

浙江大學



《生物医学传感与检测》实验报告

项目名称：电容式传感器的特性测试及其应用

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 4 月 23 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: 电容式传感器的特性测试及其应用

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 4 月 23 日

目 录

一、实验目的	2
二、实验原理	2
三、实验器材	3
四、实验步骤	3
五、原始实验数据记录	5
六、实验数据处理与分析	6
6.1 电压与位移 U-Y 关系曲线及特性计算	6
6.2 振动频率比较	7
6.3 振幅-频率特性曲线与固有频率	7
七、问题和讨论	8
八、实验心得	9

一、实验目的

了解差动变面积式电容传感器的原理、特性及应用。

二、实验原理

图 5.1 为差动变面积式电容传感器的实验装置。它由两组上、下层定片和一组固定在振动台上的动片组成，上层定片组与动片组成电容器，总电容值为 C_{X1} ，下层定片组与动片组成另一个电容器，总电容值为 C_{X2} 。当改变振动台上下位置时，动片组跟着改变垂直位置，使动片组与上下两组定片之间的重叠面积相应发生变化，引起上下两组电容器的总电容值 C_{X1} 和 C_{X2} 差动变化。如将 C_{X1} 、 C_{X2} 接入电容—电压变换电路（电容变换器），则变换电路的输出电压 U 与电容变化有关，即与振动台位移量 Y 有关。

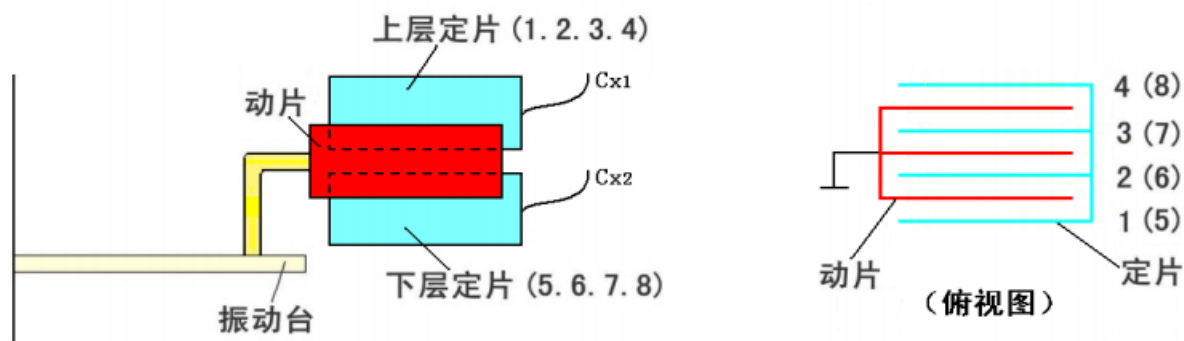


图 5.1 实验装置示意图

图 5.2 为电容变换器电路原理图，电容变换器采用二极管双 T 型交流电桥电路，将两个 差动电容器 C_{X1} 和 C_{X2} 电容值的差值转换为电压信号输出，其电容—电压转换特性为：

$$U \approx E \left[\frac{R + 2R_L}{(R + R_L)^2} \right] R f R_L (C_{X1} - C_{X2})$$

式中

f ——电容变换器高频方波电源的频率；

E ——方波的幅值；

R ——内部固定电阻；

R_L ——负载电阻（可调）；

C_{X1}, C_{X2} ——差动电容。

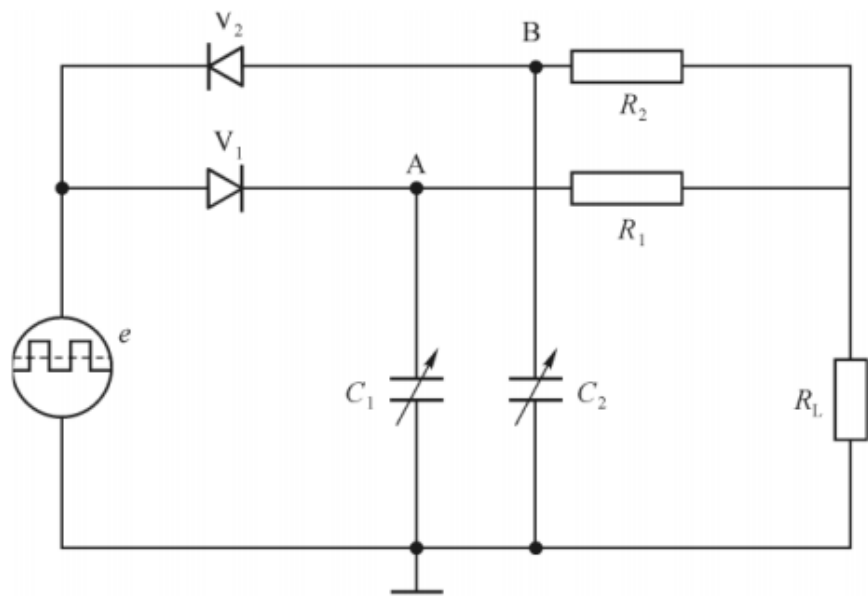


图 5.2 电容变换器电路原理图

三、实验器材

电容传感器、电容放大（变换）器、差动变换（放大）器 II、低通滤波器、电压表、测微头、示波器、低频振荡器。

差动变换器 II 增益旋钮置于中间，电压表置于 2V 档，电容放大器增益最大。

四、实验步骤

- (1) 差动变换器 II 调零。
- (2) 实验按图 5.3 接线。

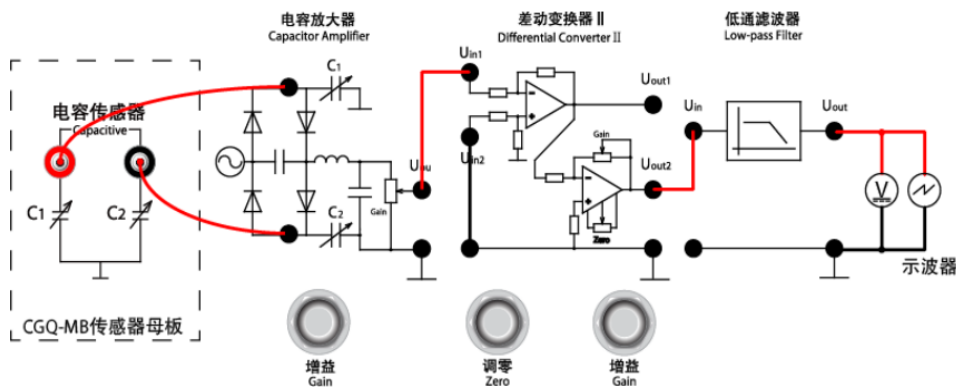


图 5.3 实验接线参考图

- (3) 电压表选 2V 档，安装测微头与圆盘工作台吸合，转动测微头，调节电容传感器动片的垂直位置，直至电压表读数为零，此时电容传感器的动片位于上层和下层定片的正中间 ($C_{X1} = C_{X2}$)，标记为位移零点。
- (4) 转动测微头,上下位移 $\pm 2\text{mm}$ ，每次 0.1mm，记录测微头读数及电压表读数。建议：

找到位移零点后，可将测微头转到+2mm处，从+2mm往下到-2mm连续测量，保持数据的连贯性，避免回程误差。

作出电压和位移 U-Y 关系曲线，求出灵敏度和线性度。

- (5) 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 5.4，调节低频振荡器的幅度和频率，使圆盘工作台产生适当幅度的振动。

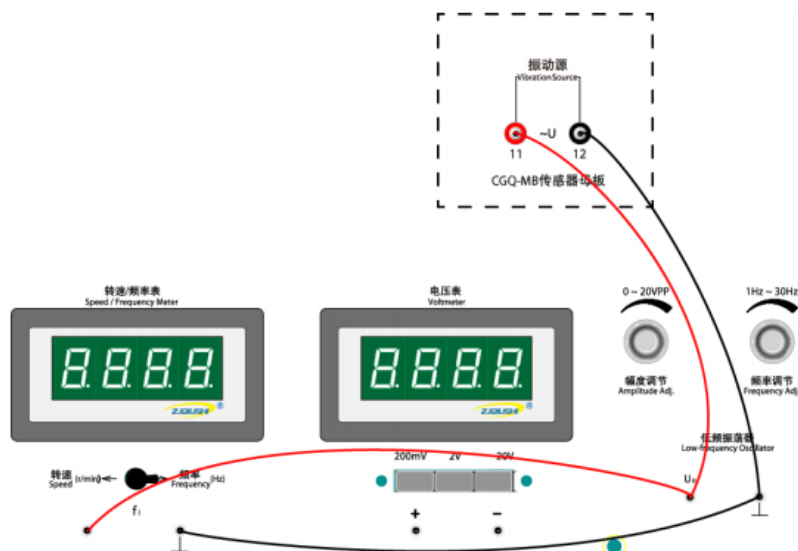


图 5.4 振动接线参考图

- (6) 用示波器观察低通滤波器的输出电压波形，记录振动频率，与低频振荡器的频率相

比较（频率一致吗）；记录输出电压的峰-峰值 V_{p-p} ，通过 U-Y 曲线计算振动幅值 Y_{p-p} 。根据实验结果作出振动平台的振幅——频率(幅频)特性曲线，并指出振动平台自振频率（固有频率）的大致值。（提示：频率太小或太大时，振动平台振幅太小，数据采集不方便，我们可以多取自振频率附近的数据。同时切记避免振动平台振幅过大，会让仪器的固定件松动，降低使用寿命。）

五、原始实验数据记录

表 1：差动电容传感器静态特性测试数据

Y (mm)	U (V)	Y (mm)	U (V)
11.60	-1.50	10.50	-0.69
11.50	-1.43	10.40	-0.61
11.40	-1.35	10.30	-0.54
11.30	-1.28	10.20	-0.46
11.20	-1.21	10.10	-0.39
11.10	-1.13	10.00	-0.31
11.00	-1.06	9.90	-0.24
10.90	-0.99	9.80	-0.15
10.80	-0.91	9.70	-0.08
10.70	-0.84	9.60	-0.01
10.60	-0.76	9.50	0.06
9.40	0.14	8.40	0.90
9.30	0.22	8.30	0.98
9.20	0.29	8.20	1.06
9.10	0.37	8.10	1.14
9.00	0.44	8.00	1.22
8.90	0.52	7.90	1.29
8.80	0.59	7.80	1.37
8.70	0.67	7.70	1.45
8.60	0.75	7.60	1.52
8.50	0.82		

表 2：振动平台幅频特性实验数据记录

频率 f (Hz)	峰-峰值 V_{p-p} (V)	计算振幅 Y_{p-p} (mm)
10	0.672	0.890
11	1.19	1.576
11.5	3.64	4.821
11.83	2.24	2.967
12.3	1.36	1.801

注：固有频率在 11.5Hz 左右。

振幅计算过程：

根据表 1 数据，取全量程进行灵敏度计算。位移变化量 $\Delta Y = 11.60 - 7.60 = 4.00 \text{ mm}$ ，对应的输出电压变化量 $\Delta U = 1.52 - (-1.50) = 3.02 \text{ V}$ 。

静态灵敏度 S 为:

$$S = \left| \frac{\Delta U}{\Delta Y} \right| = \frac{3.02}{4.00} = 0.755 \text{ V/mm}$$

动态振幅峰-峰值 Y_{p-p} 计算公式为:

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

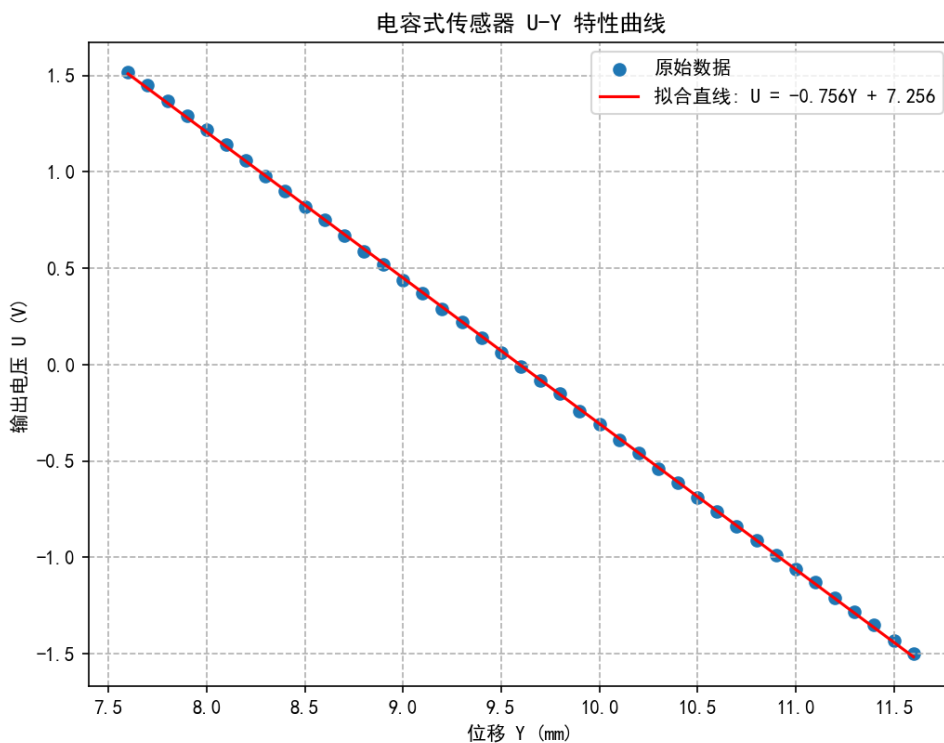
以 $f = 10 \text{ Hz}$ 为例: $Y_{p-p} = \frac{0.672}{0.755} \approx 0.890 \text{ mm}$ 。其余频率计算结果见表 2。

六、实验数据处理与分析

6.1 电压与位移 U-Y 关系曲线及特性计算

使用 Python 进行线性拟合, 代码如下:

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # 设置中文字体, 防止中文乱码 (如果在 Mac 上, 可以将 'SimHei' 改为 'Arial Unicode MS' 或
5 'Songti SC')
6 plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']
7 plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False # 正常显示负号
8
9 # 实验数据
10 Y = np.array([11.6, 11.5, 11.4, 11.3, 11.2, 11.1, 11.0, 10.9, 10.8, 10.7, 10.6,
11 10.5, 10.4, 10.3, 10.2, 10.1, 10.0, 9.9, 9.8, 9.7, 9.6, 9.5, 9.4, 9.3, 9.2, 9.1,
12 9.0, 8.9, 8.8, 8.7, 8.6, 8.5, 8.4, 8.3, 8.2, 8.1, 8.0, 7.9, 7.8, 7.7, 7.6])
13 U = np.array([-1.50, -1.43, -1.35, -1.28, -1.21, -1.13, -1.06, -0.99, -0.91,
14 -0.84, -0.76, -0.69, -0.61, -0.54, -0.46, -0.39, -0.31, -0.24, -0.15, -0.08,
15 -0.01, 0.06, 0.14, 0.22, 0.29, 0.37, 0.44, 0.52, 0.59, 0.67, 0.75, 0.82, 0.90,
16 0.98, 1.06, 1.14, 1.22, 1.29, 1.37, 1.45, 1.52])
17
18 # 线性拟合
19 slope, intercept = np.polyfit(Y, U, 1)
20 U_fit = slope * Y + intercept
21
22 # 绘图
23 plt.figure(figsize=(8, 6))
24 plt.scatter(Y, U, label='原始数据')
25 plt.plot(Y, U_fit, color='red', label=f'拟合直线: U = {slope:.3f}Y +
26 {intercept:.3f}')
27 plt.title('电容式传感器 U-Y 特性曲线')
28 plt.xlabel('位移 Y (mm)')
29 plt.ylabel('输出电压 U (V)')
30 plt.legend()
31 plt.grid(True, linestyle='--')
32 plt.show()
33
34 # 计算线性度
35 max_error = np.max(np.abs(U - U_fit))
36 U_fs = np.max(U) - np.min(U)
37 linearity = (max_error / U_fs) * 100
38 print(f"灵敏度: {abs(slope):.3f} V/mm, 线性度: {linearity:.3f}%")
```



特性求解:

- 灵敏度 S : 通过拟合直线的斜率绝对值求得:

$$S = \left| \frac{dU}{dY} \right| \approx 0.756 \text{ V/mm}$$

- 线性度 δ

$$\delta = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{FS}} \times 100\% \approx 0.554\%$$

6.2 振动频率比较

实验中观察到低通滤波器的输出电压波形频率与低频振荡器的频率在误差允许范围内可以认为一致。

这是由于电容传感器及其信号转换电路（二极管双 T 型交流电桥）是一个线性系统。当动片随振动台以频率 f 做机械简谐振动时，极板间的重叠面积 A 亦随之以频率 f 发生周期性变化，从而调制了输出电压的幅度。经过检波和低通滤波后，还原出的电信号频率直接取决于机械位移的变化频率，因此两者频率保持一致。

6.3 振幅-频率特性曲线与固有频率

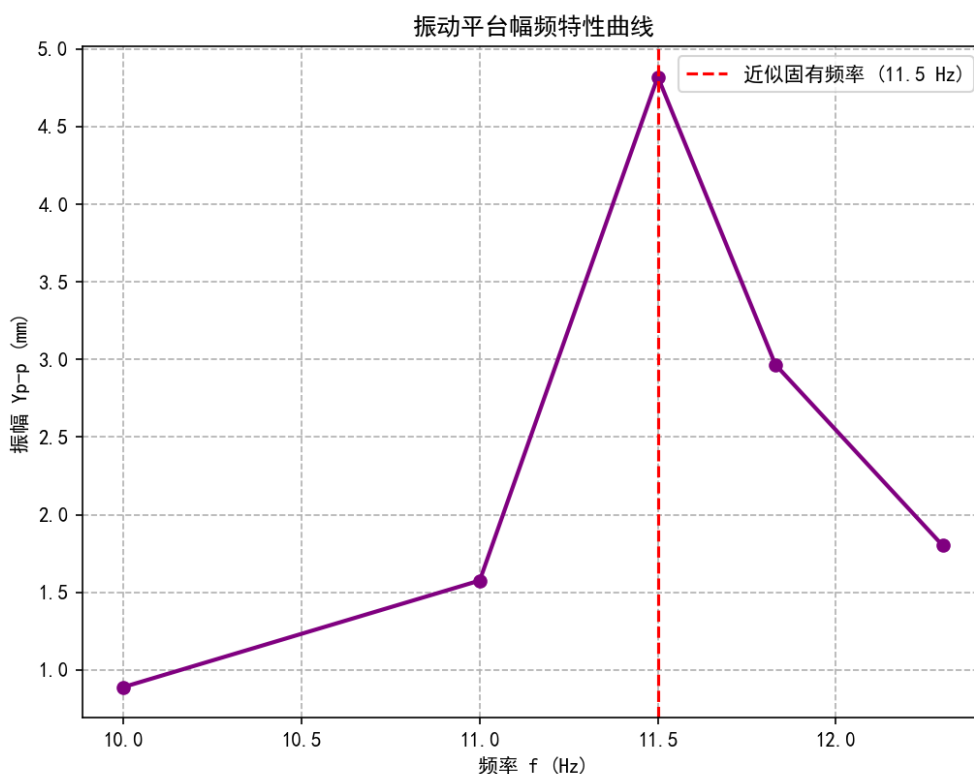
使用 Python 进行线性拟合，代码如下：

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2
3 # 设置中文字体，防止中文乱码
4 plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']
5 plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False
6
7 # 实验数据
```

```

8 f = [10, 11, 11.5, 11.83, 12.3]
9 Y_pp = [0.890, 1.576, 4.821, 2.967, 1.801]
10
11 # 绘图
12 plt.figure(figsize=(8, 6))
13 plt.plot(f, Y_pp, marker='o', color='purple', linestyle='-', linewidth=2)
14 plt.axvline(x=11.5, color='red', linestyle='--', label='近似固有频率 (11.5 Hz)')
15 plt.title('振动平台幅频特性曲线')
16 plt.xlabel('频率 f (Hz)')
17 plt.ylabel('振幅 Yp-p (mm)')
18 plt.legend()
19 plt.grid(True, linestyle='--')
20 plt.show()

```



固有频率判定：观察实验数据及幅频特性曲线可见，在 $f = 11.5$ Hz 附近，输出电压峰-峰值和计算振幅均出现极大值（共振现象）。因此，该振动平台的自振频率（固有频率）大致为 11.5 Hz。

七、问题和讨论

1、与电涡流式传感器进行对比，分析比较这两种传感器测位移在相同区间内的线性度。

在相同的位移测量区间内，差动变面积式电容传感器的线性度显著优于电涡流式传感器。

根据前次实验数据，电涡流传感器在 1.0mm - 1.4mm 的窄量程内线性度约为 5% 左右。而本次实验的电容传感器在 ± 2 mm（总计 4mm）的宽量程内，线性度达到了约 0.554%。

这是由于差动式电容传感器通过结构上的对称性，利用差分电路抵消了单片式传感器中的高阶非线性项。相比之下，电涡流传感器的输出电压与距离的关系本质上是是非线性的（受涡流渗透深度和磁场分布限制），仅在极小的准线性区域内可用，因此电容传感器在大位移测量中具有更明显的线性优势。

八、实验心得

本次传感实验通过亲手操作，我对差动变面积式电容传感器的物理机制和电路原理有了更深刻的理解。它巧妙地将机械位移转化为动极板与定极板重叠面积的变化，进而引起上下两组电容 C_{X1} 和 C_{X2} 的差动变化，最后经由二极管双 T 型交流电桥检波转换为对应的电压信号输出。这种差动结构不仅提高了系统的灵敏度，更重要的是有效地补偿了环境干扰、克服了单片传感器的非线性项。这正是在数据分析时，它能在 $\pm 2\text{mm}$ 的宽量程内依然保持极高线性度（计算非线性误差仅约 0.55%）的核心原因。

在实际动手操作环节，我们也经历了一些波折。在刚开始进行静态标定读取数据时，我们发现电压表读数十分跳跃，记录下的数据毫无线性规律可言，导致根本无法正常进行后续的数据处理。经过仔细检查与排查，我们发现是因为测微头没有与圆盘工作台稳定吸合并固定牢靠。这种机械连接上的微小松散，直接导致了极板间初始位置的随机晃动。在重新紧固测微头并耐心完成差动调零后，电压读数才恢复了稳定连续的变化。这次小插曲让我切身体会到，精密传感检测不仅考验电路的精度，机械结构的稳定性更是获取可靠电气信号的绝对基石。

最后，由衷感谢陈凌翔老师和助教老师在实验中对我们的悉心指导和帮助！