

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：_____

指导教师：郭红丽_____

班级：_____

姓名：_____

学号：_____

实验日期:2025 年 4 月 17 日 星期四上午

浙江大学物理实验教学中心

一、预习报告

1. 实验综述

实验现象：铁磁材料的磁滞回线为闭合曲线，磁感应强度 B 滞后于磁场强度 H 。硬磁材料回线宽，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 较大；软磁材料回线窄， B_r 和 H_c 较小。动态测量时回线面积大于静态，因存在涡流损耗，且频率越高差异越显著。

实验原理：基于示波器法，将 H 和 B 转换为电信号测量。 H 通过安培环路定律计算（ $H = N_1 I_1 / L$ ）， B 通过次级线圈感应电动势积分获得（ $B \propto U_c$ ）。积分电路将次级电压积分后输入示波器 Y 轴，磁化电流采样电压输入 X 轴，形成 $B-H$ 曲线。

实验方法：

- (1) **退磁：**调节磁化电流至饱和后缓慢降为零，消除剩磁。
- (2) **测绘磁滞回线：**调节励磁电压，示波器显示动态磁滞回线，记录顶点坐标和示波器灵敏度。
- (3) **基本磁化曲线：**逐级增大励磁电流，记录各磁滞回线顶点并连线。
- (4) **参数计算：**通过定标公式（ $H = \frac{N_1 S_X}{LR_1} \cdot X$ ， $B = \frac{R_2 C S_Y}{N_2 S} \cdot Y$ ）定量分析 B_s 、 B_r 、 H_c 。
- (5) **对比分析：**更换材料或改变频率，观察回线形状变化，验证硬磁与软磁特性差异。

2. 实验重点

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；学会用示波器法测绘基本磁化曲线和磁滞回线；根据磁滞回线确定磁性材料的饱和磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 的数值；研究不同频率下动态磁滞回线的区别，并确定某一频率下的磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 数值；改变不同的磁性材料，比较磁滞回线形状的变化。

3. 实验难点

退磁不彻底导致剩磁残留；示波器定标及积分电路参数（ R_2 、 C ）的精准匹配；动态磁滞回线因涡流损耗与频率差异引入误差；避免磁滞回线图形畸变（如顶部编织状环）；定量计算时需严格转换峰峰值与有效值，确保 B_s 、 B_r 、 H_c 的精确测定。

二、原始数据

样品1: 环形铁氧体磁性材料 $N_1=N_2=N_3=150T$, $L=0.130m$, $S=1.24 \times 10^{-4}m^2$
 样品2: EI型铁芯 $N_1=N_2=N_3=150T$, $L=6.0 \times 10^{-2}m$, $S=8.0 \times 10^{-5}m^2$

数据记录:

$R_1=25\Omega$, $R_2=10k\Omega$, $C=3.0\mu F$, $f=125.0Hz$

1. 基本磁化曲线数据

电压表显示	水平灵敏度	水平方向格子数	竖直灵敏度	竖直方向格子数

(光标法)

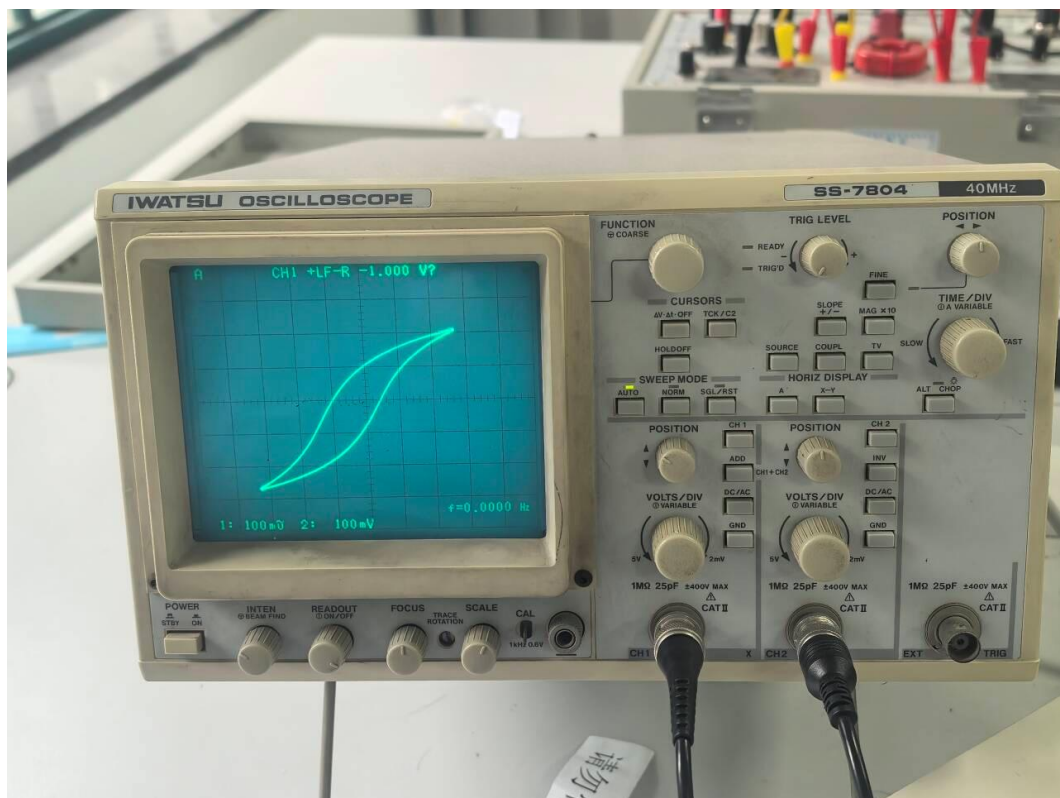
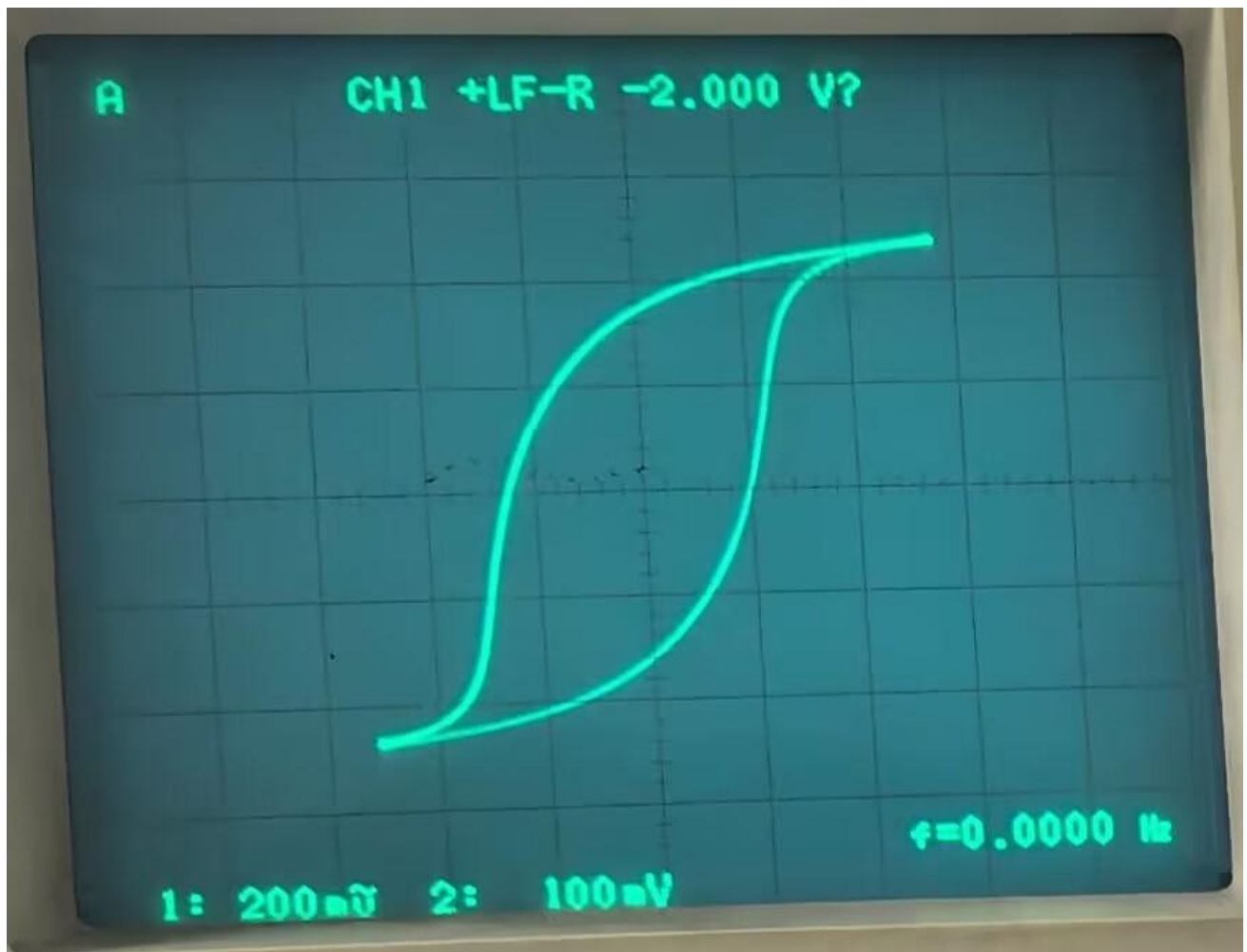
电压表显示	水平方向电压	垂直方向电压

电压表显示	水平灵敏度	水平方向格子数	竖直灵敏度	竖直方向格子数
0.5V	20mV	2.5	20mV	2.2
1.0V	20mV	4.85	50mV	1.75
1.2V	50mV	2.3	50mV	2.1
1.5V	50mV	2.9	50mV	2.6
1.8V	50mV	3.45	50mV	3.1
2.0V	50mV	3.85	50mV	3.4
2.2V	50mV	4.3	50mV	3.75
2.5V	100mV	2.9	100mV	2.15
2.8V	200mV	2.75	100mV	2.4
3.0V				

光标法

电压表显示	水平方向电压	垂直方向电压
0.5V	49.1mV	43.5mV
1.0V	96.4mV	87.75mV
1.2V	114.5mV	102.0mV
1.5V	143.5mV	127.5mV
1.8V	172.0mV	152.0mV
2.0V	192.5mV	169.0mV
2.2V	218.0mV	187.0mV
2.5V	295.0mV	213.0mV
2.8V	552.0mV	235.0mV
3.0V		

JP 4.1

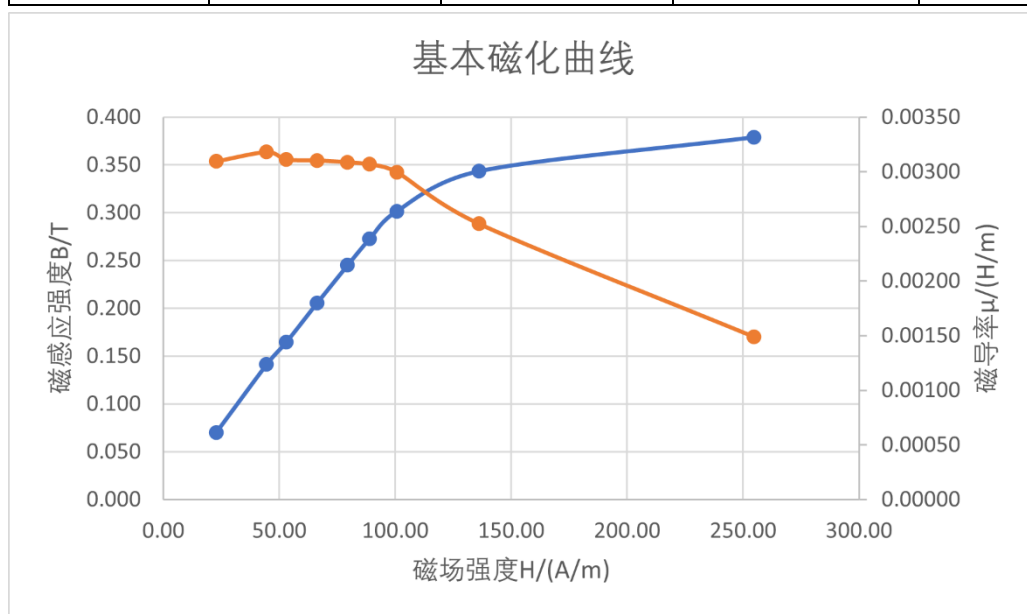


三、结果与分析

1. 数据处理与结果

对于观察铁磁材料基本磁化曲线这一任务，我同时用了两种读数方法进行读数，其中光标法的精确度更高，故这里采用光标法的数据，处理结果如下：

电压表显示 /V	水平方向电压 /V	垂直方向电压 /V	磁场强度 $H/(A \cdot m^{-1})$	磁感应强度 B/T	磁导率 $\mu/$ $(H \cdot m^{-1})$
0.50	0.0491	0.0435	22.66	0.070	0.00310
1.00	0.0964	0.0878	44.49	0.142	0.00318
1.20	0.1145	0.1020	52.85	0.165	0.00311
1.50	0.1435	0.1275	66.23	0.206	0.00310
1.80	0.1720	0.1520	79.38	0.245	0.00309
2.00	0.1925	0.1690	88.85	0.273	0.00307
2.20	0.2180	0.1870	100.62	0.302	0.00300
2.50	0.2950	0.2130	136.15	0.344	0.00252
2.80	0.5520	0.2350	254.77	0.379	0.00149



对于观察铁磁材料磁滞回线这一任务，我将图片（三张原始数据图片中的第二张）使用python 对坐标进行解析，python 代码如下：

```
import cv2
import numpy as np
from sklearn.cluster import KMeans

def detect_grid_axes(img):
    """检测倾斜网格的主方向（完整定义）"""
    # 提取深色网格线
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    edges = cv2.Canny(gray, 50, 150)
```

```

# 霍夫线变换检测直线
lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi/180, 100,
                        minLineLength=100, maxLineGap=10)

# 提取直线角度
angles = []
if lines is not None:
    for line in lines:
        x1, y1, x2, y2 = line[0]
        angle = np.arctan2(y2-y1, x2-x1)
        angles.append(angle)

if len(angles) < 2:
    raise ValueError("未检测到足够网格线")

# K-means 聚类分两个主方向
kmeans = KMeans(n_clusters=2).fit(np.array(angles).reshape(-1,1))
centroids = kmeans.cluster_centers_

# 确定更接近水平/垂直的角度
if abs(centroids[0][0]) < abs(centroids[1][0]):
    theta_x = centroids[0][0]
    theta_y = centroids[1][0]
else:
    theta_x = centroids[1][0]
    theta_y = centroids[0][0]

return theta_x, theta_y

def detect_grid_scale(img):
    """检测网格间距（完整定义）"""
    # 使用 Canny 检测网格线
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    edges = cv2.Canny(gray, 50, 150)

    # 霍夫线变换检测直线
    lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi/180, 100,
                            minLineLength=100, maxLineGap=10)

    # 分析线间距
    horizontal = []
    vertical = []
    for line in lines:
        x1, y1, x2, y2 = line[0]

```



```

        if abs(x1 - x2) < 10: # 垂直线
            vertical.append(x1)
        elif abs(y1 - y2) < 10: # 水平线
            horizontal.append(y1)

# 计算网格间距
def get_grid_spacing(values):
    values = np.sort(values)
    diffs = np.diff(values)
    return np.median(diffs[diffs > 10])

grid_x = get_grid_spacing(vertical)
grid_y = get_grid_spacing(horizontal)
return grid_x, grid_y

def create_coordinate_matrix(theta_x, theta_y, grid_x, grid_y, img_size):
    """创建坐标转换矩阵（完整定义）"""
    h, w = img_size
    center = (w//2, h//2)

    # 单位向量基
    e_x = np.array([np.cos(theta_x), np.sin(theta_x)])
    e_y = np.array([np.cos(theta_y), np.sin(theta_y)])

    # 构建仿射变换矩阵
    transform_matrix = np.column_stack((e_x, e_y))
    return center, np.linalg.inv(transform_matrix)

def uniform_sample_contour(contour, num_points=40):
    """沿轮廓均匀采样（完整定义）"""
    perimeter = cv2.arcLength(contour, True)
    step = perimeter / num_points

    points = []
    current = 0.0
    for i in range(len(contour)-1):
        p1 = contour[i][0]
        p2 = contour[i+1][0]
        seg_length = np.linalg.norm(p2 - p1)

        while current + seg_length >= len(points)*step:
            t = (len(points)*step - current) / seg_length
            x = p1[0] + t*(p2[0]-p1[0])
            y = p1[1] + t*(p2[1]-p1[1])

```

```

        points.append((x, y))

    current += seg_length

return np.array(points[:num_points])

def process_image(image_path):
    img = cv2.imread(image_path)
    h, w = img.shape[:2]

    try:
        # 检测网格参数
        theta_x, theta_y = detect_grid_axes(img)
        grid_x, grid_y = detect_grid_scale(img)
        center, inv_matrix = create_coordinate_matrix(theta_x, theta_y,
                                                    grid_x, grid_y, (h, w))

    except Exception as e:
        print(f"初始化失败: {str(e)}")
        return

    # 提取环线轮廓
    hsv = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    mask = cv2.inRange(hsv, (80, 100, 100), (90, 255, 255))
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_CLOSE, np.ones((3,3), np.uint8),
iterations=2)

    contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    if not contours:
        print("未找到环线")
        return

    max_contour = max(contours, key=cv2.contourArea)

    # 均匀采样40个点
    points = uniform_sample_contour(max_contour)

    # 坐标转换
    coordinates = []
    for x, y in points:
        dx = x - center[0]
        dy = center[1] - y
        coord = inv_matrix @ np.array([dx, dy])
        coordinates.append((round(coord[0],3), round(coord[1],3)))

```



```

    return coordinates

# 使用示例
if __name__ == "__main__":
    coords = process_image("grid_image.jpg")
    if coords:
        print("转换后的坐标 (x, y) : ")
        for i, (x, y) in enumerate(coords, 1):
            print(f"{i:2d}: ({x:>7.3f}, {y:>7.3f})")

```

该代码中的 grid_image.jpg 即为原始数据。

由于其无法对坐标进行准确转换，只能反映其相对大小，结合我在 2.80V 时测出的两个坐标下的最大电压，使用了 C++ 代码对坐标进行修正，并输出至一个 csv 文件中：

```

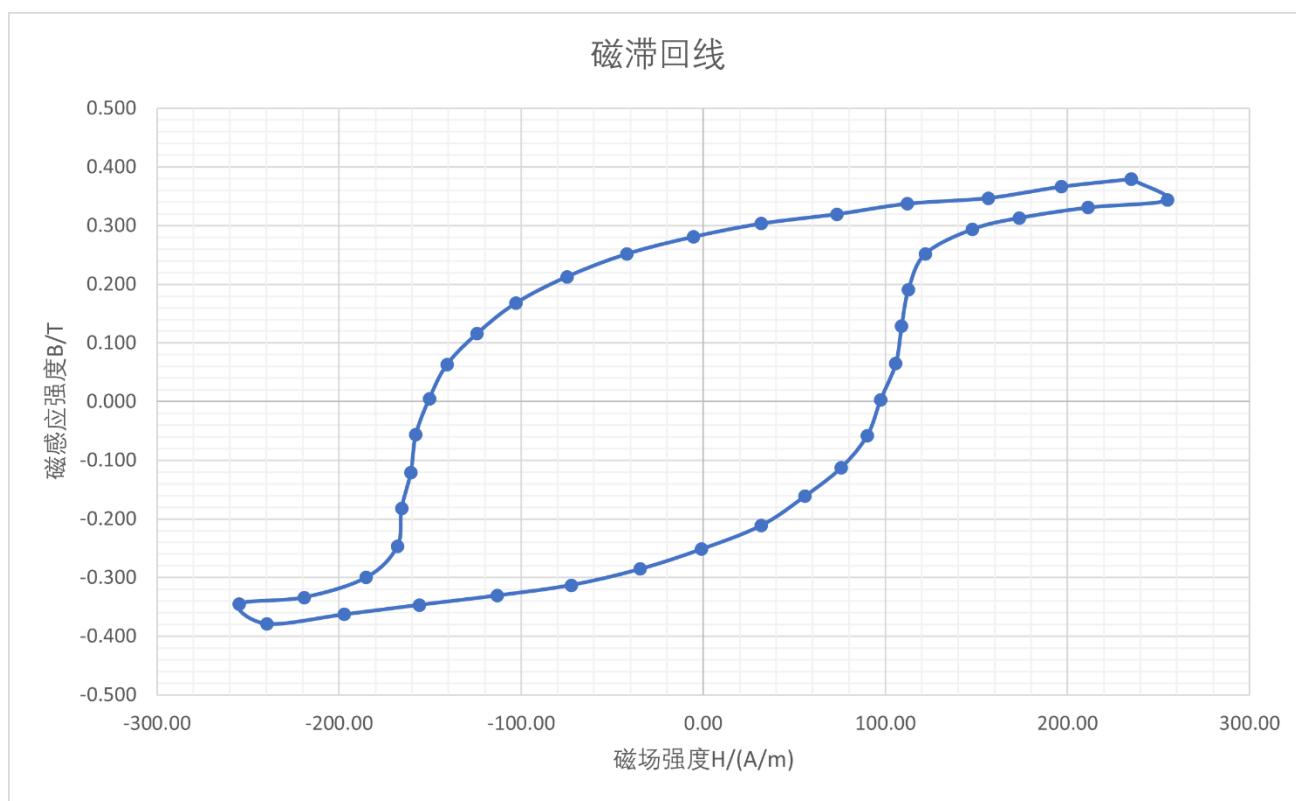
#include<bits/stdc++.h>
using namespace std;
struct point{
    double x,y;
    point(double x=0,double y=0):x(x),y(y){}
};
point a[47];
double x,y,maxx,maxy,minx,miny;
int main(){
    for(int i=1;i<=40;++i){
        scanf("%*d: ( %lf, %lf)",&x,&y);
        a[i]=point(x,y);
        maxx=max(x,maxx);
        maxy=max(y,maxy);
        minx=min(x,minx);
        miny=min(y,miny);
    }
    for(int i=1;i<=40;++i){
        a[i].x=(a[i].x-minx)/(maxx-minx)*1.104-0.552;
        a[i].y=(a[i].y-miny)/(maxy-miny)*0.47-0.235;
    }
    FILE* fout=fopen("temp.csv","w");
    fprintf(fout,"水平电压/V,垂直电压/V\n");
    for(int i=1;i<=40;++i)
        fprintf(fout,"%0.3lf,%0.3lf\n",a[i].x,a[i].y);
    return 0;
}

```

通过这些操作，可将示波器中显示的电压解析为具体的坐标值，然后将电压转化为磁场强度和磁感应强度：

水平电压 /V	垂直电压 /V	磁场强度 H/(A/m)	磁感应强度 B/T
0.509	0.235	234.92	0.379
0.426	0.227	196.62	0.366
0.339	0.215	156.46	0.347
0.243	0.209	112.15	0.337
0.159	0.198	73.38	0.319
0.069	0.188	31.85	0.303
-0.012	0.174	-5.54	0.281
-0.091	0.156	-42.00	0.252
-0.162	0.132	-74.77	0.213
-0.223	0.104	-102.92	0.168
-0.269	0.072	-124.15	0.116
-0.305	0.039	-140.77	0.063
-0.326	0.003	-150.46	0.005
-0.342	-0.035	-157.85	-0.056
-0.348	-0.075	-160.62	-0.121
-0.359	-0.113	-165.69	-0.182
-0.364	-0.153	-168.00	-0.247
-0.401	-0.186	-185.08	-0.300
-0.475	-0.207	-219.23	-0.334
-0.552	-0.214	-254.77	-0.345
-0.519	-0.235	-239.54	-0.379
-0.427	-0.225	-197.08	-0.363
-0.338	-0.215	-156.00	-0.347
-0.245	-0.205	-113.08	-0.331
-0.157	-0.194	-72.46	-0.313
-0.075	-0.177	-34.62	-0.285
-0.002	-0.156	-0.92	-0.252
0.069	-0.131	31.85	-0.211
0.121	-0.100	55.85	-0.161
0.164	-0.070	75.69	-0.113
0.195	-0.036	90.00	-0.058
0.211	0.002	97.38	0.003
0.229	0.040	105.69	0.065
0.236	0.080	108.92	0.129
0.244	0.118	112.62	0.190
0.264	0.156	121.85	0.252
0.320	0.182	147.69	0.294
0.376	0.194	173.54	0.313
0.458	0.205	211.38	0.331
0.552	0.213	254.77	0.344
0.509	0.235	234.92	0.379

并绘制磁滞回线：



观察图表可知，该铁磁材料的剩磁 $B_r = \frac{0.28+0.25}{2} T = 0.265 T$ ，矫顽力 $H_c = \frac{100+150}{2} A/m = 125 A/m$ （原始数据也长这样），同时计算该图形的面积可得其磁滞损耗为 140.88J（将其近似为多边形）。

同时，我也观察力样品 2 的磁滞回线（原始数据第三张图片），相较于样品 1，样品 2 的磁滞回线更加狭长。

2. 误差分析

在本实验中，存在以下影响实验精度的因素：

- (1) 实验过程中，励磁电压的频率在不断发生波动，从而会导致磁滞回线也发生波动，对实验的测量造成影响。
- (2) 实验过程中，即使在初始时已对铁磁材料进行退磁且将该焦点调整至坐标原点，但随着电压的增大，该磁滞回线仍然会出现不对称的情况（如上图线，剩磁基本对称，但矫顽力明显不对称），对数据处理造成感染。
- (3) 在数据处理的过程中，工具对坐标的识别并不完全精确，会存在一定的误差。
- (4) 在计算磁滞损耗时，我将该磁滞回线近似为一个多边形，而实际上的磁滞回线是一个由曲线围成的图线，也会带来计算误差。

3. 实验探讨

在本次实验中，我掌握了测量铁磁材料的基本磁化曲线和磁滞回线的方法，也观察到了对应的波形图，同时也对处理实验数据的方法有了更多的了解，学会采用更高级的方法来处理实验数据。

四、思考题

1. 磁滞现象指的是当外加磁场强度 H 变化时，磁感应强度 B 的变化滞后于 H ，这种现象称为磁滞。具体表现为：当 H 从正向减小到零时， B 不会归零，而是保留剩磁 B_r ；需施加反向的矫顽力 H_c 才能使 B 归零。基本磁化曲线由磁滞回线顶点连接而成，呈非线性。初始阶段 B 随 H 快速增加，随后趋于饱和；磁滞回线是闭合曲线，体现 B 与 H 的非单值关系。硬磁材料回线宽（剩磁大、矫顽力高），软磁材料回线窄（剩磁小、矫顽力低）。
2. 体现方式为磁滞损耗与磁滞回线包围的面积直接相关。回线面积越大，材料在交变磁场中反复磁化时消耗的能量（转化为热能）越多。计算方法是通过测量磁滞回线的面积，面积越大，磁滞损耗越大。
3. 低频时涡流损耗较小，磁滞回线面积主要由磁滞效应主导，形状接近静态回线，但面积仍稍大。高频时涡流效应显著增强，导致总损耗增加，动态磁滞回线面积明显扩大，且可能出现波形畸变。