

《基础物理实验》实验报告

实验名称 磁场的测量 指导教师 丰家峰
姓名 徐昕妍 学号 2023K8009970008 分班分组及座号 1-10-5 号(例: 1-04-5 号)
实验日期 2024 年 11 月 18 日 实验地点 708 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

第一部分 利用霍尔效应实验仪测量磁感应强度

1 实验目的

1. 霍尔效应原理及霍尔元件有关参数的含义和作用
2. 测绘霍尔元件的 V_H-I_S , V_H-I_M 曲线, 了解霍尔电势差 V_H 与霍尔元件工作电流 I_S 、磁感应强度 B 及励磁电流 I_M 之间的关系。
3. 学习利用霍尔效应测量磁感应强度 B 及磁场分布。
4. 了解几种副效应及其产生原因, 学习用“对称交换测量法”消除副效应产生的系统误差。

2 实验器材

DH4512D 霍尔效应实验仪。DH4512D 霍尔效应实验仪由实验架和测试仪二个部分组成。具体组成如下图所示:

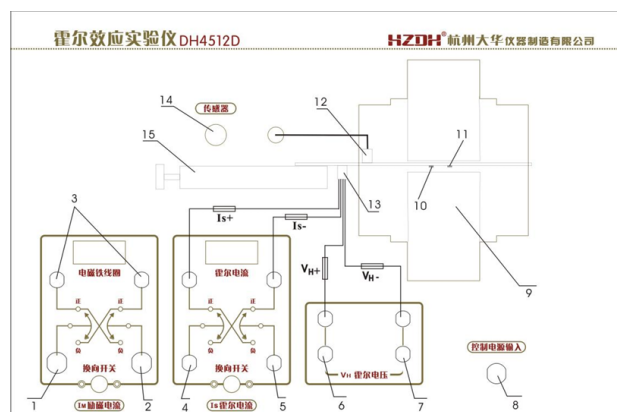


图 1: DH4512D 霍尔效应实验仪测试架平面图

1. 电磁铁励磁电流 I_M 输入+ (与测试仪对应 I_{M+} 输出相连)
2. 电磁铁励磁电流 I_M 输入- (与测试仪对应 I_{M-} 输出相连)
3. 电磁铁线圈端 (内部已连接到电磁铁线圈, 无需再连线)
4. 霍尔工作电流 I_{S+} 输入 (与测试仪对应 I_{S+} 输出相连)
5. 霍尔工作电流 I_{S-} 输入 (与测试仪对应 I_{S-} 输出相连)
6. 霍尔电压输出正极 V_{H+} (与测试仪对应 V_{H+} 输入相连)

7. 霍尔电压输出正极 V_{H+} (与测试仪对应 V_{H+} 输入相连)
8. 控制电源输入 (继电器控制工作电源, 与测试仪机箱后面板控制电源输出相连)
9. 电磁铁 (由铁芯和线圈组成, 用于产生磁场)
10. 霍尔元件 (被测霍尔元件, 用于研究其霍尔效应特性)
11. 霍尔传感器 (用于测量电磁铁磁场)
12. 霍尔传感器信号输出插座, 通过连接线内接到传感器插座 14 上;
13. 霍尔元件引脚插座 (被测霍尔元件, 共四线输出, 分别为 I_{S+} , I_{S-} , V_{H+} 和 V_{H-} , 每根线上均有号码管进行标示, 连接时注意脚位)
14. 霍尔传感器插座 (与测试仪毫特计传感器插座相连)
15. 可调移动尺, 微调霍尔元件在电磁铁间隙中的位置

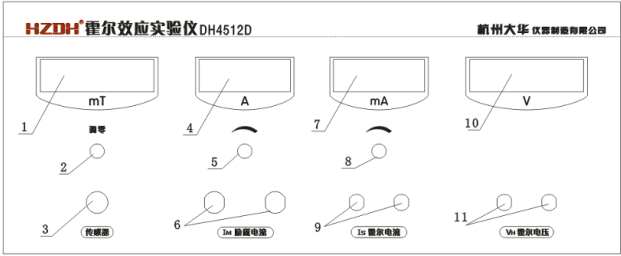


图 2: DH4512D 霍尔效应实验仪测试仪面板图

1. 毫特计显示窗
2. 毫特计调零电位器
3. 毫特计传感器接口
4. I_M 励磁电流显示
5. I_M 励磁电流调节电位器
6. I_M 励磁电流输出接口
7. I_S 霍尔工作电流显示
8. I_S 霍尔工作电流调节电位器
9. I_S 霍尔工作电流输出
10. 霍尔电压 V_H 显示
11. 霍尔电压 V_H 输入接口

3 实验原理

3.1 霍尔效应

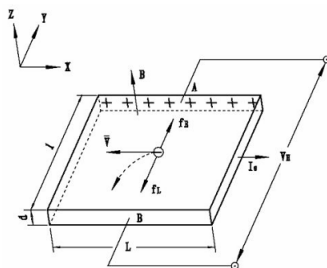


图 3: 霍尔效应示意图

如上图所示,将通有电流 I_H 的 p 型样品(n 型样品的霍尔电势差方向相反)导体放置于方向垂直于电流方向的匀强磁场 B 中,那么导体中将会出现一个电势差 U_H ,其方向垂直于 I_H 和 B ,此现象称为霍尔效应。对于空穴中沿着电流传播方向的运动电荷,设其漂移速度为 v ,那么磁场会对该电荷产生一个洛伦兹力 F_B ,方向与运动方向和磁场方向垂直。设电荷量绝对值为 q ,则有 $F_B = qv \times B$ 。于是同种电荷将在一面上堆积,产生沿 3、4 面法向的电场,直到载流子受力平衡时才达到平衡,即 $F_E = F_B$ 。由电场和电势差的定义,此时电场强度 $E = vB$,电势差 $U_H = wvB$,其中 w 为 3、4 面间的距离。

由电流的定义,设单位体积内载流子个数为 n ,导体宽度为 w ,厚度为 d ,载流子的速度为 v ,则有 $I_H = nqw dv$,进而有 $E = \frac{BI_H}{nqw d}$,以及霍尔电压 $U_H = \frac{BI_H}{nqw d} = K_H I_H B$,其中 $R_H = \frac{1}{nq}$ 称为霍尔系数, $K_H = \frac{1}{nq d}$ 称为霍尔元件灵敏度,与载流子浓度 n 成反比,与导体厚度 d 成反比。而通常来说,霍尔元件灵敏度越大越好,所以实验室会采用载流子浓度较小的半导体,同时把霍尔元件尽可能做得薄。

3.2 实验系统误差及其消除(消除霍尔元件副效应的影响)

测量霍尔电势 V_H 时,不可避免的会产生一些副效应,由此而产生的附加电势叠加在霍尔电势上,形成测量系统误差,这些副效应有:

1. 不等位电势 V_0

由于制作时,两个霍尔电势不可能绝对对称的焊在霍尔片两侧(图 4a)、霍尔片电阻率不均匀、控制电流极的端面接触不良(图 4b)都可能造成 A、B 两极不处在同一等位面上,此时虽未加磁场,但 A、B 间存在电势差 V_0 ,此称不等位电势, $V_0 I_s R_0$, R_0 是两等位面间的电阻,由此可见,在 R_0 确定的情况下, V_0 与 I_s 的大小成正比,且其正负随 I_s 的方向而改变。

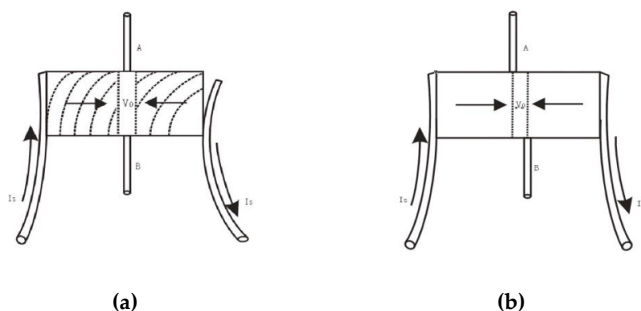


图 4: 不等位电势 V_0

2. 爱廷豪森效应

当元件 X 方向通以工作电流 I_s , Z 方向加磁场 B 时, 由于霍尔片内的载流子速度服从统计分布, 有快有慢。在到达动态平衡时, 在磁场的作用下慢速快速的载流子将在洛伦兹力和霍尔电场的共同作用下, 沿 y 轴分别向相反的两侧偏转, 这些载流子的动能将转化为热能, 使两侧的温升不同, 因而造成 y 方向上的两侧的温差 $T_A T_B$ 。所产生的温度梯度与通过样品的电流和磁感应强度成正比, 即

$$\frac{\partial T}{\partial y} = P I_H B \quad (1)$$

P 为埃廷斯豪森系数。

因为霍尔电极和元件两者材料不同, 电极和元件之间形成温差电偶,

$$V_E = U(T - \Delta T, T + \Delta T) \quad (2)$$

这一温差在 A、B 间产生温差电动势 $V_E V_E \propto I_B$ 。这一效应称爱廷豪森效应, V_E 的大小与正负符号与 I 、 B 的大小和方向有关, 跟 V_H 与 I 、 B 的关系相同, 所以不能在测量中消除。

3. 伦斯脱效应

由于控制电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同, 控制电流在两电极处将产生不同的焦耳热, 引起两电极间的温差电动势, 此电动势又产生温差电流 (称为热电流) Q , 热电流在磁场作用下将发生偏转, 结果在 y 方向上产生附加的电势差 V_N , 且 $V_N \propto Q_B$ 这一效应称为伦斯脱效应。

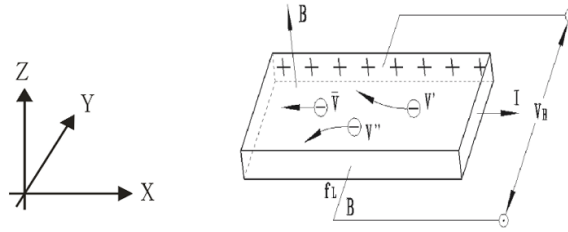


图 5: 正电子运动平均速度

在 p 型霍尔片中, 如果样品电极 1, 2 端 (图 6) 接触电阻不同, 就会产生不同的焦耳热, 使两端温度不同。沿温度梯度 dT/dx 有扩散倾向的空穴受到磁感应强度的偏转, 会建立一个横向电场, 与洛伦兹力相抗衡, 则在 y 方向电极 3, 4 之间产生电势差

$$V_N = -Q \frac{\partial T}{\partial x} B \quad (3)$$

其中 Q 成为能斯特系数。由上式可知 V_N 的符号只与 B 的方向有关。

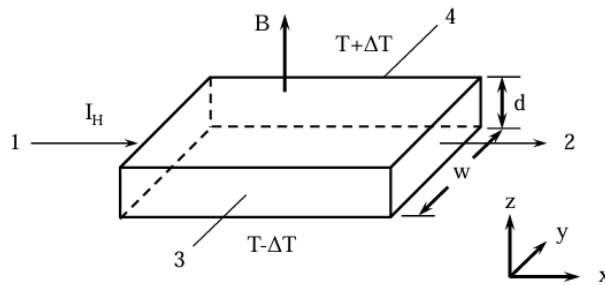


图 6: 副效应示意图

4. 里纪-杜勒克效应

如 3 所述霍尔元件在 x 方向有温度梯度 $\frac{dT}{dx}$, 引起载流子沿梯度方向扩散而有热电流 Q 通过元件, 在此过程中载流子受 Z 方向的磁场 B 作用下, 在 y 方向引起类似爱廷豪森效应的温差 $T_A T_B$,

$$\frac{\partial T}{\partial y} = S \frac{\partial T}{\partial x} B \quad (4)$$

S 称为里吉-勒迪克系数。

由此产生的电势差 $V_R \propto Q_B$, 其符号与 B 的方向有关, 与 I_s 的方向无关。

为了减少和消除以上效应的附加电势差, 利用这些附加电势差与霍尔元件工作电流 I_s , 磁场 B (即相应的励磁电流 I_M) 的关系, 采用对称 (交换) 测量法进行测量。

$$\begin{aligned} \text{当 } +I_s, +I_M \text{ 时 } V_{AB1} &= +V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R \\ \text{当 } +I_s, -I_M \text{ 时 } V_{AB2} &= -V_H + V_0 - V_E + V_N + V_R \\ \text{当 } -I_s, -I_M \text{ 时 } V_{AB3} &= +V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R \\ \text{当 } -I_s, +I_M \text{ 时 } V_{AB4} &= -V_H - V_0 - V_E - V_N - V_R \end{aligned}$$

对以上四式作如下运算则得:

$$\frac{1}{4}(V_{AB1} - V_{AB2} + V_{AB3} - V_{AB4}) = V_H + V_E$$

可见, 除爱廷豪森效应以外的其他副效应产生的电势差会全部消除, 因爱廷豪森效应所产生的电势差 V_E 的符号和霍尔电势 V_H 的符号, 与 I_s 及 B 的方向关系相同, 故无法消除, 但在非大电流、非强磁场下, $V_H \gg V_E$, 因而 V_E 可以忽略不计, 由此可得:

$$V_H \approx V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 + V_4}{4}$$

4 实验内容与数据处理

4.1 测量霍尔电压 V_H 与工作电流 I_s 的关系

将霍尔元件移至电磁铁中心, 在 $I_M = 0$ 的情况下, 调零毫特计; 调节 $I_M = 200mA$, 调节 $I_s = 0.5mA$, 按表 (1) 中 $I_M I_s$ 正负情况切换“测试架”上的电子开关方向, 分别测量霍尔电压 V_H 值 ($V_1 V_2 V_3 V_4$) 填入表 (1)。以后 I_s 每次递增 $0.50mA$, 测量各 $V_1 V_2 V_3 V_4$ 值。绘出 $I_s V_H$ 曲线, 验证线性关系。

$I_s(mA)$	$V - 1(mV)$	$V - 2(mV)$	$V - 3(mV)$	$V - 4(mV)$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}(mV)$
	$+I_M + I_s$	$+I_M - I_s$	$-I_M - I_s$	$-I_M + I_s$	
0.50	26.0	-25.9	23.9	-23.8	24.9
1.00	51.3	-50.9	47.3	-47.0	49.1
1.50	77.2	-76.2	71.1	-70.5	73.8
2.00	102.9	-101.0	94.7	-93.6	98.1
2.50	128.9	-126.1	118.8	-117.1	122.7
3.00	154.9	-151.0	142.7	-140.2	148.8

表 1: $V_H - I_s$

该表记录了工作电流 I_s 与霍尔电压 V_H 的关系。整体上得到的 V_H 大致呈等差数列, 将所得数据线性拟合得到如下结果:

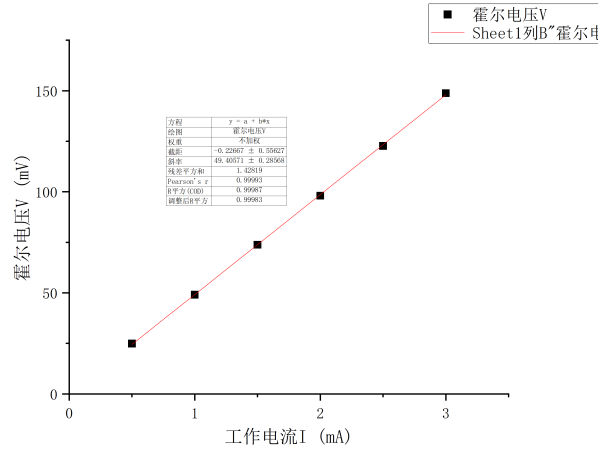


图 7: 霍尔电压与工作电流关系图

由图可知, 霍尔电压与工作电流呈线性关系。斜率 $k \approx 49.4$, 截距接近于 0, 实验结果较理想。

4.2 测量霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 的关系, 磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 的关系

现将 I_M, I_S 调零, 再调节 I_S 至 1.00mA 。调节 $I_M = 50, 100, 150 \dots 300\text{mA}$, 分别测量霍尔电压 V_H 和磁感应强度 B 值, 分别绘出 $V_H - B, B - I_M$ 曲线并进行线性拟合。

实验数据如下表所示:

$I_M(\text{mA})$	$V - 1(\text{mV})$	$V - 2(\text{mV})$	$V - 3(\text{mV})$	$V - 4(\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$
	$+I_M + I_S$	$+I_M - I_S$	$-I_M - I_S$	$-I_M + I_S$	
50	14.2	-13.8	10.2	-10.0	12.1
100	26.5	-26.1	22.2	-21.9	24.2
150	39.2	-38.9	35.2	-34.9	37.1
200	51.3	-50.8	47.3	-47.0	49.1
250	63.6	-63.2	59.2	-59.2	61.3
300	75.9	-75.4	71.8	-71.4	73.6

表 2: $V_H - I_M$

$I_M(\text{mA})$	$B_1(\text{mV})$	$B_2(\text{mV})$	$B_3(\text{mV})$	$B_4(\text{mV})$	$B_H = \frac{B_1 - B_2 + B_3 - B_4}{4} (\text{mT})$
	$+I_M + I_S$	$+I_M - I_S$	$-I_M - I_S$	$-I_M + I_S$	
50	35.1	35.1	-34.1	-34.0	34.6
100	70.1	70.1	-68.2	-68.2	69.2
150	105.9	106.3	-105.1	-105.1	105.6
200	140.3	140.3	-139.5	-139.5	139.9
250	175.4	175.4	-173.7	-174.2	174.7
300	210.3	210.3	-209.1	-208.6	209.6

表 3: $V_H - I_M$

分别绘制 $V_H - B$ 和 $B - I_M$ 曲线并进行线性拟合, 得到如下结果:

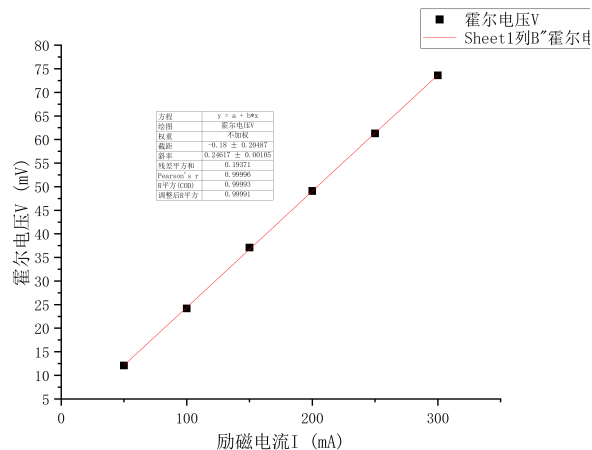


图 8: 霍尔电压与励磁电流的关系曲线

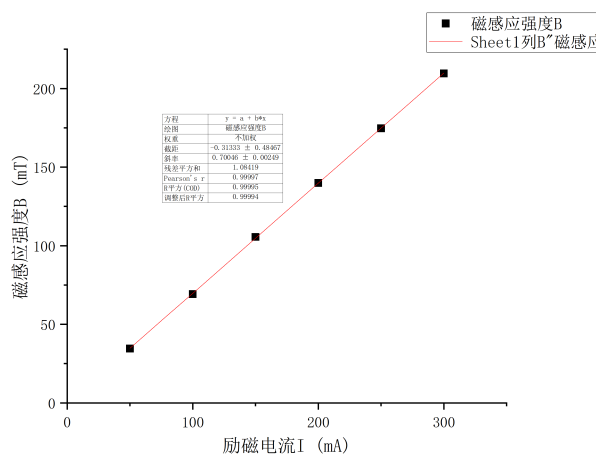


图 9: 磁感应强度与励磁电流的关系曲线

从拟合曲线可以看出，霍尔电压与励磁电流、磁感应强度与励磁电流均呈线性关系。霍尔电压与励磁电流关系图 $k \approx 0.246$, 磁感应强度与励磁电流关系图 $k \approx 0.700$ 。

根据测得数据计算霍尔元件的灵敏度。如果已知 B , 根据公式 $V_H = K_H I_S B \cos B = K_H I_S B$ 可知,

$$K_H = \frac{V_H}{I_S B} \quad (5)$$

$V_H - B$ 曲线斜率 $k = \frac{k_{V_H - I_M}}{k_{B - I_M}} = 0.351$, 根据公式(1)得:

$$K_H = \frac{K_{HB}}{I_S} = 351.43 \text{ mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$$

与实验仪器上提供的理论值 $K_H = 345 \text{ mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$ 相比, 相对误差为 $W \approx 1.86\%$ 。可见实验结果较准确。

4.3 测量电磁铁磁场沿水平方向分布

首先调零。在励磁电流 $I_M=0$ 的情况下调零毫特计。调节 $I_M=200\text{mA}$, 调节移动尺的位置, 每 2mm 记录毫特计读数。具体结果如下表所示:

X/mm	42	40	38	36	34	32	30
B/mT	40.8	65.4	115.9	138.2	140.0	140.3	140.4
X/mm	28	26	24	22	20	18	16
B/mT	140.6	140.7	140.8	140.9	141.0	141.2	141.3

表 4: 电磁铁磁场沿水平方向分布

将所得数据绘成图像,如下图所示:

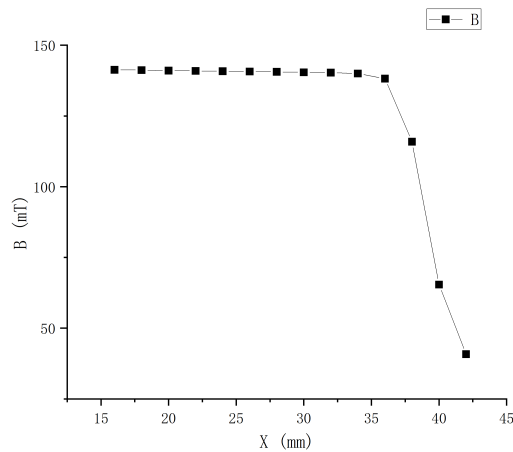


图 10: B-X 关系图

由上图和上表可知,本实验所用的电磁铁磁场在靠近电磁铁中心处($16mm \leq X \leq 34mm$)几乎匀强,而当探头接近电磁铁边缘部分时,磁感应强度急剧下降。从总体趋势上看,这个结果与理论是相符的,尤其是在电磁铁的气隙宽度比较小的条件下。

4.4 AC 模式霍尔效应测量磁场

将万用表接入到电路中,并调整万用表至 AC 模式,调解工作电流为 1mA,改变励磁电流,测量磁感应强度及霍尔电压大小。所得数据如下表所示:

$I_M(mA)$	50	75	100	125	150	175	200
B/mT	35.3	52.3	69.1	86.7	105.3	122.3	139.6
V_{H-AC}/mV	14.503	20.372	26.262	32.435	38.945	44.844	50.924

表 5: AC 模式霍尔效应测量磁场

根据数据绘出霍尔电压与磁感应强度的关系图,如下所示:

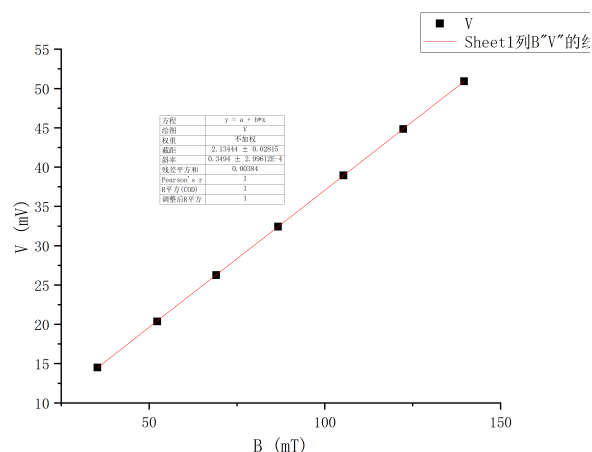


图 11: AC 模式霍尔效应测量磁场

经过线性拟合后可得斜率 k 约为 0.3494, 根据公式

$$K_H = \frac{k}{I_S}$$

得 $K_H = 349.4 \text{ mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$ 。计算相对误差 $W \approx 1.28\%$, 可见实验结果较准确。

第二部分 亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量

1 实验目的

1. 掌握载流圆线圈的磁感应强度分布;
2. 掌握亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布。

2 实验仪器与用具

亥姆霍兹线圈磁感应强度实验仪由两个部分组成, 亥姆霍兹线圈架部分(图 11 和图 12)和磁感应强度测量仪(见图 13)。

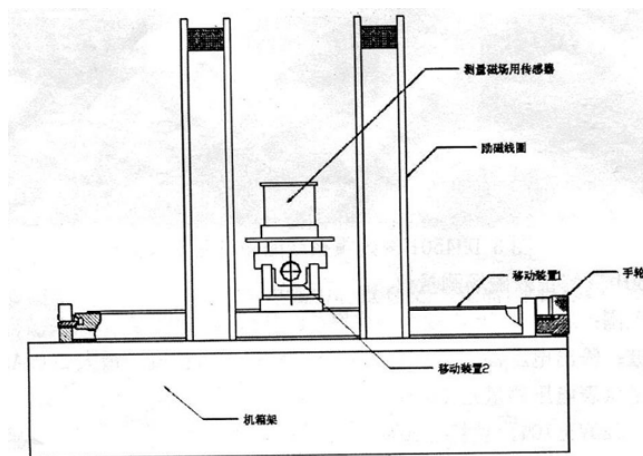


图 12: 亥姆霍兹线圈架部分

亥姆霍兹线圈架部分包括有一个传感器盒,里面装有利于测量磁感应强度的感应线圈。

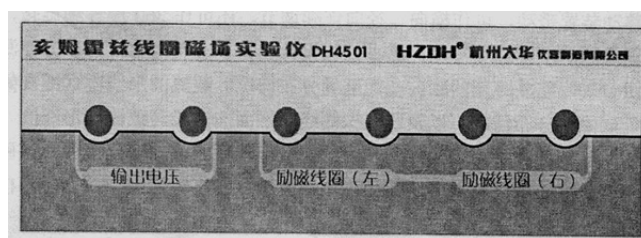


图 13: DH4501 亥姆霍兹线圈架面板

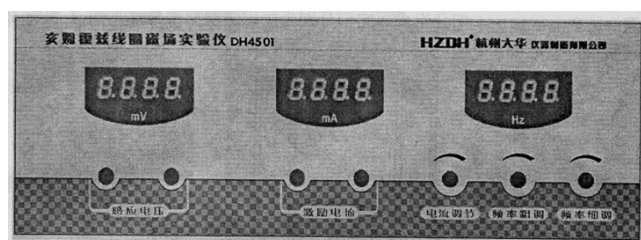


图 14: DH4501 亥姆霍兹线圈磁感应强度测量仪面板

具体如下:

亥姆霍兹线圈架

- 两个励磁线圈:线圈有效半径 105mm;单个线圈匝数 400 匝;二线圈中心间距 105mm
- 移动装置:轴向可移动距离 250mm,径向可移动距离 70mm,距离分辨率 1mm
- 探测线圈:匝数 1000,旋转角度 360 度。

DH4501 亥姆霍兹磁感应强度测量仪

- 频率范围:20 ~ 200Hz,频率分辨率:0.1Hz,测量误差:0.1%
- 正弦波:输出电压幅度:最大 20V_{P-P},输出电流幅度:最大 200mA
- 数显毫伏表电压测量范围:0 ~ 20mV,测量误差:1%

电源:220V ± 10%

外形尺寸

- 亥姆霍兹线圈架 340mm × 270mm × 250mm
- 磁感应强度测试仪 320mm × 300mm × 120mm

3 实验原理

3.1 载流圆线圈与亥姆霍兹线圈的磁感应强度

3.1.1 载流圆线圈的磁感应强度

一半径为 R,通以电流 I 的圆线圈,轴线上磁感应强度的公式为:

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

式中 N_0 为圆线圈的匝数, x 为轴上某一点到圆心 O 的距离。 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。轴线上磁感应强度的分布如图 14 所示。

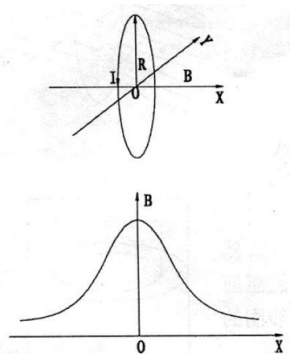


图 15: 单个圆环线圈的磁感应强度分布示意图

3.1.2 亥姆霍兹线圈的磁感应强度

所谓亥姆霍兹线圈为两个相同线圈彼此平行且共轴, 使线圈上通以相同方向电流 I , 理论计算证明: 线圈距离 a 等于线圈半径 R 时, 两个单个线圈的磁感应强度叠加在轴上 (两个线圈的圆心连线) 附近较大范围内的合磁感应强度是均匀的, 如图 15 所示。

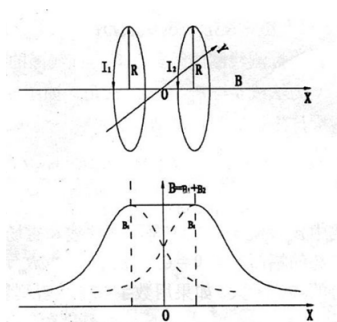


图 16: 亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布示意图

设 Z 为亥姆霍兹线圈中轴线上某一点离中心点 O 处的距离, 则亥姆霍兹线圈轴线上改点的磁感应强度为:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[R^2 + \left(\frac{R}{2} + z \right)^2 \right]^{-1.5} + \left[R^2 + \left(\frac{R}{2} - z \right)^2 \right]^{-1.5} \right\} \quad (7)$$

而在亥姆霍兹线圈轴线上中心 O 处, $Z=0$, 磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R} \times \frac{16}{5^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

3.1.3 电磁感应法测磁感应强度

1. 电磁感应法测量原理

设由交流信号驱动的线圈产生的交变磁感应强度, 它的磁感应强度的瞬时值为

$$B = B_m \sin \omega t$$

式中 B_m 为磁感应强度的峰值, 其有效值记作 B , ω 为角频率。磁感应强度中一探测线圈的磁通量为

$$\Phi = N S B_m \cos \theta \sin \omega t$$

式中: N 为探测线圈的匝数, S 为该线圈的截面积, θ 为 B 与线圈法线夹角。线圈产生的感应电动势为

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\epsilon_m \cos \omega t$$

式中 ϵ_m 为感应电动势幅值。当 $\theta=0$ 时, 感应电动势幅值最大, 如果用数字式毫伏表测量此时线圈的电动势, 则毫伏表的示值(有效值) $U_{max} = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{2}}$, 则

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2}U_{max}}{NS\omega} \quad (9)$$

2. 探测线圈的设计实验中由于磁感应强度的不均匀性, 探测线圈又不可能做得很小, 否则会影响测量灵敏度。一般设计的线圈长度 L 和外径 D 有 $L=2/3 D$ 的关系, 线圈的内径 d 与外径 D 有 $d \leq 3/D$ 的关系。线圈在磁感应强度中的等效面积, 经过理论计算, 可用下式表示

$$S = \frac{13}{108}\pi D^2 \quad (10)$$

这样的线圈测得的平均磁感强度可以近似看成是线圈中心点的磁感强度。本实验励磁电流由专用的交变磁感强度测试仪提供。

$$B = \frac{54}{13\pi^2 ND^2 f} U_{max} \quad (11)$$

4 实验内容与数据处理

4.1 测量圆电流线圈轴线上磁感应强度的分布

按照实验要求连接。调节频率调节电位器, 使频率表读数为 **120Hz**。调节磁感应强度实验仪的电流调节电位器, 使励磁电流有效值为 **I=60mA**, 以圆电流线圈中心为坐标原点, 每隔 **5mm** 测一个 U_{max} 值, 测量过程中主义保持励磁电流值不变, 并保证探测线圈发现方向与圆电流线圈轴线 D 的夹角为 0° , 圆电流线圈轴线上磁感应强度分布测量数据如下:

轴向距离 $X(\text{mm})$	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$U_{max}(\text{mV})$	5.61	5.79	5.93	6.02	6.09	6.11	6.09	6.03	5.94	5.81	5.65
$B = \frac{2.926U_{max}}{f} (\text{mT})$	0.1367	0.1412	0.1446	0.1468	0.1485	0.1490	0.1485	0.1470	0.1448	0.1417	0.1378
$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{1.5}} (\text{mT})$	0.1322	0.1361	0.1393	0.1417	0.1431	0.1436	0.1431	0.1417	0.1393	0.1361	0.1322
相对误差 %	3.47	3.70	3.78	3.60	3.75	3.74	3.75	3.78	3.96	4.06	4.20

表 6: 圆电流线圈轴线上磁感应强度分布

由上表数据可得, 测量值与理论计算值相比较。计算理论值与实验值的相对误差, 发现相对误差在 4% 将左右, 较符合。将上述数据绘图得:

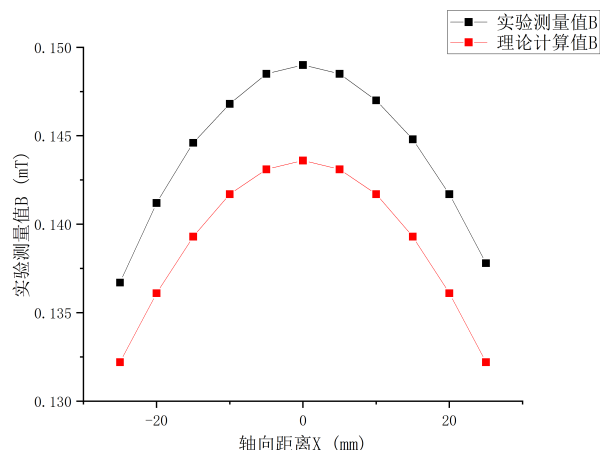


图 17: 载流圆线圈轴线上的磁场分布

定性上看, 测量值与理论值的趋势是一致的, 都是随着坐标增大, 磁感应强度先增大后减小, 在位置 0mm 处达到最大, 且关于 0mm 具有一定的对称性; 定量上看, 测量值与计算相对误差全部都在 5% 以内, 在实验误差允许的范围, 符合理论预期。

4.2 测量亥姆霍兹线圈轴线上磁感应强度的分布

按照实验要求连接。在励磁电流为零的情况下将磁感应强度清零。把磁感应强度实验仪的两个线圈串联起来, 接到磁感应强度测试仪的励磁电流两段。调节频率电位器, 使频率表读数为 120Hz。调节磁感应强度测量仪的电流调节电位器, 使励磁电流有效值为 60mA, 保持励磁电流值不变。以亥姆霍兹线圈中心为坐标原点, 每隔 5mm 测一磁感应强度 U_{max} 的值。实验数据如下:

轴向距离 X(mm)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$U_{max}(mV)$	8.46	8.47	8.49	8.49	8.50	8.50	8.49	8.49	8.49	8.48	8.47
$B = \frac{2.926U_{max}}{f}(mT)$	0.2088	0.2090	0.2096	0.2096	0.2098	0.2098	0.2096	0.2096	0.2096	0.2093	0.2090

表 7: 亥姆霍兹线圈轴线上磁感应强度的分布

将数据进行多项式拟合得到下图;

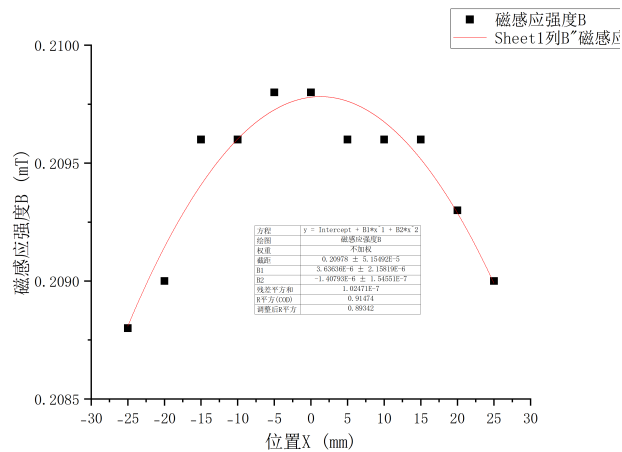


图 18: 亥姆霍兹线圈轴线上磁感应强度的分布

由上表及上图可知，轴向上磁感应强度变化比较微小，但依然遵从先增大后减小，在 0mm 处达到最大，且具有一定对称性的规律。在线圈中心磁感应强度变化较小，边缘处会出现磁感应强度的明显减弱。

4.3 测量亥姆霍兹线圈沿径向的磁感应强度分布

固定探测线圈法线方向和圆电流轴线 D 的夹角为 0° ，转动探测线圈径向移动手轮，每一步 5mm 测量一个数据，按正负方向测到边缘，记录数据。实验数据如下：

轴向距离 X(mm)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$U_{max}(mV)$	8.46	8.46	8.47	8.47	8.48	8.49	8.49	8.48	8.48	8.47	8.45
$B = \frac{2.926U_{max}}{f}(mT)$	0.2063	0.2063	0.2065	0.2065	0.2068	0.2070	0.2070	0.2068	0.2068	0.2065	0.2060

表 8: 亥姆霍兹线圈径向上磁感应强度的分布

将数据进行多项式拟合得到下图：

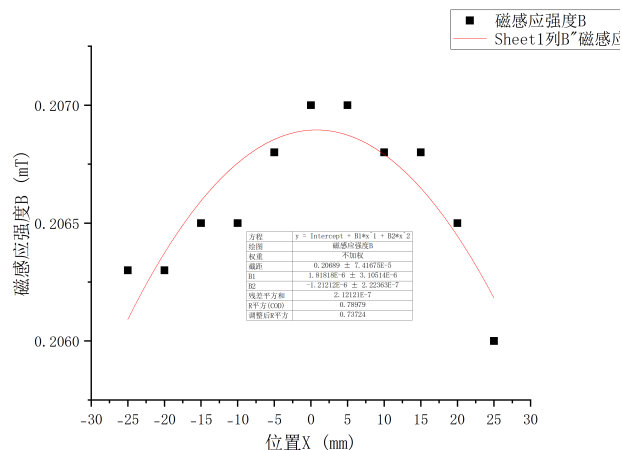


图 19: 亥姆霍兹线圈径向上磁感应强度的分布

由图表可知，在两线圈中心，磁感应强度沿径向在一定范围内变化较小，但是在边缘有明显的衰减，这与理论

计算结果预期一致。如果增加测量的点位，得到的实验结果将会更接近线圈中心处磁场强度几乎不变，边缘处缓慢下降。

4.4 探测线圈转角与感应电压

按照实验要求，把探测线圈沿轴线固定在某一位置上，让探测线圈法线方向与圆电流轴线 D 的夹角从 0° 开始，逐步转移到 $90^\circ 180^\circ 270^\circ$ ，再回到 0° 。每改变 10° 测一组数据。

探测线圈转角 θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U(mV)	8.47	8.40	7.96	7.31	6.48	5.50	4.31	2.99	1.54	0.15
计算值 U	8.470	8.272	7.480	6.330	4.964	3.535	2.155	1.023	0.267	0
探测线圈转角 θ	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
U(mV)	1.45	2.84	4.17	5.59	6.55	7.42	8.02	8.39	8.46	8.23
计算值 U	-0.252	-0.971	-2.085	-3.593	-5.017	-6.426	-7.536	-8.262	-8.46	-8.105
探测线圈转角 θ	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
U(mV)	7.76	7.07	6.26	5.23	3.92	2.44	0.92	0.35	2.00	3.43
计算值 U	-7.292	-6.123	-4.795	-3.362	-1.96	-0.834	-0.160	0	0.347	1.173
探测线圈转角 θ	300	310	320	330	340	350	360			
U(mV)	4.62	5.86	6.74	7.48	8.02	8.39	8.48			
计算值 U	2.310	3.767	5.163	6.478	7.536	8.263	8.48			

表 9: 探测线圈转角与感应电压

将所得数据绘制成图像：

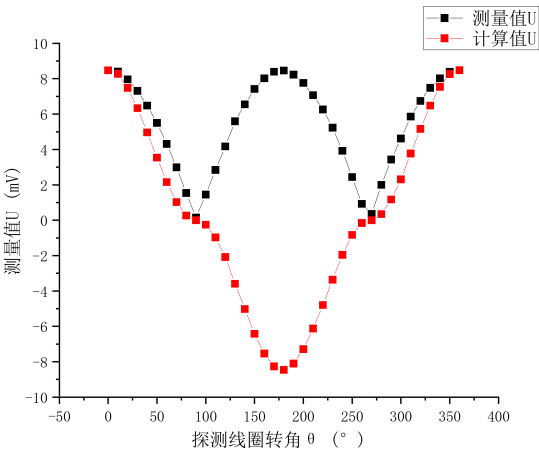


图 20: 探测线圈转角与感应电压

由上图可知，对于测量值， U 先减小再增大，在 $0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 处达到最大值，在 $90^\circ, 270^\circ$ 处达到最小值，最小值接近于 0 。对于计算得理论值，由于 $\cos \theta$ 存在正负变化，所得的计算值也存在正负变化，由图可知计算值先减小后增大，在 180° 处达到反向极小，但计算值的绝对值变化趋势与测量值一致。

4.5 励磁电流大小对磁感应强度的影响

把探测线圈固定在亥姆霍兹线圈中心点，其法线方向与圆电流轴线 D 的夹角为 0° ，并保持不变。保持电流 $I=60\text{mA}$ 不变，调节磁感应强度测试仪输出电流频率，再 $20\text{Hz} \sim 150\text{Hz}$ 范围内，每次频率改变 10Hz ，主次测量感应电动势的数值并记录。实验数据如下表所示：

励磁电流频率 $f(\text{Hz})$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$U_{max}(\text{mV})$	1.42	2.16	2.89	3.60	4.30	5.02	5.75	6.47	7.19	7.92	8.65
$B = \frac{2.926U_{max}}{f}(\text{mT})$	0.2077	0.2107	0.2114	0.2107	0.2097	0.2098	0.2103	0.2103	0.2104	0.2107	0.2109

表 10: 励磁电流大小对磁感应强度的影响

将所得数据绘制成图像：

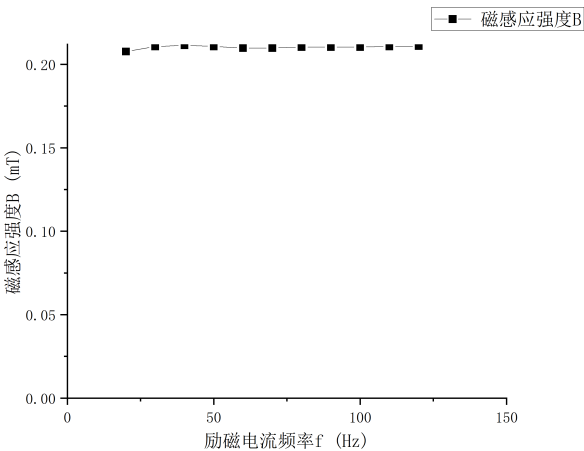


图 21: 励磁电流大小对磁感应强度的影响

从图表中不难看出，励磁电流频率的改变对于磁感应强度几乎没有显著影响。磁感应强度存在轻微的波动，不排除环境因素及电流 I 轻微改变导致磁感应强度波动。可以认为励磁电流的频率对磁感应强度的大小并无影响，符合理论预期。

5 思考题

1. 分析本实验主要误差来源，计算磁感应强度 B 的合成不确定度（分别取 $I_M = 0.2AI_H = 1\text{mA}$ ）。

答：

(a) 误差来源：

- i. 实验原理上，尚有埃廷斯豪森效应没有抵消。
- ii. 仪器本身上，实验仪器读数不稳定，导致读数存在一定的误差。
- iii. 环境影响上，实际的仪器参数和所处的环境与讲义给出的有所区别。

(b) 计算合成不确定度

由公式 $B = \frac{U_H}{K_H I_H}$ 可得不确定度公式

$$\frac{u(B)}{B} = \sqrt{\left(\frac{u(U_H)}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{u(K_H)}{K_H}\right)^2 + \left(\frac{u(I_H)}{I_H}\right)^2}$$

电压测量的允差应与仪器本身有关,而讲义未给出,于是设定为 1%, 由于 I_H 已给定,所以认为它的允差是 0。计算得 $\frac{u(U_H)}{U_H} = 2.0 \times 10^{-4}$

下面计算 K_H 的不确定度:

最小二乘所得斜率的相对不确定度的公式

$$\frac{u(x)}{x} = \sqrt{\frac{\frac{1}{R^2} - 1}{N - 2}}$$

R 为线性相关系数, N 为所测数据个数,代入计算可得 K_H 的不确定度为 1.58×10^{-3} 。

综上计算得, B 的合成不确定度为 $u(B) = 0.24 \text{ mT}$

2. 以简图示意,用霍尔效应法判断霍尔片上磁感应强度方向。

答:

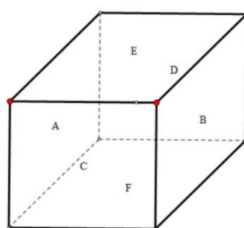


图 22: 霍尔效应判断磁场方向

一个简化的霍尔元件如上图所示, 设 AB 面为左右侧面, CD 面为前后面, EF 面为上下面。在空间中, 磁感应强度的方向是任意的, 因此此问题需要简化为测量其在三个正交的方向上的分量。如果沿着 AB 方向通电流, 那么在 CD 和 EF 方向均会产生霍尔电压。如果检测 EF 方向霍尔电压, 以及电势孰高孰低, 则可得磁场在 CD 方向的分量。重复至多 3 次, 则可算出三个正交方向的分量。将其进行矢量合成, 即可得到磁感应强度的所有信息。

3. 如何测量交变磁感应强度, 写出主要步骤。

答: 理论上, 可以将霍尔元件置于交变磁场中, 测量霍尔电压与霍尔电流的有效值, 利用公式 $U_H = K_H I_H B$ 可以得到 B 的有效值, 乘 $\sqrt{2}$ $B_0 B = B_0 \sin \omega t + \phi$ 。

4. 单线圈轴线上磁感应强度的分布规律如何? 亥姆霍兹线圈是怎样组成的? 其基本条件有哪些? 它的磁感应强度分布特点怎样?

答: 单线圈轴线上磁感应强度分布规律为中间高两侧低, 大致与距离成负三次方衰减。

亥姆霍兹线圈由两个圆线圈组成, 基本条件有: 两个圆线圈参数完全一致, 包括半径、线圈匝数、宽度等; 两个圆线圈共轴平行放置, 通同向的相同电流; 两个圆线圈间距等于圆线圈的半径。

其磁感应强度为两个单线圈单独产生的磁感应强度的矢量叠加, 分布特点是在轴向和径向的一定范围内 (两个圆线圈之间) 磁感应强度变化极小, 在通直流电时可近似形成匀强磁场。而在开始靠近线圈并到达线圈外侧时, 磁感应强度则开始缓慢下降。

5. 探测线圈放入磁感应强度后, 不同方向上毫伏表指示值不同, 哪个方向最大? 如何测准 U_{max} 值? 指示值最小表示什么?

答: 当探测线圈法向与磁感应强度方向重合时, 即磁通量变化幅度最大时毫伏表指示最大。具体到本实验的场景就是探测线圈的转角为 0° 和 180° 的时候毫伏表上的示数最大。

测 U_{max} 的办法为反复旋转线圈,找到指示最大的值。如果想测得更准,那么在实验操作上就需要等待测量值示数稳定后再读数,并要多次试验,对结果进行反复验证。在数据处理上则要对 0° 和 180° 两次结果取平均。

指示值最小表示在该方向,线圈平面与磁感应强度方向几乎平行,磁通量变化极小。具体到本实验而言,就是探测线圈的转角为 90° 的时候示数最小,表示此时探测线圈的法线方向和磁场方向是垂直的。

6. 分析圆电流磁场分布的理论值与实验值的误差的产生原因。

答:首先是励磁线圈匝数和半径。这两个值与参考值可能不完全相同,因而直接导致有误差;

然后是电流、电压、频率,仪器的机械误差、读数的示数跳动、由于线圈遮挡而导致的斜视误差会导致测量过程中掺杂人为主观因素,进而引入误差;

还有探测线圈法向和磁感应强度方向可能没有完全重合,环境中的各种干扰因素会导致实际的磁场分布与理论值并不一致,探测线圈的出现也会对这个系统的磁场分布造成影响等等,都会导致误差。

最后,计算 B 值公式中所提供的参数 2.926 可能并不准确,导致实验值比理论计算值普遍偏大。

7. 使用亥姆霍兹磁感应强度实验仪之前为什么要预热 10 分钟?

答:亥姆霍兹线圈及其测量设备对温度变化比较敏感。预热可以帮助仪器达到热平衡状态,减少温度波动对测量结果的影响;实验仪中的电子元件,如放大器、电源等,在刚开机时可能存在参数漂移,通过预热可以使这些元件的性能稳定下来,从而提高测量的精确度;如果线圈中含有磁芯,温度的变化会导致磁芯的磁导率发生变化,这会影响线圈的电感值和磁场分布。预热可以减少这种影响。

8. 在地球前面、太阳风后面挖一个无穷大的磁场空洞,地球能否移动?

答:理论上,如果在地球前面和太阳风后面挖一个无穷大的磁场空洞,这个行为本身并不会直接导致地球移动。

地球在太阳系中的运动主要受太阳引力及太阳风与地球磁场相互作用产生的力。地球的磁场主要是由地球内部的熔铁外核流动产生的,称为地球磁层。太阳风与地球磁层的相互作用对地球磁层有显著影响,但这种作用主要是对磁层形态的改变,而不是对地球本身轨道运动的直接影响。即使移除了太阳风对地球磁层的影响,也不会破坏地球围绕太阳运动的引力平衡。太阳风的作用力相对于太阳对地球的引力来说是非常微弱的。

因此,即使理论上存在这样的磁场空洞,它也不会对地球的轨道运动产生显著影响。

6 总结

首先,实验过程中,我深刻体会到了理论知识与实践操作相结合的重要性。虽然在课堂上学过霍尔效应的原理,但直到亲自进行实验操作,我才真正理解了霍尔电压是如何产生的,以及如何通过霍尔电压来测量磁感应强度。这个过程让我认识到,理论知识是实践的基础,而实践是检验和深化理论知识的途径。

同时,实验让我对科学研究的严谨性有了更深刻的认识。在实验中,任何一点疏忽都可能导致结果的偏差,因此在实验的每一个环节都必须保持严谨的态度。这种态度也将成为我未来学习和工作中的一种宝贵品质。

总之,通过这次磁场测量实验,我不仅学到了专业知识,更在实验技能、团队协作和科研态度上得到了锻炼和提高。我相信,这些经验和感悟将对我未来的学习和科研工作产生深远的影响。