

浙江大学

物理实验报告

实验名称：铁磁材料的磁滞回线
和基本磁化曲线

实验桌号：12

指导教师：陈水桥

班级：

姓名：

学号：

实验日期：2025 年 12 月 4 日 星期四 下午

浙江大学物理实验教学中心

一、预习报告（10 分）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

1. 起始磁化曲线、基本磁化曲线、磁滞回线、磁滞损耗

铁磁材料的磁化过程非常复杂， B 与 H 之间的关系如图 1 所示。

起始磁化曲线是铁磁材料从 $H = 0$ 、 $B = 0$ 的未磁化状态开始， B 随 H 非线性增加至磁饱和的 Oa 段曲线；磁滞回线是 H 循环变化时， B 沿特定路径形成的封闭 $B - H$ 曲线；基本磁化曲线是原点与同一材料各磁滞回线顶点连成的曲线（如图 2 所示）；磁滞损耗是铁磁材料磁化循环中因磁滞效应消耗的能量，单位体积损耗正比于磁滞回线面积。

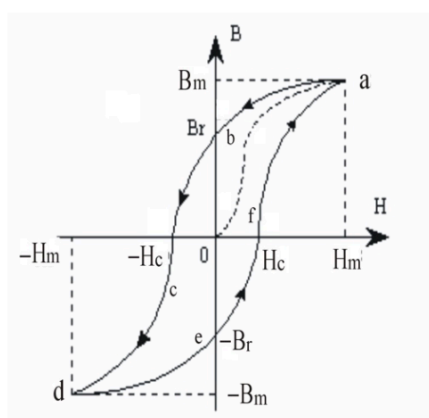


图 1

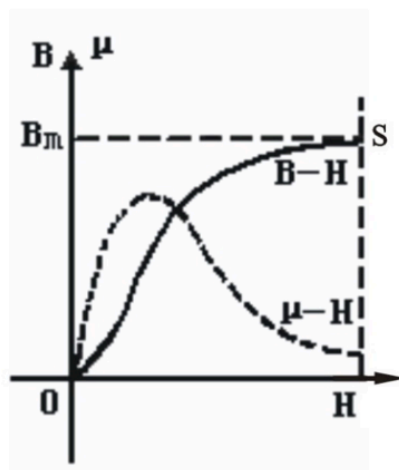


图 2

2. 示波器显示 $B - H$ 曲线的原理

测量曲线的实验线路图如图 3 所示。

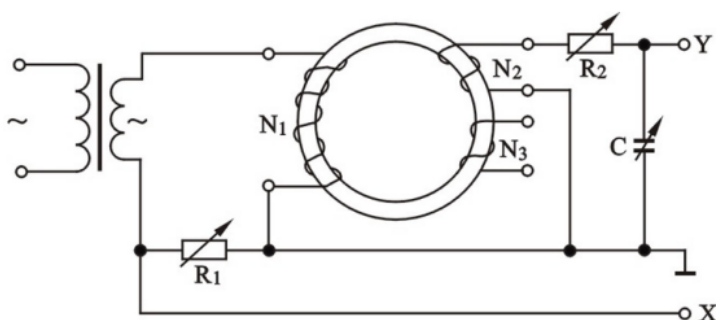


图 3

在线圈 N_1 中通过磁化电流 I_1 ，磁场强度 $H = \frac{N_1 I_1}{L}$ ，其中 L 为环形铁芯平均磁路长度。

由图 3 可知示波器 $CH1(X)$ 轴偏转板输入电压： $U_x = I_1 R_1$ ，得到 $U_x = \frac{L R_2}{N_1} H$ 。

为测量 B ，在次级线圈 N_2 串联电阻 R_2 与电容 C ，取电容两端电压至示波器 $CH2(Y)$ 轴输入，当 R_2 与 C 满足 $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$ 时， $I_2 = \frac{E_2}{(R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{E_2}{R_2}$ ，其中 ω 为电源角频率， E_2 为次级线圈的感应电动势。

因交变磁场 H 产生交变的磁感应强度 B ，有： $E_2 = N_2 S \frac{dB}{dt}$ ，其中 S 为环形式样截面积。所以 $U_Y = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{CR_2} \int E_2 dt = \frac{N_2 S}{CR_2} B$

观测时将 X 轴输入选择 AC ， Y 轴输入选择 DC ，并选择合适的 R_1 与 R_2 阻值以得到最佳磁滞回线图形。

3. 示波器的定标

设 X 轴灵敏度为 $S_X(V/\text{格})$ ， Y 轴灵敏度为 $S_Y(V/\text{格})$ ，则 $U_X = S_X X$ ， $U_Y = S_Y Y$ ，式中 X, Y 分别为测量时记录的坐标值。由于本实验使用的 R_1, R_2, C 都是阻抗已知的标准元件，综合上述分析，本实验定量计算公式为：

$$H = \frac{N_1 S_X}{LR_1} X, B = \frac{R_2 C S_Y}{N_2 S} Y$$

2. 实验重点（3分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

掌握磁滞回线、磁化曲线及 B_S 、 B_r 、 H_C 等参数的物理意义；学会示波器法测绘曲线的操作，包括退磁、电路接线、示波器定标与参数计算；理解动态磁滞回线与频率、材料类型的关系。

3. 实验难点（2分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

精准控制示波器定标与增益，确保 H 、 B 定量计算的准确性；磁滞回线图形的调节，避免因积分电路参数不当或信号畸变导致图形失真。样品退磁过程的控制，需通过反复磁化和逐步减小电流实现完全退磁，确保实验起点准确。动态磁滞回线与静态磁滞回线的差异分析，需理解涡流损耗对回线面积的影响。

二、原始数据（20分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

三、结果与分析（60分）

1. 数据处理与结果（30分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

1. 磁滞回线

使用环形铁氧体磁性材料，参数如下：

$$N_1 = N_2 = N_3 = 150T, L = 0.130m, S = 1.24 \times 10^{-4}m^2$$

在试验仪上读取电容与电阻参数如下：

$$R_1 = 2.5\Omega, R_2 = 10k\Omega, C = 3\mu F$$

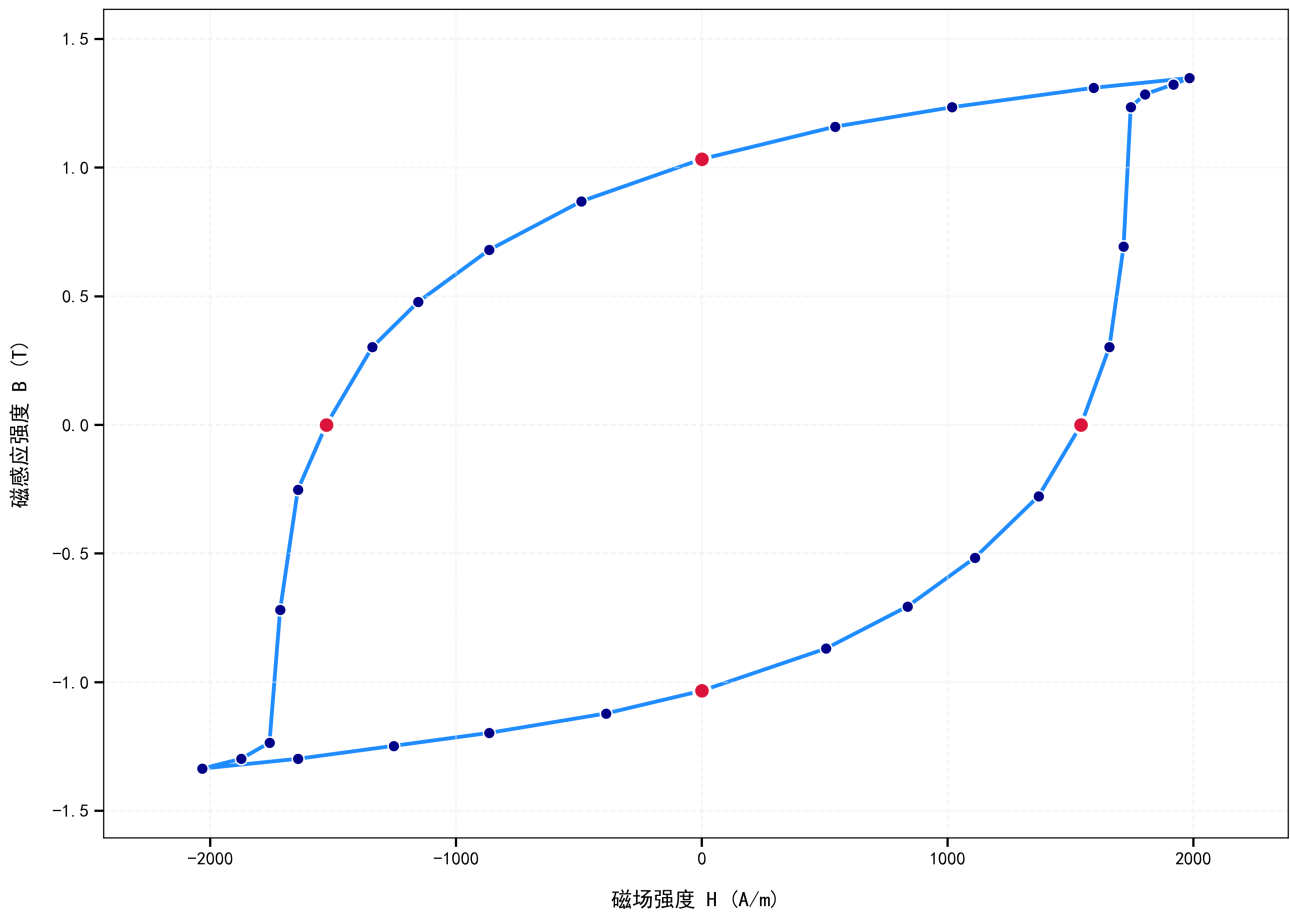
使用数字示波器得到如下图像：

根据 $H = \frac{N_1}{LR_1}U_X$, $B = \frac{R_2C}{N_2S}U_Y$ 计算记录的实验数据，得到下表：

序号	$U_X(V)$	$U_Y(mV)$	$H(A/m)$	$B(T)$
1	4.298	835.8	1983.7	1.348
2	3.454	812.3	1594.2	1.310
3	2.204	765.5	1017.2	1.235
4	1.173	718.6	541.4	1.159
5	0.000	640.5	0.000	1.033
6	-1.062	538.9	-490.2	0.869
7	-1.875	421.7	-865.4	0.680
8	-2.500	296.7	-1153.8	0.479
9	-2.906	187.3	-1341.2	0.302
10	-3.312	0.000	-1528.6	0.000
11	-3.562	-156.2	-1644.0	-0.252
12	-3.718	-445.3	-1716.0	-0.718
13	-3.812	-765.6	-1759.4	-1.235
14	-4.062	-804.6	-1874.8	-1.298
15	-4.406	-828.1	-2033.5	-1.336
16	-3.562	-804.6	-1644.0	-1.298
17	-2.718	-773.4	-1254.5	-1.247
18	-1.875	-742.1	-865.4	-1.197
19	-0.844	-695.3	-389.5	-1.121
20	0.000	-640.6	0.000	-1.033
21	1.093	-539.0	504.5	-0.869
22	1.812	-437.5	836.3	-0.706
23	2.406	-320.3	1110.5	-0.517
24	2.968	-171.8	1369.8	-0.277
25	3.343	0.000	1542.9	0.000
26	3.593	187.5	1658.3	0.302
27	3.718	429.6	1716.0	0.693
28	3.781	765.6	1745.1	1.235
29	3.906	796.8	1802.8	1.285
30	4.156	820.3	1918.2	1.323

使用 Python 对数据进行绘图，得到磁滞回线如下：

铁磁材料H-B磁滞回线



根据曲线得到：

$$\text{剩余磁感应强度 } B_r = \frac{1}{2}(1.033 + 1.033) = 1.033T$$

$$\text{矫顽力 } H_c = \frac{1}{2}(1528.6 + 1542.9) = 1535.8A/m$$

$$\text{饱和磁感应强度 } B_m = \frac{1}{2}(1.348 + 1.336) = 1.342T$$

$$\text{饱和磁场强度 } H_m = \frac{1}{2}(1983.7 + 2033.5) = 2008.6A/m$$

$$\text{磁耗 } W_b = 6099.4J/m^3$$

2. 基本磁化曲线

使用 EI 型铁芯，参数如下：

$$N_1 = N_2 = N_3 = 150T, L = 6.0 \times 10^{-2}m, S = 8.0 \times 10^{-5}m^2$$

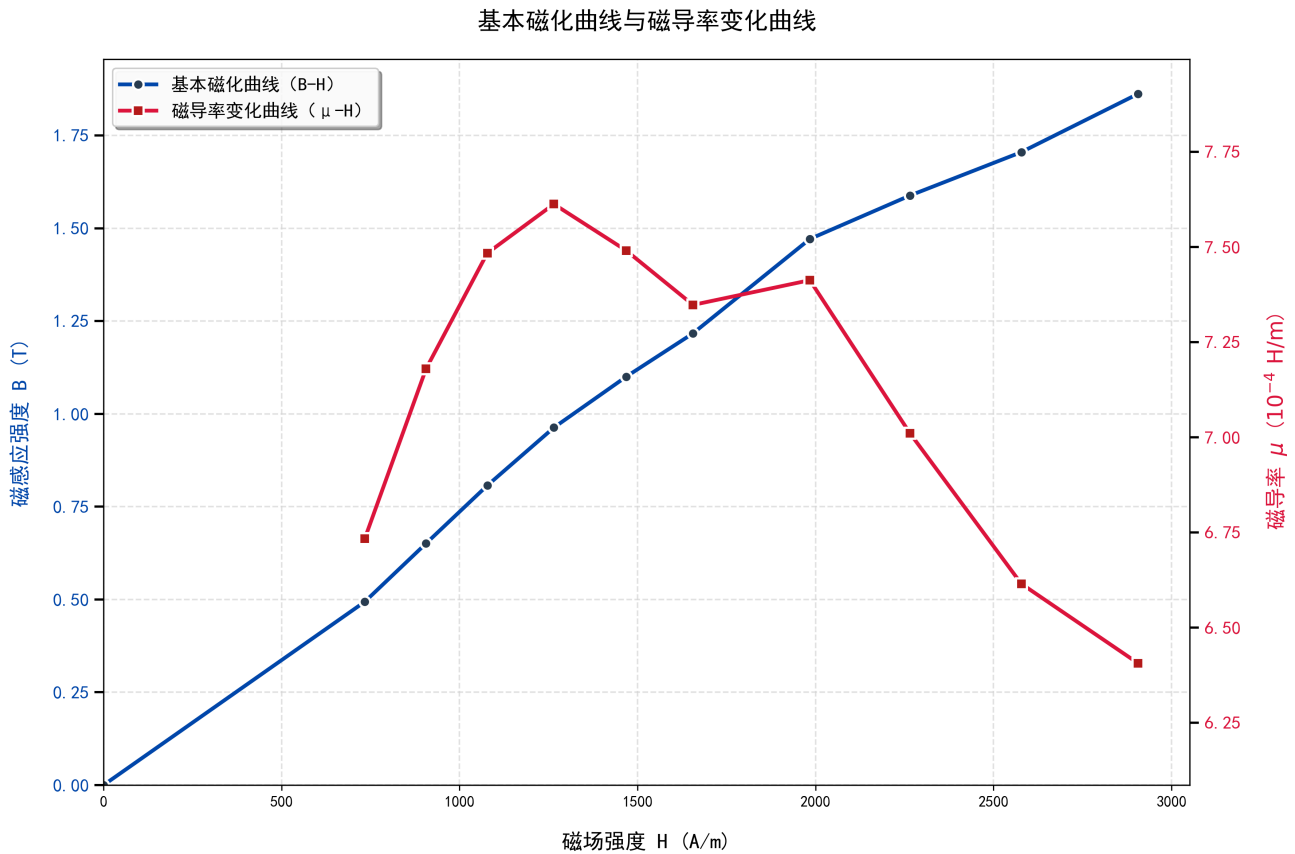
在试验仪上读取电容与电阻参数如下：

$$R_1 = 2.5\Omega, R_2 = 10k\Omega, C = 3\mu F$$

根据 $H = \frac{N_1}{LR_1}U_X, B = \frac{R_2C}{N_2S}U_Y$ 计算记录的实验数据，得到下表：

序号	$U(V)$	$U_X(V)$	$U_Y(mV)$	$H(A/m)$	$B(T)$	$\mu(10^{-4}H/m)$	μ_r
1	1.20	0.734	197.7	734	0.494	6.734	535.8
2	1.50	0.906	260.2	906	0.651	7.180	571.4
3	1.90	1.078	322.7	1078	0.807	7.484	595.5
4	2.20	1.265	385.2	1265	0.963	7.613	605.8
5	2.50	1.468	439.9	1468	1.100	7.491	596.2
6	2.80	1.656	486.7	1656	1.217	7.348	584.7
7	3.21	1.984	588.3	1984	1.471	7.413	589.9
8	3.52	2.265	635.2	2265	1.588	7.011	557.9
9	3.81	2.578	682.1	2578	1.705	6.615	526.4
10	4.11	2.906	744.6	2906	1.862	6.406	509.8

使用 Python 对数据进行绘图，得到基本磁化曲线与磁导率变化曲线如下：



2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

误差可能的原因：

1. 仪器误差：

B, H 的计算依赖于 R_1, R_2, C 等元件参数,若这些元件存在标称误差或老化现象,会影响最终结果。

2. 操作误差:

若样品退磁不彻底,初始磁化状态非零,会导致磁滞回线偏移。

信号存在比较明显的噪声,在电压较低时会出现明显的波形抖动,影响数据读取,造成误差。

用光标法读取电压值时,光标的对准存在一定的主观性,可能造成一定的测量误差。

3. 环境因素:

电阻和电容的参数会随温度变化,导致一定的误差。

3. 实验探讨 (10 分)

(对实验内容、现象和过程的小结,不超过 100 字。)

本次实验利用 FB310D 型磁特性综合测量试验仪与数字示波器,顺利测绘了铁磁材料的磁滞回线与基本磁化曲线,掌握了磁滞、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。实验过程较为顺利。

四、 思考题 (10 分)

(解答教材或讲义或老师布置的思考题,请先写题干,再作答。)

1. 什么叫铁磁材料的磁滞现象?试说明铁磁材料基本磁化曲线和磁滞回线的特性。

铁磁材料的磁滞现象,指其磁感应强度 B 的变化始终滞后于磁场强度 H 变化的现象,当 H 降为0时 B 仍有剩磁 B_r ,需反向矫顽力 H_c 才能使 B 归零。磁滞回线是 H 往复变化时 B 随 H 形成的闭合曲线,具有不可逆性,可从中获取饱和磁感应强度 B_m 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 等参数,且动态回线因含涡流损耗,面积大于静态回线,其形态还随励磁频率改变。基本磁化曲线由不同励磁强度下磁滞回线的顶点与原点连接而成,呈非线性,对应的磁导率 $\mu = \frac{B}{H}$ 先随 H 增大至峰值,后因磁饱和急剧减小,且需经充分“磁锻炼”才能形成。

2. 铁磁材料的基本磁化曲线和磁滞回线各有什么意义?

基本磁化曲线反映铁磁材料在不同磁场下的平均磁化特性,可据此确定材料在各磁化状态的磁导率,是电机、变压器等电磁器件铁芯选型与设计的关键依据。磁滞回线可区分材料类型:回线宽、矫顽力大的为硬磁材料,适制永久磁铁;回线窄、矫顽力小的为软磁材料,宜做电磁器件铁芯。同时,单位体积材料的磁滞损耗与回线面积成正比,回线还能直接提供 B_m 、 B_r 、 H_c 等核心磁参数,为材料应用提供数据支撑。

3. 怎样才能示波器上显示出铁磁材料的磁滞回线?

核心是将磁学量 H 和 B 转化为示波器可识别的电学量。首先按原理图接线,将正比于 H 的励磁线圈取样电阻电压接入示波器 X 轴,将经积分电路处理、正比于 B 的次级线圈感应电压接入 Y 轴,且连通各设备 GND 端。随后对样品退磁,先将材料磁化至饱和,再缓慢减小励磁电流至示波器显示点收缩至屏幕中心。接着设定 R_1 、 R_2 、 C 的固定参数,将示波器 X 轴设为“AC”档、 Y 轴设为“DC”档,调节信号源输出电压和示波器灵敏度,消除波形畸变,即可在屏上显示稳定的磁滞回线。

• 注意事项:

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名+学号+实验名称+周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。