

用示波器观测动态磁滞回线

杨轶

November 2023

1 数据处理

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): $l = 0.130\text{ m}$, $S = 1.24 \times 10^{-4}\text{ m}^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 匝。

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

1.1 观测样品 1 的饱和磁滞回线

1.1.1

实验条件: $f = 100.0\text{ Hz}$, $R_1 = 2.0\Omega$, $R_2 = 50\text{ k}\Omega$, $C = 10.0\text{ }\mu\text{F}$

按照公式有

$$H = \frac{N_1}{lR_1}U_{R_1}, B = \frac{R_2C}{N_2S}U_C$$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{R_1}/mV	-300	-200	-100	-45.0	-18.0	0.00	45.0	100	200	300
U_C/mV	-14.70	-13.90	-11.15	-5.00	0.00	3.55	10.00	12.80	14.45	15.15
$H/(\text{A/m})$	-173.1	-115.4	-57.69	-25.96	-10.38	0.000	25.96	57.69	115.4	173.1
B/mT	-395.2	-373.6	-299.7	-134.4	0.000	95.43	268.8	344.1	388.4	407.2

表 1: 样品 1 U_{R_1} - U_C 与 B - H 数据表

可计算得出: $B_S = 395.2\text{ mT}$, $H_C = 10.38\text{ A/m}$, $B_r = 95.43\text{ mT}$

1.1.2

改变仪器频率, 保持 H_m R_1 R_2 C 一致, 测量 $f = 50\text{ Hz}$ 与 $f = 100\text{ Hz}$ 时, 对应的 B_r H_C

示波器 $CH1$ 分度值为 100 mV/div , $CH2$ 分度值为 5 mV/div 。下面对表 2 中的 H_C 与 B_r 进行不确定度的评估:

对于 $f = 50\text{ Hz}$:

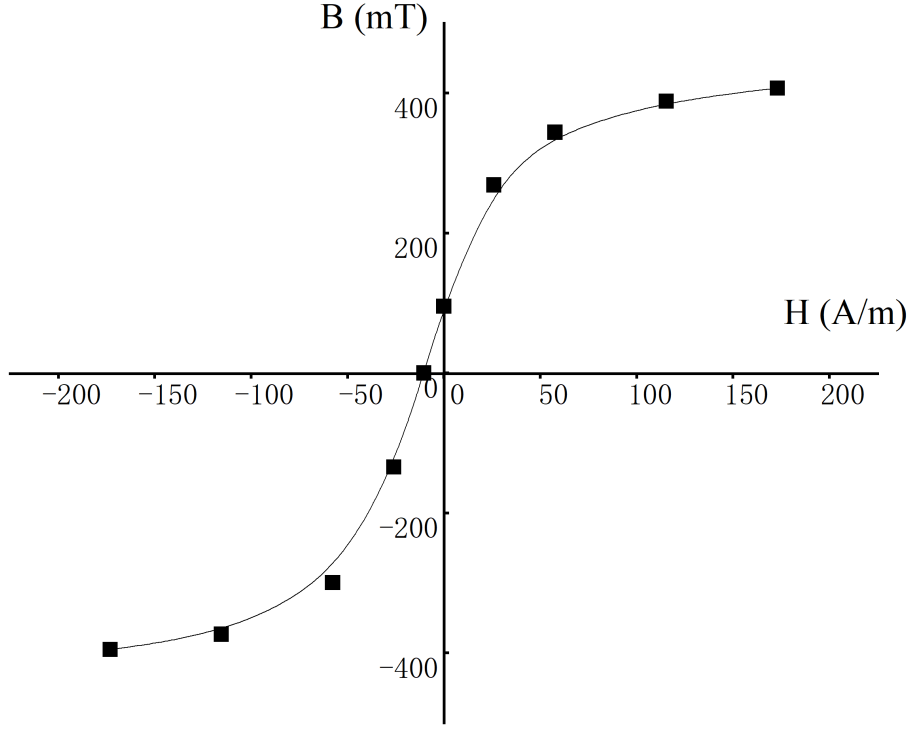


图 1: 实验中磁滞回线上半支

f/Hz	U_{R_1}/mV	$H_m/(\text{A/m})$	U'_{R_1}/mV	$H_C/(\text{A/m})$	U_C/mV	B_r/mT
50	241	139.0	18.0	10.38	3.55	95.43
150	241	139.0	17.0	9.808	3.55	95.43

表 2: 不同频率下的 H_C 与 B_r

U'_{R_1} 的示波器光标读数允差为: $e_1 = 2\% \times 18 \text{ mV} + 0.3\% \times 100 \text{ mV} = 0.66 \text{ mV}$, 示波器波形线宽造成的读数误差为: $e_2 = 0.01 \times 100 \text{ mV} = 1 \text{ mV}$, U'_{R_1} 极限误差: $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} = 1.2 \text{ mV}$, 根据公式 $H_C = \frac{N_1}{lR_1} U'_{R_1}$, 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。

$$\sigma_{H_C} = \frac{N_1}{lR_1} \sigma_{U'_{R_1}} = \frac{N_1}{lR_1} \frac{e}{\sqrt{3}} = 0.7 \text{ A/m}$$

$$H_C = 10.4 \pm 0.7 \text{ A/m}$$

U_C 的示波器光标读数允差为: $e_1 = 2\% \times 3.55 \text{ mV} + 0.3\% \times 5 \text{ mV} = 0.086 \text{ mV}$, 示波器波形线宽造成的读数误差为: $e_2 = 0.01 \times 5 \text{ mV} = 0.05 \text{ mV}$, U_C 极限误差: $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} = 0.099 \text{ mV}$, 根据公式 $B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C$, 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。

$$\sigma_{B_r} = \frac{R_2 C}{N_2 S} \sigma_{U_C} = \frac{R_2 C}{N_2 S} \frac{e}{\sqrt{3}} = 2.7 \text{ mT}$$

$$B_r = 95.4 \pm 2.7 \text{ mT}$$

对于 $f = 150 \text{ Hz}$:

U'_{R_1} 的示波器光标读数允差为: $e_1 = 2\% \times 17 \text{ mV} + 0.3\% \times 100 \text{ mV} = 0.64 \text{ mV}$, 示波器波形线宽造成的读数误差为: $e_2 = 0.01 \times 100 \text{ mV} = 1 \text{ mV}$, U'_{R_1} 极限误差: $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} = 1.2 \text{ mV}$, 根据公式 $H_C = \frac{N_1}{lR_1} U'_{R_1}$, 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。

$$\sigma_{H_C} = \frac{N_1}{lR_1} \sigma_{U'_{R_1}} = \frac{N_1}{lR_1} \frac{e}{\sqrt{3}} = 0.7 \text{ A/m}$$

$$H_C = 9.8 \pm 0.7 \text{ A/m}$$

U_C 的示波器光标读数允差为: $e_1 = 2\% \times 3.55 \text{ mV} + 0.3\% \times 5 \text{ mV} = 0.086 \text{ mV}$, 示波器波形线宽造成的读数误差为: $e_2 = 0.01 \times 5 \text{ mV} = 0.05 \text{ mV}$, U_C 极限误差: $e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} = 0.099 \text{ mV}$, 根据公式 $B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C$, 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。

$$\sigma_{B_r} = \frac{R_2 C}{N_2 S} \sigma_{U_C} = \frac{R_2 C}{N_2 S} \frac{e}{\sqrt{3}} = 2.7 \text{ mT}$$

$$B_r = 95.4 \pm 2.7 \text{ mT}$$

1.1.3

在频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 下, 改变不同的积分常量 (即 $R_2 C$)。取 $I_m = 0.2 \text{ A}$, $R_2 C = 0.5, 0.05, 0.01$ 。

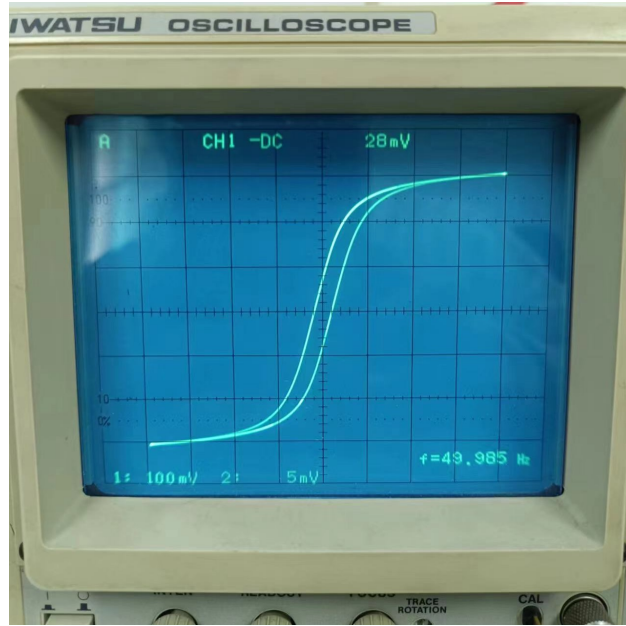


图 2: $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$, $C = 10.0 \mu\text{F}$, $R_2 C = 0.5$ 磁滞回线

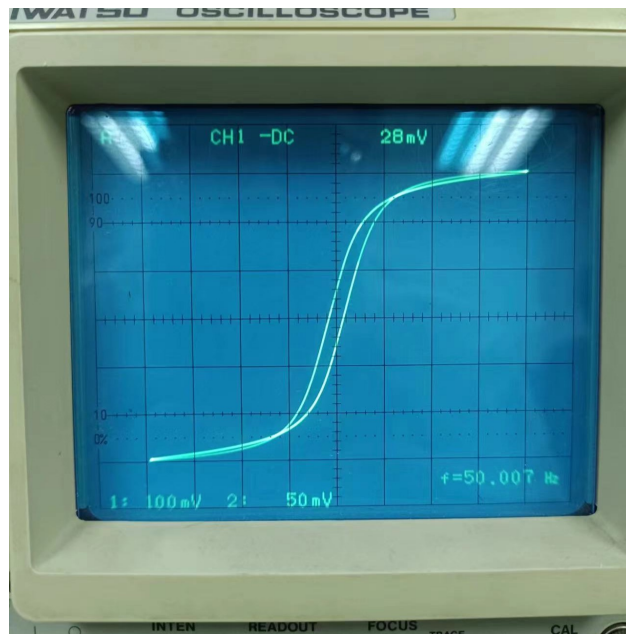


图 3: $R_2 = 25\text{k}\Omega$, $C = 2.0\mu\text{F}$, $R_2C = 0.05$ 磁滞回线

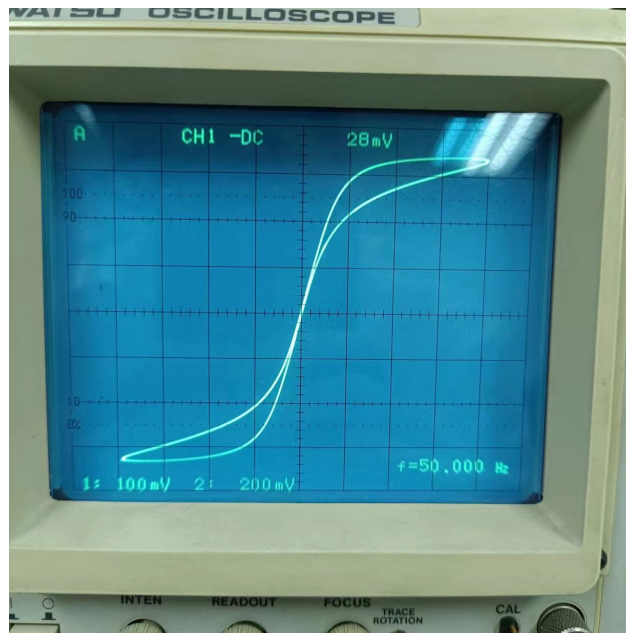


图 4: $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C = 0.5\mu\text{F}$, $R_2C = 0.01$ 磁滞回线

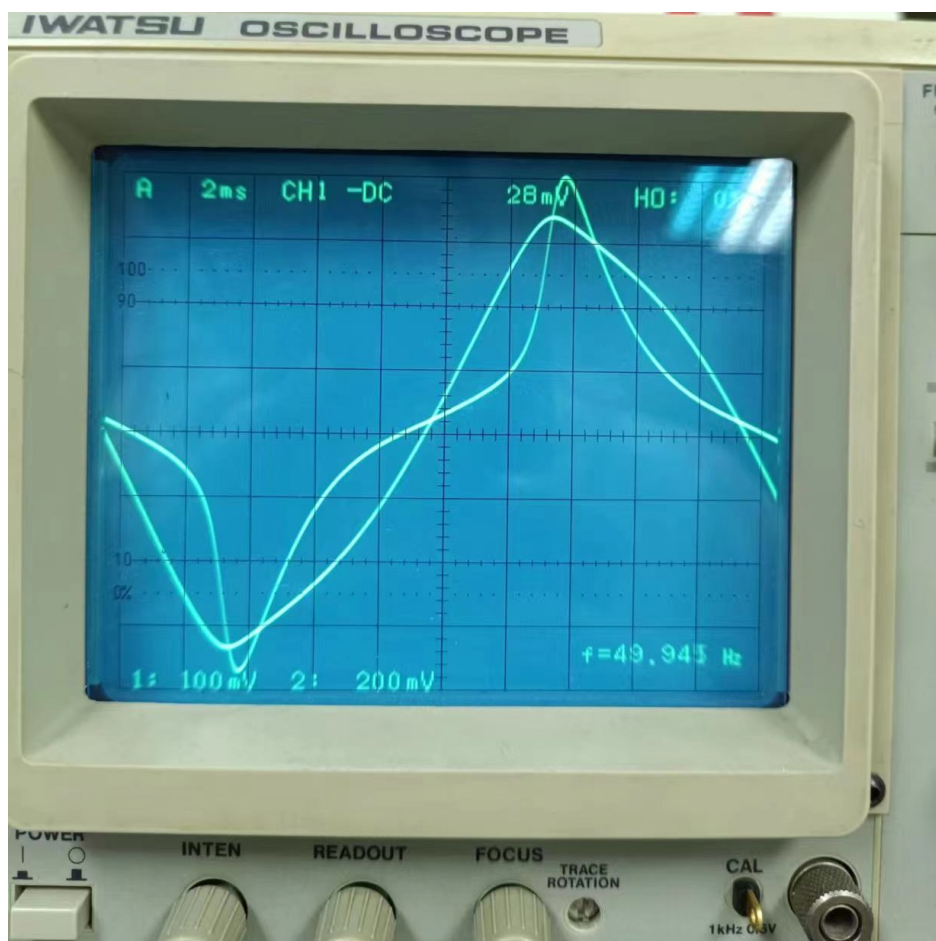


图 5: $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C = 0.5\mu\text{F}$, $R_2C = 0.01$ CH1 与 CH2 相位差

1.2 样品 1 动态磁化曲线

实验条件: $f = 100.0\text{ Hz}$, $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C = 10.0\mu\text{F}$

$$B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C, H_m = \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1}$$

$$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{\frac{R_2 C}{N_2 S} U_C}{\mu_0 \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1}} = \frac{l R_1 R_2 C}{\mu_0 N_1 N_2 S} \frac{U_C}{U_{R_1}}$$

U_{R1}/mV	8.00	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0
$H_m/(\text{A/m})$	4.615	11.54	17.31	23.08	28.85	34.62	40.38	46.15	51.92
U_C/mV	0.700	2.00	3.35	4.60	5.75	7.30	8.55	9.45	10.35
B_m/mT	18.82	53.76	90.05	123.6	154.6	196.2	229.8	254.0	278.2
μ_m	3244	3708	4140	4264	4264	4511	4528	4379	4264
U_{R1}/mV	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$H_m/(\text{A/m})$	57.69	63.46	69.23	75.00	80.77	86.54	92.31	98.08	103.8
U_C/mV	11.00	11.70	12.20	12.60	12.90	13.10	13.35	13.50	13.65
B_m/mT	295.7	314.5	328.0	338.7	346.8	352.2	358.9	362.9	366.9
μ_m	4079	3944	3770	3594	3416	3238	3094	2944	2812
U_{R1}/mV	190	200	210	220	230	240	250	260	270
$H_m/(\text{A/m})$	109.6	115.4	121.2	126.9	132.7	138.5	144.2	150.0	155.8
U_C/mV	13.85	14.00	14.10	14.20	14.25	14.30	14.40	14.50	14.55
B_m/mT	372.3	376.3	379.0	381.7	383.1	384.4	387.1	389.8	391.1
μ_m	2703	2596	2490	2393	2297	2209	2136	2068	1998

表 3: $U_{R1}, H_m, U_C, B_m, \mu_r$ 数据表

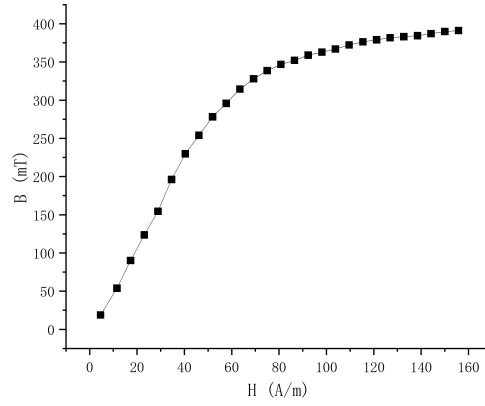


图 6: 动态磁化曲线

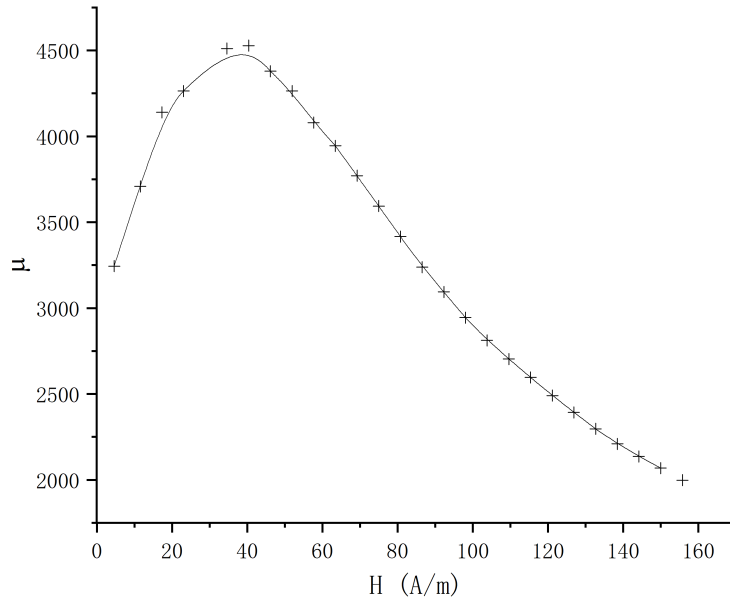


图 7: 相对振幅磁导率曲线

1.3 样品 1 的起始磁化率 μ_i 与不同直流偏置场 H 下的可逆磁化率 μ_r

实验条件: $f = 100.0 \text{ Hz}$, $R_1 = 2.0 \Omega$, $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$, $C = 2.0 \mu\text{F}$

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

$$\mu_r = \frac{l R_1 R_2 C}{\mu_0 N_1 N_2 S} \frac{\Delta U_C}{\Delta U_{R_1}}$$

其中 $\Delta U_C, \Delta U_{R_1}$ 为示波器上直线图样两端点竖直差与水平差。

i_{DC}/mA	0.00	20.72	39.43	60.6	83.0	107.3	120.5	142.0	165.0	195.2
$H/(\text{A/m})$	0.000	23.91	45.50	69.92	95.77	123.8	139.0	163.8	190.4	225.2
$\Delta U_{R_1}/\text{mV}$	5.26	6.72	11.08	13.90	14.32	14.20	13.98	13.72	13.56	13.38
$\Delta U_C/\text{mV}$	4.42	4.42	4.10	3.14	2.22	1.58	1.34	1.10	0.860	0.660
μ_r	2493	1951	1098	670.1	459.9	330.1	284.3	237.8	188.1	146.3

表 4: 直流偏置不同 H 下对应 μ_r 数据表

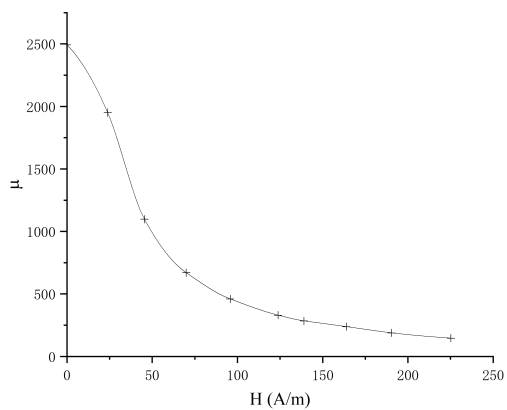


图 8: 可逆磁导率 μ_r 与偏置直流磁场 H 的关系图

1.4 样品 2 的磁滞回线

维持 $H_m = 400 \text{ A/m}$, 实验条件: $R_1 = 2\Omega, R_2 = 50 \text{ k}\Omega, C = 10.0 \mu\text{F}$

$$U_{R_1} = \frac{H_m l R_1}{N_1} = 400 \text{ mV}$$

$f = 20 \text{ Hz}$:

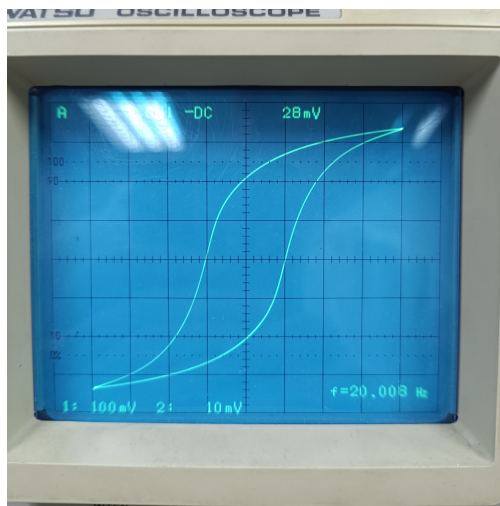


图 9: $f = 20 \text{ Hz}$ 样品 2 磁滞回线

$$U_{C,m} = 33.8 \text{ mV}, B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,m} = 938.9 \text{ mT}$$

$$U_{C,r} = 21.1 \text{ mV}, B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,r} = 586.1 \text{ mT}$$

$$U_{R_1} = 100 \text{ mV}, H_C = \frac{N_1}{lR_1} U_{R_1} = 100.0 \text{ A/m}$$

$f = 40 \text{ Hz}$:

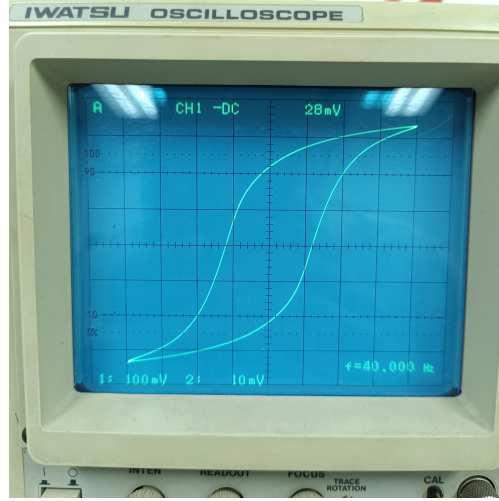


图 10: $f = 40 \text{ Hz}$ 样品 2 磁滞回线

$$U_{C,m} = 33.6 \text{ mV}, B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,m} = 933.3 \text{ mT}$$

$$U_{C,r} = 22.5 \text{ mV}, B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,r} = 625.0 \text{ mT}$$

$$U_{R_1} = 119 \text{ mV}, H_C = \frac{N_1}{lR_1} U_{R_1} = 119.0 \text{ A/m}$$

$f = 60 \text{ Hz}$:

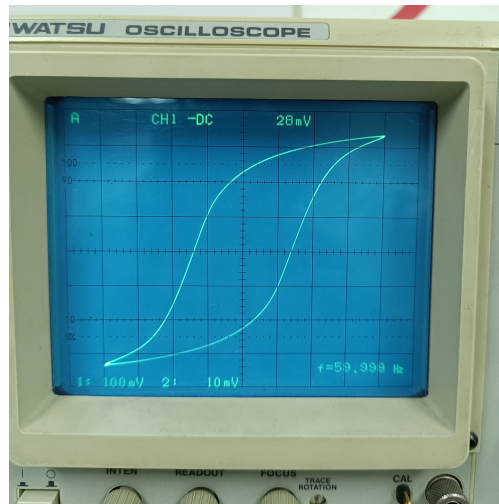


图 11: $f = 60 \text{ Hz}$ 样品 2 磁滞回线

$$U_{C,m} = 33.6 \text{ mV}, B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,m} = 933.3 \text{ mT}$$

$$U_{C,r} = 23.1 \text{ mV}, B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{C,r} = 641.7 \text{ mT}$$

$$U_{R_1} = 139 \text{ mV}, H_C = \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1} = 139.0 \text{ A/m}$$

通过数据不难发现， B_m 随频率改变几乎不变， B_r 与 H_C 随频率增加有增长，

2 思考题

2.1

铁磁材料的动态磁滞回线是指其在交变磁场磁化下，所得到的 B - H 关系曲线；静态磁滞回线是金属材料在磁场变化的速度很慢时，也就是在准静态磁化的条件下测得的磁滞回线。铁磁材料动态磁滞回线的形状与磁化场频率和幅度有关。频率越高，在 H_m 一定时， H_C 越大， B_r 越大；而在频率一定时，磁化场幅度越大，磁滞回线越大。磁滞回线的面积对应于循环磁化一周所发生的能量损耗，与积分电路时间常数 $R_2 C$ 、磁化场频率和振幅等均有关系。

2.2

实验中样品 1（铁氧体）的动态磁化曲线较窄， H_C 较小，饱和磁场强度较小；而样品 2（硅钢材料）的动态磁化曲线较宽， H_C 较大，饱和磁场强度较大。

2.3

电路参量应保证积分电路的时间常数远大于外磁场周期，即 $R_2 C \gg T$ ，同样应保证 R_2 足够大，在实验中我们使 $R_2 > 10 \text{ k}\Omega$

2.4

将示波器调成 A-t 模式，从极值开始，若是 CH1 路先到 0，则是逆时针绕行；若是 CH2 路先到 0，则是顺时针绕行。

姓名 杨轶

学号 2300011403

星期 第 组

页码 1 /

$$u) \quad l = 0.130 \text{ m} \quad S = 1.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad M = N_2 = N_3 = 150$$

$$\textcircled{1} \quad f = 100.0 \text{ Hz} \quad R_1 = 2.0 \Omega \quad R_2 = 50 \text{ k}\Omega \quad C = 10.0 \mu\text{F}$$

$$U_R/\text{mV} \quad 0.434 \text{ V}_x \quad 0.300 \text{ V}_x \quad 0.200 \text{ V} \quad 0.100 \text{ V} \quad 0.000 \text{ V} \quad -0.100 \text{ V}$$

$$U_g/\text{mV} \quad 15.65 \quad 15.15 \quad 14.45 \quad 12.80 \quad 3.55 \quad -11.15$$

$$U_{R_1} \quad -0.200 \text{ V} \quad -0.300 \text{ V}_x \quad -0.424 \text{ V}_x \quad -45.0 \text{ mV} \quad 45.0 \text{ mV} \quad -18.0 \text{ mV}$$

$$U_c \quad -13.90 \quad -14.70 \quad -15.40 \quad -5.00 \quad 10.00 \quad 0.00$$

$$V_1 = 100 \text{ mV/div} \quad V_2 = 5 \text{ mV/div}$$

$$\textcircled{2} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad H_m = \frac{U_R}{\sqrt{2}} = \frac{0.241}{\sqrt{2}} \text{ V}$$

$$H_c: \quad U_c = -18.0 \text{ mV}$$

$$B_r: \quad U_c = 3.55 \text{ mV}$$

$$f = 150 \text{ Hz} \quad H_m: \quad U_R = 0.241 \text{ V}$$

$$H_c: \quad U_c = -17.0 \text{ mV}$$

$$B_r: \quad U_c = 3.55 \text{ mV}$$

12)

$$\textcircled{1} \quad f = 100 \text{ Hz} \quad R_1 = 2.0 \Omega \quad R_2 = 50 \text{ k}\Omega \quad C = 10.0 \mu\text{F}$$

$$U_R \quad 42.3 \text{ mV} \quad 8.00 \text{ mV} \quad 20.0 \text{ mV} \quad 30.0 \text{ mV} \quad 40.0 \text{ mV} \quad 50.0 \text{ mV} \quad 60.0 \text{ mV}$$

$$U_c \quad 4.78 \text{ mV} \quad 0.700 \text{ mV} \quad 2.00 \text{ mV} \quad 3.35 \text{ mV} \quad 4.60 \text{ mV} \quad 5.75 \text{ mV} \quad 7.10 \text{ mV}$$

$$U_R \quad 70.0 \text{ mV} \quad 80.0 \text{ mV} \quad 90.0 \text{ mV} \quad 0.100 \text{ V} \quad 0.110 \text{ V} \quad 0.120 \text{ V} \quad 0.130 \text{ V}$$

$$U_c \quad 8.55 \text{ mV} \quad 9.45 \text{ mV} \quad 10.35 \text{ mV} \quad 11.00 \text{ mV} \quad 11.70 \text{ mV} \quad 12.20 \text{ mV} \quad 12.60 \text{ mV}$$

$$U_R \quad 0.140 \text{ V} \quad 0.150 \text{ V} \quad 0.160 \text{ V} \quad 0.170 \text{ V} \quad 0.180 \text{ V} \quad 0.190 \text{ V} \quad 0.200 \text{ V}$$

$$U_c \quad 12.90 \text{ mV} \quad 13.10 \text{ mV} \quad 13.35 \text{ mV} \quad 13.50 \text{ mV} \quad 13.65 \text{ mV} \quad 13.85 \text{ mV} \quad 14.00 \text{ mV}$$

$$U_R \quad 0.210 \text{ V} \quad 0.220 \text{ V} \quad 0.230 \text{ V} \quad 0.240 \text{ V} \quad 0.250 \text{ V} \quad 0.260 \text{ V} \quad 0.270 \text{ V}$$

$$U_c \quad 14.10 \text{ mV} \quad 14.20 \text{ mV} \quad 14.25 \text{ mV} \quad 14.30 \text{ mV} \quad 14.40 \text{ mV} \quad 14.50 \text{ mV} \quad 14.55 \text{ mV}$$

姓名

学号

星期

第

组

页码

/

3* 样品1的起始频率 μ

$$R_1 = 2.0 \Omega \quad R_2 = 20 \text{ k}\Omega \quad C = 2.0 \mu\text{F} \quad f = 100.0 \text{ Hz}$$

$$U_{R_1} = 2.70 \text{ mV} \quad 3.20 \text{ mV} \quad 4.70 \text{ mV}$$

$$U_c = 2.30 \text{ mV} \quad 2.30 \text{ mV}$$

$$\frac{\Delta U_c}{\Delta U_{R_1}}$$

ΔU_{R_1}	5.30 mV	9.40 mV	12.40 mV	14.50 mV	15.15 mV	15.05 mV
ΔU_c	4.32 mV	4.52 mV	4.16 mV	3.38 mV	2.32 mV	1.72 mV

ΔU_{R_1}	14.65 mV	14.60 mV	14.40 mV	14.23 mV		
ΔU_c	1.40 mV	1.08 mV	0.96 mV	0.84 mV		x

$$H = \frac{N_3}{L} i$$

ΔU_{R_1}	5.32 mV	10.30 mV	13.42 mV	15.04 mV	15.10 mV
ΔU_c	4.48 mV	4.48 mV	3.92 mV	2.98 mV	2.34 mV
I_H	0	0.029 A	0.049 A	0.066 A	0.080 A

ΔU_{R_1}	5.26	6.72 mV	11.08 mV	13.90 mV	14.72 mV
ΔU_c	4.42 mV	4.42 mV	4.10 mV	3.14 mV	2.22 mV
I_H	0.029 A 0.22 mA	20.72 mA	39.43 mA	60.6 mA	83.0 mA

ΔU_{R_1}	14.20 mV	13.98 mV	13.72 mV	13.56 mV	13.38 mV
ΔU_c	1.58 mV	1.34 mV	1.10 mV	0.86 mV	0.66 mV
I_H	157.3 mA	120.8 mA	142.0 mA	165.0 mA	195.2 mA

$$4. \quad H_m = 400 \text{ A/m} \quad U_{R_1} = 400 \text{ mV}$$

$$R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = 5 \text{ k}\Omega \quad C = 10.0 \mu\text{F}$$

$$f = 20 \text{ Hz}$$

$$B_m: U_c = 12.70 \text{ mV} \quad 33.8 \text{ mV}$$

$$B_r: U_c = 21.1 \text{ mV}$$

$$H_c: U_{R_1} = 0.100 \text{ V}$$

$$f = 40 \text{ Hz}$$

$$B_m: U_c = 33.6 \text{ mV}$$

$$B_r: U_c = 22.5 \text{ mV}$$

$$H_c: U_{R_1} = 0.119 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$B_m: U_c = 33.6 \text{ mV}$$

$$B_r: U_c = 23.1 \text{ mV}$$

$$H_c: U_{R_1} = 0.139 \text{ V}$$