

《基础物理实验》实验报告

实验名称 用霍尔效应测量磁感应强度 指导教师 王雪
姓 名 学号 分班分组及座号 号 (例: 1-04-5 号)
实验日期 2023 年 12 月 7 日 实验地点 708 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

第一部分：利用霍尔效应实验仪测量磁感应强度

【实验目的】

1. 霍尔效应原理及霍尔元件有关参数的含义和作用；
2. 测绘霍尔元件的 V_H-I_S , V_H-I_M 曲线, 了解霍尔电势差 V_H 与霍尔元件工作电路 I_S 、磁感应强度 B 以及励磁电流 I_M 之间的关系；
3. 学习利用霍尔效应侧廊磁感应强度 B 及磁场分布；
4. 学习用“对称交换测量法”消除负效应产生的系统误差。

【实验器材与用具】

DH4512D 霍尔效应实验仪由实验架和测试仪两个部分组成, 其中集成了电磁铁线圈、霍尔电流电源、励磁电流电源、霍尔元件、电流表、电压表、毫特计等; 数字万用表。

【实验原理】

1. 霍尔效应

霍尔效应是指运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力的作用而引起的偏转。运动的带电粒子在磁场中受到洛伦兹力的作用, 导致在垂直电流和磁场方向上产生正负电荷的聚积, 形成横向电场。这横向电场引起电子积累, 形成电势差, 而达到动态平衡时, 洛伦兹力和电场力平衡, 此时 A、B 端面间建立的电场称为霍尔电场 E_H , 对应的电势差称为霍尔电势 V_H 。

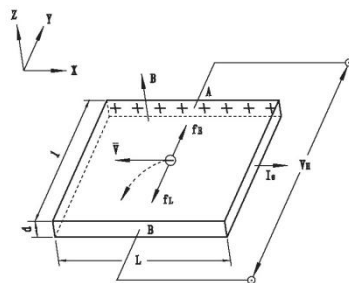


图 1 霍尔效应示意图

设电子按均一速度 \bar{v} 向图示的 x 负方向运动, 霍尔元件宽度为 l , 厚度为 d , 载流子浓度为 n , V_H 为霍尔电势。在磁场 B 的作用下, 达到动态平衡时满足公式:

$$f_L = -f_E \quad \bar{v}B = \frac{V_H}{l} \quad \#(1)$$

设载流子浓度为 n , 则霍尔元件的工作电流为

$$I_S = ne\bar{v}ld \quad \#(2)$$

由(1)(2)式可得:

$$V_H = E_H l = \frac{1}{ne} \frac{I_S B}{d} = R_H \frac{I_S B}{d} \quad \#(3)$$

可见, 霍尔电压与 I_S 、 B 的乘积成正比, 与霍尔元件的厚度成反比, 比例系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数。

霍尔系数是反应材料霍尔效应强弱的重要参数。

根据材料的电导率 $\sigma = ne\mu$ 的关系，可以得到 $R_H = \frac{\mu}{\sigma} = \mu p \mu = |R_H| \sigma$ ，其中 μ 为载流子的迁移率，即单位电场下载流子的运动速度。

当霍尔元件的材料和厚度确定时，设 $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{l}{ne d}$ ，代入(3)中可得：

$$V_H = K_H I_S B \quad (4)$$

式中， K_H 为霍尔元件的灵敏度，表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流下的霍尔电势大小，其单位为 $mV / mA \cdot T$ ，一般要求灵敏度越大越好。

霍尔元件测量磁场的基本电路（如图2），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 ，霍尔元件的霍尔电势输出端接毫伏表，测量霍尔电势 V_H 的值。

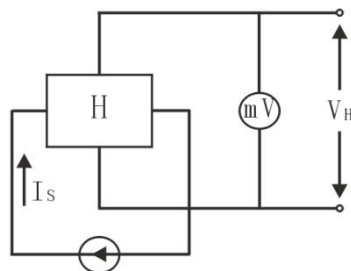


图2 霍尔元件测量磁场的基本电路

2. 实验系统误差及其消除（消除霍尔元件副效应的影响）

在测量霍尔电势时，不可避免地会产生一些副效应，由此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

- 由于制作过程中的不对称性，电极不可能绝对对称地焊接在霍尔片两侧，可能导致A、B两极不在同一等位面上。
- V_0 是两等位面间的电势差，与工作电流 I_S 的大小成正比。正负符号与工作电流方向有关。

(2) 爱廷豪森效应：

- 当X方向通以工作电流 I_S ，Z方向加磁场 B 时，载流子速度分布不均，导致在y方向上产生温差，形成爱廷豪森效应。
- 该效应产生的电势差 V_E 与 I_S 和 B 的方向相关，无法在测量中完全消除，但通常可忽略不计。

(3) 伦斯脱效应：

- 由于控制电流的两电极与霍尔元件的接触电阻不同，控制电流在两电极处产生焦耳热，引起温差电动势，形成伦斯脱效应。
- 伦斯脱效应产生的电势差 V_N 与热电流 QB 相关，符号与磁场 B 的方向有关。

(4) 里纪-杜勒克效应：

- 当霍尔元件在x方向有温度梯度时，引起载流子沿梯度方向扩散，形成里纪-杜勒克效应。
- 该效应产生的电势差 V_R 与热电流 Q_B 相关，符号与磁场 B 的方向有关。

为了减小和消除这些副效应引起的电势差，采用了对称（交换）测量法。该方法利用正负的工作电流和励磁电流组合进行多次测量，通过数学运算消除了不等位电势、伦斯脱效应和里纪-杜勒克效应产生的附加电势，从而提高了测量的准确性。然而，爱廷豪森效应的影响通常无法完全消除。

【实验步骤】

1、测量霍尔电压 V_H 与工作电流 I_S 的关系

将霍尔元件移至电磁铁中心，在 $I_M=0$ 的情况下，调零毫特计；调节 $I_M=200\text{mA}$ ，调节 $I_S=0.5\text{mA}$ ，按表（1）中 I_M 、 I_S 正负情况切换“测试架”上的电子开关方向，分别测量霍尔电压 V_H 值（ V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 ）填入表（1）。以后 I_S 每次递增 0.50mA ，测量各 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 值。绘出 I_S-V_H 曲线，验证线性关系。

2、测量霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 的关系，磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 的关系

- (1) 先将 I_M 、 I_S 调零，调节 I_S 至 1.00mA 。
- (2) 调节 $I_M=50$ 、 100 、 $150\cdots500\text{mA}$ (间隔为 50mA)，分别测量霍尔电压 V_H 值和磁感应强度 B 值，填入表（2）和表（3）中。
- (3) 根据表（2）和表（3）中所测得的数据，绘出 V_H-B 曲线，并作曲线拟合，验证线性关系。
- (4) 根据表（2）和表（3）中所测得的数据，绘出 $B-I_M$ 曲线，并作曲线拟合，验证线性关系。

3、计算霍尔元件的霍尔灵敏度

如果已知 B ，根据公式 $V_H = K_H I_S B$ 可求得 K_H 。根据 V_H-B 曲线，求出曲线斜率 K_H-B ，根据公式 $K_H = \frac{K_H-B}{I_S}$ 求得霍尔灵敏度。

4、测量电磁铁磁场沿水平方向分布

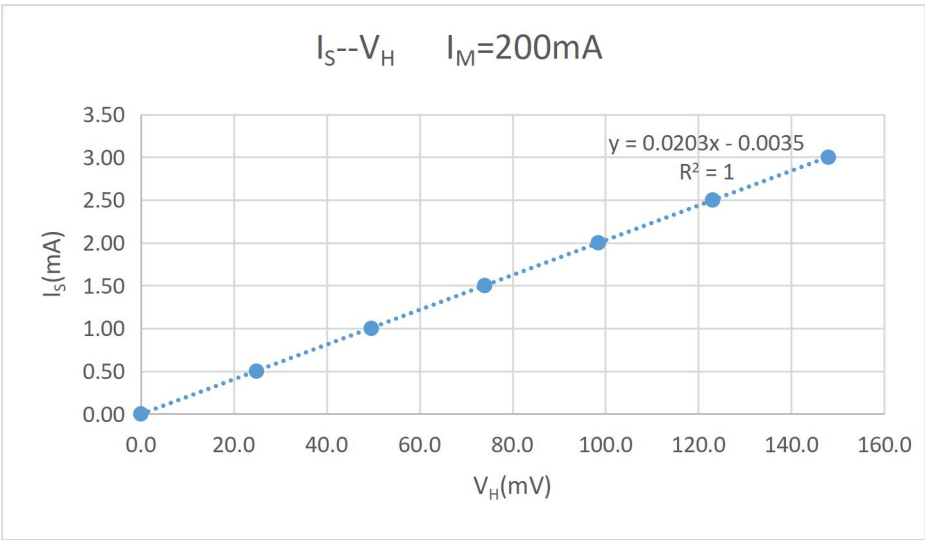
- (1) 在 $I_M=0$ 的情况下，调零毫特计。
- (2) 调节 $I_M=200\text{mA}$ ，调节移动尺的位置，每 2mm 记录毫特计读数值，填入表格(4)。

【实验数据与处理】

Table 1 霍尔电压 V_H 与工作电流 I_S 数据记录

V_H-I_S $I_M=200\text{mA}$					
$I_S(\text{mA})$	$V_1(\text{mV})$ + I_M + I_S	$V_2(\text{mV})$ + I_M - I_S	$V_3(\text{mV})$ - I_M - I_S	$V_4(\text{mV})$ - I_M + I_S	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$
0	0	0	0	0	0
0.50	25.1	-25.1	24.7	-24.7	24.9
1.00	50.0	-50.0	49.2	-49.2	49.6
1.50	74.6	-74.6	73.4	-73.4	74.0
2.00	99.3	-99.3	97.6	-97.6	98.5
2.50	124.1	-124.1	122.0	-122.0	123.1
3.00	149.2	-149.2	146.7	-146.7	148.0

绘制 V_H-I_S 图像如下：



可见，霍尔电压与工作电流成正比，具有线性性。

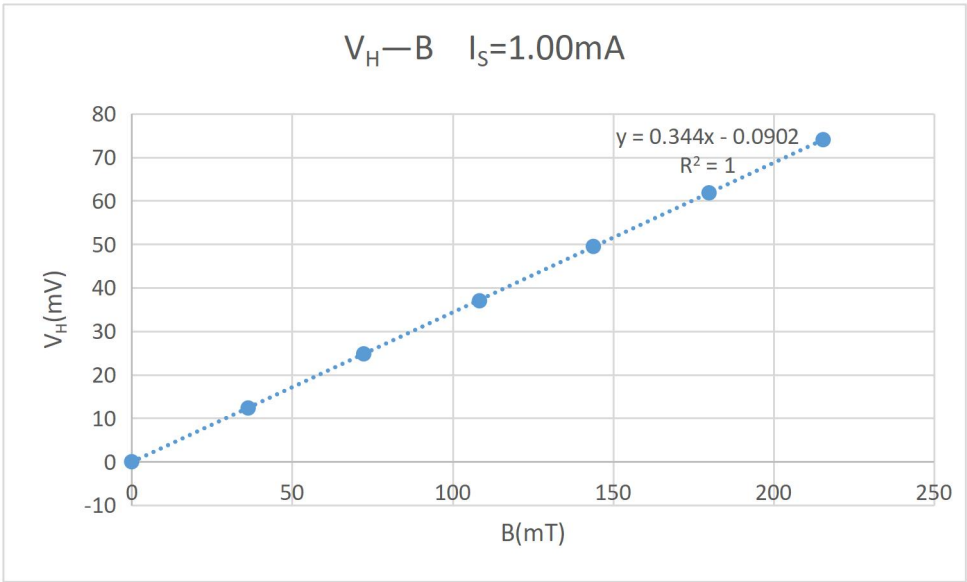
Table 2 霍尔电压 V_H 与励磁电流 I_M 数据记录 ($V_H—I_M$, $I_S=1.00mA$)

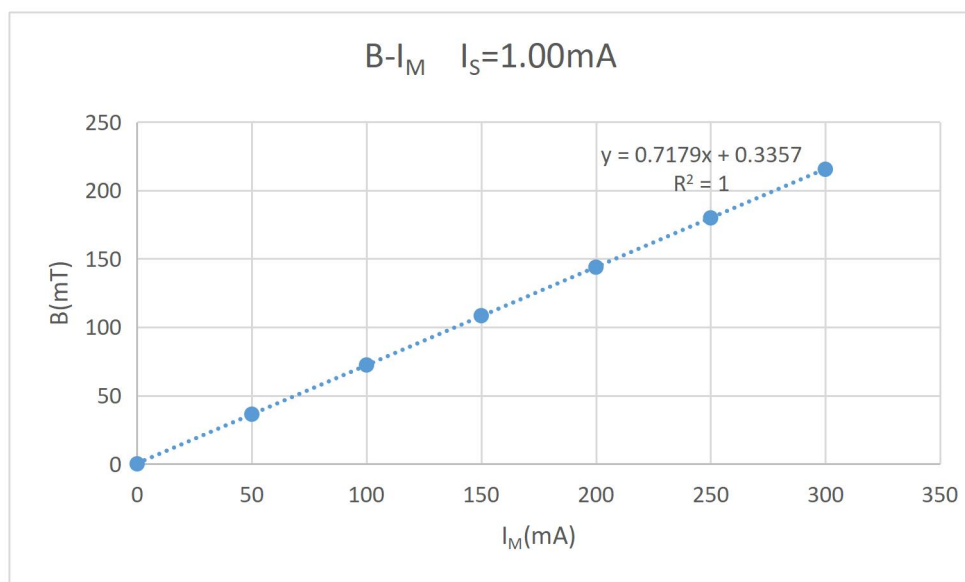
$I_M(mA)$	$V_1(mV)$	$V_2(mV)$	$V_3(mV)$	$V_4(mV)$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (mV)$
	$+I_M + I_S$	$+I_M - I_S$	$-I_M - I_S$	$-I_M + I_S$	
0	0.4	-0.4	-0.4	0.4	0.0
50	12.8	-12.8	11.9	-11.9	12.4
100	25.3	-25.3	24.3	-24.3	24.8
150	37.4	-37.4	36.6	-36.6	37.0
200	49.9	-49.9	49.1	-49.1	49.5
250	62.2	-62.3	61.4	-61.4	61.8
300	74.5	-74.5	73.6	-73.6	74.1

Table 3 磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 数据记录 ($B—I_M$, $I_S=1.00mA$)

$I_M(mA)$	$B_1(mT)$	$B_2(mT)$	$B_3(mT)$	$B_4(mT)$	$B = \frac{B_1 + B_2 - B_3 - B_4}{4} (mT)$
	$+I_M + I_S$	$+I_M - I_S$	$-I_M - I_S$	$-I_M + I_S$	
0	0	0	0	0	0
50	36.3	36.3	-36.3	-36.3	36.3
100	72.5	72.5	-72.1	-72.1	72.3
150	108.1	108.1	-108.6	-108.7	108.4
200	143.7	143.7	-144.0	-144.0	143.9
250	179.6	179.6	-180.2	-180.2	179.9
300	215.2	215.2	-215.7	-215.7	215.5

根据表 2 和表 3 中的数据，可以作出以下图像：





由图像可知，霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 以及磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 具有良好的线性关系。同时，根据 V_H-B 曲线，斜率为 0.344，同时 $I_S=1.00\text{mA}$ ，可求出霍尔灵敏度为 $344\text{mV}/(\text{A}\cdot\text{T})$ 。标定值为 $341\text{mV}/(\text{A}\cdot\text{T})$ ，误差小于 0.9%。可视为实验结果良好。

Table 4 电磁铁磁场沿水平方向分布

X/mm	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
B/mT	45.3	87.5	135.1	143.5	143.6	143.6	143.6	143.6	143.6	143.5	143.5	143.4
X/mm	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
B/mT	143.3	143.3	143.2	143.1	143	142.9	142.7	142.5	141.9	135	81.9	41.3

根据上述数据可以作出电磁铁磁场与水平方向位置的图像，如下图：

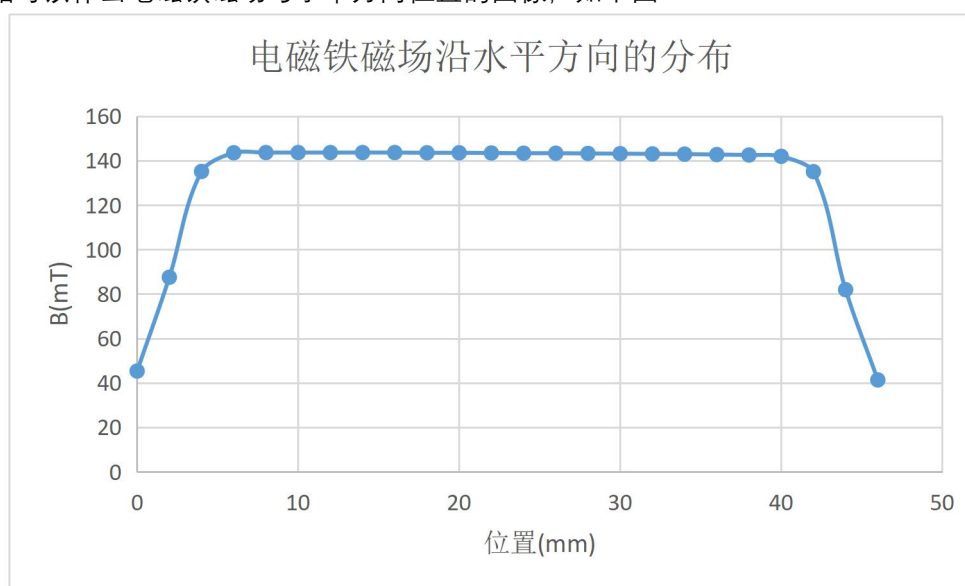


Table 5 AC 模式霍尔效应测量磁场 ($I_{S-AC}=1\text{mA}$)

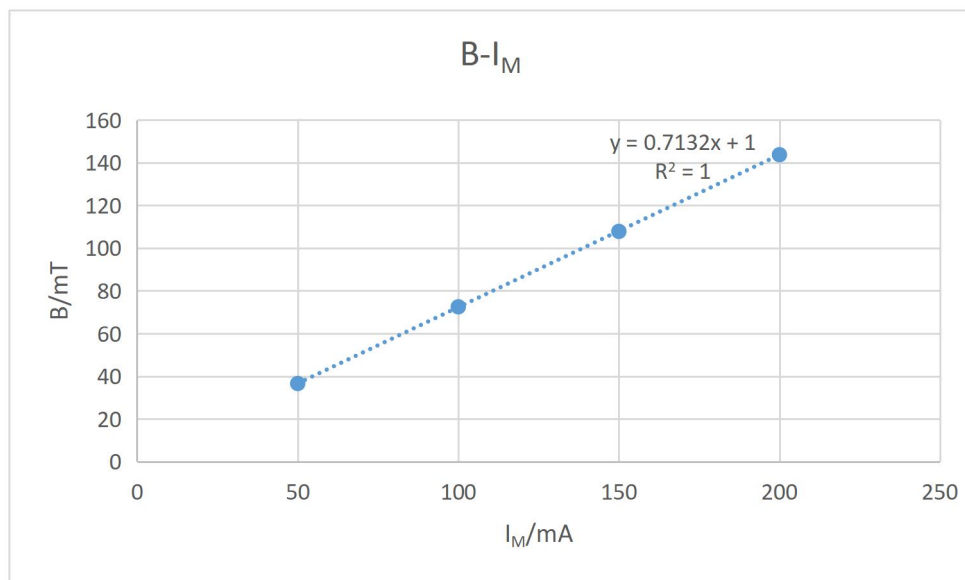
$I_M (\text{mA})$	50	100	150	200
B/mT	36.6	72.5	107.8	143.7
V_{H-AC}/mV	13.362	25.599	37.954	50.315

经计算，各条件下求得的霍尔灵敏度的值及与标准值的相对误差如下表：

$I_M(\text{mA})$	50	100	150	200
B/mT	36.6	72.5	107.8	143.7
V_{H-AC}/mV	13.362	25.599	37.954	50.315
霍尔灵敏度	365.0819672	353.0896552	352.0779221	350.1391788
误差	0.070621605	0.035453534	0.032486575	0.026801111

可见误差均小于不超过 8%，用平均值来代替霍尔灵敏度的测量值，可求得相对误差约为 4%，结果与标定值符合良好。

作出 B- I_M 图像如下：



可见二者符合上述线性关系。斜率为 0.7132，与在上一步实验中得到的 0.7179 相差约为 0.66%。可见实验结果的正确性。

【思考题】

1. 分析本实验主要误差来源，计算磁感应强度 B 的合成不确定度（分别取 $I_M = 0.2 \text{ A}$ ， $I_H = 1 \text{ mA}$ ）。

实验误差可能来源于实验器材本身的耗散，还可能来自于数字电流、电压表示数的精度等。

误差来源：

- ① 实验中采用的换向法并没有消除艾廷豪森效应带来的 UE 的误差，造成虽然不大但存在的误差；
- ② 实验仪器的精度导致不能得到准确的电流电压数值；另外由于测交流时电压表的读数不稳定，造成一定的误差；
- ③ 环境磁场的变化未考虑；
- ④ 由于霍尔元件的脆弱性，存在一定的损坏而为发现导致的误差。

合成不确定度：

已知 $I_M = 0.2 \text{ A}$ ， $I_H = 1 \text{ mA}$ ，以及计算公式 $B = \frac{V_H}{K_H I_H}$ 。根据不确定度的传递公式，有

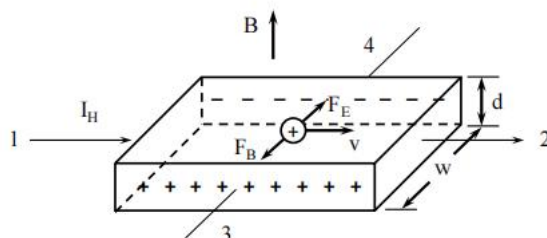
$$\frac{u(B)}{B} = \sqrt{\left(\frac{u(V_H)}{V_H}\right)^2 + \left(\frac{u(K_H)}{K_H}\right)^2 + \left(\frac{u(I_H)}{I_H}\right)^2}$$

由于最小二乘法斜率的不确定度为 $\frac{u(x)}{x} = \sqrt{\frac{\frac{1}{R^2} - 1}{N - 2}}$ ，则根据实验数据得到

$$\frac{u(K_H)}{K_H} = \sqrt{\frac{\frac{1}{R^2} - 1}{N - 2}} = 7.7 * 10^{-4}$$

由于通过 Excel 线性拟合计算，在其精度范围内得到的 $R^2 = 1$ ，这里我们采用更加精确的 R^2 值，取到小数点后十位。将结果代入公式得到 $\frac{u(B)}{B} = 0.0034$ ，又 $B = 145.4 \text{ mT}$ ，即得到 $u(B) = 0.49 \text{ mT}$ 。最终得到 $B = 145.4 \pm 0.49 \text{ mT}$ 。

2. 以简图示意，用霍尔效应法判断霍尔片上磁感应强度方向。



以上图为例，设电流方向为 \vec{i} 、霍尔电压对应电场方向为 \vec{j} 、磁场方向为 \vec{k} 。当载流子带正电荷时，磁场 B 方向： $\vec{k} = \vec{i} \times \vec{j}$ ；当载流子是负电荷时，磁场 B 方向： $\vec{k} = -\vec{i} \times \vec{j} = \vec{j} \times \vec{i}$ 。

3. 如何测量交变磁感应强度，写出主要步骤。

- 电流通入霍尔元件：
将霍尔元件与电流源连接，通入恒定强度的电流作为工作电流。
- 置于交变磁场中：
将霍尔元件放置于交变磁场中。霍尔元件受到磁场的影响，产生霍尔电压。
- 直接测量瞬时磁感应强度：
将电压表直接连接到霍尔元件的两端，测量霍尔电压。由于霍尔效应电场建立时间较快，霍尔电压与瞬时磁感应强度成正比。
- 获得均值：
如果希望得到磁感应强度的均值，可以对霍尔元件两端的信号进行整流。通过使用二极管进行整流并用电容电感滤波，可以得到信号的平均电压。
- 测定平均电压：
通过测定整流后的信号的平均电压，得到霍尔元件在一定时间内的平均霍尔电压。
- 实验测定霍尔元件灵敏度：
在事先的实验中，测定霍尔元件的灵敏度。灵敏度是霍尔电压与磁感应强度之间的比例关系，通常以 mV/T （毫伏/特斯拉）为单位。
- 计算交变磁感应强度：
利用实验获得的霍尔电压数据和霍尔元件的灵敏度，可以计算出交变磁感应强度的值。

第二部分：亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量

【实验目的】

1. 掌握载流圆线圈的磁感应强度分布；
2. 掌握亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布。

【实验仪器与用具】

亥姆霍兹线圈磁感应强度实验仪，由亥姆霍兹线圈架部分和磁感应强度测量仪组成。其中亥姆霍兹线圈架部分包括一个传感器盒，其中有用于测量磁感应强度的感应线圈。

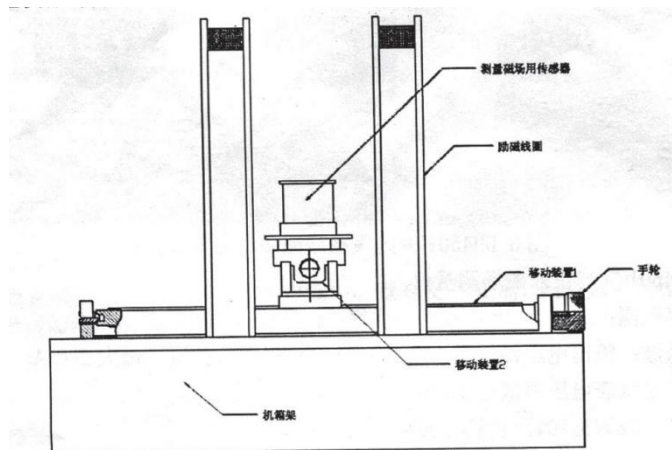


图 3 亥姆霍兹线圈架部分

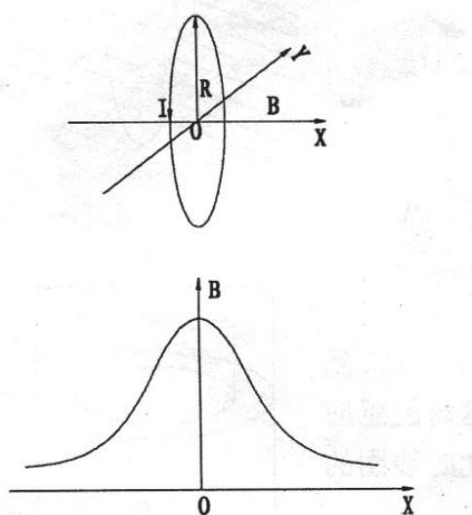
【实验原理】

1. 载流圆线圈的磁感应强度

圆线圈轴线上的磁感应强度公式为

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

式中 N_0 为圆线圈的匝数， X 为轴上某一点到圆心的距离， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。轴线上磁感应强度的分布如图所示。



本实验取 $N_0 = 400$ 匝， $R = 105\text{mm}$ 。当 $f = 120\text{Hz}$ ， $I = 60\text{mA}$ （有效值），圆心处 $X = 0$ ，可计算得到单个圆线圈中的磁感应强度为： $B = 0.144\text{mT}$ 。

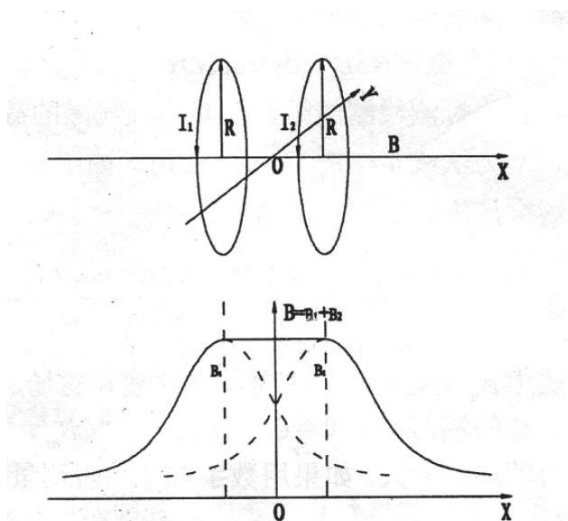
2. 亥姆霍兹线圈的磁感应强度

亥姆霍兹线圈是两个平行且共轴的相同线圈，通过理论计算，合成磁感应强度在轴上呈均匀分布。

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

其中 a 为线圈间距。

亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布图如下：



在亥姆霍兹轴线上中心 O 处, $Z=0$, 磁感应强度为 $B = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R} * \frac{16}{5^{3/2}}$ 。

3. 电磁感应法测磁感应强度

电磁感应法测磁感应强度即利用交流信号驱动的线圈产生的交变磁感应强度进行测量。

计算公式: $\varepsilon_{max} = B_{max} N S \omega = \sqrt{2} U_{max}$

其中 U_{max} 为感应电动势的幅值最大时毫伏表的示值 (有效值)。

实验中由于磁感应强度的不均匀性, 探测线圈又不可能做得很小, 否则会影响测量灵敏度。一般设计的线圈长度 L 和外径 D 有 $L=2/3 D$ 的关系, 线圈的内径 d 与外径 D 有 $d \leq 3/4 D$ 的关系 (本实验选 $D =$

0.012 m , $N = 800$ 匝的线圈)。将线圈在磁感应强度中的等效面积 $S = \frac{13}{108} \pi D^2$ 代入后, 可得到

$$B = \frac{54}{13\pi^2 N D^2 f} U_{max}$$

将不同的频率 f 代入上式就可以求出 B 。本实验中 $D=0.012\text{m}$, $N=1000$ 匝。

【实验步骤】

1. 测量圆电流线圈轴线上的磁感应强度分布

按照实验要求连接。调节频率调节电位器, 使频率表读数为 120Hz 。调节磁感应强度实验仪的电流调节电位器, 使励磁电流有效值为 $I=60\text{mA}$, 以圆电流线圈中心为坐标原点, 每隔 5mm 测一个 U_{max} 值, 测量过程中主义保持励磁电流值不变, 并保证探测线圈发现方向与圆电流线圈轴线 D 的夹角为 0° 。由于 0° 和 180° 都是最大值, 但在实验中往往不相等, 所以将两个数据都测出对比一下, 正反方向测量误差不大于 2% , 则制作一个方向数据即可。否则取平均值。圆电流线圈轴线上磁感应强度分布测量数据记录于表格。

2. 测量亥姆霍兹线圈轴线上的磁感应强度分布

按照实验要求连接。在励磁电流为零的情况下将磁感应强度清零。把磁感应强度实验仪的两个线圈串联起来, 接到磁感应强度测试仪的励磁电流两段。调节频率电位器, 使频率表读数为 120Hz 。调节磁感应强度测量仪的电流调节电位器, 使励磁电流有效值为 60mA 以亥姆霍兹线圈中心为坐标原点, 每隔 5mm 测一磁感应强度 U_{max} 的值, 测量过程中注意保持励磁电流值不变。亥姆霍兹圈轴线上磁感应强度分布测量数据记录于表格。

3. 测量亥姆霍兹线圈沿径向的磁感应强度分布

固定探测线圈法线方向和圆电流轴线 D 的夹角为 0，转动探测线圈径向移动手轮，每一步 5mm 测量一个数据，按正负方向测到边缘，记录数据并作出磁感应强度分布曲线图。
亥姆霍兹线圈磁感应强度径向分布测量数据记录于表格 6。

4. 验证公式 $\varepsilon_m = NS\omega B_m \cos \theta$

$NS\omega B_m$ 不变时， ε_m 与 $\cos \theta$ 成正比。按照实验要求，把探测线圈沿轴线固定在某一位置上，让探测线圈法线方向与圆电流轴线 D 的夹角从 0 开始，逐步转移到 90，180，270，再回到 0。每改变 10 测一组数据。
探测线圈转角与感应电压数据记录于表格。

【实验数据与处理】

本实验取 $N_0 = 400$ 匝， $R = 105\text{mm}$ 。

Table 7 圆电流线圈轴线上磁场分布测量数据记录

轴向距离 X (mm)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
U_{\max} (mV)	5.49	5.66	5.79	5.88	5.94	5.96	5.94	5.89	5.79	5.66	5.49
测量值 B (mT)	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
计算值 B (mT)	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
f = 120Hz, I = 60mA, $N_0 = 400$, R = 105mm											

其中，测量值为 $B = \frac{2.926}{f} U_{\max}$ ，计算值为 $B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}}$ 。

经计算，测量值与计算值之间的相对误差约为 1%，且均为测量值大于计算值。

根据表格中数据可以绘制出圆电流线圈轴线上的磁场分布曲线。

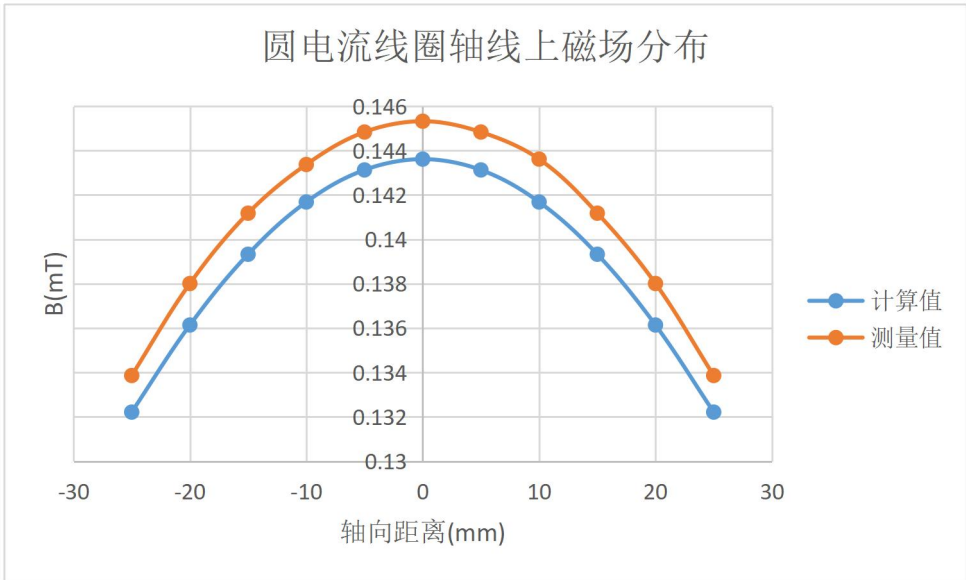


Table 8 亥姆霍兹线圈轴线上磁感应强度分布

轴向距离 X (mm)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
U_{\max} (mV)	8.70	8.72	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
测量值 B (mT)	0.212	0.213	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214
f = 120Hz, I = 60mA											

根据上表作出如下图像，由于实验中测量距离过短，这里只可以看见一小段上升的过程与保持稳定的过程。

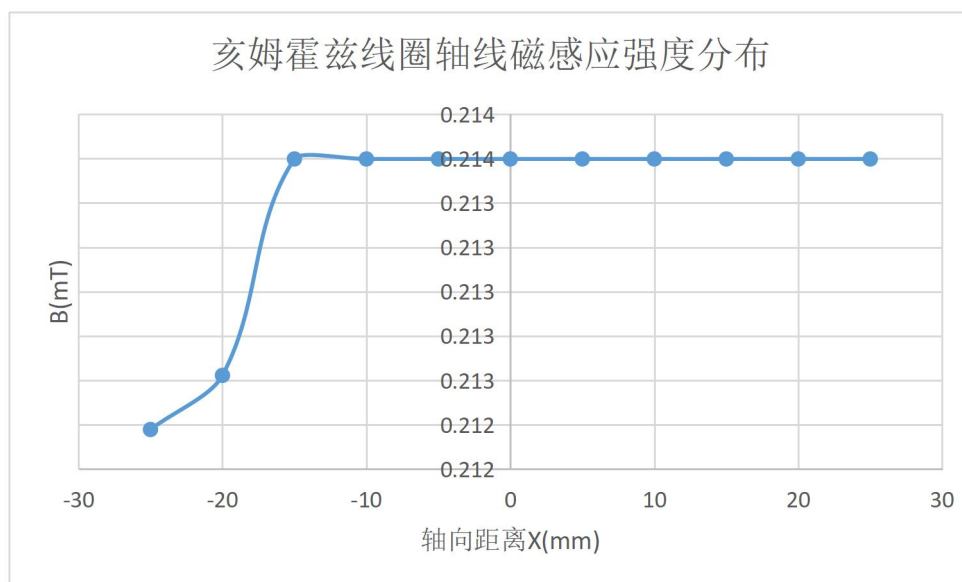
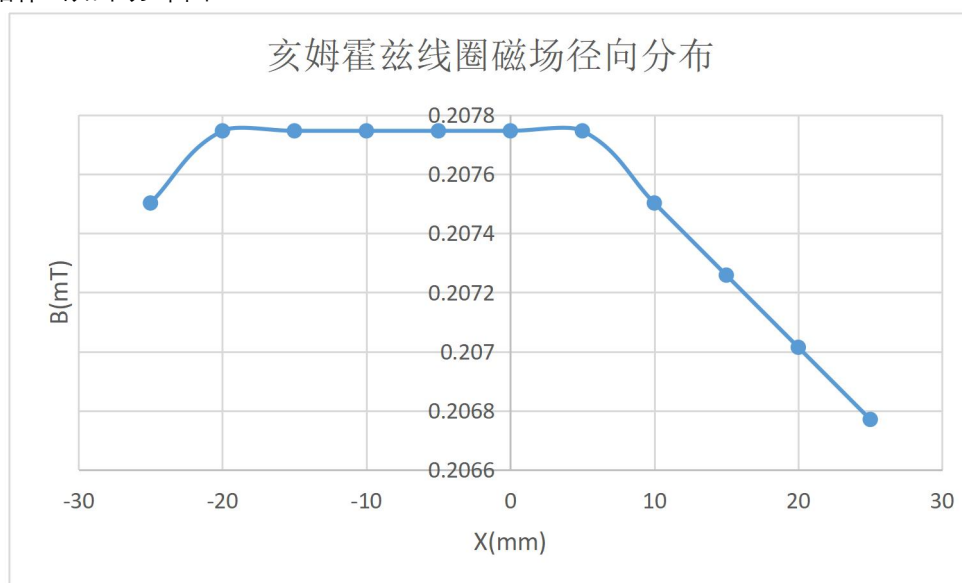


Table 9 亥姆霍兹线圈磁场径向分布

径向距离 X (mm)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
U_{\max} (mV)	8.51	8.52	8.52	8.52	8.52	8.52	8.52	8.51	8.50	8.49	8.48
测量值 B (mT)	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.207	0.207	0.207

根据表中数据作出如下分布图：



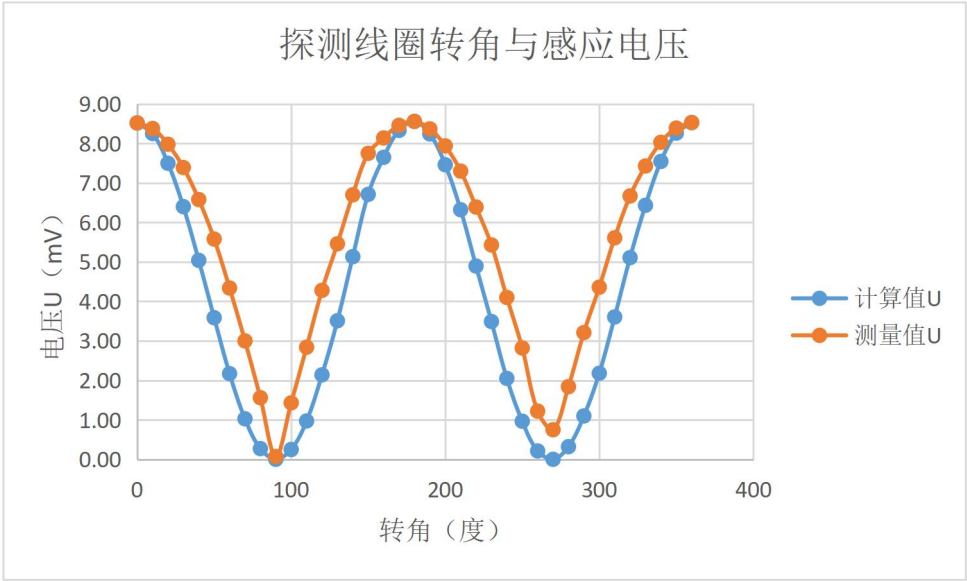
可见，磁场强度随径向距离有先升后降的趋势，但由于测量数据组数偏少，无法看出较完整的曲线样式。

Table 10 探测线圈转角与感应电压数据记录

探测线圈转角 θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U (mV)	8.52	8.38	7.98	7.39	6.58	5.58	4.34	3	1.56	0.07
计算值 U (mV)	8.52	8.25	7.50	6.40	5.04	3.59	2.17	1.03	0.27	0.00
探测线圈转角 θ	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
U (mV)	1.43	2.84	4.28	5.46	6.7	7.75	8.14	8.46	8.56	8.37

计算值 U (mV)	-0.25	-0.97	-2.14	-3.51	-5.13	-6.71	-7.65	-8.33	-8.56	-8.24
探测线圈转角 θ	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
U (mV)	7.94	7.3	6.39	5.43	4.1	2.82	1.22	0.75	1.84	3.21
计算值 U (mV)	-7.46	-6.32	-4.90	-3.49	-2.05	-0.96	-0.21	0.00	0.32	1.10
探测线圈转角 θ	300	310	320	330	340	350	360			
U (mV)	4.36	5.61	6.67	7.43	8.03	8.39	8.53			
计算值 U (mV)	2.18	3.61	5.11	6.43	7.55	8.26	8.53			

根据表中数据，可绘制出其图像。为了更好地比较测量值与计算值之间的差异，我们将计算值取绝对值后再进行作图。

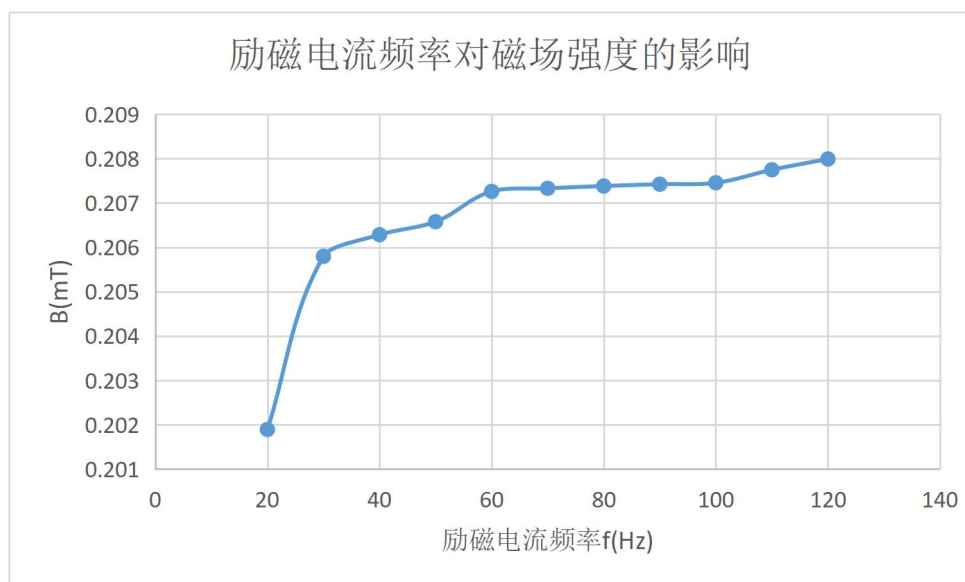


可以看出，实际测量值与计算值得到的曲线几乎重合，略有偏差。尤其在 90°与 270°附近。由于探测线圈转角在此角度附近较为敏感，因此可能存在较大的测量偏差。在其余部分测量结果较为准确。

Table 11 励磁电流频率对磁场强度的影响

励磁电流频率 f(Hz)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
U_{max} (mV)	1.37	2.11	2.82	3.53	4.25	4.96	5.67	6.38	7.09	7.81	8.53
测量值 B (mT)	0.200	0.206	0.206	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.208	0.208
I=60 mA											

根据表格数据绘制出如下图像：



可以看到，忽略低频数据，在较为高频的数据中，在有效值一定的情况下，励磁电流频率的变化并不影响磁场强度的变化。

理论上，磁感应强度在有效电流恒定时与电流频率无关。实验数据也表明磁感应强度在 0.01mT 的精度下变化没有变化。由于测量时数据并不稳定一直在波动，读取数据时很可能导致一些误差。同时，有效电流的调节可能也存在一定程度的差异，即使在屏幕上均显示为 60mA。

在低频时，很明显磁场强度低于高频时的磁场强度。可能的原因为由于磁场缓慢变化，探测线圈中压强较小，电阻不变，类似于高压输电优于低压输电，仪器中的耗散会相对较高，从而使测量结果偏小。

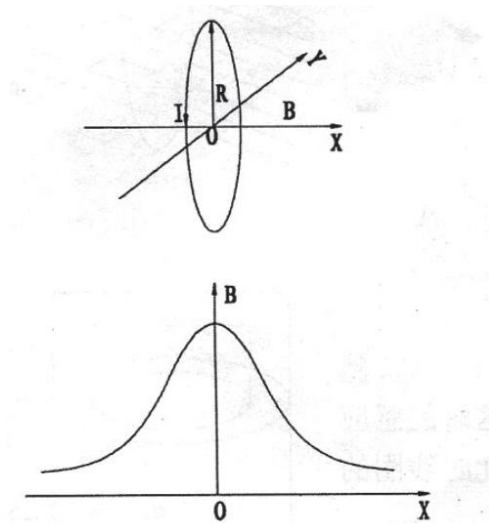
【思考题】

1. 单线圈轴线上磁感应强度的分布规律如何？亥姆霍兹线圈是怎样组成的？其基本条件有哪些？它的磁感应强度分布特点怎样？

圆线圈轴线上的磁感应强度公式为

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

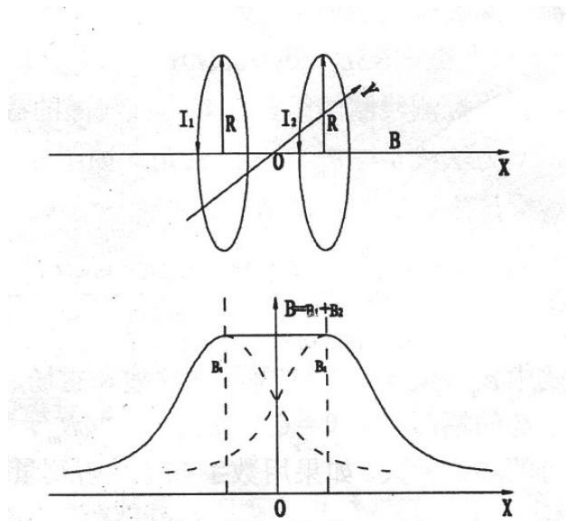
式中 N_0 为圆线圈的匝数， X 为轴上某一点到圆心的距离， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。轴线上磁感应强度的分布如图所示。



亥姆霍兹线圈由两个相同半径为 R 、匝数为 N 的线圈组成，彼此平行、共轴，且电流方向相同。

亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布计算公式：
$$B = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[R^2 + \left(\frac{R}{2} + z \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[R^2 + \left(\frac{R}{2} - z \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}$$

其中 a 为线圈间距。



亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布具有以下特点：

- 1) 均匀性：亥姆霍兹线圈的设计旨在产生均匀的磁场。当两个完全相同的线圈以相反方向的电流通过时，它们的磁场叠加，形成一个近似均匀的磁场区域。这对于实验和测量非常有用，因为我们可以在这个区域内进行精确的磁场测量。
- 2) 中心区域稳定：在亥姆霍兹线圈的中心区域，磁场强度非常稳定。这是因为两个线圈的磁场在这一区域内几乎完全抵消，从而产生一个近似恒定的磁场。
- 3) 边缘区域变化：随着离开中心区域，磁场的均匀性逐渐减弱。边缘区域的磁场强度可能会有一些变化，但仍然比其他非均匀磁场要好得多。

2. 探测线圈放入磁感应强度后，不同方向上毫伏表指示值不同，哪个方向最大？如何测准 U_{max} 值？指示值最小表示什么？

- 1) 探测线圈的转角为 0° 或 180° 时，即线圈与磁场同向或者反向时，毫伏表上的示数最大。
- 2) 为测准 θ 处的 U_{max} ，可以使用探测线圈分别测量 θ 和 $\theta + 180^\circ$ 处的数据，对得到的数据的绝对值取平均得到 U_{max} 。
- 3) 当探测线圈的转角为 90° 或 270° 时，指示值示数最小，表示此时探测线圈的方向和磁场方向垂直。

3. 分析圆电流磁感应强度分布的理论值与实验值的误差的产生原因。

在实验中发现实验值与理论值不完全重合，且实验值均高于理论值的现象可能由多种原因引起。以下是可能的一些主要原因：

- 1) 实验仪器误差和精度不足；
- 2) 实验仪器标注与实际参数差异；
- 3) 实验仪器输出参数与实际存在差距；
- 4) 外界环境磁场的影响；
- 5) 温度和湿度变化；
- 6) 电源的稳定性。