

# 《基础物理实验》实验报告

实验名称 观测铁磁材料的磁滞回线 指导教师 李建民  
姓名 徐昕妍 学号 2023K8009970008 分班分组及座号 1-10-5 号(例: 1-04-5 号)  
实验日期 2024 年 10 月 21 日 实验地点 713 调课/补课 ☐ 是 成绩评定 \_\_\_\_\_

---

## 观测铁磁材料的磁滞回线

### 1 实验目的

1. 掌握利用示波器测量铁磁材料动态磁滞回线的方法;
2. 掌握利用霍尔传感器测量铁磁材料(准)静态磁滞回线的方法;
3. 了解铁磁性材料的磁化特性;
4. 了解磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念,加深对饱和磁化强度、剩余磁化强度、矫顽力等物理量的理解。

### 2 实验器材

1、DH4516 磁特性综合测量实验仪(包括正弦波信号源,待测样品及绕组,积分电路所用的电阻和电容)。双踪示波器,直流电源,电感,数字多用表。

磁特性综合测量实验仪主要技术指标如下:

1) 样品 1: 锰锌铁氧体,圆形罗兰环,磁滞损耗较小。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: 1 N=150 匝, 2 N=150 匝; 3 N=150 匝。

2) 样品 2: EI 型硅钢片,磁滞损耗较大。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: 1 N=150 匝, 2 N=150 匝; 3 N=150 匝。

3) 信号源的频率在 20~200 Hz 间可调;可调标准电阻 1 R、2 R 均为无感交流电阻,1 R 的调节范围为 0.1~11  $\Omega$ ; 2 R 的调节范围为 1~110 k $\Omega$ 。标准电容有 0.1  $\mu\text{F}$ ~11  $\mu\text{F}$  可选。

2、FD-BH-I 磁性材料磁滞回线和磁化曲线测定仪(包括数字式特斯拉计、恒流源、磁性材料样品、磁化线圈、双刀双掷开关、霍耳探头移动架、双叉头连接线、箱式实验平台)。

其主要技术指标如下:

1) 数字式特斯拉计: 四位半 LED 显示,量程 2.000T;分辨率 0.1mT;带霍耳探头。

2) 恒流源: 四位半 LED 显示,可调恒定电流 0-600.0mA。

3) 磁性材料样品: 条状矩形结构,截面长 2.00cm;宽 2.00cm;隔隙 2.00mm;平均磁路长度  $l=0.240\text{ m}$ (样品与固定螺丝为同种材料)。

4) 磁化线圈总匝数  $N=2000$ 。

### 3 实验原理

#### 3.1 铁磁材料的磁化特性

把物体放在外磁场  $H$  中,物体就会被磁化。其内部产生磁场。设其内部磁化强度为  $M$ ,磁感应强度为  $B$ ,可以定义磁化率  $\chi_m$  和相对磁导率  $\mu_r$  表示物质被磁化的难易程度:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (1)$$

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2)$$

物质可以分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三种,分别具有以下性质:

- 抗磁性:  $\chi_m$  通常在  $-10^{-6} \sim -10^{-5}$  量级,几乎不随温度改变。
- 顺磁性:  $\chi_m$  通常在  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  量级,随温度线性增大。
- 铁磁性:  $\chi_m > 1$ , 随温度增高而减小。

除了磁导率高以外,铁磁材料还具有特殊的磁化规律:磁化曲线通常不可逆,,称为磁滞回线。

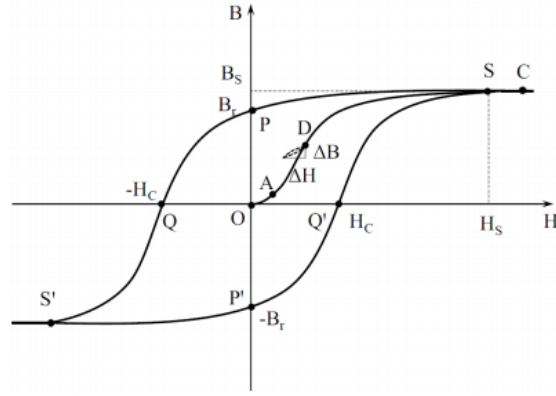


图 1: 铁磁材料磁滞回线示意图

如图 1,  $OA$  段为可逆磁化阶段,  $AS$  段为不可逆磁化阶段,  $SC$  为饱和磁化阶段。  $H_s$  表示饱和磁场强度,  $B_s$  表示饱和磁感应强度,  $B_r$  表示剩余磁感应强度  $H_c$  表示矫顽力(消除剩磁所需要的反向磁场强度)。周期变化的  $H$  下,铁磁材料的  $B-H$  关系图能形成磁滞回线,称为动态磁滞回线。磁滞回线的面积对应于循环磁化一周的能量损耗(磁能积)。

动态磁滞回线的形状与磁化场的频率和幅度都有关系,将磁场幅值由 0 增加到  $H_s$ ,可以得到一系列动态磁滞回线,其顶点  $(H_m, B_m)$  的连线称为动态磁化曲线。定义以下物理量:

振幅磁导率:

$$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (3)$$

起始磁导率:

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} \quad (4)$$

(直流偏置磁场下的)可逆磁导率:

$$\mu_R = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \quad (5)$$

其中  $\Delta B, \Delta H$  分别是交流弱磁场引起的磁感应强度变化值和磁场强度变化值。

### 3.2 动态磁滞回线的测量

图 2 为第一个实验中测量动态磁滞回线的原理电路示意图, 明显可见电路上有三个线圈, 通过交流电实现动态磁滞回线的生成。 $H$  和  $B$  的测量原理为:

$$H = \frac{N_1}{l} I_1 = \frac{N_1}{l R_1} u_{R1} \quad (6)$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_C \quad (7)$$

其中  $N_1$  是线圈 1 的匝数,  $l$  是磁环的等效磁路长度,  $u_{R1}$  是电阻  $R_1$  上的电压,  $u_C$  是电容  $C$  上的电压,  $S$  是单匝线圈环绕的面积。

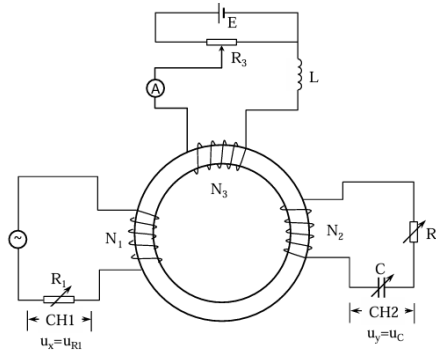


图 2: 用示波器测量动态磁滞回线电路图

### 3.3 (准)静态磁化曲线和磁滞回线的测量

实验装置如图 3。退磁、反复磁化(即“磁锻炼”)之后, 测得在环形样品的磁化线圈中通过的电流为  $I$ , 则磁化场的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{N}{l} I \quad (8)$$

$N$  为磁化线圈的匝数,  $l$  为样品平均磁路长度,  $H$  的单位为  $A/m$ 。而实际测量中, 需要进行对于  $H$  的修正:

$$H\bar{l} + H_g l_g = NI \quad (9)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H_g \quad (10)$$

$$\mu_r = 1 \quad (11)$$

得到:

$$H = \frac{N}{l} I - \frac{l_g}{\mu_0 l} B \quad (12)$$

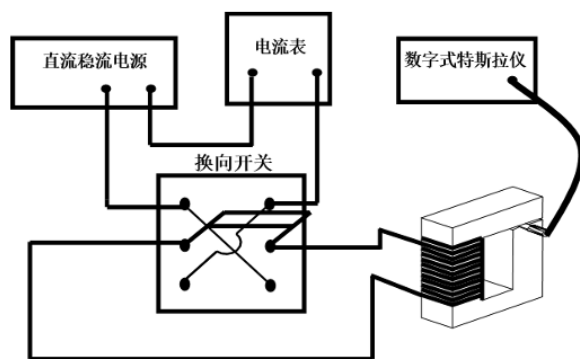


图 3: 磁滞回线和磁化曲线测量装置

## 4 实验步骤

### 4.1 用示波器观测动态磁滞回线

#### 1. 观测样品 1(铁氧体)的饱和动态磁滞回线

- 测量频率  $f=100\text{Hz}$  时的饱和磁滞回线。取  $R_1=2.0\Omega, R_2=50\text{k}\Omega, C=10.0\mu\text{F}$ 。示波器选择 X-Y 模式。调节励磁电流大小及示波器的垂直、水平位移旋钮，在示波器显示屏上调出一个相对于坐标原点对称的饱和磁滞回线。测量并画出饱和磁滞回线的  $B-H$  图上下半支各选取 9 个以上的测量点。测量  $B_S, B_r, H_C$  可通过示波器光标(cursor)来读数。
- 保持信号源幅度不变，在仪器频率可调范围内，观测不同频率时的饱和磁滞回线。保持  $R_1, R_2, C$  不变，测量并比较  $f=95\text{Hz}$  和  $150\text{Hz}$  时的  $B_r$  和  $H_C$ 。
- 在频率  $f=50\text{Hz}$  下，比较不同积分常量取值对李萨如图的影响。固定励磁电流幅度  $I_m=0.1\text{A}$ ,  $R_1=2.0\Omega$ , 改变积分常量  $R_2C$ 。调节  $R_2C$  分别为  $0.01\text{s}, 0.05\text{s}, 0.5\text{s}$ , 观察并粗略画出不同积分常量下  $u_{R1}-u_C$  李萨如图形的示意图。

#### 2. 测量样品 1(铁氧体)的动态磁滞回线。

- 在  $f=100\text{Hz}$  时，调出不同幅度的动态磁滞回线，测量并画出动态磁化曲线。取  $R_1=2.0\Omega, R_2=50\text{k}\Omega, C=10.0\mu\text{F}$ 。磁场幅度  $H_m$  从 0 到  $H_S$  单调增加。
- 根据测量数据计算并画出  $\mu_m-H_m$  曲线。
- 测量起始磁导率。

#### 3. 观察不同频率下样品 2(硅钢)的动态磁滞回线。

取  $R_1=2.0\Omega, R_2=50\text{k}\Omega, C=10.0\mu\text{F}$ 。在给定交变磁场幅度  $H_m=400\text{A/m}$  下，测量  $f=20\text{Hz}, 40\text{Hz}, 60\text{Hz}$  的  $B_m, B_r, H_C$ 。

#### 4. 测量样品 1(铁氧体)在不同直流偏置磁场 $H$ 下的可逆磁导率。

交流磁场频率取  $f=100\text{Hz}$ 。电路参数设置为： $R_1=2.0\Omega, R_2=20\text{k}\Omega, C=2.0\mu\text{F}$ 。直流偏置磁场必须从 0 到  $H_S$  单调增加。画出  $\mu_R-H$  曲线。

### 4.2 用霍尔传感器测量铁磁材料(准)静态磁滞回线

#### 1. 测量模具钢样品的起始磁化曲线

- (a) 调整霍尔传感器探头位置。选择合适的电流与磁感应强度  $B$ , 用数字式特斯拉计测量样品间隙中剩磁的磁感应强度  $B$  与位置  $X$  的关系,  $X$  从  $-10\text{ mm}$  到  $10\text{ mm}$ , 间隔  $1\text{ mm}$  测一组数据, 求得间隙中磁感应强度  $B$  的均匀区范围  $\Delta X$  值, 将霍尔传感器放在测出的均匀区的中央。
- (b) 对样品进行退磁处理。其方法是利用双刀开关使磁化电流不断反向, 且幅值由最大值逐渐减小至零, 最终使样品的剩磁  $B$  为零。例如将电流值由  $0$  增至  $600\text{mA}$  再逐渐减小至  $0$ , 然后双刀开关换为反向电流由  $0\text{mA}$  增至  $500\text{mA}$ , 再由  $500\text{mA}$  调至零, 这样磁化电流不断反向, 最大电流值每次减小  $100\text{mA}$ , 当剩磁减小到  $100\text{mT}$ , 每次最大电流减小量还需小些, 最后将剩磁消除。然后测量  $B$ - $H$  关系曲线。至少获取  $20$  个采样点的实验数值。

## 2. 测量模具钢的磁滞回线

- (a) 测量模具钢的磁滞回线前的磁锻炼。由初始磁化曲线可以得到  $B$  增加得十分缓慢时, 磁化线圈通过的电流值  $I_m$ , 然后保持此电流  $I_m$  不变, 把双刀换向开关来回拨动  $8$ - $10$  次, 进行磁锻炼。开关拉动时, 应使触点从接触到断开的时间长些, 这是为了使磁锻炼更加充分, 以此来获得更完整、对称、稳定的磁滞回线。
- (b) 测量模具钢的磁滞回线。通过磁化线圈的电流从饱和电流  $I_m$  开始逐步减小  $0$ , 然后双刀换向开关将电流换向, 电流又从  $0$  增加到  $-I_m$ , 重复上述过程, 每隔  $50\text{mA}$  测一组  $(I_j, B_j)$  值。

# 5 实验结果与数据处理

## 5.1 用示波器观测动态磁滞回线

### 5.1.1 观测样品 1 (铁氧体) 的饱和动态磁滞回线

| $U_x \backslash U_y$ | 数据点 1          | 数据点 2 |
|----------------------|----------------|-------|
| 8.8                  | 0.0            | 6.8   |
| 0.0                  | 4.0            | -8.8  |
| -18.4                | -5.2           | -10.0 |
| -29.6                | -9.6           | -12.4 |
| 10.4                 | 8.0            | -1.2  |
| 28.4                 | 12.4           | 8.8   |
| 22.4                 | 6.4            | 11.2  |
| 87.2( $H_S$ )        | 18.0( $B_S$ )  |       |
| -91.2( $H_S$ )       | -17.2( $B_S$ ) |       |

表 1: 饱和磁滞回线 (原始数据)

用实验原理部分的公式进行换算, 得到数据如下:

| $\begin{matrix} B \\ H \end{matrix}$ | 数据点 1          | 数据点 2 |
|--------------------------------------|----------------|-------|
| 44.7                                 | 0.00           | 1.24  |
| 0.0                                  | 0.11           | -0.24 |
| -10.6                                | -0.14          | -0.27 |
| -17.1                                | -0.26          | -0.33 |
| 6.0                                  | 0.22           | -0.03 |
| 16.4                                 | 0.33           | 0.24  |
| 12.9                                 | 0.17           | 0.30  |
| 50.3( $H_S$ )                        | 0.48( $B_S$ )  |       |
| -52.6( $H_S$ )                       | -0.46( $B_S$ ) |       |

表 2: 饱和磁滞回线

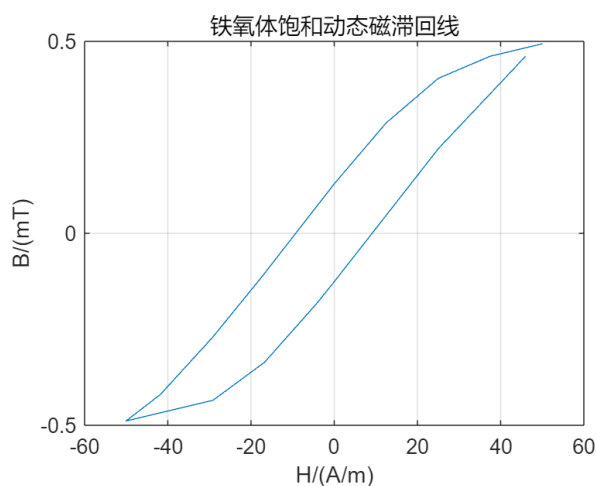


图 4: 饱和磁滞回线

|         | 95HZ | 150HZ |
|---------|------|-------|
| $(B_r)$ | 4.0  | 2.4   |
| $(H_c)$ | 10.4 | 5.6   |

表 3: 饱和磁滞回线随频率变化规律

从表中我们可以发现  $B_r$  随着频率的增大而减小, 而  $H_c$  也一样, 随着频率的增大而减小。这说明矫顽力随着频率的增大而减小, 从图像整体来看, 就是磁滞回线包围的区域内部的面积随着频率的增大而减小。这种现象形成的原因在于磁滞回线本身就是材料对于外界磁场变化的一个滞后的反应, 当外加磁场改变的频率变得很高的时候, 由于在很短的时间内材料内部的磁场方向就要反向, 所以在变化过程中会沿着更短的路径变化, 于是磁滞回线呈现出细窄的形状; 而频率较低的时候, 磁滞回线会变得更加的圆润, 面积也会更大。

以下是在  $f=50\text{HZ}$ ,  $I_m=0.1\text{A}$ ,  $R_1=2.0\Omega$  条件下, 不同积分常量下的动态磁滞回线:

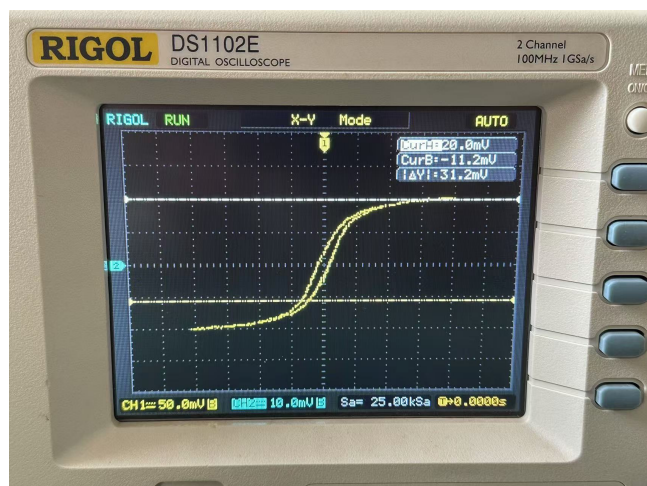


图 5:  $R_2C=0.5s$  时的李萨如图形

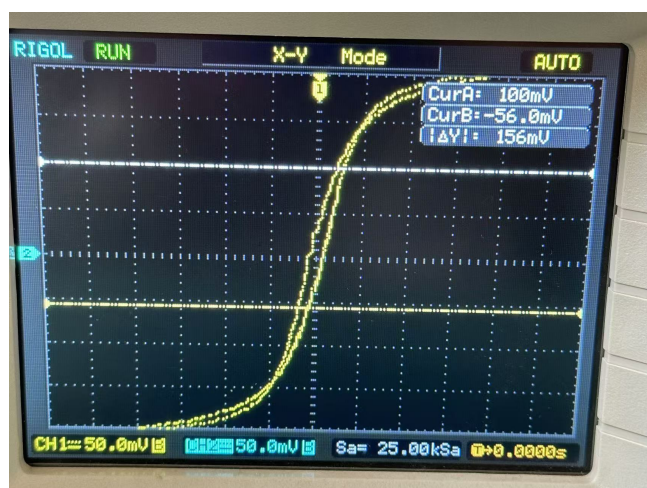


图 6:  $R_2C=0.05s$  时的李萨如图形

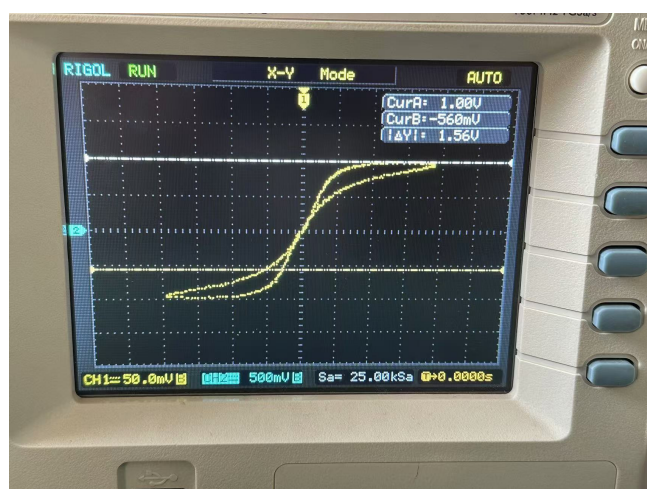


图 7:  $R_2C=0.01s$  时的李萨如图形

从图中可以看出，李萨如曲线有明显变形，这是因为在推导出： $B = \frac{R_2C}{N_2S}u_C$  时，用到了积分近似  $u_c \approx \frac{1}{R_2C}$ ，

这要求  $R_2C \geq T$ , 否则电容  $C$  上的电压相对于总电压来说就不可忽略,  $R_2$  上的电压不可被视为总电压, 由此出现误差。但这一误差只会影响到  $u_{R1} - u_C$  图像, 而真实的磁滞回线形状是  $B - H$  图像, 这是不会改变的。

### 5.1.2 测量样品 1(铁氧体)的动态磁化曲线

以下是测量铁氧体动态磁滞回线的原始数据：

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $H_m$ | 6.16  | 7.52  | 10.00 | 12.00 | 14.00 | 14.80 | 18.80 | 21.21 | 24.40 |
| $B_m$ | 1.44  | 2.00  | 2.64  | 3.36  | 4.40  | 4.80  | 6.00  | 6.80  | 7.80  |
| $H_m$ | 28.00 | 30.80 | 35.20 | 38.40 | 40.82 | 44.00 | 87.20 |       |       |
| $B_m$ | 9.00  | 10.00 | 11.00 | 12.40 | 13.22 | 13.60 | 18.00 |       |       |

表 4: 测量样品 1(铁氧体)的动态磁滞回线(原始数据)

根据实验原理公式进行数据处理：

$$H = \frac{N_1}{l} I_1 = \frac{N_1}{lR_1} u_{R1} \tag{13}$$

$$B = \frac{R_2C}{N_2S} u_C \tag{14}$$

$$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \tag{15}$$

处理后的数据如下：

|         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $H_m$   | 3.55     | 4.34     | 5.77     | 6.92     | 8.08     | 8.54     | 10.85    | 12.23    | 14.08    |
| $B_m$   | 0.039    | 0.054    | 0.071    | 0.090    | 0.118    | 0.129    | 0.161    | 0.183    | 0.210    |
| $\mu_m$ | 8739.79  | 9898.49  | 9789.20  | 10346.68 | 11618.10 | 12017.01 | 11804.86 | 11903.90 | 11865.37 |
| $H_m$   | 16.16    | 17.77    | 20.31    | 22.16    | 23.55    | 25.39    | 50.31    |          |          |
| $B_m$   | 0.242    | 0.269    | 0.296    | 0.334    | 0.355    | 0.366    | 0.484    |          |          |
| $\mu_m$ | 11913.48 | 12042.86 | 11594.35 | 11990.61 | 11992.29 | 11467.88 | 7653.42  |          |          |

表 5: 测量样品 1(铁氧体)的动态磁滞回线

绘制出对应的铁氧体动态磁滞回线和  $\mu_m - H_m$  曲线, 图像如下：

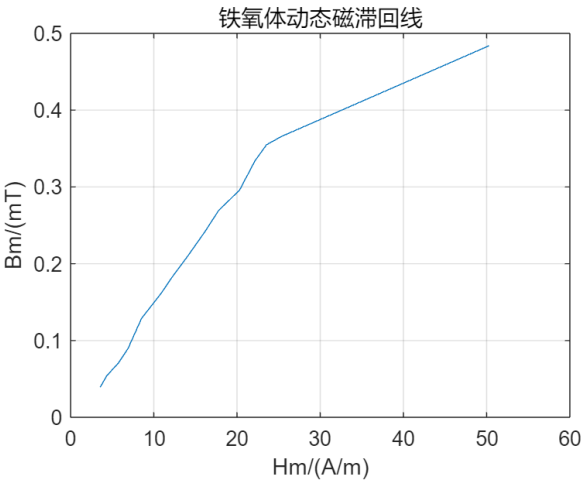


图 8: 铁氧体动态磁滞回线



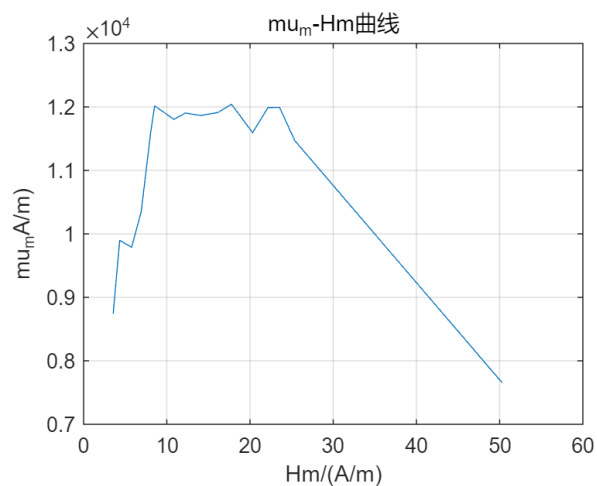


图 9:  $\mu_m - H_m$  曲线

### 5.1.3 观察不同频率下样品 2(硅钢)的动态磁滞回线

取  $R_1=2\Omega, R_2=50k\Omega, C=10, H_m=400A/m$ , 调节电源频率分别为 20, 40, 60Hz, 测得数据如下表所示。

|       | 20HZ | 40HZ | 60HZ |
|-------|------|------|------|
| $B_m$ | 34.4 | 32.8 | 32.8 |
| $B_r$ | 21.6 | 21.6 | 24.8 |
| $H_c$ | 104  | 120  | 140  |

表 6: 观察不同频率下样品 2(硅钢)的动态磁滞回线(原始数据)

代入公式

$$H = \frac{N_1}{l} I_1 = \frac{N_1}{l R_1} u_{R1} \quad (16)$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_C \quad (17)$$

处理得:

|       | 20HZ  | 40HZ  | 60HZ  |
|-------|-------|-------|-------|
| $B_m$ | 0.956 | 0.912 | 0.912 |
| $B_r$ | 0.600 | 0.600 | 0.689 |
| $H_c$ | 104   | 120   | 140   |

表 7: 观察不同频率下样品 2(硅钢)的动态磁滞回线

随着频率改变,  $H_C$  明显随着频率  $f$  增大而增加。但  $B_m, B_r$  的变化并不明显。

### 5.1.4 测量样品 1(铁氧体)在不同直流偏置磁场下的可逆磁导率

如下图连接好实验电路。取  $f=100\text{HZ}$ 。电路参数设置为:  $R_1=2.0\Omega, R_2=20k\Omega, C=2.0\mu F$ 。直流偏置磁场从 0 到  $H_S$  单调缓慢增加, 测量 10 组磁滞回线小线段的斜率。

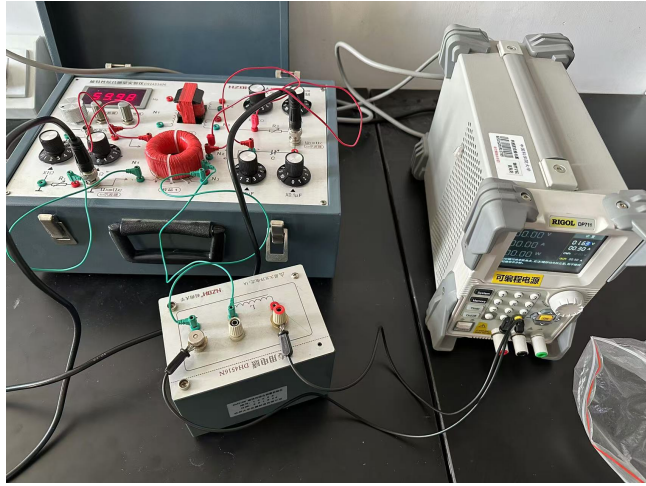


图 10: 实验电路连接实物图

以下是实验原始数据:

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I(A)  | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.10 |
| H(mV) | 14.4 | 13.6 | 13.2 | 20.0 | 24.8 | 25.6 | 20.0 | 20.4 | 17.6 | 27.2 |
| B(mV) | 28.0 | 12.0 | 8.0  | 8.8  | 8.0  | 6.4  | 4.0  | 2.4  | 1.6  | 0.1  |

表 8: 测量样品 1(铁氧体)在不同直流偏置磁场下的可逆磁导率(原始数据)

$\mu_R$  由  $u_c-u_{R1}$  曲线斜率决定。带入计算后得到处理后的数据:

|         |         |         |         |         |        |        |        |        |        |        |
|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I(A)    | 0.01    | 0.02    | 0.03    | 0.04    | 0.05   | 0.06   | 0.07   | 0.08   | 0.09   | 0.10   |
| H(A/m)  | 11.54   | 23.08   | 34.62   | 46.15   | 57.69  | 69.23  | 80.77  | 92.31  | 103.85 | 115.39 |
| $\mu_R$ | 5960.12 | 2704.59 | 1857.70 | 1348.69 | 988.78 | 766.30 | 613.04 | 360.61 | 278.66 | 18.03  |

表 9: 测量样品 1(铁氧体)在不同直流偏置磁场下的可逆磁导率

$\mu_R - H$  曲线图如下图所示。由图像可知,  $\mu_R$  随着  $H$  的增大而减小。当  $H$  持续增大时,  $\mu_R$  会趋于一个定值。这是由于在动态磁滞回线中我们已经可以看到  $H$  充分大时,  $B$  几乎已经不再增长, 而  $\mu_R = \lim_{\Delta H \rightarrow \infty} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}$ , 故而从理论计算角度来讲,  $\mu_R$  应无限趋于 1 而不是 0, 这是与  $\mu_m$  最大的差别。

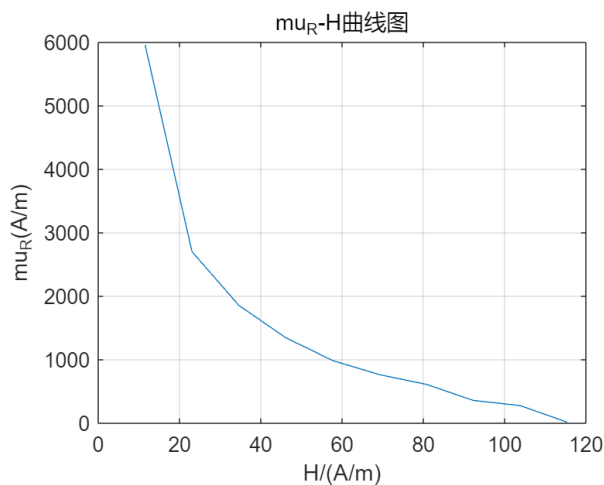


图 11:  $\mu_R - H$  曲线图

## 5.2 用霍尔传感器测量铁磁材料(准)静态磁滞回线

### 5.2.1 测量样品的起始磁化曲线

首先对样品进行退磁处理。其方法是利用双刀开关使磁化电流不断反向,且幅值由最大值逐渐减小至零,最终使样品的剩磁  $B$  为零。首先将电流值由 0 增至 600mA 再逐渐减小至 0,然后双刀开关换为反向电流由 0 增至 500mA,再由 500mA 调至零,这样磁化电流不断反向,最大电流值每次减小 100mA,当剩磁减小到 100mT,每次最大电流减小量再次减小至 30mA,最后将剩磁消除。

对样品退磁后,每隔 30mA 测量一组  $I$  和  $B$ ,直至  $B$  变化缓慢趋于饱和。由公式

$$H = \frac{N}{l} I \quad (18)$$

得  $H$ 。再由公式

$$H = \frac{NI - \frac{Bl_g}{\mu_0}}{l} \quad (19)$$

得修正后的  $H$ 。数据如下表所示:

| $I(\text{mA})$ | $B(\text{mT})$ | $H(\text{A/m})$ | 修正 $H(\text{A/m})$ |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|
| 30.8           | 3.3            | 256.6564        | 234.7766667        |
| 60.7           | 5.3            | 505.8131        | 470.6766667        |
| 90.4           | 7.5            | 753.3032        | 703.5833333        |
| 120.1          | 10.0           | 1000.7933       | 934.5              |
| 151.9          | 14.6           | 1265.7827       | 1168.986667        |
| 180.2          | 20.0           | 1501.6066       | 1369               |
| 212.4          | 26.1           | 1769.9292       | 1596.87            |
| 240.9          | 31.5           | 2007.4197       | 1798.55            |
| 271.1          | 37.1           | 2259.0763       | 2013.07            |
| 300.8          | 42.4           | 2506.5664       | 2225.413333        |
| 360.9          | 52.6           | 3007.3797       | 2658.586667        |
| 390.5          | 57.4           | 3254.0365       | 2873.413333        |
| 421.4          | 62.2           | 3511.5262       | 3099.073333        |
| 450.6          | 66.9           | 3754.8498       | 3311.23            |
| 480.2          | 71.5           | 4001.5066       | 3527.383333        |
| 514.7          | 76.7           | 4288.9951       | 3780.39            |
| 542.9          | 80.6           | 4523.9857       | 3989.52            |
| 573.4          | 84.4           | 4778.1422       | 4218.48            |
| 601.0          | 87.5           | 5008.133        | 4427.916667        |
| 631.8          | 90.6           | 5264.7894       | 4664.02            |

表 10: 模具钢的起始磁化曲线数据表

$B$ - $H$ (修正后)图像如下图所示:

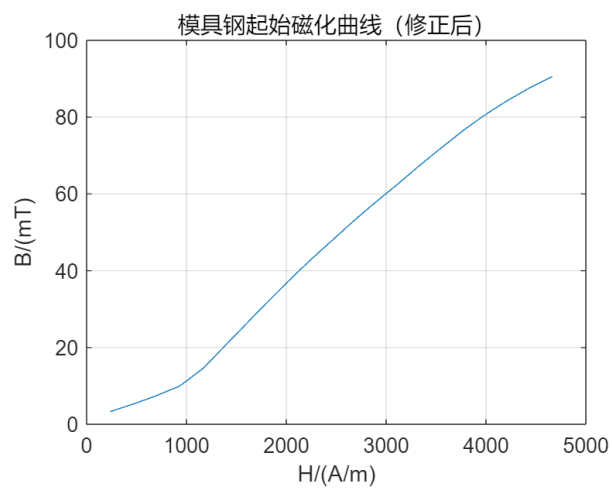


图 12: 模具钢起始磁滞回线(修正后)

### 5.2.2 测量模具钢的磁滞回线

首先,保持电流不变,把双刀换向开关来回拨动 8-10 次,进行磁锻炼。磁锻炼后,让磁化线圈的电流开始逐步减小到 0,然后将电流反向,电流又从 0 增加到反向-600.0mA。重复上述过程,再回到正向 600mA。每隔 50mA 测一组值。数据如下表所示:

| $I/(\text{mA})$ | $B/(\text{mT})$ | $H/(\text{A/m})$ | 修正 $H$       | $I/(\text{mA})$ | $B/(\text{mT})$ | $H/(\text{A/m})$ | 修正 $H$       |
|-----------------|-----------------|------------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|
| 600.8           | 87.8            | 5007.0672        | 4424.26      | -400.8          | -80.9           | -3340.2672       | -2803.363333 |
| 549.9           | 86.1            | 4582.8666        | 4011.37      | -349.6          | -77.3           | -2913.5664       | -2400.576667 |
| 500.5           | 84.2            | 4171.167         | 3612.306667  | -300.8          | -72.8           | -2506.8672       | -2023.76     |
| 449.6           | 82              | 3746.9664        | 3202.733333  | -250.6          | -66.9           | -2088.5004       | -1644.563333 |
| 400.7           | 79.4            | 3339.4338        | 2812.48      | -200.9          | -59.7           | -1674.3006       | -1278.156667 |
| 350.8           | 76.1            | 2923.5672        | 2418.536667  | -148.9          | -51.0           | -1240.9326       | -902.5333333 |
| 300.6           | 71.8            | 2505.2004        | 2028.726667  | -100.5          | -42.1           | -837.567         | -558.2366667 |
| 248             | 65.9            | 2066.832         | 1629.53      | -48.4           | -32.1           | -403.3656        | -190.4033333 |
| 200.5           | 59.3            | 1670.967         | 1277.476667  | 0.0             | -22.4           | 0                | 148.5866667  |
| 150.2           | 51.2            | 1251.7668        | 912.04       | 50.0            | -12.2           | 416.7            | 497.5933333  |
| 100.5           | 42.4            | 837.567          | 556.2466667  | 100.5           | -1.7            | 837.567          | 848.7766667  |
| 50.3            | 32.8            | 419.2002         | 201.5933333  | 150.0           | 8.7             | 1250.1           | 1192.29      |
| 0               | 22.9            | 0                | -151.9033333 | 200.9           | 19.3            | 1674.3006        | 1546.143333  |
| -100.9          | 2.2             | -840.9006        | -855.4266667 | 250.7           | 29.4            | 2089.3338        | 1894.146667  |
| -150.8          | -8.1            | -1256.7672       | -1202.936667 | 300.3           | 39.2            | 2502.7002        | 2242.473333  |
| -212            | -20.8           | -1766.808        | -1628.693333 | 350.3           | 48.8            | 2919.4002        | 2595.46      |
| -251.4          | -28.8           | -2095.1676       | -1903.96     | 400.3           | 58.1            | 3336.1002        | 2950.436667  |
| -302            | -38.7           | -2516.868        | -2259.956667 | 450.4           | 66.8            | 3753.6336        | 3310.226667  |
| -352.1          | -48.4           | -2934.4014       | -2613.113333 | 500.8           | 74.9            | 4173.6672        | 3676.496667  |
| -400.7          | -57.3           | -3339.4338       | -2959.076667 | 551.9           | 82.0            | 4599.5346        | 4055.233333  |
| -450            | -65.9           | -3750.3          | -3312.863333 |                 |                 |                  |              |
| -501.2          | -74.6           | -4177.0008       | -3681.82     |                 |                 |                  |              |
| -552.2          | -81.1           | -4602.0348       | -4063.703333 |                 |                 |                  |              |
| -600.5          | -86.9           | -5004.567        | -4427.73     |                 |                 |                  |              |
| -550.0          | -87.8           | -4583.7          | -4000.926667 |                 |                 |                  |              |
| -500.0          | -85.9           | -4167            | -3596.863333 |                 |                 |                  |              |
| -449.6          | -83.6           | -3746.9664       | -3192.12     |                 |                 |                  |              |

表 11: 测量模具钢的磁滞回线

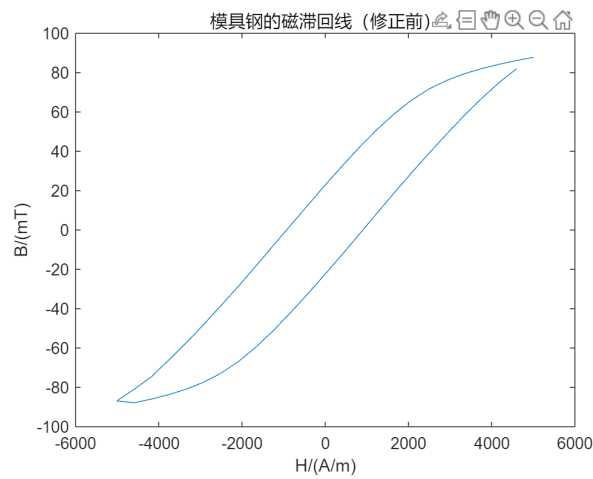


图 13: 模具钢的磁滞回线 (修正前)

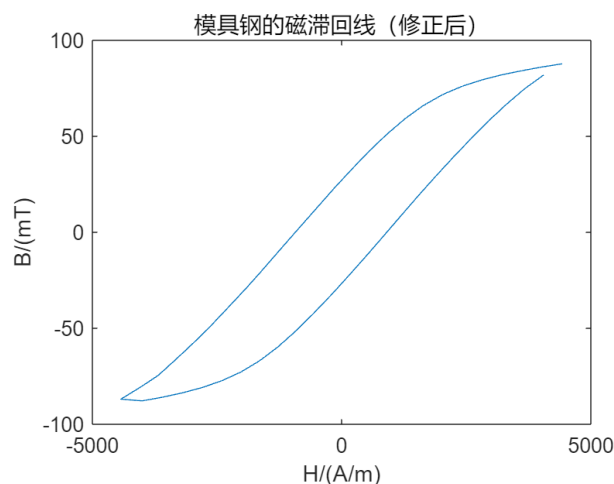


图 14: 模具钢的磁滞回线(修正后)

从图中我们可以看出,修正前后图像整体形状差异不大,图像大致中心对称但并非绝对中心对称。

## 6 思考题

1. 铁磁材料的动态磁滞回线与(准)静态磁滞回线在概念上有什么区别? 铁磁材料动态磁滞回线的形状和面积受那些因素影响?

答: 铁磁材料的动态磁滞回线与(准)静态磁滞回线在概念上的区别主要体现在磁化过程的速度和测量方法上。动态磁滞回线通常在交变磁场下进行测量,它反映了材料在快速磁化过程中磁化强度与磁场强度之间的关系;准)静态磁滞回线是在非常慢的磁场变化下测量的,接近于静态条件,它反映了材料在接近平衡状态下的磁性行为。

铁磁材料动态磁滞回线的形状和面积受以下因素影响:

- (a) 磁化速率: 磁化速率越快,磁滞损耗通常越大,回线面积可能增大。
- (b) 频率: 交变磁场的频率越高,涡流损耗越大,导致动态磁滞回线的面积增加。
- (c) 材料特性。
- (d) 温度。温度变化会影响材料的磁导率和磁滞损耗。
- (e) 磁场幅值: 磁场幅值越大,磁滞损耗通常也越大,回线面积增加。
- (f) 材料的微观结构。

2. 什么叫做基本磁化曲线? 它和起始磁化曲线间有何区别?

答: 基本磁化曲线: 是在不同磁场强度下绘制的,显示了材料在整个磁化过程中的行为,从磁化开始到饱和状态。起始磁化曲线: 特指从磁化强度为零(或非常小的值)开始,到第一次达到磁化饱和点的曲线段。它只描述了材料从退磁状态到第一次饱和磁化状态的过程。基本磁化曲线可能是在不同磁化循环中得到的;起始磁化曲线通常是在材料完全退磁后,即没有磁化历史的情况下测量的。基本磁化曲线在磁场强度减小时,磁化强度并不完全按照原来的路径返回;起始磁化曲线通常是一条较为简单的曲线,显示了材料在初次磁化时的行为,不会有磁滞现象的明显表现。

3. 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点?

答: 铁氧体的动态磁化特点:

- (a) 电阻率高: 铁氧体的电阻率比硅钢高得多, 因此在高频下涡流损耗小, 适合用于高频应用。
- (b) 磁导率较高: 在较低的磁场下, 铁氧体就能达到较高的磁导率, 但它的饱和磁通密度相对较低。
- (c) 磁滞回线较窄: 铁氧体的磁滞损耗相对较小, 这使得它在高频下的能量损耗较低。剩磁和矫顽力较低: 铁氧体的剩磁和矫顽力通常比硅钢低, 这意味着它的磁化过程较为容易, 但磁化保持能力较弱。
- (d) 频率依赖性: 铁氧体的磁导率和损耗随着频率的变化而变化, 高频下磁导率会下降, 损耗增加。温度稳定性: 铁氧体的磁性能对温度相对稳定, 但在高温下磁导率会下降。

硅钢的动态磁化特点:

- (a) 电阻率高: 硅钢含有硅, 这提高了其电阻率, 从而减少了涡流损耗, 特别是在低频应用中。饱和磁通密度高: 硅钢的饱和磁通密度比铁氧体高, 这使得它在电力设备中有更好的应用性能。
- (b) 磁滞回线较宽: 硅钢的磁滞损耗相对较大, 特别是在高频下, 但由于其高饱和磁通密度, 它仍然广泛用于电机和变压器中。
- (c) 剩磁和矫顽力较高: 硅钢的剩磁和矫顽力通常比铁氧体高, 这意味着它的磁化保持能力较强。
- (d) 频率依赖性: 硅钢的磁性能对频率的依赖性较小, 适用于广泛的频率范围, 特别是在低频和中频应用。
- (e) 温度稳定性: 硅钢的磁性能对温度有一定的依赖性, 但在正常工作温度范围内, 其性能相对稳定。

#### 4. 动态磁滞回线测量实验中, 电路参量应怎样设置才能保证正确反映材料动态磁滞回线的形状?

答: 一方面, 要求积分常量  $R_2 C \gg T$ , 这是由于推导公式时的近似, 在数据处理时已经有所分析; 另一方面, 交流电的幅度应当充分大, 以保证铁磁体饱和磁化。

- (a) 适当的激励信号。激励信号的频率应选择在材料的工作频率范围内。激励信号的幅度应足够大, 以确保材料在整个磁滞回线上循环, 但又不能超过材料的饱和磁通密度。
- (b) 测量电路在中需要在磁化线圈中串联一个电阻以测量线圈中的电流, 同时电阻值应足够小, 以减少对激励信号的影响。示波器应有足够的带宽, 以准确捕捉电压信号。

#### 5. 准静态磁滞回线测量实验中, 为什么要对样品进行磁锻炼才能获得稳定的饱和磁滞回线?

答: 新材料在首次磁化时可能会留下较高的剩磁和矫顽力, 这会影响到后续磁化曲线的形状和位置。通过磁锻炼, 可以减少剩磁, 降低矫顽力, 使材料更容易达到饱和磁化状态。

## 7 总结

本次实验的主要困难在于大量的实验数据记录与处理。在使用示波器读数时, 我们必须反复切换示波器光标快速读数。在用霍尔传感器测量铁磁材料(准)静态磁滞回线的实验中, 进行间隔磁化测量和磁滞回线测量时, 调节电流必须非常小心, 且电流调节过度后无法返回。

另一大难点在于处理数据。磁滞回线测量数据繁多, 数据录入便是一大难题, 同时我们还需要借助 Excel 工具来进行数据修正和处理, 将测量的电压转化为  $H$  和  $B$ 。同时, 实验报告还要求根据数据进行绘图。Excel 并不适用于大量数据的精细绘图。在这里特别感谢周纯伊同学在 Matlab 绘图上提供的宝贵帮助, 谢谢你的耐心指点和深夜的陪伴。

同时, 这是我首次使用 Latex 撰写实验报告, 从最初的生疏到现在的熟练, 这篇报告见证了我习得新技能的全部过程, 对我日后的学习帮助巨大。