

GH

高等专业学校 规划教材
工科电子类

磁性测量

周世昌 编

电子工业出版社

磁 性 測 量

周 世 昌 編

電 子 工 業 出 版 社

(京)新登字055号

内 容 提 要

本书主要介绍各种磁性材料磁特性的测量原理和方法。全书共分七章。第一、二章讨论磁性材料的磁化行为和磁性测量的基本问题,讨论试样的磁化方法和磁化装置;第三章讨论中等强度的磁场测量;第四、五章讨论磁性材料直流磁特性和本征磁特性的测量;第六、七章讨论从低频至微波频率的交流磁特性的测量。本书可供高等学校工科电子类磁性物理与器件专业以及与磁学、磁性材料有关的专业作教材,也是从事磁性材料与器件、磁测仪器的研究与生产的科技人员的较好参考书。

磁 性 测 量

周世昌 编

责任编辑: 詹善琼

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂 印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 11.375 字数: 300千字

1994年4月第1版 1994年9月第1次印刷

印数: 1000册 定价: 6.60元

ISBN 7-5053-2463-2/TN·719

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,“我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

修 编 前 言

《磁性测量》自 1987 年 6 月出版以来,作为工科电子类“磁性物理与器件专业”的本科教材,已经使用六年了。在这六年中,我国的磁性材料工业和磁性测量技术都有重要的进展,尤其是新的测量技术已日趋成熟并得到了广泛的应用。这些进展和变化都要求我们对本书进行修编再出版。

本书仍由原《磁性测量》编者——华中理工大学周世昌教授修编,由电子科技大学陈巧生教授主审。编审者均依据“电子材料与器件编审小组”审定的修编大纲进行修编和审阅。

修编本对原书的内容作了更合理的调整;增补了一些已广泛使用的新技术和测量内容;删去了一些不很成熟的技术内容;对原书中的印刷错误和不妥之处作了订正;修编本增加了两个附录,是对全书教学内容的有益补充,其中附录 2 由华中理工大学刘玳珩编写。

原《磁性测量》出版后,受到有关高等学校、科研单位、磁性材料与器件生产厂和磁测仪器生产厂的关注,他们对其提出了许多宝贵的建议,这是本书修编的基础。华中理工大学用《磁性测量》作教材,为磁性物理与器件专业的本科生开设了 6 次专业课,收到了较好的教学效果。教学实践表明,只要学生们仔细地阅读了本书内容,他们就会对磁性材料的磁特性测量原理与方法有一个比较深刻的理解,再经过实验教学,基本上可以达到学以致用用的目的。这也是本书编写的宗旨。

磁性材料磁特性的测量是严格地按照物质的磁化行为和磁性参数的物理定义行事的。因此,磁性测量的磁学原理贯穿于全书的每个章节,这是初学者应该注意的问题。本书修编时仍将测量仪器和设备作为一种技术工具对待,但也绝非将它们放在次要位置。我们在选择仪器和设备时,首先还是应该与磁学原理相联系,无论是研究新的仪器或选用仪器都要十分注意这一点。

本书在修编时得到了国内许多仪器仪表生产厂寄来的宝贵资料,在此一并致谢。

主审人陈巧生教授仔细地审阅了修编稿,并提出了许多有意义的修改意见,在此深表谢意。

编者对全国磁性元件及铁氧体材料标准化技术委员会所给予的帮助表示感谢。

由于编者水平所限,修编后的《磁性测量》,肯定还会有许多不妥和不尽人意之处,深望读者指正。

编者

1993 年 9 月

目 录

第一章 基本概念	1
1.1 测量的术语和定义	1
1.2 磁性测量的研究内容和术语	2
1.3 基本磁学量	3
1.4 SI 单位制	4
1.5 磁性材料的静态磁化特性	5
1.6 磁性材料的动态磁特性	9
1.7 试样的磁化—退磁因子	16
1.8 试样	17
1.9 试样的磁中性化	22
1.10 磁测量的基准和标准	23
第二章 产生磁场的装置	26
2.1 永久磁铁	26
2.2 磁场线圈	32
2.3 电磁铁	35
2.4 脉冲磁场	38
2.5 电磁铁磁场的稳定方法	39
2.6 超导磁体	42
第三章 磁场的测量	43
3.1 磁通计	43
3.2 旋转线圈——测量发电机	45
3.3 电子积分器与电子磁通表	46
3.4 霍尔效应磁强计	49
3.5 核磁共振法	51
3.6 非均匀磁场的测量技术	54
第四章 磁性材料直流磁特性的测量	56
4.1 冲击电流计	56
4.2 冲击法测量环形软磁试样的磁特性	62
4.3 冲击法测量片状软磁试样的磁特性	66
4.4 永磁材料磁特性的测量	69
4.5 $M-H$ 曲线的测量原理	75
4.6 振动样品磁强计 (VSM)	77
4.7 直流磁化特性自动测量装置	80
第五章 磁性材料本征磁特性的测量	86
5.1 饱和磁化强度 M_s 的测量	86
5.2 居里温度或抵消温度的测量	92

5.3 磁各向异性常数的测量	97
5.4 磁致伸缩系数的测量	102
5.5 应用铁磁共振技术测量饱和磁化强度、磁各向异性常数和磁致伸缩系数	106
第六章 磁性材料交流磁特性的测量	109
6.1 交流磁化曲线和磁滞回线的测量	109
6.2 高磁通密度下磁损耗的测量	117
6.3 高频弱场下磁芯线圈的等效电路	121
6.4 交流电桥	126
6.5 复数磁导率的电桥测量法	129
6.6 谐振法测量复数磁导率	133
6.7 磁芯电感与损耗的自动测量技术	139
6.8 高频低磁通密度下磁损耗的测量	141
6.9 同轴谐振腔在磁测量中的应用	143
第七章 微波频率下旋磁材料物理量的测量	147
7.1 谐振腔的微扰理论	147
7.2 传输式谐振腔的等效电路	149
7.3 复数介电常数的测量	154
7.4 铁磁共振线宽 ΔH 和有效朗德因子 g_e 的测量	159
7.5 有效线宽 ΔH_e 的测量	165
7.6 自旋波(共振)线宽 ΔH_K 的测量	168
附录1 磁学单位及不同单位制中数值的换算关系	172
附录2 磁性测量基本教学实验纲要	174
主要参考书	175

第一章 基本概念

本章首先讨论有关磁性测量的基本问题,将从磁性测量的观点叙述磁性现象、基本磁学的名词和术语的定义。然后着重讨论测试样品及样品磁化的静磁学问题和磁性材料在恒定磁场和交变磁场下的磁化行为。

1.1 测量的术语和定义

“测量”,是人们借助专门的技术工具,采用实验方法找出物理量的数值的生产活动或科学实验活动。人类从古代开始就对一些简单的物理量进行测量。但是,作为一门精密技术,“测量”问世不过数百年。从原理上,它可分为直接测量和间接测量,前者是直接从实验数据中找出物理量未知数的测量,而后者则是根据未知量与直接测量得出的量之间的已知关系,找出未知量。磁学量的测量几乎都属于间接测量。从方法上,测量又可分为绝对测量和相对测量,在磁测量技术中,这两种方法都经常用到。绝对测量是基于对一个或数个基本量的直接测量或者利用物理常数值所进行的测量;相对测量则是为了得到被测的量与作为标准的同名量之间的比例关系的一种测量。

测量技术所追求的目的,是用实验的方法找出与物理量的真值非常接近的实际值。物理量的真值在质和数两方面都理想地反映了物理量的量值,但是由于人们对物理现象认识的局限性和技术上的原因,真值总是不可能得到的。因此,只能用与真值非常接近的实际值来代替物理量的真值,实际值往往用测量结果来代替。由于测量结果又与测量方法有关,因此,测量结果可以被认为是应用某种测量方法所得到的量值。

测量结果与被测量真值之间的偏差,称为测量误差。由于被测量的数值形式,常常是不可通约的;又由于人的认识能力和科学水平的限制,实验中测得的值与真值总是不一致的,所以一切实验结果均有误差。误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中,这就是所谓的误差公理。

对于一种测量,我们常常使用精确度(或精密度)、准确度和正确度来表示它的好坏程度,这是三个不同的概念。

测量的精确度:反映随机误差大小的程度,是使用仪器测量所得到的最可靠的最小值,与仪器的最小读数有关。

测量的准确度:反映随机误差与系统误差合成的大小程度,指的是使用某种仪器作多次测量所得平均结果的可靠程度,即与真值的符合程度。一般可用相对误差的倒数来表示。

测量的正确度:反映系统误差大小的程度。不能排除系统误差的测量,便无正确度可言。

精密度高的测量,正确度不一定高,两者并不一致。而准确度高的测量则精密度和正确度都高,所以我们应以准确度的高低来衡量一个仪器、一个测量方法的质量。具有同样

精密度的两台仪器,它们的准确度不一定相同;精密度高的仪器,准确度不一定就高,所以任何一台仪器在测量之前必须用标准量值进行校准。

测量结果的准确度,常用多次测量的重复性和可靠性来衡量。重复性高的便说是精密度高,但结果的可靠性并不一定就高,也可能很差。在测量中,可靠性高的测量,测量的准确度就高。

在实验科学中,人们用平均值代替真值。当测量次数无限多时,正负误差出现的机率相等。将多次测量值相加后取平均,在无系统误差的情况下,可以获得非常接近于真值的数值。对于正态分布的观察值,用最小二乘法原理可以证明:在一组精密的测量值中,算术平均值为最佳值或最可信赖的值。

1.2 磁性测量的研究内容和术语

磁性测量是应用磁学领域里的一门技术性学科,它的研究目的是应用磁学原理,借助专门的技术工具,采用实验的方法找到各种磁学量和磁性材料磁特性的数值。所以,我们所指的“磁性测量”是与磁性材料的研究和生产密切相关的,而不是泛指“磁性测量”。所谓泛指的“磁性测量”除以上内容外,还包含了磁性探伤、磁性分析和磁场测量等诸多内容。

磁性材料的磁特性可分为本征磁特性和技术磁特性两大类,前者仅与物质的成份和结构有关,后者还与磁化场的频率、幅度以及被测试样的形状有关。磁性材料磁特性的最突出的特点是对测量条件的严格限制,在不同条件下,磁特性可以呈现出多值性。所以,磁性材料磁特性的测量是严格地按照物质的磁化行为和磁性参数的“定义”行事的。磁性测量最重要的研究内容就应该是各种磁性测量技术的磁学原理,而将磁性测量设备和各种电子仪器仅作为一种技术工具去研究和使用。这样的安排,既保持了普遍性,又避免了肤浅化。

在磁性测量中,几乎全部的磁学量都是采用所谓“间接测量技术”而得到的,“磁学量”与“被测量”之间往往呈现出复杂的函数关系。但是,无论这种函数关系如何复杂,各种各样磁性参数的测量问题都可以归纳为:试样的磁化、磁信号的变换与提取以及数据处理这样一个简单的模式。试样的磁化是各种磁特性测量的共同问题,磁化方式受到磁信号提取方法的制约,无论制约条件如何苛刻,我们总是希望在被测试样整个体积内“磁化”是均匀的,这一点可以用“测量结果”重复性的好坏来判断。当我们对磁化物体的静磁学问题进行了较深入的研究之后,就会发现在均匀外磁场中,只有少数几种形状的试样才能被均匀磁化。所以,不论是精密的测量,还是“粗糙”(快捷)的测量都应该充分地考虑到,使试样均匀磁化的原理和方法。磁信号的变换与提取和磁性测量的具体方法有关。从原理来说,凡是由精确的物理定律所确定的函数关系都可以应用,如力学的,电磁学的,光学的,原子物理学的,各种与磁现象有关的定律我们都可以应用。但是,在实际的测量工作中,必须设法去满足这种物理定律之所以存在的客观条件。磁性测量的数据处理包含了显函数和隐函数的数值计算和数值分析,这里可以是简单的数值计算,也可以是最优化计算机数值求解,也可以是一次或二次作图法。以上所述也就是我们将要研究的内容。

以电磁感应定律为基础的测量方法,在全部的磁性测量方法中占有很大的优势,它可

用于测量恒定磁场和交变磁场的磁通。在恒定磁场中, 这种方法是使测量线圈的磁链作单次跳跃式的变化, 用冲击电流计或磁通计来测量磁通, 或者是使测量线圈在被测磁场中持续运动, 用电子积分式仪表或平均值电压表来测量磁通。对这两种方法, 可以这样来命名: 使用冲击电流计的感应法习惯上叫做“冲击法”; 至于后者, 不论采用什么仪表测量感生电动势, 都可叫做“测量发电机法”。我们认为, 测量方法应以测量所依据的基本物理现象的名称来命名。因此, 上述两种测量方法首先应该叫感应法, 其次再按照测量时磁通变化的形式来区分, “冲击法”应该叫做“脉冲感应法”; “测量发电机法”则应叫做“连续感应法”。

按照以上的命名原则定义磁性测量术语, 无疑是符合科学规律的。但是, 由于习惯的原因和技术的原因, 很多测量方法仍然以所使用的测量仪器来命名, 或者两者兼而用之。如冲击法、振动样品磁强计法、磁秤法、Q表法、电桥法、谐振法、电流—电压表法、磁共振法等等。对于用测量仪器命名的测量方法, 应该选用以物理量的名称而不是物理量的单位名称来命名, 否则会造成磁性测量术语的混乱。例如应用磁通表测量磁通的方法, 可以叫脉冲感应法, 也可以叫磁通表法, 但不可以叫韦伯计、特斯拉计或高斯计法。因为目前已经可以用多种物理现象制造测量磁通的仪表。

1.3 基本磁学量

基本磁学量是表征某一空间或某一物体内部磁性现象的基本量值, 本节将讨论它们的确切定义。

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里产生磁场。从广义的角度来说, 我们可以将产生磁场的“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。最明显的例子则是一个被磁化了的物体。磁体可分的最小单元是磁偶极子, 它就是一个可以用无限小的电流回路来代替的小磁体。如果我们把观察点移到距离远大于磁体尺寸的远源区, 对该区域所有点上的磁场而言, 此磁体又是一个可以用平面电流回路来代替的磁偶极子。磁偶极子的磁特性可以用磁矩 m 来描述。

磁矩 m , 是用来表征磁偶极子磁性强弱与方向的一个轴矢量, 其值等于与磁偶极子等效的平面回路电流和回路面积的乘积; 其方向垂直于回路平面, 并且从这个方向观察, 电流是沿顺时针方向流动的。磁偶极子的磁矩可写成

$$m = iA \quad (1-1)$$

式中, i ——电流强度; A ——电流回路的面积。

这个磁矩的定义来自于平面回路电流, 与电流回路的面积成正比, 因此也称为磁面积矩。

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。

为了表征物体的磁化程度, 我们引入磁化强度 M 的概念。磁化强度是一个与物体体积 (V) 有关的矢量, 它等于单位体积内的总磁矩, 即:

$$\mathbf{M} = \frac{\sum \mathbf{m}}{V} \quad (1-2)$$

如果对整个体积求和,就可得到整个体积内的磁化强度。一般地说,物体内部各部分的磁化强度都不相同。物体内部任意点上的磁化强度可以通过对该点的一个微小体积求和而得到。

这里我们还引入与磁面积矩有关的两个基本磁学量。

磁偶极矩 $\mathbf{j}$, 定义为磁性常数 μ_0 和磁面积矩的乘积。

磁极化强度 $\mathbf{J}$, 是一个与材料的体积有关的矢量, 它等于体积 V 内的总磁偶极矩与该体积之比,

$$\mathbf{J} = \frac{\sum \mathbf{j}}{V} \quad (1-3)$$

为了描述空间某点的外磁场,我们引入磁场强度 $\mathbf{H}$ 的概念,它是表征磁场的大小和方向的物理量。实际上,磁场强度是与空间某点的磁感应强度(或称磁通密度) $\mathbf{B}$ 相联系的一个轴矢量。

磁感应强度 $\mathbf{B}$ 是一个无散轴矢量,用它可以描述空间某点的磁场的大小和方向。

对于一个磁化强度为 $\mathbf{M}$ 的磁体,它的磁感应强度可以看作由二个分量所组成。其一是由宏观电流所产生的 $\mu_0 \mathbf{H}$, 另一个是由磁体所引起的 $\mu_0 \mathbf{M}$, 所以,

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1-4)$$

除上述磁学量外,在磁性测量和磁路设计中,还常用到磁通量 Φ 和磁动势 F_m 两个参数。它们分别由下列方程所定义:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1-5)$$

$$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-6)$$

1.4 SI 单位制

由于历史的原因,目前还使用着几种不同的电磁测量单位制。过去我们所使用的若干种单位系统,都是按照同一的普遍原则,对几个物理量任意地、相互无关地选取测量单位,这些单位在该单位制中叫做基本单位,然后依据物理量之间存在着的有规律的联系,由基本单位导出其它量的测量单位。形成多种单位制的历史原因,当然是人们对基本电磁现象的物理意义持有不同的观点,并且又难于统一。但是,目前还使用多种单位制,则完全是由于习惯势力的约束或对 SI 单位制的科学性缺乏了解。

一九八四年二月二十七日,国务院关于在我国统一实行法定计量单位的命令中指出:为贯彻对外实行开放、对内搞活经济的方针,适应我国国民经济、文化教育事业的发展,以及推进科学技术进步和扩大国际经济、文化交流的需要,国务院决定在采用先进的国际单位制的基础上,进一步统一我国的计量单位。

国际单位制 (Système International d'Unités) 这一名称以及国际缩写 SI, 是十一届国际计量大会 (Conférence Générale des Poids et Mesures) 在一九六〇年通过的。这一单位制包括三类单位: 基本单位; 辅助单位; 导出单位。它们构成了 SI 单位的一贯系统。

关于 SI 单位制的详细情况, 请参阅有关资料。这里仅就 SI 单位制中有关电磁部分的单位作一些必要的介绍(参见表 1-1、1-2)。另外, 在磁学领域里, 国内外还沿用着习惯的厘米·克·秒 (CGS) 实用单位制, 这种单位制又称为 CGS 混合单位制。我们在本书附录 1 中也给出了这两种单位制的换算关系。

表 1-1 SI 单位制中的部分单位

量	单位名称	符号	其他表示式例	量	单位名称	符号	其他表示式例
长度	米	m		电导	西[门子]	S	A/V
质量	千克(公斤)	kg		磁感应通量、磁通量	韦[伯]	Wb	V·s
时间	秒	s		磁通量密度、磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m ²
电流	安[培]	A		电感	亨[利]	H	Wb/A
平面角	弧度	rad		摄氏温度	摄氏度	℃	
立体角	球面度	sr		电容率	法[拉]每米	F/m	
频率	赫[兹]	Hz	s ⁻¹	磁势差	安[培]	A	
力	牛[顿]	N	kg·m/s ²	磁导率	亨[利]每米	H/m	N/A ²
压力、应力	帕[斯卡]	Pa	N/m ²	磁矩	安[培]平方米	A·m ²	
能、功、热量	焦[耳]	J	N·m	磁化强度	安[培]每米	A/m	
功率	瓦[特]	W	J/s	磁极化强度	特[斯拉]	T	
电荷、荷量	库[仑]	C	A·s	磁偶极矩	韦伯米	Wb·m	
电位; 电压; 电动势	伏[特]	V	W/A	磁阻	每亨[利]	H ⁻¹	
电容	法[拉]	F	C/V	磁导	亨[利]	H	
电阻	欧[姆]	Ω	V/A				

表 1-2 SI 单位制的倍数单位

因数	词 头		因数	词 头	
	名 称	符号		名称	符号
10 ¹⁸	艾[可萨]	E	10 ⁻¹	分	d
10 ¹⁵	拍[它]	P	10 ⁻²	厘	c
10 ¹²	太[拉]	T	10 ⁻³	毫	m
10 ⁹	吉[咖]	G	10 ⁻⁶	微	μ
10 ⁶	兆	M	10 ⁻⁹	纳[诺]	n
10 ³	千	k	10 ⁻¹²	皮[可]	p
10 ²	百	h	10 ⁻¹⁵	飞[姆托]	f
10	十	da	10 ⁻¹⁸	阿[托]	a

1.5 磁性材料的静态磁化特性

磁性材料的静态磁化特性, 就是磁性材料在恒定的直流磁场中所表现出的特性, 所以又称为直流磁特性。静态磁特性是各类磁性材料最基本的性能指标。对磁性材料性能的了解, 将有助于对其测量原理和方法的理解。

磁性材料的静态特性, 常用特性曲线来表示, 最常用的是 $B = f(H)$ 和 $M = f(H)$ 曲线。这些特性曲线都是在极严格的给定条件(例如环境温度和机械应力等)下测试的。实验证明: 磁性材料的磁特性除与上述条件有关之外, 还和它的“磁性经历”有关, 图 1-1

示出了“磁性经历”的概念。A点表示某个磁状态,从不同的起点、不同的路径都可到达A点

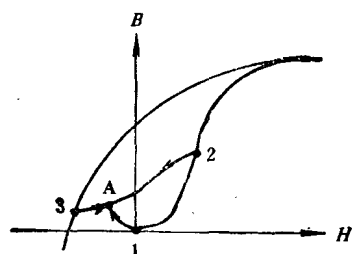


图 1-1 磁性经历示意图

点,例如从1、2、3点都可到A点。材料磁性能的变化特征与到达A点所经过的路径有关。所以在测量之前,样品应该回到所谓的初始状态。而初始状态又随着测量任务的不同而变更。例如为了测量初始磁化曲线,就应该使样品中的磁感应强度等于零。初始状态的确切定义将在下节讨论。这里我们暂时把这种状态叫做磁中性状态。

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:是单调地增加磁场强度而得到的曲线,即磁化曲线上每一点的 B (或 M)值是由前一个与较小 H 相应的 B (或 M)值递增而来的。

(2) 正常磁化曲线:是在不同磁场下,反复磁化时所得到的各条磁滞回线顶点的连线,又称为基本磁化曲线或技术磁化曲线。图1-2示出了初始磁化曲线和正常磁化曲线。

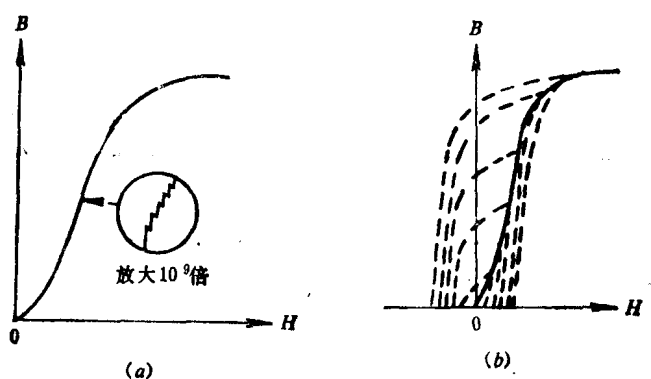


图 1-2 初始磁化曲线(a)和正常磁化曲线(b)

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 变化的性质等)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。今后,若不作特别说明,我们所指的磁化曲线就是正常磁化曲线。

磁化曲线可以划分成三个区域,如图1-3所示。0~1为起始段,这是在弱磁场范围内,磁感应强度增长比较缓慢;1~2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,很快上升;2~3为第三段,曲线经过第二次弯曲之后(这个点通常称之为“膝点”),磁感应强度增长愈来愈慢,最后在某一磁场强度下达到技术饱和。这时的磁化强度称为饱和磁化强度,用 M_s 表

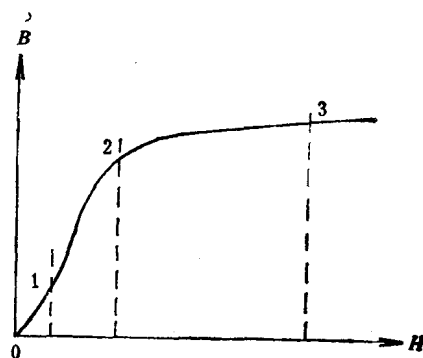


图 1-3 正常磁化曲线

示,它是一个常数。而饱和磁感应强度 B_s 却在继续增加,但是这种增加与 M_s 相比是很小的。所以,在磁化曲线的饱和段,实际上也可以把 B_s 看成是一个常数。这里应该注意 M_s 和 B_s 的区别,前者是磁性物质的本征物理量,而后者却是加进了外磁场数值的表观物理量。

将磁性材料周期性地反复磁化,即循环磁化,可得到对于坐标原点对称的正常磁滞回线,如图 1-4 所示。当磁场强度从 $+H_m$ 变化到 $-H_m$ 再回到 $+H_m$ 时,磁性材料按图 1-4(a) 中箭头所示的方向磁化,其路径是 $O \rightarrow A \rightarrow b \rightarrow h \rightarrow A' \rightarrow b' \rightarrow h' \rightarrow A$ 。

在循环磁化过程中,从 A 点出发,磁化一周之后并不回到 A 点,而是落在比 A 点低的 a 点上,如图 1-4(b) 所示,得到的是一个非闭合的磁滞回线。只有在经过多次反复磁化之后, a 点才渐渐接近 A 点,从而形成一个稳定的封闭的磁滞回线。这种在同一磁场下将材料进行多次的反复磁化,在磁性测量中称为“磁锻炼”。

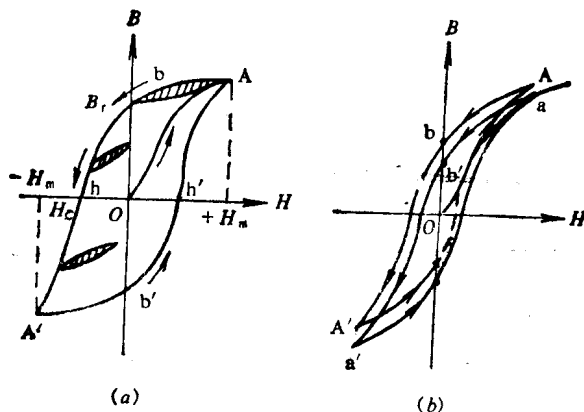


图 1-4 正常磁滞回线
(a) 闭合的回线; (b) 非闭合的回线。

描写材料的磁化状态,除采用磁感应强度这个物理量外,还经常采用磁化强度 M 这个量。式(1-4)给出了磁性材料磁化强度、磁感应强度和磁场强度之间的关系。在图 1-4 所表示的 $B = f(H)$ 回线中,将 B 减去 $\mu_0 H$ 再除以 μ_0 ,就得到 $M = f(H)$ 回线。如果 H 变化足够大,则回线的高度不随 H 而变化,并等于 $\mu_0 M_s$ 。 M_s 就是前面提到的饱和磁化强度。

磁性材料磁滞回线的形状主要取决于该材料的性质,但是,同一样品在不同极限磁场下,会有不同形状的磁滞回线,如图 1-5 所示。

在弱磁场下,磁滞回线是椭圆形,随着磁场的增加它开始伸出相应于图 1-4 中 A 和 A' 的“尖嘴”。饱和磁场下得到最大或饱和磁滞回线,在材料产品手册中列举的都是这种回线。磁滞回线的重要参数是:剩磁感应强度 B_r 、矫顽力 H_c 以及磁滞回线面积等。

除上述介绍的顶点落在正常磁化曲线上的磁滞回线外,在许多情况下也会出现所谓的局部磁滞回线,即顶点不落在正常磁化曲线上的那些磁滞回线。局部磁滞回线形成的原因是磁性材料磁化过程的不可逆性和在反复磁化过程中磁场突然改变了方向,如图 1-6 所示。图中箭头指的是工作点的移动方向。

值得注意的是,在交直流叠加磁化的变压器磁心中,所出现的局部磁滞回线有别于上

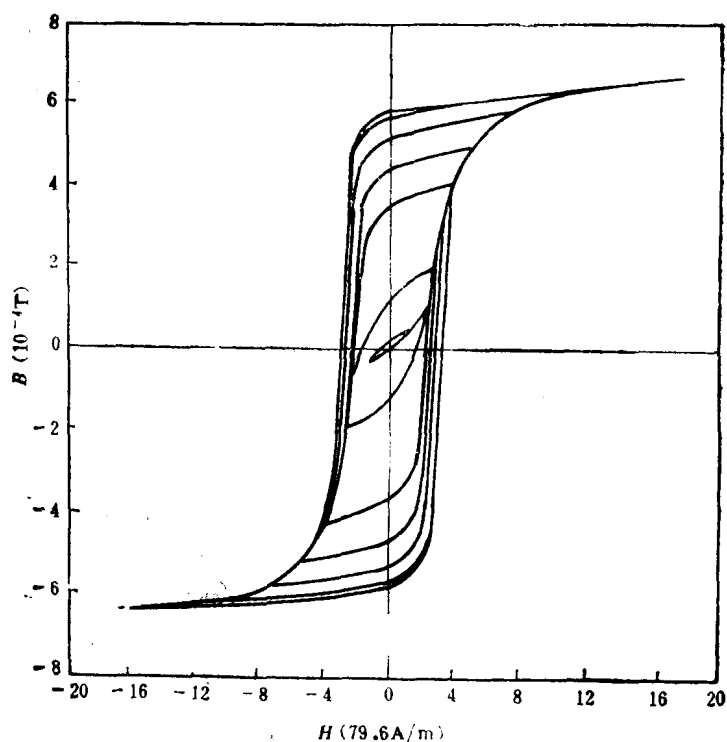


图 1-5 Fe-Ni 合金在不同磁场下的磁滞回线

述磁化过程的磁滞回线。

从图中可以看出：由于局部磁滞回线的出现，在同一磁场强度下，材料的磁感应强度可能有几种不同的数值。测量过程的偶然疏忽和自动测试仪中磁化电流不稳定，都可能出现局部磁滞回线，使我们不能得到位于正常磁滞回线上的磁感应强度数值。

有了以上一些概念之后，我们就可以进一步讨论材料的磁导率的确切定义。定义材料的相对磁导率为磁感应强度和磁场强度的比值，即 $\mu = B/\mu_0 H$ （即以后常称的磁导率）。这种定义在磁性测量中，是对磁化曲线上各点而言的。磁滞回线上的点，在形式上也可以用来定义磁导率，但是没有物理意义。

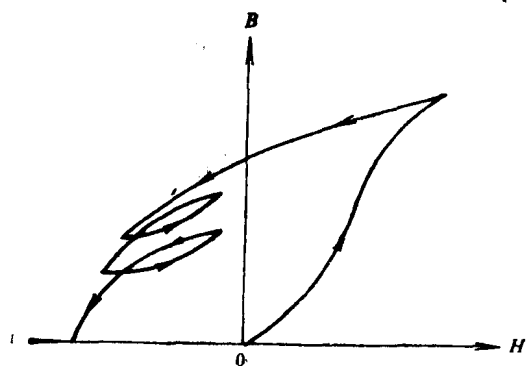


图 1-6 局部磁滞回线的形成

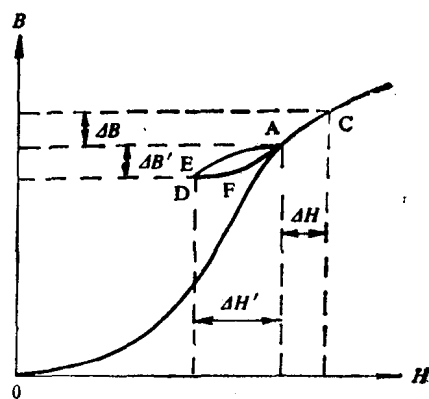


图 1-7 μ_Δ, μ_d, μ_i 的图示

如果材料处于循环磁化状态, 我们所定义的磁导率就是振幅磁导率 μ_a , 它等于 B 和 $\mu_0 H$ 静态值之比。这种定义实际上是振幅磁导率的一种极限情况, 关于它的一般定义将在第六章中讨论。

与磁化曲线起始段有关的磁导率是起始磁导率 μ_i ,

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (1-7)$$

即磁场强度趋于零时, 振幅磁导率的极限值。它是软磁材料的重要参数。在磁化曲线的陡增段, 振幅磁导率达到最大值, 称为最大磁导率 μ_m ,

$$\mu_m = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B}{H} \right)_{\max} \quad (1-8)$$

μ_m 也是软磁材料的重要参数。

实际上, 除了上述所定义的一些磁导率概念之外, 还可以定义增量磁导率 μ_Δ 、可逆磁导率 μ_r 和微分磁导率 μ_d 。当交变磁场在某一恒定磁场(如图 1-7 中的 A 点)附近作周期性变化, 磁通密度或磁场强度两者之一的振幅为固定值时, 增量磁导率为磁通密度峰值之差与磁场强度峰值之差的比值, 即

$$\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B'}{\Delta H'} \quad (1-9)$$

增量磁导率决定于磁性材料中静态磁场的强度, 定义中交变场和静态场是共线的, 否则磁导率就变成了张量。

可逆磁导率是用下面的方法定义的: 即当交变磁场强度趋近于零时, 增量磁导率的极限值就是可逆磁导率。从图 1-7 看出, OA 是基本磁化曲线。如果从 A 点开始降低磁场强度 $\Delta H' (< 0)$, 磁感应强度也降低 $\Delta B'$, 但不是沿基本磁化曲线, 而是沿着 AED 路径移至 D 点, 这表明了磁化过程的不可逆性。当直流场 H 不变, 而减小交流场幅值 ΔH 时, 回线 AEDFA 也随着变窄。当 $\Delta H' \rightarrow 0$ 时, 这个回线的斜率被定义为可逆磁导率,

$$\mu_r = \lim_{\Delta H' \rightarrow 0} \mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H' \rightarrow 0} \frac{\Delta B'}{\Delta H'} \quad (1-10)$$

微分磁导率被定义为磁化曲线上与某一点的斜率相对应的磁导率, 在图 1-7 中, 从 A 点使磁场增加 ΔH , 则磁感应强度增加 ΔB , 于是沿曲线上升到 C 点, 此时定义微分磁导率为

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{dB}{\mu_0 dH} \quad (1-11)$$

在研究物质的磁性时, 除了上述一些静态磁化特性之外, 还常常用到磁化率 χ 这个参数, 它是磁化强度与磁场强度的比值,

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1-12)$$

磁化率与磁导率之间有下列关系,

$$\mu = 1 + \chi \quad (1-13)$$

在式(1-12)中, H 应是内磁场强度。

1.6 磁性材料的动态磁特性

磁性物质在交变磁场中所表现出的磁特性——交流磁特性或称动态磁特性, 与在恒

定磁场中的静态磁特性有着很大的不同。物质的动态磁特性不仅与物质本身的磁性有关，而且还与样品的几何形状、物质的电学性质、磁场的频率、幅度、波形等一系列因素有关。所以，为了正确地选择测量方法及分析、应用其测量结果，必须首先了解磁性材料的动态磁特性。

在交变磁场中，由于趋肤效应，磁性材料内各点的磁场强度及磁感应强度都不相同，我们很难得到样品内各点的正确的磁场强度值和磁感应强度值。

一、动态磁滞回线和磁化曲线

当磁性材料处在一个振幅、频率一定的交变磁场中，便被周期地反复磁化，这种过程称为循环磁化。其磁状态沿着一个对称的回线 $ac'a'ca$ (图 1-8) 变化。由于在动态情况下，反复磁化一周所耗费的能量不仅仅是磁滞损耗和微观涡流损耗之和，而且还与宏观涡流损耗和磁粘滞性所引起的损耗有关，所以动态回线所包围的面积总是大于静态回线 ($ab'a'ba$) 的面积。

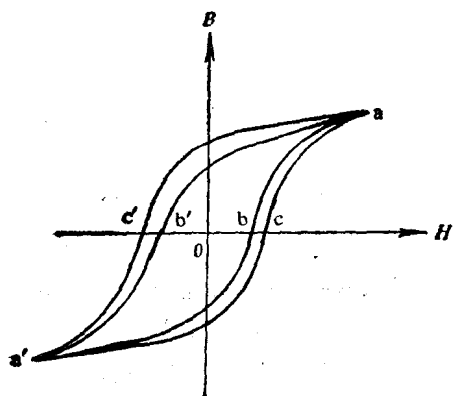


图 1-8 动态磁滞回线

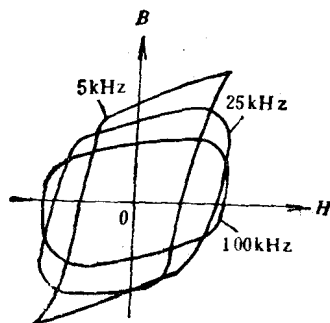


图 1-9 Fe-Ni 合金片在不同频率下的动态磁滞回线

动态磁滞回线的形状与磁感应强度的幅度有关，在弱交变磁场中，呈椭圆形形状；在较强磁场下，其形状与静态典型磁滞回线相似，只是稍胖一些，但在频率增高时也趋于椭圆形。图 1-9 表示了这种情况。

在同一频率下，改变交变磁化场强度的大小，可得到不同的动态磁滞回线。在磁化曲线上任一点的磁感应强度 B_m 和磁场强度 H_m 的比 $\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$ 称为振幅磁导率 ($\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$)。

在低频下薄片金属材料或铁氧体材料的动态回线与静态回线基本重合，振幅磁导率与基本磁化曲线上的磁导率相等。

二、B 与 H 间的非线性关系

交流磁化的时间效应显著地表现为 B 和 H 间的非线性关系和相角滞后现象。高磁通密度下使用的材料必须考虑 B 和 H 间的非线性问题，而在高频弱场情况下使用的材料则必须考虑 B 对 H 的相角滞后和其它原因而引起的损耗增加的问题。