

《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 朱中柱

姓名 任昊霖 学号 2022K8009908022 分班分组及座号 2 - 03 - 7 号

实验日期 2023 年 12 月 12 日 实验地点 教 705 调课/补课 ☐是 成绩评定

磁滞回线实验

一、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。

二、实验仪器

1、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 $0.1\sim 11\text{ }\Omega$ ； R_2 的调节范围为 $1\sim 110\text{ k}\Omega$ 。标准电容有 $0.1\text{ }\mu\text{F}\sim 11\text{ }\mu\text{F}$ 可选。

2、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 2.000 T ；分辨率 0.1 mT ；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 $l=0.240\text{cm}$ (样品与固定螺丝为同种材料)。

4) 磁化线圈总匝数 $N=2000$ 。

三、实验原理

放在外磁场中的物体会被磁化, 产生内部磁场。设外磁场为 H , 内部磁化强度为 M , 磁感应强度为 B , 真空磁导率为 μ_0 , 则有:

$$X_m = M/H$$

$$\mu_r = B/\mu_0 H$$

又有 $B=\mu_0(M+H)$, 得到:

$$\mu_r = 1 + X_m$$

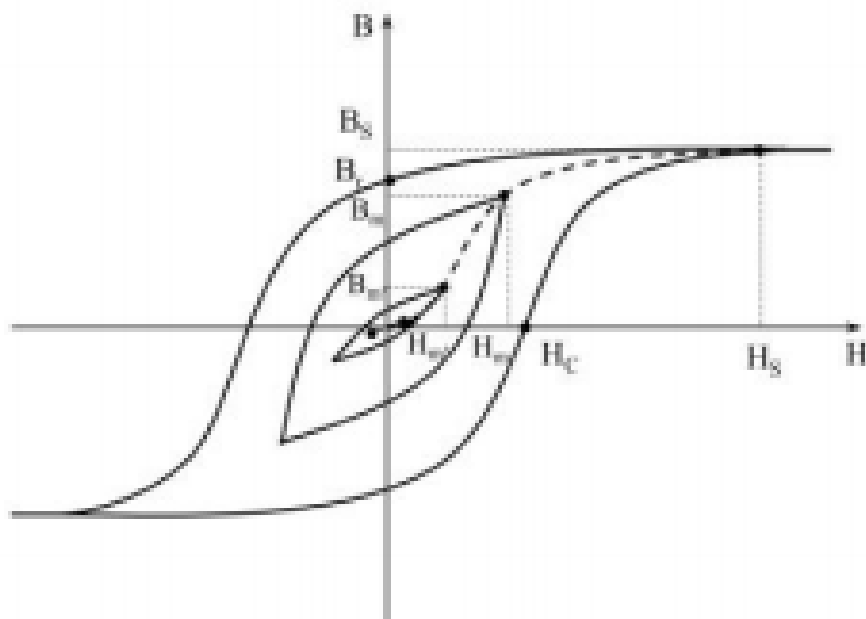


图 1: 铁磁材料动态磁滞回线和动态磁化曲线

另一方面, 振幅磁导率表达式为

$$\mu_m = B_m/\mu_0 H_m$$

可用以衡量大幅度交变磁场中电感铁芯的磁化性能（交流强场下）。

起始磁导率表达式为

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

可用以衡量弱磁场中软磁材料的磁化性能（交流弱场下）。

可逆磁导率（有直流偏置）表达式为

$$\mu_r = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} B / \Delta H \mu_0$$

可用以设计磁放大器。

本实验利用环形铁芯+线圈测量 H 和 B 的关系。原理如下：

安培环路定理： $H = N_1 u_{R_1} / l R_1$

法拉第电磁感应定理，电路积分得： $B = R_2 C u_C / N_2 S$ （ $R_2 C \gg T, T$ 为外磁场周期）

注意到一个事实：H 与 B 分别和 u_{R_1} 、 u_C 成线性关系，这表明二者构成的李萨如图形与磁滞回线形状相同。

测试开始前还需要对样品退磁。另外，如果不满足 $H l \gg B l_g / \mu_0$ ，则需要对 H 的值进行修正。

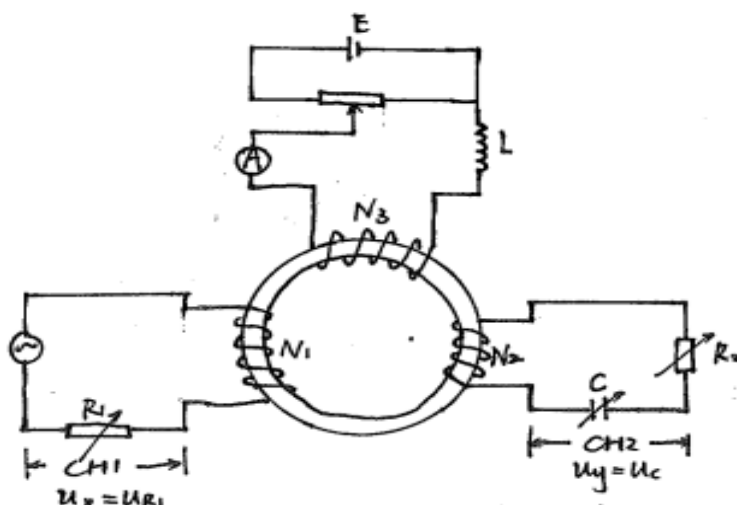


图 2：用示波器测量动态磁滞回线示意图

四、实验内容

第一部分 用示波器观测动态磁滞回线

1.观测铁氧体的饱和动态磁滞回线

1)测量频率 $f=100\text{Hz}$ 的饱和磁滞回线。取 $R_1 = 2.0\ \Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C = 10.0\ \mu\text{F}$ 。

将回路连接至示波器, 调节为 X-Y 模式。调节励磁电流直至示波器上出现磁滞回线。利用光标读数, 记录 8 个点。

2) 保持信号源不变, 观测不同频率时饱和磁滞回线。观察不同频率下磁滞回线的变化, 分析原因。保持 R_1 , R_2 C 不变, 测量、比较 $f = 95\text{Hz}$, 150Hz 时的 B_r 、 H_c 。

3) $f=50\text{Hz}$ 下, 改变积分常量 R_2C 分别为 0.01s , 0.05s , 0.5s , 比较李萨如图形。

2.测量铁氧体的动态磁滞回线 (测量前需要退磁)

频率 $f=100\text{Hz}$ 时, 取 $R_1 = 2.0\ \Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C = 10.0\ \mu\text{F}$ 。测量 20 个顶点, 绘制动态磁化曲线, 计算振幅磁导率并绘制其随 H_m 变化的曲线, 进而确定起始磁导率。

3.观察不同频率下硅钢动态磁滞回线

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 $H_m=400\text{A/m}$ ($u_R=400\text{mV}$) 时, 测量三种频率下的 B_m, B_r, H_c 。

4.测量铁氧体在不同直流偏置磁场 H 下的可逆磁导率

取 $f=100\text{Hz}$, $R_1 = 2.0\ \Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C = 2.0\ \mu\text{F}$ 。直流偏置磁场从 0 到 H_s 单调增加。测量 10 组回线小线段的斜率, 绘制可逆磁导率随 H 变化的曲线。

第二部分 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

将霍尔传感器置于磁场均匀区中央。取 20 个采样点, 测量样品的起始磁化曲线。需要对 H 进行修正。

2.测量模具钢的磁滞回线

对样品进行磁训练后, 磁化线圈的电流从饱和电流 (600mA) 逐渐减小至 0, 然后电流反向从 0 增加到 -600mA , 重复上述过程直到回到原点。每个 50mA 测一组, 同样对 H 进行修正。

3.数据处理及绘图

求出 H_i ，测量模具钢平均磁路长度和间隙宽度，用 $Hl + \frac{Blg}{\mu_0} = NI$ 对 H_i 进行修正，利用起始磁化曲线和磁滞回线，记录 B_m, H_m 和 H_c 。

五. 实验数据处理与分析

第一部分：用示波器观测动态磁滞回线

1. 观测铁氧体的饱和动态磁滞回线

1) 测量 f=100Hz 时的饱和磁滞回线

表 1：铁氧体饱和磁滞回线采样数据表

<div>B(mV)</div> <div>H(mV)</div>	点 1	点 2
-234.0 (注:-Hs)	-15.40 (注:-Bs)	
-9.2	0	-6.040
0	3.000	-3.440
10.00	5.880	0
--	--	--
--	--	--
234.0 (注:Hs)	15.40 (注:Bs)	
Br	3.22	
Hc	9.6	

根据表 1 的数据，不难得到铁氧体饱和磁滞回线示意图如下：

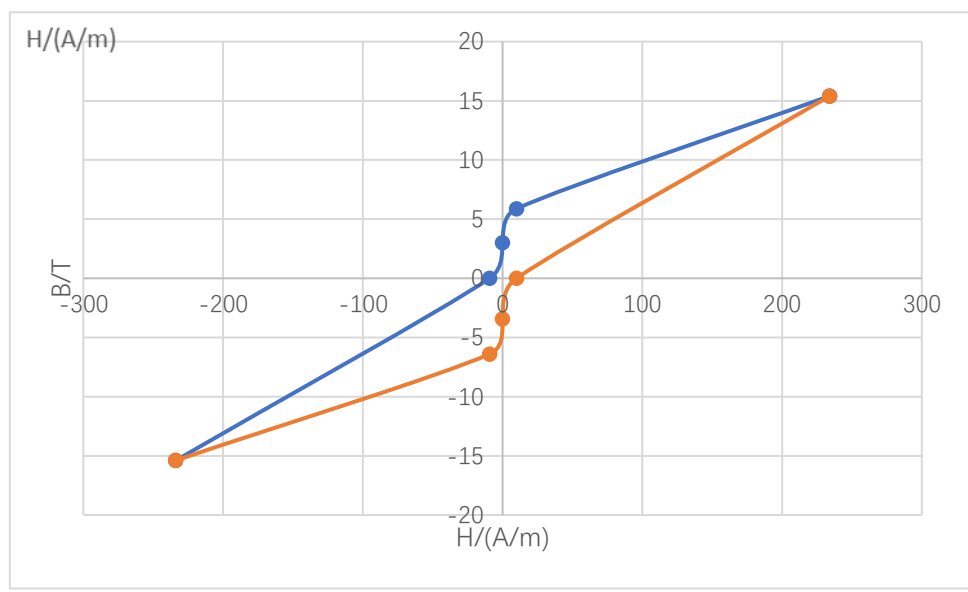


图 3 样品饱和磁滞回线 B-H 关系图

通过对称法寻找该磁滞回线与坐标轴的交点，得到 $B_r = 0.087 \text{ T}$ ， $H_c = 5.54 \text{ A/m}$ 。

【实验总结】

图中曲线与理论相符，但是数据点过少，无法判断实验是否成功。

2) 固定信号源幅度，观察并记录饱和磁滞回线随频率的变化规律。

表 2：变频率下的磁滞回线参数

频率 f/Hz	95	150
u_{B_r}/mV	3.000	1.920
B_r/T	0.080645	0.051613
u_{H_c}/mV	8.80	6.150
$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	5.076923	3.548077

【实验数据分析】

从上面的数据中，不难发现规律如下：饱和磁滞回线随频率的变化规律：随着频率的增高，饱和动态磁滞回线的 B_r 和 H_c 均减小，形状也越从饱满过渡到尖锐，逐渐丢失了磁滞回线的形状特征。原因在于频率增大的时候材料磁化周期变短，尚未能够充分磁化，因此磁滞回线特征就越发不明显。

3) 固定励磁电流幅度，改变积分常量。

得到李萨如图形如下：

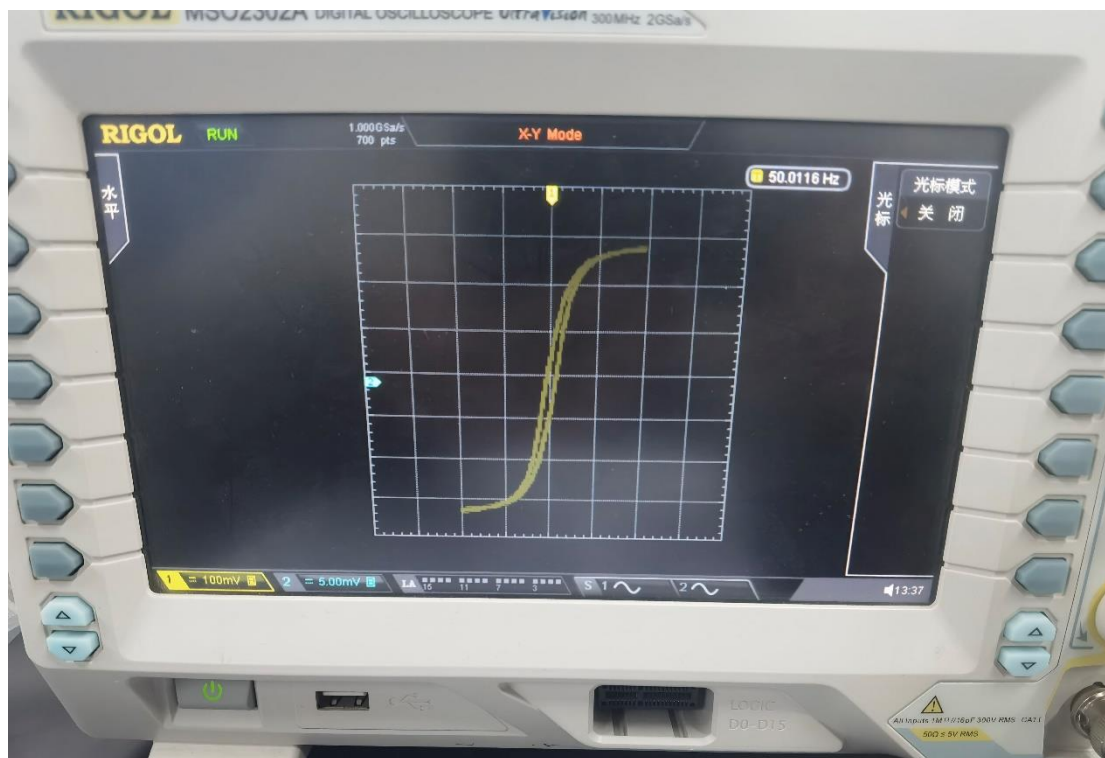


图 4 $R_2C = 0.5s$ 时李萨如图

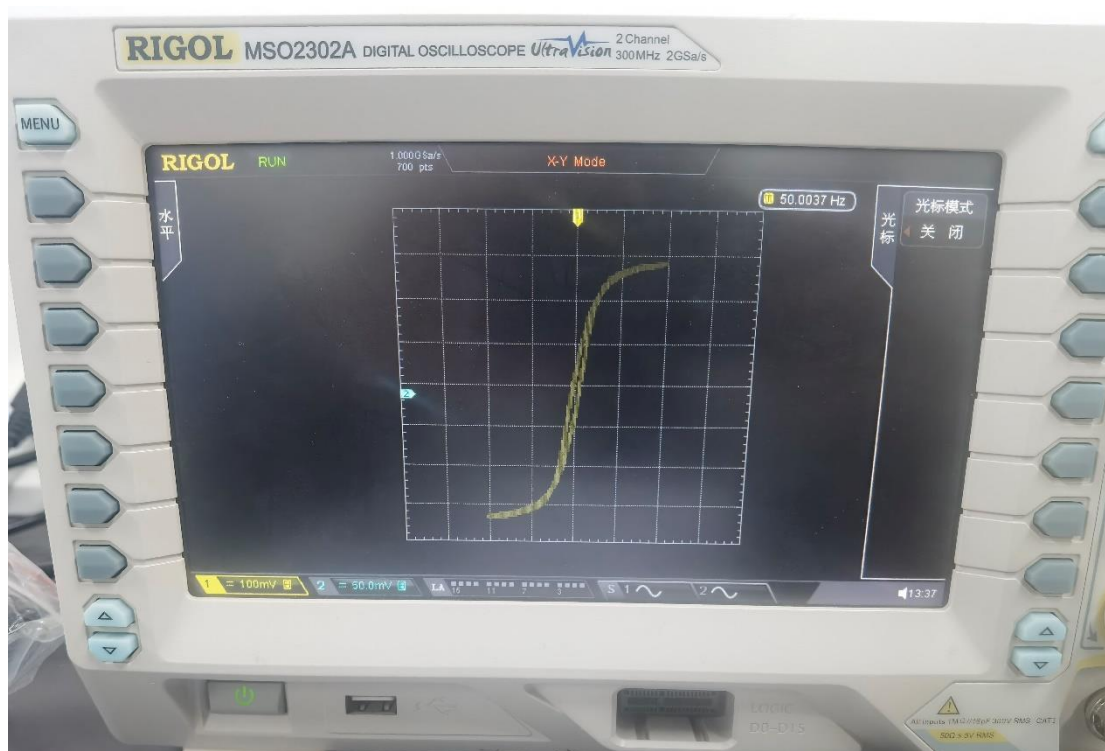


图 5 $R_2C = 0.05s$ 时李萨如图

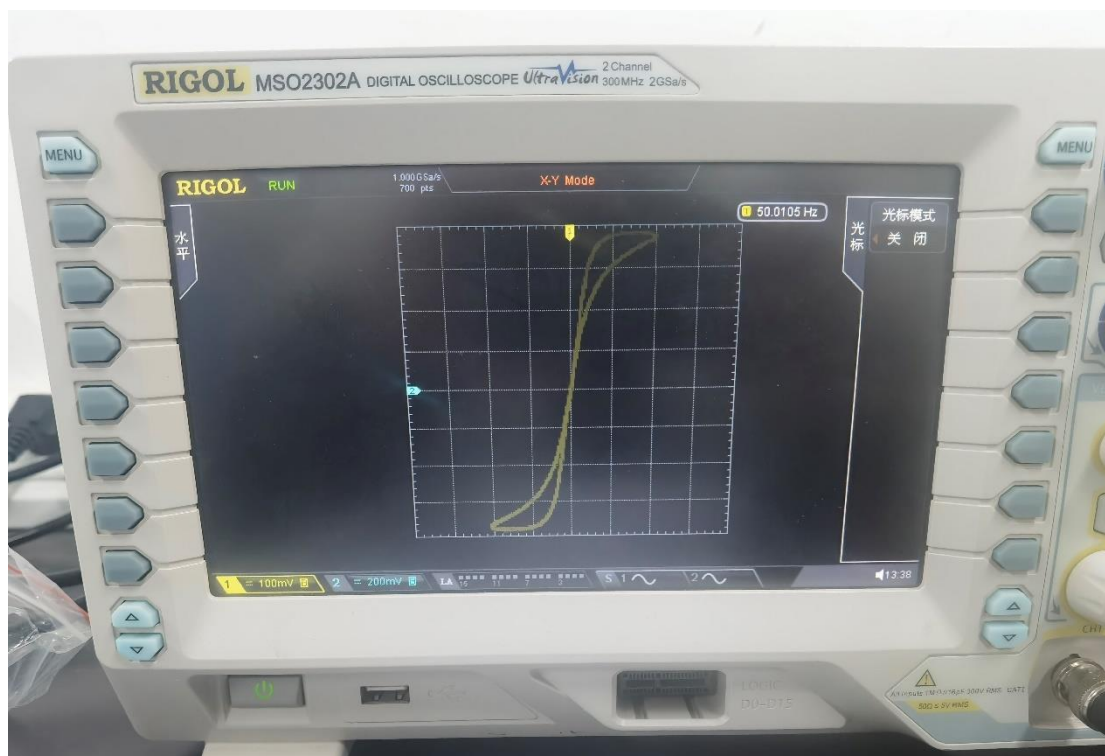


图 6 $R_2C = 0.01s$ 时李萨如图

【实验总结】

对于积分常量对李萨如图形的影响，由于理论推导中出现了

$$u_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{CR_2} \int u_{R_2} dt \approx \frac{1}{CR_2} \int u_2 dt$$

这一公式，而最后一个等号成立条件为 $R_2C \gg T$ ，于是，当调小积分常量时，这一条件逐渐不再被满足，因此李萨如图形也会发生畸变。

另一方面，不难发现积分常量所影响的仅仅是 B 与 u_C 的关系，而不影响 H 与 B 的关系。事实上，它仅仅是探究 B 与 H 关系时所利用的中间量，独立于 B 与 H 中的任何一个。因此我们可以断言：积分常量的改变并不影响真实的 B 与 H 的关系。

2. 测量铁氧体的动态磁滞回线（测量前需要对样品进行退磁）

在频率 $f=100\text{ Hz}$ 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和 $\mu_m\text{-}H_m$ 曲线。

表 3：铁氧体的变幅磁滞回线参数表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u_{H_C} /mV	11.65	24.00	34.40	47.40	57.80	69.20	82.00	94.00	104.5 0	117.0

H_c $/(A \cdot m^{-1})$	6.721 154	13.84 615	19.84 615	27.34 615	33.34 615	39.92 308	47.30 769	54.23 077	60.28 846	67.5
u_{B_r} $/mV$	2.65	5.95	8.55	10.85	12.05	12.95	13.40	14.00	14.30	14.65
B_r $/T$	0.071 237	0.159 946	0.229 839	0.291 667	0.323 925	0.348 118	0.360 215	0.376 344	0.384 409	0.393 817
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
u_{H_c} $/mV$	130.0	140.5	151.5	164.0	175.5	188.0	199.5	214.0	226.0	234.0
H_c $/(A \cdot m^{-1})$	75	81.05 769	87.40 385	94.61 538	101.2 5	108.4 615	115.0 962	123.4 615	130.3 846	135
u_{B_r} $/mV$	14.90	15.00	15.15	15.40	15.45	15.50	15.55	15.55	15.55	15.55
B_r $/T$	0.400 538	0.403 226	0.407 258	0.413 978	0.415 323	0.416 667	0.418 011	0.418 011	0.418 011	0.418 011

根据表中数据，有：

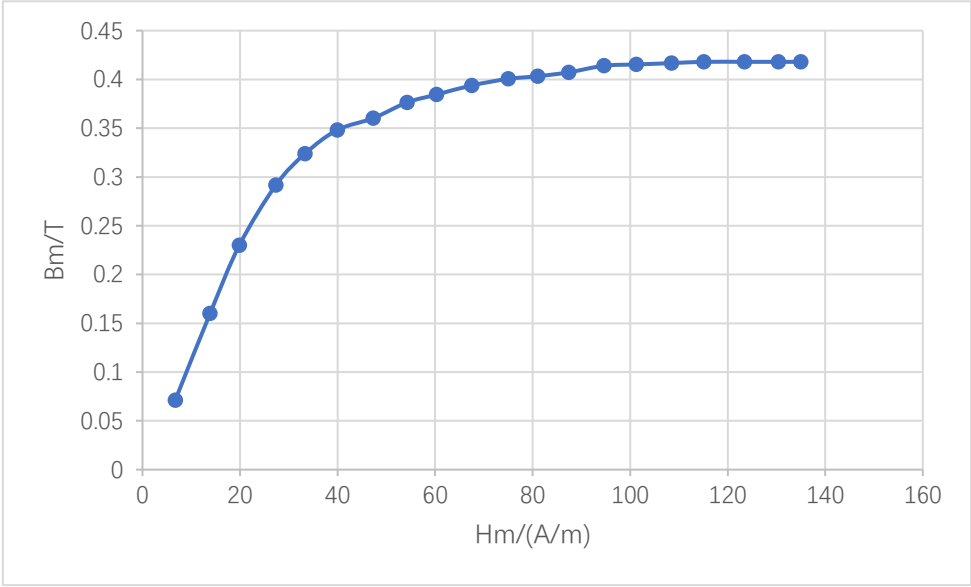


图 7 铁氧体动态磁滞回线 Bm-Hm 关系图

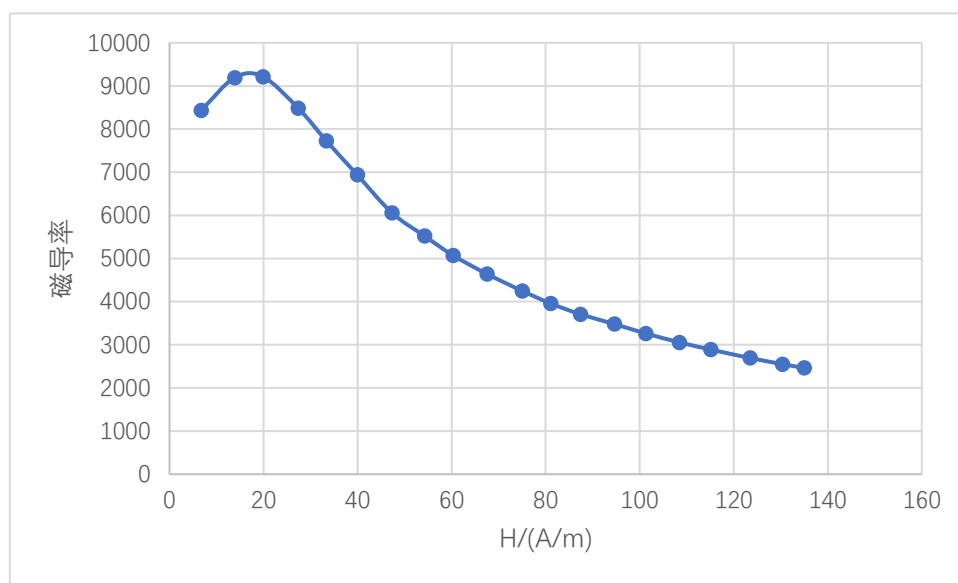
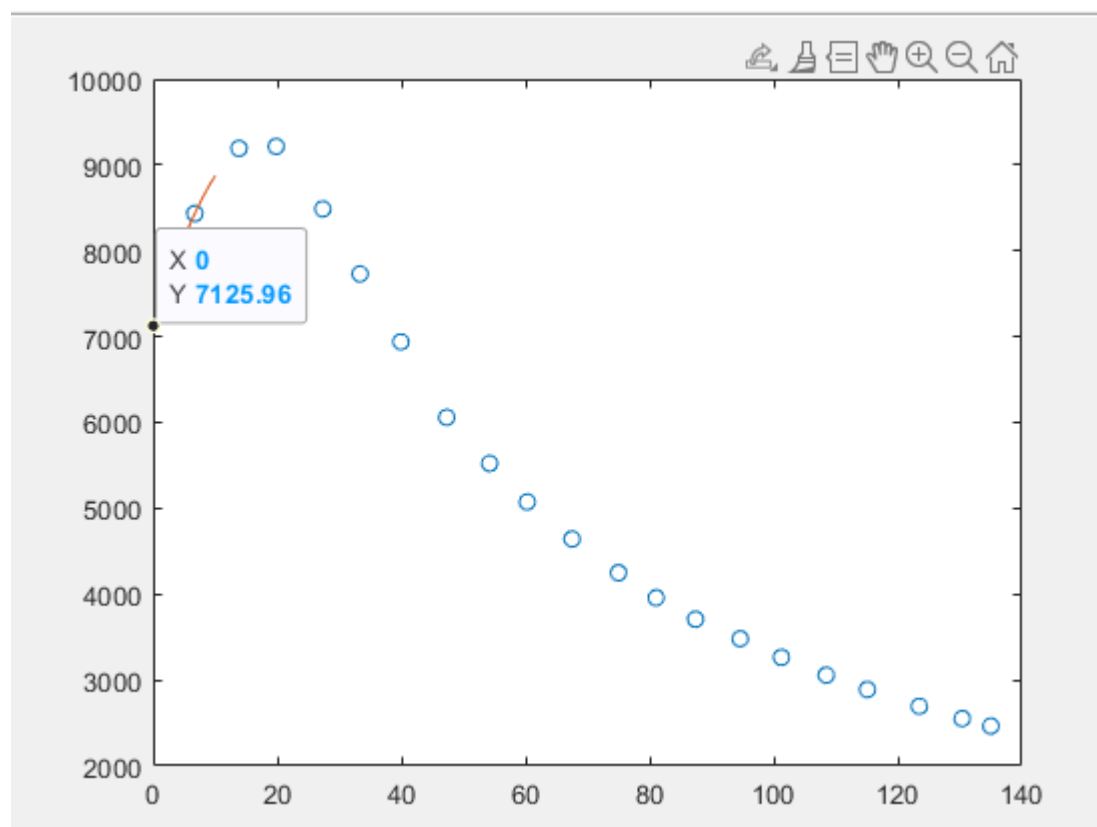


图 8 铁氧体动态磁滞回线磁导率-Hm 关系图

测定起始磁导率：



利用 matlab 的 spline 插值，得 $\mu_i = 7125.96$

【实验总结】

从 Bm-Hm 关系图，可以看到，初始时 Bm 与 Hm 的关系近似为线性，然而到了后面的数据点的时候这一线性关系逐渐模糊，Bm 有平稳趋势。

从磁导率-Hm 关系图，可以看到，靠后的图像有先递增后递减的趋势，这与

预期相符。

3.观察不同频率下硅钢的动态磁滞回线

表 4：硅钢变频磁滞回线参数表

	20Hz	40Hz	60Hz
u_{B_m}/mV	35.80	35.60	35.60
B_m/T	0.962366	0.956989	0.956989
u_{B_r}/mV	22.80	23.60	24.6
B_r/T	0.612903	0.634409	0.66129
u_{H_C}/mV	103.5	122.0	142.0
$H_C/(A \cdot m^{-1})$	59.71154	70.38462	81.92308

【实验总结】

从表 5 不难看出，随着频率增大，Hc 明显增大，Br 也缓慢增加，但是 Bm 几乎保持不变。对此，我们可以断言 Hc 与频率有关，但是无法说 Br 以及 Bm 与频率存在明确关系。尽管如此，我们也还是能够确定两种可能：要么 Br 与 Bm 确实独立于频率；要么就是它们确然受频率影响，但是因为实验仪器的测量精度限制而无法明显观察到而已。

4.测量铁氧体在不同直流偏置磁场 H 下的可逆磁导率

表 5：铁氧体直流偏置测量数据

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

电流/ A	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
端点坐标 $\Delta x/$ mV	13.8	19.8	15.3	13.4	16.9	17.7	17.0	17.1	16.7	16.1
端点坐标 $\Delta y/$ mV	19.6	19.6	8.44	4.84	3.84	2.88	0.97	0.73	0.54	0.43
端点坐标 $H1/$ (A/m)	7.96153 8	11.4230 8	8.82692 3	7.73076 9	9.75	10.2115 4	9.80769 2	9.86538 5	9.63461 5	9.28846 2
端点坐标 $B1/$ (T)	0.04355 556	0.04355 6	0.01875 6	0.01075 56	0.00853 3	0.0064	0.00215 6	0.00162 2	0.0012	0.000 956
$\mu_R/(A$ $\cdot s/m)$	4353.48 143	3034.24 5	1690.87 2	1107.13 42	696.472 9	498.745 4	174.897 1	130.853 8	99.1144 6	81.86 576

根据实验原理不难得到

$$\mu_R = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}$$

又

$$H = \frac{N_1}{lR_1}u_{R_1}, \quad B = \frac{R_2C}{N_2S}u_C$$

得

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

根据表 6 数据，绘制图像如下：

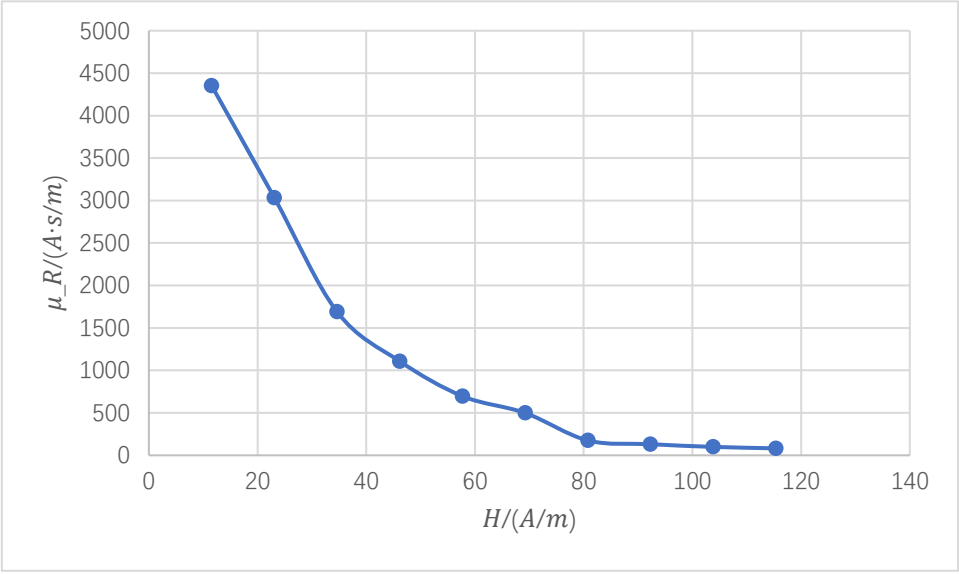


图 9 铁氧体 μ_R — H 关系图

【实验总结】

从图中可以看到， μ_r 随 H 增大而递减，且递减速率递减，最终趋近于 0，与理论符合得很好，实验成功。

第二部分：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

由实验原理部分的推导，我们容易知道：

$$H = \frac{N}{\bar{l}}I, \quad H\bar{l} + \frac{1}{\mu_0}B\ell_g = NI$$

以及

$$N = 2000, \bar{l} = \bar{\ell} = 0.240\text{m}, \ell_g = 0.20\text{cm} = 2.0 \times 10^{-3}\text{m}$$

计算填写数据表如下：

表 6：模具钢样品的起始磁化曲线数据表

I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)	I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)
0	1.5	0	9.947183943	501.3	295.9	4177.5	2215.252181
49.9	13.0	415.8333	329.6244058	549.8	323.3	4581.667	2437.716954
100.8	29.3	840	645.6983403	600.1	347.8	5000.833	2694.41295
149.1	56.7	1242.5	866.4964469	646.3	367.3	5385.833	2950.099558
201.5	87.3	1679.167	1100.240561				

251.1	120.0	2092.5	1296.725285				
299.8	157.2	2498.333	1455.868456				
350.5	195.2	2920.833	1626.37313				
400.3	230.3	3335.833	1808.609025				
450.0	263.3	3750	2003.937645				

根据表 8 数据，得到曲线如下：

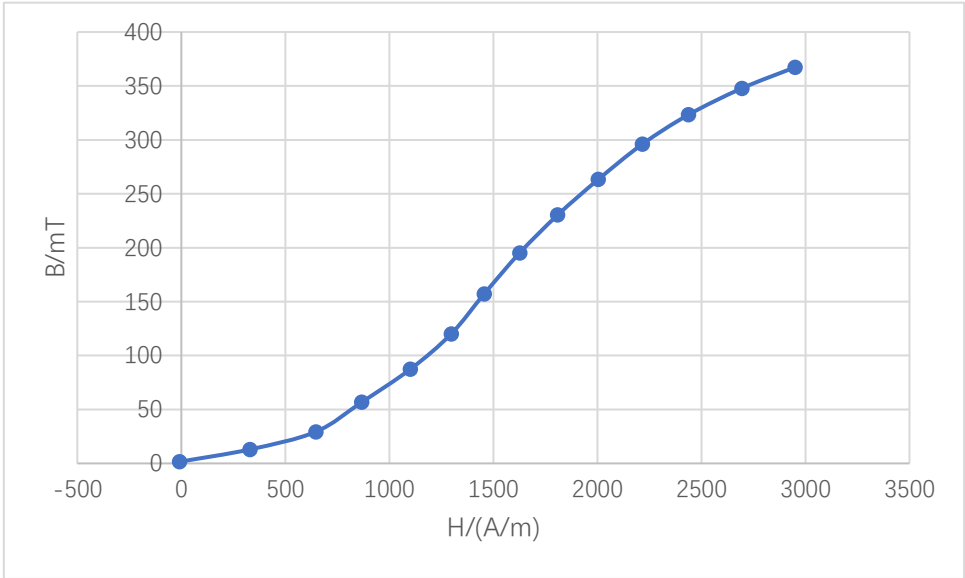


图 10 模具钢样品的起始磁化曲线

【实验总结】

起始磁化曲线与预期符合的很好。

2.测量模具钢样品的饱和磁化曲线

由实验原理部分的推导，我们容易知道：

$$H = \frac{N}{\bar{l}}I, \quad H\bar{l} + \frac{1}{\mu_0}B\ell_g = NI$$

以及

$$N = 2000, \bar{l} = \bar{\ell} = 0.240\text{m}, \ell_g = 0.20\text{cm} = 2.0 \times 10^{-3}\text{m}$$

计算填写数据表如下：

表 7：模具钢样品的饱和磁化曲线数据表

I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)	I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)
599.9	368.5	4999.167	2555.475145	-599.9	-375.4	-4999.17	-2509.718098

549.2	361.5	4576.667	2179.395336	-550.2	-368.7	-4585	-2139.982187
500.4	353.8	4170	1823.790881	-500.2	-360.9	-4168.33	-1775.040877
449.6	344.1	3746.667	1464.78267	-449.9	-351.4	-3749.17	-1418.873042
400.3	332.3	3335.833	1132.200517	-399.3	-339.7	-3327.5	-1074.79441
349.9	316.9	2915.833	814.3249389	-349.3	-324.8	-2910.83	-756.9364368
299.2	296.8	2493.333	525.1172038	-300.4	-306.1	-2503.33	-473.4446633
250.3	272.1	2085.833	281.414166	-250.2	-281.6	-2085	-217.5820011
200.1	241.4	1667.5	66.66653073	-200.0	-251.6	-1666.67	1.807653413
150.0	206.6	1250	-120.0588018	-150.2	-217.5	-1251.67	190.6750051
97.6	167.0	813.3333	-294.1198123	-100.2	-180.3	-835	360.65151
49.5	128.9	412.5	-442.2946735	-50.2	-141.2	-418.333	518.0282485
0.0	88.6	0	-587.5469982	0.0	-100.5	0	666.4613242
-50.2	46.8	-418.333	-728.6854724	50.2	-58.9	418.3333	808.9260895
-100.2	4.4	-835	-864.1784062	100.0	-16.8	833.3333	944.7417935
-149.7	-37.8	-1247.5	-996.8309646	149.9	25.7	1249.167	1078.738248
-199.7	-80.5	-1664.17	-1130.334462	199.7	68.1	1664.167	1212.564516
-250.5	-122.4	-2087.5	-1275.80979	250.4	109.8	2086.667	1358.532802
-300.2	-162.4	-2501.67	-1424.718218	300.4	150.1	2503.333	1507.951793
-350.5	-201.7	-2920.83	-1583.268666	350.4	189.3	2920	1664.665386
-400.0	-239.0	-3333.33	-1748.415358	400.3	226.8	3335.833	1831.819121
-450.7	-275.0	-3755.83	-1932.182944	454.2	265.0	3785	2027.66417
-499.8	-307.1	-4165	-2128.479874	499.7	294.2	4164.167	2213.192323
-550.3	-336.5	-4585.83	-2354.348402	550.2	323.2	4585	2441.713433
-601.0	-361.8	-5008.33	-2609.072566	600.9	347.9	5007.5	2700.416471
-647.2	-381.2	-5393.33	-2865.422321	647.1	367.1	5392.5	2958.092516

根据表 9 数据，得到曲线如下：

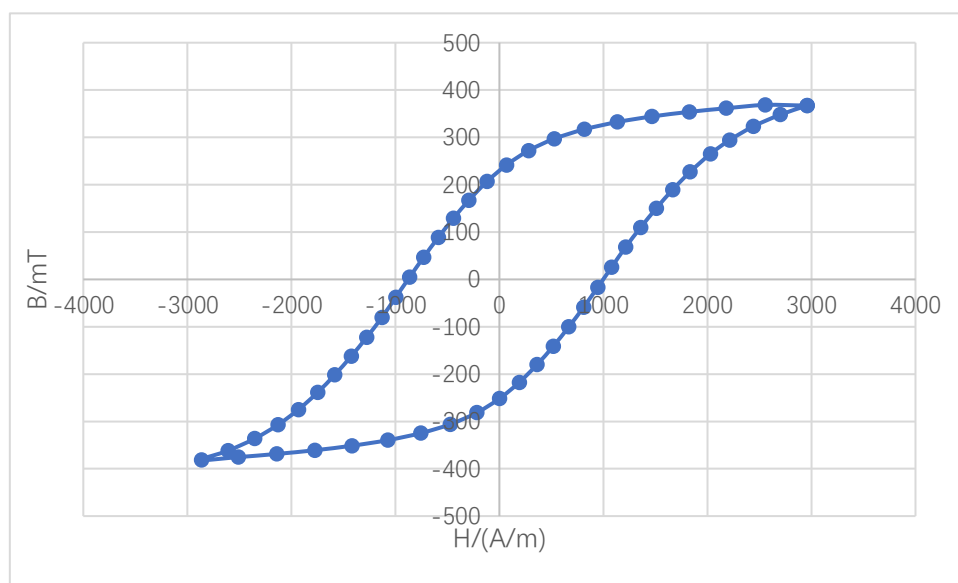


图 11 模具钢样品的磁滞回线

【实验总结】

我们发现修正以后的 H 与原来的 H 差距很大，因而反推出

$$H\bar{\ell} \gg \frac{1}{\mu_0} B\ell_g$$

这一条件不成立。

另外，绘制而成的磁滞回线与理论符合得非常好，可以断言，实验非常成功。

六. 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哪些因素影响？

动态磁滞回线：交变磁场中铁磁材料内部磁感应强度和外加的交变磁场的变化关系；

（准）静态磁滞回线：将不同的直流偏置磁场和在这些磁场下铁磁材料内部的磁感应强度组成的点连成的曲线。

二者主要区别在于：动态磁滞回线外磁场时刻周期变化，（准）静态磁滞回线外磁场变化很小。

影响因素：铁磁材料种类、形状、交流电的频率与幅度等。

2. 什么叫基本磁化曲线？它和起始磁化曲线间有何区别

基本磁化曲线：同一铁磁材料的一系列大小不同的稳定的磁滞回线的顶点连成的曲线。

起始磁化曲线：处于磁中性状态的铁磁材料加上由小变大的磁场进行磁化时，磁感应强度随 H 的变化曲线。

二者主要区别在于：基本磁化曲线是由一系列磁滞回线的顶点连接而成；起始磁化曲线则反映铁磁材料从磁中性至饱和磁化的过程。

3. 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点？

铁氧体更容易被磁化，磁滞损耗小；硅钢相对不容易被磁化，磁滞损耗较大。

4. 动态磁滞回线测量实验中，电路参量应该怎样设置才能保证 $u_{R_1} - u_C$ 所形成的李萨如图形正确反映材料动态磁滞回线的形状？

积分常量 $RC \gg T$ 且交流电幅度足够完成饱和磁化。

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？

样品存在剩磁，且正负方向剩磁不同，会导致磁滞回线无法自合。磁锻炼将正负方向的剩磁调节一致，使得磁滞回线能够自合。

七. 感悟与思考

在实验中，我注意到了实验数据的局限性，如数据点较少导致了部分结论无法得到充分支持。在将来的实验中，应该增加数据点数量以获得更可靠的结果。此外，在静态磁滞回线测量中，对样品进行了磁训练以获得稳定的磁滞回线，但在分析时发现修正后的数据与原始数据存在较大差距，这值得进一步深入研究。

八. 附录

基础物理实验原始数据记录

实验名称 观测铁磁材料的磁滞回线 地点 教学楼 713
 学生姓名 学号 分班分组座号 - 号 (例: 1-04-5 号)
 实验日期 年 月 日 成绩评定 教师签字

第一部分：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 (存储数据, 在实验报告上精确计算)

(1) 测量频率 $f=100\text{ Hz}$ 时的饱和磁滞回线。取 $R_1=2.0\ \Omega$, $R_2=50\text{ k}\Omega$, $C=10.0\ \mu\text{F}$ 。

表 1. 饱和磁滞回线 (竖直方向成对测量)

$\begin{matrix} B \\ H \end{matrix}$	点 1	点 2
$H_s = 234.0\text{ mV}$ (注: $-H_s$)	$-B_s = -15.40\text{ mV}$	(注: $-B_s$)
$-H_c = -9.2\text{ mV}$	0	-6.040 mV
0	$B_r = 3.000\text{ mV}$	$B_r = 3.520\text{ mV} - 3.440\text{ mV}$
$H_c = 10.00\text{ mV}$	5.860 mV	0
$H_s = 234.0\text{ mV}$ (注: H_s)	$B_s = 15.40\text{ mV}$	(注: B_s)
Br	3.220	
Hc	9.6	

表 2. 饱和磁滞回线 (水平方向成对测量)

$\begin{matrix} H \\ B \end{matrix}$	点 1	点 2
(注: $-B_s$)		(注: $-H_s$)

B_r	22.80	23.60	24.26
H_c	103.5	122.0	142.0

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

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_0 单调增加 (一定缓慢增加)。测量 10 组回线小线段的斜率。课后把电流换算成磁场强度, 并绘制可逆磁导率随外场强度的变化曲线 μ_i-H 。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电流	0.01A	0.02A	0.03A	0.04A	0.05A	0.06A	0.07A	0.08A	0.09A	0.10A
端点坐标 H_1/A	13.8mV	19.8mV	15.3mV	13.4mV	16.9mV	17.7mV	17.0mV	17.1mV	16.7mV	16.1mV
端点坐标 B_1/mT	19.6mV	19.6mV	8.44mV	4.84mV	63.8mV	2.88mV	0.97mV	0.73mV	0.54mV	0.43mV
三象限端点 $H3$ (备用)										
三象限端点 $B3$ (备用)										

第二部分: 用霍尔传感器测量铁磁材料 (准) 静态磁滞回线

1、测量样品的起始磁化曲线。

将霍尔传感器置于磁场均匀区的中央。取 20 个采样点, 测量样品的起始磁化曲线。实验中记录 I 和 B , 课后通过计算, 在实验报告中补充 H 和修正 H 的数值, 并利用 B 和修正后的 H 绘图。其中利用讲义公式 (3) 来计算 H , 利用公式 (7) 来对 H 进行修正。

I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)	I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)
0	1.5			501.3	295.9		
49.9	13.0			549.8	323.3		
100.8	29.3			600.1	347.8		
149.1	56.7			646.3	367.3		
201.5	87.3						
251.1	120.0						
299.8	137.2						
350.5	195.2						
400.3	230.3						
450.0	263.3						

(注:Bs)	(注:Hs)
Br	
Hc	

(2) 固定信号源幅度, 观测并记录饱和磁滞回线随频率的变化规律。

变化规律:

为什么? (课后报告里回答)

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

	95Hz	150Hz
Br	$3.50 \quad 2.480 = 3.00$	$1.90 \quad 1.90 = 1.90$
Hc	$6.40 \quad 9.70 = 8.80$ -1.90	$6.20 \quad 6.10 = 6.15$

(3) 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 $I_m=0.1\text{ A}$, $R_1=2.0\text{ }\Omega$, 改变积分常量 R_2C 。调节分别为 0.01 s , 0.05 s , 0.5 s , 课上观察并粗略画出不同积分常量下李萨如图形的示意图。思考为什么积分常量会影响李萨如图形的形状? 积分常量是否会影响真实的磁滞回线的形状? (课后报告里回答)

2. 测量样品 1 (铁氧体) 的动态磁滞回线

(1) 在 $f=100\text{ Hz}$ 时, 取 $R_1=2.0\text{ }\Omega$, $R_2=50\text{ k}\Omega$, $C=10.0\text{ }\mu\text{F}$ 。测量 20 个顶点。课后绘制动态磁化曲线。计算振幅磁导率 μ_m , 并绘制其随 H_m 的变化曲线, 进而确定起始磁导率。(注: 要绘制两条曲线: 动态磁化曲线和 μ_m-H_m 曲线, 有同学会忘记绘制磁化曲线)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_m	11.65	24.00	34.40	47.40	57.80	69.20	82.00	94.00	104.50	117.0
B_m	2.65	5.95	8.55	10.85	12.05	12.95	13.40	14.00	14.30	14.65
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
H_m	130.0	140.5	151.5	164	175.5	188.0	199.5	214.0	226.0	234.0
B_m	14.90	15.00	15.15	15.40	15.45	15.50	15.55	15.55	15.55	15.55

注: 关于 20 个点的分配, 前面点可以适当分配多一些, 密集些测量, 后面可以少一些。

3. 观察不同频率下样品 2 (硅钢) 的动态磁滞回线

参数调至 $R_1=2.0\text{ }\Omega$, $R_2=50\text{ k}\Omega$, $C=10.0\text{ }\mu\text{F}$ 。在给定交变磁场幅度 $H_m=400\text{ A/m}$ 下, 测量三种频率下的 B_m , B_r , H_c

	20Hz	40Hz	60Hz
B_m	35.20 35.60	34.80 35.60	34.80 35.60

2、测量模具钢的磁滞回线

对样品进行磁训练后，磁化线圈的电流从饱和电流 I_m 开始逐步减小到 0，然后将电流反向，电流又从 0 增加到 $-I_m$ ，重复上述过程，再回到 I_m 。每隔 50mA 测一组 (I, B) 值。实验中记录 I 和 B ，课后通过计算，在实验报告中补充 H 和修正 H 的数值，并利用 B 和修正后的 H 绘图。 H 和修正 H 的计算方法同上。

I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)	I (mA)	B (mT)	H (A/m)	修正 H (A/m)
599.9	368.5			-599.9	-375.4		
549.2	361.5			-550.2	-368.7		
500.4	353.8			-500.2	-360.9		
449.6	344.1			-449.9	-351.4		
400.3	332.3			-399.3	-344.0		
349.9	316.9			-349.3	-324.8		
299.2	296.8			-300.4	-306.1		
250.3	272.1			-250.2	-281.6		
200.1	241.4			-200.0	-281.6		
150.0	206.6			-150.2	-217.5		
100.2	172.6			-100.2	-180.3		
50.5	128.9			-50.2	-141.2		
0.0	88.6			0.0	-100.5		
-50.2	46.8			50.2	-58.9		
-100.2	4.4			100.0	-16.8		
-149.7	-37.8			149.9	25.7		
-199.7	-80.5			199.7	68.1		
-249.5	-122.4			250.4	109.8		
-300.2	-162.4			300.4	150.1		
-350.5	-201.7			350.4	189.3		
-400.0	-239.0			400.3	226.8		
-450.7	-275.0			454.2	265.0		
-499.8	-302.1			499.7	294.2		
-550.3	-330.5			550.2	323.2		
-601.0	-361.8			600.9	347.9		
-647.2	-381.2			647.1	367.1		