

实验二 磁场的测量

本实验的内容出自《电磁学》中的知识点，如霍尔效应，亥姆霍兹线圈，磁感应强度的计算与测量。

本实验分为两个部分，第一部分是利用霍尔效应实验仪测量磁感应强度，第二个部分是亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量。

第一部分：利用霍尔效应实验仪测量磁感应强度

【实验简介】

霍尔效应是电磁效应的一种，这一现象是美国物理学家霍尔于 1879 年在研究金属的导电机理时发现的。它定义了磁感应强度和感应电压之间的关系，这种效应和传统的电磁感应完全不同。当电流通过一个位于磁感应强度中的导体的时候，磁感应强度会对导体中的电子产生一个垂直于电子运动方向上的作用力，从而在垂直于导体与磁感线的两个方向上产生电势差。

霍尔效应对金属来说并不显著，但对半导体非常显著。霍尔效应可以测定载流子浓度及载流子迁移率等重要参量，以及判断材料的导电类型，是研究半导体材料的重要手段。还可以用霍尔效应测量直流或交流电路中的电流强度和功率以及把直流转成交流电流并对它进行调制、放大。

用霍尔效应制作的传感器广泛用于磁感应强度、位置、位移、转速的测量。在汽车上应用的霍尔器件有：速度表、里程表、ABS 系统中的速度传感器、汽车点火系统等。

在有关磁现象的研究和应用中，霍尔效应及其元件是不可缺少的。利用它观测磁感应强度直观，干扰小，灵敏度高，效果明显。

在霍尔效应发现约 100 年后，德国物理学家克利青等在研究极低温度和强磁感应强度中的半导体时发现了量子霍尔效应，这是当代凝聚态物理学令人惊异的进展之一，克利青为此获得了 1985 年的诺贝尔物理学奖。之后，美籍华裔物理学家崔琦和美国物理学家劳克林、施特默在更强磁感应强度下研究量子霍尔效应时发现了分数量子霍尔效应，这个发现使人们对量子现象的认识更进一步，他们为此获得了 1998 年的诺贝尔物理学奖。

【实验原理】

1. 霍尔效应

霍尔效应从本质上讲，是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力的作用而引起的偏转。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷在不同侧的聚积，从而形成附加的横向电场。如图 1 所示，磁场 B 位于 Z 的正向，与之垂直的半导体薄片上沿 X 正向通以电流 I_s （称为工作电流），假设载流子为电子（N 型半导体材料），它沿着与电流 I_s 相反的 X 负向运动。

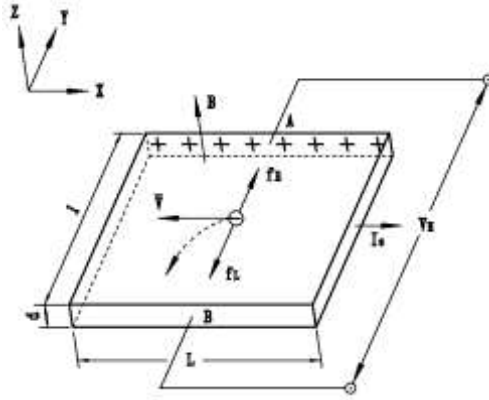


图1 霍尔效应示意图

由于洛伦兹力 f_L 作用，电子即向图中虚线箭头所指的位于 y 轴负方向的 B 侧偏转，并使 B 侧形成电子积累，而相对的 A 侧形成正电荷积累。与此同时运动的电子还受到由于两种积累的异种电荷形成的反向电场力 f_E 的作用。随着电荷积累的增加， f_E 增大，当两力大小相等（方向相反）时， $f_L = -f_E$ ，则电子积累便达到动态平衡。这时在 A 、 B 两端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H ，相应的电势差称为霍尔电势 V_H 。

设电子按均一速度 \bar{V} ，向图示的 X 负方向运动，在磁场 B 作用下，所受洛伦兹力为：

$$f_L = -e\bar{V}B$$

式中： e 为电子电量， \bar{V} 为电子漂移平均速度， B 为磁感应强度。

同时，电场作用于电子的力为：

$$f_E = -eE_H = -eV_H / l$$

式中： E_H 为霍尔电场强度， V_H 为霍尔电势， l 为霍尔元件宽度

当达到动态平衡时：

$$f_L = -f_E \quad \bar{V}B = V_H / l \quad (1)$$

设霍尔元件宽度为 l ，厚度为 d ，载流子浓度为 n ，则霍尔元件的工作电流为

$$I_s = ne\bar{V}ld \quad (2)$$

由(1)、(2)两式可得：

$$V_H = E_H l = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (3)$$

即霍尔电压 V_H (A 、 B 间电压)与 I_s 、 B 的乘积成正比，与霍尔元件的厚度成反比，比例系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数（严格来说，对于半导体材料，在弱磁场下应引入一个修正因子 $A = \frac{3\pi}{8}$ ，从而有 $R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{ne}$ ），它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数，根据材料的电导率 $\sigma = ne\mu$ 的关系，还可以得到：

$$R_H = \mu / \sigma = \mu p \text{ 或 } \mu = |R_H| \sigma \quad (4)$$

式中： μ 为载流子的迁移率，即单位电下载流子的运动速度，一般电子迁移率大于空穴迁移率，因此制作霍尔元件时大多采用 N 型半导体材料。

当霍尔元件的材料和厚度确定时，设：

$$K_H = R_H / d = l / ned \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中得：

$$V_H = K_H I_s B \quad (6)$$

式中： K_H 称为元件的灵敏度，它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流下

的霍尔电势大小，其单位是 $[mV/mA \cdot T]$ ，一般要求 K_H 愈大愈好。由于金属的电子浓度 (n) 很高，所以它的 R_H 或 K_H 都不大，因此不适宜作霍尔元件。此外元件厚度 d 愈薄， K_H 愈高，所以制作时，往往采用减少 d 的办法来增加灵敏度，但不能认为 d 愈薄愈好，因为此时元件的输入和输出电阻将会增加，这对霍尔元件是不希望的。本实验采用的双线圈霍尔片的厚度 d 为 $0.2mm$ ，宽度 l 为 $2.5mm$ ，长度 L 为 $3.5mm$ 。螺线管霍尔片的厚度 d 为 $0.2mm$ ，宽度 l 为 $1.5mm$ ，长度 L 为 $1.5mm$ 。

应当注意：当磁感应强度 B 和元件平面法线成一角度时（如图2），作用在元件上的有效磁场是其法线方向上的分量 $B \cos \theta$ ，此时：

$$V_H = K_H I_s B \cos \theta$$

所以一般在使用时应调整元件两平面方位，使 V_H 达到最大，即： $\theta = 0$ ，这时有：

$$V_H = K_H I_s B \cos \theta = K_H I_s B \quad (7)$$

由式(7)可知，当工作电流 I_s 或磁感应强度 B ，两者之一改变方向时，霍尔电势 V_H 方向随之改变；若两者方向同时改变，则霍尔电势 V_H 极性不变。

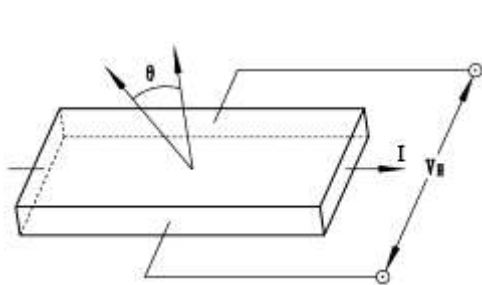


图 2

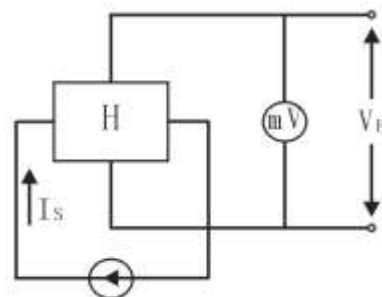


图 3

霍尔元件测量磁场的基本电路（如图3），将霍尔元件置于待测磁场的相应位置，并使元件平面与磁感应强度 B 垂直，在其控制端输入恒定的工作电流 I_s ，霍尔元件的霍尔电势输出端接毫伏表，测量霍尔电势 V_H 的值。

2. 实验系统误差及其消除（消除霍尔元件副效应的影响）

测量霍尔电势 V_H 时，不可避免的会产生一些副效应，由此而产生的附加电势叠加在霍尔电势上，形成测量系统误差，这些副效应有：

(1) 不等位电势 V_0

由于制作时，两个霍尔电势不可能绝对对称的焊在霍尔片两侧（图5a）、霍尔片电阻率不均匀、控制电流极的端面接触不良（图5b）都可能造成A、B两极不处在同一等位面上，此时虽未加磁场，但A、B间存在电势差 V_0 ，此称不等位电势， $V_0 = I_s R_0$ ， R_0 是两等位面间的电阻，由此可见，在 R_0 确定的情况下， V_0 与 I_s 的大小成正比，且其正负随 I_s 的方向而改变。

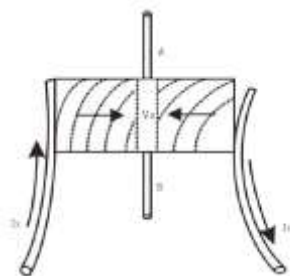


图 5a

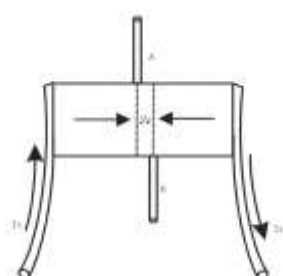


图 5b

(2) 爱廷豪森效应

当元件 X 方向通以工作电流 I_s ，Z 方向加磁场 B 时，由于霍尔片内的载流子速度服从统计分布，有快有慢。在到达动态平衡时，在磁场的作用下慢速快速的载流子将在洛伦兹力和霍尔电场的共同作用下，沿 y 轴分别向相反的两侧偏转，这些载流子的动能将转化为热能，使两侧的温升不同，因而造成 y 方向上的两侧的温差 ($T_A - T_B$)。因为霍尔电极和元件两者材料不同，电极和元件之间形成温差电偶，这一温差在 A、B 间产生温差电动势 V_E ， $V_E \propto IB$ 。这一效应称爱廷豪森效应， V_E 的大小与正负符号与 I 、 B 的大小和方向有关，跟 V_H 与 I 、 B 的关系相同，所以不能在测量中消除。

(3) 伦斯脱效应

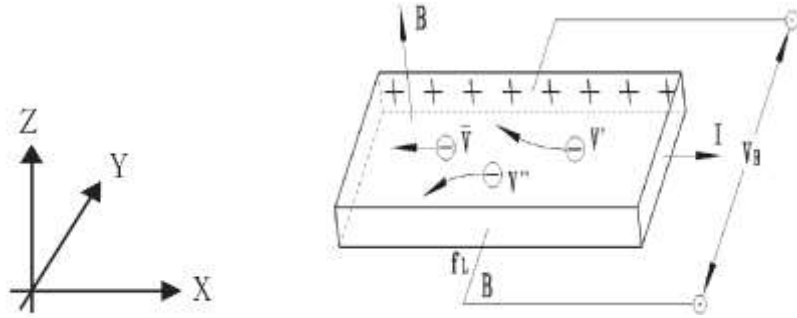


图 6 正电子运动平均速度 图中 $V' < \bar{V}$ $V'' > \bar{V}$

由于控制电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同，控制电流在两电极处将产生不同的焦耳热，引起两电极间的温差电动势，此电动势又产生温差电流（称为热电流） Q ，热电流在磁场作用下将发生偏转，结果在 y 方向上产生附加的电势差 V_H ，且 $V_H \propto QB$ 这一效应称为伦斯脱效应，由上式可知 V_H 的符号只与 B 的方向有关。

(4) 里纪-杜勒克效应

如 (3) 所述霍尔元件在 x 方向有温度梯度 $\frac{dT}{dx}$ ，引起载流子沿梯度方向扩散而有热电流 Q 通过元件，在此过程中载流子受 Z 方向的磁场 B 作用下，在 y 方向引起类似爱廷豪森效应的温差 $T_A - T_B$ ，由此产生的电势差 $V_H \propto QB$ ，其符号与 B 的方向有关，与 I_s 的方向无关。

为了减少和消除以上效应的附加电势差，利用这些附加电势差与霍尔元件工作电流 I_s ，磁场 B （即相应的励磁电流 I_M ）的关系，采用对称（交换）测量法进行测量。

$$\text{当 } +I_s, +I_M \text{ 时} \quad V_{AB1} = +V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R$$

$$\text{当 } +I_s, -I_M \text{ 时} \quad V_{AB2} = -V_H + V_0 - V_E + V_N + V_R$$

$$\text{当 } -I_s, -I_M \text{ 时} \quad V_{AB3} = +V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R$$

$$\text{当 } -I_s, +I_M \text{ 时} \quad V_{AB4} = -V_H - V_0 - V_E - V_N - V_R$$

对以上四式作如下运算则得：

$$\frac{1}{4} (V_{AB1} - V_{AB2} + V_{AB3} - V_{AB4}) = V_H + V_E$$

可见，除爱廷豪森效应以外的其他副效应产生的电势差会全部消除，因爱廷豪森效应所产生的电势差 V_E 的符号和霍尔电势 V_H 的符号，与 I_s 及 B 的方向关系相同，故无法消除，但在非大电流、非强磁场下， $V_H \gg V_E$ ，因而 V_E 可以忽略不计，由此可得：

$$V_H \approx V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (8)$$

【实验目的】

- 1、霍尔效应原理及霍尔元件有关参数的含义和作用
- 2、测绘霍尔元件的 V_H-I_s , V_H-I_M 曲线, 了解霍尔电势差 V_H 与霍尔元件工作电流 I_s 、磁感应强度 B 及励磁电流 I_M 之间的关系。
- 3、学习利用霍尔效应测量磁感应强度 B 及磁场分布。
- 4、学习用“对称交换测量法”消除负效应产生的系统误差。

【实验仪器】

DH4512D 霍尔效应实验仪由实验架和测试仪二个部分组成。图 7 为 DH4512D 霍尔效应实验仪测试架平面图; 图 8 为 DH4512D 霍尔效应实验仪测试仪面板图。

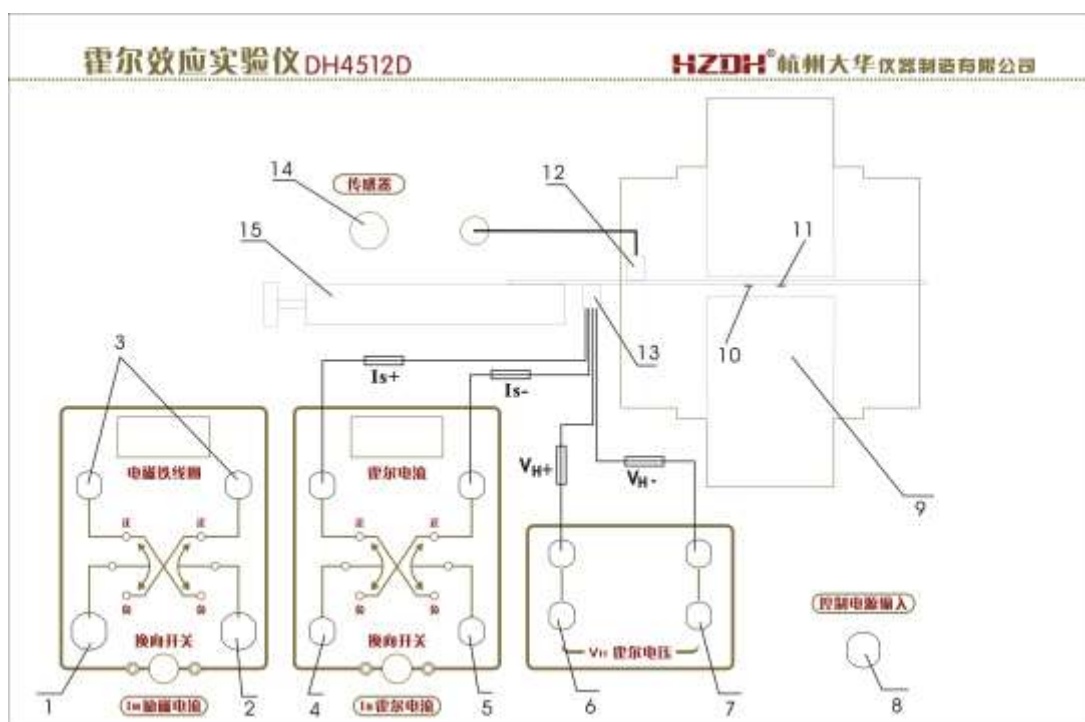


图 7 DH4512D 霍尔效应实验仪 测试架平面图

1. 电磁铁励磁电流 I_M 输入+ (与测试仪对应 I_M+ 输出相连)
2. 电磁铁励磁电流 I_M 输入- (与测试仪对应 I_M- 输出相连)
3. 电磁铁线圈端 (内部已连接到电磁铁线圈, 无需再连线)
4. 霍尔工作电流 I_s+ 输入 (与测试仪对应 I_s+ 输出相连)
5. 霍尔工作电流 I_s- 输入 (与测试仪对应 I_s- 输出相连)
6. 霍尔电压输出正极 V_H+ (与测试仪对应 V_H+ 输入相连)
7. 霍尔电压输出正极 V_H- (与测试仪对应 V_H- 输入相连)
8. 控制电源输入 (继电器控制工作电源, 与测试仪机箱后面板控制电源输出相连)
9. 电磁铁 (由铁芯和线圈组成, 用于产生磁场)
10. 霍尔元件 (被测霍尔元件, 用于研究其霍尔效应特性)
11. 霍尔传感器 (用于测量电磁铁磁场)

12. 霍尔传感器信号输出插座，通过连接线内接到传感器插座 14 上；
13. 霍尔元件引脚插座（被测霍尔元件，共四线输出，分别为 I_{s+} 、 I_{s-} 、 V_{H+} 和 V_{H-} ，每根线上均有号码管进行标示，连接时注意脚位）
14. 霍尔传感器插座（与测试仪毫特计传感器插座相连）
15. 可调移动尺，微调霍尔元件在电磁铁间隙中的位置

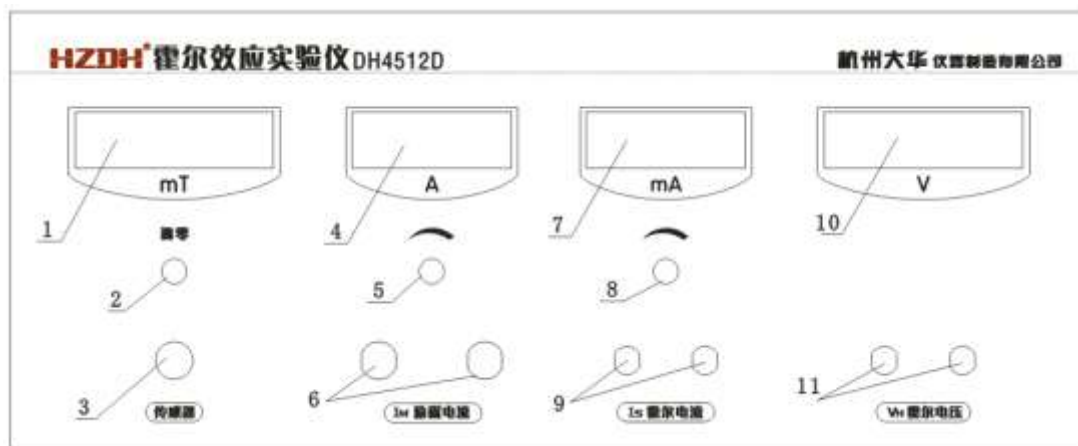


图 8 DH4512D 霍尔效应实验仪 测试仪面板图

1. 毫特计显示窗 2. 毫特计调零电位器 3. 毫特计传感器接口
4. I_M 励磁电流显示 5. I_M 励磁电流调节电位器 6. I_M 励磁电流输出接口
7. I_s 霍尔工作电流显示 8. I_s 霍尔工作电流调节电位器 9. I_s 霍尔工作电流输出
10. 霍尔电压 V_H 显示 11. 霍尔电压 V_H 输入接口

【使用说明】

- 1、测试仪的供电电源为交流 220V，50Hz，电源进线为单相三线。
- 2、电源插座安装在机箱背面，保险丝为 1A，置于电源插座内，电源开关在面板的左侧。
- 3、测试仪面板上的“ I_M 输出”，“ I_s 输出”和“ V_H 输入”三对接线柱应分别与测试架上的三对相应的接线柱正确连接。
- 4、将控制电源连接线一端插入测试仪背部的控制电源输出插孔，另一端连接到测试架的控制电源输入插孔。
- 5、仪器开机前应将 I_s 、 I_M 调节旋钮逆时针方向旋到底，使其输出电流趋于最小状态，然后再开机。
- 6、仪器接通电源后，预热数分钟即可进行实验。
- 7、“ I_s 调节”和“ I_M 调节”分别来控制样品工作电流和励磁电流的大小，其电流随旋钮顺时针方向转动而增加，细心操作。
- 8、关机前，应将“ I_s 调节”和“ I_M 调节”旋钮逆时针方向旋到底，使其输出电流趋于零，然后才可切断电源。
- 9、继电器换向开关的使用说明

当未按下转换开关时，继电器线包不加电，常闭端与动触点相连接；当按下按钮开关时，继电器吸合，常开端与动触点相连接, 实现连接线的转换。由此可知，通过按下、按上转换开关，可以实现与继电器相连的连接线的换向功能。

本测试架内部定义：按下转换开关，上面两排指示灯亮，代表电流为正向；转换开关弹起时，下面两排指示灯亮，代表电流为负向。

【实验内容】

- 1、研究霍尔电势 V_H 与工作电流 I_S 之间的关系
- 2、研究霍尔电势 V_H 与磁感应强度 B 之间的关系
- 3、研究磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 之间的关系
- 4、霍尔元件的霍尔灵敏度
- 5、测量电磁铁磁场分布

【实验方法与步骤】

一、按仪器面板上的文字符号提示将霍尔效应测试仪与测试架正确连接，参见接线图9。

1、将测试仪面板上的“ I_M 输出”，“ I_S 输出”和“ V_H 输入”三对接线柱分别与测试架上的三对相应的接线柱正确连接。

2、将控制电源连接线一端插入测试仪背部的控制电源输出插孔，另一端连接到测试架的控制电源输入插孔。

3、将测试仪的传感器接口与测试架上传感器接口相连。

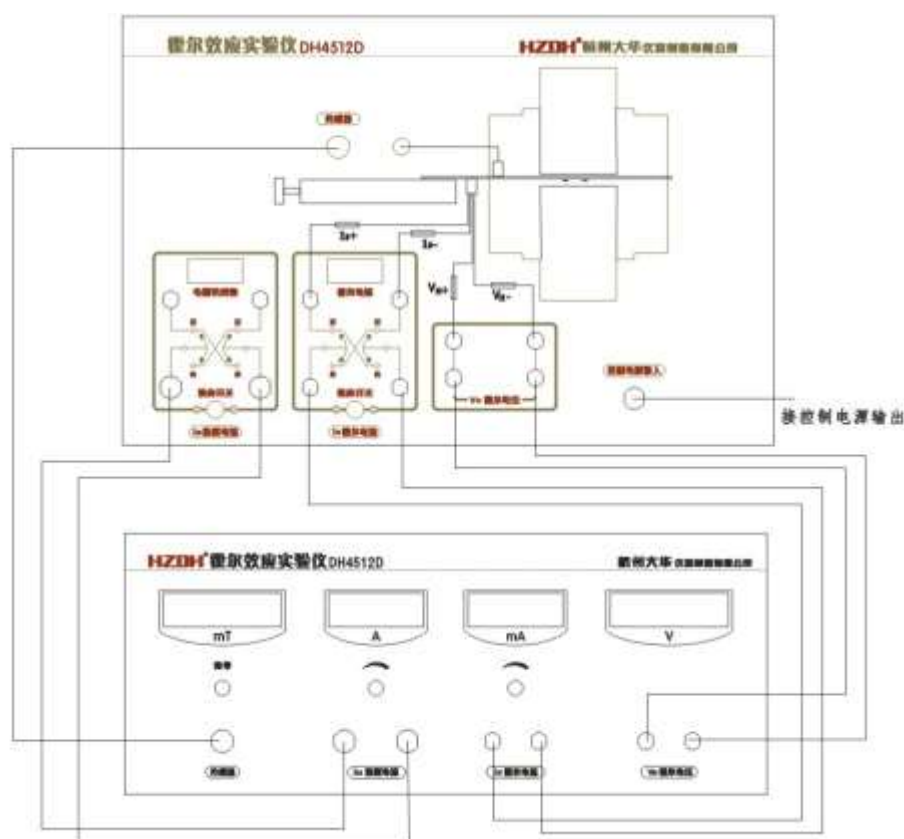


图9 实验接线图

二、研究霍尔效应与霍尔元件特性

1、测量霍尔电压 V_H 与工作电流 I_s 的关系

将霍尔元件移至电磁铁中心，在 $I_M=0$ 的情况下，调零毫特计；调节 $I_M=300\text{mA}$ ，调节 $I_s=0.5\text{mA}$ ，按表（1）中 I_M ， I_s 正负情况切换“测试架”上的电子开关方向，分别测量霍尔电压 V_H 值（ V_1 ， V_2 ， V_3 ， V_4 ）填入表（1）。以后 I_s 每次递增 0.50mA ，测量各 V_1 ， V_2 ， V_3 ， V_4 值。绘出 I_s-V_H 曲线，验证线性关系。

表 1 V_H-I_s $I_M=300\text{mA}$

$I_s(\text{mA})$	$V_1(\text{mV})$	$V_2(\text{mV})$	$V_3(\text{mV})$	$V_4(\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$
	$+I_M + I_s$	$+I_M - I_s$	$-I_M - I_s$	$-I_M + I_s$	
0.50					
1.00					
1.50					
2.00					
2.50					
3.00					

2、测量霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 的关系，磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 的关系

1) 先将 I_M 、 I_s 调零，调节 I_s 至 1.00mA 。

2) 调节 $I_M=50$ 、 100 、 150 …… 500mA (间隔为 50mA)，分别测量霍尔电压 V_H 值和磁感应强度 B 值，填入表（2）和表（3）中。

3) 根据表（2）和表（3）中所测得的数据，绘出 V_H-B 曲线，并作曲线拟合，验证线性关系。

4) 根据表（2）和表（3）中所测得的数据，绘出 $B-I_M$ 曲线，并作曲线拟合，验证线性关系。

表 2 V_H-I_M $I_s=1.00\text{mA}$

$I_M(\text{mA})$	$V_1(\text{mV})$	$V_2(\text{mV})$	$V_3(\text{mV})$	$V_4(\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$
	$+I_M + I_s$	$+I_M - I_s$	$-I_M - I_s$	$-I_M + I_s$	
50					
100					
150					
.....					
500					

表 3 $B-I_M$ $I_s=1.00\text{mA}$

$I_M(\text{mA})$	$B_1(\text{mT})$	$B_2(\text{mT})$	$B_3(\text{mT})$	$B_4(\text{mT})$	$B = \frac{B_1 + B_2 - B_3 - B_4}{4} (\text{mT})$
	$+I_M + I_s$	$+I_M - I_s$	$-I_M - I_s$	$-I_M + I_s$	
50					
100					
150					
.....					

500					
-----	--	--	--	--	--

3、计算霍尔元件的霍尔灵敏度

如果已知 B ，根据公式 $V_H = K_H I_S B \cos \theta = K_H I_S B$ 可知

$$K_H = \frac{V_H}{I_S B} \quad (9)$$

根据 V_H — B 曲线，求出曲线斜率 K_{H-B} ，根据公式 (10) 得：

$$K_H = \frac{K_{H-B}}{I_S} \quad (10)$$

4、测量电磁铁磁场沿水平方向分布（选做）

1) 在 $I_M=0$ 的情况下，调零毫特计。

2) 调节 $I_M=400\text{mA}$ ，调节移动尺的位置，每 2mm 记录毫特计读数值，填入表格(4)。

表 4 $I_M=400\text{mA}$

X/mm	44	42	40	38	36	34	32	30
B/mT								
X/mm	28	26	24	22	20	18	16	14
B/mT								

【实验注意事项】

1. 当霍尔片未连接到实验架，并且实验架与测试仪未连接好时，严禁开机加电，否则，极易使霍尔片遭受冲击电流而使霍尔片损坏。

2. 霍尔片性脆易碎、电极易断，严禁用手去触摸，以免损坏！在需要调节霍尔片位置时，必须谨慎。

3. 加电前必须保证测试仪的“ I_S 调节”和“ I_M 调节”旋钮均置零位（即逆时针旋到底），严防 I_S 、 I_M 电流未调到零就开机。

4. 测试仪的“ I_S 输出”接实验架的“ I_S 输入”，“ I_M 输出”接“ I_M 输入”。决不允许将“ I_M 输出”接到“ I_S 输入”处，否则一旦通电，会损坏霍尔片！

5. 为了不使电磁铁线圈过热而受到损害，或影响测量精度，除在短时间内读取有关数据外，其余时间最好断开 I_M 励磁电流或者调到最小。

6. 注意：移动尺的调节范围有限！在调节到两边停止移动后，不可继续调节，以免因错位而损坏移动尺。

【实验思考题】

- 分析本实验主要误差来源，计算磁感应强度 B 的合成不确定度（分别取 $I_M=1.0\text{ A}$ ， $I_H=10\text{ mA}$ ）。

2. 以简图示意，用霍尔效应法判断霍尔片上磁感应强度方向。
3. 如何测量交变磁感应强度，写出主要步骤。

【第一部分实验附录】

1. 埃廷斯豪森效应

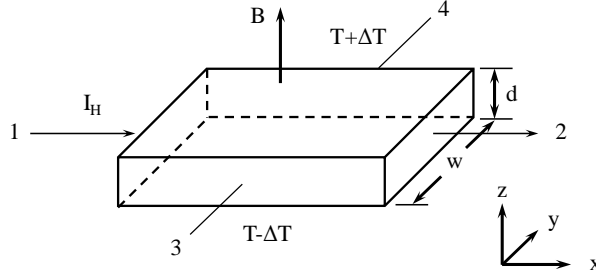


图 10 副效应示意图

1887 年埃廷斯豪森 (Ettingshausen) 发现当金属片沿 x 方向通过电流， z 方向加磁感应强度时 (见图 10)，则在金属片的两侧 (沿 y 方向)，有温度差，所产生的温度梯度与通过样品的电流与磁感应强度成正比，即

$$\frac{\partial T}{\partial y} = P I_H B \quad (11)$$

P 称为埃廷斯豪森系数。温度梯度引起温差电动势 U_E ，则

$$U_E = U(T - \Delta T, T + \Delta T)$$

所以

$$U_E \propto I_H B \quad (12)$$

温差电动势与霍尔电流 I_H 及磁感应强度 B 的方向有关。

2. 能斯特效应

能斯特 (Nernst) 和埃廷斯豪森在研究金属片的霍尔效应时发现，当有热流通过霍尔片时，在热能流及磁感应强度的垂直方向产生电动势 U_N 。改变磁感应强度或热流方向，电动势方向也将改变。这个现象称为能斯特效应。

在 p 型霍尔片中，如果样品电极 1, 2 端 (图 10) 接触电阻不同，就会产生不同的焦耳热，使两端温度不同。沿温度梯度 dT/dx 有扩散倾向的空穴受到磁感应强度的偏转，会建立一个横向电场，与洛伦兹力相抗衡，则在 y 方向电极 3, 4 之间产生电势差

$$U_N = -Q \frac{\partial T}{\partial x} B \quad (13)$$

其中 Q 称为能斯特系数。

U_N 的方向与磁感应强度 B 方向有关 (热流方向一定)，而与通过样品的电流 I_H 方向无关。

3. 里吉-勒迪克 (Righi-Leduc) 效应

1887 年里吉和勒迪克几乎同时发现，当有热流通过霍尔片时，与样品面垂直的磁感应强度可以使霍尔片的两旁产生温度差，如果改变磁感应强度方向，温度梯度的方向也随着改变。

在图 10 中 1, 2 端（沿 x 方向）有温度梯度 $\partial T/\partial x$ ，热流沿 x 方向通过，在 y 方向的 3, 4 端就会产生温度梯度，磁感应强度方向 B 沿 z 方向，则有

$$\frac{\partial T}{\partial y} = S \frac{\partial T}{\partial x} B \quad (14)$$

S 称为里吉-勒迪克系数。

根据埃廷斯豪森效应，在 y 方向的温度差产生温差电动势 U_R 。 U_R 和 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 成正比，所以 U_R 的方向随磁感应强度 B 的方向而改变，与霍尔电流 I_H 无关。

【参考文献】

[1] 吕斯骅，段家祗，张朝晖。新编基础物理实验（第二版），北京：高等教育出版社，2013。

[2] DH4512D 霍尔效应实验仪 使用说明书

第二部分：亥姆霍兹线圈的磁感应强度测量

【实验简介】

本部分实验用的是杭州大华科教仪器研究所生产的 DH4501 亥姆霍兹线圈磁感应强度实验仪。该型号亥姆霍兹线圈磁感应强度实验仪（以下简称磁感应强度实验仪）是集信号发生，信号感应，测量显示于一体的多用途实验仪器，可用于研究交流线圈磁感应强度分布，亥姆霍兹线圈磁感应强度分布。

该磁感应强度实验仪具有激励信号的频率可变、输出强度连续可调的特点，可以研究不同激励频率、不同磁感应强度下，探测线圈上产生不同感应电动势的情况。探测线圈由二维移动装置带动，可作横向、径向连续调节，还可作 360 度连续旋转，从而实现了探测线圈的三维连续可调。

这种结构方便测量载流圆形线圈和还木活字线圈的轴向上的磁感应强度分布，载流圆形线圈的径向磁感应强度分布情况、以及研究探测线圈平面的发现和载流圆形线圈的周线成不同夹角时所产生的感应电动势的值的规律。

该磁感应强度实验仪具有测量原理简单，测量方法简便以及测试灵敏度高优点。

【实验目的】

1. 掌握载流圆线圈的磁感应强度分布；
2. 掌握亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布。

【实验仪器与用具】

亥姆霍兹线圈磁感应强度实验仪由两个部分组成，亥姆霍兹线圈架部分（图 4 和图 5）和磁感应强度测量仪（见图 6）。

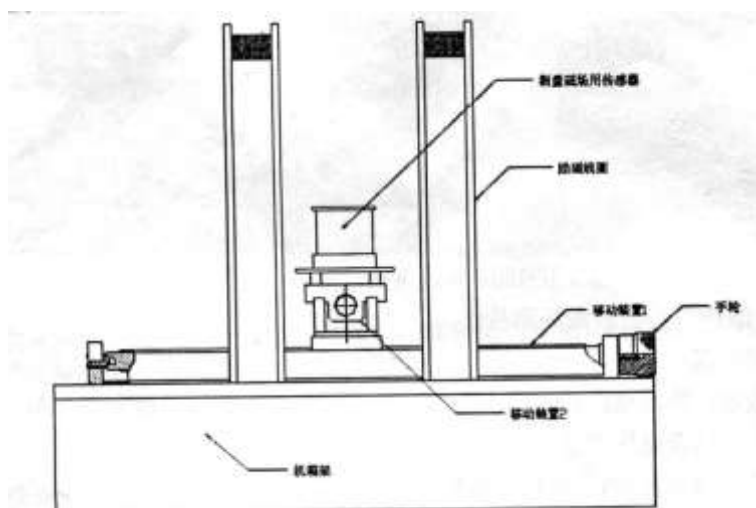


图 4 亥姆霍兹线圈架部分

亥姆霍兹线圈架部分包括有一个传感器盒，里面装有用于测量磁感应强度的感应线圈。



图 5 DH4501 亥姆霍兹线圈架面板



图 6 DH4501 亥姆霍兹线圈磁感应强度测量仪面板

1.主要技术指标如下：

1.1 亥姆霍兹线圈架

二个励磁线圈：线圈有效半径 105mm

单个线圈匝数 400 匝

二线圈中心间距 105mm

移动装置：轴向可移动距离 250mm，径向可移动距离 70mm

距离分辨率 1mm

探测线圈：匝数 1000，旋转角度 360 度。

1.2 DH4501 亥姆霍兹磁感应强度测量仪：

频率范围：20~200Hz，频率分辨率：0.1Hz，测量误差：0.1%

正弦波：输出电压幅度：最大 20Vp-p，输出电流幅度：最大 200mA

数显毫伏表电压测量范围：0~20mV，测量误差：1%

1.3 电源：220V±10%

1.4 外形尺寸：亥姆霍兹线圈架 340mm×270mm×250mm

磁感应强度测试仪 320mm×300mm×120mm

【实验原理】

1. 载流圆线圈与亥姆霍兹线圈的磁感应强度

1.1 载流圆线圈的磁感应强度

一半径为 R ，通以电流 I 的圆线圈，轴线上磁感应强度的公式为：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}} \quad (13)$$

式中 N_0 为圆线圈的匝数， X 为轴上某一点到圆心 O 的距离。 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。轴线上磁感应强度的分布如图 7 所示。

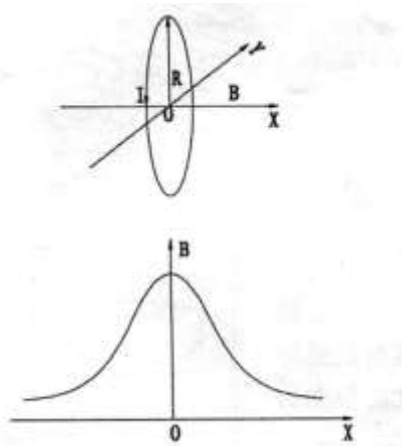


图 7 单个圆环线圈的磁感应强度分布示意图

本实验取 $N_0=400$ 匝， $R=105\text{mm}$ 。当 $f=120\text{Hz}$ ， $I=60\text{mA}$ （有效值），圆心 O 处 $X=0$ ，可计算得到单个圆线圈中的磁感应强度为： $B=0.144\text{mT}$ 。

1.2 亥姆霍兹线圈的磁感应强度

所谓亥姆霍兹线圈为两个相同线圈彼此平行且共轴，使线圈上通以相同方向电流 I ，理论计算证明：线圈距离 a 等于线圈半径 R 时，两个单个线圈的磁感应强度叠加在轴上（两个线圈的圆心连线）附近较大范围内的合磁感应强度是均匀的，如图 8 所示。

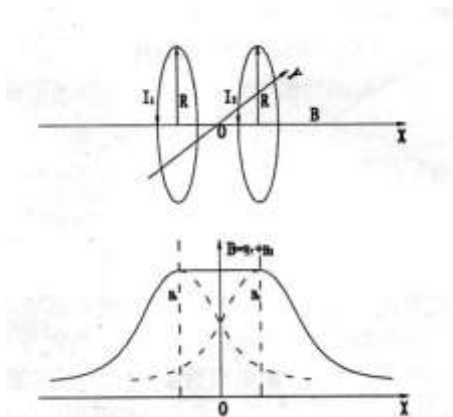


图 8 亥姆霍兹线圈的磁感应强度分布示意图

设 Z 为亥姆霍兹线圈中轴线上某一点离中心点 O 处的距离，则亥姆霍兹线圈轴线上改点的磁感应强度为：

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[R^2 + \left(\frac{R}{2} + z \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \left[R^2 + \left(\frac{R}{2} - z \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (14)$$

而在亥姆霍兹线圈轴线上中心 O 处， $Z=0$ ，磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R} \times \frac{16}{5^{3/2}} \quad (15)$$

当实验取 $N_0=400$ 匝， $R=105\text{mm}$ 。当 $f=120\text{Hz}$ ， $I=60\text{mA}$ （有效值）时，在中心 O 处 $Z=0$ ，可计算得到亥姆霍兹线圈（两个线圈的合成）磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R} \times \frac{16}{5^{3/2}} = 1.43 \times 1.431 = 2.05\text{mT}$$

1.3 电磁感应法测磁感应强度

1.3.1 电磁感应法测量原理

设由交流信号驱动的线圈产生的交变磁感应强度，它的磁感应强度的瞬时值为

$$B = B_m \sin \omega t$$

式中 B_m 为磁感应强度的峰值，其有效值记作 B ， ω 为角频率。磁感应强度中一探测线圈的磁通量为

$$\Phi = NSB_m \cos \theta \sin \omega t$$

式中： N 为探测线圈的匝数， S 为该线圈的截面积， θ 为 B 与线圈法线夹角。线圈产生的感应电动势为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{d\Phi}{dt} = NS\omega B_m \cos \theta \cos \omega t \\ &= -\varepsilon_m \cos \omega t \end{aligned}$$

式中 $\varepsilon_m = NS\omega B_m \cos \theta$ 是线圈法线和磁感应强度成 θ 角时，感应电动势的幅值。当 $\theta=0$ ， $\varepsilon_{\max} = NS\omega B_m$ ，这时的感应电动势的幅值最大。如果用数字式毫伏表测量此时线圈的电动势，则毫伏表的示值（有效值） U_{\max} 为 $\frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{2}}$ ，则

$$B_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{NS\omega} = \frac{\sqrt{2}U_{\max}}{NS\omega} \quad (16)$$

B 为磁感应强度有效值， B_m 为磁感应强度的峰值。由式（16）可计算出 B_m 来。

1.3.2 探测线圈的设计

实验中由于磁感应强度的不均匀性，探测线圈又不可能做得很小，否则会影响测量灵敏度。一般设计的线圈长度 L 和外径 D 有 $L=2/3 D$ 的关系，线圈的内径 d 与外径 D 有 $d \leq 3/D$ 的关系(本实验选 $D = 0.012 \text{ m}$ ， $N = 800$ 匝的线圈)。线圈在磁感应强度中的等效面积，经过理论计算，可用下式表示

$$S = \frac{13}{108} \pi D^2 \quad (17)$$

这样的线圈测得的平均磁感强度可以近似看成是线圈中心点的磁感应强度。本实验励磁电流由专用的交变磁感应强度测试仪提供。

$$B = \frac{54}{13\pi^2 ND^2 f} U_{max}$$

(18)

将不同的频率 f 代入上式就可以得出 B 。本实验的 $D=0.012\text{m}$ ， $N=1000$ 匝。

例如， $I=60\text{mA}$ ， $f=120\text{Hz}$ 时，交流毫伏表读数为 5.95mV ，则根据式 (18) 求得单个线圈的磁感应强度 $B=0.145\text{mT}$ 。

【实验使用方法】

1. 准备工作：仪器使用前，先**开机预热 10 分钟**。这段时间内，请使用者熟悉亥姆霍兹线圈测试架和磁感应强度测量仪的构成，各个接线端子的正确连线方法，以及仪器的正确操作方法。

2. 亥姆霍兹线圈架与磁感应强度测量仪之间的连线如图 9 所示。

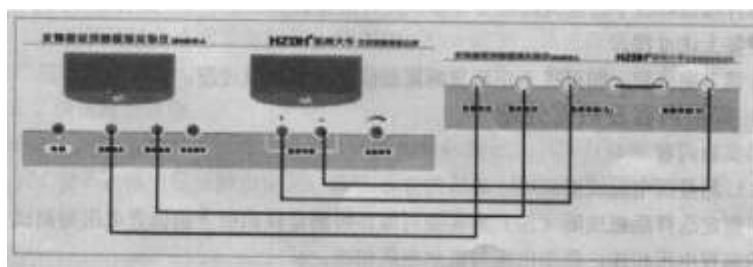


图 9 实验连线示意图

用随机带来的两头都是同轴插头的连接线将测量仪的偏置电压端与测试架的偏置电压端相连，将测量仪的霍尔电压端与测试架的霍尔电压端相连。

如果只是用二个线圈中的某一个产生磁感应强度时，可选择左边或者右边的线圈，从测量仪的励磁电流两端用两头都是插片的连接线接至测试架的励磁线圈两端，红接线柱与红接线柱相连，黑接线柱与黑接线柱相连。

用亥姆霍兹线圈(双个线圈)产生磁感应强度时，将励磁线圈(左)的黑色端子与励磁线圈(右)的红色端子用短接片短接。

3. 移动装置的使用方法

亥姆霍兹线圈的中心设有二维移动装置，其中长的一个移动装置用于测量轴向的磁感应强度分布：短的一个移动装置用于测量径向磁感应强度分布。慢慢转动手轮，移动装置上的霍尔磁传感器盒随之移动，通过转动二个移动架的手轮，可将霍尔磁传感器移动到需要的位置上。磁传感器的位置，也就是磁感应强度的位置由相应的指示标尺确定。用手转动传感器盒的有机玻璃罩就可转动探测线圈，改变测量角度。

调零完毕后，即可进入正常亥姆霍兹线圈磁感应强度测量过程。

【实验内容】

1 测量圆电流线圈轴线上磁感应强度的分布

按照实验要求连接。调节频率调节电位器，使频率表读数为 120Hz。调节磁感应强度实验仪的电流调节电位器，使励磁电流有效值为 $I=60\text{mA}$ ，以圆电流线圈中心为坐标原点，每隔 5mm 测一个 U_{\max} 值，测量过程中主义保持励磁电流值不变，并保证探测线圈发现方向与圆电流线圈轴线 D 的夹角为 0° 。

由于 0° 和 180° 都是最大值，但在实验中往往不相等，所以将两个数据都测出对比一下，正反方向测量误差不大于 2%，则制作一个方向数据即可。否则取平均值。

圆电流线圈轴线上磁感应强度分布测量数据记录于表格 4。

表格 4

轴向距离X (mm)	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
$U_{\max} \text{ (mV)}$															
测量值: $B = \frac{2.926}{f} U_{\max} \text{ (mT)}$															
计算值: $B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}} \text{ (mT)}$															
$f = 120 \text{ Hz}, I = 60 \text{ mA}, N_0 = 1000, R = 105 \text{ mm}$															

2 测量亥姆霍兹线圈轴线上磁感应强度的分布

按照实验要求连接。在励磁电流为零的情况下将磁感应强度清零。

把磁感应强度实验仪的两个线圈串联起来，接到磁感应强度测试仪的励磁电流两段。

调节频率电位器，使频率表读数为 120Hz。

调节磁感应强度测量仪的电流调节电位器，使励磁电流有效值为 60mA

以亥姆霍兹线圈中心为坐标原点，每隔 5mm 测一磁感应强度 U_{\max} 的值，测量过程中注意保持励磁电流值不变。

亥姆霍兹圈轴线上磁感应强度分布测量数据记录于表格 5。

表格 5

轴向距离X (mm)	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
$U_{\max} \text{ (mV)}$															
测量值: $B = \frac{2.926}{f} U_{\max} \text{ (mT)}$															
$f = 120 \text{ Hz}$															

3 测量亥姆霍兹线圈沿径向的磁感应强度分布

固定探测线圈法线方向和圆电流轴线 D 的夹角为 0° ，转动探测线圈径向移动手轮，每一步 5mm 测量一个数据，按正负方向测到边缘，记录数据并作出磁感应强度分布曲线图。

亥姆霍兹线圈磁感应强度径向分布测量数据记录于表格 6。

表格 6（注意下面表格里面写的是轴向是不对的，应该是径向）

轴向距离X (mm)	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
$U_{\max} \text{ (mV)}$															
测量值: $B = \frac{2.926}{f} U_{\max} \text{ (mT)}$															
$f = 120 \text{ Hz}$															

4 验证公式 $\varepsilon_m = NS\omega B_m \cos\theta$

$NS\omega B_m$ 不变时， ε_m 与 $\cos\theta$ 成正比。

按照实验要求，把探测线圈沿轴线固定在某一位置上，让探测线圈法线方向与圆电流

轴线 D 的夹角从 0°开始，逐步转移到 90°，180°，270°，再回到 0°。每改变 10°测一组数据。

探测线圈转角与感应电压数据记录于表格 7。

表格 7

探测线圈转角 θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U (mV)										
计算值: $U = U_{max} \cdot \cos\theta$										
探测线圈转角 θ	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
U (mV)										
计算值: $U = U_{max} \cdot \cos\theta$										
探测线圈转角 θ	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
U (mV)										
计算值: $U = U_{max} \cdot \cos\theta$										
探测线圈转角 θ	300	310	320	330	340	350	360			
U (mV)										
计算值: $U = U_{max} \cdot \cos\theta$										
$f = 120 \text{ Hz}$										

5 励磁电流大小对磁感应强度的影响

把探测线圈固定在亥姆霍兹线圈中心点，其法线方向与圆电流轴线 D 的夹角为 0°，并保持不变。调节磁感应强度测试仪输出电流频率，再 20Hz~150Hz 范围内，每次频率改变 10Hz，主次测量感应电动势的数值并记录。

励磁电流频率对磁感应强度的影响记录于表格 8。

表格 8

励磁电流频率 f (Hz)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
U_m (mV)														
测量值: $B = \frac{2.926}{f} U_{max} \text{ (mT)}$														
$I = 60 \text{ mA}$														

【实验注意事项】

1. 接线或测量数据时，要特别注意检查移动两个线圈时，是否满足亥姆霍兹线圈的条件。
2. 两个线圈采用串接或并接方式与电源相连时，必须注意磁感应强度的方向。如果接错线有可能使亥姆霍兹线圈中间轴线上磁感应强度为零。

【思考题】

1. 单线圈轴线上磁感应强度的分布规律如何？亥姆霍兹线圈是怎样组成的？其基本条件有哪些？它的磁感应强度分布特点怎样？
2. 探测线圈放入磁感应强度后，不同方向上毫伏表指示值不同，哪个方向最大？如何测准 U_{max} 值？指示值最小表示什么？
3. 分析圆电流磁感应强度分布的理论值与实验值的误差的产生原因。

【参考文献】

- [1] DH4501 亥姆霍兹线圈磁感应强度实验仪 使用说明书。