



课程(实验)名称 用示波器观测动态磁滞回线 (组别) 1613 01-9 组内 7

指导教师 吴冬 实验日期 2017.12.4 仪器号 7

学生姓名 王华强 学号 201658009929035 成绩

观测动态磁滞回线实验报告

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之方法.
2. 了解铁磁性材料之动态磁化特性
3. 了解磁滞, 磁滞回线和磁化曲线概念, 加深对饱和磁化强度, 剩余磁化强度, 矫顽力等物理概念的理解.

二. 实验仪器

磁特性综合测量实验仪 样品参数 } 样品₁: $L=0.120m, S=1.24 \times 10^{-4}m^2, N_1=150$
 $N_2=150, N_3=150$
示波器 } 样品₂: $L=0.075m, S=1.20 \times 10^{-4}m^2$
 $N_1=N_2=N_3=150$
直流电源 } R_1 在 $[1, 110k\Omega]$ R_2 在 $[0\Omega, 110k\Omega]$, C 在 $0.1\mu F \sim 11\mu F$
引线 (3红3绿, 2红黑叉线, 2信号线) 可调

三. 实验原理

1. 铁磁材料的磁化特性

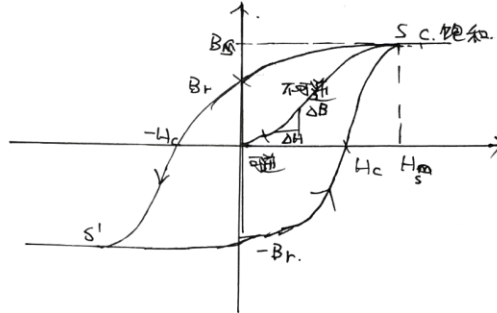
在外磁场 H 中物体会被磁化产生 M (内部磁化强度), 磁感应强度 B ,

定义 $I_m = \frac{M}{H}$, $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$, 其中 μ_0 为真空磁导率.

铁磁材料的磁化率 $\mu_r > 1$, 且有特殊的磁化规律. 对 $H=0, B=0$ 材料进行磁化时, 可分为可逆磁化, 不可逆磁化, 饱和磁化状态. 磁化曲线 (起始) 和饱和磁滞回线如下图所示;



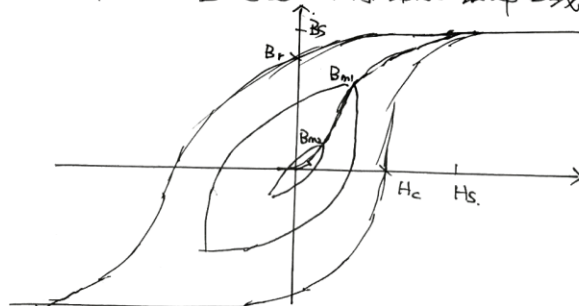
课程(实验)名称 _____ 班级(组别) _____
指导教师 _____ 实验日期 _____ 仪器号 _____
学生姓名 _____ 学号 _____ 成绩 _____



注意:铁磁材料的磁化状态与之前磁化历史有关。因此,在实验开始之前,作退磁操作以消除其影响。

曲线的顺序如图所示。图中 H_c 称为矫顽力, B_r 为无外部磁场下的剩余饱和磁感应强度。其形状与磁化场频率的幅度均有关。

随着磁化场频率和强度的变化,得动态磁滞回线与动态磁化曲线。



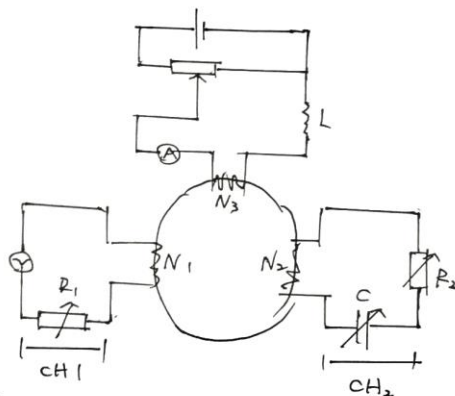
其中动态磁化曲线可由动态磁滞回线的顶点相连得到。可以定义振幅磁导率:

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

注意在交流磁场变化幅度很小时,其磁化过程是不可逆的,磁滞回线退化为一直线段,这是此后测量的重要原理

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 _____

动态磁滞回线测量：原理如下。



其中 N_1 为交流励磁线圈, N_2 为感应线圈, N_3 为直流励磁线圈。

示波器 X, Y 两通道分别输入 U_{R1} 和 U_C , 其中 U_{R1} 正比于磁场强度, U_C 在 RC 积分电路中, 磁感应强度正比于线圈上感应电势 \mathcal{E} 的时间积分。

计算得 U_{R1} , U_C , B , H 的关系如下:

$$H = \frac{N_1}{L R_1} U_{R1}, \quad B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C \quad (1)$$

实验内容

1. 测量铁氧体的饱和动态磁滞回线

(1) 测 $f=100\text{Hz}$ 时的饱和磁滞回线, 取 $R_1=2\Omega$, $R_2=50\text{k}\Omega$, $C=10\mu\text{F}$, X-Y 取上下至少 9 个测量点, 记录 B_s , B_r , H_c

(2) 保持信源幅度, 观测不同 f 时饱和磁滞回线。保持 R_1, R_2, C , 取 $f=95\text{Hz}$, $f=150\text{Hz}$, 观测磁滞回线的变化, B_r , H_c 。



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) 取 $f=50\text{Hz}$, 比较不同 R_2C (0.01s , 0.05s , 0.5s) 下李萨如图形, 固定 $I_m = 0.1\text{A}$, $R_1 = 2.0\Omega$.

思考为何积分常量会影响李萨如图形的形状? 积分常量是否会影响到真实的磁滞回线形状?

2. 退磁后测铁磁体的动态磁滞回线.

(1) 测量并画出动态磁化曲线。取 $f=100\text{Hz}$, $R_1 = 2.0\Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C = 10.0\mu\text{F}$ 磁场幅度 H_m 从 0 到 H_s 单调增.

(2) 计算并作出 $\mu_m - H_m$ 曲线

(3) 测起始磁导率 μ_i

3. 观察不同 f 下硅钢的动态磁滞回线

取 $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$, $H_m = 400\text{A/m}$, 测 $f = 20\text{Hz}$, 40Hz , 60Hz 的 B_m , B_r , H_c .

4. 测铁氧体在不同直流偏置磁场 H 下的可逆磁导率 (退磁后)

$f = 100\text{Hz}$, $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C = 2\mu\text{F}$, 直流偏置磁场从 0 到 H_s 单调增. 实验中使 ωH (交流磁场) 足够小. 调节示波器使李萨如图充分放大, 以观测磁化是否可逆. 作出 $\mu_p - H$ 曲线.

五. ~~数据获取及数据处理~~, 实验结论

数据记录如下. (数据处理, 问题解答见结论部分)

1-(1) 测量 B_s 对应 $U_c = 17.6\text{mV}$
 B_r 对应 $U_c = 3.92\text{mV}$
 H_c 对应 $U_{R_1} = 10.0\text{mV}$



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 _____

测量对象	测量的物理量	测量值									
(H)	U_{R1} (mV)	-90.0	-60.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	---
(B ₁)	U_C (mV)	-17.2	-14.6	-8.80	-4.00	0.00	3.92	8.00	10.4	12.4	---
(B ₂)	U_a (mV)	-17.2	-14.8	-12.0	-9.60	-7.80	-3.60	0.00	5.20	9.60	---
---	60.0	90.0	45.0	-45.0							
---	16.0	17.6	14.4	-12.8							
---	15.2	17.6	12.8	-14.0							

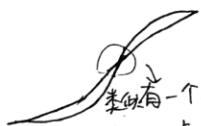
1-(12)

f (Hz)	85.6m (B ₁ 对应) U_C (mV)	(H ₁ 对应) U_{R1} (mV)
95.00	4.40	11.2
150.00	2.32	6.00

1-(13) 选取 $U_{R1} = 200\text{mV}$

示意图如下:

$R_2 C = 0.015$



实际中心点放大后形如:

$R_2 C = 0.055$



$R_2 C = 0.55$



2. $f = 100\text{Hz}$, $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C = 10.0\mu\text{F}$.





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 _____

U_R (mV)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90
U_C (mV)	0	1.68	3.20	4.80	5.60	6.80	9.60	11.2	12.0	12.8	14.0	15.6	16.4	16.8	16.8
U_R (mV)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200				
U_C (mV)	17.6	18.0	18.4	18.8	19.2	19.2	19.6	19.6	20.0	20.0					

3. $I_m = 400 \text{ A/m}$, $U_{P1} = 400 \text{ mV}$, $l = 0.075 \text{ m}$, $N_1 = 150$, $R_1 = 2 \Omega$

f (Hz)	20	40	60
$(B_m) U_C$ (mV)	34.4	35.2	34.4
$(B_r) U_C$ (mV)	21.6	23.6	24.0
$(H_C) U_R$ (mV)	120	128	152

4.

I (A)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3
U_C (mV)	0	3.28	4.24	4.24	1.08	2.96	0.96	1.92	1.36	1.04	1.04	0.24	0.24
U_R (mV)	0	2.08	4.08	6.00	4.24	7.76	2.88	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84

此表Y
无显示
变化

六. 数据处理及结论

(-1) B_S : $U_C = 17.6 \text{ mV}$

$$B_S = \frac{R_2 \cdot C}{N_2 S} U_C$$

$$N_2 = 150, S = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2, R_2 = 50 \text{ k}\Omega, C = 10.0 \mu\text{F}$$

$$B_S = \frac{50 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}{150 \times 1.2 \times 10^{-4}} \cdot 17.6 \times 10^{-3} \text{ T}$$

$$= \frac{50000}{150 \times 1.2} \times 17.6 \times 10^{-3} \text{ T} = 27.8 \times 17.6 \times 10^{-3} \text{ T} \approx 4.89 \text{ T}$$

0.489

B_r : $U_C = 3.92 \text{ mV}$

$$B_r = 27.8 \times 3.92 \times 10^{-3} \text{ T} = 1.09 \text{ T}$$



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 _____

$$H_c = \frac{N_1}{L R_1} U_{R1} = \frac{150}{0.130 \times 2} \cdot U_{R1} = \frac{150}{0.130 \times 2} \times 10 \times 10^{-3} = 5.77 \text{ A/m}$$

0.5 (5.77)

按测量值计算如下.

H (A/m)	-51.9	-34.6	-26.0	-17.3	-11.54	-5.77	0	5.77	11.54	17.31	26.00	34.7	51.9
B ₁ (T)	0.478	0.406	0.3558	0.245	0.110	0.10	0.222	0.290	0.345	0.404	0.445	0.490	0.490
B ₂ (T)	0.478	0.411	0.389	0.334	0.267	0.10	0.145	0.267	0.356	0.423	0.490	0.490	0.490

作图结果见附图一.

1-(2) $f = 95 \text{ Hz}$ 时 $U_c = 4.40 \text{ mV}$ $B = 27.8 \times 4.4 \times 10^{-3} = 0.122 \text{ T}$
 $U_{R1} = 11.2 \text{ mV}$ $H = 5.77 \times 11.2 \times 10^{-3} = 6.462 \text{ (A/m)}$

$f = 150 \text{ Hz}$ 时 $U_c = 2.32 \text{ mV}$ $B = 27.8 \times 2.32 \times 10^{-3} = 0.0645 \text{ T}$
 $U_{R1} = 6.00 \text{ mV}$ $H = 5.77 \times 6 \times 10^{-3} = 3.462 \text{ (A/m)}$

理论

理论分析: 磁滞回线的面积对应于循环磁化一周发生的能量损耗。对材料进行高频动态磁化时, 有磁滞损耗, 涡流损耗, 剩磁损耗。其中涡流损耗依频率增大, 磁滞回线面积增大

1-(3) 画图见数据表格部分(前文)

不会影响真实的磁滞回线.

注意 $B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_c$ 成立的条件是 $R_2 C \gg T$

显然, 这里 $R_2 C$ 取较小值时 $R_2 C \not\gg T$, 此时 $U_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C R_2} \int U_{R2} dt$ 不成立, $U_c \ll U_2$, 从而李萨如图形的 Y 轴在 $R_2 C$ 变化时对 U_c 描绘的精确度会发生变化, 从而改变图形形状.



课程(实验)名称 _____ 班级(班别) _____

指导教师 _____ 实验日期 _____ 仪器号 _____

学生姓名 _____ 学号 _____ 成绩 _____

2-10(2)

计算值:

$H(A/m)$	0	2.985	25.77	8.66	11.54	14.425	17.31	20.19	23.08	25.965
$B(T)$	0	0.0467	0.0889	0.133	0.15563	0.189	0.266	0.311	0.3334	0.3558
$H(A/m)$	28.85	34.62	40.39	46.16	51.93	57.7	63.47	69.24	75.01	
$B(T)$	0.3892	0.4336	0.4559	0.4670	0.4670	0.489	0.500	0.51152	0.5152	
$H(A/m)$	80.78	86.55	92.3	98.09	103.86	109.63	115.4			
$B(T)$	0.5226	0.534	0.5337	0.545	0.545	0.556	0.556			

$(T \cdot m/A)$

$$u_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$$

(真空磁导率值为: $4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$)

10735	9968	8982	8651	7156	6747	6273	5878	5426	5148	4907	4600
4420	4174	4035	3834								

作图见附页:

与理论曲线相比在 $H \rightarrow 0$ 时误差大偏差, 可能是由于 H 较小时读数误差所致

$$u_m = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} \approx 11940 T \cdot m/A \quad (\text{由 } B-H \text{ 曲线前三点作线性拟合})$$

(舍去首点, 偏差过大)

3. $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 50k\Omega$, $C = 10 \times 10^{-6} F$, $H_m = 400 A/m$ $U_{k1} = 400 mV$

$$L = 0.075 m, N_1 = 150$$

$$H = \frac{N_1}{L R_1} U_{k1} = \frac{150}{0.075 \cdot 2} \cdot U_{k1} = 10^3 U_{k1}$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C = \frac{50 \times 10^3 \times 10^{-6}}{150 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1.2 \times 10^{-4}} U_C = \frac{5 \times 10^{-7} U_C}{1.8 \times 10^{-2}} = \frac{50}{1.8} U_C = 27.8 U_C$$



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 _____

计算得:

$f(\text{Hz})$	20	40	60
$B_m(\text{T})$	0.956	0.979	0.956
$B_r(\text{T})$	0.601	0.656	0.667
$H_c(\text{A/m})$	120	128	152

4.

计算得: (由 $H = \frac{NI}{L}$, $\mu_r = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH\mu_0}$). $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $L = 150$ $N = 150$
 $\mu_r(\text{Tm/A})$ 60462 39844 2099 15191 14624 127801 7481 5299 4052 4052 935 935
 $H(\text{A/m})$ 11.5 23.0 34.6 46.1 57.6 69.2 80.7 92.3 103.8 115.4 126.8 146.1

图见附图.

思考题.

- ①动态磁滞回线描述在交变磁场上 B, H 随时间变化的轨迹, 其中能量损失有磁滞损耗, 涡流损耗与剩余损耗.
 ②静态磁滞回线是在磁化完全稳定后的 BH 关系, 几乎在测量时不受时间因素影响. 其中损耗也仅有磁滞损耗.
 ③形状影响因素有 材料种类, 几何特征(形状, 尺寸, etc.) 外部磁场强度, 频率
 (由 由交流电 I, f 决定)
 ④面积影响因素: 由于面积代表一个周期内的磁化损耗, 由磁滞损耗, 涡流损耗, 剩余损耗决定. 显然, 影响形状的因素也会影响损耗值, 从而改变面积.

2. 列表如下.

	磁化难易 (饱和所需外磁场)	剩余磁感应强度 B_r	矫顽力 H_c	S
铁氧体	小(易)	小	小	小
硅钢材料	大(难)	大	大	大



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 _____

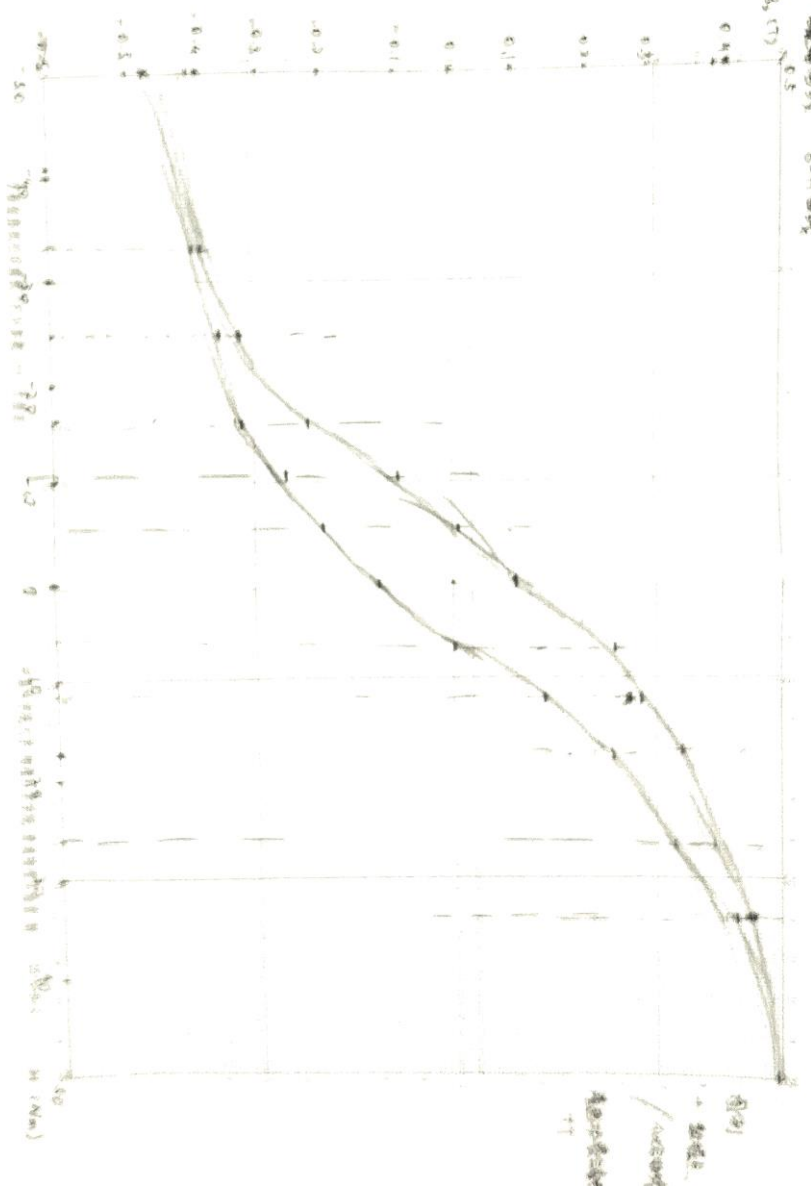
3. ① $R_2C \gg T$, 否则会发生实验中观察到的几种李萨如图形一样的情况
(积分常量)
② I_{max} 足够大, 使得饱和磁化
③ f 足够稳定

实验思考与补充.

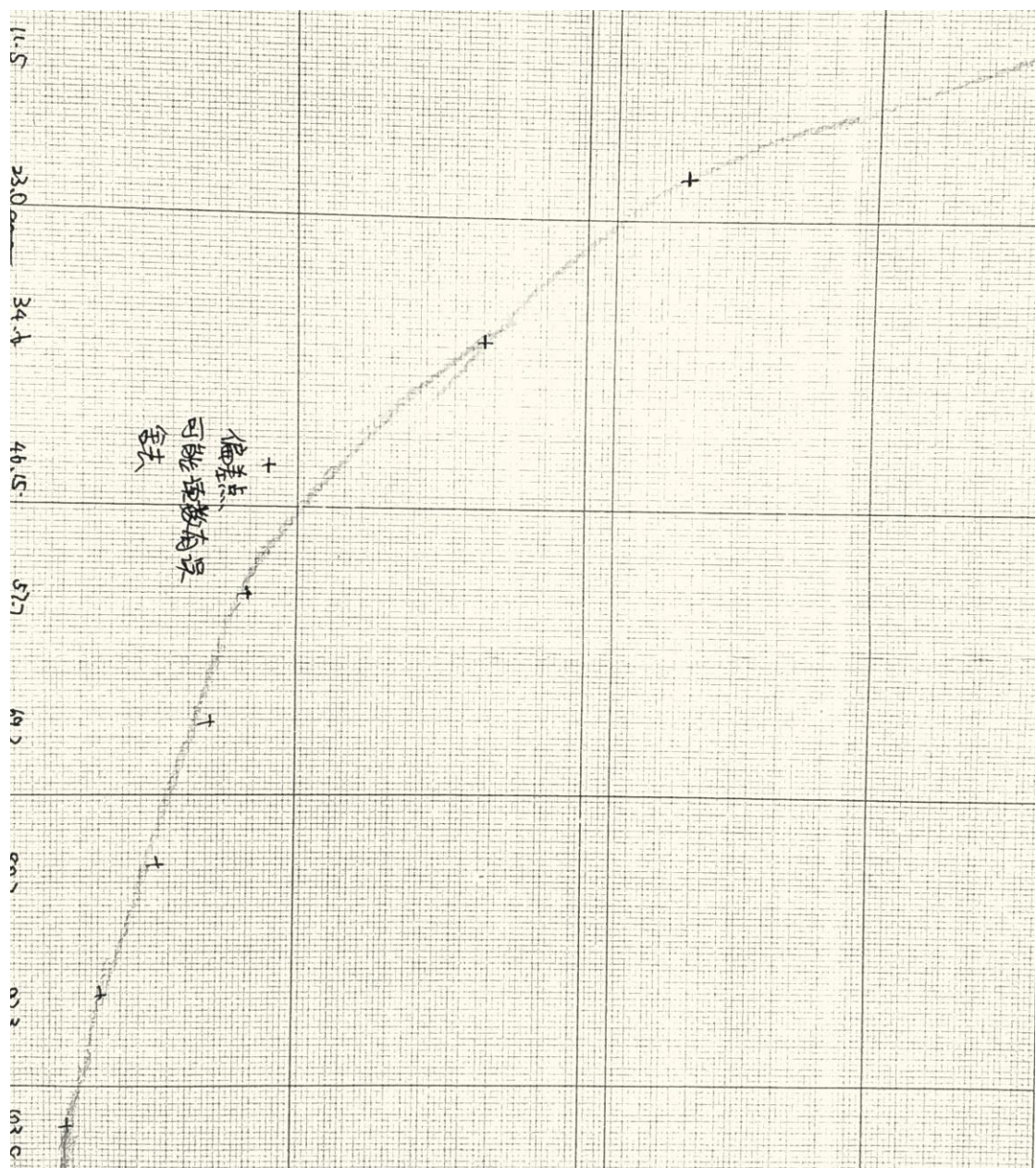
使用示波器的光栅标读数时, 会受到当前显示比例的很大影响, 若不放大的图形到一定程度的化, 极易引起测量误差。同时采用更灵敏的测量方式如之前实验中的虚拟仪器, 可能能在一定程度上提高准确度并降低数据处理难度。

实际操作中由于示波器测量精度的限制, 在一些情况下会出现测量值过小, 在自变量连续变化时因变量跳变的情况。这时可以放弃取固定自变量值, 而是在因变量发生跳变时记录下此时自变量的值。

1-1 曲线
 B, B₂ (7)



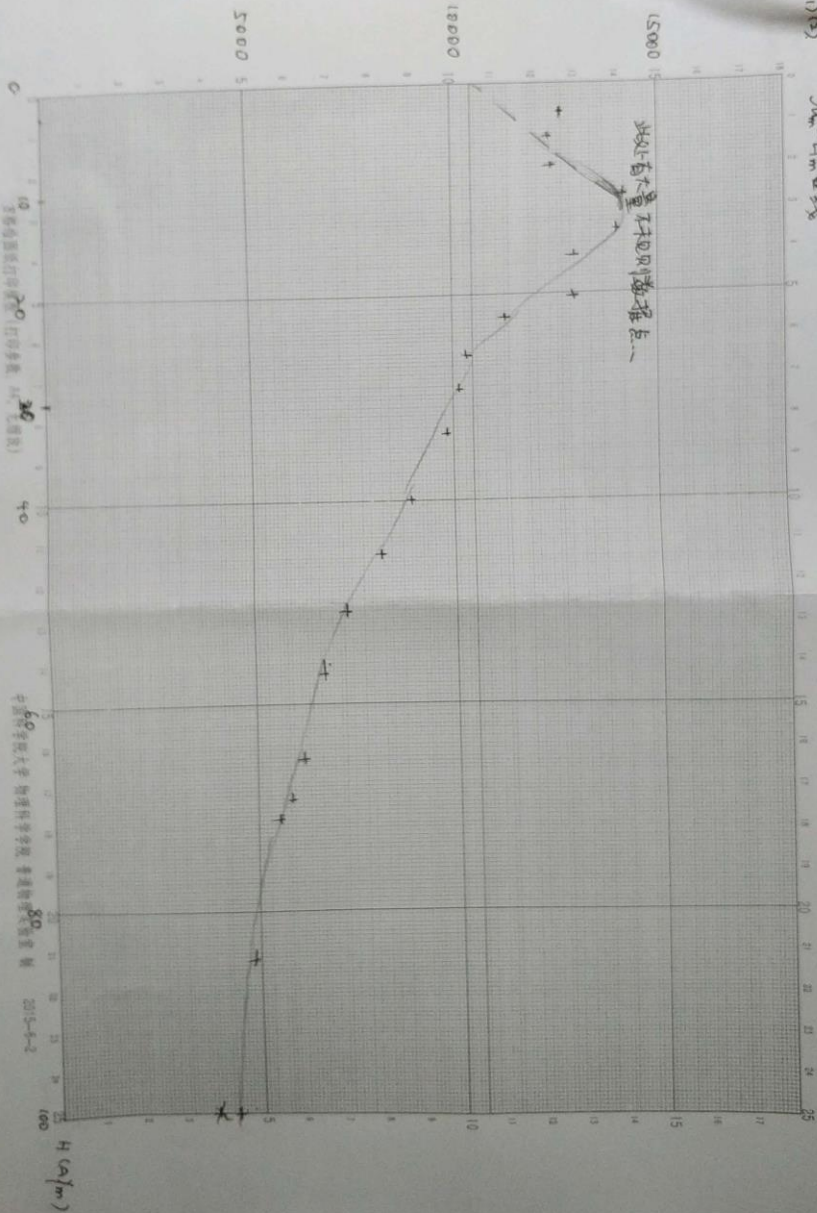
1-1
 B, B₂ (7)



2-41(12)

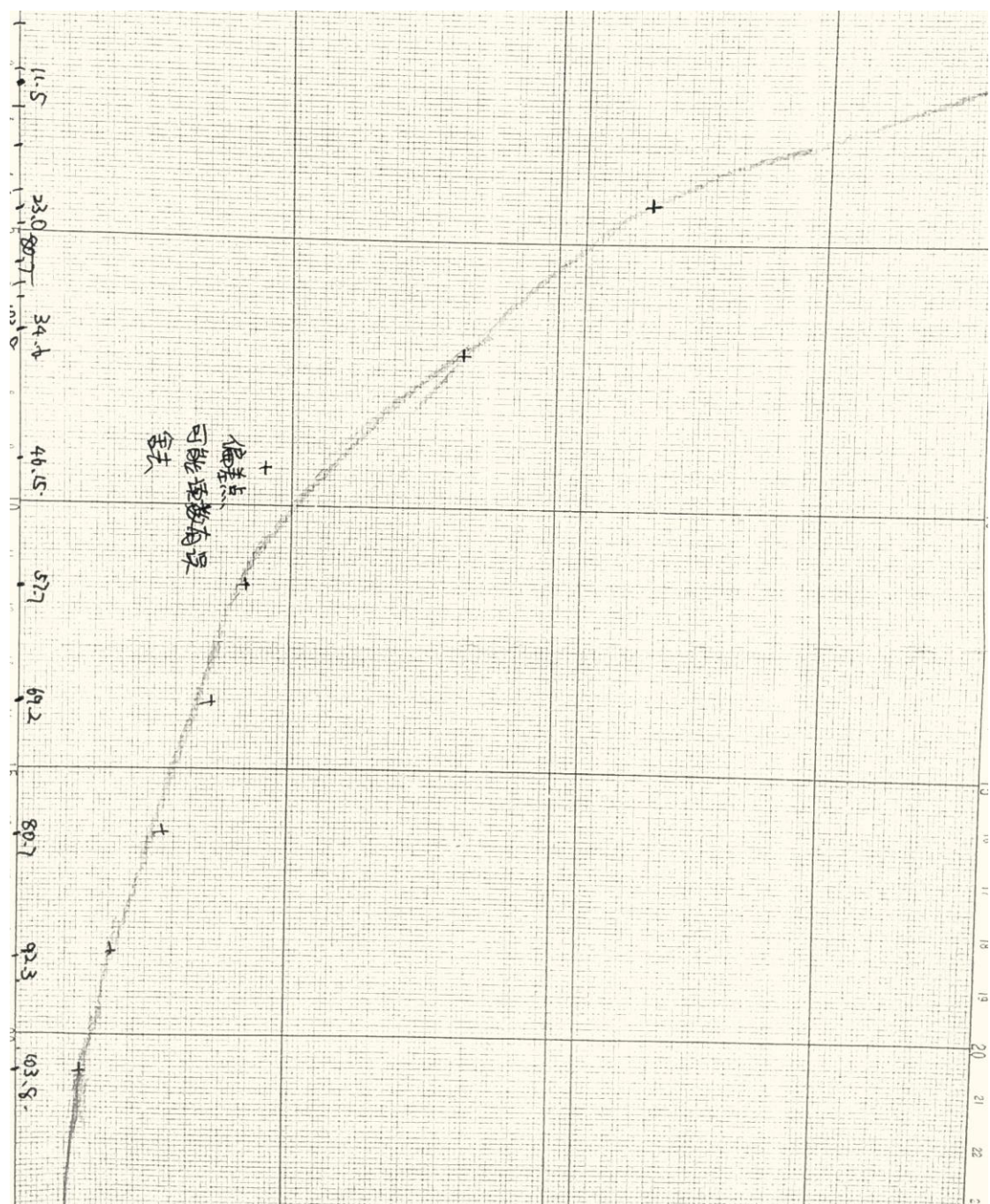
$\lambda_m - \lambda_m$ 曲线

此处有少量不规则数据点



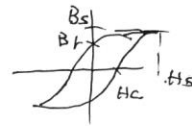
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

中国海洋大学海洋科学学院 曹建刚 2015-4-2



数据记录 王华强

1. $f = 100.0 \text{ Hz}$
 (P) B_s 17.6 mV
 B_r 3.92 mV
 H_c 10.0 mV
 (Hs) 87.2 mV



(H) U_{P1}	-90.0 mV	-60.0 mV	-30.0 mV	-20.0 mV	-10.0 mV	0.0 mV
B_1	-17.2 mV	-14.6 mV	-8.80 mV	-4.80 mV	0.00 mV	3.92 mV
B_2	-17.2 mV	-14.8 mV	-12.0 mV	-9.60 mV	-7.60 mV	-3.60 mV

(H) U_{P1}	+10.0 mV	+20.0 mV	+30.0 mV	+60.0 mV	+90.0 mV
B_1	8.80 mV	10.4 mV	12.4 mV	16.0 mV	17.6 mV
B_2	0.00 mV	5.20 mV	9.60 mV	15.2 mV	17.6 mV

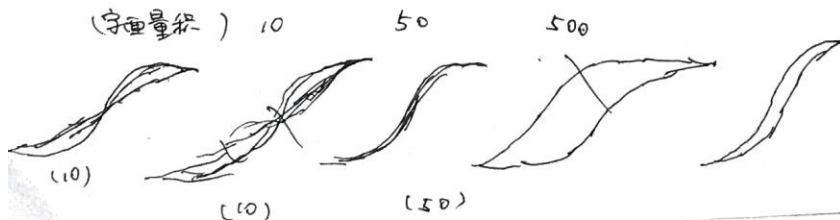
补录 H	+45.0 mV	-45.0 mV
B_1	14.4 mV	-12.8 mV
B_2	12.8 mV	-14.0 mV

(2) $f = 95.00 \text{ Hz}$ 时 $B_r = 4.40 \text{ mV}$ $H_c = 11.2 \text{ mV}$

$f = 150.04 \text{ Hz}$ 时 $B_r = 2.32 \text{ mV}$ $H_c = 6.00 \text{ mV}$

(3) $f = 50 \text{ Hz}$ $I_m = 0.1 \text{ A}$ $H = \frac{N_1}{L} i$ $H = \frac{N_1}{L} \cdot 0.1 = \frac{150}{0.130} \times 0.1 \text{ A}$
 $N_1 = 150$ $L = 0.130$ $H = \frac{15}{0.13} \text{ A}$
 $U \Rightarrow 200 \text{ mV}$

$R_2 \times 10^3 \Omega$ 0.015 0.055 0.55
 $C \times 10^{-6} \text{ F}$
 $\times 10^{-3}$



2.

$$f = 100 \text{ Hz}$$

$$R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = 50 \text{ k}\Omega \quad C = 10.0 \text{ }\mu\text{F}$$

(Hm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
U_p (mV)						9.80	5.60	6.80	9.60	11.2	12.0	12.8	14.0		15.6	16.4	16.8	16.8			
U_c (mV)	0	1.08	3.20					10.4													17.6

(Hm) U_p (mV)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
U_c (mV)	18.0	18.4	18.4	18.8	19.2	19.2	19.6	19.6	20.0	20.0

$$u_1 = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{100H} \quad \text{自题由上表计算}$$

思考: 先求 U_c 或是 U_p

3.

$$H_m = 400 \text{ A/m}$$

$$H = \frac{N_1}{L} U_{p1} \quad U_{p1} = \frac{H L R_1}{N_1} = \frac{0.075 \times 2}{150 \times 400} = \frac{0.050}{150} \cdot 400 = 400 \cdot 10^{-3} = 0.4 \text{ mV}$$

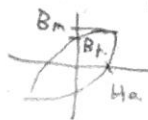
$$\text{样品 2 中} \quad L = 0.075 \text{ m} \quad N_1 = 150 \quad R_1 = 2 \Omega$$

$$f = 20 \text{ Hz} \quad 40 \text{ Hz} \quad 60 \text{ Hz}$$

$$(B_m) \quad \frac{34.4 \text{ mV}}{4.4 \text{ mV}} \quad 35.2 \text{ mV} \quad 34.4 \text{ mV}$$

$$(B_r) \quad \frac{21.6}{22.6} \quad 23.6 \text{ mV} \quad 24.0 \text{ mV}$$

$$(H_c) \quad \frac{15.2 \text{ mV}}{120 \text{ mV}} \quad 128 \text{ mV} \quad 152 \text{ mV}$$



4. (H) 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 16 18 20

$V_R = 0$

I_{cm}	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
U_a	(cmV)	3.28	4.24	4.24	1.66	2.96	0.96	1.92	1.36
$1/p$	(cmV)	2.08	4.08	6.50	4.24	7.76	2.88	9.84	9.84
K									

0.09	0.10	0.20	0.30	此后 Y 不再变化.
1.04	1.04	0.24	0.24	
9.84	9.84	9.84	9.84	

12.14

2.2