



## 实验3 集成运算放大器的指标测试P263

---

浙江大学电工电子教学中心

傅晓程

**桌号**请写在实验地点后

例如，**地点：东3 - 2XX A1**

**验收：任务4**

**本次需提交实验报告**



# 实验目的

---

1. 加深对集成运算放大器特性和参数的理解。
2. 学习集成运算放大器主要性能指标的测试方法。

## P263实验任务和验收内容

**注意：**频率要低（请标注信号的频率），且示波器输入耦合视电路或调试情况选择DC或AC！

### 实验任务

1. 测量输入失调电压 $V_{IO}$ 。
2. 测量输入失调电流 $I_{IO}$ 。
3. 测量输入偏置电流 $I_{IB}$ 。
4. 测量开环差模电压增益 $A_{od}$ 。
5. 测量最大不失真输出电压幅度 $V_{o(max)}$ 。
6. 测量共模抑制比 $K_{CMR}$ 。（用于：实验18 仪用放大器应用电路设计P341）
7. 测量转换速率SR。

### 验收：任务4

测量开环差模电压增益 $A_{od}$ ---验收要求：在示波器上双踪显示稳定、合适的正弦波信号。

**注意：**上述手册上提供的参数，除SR是交流参数外其他的都是直流参数。

**注意：**RMS（有效值）表示时示波器最好选择AC耦合，否则会有直流偏置被计数到RMS；**如果有毛刺请选择峰峰值；所有被测量表示RMS或峰峰值要保持一致！**

**问题1：**测量开环增益、最大不失真输出、共模抑止比实验中信号的频率不一样是否对实验的结果有影响？

# LM358 (双运放) 管脚图和技术指标

**注意**手册中的测量条件：

单电源(3—32V)

双电源( $\pm 1.5$  —  $\pm 16$ V)

共模输入电压范围宽(0 至 $V_{cc}-1.5$ V)

差模输入电压范围宽，等于电源电压范围

低功耗电流，适合于电池供电，

输入失调电压3mV

输入失调电流2 nA

输入偏置电流20 nA

直流开环差模增益100 V/mV

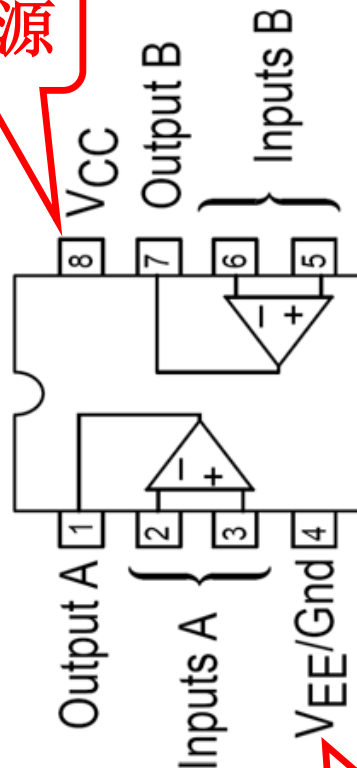
输出电压摆幅 (0 至 $V_{cc}-1.5$ V) (最大不失真输出)

共模抑制比80dB

压摆率(0.3V/us) (转换速率)

单位增益频带宽(约0.7MHz)

正电源



$$R_{id} \rightarrow \infty$$

$$R_{od} \rightarrow 0$$

$$A_{od} \rightarrow \infty$$

虚短

虚断

叠加定理

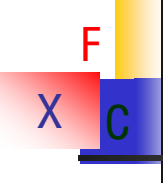
运放GBW就是增益带宽积，该参数决定着运放在小信号时的最高工作频率。如：LM358的仅0.7MHz，就是说在增益为1时其最高工作频率为0.7MHz，如果增益为10，则为70KHz。

负电源或地



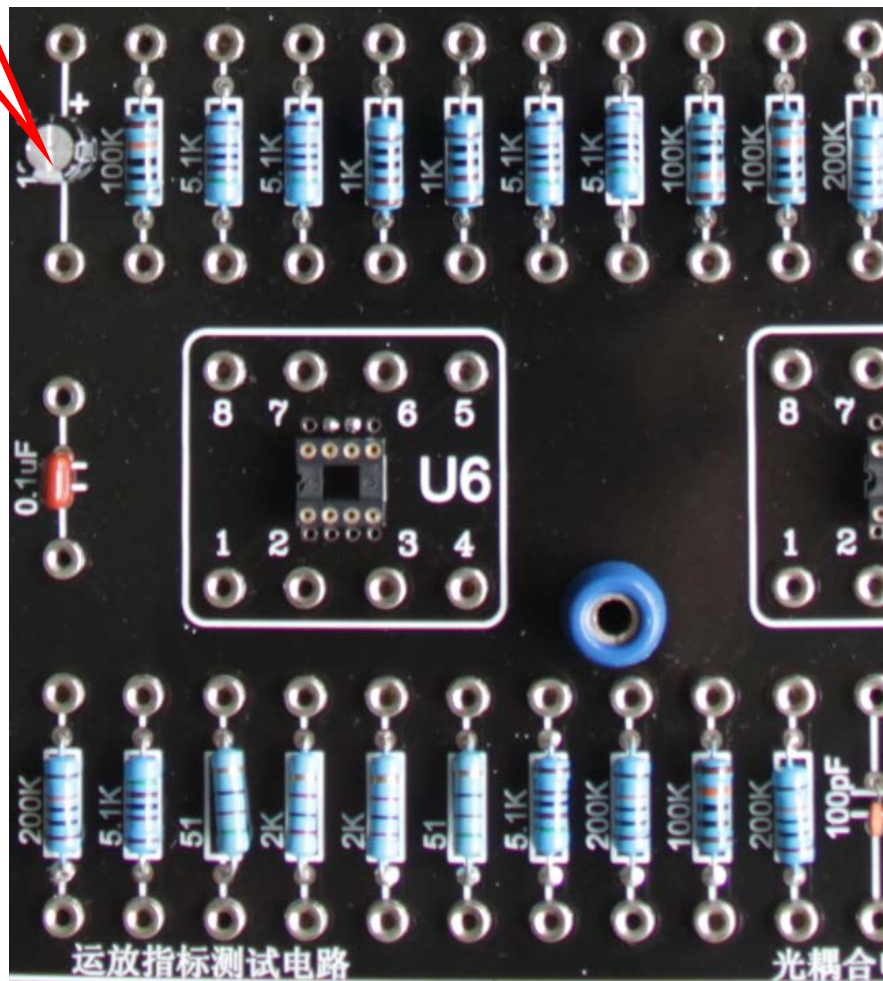
## 实验准备工作

- 1、在断电情况下，观察是否准确插入LM358。
- 2、用万用表测量实验箱上的+15V和-15V，或应用稳压电源调节+15V和-15V；以万用表测量示数为准。  
14.87V      -15.17V
- 3、检查示波器、函数发生器是否正常。
- 4、关闭实验箱直流电源，连接各实验电路。**注意：**用导线将工作电源与+15V、-15V和COM2 ( GND ) 的连接方式。
- 5、**注意：**实验教材中以 $\mu$ A741为例介绍运放主要指标的简易测试方法，不同的集成运放由于技术指标的差异，外围电阻会有所不同。本次实验使用的是LM358，具体的外围电阻请参看PPT或其手册。



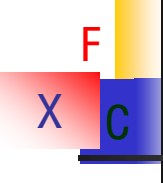
100uF

## 运放指标测试电路模块

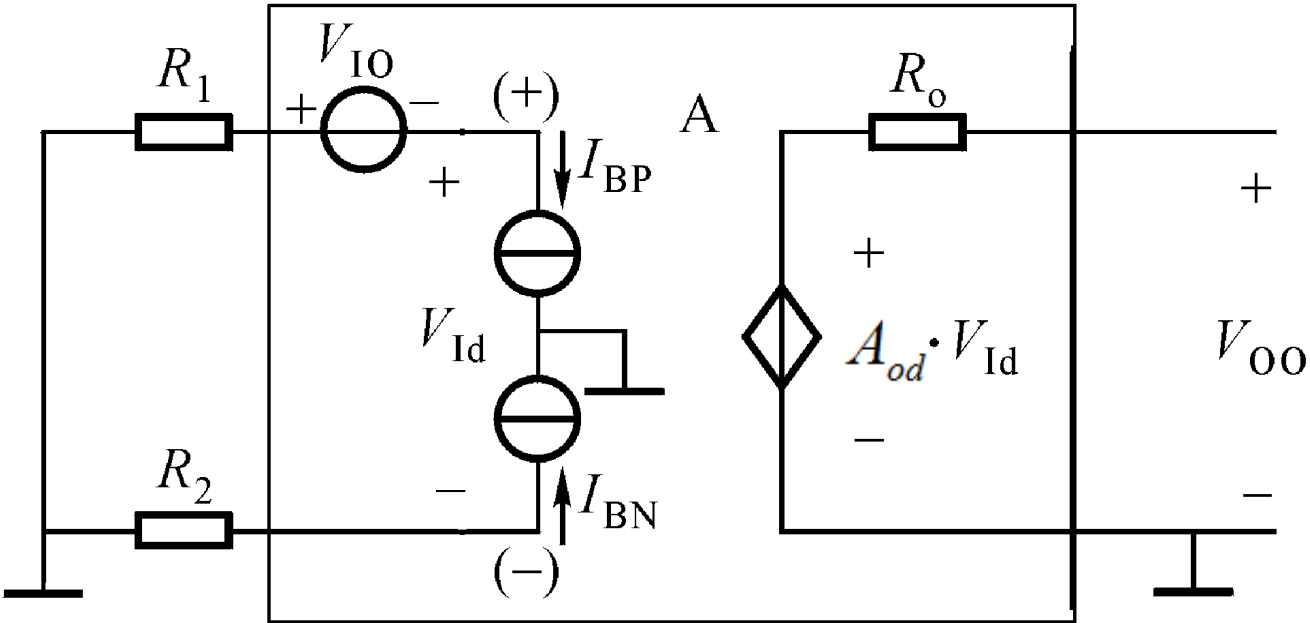


**Preset(2个GND是不连接在一起的)不要去连接EARTH**





# 运算放大器参数



$$V_{IO} = -\frac{V_{OO}}{A_{vd}}$$

$$I_{IB} = \frac{I_{BP} + I_{BN}}{2}$$

$$v_{Ic(max)}$$

$$I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}|$$

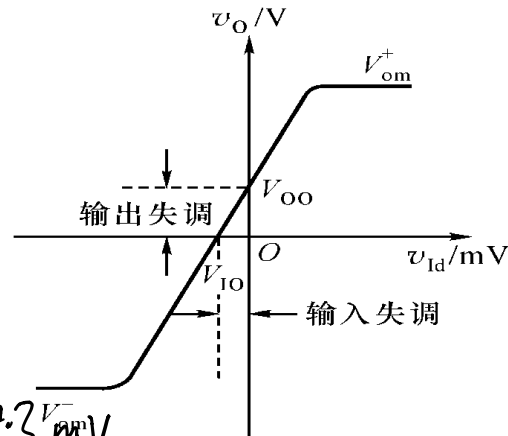
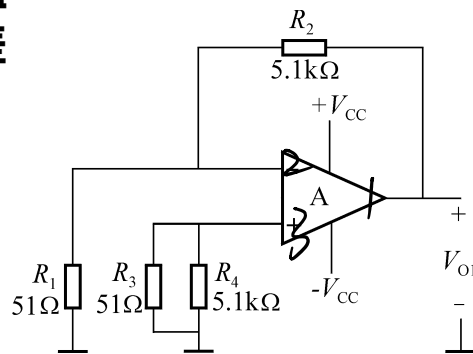
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$$

$$R_{ic} = \frac{\Delta v_{Ic}}{\Delta i_{Ic}}$$



# 1. 输入失调电压 $V_{IO}$ 的测量电路

运放的输入外接电阻  
(包括信号源内阻)较小时, 失调电压及其温漂往往是引起运放误差的主要原因。LM358 典型参数 3 mV



P264图8.6 集成运放输入失调电压的测试电路

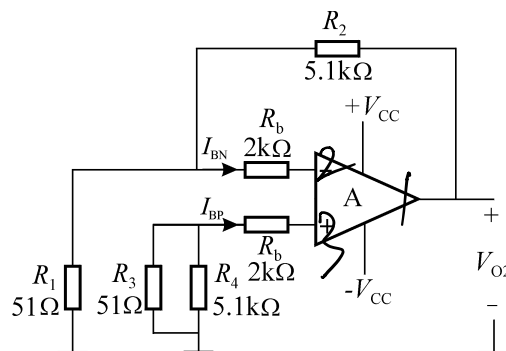
$$V_{IO} = -\frac{V_{OO}}{A_{od}}$$

加上反向补偿电压

电阻参数应严格对称。测出输出电压 $V_{O1}$ 的大小 (实测值可能为正, 也可能为负)

$$V_{IO} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{O1} \quad \frac{1}{101} \times V_{O1} =$$

## 2. 输入失调电流 $I_{IO}$ 的测量电路



$$I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}|$$

P265图8.7 集成运放输入失调电流的测试电路

$$I_{IO} = |V_{O2} - V_{O1}| \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_b}$$

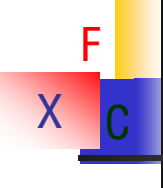
$$V_{O2} = (1 + \frac{R_2}{R_1})(V_{IO} + I_{IO}R_b)$$

$$\approx 82.6 \text{ mV}$$

$$V_{IO} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{O1}$$

当集成运算放大器的输入端外接电阻比较大时，输入失调电流及其温漂是造成运放误差的主要原因。（LM358 典型参数 2 nA）

电阻精确配对才能保证测量精度。由于 $R_b \gg R_1$ ，因此输入电流 $I_{BN}$ 和 $I_{BP}$ 在电阻 $R_1$ 和 $R_3$ 上的压降可以忽略。



### 3 . 输入偏置电流 $I_{IB}$

输入偏置电流是指在常温下，且输入信号为零时，集成运算放大器两个输入端输入电流的平均值，即

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{BP} + I_{BN})$$

( LM358 典型参数 20 nA )

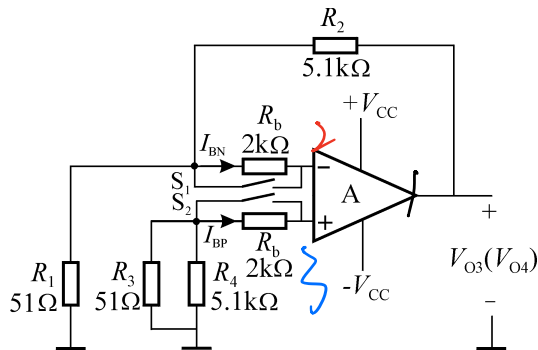
该指标测试需**注意**：

- 1) 只有当集成运放的输出电压尚未达到饱和值时，测试电路所获得的各项测试结果才是正确的。
- 2) 在测试时，应该用示波器监视输出电压波形，若发现集成运放的输出端产生自激（一般是高频），则必须加补偿电容，以消除自激振荡。

**P270③** 为了减小运放失调参数的影响，在设计运算放大器电路时，有哪些需要遵循的原则？

（平衡补偿电阻不建议采用电位器，但可以省略；调零电路）

### 3. 输入偏置电流 $I_{IB}$ 的测量电路



P266图8.8 集成运放输入偏置电流的测试电路

当 $S_1$ 断开、 $S_2$ 闭合时，若测得运放输出电压为 $V_{O3}$ ，而

$$V_{O3} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(V_{IO} + I_{BN} R_b) \quad 65.7mV \quad ?$$

当 $S_1$ 闭合、 $S_2$ 断开时，若测得运放输出电压为 $V_{O4}$ ，而

$$V_{O4} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(V_{IO} - I_{BP} R_b) \quad 87.8mV$$

两式相减，得：

$$V_{O3} - V_{O4} = R_b (I_{BN} + I_{BP}) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

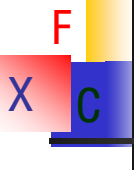
两式相减，得：

因此，输入偏置电流为：

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{BN} + I_{BP}) = \frac{1}{2}(V_{O3} - V_{O4}) \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot \frac{1}{R_b}$$

$\frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2000}$

这肯定不对称  
题目



## 4 . 开环差模电压放大倍数 $A_{od}$

$$A_{od} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_P - \Delta v_N} \quad (\text{LM358 典型参数 } 100 \text{ V/mV})$$

测试该指标**注意**事项：

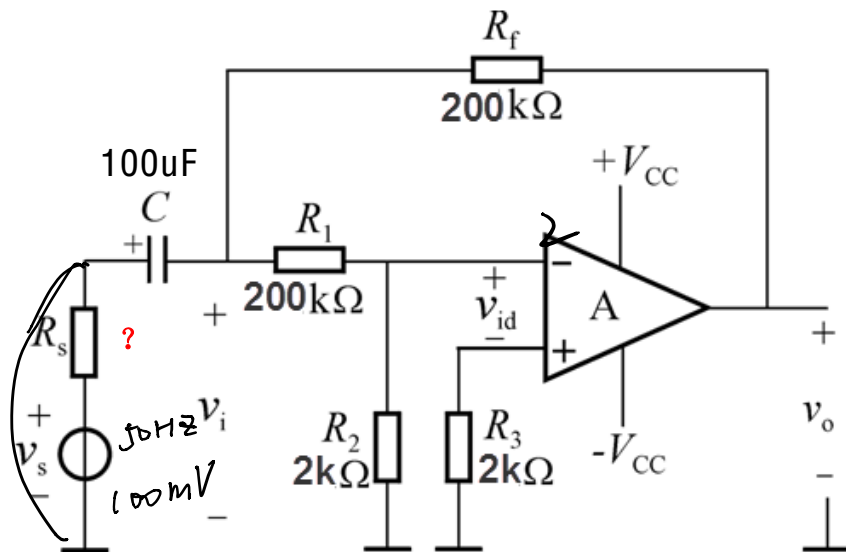
- 1) 静态测试，保证零输入时为零输出。
- 2) 加入低频正弦波（建议50Hz），手册中的**开环增益**是一个直流参数，它是随着**频率的升高而减小的**。
- 3) 在测量过程中，要求被测运放始终工作在线性放大区，而且没有自激振荡现象（一般是高频）。（30pF电容接在反相输入端和输出端，这样可以适当牺牲电压增益，减少自激振荡）

**问题2：**零输入时一定要零输出吗？

P270⑥ 如果一个正弦波放大电路放大后出现了直流偏移，可能是什么原因？

## 4. 开环差模电压放大倍数 $A_{od}$ 的测量电路

被测运放一方面通过 $R_f$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 引入直流反馈完成闭环，以抑制输出电压失调。



另一方面，通过 $R_f$ 引入交流反馈，输入回路中的电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 同时又起到对输入交流信号进行分压衰减的作用。同相端接地电阻 $R_3$ 应与反相端所接电阻相匹配以减小输入偏置电流的影响。电容 $C$ 是隔直电容。

$$A_{od} = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_o}{v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

输入有效值 25.43mV  
输出有效值 7.959V

该图参数不同于P267图8.9 开环电压放大倍数与最大不失真输出电压的测试电路，且不能直流测量（不是因为电容 $C$ 的原因）。

P269① 在测试运放的开环差模电压增益时，为什么必须引入直流负反馈？

## 5.最大不失真输出电压 $V_{o(max)}$ 的测量

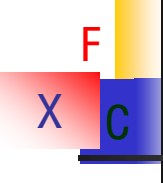
$$F = 50\text{Hz}$$

$V_{o(max)}$  的测试电路与 $A_{od}$ 的测试电路相同。实验时，只需改变 $u_s$ 幅度，并观察 $u_o$ 是否开始出现**削顶失真**（**波峰和波谷都有可能,请选择DC耦合观测失真情况**），从而确定运放在一定电源电压下的最大不失真输出电压幅度 $V_{o(max)}$ 。

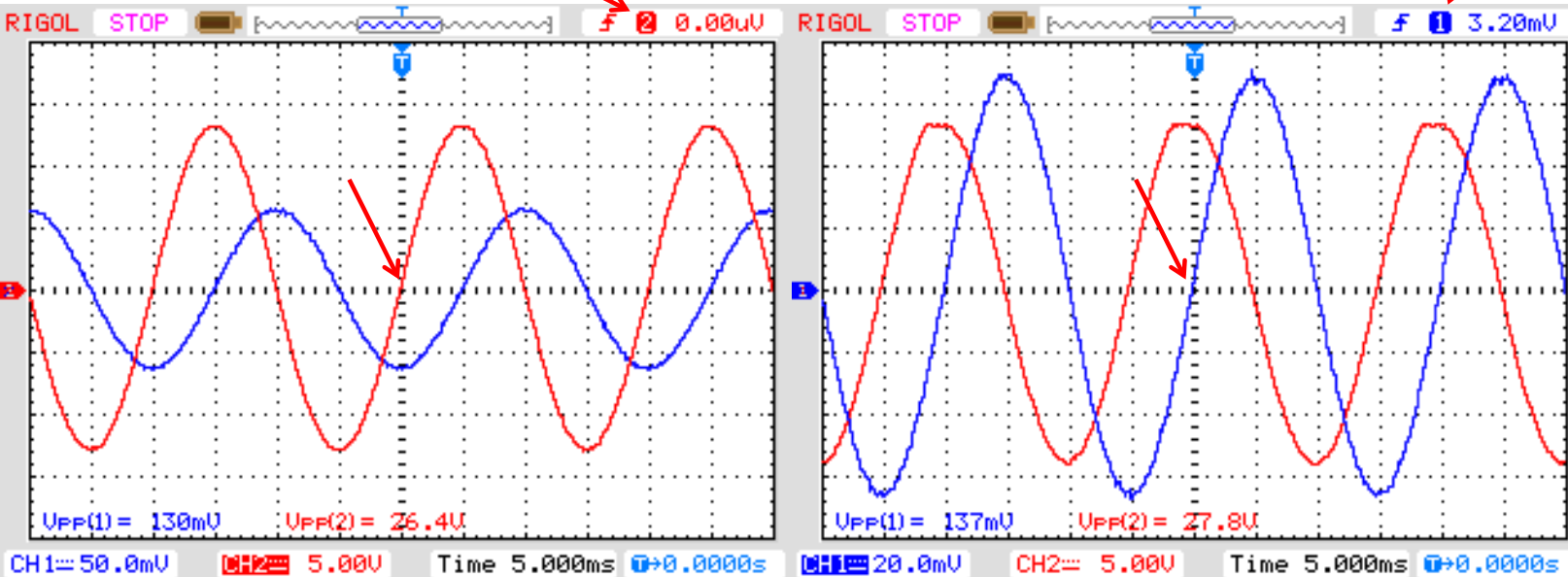
$$V_s = 167\text{mV}$$

$$V_{o(max)} \text{ 峰值 } 10.74\text{V}$$

**P270⑤** 如果一个正弦波放大电路产生了方波输出，可能是什么原因？



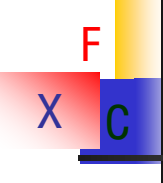
## 任务4和任务5(在DC耦合下)参考, $F=50\text{Hz}$



**注意：**RMS (有效值) 表示时示波器最好选择AC耦合，否则会有直流偏置被计数到RMS；如果有毛刺请选择峰峰值；所有被测量表示RMS或峰峰值要**保持一致**！

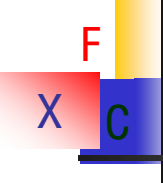
**注意：**该参考图的输入测量为函数发生器的输入；实际测量也可以参照原理图上一—在电解电容的负端。





# DG4000函数发生器





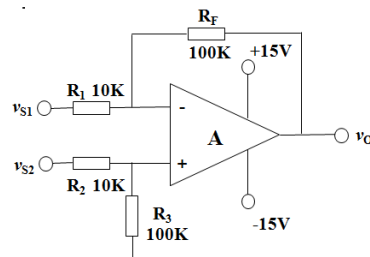
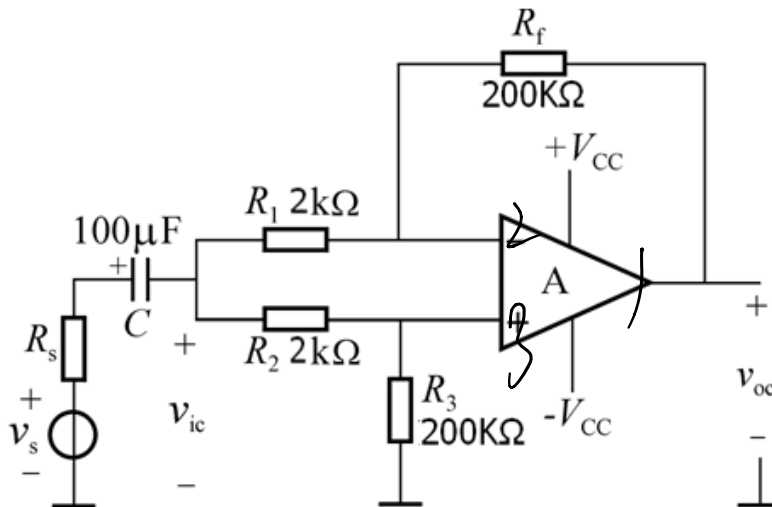
# MSCO4054示波器



**注意：**触发信源选择、Cursor和自动测量情况、

## 6. 共模抑制比 $K_{CMR}$ 的测量电路（建议用有效值）

$V_S$  参考  $20V_{PP}$



该图参数不同于P268图8.10 集成运放共模电压放大倍数的测试电路

$\approx -\infty$

?  $A_{od} (= -R_f/R_1)$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$$

$$A_{oc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}}$$

7.218V

~~2~~ 133.7mV

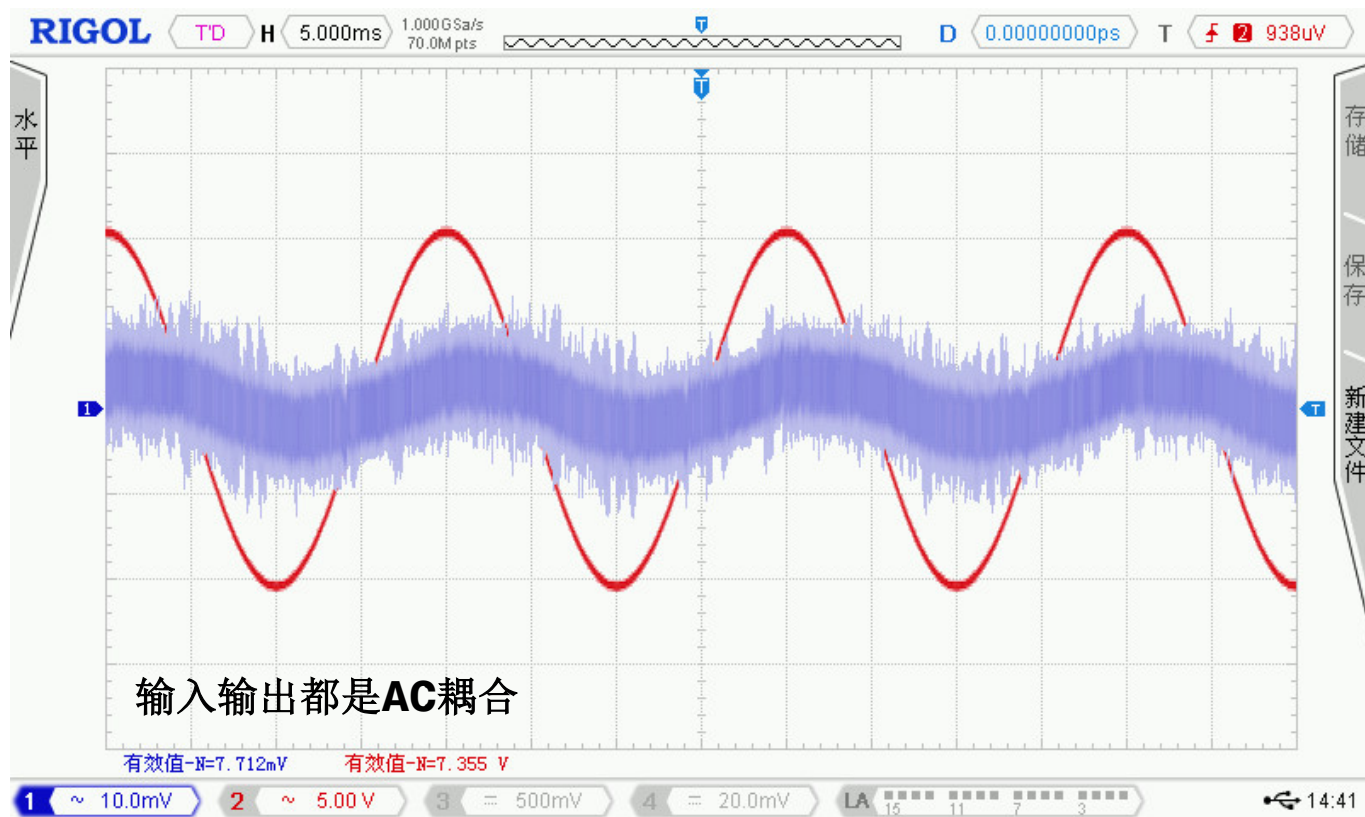


## 注意事项

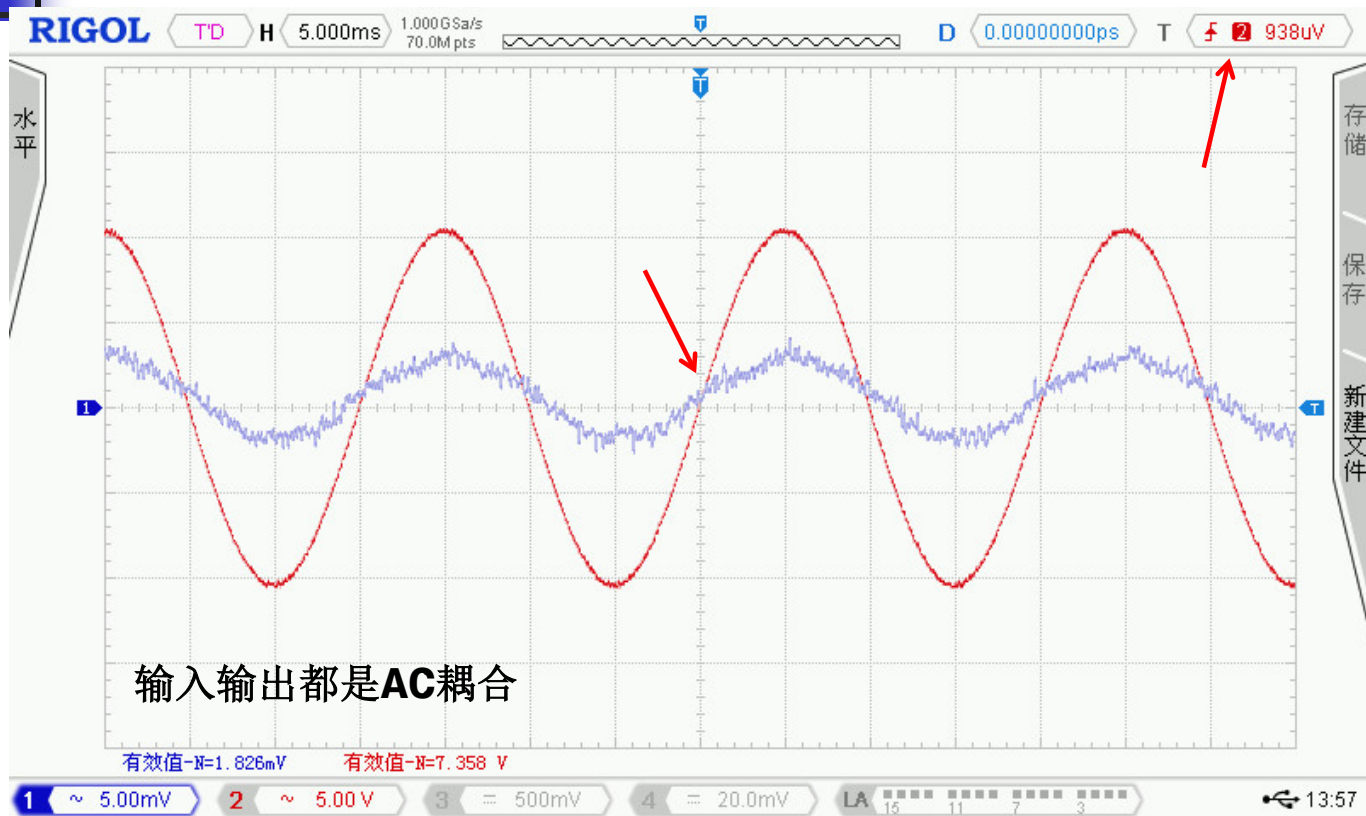
- 1) 静态测试，保证零输入时为零输出。
- 2) 加入正弦波（低频），用示波器观察输入和输出波形，测量 $V_{oc}$ 和 $V_{ic}$ 。
- 3)  $R_1$ 与 $R_2$ 、 $R_3$ 与 $R_f$ 的阻值应严格配对，否则将影响测量精度。
- 4) 在测量 $A_{oc}$ 时，应该适当加大共模输入信号 $V_{ic}$ 的幅度，但又必须小于被测集成运放的最大共模输入电压 $V_{Ic(max)}$ 。
- 5) 在输出端上，仍需用示波器监视电路没有产生自激振荡。
- 6) 手册中的共模抑制比 $K_{CMR}$ 是一个直流参数，它是随着频率的升高而减小的。

P270② 为什么在输出端必须用示波器监视波形？

共模测量电路参考波形,  $F=50\text{Hz}$ , 获取方式选择“普通”



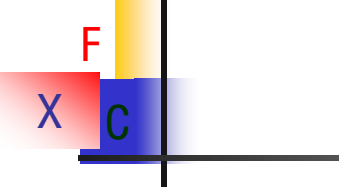
共模测量电路参考波形,  $F=50\text{Hz}$ , 获取方式选择“平均”要耐心等待



(**建议**用有效值), 因是50Hz正弦波, 输入输出信号用万用表交流档测量输入为7V, 输出为1.4mV。

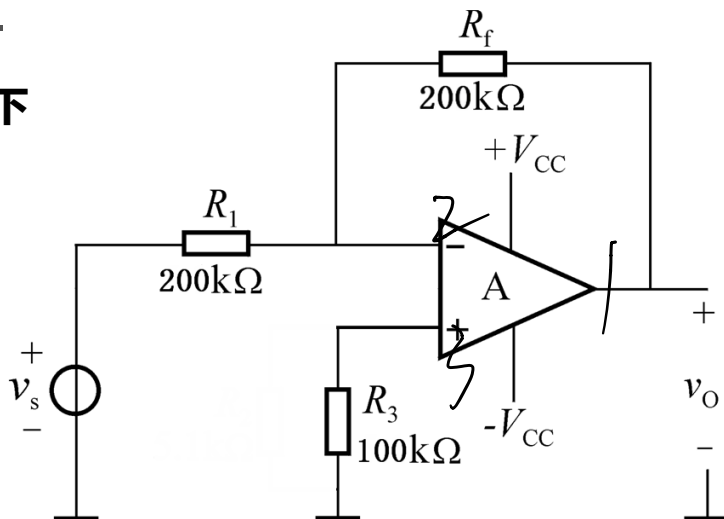
**注意:** 该参考图的输入测量为函数发生器的输入; 实际测量也可以参照原理图上一在电解电容的负端。





## 7. 转换速率SR的测量电路（建议用峰峰值）

在大信号条件下



参考：峰峰值20V

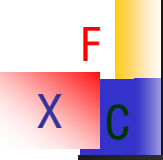
注意：阻值应严格配对

该图参数不同于P268图8.11 集成运放转换速率的测试电路

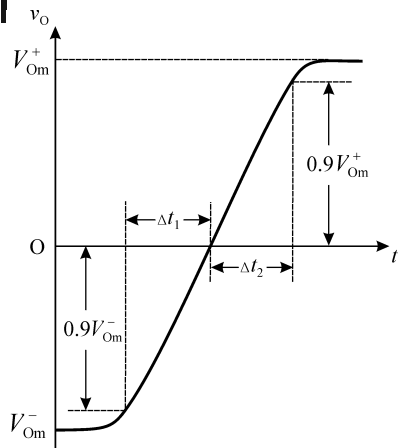
输入信号是前沿陡峭的大幅度方波（峰峰值 $\geq 1V$ ）  $SR = \frac{0.9V_{Om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9V_{Om}^-}{\Delta t_1}$

正弦电压作为输入信号时： $SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = 2\pi f V_{o(\max)}$   $v_o = V_{o(\max)} \sin 2\pi f t$

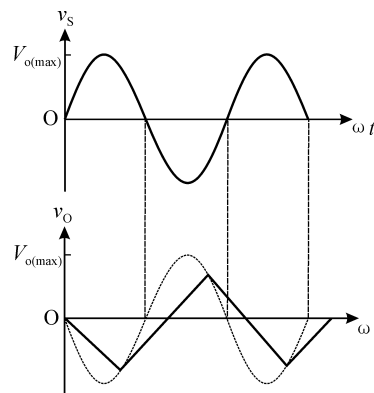
LM358的典型值SR(0.3V/us)，集成运放的转换速率与运放的电路结构、反馈深度及补偿网络有关，手册中给出的SR一般是在集成运放接成电压跟随器或反相器的情况下测得的。



## 7. 转换速率SR



SR测试波形



因SR引起的失真

集成运放的最大不失真输出电压幅度受运放工作频率的限制。随着频率的升高，由于转换速率一定，运放的最大不失真输出电压幅度将减小。当输入正弦波 $v_s$ 的频率太高时，由于受转换速率的限制，将出现输出电压的变化跟不上输入电压的变化，从而引起输出正弦波形严重失真，甚至使输出几乎成为三角波，而且幅度也将明显地减小。因此，通常集成运算放大器在大信号条件下的最高工作频率远低于小信号工作时的上限频率。

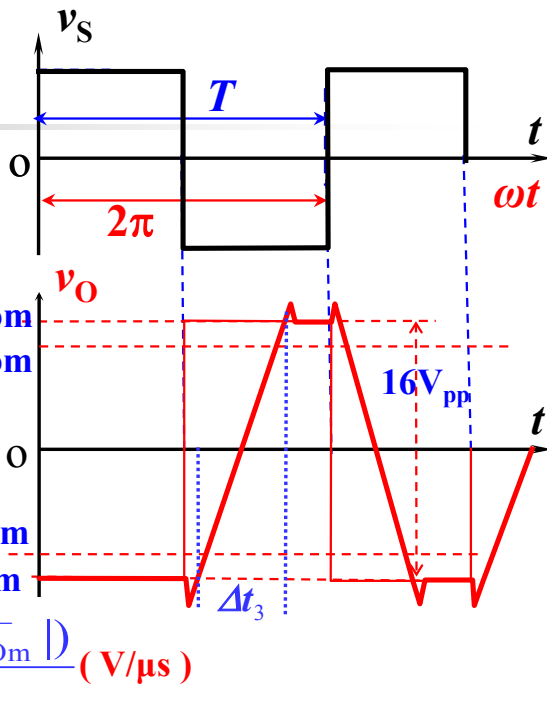
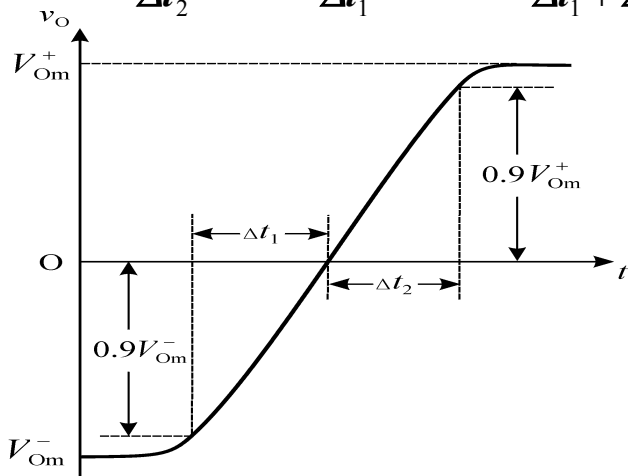
**P270④** 如果一个正弦波放大电路产生了三角波输出，可能是什么原因？



# 实验参考

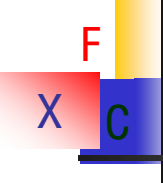
$V_o$  峰峰值 2.20V

$$SR \approx \frac{0.9V_{Om}^+}{\Delta t_2} \approx \frac{0.9|V_{Om}^-|}{\Delta t_1} \approx \frac{0.9(V_{Om}^+ + |V_{Om}^-|)}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \approx \frac{(V_{Om}^+ + |V_{Om}^-|)}{\Delta t_3} \text{ (V/}\mu\text{s)}$$

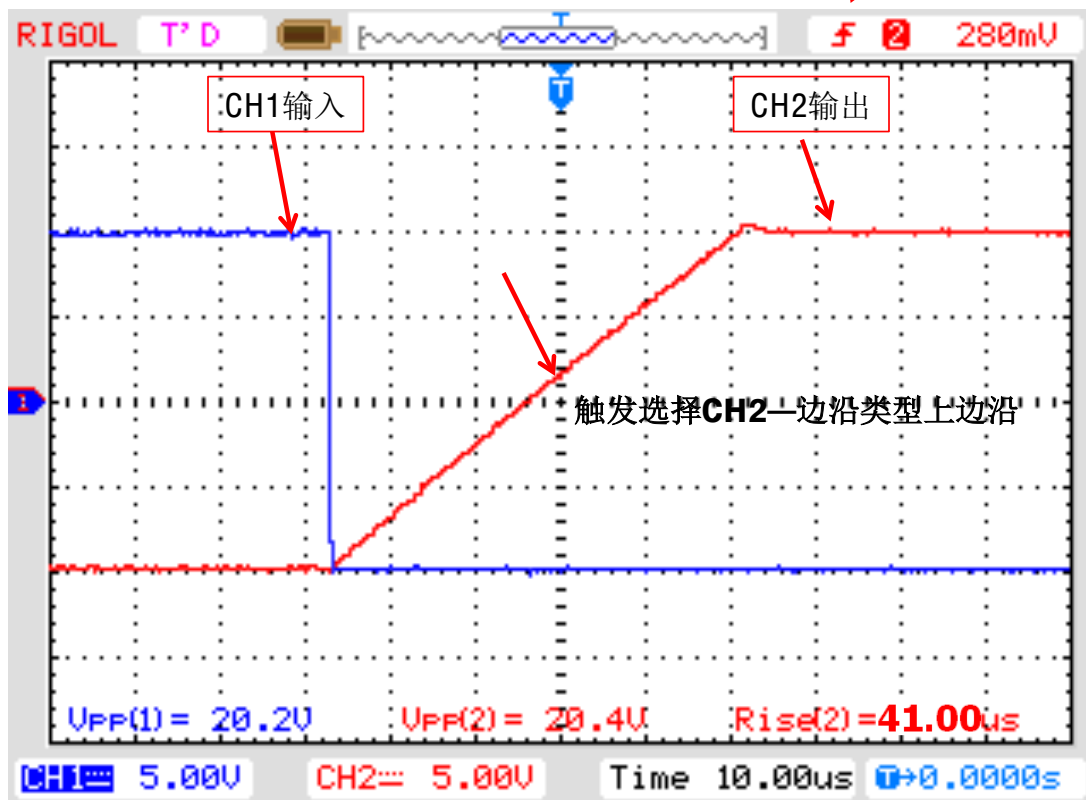


**方波频率的选取：**针对该电路输入的频率变化，输入输出幅度要基本保持一致大小。

**注意：**方波用示波器测量时，示波器耦合应该是DC耦合，幅度大小用峰峰值测量。



方波 $V_s = 20V_{pp}$ (即 $V_{om} = 10$ ),  $f = 20Hz$

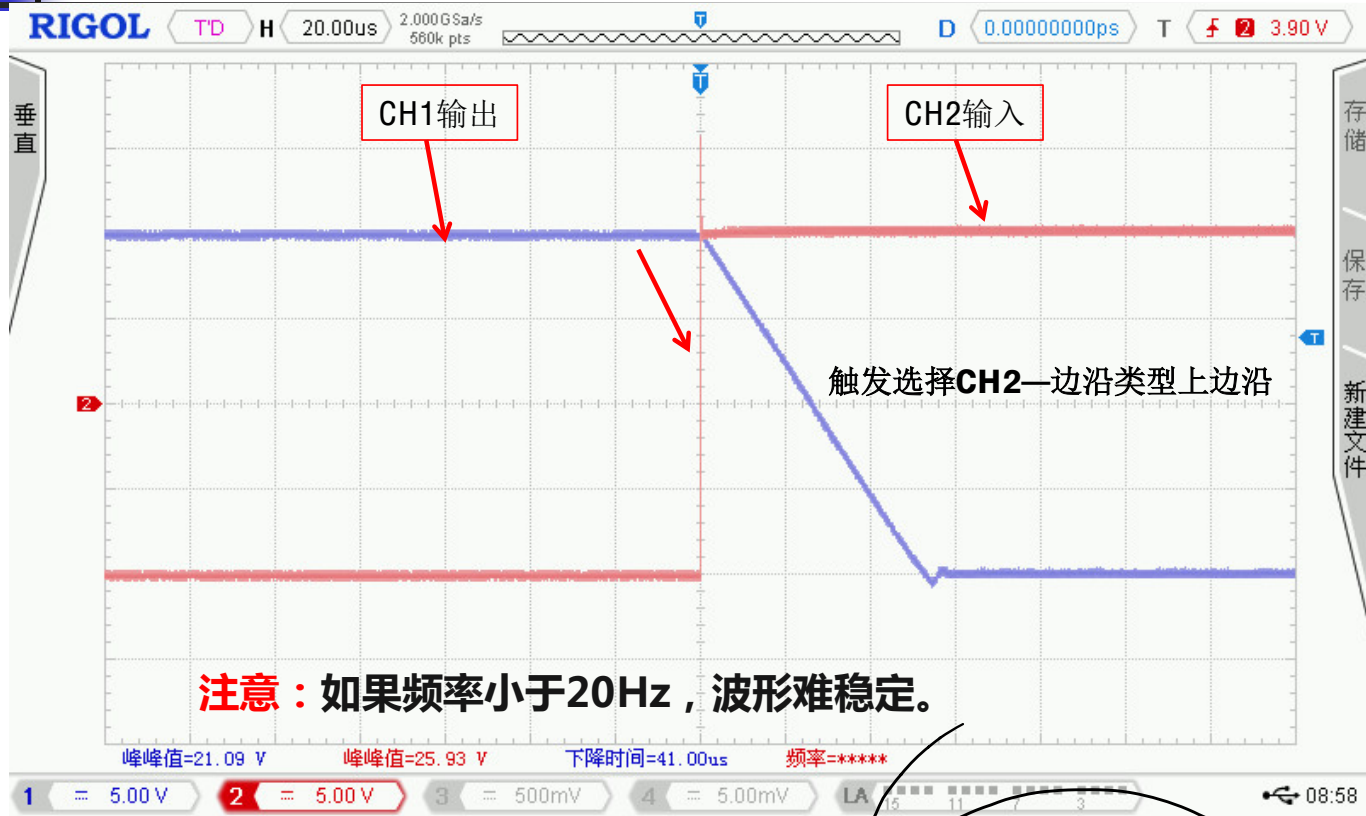


该图测得上升时间为**41us** (即 $\Delta t_3$ )

$\sigma t_3 = 4.1/\mu s$

$$SR = \frac{0.9V_{om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9V_{om}^-}{\Delta t_1} = \frac{0.9V_{om}^+ + 0.9V_{om}^-}{\Delta t_3} = 0.44V / \mu s$$

$f = 20\text{Hz}$  方波  $V_s = 20\text{Vpp}$  (即  $V_{om} = 10$ )

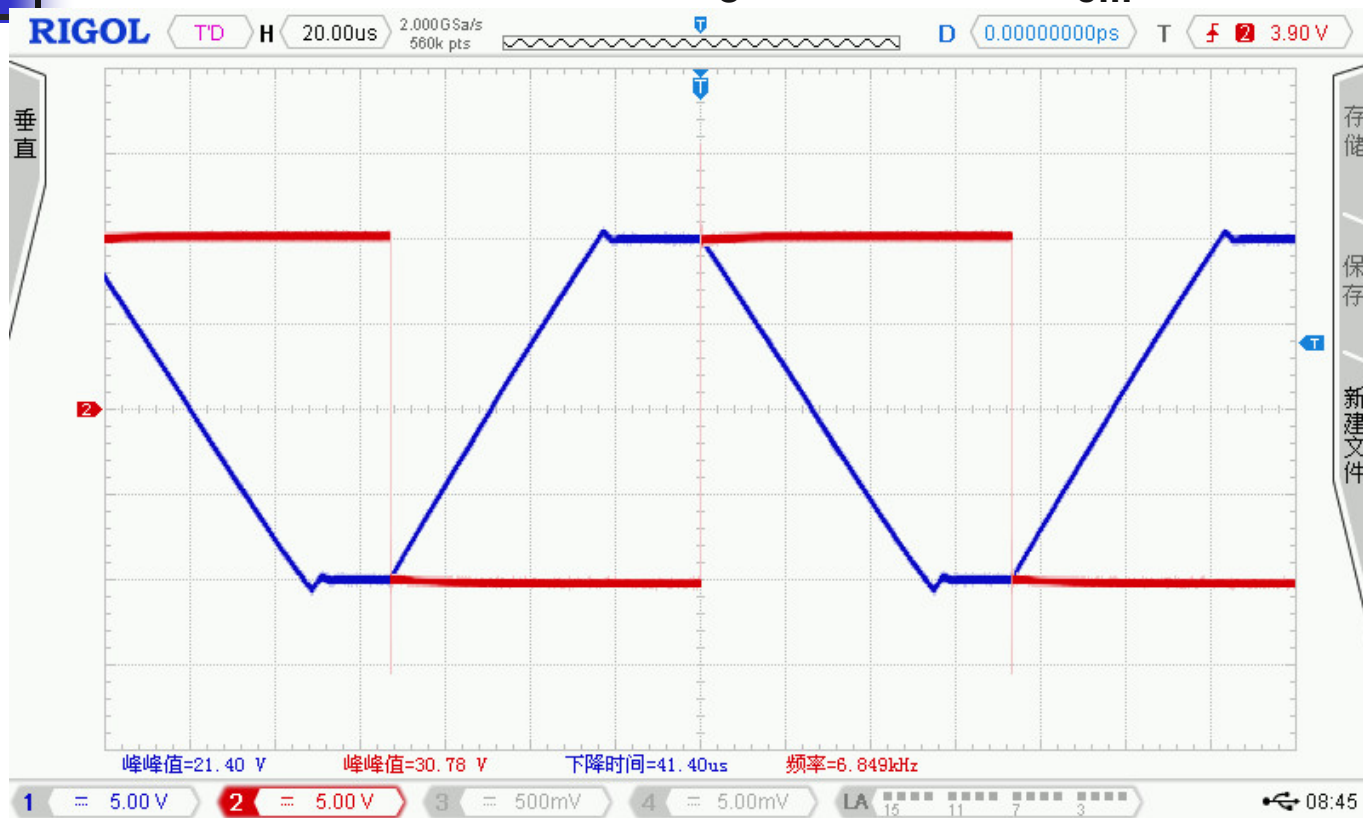


该图测得下降时间为41us (即  $\Delta t_3$ )

$$SR = \frac{0.9V_{om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9V_{om}^-}{\Delta t_1} = \frac{0.9V_{om}^+ + 0.9V_{om}^-}{\Delta t_3} = 0.44\text{V} / \mu\text{S}$$

50Hz 4.1us

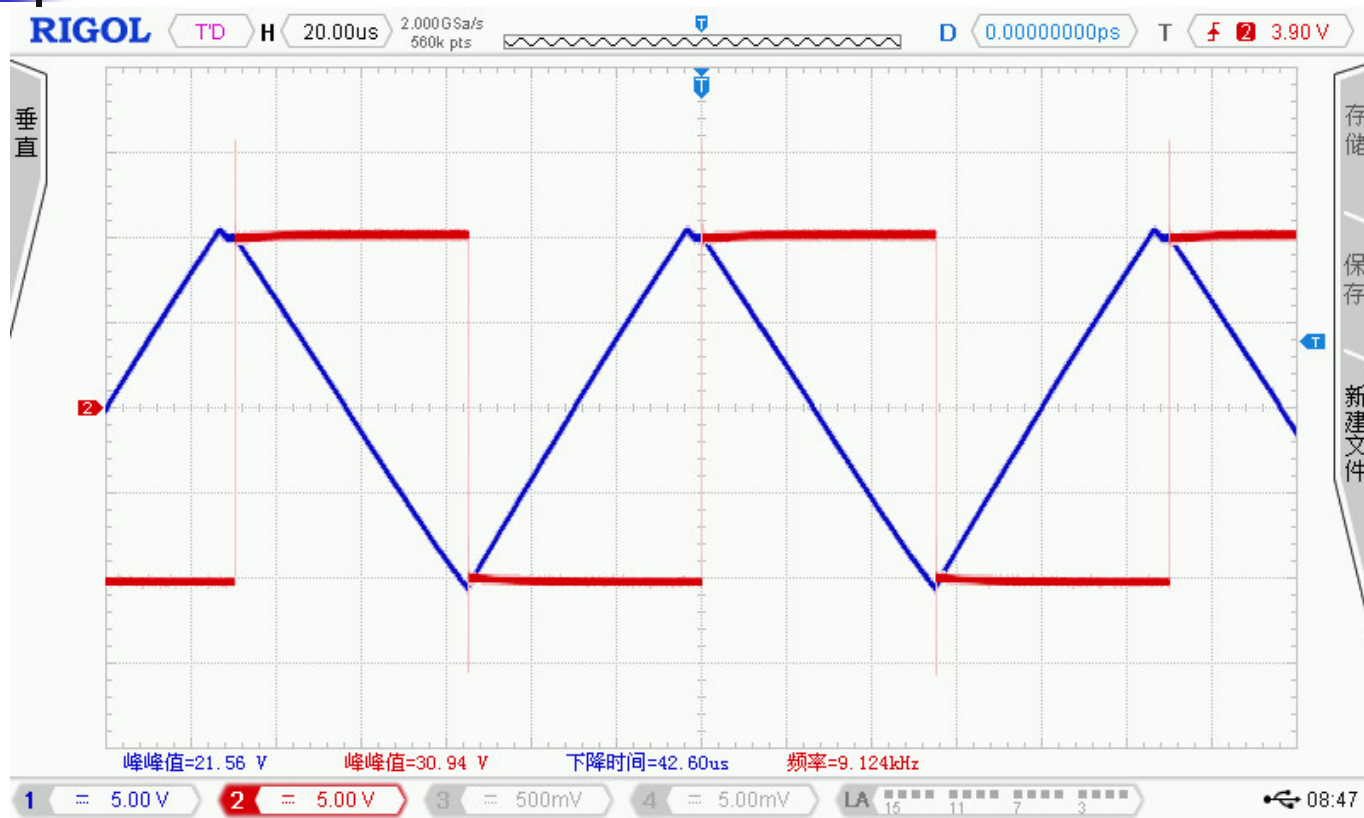
**f = 6.84KHz方波  $V_s = 20V_{pp}$  (即  $V_{om} = 10$ )**



该图测得下降时间为**41.4us** (即  $\Delta t_3$ )

$$SR = \frac{0.9V_{om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9V_{om}^-}{\Delta t_1} = \frac{0.9V_{om}^+ + 0.9V_{om}^-}{\Delta t_3} = 0.434V / \mu S$$

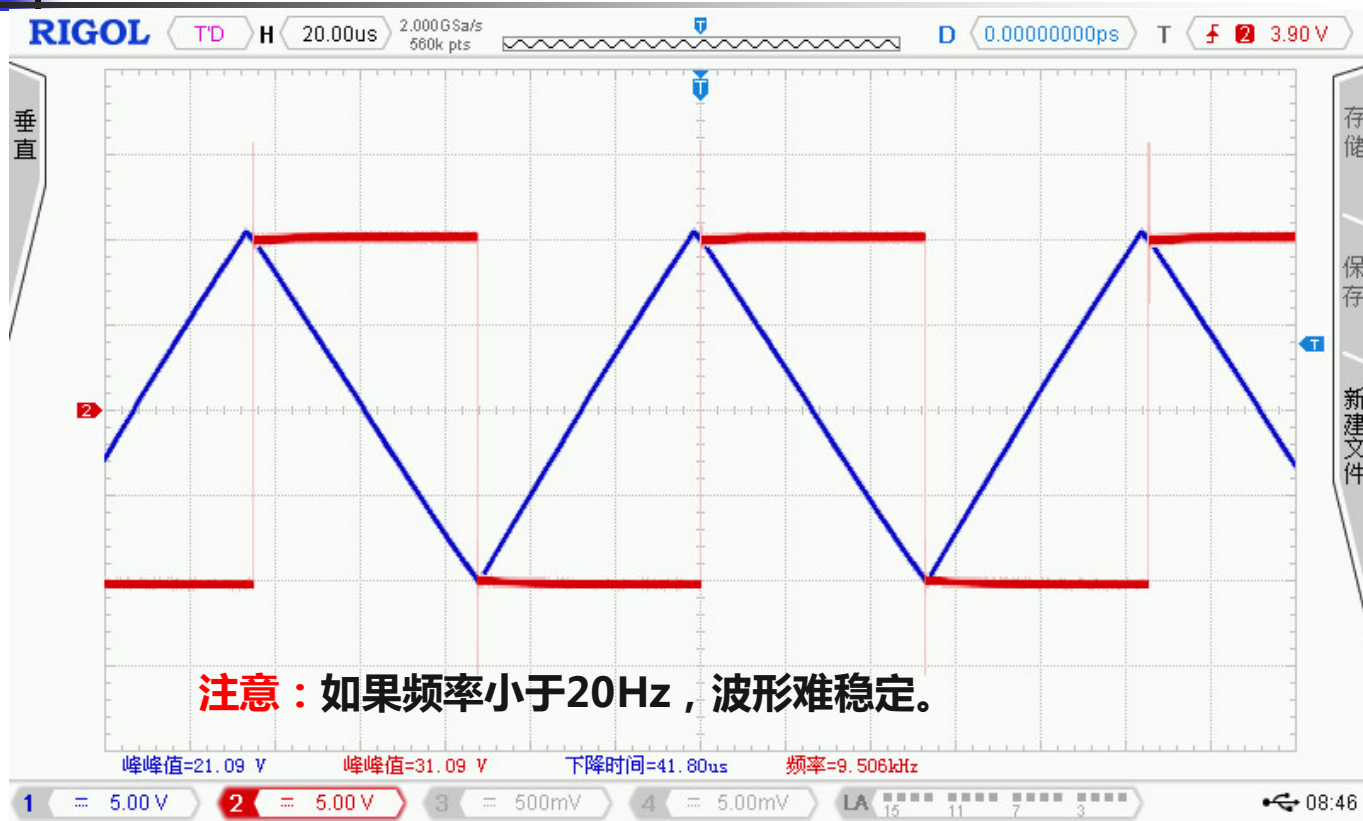
**$f = 9.1\text{KHz}$ 方波  $V_s = 20\text{Vpp}$  (即  $V_{om} = 10$ )**



该图测得下降时间为 **$42.6\mu\text{s}$**  (即  $\Delta t_3$ )

$$SR = \frac{0.9V_{om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9V_{om}^-}{\Delta t_1} = \frac{0.9V_{om}^+ + 0.9V_{om}^-}{\Delta t_3} = 0.423\text{V} / \mu\text{S}$$

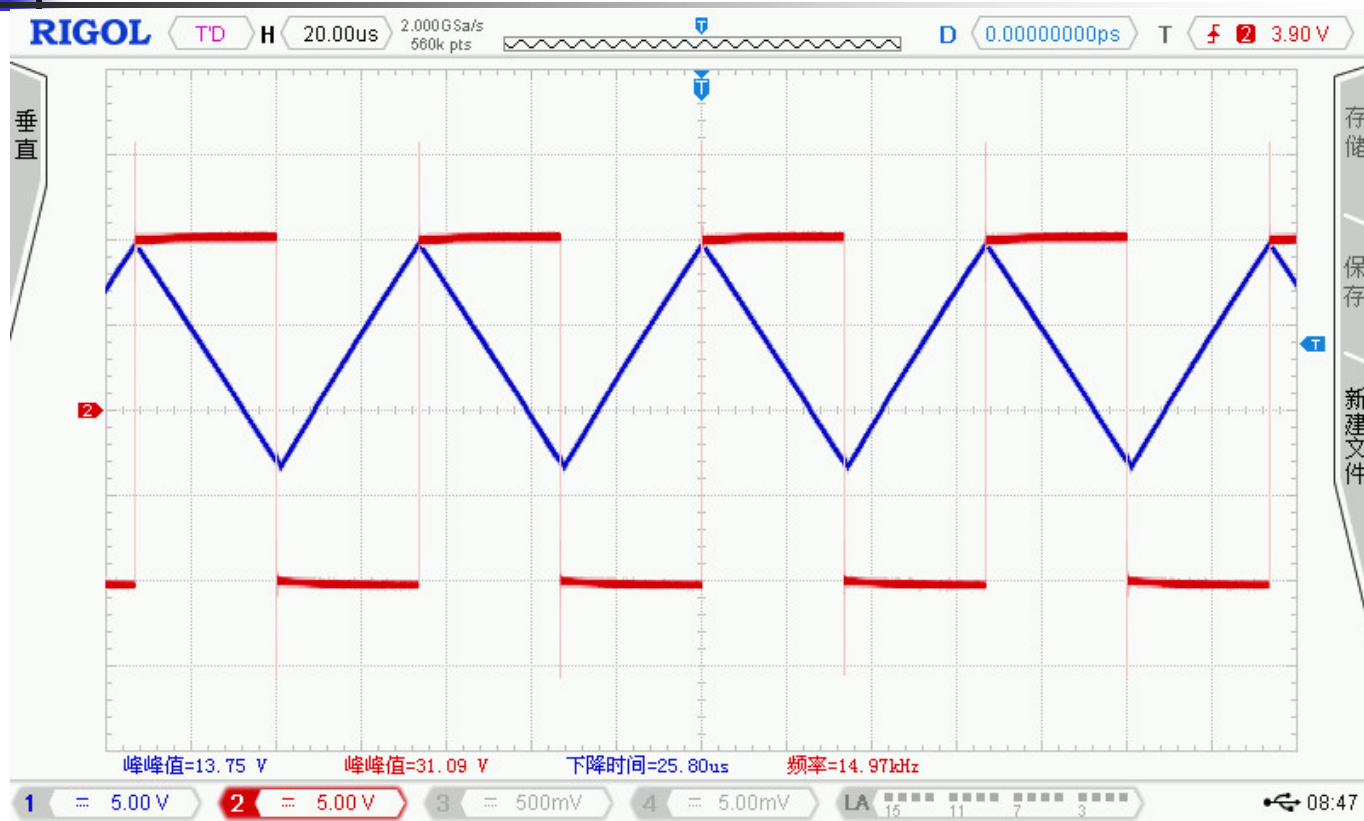
**$f = 9.5\text{KHz}$ 方波  $V_s = 20\text{Vpp}$  (即  $V_{om} = 10$ )**



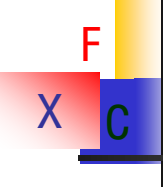
该图测得下降时间为 **$41.8\mu\text{s}$**  (即  $\Delta t_3$ )

$$SR = \frac{0.9V_{om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9V_{om}^-}{\Delta t_1} = \frac{0.9V_{om}^+ + 0.9V_{om}^-}{\Delta t_3} = 0.43\text{V} / \mu\text{S}$$

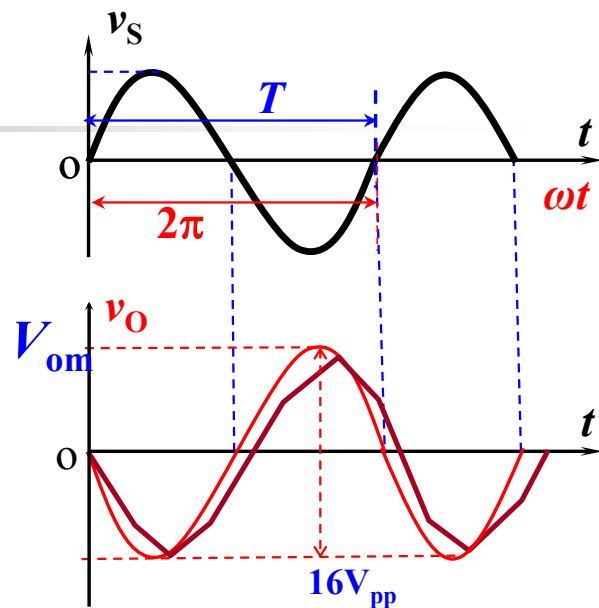
**$f = 15\text{KHz}$ 方波 $V_s = 20\text{Vpp}$ (即 $V_{om} = 10$ )**



**注意：**如果频率太大，则输出波形变幅度缩小的三角波了。



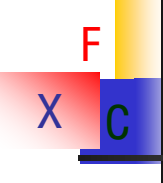
## 实验参考



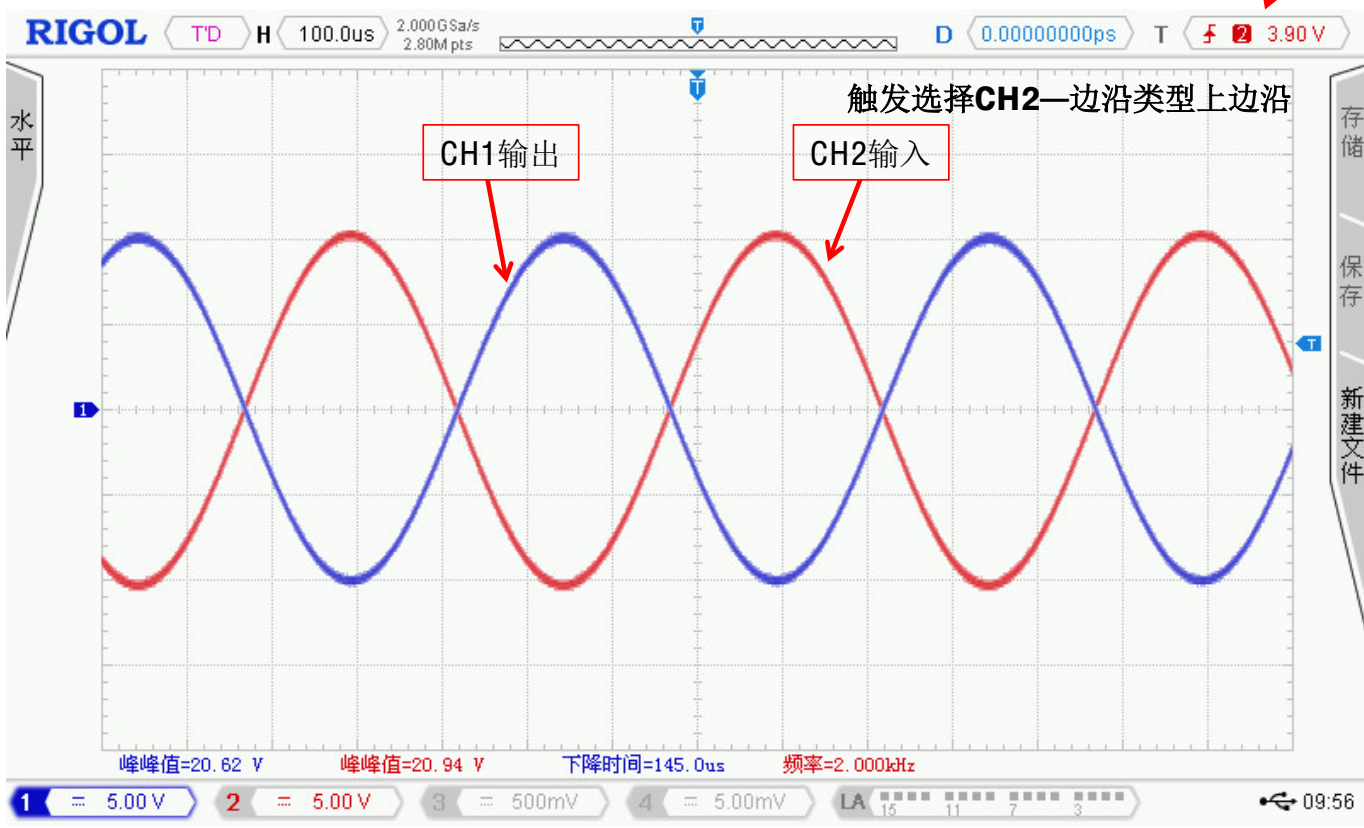
增大输入信号的频率

$$SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = \left| \frac{d(V_{om} \sin 2\pi f t)}{dt} \right|_{\max} = |V_{om} \times 2\pi f \times \cos 2\pi f t|_{\max} = 2\pi f V_{om}$$

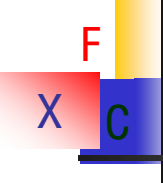




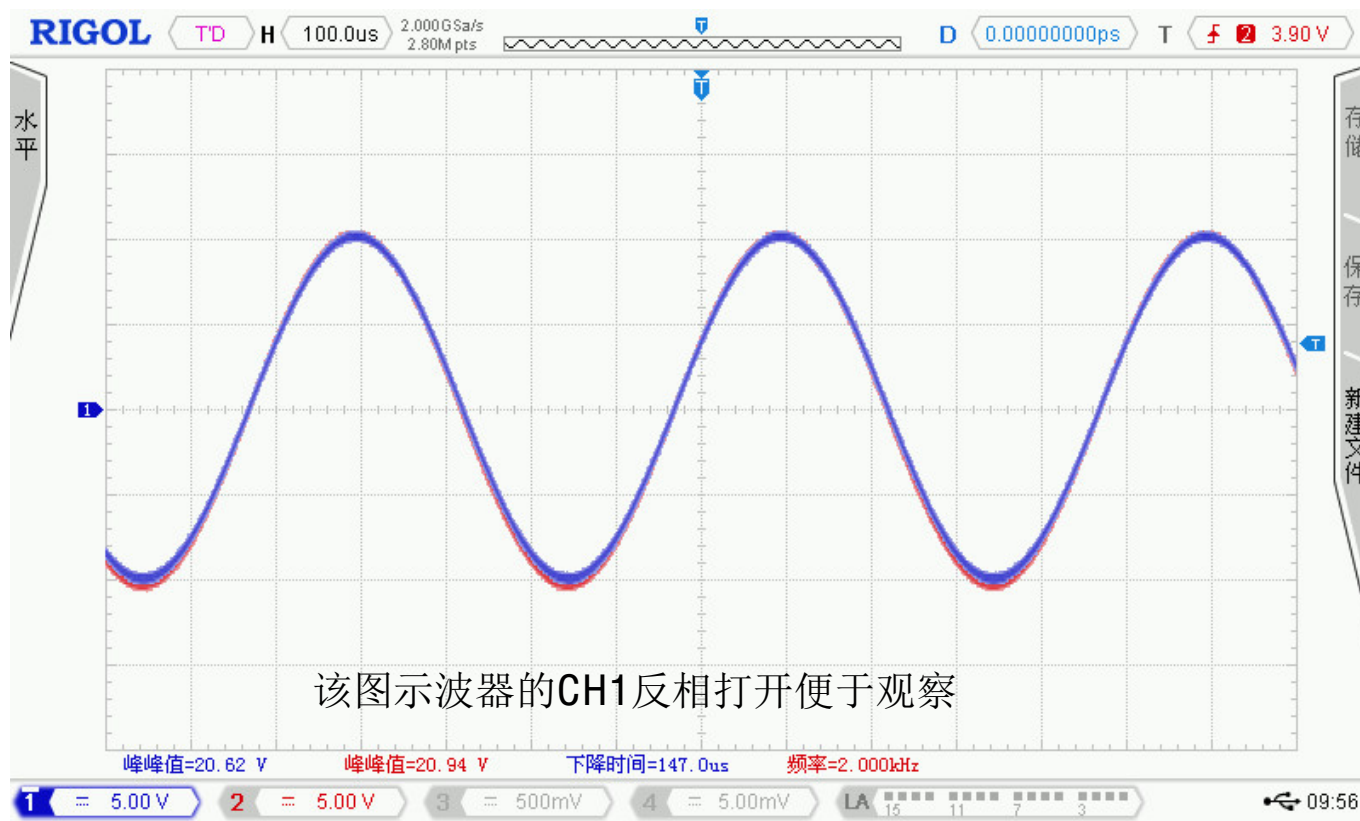
正弦波 $V_s = 20V_{pp}$ (即 $V_{om} = 10V$ )



频率为2KHz输出波形无变化，CH1为输出

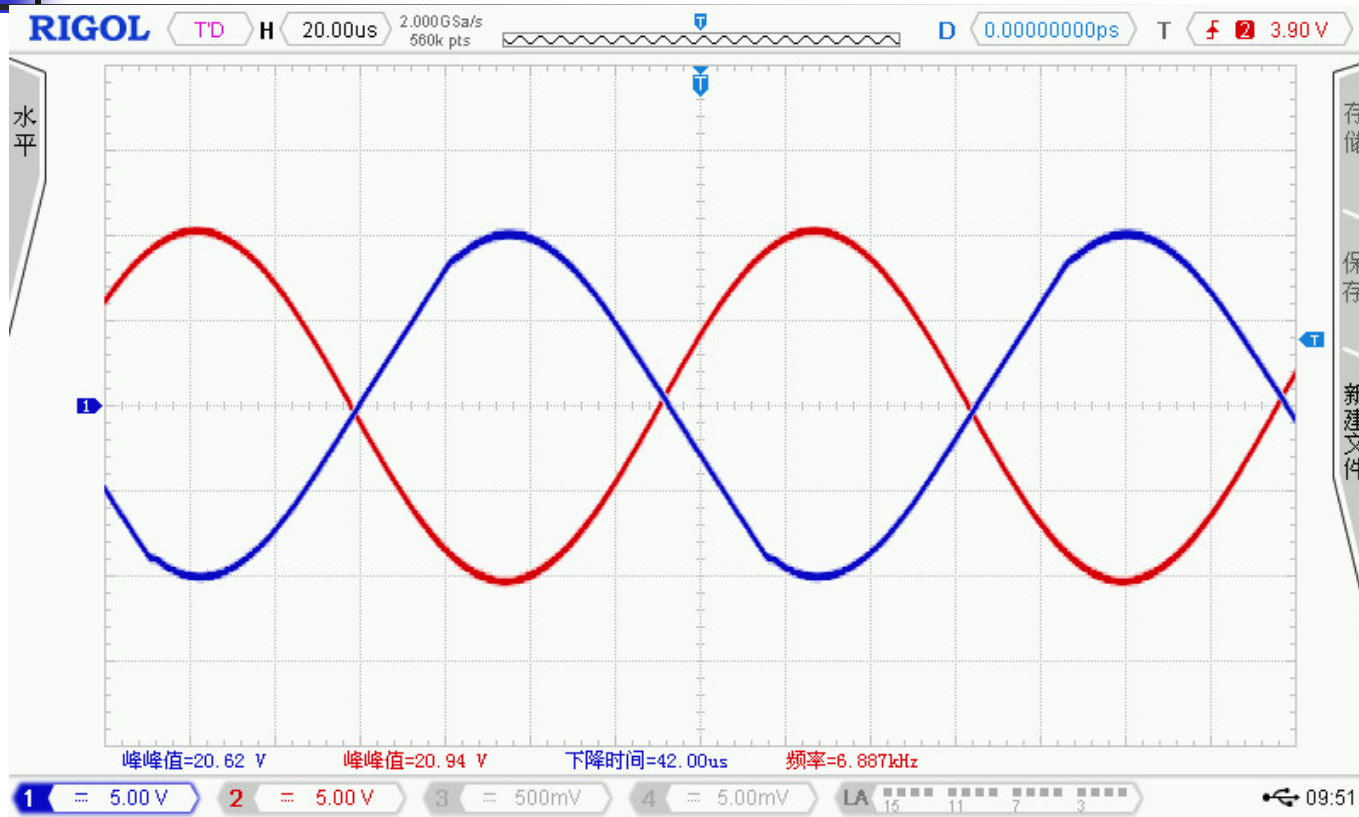


正弦波 $V_s = 20V_{pp}$ (即 $V_{om} = 10V$ )



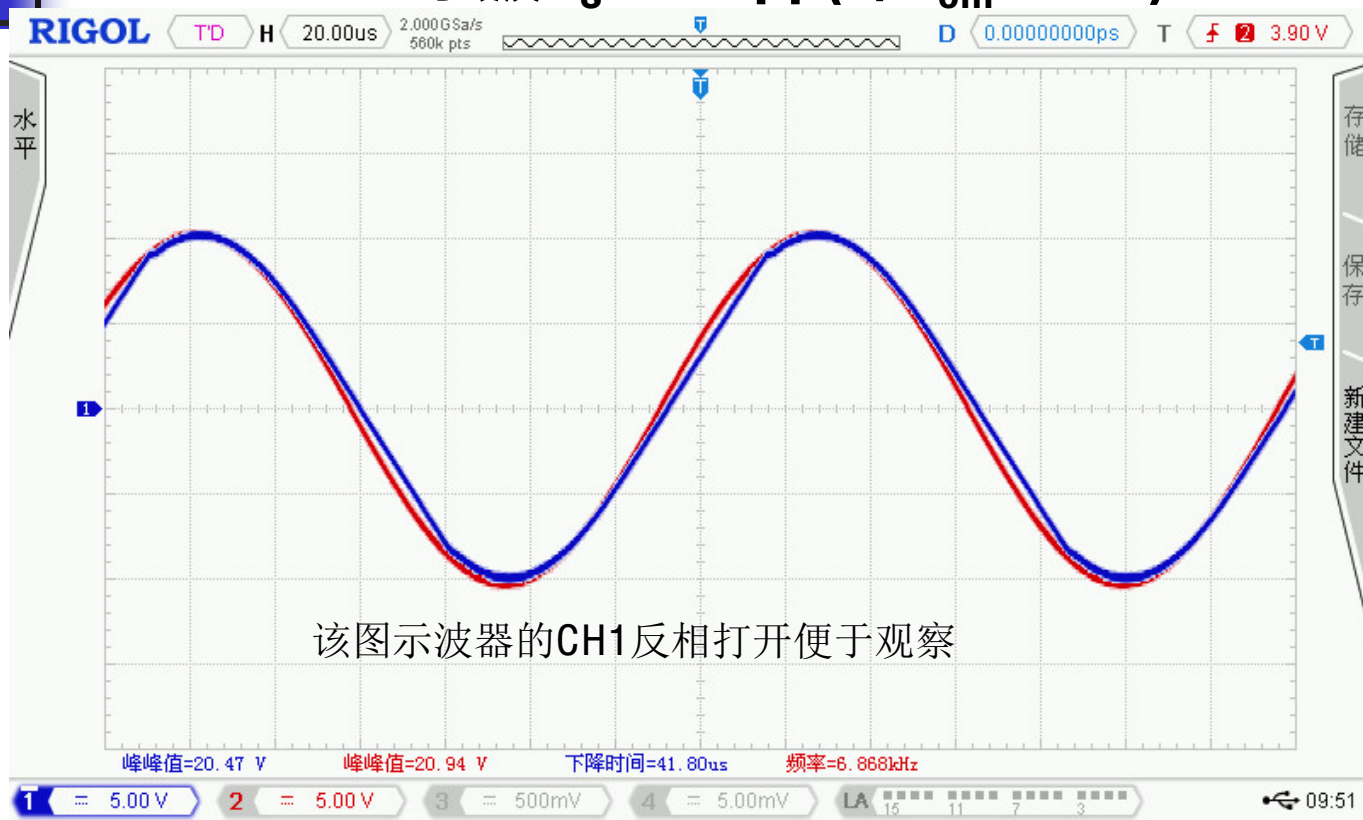
频率为2KHz输出波形无变化，CH1为输出

正弦波  $V_s = 20V_{pp}$  (即  $V_{om} = 10V$ )



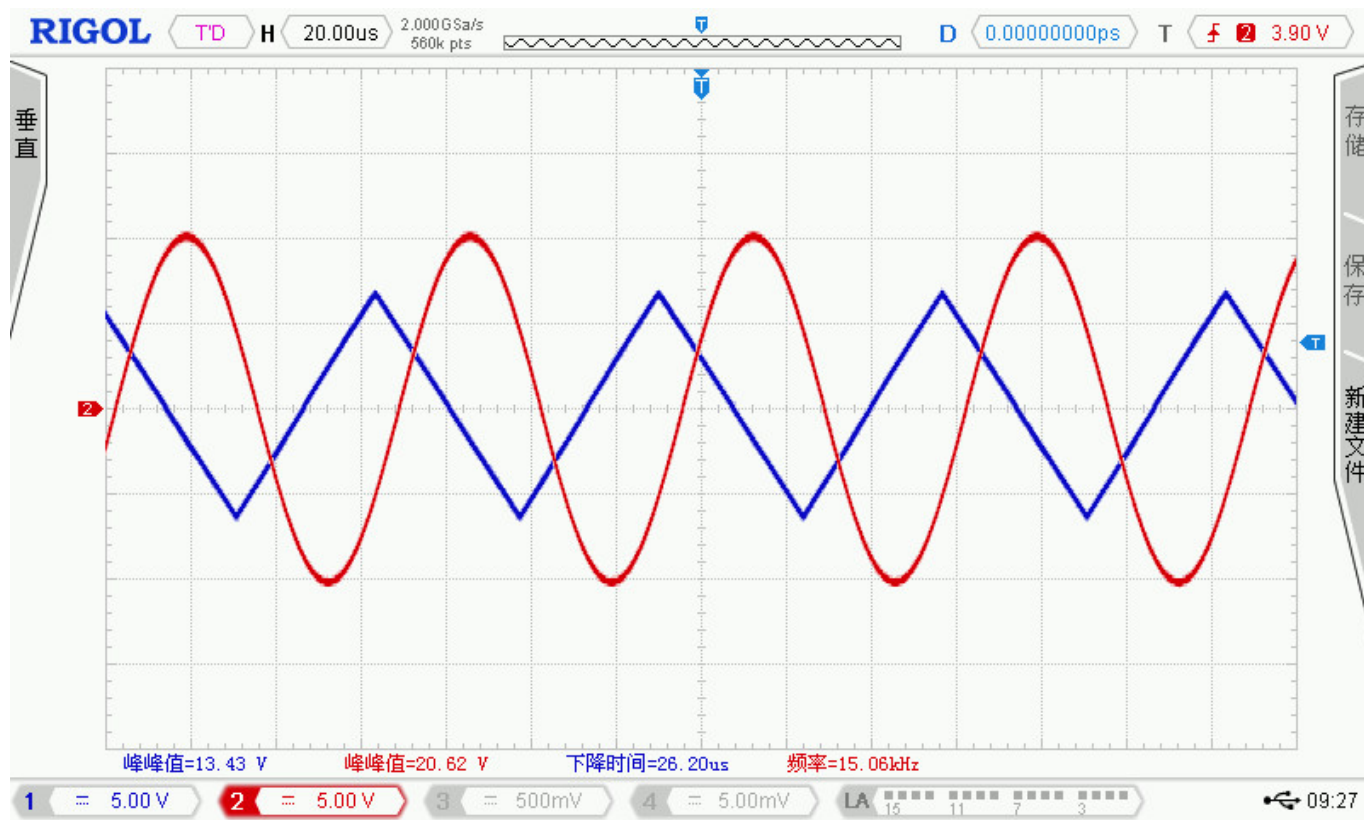
$$SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = 2\pi f V_{om} = 0.43V / \mu S$$

正弦波  $V_s = 20V_{pp}$  (即  $V_{om} = 10V$ )

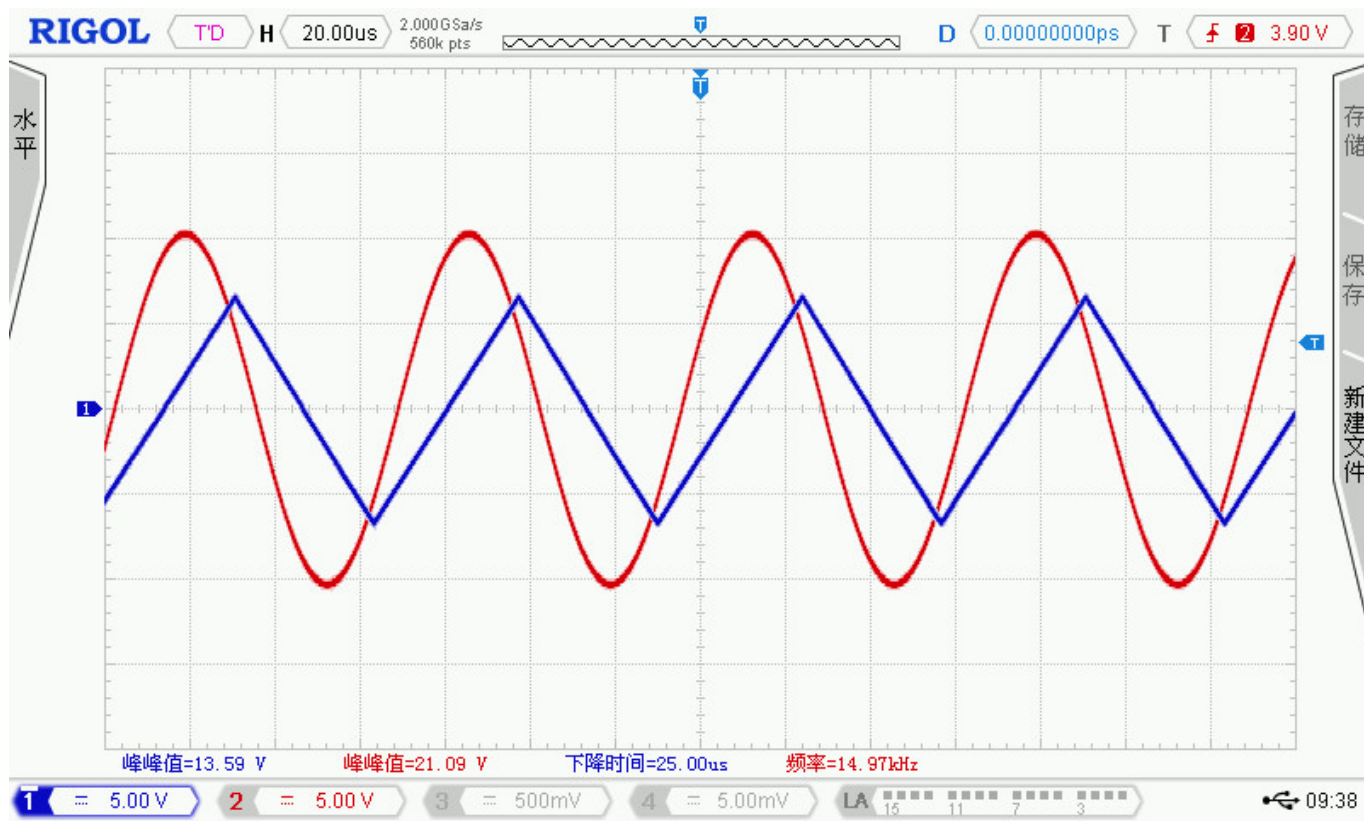


$$SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = 2\pi f V_{om} = 0.43V / \mu S$$

# 正弦波15KHz $V_s = 20V_{pp}$ (即 $V_{om} = 10V$ )

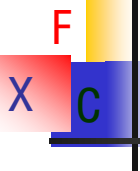


# 正弦波15KHz $V_s = 20V_{pp}$ (即 $V_{om} = 10V$ )



该图示波器的CH1反相打开观察



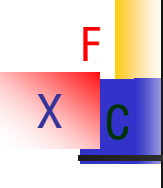


## 思考题

**问题1**：测量开环增益、最大不失真输出、共模抑止比实验中信号的频率不一样是否对实验的结果有影响？

**问题2**：零输入时一定要零输出吗？

**问题3**：学习集成运算放大器主要性能指标的测试方法后，请简述电路中如何合理使用运放？



## 实验教程：思考与讨论

**P269-270**

- ① 在测试运放的开环差模电压增益时，为什么必须引入直流负反馈？
- ② 为什么在输出端必须用示波器监视波形？
- ③ 为了减小运放失调参数的影响，在设计运算放大器电路时，有哪些需要遵循的原则？
- ④ 如果一个正弦波放大电路产生了三角波输出，可能是什么原因？
- ⑤ 如果一个正弦波放大电路产生了方波输出，可能是什么原因？
- ⑥ 如果一个正弦波放大电路放大后出现了直流偏移，可能是什么原因？





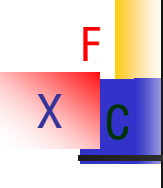
## 课后作业

本次需提交实验报告，要求请参看实验教材的要求和课件要求，及请回答教材和课件中思考问题。

**选做**：请仿真本次实验任务，且请把整个文件夹提交至FTP。

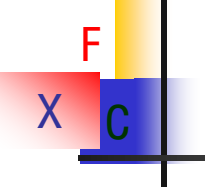
- 1、请提交做好的整个EDA文件夹的内容；请配上word文档说明。
- 2、提交时需压缩文件，压缩文件名的命名“座号\_姓名.rar”。
- 3、提交的位置和截止时间：

“选做07 集成运放组成的基本运算电路\_下次上课前提交”

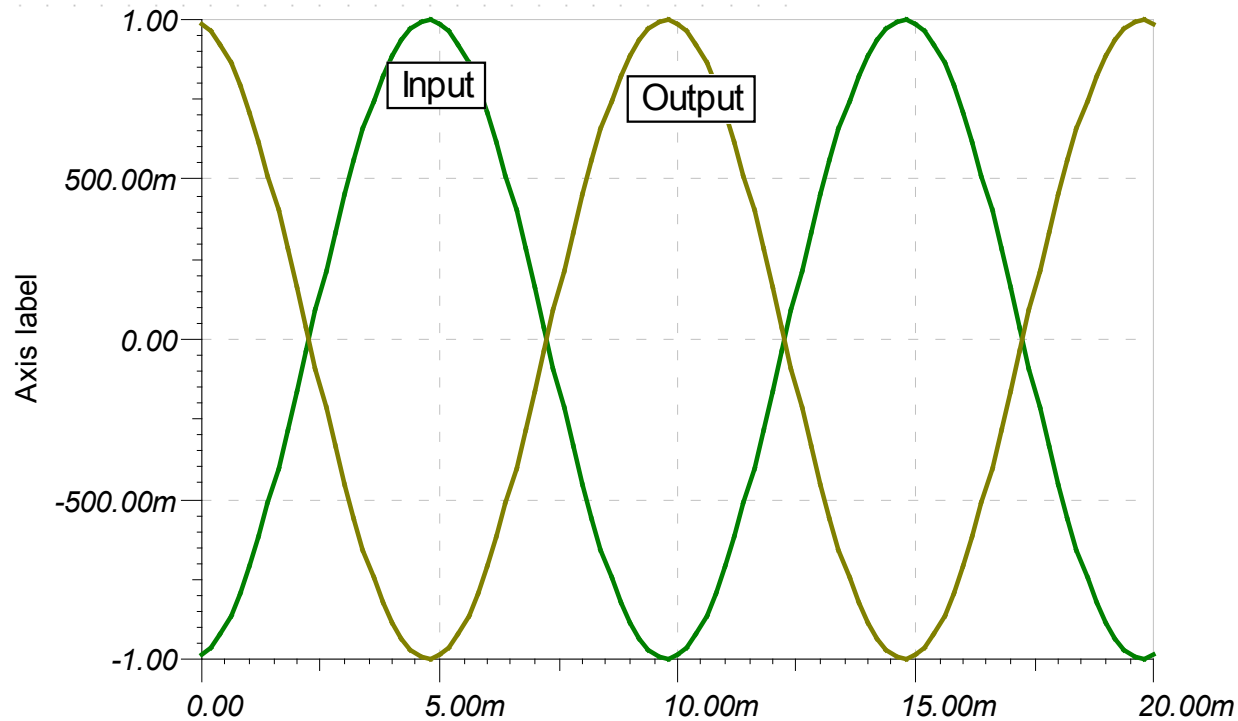
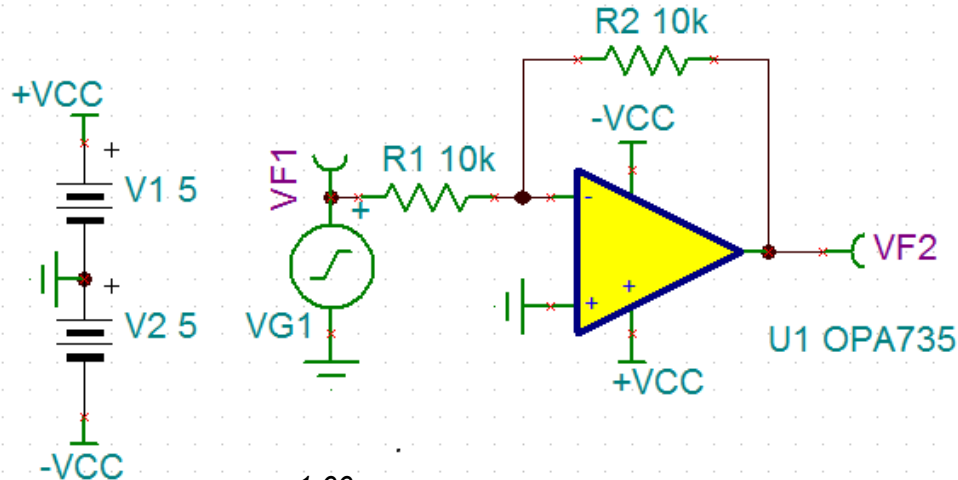


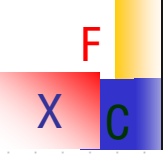
## 运放的工作电源电压

**了解：**除对称电源电压工作外，可以单电源供电，也可以不对称电源电压供电的，只要工作电源电压之间的差值满足足够的电压差。  
( 其实严格来讲很难调出完全对称的电源电压 )

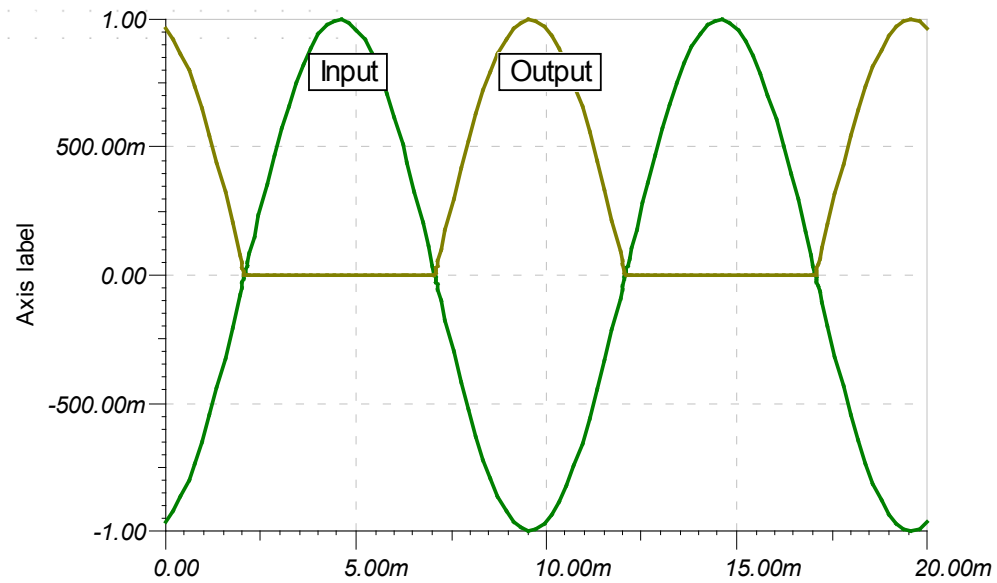
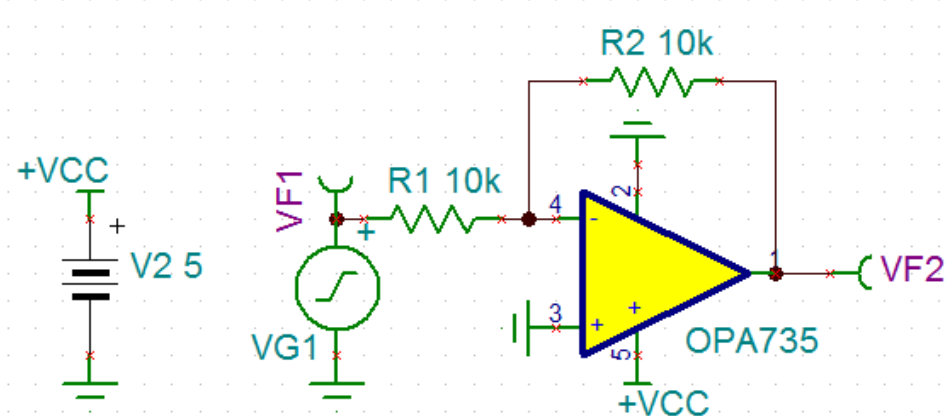


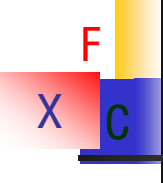
# 双电源





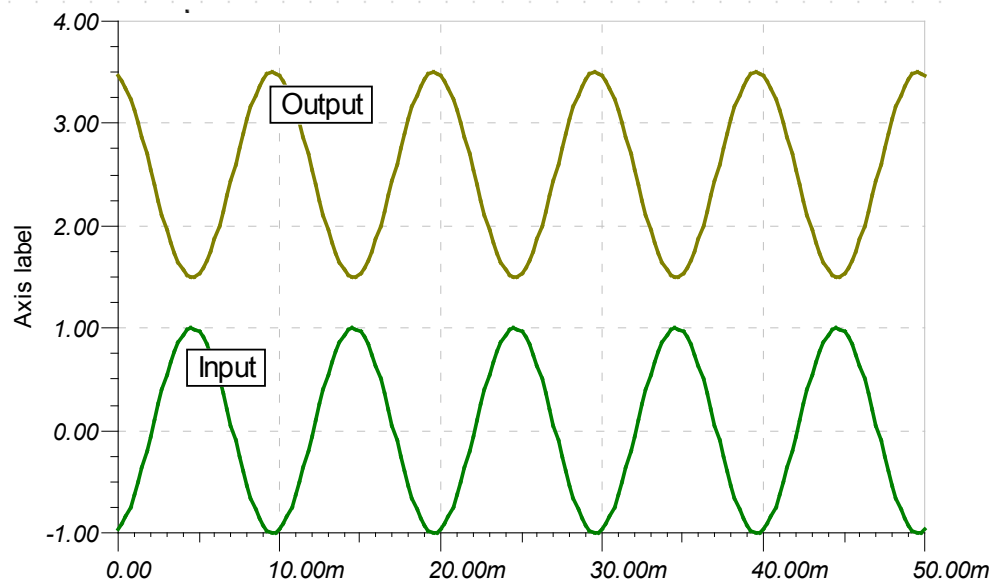
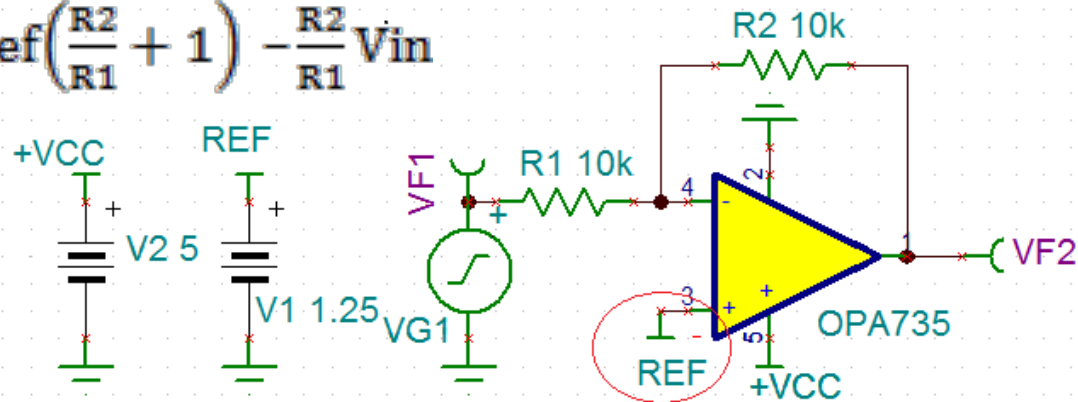
选做：单电源供电（直流耦合型（输入信号不带DC分量））

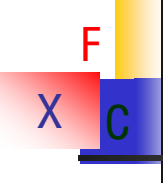




## 选做：单电源供电（直流耦合型（输入信号不带DC分量））

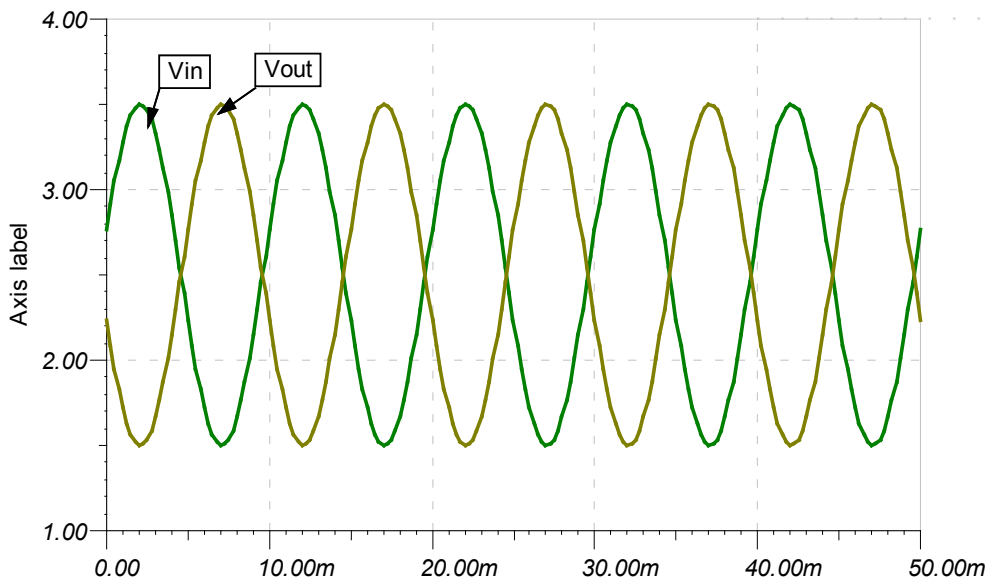
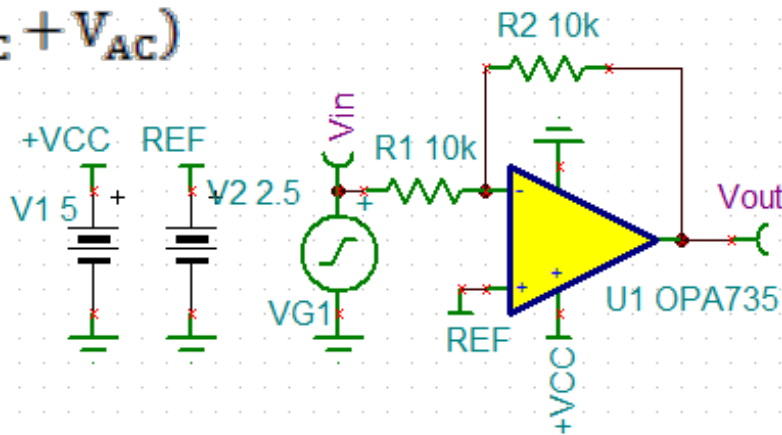
$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) - \frac{R_2}{R_1} V_{in}$$



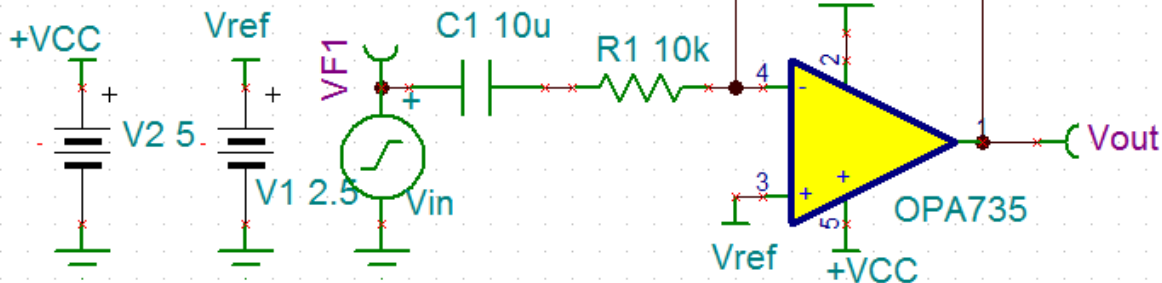


## 选做：单电源供电（直流耦合型（输入信号带DC分量））

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_3}{R_4} + 1 \right) - \frac{R_3}{R_4} (V_{DC} + V_{AC})$$



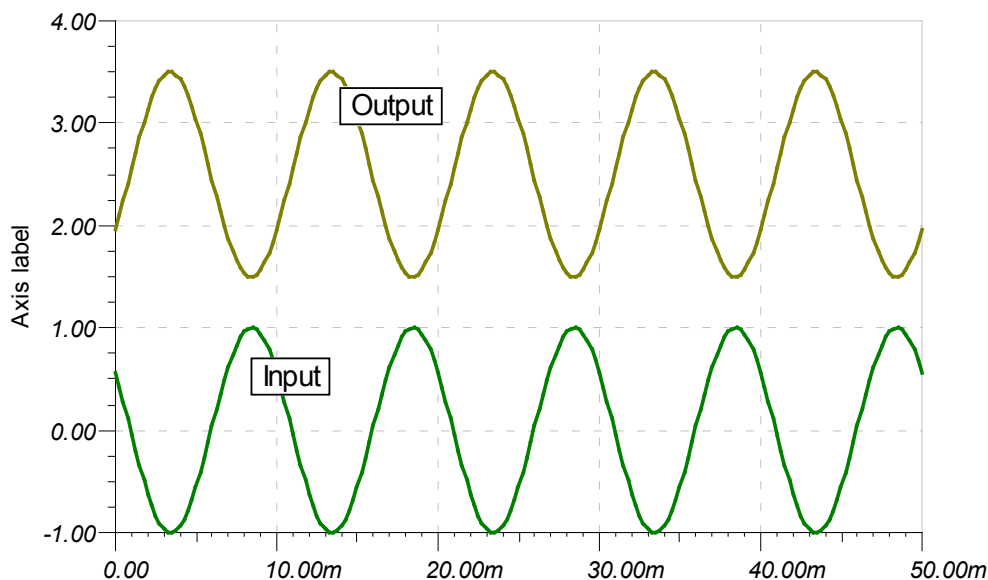
## 选做：单电源供电（交流耦合型）

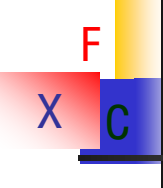


$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R_2}{Z_1} + 1 \right) - \frac{R_2}{R_1} (V_{in} + V_{DC})$$

$$V_{out} = V_{ref} - \frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

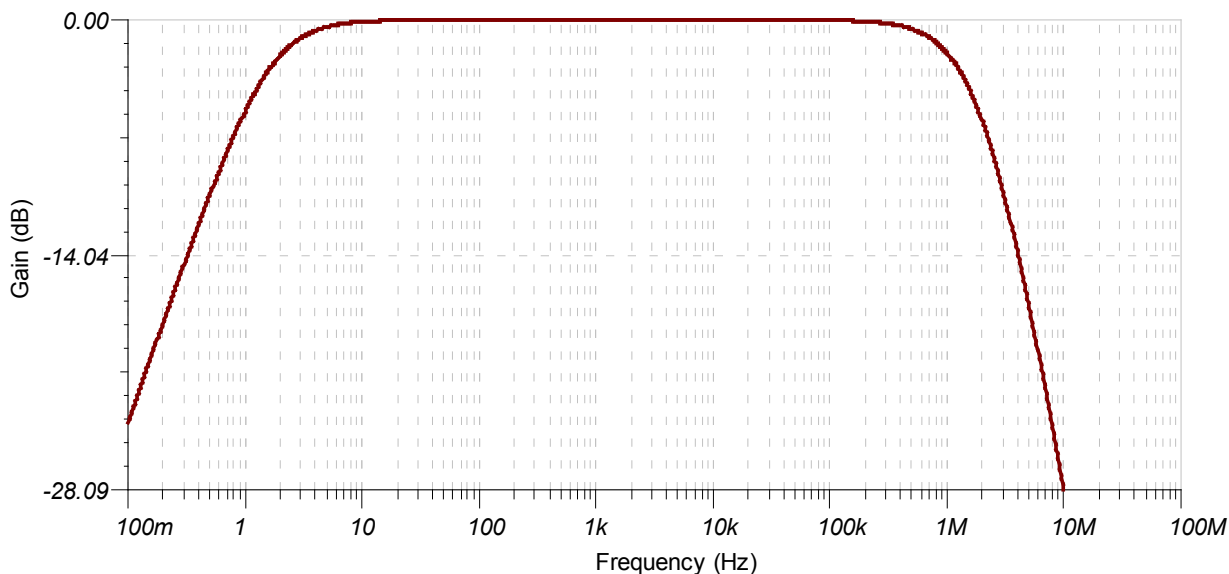
流耦合方式通过在信号输入端加入耦合电容，形成一个**高通滤波器**，隔离直流信号，仅对交流信号起到放大作用。其中 $Z_1$ 为 $C_1$ 和 $R_1$ 串联后的阻抗，因为 $C_1$ 对直流电平有无穷大的阻抗，所以 $Z_1$ 也趋于无穷大， $V_{DC}$ 直流无法通过 $C_1$ 。



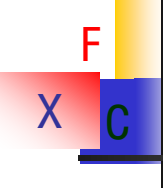


## 选做：单电源供电（交流耦合型）

下图显示了该电路的频响特性，可以看到当输入信号频率超过100Hz后，C1可以视为完全短路，此时交流信号的增益为 $G = -1$ （0db）

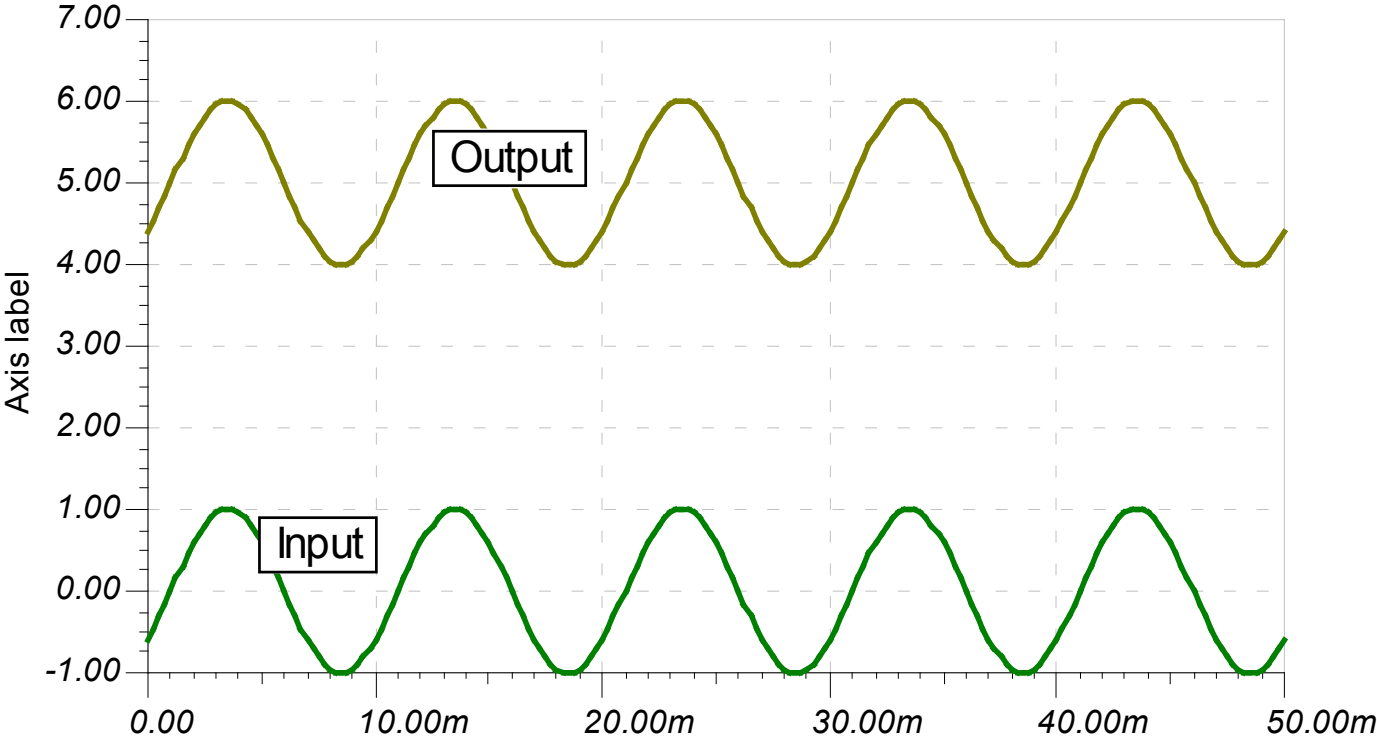


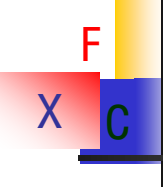




# 选做：单电源简单设计1

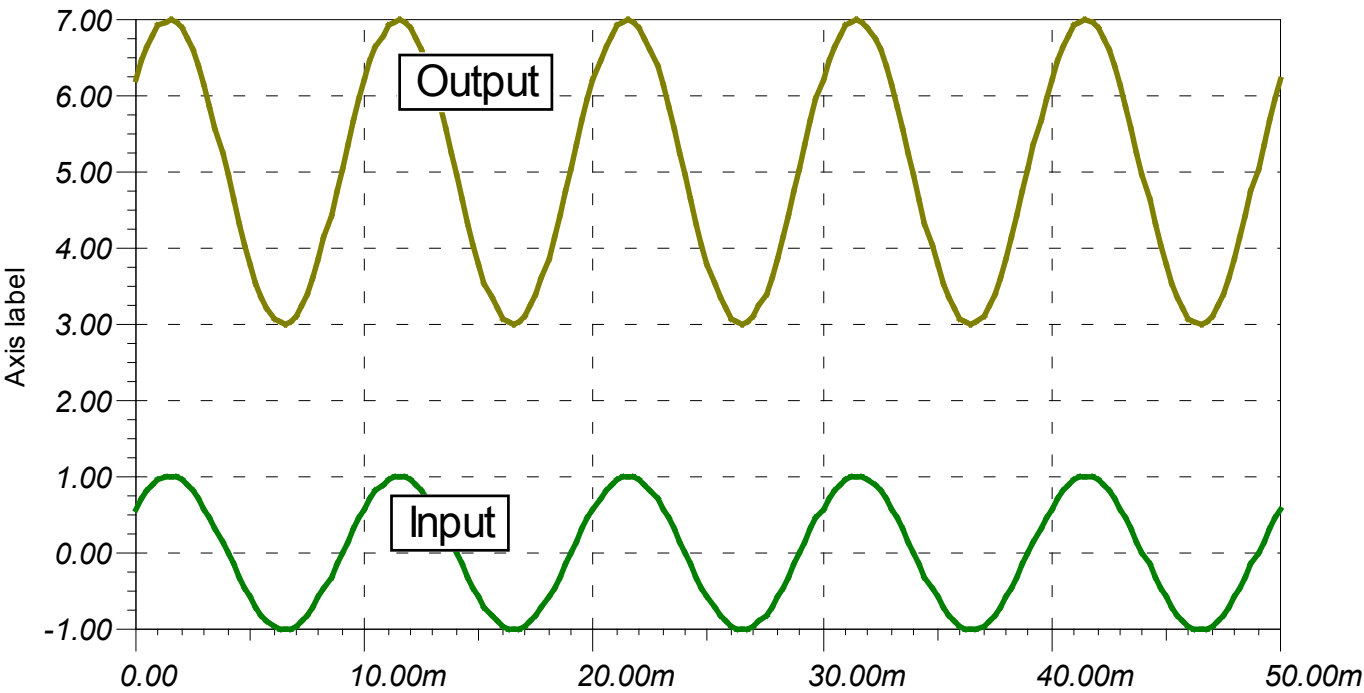
## 1、同相放大器，直流耦合

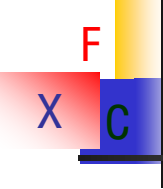




# 选做：单电源简单设计2

## 2、同相放大器，交流流耦合





## 下次实验

- 实验18 仪用放大器应用电路设计P341
- 建议带一瓶水（不要超过700g）用于做称重实验