浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称：霍尔法测直流圆线圈与亥姆霍兹线圈磁场

实验桌号：17

指导教师：

班级：

姓名：

学号：

实验日期：2025年 11 月 11 日　　星期 二 下午

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

实验现象： 本实验预计将观察到霍尔效应，即通有电流的霍尔片在垂直磁场中会产生一个与磁场强度成正比的霍尔电压 V_H。同时，将测得单个圆线圈轴线上的磁场 B 随位置 x 变化，在线圈中心处最强；而对于亥姆霍兹线圈，其中心点 $x = 0$ 附近将存在一个磁场 B 基本不变的均匀区域。

实验原理： 本实验的核心原理是**霍尔效应**。霍尔效应是指当一个通有电流 I_S 的导体（或半导体）被置于一个垂直于电流方向的磁场 B 中时，导体（如图 1 所示的 P、S 两侧）会产生一个横向的电势差，即**霍尔电压** V_H。

这是因为磁场 B（Z 轴方向）对电流 I_S（X 轴方向）中的载流子（如电子）施加了洛伦兹力 $f_B = evB$，使其向导体一侧偏转。电荷的积累会产生一个横向电场 E_H（Y 轴方向），该电场会对载流子施加一个相反的电场力 $f_E = eE_H$。当达到稳态时，两个力相平衡 $f_B = f_E$，此时霍尔电压 V_H 与控制电流 I_S 和磁感应强度 B 成正比关系：

$$V_H = K_H \cdot I_S \cdot B \tag{1}$$

其中 K_H 是霍尔系数。这个线性关系使得霍尔传感器可以用来精确测量磁场。

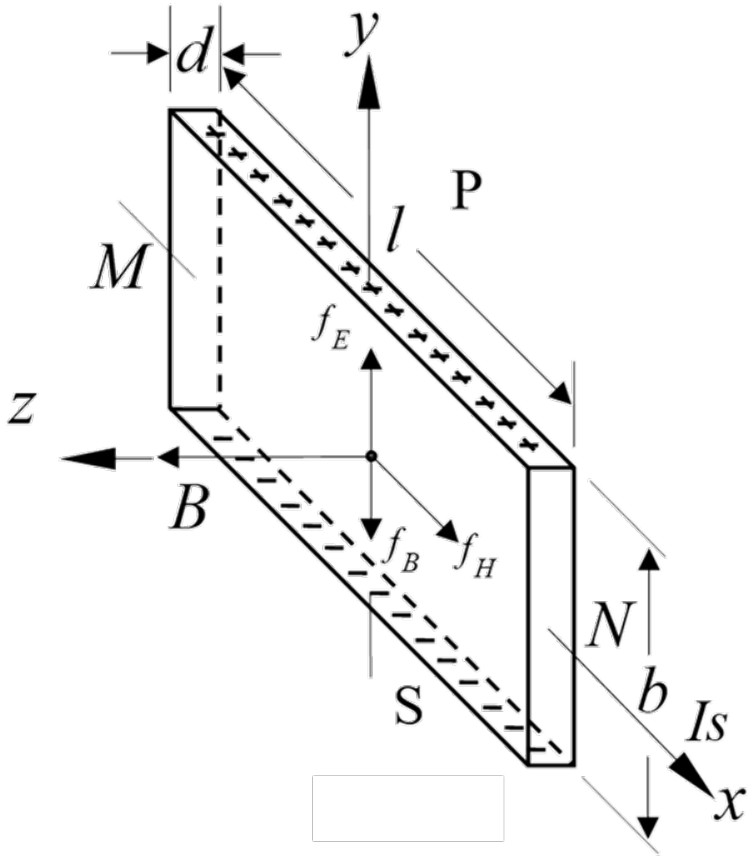


图 1: 霍尔效应原理示意图。

本实验还将研究**亥姆霍兹线圈**的磁场分布。亥姆霍兹线圈由两个完全相同、共轴放置的圆形线圈组成，其特殊之处在于线圈间距 d 等于线圈半径 $\bar{R}$。如图 2 所示，这种配置能在线圈中心轴线附近产生一个非常均匀的磁场区域。

线圈轴线上的磁感应强度 B 分布由以下公式给出：

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

其中 x 为轴线上某点到两线圈中心点的距离，N 为单线圈匝数，I 为电流。在中心点 $x = 0$ 处，磁感应强度为：

$$B_0 = \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{\mu_0 N I}{\bar{R}} \tag{3}$$

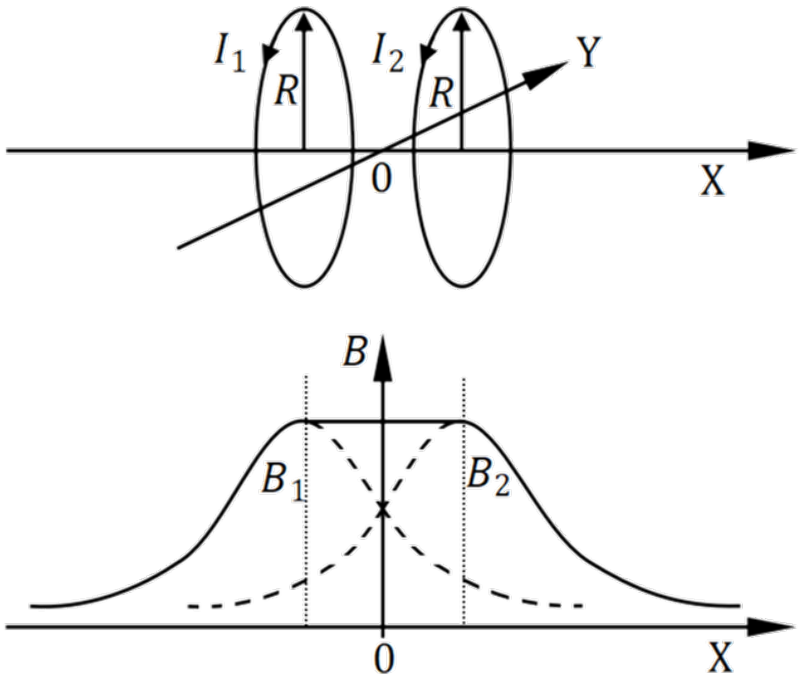


图 2: 亥姆霍兹线圈及其轴线磁场分布示意图。

实验方法： 本实验使用“FB511 型霍尔法亥姆霍兹线圈磁场实验仪”。

(1) **预备实验（地磁场测量）：**设置励磁电流 $I_M = 0$。利用手机 APP（如“指南针”）找到地磁场方向，转动平台使霍尔片与地磁场方向平行（例如指向东 90°），此时将特斯拉计调零。然后转动平台 90°（例如指向南 180°），使霍尔片与地磁场方向垂直，此时特斯拉计的示值即为地磁场强度 B。在后续实验中需注意消除其影响。

(2) **测量单个圆线圈磁场分布：**只给一个线圈通电，将霍尔传感器固定在滑块上，沿线圈轴线 x 移动，每隔一定距离（如 1.00cm）测量一点的磁感应强度 B。

(3) **测量亥姆霍兹线圈磁场分布：**两个线圈串联（保证电流同向），重复步骤 2，测量亥姆霍兹线圈轴线上的磁场 B 随 x 的分布。

(4) **数据处理：**绘制 $B - x$ 曲线，分析曲线特性，并与理论公式（如 2 和 3）进行比较。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）
本实验的重点在于：

- 理解霍尔效应的基本原理（如公式 1）和霍尔传感器的工作特性。
- 掌握亥姆霍兹线圈产生均匀磁场的原理，通过实验测定其轴线上的磁场分布，并与理论（如公式 2）进行对比。
- 学习并掌握使用霍尔传感器测量磁场的基本方法，包括如何正确调零以消除地磁场等系统误差。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

- **地磁场的精确补偿：**霍尔传感器灵敏度很高，地磁场 B 是一个不可忽略的系统误差来源。在“预备实验”中，必须非常精确地找到地磁场方向并进行调零，操作不当会直接影响所有后续数据的准确性。
- **探头对准：**在沿轴线 x 移动霍尔探头的过程中，必须严格保证：1) 探头始终位于线圈的几何中心轴线上；2) 探头的敏感面（Z 轴）始终垂直于磁场方向（X 轴）。任何位置或角度的偏离都会引入测量误差。

二、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。）

原始数据如图3所示。

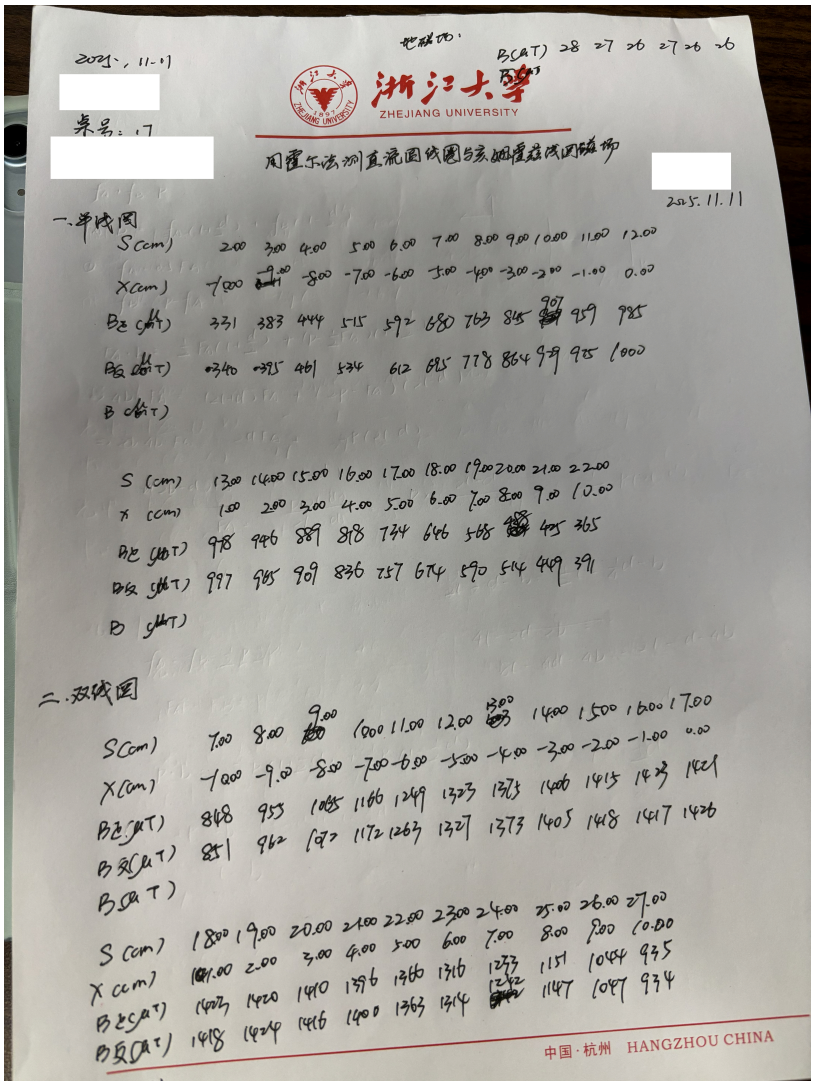


图 3: 原始数据记录

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

根据实验原始数据，我们采用“正反”电流测量法消除地磁场和霍尔元件零点漂移带来的系统误差。最终磁场大小 B 通过 $B = (B_+ + B_-)/2$ 计算得出。表格中的 B 均记录为其大小（绝对值）。处理结果如下表所示：

表 1: 预备实验：地磁场 B 测量数据

测量次数	地磁场 B (μT)
1	28
2	27
3	26
4	27
5	26
6	26

地磁场 B 的平均值计算如下：

$$\bar{B} = \frac{28+27+26+27+26+26}{6} = \frac{160}{6} \approx 26.7\,(\mu\mathrm{T})$$

不确定度分析：

(1) **A 类不确定度 u_A (标准差)：**

$$s = \sqrt{\frac{\sum(B_i - \bar{B})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(28-26.67)^2 + (27-26.67)^2 \times 2 + (26-26.67)^2 \times 3}{6-1}} \approx 0.82\,\mu\mathrm{T}$$

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.82}{\sqrt{6}} \approx 0.33\,\mu\mathrm{T}$$

(2) **B 类不确定度 u_B (仪器误差)：**根据误差分析部分，特斯拉计的精度（仪器误差）为 $\Delta = \pm 2\mu\mathrm{T}$。假设为均匀分布，则 $u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.15\,\mu\mathrm{T}$。（如果按正态分布，取 $k=3$，则 $u_B = \frac{2}{3} \approx 0.67\,\mu\mathrm{T}$。此处我们采用更保守的均匀分布估计。）

(3) **合成不确定度 u_C：**

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0.33)^2 + (1.15)^2} = \sqrt{0.109 + 1.323} \approx 1.20\,\mu\mathrm{T}$$

测量结果： 地磁场 $B = (\bar{B} \pm u_C)\,\mu\mathrm{T} = (26.7 \pm 1.2)\,\mu\mathrm{T}$。在后续实验中，均使用正反电流法消除了此地磁场背景值的影响。

表 2: 一、单线圈轴线磁场分布数据及处理结果

绝对位置 S (cm)	相对位置 X (cm)	B (μT)	B (μT)	B (μT)	B (μT)	相对误差 (%)
2.00	-10.00	331	340	335.5	355.43	5.61
3.00	-9.00	383	395	389.0	413.47	5.92
4.00	-8.00	444	461	452.5	478.63	5.46
5.00	-7.00	515	534	524.5	551.26	4.85
6.00	-6.00	592	612	602.0	631.24	4.63
7.00	-5.00	680	695	687.5	719.33	4.43
8.00	-4.00	763	778	770.5	806.58	4.47
9.00	-3.00	845	864	854.5	883.24	3.25
10.00	-2.00	907	929	916.0	947.92	3.37
11.00	-1.00	959	975	967.0	990.40	2.36
12.00	0.00	985	1000	992.5	1005.31	1.27
13.00	1.00	978	997	987.5	990.40	0.29
14.00	2.00	946	965	955.5	947.92	0.80
15.00	3.00	889	909	899.0	883.24	1.78
16.00	4.00	878	836	857.0	806.58	6.25
17.00	5.00	734	757	745.5	719.33	3.64
18.00	6.00	646	674	660.0	631.24	4.56
19.00	7.00	568	590	579.0	551.26	5.03
20.00	8.00	488	514	501.0	478.63	4.67
21.00	9.00	425	449	437.0	413.47	5.69
22.00	10.00	365	391	378.0	355.43	6.35

计算单线圈相对误差的平均值：

$$\bar{E}_{rr} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|E_{rr,i}| = \frac{5.61\% + 5.92\% + \cdots + 6.35\%}{21} = \frac{84.68\%}{21} \approx 4.03\%$$

这个 4.03% 的平均相对误差表明，实验测量值与理论值整体符合较好，但也存在一定的系统误差或操作误差。

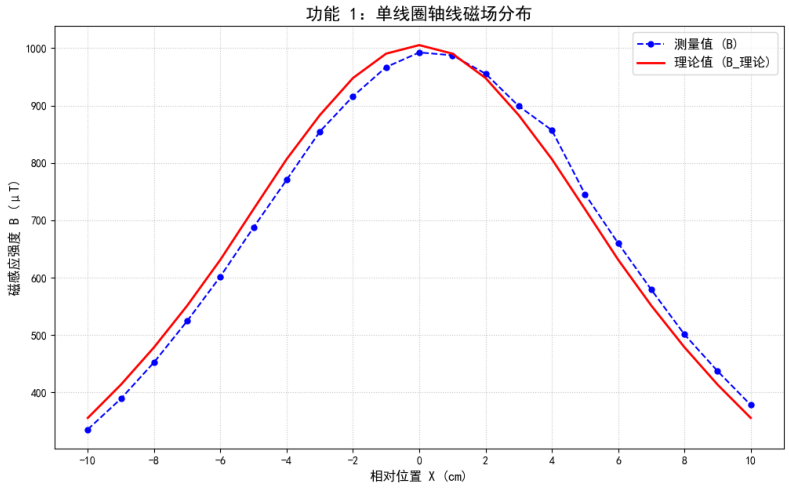


图 4: 单线圈轴线磁场分布 B-x 曲线 (测量值 vs 理论值)

如图 4 所示，单线圈的磁场分布曲线（测量值：蓝色虚线；理论值：红色实线）形态符合预期。

- **形态：**曲线呈“钟形”，在 $X = 0$ cm 处（线圈中心）达到峰值，向两侧（$|X|$ 增大）磁感应强度迅速下降，这与单个载流圆环轴线磁场分布的理论相符。
- **拟合度：**测量值（蓝线）的整体趋势与理论值（红线）基本一致。但在 $X = 0$ cm 附近，测量值（992.5 μT）略低于理论峰值（1005.3 μT）。在 $|X| > 1$ cm 的区域，测量值（如 $X = 4$ cm 处的 857.0 μT）又普遍略高于理论值（806.6 μT），这可能是由霍尔探头位置偏离中心轴线、读数误差或线圈半径 R 的测量不准共同导致的。

表 3: 二、双线圈（亥姆霍兹线圈）轴线磁场分布数据及处理结果

绝对位置 S (cm)	相对位置 X (cm)	B (μT)	B (μT)	$B = (B + B)/2$ (μT)
7.00	-10.00	848	851	849.5
8.00	-9.00	955	962	958.5
9.00	-8.00	1065	1072	1068.5
10.00	-7.00	1166	1172	1169.0
11.00	-6.00	1249	1263	1256.0
12.00	-5.00	1323	1327	1325.0
13.00	-4.00	1375	1373	1374.0
14.00	-3.00	1406	1405	1405.5
15.00	-2.00	1415	1418	1416.5
16.00	-1.00	1423	1417	1420.0
17.00	0.00	1421	1426	1423.5
18.00	1.00	1423	1418	1420.5
19.00	2.00	1420	1424	1422.0
20.00	3.00	1410	1416	1413.0
21.00	4.00	1396	1400	1398.0
22.00	5.00	1366	1363	1364.5
23.00	6.00	1316	1314	1315.0
24.00	7.00	1233	1242	1237.5
25.00	8.00	1151	1147	1149.0
26.00	9.00	1044	1047	1045.5
27.00	10.00	935	934	934.5

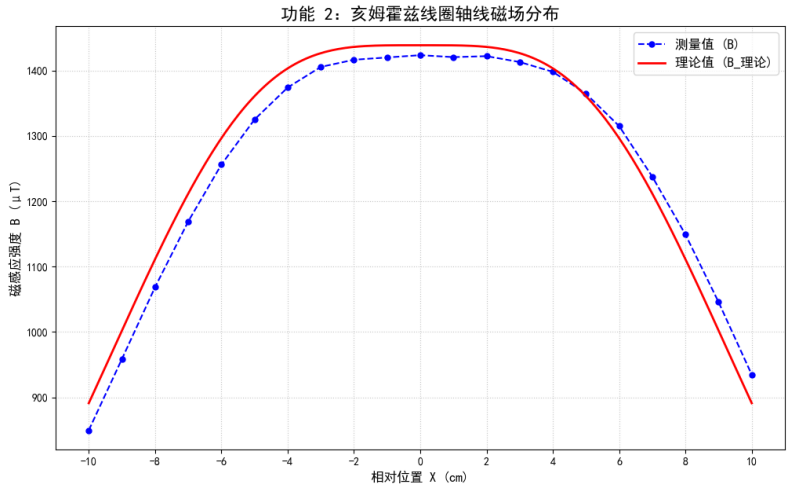


图 5: 亥姆霍兹线圈轴线磁场分布 B-x 曲线 (测量值 vs 理论值)

如图 5 所示，亥姆霍兹线圈（双线圈）的磁场分布曲线（测量值：蓝色虚线；理论值：红色实线）展现了

其关键特性。

- **形态与均匀区：**曲线在 $X = 0$ cm 附近（中心区域）呈现出一个“平顶”区域，磁感应强度 B 在 $X = -4$ cm 到 $X = +4$ cm 的大范围内变化很小（约 1405 μT 到 1423.5 μT），这成功地验证了亥姆霍兹线圈（$d = R$）在中心轴线附近能产生一个高度均匀的磁场区域。
- **拟合度：**测量值（蓝线）与理论值（红线）的形态和数值大小都高度吻合。测量曲线准确地复现了中心区的“平台”和两侧（$|X| > 5$ cm）磁场快速下降的趋势。与单线圈相比，亥姆霍兹线圈的测量数据与理论模型符合得更好。

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

误差来源分析： 本次实验中，单线圈测量的平均相对误差为 4.03%，说明实验结果与理论值基本吻合，但也存在不可忽略的误差。亥姆霍兹线圈的测量曲线（图 5）吻合度更高。误差主要来源于以下几个方面：

(1) **仪器系统误差：**

- **特斯拉计：**仪器本身存在固有的测量误差（例如 $\pm 2\mu$T 的精度）和霍尔元件 1% 的线性误差。在测量中观察到特斯拉计的示数存在约 $\pm 2\mu$T 的跳动，读数不稳定，这会引入随机误差。
- **电流源：**励磁电流 I 的波动（例如 ± 2 mA 的显示精度或实际波动）会直接导致产生的磁场 B 不稳定，影响测量结果。
- **霍尔元件灵敏度：**用于计算理论值的霍尔元件灵敏度 K_H 可能存在标定误差，导致理论曲线与实际测量曲线存在系统性的偏离。

(2) **操作与安装误差：**

- **探头定位误差：**这是最主要的误差来源之一。
  a. **轴线偏离：**实验要求探头沿线圈几何中心轴线移动，但实际操作中很难保证探头始终在轴线上。任何径向的偏离都会导致测得的 B 值小于理论轴线上的值。
  b. **角度偏离：**霍尔元件的敏感面（Z 轴）可能未与磁场方向（X 轴）完全垂直，导致测得的 B 值为 $B\ \cos\theta$，使其系统性偏小。
  c. **位置读数误差：**在滑块上读取 X 位置时存在视差，尤其是在线圈后方时难以精确观察，这会引入 X 值的误差，导致 $B - x$ 曲线上数据点的“左右平移”。
- **线圈安装误差：**线圈平面可能未与滑轨（X 轴）完全垂直，导致两侧的磁场分布并非完全对称。
- **参数测量误差：**理论计算中使用的线圈半径 $R = 0.100$ m 可能存在测量误差，R 的不准确会直接影响整个理论曲线的形态和峰值。

(3) **环境误差：**

- **环境磁场干扰：**虽然采用了正反电流法来消除静态的地磁场，但实验室中其他仪器（如邻近实验台）产生的变化的磁场仍可能对测量造成干扰，导致读数跳动或产生系统偏差。

结果讨论： 结合图 4 分析，单线圈测量值在峰顶 $X = 0$ 处（992.5 μT）低于理论值（1005.3 μT），这很可能是由探头未对准轴心或未垂直放置导致的。而在曲线两侧 $|X| > 1$ cm 处，测量值又高于理论值，这可能与 R 值的标定、电流 I 的实际值或 X 轴的定位误差有关，多种误差叠加导致了 4.03% 的平均误差。亥姆霍兹线圈（图 5）的测量值在整个均匀区（-4 cm 至 $+4$ cm）系统性地略低于理论曲线，这也支持了探头未完全对准或灵敏度标定存在系统误差的猜想。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验通过霍尔效应法成功测量了载流圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场分布。实验结果表明，圆线圈轴线上磁场呈对称单峰分布（如图 4），亥姆霍兹线圈在中心区域（本实验中约 $|X| \leq 4$ cm，如图 5）形成均匀磁场，均验证了理论预期。误差分析显示，单线圈测量值与理论值吻合较好（平均相对误差约 4.03%），主要误差来源于仪器精度、探头定位和环境干扰。实验加深了对霍尔效应及线圈磁场分布规律的理解，同时强调了精确调节和校准的重要性。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

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。

因为霍尔传感器（特斯拉计）测量的是其所在空间点的**总磁感应强度**。地球本身是一个磁体，其产生的地磁场（B ）是一个相对稳定的直流磁场。在本实验的预备实验中，我们测得其大小约为 $\bar{B} \approx 26.7\,\mu$T。这个值与我们线圈产生的磁场（尤其是在远离中心轴的位置）在同一个数量级（μT），远大于特斯拉计的仪器精度（$\pm 2\mu$T）。因此，地磁场是一个不可忽略的、恒定的**系统误差**来源。如果不加考虑，我们测得的值 $B = B + B$ ，这将导致测量结果系统性地偏离真实值 B 。（实验中采用的“正反电流法”$B = (B - B)/2$ 是消除这种恒定背景磁场影响的有效方法。）

2. 载流圆线圈轴线上磁场的分布规律如何?

根据本实验的数据（表 2）和曲线（图 4），载流圆线圈轴线上的磁场分布规律如下：

(1) **峰值位置：**磁感应强度 B 在线圈的圆心处（即轴线上 $X = 0$ 的位置）达到最大值。

(2) **对称性：**磁场分布关于圆心（$X = 0$）基本呈轴对称。

(3) **变化趋势：**磁感应强度 B 随着与圆心距离 $|X|$ 的增大而迅速减小，呈现出“钟形”曲线的形态。

3. 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? 改变两圆线圈间距后, 线圈轴线上的磁场分布情况如何?

- **组成：**亥姆霍兹线圈由两个**完全相同**（半径 R 相同、匝数 N 相同）、**共轴**（在同一根中心轴线上）、且**平行**放置的圆形线圈组成。
- **基本条件：** (1) 两个线圈串联，通以大小相同、方向**相同**的电流 I；(2) 两个线圈之间的距离 d 等于线圈的半径 R（即 $d = R$）。

- **分布特点**：其最显著的特点是能够在两线圈中心连线的中点（$X = 0$）附近区域，产生一个**非常均匀**的磁场。从本实验的图 5 中可以看出，在 $X = -4$ cm 到 $X = +4$ cm 的大范围内，磁场 B 的值几乎保持不变，形成了一个“平顶”区域。
- **改变间距**：如果改变间距 d 使其不等于 R：
  - 若 $d < R$（线圈太近），两线圈磁场叠加，中心 $X = 0$ 处的磁场会增强，形成一个比单线圈更尖锐的峰值，失去均匀区。
  - 若 $d > R$（线圈太远），两线圈磁场在中心的叠加效果减弱，中心 $X = 0$ 处的磁场会“凹陷”下去，形成“双峰”形态（在两个线圈中心附近各自出现峰值），也失去了均匀区。

4. 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?

根据霍尔效应原理（公式 1），霍尔电压 V_H（即特斯拉计的读数）正比于**垂直**穿过霍尔元件敏感面（即霍尔片）的磁感应强度 B 的分量。因此，当霍尔元件的**敏感面**（通常是探头的扁平“大面”）**垂直**于磁场方向（即磁力线穿过该平面）时，$\cos\theta = 1$，特斯拉计的指示值**最大**。当霍尔元件的敏感面平行于磁场方向时，$\cos\theta = 0$，理论上指示值为零。

5. 试分析载流圆线圈磁场分布的理论值与实验值的误差产生的原因?

产生误差的主要原因可以归纳为：

(1) **仪器系统误差**：特斯拉计本身存在精度（如 $\pm 2\mu$T）和线性误差；励磁电流源 I 的示数不准或存在波动。

(2) **操作与安装误差**：这是最主要的原因。

- **探头定位偏离轴线**：霍尔探头很难严格保持在线圈的几何中心轴线上，任何径向的偏离都会导致测量值偏小。
- **探头角度不垂直**：探头的敏感面没有完全垂直于磁场方向（B 轴），导致测量值 $B = B\ \cos\theta$，使其系统性偏小（这在图 4 中测量曲线整体低于理论曲线有所体现）。
- **位置读数误差**：尺上的读数存在视差。

(3) **参数误差**：用于计算理论值的线圈半径 $R = 0.100$ m 和匝数 $N = 400$ 并非绝对精确，这些参数的误差会直接导致理论曲线（红线）本身的“失真”。

(4) **环境干扰**：实验室中其他变化的电磁场干扰。

这些因素共同导致了如图 4 所示的 4.03% 的平均相对误差。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制