

第7章 集成运算放大电路

7.1 集成运算放大器的组成、传输特性

7.2 集成运算放大器的分析方法

7.3 集成运放的基本运算电路

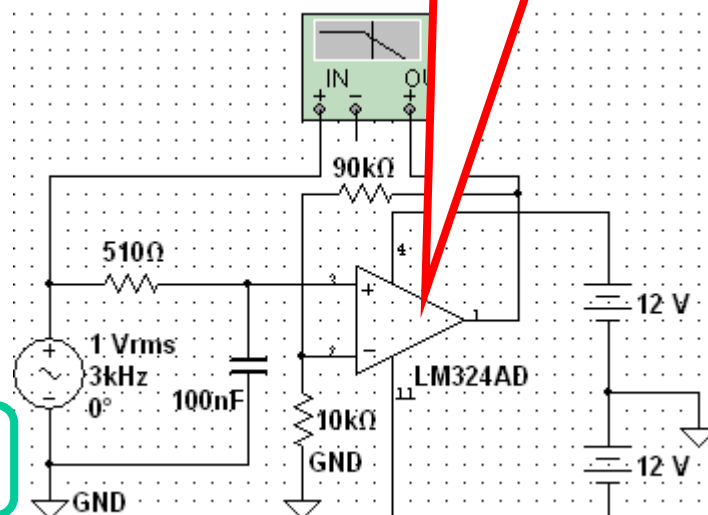
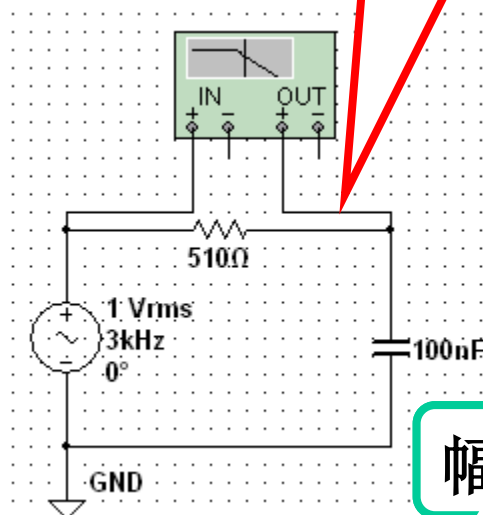
7.4 电压比较器

7.5 集成运放应用电路举例

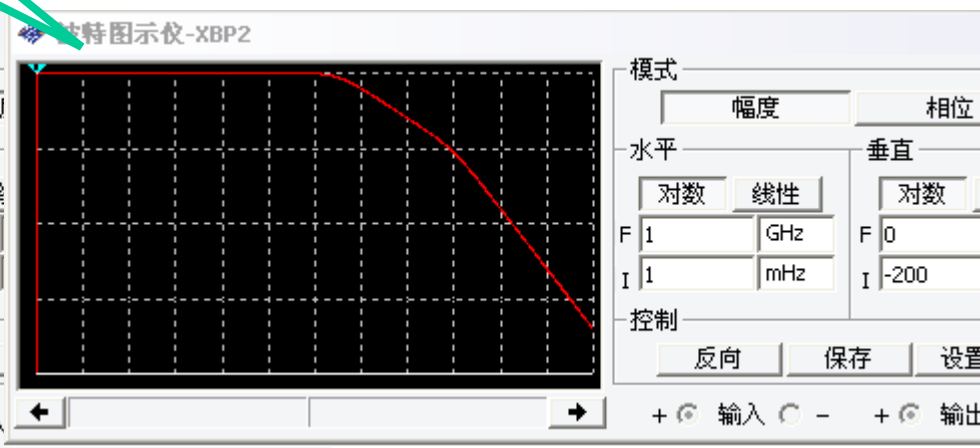
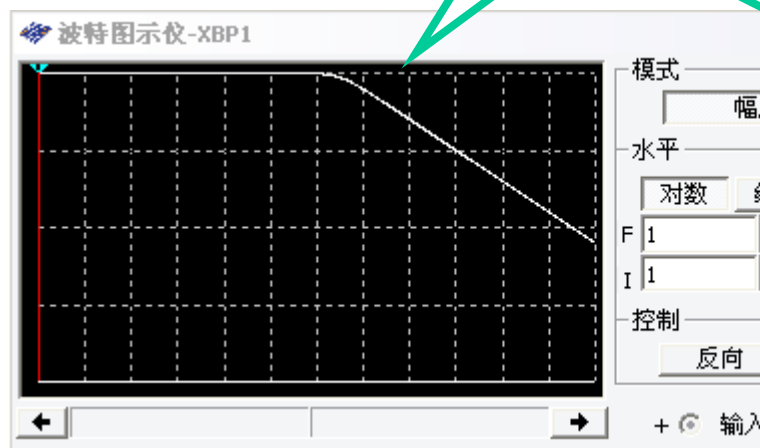
【引例】

无源滤波器

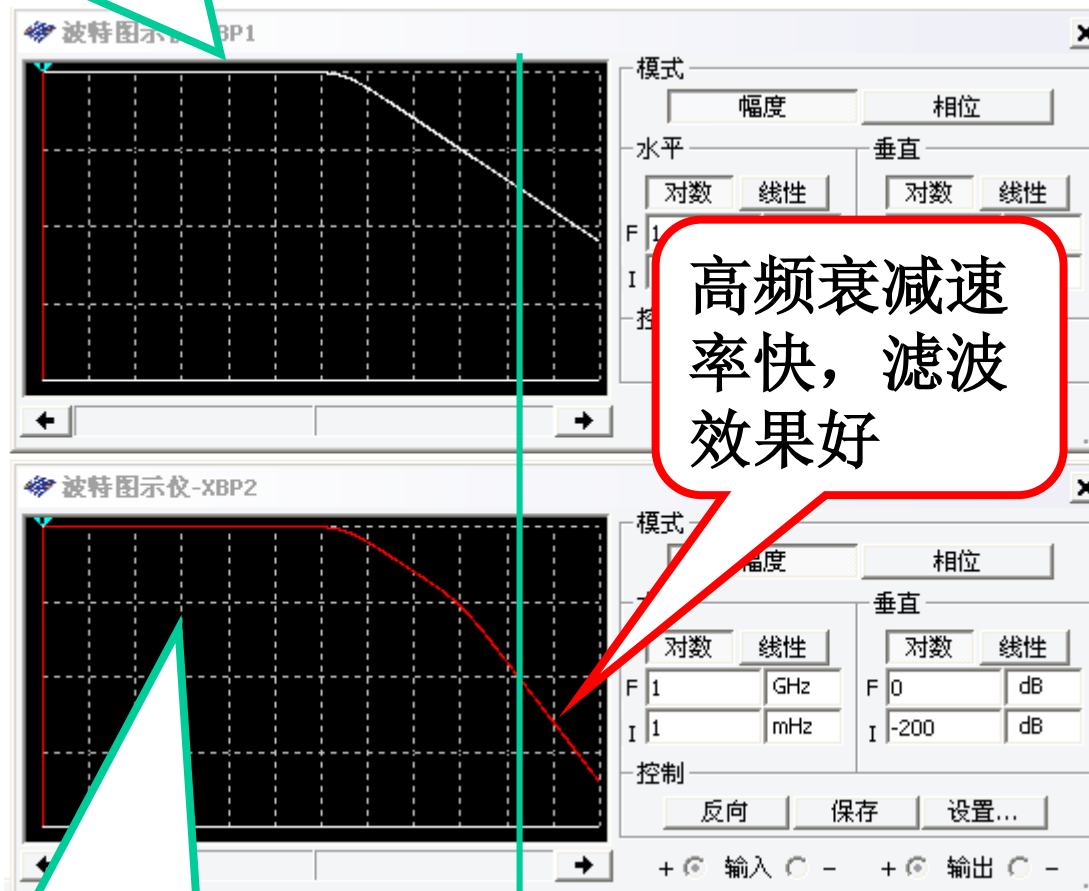
有源滤波器



幅频特性



无源滤波器的幅频特性



高频衰减速率快，滤波效果好

有源滤波器的幅频特性

集成运算放大器为什么具有这样的优点？

7.1. 集成运算放大器的组成、传输特性及主要参数

集成运算放大器：

集成运算放大器是一种具有很高放大倍数的多级直接耦合放大电路，是由许多晶体管组成的集成电路。

早期主要用于放大信号，完成信号的加法，积分，微分等数学运算因而被称为运算放大器。

集成电路：将整个电路的各个元件做在一个半导体基片上。

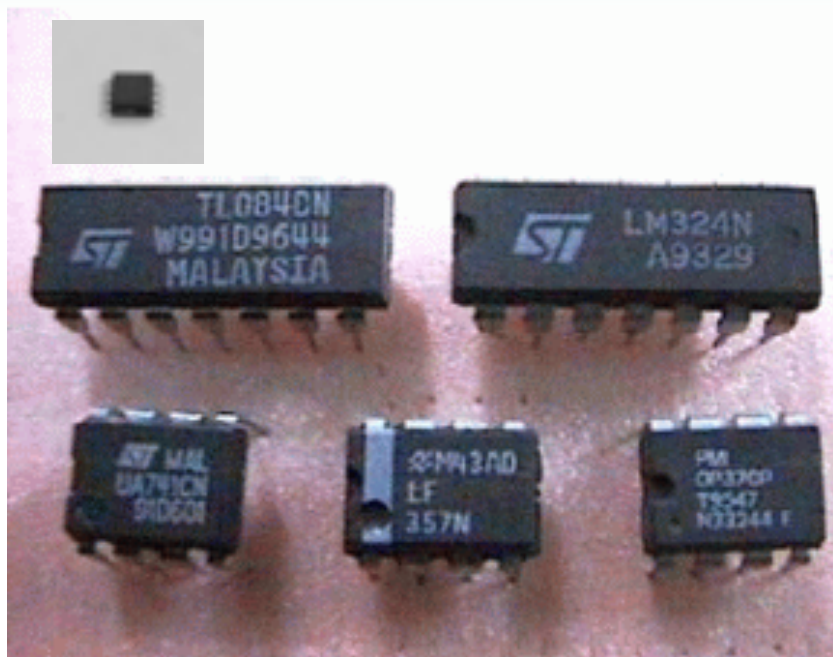


特点：体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、价格低。

集成运算放大器的特点：

1. 元器件参数的一致性和对称性好
2. 电阻的阻值受到限制，大电阻常用晶体管恒流源代替，电位器需外接。
3. 电感、电容不易集成，常采用外接形式。
4. 二极管多用晶体管的发射结代替。



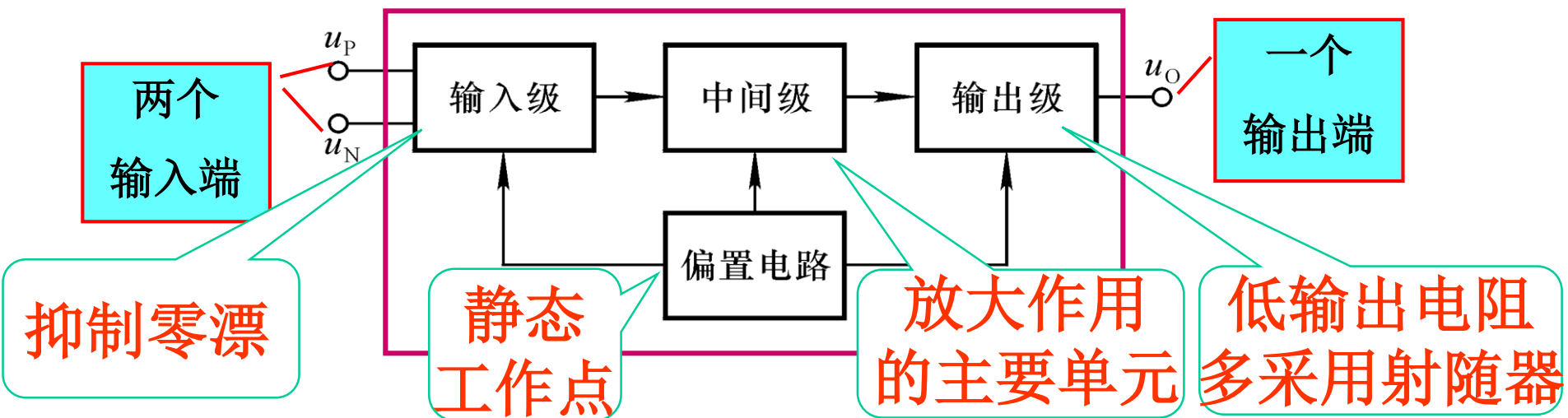


随着集成电路技术的发展，制造集成电路的成本越来越低，使集成运算放大器的应用越来越广泛。

运算放大器的实际应用

- (1) 信号的运算电路 → 比例、加、减、对数、指数、积分、微分等运算。
- (2) 信号的处理电路 → 有源滤波器、精密整流电路、电压比较器、采样—保持电路。
- (3) 信号的产生电路 → 产生正弦波、方波、锯齿波等波形。

1. 集成运算放大器的组成 (内部电路)

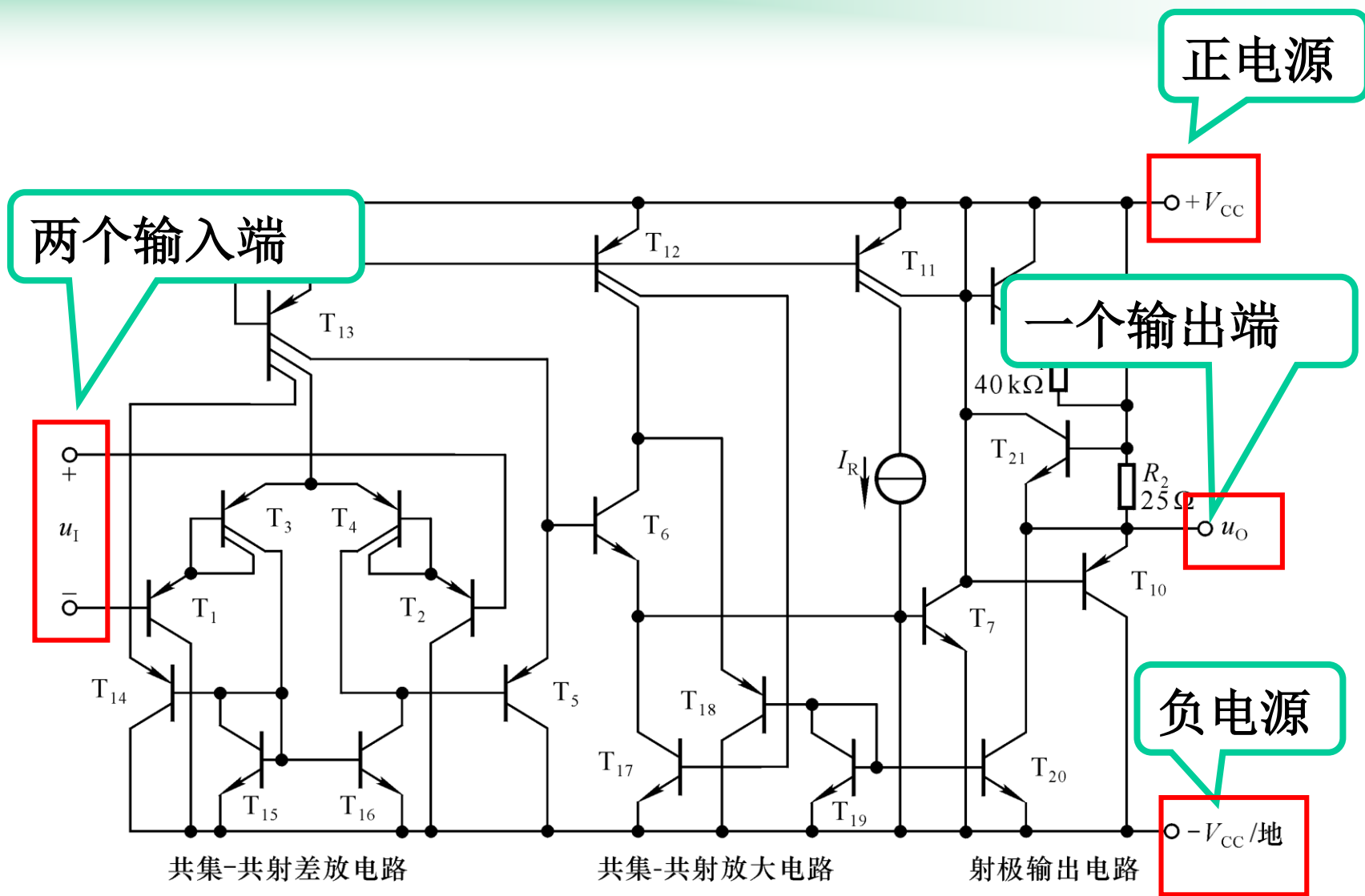


输入级： 输入电阻高，能减小零点漂移和抑制干扰信号，多采用差分放大电路。

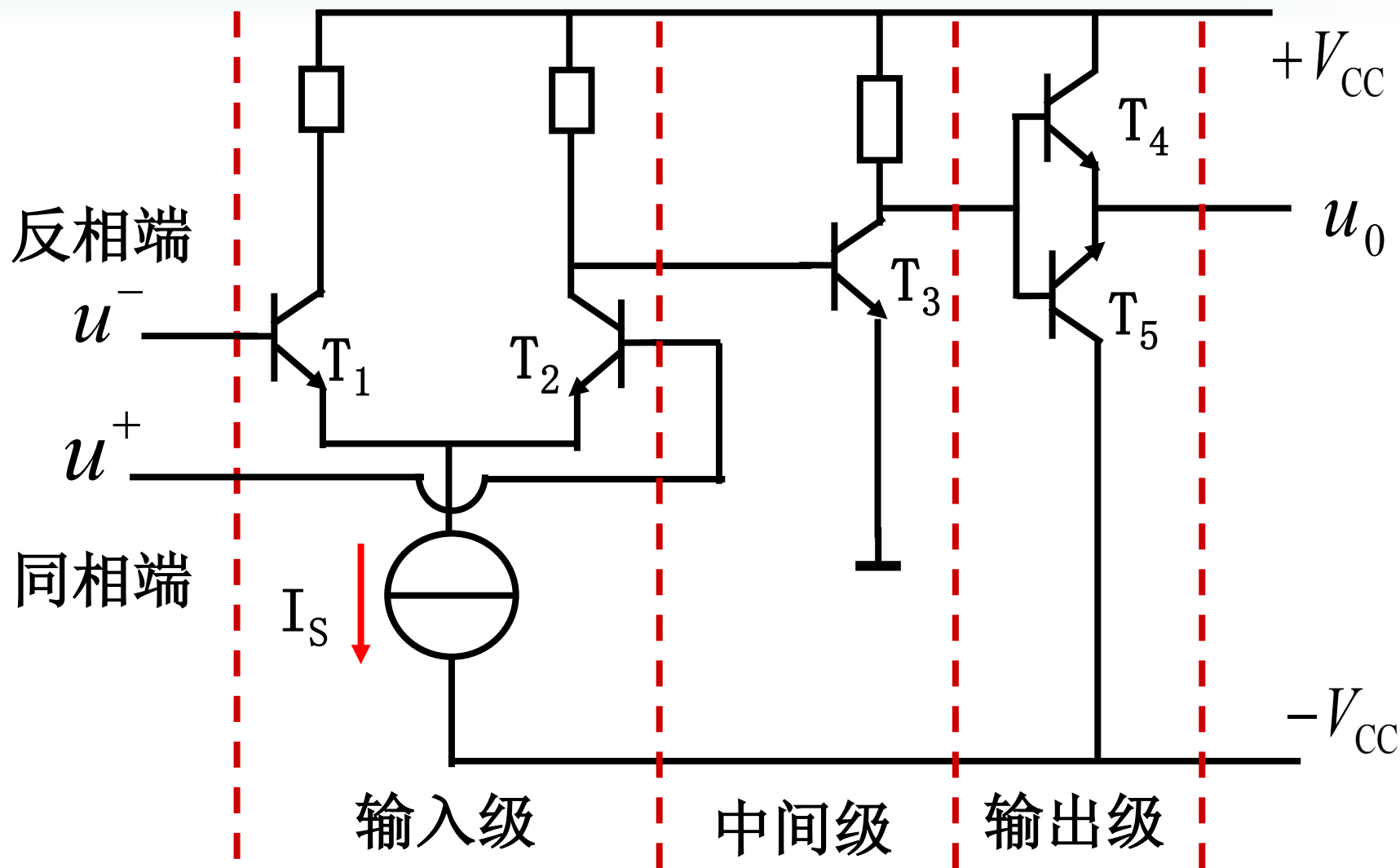
中间级： 要求电压放大倍数高。常采用共发射极放大电路构成。

输出级： 与负载相接，要求输出电阻低，带负载能力强，一般由互补功率放大电路或射极输出器构成。

偏置电路： 为各级放大电路设置合适的静态工作点，一般由各种恒流源等电路组成。



集成运放LM324内部结构



在应用集成运放时，需要知道它的管脚用途以及放大器的主要参数，无需关注内部电路。

运算放大器的表示符号

8个管脚的运放 LM358

2脚：反相输入端

3脚：同相输入端

1脚：输出端

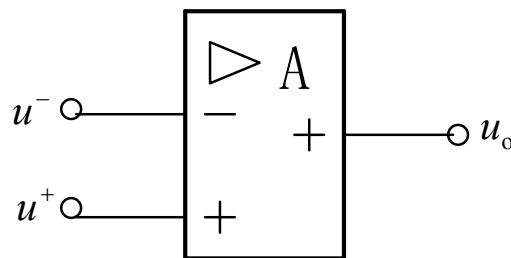
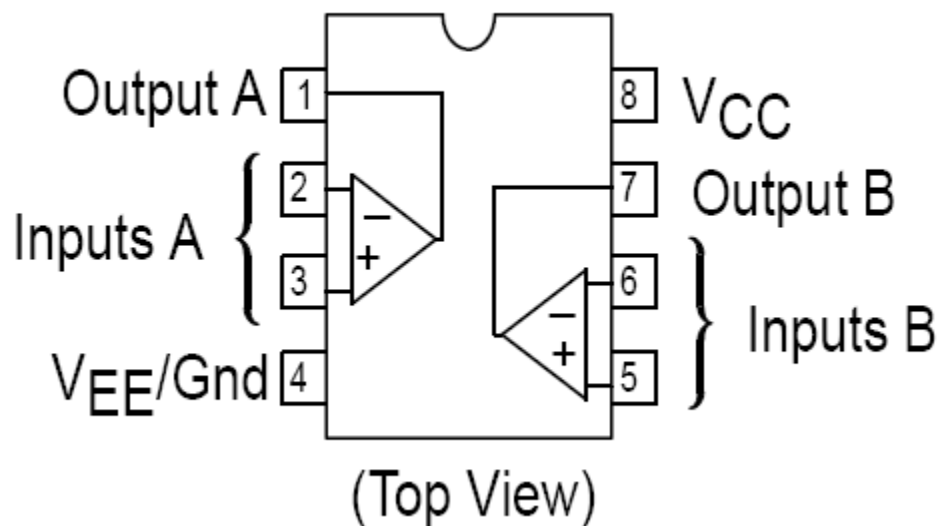
8脚、4脚：正负电源端

5脚：同相输入端

6脚：反相输入端

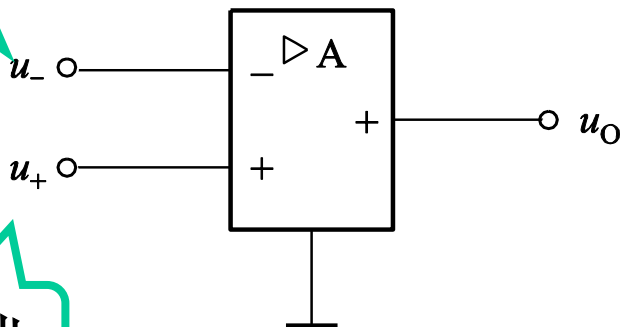
7脚：输出端

在电路符号图中一般不画出直流电源端。



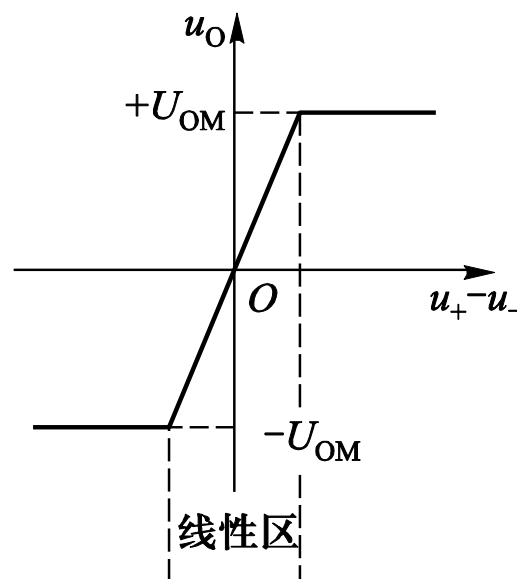
2. 电压传输特性

反相端



同相端

(a) 电路

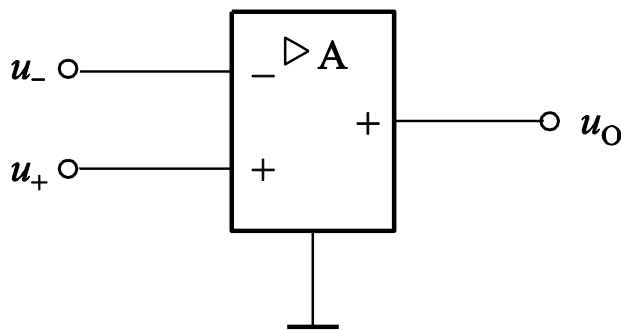


(b) 电压传输特性

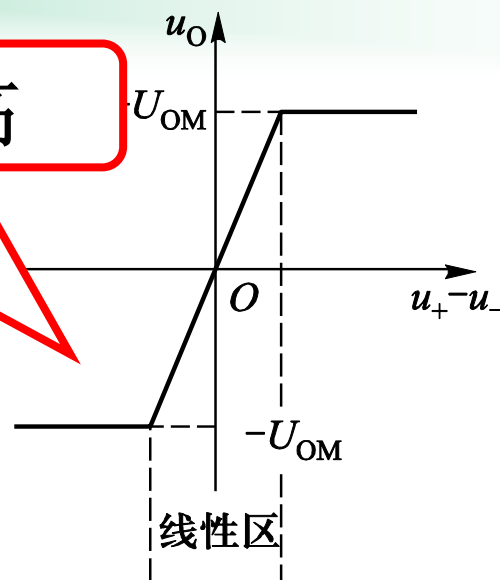
输出电压 u_O 与输入电压 $u_+ - u_-$ 之间的关系，称为电压传输特性。

可知，集成运放工作区域分为线性区和非线性区。

线性区很窄，放大倍数高



(a) 电路



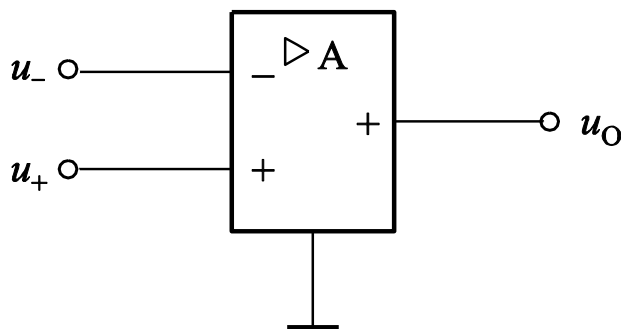
(b) 电压传输特性

在**线性区**，输出电压与输入电压之间是线性关系，即

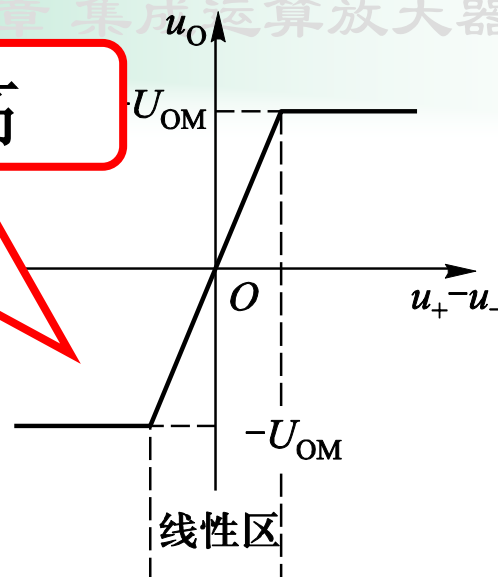
$$u_o = A_{u0}(u_+ - u_-) \quad A_{u0} \text{ 是开环差模放大倍数}$$

由于 A_{u0} 高达几十万倍，所以集成运放工作在线性区时的最大输入电压 $(u_+ - u_-)$ 的数值仅为几十~一百多微伏。

线性区很窄，放大倍数高



(a) 电路



(b) 电压传输特性

在非线性区，输出电压与输入电压不是线性关系，即

$$u_O = \pm U_{OM}$$

$(u_+ - u_-)$ 的数值大于一定值时，集成运放的输出不是 $+U_{OM}$ ，就是 $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。

3. 主要参数

(1) 开环电压放大倍数 A_{uo}

是指运放的输出端与输入端之间没有外接元件（**无负反馈**）时的放大倍数，一般实际运放的开环电压放大倍数为

$$A_{uo} \approx 10^4 \sim 10^7$$

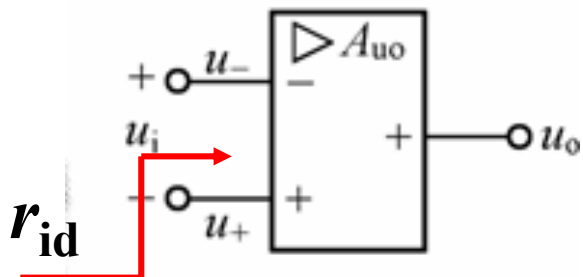
(2) 最大输出电压 U_{OM}

是指在不失真的情况下输出的最大电压，此电压一般约等于正、负电源的电压。即

$$U_{OM} \approx \pm V_{CC}$$

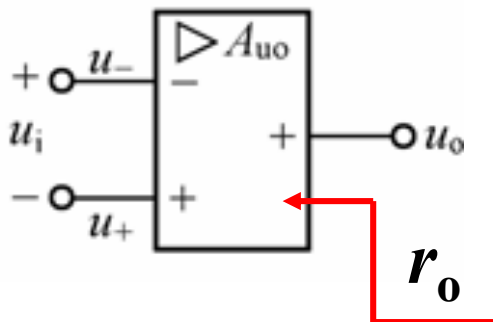
(3) 输入电阻 r_{id}

运放的输入电压和输入电流之比



通常为几兆欧。

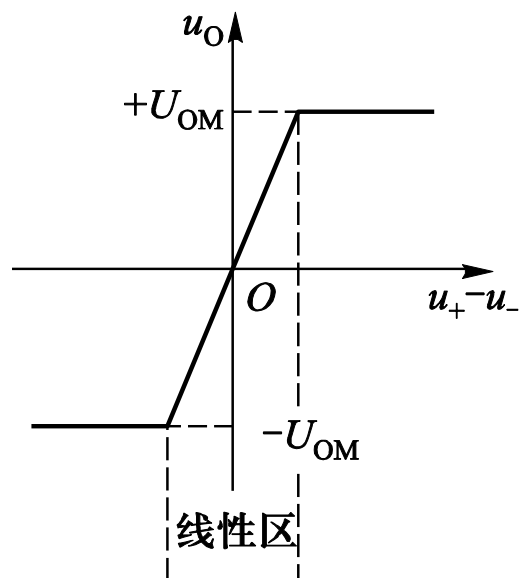
(4) 输出电阻 r_o



通常为几十欧。

7.2 集成运算放大器的分析方法

1. 集成运放工作在线性区的分析方法

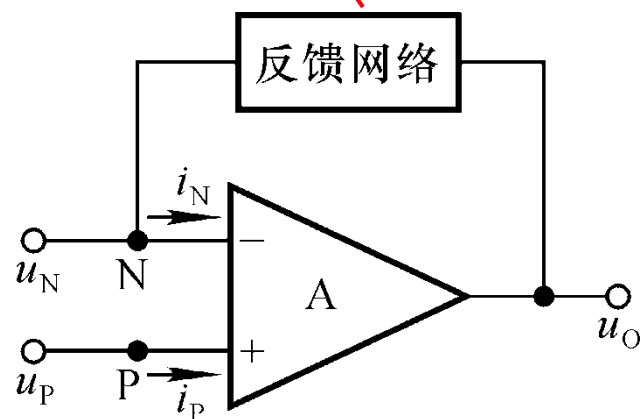


(b) 电压传输特性

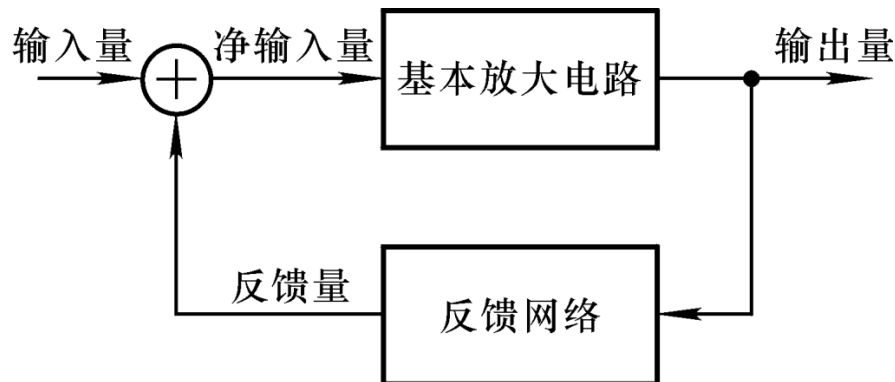
$$u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$$

电路特征：引入负反馈。

无源网络

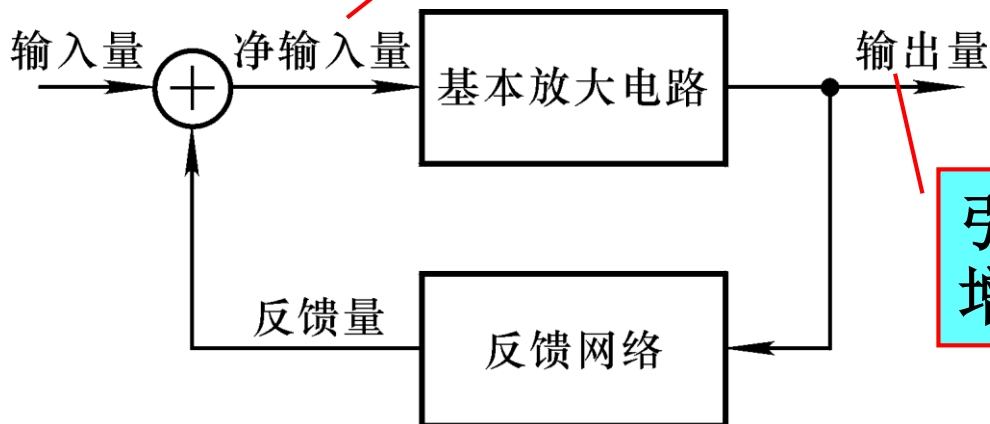


1. 什么是反馈？



放大电路输出量的一部分或全部通过一定的方式引回到输入回路，影响输入，称为反馈。

2. 正反馈和负反馈



引入反馈后其变化是增大？
还是减小？

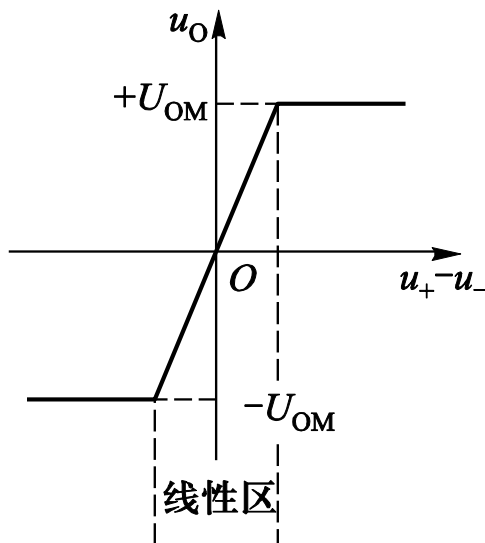
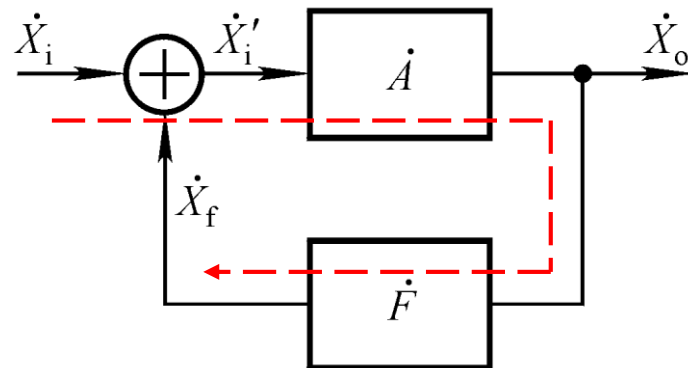
引入反馈后其变化是
增大？还是减小？

从反馈的结果来判断，凡反馈的结果使输出量的变化减小的为负反馈，否则为正反馈；

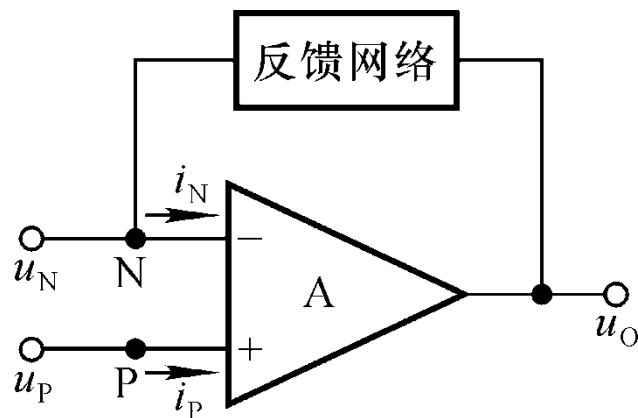
或者，凡反馈的结果使净输入量减小的为负反馈，否则为正反馈。

2. 正反馈和负反馈

“看反馈的结果”，即净输入量是被增大（正反馈）还是被减小（负反馈）。



(b) 电压传输特性



7.2 集成运算放大器的分析方法

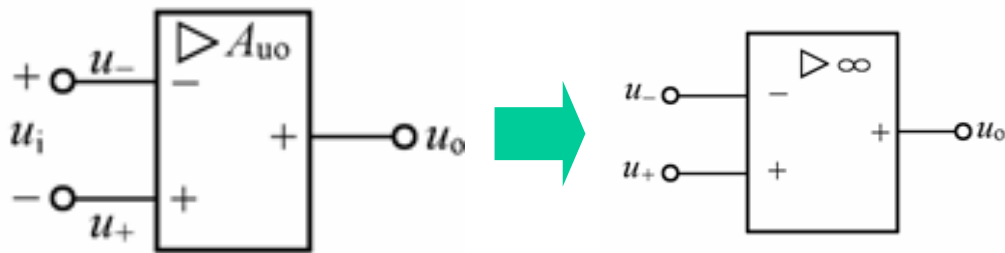
1. 集成运放工作在线性区的分析方法

(1) 集成运放理想化条件

① $A \rightarrow \infty$

② $r_i \rightarrow \infty$

③ $r_o \rightarrow 0$

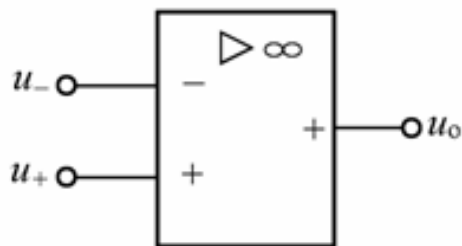


(2) 集成运放的分析依据

① 输入端虚短 ② 输入端虚断

③ 输入端虚地

① 输入端虚短



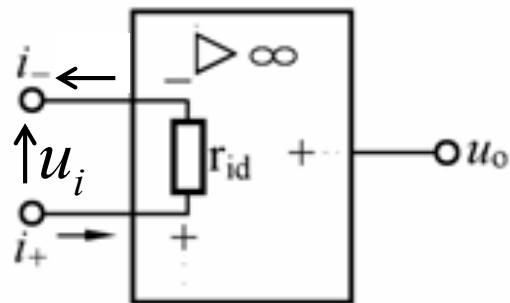
$$u_o = A_{uo} (u_+ - u_-)$$

$$u_+ - u_- = \frac{u_o}{A_{uo}} = \frac{u_o}{\infty} = 0$$

$$u_+ - u_- = 0$$

$$u_+ = u_-$$

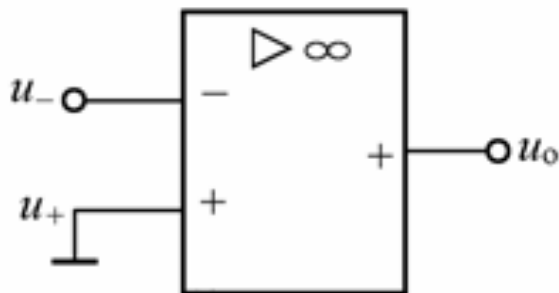
② 输入端虚断



$$i_- = i_+ = \frac{u_i}{r_{id}} = \frac{u_i}{\infty} = 0$$

$$i_- = i_+ = 0$$

③ 输入端虚地



$$u_+ = u_-$$

因为 $u_+ = 0$

$$u_- = 0$$

三个分析依据：

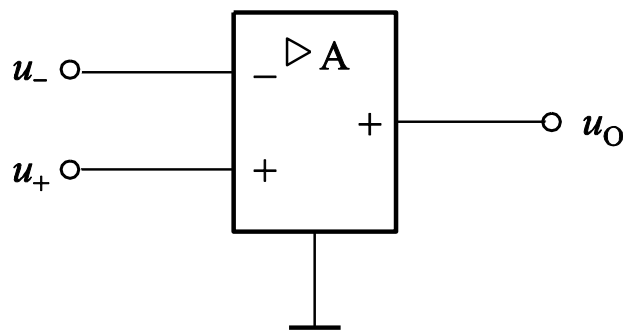
$$u_+ = u_-$$

$$i_- = i_+ = 0$$

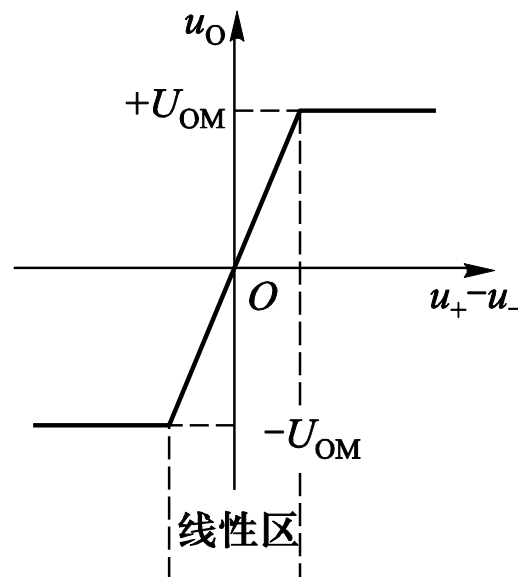
$$u_- = 0$$

2. 集成运放工作在非线性区的分析方法

分析依据:



(a) 电路



(b) 电压传输特性

$$u_- < u_+, \quad u_o = +U_{OM}$$

$$u_- > u_+, \quad u_o = -U_{OM}$$

7.3 集成运放的基本运算电路

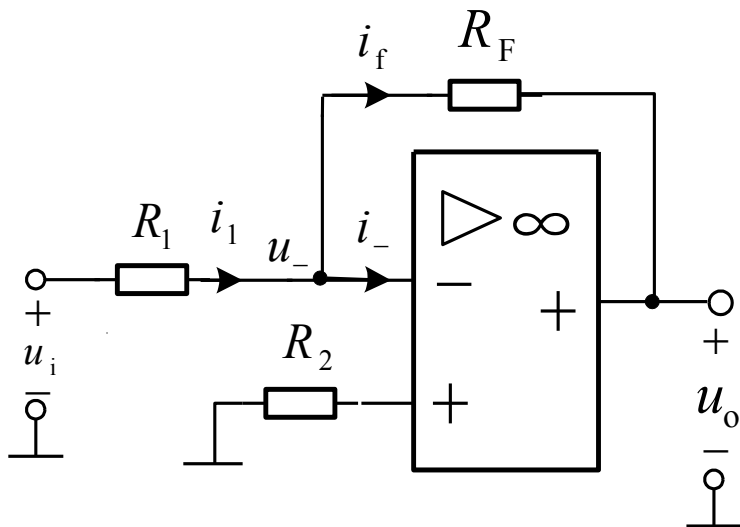
运算电路：比例、加法、减法、积分与微分、对数与反对数及乘除法等运算。

分析的问题：

1. 输出电压与输入电压之间的关系
2. 放大倍数
3. 静态平衡电阻
4. 分析输出波形
5. 设计运算电路

1. 比例运算电路

(1) 反相比例运算电路



就有
$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

求出

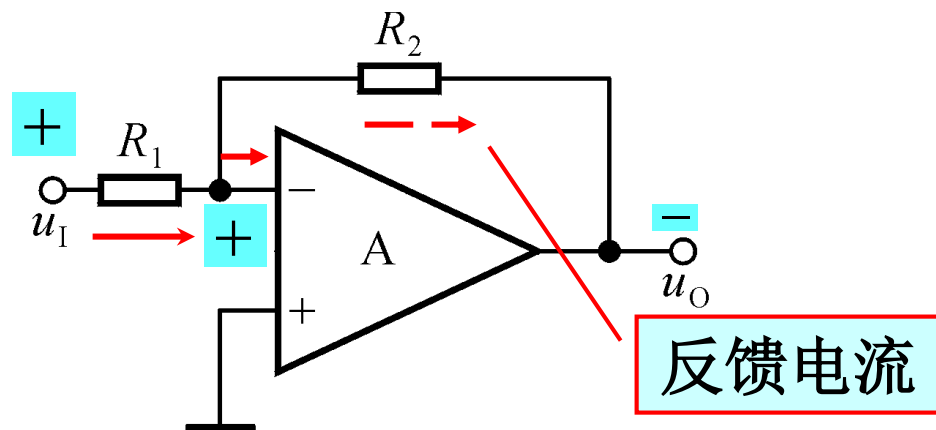
$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

③ 静态平衡电阻

保证差分放大电路的静态工作点相同，使运放同相端和反相端对地电阻相等

$$R_2 = R_1 // R_F$$

电压并联负反馈



净输入电流减小，引入了负反馈

$$i_{R_2} = \frac{u_- - u_O}{R_2}$$

反馈量

- ◆ 反馈量仅决定于输出量
- ◆ 在判断集成运放构成的反馈放大电路的反馈极性时，
净输入电压指的是集成运放两个输入端的电位差，
净输入电流指的是同相输入端或反相输入端的电流。

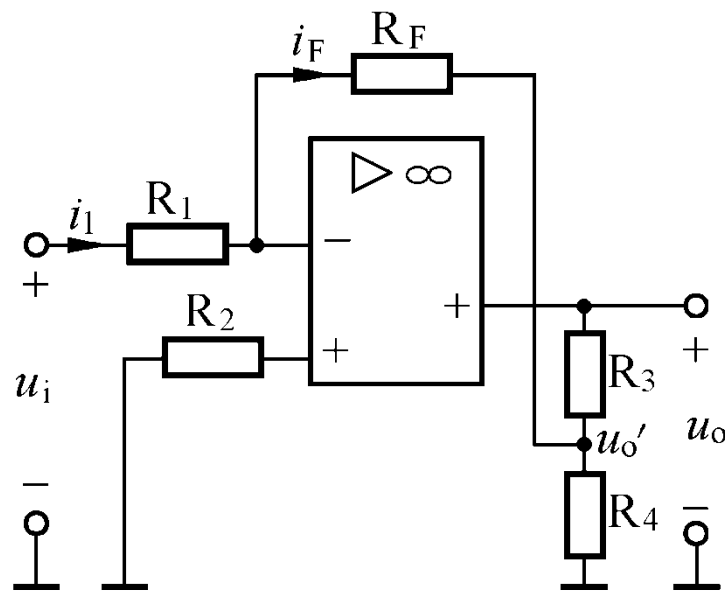
【例7.3.1】 在图示电路中，若电阻 R_F 支路对 R_3 和 R_4 电路的分流作用很小，试求：
 (1) A_{uf} 的表达式； (2) 分析电路的功能。

【解】 因为 $u_+ = u_- = 0$

$$i_1 = \frac{u_i}{R_1}, \quad i_F = \frac{u_- - u_o'}{R_F} = \frac{-u_o'}{R_F}$$

$$u_o' = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

因为 $R_F \gg R_3$ 和 R_4

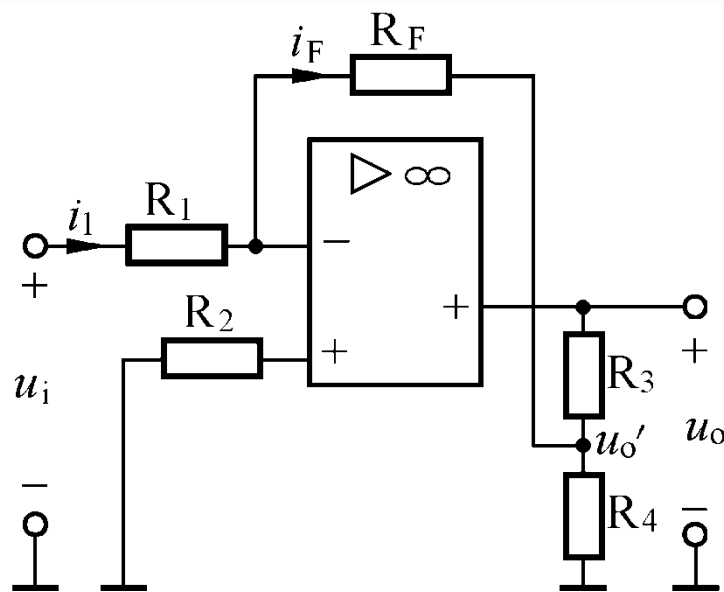


因为 $u_+ = u_- = 0$

$$i_1 = \frac{u_i}{R_1}, \quad i_F = \frac{-u'_o}{R_F}$$

$$u'_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

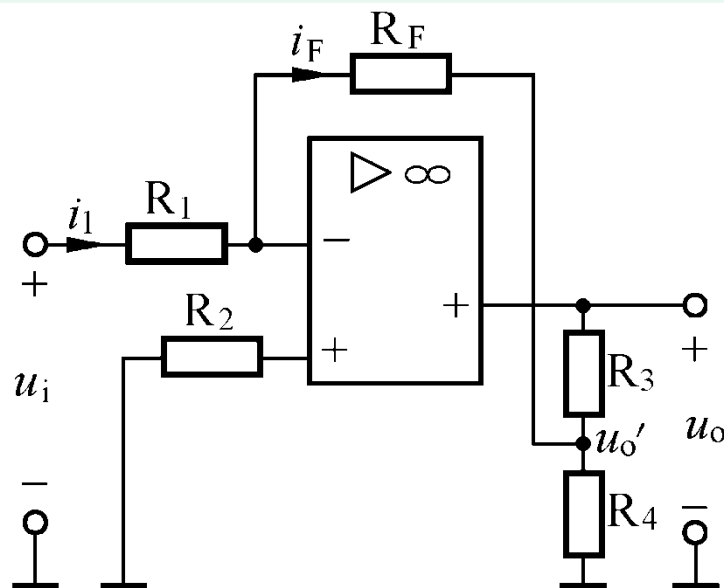
因为 $R_F \gg R_3$ 和 R_4



$$u'_o = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_o \quad \text{所以, } -\frac{R_F}{R_1} u_i = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_o$$

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) u_i$$

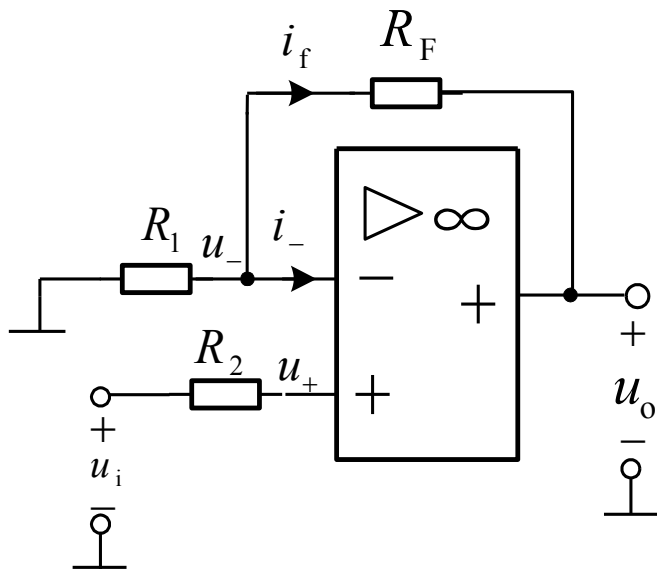
$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right)$$



$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right)$$

若反馈电阻 R_F 过大，比例系数和运放内部参数有关，使电路工作不稳定。在此电路中， R_F 不用选择太大，也能获得较高的电压放大倍数。

(2) 同相比例运算电路



$$i_- = 0, u_- = u_+ = u_i$$

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o$$

$$u_i = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o$$

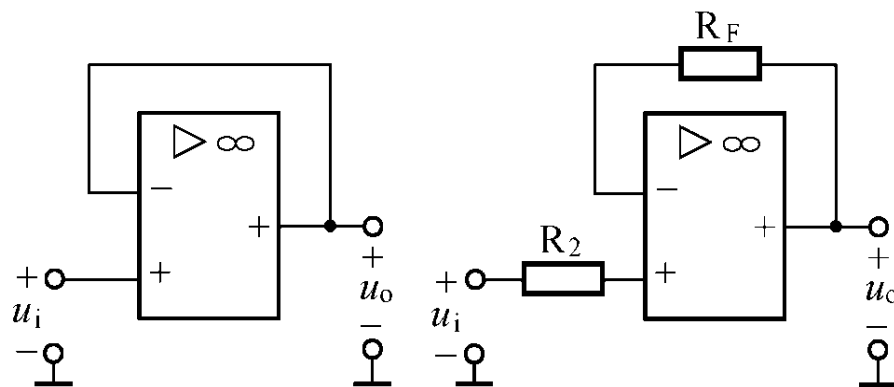
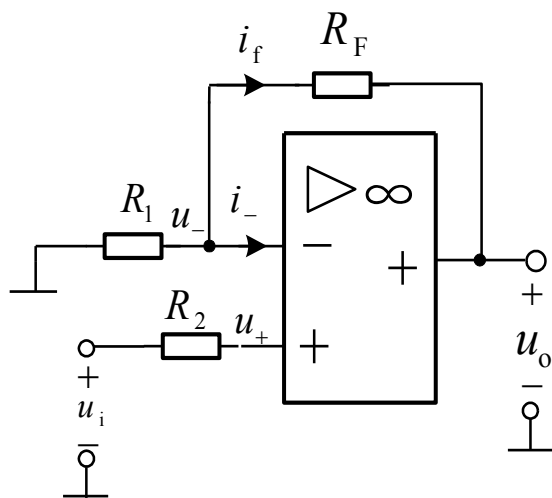
即

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i \quad A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

$$R_2 = R_1 // R_F$$

(3) 电压跟随器

当 $R_1 = \infty$ 或 $R_F = 0$ 时,



$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$$

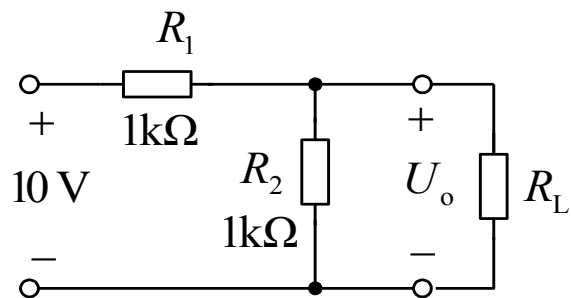
$$u_o = u_i$$

特点：输入电阻大，
输出电阻小。

【例7.3.2】电阻分压器向5V的负载供电电路如图所示。
求：（1）分压器的输出电压；（2）当分压器带上 $1\text{k}\Omega$ 负载时的输出电压。

可见，电阻分压器输出电压不稳定，带上负载时输出电压下降很多。

【解】（1）当电路不接负载

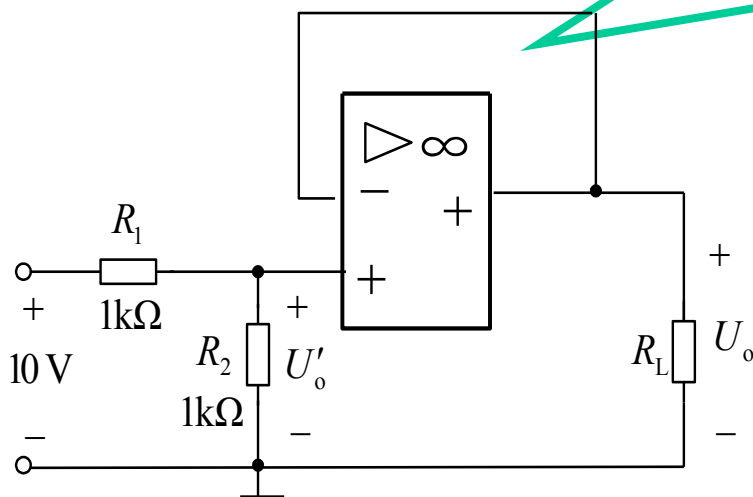
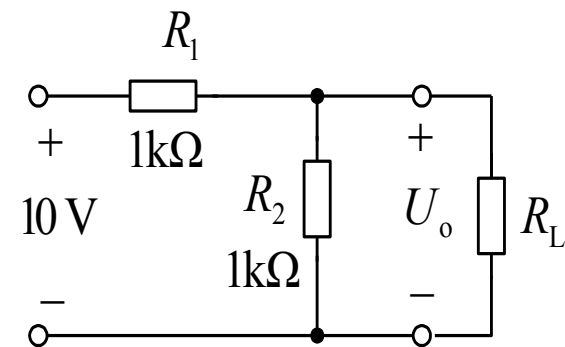


$$U_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 10 = \frac{1}{1+1} \times 10 = 5\text{V}$$

（2）当分压器带上 $1\text{k}\Omega$ 负载时，

$$U_o = \frac{R_2 // R_L}{R_1 + R_2 // R_L} \times 10 = \frac{0.5}{1+0.5} \times 10 = 3.3\text{V}$$

为了使分压器的输出电压不受负载的影响，可在分压器的输出端和负载之间接入电压跟随器，电路如图所示。

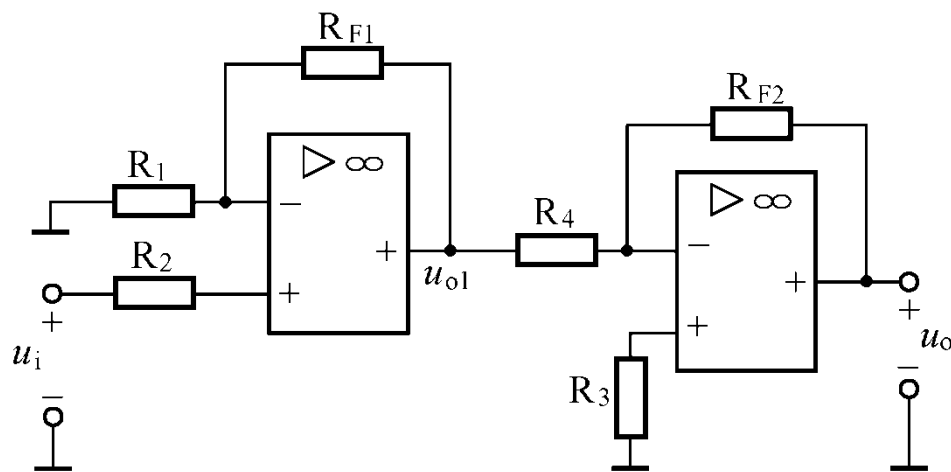


$$U'_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 10 = \frac{1}{1+1} \times 10 = 5V$$

$$U_o = U'_o = 5V$$

可见，接入电压跟随器之后，不论负载如何变化，负载两端电压都保持不变。

【例7.3.3】在图示电路中，已知 $u_i=0.5V$ ， $R_1=R_4=10k$ ， $R_{F1}=R_{F2}=50k$ ，集成运放的工作电压为 $\pm 12V$ 。求输出电压 u_o 和静态平衡电阻。



理论计算此电压超过集成运放的工作电压，第二级运放的参数不合适。

$$u_o = -\frac{R_{F2}}{R_4} u_{o1} = -\frac{50}{10} \times 3V = -15V$$

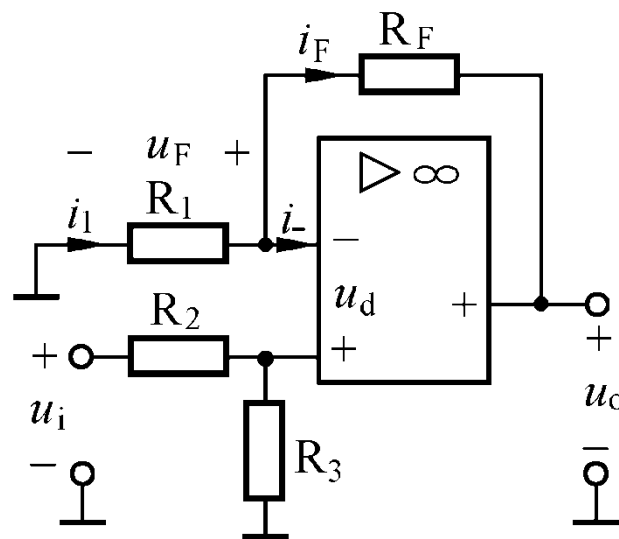
$$R_2 = R_1 // R_{F1} = 8.3k\Omega, \quad R_3 = R_4 // R_{F2} = 8.3k\Omega$$

【例7.3.4】已知电路如图所示，试求输出电压 u_o ；
若 $u_o = 0.5u_i$ ，试选择各电阻值。

解
$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$$

$$i_1 = i_F$$

$$\frac{0 - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$



根据虚短有 $u_- = u_+$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_i$$

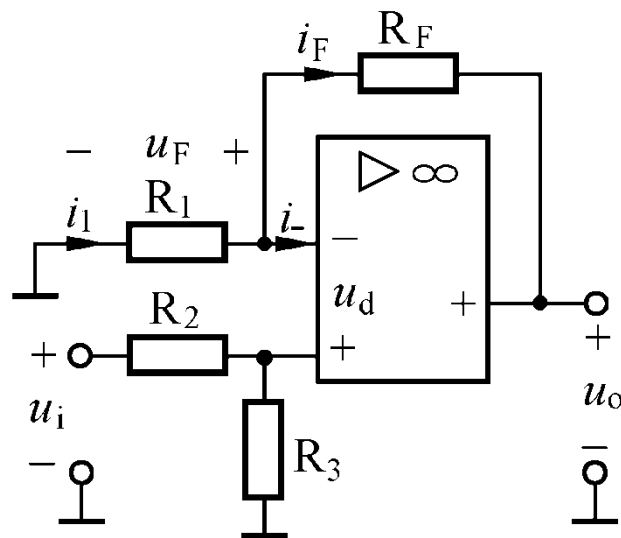
若实现 $u_o = 0.5u_i$, 则需

$$\left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0.5$$

可取 $R_1 = \infty$,

$R_2 = R_3 = 10\text{k}\Omega$,

$R_F = R_2 // R_3 = 5\text{k}\Omega$



2. 加法运算电路

反相输入求和电路

$$i_- = 0$$

$$i_{i1} + i_{i2} + i_{i3} = i_f$$

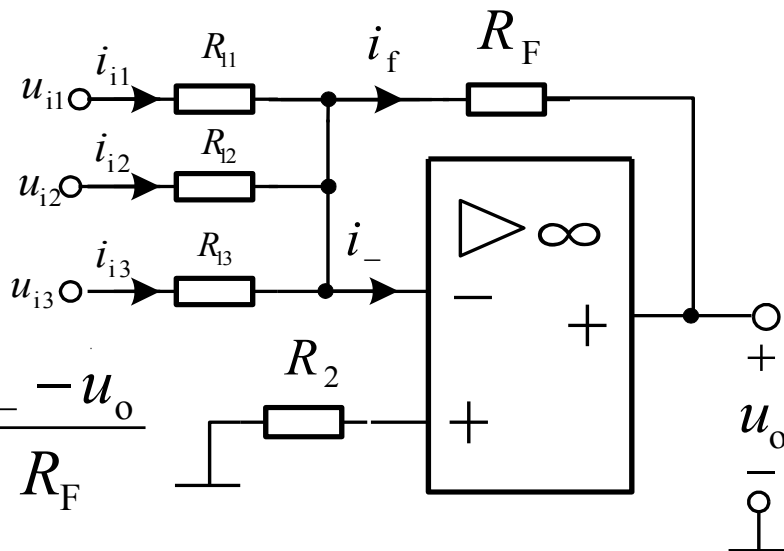
$$\frac{u_{i1} - u_-}{R_{11}} + \frac{u_{i2} - u_-}{R_{12}} + \frac{u_{i3} - u_-}{R_{13}} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

$$u_- = 0, \text{ 则 } \frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} + \frac{u_{i3}}{R_{13}} = -\frac{u_o}{R_F}$$

$$u_o = -R_F \left(\frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} + \frac{u_{i3}}{R_{13}} \right)$$

$$\text{当 } \frac{R_F}{R_1} = 1 \text{ 时,}$$

$$u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$

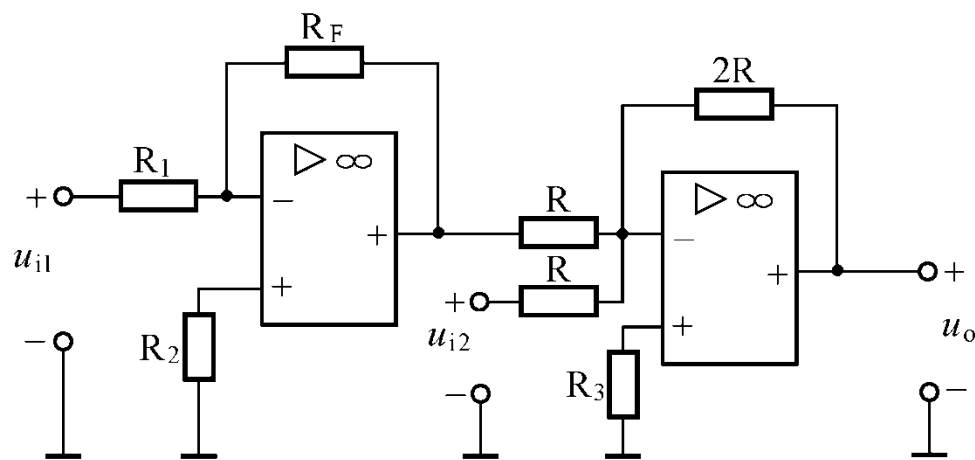


当 $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_1$ 时,

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$

静态平衡电阻为 $R_2 = R_{11} // R_{12} // R_{13} // R_F$

【例7.3.5】在图示电路中，已知 $u_{i1} = 1V$, $u_{i2} = -1V$, $R_1 = R_F = 10k\Omega$, $R = 5k\Omega$, 试求 u_o 。



【解】 $u_{o1} = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1} = -1V$

$$u_o = -\frac{2R}{R} (u_{o1} + u_{i2}) = -2(-1-1) = 4V$$

【例7.3.6】求图示电路中的 u_o 。

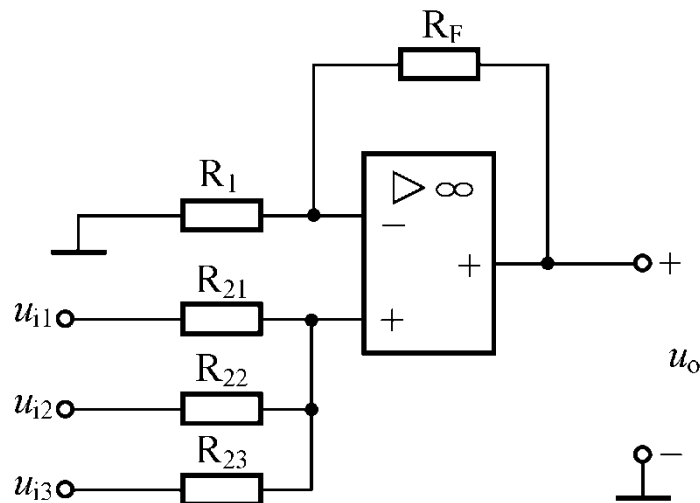
【解】利用叠加原理有：

$$u'_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_{22} // R_{23}}{R_{21} + R_{22} // R_{23}} u_{i1}$$

$$u''_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_{21} // R_{23}}{R_{22} + R_{21} // R_{23}} u_{i2}$$

$$u'''_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_{21} // R_{22}}{R_{23} + R_{21} // R_{22}} u_{i3}$$

$$\text{则 } u_o = u'_o + u''_o + u'''_o$$



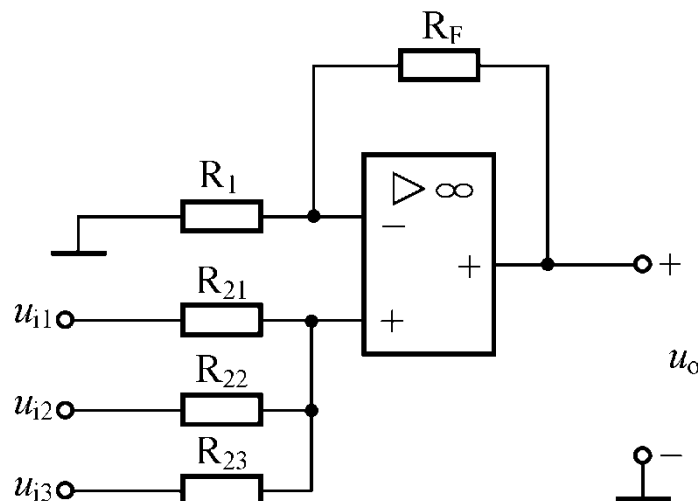
同相输入求和电路

【例7.3.6】求图示电路中的 u_o 。

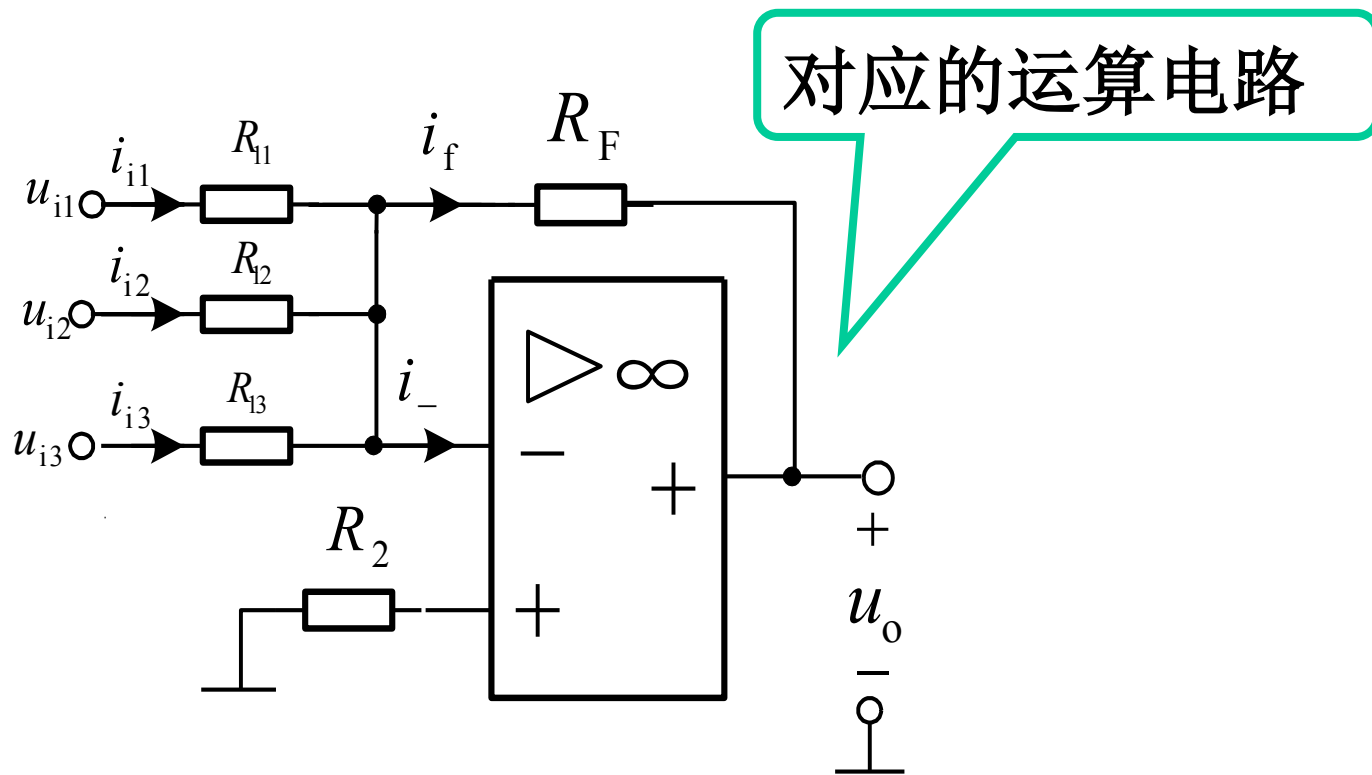
【解】此题还可以用两个结点电压公式求解

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+$$

$$u_+ = \frac{\frac{u_{i1}}{R_{21}} + \frac{u_{i2}}{R_{22}} + \frac{u_{i3}}{R_{23}}}{\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_{23}}}$$



$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{\frac{u_{i1}}{R_{21}} + \frac{u_{i2}}{R_{22}} + \frac{u_{i3}}{R_{23}}}{\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_{23}}}$$



$$u_o = -R_F \left(\frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} + \frac{u_{i3}}{R_{13}} \right)$$

$$u_o = -R_F \left(\frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} + \frac{u_{i3}}{R_{13}} \right) \quad \boxed{u_o = -5u_{i1} - 4u_{i2} - 2u_{i3}}$$

从上式可见，首先要确定反馈电阻的阻值，我们选
 $R_F = 50\text{k}\Omega$

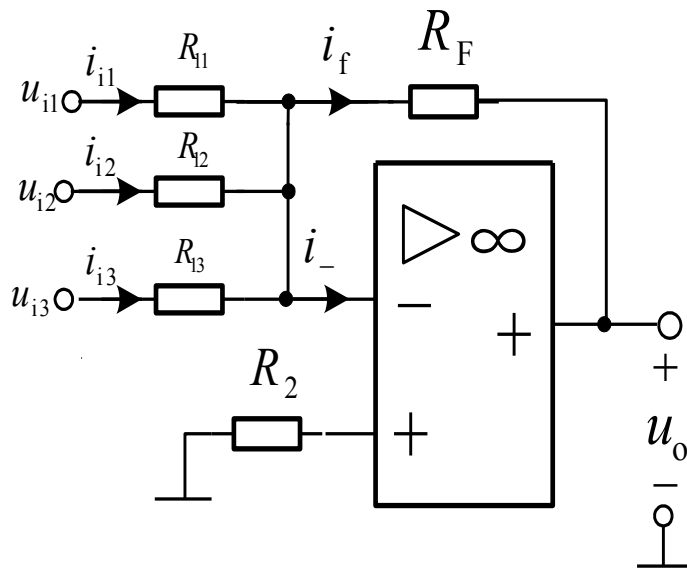
然后根据上式的比例关系确定其他电阻，即

$$\frac{R_F}{R_{11}} = 5, \frac{R_F}{R_{12}} = 4, \frac{R_F}{R_{13}} = 2 \quad \text{所以}$$

$$R_{11} = \frac{R_F}{5} = \frac{50}{5} = 10\text{k}\Omega \quad R_{12} = \frac{R_F}{4} = \frac{50}{4} = 12.5\text{k}\Omega$$

$$R_{13} = \frac{R_F}{2} = \frac{50}{2} = 25\text{k}\Omega \quad R_2 = R_{11} // R_{12} // R_{13} // R_F$$

$$= 10 // 12.5 // 25 // 50 = 4.2\text{k}\Omega$$

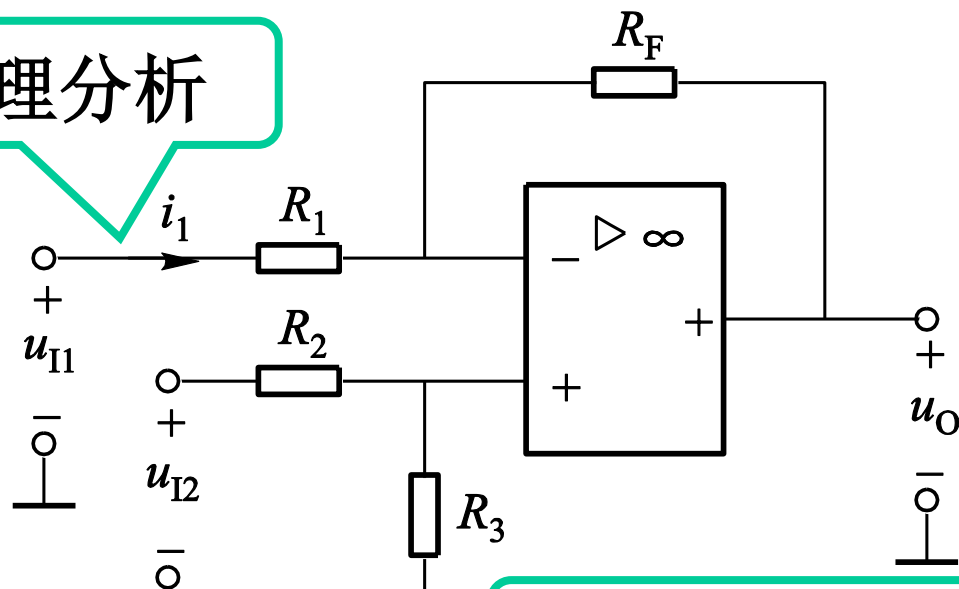


(2) 当 $u_{i1} = 0.2\text{V}$, $u_{i2} = 0.5\text{V}$, $u_{i3} = 1\text{V}$ 时, 输出电压为

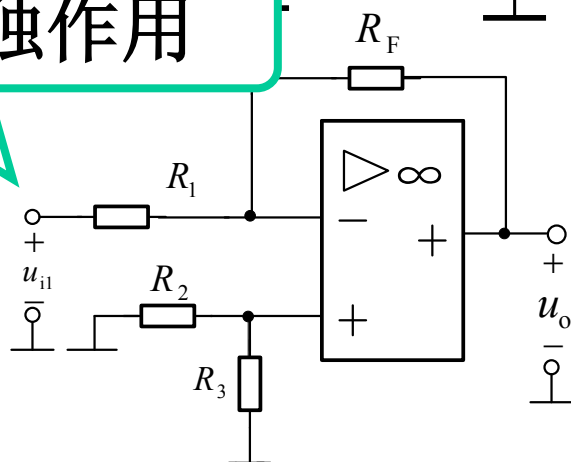
$$u_o = -5u_{i1} - 4u_{i2} - 2u_{i3} = -5 \times 0.2 - 4 \times 0.5 - 2 \times 1 = -5\text{V}$$

3. 减法运算电路

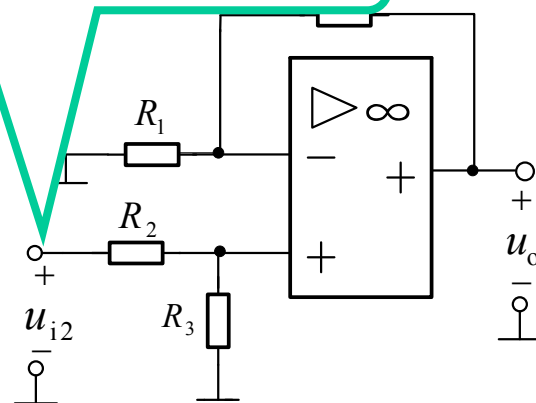
用叠加原理分析

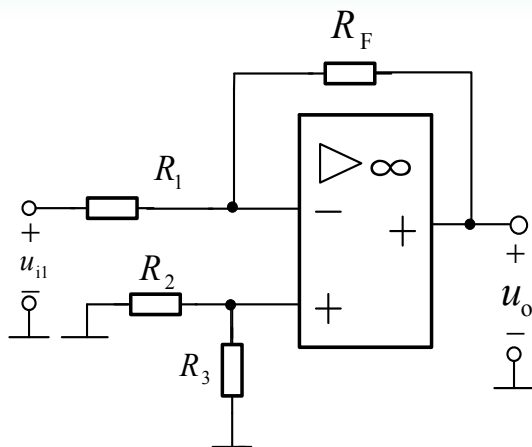


u_{i1} 单独作用



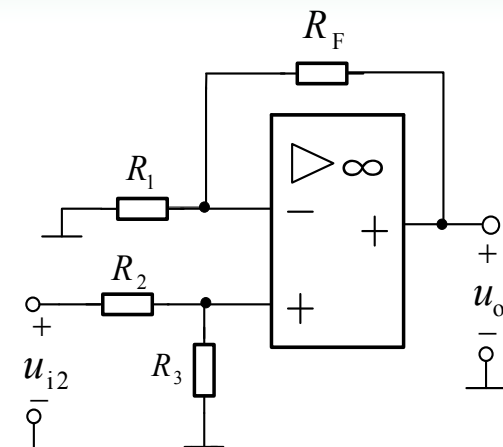
u_{i2} 单独作用





u_{i1} 单独作用时, $u_{i2} = 0$ 。

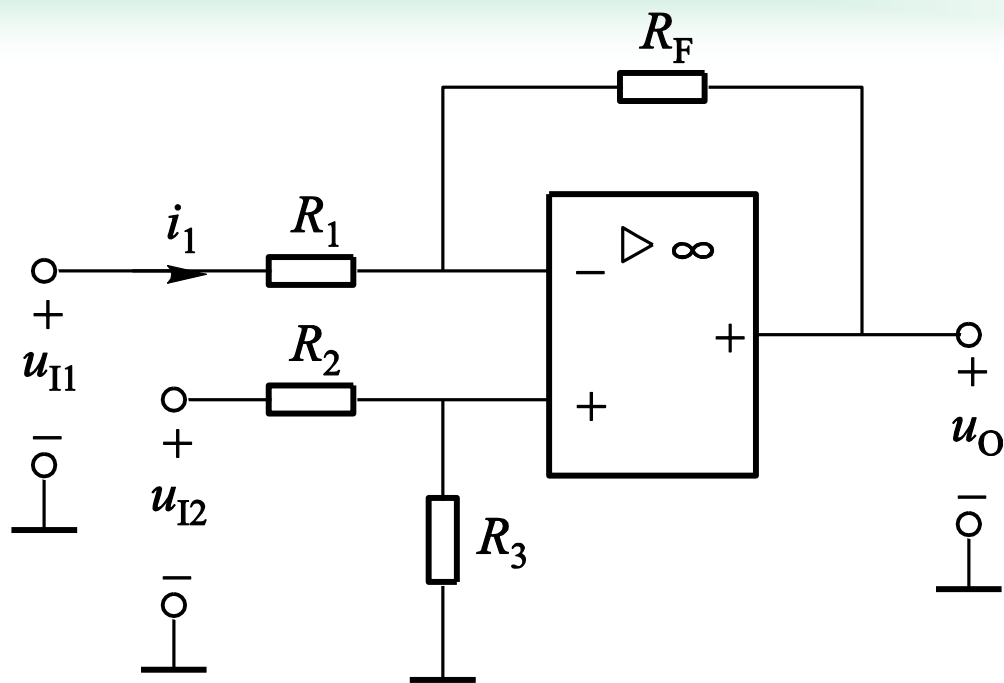
$$u'_o = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$



u_{i2} 单独作用时, $u_{i1} = 0$ 。

$$u''_o = (1 + \frac{R_F}{R_1}) u_+ = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

$$u_o = u'_o + u''_o = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1} + (1 + \frac{R_F}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

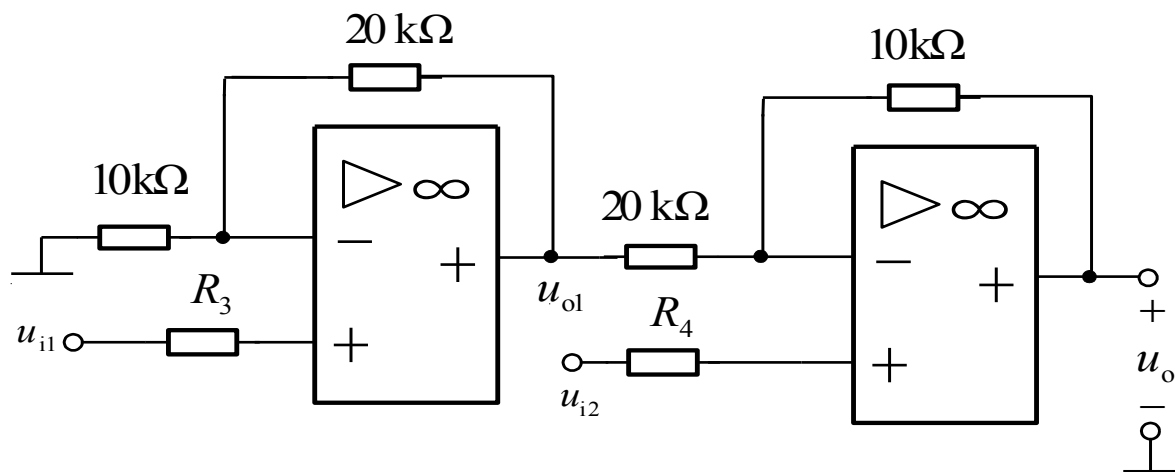


$$u_o = u'_o + u''_o = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

$$\text{当 } R_1 = R_2 \text{ 和 } R_F = R_3 \text{ 时, } u_o = \frac{R_F}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$

$$\text{当 } R_F = R_1 \text{ 时, } u_o = u_{i2} - u_{i1}$$

【例7.3.8】求如图所示电路输出电压 u_o 和静态平衡电阻。



【解】
$$u_{o1} = \left(1 + \frac{20}{10}\right)u_{i1} = 3u_{i1}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{10}{20}\right)u_{i2} - \frac{10}{20}u_{o1} = 1.5u_{i2} - 0.5 \times 3u_{i1} = 1.5(u_{i2} - u_{i1})$$

$$R_3 = R_4 = 10 // 20 = 6.7\text{k}\Omega$$

【例7.3.9】

已知电路如图所示。

试求输出电压 u_o 。

【解】

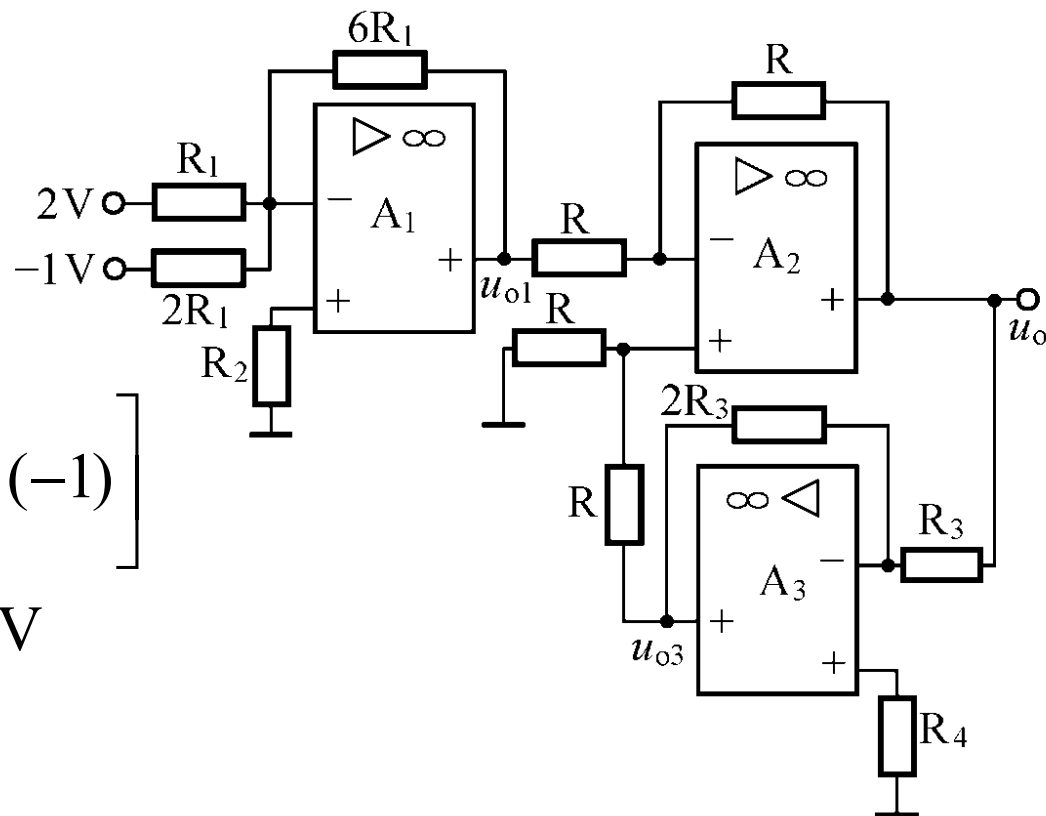
$$u_{o1} = - \left[\frac{6R_1}{R_1} \times 2 + \frac{6R_1}{2R_1} \times (-1) \right]$$

$$= -12 + 3 = -9V$$

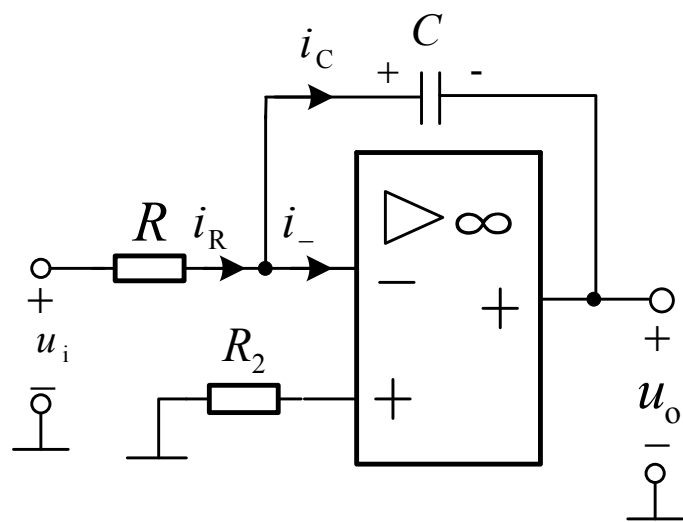
$$u_{o3} = - \frac{2R_3}{R_3} u_o = -2u_o$$

$$u_o = u_{o3} - u_{o1} = -2u_o + 9$$

$$u_o = \frac{9}{3} = 3V$$



4. 积分运算电路



$$i_R = i_C + i_-$$

$$i_C = i_R = \frac{u_i}{R} = C \frac{du_C}{dt}$$

$$u_C = u_- - u_o = -u_o$$

$$u_o = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

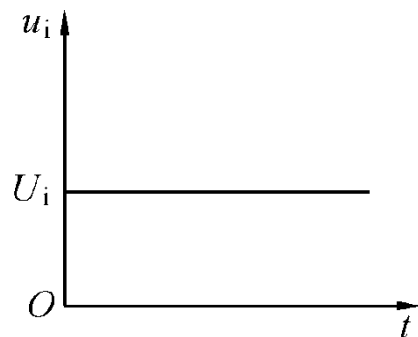
$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

RC 为积分时间常数

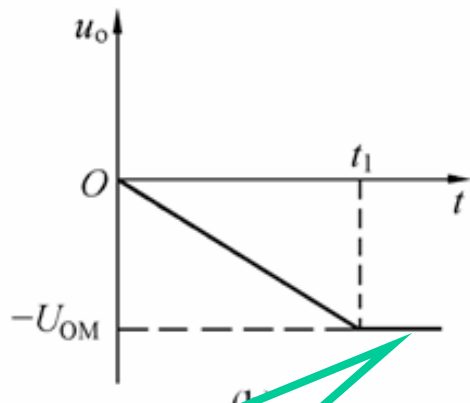
静态平衡电阻 $R_2 = R$

【例7.3.10】 已知积分电路的输入波形如图（a）所示。当 $t=0$ 时 $u_o=0$ ，试求输出电压的表达式，并画出输出波形。

【解】



(a)



积到最大值

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

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + u_o(0)$$

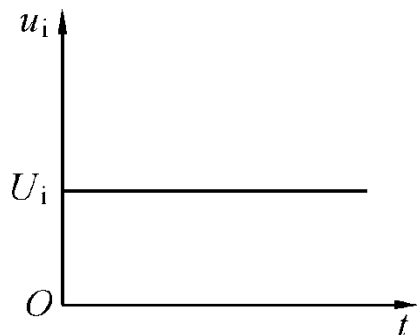
当 u_i 为常量时

$$u_o = -\frac{1}{RC} U_i t$$

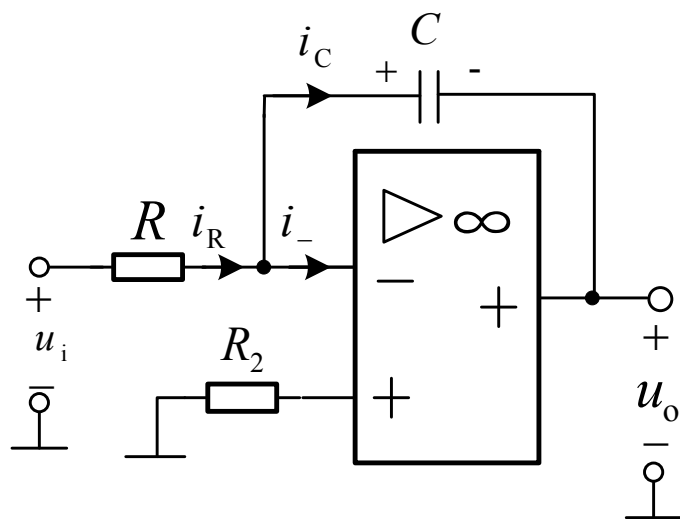
画出的输出波形如图（b）。

【例7.3.10】 已知积分电路的输入波形如图（a）所示。当 $t=0$ 时 $u_o=0$ ，试求输出电压的表达式，并画出输出波形。

【解】



(a)



关于积分初始值：

$$du_C = \frac{1}{C} i_C dt$$

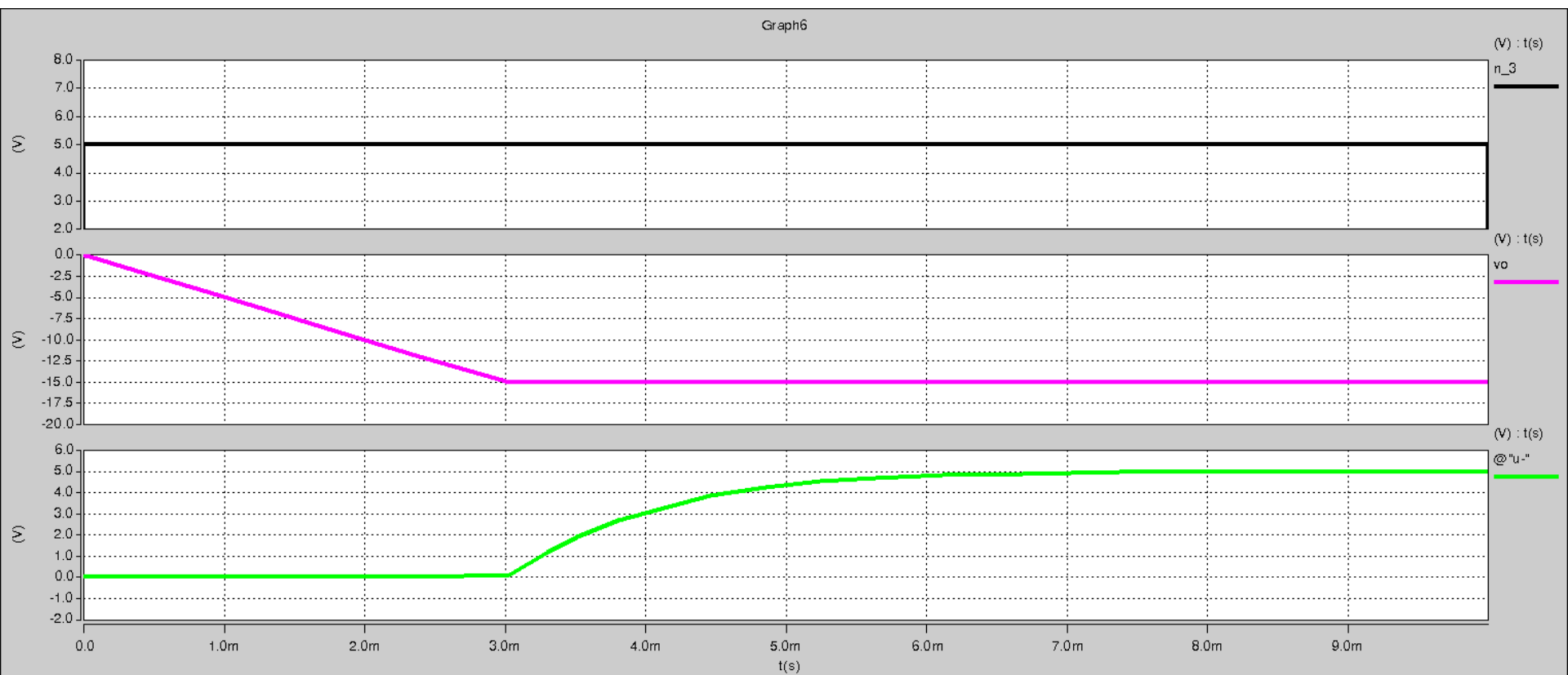
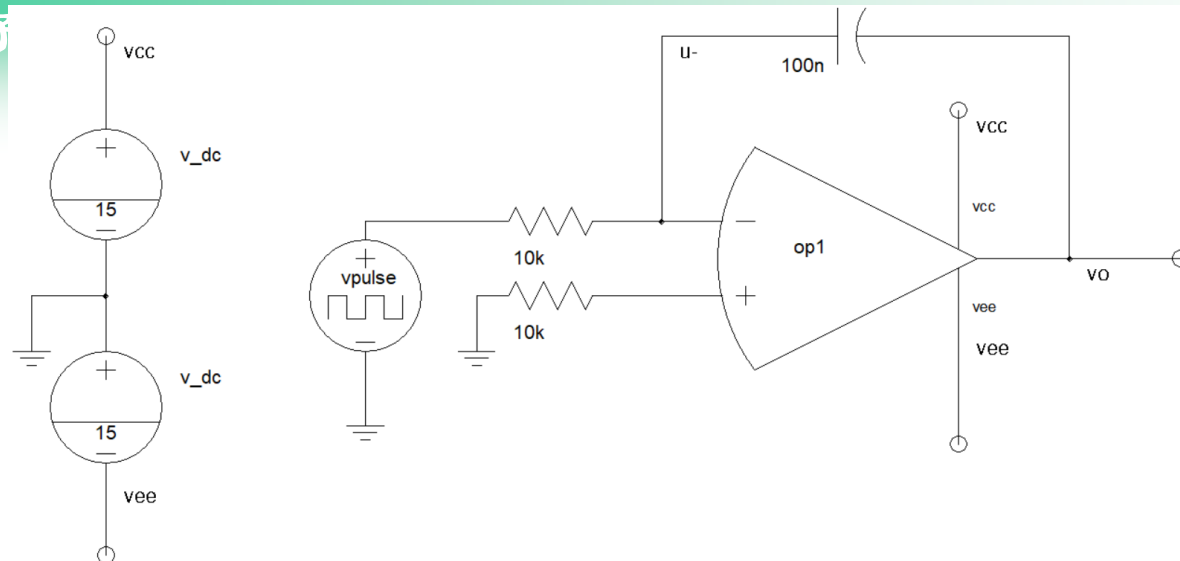
$$\int_{t_0}^t du_C = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C dt = \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt$$

$$u_C(t) - u_C(t_0) = \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt$$

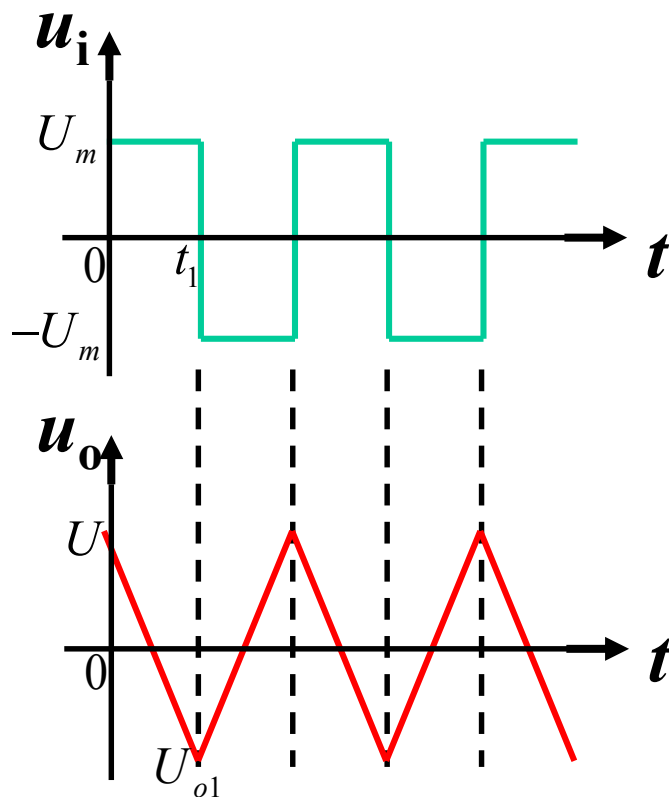
$$u_C(t) = \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt + u_C(t_0)$$

$$u_o(t) = -u_C(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt - u_C(t_0)$$

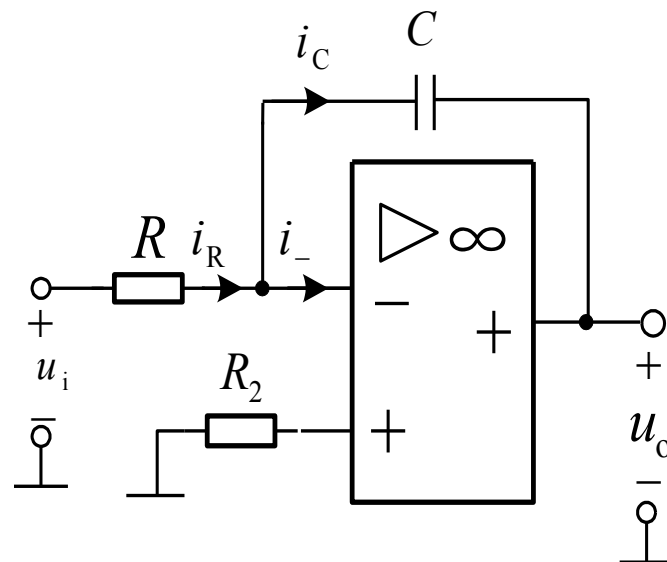
$$= -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt + u_o(t_0)$$



如果输入电压为方波，输出电压是三角波。



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



$$u_1(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + u_o(0) = -\frac{1}{RC} U_m t + U$$

$$u_2(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^t u_i dt + u_o(t_1) = \frac{1}{RC} U_m (t - t_1) + U_{o1}$$

5. 微分运算电路

$$u_- = u_+ = 0$$

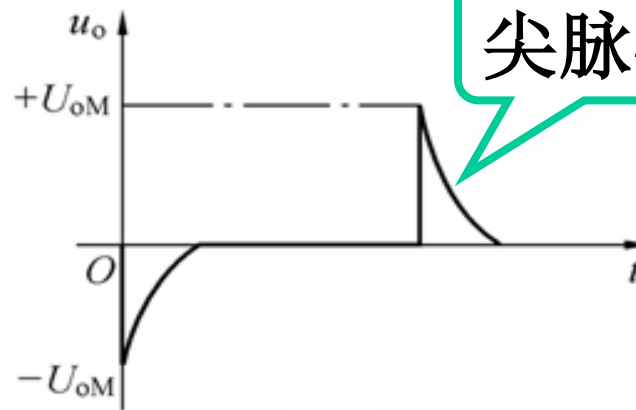
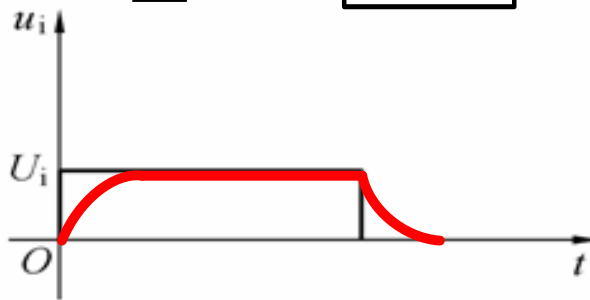
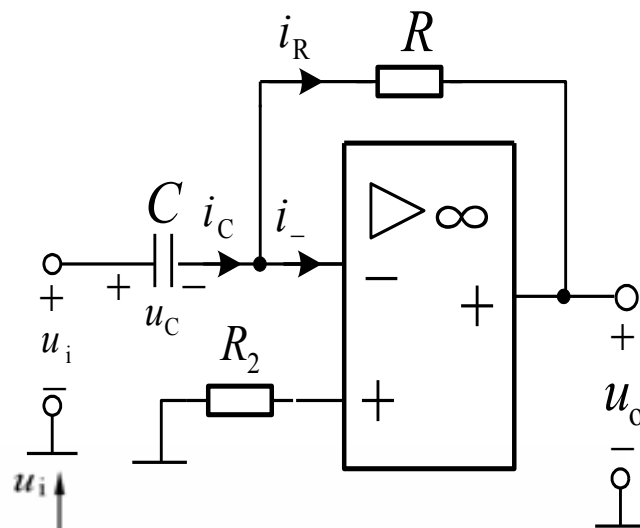
$$i_R = -\frac{u_o}{R}$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_i}{dt}$$

$$i_C = i_R$$

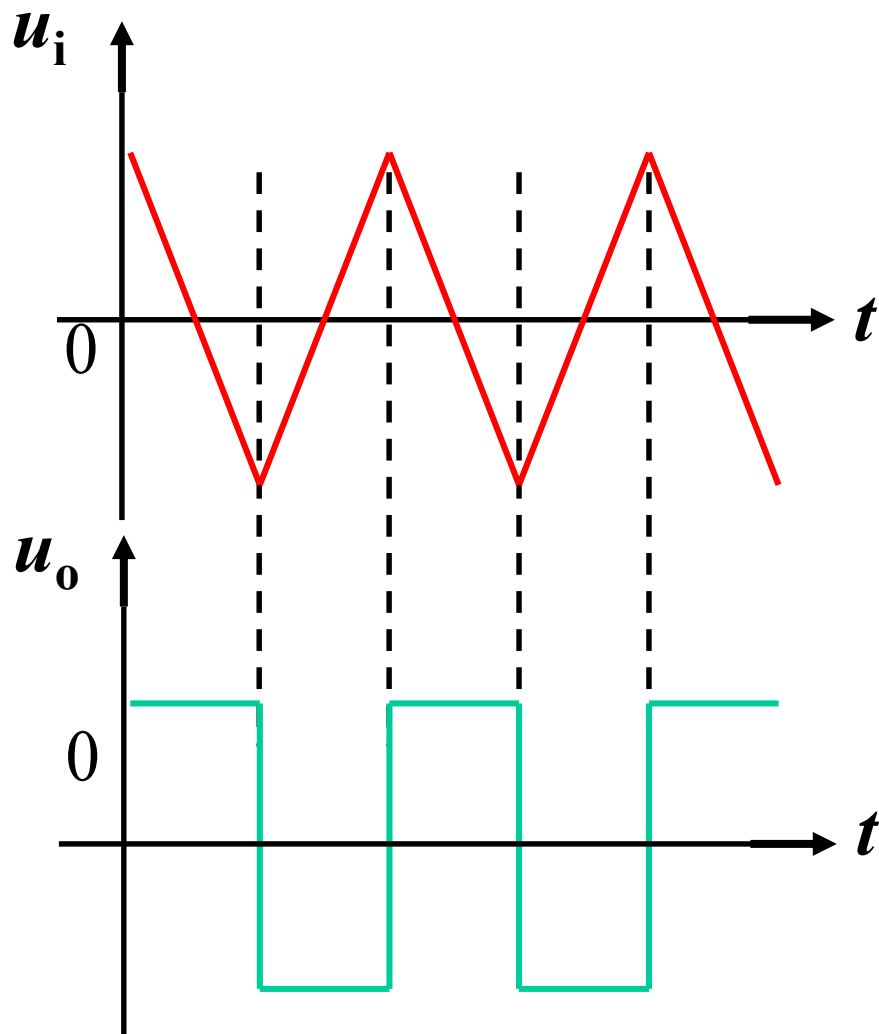


$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$



尖脉冲

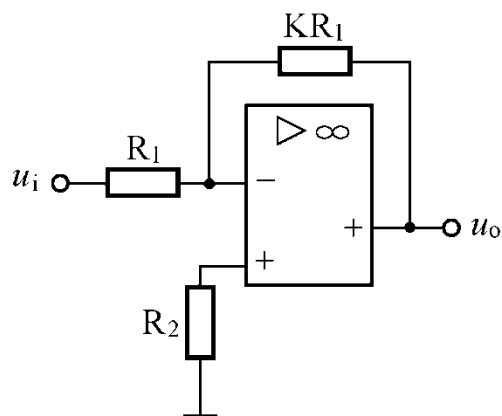
三角波微分



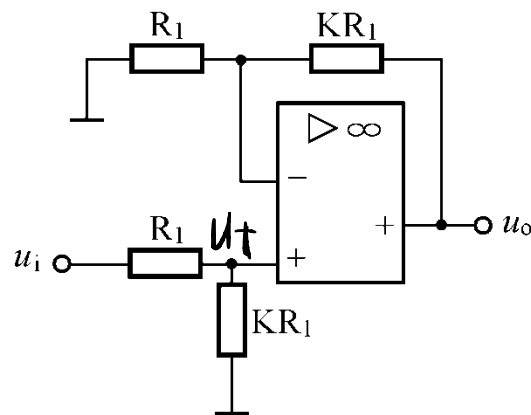
$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$

【思考题】写出如图所示各电路中的输入、输出电压的关系式。

$$u_o = -kR_1$$



(a)

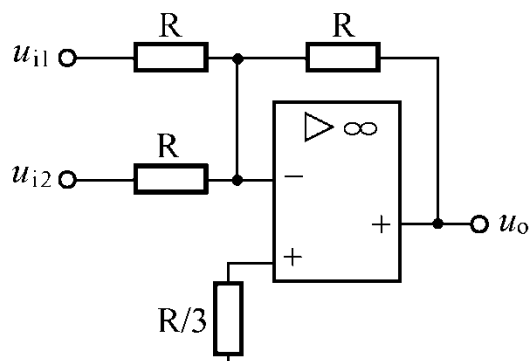


(b)

$$u_+ = \frac{k}{1+k} u_i$$

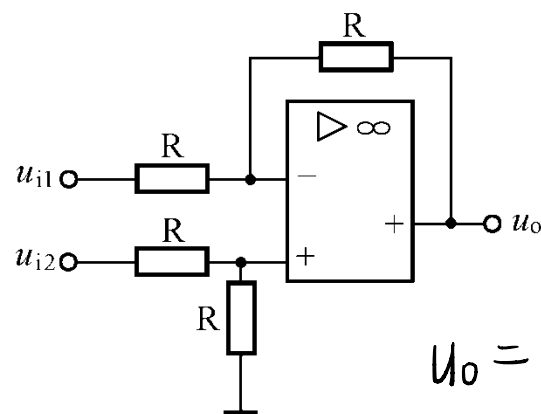
$$u_o = (1+k) \cdot \frac{k}{1+k} u_i$$

$$= k u_i$$



(c)

$$u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$$



(d)

$$u_o = -u_{i1} + u_{i2}$$

7.4 电压比较器

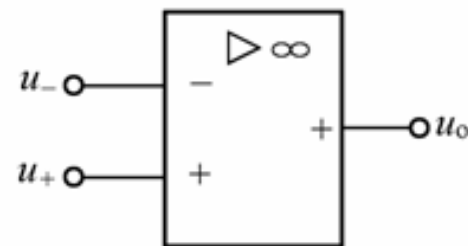
非线性应用：运算放大器不外加负反馈，运放工作在开环状态或者正反馈状态。

特点：

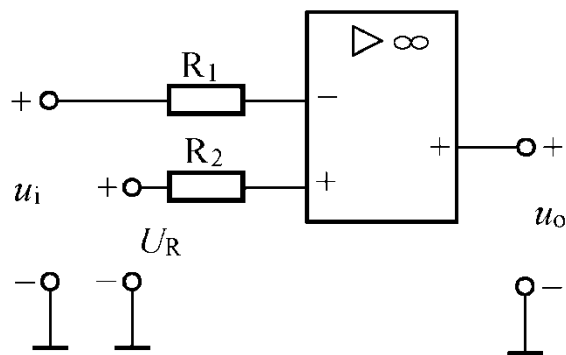
① 集成运放的输出电压为 $\pm U_{OM}$

$$u_+ > u_- , \quad u_o = +U_{OM}$$

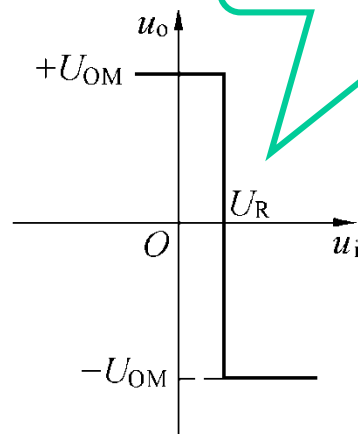
$$u_+ < u_- , \quad u_o = -U_{OM}$$



② 理想运放的差模输入电阻无穷大，所以静输入电流为零，即 $i_- = i_+ = 0$



(a)



(b)

电压传输特性

u_i 是输入信号
 U_R 是基准信号

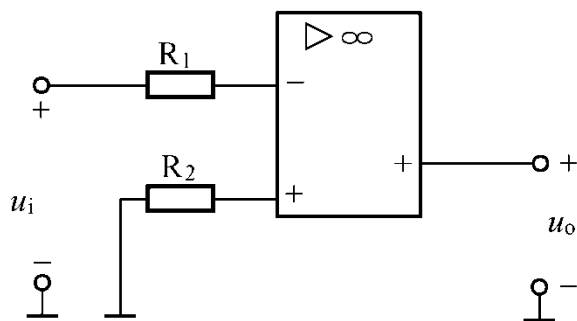
$$\begin{aligned} u_i > U_R & \quad u_o = -U_{OM} \\ u_i < U_R & \quad u_o = +U_{OM} \end{aligned}$$

【例7.4.1】图（a）是过零电压比较器。求：
（1）画出其电压传输特性；（2）当输入信号
 u_i 为正弦波时，画出输出波形。

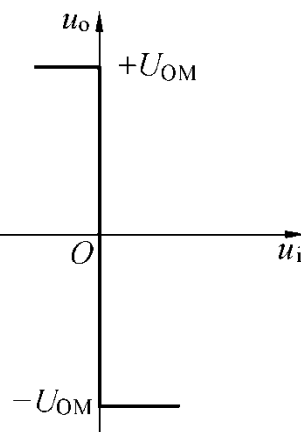
【解】

$$U_R = 0$$

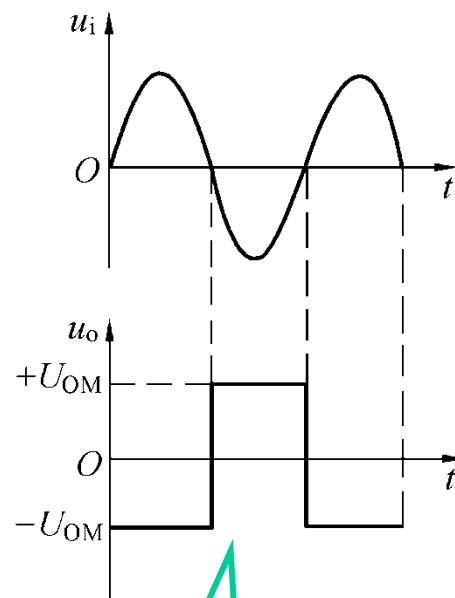
电压传输特性



(a)



(b)



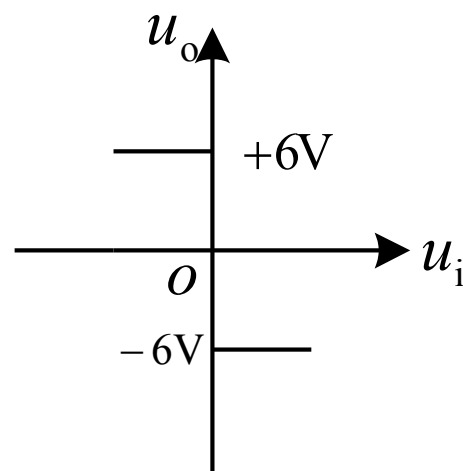
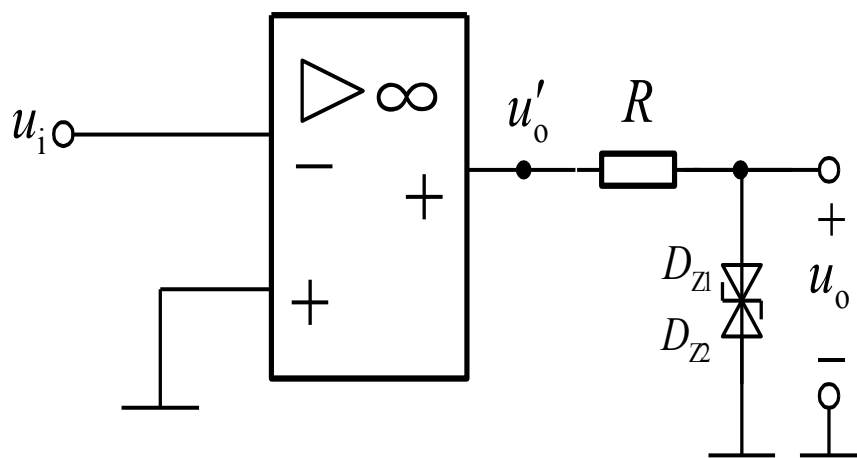
矩形波

$$u_i > 0, \quad u_o = -U_{OM}$$

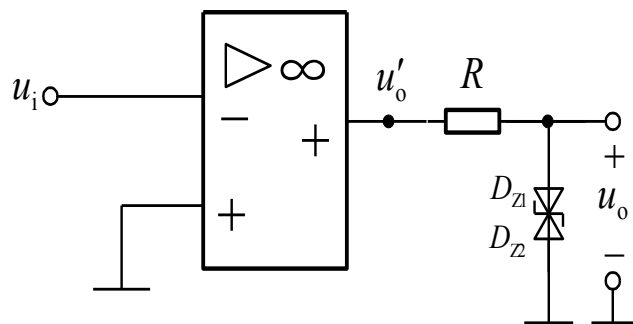
$$u_i < 0, \quad u_o = +U_{OM}$$

【例7.4.2】 图示电路是双向限幅电压比较器。设理想运放的最大输出电压为 $\pm 12\text{V}$, 稳定管的稳定电压为 $\pm 6\text{V}$, 稳压管正向导通压降忽略不计。求: (1) 画出其电压传输特性; (2) 当输入信号 u_i 为正弦波时, 画出输出波形。

【解】 (1) $u_i > 0$, $u'_o = -12\text{V}$, $u_o \approx U_{Z1} = -6\text{V}$
 $u_i < 0$, $u'_o = +12\text{V}$, $u_o \approx U_{Z2} = +6\text{V}$



(2) 输出波形

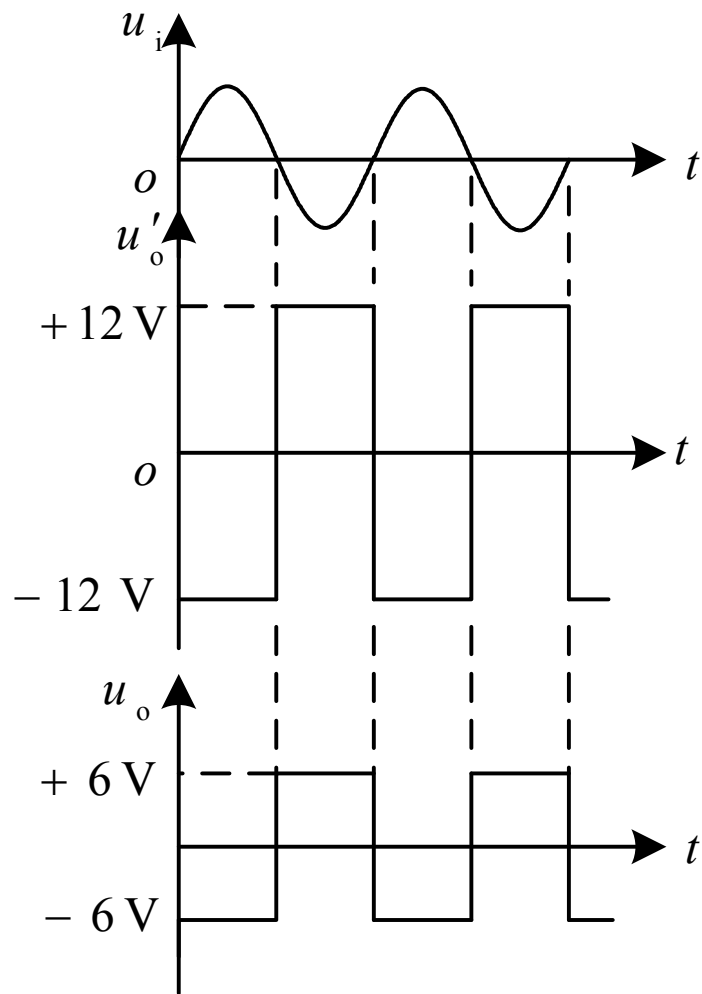


$$u_i > 0, \quad u'_o = -12\text{V},$$

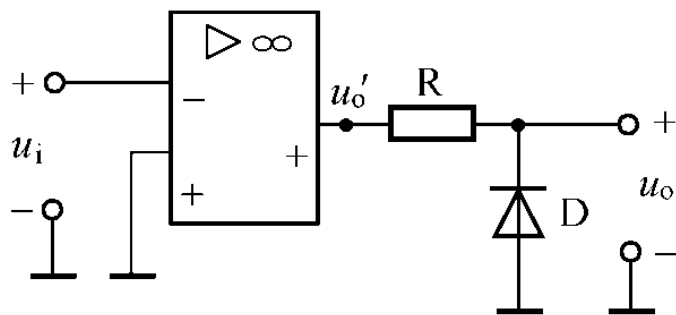
$$u_o \approx U_{Z1} = -6\text{V}$$

$$u_i < 0, \quad u'_o = +12\text{V},$$

$$u_o \approx U_{Z2} = +6\text{V}$$



【例7.4.3】 图示是二极管限幅电路。求：（1）当输入信号 u_i 为正弦波时，画出输出电压波形。

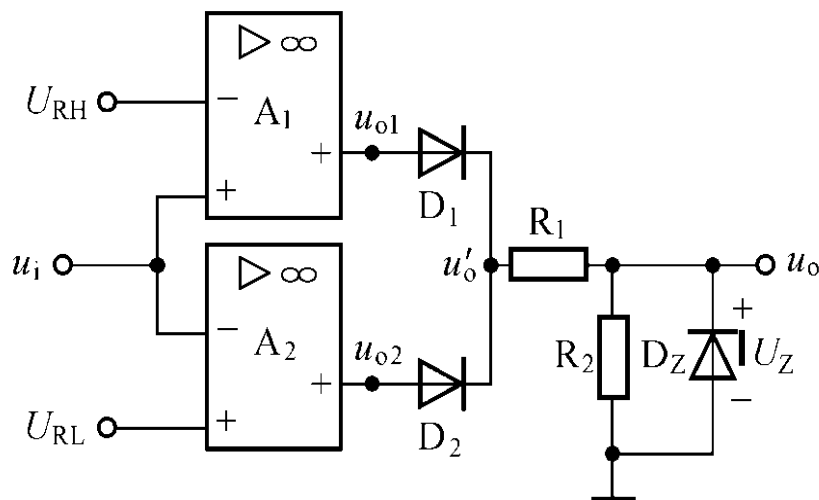


(a) 电路

$u_i > 0$, $u_o' = -U_{OM}$; 二极管 D 导通, $u_o \approx 0$;

$u_i < 0$, $u_o' = +U_{OM}$; 二极管 D 截止, $u_o = +U_{OM}$

【例7.4.4】窗口电路



(a)

$U_{RH} \rightarrow$ 上限参考电压;

$U_{RL} \rightarrow$ 下限参考电压。

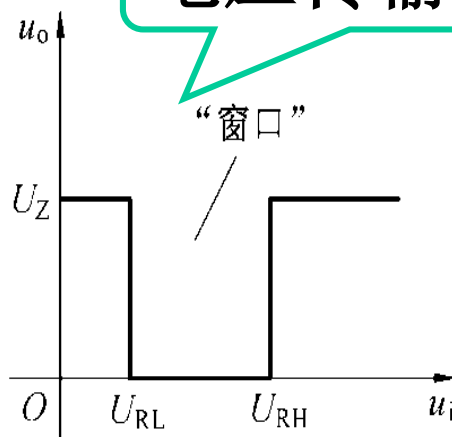
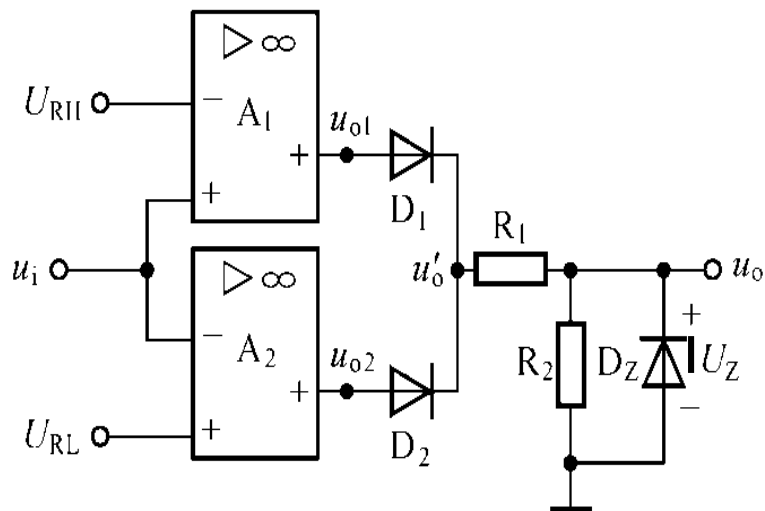
R_1 、 R_2 和稳压管 D_Z 是限幅电路。

原理分析:

电压传输特性

上限参考电压 U_{RH}

下限参考电压 U_{RL}



(a)

(b)

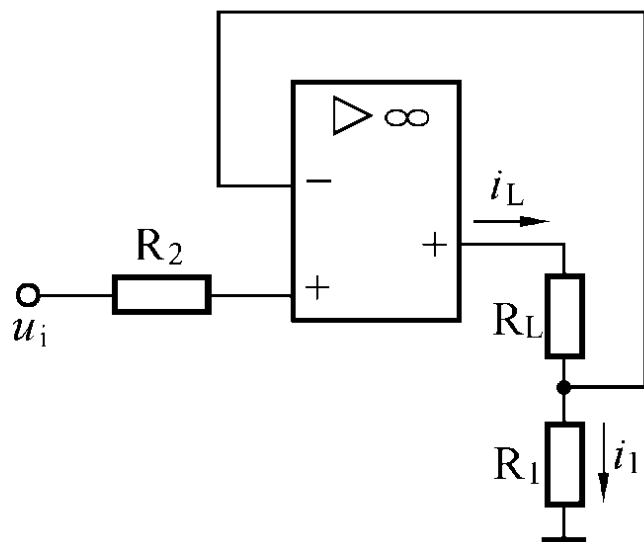
当 $u_i > U_{RH}$ 时, $u_{o1} = +U_{oM}$, $u_{o2} = -U_{oM}$,
二极管 D_2 截止, D_1 导通, $u_o = U_Z$ 。

当 $u_i < U_{RL}$ 时, $u_{o1} = -U_{oM}$, $u_{o2} = +U_{oM}$,
二极管 D_1 截止, D_2 导通, $u_o = U_Z$ 。

当 $U_{RL} < u_i < U_{RH}$ 时, $u_{o1} = u_{o2} = -U_{oM}$,
二极管 D_1 、 D_2 均截止, $u_o = 0$ 。

7.5 集成运放应用电路举例

1. 电压—电流转换电路

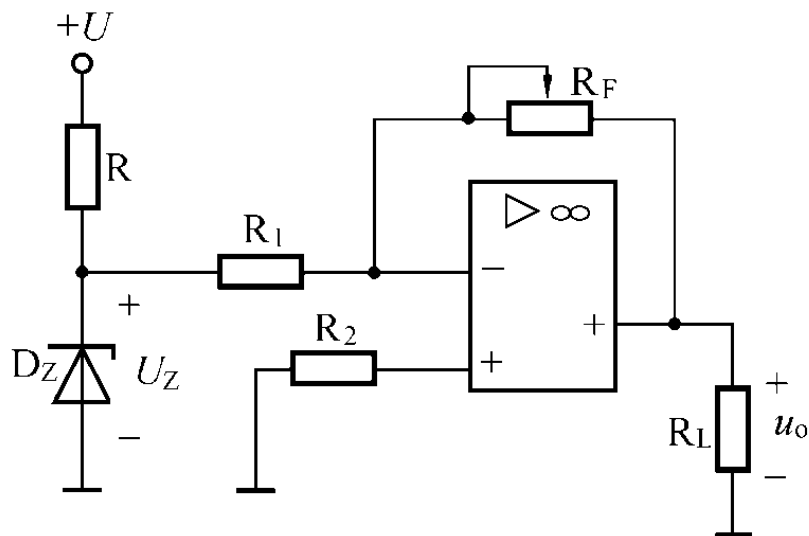


$$\because u_- = u_+ = u_i \quad i_- = i_+ = 0$$

$$\therefore i_L = i_1 = \frac{u_-}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}$$

输出电流与输入电压成正比，与负载电阻无关。

2. 恒电压源电路

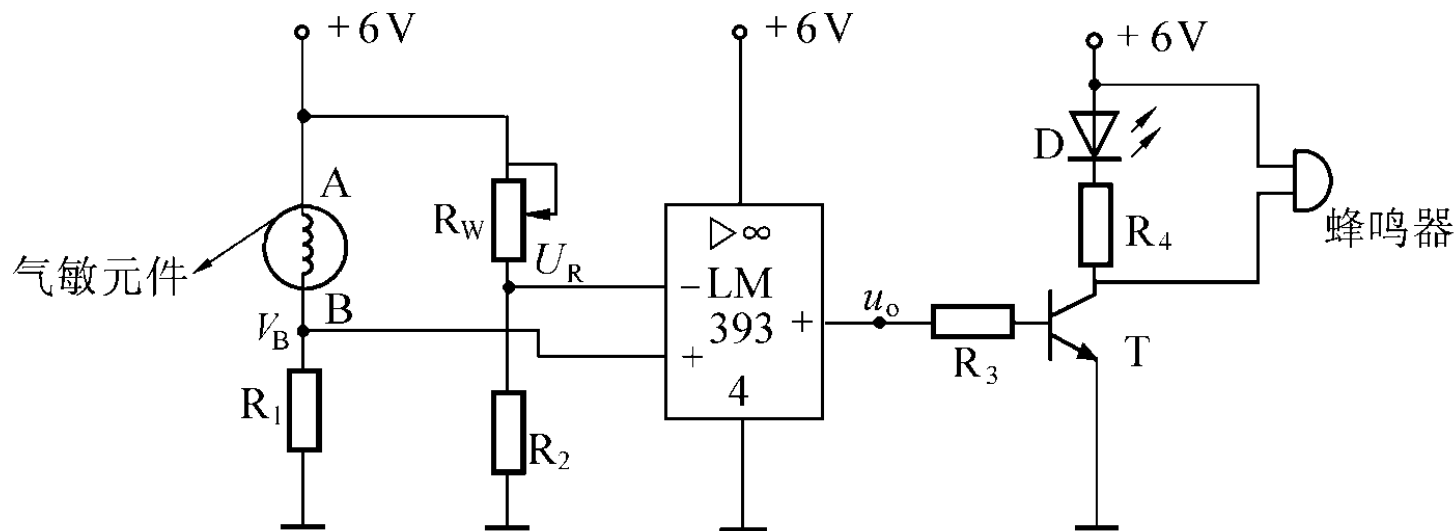


$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} U_Z$$

改变 R_F , 输出电压可调。

输入信号从稳压管两端取出，输出电压与 U_Z 成正比，输出电压稳定。

3. 可燃气体报警器



正常工作时： $V_B < U_R$ ， $u_o = 0$ ；晶体管 T 截止，蜂鸣器不响，报警灯不亮。

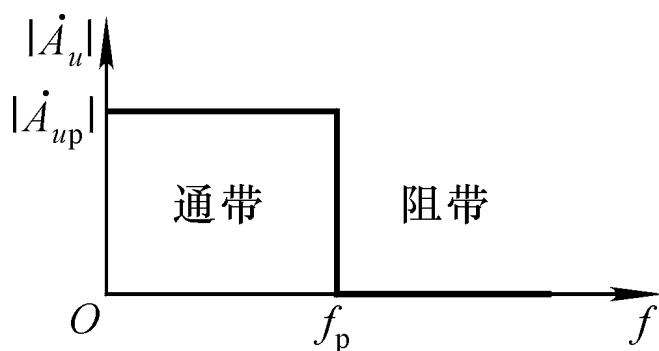
当空气燃气浓度超过允许值时：

气敏元件的电阻值减小， B 点电位上升， $V_B > U_R$ ， $u_o = 6V$ ；晶体管 T 导通，蜂鸣器响，报警灯亮。

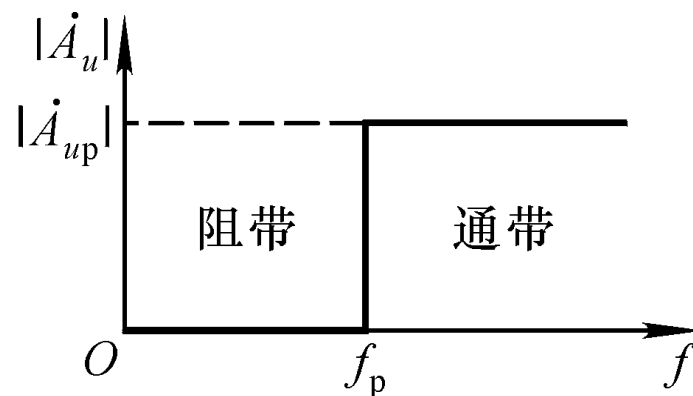
4. 滤波电路

- 使指定频段的信号顺利通过，其它频率的信号被衰减。
- 用幅频特性描述滤波特性

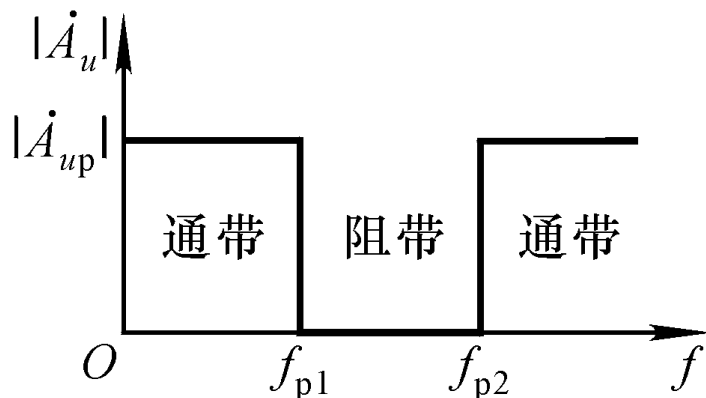
低通滤波器 (LPF)



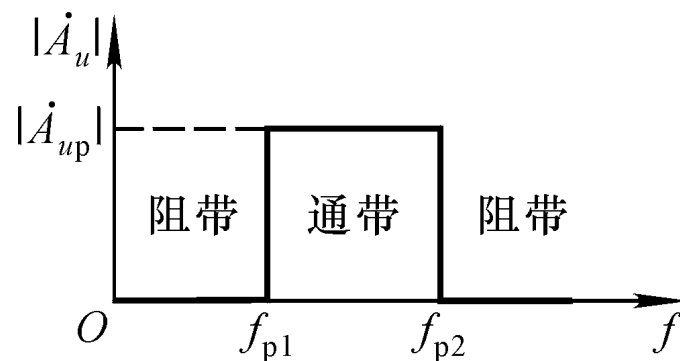
高通滤波器 (HPF)



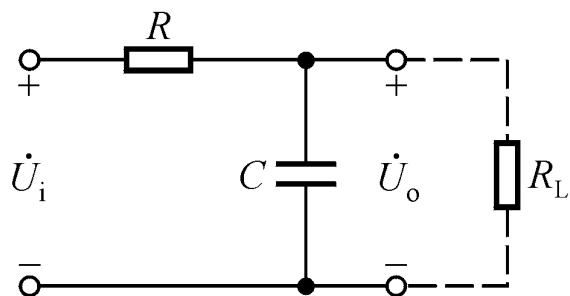
带阻滤波器 (BEF)



带通滤波器 (BPF)



无源滤波电路和有源滤波电路



空载:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$f \rightarrow 0$, 通带放大倍数为

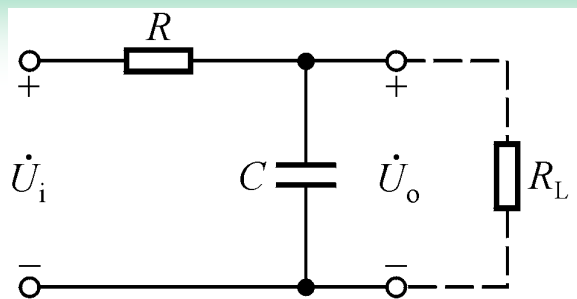
$$\dot{A}_{up} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 1$$

$$\text{令 } f_p = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_p}} = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j\frac{f}{f_p}}$$

其模为

$$|\dot{A}_u| = \frac{|\dot{A}_{up}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}}$$



$$|\dot{A}_u| = \frac{|\dot{A}_{uP}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}}$$

当 $f \ll f_p$ 时, $|\dot{A}_u| = |\dot{A}_{uP}|$

当 $f = f_p$ 时, 则

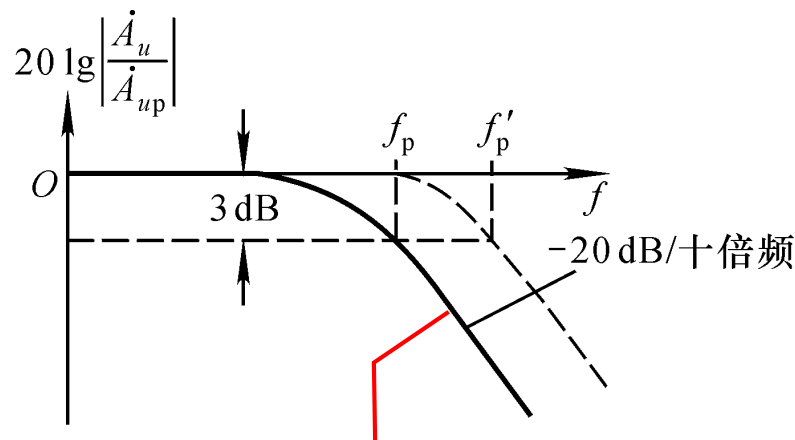
$$|\dot{A}_u| = \frac{|\dot{A}_{uP}|}{\sqrt{2}} = 0.707 |\dot{A}_{uP}|$$

当 $f \gg f_p$ 时, $|\dot{A}_u| = \frac{f_p}{f} |\dot{A}_{uP}|$

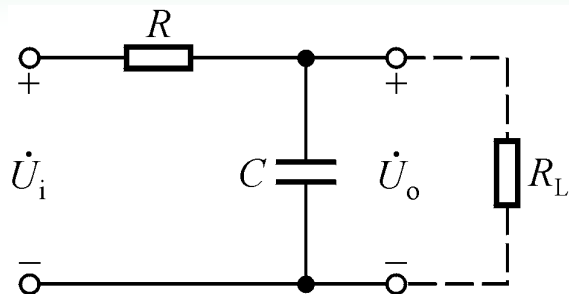
$$20 \lg \left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = -20 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2}$$

$$20 \lg \left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = -20 \lg \sqrt{2} = -20 \times 0.15 = -3 \text{ dB}$$

$$20 \lg \left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{up}} \right| = -20 \lg \frac{f}{f_p}$$



空载时幅频特性曲线

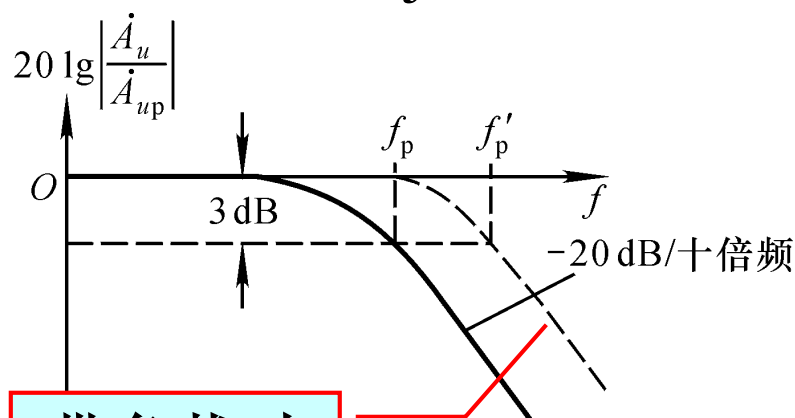


当带上负载时,

$$\dot{A}_{up} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_L}{R + R_L} < 1$$

f 从 $0 \rightarrow \infty$ 时, 电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_L // \frac{1}{j\omega C}}{R + R_L // \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{R_L}{R + R_L}}{1 + j\omega(R // R_L)C} \quad \text{令 } f'_p = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi(R // R_L)C}$$

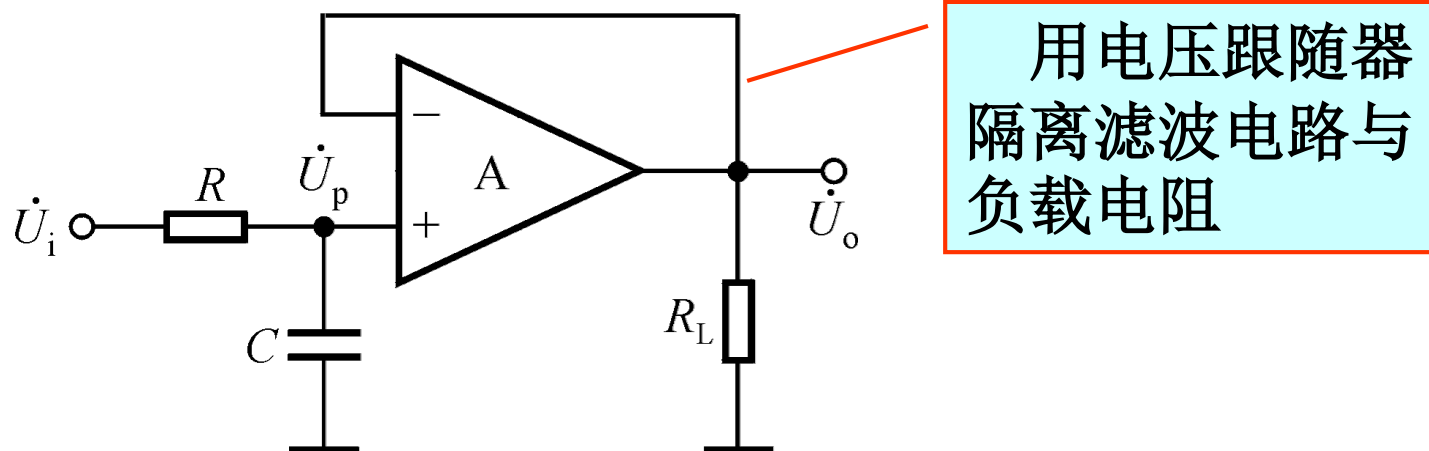


带负载时

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{A}_{up}}{1 + j\frac{f}{f'_p}}$$

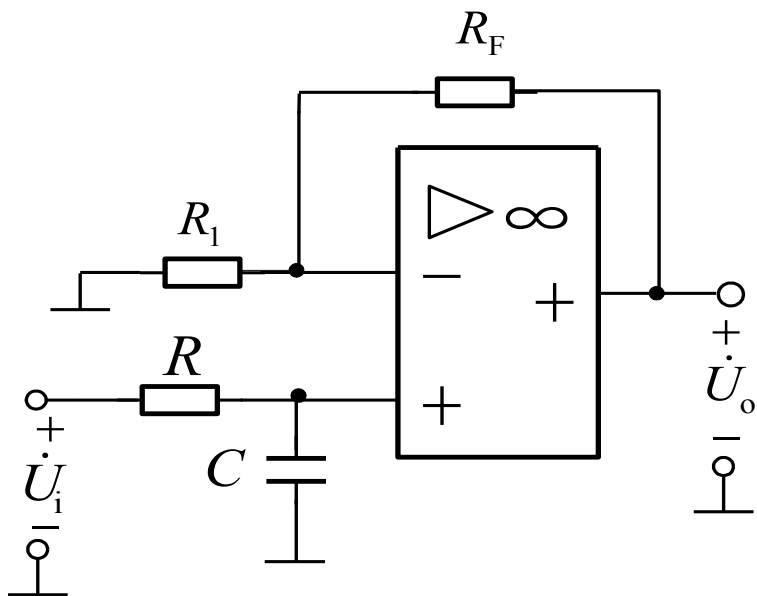
负载变化, 通带放大倍数和截止频率均变化。

有源滤波电路



- 无源滤波电路的滤波参数随负载变化；
- 有源滤波电路的滤波参数不随负载变化。

有源低通滤波器

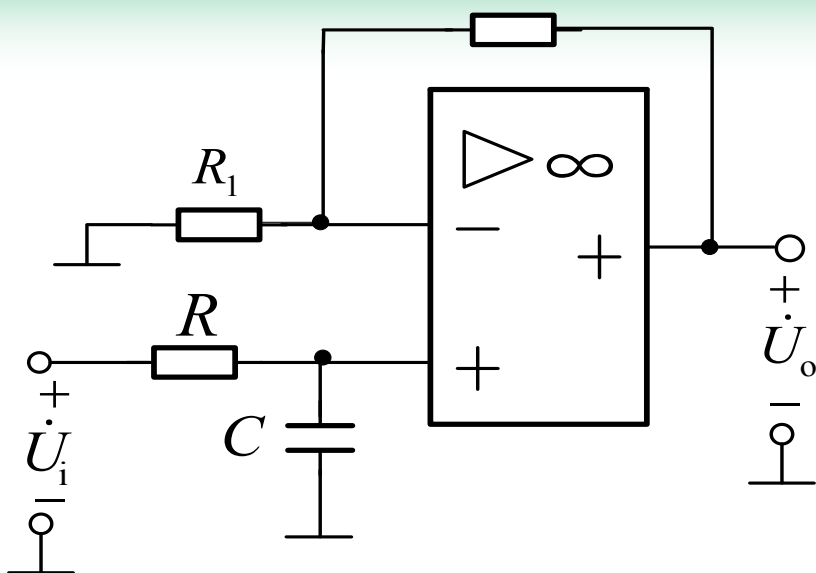


$$\dot{U}_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \dot{U}_+$$

$$\dot{U}_+ = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{1}{1 + j\omega RC} \dot{U}_i$$

所以，有源低通滤波器的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j\omega RC} = A_u \frac{1}{1 + j\omega RC} = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$



$$|H(j\omega)| = \frac{|A_u|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}}$$

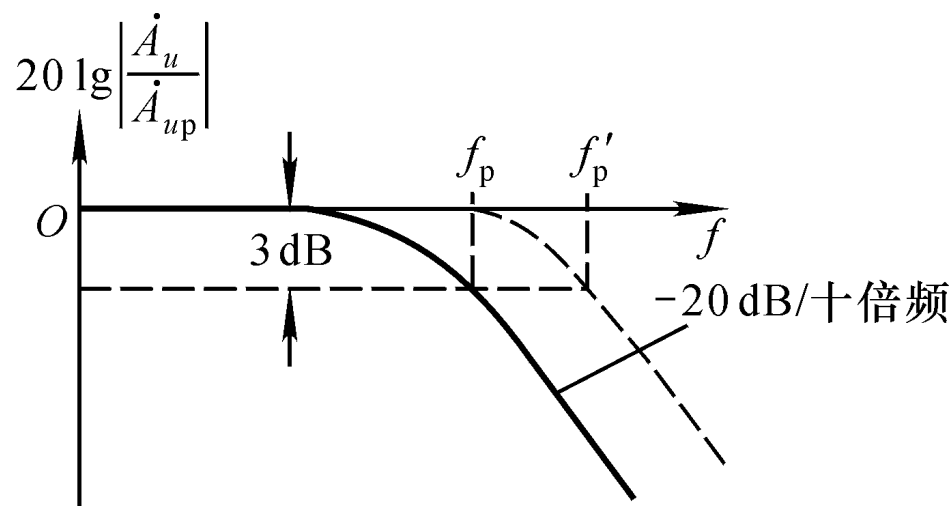
$$20\lg\left|\frac{H(j\omega)}{A_u}\right| = -20\lg\sqrt{2} = -3\text{dB}$$

$$20\lg\left|\frac{H(j\omega)}{A_u}\right| = -20\lg\frac{f}{f_p}$$

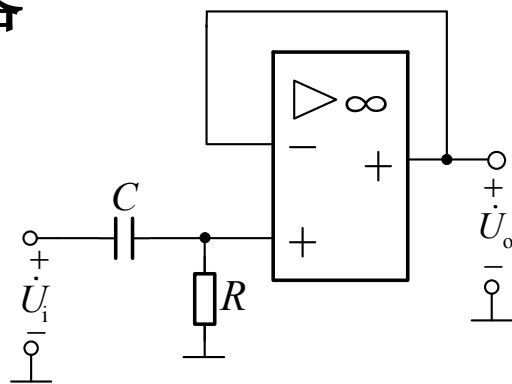
$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$= A_u \frac{1}{1 + j\omega RC} = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$

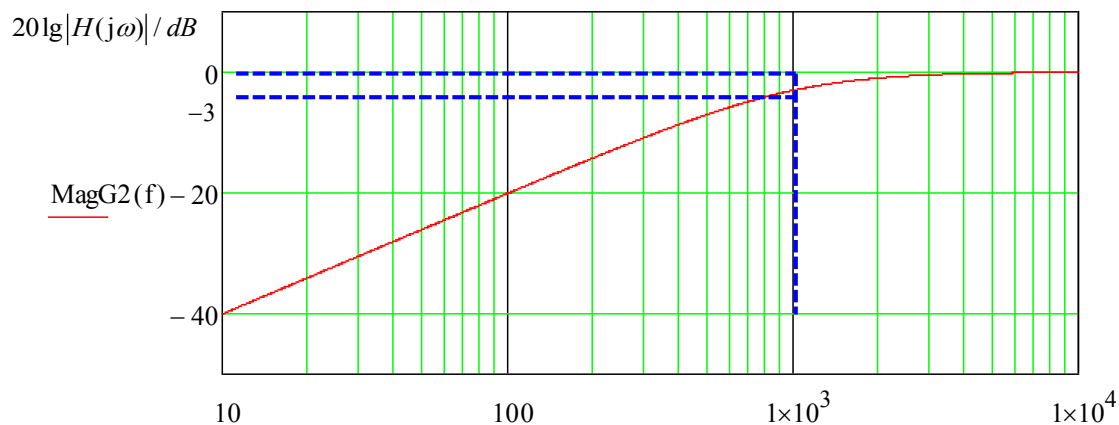
$$\text{令 } f_p = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC} \quad H(j\omega) = A_u \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_p}}$$



有源高通滤波器



$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

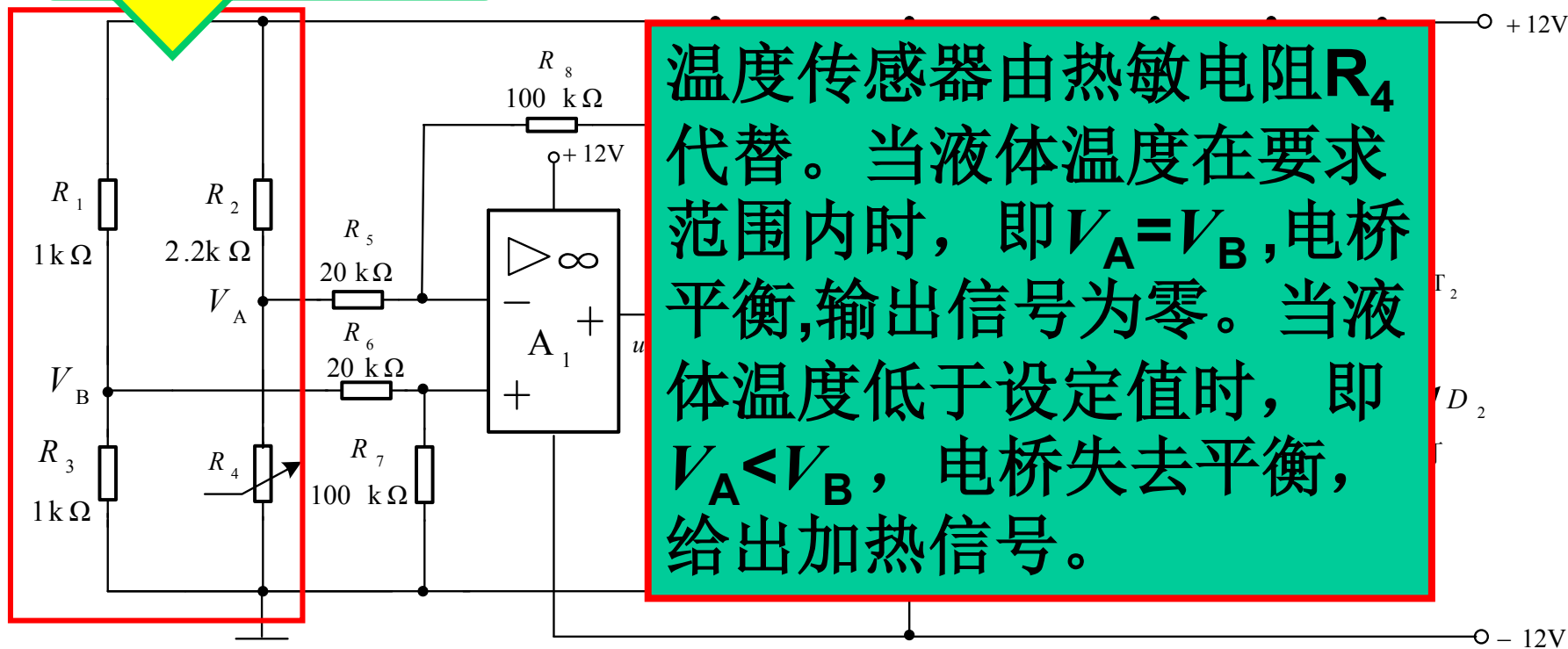


$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad 3\text{dB截止角频率}$$

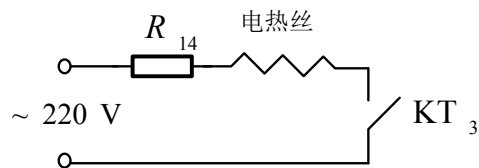
5. 恒温控制电路

温控电桥电路

温控控制电路如图所示：



温度传感器由热敏电阻 R_4 代替。当液体温度在要求范围内时，即 $V_A = V_B$ ，电桥平衡，输出信号为零。当液体温度低于设定值时，即 $V_A < V_B$ ，电桥失去平衡，给出加热信号。

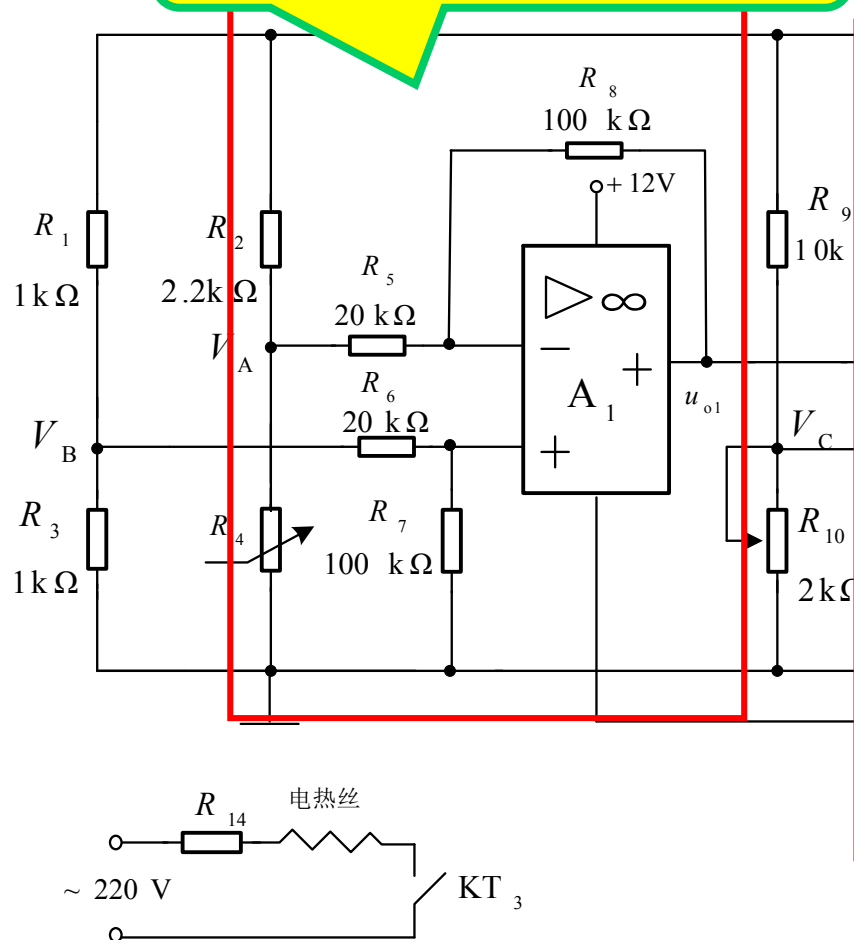


继电器：线圈+常开触点+常闭触点

常开触点（ KT_2 和 KT_3 ）：线圈没有通电时开路

常闭触点（ KT_1 ）：线圈没有通电时闭合

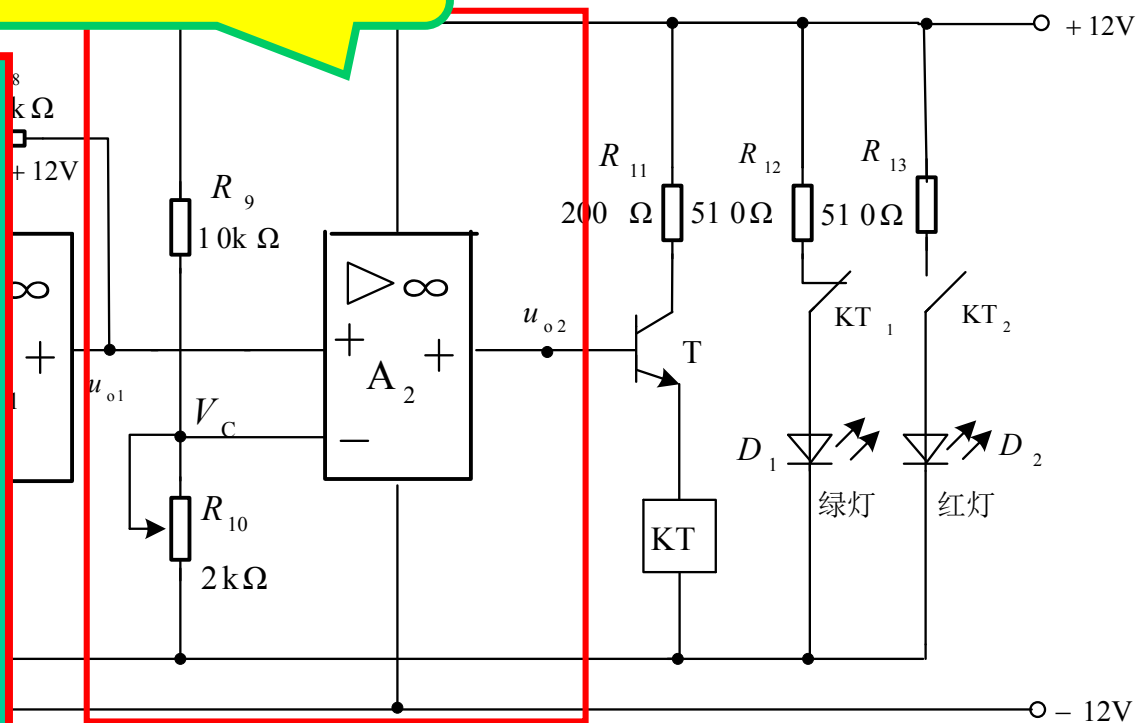
温度信号放大电路



温度信号放大电路由运放 A_1 和几个电阻组成，接成差分输入形式。当液体温度在要求范围内时，即 $V_A = V_B$ ，运放的输出电压 $u_{o1} = 0$ 。当液体温度低于设定值时，即 $V_A < V_B$ ，运放有差值信号输入，经过 A_1 放大，送到下一级电路。

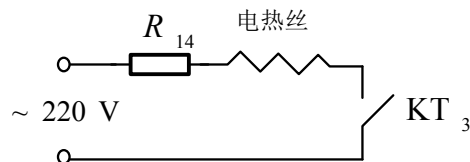
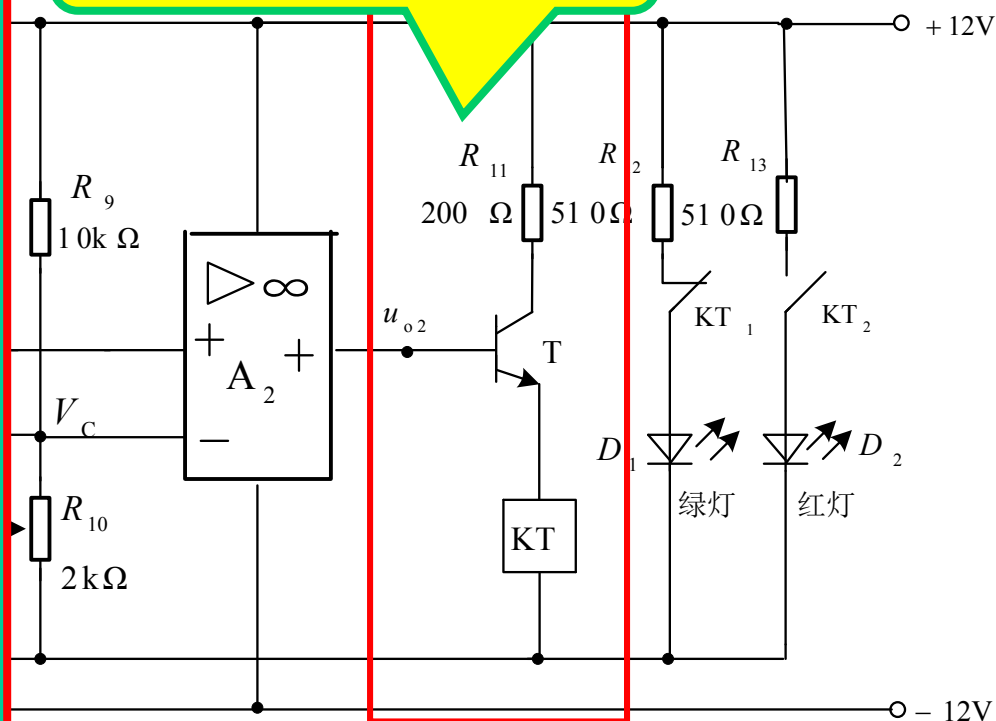
恒温预置电路

恒温预置电路由运放 A_2 和几个电阻组成， A_2 接成电压比较器。调整电阻 R_{10} 的阻值，设定参考电压值 V_C ，与 u_{01} 进行比较，当 $u_{01} < V_C$ 时， u_{02} 输出低电平；当 $u_{01} > V_C$ 时， u_{02} 输出高电平。



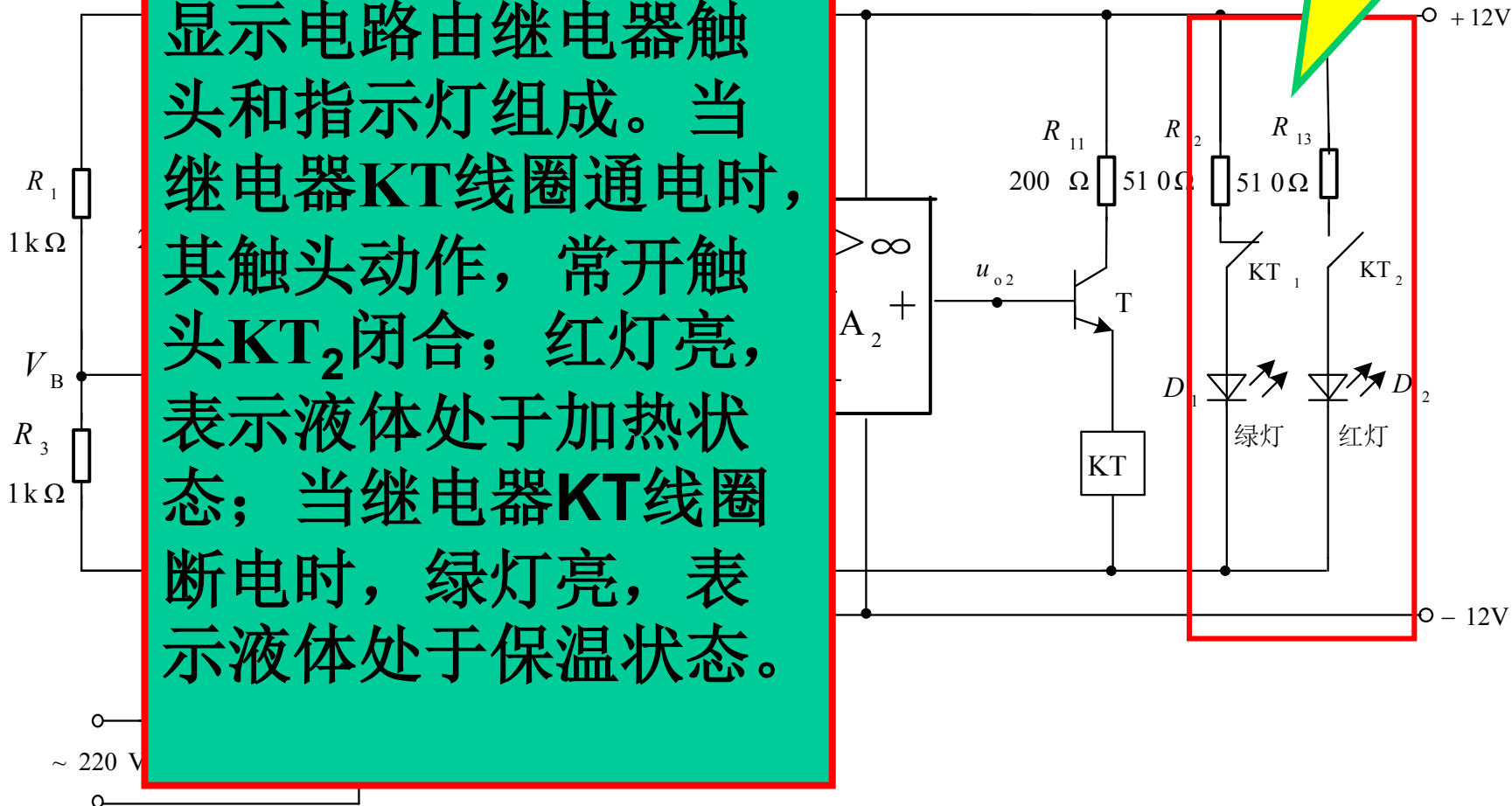
继电器驱动电路

继电器驱动电路由晶体管T和继电器KT线圈及电阻组成。当 $u_{01} > V_C$ 时， u_{02} 输出高电平，晶体管T导通，继电器KT线圈通电，其触头动作。

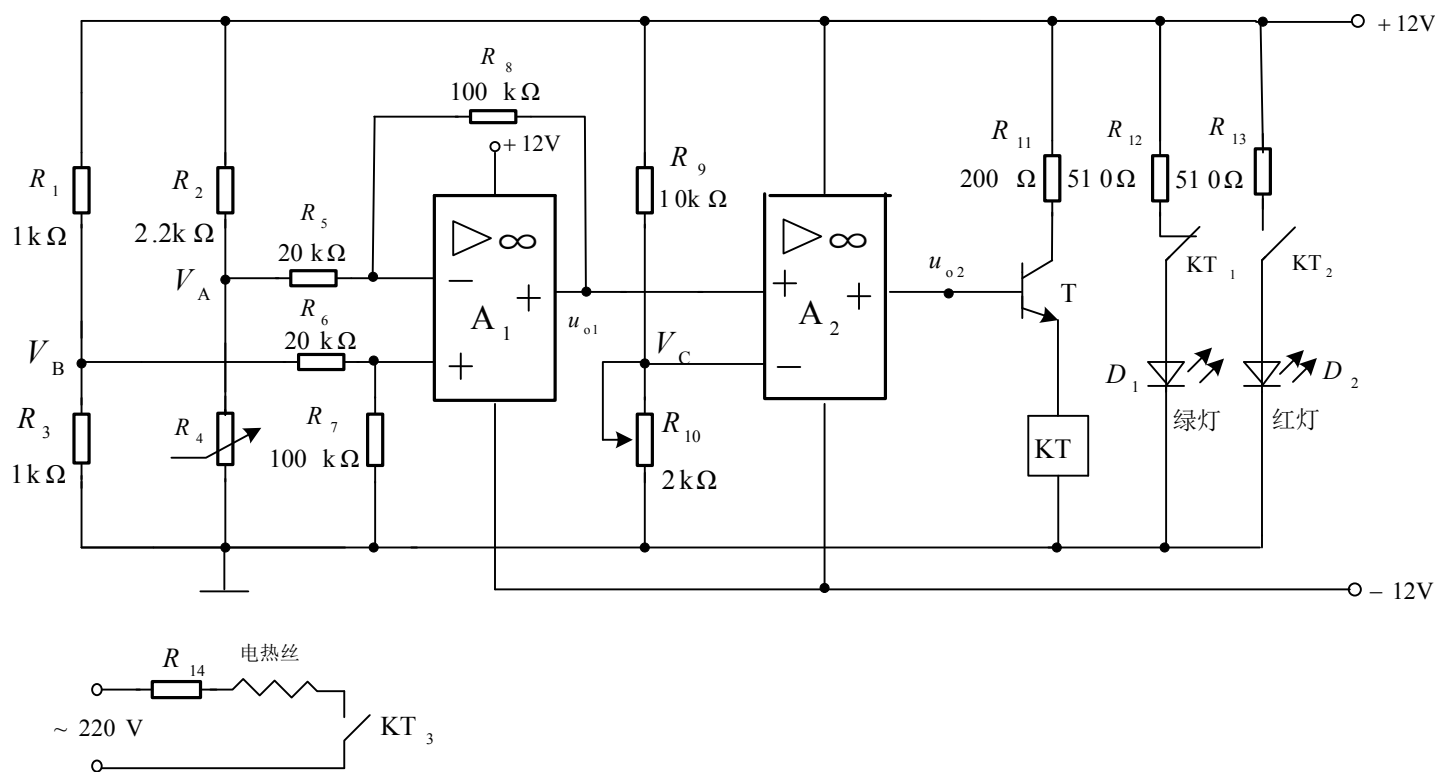


显示电路

显示电路由继电器触头和指示灯组成。当继电器KT线圈通电时，其触头动作，常开触头KT₂闭合；红灯亮，表示液体处于加热状态；当继电器KT线圈断电时，绿灯亮，表示液体处于保温状态。



控制原理分析



当液体的温度低于设定值时，电桥不平衡， $V_A < V_B$ ， A_1 和 A_2 输出高电平，晶体管 T 导通， KT 通电，其触头 KT_3 和 KT_2 闭合，主电路接通， D_2 导通，红灯亮，液体处于加热状态。

第7章

结 束