

浙江大学



《生物医学传感与检测》实验报告

项目名称: 电涡流式传感器的性能测试

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 4 月 16 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: 电涡流式传感器的性能测试

学 生 一: 学 号: 3230103696 专 业: 生物医学工程

学 生 二: 学 号: 3230103090 专 业: 生物医学工程

实验地点: 玉泉教七西裙楼-303 日 期: 2026 年 4 月 16 日

目 录

一、电涡流式传感器静态标定	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 原始实验数据记录	4
1.6 数据处理与分析	5
二、电涡流式传感器的应用	6
2.1 实验目的	6
2.2 实验器材	6
2.3 实验步骤	6
2.4 注意事项	7
2.5 原始实验数据记录	7
2.6 数据处理与分析	7
2.7 问题与讨论	10
三、实验心得	10

一、电涡流式传感器静态标定

1.1 实验目的

了解电涡流式传感器的原理及静态特性。

1.2 实验原理

图 4.1 是电涡流式传感器静态标定的实验装置。被测金属板安装在振动台上，电涡流式传感器固定在实验仪台板上，上下可调节。当线圈通以交变电流后，产生交变磁场，铝片上产生电涡流，涡流磁场与原磁场相互作用，导致线圈等效阻抗（电感、电阻）发生变化。电涡流强度的不同，对线圈阻抗 Z 的影响程度不同。而电涡流强度与金属板的电阻率、导磁率、厚度、温度以及线圈与金属表面距离 Y 等有关。当平面线圈、被测体、激励源已确定，并保持环境温度不变时，阻抗 Z 就只与距离 Y 有关。将阻抗变化经涡流变换器变换成电压输出，则输出电压 U 仅是位移 Y 的单值函数，其关系曲线可由图 4.2 表示。

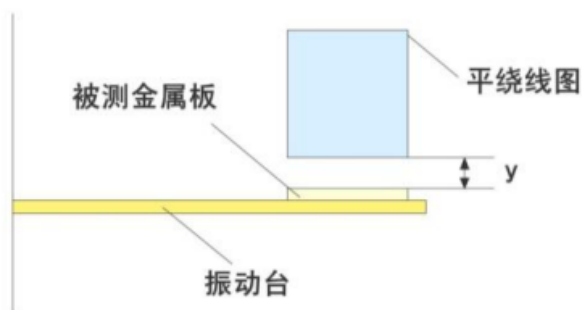


图 4.1 实验结构

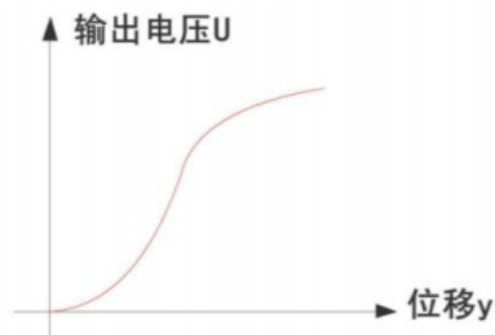


图 4.2 电涡流式传感器特性曲线

图 4.3 为实验中采用的电涡流传感器测量电路。电路由以下三部分组成：

- (1) 振荡电路。Q1、C1、C2、C3 组成电容三点式振荡器，产生频率为 1MHz 左右的正弦载波信号。电涡流传感器接在振荡回路中，传感器线圈是振荡回路的一个电感元件。振荡器作用是将位移变化引起的振荡回路的 Q 值变化转换成高频载波信号的幅值变化。
- (2) 涡流变换器。D1、C5、L2、C6 组成了由二极管和 LC 形成的 π 形滤波的检波器，检波器的作用是将高频调幅信号中传感器检测到的低频信号取出来。
- (3) 射极跟随器。射极跟随器的作用是实现输入、输出匹配，以获得尽可能大的不失真输出的幅度值。

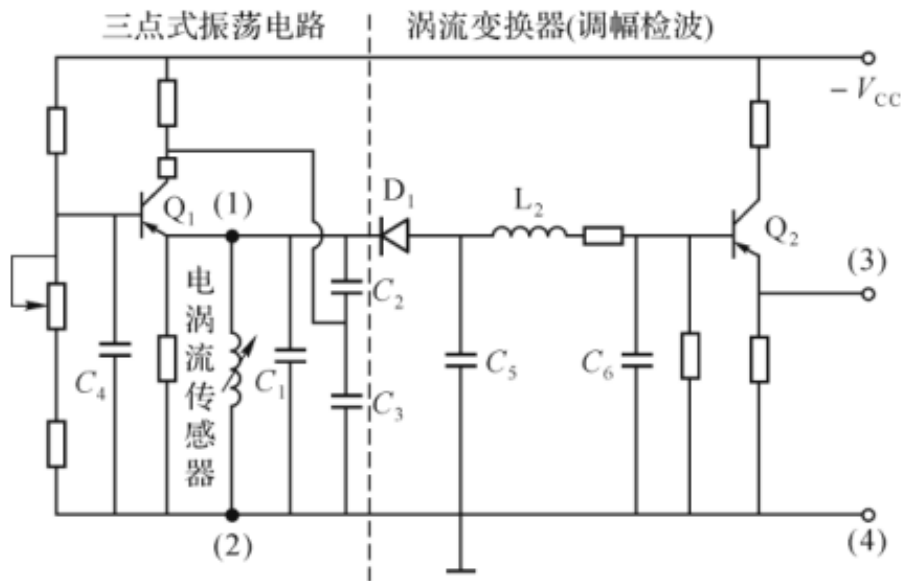


图 4.3 振荡器和涡流变换器的电路

1.3 实验器材

电涡流式传感器、涡流变换器、示波器、电压表、测微头、铝测片、振动台、电源。

1.4 实验步骤

1. 观察电涡流传感器结构，它的底部是一个扁平线圈。测微头与圆盘工作台吸合，再安装电涡流传感器，传感器对准铝测片，距离一定高度。如图 4.4 接线，将涡流传感器接入涡流变换器输入端，变换器输出端接至电压表，电压表置于 20V 挡，开启电源。

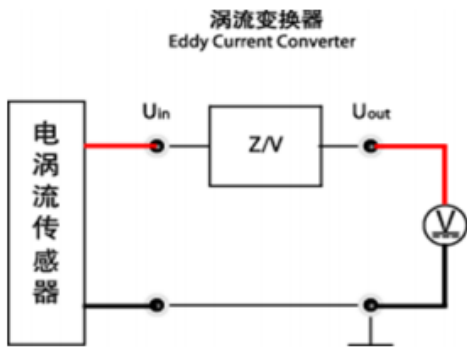


图 4.4 实验接线

- (1) 用示波器观察涡流变换器输入端 U_{in} 的波形，如发现没有振荡波形出现，可将被测体移开或移近一些。
- (2) 调节电涡流传感器高度，使其与被测片平行接触(电涡流传感器与被测体接触时间不能过久，可能损坏传感器)，再微调测微头，让电压表读数最小，标记为位移零点。向下旋转测微头，让金属片远离传感器，建议每次取 $\Delta Y = 0.1\text{mm}$ ，至少位移 4mm 或线性度严重破坏为止。记录位移和电压数据。

4. 作 U-Y 曲线，指出大致的线性范围，求线性度（即非线性误差）、灵敏度。

1.5 原始实验数据记录

表 1.1 – 电涡流传感器位移与电压静态标定数据

位移 Y (mm)	电压 U (V)	位移 Y (mm)	电压 U (V)
7.75	3.99	5.65	6.68
7.65	4.04	5.55	6.79
7.55	4.09	5.45	6.88
7.45	4.14	5.35	6.98
7.35	4.18	5.25	7.06
7.25	4.23	5.15	7.15
7.15	4.29	5.05	7.22
7.05	4.35	4.95	7.28
6.95	4.49	4.85	7.35
6.85	4.76	4.75	7.42
6.75	4.97	4.65	7.47
6.65	5.20	4.55	7.52
6.55	5.40	4.45	7.57
6.45	5.58	4.35	7.62
6.35	5.76	4.25	7.66
6.25	5.92	4.15	7.71
6.15	6.07	4.05	7.76
6.05	6.22	3.95	7.79
5.95	6.34	3.85	7.85
5.85	6.47	3.75	7.88
5.75	6.58		

1.6 数据处理与分析

1.6.1 涡流变换器输入端 U_{in} 的波形

用示波器观察涡流变换器输入端 U_{in} 的波形，如发现没有振荡波形出现，可将被测体移开或移近一些。此波形如图所示，为正弦波形，其频率为 1.397M Hz。

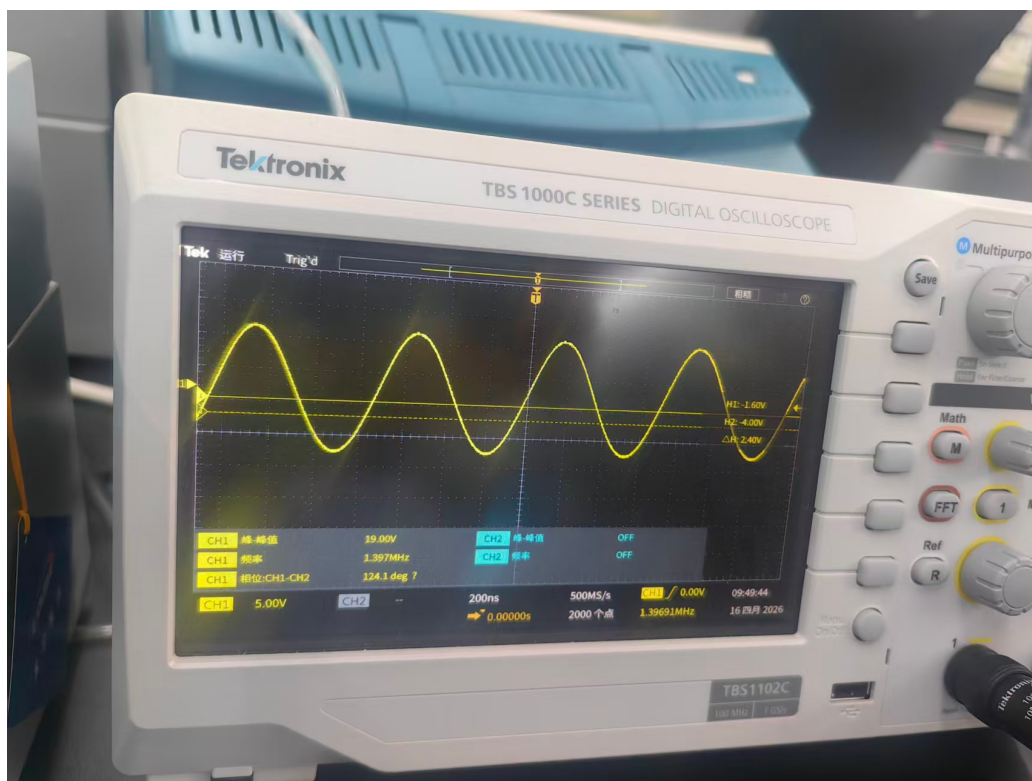
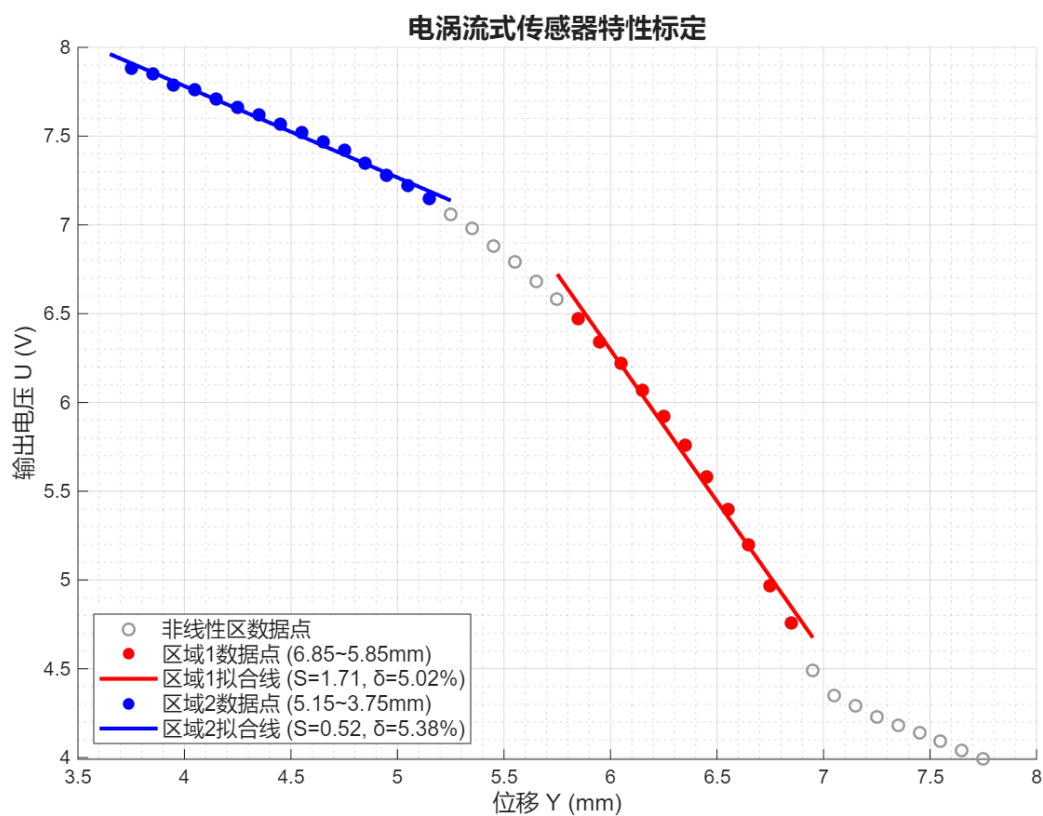


图 1.4 – 涡流变换器输入端 U_{in} 的波形

1.6.2 U-Y 曲线图



1.6.3 线性区域、灵敏度和线性度分析

理论上传感器的最佳灵敏度区为 5.85mm-6.85mm。这段区间拟合的直线斜率最大 (灵敏度 $S \approx 1.706 \text{ V/mm}$), 也就是对位移变化最敏感。但是它的范围太窄了, 只有 1.0mm。在实际测振动时, 如果振幅稍大, 或者传感器初始位置产生漂移, 很容易就会冲出这 1.0mm 的范围, 进入严重的非线性区, 导致测量波形发生严重的削顶或变形失真。

该区域 MATLAB 计算的拟合方程为

$$U = -1.706 * Y + 16.534$$

灵敏度

$$S_1 = 1.706 \text{ V/mm}$$

线性度 (非线性误差)

$$\delta_1 = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{FS}} * 100\% = 5.02\%$$

因此我们在实验中选定的区域为 3.75-5.15mm。这一段的灵敏度虽然降低了, 但它的线性范围更长 (量程达到了 1.4mm), 且在这段范围内的线性度表现优异 (非线性误差极小)。选择这段区域, 传感器允许被测体有更大的振动幅度而不失真, 更符合双向大振幅测量的稳定性和宽容度要求。

该区域 MATLAB 计算的拟合方程为

$$U = -0.515 * Y + 9.843$$

灵敏度

$$S_2 = 0.515 \text{ V/mm}$$

线性度 (非线性误差)

$$\delta_2 = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{FS}} * 100\% = 5.38\%$$

二、电涡流式传感器的应用

2.1 实验目的

通过实验掌握电涡流式传感器应用在振幅测量上的理论和方法。

2.2 实验器材

电涡流式传感器、涡流变换器、示波器、低频振荡器、数字电压表、铝测片。

2.3 实验步骤

- (1) 将圆盘式工作台与测微头分离, 调整电涡流式传感器与被测体之间的距离, 使电涡流式传感器位于双向工作时的最佳安装点。记录安装点位置。
- (2) 卸下测微头和电压表, 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 4.5, 调节低频振荡器的频率和幅度, 使圆盘工作台产生适当幅度的振动。(操作提示: 先确定低频振荡器的幅度, 一般中间位置, 再调节频率)

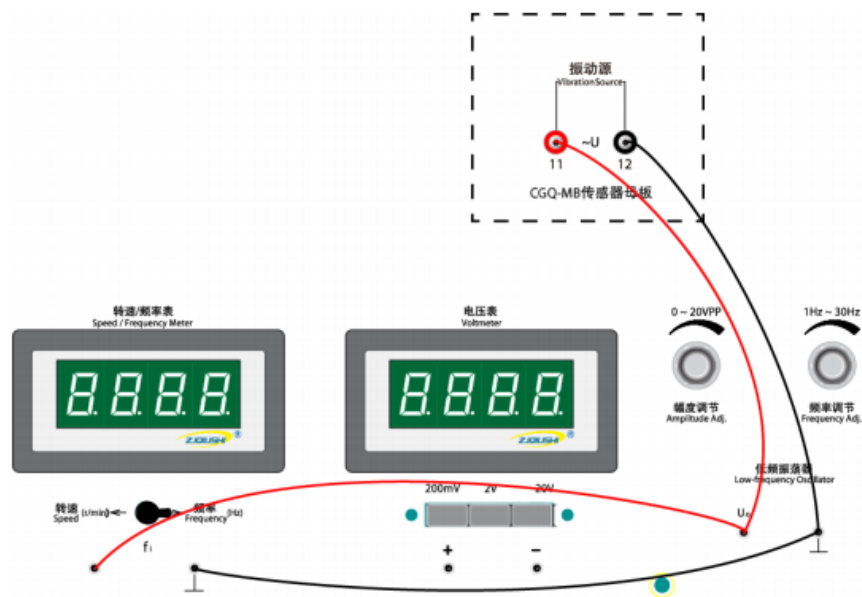


图 4.5 振动接线参考图

- (3) 用示波器的两个通道同时观察涡流变换器的输入、输出波形,对比两个波形,说明观察到的现象,并解释原因。
- (4) 用示波器的一个通道读取低频振荡器的输出频率值,选取一两个合适的振动频率,用示波器的另一个通道观察涡流变换器的输出波形,记录输出电压的峰-峰值 V_{p-p} 。根据初始安装点位置和测得的 V_{p-p} ,在 U - Y 曲线上计算被测体的振动幅值 Y_{p-p} 。

2.4 注意事项

不要将低频振荡器频率打在圆盘自振频率附近(约 11Hz,每台设备略有不同),避免产生过大振幅而碰撞电涡流传感器,长时间大幅振荡也会让钢条连接处松动影响设备性能。

2.5 原始实验数据记录

表 2.1 – 电涡流传感器振幅测量实验数据记录表

频率 f (Hz)	输出电压峰峰值 V_{p-p} (V)	振幅峰峰值 Y_{p-p} (mm)
3.00	0.44	0.854
6.58	0.64	1.242
9.00	1.44	2.794 (失真)

2.6 数据处理与分析

2.6.1 涡流变换器的输入、输出波形

观察到的示波器上的涡流变换器的输入、输出波形如下图所示。

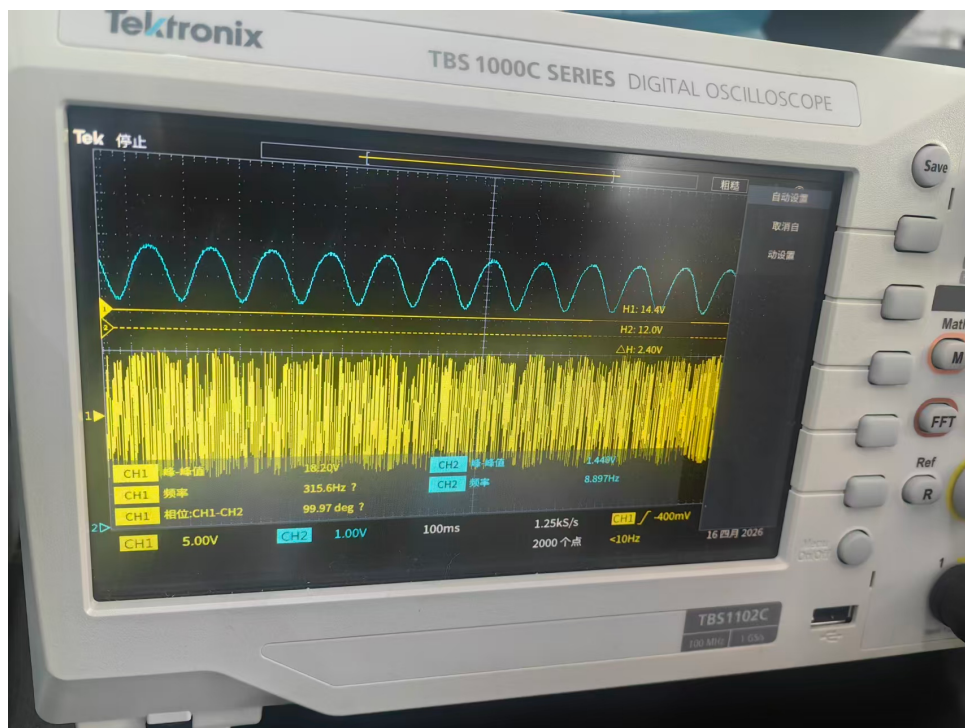


图 2.2 – 涡流变换器的输入、输出波形

从示波器波形可以看出，涡流变换器的输入端信号存在明显的高频噪声干扰，而输出端则呈现稳定的单一频率正弦波形。

电涡流传感器线圈是电容三点式振荡电路的一部分。当被测金属板发生低频机械振动时，线圈与金属板之间的距离 Y 发生周期性变化，导致线圈的等效阻抗和振荡回路的 Q 值改变。振荡器原本产生幅值恒定的 1MHz 高频载波，但因为 Q 值的不断变化，这个高频载波的幅值受到了低频振动信号的控制（调制），所以输入端呈现出的是高频调幅波。

而涡流变换器的本质是一个调幅包络检波器。它内部电路由二极管和 π 型 LC 低通滤波器组成。首先，二极管起到了半波整流的作用，削去了调幅波的下半部分。接着，高频成分（1MHz）对电容相当于短路、对电感相当于开路，因此被 π 型滤波器彻底滤除。最后，只剩下变化缓慢的低频包络信号顺利通过滤波器。这就是为什么输出端成功还原了反映金属板真实位移的低频机械振动信号。

不同频率振荡时的涡流转换器输出波形峰-峰值会有变化。



图 2.3 – 涡流变换器的输入、输出波形 2

2.6.2 Y_{p-p} 的计算与分析

在电涡流传感器的动态应用中，通过测量输出交流信号的峰峰值 V_{p-p} ，可以利用静态标定时得到的灵敏度 S 反向推算出被测体的振动位移峰峰值 Y_{p-p} 。

(1) 灵敏度 S 的确定

根据实验要求，选取区间 $Y \in [3.75, 5.15]$ mm 进行线性拟合。利用最小二乘法计算该段特性的斜率：

- $U = -0.5154Y + 9.8433$
- $S = 0.5154 \text{ V/mm}$

(2) 计算公式 振动位移峰峰值 Y_{p-p} 与电压峰峰值 V_{p-p} 的关系遵循：

$$Y_{p-p} = \frac{V_{p-p}}{S}$$

(3) 各频率具体计算

• 当 $f = 3.00 \text{ Hz}$ 时：

已知 $V_{p-p} = 440 \text{ mV} = 0.44 \text{ V}$
代入公式：

$$Y_{p-p} = \frac{0.44}{0.5154} \approx 0.854 \text{ mm}$$

• 当 $f = 6.58 \text{ Hz}$ 时：

已知 $V_{p-p} = 640 \text{ mV} = 0.64 \text{ V}$
代入公式：

$$Y_{p-p} = \frac{0.64}{0.5154} \approx 1.242 \text{ mm}$$

- 当 $f = 9.00 \text{ Hz}$ 时:

已知 $V_{p-p} = 1.44 \text{ V}$

代入公式:

$$Y_{p-p} = \frac{1.44}{0.5154} \approx 2.794 \text{ mm}$$

该位移幅值已显著超出所选的 1.4mm 线性范围宽度, 导致传感器进入非线性区。这可能是因为 9Hz 接近振动台的固有频率, 引发了共振失真。

2.7 问题与讨论

1. 电涡流传感器与被测体间有一个最佳初始工作点, 根据实验数据分析说明单向工作及双向工作时最佳初始工作点分别在哪里?

单向工作最佳初始工作点: 根据实验数据, 最佳线性范围为 5.85-6.85mm。若传感器仅需单向测量 (如远离或接近某一固定方向), 最佳初始工作点应设在线性范围的起始点 (5.85mm)。此时传感器可在单向移动时覆盖最大线性范围 (5.85-6.85mm), 避免非线性误差。

双向工作最佳初始工作点: 若需双向测量 (如振动检测), 最佳初始工作点应设在线性范围的中点 (6.35mm)。此时传感器可在正负方向各移动约 0.5mm ($6.35 \pm 0.5 \text{ mm}$), 充分利用线性区域, 保证双向测量的准确性。

2. 如果传感器的线性范围是 0 ~ 1mm, 测振幅时最佳工作点是距离被测体几毫米处?

测振幅属于双向工作模式, 要求传感器在靠近和远离两个方向上具备相等的线性动态余量。为了防止振动波形的波峰或波谷进入非线性区域而导致削顶失真, 初始工作点必须位于线性范围的几何中点。因此, 若线性范围为 0 ~ 1 mm, 测振幅时的最佳工作点应设置在距离被测体 0.5 mm 处。

三、实验心得

本次“电涡流式传感器的性能测试”实验, 让我将课堂上的理论知识与实际的工程测试紧密结合了起来。通过静态标定和动态测振两部分实验, 我不仅直观地绘制并分析了电涡流传感器输出的 U-Y 特性曲线, 还深入理解了其背后的调幅与包络检波物理机制。示波器上高频载波被低频机械振动信号调制, 随后又经过滤波电路还原为纯净低频信号的波形对比, 使我对传感器信号调理电路的实际工作状态有了更为深刻的认识。

在数据处理与分析环节, 令我印象最深的是对“最佳线性工作区”的选取考量。理论上, 特性曲线中斜率最大的区段 (5.85mm-6.85mm) 拥有最优的灵敏度, 但其线性量程仅有 1.0mm。在实际的动态测振应用中, 为了防止由于振幅过大导致的波形削顶与非线性失真, 我们最终选择牺牲部分灵敏度, 换取了具有更大动态余量 (1.4mm) 的 3.75mm-5.15mm 区间。这让我切身体会到, 实际工程应用往往需要在灵敏度、线性度与量程等多个性能指标之间寻找最优折中, 而不能盲目追求单一理论参数的最大化。

此外, 在测量 9Hz 振动频率时, 我们通过电压峰峰值反推算得出的位移高达 2.794mm, 导致测量数据发生失真。结合系统的物理特性分析, 这是因为该激励频率接近了振动台的固有机电共振频率。这一现象的观察与分析, 锻炼了我将物理模型与异常测试数据相结合来排查系统问题的能力。

最后，衷心感谢陈凌翔老师在课堂与实验中的严谨治学和悉心指导，让我们能够扎实掌握传感器的核心原理；同时也非常感谢助教姐姐在实验操作细节与数据处理分析中给予的热心帮助与点拨，让本次实验得以顺利、圆满地完成。