

霍尔效应

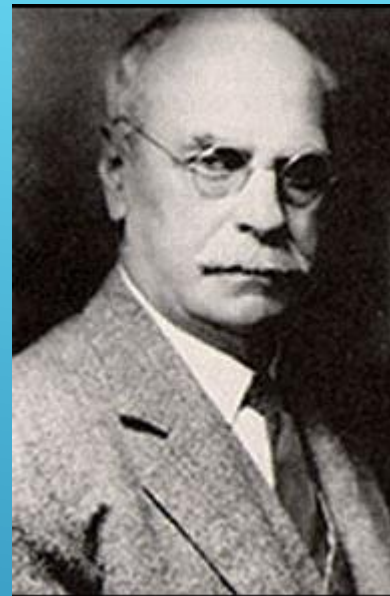
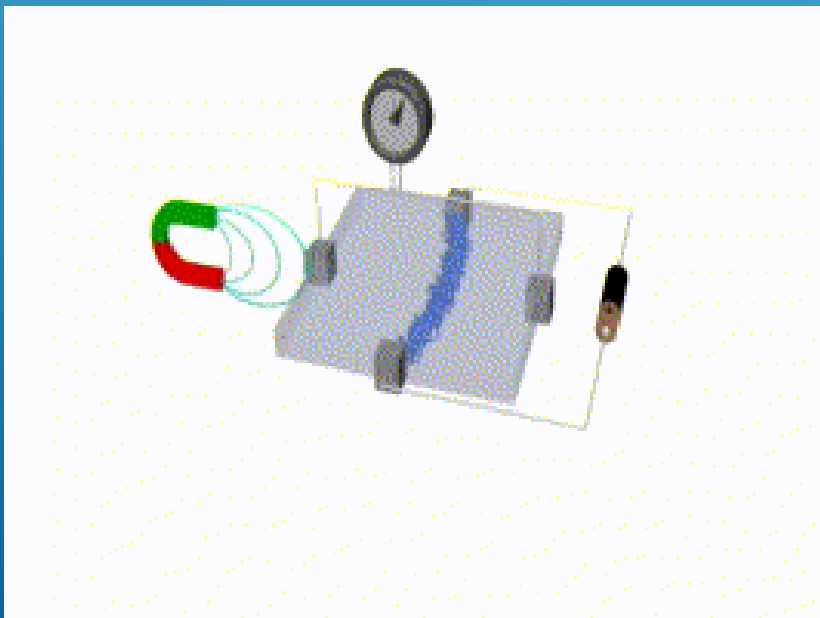
实验目的：

- 1.了解霍尔效应原理及霍尔元件有关参数的含义
- 2.学会测绘霍尔元件的 V_H-I_s 、 V_H-I_m 曲线，计算霍尔元件参数

背景 介绍

霍尔效应

霍尔效应是电磁效应的一种，这一现象是美国物理学家霍尔（E.H.Hall）于1879年在研究载流导体在磁场中的受力性质时发现的。



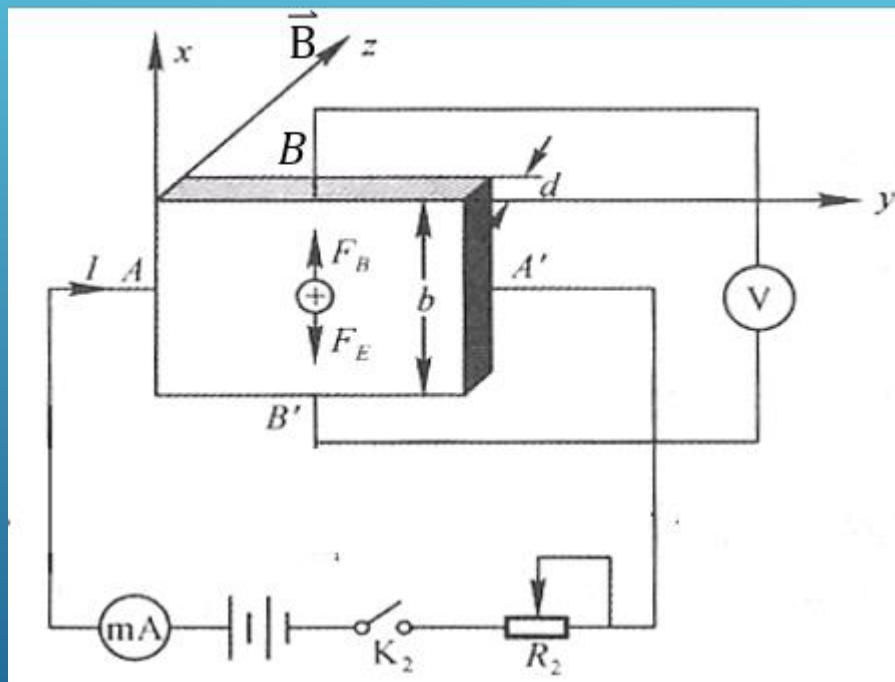
(Edwin Herbert Hall, 1855-1938)

霍尔发现：当电流垂直于外磁场通过导体时，在导体两端垂直于电流和磁场的方向上会产生一个电势差（霍尔电压）。

实验原理

霍尔效应装置如图所示。将一个半导体薄片(宽为 b , 厚为 d), 放在垂直于它的磁场中(\vec{B} 沿 z 轴方向), 当沿 y 方向的电极 A 、 A' 上施加电流 I 时, 薄片内定向移动的载流子(设平均速率为 v)受到洛伦兹力 F_B 的作用。

半导体是指在常温下导电性能介于导体与绝缘体之间的材料。



载流子: N型半导体中指自由电子, P型半导体中指空穴, 它们在电场作用下能作定向运动, 形成电流。

$$F_B = qvB \quad (1)$$

无论载流子是负电荷还是正电荷， F_B 的方向均沿着x方向。

F_B 的方向判断依据（右手螺旋定则）：伸开右手，使拇指与其余四指垂直，并且跟手掌在同一平面内。四指指向电流方向，弯曲四指与磁场方向一致，那么拇指的方向就是导体受洛伦兹力的方向。

在洛伦兹力的作用下，载流子发生偏移，产生电荷积累，从而在薄片 B 、 B' 两侧产生一个电位差 $V_{BB'}$ ，形成一个电场 E 。电场使载流子又受到一个与 F_B 方向相反的电场力 F_E ，

$$F_E = qE = qV_{BB'}/b \quad (2)$$

场强在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势差

其中 b 为薄片厚度， F_E 随着电荷累积而增大，当达到稳定状态时 $F_E = F_B$ ，即

$$qvB = qV_{BB'}/b$$

$$\Rightarrow V_{BB'} = bvB \quad (3)$$

这时在 B 、 B' 两侧建立的电场称为霍尔电场，相应的电压称为霍尔电压，电极 B 、 B' 称为霍尔电极。

另一方面，设载流子浓度为 n ，薄片厚度为 d ，则电流强度 I 与 v 的关系为：

$$I = bdnqv$$

$$\Rightarrow v = I/bdnq \quad (4)$$

(4) 代入(3)可得到 $V_{BB'} = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d}$ (5)

令 $R_H = \frac{1}{nq}$, 则 $V_{BB'} = R_H \frac{IB}{d}$ (6)

R_H 称为霍尔系数，它体现了材料的霍尔效应大小。根据霍尔效应制作的元件称为霍尔元件。

在应用中，(6)常以如下形式出现：

$$V_{BB'} = K_H IB \quad (7)$$

式中 $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{nqd}$ 称为霍尔元件灵敏度， I 称为控制电流。

由式(7)可见，若 I 、 K_H 已知，只要测出霍尔电压 $V_{BB'}$ ，即可算出磁场 B 的大小；若已知磁场方向，则可判断载流子类型 (N型半导体多数载流子为电子，P型半导体多数载流子为空穴)。

N型半导体：电子导电为主
P型半导体：空穴导电为主

由于霍尔效应建立所需时间很短 ($10^{-12} \sim 10^{-14} \text{s}$)，因此霍尔元件使用交流电或者直流电都可。使用交流电时，得到的霍尔电压也是交变的，(7)中的 I 和 $V_{BB'}$ 应理解为有效值。

在实际应用中，伴随霍尔效应经常存在其他效应。例如实际中载流子迁移速率 v 服从统计分布规律，速度小的载流子受到的洛伦兹力小于霍尔电场作用力，向霍尔电场作用力方向偏转，速度大的载流子受到磁场作用力大于霍尔电场作用力，向洛伦兹力方向偏转。这样使得一侧高速载流子较多，相当于温度较高，而另一侧低速载流子较多，相当于温度较低。这种横向温差就是温差电动势 V_E ，这种现象称为爱廷豪森效应。这种效应建立需要一定时间，如果采用直流电测量时会给霍尔电压测量带来误差，如果采用交流电，则由于交流变化快使得爱廷豪森效应来不及建立，可以减小测量误差。

此外，在使用霍尔元件时还存在不等位电势引起的误差，这是因为霍尔电极 B 、 B' 不可能绝对对称焊在霍尔片两侧产生的。在额定控制电流下，不加磁场时霍尔元件输出电极间的空载霍尔电势称为不等位电势。（由于目前生产工艺水平较高，不等位电势很小，故一般可以忽略。）

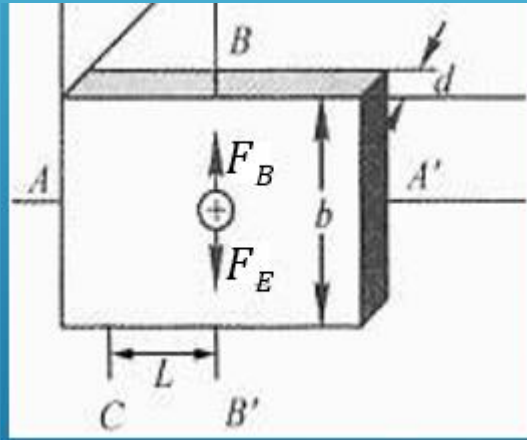
我们可以通过改变 I_S 和磁场 B 的方向消除大多数副效应。具体说在规定电流和磁场正反方向后，分别测量下列四组不同方向的 I_S 和 B 组合的 $V_{BB'}$ ：

然后利用 $V_{BB'} = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4} = V_H$ 得到霍尔电压平均值，这样虽然不能消除所有的负效应，但其引入的误差不大，可以忽略不计。

$+B, +I_S$	$V_{BB'}=V_1$
$-B, +I_S$	$V_{BB'}= V_2$
$-B, -I_S$	$V_{BB'}=V_3$
$+B, -I_S$	$V_{BB'}= V_4$

电导率测量方法如下图所示。设B'、C间距离为 L ，样品横截面积为 $S = bd$ ，流经样品电流为 I_S ，在零磁场下，测得B'、C间电压为 $V_{B'C}$ ，根据欧姆定律可以求出材料的电导率。

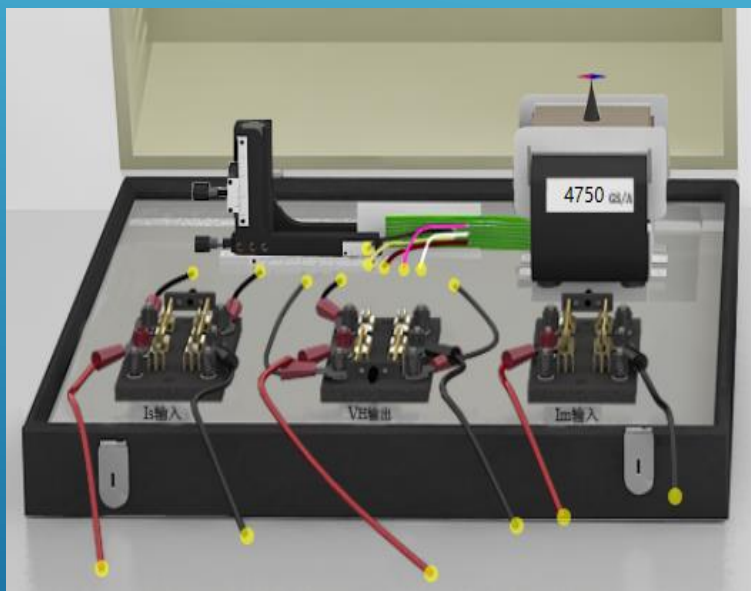
电导率公式 $\sigma = I_S \cdot L / (V_{B'C} \cdot S)$



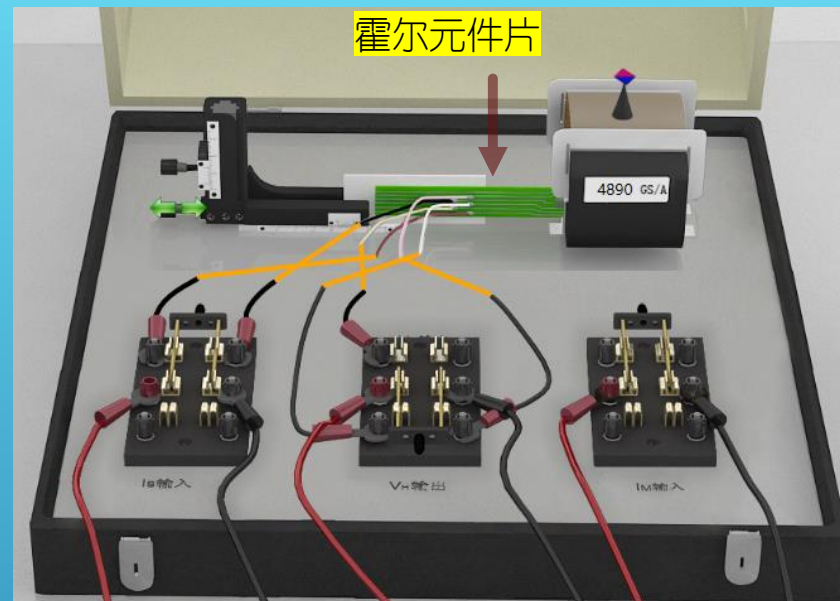
注意： $V_{B'C}$ 在仿真实验仪器上、以及数据测量表格里，表达为 V_σ 。

仿真实验仪器介绍：

霍尔效应实验仪

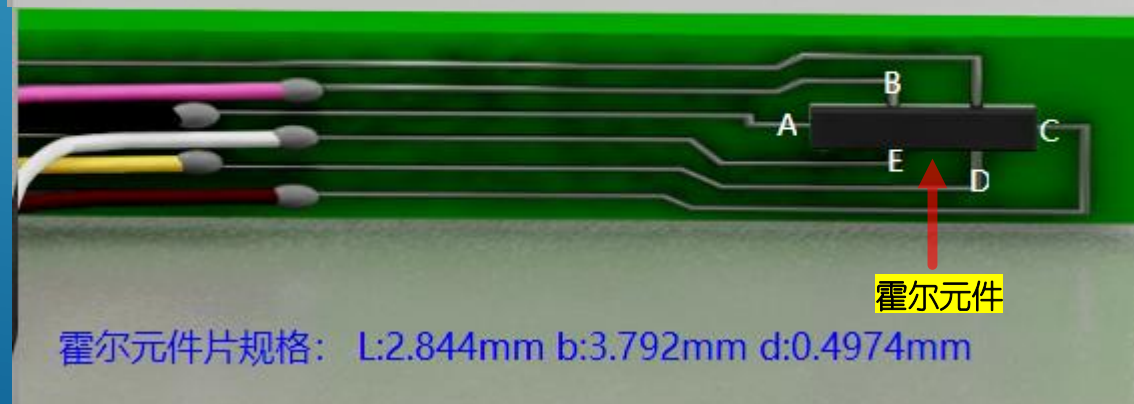


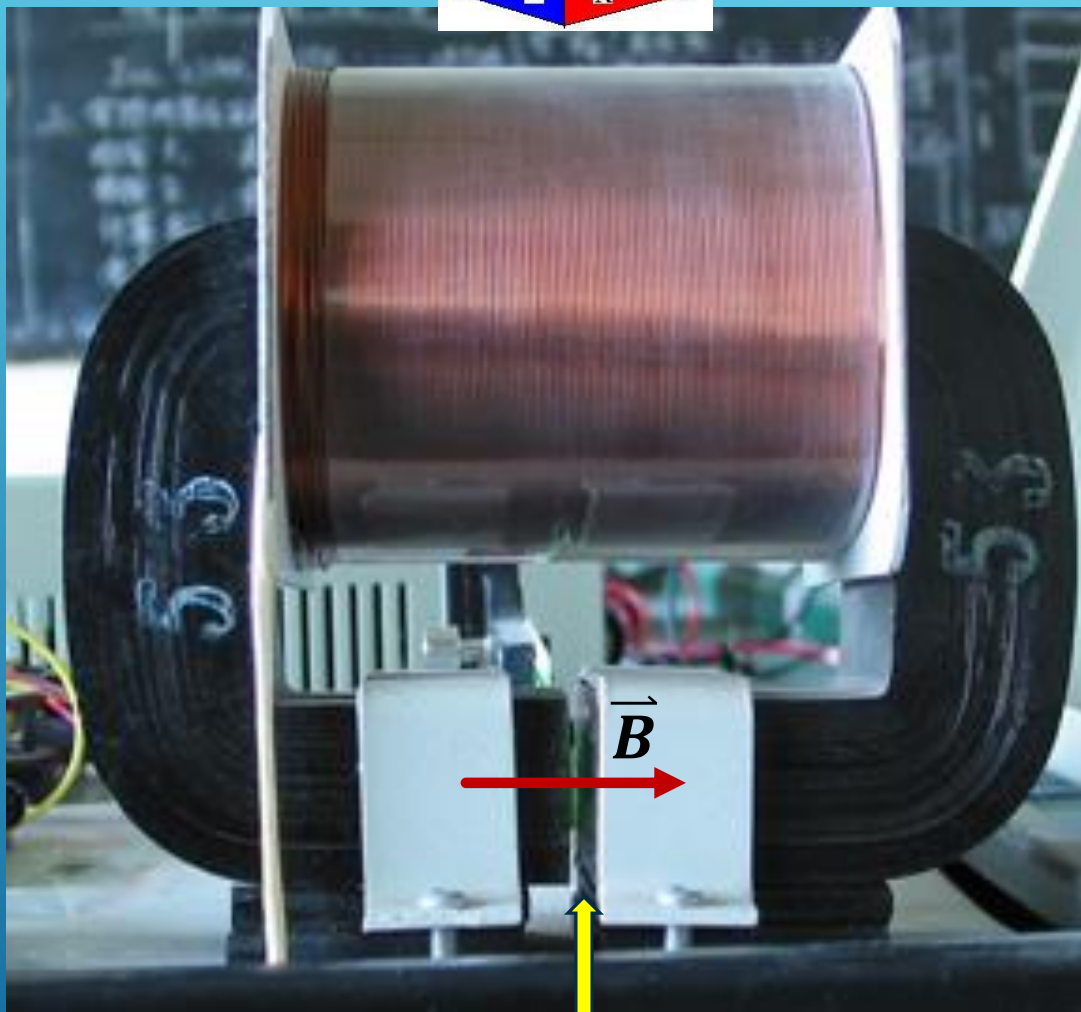
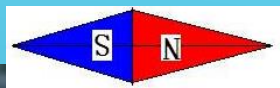
双击实验仪



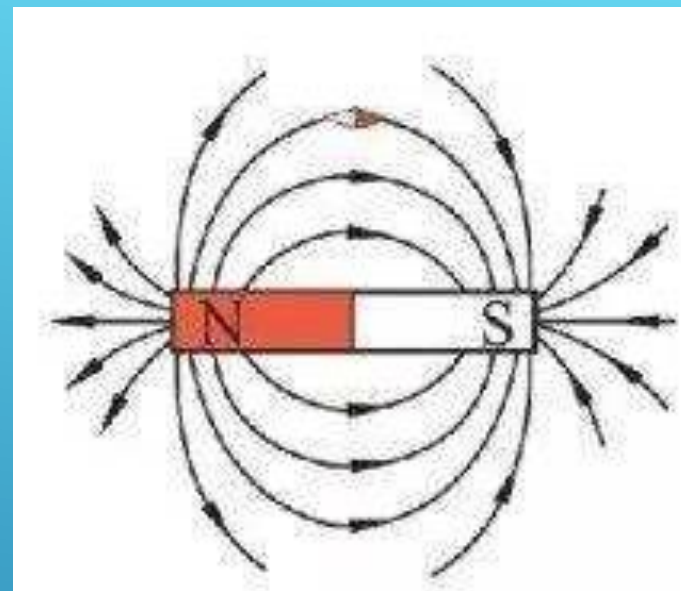
双击霍尔
元件片

A: 工作电流输入负极 B: 霍尔电压输出负极 C: 工作电流输入正极
D: V_{σ} 输出正极 E: 霍尔电压输出正极, 同时为 V_{σ} 输出负极



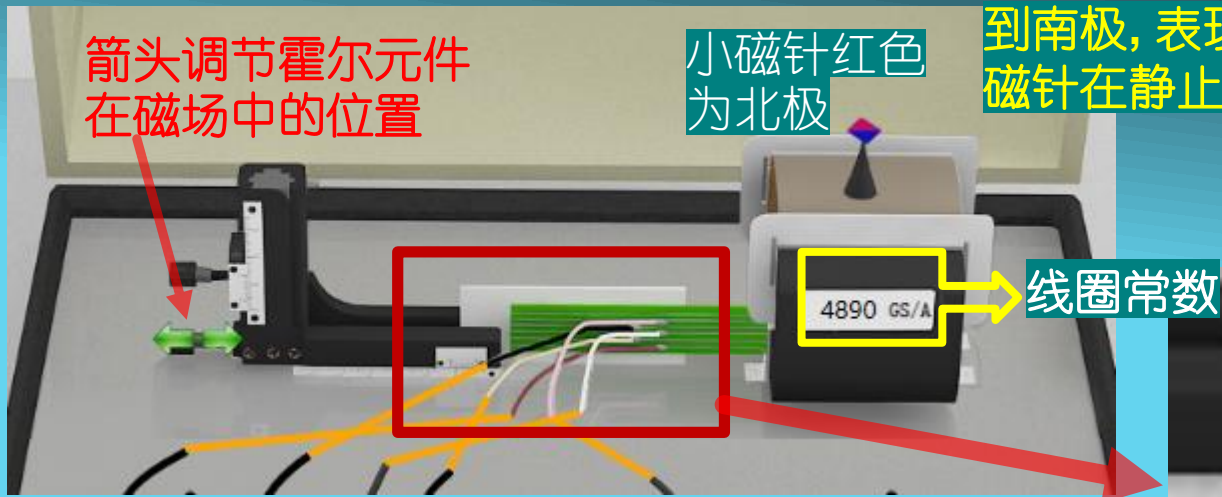


等效



霍尔元件在磁场中的位置

磁场方向:磁体外部从北极出发到南极, 表现为放入磁场的小磁针在静止时北极所指的方向。



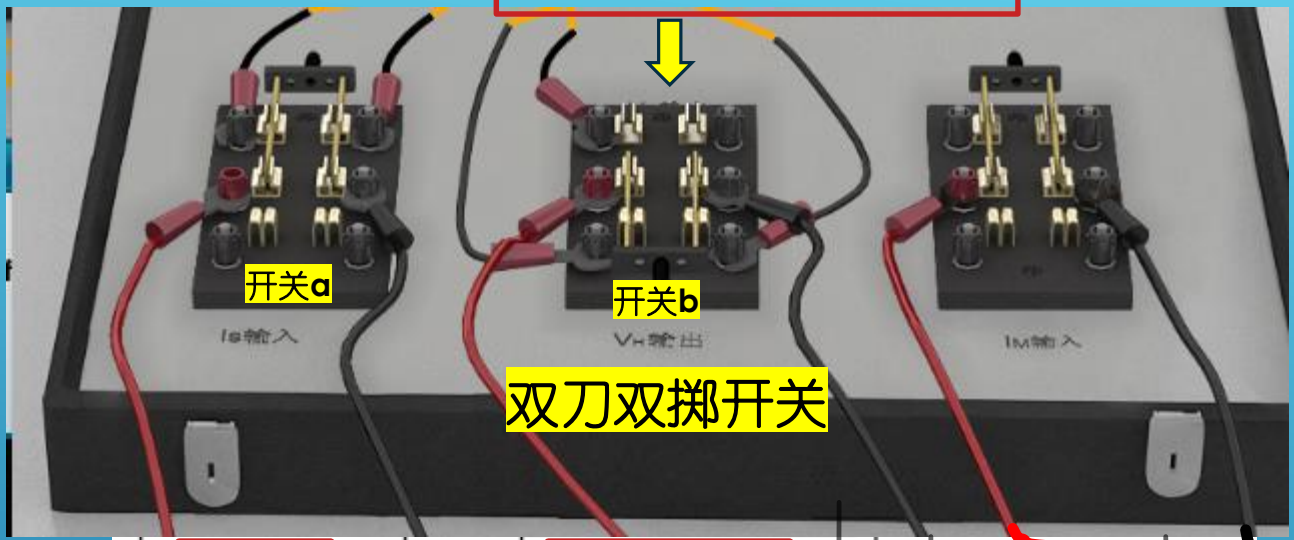
A: 工作电流输入负极 B: 霍尔电压输出负极 C: 工作电流输入正极
D: V_σ 输出正极 E: 霍尔电压输出正极, 同时为 V_σ 输出负极



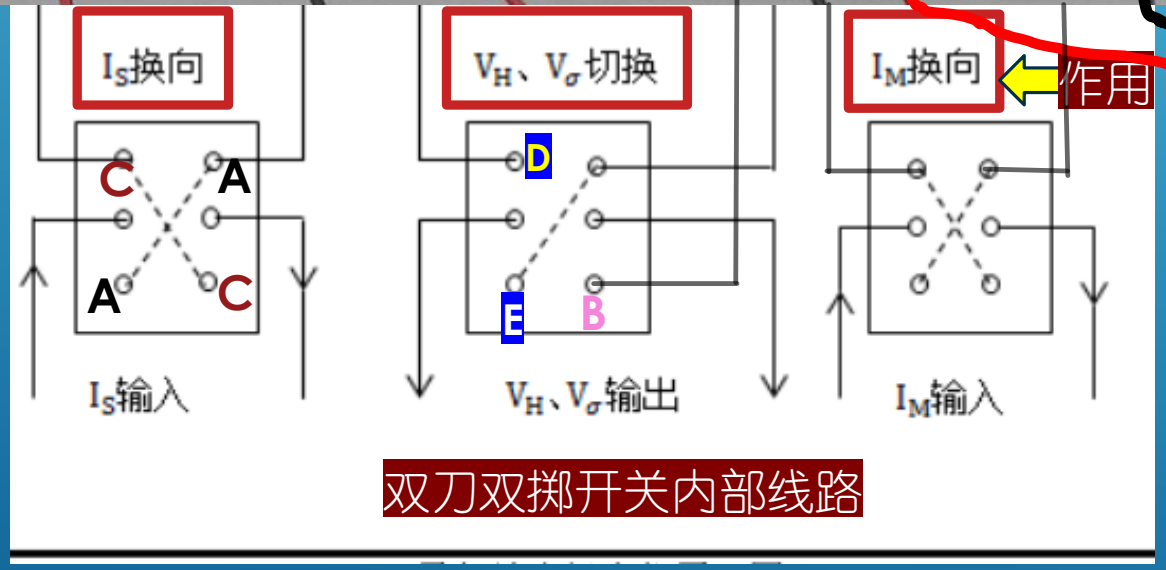
导线颜色辨认:

- A: 黑色导线---工作电流输入负极---连接“ I_S 输入”负极（双刀开关a右上接线柱）；
- C: 棕色导线---工作电流输入正极---连接“ I_S 输入”正极（双刀开关a左上接线柱）；
- B: 粉色导线---霍尔电压输出负极---连接“ V_H 输出”负极（双刀开关b右下接线柱）；
- E: 白色导线---霍尔电压输出正极, 同时为 V_σ 输出负极---连接“ V_H 输出”正极（双刀开关b左下接线柱）；
- D: 黄色导线--- V_σ 输出正极---连接“ V_H 输出”正极（双刀开关b左上接线柱）。

开关往上闭合为 V_{σ} 输出
开关往下闭合为 V_H 输出



双刀双掷开关



霍尔效应测试仪



导线与霍尔效应测试仪连接时，
注意正负（红、黑）——对应

A: 工作电流输入负极 B: 霍尔电压输出负极 C: 工作电流输入正极
D: V_{σ} 输出正极 E: 霍尔电压输出正极，同时为 V_{σ} 输出负极



红色导线端为电流流出端，黑色为电流流入端；



电源打开，
先机械调零

红色导线端为电压正极，
黑色为电压负极

弹起，
按下，

窗□显示为 I_s (单位 mA) 输出，
窗□显示为 I_M (单位 A) 输出

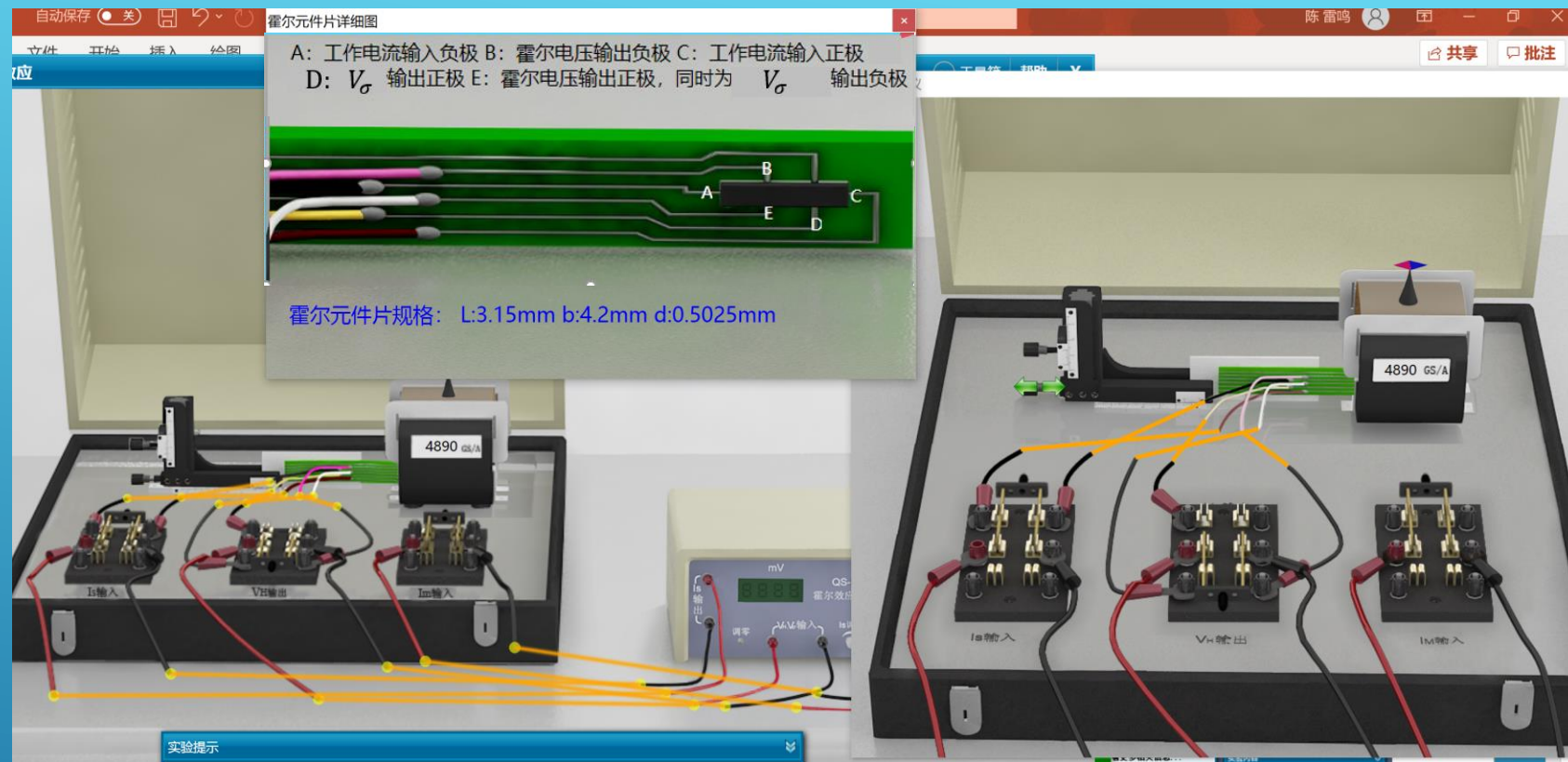
实验内容

一.连接线路

①将霍尔效应测试仪上“ I_S 输出”，“ I_M 输出”和“ $V_H V_M$ 输入”三对接线柱分别与霍尔效应实验仪的双刀双掷开关上的红黑导线对应连接。

②点击弹出“霍尔元件片详细图”，对照并区分正确各颜色的导线，并与双刀双掷开关上的导线对应连接。

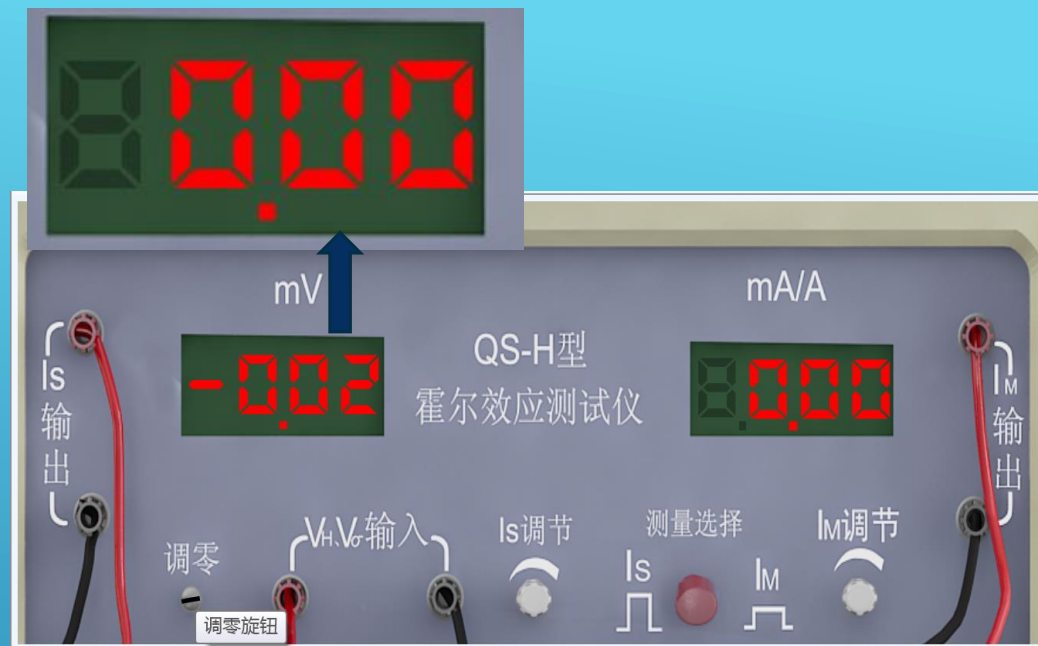
③打开测试仪电源开关，预热数分钟后开始实验。



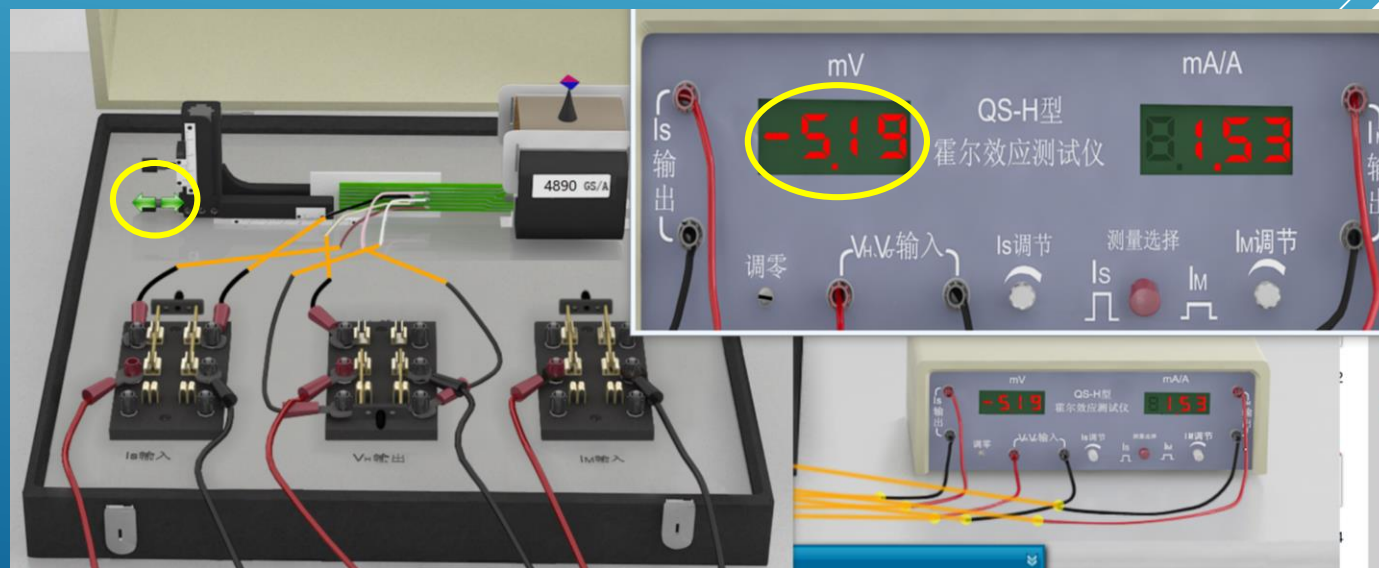
二.磁场最强位置确定

①校准霍尔效应测试仪

调节 $I_S = 0$ ，调节“调零”螺丝，使电压窗口显示为0.00



②分别给工作电流 I_S 和励磁电流 I_M 赋予一个初始值，点击样品架上的箭头移动霍尔元件片在磁场中的位置，并观察电压窗口示数，找到霍尔元件片中磁场最强的位置（电压示数绝对值最大）。



三.测量

1.零磁场下，测 V_σ

霍尔元件片规格: L:2.844mm b:3.792mm d:0.4974mm

A: 工作电流输入负极 B: 霍尔电压输出负极 C: 工作电流输入正极
D: V_σ 输出正极 E: 霍尔电压输出正极, 同时为 V_σ 输出负极



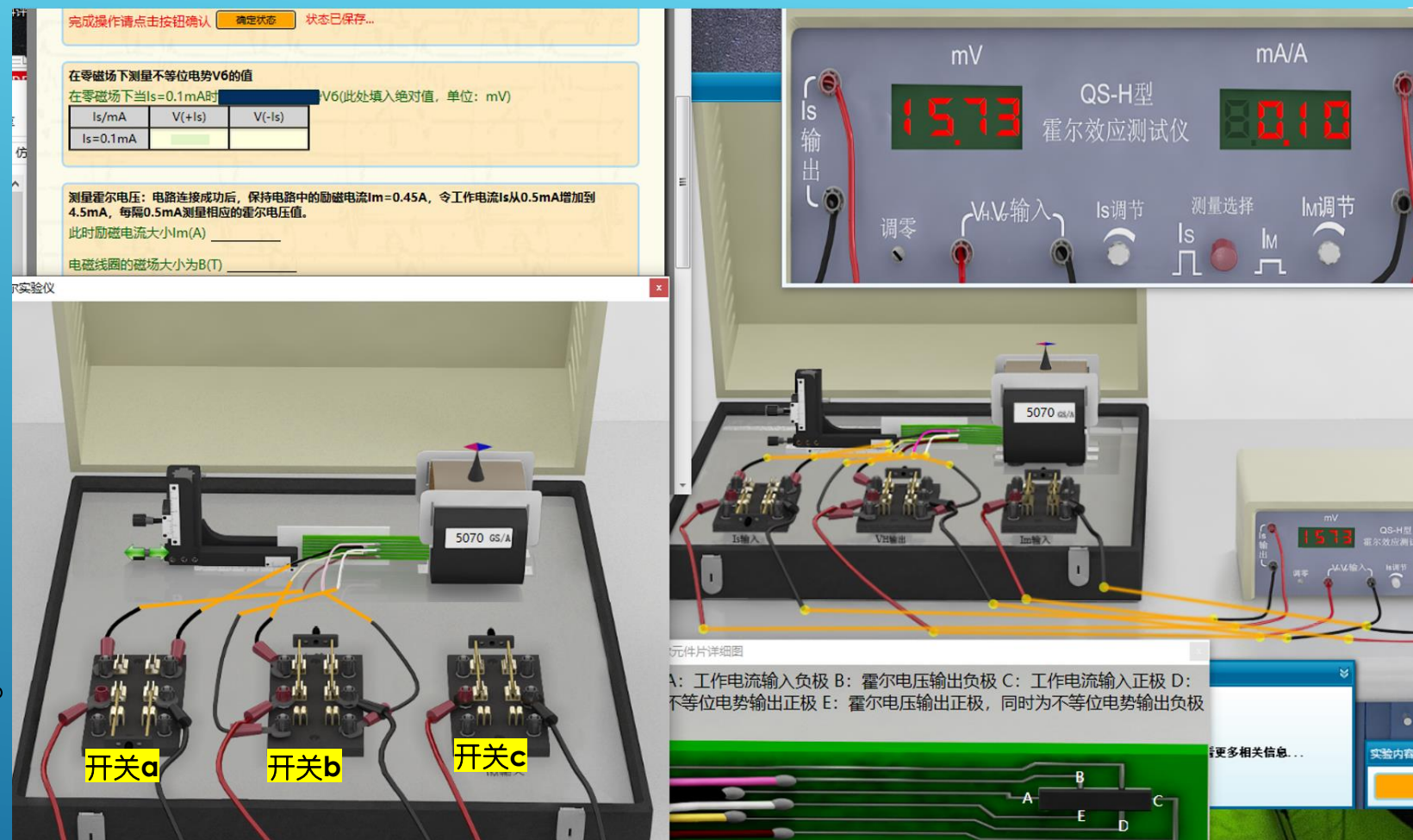
目标: 计算电导率 $\sigma = I_s \cdot L / (V_\sigma \cdot S)$

0.1mA 已知 待测 $S = bd$

调节励磁电流 $I_M = 0$,
工作电流 $I_S = 0.1mA$,

开关b掷上端，此时电压窗口显示为 V_G 。

改变开关a的掷向，即改变 I_s 的输入方向。分别测量并记录 $V_{\sigma(+I_s)}$ 、 $V_{\sigma(-I_s)}$ 。

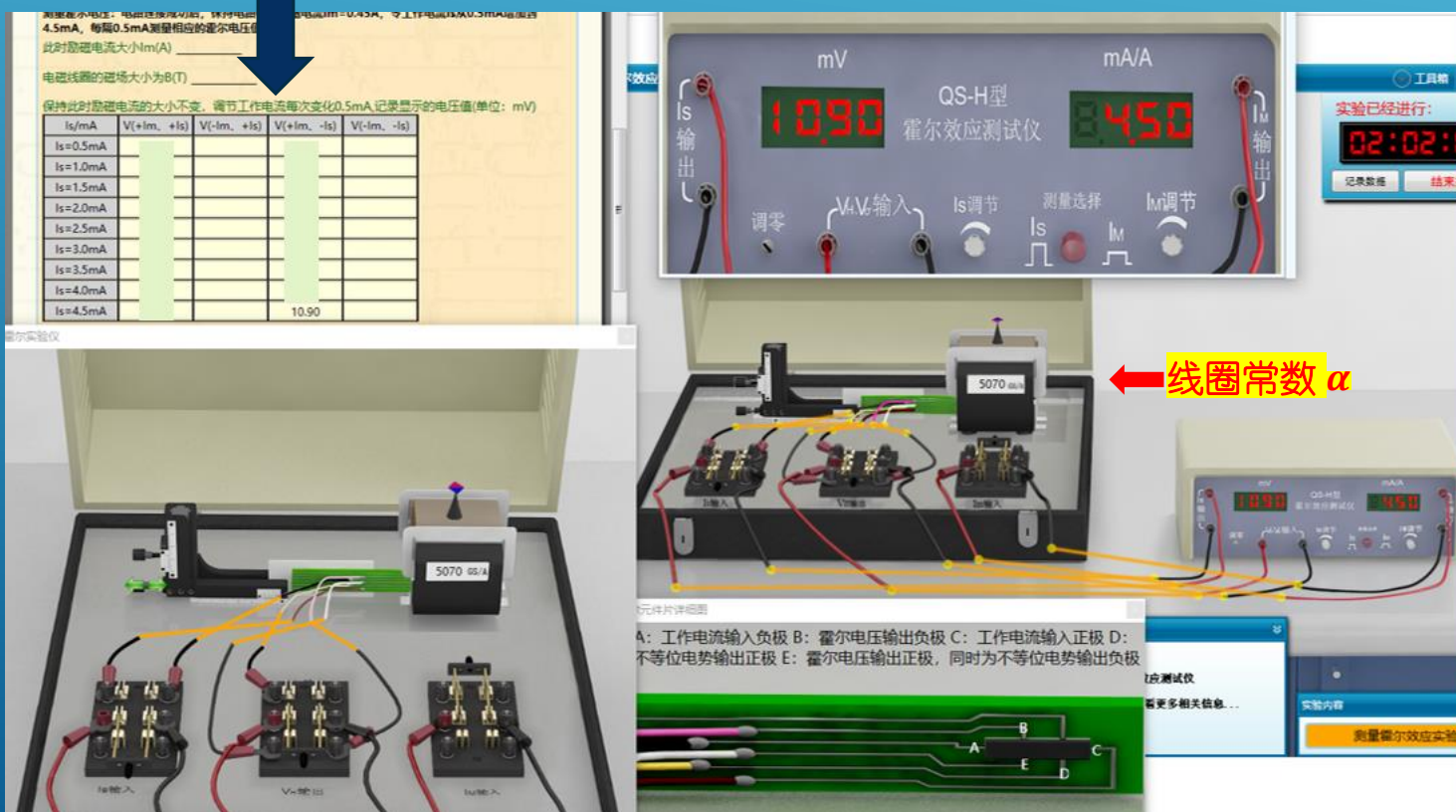


2. 测绘 $V_H - I_S$ 关系曲线

$$B = \alpha I_M$$

励磁电流 $I_M = 0.450\text{A}$ ，保持不变（恒定磁场）
调节工作电流 I_S （ $0.50\text{mA} \sim 4.50\text{mA}$ ）

改变 I_S 、 I_M 电流方向组合，测量四次，填入表格。

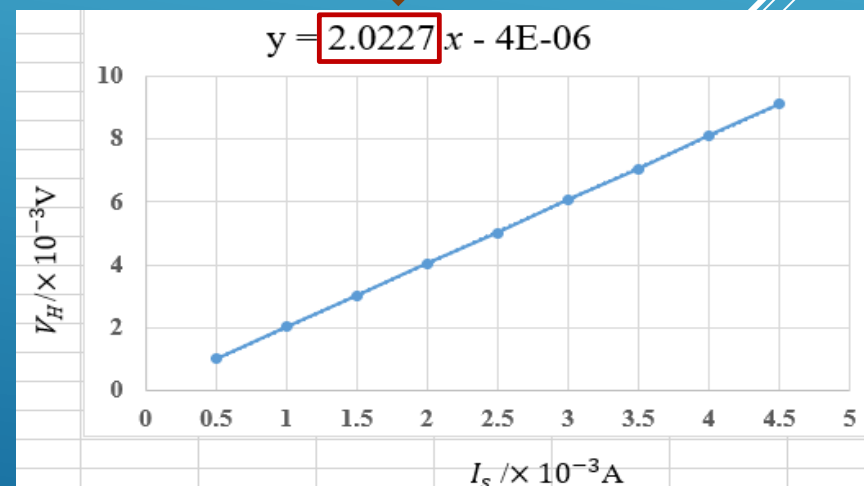


$$V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4}$$

记录霍尔电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4
数据处理： 计算平均值 V_H ，
绘制 $V_H - I_S$ 曲线，计算 K_H

$$V_H = K_H \cdot I_S \cdot B$$

$$V_H = (K_H \cdot \alpha I_M) \cdot I_S$$



$V_H - I_S$ 曲线 ($I_M = 0.45\text{A}$)

3. 测绘 $V_H - I_M$ 关系曲线

工作电流 $I_S = 4.50\text{mA}$ ，保持不变(恒流)
调节励磁电流 I_M (0.050A~0.450A)



记录霍尔电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4
数据处理：计算平均值 V_H ，绘制 $V_H - I_M$ 曲线，计算 K_H

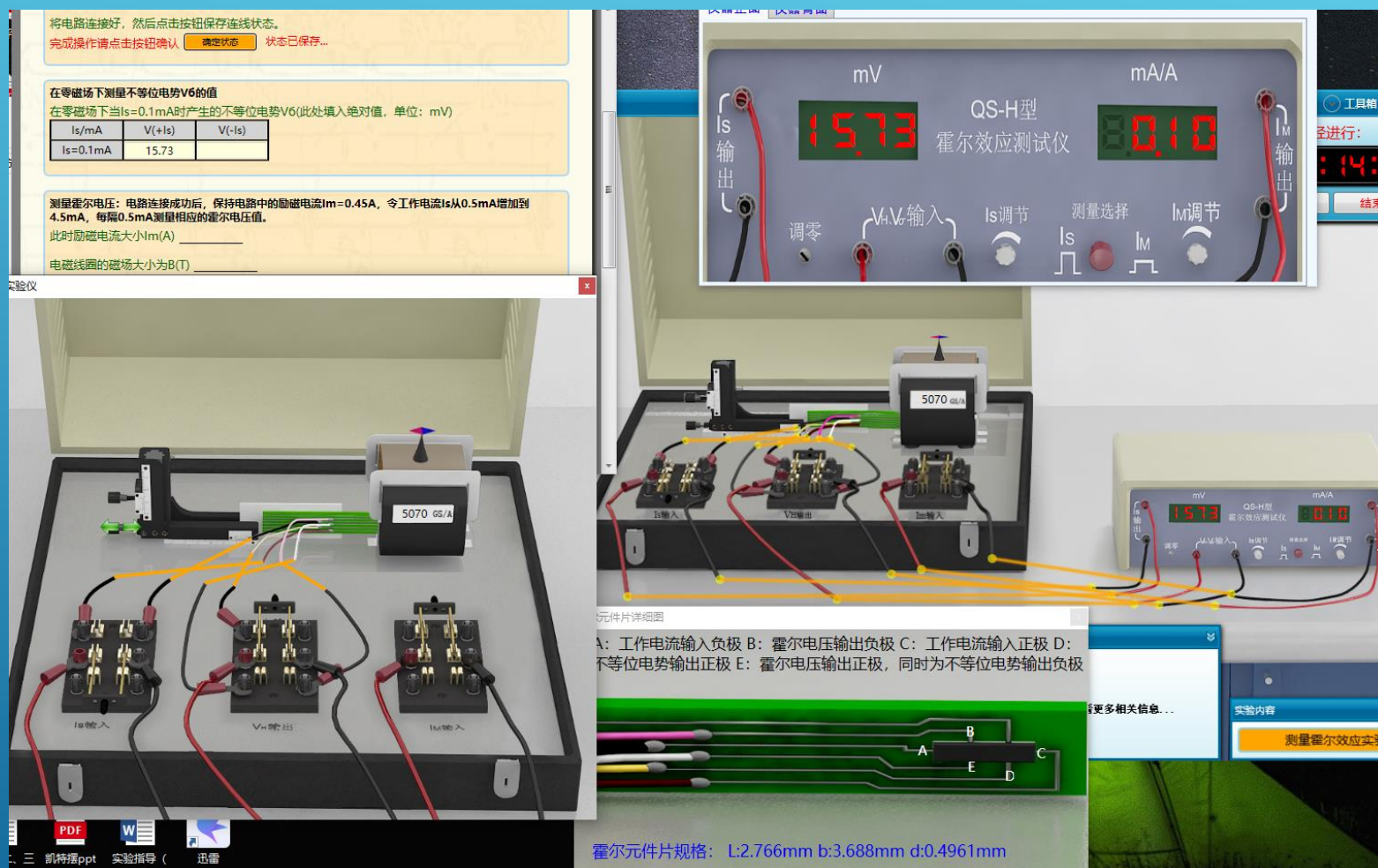


$$V_H = (K_H \cdot \alpha \cdot I_S) \cdot I_M$$

截图要求

一. V_o 的测量状态

1. 视窗要求如图所示;
2. 右上角显示操作时长;
3. 右下角显示电脑系统日期、时间

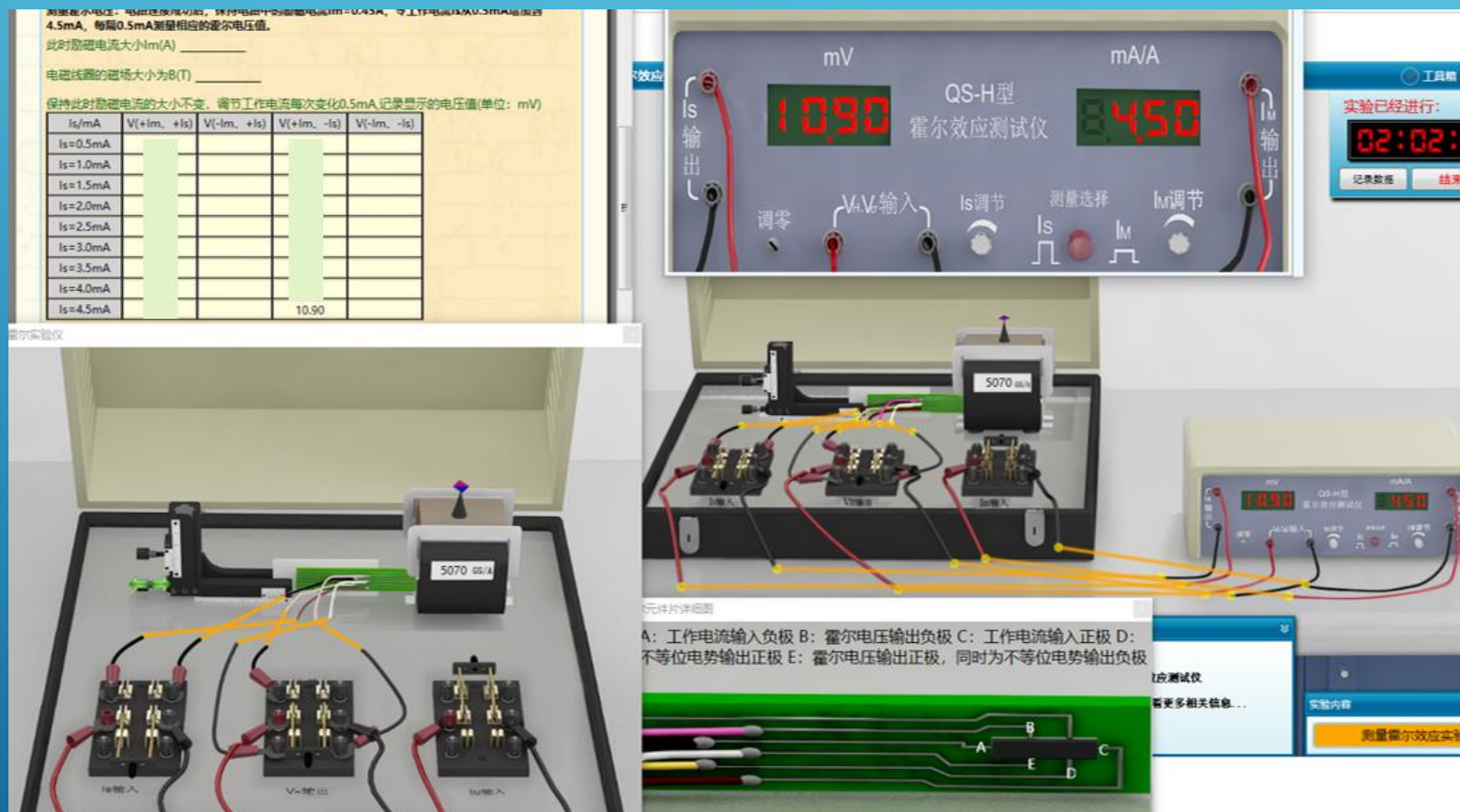


二. V_H-I_S 测量状态

1. 视窗要求如图所示，仪器显示表格第三列最后一个测量结果（其他测量值全部填完）；

2. 右上角显示操作时长；

3. 右下角显示电脑系统日期、时间



三. $V_H - I_M$ 的测量状态

1. 视窗要求如图所示，仪器显示表格第三列最后一个测量结果（其他测量值全部填完）；

2. 右上角显示操作时长；

3. 右下角显示电脑系统日期、时间



数据处理

计算霍尔效应试验的相关值

通过以上测量值计算可得到霍尔系数 $R_H(m^3/C)$ _____

通过以上测量值计算可得到霍尔元件的载流子类型(*型)(请填P或N) _____

通过以上测量值计算可得到霍尔元件的载流子浓度 $n(\times 10^{21}/m^3)$ _____

通过以上测量值计算可得到霍尔元件的电导率 $\sigma(1/(\Omega \cdot m))$ _____

通过以上测量值计算可得到霍尔元件的载流子迁移率 $\mu(m^2/(V \cdot s))$ _____

载流子运动速度等于迁移率乘以电场强度 $\mathbf{v} = \mu \mathbf{E}$ ，即相同的电场强度下，载流子迁移率越大，运动得越快

$$\left. \begin{array}{l} v = I_s / b d n q \\ E = V_\sigma / L \end{array} \right\} \Rightarrow \mu = v / E \\ = R_H \cdot \sigma$$

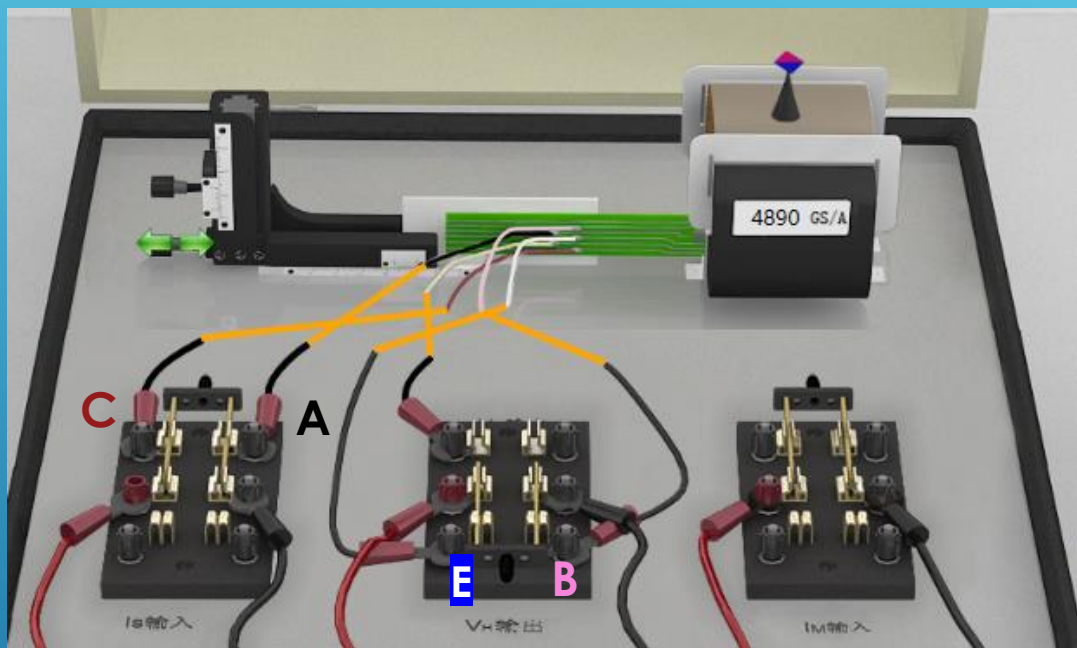
$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{n q d} \quad q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

由 V_H-I_s 关系曲线、 V_H-I_M 关系曲线 $\Rightarrow K_H$ (平均值) $\Rightarrow R_H \Rightarrow n$

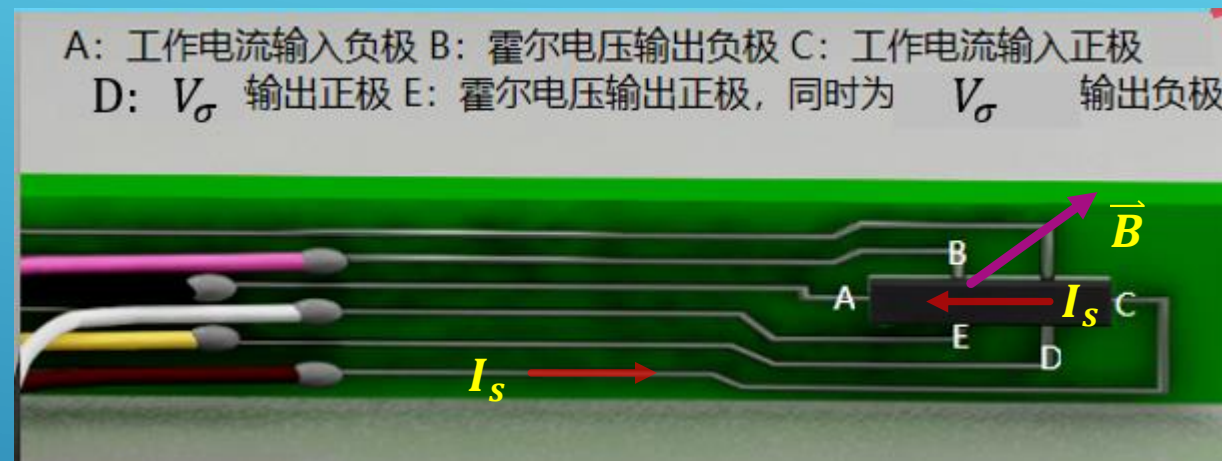
$$\sigma = I_s \cdot L / (V_\sigma \cdot b d) \quad \text{实验中取 } I_s = 0.1 \text{ mA}$$

$$\mu = R_H \cdot \sigma$$

判断载流子类型



图a



图b

双刀开关如图a所示时, I_s 、 \vec{B} 的方向如图b所示, 则的 F_B 的方向指向霍尔元件下极板。若 $V_H > 0$ (下极板为霍尔电压输出正极), 则半导体为P型, 载流子为空穴; 若 $V_H < 0$, 则该半导体为N型, 载流子为电子。