

动态磁滞回线的测量

班级 18 级软件 6 班 姓名 乔翱 学号 201811040809

一、实验目的

- 1.掌握磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念，加深对铁磁材料的主要物理量：矫顽力、剩磁和磁导率的理解。
- 2.学会用示波法测绘基本磁化曲线和磁滞回线。
- 3.根据磁滞回线确定磁性材料的饱和磁感应强度、剩磁和矫顽力的数值。

二、实验原理

1.铁磁材料的磁滞性质

铁磁材料除了具有高的磁导率外，另一重要的特点就是磁滞。当材料磁化时，磁感应强度 B 不仅与当时的磁场强度 H 有关，而且决定于磁化的历史情况，如图 1 所示。曲线 OA 表示铁磁材料从没有磁性开始磁化，磁感应强度 B 随 H 的增加而增加，称为磁化曲线。当 H 增加到某一值 H_s 时， B 几乎不再增加，说明磁化已达到饱和。材料磁化后，如使 H 减小， B 将不沿原路返回，而是沿另一条曲线 $A'CA$ 下降。当 H 从 $-H_s$ 增加时， B 将沿 $A'C'A$ 曲线到达 A ，形成一闭合曲线称为磁滞回线，其中 $H=0$ 时， $|B|=B_r$ ， B_r 称为剩余磁感应强度。要使磁感应强度 B 为零，就必须加一反向磁场 $-H_c$ ， H_c 称为矫顽力。各种铁磁材料有不同的磁滞回线，主要区别在于矫顽力的大小，矫顽力大的称为硬磁材料，矫顽力小的称为软磁材料。

由于铁磁材料的磁滞特性，磁性材料所处的某一状态必然和它的历史有关。为了使样品的磁特性能重复出现，也就是指所测得的基本磁化曲线都是由原始状态($H=0, B=0$)开始，在测量前必须进行退磁，以消除样品中的剩余磁性。

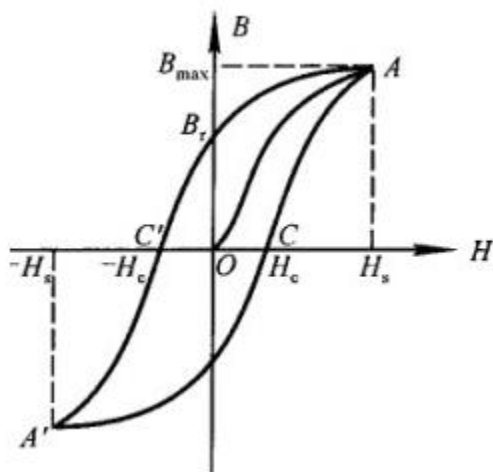


图 1 B-H 磁滞回线

2.示波器测量磁滞回线的原理

图 2 所示为示波器测动态磁滞回线的原理电路。将样品制成闭合的环形，然后均匀地绕以磁化线圈 N_1 及副线圈 N_2 ，即所谓的罗兰环。交流电压 u 加在磁化线圈上， R_1 为取样电阻，其两端的电压 u_1 加到示波器的 x 轴输入端上。副线圈 N_2 与电阻 R_2 和电容串联成一回路。电容 C 两端的电压 u_c 加到示波器的 y 输入端上。

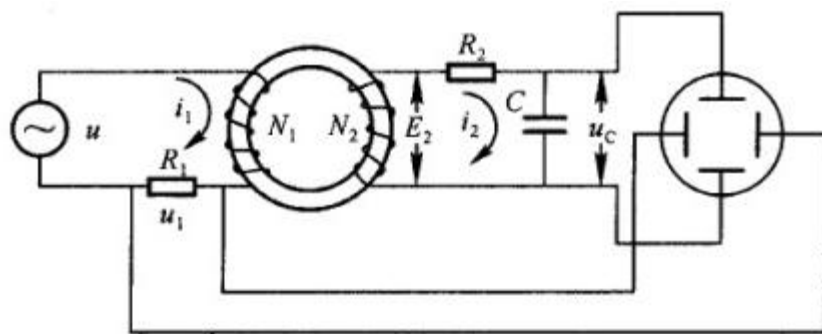


图 2 用示波器测动态磁滞回线的原理图

(1) u_x (x 轴输入)与磁场强度 H 成正比

若样品的平均周长为 l ，磁化线圈的匝数为 N_1 ，磁化电流为 i_1 (瞬时值)，根据安培环路定理，有 $Hl=N_1i_1$ ，而 $u_1 = R_1i_1$ ，所以

$$u_1 = \frac{R_1 l}{N_1} H \quad (1)$$

由于式中 R_1 、 I 和 N_1 皆为常数，因此，该式清楚地表明示波器荧光屏上电子束水平偏转的大小(u_1)与样品中的磁场强度(H)成正比。

(2) u_c (y 轴输入)在一定条件下与磁感应强度 B 成正比

设样品的截面积为 S，根据电磁感应定律，在匝数为 N_2 的副线圈中，感应电动势应为

$$E_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

此外，在副线圈回路中的电流为 i_2 且电容 C 上的电量为 q 时，又有

$$E_2 = R_2 i_2 + \frac{q}{C} \quad (3)$$

考虑到副线圈匝数 N_2 较小，因而自感电动势未加以考虑，同时， R_2 与 C 都做成足够大，使电容 C 上的电压降($u_c=q/C$)比起电阻上的电压降 $R_2 \cdot i_2$ 小到可以忽略不计。于是式(3)可以近似的改写为

$$E_2 = R_2 i_2 \quad (4)$$

将关系式 $i_2 = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}$ 代入式(4)，得

$$E_2 = R_2 C \frac{du_c}{dt} \quad (5)$$

将上式与式(2)比较，不考虑其负号(在交流电中负号相当于相位差 $\pm\pi$)时，应有

$$N_2 S \frac{dB}{dt} = R_2 C \frac{du_c}{dt}$$

将两式两边对时间积分，由于 B 和 u_c 都是交变的，故积分常数为 0。整理后得

$$u_c = \frac{N_2 S}{R_2 C} B \quad (6)$$

由于 N_2 、 S 、 R_2 和 C 皆为常数，因此该式表明了示波器的荧光屏上竖直方向偏转的大小(u_C)与磁感强度(B)成正比。

由此可见，在磁化电流变化的一周期内，示波器的光点将描绘出一条完整的磁滞回线，并在以后每个周期都重复此过程，这样在示波器的荧光屏上将看到一稳定的磁滞回线图线。

(3) 测量标定

本实验不仅要求能用示波器显示出待测材料的动态磁滞回线，而且要能使用示波器定量观察和分析磁滞回线。因此，在实验中还需确定示波器荧光屏上 x 轴(即 H 轴)的每一小格实际代表多少磁场强度， y 轴(即 B 轴)的每一小格实际代表多少磁感应强度，这就是测量标定问题。

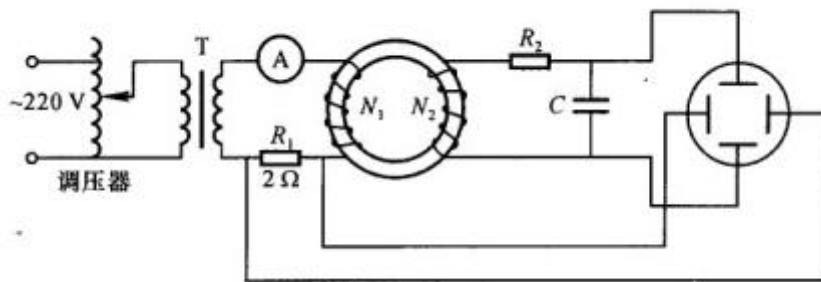


图3 测动态磁滞回线的实际线路图

1) x 轴(H 轴)标定

x 轴标定操作的目的是标定 H 。具体而言就是确定示波器荧光屏 x 轴(即 H 轴)的每一小格实际代表多少磁场强度。由式(1)可见，若设法测出光点沿 x 轴偏转的大小与电压 u_1 的关系，就可确定 H 。具体标定 H 的线路图如图4所示。其中交流电表 A 用于测量 u_0 (请注意 A 的指示是 i_0 的有效值 I_0)。调节 I_0 使荧光屏上水平线长度为 M_x 格，它对应于 u_1 且为峰峰值，即 $2\sqrt{2}R_1I_0$ ，因此，每一小格所代表的 u_1 的值为 $2\sqrt{2}R_1I_0/M_x$ 。这样由式(1)就可知荧光屏每一小格所代表的磁场强度 H 是

$$H_0 = \frac{2\sqrt{2}N_1I_0}{lM_x} \quad (7)$$

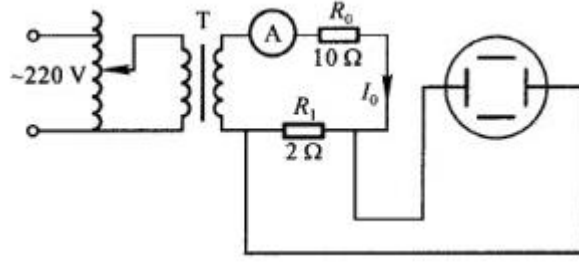


图 4 x 轴(H)轴标定线路图

值得注意的是，标定线路中应将被测样品去掉，而代之以一个纯电阻 R_0 。这主要是因为被测样品是铁磁材料，它的 B 和 H 的关系是非线性的，从而使电路中的电流产生非正弦形畸变。 R_0 起限流作用，标定操作中应使 I_0 不超过 R_0 允许的电流。

2) y 轴(B 轴)标定

y 轴标定操作的目的是标定 B ，具体而言就是确定 y 轴(B 轴)的每一小格实际代表多少磁感应强度。具体标定 B 的线路如图 5 所示。图中 M 是一个标准互感器。

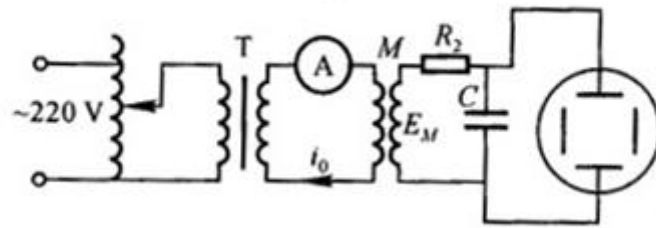


图 5 y 轴(B 轴)标定线路图

流经互感器原边的瞬时电流为 i_0 ，则互感器副边中的感应电动势 E_0 为

$$E_0 = -M \frac{di_0}{dt}$$

类似于式(5)，又有

$$M \frac{di_0}{dt} = R_2 C \frac{du_c}{dt}$$

对上式两边积分，可得

$$u_c = \frac{M i_0}{R_2 C} \quad (8)$$

由于 A 测出的是 i_0 的有效值 I_0 ，所以对应于 u_c 的有效值 U_c ，有

$$u_c = MI_0/R_2C$$

而相应的峰峰值为 $2\sqrt{2}MI_0/R_2C$ 。

若此时对应 U_c 峰峰值的垂直线总长主度为 M_y ，则根据(6)可得，y 轴每一小格所代表的磁感应强度为

$$B_0 = \frac{2\sqrt{2}MI_0}{N_2SM_y} \quad (9)$$

应注意实验中，不要使 I_0 超过互感器所允许的额定电流值。

三、实验内容

1. 示波器的校准

打开示波器窗体，点击开关按钮，打开示波器电源。调节辉度旋钮、聚焦旋钮，并将校准信号接入示波器，分别对示波器 CH1 通道和 CH2 通道进行校准。详细操作过程见仿真实验中实验指导和在线演示。

2. 仪器的调节

(1)按图 3 所示线路接线，调节示波器，使光点调至荧光屏正中心。示波器的 x 轴增益置“50mV”档，y 轴增益置“0.1V”档，可适当调整 x、y 的增幅，使荧光屏上得到大小适中的磁滞回线。调节可调隔离变压器，从零开始逐步增大磁化电流，使磁滞回线上的 B 值能达到饱和。

(2)样品的退磁：缓慢调节调压器的输出电压，使励磁电流从最大值每次减小 20mA 左右，直至调为零，重新增大励磁电流使样品达到磁滞饱和，若磁滞回线闭合则样品被完全退磁，否则重复退磁操作，直至退磁完成。

(3)退磁完成后，重新调节可调隔离变压器电压为 80V，使荧光屏上得到大小适中的磁滞回线，并记录饱和磁化电流 I 的大小。

3. 测量动态磁滞回线以及基本磁化曲线

(1)将电源电压从 0V 逐渐调节到 100V，以每小格为单位测若干组 B、H 的坐标值。并记录电压为 80V 时饱和磁滞回线的顶点(A)、剩磁(B_r)、矫顽力(H_c)三个点的读数。

(2)测量基本磁化曲线，将电源电压从 0V 逐渐调节到 100.0V，每隔 10V 记录当前电流值以及磁滞回线的顶点坐标值，并将各个磁滞回线的顶点进行连接即可得到基本磁化曲线。

(3)标定 H, 按图 4 接线, 依次逐渐增大线路中的电流值分别为 0.02mA、0.04 mA、0.06 mA、0.08mA、0.10 mA、0.12 mA, 并记录下不同电流时示波器对应的格数, 根据公式求出示波器单位每小格表示的磁场强度 H_0 。

4.标定 B, 按图 5 接线, 依次逐渐增大线路中的电流值分别为 0.05mA、0.10 mA、0.15 mA、0.20 mA、0.25 mA、0.30 mA, 记录下不同电流时示波器对应的格数, 并根据公式求出示波器单位每小格表示的磁感应强度 B_0 。

5.将标定的结果带入测基本磁化曲线数据表格, 求出对应不同电压时的 H_m 、 B_m 以及相对磁导率 μ_a 。

四、实验数据记录

1.测饱和磁滞回线。

80V 的电流 (A) = 0.61

表 1 饱和磁滞回线的 H_m 、 B_m 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c

主要仪器：可调隔离变压器、示波器 精度：1 个小格 实验台号：无

测量量	H_m	B_m	H_c	B_r
格数（小格）	12.2	11.0	5.0	7.5

2.测基本磁化曲线。

表 2 磁滞回线的顶点坐标值 B_m 和 H_m

主要仪器：可调隔离变压器、示波器、交流电流表 精度：1 个小格 实验台号：无

电压（V）	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U_x （小格）	2.8	3.7	4.0	4.9	6.0	7.5	9.8	12.0	15.1	19.0
U_y （小格）	1.5	3.0	4.7	6.0	7.2	8.5	10.0	11.1	12.0	12.5
$H_m(A/m)$	24.74	32.69	35.34	43.30	53.02	66.27	86.59	106.03	133.42	167.88
B_m （T）	0.0326	0.0651	0.1020	0.1302	0.1562	0.1844	0.2170	0.2409	0.2604	0.2712
磁导率 μ	1046.9	1584.6	2296.3	2293.0	2345.2	2214.9	1994.2	1807.7	1553.1	1285.7

3.标定磁场强度 H。

表 3 标定磁场强度数据表格

主要仪器：可调隔离变压器、示波器、交流电流表 精度：1 小格 实验台号：无

电流值（A）	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12
M_x （小格）	8.0	15.6	24.0	33.0	40.0	48.0
H_0 （A/m）	9.00	9.23	9.00	8.73	9.00	9.00

50mV 档位每小格对应的磁场强度 H_0 （A/m）= 8.996

4. 标定磁感应强度 B。

表 4 标定磁感应强度数据表格。

主要仪器：可调隔离变压器、示波器、交流电流表 精度：1 小格 实验台号：无

电流值 (A)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
My (小格)	6.2	13.8	20.0	26.2	32.6	40.0
B ₀ (T)	0.0229	0.0206	0.0213	0.0217	0.0218	0.0213

0.1V 档位每小格对应的磁感应强度 B₀ (T) = 0.02160

五、数据处理

1、标定磁场强度 H

$$H_{0i} = \frac{2N_1 \times I_{0i} \times \sqrt{2}}{l \times M_{xi}}, \text{ 其中 } N_1 = 600, l = 47.123\text{cm}.$$

$$H_{01} = \frac{2N_1 \times I_{01} \times \sqrt{2}}{l \times M_{x1}} = \frac{2 \times 600 \times 0.02 \times \sqrt{2}}{0.47123 \times 8.0} = 9.00(A/m)$$

$$H_{02} = \frac{2N_1 \times I_{02} \times \sqrt{2}}{l \times M_{x2}} = \frac{2 \times 600 \times 0.04 \times \sqrt{2}}{0.47123 \times 15.6} = 9.23(A/m)$$

$$H_{03} = \frac{2N_1 \times I_{03} \times \sqrt{2}}{l \times M_{x3}} = \frac{2 \times 600 \times 0.06 \times \sqrt{2}}{0.47123 \times 24.0} = 9.00(A/m)$$

$$H_{04} = \frac{2N_1 \times I_{04} \times \sqrt{2}}{l \times M_{x4}} = \frac{2 \times 600 \times 0.08 \times \sqrt{2}}{0.47123 \times 33.0} = 8.73(A/m)$$

$$H_{05} = \frac{2N_1 \times I_{05} \times \sqrt{2}}{l \times M_{x5}} = \frac{2 \times 600 \times 0.10 \times \sqrt{2}}{0.47123 \times 40.0} = 9.00(A/m)$$

$$H_{06} = \frac{2N_1 \times I_{06} \times \sqrt{2}}{l \times M_{x6}} = \frac{2 \times 600 \times 0.12 \times \sqrt{2}}{0.47123 \times 48.0} = 9.00(A/m)$$

$$\therefore H_0 = \frac{H_{01} + H_{02} + H_{03} + H_{04} + H_{05} + H_{06}}{6} = \frac{9.00 + 9.23 + 9.00 + 8.73 + 9.00 + 9.00}{6} = 8.996(A/m)$$

2、标定磁感应强度 B

$$B_{0i} = \frac{2M \times I_{0i} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{yi}}, \text{ 其中 } N_2 = 75, M = 0.01H, S = 1.3273cm^2$$

$$B_{01} = \frac{2M \times I_{01} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{y1}} = \frac{2 \times 0.01 \times 0.05 \times \sqrt{2}}{75 \times 0.00013273 \times 6.2} = 0.0229(T)$$

$$B_{02} = \frac{2M \times I_{02} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{y2}} = \frac{2 \times 0.01 \times 0.10 \times \sqrt{2}}{75 \times 0.00013273 \times 13.8} = 0.0206(T)$$

$$B_{03} = \frac{2M \times I_{03} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{y3}} = \frac{2 \times 0.01 \times 0.15 \times \sqrt{2}}{75 \times 0.00013273 \times 20.0} = 0.0213(T)$$

$$B_{04} = \frac{2M \times I_{04} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{y4}} = \frac{2 \times 0.01 \times 0.20 \times \sqrt{2}}{75 \times 0.00013273 \times 26.2} = 0.0217(T)$$

$$B_{05} = \frac{2M \times I_{05} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{y5}} = \frac{2 \times 0.01 \times 0.25 \times \sqrt{2}}{75 \times 0.00013273 \times 32.6} = 0.0218(T)$$

$$B_{06} = \frac{2M \times I_{06} \times \sqrt{2}}{N_2 \times S \times M_{y6}} = \frac{2 \times 0.01 \times 0.30 \times \sqrt{2}}{75 \times 0.00013273 \times 40.0} = 0.0213(T)$$

$$\therefore B_0 = \frac{B_{01} + B_{02} + B_{03} + B_{04} + B_{05} + B_{06}}{6} = \frac{0.0229 + 0.0206 + 0.0213 + 0.0217 + 0.0218 + 0.0213}{6} = 0.02160(T)$$

3、测量基本磁化曲线

已知

$$H_m = U_x \cdot H_0, \text{ 其中已计算得 } H_0 = 8.996(A/m)$$

$$B_m = U_y \cdot B_0, \text{ 其中已计算得 } B_0 = 0.02160(T)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{H \cdot 4\pi \times 10^{-7}}$$

$$\therefore H_{m1} = 2.8 \times 8.996 = 24.74(A/m), B_{m1} = 1.5 \times 0.02160 = 0.0324(T), \mu_{r1} = \frac{0.0324}{24.74 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 1046.9$$

$$H_{m2} = 3.7 \times 8.996 = 32.69(A/m), B_{m2} = 3.0 \times 0.02160 = 0.0648(T), \mu_{r2} = \frac{0.0648}{32.69 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 1584.6$$

$$H_{m3} = 4.0 \times 8.996 = 35.34(A/m), B_{m3} = 4.7 \times 0.02160 = 0.1015(T), \mu_{r3} = \frac{0.1015}{35.34 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 2296.3$$

$$H_{m4} = 4.9 \times 8.996 = 43.30(A/m), B_{m4} = 6.0 \times 0.02160 = 0.1296(T), \mu_{r4} = \frac{0.1296}{43.30 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 2293.0$$

$$H_{m5} = 6.0 \times 8.996 = 53.98(A/m), B_{m5} = 7.2 \times 0.02160 = 0.1565(T), \mu_{r5} = \frac{0.1565}{53.98 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 2245.2$$

$$H_{m6} = 7.5 \times 8.996 = 66.27(A/m), B_{m6} = 8.5 \times 0.02160 = 0.1836(T), \mu_{r6} = \frac{0.1836}{66.27 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 2214.9$$

$$H_{m7} = 9.8 \times 8.996 = 86.59(A/m), B_{m7} = 10.0 \times 0.02160 = 0.2160(T), \mu_{r7} = \frac{0.2160}{86.59 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 1994.2$$

$$H_{m8} = 12.0 \times 8.996 = 106.32(A/m), B_{m8} = 11.1 \times 0.02160 = 0.2400(T), \mu_{r8} = \frac{0.2400}{106.32 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 1807.7$$

$$H_{m9} = 15.1 \times 8.996 = 133.42(A/m), B_{m9} = 12.0 \times 0.02160 = 0.2592(T), \mu_{r9} = \frac{0.2592}{133.42 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 1553.1$$

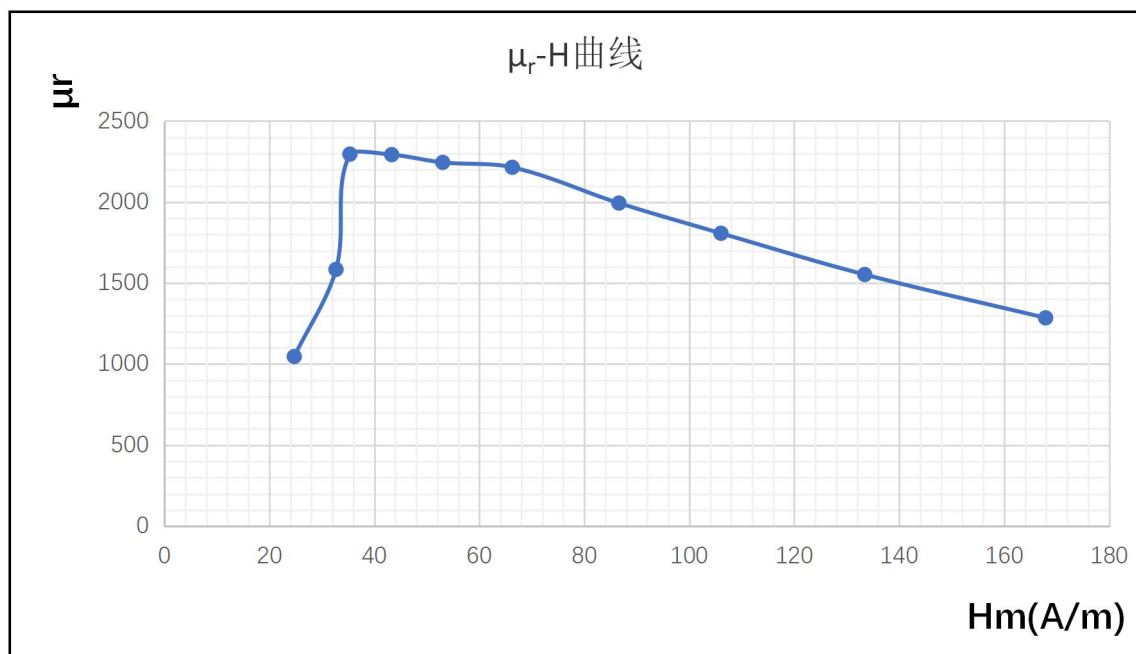
$$H_{m10} = 19.0 \times 8.996 = 167.88(A/m), B_{m10} = 12.5 \times 0.02160 = 0.2700(T), \mu_{r10} = \frac{0.2700}{167.88 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 1285.7$$

计算 B_m, B_r, H_c

$$B_m = 11.0 \times 0.02160 = 0.2376(T)$$

$$B_r = 7.5 \times 0.02160 = 0.1620(T)$$

$$H_c = 5.0 \times 8.996 = 44.98(A/m)$$



误差分析：

- 1、仪器精度产生的误差。
- 2、环境因素造成的误差，例如：光照、温度等。
- 3、仪器磨损、老化造成的误差。