

# 浙江大学



## 测控技术实验-控制实验报告

姓名： 徐屹寒

学院： 机械工程

系： 机械

专业： 机械工程

学号： 3230103743

2025 年 10 月 27 日

# 浙江大学实验报告

实验项目名称：测试技术实验 2 ： 传感器综合实验 1

同组学生姓名：张一多

## 一、实验目的和要求

- 1.了解金属箔式应变片的工作原理并进行全桥性能测试
- 2.了解运算放大器构成的移相电路的原理及工作情况；学会使用示波器进行基础信号测试
- 3.了解相敏检波器的原理和工作情况。

## 二、实验内容

- 1.金属箔式应变片性能及全桥测试实验
- 2.移相器实验
- 3.相敏检波器实验

## 三、实验结果（原理）分析

### 1.金属箔式应变片性能及全桥测试实验

#### 实验原理：

BF1,BF3 放上砝码后电阻变大，对应受力时拉伸应变区域，在上方；  
BF2,BF4 放上砝码后电阻变小，对应受力时压缩应变区域，在下方。

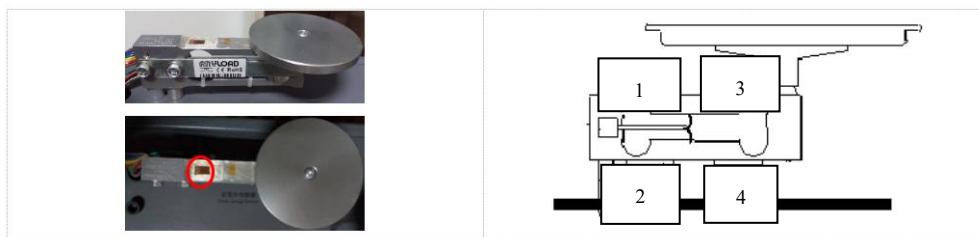


图 1.1 应变片示意图

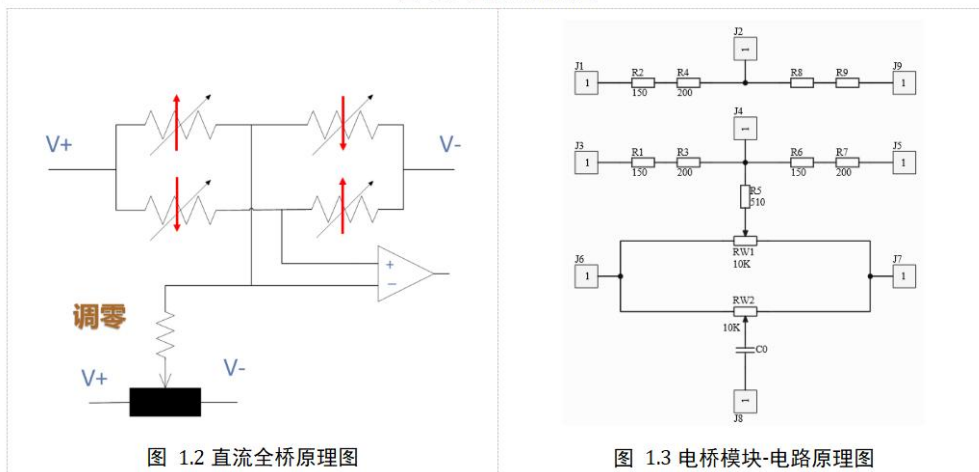
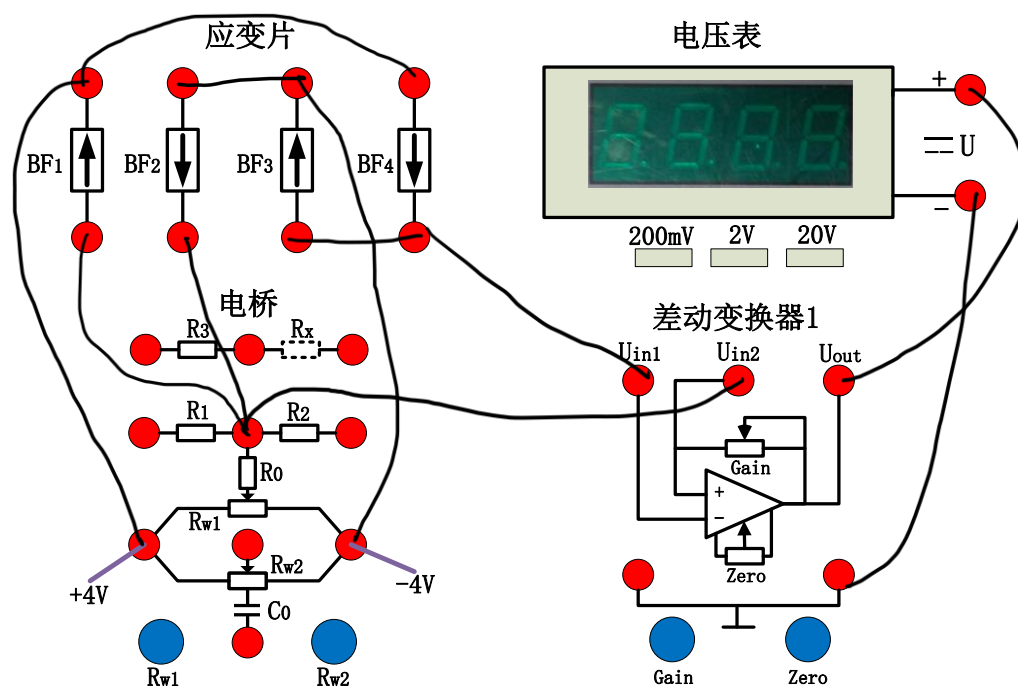


图 1.2 直流全桥原理图

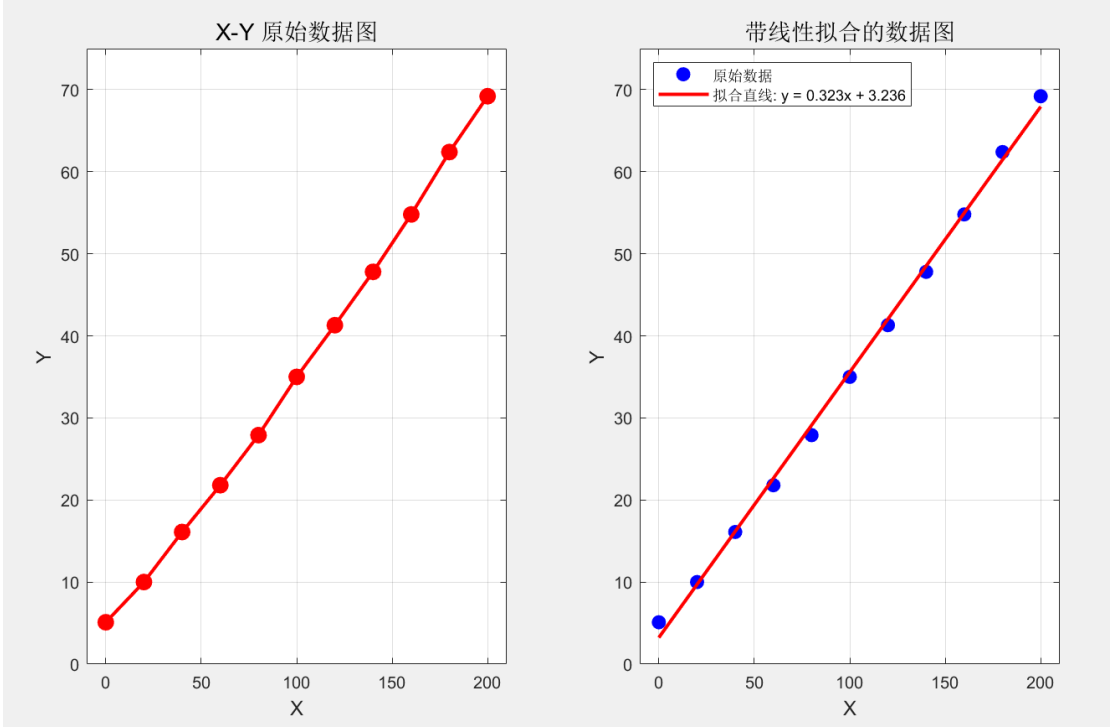
图 1.3 电桥模块-电路原理图

实际接线图如图所示。



实验结果和分析：

重量 /g	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
电压 /mv	5.1	10.0	16.1	21.8	27.9	35.0	41.3	47.8	54.8	62.4	69.2



① 通过拟合直线得到灵敏度  $S = \frac{\Delta U}{\Delta m} = 0.323(V / kg)$

② 全桥测试原理：全桥由四个电阻组成，形成一个闭合回路。当对角线上两个电阻的比值相等时，电桥处于平衡状态，此时没有电流通过电桥中心的检测器。如果其中一个或多个电阻发生变化，电桥就会失去平衡，导致检测器显示出电压差。本实验中是由于放上砝码后，应变片受力引起电阻变化。

③ 非线性产生的原因有：

1. 应变片存在应变极限，只在一定范围内是线性的，同时存在零点偏移。
2. 电压表示数存在波动，会存在误差。
3. 未完全调零。
4. 应变片安装的位置不够对称可能导致测量结果出现偏差。

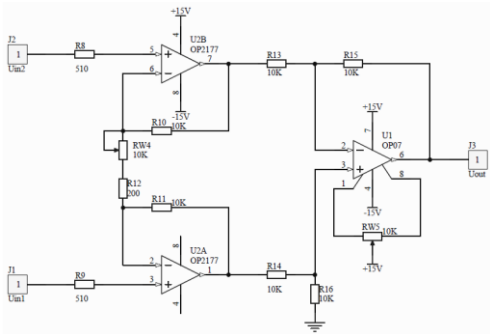
④ 差动放大器的放大倍数分析

$$U_{in1} = U_2 = U_3$$

$$U_{in2} = U_5 = U_6$$

$$\frac{U_7 - U_6}{R_{10}} = \frac{U_6 - U_2}{R_{w4} + R_{12}} = \frac{U_2 - U_1}{R_{11}}$$

$$U_1 \frac{R_{16}}{R_{14} + R_{16}} = U_7 - (U_7 - U_{out}) \frac{R_{13}}{R_{13} + R_{15}}$$



$$U_{out} = U_1 - U_7 = (U_{in1} - U_{in2}) \left( 1 + \frac{20k\Omega}{R_{w4} + 200\Omega} \right)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in1} - U_{in2}} = 1 + \frac{20k\Omega}{R_{w4} + 200\Omega}$$

## 2. 移相器实验

实验原理：

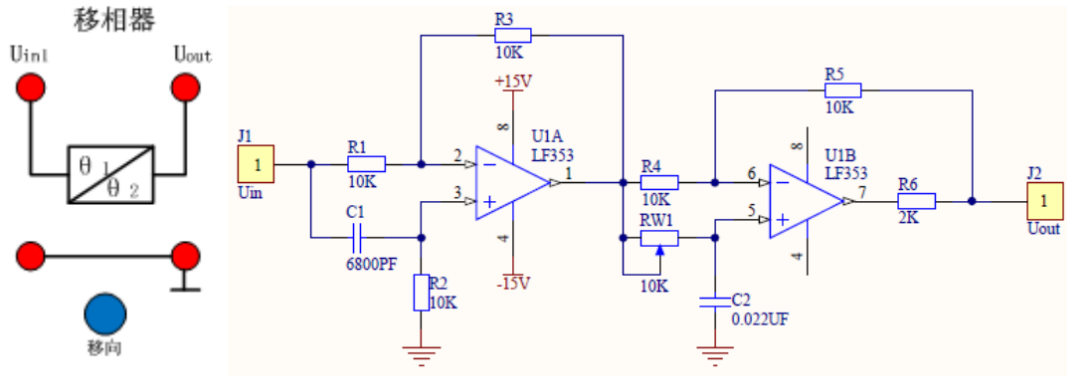


图 2.1 移相器模块及其电路原理图

[提取文字](#) [更多](#)

传递函数推导：

$$U_3 = U_2$$

$$U_2 = U_1 - \frac{U_1 - U_{in}}{R_1 + R_3} R_3$$

$$U_3 = \frac{U_{in}}{R_2 - jX_{c1}} R_2$$

$$U_1 = U_{in} \left( \frac{2R_2}{R_2 - jX_{c1}} - 1 \right)$$

$$U_{out} = U_{in} \left( \frac{R_2 + jX_{c1}}{R_2 - jX_{c1}} \times \frac{X_{c2} - jR_{w1}}{X_{c2} + jR_{w1}} \right)$$

$$\varphi = U_{out} - U_{in} = \pi - 2 \arctan \omega C_1 R_2 + 2 \arctan \omega C_2 R_{w1}$$

$$\varphi' = U_{in} - U_{out} = -\pi + 2 \arctan \omega C_1 R_2 - 2 \arctan \omega C_2 R_{w1}$$

分析：输出信号与输入信号之间存在相位差，

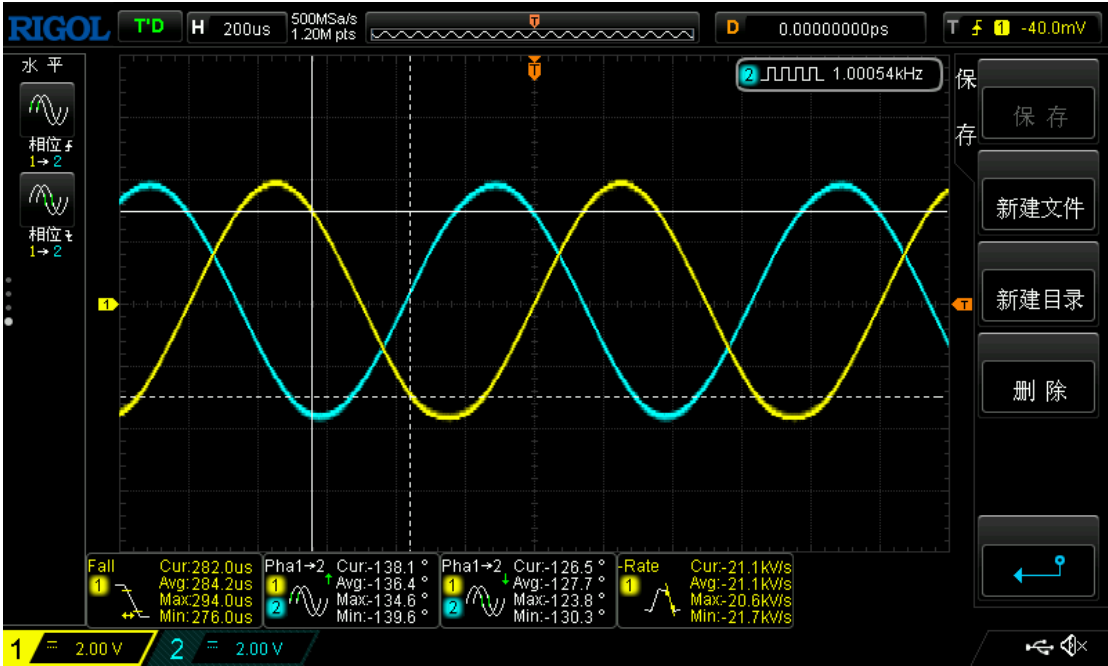
$$U_{in} - U_{out} = -\pi + 2 \arctan \omega C_1 R_2 - 2 \arctan \omega C_2 R_{w1}$$

根据原理图计算相位差理论值:

	RW1=0K（移相旋钮左旋到底）		RW1=10K（移相旋钮右旋到底）	
频率	相位 1→2 $\angle$ (°)	相位 1-2 $\angle$ (°)	相位 1→2 $\angle$ (°)	相位 1-2 $\angle$ (°)
1K	221	-129	-34	-28
2K	256	-95	34	37
4K	296	-59	94	94
6K	-42	-42	-247	121
8K	-32	-28	-228	136
10K	-30	-28	138	-216

实验结果：

现象分析：CH1，CH2 波形如下图所示，黄色波形为 CH1，蓝色波形为 CH2，相位 1→2 表示相位 2 减去相位 1（因为图中相位 2 滞后于相位 1，测量得到的相位差为-130° 左右）。



改变 RW1 的值和输入信号的频率得到以下相位差测量值，并进行数据分析：

频率	RW1=0K（左旋到底）				
	相位 1→2 (°)	相位 1-2 (°)	实测相位差 Φ1	计算相位差 Φ1'	误差百分比
1K	-136.6	-127.7	-132.15	-133.73	1.18%
2K	-103.1	-91.5	-97.3	-98.979	1.70%
4K	-65.7	-58.9	-62.3	-60.67	2.69%
6K	-44.3	-41.3	-42.8	-42.62	0.42%
8K	-34.0	-27.1	-30.55	-32.62	6.35%
10K	-32.9	-21.9	-27.4	-26.35	3.98%

频率	RW1=10K（右旋到底）				
	相位 1→2 (°)	相位 1-2 (°)	实测相位差 Φ1	计算相位差 Φ1'	误差百分比
1K	-37.3	-28.5	-32.9	-25.5	29.02%
2K	39.0	37.1	38.05	41.26	7.78%
4K	95.2	96.3	95.75	98.83	3.12%
6K	117.3	124.0	120.65	123.63	2.41%
8K	130.5	137.4	133.95	137.05	2.26%
10K	138.0	146.3	142.15	145.38	2.22%

### 实验结果分析

频率不变， $R_{w1}$  变大时， $U_{in} - U_{out}$  变大。 $R_{w1}$  不变，频率变大时， $U_{in} - U_{out}$  变大

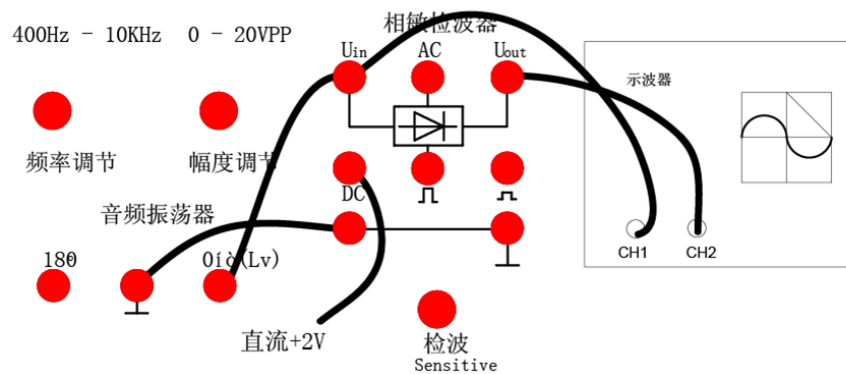
存在误差的原因可能是

1. 精准调到相应数值
2. 电值和电阻值与标定的数值不同
3. 示波器显示的相位差在上下波动，未完全稳定

### 3. 相敏检波器实验

准备直流模块±2V，音频振荡器  $V_{pp} = 8V$ 、频率 4K。

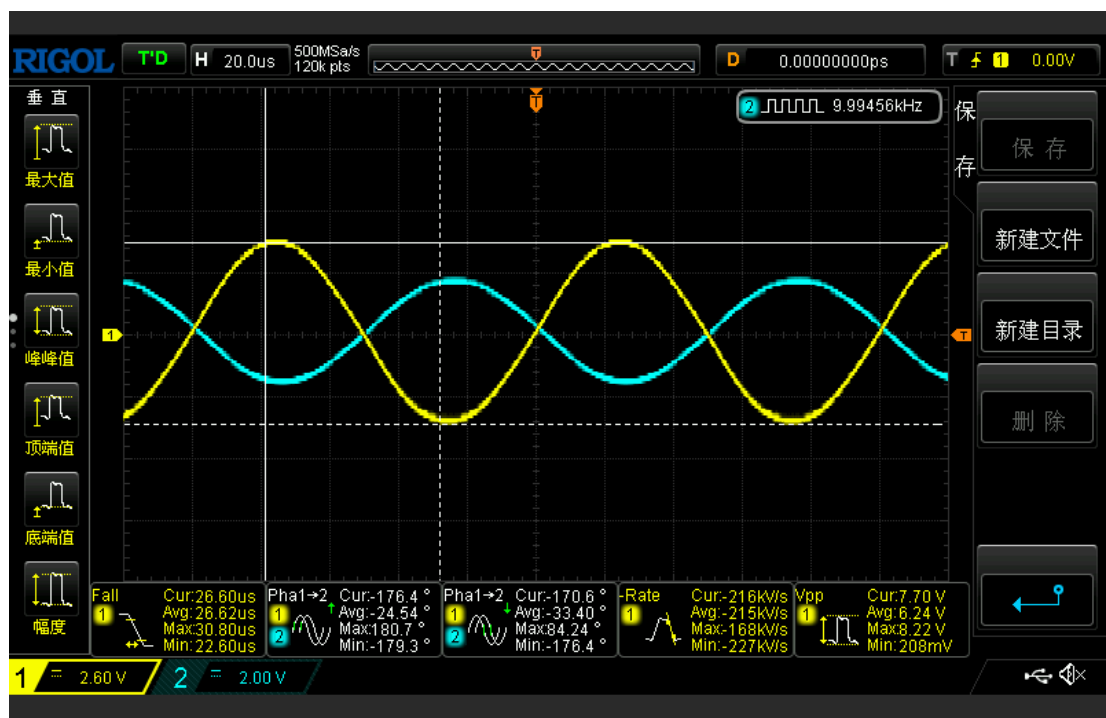
- 1、采用直流控制模式，需在 DC 端口接入直流控制电压。
  - a) 直流参考电压 DC 端口接+2V 直流电源，观察输入和输出波形的相位和幅值关系。调整检波旋钮， $U_{out}$  是否有变化？



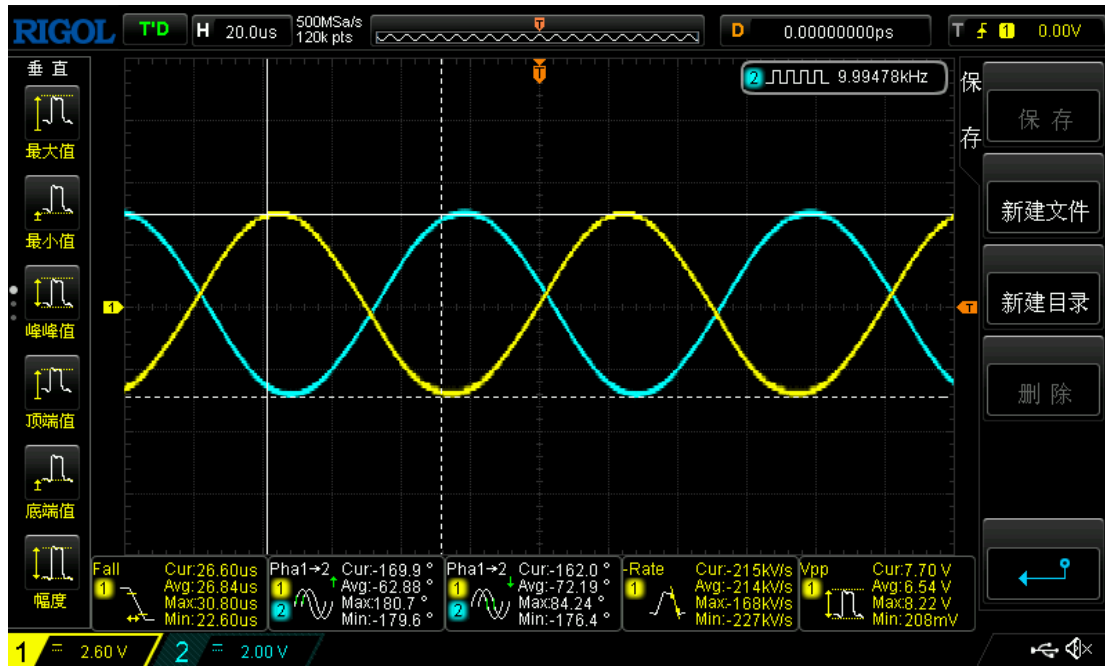
结论：调整检波旋钮，相位同向（同向/反向），幅值不变（可调/不变）。

b) 直流参考电压 DC 端口接+2V 直流电源，观察并记录输入和输出波形的相位和幅值关系。调整检波旋钮，Uout 是否有变化？

结论：调整检波旋钮，相位反向（同向/反向），幅值可调（可调/不变）。





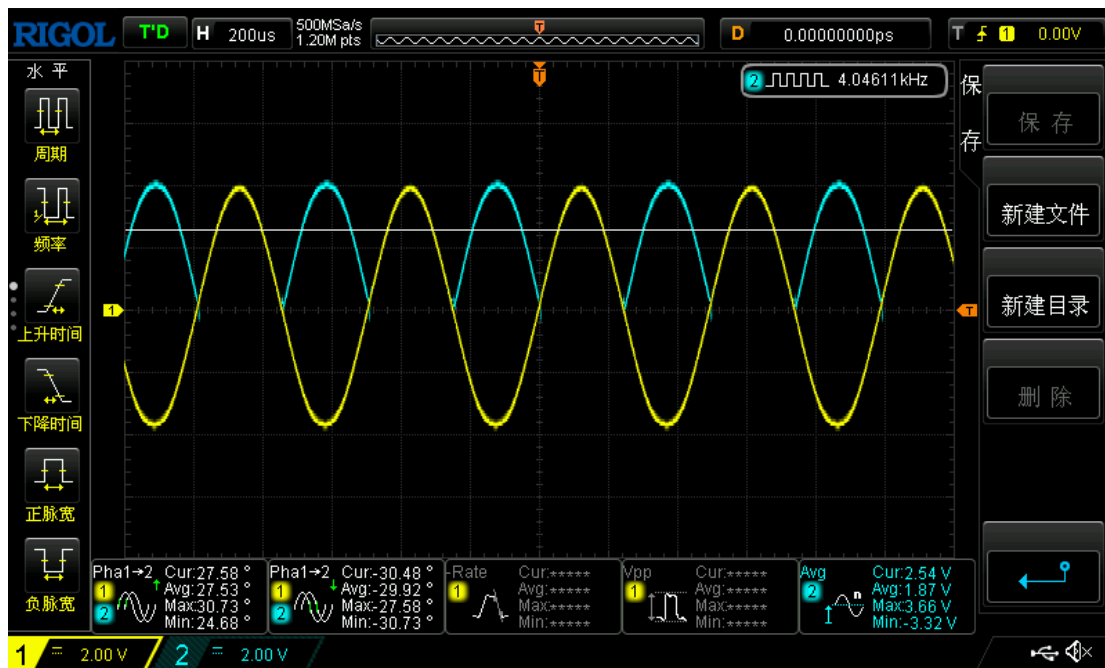


c) 结论：此电路的放大倍数由检波旋钮调节，将放大倍数调为 1 倍，在后续实验过程中，检波旋钮保持不变。

2.

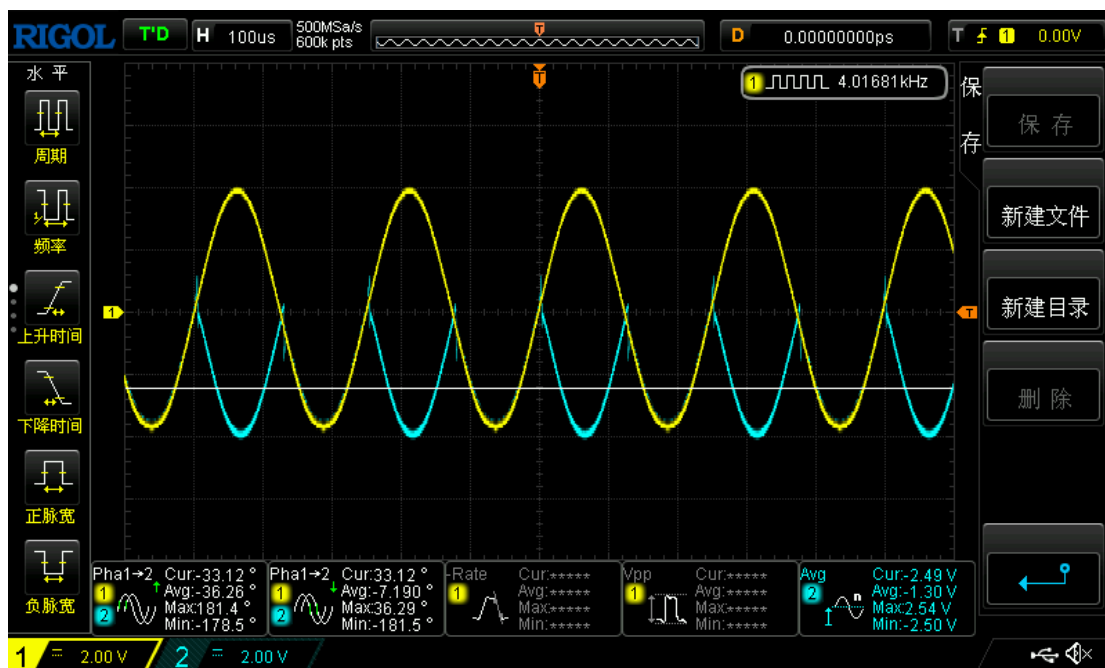
a) AC 接音频振荡器  $0^\circ$ ，电压表读数 6.45V

波形：



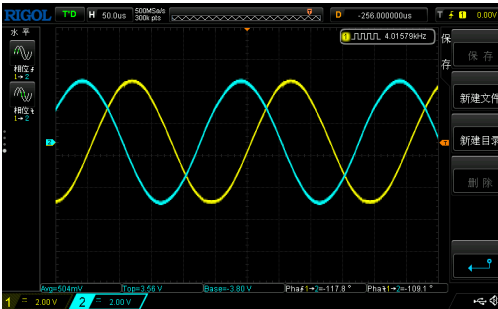

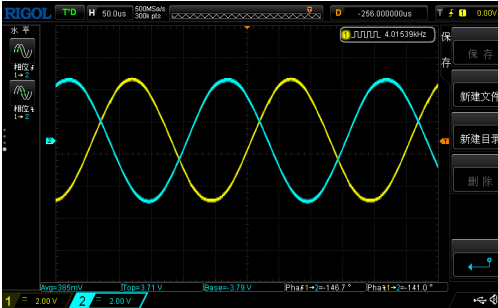

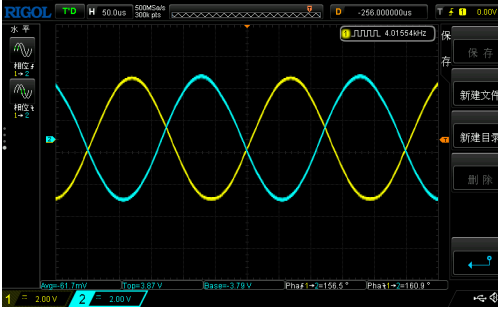

b) AC 接音频振荡器  $180^\circ$ ，电压表读数-6.44V

波形：

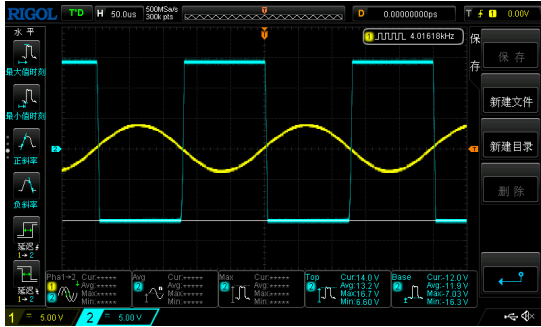
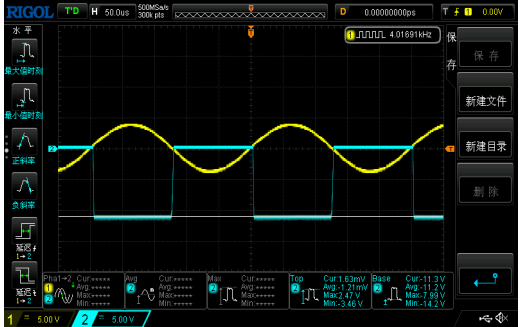


C) AC 接任意相位差波形:

序号	CH1 接相敏检波器 Uin	
	CH2 接相敏检波器 AC	CH2 接相敏检波器 Uout
1	<p>相位差波形记录:</p> <p>相位差: <math>-83.3^\circ</math> 电压表示数: 1.305V</p>	<p>Uout 波形记录:</p> <p>Uout 电压平均值: 495mV</p>
2	<p>相位差波形记录:</p> <p>相位差: <math>-93.1^\circ</math> 电压表示数: 0.105V</p>	<p>Uout 波形记录:</p> <p>Uout 电压平均值: 3.75mV</p>
3	<p>相位差波形记录:</p>	<p>Uout 波形记录:</p>

	 <p>相位差: <math>-113.1^{\circ}</math> 电压表示数: <math>-1.960\text{V}</math></p>	 <p>Uout 电压平均值: <math>-663\text{mV}</math></p>
4	<p>相位差波形记录:</p>  <p>相位差: <math>-144.3^{\circ}</math> 电压表示数: <math>-4.700\text{V}</math></p>	<p>Uout 波形记录:</p>  <p>Uout 电压平均值: <math>-1.66\text{V}</math></p>
5	<p>相位差波形记录:</p>  <p>相位差: <math>158^{\circ}</math> 电压表示数: <math>-6.050\text{V}</math></p>	<p>Uout 波形记录:</p>  <p>Uout 电压平均值: <math>-2.18\text{V}</math></p>

D) 示波器 CH1, CH2 分别接至相敏检波器 AC 和附加观察端  $\bar{A}$ ; 示波器 CH1, CH2 分别接至相敏检波器 AC 和附加观察端  $\bar{A}$ , 观察并记录波形。结合上述相关实验, 以及错误!未找到引用源。 , 深入理解并解释相敏检波器的作用。

CH1 接相敏检波器 AC	
CH2 接附加观察端 $\overline{U}_1$	CH2 接附加观察端 $\overline{U}_2$
<p>波形记录:</p>  <p>CH2 顶端值: 14V CH2 底端值: -12V</p>	<p>波形记录:</p>  <p>CH2 顶端值: -2mV CH2 底端值: -11.2V</p>

电路原理分析:

相敏检波器需要一个与待测信号同频的参考信号, 将待测信号与参考信号进行混频处理, 即两者相乘。当待测信号与参考信号相位相同或相差  $180^\circ$  时, 输出信号最大; 而当两者的相位差为  $90^\circ$  或  $270^\circ$  时, 输出信号最小或接近于零。混频后的信号是一个包含直流分量和高频分量的复合信号。使用低通滤波器可以去除高频分量, 保留有用的直流或低频信号。直流分量的大小反映了待测信号与参考信号之间的相位关系。最后, 通过适当的信号处理, 可以得到所需的输出信号, 用于进一步的分析或控制目的。

理解相敏检波器的作用:

①鉴相特性: 当 J5 电压为高电平时, 二极管 D1 截止, 开关管截止, 此时相敏检波器为反相运算放大器, 输入与输出信号反相; 当 J5 电压为低电平时, 二极管 D1 导通, 开关管导通, 此时相敏检波器为同相运算放大器, 输入与输出信号同相。因此, 若  $U_{in}$  与参考信号同频但

存在相位差 $\varphi$ 时, 输出电压 $U_{out} = \frac{2}{\pi} U_{in\max} \cos \varphi$ , 通过输出信号大小计算得到相位差。

②选频特性: 相敏检波器对不同频率的输入信号有不同的传递特性。以参考信号为基波, 计算得到所有偶次谐波在载波信号的一个周期内平均输出为零, 对于  $n=1,3,5$  等各奇次谐波, 输出信号的幅值相应衰减为基波的  $\frac{1}{n}$ 。

#### 四、实验思考

本次实验表面上是三个独立的模块, 但深入思考后, 我发现它们共同揭示了从“简单测量”迈向“精密测量”的核心思想。

实验一的直流全桥 是一种直观的测量方法, 但它很容易受到零点漂移、热噪声等直流干扰的影响。

而实验二(移相器) 和实验三(相敏检波器) 则为解决这一问题提供了强大的“交流”方案。相敏检波器的核心作用, 就是能从嘈杂的背景噪声中, 只“锁定”并提取出与参考信号同频率、同相位的特定信号, 将其转换为稳定的直流输出。

这让我领悟到, 如果我们将实验一的直流电桥改为用交流信号激励, 然后用实验三的电桥来

解调输出信号，同时用实验二的移相器来精确同步参考信号与待测信号的相位，我们就能构建一个“锁相放大器”的雏形。这种方法能极大地抑制噪声和干扰。

.....



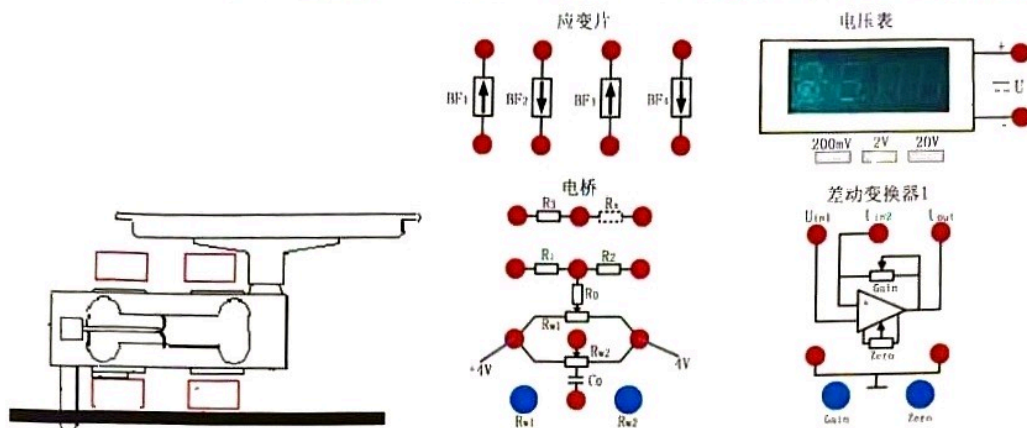
姓名: 张一  
实验台: 2

学号: 3230104085  
组号: 03

指导老师:  
时间: 10.27

## 实验记录纸

实验 1: 准备工作: 直流电源  $\pm 4V$ ; 差动放大器 I 调零; 直流电桥连线, 电桥调平, 可用万用表测量。



重量 (g)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
电压 (mV 或 V)	5.1	9.8	15.8	21.8	27.9	35.0	41.3	47.8	54.8	61.8	69.2

实验 2: 准备: 音频振荡器  $V_{pp}=4V$ 。

注意: CH1 和 CH2 通道信号观察并记录图形, 分析两个信号之间的超前滞后, 与记录得到的相位差是什么关系?

数据记录: 建议移项旋钮左旋到底后, 调节音频振荡器频率, 进行数据记录 (这样不用移项旋钮不停的来回旋转很多圈, 提高速率), 频率调节的过程中, 根据图形及时调整示波器水平时基 Scale 旋钮, 窗口的波形为 2-5 个。

相位 频率	RW1=0K (左旋到底)					RW1=10K (右旋到底)				
	相位 1→2	相位 1-2	相位差 $\Phi_1$ 记录	相位差 $\Phi_1$ 计算	误差百 分比	相位 1→2	相位 1-2	相位差 $\Phi_2$ 记录	相位差 $\Phi_2$ 计算	误差百 分比
1K	-136.6°	-127.7°				-37.3°	-28.5°			
2K	-103.1°	-91.5°				39.0°	37.1°			
4K	-65.7°	-58.9°				95.2°	96.3°			
6K	-57.0°	-44.5°	-41.3°			117.3°	124°			
8K	-34.0°	-47.4°	-27.9°			130.5°	137.4°			
10K	-32.9°	-21.9°				138.0°	146.3°			

实验三: 准备直流模块  $\pm 2V$ , 音频振荡器  $V_{pp}=8V$ 、频率 4K。

1a、DC=2V, 调整检波旋钮, 相位 1 (同向/反向), 幅值 不变 (可调/不变)。

1b、DC= -2V, 调整检波旋钮, 相位 1 (同向/反向), 幅值 可调 (可调/不变)。记录波形 2 组。检波调 1 倍 ( $U_{outpp}=U_{inpp}$ ) 后不变。

2a、AC 接音频振荡器 0°, 电压表的读数: 6.45V。波形记录: U 盘。

2b、AC 接音频振荡器 180°, 电压表的读数: 6.44V。波形记录: U 盘。

2c、AC 接任意相位差波形 (通过移相器实现)

CH1 接相敏检波器 $U_{in}$ , 注意: 每一行的数据是同样的实验条件, 只是改变 CH2 的观测口									
控制相位差记录 (CH2 接相敏检波器 AC)				输出结果 (CH2 接相敏检波器 $U_{out}$ )					
1	波形: U 盘	相位差: -84.9°	-83.3°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 3.75mV	5.70mV	1.305V		
2	波形: U 盘	相位差: -92.1°		波形: U 盘	CH2 电压平均值: 6.63mV	0.277V	0.105V		
3	波形: U 盘	相位差: -113.1°	-109.1°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 1.66V	1.617V	-1.956V		
4	波形: U 盘	相位差: -144.3°		波形: U 盘	CH2 电压平均值: 2.42mV	4.46mV	-4.70V		
5	波形: U 盘	相位差: 158°		波形: U 盘	CH2 电压平均值: 2.18V	5.94V	-6.05V		

方波记录注意示波器信号的耦合模式在直流模式, 不能选交流模式, 不然会把直流分量过滤掉。

波形记录:		波形记录:	
CH2 顶端值: 14V	CH2 底端值: -12V	CH2 顶端值: -2mV	CH2 底端值: -11.2V