

- 【实验目的】**
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轴向上的磁场分布。
 4. 两平行线圈间距改变为 $d = R/2$ 和 $d = 2R$ 时, 测定其轴向上的磁场分布。

【实验原理】 (电学、光学画出原理图)

1. 载流圆线圈磁场

如右图, 半径为 R 的 N_0 匝圆线圈通有电流 I , 轴线上到圆心 O' 距离为 x 处的磁感应强度

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$. 磁场分布图如右图。

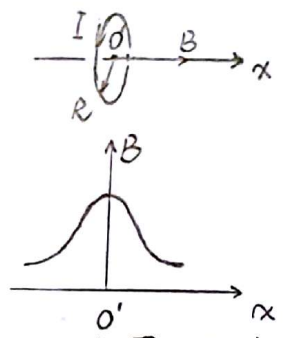


图1 载流圆线圈磁场

2. 亥姆霍兹线圈

两个如图1所示的线圈平行共轴放置, 间距为 R 时, 两线圈合磁场在中心轴线(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。

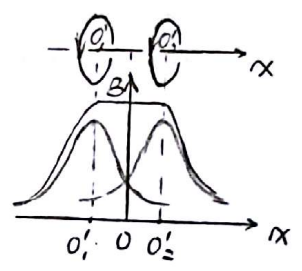


图2 亥姆霍兹线圈磁场

3. 利用霍尔效应测磁场

如右图, 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, 发生横向偏转, 在边界积累产生横向电场 E . 直到 E 产生的 F_E 作用与洛伦兹力 F_B 抵消, 即

$$q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot \vec{E} \quad (2)$$

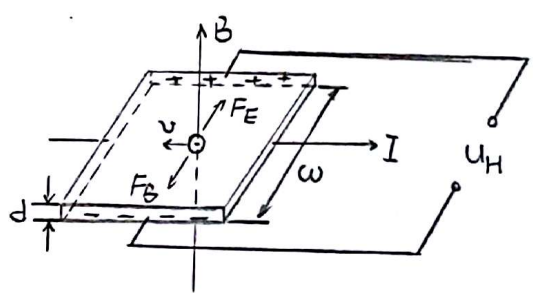
时, 电荷不再偏转。

由于 $I = nqSv = nqwdv$, 则 $v = \frac{I}{nqwd}$ (3), (4) (n为载流子浓度)

代入 (2) 式有 $E = \frac{IB}{nqwd}$, 即 $U_H = \frac{IB}{nq d}$ (5), (6)

记霍尔系数 $R_H = \frac{1}{nq}$, 霍尔元件的灵敏度 $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{nq d}$

则 $U_H = K_H I B$. (7)



【实验内容】（重点说明）

1. 测量载流圆线圈轴线上磁场的分布

正确连接仪器，调节励磁电流 $I = 0.000\text{A}$ ，在线圈磁感应强度为 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），这样微特斯拉计就较准好了。

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

2. 测量亥姆霍兹轴线上磁场的分布

$d = R = 10\text{cm}$ ，串联两个励磁线圈，调节励磁电流 $I = 0.400\text{A}$ 。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 $B \sim X$ 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线圈中心，轴线 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，记录数据并作出 $B \sim Y$ 曲线。

【实验器材及注意事项】

实验器材：FB511 型霍尔法亥姆霍兹线圈磁场实验仪

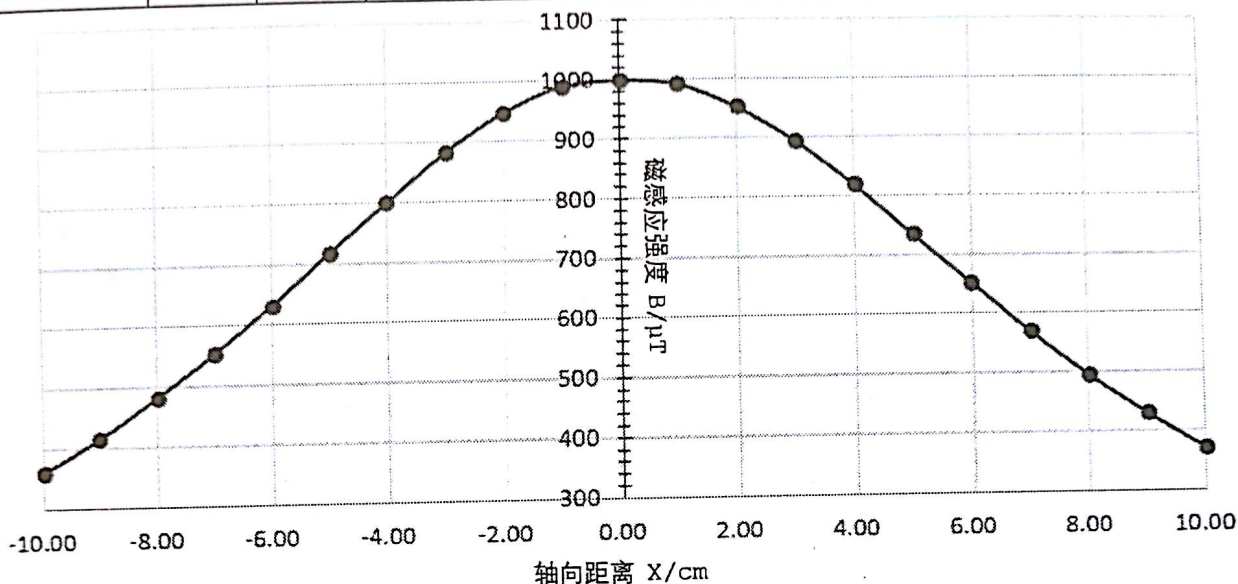
注意事项：1. 在励磁电流为 0 的情况下，通过补偿电位器，对微特斯拉计进行补偿调零。在实验过程中测试架位置要保持不变，若有变动，微特斯拉计要重新补偿调零。

2. 实验室中磁场实验仪较多，应注意实验仪之间不要靠得太近，以免互相影响。

【数据处理】

实验 1 - 测量载流圆线圈轴线上磁场的分布

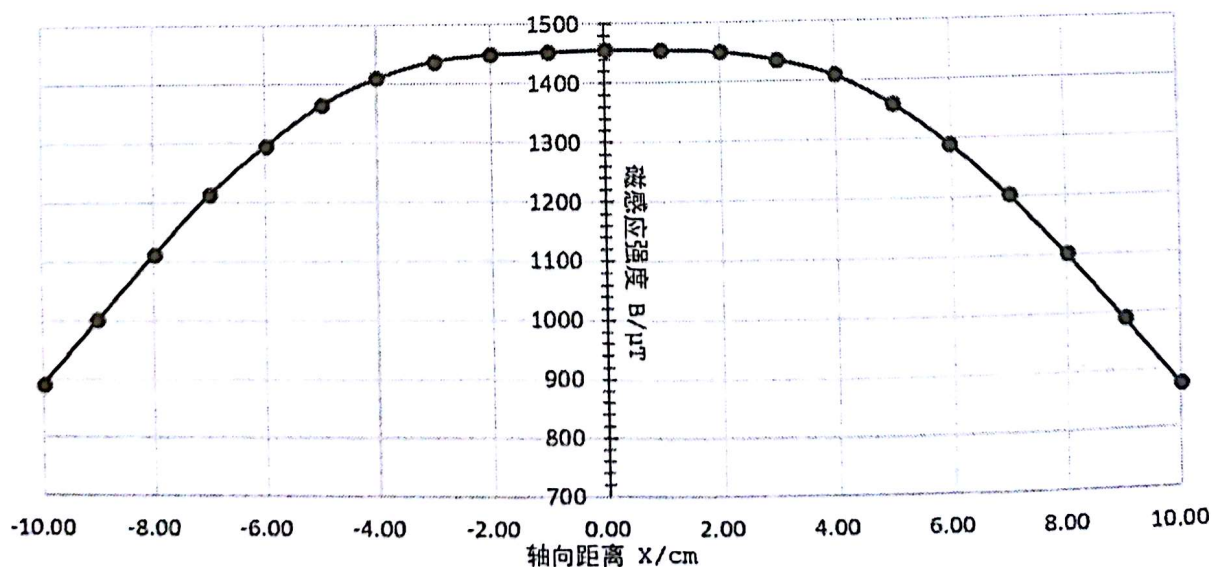
轴向距离 X/cm	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0.00
磁感应强度 B/ μ T	359	415	481	552	631	717	800	881	946	989	999
轴向距离 X/cm	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	
磁感应强度 B/ μ T	991	952	894	820	735	652	569	495	430	371	



可见，载流圆线圈轴线上磁场分布左右对称，且由中间到两边递减。

实验 2 - 测量亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布

轴向距离 X/cm	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0.00
磁感应强度 B/ μ T	890	1002	1111	1213	1295	1364	1410	1438	1449	1453	1456
轴向距离 X/cm	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	
磁感应强度 B/ μ T	1455	1451	1436	1410	1360	1290	1203	1101	989	875	



可见，亥姆霍兹线圈间轴线上的磁场分布比较均匀。

【误差分析】

1. 注意到从 $x = 0.00 \text{ cm}$ 到 $x = 15.00 \text{ cm}$ 测量再回到 $x = 0.00 \text{ cm}$ 时, 两次在原点读到 B 不同。这可能是由于环境中磁场发生变化, 尤其是邻近的其他实验仪影响造成的。
2. 实验中对原点(中心点)两侧进行测量时, 两侧读到 B 值虽明显呈对称, 但有一定误差。除了第1条提到的问题外, 还有可能是因为线圈放置并非完全竖直, 因而两侧水平方向上磁场分布并非完全对称。
3. 调零时会有 $\pm 2 \mu\text{T}$ 的跳动, 不能稳定。这同样说明测量时的值也会存在浮动。事实也确实如此。
4. 调节霍尔元件位置时可能有视觉误差。尤其是调节到线圈正后方时很难观察。这可能会带来误差。

【实验心得及思考题】

思考题1: 地磁场水平分量的量级为 10^{-5} T , 实验测量结果精确到 10^{-6} T , 可见地磁场对测量结果的有效位有影响, 需要消除。

思考题2: ① 两个等大的平行、共轴放置的线圈, 通有同向等大电流, 相距距离等于其半径组成亥姆霍兹线圈。

② 亥姆霍兹线圈中心轴线上磁场大小满足

$$B(x) = \frac{kR^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}} + \frac{kR^2}{2(R^2+(R-x)^2)^{3/2}} \quad (8)$$

其中 x 为轴线上到左边线圈中心的距离。

要说明中心附近匀度很高, 核心是说明在

$x \in [0, R]$ 处 $\frac{dB}{dx} \approx 0$ 。

利用 Mathematica 帮助计算, 有

$$B'(x) = \frac{dB}{dx} = \frac{3kR^2(R-x)}{2(R^2+(R-x)^2)^{5/2}} - \frac{3kR^2x}{2(R^2+x^2)^{5/2}} \quad (11)$$

$$\text{有 } B'(R/2) = 0 \quad (12)$$

$$B''(x) = -\frac{3kR^2}{2(R^2+(R-x)^2)^{5/2}} + \frac{15kR^2(R-x)^2}{2(R^2+(R-x)^2)^{7/2}} + \frac{15kR^2x^2}{2(R^2+x^2)^{7/2}} - \frac{3kR^2}{2(R^2+x^2)^{5/2}} \quad (13)$$

$$\text{同样有 } B''(R/2) = 0 \quad (14)$$

其中 $k = \mu_0 N_0 I$ 。

⑨

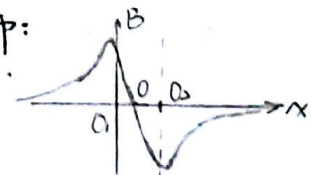
$$B'''(x) = -\frac{45kR^2(R-x)}{2(R^2+(R-x)^2)^{7/2}} + \frac{105kR^2(R-x)^3}{2(R^2+(R-x)^2)^{9/2}} - \frac{105kR^2x^3}{2(R^2+x^2)^{9/2}} + \frac{45kR^2x}{2(R^2+x^2)^{7/2}} \quad (15)$$

$$\text{也有 } B'''(R/2) = 0 \quad (16)$$

由于 $B'(R/2) = 0$, 且 $B''(R/2) = 0$, 因此在 $R/2$ 附近 $B'(x)$ 值与 0 接近; 又 $B'(R/2) = 0$, 因此 $B'(x)$ 在 $R/2$ 附近的更大区间内, 与 0 更接近, 而 $B'(x)$ 即为 $B(x)$ 的变化率, 因此 $R/2$ 附近 $B(x)$ 的值变化较小, 即磁场较为均匀。

$$\text{③ 则 } B' = \frac{kR^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}} - \frac{kR^2}{2(R^2+(R-x)^2)^{3/2}}, \quad (17)$$

因此磁场分布:



3. ① 因为移动测试架后, 地磁场和环境其他干扰磁场可能发生改变, 需要重新调零。

② 需要。如果测试架方向发生改变, 那么仍然需要重新调零。