

## 运算放大器基本应用电路（双电源应用图集）

### 1.1 比例运算电路

将输入信号按比例放大的电路，简称为比例运算电路或比例电路。它由集成运放和电阻组成深度负反馈电路来构成。根据输入信号所加到运放端口的不同，可划分为反相输入、同相输入和差动输入等三种比例电路。

#### 1.1.1 反向比例运算电路

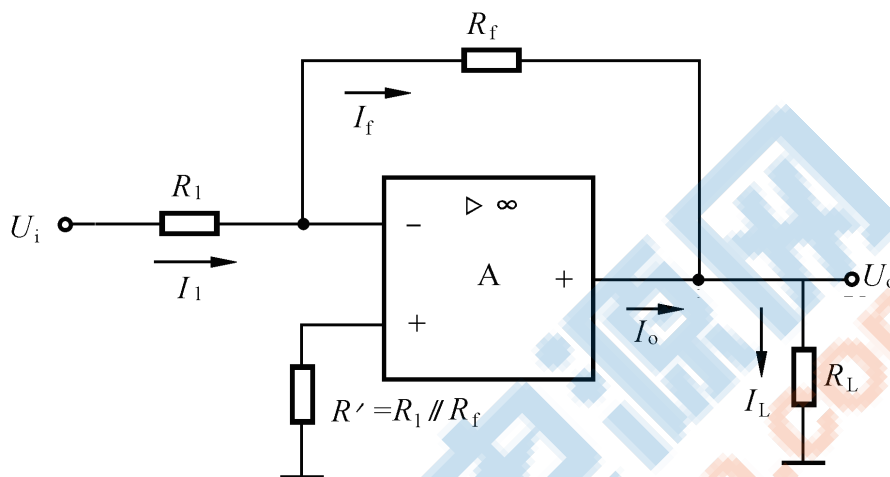


图 1 反向比例运算电路

反相比例电路如图 1 所示。由于输入信号  $U_i$  加在反相端，故输出电压  $U_o$  与  $U_i$  反相位。

电压放大倍数  $A_u$  为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

通过改变  $R_f$  和  $R_1$  的比例，可以改变  $|A_u|$  的大小。 $|A_u|$  可以大于 1、小于 1 或等于 1。（备注：考虑到运放工作的稳定性，一般增益都会大于等于 1）

#### ◆ 知识扩展：

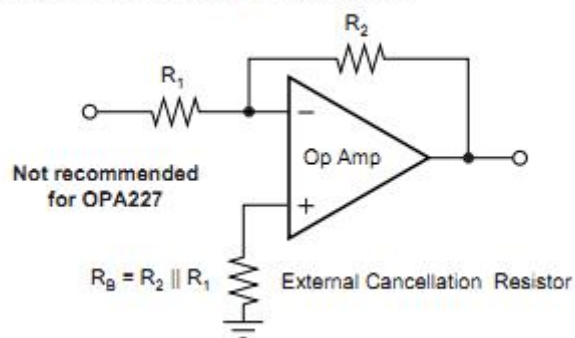
1、 $R'$  为偏置电流补偿电阻。一些类型运算放大器内部集成了偏置电流补偿电路，在实际使用时就不需要电阻  $R'$ ，连接反而会造成输出偏移，可参看运算放大器数据手册。

2、 $R_f$  为负反馈电阻，一般取值范围为  $1\text{ k}\Omega \sim 100\text{ k}\Omega$ ，具体取值可参看数据手册推荐值。

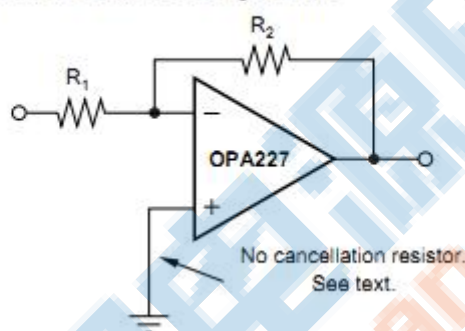
◆ **设计举例：**使用运算放大器 OPA227 设计一个设计反向比例运算电路，电路增益  $A_u = 10$ ，记录 OPA227 各引脚的静态工作点。

◆ **设计过程：**根据 OPA227 数据手册可知补偿电阻  $R'$  不需要，见数据手册 P12 “INPUT BIAS CURRENT CANCELLATION” 部分说明。

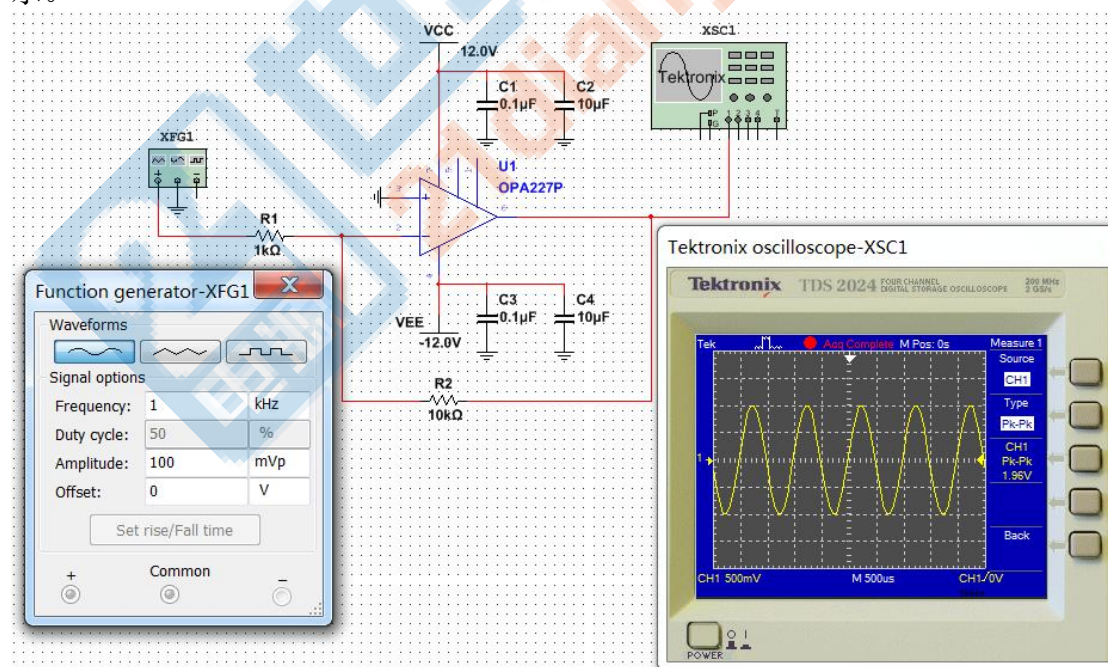
## Conventional Op Amp Configuration



## Recommended OPA227 Configuration



由增益关系式计算电阻取值过程如下，取  $R_f=10k$ ，则  $R_i=1k$ ，电路图如下图所示。



## 1.1.2 同向比例运算电路

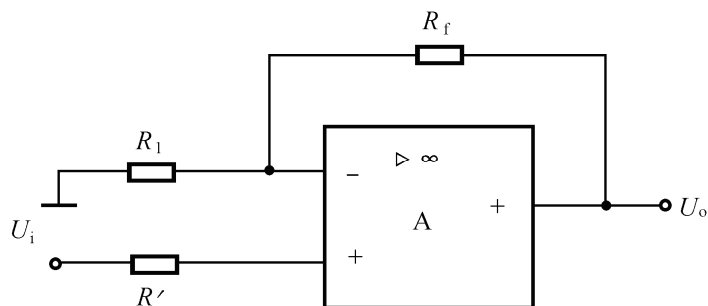


图 2 同向比例运算电路

同相比例电路如图 2 所示。输入信号  $U_i$  加到同相输入端，输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  同相位。

电压放大倍数  $A_u$  为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

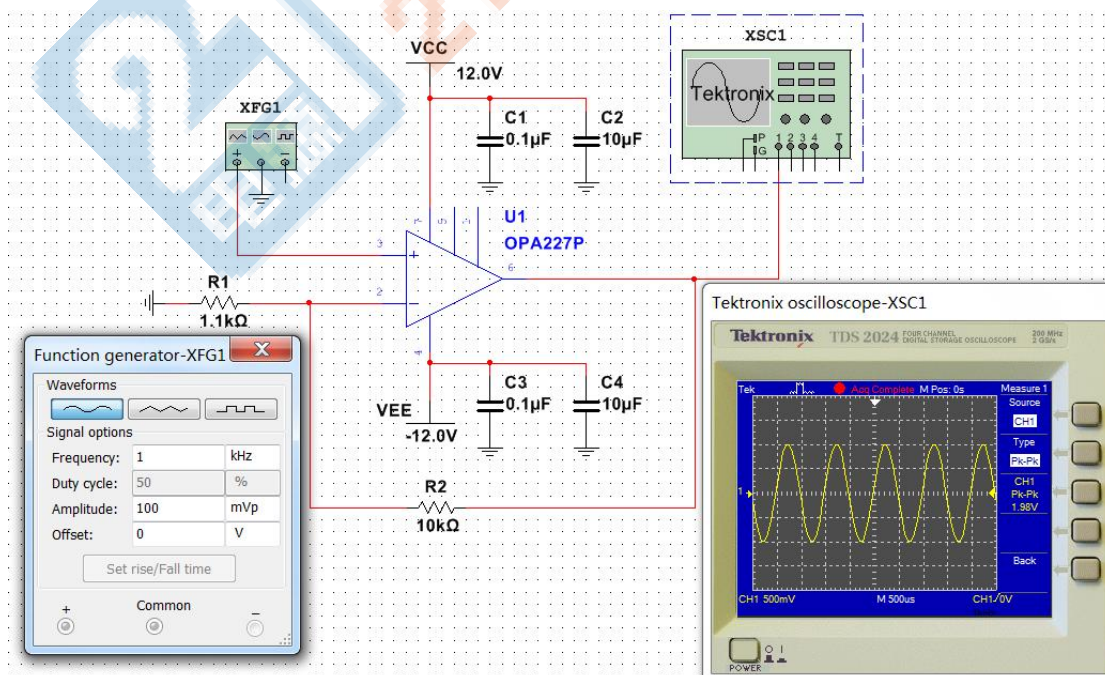
◆ **设计举例：**使用运算放大器 OPA227 设计一个设计同向比例运算电路，电路增益  $A_u = 10$ ，记录 OPA227 各引脚的静态工作点，并采用设计完成的电路测量 OPA227 的增益带宽积  $GBW$  和压摆率  $SR$ 。

◆ **设计过程**

(1) 根据芯片手册取  $R_f = 10k$ ;

(2) 由公式  $A_u = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$  可得  $R_1 = 1.11k$ ，取标称值  $1.1k$ ;

电路图如下图所示。

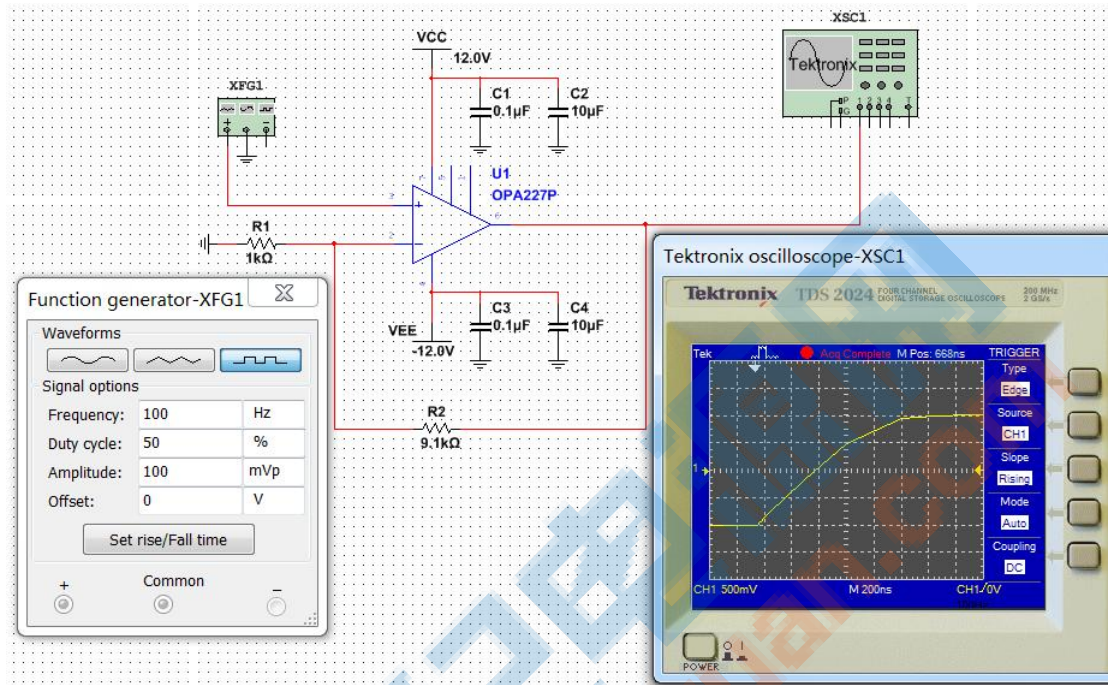




下面基于上图来测量 OPA227 的增益带宽积和压摆率技术指标。

### （1）压摆率 SR 测试

输入低频方波，频率约 100Hz，这种方波会在输出端导致全电压摆幅，用示波器测量输出信号，注意了清楚观看上升沿信号，需拉伸示波器的水平时间轴。测量示意图如下图。



选线性度较好的一段，使用示波器测量幅度和时间的变化量，如下图所示。



由上图可知， $SR = \frac{1V}{463ns} = 2.16V/us$ ，与数据手册提供的  $2.3V/us$  吻合。

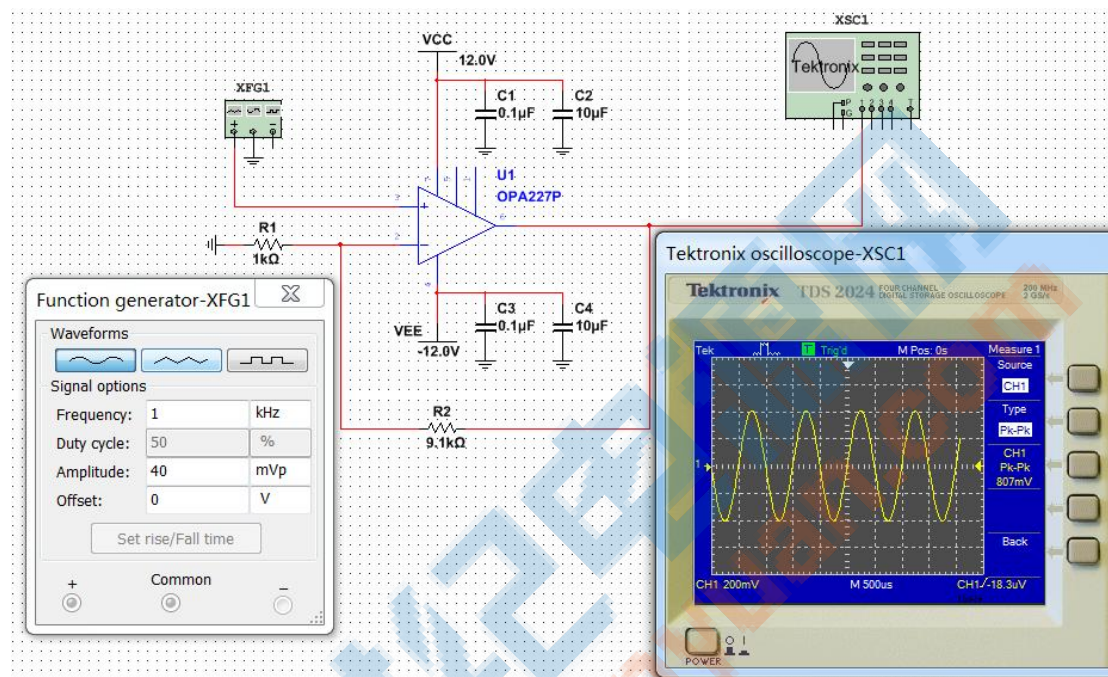
### （2）增益带宽积 GBW 测试

测试方案：改变信号源的输出频率，测量运算放大器输出信号的幅度，由运算放大器输出幅度和信号源输出幅度，可以计算出在不同频率时放大电路的增益，进而可以得出电路的幅频特性，由幅频特性即可得出运放的增益带宽积指标。注意，在测量增益带宽积时，一定要保证运放不会由于压摆率受限处于非线性失真。

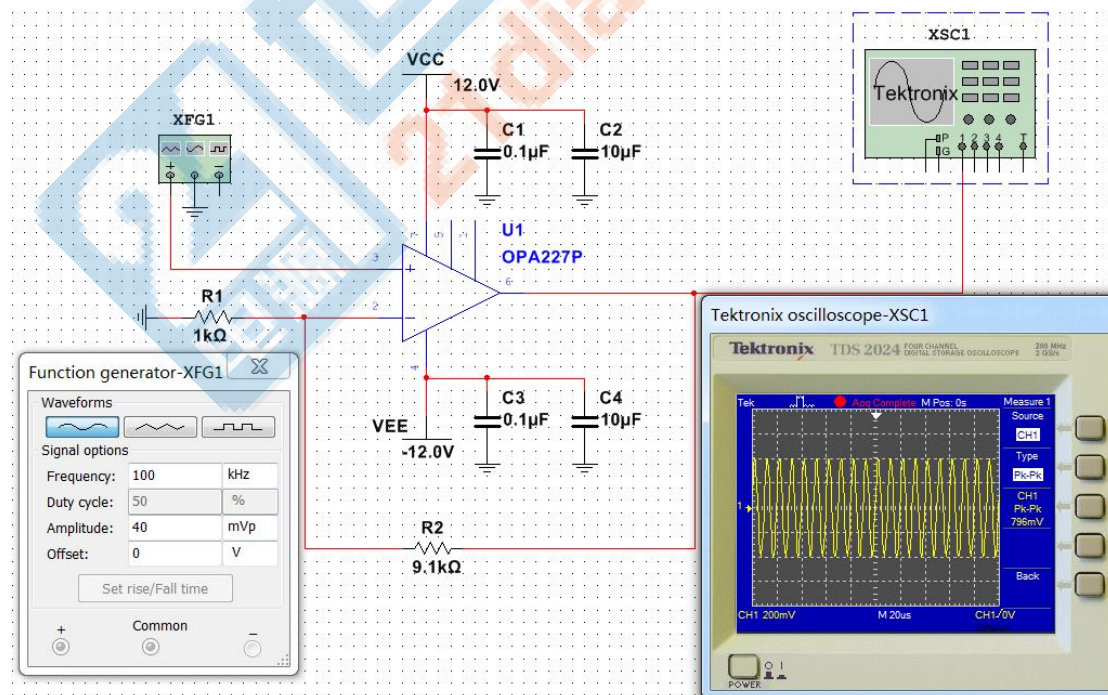
对于本测试电路，电路增益为 10，查阅 OPA227 数据手册可知 OPA227 的增益带宽积为 8MHz，因此估算在增益为 10 时，-3dB 带宽为 800kHz 左右，需要保证输出信号在 800kHz 时不出现压摆率受限的失真，则输入信号幅度  $U_{in} \times 10 \times 2\pi \times 800\text{kHz} \leq 2.3\text{V}/\mu\text{s}$ ，则

$U_{in} \leq 45.75\text{mV}$ ，选择输入信号  $U_{in} \leq 40\text{mV}$ （峰值）。记录如下序列信号：

输入信号频率为 1kHz 时，

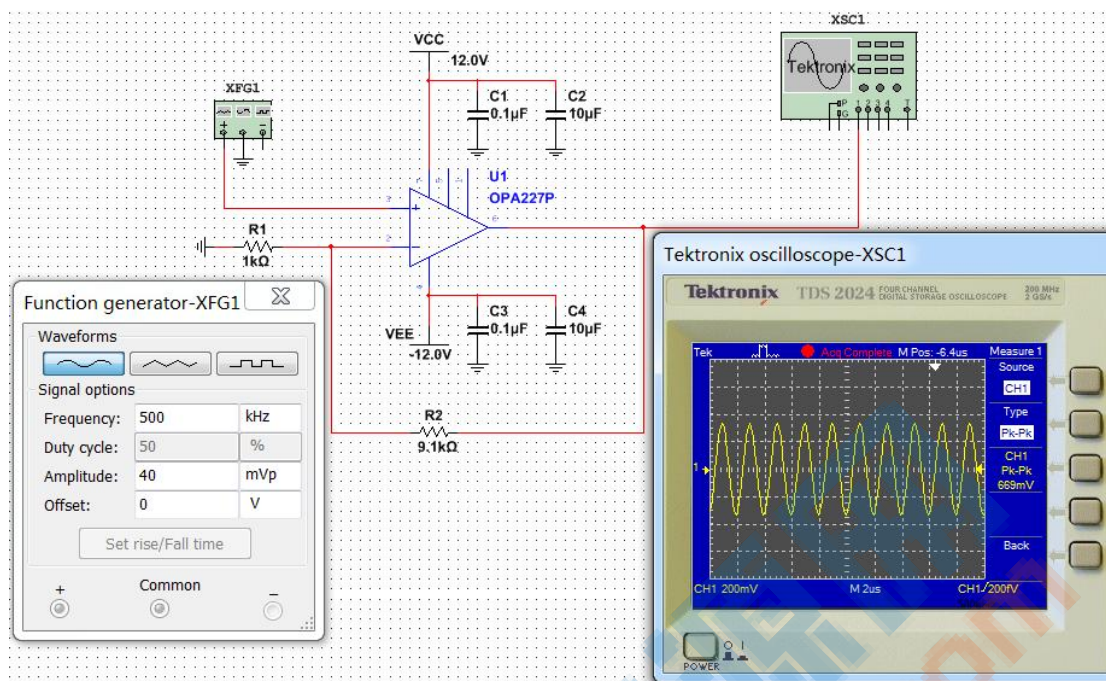


输入信号频率为 100kHz 时，

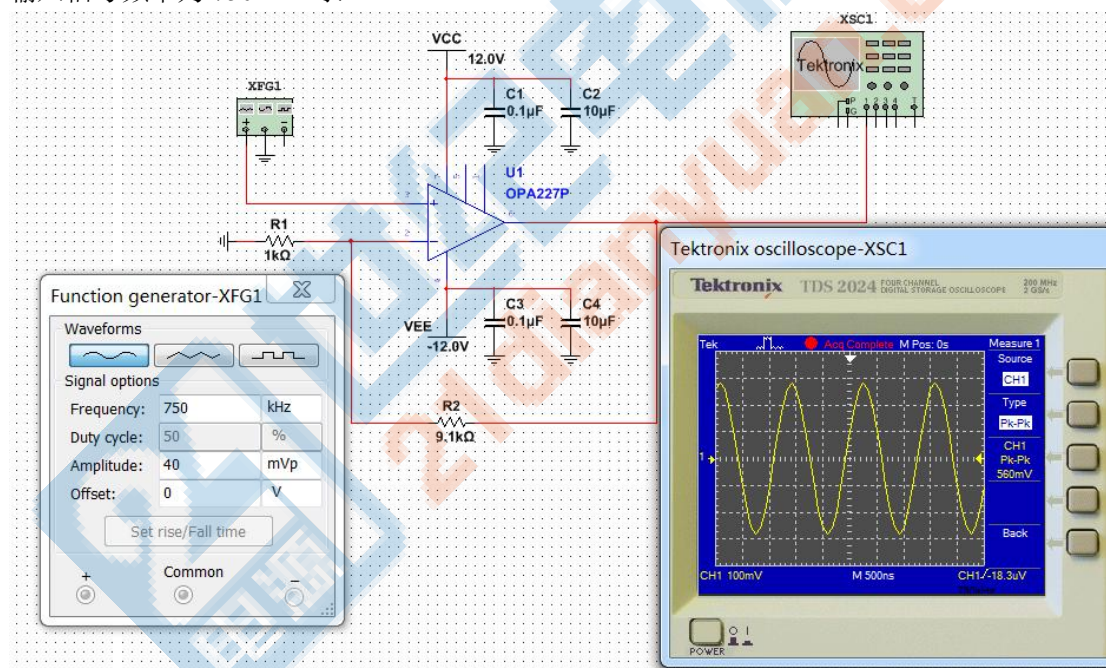


输入信号频率为 500kHz 时，





输入信号频率为 750kHz 时，



因此测得的增益带宽积大小为 7.5MHz。

### 1.1.3 电压跟随器电路

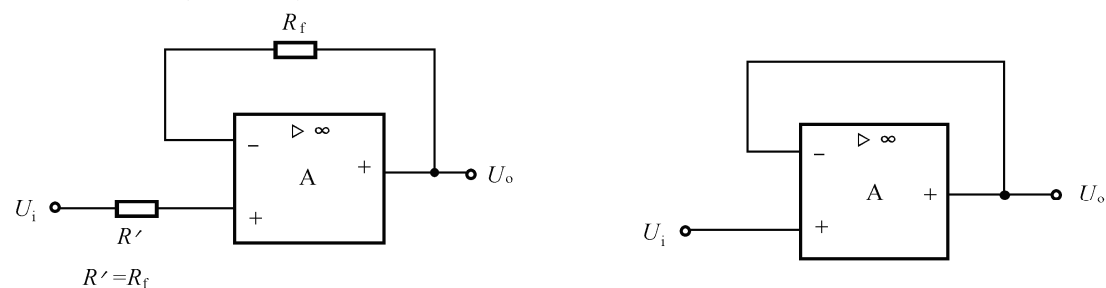


图 3 电压跟随器电路

当断开同向比例运算电路的  $R_1$  时，电路图如图 3 所示，此时电路的电压放大倍数  $A_u = 1$ 。

该电路通常用作阻抗转换或隔离缓冲级。

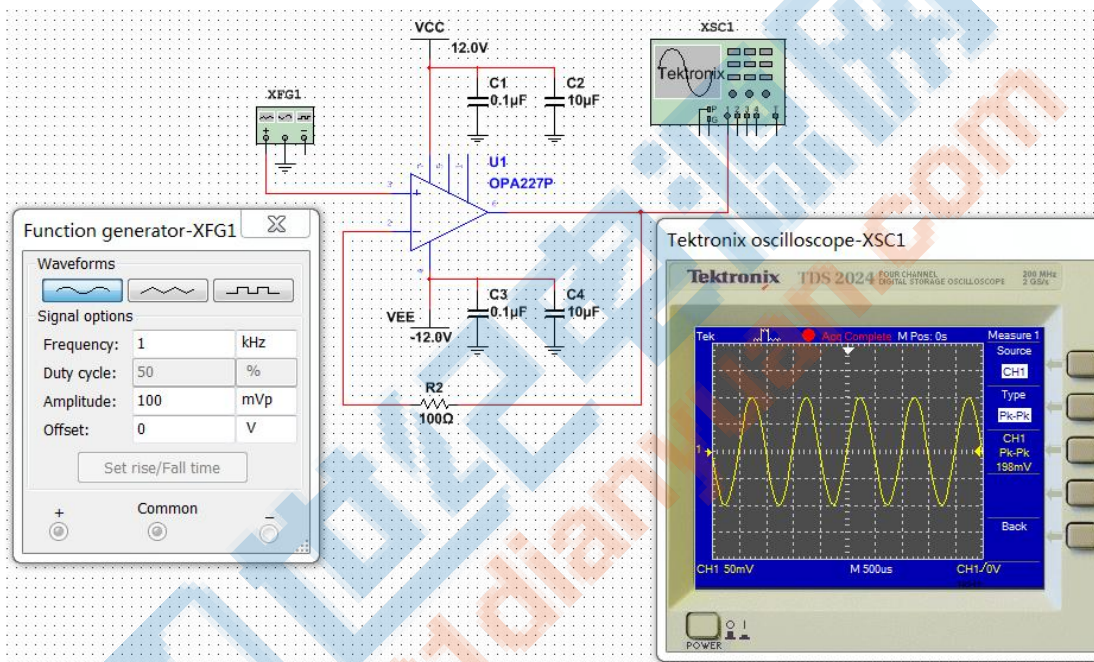
#### ◆ 知识扩展：

1、 $R'$  和  $R_f$  不影响电路的增益，因此简单处理可以直接短路。在实际电路中， $R'$  和  $R_f$  可取 50~500 范围内的电阻值。

◆ **设计举例：**使用运算放大器 OPA227 设计一个设计电压跟随器电路，记录 OPA227 各引脚的静态工作点，并采用设计完成的电路测量 OPA227 的增益带宽积  $GBW$  和压摆率  $SR$ 。

#### ◆ 设计过程

电路图如下图所示。



## 1.2 加减运算电路

### 1.2.1 反向求和运算电路

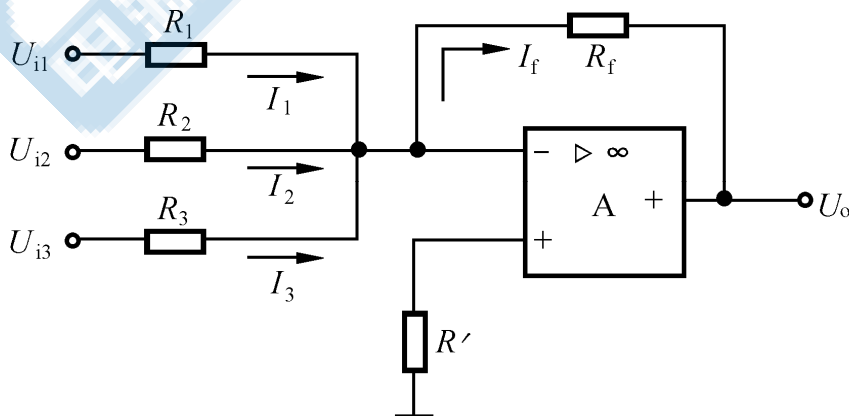


图 4 反向求和运算电路

反相加法电路是指多个输入电压同时加到集成运放的反相输入端。图 3 为三个输入信号

(代表三个变量)的反相加法电路。 $R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$ 。运用虚短、虚断和虚地的概念，由电路可得

$$U_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}U_{i1} + \frac{R_f}{R_2}U_{i2} + \frac{R_f}{R_3}U_{i3}\right)$$

若  $R_1=R_2=R_3=R$ ，上式可变为

$$U_o = -\frac{R_f}{R}(U_{i1} + U_{i2} + U_{i3})$$

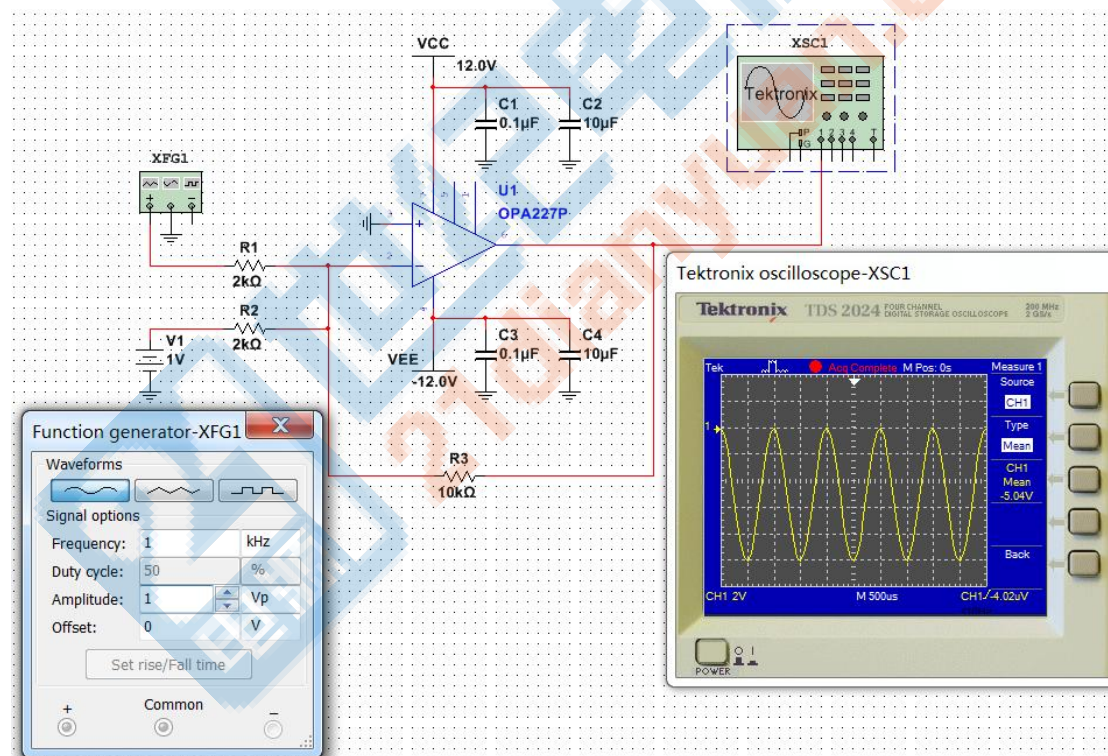
◆ **设计举例：**设计一个反向求和加法器，输入信号为频率 1kHz，幅度为 1V 的正弦波和 1V 的直流信号，增益为 5。关系式为  $y = -5 \times [\cos(2 \times \pi \times 1\text{kHz} \times t) + 1]$

◆ **设计过程：**

(1) 取  $R_f=10\text{k}$ ;

(2) 令  $R_1=R_2=R$  则  $U_o = -\frac{R_f}{R}(U_{i1} + U_{i2})$  可得  $R_1=R_2=R=2\text{k}$ ;

电路图如下图所示。



## 1.2.2 同向求和运算电路



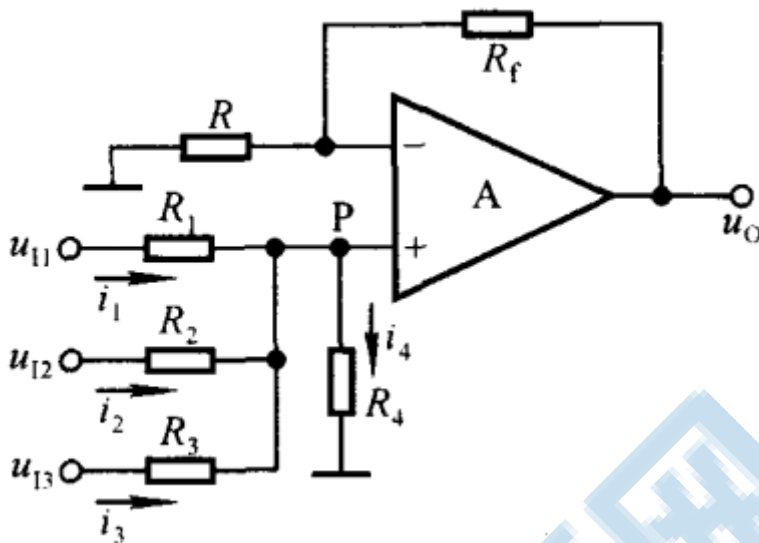


图 5 同向求和运算电路

如果将各输入电压同时加到集成运放的同相输入端，称为同相加法电路。图 5 表示有三个输入量的同相加法电路。

$$U_o = \frac{R_p}{R_n} R_f \left( \frac{U_{i1}}{R_1} + \frac{U_{i2}}{R_2} + \frac{U_{i3}}{R_3} \right)$$

$$R_n = R // R_f$$

$$R_p = R_1 // R_2 // R_3 // R_4$$

在  $R_p$  严格等于  $R_n$  的条件下，图 5 电路的输出电压与输入电压的关系为

$$U_o = R_f \left( \frac{U_{i1}}{R_1} + \frac{U_{i2}}{R_2} + \frac{U_{i3}}{R_3} \right)$$

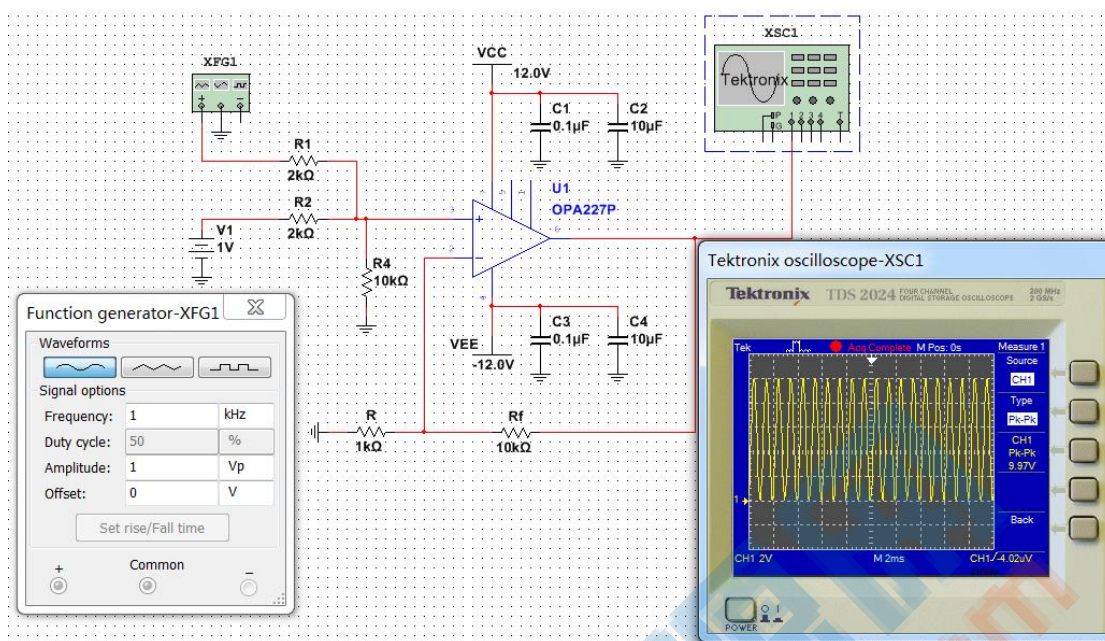
如果调整某一路信号的电阻( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ )的阻值，则必须改变电阻  $R$  的阻值，以使  $R_p$  严格等于  $R_n$ 。由于常常需反复调节才能将参数值最后确定，估算和调试的过程比较麻烦。所以，在实际工作中，不如反相电路应用广泛。

◆ **设计举例：**设计一个同向求和加法器，输入信号为频率 1kHz，幅度为 1V 的正弦波和 1V 的直流信号，增益为 5。关系式为  $y = 5 \times [\cos(2 \times \pi \times 1\text{kHz} \times t) + 1]$ 。

◆ **设计过程：**

- (1) 取  $R_f = 10\text{k}$ ;
- (2) 由增益为 5，可计算  $R_1 = R_2 = 2\text{k}$ ;
- (3) 由于需选取电阻  $R_4$  和  $R$ ，使  $R_p = R_n$ ，可选  $R_4 = 10\text{k}$ ，则  $R = 1\text{k}$ 。

电路图如下图所示。



### 1.2.3 差分比例运算电路

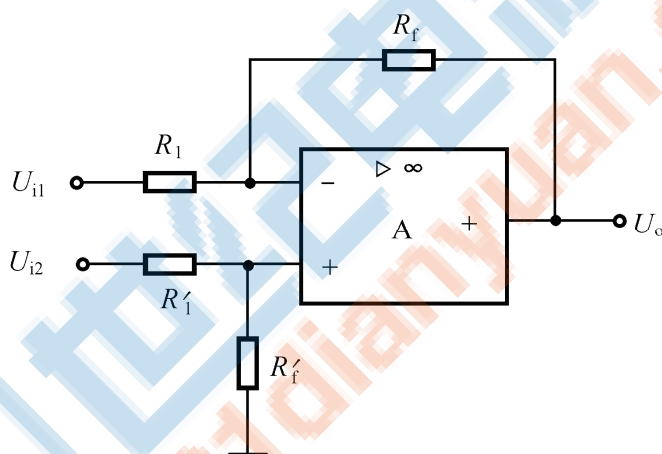


图 5 差分比例运算电路

输出电压为

$$U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R'_f}{R'_1 + R'_f} U_{i2} - \frac{R_f}{R_1} U_{i1}$$

当满足匹配条件(电路对称)即  $R'_1 = R_1$ ,  $R'_f = R_f$  时, 则

$$U_o = \frac{R_f}{R_1} (U_{i2} - U_{i1}), \quad A_u = \frac{U_o}{U_{i2} - U_{i1}} = \frac{R_f}{R_1}$$

若四个外接电阻全相等, 即  $R'_1 = R_1 = R'_f = R_f$ , 则有

$$U_o = U_{i2} - U_{i1}$$

可以看出, 四只电阻全相同的差动比例电路可作减法运算。该电路结构简单, 缺点是输入电阻低, 对元件的对称性要求比较高。如果元件失配, 不仅在计算中会带来附加误差, 而且将产生共模电压输出, 同时输出电压调节也不方便。

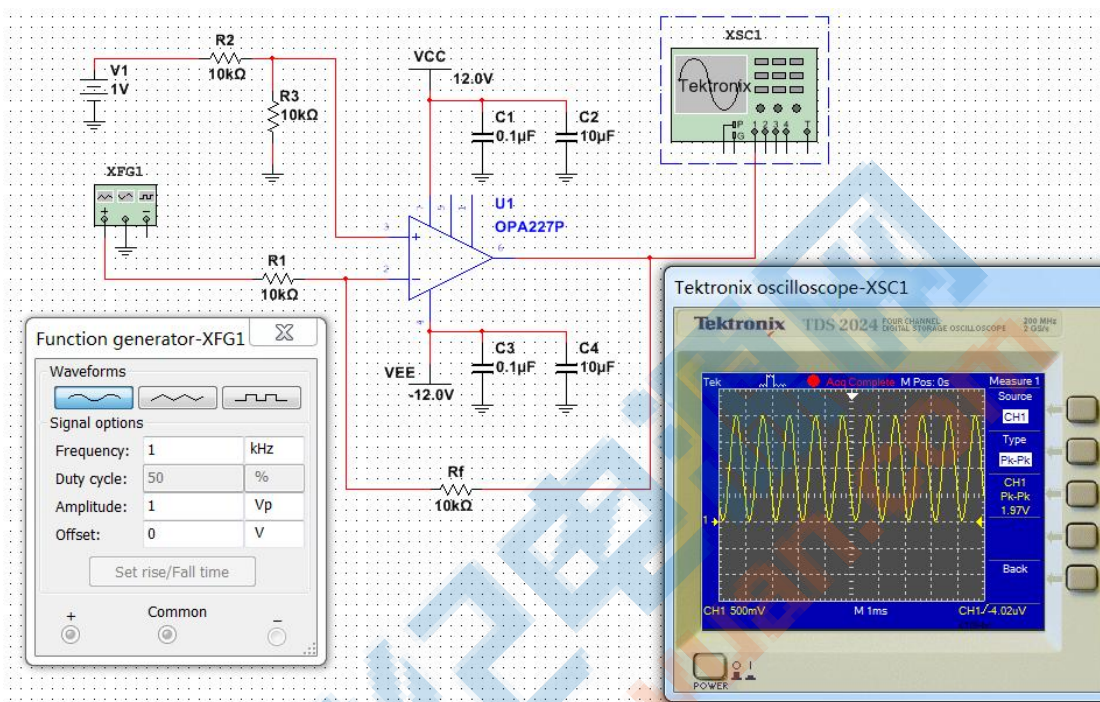
◆ **设计举例:** 设计一个差分比例运算电路, 输入信号为频率 1kHz, 幅度为 1V

的正弦波和 1V 的直流信号。关系式为  $y = -[\cos(2 \times \pi \times 1kHz \times t)] + 1$

#### ◆ 设计过程:

由所要求的关系式，可取  $R'_1 = R_1 = R'_f = R_f = 10k$

电路图如下图所示。



### 1.3 积分运算电路

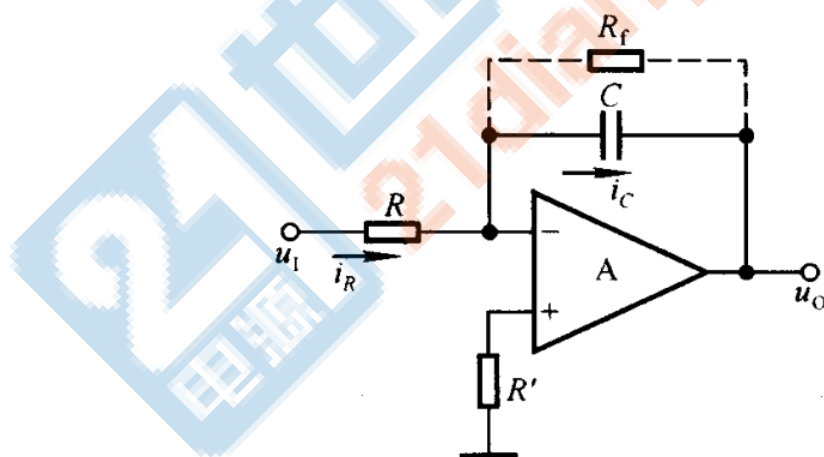


图 6 积分运算电路

$$u_o = -\frac{1}{C} \int i dt \approx -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

积分时间常数  $\tau = RC$

#### ◆ 知识扩展:

- 1、 $R_f$  的作用是限制积分器的低频增益，以抑制漂移的影响， $R_f$  要远大于  $R$ ，这样才能避免  $R_f$  的引入影响积分特性。
- 2、在低频时，由于电容  $C$  认为是断路，因此上图不再是积分器。作为积分器使



用的下限频率  $f_x$  是

$$f_x = -\frac{1}{2\pi R_f C}$$

◆ **设计举例：**应用集成运算放大器设计方波转换成三角波电路，方波频率 500Hz、幅度为 5V。输出三角波幅度的绝对值为 5V。

◆ **设计过程：**

为保证积分后三角波的线性度好，应保证方波的频率  $f > 10f_x$

$$(1) \quad \text{积分时间 } t = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2 \times 500} = 1ms$$

$$(2) \quad R = \frac{U_i t}{(U_o C)}$$

(3) 取  $C=100nF$ ，则

$$R = \frac{U_i t}{(U_o C)} = \frac{5 \times 1 \times 10^{-3}}{(5 \times 0.1 \times 10^{-6})} = 10k\Omega;$$

(4) 由  $f > 10f_x$  可得

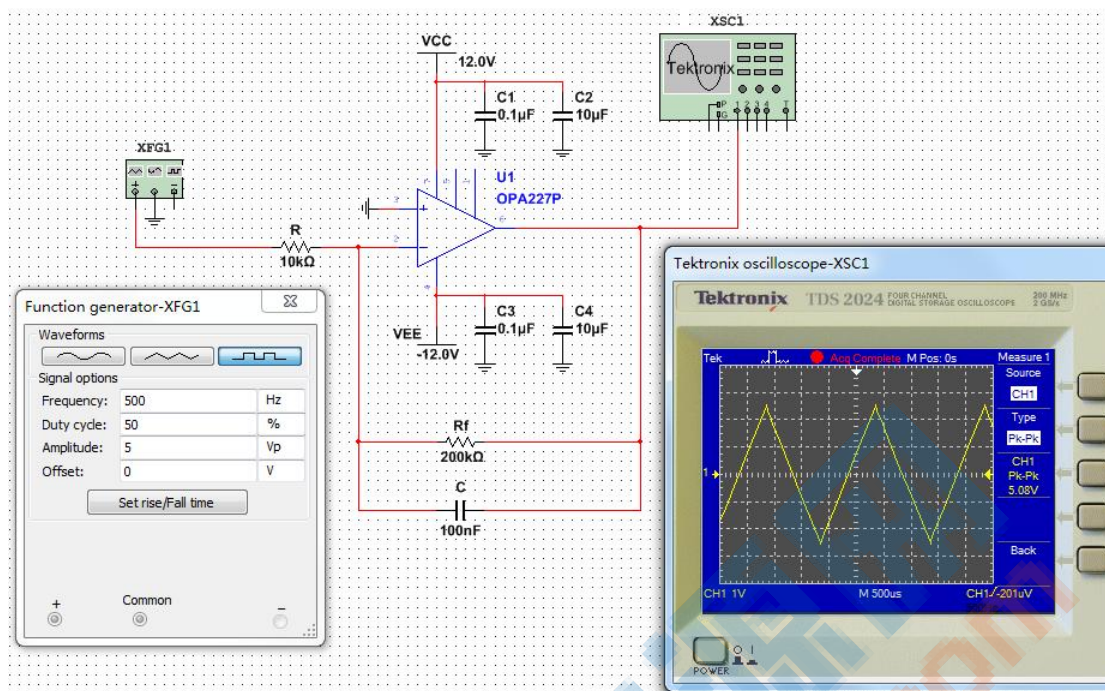
$$R_F > \frac{10}{2\pi \times f \times C} = \frac{10}{2\pi \times 500 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 31.8k\Omega$$

为满足  $R_F \gg R$ ，取  $R_F = 200k\Omega$ ；

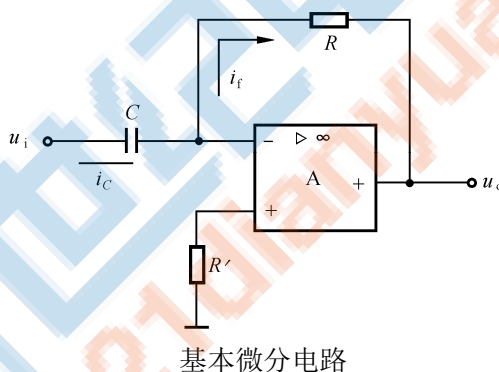
$$(5) \quad \text{验算 } 10f_x = \frac{10}{2\pi \times R_F \times C} = \frac{10}{2\pi \times 200 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 80Hz$$

$f = 500Hz$ ，满足  $f > 10f_x$ ，符合要求。

由计算参数所得原理图如下。



#### 1.4 微分运算电路



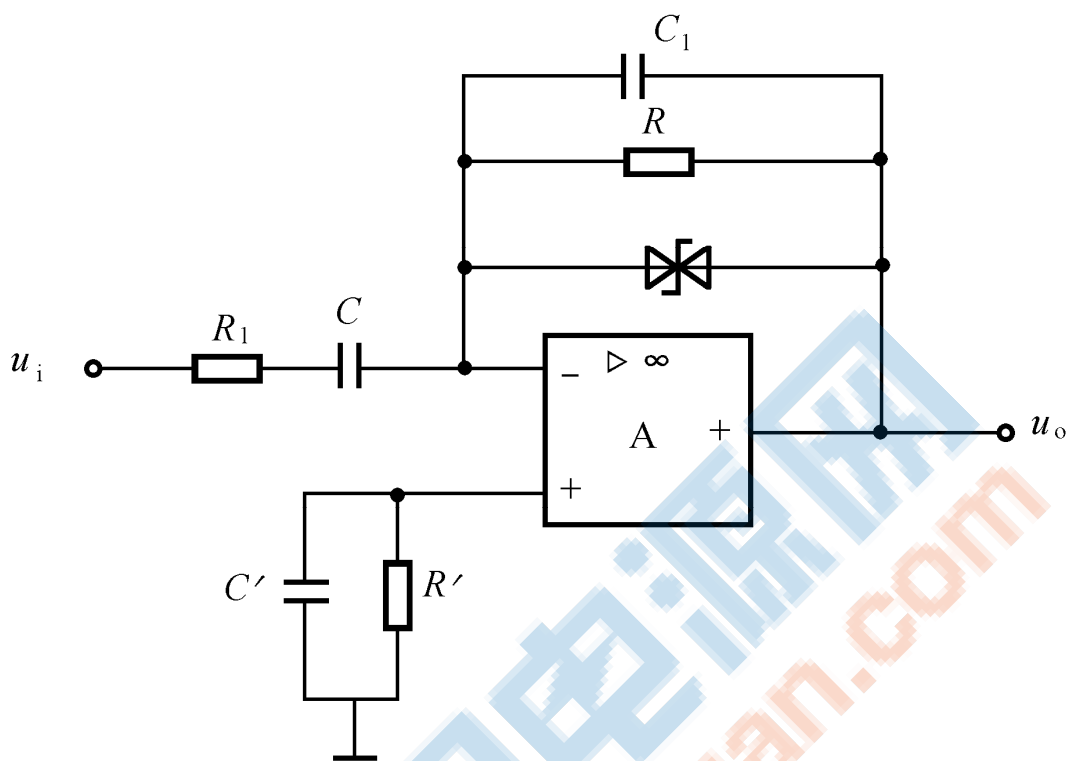
基本关系式

$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$

◆ 知识扩展:

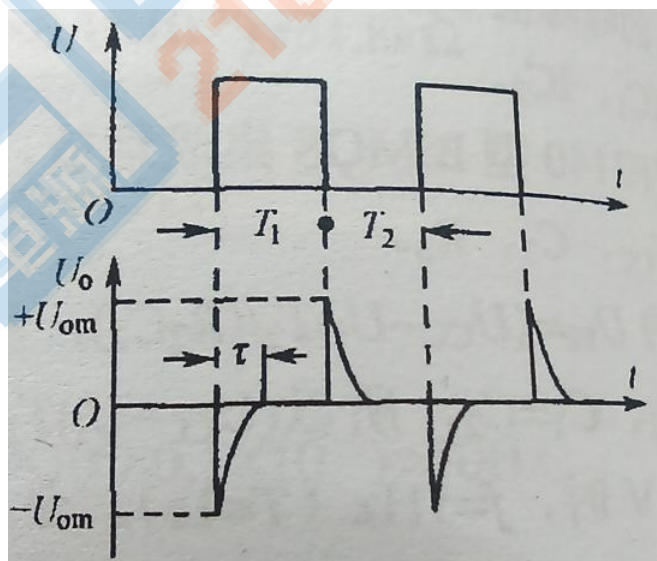
- 1、由于输出  $u_o$  正比于  $\frac{du_i}{dt}$ ，因此输出对输入的变化(如噪声和干扰等)非常敏感，以致输出噪声可能完全淹没微分信号，因此基本微分电路的抗干扰能力差。
- 2、由于基本微分电路的 RC 环节对于反馈信号具有滞后作用，它和集成运放内部电路的滞后作用合在一起，在高频段工作时极易引起自激振荡，使放大器工作不稳定。因此，在 R 和 R' 两端各并联一只小电容器 C1 和 C'，起相位补偿作用，以消除自激。
- 3、当输入电压发生跳变时，有可能超过集成运放的最大输出电压，严重时将使微分电路不能正常工作。可在 R 两端并联稳压管，限制输出幅度。

- 4、加一个小电阻  $R_1$  和  $C$  串联，以限制噪声和突变的输入电压。实用微分电路如下图所示。



实用微分电路

当输入阶跃信号时，输出为尖脉冲，输出信号幅度除与  $R$ 、 $C$  有关，还与输入信号的变化率有关，输出信号大小受运算放大器输出饱和电压  $\pm U_B$  限制。阶跃信号作用时，微分电路输入和输出的波形如下图所示。



基本关系式

$$(1) \quad u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$



(2) 微分时间常数  $\tau_F = RC$

(3)  $R_1 = [2 \times \tau_F / (\pi \times BW_G \times C^2)]^{1/2}$ ，式中  $BW_G$  为运放增益带宽积。

(4)  $\tau = \tau_F$ ， $\tau < T_1$ ， $\tau < T_2$

式中， $\tau$  为输出尖脉冲宽度， $T_1$  为输入脉冲作用期， $T_2$  为输入脉冲休止期。

(5)  $R' = R$

(6)  $U_{om} = \pm U_B$ ， $U_{om}$  为输出最大值， $U_B$  为集成运放饱和输出电压。

(7) 令  $\tau_1 = R_1 C$ ， $\tau_2 = RC_1$ ，为更好抑制噪声，应满足  $\tau_1 = \tau_2$ 。

◆ **设计举例：**应用集成运算放大器设计一个将对称三角波转换成方波的电路，三角波频率 500Hz、峰峰值为 5V，要求输出方波的峰峰值为 10V。

◆ **设计过程：**

(1) 由  $u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$  可知，当输入为三角波时， $U_o = -RC \frac{U_i}{t}$

上式中， $U_o$  为输出方波峰值， $U_i$  为三角波峰峰值， $t$  为三角波峰峰值变化时间。

(2)  $t = \frac{T}{2} = \frac{1}{(2f)} = \frac{1}{(2 \times 500)} = 1ms$

(3)  $R = \frac{U_o t}{(U_i C)}$

(4) 取  $C=100nF$ ，则

$$R = \frac{U_o t}{(U_i C)} = \frac{5 \times 1 \times 10^{-3}}{(5 \times 0.1 \times 10^{-6})} = 10k\Omega ;$$

(5) 由

$$R_1 = [2 \times \tau_F / (\pi \times BW_G \times C^2)]^{1/2} = [2 \times 10 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} / (\pi \times 8 \times 10^6 \times (0.1 \times 10^{-6})^2)]^{1/2} = 89\Omega$$

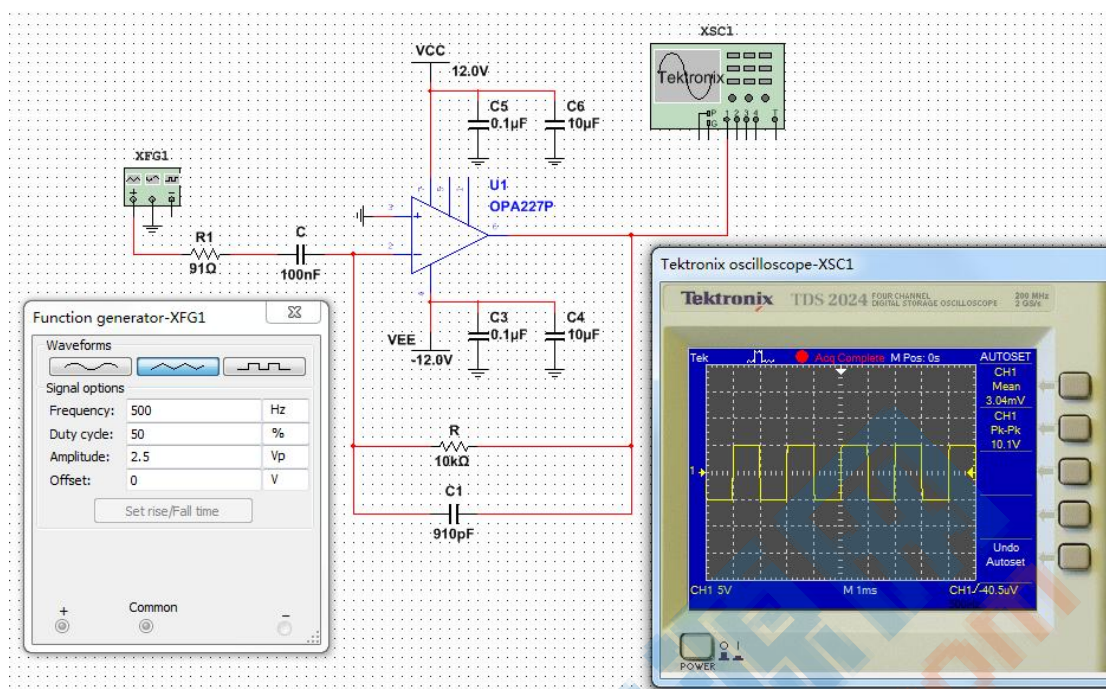
=

取系列电阻  $91\Omega$ ；

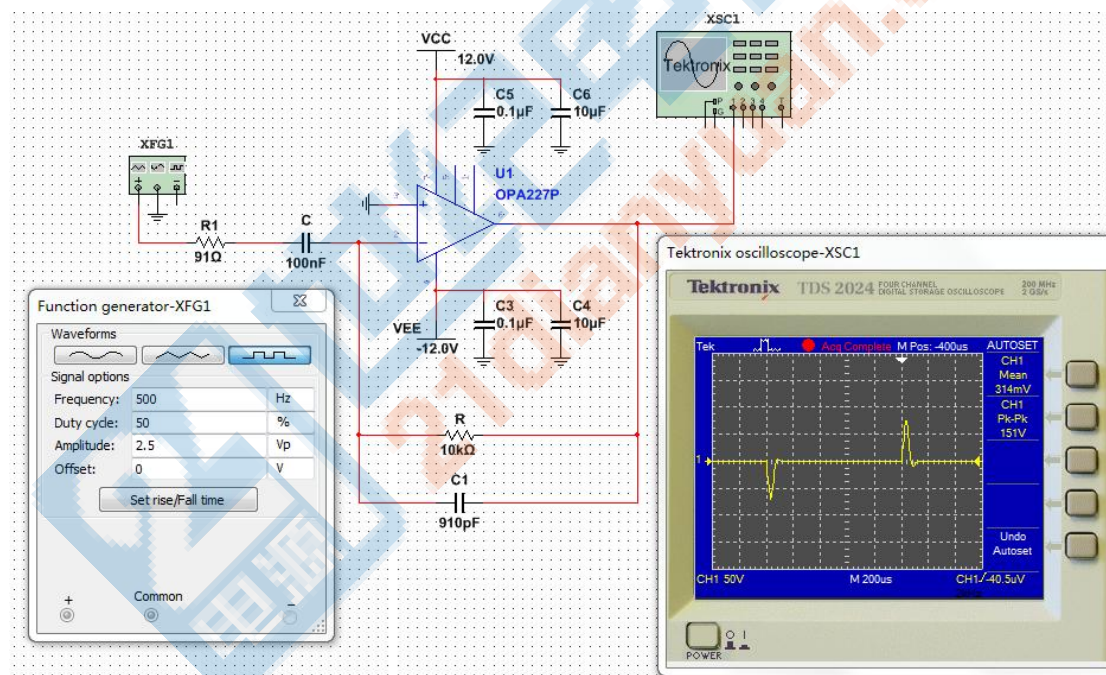
(6) 由  $\tau_1 = \tau_2$  可得  $R_1 C = RC_1$ ，推导

$$C_1 = R_1 C / R = 91 \times 0.1 \times 10^{-6} / (10 \times 10^3) = 910pF$$

由计算参数所得原理图如下。

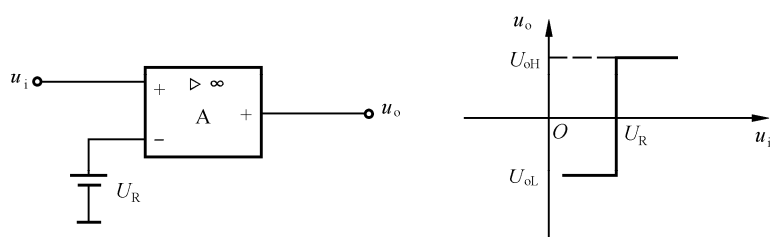


当输入阶跃信号时，仿真输出波形如下图所示。



## 1.5 电压比较器电路

### 1.5.1 单限比较器



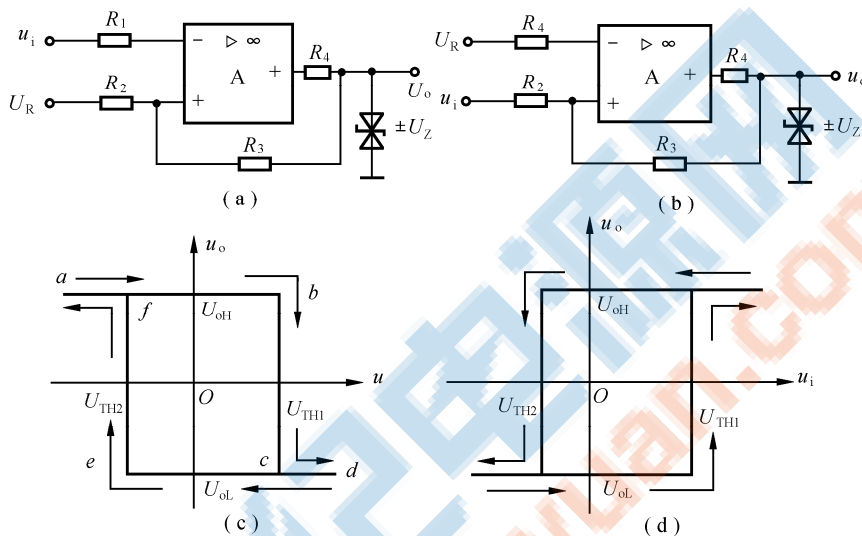
## ◆ 知识扩展:

- 1、运算放大器做电压比较器使用时, 由于同相输入端和反相输入端存在差模电压, 需要根据运放的差模输入电压范围来选型运算放大器。
- 2、在设计电压比较器电路时, 可选用专门的电压比较器芯片, 如 LM311、LM339、TLV3501、TLV3502 等。

## 1.5.2 滞回比较器

滞回比较器又称施密特触发器。这种比较器的特点是当输入信号  $u_i$  逐渐增大或逐渐减小时, 它有两个阈值, 且不相等, 其传输特性具有“滞回”曲线的形状。

滞回比较器也有反相输入和同相输入两种方式, 它们的电路及传输特性示下图所示。



滞回比较器及其传输特性(a)反相输入; (b)同相输入

集成运放输出端至反相输入端为开环。输出端至同相输入端引入正反馈, 目的是加速输出状态的跃变, 使运放经过线性区过渡的时间缩短。  $U_R$  是某一固定电压, 改变  $U_R$  值能改变阈值及回差大小。

对于反相输入滞回电压比较器, 正向和反向过程的阈值分别为

$$U_{TH1} = \frac{R_3 U_R + R_2 U_{oH}}{R_2 + R_3} = \frac{R_3 U_R + R_2 U_Z}{R_2 + R_3}$$

$$U_{TH2} = \frac{R_3 U_R + R_2 U_{oL}}{R_2 + R_3} = \frac{R_3 U_R - R_2 U_Z}{R_2 + R_3}$$

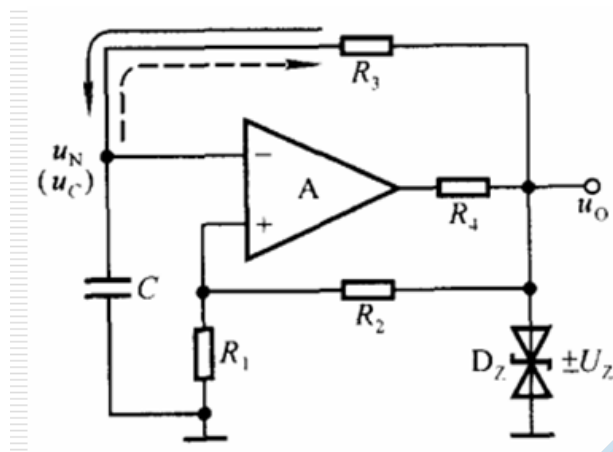
对于同向输入滞回电压比较器, 正向和反向过程的阈值分别为

$$U_{TH1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) U_R - \frac{R_2}{R_3} U_{oL}$$

$$U_{TH2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) U_R - \frac{R_2}{R_3} U_{oH}$$

## 1.6 矩形波发生电路





$$\text{振荡周期 } T = T_1 + T_2 = 2R_3C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

◆ 设计举例：应用集成运算放大器设计一个方波发生电路，要求方波频率 1kHz、幅度为 5V。

◆ 设计过程：

(1) 选  $C = 0.01\mu\text{F}$ ，令  $R_1 = R_2 = 5.1\text{k}$ ，则  $R_3 = 45.5\text{k}$

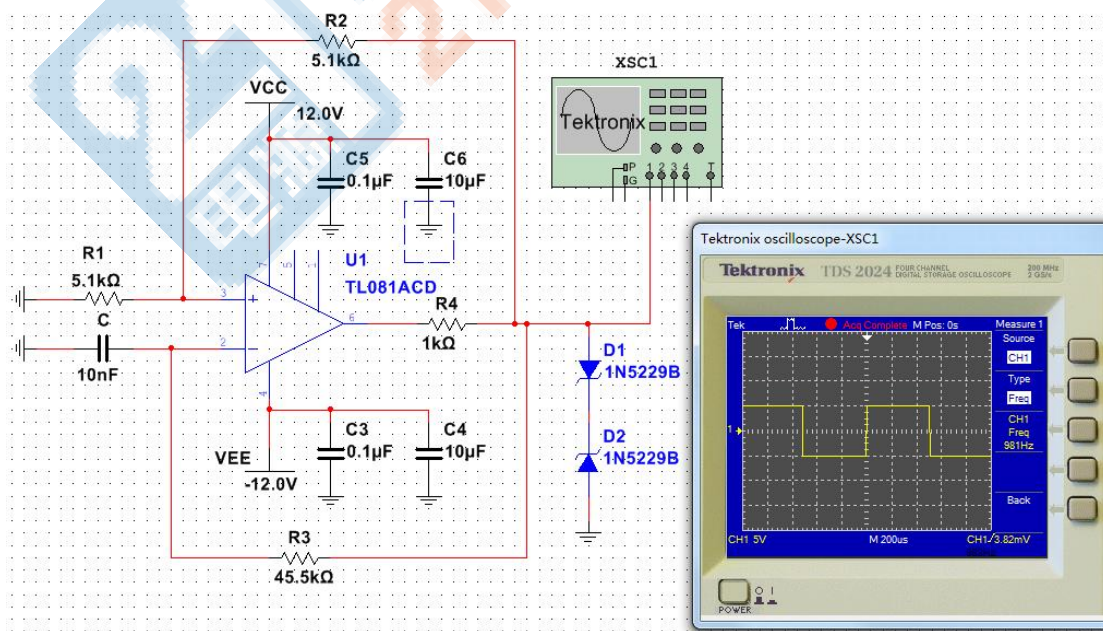
(2) 输出稳压电路设计，需考虑稳定电流  $I_Z$ 。由于要求输出幅度为 5V，可选

用稳定电压  $U_Z = 4.3$  的两个稳压二极管反向串联使用。查阅资料，选取稳压二极

管 1N5229B，其  $I_Z = 20\text{mA}$ ，当电源电压为 12V 时，估算电阻

$R_4 < (12 - 5)/(20 \times 10^{-3})\Omega$ ，所以  $R_4 < 350\Omega$ ，选取  $300\Omega$

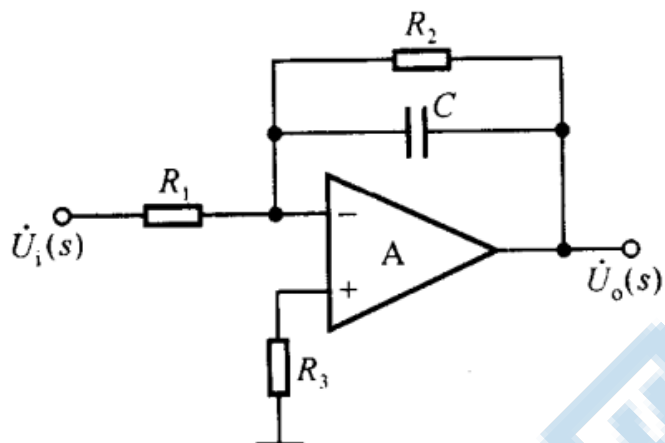
由计算参数所得原理图如下。（备注：OPA227 运放仿真输出不符合，原因不明）



## 1.7 有源滤波电路

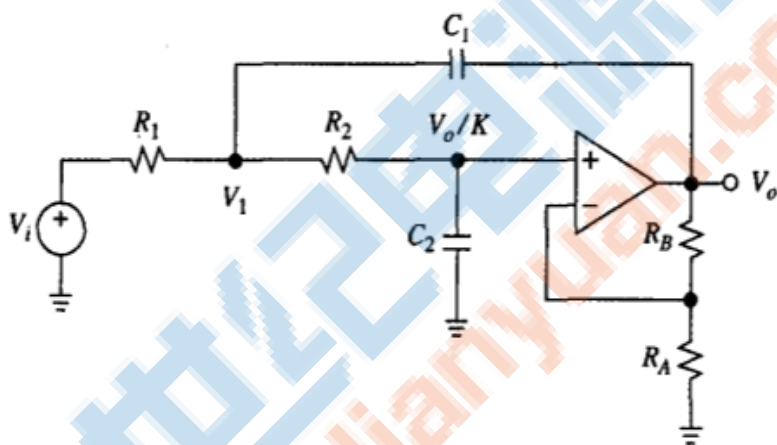
## 1.7.1 低通滤波电路

## 1.7.1.1 一阶低通滤波电路



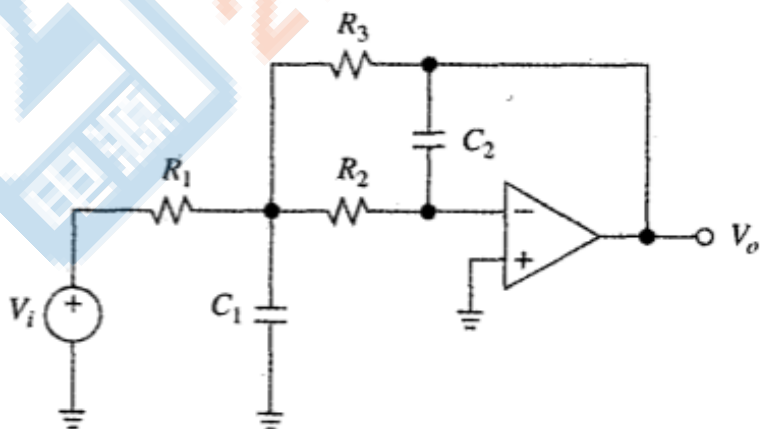
请参看《有源滤波器设计范例》

## 1.7.1.2 二阶有源低通滤波电路（VCVS）



请参看《有源滤波器设计范例》

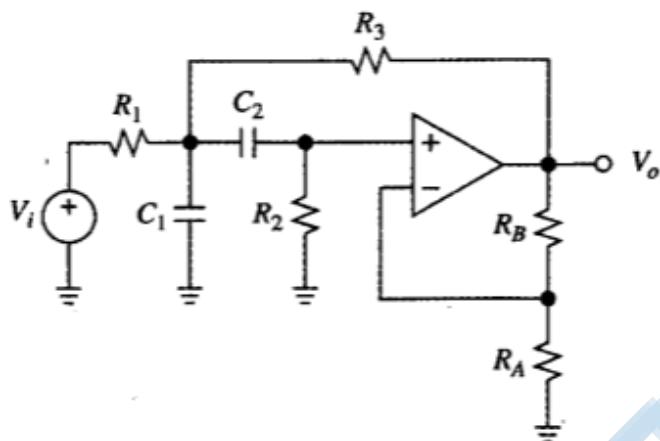
## 1.7.1.3 二阶有源低通滤波电路（MFB）



请参看《有源滤波器设计范例》

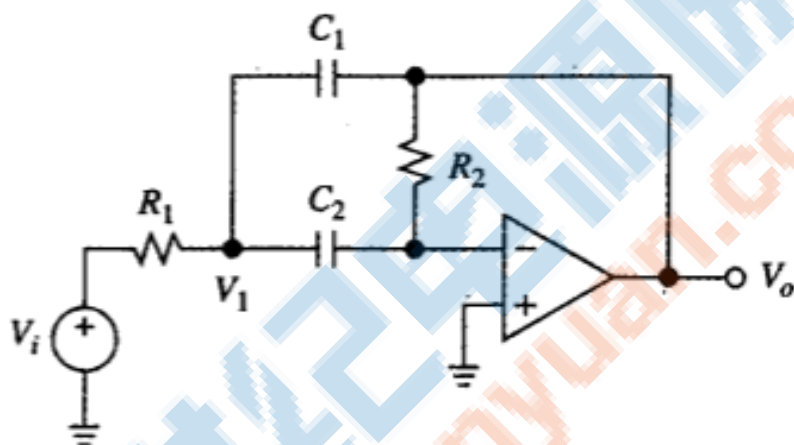
## 1.7.2 带通滤波电路

## 1.7.2.1 二阶有源带通滤波器（VCVS）



请参看《有源滤波器设计范例》

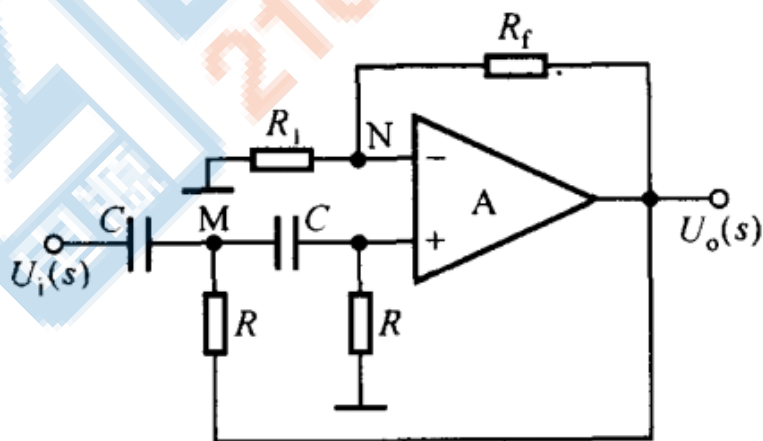
### 1.7.2.2 二阶有源带通滤波器（MFB）



请参看《有源滤波器设计范例》

### 1.7.3 高通滤波电路

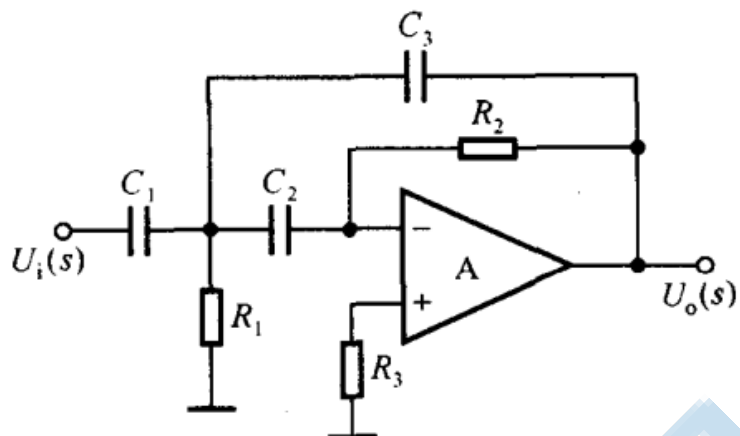
#### 1.7.3.1 二阶有源高通滤波器（VCVS）



请参看《有源滤波器设计范例》

#### 1.7.3.2 二阶有源高通滤波器（MFB）

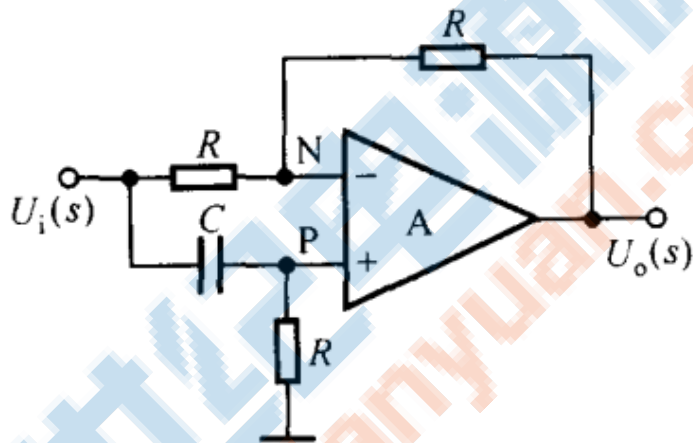




请参看《有源滤波器设计范例》

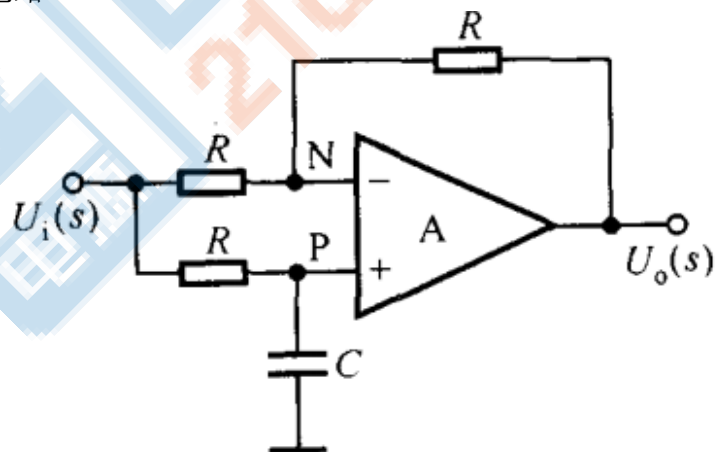
#### 1.7.4 全通滤波电路

##### 1.7.4.1 超前电路



请参看《有源滤波器设计范例》

##### 1.7.4.2 滞后电路



请参看《有源滤波器设计范例》