

1. 金属箔式应变片性能及全桥测试实验

一、实验目的

- 了解金属箔式应变片的工作原理并进行全桥性能测试

二、需用器件与单元

直流电源模块、电桥、差动放大器 I、应变片传感器、砝码、电压表等。

三、实验步骤

- 1、直流电源模块可调电源调到 $\pm 4V$ 。

- 2、差动放大器 I 调零

将差动放大器的增益到最大位置（逆时针旋转到底）， U_{in2} （+）、 U_{in1} （-）、地 \perp 短接，输出端与电压表相连；开启电源；然后调整调零旋钮使电压表显示为零（mv 档位），关闭电源。

注意：差动放大器 I 调零过后，增益及调零旋钮，均不再调节。

- 3、观察应变片传感器的位置，见图 1.1，应变片为金色箔式结构小方薄片，在图中标示出来，结合应变片受力，标出应变片对应的序号 BF1，BF2，BF3，BF4。

注意：BF1、BF3，不区分位置，都代表放上砝码后电阻变大；BF2、BF4，不区分位置，都代表放上砝码后电阻变小。

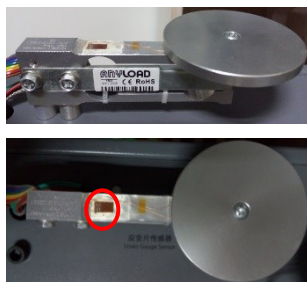


图 1.1 应变片示意图

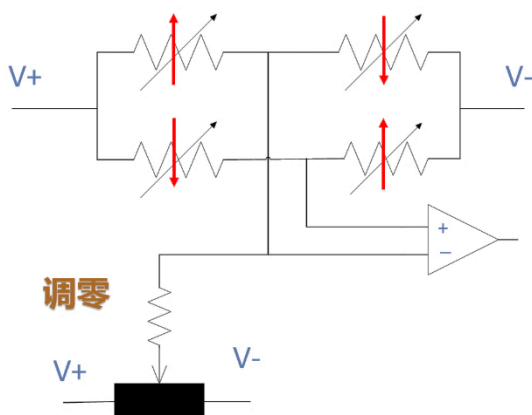


图 1.2 直流全桥原理图

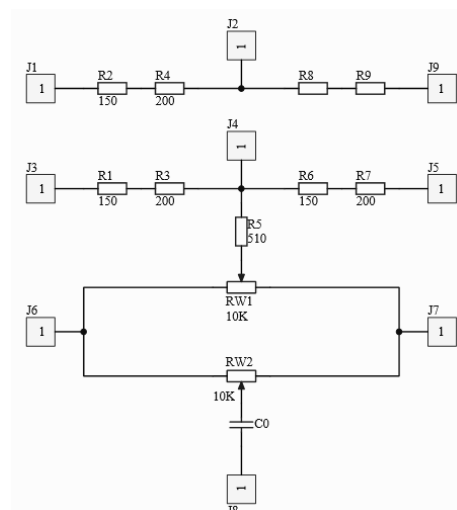


图 1.3 电桥模块-电路原理图

- 4、根据直流全桥原理，在图 1.4 中画出接线图，并进行实际连线。

电压置 20V 档，开启电源，调节电桥平衡网络中的 R_{W1} ，使电压表显示为零；然后将电压表置 2V 档，再调电桥 R_{W1} （慢慢地调），使电压表显示基本为零（也可选取 0 附近的值记录）。

图 1.4 全桥测试接线图

表格 1.1 全桥测量数据表

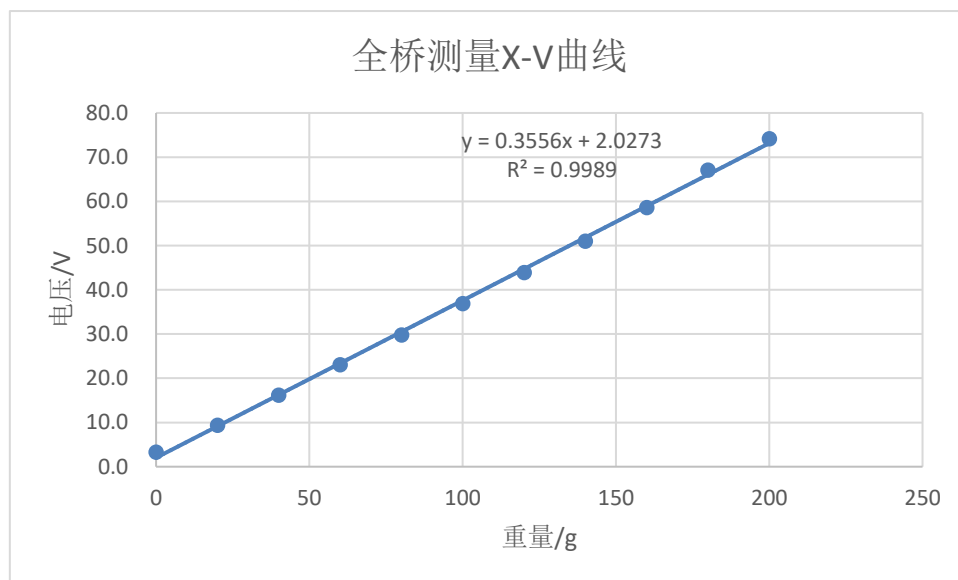
重量 (g)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
电压 (V)	3.3	9.4	16.2	23.1	29.8	36.9	43.9	51.0	58.6	67.1	74.2

四、注意事项：

- 1、 做此实验时应将低频振荡器的幅度关至最小，以减小其对直流电桥的影响。
- 2、 在实验过程中如发现电压表发生过载，应将电压量程扩大。
- 3、 在本实验中只能将放大器接成差动形式，否则系统不能正常工作。
- 4、 直流稳压电源±4V 不能打的过大，以免损坏应变片或造成严重自热效应。
- 5、 接全桥时请注意区别各应变片子的工作状态方向。

五、实验分析与结论

- 1、 画出 X-V 曲线，得到全桥灵敏度。理论分析全桥测试原理，分析非线性产生的原因。



经数据处理分析后得到：斜率为 0.3556V/g，也为全桥灵敏度。

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta m} = 0.3556V/g$$

全桥原理：

$$u_y = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} u_0$$

其中 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为电桥的四个桥臂。若它们所产生的电阻变化量分别用 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_4 表示，初始状态电桥的各臂阻值又相等，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，且考虑到电阻变化量远小于 R ，可忽略电阻变化量的高次项，则上式可写成

$$u_y = \frac{u_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right)$$

当各桥臂应变片的灵敏度 S_g 相同时，上式可改写为

$$u_y = \frac{u_0}{4} S_g (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

上述式子经过了线性化处理，存在非线性误差的计算如下

$$\gamma = \left| \frac{u_y - u_0}{u_0} \right| \times 100\% = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \times 100\%$$

当砝码放在砝码盘上时，应变片所在的梁会发生弯曲，从而使应变片形变并引起电阻变化，如上图所示。电阻变化引起的电位变化经差分放大器放大，得到差模电压，即为 U 。

非线性原因：

- 砝码放置在托盘上的位置不在同一点，对于悬臂梁的扭矩不完全相同，产生非线性。
- 实验所用的应变片和电阻等元件受环境因素（温度、湿度）的影响，读数不稳定
- 电信号可能会受到电源干扰和信道干扰等
- 桥臂上的电阻阻值不完全相等

2、根据图 1.5 差动放大器 I 电路原理图，分析差动变换器 I 的放大倍数。

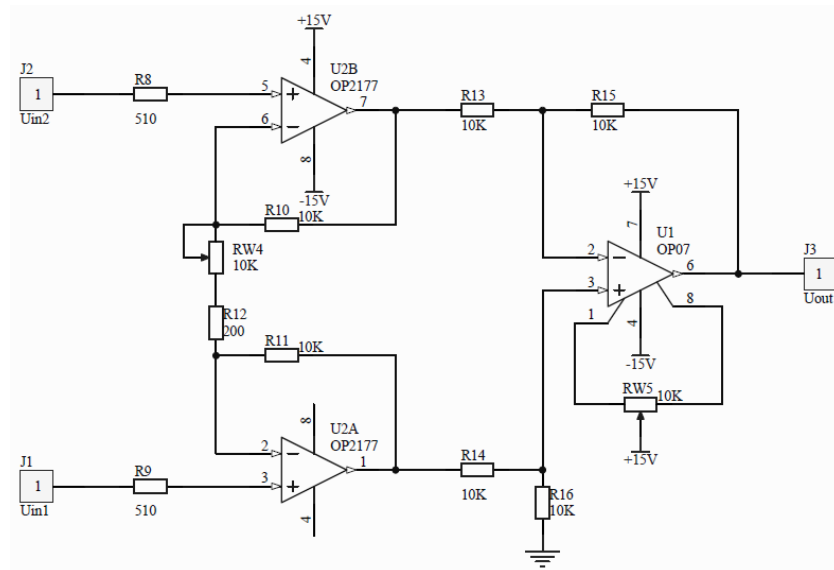


图 1.5 差动放大器 I 电路原理图

$$\begin{cases} U_{in2} - U_{in1} = I_1(R_{w4} + R_{12}) \\ U_7 - U_{in2} = I_1 R_{10} \\ U_{in1} - U_1 = I_1 R_{11} \\ U_1 = I_2(R_{14} + R_{16}) \\ U_7 - U_{out} = I_3(R_{13} + R_{15}) \\ U_7 - I_2 R_{16} = I_3 R_{13} \end{cases}$$

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

2. 移相器实验

一、实验目的

- 1、了解运算放大器构成的移相电路的原理及工作情况
- 2、学会使用示波器进行基础信号测试

二、所需单元及部件

移相器、音频振荡器、双模拟通道数字示波器、电源

三、实验步骤

- 1、了解移相器在实验仪所在位置及电路原理（见图 2.1）。

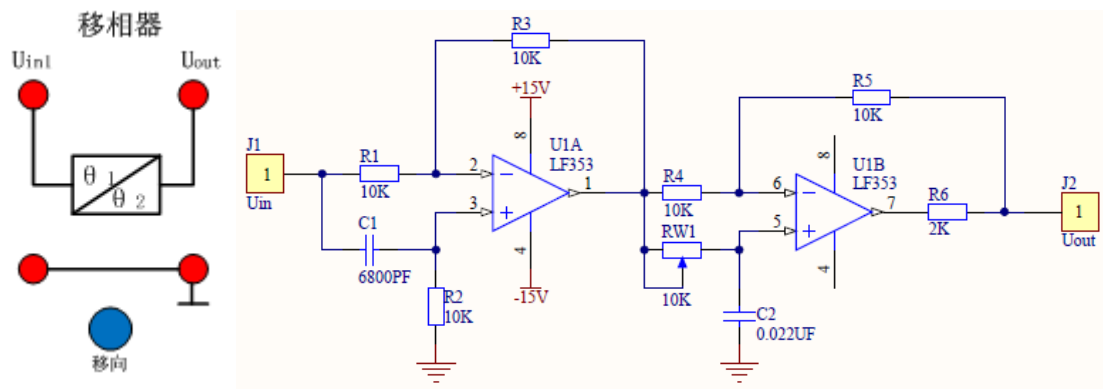
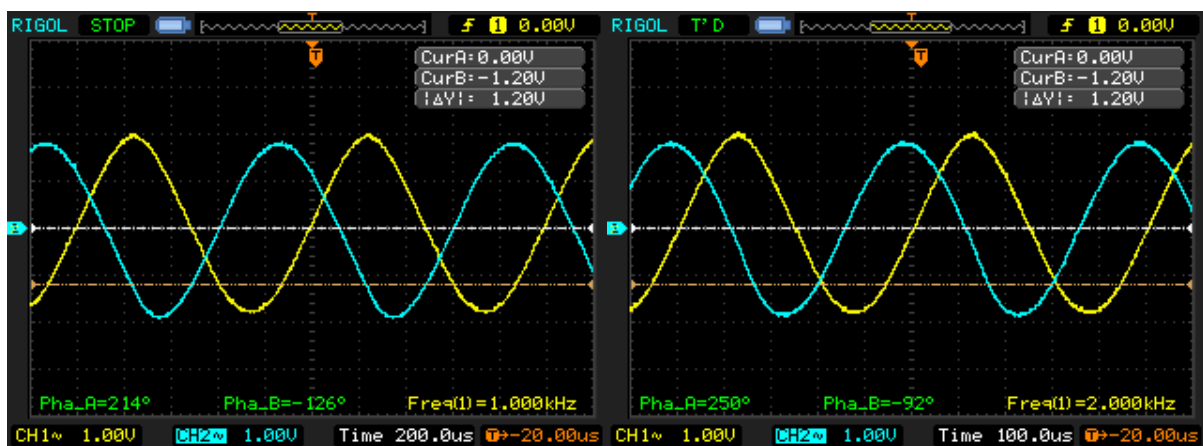
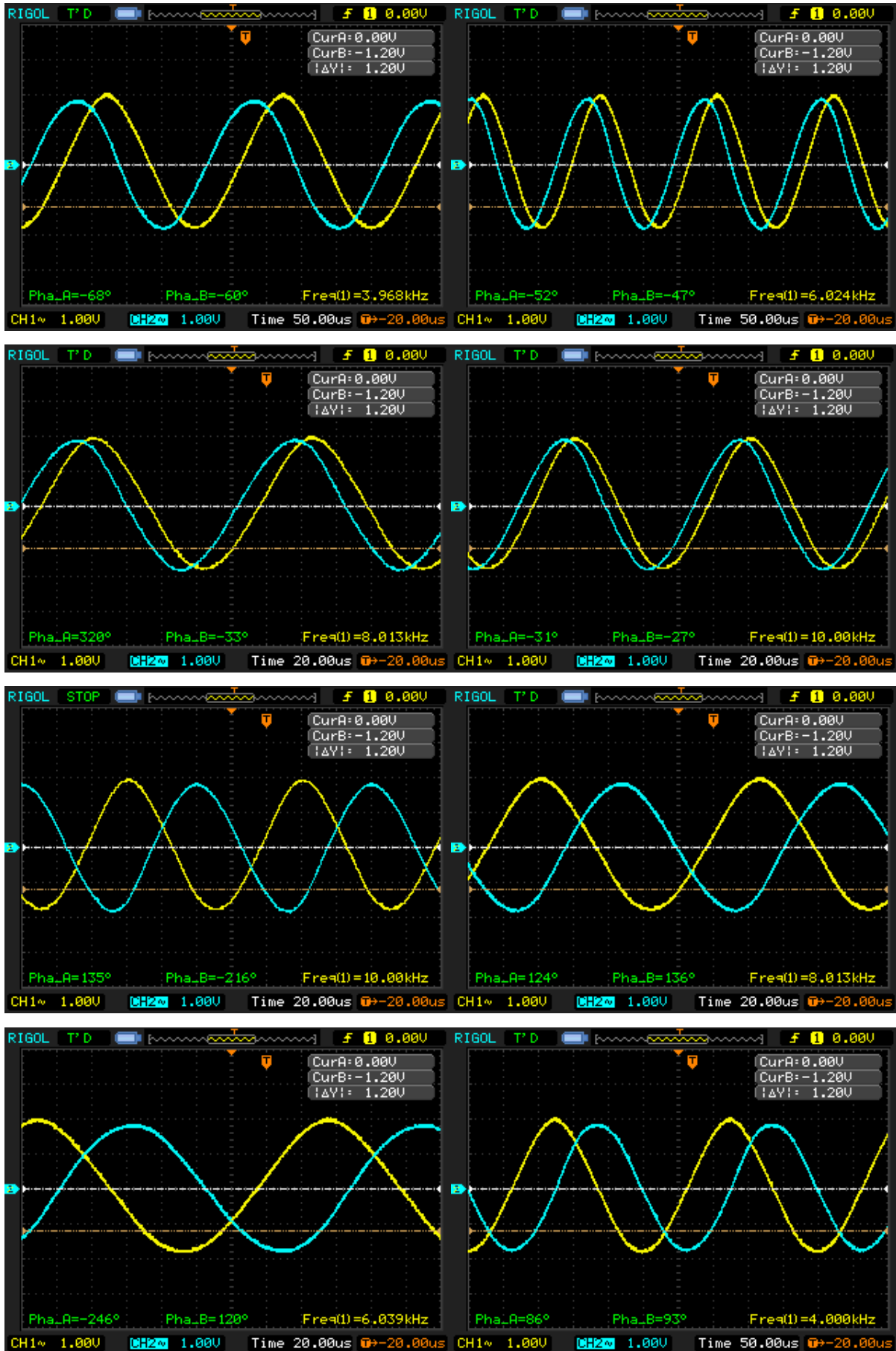


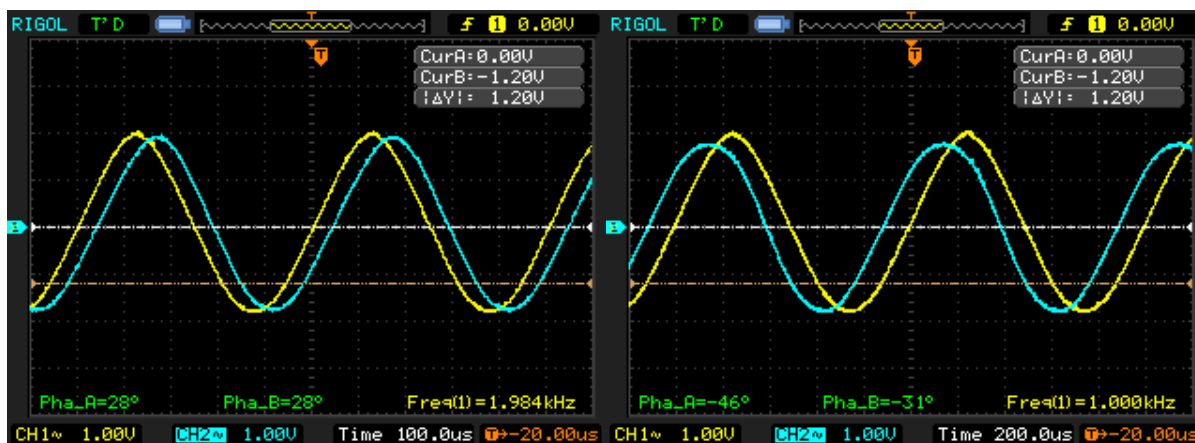
图 2.1 移相器模块及其电路原理图

- 1、将音频振荡器的信号从 0° 插口输出，引入移相器的输入端 U_{in} ，开启电源。
- 2、将示波器的两个探测口 CH1、CH2 分别接到移相器的输入和输出端，观察示波器的波形（调整音频振荡器输出峰峰值为 4V）。
- 3、观察信号，使用数字示波器得到的相位差（Measure→时间测量→相位 1-2）代表的是 CH1-CH2 还是 CH2-CH1？请记录波形及数据，并进行说明。

图：







说明：对于前面 $RW1 = 0K$ 的情况，CH2 超前于 CH1，考虑将相位差化至 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 区间内，则有相位 1-2 始终为负，所以相位差代表的是 CH1-CH2。

4、转动移相器上的电位器，观察两个波形间相位的变化。改变音频振荡器的频率，记录不同频率的最大移相范围。

	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 ↗	相位 1-2 ↘	相位 1→2 ↗	相位 1-2 ↘
1K	-146	-126	-46	-31
2K	-110	-92	28	28
4K	-68	-60	86	93
6K	-52	-47	114	120
8K	-40	-33	124	136
10K	-31	-27	135	144

四、实验分析与结论

1、分析本移相器的工作原理：根据图 2.1，推导移相器输出 U_{out} 与输入 U_{in} 关于 R_{w1} 的传递函数，得到其幅频特性和相频特性，并解释所观察到的现象。将相位的实测数据与理论数据进行比较分析。

传递函数推导：

$$\begin{cases} U_{in} - U_1 = I_1(R_1 + R_3) \\ U_{in} = I_2(\frac{1}{j\omega C_1} + R_2) \\ U_{in} - I_2 R_2 = I_1 R_1 \\ U_1 - U_{out} = I_3(R_4 + R_5) \\ U_1 = I_4(R_{w1} + \frac{1}{j\omega C_2}) \\ U_1 - I_4 \frac{1}{j\omega C_2} = I_3 R_4 \end{cases}$$

$$\text{解得 } U_{out} = \frac{j\omega R_2 C_1 - 1}{j\omega R_2 C_1 + 1} \cdot \frac{1 - j\omega R_{w1} C_2}{1 + j\omega R_{w1} C_2} \cdot U_{in}$$

$$\varphi = \pi - 2\arctan(\omega R_2 C_1) - 2\arctan(\omega R_{w1} C_2)$$

$$\varphi' = -\pi + 2\arctan(\omega R_2 C_1) + 2\arctan(\omega R_{w1} C_2)$$

现象分析：

根据 U_{out} 和 U_{in} 的传递函数的相角函数，可以看出 φ 是关于 ω 的单调减函数。同时， R_{w1} 越大，相位差越大。

数据比较分析：

频率	RW1=0K			RW1=10K		
	实测相位差 $\Phi_1/^{\circ}$	计算相位差 $\Phi_1'/^{\circ}$	误差百分比	实测相位差 $\Phi_2/^{\circ}$	计算相位差 $\Phi_2'/^{\circ}$	误差百分比
1K	-137	-133.73	2.45%	-38.5	-25.50	51.00%
2K	-101	-98.97	2.05%	28	41.26	32.13%
4K	-64	-60.67	5.50%	89.5	98.83	9.44%
6K	-49.5	-42.62	16.14%	117	123.63	5.36%
8K	-36.5	-32.62	11.91%	130	137.05	5.14%
10K	-29	-26.35	10.07%	139.5	145.38	4.04%

分析比较：

理论值与实际值的比较显示，大部分实验数据均在实验允许的误差范围内。然而，在某些特定条件下，实验结果的偏差明显。例如，在 RW1 为 10K 时，低频信号的相位差实测值与理论值之间的相对误差显著较大。这一现象可能与以下因素有关：

- 频率影响：**在低频段，系统内的元件损耗可能会导致非线性现象，进而使得相位差的实际测量值偏离理论预测。随着频率的提升，系统的响应逐渐趋于线性，因此相位差的误差显著减少。
- 元件特性：**运算放大器及其周围元件的实际行为可能与理论模型不完全一致，尤其是在频率变化时，元件的相应特性（如增益带宽、相位裕度）会影响到整体电路的表现。
- 实验条件：**测量过程中可能存在的干扰噪声、信号衰减等因素也可能对数据的准确性产生影响。需要在以后的实验中尽量减少外界干扰，以提高测量结果的可靠性。

总结来看，尽管在低频信号下的表现存在较大误差，但总体上，移相器在不同频率下的工作情况与理论预测基本相符，验证了其设计的有效性。

3. 相敏检波器实验

一、实验目的

了解相敏检波器的原理和工作情况。

二、所需单元和部件

相敏检波器、移相器、音频振荡器、双线示波器、直流稳压电源、低通滤波器、电压表、电源。

三、实验步骤

- 1、直流稳压电源输出调置于 $\pm 2V$ ，音频振荡器的幅度旋钮调至峰峰值 8V，频率 4KHz
- 2、了解相敏检波器和低通滤波器在实验仪面板上的符号。

U_{in} ：信号输入端， U_{out} ：信号输出端，AC：交流参考信号输入端，DC：直流参考信号输入端， \square 、 \square 用于观察参考信号在电路内部被转化成矩形波的情况。

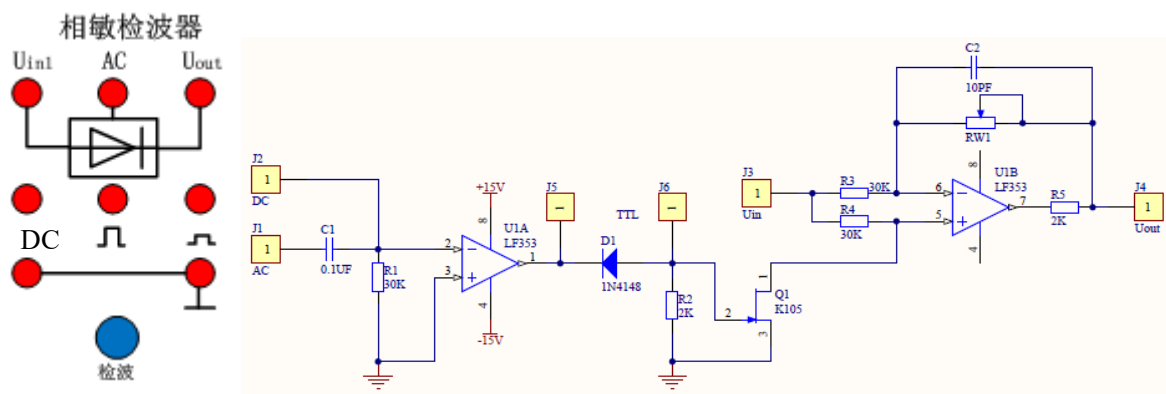
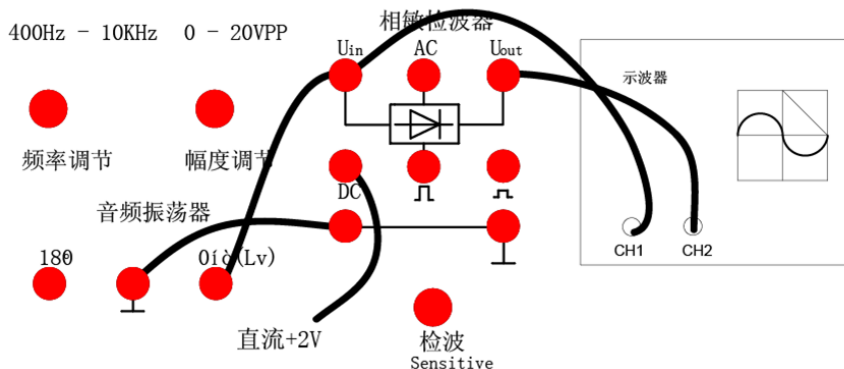


图 3.1 相敏检波电路及其原理图

相敏检波器的电路如图所示，其中，U1A 为零电压比较器；D1 为检波二极管；Q1 为场效应管电子开关；U1B 为差动放大器。

相敏检波器主要由三部分组成：一是由运算放大器 U1A 构成的整形电路部分，用于对参考信号的处理；二是由场效应管 Q1 构成的电子开关电路部分，控制相敏检波器；三是由运算放大器 U1B 构成的相敏检波器部分。

- 3、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？

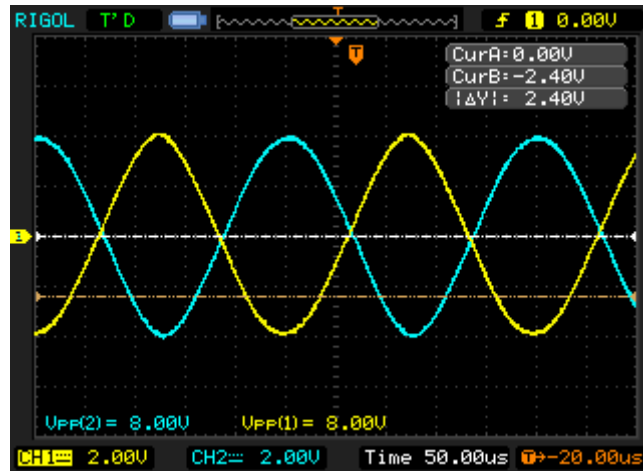


结论：调整检波旋钮，相位同向（同向/反向），幅值不变（可调/不变）。

- 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， U_{out} 是否有变化？

记录波形：

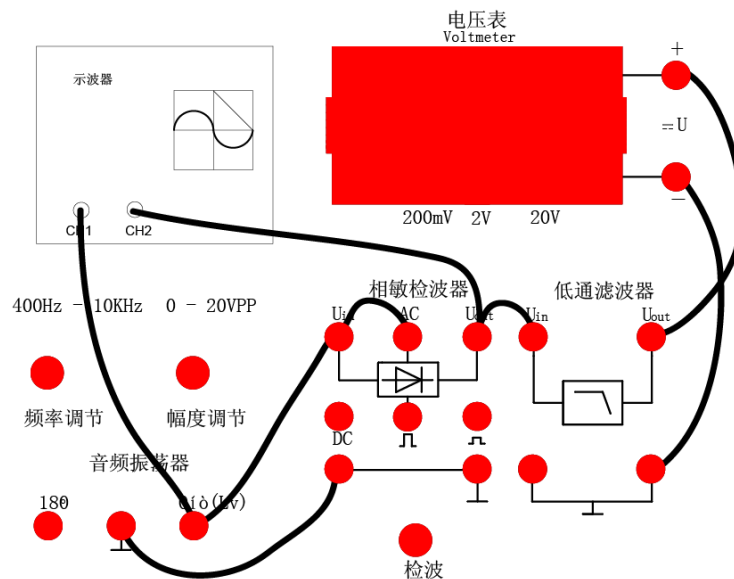


结论：调整检波旋钮，相位 反向 （同向/反向），幅值 可调 （可调/不变）。

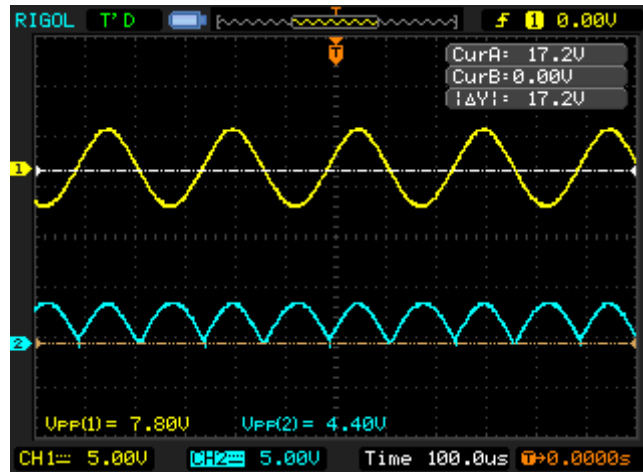
c) 结论：此电路的放大倍数由检波旋钮调节，将放大倍数调为 1 倍，在后续实验过程，检波旋钮保持不变。

4、采用交流控制模式，需要删除 DC 口控制电压，在 AC 口接入交流控制信号。

a) 如图所示，使得相敏检波器 AC 端口与相敏检波器 U_{in} 端口的相位差为 0° （相敏检波器 U_{in} 口接音频振荡器 0° 输出端，AC 口接音频振荡器 0° 输出端）， U_{out} 接至低通滤波器输入端，示波器 CH1 接相敏检波器 U_{in} ，CH2 接相敏检波器 U_{out} ，观察并记录波形，同时记录电压表的读数。



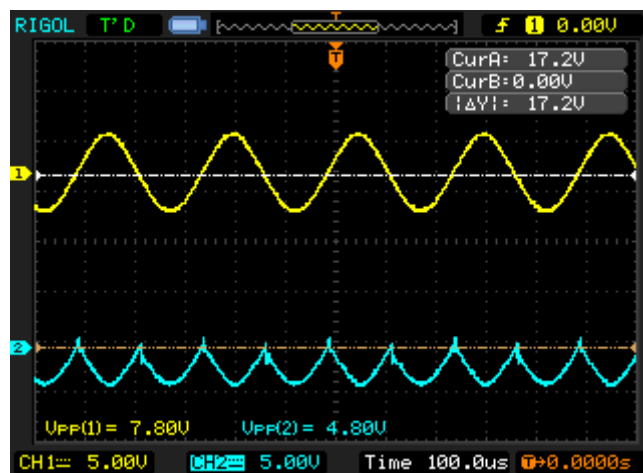
波形记录：



电压表读数：10.27V

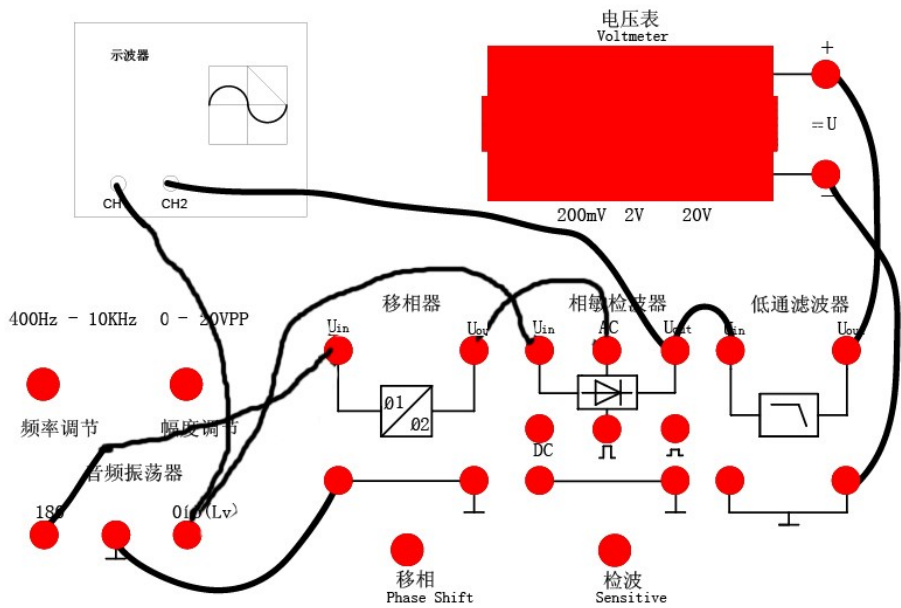
- b) 更换相敏检波器 AC 端口的参考电压，使得相敏检波器 AC 端口与相敏检波器 U_{in} 端口的相位差为 180° （相敏检波器 U_{in} 口接音频振荡器 0° 输出端，AC 口接音频振荡器 180° 输出端），观察并记录波形，同时记录电压表的读数。

波形记录：



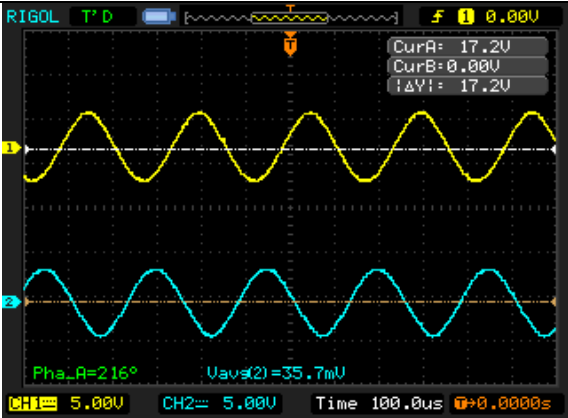
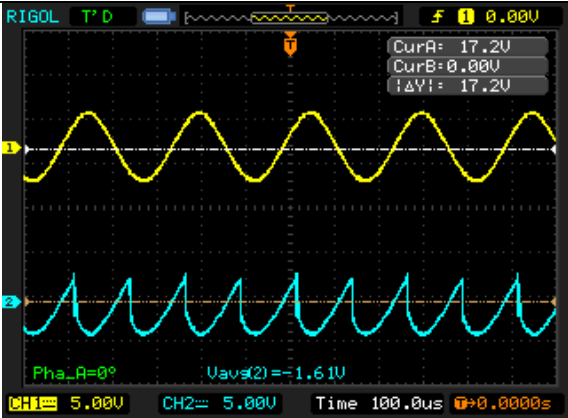
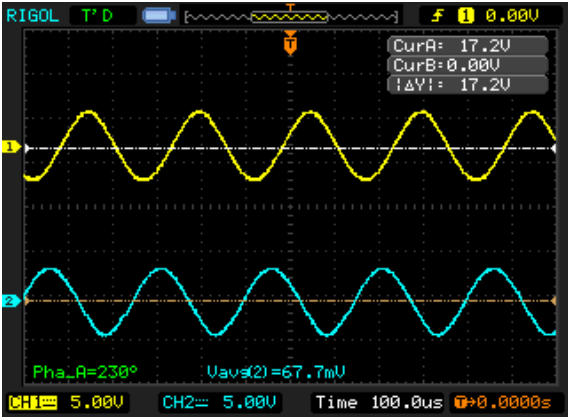
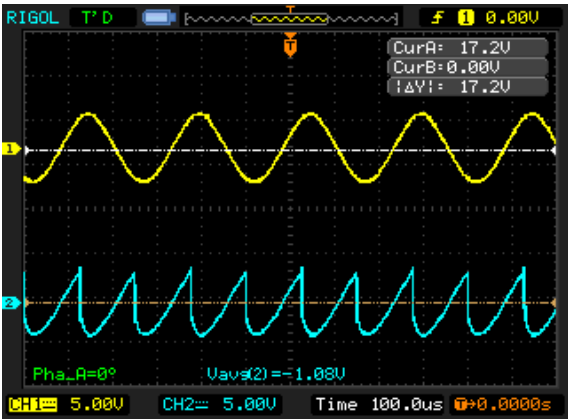
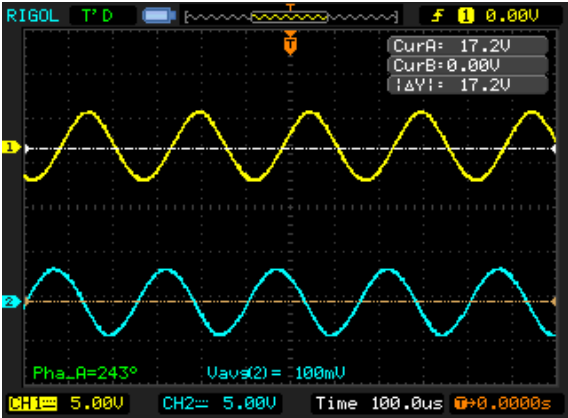
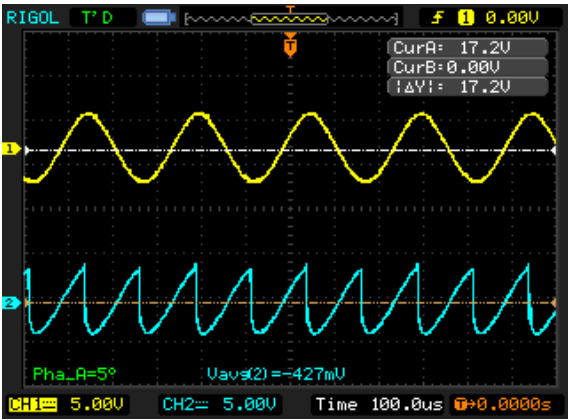
电压表读数：-9.65V

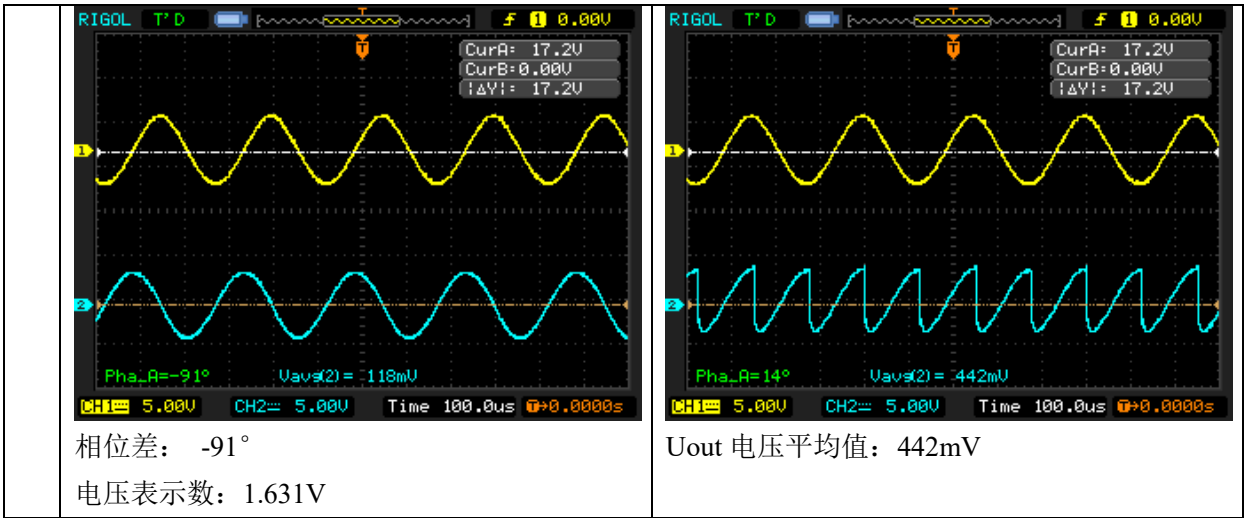
- c) 根据下图进行连线，使得相敏检波器 AC 端口与相敏检波器 U_{in} 端口的相位差可调，调节移相旋钮，观察电压表的示数变化与相敏检波器输出波形变化。



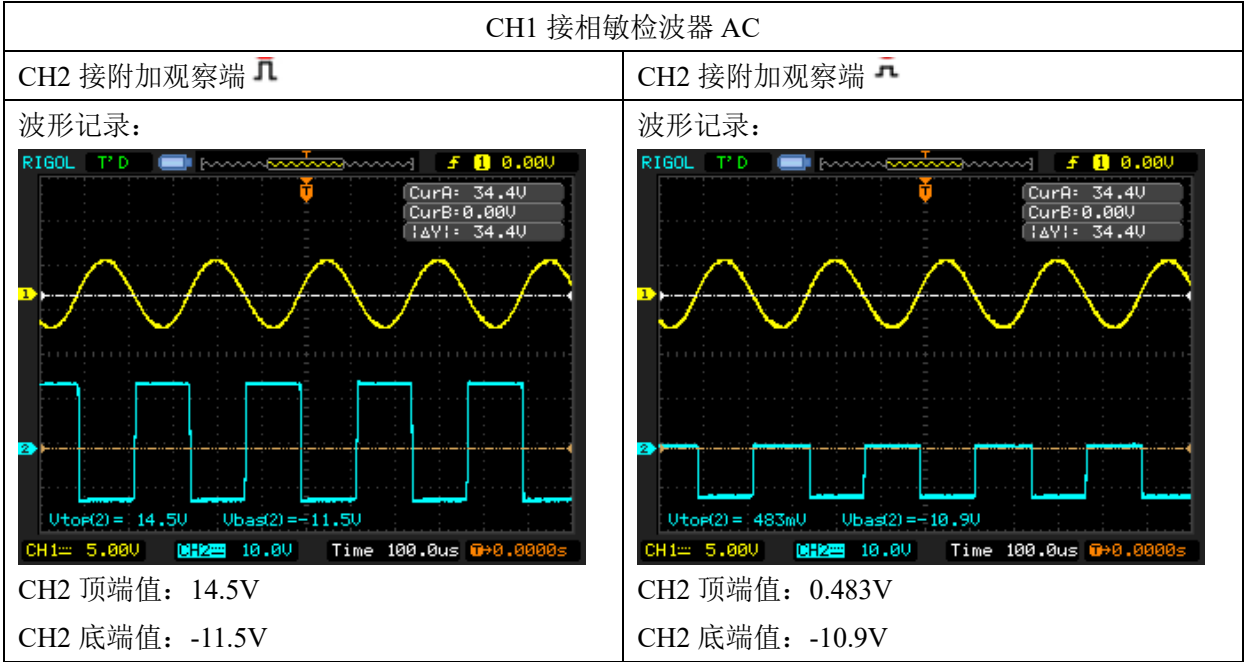
- CH1 接相敏检波器 U_{in} , CH2 接相敏检波器 AC, 可以读出两个信号之间的相位差以及电压表示数
- CH1 接相敏检波器 U_{in} , CH2 接相敏检波器 U_{out} , 可以记录输入与输出波形。
- 调节移相旋钮, 相位差可以选取有代表性的数值

序号	CH1 接相敏检波器 U_{in}	
	CH2 接相敏检波器 AC	CH2 接相敏检波器 U_{out}
1	<div>相位差波形记录: 相位差: 120° 电压表示数: -5.18V</div>	<div>Uout 波形记录: Uout 电压平均值: -1.17V</div>
2	<div>相位差波形记录:</div>	<div>Uout 波形记录:</div>

	 <p>相位差： 216° 电压表示数： -6.76V</p>	 <p>Uout 电压平均值： -1.61V</p>
3	<p>相位差波形记录：</p>  <p>相位差： 230° 电压表示数： -4.39V</p>	<p>Uout 波形记录：</p>  <p>Uout 电压平均值： -1.08V</p>
4	<p>相位差波形记录：</p>  <p>相位差： 243° 电压表示数： -1.792V</p>	<p>Uout 波形记录：</p>  <p>Uout 电压平均值： -427mV</p>
5	<p>相位差波形记录：</p>	<p>Uout 波形记录：</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{B} ，观察并记录波形。结合上述相关实验，以及图 3.1 相敏检波电路及其原理图，深入理解并解释相敏检波器的作用。



电路原理分析：

前级运放 U1A 由于正级输入端接地，处于开环状态。当输入信号为负时，运放输出为正，二极管 D1 处于截止状态，场效应管导通，输出信号与输入信号由于放大器 U1B 反相；当输入信号为正时，运放输出为负，二极管导通，场效应管截止，输入信号与参考信号通过放大器相减，使信号幅值降低。

理解相敏检波器的作用：

相敏检波器的主要作用是实时监测和分析输入信号的相位变化。通过将相位差转化为电压信号，用户可以直观地观察到输入信号与参考信号之间的相位关系，进而应用于相位锁定、信号解调等多种电子应用场景。这使得相敏检波器在信号处理和控制系统中扮演了至关重要的角色。

4. 实验感想：

在此次实验中，我们深入复习了金属箔式应变片的工作原理，并进行了全桥性能测试。同时，通过实际操作，我们更好地理解了运算放大器构成的移相电路的原理与工作情况。我们学会了使用

姓名: 刘侃 方天润
实验台: 10

学号: 3220103259 3220102988
组号: 10

指导老师:
时间: 2024.10.18

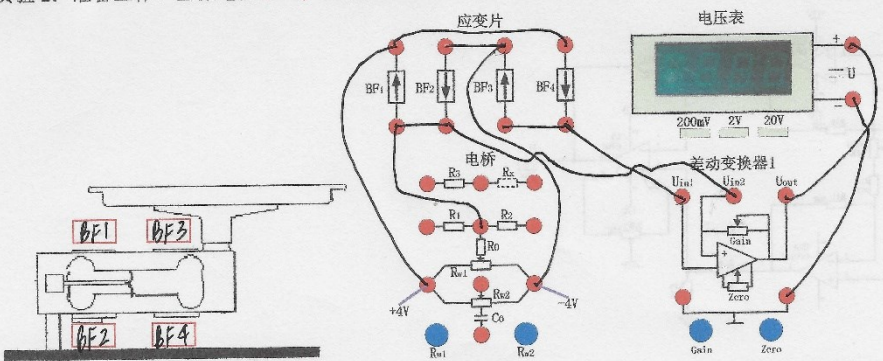
成绩:

示波器进行基础信号测试, 并掌握了相敏检波器的功能与应用。整体而言, 这次实验不仅加深了我们对理论知识的理解, 还提高了我们的实验技能, 对未来的学习与研究有着积极的促进作用。

5. 实验记录纸

姓名: 刘侃 方天润 学号: 3220103259 3220102988 指导老师: 实验记录纸
实验台: 10 组号: 10 时间: 2024.10.18

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, 直接用万用表测量。



重量 (g)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
电压 (mV 或 V)	3.3	9.4	16.2	23.1	29.8	36.9	43.9	51.0	58.6	67.1	74.2

实验 2: 准备: 音频振荡器 $V_{pp}=4V$ 。
注意: CH1 和 CH2 通道信号观察并图形记录, 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 \rightarrow 2 $^{\circ}$	相位 1-2 $^{\circ}$	相位差 Φ_1 记录 $^{\circ}$	相位差 Φ_1 计算 $^{\circ}$	误差百 分比	相位 1 \rightarrow 2 $^{\circ}$	相位 1-2 $^{\circ}$	相位差 Φ_2 记录 $^{\circ}$	相位差 Φ_2 计算 $^{\circ}$	误差百 分比
1K	248	-146	-137	-133.73	5.8%	-46	-31	-38.5	-25.50	51.0%
2K	250	-110	-92	-98.97	2.0%	28	28	28	41.26	32.13%
4K	-68	-60	-64	-60.67	5.5%	86	93	89.5	98.83	9.44%
6K	-52	-47	-49.5	-42.62	16.14%	246	120	117	123.63	53.6%
8K	320	-40	-33	-32.62	1.14%	124	136	130	137.05	5.14%
10K	-31	-27	-29	-26.35	10.0%	135	-216	139.5	145.38	4.04%

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, 相位同向 (同向/反向), 幅值不变 (可调/不变)。
1b、DC=-2V, 调整检波旋钮, 相位同向 (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: 10.27 V。波形记录: U 盘
2b、AC 接音频振荡器 180° , 电压表的读数: 10.27 V。波形记录: U 盘
2c、AC 接任意相位差波形 (通过移相器实现) -9.65

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: 120°	波形: U 盘 CH2 电压平均值: -1.17V	-5.18
2 波形: U 盘 相位差: 216°	波形: U 盘 CH2 电压平均值: -1.61V	-6.76
3 波形: U 盘 相位差: 230°	波形: U 盘 CH2 电压平均值: -1.08V	-4.39
4 波形: U 盘 相位差: 243°	波形: U 盘 CH2 电压平均值: -4.27mV	-1.792
5 波形: U 盘 相位差: -91°	波形: U 盘 CH2 电压平均值: 4.42mV	1.631

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, 不然会把直流量过滤掉。

波形记录:	波形记录:
CH2 顶端值: 14.5V CH2 底端值: -11.5V	CH2 顶端值: 483mV CH2 底端值: -10.9V