

41 用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线

铁磁材料应用广泛，从常用的永久磁铁、变压器铁芯到录音、录像、计算机存储用的磁带、磁盘等都采用铁磁性材料。磁滞回线和基本磁化曲线反映了铁磁材料的主要特征。根据磁滞回线的不同，可将铁磁材料分为硬磁和软磁两大类，其根本区别在于矫顽磁力 H_c 的大小不同。硬磁材料的磁滞回线宽，剩磁和矫顽磁力大（大于 10^2A/m ），因而磁化后，其磁感应强度可长久保持，适宜做永久磁铁。软磁材料的磁滞回线窄，矫顽磁力 H_c 一般小于 10^2A/m ，但其磁导率和饱和磁感强度大，容易磁化和去磁，故广泛用于电机、电器和仪表制造等工业部门。

本实验通过示波器来观测不同磁性材料的磁滞回线和基本磁化曲线，以加深对材料磁特性的认识。

【实验目的】

- 1、掌握磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念，加深对铁磁材料的主要物理量：矫顽力、剩磁和磁导率的理解。
- 2、学会用示波器法观测基本磁化曲线和磁滞回线。
- 3、根据磁滞回线确定磁性材料的饱和磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 的数值。
- 4、研究不同频率下动态磁滞回线的区别。
- 5、改变不同的磁性材料，比较磁滞回线形状的变化。

【实验仪器】

DH4516N 型动态磁滞回线测试仪，示波器。

【实验原理】

1、磁化曲线

如果在由电流产生的磁场中放入铁磁物质，则磁场将明显增强，此时铁磁物质中的磁感应强度比单纯由电流产生的磁感应强度增大百倍，甚至在千倍以上。铁磁物质内部的磁场强度 H 与磁感应强度 B 有如下的关系：

$$B=\mu H$$

对于铁磁物质而言，磁导率 μ 并非常数，而是随 H 的变化而改变的物理量，即 $\mu=f(H)$ ，为非线性函数。所以如图 1 所示， B 与 H 也是非线性关系。

铁磁材料的磁化过程为：其未被磁化时的状态称为去磁状态，这时若在铁磁材料上加一个由小到大的磁化场，则铁磁材料内部的磁场强度 H 与磁感应强度 B 也随之变大，其

B - H 变化曲线如图 1 所示。但当 H 增加到一定值 (H_s) 后, B 几乎不再随 H 的增加而增加, 说明磁化已达饱和, 从未磁化到饱和磁化的这段磁化曲线称为材料的起始磁化曲线。如图 1 中的 OS 端曲线所示。

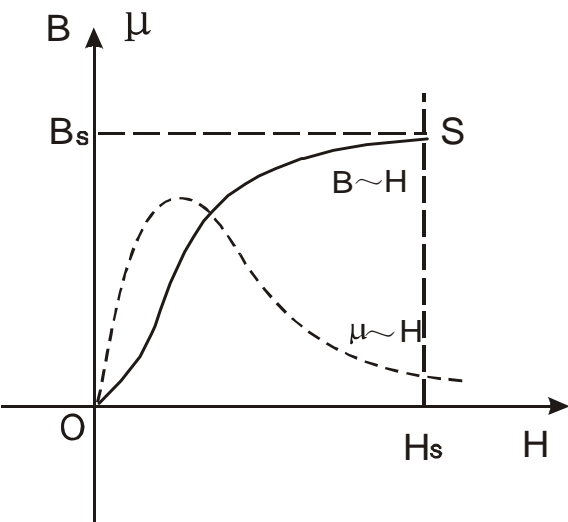


图 1 磁化曲线和 $\mu \sim H$ 曲线

2、磁滞回线

当铁磁材料的磁化达到饱和之后, 如果将磁化场减少, 则铁磁材料内部的 B 和 H 也随之减少, 但其减少的过程并不沿着磁化时的 OS 段退回。而且当磁化场撤消, $H=0$ 时, 磁感应强度仍然保持一定数值 $B=Br$, 称为剩磁 (剩余磁感应强度), 如图 2 所示。

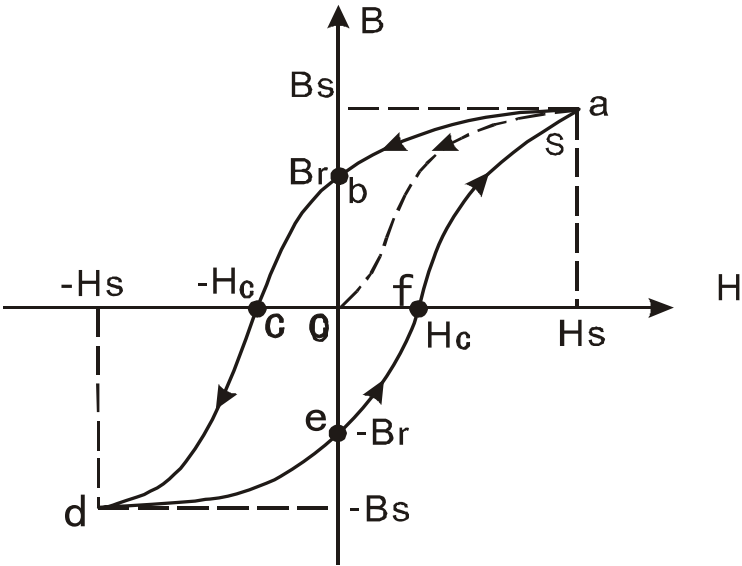


图 2 起始磁化曲线与磁滞回线

若要使被磁化的铁磁材料的磁感应强度 B 减少到 0，必须加上一个反向磁场并逐步增大。当铁磁材料内部反向磁场强度增加到 $H = -H_c$ 时（图 2 上的 c 点），磁感应强度 B 才是 0，达到退磁。图 2 中的 bc 段曲线为退磁曲线， H_c 为矫顽磁力。继续增加反向磁场，铁磁质的磁化达到反向饱和。如果减小反向磁场强度，同样出现剩磁现象。如图 2 所示，所形成的封闭曲线 abcdefa 称为磁滞回线。这种 B 的变化始终落后于 H 的变化的现象，称为磁滞现象。

当从初始状态（ $H = 0$ ， $B = 0$ ）开始周期性地改变磁场强度的幅值时，在磁场由弱到强单调增加过程中，可以得到面积由大到小的一簇磁滞回线，如图 3 所示。其中最大面积的磁滞回线称为极限磁滞回线。

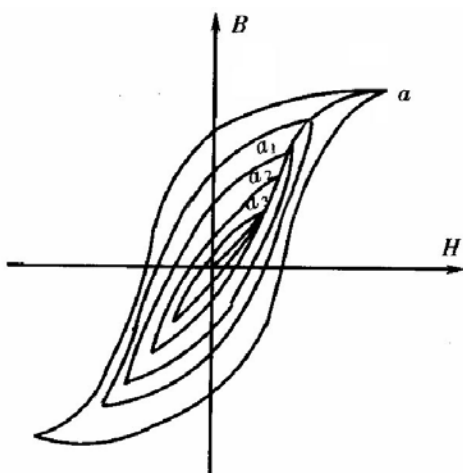


图 3

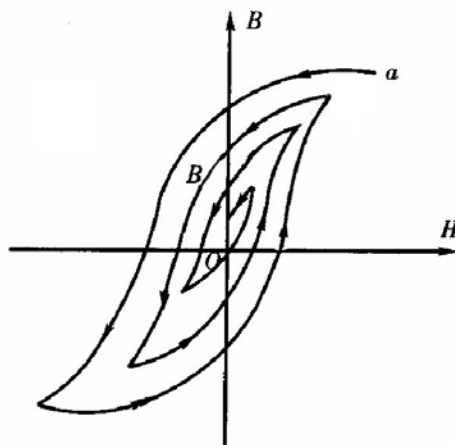


图 4

把图 3 中原点 O 和各个磁滞回线的顶点 a_1, a_2, \dots, a_n 所连成的曲线，称为铁磁性材料的基本磁化曲线。不同的铁磁材料其基本磁化曲线是不相同的。为了使样品的磁特性可以重复出现，也就是指所测得的基本磁化曲线都是由原始状态（ $H = 0$ ， $B = 0$ ）开始，因此在测量前必须进行退磁，消除样品中的剩余磁性，以保证外加磁场 $H = 0$ ， $B = 0$ 。在理论上，要消除剩磁 B_r ，只需通一反向励磁电流，使外加磁场正好等于铁磁材料的矫顽磁力即可。实际上，矫顽磁力的大小通常并不知道，因而无法确定退磁电流的大小。我们从磁滞回线得到启示，如果使铁磁材料磁化达到磁饱和，然后不断改变励磁电流的方向（如采用交变电流），与此同时逐渐减小励磁电流，直到为零。则该材料的磁化过程就是一连串逐渐缩小而最终趋于原点的环状曲线，如图 4 所示。当 H 减小到零时， B 亦同时降为零，达到完全退磁。

实验表明,经过多次反复磁化后, $B-H$ 的量值关系形成一个稳定的闭合的“磁滞回线”。通常以这条曲线来表示该材料的磁化性质。这种反复磁化的过程称为“磁锻炼”。本实验使用交变电流,所以每个状态都是经过充分的“磁锻炼”,随时可以获得磁滞回线。

3、示波器法观测磁滞回线原理

用示波器测量 $B-H$ 曲线的实验线路如图 5 所示。

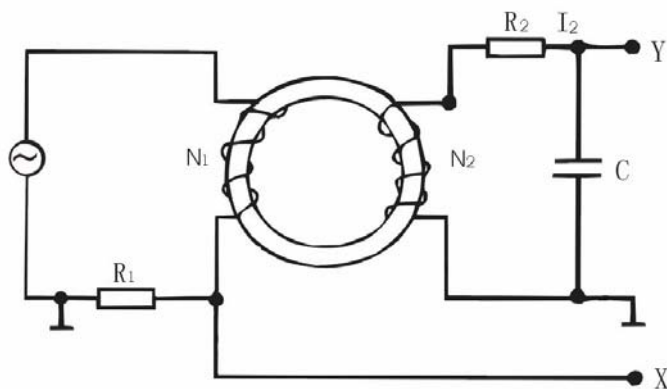


图 5

在圆环状磁性样品上绕有励磁线圈 N_1 匝（原线圈）和测量线圈 N_2 匝（次线圈），当 N_1 通以交变电流 i_1 时，样品内将产生磁场，根据安培环路定律有：

$$i_1 = \frac{HL}{N_1} \quad (1)$$

式中 L 为的环状样品的平均磁路长度。 R_1 两端的电压 U_{R1} 为：

$$U_{R_1} = \frac{LR_1}{N_1} H \quad (2)$$

上式表明磁场强度 H 与 U_{R1} 成正比，将 R_1 两端的电压送到示波器的 X 输入端，即 $U_X = U_{R_1}$ ，则示波器 X 方向偏转量的大小反映了磁场强度 H 的大小。

为了测量磁感应强度 B ，在次级线圈 N_2 上串联一个电阻 R_2 与电容 C 构成一个回路，同时 R_2 与 C 又构成一个积分电路。线圈 N_1 中交变磁场 H 在铁磁材料中产生交变的磁感应强度 B ，因此在线圈 N_2 中产生感应电动势，其大小为：

$$\varepsilon_2 = \frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

式中 S 为线圈 N_2 的横截面积。回路中的电流为：

$$i_2 = \frac{\varepsilon_2}{\sqrt{R_2^2 + (1/\omega C)^2}} \quad (4)$$

式中 ω 为电源的角频率。若适当选择 R_2 和 C 使 $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$ ，则：

$$i_2 \approx \frac{\varepsilon_2}{R_2} \quad (5)$$

电容 C 两端的电压为：

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{N_2 S}{C R_2} B \quad (6)$$

将电容 C 两端电压送至示波器的 Y 轴输入端，即 $U_Y = U_C$ ，则示波器 Y 方向偏转量的大小反映了磁感应强度 B 的大小。

可见，只要通过示波器测出 U_X 、 U_Y 的大小，即可得到相应的 H 和 B 值。当励磁电流周期性变化时，并由小到大调节信号发生器的输出电压时，即能在荧光屏上观察到由小到大扩展的磁滞回线图形。如果逐次记录其正顶点的坐标，并在坐标纸上把它连成光滑的曲线，就得到样品的基本磁化曲线。

【实验内容与步骤】

1. 实验前先熟悉实验仪器的构成。本实验所用 DH4516N 型动态磁滞回线测试仪由测试样品、功率信号源、可调标准电阻、标准电容和接口电路等组成。仪器面板如图 6 所示。

测试样品有两种，一种是圆形罗兰环，材料是锰锌功率铁氧体，磁滞损耗较小；另一种是 EI 型硅钢片，磁滞损耗较大些。信号源的频率在 20~200Hz 间可调；可调标准电阻 R_1 、 R_2 均为无感交流电阻， R_1 的调节范围为 0.1~11 Ω ； R_2 的调节范围为 1~110k Ω 。标准电容有 0.1 μ F~11 μ F 可选，其介质损耗很小。

实验样品的参数如下：

样品 1：平均磁路长度 $L=0.130\text{m}$ ，铁芯实验样品截面积 $S=1.24 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ，线圈匝数： $N_1=150$ 匝， $N_2=150$ 匝； $N_3=150$ 匝。

样品 2：平均磁路长度 $L=0.075\text{m}$ ，铁芯实验样品截面积 $S=1.20 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ，线圈匝数： $N_1=150$ 匝， $N_2=150$ 匝； $N_3=150$ 匝。

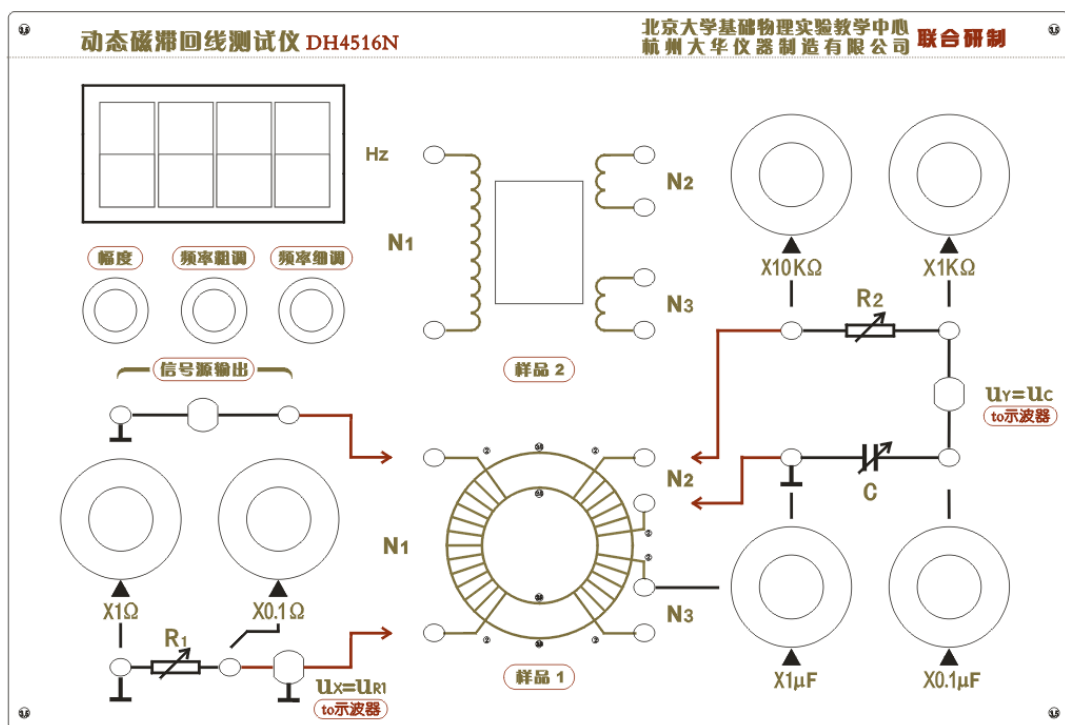


图 6 DH4516N 型动态磁滞回线测试仪

2. 观测样品 1 在不同频率交流信号下的磁化曲线和磁滞回线。

(1) 按图 5 所示的线路图接线。

注意：由于信号源、电阻 R_1 和电容 C 的一端已经与地相连，所以不能与其他接线端相连接。否则会短路信号源、 U_R 或 U_C ，从而无法正确做出实验。

标有红色箭头的线表示接线的方向，样品的更换通过换接接线位置来完成。

(2) 逆时针调节幅度调节旋钮到底，使信号输出最小。调示波器显示工作方式为 X-Y 方式，示波器 X 输入和 Y 输入选择为 DC 方式。

(3) 接通示波器和 DH4516N 型动态磁滞回线测试仪电源，适当调节示波器辉度，以免荧光屏中心受损。预热 10 分钟后开始测量。

(4) 将示波器光点调至显示屏中心，调节实验仪频率调节旋钮，频率显示窗显示 50.00Hz。

(5) 退磁。

①单调增加励磁电流，即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮，使示波器显示的磁滞回线上 B 值缓慢增加，达到饱和。改变示波器上 X、Y 输入衰减器开关（偏转因数旋钮），并将他们的微调旋钮顺时针旋转到底（此时偏转因数旋钮对应的数值处于校准状态），调节 R_1 、

R_2 的大小，使示波器显示出典型美观的磁滞回线图形，并使磁滞回线顶点在水平方向上的读数为（-5.00，+5.00）格，此后，保持示波器上X、Y输入偏转因数旋钮和 R_1 、 R_2 值固定不变，以便进行 H 、 B 的测量。

②单调减小励磁电流，即缓慢逆时针调节幅度调节旋钮，直到示波器最后显示为一点，位于显示屏的中心，即 X 和 Y 轴线的交点，如不在中间，可调节示波器的 X 和 Y 位移旋钮。实验中可用示波器 X、Y 输入的接地开关检查示波器的中心是否对准屏幕 X、Y 坐标的交点。

注意：励磁电流在实验过程中只允许单调增加或减少，不能时增时减。

在频率较低时，由于相位失真，磁滞回线经常会出现如图 7 所示的畸变。这时需要选择合适的 R_1 、 R_2 和 C 的阻值，可避免这种畸变，得到最佳磁滞回线图形。

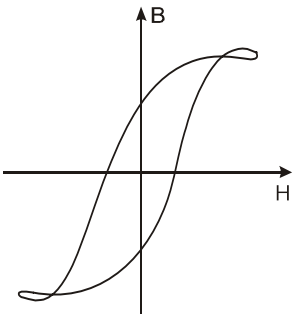


图 7

（6）测磁化曲线（即测量大小不同的各个磁滞回线的顶点的连线）。

①单调增加磁化电流，即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮，使磁滞回线顶点在 X 方向读数分别为 0、0.40、0.80、1.20、1.60、2.00、2.40、3.00、4.00、5.00，单位为格（指一大格），记录磁滞回线顶点在 Y 方向上读数。将数据填入表 1。

表 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X/格	0	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00	2.40	3.00	4.00	5.00
Y/格										

注意：测量过程中保持示波器上X、Y输入偏转因数旋钮和 R_1 、 R_2 值固定不变，并记录下列数据：

$$R_1 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega; \quad R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega; \quad C = \underline{\hspace{2cm}} \text{F};$$

$$S_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{V/格 (X偏转因数调节钮的读数)};$$

$$S_y = \underline{\hspace{2cm}} \text{V/格 (Y偏转因数调节钮的读数)}。$$

②计算相应的 H (A/m) 和 B (mT) 值。

根据 X、Y 的读数可以得到输入到示波器 X 偏转板和 Y 偏转板上的电压：

$$U_x = S_x \cdot X$$

$$U_y = S_y \cdot Y$$

由公式 (2) 和 (6) 可知：

$$U_x = U_{R_1} = \frac{LR_1}{N_1} H$$

$$U_y = U_c = \frac{N_2 S}{CR_2} B$$

则有：

$$H = \frac{N_1 \cdot S_x}{LR_1} X$$

$$B = \frac{C \cdot R_2 \cdot S_y}{N_2 S} Y$$

③根据得到的 H 和 B 值绘制磁化曲线，并给出饱和磁感应强度的大小。

④计算磁导率 μ (指相对磁导率)，并绘制 μ - H 曲线。

磁导率定义为：

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

通常铁磁材料的 μ 是温度 T 、磁化场 H 、频率 f 的函数。基本磁化曲线上的点与原点的连线的斜率即为磁导率。 $H \rightarrow 0$ 时的磁导率称为起始磁导率，即

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}$$

(7) 测绘动态磁滞回线

①当示波器显示的磁滞回线的顶点在 X 方向上读数为 (-5.00, +5.00) 格时 (即在饱和状态), 记录磁滞回线在 X 坐标分别为 -5.00、-4.00、-3.00、-2.00、-1.50、-1.00、-0.50、0.00、0.50、1.00、1.50、2.00、3.00、4.00、5.00 格时, 相对应的 Y 坐标, 将数据填入表 2。

表 2

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
X/格	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.50	-1.00	-0.05	0.00
Y ₁ /格								
Y ₂ /格								

续表

序号	9	10	11	12	13	14	15
X/格	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00
Y ₁ /格							
Y ₂ /格							

②计算相应的 H 和 B 值, 并绘制 $B-H$ 图 (磁滞回线)。

③给出剩磁和矫顽力的大小。

(8) 逆时针调节 (幅度调节旋钮到底), 使信号输出最小, 调节实验仪频率调节旋钮, 频率显示窗分别显示 150.0Hz, 重复上述 (5) — (7) 的操作, 比较磁滞回线形状的变化。

3. 观测样品 2 在交流信号频率为 50 赫兹时的磁化曲线和磁滞回线, 并与样品 1 进行比较。

测量方法同样品 1

【思考题】

1. 什么叫磁滞回线? 测绘磁滞回线和磁化曲线为何要先退磁?
2. 怎样使样品完全退磁, 使初始状态在 $H=0$, $B=0$ 点上?
3. 用示波器法观测磁滞回线时, 通过什么方法获得 B 和 H 两个磁学量?
4. 如何判断铁磁材料属于软、硬磁材料?
5. 磁滞回线的形状随交流信号频率如何变化? 为什么?

注: 做本实验前请预习或复习示波器的使用方法 (实验 20)。