

## 实验三 霍尔效应与磁场测量

2023 年秋季学期试用版

### 一、【背景介绍】

1879 年美国霍普金斯大学的二年级研究生霍尔，在研究载流导体在磁场中受力的性质时，发现了一种电磁效应，即将载流导体于与其电流的流通方向垂直的磁场中，则在同电流和磁场都垂直的方向上，载流导体内会产生一个横向电势差和电场，这种现象称为霍尔效应。这种电势差及电场分别被称作霍尔电压和霍尔电场。

在半导体中，霍尔效应比较明显，人们可以通过对半导体试件的霍尔系数和电导率的测量，来获得其导电类型、载流子浓度和迁移率等许多重要参数，成为研究半导体材料的基本方法。此外，在工程技术领域中霍尔器件还可以广泛地应用于自动控制系统、测量技术及信息处理技术中。其中利用霍尔效应测量磁场的磁感应强度值是其应用的成功典范之一。将霍尔元件制成的特斯拉计或磁场测量装置，测量范围可从 10T 的强磁场到  $10^{-7}$ T 的弱磁场，测量精度可从 1% 到 0.01%；既可测量大范围的均匀场，也可测不均匀场或某点的磁场；既可测直流磁场，也可测脉宽几 ms 到  $\mu$ s 的脉冲磁场或其它交变磁场；既可避免冲击法只能作间断测量的弱点，又不像一般感应法那样必须有运动线圈或磁场的变化。由于上述特点，霍尔效应被广泛用于各种磁场测量的仪器和装置中。

### 二、【实验目的】

1. 了解霍尔效应的原理；
2. 掌握霍尔效应中各种副效应的消除方法；
3. 学习利用霍尔效应测量磁场的方法。

### 三、【实验仪器】

FB510A 型霍尔效应组合实验仪，FB400 型螺线管磁场测定仪，FB510 型霍尔效应实验仪（双线圈型）。

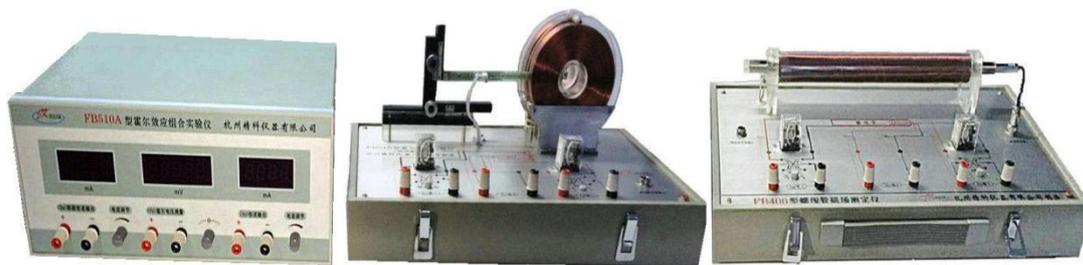


图 3-1 FB510A 型霍尔效应实验仪实物图

#### 四、 【实验原理】

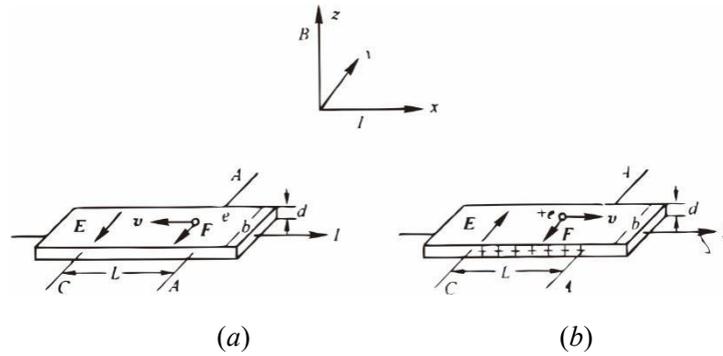


图 3-2 霍尔效应原理

霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏移。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中时，这种偏移就导致在垂直电流和磁场的方向产生正负电荷的聚积，从而形成附加横向电场。取一宽为  $b$ 、厚为  $d$  的半导体薄片试样（如图 3-2），在  $x$  方向通一电流  $I_s$ ，在  $z$  方向加磁场  $B$ ，则在  $y$  方向即试样 A、A' 两侧就开始聚积异号电荷而产生相应的附加电场  $E_H$ 。 $E_H$  的指向取决于试样的导电类型（即  $n$  型或  $p$  型），该电场阻止载流子继续向侧面偏移，当载流子所受的横向电场力  $F_e = eE_H$  与洛伦兹力  $F_B = e\bar{v}B$ （ $\bar{v}$  为载流子在电流方向上的平均漂移速度）相等时，样品两侧电荷的积累就达到平衡。故有

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (3-1)$$

设试样中载流子浓度为  $n$ ，则：

$$I_s = ne\bar{v}bd \quad (3-2)$$

由式(3-1)和式(3-2)可得：

$$V_H = E_H b = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} = K_H I_s B \quad (3-3)$$

其中 
$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (3-4)$$

$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{ned} \quad (3-5)$$

$R_H$  被称为霍尔系数，单位是  $\text{m}^3/\text{C}$ ； $K_H$  被称为霍尔灵敏度，单位是  $\text{m}^2/\text{C}$ 。在实际应用中，为便于快速换算， $K_H$  的单位往往写成  $\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{mT}$  或  $\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$ 。

#### 五、 【常规应用】

##### 1. 判定材料的导电类型

基于带电粒子在磁场中所受洛伦兹力方向的判定方法，可根据  $R_H$  的符号（或霍

尔电压的正负)来判断样品的导电类型,如n型和p型半导体的判定。如按图3-2所示的*I*和*B*的方向,测得的*V<sub>H</sub>*为负(A的电位低于A'的电位)则*R<sub>H</sub>*为负,样品为n型,反之为p型。

## 2. 测定材料中载流子浓度 *n*

$$n = \frac{1}{|R_H|e} \quad (3-6)$$

注意:此式是假定所有的载流子都具有相同的漂移速度得到的。除了测得*R<sub>H</sub>*大小,还需要已知或测得样品的厚度,才能最终得出样品的载流子浓度。

## 3. 结合电导率测量判断载流子的迁移率 $\mu$

载流子的迁移率是指载流子(电子和空穴)在单位电场强度作用下的平均漂移速度,即是载流子在电场作用下运动速度快慢的量度,是半导体材料的重要参量之一,它和载流子浓度共同决定了材料的导电性能,即

$$\sigma = ne\mu \quad (3-7)$$

式中 $\sigma$ 为材料的电导率。继而得出

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = |R_H|\sigma \quad (3-8)$$

由式(3-8)可以看出,测出电导率 $\sigma$ 和*R<sub>H</sub>*, $\mu$ 就可求出。而 $\sigma$ 可以通过图3-2所示的A、C电极进行测量。设A、C之间的距离为*L*,样品的横截面积为*S=bd*,流经样品的电流为*I<sub>S</sub>*,在零磁场下,测得A、C间的电位差为*V<sub>AC</sub>*,可由下式求得 $\sigma$

$$\sigma = \frac{I_S L}{V_{AC} S} \quad (3-9)$$

## 4. 利用霍尔效应测磁场

由式(3-3)可得

$$B = \frac{1}{K_H} \frac{V_H}{I_S} \quad (3-10)$$

式中,*K<sub>H</sub>*为霍尔灵敏度,其物理意义为霍尔元件在单位电流强度、单位磁感应强度下所获得的霍尔电压的大小。实验中,只要测出处在磁场中霍尔元件的霍尔电压,在已知元件的霍尔灵敏度和流过元件的工作电流的条件下,可以计算出元件所处磁场的磁感应强度值。特斯拉计就是利用这种原理来测量磁场的。

## 六、【 $V_H$ 测量中的副效应】

要实验测得霍尔电压值，就必须对 A、A' 两电极进行电压测量，但在实际测量过程中所测得的 A、A' 之间的电压值并不等于真实的霍尔电压值，还包括着各种副效应所引起的虚假电压。这些副效应分成两大类：热磁副效应和不等位电势差。

### 1. 热磁副效应

由于温度梯度存在，伴随霍尔效应会有一些热磁副效应产生。如埃廷斯豪森效应、里吉—勒迪克效应和能斯特效应，它们与霍尔效应同时出现，这些效应都会在霍尔电势差上再叠加温差电动势。

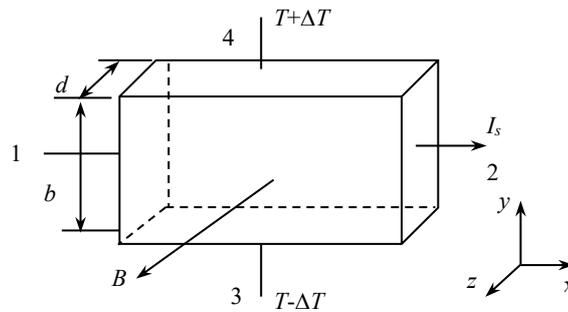


图 3-3 热磁副效应

#### ① 埃廷斯豪森效应

如图 3-4 所示，由于半导体内载流子的速度不相等，慢载流子与快载流子的偏转方向相反，而慢载流子的能量比快载流子的能量小，因而它们偏向的那边比对边温度低。霍尔电极(金属)的材料与霍尔片(半导体)的不同，因此两电极间产生温差电动势，并叠加在霍尔电势差上。这是埃廷斯豪森于 1887 年发现的，称为埃廷斯豪森效应。

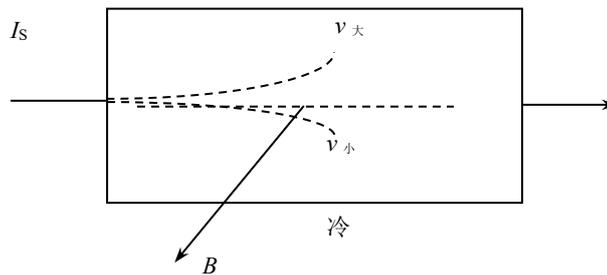


图 3-4 埃廷斯豪森效应

如图 3-4 所示，当霍尔元件沿  $x$  方向通过电流， $z$  方向加磁场，则在元件的两侧(沿  $y$  方向)有温度差，所产生的温度梯度与通过样品的电流和元件所处的磁感应强度成正比

$$\frac{\partial T}{\partial y} = P I_s B \quad (3-11)$$

其中， $P$  称为埃廷斯豪森系数。温度梯度引起温差电动势  $V_E$ ，则

$$V_E \propto I_s B \quad (3-12)$$

即温差电动势  $V_E$  与工作电流  $I_S$  及磁感应强度  $B$  的有关。

### ② 能斯特效应

如图 3-5 所示，如果样品电极 1 和 2 端接触电阻不同，就会产生不同的焦耳热，使两端温度不同。沿温度梯度  $\partial T / \partial x$  有扩散倾向的载流子受到磁场的偏转，会建立一个横向电场，与洛伦兹力相抗衡（如图 3-5 所示），则在  $y$  方向电极 3 和 4 之间产生电势差

$$V_N = -Q \frac{\partial T}{\partial x} B \quad (3-13)$$

其中  $Q$  称为能斯特系数。能斯特效应和霍尔效应相似，但横向载流子的运动不是由于横向电流，而是由于横向热流造成的，因此与电流  $I_S$  无关，只与磁场  $B$  有关。

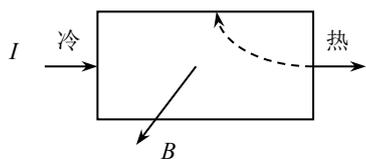


图 3-5 能斯特效应

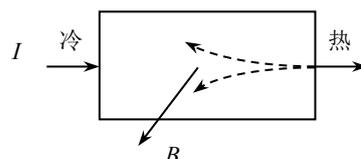


图 3-6 里吉—勒迪克效应

### ③里吉-勒迪克效应

在能斯特效应的基础上，热扩散载流子的速率并不相同，与埃廷斯豪森效应类似，慢载流子受磁场偏转的那边冷些（如图 3-6 所示），这样又产生温差电动势  $V_R$ 。

如图 3-6 所示，沿  $x$  方向，1 和 2 端有温度梯度  $\partial T / \partial x$ ，热流沿  $x$  方向通过，在  $y$  方向的 3 和 4 端就会产生温度梯度，磁场  $B$  方向沿  $z$  方向，则有

$$\frac{\partial T}{\partial y} = S \frac{\partial T}{\partial x} B \quad (3-14)$$

其中， $S$  称为里吉—勒迪克系数。

根据埃廷斯豪森效应，在  $y$  方向的温度差产生温差电动势  $V_R$ 。  $V_R$  和  $\partial T / \partial y$  成正比，所以  $V_R$  的方向随磁场  $B$  的方向而改变，与工作电流  $I_S$  无关。

### 2. 不等位电势差

电流通过霍尔片时，霍尔片中电场的等位面分布如图 3-7 中的虚线所示。未加磁场时，只有当 A、A' 在同一个等势面上时才有  $V_A = V_{A'}$ ，如图 3-7 (a) 所示，如果 A、A' 不在同一个等势面上，如图 3-7 (b) 所示，则  $V_A \neq V_{A'}$ 。因此当有电流  $I_S$  通过时，即使不加磁场也会产生附加的电压（称为不等位电势差）  $V_0 = I_S \cdot r$ ，其中  $r$  为 A、A' 所在的两个等势面之间的电阻，显然  $V_0$  的符号只与电流  $I_S$  的方向有关，与磁场  $B$  的方向无关。

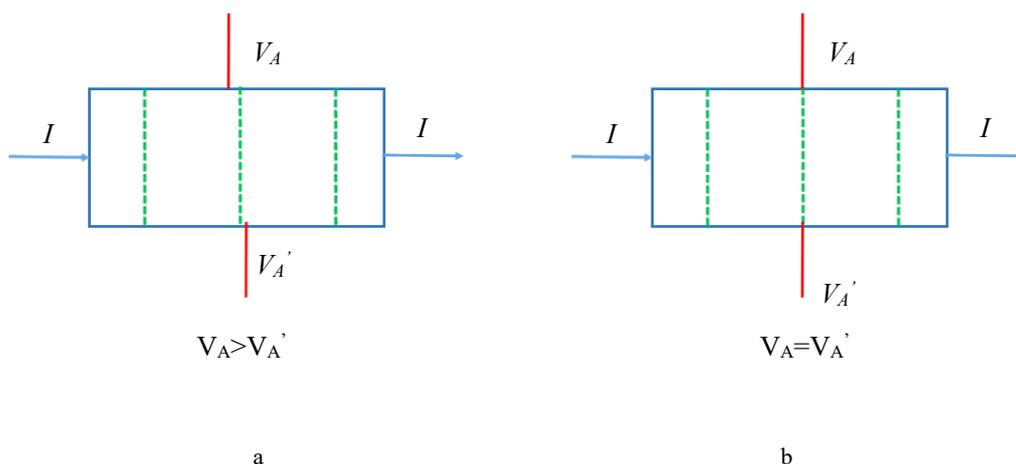


图 3-7 不等位电势差

### 3. 霍尔效应中的副效应的消除方法—霍尔电势差的获得

在测量霍尔电势差  $V_H$  时，实际上同时存在各种副效应，在作精确测量时应考虑这些副效应，并消除各副效应引入的误差。由于这些副效应与电流  $I_S$  和磁场  $B$  的方向有关，在测量时采用对称交换测量法，即改变电流  $I_S$  或磁场  $B$  的方向，将各次测得的“霍尔电势差”取平均，就可以基本消除副效应的影响。

由前边的讨论可知，由于引出电极位置不在同一等势面而产生的电势差  $V_0$  的符号与电流  $I_S$  的方向有关，而与磁场  $B$  的方向无关；热磁副效应产生的温差电动势  $V_E$ 、霍尔电压  $V_H$  与电流  $I_S$  和磁场  $B$  方向都有关；热磁副效应产生的温差电动势  $V_N$ 、 $V_R$  只与磁场  $B$  方向有关。实验时通过改变工作电流  $I_S$  和磁场  $B$  的方向测出下列 4 个数据：

霍尔元件在  $+B$ 、 $+I_S$  时的“霍尔电势差”  $V_1$ ：

$$V_1 = +V_H + V_E + V_N + V_R + V_0 \quad (3-15)$$

霍尔元件在  $+B$ 、 $-I_S$  时的“霍尔电势差”  $V_2$ ：

$$V_2 = -V_H - V_E + V_N + V_R - V_0 \quad (3-16)$$

霍尔元件在  $-B$ 、 $-I_S$  时的“霍尔电势差”  $V_3$ ：

$$V_3 = +V_H + V_E - V_N - V_R - V_0 \quad (3-17)$$

霍尔元件在  $-B$ 、 $+I_S$  时的“霍尔电势差”  $V_4$ ：

$$V_4 = -V_H - V_E - V_N - V_R + V_0 \quad (3-18)$$

合并式(3-15)~(3-18)可得

$$V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (3-19)$$

测出  $V_1 \sim V_4$  代入式(3-19), 就可以避免能斯特效应、里吉—勒迪克效应和电极电势不等所引入的误差。

一般  $V_E \ll V_H$ , 可以忽略不计, 则有

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (3-20)$$

但要注意在电流  $I_S$  和磁场  $B$  反向时, 电流  $I_S$  和磁场  $B$  的值应保持不变。

## 七、两种典型的磁场

### 1. 螺线管的磁场

在大学物理中已经学过, 一个均匀密绕的螺线管, 未填充任何磁介质, 当横截面的线度远远小于长度时, 螺线管中部磁感应强度  $B$  基本为常量:

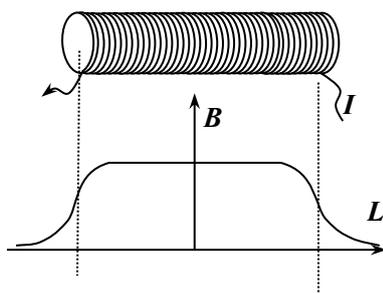


图 3-8 螺线管磁感应强度示意图

$$B = \mu_0 n I \quad (3-21)$$

式中  $n$  为螺线管单位长度匝数,  $I$  为电流强度,  $\mu_0$  为真空中磁导率。在螺线管两端, 磁感应强度减弱到大约中部轴线区域的一半 (如图 3-8 所示)。

### 2. 亥姆霍兹线圈磁场

根据毕奥-萨伐尔定律, 一半径为  $R$ , 通以直流电流  $I$  的圆线圈, 其轴线上离圆线圈中心距离为  $x$  米处的磁感应强度的表达式为:

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (3-22)$$

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,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。其轴线方向磁感应强度分布图见图 3-9 (a)。

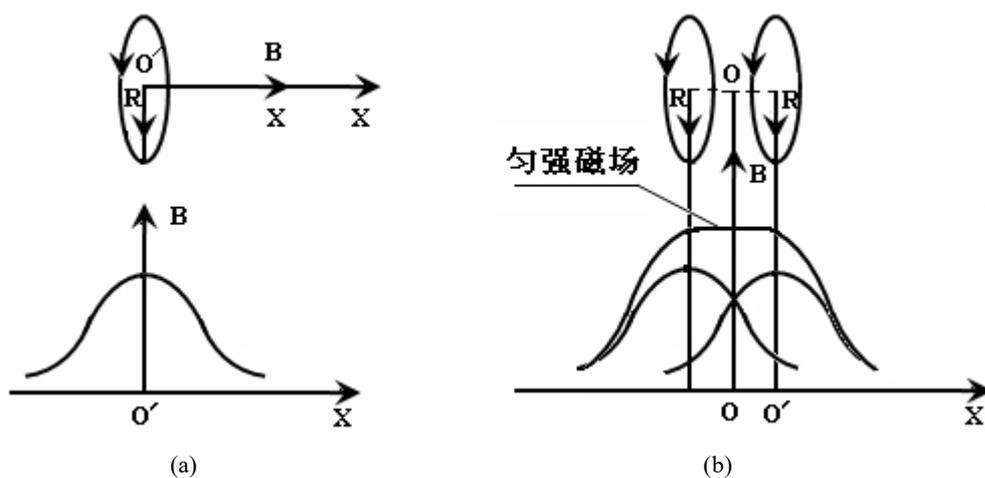
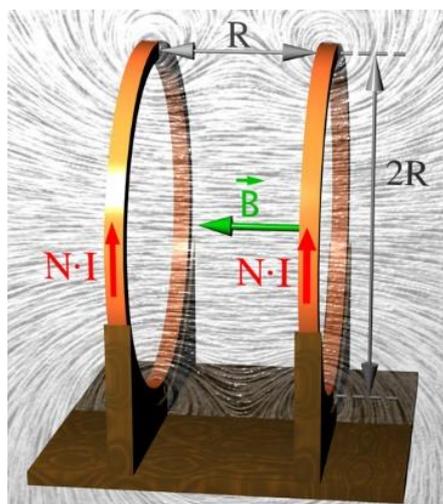
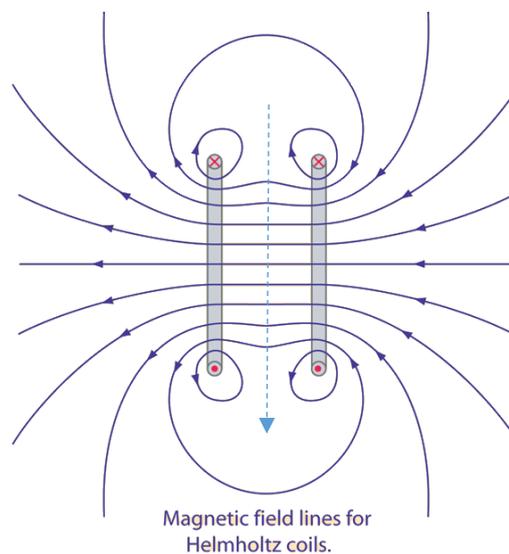


图 3-9 亥姆霍兹线圈磁感应强度分布示意图（轴向）

两个完全相同的圆线圈彼此平行且共轴，通以同方向电流  $I$ ，线圈间距等于线圈半径  $R$  时，从磁感应强度分布曲线可以看出，（理论计算也可以证明）：两线圈合磁场在中心轴线上（两线圈圆心连线）附近较大范围内是均匀的，这样的一对线圈称为亥姆霍兹线圈，如 3-9 (b) 所示。从分布曲线可以看出，在两线圈中心连线一段，出现一个平台，这说明该处是匀强磁场。



(a)



(b)

图 3-10 亥姆霍兹线圈磁感应强度分布示意图(虚线箭头所示为径向)

对于亥姆霍兹线圈，如图 3-10 所示，磁感应强度沿其径向的分布与轴向分布表现出不同的规律。在本实验中将会重点研究该取向的分布规律。

## 八、【实验内容与步骤】

### 1. 仪器介绍

本实验所用设备为 FB510A 型霍尔效应组合实验仪一台、FB400 型螺线管磁场测定仪一台、FB510 型霍尔效应实验仪（双线圈型）一台。

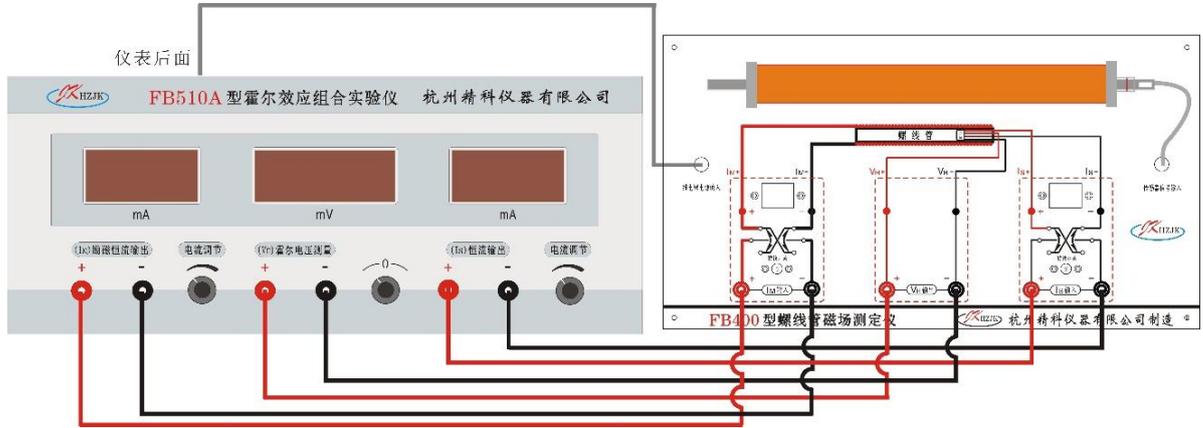


图 3-11 霍尔效应组合实验仪面板与螺线管磁场测定仪连线图

**FB400 型螺线管磁场测定仪：**包括磁场线圈（螺线管）、霍尔传感器、样品架、两个换向按钮（ $I_S$ 、 $I_M$ ）和输出电压接口、继电器等。

**FB510 型霍尔效应实验仪（双线圈型）：**包括磁场线圈（亥姆霍兹线圈）、霍尔传感器、样品架、两个换向按钮（ $I_S$ 、 $I_M$ ）和输出电压接口、继电器等。

**FB510A 型霍尔效应组合实验仪：**由励磁恒流源  $I_M$ 、样品工作恒流源  $I_S$ 、数字毫伏表等单元组成。以图 3-11 为例，分别介绍一下组合实验仪的几个主要部分：

- ①  $I_M$  恒流源。在面板的右侧，接线柱红、黑分别为该电源输出的正、负极。右数显窗显示该电源输出的数值，单位为  $A$ 。该电流输出的数值可用相应旋钮调整。
- ②  $I_S$  恒流源。在面板的左侧，接线柱红、黑分别为该电源输出的正、负极。中数显窗显示该电源输出的数值，单位为  $mA$ 。该电流输出的数值可用相应旋钮调整。
- ③ 数字毫伏表。在面板的中间，量程为  $200mV$ ，单位为  $mV$ 。有调零旋钮调节零点电压位置。

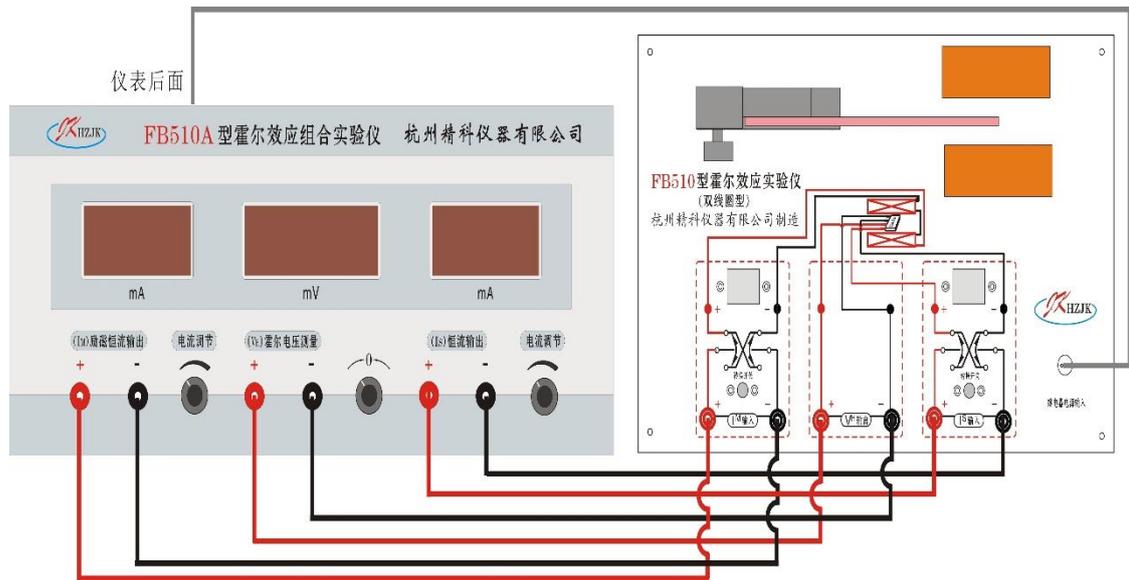


图 3-12 霍尔效应组合实验仪面板与亥姆霍兹线圈实验仪连线图

实验仪器的连线分别见图 3-11 和图 3-12。实验时，工作电流和励磁电流的换向通过换向按钮和继电器完成，具体走向在面板上通过示意图和相应的指示灯显示。

## 2. 实验内容：

根据图 3-11 和图 3-12 所示，检查仪器的连接是否正确，熟悉实验装置和组合实验仪的使用。记录实验装置标签上所给的霍尔灵敏度，注意单位！

### a. 利用螺线管磁场测定仪学习测量霍尔电压并研究其内部磁场分布：

#### ① 测量霍尔电势差与霍尔工作电流的关系，即测量 $V_H \sim I_S$ 曲线：

- 霍尔传感器位于移动杆刻度为  $\pm 17\text{cm}$  处
- 令  $I_M = 500\text{mA}$ ，且使霍尔传感器位于螺线管轴线中心，即移动杆的零点与固定套管的红色刻度线重合。
- 从  $0.50\text{mA}$  开始至  $5\text{mA}$  结束，以  $0.50\text{mA}$  为间隔改变  $I_S$ 。同时在每一个  $I_S$  值下面，通过换向开关，分别测量横向电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，并利用合适的表格记录数据；

#### ② 验证霍尔电势差与螺线管内磁感应强度成正比：

- 令  $I_S = 4.00\text{mA}$ ，且使霍尔传感器位于螺线管轴线中心。
- 从  $0\text{mA}$  开始至  $800\text{mA}$  结束，以  $100\text{mA}$  为间隔改变  $I_M$ 。同时在每一个  $I_M$  值下面，通过换向开关，分别测量横向电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，并利用合适的表格记录数据。

#### ③ 研究通电螺线管轴向磁场分布（参考图 3-8）：

- 令  $I_M = 500\text{mA}$ ， $I_S = 4.00\text{mA}$  并保持不变；
- 沿螺线管轴向改变霍尔传感器的位置，并在每一个位置下分别测量横向电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ 。

- 位置坐标的选择及间隔由学生自定,测量区间起点取螺线管轴线中点。

**b.研究亥姆霍兹线圈径向磁场分布（参考图 3-10）：**

- 令  $I_M=500\text{mA}$ ,  $I_S=3.00\text{mA}$  并保持不变；
- 沿亥姆霍兹线圈径向改变霍尔传感器的位置,并在每一个位置下分别测量横向电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ 。
- 位置坐标的选择及间隔由学生自定。

**九、【注意事项】**

- 切不可将磁场激励电流  $I_M$  接到霍尔元件工作电流  $I_S$  上,否则,有可能烧毁试件；
- 关闭电源前,一定把各电流调节到零；
- 霍尔元件工作电流不要过大。

**十、【数据记录与处理】**

1. 将霍尔传感器置于螺线管轴线中间位置,学习霍尔电压的测量方法。测量并记录在不同工作电流或励磁电流时用于计算霍尔电压的数据,将计算结果列表。
2. 自拟表格记录  $V_H \sim I_S$  和  $V_H \sim I_M$  实验数据,参考 Python 数据处理程序对  $V_H \sim I_S$  和  $V_H \sim I_M$  关系进行处理。根据曲线的正负,结合给定的接线图,判断霍尔器件的导电类型 (p 型还是 n 型)；
3. 计算亥姆霍兹线圈径向和螺线管轴线上各点的霍尔电压  $V_H$ , 并计算出磁感应强度,将计算结果列表。
4. 用坐标纸或者计算机作图,分别描绘出螺线管轴线上  $B-x$  曲线和亥姆霍兹线圈径向  $B-x$  曲线。
5. 螺线管中心和端点的电磁感应强度进行比较,估算出螺线管边缘位置。

**建议用 Python 进行数据处理：**

1. 安装包含 Python3.11 的 Anaconda

Anaconda 官网下载地址：<https://www.anaconda.com/download/> （速度较慢）

镜像网址：<https://mirrors.tuna.tsinghua.edu.cn/anaconda/archive/>

Window 版文件名： Anaconda3-2023.07-2-Windows-x86\_64.exe

2. 打开 Spyder 或 Jupyter Notebook
3. 参考如下例程,编写数据处理程序

```
import pandas
data = pandas.read_csv(
    'D:/.../HallEffect/VoltageVsCurrency.txt',
    names=['Is','V1','V2','V3','V4'],
    encoding='ANSI',engine='python'
)
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

data['Vh'] = round(((data['V1']-data['V2']+data['V3']-data['V4'])/4,2)

from pylab import mpl
mpl.rcParams['font.sans-serif']=['Simhei']
mpl.rcParams['axes.unicode_minus']= False #坐标轴中国符号编码
plt.scatter( data['Is'],data['Vh'],marker='o')
plt.title('霍尔电势差与工作电流关系')
plt.xlabel('Is/mA')
plt.ylabel('Vh/mV')

data['Is'].corr(data['Vh'])
#data.plot('Is','Vh',kind = 'scatter',title='霍尔电势差与工作电流关系')
#data.plot('Is','Vh',kind = 'line',title='霍尔电势差与工作电流关系')

from sklearn.linear_model import LinearRegression
x = data[['Is']]
y = data[['Vh']]
lrModel = LinearRegression()
lrModel.fit(x, y)

scoreval = lrModel.score(x, y)
print(scoreval)

belta = lrModel.coef_
alpha = lrModel.intercept_
#x = data['Is']
newrow = pandas.DataFrame({'Is':[0,5.5]})
#x = x.append(newrow) #deprecated
x = pandas.concat([x.loc[:,newrow])
plt.plot(x, alpha + belta*x)

```

其中 VoltageVsCurrency.txt 文件格式为以逗号分隔的工作电流及各电压读数数值：

0.5,0.76,-0.72,0.45,-0.41

1.0,1.48,-1.65,1.45,0.86

.....

## 十一、【问题思考】

1. 在实验中是如何消除霍尔效应的副效应的？
2. 如果霍尔传感器的工作电流偏大，会有哪些不良影响？

### 【参考文献】

1. 吕斯骅。基础物理实验。北京大学出版社，2002。
2. 余虹。大学物理（第二版）。科学出版社，2008。
3. 丁慎训。物理实验教程。清华大学出版社，2003。
4. 是度芳。基础物理实验。湖北科学技术出版社，2003。
5. 詹卫伸等。物理实验教程。大连理工大学出版社，2004。
6. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/helmholtz.html>
7. <http://www.hlooser.ch/seite%201.html>

（白洪亮, 李建东, 李宏）