

浙江大学



《生物医学传感与检测》实验报告

项目名称： 霍尔式传感器特性测试及其应用

姓 名：

学 号：

学 院： 生物医学工程与仪器科学学院

专 业： 生物医学工程

指导老师： 陈凌翔

2026 年 5 月 7 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: 探究型实验 指导老师: 陈凌翔

实验名称: 霍尔式传感器特性测试及其应用

学 生 一: 学 号: 专 业: 生物医学工程

学 生 二: 学 号: 专 业: 生物医学工程

实验地点: 玉泉教七西裙楼-303 日 期: 2026 年 5 月 7 日

目 录

一、霍尔式传感器特性——直流激励	2
1.1 实验目的	2
1.2 实验原理	2
1.3 实验器材	3
1.4 实验步骤	3
1.5 注意事项	4
1.6 原始实验数据记录	5
1.7 数据处理与分析	6
二、霍尔式传感器——交流激励	8
2.1 实验目的	8
2.2 实验原理	8
2.3 实验器材	8
2.4 实验步骤	8
2.5 原始实验数据记录	9
2.6 数据处理与分析	10
2.7 问题和讨论	12
三、实验心得	12

一、霍尔式传感器特性——直流激励

1.1 实验目的

- 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。

1.2 实验原理

图 1.1 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)受到相反方向的洛仑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)称为霍尔电势

$$U_H = KIB$$

式中 K 霍尔片的灵敏度。

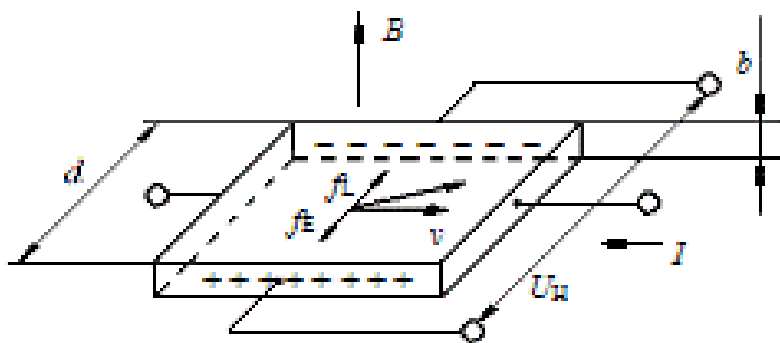


图 1.1 – 霍尔效应

图 1.2 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 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 1.3 所示。

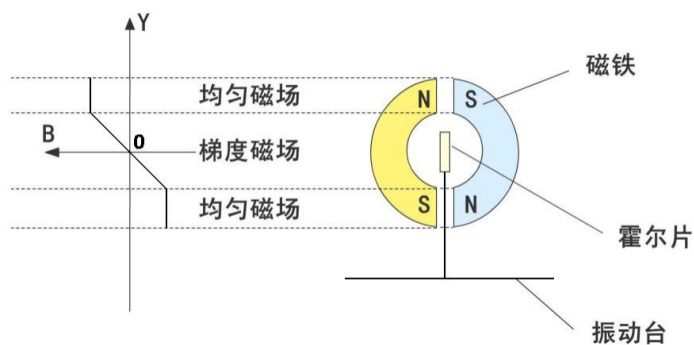


图 1.2 – 实验原理

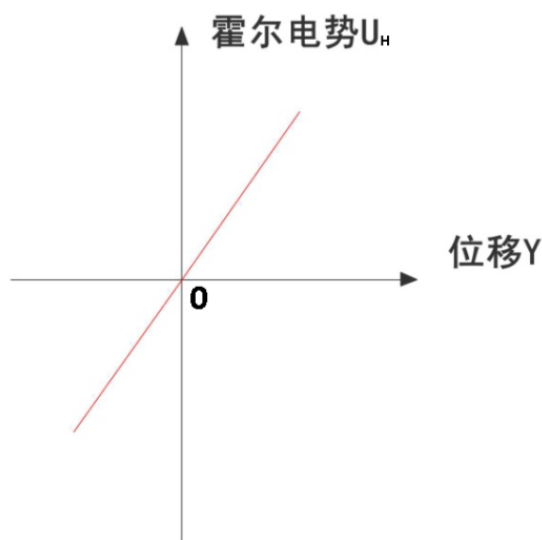


图 1.3 – 霍尔元件特性曲线

1.3 实验器材

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。

差动变换器 I 增益旋钮置最大，电压表置 20V 档，直流稳压电源 $\pm 5V$

1.4 实验步骤

- (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_1 、 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。

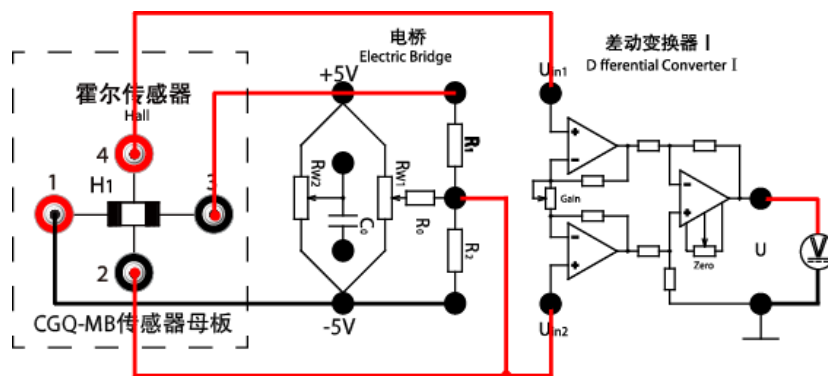


图 1.4 – 接线参考图

- (3) 装好测微头,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 $\pm 4mm$ 或者测微头向上与振动台脱开为止。

作出输出电压 U 和位移的关系曲线,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(实验可以看到:正弦波、同频率;当低频振荡输出频率固定时,随着幅度增大,差动放大器输出振幅……………当低频振荡输出幅度固定时,随着频率变化,差动放大器输出波形 调节 所以差动放大器输出波形能反映……………的信息)。

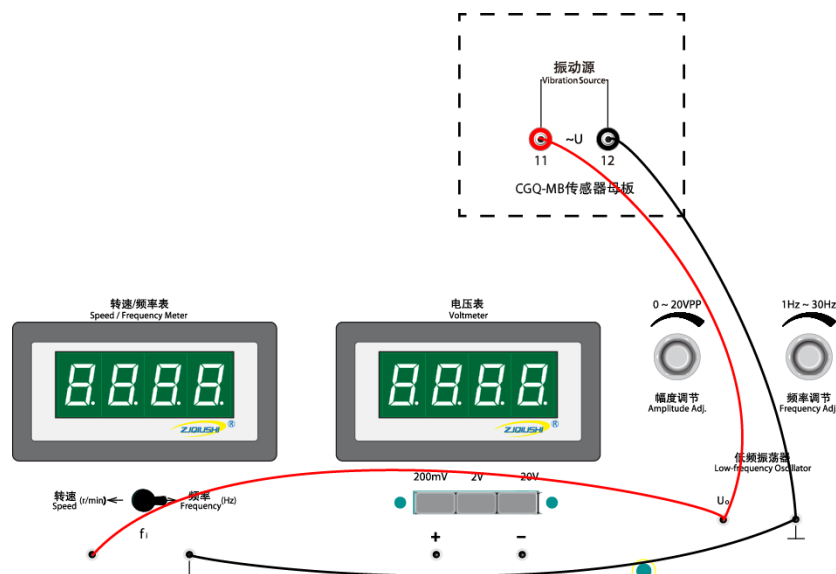


图 1.5 – 振动接线参考图

1.5 注意事项

- (1) 霍尔片要全部处于梯度磁场中,磁路部分的中缝必须与霍尔片平行,以提高线性度和灵敏度。
- (2) 不要随意增大激励电压,以免损坏霍尔片。

1.6 原始实验数据记录

位移零点位置： $Y_0 = 10.920 \text{ mm}$ 。为方便处理，以下表格记录了相对位移 $\Delta Y = Y - Y_0$ 与输出电压 U 的关系。

表 1.1 – 直流激励下霍尔传感器输出电压与位移关系数据记录

Y (mm)	ΔY (mm)	U (V)	Y (mm)	ΔY (mm)	U (V)
14.92	4.0	4.34	10.72	-0.2	-0.18
14.72	3.8	4.09	10.52	-0.4	-0.36
14.52	3.6	3.82	10.32	-0.6	-0.54
14.32	3.4	3.55	10.12	-0.8	-0.72
14.12	3.2	3.29	9.92	-1.0	-0.90
13.92	3.0	3.04	9.72	-1.2	-1.09
13.72	2.8	2.80	9.52	-1.4	-1.28
13.52	2.6	2.56	9.32	-1.6	-1.47
13.32	2.4	2.33	9.12	-1.8	-1.68
13.12	2.2	2.11	8.92	-2.0	-1.89
12.92	2.0	1.89	8.72	-2.2	-2.10
12.72	1.8	1.68	8.52	-2.4	-2.33
12.52	1.6	1.48	8.32	-2.6	-2.56
12.32	1.4	1.28	8.12	-2.8	-2.79
12.12	1.2	1.08	7.92	-3.0	-3.03
11.92	1.0	0.89	7.72	-3.2	-3.28
11.72	0.8	0.71	7.52	-3.4	-3.54
11.52	0.6	0.53	7.32	-3.6	-3.80
11.32	0.4	0.35	7.12	-3.8	-4.07
11.12	0.2	0.17	6.92	-4.0	-4.36
10.92	0.0	0.00			

1.7 数据处理与分析

1.7.1 U-Y 曲线与参数计算

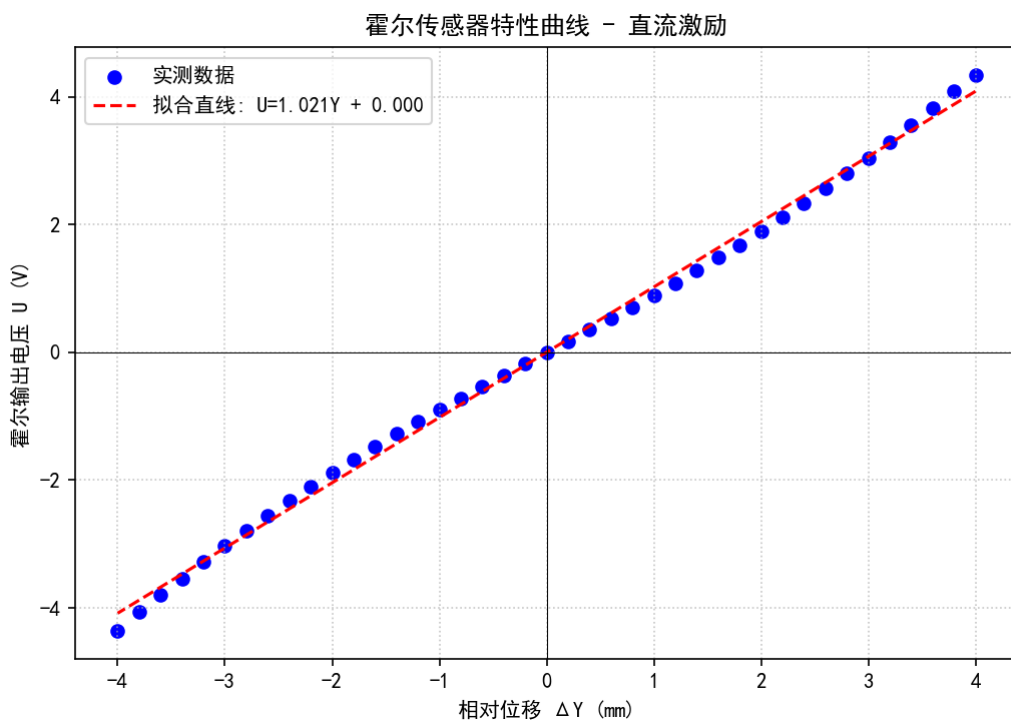


图 1.6 – 直流霍尔传感器 U-Y 曲线

(1) 灵敏度:

霍尔传感器在 ± 4.0 mm 范围内的满量程输出为:

$$\Delta U = U_{max} - U_{min} = 4.34 - (-4.36) = 8.70 \text{ V}$$

满量程位移为:

$$\Delta Y_{FS} = 4.0 - (-4.0) = 8.0 \text{ mm}$$

则灵敏度 $K = \frac{\Delta U}{\Delta Y_{FS}} \approx 1.088 \text{ V/mm}$ 。

若以线性拟合的斜率来计算灵敏度, 则 $K = 1.021$

(2) 线性度:

将各数据点代入拟合方程, 对比实际输出与理论拟合直线间的偏差。经计算, 最大偏差出现在端点 $\Delta Y = -4.0$ mm 处, 此时实际电压为 -4.36 V, 理论拟合电压为 -4.084 V, 最大偏差绝对值 $\Delta U_{max} \approx 0.276$ V。

$$\text{线性度 } \delta = \frac{\Delta U_{max}}{\Delta U_{FS}} \times 100\% = \frac{0.276}{8.70} \times 100\% \approx 3.17\%。$$

1.7.2 示波器观察的差动放大器和低频振荡器的输出波形

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。

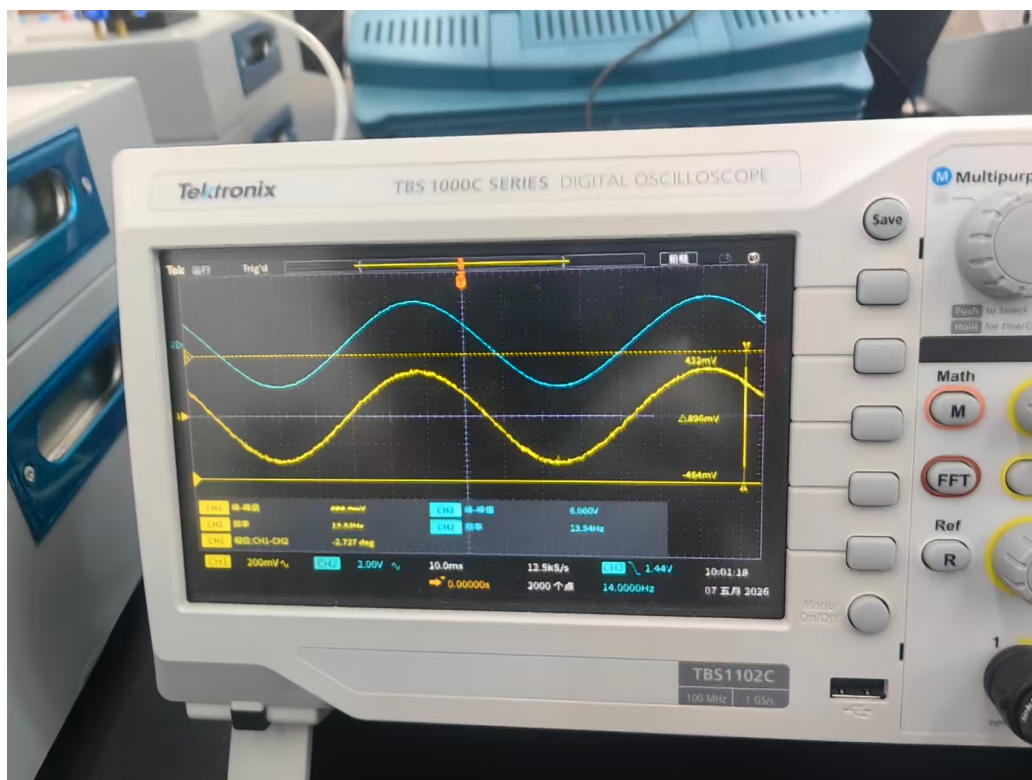


图 1.7 – 差动放大器和低频振荡器的输出波形

实验中可以看到：正弦波、同频率；当低频振荡输出频率固定时，随着幅度增大，差动放大器输出振幅也随之增大；当低频振荡输出幅度固定时，随着频率变化，越靠近共振频率，差动放大器输出振幅越大。所以差动放大器输出波形能反映振动台的振动率的信息。

这是由于霍尔元件在直流激励下，输出的霍尔电动势与感受到的磁场梯度成正比。由于被测磁场呈现梯度分布，磁感应强度的变化量与位移量成正比，因此差动放大器输出的电压幅度能够直接反映振动位移的大小（振幅）。位移周期性变化的频率即为机械振动频率，故输出电压信号的频率对应了振源的频率。

二、霍尔式传感器——交流激励

2.1 实验目的

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。

2.2 实验原理

图 2.1 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,所以要接入差动放大器。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_1 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。

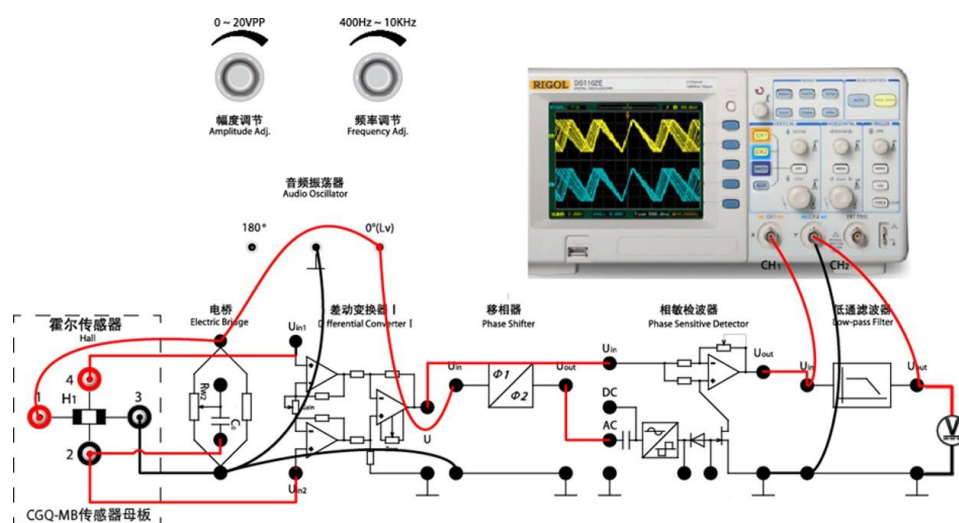


图 2.1 - 交流激励实验接线

2.3 实验器材

霍尔传感器、差动放大器 I、测微头、移相器、相敏检波器、低通滤波器、双踪示波器、数字电压表、音频振荡器、低频振荡器、振动源、频率表。

2.4 实验步骤

- (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 2.1 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,观察电压表读数,调节电桥电位器 R_{w2} 使电压表为零;旋转测微头使振动台在 ± 4 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 0.2mm 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。记录数据。

(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,试说明所观察到的波形。观察差动放大器、相敏检波器和低通滤波器三者的输出波形,试说明此处相敏检波器和低通滤波器的工作原理。

2.5 原始实验数据记录

位移零点位置： $Y_0 = 10.920\text{ mm}$ 。交流激励下的相对位移 ΔY 与输出电压 U 记录如下：

表 2.1 – 交流激励下霍尔传感器输出电压与位移关系数据记录

Y (mm)	ΔY (mm)	U (V)	Y (mm)	ΔY (mm)	U (V)
14.92	4.0	-1.944	10.72	-0.2	0.079
14.72	3.8	-1.820	10.52	-0.4	0.157
14.52	3.6	-1.701	10.32	-0.6	0.235
14.32	3.4	-1.583	10.12	-0.8	0.316
14.12	3.2	-1.469	9.92	-1.0	0.394
13.92	3.0	-1.358	9.72	-1.2	0.477
13.72	2.8	-1.247	9.52	-1.4	0.559
13.52	2.6	-1.141	9.32	-1.6	0.643
13.32	2.4	-1.038	9.12	-1.8	0.730
13.12	2.2	-0.940	8.92	-2.0	0.819
12.92	2.0	-0.844	8.72	-2.2	0.912
12.72	1.8	-0.747	8.52	-2.4	1.006
12.52	1.6	-0.658	8.32	-2.6	1.104
12.32	1.4	-0.570	8.12	-2.8	1.204
12.12	1.2	-0.484	7.92	-3.0	1.307
11.92	1.0	-0.400	7.72	-3.2	1.415
11.72	0.8	-0.316	7.52	-3.4	1.527
11.52	0.6	-0.234	7.32	-3.6	1.639
11.32	0.4	-0.155	7.12	-3.8	1.759
11.12	0.2	-0.076	6.92	-4.0	1.879
10.92	0.0	0.000			

2.6 数据处理与分析

2.6.1 U-Y 曲线与参数计算

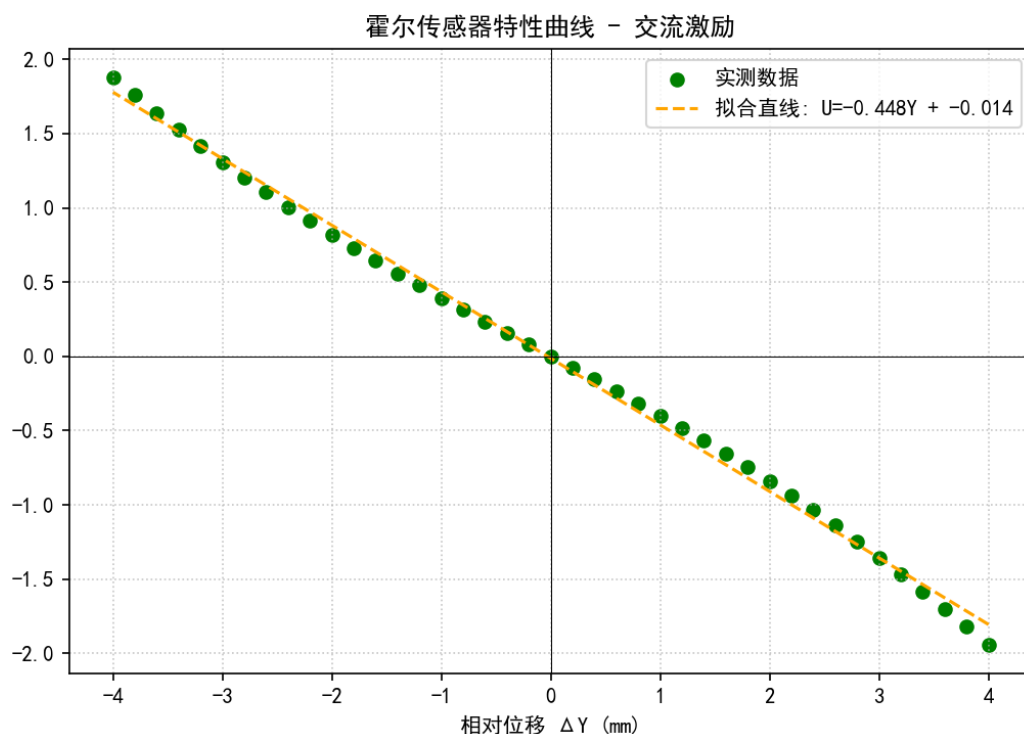


图 2.2 – 交流霍尔传感器 U-Y 曲线

根据端点连线法求取交流激励静态特性参数：

(1) 灵敏度：

满量程输出为：

$$\Delta U = 1.879 - (-1.944) = 3.823 \text{ V}$$

满量程位移为 8.0 mm。则灵敏度

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta Y_{FS}} \approx 0.478 \text{ V/mm}$$

。

若以线性拟合的斜率作为灵敏度，则 $K = 0.448$

(2) 线性度：

理论拟合直线约为 $U = -0.448 \cdot \Delta Y - 0.014$ 。

对比实际输出与理论拟合值，最大偏差出现在端点 $\Delta Y = 4.0 \text{ mm}$ 处，此时实际电压为 -1.944 V ，理论拟合电压为 -1.806 V ，最大偏差绝对值 $\Delta U_{max} \approx 0.138 \text{ V}$ 。

$$\text{线性度 } \delta = \frac{\Delta U_{max}}{\Delta U_{FS}} \times 100\% = \frac{0.138}{3.823} \times 100\% \approx 3.61\%。$$

2.6.2 示波器观察到的波形及分析

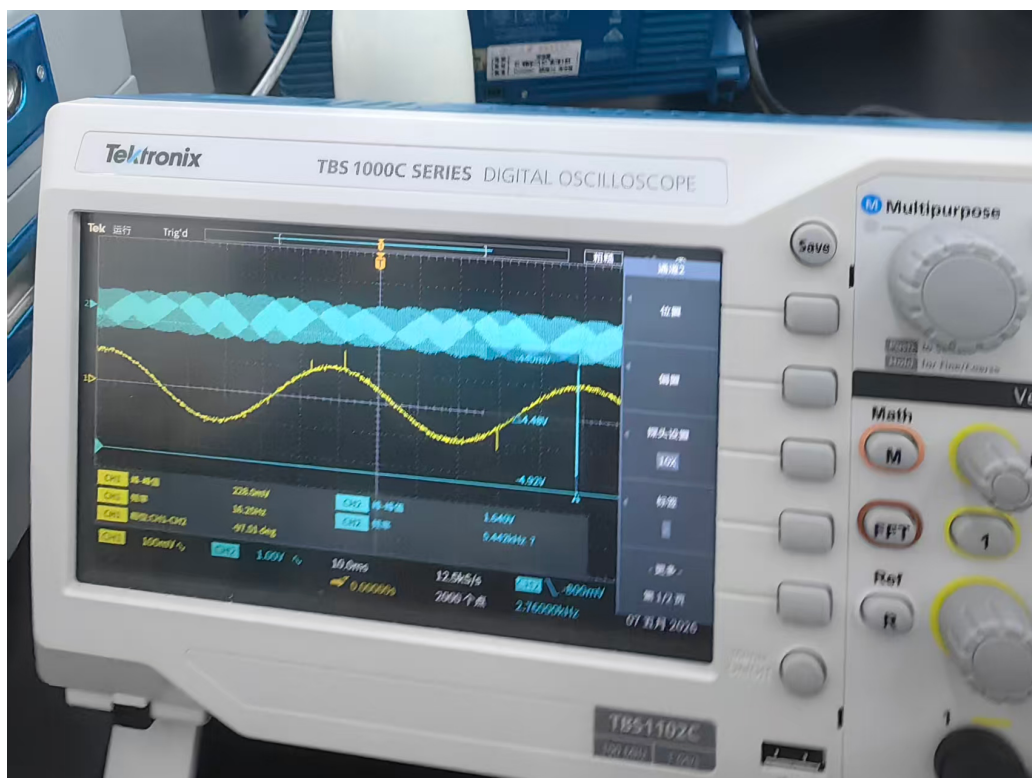


图 2.3 – 差动放大器和低通滤波器输出

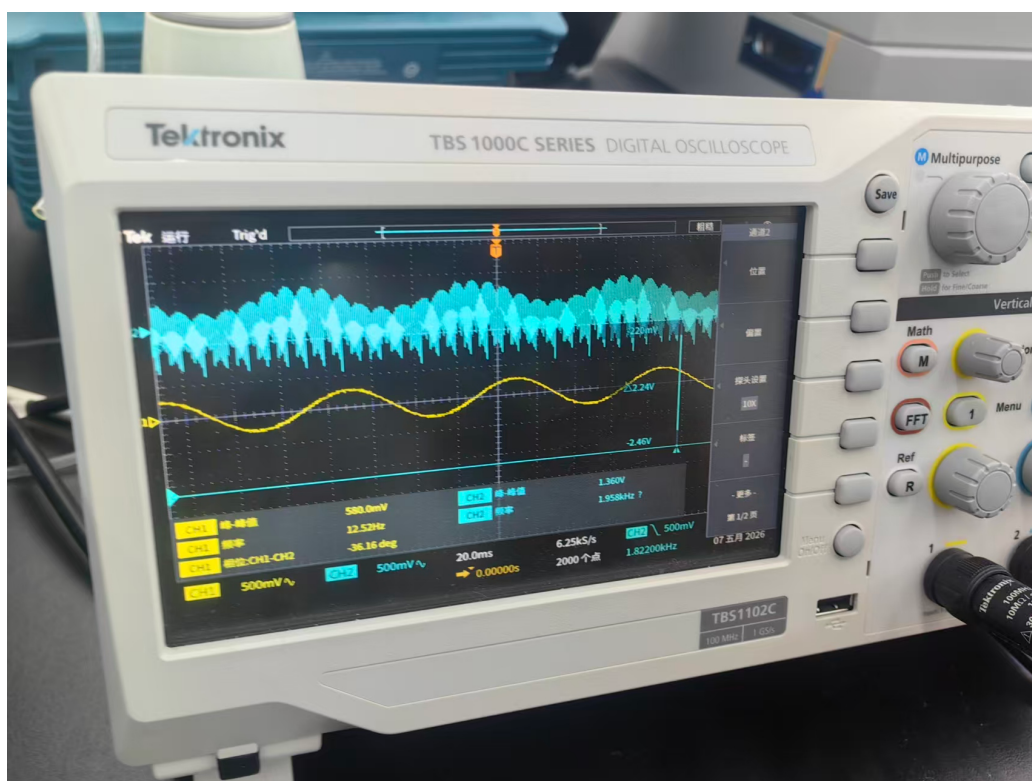


图 2.4 – 相敏检波器和低通滤波器输出

波形说明：在示波器上观察到，差动放大器的输出为高频调幅波（5kHz 的音频载波包络随着低频振荡台的运动规律而发生纺锤状的幅度变化）；相敏检波器的输出为含有大量高频脉动纹波的解调波形（且随着位移方向改变，电压极性会翻转）；而低通滤波器的输出则是平滑的低频正弦波，波形的频率与低频振荡源的工作频率完全一致。

工作原理：霍尔元件在交流（高频音频信号）激励下，将原本低频微小的机械位移信号调制到了高频交流载波上，从而具有很强的抗干扰能力。

相敏检波器：其作用是进行解调。它引入了与激励信号同频同相的参考电压。它不仅能像普通检波器一样把被测信号的幅度（即载波的包络线）检出，还能通过比对输入信号与参考电压的相位关系，判断出调幅波相位的正反，从而在输出端反映出振动台位移的方向（正负电压）。

低通滤波器：经相敏检波解调出的信号中虽然包含了有用的低频位移信号，但仍然混杂着频率极高的高频载波基波及谐波成分（表现为示波器上的“毛刺”和纹波）。低通滤波器利用电容电感等元件的频率特性，有效滤除高频分量，最终还原输出纯净、平滑的对应实际振动的低频波形。

2.7 问题和讨论

1. 霍尔式传感直流激励和交流激励有何区别(从测量电路、抗干扰、应用场景等方面进行比较)?

（1）测量电路：直流激励电路相对简单，只需要直流稳压电源提供激励信号即可，输出信号经普通的直流差动放大器放大后直接测量。交流激励电路则复杂许多，需要额外的音频振荡器提供高频交流载波激励，且后续测量电路必须配合使用移相器、相敏检波器以及低通滤波器，以进行载波调制和相敏解调，才能恢复出有用的位移信号。

（2）抗干扰能力：直流激励的抗干扰能力相对较弱，容易受到环境温度变化引起的热电势干扰、零点漂移以及环境中低频噪声的影响。交流激励通过使用载频激励和相敏检波技术，只对特定载波频率及其附近的信号进行检波放大，有效隔离和滤除了直流零漂、低频干扰及其他高频杂讯，具有极强的抗干扰性能。

（3）应用场景：由于直流激励电路简单，通常主要用于静态位移或者缓慢变化的大位移测量环境中。而交流激励由于灵敏度高、抗干扰能力强，不仅能够用于高精度的静态测量，更适用于动态微小位移和振动测量，以及噪声干扰较大的复杂工业现场应用。

三、实验心得

通过本次霍尔式传感器特性测试的探究实验，我对霍尔效应的理论知识和传感器的实际工程应用有了更直观且深刻的认识。

首先，在直流激励实验中，我体验了如何通过调整测微头来校准位移零点，并手动记录了电位随位移变化的过程。数据处理结果表明，在磁钢所营造的梯度磁场中心区域，霍尔电势与位移保持了较好的线性关系。

其次，交流激励实验极大拓宽了我的视野。相比于简单的直流放大，交流激励采用的“载波调制-相敏解调-低通滤波”这一套信号处理链路令我印象深刻。我在示波器上观察到了高频载波是如何随着低频振动产生包络变化，以及最终如何通过低通滤波器还原出干净的低频正弦波的。这让我深刻理解了相敏检波在消除低频噪声、判断运动方向（相位）以及微小信号提取方面的巨大优势。

整体而言，这次实验不仅锻炼了我的电路接线能力和数据处理能力，更让我在遇到不对称或者零漂问题时，学会了如何通过调节电桥网进行耐心排查。

最后感谢陈凌翔老师和助教在实验过程中对我们耐心和细致的指导和帮助！