

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：9

指导教师：费莹老师

班级：-

姓名：-

学号：-

实验日期：2025年12月29日 星期一 上午

(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。）

用霍尔法测直流圆线圈与亥姆霍兹线圈磁场实验旨在利用霍尔效应原理，测量载流圆线圈及亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布，并验证磁场叠加原理及亥姆霍兹线圈产生匀强磁场的条件。

实验原理：

1. 霍尔效应测磁场原理

如图 1 所示，厚度为 d 的矩形半导体薄片垂直磁场 B 放置，通有电流 I 。载流子在洛伦兹力的作用下运动方向发生改变，产生横向偏转，在边界累积产生横向电场 E 。直到 E 产生的 F_E 作用与洛伦兹力 F_B 抵消，即：

$$q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot \vec{E} \quad (1)$$

时，电荷不再发生偏转。

由于 $I = nqSv = nq\omega dv$ ，则 $v = \frac{I}{nq\omega d}$

因此我们有 $U_H = \frac{IB}{nqd}$ 。记霍尔系数 $R_H = \frac{1}{nq}$ ，霍尔元件的灵敏度 $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{nqd}$ ，则 $U_H = K_H IB$ 。

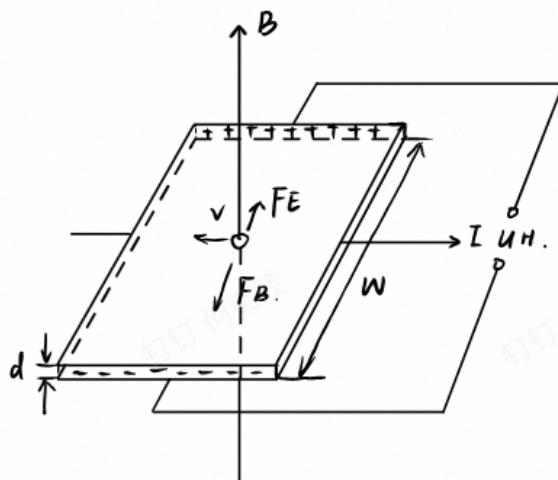


图 1: 霍尔效应原理图

2. 载流圆线圈与亥姆霍兹线圈的磁场

- 载流圆线圈：半径为 R ，匝数为 N ，通以电流 I 的圆线圈，其轴线上距圆心 X 处的磁感应强度为：

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

其分布图为关于圆心对称的单峰曲线。

- 亥姆霍兹线圈：由两个半径 R 、匝数 N 相同的线圈平行共轴放置，通以同向等大电流 I 。当线圈间距 $d = R$ 时，两线圈产生的磁场叠加，在两线圈中心连线区域内磁场导数 $\frac{dB}{dX} = 0$ 且 $\frac{d^2B}{dX^2} = 0$ ，形成较宽的匀强磁场区。

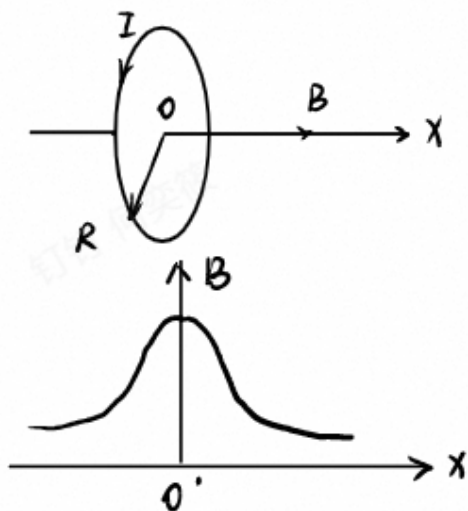


图 2: 载流圆线圈原理图

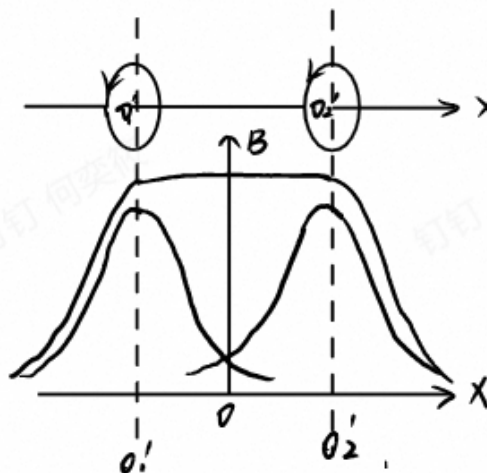


图 3: 亥姆霍兹线圈原理图

实验方法：

1. 测量载流圆线圈轴线上的磁场分布

- 连接 FB511 型实验仪，将霍尔探头固定在测试架上。
- 调零：在励磁电流 $I = 0$ 时，调节微特斯拉计的调零旋钮，以消除地磁场及不等位电势的影响。
- 设置励磁电流 $I = 0.400\text{A}$ ，移动探头，以线圈中心为原点，每隔 1.0cm 测量一次 B 值，记录数据并绘制 $B - X$ 曲线。

2. 测量亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布

- 调节两个线圈间距 $d = R$ （即移动线圈至刻度 R 处）。
- 同样通以 $I = 0.400\text{A}$ 电流，以两线圈中心连线中点为原点，沿轴线测量磁场分布。
- 观察并记录中心区域磁场出现的“平台”现象，验证匀强磁场特性。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

1. 深入理解霍尔效应测量磁场的物理机制，以及亥姆霍兹线圈产生匀强磁场的几何条件（ $d = R$ ）。
2. 通过实测数据绘制磁场分布曲线，验证载流圆线圈的理论公式，并分析亥姆霍兹线圈中心区域磁场的均匀性。
3. 掌握 FB511 型磁场实验仪的操作，特别是霍尔探头的定标与调零方法。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

1. **地磁场与环境干扰的消除：**霍尔传感器灵敏度高，地磁场及周围铁磁物质会引入误差，因此必须在电流为零时仔细调零，且实验过程中探头方向改变或仪器移动后均需重新调零。

2. **探头位置的准确定位：**霍尔探头必须严格处于线圈轴线上并保持垂直于磁场方向，探头的径向或角度偏差会导致测量值 B 偏小。

3. **微弱变化的观测：**在亥姆霍兹线圈中心匀强区，磁场变化极小，需仔细读取数据以分辨微小差异。

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。）

B₀ = 23 μT.

费 1. 12.29

实验一. 测绘单个圆线圈磁场强度分布.

实验序号 $N_0 = 400$ 匝, $I = 0.4$ A $R = .$ m 线圈位置 $X_0 = ,$ cm

传感器位置 (cm)	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00
轴面距离 (cm)	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00
正面 B_z (μT)	361	418	478	551	628	715	798	876
反面 B_z (μT)	-332	-389	-454	-525	-605	-686	-776	-854

13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00
-2.00	-1.00	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
939	985	1002	994	954	893	814	732	645	565	490	425	367
-925	-970	-986	-976	-927	-879	-804	-719	-636	-559	-481	-415	-360

实验二. 测绘单个圆线圈径向磁场强度分布

径向 r / cm	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
正面 B_r / μT	1235	1140	1076	1038	1013	1008	1017	1043	1088	1161	1269
反面 B_r / μT	-1208	-1110	-1046	-1008	-984	-975	-985	-1012	-1051	-1124	-1230

实验三. 测绘亥姆霍兹线圈轴面磁场分布

$N_0 = 400$ 匝 $I = 0.4$ A $R = 0.1$ m $X_1 = 10$ cm $X_2 = 20.00$ cm.

传感器 x / cm	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00
轴面 s / cm	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00
正 B_z / μT	876	983	1094	1190	1276	1341	1388	1408	1424	1423
反 B_z / μT	-880	-988	-1093	-1196	-1279	-1348	-1389	-1418	-1425	-1435

15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00
0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
1423	1422	1423	1412	1390	1350	1290	1209	1114	1006	894
-1432	-1433	-1428	-1420	-1401	-1358	-1295	-1213	-1115	-1010	-900
							7216			

图 4: original data

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。）

实验一：测绘单个圆线圈磁场强度分布

相关参数： $N_0 = 400$ 匝， $I = 0.4A$ ， $R = 0.1m$ ，线圈位置 $x_0 = 15.00cm$

其中，理论磁感应强度的计算公式为： $B(x) = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}}$

表 1: 单个圆线圈磁场强度分布

传感器所在位置 (cm)	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00
轴向距离 (cm)	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00
正向磁感应强度 $B_{\text{正}}(\mu T)$	361	418	478	551	628	715	798	876	939	985
反向磁感应强度 $B_{\text{反}}(\mu T)$	-332	-389	-454	-525	-605	-686	-776	-854	-925	-970
平均磁感应强度 $B(\mu T)$	347	404	466	538	616	700	787	865	932	978
理论磁感应强度 $B_x(\mu T)$	355	413	479	553	634	719	805	883	948	990
相对误差	2.54	2.18	2.71	2.71	2.84	2.64	2.24	2.04	1.69	1.21

表 2: 单个圆线圈磁场强度分布（续表）

传感器所在位置 (cm)	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00
轴向距离 (cm)	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
正向磁感应强度 $B_{\text{正}}(\mu T)$	1002	994	954	893	814	732	645	565	490	425	367
反向磁感应强度 $B_{\text{反}}(\mu T)$	-986	-976	-937	-879	-804	-719	-636	-556	-481	-415	-360
平均磁感应强度 $B(\mu T)$	994	985	946	886	809	726	640	560	486	420	364
理论磁感应强度 $B_x(\mu T)$	1005	990	948	883	805	719	634	553	479	413	355
相对误差	1.09	0.51	0.21	0.34	0.5	0.97	0.95	1.27	1.46	1.69	2.54

使用 matplotlib 绘制出了 B-x 和 B_x -x 曲线，如下图所示：

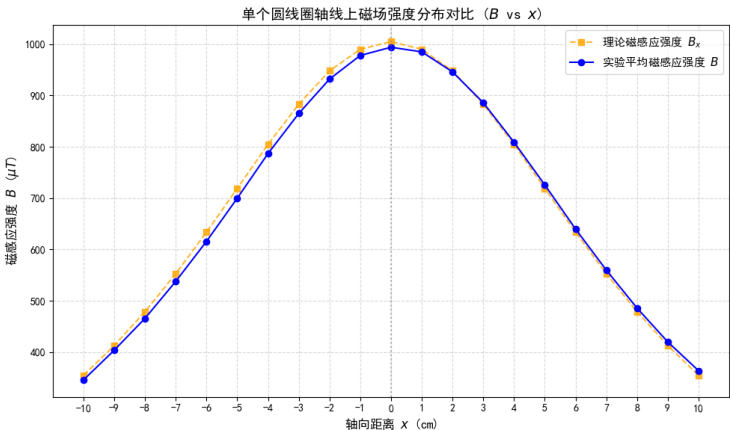


图 5: B-x 和 B_x -x 曲线

从图中我们可以看出，曲线呈现关于 $x=0$ 对称的单峰分布，磁感应强度在 $x=0$ 处达到最大值，并随轴向距离的增加而逐渐减小。实验测量曲线与理论计算曲线走势高度吻合，很好地验证了载流圆线圈轴向磁场分布的理论规律。

实验二：测绘单个圆线圈径向磁场强度分布

表 3: 单个圆线圈径向磁场强度分布

径向距离 $y(\text{cm})$	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
正向磁感应强度 $B_{\text{正}}(\mu T)$	1235	1140	1076	1038	1013	1008	1017	1043	1088	1161	1269
反向磁感应强度 $B_{\text{反}}(\mu T)$	-1208	-1110	-1046	-1008	-984	-975	-985	-1012	-1051	-1124	-1230
平均磁感应强度 $B(\mu T)$	1222	1125	1061	1023	998	992	1001	1028	1070	1142	1250

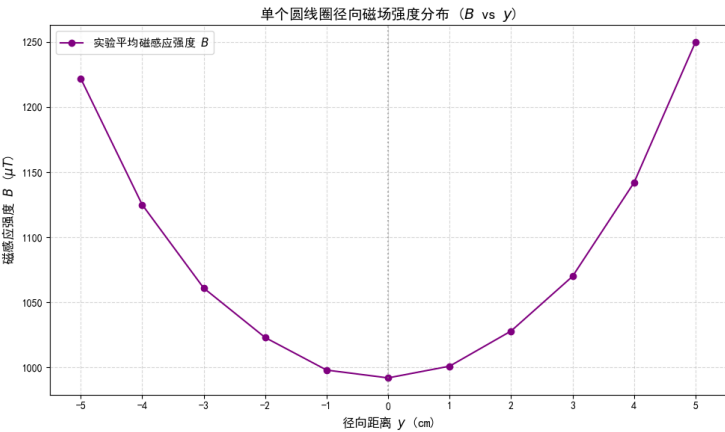


图 6: 单个圆线圈径向磁场强度分布

我们可以发现，曲线呈现关于中心呈高度对称的凹形分布，磁感应强度在中心处达到最小值；随着径向距离向两侧增加（即从圆心向线圈边缘移动），磁感应强度逐渐增大；这符合载流圆线圈内部的磁场分布规律，即越靠近电流所在的导线，磁场越强。

实验三：测绘亥姆霍兹线圈的轴向磁场强度分布

相关参数： $N_0 = 400$ 匝， $I = 0.4\text{A}$ ， $R = 0.1\text{m}$ ， $x_1 = 10.00\text{cm}$ ， $x_2 = 10.00\text{cm}$

表 4: 亥姆霍兹线圈磁场强度分布

传感器所在位置 (cm)	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00
轴向距离 (cm)	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00
正向磁感应强度 $B_{\text{正}}(\mu T)$	876	983	1094	1190	1276	1341	1388	1408	1424	1423
反向磁感应强度 $B_{\text{反}}(\mu T)$	-880	-988	-1093	-1196	-1279	-1348	-1389	-1418	-1425	-1435
平均磁感应强度 $B(\mu T)$	878	986	1094	1193	1278	1344	1388	1413	1424	1429

表 5: 亥姆霍兹线圈磁场强度分布（续表）

传感器所在位置 (cm)	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

轴向距离 (cm)	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
正向磁感应强度 $B_{\text{正}}(\mu T)$	1423	1422	1423	1412	1390	1350	1290	1209	1114	1006	894
反向磁感应强度 $B_{\text{反}}(\mu T)$	-1432	-1433	-1428	-1420	-1401	-1358	-1295	-1216	-1115	-1010	-900
平均磁感应强度 $B(\mu T)$	1428	1428	1426	1416	1396	1354	1292	1212	1114	1008	897

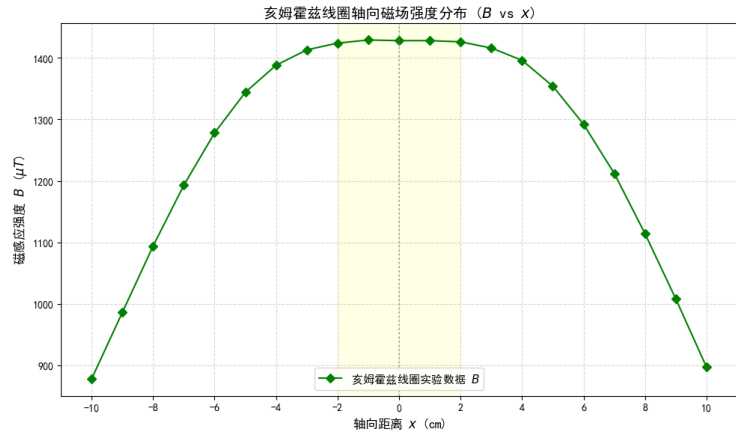


图 7: 亥姆霍兹线圈磁场强度分布

在中心附近，磁感应强度数值变化极小，形成了一个明显的平台。这有力地验证了亥姆霍兹线圈的特性：当两线圈间距等于半径时，能在其轴线中心产生范围较宽的匀强磁场。

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。）

1. 我们可以注意到左右两侧距离中心相同距离的点，在先后两次的测量中获得的磁感应强度并不相同，这可能是由于环境中的磁场发生了变化，特别是实验教室中的其他仪器产生的磁场干扰。
2. 实验过程中我们也发现，线圈在导轨上的固定其实不是很牢固，我们在移动线圈后，仅是通过肉眼观察是否竖直，可能实际上线圈并未达到竖直，这也会对实验结果产生一定的误差。
3. 调零的时候，读数会一直在跳动，有时因为环境磁场的干扰，读数的扰动会非常大，这导致我们的调零可能并不是很准确；同时从调零时读数的跳动我们也可以看出，在实验过程的实际读数中，也会存在一定的误差。
4. 调节霍尔元件的位置时，我们对刻度尺位置的判断可能存在一定的误差。

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。）

本次实验中，我利用霍尔效应测量了载流圆线圈及亥姆霍兹线圈的磁场分布情况。测量结果表明：单线圈的轴向磁场呈关于圆心对称的单峰分布，而径向磁场强度则由中心向外递增；亥姆霍兹线圈轴线中心区域出现宽平的“平台”，验证了其能够在一定范围内产生匀强磁场的特性；我的实验结果与理论分析高度一致。

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。）

思考题一：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

地球本身是一个巨大的磁体，地磁场在实验环境中的水平分量通常在几十微特斯拉的量级。由于霍尔传感器测量的是空间中磁感应强度的矢量叠加值，微特斯拉计的读数实际上是实验线圈产生的磁场与地磁场（以及环境中其他杂散磁场）之和。在测量弱直流磁场时，地磁场的大小可能与被测磁场处于同一数量级，若不加以消除，它会给测量结果引入显著的系统误差。因此，在实验开始前必须在励磁电流为零的状态下进行调零，或者采用改变电流方向测量正反两组数据取平均值的方法，以有效抵消地磁场的影响，确保测量结果真实反映线圈本身产生的净磁场。

思考题二：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？

亥姆霍兹线圈由两个完全相同的圆形线圈组成，其构建的基本条件要求两个线圈彼此平行且共轴放置，具有相同的半径 R 和匝数，通以大小相等且方向相同的电流，最关键的是两线圈之间的距离 d 必须严格等于线圈半径 R 。

在这种特定的几何结构下，两线圈产生的磁场在中心区域相互叠加，使得中心点磁感应强度的一阶导数和二阶导数均为零，从而在两线圈中心连线的中点附近形成了一个范围较宽、均匀度极高的匀强磁场区。

若改变间距，当间距 $d < R$ 时，合磁场呈现中心高、两侧低的单峰分布，中心磁场变强但均匀范围变窄；当间距 $d > R$ 时，合磁场呈双峰（马鞍形）分布，即在靠近中心点的过程中，磁场强度大小先变大后变小（不会在变大后保持不变），中心处出现极小值，不再具备匀强磁场的特性。

思考题三：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？

霍尔传感器是利用霍尔效应工作的，其产生的霍尔电压 U_H 大小直接正比于流经元件的电流、灵敏度系数以及垂直于霍尔元件平面的磁感应强度分量。这意味着霍尔元件只能检测到与其表面法线方向平行的磁场分量。当探头在磁场中旋转时，磁场线与霍尔元件平面的夹角发生变化，导致有效磁分量改变，从而使示数发生变化。当霍尔元件的平面与磁力线方向完全垂直时（此时载流子受到的洛伦兹力最大，且全部用于建立霍尔电场），有效磁感应强度达到最大值，因此在这个方向上特斯拉计的指示值最大。

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