

霍尔效应实验

霍尔效应是导电材料中的电流与外磁场相互作用而在垂直于磁场和电流方向的两个端面之间产生电动势的效应。1879 年美国霍普金斯大学研究生霍尔在研究金属导电机理时发现了这种电磁现象，故称霍尔效应。后来曾有人利用霍尔效应制成测量磁场的磁传感器，但因金属的霍尔效应太弱而未能得到实际应用。随着半导体材料和制造工艺的发展，人们又利用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著而得到实用和发展，现在广泛用于非电量检测、电动控制、电磁测量和计算装置等方面。在电流体中的霍尔效应也是目前在研究中的“磁流体发电”的理论基础。1980 年原西德物理学家冯·克利青 (K.Von Klitzing) 研究二维电子气系统的输运特性，在低温和强磁场下发现了量子霍尔效应，这是凝聚态物理领域最重要的发现之一。目前对量子霍尔效应正在进行深入研究，并取得了重要应用，例如用于确定电阻的自然基准，可以极为精确地测量光谱精细结构常数等。

在磁场、磁路等磁现象的研究和应用中，霍尔效应及其元件是不可缺少的，利用它检测磁场直观、干扰小、灵敏度高、效果明显，本实验利用霍尔效应测量 C 型电磁铁二维磁场分布。

1 实验目的

- 1.1 了解霍尔效应原理及霍尔元件有关参数；
- 1.2 学习用“对称交换测量法”消除副效应产生的系统误差；
- 1.3 计算霍尔元件灵敏度、载流子的浓度和迁移率，并判断其载流子的类型；
- 1.4 学习利用霍尔效应测量磁感应强度 B 及磁场分布。

2 实验原理

2.1 霍尔效应

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的作用而引起带电粒子的偏转。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直于电流和磁场方向的两个端面产生正负电荷的聚积，从而形成附加的横向电场。

如图 1 所示，沿 Z 轴的正向加以磁场 B ，与 Z 轴垂直的半导体薄片上沿 X 正向通以电流 I_s （称为工作电流或控制电流），假设载流子为电子（如 N 型半导体材料，图 1a），它沿着与电流 I_s 相反的 X 负向运动。由于洛伦兹力 F_m 的作用，电子即向图中的 D 侧偏转，并使 D 侧形成电子积累，而相对的 C 侧形成正电荷积累。与此同时，运动的电子还受到由于两侧积累的异种电荷形成的反向电场力 F_e 的作用。随着电荷的积累， F_e 逐渐增大，当两力大小相等，方向相反时，电子积累便达到动态平衡。这时在 C、D 两端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H ，相应的电势差称为霍尔电压 U_H 。

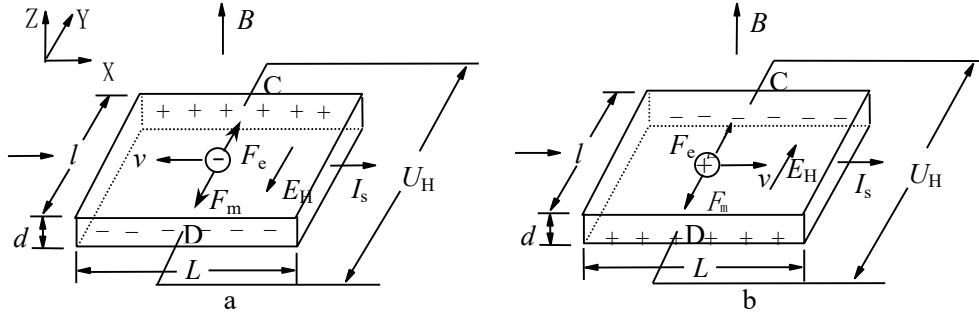


图 1 霍尔元件中载流子在外磁场下的运动情况 (a.电子 b.空穴)

设电子按相同平均漂移速率 v 向图 1 中的 X 轴负方向运动, 在磁场 B 作用下, 所受洛伦兹力为:

$$F_m = -e\bar{v} \times B \quad (1)$$

式中 e 为电子电量 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, \bar{v} 为电子漂移平均速度, B 为磁感应强度。

同时, 电场作用于电子的力为:

$$F_e = -eE_H = -e \frac{U_H}{l} \quad (2)$$

式中 E_H 为霍尔电场强度, U_H 为霍尔电压, l 为霍尔元件宽度。

当达到动态平衡时, $F_m = -F_e$, 从而得到:

$$vB = \frac{U_H}{l} \quad (3)$$

霍尔元件厚度为 d , 载流子浓度为 n , 则霍尔元件的工作电流为:

$$I_s = nevld \quad (4)$$

由式 (3) (4) 可得:

$$U_H = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} = K_H I_s B \quad (5)$$

即霍尔电压 U_H (此时为 C、D 间电压) 与 I_s 、 B 成正比, 与霍尔元件的厚度 d 成反比。

其中: 比例系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数, 它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数; 比例系数

$K_H = \frac{1}{ned}$ 称为霍尔元件的灵敏度, 它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位工作电流下的霍尔电势大小, 其单位是 $\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$, 一般要求 K_H 愈大愈好。

当霍尔元件的材料和厚度确定时, 根据霍尔系数或灵敏度可以得到载流子的浓度 n :

$$n = \frac{1}{eR_H} = \frac{1}{edK_H} \quad (6)$$

霍尔元件中载流子迁移率 μ :

$$\mu = \frac{v}{E_s} = \frac{v \cdot L}{U_s} \quad (7)$$

将式 (4) (5) (7) 联立求得:

$$\mu = K_H \cdot \frac{L}{l} \cdot \frac{I_s}{U_s} \quad (8)$$

式中 μ 为载流子的迁移率, 即单位电场强度下载流子获得的平均漂移速度 (一般电子迁移率大于空穴迁移率, 因此制作霍尔元件时大多采用 N 型半导体材料)。 L 为霍尔元件的长度 (见图 1), U_s 为霍尔元件沿着 I_s 方向的工作电压, E_s 为由 U_s 产生的电场强度。

由于金属的电子浓度 n 很高, 所以它的 R_H 或 K_H 都不大, 因此不适宜作霍尔元件。此外

元件厚度 d 愈薄, K_H 愈高, 所以制作时, 往往采用减少 d 的办法来增加灵敏度, 但不能认为 d 愈薄愈好, 因为此时元件的输入和输出电阻将会增加。

由于霍尔效应建立时间很短 (约 $10^{-14} \sim 10^{-12}s$), 因此, 使用霍尔元件时既可用直流电, 也可用交流电。但使用交流电时, 霍尔电压是交变的, I_s 和 U_H 应取有效值。

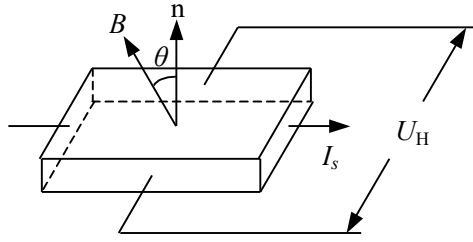


图 2

应当注意, 当磁感应强度 B 和元件平面法线成一角度时 (如图 2), 作用在元件上的有效磁场是其法线方向上的分量 $B \cos \theta$, 此时:

$$U_H = K_H I_s B \cos \theta \quad (9)$$

所以, 一般在使用时应调整元件平面朝向, 使 U_H 达到最大, 即 $\theta=0$, $U_H = K_H I_s B \cos \theta = K_H I_s B$ 。

由式 (9) 可知, 当工作电流 I_s 或磁感应强度 B , 两者之一改变方向时, 霍尔电压 U_H 的方向随之改变; 若两者方向同时改变, 则霍尔电压 U_H 极性不变。

2.2 霍尔效应的副效应及其消除

测量霍尔电势 U_H 时, 不可避免地会产生一些副效应, 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 U_0

由于制作时, 两个霍尔电极不可能绝对对称地焊在霍尔元件两侧 (图 3a)、霍尔元件电阻率不均匀、工作电流极的端面接触不良 (图 3b) 都可能造成 C、D 两极不处在同一等位面上, 此时虽未加磁场, 但 C、D 间存在电势差 U_0 , 称为不等位电势, $U_0 = I_s R_0$, R_0 是 C、D 两极间的不等位电阻。由此可见, 在 R_0 确定的情况下, U_0 与 I_s 的大小成正比, 且其正负随 I_s 的方向改变而改变。

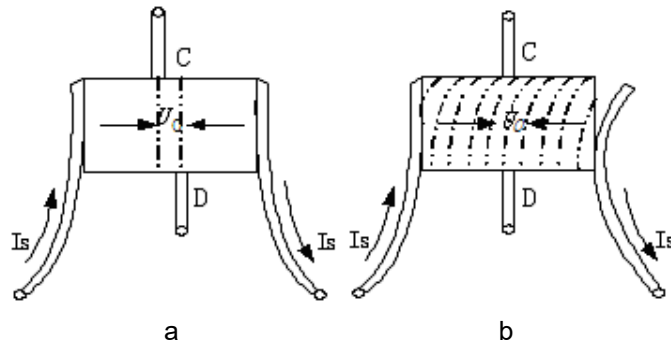


图 3

2) 爱廷豪森 (Eting hausen) 效应

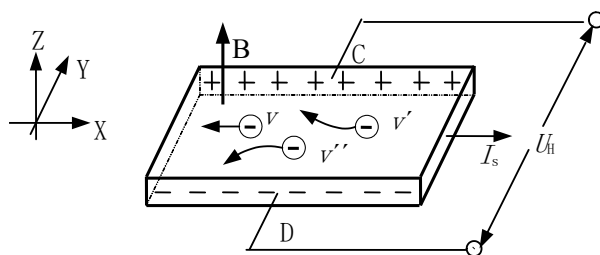


图 4 霍尔元件中电子实际运动情况 (图中 $v' < v$, $v'' > v$)

当霍尔元件的 X 方向通以工作电流 I_s , Z 方向加磁场 B 时, 由于霍尔元件内的载流子速度服从统计分布, 有快有慢。在达到动态平衡时, 在磁场的作用下慢速与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, 使两侧的温度不同, 因而造成 Y 方向上两侧出现温差 ($\Delta T = T_C - T_D$)。

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, 这一温差在 C、D 间产生温差电动势 U_E , $U_E \propto I_s B$ 。

这一效应称爱廷豪森效应, U_E 的大小及正负符号与 I_s 、 B 的大小和方向有关, 跟 U_H 与 I_s 、 B 的关系相同, 所以不能在测量中消除。

3) 伦斯脱 (Nernst) 效应

由于工作电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同, 工作电流在两电极处将产生不同的焦耳热, 引起工作电流两极间的温差电动势, 此电动势又产生温差电流 (称为热电流) I_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 U_N 且 $U_N \propto I_Q B$, 这一效应称为伦斯脱效应, 由上式可知 U_N 的符号只与 B 的方向有关。

4) 里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应

如 3) 所述霍尔元件在 X 方向有温度梯度, 引起载流子沿梯度方向扩散而有热电流 I_Q 通过霍尔元件, 在此过程中载流子受 Z 方向的磁场 B 作用, 在 Y 方向引起类似爱廷豪森效应的温差 $\Delta T = T_C - T_D$, 由此产生的电势差 $U_R \propto I_Q B$, 其符号与 B 的方向有关, 与 I_s 的方向无关。

在确定的磁场 B 和工作电流 I_s 下, 实际测出的电压是 U_H 、 U_0 、 U_E 、 U_N 和 U_R 这 5 种电势差的代数和。上述 5 种电势差与 B 和 I_s 方向的关系如下:

U_H		U_0		U_E		U_N		U_R	
B	I_s	B	I_s	B	I_s	B	I_s	B	I_s
有关	有关	无关	有关	有关	有关	有关	无关	有关	无关

为了减少和消除以上效应引起的附加电势差, 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) 测量法测量 C、D 间电势差:

$$\text{当 } +I_M, +I_s \text{ 时} \quad U_{CD1} = +U_H + U_0 + U_E + U_N + U_R$$

$$\text{当 } +I_M, -I_s \text{ 时} \quad U_{CD2} = -U_H - U_0 - U_E + U_N + U_R$$

$$\text{当 } -I_M, -I_s \text{ 时} \quad U_{CD3} = +U_H - U_0 + U_E - U_N - U_R$$

$$\text{当 } -I_M, +I_s \text{ 时} \quad U_{CD4} = -U_H + U_0 - U_E - U_N - U_R$$

对以上四式作如下运算:

$$\frac{1}{4}(U_{CD1} - U_{CD2} + U_{CD3} - U_{CD4}) = U_H + U_E \quad (10)$$

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 U_E 的符号和霍尔电势 U_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, $U_H \gg U_E$, 因而 U_E 可以忽略不计, 故有:

$$U_H \approx U_H + U_E = \frac{1}{4}(U_{CD1} - U_{CD2} + U_{CD3} - U_{CD4}) \quad (11)$$

一般情况下当 U_H 较大时, U_{CD1} 与 U_{CD3} 同号, U_{CD2} 与 U_{CD4} 同号, 而两组数据反号, 故:

$$U_H = \frac{1}{4}(U_{CD1} - U_{CD2} + U_{CD3} - U_{CD4}) = \frac{1}{4}(|U_{CD1}| + |U_{CD2}| + |U_{CD3}| + |U_{CD4}|) \quad (12)$$

即用四次测量值的绝对值的平均值即可。

霍尔元件测量磁场的基本电路如图 5, 将霍尔元件置于待测磁场的相应位置, 并使元件平面与磁感应强度 B 垂直, 在其控制端输入恒定的工作电流 I_s , 霍尔元件的霍尔电压输出端接毫伏表, 测量霍尔电压 U_H 的值。

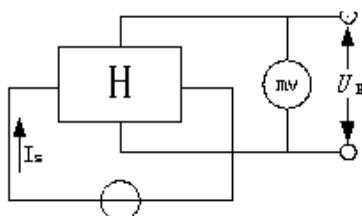


图 5 霍尔元件测量磁场的电路图

3 仪器介绍

本产品型号及名称: ZKY-PEE0200 霍尔效应实验组合仪。

本产品执行标准为: Q/9151011206008316XG•28 《ZKY-PEE0200 霍尔效应实验组合仪产品标准》。

本产品正常工作条件:

- 1) 环境温度: $0 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) 相对湿度: $\leq 90\% \text{RH}$;
- 3) 大气压强: $86\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}$;
- 4) 电源: 电压: $\sim 220 (1 \pm 10\%) \text{ V}$; 频率: $\sim 50 (1 \pm 5\%) \text{ Hz}$

仪器主要是由六部分组成: ZKY-H/L 霍尔效应-螺线管磁场测试仪、C 型电磁铁 (带滑块)、横向霍尔传感器模块、二维移动座、导轨及双刀双掷开关盒, 如图 8 所示 (图片仅供参考, 以实物为准)。

3.1 ZKY-H/L 霍尔效应-螺线管磁场测试仪

仪器面板如图 6 所示, 分为工作电流 I_s 的输出、调节、显示; 霍尔电压 U_H 的输入、显示; 励磁电流 I_M 的输出、调节、显示三大部分。

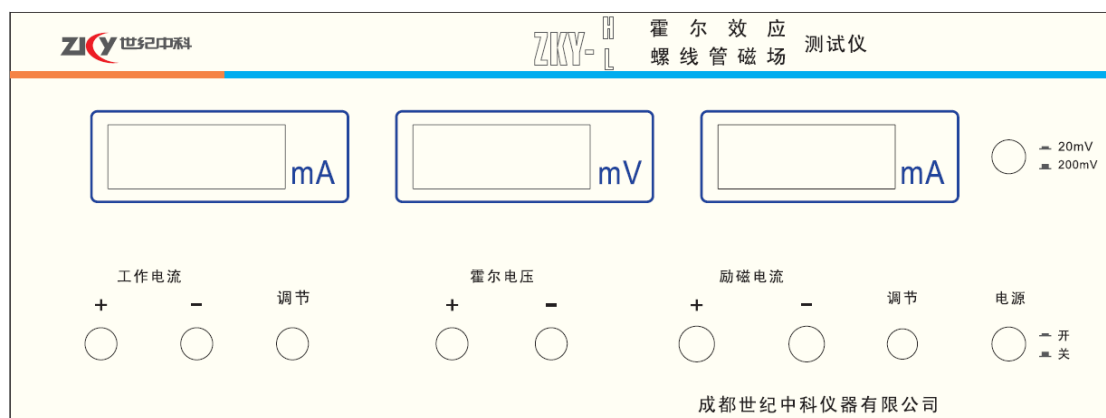


图 6 ZKY-H/L 面板示意图

工作电流输出直流电流，调节范围 0~10mA，四位数码管显示输出电流值；励磁电流输出直流电流，调节范围 0~1000 mA，四位数码管显示输出电流值；霍尔电压测量范围 $\pm 20.00 \text{ mV}/\pm 200.0 \text{ mV}$ 两档，四位数码管显示输入电压值。

3.2 C 型电磁铁（带滑块）

由 C 型电磁铁+滑块等组成，接头为一对 6mm 接线柱，磁隙为 8mm，中心点最大磁感应强度 $> 220 \text{ mT}$ ，长时间使用时励磁电流 $\leq 0.8 \text{ A}$ ，短时间（3min 之内）可流经 1.0A 的电流。滑块宽 50mm，一侧带锁紧螺钉，一侧刻有刻线，均位于宽度中心，配合燕尾结构的导轨使用。

磁场方向通过电流方向根据右手定则判定。

3.3 横向霍尔传感器模块

霍尔传感器的磁感应方向为印制板的法线方向，灵敏度 $> 150 \text{ mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$ ，接头为四芯航空插头。霍尔元件的尺寸为长 \times 宽 \times 厚=400um \times 400um \times 260um。

3.4 二维移动座

图 7 为二维移动座的示意图，锁紧螺母可控制转接盒的位置：顺时针旋转时锁紧螺母，转接盒不可上下移动；逆时针旋转时松开螺母，转接盒可上下移动，移动或所处的位置参考立杆上刻线的读数。滑块置于导轨上，可在导轨上左右移动。将横向霍尔传感器固定在二维移动座上，霍尔元件到二维移动座指示线的横向垂直距离为 190mm。

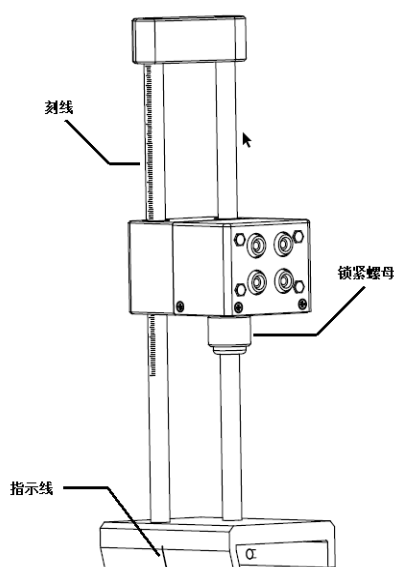


图 7 二维移动座示意图

3.5 导轨

用于放置和固定 C 型电磁铁（带滑块）和二维移动座。

3.6 双刀双掷开关盒

两组换向开关，均含三种状态：断开、正向和反向，一组为钮子开关+6mm 接线柱，带 30V 超压保护；一组为钮子开关+4mm 插座。

3.7 设备性能指标

- 1) C 型电磁铁：磁隙 8mm，中心点最大磁感应强度 $> 220 \text{ mT}$ ，励磁电流 $\leq 1.0 \text{ A}$ 。
- 2) 横向霍尔传感器模块：不等位电势 $U_0 \leq 2 \text{ mV}$ （工作电流 $I_s = 4 \text{ mA}$ 时），灵敏度

$>150\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ 。

- 3) 工作电流源：量程 $0\sim10.00\text{mA}$ ，分辨率 0.01mA 。
- 4) 励磁电流源：量程 $0\sim1000\text{mA}$ ，分辨率 1mA 。
- 5) 霍尔电压表：量程 $0\sim20\text{mV}$ 和 $0\sim200\text{mV}$ 两档，可切换，分辨率分别为 0.01mV 和 0.1mV 。

霍尔效应实验组合仪组成如图 8 及表 1 所示：

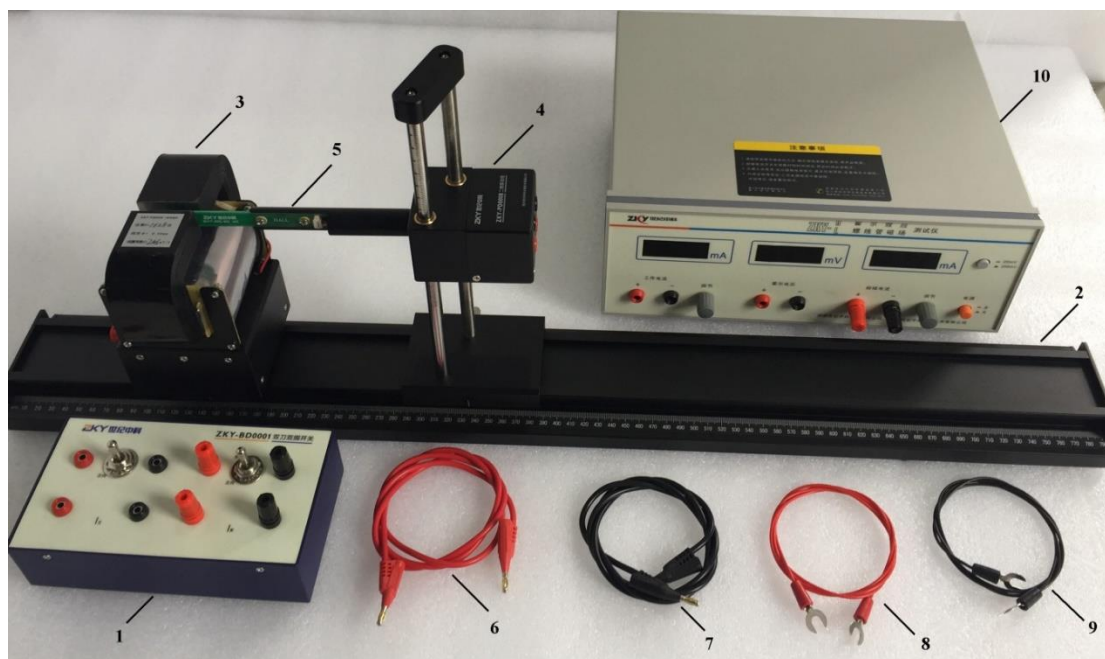


图 8 霍尔效应实验组合仪整机（照片仅供参考，以实物为准）

表 1 霍尔效应实验组合仪成套件清单

序号	编码	名称	数量	备注
1	ZKY-BD0001	双刀双掷开关盒	1	
2	ZKY-BB0002	导轨	1	
3	ZKY-PD0010	C 型电磁铁（带滑块）	1	
4	ZKY-PD0008	二维移动座	1	
5	ZKY-BH0011	横向霍尔传感器模块	1	
6	ZKY-BA0014	单芯连接线	3	红色，4mm 插头，长 1000mm
7	ZKY-BA0015	单芯连接线	3	黑色，4mm 插头，长 1000mm
8	ZKY-BA0026	单芯连接线	2	红色，6mm 鱼叉，长 1000 mm
9	ZKY-BA0027	单芯连接线	2	黑色，6mm 鱼叉，长 1000 mm
10	ZKY-H/L	霍尔效应螺线管磁场测试仪	1	

4 实验内容与步骤

按图 9 将 C 型电磁铁（带滑块）、霍尔元件、双刀双掷开关盒和 ZKY-H/L 霍尔效应螺线管磁场测试仪（以下简称“测试仪”）正确连接。图中的编号对应的模块名称参考表 1。

- 将工作电流、励磁电流调节旋钮逆时针旋转到底，使电流最小。
- 将测试仪的电压量程调至高量程。
- 测试仪面板右下方为提供励磁电流 I_M 的恒流源输出端，接实验仪上励磁电流的输入端（将接线叉口与接线柱连接）。
- 测试仪左下方为提供霍尔元件工作电流 I_S 的恒流源输出端接实验仪工作电流输入端（将插头插入插孔）。
- 实验仪上的霍尔电压输出端接测试仪中部下方的霍尔电压输入端。
- 将测试仪与 220V 交流电源相连，按下开机键。

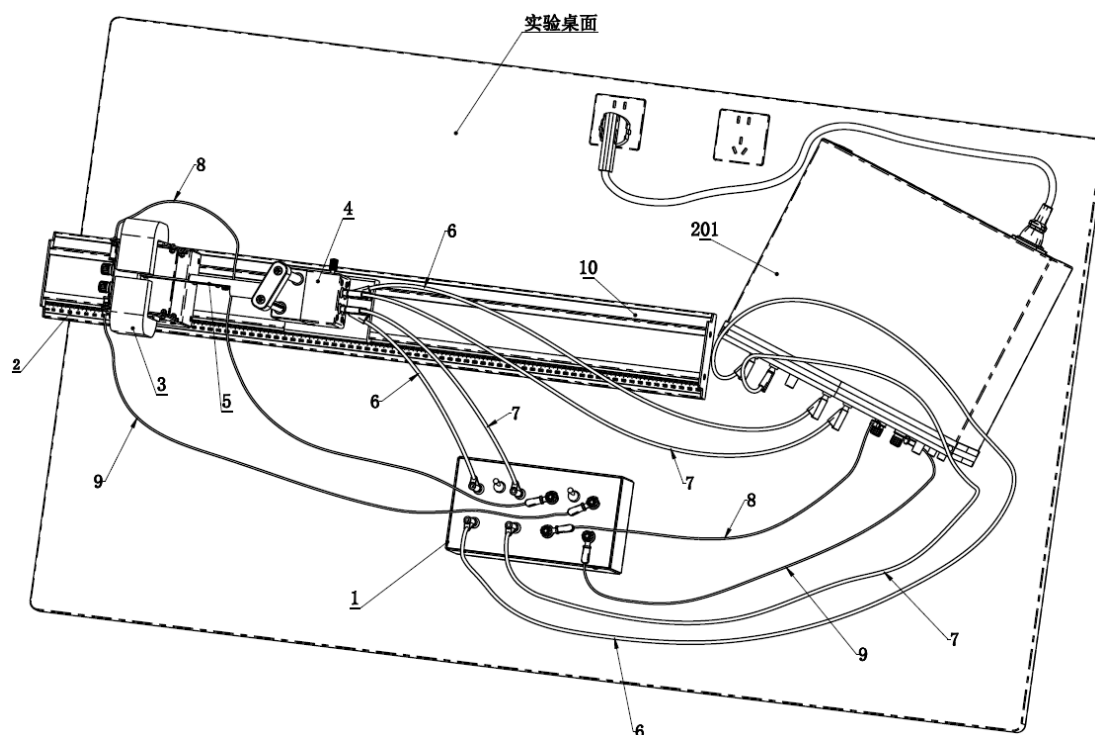


图 9 霍尔效应实验仪接线图

注：为了提高霍尔元件测量的准确性，实验前霍尔元件应至少预热 5min，具体操作如下：断开励磁电流开关，闭合工作电流开关，通入工作电流 5mA，待至少 5min 可以开始实验。

4.1 测量霍尔元件灵敏度 K_H ，计算载流子浓度 n

- 移动二维移动座，使霍尔元件处于电磁铁气隙中心位置（其法线方向已调至平行于磁场方向，霍尔元件到二维移动座的距离为 190mm，纵向上转接座上表面与“0”刻线对齐），闭合励磁电流开关，调节励磁电流 $I_M=300\text{mA}$ ，通过公式： $B=C \cdot I_M$ 求得并记录此时电磁铁气隙中的磁感应强度 B （ C 为电磁铁的线圈常数， C 的值见面板标示牌）。
- 调节工作电流 $I_S=1.00、2.00、\dots、10.00\text{mA}$ （间隔 1.00mA），通过变换各换向开关，在 $(+I_M, +I_S)、(-I_M, +I_S)、(-I_M, -I_S)、(+I_M, -I_S)$ 四种测量条件下，分别测出对应的电压值 U ($i=1、2、3、4$)，根据式 (12) 计算霍尔电压 U_H 填入表 2，并绘制 U_H-I_S 关系曲线，求得斜率 K_1 ($K_1=U_H/I_S$)。
- 根据式 (5) 可知 $K_H=K_1/B$ ；据式 (6) 可计算载流子浓度 n （霍尔元件厚度 $d=260\mu\text{m}$ ）。

表 2 霍尔电压 U_H 与工作电流 I_s 的关系

$I_M=300\text{mA}, C=\text{_____mT/A}$					
$I_s(\text{mA})$	$U_1(\text{mV})$	$U_2(\text{mV})$	$U_3(\text{mV})$	$U_4(\text{mV})$	$U_H = \frac{1}{4}(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)$ (mV)
	$+I_M, +I_s$	$-I_M, +I_s$	$-I_M, -I_s$	$+I_M, -I_s$	
1.00					
2.00					
3.00					
4.00					
5.00					
6.00					
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					

4.2 测量霍尔元件的载流子迁移率 μ (选做)

注：该实验用户需自备一只电压表，用于测量工作电压 U_s ，电压表档位选为“直流 20V 档”。电压表的正负极分别接测试仪上工作电流输出端的红、黑插孔。

表 3 工作电流 I_s 与工作电压 U_s 的关系

$I_M=0\text{mA}$										
$I_s(\text{mA})$	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
$U_s(\text{mV})$										

- 1) 断开励磁电流开关，使 $I_M=0$ (电磁铁剩磁很小，约零点几毫特，可忽略不计)。调节 $I_s=0.50$ 、 1.00 ……、 5.00mA (间隔 0.50mA)，记录对应的工作电压 U_s 填入表 3，绘制 $I_s - U_s$ 关系曲线，求得斜率 K_2 ($K_2=I_s/U_s$)。
- 2) 根据上面求得的 K_H ，结合式 (8) 可以求得载流子迁移率 μ (霍尔元件长度 L 、宽度 b 已知，见仪器介绍对应部分的详细参数)。

4.3 判定霍尔元件半导体类型 (P 型或 N 型) 或者反推磁感应强度 B 的方向

- 1) 根据电磁铁导线绕向及励磁电流 I_M 的流向，可判定气隙中磁感应强度 B 的方向。
- 2) 根据钮子开关接线以及霍尔测试仪 I_s 输出端引线，可判定 I_s 在霍尔元件中流向。
- 3) 根据换向钮子开关接线以及霍尔测试仪 U_H 输入端引线，可以得出 U_H 的正负与霍尔元件上正负电荷积累的对对应关系。
- 4) 由 B 的方向、 I_s 流向以及 U_H 的正负并结合霍尔元件的引脚位置可以判定霍尔元件半导体的类型 (P 型或 N 型)。反之，若已知 I_s 流向、 U_H 的正负以及霍尔元件半导体的类型，可以判定磁感应强度 B 的方向。

4.4 研究霍尔电压 U_H 与励磁电流 I_M 之间的关系

霍尔元件仍位于电磁铁气隙中心，调定 $I_s=3.00\text{mA}$ ，分别调节 $I_M=100$ 、 200 …… 1000mA (间隔为 100mA)，分别测量对应的电压值 U_i ，计算霍尔电压 U_H 填入表 4，并绘出 $U_H - I_M$ 曲线，分析霍尔电压 U_H 与励磁电流 I_M 之间的关系。

表 4 霍尔电压 U_H 与励磁电流 I_M 之间的关系

$I_S=3.00\text{mA}$

$I_M(\text{mA})$	$U_1(\text{mV})$	$U_2(\text{mV})$	$U_3(\text{mV})$	$U_4(\text{mV})$	$U_H = \frac{1}{4}(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)$ (mV)	$B(\text{mT})$
	$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$		
100						
200						
300						
400						
500						
600						
700						
800						
900						
1000						

4.5 测量一定 I_M 条件下电磁铁气隙中磁感应强度 B 的大小及分布情况

- 1) 调节 $I_M=600\text{mA}$, $I_S=5.00\text{mA}$, 调节二位移动尺的垂直标尺, 使霍尔元件处于电磁铁气隙垂直 (Y) 方向的中心位置 (0 刻线处)。移动二维移动座在导轨上的位置, 使霍尔元件位于磁场中 X 方向的中心位置 (二维移动座和 C 型电磁铁间距 190mm), 设此时相对位置为 $X=0$, 将二维移动座向左移动 40mm, 记此时的位置为 $X=-40\text{mm}$, 按照上述方法测量相应的 U_i 。
- 2) 调节水平标尺按表 5 中给出的位置测量 U_i , 填入表 5。
- 3) 根据以上测得的 U_i , 计算霍尔电压 U_H 值, 根据式 (5) 计算出各点的磁感应强度 B , 并绘出 B - X 曲线, 描述电磁铁气隙内 X 方向上 B 的分布状态。
- 4) 移动二维移动座在导轨上的位置, 使霍尔元件位于磁场中 X 方向的中心位置, 调整霍尔元件在垂直 (Y) 方向的位置, 测量其磁场分布, 描绘 B - Y 曲线, 描述电磁铁气隙中 Y 方向上 B 的分布状态。

表 5 电磁铁气隙中磁感应强度 B 的分布

$I_M=600\text{mA}, I_S=5.00\text{mA}$

$X(\text{mm})$	$U_1(\text{mV})$	$U_2(\text{mV})$	$U_3(\text{mV})$	$U_4(\text{mV})$	$U_H = \frac{1}{4}(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)$ (mV)	$B(\text{mT})$
	$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$		
-30						
-25						
-20						
-15						
-10						
-5						
0						
5						
10						

$\chi(\text{mm})$	$\mathcal{U}_1(\text{mV})$	$\mathcal{U}_2(\text{mV})$	$\mathcal{U}_3(\text{mV})$	$\mathcal{U}_4(\text{mV})$	$U_H = \frac{1}{4}(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)$ (mV)	$B(\text{mT})$
	$+I_M,$ $+I_S$	$-I_M,$ $+I_S$	$-I_M,$ $-I_S$	$+I_M,$ $-$ I_S		
15						
20						
25						
30						
35						
40						