

铁磁材料动态磁滞回线和磁化曲线的测量

一. 实验目的

1. 了解磁性材料的磁滞回线和磁化曲线的概念，加深对铁磁材料的重要物理量矫顽力、剩磁和磁导率的理解。
2. 用示波器测量软磁材料（软磁铁氧体）的磁滞回线和基本磁化曲线，求该材料的饱和磁感应强度 B_m 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 。
3. 用示波器显示硬铁磁材料（模具钢 $Cr12$ ）的交流磁滞回线，并与软磁材料进行比较。

二. 实验原理

（一）铁磁物质的磁滞现象

铁磁性物质的磁化过程很复杂，这主要是由于它具有磁性的原因。一般都

是通过测量磁化场的磁场强度 H 和磁感应强度 B 之间关系来研究其磁化规律的。

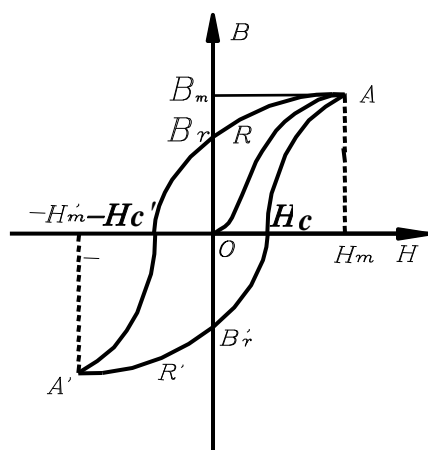


图1 磁滞回线和磁化曲线

线性关系。当 H 增加到一定值时， B 不再增加或增加的十分缓慢，这说明该物质的磁化已达到饱和状态。 H_m 和 B_m 分别为饱和时的磁场强度和磁感应强度（对应于图中 A 点）。如果再使 H 逐步退到零，则与此同时 B 也逐渐减小。然而，其轨迹并不沿原曲线 AO ，而是沿另一曲线 AR 下降到 B_r ，这说明当 H 下降为零时，铁磁物质中仍保留一定的磁性。将磁化场反向，再逐渐增加其强度，直到

$H = -H_m$ ，这时曲线达到 A' 点(即反向饱和点)，然后，先使磁化场退回到 $H = 0$ ；再使正向磁化场逐渐增大，直到饱和值 H_m 为止。如此就得到一条与 ARA' 对称的曲线 $A'R'A$ ，而自 A 点出发又回到 A 点的轨迹为一闭合曲线，称为铁磁物质的磁滞回线，此属于饱和磁滞回线。其中，回线和 H 轴的交点 H_c 和 H_c' 称为矫顽力，回线与 B 轴的交点 B_r 和 B_r' ，称为剩余磁感应强度。

(二) 利用示波器观测铁磁材料动态磁滞回线

电路原理图如图 2 所示。

将样品制成闭合环状，其上均匀地绕以磁化线圈 N_1 及副线圈 N_2 。交流电压 u 加在磁化线圈上，线路中串联了一取样电阻 R_1 ，将 R_1 两端的电压 u_1 加到示波器的 X 轴输入端上。副线圈 N_2 与电阻 R_2 和电容 C 串联成一回路，将电容 C 两端的电压 u_2 加到示波器的 Y 轴输入端，这样的电路，在示波器上可以显示和测量铁磁材料的磁滞回线。

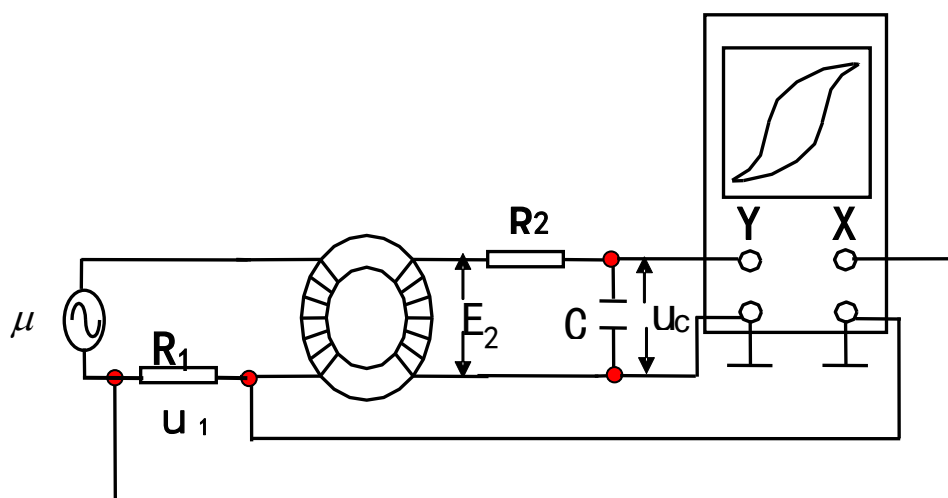


图 2 用示波器测动态磁滞回线的电路图

(图中正弦交流电源浮地)

1. 磁场强度 H 的测量

设环状样品的平均周长为 l ，磁化线圈的匝数为 N_1 ，磁化电流为交流正弦波

电流 i_1 ，由安培回路定律 $Hl = N_1 i_1$ ，而 $u_1 = R_1 i_1$ ，所以可得

$$H = \frac{N_1 \cdot u_1}{l \cdot R_1} \quad (1)$$

式中， u_1 为取样电阻 R_1 上的电压。由公式 (1) 可知，在已知 R_1 、 l 、 N_1 的情况下，测得 u_1 的值，即可用公式 (1) 计算磁场强度 H 的值。

2. 磁感应强度 B 的测量

设样品的截面积为 S ，根据电磁感应定律，在匝数为 N_2 的副线圈中感生电动势 E_2 为

$$E_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

(2) 式中， $\frac{dB}{dt}$ 为磁感应强度 B 对时间 t 的导数。

若副线圈所接回路中的电流为 i_2 ，且电容 C 上的电量为 Q ，则有

$$E_2 = R_2 i_2 + \frac{Q}{C} \quad (3)$$

在 (3) 式中，考虑到副线圈匝数不太多，因此自感电动势可忽略不计。在选定线路参数时，将 R_2 和 C 都取较大值，使电容 C 上电压降 $u_C = \frac{Q}{C} \ll R_2 i_2$ ，可忽略不计，于是 (3) 式可写为

$$E_2 = R_2 i_2 \quad (4)$$

把电流 $i_2 = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$ 代入 (4) 式得

$$E_2 = R_2 C \frac{du_C}{dt} \quad (5)$$

把 (5) 式代入 (2) 式得

$$-N_2 S \frac{dB}{dt} = R_2 C \frac{du_C}{dt}$$

在将此式两边对时间积分时，由于 B 和 u_C 都是交变的，积分常数项为零。于是，在不考虑负号（在这里仅仅指相位差 $\pm \pi$ ）的情况下，磁感应强度

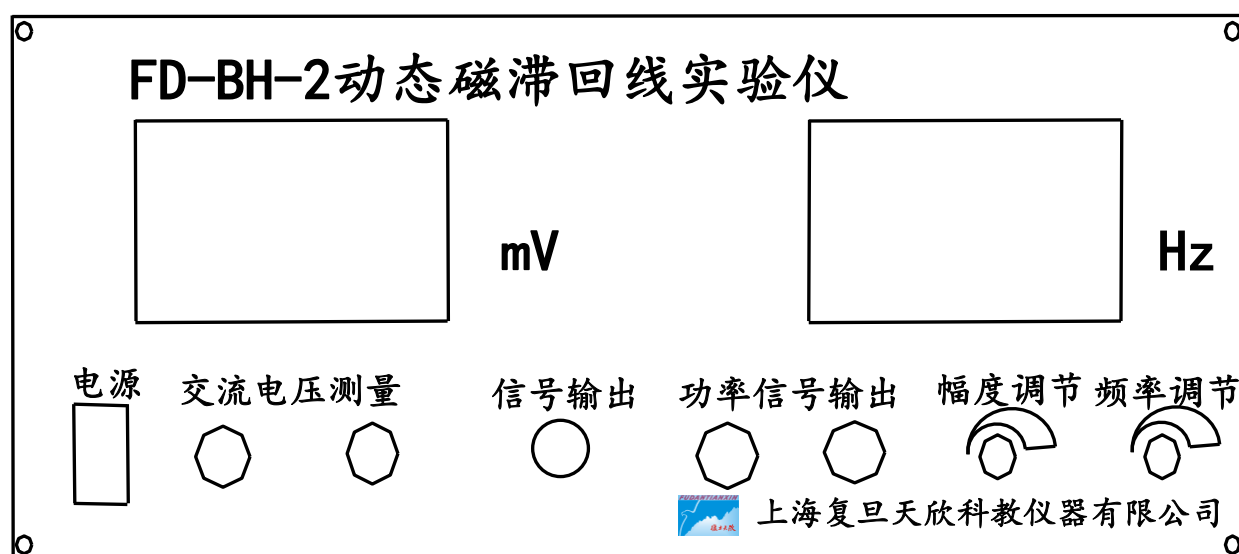
$$B = \frac{R_2 C u_C}{N_2 S} \quad (6)$$

式中， N_2 、 S 、 R_2 和 C 皆为常数，通过测量电容两端电压幅值 u_C 代入公式(6)，可以求得材料磁感应强度 B 的值。

当磁化电流变化一个周期，示波器的光点将描绘出一条完整的磁滞回线，以后每个周期都重复此过程，形成一个稳定的磁滞回线。

三. 实验仪器及装置

动态磁滞回线实验仪由可调正弦信号发生器、交流数字电压表、示波器、待测样品（软磁铁氧体、硬磁 Cr12 模具钢）、电阻、电容、导线等组成。其外型结构如图 4 所示。



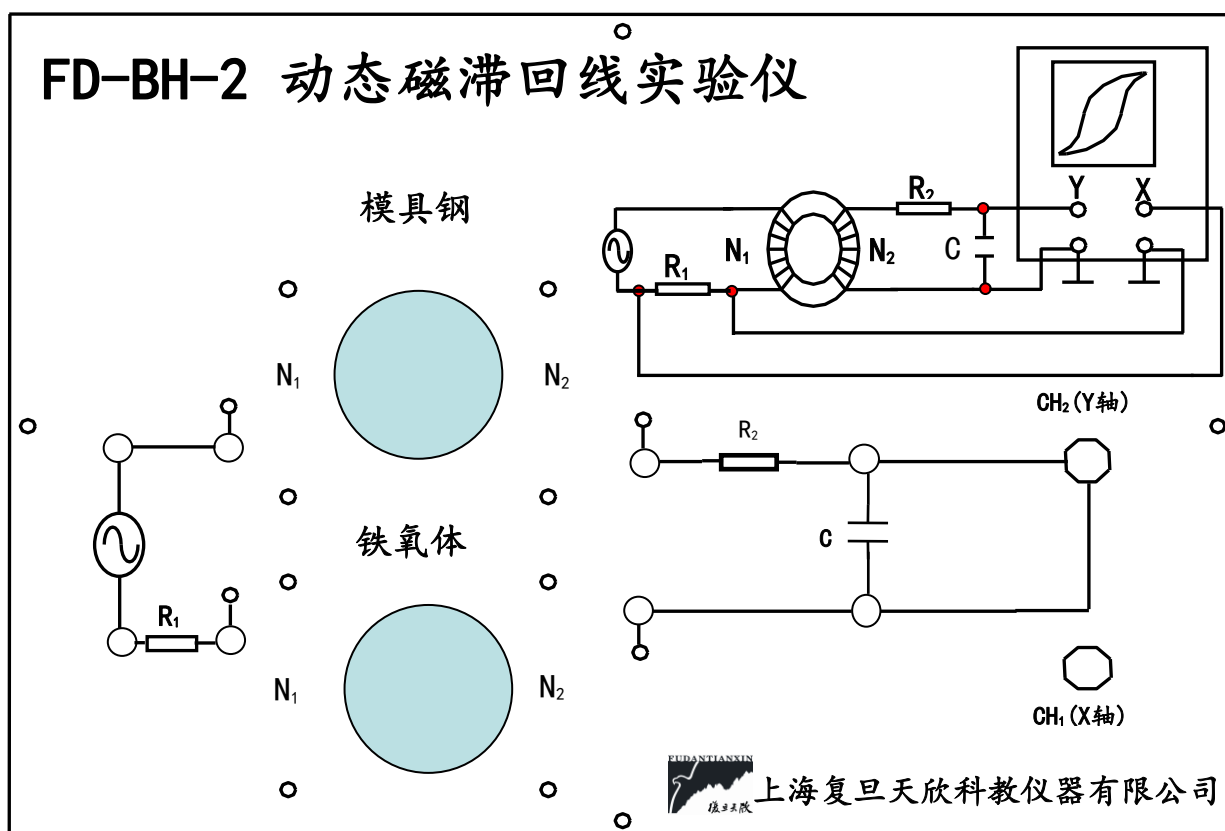


图 4 动态磁滞回线实验仪外观

四. 实验内容

(一) 观察和测量软磁铁氧体的动态磁滞回线

1. 把示波器光点调至荧光屏中心。磁化电流从零开始，逐渐增大磁化电流，直至磁滞回线上的磁感应强度 B 达到饱和（即 H 值达到足够高时，曲线有变平坦的趋势，这一状态属饱和）。磁化电流的频率 f 取 50Hz 左右。示波器的 X 轴和 Y 轴分度值调整至适当位置，使磁滞回线的 B_m 和 H_m 值尽可能充满整个荧光屏，且图形为不失真的磁滞回线图形。

2. 记录磁滞回线的顶点 B_m 和 H_m ，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 三个读数值（以长度为单位），在作图纸上画出软磁铁氧体的近似磁滞回线。

(二) 测量软磁铁氧体的基本磁化曲线。

现将磁化电流慢慢从大至小，退磁至零。从零开始，由小到大测量不同磁

滞回线顶点的读数值 B_i 和 H_i ，用作图纸作铁氧体的基本磁化曲线 ($B-H$ 关系) 及磁导率与磁感应强度关系曲线 ($\mu-H$ 曲线)，其中 $\mu = \frac{B}{H}$ 。

(三) 观察和测量硬磁 Cr12 模具钢(铬钢)材料的动态磁滞回线

1. 将样品换成 Cr12 模具钢硬磁材料，经退磁后，从零开始电流由小到大增加磁化电流，直至磁滞回线达到磁感应强度饱和状态。磁化电流频率约为 $f=50\text{Hz}$ 左右。调节 X 轴和 Y 轴分度值使磁滞回线为不失真图形。(注意硬磁材料交流磁滞回线与软磁材料有明显区别，硬磁材料在磁场强度较小时，交流磁滞回线为椭圆形回线，而达到饱和时为近似矩形图形，硬磁材料的直流磁滞回线和交流磁滞回线也有很大区别。

2. 记录相应的 B_m 和 H_m ， B_r 和 H_c 值，在作图纸上近似画出硬磁材料在达到饱和状态时的交流磁滞回线。

五. 实验数据

铁氧体基本磁化曲线与磁滞回线的测量

测量铁氧体的基本磁化曲线时，先将样品退磁，然后从零开始不断增大电流，记录各磁滞回线顶点的 B 和 H 值，直至达到饱和。注意由于基本磁化曲线各段的斜率并不相同，一条曲线至少 20 余个实验数据点，实验结果如表 1 所示。(本示波器 $1\text{div}=1.00\text{cm}$ ，估读至 $1/4$ 小格，即 0.05cm)。

表 1 软磁铁氧体基本磁化曲线的测量

U_{R_1} / cm	$H / (\text{A} / \text{m})$	U_C / cm	B / mT		U_{R_1} / cm	$H / (\text{A} / \text{m})$	U_C / cm	B / mT
0.20					2.40			
0.40					2.60			
0.60					2.80			
0.80					3.00			

1. 00					3. 20			
1. 20					3. 40			
1. 40					3. 60			
1. 60					3. 80			
1. 80					4. 00			
2. 00					4. 20			
2. 20					4. 40			

并且记录得到矫顽力 H_c 在示波器上显示 $0.55cm$ ，剩磁 B_r 在示波器上显示 $1.00cm$ ，饱和磁感应强度在示波器上显示 $2.20cm$ 。

根据记录数据可以描画出样品的磁化曲线：

铁氧体环状样品，外径 $\Phi_1 = 38.0mm$ ，内径 $\Phi_2 = 23.0mm$ ，高 $l_H = 10.0mm$ ，平均周长 $\bar{l} = \pi \cdot (\Phi_1 + \Phi_2) / 2 = 95.8 \times 10^{-3}m$ ，磁环截面积 $S = (\Phi_1 - \Phi_2) \cdot l_H / 2 = 75 \times 10^{-6}m^2$ 。

初级线圈和次级线圈匝数相等，即 $N_1 = N_2 = 200$ 匝，电阻 $R_1 = 2.00\Omega$ ， $R_2 = 51.0 \times 10^3\Omega$ ，电容 $C = 4.70 \times 10^{-6}F$ ，计算磁场强度

$$H = \frac{N_1}{\bar{l}} I = \frac{N_1}{\bar{l}} \frac{U_{R_1}'}{R_1} = \frac{200 \times 0.01989}{95.8 \times 10^{-3} \times 2.00} U_{R_1} = 20.76 \cdot U_{R_1} (A/m)$$

$$\text{磁感应强度 } B = \frac{R_2 C}{N_2 S} \cdot U_C' = \frac{51.0 \times 10^3 \times 4.70 \times 10^{-6} \times 0.00996}{200 \times 75 \times 10^{-6}} U_C = 0.1534 \cdot U_C (T) = 159.2 U_C (mT)$$

根据上面记录数据得到：矫顽力 H_c

剩磁 B_r

饱和磁感应强度 B_m

六. 思考题

1. 在公式(3)中， $U_C \ll R_2 i_2$ 时可将 U_C 忽略， $E_2 = R_2 i_2$ 。考虑一下，由这项忽略引起的不确定度有多大？

2. 在测量 $B-H$ 曲线过程, 为何不能改变 X 轴和 Y 轴的分度值?
3. 示波器显示的正弦波电压值与交流电压表显示的电压值有何区别? 两者之间如何换算?
4. 硬磁材料的交流磁滞回线与软磁材料的交流磁滞回线有何区别?
5. 准确测量电阻 R_1 、 R_2 和电容 C 还有那些方法?

附录:

软磁材料和硬磁材料介绍

磁滞回线所围面积很小的材料称为软磁材料。这种材料的特点是磁导率较高, 在交流下使用时磁滞损耗也较小, 故常作电磁铁或永磁铁的磁轭以及交流导磁材料。如电工纯铁、坡莫合金、硅钢片、软磁铁氧体等都属于这一类。磁滞回线所围面积很大的材料称为硬磁材料, 其特征常常用剩余磁感应强度 B_r 和矫顽力 H_c , 此两个特定点数值表示。 B_r 和 H_c 大的材料可作为永久磁铁使用。有时也用 BH 乘积的最大值 $(BH)_{\max}$ 衡量硬磁材料的性能, 称为最大磁能, 硬磁材料典型例子是各种磁钢合金和永久钕铁氧体。