

实验 14 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线

在各类磁介质中，应用最广泛的是铁磁物质。磁性材料在电力、通讯、电子仪器、汽车、计算机和信息存储等领域有着十分广泛的应用。因此，对铁磁材料性能的研究，无论在理论上或实用上都有很重要的意义。

铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线，是反映铁磁材料磁特性的主要特征。本实验仪用交流电对铁磁材料样品进行磁化，测绘的 $B-H$ 曲线称为动态磁滞回线。测量铁磁材料动态磁滞回线的方法很多，用示波器测绘动态磁滞回线具有直观、方便、迅速及能在不同磁化状态下（交变磁化及脉冲磁化等）进行观察和测绘的独特优点。

【实验目的】

1. 认识铁磁物质的磁化规律，比较两种典型的铁磁物质的动态磁化特性。
2. 测定样品的基本磁化曲线，作 $\mu-H$ 曲线。
3. 测定样品的 H_c 、 B_r 、 H_m 和 B_m 等参数。
4. 测绘样品的磁滞回线，估算其磁滞损耗。

【实验仪器】

TH-MHC 磁滞回线测量组合实验仪

【实验原理】

1. 铁磁材料的磁滞特性

铁磁物质是一种性能特异，用途广泛的材料。铁、钴、镍及其众多合金以及含铁的氧化物（铁氧体）均属铁磁物质。其特性之一是在外磁场作用下能被强烈磁化，故磁导率 μ 很高。另一特征是磁滞，即磁场作用停止后，铁磁物质仍保留磁化状态，磁滞现象是反复磁化过程中磁场强度 H 与磁感应强度 B 之间关系的特性。它的磁感应强度不仅依赖于外磁场强度，而且还依赖于原先的磁化程度。图 1 为铁磁物质的磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的关系曲线。

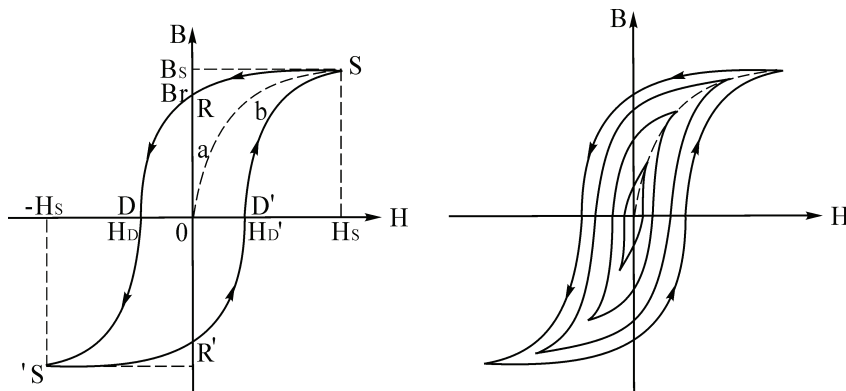


图1 铁磁物质 B 与 H 的关系曲线 图2 铁磁材料的基本磁化曲线

将一块未被磁化的铁磁材料放在磁场中进行磁化，图中的原点 O 表示磁化之前铁磁物质处于磁中性状态，即 $B = H = 0$ ，当磁场强度 H 从零开始增加时，磁感应强度 B 随之从零缓慢上升，如曲线 $0a$ 所示，继之 B 随 H 迅速增长，如曲线 ab 所示，其后 B 的增长又趋缓慢，并当 H 增至 H_s 时， B 达到饱和值 B_s ， $0abS$ 曲线称为起始磁化曲线。如果在达到饱和状态之后使磁场强度 H 减小，这时磁感应强度 B 并不沿起始磁化曲线减小，而是沿另一条新的曲线 SR 下降，对应的 B 值比原先的值大，说明铁磁材料的磁化过程是不可逆的过程。比较线段 OS 和 SR 可知， H 减小 B 相应也减小，但 B 的变化滞后于 H 的变化，这种现象称为磁滞。磁滞的明显特征是当 $H = 0$ 时，磁感应强度 B 值并不等于 0，而是保留一定大小的剩磁 B_r 。

当磁场反向从 0 逐渐变至 $-H_D$ 时，磁感应强度 B 消失，说明要消除剩磁，可以施加反向磁场。当反向磁场强度等于某一定值 H_D 时，磁感应强度 B 才等于 0， H_D 称为矫顽力，它的大小反映铁磁材料保持剩磁状态的能力，曲线 RD 称为退磁曲线。

图 1 还表明，当磁场按 $H_s \rightarrow 0 \rightarrow H_c \rightarrow -H_s \rightarrow 0 \rightarrow H_D \rightarrow H_s$ 次序变化，相应的磁感应强度 B 则沿闭合曲线 $SRDS'R'D'S$ 变化，这条闭合曲线称为磁滞回线。所以，当铁磁材料处于交变磁场中时（如变压器中的铁心），将沿磁滞回线反复被磁化 \rightarrow 去磁 \rightarrow 反向磁化 \rightarrow 反向去磁。在此过程中要耗费额外的能量，并以热的形式从铁磁材料中释放，这种损耗称为磁滞损耗。可以证明，磁滞损耗与磁滞回线所围面积成正比。磁滞是铁磁材料的重要特性之一，研究铁磁材料的磁性就必须知道它的磁滞回线。各种不同铁磁材料有不同的磁滞回线，主要是磁滞回线的宽、窄不同和矫顽力大小不同。

初始状态为 $H = B = 0$ 的铁磁材料，在交变磁场强度由弱到强依次进行磁化，可以得到面积由小到大向外扩张的一簇磁滞回线，如图 2 所示，这些磁滞回线顶点的连线称为铁磁材料的基本磁化曲线。

基本磁化曲线上点与原点连线的斜率称为磁导率，由此可近似确定铁磁材料的磁导率 $\mu = \frac{B}{H}$ ，它表征在给定磁场强度条件下单位 H 所激励出的磁感应强度 B ，直接表示材料磁化性能强弱。从磁化曲线上可以看出，因 B 与 H 非线性，铁磁材料的磁导率 μ 不是常数，而是随 H 而变化(如图 3 所示)，铁磁材料的相对磁导率 $\mu_0 = B/B_0$ 可高达数千乃至数万，这一特点是它用途广泛的主要原因之一。

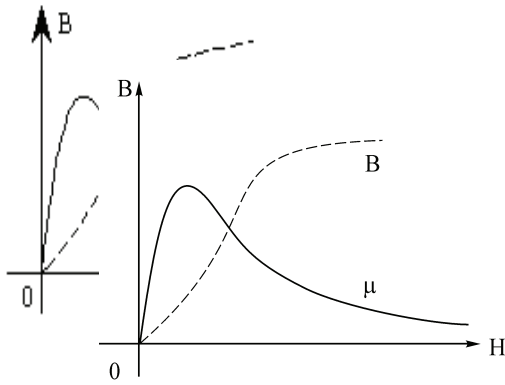


图 3 铁磁材料 μ 与 H 并系曲线

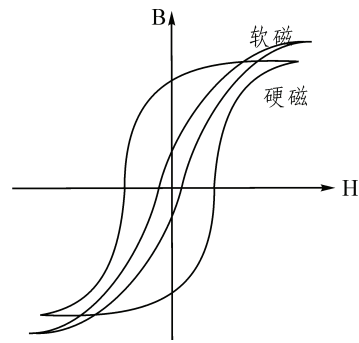


图 4 不同铁磁材料的磁滞回线

可以说磁化曲线和磁滞回线是铁磁材料分类和选用的主要依据，图 4 为常见的两种典型的磁滞回线，其中软磁材料的磁滞回线狭长、矫顽力小($<10^2\text{A/m}$)、剩磁和磁滞损耗均较小，磁滞特性不显著，可以近似地用它的起始磁化曲线来表示其磁化特性，这种材料容易磁化，也容易退磁，是制造变压器、继电器、电机、交流磁铁和各种高频电磁元件的主要材料。而硬磁材料的磁滞回线较宽，矫顽力大($>10^2\text{A/m}$)，剩磁强，磁滞回线所包围的面积肥大，磁滞特性显著，因此硬磁材料经磁化后仍能保留很强的剩磁，并且这种剩磁不易消除，可用来制造永磁体，应用于各种电表、扬声器、录音机等。

2. 示波器测绘磁滞回线原理

待测样品为 EI 型矽钢片， N 为励磁绕组， n 为用来测量磁感应强度 B 而设置的绕组。 R_1 为励磁电流取样电阻，设通过 N 的交流励磁电流为 i ，根据安培环路定律，样品的磁场强度：

$$H = \frac{Ni}{L} \quad ; \quad L \text{ 为样品的平均磁路}$$

观察和测量磁滞回线和基本磁化曲线的线路如图 5 所示。

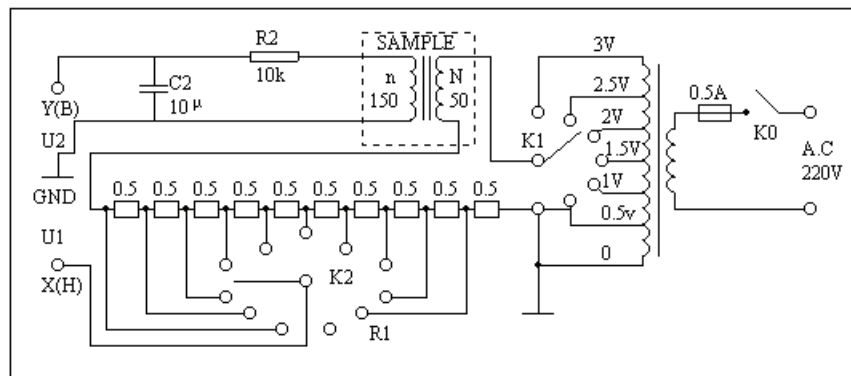


图 5 智能磁滞回线实验线路

$$\therefore i = \frac{U_1}{R_1}$$

$$\therefore H = \frac{N}{LR_1} \cdot U_1 \quad (1)$$

N 、 L 、 R_1 均为已知常数，磁场强度 H 与示波器 X 输入 U_1 成正比，所以由 U_1 可确定 H 。

在交变磁场下，样品的磁感应强度瞬时值 B 是由测量绕组 n 和 R_2C_2 电路确定的。根据法拉第电磁感应定律，由于样品中的磁通 ϕ 的变化，在测量线圈中产生的感应电动势的大小为

$$\varepsilon_2 = n \frac{d\phi}{dt} \quad \phi = \frac{1}{n} \int \varepsilon_2 dt \quad B = \frac{\phi}{S} = \frac{1}{nS} \int \varepsilon_2 dt \quad (2)$$

式中 S 为样品的横截面积。

考虑到测量绕组 n 较小，如果忽略自感电动势和电路损耗，则回路方程为：

$$\varepsilon_2 = i_2 R_2 + U_2$$

式中 i_2 为感生电流， U_2 为积分电容 C_2 两端电压。设在 Δt 时间内， i_2 向电容 C_2 的充电量为 Q ，则

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} \quad \therefore \varepsilon_2 = i_2 R_2 + \frac{Q}{C_2}$$

如果选取足够大的 R_2 和 C_2 ，使得 $i_2 R_2 \gg \frac{Q}{C_2}$ ，则上式可以近似改写为

$$\varepsilon_2 = i_2 R_2$$

$$\therefore i_2 = \frac{dQ}{dt} = C_2 \frac{dU_2}{dt} \quad \therefore \varepsilon_2 = C_2 R_2 \frac{dU_2}{dt} \quad (3)$$

将 (3) 式两边对时间 t 积分，代入 (2) 式可得

$$B = \frac{C_2 R_2}{nS} U_2 \quad (4)$$

上式中 C_2 、 R_2 、 n 和 S 均为已知常数。磁场强度 B 与示波器 Y 输入 U_2 成正比，所以由 U_2 可确定 B 。

在交流磁化电流变化的一个周期内，示波器的光点将描绘出一条完整的磁滞回线，并在以后每个周期都重复此过程，这样在示波器的荧光屏上可以看到稳定的磁滞回线。

综上所述，将图 5 中的 U_1 和 U_2 分别加到示波器的“X 输入”和“Y 输入”便可观察样品的 $B-H$ 曲线；如将 U_1 和 U_2 加到测试仪的信号输入端可测定样品的饱和磁感应强度 B_s 、剩磁 R_r 、矫顽力 H_D 、磁滞损耗 (BH) 以及磁导率 μ 等参数。

【实验步骤】

1. 电路连接：选样品 1 按实验仪上所给的电路图连接线路，并令 $R_1 = 2.5\Omega$ ，“U 选择”置于 O 位。 U_H 和 U_B （即 U_1 和 U_2 ）分别接示波器的“X 输入”和“Y 输入”，插孔 \perp 为公共端。

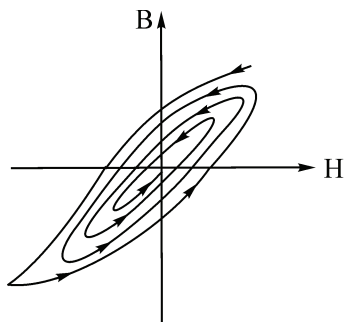


图 6 退磁示意图

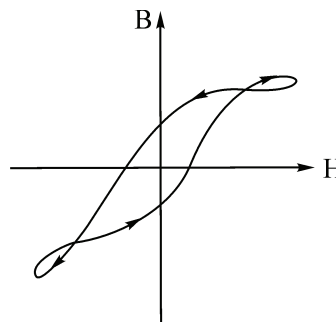


图 7 U_2 和 B 的相位差等因素引起的畸变

2. 样品退磁：开启实验仪电源，对试样进行退磁，即顺时针方向转动“U 选择”旋钮，令 U 从 0 增至 $3V$ ，然后逆时针方向转动旋钮，将 U 从最大值降为 0，其目的是消除剩磁，确保样品处于磁中性状态，即 $B = H = 0$ ，如图 6 所示。

3. 观察磁滞回线：开启示波器电源，调节示波器微调旋钮均置于“cal”，“AC-GND-DC”耦合开关均置于“DC”，接通示波器“X-Y”按钮，将光点位于荧光屏坐标网格中心后，将

“AC-GND-DC”耦合开关恢复到“AC”位置。调实验仪“U 调节”旋钮，使“U 输出”最大（顺时针方向旋至底），令 $U = 2.2V$ ，并分别调节示波器 x 和 y 轴的灵敏度，使荧光屏上出现图形大小合适的磁滞回线（若图形顶部出现编织状的小环，如图 7 所示，这时可降低励磁电压 U 予以消除）。

4. 观察基本磁化曲线，按步骤 2 对样品进行退磁，从 $U = 0$ 开始，逐档提高励磁电压，将在荧光屏上得到面积由小到大一个套一个的一簇磁滞回线。这些磁滞回线顶点的连线就是样品的基本磁化曲线，借助长余辉示波器，便可观察到该曲线的轨迹。

5. 取 $U_1 \approx 200mV$ ， $R_1 = 2.5\Omega$ ，观察、比较样品 1 和样品 2 的磁化性能。

6. 测绘 $\mu-H$ 曲线：仔细阅读测试仪的使用说明，连接实验仪和测试仪之间的信号连线。开启电源，对样品进行退磁后，依次测定 $U = 0.5, 1.0 \cdots 3.0V$ 时的十组 H_m 和 B_m 值，作 $\mu-H$ 曲线。

7. 令 $U = 3.0V$, $R_1 = 2.5\Omega$ 测定样品 1 的 H_c 、 B_r 、 H_m 、 B_m 和 (BH) 等参数。

8. 取步骤 7 中的 H 和其相应的 B 值, 用坐标纸绘制 $B-H$ 曲线 (如何取数? 取多少组数据? 自行考虑), 并估算曲线所围面积。

以上磁滞回线基本实验内容均可以由 TH-MHC 型智能磁滞回线实验组合仪完成。

【实验数据记录】

表一 基本磁化曲线与 $\mu-H$ 曲线

U(V)	H×10 ⁴ A/m	B×10 ² T	$\mu=B/H(H/m)$	U(V)	H×10 ⁴ A/m	B×10 ² T	$\mu=B/H(H/m)$
0.5				2.0			
1.0				2.2			
1.2				2.5			
1.5				2.8			
1.8				3.0			

表二 $B-H$ 曲线 $H_c =$ _____ $B_r =$ _____ $H_m =$ _____ $B_m =$ _____ $(BH) =$ _____

NO	H×10 ⁴ A/m	B×10 ² T	NO	H×10 ⁴ A/m	B×10 ² T	NO	H×10 ⁴ A/m	B×10 ² T

【注意事项】

1. 样品 1 和样品 2 为尺寸 (平均磁路长度和截面积 S) 相同而磁性不同的两只 EI 型铁芯, 两者的励磁绕组匝数 N 和磁感应强度 B 的测量绕组匝数 n 亦相同。其参数如下:

$$N = 50, n = 150, L = 60\text{mm}, S = 80\text{mm}^2$$

2. “U 调节” 旋钮具有带锁装置, 调节时应使其处于开锁状态, 避免在其处于锁紧状态时旋动以至损坏。

3. 本实验中, 示波器始终处于 “X-Y” 工作模式, 当无 X、Y 信号输入时, 屏上仅显示一亮点, 应避免该亮点过亮及长时间停留在某一固定点, 造成荧光屏荧光物过热脱落而出现黑斑。

4. 实验步骤 5 中, 为了方便比较, 应取两样品 U1 的大小相同, 但电压频率可以不同。

5. 实验步骤 6 中, 用万用表测电压时, 应同时用示波器监测磁滞回线, 以保证 U 较大时图形不出现畸变, 但为得到较完整的磁化曲线, U 又不宜太小。因此, 为了取得满意的实验效果, 首先应取一个合适的信号电压 U, 可采用以下方法:

- 1) 先使屏幕上显示出大小合适的磁滞回线图形;
- 2) 使 “U 输入” 及 “U 输出” 最大, 即调信号源幅值旋钮 “AMPLITUDE” 使 “U 输入” 为最大及调实验仪 “U 调节” 旋钮使 “U 输出” 为最大;
- 3) 调信号源频率调节 “FREQUENCY” 旋钮, 减小频率使图形出现扭曲, 再增加频率使图形扭曲现象刚好消失。

【思考题】

1. 为什么有时磁滞回线图形顶部出现编织状的小环, 如何消除?
2. 在测绘磁滞回线和基本磁化曲线时, 为什么要先退磁? 如果不退磁对测绘结果有什么影响?

【实验仪器】

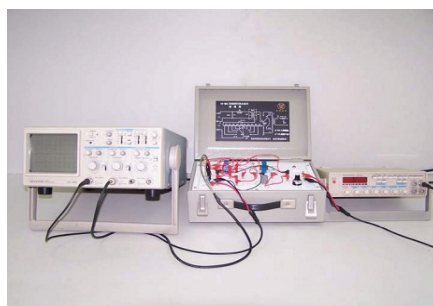


图 8 TH-MHC 实验装置图



图 9 TH-MHC 磁滞回线实验仪



图 10 FG-273A 信号发生器

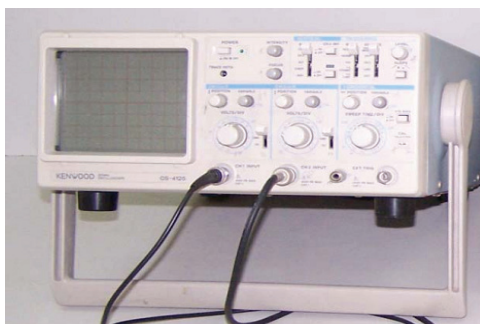


图 11 示波器