

# 磁场测量实验报告

宋熙喆 PB21000301

## 1 实验背景

磁通门磁强计是一种高灵敏度、便携的磁场测量仪器，利用高导磁铁芯，在交变激励下，调制铁芯中的直流磁场成分，将其转换为交流电压信号，从而测量弱直流磁场。

在本次实验中，我们使用磁通门磁强计测量螺旋管线圈中心位置的磁场，并据此推算线圈的匝数。有限长螺线管内的磁场公式如下：

$$B(z) = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (1)$$

其中：

$$\cos \theta_1 = \frac{z - z_1}{\sqrt{(z - z_1)^2 + R^2}} \quad (2)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{z - z_2}{\sqrt{(z - z_2)^2 + R^2}} \quad (3)$$

测量螺线管长度  $L = 0.785\text{m}$

测量螺线管直径  $d = (100.04\text{mm} + 100.06\text{mm} + 100.11\text{mm})/3 = 100.07\text{mm}$

测量螺线管电阻  $R = (40.1506\Omega + 40.1650\Omega + 40.1435\Omega)/3 = 40.1530\Omega$

由此，螺线管内中心磁场强度应为

$$B\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (4)$$

其中：

$$\cos \theta_1 = \frac{\frac{L}{2}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + R_s^2}} = \frac{0.3925}{\sqrt{0.3925^2 + 0.050035^2}} \approx 0.9894 \quad (5)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{-\frac{L}{2}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + R_s^2}} = \frac{-0.3925}{\sqrt{0.3925^2 + 0.050035^2}} \approx -0.9894 \quad (6)$$

代入磁场强度公式：

$$B \left( \frac{L}{2} \right) = \frac{\mu_0 n U}{2 * 40.1530 \Omega} (0.9894 - (-0.9894)) = \frac{\mu_0 n U}{40.1530 \Omega} \cdot 0.9894 \quad (7)$$

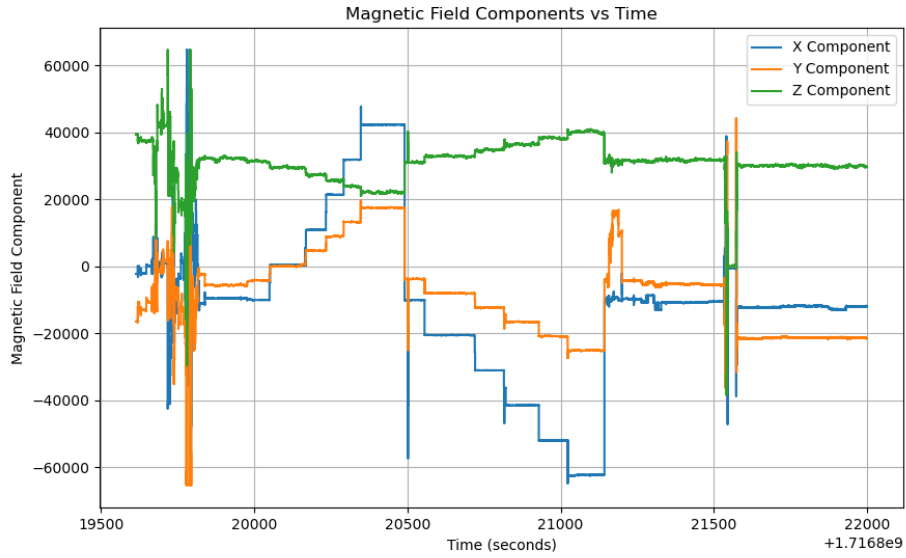
$$N = B * \frac{40.5832 \Omega}{\mu_0 U} * L = \frac{B}{U} * \frac{31.8578 \text{m} * \Omega}{\mu_0} \quad (8)$$

## 2 实验过程

1. 将磁通门磁强计探头放置在螺旋管线圈的中心。通过标记和测量探头连接线的插入长度来确认探头是否位于中心位置。
2. 加电压  $U$ ，读数。在本次实验中，电压设置为 0 V, 0.2 V, 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1.0 V, -0.2 V, -0.4 V, -0.6 V, -0.8 V, -1.0 V。

### 3 数据处理

数据按时间绘制如下。



$U$ (V)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$B_x$ (nT)	-10081.69	378.92	10897.64	21306.32	31838.09	42301.15
$B_y$ (nT)	-4210.15	130.79	4630.99	9022.11	13330.84	17475.14
$B_z$ (nT)	31303.72	29827.99	27392.20	25779.00	24209.24	22076.30

$U$ (V)	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0
$B_x$ (nT)	-20541.90	-31091.78	-41510.11	-51946.09	-62317.38
$B_y$ (nT)	-8098.81	-12318.03	-16573.23	-20852.24	-25195.11
$B_z$ (nT)	32654.11	34678.25	36452.46	38377.38	40181.37

以下程序实现了上面的挑出这十一个电压对应的磁场

```
import pandas as pd
import numpy as np

file_path = '240527142015.A119'
data = pd.read_csv(file_path, delim_whitespace=True, header=None, error_bad_lines=False)

time = data[0]
x_component = data[4]
y_component = data[5]
z_component = data[6]
start_time = 20000 + 1.7168e9
end_time = 21100 + 1.7168e9

mask = (time >= start_time) & (time <= end_time)
time_filtered = time[mask]
x_filtered = x_component[mask]
y_filtered = y_component[mask]
z_filtered = z_component[mask]

steps = []
current_step_start = 0
step_duration = 30 # seconds

i = 1
while i < len(time_filtered):
    while i < len(time_filtered) and np.abs(x_filtered.iloc[i] - x_filtered.iloc[i-1]) > 1:
        i += 1

    if time_filtered.iloc[i-1] - time_filtered.iloc[current_step_start] > step_duration:
        avg_x = x_filtered[current_step_start:i].mean()
```

```

avg_y = y_filtered[current_step_start:i].mean()
avg_z = z_filtered[current_step_start:i].mean()
steps.append((time_filtered.iloc[current_step_start], time_filtered.iloc

```

```

current_step_start = i

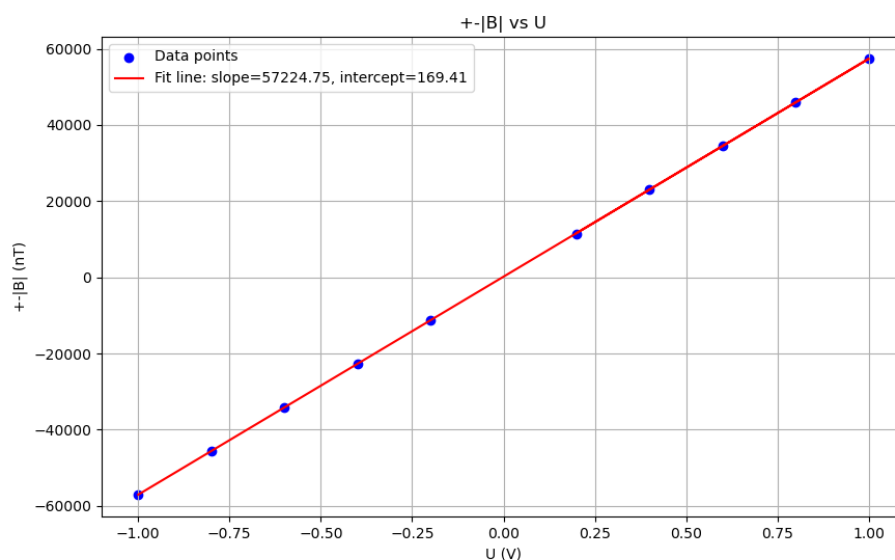
```

```

steps_df = pd.DataFrame(steps, columns=['Start Time', 'End Time', 'X Component',
print(steps_df)

```

下面计算非零电压对应的除去背景磁场的磁场强度  $B = |\mathbf{B}(U) - \mathbf{B}_0|$ 。对于负电压，取磁场强度的相反数，以保证磁场之差与电压之差呈大致线性关系。绘制  $B - U$  图。



所得斜率为  $57224.75 \text{ nT/U}$ 。代入 (8)，计算出匝数

$$N = 57224.75 \text{ nT/U} * \frac{31.8578 \text{ m} * \Omega}{\mu_0} = 1450.7 \approx 1451 \quad (9)$$

所用代码如下

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import linregress

U = np.array([0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1.0])
Bx = np.array([-10081.69, 378.92, 10897.64, 21306.32, 31838.09, 42301.15, -20541.15, -10081.69, 378.92, 10897.64, 21306.32])
By = np.array([-4210.15, 130.79, 4630.99, 9022.11, 13330.84, 17475.14, -8098.81, -4210.15, 130.79, 4630.99, 9022.11])
Bz = np.array([31303.72, 29827.99, 27392.20, 25779.00, 24209.24, 22076.30, 32654.00, 31303.72, 29827.99, 27392.20, 25779.00])

Bx_corrected = Bx[1:] - Bx[0]
By_corrected = By[1:] - By[0]
Bz_corrected = Bz[1:] - Bz[0]
B_magnitude = np.sqrt(Bx_corrected**2 + By_corrected**2 + Bz_corrected**2)*np.sin(U)

U_nonzero = U[1:]

slope, intercept, r_value, p_value, std_err = linregress(U_nonzero, B_magnitude)

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(U_nonzero, B_magnitude, label='Data points', color='blue')
plt.plot(U_nonzero, slope*U_nonzero + intercept, label=f'Fit line: slope={slope:.2f}')
plt.xlabel('U (V)')
plt.ylabel('+-|B| (nT)')
plt.title('+-|B| vs U')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

print(f'Slope: {slope:.2f}')
print(f'Intercept: {intercept:.2f}')

```

```
print(f'R-squared: {r_value**2:.9f}')
```

输出:

Slope: 57224.75

Intercept: 169.41

R-squared: 0.999996450

## 4 思考题

1. 如果在教学行政楼 823 建立一组亥姆霍兹线圈（南北、东西、上下各两个直径 2 米的线圈），获得一个剩磁低于 100 nT 的弱磁实验区域，需要的线圈匝数和电流是多少？

$\mathbf{B}_0 = (B_x, B_y, B_z) = (-10081.69, -4210.15, 31303.72)\text{nT}$ 。各方向线圈的单位长度匝数  $n_i$  和电流  $I_i$  ( $i = x, y, z$ ) 之积为

$$n_x I_x = \frac{B_x}{\mu_0} = 8.065\text{Am}^{-1} \quad (10)$$

$$n_y I_y = \frac{B_y}{\mu_0} = 3.368\text{Am}^{-1} \quad (11)$$

$$n_z I_z = \frac{B_z}{\mu_0} = 25.04\text{Am}^{-1} \quad (12)$$

2. 如果在科大现有的校区（东、西、高新校区）选择建立一个弱磁实验室，哪个位置最合适？理由是？

答：高新区。高新区位于郊区，周围人类活动少，对磁场的不可预测的干扰出现的频率很低。

## 5 哪种方法测得的数据更可信

本组仅采用了上述根据磁场测量的方法测量。所绘磁场-电压关系相关系数非常接近 1，理论上很准确。实验中发现，肉眼可以数出每一匝线圈（大概每圈 0.5mm 宽），理论上这一测量最准确。

## 6 将磁通门原始数据 (200Hz) 处理为 1Hz

### 6.1 重采样

先转为 txt 文件。将时间列转换为时间戳, 使用 Pandas 的 `resample` 函数按秒重采样数据。对重采样后的数据进行平均处理。

```
import pandas as pd
file_path = '240527142015.txt'

data = pd.read_csv(file_path, delimiter='\t', header=None, names=['time', 'col2'])

data['time'] = pd.to_datetime(data['time'], unit='s')

data.set_index('time', inplace=True)
data_resampled = data.resample('1S').mean()
data_resampled.reset_index(inplace=True)

data_resampled.to_csv('resampled.txt', sep='\t', index=False, header=False)
```

### 6.2 滑动平均

使用滑动窗口对每秒的数据窗口进行平均处理。窗口大小设置为 200 个数据点。

```
import pandas as pd
import numpy as np
file_path = '240527142015.txt'

data = pd.read_csv(file_path, delimiter='\t', header=None, names=['time', 'col2'])

data['time'] = pd.to_datetime(data['time'], unit='s')
data.set_index('time', inplace=True)
window_size = 200
```



```
x_rolling = data['x'].rolling(window=window_size).mean()
y_rolling = data['y'].rolling(window=window_size).mean()
z_rolling = data['z'].rolling(window=window_size).mean()

x_resampled = x_rolling[window_size-1::window_size]
y_resampled = y_rolling[window_size-1::window_size]
z_resampled = z_rolling[window_size-1::window_size]

resampled_data = pd.DataFrame({'time': x_resampled.index, 'x': x_resampled.values,
                              'y': y_resampled.values, 'z': z_resampled.values})

resampled_data.reset_index(drop=True, inplace=True)
resampled_data.to_csv('averaged.txt', sep='\t', index=False, header=False)
```

### 6.3 傅立叶变换

对原始 200Hz 数据进行傅立叶变换，转换到频域。在频域中应用低通滤波器，保留低于 1Hz 的频率成分，去除高频噪声和干扰。对滤波后的频域信号进行逆傅立叶变换，转换回时间域。对时间域信号进行重采样，得到每秒的 XYZ 分量。

```
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.fft import fft, ifft, fftfreq
file_path = '240527142015.txt'

data = pd.read_csv(file_path, delimiter='\t', header=None, names=['time', 'col2', 'col3', 'col4'])
x = data['x'].values
y = data['y'].values
z = data['z'].values
sampling_rate = 200
T = 1 / sampling_rate
```

```
x_fft = fft(x)
y_fft = fft(y)
z_fft = fft(z)
N = len(x)

freq = fftfreq(N, T)
cutoff_freq = 1 # 1Hz
x_fft[np.abs(freq) > cutoff_freq] = 0
y_fft[np.abs(freq) > cutoff_freq] = 0
z_fft[np.abs(freq) > cutoff_freq] = 0

x_ifft = ifft(x_fft).real
y_ifft = ifft(y_fft).real
z_ifft = ifft(z_fft).real

x_resampled = x_ifft[::sampling_rate]
y_resampled = y_ifft[::sampling_rate]
z_resampled = z_ifft[::sampling_rate]
time_resampled = data['time'].values[::sampling_rate]

resampled_data = pd.DataFrame({'time': time_resampled, 'x': x_resampled, 'y': y_
resampled_data.to_csv('fft.txt', sep='\t', index=False, header=False)
```

## 7 分析磁通门磁强计测量数据的噪声水平

磁通门磁强计是一种高精度的磁场测量仪器，其工作原理基于磁通门效应。测量数据的噪声水平分析通常需要考虑以下几个方面：

1. **仪器噪声**：磁通门磁强计本身的噪声特性，如噪声频谱、噪声密度等。这些参数可以从仪器的技术规格中获取。

2. **环境噪声**：测量环境中的干扰因素，如电磁干扰（EMI），地磁场的变化，机械振动等。这些因素会影响测量结果的精度。

3. **数据处理噪声**：在数据采集和处理过程中可能引入的噪声，如信号放大器的噪声、数字化过程中的量化噪声等。

在地空楼，磁通门磁强计测量了一个直螺线管内部的电流。我们假设测量的数据中包含了以下噪声源：

- 地磁场  $\mathbf{B}_0 = (B_x, B_y, B_z) = (-10081.69, -4210.15, 31303.72)\text{nT}$ 。尽管这些信息可能不直接相关，但地磁场的变化会引入背景噪声。

为了分析测量数据的噪声水平，可以采取以下步骤：

1. **数据预处理**：对测量数据进行预处理，去除明显的异常值和干扰信号。

2. **频谱分析**：对测量数据进行频谱分析，确定噪声的频率分布。使用快速傅里叶变换（FFT）可以有效地提取频谱信息。

3. **噪声滤波**：根据频谱分析的结果，设计合适的滤波器（如低通滤波器、高通滤波器或带通滤波器）以去除噪声成分。

4. **统计分析**：计算测量数据的统计特性，如均值、方差、标准差等，以定量评估噪声水平。

设测量数据为  $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$ ，经过预处理和滤波后，可以得到净信号  $\mathbf{B}_{\text{净}}$ ，噪声水平可以通过以下公式计算：

$$\text{噪声水平} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{B}_i - \mathbf{B}_{\text{净},i})^2}$$

其中， $N$  为数据点的总数， $\mathbf{B}_i$  为原始测量数据， $\mathbf{B}_{\text{净},i}$  为净信号。

通过上述方法，可以系统地分析磁通门磁强计测量数据的噪声水平，从而提高测量精度和数据可靠性。

## 8 测量图片

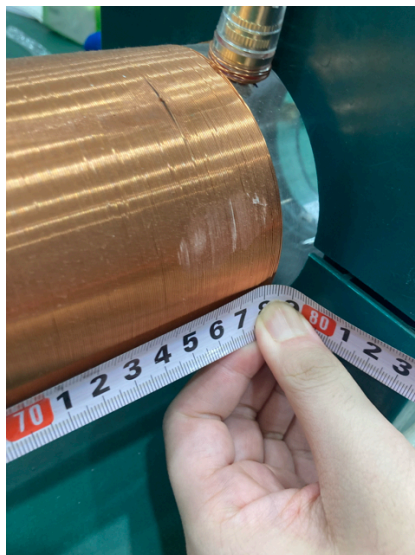


图 1: 测量螺线管长度

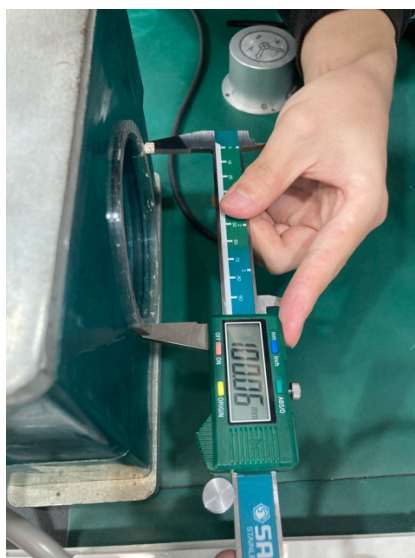


图 2: 测量螺线管直径 1

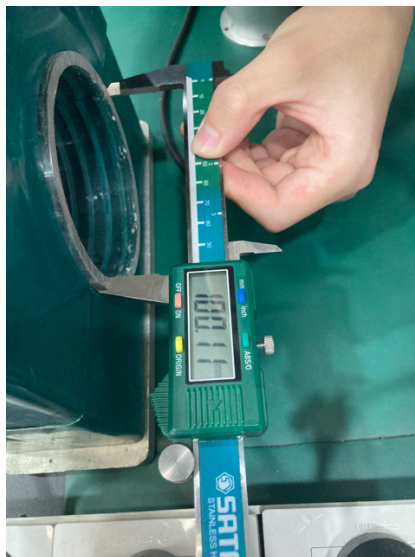


图 3: 测量螺线管直径 2

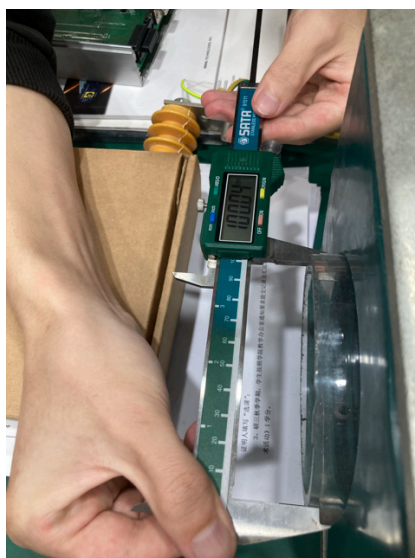


图 4: 测量螺线管直径 3



图 5: 测量螺线管电阻 1



图 6: 测量螺线管电阻 2



图 7: 测量螺线管电阻 3