

电子技术培训教材

培训教材

磁性材料及器件测量

电子元器件专业技术培训教材编写组

及器件测量

71.06



电子工业出版社

电子技术培训教材编写组

71.06



电子工业出版社

内 容 简 介

本书共分七章，讲述了磁性材料基本参数的测量，软磁、永磁、旋磁材料参数的测量，典型器件实用参数以及单晶器件的测量。书中结合实例，具体说明了测量原理、方法、步骤、计算过程和仪器仪表的使用。

本书作为从事磁性材料及器件生产的工人培训教材，也适用于有关科技人员阅读。

磁性材料及器件测量

电子元器件专业技术培训教材编写组

责任编辑 宋玉升

*

电子工业出版社出版发行（北京市万寿路）

山东电子工业印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：7.8125 字数：175.5千字

1984年8月第1版 1984年12月第1次印刷

印数：4000册 定价：1.30元

统一书号：15290·80

出版说明

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，提高电子工业职工技术素质，按照电子工业部的统一分工，参照部颁《电子工业元器件、机电组件、电表专业工人初级技术理论教学计划、教学大纲》并考虑到企业管理现代化对管理干部的要求，由电子工业部元器件工业管理局组织有关单位编写了《磁学知识》、《铁氧体工艺》、《永磁合金工艺》、《磁性材料及器件测量》、《实用电子陶瓷》(上、下册)、《电阻器与电位器》、《微电机原理及工艺》(上、下册)、《电声器件》、《电子敏感元件》、《继电器技术基础》、《接插件工艺学》、《电容器》、《压电石英晶体及元器件》、《化学电源》(上、下册)和《物理电源》共十八册专业技术培训统编教材。这套教材可作为电子工业工人的技术培训和管理人员的业务进修用书，也可作为技工学校、职业高中的教材和中等专业学校的参考书。

这套教材由董元昌、王乃增、陈兴信、刘联宝、杨臣华、张熙、池玉清、展发祥、张志远、丁光未、焦桐顺、王志昌等同志组成编委会，负责组稿和技术协调。董元昌同志任主任，王乃增、张志远、丁光未同志任副主任。在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业职工技术培训的需要，文字叙述上简明扼要，通俗易懂。但由于电子元器件和机电组件门类杂，专业多，涉及科学技术知识十分广泛，加之时间仓促，书中难免有不足之处，恳切希望广大读者提出宝贵意见。

《磁性材料及器件测量》是由夏先友、刘治安、魏启娟、马永昌同志负责编写，全书由北京大学物理系周增均同志修改，798厂张业万同志担任主审。

电子工业部元器件工业管理局
技术培训教材编委会

目 录

第一章 磁性测量的基本问题	1
第一节 引言	1
第二节 测量方法的分类	2
第三节 基本物理量的单位及量纲式	3
第四节 测量样品的选择	5
第五节 样品中性化	7
第六节 测量误差的基本概念	8
第七节 数据处理及公式	14
小 结	17
复习题	17
第二章 磁性材料基本参数测量	18
第一节 饱和磁化强度 M_s 的测量	19
第二节 居里温度 T_c 的测量	33
第三节 电阻率 ρ 的测量	37
第四节 密度 D_m 的测量	40
第五节 磁致伸缩系数的测量	43
第六节 磁各向异性常数 K 的测量	47
复习题	51
第三章 磁性材料静态特性参数的测量	52
第一节 冲击法	52
第二节 磁通计法	65
第三节 自动测量法	67
复习题	70
第四章 磁性材料动态特性参数测量	71
第一节 引言	71

第二节	交流弱磁场下磁特性测量	72
第三节	交流强磁场下磁特性测量	110
第四节	交流磁化曲线的测量	120
第五节	记忆磁芯特性的测试	127
复习题		133
第五章	永磁材料及元件参数的测量	135
第一节	永磁材料静态特性参数	135
第二节	磁场的产生和磁化装置	139
第三节	测量样品的要求	146
第四节	永磁材料静态参数的测量	147
第五节	稀土钴永磁材料的测量	161
第六节	永磁产品的快速检验	165
小 结		168
复习题		168
第六章	旋磁材料及器件参数测量	170
第一节	不均匀区与等效网络	171
第二节	二端口隔离器与散射网络参量	174
第三节	网络衰减与网络插入损耗	176
第四节	晶体检波器	179
第五节	低功率隔离器与环行器参数的测量	184
第六节	扫频法测量旋磁铁氧体器件	195
第七节	铁磁共振线宽 ΔH 和有效 g 因子的测量	199
第八节	介电常数 ϵ 和 $\text{tg}\delta$ 的测量	204
第九节	有效线宽 ΔH_{eff} 的测量	209
小 结		216
复习题		218
第七章	YIG 调谐器件参数测量	219
第一节	引言	219
第二节	调谐方式	220

第三节	YIG调谐带通滤波器的测量	221
第四节	YIG振荡器主要参数及一般含义	233
第五节	YIG振荡器性能的测量	235
附表:	国际单位制SI与CGS制的换算关系	242

第一章 磁性测量的基本问题

第一节 引言

一、磁性测量的意义

所谓测量，是指在一定条件下按一定度量单位去确定被测参量的数值和参量间的定量关系。测量，是人们认识和改造自然的重要手段，不论是科学技术部门还是生产部门，都离不开测量。没有适当的测量方法和测量仪器，科学研究，生产建设工作就无法进行。

磁性材料及器件参数的测量，统称磁性测量。磁性测量已发展成为电子测量分支的独立学科。今天，磁性元器件能在近代技术中广泛应用，从某种意义上说是与磁性测量技术的发展分不开的。当然，科学技术本身的进步又给磁性测量技术的发展和完善创造了有利条件，如静态或动态磁滞回线、磁化曲线自动记录仪就是一个例证。由于电子技术发展十分迅速，自七十年代初期开始，出现了电子计算机技术与电子测量仪器相结合的一代崭新的测量仪器，如微波网络分析仪就是一种精度高、速度快、多功能、自动修正误差、自动显示的测量设备。因此，电子计算机技术与电子测量技术相结合，成为八十年代磁性测量技术发展的重要方向。

二、磁性测量的特点

1. 频率范围宽

磁性测量的频率范围从零(直流)到数百万兆赫以上。在不同频率范围内,不仅被测的磁性材料及器件种类不同,参数不同,而且采用的测量方法和使用的仪器也不同。

2. 参数多

磁性材料及器件在不同频率下,乃至不同的磁化条件下,磁特性和磁效应是不同的,相应地表征它们的特性参数也很繁多。

3. 与磁性材料的结构和磁化过程有关

这一点使得磁性测量具有独特性。

磁性测量的内容很多,大致可分如下几类:

- (1) 磁性材料的基本磁性参数测量;
- (2) 磁性元器件参数测量;
- (3) 磁性材料相应物理量测量;
- (4) 磁性材料物理化学分析;
- (5) 磁性材料的磁结构磁效应的观察研究;

本课程的主要任务是学习有关磁性测量的基本原理、方法和常用仪器的使用知识,侧重点是铁氧体磁性材料的基本参数、静态特性参数的测量,软磁、永磁材料及典型元器件参数的测量。关于(4)、(5)两点我们不准备涉及。由于实际的待测参数和测量方法较多,我们只能选择其中最基本的来分析,还有更多的尚未提到。对于有关的测量仪器,我们只介绍其组成方框图,对具体电路一般不作讲述。

第二节 测量方法的分类

测量方法分为直接测量和间接测量两大类。

一、直接测量

由已知标准量定度好的测量仪器或样品，对某一未知量直接进行测量，得出未知量的数值。这类测量称为直接测量或叫比较测量。

二、间接测量

不是直接测量被测参数，而是测量与被测量有一定函数关系的其它物理量，然后根据测得的物理量数值，通过代表该函数关系的公式、曲线求出被测量。这类测量称为间接测量。

第三节 基本物理量的单位及量纲式

一个物理量通常包括两个方面：一个是数值（绝对值大小及其符号），一个是单位。单位分基本单位和导出单位。为了科学技术的交流和发展，国际上制定了一种通用的单位制，代号为 SI。

1984 年 2 月 27 日我国国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，在我国全面推行法定计量单位。我国的法定计量单位包括：国际单位制的基本单位；国际单位制的辅助单位；国际单位制中具有专门名称的导出单位等。表1-1列举出基本单位的名称和符号。

由基本量根据有关公式推导出来的其它物理量叫做导出量，导出量的单位叫做导出单位。所以物理量可分为基本量和导出量，而导出量又可以从基本量导出，所以每个物理量就可以用基本量的某种组合表示出来。量 Q 的量纲则表示为量纲积：

dimQ = A 'B C

表1-1 国际单位制的基本单位

量 的 名 称	单 位 名 称	单 位 符 号
长 度	米	m
质 量	千克(公斤)	kg
时 间	秒	s
电 流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物 质 的 量	摩尔	mol
发 光 强 度	坎德拉	cd

式中 A,B,C,... 表示基本量 A,B,C,... 的量纲,而 $\alpha,\beta,\gamma,\cdots$ 则称之为量纲指数。所有量纲指数都等于零的量,称为无量

表1-2 常用物理量的单位及量纲式

物理量及符号	单位名称	单位符号	用SI基本单位表示	量 纲 式
磁场强度 <i>H</i>	安培每米	A/m	$A\cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$
磁感应强度 <i>B</i>	特斯拉	T	$kg\cdot S^{-2}\cdot A^{-1}$	$MT^{-2}I^{-1}$
磁通量 Φ	韦伯	Wb	$kg\cdot m^2\cdot S^{-2}A^{-1}$	$L^2MT^{-2}I^{-1}$
磁化强度 <i>M</i>	安培每米	A/n	Am^{-1}	$L^{-1}I$
电感 <i>L</i>	亨利	H	$m^2\cdot kg\cdot S^{-2}A^{-2}$	$L^2MT^{-2}I^{-2}$
磁导率 μ	亨利每米	H/m	$m\cdot kg\cdot S^{-2}\cdot A^{-2}$	$LMT^{-2}I^{-2}$
磁能积 <i>w</i>	焦耳每立方米	J/m ³	$m^{-1}\cdot kg\cdot S^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$
电阻 <i>R</i>	欧姆	Ω	$m^2\cdot kg\cdot S^{-3}\cdot A^{-2}$	$L^2MT^{-3}I^{-2}$
电容 <i>C</i>	法拉	F	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot S^4\cdot A^2$	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$

纲量，其量纲积或量纲为 $A^{\alpha}B^{\beta}C^{\gamma}\cdots = 1$ 。

例如：若以 L 、 M 、 T 分别表示三个基本量：长度、质量、时间的量纲，功的量纲则表示为 $\dim W = L^2MT^{-2}$ ，其量纲指数为 2，1 和 -2。

磁测量常用物理量的单位及量纲式如表1-2所示。

第四节 测量样品的选择

在磁性测量中，人们希望能测出磁性材料本身的特性，而不希望测试数据受到样品形状的影响。但是，这些参数必须通过具有一定形状的磁性样品来测得，因此如何选择合适的样品形状求得准确的磁性材料参数，是必须考虑的一个问题。其中较为关键的两个问题是样品的去磁因子与样品中磁场的均匀性。目前，测量铁氧体磁性材料参数所采用的样品有三种：环形、圆柱形和球形。

一、环形样品

有绕组的环形磁芯如图1-1所示。

环形磁芯样品是闭合磁路，在理想状态下磁化时没有漏磁通，而且没有去磁场存在。设环的内外径为 R_1 、 R_2 ，绕组匝数为 N （且均匀地分布在环形样品上），通过绕组的电流为 I （安），那么磁场强度 H 可写成：

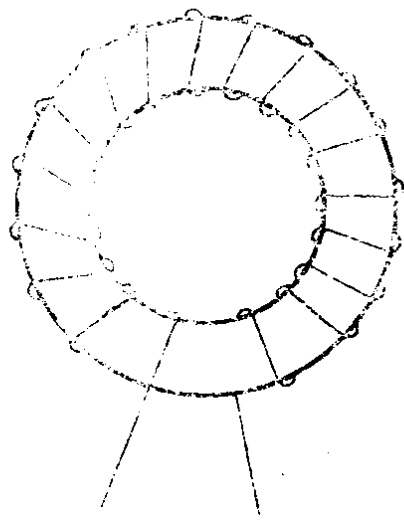


图 1-1 有绕组的环形磁芯

$$H = \frac{NI}{L} = \frac{NI}{2\pi R} \quad (\text{安/米}) \quad (1-1)$$

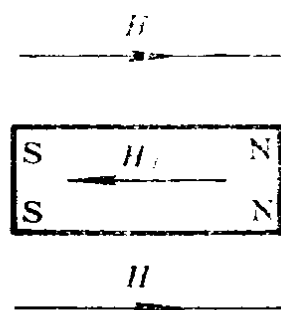
显然，沿圆周方向的磁场分布是均匀的，但在半径方向上，磁场强度是不均匀的，而是随半径的增大逐渐下降，这是因为半径方向上各点的线圈匝数密度不同的缘故。所以，一般均采用平均半径，即计算环内平均磁场强度时的平均半径：

$$\bar{R} = R_2 - R_1 / \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1-2)$$

将式(1-2)代入(1-1)即得样品环内的平均磁场强度。

二、圆柱形样品

有绕组的环形样品，不便于更换，而且绕组产生的磁化场上限也较低，不适于高矫顽力材料的测量。一般永磁材料



图中 H 为外场 H_d 为退磁场

图 1-2 圆柱形去磁场示意图

参数的测量采用开路形式的圆柱形样品，它加工方便，能放入适合测量要求的任何磁化装置中，而且更换容易。但是样品磁化后，圆柱形两端可能产生如图 1-2 所示的磁极。这磁极产生的场叫退磁场 H_d 。退磁场的方向是从N到S极，与外场 H 对物体磁化的方向相反，使样品内磁化变弱。

H_d 可用下式表示

$$H_d = NM \quad (1-3)$$

样品内部磁场强度

$$H_i = H - H_d \quad (1-4)$$

N 是与样品形状、尺寸有关去磁因子， M 是样品的磁

化强度。影响 N 的因素较复杂。

当圆柱形样品处于近似闭合磁路时，样品两端不可避免地因接触部分不平整而造成的空隙。这个空隙也可认为是存在着去磁因子，因此对圆柱形样品的端面需要加工，使之平整。由于开路样品有 H_d 存在，所以开路样品的磁化强度必然要比闭合样品的磁化强度低。但实验表明，开路样品的矫顽力与材料的矫顽力是相等的，二者并无差别。

三、球形样品

球形样品各个方向的去磁因子相同，即

$$N_x = N_y = N_z = \frac{1}{3} \quad (1-5)$$

球形样品主要用于测量材料的 M_s 、 Q_f 值和微波频段下的铁磁共振线宽 ΔH 值等。

第五节 样品中性化

铁磁材料在磁化过程中含有不可逆磁化部分，它的磁特性与原始磁化状态有很大关系。同一样品所经历的磁化历史不同，可以出现不同的磁状态，显然，在不同的磁状态下测量某些参数（如软磁材料的 μ_i 、 $\text{tg}\delta$ 值）是毫无意义的。当外场 $\vec{H} = 0$ 时，样品的磁化强度的状态叫作磁中性状态。达到中性状态的过程称为磁中性化。磁中性化的方法很多，从磁性测量要求出发，普遍采用动态磁中性化。要获得良好的测量结果，必须注意以下几点：

（1）退磁时，退磁场要强，一般为材料矫顽力 BH_c 的 5~10 倍，甚至 20~40 倍；

(2) 退磁场方向每改变一次，幅值下降的相对比率不能太大，一般不大于20%；

(3) 退磁场方向改变的次数不宜过多，一般十来次就够了，否则因磁滞现象使样品发热，导致温度效应影响测量结果；

(4) 交变磁场退磁的频率不宜过高。

精确的测量可采用自动线性减幅器，或用指数率减幅的功率信号源进行磁中性化。

第六节 测量误差的基本概念

一、测量误差

利用任何量具或仪器进行测量，总存在着误差，统称测量误差。测量结果总不可能完全达到被测量的真值，而是它的近似值。所谓真值是指在一定的时间及空间条件下，一个物理量的真实数值。误差分析极其重要，但又较复杂，此节主要讲述测量误差的基本概念，以便对误差有一个初步认识。

(一) 绝对误差

设被测某物理量的真值为 x_0 ，仪器或量具的示值为 x ，于是绝对误差等于

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-6)$$

由于 x_0 一般无法求得，故式(1-6)只有理论上的意义。示值是指被测量的数值。有时读数和示值在数字上相同，但通常还需要把读数经过简单的计算、查曲线或数表才能得出示值。在实际工作中，常用高一级标准仪器或量具的示值来代替真值。一般而言， x_A 总比 x 更接近于 x_0 ，于是

$$\Delta x = x - x_A \quad (1-7)$$

通过检定，可以由高一级标准给出受检仪器或量具的修正值 c ，那么

$$x_A = x + c \quad (1-8)$$

式 (1-8) 是一个代数式，而 c 也可能是一条曲线、公式或数表。

(二) 相对误差

为了说明测量精确度的高低，常采用相对误差的形式。

1. 示值相对误差 绝对误差 Δx 与示值 x 的百分比值表示相对误差，记为

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-9)$$

2. 满度相对误差 用绝对误差 Δx 与仪器的满度值 x_m 之比来表示满度相对误差，记为

$$\delta m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-10)$$

电工仪表是按满度相对误差 δm 之值来进行分级的，分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0 七个等级。例如 0.5 级表明 $\delta m \leq 0.5\%$ ，并在仪表面板上标以 0.5 的符号。因此，为了减少测量中的示值误差，在选择量程时应使指针尽可能接近于满度值。一般最好能工作在不小于满度值 $2/3$ 以上的区域。

(三) 容许误差

是指根据技术条件，规定某一类仪器的误差不应超过的最大范围，并不是指某一确定仪器的实际误差。通常技术说

明书上所指的误差都是容许误差。

二、测量误差的主要来源

测量误差实际上是测量仪器、测量辅助设备、测量方法、外界环境、操作技术等因素共同作用的结果。

(一) 仪器误差

是指仪器本身电气或机械等性能的不完善而产生的，主要包括：

1. 刻度误差

批量生产的测量仪器一般都采用统一的刻度盘。由于每一台仪器的特性不完全相同，故在非标准点就有可能引起不同程度的误差。图1-3表示某类仪器刻度误差可能出现的情况。图中①、②、③表示同类型的三台仪器的刻度值 θ 与频率变化的函数关系曲线。 θ_1, θ_2 表示在频率 f_1, f_2 下的校准点。如果①是规定的函数关系，那么②和③就是刻度的非线性误差。

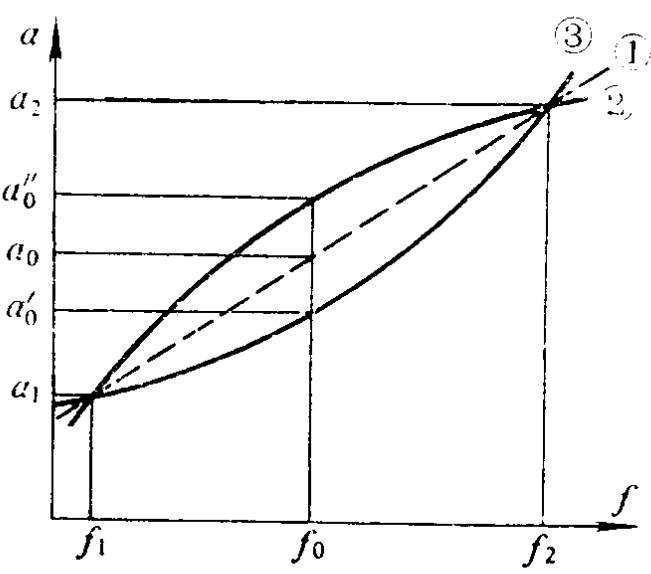


图 1-3 刻度误差

点。如果①是规定的函数关系，那么②和③就是刻度的非线性误差。

2. 读数分辨率不高导致的误差

这是指仪器仪表能读出被测量的最小变化量。例如0.5级与1.5级电流表，显然0.5级比

1.5级的读数分辨率高。但不适当地提高仪器分辨率也不好，