

磁 测 量 技 术

238

中国计量科学研究院
重庆仪表材料研究所

毛主席语录

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

目 录

硬磁材料测量装置和方法的研究.....(1)

软磁材料直流磁性测量方法的研究.....(37)

弱场下软磁材料的磁化与起始磁导率 μ_0 的确定.....(71)

关于硅钢片磁性测量方法的研究

 I. 交流损耗.....(83)

关于硅钢片磁性测量方法的研究

 II. 磁化曲线.....(126)

纯铁矫顽力测量方法的研究.....(146)

用古依法绝对测量顺磁、抗磁物质磁化率的误差

 分析.....(165)

硬磁材料测量装置和方法的研究

中国计量科学研究院电磁室磁测组

1. 引言

硬磁（也称永磁）材料在仪器仪表制造部门被广泛大量地应用。解放以来我国硬磁材料的研究和生产已取得很大的进展。但是，为了适应科学技术日益发展的需要，必须生产品种更多性能更好的硬磁材料。这样，解决这些材料基本磁性的准确测试就成为重要的课题了。

近年来，国内许多研究、生产和使用硬磁材料部门，都相应地进行了测试工作。但是，由于设备和方法上还存在不少的问题，同一样品在不同单位测量，结果往往差别甚大，无法正确评定材料的磁性。

一九五九年一机部曾以北京电器科学研究院为首拟定了“永磁测量暂行标准规程（草案）”。但是其本身还不够完善，所以并未得到真正的推行。硬磁材料的测试目前仍较为混乱。

因此从计量工作的角度出发，建立硬磁材料标准样品检定装置，对硬磁材料测试工作进行监督和统一已经是十分必要和迫切的任务了。

根据这种需要，考虑到冲击法的准确可靠和比较方便以

* 此项工作系 1965 年完成

及使用的广泛，同时国内已生产供硬磁材料测试用的成套的冲击装置，因此利用冲击法建立标准装置是适宜和现实的。实际上世界上各主要国家、如英、美、苏、日等在硬磁材料的国家标准中均采用冲击法进行磁性测量。

根据计量工作十年规划，对硬磁材料基本磁性测量结果误差的要求是： B_r 接近 $\pm 1\%$ ， H_c 接近 $\pm (1-2\%)(B \cdot H)_{\max}$ 接近 $\pm (2-3\%)$ 我们在国产CC₂型冲击装置基础上，完成了达到上述指标的硬磁材料标准样品检定装置的研究，特提出如下的报告。

2. 装置的结构和原理

2.1. 装置的概述

装置的测量线路图如（图1）所示。

2.2. 装置的主要技术特性：

（1）在室温 $20^\circ \pm 5^\circ \text{C}$ ，相对湿度不超过70%的条件下使用。可以测定下述磁性：

序号	磁性名称	采用符号	备 注
1	矫 顽 力	H_c	$H_c < 1500$ 奥
2	剩 余 磁 感应强度	B_r	
3	退磁曲线	$B=f(H)$	从而求得 $(B \cdot H)_{\max}$

（2）标准样品尺寸和加工要求：尺寸：

当 $H_c < 1000$ 奥时取 $\phi 10 \times 50\text{mm}$ 或 $10 \times 10 \times 50\text{mm}$ ；

当 $H_c > 1000$ 奥时，建议暂取 $\phi 10 \times 20\text{mm}$ 或 $10 \times 10 \times 20\text{mm}$

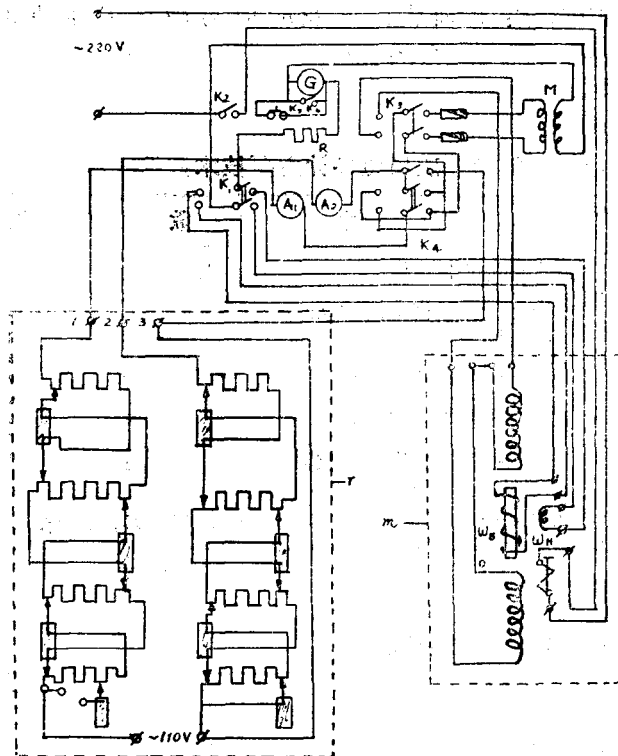


图1. 装置线路图

其中G: AC4/3型冲击检流计;

A_1, A_2 : C4/2型0.2级多量程安培计;

M: BH2/1型0.2级标准互感线圈;

R: 旋钥式六档电阻箱;

K_1 : 接通测量线圈的水银开关;

K_2 : 继电器电源开关;

K_3 : 接通磁导计或互感线圈的转换开关;

K_4 : 磁化电流控制开关;

K_5 : 检流计阻尼电键;

K_6 : 检流计锁住开关;

W_B : 测量磁感应强度B值线圈;

W_H : 测量磁场强度H值线圈;

O: 被测样品;

m: 磁导计(地峡型);

r: 电流调节装置。

加工要求：端面平行度及端面与轴线的垂直度为0.05mm；表面光洁度为 $\nabla\nabla 6$ 。

(3) 地峡型强磁场磁导计主要技术数据：

序号	名 称	数 值
1	最大允许磁化电流	12安
2	相应于最大磁化电流12安时磁场强度	
	当极间距离为50毫米时	≥ 5000 奥
	当极间距离为25毫米时	≥ 7500 奥
3	磁场强度测量线圈常数 (WS) _H	269厘米 ²
4	外形尺寸	85×80×140厘米

(4) 电流调节装置

序号	名 称	数 值
1	额定输入电压 (直流)	110 伏
2	电流调节范围	
	a) 附标号6A的滑轮	0.1—6安
	b) 附标号 12A 的滑轮	0.2—12 安
3	外形尺寸	110×60×110厘米

(5) 操纵台

序号	名 称	数 值
1	使用时C4/2型仪表的运用范围	
	a) 标值6A (A_2)	0.03—7.5 安
	b) 标值12A (A_1)	0.03—12安
2	安培计的准确度等级	0.2
3	电阻箱的额定值	0.1—99999.9欧
4	外形尺寸	140×80×90 厘米

(6) BH2/1型标准互感线圈

序号	名 称	数 值
1	互感系数额定值	0.01亨
2	最大允许工作电流	1 安
3	准确度等级	0.2

(7) AC4/3 型冲击检流计

序号	名 称	数 值
1	电流常数 (安培/毫米/米)	$\approx 1.10^{-9}$
2	电压常数 (伏特/毫米/米)	$\approx 2.10^{-6}$
3	冲击常数 (库伦/毫米/米)	$\approx 1.10^{-8}$
4	外临界电阻 (欧)	1400
5	自由振动周期 (秒)	24

(8) 主观读数装置

序号	名 称	数 值
1	读数标尺长 (毫米)	1500
2	读数标尺最小分度 (毫米)	1
3	照明灯泡电压 (伏)	220
4	读数望远镜 (放大率)	1.59倍
5	读出精度 (毫米)	0.2

(9) 电源数据

序号	名 称	数 值
1	磁化线路供电电压 (伏) (直流)	110
2	电源 (蓄电池组) 容量 (安·时)	≈500
3	磁场测量线圈甩脱装置继电器 电源电压 (伏)	220
4	磁场测量线圈甩脱装置最大需 用功率 (伏安)	6

2.3. 工作原理

1. 冲击法原理:

本装置利用冲击法测量硬磁材料的 B_r 、 H_c 和退磁曲线 (从退磁曲线上求得 $(B \cdot H)_{\max}$)。实际上就是利用冲击检流计测量磁通。

用冲击法测量磁通的原理, 是借助于冲击检流计测量在测量线圈内当被测磁通发生变化时感生的电量, 然后由这个电量与被测磁通变化量的关系计算得到被测磁通。

由检流计理论可知，这个电量 Q 与磁通变化量 $\Delta\Phi$ 有如下的关系：

$$Q \cdot r = W \Delta\Phi \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

这里 r —检流计回路的总电阻，欧姆；

Q —磁通变化的时间内流经检流计的总电量，库伦；

$\Delta\Phi$ —磁通变化量，麦克斯韦；

W —测量线圈的匝数。

当磁通变化时间很短或其与检流计周期相比很小时，检流计偏转与这个电量有如下的关系：

$$Q = C'_\delta \cdot \alpha \quad (2)$$

这里 C'_δ —检流计的冲击常数，库伦/毫米；

α —检流计的冲击偏转，毫米。

于是，由(1)、(2)式得到：

$$\Delta\Phi = \frac{C'_\delta \cdot r}{W} \alpha \cdot 10^8 \quad (3)$$

在实际测中可以认为检流计回路总电阻不改变。因此，实际上 $C'_\delta \cdot r \cdot 10^8$ 也是常数，令 $C_\delta = C'_\delta \cdot r \cdot 10^8$ ，实际上， C_δ 就是检流计以磁通分度的冲击常数，即单位为麦克斯韦/毫米。于是得到：

$$\Delta\Phi = \frac{C_\delta \cdot \alpha}{W} \quad (4)$$

冲击常数 C_δ 可以借标准互感线圈测定，即

$$C_\delta = \frac{M \cdot \Delta I}{\alpha_\delta} \cdot 10^8 \text{ (麦/毫米)} \quad (5)$$

这里 M —互感系数，亨利；

ΔI —电流改变量，安培；

α_s —电流改变时检流计的冲击偏转，毫米。

由此可见，测定冲击常数由检流计的冲击偏转即可得到被测磁通变化量。

如果这个磁通变化对应于磁场强度的改变，例如，将测量线圈从被测场内抽出，那末，

$$\Delta\Phi = \mu HS^* \quad (6)$$

这里 μ —空气磁导率，近似等于 1；

H —被测磁场强度，奥；

S —测量线圈的横截面积，〔厘米〕²。

于是可由(4)式计算得到被测磁场强度，即

$$H = \frac{C_s^H \cdot \alpha_H}{(WS)_H} \text{ (奥)} \quad (7)$$

这里 $(WS)_H$ 是测量 H 值线圈截面积与匝数之乘积，称为常数，可以直接测得。

同样，如果磁通变化是对应于磁感应强度变化，则可由(4)式求得磁感应强度 B ，即

$$B = \frac{C_s^B \cdot \alpha_B}{(WS)_B} \text{ (高斯)} \quad (8)$$

这里 $(WS)_B$ 是测量 B 值线圈的匝数与样品截面积的乘积。 W 可以数得，而 S 则可用某一方法测得，例如对于规则的圆棒或方柱体，可用千分尺测量（计算）得到。

(2) 退磁曲线 $((B \cdot H)_{max})$ 和 B_r 、 H_c 的测量

硬磁材料的磁滞回线如图 2 所示。磁滞回线的第二象限 (B_r, AH_c 段) 一段称为退磁曲线。它是硬磁材料磁性的重要

* 假设测量线圈的轴向与被测磁场方向一致。

标志。尤其是这个曲线上的特殊点 B_r —剩余磁感应强度， H_c —矫顽力以及某一点（如 A ）对应的最大磁能积 $(B \cdot H)_{max}$ ，最有实际意义。

退磁曲线上每一点（如 A 点）的测量包括测量磁化场强度 H_A 及与它对应的磁感应强度 B_A 。

H_A 的测量是用置于表面上的测量线圈进行的。就是用一个专门的甩脱装置将测量线圈很快地抽出磁场之外。这样由检流计的偏转 α_{HA} 按 (7) 式计算得到 H_A 。

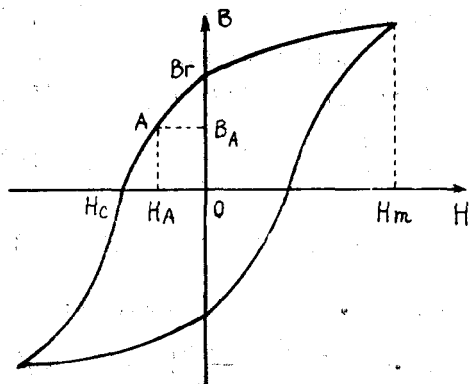


图2 硬磁材料的磁滞回线

B_A 的测量是这样进行：先将磁化电流调到最大 I_m （它对应于 $H_m \cong (5-7)H_c$ ），然后进行约 5 次来回反向 I_m 的磁性锻炼，在磁锻炼之后之电流由 $+I_m$ 变到 $-I_m$ ，观察检流计偏转 α_m ，然后再使电流由 $+I_m$ 变到 $-I_A$ （ I_A 对应磁场 H_A ），观察到检流计偏转 α_{BA} 。显然， B_A 应按下式计算：

$$B_A = \frac{C_{\delta}^B}{(WS)_B} \left(\frac{1}{2} \alpha_m - \alpha_{BA} \right) \quad (9)$$

其余各点依此类推。

由按上述方法得到的 H 和 B ，即可绘出退磁曲线。由此还可以很容易求得 $(B \cdot H)_{max}$ 。

B_r 的测量实际上与上述方法相同，如果 $I_A=0$ ，即对应 $H=0$ 时的 B 值则为 B_r 。

H_c 实际上是对应于 $B=0$ 时的磁场值。调节电流 I_A 使 $\frac{1}{2}\alpha_m - \alpha_B = 0$ ，此时电流 I_c 对应之磁场即为 H_c 。

但是，有时对应退磁曲线在靠近 H_c 附近很陡的材料而言，要找到 I_c 这一点是比较困难的，对于这种情况，可以找到两个电流值 I_c' 和 I_c'' ，使得它们对应之偏转 α_B' 与 α_B'' 都很靠近 $\frac{1}{2}\alpha_m$ ，但 $\alpha_B'' > \frac{1}{2}\alpha_m$ ， $\alpha_B' < \frac{1}{2}\alpha_m$ ，它们之间的差越小越好，最大也不要超过 $\frac{1}{2}\alpha_m$ 的5%。这样同时测得与 I_c' 和 I_c'' 对应的 α_H' 和 α_H'' ，则 H_c 可按下式计算：

$$H_c = \frac{C_d^H}{(WS)_H} \cdot \left[\alpha_H' + \frac{\frac{1}{2}\alpha_m - \alpha_B'}{\alpha_B'' - \alpha_B'} (\alpha_H'' - \alpha_H') \right] \quad (10)$$

3. 误差分析

测量结果的误差，按照它们产生的性质，我们可以分为基本误差和附加误差来讨论。所谓基本误差就是由计算公式中各量的测量误差所决定的结果累积误差；而附加误差就是由装置和测量中其他因素影响而产生的误差。

3.1. 基本误差的计算

(1) B 和 H 单独测量的误差

B 和 H 单独测量的误差, 由(7)和(8)式很容易得到:

$$\left| \frac{\delta B}{B} \right| = \left| \frac{\delta C_{\delta^B}}{C_{\delta^B}} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_B}{\alpha_B} \right| + \left| \frac{\delta S}{S} \right|, \quad (11)$$

$$\left| \frac{\delta H}{H} \right| = \left| \frac{\delta C_{\delta^H}}{C_{\delta^H}} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_H}{\alpha_H} \right| + \left| \frac{\delta (WS)_H}{(WS)_H} \right| \quad (12)$$

$$\text{或 } E_{OB} = \pm \sqrt{\left[\frac{\delta C_{\delta^B}}{C_{\delta^B}} \right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_B}{\alpha_B} \right]^2 + \left[\frac{\delta S}{S} \right]^2}, \quad (11)'$$

(均方根相对误差)

$$E_{OH} = \pm \sqrt{\left[\frac{\delta C_{\delta^H}}{C_{\delta^H}} \right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_H}{\alpha_H} \right]^2 + \left[\frac{\delta (WS)_H}{(WS)_H} \right]^2} \quad (12)'$$

式中 $\frac{\delta C_{\delta}}$ 为冲击常数的测量误差, 由(5)式得:

$$\frac{\delta C_{\delta}}{C_{\delta}} = \left| \frac{\delta M}{M} \right| + \left| \frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_{\delta}}{\alpha_{\delta}} \right| \quad (\text{最大相对误差}) \quad (13)$$

$$E_{Oc\delta} = \pm \sqrt{\left[\frac{\delta M}{M} \right]^2 + \left[\frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I} \right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_{\delta}}{\alpha_{\delta}} \right]^2}.$$

(均方根相对误差) (13)'

将(13)和(13)'式分别代入(11)、(12)和(11)'、(12)', 得到:

$$\left| \frac{\delta B}{B} \right| = \left| \frac{\delta M}{M} \right| + \left| \frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_{\delta^B}}{\alpha_{\delta^B}} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_B}{\alpha_B} \right| + \left| \frac{\delta S}{S} \right|, \quad (\text{最大相对误差}) \quad (14)$$

$$\left| \frac{\delta H}{H} \right| = \left| \frac{\delta M}{M} \right| + \left| \frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_{\delta^H}}{\alpha_{\delta^H}} \right| + \left| \frac{\delta \alpha_H}{\alpha_H} \right| + \left| \frac{\delta (WS)_H}{(WS)_H} \right|. \quad (15)$$

$$\text{或 } E_{OB} = \pm \sqrt{\left[\frac{\delta M}{M}\right]^2 + \left[\frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I}\right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_{\delta}^B}{\alpha_{\delta}^B}\right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_B}{\alpha_B}\right]^2 + \left[\frac{\delta S}{S}\right]^2} \quad (14)'$$

(均方根相对误差)

$$E_{OH} = \pm \sqrt{\left[\frac{\delta M}{M}\right]^2 + \left[\frac{\delta(\Delta I)}{\Delta I}\right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_{\delta}^H}{\alpha_{\delta}^H}\right]^2 + \left[\frac{\delta \alpha_H}{\alpha_H}\right]^2 + \left[\frac{\delta(W S)_H}{(W S)_H}\right]^2} \quad (15)'$$

在这里，我们用 0.2 级标准互感线圈， $\frac{\delta M}{M} = 0.2\%$ ；

用 0.2 级安培计，并且假设每次读数均在 100 分格以上的范围内进行（满刻度为 150 分格），测定电流的基本误差为 $\pm 0.3\%$ 。如果考虑调整指针的误差为 $\pm 0.1\%$ （即读准 0.1 分格），那么测定电流的总误差为 $\pm 0.4\%$ ；检流计偏转读数可以读准 0.2 毫米，并假定每次读数偏转在 100 毫米以上，

则测定冲击常数时 $\frac{\delta \alpha_{\delta}^B}{\alpha_{\delta}^B} = \frac{\delta \alpha_{\delta}^H}{\alpha_{\delta}^H} = \pm 0.2\%$ ；而测量 H 时

检流计偏转最小，一般不低于 50 毫米，故 $\frac{\delta \alpha_H}{\alpha_H} \leq \pm 0.5\%$ ，而

测退磁曲线上某一点 B 值时，一般 $\frac{1}{2} \alpha_m - \alpha_B$ 的数值不低于 50 毫米（对由 B 到最大磁能积一段而言），故

$$\frac{\delta(\frac{1}{2} \alpha_m - \alpha_B)}{\frac{1}{2} \alpha_m - \alpha_B} \leq \pm 0.5\%$$

样品的横截面积用0.01毫米千分尺测量，当直径或每边长等于10毫米时

$$\frac{\delta S}{S} \leq \pm 0.2\%$$

H 测量线圈的常数值，用磁通磁场强度标准比较装置进行检定，

$$\frac{\delta(W S)_H}{(W S)_H} \leq \pm 0.5\%$$

将上述数据分别代入(14)、(15)和(14)'、(15)'式，得

$$\frac{\delta B}{B} = \pm(0.2 + 0.4 + 0.2 + 0.5 + 0.2) = \pm 1.5(\%)$$

$$\frac{\delta H}{H} = \pm(0.2 + 0.4 + 0.2 + 0.5 + 0.5) = \pm 1.8(\%)$$

$$E_{OB} = \pm \sqrt{0.2^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 0.5^2 + 0.2^2} \\ = \pm 0.8(\%)$$

$$E_{OH} = \pm \sqrt{0.2^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 0.5^2 + 0.5^2} \\ = \pm 0.9(\%)$$

(2) 函数关系的测量和 H 及 $(B \cdot H)_m$ 的误差

由上面的计算我们得到了 B 和 H 单独测量时的基本误差。但是当我们评定测量退磁曲线的结果时，就牵涉到了 B 和 H 之间的函数关系。显然当我们评退磁曲线上某一点（在确定的磁场下的 B 值）结果时，由于有这种关系的存在， H 的测量误差必然影响 B 的数值，因此 B 的结果误差除了上述 B 值单独测量时的误差外，还应当包括由 H 的误差而产生的误差。根据 Е. Г. Шрамков 的讨论^[6] B 的总误差为

$$E'_{OB} = E_{OB} + \frac{\mu_d}{\mu} E_{OH} \quad (16)$$

其中 μ_d 和 μ 分别为该点的微分磁导率和通常磁导率。显然对应不同的点或不同的材料比值 μ_d/μ 是不同的。这个比值可由被试材料的标准或测得的退磁曲线上求得。

显然，磁能积的误差应是：

$$E_{O(B \cdot H)} = \pm \sqrt{E'_{OB}{}^2 + E_{OH}^2} \quad (17)$$

B_r 的误差仍可按(14)或(14)'计算，因为这时 $E_{OH}=0$ 。

由前述可知， H_c 的测量是由 $B=0$ 来判断的。因此实际上可以认为 H_c 是 B 的函数。那么同理， B 的测量误差也会影响 H_c 的测量结果。

我们设 $H_c=F(B)$ 、微分此式得：

$$dH_c = F'(B) dB \quad (18)$$

这里 $F'(B) = \frac{dH_c}{dB} = 1/\mu_d(H_c)$ ，即对应于 H_c 点的微分磁导率的倒数。而

$dB = d(B_m - \Delta B) = 2 \Delta B_m = 2 E_{OB_m} \cdot B_m$ 。所以 H_c 的总误差为

$$E'_{OH_c} = E_{OH_c} + 2 E_{OB_m} \cdot \frac{B_m}{\mu_d \cdot H_c} \quad (19)$$

这里 E_{OH_c} 是 H_c 单独测量的误差，按(15)'计算。但当 H_c 是按(10)式计算时， $\frac{\delta \alpha_H}{\alpha_H}$

$$\text{应当代以 } \frac{\delta \left[\alpha'_H + \frac{\frac{1}{2} \alpha_m - \alpha'_B}{\alpha''_B - \alpha'_B} (\alpha''_H - \alpha'_H) \right]}{\left[\alpha'_H + \frac{\frac{1}{2} \alpha_m - \alpha'_B}{\alpha''_B - \alpha'_B} (\alpha''_H - \alpha'_H) \right]}.$$

然而，显然这一项误差主要取决于 α_H' 项，