

用示波器观测磁滞回线

实验中铁芯和线圈相关参数分别为：

样品 1 (环形铁氧体磁芯) : $l = 0.130 \text{ m}$, $S = 1.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 。

样品 2 (EI 型硅钢磁芯) : $l = 0.075 \text{ m}$, $S = 1.20 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 。

1、观察样品 1 的饱和磁滞回线

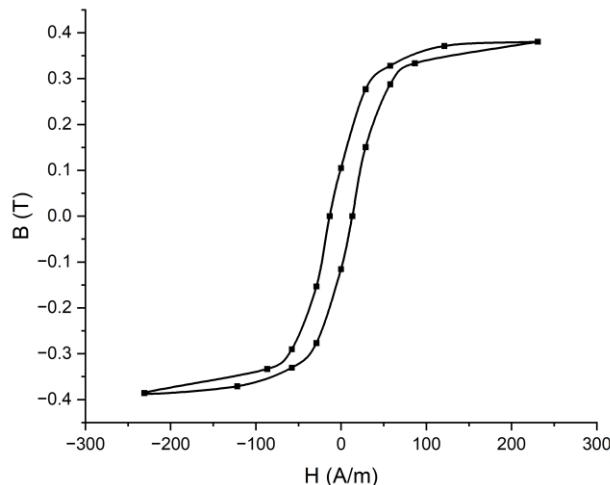
(1) $R_1 = 2.0\Omega$; $R_2 = 50k\Omega$; $C = 10.0\mu F$; $f = 100Hz$

$$H = \frac{N_1 U_{R_1}}{l R_1}, \quad B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_c$$

表 1: 样品 1 的饱和磁滞回线测量数据表

| 测量次数 | U_{R_1}/mV | $H/A \cdot m^{-1}$ | U_c/mV | B/T |
|------|--------------|--------------------|----------|-------|
| 1 | 400 | 230.77 | 14.15 | 0.38 |
| 2 | 210 | 121.15 | 13.8 | 0.37 |
| 3 | 100 | 57.69 | 12.2 | 0.33 |
| 4 | 50 | 28.85 | 10.3 | 0.28 |
| 5 | 0 | 0.00 | 3.9 | 0.10 |
| 6 | -23 | -13.27 | 0 | 0.00 |
| 7 | -50 | -28.85 | -5.7 | -0.15 |
| 8 | -100 | -57.69 | -10.8 | -0.29 |
| 9 | -150 | -86.54 | -12.4 | -0.33 |
| 10 | -400 | -230.77 | -14.35 | -0.39 |
| 11 | -211 | -121.73 | -13.8 | -0.37 |
| 12 | -100 | -57.69 | -12.3 | -0.33 |
| 13 | -50 | -28.85 | -10.3 | -0.28 |
| 14 | 0 | 0.00 | -4.3 | -0.12 |
| 15 | 23 | 13.27 | 0 | 0.00 |
| 16 | 50 | 28.85 | 5.6 | 0.15 |
| 17 | 100 | 57.69 | 10.7 | 0.29 |
| 18 | 150 | 86.54 | 12.4 | 0.33 |
| 19 | 400 | 230.77 | 14.15 | 0.38 |

图 1. 饱和磁滞回线的 B-H 图



计算得饱和磁感应强度、剩余磁感应强度、矫顽力为：

$$B_s = 383.1 \text{mT}; \quad B_r = 106.2 \text{mT}; \quad H_c = 13.27 \text{A/m}$$

(2) 观察不同频率时的饱和磁滞回线。

表 2. f=50Hz 时饱和磁滞回线 B_r, H_c 测量

| f = 50Hz | U_{R_1}/mV | U_c/mV |
|----------|---------------------|-----------------|
| | 0 | 3.6 |
| | 20 | 0 |
| | 0 | -3.7 |
| | -18 | 0 |

表 3. f=150Hz 时饱和磁滞回线 B_r, H_c 测量

| f = 150Hz | U_{R_1}/mV | U_c/mV |
|-----------|---------------------|-----------------|
| | 0 | 3.75 |
| | 20.2 | 0 |
| | 0 | -3.95 |
| | -19.2 | 0 |

$$f = 50\text{Hz} \text{ 时, } B_r = 100.8 \text{mT}, H_c = 10.96 \text{A/m};$$

$$f = 150\text{Hz} \text{ 时, } B_r = 103.5 \text{mT}, H_c = 11.365 \text{A/m};$$

不同频率下 B_r, H_c 基本一致。

(3) 不确定度分析:

1) U_{R_1} 带来的不确定度。

示波器光标读数允差: $e_1 = U_{\text{测量值}} \times 0.02 + U_{\text{满刻度}} \times 0.003$,

示波器线宽造成的读数误差: $e_2 = 0.01 \times 100 \text{mV} = 1 \text{mV}$

其中 U_{R_1} 所带来的不确定度所带来的的相对误差是最大的, 我们仅考虑 U_{R_1} 的不确定度即可。

$$\sigma_{U_{R_1}} = \sqrt{\left(\frac{e_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_2}{\sqrt{3}}\right)^2}, \quad \sigma_H = \frac{\partial H}{\partial U_{R_1}} \sigma_{U_{R_1}} = \frac{N_1}{lR_1} \sqrt{\left(\frac{e_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_2}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$f = 50\text{Hz} \text{ 时, } \sigma_H = 1.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}; \quad f = 150\text{Hz} \text{ 时, } \sigma_H = 1.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

2) U_c 带来的不确定度。

示波器光标读数允差: $e_1 = U_{\text{测量值}} \times 0.02 + U_{\text{满刻度}} \times 0.003$,

示波器线宽造成的读数误差: $e_2 = 0.01 \times 5 \text{mV} = 0.05 \text{mV}$

其中 U_c 所带来的不确定度所带来的的相对误差是最大的, 我们仅考虑 U_c 的不确定度即可。

$$\sigma_{U_c} = \sqrt{\left(\frac{e_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_2}{\sqrt{3}}\right)^2}, \quad \sigma_B = \frac{\partial B}{\partial U_c} \sigma_{U_c} = \frac{R_2 C}{N_2 S} \sqrt{\left(\frac{e_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_2}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$f = 50\text{Hz}$ 时, $\sigma_B = 7 \text{mT}$; $f = 150\text{Hz}$ 时, $\sigma_B = 7\text{mT}$

因此,

$f = 50\text{Hz}$ 时, $B_r = (101 \pm 7)\text{mT}$, $H_c = (11.0 \pm 1.5)\text{A/m}$;

$f = 150\text{Hz}$ 时, $B_r = (104 \pm 7)\text{mT}$, $H_c = (11.4 \pm 1.5)\text{A/m}$;

(4) 固定频率、比较不同积分常量取值对 U_{R_1} - U_C 李萨如图的影响, 固定参数 $f = 50\text{Hz}$, $I_m = 0.2\text{A}$, $R_1 = 2.0\Omega$,

图 2. $R_2 = 50k\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$, $\tau = 0.5\text{s}$

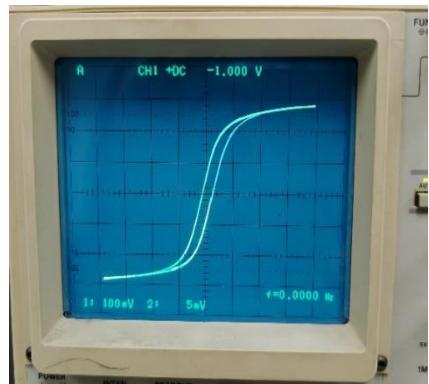


图 3. $R_2 = 25k\Omega$, $C = 2\mu\text{F}$, $\tau = 0.05\text{s}$

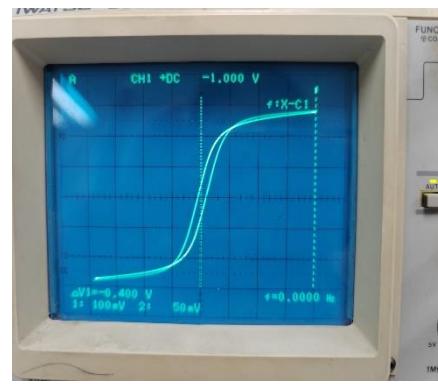
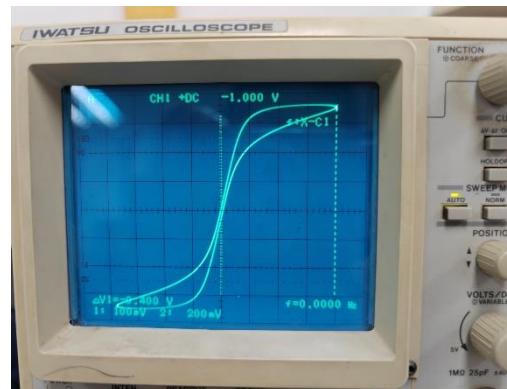


图 4. $R_2 = 20k\Omega$, $C = 0.5\mu\text{F}$, $\tau = 0.01\text{s}$



1) 积分常量为什么会影响李萨如图?

积分常量越大, 输出信号的幅值越小, 因为积分器对输入信号的积分效果更强。积分器会引入一个 90 度的相位滞后。如果积分常量变化, 可能会导致相位差的变化, 从而影响李萨如图的形状。

2) 积分常量是否影响真实的磁滞回线的形状?

这种畸变只是来源于测量电路参数的变化, 与材料的特性无关。因此积分常量不会影响真实的磁滞回线形状。

2、观察样品 1 的动态磁化曲线

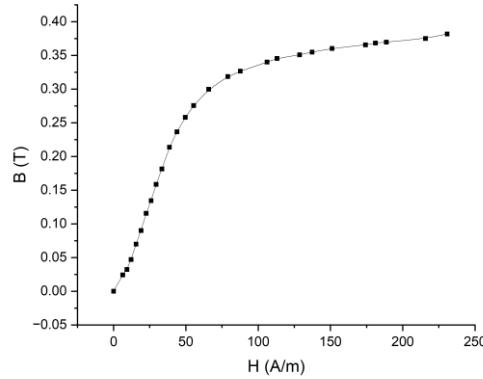
固定参数 $R_1 = 2.0\Omega$; $R_2 = 50k\Omega$; $C = 10.0\mu\text{F}$; $f = 100\text{Hz}$;

表 4. 样品 1 动态磁化曲线测量数据表

| 测量次数 | U_{R_1}/mV | $H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ | U_c/mV | B/T | μ_m |
|------|---------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|---------|
| 1 | 11.0 | 6.35 | 0.90 | 0.02 | 3035.28 |
| 2 | 21.0 | 12.12 | 1.75 | 0.05 | 3091.49 |
| 3 | 27.0 | 15.58 | 2.60 | 0.07 | 3572.39 |
| 4 | 33.0 | 19.04 | 3.35 | 0.09 | 3766.00 |
| 5 | 39.0 | 22.50 | 4.30 | 0.12 | 4090.28 |
| 6 | 45.0 | 25.96 | 5.00 | 0.13 | 4121.99 |
| 7 | 51.0 | 29.42 | 5.90 | 0.16 | 4291.72 |
| 8 | 58.0 | 33.46 | 6.75 | 0.18 | 4317.43 |
| 9 | 67.0 | 38.65 | 7.95 | 0.21 | 4401.92 |
| 10 | 76.0 | 43.85 | 8.80 | 0.24 | 4295.55 |

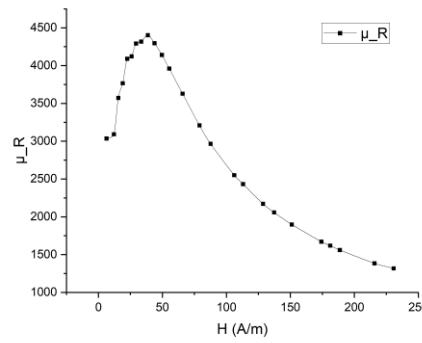
| | | | | | |
|----|-------|--------|-------|------|---------|
| 11 | 86.0 | 49.62 | 9.60 | 0.26 | 4141.16 |
| 12 | 96.0 | 55.38 | 10.25 | 0.28 | 3960.98 |
| 13 | 114.0 | 65.77 | 11.15 | 0.30 | 3628.44 |
| 14 | 137.0 | 79.04 | 11.85 | 0.32 | 3208.83 |
| 15 | 152.0 | 87.69 | 12.15 | 0.33 | 2965.39 |
| 16 | 184.0 | 106.15 | 12.65 | 0.34 | 2550.48 |
| 17 | 196.0 | 113.08 | 12.85 | 0.35 | 2432.18 |
| 18 | 223.0 | 128.65 | 13.05 | 0.35 | 2170.98 |
| 19 | 238.0 | 137.31 | 13.20 | 0.35 | 2057.53 |
| 20 | 262.0 | 151.15 | 13.40 | 0.36 | 1897.37 |
| 21 | 302.0 | 174.23 | 13.60 | 0.37 | 1670.63 |
| 22 | 314.0 | 181.15 | 13.70 | 0.37 | 1618.60 |
| 23 | 327.0 | 188.65 | 13.75 | 0.37 | 1559.93 |
| 24 | 374.0 | 215.77 | 13.95 | 0.38 | 1383.73 |
| 25 | 400.0 | 230.77 | 14.20 | 0.38 | 1316.98 |

图 5. $B_m - H_m$ 动态磁化曲线图



$B_m - H_m$ 动态磁化曲线变化规律：从 $(0,0)$ 开始单调递增，曲线斜率由大变小，最终趋于水平。

图 6. $\mu_m - H_m$ 曲线图



$\mu_m - H_m$ 曲线变化规律：随着 H_m 从 0 开始增大， μ_m 从 3000 左右递增，在 $H_m = 40 \text{ A/m}$ 附近达到最大，约为 4500，之后递减，且斜率逐渐减小。

计算起始磁导率为：

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = 3035.28$$

3、测量样品 1 在不同直流偏置下的可逆磁导率

固定参数 $R_1 = 2.0\Omega$; $R_2 = 20k\Omega$; $C = 2.0\mu F$; $f = 100Hz$;

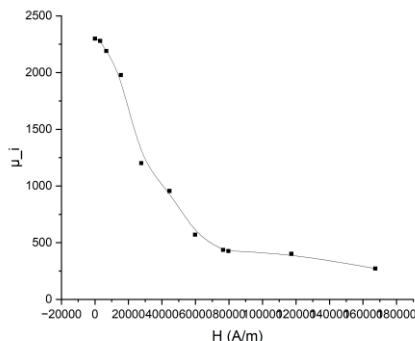
$$H = \frac{N_3}{l} i_{DC}$$

$$\mu_R = \frac{lR_1R_2C}{\mu_0 N_1 N_2 S} \frac{\Delta U_C}{\Delta U_{R_1}}$$

表 5. 样品 1 可逆磁导率测量数据表

| 测量次数 | i_{DC}/mA | $\Delta U_{R_1}/mV$ | $\Delta U_C/mV$ | μ_R |
|------|-------------|---------------------|-----------------|----------|
| 1 | 0.024 | 0.8 | 0.62 | 2300.071 |
| 2 | 2.68 | 0.82 | 0.63 | 2280.165 |
| 3 | 5.86 | 0.84 | 0.62 | 2190.544 |
| 4 | 13.4 | 0.96 | 0.64 | 1978.556 |
| 5 | 23.95 | 1.58 | 0.64 | 1202.16 |
| 6 | 38.5 | 1.8 | 0.58 | 956.3018 |
| 7 | 51.8 | 2.08 | 0.4 | 570.7372 |
| 8 | 66.3 | 2.04 | 0.3 | 436.4461 |
| 9 | 69 | 1.88 | 0.27 | 426.2314 |
| 10 | 101.6 | 1.92 | 0.26 | 401.8941 |
| 11 | 145 | 1.96 | 0.18 | 272.5561 |

图 7. $\mu_R - H$ 曲线图



随着直流偏置的增加，可逆磁导率大小逐渐减小，变化率逐渐减小。

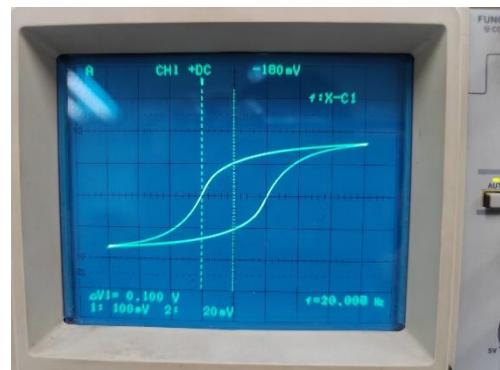
4、测量样品 2 在不同频率下的磁滞回线

$R_1 = 2.0\Omega$; $R_2 = 50k\Omega$; $C = 10.0\mu F$; $H_m = 400A/m$

图 8. $f=20Hz$ 样品 2 饱和磁滞回线

表 6. $f=20Hz$ 样品 2 磁滞回线数据表

| $f = 20Hz$ | U_{R_1}/mV | U_c/mV |
|------------|--------------|----------|
| | 400 | 33.2 |
| | -400 | -33.2 |
| | 0 | 21.2 |
| | 0 | -21.8 |
| | 100 | 0 |
| | -100 | 0 |



$$U_{C,m} = 33.2 \text{ mV}, \quad B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,m} = 922.22 \text{ mT}$$

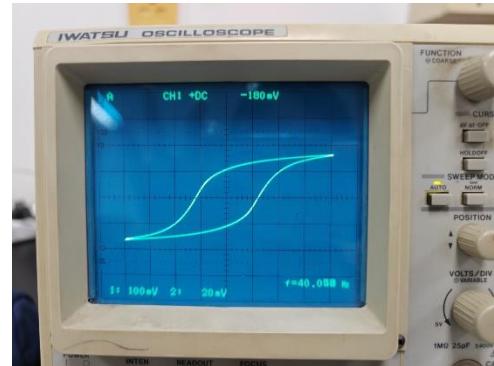
$$U_{C,r} = 21.5 \text{ mV}, \quad B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,r} = 597.22 \text{ mT}$$

$$U_{R_1} = 100 \text{ mV}, \quad H_C = \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1} = 100.00 \text{ A/m}$$

表 7. f=40Hz 样品 2 磁滞回线数据表

| | U_{R_1}/mV | U_c/mV |
|----------|---------------------|-----------------|
| f = 40Hz | 400 | 33.0 |
| | -400 | -33.6 |
| | 0 | 22.0 |
| | 0 | -22.2 |
| | 120 | 0 |
| | -120 | 0 |

图 9. f=40Hz 样品 2 饱和磁滞回线



$$U_{C,m} = 33.3 \text{ mV}, \quad B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,m} = 925.00 \text{ mT}$$

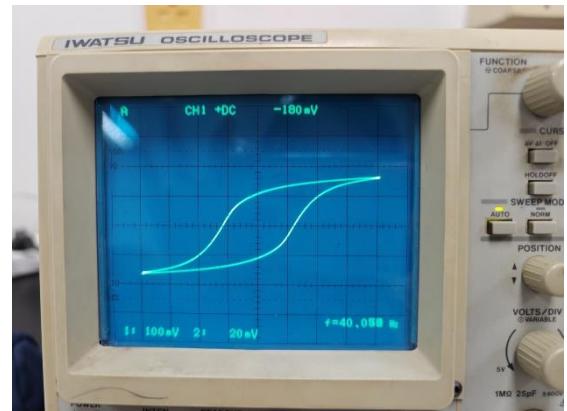
$$U_{C,r} = 22.1 \text{ mV}, \quad B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,r} = 613.89 \text{ mT}$$

$$U_{R_1} = 120 \text{ mV}, \quad H_C = \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1} = 120.00 \text{ A/m}$$

表 8. f=60Hz 样品 2 磁滞回线数据表

| | U_{R_1}/mV | U_c/mV |
|----------|---------------------|-----------------|
| f = 60Hz | 400 | 33.0 |
| | -400 | -33.6 |
| | 0 | 22.4 |
| | 0 | -22.8 |
| | 141 | 0 |
| | -139 | 0 |

图 10. f=60Hz 样品 2 饱和磁滞回线



$$U_{C,m} = 33.3 \text{ mV}, \quad B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,m} = 925.00 \text{ mT}$$

$$U_{C,r} = 22.6 \text{ mV}, \quad B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,r} = 627.78 \text{ mT}$$

$$U_{R_1} = 140 \text{ mV}, \quad H_C = \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1} = 140.00 \text{ A/m}$$

规律: B_m 几乎不变, B_r 和 H_C 随着频率的增加而有所增加。

原因: 因为硅钢中随频率增大涡流增强, 能量损耗增多, 表现在磁滞回线中则是曲线包围的面积增大, B_r, H_C 增大。

5、思考题

(1) 铁磁材料的动态磁滞回线与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到哪些因素的影响？

铁磁材料的动态磁滞回线与静态磁滞回线的主要区别在于外加磁场的频率和动态效应的影响。静态磁滞回线在准静态条件下测量；而动态磁滞回线在外加交变磁场下测量，受频率、外加磁场强度、涡流效应、磁滞损耗和磁弛豫效应的综合影响。动态磁滞回线更能反映材料在高频或交变磁场下的实际磁性能。动态磁化的曲线面积等于磁化一个周期的损耗。

(2) 铁氧体和硅钢材料的动态磁化曲线特性各有什么特点？

铁氧体材料由于其磁化状态易于改变，达到饱和磁化所需的外加磁场较小，因此其剩余磁感应强度 B_r 和矫顽力 H_C 也相对较小；而硅钢材料则更难改变其磁化状态，达到饱和磁化需要的外加磁场较大，且其剩余磁感应强度和矫顽力均较高。这使得硅钢材料的磁滞回线面积比铁氧体材料更大，导致其在磁化一个周期内的能量损耗相对较高。

(3) 电路参量怎样设置才能保证李萨如图正确反映材料动态磁滞回线形状？

$R_2C \gg T$ ，才有 $u \sim u_{R_2}$ ，使得公式 $B = \frac{R_2C}{N_2S}u_c$ 能够认为近似成立， $u_{R_1} - u_c$ 李萨如图才能正确反映材料动态磁滞回线的形状。

(4) 如何判断磁滞回线绕行方向？

将示波器调至 A-t 模式，若 CH1 路的信号先到达零点，则绕行方向为逆时针。若 CH2 路的信号先到达零点，则绕行方向为顺时针。