

第五章 集成运放及其应用

集成运算放大器——高增益的直接耦合的集成的多级放大器。

集成电路的工艺特点：

(1) 元器件具有良好的一致性和同向偏差，因而特别有利于实现需要对称结构的电路。

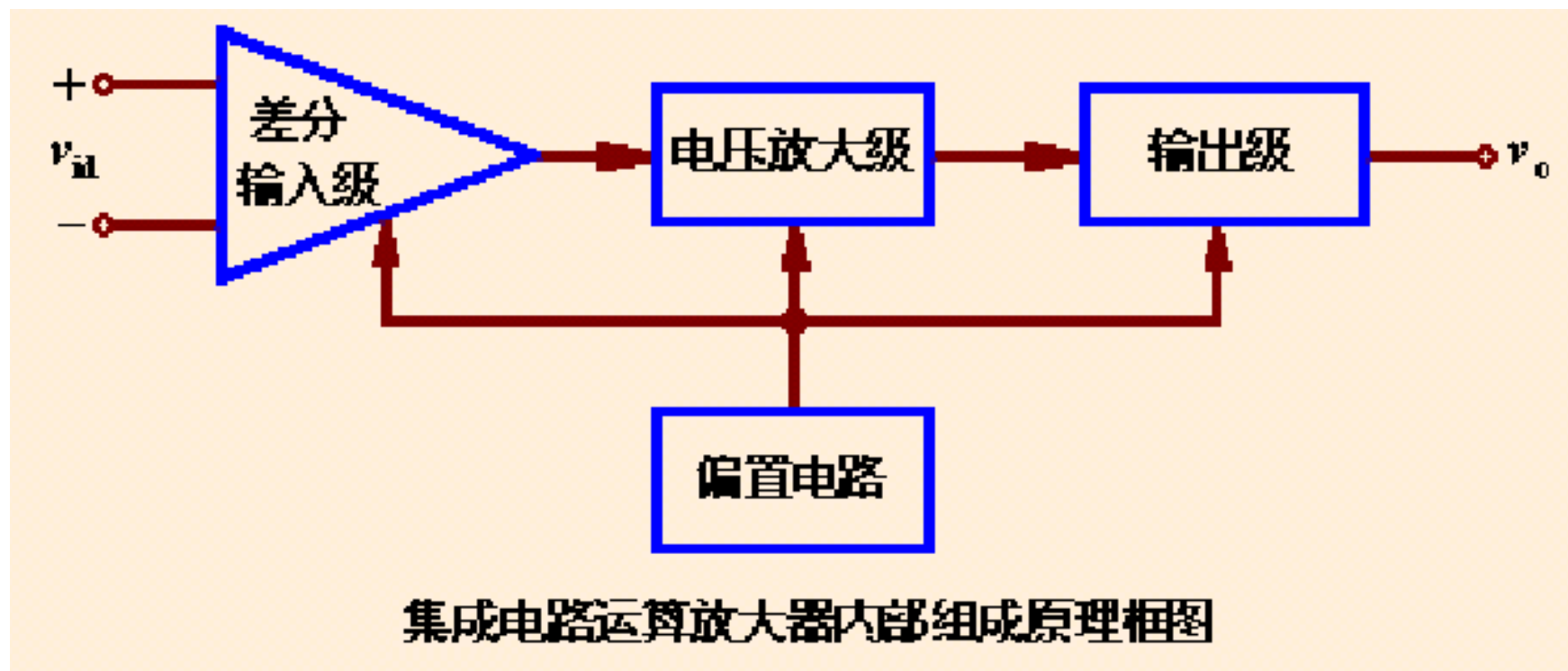
(2) 集成电路的芯片面积小，集成度高，所以功耗很小，在毫瓦以下。

(3) 不易制造大电阻。需要大电阻时，往往使用有源负载。

(4) 只能制作几十pF以下的小电容。因此，集成放大器都采用直接耦合方式。如需大电容，只有外接。不能制造电感，如需电感，也只能外接。

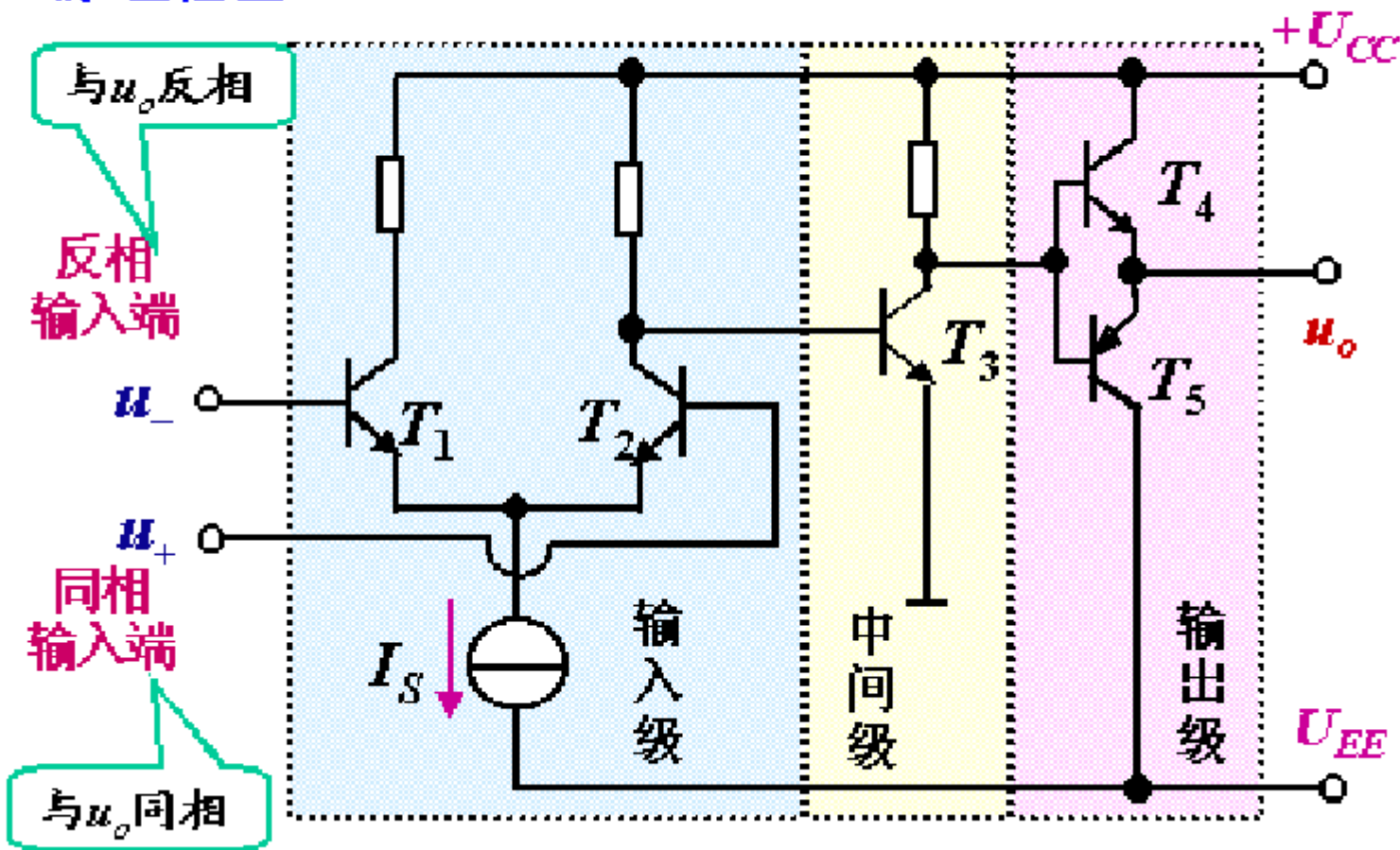
(5) 电路中二极管作温度补偿和电位移动，一般用三极管发射结构成。

一. 集成运放的总体结构



二. 简单的集成运放

原理框图:



5.1 集成运算放大器的主要参数

1. 输入失调电压 V_{io}

输入电压为零时，将输出电压除以电压增益，即为折算到输入端的失调电压。是表征运放内部电路对称性的指标。

2. 输入失调电压温漂 dV_{io}/dT

在规定工作温度范围内，输入失调电压随温度的变化量与温度变化量之比值。

3.输入偏置电流 I_B ：

输入电压为零时，运放两个输入端偏置电流的平均值，用于衡量差分放大对管输入电流的大小。

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$$

4.输入失调电流 I_{i0} ：

在零输入时，差分输入级的差分对管基极电流之差，用于表征差分级输入电流不对称的程度。

$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

5.输入失调电流温漂 dI_{i0}/dT

在规定工作温度范围内，输入失调电流随温度的变化量与温度变化量之比值。

6.最大差模输入电压 V_{idmax}

运放两输入端能承受的最大差模输入电压，超过此电压时，差分管将出现反向击穿现象。

7.最大共模输入电压 V_{icmax}

在保证运放正常工作条件下，共模输入电压的允许范围。共模电压超过此值时，输入差分对管出现饱和，放大器失去共模抑制能力。

8.开环差模电压放大倍数 A_{od} :

无反馈时的差模电压增益。

一般 A_{od} 在100~120dB左右，高增益运放可达140dB以上。

$$A_{od} = \frac{V_o}{V_+ - V_-}$$

9.差模输入电阻 r_{id} :

双极型管输入级约为 $10^5 \sim 10^6$ 欧姆，场效应管输入级可达 10^9 欧姆以上。

10.共模抑制比 K_{CMR} :

$$K_{CMR} = 20 \lg(A_{vd} / A_{vc}) \text{ (dB)}$$

其典型值在80dB以上，性能好的高达180dB。

11. -3dB带宽 f_H :

运放的差模电压放大倍数在高频段下降3dB所定义的带宽 f_H 。

12. 转换速率 S_R (压摆率):

反映运放对于快速变化的输入信号的响应能力。
转换速率 S_R 的表达式为

$$S_R = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$$

5.1.2 特殊集成运算放大器

为满足实际使用中对集成运放性能的特殊要求，除性能指标比较适中的通用型运放外，还有适应不同需要的专用型集成运放。它们在某些技术指标上比较突出。

根据运算放大器的技术指标可以对其进行分类，主要有通用、高速、宽带、高精度、高输入电阻和低功耗等几种。

1. 高速型和宽带型

用于宽频带放大器，高速A/D、D/A，高速数据采集测试系统，这种运放的单位增益带宽和压摆率的指标均较高。用于小信号放大时，可注重 f_H 或 f_c 。用于高速大信号放大时，同时还应注重 S_R 。例如：

CF2520/2525	$S_R = 120 \text{ V}/\mu\text{s}$	$BWG = 20\text{MHz}$
AD9620	$S_R = 2200 \text{ V}/\mu\text{s}$	$f_H = 600\text{MHz}$
AD9618	$S_R = 1800 \text{ V}/\mu\text{s}$	$BWG = 8000\text{MHz}$
OP37	$S_R = 17 \text{ V}/\mu\text{s}$	$BWG = 63\text{MHz}$
CF357	$S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s}$	$BWG = 20\text{MHz}$

2. 高精度（低漂移型）

用于精密仪表放大器，精密测试系统，精密传感器信号变送等，主要看失调电压、电流和温漂指标。例如：

OP177

$$V_{IO} = 4\mu\text{ V}$$

$$I_{IO} = 0.3\text{ nA}$$

$$\frac{dV_{IO}}{dT} = 0.03\mu\text{ V}/^{\circ}\text{C} \quad \frac{dI_{IO}}{dT} = 1.5\text{ pA}/^{\circ}\text{C}$$

CF714

$$V_{IO} = 30 \sim 60\ \mu\text{ V}$$

$$I_{IO} = 0.4 \sim 0.8\text{ nA}$$

$$\frac{dV_{IO}}{dT} = 0.3 \sim 0.5\ \mu\text{ V}/^{\circ}\text{C} \quad \frac{dI_{IO}}{dT} = 8 \sim 12\text{ pA}/^{\circ}\text{C}$$

3. 高输入阻抗型

用于测量设备及采样保持电路中，主要看偏置电流和输入电阻。例如：

AD549

$$I_{IB} < 0.040 \text{ pA} \quad R_{id} > 10^{13} \Omega$$

CF155/255/355

$$I_{IB} = 30 \text{ pA} \quad R_{id} > 10^{12} \Omega$$

4. 低功耗型

用于空间技术和生物科学研究中，工作于较低电压下，工作电流微弱。 例如：

OP22 正常工作静态功耗可低至 $36\mu\text{W}$ 。

OP290 在 $\pm 0.8\text{ V}$ 电压下工作，功耗为 $24\mu\text{W}$ 。

CF7612 在 $\pm 5\text{ V}$ 电压下工作，功耗为 $50\mu\text{W}$ 。

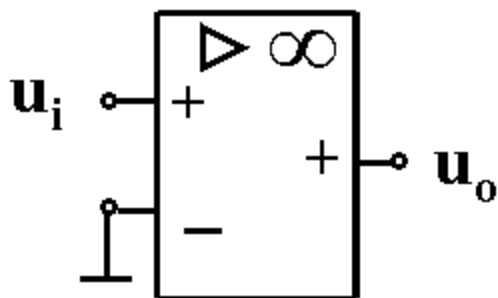
5.2 集成运放电路分析方法

运算放大器的两个工作区域（状态）

1. 运放的电压传输特性：

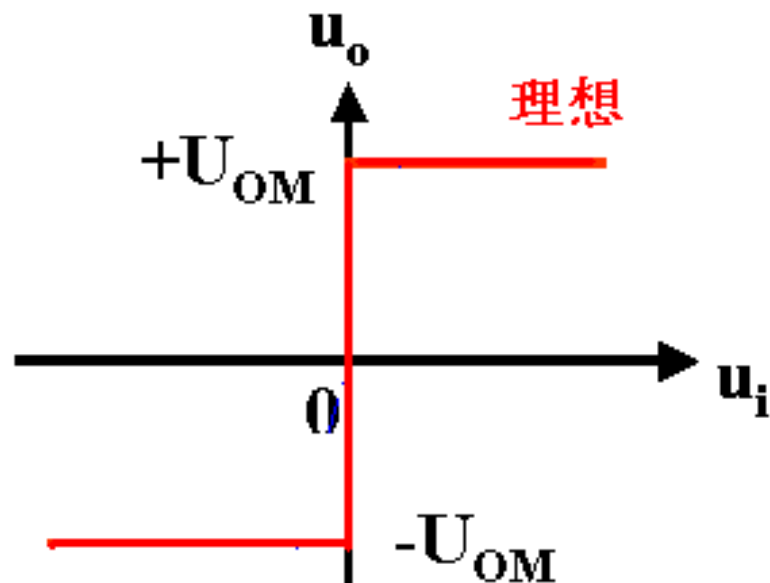
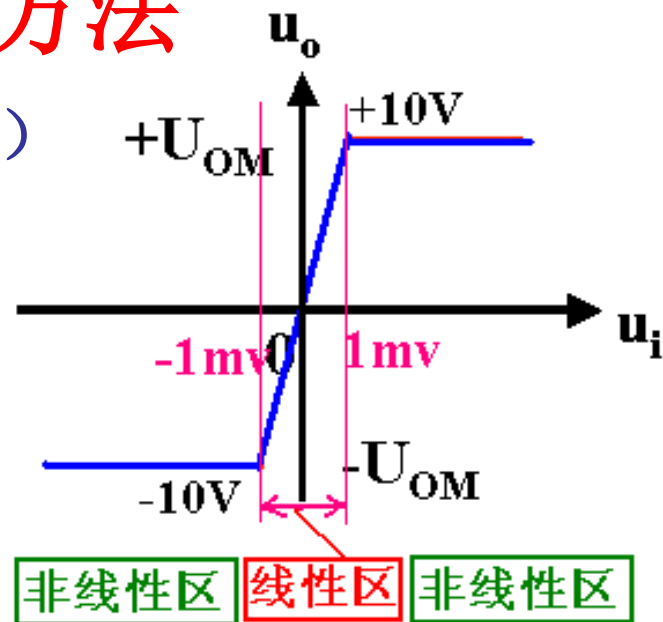
设：电源电压 $\pm V_{CC} = \pm 10V$ 。

运放的 $A_{VO} = 10^4$



$|U_i| \leq 1mV$ 时，运放处于线性区。

A_{VO} 越大，线性区越小，
当 $A_{VO} \rightarrow \infty$ 时，线性区 $\rightarrow 0$



2.理想运算放大器：开环电压放大倍数 $A_{V0}=\infty$
差模输入电阻 $R_{id}=\infty$
输出电阻 $R_0=0$

3. 线性区

为了扩大运放的线性区，给运放电路引入负反馈：

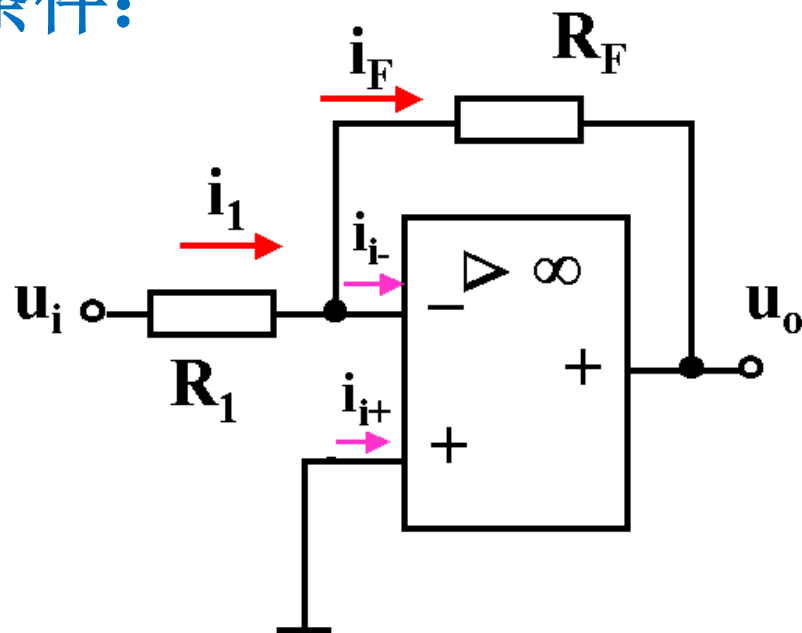
理想运放工作在线性区的条件：

电路中有负反馈！

运放工作在线性区的分析方法：

虚短 ($V_+=V_-$)

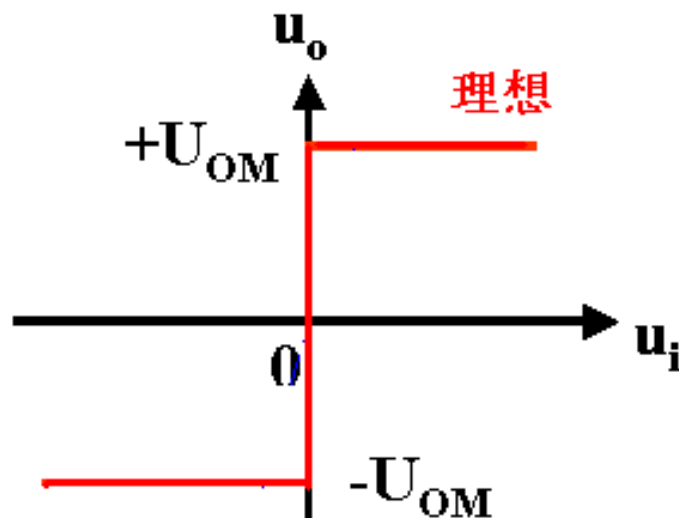
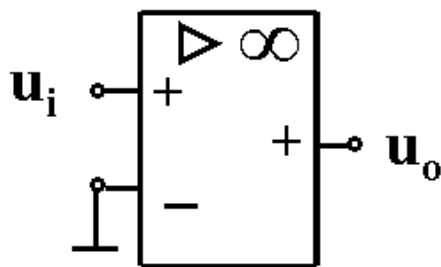
虚断 ($i_{i+}=i_{i-}=0$)



4. 非线性区（正、负饱和输出状态）

运放工作在非线性区的条件：

电路中开环工作或引入正反馈！

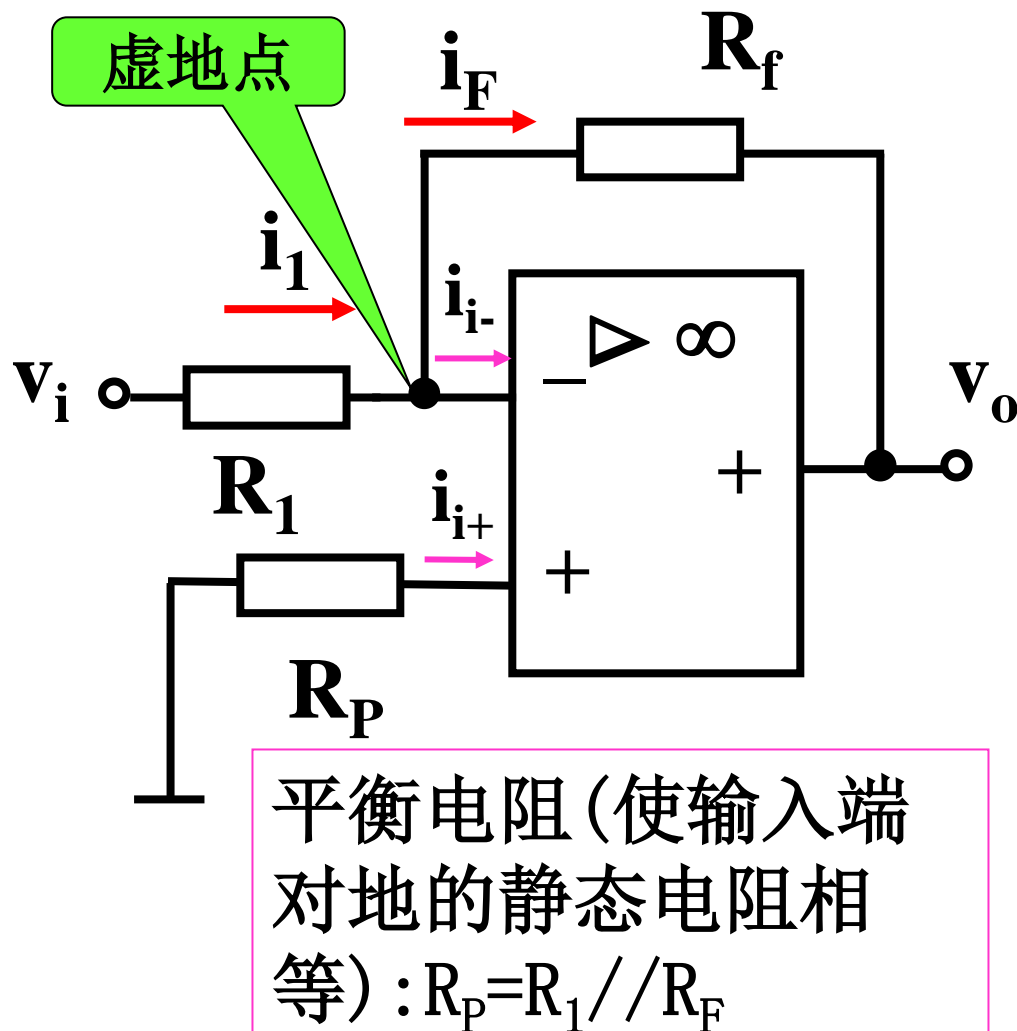


运放工作在非线性区的分析方法在下一章讨论

5.3 基本运输道路

5.3.1 比例运算电路

一. 反相比例运算



反馈方式:

电压并联负反馈

因为有负反馈，
利用虚短和虚断

$$v_+ = 0$$

$$v_- = v_+ = 0 \text{ (虚地)}$$

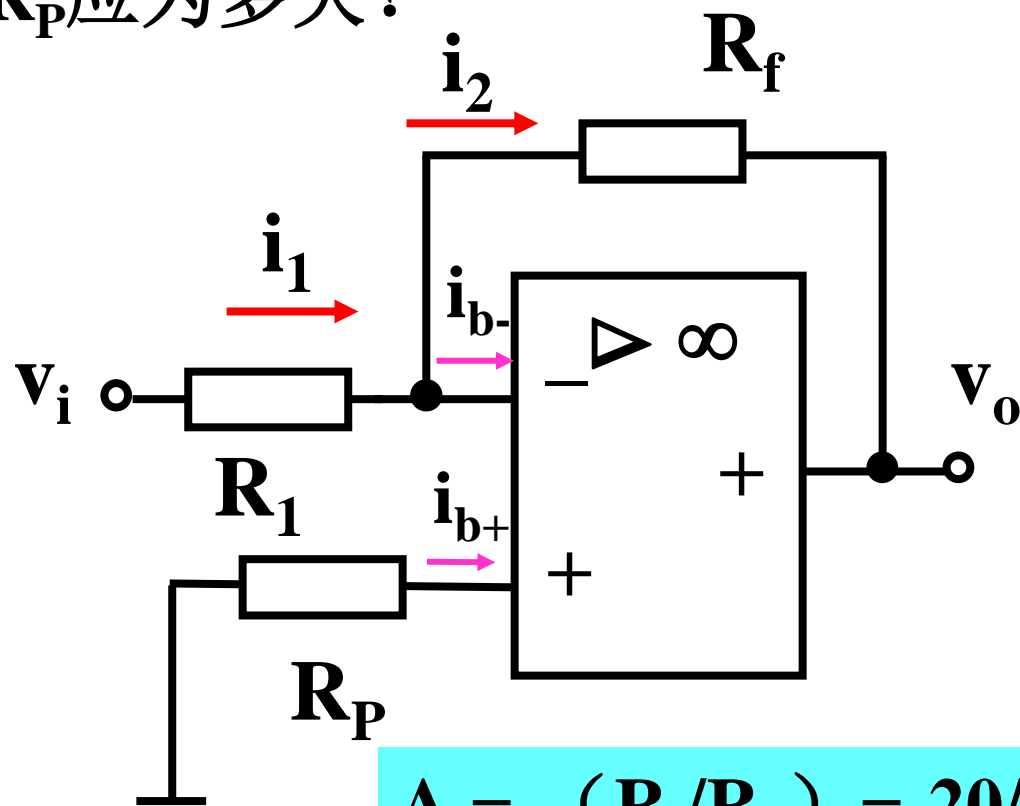
$$i_1 = i_F \text{ (虚断)}$$

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

电压放大倍数:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

例题1. $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_F=20\text{k}\Omega$, $u_i=-1\text{V}$ 。求： u_o 、 R_i ， R_P 应为多大？



特点：

共模输入电压=0

($v_- = v_+ = 0$)

缺点：

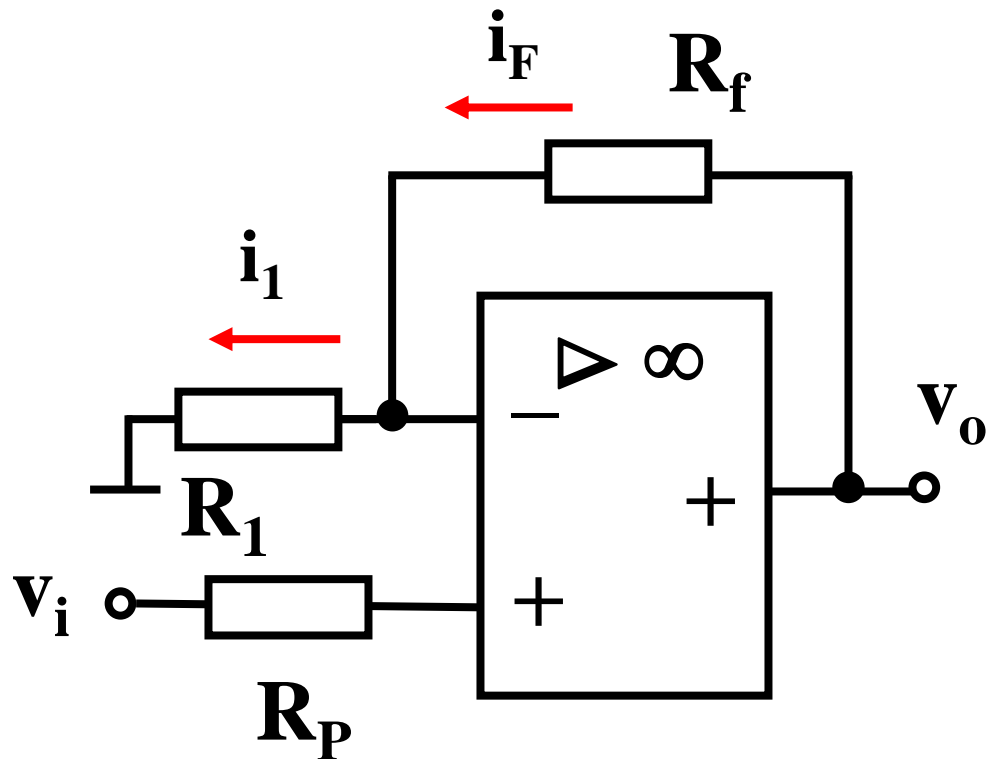
输入电阻小 ($R_i = R_1$)

$$A_v = - (R_f / R_1) = -20 / 10 = -2$$

$$v_o = A_v u_i = (-2)(-1) = 2\text{V}, \quad R_i = R_1$$

$$R_P = R_1 // R_f = 10 // 20 = 6.7 \text{ k}\Omega$$

二. 同相比例运算放大器



$$R_P = R_f // R_1$$

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

反馈方式:

电压串联负反馈

因为有负反馈，
利用虚短和虚断

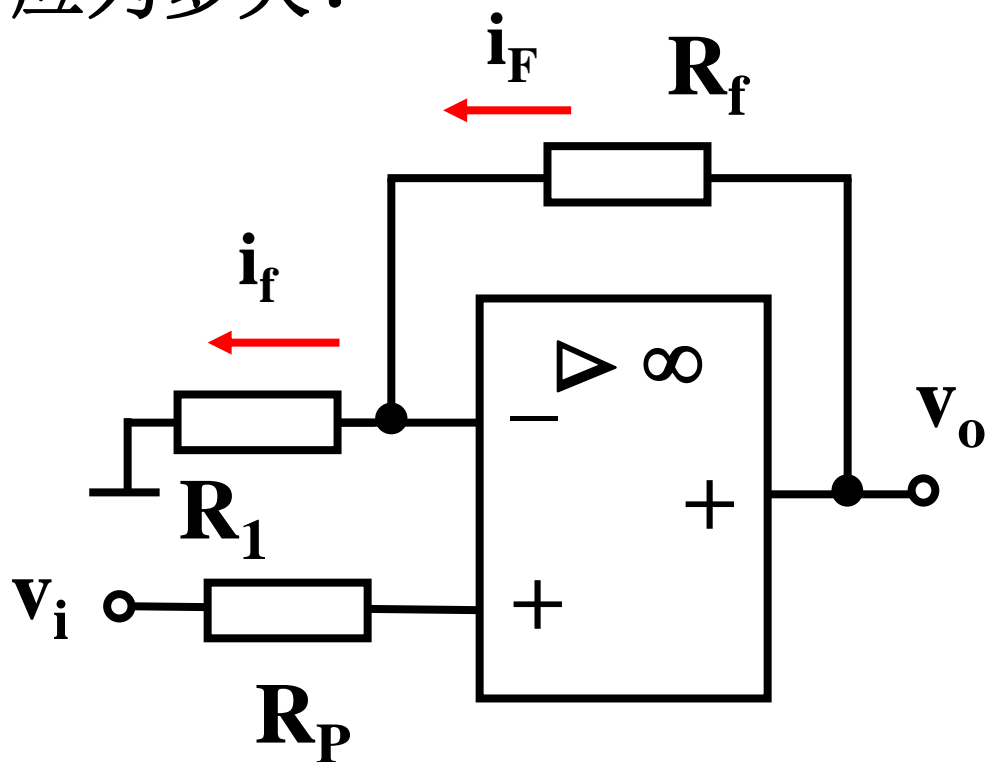
$$V_- = V_+ = V_i$$

$$i_1 = i_F \quad (\text{虚断})$$

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

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

例题2. $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_f=20\text{k}\Omega$, $v_i=-1\text{V}$ 。求： u_o , R_P 应为多大？



特点：

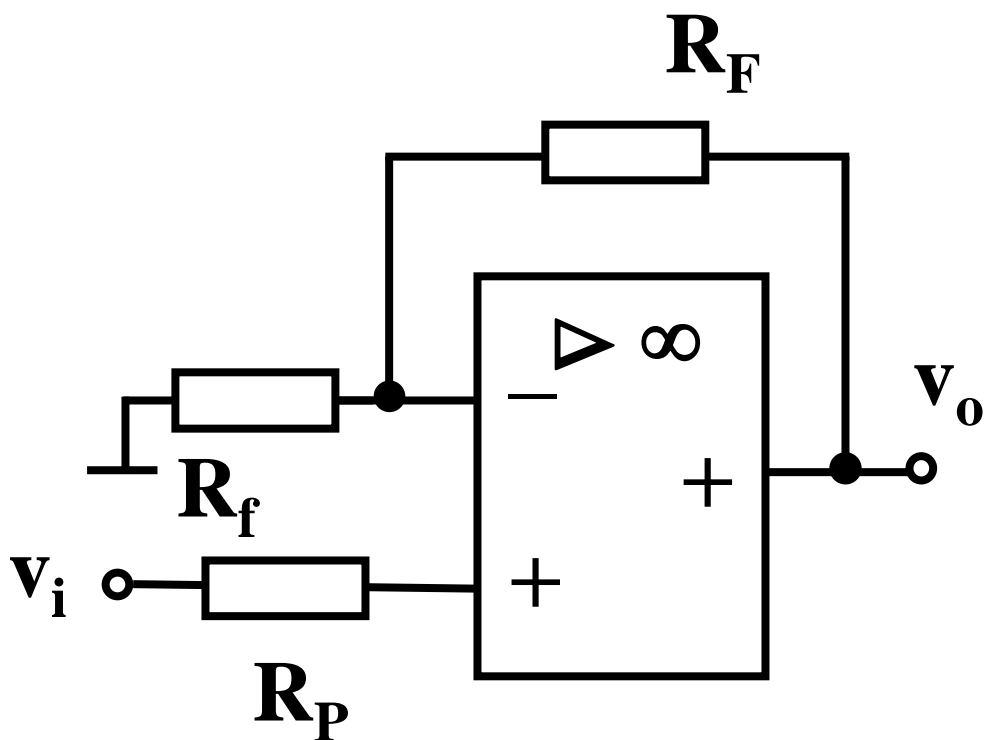
输入电阻(高)

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + 20/10 = 3$$

$$v_o = A_v v_i = (3)(-1) = -3\text{V}$$

$$R_P = R_f // R_1 = 10 // 20 = 6.7 \text{ k}\Omega$$

三.电压跟随器



此电路是同相比
例运算的特殊情况，
输入电阻大，输出
电阻小。在电路中
作用与分离元件的
射极输出器相同，
但是电压跟随性能
好。

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_f}$$

当 $R_F=0$ 时，

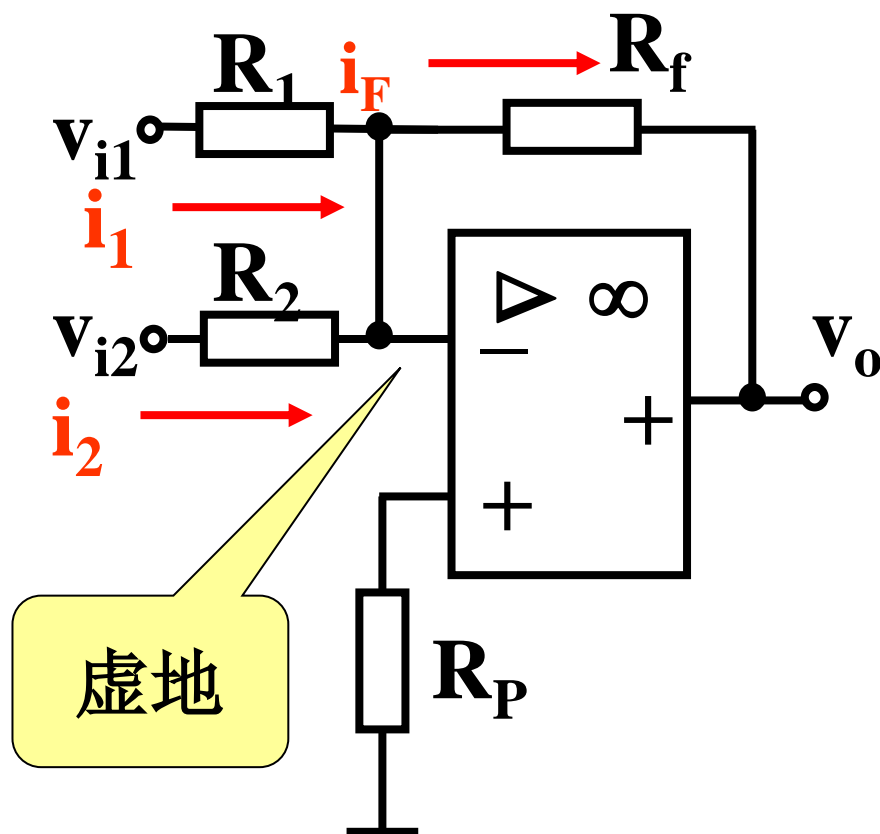
$$A_v = 1$$

$$V_o = V_i$$

5.3.2 基本运算电路

一. 加法运算电路

1. 反相求和运算:



$$\text{取 } R_P = R_1 // R_2 // R_f$$

$$v_+ = v_- = 0$$

$$i_1 + i_2 = i_F$$

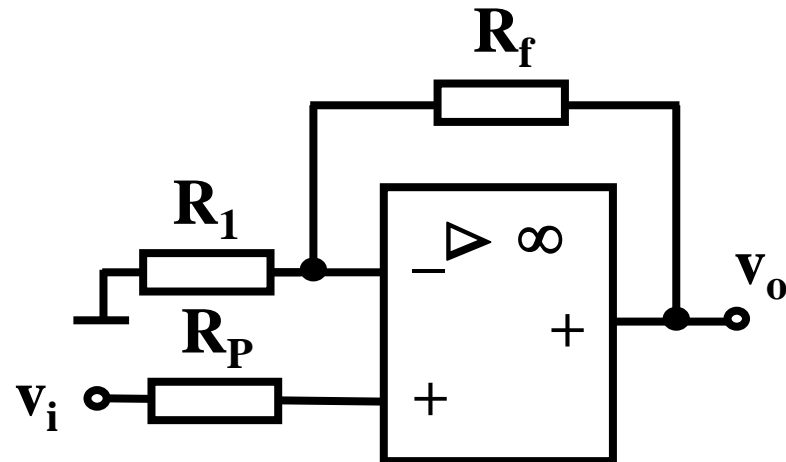
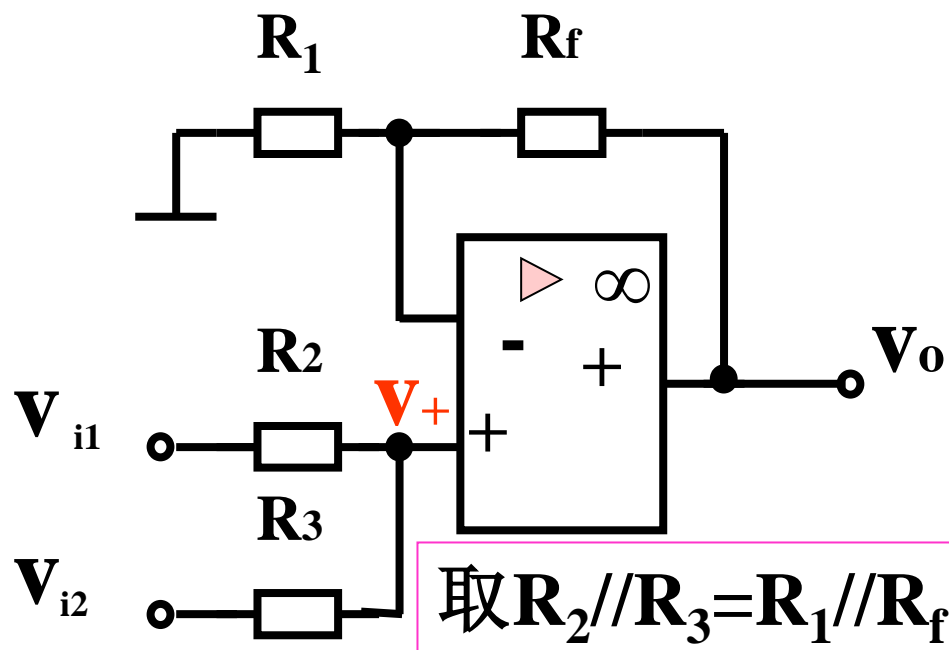
$$\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} = \frac{-v_o}{R_f}$$

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_{i1} + \frac{R_f}{R_2} v_{i2} \right)$$

$$\text{若 } R_1 = R_2 = R,$$

$$v_o = -\frac{R_f}{R} (v_{i1} + v_{i2})$$

2. 同相求和运算:



$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = \frac{u_o}{u_+}$$

$$V_o = A_v V_+ = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i1} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} v_{i2} \right)$$

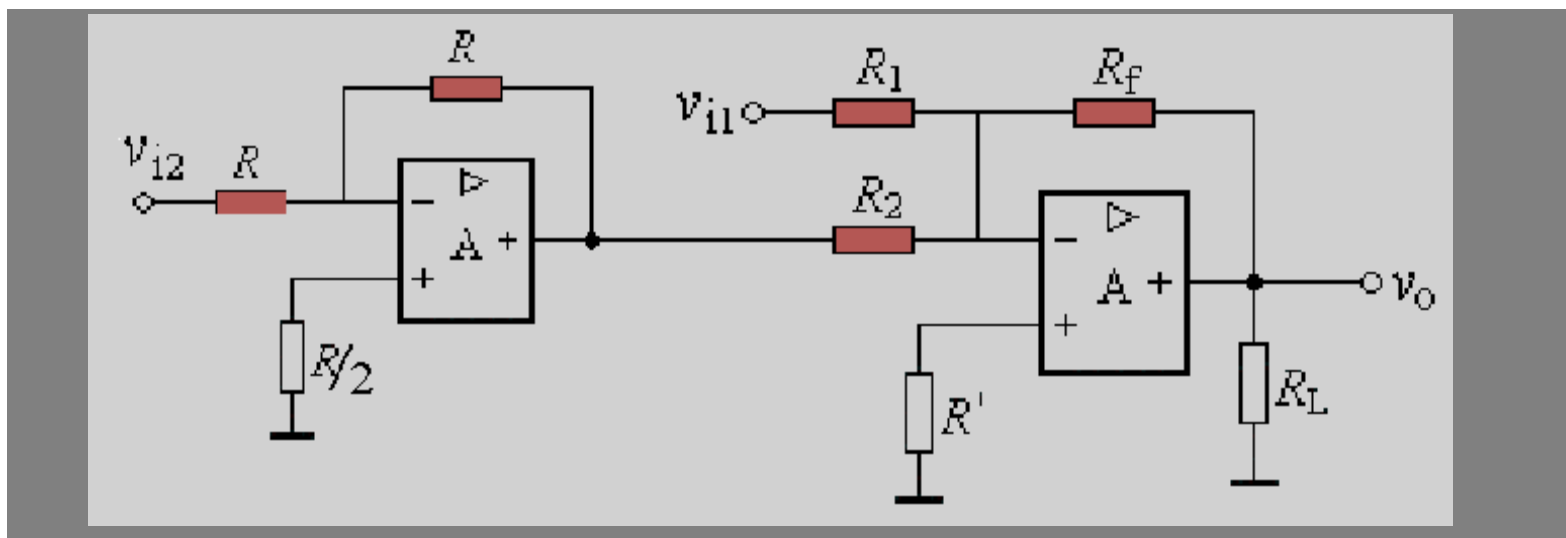
$$\text{当 } R_2 = R_3 \text{ 时, } V_o = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) (v_{i1} + v_{i2})$$

二. 减法运算电路

1、利用加法器

$$V_{i2} - V_{i1} = V_{i2} + (-V_{i1})$$

反相器 (-1)



$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_{i1} + \frac{R_f}{R_2} V_{i2}\right)$$
$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_{i1} + \frac{R_f}{R_2} (-V_{i2})\right) = \frac{R_f}{R_2} V_{i2} - \frac{R_f}{R_1} V_{i1}$$

(二) 减法器

2、差动减法器

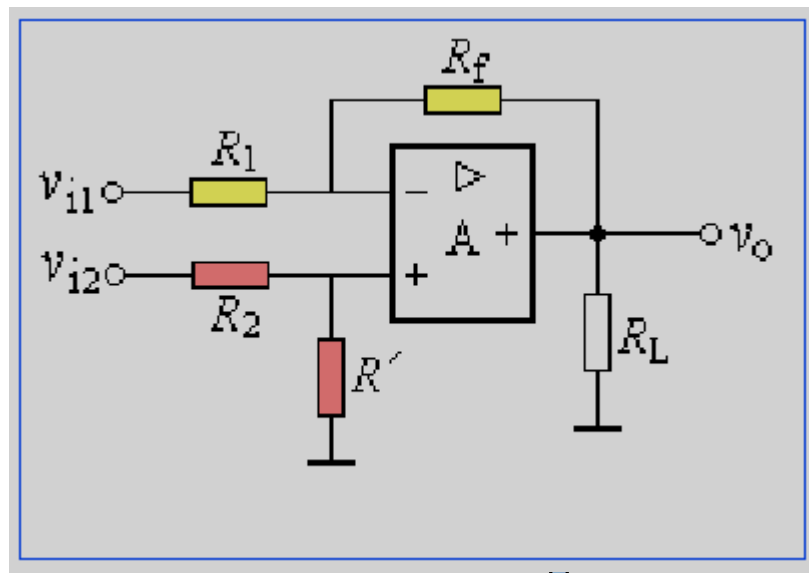
叠加定理

V_{i1} 作用

$$v'_o = -\frac{R_f}{R_1} v_{i1}$$

V_{i2} 作用

$$v''_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R'}{R' + R_2} v_{i2}$$



综合:

$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_{i1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R'}{R' + R_2} v_{i2}$$

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{R_f}{R_1} (v_{i1} - v_{i2}) \\ &= \frac{R_f}{R_1} (v_{i2} - v_{i1}) \end{aligned}$$

若 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R'}{R_2}$

(三) 加减运算

当满足条件: $R_N = R_P$

$R_N = R_1 // R_2 // R_f$,

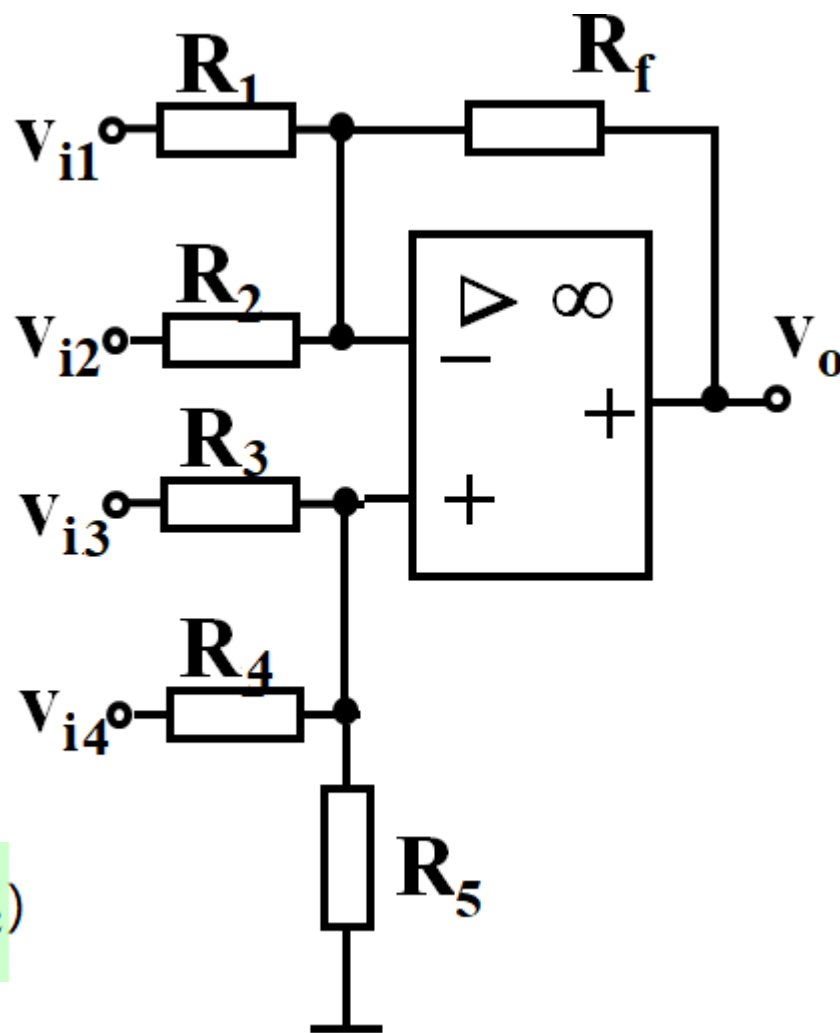
$R_P = R_3 // R_4 // R_5$ 时

采用叠加原理

$$v_o' = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_{i1} + \frac{R_f}{R_2}v_{i2}\right)$$

$$v_o'' = \left(\frac{R_f}{R_3}v_{i3} + \frac{R_f}{R_4}v_{i4}\right) \quad (\text{简化后})$$

$$v_o = \left(\frac{R_f}{R_3}v_{i3} + \frac{R_f}{R_4}v_{i4}\right) - \left(\frac{R_f}{R_1}v_{i1} + \frac{R_f}{R_2}v_{i2}\right)$$



三. 积分和微分电路

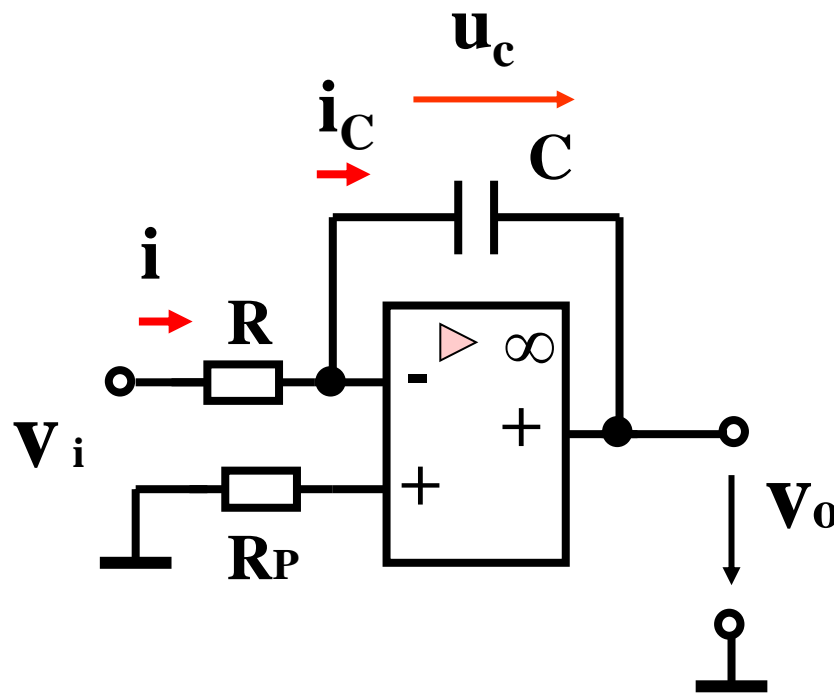
1. 积分电路

$$\because \text{虚地} \quad \therefore i = \frac{v_i}{R}$$

$$i_c = C \cdot du_c / dt$$

$$v_o = -v_c = -\frac{1}{C} \int i_c dt$$

$$= -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$



反相积分器：如果 u_i =直流电压 U ,输出将反相积分，经过一定的时间后输出饱和。

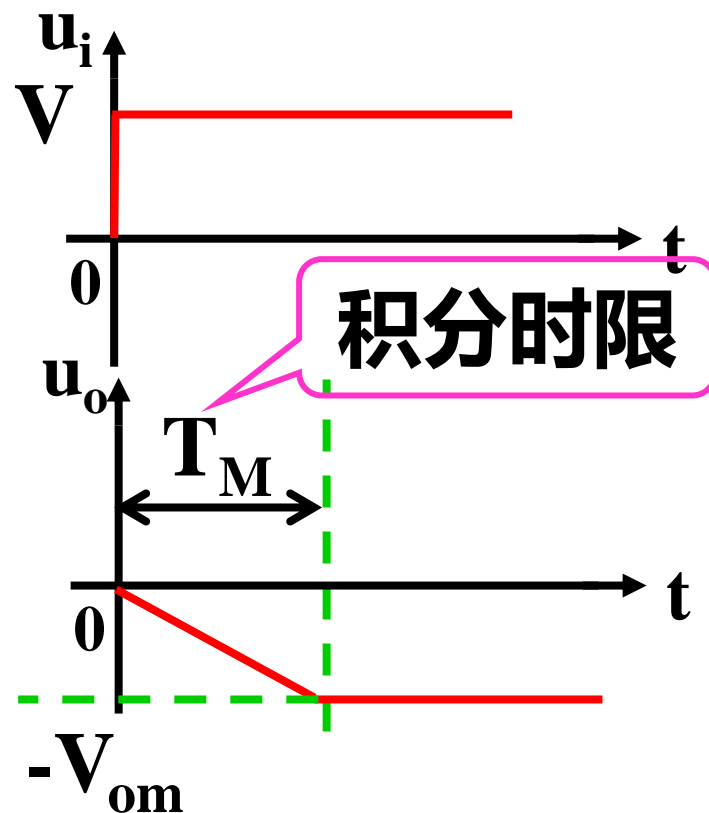
$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V dt$$

$$= -\frac{V}{RC} t$$

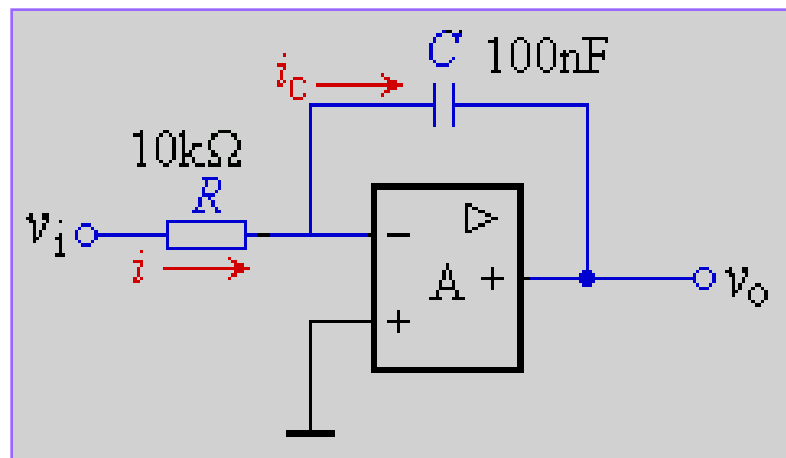
$$-V_{om} = -\frac{1}{RC} VT_M$$

$$T_M = \frac{RCV_{om}}{V} = 50\text{ms} \text{ 进入饱和}$$

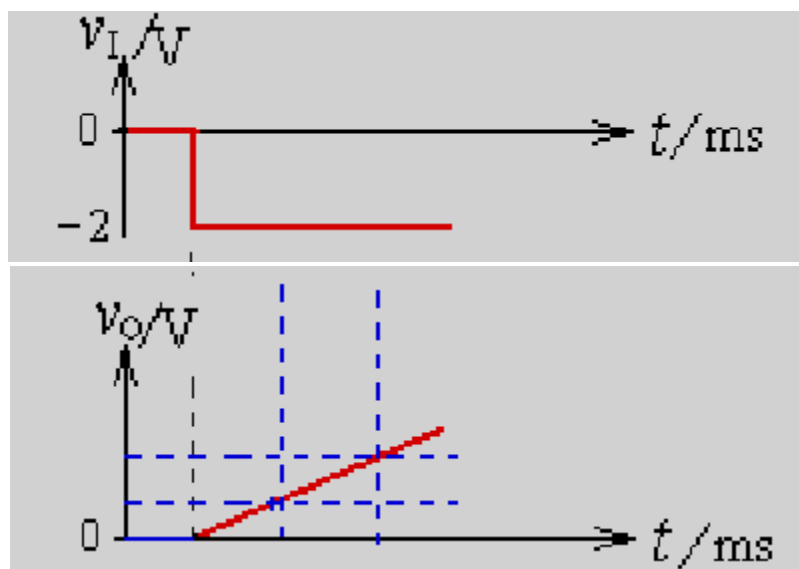


设： $V_{om}=15\text{V}$ ， $V=+3\text{V}$ ，
 $R=10\text{k}\Omega$ ， $C=1\mu\text{F}$ ， $\tau=10\text{ms}$

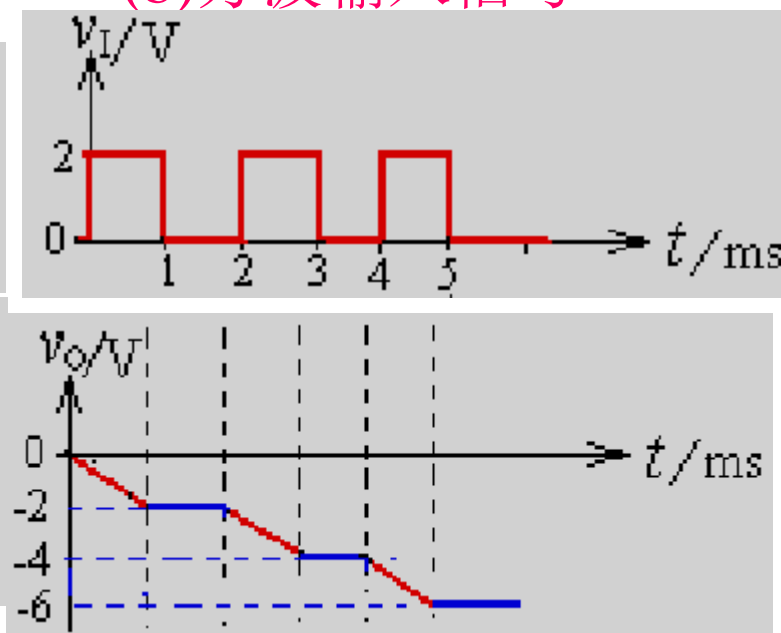
练习：画出在
给定输入波形
作用下积分器
的输出波形。



(a) 阶跃输入信号



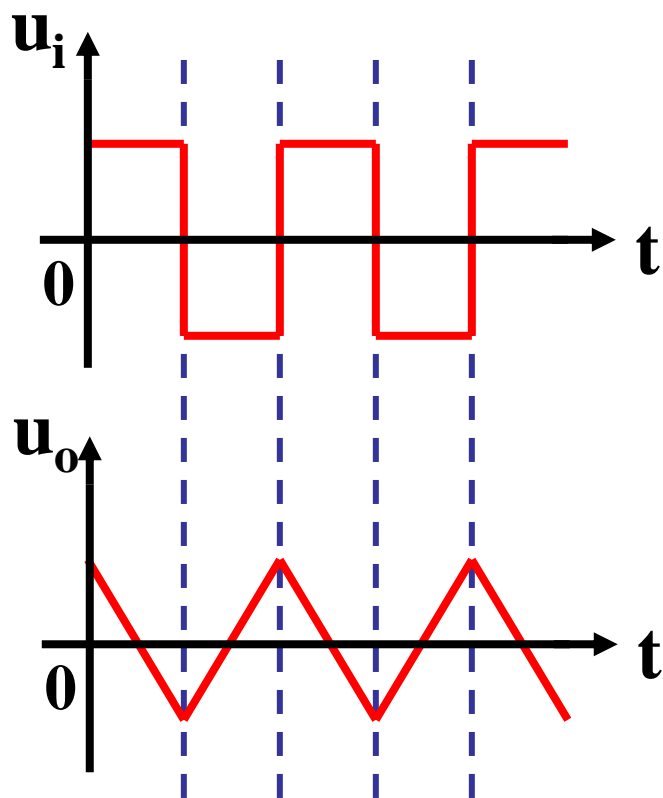
(b) 方波输入信号



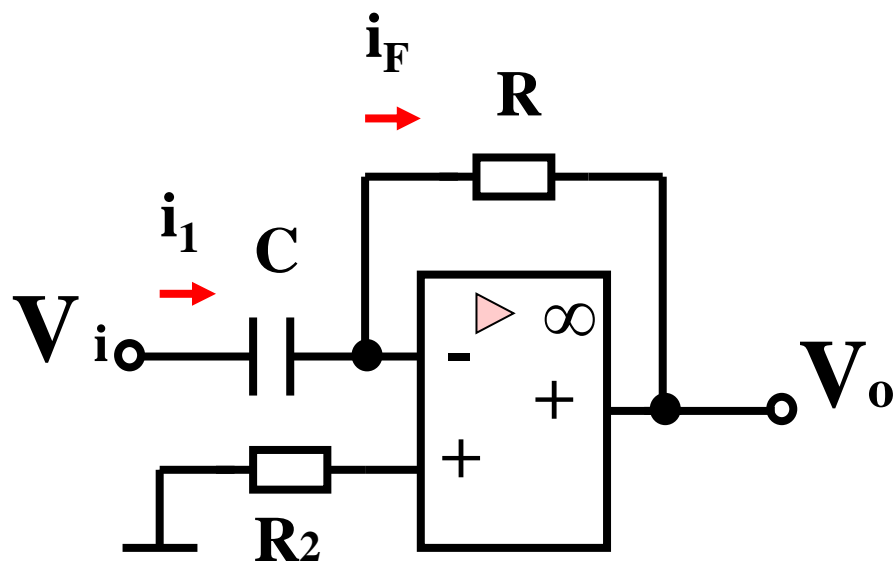
$R=10k\Omega$, $C=100nF$, $\tau =1mS$, $V_{om}=15V$

积分器的输入和输出波形图

应用举例：输入方波，输出是三角波。



2. 微分电路:

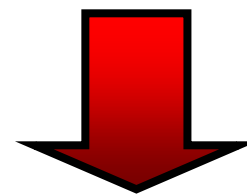


$$v_- = v_+ = 0$$

$$i_1 = C \frac{dv_i}{dt}$$

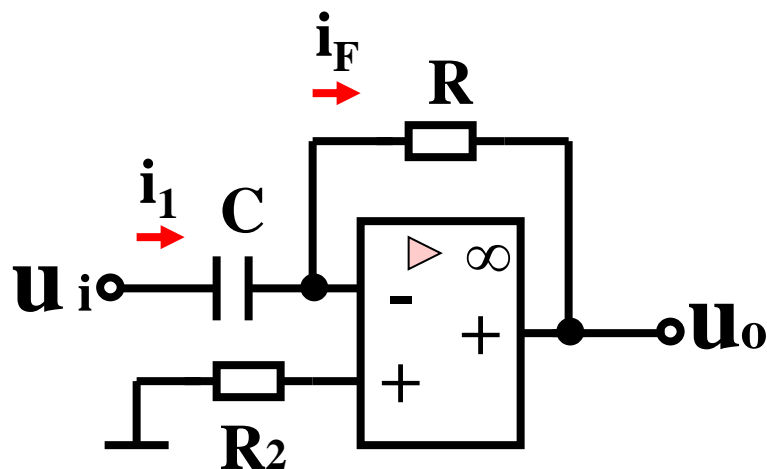
$$i_1 = i_F$$

$$V_o = -i_F R = -i_1 R$$



$$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt}$$

例： $u_i = \sin \omega t$, $\omega = 1$, 求 u_o 。



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

$$\begin{aligned} v_o &= -RC \cos \omega t \\ &= RC \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

