

# 螺线管磁场测定实验

## 【实验目的】

1. 验证霍耳传感器输出电势差与螺线管内磁感应强度成正比。
2. 测量集成线性霍耳传感器的灵敏度。
3. 测量螺线管内磁感应强度与位置之间的关系，求得螺线管均匀磁场范围及边缘的磁感应强度。
4. 学习补偿原理在磁场测量中的应用。

## 【实验原理】

霍耳元件的作用（如右图 2 所示）：若电流  $I$  流过厚度为  $d$  的半导体薄片，且磁场  $B$  垂直于该半导体，是电子流方向由洛伦茨力作用而发生改变，在薄片两个横端面  $a$ 、 $b$  之间应产生电势差，这种现象称为霍耳效应。在与电流  $I$ 、磁场  $B$  垂直方向上产生的电势差称为霍耳电势差，通常用  $U_H$  表示。霍耳效应的数学表达式为：

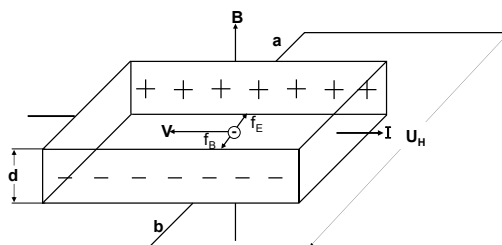


图 2 霍耳元件

$$U_H = \left(\frac{R_H}{d}\right)IB = K_H IB \quad (1)$$

其中  $R_H$  是由半导体本身电子迁移率决定的物理常数，称为霍耳系数。 $B$  为磁感应强度， $I$  为流过霍耳元件的电流强度， $K_H$  称为霍耳元件灵敏度。

虽然从理论上讲霍耳元件在无磁场作用（即  $B=0$ ）时， $U_H=0$ ，但是实际情况用数字电压表测时并不为零，这是由于半导体材料结晶不均匀及各电极不对称等引起附加电势差，该电势差  $U_0$  称为剩余电压。

随着科技的发展，新的集成化 (IC) 元件不断被研制成功。本实验采用 SS95A 型集成霍耳传感器（结构示意图如图 3 所示）是一种高灵敏度集成霍耳传感器，它由霍耳元件、放大器和薄膜电阻剩余电压补偿组成。测量时输出信号大，并且剩余电压的影响已被消除。对 SS95A 型集成霍耳传感器，它由三根引线，分别是：“ $V_+$ ”、“ $V_-$ ”、“ $V_{out}$ ”。其中“ $V_+$ ”和“ $V_-$ ”构成“电流输入端”，“ $V_{out}$ ”和“ $V_-$ ”构成“电压输出端”。由于 SS95A 型集成霍耳传感器，它的工作电流已设定，被称为标准工作电流，使用传感器时，必须使工作电流处在该标准状态。在实验时，只要在磁感应强度为零（零磁场）条件下，调节“ $V_+$ ”、“ $V_-$ ”所接的电源电压（装置上有一调节旋钮可供调节），使输出电压为 2.500V（在数字电压表上显示），则传感器就可处在标准工作状态之下。

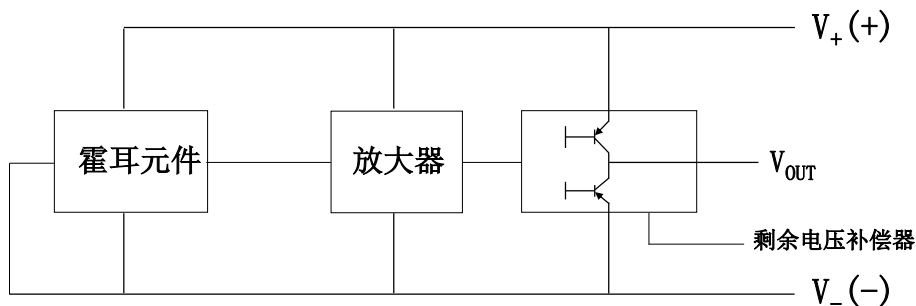


图 3 95A 型集成霍耳元件内部结构图

当螺线管内有磁场且集成霍耳传感器在标准工作电流时，与(1)式相似，由(1)式可得：

$$B = \frac{(U - 2.500)}{K} = \frac{U'}{K}$$

式中 U 为集成霍耳传感器的输出电压，K 为该传感器的灵敏度，U' 经用 2.500V 外接电压补偿以后，用数字电压表测出的传感器输出值(仪器用 mV 档读数)。

### 【实验仪器】

FD-ICH-II 新型螺线管磁场测定仪由集成霍耳传感器探测棒、螺线管、直流稳压电源；数字电压表组成，仪器连线图如图 4 所示。

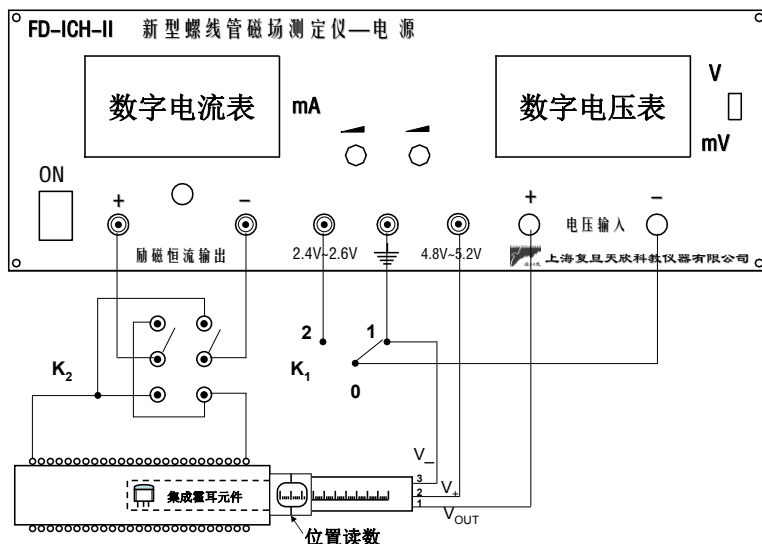


图 4 螺线管测量磁场仪器连

### 【实验过程】

#### 1. 必做实验

1) 实验接线如图 1 所示。左面数字直流稳流源的“励磁恒流输出”端接电流换向开关, 然后接螺线管的线圈接线柱。右面稳压电源 4.8V—5.2V 的输出接线柱(红)接霍耳元件的  $V_+$  (即引脚 2—红色导线), 直流稳压电源的  $\perp$  (黑)接线柱接霍耳元件的  $V_-$  (即引脚 3—黑色导线), 霍耳元件的  $V_{OUT}$  (引脚 1—黄色导线) 接右边电压表‘电压输入’的+ (红)接线柱, 电压表的- (黑)接线柱与直流稳压源的  $\perp$  (黑)接线相连。电压表切换到 V 档(即拨动开关向上拨)。

2) 检查接线无误后接通电源, 断开电流换向开关, 集成霍耳传感器放在螺线管的中间位置 ( $X=16.0\text{cm}$  处), 调节中间直流电源 4.8V—5.2V 的输出旋钮, 使右边数字电压表显示 2.500V, 这时集成霍耳元件便达到了标准化工作状态, 即集成霍耳传感器通过电流达到规定的数值, 且剩余电压恰好达到补偿,  $U_0=0\text{V}$ 。

3) 仍断开开关  $K_2$ , 在保持“ $V_+$ ”和“ $V_-$ ”电压不变的情况下, 把开关  $K_1$  指向 2, 调节 2.4V—2.6V 电源输出电压, 使数字电压表指示值为 0 (这时应将数字电压表量程拨动开关指向 mV 档), 也就是用一外接 2.500V 的电位差与传感器输出 2.500V 电位差进行补偿, 这样就可直接用数字电压表读出集成霍耳传感器电势差的值  $U'$ 。

4) 测定霍耳传感器的灵敏度  $K$

(1) 改变输入螺线管的直流电流  $I_m$ , 将传感器处于螺线管的中央位置(即  $X=17.0\text{cm}$ ), 测量  $U'—I_m$  关系, 记录 10 组数据,  $I_m$  范围在 0—500mA, 可每隔 50mA 测一次。

(2) 用最小二乘法求出  $U'—I_m$ , 直线的斜率  $K' = \frac{\Delta U'}{\Delta I_m}$  和相关系数  $r$ 。

(3) 对于无限长直螺线管磁场可利用公式:  $B = \mu_0 n I_m$  ( $\mu_0$  真空磁导率,  $n$  为螺线管单位长度的匝数), 求出集成霍耳传感器的灵敏度

$$K = \frac{\Delta U'}{\Delta B}$$

注: 实验中所用螺线管参数为:

螺线管长度  $L=260 \pm 1\text{mm}$ ,  $N=(3000 \pm 20)$  匝, 平均直径  $\bar{D}=35 \pm 1\text{mm}$ , 而真空磁导率

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。由于螺线管为有限长，由此必须用公式： $B = \mu_0 \frac{N}{\sqrt{L^2 + D^2}} I_m$  进行计算。

$$\text{即 } K = \frac{\Delta U'}{\Delta B} = \frac{\sqrt{L^2 + D^2}}{\mu_0 N} \frac{\Delta U'}{\Delta I_m} = \frac{\sqrt{L^2 + D^2}}{\mu_0 N} K' \quad (\text{单位: 伏/特斯拉, 即: V/T})$$

## 5. 测量通电螺线管中的磁场分布

(1) 当螺线管通恒定电流  $I_m$  (例如 250mA) 时, 测量  $U'$ — $X$  关系。 $X$  范围为 0—30.0cm, 两端的测量数据点应比中心位置的测量数据点密一些。

(2) 利用上面所得的传感器灵敏度  $K$  计算  $B$ — $X$  关系, 并作出  $B$ — $X$  分布图。

(3) 计算并在图上标出均匀区的磁感应强度  $\overline{B_0'}$  及均匀区范围(包括位置与长度), 理论值

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{\sqrt{L^2 + D^2}} I_m, \text{ 假定磁场变化小于 1\% 的范围为均匀区 (即}$$

$$\frac{|B_0 - \overline{B_0'}|}{\overline{B_0'}} \times 100\% \leq 1\%)。$$

(4) 已知螺线管长度  $L=26.0\text{cm}$ , 在图上标出螺线管边界的位置坐标(即  $P$  与  $P'$  点, 一般认为在边界点处的磁场是中心位置的一半, 即  $B_P = B_{P'} = \frac{1}{2} \overline{B_0'}$ )。验证  $P-P'$  间距约 26.0cm。

注意:

1. 测量  $U' \sim I_m$  时, 传感器位于螺线管中央(即均匀磁场中)。
2. 测量  $U' \sim X$  时, 螺线管通电电流  $I_m$  应保持不变。
3. 常检查  $I_m=0$  时, 传感器输出电压是否为 2.500V。
4. 用 mV 档读  $U'$  值。当  $I_m=0$  时, mV 指示应该为 0。
5. 实验完毕后, 请逆时针地旋转仪器上的三个调节旋钮, 使恢复到起始位置(最小的位置)。

## 2. 选做内容

设计一个实验, 用 95A 型霍耳传感器测量地磁场水平分量。

**【实验数据】**(注: 以下数据不作为仪器验收标准, 仅供实验时参考)

1. 霍耳电势差与磁感应强度 B 的关系

霍耳传感器处于螺线管中央位置 (即  $X=16\text{cm}$  处)

表 1 测量霍耳电势差 (已放大为  $U$ ) 与螺线管通电电流  $I_m$  关系

|                 |   |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_m/\text{mA}$ | 0 | 50   | 100  | 150  | 200  | 250   | 300   | 350   | 400   | 450   | 500   |
| $U/\text{mV}$   | 0 | 22.2 | 44.1 | 66.1 | 88.1 | 110.1 | 132.0 | 154.1 | 176.0 | 198.0 | 220.0 |

根据表 1 描绘霍耳电势差  $U$  与螺线管通电电流  $I_m$  的关系图

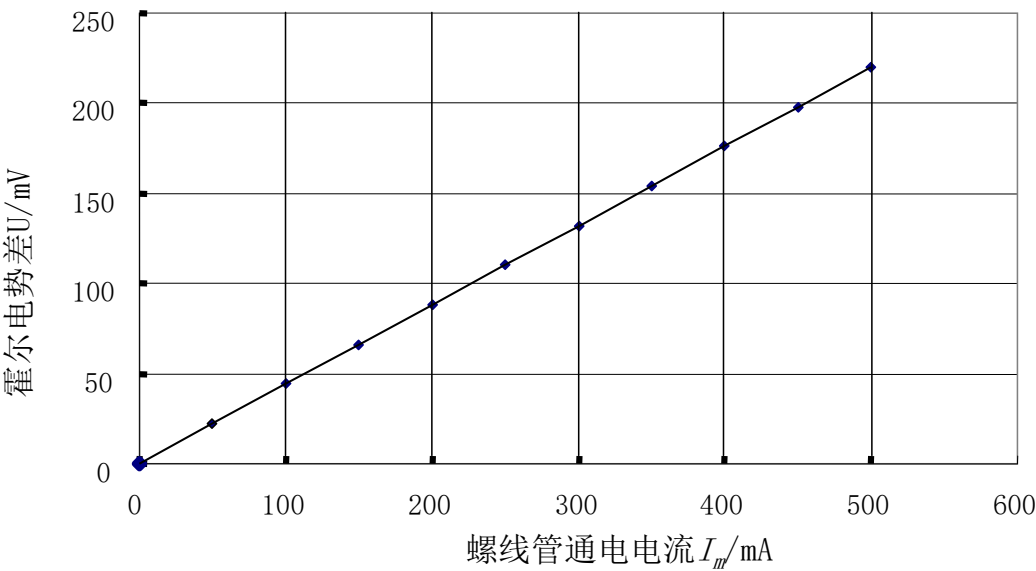


图 5 霍耳电势差  $U$  与螺线管通电电流  $I_m$  关系图

2. 通电螺线管内磁感应强度分布测定 (螺线管的励磁电流  $I_m=250\text{mA}$ )

$U'_1$  为螺线管通正向直流电流时测得集成霍耳传感器输出电压

$U'_2$  为螺线管通反向直流电流时测得集成霍耳传感器输出电压

$U'$  为  $(U'_1-U'_2)/2$  的值。

(测量正、反二次不同电流方向所产生磁感应强度值取平均值, 可消除地磁场影响)

表 2 螺线内磁感应强度  $B$  与位置刻度  $X$  的关系 ( $B=U'/K$ )

| $X/\text{cm}$ | $U'_1/\text{mV}$ | $U'_2/\text{mV}$ | $U'/\text{mV}$ | $B/\text{mT}$ |
|---------------|------------------|------------------|----------------|---------------|
| 1.00          | 9.0              | -8.8             | 8.90           | 0.29          |
| 1.50          | 12.5             | -12.4            | 12.45          | 0.41          |
| 2.00          | 17.8             | -17.8            | 17.80          | 0.58          |
| 2.50          | 25.7             | -25.6            | 25.65          | 0.84          |
| 3.00          | 38.4             | -38.3            | 38.35          | 1.26          |
| 3.50          | 54.6             | -54.5            | 54.55          | 1.79          |
| 4.00          | 71.1             | -70.9            | 71.00          | 2.33          |
| 4.50          | 84.5             | -84.4            | 84.45          | 2.77          |
| 5.00          | 93.6             | -93.4            | 93.50          | 3.07          |
| 5.50          | 98.9             | -98.6            | 98.75          | 3.24          |
| 6.00          | 102.5            | -102.2           | 102.35         | 3.36          |
| 6.50          | 104.8            | -104.5           | 104.65         | 3.43          |
| 7.00          | 106.3            | -105.9           | 106.10         | 3.48          |
| 7.50          | 107.3            | -106.9           | 107.10         | 3.51          |
| 8.00          | 108.0            | -107.6           | 107.80         | 3.53          |
| 9.00          | 108.9            | -108.4           | 108.65         | 3.56          |
| 10.00         | 109.2            | -108.7           | 108.95         | 3.57          |
| 11.00         | 108.9            | -108.4           | 108.65         | 3.56          |
| 12.00         | 108.7            | -108.2           | 108.45         | 3.56          |
| 13.00         | 109.2            | -108.6           | 108.90         | 3.57          |
| 14.00         | 109.7            | -109.2           | 109.45         | 3.59          |
| 15.00         | 110.2            | -109.5           | 109.85         | 3.60          |
| 16.00         | 110.4            | -109.8           | 110.10         | 3.61          |
| 17.00         | 110.7            | -110.1           | 110.40         | 3.62          |
| 18.00         | 110.7            | -110.1           | 110.40         | 3.62          |

|       |       |        |        |      |
|-------|-------|--------|--------|------|
| 19.00 | 110.6 | -109.8 | 110.20 | 3.61 |
| 20.00 | 110.6 | -109.9 | 110.25 | 3.61 |
| 21.00 | 110.5 | -109.8 | 110.15 | 3.61 |
| 22.00 | 110.2 | -109.4 | 109.80 | 3.60 |
| 23.00 | 109.9 | -109.2 | 109.55 | 3.59 |
| 24.00 | 109.7 | -108.9 | 109.30 | 3.58 |
| 24.50 | 109.5 | -108.6 | 109.05 | 3.58 |
| 25.00 | 109.1 | -108.2 | 108.65 | 3.56 |
| 25.50 | 108.5 | -107.6 | 108.05 | 3.54 |
| 26.00 | 107.6 | -106.6 | 107.10 | 3.51 |
| 26.50 | 106.1 | -105.1 | 105.60 | 3.46 |
| 27.00 | 103.6 | -102.7 | 103.15 | 3.38 |
| 27.50 | 99.5  | -99.0  | 99.25  | 3.25 |
| 28.00 | 93.5  | -92.7  | 93.10  | 3.05 |
| 28.50 | 83.5  | -83.1  | 83.30  | 2.73 |
| 29.00 | 69.0  | -68.6  | 68.80  | 2.26 |
| 29.50 | 52.4  | -51.8  | 52.10  | 1.71 |
| 30.00 | 36.2  | -35.4  | 35.80  | 1.17 |

根据表 2 描绘通电螺线管内磁感应强度分布图见图 5 所示。

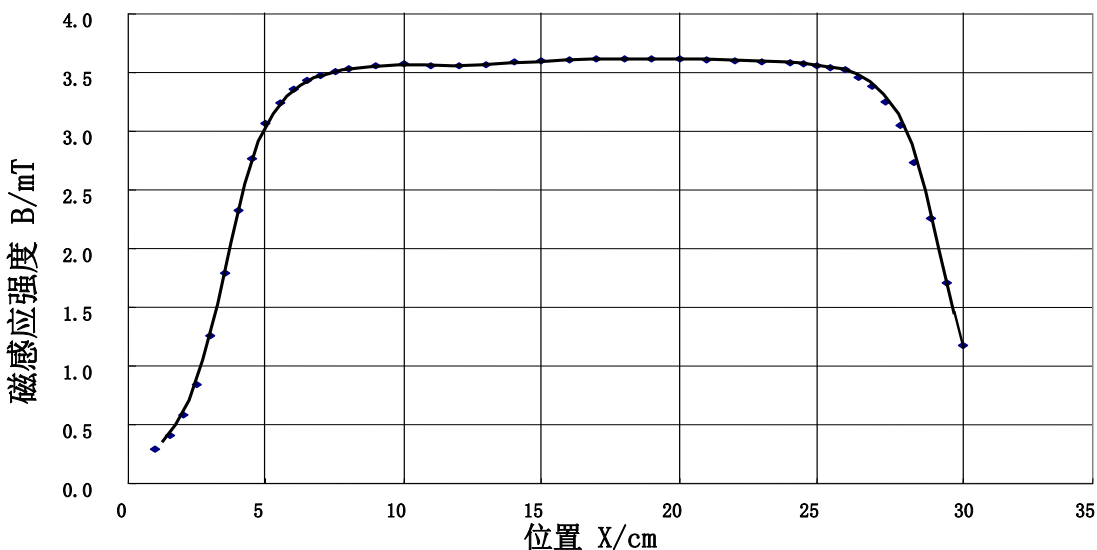


图 5 通电螺线管内磁感应强度分布图

### 3、结论

- 1) 研究霍耳效应：由最小二乘法求出  $K' = \Delta U / \Delta I_m = 0.4396 \text{ V/A}$ ，相关系数  $r=0.99999$ 。由于螺线管内磁感应强度  $B$  与通过螺线管  $I$  成正比，所以表 1 数据可以证明霍耳电势差  $U$  与磁感应强度  $B$  成正比。

- 2) 计算集成霍耳元件的灵敏度  $K$ ：已知：螺线管  $B_{\text{中心}} = \mu_0 \frac{N}{\sqrt{L^2 + D^2}} I_m$ ， $N=3000$  匝，

$L=26.00\text{cm}$ ,  $\bar{D}=35.0\text{mm}$  (为螺线管的平均直径)，所以：

$$K = \frac{\Delta U'}{\Delta B} = \frac{\sqrt{L^2 + \bar{D}^2}}{\mu_0 N} \frac{\Delta U'}{\Delta I_m} = \frac{\sqrt{L^2 + \bar{D}^2}}{\mu_0 N} K' = \frac{\sqrt{0.260^2 + 0.035^2}}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 3000} \times 0.4396 = 30.5 \text{ V/T}$$

根据 95A 型集成霍耳元件产品说明书上注明，该传感器灵敏度  $(31.3 \pm 1.3) \text{ V/T}$ ，现计算值与说明书提供的技术指标相符。

- 3) 确定磁场均匀区和螺线管长度：

螺线管中心磁感应强度理论值：

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{\sqrt{L^2 + D^2}} I_m = 4\pi \times 10^{-7} \frac{3000}{\sqrt{0.26^2 + 0.035^2}} \times 0.25 = 3.592 \times 10^{-3} \text{ T} \quad , \quad \text{由}$$



$\frac{|B_0 - B_0'|}{B_0} \times 100\% \leq 1\%$  可以求出  $B_0' = 3.556\text{mT}$ , 从而定出螺线管的均匀区, 由上面图 5 可知, 在

$x_1 = 9.0\text{cm}$  到  $x_2 = 25.0\text{cm}$  内螺线管为均匀磁场区。

由于  $\frac{B_0}{2} = 1.796\text{mT}$ , 在  $P \approx 3.50\text{cm}$  处  $B_P = 1.79\text{mT}$ ;  $P' \approx 29.40\text{cm}$  处,  $B_{P'} = 1.79\text{mT}$ , 所以螺线

管长度  $P' - P = 29.40 - 3.50 = 25.90\text{cm}$ , 与理论值  $26\text{cm}$  的百分误差为  $0.4\%$ 。

### 【思考题】

1. 什么是霍耳效应? 霍耳传感器在科研中有何用途?
2. 如果螺线管在绕制中两边的单位匝数不相同或绕制不均匀。这时将出现什么情况? 在绘制  $B-X$  分布图时, 如果出现上述情况, 怎样求  $P$  和  $P'$  点?
3. SS95A 型集成霍耳传感器为何工作电流必须标准化? 如果该传感器工作电流增大些, 对其灵敏度有无影响?

### 【参考资料】

1. 陆申龙 焦丽凤. 用集成霍耳传感器研究霍耳效应及测量螺线管磁场分布, 实验技术与管理、第 17 卷第 2 期, 2000. 4: 27-30
2. 沈元华 陆申龙. 基础物理实验, 北京: 高等教育出版社, 2003

### 注意事项

1. FD-ICH-II 新型螺线管磁场测定仪-电源(以下简称实验电源), 供电电压交流  $220\text{V}$ ,  $50\text{Hz}$ 。电源插座位于机箱后面。新型电源插座内装  $0.5\text{A}$  保险丝, 可方便保险丝的更换。
2. 实验电源分三个部分(如上图 1 所示), 面板左面为数字式直流稳流源, 用精密多圈电位器调节输出电流的大小, 调节精度  $1\text{mA}$ , 电流大小由三位半数字电流表显示; 面板右边为四位半电压表, 黑色拨动开关切换量程  $0-19.999\text{V}$  和  $0-1999.9\text{mV}$ 。面板中间为直流稳压电源, 对应输出接线柱上方是调节输出电压电位器(顺时针调节电压增加)。
3. 集成霍耳元件的  $V_+$  和  $V_-$  不能接反, 否则将损坏元件。
4. 拆除接线前应先将螺线管工作电流调至零, 再关闭电源, 以防止电感电流突变引起高电压。
5. 仪器应预热 10 分钟后测量数据。