

化。也就是说, 电流计的活动线框在脉冲电流终止之前就开始运动。若要将由磁通非瞬时变化而产生的误差限制在 $0.2 \sim 0.3\%$, 则第一次最大偏转所需的时间 t_1 应大约比电流脉冲时间大 10 倍。但是由于在电流计测量回路中电感 L 很大, 以至回路的时间常数 ($\tau = L/r$, r 为回路总电阻) 也十分大。若认为时间常数是 0.5s (这相当于实际上遇到的数值), 则第一次偏转时间 t_1 不应小于 5s , 这个时间是由工作状态和自由振荡周期所决定的, 在临界状态下, 可以认为: $t \approx 0.2T$, 所以, 对于我们所提出的条件, 电流计的自由振荡周期不应小于 25s 。在磁性测量中, 一般都采用 $T = 15 \sim 60\text{s}$ 的电流计。这是问题的主要方面。

AC4/3 和 AC4/4 是应用得比较广泛的冲击电流计。它们的共同特点是: 具有比较小的内阻、比较大的电流灵敏度和比较大的自由振荡周期, 还具有可以调节灵敏度的磁分路。调节磁分路, 可以同时改变磁通灵敏度和外临界电阻的数值, 以适应不同测量的需要。当磁分路引入时, 外临界电阻将减小, 磁通灵敏度也降低。当磁分路引出时, 则会得到相反的结果。

三、冲击常数的测定

冲击电流计的冲击常数 C_Φ , 通常用互感线圈来测定, 互感线圈是互感系数 M 已知的标准磁通量具。图 4-3 是测量冲击常数的电路。

利用换向开关 K_1 , 使互感线圈初级回路的电流发生瞬时改变 ΔI , 则在次级回路里

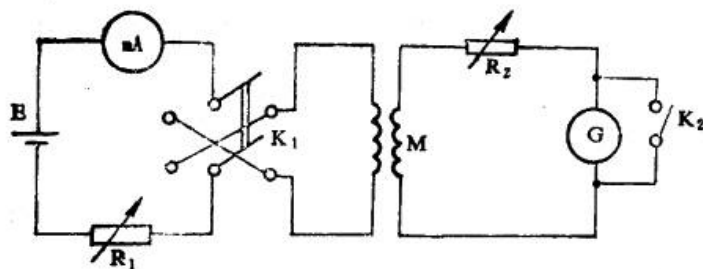


图 4-3 冲击常数的测量电路

就感应一个电动势 $\epsilon = -M \frac{dI}{dt}$ 。 i 、 R 和 L 分别表示次级回路的电流、电阻和电感, 则:

$$M \frac{dI}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (4-23)$$

将式 (4-23) 积分, 得到:

$$M\Delta I = RQ$$

若已知此时电流计的偏转 α_m , 则电量灵敏度为:

$$S_Q = \frac{\alpha_m}{Q} = \frac{R}{M \cdot \Delta I} \cdot \alpha_m \quad (4-24)$$

由式 (4-21) 可得冲击常数

$$C_\Phi = C_Q \cdot R = \frac{1}{S_Q} \cdot R = \frac{M\Delta I}{\alpha_m} \quad (4-25)$$

式中, M 的单位为 H , I 的单位为 A , C_Φ 的单位为每分格韦伯。在 CGS 单位制中, 冲击

常数为:

$$C_\phi = \frac{M \Delta I}{\alpha_m} \times 10^8 \quad (4-26)$$

C_ϕ 的单位为每分格麦克斯威。这里由于采用了电流换向法, 所以 ΔI 的值实际上应该是电流表读数值 2 倍。 α_m 的读数以电流计读数标尺的最小分格为单位。

4.2 冲击法测量环形软磁试样的磁特性

本节要讨论的是用“换向冲击法”测量环形、框形样品的静态磁化曲线(技术磁化曲线)和磁滞回线的线路装置和测量技术。

一、测量环形试样的基本线路

冲击法的测量原理电路如图 4-4 所示。这是一个原理线路。在磁性测量中, 随着测量对象和测量条件的不同, 实验线路可能还会有一些微小的变化。为此, 在这里只对整个线路和个别元件作一些分析, 重点讨论测量原理。

(1) 冲击电流计 G 希望其动框的自由振荡周期不低于 $25s$, 要求灵敏度高和内阻低(以 100Ω 为宜)。其数据指标的计算办法是: 测量时, 测量线圈 N_2 中产生的脉冲电流的持续时间不能超过 $0.1\tau_1$, 以 $T_0=15s$ 的电流计为例: 在临界状态下 $\tau_1 \approx 0.2T_0=3s$ 。那么脉冲持续时间就不能大于 $0.3s$ 了。如果选用 $T_0=25s$ 的冲击电流计, 则脉冲持续时间正好与上节中给出的 $0.5s$ 的数据相符。

(2) 电源 E 最好是采用高电流容量的蓄电池组, 在某些场合也允许采用输出电压稳定且纹波电压很小的低内阻整流滤波电源。

(3) 主电流调节电阻 R_1 它应有足够高的电阻值, 以获得测量中所需要最小磁化电流, 它还应有足够高的额定功率和散热能力。

(4) 磁滞回线部分的电流调节电阻 R_2 它和 R_1 有相同额定功率和电阻值。

(5) 测量主电流的电流表 A_1 通常是多量程的直流电流表(例如 $0.03A \sim 15A$)。

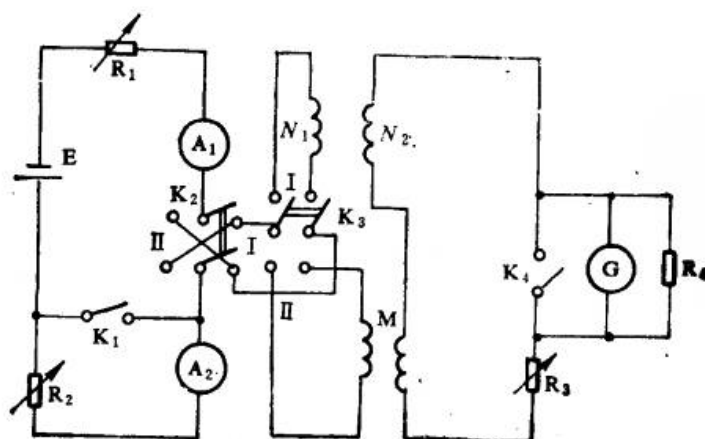


图 4-4 冲击法测量环形样品的电路

(6) 互感线圈 M 是决定冲击电流计冲击常数的磁通标准量具,其精确度在很大程度上决定了测量的准确性,它的数值通常为 $0.01H$,基本误差应小于 $\pm 0.1\%$ 。只有这样,它的误差才不会影响测量的误差。它应放在完全远离可变磁场的地方,周围的环境对互感系数应无任何明显的影响。试样和大多数仪器一样不能放在互感线圈附近。一旦发现互感系数是电流的函数时,则不能使用。

(7) 换向开关 K_2 这是一个很关键的元件,可以使用机械结构良好的闸刀开关和交流接触器或使用具有大电流容量并在两个电流方向保持相同接触电阻的其它形式的开关。当测量大的环形试样(或以后要讨论的永磁材料)时,这种开关必须具有良好的承受接触电弧的能力。为了减小测量误差还应缩短测量回路中脉冲电流的持续时间,因此扳动开关的动作应该很快,并且不允许触点发生跳动或多次接触。

(8) 调节磁滞回线电流的开关 K_1 要求与 K_2 相同,结构应当可靠。

(9) 接入测量或校准的开关 K_3 应能在通过最大的测量电流和校准电流时,其电阻没有明显变化。一般,它不需要承受太大的电弧。

(10) 电流计开关 K_4 这个开关的接触电阻必须很小,接点和接地端之间应有高的绝缘电阻。接点不应有热电势和接触电势,应防止氧化或其他表面状态的变化,由于对杂散交流电压的整流作用,表面状态的变化将产生明显的热漂移。

(11) 测量回路校准电阻 R ,通常是十进电阻箱,其电阻温度系数应当小,且具有很低的热电势和接触电势,以及很高的对地绝缘电阻。

以上所叙述的对线路元件的要求,都是应当满足的,除此之外,为了获得精确的测量数据,在线路的安装上还应注意以下问题:

(1) 冲击电流计不能安装在外磁场源附近,这里所说的外磁场源包括:强的电磁铁,无线电发射设备等。

(2) 正确地安置冲击电流计及其附件,使用电流计时不应有任何机械振动。电流计的读数标尺应该牢牢固定,并应注意放置在电流计小镜和标尺零点连线的垂直位置。

(3) 电流计的测量回路与外电源必须绝缘。消除由外电源而引起的任何漏电现象是保证测量工作的必要条件。测量电路中所有的接点、转换开关,同样也不应该成为任何电动势的源。

(4) 在进行磁测量时,必须使测量线路的所有导线避免形成明显的电磁耦合回路。因为这种回路可能成为外来电压脉冲的源,以致造成较大的测量误差。当这种回路位于磁化电路滑线电阻附近时,危害最大。

线路安装完毕之后,必须检查是否有外来感应电压脉冲存在。检查的方法是,将测量线圈从磁化装置中取出,将磁化电流换向,电流计不应有任何偏转。同样,也应检查是否存在接触电势和热电势,如果完全消除了这种电动势,那么电流计电路断开或闭合时,电流计也不应发生偏转。

二、环形试样磁化曲线的测量

在进行测量之前必须准备样品,并在样品上绕制测量绕组和磁化绕组,测量绕组用细的绝缘导线(直径约为 $0.1mm$)绕制,若大概知道样品的磁特性及冲击电流计的灵敏度,绕组的匝数就可以预先估计,测量绕组应直接绕在样品上。如果样品具有保护骨架,在计

算 B 值时应考虑样品和绕组间空隙的修正值。这个修正值可以这样求得：设 A 为样品截面， A' 为测量绕组的平均截面， N_2 为测量绕组匝数， H 为磁场强度， B 为样品中磁感应强度。通过测量绕组的磁链 $\Delta\psi$ 可以表示成：

$$\Delta\psi = \Delta B AN_2 + \mu_0 H (A' - A) N_2 = C_\phi \alpha \quad (4-27)$$

由此得出：

$$\Delta B = \frac{C_\phi \alpha}{AN_2} - \mu_0 H \left(\frac{A'}{A} - 1 \right) [\text{T}] \quad (4-28)$$

若测量绕组直接绕在样品上，就可以不必考虑修正项，直接按下式计算 B 值：

$$\Delta B = \frac{C_\phi \alpha}{AN_2} [\text{T}] \quad (4-29)$$

如果磁化绕组均匀分布在样品上，则可以按照下式计算环形样品的磁场强度：

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} = \frac{N_1 I}{2\pi R_m} [\text{A/m}] \quad (4-30)$$

式中， l_m ——试样的平均磁路长度； R_m ——试样的平均半径； N_1 ——磁化绕组匝数。

应注意，试样的磁状态除和磁化场有关外，还与所谓的“磁性经历”有关。在测量过程中，只要有一个步骤不正确，例如电流换向不对，就必须从头开始测量。在测量之前也希望正确地选择最大磁场强度值，这不仅与材料的磁性能有关，而且也与使用的具体条件有关。知道了最大磁场强度值之后，就可应用式 (4-30) 计算最大磁化电流。

在具体讨论测量步骤之前，我们首先讨论准备工作。

首先是选择冲击电流计的灵敏度，调整 R_3 ，使每一个磁化电流值所对应的冲击电流计偏转，都应在刻度尺的 150~240 分格的范围内。然后根据不同的 R_3 数值，用实验方法求出对应的冲击常数 C_ϕ 。

开始测量时，必须使试样磁中性化，磁中性化可以按照 1.9 节中所述的方法进行，也可以用图 4-4 所示的测量电路进行。这种测量电路的缺点在于很难达到完全磁中性化，但是使用起来却比较方便。为了使试样完全磁中性化，可按下面的步骤进行，闭合 K_1 、 K_2 ，将 K_3 放在“1”位置，调节 R_1 使电流表 A_1 的读数大于最大磁化电流的 1.5~2 倍。然

后用换向开关 K_2 连续改变电流方向（大约每秒 2 次）并且缓慢地调节 R_1 ，直到电流降至最小值。

磁化曲线的测量，也就是在不同磁场强度 H 下测量相应的磁滞回线顶点的 B 值，如图 4-5 所示。具体测量步骤如下：

给定 H_1 值，由式 (4-30) 计算 I_1 值。将 K_3 放在“1”位置，闭合 K_1 与 K_4 。调节 R_1 使电流表 A_1 的读数为 I_1 ，应该注意的是，这时 R_1 只能向使电流 I 增大的方向调节而不能相反，否则就会出现局部磁滞回线，而得到不正确的测量结果。假如偶

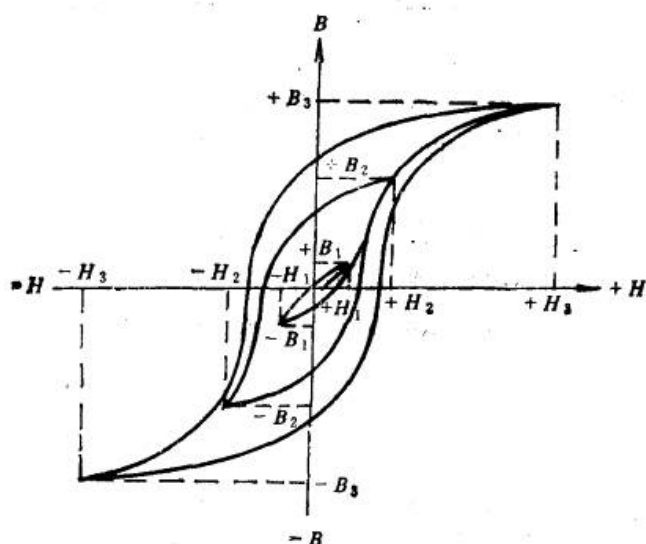


图 4-5 基本磁化曲线的测量原理

然碰到了大于给定值的电流，应该就在该电流下测量。否则须将样品重新磁中性化，那么一切工作就要从头做起了。确定了给定电流 I_1 之后，反复扳动 K_2 ，将磁化电流换向 5~6 次，使磁滞回线闭合（这种操作在磁性测量中叫做“磁锻炼”，这是一个专用术语。对于每一个被测点都要进行）。然后打开 K_1 ，扳动转换开关 K_2 ，由 I 到 II 或由 II 到 I，读取冲击电流计的最大偏转角 α ，按下式计算 B 值。

$$B = \frac{1}{2} \Delta B = \frac{C_{\phi} \alpha}{2 A N_2} \quad (4-31)$$

照此步骤测出 10~15 点的值，并立即绘成曲线，以便检验测量正确与否。同一条曲线建议至少测量三次，取其算术平均值。

三、磁滞回线的测量

首先应说明的是，磁化曲线的测量原则在此是适用的，所以我们不去重复前面已经讨论过的一些细节。这里仅仅讨论一些实质性的问题。

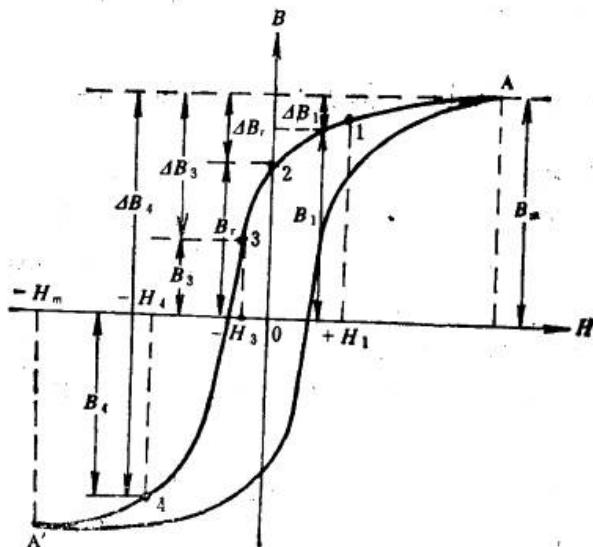


图 4-6 磁滞回线的测量原理

概括地说，磁滞回线上各点的测量，是以饱和值 B_m 和 H_m 所对应的 A 点为参考点，从第一象限至第三象限逐点求得的，如图 4-6 所示。还是利用图 4-4 的测量电路，通过测量磁化曲线的方法求得 A 点，并计算 B_m 值。

下面分几种情况来讨论磁滞回线的测量步骤。

(1) 第一象限点的测量 如图 4-6 所示。以图中的“1”点为例加以说明。

闭合 K_1 ，打开 K_2 ，调节 R_2 使电流表 A_2 的读数等于 I_1 的数值。然后闭合 K_1 ，扳动 K_2 作 5~6 次磁锻炼，并将 K_2 放在 I 位置，设此位置磁化电流为正，测第一象限的点时，不应再扳动它。在图 4-4 中 I 位置相当于 A 点，II 位置相当于 A' 点。打开 K_1 ，然后打开 K_2 ，读取冲击电流计的偏转 $\Delta\alpha_1$ ，相应的磁感应 ΔB_1 为

$$\Delta B_1 = \frac{C_{\phi} \Delta\alpha_1}{A N_2} \quad (4-32)$$

而“1”点的 B 为

$$B_1 = B_m - \Delta B_1 \quad (4-33)$$

然后闭合 K_4 , 并将 K_2 扳到 II 位置, 再闭合 K_1 , 这时磁化状态已到了 A' 点, 再扳动 K_2 到 I 位置, 使其回到 A 点, 以上是第一象限内各点的测量方法。

(2) B_r 点的测量: 可在 A 点作磁锻炼, 然后打开 K_4 , 并将 K_2 扳到中间位置, 断开磁化电流并读取冲击电流计的偏转 $\Delta\alpha_0$ 。按式 (4-32) 和 (4-33) 计算 B_r , 在此之后, 仍然要使磁化状态回到 A 点。

(3) 第二、三象限的点, 测量方法相同, 现以图 (4-6) 中的“3”点为例加以说明。

调整 R_2 得到电流 I_3 , 按照前述的步骤作完磁锻炼之后, 扳动换向开关 K_2 由 “I” 到 “II”, 与此同时打开开关 K_1 。此时, 磁化电路中的电流从 $+I_m$ 改变到 $-I_3$, 这时电流不仅改变了方向而且还改变了大小。读取 $\Delta\alpha_3$, 按式 (4-32) 和 (4-33) 计算出 ΔB_3 和 B_{30} 。

重复以上步骤测量 10~15 个点, 就可描绘出磁滞回线的左半部, 利用磁滞回线的反对称性, 可描出其右半部。

必须注意的是: 在操作过程中, 不能扳错一个开关, 否则一切工作都将重新开始。

4.3 冲击法测量片状软磁试样的磁特性

在较高磁场下工作的磁性材料, 有时做成片状试样, 并使用磁导仪组成闭合磁路进行测量。这种试样对于测试各向异性电工钢的磁特性也是非常适宜的。

常用的磁导仪有两种结构, 即单轭型和双轭型, 为了研究磁导仪的原理我们来讨论如图 4-7 所示的最简单的装置。

图中, “1”是较长的矩形截面试样, “2”是磁导仪的两个轭, 用纯铁或硅钢片做成。“3”是磁化线圈, 它所包围的那部分样品被磁化后, 由于两磁轭与样品接触处磁阻很小, 磁通可以认为是闭合的, 因而没有退磁场产生, 样品磁化就比较均匀(至少在中心部位是均匀的), 用测量线圈“4”就可以测量样品的真正磁特性了。实际上测量线圈被分为两组: 一组绕在试样上, 测量磁感应强度 B , 另一组放在样品表面测量内磁化场 H_{i0} 。

由于试样和磁轭的材料和结构数据不同, 因而磁路的闭合情况也不都是理想的, 可以用磁路定律来研究这种影响。引入磁阻 R_m 和磁动势 F 的概念之后, 磁通可以表示为:

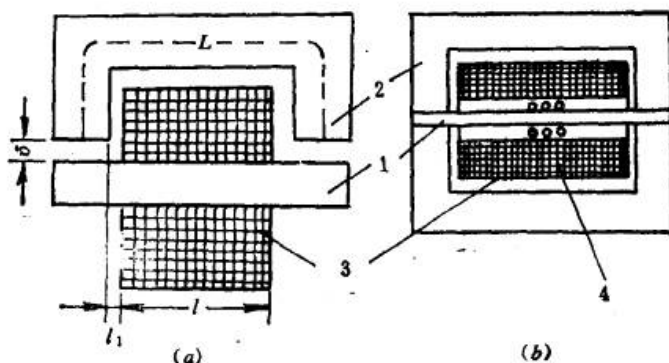


图 4-7 磁导仪的原理和结构

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{\mu_0 N I}{\frac{l}{\mu S'} + \frac{2l_1}{\mu S'} + \frac{2\delta}{S''} + \frac{L}{\mu_1 S'''}}$$

上式的分母是磁导仪的总磁阻。除图 4-7 所标出的符号外, S' 为试样的截面积, S'' 为磁轭和试样之间气隙的截面积, S''' 为磁轭的截面积; μ 及 μ_1 为试样及磁轭的磁导率。 N 为磁化线圈的匝数, I 为磁化电流。

用 $\Phi = BS'$ 和 $\mu = B/\mu_0 H$ 代入上式左边, 得到试样的磁化场强度为:

$$\begin{aligned} H &= \frac{NI}{l + 2l_1 + \frac{2\delta\mu S'}{S''} + \frac{\mu S' L}{\mu_1 S'''}} \\ &= \frac{NI}{l} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{2l_1}{l} + \frac{2\delta\mu S'}{lS''} + \frac{\mu S' L}{l\mu_1 S'''}\right)} \end{aligned} \quad (4-34)$$

利用近似计算公式 $\frac{1}{1+\Delta} \approx 1 - \Delta$, 将上式变换成:

$$H = \frac{NI}{l} \left[1 - \left(\frac{2l_1}{l} + \frac{2\delta\mu S'}{lS''} + \frac{LS'\mu}{l\mu_1 S'''} \right) \right]$$

或

$$H = H_0 - \Delta \cdot H_0 \quad (4-35)$$

式中, $H_0 = \frac{NI}{l}$ 为无限长螺管线圈的磁场强度; 而

$$\Delta = \frac{2l_1}{l} + \frac{2\delta\mu S'}{lS''} + \frac{LS'\mu}{l\mu_1 S'''}$$

所以 ΔH_0 是一个修正因数, 由于它的存在, 致使磁化场不等于 H_0 , 因此在决定线圈的有效磁化场时, 应考虑它的影响, 修正因数是一个变数, 因为它包含了与 H 有复杂关系的 μ 及 μ_1 。用计算方法实际上是不可能求出的。

从式 (4-35) 可以看出: 只有当 $l_1 = 0$, $\delta = 0$, $\mu_1 = \infty$ 时, 磁化场才等于 H_0 。但是, 实际上, 这些条件是不可能满足的。在设计磁导仪时, 只能设法使这个修正项变得非常之小, 为此必须减小空气隙 l_1 和 δ 、磁轭的长度 l 、样品截面积 S' 及磁导率 μ ; 必须增加样品长度、空隙截面 S'' 、磁轭截面 S''' 及磁轭的磁导率 μ_1 。采取这些措施的目的, 在于使样品的磁阻远大于磁轭和空气隙的磁阻。所有这些措施中, 以增加磁轭的截面最为有效, 一般来说磁导仪的磁轭截面达到了 $100 \sim 150 \text{ cm}^2$, 就使磁导仪的重量有几十千克到几百千克。磁轭的材料应有很好的磁特性, 除了有高的磁导率外, 还应具有尽可能低的剩磁感应强度 B_r 。

由磁动势这个概念分析, 产生上述磁化场不等于 H_0 的原因是: 由于在总磁势 F 中, 有一部分用于克服磁轭和试样接触处的磁位降。也就是说, 磁动势 F 不仅用于平衡样品上的磁位降, 而且还用于平衡闭合磁路其它部分的磁位降, 所以在有些磁导仪中, 还设有附加磁化绕组, 这个绕组中的电流可以独立调节, 以补偿磁路中的磁位降, 所以它又叫做“补偿绕组”, 带有补偿绕组的磁导仪, 能使试样磁化均匀。

用于测量非闭合磁路试样的磁导仪有很多不同的型式, 最常见的有如图 4-7 所示的

霍普金松磁导仪 (Hopkinson)。这是一种最简单的结构,可以测量矫顽力高于 200A/m 的软磁薄片和棒形试样。

在霍普金松磁导仪中,磁感应强度 B 可以由直接绕在试样上的测量线圈测出。试样的内磁场则可以采用放在矩形截面试样表面的扁平线圈来测量,这种扁平线圈又称平磁位计,如图 4-8 所示。

根据有限介质中磁场的边界条件,试样表面磁场的切线分量与内磁场相等,所以就可以用平磁位计测量内磁场。使用这种方法要将平磁位计紧贴样品表面。但由于测量时平磁位计并不能真正紧贴在试样表面,因此测量值总有别于真实值。精确地测量内磁场 H_i ,必须采用外推法。在离开试样表面不同距离 d , 测量磁场强度 H , 作出 $H-d$ 直线,然后外推到距离为零。

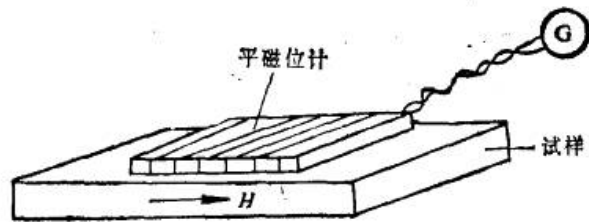


图 4-8 利用平磁位计测量试样的内磁场

利用换向冲击法或抛掷线圈法均可测量内磁场。假若平磁位计的线圈常数为 AN , 那么,应用换向冲击法,内磁场由下式计算:

$$H = \frac{C_\phi \cdot \alpha}{2\mu_0 AN} \quad (4-36)$$

应用抛掷线圈法,按下式计算内磁场:

$$H = \frac{C_\phi \cdot \alpha}{\mu_0 AN} \quad (4-37)$$

霍普金松磁导仪在结构上虽说是磁化绕组包围了试样的大部分体积,但是并不能完全解决试样的均匀磁化问题。最成功地解决上述问题的是布罗斯 (Burrows) 磁导仪(图 4-9)。

布罗斯磁导仪可以作为非闭合磁路样品的标准测量之用。为了进行测量,必须用两个磁轭和两个相同的试样组成闭合磁路,试样放在两个相同的并且相互串联的磁化线圈里。在磁化线圈末端,放有四个同样的绕组,由它们组成两个附加补偿线圈。补偿线圈由独立的电源供电,用来产生补偿漏磁通的附加磁通。

在布罗斯磁导仪中, B 线圈也有四个,其中两个为主测量线圈,它可以检验两个磁化线圈中的磁场是否相等。其方法是:将两个主测量线圈与冲击电流计对接,转换磁化电流时,冲击电流计不应发生偏转。为了检查沿磁化线圈长度方向磁场的均匀性,利用了两个副测量线圈串联放在主线圈两旁,其圈数为主线圈的一半。当磁场均匀时,副测量线圈与主测量线圈串联反接,冲击电流计也不应发生偏转。

布罗斯磁导仪的磁化场强度 H_i 可以用磁化线圈常数和通入的电流,引入与罗绕环相似的公式计算出来。

使用布罗斯磁导仪的测量手续极为麻烦,但是由于它能完全克服非闭合磁路样品在测量上的困难,作为一种检验标准,仍然是有用的。

另一种结构的磁导仪,是在磁轭上绕有磁化绕组的法耶 (Fany) 磁导仪。如图 4-10 所示。它由闭合被测样品的 U 型磁轭和磁化线圈所组成。测量磁感应强度 B 的线圈 b 用骨架支承,样品放在骨架里,并由固定螺钉夹紧,与磁轭组成闭合磁路。测量磁场强度的

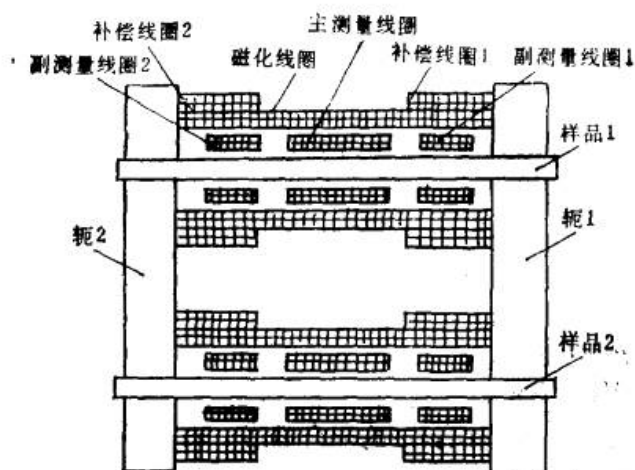


图 4-9 布罗斯磁导仪

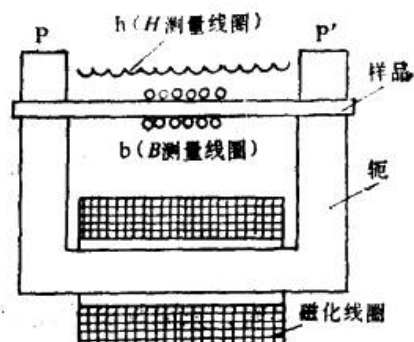


图 4-10 法耶磁导计

装置是一种叫做磁位计的测量线圈 h ，它装在紧贴着样品的两块软铁 P 、 P' 之间，通过测量 P 、 P' 之间磁位差来测量试样的磁化场。 B 和 H 线圈都分布在整個试样上，由于试样沿长度方向不可能被均匀磁化，所以测得的特性是线圈所包围的体积内试样磁特性的平均值。因此，法耶磁导计的准确度不很高。但是，如果用一个标准试样校正后（如在布罗斯磁导仪或霍普金松磁导仪上校准过的样品），其测量结果仍然是相当可靠的。实际上，由于试样本身的性质不是理想均匀的，所以用这种磁导仪测得的平均磁特性，在某种意义上，要比在局部范围内测得的结果更可靠一些。

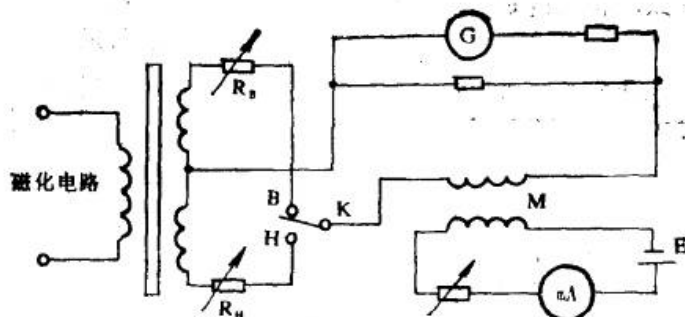


图 4-11 应用磁导仪的冲击法线路

图 4-11 是应用霍普金松磁导仪和法耶磁导仪测量软磁材料磁特性的冲击法线路。应用此电路测量片状软磁材料磁特性的方法除上述介绍的内磁场的测量方法之外，其它内容与上节所述内容相同。

4.4 永磁材料磁特性的测量

永磁材料的种类繁多，除铁氧体永磁材料和目前大量使用的铝镍钴永磁合金之外，还有稀土永磁合金。由于各类材料的性能差异甚大，测量装置（主要指磁化装置）和方法也有很大不同。

永磁材料的磁特性，是通过测量磁滞回线的退磁曲线部分而得到的，它们是：剩磁感应强度 B_r 、矫顽力 H_c 以及最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。有时，为了描述退磁曲线的形状，也

要求测量凸出系数,它等于最大磁能积与剩磁感应强度和矫顽力乘积的比值。即

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r \cdot H_c} \quad (4-38)$$

对于永磁材料,这个系数的最大理论值为1,但是这个定义对高矫顽力材料是不很适用的。例如,对于 H_{CB} 接近于 B_r/μ_0 的材料,其 γ 的最大可能值为0.25。在这种场合,使用 $(M-H)$ 退磁曲线来定义凸出系数较为合适,它可以由磁化强度 M 、剩余磁化强度 M_r 以及内禀矫顽力 H_{CM} 来表示:

$$\gamma' = \frac{(\mu_0 MH)_{\max}}{M_r \cdot H_{CM}} \quad (4-39)$$

从原理来看,永磁材料的测量方法是用一个模拟圆环的闭合磁路。由于磁特性可明显地依赖于外加磁场的大小,所以,对矫顽力不同的两类永磁材料,使用了两种不同的测量方法,一种方法用于测量内禀矫顽力不大于 600kA/m 的永磁材料,另一种则用于测量内禀矫顽力大于 600kA/m 的永磁材料。

一、冲击法测量一般永磁材料

在测量永磁材料时,试样一般都是采用短而粗的圆柱体,并且需要大的磁化场。测试时必须使用强磁场磁导仪或电磁铁,与试样构成闭合磁路。试样的端面必须与磁导仪或电磁铁的极头紧密结合,尽可能做到没有任何气隙,否则试样端面将产生表面磁荷,仍然会在试样内部产生退磁场。

通常,用于测试永磁材料的是一种地峡形磁导仪,习惯上把它称为地峡形双轭磁导仪,如图4-12所示。这种磁导仪的两个

磁化线圈分别安装在二组磁极上,两组磁极之间各安置一个“T”型极头,极头用工业纯铁做成,两块大型磁轭用硅钢片制成。被测试样,由T型极头夹住。B测量线圈绕在试样的中部,当变化磁化线圈的电流时,可以用它来测量磁感应强度。内磁场的测量还是应用上节已经讨论过的平磁位计。为了避免磁导仪(或电磁铁)剩磁的影响,以采用抛掷线圈法为宜。

对于圆柱形试样,可以采用多个同轴、匝数相等的线圈,使它们之间两两串联反接。分别测出它们之间空隙的平均磁场,然后外推到试样表面。当沿试样

径向磁场足够均匀时,也可以不用外推法。这时只用一对串联反接的同轴线圈测量两线圈之间的气隙磁场,甚至可以应用紧贴试样的圆柱线圈和矩形线圈测量磁场。但是,不管是应用那种测量线圈,其线圈常数 AN 必须由标准磁场校准。

测量永磁材料的磁特性,用电流换向法会引起磁场的测量误差,这是因为在测量结果

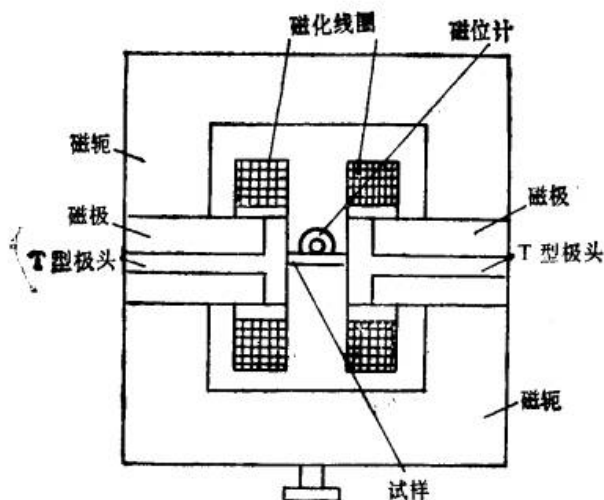


图4-12 地峡形双轭磁导仪

中除了由磁轭剩磁所产生的误差外,主要的还有磁化电流的非瞬时变化而引起的误差,这种影响在 H 和 B 的测量中均可发现。因此,在设计测量永磁材料的强磁场磁导仪或电磁铁时,都采用尽可能少的绕组匝数,采用低压大电流的供电方式,以获得大的磁场强度。地峡形双轭磁导仪的磁化绕组中最大电流为12A(110V)、两极间距离为20mm时,磁场强度不小于 $6 \times 10^5 \text{ A/m}$;极间距离在50mm时,磁场强度不小于 $3 \times 10^5 \text{ A/m}$,可以测量 H_c 在120kA/m以下的永磁材料。

为了便于说明永磁材料的测量原理,我们引用图4-13所示的典型线路。

这个电路中,测量 B 和 H 的回路有独立的并、串联电阻,便于测量和复核冲击常数,并且易于得到临界工作状态。

由于磁化电路的电感很大,使用灭弧开关以后,可能仍有电弧产生,为此在磁化线圈两端并联一个100~200 Ω 的放电电阻。

利用图4-13测量永磁材料的退磁曲线,除了测量磁场强度的方法不同之外,其余的操作过程完全与环形试样相同,这里不须复述。但是,为了对永磁测量有进一步的理解,还有必要叙述一些特殊问题。

测量磁感应强度 B ,先在样品的中间部位绕上测量线圈 N_B ,线圈与冲击电流计组成一个闭合回路,当磁化电流改变方向时,磁场也改变方向,从 $+H$ 到 $-H$,相应的磁感应强度从 $+B$ 到 $-B$, B 在坐标轴上的变化量 $\Delta B = 2B$ 。如图4-6所示,这时磁通的变化量为:

$$\Delta \Phi = \Delta B A N_B = 2 B A N_B$$

而

$$2 B_m A N_B = C_{\Phi B} \cdot \alpha_m$$

所以

$$B_m = \frac{C_{\Phi B} \cdot \alpha_m}{2 A N_B} [\text{T}] \quad (4-40)$$

关于退磁曲线上各点 B 值的测量,象4.2节所指出的一样,应以图4-14中的A点(B_m ,

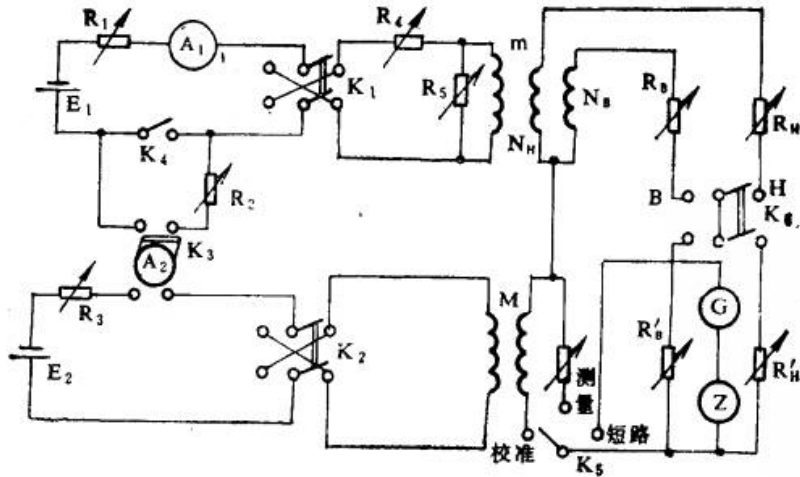


图 4-13 永磁材料冲击法测量电路

G—AC4/3 冲击电流计; Z—感应式调零器; A_1 —C19-A 型 0.5 级电流表 (或 0.2 级); A_2 —C4/1 型 0.5 级多档电流表 (或 0.2 级); M—330-2 型 0.2 级 0.01H 互感器; R_B 、 R_H 、 R'_B 、 R'_H —交流电阻箱; K_1 —磁化电流换向开关 (灭弧开关); K_2 —校准电流换向开关; K_3 、 K_4 —双刀转换开关; K_5 —单刀三掷开关; K_6 —测量磁滞回线的短路开关; m—磁导仪或电磁铁; N_B —磁感应测量线圈; N_H —磁场强度测量线圈。

H_m) 为参考点;仍按式(4-32)和(4-33)计算 ΔB 和 B 。

测量磁场强度 H , 是将一只专门的扁平测量线圈(上节叙述过的磁位计)置于磁场之中, 让线圈平面与磁场方向垂直。当磁化电流改变或者把测量线圈从磁场中抛掷出来时, 测量线圈中由于磁通变化而使冲击电流计发生偏转 α_m , 这个偏转正比于磁通的变化:

$$\Delta\Phi = C_{\Phi H} \cdot \alpha_m$$

当用电流换向法测量磁场时, $\Delta\Phi = 2(AN)_H \cdot \mu_0 H$, 将此式代入上式得:

$$C_{\Phi H} \cdot \alpha_m = 2(AN)_H \cdot \mu_0 H$$

所以

$$H = \frac{C_{\Phi H} \cdot \alpha_m}{2\mu_0(AN)_H} [\text{A/m}] \quad (4-41)$$

在 CGS 单位制中:

$$H = \frac{C_{\Phi H} \cdot \alpha_m}{2(AN)_H} [\text{Oe}] \quad (4-42)$$

当把测量线圈从磁场中抛掷出来时, 因为 $\Delta\Phi = (AN)_H \cdot \mu_0 H$ 。所以,

$$H = \frac{C_{\Phi H} \cdot \alpha_m}{\mu_0(AN)_H} [\text{A/m}] \quad (4-43)$$

在 CGS 单位制中:

$$H = \frac{C_{\Phi H} \cdot \alpha_m}{(AN)_H} [\text{Oe}] \quad (4-44)$$

对于永磁材料, 首先应该测量最大磁感应强度 B_m , 为此, 必须调节磁化场强度达到饱和磁场强度 H_m (一般约为 H_c 的 5~7 倍)。

必须注意的是, 对于 B 的测量, 尤其是对 B_r 的测量, 必须避免磁导仪或电磁铁剩磁的影响, 一般做得不太好的磁导仪或电磁铁, 剩磁感应强度大约为 $2 \sim 3 \times 10^{-3}(\text{T})$, 所以测量出的磁感应强度总比实际值要高一些。为了准确地测量磁感应强度, 必须把磁导仪或电磁铁的固有剩磁去掉。在测量 B_r 时可作这样的处理: 当换向开关从最大电流 I_m 断开的时候, 立刻在磁导仪磁化线圈中加一个反向的小电流, 这个反向小电流所产生的磁场, 在数量上恰好抵消剩余磁场。反向小电流的大小应由实验确定: 即当断开电流

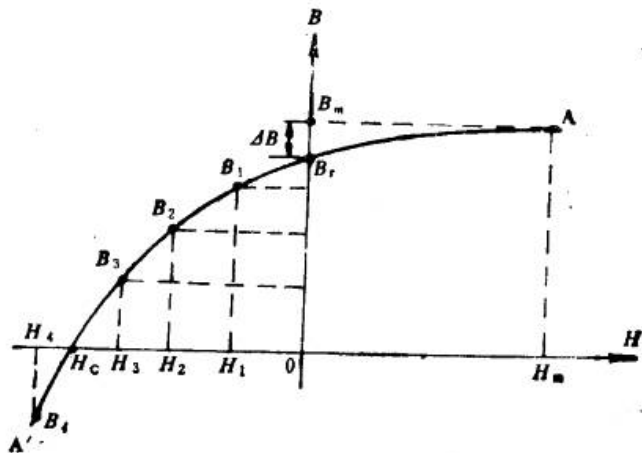


图 4-14 退磁曲线的测量原理

并加上反向小电流时,抽动 H 探测线圈,冲击电流计指针不应发生偏转。

我们知道 B 为零时的反向磁场就是 H_{c0} 。当我们调节反向电流到 $-I_A$ (相当于 $B=0$ 时的电流)时,冲击电流计(接在 N_B 回路)的偏转正好是最大偏转 α_m (相对于 B_m)的一半,那么这个反向电流 I_A 所对应的磁场就是矫顽力 H_{c0} 。在实际测量中,要做到使冲击电流计的偏转量正好为最大偏转量的一半是很困难的。但是,由于永磁材料的退磁曲线在横轴附近接近于直线,可以在 H_c 点附近选取两点,其电流值为 $-I_3, -I_4$ (参看图 4-13),相应的冲击电流计的偏转为: $\alpha_{B_3} < \alpha_{mB}/2$ 和 $\alpha_{B_4} > \alpha_{mB}/2$ 。应用退磁曲线的测量方法得到 $\alpha_{B_3}, \alpha_{H_3}, \alpha_{B_4}, \alpha_{H_4}$ 之后,通过下式计算 H_c :

$$H_c = \frac{C_{\Phi H}}{(AN)_H} \left[\alpha_{H_3} + \frac{\frac{\alpha_{mB}}{2} - \alpha_{B_3}}{\alpha_{B_4} - \alpha_{B_3}} (\alpha_{H_4} - \alpha_{H_3}) \right] \quad (4-45)$$

测量最大磁能积 $(BH)_{max}$,如采用冲击测量法,只能在测出退磁曲线的基础上用作图法求出,如图 4-15 所示,在 H_c 点作纵轴的平行线和在 B_r 点作横轴的平行线,两线相交于 P 点,从 P 点向坐标原点 O 作直线 OP , OP 线与退磁曲线的交点 D 处的 B_d, H_d 的乘积即为 $(BH)_{max}$ 。 ($B_d \cdot H_d$) 与真正的 $(BH)_{max}$ 值相差很小,在一般情况下略偏大。

当知道了 B_r, H_c 和相对饱和磁感应 $R = \frac{B_s}{B_r}$ 之后,可以用数学公式来计算 $(BH)_{max}$,即

$$(BH)_{max} = B_r H_c [2R(R-1)R + 2R^2 + R] \quad (4-46)$$

这个公式是由 R 为 1~2 的永磁材料的退磁曲线方程推导而来。实验证明,对于这类材料应用式 (4-46) 和由作图法所得的 $(BH)_{max}$ 的数值非常接近。

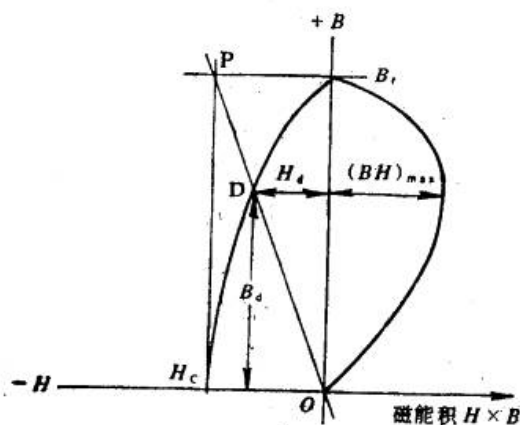


图 4-15 $(BH)_{max}$ 的作图法

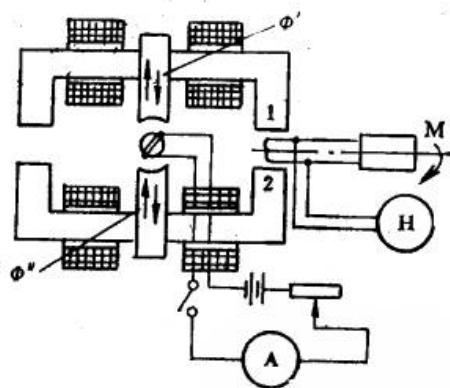


图 4-16 对称双轭永磁快速测试仪

二、对称双轭磁导仪测量永磁材料

对称双轭磁导仪是一种测量永磁材料特性参数的快速测量装置,如图 4-16 所示。测量结果可以分别通过以磁场强度和磁感应强度刻度的直流毫伏表直接读数。这种磁导仪以对称双轭桥式平衡磁路为主体,包含两个完全相同的对称磁轭 1 和 2,形成三个磁通

的通路,轭上绕有线圈。在没有试样时,中间通路的磁通 Φ' 及 Φ'' 大小相等而方向相反,所以在试样抽出时,在中间通路的空气隙中磁感应强度 B 等于零,而当在磁导仪中放入试样时,所有的磁通将通过中间通路而使磁路闭合。因此用感应法所测得的磁感应强度将取决于试样的磁特性。

测量磁场强度 H 用旋转线圈法。用这种方法测量表面磁场,必须使探测线圈的平面垂直于磁场。也可以应用霍尔元件测量 H 和 B 。测量 B 值时,霍尔元件放在磁轭中间的气隙中;而测 H 时,霍尔元件则放在试样的表面。

三、稀土永磁的测量方法

稀土永磁是一种新型的永磁合金,具有非常高的矫顽力和非常大的磁能积。但由于难以将它磁化到饱和,致使测量误差很大。目前比较适用的方法是在强磁场下磁化样品,然后用磁化特性自动记录装置测量 $M-H$ 曲线,从而求得 $B-H$ 曲线。

试样为有限长圆柱体,置于电磁铁中磁化,用探测线圈测量磁场强度 H 。用同轴或非同轴串联反接的双线圈测量磁化强度 M ,图4-17示出了它们在电磁铁中的安放位置。非同轴串联反接双线圈中的测量线圈和虚设线圈的横截面积和匝数的乘积必须相等。同轴串联反接线圈的设计,必须满足如下条件:即同轴串联反接线圈中的内、外线圈的横截面积和匝数的乘积必须相等,所以它的有效匝数:

$$N_e = n_i - n_y \quad (4-47)$$

式中, n_i 和 n_y 分别表示内、外线圈的匝数。

由于电磁铁的磁场存在着固有的不均匀性,所以非同轴双线圈中的测量线圈和虚设线圈必须以电磁铁极头的圆心为中心对称安放。而非同轴双线圈必须在安放位置上调整匝数,同时必须用一已知磁化强度的标准试样(如纯Ni或纯Fe)来确定线圈的有效匝数 N_e 。

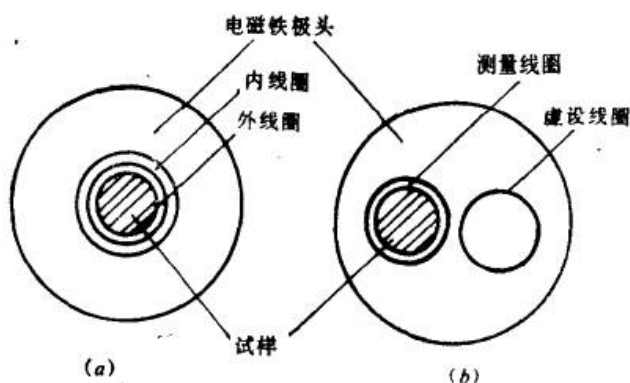


图4-17 M 测量线圈的剖面图

a—同轴串联反接双线圈; b—非同轴串联反接双线圈

进行这种测量时,首先将试样放在超导磁体或脉冲磁化装置中磁化,然后放入带 M 测量线圈的电磁铁中,保证试样的端面与磁头端面之间没有气隙,磁场测量线圈应靠近样品。为了得到正确的退磁曲线,还应利用测量用电磁铁沿着试样的磁化方向再磁化样品。一个标准的测量电路示于图4-18中,电路中采用了自动记录磁通计,这种仪器将在本章最后几节讨论。假如我们改变磁化电流的方向,直到最大值,那么记录仪就可记录退磁曲线。

对于磁化样品的初始磁场,应使样品磁化到趋近饱和,在闭合磁路中,此值是 1600 kA/m 。样品放入测量装置之后,按起始极性再次磁化的磁场应大于材料的内禀矫顽力 H_{CMO} 。

由于这类材料的退磁曲线方程已不满足式4-46的条件,所以最大磁能积 $(BH)_{max}$ 只能通过逐点计算得出,而不能用作图法。

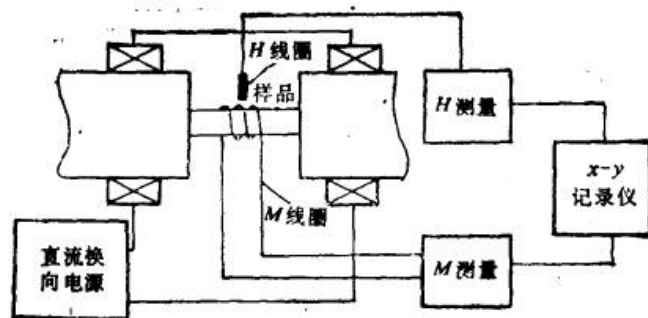


图 4-18 用自动记录磁通计测试退磁曲线

4.5 $M-H$ 曲线的测量原理

前面几节讨论的测量方法，都是用磁通的变化来确定 $B-H$ 曲线。这种磁化曲线对于一般材料来说是非常适用的，但是由于某些高内禀矫顽力 H_{CM} 材料，则难于得到对称的磁滞回线。即使应用本章最后几节将要讨论的磁化特性自动记录装置确定的退磁曲线，在多数情况下也不能确定坐标原点。因此，直接测量 $M-H$ 曲线求得 $B-H$ 曲线是最为可取的办法。

另一方面，磁化强度 M 对于某些磁性材料，例如粉末状材料或者重量为几千到几百毫克的小尺寸样品，既是基本的、又是有用的物理量。

本节分两种情况讨论 $M-H$ 曲线的测量原理。

一、环形样品

取一个与样品尺寸完全相同的非磁性环，在样品环和非磁性环上绕有匝数相同的磁化线圈 N_1 和测量线圈 N_2 ，两组 N_1 串联反接，如图 4-19 所示。

在样品环里，测量绕组感应的电动势 E 正比于磁心内磁通密度对时间的微分。

$$E = K \frac{dB}{dt}$$

式中， $K = N_2 A_s$ ， A_s 为试样的有效横截面积。在非磁性环里，测量线圈感应的电动势为：

$$E' = K \cdot \mu_0 \frac{dH}{dt}$$

由于磁化绕组反向串联，则总的输出电压为：

$$U = E - E' = K \left(\frac{dB}{dt} - \mu_0 \frac{dH}{dt} \right)$$

由于 $B = \mu_0 (H + M)$

所以

$$U = K \cdot \mu_0 \frac{dM}{dt} \quad (4-48)$$

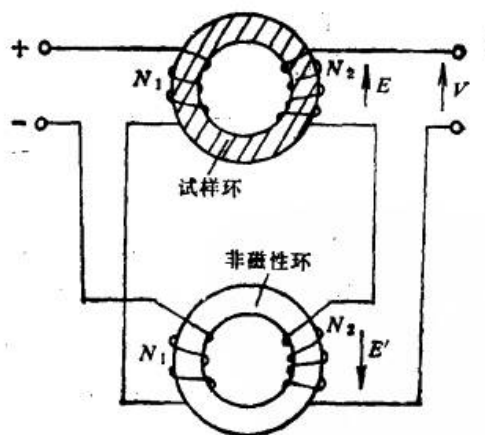


图 4-19 试样和非磁环

由此得到总的输出电压与磁化强度对时间的微分成正比的结论。应用任何一种积分式测量仪表(例如冲击电流计)以及电子积分器都可以直接测量试样的磁化强度。如果使磁化电流按一定规律变化,则可得到 $M-H$ 曲线。

二、开启磁路试样

采用开启磁路试样进行磁测量,是将样品放在螺线管中磁化,这是研究相对磁导率比较小或内禀矫顽力较大的材料磁性能的重要方法,也是测量磁化强度常用的方法。我们已经知道,只有环形试样才能较好地满足均匀磁化条件,利用环形试样可以方便地计算样品的内磁场,因而它能准确地得到物质真正的磁化曲线。但是环形试样不可能建立大于 $1.5 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4 \text{ A/m}$ 的磁场,因而不能进行高场测量。

采用开启磁路试样进行测量,最理想的形状是椭球形,这不仅可以满足均匀磁化条件,而且退磁因子也可以计算出来。也可以采用能保证近似均匀磁化的双抛物线形薄板样品,此样品的外形轮廓应满足方程:

$$y = \pm b \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right)$$

式中, a 和 b 分别为在 x 方向和 y 方向长度尺寸的 $\frac{1}{2}$ 。它们的数值可以选用 10:1。

除了以上两种样品形状之外,还可采用有限长圆柱体形样品。但是,这种样品甚至在均匀磁场里也不能被均匀磁化,要获得物质本身的磁特性,存在着较多的困难。采用这种样品时测量线圈最好安放在样品的中心部位,因为在中心部位样品磁化比较均匀,同时退磁场也最小。测量线圈做得愈短,这种误差也就愈小。但是测量线圈尺寸的选择还与测量装置的灵敏度有关。这时很自然地就产生了关于磁场和磁化强度可以允许的不均匀程度问题。这种允许的不均匀程度决定于该问题中对测量准确度的要求。

下面我们讨论用非椭球样品测量 $M-H$ 曲线时,磁化强度和内磁场的测量方法。在测量时我们常常采用四绕组线圈法,如果以 A 代表样品的截面积,以 A_1 和 n_1 代表第一组线圈的截面积和匝数,以 A_2 和 n_2 代表第二组线圈的截面积和匝数……,如果这四组线圈同轴绕制,则样品磁化时,磁通量的变化作用在四组线圈上,穿过线圈的磁通量为:

$$\Delta\Phi_1 = \Delta B A n_1 + \mu_0 \Delta H_i (A_1 - A) n_1$$

$$\Delta\Phi_2 = \Delta B A n_2 + \mu_0 \Delta H_i (A_2 - A) n_2$$

$$\Delta\Phi_3 = \Delta B A n_3 + \mu_0 \Delta H_i (A_3 - A) n_3$$

$$\Delta\Phi_4 = \Delta B A n_4 + \mu_0 \Delta H_i (A_4 - A) n_4$$

式中, H_i 为内磁场强度。根据磁场强度切线分量的连续原理,样品表面附近的磁场强度和样品的内磁场强度是相等的。 $\Delta\Phi_1 \sim \Delta\Phi_4$ 分别是通过 1~4 绕组线圈的磁通量, ΔB 是样品内磁感应强度的变化。将线圈如图 4-20 那样连接,即将 1 和 3、2 和 4 分别串联反接。在 A、B 端磁通的变化量为

$$\Delta\Phi_{1-3} = \Delta B A (n_1 - n_3) + \mu_0 \Delta H_i (A_1 n_1 - A_3 n_3) - \mu_0 \Delta H_i A (n_1 - n_3)$$

在 C、D 端磁通的变化量为

$$\Delta\Phi_{2-4} = \Delta B A (n_2 - n_4) + \mu_0 \Delta H_i (A_2 n_2 - A_4 n_4) - \mu_0 \Delta H_i A (n_2 - n_4)$$

如果设计线圈时满足下列条件:

$$n_1 = n_3 = n \quad (4-49)$$

$$A_2 n_2 = A_4 n_4$$

那么 $\Delta\Phi_{1-3} = \mu_0 \Delta H_1 n (A_1 - A_3) \quad (4-50)$

$$\Delta\Phi_{2-4} = \mu_0 \Delta M A (n_2 - n_4) \quad (4-51)$$

式(4-50)和式(4-51)是四绕组法的基本公式,对于任何积分式的测量装置都是适用的。以冲击电流计为例,按图4-21的简略电路将线圈与冲击电流计相连;开关K置于位置I测量 H_1 ,置于位置II测量 M 。据以前叙述的原理,冲击电流计的最大偏转与通过测量线圈的磁通的变化 $\Delta\Phi_{2-4}$ 成正比,若用电流换向法,则 M 的计算公式为:

$$M = \frac{C_\Phi \cdot \Delta\alpha}{\mu_0 \cdot 2A(n_2 - n_4)} = \frac{C_\Phi \cdot \Delta\alpha}{2\mu_0 AN_c} \quad (4-52)$$

式中, $N_c = n_2 - n_4$ 称为 M 测量线圈的有效匝数。而内磁场为:

$$H_1 = \frac{C_\Phi \cdot \Delta\alpha}{2\mu_0 n(A_1 - A_3)} \quad (4-53)$$

必须注意:具有以上结构的线圈对变温测量是不适用的,因为温度的变化,将会引起式(4-50)中的常数 $(A_1 - A_3)$ 发生变化。

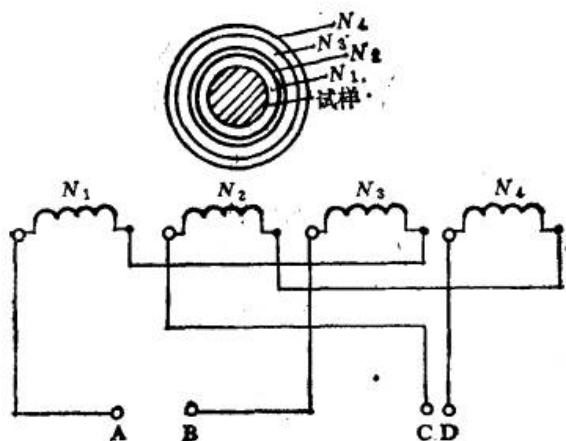


图 4-20 四绕组同轴线圈

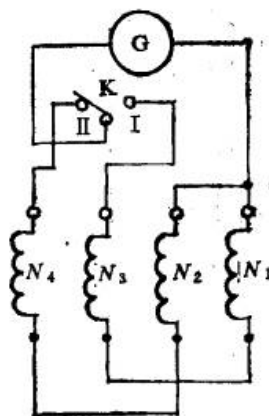


图 4-21 四绕组线圈冲击法线路

并且,由于式(4-50)不再成立,那么式(4-53)也不成立了,即在温度变化时,测量线圈的相互补偿已被破坏,为此必须重新加以补偿。这个新的补偿线圈可以放在螺管线圈的端口,可以绕轴旋转并与测量线圈串联,调整它与螺线管的相对角度可以使测量线圈得到重新补偿。

4.6 振动样品磁强计 (VSM)

振动样品磁强计,首先由弗尼尔 (S. Foner) 提出,他对磁强计的结构、各种检测线圈及其对灵敏度的影响等问题作了详尽的讨论。近年来由于锁相放大技术在振动样品磁强计中的应用,大大提高了振动样品磁强计的灵敏度和扩大了使用范围。振动样品磁强计测量磁化强度的范围为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ EMU,在实验室内精度可达 10^{-7} EMU,经过校准后,相对精度不小于 $\pm 0.5\%$ 。图 4-22 是振动样品磁强计的简单示意图。

将各向同性的小球样品置于均匀磁场中,球体在外磁场的方向上被均匀磁化。如果样品的尺寸远小于样品到检测线圈的距离,则可以把小球样品近似认为是一个磁矩为 m 的磁偶极子,这个磁矩在数值上等于球体中心的总磁矩。而球本身所产生的磁场则可等效于这个磁偶极子取平行于磁场方向所产生的磁场。

如图 4-23 所示,将一个轴向与 x 轴平行的小线圈固定放置于样品球附近。当样品沿 x 轴方向在坐标原点附近作小幅度振动时,则在线圈中感应的电动势正比于在 x 方向的磁通量 Φ_x 的变化率,即:

$$e_s = -N \left(\frac{d\Phi_s}{dx} \right)_{x_0} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (4-54)$$

式中, N 是线圈的匝数。样品在 x 方向以角频率 ω 、振幅 δ 振动,其运动方程为:

$$x = x_0 + \delta \sin \omega t \quad (4-55)$$

如果将坐标原点选在球心的平衡位置上,则小线圈中的感应电动势为:

$$e_s = G \omega \delta V_s M_s \cos \omega t \quad (4-56)$$

G 由下式计算:

$$G = \frac{3}{4\pi} \mu_0 N A \frac{z_0(r^2 - 5x_0^2)}{r^7} \quad (4-57)$$

式中, r 是小线圈的位置, $r^2 = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2$; A 为线圈的平均截面积; V_s 为样品的体积; M_s 为样品的磁化强度。如果不能将探测线圈看作是小线圈时,感应电动势要对线圈截面积 A 求面积分并对匝数求和,而不能应用式(4-56)。但是,线圈的几何形状和位置很难确定,计算磁化强度相当困难。在实际测量中,往往应用具有已知磁化强度数值的标准样品(例如镍球)来进行相对测量。

这种定标方法称为比较法。如果用已知饱和磁化强度 M_c 、体积为 V_c 的标准样品取代被测样品,检测线圈中的感应电压 E_c ,则由比较法可以求出样品的饱和磁化强度:

$$\frac{M_s}{M_c} = \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{V_c}{V_s} \quad (4-58)$$

如果感应电压 E_s 和 E_c 在仪器上的读数为 E'_s 和 E'_c ,则:

$$M_s = \left(\frac{E'_s}{E'_c} \right) \left(\frac{D_c^3}{D_s^3} \right) \cdot M_c \quad (4-59)$$

式中, D_c 和 D_s 分别为定标球和样品的直径。由式(4-59)可见 M_s 的测量误差来自于 E 、 D 和 M_c 三个量的测量误差。电压 E 的测量误差首先来自于仪器读数漂移。为了减少这一误差,一方面,要求很快地更换定标样品和待测样品;另一方面,在测试前后紧接着定标并用内插法求出电压读数。其次是探测线圈与样品的相对位置发生变化以及样品振动幅度的变化、振动频率、磁场的微小不稳定性、磁场的均匀性和放大器的非线性都会引起感应电压的测量误差。

由式(4-58)可以看出:检测线圈中的感应电压,与样品的饱和磁化强度 M_s 成正

比,如果保持振动幅度和频率不变,则感应电压的频率就是一个定值。这就为测量提供了许多有利条件。

图 4-24 是振动样品磁强计的电子线路方框图。磁强计的主要部件也在图中示出。图中的参考样品在固定的参考线圈组中产生感应参考电压。参考样品可以是一个很小的永久磁铁。样品与参考样品通过一个公共的连杆被同步推动,样品在探测线圈中也感应一个检测电压,两个电压的相位和振幅直接相关。可以通过调整参考线圈中电压的相位来平衡检测线圈的电压。此时振动幅度的变化、振动频率微小的不稳定性、磁场的不均匀性、放大器的增益或放大器的线性对测量的影响不大。

在图 4-24 所示的方框图中,扬声器传感机构由一个小功率放大器推动,放大器由一

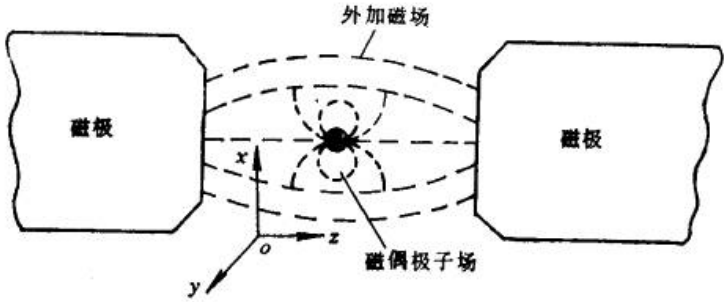


图 4-23 样品的坐标系统和磁场分布

个频率为 90Hz 的振荡器提供输入电压。相移器、分压器和差分放大器组成一个交流校准桥;来自参考线圈的输出电压经相移器、分压器与探测线圈的输出电压在差分放大器中混合。分压器由一个校正好的、有恒定阻抗的十分度电阻分压器和一个多圈线性电位器组成。调节分压器的分压比,使指示仪表上的读数为零时,参考电压和信号电压的大小相等,此时分压器上的刻度数就是信号电压的大小。交流桥的任何一种不平衡性,都可以通过调整放大器和以后的电路来指示。示波器是作为探测之前观察交流桥是否平衡的指零计。将探测线圈输出的信号,经放大相敏检波后变成与样品的磁化强度成正比的直流信号,驱动 $x-y$ 记录仪或数字电压表自动记录测量结果。

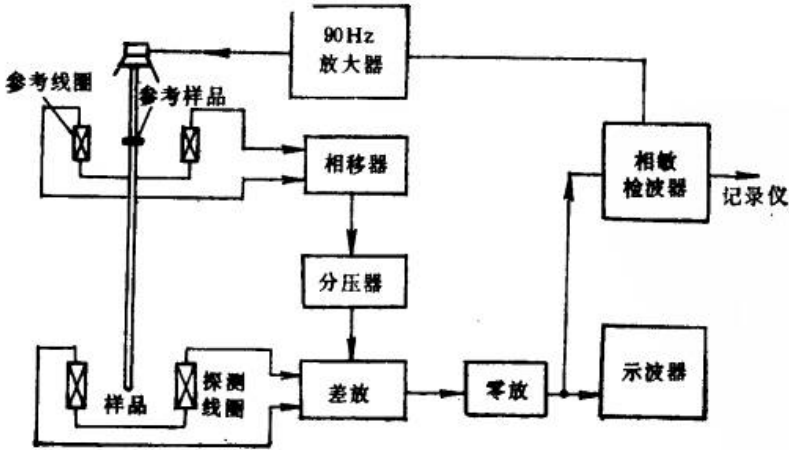


图 4-24 振动样品磁强计的电子线路 (1)

这样的一套装置从原理上来说,并不能对样品的磁化强度进行绝对测量。这是因为,在一个振动样品磁强计中,虽然样品振动的振幅和频率可以确定,但线圈的位置和几何形状很难由公式给出。

振动样品磁强计除了能测量磁化强度之外,还可用于测量高矫顽力稀土永磁合金的磁化曲线、磁滞回线。从原理上讲,振动样品磁强计几乎不用考虑零点漂移,而其它任何类型的积分器,使零漂完全为零是非常困难的。振动样品磁强计的唯一缺点是,只能进行开启磁路测量。因此,必须修正退磁场的影响。为了利用振动样品磁强计测量磁化曲线和磁滞回线,图 4-25 给出了不同于图 4-24 的电子线路。电路中使用了一个使振幅恒定的振幅探测线圈和自动稳幅放大器,利用信号检测线圈和锁相放大器检测试样所感应的电压,由锁相放大器的直流输出直接驱动 $x-y$ 函数记录仪。

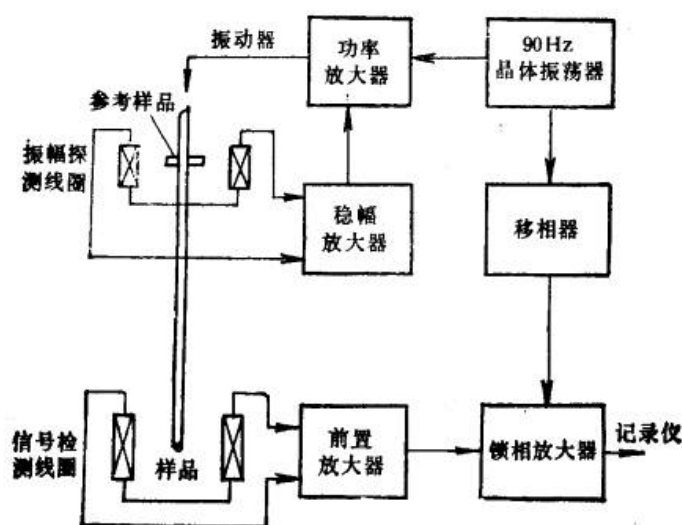


图 4-25 振动样品磁强计电路 (II)

振动样品磁强计具有高的灵敏度(约为下节将要讨论的磁化特性自动记录装置的 2000 倍),可以测量微小样品。由于没有零点漂移,可以进行长时间的测量,因此可以测量随温度变化的磁特性。

4.7 直流磁化特性自动测量装置

本节讨论的自动测量装置可以快速而准确地测量磁滞回线。这种自动测量技术又可分为半自动测量技术和自动测量技术两大类。

一、半自动测量技术

半自动测量技术也是以电磁感应定律为基础的测量方法,为了从感应电压中获得磁通的值,必须使用积分器来完成积分模拟运算。由积分器的原理知道:只有电路的时间常数很大时,输出电压才正比于输入电压对时间的积分,否则,积分运算就有明显的误差。在直流磁测量中,为了使磁感应的变化途径与静态磁化过程曲线的轨迹一致,磁场必须连续缓慢地变化。磁场变化一周往往需要几分钟乃至几十分钟的时间。所以,这种测量就

需要一种低零漂的长时间积分器。半自动测量技术可分为：光电积分放大器和电子积分器两大类。

(一) 光电积分放大器

光电积分放大器是最早用于直流磁性测量的负反馈积分放大器，它的积分时间常数可以达到 10^{-3} s，完全可以满足测量的要求。一般地说，积分器可以由负反馈放大器和互感器组成的积分电路，也可以是由负反馈放大器和电容器组成的积分电路。

图 4-26 是以互感反馈光电积分放大器为主体的磁化特性自动记录仪的电路方框图。图中虚线方框部分就是光电积分放大器。

图中： N_1 是环形试样的磁化线圈， N_2 为测量线圈，它与一个短周期式电流计 G 和互感器 M 的次级线圈串联组成次级闭合回路，此回路由电流计小镜反射的光束通过棱镜与一桥式光电放大电路相联，桥式光电放大电路由特性相同的两个串联光电管 P_1 、 P_2 和电阻 R_1 、 R_2 ($R_1 = R_2$) 组成。

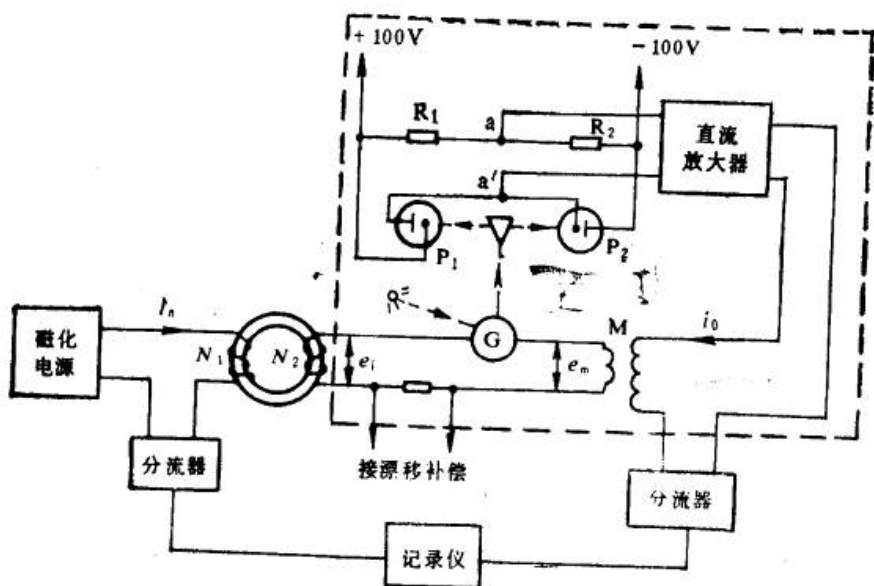


图 4-26 互感反馈光电积分磁化特性自动测量仪

当电流计中无电流通过时，调节照射两光电管的光通量使其对称相等。此时光电管 P_1 、 P_2 导电电阻相等，电桥处于平衡状态，其输出端 a 、 a' 之间的电压为零，即输入到直流放大器的电压为零。当 N_1 中磁化电流 i_a 发生连续缓慢变化时， N_2 中便产生感应电动势 e_i ，其感应电流通过电流计使反射小镜发生偏转。这时照射两光电管 P_1 、 P_2 的光通量失去对称性，因而导电电阻发生变化，电桥失去平衡， a 、 a' 之间就有电压输出。此电压经直流放大器放大后，再输入到由互感器初级线圈和分流电阻所组成的回路中形成缓变电流 i_0 ，此电流通过互感器与次级回路发生耦合，在互感器的次级线圈中就有感应电动势产生，这就构成了负反馈放大器。下面分析这个放大器的积分特性。

设试样次级线圈的感应电动势为：

$$e_i = \left| \frac{d\psi}{dt} \right|$$

标准互感器次级的感应电动势为：

$$e_m = \left| M \frac{di_0}{dt} \right|$$

由于 e_i 和 e_m 的相位相反, 它们的差值为:

$$\Delta e = e_i - e_m$$

Δe 通常称作不平衡信号电压, 也就是电流计 G 的输入信号电压, 当光电放大器的放大倍数很高(约 10^7) 时, 可以认为 Δe 等于零, 于是

$$\frac{d\Psi}{dt} = M \frac{di_0}{dt}$$

所以

$$\Psi = M i_0 \quad (4-60)$$

这就是光电积分放大器的积分特性方程。由于试样次级线圈中的磁链又可表示成:

$$\Psi = N_2 \Phi = N_2 A B$$

假若准确地测定了 i_0 , 那么, 磁感应强度就由下式确定:

$$B = \frac{M}{N_2 A} i_0 \quad (4-61)$$

若应用分流电阻, 取出与 i_0 成正比的电压和与磁化电流 i_m 成正比的电压, 将这两个电压分别输入到 x - y 记录仪的 y 轴和 x 轴, 就可以描绘 B - H 曲线了。

在测量磁化曲线时, 磁化电流从零变化到最大值 i_m , 这样测出的是起始磁化曲线, 而不是基本磁化曲线。在测试磁滞回线时, 磁化电流应该这样变化: $I_m \rightarrow 0 \rightarrow -I_m \rightarrow 0 \rightarrow I_m$ 。

开路试样(例如永磁材料)磁性的自动测量, 需要在电磁铁中进行, 这时不仅需要测量 B , 而且还要测量内磁场 H_i 。因此这种自动记录仪还要设置 H 道光电积分放大器。

为了缓慢连续地改变磁化电流, 可以采用晶闸管整流元件, 用移相触发电路控制它的输出电压, 使它产生能作 360° 相移的平滑连续变化的输出电流。这种自动电源中还采用了无触点开关, 因而避免了电弧的发生, 消除了非瞬时过程的影响。

光电积分放大器配上自动电源之后能够实现直流参数的自动测量, 而且测量误差低达 $1 \sim 3\%$, 这个数值与冲击法相当。但是灵敏度却比冲击法高出一个数量级。此外由于积分时间常数很大, 不存在非瞬时误差, 测量速度快, 在几分钟之内就可给出磁化曲线和磁滞回线。

光电积分器的一个主要缺点是有零点漂移。这种零点漂移主要来自两方面, 一是光电积分放大器本身的零漂, 二是测试过程中温差电动势产生的零漂, 前者是因为放大倍数很高, 而电流计的偏转又非常微小, 这时如果电流计发生微小的蠕动就会引起可观的零点漂移。另外, 也不能排除直流放大器本身的零点漂移。要防止这种零点漂移, 一般只能采用防震措施并提高直流放大器的稳定度。关于温差电动势所产生的零点漂移, 可以应用一个带有小功率电池的由电位器和电阻组成的附加电路加以补偿, 这个附加电路产生的微小电流可以补偿测量过程中由温差电动势所引起的零点漂移。

(二) 电子积分器

由电子积分器所构成的电子磁通计, 其主要部分就是一个负反馈积分放大器, 可以用集成电路运算放大器组成。与光电积分放大器相比较, 它没有使用象检流计这样难以维护的仪表。

电子积分器可以全部采用晶体管电路和集成电路元件，可以通过改变积分时间常数来扩大量程。因为积分时间常数很大，可以实现连续测量。

由于电子积分器具有测量范围宽、灵敏度高和速度快等特点，所以在磁性测量技术中受到了普遍的重视，图 4-27 是电子直流自动测量仪的原理电路。它由磁化电源(包括锯齿波发生器和功率放大器)、磁通积分器和 H 幅度调节器及 $x-y$ 记录仪组成。

若样品的磁化线圈为 N_1 ，测量线圈为 N_2 ，磁化电流为 I ，此电流通过 N_1 后，在 N_2 中产生感应电动势 e 为：

$$e = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

或

$$N_2 \Phi = \int e dt$$

磁感应强度

$$B = \frac{1}{N_2 A} \int e dt$$

式中， A 为试样的截面积。若将感应电压输入到积分器中，则 B 正比于积分器的输出电压。

磁场强度 H ，可以由磁化电流求得。

即 $H = KI$ ， K 为由磁化线圈的匝数和

平均磁路长所决定的系数。因此，可以通过串联在磁化回路上的取样电阻 W_H (其值很小) 并经过 H 运算器求得磁场 H 的数值。当把与 B 和 H 成正比的电压分别送到 $x-y$ 记录仪的 y 轴和 x 轴时，即得到 $B-H$ 曲线。

磁化电流的自动扫描，是由低频方波发生器和积分器所组成的锯齿波发生器实现的。积分器的输出可以改变扫描速度和幅度。锯齿波电流经功率放大器放大后加到试样的磁化线圈 N_1 上，从而实现了磁场的自动扫描。

为了使 $B-H$ 曲线在磁感应 B 急剧变化的部分抑制磁场 H 的变化速度，防止 y 轴笔的滞后，须将 B 信号以负反馈的形式加到磁化电流控制部分。

如上所述，这类装置的测量原理是使用了感应电动势的模拟积分运算，而冲击电流计在原理上是采用了脉冲电流的积分运算，两者相比，前者可以进行连续测量，而后者只能进行逐点测量。这是在 50~60 年代磁性测量技术的一个重大变革。但是，由于积分器无法避免的零点漂移和 $x-y$ 函数记录仪的读数误差，这种装置实际上只能给出 $\pm 1 \sim 2\%$ 的测量精度。一些不太稳定的装置，其测量误差大于冲击法。

二、自动测量技术

自动测量装置 (ATS) 即数字装置，是第三代磁性测量装置，80 年代才有产品问世。它是由微型计算机接口母线和具有相应速度和精度的 A/D 和 D/A 转换器所组成的自动测试系统。其逻辑原理见图 4-28。这是一个以微型计算机为核心的测试系统，它通过母线作用于整个装置，使各种测量变成一个简单的模式。也就是由计算机通过 D/A 转

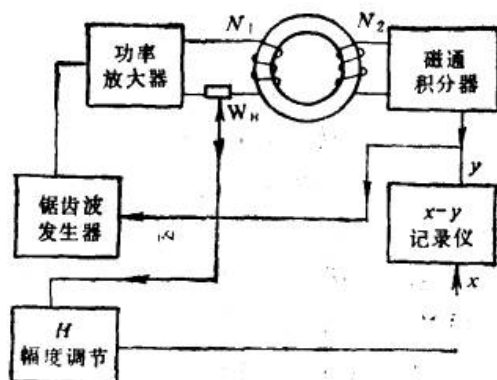


图 4-27 电子式磁化特性自动测量仪

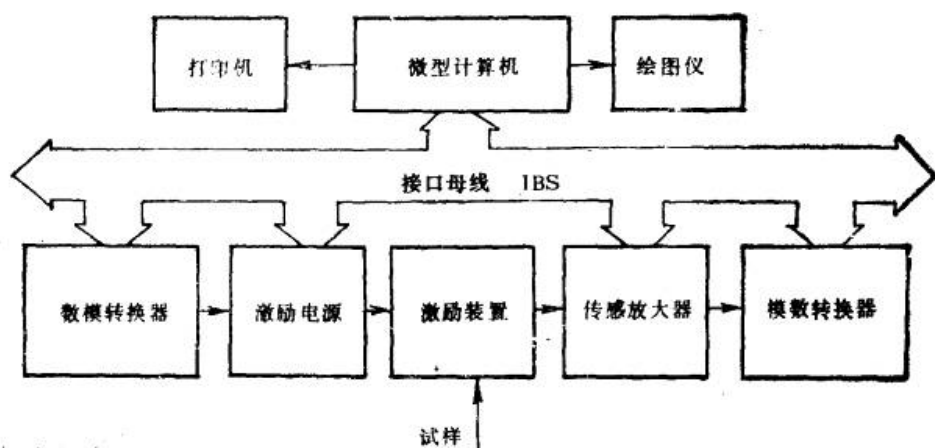


图 4-28 ATS 原理方框图

换器发出激励函数 $X(t)$ ，经过激励机构作用于被测试样。用各种相应的传感放大器将试样的响应函数 $R(t)$ 变为电信号并放大到一定的电平。由 A/D 转换器对 $R(t)$ 的模拟量进行时间和幅值的量化(即采样)，变为数据集，再由接口母线把这些数据集送到计算机中。计算机则根据激励函数 $X(t)$ 和响应函数 $R(t)$ 求出两者之间的函数关系 $R(X)$ 。这就是我们所需要的测量结果，可用数据曲线、图表或者是模拟量的形式直接输出，或者把它们反馈到更大的系统中去。

图 4-29 是用 MATS-2000 型磁性材料自动测量装置测量软磁材料的原理方框图。

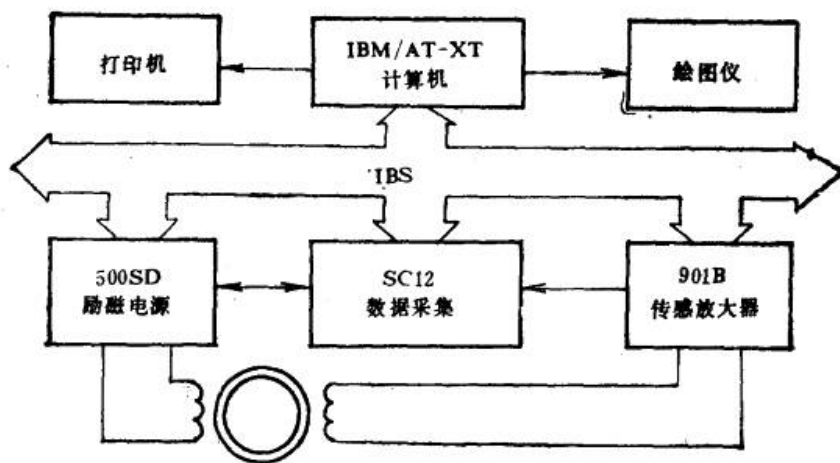


图 4-29 ATS 软磁材料测量原理

计算机通过 SC12 中的 D/A 驱动 500SD 励磁电源产生扫描电流，该电流通过试样的磁化绕组，正比于磁场的信号 $H(t)$ 是从励磁电流回路中的采样电阻上获取的。试样中的磁通变化在测量绕组中产生感应电压 $e = ANdB/dt$ ，式中， AN 为测量绕组的匝数和试样截面积的乘积。感应信号被送到模拟积分器 (901B) 进行积分运算，获得正比于磁感应强度 B 的输出电压为：

$$U = \frac{1}{RC} \int AN \frac{dB}{dt} = \frac{AN}{RC} B(t) + B[0]$$

$H(t)$ 和 $B(t)$ 两组数据集被送入计算机进行数据处理，便可获得磁滞回线和磁化曲线及

其上面所定义的各种磁性参数。其数据处理功能包含了对积分器零点漂移的修正。

MATS-2000 型测量装置的一个最大特点是, 激励磁电源的工作方式, 除可以用磁场扫描法获得磁滞回线和磁化曲线及其参数外, 还可以用冲击法测量材料的准静态磁特性。它彻底摆脱了长期以来磁性测量对冲击电流计的依赖, 同时又保留和完善了冲击测量法, 而且操作大为简化, 灵敏度可达 $4 \times 10^{-4} \text{Wb}$, 已超过了最好的冲击电流计。

图 4-30 是用 MATS-2000 型磁性材料自动测量装置测量永磁材料的原理方框图。与图 4-29 相比, 除励磁电源和磁化装置不同之外, 还采用了霍尔效应磁强计 (901H) 测量磁场。从 901B 和 901H 获取正比于磁感应强度 $B(t)$ 和磁场强度 $H(t)$ 的信号被送到 A/D 转换器的第一和第二通道进行采样, 形成 $B(t)$ 、 $H(t)$ 两组数据集送入计算机进行数据处理, 其测量原理与软磁相同。数据处理功能除可对积分器零点漂移进行修正之外, 还能对霍尔元件的非线性和对测量线圈中的空气磁通进行补偿, 并可进行 $B(H)$ 曲线和 $M(H)$ 曲线的相互转换。

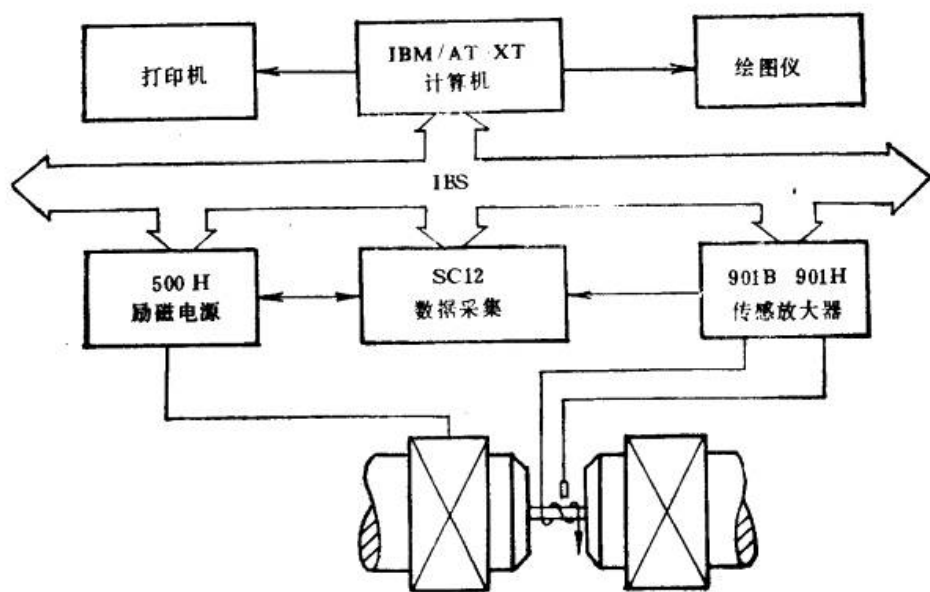


图 4-30 ATS 永磁材料测量原理

第五章 磁性材料本征磁特性的测量

磁性材料的本征磁性参数包括饱和磁化强度 M_s 、居里温度 θ_f (或抵消温度 θ_c)、磁各向异性常数 K 、磁致伸缩系数 λ 。这些参数与技术参数的区别在于,它们仅与材料的化学成分和晶体结构有关(除存在有序化过程之外),几乎与晶粒的大小、取向以及应力分布等结构因素无关。所以这些参数又叫做结构不灵敏参数。

测量这些参数,在理论上,是研究自发磁化有关课题的实验基础,在实践上,是研究与磁性材料的成分和晶体结构转变有关问题的手段。

5.1 饱和磁化强度 M_s 的测量

饱和磁化强度 M_s 的测量,无论对于什么类型的磁性材料,都是属于高磁场下的测量。我们知道,在技术磁化过程中,磁化强度随着磁场强度的增长而趋近极限值,这个极限值就叫做饱和磁化强度。

由铁磁理论可知,当试样磁化到饱和时,其内部已不存在磁畴结构,整个样品,相当于一个大磁畴。但在实际测量中,我们仍然会观察到这样一种现象:随着磁场的增长磁化强度仍有微小的上升,我们把这种磁化过程称为平行过程。饱和磁化强度应是平行过程无关的自发磁化强度。这一点在以后将要讨论的测量方法中是应给予足够重视的。

测量饱和磁化强度的方法很多,这里我们只介绍几种常用的方法。测量的对象也主要是常用的磁性材料试样而不是顺磁性物质的试样。测量方法根据原理的不同而分为:(1)冲击电流计法;(2)磁秤法;(3)振动样品(或线圈)磁强计法;(4)微波方法。

一、冲击电流计法测量饱和磁化强度 M_s

应用冲击电流计测量饱和磁化强度 M_s ,其实就是在高磁场下用冲击法测量技术磁化曲线。在 4.2 节中已经讨论过测量磁化曲线的方法,如果将这个办法加以适当改进就可以测量饱和磁化强度 M_s 。本节只讨论由高场磁化曲线确定 M_s 的原理。

在高场区域,磁化曲线可用外斯趋近饱和定律来描述:

$$M = M_s \left(1 - \frac{a_1}{H} \right) \quad (5-1)$$

式中, a_1 ——磁场硬度系数,表征物质反抗磁饱和的特性。

在高磁场下磁化强度 M 会逐渐地趋近于某一个定值。因此,人们往往会错误地在不很高的磁场下进行测量,并将测量结果作为饱和值。例如,金属磁性材料在不同热处理工艺下应该有相同的 M_s ,但由于磁化曲线的形状不同,即使在较高的磁场下,磁化强度也有差别。所以,在不同的磁场下它就有不同的测量值,这是显而易见的。

对于式(5-1),在测量技术上通常写成:

$$\frac{M}{H} = \frac{M}{M_s} \cdot \frac{M_s - M}{a_1}$$

由于在高场区 $M \cong M_s$, 故

$$\frac{M}{H} = \frac{M_s - M}{a_1} = \frac{M_s}{a_1} - \frac{1}{a_1} M \quad (5-2)$$

根据式(5-2), 在确定磁场强度范围时, 必须使磁化率 $\frac{M}{H}$ 与磁化强度 M 满足线性关系, 即, $\frac{M}{H} = f(M)$ 是线性函数。这个原则在以后将要讨论的其它方法中也是适用的。由式(5-2)可以得到用冲击法测量 M_s 的程序: 在线性范围内, 对应于不同的磁场强度值, 测量磁化强度 M ; 以 M 为横坐标, $\frac{M}{H}$ 为纵坐标, 绘出 $\frac{M}{H} = f(M)$ 直线, 此直线与横轴的交点就是饱和磁化强度 M_s (图 5-1)。这种测量 M_s 的方法已被实践证明是有效的。

只有在高磁场下进行测量才能满足上述线性条件, 但是目前还不能指出一个对各类材料都适用的磁场强度范围。针对不同类型的材料, 必须用实验方法来确定这个范围。在测量技术中, 目前不少的人都在 $2.4 \times 10^5 \text{A/m}$ (约 $3 \times 10^3 \text{Oe}$) 的磁场下进行测量。在使用冲击法时, 原则上可以采用 4.8 节中叙述的方法。但是较为妥善的办法还是采用圆柱样品四绕组法并将样品置于电磁铁强磁场中磁化。

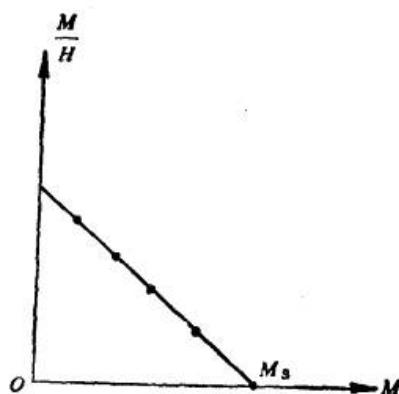


图 5-1 外推法求 M_s 的图解

与此同时, 还必须采取可能的措施, 提高冲击电流计的灵敏度和分辨率。如采用平衡电路法, 将冲击电流计仅作为指零仪使用, 灵敏度可以很高。

二、磁秤法测量饱和磁化强度 M_s

磁秤法是根据磁性物质在非均匀磁场中的受力原理来确定饱和磁化强度的方法。使用这种方法可以在不同温度下进行测量, 从而确定饱和磁化强度随温度的变化规律以及居里温度。

设一小球样品处在非均匀磁场中, 若样品的质量为 m , 饱和磁化强度为 M_s , 体积为 V , 则样品在此非均匀磁场内沿任意轴向 α ($\alpha = x, y, z$) 所受的力为:

$$F_\alpha = \mu_0 M_s V \frac{\partial H}{\partial \alpha} \quad (5-3)$$

或

$$F_\alpha = \mu_0 \sigma_s m \frac{\partial H}{\partial \alpha} \quad (5-4)$$

式中, σ_s 为单位质量的饱和磁化强度, 称为比饱和磁化强度。显然, 在上两式中有

$$\sigma_s m = M_s \cdot V$$

则

$$M_s = \sigma_s \cdot d \quad (5-5)$$

式中, d 为试样的密度。如果磁场不均匀, 受力则表现在与磁场垂直的 z 方向, 即

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial y} = 0$$

而

$$\frac{\partial H}{\partial z} \neq 0$$

那么, 式(5-3)、(5-4)就可写成:

$$F_z = \mu_0 M_s V \frac{\partial H}{\partial z} \quad (5-6)$$

或

$$F_z = \mu_0 \sigma_s m \frac{\partial H}{\partial z} \quad (5-7)$$

从式(5-6)、(5-7)可看出, 试样所受的力是沿 $\frac{\partial H}{\partial z} > 0$ 的方向, 也就是沿磁场增加的方向, 只要能测量出试样所受的力 F_z 和磁场梯度 $\frac{\partial H}{\partial z}$, 就可以用绝对法测量饱和磁化强度 M_s 。但是, 在测量技术中, 磁场梯度是难以精确测量的, 所以, 往往采用相对法测量。

下面讨论几种常用来测量纵向力的磁秤装置。

(一) 磁天平

磁天平就是利用一个灵敏天平来测定磁性物质在不均匀磁场中所受纵向力的装置。其原理如图 5-2 所示。图中试样在 z 方向受到一个纵向力 F_z 的作用, 其大小由式(5-6)或式(5-7)确定。无磁场作用时, 在天平的一个盘里加上适量砝码平衡样品的重量; 加磁场后, 由于 F_z 的作用, 原来的平衡被破坏, 需要增加砝码来达到新的平衡。当天平重新平衡时, 必有:

$$F_z = \mu_0 \sigma_s m \frac{\partial H}{\partial z} = g \cdot \Delta W$$

式中, g ——重力加速度; ΔW ——加磁场前后使天平平衡所加的砝码之差。

这时, 比饱和磁化强度可由下式确定:

$$\sigma_s = \frac{g \cdot \Delta W}{\mu_0 m \frac{\partial H}{\partial z}} \quad (5-8)$$

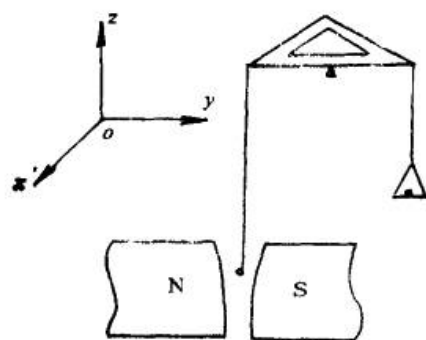


图 5-2 磁性天平原理

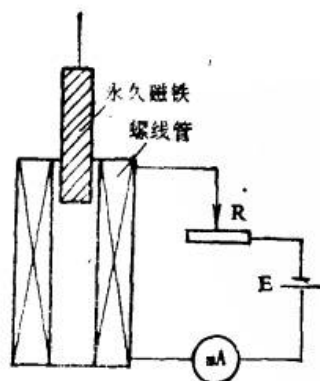


图 5-3 磁天平的电磁平衡装置

在图 5-2 中, 也可借助于一个电磁装置用电磁方法使天平恢复平衡, 这种装置的结构

如图 5-3 所示。图中与天平右盘相连的小磁铁的一端伸延到一个小线圈的中央，当线圈通过电流时，它所产生的磁场吸引小磁铁，通过控制电流的大小就可以调节天平的平衡。

小磁铁由具有高矫顽力的永磁合金制成。设其剩余磁化强度为 M_r ，截面积为 S ，小线圈通过电流 i 后所产生的磁场为 $H = C' \cdot i$ ，故作用于小磁铁的力 f_z 为：

$$\begin{aligned} f_z &= \frac{\partial}{\partial z} (-\mu_0 M_r H dV) - \frac{\partial}{\partial z} (\mu_0 M_r H S dz) \\ &= \mu_0 M_r S \cdot H = \mu_0 M_r S C' i = C i \end{aligned}$$

对系统而言， C 是一个常数。将此式代入式(5-7)得：

$$\sigma_s = \frac{C i}{\mu_0 m \frac{\partial H}{\partial z}} \quad (5-9)$$

利用式(5-8)和式(5-9)，原则上都可以对饱和磁化强度 M_s 作绝对测量。但是，由于磁场梯度难以测量准确，在测量实践中往往仍然应用相对测量法。

下面仍以图 5-2 的磁天平为例，说明相对测量法的测量步骤。若将标准试样置于非均匀磁场中，测得纵向力为：

$$F_z = g \Delta W_0 = \mu_0 \sigma_{s0} m_0 \frac{\partial H}{\partial z}$$

然后再将被测试样置于与标准试样相同的位置上，测得试样所受的纵向力为：

$$F'_z = g \Delta W_x = \mu_0 \sigma_{sx} m_x \frac{\partial H}{\partial z}$$

以上两式中，由于 $\frac{\partial H}{\partial z}$ 相等，可以得到

$$\sigma_{sx} = \frac{\sigma_{s0} m_0 \Delta W_x}{\Delta W_0 m_x} \quad (5-10)$$

式中，脚标“0”和“x”分别代表标准试样和被测试样。

对于图 5-3 的结构，同样也可得到下面关系式：

$$\sigma_{sx} = \frac{\sigma_{s0} m_0 i_x}{i_0 \cdot m_x} \quad (5-11)$$

若知道了试样的比饱和磁化强度 σ_s ，则试样的饱和磁化强度就可由式(5-5)得到。

在测量技术中，标准试样一般都使用密度为 8.90 kg/m^3 、纯度为 99.995% 的镍球，饱和磁化强度 $M_s = 485.6 \text{ kAm}^{-1}$ 。

测量一般都在电磁铁中进行，利用具有特殊形状的极头提供所需的非均匀磁场。从测量原理来看，尤其是应用相对测量法时，对磁场要求严格，既需要非均匀磁场的梯度比较大，又要求在一小段范围内磁场梯度变化不大。最能满足这个条件的是著名的索克斯密思(Sucksmith)极头(图 5-4)。

这种极头在 z 轴方向存在着两个受力均匀区：在 A 区域中， $\partial H / \partial z$ 较小，但均匀区域甚大，适于测量铁磁物质；在 B 区域中， $\partial H / \partial z$ 较大，但均匀区域较小，适于测量顺磁物质。

也可以用勒维斯(Lewis)线圈和一个大功率电源为电磁铁磁场提供磁场梯度，以代替上述的索克斯密思极头。勒维斯线圈由两组平面线圈构成(图 5-5)，其中 A 线圈的磁

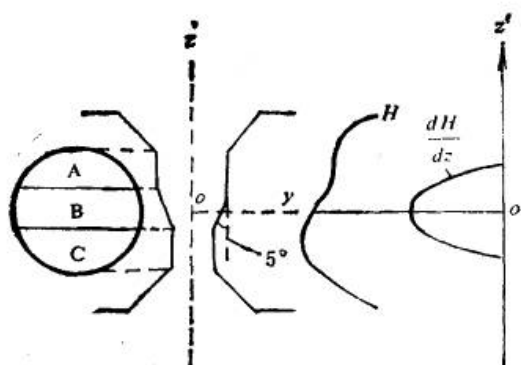


图 5-4 索克斯密思极头

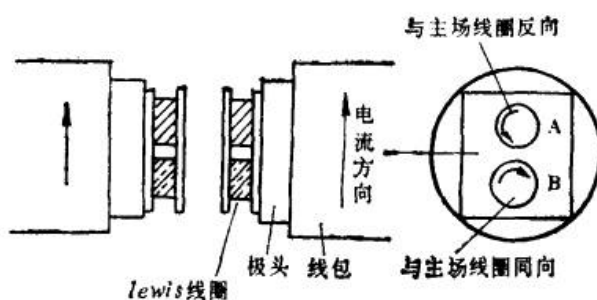


图 5-5 勒维斯 (Lewis) 梯度场线圈

场方向与电磁铁方向相反，而 B 线圈的磁场方向与电磁铁磁场方向相同。当磁极间隙为 5cm，应用水冷却消耗 2.5kW 的功率的条件下可以产生高于 $4 \times 10^4 \text{ Acm/m}$ 的磁场梯度，在 1cm 的范围内梯度均匀性优于 $\pm 5\%$ 。用这种线圈装成的磁性天平，即使工作在低场区也还有很高的灵敏度。

(二) 索克斯密思 (Sucksmith) 环秤

索克斯密思环秤(图 5-6)的主要部分是用磷青铜薄片制成的圆环，此环与支持试样的长杆相连。试样放在非均匀磁场中，受到的纵向力 F_z 使弹性圆环变形，再利用由反射镜 M_1 和 M_2 组成的光杠杆系统将其放大。最后由光点的位移来表示被测量 F_z 的大小。

如圆环变形在弹性范围内，则试样将在力 F_z 的作用下，在 z 轴方向发生微小移动， F_z 的大小与光点位移 Δx 成正比，即：

$$F_z = C \cdot \Delta x \quad (5-12)$$

式中， C 是一个只与系统结构有关的常数。

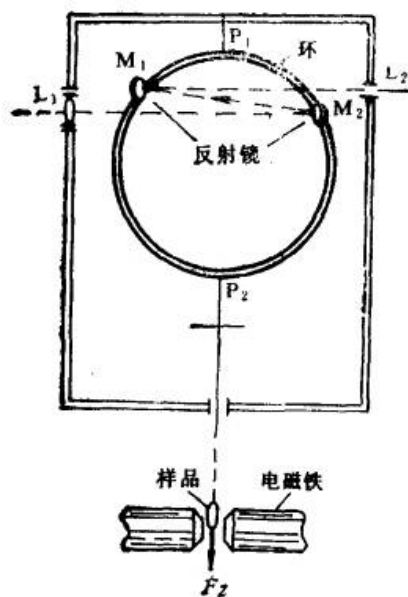


图 5-6 索克斯密思环秤示意图

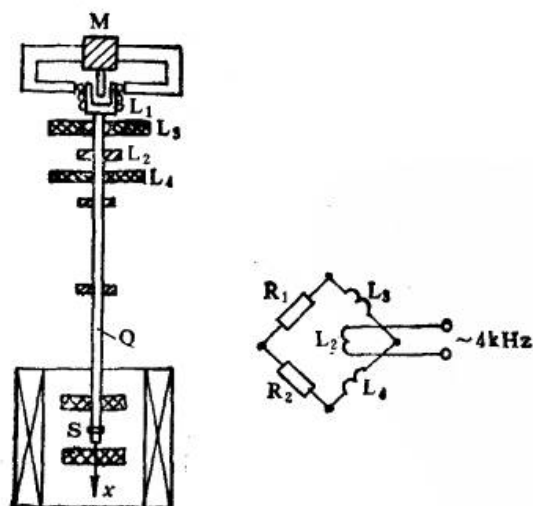


图 5-7 差动变压器电磁秤原理