

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。

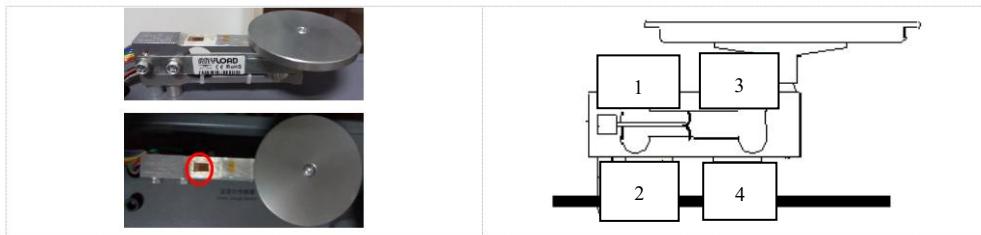
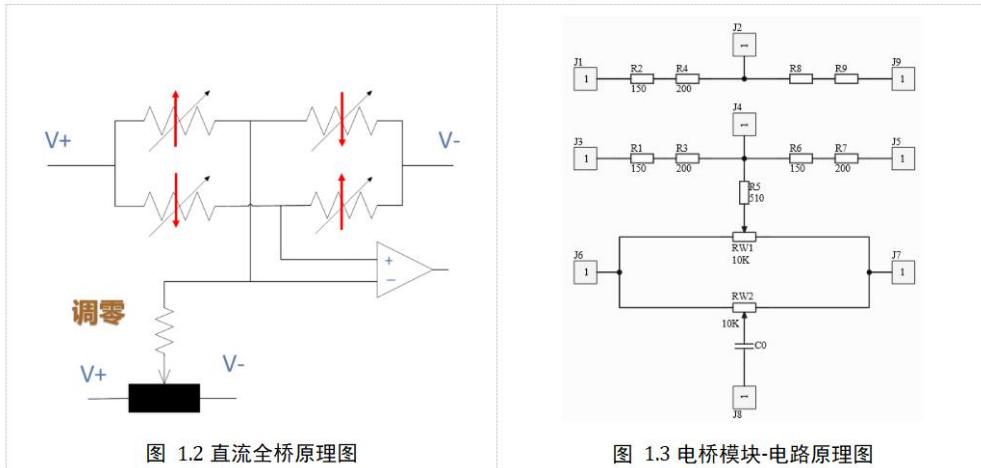
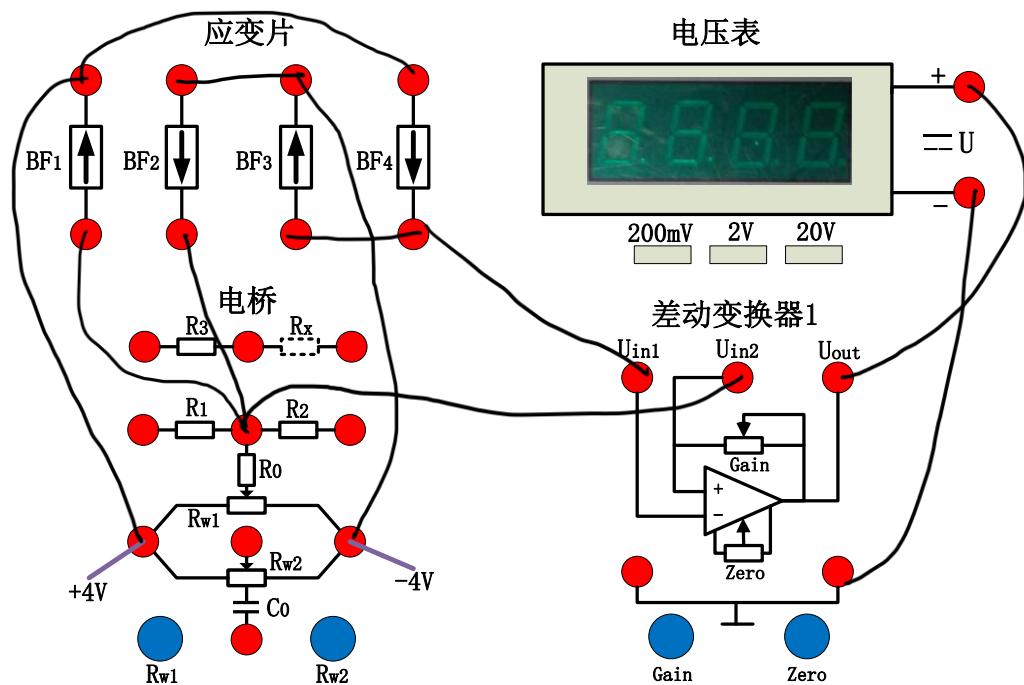


图 1.1 应变片示意图

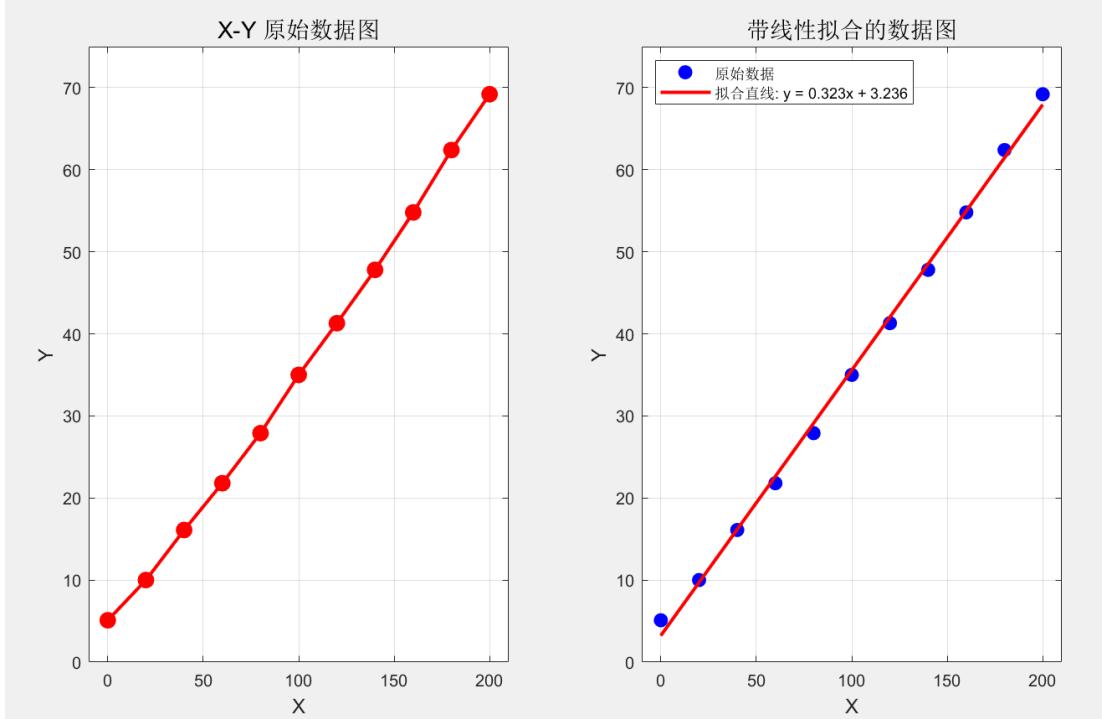


实际接线图如图所示。



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



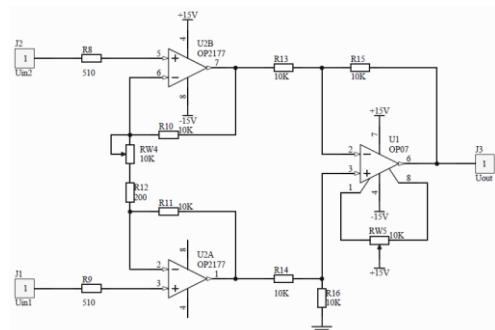
- ① 通过拟合直线得到灵敏度 $S = \frac{\Delta U}{\Delta m} = 0.323(V/kg)$
- ② 全桥测试原理：全桥由四个电阻组成，形成一个闭合回路。当对角线上两个电阻的比值相等时，电桥处于平衡状态，此时没有电流通过电桥中心的检测器。如果其中一个或多个电阻发生变化，电桥就会失去平衡，导致检测器显示出电压差。本实验中是由放上砝码后。应变片受力引起电阻变化。
- ③ 非线性产生的原因有：
1. 应变片存在应变极限，只在一定范围内是线性的，同时存在零点偏移。
 2. 电压表示数存在波动，会存在误差。
 3. 未完全调零。
 4. 应变片安装的位置不够对称可能导致测量结果出现偏差。
- 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：

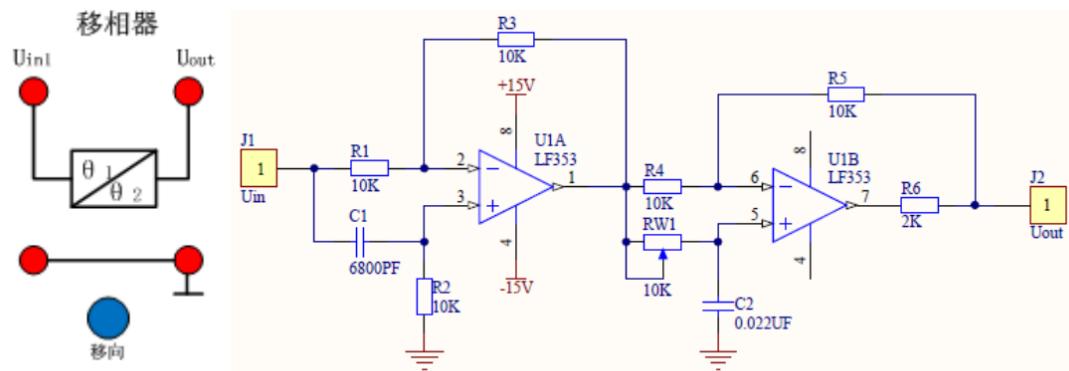


图 2.1 移相器模块及其电路原理图

[A] 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，

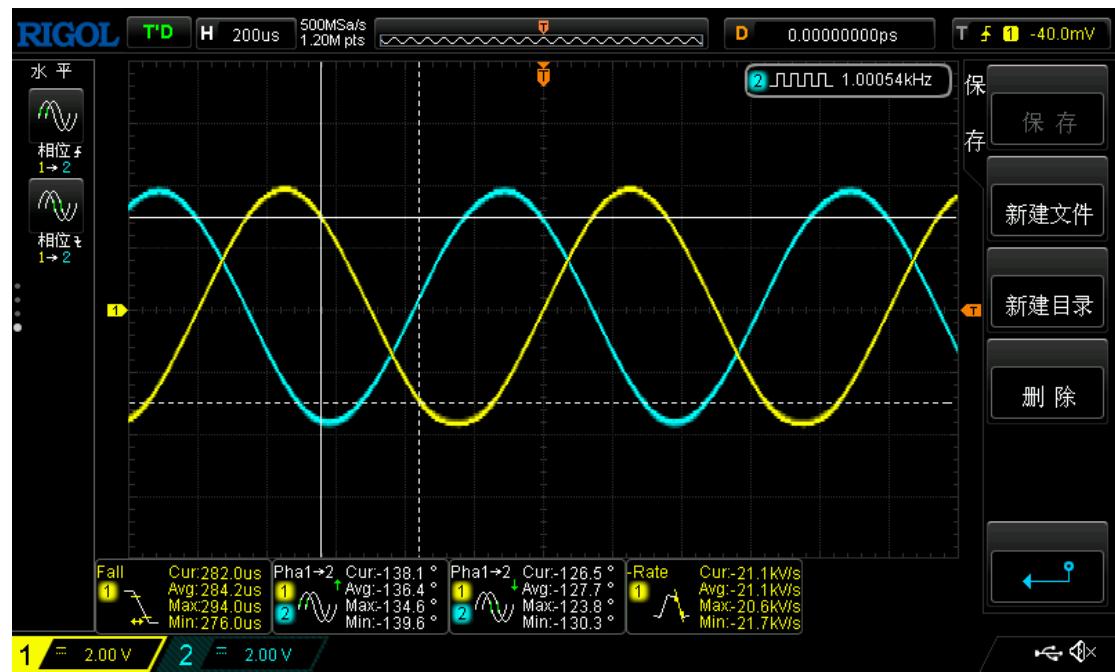
$$U_{in} - U_{out} = -\pi + 2 \arctan \omega C_1 R_2 - 2 \arctan \omega C_2 R_{w1}$$

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 $\Delta\phi$ (°)	相位 1-2 $\Delta\phi$ (°)	相位 1→2 $\Delta\phi$ (°)	相位 1-2 $\Delta\phi$ (°)
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

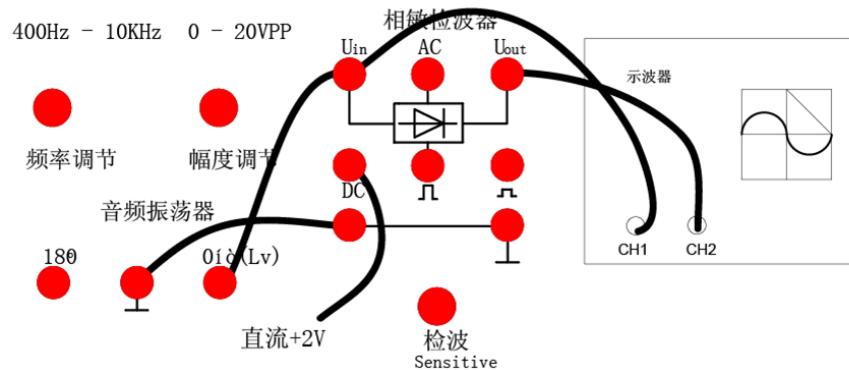
存在误差的原因可能是

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 Vpp = 8V、频率 4K。

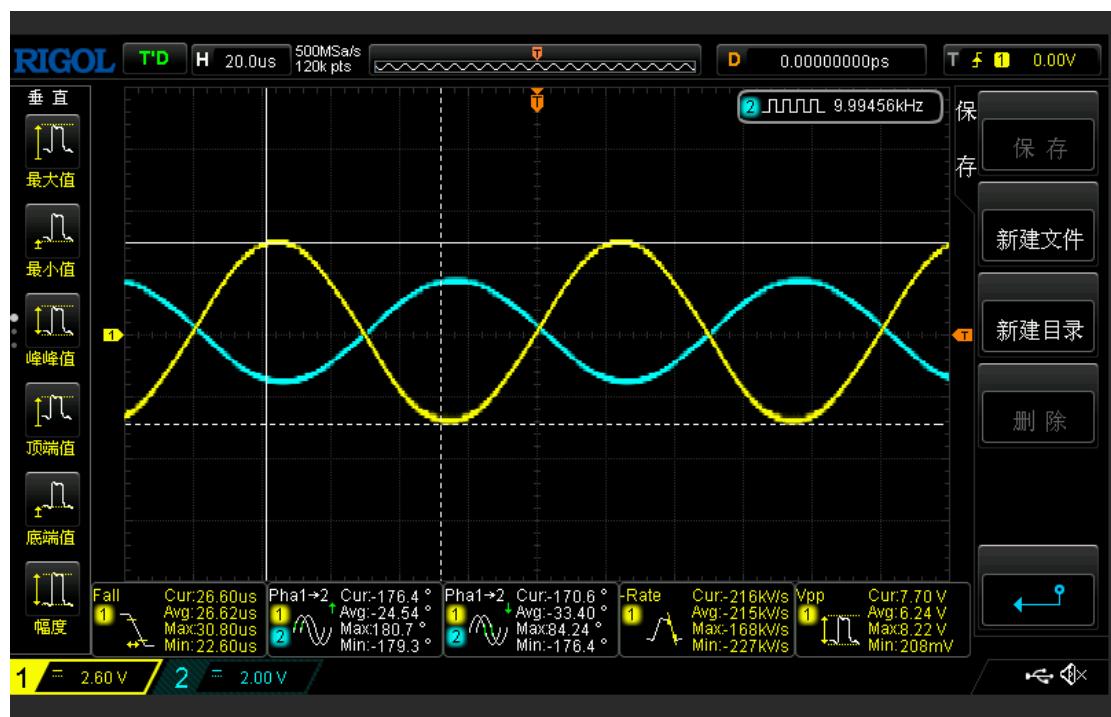
- 1、采用**直流控制**模式，需在**DC**端口接入直流控制电压。
- a) 直流参考电压 DC 端口接+2V 直流电源，观察输入和输出波形的相位和幅值关系。
调整检波旋钮，Uout 是否有变化？

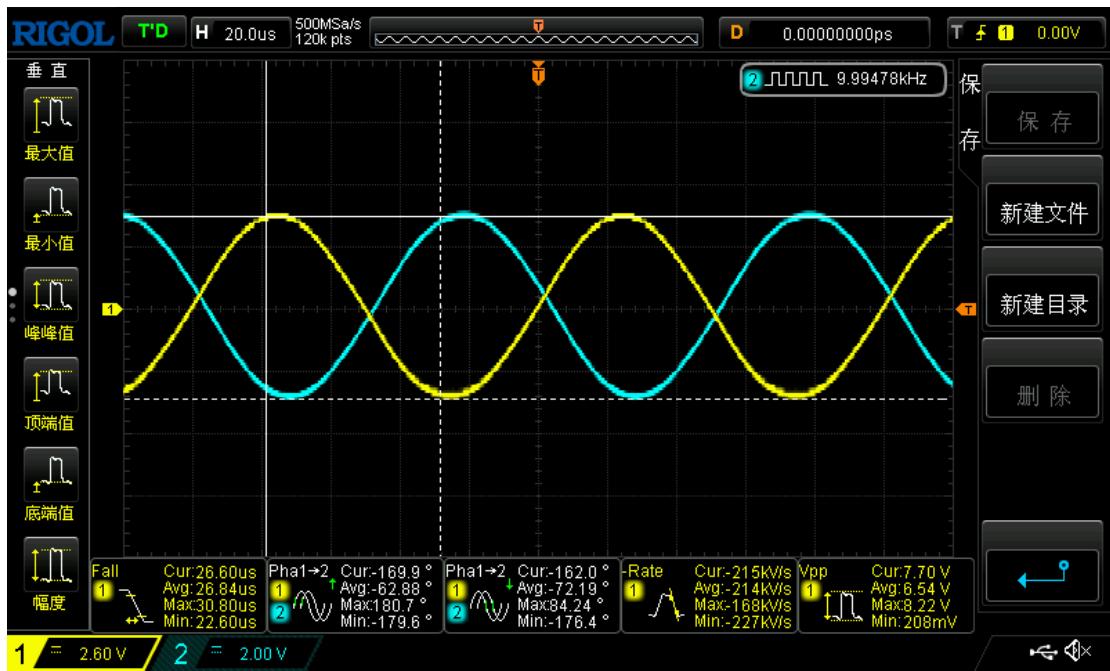


结论：调整检波旋钮，相位同向（同向/反向），幅值不变（可调/不变）。

- 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）。



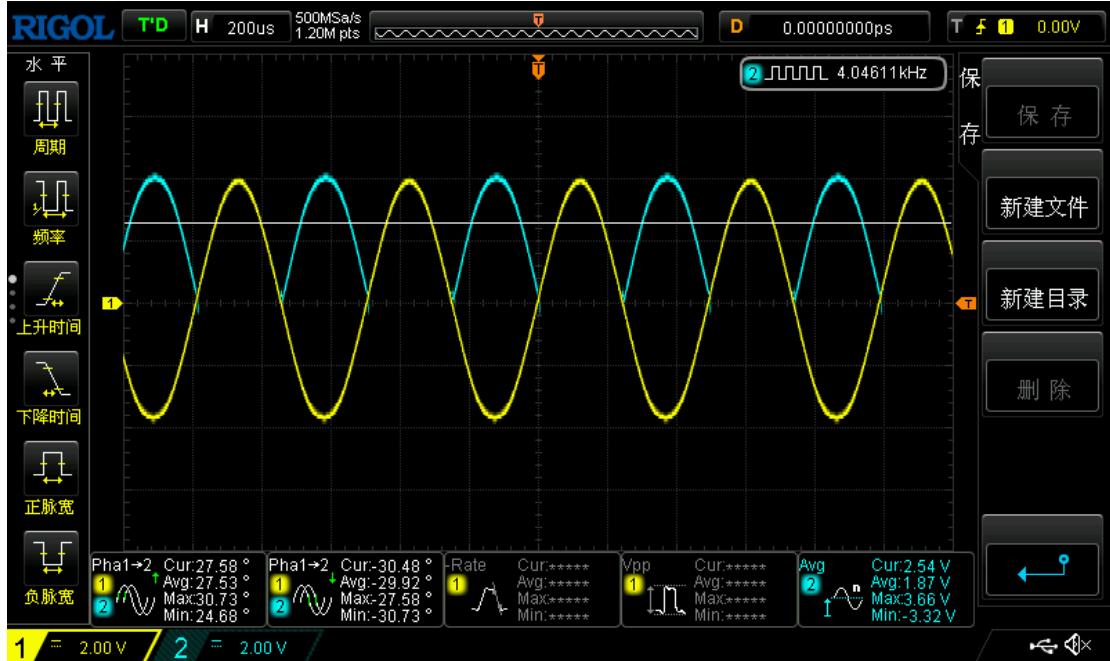


c) 结论: 此电路的放大倍数由检波旋钮调节, 将放大倍数调为 1 倍, 在后续实验过程中, 检波旋钮保持不变。

2.

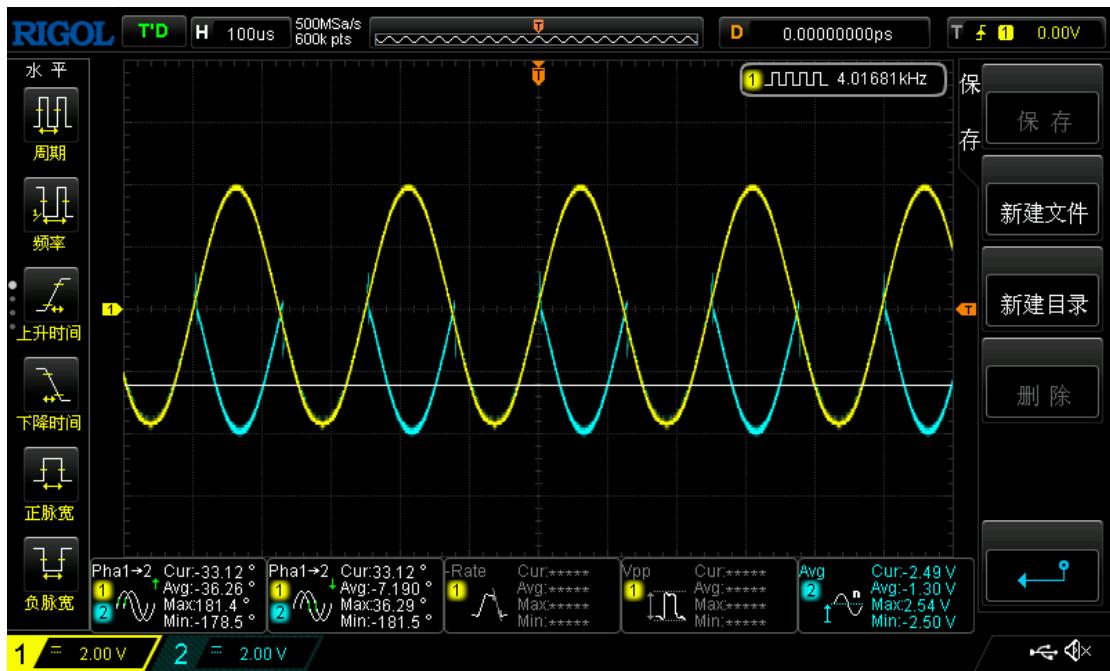
a) AC 接音频振荡器 0° , 电压表读数 6.45V

波形:



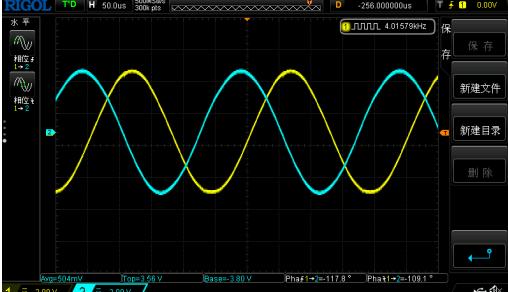
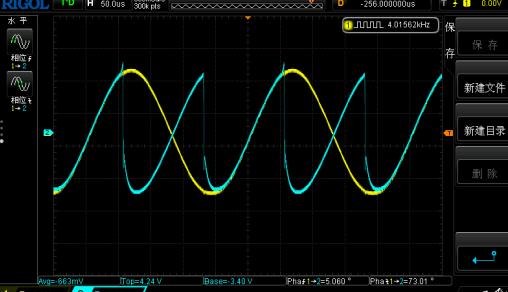
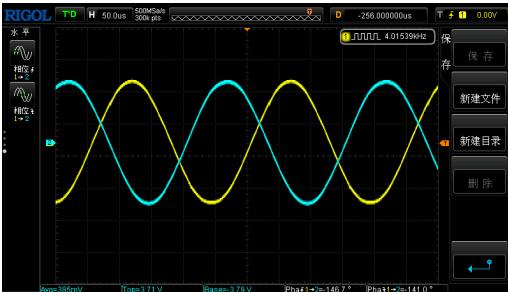
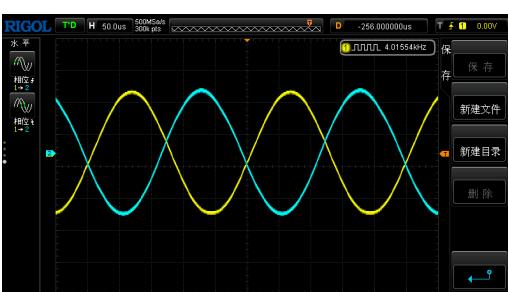
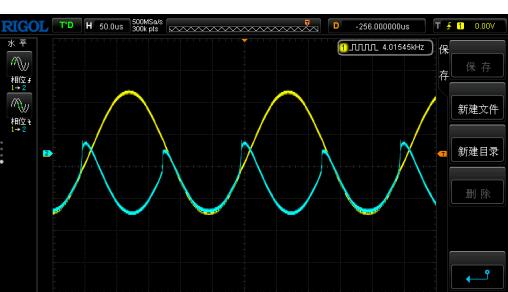
b) AC 接音频振荡器 180° , 电压表读数 -6.44V

波形:

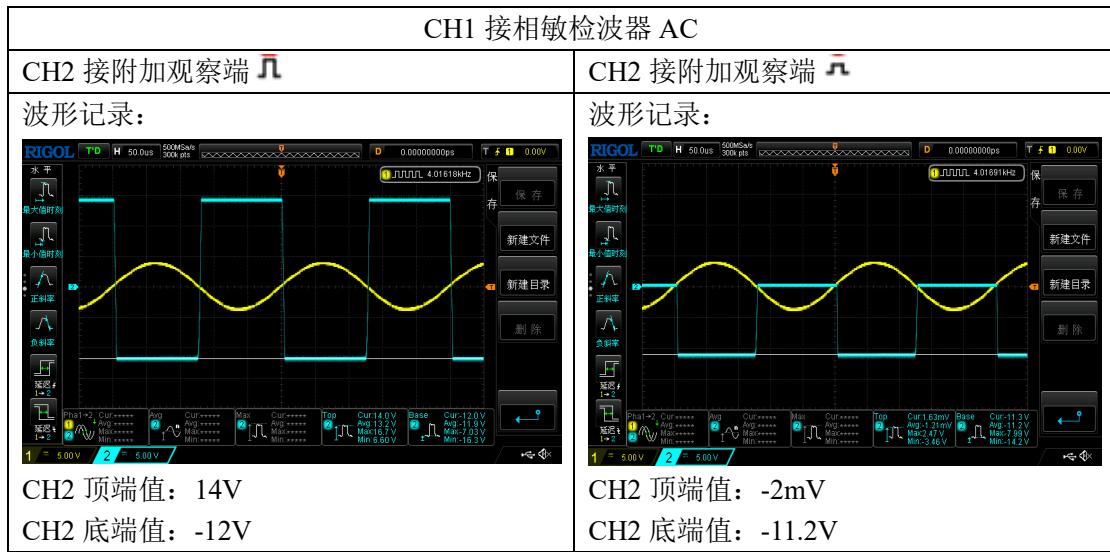


C) AC 接任意相位差波形:

序号	CH1 接相敏检波器 U_{in}	CH2 接相敏检波器 U_{out}
	CH2 接相敏检波器 AC	CH2 接相敏检波器 U_{out}
1	相位差波形记录: 	Uout 波形记录:
	相位差: -83.3° 电压表示数: 1.305V	Uout 电压平均值: 495mV
2	相位差波形记录: 	Uout 波形记录:
	相位差: -93.1° 电压表示数: 0.105V	Uout 电压平均值: 3.75mV
3	相位差波形记录:	Uout 波形记录:

	 <p>相位差: -113.1° 电压表示数: -1.960V</p>	 <p>Uout 电压平均值: -663mV</p>
4	<p>相位差波形记录:</p>  <p>相位差: -144.3° 电压表示数: -4.700V</p>	<p>Uout 波 形 记 录 :</p>  <p>Uout 电压平均值: -1.66V</p>
5	<p>相位差波形记录:</p>  <p>相位差: 158° 电压表示数: -6.050V</p>	<p>Uout 波形记录:</p>  <p>Uout 电压平均值: -2.18V</p>

D) 示波器 CH1, CH2 分别接至相敏检波器 AC 和附加观察端 J^+ ; 示波器 CH1, CH2 分别接至相敏检波器 AC 和附加观察端 J^- , 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。



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° 时，输出信号最大；而当两者的相位差为 90° 或 270° 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 φ 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，然后用实验三的电路来

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。



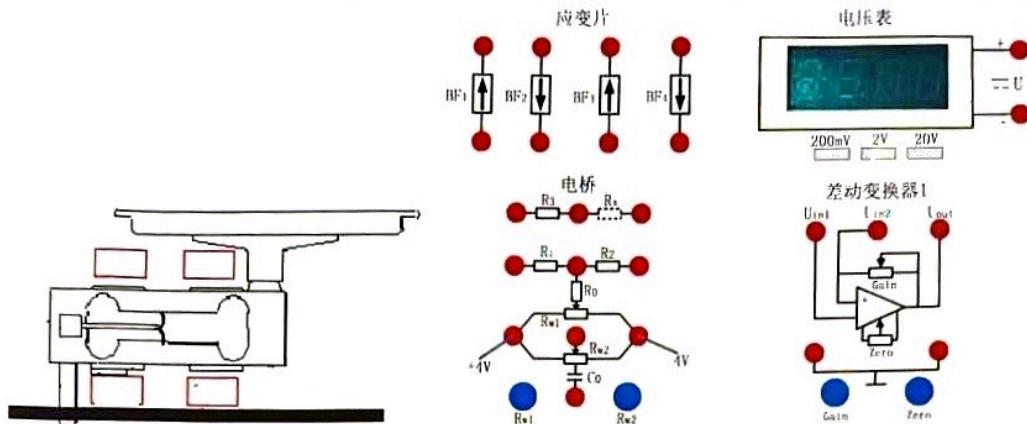
姓名: 张一
实验台: 2

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±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(V或mV)	5.1	9.8	15.8	21.8	27.9	35.0	41.3	47.8	54.3	61.8	69.2

实验2: 准备: 音频振荡器 Vpp=4V(6-1).

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 差 频率	RW1=OK (左旋到底)				RW1=10K (右旋到底)					
	相位 1→2↑	相位 1→2↓	相位差Φ ₁ 记录	相位差Φ ₁ 计算	误差百分比	相位 1→2↑	相位 1→2↓	相位差Φ ₂ 记录	相位差Φ ₂ 计算	
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	-45.4°	-40.0°	-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±2V, 音频振荡器 Vpp=8V、频率 4K。

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

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

2a、AC 接音频振荡器 0°, 电压表的读数: 5V。波形记录: U 盘 (5+12)

2b、AC 接音频振荡器 180°, 电压表的读数: -6V。波形记录: U 盘 (-6+12)

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})				电压表	
1 波形: U 盘	相位差: -83.3°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 5.0mV	3.75mV	1.305V	1.305V	1.305V	1.305V	1.305V
2 波形: U 盘	相位差: -92.1°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 3.75mV	3.75mV	0.105V	0.105V	0.105V	0.105V	0.105V
3 波形: U 盘	相位差: -113.1°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 6.63mV	6.63mV	-1.956V	-1.956V	-1.956V	-1.956V	-1.956V
4 波形: U 盘	相位差: -144.3°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 11.66mV	11.66mV	-4.701V	-4.701V	-4.701V	-4.701V	-4.701V
5 波形: U 盘	相位差: 158.1°	波形: U 盘	CH2 电压平均值: 8.00mV	8.00mV	-5.94V	-5.94V	-5.94V	-5.94V	-5.94V

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

-6.05