

实验三十 用示波器观测动态磁滞回线 实验报告

物理学院 2200011629 庄易诚

2024 年 6 月 4 日

目录

1	观测样品 1（铁氧体）的饱和动态磁滞回线	2
1.1	测量 $f=100\text{Hz}$ 时的饱和磁滞回线	2
1.2	观测不同频率时的饱和磁滞回线	3
1.3	在 $f = 50\text{Hz}$ 下，比较不同积分常量取值对李萨如图的影响	4
2	测量样品 1（铁氧体）的动态磁化曲线	5
3	观测不同频率下样品 2（硅钢）磁滞回线的变化规律	8
4	思考题	8
4.1	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的影响？	8
4.2	铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点？	9
4.3	本实验中, 电路参量应怎样设置才能保证 $U_{R_1} - U_C$ 所形成的李萨如图形正确反映材料动态磁滞回线的形状？	9
4.4	实验中如何判断磁滞回线绕行方向？	9

1 观测样品 1（铁氧体）的饱和动态磁滞回线

1.1 测量 $f=100\text{Hz}$ 时的饱和磁滞回线

实验参数为: $f = 100\text{Hz}$, $R_1 = 2.0\Omega$, $R_2 = 50k\Omega$, $C = 10.0\mu\text{F}$ 。环形铁氧体磁芯参数为: $l = 0.130\text{m}$, $S = 1.24 \times 10^{-4}\text{m}^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 。

调节电流使得磁滞回线饱和, 调节位置旋钮使得曲线中心对称。用示波器测出各点 U_{R1} 与 U_C 的电压值, 计算出相应的 H 与 B , 结果如下表所示:

表 1: 样品 1（铁氧体）的饱和磁滞回线测量数据表（上半支）

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{R1}(\text{mV})$	-378	-238	-158	-104	-38.0	0.00	20.0	45.0	85.0	124	129	362
$U_C(\text{mV})$	-15.10	-13.60	-12.90	-12.00	-9.40	-4.20	0.00	4.10	9.30	11.80	12.50	15.70
$H(\text{A/m})$	-218	-137	-91.0	-60.0	-21.9	0.00	11.5	26.0	49.0	71.5	97.5	209
$B(\text{mT})$	-406	-366	-347	-323	-253	-113	0.00	110	250	317	336	422

表 2: 样品 1（铁氧体）的饱和磁滞回线测量数据表（下半支）

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_{R1}(\text{mV})$	100	64.0	39.0	18.0	0.00	-22.0	-36.0	-59.0	-79.0	-127	-179	-378
$U_C(\text{mV})$	13.20	11.50	10.00	6.20	3.70	0.00	-3.60	-6.70	-9.00	-11.10	-12.20	-15.10
$H(\text{A/m})$	57.7	36.9	22.5	10.4	0.00	-12.7	-20.8	-34.0	-45.6	-73.3	-103	-218
$B(\text{mT})$	355	309	269	167	99.5	0.00	-96.8	-180	-242	-298	-328	-406

以 H 为横轴, B 为纵轴绘制出铁氧体的饱和磁滞回线, 如图 1 所示。为了消除零点选择带来的误差, 将表中测得的 $\pm B_s$ 、 $\pm B_r$ 、 $\pm H_c$ 的结果的绝对值分别取平均, 得到 B_s 、 B_r 、 H_c 的测量结果为:

饱和磁感应强度: $B_s = 414 \text{ mT}$

剩余磁感应强度: $B_r = 106 \text{ mT}$

矫顽力: $H_c = 12.1 \text{ A/m}$

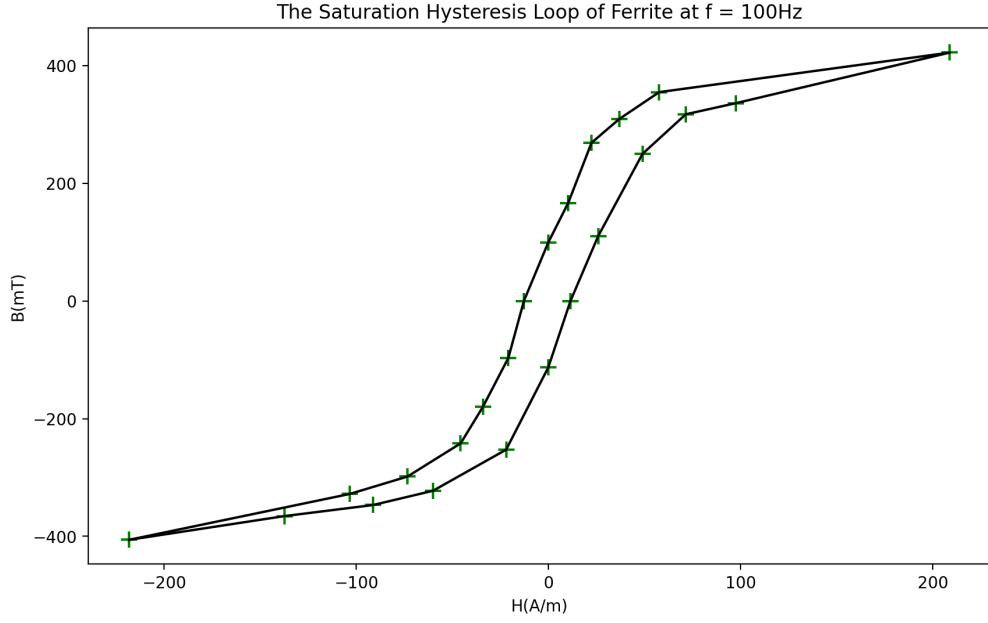


图 1: 铁氧体的饱和磁滞回线 ($f=100\text{Hz}$)

1.2 观测不同频率时的饱和磁滞回线

不同频率下，曲线外观并无明显变化。测得不同频率下 H_c 与 B_r 的数据如下表所示。其中 H_c 和 B_r 都由正反两个方向的测量值的绝对值取平均得到。

表 3: 不同频率下饱和磁滞回线特征量测量数据表

$f(\text{Hz})$	$U_{R1}(\text{mV})$	$U_{R2}(\text{mV})$	$U_{C1}(\text{mV})$	$U_{C2}(\text{mV})$	$H_c(\text{A/m})$	$B_r(\text{mT})$
50	-22.00	20.00	-4.60	3.40	12.1	108
100	-22.00	20.00	-4.20	3.70	12.1	106
150	-19.00	22.00	-4.40	3.50	11.8	106

可以看出， H_c 与 B_r 在不同频率下近似不变（最大误差在 3% 以内），磁滞回线形状无明显变化。这是因为铁氧体电阻率低，涡流损耗小，因此磁滞回线形状随频率变化不大。仅考虑 b 类不确定度， B_r 、 H_c 的不确定度计算公式如下：

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \bar{U} \cdot 2\% + U_{grid} \cdot 0.3\% \\ \sigma_{H_c} &= H_c \frac{\sigma_{bc}}{\bar{U}_R} \\ \sigma_{B_r} &= B_r \frac{\sigma_{br}}{\bar{U}_c}\end{aligned}$$

带入相关数值，估计 B_r 、 H_c 的不确定度为

$$\begin{aligned}\sigma_{H_c} &\approx 0.4 \text{ A/m} \\ \sigma_{B_r} &\approx 4 \text{ mT}\end{aligned}$$

1.3 在 $f = 50\text{Hz}$ 下，比较不同积分常量取值对李萨如图的影响

控制实验参数 $I_m = 0.2\text{A}$, $R_1 = 2.0\Omega$, 即控制 $2U_{R_1} = 0.8\text{V}$, 调整 R_2 、 C 使积分常量为 0.5s 、 0.01s 、 0.05s , 得到的磁滞回线分别如图 2、图 3、图 4 所示。

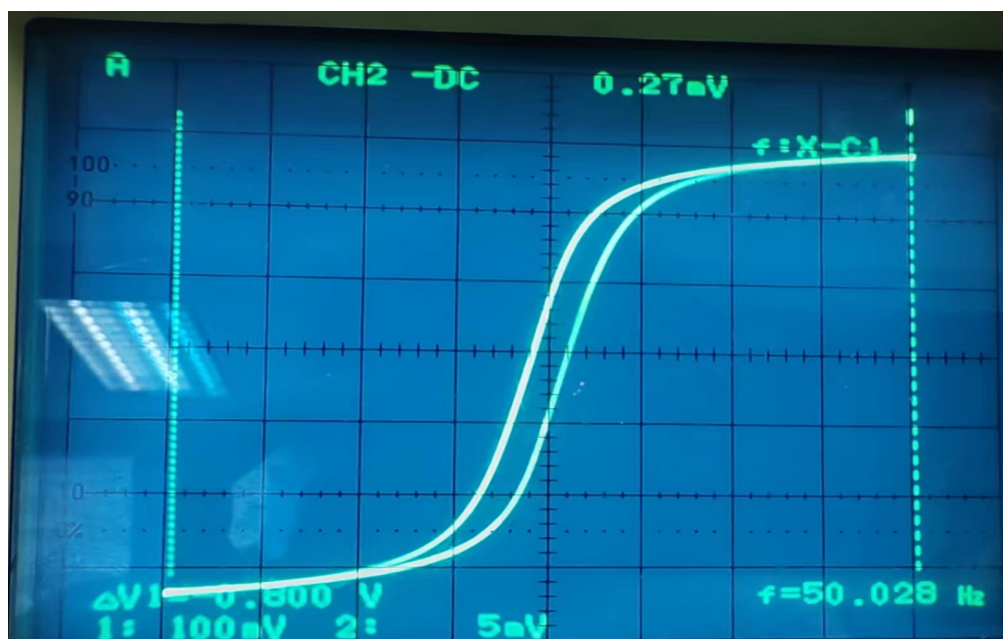


图 2: $R_2C = 0.5\text{s}$ 时的李萨如图形

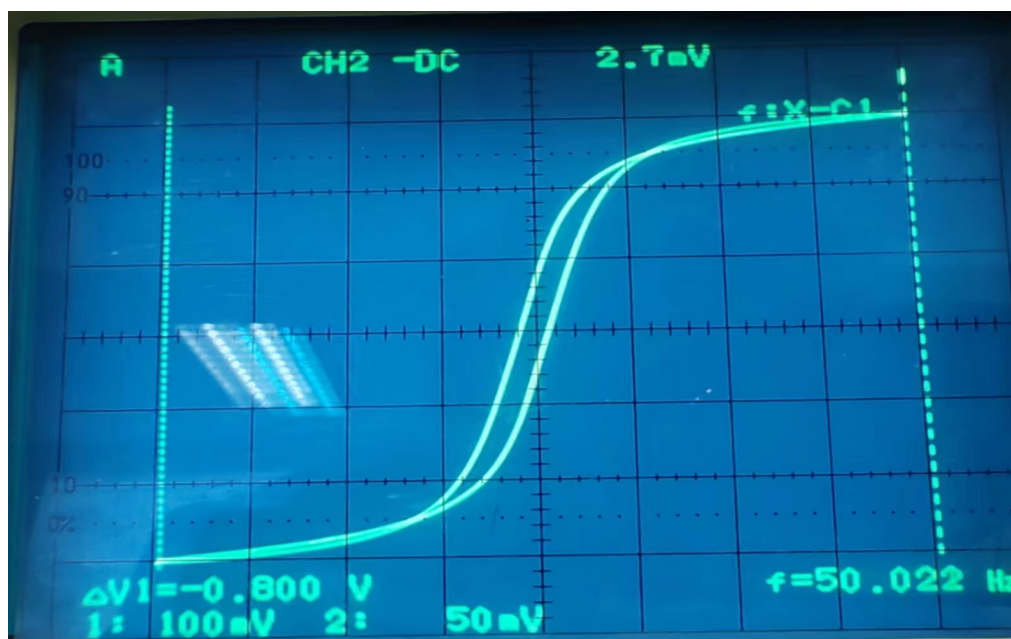


图 3: $R_2C = 0.05\text{s}$ 时的李萨如图形

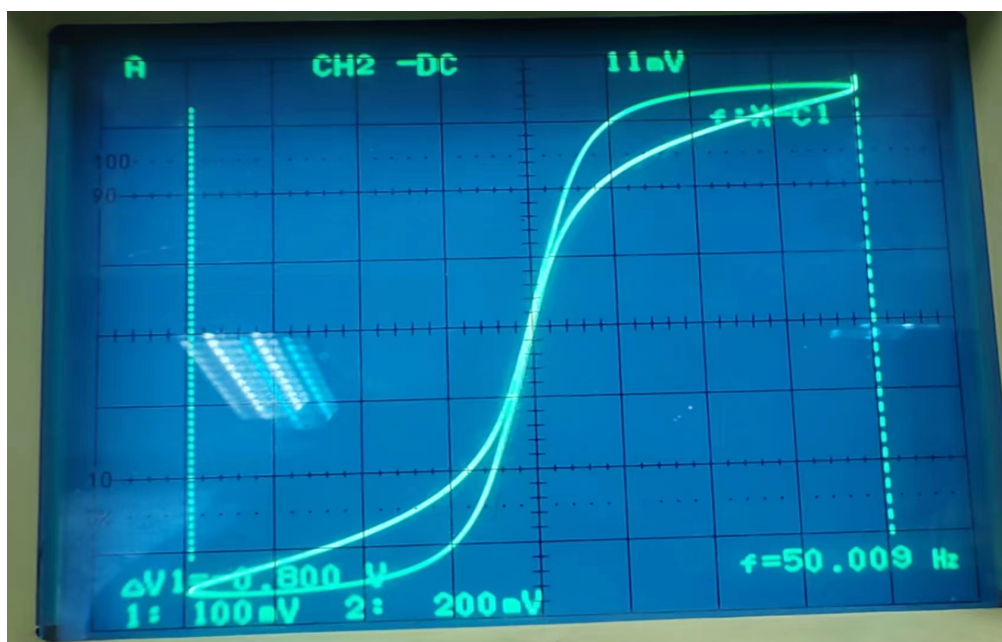


图 4: $R_2C = 0.1s$ 时的李萨如图形

从可以看出, $t = R_2C = 0.5s$ 时曲线没有畸变, $t = 0.1s$ 时曲线有轻微畸变, $t = 0.01s$ 时曲线剧烈畸变, 说明积分常数会影响李萨如图形的形状。这是因为在相同的频率下, 不同的积分常量会使得电阻分压不同。 t 越大, 电阻两边分压越大, 电容越接近理想积分器, 此时曲线越接近真实的磁滞回线。当 t 远大于外磁场周期时, 电容上的电压远小于总电压, 可以近似认为是理想积分器, 所以李萨如图形是正常的; 当 t 较小 (与磁场周期可以比拟) 时, 积分器的近似公式不再成立, 不能直接用总电压代替电阻上的分压, 总电压和电阻分压之间存在相位差, 因而电压和磁场之间存在相位差, 因此李萨如图形会存在畸变。但积分常数的改变对磁场本身没有任何影响, 不会改变 B 和 H 的真实值, 因此**不会影响真实的磁滞回线的形状**。

2 测量样品 1 (铁氧体) 的动态磁化曲线

固定 $f = 100Hz$, 取 $R_1 = 2.0\Omega$, $R_2 = 50k\Omega$, $C = 10.0\mu F$ 。先将信号源振幅增大直到磁滞回线饱和, 然后将振幅逐渐减小到 0 实现退磁。之后单调增加信号源的幅度, 测量 U_{R1} 与 U_c 的峰峰值, 计算出 H_m 、 B_m 、 μ_m , 测量与计算的结果如表 4 所示。以 H_m 为横轴, 分别以 B_m 、 μ_m 为纵轴, 绘制铁氧体的动态磁化曲线与 μ_m-H_m 图, 结果如图 5 和图 6 所示。

表 4: 铁氧体动态磁化曲线测量数据

测量次数	$2\Delta U_{R_1}(\text{mV})$	$2\Delta U_C(\text{mV})$	$H_m(\text{A/m})$	$B_m(\text{mT})$	$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}(\text{mV})$
1	5.30	0.400	1.53	5.38	2798
2	10.20	0.800	2.94	10.75	2908
3	17.00	1.40	4.90	18.82	3054
4	25.00	2.15	7.21	28.90	3189
5	33.50	3.00	9.66	40.32	3321
6	43.00	4.05	12.40	54.44	3492
7	51.00	5.30	14.71	71.24	3853
8	62.00	7.00	17.88	94.09	4186
9	77.00	8.95	22.21	120.30	4310
10	88.00	10.60	25.38	142.47	4466
11	101.0	12.35	29.13	165.99	4534
12	116.0	14.60	33.46	196.24	4667
13	127.0	15.80	36.63	212.37	4613
14	138.0	17.10	39.81	229.84	4595
15	147.0	18.10	42.40	243.28	4566
16	163.0	19.60	47.02	263.44	4459
17	182.0	21.00	52.50	282.26	4278
18	204.0	22.40	58.85	301.08	4071
19	225.0	23.60	64.90	317.20	3889
20	238.0	24.20	68.65	325.27	3770
21	253.0	25.00	72.98	336.02	3664
22	279.0	25.70	80.48	345.43	3416
23	315.0	26.90	90.87	361.56	3166
24	348.0	27.50	100.38	369.62	2930
25	412.0	28.50	118.85	383.06	2565
26	450.0	29.00	129.81	389.78	2390
27	538.0	29.80	155.19	400.54	2054
28	602.0	30.30	173.65	407.26	1866
29	734.0	31.00	211.73	416.67	1566
30	793.0	31.70	228.75	426.08	1482

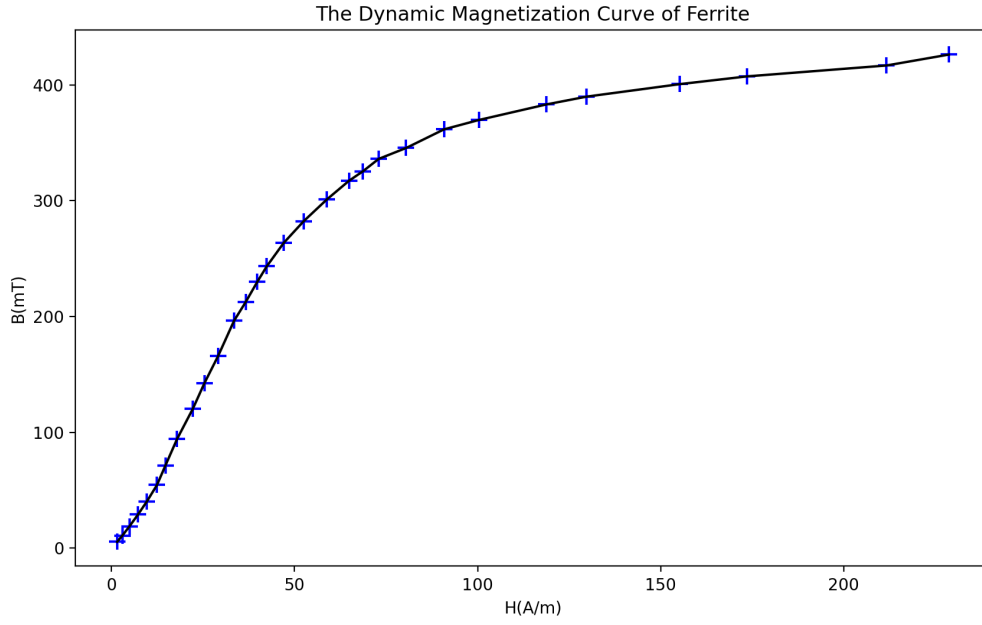


图 5: 铁氧体的动态磁化曲线

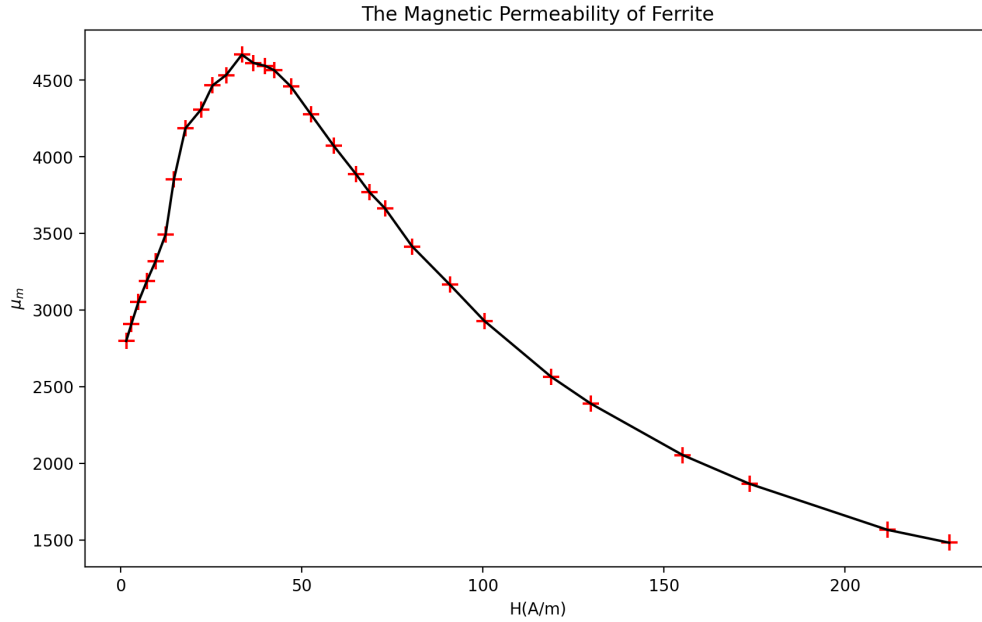


图 6: 铁氧体的振幅磁导率和 H_m 的关系图

图 5 显示随着 H_m 不断增大, B_m 也不断增大, 并且增速大体上先增加后减小。

使用原点附近的第一个值计算起始磁导率, 此时 $2\Delta U_{R1} < 10mV$, 使得第一个值在可逆区内。起始磁导率的测量结果为:

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} \approx \frac{B_1}{\mu_0 H_1} = 2798$$

起始磁导率大约在 2700-3000 附近。图 6 显示, 振幅磁导率从 2800 附近开始, 先随着 H_m 的增大而增大, 在达到 4700 左右的最大值后开始减小。这是因为开始时较小的 H 可以导致大量的铁磁极化, 当极化饱和后增大 H 对 B 的影响非常小 ($\mu_m \gg 1$), 因此振幅磁导率开始减小。

3 观测不同频率下样品 2（硅钢）磁滞回线的变化规律

硅钢的参数为： $l = 0.075\text{m}$, $S = 1.20 \times 10^{-4}\text{m}^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 。

固定 $H_m = 400\text{A/m}$ ，取 $R_1 = 2.0\Omega$ ， $R_2 = 50\text{k}\Omega$ ， $C = 10.0\mu\text{F}$ ，控制 $U_{R_1} = 0.4\text{V}$ 。分别取 f 为 20Hz、40Hz、60Hz，测量不同频率下 B_s 、 B_r 、 H_c 的值，结果如下：

表 5: 不同频率下磁滞回线的处理结果

$f(\text{Hz})$	$2\Delta U_{B_m}(\text{mV})$	$2\Delta U_{B_r}(\text{mV})$	$2\Delta U_{H_c}(\text{mV})$	$B_m(\text{mT})$	$B_r(\text{mT})$	$H_c(\text{A/m})$
20	68.9	41.8	205	926	562	102
40	69.3	45.2	232	931	608	116
60	69.6	47.3	276	935	637	138

可见 B_m 、 B_r 、 H_c 都随频率增大而增大，但 B_m 增长极其缓慢，变化不明显，而另外两个量增长较快。这是因为硅钢内部容易产生涡流，频率越高，涡流越强，能量损耗越大，使得磁滞回线的包围面积变大，相应的 B_r 、 H_c 增大。

4 思考题

4.1 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的影响？

概念差异：

静态磁滞回线：

静态磁滞回线是指外加磁场场强缓慢变化（准静态）时测得的磁感应强度与磁场场强的关系。这意味着磁场变化足够慢，使得材料内部的磁化过程能跟随外部的磁场变化。它主要反应了材料在缓慢变化磁场下的基本磁性能，如磁滞损耗、矫顽力、剩余磁感应强度等参数。它只依赖于材料本身的性质。

动态磁滞回线：

动态磁滞回线是在动态的快速交变磁场下测得的磁感应强度与磁场场强的关系。磁场变化速度很快，材料内部的磁化过程不能完全跟随外部的磁场变化。它不仅反应了材料的基本磁性能，也反应了磁滞效应和涡流效应引起的动态损耗。其损耗除了磁滞损耗之外还有涡流损耗和剩余损耗。此外，它的形状和面积往往会因为磁场变化速率的改变而发生变化。

动态磁滞回线的影响因素：

- **磁场场强的幅值：**在幅值足够小时，材料处于可逆区，故磁滞回线退化为直线，面积为 0。在幅值增大到一定程度后，材料饱和磁化，磁感应强度随后上升得不明显。在此期间，磁滞回线随着磁场振幅增加，尖端逐渐变尖，随后尖端进入饱和磁化的区域。磁滞回线面积在此处与磁滞损耗、磁场幅度相关。
- **频率：**外磁场变化的频率是影响动态磁滞回线最重要的因素之一。频率升高时，外磁场变化速率增加，动态磁滞回线会变宽，回线面积增加。这是因为磁畴壁移动的阻力和磁滞损耗会增大，同时涡流损耗也会增大。此外，在较低频率下，动态磁滞回线趋近于静态磁滞回线。
- **材料特性：**材料本身的涡流也会影响磁滞回线的形状与面积。对于电阻率低的材料，高频率时涡流大，动态损耗高，磁滞回线更宽，面积随之增大。此外，材料的磁性能也有影响，高矫顽力材料在动态条件下，磁化过程更难以跟随快速变化的外磁场，导致更宽的回线。高磁导率材料在高频

率下动态磁滞回线可能会有出较低的损耗和较窄的回线。几何因素也有影响，细长状的、薄片状的材料会有更小的涡流效应，从而有更小动态损耗，磁滞回线面积减小。

- **温度：**温度升高会增加电导率，进而加大涡流损耗。

4.2 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点？

铁氧体：

铁氧体电阻率较高。其动态磁化与频率的关系不大，主要影响因素是磁场的振幅。其动态磁滞回线往往较窄，在高频过程中磁滞损耗较低。这意味着铁氧体在高频下能够维持稳定。因此，铁氧体在高频应用中表现较好。其次，同等情况下铁氧体矫顽力和剩磁更小，更容易被磁化和去磁化。

硅钢：

硅钢电阻率较低。动态磁滞回线的形状在低频下较窄，损耗小。高频时涡流损耗较为明显，磁滞回线会变宽，改变频率可以显著地改变动态磁化。另外，硅钢的饱和磁化水平比铁氧体要高，适用于需要更大磁通的场景。

4.3 本实验中，电路参量应怎样设置才能保证 $U_{R_1} - U_C$ 所形成的李萨如图形正确反映材料动态磁滞回线的形状？

- 要选取合适的电阻电容参数。在实验中，影响李萨如图形的主要因素是积分器的不精确。当积分常数 R_2C 与磁场变化周期 T 数量级相当时， R_2 两边的分压就不能近似等于线圈两边的电压。因此需要满足 $R_2C \gg T$ 使得近似关系成立。本实验中， $T \approx 0.01s$ ， $R_2C = 0.5s \approx 50T$ ，因此近似关系可以成立。
- 要选择合适的信号源使频率、波形和振幅在合适范围内，易于观察。

4.4 实验中如何判断磁滞回线绕行方向？

- 可通过观察李萨如图形中 X，Y 方向信号的相位。具体而言，如果 X 方向信号的相位超前于 Y 方向信号，那么就是逆时针绕行，反之则为顺时针绕行。
- 也可以先调低频率，如 20Hz，此时可以观察到磁滞回线的闪动，据此就可以判断出绕行的方向。