

# 浙江大学

## 物理实验报告

用霍尔法测直流圆线圈与亥姆霍

实验名称: \_\_\_\_\_

实验桌号: \_\_\_\_\_ 4

指导教师: \_\_\_\_\_ 费莹

班级: \_\_\_\_\_ 计科 2404

姓名: \_\_\_\_\_ 李宇晗

学号: \_\_\_\_\_ 3240106155

实验日期: 2025 年 9 月 29 日 星期 二 上午

# 一、物理实验预习报告

## 1. 实验综述

### 1.1 【实验目的】

1. 了解用霍尔效应测量磁场的原理，掌握 FBDH 型霍尔法永磁/电磁场磁强计的使用方法。
2. 了解载流圆线圈的磁场分布情况。
3. 测量载流圆线圈和亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布。
4. 当两个单线圈的间距改变为  $d = \frac{1}{2}R$  和  $d = 2R$  时，测定其轴线上的磁场分布。

### 1.2 【实验原理】

#### 一、霍尔效应

当电流通过一个置于磁场中的导体时，磁场会使导体中的载流子发生偏转，从而在导体的两个侧面产生电荷积累，形成一个垂直于电流和磁场方向的电场，这个电场就是霍尔电场，其两端的电压即为霍尔电压  $U_H$ 。

其原理平衡关系式为洛伦兹力等于电场力：

$$q((v) \times (B)) = q(E_H)$$

电流的微观表达式为  $I = nqv d$ ，其中  $n$  为载流子浓度， $d$  为导体厚度。

联立可得霍尔电压  $U_H$  与磁感应强度  $B$  的关系：

$$U_H = R_H \frac{IB}{d}$$

其中， $R_H = \frac{1}{nq}$  称为霍尔系数。令  $K_H = \frac{R_H}{d}$  为霍尔元件的灵敏度，则公式简化为：

$$U_H = K_H IB$$

因此，只要测得霍尔电压  $U_H$ ，即可计算出磁感应强度  $B$ ：

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

(在实验中， $K_H$  和霍尔元件的工作电流  $I_H$  均为已知值)。

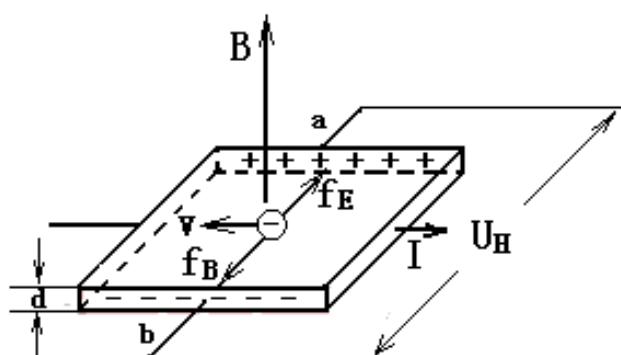


Figure 1: 霍尔效应原理图

## 二、载流线圈与亥姆霍兹磁场

### 1. 载流圆线圈磁场

对于一个半径为  $R$ 、匝数为  $N$ 、通有电流  $I$  的圆形线圈，其轴线上距离圆心  $x$  处的磁感应强度大小为：

$$B = \frac{\mu_0 N I R^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

其中,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空磁导率。

## 2. 亥姆霍兹线圈磁场

亥姆霍兹线圈由两个完全相同的共轴圆形线圈构成, 两线圈平行放置, 间距  $d$  等于线圈半径  $R$ , 且通以同向等大的电流。这样的组合在其中心轴线附近能够产生一个较广范围的匀强磁场。

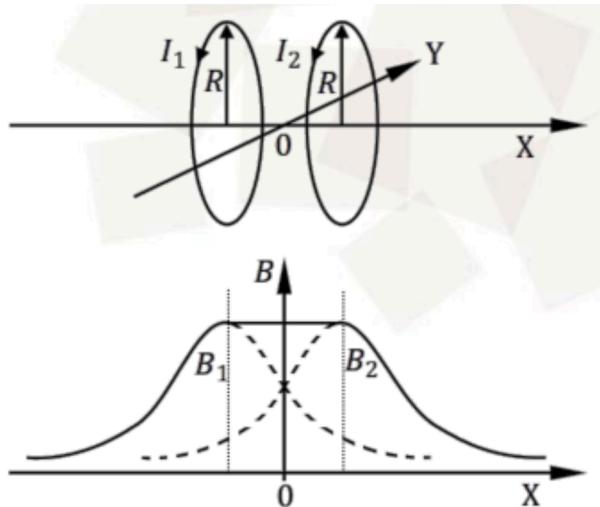


Figure 2: 载流线圈与亥姆霍兹磁场示意图

### 1.3 【实验方法】

#### 1. 测量载流圆线圈轴线上的磁场分布

1. **连接线路:** 按图连接仪器, 将霍尔探头固定在测试架的移动平台上。开启电源, 将励磁电流调节至  $I = 0.400$  A。在测量前, 需对微特斯拉计进行调零, 以消除地磁场及其他环境磁场的干扰。
2. **准备测量:** 将单个线圈固定在标尺的中心 (例如 5 cm 处) 作为坐标原点。
3. **开始测量:** 保持励磁电流  $I = 0.400$  A 不变, 以线圈中心为零点, 沿轴线方向每隔 1.0 cm 测量一个点的磁感应强度  $B$  值, 并记录数据。

#### 2. 测量亥姆霍兹线圈轴线上磁场分布

1. **准备测量:** 将两个线圈平行共轴放置, 调节其间距使  $d = R$  (本实验中  $R = 10$  cm)。两线圈中心连线的中点即为坐标原点。
2. **开始测量:** 将两个线圈串联后接入电源, 调节励磁电流至  $I = 0.400$  A。以两线圈连线的中点为原点, 沿轴线方向每隔 1.0 cm 测量一个点的磁感应强度  $B$  值, 并记录数据。

#### 3. 测量载流圆线圈径向磁场

1. **准备测量:** 将霍尔探头移动至线圈中心, 并旋转 90°, 使其敏感面与线圈轴线平行, 用于测量径向磁场。
2. **开始测量:** 从线圈中心开始, 沿径向向外移动探头, 每隔 1.0 cm 测量一个数据点, 测量范围为 6 cm 内。

#### 4. 改变亥姆霍兹线圈间距进行测量 (未实验)

- 调节两线圈间距使  $d = \frac{1}{2}R(5\text{ cm})$ , 重复 步骤 2 中的测量过程, 记录数据。
- 调节两线圈间距使  $d = 2R(20\text{ cm})$ , 重复 步骤 2 中的测量过程, 记录数据。

## 二、实验重点 (3 分)

- 理解霍尔效应的物理原理及其在磁场测量中的应用。
- 掌握霍尔法测量磁场的实验方法, 包括仪器的正确连接、调零和读数。
- 熟悉单个载流圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场分布规律, 并能通过实验数据绘制出  $B-x$  关系图。
- 学习比较实验数据与理论模型, 并分析其间差异。

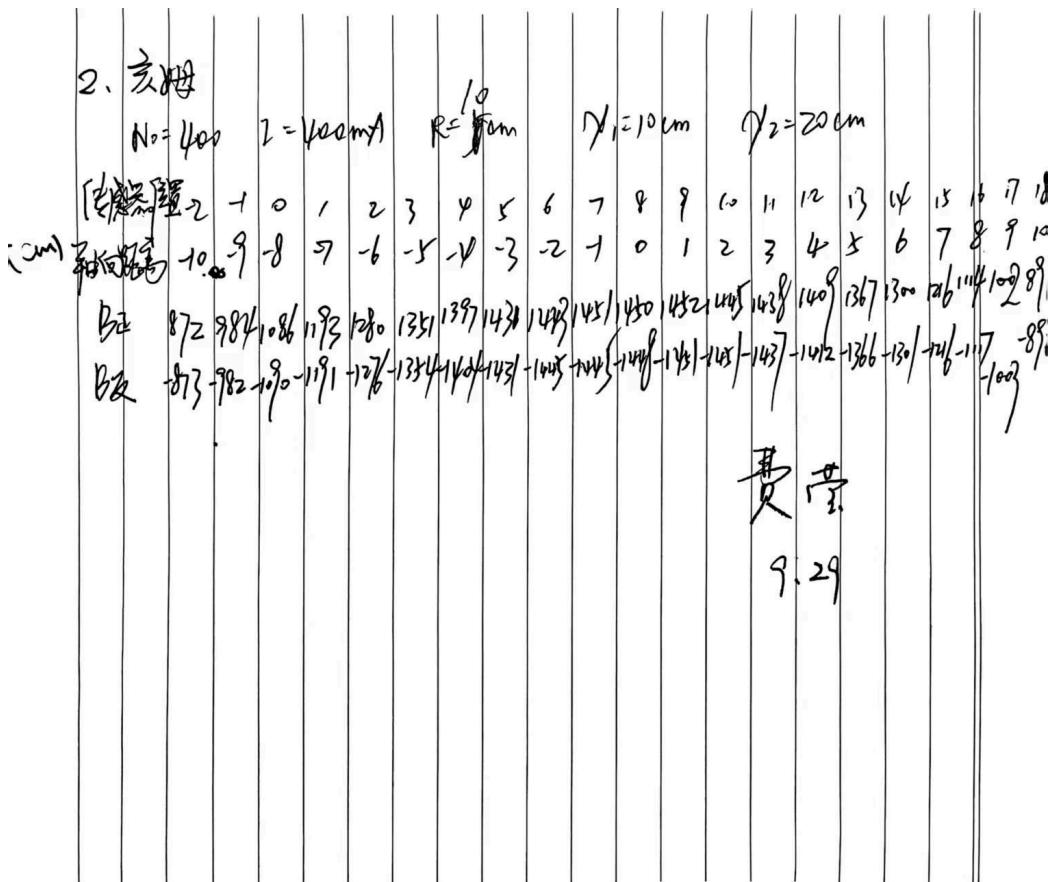
## 三、实验难点 (2 分)

- 精确地对微特斯拉计进行调零, 以完全消除地磁场和其他环境杂散磁场的干扰。
- 在测量过程中, 保证霍尔探头的感应面始终与线圈轴线垂直 (测量轴向磁场时) 或平行 (测量径向磁场时), 以确保测量的是目标磁场分量。
- 准确读取探头位置和磁强计的读数, 尤其是在磁场变化较快的区域。

## 四、原始数据 (20 分)

(将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方, 完整保留姓名, 学号, 教师签字和日期。)

1.	单个轴向	$N_o = 400$	$I = 400\text{mA}$	$R = 10\text{cm}$	$X_o = 15\text{cm}$																
	轴向强度	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 18	
	轴向强度	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8 9 10	
	B <sub>z</sub> (T)	3.50	4.06	4.70	5.45	6.31	7.08	8.04	8.85	9.57	10.04	10.22	10.05	9.65	8.95	8.13	7.18	6.31	5.50	4.75	4.07 3.35
	B <sub>z</sub>	-3.14	-3.98	-4.62	-5.38	-6.22	-7.05	-7.8	-8.9	-9.52	-9.93	-10.14	-10.07	-9.60	-8.94	-8.14	-7.5	-6.8	-5.8	-4.7	-3.8
2.	单个径向	$N_o = 400$	$I = 400\text{mA}$	$R = 10\text{cm}$																	
	径向强度	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5									
	B <sub>z</sub> (T)	12.56	11.45	10.75	10.33	10.07	9.96	10.03	10.26	10.64	11.28	12.97									
	B <sub>z</sub>	-12.47	-11.41	-10.72	-10.38	-10.03	-9.95	-10.01	-10.21	-10.64	-11.34	-12.95									



## 五、结果与分析 (60 分)

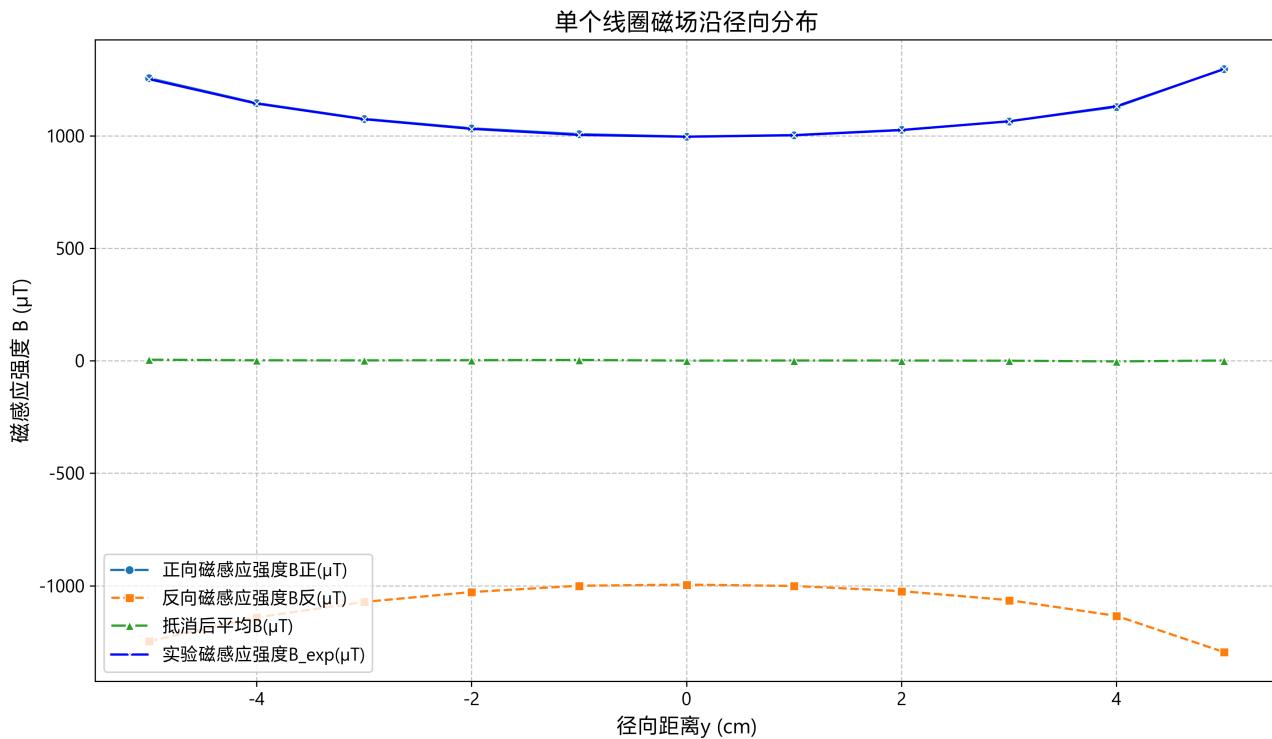
### 1. 数据处理与结果 (30 分)

1.1 测绘单个直流圆线圈的径向磁场强度分布

$N_0 = 400$ ,  $I = 400mA$ ,  $R = 10cm$ , 线圈位置  $x_0 = 15cm$

传感器位置 (cm)	轴向距离 $x$ (cm)	$B_x$ ( $\mu T$ )	$B_z$ ( $\mu T$ )	平均 $B$ ( $\mu T$ )	理论 $B_{\text{理论}}$ ( $\mu T$ )	相对误差 (%)
-2.0	-10.0	350	-341	345.5	355.4	2.79
-1.0	-9.0	406	-398	402.0	412.8	2.63
0.0	-8.0	470	-462	466.0	478.7	2.65
1.0	-7.0	545	-538	541.5	552.7	2.03
2.0	-6.0	631	-622	626.5	633.9	1.16
3.0	-5.0	708	-705	706.5	719.3	1.79
4.0	-4.0	804	-798	801.0	804.7	0.45
5.0	-3.0	885	-891	888.0	883.4	0.52

6.0	-2.0	957	-952	954.5	947.9	0.70
7.0	-1.0	1004	-993	998.5	990.4	0.82
8.0	0.0	1022	-1014	1018.0	1005.3	1.26
9.0	1.0	1005	-1007	1006.0	990.4	1.57
10.0	2.0	965	-960	962.5	947.9	1.54
11.0	3.0	895	-894	894.5	883.4	1.26
12.0	4.0	813	-814	813.5	804.7	1.10
13.0	5.0	718	-725	721.5	719.3	0.30
14.0	6.0	631	-638	634.5	633.9	0.10
15.0	7.0	550	-548	549.0	552.7	0.68
16.0	8.0	475	-477	476.0	478.7	0.56
17.0	9.0	407	-415	411.0	412.8	0.45
18.0	10.0	352	-357	354.5	355.4	0.26



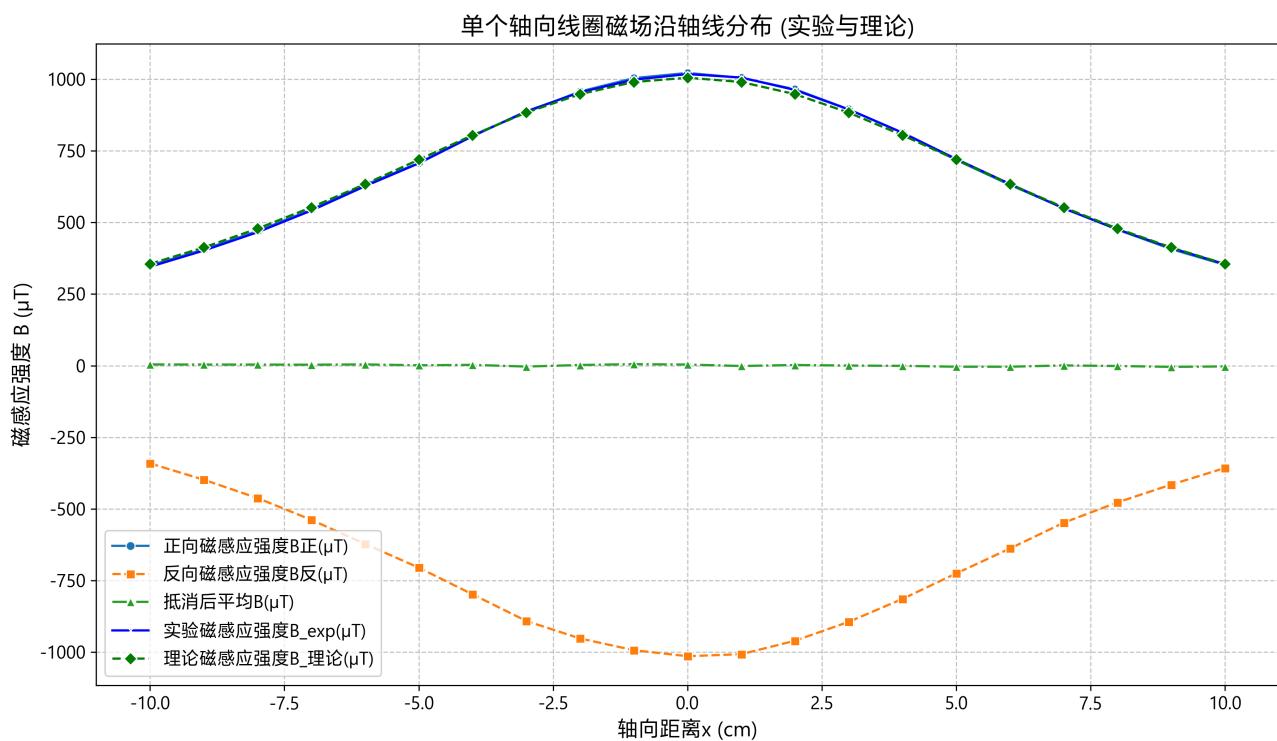
可见单个直流圆线圈的径向磁场分布左右对称，且由中间到两边递减。

## 1.2 测绘单个直流圆线圈的轴向磁场强度分布

$$N_0 = 400, I = 400mA, R = 10cm$$

径向距离 y (cm)	$B_{\text{正}}$ ( $\mu\text{T}$ )	$B_{\text{反}}$ ( $\mu\text{T}$ )	平均 $B$ ( $\mu\text{T}$ )
-------------	----------------------------------	----------------------------------	--------------------------

-5.0	1256	-1247	1251.5
-4.0	1145	-1141	1143.0
-3.0	1075	-1072	1073.5
-2.0	1033	-1028	1030.5
-1.0	1007	-1000	1003.5
0.0	996	-995	995.5
1.0	1003	-1001	1002.0
2.0	1026	-1024	1025.0
3.0	1064	-1064	1064.0
4.0	1128	-1134	1131.0
5.0	1297	-1295	1296.0

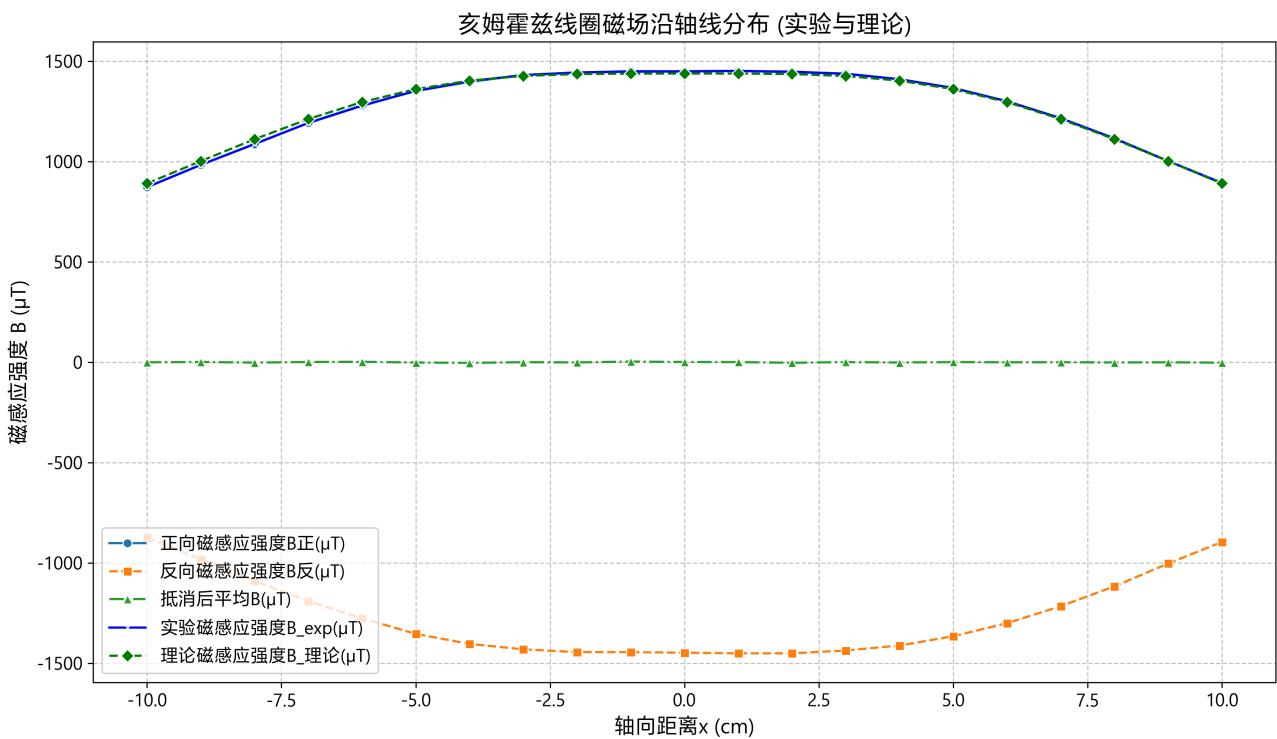


### 1.3 测绘亥姆霍兹线圈的轴向磁场强度分布 ( $d = R$ )

$N_0 = 400$ ,  $I = 400mA$ ,  $R = 10cm$ , 线圈位置  $x_1 = 10cm$ ,  $x_2 = 20cm$

传感器位置 (cm)	轴向距离 $x$ (cm)	$B_{\text{正}}$ (μT)	$B_{\text{反}}$ (μT)	平均 $B$ (μT)
-2.0	-10.0	872	-873	872.5
-1.0	-9.0	984	-982	983.0

0. 0	-8. 0	1086	-1090	1088. 0
1. 0	-7. 0	1193	-1191	1192. 0
2. 0	-6. 0	1280	-1276	1278. 0
3. 0	-5. 0	1351	-1354	1352. 5
4. 0	-4. 0	1397	-1404	1400. 5
5. 0	-3. 0	1431	-1431	1431. 0
6. 0	-2. 0	1443	-1445	1444. 0
7. 0	-1. 0	1451	-1445	1448. 0
8. 0	0. 0	1450	-1448	1449. 0
9. 0	1. 0	1452	-1451	1451. 5
10. 0	2. 0	1445	-1451	1448. 0
11. 0	3. 0	1438	-1437	1437. 5
12. 0	4. 0	1409	-1412	1410. 5
13. 0	5. 0	1367	-1366	1366. 5
14. 0	6. 0	1300	-1301	1300. 5
15. 0	7. 0	1216	-1216	1216. 0
16. 0	8. 0	1114	-1117	1115. 5
17. 0	9. 0	1002	-1003	1002. 5
18. 0	10. 0	891	-896	893. 5



可见，亥姆霍兹线圈间轴线上的磁场分布比较均匀。

## 2. 误差分析 (20 分)

实验误差主要来源于以下几个方面：

### 1. 系统误差

- **仪器精度：**实验仪器的精度并非 100%，例如微特斯拉计的最小量程限制了读数的精确度，这会引入不可避免的测量误差。
- **仪器校准：**调零时可能无法精确调到 0.000，通常在 0 附近的一个小范围内波动，这会给所有测量数据带来一个系统性的偏移。
- **环境干扰：**实验室中其他用电设备产生的电磁场，以及未被完全抵消的地磁场，都会对测量结果造成干扰。

### 2. 偶然误差

- **读数误差：**读取刻度尺上的位置和微特斯拉计的数值时，存在估读误差和视差。
- **定位误差：**霍尔探头的位置和方向可能没有精确地对准线圈轴线和规定的刻度，导致测量点偏离预定位置。
- **电源波动：**实验过程中的电源电流可能存在微小波动，导致产生的磁场强度不稳定。
- **操作干扰：**实验者身体（如手）靠近霍尔元件时，可能会对测量产生微小影响。

## 3. 实验探讨 (10 分)

本次实验成功地利用霍尔效应测量了单个圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场分布。实验操作在原理上虽然简单，但要获得精确的结果需要严谨细致的操作。

从实验数据（如图表所示）可以看出，单个圆线圈的磁场在中心处最强，向两侧迅速衰减，这与理论预期相符。亥姆霍兹线圈在其中心区域的磁场强度变化非常平缓，验证了其产生匀强磁场的特性。

实验过程中也发现，仪器的稳定性对结果影响较大。例如，励磁电流的微小漂移会导致磁场读数不稳定。这提示我们在未来的实验中，应在读数前确保所有设备都处于稳定工作状态。此外，对环境磁场的屏蔽和精确的仪器调零是保证测量准确性的关键步骤。通过本次实验，我们不仅掌握了一种重要的磁场测量方法，也更深刻地理解了电磁场理论。

## 六、思考题

### 1. 为什么在测量直流磁场时，必须考虑地球磁场对被测磁场的影响。

在测量直流磁场时必须考虑并消除地磁场的影响，这主要源于测量的精确性要求和霍尔元件的工作原理：

1. **信号与噪声的叠加：**实验的目的是测量由励磁电流在线圈中产生的磁场（信号），但霍尔效应传感器无法分辨磁场的来源，它会同时响应空间中存在的所有磁场。地球本身就是一个巨大的磁体，其产生的地磁场（噪声）持续存在于实验环境中。因此，如果不加处理，特斯拉计的读数将是线圈磁场与地磁场的矢量和，而非纯粹的线圈磁场值。
2. **地磁场并非微不足道：**地磁场的强度虽然不大（约 25–65 微特斯拉），但与本实验中测量的磁场值相比，尤其是在远离线圈中心、磁场较弱的位置，地磁场是一个不可忽略的干扰源。若不消除，它将导致显著的系统误差，使测量数据偏离真实值。
3. **保证测量基准的准确性：**为了确保测量的准确性，必须建立一个可靠的零点基准。实验步骤中，在开启励磁电流之前进行的“调零”或“补偿”操作，正是为了抵消地磁场及其他环境杂散磁场的影响。该操作通过仪器内部电路产生一个与环境磁场大小相等、方向相反的补偿场，确保在没有目标磁场时，仪器读数为零。这样，后续的测量值才能真实地反映由励磁电流产生的磁场强度。如果测量过程中测试架的方向发生改变，必须重新调零，因为探头相对于地磁场的方向改变了，原有的补偿会失效。

### 2. 亥姆霍兹线圈是怎样组成的？其基本条件有哪些？它的磁场分布特点又怎样？

亥姆霍兹线圈是一种用于产生匀强磁场的标准装置，其构成、条件和特点如下：

1. **组成：**亥姆霍兹线圈由两个完全相同的圆形线圈构成，这两个线圈的半径 ( $R$ )、匝数 ( $N_0$ ) 等参数完全一致。它们被平行、共轴地放置，并通以大小相同、方向一致的直流电流。
2. **基本条件：**其最核心的结构条件是，两个线圈之间的距离  $d$  必须精确地等于线圈的半径  $R$ （即  $d = R$ ）。只有满足这个条件，才能实现最佳的磁场均勻性。
3. **磁场分布特点：**其最主要的特点是在两线圈中心轴线附近的较大区域内能够产生一个高度均匀的磁场。从磁场分布曲线上看，单个线圈的磁场在中心最强，向外侧非线性地减弱。当两个线圈满足  $d = R$  的条件时，在两线圈的中心区域，一个线圈磁场强度的下降趋势恰好被另一个线圈的磁场贡献所补偿。这种巧妙的叠加使得总磁场在中心点的一阶和二阶导数均为零，从而在分布图上形成一个宽阔的“平台”。这个平台区域的磁场梯度极小，磁感线接近于平行直线，因此可以视为匀强磁场。这种特性使其在科学实验中应用十分广泛，例如用于抵消地磁场、校准磁传感器或为电子束等提供均匀偏转磁场。

### 3. 霍尔元件放入磁场时，不同方向上特斯拉计指示值不同，哪个方向最大？

当霍尔元件的平面与磁场方向垂直时，特斯拉计的指示值最大。这背后的物理原理如下：

1. **洛伦兹力是核心:** 霍尔效应的根源在于霍尔元件内部的载流子（电荷  $q$ ）在磁场  $(B)$  中以漂移速度  $(v)$  运动时所受到的洛伦兹力。该力的大小和方向由矢量叉乘公式  $(F)_B = q((v) \times (B))$  决定。
2. **最大化洛伦兹力:** 根据矢量叉乘的数学性质，洛伦兹力的大小  $F_B = qvB \sin \theta$ ，其中  $\theta$  是速度矢量  $(v)$  和磁场矢量  $(B)$  之间的夹角。当  $\theta = 90^\circ$  时， $\sin \theta = 1$ ，洛伦兹力达到最大值  $F_B = qvB$ 。在实验中，载流子的速度  $(v)$  的方向总是在霍尔元件的平面内（平行于电流方向）。因此，要使  $(v)$  和  $(B)$  垂直，就必须让磁场  $(B)$  的方向垂直于霍尔元件的平面。
3. **最大化霍尔电压:** 垂直于元件平面的磁场产生了最大的洛伦兹力，这个力会将载流子最大程度地推向元件的两侧并积累起来。这就在元件两侧形成了最强的横向电场和最大的电势差，即霍尔电压  $U_H$ 。
4. **最大化仪器读数:** 特斯拉计的读数与霍尔电压  $U_H$  成正比  $(B = \frac{U_H}{K_H \cdot I_H})$ 。因此，在产生最大霍尔电压的方向上，特斯拉计的指示值也必然是最大的。任何其他方向都会导致作用于载流子的有效磁场分量变小，从而使测量值偏小。