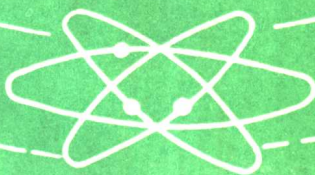


高等学校教材

磁性测量

周世昌 编



电子工业出版社

磁性测量

周世昌 编

电子工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍磁性材料各种磁特性的测量原理和方法。全书共分七章。第一、二章介绍测量的基本概念和磁化样品的基本测量;第三章讨论中等强度磁场的测量方法;第四、五、六、七章分别讨论直流磁特性、基本磁特性以及在工频至射频和微波频率下磁特性的测量。

本书可供高等院校工科电子类有关材料与器件专业作教材使用,也可供有关科技人员参考。

磁 性 测 量

周世昌 编

责任编辑 晓 耕

· 电子工业出版社出版(北京万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京科技印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11.875 字数: 28.2 千字

1987 年 6 月第一版 1987 年 6 月第一次印刷

印数: 1—2,800 册 定价: 2.00 元

统一书号: 15290·414

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二至一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编者,各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为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

前 言

本教材由高等学校工科电子类专业《电子材料与固体器件》教材编审委员会《电子材料与器件》编审小组评选审定,并推荐出版。

该教材由华中工学院周世昌编写、成都电讯工程学院张有钢审阅。编审者均依据电子材料与器件编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅。

本课程的参考教学时数为 50 学时,其主要内容为磁性材料各种磁特性的测量原理和测量方法。磁性测量是应用磁学领域的一门技术性学科,它的研究目的是应用磁学理论,借助专门的技术工具,采用实验的方法找出各种磁学量或磁性材料磁特性的数值。

本教材共分七章,第一章和第二章讨论磁测量的一些基本概念和磁化样品的基本装置;第三章讨论中等强度磁场的测量方法;第四、五、六、七章分别讨论直流磁特性、基本磁特性以及从工频至射频、微波频率下磁特性的测量。本教材侧重于测量原理和方法的讨论,把测量仪器,尤其是电子仪器仅作为一种技术工具对待。这样做,既避免了重复和肤浅化,同时又尽量地保持了普遍性。学习本教材之前,学生应具有磁性物理和电子线路的基本知识。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 基本概念.....	1	4.10 直流磁化特性自动纪录装置	90
1.1 测量的术语和定义	1	第五章 磁性材料本征磁特性的测	
1.2 基本磁学量	2	量	86
1.3 SI 单位制	3	5.1 饱和磁化强度 M_s 的测量	86
1.4 磁性材料的静态磁化特性	4	5.2 居里温度或抵消温度的测量	93
1.5 试样的磁化——退磁因子	9	5.3 磁各向异性常数的测量	97
1.6 磁测量的基准和基本方法	11	5.4 磁致伸缩系数的测量	104
第二章 产生磁场的装置	13	5.5 旋转样品磁强计 (RSM)	108
2.1 永久磁铁	13	5.6 应用铁磁共振技术测量饱和	
2.2 磁场线圈	19	磁化强度、磁各向异性常数和	
2.3 电磁铁	22	磁致伸缩系数	111
2.4 脉冲磁场	25	第六章 磁性材料交流磁特性的测	
2.5 电磁铁磁场的稳定方法	27	量	115
2.6 超导磁体	29	6.1 磁性材料的动态磁特性	115
第三章 磁场的测量	31	6.2 交流磁化曲线和磁滞回线的测	
3.1 磁通计	31	量	121
3.2 旋转线圈——测量发电机	33	6.3 磁损耗的测量	129
3.3 电子积分器与电子磁通表	34	6.4 高频弱场下复数磁导率的测量	134
3.4 霍尔效应磁强计	37	6.5 交流电桥	138
3.5 核磁共振法	39	6.6 磁特性的电桥测量法	143
3.6 非均匀磁场的测量技术	43	6.7 谐振法测量复数磁导率	146
第四章 磁性材料直流磁特性的		6.8 阻尼振荡法测量损耗	152
测量	45	6.9 同轴谐振腔在磁测量中的应用	154
4.1 试样	45	第七章 微波频率下旋磁材料物理量	
4.2 试样的磁中性化	50	的测量	158
4.3 冲击电流计	51	7.1 谐振腔的微扰理论	158
4.4 冲击法测量环形软磁试样的磁		7.2 传输式谐振腔的等效电路和	
特性	57	基本关系式	161
4.5 冲击法测量片状软磁试样的磁		7.3 复数介电常数的测量	165
特性	61	7.4 铁磁共振线宽 ΔH 和有效朗德	
4.6 永磁材料磁特性的测量	65	因子 g_e 的测量	171
4.7 冲击法的测量误差	69	7.5 有效线宽 ΔH_e 的测量	177
4.8 $M-H$ 曲线的测量	73	7.6 自旋波(共振)线宽 ΔH_K 的测	
4.9 振动样品磁强计 (VSM)	77	量	189

第一章 基本概念

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，前者是直接由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，所以我们应该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。

12 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,电流是顺时针流动的。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磁矩,即:

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

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。物体内存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 j , 定义为磁性常数 μ_0 和磁面积矩的乘积。

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

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

为了描述空间某点的外磁场,我们引入磁场强度 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) B 相联系的一个轴矢量。

磁感应强度 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 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 $\mu_0 H$,另一个是由磁体所引起的 $\mu_0 M$,所以,

$$B = \mu_0(H + M)。(1-4)$$

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:

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad (1-5)$$

$$F_m = \oint H \cdot dl \quad (1-6)$$

1.3 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

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	°C	
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				

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。另外,由于在磁学领域里,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。所以我们也给出这两种单位制的换算关系。参见表 1-1,表 1-2,表 1-3。

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

表 1-3 换算因子(两种单位制的数量比)

量	SI 单位名称	CGS 单位名称	换 算 因 子	
			CGS/SI	SI/CGS
磁矩 m	安米 ² A·m ²	高斯厘米 ² Gs·cm ²	10^{-3}	10^3
磁化强度 M	安/米 A/m	高斯 Gs	79.6	1.26×10^{-2}
磁感应强度 B	特斯拉 T	高斯 Gs	10^{-4}	10^4
磁通 Φ	韦伯 Wb	麦克斯威 Mx	10^{-8}	10^8
磁场强度 H	安/米 A/m	奥斯特 Oe	79.6	1.26×10^{-2}
磁动势 F_m	安 A	吉伯 Gb	7.96×10^{-1}	1.26
磁各向异性常数 K	焦耳/米 ³	尔格/厘米 ³	10^{-1}	10
磁能积 $(BH)_m$	焦耳/米 ³	高斯·奥斯特	$\frac{1}{4\pi} 10^{-1}$	$4\pi \times 10$
磁常数 μ_0	$= 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米	(=1)		$\frac{1}{4\pi} \times 10^7$

1.4 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,例如从 1、2、3 点都可到 A 点。材料磁性能的变化特征和到达 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。

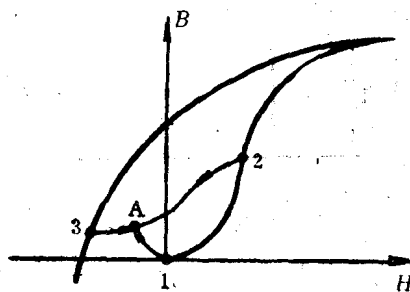


图 1-1 磁性经历示意图

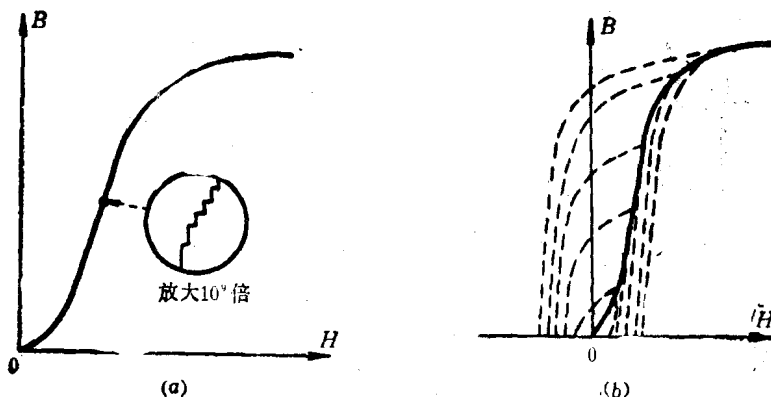


图 1-2 初始磁化曲线 (a) 和正常磁化曲线 (b)。

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。 $0 \sim 1$ 为起始段,这是在弱磁场范围内,磁感应强度增长比较缓慢; $1 \sim 2$ 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; $2 \sim 3$ 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”),磁感应强度增长就愈来愈慢,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。

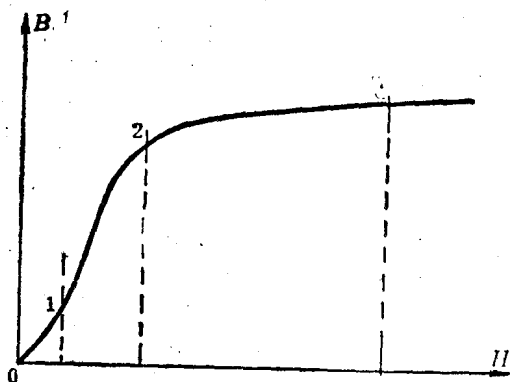


图 1-3 正常磁化曲线

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”。

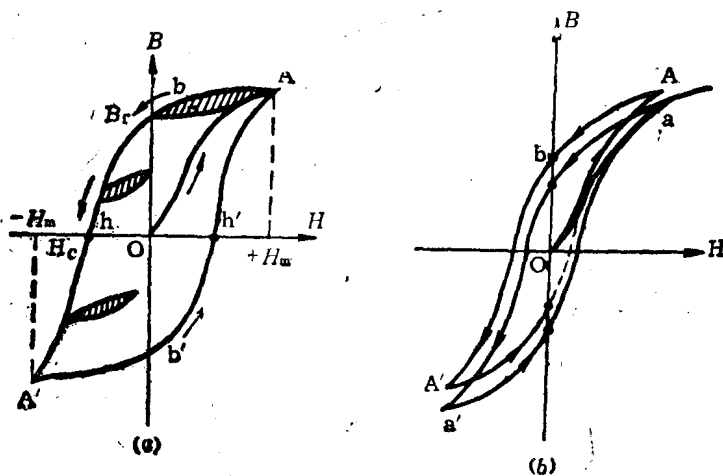


图 1-4 正常磁滞回线

(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

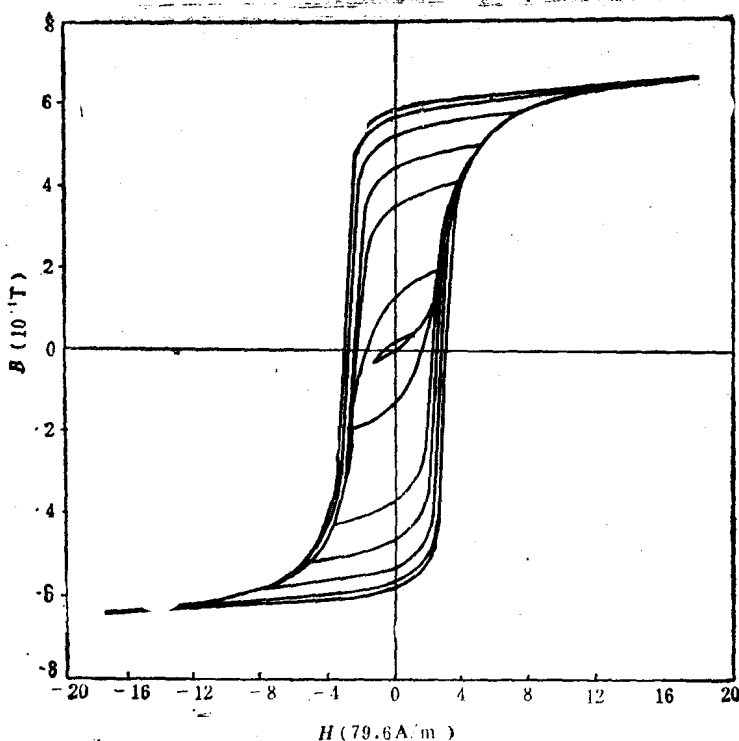


图 1-5 Fe-Ni 合金在不同磁场下的磁滞回线

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述的磁化过程。

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

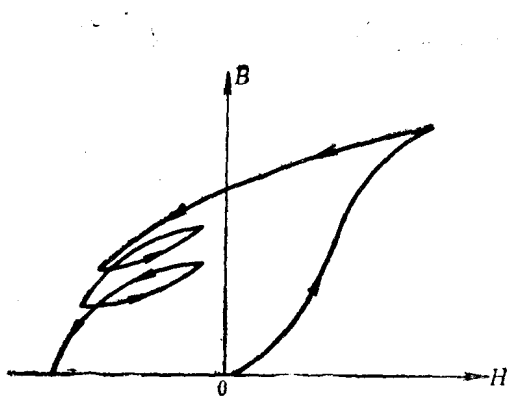


图 1-6 局部磁滞回线的形成

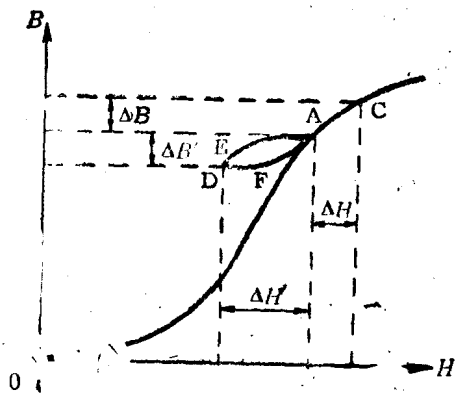


图 1-7 μ_Δ, μ_d, μ_c 的图示

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, $\mu = B/\mu_0 H$ (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。

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 ,

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}, \quad (1-17)$$

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 ,

$$\mu_m = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B}{H} \right)_{\max}, \quad (1-18)$$

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

$$\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B'}{\Delta H'}. \quad (1-19)$$

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,0A 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,

$$\mu_r = \lim_{\Delta H' \rightarrow 0} \mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H' \rightarrow 0} \frac{\Delta B'}{\Delta H'} \quad (1-20)$$

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

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{dB}{\mu_0 dH} \quad (1-21)$$

除了上述一些静态磁化特性之外,在研究物质的磁性时,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,

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1-22)$$

磁化率与磁导率之间有下列关系，

$$\mu = 1 + \chi \quad (1-23)$$

在式(1-22)中， H 应是内磁场强度。

任何磁性材料，其磁导率 μ 和磁化率 χ 的数值并不随单位制的变更而改动，这一点是应该充分注意的。

1.5 试样的磁化——退磁因子

前一节所讨论的一些关系式和曲线上的一些点，严格地说都是指被磁化了的物体各点 B 和 H 的关系。要想得到被磁化物体本身各点的 B 和 H 的数值，在技术上存在着极大的困难。所有的测量方法都只能得到整个样品体积内或整个探测元件体积内 B 和 H 的平均值。那么，如何使测量结果能代表物质的真正磁特性？这是所有的磁测量都应该注意的问题。

假若被磁化了的物体，在它的体积范围内各点的 B 和 H 都彼此相等，这时所测得的平均值就可代表物质真正的磁特性。这就是物体均匀磁化的含意。一个物体被磁化时，尤其是任意几何形状的物体被磁化时，要求该物体各点的 B (和 H)都彼此相等是不可能的。在很多情况下只能做到部分均匀磁化。一个测试样品是否被均匀磁化，是影响测量准确度的主要原因。试样在外磁场中能否被均匀磁化，既取决于外加磁场是否均匀，也取决于试样本身的形状和尺寸。

测量所用试样的形状与测量所提出的要求和可能构成样品外形的条件有关。在磁性测量中，我们将根据不同的测量要求和可能构成样品外形的条件而采用条状、片状、环形和球形等样品形状。样品尺寸的选择，首先决定于测量设备的灵敏度，并且力求避免浪费材料，同时又必须使被研究的试样能均匀磁化。这就是我们选择试样形状和尺寸的原则。所以，每一个测量标准方法都严格地规定了被测试样的外形和尺寸。

这里我们必须研究一些关于物体磁化的静磁学问题。

在磁化一非闭合形状的物体时，由于在物体两端形成了“表面磁荷”，因此总要产生一个附加磁场，在物体内部，这个附加磁场总是与外磁场反向，因此我们称它为退磁场，以 H_d 表示。外磁场 H_e 和退磁场将有一个合成磁场 H_i 作用在物体上，这个磁场称为内磁场。即

$$H_i = H_e + H_d \quad (1-24)$$

它使物体磁化并决定磁感应强度 B 的值。退磁场强度 H_d 随着物体在磁化方向上尺寸的减小而增大，譬如，将一个长棒沿其横向磁化比沿长度方向磁化困难得多；将一薄板沿其法线方向磁化，实际上也很困难。一些非均匀磁化的物体，一般地说，其退磁场强度是其内部各点位置的函数；因为它除了主要决定于样品几何尺寸以外，还和样品的磁化强度有关，在这种情况下讨论退磁场的概念就非常困难。下面我们仅讨论均匀磁化物体的退磁场。

现在我们来研究磁化椭球物体的情况。将椭球放在均匀外磁场 H_e 之中，使椭球的某

一主轴与外磁场 H_c 的方向平行, 这时椭球将被均匀磁化, 可用均匀退磁场强度 H_d 来处理, H_d 与外磁场强度 H_c 和磁化强度 M 的方向相反, 数量与磁化强度 M 成正比。

$$H_d = -NM \quad (1-25)$$

其中 N 是退磁因子, 与椭球的相对线度有关。椭球体内部的合成磁场强度等于:

$$H_i = H_c + H_d = H_c - NM \quad (1-26)$$

被均匀磁化的样品, 其退磁因子是一个常数, 只与试样的几何形状有关。形状规则的物体的退磁因子, 通常由计算确定。由均匀材料制成的三个主轴长度分别为 a 、 b 、 c 的椭球体, 沿三个主轴的退磁因子有如下关系,

$$N_a + N_b + N_c = 1 \quad (1-27)$$

N_a 、 N_b 、 N_c 的计算非常复杂, 在此不作详述, 我们只举出几个椭球的特例。

球体 ($a = b = c$): 根据式(1-27), 得到

$$N_a = N_b = N_c = \frac{1}{3} \quad (1-28)$$

垂直于磁场方向放置的无限长圆柱体, 可以看成是 $a = b \ll c$ 的椭球, 所以有:

$$N_c = 0 \quad N_a = N_b = \frac{1}{2} \quad (1-29)$$

一块无限薄片, 可以看作是 $a = d \rightarrow \infty$ 的椭球, $N_a = N_b = 0$, 若垂直于薄片平面磁化, 则

$$N = 1 \quad (1-30)$$

在磁性研究中, 常常要碰到非均匀磁化的物体, 例如圆柱形样品, 它的各点的退磁因子并不是常数。即使将它放在均匀磁场中, 它的磁化也是不均匀的。其内部各点的磁化强度的大小和方向均不相同。当外磁场变化时, 物体内部各点的磁化强度的变化也不成比例, 所以式(1-26)也不适用。非均匀磁化样品的退磁因子, 一般来说不可能由计算得出, 只能用实验方法求出。表 1-4 中给出了沿纵轴磁化的完整圆柱体的退磁因子 N 与 L/D 的关系 (L ——圆柱体长度, D ——圆柱体直径)。

从表 1-4 可以看出: 物体越长, 退磁因子越小, 也就是说, 沿外磁场方向伸长的物体的磁特性和形状的关系很小。圆环形样品作为一个特例, 其退磁因子为零。

表 1-4 圆柱体的退磁因子 [用 SI 单位, 须乘上 $\frac{1}{4\pi}$]

尺寸比 L/D	N (C.G.S 单位)	尺寸比 L/D	N (C.G.S 单位)
0	$12.57 = 4\pi$	50	0.162
1	3.4	100	0.0045
2	1.8	200	0.0011
5	0.50	500	0.00017
10	0.216	1000	0.000045
20	0.0776	2000	0.000011

1.6 磁测量的基准和基本方法

一、磁量具

磁测量和所有其它测量一样,应有几种基本量具作为测量的基准,并且还应有复制和传递量值的基本方法。否则磁测量将失去计量学价值。

磁量具可以分成:磁通量具、磁感应量具和磁矩量具。磁性材料的标准试样也是磁量具,它是一种表征磁性材料磁特性量值的量具,具有一定的磁性能并有确定的精度。

测量恒定磁通的量具是已知线圈常数的磁通线圈和带有测量线圈的永久磁铁。测量交流磁通仅用磁通线圈作为磁量具。所谓线圈常数就是线圈截面积 A 与匝数 N 的乘积,对于多层线圈,这个乘积只能用精密测量的办法来确定。

磁感应量具有螺线管、组合线圈、电磁铁和永久磁铁。

线圈常数是螺线管和组合线圈的基本参数,在 SI 单位制中,等于绕组通过 1 安电流时所产生的磁感应强度 B_0 [T]。

亥姆霍兹线圈是应用最广泛的一种弱磁感应量具。在制造工艺严格符合理论要求的情况下,单层绕组的亥姆霍兹线圈常数的计算误差为 $\pm 0.001\%$ 。

能产生较强磁场的螺管线圈的常数,可以用实验或计算办法确定,但要达到很高的精度却很困难。

电磁铁和永久磁铁作为磁感应量具,一般都由质子核磁共振来确定磁感应 B_0 的量值,其误差为 $\pm 0.001\% \sim 0.01\%$ 。

磁矩量具可以用永久磁铁或通有电流的线圈来充当。将永久磁铁做成尺寸比例不同的椭球形或圆柱形,每种形状都有一个确定的磁矩量值。通电流线圈,其磁矩的量值为,

$$m = iK_{AN}$$

式中, i 为电流, K_{AN} 为线圈常数。

二、磁测量的基本方法

从科学的观点来说,测量方法应以测量所依根的基本物理现象来命名。但是由于习惯的原因,很多测量方法仍以所使用的测量仪器来命名,如冲击法、Q 表法、电桥法等等。

而测量仪器的命名大体上又可分为两种情况,一些仪器的命名反映了被测量的物理本质,如电流表、温度表等等;另一些仪器的命名通常用具有固定单位名称的单位来称呼仪器,如安培计、伏特计等等。依此习惯,则磁通表就应称之为韦伯计。而测量磁感应的仪器也可称之为特斯拉计。显然,后一种命名法不便于人们根据被测物理量去选择仪表。

由于测量仪器的命名存在着某些混乱,所以对于有些测量方法若以仪器名称来命名,就不可能反映测量方法的物理本质。磁测量方法按测量原理来区分,大体上可以分为五类:

- (1) 力和力矩法;
- (2) 电磁感应法;
- (3) 磁传输效应法;