

# 浙江大学



## 本科实验报告

姓名：

---

学院： 生物医学工程与仪器科学学院

---

系： 生物医学工程

---

专业： 生物医学工程

---

学号：

---

指导教师： 陈凌翔

---

2025 年 4 月 24 日

# 浙江大学实验报告

课程名称： 生物医学传感与检测 实验类型：                     

实验项目名称： 霍尔传感器的特性及其应用

指导老师： 陈凌翔

实验地点： 教7西裙楼 - 301 实验日期： 2025 年 4 月 24 日

## 一、实验目的和要求

- 1、了解霍尔式传感器的结构和工作原理；
- 2、分析霍尔传感器特性（包括灵敏度、线性度）；
- 3、了解霍尔传感器在静态测量中的应用。
- 4、了解霍尔片在交流信号激励下的特性及其在振动测量中的应用。

## 二、实验内容和原理

图 8.1 中，处于磁场中的载流导体，当其中的电流方向与磁场方向不一致时，导体中的载流子（电子与空穴）受到相反方向的洛伦兹力而向导体的两个不同端面聚集，从而在两个端面之间产生电场，这种现象称为霍尔效应（Hall effect），产生的电势( $U_H$ )称为霍尔电势：

$$U_H = K_H IB$$

式中  $K_H$ ——霍尔片的灵敏度。

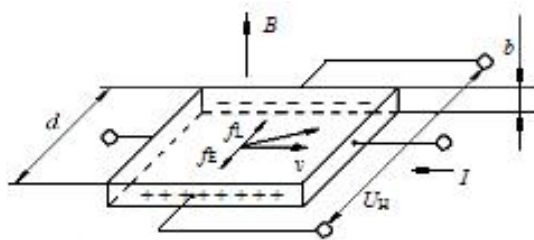


图 8.1 霍尔效应

图 8.2 是运用霍尔元件进行位移测量的实验装置。磁路系统由两个半环形永久磁钢组成，形成梯度磁场，位于梯度磁场中的霍尔元件（霍尔片）通过底座连接在振动台上。当霍尔片通以恒定的电流时，霍尔元件就有电压输出。如果改变振动台的位置，使霍尔片在梯度磁场中上下移动，输出的霍尔电势  $U_H$  值就取决于霍尔片在磁场中的位移量  $Y$ ，所以由霍尔电势的大小便可获得振动台的位移，其关系如图 8.3 所示。

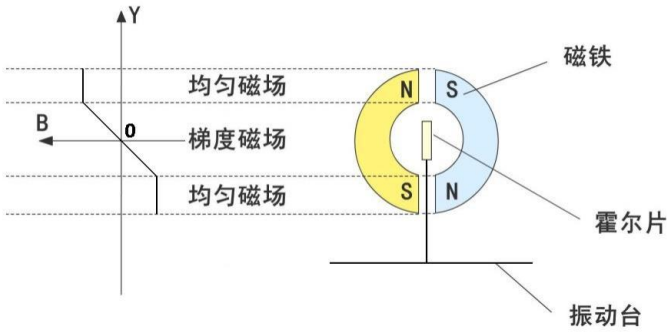


图 8.2 实验原理

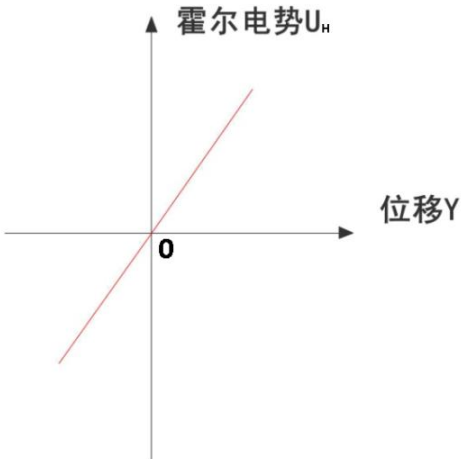


图 8.3 霍尔元件特性曲线

图 8.6 是交流信号激励下的霍尔式传感器振动测量系统。测量电路中采用相敏检波器，以保证测量电路的输出电压能充分反映被测位移量的变化。霍尔式传感器测量小位移时，输出信号过小，所以要接入放大器。相敏检波器要求参考电压与差动变压器式电感传感器的输出电压频率相同、相位相同或相反，因此需要在音频振荡器的输出与相敏检波器的参考电压输入端之间接入移相器。相敏检波器的输出信号经低通滤波器消除高频分量后，得到与霍尔片运动一致的有用信号。电桥电位器  $R_{W1}$  和  $R_{W2}$  用于直流不等位电势和交流不等位电势补偿：当霍尔

片位于梯度磁场的中间位置时，调节  $R_{W1}$  和  $R_{W2}$  使电路的输出最小，实现不等位电势补偿。

### 三、主要仪器设备

霍尔传感器、电桥、差动放大器 I、电压表、直流稳压电源、测微头、振动平台、电源。

### 四、操作方法和实验步骤

#### (一) 直流激励

- 1、观察霍尔传感器结构和位置。霍尔片安装在实验仪振动圆盘的支架上，两个半圆永久磁钢固定在实验仪的顶板上，二者组合成霍尔传感器。
- 2、差动变换(放大)器 I 调零(调零方法:用导线将差动变换器 I 的  $U_{in1}$ 、 $U_{in2}$ 、地短接，将差动变换器 I 的输出端与电压表的输入端正 (+) 相连，开启电源，调节差动变换器 I 的增益到最大位置，调整差动变换器 I 的调零旋钮使电压表显示为零)。关闭电源，根据图 8.4 接线， $R_{W1}$ 、 $R_0$  为电桥单元的直流电桥平衡网络。差动变换器 I 增益调至最大位置， 然后不再改变。



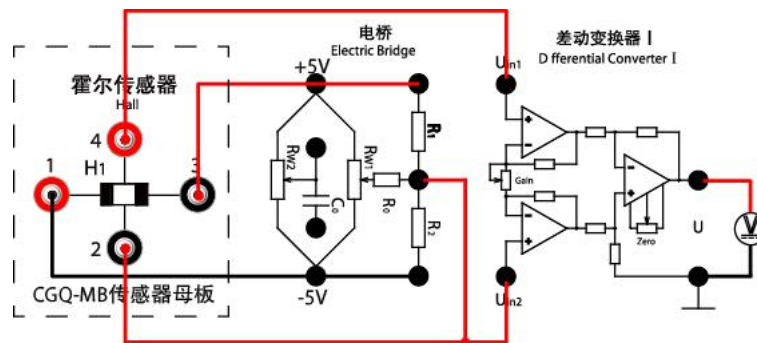


图 8.4 接线参考图

3、调好测微头，让测微头与振动台吸合，移动测微头使霍尔片位于半圆磁钢上下的中间位置（目测）。

4、开启电源，调整  $R_{W1}$  使电压表指示为零，如果电压表很难显示为零，可以适当调节测微头，让霍尔片位置微调，使电压表显示为零，标记此为位移零点，上下旋动测微头，记下对应的位移和电压表读数。建议每位移 0.2mm 读取一组数据，总位移  $\pm 4$  mm 或者测微头向上与振动台脱开为止。

作出输出电压  $U_H$  和位移  $Y$  的关系曲线，求其线性度和灵敏度。

5、卸下测微头。将低频振荡器的输出端与频率表的输入端及振动源相连，如图 8.5，使低频振荡器带动圆盘工作台振动。用示波器的两个通道同时观察差动放大器和低频振荡器的输出波形，调节低频振荡器的输出频率和输出幅度，观察差动放大器输出波形频率和振幅的变化。

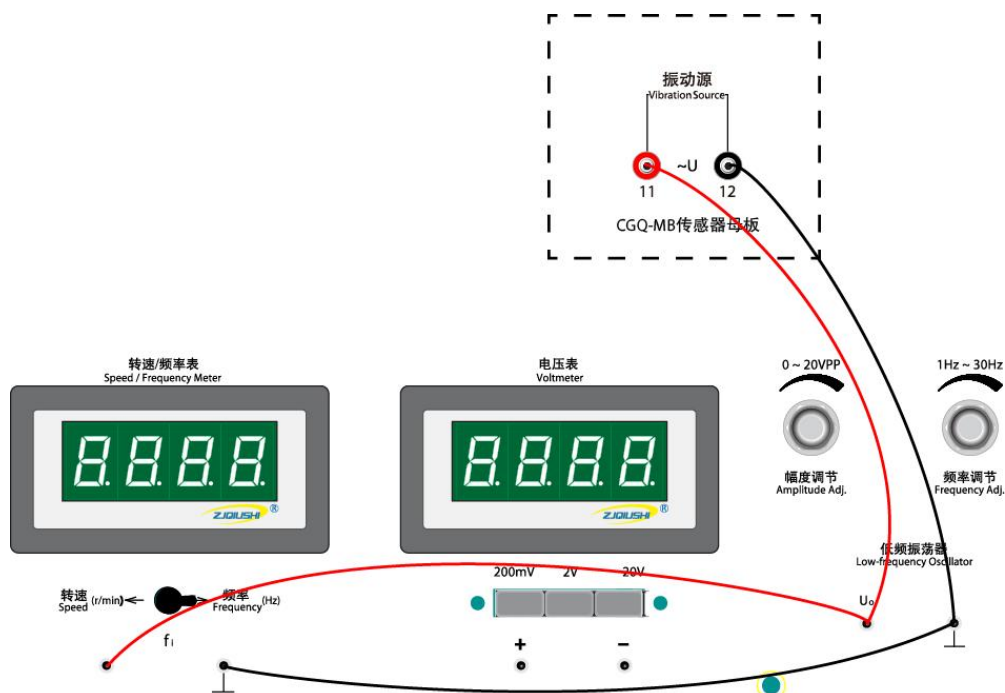


图 8.5 振动接线参考图

## (二) 交流激励

- 1、音频振荡器输出频率 5KHz、峰-峰值 4V。电压表选择 2V 量程。差动放大器 I 调零,增益最大。
- 2、按图 8.5 接线。

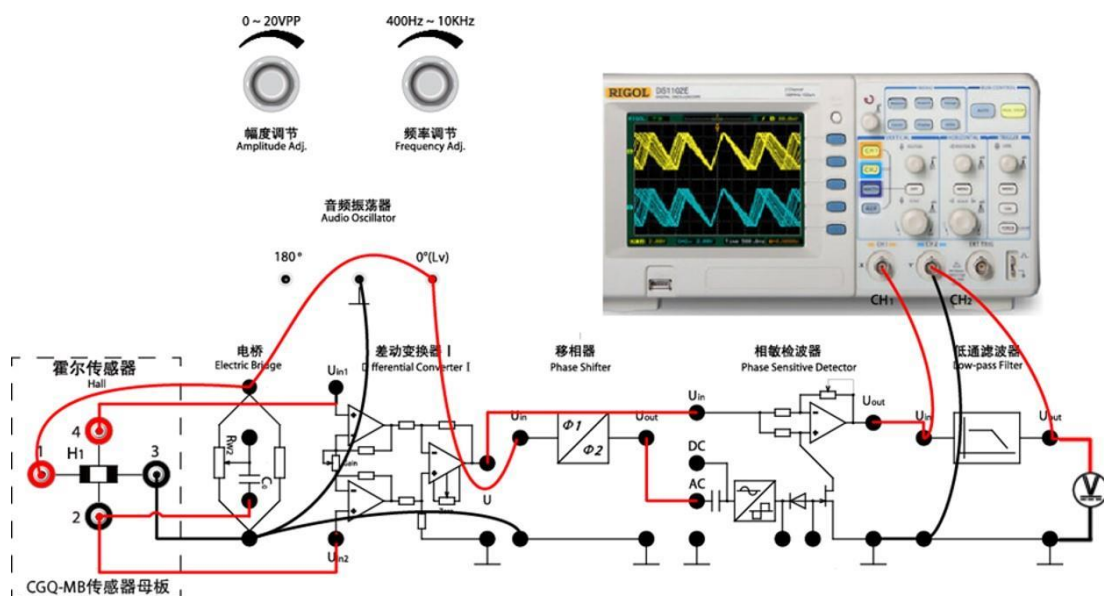


图 8.5 实验接线

- 3、将测微头与振动台吸合, 调节移相旋钮, 示波器观察相敏检波器输入端和参考端, 使两端相位同相或反相。
- 4、确定磁路中间位置: 霍尔片调到前面直流实验的位移零点, 观察系统输出波形和电压表读数, 调节电桥电位器 RW2 使电压表为零; 旋转测微头使振动台在  $\pm 4 \text{ mm}$  移动, 当振动台位于上下端点处电压表双向指示基本对称; 如果不对称, 调整位移零点位置, 重复这个步骤, 直至双向端点读数基本对称。
- 5、霍尔片回到最后确定的磁路中间位置(此时电压表为零), 旋动测微头  $\pm 4 \text{ mm}$ , 每间隔  $0.2 \text{ mm}$  用数字电压表读取相应电压值。也可以将霍尔片移到  $+4 \text{ mm}$  处, 从上往下测, 避免回程误差。
- 6、分离测微头与振动台, 将低频振荡器与振动源相连带动圆盘工作台振动。用示波器的两个通道同时观察差动放大器和低通滤波器的输出波形, 调节低频振荡器的输出频率和输出幅度, 观察两路信号的变化, 试说明在什么情况下要用到相敏检波器。

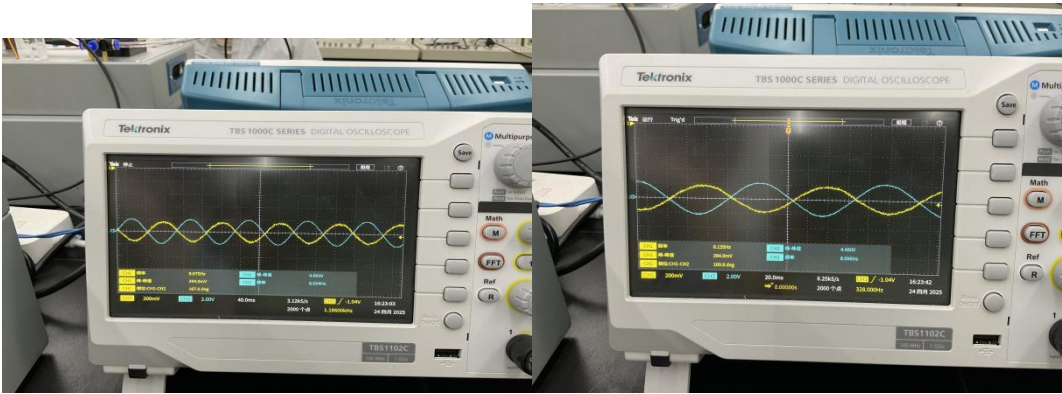


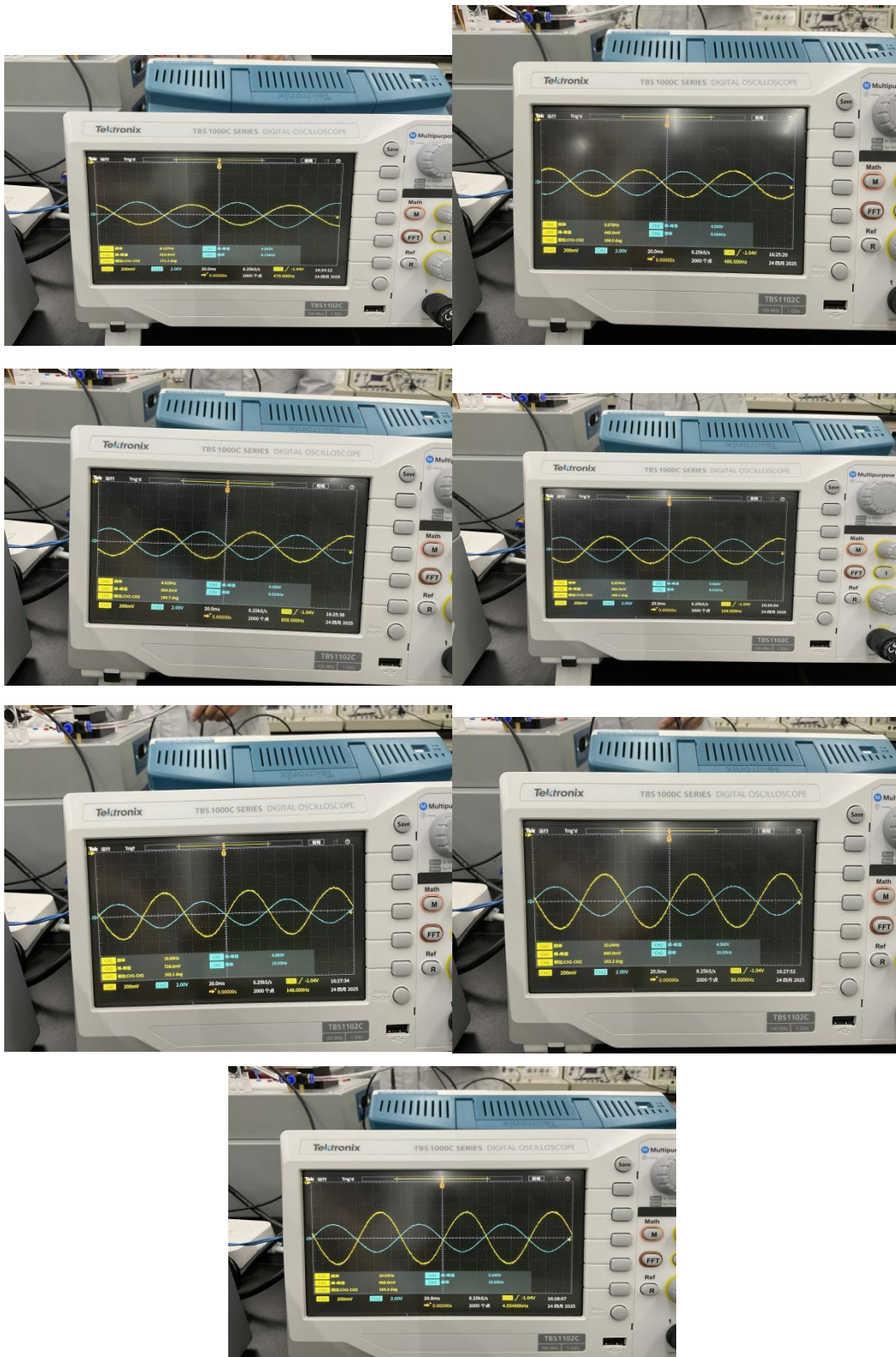
# 五、实验数据记录和处理

## (一) 直流激励

经目测确认中间位置为 10.5mm。

Y (mm)	U (V)	Y (mm)	U (V)
4	5.5	-0.2	-0.2
3.8	5.14	-0.4	-0.4
3.6	4.79	-0.6	-0.6
3.4	4.44	-0.8	-0.79
3.2	4.1	-1	-0.99
3	3.78	-1.2	-1.18
2.8	3.45	-1.4	-1.36
2.6	3.14	-1.6	-1.57
2.4	2.84	-1.8	-1.77
2.2	2.55	-2	-1.98
2	2.29	-2.2	-2.19
1.8	2.01	-2.4	-2.4
1.6	1.76	-2.6	-2.63
1.4	1.51	-2.8	-2.86
1.2	1.28	-3	-3.09
1	1.04	-3.2	-3.33
0.8	0.81	-3.4	-3.58
0.6	0.6	-3.6	-3.83
0.4	0.39	-3.8	-4.09
0.2	0.19	-4	-4.33



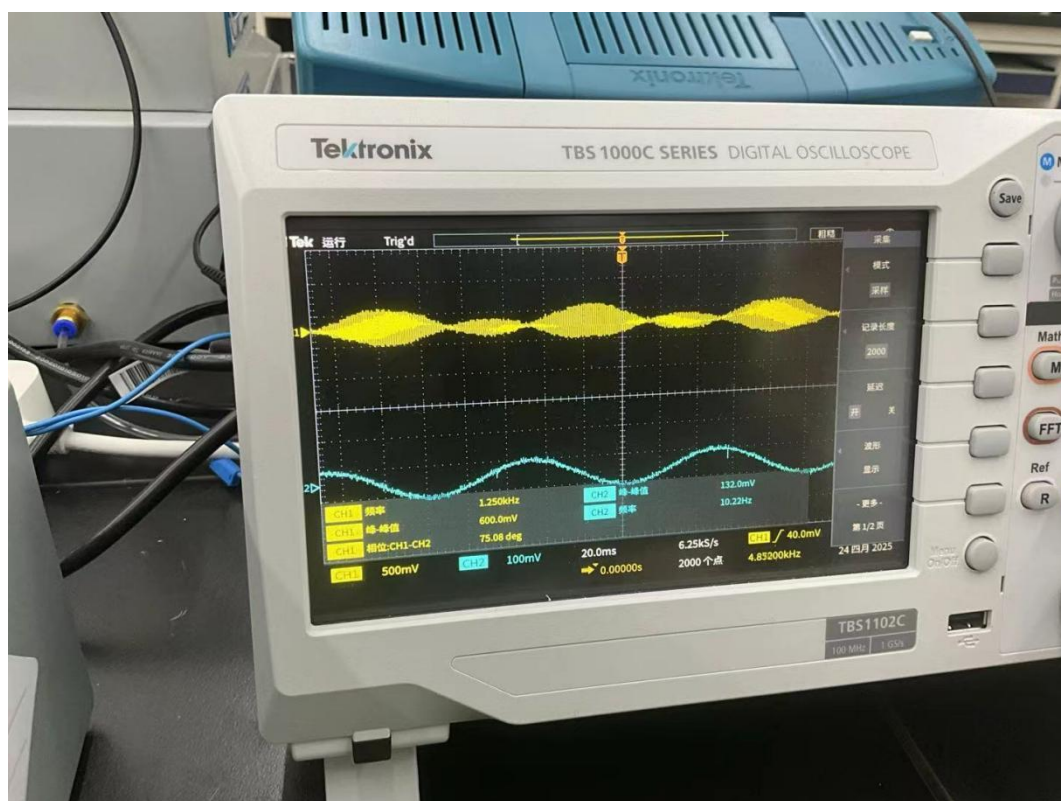


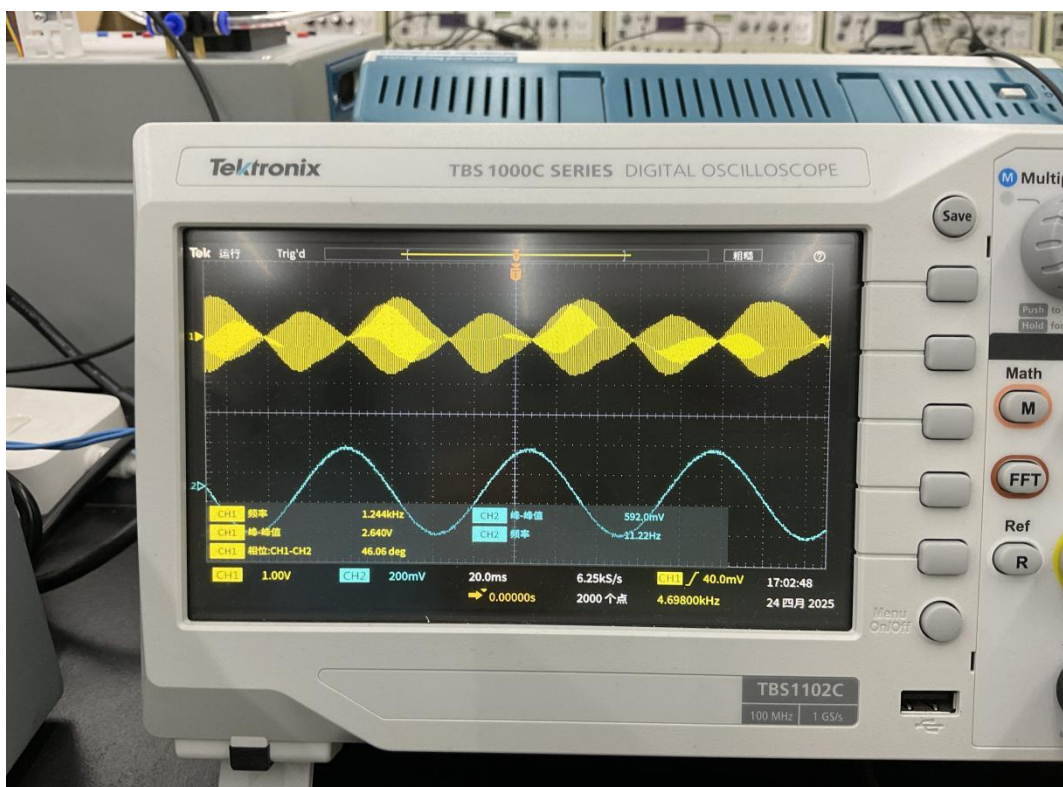
## (二) 交流激励

经调整后，确认磁路中间位置为  $Y=9.5\text{mm}$  处。



Y (mm)	U (V)	Y (mm)	U (V)
4	0.353	-0.2	-0.013
3.8	0.328	-0.4	-0.027
3.6	0.306	-0.6	-0.042
3.4	0.284	-0.8	-0.057
3.2	0.262	-1	-0.071
3	0.242	-1.2	-0.087
2.8	0.222	-1.4	-0.102
2.6	0.203	-1.6	-0.118
2.4	0.185	-1.8	-0.134
2.2	0.167	-2	-0.151
2	0.15	-2.2	-0.169
1.8	0.134	-2.4	-0.186
1.6	0.118	-2.6	-0.205
1.4	0.102	-2.8	-0.223
1.2	0.085	-3	-0.243
1	0.068	-3.2	-0.261
0.8	0.057	-3.4	-0.281
0.6	0.043	-3.6	-0.301
0.4	0.028	-3.8	-0.322
0.2	0.015	-4	-0.344



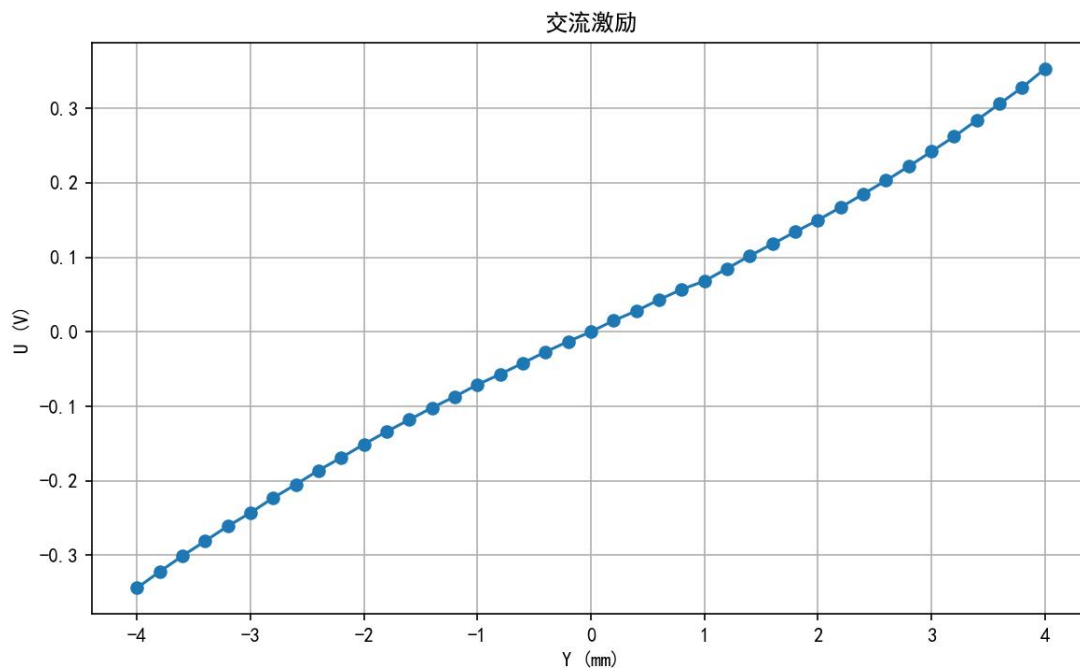


CH1 (黄色, 差动放大器输出): 这个波形是一个调幅波 (AM)。高频信号 (载波, 实验中是 5kHz) 的幅度受到低频振动信号 (调制信号, 来自低频振荡器驱动的振动台) 的调制。包络线 (Envelope) 的形状就反映了振动台的位移随时间变化的情况。

CH2 (蓝色, 低通滤波器输出): 这个波形是经过相敏检波 (PSD) 和低通滤波 (LPF) 后的输出。它成功地从调幅波 (CH1) 中解调出了低频的振动信号。这个信号的频率与振动台的振动频率一致, 其幅度代表了振动的幅度, 其极性 (正负) 代表了振动的方向 (相对于平衡位置)。

## 六、实验结果与分析

### (一) 直流激励



经计算得，灵敏度为 1.092 V/mm，线性度为 5.62%。

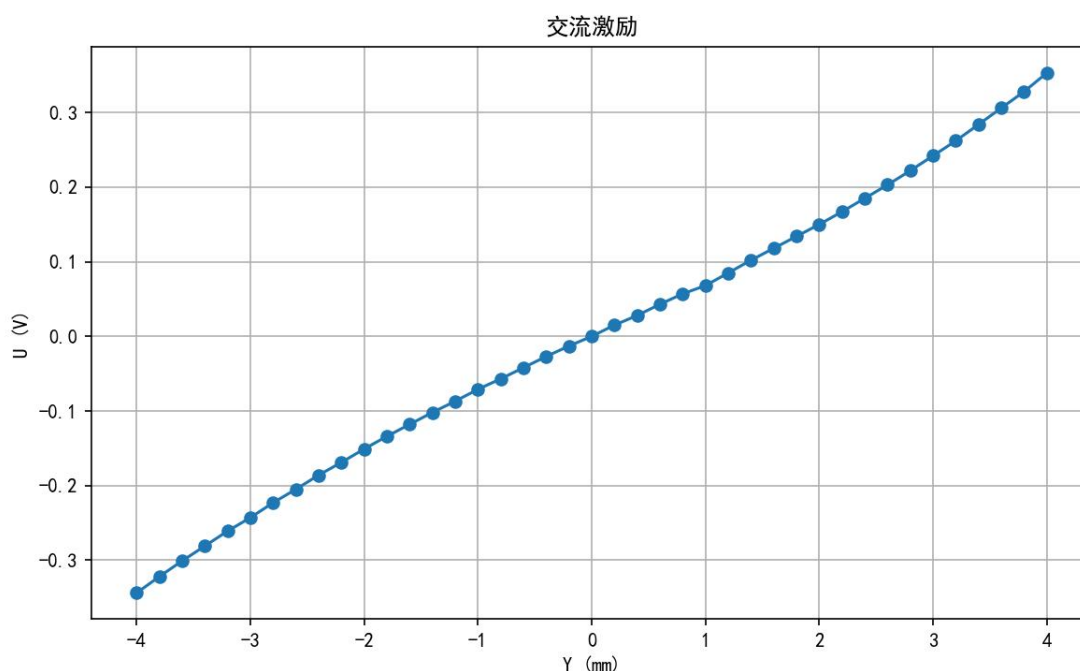
从数据可以看出，霍尔传感器系统能够准确地跟随并反映振动源的频率，在相同驱动频率下随着低频振荡器输出电压幅度的增大（从 4V 到 5V），差动放大器的输出电压幅度也随之增大（从 344mV 到 416mV），在 9Hz 和 10Hz 频率下也观察到同样的规律。

这说明，驱动电压幅度的增大会导致振动台的振动幅度增大，霍尔传感器检测到的位移变化量也相应增大，最终体现为差动放大器输出电压幅度的增加。这符合预期，表明系统输出幅度与输入振动幅度正相关。

在相同驱动电压幅度下，随着低频振荡器输出频率的增大（从 8Hz 到 10Hz），差动放大器的输出电压幅度的增大（从 8Hz 到 10Hz），差动放大器的输出电压幅度也显著增大（从 344mV 到 728mV），在 4.5V 和 5V 驱动电压下也观察到同样的规律。

这表明，在测试的频率范围内（8-10Hz），即使驱动电压幅度不变，提高驱动频率也会导致振动台的振动幅度（以及传感器的输出电压幅度）增大，即自振频率附近。

## （二）交流激励



经计算得，灵敏度为 0.0814 V/mm，线性度为 3.87%。

如上图所示，理想情况下静态特性曲线是关于原点对称的直线。但实际上传感器或磁场可能存在非理想性，导致位移  $Y$  为正和为负时的灵敏度（曲线斜率）略有不同。当振动台带着霍尔片穿过零点，在正向位移区域和负向位移区域运动时，如果这两个区域的灵敏度不同，那么即使振动本身是对称的（例如正弦波），其对高频载波的调制深度也会不同，这导致差动放大器输出的调幅波（CH1）的包络线在一个方向的峰值（比如对应正向最大位移）与另一个方向的峰值（对应负向最大位移）幅度不同，相敏检波器处理这种不对称的调幅信号后，输出的低频信号（CH2）幅度仍然能较好地反映实际的振动幅度。

在本实验的交流激励振动测量中，使用相敏检波器是为了：

**解调**出低频振动信号。

**恢复**振动的方向信息（通过输出电压的极性）。

**抑制**噪声和干扰，提高测量精度。

因此总结下来，要用到相敏检波器的情况包括

### 1、需要恢复信号的幅度和相位（或极性）信息

在交流激励的霍尔传感器（或其他类似传感器如 LVDT）中，位移的大小体现在输出交流信号的幅度上，而位移的方向（正或负）则体现在输出交流信号相对于参考信号（激励信号）的相位上（通常是同相或反相）。

普通的包络检波器只能提取幅度信息，丢失了相位信息，因此无法判断位移的方向。相敏检波器利用参考信号，可以将输入的调制信号解调为直流电压，该电压的大小正比于输入信号的幅度，极性（正负）则反映了输入信号的相位（即位移的方向）。这是 PSD 在此类应用中最核心的作用。

## 2、从强噪声中提取微弱信号（锁相放大原理）

相敏检波器对噪声具有很强的抑制能力。它只对与参考信号频率相同且相位固定的信号敏感。

其他频率的噪声或相位随机的噪声，在经过相敏检波和低通滤波后，其平均输出接近于零。

因此，即使传感器的原始信号（CH1）被噪声淹没，只要噪声特性与有用信号不同，PSD 也能有效地将有用信号（CH2）提取出来，极大地提高信噪比。

## 3、抑制直流漂移和干扰

由于系统采用交流激励和交流耦合，后续的相敏检波只关心特定频率的交流信号，可以有效抑制传感器或放大电路产生的直流偏移或低频漂移。

# 七、讨论、心得

## 1、用霍尔式传感测量位移和振动时，有何限制？

**（1）线性范围有限：** 霍尔传感器通常只在梯度磁场的中心附近区域具有较好的线性度，测量范围受限于线性区的大小。

**（2）磁场要求：** 需要一个稳定且具有合适梯度的磁场。磁场分布的均匀性和梯度直接影响传感器的性能。易受外部强磁场干扰。

**（3）温度影响：** 霍尔元件的灵敏度和电阻率对温度敏感，温度变化会引起零点漂移和灵敏度变化，需要温度补偿措施。

**（4）频率响应：** 对于振动测量，霍尔元件本身及后续处理电路（如放大器、滤波器）的频率响应会限制可测量的振动频率上限。

**（5）安装精度：** 霍尔片在磁场中的初始位置和方向对测量结果有影响，安装时需要精确对准。

## 2、设计一个利用霍尔式传感器进行物体三维空间定位的系统。



基本思路是利用多个霍尔传感器测量空间中某一点（或由已知磁体产生）的磁场矢量（包括大小和方向）或磁场梯度，通过解算磁场分布模型来反推出物体的位置。

#### **（1）方案一（基于磁场矢量）**

使用三个相互正交放置的霍尔传感器组成一个三轴磁力计探头，测量空间某点的磁场三分量（ $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ）。

在已知背景磁场（如地磁场）或已知固定磁源（如电磁铁）的情况下，移动待定位物体（其上固定另一个磁源或三轴磁力计）。

通过测量不同位置的磁场矢量变化，结合磁场模型（如偶极子模型）进行计算，可以解算出物体相对于固定参考系的三维坐标和姿态。需要至少一个三轴传感器。

#### **（2）方案二（基于磁场梯度）**

布置一个霍尔传感器阵列（至少需要 3 个非共线的传感器，更多传感器可提高精度和鲁棒性）。

在待定位物体上固定一个永磁体或电磁铁作为目标磁源。

测量阵列中每个传感器处的磁场强度（或特定分量）。

利用磁场强度随距离衰减的特性，通过各个传感器的读数组合解算，可以定位出目标磁源的三维坐标。

### **3、霍尔式传感直流激励和交流激励时有何区别？**

**（1）激励源：** 直流激励使用恒定电流源；交流激励使用交流信号源（如正弦波）。

**（2）输出信号：** 直流激励直接输出与位移（磁场）成比例的直流霍尔电压；交流激励输出的是一个被位移（磁场）调制的交流信号（载波信号），其幅值和相位反映了位移的大小和方向。

**（3）信号处理：** 直流激励通常需要放大和零点补偿；交流激励需要更复杂的处理电路，包括放大、相敏检波（解调）、滤波等，以提取出与位移对应的直流信号。

**（4）抗干扰能力：** 交流激励配合相敏检波技术，可以有效抑制直流漂移、失调电压以及特定频率之外的噪声干扰，信噪比通常优于直流激励。

**(5) 方向信息：** 直流激励输出电压的极性直接表示位移方向；交流激励需要通过相敏检波器才能恢复位移的方向信息（输出直流电压的极性）。

**(6) 应用：** 直流激励适用于静态或缓变位移测量；交流激励更适用于动态测量（如振动）和需要高信噪比、抑制漂移的场合。

#### 4、在交流激励时，测量电路中为何要使用相敏检波器？

**(1) 恢复幅值和相位信息：** 霍尔传感器在交流激励下，其输出是一个幅值和相位都可能随位移变化的交流信号（载波）。相敏检波器（PSD，也称锁相放大器或同步检波器）可以将这个被调制的交流信号解调为直流电压。这个直流电压的大小正比于输入交流信号中与参考信号同频同相（或反相）分量的幅值，其极性则反映了输入信号相对于参考信号的相位关系（通常是  $0^\circ$  或  $180^\circ$ ）。

**(2) 确定位移方向：** 当霍尔片经过磁场中心点向不同方向移动时，输出交流信号的相位会相对于激励信号（或参考信号）发生  $180^\circ$  的反转。相敏检波器能够识别这种相位反转，并将其转换为输出直流电压极性的变化（正负号）。这样，输出的直流电压不仅反映了位移的大小（绝对值），还反映了位移的方向（正负号）。普通的包络检波器则无法区分相位的反转，只能得到位移大小。

**(3) 抑制噪声和干扰：** 相敏检波器只对与参考信号频率相同且相位关系固定的信号敏感。对于频率不同或相位随机的噪声和干扰信号，其在相敏检波器输出端的平均值为零（经过低通滤波后）。因此，相敏检波器具有很强的窄带滤波特性，能有效地从强噪声背景中提取微弱的有用信号，显著提高信噪比。

**(4) 消除直流偏移：** 交流耦合和相敏检波可以消除直流激励中可能存在的零点漂移和不等位电势带来的误差。

通过本次实验，我深入理解了霍尔效应的原理及其在位移测量中的应用。实际操作中，直流激励电路相对简单，但零点调整较为关键；交流激励电路虽然复杂，但通过相敏检波能有效提取信号并判断方向，抗干扰能力强。实验也让我认识到理论与实践的结合，以及误差分析在传感器应用中的重要性。