 的单值函数. 而 BDEGB 为磁滞回线. 在此回线上, 同一 H 可有两个 M 值, 取决于磁状态的历史. 这是由不可逆磁化过程所致. 若在小于 H_s 的 $\pm H_{CM}$ 间反复磁化时, 则得到较小的磁滞回线, 称为小磁滞回线或局部磁滞回线 (minor loop). 相应于不同的 H_{CM} , 可有不同的回线. 而上述 BDEGB 为其中最大的. 故称为极限磁滞回线或主磁滞回线 (major loop). H 大于极限回线的最大磁场强度 H_s 时, 磁化基本可逆; H 小于此值时, M 为 H 的多值函数. 通常将极限磁滞回线上的 M_r 及 H_c 定义为材料的剩磁及矫顽力, 为表征该材料的磁特性的重要参量.

磁滞回线较窄 (或矫顽力较小) 的材料就是软磁材料 (或导磁材料); 磁滞回线较宽的材料就是硬磁 (或永磁) 材料. 软磁材料的特点是磁导率高、矫顽力低 (一般在 1000A/m 以下), 磁化后材料保留的磁性很小、磁滞损耗小, 如硅钢片、电工用纯铁等材料. 硬磁材料 (也称永磁材料) 的特点是矫顽力高, 一般 H_c 在几千 A/m 以上, 也即磁化后可以保留很高的磁性, 如硬磁铁氧体等材料. 它适合作磁场源提供恒定磁场, 如永磁发电机内的永久磁钢.

1.5 磁化状态下磁体中的能量与磁畴

各种磁电阻效应的大小与构成系统中的磁性薄膜材料的磁矩分布密切相关, 而磁性薄膜材料的磁矩分布则是由能量决定的. 根据热力学平衡原理, 稳定的磁矩分布, 即磁状态, 一定与铁磁体内总自由能为极小状态相对应. 当温度远低于居里温度时, 一般磁体的能量包括: 电子自旋间的交换作用能、磁各向异性能、外磁场能以及退磁场能等, 对组成磁电阻传感器的磁性薄膜系统还包括层间耦合能等.

1.5.1 自发磁化与磁畴^[5]

铁磁体的基本特征之一就是存在自发磁化. 自发磁化指的是原子或分子的磁矩之间, 依靠自身内部的作用, 按一定的方式有序排列的现象. 1907 年法国科学家外斯系统地提出了铁磁性假说, 解释了自发磁化的原因. 其主要内容有: 铁磁物质内部存在很强的“分子场”, 在“分子场”的作用下, 原子磁矩趋于同向平行排列, 即自发磁化至饱和, 称为自发磁化; 铁磁体自发磁化分成若干个小区域 (这种自发