

## 电阻应变式传感器实验内容和原理（必填）

原理：

I 应变片是一种将试件上的应变变化转化成电阻变化的传感元件。

应用应变片测试时，将应变片用粘合剂牢固地粘贴在测试件表面上。当试件受力变形时，应变片的敏感栅也随之变形，电阻也发生相应的变化，通过测量电路将其转换成电压或电流的变化。电桥电路是把被测量转换成电压或电流量的一种常用方法。

II 金属应变片（metal strain gauge）

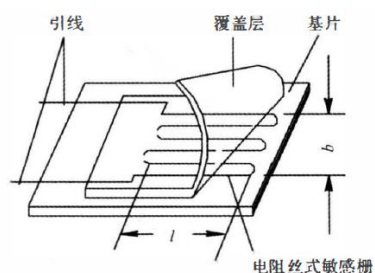


图 1.1 金属应变片的结构

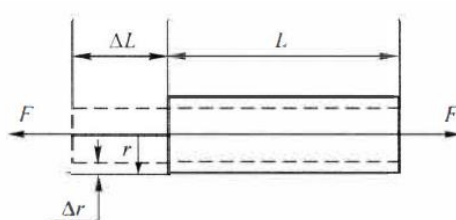


图 1.2 金属电阻丝应变效应原理

金属电阻丝应变效应： $R = \frac{\rho L}{S}$

施加力 \$F\$ 后， $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$

令应变  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ ， $\frac{\Delta S}{S} \approx 2 \frac{\Delta r}{r}$

其中  $\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta L}{L} = -\mu \epsilon$

综上所述  $\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho}$

令  $K = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} / \epsilon$ ，则  $K = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon$ ，即为电阻丝的灵敏度系数。

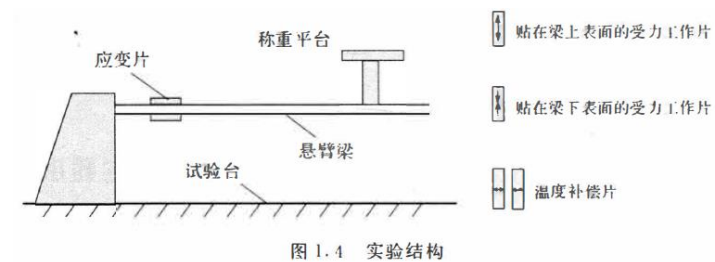
III 金属应变片的优点：

- ①精度高，测量范围广；
- ②频率响应特性较好；
- ③结构简单，尺寸小，重量轻；
- ④可在高低温、高速、高压、强烈振动、强磁场及核辐射和化学腐蚀等恶劣条件下正常工作；
- ⑤易于实现小型化、固态化；
- ⑥价格低廉，品种多样，便于选择。

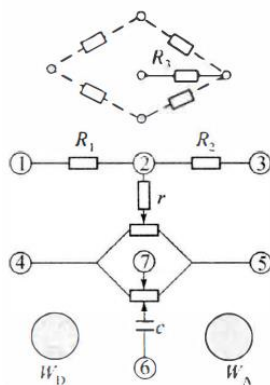
金属应变片的缺点：

- ①非线性，输出信号微弱，抗干扰能力较差，因此信号线需要采取屏蔽措施；
- ②只能测量一点或应变栅范围内的平均应变，不能显示应力场中应力梯度的变化等；
- ③不能用于过高温度场合下的测量。

## 主要仪器设备



直流稳压电源，数字电压表，金属箔式应变片(4 片，位千双孔称重悬臂梁上)，精密电阻，双孔称重悬臂梁，双平行式悬臂梁，差动放大器，低通滤波器，法码，可变电阻  $W_0$ 。



虚线所示的四个电阻并不存在，只是为做实验时接桥路提供方便。

图中： $R_1 = R_2 = R_3 = 350\Omega$ 为精密电阻；②④⑤组成可调电位器  $W_0$ ；④⑤⑦或④⑤⑥组成  $W_A$  可调电位器。

## 四、操作方法与实验步骤

### 金属箔式应变片实验

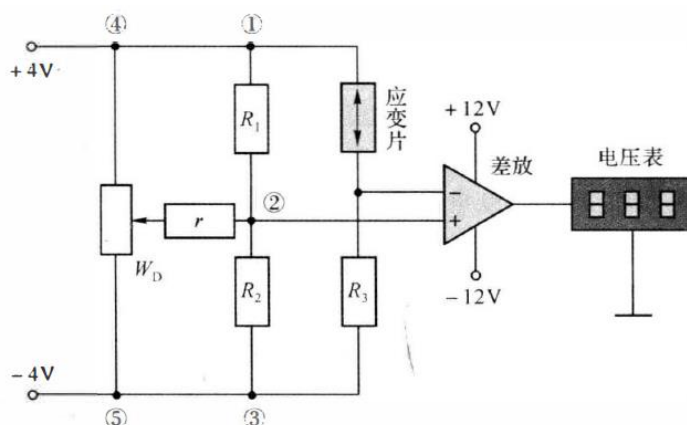


图 1.6 单臂电桥接线

### ①单臂电桥

- 开启仪器总电源，预热数分钟，将差动放大器调零。（差动放大器十、一输入端接地，调节差动放大器的“调零”旋钮，使输出为零）。
- 根据图 1.5 和图 1.6 接线。
- 双孔称重悬臂梁的称重平台上不设法码，使梁处于水平位置（自由状态）。
- 调节  $W_D$  使电路输出为零。通过调节差动放大器增益，调整量程。
- 在称重平台上逐个放上法码，每放一个法码，用数字电压表读取一个数值。根据所得数据列表，作出  $U$ （输出电压）— $X$ （砝码重量）关系曲线，计算灵敏度  $S$ 。

$$S = \Delta U / \Delta X$$

式中  $\Delta U$ ——电压变化值；

$\Delta X$ ——相应的砝码重量变化量。保持放大器增益不变继续以下实验：

### ②半桥测量

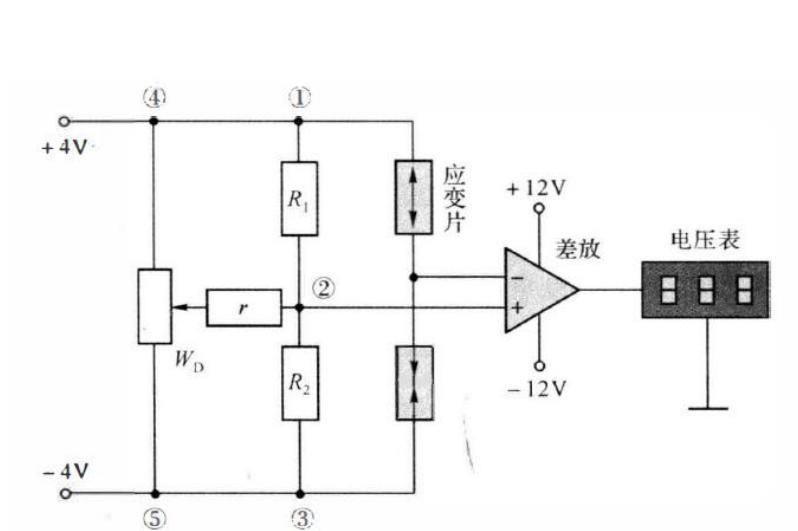
画出半桥接线图，标明应变片的工作状态，按图接线。重复单臂电桥实验步骤，整理数据，作出  $U-X$  曲线。

### ③全桥测量

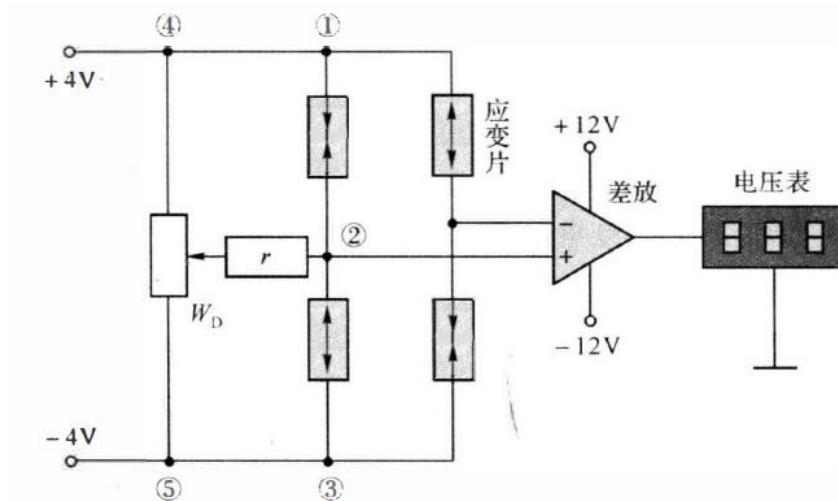
画出全桥接线图，并按图接线。重复单臂电桥实验步骤，整理数据，作出  $U-X$  曲线。

## 实验数据记录和处理

### ②双臂电桥接线图：



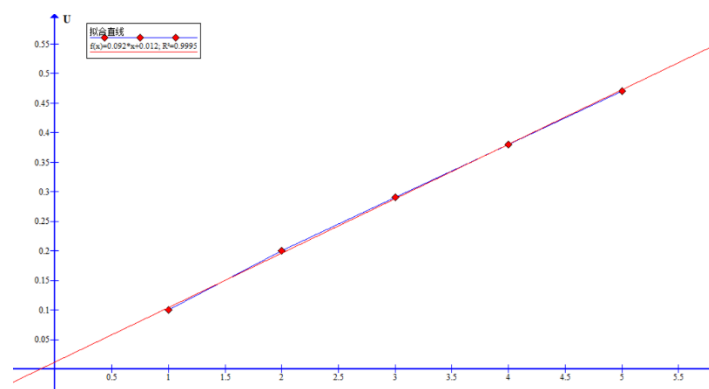
③全桥电路接线图：



## 实验结果与分析（必填）

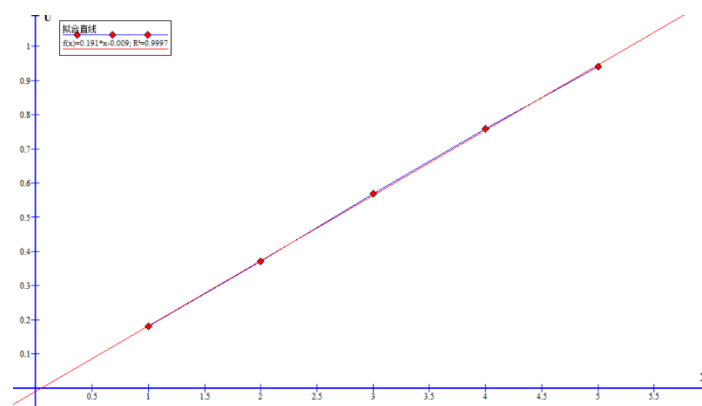
I 结果：

单臂电桥 U-X 关系曲线：



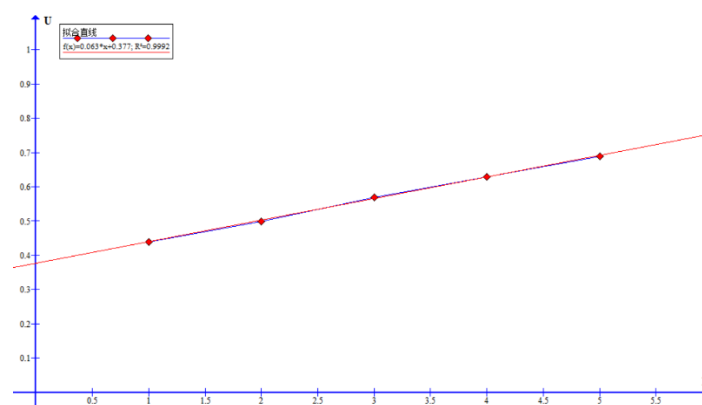
计算得出S值为：0.092

## 双臂电桥 U-X 关系曲线



计算得出 $S$ 值为: 0.191

## 全桥电路 U-X 关系曲线:



计算得出 $S$ 值为: 0.063

全桥电路这里有问题, 由于做单臂电桥和双臂电桥的实验时, 放大器增益倍数调整的太大, 导致在做这个实验时示数溢出出现问题。但实验时间有限, 故只调整了增益来做实验, 而没有进行调零。

双臂电桥比单臂电桥的灵敏度大, 但是全桥电路因为增益倍数设定原因不能进行比较。理论上, 是全桥电路比双臂和单臂电桥灵敏度大。

## II 分析

单臂电桥、双臂电桥、全桥电路的共同点是应用了不平衡电桥的特点, 将把阻值变化转换为电桥中电压输出, 生活中通过一系列转换可以将电压信号转换为其他物理值。

三种桥式电路的不同点是其中应变片的数量, 依次分别为一片、两片 and 四片。当应变片增加, 桥壁上的电阻变化量能够更精细地区分产生的微小变化值, 也就使得桥式测量电路的灵敏度提高。

讨论:

① 单臂、半桥和全桥实验测得的结果与理论上推导的公式相比较, 结果如何?

设变化引起的应变片阻值变化值为  $\Delta R$ , 相对于原电阻  $R$  很小, 则根据电路图和电路知识, 可推得:

单桥的输入电压值

$$((R + \Delta R) / (2R + \Delta R) - 1/2) U = 0.5U * \Delta R / (2R + \Delta R) \approx 0.25U * \Delta R / R;$$

半桥的输入电压值

$$((R + \Delta R) / (R + \Delta R + R - \Delta R) - 1/2) U = (\Delta R / 2R) U = 0.5U * \Delta R / R;$$

全桥的输入电压值

$$((R + \Delta R) / (R + \Delta R + R - \Delta R) - (R - \Delta R) / (R + \Delta R + R - \Delta R)) U = (2 \Delta R / 2R) U = U * \Delta R / R;$$

从而理论值是三者比例约为 1: 2: 4, 实验结果前两者符合, 若第三次实验能正常完成, 应该也符合理论结果。

② 对桥路测量电路有何特别的要求? 为什么?

对于桥式电路, 在初始状态时要组成平衡电桥, 最好是四个桥臂的初始阻值都一样。而且在相邻桥臂上应该布置极性相反的应变片, 而在相对的应变片上布置极性相同的应变片。通过电桥的和差特性, 这样布置能使输出的灵敏度最大, 并且能排除其他负载的影响, 还能进行温度补偿。

## 电感式传感器实验内容和原理 (必填)

差动变压器的基本元件有衔铁、初级线圈、次级线圈和线圈骨架等。初级线圈作为差动变压器激励用, 相当于变压器的原边, 而次级线圈由两个结构尺寸和参数相同的线圈反相串联而成, 形成变压器的副边。差动变压器是开磁路, 工作是建立在互感变化的基础上的。原理及特性见图 3. 1 和图 3. 2。

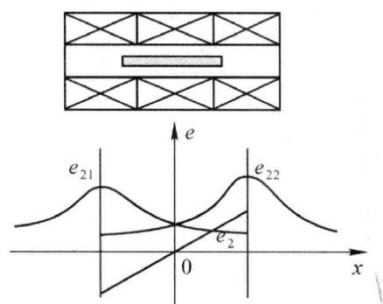


图 3. 1 电感式差动变压器结构及特性

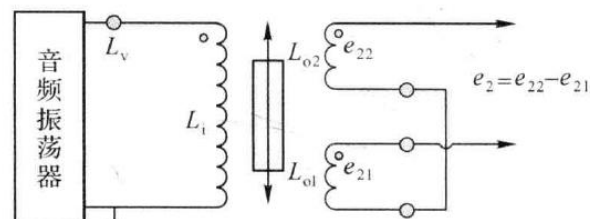


图 3. 2 电感式差动变压器工作原理

## 操作方法与实验步骤

### 1. 差动变压器式电感传感器的性能

① 接图 3. 2 接线, 差动变压器初级线圈的输入必须从音频振荡器  $L_V$  端 (即电流输出端) 输出。示波器的两个通道分别接差动变压器的初级线圈输入端和次级输出端。

②音频振荡器输出频率 4kHz，输出峰—峰值 2V。

③用手提压变压器磁芯，观察次级输出波形是否能过零翻转，如不能则改变两个次级线圈的串接端。

④旋转测微头调节圆盘工作台位置，或者直接调整衔铁位置，将衔铁置于差动变压器的中间，使次级的差动输出为最小。这个最小电压即为零点残余电压，可以看出与输入电压的相位差约为  $8.182^\circ$ ，是 基频 分量。

⑤旋动测微头，每 0.5mm 读取次级输出电压  $e_2$  的峰—峰值  $V_{OP-P}$ ，记录  $\pm 5\text{mm}$  范围内的数据，填入表格 1-1。读数过程中应注意初、次级波形的相位关系。当铁芯从上至下时，相位由 同 相变为 反 相。

⑥根据表格所列数据，画出  $V_{OP-P}-X$  曲线，指出线性工作范围。

## 2. 差动变压器式电感传感器的应用

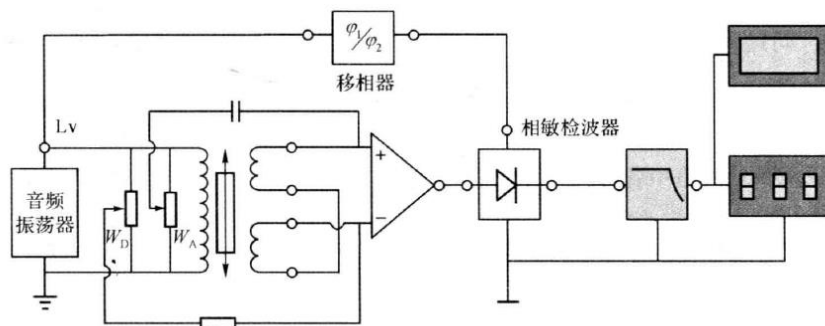


图 3.3 实验接线

①将衔铁置于线圈中间位置。

②接图 3.3 接线，差动放大器增益适度，音频振荡器  $L_v$  端输出，频率 4kHz，峰—峰值 2V。

③用示波器的两个通道同时观察移相器的输出波形和相敏检波器的输入波形，调节“移相”旋钮，使这两路信号完全同相或者反相。

④调节平衡电位器  $W_D$  和  $W_A$ ，使系统输出为零。如无法到零，则需调节测微头微调图衔铁的位置。

⑤旋动测微头，带动衔铁  $\pm 5\text{mm}$  位移，用数字电压表读取系统的输出电压，每 0.5mm 记录一次读数，填入表格 2-1（注意电压值的极性）。

⑥作出电压—位移特性曲线，计算系统的灵敏度和  $\pm 5\text{mm}$  内的线性度。

⑦振动测量：

a. 测量电路同上，将测微头与圆盘式工作台分离，音频振荡输出频率和幅度不变。调整衔铁在支架上的位置，使衔铁位于线圈的中间处，调节  $W_D$  和  $W_A$ ，使系统输出为零。

b. 将低频振荡器上的“转换”开关拨到左边，“激振”开关打到“1”，使低频振荡器输出到圆盘振动台的激振器，从而给圆盘振动台加一个频率为  $f$  的交变力，使振动台上下振动。用示波器观察系统输出波形是否正负对称，如不对称则需反复调节衔铁位置、平衡电位器  $W_D$ 、

$W_A$ 和移相器，直到输出对称。

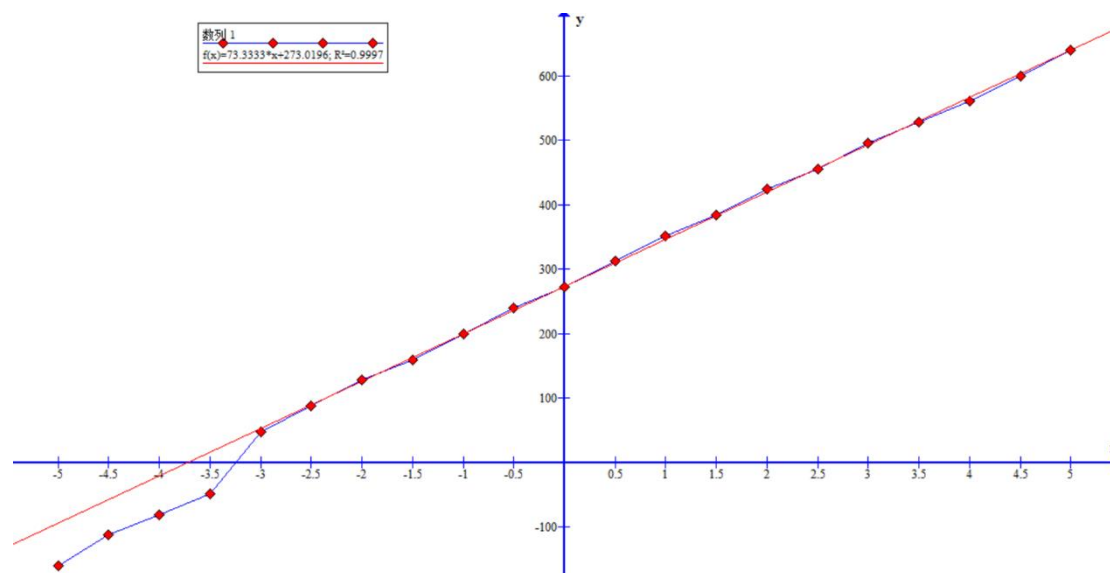
c. 低频振荡器的 " 增益 " 旋钮旋至适中，保持输出幅度不变。用示波器的一个通道从低频振荡器的 $V_O$ 输出端读取低频振荡器的输出频率值，改变输出频率 $f$ ，从 5Hz 到 30Hz，用示波器的另一通道读取不同振动频率下系统输出电压的峰—峰值 $V_{OP-P}$ 并读取电压表的读数 $U$ ，记录实验数据，填入表格 2-2。

根据实验结果，作出圆盘振动台的振幅—频率特性曲线，并指出圆盘振动台自振频率的大致数值。

## 五、实验数据记录和处理

表格 1-1. 差动变压器式电感传感器的性能

$V_{OP-P}$ — $X$ 曲线如下：



由图像可知，系统在测量范围-3mm~+5mm 中间均有良好的线性

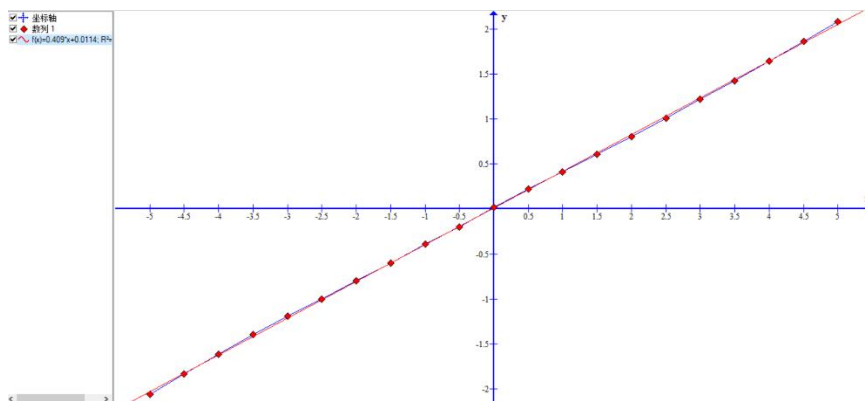
系统的灵敏度： $S = \frac{\Delta V}{\Delta X} = 73.33mV/mm = 0.073333V/mm$

-3mm~+5mm 线性度： $R^2=0.9997$

表格 2-1. 差动变压器式电感传感器的应用

电压—位移特性曲线如下：



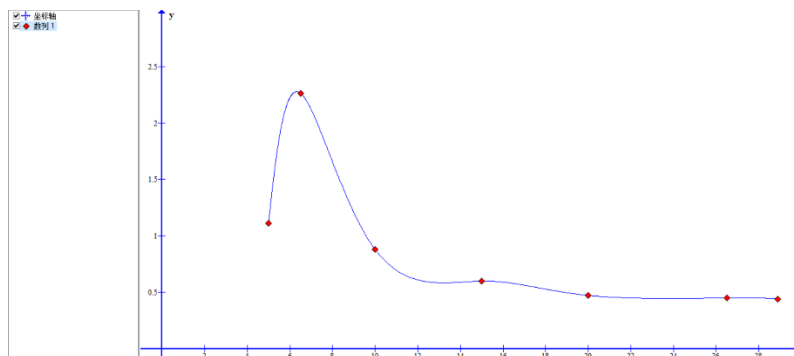


系统的灵敏度:  $S = \frac{\Delta V}{\Delta X} = 0.409 \text{ V/mm}$

$\pm 5\text{mm}$  内的线性度:  $R^2 = 0.9998$

表格 2-2. 差动变压器式电感传感器的应用

振幅—频率特性曲线如下:



由图像估算, 圆盘振动台自振频率约为:  $6.4\text{Hz}$

## 实验结果与分析 (必填)

### I. 差动变压器式电感传感器的性能:

可以看到在  $-3 \sim +5\text{mm}$  区间中, 传感器均有良好的线性, 并且在  $-5 \sim -3\text{mm}$  也有一定的线性, 可能是实验时有些小错误 (比如旋动测微头过头), 存在偶然误差, 理论上线性区间是左右对称的;

位移为 0 时, 电压只有  $0.272\text{V}$ , 相位  $8.182^\circ$ , 是比较小的分量, 在大多情况下可以忽略。

在旋动测微头的过程中, 可以看到相位由同向变为反向, 这也和理论情况符合。

### II. 差动变压器式电感器的应用

实验时由于时间紧张, 导致在  $X=0$  时没有完全调零, 导致电压-位移曲线存在一定的残差, 没有完全关于原点对称。

但整体上, 线性度是很高的, 如果在实验中对 0 进行调零, 就可以得到更好的实验数据。

忽略这一点误差来看, 零点残余电压的确得到了补偿 (相比于之前实验中的  $0.272\text{V}$ )。

圆盘振动台的振幅-频率特性曲线是卡方曲线，可以通过函数拟合有峰值点来推算出圆盘振动台自振频率。由于在低频接近自振频率时，电压幅度变化较大，难以通过示波器准确测量自振频率值。本来应该多测几个数据使得拟合曲线更精确，但迫于时间有限，没能测量更多数据。

#### 讨论：

##### I. 差动变压器式电感传感器的性能

①最小电压波形包含了哪些波形成分？产生的原因是什么？

包含基波分量、高次谐波分量等成分。

基波分量主要是因为差动变压器两个电感线圈结构和参数不完全对称，使得两端感应电动势幅值不等；

高次谐波分量主要因为导磁材料磁化曲线是非线性的。

②采取何种手段可以减小这个最小电压？

一方面可以增加差动变压器的两个电感线圈的对称性，通过提高技术工艺，尽可能消除由非对称带来的影响。

另一方面，对于导磁材料，应该选用导磁率高、磁滞小的材料，尽量能保证工作区间内的磁化曲线是线性的。

还有一种是用补偿电路，把零点残余电压进行补偿，从而消除最小电压，这也是最常用的方法。实验中，通过放大器、移相器和相敏检波器、低通滤波器把高频分量过滤，基波分量补偿，消除最小电压。

##### II. 差动变压器式电感传感器的应用

①通过以上两个差动变压器的应用实例，请你粗略说明一下制作差动变压器要注意的几个主要方面。

第一，差动变压器的两个电感线圈要尽可能对称，在技术工艺上需要尽可能精细，尽可能消除由非对称带来的影响。

第二，选用导磁率高、磁滞小的导磁材料，尽量能保证变压器工作区间内的磁化曲线是线性的。

第三，设置补偿电路，消除由不对称、温漂等因素带来的影响，尽可能消除零点残余电压。

②提高差动变压器式电感传感器的静态特性和灵敏度的途径。

第一，尽可能让振荡器的振荡频率接近圆盘的自振频率，提高圆盘的灵敏度。

第二，提高制作工艺，保证对称性，并做补偿电路等，保证理想的静态特性

第三，选用更好的导磁材料，提高传感器的灵敏度。

## 电涡流式传感器实验内容和原理（必填）

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（铝金属片）安装在振动台上，电涡流式传感器固定在实验仪台板上，上下可以调节。当线圈通以交变电流后，铝金属片上会产生电涡流，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。

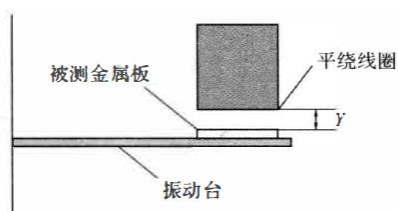


图 4.1 实验结构

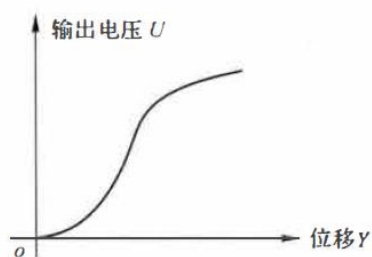


图 4.2 电涡流式传感器特性曲线

## 操作方法与实验步骤

### 1. 电涡流式传感器静态标定

测量系统见图 4. 3，图 4. 4 为测量电路的电原理图。

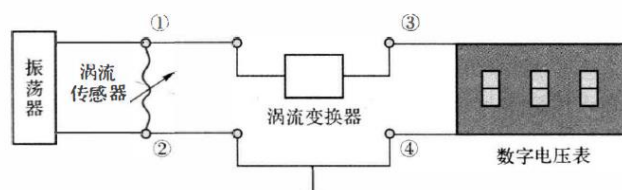


图 4.3 实验接线

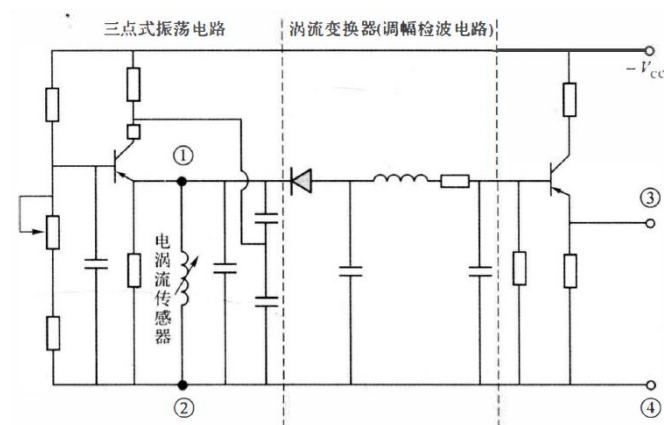


图 4.4 振荡器和涡流变换器的电路

①装好电涡流式传感器，将传感器尾部的引线插入试验台上的插座内，以获得 1MHz 的交流电源。

②按图 4.3 接线。

③将电涡流式传感器远离被测体，用示波器观察①点处电涡流式传感器上的电压波形，此波形为高频 正弦 波形，其频率为 1.2MHz。

④将电涡流式传感器对准铝测片，调节电涡流式传感柁的高度，使其与被测片接触并且

平行，由此开始读数。旋转测微头，每次取  $\Delta Y = 0.1\text{mm}$ ，用示波器观察①点处电涡流式传感器上的电压波形，记录电压峰—峰值  $V_{p-p}(V)$ ；用数字电压表读取③点处涡流变换器的输出电压值  $U(V)$ 并记录，直到线性度严重破坏为止。将数据填入表格 4-1。

- a. 将数据整理好作出 U—Y 曲线。
- b. 求出线性范围为 3mm，线性度为 3%时的系统灵敏度  $S = \Delta U / \Delta Y$ （用误差理论的方法求得）。
- c. 说明电涡流式传感器与被测体之间的最佳初始工作点；单向工作及双向工作时，电涡流式传感器的最佳安装点。

2. 电涡流式传感器的应用

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。

②把低频振荡器上的“转换“开关拨到左边，”激振“开关拨到“1”，使激振器带动圆盘工作台振动。 低频振荡器的增益调至适当大小，使圆盘式工作台产生适当幅度的振动。

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。

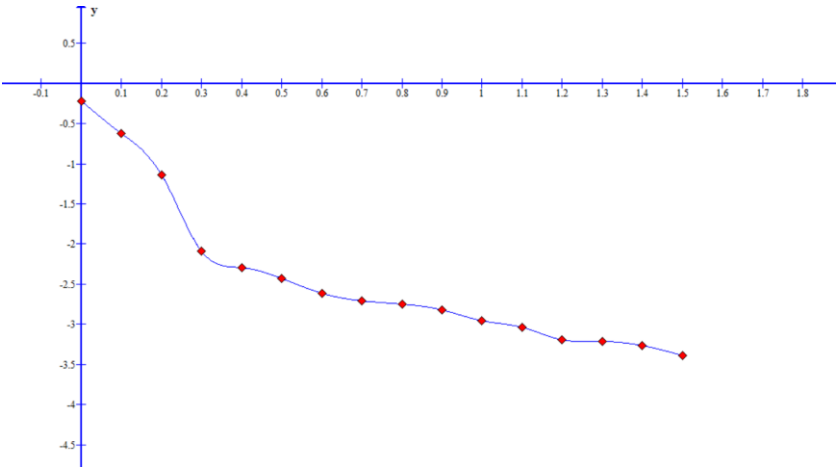
④用示波器的一个通道从低频振荡器的  $V_0$  输出端读取低频振荡器的输出频率值，设置振动频率分别为 10Hz、15Hz、20Hz、30Hz。用示波器的另一个通道观察③点处涡流变换器的输出波形，记录输出电压的峰—峰值  $V_{p-p}$ 。计算被测体的振动幅值  $Y_{p-p}$ ，填入表格 4-2。

注意事项

- ①不能将激振频率打得过低，以免产生过大的振幅。
- ②调节低频振荡器输出幅值时，要缓慢旋动“增益”旋钮。

五、实验数据记录和处理

表格 4-1. 电涡流式传感器静态标定

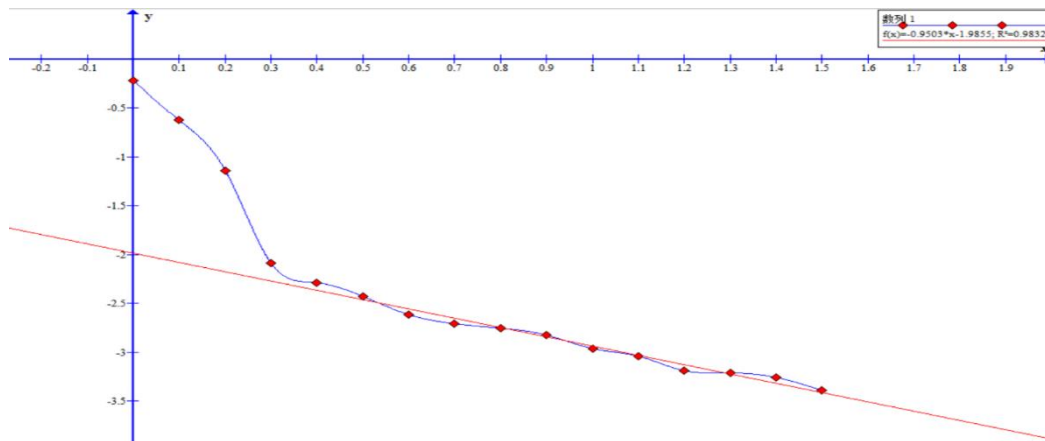


## 实验结果与分析（必填）

### 1. 电涡流式传感器静态标定

随着位移的增大，电压不断增大。最初是缓慢上升，然后突然快速增大，最后缓慢上升。本次实验由于没明白实验意图，误把 $V_{p-p}(V)$ 处于非线性区作为停止记录数据的依据，导致记录的实验数据缺少一半。根据理论和已测数据可以推测，U 最后趋于平缓上升。

b. 求出线性范围为 3mm，线性度为 3%时的系统灵敏度 $S = \Delta U / \Delta Y$ （用误差理论的方法求得）。



由图像可知， $S=0.9530$

c. 说明电涡流式传感器与被测体之间的最佳初始工作点；单向工作及双向工作时，电涡流式传感器的最佳安装点。

电涡流式传感器与被测体之间的最佳初始工作点应为开始迅速上升的临界点处，因为此处灵敏度大，线性度高，选择起点使得工作区间最大。

双向工作时最佳安装点应为中间快速上升区间的中点处，这样可以保证两个方向的灵敏度和线性度。

### 2. 电涡流式传感器的应用

从表格数据可以看出，当频率较大时， $V_{p-p}$ 值较小，振动幅值较小。

用示波器的两个通道同时观察涡流变换器的输入、输出波形时：频率较低时，图像为上下跳动的正弦波和一条直线波，频率较高时（接近 30Hz），图像为两个相互反相的正弦波。

### 讨论：

①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？

0.5mm，在中间可以保证输出电压的峰峰值都在线性有效区间。

②如果已知被测体振幅峰—峰值为 0.2mm，传感器是否一定要安装在最佳工作点处？

不一定，由于振幅峰峰值较小，故即便与最佳工作点有一定的偏移，仍能保证在较大的范围内测量的电压都处于线性范围中。

③如果涡流传感器仅用来测量振动频率，工作点问题是否仍然重要？

不重要，工作点的作用主要是保证测量时振幅始终在线性范围内，也就是波形不会失真，但对于振动频率而言，波形失真与否对频率测量不会有影响。

④请举出几个电涡流传感器应用的例子。

测量物体位移和振幅，测量物体尺寸和温度等；转速计。

⑤请根据实验结果总结电涡流传感器的特点。

灵敏度高；抗干扰能力强；非接触测量；响应速度快；分辨力高；结构简单，使用方便；不受介质影响。

## 电容式传感器实验内容和原理（必填）

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。

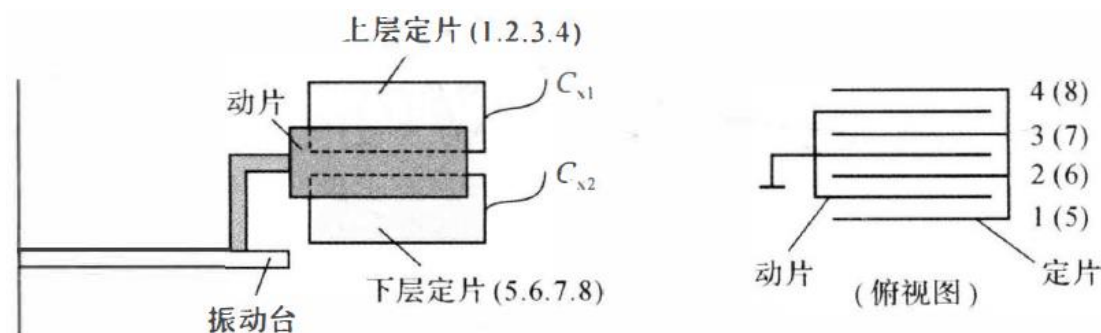


图 5.1 实验装置原理

### 差动变面积式电容传感器的测量电路

图 5.2 中，图(a)为实验接线图；图(b)为电容变换器单元电路在仪器面板上的示意图；图(c)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：

$$U_L \approx E \left[ \frac{(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \right] R f R_L (C_{x1} - C_{x2})$$

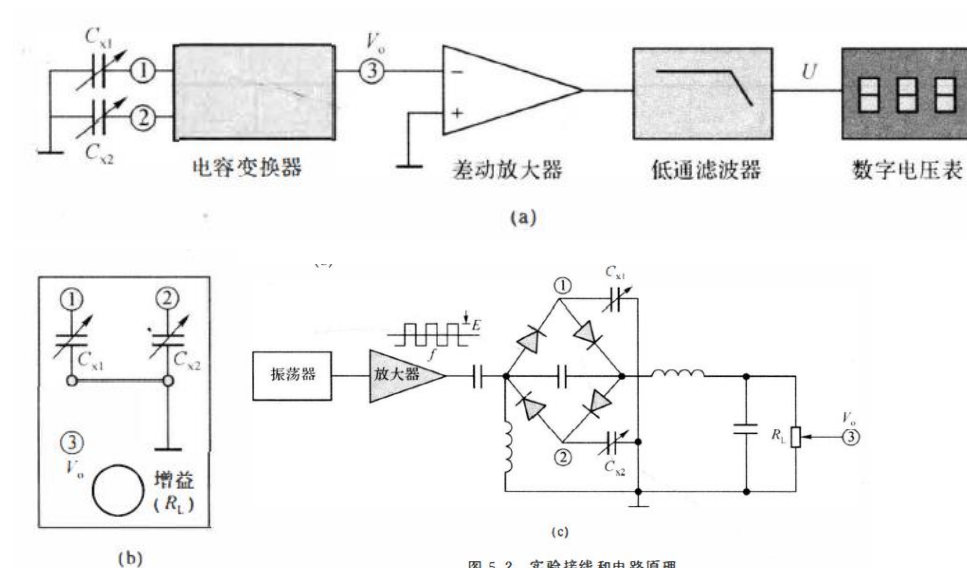
式中， $f$ ——电容变换器高频方波电源的频率；

$E$ ——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。



## 操作方法与实验步骤

- ①按图 5. 2 (a) 接线。
- ②将差动放大器正、负输入端接地，并旋动调零电位器，使电压表读数为零。
- ③调节电容变换器的输出电位器（图 5. 2 (b) 中的 $R_L$ ），使其接近最大位置（右旋到底为最大）。
- ④将电容变换器的输出端③接差动放大器“—”输入端。把测微头与振动台吸合，旋动测微头，调节电容传感器动片的垂直位置，观察直流电压表的电压读数，直至读数为零。此时电容传感器的动片位于上层和下层定片的正中间（ $C_{x1} = C_{x2}$ ）。
- ⑤旋动测微头，改变振动台位置 $Y$ ，每次取 $\Delta Y = 0.2mm$ ，并记录相应的电压表读数，填入表格 5-1 中，直至线性度完全破坏为止。
- ⑥退回测微头至初始位置，使振动台向相反方向移动，读取相应数值，记入表格 5-2 中。
- ⑦松开测微头，断开电压表。把低频振荡器上的“转换”开关拨到左边，将“激振”开关拨到“I”，振荡器的增益调至适当大小，使圆盘式工作台产生适当幅度的振动。调节低频 振荡器的频率，用示波器观察低通滤波器的输出电压波形，记录振动频率，并与低频振荡器的频率相比较。

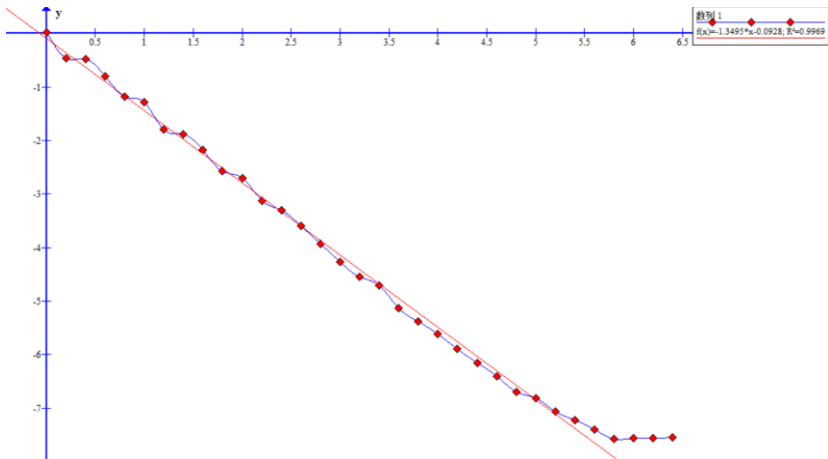
数据处理：

- ①作出电压和位移 $U - Y$ 关系曲线，求出灵敏度。
- ②找出 3mm 的线性范围。

实验数据记录和处理

表格 5-1，向上旋动测微头的读数：

作出对应图像为：



去除最后三个明显的处于非线性范围的点，在线性区间内，

灵敏度为 $\Delta S = \frac{\Delta U}{\Delta Y} = 1.3495 \text{ V/mm}$

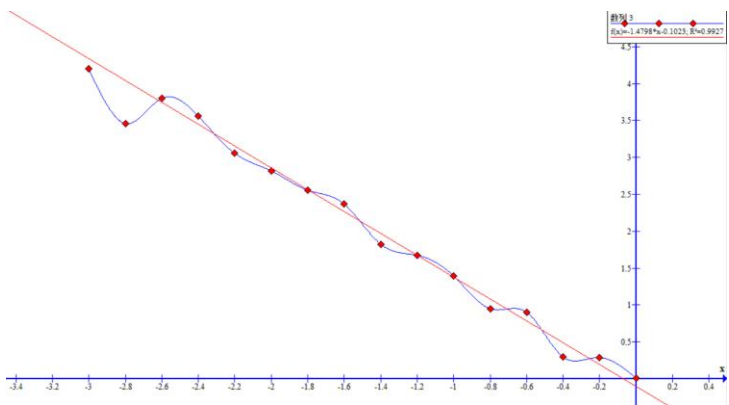
选取从 Y=0 至 Y=5.4 的点，作出残差-拟合 Y 值图：

从图中可知，线性度 =  $\frac{0.179}{7.3801 - 0.0928} * 100\% = 2.24\%$ ,

得到向上旋转时线性度为 3%的范围为 0mm - 5.4mm

表格 5-2，向下旋动测微头的读数：

作出对应图像为：



去除最后三个明显的处于非线性范围的点，在记录的数据范围内，

灵敏度为 $\Delta S = \frac{\Delta U}{\Delta Y} = 1.4798 \text{ V/mm}$

低频滤波器与低频振荡器的波形比较：

将下文两图进行比对可以看出，低频滤波器和低频振荡器的输出波形频率接近，只是在振荡频率比较低时两信号基本同相；振荡频率比较高时，两信号反相。



## 实验结果与分析（必填）

对数据进行分析，可以看到在中间正负两个方向中，有一个比较大的线性区间，而且正负两边的灵敏度相近。由于非线性部分测得数据较少，推测是非线性区间是在缓慢变化。

由于测微头在旋进旋退中存在回程差，导致测量数据会出现变化快慢不一致。

### 讨论：

①与电涡流式传感器作比较，比较两种传感器在相同区间内的线性度。

电涡流式传感器测得的线性度为 7.74%，电容式传感器是 2.24%，虽然电涡流式传感器实验时测得数据不够充分，但可以看出电容式传感器的线性度是很好的，应该比电涡流式传感器要好。

②变面积式电容传感器与变极距式电容传感器相比哪一种线性好？讨论它们存在非线性的原因。

一般变面积式电容传感器线性较好，而变极距式电容传感器的灵敏度较高。

变面积式电容传感器适合测量较大的位移，如果测小位移，则由于面积的减小，边缘效应加剧到无法被忽略的程度，使得测量结果非线性。

变极距式电容传感器则是相对位移越大，非线性程度越高。另外由于其灵敏度与初始极距成反比，为了高灵敏度需要减小初始极距，而初始极距减小会使得非线性程度增大。

## 压电式传感器实验内容和原理（必填）

压电加速度计是根据压电原理制成的测量振动的传感器，图 6.1 是一种压缩式压电加速度计的结构原理图。

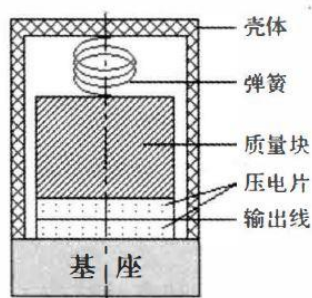


图 6.1 压缩式压电加速度传感器的结构原理

压电元件固定在外壳基座上，其上的质量块用弹簧施加预压力，其力学模型可简化为一个单自由度质量——弹簧系统。当有一个振动激励该质量——弹簧系统时，传感器内部的敏感质量块感受到振动后对压电元件施加作用力，作用力  $F$  可用下式表示：

$$F = ma$$

式中  $m$ ——敏感块的质量；

$a$ ——敏感质量块的加速度。

由于压电元件的压电效应，压电元件受力后产生的电荷量与其所受到的力成正比，即

$$Q = d_{ij}F = d_{ij}ma$$

式中  $d_{ij}$ ——压电材料的压电系数。

对于每只压电加速度计，其内装压电晶体的压电系数和敏感块质量均为常量，所以压电元件受力后产生的电荷量 $Q$ 与加速度 $a$ 成正比。因此，只要测量压电加速度计输出的电荷量，即可确定振动所产生的加速度值，并可由此测量振动的频率和幅度。

为了改善压电传感器的低频特性，常采用电荷放大器。电荷放大器由一个反馈电容 $C_f$ 和高增益运算放大器构成，电荷放大器等效电路如下图 6.2 所示。

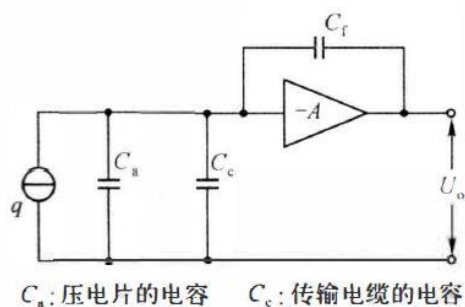


图 6.2 电荷放大器等效电路

当开环增益足够大时，电缆电容和传感器电容可以忽略，输出电压仅为输入电荷及反馈电容的函数：

$$U_o = -q/C_f$$

电荷放大器的输出电压与电缆电容无关，因此可以采用长电缆进行远距离测量，并且电缆电容变化也不影响灵敏度，这是电荷放大器的最大特点。

压电传感器不能用于静态测量，因为经过外力作用后产生的电荷，只有在测量电路具有无限大的输入阻抗时才能保存，而实际情况无法做到这样，这就决定了压电传感器只能测量动态的应力。在本实验中，当振动频率过低（ $<3\text{Hz}$ ）时，电荷放大器将无输出。

## 操作方法与实验步骤

- ①观察装于平行式悬臂梁上的压电加速度计结构。
- ②将压电加速度计的输出用短线引到电荷放大器的输入端，然后将电荷放大器的输出接到低通滤波器的输入端，如图 6-3 所示。

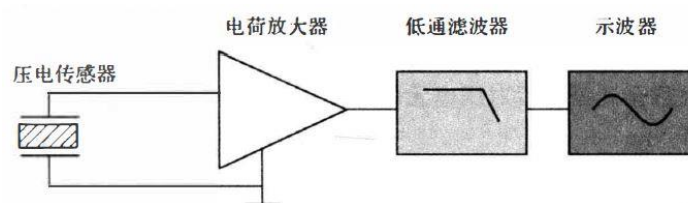


图 6.3 压电式加速度计的实验系统连接

③把低频振荡器上的“转换”开关拨到左边，将“激振”开关切换到 II，使低频振荡器输出到平行式悬臂梁的激振器，从而带动平行式悬臂梁振动。

④开启电源，将低频振荡器的频率打到 5~30Hz 范围内，适当调节低频振荡器的“增益”，使悬臂梁的振动不至于过大。

⑤用示波器的两个通道同时观察电荷放大器与低通滤波器的输出波形，说明观察到的现象并解释原因。

⑥用手轻击试验台，观察输出波形的变化。可见敲击时输出波形会产生“毛刺”，试解释原因。

⑦保持低频振荡器的输出幅度不变，用示波器的一个通道从低频振荡器的  $V_0$  端读取低频振荡器的输出频率值，改变输出频率  $f$ ，从 5Hz 到 30Hz，用示波器的另一通道读取不同振动频率下测量系统输出电压的峰—峰值  $V_{OP-P}$ ，记录实验数据，填入表格 6-1。

根据实验结果，作出平行式悬臂梁的振幅—频率特性曲线，并指出悬臂梁自振频率的大致数值。

注意事项：

①平行式悬臂梁振动时应无碰撞现象，否则将严重影响输出波形。如有必要可松开梁的固定端，小心调整一下位置。

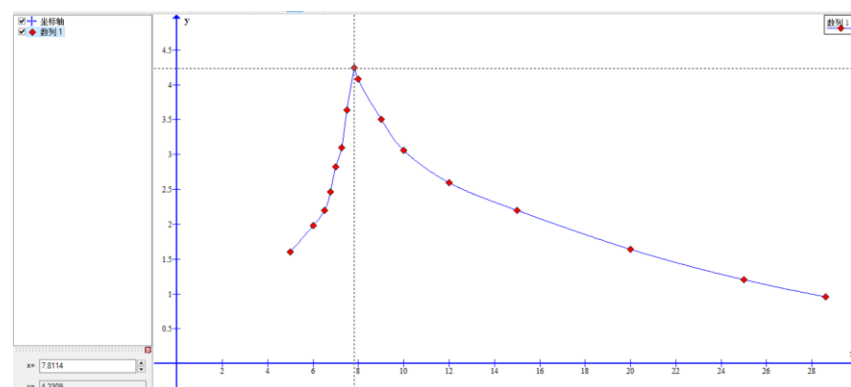
②低频振荡器的输出幅度应适当，避免失真。

③仪器应可靠接地，以减小工频干扰。

## 五、实验数据记录和处理

表格 6-1：输出频率  $f$  与输出电压的峰—峰值  $V_{OP-P}$ ：

由实验数据作图，观察拟合曲线，可推测最大振幅在约 7.8Hz，即悬臂梁的共振频率为 7.8Hz



## 实验结果与分析（必填）

### I. 观察电荷放大器与低通滤波器的输出波形：

这里失误没有拍全，只拍了之后低频振荡器的输出波形(测量系统的输出波形的关系)。

实验过程中可以观察到两个波形存在约  $180^\circ$  的相位差，且两个波形均为正弦波形。

另外，输出电压与敏感质量块的加速度有关：加速度越大，波形对应的电压越大。

### II. 用手轻击试验台，可见敲击时输出波形会产生“毛刺”。

由于轻击试验台时，敏感质量块会产生额外的加速度，从而影响敏感质量块的振动，以及输出电压的大小。但由于轻击使得额外加速度的持续时间短，产生的变化幅度小，使得输出电压产生小突变，也就是“毛刺”。

#### 讨论：

①为什么电荷放大器与压电加速度计的接线必须用屏蔽线或者短线，否则会产生什么问题？

由于压电式传感器的输出电荷量很小，必须用电荷放大器来进行放大，变成明显的电压信号。因此如果在放大器放大前，微量的电荷等干扰都会被放大成很大的实验误差，因此必须用屏蔽线或者短线，来避免其他来源的电磁干扰和噪声，使实验结果更准确。

③ 必须将传感器的基座固定在振动梁上，否则人体的干扰会比较严重，为什么？

由于轻击试验台都会使得输出电压曲线出现毛刺，如果传感器不被固定住，那么人体的任何运动都可能会影响敏感质量块的加速度，而且往往幅度会很大，导致输出信号受到较严重的干扰。