

用示波器观测动态磁滞回线 实验报告

隋源 2000011379 11 号

Apr 15 2022

1 实验数据与处理

1.1 铁氧体的饱和动态磁滞回线

1.1.1 $f=100\text{Hz}$ 时的饱和磁滞回线

测量 $f=100\text{ Hz}$, $R_1=20\Omega$, $R_2=5\times 10^4\Omega$, $C=10\mu\text{F}$ 时的电阻和电容电压值的李萨如图形, 根据实验原理

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

可以得到交流输出最大时铁氧体的饱和动态磁滞回线。实验数据如下表

$U_{Ru}(\text{mV})$	$U_{Cu}(\text{mV})$	$H_u(\text{A/m})$	$B_u(\text{mT})$	$U_{Rd}(\text{mV})$	$U_{Cd}(\text{mV})$	$H_d(\text{A/m})$	$B_d(\text{mT})$
-250	-14.50	-144	-403	-250	-14.50	-144	-403
-99.0	-11.00	-57.1	-306	-99.0	-12.55	-57.1	-349
-87.0	-10.25	-50.2	-285	-49.0	-10.15	-28.3	-282
-44.0	-5.45	-25.4	-151	-7.00	-5.00	-4.04	-139
0	3.95	0	110	0	-4.00	0	-111
-18.0	0	-10.4	0	20.0	0	11.5	0
8.00	5.15	4.62	143	46.0	5.10	26.5	142
51.0	10.25	29.4	285	90.0	10.40	51.9	289
100	12.55	57.7	349	100	11.00	57.7	306
250	14.55	144	404	250	14.55	144	404

表 1: $f=100\text{Hz}$ 时的饱和磁滞测量数据

考虑到零点修正, 从表中得到上下两支的数据平均得到饱和磁感应强度、剩余磁感应强度和矫顽力的测量值

$$B_s = 404\text{mT}, \quad B_r = 110\text{mT}, \quad H_c = 11.0\text{A/m}$$

根据表中数据可以作出 100Hz 时铁氧体的饱和磁滞回线

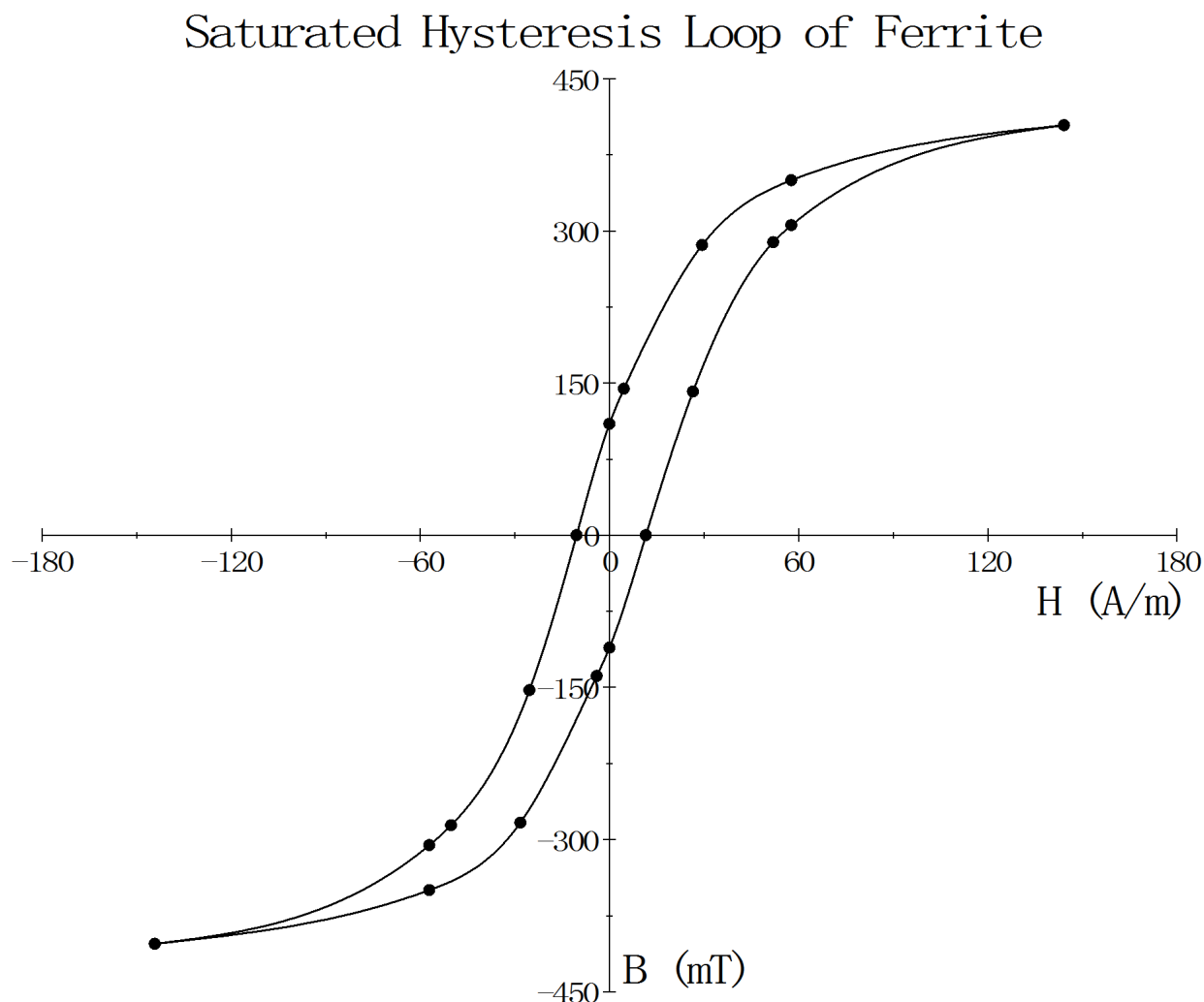


图 1: $f = 100\text{Hz}$ 时的饱和磁滞回线

1.1.2 不同频率下的剩余磁感应强度和矫顽力变化

保持 R_1, R_2, C 不变, 依次测量 $f = 50, 100, 150\text{Hz}$ 时的剩余磁感应强度 B_r 和矫顽力 H_c 的值, 得到原始电压数据

根据零点修正将正负电压平均, 之后代入公式算出各频率下剩余磁感应强度和矫顽力的测量值

$$B_r(50) = 111\text{mT}, \quad B_r(100) = 110\text{mT}, \quad B_r(150) = 112\text{mT}$$

$$H_c(50) = 11.0\text{A/m}, \quad H_c(100) = 11.0\text{A/m}, \quad H_c(150) = 11.0\text{A/m}$$

可以看出不同电压下剩余磁感应强度和矫顽力的值无太大差别。可以计算出此时示波器的测量精度 (根据原书 p51 计算得到)

$$\sigma_{U_C} = 0.08\text{mV}, \quad \sigma_{B_r} = 2\text{mT}$$

$f(\text{Hz})$	$U_{C+}(\text{mV})$	$U_{C-}(\text{mV})$	$U_{R+}(\text{mV})$	$U_{R-}(\text{mV})$
50	3.95	4.05	20.0	-18.0
100	3.95	4.00	20.0	-18.0
150	4.00	4.05	20.0	-18.0

表 2: 不同频率下的剩余磁感应强度和矫顽力电压数据

$$\sigma_{U_R} = 0.4\text{mV}, \quad \sigma_{H_c} = 0.2\text{A/m}$$

发现不同频率下的测量值差距都在示波器精度范围之内。由此可说明频率基本无影响。

1.1.3 不同积分常量对李萨如图的影响

更换电路中的积分常量 ($\tau = R_2C$) 发现李萨如图形产生不同程度的畸变。固定励磁电流 $I_m = 0.2\text{A}$, $R_1 = 2.0\Omega$, 频率 50Hz 时不同时间常数的李萨如图形如下

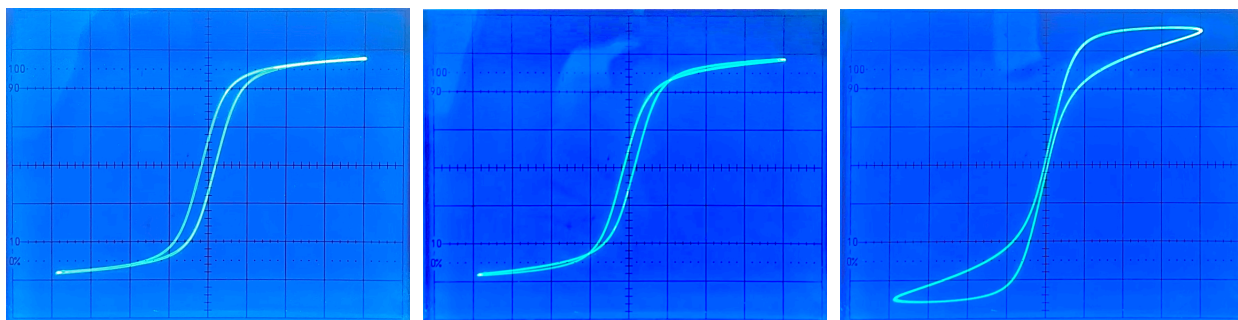


图 2: 从左到右 $\tau=0.5, 0.05, 0.01\text{s}$; CH2 分度值 5, 50, 200mV

从图中可以看出, 当积分常量较大时, 李萨如图可以反应磁滞回线的形状; 当积分常量较小时, 由于电容充电速度过快, 将会产生图形畸变。这是因为

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

仅在 $\tau = 1/R_2C \gg T$ 时成立, 当该条件无法满足时, 电容充电过快引起的暂态效应将会使磁滞曲线失真。上图当中, $T = 1/f = 0.02\text{s}$, 因而当时间常量为 0.5s 时, 李萨如图不会产生影响, 当时间常量缩小十倍甚至五十倍时, 这一现象就尤为明显。但是, 不同积分常量并不影响实际的磁滞回线, 只是当积分常量不再足够大时, 电容的电压将不能再反应磁感应强度的变化。

1.2 铁氧体的动态磁化曲线

1.2.1 $f=100\text{Hz}$ 时的动态磁滞回线

对样品退磁, 再逐步增大交变磁场幅值 (必须保证单向增大), 就可以测量铁氧体的初始磁化曲线。固定 $f=100\text{Hz}$, $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 5 \times 10^4\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$ 进行测量, 可根据得到的实验数据绘制如下的初始磁化曲线。(原始数据表见报告后附录)

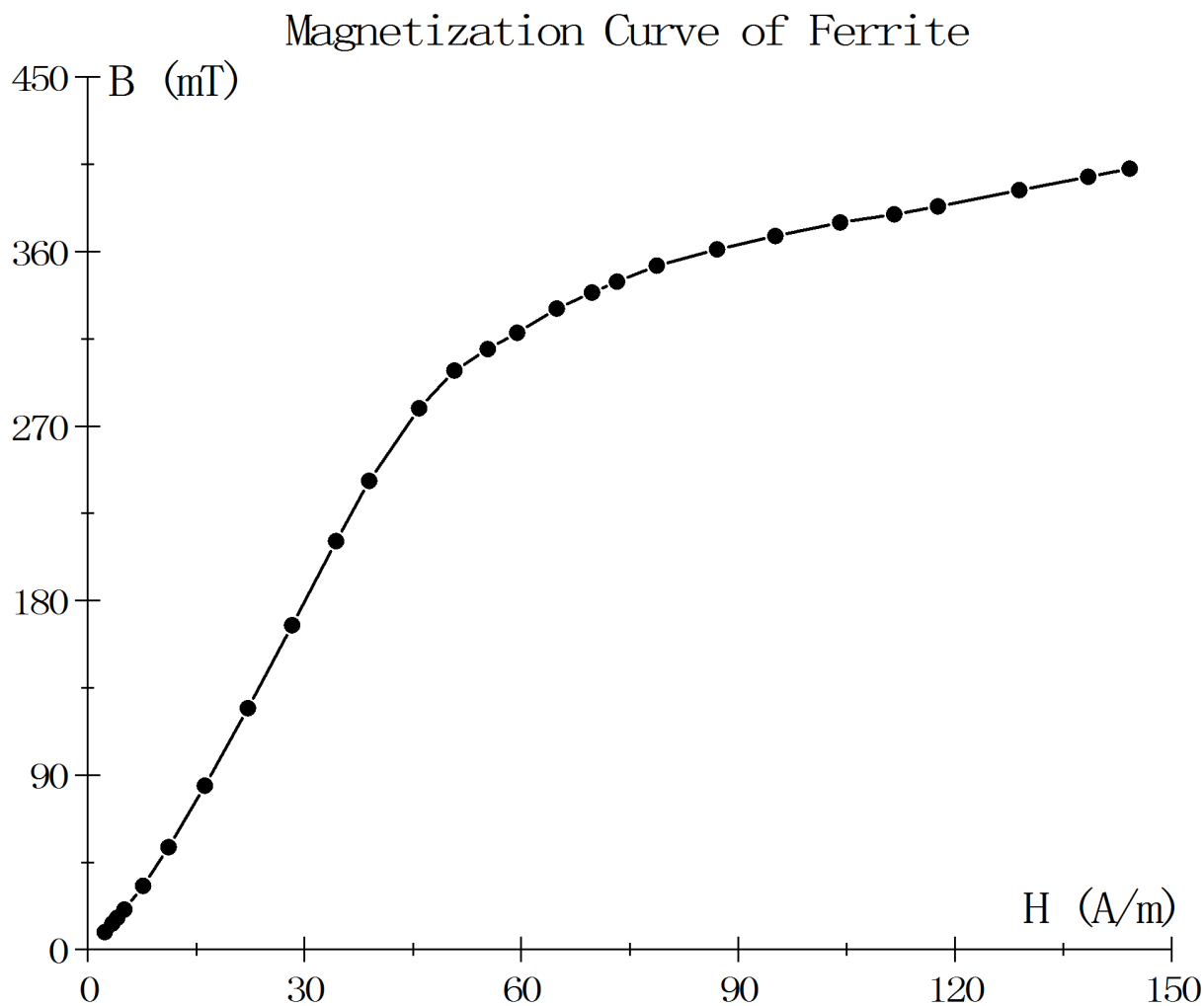


图 3: $f=100\text{Hz}$ 时的初始磁化曲线

可以看出初始磁化曲线的变化规律：随着磁场由小变大，磁感应强度始终增大，但增长速率由大变小，达到饱和后增长速率趋于稳定。

1.2.2 $\mu_m - H_m$ 曲线及变化规律

根据测量得到的数值计算出 H 和 B 的变化关系，之后便可根据公式

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

计算振幅磁导率和磁场强度的变化关系。（计算数据见报告后附录）将得到的数据绘成图，可以发现曲线的变化规律是先增后减，在 $H \approx 40\text{A/m}$ 处达到极值 $\mu_m \approx 5000$ ，初始值约为 3000，达到饱和时振幅磁导率约为 2000。 $\mu_m - H$ 关系图如下所示

Relation of Permeability and Magnetic Field Intensity

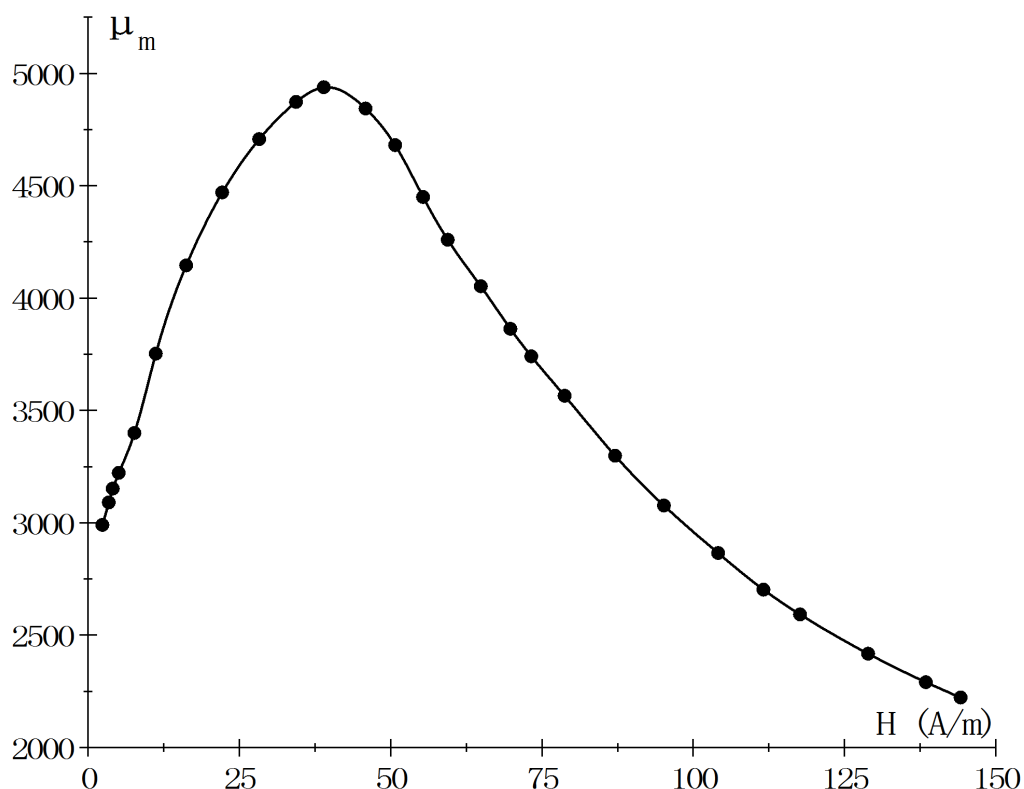


图 4: $f = 100\text{Hz}$ 时的振幅磁导率变化曲线

1.2.3 起始磁导率 μ_i

根据起始磁导率的定义，在磁场趋于 0 时的振幅磁导率即是起始磁导率。因而可以用第一个数据点的振幅磁导率（对应的 $2U_{R_1} < 10\text{mV}$ ）作为起始磁导率的测量值（原始数据见报告后附录）

$$\mu_i = 2990$$

1.3 硅钢磁滞回线的变化规律

给定 $H_m = 400\text{A/m}$, $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 5 \times 10^4\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$ ，观察不同频率下硅钢材料磁滞回线的变化规律，发现频率越大，曲线范围越大，面积越大，对应的能量损耗越大。测量得到的原始电压数据如下表

$f(\text{Hz})$	$U_{B_r+}(\text{mV})$	$U_{B_r-}(\text{mV})$	$U_{H_c+}(\text{mV})$	$U_{H_c-}(\text{mV})$	$U_{B_m+}(\text{mV})$	$U_{B_m-}(\text{mV})$
20	21.3	-20.4	102	-102	34.4	-33.5
40	22.2	-21.8	-118	120	34.1	-33.4
60	23.0	-22.4	139	-136	34.0	-33.4

表 3: 不同频率下的饱和、剩余磁感应强度和矫顽力电压数据

从图表中可以看出频率改变对饱和磁感应强度几乎无影响，考虑到零点修正，各频率的测量值为

$$B_m(20) = 943\text{mT}, \quad B_m(40) = 938\text{mT}, \quad B_m(60) = 936\text{mT}$$

最大差距不到千分之八，小于示波器的测量精度。另一方面，剩余磁感应强度和矫顽力随频率的变化却很明显，且在频率越大时越大。考虑到零点修正，各频率的测量值为

$$B_r(20) = 579\text{mT}, \quad B_r(40) = 611\text{mT}, \quad B_r(60) = 630\text{mT}$$

$$H_c(20) = 102\text{A/m}, \quad H_c(40) = 119\text{A/m}, \quad H_c(60) = 138\text{A/m}$$

这与磁滞回线随频率增大变宽的规律一致，应是随着磁场强度变化加快，滞回效应越明显的缘故。

2 思考题

2.1 铁磁材料的动态磁滞回线和静态磁滞回线在概念上的区别？动态磁滞回线的面积和形状受什么影响？

动态磁滞回线是在交变磁场下材料的磁滞回线，而静态磁滞回线是指磁场准静态变化过程中的磁滞回线，由于涡流效应等影响，动态磁滞曲线的形状和面积大小等都与准静态磁滞回线的不同。铁磁材料的动态磁滞回线会受到交流磁场幅度和频率的影响、同时还有铁磁材料自身形状与性质的影响。

2.2 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点？

在相同的回线尺度下，铁氧体的剩磁与矫顽力都比硅钢要小一些，因而在饱和和交流磁场下，铁氧体相对于硅钢会有范围面积更小的动态磁化曲线，耗能也更小。

2.3 怎样设置电路参量来保证示波器波形正确反映动态磁滞回线的形状？

要让电容上的电压正确反映磁感应强度，需满足 $RC \gg T$ ，即 RC 积分电路的时间常数远大于磁场强度的变化周期。

2.4 实验中如何判断磁滞回线绕行方向？

分析电路原理可知，H 变化导致 B 变化，H 相位领先于 B，因而磁滞回线一定是逆时针绕行的。这也可从磁滞回线围成的面积代表外磁场变化一个周期下来在铁磁体上的能量损耗来解释，如果顺时针绕行的话等于是磁体源源不断输出能量。

3 附录

$U_R(\text{mV})$	$U_C(\text{mV})$	$H(\text{A/m})$	$B(\text{mT})$	μ_m
4.10	0.320	2.37	8.89	2990
5.95	0.480	3.43	13.3	3091
7.05	0.580	4.07	16.1	3152
8.80	0.740	5.08	20.6	3222
13.3	1.18	7.67	32.8	3399
19.4	1.90	11.2	52.8	3753
28.1	3.04	16.2	84.4	4145
38.4	4.48	22.2	124	4470
49.0	6.02	28.3	167	4707
59.6	7.58	34.4	211	4873
67.5	8.70	38.9	242	4938
79.5	10.05	45.9	279	4844
88.0	10.75	50.8	299	4681
96.0	11.15	55.4	310	4450
103.0	11.45	59.4	318	4259
112.5	11.90	64.9	331	4053
121.0	12.20	69.8	339	3863
127.0	12.40	73.3	344	3741
136.5	12.70	78.8	353	3565
151.0	13.00	87.1	361	3299
165.0	13.25	95.2	368	3077
180.5	13.50	104	375	2866
193.5	13.65	112	379	2703
204.0	13.80	118	383	2592
223.5	14.10	129	392	2417
240.0	14.35	138	399	2291
250.0	14.50	144	403	2222

表 4: $f = 100\text{Hz}$ 时的初始磁化曲线数据