

用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线

磁性材料应用广泛，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、磁盘等都采用磁性材料。磁滞回线和基本磁化曲线反映了磁性材料的主要特征。通过实验研究这些性质不仅能掌握用示波器观察磁滞回线以及基本磁化曲线的基本测绘方法，而且能从理论和实际应用上加深对材料磁特性的认识。

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（达 $120\text{--}20000\text{A/m}$ 以上），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 120A/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。磁化曲线和磁滞回线是铁磁材料的重要特性，也是设计电磁机构作仪表的重要依据之一。

本实验采用动态法测量磁滞回线。需要说明的是用动态法测量的磁滞回线与静态磁滞回线是不同的，动态测量时除了磁滞损耗还有涡流损耗，因此动态磁滞回线的面积要比静态磁滞回线的面积要大一些。另外涡流损耗还与交变磁场的频率有关，所以测量的电源频率不同，得到的 $B\text{--}H$ 曲线是不同的，这可以在实验中清楚地从示波器上观察到。

【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、学会用示波法测绘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，并确定某一频率下的磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 数值。
- 5、改变不同的磁性材料，比较磁滞回线形状的变化。

【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。

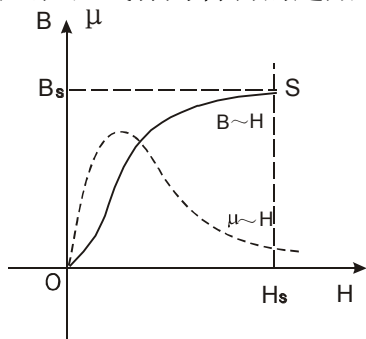


图 1 磁化曲线和 $\mu \sim H$ 曲线

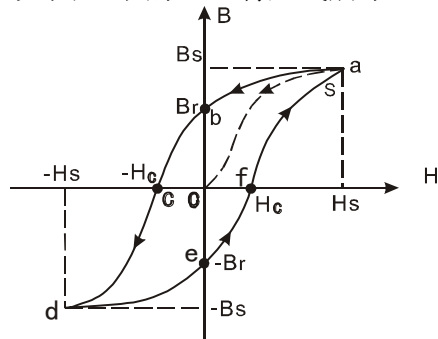


图 2 起始磁化曲线与磁滞回线

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。从图 2 可知当磁化场撤消， $H=0$ 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）。

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。如图 2 所示，当 H 按 $O \rightarrow H_s \rightarrow O \rightarrow H_c \rightarrow H_s \rightarrow O \rightarrow H_c \rightarrow H_s \rightarrow$ 的顺序变化时， B 相应沿 $O \rightarrow B_s \rightarrow O \rightarrow Br \rightarrow O \rightarrow B_s \rightarrow Br \rightarrow O \rightarrow B_s$ 顺序变化。图中的 Oa 段曲线称起始磁化曲线，所形成的封闭曲线 $abcdefa$ 称为磁滞回线。 bc 曲线段称为退磁曲线。由图 2 可知：

(1) 当 $H=0$ 时， $B \neq 0$ ，这说明铁磁材料还残留一定值的磁感应强度 Br ，通常称 Br 为铁磁物质的剩余感应强度（剩磁）。

(2) 若要使铁磁物质完全退磁，即 $B=0$ ，必须加一个反方向磁场 H_c 。这个反向磁场强度 H_c ，称为该铁磁材料的矫顽磁力。

(3) B 的变化始终落后于 H 的变化，这种现象称为磁滞现象。

(4) H 上升与下降到同一数值时，铁磁材料内的 B 值并不相同，退磁化过程与铁磁材料过去的磁化经历有关。

(5) 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，在磁场由弱到强地单调增加过程中，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。

(6) 由于铁磁材料磁化过程的不可逆性及具有剩磁的特点，在测定磁化曲

线和磁滞回线时，首先必须将铁磁材料预先退磁，以保证外加磁场 $H=0$ ， $B=0$ ；其次，磁化电流在实验过程中只允许单调增加或减少，不能时增时减。在理论上，要消除剩磁 B_r ，只需通一反向磁化电流，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，然后不断改变磁化电流的方向，与此同时逐渐减少磁化电流，直到于零。则该材料的磁化过程中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。

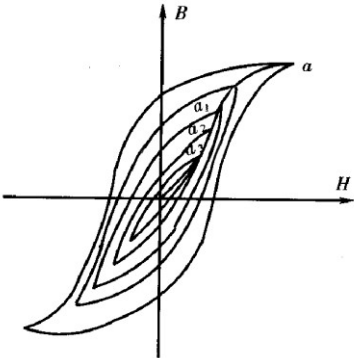


图 3

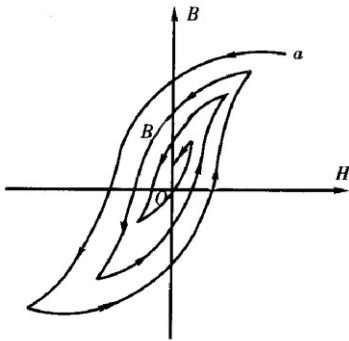


图 4

我们把图 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，在测量前必须进行退磁，以消除样品中的剩余磁性。

在测量基本磁化曲线时，每个磁化状态都要经过充分的“磁锻炼”。否则，得到的 $B-H$ 曲线即为开始介绍的起始磁化曲线，两者不可混淆。

3、示波器显示 $B-H$ 曲线的原理线路

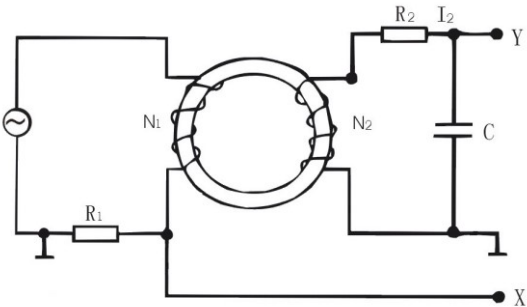


图 5

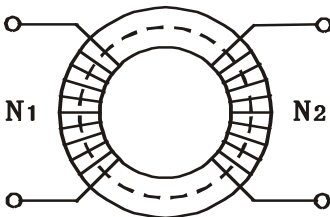


图 6

示波器测量 B—H 曲线的实验线路如图 5 所示。

本实验研究的铁磁物质是一个环状式样（如图 6 所示）。在式样上绕有励磁线圈 N_1 匝和测量线圈 N_2 匝。若在线圈 N_1 中通过磁化电流 i_1 时，此电流在式样内产生磁场，根据安培环路定律 $HL=N_1i_1$ ，磁场强度 H 的大小为：

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

其中 L 为的环状式样的平均磁路长度。（在图 6 中用虚线表示）。

由图 5 可知示波器 X 轴偏转板输入电压为：

$$U_x = U_R = i_1 R_1 \quad (2)$$

由式（1）和式（2）得：

$$U_x = \frac{L R_1}{N_1} H \quad (3)$$

上式表明在交变磁场下，任一时刻电子束在 X 轴的偏转正比于磁场强度 H 。

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。取电容 C 两端电压 U_c 至示波器 Y 轴输入，若适当选择 R_2 和 C 使 $R_2 \gg 1/\omega C$ ，则：

$$I_2 = \frac{E_2}{[R_2^2 + (1/\omega C)^2]^{1/2}} \approx \frac{E_2}{R_2}$$

式中， ω 为电源的角频率， E_2 为次级线圈的感应电动势。

因交变的磁场 H 的样品中产生交变的磁感应强度 B ，则：

$$E_2 = N_2 \frac{dQ}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}$$

式中 S ($S = \frac{(D_2 - D_1)h}{2}$) 为环式样的截面积，设磁环厚度为 h 则：

$$U_y = U_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{C R_2} \int E_2 dt = \frac{N_2 S}{C R_2} \int dB = \frac{N_2 S}{C R_2} B \quad (4)$$

上式表明接在示波器 Y 轴输入的 U_y 正比于 B 。

$R_2 C$ 构成的电路在电子技术中称为积分电路，表示输出的电压 U_c 是感应电动势 E_2 对时间的积分。为了如实地绘出磁滞回线，要求：（1） $R_2 \gg \frac{1}{2\pi f \cdot C}$ ；

（2）在满足上述条件下， U_c 振幅很小，不能直接绘出大小适合需要的磁滞回线。为此，需将 U_c 经过示波器 Y 轴放大器增幅后输至 Y 轴偏转板上。这就要

求在实验磁场的频率范围内，放大器的放大系数必须稳定，不会带来较大的相位畸变。事实上示波器难以完全达到这个要求，因此在实验时经常会出现如图 7 所示的畸变。观测时将 X 轴输入选择“AC”，Y 轴输入选择“DC”档，并选择合适的 R_1 和 R_2 的阻值，可避免这种畸变，得到最佳磁滞回线图形。

这样，在磁化电流变化的一个周期内，电子束的径迹描出一条完整的磁滞回线。适当调节示波器 X 和 Y 轴增益，再由小到大调节信号发生器的输出电压，即能在屏上观察到由小到大扩展的磁滞回线图形。逐次记录其正顶点的坐标，并在坐标纸上把它联成光滑的曲线，就得到样品的基本磁化曲线。

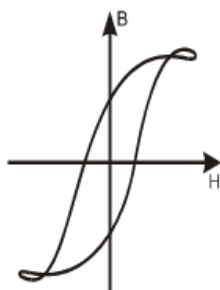


图 7

4、示波器的定标

从前面说明中可知从示波器上可以显示出待测材料的动态磁滞回线，但为了定量研究磁化曲线磁滞回线，必须对示波器进行定标。即还须确定示波器的 X 轴的每格代表多少 H 值 (A/m)，Y 轴每格实际代表多少 B (T)。(见参考文献 1 的 P143)

由公式 (3)、(4) 可以得知，在 U_x 、 U_y 可以准确测得且 R_1 、 R_2 和 C 都为已知的标准元件的情况下，就可以省去繁琐的定标工作(见参考文献 1 的 P143~144)。下面就如何在这种情况下测量进行分析。

一般示波器都有已知的 X 轴和 Y 轴的灵敏度，设 X 轴灵敏度为 S_x (V/格)，Y 轴的灵敏度为 S_y (V/格)。将 X 轴、Y 轴的灵敏度旋钮顺时针打到底并锁定，则上述 S_x 和 S_y 均可从示波器的面板上直接读出，则有：

$$U_x = S_x X, U_y = S_y Y$$

式中 X, Y 分别为测量时记录的坐标值 (单位：格。注意，指一大格，示波器一般有 8~10 大格)，可见通过示波器就可测得 U_x 、 U_y 值。

由于本实验使用的 R_1 、 R_2 和 C 都是阻抗值已知的标准元件，误差很小，其中的 $R_1 R_2$ 为无感交流电阻，C 的介质损耗非常小。这样就可结合示波器测量出 H 值和 B 值的大小。

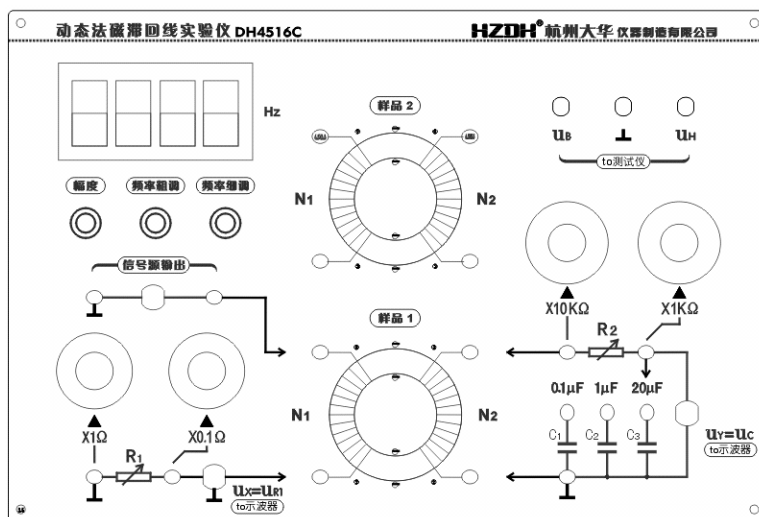
综合上述分析，本实验定量计算公式为：

$$H = \frac{N_1 S_X}{L R_1} X \quad (5)$$

$$B = \frac{R_2 C S_Y}{N_2 S} Y \quad (6)$$

式中各量的单位为： R_1, R_2 为 Ω ； L 为 m； S 为 m^2 ； C 为 F； S_X, S_Y 为 V/格； X, Y 为格（分正负向读数）； H 的单位为 A/m； B 的单位为 T。

【实验仪器】



实验使用的仪器由测试样品、功率信号源、可调标准电阻、标准电容和接口电路等组成。测试样品有两种，一种磁滞损耗较大，另一种较小，其它参数相同；信号源的频率在 20~250Hz 间可调；可调标准电阻 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 μF 、1 μF 、20 μF 三档可选；

接口电路包括 u_X 、 u_Y 接示波器的 X 和 Y 通道； u_B 、 u_H 接 DH4516A 测试仪，可自动测量 H 、 B 、 H_c 、 B_R 等参数，连接微机后可用微机作磁滞回线曲线，并测量 H 、 B 、 H_c 、 B_R 等参数，详见 DH4516A 说明书。

【实验内容】

实验前先熟悉实验的原理和仪器的构成。使用仪器前先将信号源输出幅度调节旋钮逆时针到底（多圈电位器），使输出信号为最小。

标有红色箭头的线表示接线的方向，样品的更换是通过换接接线来完成的。

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。

一、显示和观察 2 种样品在 25Hz、50Hz、100Hz、150Hz 交流信号下的磁滞回线图形。

1、按图 5 所示的原理线路接线。

1) 逆时针调节幅度调节旋钮到底，使信号输出最小。

2) 调示波器显示工作方式为 X-Y 方式，即图示仪方式。

3) 示波器 X 输入为 AC 方式，测量采样电阻 R_1 的电压。

4) 示波器 Y 输入为 DC 方式，测量积分电容的电压。

5) 选择样品 1 先进行实验。

6) 接通示波器和 DH4516C 型动态磁滞回线实验仪电源，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。

2、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。

3、单调增加磁化电流，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 值增加缓慢，达到饱和。改变示波器上 X、Y 输入增益段开关并锁定增益电位器（一般为顺时针到底），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。

4、单调减小磁化电流，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。

5、单调增加磁化电流，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 值增加缓慢，达到饱和，改变示波器上 X、Y 输入增益波段开关和 R_1 、 R_2 的值，示波器显示典型美观的磁滞回线图形。磁化电流在水平方向上的读数为 (-5.00,+5.00) 格。

6、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 25.00Hz、100.0Hz、150.0Hz，重复上述 3—5 的操作，比较磁滞回线形状的变化。表明磁滞回线形状与信号频率有关，频率越高磁滞回线包围面积越大，用于信号传输时磁滞损耗也大。

7、换实验样品 2，重复上述 2—6 步骤，观察 25.00Hz、50.00Hz、100.0Hz、150.0Hz 时的磁滞回线，并与样品 1 进行比较，有何异同。

二、测磁化曲线和动态磁滞回线，用样品 1 进行实验。

1、在实验仪上接好实验线路，逆时针调节幅度调节旋钮到底，使信号输出最小。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。

2、退磁。

1) 单调增加磁化电流，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 值增加变得缓慢，达到饱和。改变示波器上 X、Y 输入增益段开关并和 R_1 、 R_2 的值，示波器显示典型美观的磁滞回线图形。磁化电流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 输入增益波段开关

和 R_1 、 R_2 值固定不变并锁定增益电位器（一般为顺时针到底），以便进行 H、B 的标定。

2) 单调减小磁化电流，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。

3、磁化曲线（即测量大小不同的各个磁滞回线的顶点的连线）。

单调增加磁化电流，即缓慢顺时针调节幅度调节旋钮，磁化电流在 X 方向读数为 0、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00，单位为格，记录磁滞回线顶点在 Y 方向上读数如表 1，单位为格，磁化电流在 X 方向上的读数为（-5.00，+5.00）格时，示波器显示典型美观的磁滞回线图形。此后，保持示波器上 X、Y 输入增益波段开关和 R_1 、 R_2 值固定不变并锁定增益电位器（一般为顺时针到底），以便进行 H、B 的标定。

表 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X/格	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
Y/格	0	0.21	0.45	0.95	1.40	2.00	2.95	3.20	3.40	3.55	3.75	3.84

4、动态磁滞回线

在磁化电流 X 方向上的读数为（-5.00，+5.00）格时，记录示波器显示的磁滞回线在 X 坐标为 5.0、4.0、3.0、2.0、1.0、0、-1.0、-2.0、-3.0、-4.0、-5.0 格时，相对应的 Y 坐标，在 Y 坐标为 4.0、3.0、2.0、1.0、0、-1.0、-2.0、-3.0、-4.0 格时相对应的 X 坐标，如表 2。

表 2

X/格	Y/格	X/格	Y/格
5.00	3.84	-5.00	-3.85
4.00	3.75	-4.00	-3.74
3.00	3.62	-3.00	-3.62
2.00	3.45	-2.00	-3.45
1.00	3.30	-1.00	-3.32
0	3.10	0	-3.15
-0.30	3.00	0.40	-3.00
-1.90	2.00	1.90	-2.00
-2.00	1.80	2.00	-1.75
-2.40	1.00	2.25	-1.00
-2.60	0	2.40	0

-2.65	-1.00	2.62	1.00
-2.70	-2.00	2.67	2.00
-2.95	-3.00	2.95	3.00
-3.00	-3.10	3.00	3.05
-4.00	-3.70	4.00	3.68
-5.00	-3.85	5.00	3.84

显然 Y 最大值对应饱和磁感应强度 B_s ;

$X=0$, Y 读数对应剩磁 B_r ; $Y=0$, X 读数对应矫顽力 H_c 。

四、作磁化曲线。

由前所述 H、B 的计算公式为:

$$H = \frac{N_1 S_x}{L R_1} \cdot X$$

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

上述公式中, 2 种铁芯实验样品和实验装置参数如下:

$L=0.130\text{m}$, $S=1.24 \times 10^{-4}\text{m}^2$, $N_1=100\text{T}$, $N_2=100\text{T}$, R_1 、 R_2 值根据仪器面板上的选择值计算。 $C=1.0 \times 10^{-6}\text{F}$ 其中, L 为铁芯实验样品平均磁路长度; S 为铁芯实验样品截面积; N_1 为磁化线圈匝数; N_2 为副线圈匝数; R_1 为磁化电流采样电阻, 单位为 Ω ; R_2 为积分电阻, 单位为 Ω ; C 为积分电容, 单位为 F 。 S_x 为示波器 X 轴灵敏度, 单位 V/格 ; S_y 为示波器 Y 轴灵敏度, 单位 V/格 ; 所以得到一组实测的磁化曲线数据, 整理如表 3 (供参考), 其中 X 轴灵敏度为 0.1V/格 , Y 轴灵敏度为 20mV/格 。

表 3

$R_1=3\ \Omega$ $R_2=60\text{K}\ \Omega$

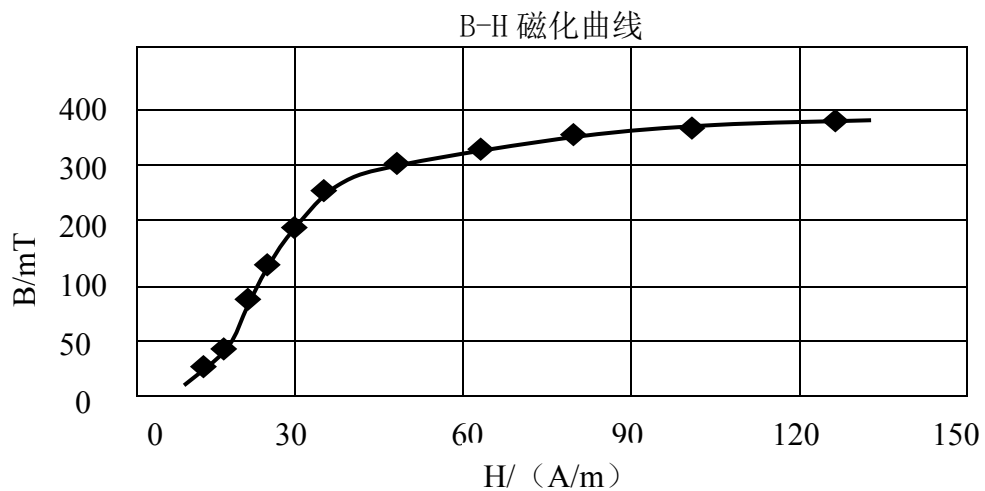
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X/格	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
H/ (A/m)	0	5.128	10.25	15.38	20.51	25.64	38.46	51.28	64.10	76.92	102.5	128.2
Y/格	0	0.21	0.45	0.95	1.40	2.00	2.95	3.20	3.40	3.55	3.75	3.84
B/mT	0	20.37	43.51	91.86	135.4	193.4	285.2	309.4	328.7	343.2	363.2	371.3

磁滞回线数据整理如表 4 (供参考)。

表 4

X/格	H/(A/m)	Y/格	B/mT	X/格	H/(A/m)	Y/格	B/mT
5.00	128.2	3.84	371.3	-5.00	-128.2	-3.85	-372.3
4.00	102.5	3.75	362.6	-4.00	-102.5	-3.74	-361.7
3.00	76.92	3.62	350.0	-3.00	-76.92	-3.62	-350.1
2.00	51.28	3.45	333.6	-2.00	-51.28	-3.45	-333.6
1.00	25.64	3.30	319.1	-1.00	-25.64	-3.32	-321.0
0	0	3.10	299.7	0	0	-3.15	-304.6
-0.30	-7.69	3.00	290.1	0.40	10.25	-3.00	-290.1
-1.90	-23.07	2.00	193.4	1.90	23.07	-2.00	-193.4
-2.00	-51.28	1.80	174.0	2.00	51.28	-1.75	-169.2
-2.40	-61.54	1.00	96.76	2.25	57.69	-1.00	-96.76
-2.60	-66.67	0	0	2.50	64.10	0	0
-2.65	-67.95	-1.00	-96.76	2.62	67.18	1.00	96.76
-2.70	-69.23	-2.00	-193.4	2.67	68.46	2.00	193.4
-2.95	-75.64	-3.00	-290.1	2.95	75.64	3.00	290.1
-3.00	-76.92	-3.10	-299.7	3.00	76.92	3.05	294.9
-4.00	-102.5	-3.70	-357.8	4.00	102.5	3.68	355.9
-5.00	-128.2	-3.85	-372.3	5.00	128.2	3.84	371.3

由表 3 作 B-H 磁化曲线（仅供参考）



由表 4 作磁滞回线图 B-H（供参考）。

显然 B 最大值对应饱和磁感应强度 $-B_s = -372.3\text{mT}$ 、 $B_s = 371.3\text{mT}$ 。

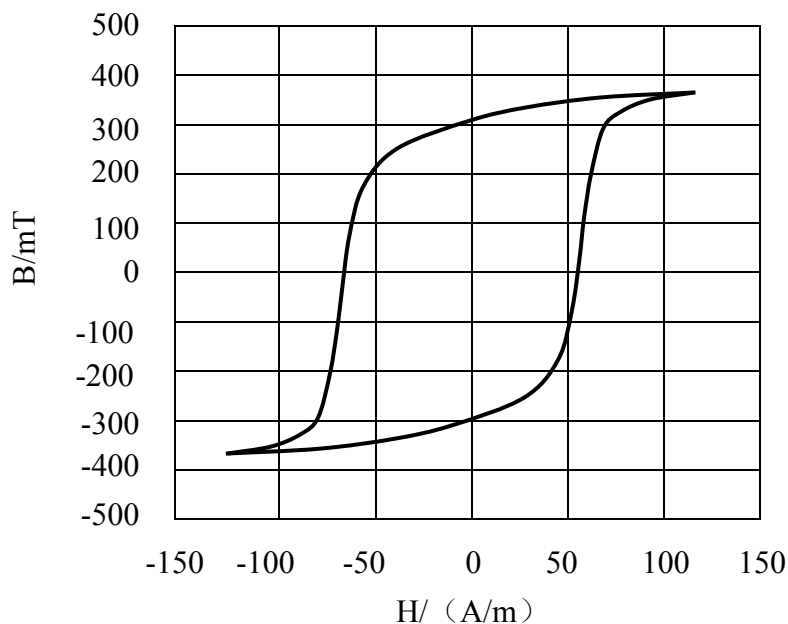
H=0 时，B 读数对应剩磁 $-B_r = -299.7\text{mT}$ 、 $B_r = 304.6\text{mT}$ 。

B=0 时，H 读数对应矫顽力 $-H_c = -66.67\text{A/m}$ 、 $H_c = 64.10\text{A/m}$ 。

5、换一种实验样品进行上述实验

6、改变磁化信号的频率，进行上述实验。

B-H 磁滞回线



参考文献：

1、《物理实验教程》第二版

丁慎训 张连芳

清华大学出版社