

# 物理实验报告



南方科技大学  
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

学号: 114514 姓名: SUSTech 日期: 2025/03/08 时间: 周二下午

## 1 实验名称: 测量螺线管的磁场

## 2 实验目的

学习测量交变磁场的一种方法, 加深理解磁场的一些特性及电磁感应定律。

## 3 实验原理

### 3.1 有限长载流直螺线管的磁场

图 1 是一个长为  $2l$ , 匝数为  $N$  的单层密绕的直螺线管产生的磁场。当导线中流过电流  $I$  时, 由毕奥-萨伐尔定律可以计算出在轴线上某一点  $P$  的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} \left\{ \frac{x+l}{\sqrt{R^2 + (x+l)^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{R^2 + (x-l)^2}} \right\} \quad (1)$$

(1)  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  (2)  $n = \frac{N}{2l}$  为单位长度上的线圈数

(3)  $R$  为线圈管半径 (4)  $x$  为  $P$  点到线圈管中心处的距离

在 SI 单位制中,  $B$  的单位为特斯拉 (T)。图 1 同时给出  $B$  随  $x$  的分布曲线。由曲线显

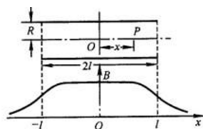


图 1 螺线管的磁场

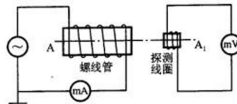


图 2 探测螺线管磁场的原理

Figure 1: 实验原理图

示, 在线圈管内部磁场近于均匀, 只在端点附近磁感应强度才显著下降。当  $l \gg R$  时,  $B = \mu_0 n I$  即场点的坐标  $x$  对内部磁场无影响, 而在线圈管两端,  $B = \frac{1}{2}\mu_0 n I$  为内部  $B$  值的一半。无限长、密绕的直线线圈是实验室中常用的产生均匀磁场的理想装置。

### 3.2 探测线圈法测量磁场

当低频交流电流通过螺线管产生磁场时, 检测线圈中感应出的电压  $V$  与磁感应强度  $B$  的关系可写为

$$B = \frac{V}{2\pi^2 N_1 r_1^2 f} \quad (2)$$

其中,  $N_1$  为螺线管的匝数,  $r_1$  为检测线圈半径,  $f$  为交流电频率。

## 4 实验仪器

螺线管套件, 示波器, 信号发生器, 电阻, 导线若干

## 5 实验内容

### 5.1 研究螺线管中磁感应强度 $B$ 与电流 $I$ 和感生电动势 $V$ 之间的关系，测量螺线管中的磁感应强度

- (1) 记录参数：螺线管 A 的半径  $R$ 、长度  $2l$ 、总匝数  $N$ ，探测线圈 A1 的半径  $r_1$  和总匝数  $N_1$ （参数由实验仪器面板给出）。
- (2) 按图 2 接好线路。需要注意的是，本实验螺线管串联 1 欧姆的电阻，通过探测电阻两端电压，可以得到输出电流。
- (3) A 和 A1 两个中心点的距离代表磁场场点坐标  $x$ ，其值由装置中的直尺读出。取  $x=0$ （中心位置），低频信号发生器频率分别选取为  $f=4000\text{Hz}$ 、 $2000\text{Hz}$ 、 $1000\text{Hz}$ ，调节信号输出使输出电流从  $10.0\text{mA}$  至  $40.0\text{mA}$ ，每隔  $5.0\text{mA}$  记录相应的感生电动势  $V$ 。
- (4) 取  $x=l$ （管口位置），频率和电流分别取三组数值： $f=4000\text{Hz}$ 、 $I=10.0\text{mA}$ ； $f=2000\text{Hz}$ 、 $I=20.0\text{mA}$ ； $f=1000\text{Hz}$ 、 $I=40.0\text{mA}$ ，测出对应的  $V$  值。从测量结果中可以得出什么结论？
- (5) 从以上测量数据中取出  $x=0$ ， $f=1000\text{Hz}$ ， $I=40.0\text{mA}$  和对应的  $V$  值，再取  $x=l$ ， $f=1000\text{Hz}$ ， $I=40.0\text{mA}$  和对应的  $V$  值。分别用公式（1）和（2）计算出  $B$  值，并对得出的  $B$  值进行比较和讨论。

### 5.2 测量直螺线管轴线上的磁场分布

- (1) 仍按图 2 接线。取  $f=2000\text{Hz}$ ，输出电流可设定为  $20.0\text{mA}$ ，当  $x=0$ （中心位置）时，记录下此时的  $V$  值。
- (2) 向外侧移动探测线圈 A1，每隔  $1.0\text{cm}$  记录对应的  $V$ ，其间注意记下  $x=l$ （管口位置）时的  $V$  值。测量直至  $x=21.0\text{cm}$  为止，此时探测线圈中心移出螺线管。
- (3) 作出  $V(x)-x$  曲线，它是否就是相应的  $B(x)-x$  曲线？对曲线进行分析讨论。
- (4) 计算  $V_{x=l}/V_{x=0}$  是否等于  $\frac{1}{2}$ ，为什么？

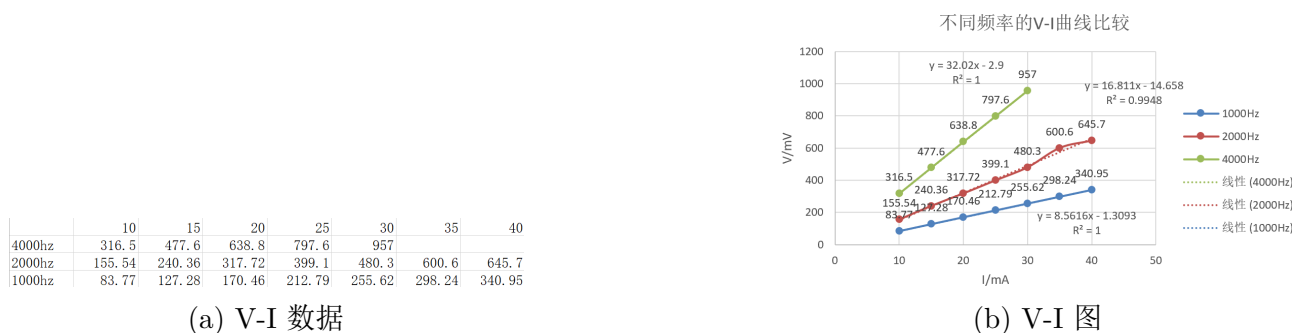
## 6 数据记录

根据实验结果记录数据，使用 excel 整理处理。

## 7 数据处理

### 7.1 分析讨论 $V-I$ 曲线

根据实验数据，做出散点图并进行线性回归分析，得拟合直线方程及  $R$  值。



直线：当  $f$  不变时，由于  $x=0$ ，故式（1）化为  $B = \mu_0 n I$ ，又有式（2） $B = \frac{V}{2\pi^2 N_1 r_1^2 f}$ ，得  $V = (2\pi^2 N r_1^2 f \mu_0 n) I$ ，故  $V-I$  呈线性相关  
斜率：由  $V-I$  图可知： $k_{4000\text{Hz}} \approx 2k_{2000\text{Hz}} \approx 4k_{1000\text{Hz}}$ ，刚好与理论公式  $V/I = (2\pi^2 N r_1^2 \mu_0 n) \cdot f$ ，斜率与  $f$  成正比相符

## 7.2 $x=1$ （管口位置）时，频率和电流得关系

Table 1: 实验数据（分成两行，每行 11 组数据）

$x$ (cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V$ (mV)	320.7	320.5	320.3	320.3	320.1	319.6	318.7	318.4	318.2	317.3	316.3
$B$ (T)	0.164678	0.164575	0.164472	0.164369	0.164113	0.163651	0.163394	0.162932	0.162418	0.16211	0.161751

$x$ (cm)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$V$ (mV)	315.7	315	312.8	309.6	302.5	281.4	238.5	181.6	126.2	74.79	29.16
$B$ (T)	0.160621	0.158978	0.155332	0.144497	0.122468	0.093251	0.064803	0.038404	0.014973	0.001119	2.18

同 7.1 推论公式  $V = (2\pi'Nr_1^2\mu_0n) \cdot If$  同理，得当  $x=1$  时， $V = \frac{\pi^2N_1r_1^2f\mu_0NI}{\sqrt{R^2+4l^2}}$   
 同时由实验数据可看出  $f_1I_1 \approx f_2I_2 \approx f_3I_3$ ，验证了推论公式： $fI$  之积约为定值，故  $V$  几乎相等

## 7.3 对计算所得 $B$ 值比较分析

带入要求场景下的实验数据，计算所得制成表格

Table 2: 不同条件下测得的磁场数据

	公式 (1)	公式 (2)
$x=0, f=1000 \text{ Hz}, I=40.0 \text{ mA}$	$3.32 \times 10^{-4}$	$3.29 \times 10^{-4}$
$x=1, f=1000 \text{ Hz}, I=40.0 \text{ mA}$	$1.48 \times 10^{-4}$	$1.44 \times 10^{-4}$

有  $B_1 \approx B'_1, B_2 \approx B'_2$ ，说明测量值与理论值相近；同时有  $B_1 \approx 2B_2, B'_1 \approx 2B'_2$ ，符合  $B_{x=0} = \mu_0nI = 2 \times \frac{1}{2}\mu_0I = 2B_{x=2}$  的理论值。

## 7.4 $V(x)$ - $x$ 曲线与 $B(x)$ - $x$ 曲线的关系

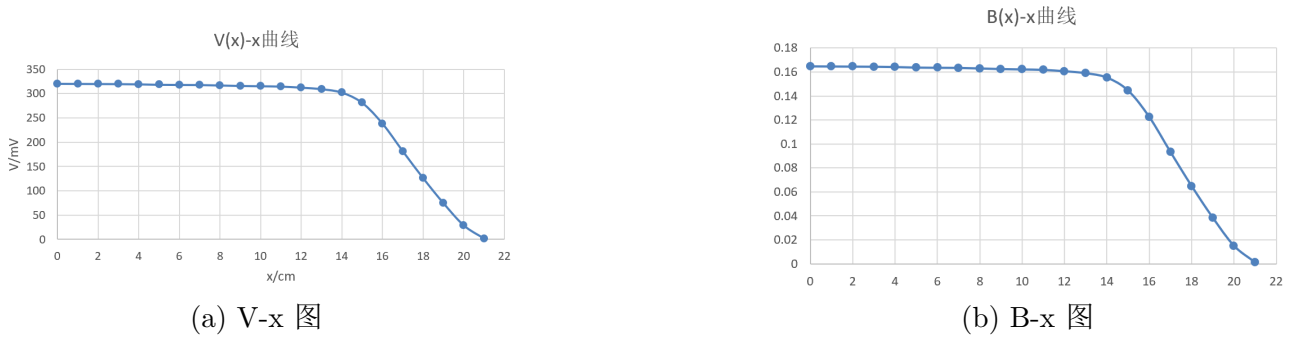


Figure 3:  $V(x)$ - $x$  曲线与  $B(x)$ - $x$  曲线对比分析

做出  $B(x)$ - $x$  曲线曲线，与  $V(x)$ - $x$  曲线对比，可以发现两者趋势相同，但值不同。  
 根据  $B = \frac{V}{2\pi^2N_1r_1^2f}$ ，可得  $V = B \cdot 2\pi^2N_1r_1^2f$ ，实验结果和理论一致。

## 7.5 $\frac{V_{x=l}}{V_{x=0}}$ 是否等于 $\frac{1}{2}$ ?

根据实验数据，其值近似  $1/2$ ，但由于实际操作中由于漏磁、边缘效应及实验仪器不稳定等一系列原因，造成其值小于  $1/2$ 。

Table 3: 不同工作条件下的电压数据及其比值

条件	$V_{x=l}$ (mV)	$V_{x=0}$ (mV)	$\frac{V_{x=l}}{V_{x=0}}$
$f = 4000$ Hz, $I = 10.0$ mA	145.4	316.5	0.46
$f = 2000$ Hz, $I = 20.0$ mA	147.76	317.72	0.465
$f = 1000$ Hz, $I = 40.0$ mA	149.36	340.95	0.438

## 7.6 误差分析

在实验测量过程中，存在多种可能影响数据精度的误差因素。下面列举了三个主要因素及其分析：

### 1. 边缘效应

理论模型通常假设磁场分布是均匀的，尤其是在螺线管或其他线圈内部采用理想化假设时。然而，在实际情况中，线圈边缘区域的磁场分布往往不均匀，即存在边缘效应。该效应会造成测量点附近的磁通密度与理论预期不同，从而导致电压及其它测量数据产生偏差。边缘效应的影响程度取决于线圈尺寸、匝数以及测量点距离边缘的远近。

### 2. 频率与信号稳定性

实验中，信号源的频率和电流稳定性对测量结果起着至关重要的作用。如果频率存在较大波动，或信号源在采样过程中不够稳定，会引起瞬时电压值的变化。目前使用的理论公式往往基于稳态信号进行推导，高频下亦可能出现寄生电感、电容等非理想效应，进一步扰乱预期信号。因此，确保信号源和电流源的稳定性是取得准确数据的关键。

### 3. 环境因素

环境温度、电磁干扰及其他外部因素也会影响实验结果。温度变化可能影响线圈的电阻和电感特性，从而改变通过线圈的电流；同时，外部电磁场的影响可能引入噪声，干扰电压和磁场的稳定测量。为了降低这方面的误差，实验通常需要在温度受控、屏蔽良好的环境中进行，或在数据分析阶段对环境因素造成的误差进行补偿。

## 8 问题思考

为减小测量误差，本实验可从以下几个方面进行改进：

1. 仪器精度与校准使用高精度的测量仪器，并定期对设备进行校准。增加数据采样次数，通过多次重复测量取平均值，降低系统和随机误差。
2. 环境控制与屏蔽建立温度、湿度受控的实验环境，并对实验装置进行电磁屏蔽，减少外部干扰对测量的影响。采用屏蔽室或磁屏蔽设备，可有效降低背景噪声。
3. 实验装置优化改进线圈及传感器的设计与制作，尽量减小边缘效应对磁场分布的影响。使用精度更高的元件，并在设计上尽量使磁场分布接近理论模型的理想状态。
4. 信号源稳定性为确保信号的频率和幅值稳定，采用高稳定性的波形发生器、电流源和相关控制器，减少因信号波动导致的误差。
5. 同步采样与时序控制采用同步采样技术，确保在不同测量位置的数据采集能同步进行，防止因时间延迟或采样误差引起的数据偏差。

## 9 实验结论

根据实验过程和实验数据，在数据处理过程进行分析讨论，可以得到部分结论，加深了对磁场的理解。