

# 《基础物理实验》预习报告

实验名称	磁场的测量			指导教师	全保刚
姓名	孙奕飞	学号	2023k8009925001	分班分组及座号	2 - 06 - 01 号
实验日期	2024 年 12 月 2 日	实验地点	教 708	调课/补课	否 成绩评定

## 1 实验目的及实验要求

- 1 霍尔效应原理及霍尔元件相关参数的含义和作用
- 2 测绘霍尔元件的  $V_H - I_S$  和  $V_H - I_M$  曲线, 研究霍尔电势差  $V_H$  与霍尔元件工作电流  $I_S$ 、磁感应强度  $B$  以及励磁电流  $I_M$  之间的关系。
- 3 学习通过霍尔效应测量磁感应强度  $B$  及磁场的空间分布。
- 4 掌握载流圆线圈磁感应强度的分布规律。
- 5 掌握亥姆霍兹线圈磁感应强度的分布特性。

## 2 实验仪器及设备

### 2.1. 霍尔效应测量磁感应强度

1. 电磁铁磁场: 磁场可调范围为  $0 \sim 350 \text{ mT}$ , 电磁铁励磁电流范围为  $0 \sim 0.5 \text{ A}$ , 连续可调, 调节细度优于  $1 \text{ mA}$ , 稳定性小于  $10^{-5}$ , 并通过 3 位半数字电压表显示。
2. 数字式特斯拉计: 测量范围为  $0 \sim 1000.0 \text{ mT}$ , 最小分辨率为  $0.1 \text{ mT}$ , 配备 4 位半数字电压表显示。
3. 霍尔工作电流: 调节范围为  $0 \sim 3.5 \text{ mA}$ , 连续可调, 最小分辨率为  $10 \mu\text{A}$ , 采用 3 位半数字电压表显示。
4. 霍尔电压表: 测量范围为  $0 \sim 2.0000 \text{ V}$ , 最小分辨率为  $0.1 \text{ mV}$ , 通过 4 位半数字电压表显示。
5. 励磁电流及霍尔工作电流: 使用电子换向开关进行切换。
6. 可调移动尺: 调节范围为  $14 \text{ mm} \sim 44 \text{ mm}$ 。

### 2.2. 亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量

1. 亥姆霍兹线圈架
2. 励磁线圈: 包括两个励磁线圈, 单个线圈的直径为  $105 \text{ mm}$ 。
3. 线圈匝数: 每个线圈的匝数为实验中预设值 (需根据具体型号说明补充)。
4. 线圈间距: 两线圈中心间距为  $105 \text{ mm}$ 。
5. 移动装置: 具有轴向和径向的移动功能, 轴向可移动距离为  $250 \text{ mm}$ , 径向可移动距离为  $70 \text{ mm}$ 。
6. 位置测量分辨率: 距离分辨率为  $1 \text{ mm}$ 。
7. DH4501 亥姆霍兹磁场测量仪:
  - (1) 频率范围:  $20 \sim 200 \text{ Hz}$ , 频率分辨率为  $0.1 \text{ Hz}$ , 测量误差为  $0.1\%$ ;

- (2) 正弦波输出：输出电压幅度最大为  $20 V_p - p$ ，输出电流幅度最大为  $200 \text{ mA}$ ；
- (3) 数显毫伏表：电压测量范围为  $0 \sim 20 \text{ mV}$ ，测量误差为  $1\%$ ；
- (4) 电源： $220 \text{ V} \pm 10\%$ 。

### 3 实验原理

#### 3.1. 霍尔效应测量磁感应强度

##### 3.1.1. 霍尔效应

载流导体中的运动电荷在磁场的作用下，其轨道会发生偏移，直至运动至导体边界。在导体边界积累的电荷将产生一个横向的静电场，当该静电场所产生的力与磁场的洛伦兹力相互抵消时，导体中运动电荷的轨道便不会再发生偏移。此时，积累的电荷在导体中形成一个电势差，这一电势差被称为霍尔电动势。洛伦兹力与静电场力达到平衡的条件可以表示为：

$$-q\vec{E} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow \vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}$$

假设导体的宽度为  $w$ ，厚度为  $d$ ，载流子的浓度为  $p$ ，空穴中的速度为  $v$ ，则导体中的工作电流满足关系：

$$I_S = w d v p q$$

代入上述条件，可以得到：

$$|\vec{E}| = |\vec{v} \times \vec{B}| = \frac{I_S B}{p q w d}$$

而霍尔电动势是沿导体横向产生的，因此霍尔电压的表达式为：

$$V_H = E w = \frac{I_S B}{p q d} = R_H \frac{I_S B}{d} = K_H I_S B$$

其中， $R_H = \frac{1}{p q}$  是霍尔系数，单位为  $(\text{mA} \cdot \text{T})^{-1}$ ； $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{d p q}$  是霍尔元件的灵敏度，单位为  $(\text{mA} \cdot \text{T})^{-1}$ 。

从上式可以看出，霍尔元件的灵敏度  $K_H$  与载流子浓度  $p$  成反比，与导体厚度  $d$  也成反比。通常来说，为了增大霍尔元件的灵敏度  $K_H$ ，应尽可能使用载流子浓度较小的半导体材料，同时尽量减小霍尔元件的厚度。本实验中所采用霍尔片的厚度为  $d = 0.2 \text{ mm}$ 。

根据上述推导，当霍尔灵敏度  $K_H$  已知时，可以通过励磁电流  $I_H$  和霍尔电势差  $V_H$  计算磁场的大小：

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

当磁感应强度  $B$  与霍尔元件的平面法线成  $\theta$  角时，作用于元件上的有效磁场为其法线方向上的分量  $B \cos \theta$ ，此时可以改写霍尔电势差的表达式为：

$$V_H = K_H I_S B \cos \theta$$

### 3.1.2. 用霍尔效应法测量电磁铁的磁场

磁场的测量方法多种多样，例如磁通法、核磁共振法以及霍尔效应法等。其中，霍尔效应法利用由半导体材料构成的霍尔片作为传感元件，将磁信号转换为电信号，从而实现对磁场中各点磁感应强度的测量。该方法的一大优势是可以同时测量交变磁场和直流磁场。基于霍尔效应原理制成的特斯拉计，具有操作简便、结果直观以及测量快速等优点，是一种十分实用的磁场测量工具。

#### 电路结构描述：

如图所示，直流电源  $E_1$  用于给电磁铁提供励磁电流  $I_M$ ，其大小通过电流表读取和测量。稳压电源  $E_2$ <sup>1</sup> 专门用于为霍尔元件提供霍尔电流  $I_H$ 。实验中，霍尔电压和霍尔电流分别通过毫伏表和毫安表测量。此外，励磁电流  $I_M$  的大小通常比霍尔电流  $I_H$  大 1~2 个量级，从而保证测量的稳定性和准确性。

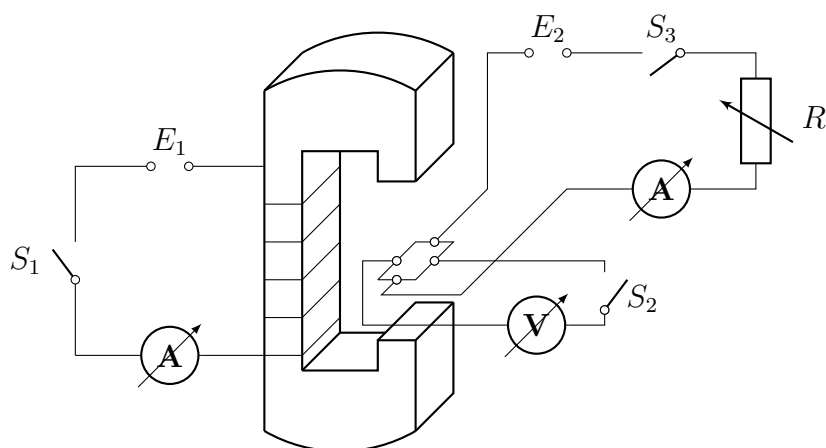


图 1: 霍尔效应测磁场强度电路图

半导体材料主要分为两种类型：N 型（电子型）和 P 型（空穴型）。N 型半导体的载流子为电子，带负电；而 P 型半导体的载流子为空穴，相当于带正电的粒子。当载流子为电子时，4 点的电势会高于 3 点，此时霍尔电压满足  $U_{H3,4} < 0$ ；而当载流子为空穴时，4 点的电势会低于 3 点，此时  $U_{H3,4} > 0$ 。因此，在已知材料载流子类型的前提下，可以通过霍尔电压  $U_H$  的正负来判断待测磁场的方向。

霍尔效应建立电场所需的时间极短，一般为  $10^{-12} \sim 10^{-14}$  s，因此，用于霍尔元件的电流既可以是直流，也可以是交流。若霍尔电流采用交流电，则有  $I_H = I_0 \sin \omega t$ ，根据霍尔效应的公式，霍尔电压表达为：

$$U_H = K_H I_H B = K_H B I_0 \sin \omega t$$

可见，得到的霍尔电压也是交变量。在使用交流电测量时，应用公式  $U_H = K_H I_H B$  计算磁场强度时，需要将  $I_H$  和  $U_H$  理解为它们的有效值。

### 3.1.3. 霍尔元件副效应及其消除

#### 霍尔元件的副效应包括：

<sup>1</sup>稳压电源既可以是直流电也可以是交流电。

### (1) 不等位电势 $V_0$

由于制作过程中存在误差，可能导致霍尔元件的两极不在同一等位面上，此时即使未施加磁场，两极之间也会存在电势差  $V_0$ 。对于霍尔元件， $V_0$  满足关系：

$$V_0 = I_S R_0$$

由此可以看出， $V_0$  的正负随工作电流  $I_S$  的方向发生变化。

### (2) 埃廷豪森效应

在霍尔元件中，载流子的动能会转化为热能，造成两极间出现温差，从而形成温差电效应。温差所产生的电动势  $V_E$  满足关系：

$$V_E \propto IB$$

由于  $V_E$  与  $I$  和  $B$  的关系与霍尔电势差  $V_H$  相同，因此埃廷豪森效应的影响无法在测量过程中被消除。

### (3) 托伦斯效应

由于控制电流的两极与霍尔元件的接触电阻存在差异，控制电流在两极处会产生不同的焦耳热，导致两电极之间形成温差，从而产生附加的电势差  $V_H$ ，其关系为：

$$V_H \propto QB$$

由上式可知，该效应导致的  $V_H$  的符号仅取决于磁场方向  $B$ ，而与工作电流  $I_S$  的方向无关。

### (4) 里纪-杜勒克效应

正如托伦斯效应中所描述，霍尔元件内存在温度梯度，这导致载流子沿梯度方向扩散，并产生一个热电流  $Q$ ，在该过程中，载流子受磁场作用会形成温差电动势，满足：

$$V_H \propto QB$$

在这种情况下， $V_H$  的符号仅与磁场方向  $B$  相关，而与工作电流  $I_S$  的方向无关。

### 霍尔电压副效应的消除方法：

通过对上述副效应的分析，可以采用对称测量法来消除除埃廷豪森效应外的所有副效应。由于埃廷豪森效应无法在测量中完全消除，但在非大电流和弱磁场条件下，其影响通常较小，可以忽略不计。

具体实验操作如下：

1. 测量  $I_S$  为正向、 $I_M$  为正向时霍尔电压的绝对值；
2. 测量  $I_S$  为正向、 $I_M$  为负向时霍尔电压的绝对值；
3. 测量  $I_S$  为负向、 $I_M$  为负向时霍尔电压的绝对值；
4. 测量  $I_S$  为负向、 $I_M$  为正向时霍尔电压的绝对值。

最后，取以上四个测量结果的平均值，作为最终的霍尔电压测量值。

## 3.2. 亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量

### 3.2.1. 载流圆线圈的磁感应强度分布

通电的圆线圈在其轴线上会产生一个磁场，其磁感应强度的公式为：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}}$$

其中，参数含义如下：

- $N_0$  为圆线圈的匝数；
- $I$  为线圈内的电流；
- $R$  为圆线圈的半径；
- $X$  为轴线上某点到圆心  $O$  的距离；
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  为真空磁导率。

利用该公式，可得通电圆线圈在轴线上某点的磁场分布如下：

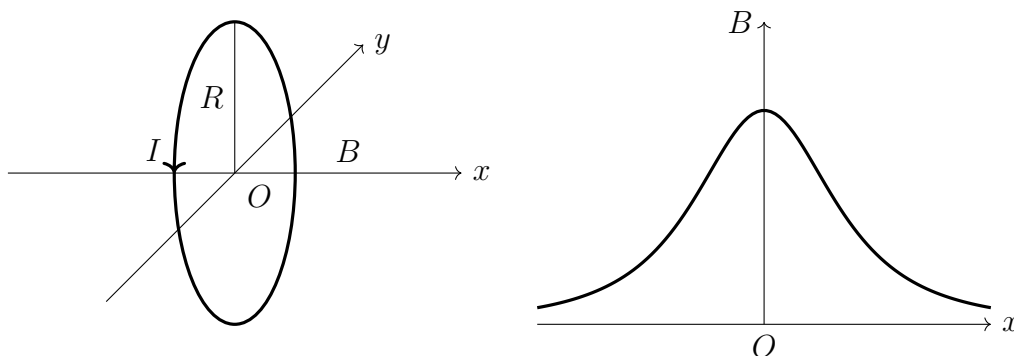


图 2: 载流圆线圈轴向磁感应强度分布

在本实验中，圆线圈的参数取值如下：匝数  $N_0 = 400$  匝，半径  $R = 105 \text{ mm}$ 。当频率  $f = 120 \text{ Hz}$ ，电流  $I = 60 \text{ mA}$ <sup>2</sup>，并且在圆心位置  $X = 0$  时，可以利用圆线圈轴线上磁感应强度公式：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}}$$

进行计算。

在圆心处  $X = 0$  时，公式可简化为：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R}$$

将已知数据代入：

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \times 400 \times (60 \times 10^{-3})}{2 \times (105 \times 10^{-3})}$$

---

<sup>2</sup>此部分实验所用  $I$  均为有效值。

计算得单个圆线圈在圆心处的磁感应强度约为：

$$B = 0.144 \text{ mT}.$$

### 3.2.2. 亥姆霍兹线圈的磁感应强度

所谓亥姆霍兹线圈，是指两组彼此平行且共轴（轴线重合）的圆线圈，并使两个线圈上流过相同方向的电流  $I$ 。根据理论证明，当两个线圈的中心间距  $a$  等于线圈的半径  $R$  时，这两个单线圈在轴线（两线圈圆心连线）上的磁场叠加后，在轴线中点附近较大的范围内可以形成一个均匀的磁场。下图形象地展示了这一均匀磁场形成的特性：

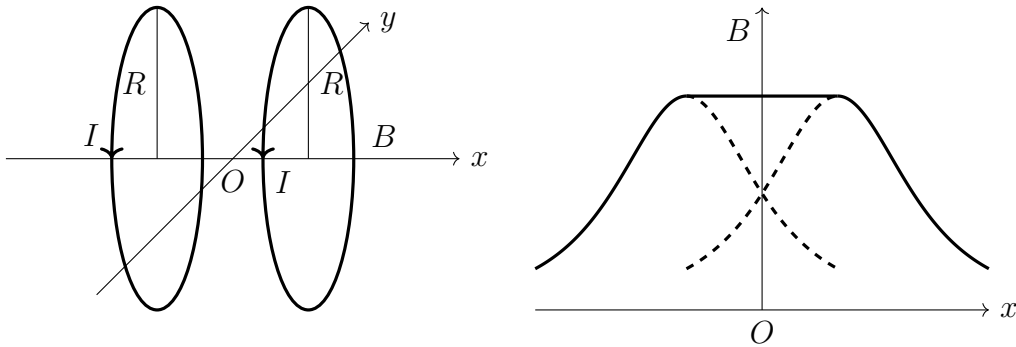


图 3: 亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布

在亥姆霍兹线圈中，设轴线上某一点距离中心点  $O$  的距离为  $z$ ，该点的磁感应强度  $B$  可表示为：

$$B = \frac{1}{2}\mu_0 N I R^2 \left\{ \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} + z \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} - z \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}$$

当  $z = 0$  时，即中心点  $O$  处，根据公式计算，磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R} \times \frac{16}{5^{3/2}}$$

在本实验中，亥姆霍兹线圈的参数如下：匝数  $N_0 = 400$  匝，半径  $R = 105 \text{ mm} = 0.105 \text{ m}$ ，频率  $f = 120 \text{ Hz}$ ，电流  $I = 60 \text{ mA} = 0.06 \text{ A}$ 。当  $z = 0$  时，套用上述公式计算亥姆霍兹线圈的合成磁感应强度。

将已知数据代入：

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \times 400 \times 0.06}{2 \times 0.105} \times \frac{16}{5^{3/2}}$$

计算得：

$$B = 2.05 \text{ mT}.$$

因此，在中心点  $O$  处 ( $z = 0$ )，亥姆霍兹线圈的合成磁感应强度为  $B = 2.05 \text{ mT}$ 。

### 3.2.3. 电磁感应法测磁感应强度

由交流信号驱动的线圈会产生交变磁场，在任意时刻的磁感应强度瞬时值可以表示为：

$$B = B_m \sin \omega t$$

其中， $B_m$  是磁感应强度的峰值， $\omega$  为角频率。

若采用匝数为  $N$ 、截面积为  $S$ 、法线与磁场夹角为  $\theta$  的探测线圈，其磁通量为：

$$\Phi = NSB_m \cos \theta \sin \omega t$$

根据法拉第电磁感应定律，其产生的感应电动势为磁通量对时间的负导数：

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = NS\omega B_m \cos \theta \cos \omega t = -\varepsilon_m \cos \omega t$$

其中， $\varepsilon_m = NS\omega B_m \cos \theta$  是感应电动势的峰值。

若使用数字式毫伏表测量该线圈的感应电动势，毫伏表的显示值  $U_{\max}$  为电动势有效值  $\varepsilon_{\text{rms}}$ ，即：

$$U_{\max} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}$$

由此可以反推出磁感应强度的峰值  $B_{\max}$ ：

$$B_{\max} = \frac{\varepsilon_m}{NS\omega} = \frac{\sqrt{2}U_{\max}}{NS\omega}$$

因此，通过测量线圈感应电动势  $U_{\max}$ ，结合匝数  $N$ 、截面积  $S$  和角频率  $\omega$ ，即可计算磁感应强度的峰值  $B_{\max}$ 。

## 4 实验内容

### 4.1. 霍尔效应测量磁感应强度

#### 4.1.1. 正确连接电路

1. 将测试仪面板上的“ $I_M$  输入”，“ $I_S$  输出”和“ $V_H$  输入”三对接线柱分别与测试架上的相应三对接线柱连接。
2. 将控制电源连接线的一端插入测试仪背面的控制电源输出插孔，另一端连接到测试架的控制电源输入插孔。
3. 将测试仪的传感器接口与测试架上的传感器接口连接。

#### 4.1.2. 测量霍尔电压 $V_H$ 与工作电流 $I_S$ 的关系

1. 设定  $I_M = 0$  的条件下，将霍尔效应测试仪调零，并将霍尔元件片置于电磁铁的中心位置。

2. 将励磁电流  $I_H = 200\text{ mA}$  和工作电流  $I_S = 0.5\text{ mA}$ ，调节励磁电流  $I_M$  和工作电流  $I_S$  的方向，测量相应的电压值  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ ，并记录数据。
3. 每次将工作电流  $I_S$  增加  $0.50\text{ mA}$ ，测量并记录电压值  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 。

#### 4.1.3. 测量霍尔电压 $V_H$ 和磁感应强度 $B$ 与励磁电流 $I_M$ 的关系

1. 将  $I_M$  和  $I_S$  调零后，设定工作电流  $I_S = 1.00\text{ mA}$ 。调节励磁电流  $I_M$  和工作电流  $I_S$  的方向，测量相应的电压值  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ ，并记录数据。
2. 每次将励磁电流  $I_M$  增加  $50\text{ mA}$ ，测量并记录电压值  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  和磁感应强度值  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 。

#### 4.1.4. 计算霍尔元件的霍尔灵敏度

根据公式  $V_H = K_H I_S B$ ，可以得出霍尔灵敏度的计算公式：

$$K_H = \frac{V_H}{I_S B}$$

选取实验中测得的几组数据，计算相应的  $K_H$ ，并与实验仪器上标注的霍尔灵敏度  $K_H$  进行比较，计算相对误差。

#### 4.1.5. 测量电磁铁磁场沿水平方向分布

1. 在励磁电流  $I_M = 0$  的条件下，将毫特计调零。
2. 设定励磁电流  $I_M = 200\text{ mA}$ ，调节移动尺的位置，每间隔  $2\text{ mm}$  记录一次毫特计的读数。

#### 4.1.6. 用交流霍尔电流测量磁场

1. 将霍尔效应测试仪调零，并将霍尔元件重新移动到电磁铁的中心位置。
2. 修改接线方式，使用信号发生器代替直流稳压电源。
3. 调节信号发生器的频率至  $f = 500\text{ Hz}$ ，并调节输出电压以保证交流工作电流  $I_S = 1\text{ mA}$ 。
4. 分别测量在  $I_M = 10\text{ mA}$ ， $I_M = 100\text{ mA}$ ， $I_M = 150\text{ mA}$  和  $I_M = 200\text{ mA}$  时的霍尔电压  $V_{H-AC}$ 。

### 4.2. 亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量

#### 4.2.1. 测量圆电流线圈轴线上磁感应强度分布

1. 正确连接电路，使单个线圈通以电流。
2. 将磁感应强度实验仪调零。



3. 调节电位器，将频率设为  $f = 120 \text{ Hz}$ ，并设定励磁电流的有效值为  $I = 60 \text{ mA}$ 。
4. 以圆电流线圈的中心为坐标原点，每隔  $5 \text{ mm}$  测量一次  $U_{\max}$  的值，记录实验数据。

#### 4.2.2. 测量亥姆霍兹线圈轴线上磁感应强度分布

1. 正确连接电路，使两个线圈通以大小相等的电流。
2. 在励磁电流为零的情况下，将磁感应强度实验仪调零。
3. 调节电位器，将频率设为  $f = 120 \text{ Hz}$ ，并设定励磁电流的有效值为  $I_M = 60 \text{ mA}$ 。
4. 以亥姆霍兹线圈的中心为坐标原点，每隔  $5 \text{ mm}$  测量一次磁感应强度  $U_{\max}$  的值，记录实验数据。

#### 4.2.3. 测量亥姆霍兹线圈磁场径向分布

1. 固定探测线圈与圆电流线圈轴线的夹角为  $0^\circ$ ，并将探测线圈的位置调到亥姆霍兹线圈的中心处。
2. 转动径向移动手轮，每隔  $5 \text{ mm}$  记录一次  $U_{\max}$  的值。

#### 4.2.4. 测量线圈转角与感应电压的关系

1. 将探测线圈移动到亥姆霍兹线圈的中心位置。
2. 从转角  $0^\circ$  开始，每改变  $10^\circ$  记录一次实验数据，直到转角为  $180^\circ$ 。

#### 4.2.5. 探究励磁电流频率对磁感应强度的影响

1. 将探测线圈的角度设置为  $0^\circ$ ，并保持其位置在亥姆霍兹线圈中心点。
2. 调节电流的频率，在  $20 \sim 120 \text{ Hz}$  的范围内，每次改变  $10 \text{ Hz}$ ，记录对应的  $U_{\max}$  数据。

## 5 预习实验中的问题

1. 在亥姆霍兹线圈的实验中，调整两线圈间的距离对磁感应强度分布均匀性的影响如何？
2. 实验中如何通过对实验误差的控制（如消除副效应）提高实验结果的可靠度？
3. 在如何选择霍尔片放置方向时，判断磁场方向有哪些依据？