

浙江大学

物理实验报告

实验名称: 用霍尔法测直流圆线圈与亥姆霍兹线圈磁场

实验桌号: 14

指导教师: 应旭初

班级: 机械 2402

姓名: 叶畅飞

学号: 3240103132

实验日期: 2025 年 9 月 28 日 星期 日 下午

浙江大学物理实验教学中心

一、预习报告（10 分）

1. 实验综述（5 分）

实验现象：

对于单个圆线圈轴线上的磁场分布，探头从中心点分别向线圈的左边（-x 方向）和右边（+x 方向）移动时，记录的霍尔电压值会以中心点为对称轴，呈现对称的衰减。

对于亥姆霍兹线圈，探头在两个线圈之间移动时，记录的霍尔电压值几乎保持不变，或者变化非常非常小。

实验原理：

1. 载流圆线圈与亥姆霍兹线圈的磁场

1) 载流圆线圈磁场

一半径为 R ，通以直流电流 I 的圆线圈，其轴线上距线圈中心 X 米处的磁感应强度为：

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

式中 N_0 为圆线圈的匝数， X 为轴上某一点距线圈中心的距离， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 为真空磁导率，磁场分布如图 1 所示，是一条单峰的关于 Y 轴对称的曲线。

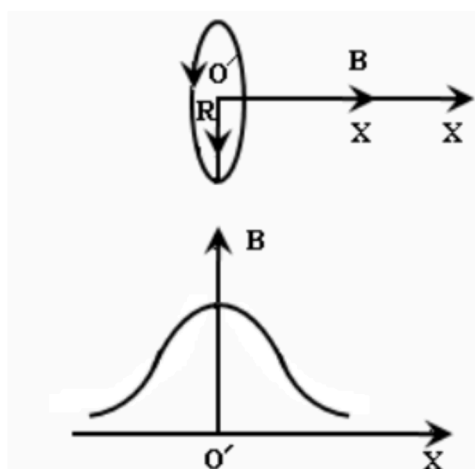


图1 载流圆线圈的磁场分布

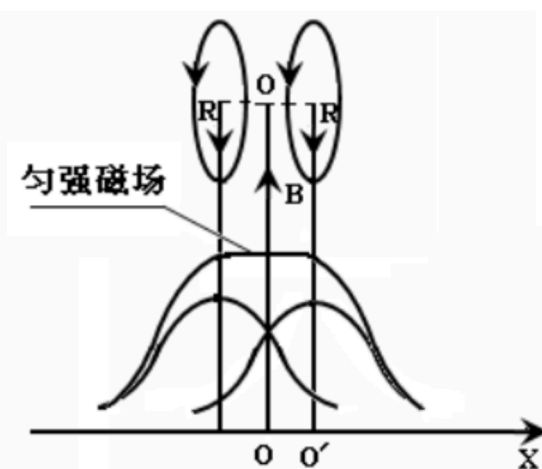


图2 亥姆霍兹线圈的磁场分布

2) 亥姆霍兹线圈磁场

两个完全相同的圆线圈彼此平行且共轴，通以同方向电流 I ，线圈间距等于线圈半径 R 时，从磁感应强度分布曲线可以看出，（理论计算也可以证明）：两线圈合磁场在中心轴线上（两线圈圆心连线）附近较大范围内是均匀的，这样的一对线圈称为亥姆霍兹线圈，如图 2 所示。从分布曲线可以看出，在两线圈中心连线一段，出现一个平台，这说明该处是匀强磁场，这种匀强磁场在科学实验中应用十分广泛。比如，大家熟悉的显像管中的行偏转线圈和场偏转线圈就是根据实际情况经过适当变形的亥姆霍兹线圈。

2. 利用霍尔效应测磁场的原理

霍尔元件的作用如图 3 所示. 若电流 I 流过厚度为 d 的矩形半导体薄片, 且磁场 B 垂直作用于该半导体, 由于洛伦兹力作用电流方向会发生改变, 这一现象称为霍尔效应, 在薄片两个横向面 a、b 之间产生的电势差称为霍尔电势。该电势同时垂直于电流 I 及磁场 B 方向。

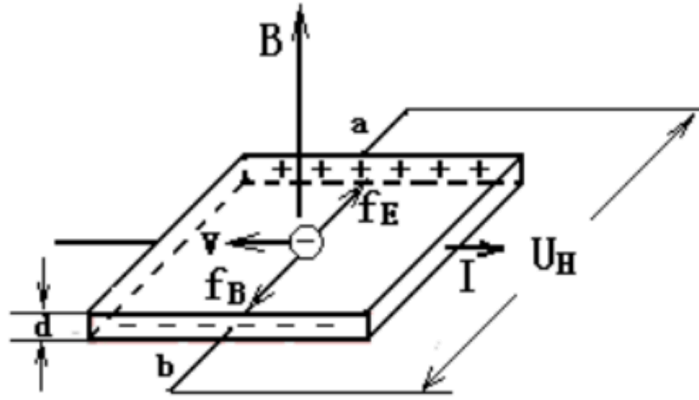


图 3

霍尔电势差是这样产生的: 当电流 I_H 通过霍尔元件 (假设为 P 型) 时, 空穴有一定的漂移速度 V , 垂直磁场对运动一定的漂移速度 v , 垂直磁场对运动电荷产生一个洛伦兹力 $F_B = q \cdot (v \times B)$ 。洛伦兹力使电荷产生横向的偏转, 由于样品有边界, 所以偏转的载流子将在边界积累起来, 产生一个横向电场 E , 直到电场对载流子的作用力 $F_E = q \cdot E$ 与洛伦兹力 F_B 平衡为止, 即

$$qE = q \cdot (v \times B)$$

这时电荷在样品中流动时不再偏转, 霍尔电势差就是由这个电场建立起来的。

如果是 N 型样品, 则横向电场方向与前者相反, 所以 N 型样品和 P 型样品的霍尔电势差有不同的符号, 据此可以判断霍尔元件的导电类型。

设 P 型样品的载流子浓度为 p , 宽度为 ω , 厚度为 d , 通过样品横截面的电流为

$$I_H = pqv\omega d$$

则空穴的速度 $v = \frac{I_H}{pq\omega d}$, 代入上式得

$$E = |v \times B| = \frac{B \cdot I_H}{pq\omega d}$$

同乘以 ω , 则霍尔电势差为

$$U_H = E\omega = \frac{B \cdot I_H}{pqd} = R_H \frac{B \cdot I_H}{d}$$

其中 $R_H = \frac{1}{pq}$ 称为霍尔系数, 在应用中一般写成

$$U_H = K_H \cdot I_H \cdot B$$

比例系数 $K_H = \frac{R_H}{d}$ 称为霍尔元件的灵敏度。一般要求 K_H 愈大愈好。 K_H 与载流子浓度成反比，半导体材料的载流子浓度远比金属载流子浓度小，所以都用半导体材料作为霍尔元件； K_H 与厚度 d 成反比，为了增大 K_H ，所以霍尔元件都做得很薄，一般只有 0.2mm。

因此，知道了霍尔片的灵敏度 K_H ，测出霍尔电势差 U_H 和霍尔电流 I_H ，就可以求出磁感应强度 B ，这就是霍尔效应测量磁场的原理。

实验方法：

1. 测量载流圆线圈轴线上的磁场分布

正确连接仪器，调节励磁电流 $I=0.000A$ ，在圆线圈磁感应强度为 0 的条件下，将微特斯拉计调零（消除地磁场、环境中其他干扰磁场、不平衡电势的影响），这样微特斯拉计就校准好了。

松开固定线圈用的螺栓，平移移动线圈至 5cm（即 $\frac{R}{2}$ ）处并固定。使励磁电流 $I=0.400A$ ，以圆线圈中心为坐标原点、每 1.0cm 测一个 B 值。记录数据并画出 $B-X$ 曲线。

2. 测量亥姆霍兹轴线上磁场的分布

$d=R=10cm$ ，串联两个励磁线圈，调节励磁电流 $I=0.400A$ 。以两个圆线圈中心连线上的中点为坐标原点、每隔 1.0cm 测量一个数据，记录数据并画出 $B-X$ 曲线。

3. 测量载流圆线圈沿径向的磁场分布

将传感器探头移动到一只圆线圈中心，轴向 D 的夹角为 0° ，径向移动探头，每移动 1.0cm 测量一个数据，按正反方向测到 6cm 为止，记录数据并画出 $B-Y$ 曲线。

2. 实验重点（3 分）

1. 了解用霍尔效应法测量磁场的原理，掌握 FB511 型霍尔法亥姆霍兹线圈磁场实验仪的使用方法。
2. 了解载流圆线圈的径向磁场分布情况。
3. 测量载流圆线圈和亥姆霍兹线圈的轴线上的磁场分布。
4. 两平行线圈的间距改变为 $d=R/2$ 和 $d=2R$ 时，测定其轴线上的磁场分布。

3. 实验难点（2 分）

- 特斯拉计在于调零时需消除地磁等干扰，保证特斯拉计稳定；
- 移动传感器时易有视觉误差；
- 实验仪器间距近易相互干扰，且原点两侧测量易因线圈不竖直导致误差

二、原始数据 (20 分)

叶申飞

25年9月28日

3240103132

(一)

$-33\mu T$ $-29\mu T$ $-29\mu T$ $-32\mu T$ $-28\mu T$ $-26\mu T$

(二) 单端圈

S	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
X	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
B _正	352	414	478	550	633	717	800	881	948	984	1006	994	955	893	815
B _反	-345	-400	-459	-533	-613	-696	-781	-859	-921	-966	-980	-969	-927	-865	-792

B

S	9	10	11	12	13	14
X	5	6	7	8	9	10
B _正	734	846	966	1094	1226	1368
B _反	-705	-631	-542	-469	-406	-349

B

反端圈

2025.9.28.

(三) 双端圈

S	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
X	+12	+11	+10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
B _正	891	789	895	1005	1112	1212	1297	1363	1410	1426	1441	1444
B _反	-695	-787	-895	-1006	-1113	-1212	-1295	-1356	-1397	-1425	-1429	-1431

B

9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1
0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
1443	1445	1440	1429	1406	1355	1290	1211	1111	994	887
1443	1445	1440	1429	1406	1355	1290	1211	1111	994	887
-1431	-1428	-1425	-1413	-1388	-1350	-1279	-1197	-1099	-990	-879

-2 -3
-11 -12
782 682
-766 -670

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

1). 测量地磁场

表 1 地磁场测量数据

	1	2	3	4	5	6
$B\ (\mu T)$	-33	-29	-29	-32	-28	-26

计算可得

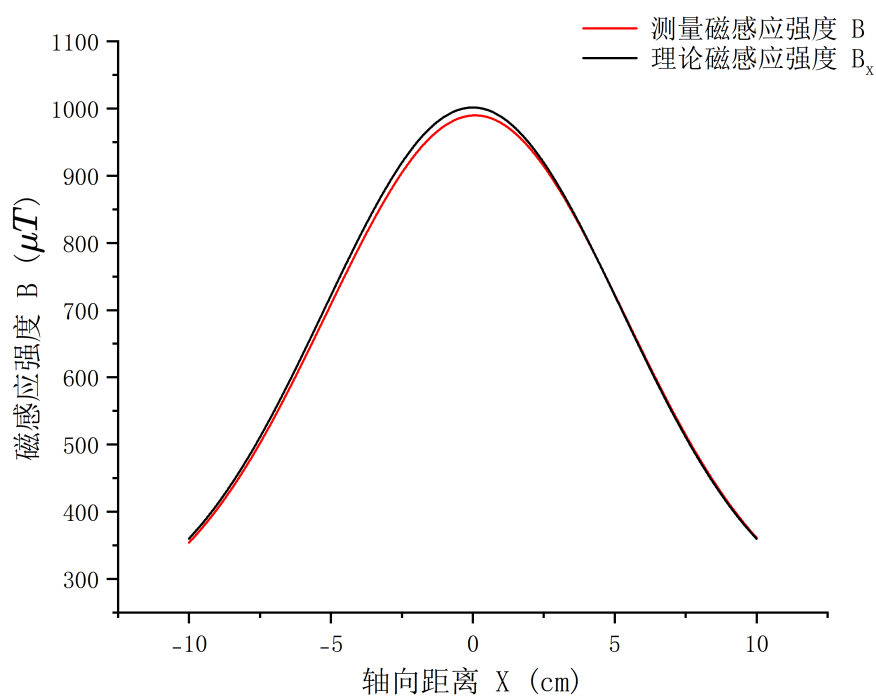
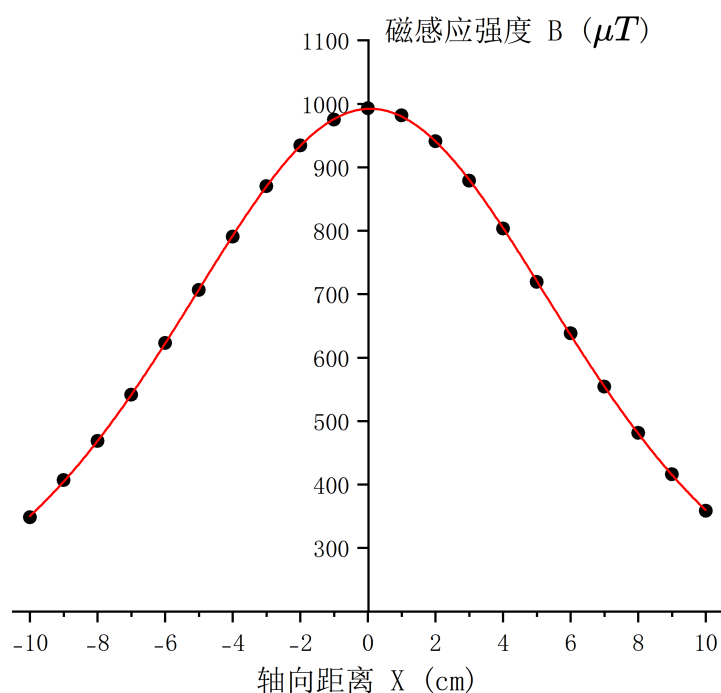
$$\overline{B} = -29.5\mu T$$

(2). 测绘单个圆线圈磁场强度分布

表 2 载流圆线圈轴线上磁场分布测量数据

S	x	$B_{\text{正}}$	$B_{\text{反}}$	B	B_x
-6	-10	352	-345	348. 5	355
-5	-9	414	-400	407	413
-4	-8	478	-459	468. 5	479
-3	-7	550	-533	541. 5	553
-2	-6	633	-613	623	634
-1	-5	717	-696	706. 5	719
0	-4	800	-781	790. 5	805
1	-3	881	-859	870	883
2	-2	948	-921	934. 5	948
3	-1	984	-966	975	990
4	0	1006	-980	993	1005
5	1	994	-969	981. 5	990
6	2	955	-927	941	948
7	3	893	-865	879	883
8	4	815	-792	803. 5	805
9	5	734	-705	719. 5	719
10	6	646	-632	638. 5	634
11	7	566	-542	554	533
12	8	494	-469	481. 5	479
13	9	426	-406	416	413
14	10	368	-349	358. 5	355

如图所示，通过绘制载流圆线圈轴线上磁场分布的图像可以发现，磁场在线圈轴线两侧呈对称分布。随着轴向距离绝对值的增大，磁场强度逐渐减弱；而在靠近线圈中心区域时，磁场强度逐渐增强，并在轴线中心位置达到最大值。整体上，磁场强度沿轴线由中心向两侧呈现出递减的变化趋势。通过对比磁场强度的测量值与理论值曲线可以发现，两者在整体趋势与数值上均吻合良好。

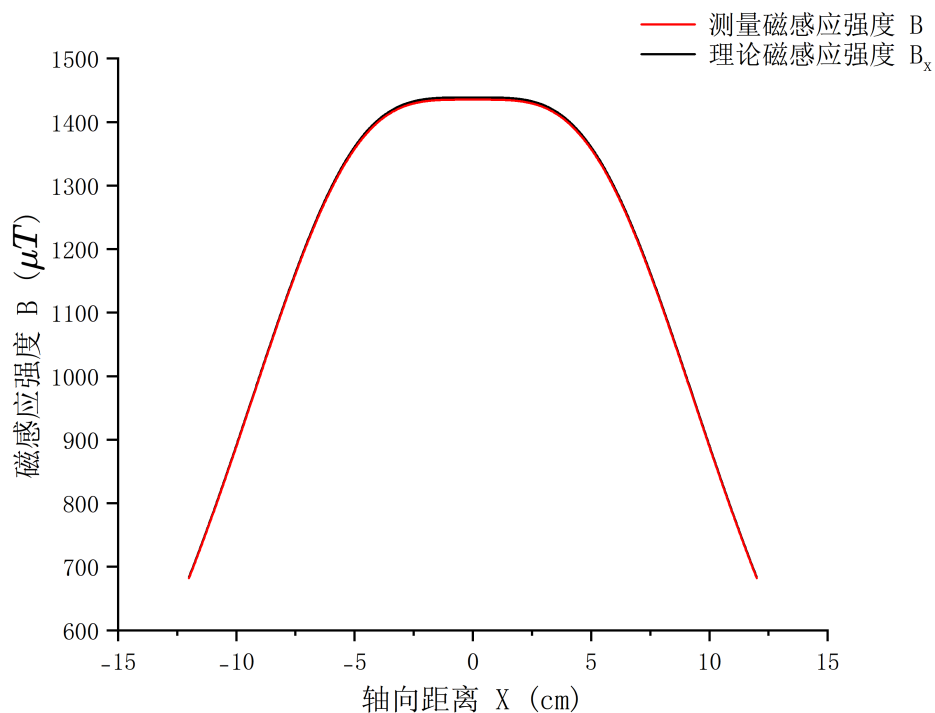
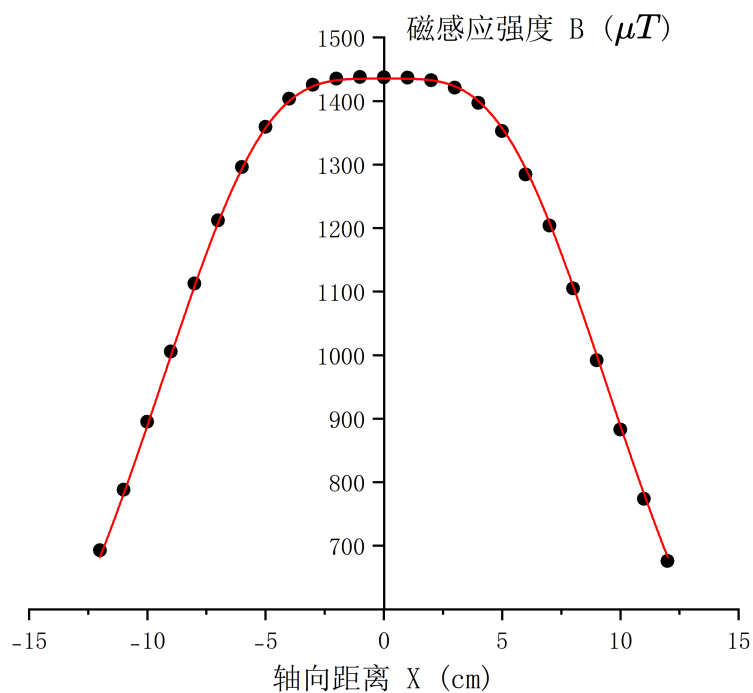


(3). 测量亥姆霍兹线圈磁场强度分布

表 3 亥姆霍兹线圈轴线上磁场分布测量数据

S	x	$B_{\text{正}}$	$B_{\text{反}}$	B	B_x
-3	-12	691	-695	693	684
-2	-11	789	-787	788	784
-1	-10	895	-895	895	891
0	-9	1005	-1006	1005.5	1002
1	-8	1112	-1113	1112.5	1111
2	-7	1212	-1212	1212	1212
3	-6	1297	-1295	1296	1296
4	-5	1363	-1356	1359.5	1361
5	-4	1410	-1397	1403.5	1403
6	-3	1426	-1425	1425.5	1427
7	-2	1441	-1429	1435	1436
8	-1	1444	-1431	1437.5	1439
9	0	1443	-1431	1437	1439
10	1	1445	-1428	1436.5	1439
11	2	1440	-1425	1432.5	1436
12	3	1429	-1413	1421	1427
13	4	1406	-1388	1397	1403
14	5	1355	-1350	1352.5	1361
15	6	1290	-1279	1284.5	1296
16	7	1211	-1197	1204	1212
17	8	1111	-1099	1105	1111
18	9	994	-990	992	1002
19	10	887	-879	883	891
20	11	782	-766	774	784
21	12	682	-670	676	684

如下图所示，亥姆霍兹线圈轴线上的磁场，在中心区域($|X| \lesssim \frac{R}{2}$)呈现出高度的均匀性，该区间内的场强值变化平缓。超出此均匀区域后，磁场强度则随轴向距离绝对值的增大而逐渐衰减。通过对比磁场强度的测量值与理论值曲线可以发现，两者在整体趋势与数值上均吻合良好。



2. 误差分析（20 分）

本实验可能存在以下几方面的误差来源：

- 传感器的非线性、灵敏度误差、零漂（零点随时间的漂移）和温漂（灵敏度、零点随温度变化）会直接引入测量偏差。
- 实验环境中的其他测量设备的磁场可能干扰测量结果。
- 测量地磁场时仪器摆放位置存在小偏差角，未能完全消除地磁场的影响。
- 移动传感器时存在视觉误差，导致位置读数不准确。

1). 测量地磁场

地磁场测量的平均值为

$$\overline{B} = -29.5\mu T$$

地磁场测量的 A 类不确定度为

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (B_i - \overline{B})^2}{n(n-1)}} = 1.06\mu T$$

(2). 测绘单个圆线圈磁场强度分布

圆心 $B \sim B_x$ 的相对误差如下表所示：

表 4 圆线圈磁场强度分布相对误差

S	x	B	B_x	相对误差(%)
-6	-10	348.5	355	1.94
-5	-9	407	413	1.41
-4	-8	468.5	479	2.13
-3	-7	541.5	553	2.03
-2	-6	623	634	1.72
-1	-5	706.5	719	1.78
0	-4	790.5	805	1.76
1	-3	870	883	1.52
2	-2	934.5	948	1.41
3	-1	975	990	1.55
4	0	993	1005	1.22
5	1	981.5	990	0.90
6	2	941	948	0.73
7	3	879	883	0.50
8	4	803.5	805	0.15
9	5	719.5	719	0.03
10	6	638.5	634	0.73
11	7	554	533	0.24
12	8	481.5	479	0.58
13	9	416	413	0.78
14	10	358.5	355	0.87

从数据可以看出，圆线圈的误差分布呈现出明显的规律性：在中心区域误差较小（普遍低于 0.9%），而在两侧边缘区域误差相对较大（普遍高于 1.5%）。

这种分布模式主要指向以下几个误差来源：

- 霍尔元件的定位误差：这是最主要的误差来源。理论上，霍尔元件应精确位于线圈的轴线上。任何微小的横向偏移（尤其是在磁场梯度较大的线圈边缘区域），都会导致测量值显著偏离轴线上的理论值，从而产生较大的误差。中心区域磁场梯度小，对定位误差不敏感，因此误差也小。
- 地磁场及环境杂散磁场的干扰：实验环境中的地磁场和杂散磁场（如来自电器、建筑钢筋）会与线圈磁场叠加。在磁场较弱的边缘区域，这种固定干扰所带来的相对误差会被放大。
- 系统误差：霍尔元件的灵敏度系数标定本身存在微小偏差，这会作为一个系统误差存在于所有测量数据中。

(3). 测量亥姆霍兹线圈磁场强度分布

表 5 圆线圈磁场强度分布相对误差

S	x	B	B_x	相对误差(%)
-3	-12	693	684	1.35
-2	-11	788	784	0.57
-1	-10	895	891	0.46
0	-9	1005.5	1002	0.34
1	-8	1112.5	1111	0.11
2	-7	1212	1212	0.03
3	-6	1296	1296	0.03
4	-5	1359.5	1361	0.09
5	-4	1403.5	1403	0.01
6	-3	1425.5	1427	0.07
7	-2	1435	1436	0.08
8	-1	1437.5	1439	0.7
9	0	1437	1439	0.12
10	1	1436.5	1439	0.14
11	2	1432.5	1436	0.25
12	3	1421	1427	0.39
13	4	1397	1403	0.45
14	5	1352.5	1361	0.60
15	6	1284.5	1296	0.92
16	7	1204	1212	0.63
17	8	1105	1111	0.57
18	9	992	1002	1.01
19	10	883	891	0.89
20	11	774	784	1.21
21	12	676	684	1.14

在整个测量范围内，相对误差都非常小（普遍低于 0.7%），且在中心均匀区（大约 $S=5$ 至 $S=14$ ，即 $x=-4$ 至 $x=5$ ）误差达到最小值（普遍低于 0.2%）。

3. 实验探讨（10 分）

本实验采用霍尔效应法依次测量了地磁场、载流圆线圈及亥姆霍兹线圈的磁场分布。测得杭州地磁场约为 $29.5\mu T$ ；载流圆线圈轴线磁场呈中心对称的单峰分布；亥姆霍兹线圈轴线中部则存在宽而平的均匀区，验证了其产生均匀磁场的特性。

四、思考题（10 分）

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？

答：由于地球本身存在一个稳定的地磁场，当测量某一直流磁场时，地磁场会与其叠加，从而使测量结果中包含地磁场的贡献。若不加以修正，将引入系统误差，导致测量值偏离被测磁场的真实强度。

2. 载流圆线圈轴线上磁场的分布规律如何？

答：载流圆线圈轴线上的磁场分布关于线圈中心呈对称形态。磁场强度在线圈中心处最大，随着轴向距离的增大，磁场强度逐渐减小。

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？

答：亥姆霍兹线圈由两个半径相同、匝数相等、平行共轴的圆形线圈组成。其基本条件是两线圈之间的间距等于线圈的半径。磁场分布的主要特点是在两线圈中心连线中点附近存在一个较宽范围内磁场变化平缓的均匀区。若改变两线圈间距，会破坏磁场的均匀性，使均匀区域缩小甚至消失，轴线上的磁场分布将不再保持原有的平坦特征。

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？

答：当磁场方向垂直于霍尔元件的敏感面（即霍尔片平面）时，特斯拉计的指示值最大。

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？

答：理论值与实验值之间的误差主要来源于以下几个方面：霍尔元件的灵敏度标定存在偏差；测量电路中存在系统误差；环境中的杂散磁场对测量造成干扰；线圈的实际半径与匝数与理论值存在偏差；以及线圈中通过的电流不恒定，引起磁场的波动。