

## 运算放大器基本应用电路（单电源应用图集）

### 1.1 比例运算电路

#### 1.1.1 反向比例运算电路

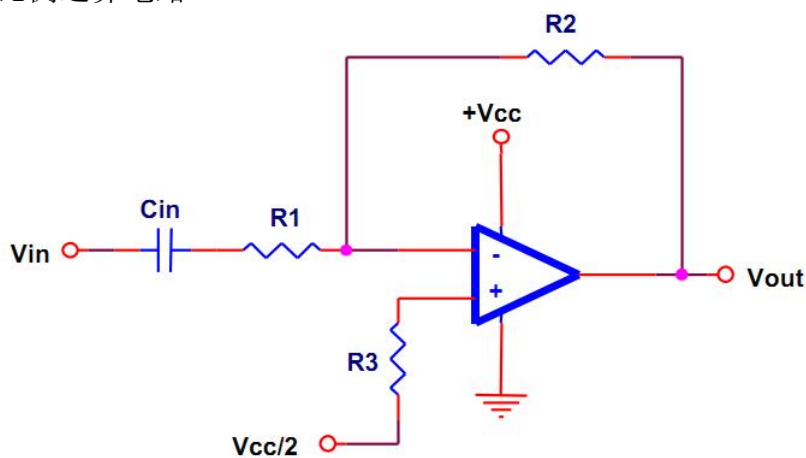


图 1 反向比例运算电路

电压放大倍数  $A_u$  为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

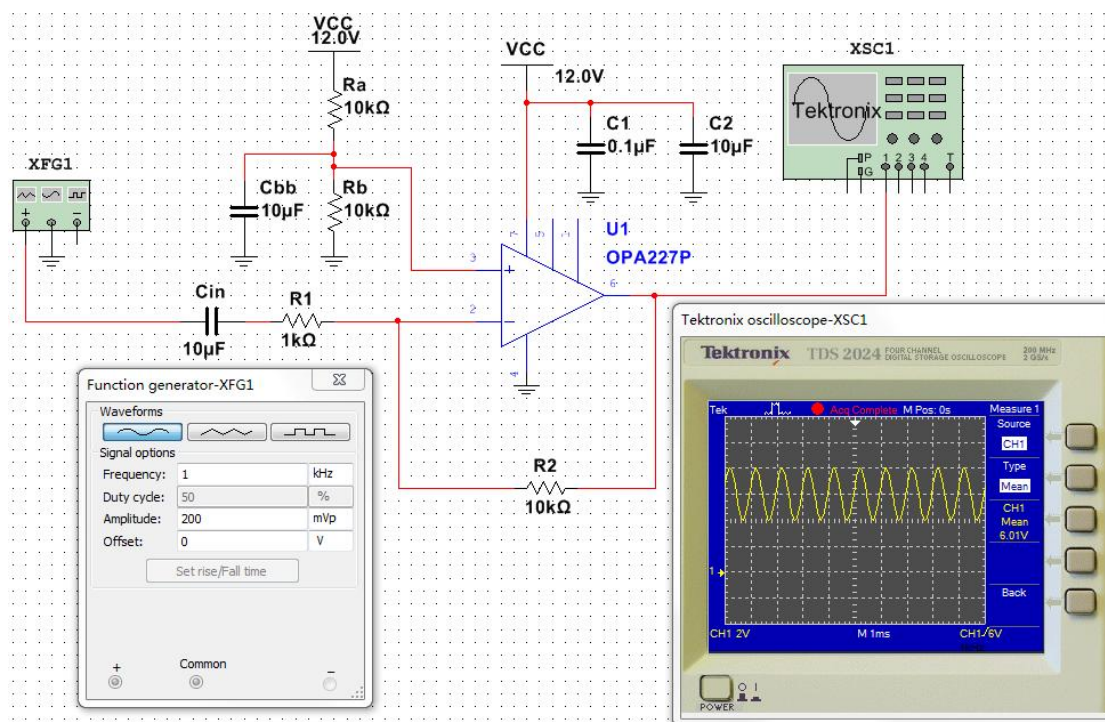
#### ◆ 知识扩展：

- 1、 $C_{in}$  为输入耦合电容，其交流阻抗相对于工作频率近似短路，起到隔直作用。
- 2、在没有输入信号时，运算放大器同相输入端、反相输入端、输出端电压都为  $V_{CC}/2$ 。
- 3、 $V_{CC}/2$  可通过电阻分压网络对  $V_{CC}$  分压来实现。

◆ **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：

由增益关系式计算电阻取值过程如下，取  $R_f = 10k$ ，则  $R_1 = 1k$ ， $C_{in} = 100\mu F$ ，电路图如下图所示。



### 1.1.2 同向比例运算电路

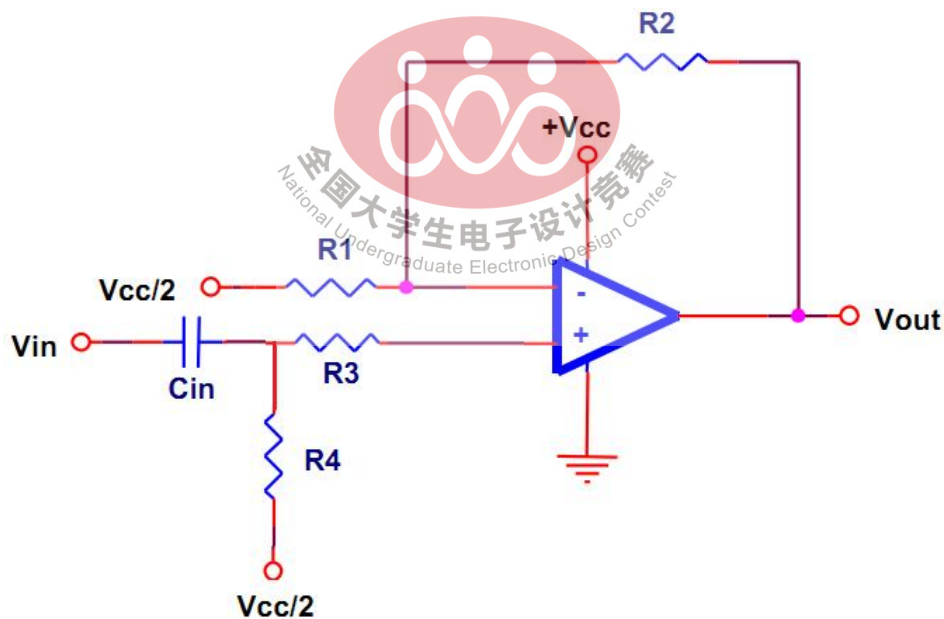


图 2 同向比例运算电路

电压放大倍数  $A_u$  为

$$A_u = \frac{U_o}{U_+} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

◆ 知识扩展：

- 1、 $C_{in}$  为输入耦合电容，与  $R_4$  构成高通滤波网络。
- 2、在没有输入信号时，运算放大器同相输入端、反相输入端、输出端电压都为  $V_{CC}/2$ 。

3、 $V_{CC}/2$  可通过电阻分压网络对  $V_{CC}$  分压来实现，其交流阻抗应该虚地。

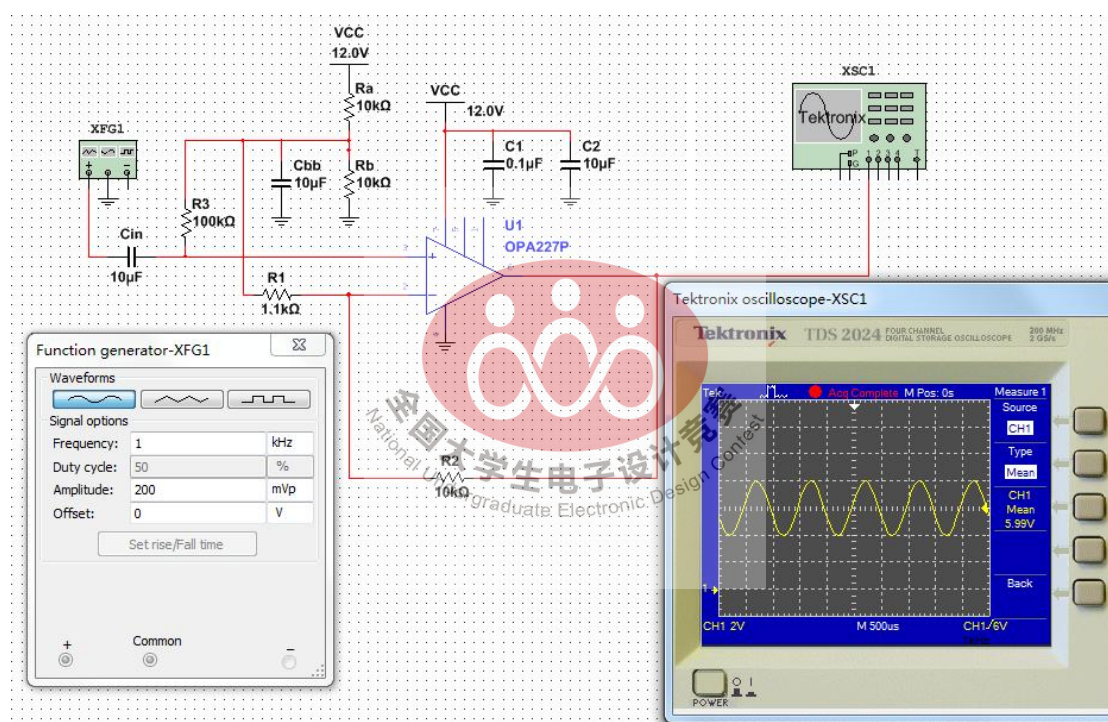
◆ **设计举例：**使用运算放大器 OPA227 设计一个设计同向比例运算电路，电路增益  $A_u = 10$ ，记录 OPA227 各引脚的静态工作点。

◆ **设计过程**

(1) 根据芯片手册取  $R_f = 10k$ ;

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

电路图如下图所示。



### 1.1.3 电压跟随器电路

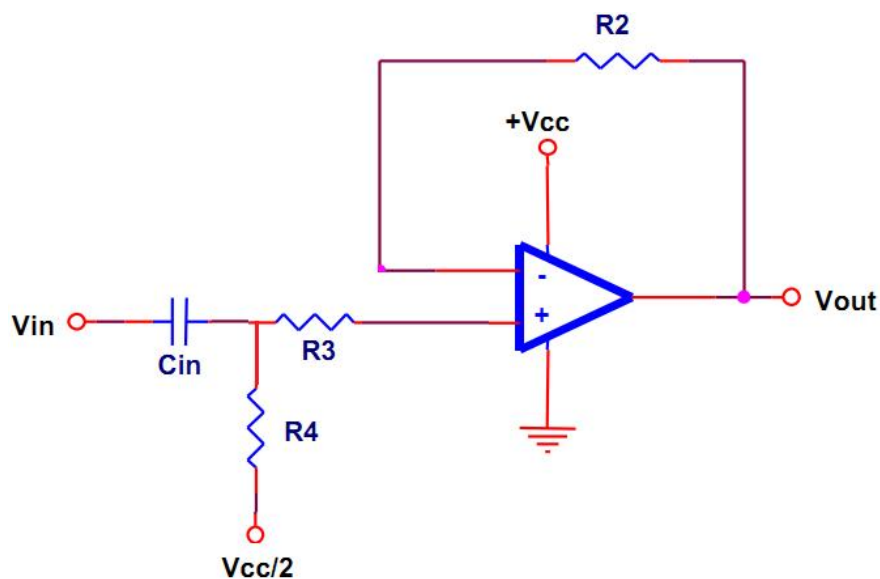
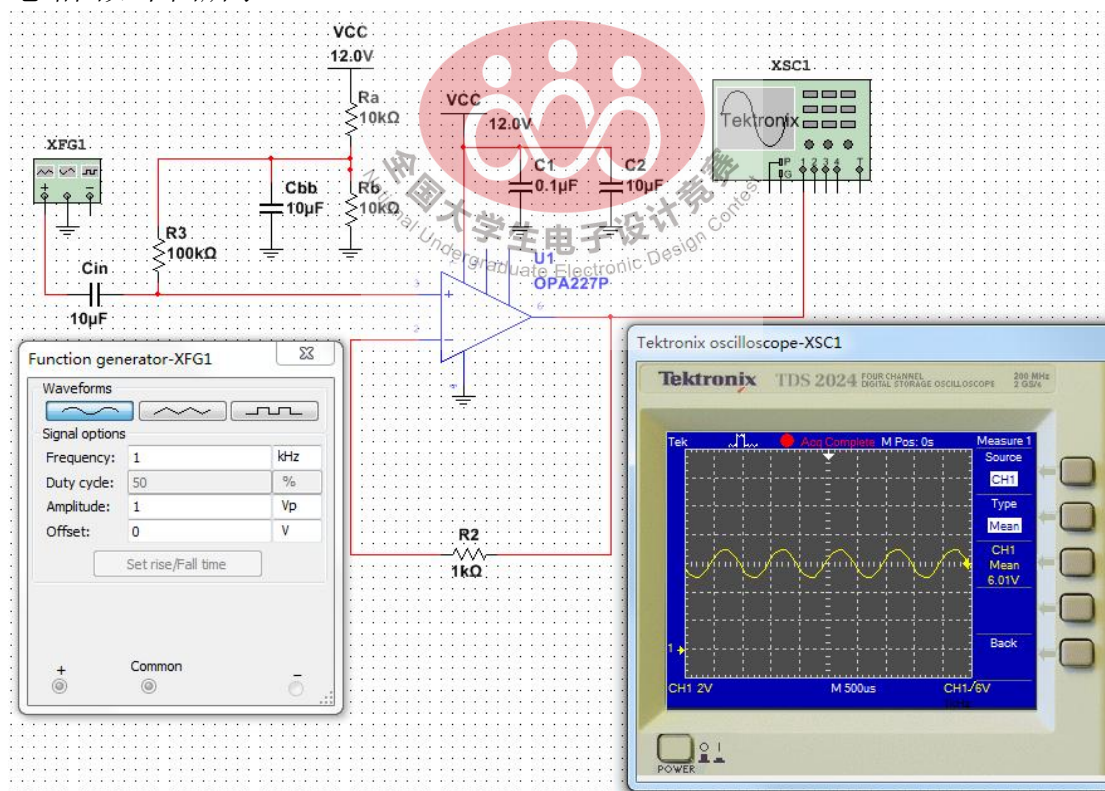


图3 电压跟随器电路

- ◆ **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。
- ◆ **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

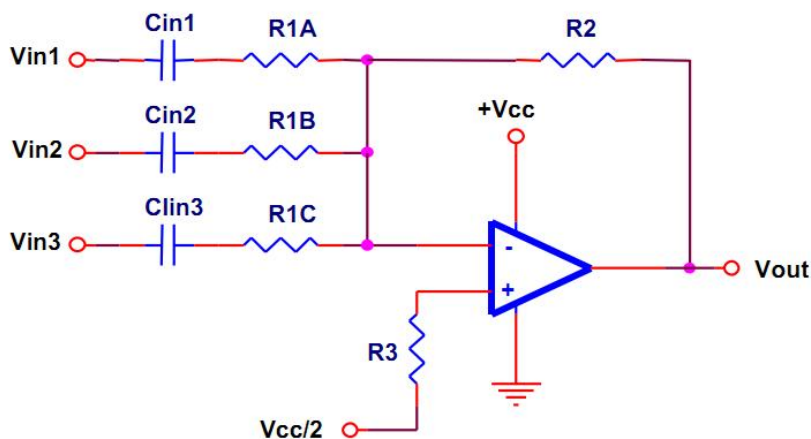


图 4 反向求和运算电路

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 4 为三个输入信号 (代表三个变量) 的反相加法电路。 $R_3 = R_2$ 。运用虚短、虚断和虚地的概念, 由电路可得

$$U_o = -\left(\frac{R_2}{R_{1A}}U_{i1} + \frac{R_2}{R_{1B}}U_{i2} + \frac{R_2}{R_{1C}}U_{i3}\right)$$

若  $R_{1A} = R_{1B} = R_{1C} = R$ , 上式可变为

$$U_o = -\frac{R_2}{R}(U_{i1} + U_{i2} + U_{i3})$$

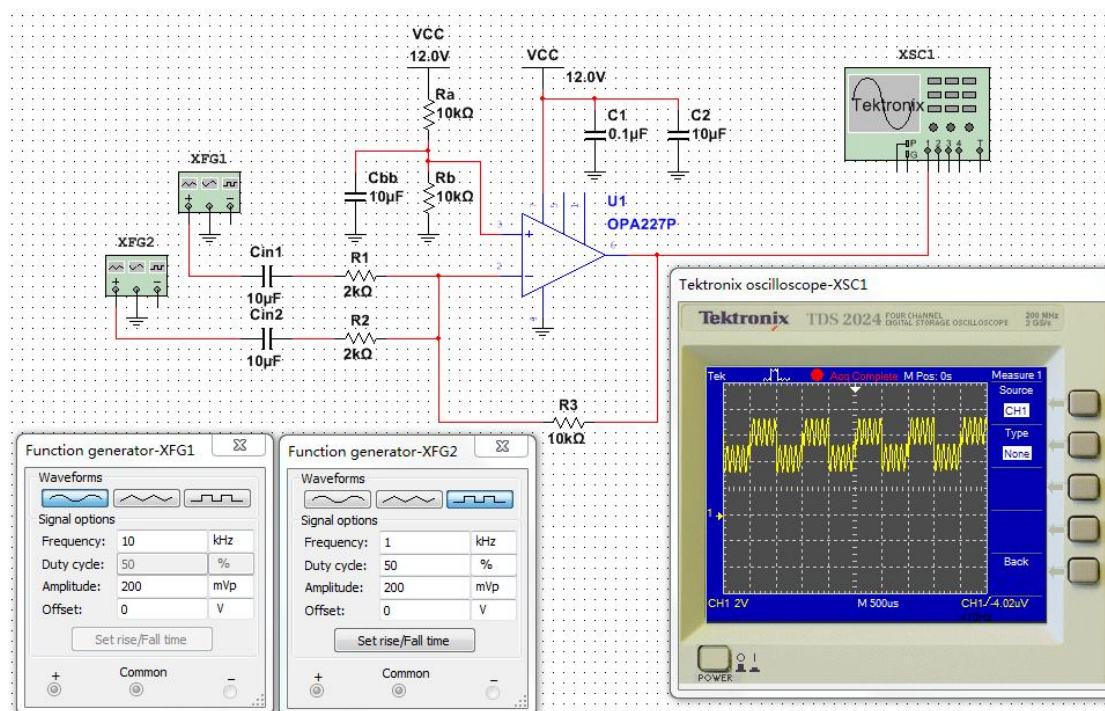
- ◆ **设计举例:** 设计一个反向求和加法器, 输入信号为频率 10kHz, 幅度为 200mV 的正弦波和频率 1kHz, 幅度为 200mV 的方波, 增益为 5。
- ◆ **设计过程:**

(1) 取  $R_f = 10k$ ;

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

电路图如下图所示。





### 1.2.2 差分比例运算电路

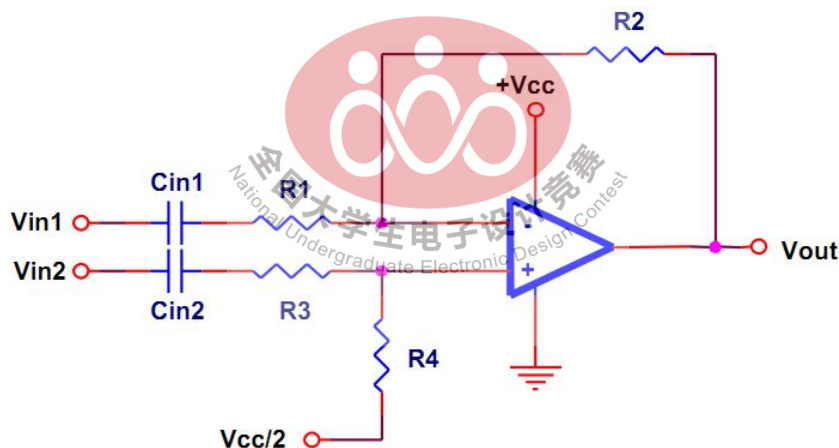


图 5 差分比例运算电路

当满足匹配条件(电路对称)即  $R_1 = R_3 = R$ ,  $R_2 = R_4 = R_f$  时, 则

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

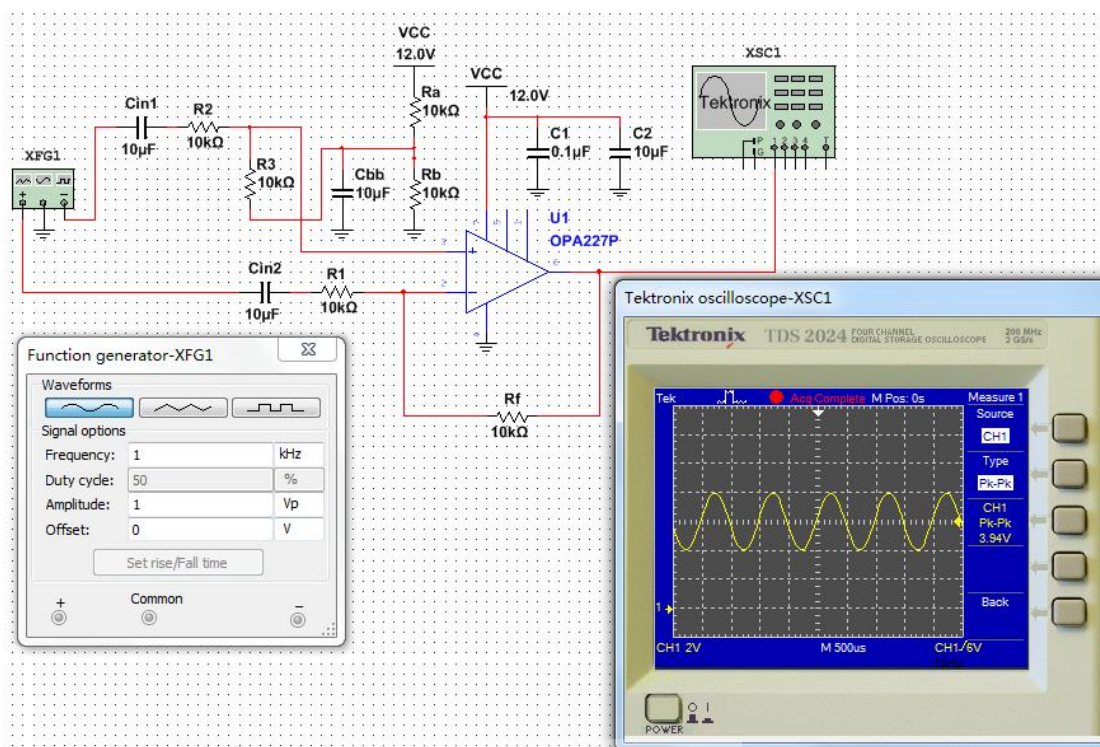
若四个外接电阻全相等, 则有

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

- ◆ **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, 相位相差 180 度的两正弦波。
- ◆ **设计过程:**

由所要求的关系式, 可取  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k$

电路图如下图所示。



### 1.3 积分运算电路

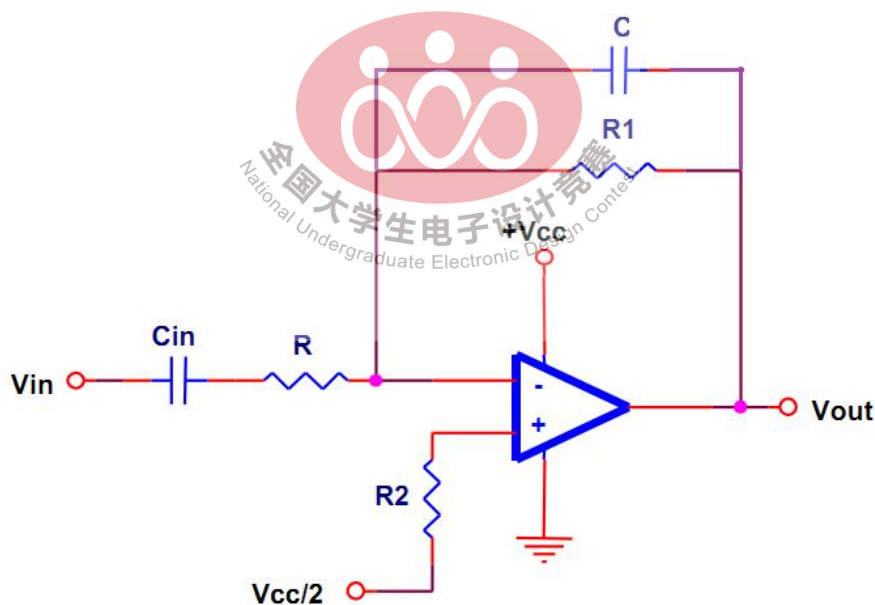


图 6 积分运算电路

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

- ◆ **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  $f > 10f_x$

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

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

(3) 取  $C=100\text{nF}$ ，则

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

(4) 由  $f > 10f_x$  可得

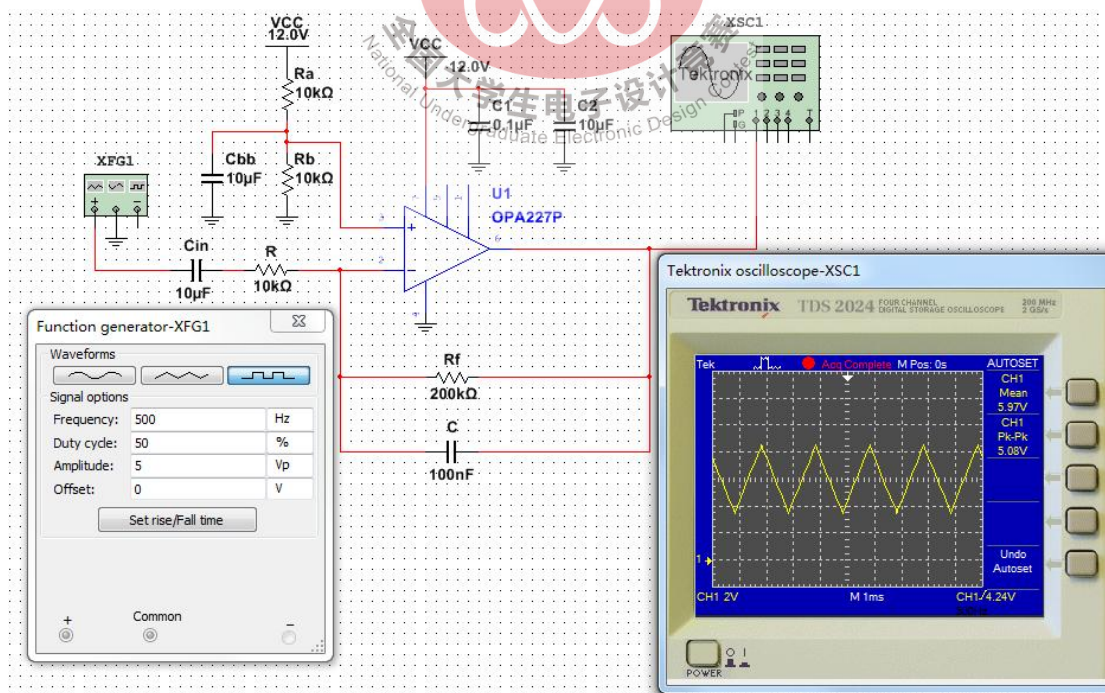
$$R_F > \frac{10}{(2\pi \times f \times C)} = \frac{10}{(2\pi \times 500 \times 0.1 \times 10^{-6})} = 31.8\text{k}\Omega$$

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

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

$f = 500\text{Hz}$ ，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



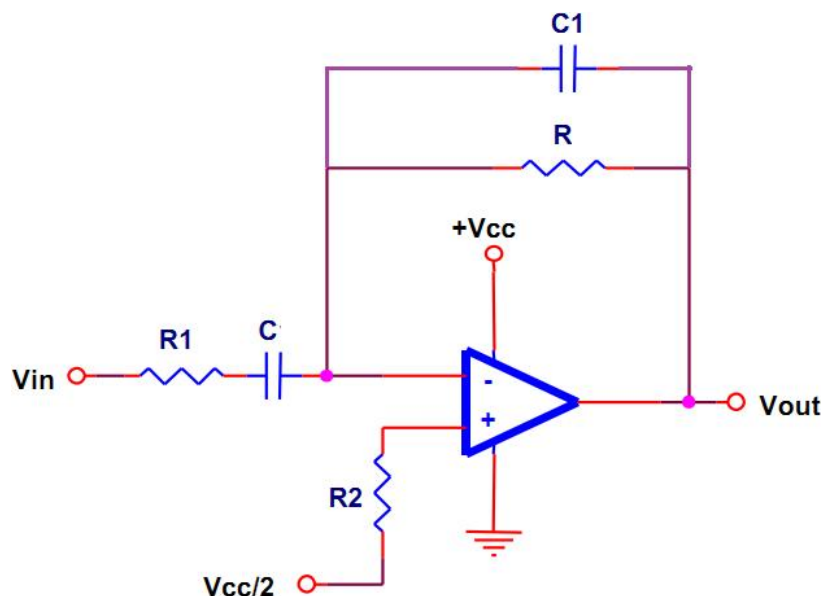


图 7 微分运算电路

基本关系式

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

◆ **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)  $t = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2 \times 500} = 1\text{ms}$

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

(4) 取  $C=100\text{nF}$ ，则

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

(5) 由

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

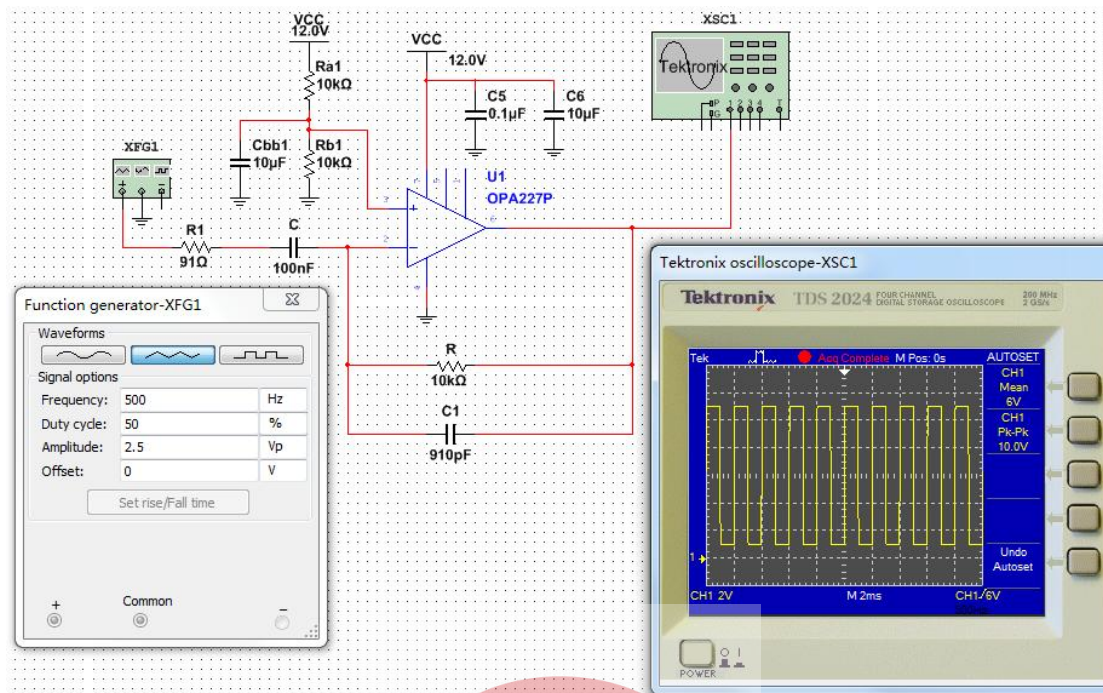
=

取系列电阻  $91\Omega$ ；

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

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

由计算参数所得原理图如下。



## 1.5 电压比较器电路

### 1.5.1 单限比较器

如果输入信号范围在零伏以上，可以不经隔直电容，直接和阈值电压比较，分为同相输入单限比较器和反相输入单限比较器。

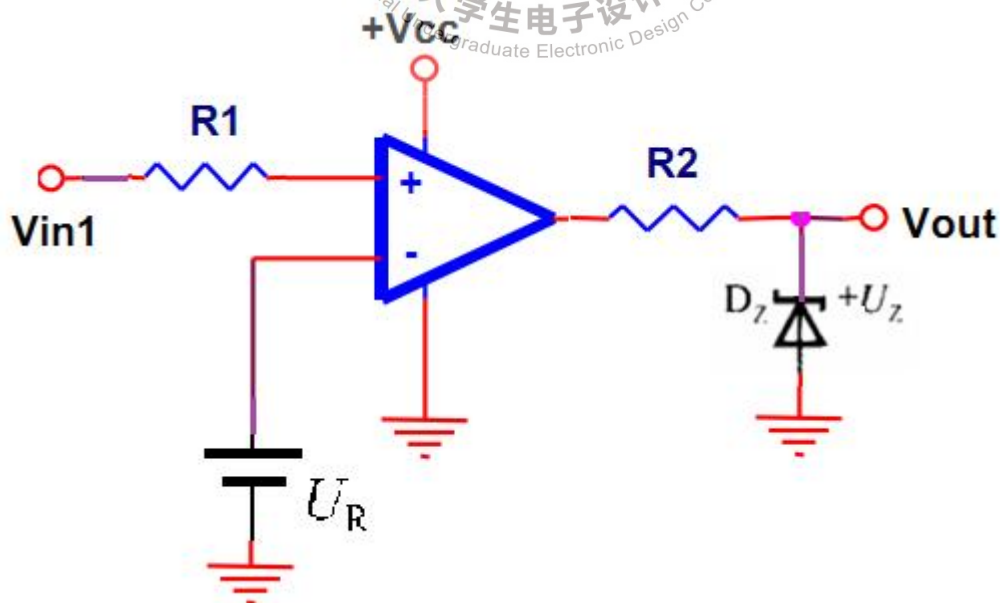


图 8 同向输入单限比较器

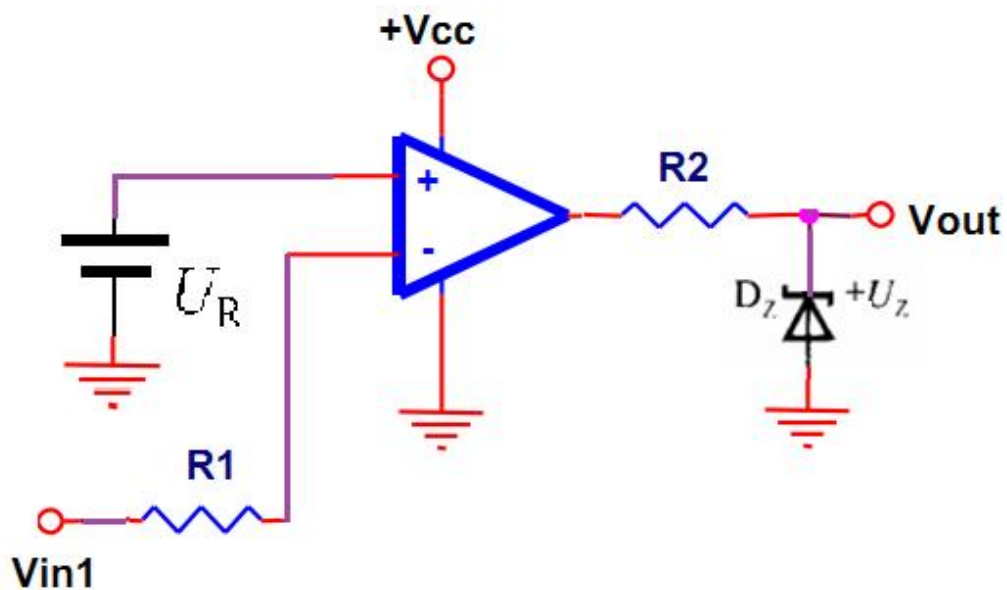


图 9 反向输入单限比较器

如果输入信号是交流信号，需经过隔直电容，加入偏置电压，然后和阈值电压比较，分为同相输入单限比较器和反相输入单限比较器。

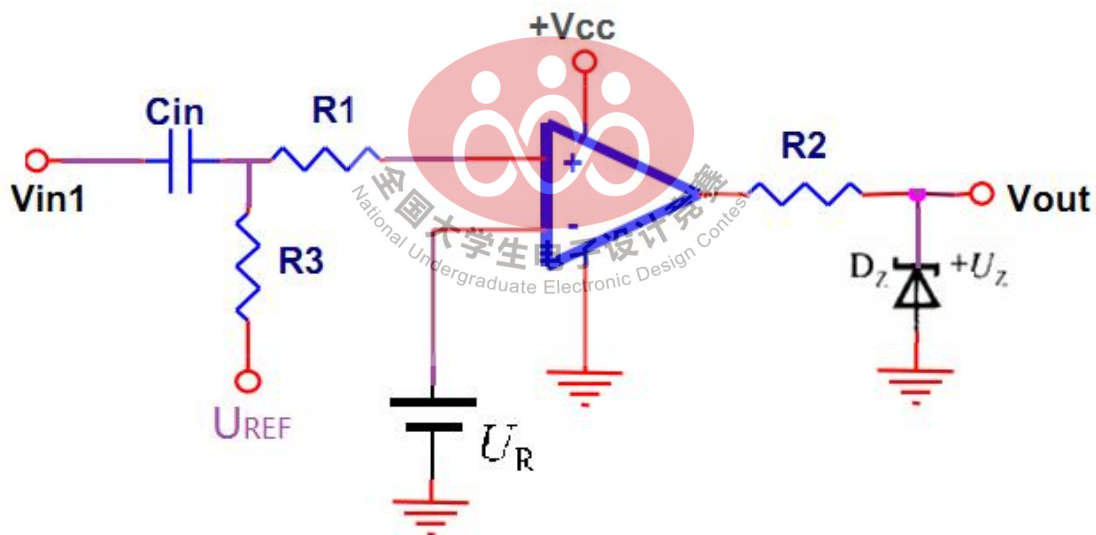


图 10 同向输入单限比较器（交流耦合）

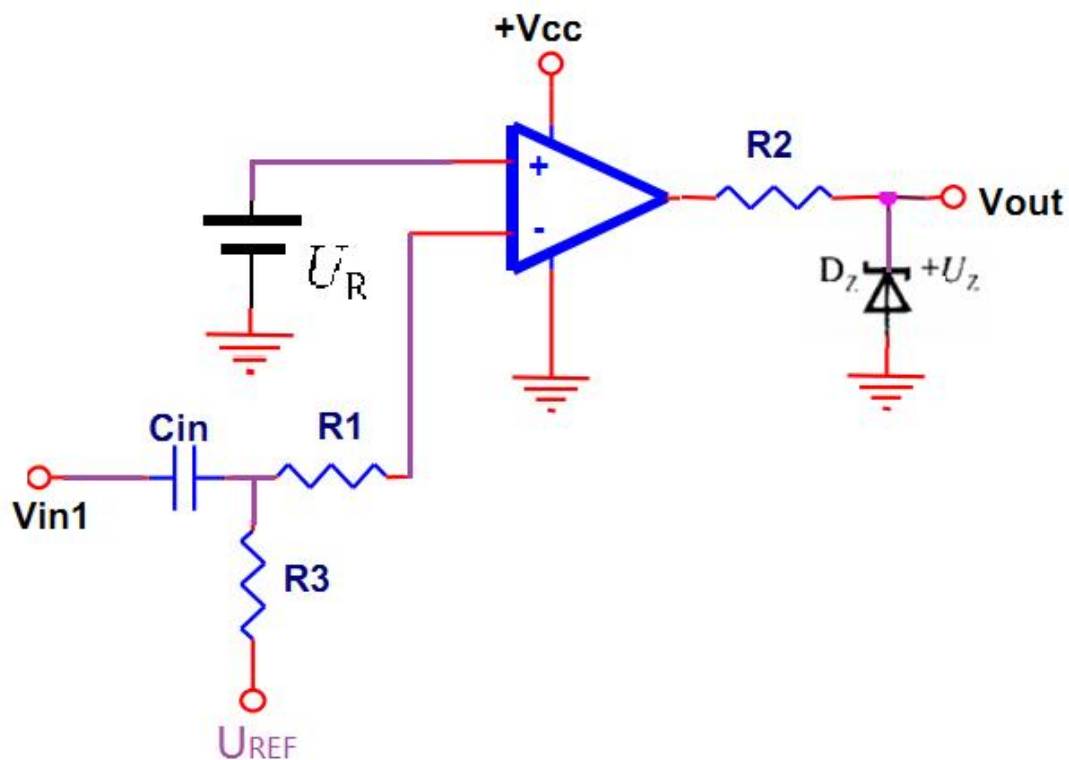


图 11 反向输入单限比较器（交流耦合）

### 1.5.2 滞回比较器

如果输入信号范围在零伏以上，可以不经过隔直电容，直接和阈值电压比较，分为同相输入单限比较器和反相输入单限比较器。

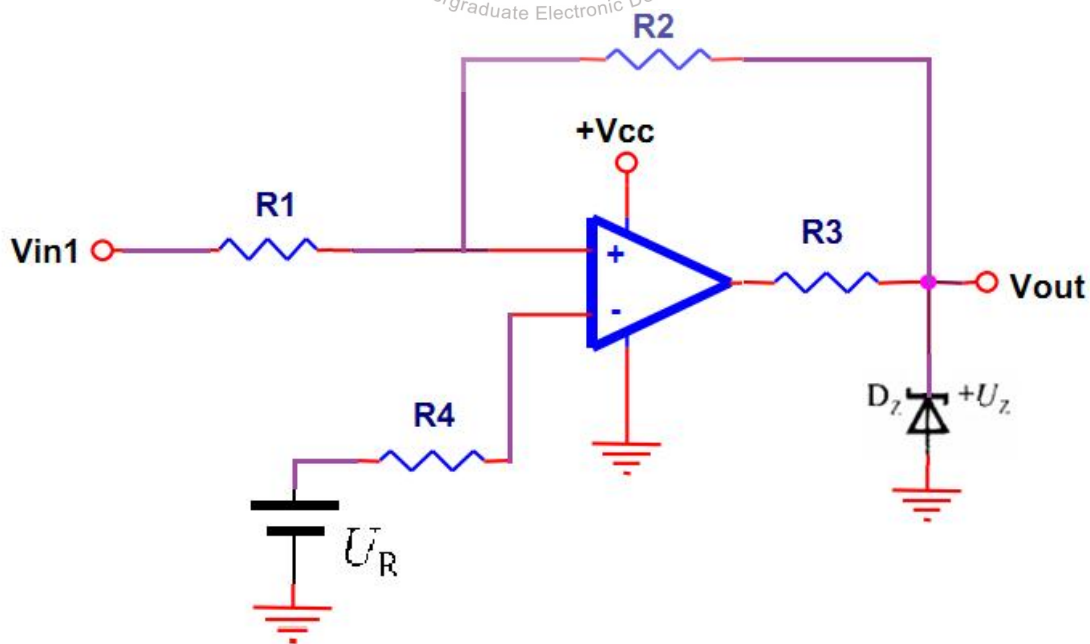


图 12 同向输入滞回比较器



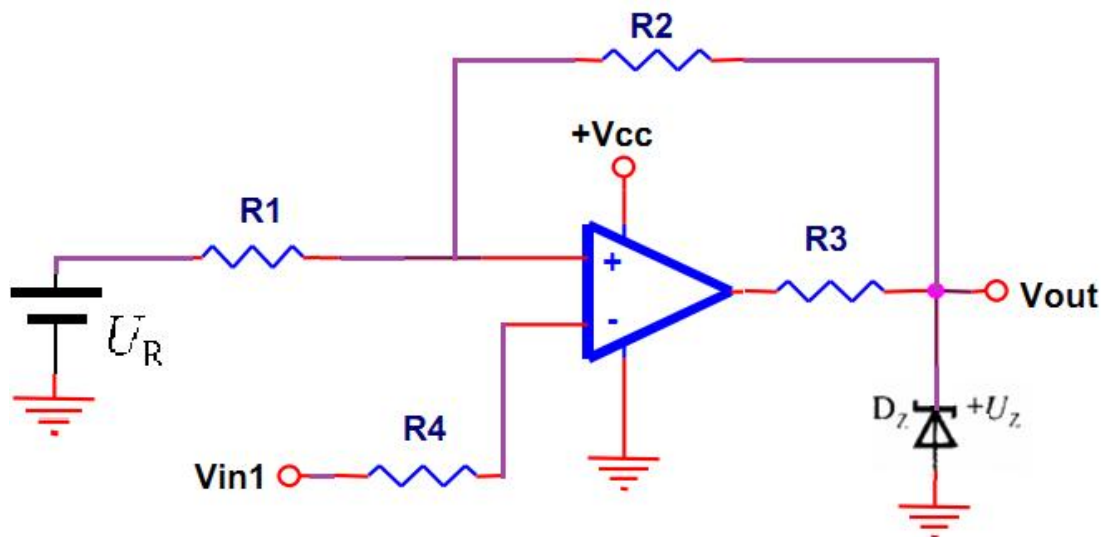


图 13 反向输入滞回比较器

如果输入信号是交流信号，需经过隔直电容，加入偏置电压，然后和阈值电压比较，分为同相输入单限比较器和反相输入单限比较器。

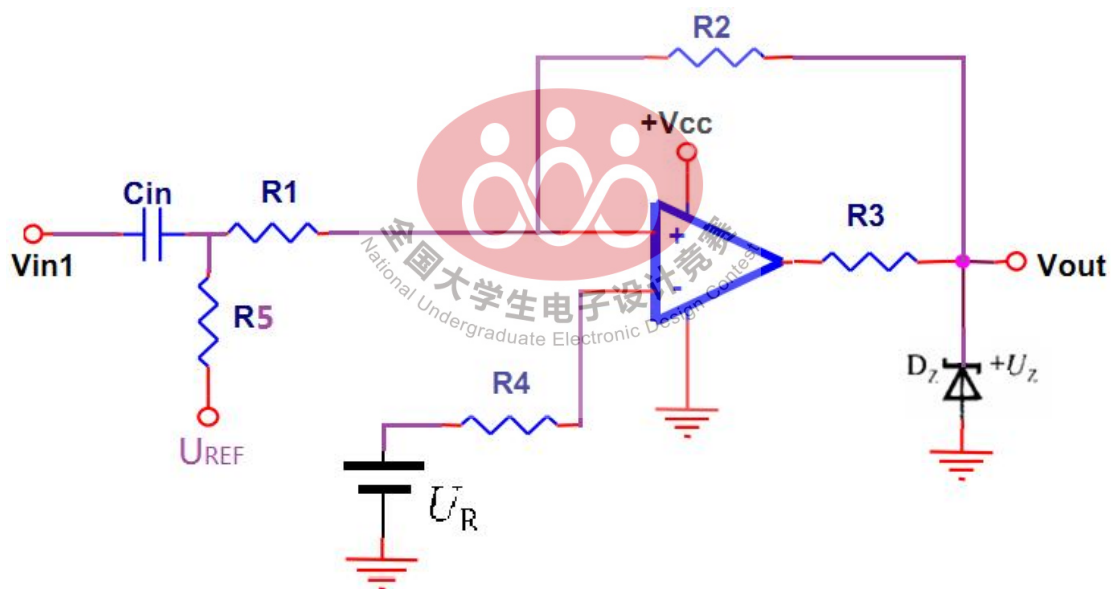


图 14 同向输入滞回比较器（交流耦合）

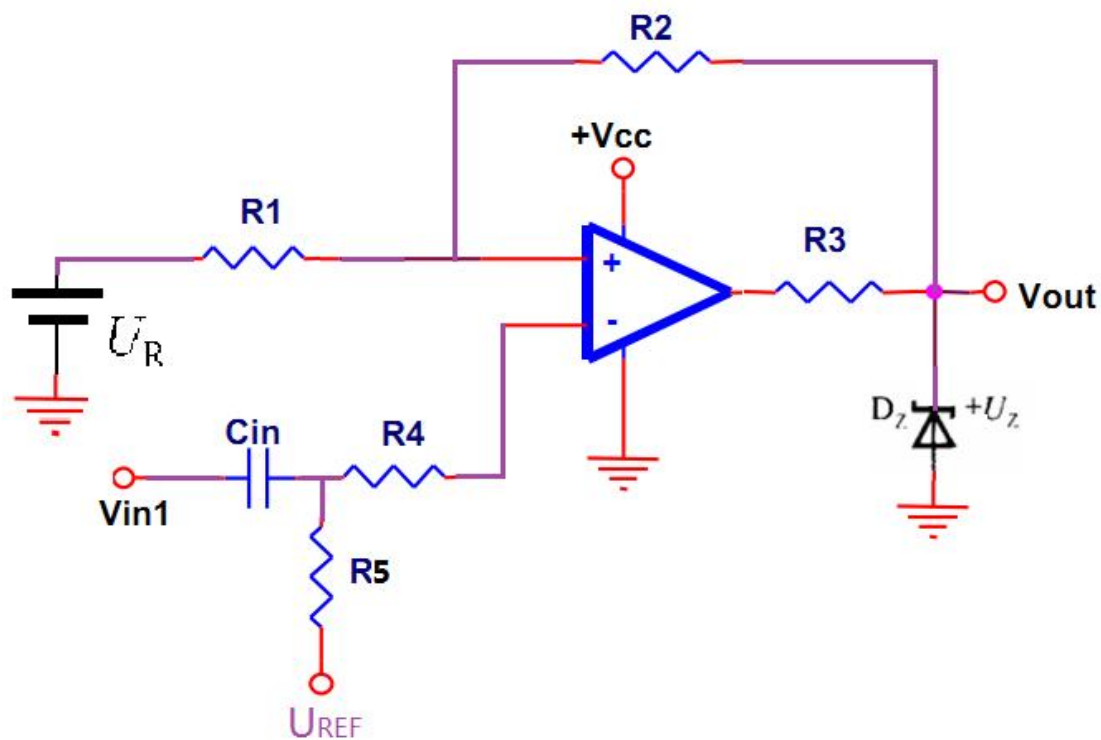


图 15 同向输入滞回比较器（交流耦合）

## 1.6 矩形波发生电路

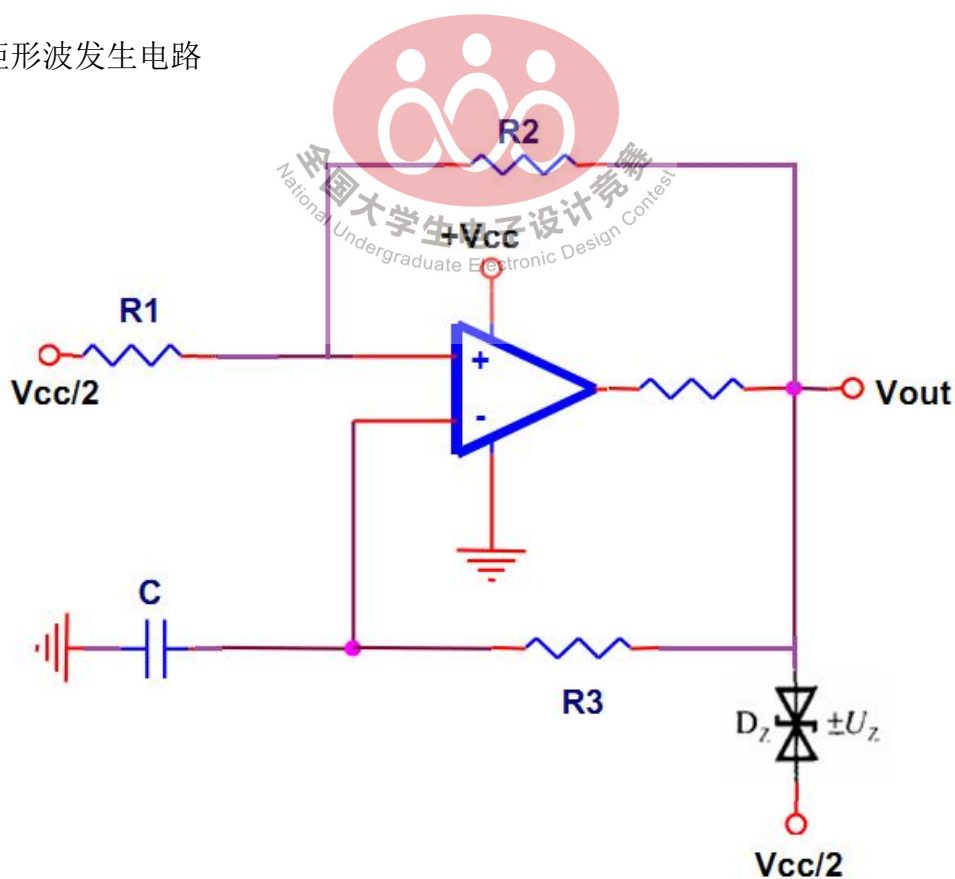


图 16 矩形波发生电路（电容接地）

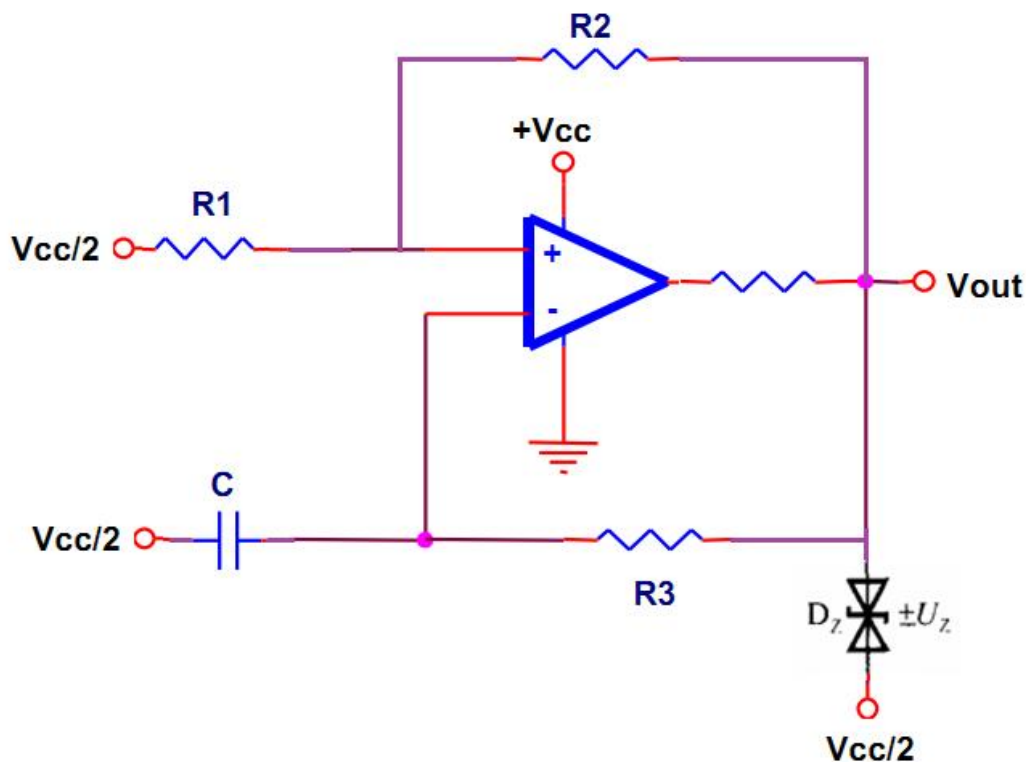


图 17 矩形波发生电路（电容接偏置电压）

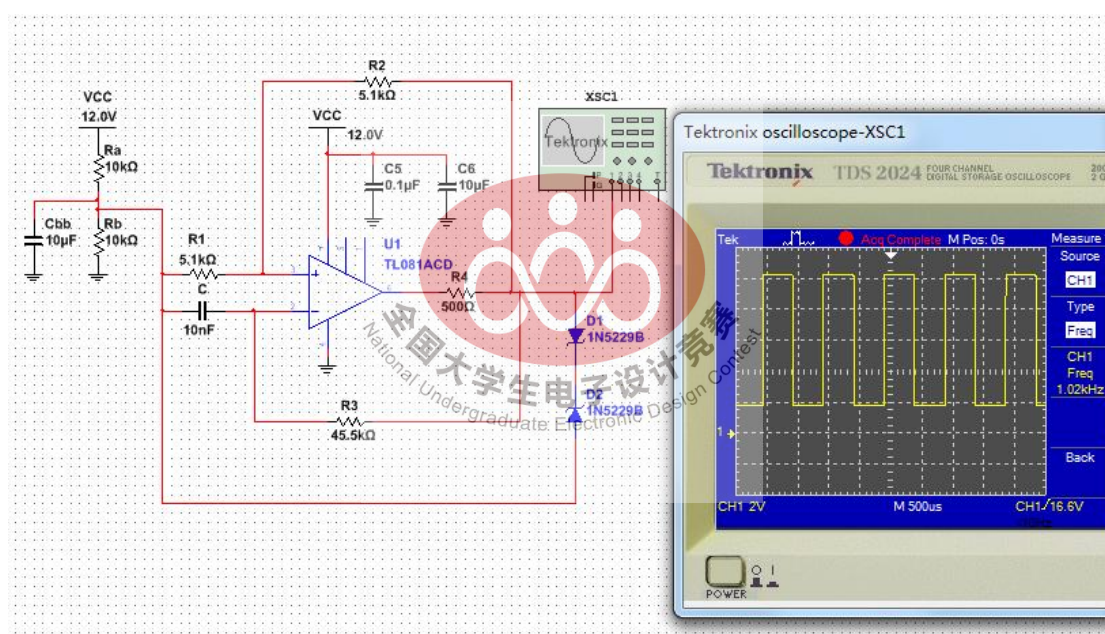
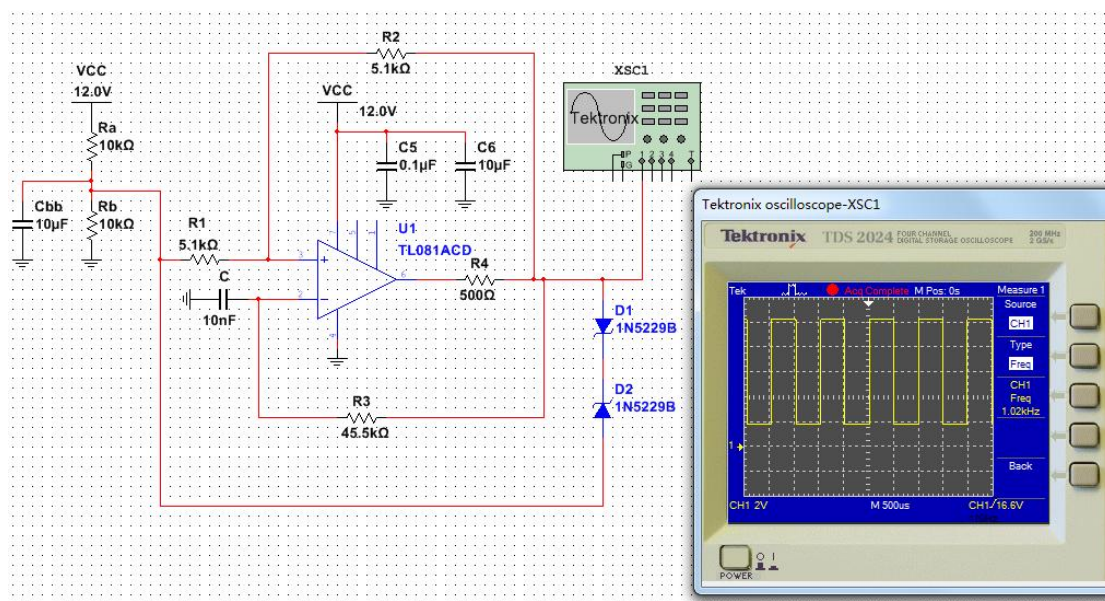
振荡周期  $T = T_1 + T_2 = 2R_3C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$

- ◆ 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  $C = 0.01\mu F$ ，令  $R_1 = R_2 = 5.1k$ ，则  $R_3 = 45.5k$
- (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  $I_Z = 20mA$ ，当电源电压为 12V 时，估算电阻

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

由计算参数所得原理图分别如下。



## 1.7 有源滤波电路

参数计算请参看《有源滤波器设计范例 V3.0（双电源电路设计）》，

$C_{in}$  为输入耦合电容远大于滤波用电容，同时需要考虑  $C_{in}$  与滤波电路输入电阻形成高通滤波电路，影响滤波特性。

### 1.7.1 低通滤波电路

#### 1.7.1.1 一阶低通滤波电路



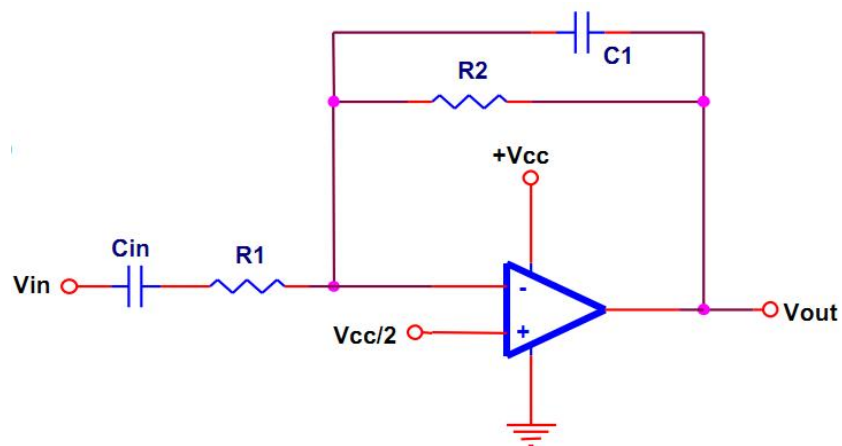


图 18 反相一阶低通滤波器

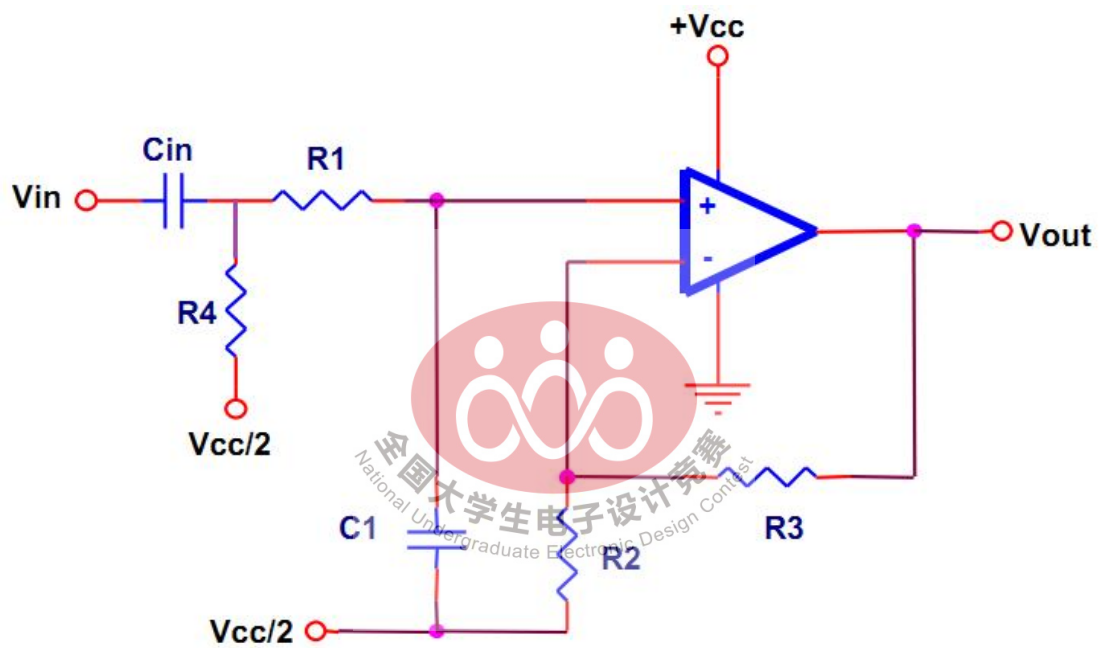


图 19 同相一阶低通滤波器（电容接偏置电压）

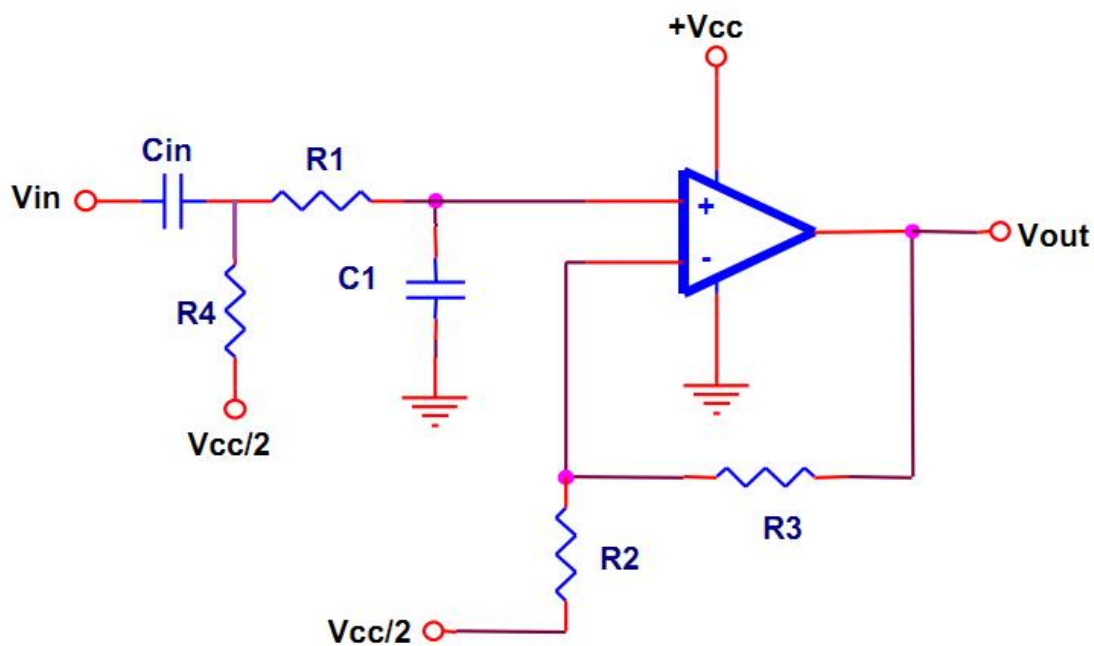


图 20 同相一阶低通滤波器（电容接地）

## 1.7.1.2 二阶有源低通滤波电路（VCVS）

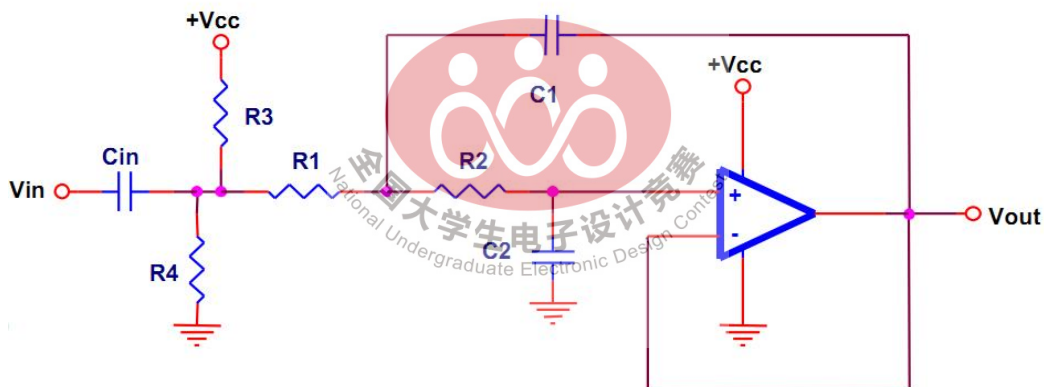


图 21 二阶有源低通滤波电路（VCVS）

## 1.7.1.3 二阶有源低通滤波电路（MFB）

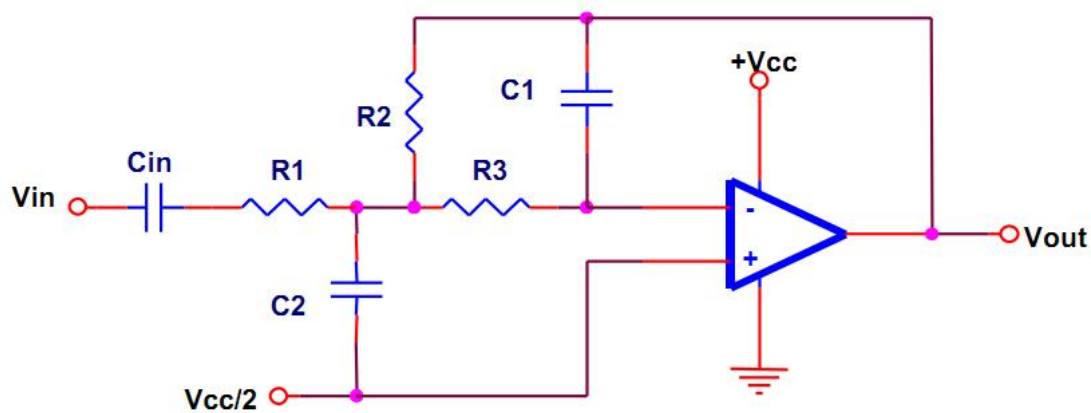


图 22 二阶有源低通滤波电路（MFB）

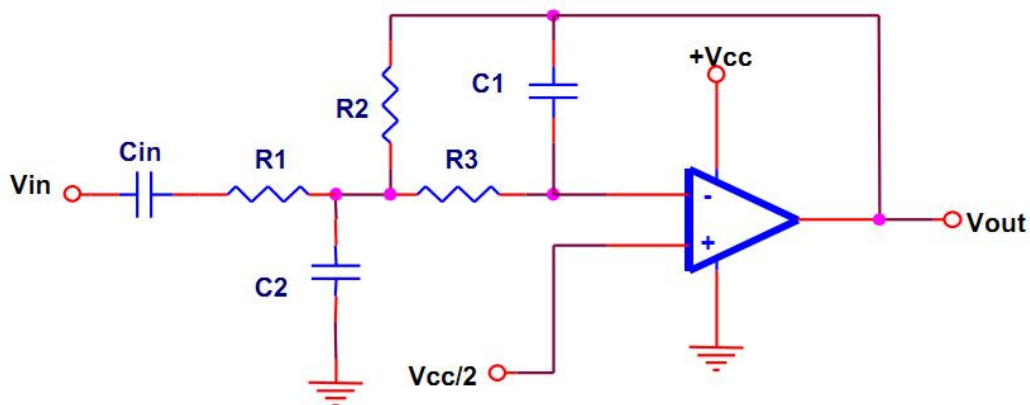


图 23 二阶有源低通滤波电路（MFB）

## 1.7.2 带通滤波电路

## 1.7.2.1 二阶有源带通滤波器（VCVS）

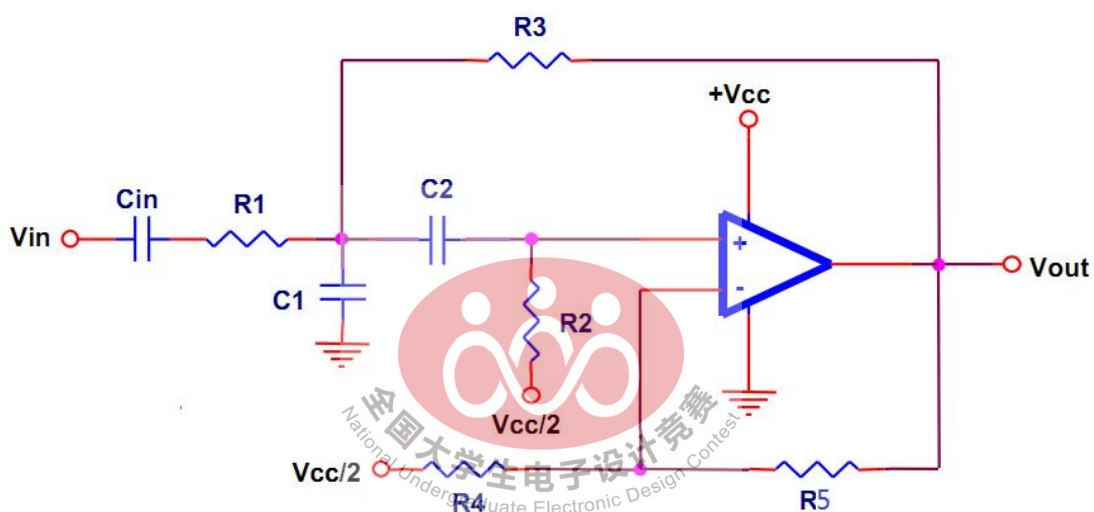


图 23 二阶有源带通滤波器（VCVS）

## 1.7.2.2 二阶有源带通滤波器（MFB）

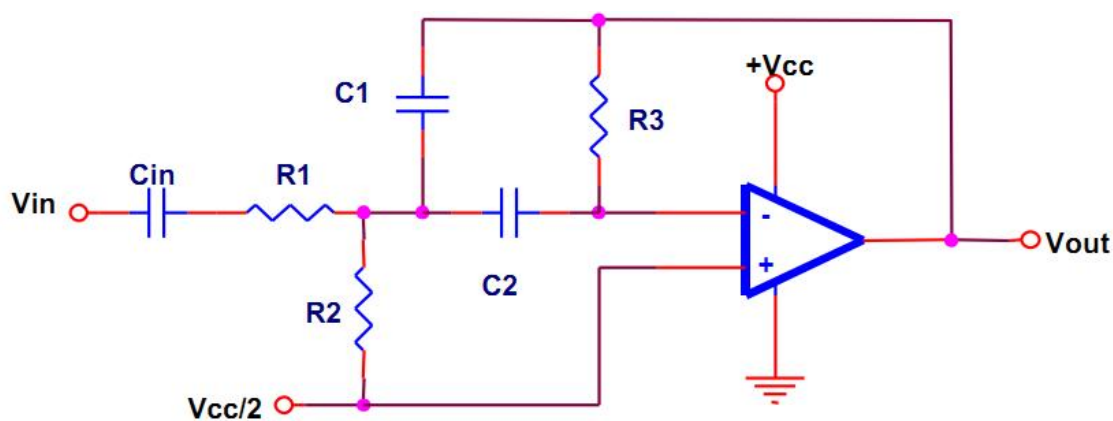


图 24 二阶有源带通滤波器（MFB）

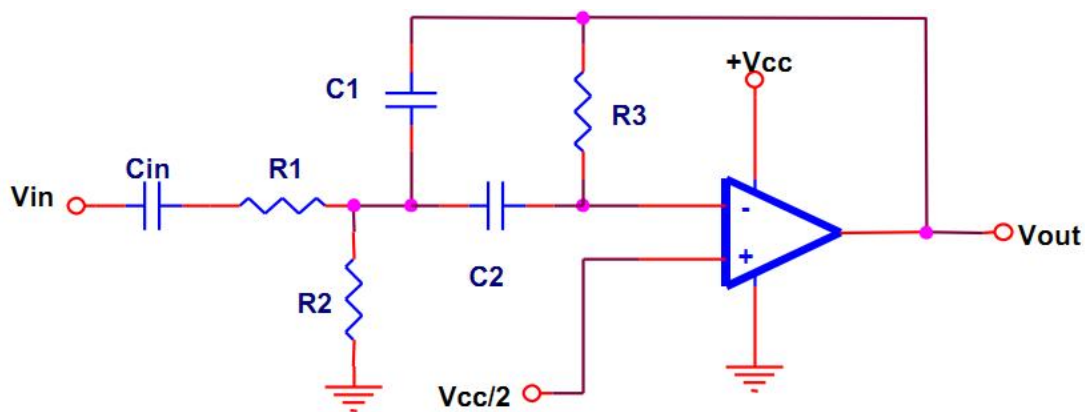


图 25 二阶有源带通滤波器（MFB）

## 1.7.3 高通滤波电路

## 1.7.3.1 一阶有源高通滤波器

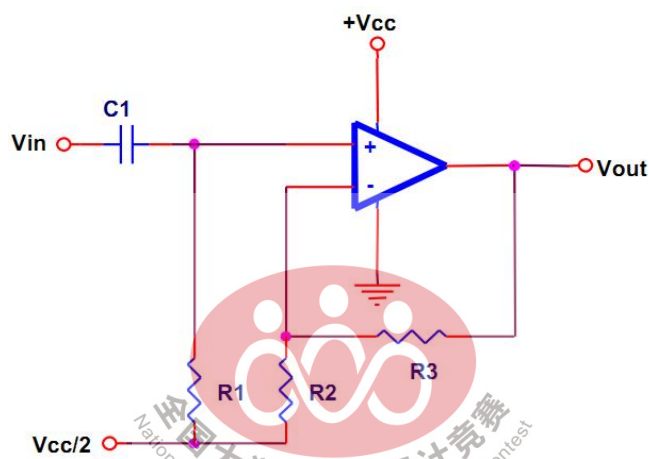


图 26 一阶有源高通滤波器

## 1.7.3.2 二阶有源高通滤波器（VCVS）

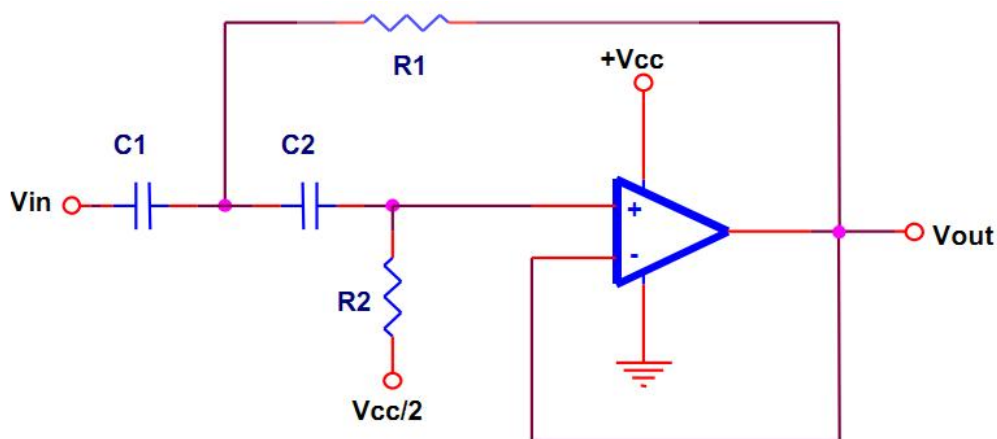


图 27 二阶有源高通滤波器（VCVS）

## 1.7.3.3 二阶有源高通滤波器（MFB）



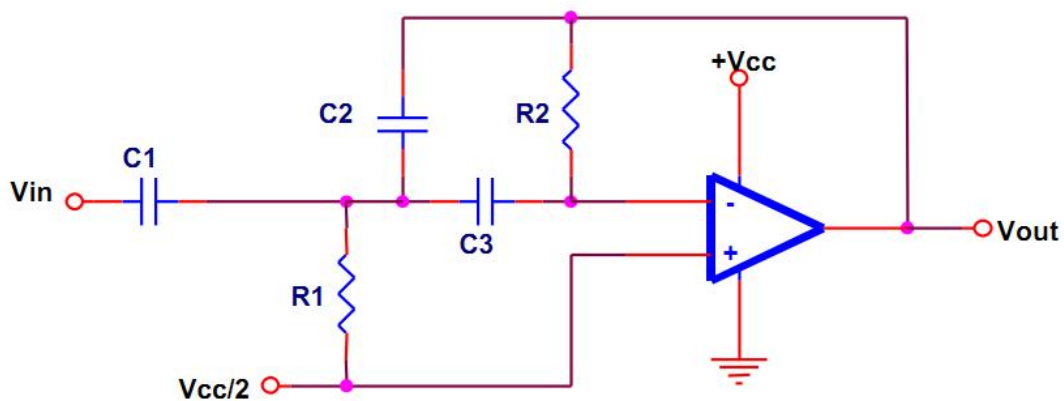


图 28 二阶有源高通滤波器（MFB）

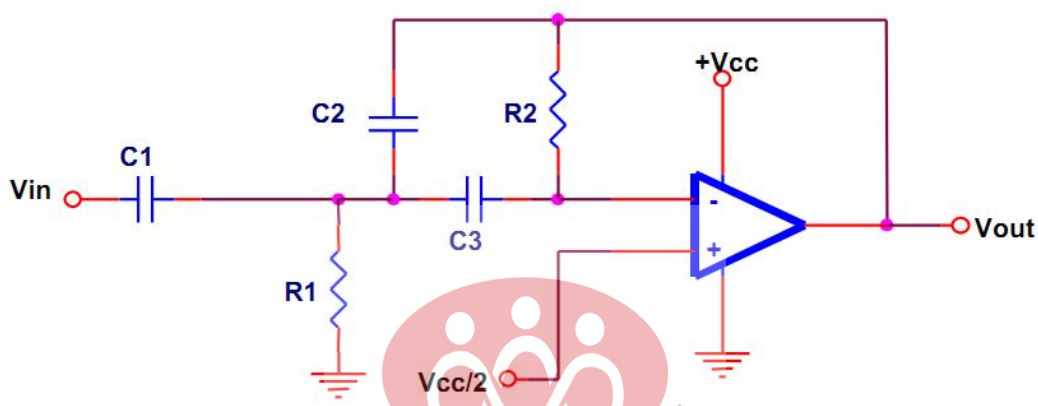


图 29 二阶有源高通滤波器（MFB）

## 1.7.4 全通滤波电路

## 1.7.4.1 超前电路

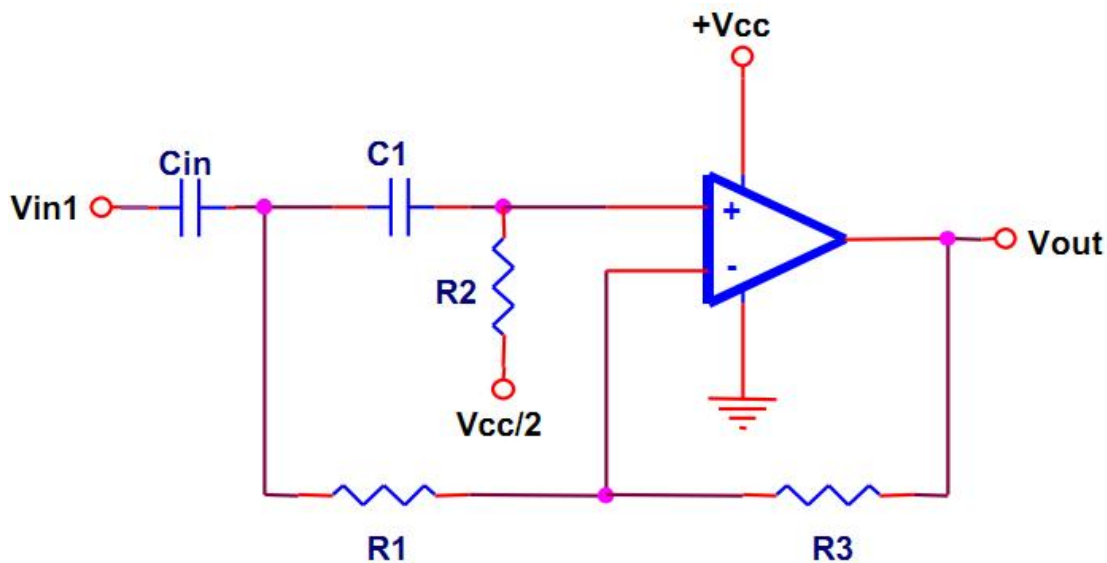


图 30 全通滤波电路（超前电路）

## 1.7.4.2 滞后电路

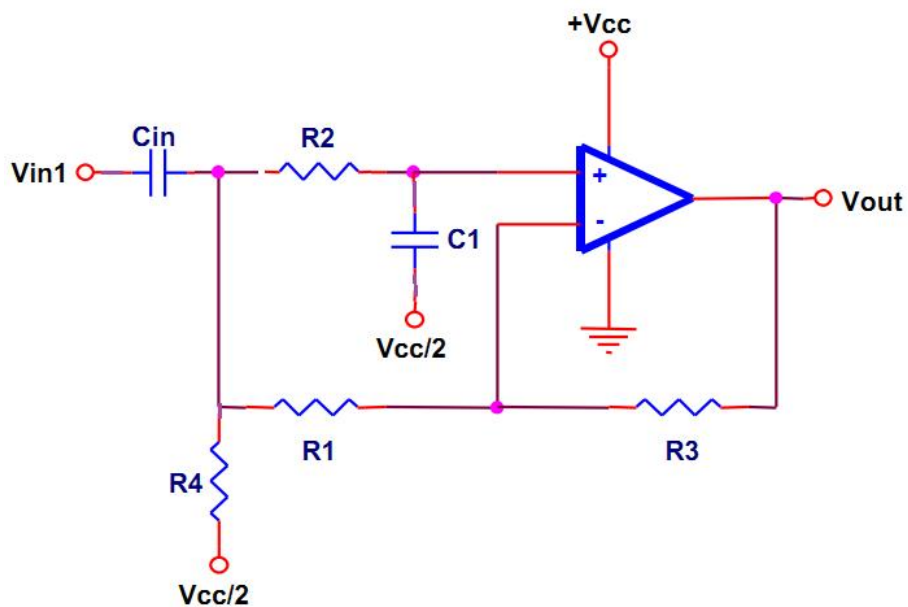


图 31 全通滤波电路（滞后电路）

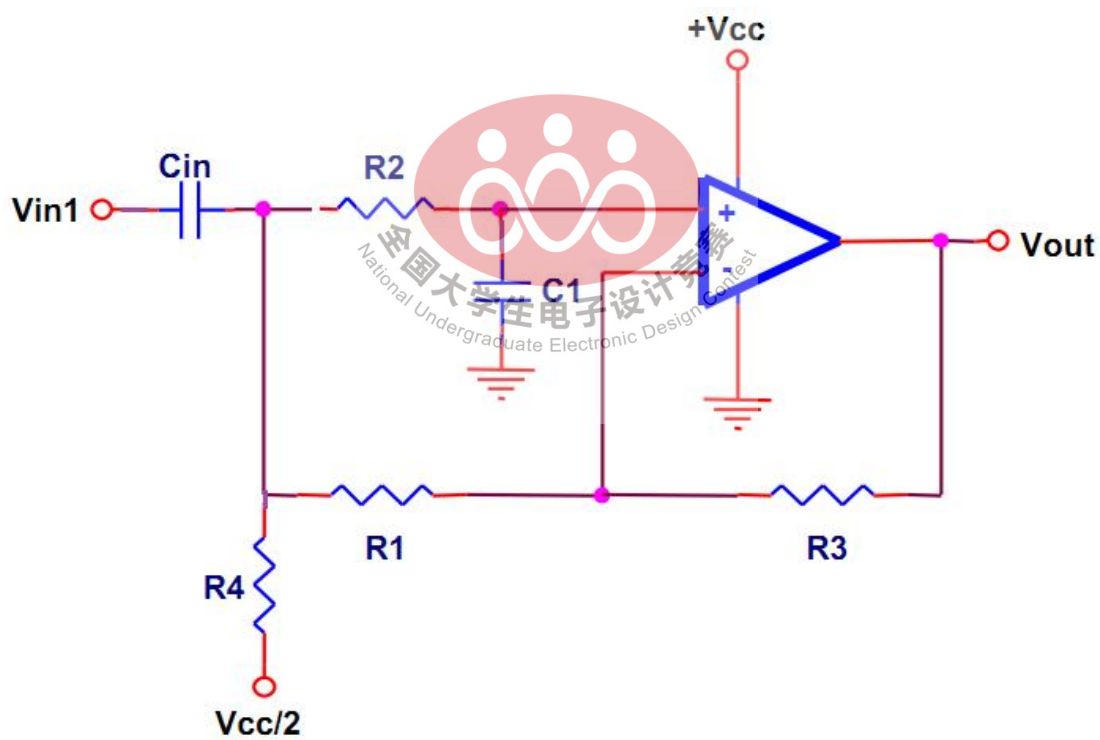


图 32 全通滤波电路（滞后电路）