

3.4 霍尔效应测量磁场





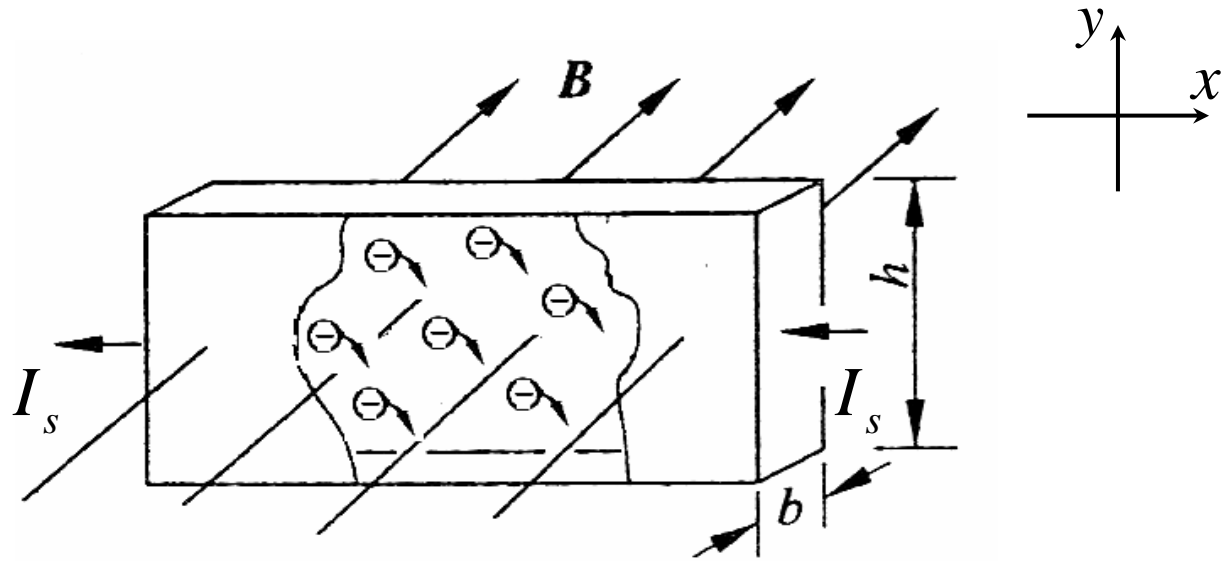
实验简介

1879年，年仅24岁的德国物理学家霍尔(A.H.Hall, 1855-1938)在研究载流金属导体在磁场中的受力时，发现了一种磁电效应。

若将通有纵向电流 I_s 的一宽度为 h 、厚度为 b 的金属板放在垂直于板面的磁场中，在金属片的横向两侧面会出现电势差。这种现象称为霍尔效应，出现的电势差称为霍尔电压。

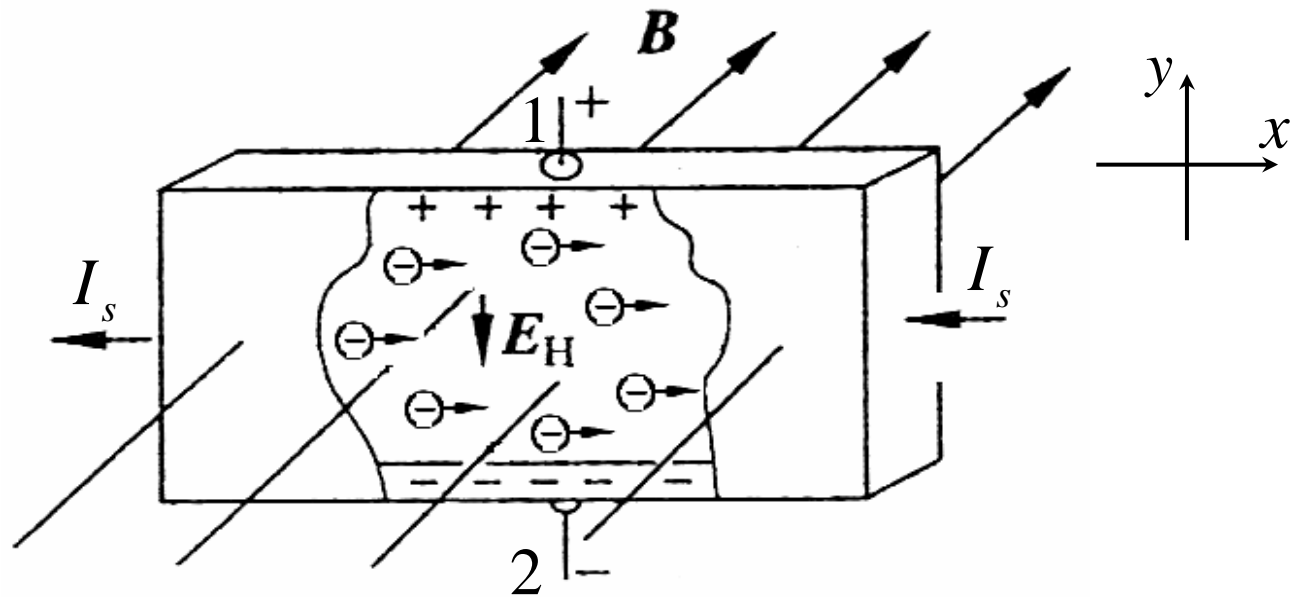


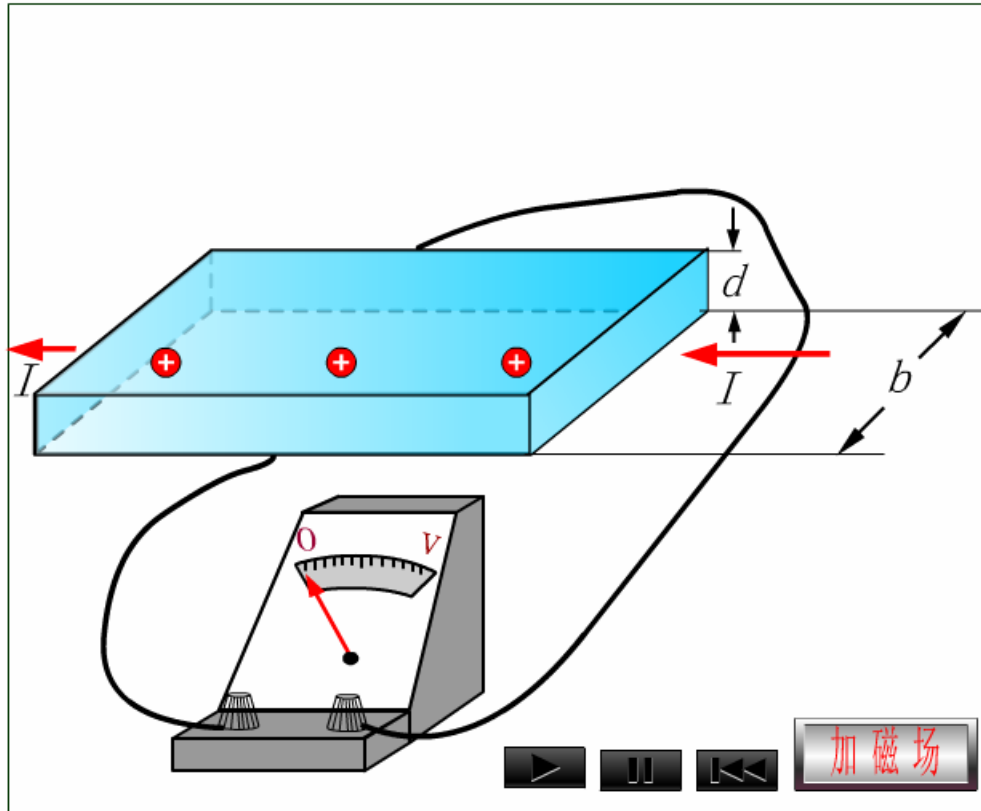
如图所示，金属板中的载流子（电子）逆着电流方向运动，在洛伦兹力作用下向下偏转，其结果使金属板上下两横向侧面上分别聚集正负电荷。





正负电荷的积累会在金属内部建立横向电场 E_H （称为霍尔电场），横向电场的作用将阻碍电子的偏转，最后达到动态平衡，电子不在发生横向移动。





霍尔效应原理



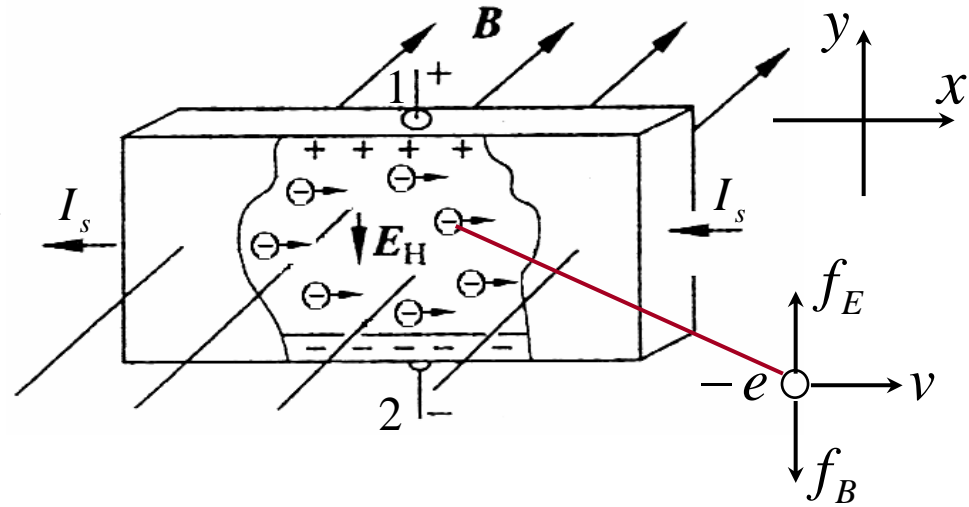
设电子的定向速度即漂移速度为 v ，平衡时电子所受向上的电场力与向下的磁场力平衡，有

$$evB = eE_H$$

则霍尔电压： $V_H = E_H h = vBh$

设金属板中载流子浓度为 n ，则电流强度 $I_s = enBhv$

$$\text{霍尔电压可写为: } V_H = vBh = \frac{I_s B}{neb} = R_H \frac{I_s B}{b}$$





霍尔电压可写为:

$$V_H = vBh = \frac{I_s B}{neb} = R_H \frac{I_s B}{b}$$

其中 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数。

金属 $\longrightarrow n$ 大 $\longrightarrow R_H$ 小 \longrightarrow 霍尔效应弱

掺杂
半导体 $\longrightarrow n$ 小 $\longrightarrow R_H$ 大 \longrightarrow 霍尔效应强



自20世纪50年代以来，随着半导体工艺的发展，用半导体材料制作的各种霍尔效应元件得到了广泛应用，而且因为其体积小、灵敏度高、测量范围大等特点也被广泛用于磁场测量仪器的设计以及信息技术等领域。



1980年，德国物理学家克里青（K.von Klitzing）又发现了“**整数量子霍尔效应**”，为此获得了1985年的诺贝尔物理学奖。

1998年崔琪（美籍华人）和美国物理学家来福林（R.B.Laughlin）、施特默（H.L.Stromer）又因“**分数量子霍尔效应**”而共享诺贝尔物理学奖。

最近我国又在“**量子反常霍尔效应**”的研究中取得了重大突破，这些都为霍尔效应的应用开辟了新的天地。



实验目的

1. 了解霍尔效应的物理图像及其副效应产生机理。
2. 学习利用对称测量消除副效应的测量磁场方法。



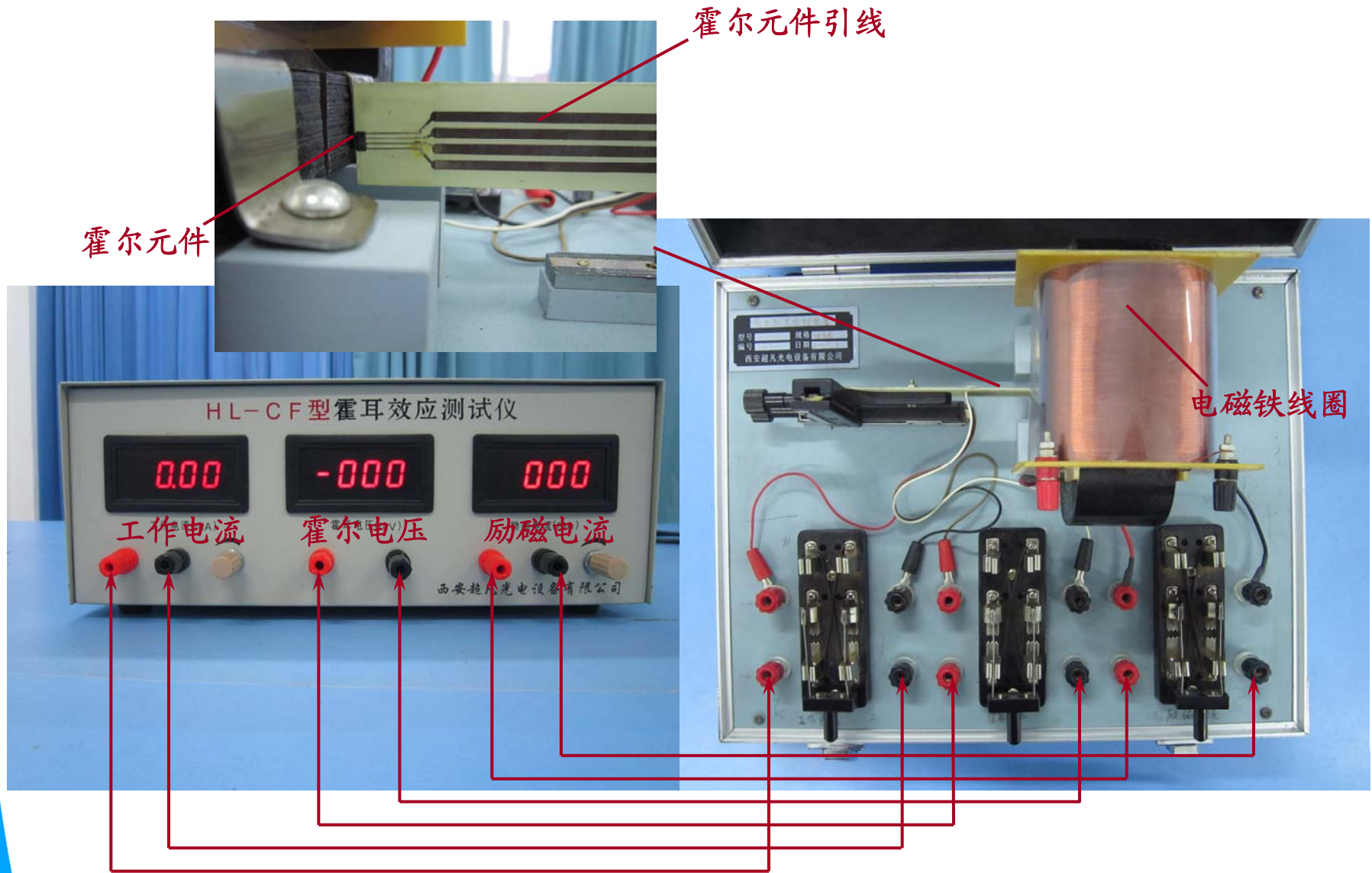
实验仪器

霍尔效应实验组合仪包括:

- (1) HL-A型霍尔效应测试装置;
- (2) HL-CF型霍尔效应测试仪;

$$\Delta_{\text{仪霍尔电压}} = 1\text{mV},$$

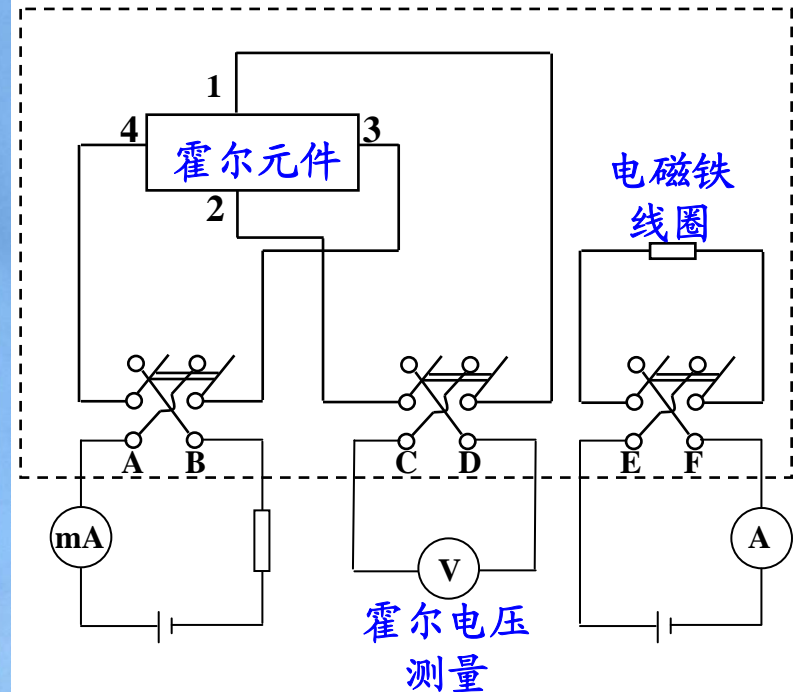
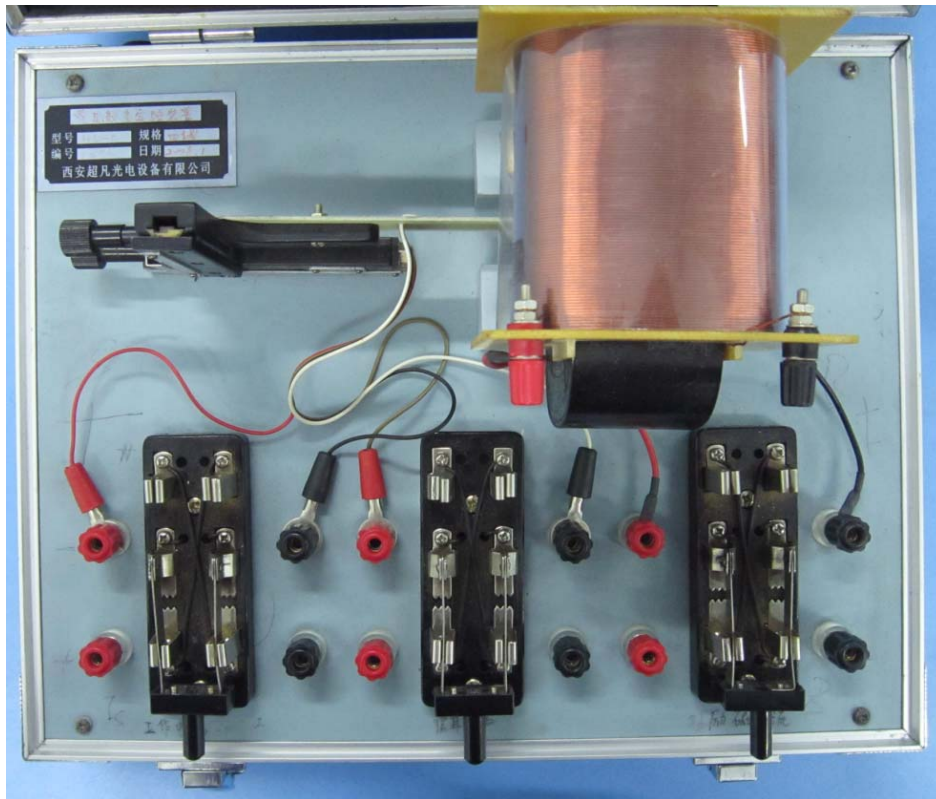
$$\Delta_{\text{仪工作电流}} = 0.01\text{mA}$$





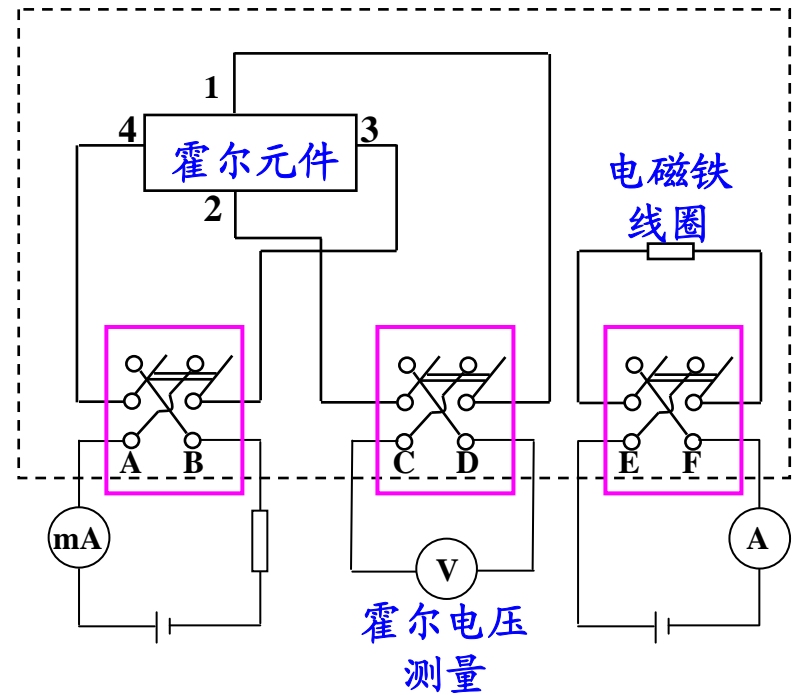
1. HL-A型霍尔效应测试装置

HL-A型霍尔效应测试装置包括霍尔元件、电磁铁、和三个换向开关。





测试装置上的霍尔元件被胶合在绝缘衬板上，是N型硅单晶经平面工艺制成。绝缘衬板的4条焊接引线上标有1、2、3、4。



- 1、2:被引到“霍尔电压”换向开关，以备测量霍尔元件上的霍尔电压。
- 3、4: 被引到“工作电流”换向开关，以备通以工作电流 I_s 和改变工作电流的流向。
- “励磁电流”换向开关，改变励磁电流 I_B 的方向，即改变磁场 B 的方向。



2. HL-CF型霍尔效应测试仪



HL-CF型霍尔效应测试仪包括**两组直流稳流电源**
一组提供测试装置上电磁铁励磁所需的**励磁电流 I_B (0~1000mA)** 由数字电表以mA为单位给出。
一组提供霍尔元件的**工作电流 I_s (0~10.00mA)** 由数字电表以mA为单位给出。



测试仪还有一个以mV为单位的“霍尔电压”直流数字毫伏表(0~1999mV)，用以测量霍尔电压值。



实验测量原理

1. 霍尔效应测量磁场原理

使N型霍尔元件通以工作电流 I_s ，并使均匀磁场 B 垂直穿过霍尔元件，根据

$$V_H = vBh = \frac{I_s B}{neb} = R_H \frac{I_s B}{b}$$

有

$$B = \frac{1}{R_H / b} \cdot \frac{V_H}{I_s} = \frac{V_H}{K_H I_s}$$

其中 $K_H = \frac{R_H}{b} = \frac{1}{neb}$ 称为霍尔元件的灵敏度。



$$B = \frac{1}{R_H / b} \cdot \frac{V_H}{I_s} = \frac{V_H}{K_H I_s}$$

只要用仪器测出霍尔电压 V_H 与 I_s ，则可求出空间某处的磁感应强度 B 的大小；使霍尔元件在空间移动，则可测量出空间 B 的分布。

注意：霍尔元件要足够小。



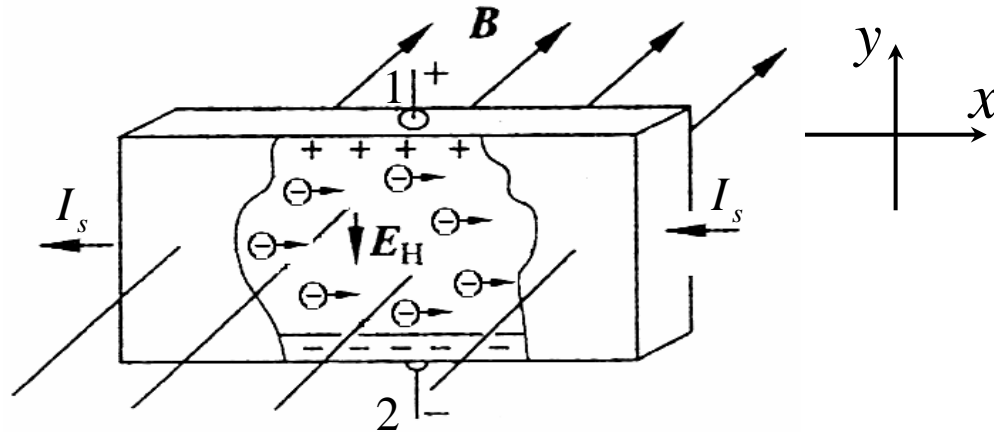
2. 霍尔电压 V_H 的对称测量方法

由于霍尔元件的加工工艺以及温差等非对称因素引起的附加效应，测试仪中“霍尔电压”数字毫伏表测量的1、2间电压不只是霍尔效应产生的霍尔电压，它包含着附加效应产生的附加电势差。



(1) 厄廷豪森效应引起的电势差 V_E

如图所示，原件y向两横截面稳定的正负电荷分布导致稳定的霍尔电场 E_H 的建立，图中标的电子沿x轴定向速度 v 实际上是电子的平均速度，场中沿x轴运动电子的速度各不相同，有的大于 v ，有的小于 v 。





速度大于 v 的电子：受到的洛伦兹力大于霍尔电场力，他们向 y 轴负向偏转；

速度小于 v 的电子：受到的洛伦兹力小于霍尔电场力，他们向 y 轴正向偏转。

动态平衡造就了稳定的正负电荷分布，图中霍尔元件的下表面集中了较多动能大的电子，他们与晶格碰撞产生的热效应大于上侧面较多低动能电子碰撞产生的热效应。

结果上下两侧面产生温差，由此温差效应引起了附加的温差电势差 V_E 。



(2) 能斯特效应引起的电势差 V_N

焊接霍尔元件工作电流引线时，两端焊点的电阻可能不同，当电流 I_s 通过时，因电流热效应在两端产生温度差，从而元件中形成**附加的温差电流**。温差电流在场作用下会产生叠加在霍尔电势差 V_H 上的附加电势差 V_N 。

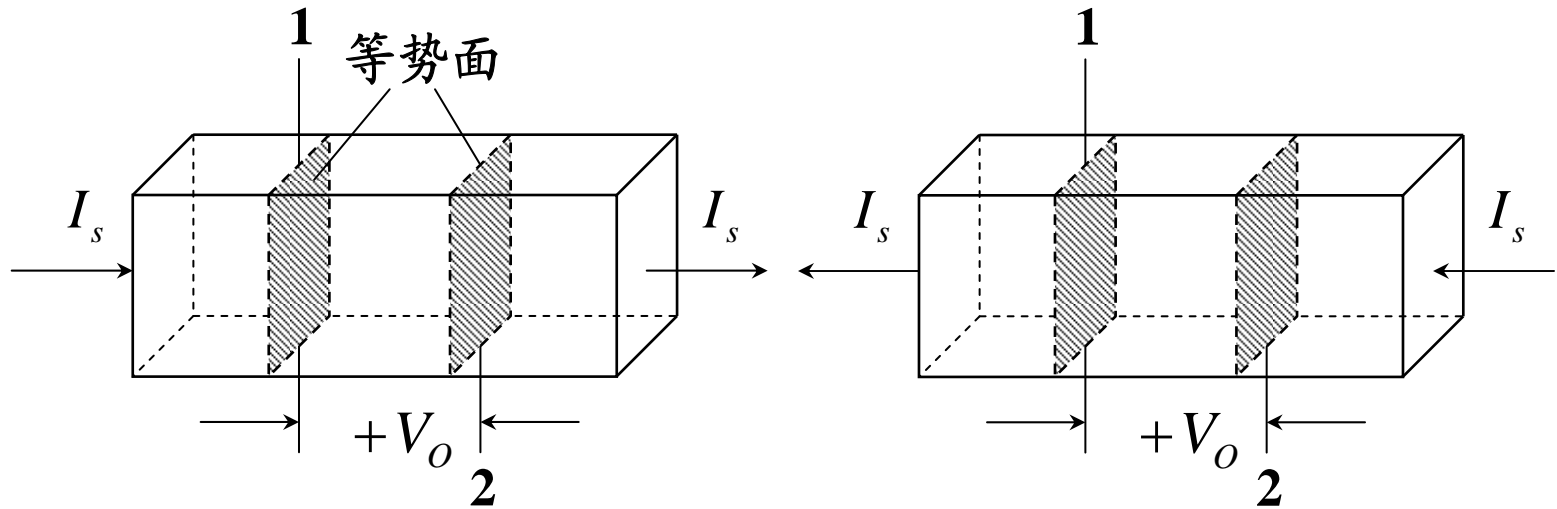
(3) 里纪—勒杜克效应产生的电势差 V_R

能斯特效应中热扩散电流的载流子的速度各不相同，类似于厄廷豪森效应，在元件上下两侧面会形成叠加在 V_H 上的温差电势差 V_R 。



(4) 不等位效应引起的电势差 V_0

由于制造商的困难和材料的不均匀性，当 I_s 流过元件时，下图所示的测量电压引线焊点1、2不能保证处在同一等势面上。所以，即使没有磁场 B ，1、2间也会出现电势差 V_0 （称为不等为电势差）。



(a) 正不等位电势

(b) 负不等位电势



当工作电流 I_s 和磁场 B 确定后，实验测得的 1、2 两电极之间的电压不仅包括霍尔电压 V_H ，还有附加电势差 V_O 、 V_E 、 V_N 和 V_R ，其中不等位电势差 V_O 对霍尔效应测磁场的影响最大，实验中通过改变 I_s 和 B 的方向可部分消除它们的影响。

实验中通过改变 I_s 和 I_B (B) 的方向，可形成四组不同方向的组合，分别测出这四种组合时 1、2 两电极之间的电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、和 V_4 。



$$+I_s, +B: V_1 = V_H + V_E + V_N + V_R + V_O$$

$$+I_s, -B: V_2 = -V_H - V_E - V_N - V_R + V_O$$

$$-I_s, +B: V_3 = -V_H - V_E + V_N + V_R - V_O$$

$$-I_s, -B: V_4 = V_H + V_E - V_N - V_R - V_O$$

由以上4式，可得霍尔电势差

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 - V_3 + V_4) - V_E$$



$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 - V_3 + V_4) - V_E$$

由此可知，除厄廷豪森效应外，实验中其他附加效应通过工作电流和磁场的换向可以消除，这种方法称为对称测量法。 V_E 虽不能消除，但相对霍尔电压很小，可被忽略，因此霍尔电压 V_H 可由下式计算。

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 - V_3 + V_4)$$



实验内容与数据处理

按图连接电路，将测试仪的“ I_S 调节”旋钮和“ I_B 调节”旋钮逆时针方向旋到底。

1. 测量电磁铁间隙内中心附近一点磁感应强度 B_0 。

(1) 将霍尔元件移动到电磁铁间隙的中心位置。

取 I_B 为 500mA，取 I_S 为 10.00mA。

表 3-5 电磁铁中心处磁感应强度 ($I_B = 500 \text{ mA}$, $I_S = 10.00 \text{ mA}$)

次数	1	2	3	4	5
$V_1 / \text{V} \quad (+ I_S + B)$					
$V_2 / \text{V} \quad (+ I_S - B)$					
$V_3 / \text{V} \quad (- I_S + B)$					
$V_4 / \text{V} \quad (- I_S - B)$					
V_H / V					



(2) 根据每次的测量数据根据公式

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 - V_3 + V_4)$$

计算 V_H ，求其算术平均值 \bar{V}_H

(3) 根据 $\bar{B} = \frac{\bar{V}_H}{K_H I_s}$ ，求中心点的磁感应强度 B_0 。



2. 测量中心点的磁感应强度 B 与励磁电流 I_B 的关系
 工作电流 I_s 取10.00mA，用对称测量法分别测量励磁电流 I_B 为500，400，350，300，250，200mA时的 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 ，计算各自的霍尔电压 V_H 和磁感应强度 B ，数据记录表3-6中，作出 $B-I_B$ 曲线，分析励磁电流与磁感应强度的关系。

表 3-6 励磁电流与磁感应强度的关系

I_B / mA	500	400	350	300	250	200
$V_1 / \text{V} \quad (+ I_s + B)$						
$V_2 / \text{V} \quad (+ I_s - B)$						
$V_3 / \text{V} \quad (- I_s + B)$						
$V_4 / \text{V} \quad (- I_s - B)$						
V_H / V						
B / T						



3. 测量电磁铁间隙内的磁感应强度分布

(1) 测量电磁铁间隙中心横向 (x 轴) 磁感应强度分布。取励磁电流 I_B 为 500mA ，取工作电流 I_s 为 10.00mA 。沿电磁铁间隙中心横向 (x 轴) 从右端至左端取点 (接近管口处测量点应多取一些) 分别用对称测量法测量 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 ，计算霍尔电压 V_H 和对应的磁感应强度 B 。数据记录表3-7中，作出 $B-x$ 曲线。



表 3-7 电磁铁间隙内磁感应强度的 x 方向分布

x / mm	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0	25.0	35.0	40.0	42.0	44.0	46.0	48.0	50.0
$V_1 / \text{V} \quad (+ I_S + B)$															
$V_2 / \text{V} \quad (+ I_S - B)$															
$V_3 / \text{V} \quad (- I_S + B)$															
$V_4 / \text{V} \quad (- I_S - B)$															
V_H / V															
B / T															

(2) 测量电磁铁间隙中心纵向 (y 轴) 磁感应强度分布。取 I_B 为 500mA, I_S 为 10.00mA。中心纵向的下端作为 y 轴零点, 从下往上分别测量 $y=0.0$, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 27.0, 30.0mm 各处的 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 , 计算 V_H 和 B 。数据记录自拟表中, 作出 B - y 曲线。



注意事项

1. 霍尔元件时易损元件，必须防止元件受压挤、受扭变和受碰撞。
2. 测试仪开机、关机前，将 I_s 、 I_B 旋钮逆时针转到底，防止输出电流过大。
3. 记录数据时，为了不使电磁铁过热，一般应断开励磁电流的换向开关。
4. 励磁电流换向时，应将电流调整到100mA以下。



思考题

1. 为什么制备霍尔元件的材料通常是半导体而不是金属？
2. 励磁电流换向时，应将电流调到100mA以下，为什么？
3. 如何判断所用霍尔元件是N型还是P型半导体？
4. 若霍尔元件表面与磁场不垂直，对测量结果会有何影响？如何用实验的方法判断霍尔元件表面与磁场垂直？