



第八章 信号的运算放大与处理电路

1. 信号运算

比例运算

加法运算

减法运算

积分和微分运算

对数和指数运算

乘法和除法运算

2. 信号处理

有源滤波器

电压比较器



第八章 信号的运算放大与处理电路

分析含集成运放电路的基本出发点 集成运放视作理想运放

在**线性区**，两个输入端“虚短” $u_+ = u_-$ 和“虚断” $i_+ = i_- = 0$

在**非线性区**， $u_+ > u_-$ 时， $u_o = +U_{opp}$ ，

$u_+ < u_-$ 时， $u_o = -U_{opp}$

并仍有 $i_+ = i_- = 0$





§ 8.1 基本运算放大电路

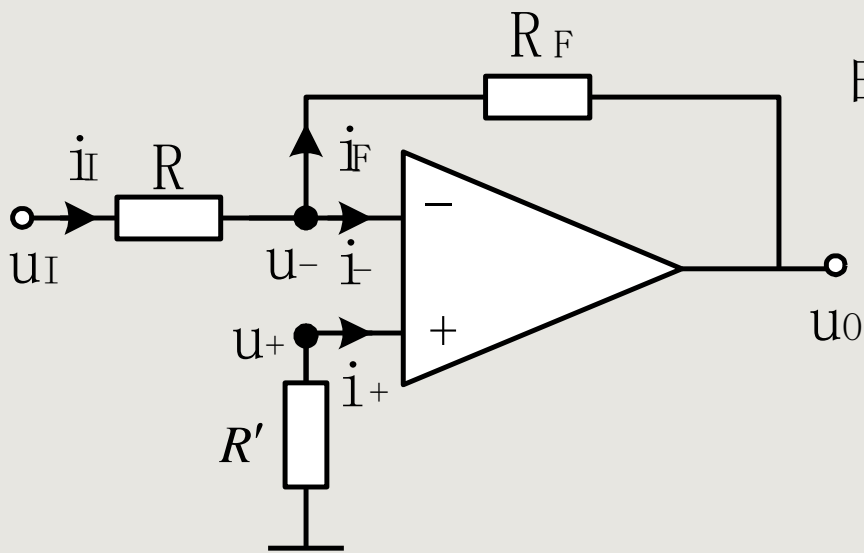
§ 8.1.1 比例运算电路

- 输出信号电压与输入信号电压存在比例关系的电路称为**比例运算电路**。
- 按输入方式，比例运算电路分为：**反向比例运算**和**同相比例运算**。



1. 反相比例运算电路

电压并联负反馈电路，运放工作在线性区



由“虚断”可得 $i_I = i_F$

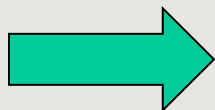
$$\frac{u_I - u_-}{R} = \frac{u_- - u_O}{R_F}$$

由“虚断”和“虚短”可得

$$u_- = u_+ = -R' i_+ = 0$$

$$R' = R // R_F$$

平衡电阻

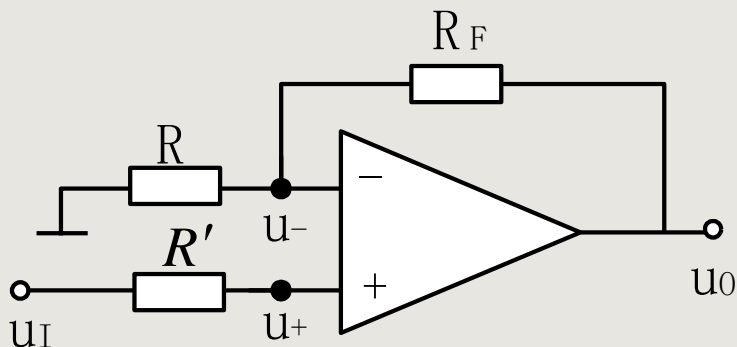


$$u_O = -\frac{R_F}{R} u_I$$

输出电压与输入电压成反相比例关系



2.同相比例运算电路



$$R' = R // R_F$$

$$u_- = u_+ = u_I$$

$$\frac{u_o - u_-}{R_F} = \frac{u_-}{R}$$

电压串联负反馈

由“虚短”和“虚断”可得

$$\rightarrow u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R}\right) u_I$$

输出与输入成反相比例关系

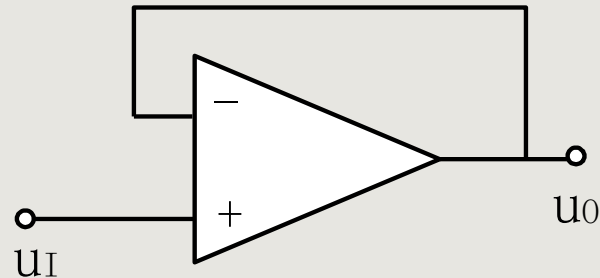
流入运放输入端的电流近似为零(虚断),输入电阻 $r_i = \frac{u_I}{i_I} \rightarrow \infty$

电压负反馈, 输出电阻很小



$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R}\right) u_I$$

$R_F=0$ 或 $R=\infty$ 时, $u_o=u_I$, 电压跟随器.



有输入电阻高, 输出电阻低的特点, 常作阻抗变换和缓冲级.



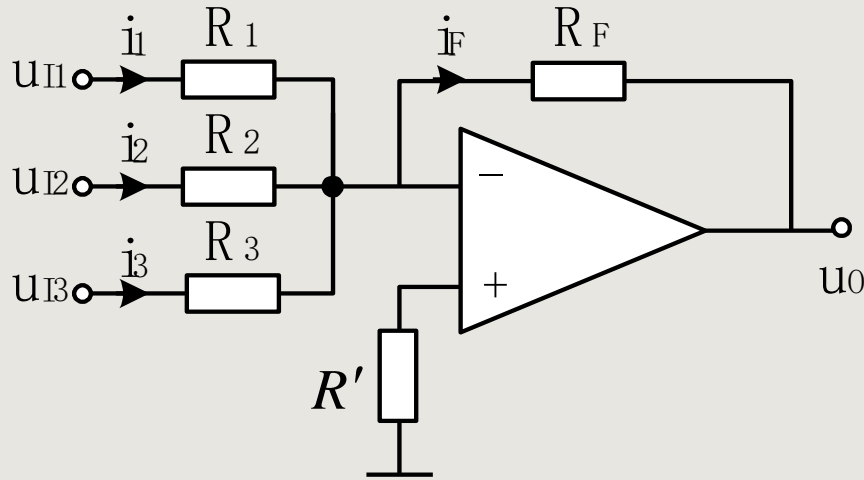


§ 8.1.2 加法运算电路

- 在同一输入端增加若干输入电路，则构成加法运算电路。
- 加法电路也有同相输入和反相输入两种



1. 反相加法电路



$$R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_F$$

由“虚断”和“虚短”得

$$u_- = u_+ = 0$$

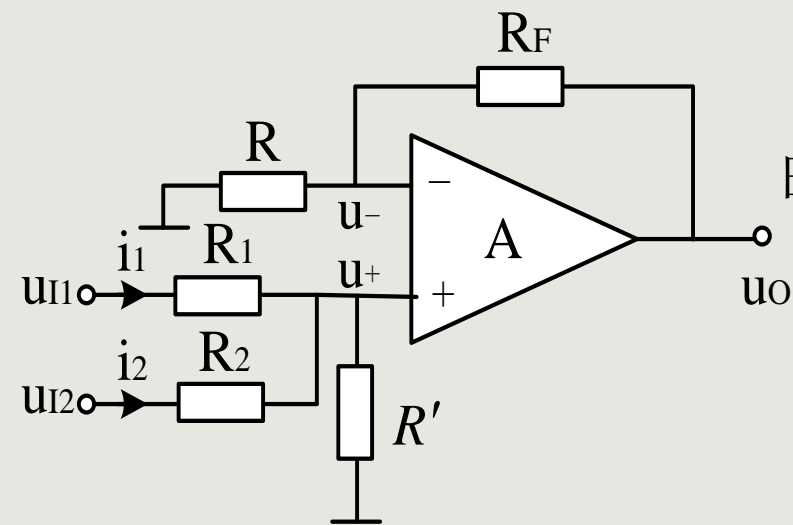
$$i_F = i_1 + i_2 + i_3$$

用电压表示，即

$$\frac{-u_o}{R_F} = \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3}$$

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2} + \frac{R_F}{R_3} u_{I3} \right)$$

2. 同相加法电路



运放输入端电阻平衡

$$R_1 // R_2 // R' = R // R_F$$

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'} = \frac{R + R_F}{RR_F}$$

由“虚断”和弥尔曼定理可得

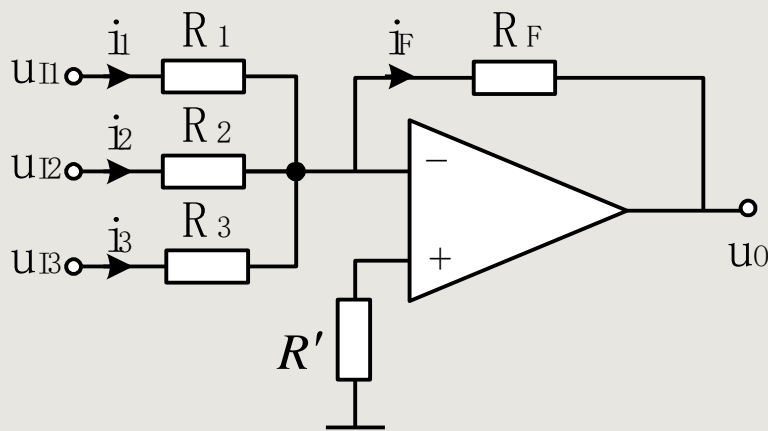
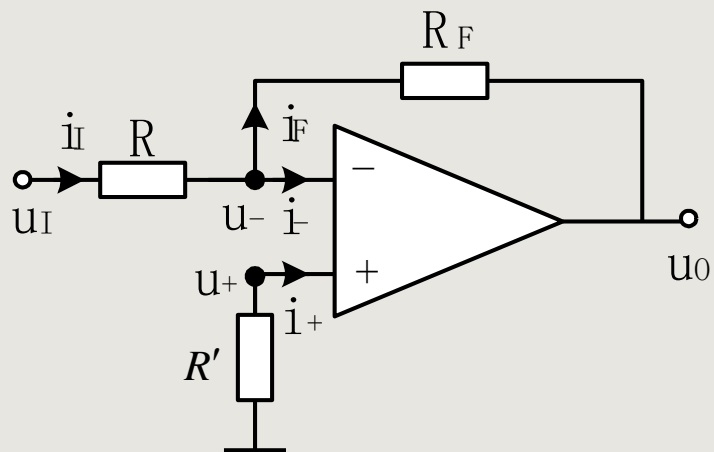
$$u_- = \frac{R}{R_F + R} u_o \quad u_+ = \frac{\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'}}$$

由“虚短”得

$$\frac{R}{R_F + R} u_o = \frac{RR_F}{R + R_F} \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

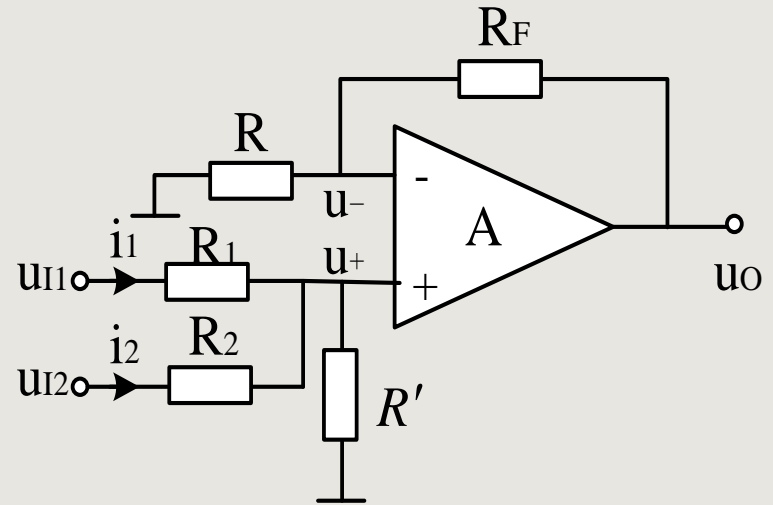
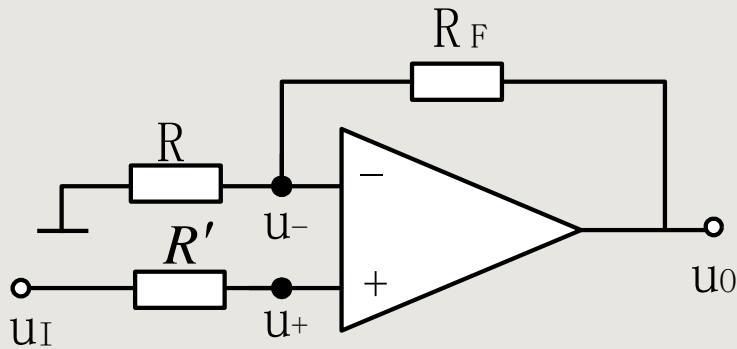
$$u_o = \frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2}$$

当要改变某支路输入电压与输出电压的比例关系而调节 R_1 或 R_2 时，要同时调节 R' ，因此，电路的调试比较麻烦。



在比例运算和加法运算电路中，信号从反相端输入时，运放的两个输入端“虚地” ($u_+ = u_- = 0$)，无共模输入信号。缺点是输入电阻较小。





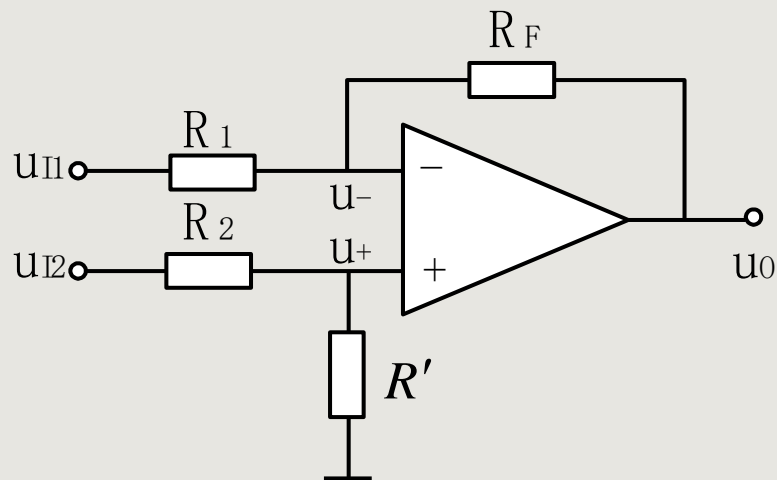
信号从同相端输入时，运放两输入端有共模信号($u_+ = u_- \neq 0$)，要使运算精确，对运放的共模放大倍数就有较高的要求。优点是输入电阻很大。



§ 8.1.3 减法运算电路

$$u_- = \frac{R_F}{R_1 + R_F} u_{I1} + \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o$$

$$u_+ = \frac{R'}{R_2 + R'} u_{I2}$$



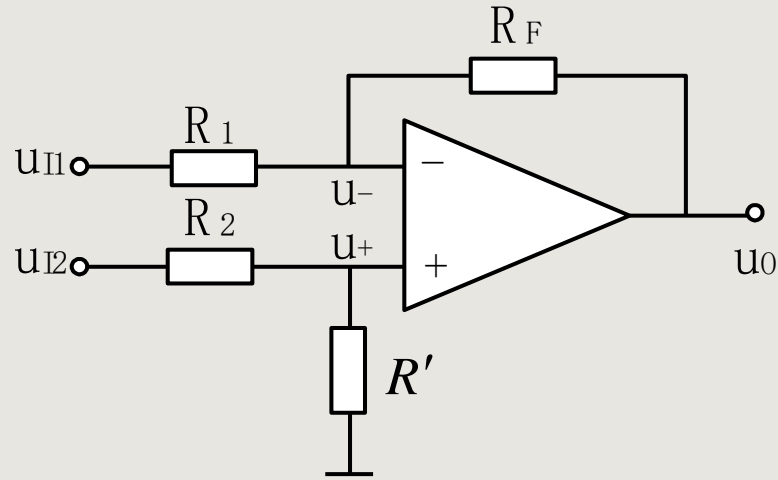
实现了信号的减法运算，并且可以通过改变两个输入信号的相对大小，控制输出信号的极性。

电阻的平衡关系式为 $R_1 \parallel R_F = R_2 \parallel R'$ ，即 $\frac{R_1 R_F}{R_1 + R_F} = \frac{R_2 R'}{R_2 + R'}$

$$\frac{R'}{R_2 + R'} = \frac{R_1 R_F}{(R_1 + R_F) R_2} \quad \longrightarrow \quad u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2}$$

$$R_1 = R_2 = R \text{ 时 } u_o = \frac{R_F}{R} (u_{I2} - u_{I1})$$





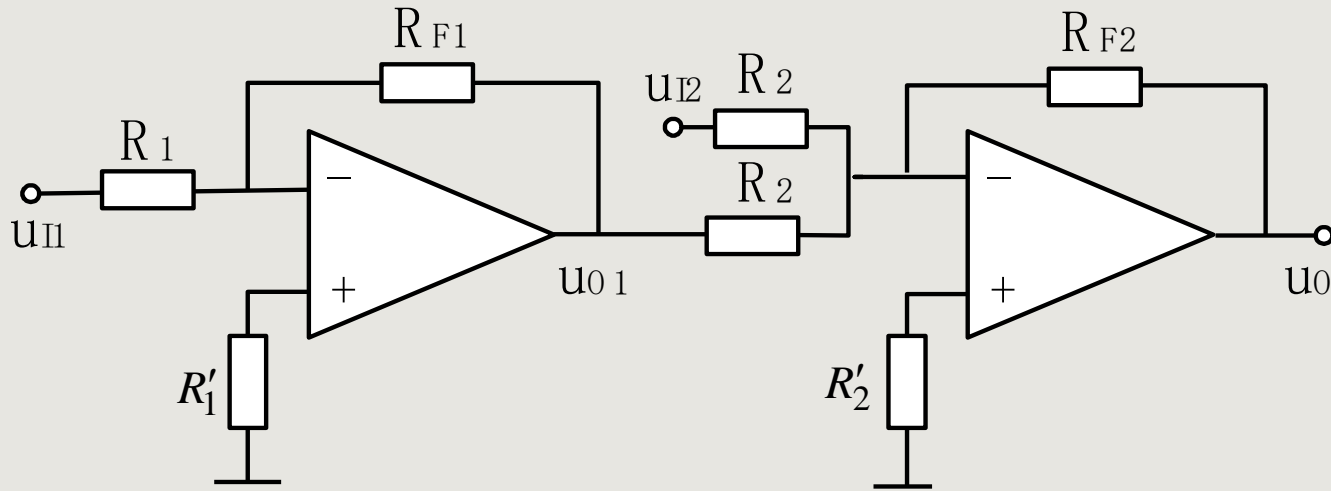
差动输入电路作减法电路时有两个不足之处：

一是电路的输入电阻不高；

二是有共模输入电压，要使运算精确，必须要求运放有较高的共模抑制比。

因此，实际电路中常采用双运放构成减法电路。





第一级为反相比例运算电路，若选取 $R_1=R_{F1}$ ，则 $u_{O1}=-u_{I1}$

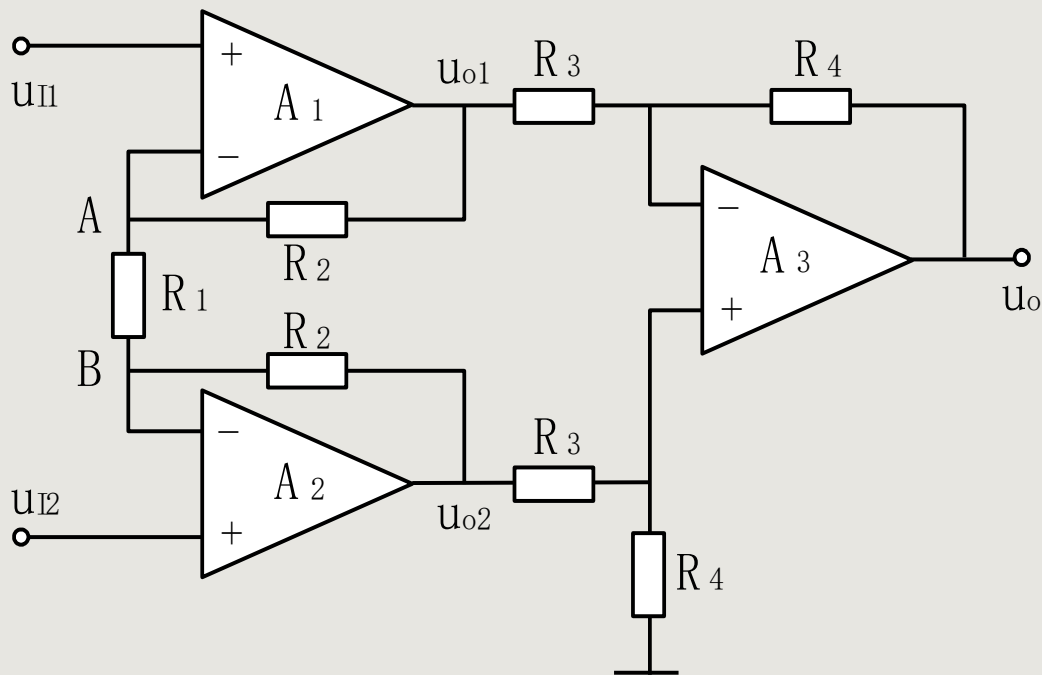
第二级为反相加法电路

$$u_o = -\frac{R_{F2}}{R_2}(u_{I2} + u_{O1}) = -\frac{R_{F2}}{R_2}(u_{I2} - u_{I1})$$



例1 图示电路为具有高输入阻抗、低输出阻抗的仪用放大器，试证明：

$$u_o = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (u_{I1} - u_{I2})$$



- 放大器由运放 A_1 、 A_2 组成差分电路，信号从同相端输入，输入电阻很高；
- A_3 组成第二级差分电路，对 A_1 、 A_2 的输出信号进行差分放大。
- 电路具有很强的共模抑制能力和较小的漂移电压，同时，可以具有较高的差模电压放大倍数。

解：三只运放均引入了负反馈，运放工作在线性区，由“虚短”得：

$$u_A = u_{I1}; u_B = u_{I2}$$

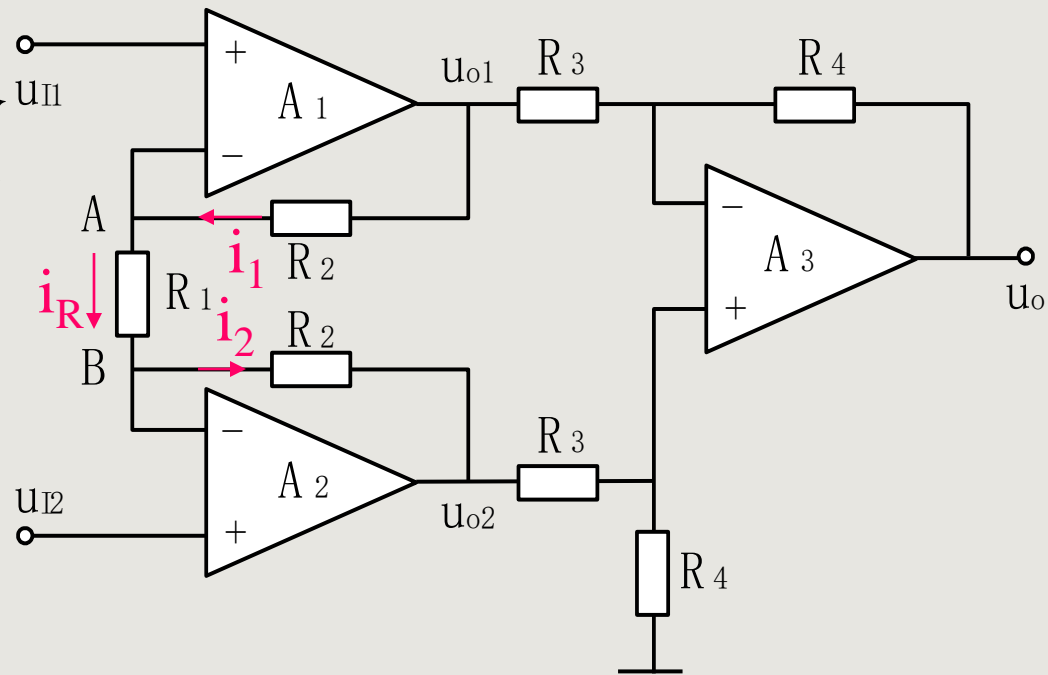
$$u_{AB} = u_A - u_B = u_{I1} - u_{I2}$$

由“虚断”得： $i_1 = i_2 = i_R = u_{AB} / R_1$

$$u_{o1} - u_{o2} = (R_1 + 2R_2)u_{AB} / R_1 = (1 + 2R_2 / R_1)(u_{I1} - u_{I2})$$

A_3 组成减法电路

$$u_o = -\frac{R_4}{R_3}(u_{o1} - u_{o2}) = -\frac{R_4}{R_3}\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{I1} - u_{I2})$$



§ 8.1.4 积分和微分运算电路

1. 积分电路

将反相比例运算电路中的反馈电阻 R_F 换成电容即构成积分电路。

平衡电阻 $R'=R$ 由“虚地”和“虚断”得

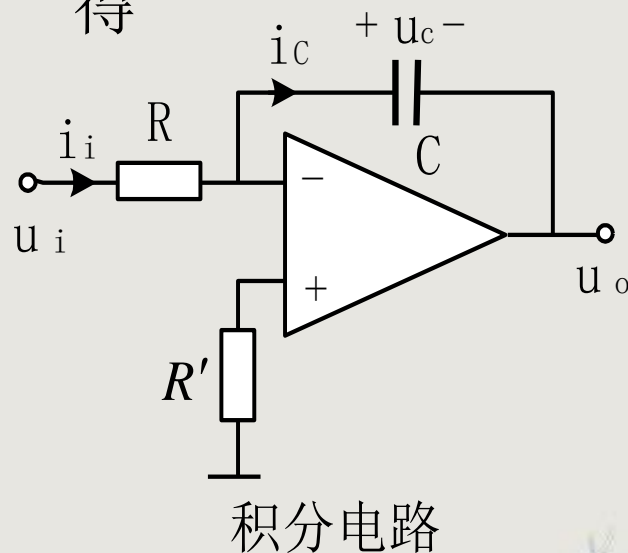
$$i_i = \frac{u_i}{R} = i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

而 $u_C = -u_o$ ，故有 $-C \frac{du_o}{dt} = \frac{u_i}{R}$

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

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

输出电压是输入电压对时间的积分



积分电路的作用

(1) 移相 $u_i = U_m \sin \omega t$

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\omega RC} \cos \omega t$$

输出电压也是一个正弦波，但相位比输入电压超前 90°

(2) 波形变换 积分电路将方波变换成三角波



输入电压为方波

在 $0 \sim T/4$ 时间内, $u_i = U_m$

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_i dt = -\frac{U_m}{RC} t \quad (\text{设 } u_o(0) = 0)$$

这是一条直线 $u_o(\frac{1}{4}T) = -\frac{U_m T}{4RC}$

输出电压为直线OA

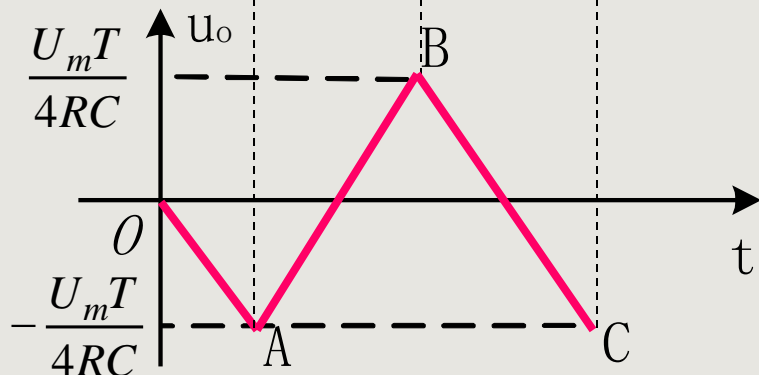
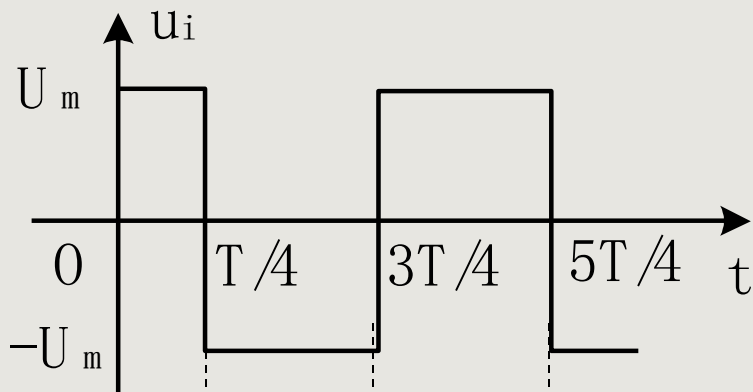
在 $T/4 \sim 3T/4$ 时间内, $u_i = -U_m$

$$u_o(t) = \frac{1}{RC} \int_{T/4}^t U_m dt + u_o(\frac{T}{4})$$

$$= \frac{U_m}{RC} (t - \frac{T}{4}) - \frac{U_m T}{4RC} = \frac{U_m}{RC} t - \frac{U_m T}{2RC}$$

这也是一条直线, $t = 3T/4$ 时, $u_o(\frac{3}{4}T) = \frac{U_m T}{4RC}$

输出电压为直线AB, $3T/4 \sim 5T/4$ 时间内的输出电压为直线BC。



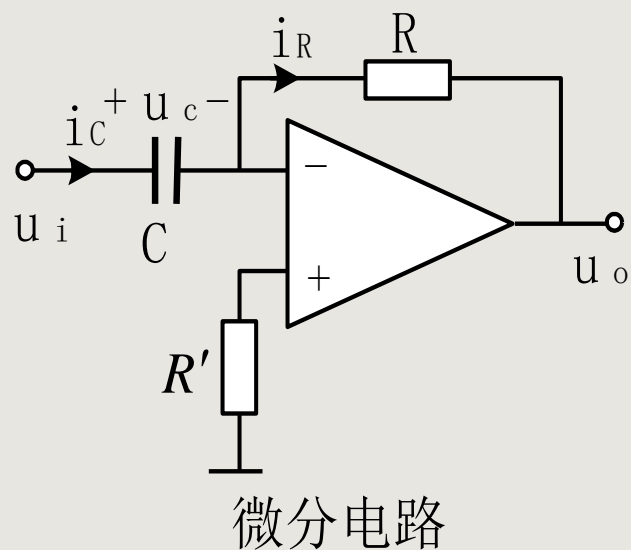
2. 微分电路

微分是积分的逆运算，将积分电路中R和C的位置互换，即可组成微分电路。

由“虚地”和“虚断”得 $u_C = u_i$ $i_C = i_R$

$$i_R = -\frac{u_o}{R} = i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_i}{dt}$$

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



输出电压正比于输入电压的微分



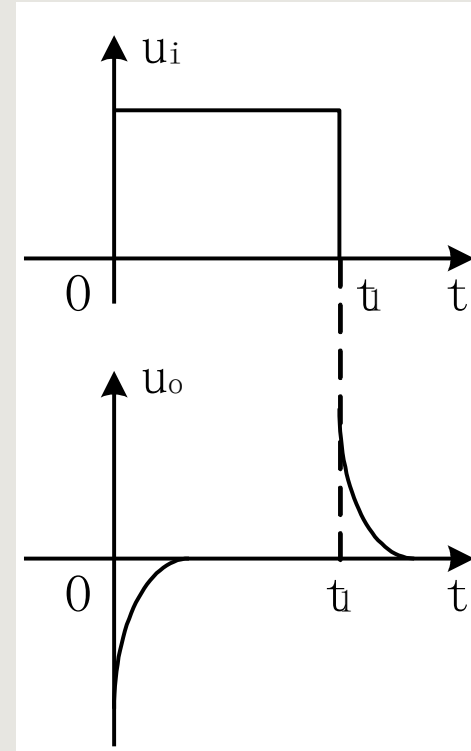
微分电路可以实现波形的变换：输入信号为矩形脉冲时，输出信号为一负一正两个尖脉冲。

对上升沿，即 $t=0$ 时刻，由于 $\frac{du_i}{dt} > 0$ ，故

$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt} < 0$$

对下降沿，即 $t=t_1$ 时刻，由于 $\frac{du_i}{dt} < 0$ ，故 $u_o > 0$

其它时间内， u_i 为恒定值， $u_o = -RC \frac{du_i}{dt} = 0$



§ 8.1.5 对数和指数运算电路

1. 对数运算电路

利用半导体二极管指数型的伏安关系，可实现对数运算。设二极管的正向电压为 u_D ，则二极管电流为

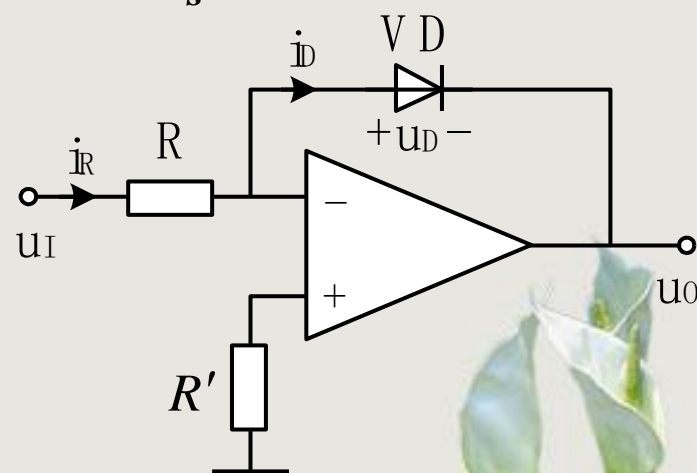
$$i_D = I_s (e^{u_D/U_T} - 1)$$

$$u_D \gg U_T \text{ 时 } i_D \approx I_s e^{u_D/U_T} \quad \text{或} \quad u_D \approx U_T \ln \frac{i_D}{I_s}$$

由“虚断”和“虚短”得 $i_D = i_R = \frac{u_I}{R}$

$$u_o = -u_D = -U_T \ln \frac{i_D}{I_s} = -U_T \ln \frac{u_I}{RI_s}$$

输出电压与输入电压的对数建立了联系



由二极管组成的对数运算电路存在以下一些问题：

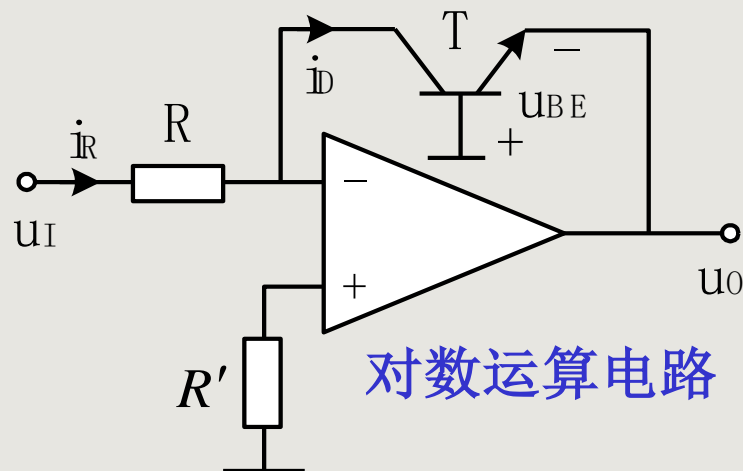
(1) 由于二极管的伏安关系是在 $u_D \gg U_T$ 条件下得到的，因此， i_D 不能太小，否则会因 u_D 太小造成较大的运算误差，而当 i_D 过大时，二极管的伏安关系也有误差，因此输入信号只能限制在较小的范围内。

(2) 由于 U_T 和 I_S 都是温度的函数，运算精度受温度的影响较大。



解决问题的方法是用接成二极管形式的三极管替代二极管。实验发现，如果 $u_{CB} > 0$ （但接近于零）， $u_{BE} > 0$ ，则集电极电流 i_C 在相当宽的范围内与 u_{BE} 保持较精确的对数关系，从而使电路的运算误差减小。

为克服温度变化对 I_S 的影响，可利用两个参数相同的三极管实现温度补偿，及采用热敏电阻补偿温度对 U_T 的影响



2. 指数运算电路

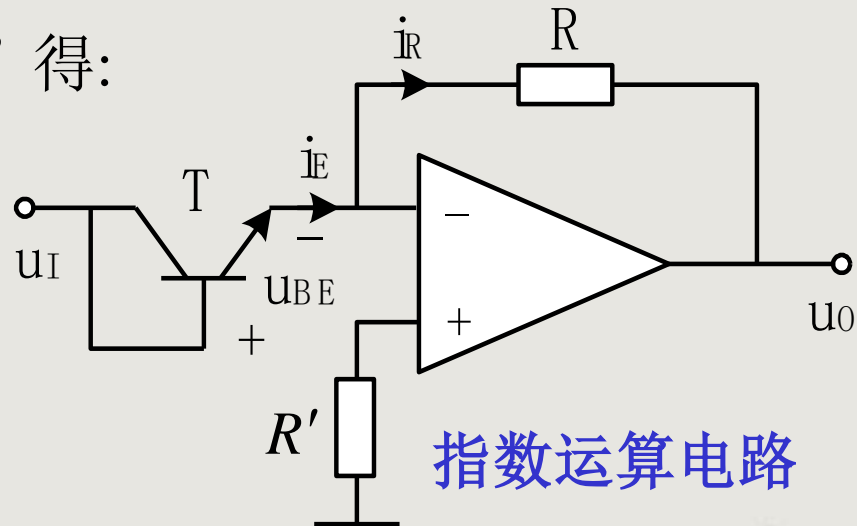
指数运算是对数运算的**逆运算**，将对数运算电路中接成二极管形式的**三极管与电阻互换位置**就构成指数运算电路。

$u_I > 0$ 时，由“虚短”和“虚断”得：

$$u_I = u_{BE}$$

$$u_o = -i_R R = -i_E R$$

$$= -R I_s e^{u_{BE} / U_T} = -R I_s e^{u_I / U_T}$$



输出电压与输入电压的指数建立了联系

