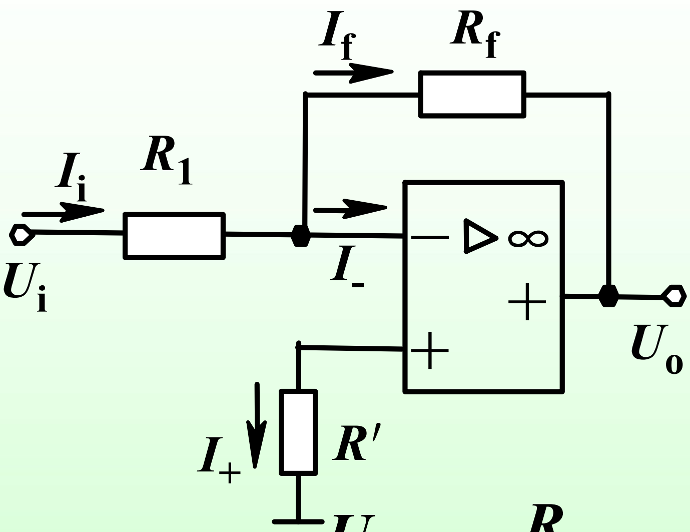
复习（熟炼掌握）：

1. 反相比例运算

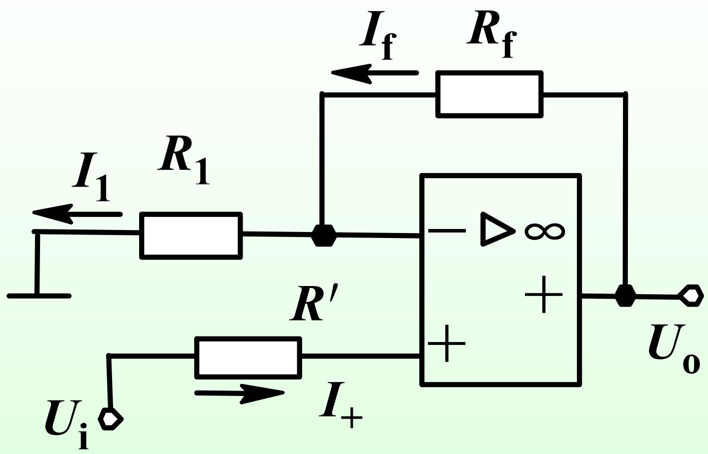


$$A_{uf}=\frac{U_o}{U_i}=-\frac{R_f}{R_1}$$

$$r_{if}=\frac{U_i}{I_i}=R_1 \qquad r_o=0$$

若$R_f=R_1$，称为 反相器

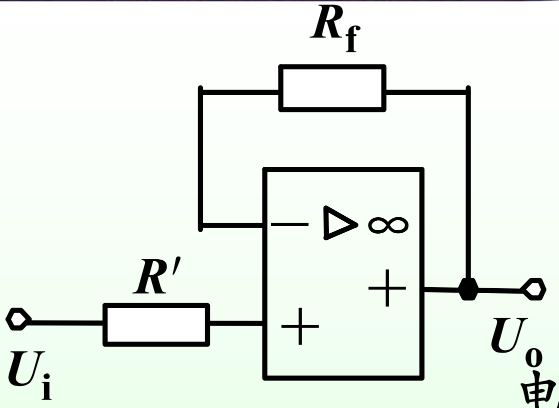
2. 同相比例运算

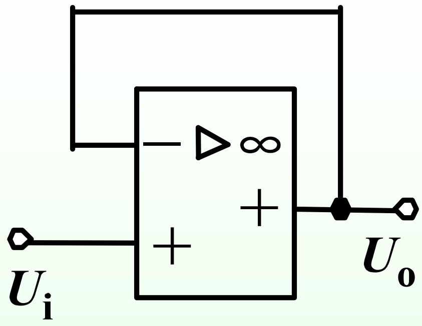


$$A_{uf}=\frac{U_o}{U_i}=1+\frac{R_f}{R_1}\text{或}=\frac{R_f}{R'}$$

$$r_{if}=\frac{U_i}{I_+}=\infty \qquad r_o=0$$

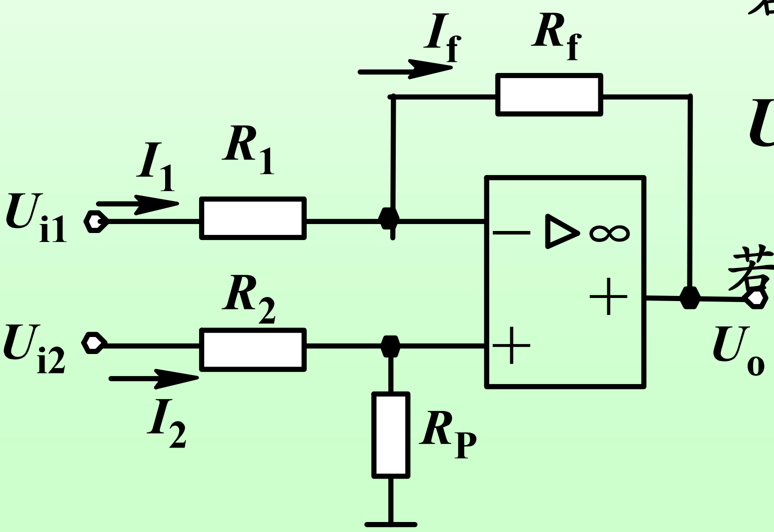
若$R_1=\infty$，称为电压跟随器





电压跟随器

3. 差动比例运算



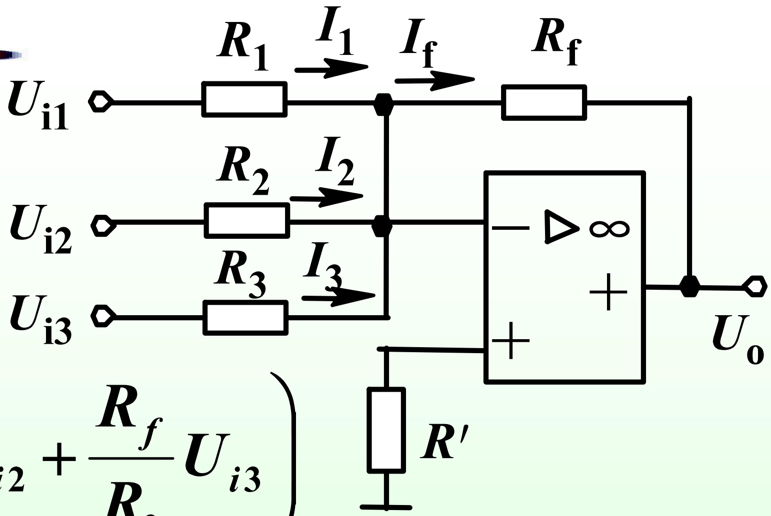
若 $R_1 /\!/ R_f = R_2 /\!/ R_p$， 则

$$U_o = \frac{R_f}{R_2} U_{i2} - \frac{R_f}{R_1} U_{i1}$$

若对称 $R_1 = R_2, R_f = R_p$， 则

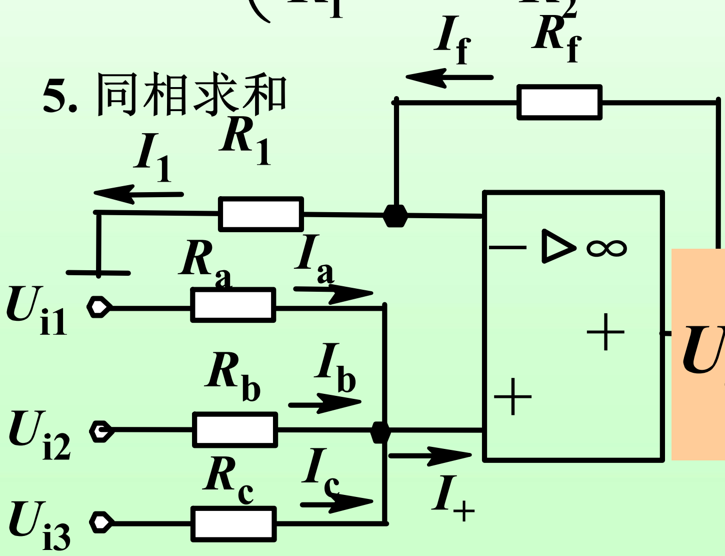
$$U_o = \frac{R_f}{R_1}(U_{i2} - U_{i1})$$

4. 反相求和



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

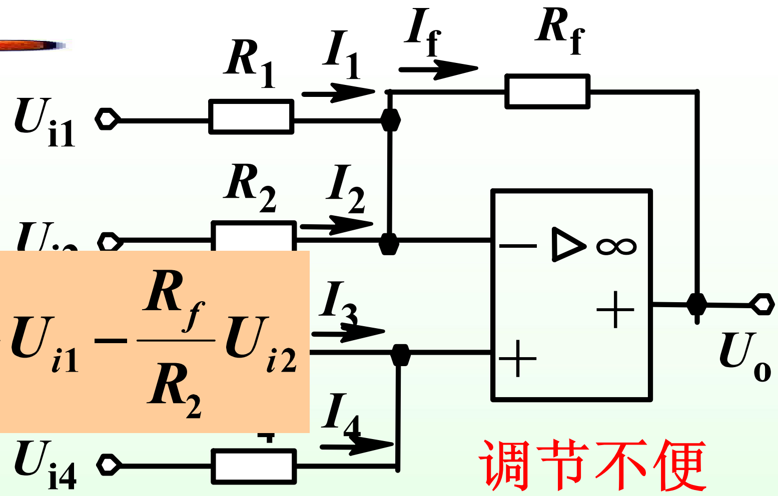
5. 同相求和



若$R_a \parallel R_b \parallel R_c = R_1 \parallel R_f$， 则

$$U_o = \frac{R_f}{R_a}U_{i1} + \frac{R_f}{R_b}U_{i2} + \frac{R_f}{R_c}U_{i3}$$

6. 单运放加减

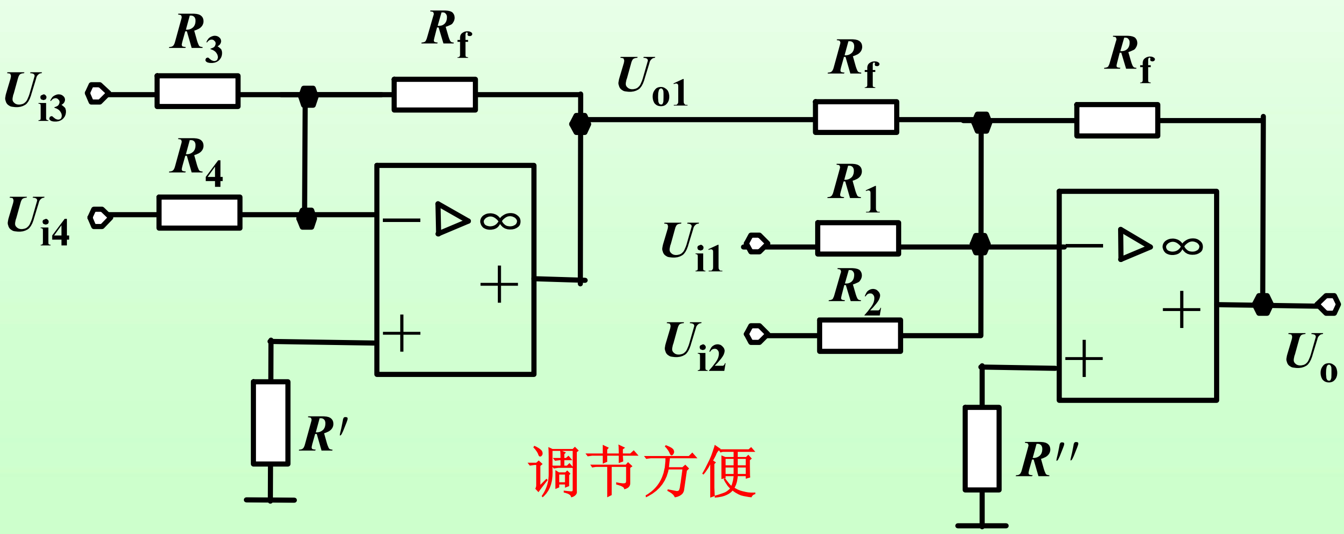


若满足平衡条件， 则

$$U_o = \frac{R_f}{R_3}U_{i3} + \frac{R_f}{R_4}U_{i4} - \frac{R_f}{R_1}U_{i1} - \frac{R_f}{R_2}U_{i2}$$

调节不便

7. 双运放加减



调节方便

7.2.3 积分电路和微分电路

一、积分电路

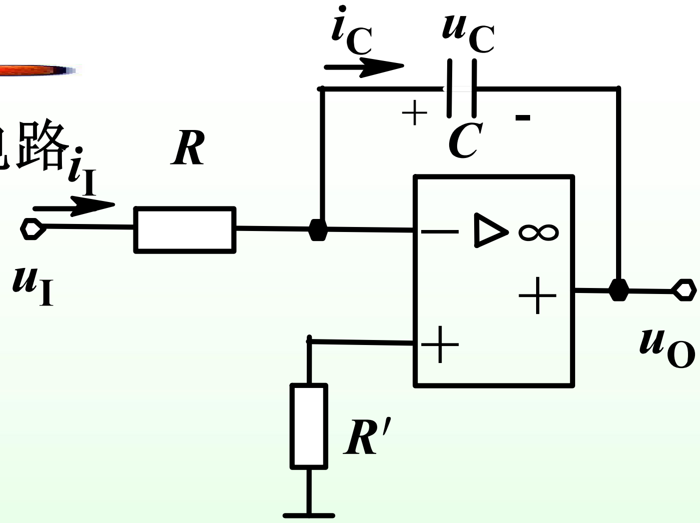


图 7－11 反相积分

$$u_C = \frac{1}{C}\int i_C \cdot dt$$

$$= \frac{1}{C}\int_0^t i_C dt + u_C(0)$$

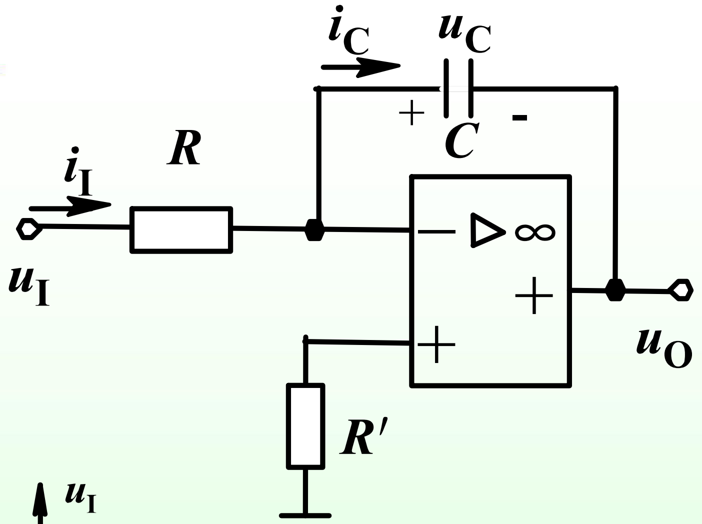
$$u_O = -u_C = -\frac{1}{C}\int i_I dt = -\frac{1}{RC}\int u_I dt$$

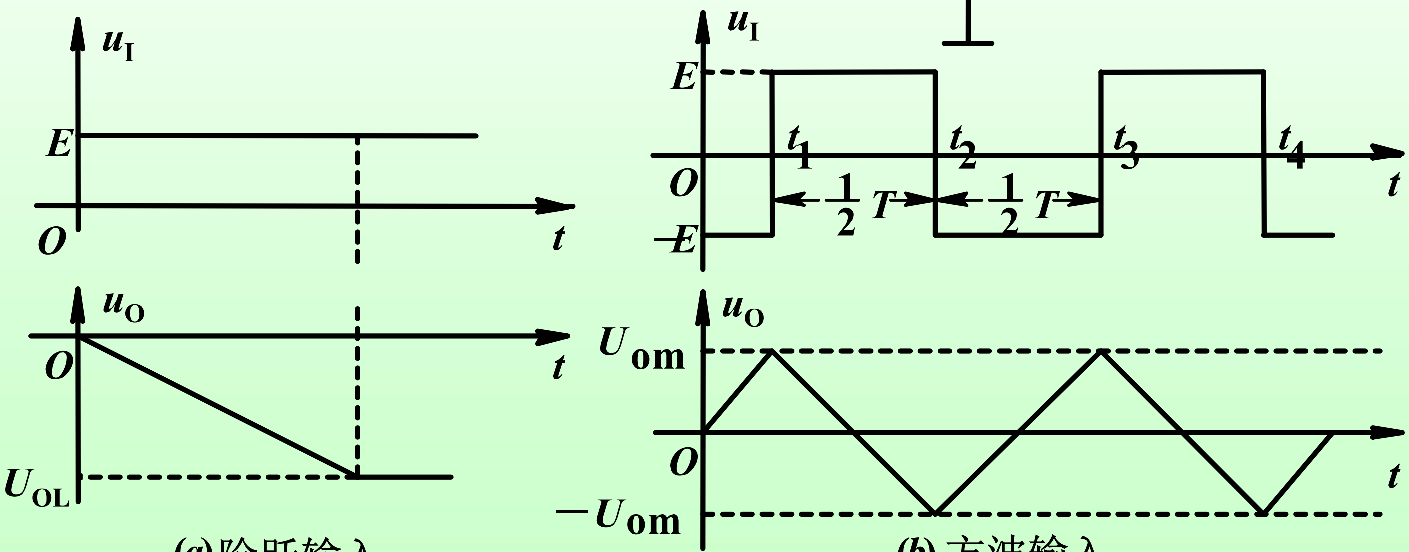
$$= -\frac{1}{RC}\int_0^t u_I dt + u_O(0)$$

7.2.4 积分电路和微分电路

一、积分电路

积分波形



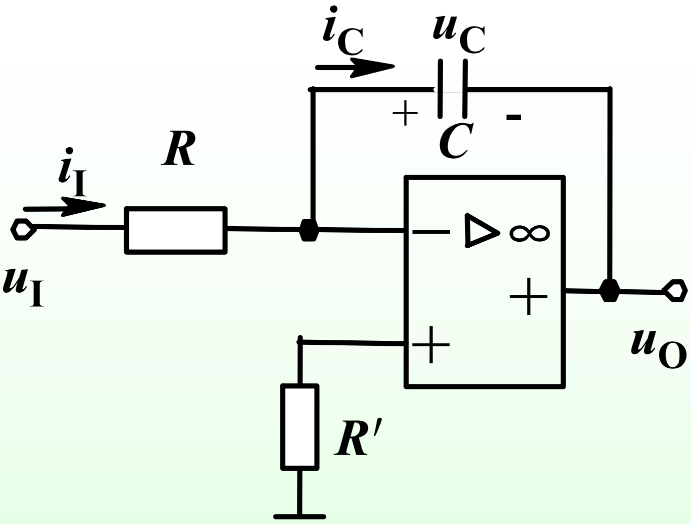


(a)阶跃输入 (b) 方波输入

7.2.4 积分电路和微分电路

一、 积分电路

积分波形



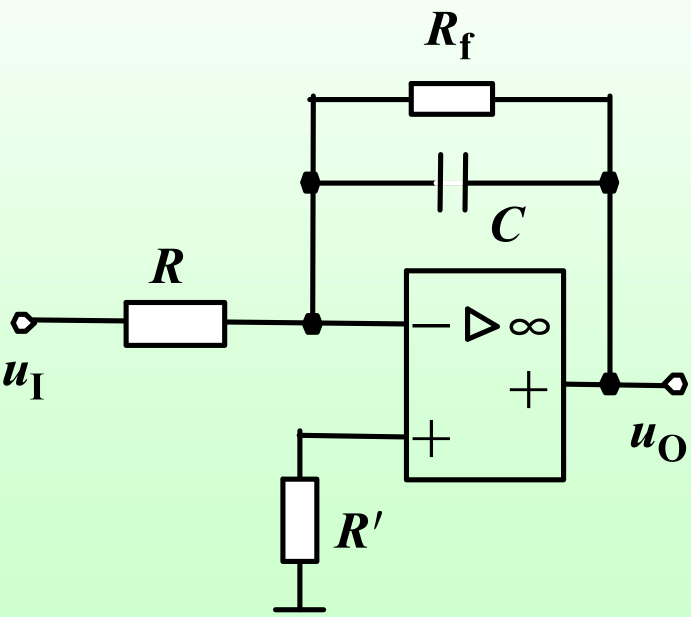
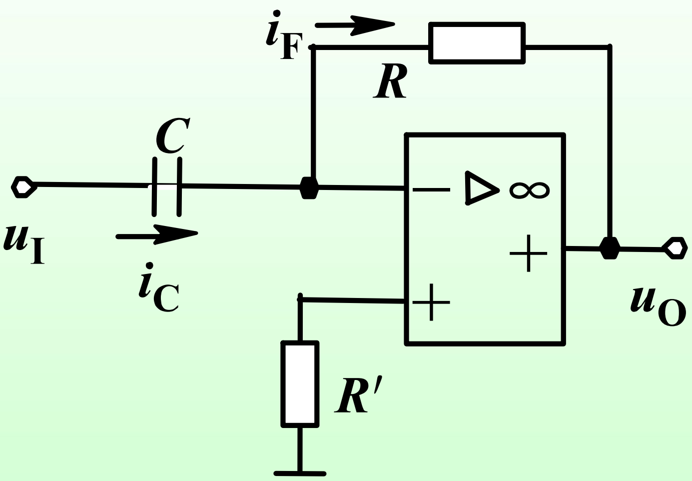


图7 – 13 实际积分电路

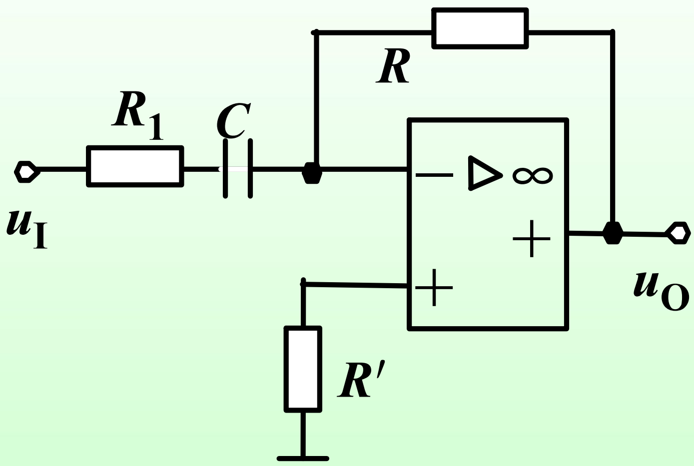
7.2.3 积分电路和微分电路

一、 积分电路

二、 微分电路



基本微分电路



实际微分电路

$$u_O = -Ri_F = -Ri_C = -RC\frac{du_I}{dt}$$

波形？

7.2.4 对数和指数运算电路

一、对数运算

$$i_D = I_S\left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1\right) \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$$

$$i_I = \frac{u_I}{R} = i_D \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$$

$$u_O = -u_D$$

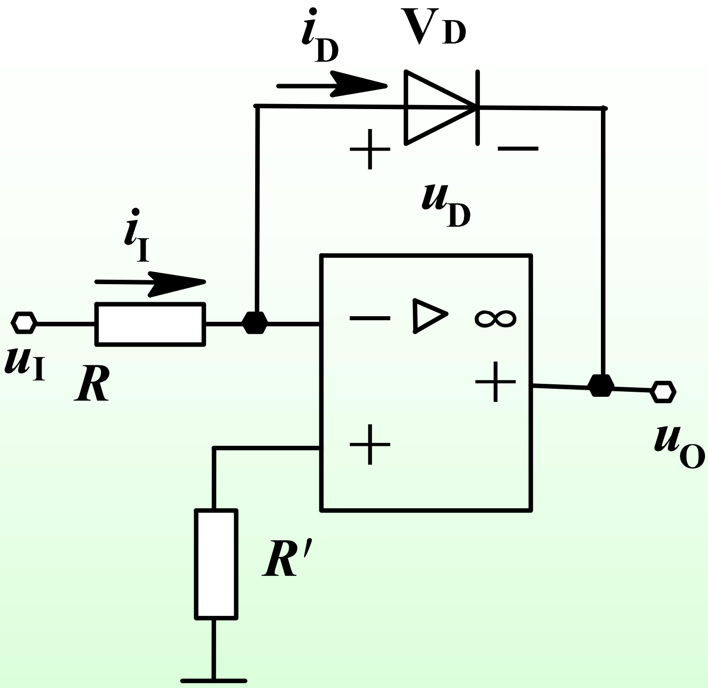


图7－15 基本对数运算电路

$$u_O \approx -U_T \ln\frac{u_I}{RI_S} \qquad (u_I > 0)$$

7.2.4 对数和指数运算电路

一、对数运算

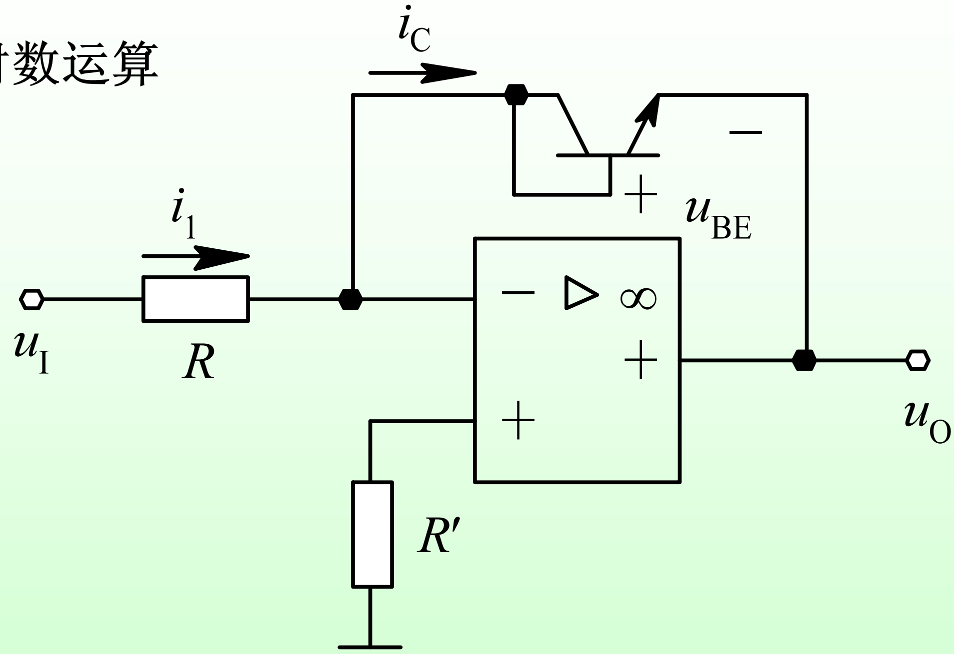


图7－16 用三极管的对数运算电路

7.2.4 对数和指数运算电路

一、对数运算
二、指数运算

$$u_D = u_I - u_- = u_I$$

$$i_D \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}} = I_S e^{\frac{u_I}{U_T}}$$

$$u_O = -i_F R = -i_D R$$

$$= -I_S R \cdot e^{\frac{u_I}{U_T}}$$

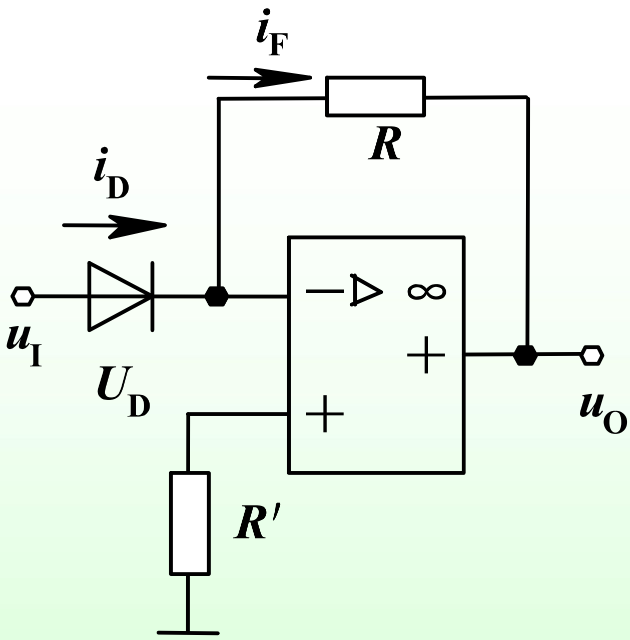
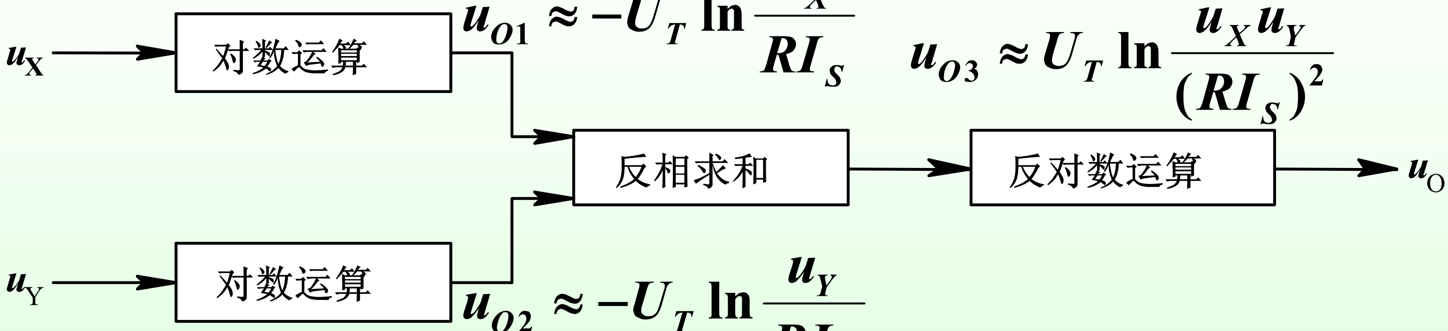


图 7－17 基本指数运算电路

7.2.5 乘法运算电路

一、实现乘



$$u_{O1} \approx -U_T \ln \frac{u_X}{RI_S}$$

$$u_{O2} \approx -U_T \ln \frac{u_Y}{RI_S}$$

$$u_{O3} \approx U_T \ln \frac{u_X u_Y}{(RI_S)^2}$$

图 7 – 18　简单乘法器框图

$$u_O = -I_S R \cdot e^{\frac{u_{O3}}{U_T}} = -I_S R \cdot e^{\ln \frac{u_X u_Y}{(RI_S)^2}} = -\frac{u_X u_Y}{RI_S} = -k u_X u_Y$$

k的单位为V^{-1}

7.2.5 乘法运算电路

一、实现乘

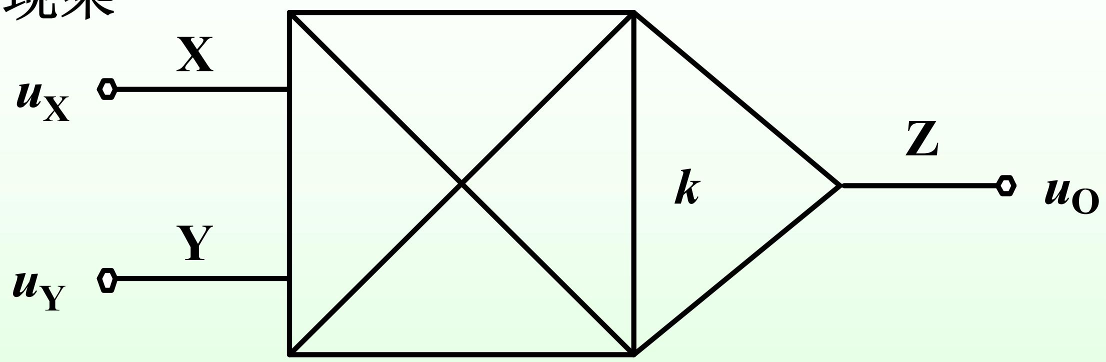


图 7 – 19 集成乘法器电路符号

$$u_O = k u_X u_Y$$

当 $u_X = u_Y = u_I$ $\quad u_O = k u_X u_Y = k u_I^2$ 实现对输入信号的平方

问题：如何实现对输入信号的立方、四次方?

7.2.5 乘法运算电路

一、实现乘

二、实现除

$$u_Z = k u_{X2} u_O$$

$$\frac{u_{X1}}{R_1} + \frac{u_Z}{R_2} = 0$$

$$u_O = -\frac{R_2}{kR_1}\frac{u_{X1}}{u_{X2}}$$

当$R_1 = R_2$，则

$$u_O = -\frac{1}{k}\frac{u_{X1}}{u_{X2}}$$

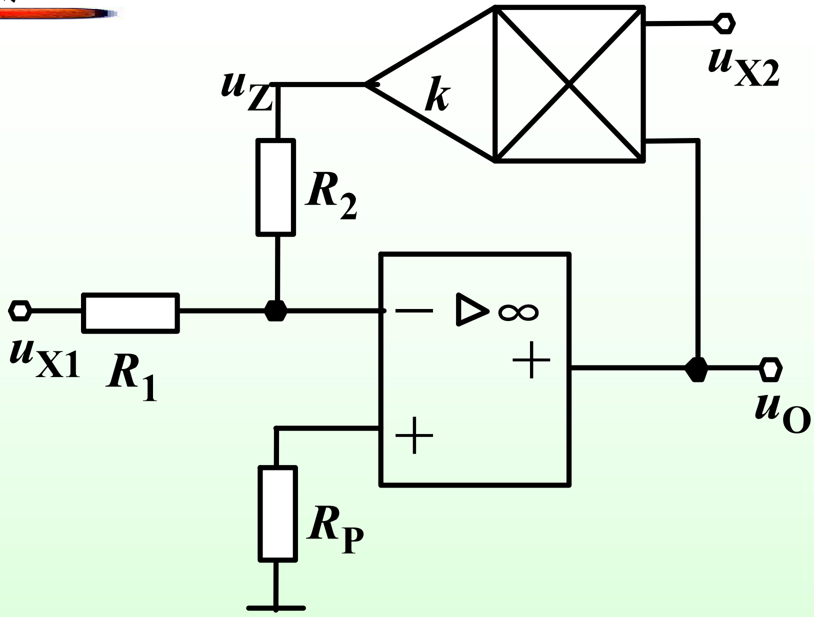


图 7–20 除法电路

7.2.5 乘法运算电路

一、实现乘

二、实现除

三、开平方

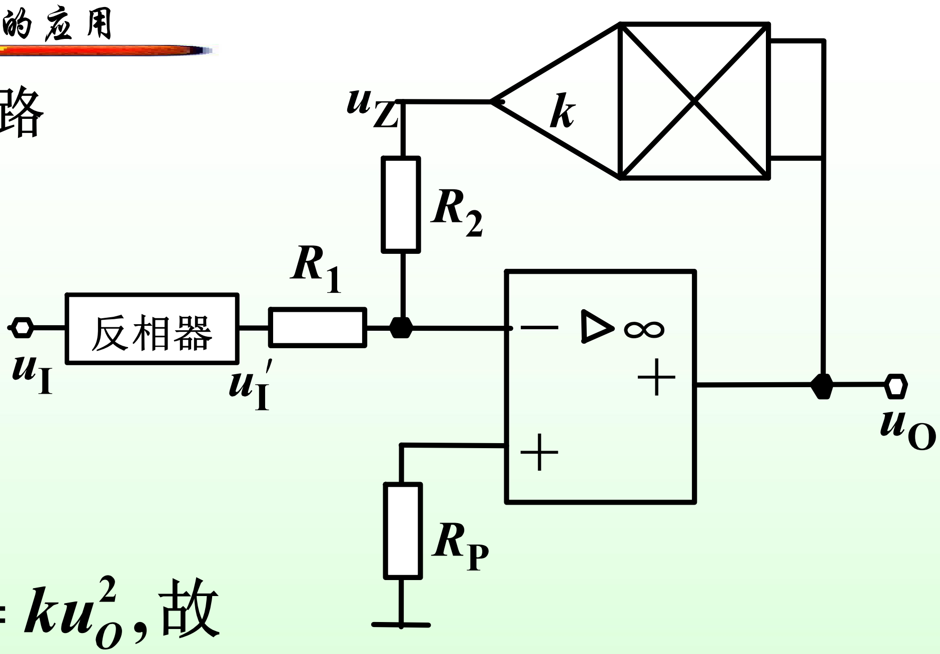


图 7–21 开平方电路($u_I>0$)

$$\frac{u_I'}{R_1}+\frac{u_Z}{R_2}=0$$

而 $u_I' = -u_I, u_Z = ku_O^2$，故

$$u_O=\sqrt{\frac{R_2}{kR_1}u_I}$$

选取 $R_1 = R_2$，则 $u_O=\sqrt{\frac{u_I}{k}}$

问题：如何实现对输入信号开立方、四次方?

小结：

1熟练掌握比例运算、加减运算电路的分析与设计方法，特别注意平衡的原则。

2熟练掌握积分运算电路的分析与计算方法，掌握波形变换的原理与参数计算。

3对模拟乘法器不作要求。

作业：P185 12，27 预习：7.3，7.4