

实验十六 霍尔效应测量磁场 实验报告

1400012141

邵智轩

周二下午3组11号

2016年11月29日

1 实验数据处理

1.1 测量霍尔电压 U_H 和霍尔电流 I_H 的关系

为了消除副效应的影响，在操作时我们要分别改变 I_H 的方向和 B 的方向（即 I_M 的方向），记下4组电势差数据：

当 I_H 正向， B 正向时： $U_1 = U_H + U_0 + U_E + U_N + U_R$

当 I_H 负向， B 正向时： $U_2 = -U_H - U_0 - U_E + U_N + U_R$

当 I_H 负向， B 负向时： $U_3 = U_H - U_0 + U_E - U_N - U_R$

当 I_H 正向， B 负向时： $U_4 = -U_H + U_0 - U_E - U_N - U_R$

考虑到 $U_E \ll U_H$ ，可忽略，于是

$$U_H = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4)$$

固定励磁电流 $I_M = 0.600 \text{ A}$ ，输入霍尔电流 I_H 接入1、2端，测量3、4端电压 U_1, U_2, U_3, U_4 。

Table 1: I_H 接1、2端时 $U_H - I_H$ 数据

| I_H/mA | U_1/mV | U_2/mV | U_3/mV | U_4/mV | U_H/mV |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2.000 | 5.66 | -5.66 | 5.79 | -5.79 | 5.73 |
| 4.000 | 11.34 | -11.32 | 11.59 | -11.57 | 11.46 |
| 6.000 | 17.04 | -16.99 | 17.41 | -17.36 | 17.20 |
| 8.000 | 22.72 | -22.63 | 23.22 | -23.13 | 22.93 |
| 10.000 | 28.44 | -28.31 | 29.06 | -28.90 | 28.68 |

计算得

$$r = 0.9999997$$

$$k = 2.869 \text{ mV/mA}$$

$$b = -0.01\text{mV}$$

作图见 Figure 1:

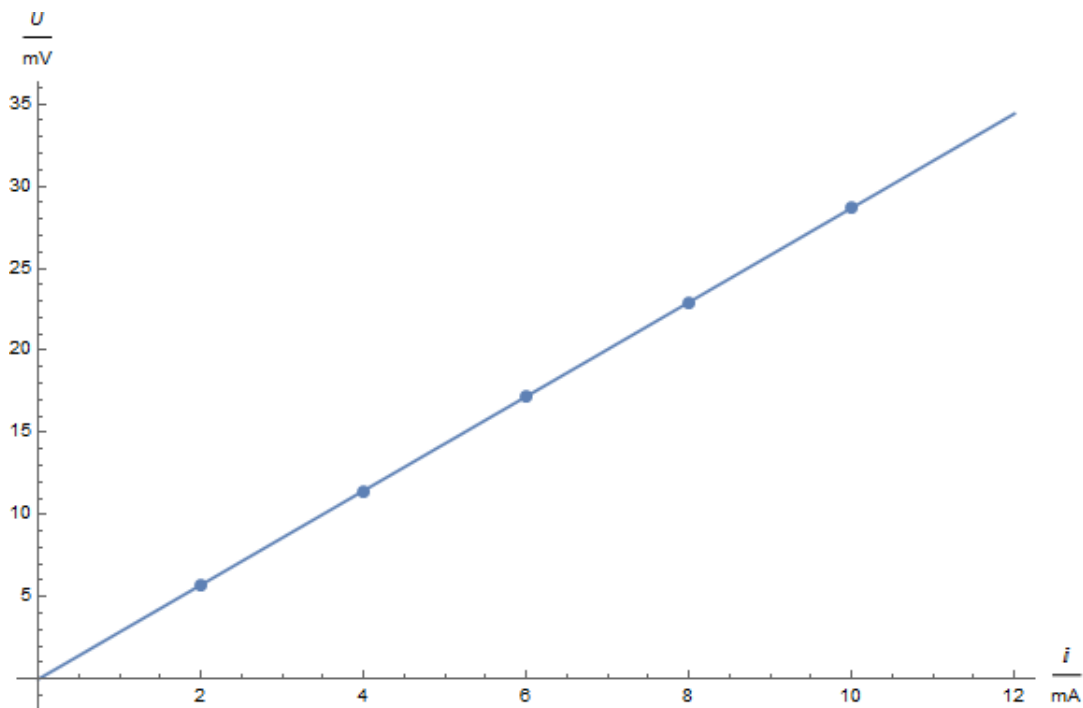


Figure 1: I_H 接1、2端时 U_H-I_H 变化曲线

可以看出 U_H 与 I_H 满足严格的线性性。

固定励磁电流 $I_M = 0.600 \text{ A}$ ，输入霍尔电流 I_H 接入3、4端，测量1、2端电压 U_1 , U_2 , U_3 , U_4 。

Table 2: I_H 接3、4端时 U_H-I_H 数据

| I_H/mA | U_1/mV | U_2/mV | U_3/mV | U_4/mV | U_H/mV |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2.00 | 5.80 | -5.81 | 5.67 | -5.69 | 5.74 |
| 4.00 | 11.59 | -11.62 | 11.35 | -11.36 | 11.48 |
| 6.00 | 17.38 | -17.43 | 17.02 | -17.07 | 17.23 |
| 8.00 | 23.16 | -23.25 | 22.68 | -22.75 | 22.96 |
| 10.00 | 28.97 | -29.10 | 28.36 | -28.47 | 28.73 |

计算得

$$r = 0.9999990$$

$$k = 2.873 \text{ mV/mA}$$

$$b = -0.01\text{mV}$$

作图见 Figure 2:

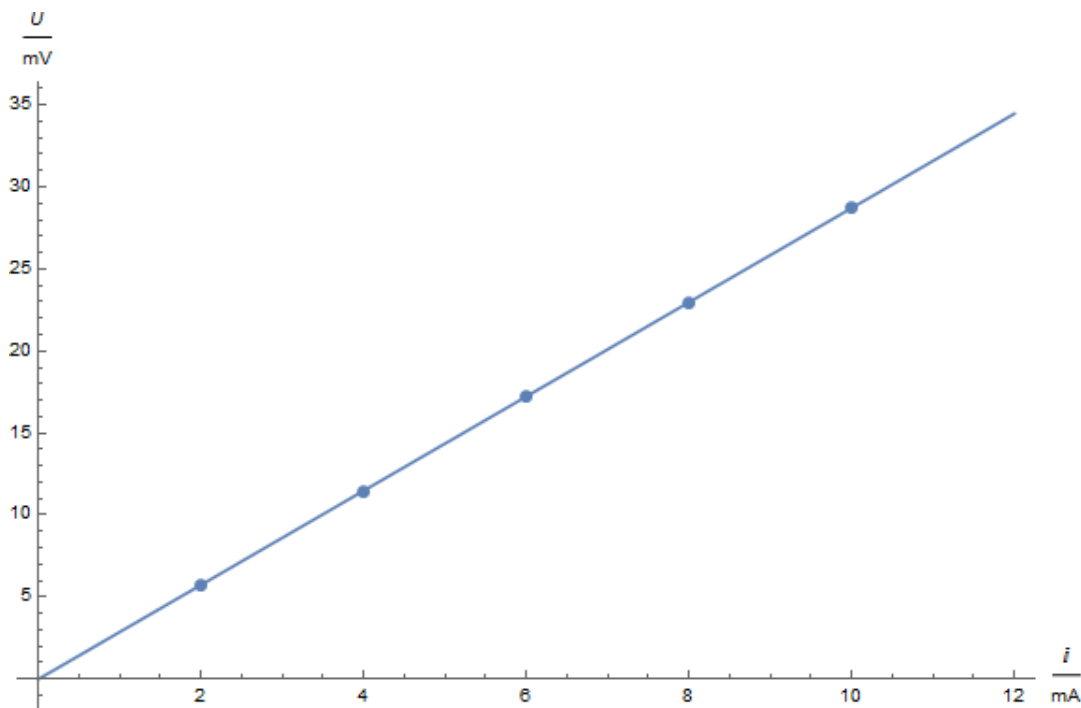


Figure 2: I_H 接3、4端时 U_H-I_H 变化曲线

可见 I_H 通入3、4端时， U_H 与 I_H 依然满足严格的线性性，且斜率 $k = K_H$ 几乎不变。这是当然的，公式 $k = K_H B = \frac{B}{pqd}$ 可知，从1、2端改为3、4端时， B, d 都不变， K_H 理应不变。

1.2 测量 K_H

霍尔电流保持 $I_H = 10.000\text{mA}$ ，霍尔电流由1、2端输入。调节励磁电流 I_M 从0—1A，每隔0.1mA分别测出磁场 B 的大小和样品的霍尔电压 U_H 。

Table 3: I_H 接1、2端时 U_H-B 数据

| I_M/A | U_1/mV | U_2/mV | U_3/mV | U_4/mV | U_H/mV | B/mT |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 0.000 | -0.13 | 0.29 | | | -0.21 | -1.1 |
| 0.100 | 4.67 | -4.52 | 5.21 | -5.06 | 4.87 | 38.9 |
| 0.200 | 9.39 | -9.23 | 9.94 | -9.80 | 9.59 | 75.5 |
| 0.300 | 14.21 | -14.07 | 14.71 | -14.55 | 14.39 | 113.3 |
| 0.400 | 18.86 | -18.71 | 19.53 | -19.37 | 19.12 | 150.9 |
| 0.500 | 23.59 | -23.44 | 24.31 | -24.14 | 23.87 | 188.0 |
| 0.600 | 28.41 | -28.25 | 29.12 | -28.96 | 28.69 | 226.3 |
| 0.700 | 33.19 | -33.04 | 33.96 | -33.80 | 33.50 | 264.2 |
| 0.800 | 38.01 | -37.85 | 38.79 | -38.64 | 38.32 | 303.5 |
| 0.900 | 42.84 | -42.68 | 43.60 | -43.45 | 43.14 | 340.0 |
| 1.000 | 47.50 | -47.37 | 48.41 | -48.27 | 47.89 | 378.2 |

对 U_H-B 进行直线拟合，作图见Figure 3:

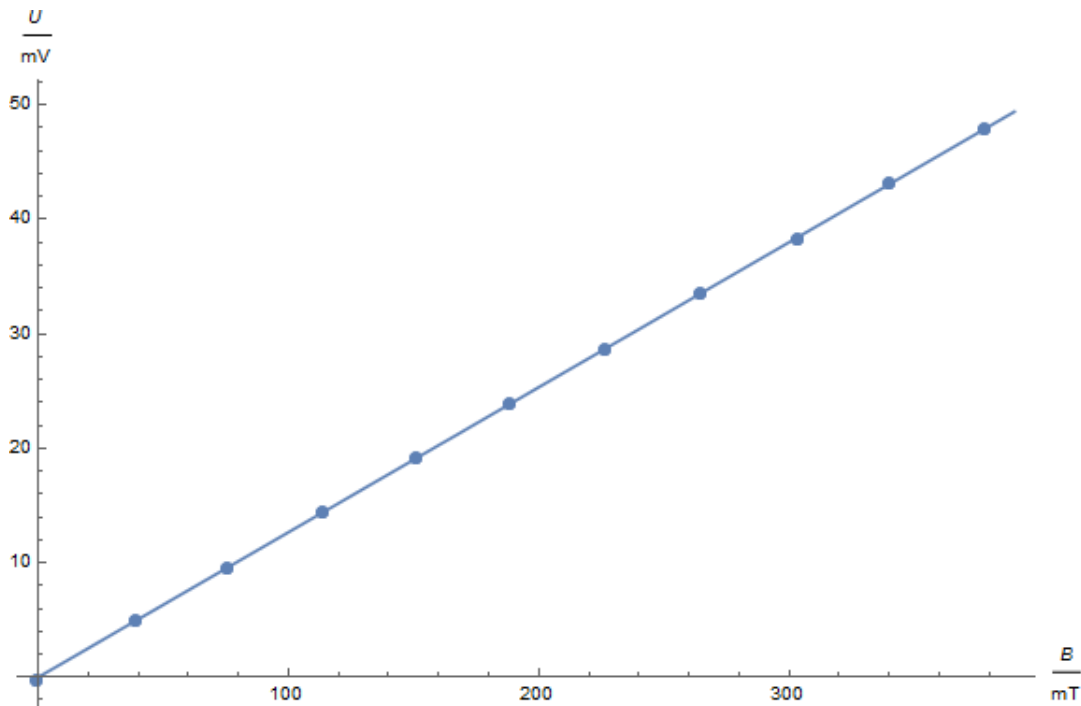


Figure 3: I_H 接1、2端时 U_H-B 数据

计算得

$$r = 0.999986$$

$$k = 0.1268 \text{ V/T}$$

$$b = -0.02 \text{ mV}$$

其中斜率 k 的不确定度为:

$$\frac{\sigma_k}{k} = \sqrt{\frac{1/r^2 - 1}{n - 2}} = 2 \times 10^{-3}$$

由 $U_H = K_H I_H B = kB$, 得

$$K_H = \frac{k}{I_H} = 12.67 \text{ V/(A} \cdot \text{T)}$$

VC9806一直流20mA档允差为 $\pm(0.5\% + 4\text{个字})$, 即

$$e_{I_H} = 10 \times 0.5\% + 0.004 = 0.054\text{mA}$$

故 K_H 的相对不确定度为:

$$\frac{\sigma_{K_H}}{K_H} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{e_{I_H}}{I_H}\right)^2} = 3.7 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{K_H} = 3.7 \times 10^{-3} \cdot K_H = 0.05 \text{ V/(A} \cdot \text{T)}$$

$$K_H \pm \sigma_{K_H} = 12.67 \pm 0.05 \text{ V/(A} \cdot \text{T)}$$

1.3 测量磁化曲线

根据已测得的 $K_H = 12.68\text{V}/(\text{A} \cdot \text{T})$ ，由 $B = \frac{U_H}{K_H I_H}$ 可以计算出相应的 B 的大小。

Table 4: 各个 I_M 对应的磁场 B

| I_M/A | U_H/mV | B/mT |
|----------------|-----------------|---------------|
| 0.000 | -0.21 | -1.6 |
| 0.100 | 4.87 | 38.4 |
| 0.200 | 9.59 | 75.6 |
| 0.300 | 14.39 | 113.5 |
| 0.400 | 19.12 | 150.8 |
| 0.500 | 23.87 | 188.2 |
| 0.600 | 28.69 | 226.3 |
| 0.700 | 33.50 | 264.2 |
| 0.800 | 38.32 | 302.2 |
| 0.900 | 43.14 | 340.2 |
| 1.000 | 47.89 | 377.7 |

磁化曲线 $B-I_M$ 见Figure 4:

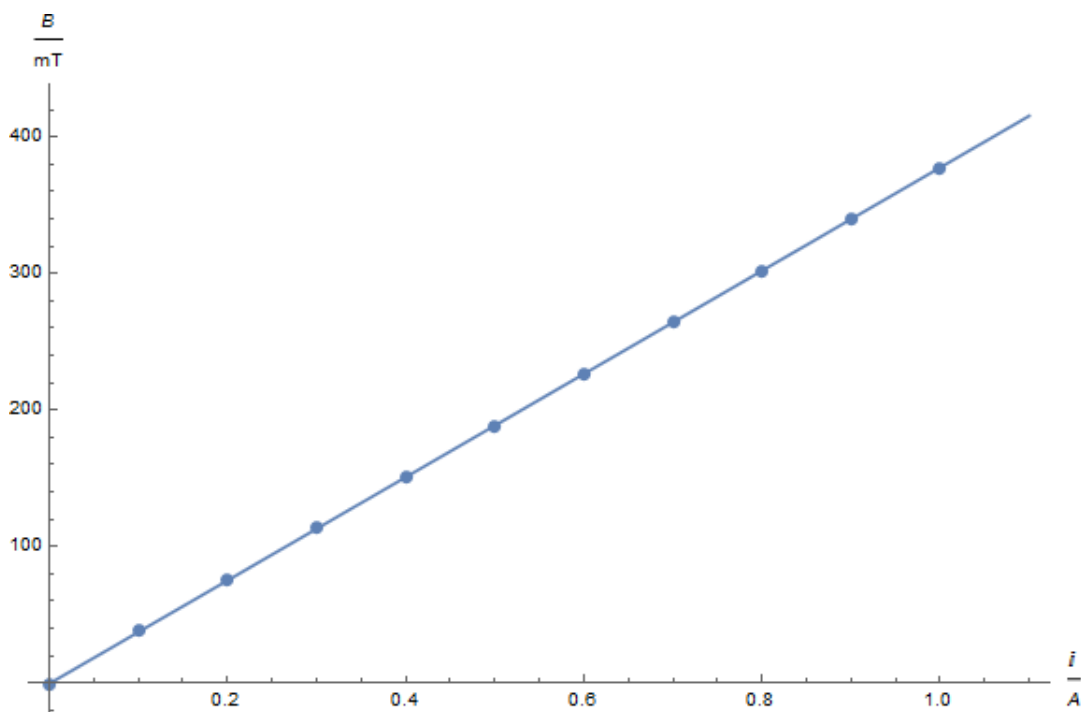


Figure 4: 磁化曲线 $B-I_M$

$$r = 0.99998$$

$$k = 378.2\text{mT/A}$$

$$b = -0.4\text{mT}$$

1.4 测量电磁铁磁场沿水平方向分布

固定励磁电流 $I_M = 0.600\text{A}$ ，霍尔电流 $I_H = 10\text{mA}$ ，移动霍尔片的水平位置 x ，测量出霍尔电压 U_H 。由已知的 K_H ，计算出每个位置磁场大小 $B(x) = \frac{U_H(x)}{K_H I_H}$ ，列表如下：

Table 5: 各个 I_M 对应的磁场 B

| | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x/mm | 0.0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 |
| U_H/mV | 6.40 | 6.88 | 7.80 | 8.99 | 10.40 | 12.75 | 15.89 | 20.67 | 27.17 | 29.72 |
| B/mT | 50.5 | 54.3 | 61.5 | 70.9 | 82.0 | 100.6 | 125.3 | 163.0 | 214.3 | 234.4 |
| x/mm | 10.0 | 11.0 | 12.0 | 13.0 | 14.0 | 15.0 | 16.0 | 17.0 | 18.0 | 19.0 |
| U_H/mV | 29.72 | 29.15 | 28.80 | 28.66 | 28.59 | 28.57 | 28.55 | 28.55 | 28.55 | 28.56 |
| B/mT | 234.4 | 229.9 | 227.1 | 226.0 | 225.5 | 225.3 | 225.2 | 225.2 | 225.2 | 225.2 |
| x/mm | 20.0 | 21.0 | 22.0 | 23.0 | 25.0 | 29.0 | 35.0 | 40.0 | 45.0 | 46.0 |
| U_H/mV | 28.57 | 28.57 | 28.58 | 28.58 | 28.60 | 28.63 | 28.66 | 28.66 | 28.90 | 29.24 |
| B/mT | 225.3 | 225.3 | 225.4 | 225.4 | 225.6 | 225.8 | 226.0 | 226.0 | 227.9 | 230.6 |
| x/mm | 47.0 | 48.0 | 49.0 | 50.0 | 51.0 | | | | | |
| U_H/mV | 28.84 | 25.55 | 19.89 | 14.69 | 11.49 | | | | | |
| B/mT | 227.4 | 201.5 | 156.9 | 115.9 | 90.62 | | | | | |

由于 x 较大的一端已经转到顶，故曲线右半部份不够完整。 $B-x$ 曲线见Figure 5:

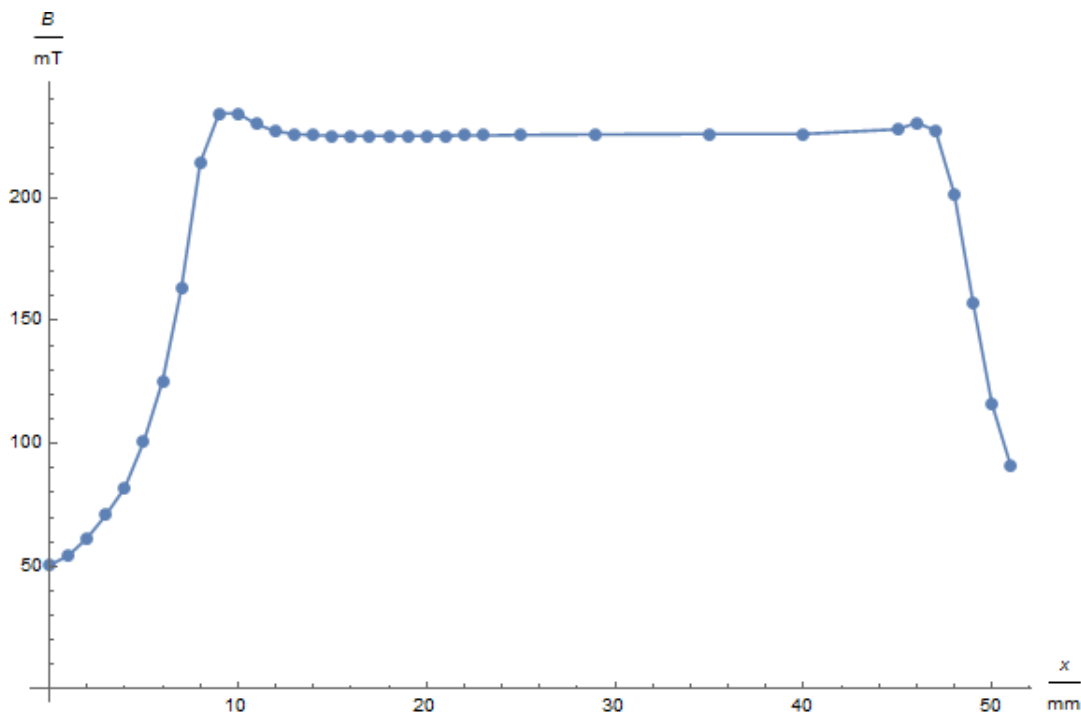


Figure 5: 电磁铁磁场 B 沿水平方向 x 的分布

从图中可以看出，电磁铁中间的磁场曲线近似水平，即电磁铁两极之间近似为匀强磁场，而当位移达到匀强磁场的边界外后，磁场迅速减弱。

2 思考题

2.1 分析本实验主要误差来源，计算磁场 B 的合成不确定度（分别取 $I_M = 1.0\text{A}$ ， $I_H = 10\text{mA}$ ）。

本实验主要误差来源有：用数字万用表测量励磁电流 I_M 、霍尔电流 I_H 、霍尔电压 U_H 的误差，特斯拉计测量磁场的误差（间接造成了 K_H 的误差）

$$B = \frac{U_H}{K_H I_H}$$

之前已计算得，

$$\sigma_{K_H} = 3.7 \times 10^{-3} \cdot K_H = 0.05 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{T})$$

又VC9806一直流20mA档允差为 $\pm(0.5\% + 4\text{个字})$ ，且 $I_H = 10.000\text{mA}$ ，即

$$e_{I_H} = 10 \times 0.5\% + 0.004 = 0.054\text{mA}$$

VC9806一直流200mV档允差为 $\pm(0.05\% + 3\text{个字})$ ，且 $U_H = 47.89\text{mV}$ ，即

$$e_{U_H} = 48 \times 0.05\% + 0.03 = 0.054\text{mV}$$

所以

$$\frac{\sigma_B}{B} = \sqrt{\frac{1}{3}\left(\frac{eU_H}{U_H}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{eI_H}{I_H}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{K_H}}{K_H}\right)^2} = 3.7 \times 10^{-3} = 0.49\%$$

$$\sigma_B = 340 \times 0.49\% = 2\text{mT}$$

2.2 以简图示意，用霍尔效应法判断霍尔片上磁场方向。

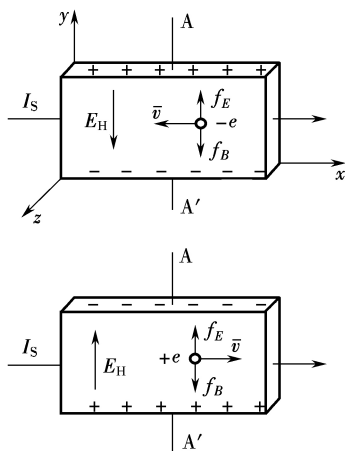


Figure 6: 霍尔效应判断磁场方向

如图Figure 6，图上半部分是n型半导体，载流子为电子。实验可测出霍尔电压 $U_{AA'} > 0$ ，电场 \vec{E}_H 方向朝下，电子受力 \vec{f}_E 向上。由平衡条件可知，电子受洛伦兹力 \vec{f}_B 方向向下。又根据霍尔电流 I_H 方向向右可得电子漂移运动 \vec{v} 方向向左。由 $\vec{f}_B = -e(\vec{v} \times \vec{B})$ 可知 \vec{B} 的方向为 $-(\vec{f}_B \times \vec{v})$ 的方向，在此图中为垂直纸面向外。

下半部分为p型半导体，载流子为带正电的空穴。可类似地判断出磁场方向仍是垂直纸面向外。

2.3 在测量 $B-I_M$ 曲线中， $I_M = 0$ 时 U_H 测量端仍有较小的电压，这是为什么？

一方面电磁铁芯产生的磁场与磁化历史有关，可能会有剩磁。另一方面，此时还有不等位电势差（可以通过霍尔电流换向消除）和残留的温差电动势（此时无法消除）。

3 分析与讨论

3.1 比较实验内容1中a、b两种接法的结果，并解释现象。

比较两种接法下的数据和 U_H-I_H 关系图，两者数据非常接近。在允许误差范围内，拟合出的两直线斜率相等。这是当然的，直线斜率 $k = K_H B = \frac{B}{pqd}$ ，从1、2端改为3、4端时， \vec{B} , d 都不变， K_H 理应不变。

3.2 说明实验内容3中为什么用计算出的 B 作磁化曲线比用直接测量的 B 更好。

我们直接测量的磁场大小是用特斯拉计测量得到的。用特斯拉计测量磁场时，很难使 \vec{B} 完全垂直于探头（探头其实也是一个霍尔片），测到的是磁场的一个分量。实验要求在转动探头时记录示数的最大值，依然难以保证测得磁场的真实大小。而我们利用已经校准过的霍尔片，其 K_H 为已测得的常量， I_H 保持不变，霍尔电压 U_H 是可以准确测得的，从而利用公式 $B = \frac{U_H}{K_H I_H}$ 计算出的 B 是准确的。本质上就是转化成 $U_H - I_H$ 的关系，所以即使 K_H 值测得不够准确，也不会影响磁化曲线的形状、线性度等，不会影响研究电磁铁的磁化规律。