



课程(实验)名称 用示波器观测动态磁滞回线 班级(组别) 周一9组
指导教师 吴尽 实验日期 2017年12月4日 仪器号 8
学生姓名 李奉治 学号 2016K8009929036 成绩

实验9 示波器观测动态磁滞回线

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. 了解铁磁性材料的动态磁化特性;
3. 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。

仪器用具

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: $N_1 = 150$ 匝 $N_2 = 150$ 匝 $N_3 = 150$ 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: $N_1 = 150$ 匝 $N_2 = 150$ 匝 $N_3 = 150$ 匝

- 3) 信号源的频率在 $20 \sim 200 \text{ Hz}$ 间可调; 可调标准电阻 R_1 、 R_2 均为无感交流

电阻, R_1 的调节范围为 $0.1 \sim 11 \Omega$; R_2 的调节范围为 $1 \sim 110 \text{ k}\Omega$ 。

标准电容有 $0.1 \mu\text{F} \sim 11 \mu\text{F}$ 可选



课程(实验)名称 _____ 班级(组别) _____

指导教师 _____ 实验日期 _____ 仪器号 _____

学生姓名 _____ 学号 _____ 成绩 _____

实验原理

1. 铁磁材料的磁化特性

磁化率 $\chi_m = \frac{M}{H}$, 相对磁导率 $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$ 。由于 $B = \mu_0 (M + H)$, 故 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 。

其中 $H \sim$ 外磁场强度, $M \sim$ 内部磁化强度, $B \sim$ 磁感应强度

$\mu_0 \sim$ 真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$

物质的磁性按磁化率可以分为抗磁性、顺磁性和铁磁性

抗磁性物质 磁化率为负值, $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级, 几乎不随温度变化

顺磁性物质 磁化率为正值, $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 之间, 随温度线性增大

铁磁性物质 磁化率为正值, 通常大于 1, 随温度增高而变小

。动态磁滞回线

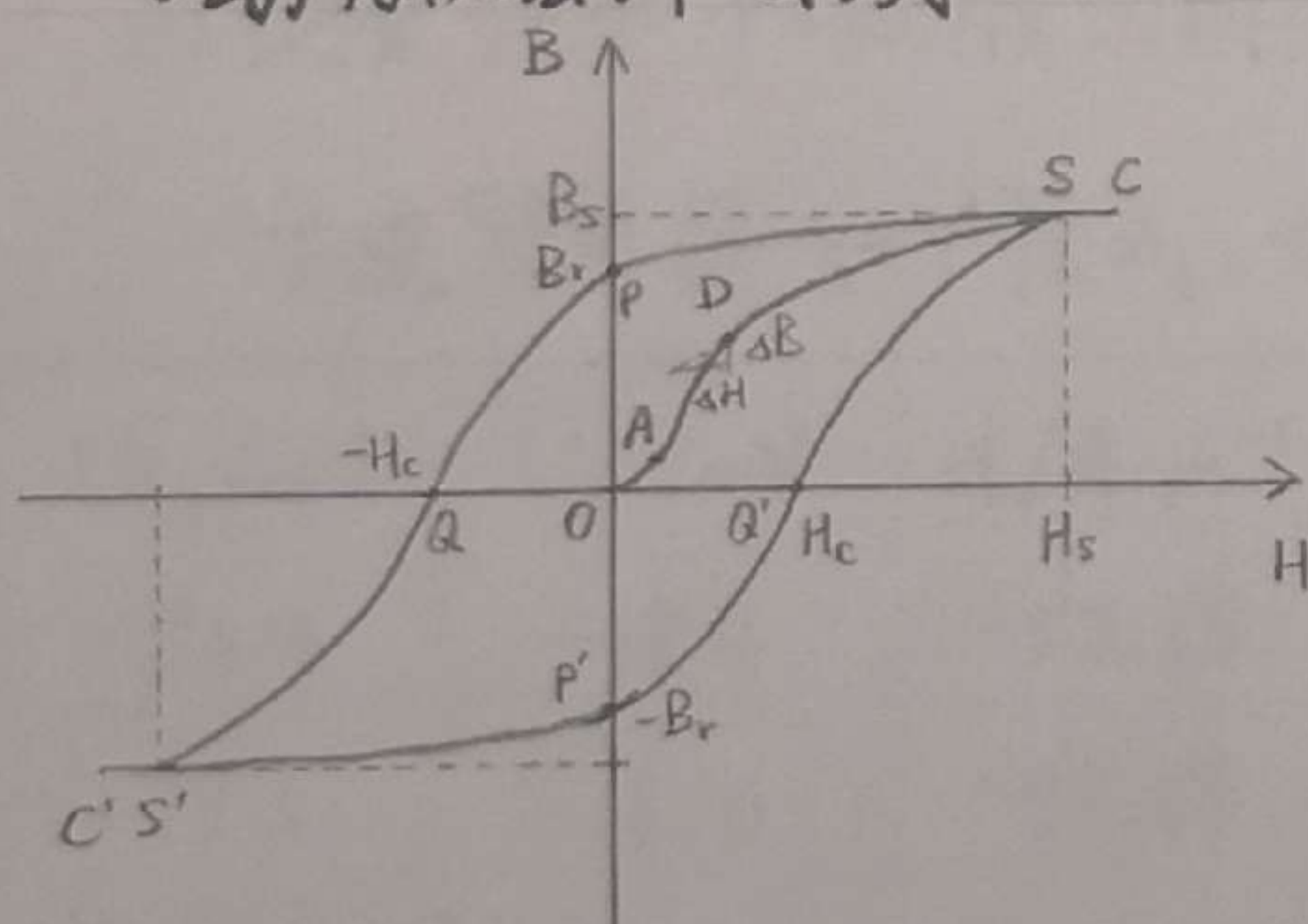


图1 铁磁材料用起始磁化曲线和饱和磁滞回线示意图

OA: 可逆磁化阶段 AS: 不可逆磁化阶段

SC: 饱和磁化阶段 H_s : 饱和磁场强度

B_s : 饱和磁感应强度 B_r : 剩磁磁化强度

H_c : 矫顽力

$S'P'Q'S$ 与 $SPQS'$ 关于原点 O 成中心对称, 所围面积为循环磁化一周的能量损耗

。动态磁化曲线

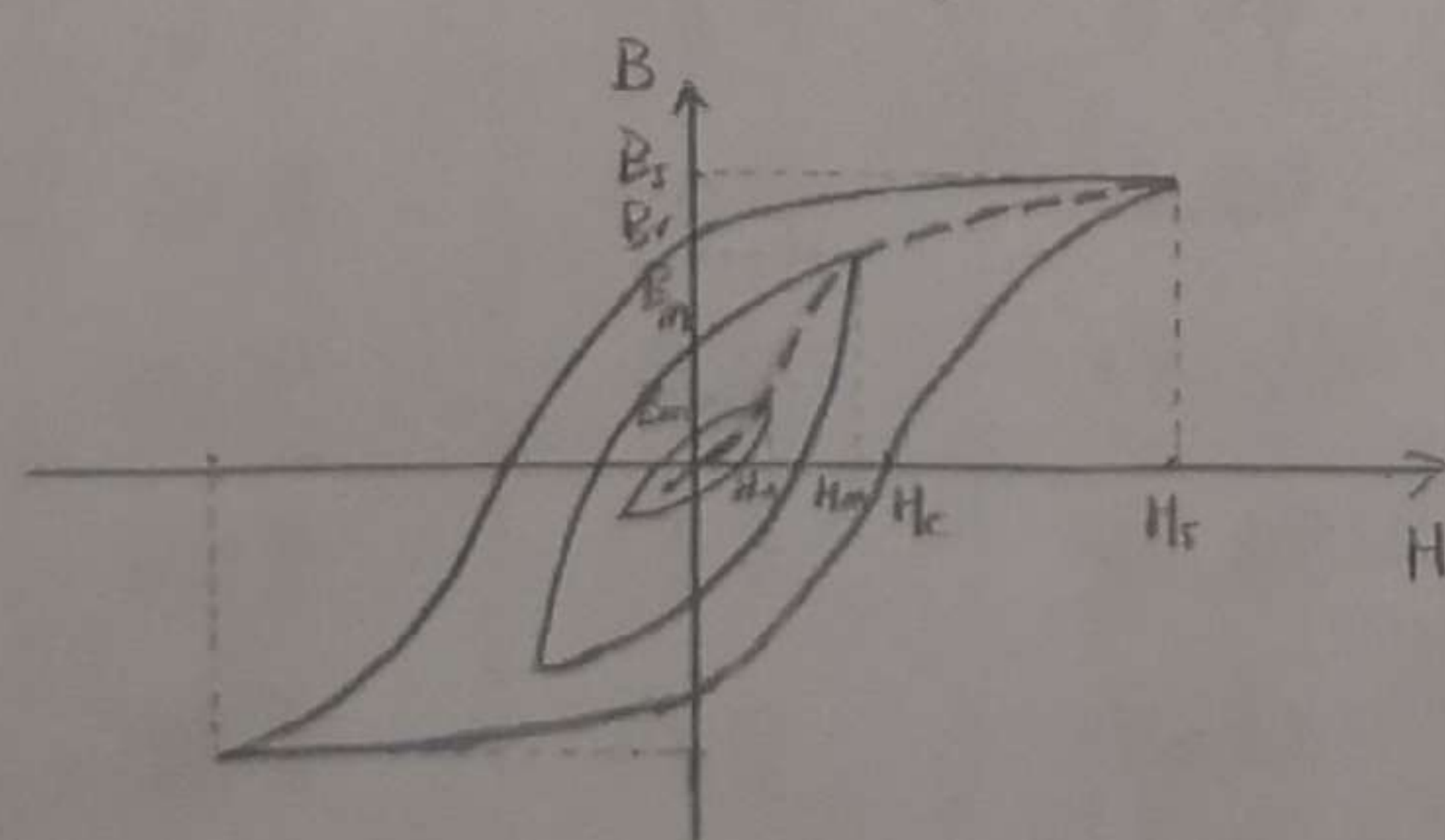


图2 铁磁材料用动态磁滞回线和动态磁化曲线示意图

振幅磁导率 $\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$

起始磁导率 $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}$

可逆磁导率 $\mu_R = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}$ (加直流偏置)



课程(实验)名称

班级(组别)

指导教师

实验日期

仪器号

学生姓名

学号

成绩

2. 动态磁滞回线的测量

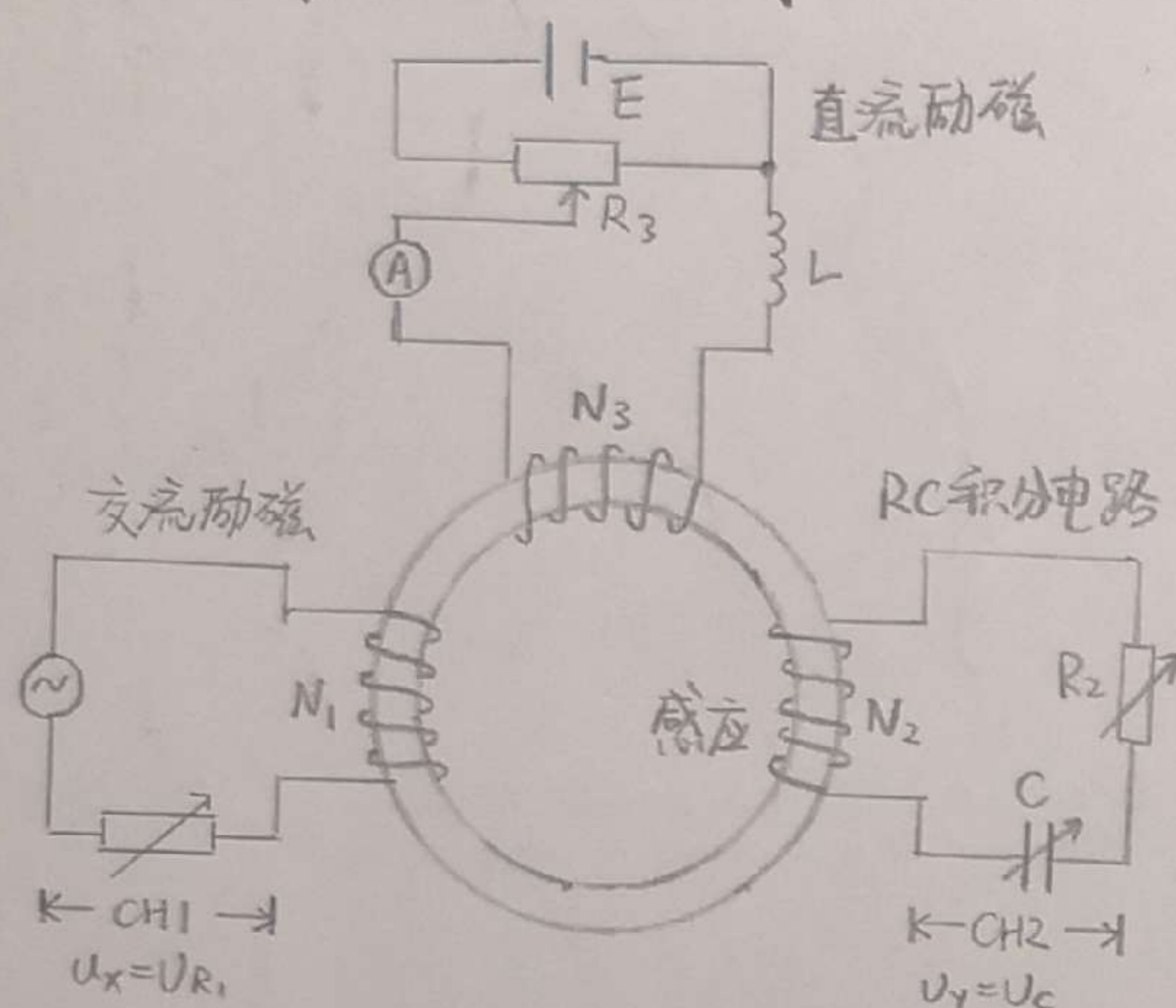


图3 用示波器测量动态磁滞回线电路图

仪器测量原理及公式:

$$H = \frac{N_1}{l} i_1 = \frac{N_1}{l R_1} U_{R_1} \Rightarrow H \propto U_{R_1}$$

$$U_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C R_2} \int U_{R_2} dt \approx \frac{1}{C R_2} \int U_2 dt \quad (R_2 C \gg T)$$

$$U_2 = -\frac{N_2 d\Phi}{dt} = -\frac{N_2 S dB}{dt}$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_c \Rightarrow B \propto U_c$$

实验内容及数据处理

1. 观测样品(铁氧体)的饱和磁滞回线

(1) 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。测量并画出饱和磁滞回线的 B-H 图。测量 B_s , B_r , H_c

U_{R_1}/mV	U_c/mV	$H/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	B/T	U_{R_1}/mV	U_c/mV	$H/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	B/T
-90.4	-18.4	-52.15	-0.495	-90.4	-18.4	-52.15	-0.495
-79.2	-18.0	-45.69	-0.484	-79.2	-18.0	-45.69	-0.484
-59.2	-16.4	-34.15	-0.441	-59.2	-14.0	-34.15	-0.376
-39.2	-14.8	-22.62	-0.398	-39.2	-9.6	-22.62	-0.258
-19.2	-12.0	-11.08	-0.323	-19.2	-1.6	-11.08	-0.043
0.0	-8.4	0.00	-0.226	0.0	7.6	0.00	0.204
20.8	-0.4	12.00	-0.011	20.8	10.8	12.00	0.290
40.8	8.4	23.54	0.226	40.8	14.0	23.54	0.376
60.8	13.6	35.08	0.452	60.8	15.6	35.08	0.419
80.8	16.8	46.62	0.366	80.8	17.6	46.62	0.473
90.8	18.0	52.38	0.484	90.8	18.0	52.38	0.484

表1 实验1-1(1)测量数据表



课程(实验)名称 _____ 班级(组别) _____

指导教师 _____ 实验日期 _____ 仪器号 _____

学生姓名 _____ 学号 _____ 成绩 _____

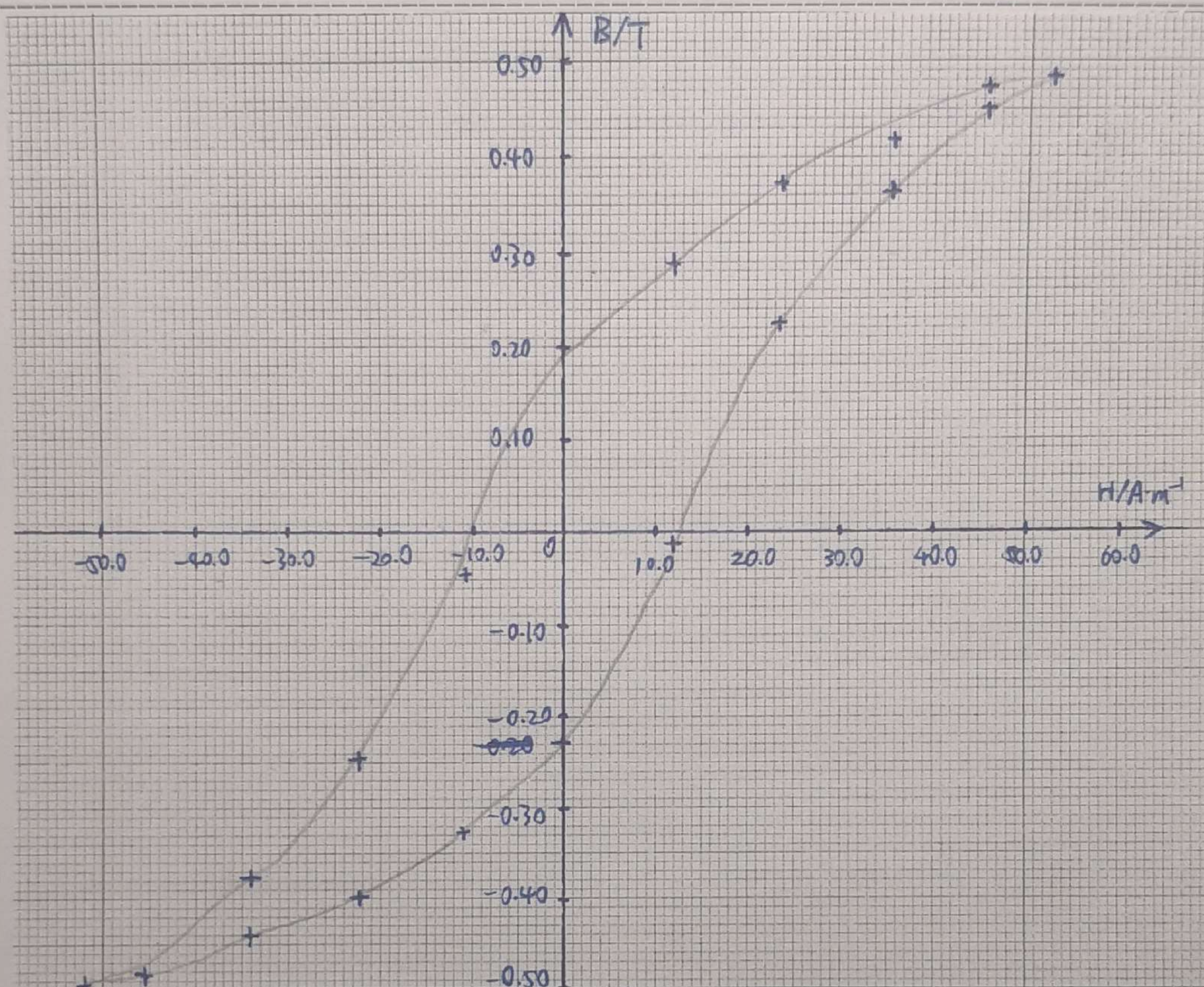


图4 样品1在实验1-1(1)中的饱和磁滞回线B-H图

由表1中数据进行绘图得到图4结果。根据测量结果也可算出:

$$B_s = -0.484 \text{ T} \quad B_r = 0.204 \text{ T} \quad H_c = 13.38 \text{ A/m}$$

图4中所得图像与理论图像也基本相符。

- (2) 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。用不同频率时,磁滞回线有何变化?为什么?保持 R_1, R_2C 不变,测量并比较 $f=95 \text{ Hz}$ 和 150 Hz 时的 B_r 和 H_c 。

$$f=95 \text{ Hz 时} \quad B_s = 0.495 \text{ T} \quad B_r = 0.172 \text{ T} \quad H_c = 13.38 \text{ A/m}$$

$$f=150 \text{ Hz 时} \quad B_s = 0.441 \text{ T} \quad B_r = 0.108 \text{ T} \quad H_c = 5.54 \text{ A/m}$$

随着频率的升高,磁性材料的饱和磁滞回线的横纵截距 B_s, B_r, H_c 均减小,

图像面积减小,且形状逐渐趋向椭圆流线形。



课程(实验)名称

班级(组别)

指导教师

实验日期

仪器号

学生姓名

学号

成绩

(3) 在频率 $f=50\text{Hz}$ 下, 比较不同积分常量对李萨如图的影响。固定励磁电流

$I_m=0.1\text{A}$, $R_1=2.0\Omega$, 改变积分常量 R_2C 。调节 R_2C 分别为 0.01s , 0.05s ,

0.5s , 观察并粗略画出不同积分常量下 $U_{R_1}-U_C$ 李萨如图形的示意图。

请思考为什么积分常量会影响 $U_{R_1}-U_C$ 李萨如图形的形状? 积分常量是否会

影响真实的 $B-H$ 磁滞回线的形状?

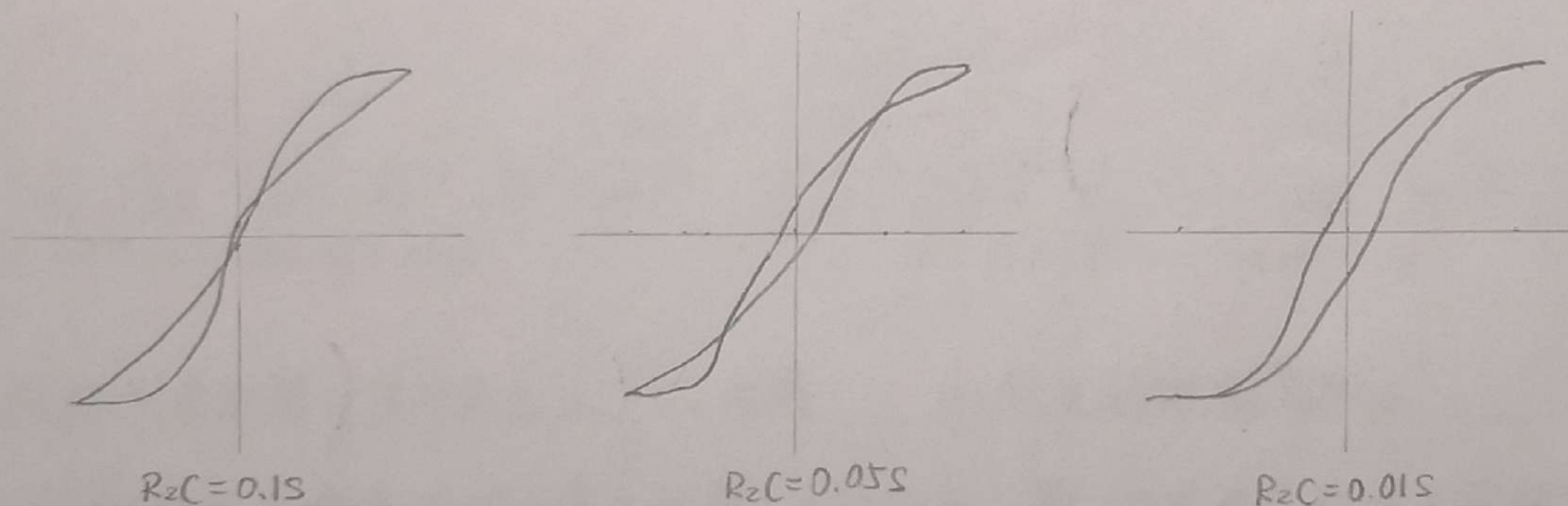


图5 不同积分常量下李萨如图形的示意图

积分常量会影响同一个 H 下 B 的伸缩比例, 但其不会影响真实的磁滞回线形状。

2. 测量样品1(铁氧体)的动态磁滞回线

(1) 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 $R_1=2.0\Omega$, $R_2=50\text{k}\Omega$, $C=10.0\mu\text{F}$ 。磁项幅度 H_m 从 0 到 H_s 单调增加。

U_{R_1}/mV	U_C/mV	$H/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	B/T	$\mu_m/10^3$	U_{R_1}/mV	U_C/mV	$H/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	B/T	$\mu_m/10^3$
5.4	2.0	3.12	0.054	13.73	50.4	14.4	29.08	0.387	10.59
8.0	2.8	4.62	0.075	12.98	53.6	14.6	30.92	0.392	10.10
11.6	3.8	6.69	0.102	12.15	56.8	14.8	32.77	0.398	9.66
15.8	5.2	9.12	0.140	12.20	62.4	15.4	36.00	0.414	9.15
19.6	6.8	11.31	0.183	12.86	68.8	16.6	39.69	0.446	8.95
23.6	8.0	13.62	0.215	12.57	84.0	18.0	48.46	0.484	7.95
27.6	9.4	15.92	0.253	12.63	102.0	18.8	58.85	0.505	6.83
34.4	11.6	19.85	0.312	12.50	132.0	19.6	76.15	0.527	5.51
40.8	12.4	23.54	0.333	11.27	212.0	20.0	122.31	0.538	3.50
44.0	13.2	25.38	0.355	11.12	472.0	20.8	249.23	0.559	1.79
47.2	13.6	27.23	0.366	10.68	632.0	21.6	364.61	0.581	1.27

表2 实验2(1)测量数据表



课程(实验)名称 _____ 班级(组别) _____

指导教师 _____ 实验日期 _____ 仪器号 _____

学生姓名 _____ 学号 _____ 成绩 _____

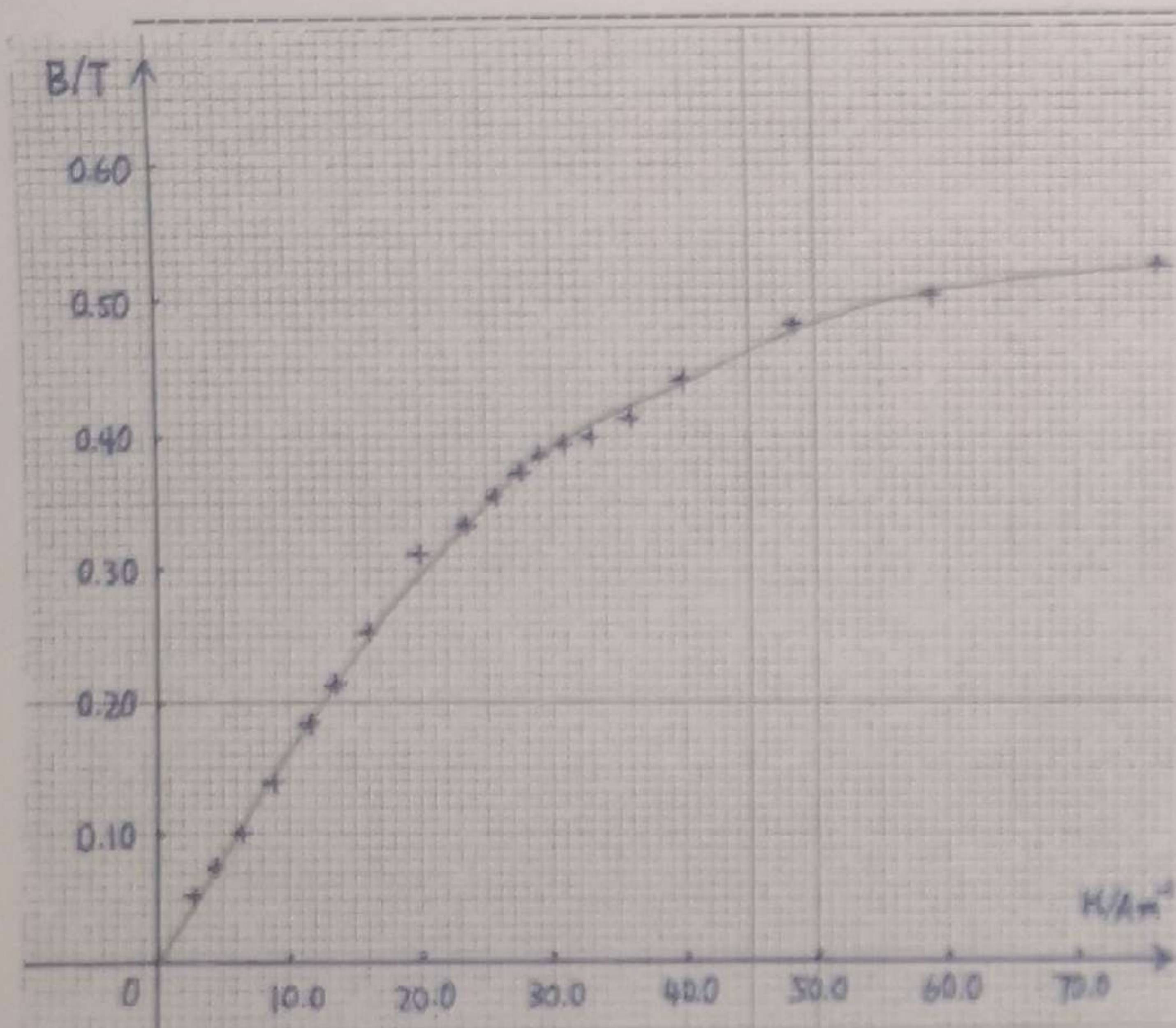


图6 样品1在正弦交流磁场中的B-H曲线

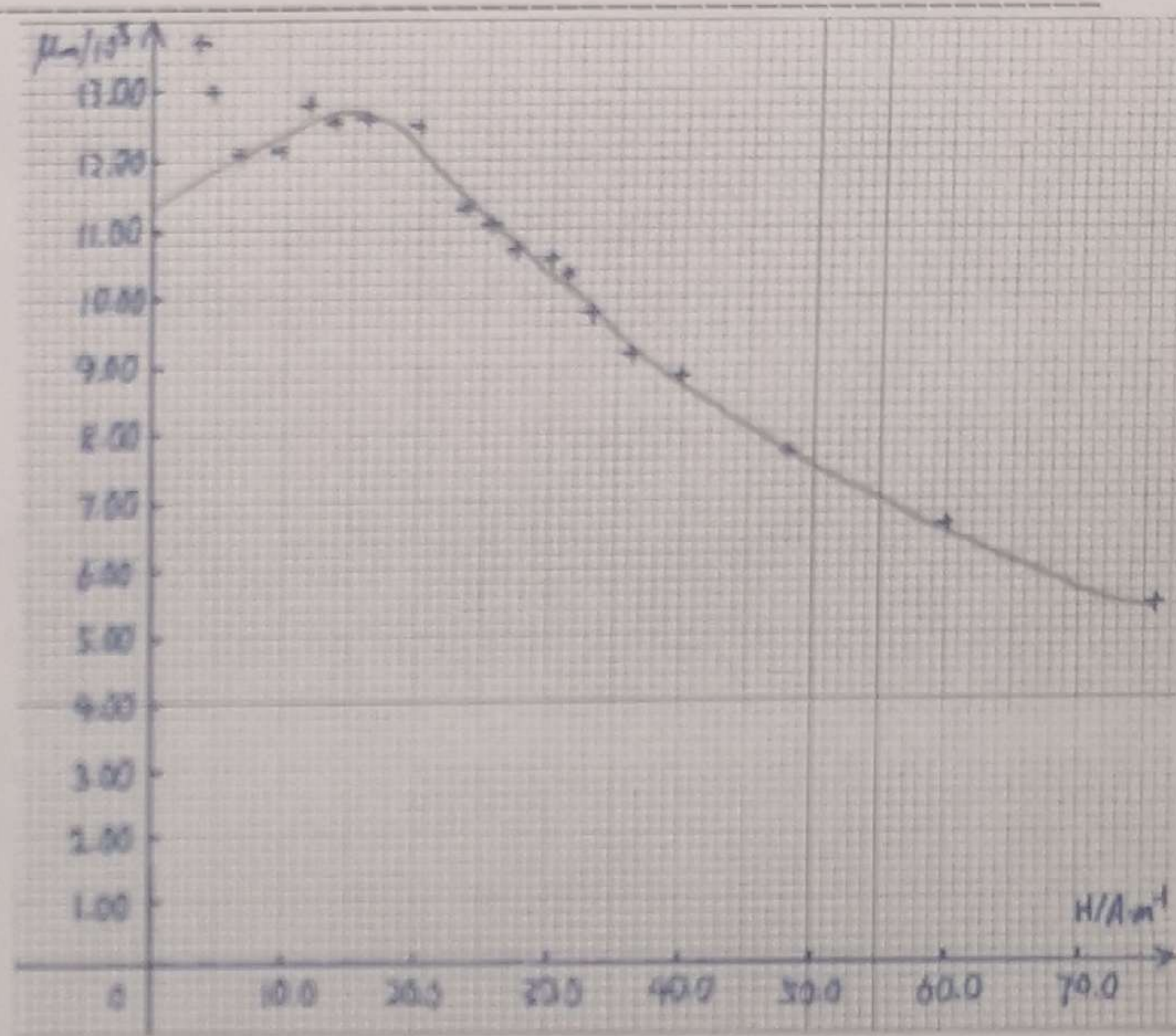


图7 样品1在正弦交流磁场中的μm-Hm曲线

(2) 根据测量数据计算并画出 μ_m-H_m 曲线 (3) 测定起始磁导率 μ_i

测量数据及曲线绘制如表2和图6、图7所示。图7中前两个数据点因精度问题舍去, 相关解释见讨论部分。

$$\text{起始磁导率 } \mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = 11.3 \times 10^3 = 11300$$

3. 观察不同频率下样品2(硅钢)的动态磁滞回线

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

$$\text{当 } f = 20 Hz \text{ 时 } B_m = 0.939 \quad B_r = 0.600 \quad H_c = 116$$

$$\text{当 } f = 40 Hz \text{ 时 } B_m = 0.933 \quad B_r = 0.600 \quad H_c = 132$$

$$\text{当 } f = 60 Hz \text{ 时 } B_m = 0.933 \quad B_r = 0.611 \quad H_c = 144$$

观察发现, 随着交变磁场 f 的增高, B_m, B_r 的大小几乎不发生变化, 而

H_c 则随之有明显增长。然而, 由于测量误差的原因, B_m 和 B_r 有可能有较

小的变化规律, 这有待于后续实验测量精度的提高。



课程(实验)名称

班级(组别)

指导教师

实验日期

仪器号

学生姓名

学号

成绩

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: $R_1=2.0\Omega$, $R_2=20\text{k}\Omega$, $C=2.0\mu\text{F}$ 。

直流偏置磁场从 0 到 H_s 单调增加, 测量时, 为保证精度, 需调交流信号源幅度使

交流磁场 ΔH 足够小, 并调节示波器, 使李萨如图充分放大, 以观测磁化是否可

逆。画出 μ_R-H 曲线

I/A	$K/H\cdot\text{m}^{-1}$	$H/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	μ_{R1}	I/A	$K/H\cdot\text{m}^{-1}$	$H/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	μ_{R1}
0.01	1.72	11.54	5103.2	0.06	0.20	69.23	593.4
0.02	0.98	23.08	2907.7	0.07	0.16	80.77	474.7
0.03	0.59	34.62	1750.1	0.09	0.11	103.85	326.4
0.04	0.36	46.15	1067.9	0.13	0.06	150.00	178.5
0.05	0.28	57.69	830.6	0.21	0.04	242.31	118.7

表3 实验4数据记录表

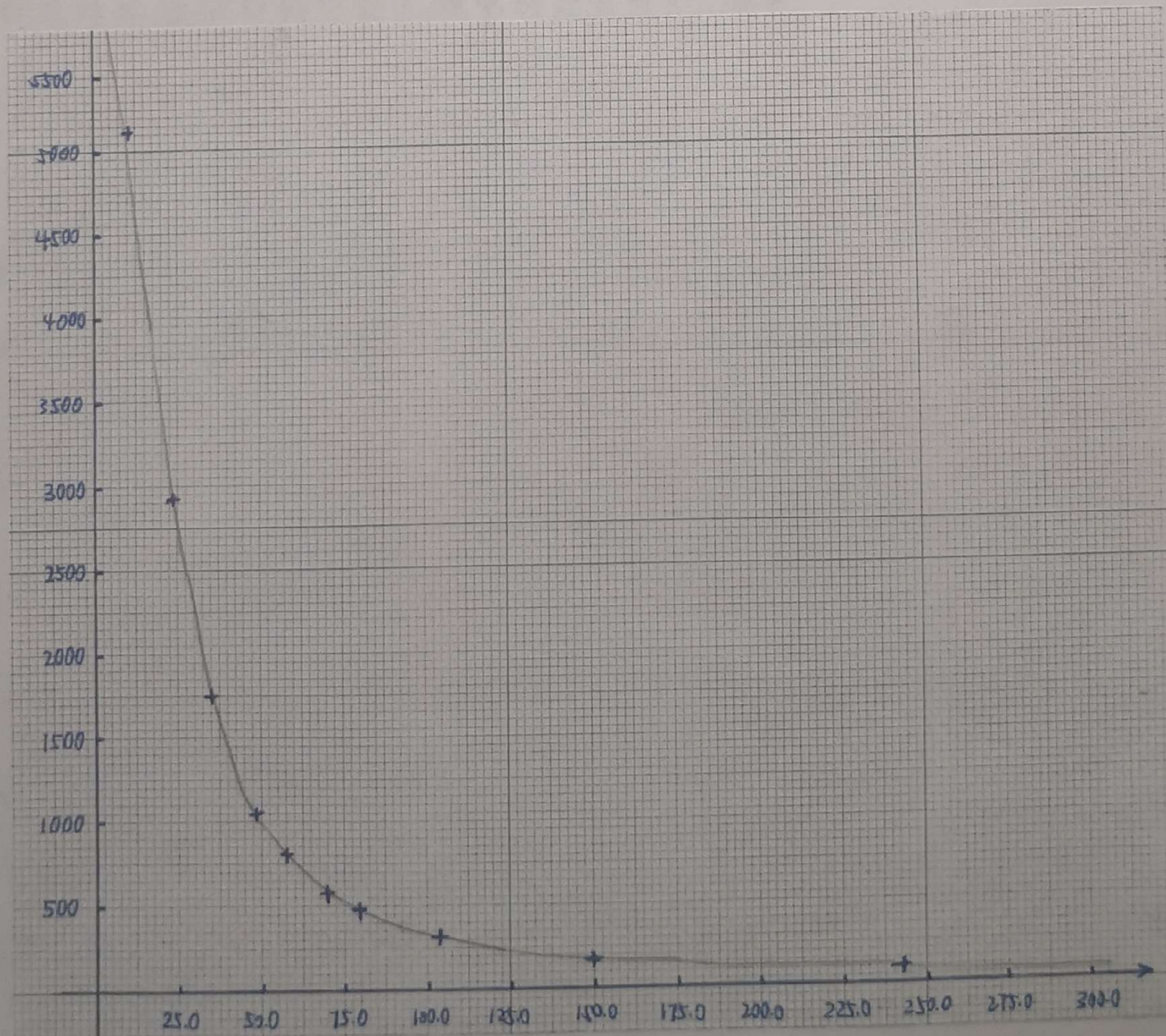


图2 样品1在实验4中 μ_R-H 曲线



课程(实验)名称

班级(组别)

指导教师

实验日期

仪器号

学生姓名

学号

成绩

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哪些因素影响?

铁磁材料的动态磁滞回线是在交变磁场的作用下, 所得到的 $B-H$ 关系曲线;

而铁磁材料的静态磁滞回线只记录磁化完全后的 $B-H$ 关系曲线。

动态磁滞回线的形状受铁磁材料的种类、形状、大小, 交流电的频率和振幅等因

素的影响, 其面积等于磁化一个周期内的损耗, 包括磁滞损耗、涡流损耗和剩

余损耗等。

2. 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点?

铁氧体较硅钢材料而言更易受到磁化, 具有较高的磁导率。由于铁氧体单位体积

中储存的磁能较低, 饱和磁化强度也较低。而硅钢材料矫顽力小, 磁滞损耗小。

3. 本实验中, 电路参量应怎样设置才能保证 $U_{RI} - U_C$ 所形成的李萨如图形正确反映

材料动态磁滞回线的形状?

应设置交流电幅度使之保证铁磁体饱和磁化, 设置积分电路的时间常数使之远大于

交流电的周期

讨论

实验2中的 $\mu_m - H_m$ 图像结果不是十分理想, 前两个数据点的偏差较大。后经分

析, 只要测量读数改变 $0.1 mV$, 即可使其回复到理论状态。而测量读数的分度为 $0.2 mV$,

导致了较大的偏差。这样的大偏差只出现在了稳定性不好的小值区, 所以在后期数据

处理中我舍弃了小值区数据。

用示波器观测动态磁滞回线 数据记录表

1. 观测样品 1 (铁氧体) 的饱和动态磁滞回线

(1)

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

U_{R_1}/mV	U_C/mV	$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B/T	U_{R_1}/mV	U_C/mV	$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B/T
-90.4	-18.4	-52.15	-0.495	-90.4	-18.4	-52.15	-0.495
-79.2	-18.0	-45.69	-0.484	-79.2	-18.0	-45.69	-0.484
-59.2	-16.4	-34.15	-0.441	-59.2	-14.0	-34.15	-0.441 - 0.376
-39.2	-14.8	-22.62	-0.398	-39.2	-9.6	-22.62	-0.398 - 0.258
-19.2	-12.0	-11.08	-0.323	-19.2	-1.6	-11.08	-0.043
0.0	-8.4	0.00	-0.226	0.0	7.6	0.00	0.204
20.8	-0.4	12.00	-0.011	20.8	10.8	12.00	0.290
40.8	8.4	23.54	0.226	40.8	14.0	23.54	0.376
60.8	13.6	35.08	0.366	60.8	15.6	35.08	0.419
80.8	16.8	46.62	0.452	80.8	17.6	46.62	0.473
90.8	18.0	52.38	0.484	90.8	18.0	52.38	0.484

$$U_C = 18.0$$

$$B_S = -0.484$$

$$U_C = 7.6$$

$$B_r = 0.204$$

$$U_{R_1} = 23.2$$

$$H_C = 13.38$$

(2)

$$f = 95\text{Hz} \quad R_1 = 2.0\Omega \quad R_2 = 50k\Omega \quad C = 10.0\mu F$$

$$U_C = 18.4$$

$$B_S = 0.495$$

$$U_C = 16.4$$

$$B_r = 0.172$$

$$U_{R_1} = 24.0$$

$$H_C = 13.85$$

$$f = 150\text{Hz} \quad R_1 = 2.0\Omega \quad R_2 = 50k\Omega \quad C = 10.0\mu F$$

$$U_C = 16.4$$

$$B_S = 0.441$$

$$U_C = 4.0$$

$$B_r = 0.108$$

$$U_{R_1} = 9.6$$

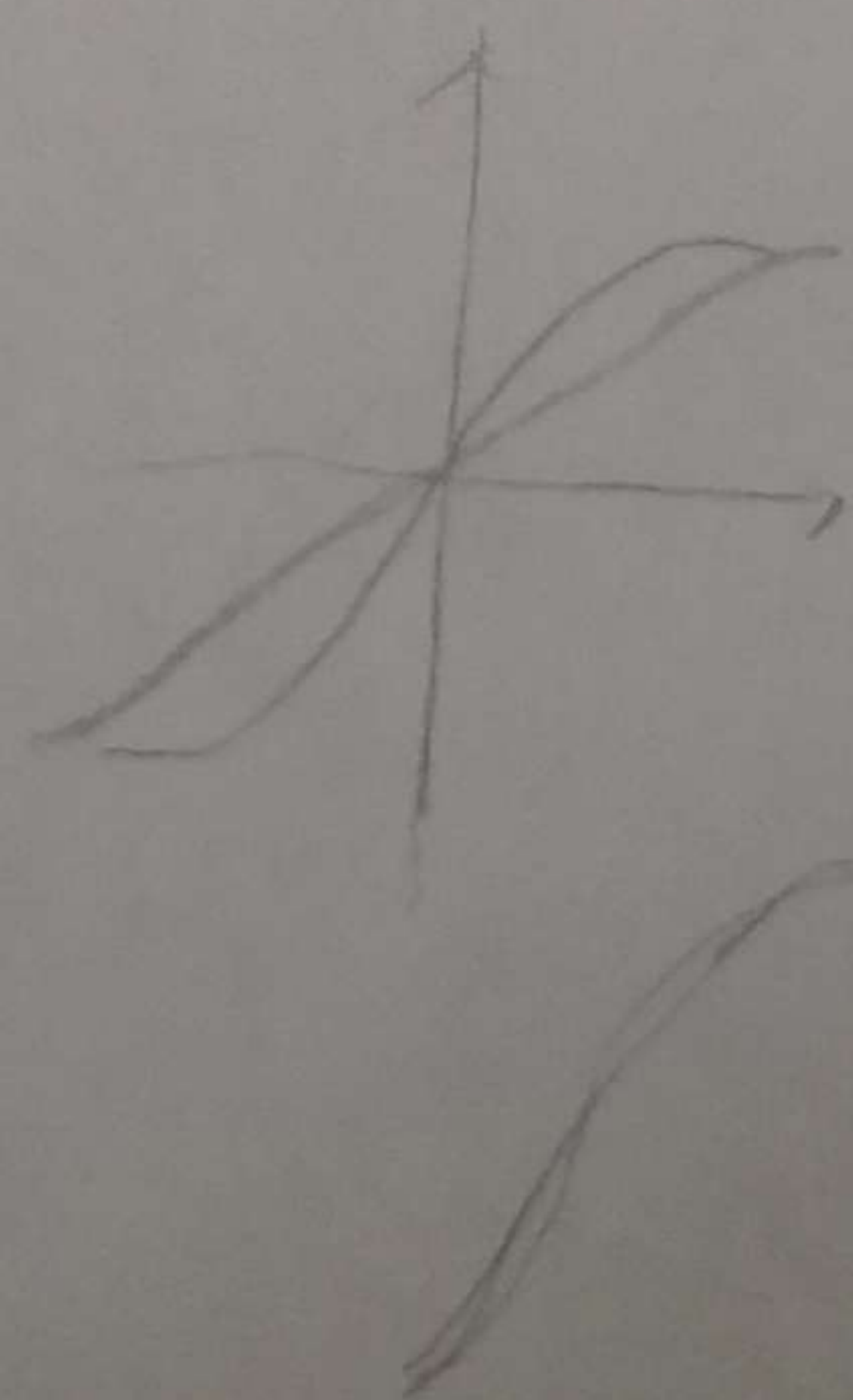
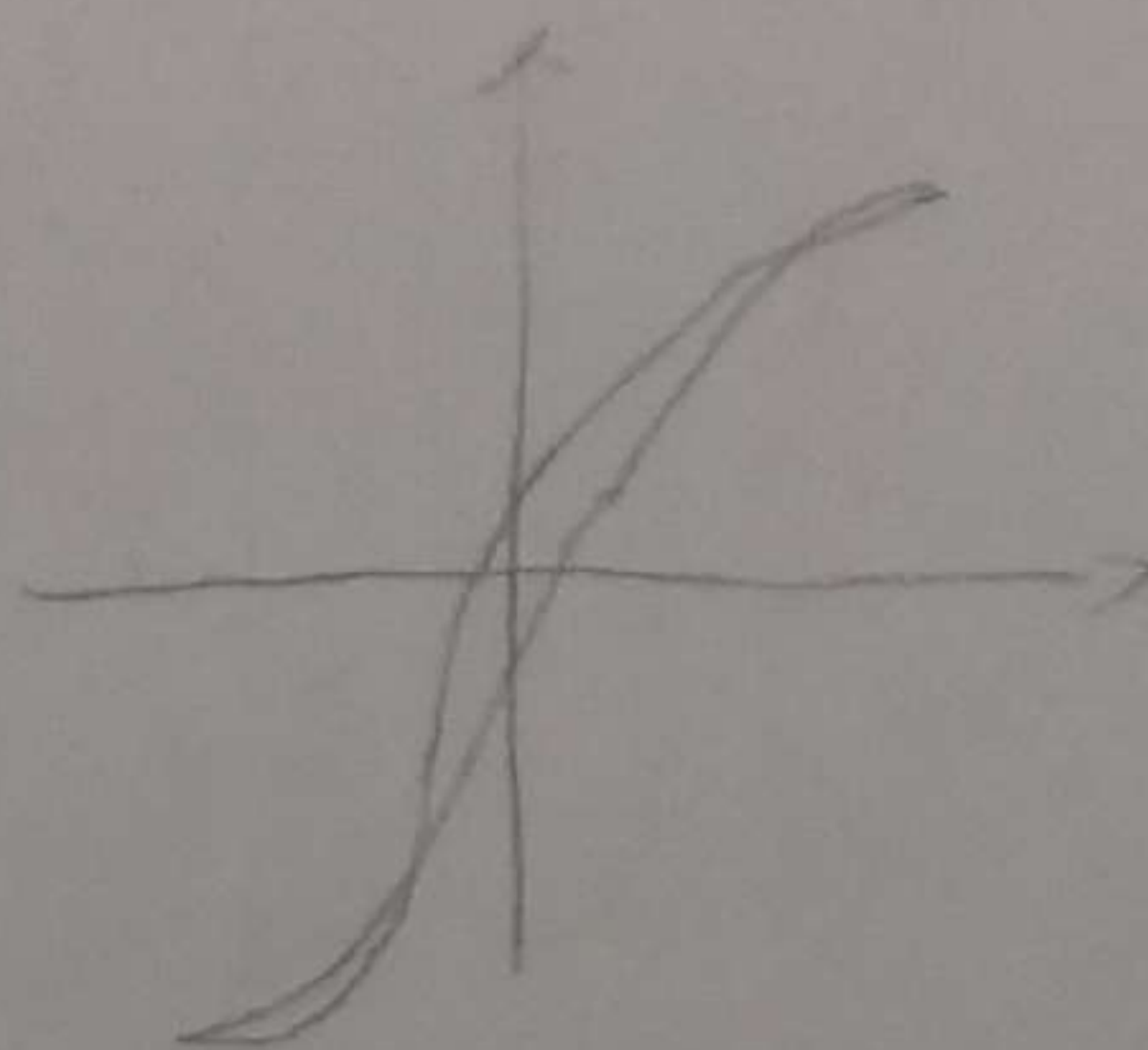
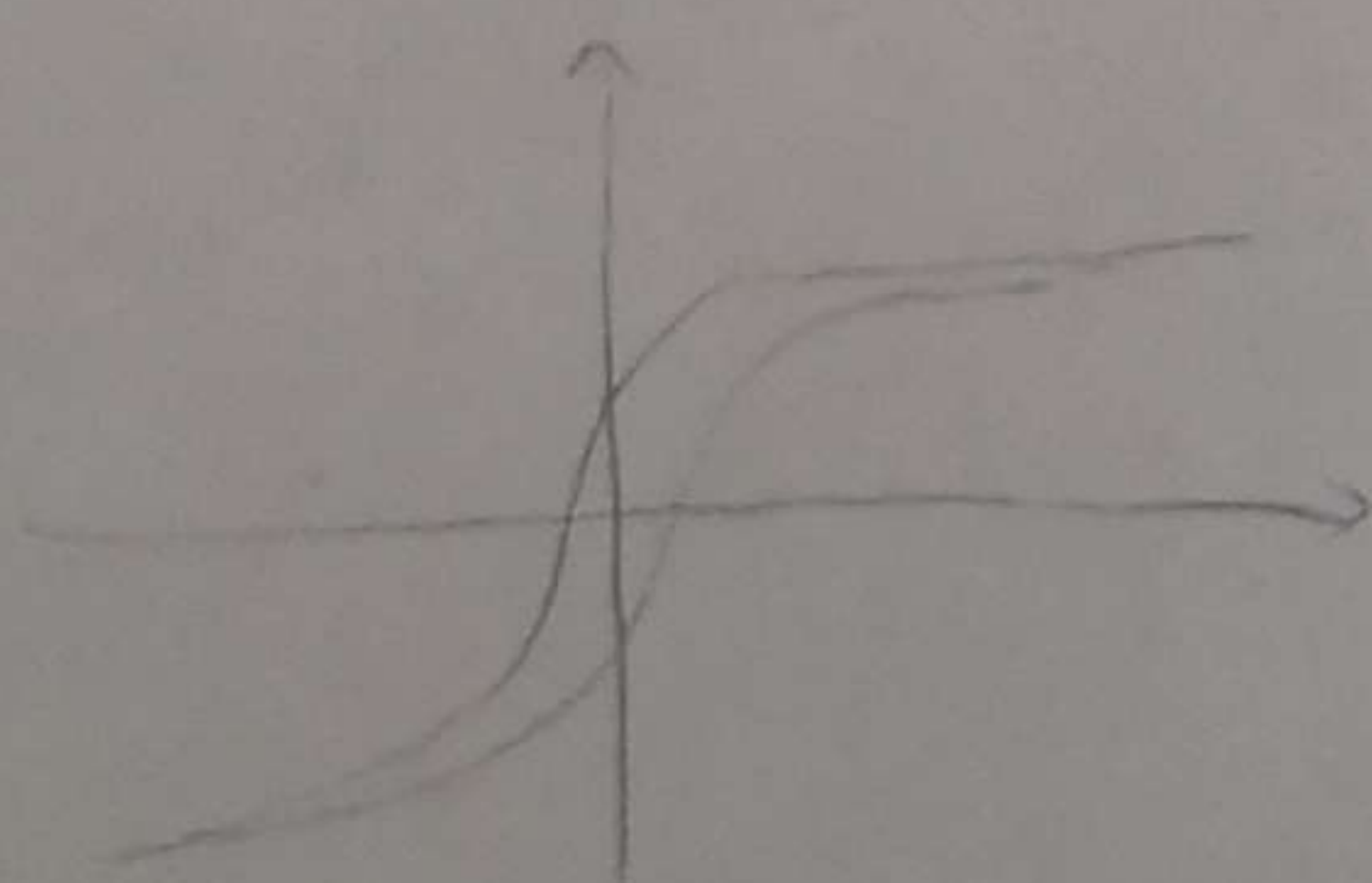
$$H_C = 5.54$$

(3)

$$R_2 C = 0.5s$$

$$R_2 C = 0.05s$$

$$R_2 C = 0.01s$$



2. 测量样品 1 (铁氧体) 的动态磁滞回线

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

U_{R_1}/mV	U_C/mV	$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B/T	U_{R_1}/mV	U_C/mV	$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B/T
5.4	2.0	3.12	0.054	50.4	14.4	29.08	0.387
8.0	2.8	4.62	0.075	53.6	14.6	30.92	0.392
11.6	3.8	6.69	0.102	56.8	14.8	32.77	0.398
15.8	5.2	9.12	0.140	62.4	15.4	36.00	0.414
19.6	6.8	11.31	0.183	68.8	16.6	39.69	0.446
23.6	8.0	13.62	0.215	84.0	18.0	48.46	0.484
27.6	9.4	15.92	0.253	102.0	18.8	58.85	0.505
34.4	11.6	19.85	0.312	132.0	19.6	76.15	0.527
40.8	12.4	23.54	0.333	212.0	20.0	122.31	0.538
44.0	13.2	25.38	0.355	432.0	20.8	249.23	0.559
47.2	13.6	27.23	0.366	632.0	21.6	364.61	0.581

3. 观察不同频率下样品 2 (硅钢) 的动态磁滞回线

$$f = 20\text{Hz} \quad R_1 = 2.0\Omega \quad R_2 = 50k\Omega \quad C = 10.0\mu F \quad H_m = 400\text{A/m}$$

$$\begin{aligned} U_C &= 33.8 & U_C &= 21.6 & U_{R_1} &= 116 \\ B_m &= 0.939 & B_r &= 0.600 & H_C &= 116 \end{aligned}$$

$$f = 40\text{Hz} \quad R_1 = 2.0\Omega \quad R_2 = 50k\Omega \quad C = 10.0\mu F \quad H_m = 400\text{A/m}$$

$$\begin{aligned} U_C &= 33.6 & U_C &= 21.6 & U_{R_1} &= 132 \\ B_m &= 0.933 & B_r &= 0.600 & H_C &= 132 \end{aligned}$$

$$f = 60\text{Hz} \quad R_1 = 2.0\Omega \quad R_2 = 50k\Omega \quad C = 10.0\mu F \quad H_m = 400\text{A/m}$$

$$\begin{aligned} U_C &= 33.6 & U_C &= 22.0 & U_{R_1} &= 144 \\ B_m &= 0.933 & B_r &= 0.611 & H_C &= 144 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_R &= \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{R_2 C}{N_2 S} \cdot \frac{\Delta U_C}{\Delta U_{R_1}} \cdot \frac{L R_1}{N_1} \\ &= \frac{R_1 R_2 L C}{\mu_0 S N_1 N_2} \cdot K \\ &= 2967 \text{K} \end{aligned}$$

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

$$f = 100\text{Hz} \quad R_1 = 2.0\Omega \quad R_2 = 20k\Omega \quad C = 2.0\mu F$$

I/A	$K/\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu_{R_1}/10^3$	I/A	$K/\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu_{R_1}/10^3$
0.01	13.2 1.72	11.54	5103.24	0.09	0.11	103.85	326.37
0.02	0.98	23.08	2907.66	0.13	0.06	150.00	178.22
0.03	0.59	34.62	1750.14	0.21	0.04	242.31	112.68
0.04	0.36	46.15	1067.88	0.35	0.02	403.85	58.34
0.05	0.28	57.69	830.57	0.77	0.01	888.46	29.67
0.06	0.20	69.23	593.40	0.88	0.01	1015.38	29.67
0.07	0.16	80.77	474.72				

12.4
吴