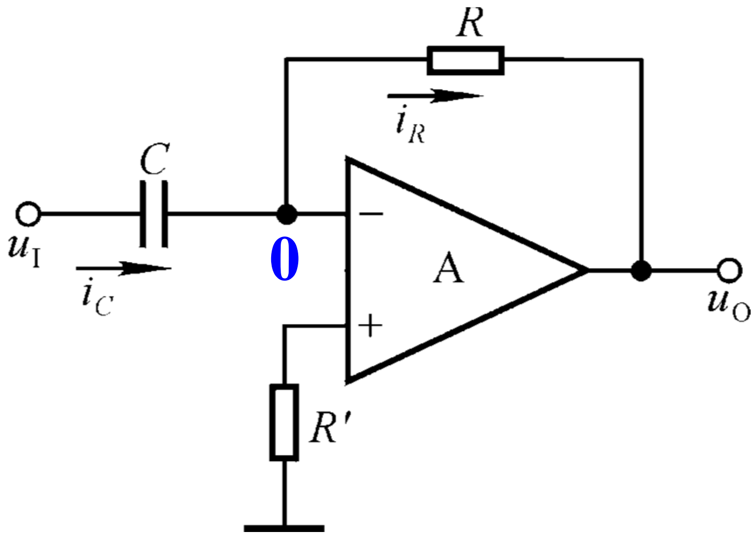
二、微分电路(Differentiator)

1．基本微分电路



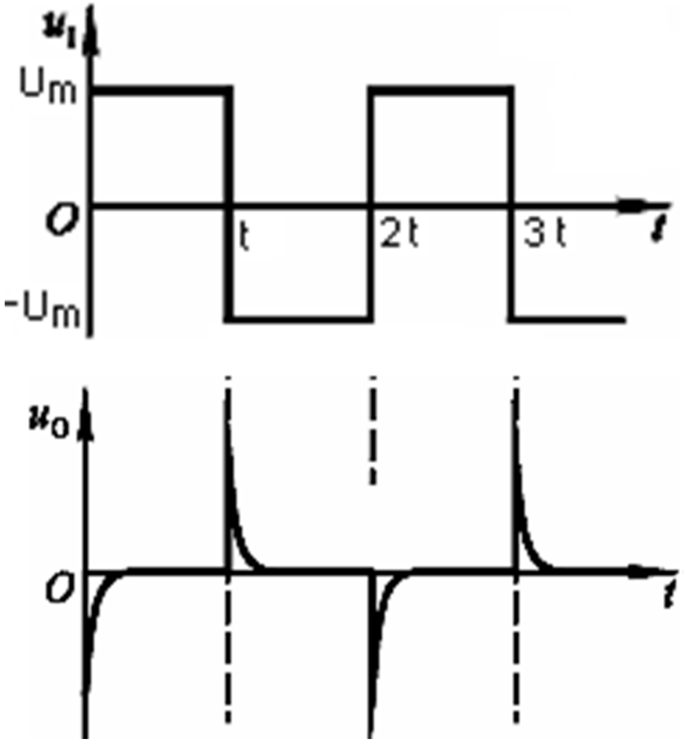
$R'=R$

➢ 运算关系

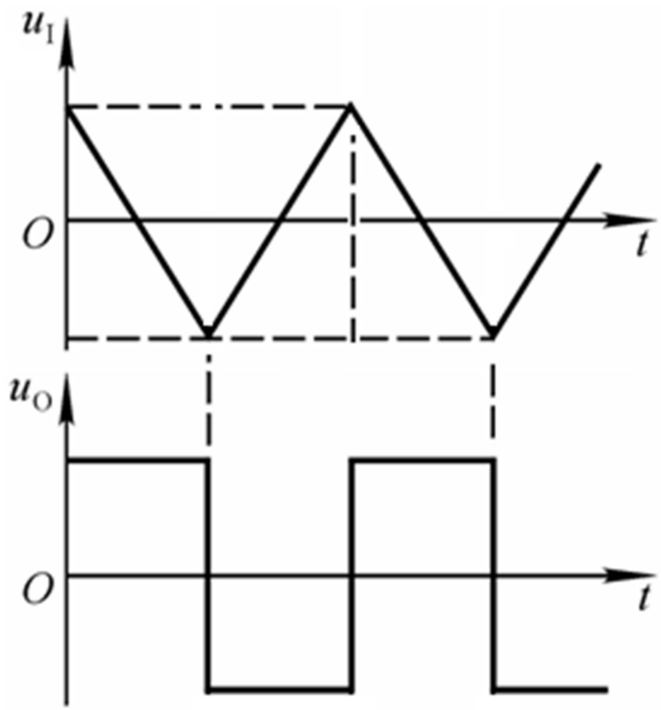
$$i_R = i_C \qquad \boxed{i_C = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}}$$

$$\boxed{u_O = -R * i_R = -RC\frac{\mathrm{d}u_I}{\mathrm{d}t}}$$

讨论3：1）方波微分　　　　2）三角波微分



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

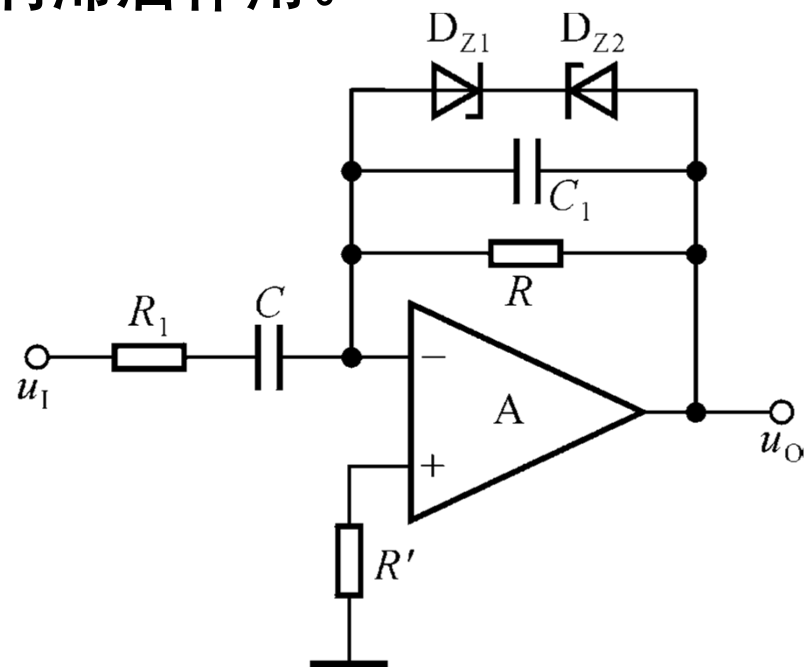


2．问题：

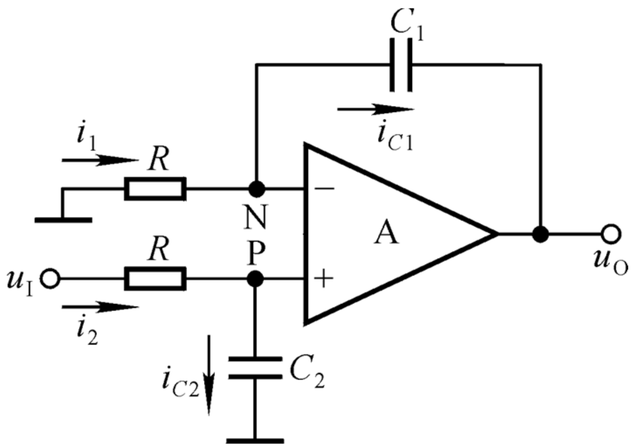
- **阻塞现象：** 输入信号产生阶跃变化，或者输入信号为脉冲式大幅值干扰时，运放中的晶体管截止或饱和，即使输入信号变为零，管子仍不能回到放大状态。
- **自激振荡：** 电容 C 对反馈信号有滞后作用。

3．实用微分电路

- R_1限制输入电流；
- 稳压管限制输出电压幅度；
- 电容C_1相位补偿，起稳定作用。



讨论4：$C_1=C_2=C$，求u_O与u_I的运算关系



- 同相端利用‘虚断’原则

$$\frac{u_I-u_P}{R}=C\frac{du_P}{dt}$$

$$\boxed{\frac{u_I}{R}=C\frac{du_P}{dt}+\frac{u_P}{R}}$$

- 反相端利用‘虚断’原则

$$\frac{-u_N}{R}=C\frac{d(u_N-u_O)}{dt}$$

$$\boxed{C\frac{du_O}{dt}=C\frac{du_N}{dt}+\frac{u_N}{R}}$$

- 利用‘虚短’原则 $u_N=u_P$

$$C\frac{du_O}{dt}=\frac{u_I}{R}$$

$$\boxed{u_O=\frac{1}{RC}\int u_I\mathrm{d}t}$$

同相积分

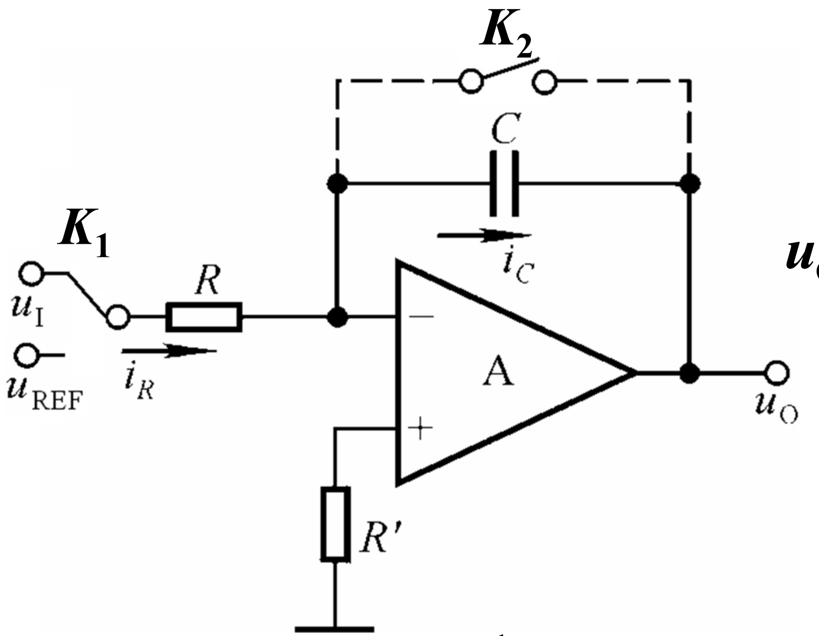
也可先求传递函数（$Z_C=1/sC$），再利用反拉氏变换求函数关系

$$\frac{\frac{1}{sC}}{R+\frac{1}{sC}}U_i(s)=\frac{R}{R+\frac{1}{sC}}U_o(s)$$

$$U_o(s)=\frac{1}{sRC}U_i(s)$$

讨论5：K_2闭合，然后断开；K_1接到u_I，经过t_1毫秒后接至u_{REF}，再经过t_2毫秒后u_O=0，求t_2。

双积分型A/D转换器的模拟电路部分



$$u_O(t_1) = -\frac{1}{RC}\int_0^{t_1} u_I \mathrm{d}t + 0 = -\frac{1}{RC} u_I \cdot t_1$$

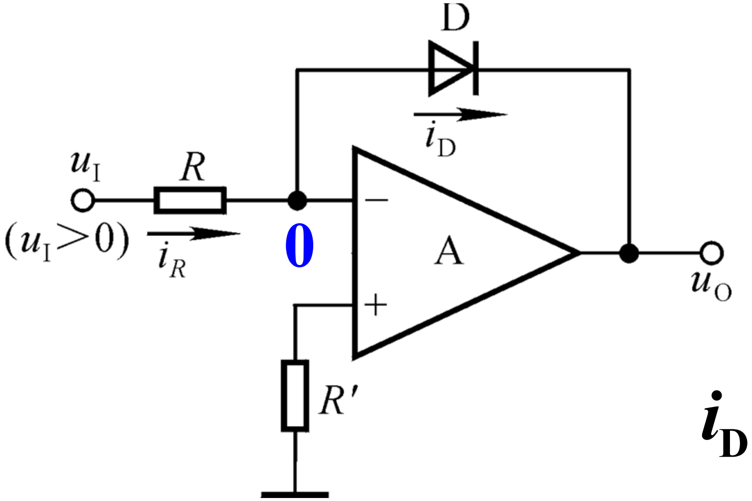
$$u_O(t_1 + t_2) = -\frac{1}{RC}\int_0^{t_2} u_{REF} \mathrm{d}t + u_O(t_1) = -\frac{1}{RC}(u_{REF} \cdot t_2 + u_I \cdot t_1) = 0$$

$$t_2 = -\frac{u_I}{u_{REF}} \cdot t_1$$

7.5 对数运算电路和指数运算电路

一、对数运算电路(Logarithmic Amplifier)

1. 采用二极管



PN结电流方程

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

$$u_D \approx U_T \ln \frac{i_D}{I_S}$$

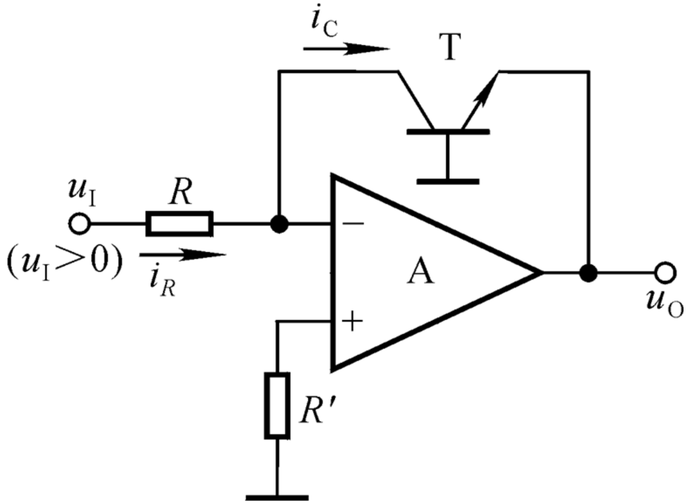
$$i_D = i_R = \frac{u_I}{R}$$

$$\boxed{u_O = -u_D \approx -U_T \ln \frac{u_I}{I_S R}}$$

缺点：

- 运算关系受温度影响（U_T, I_S）
- 输出范围小（$-u_D$）
- 二极管电流较小时运算精度较低

2. 采用三极管



$$i_C \approx i_E = I_S(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1) \approx I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$$

$$u_{BE} \approx U_T \ln \frac{i_C}{I_S} \qquad i_C = i_R = \frac{u_I}{R}$$

$$\boxed{u_O = -u_{BE} \approx -U_T \ln \frac{u_I}{I_S R}}$$

缺点：

- 运算关系仍受温度影响
- 输出范围仍然小
- 运算精度受输入电流影响

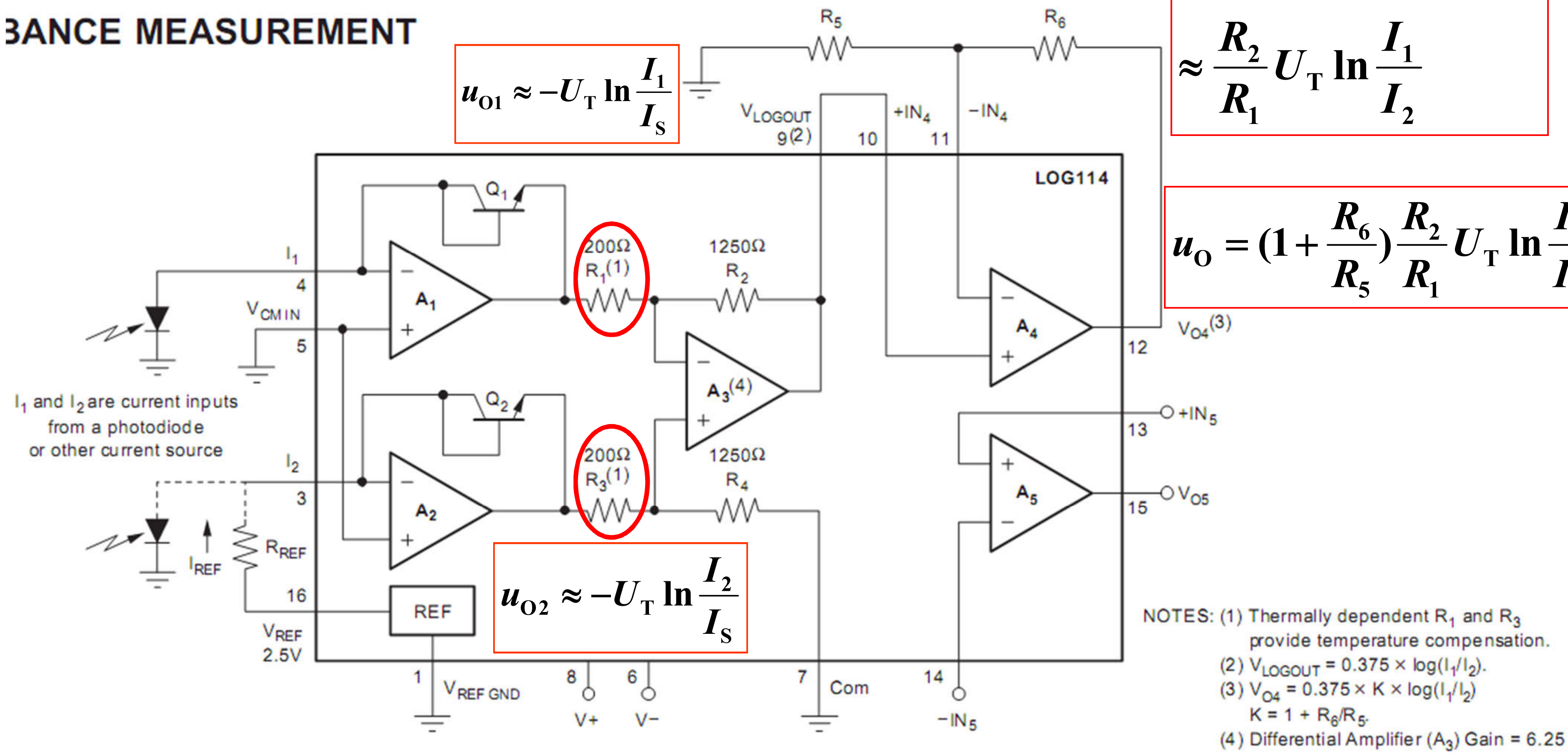
2. 采用三极管 实际对数放大器

$$u_{O1} \approx -U_T \ln \frac{I_1}{I_S}$$

$$u_{O2} \approx -U_T \ln \frac{I_2}{I_S}$$

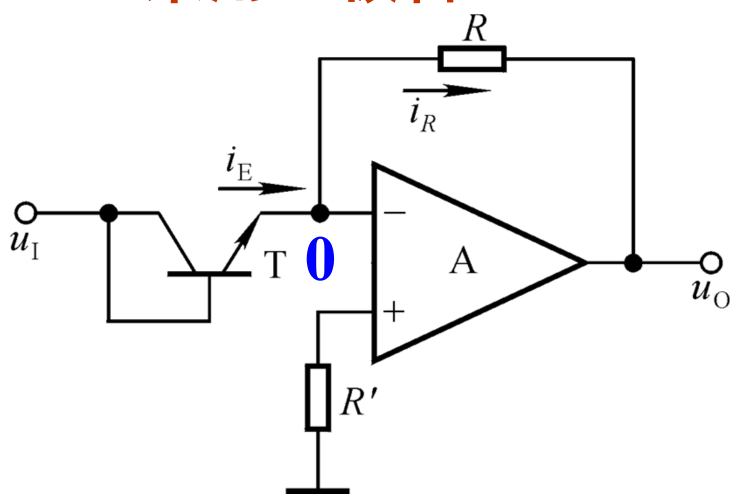
$$u_{O3} = \frac{R_2}{R_1}(u_{O2} - u_{O1}) \approx \frac{R_2}{R_1} U_T \ln \frac{I_1}{I_2}$$

$$u_O = (1 + \frac{R_6}{R_5}) \frac{R_2}{R_1} U_T \ln \frac{I_1}{I_2}$$



二、指数运算电路(Exponential Amplifier，Anti-log Amplifier)

采用三极管



$$i_E \approx I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} = I_S e^{\frac{u_I}{U_T}}$$

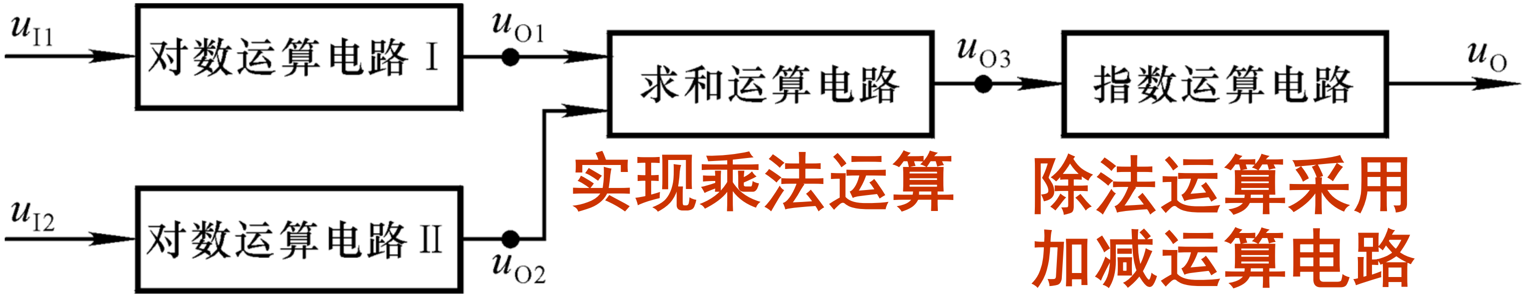
$$i_E = i_R = \frac{-u_O}{R}$$

$$\boxed{u_O = -i_E R \approx -R \cdot I_S e^{\frac{u_I}{U_T}}}$$

缺点：

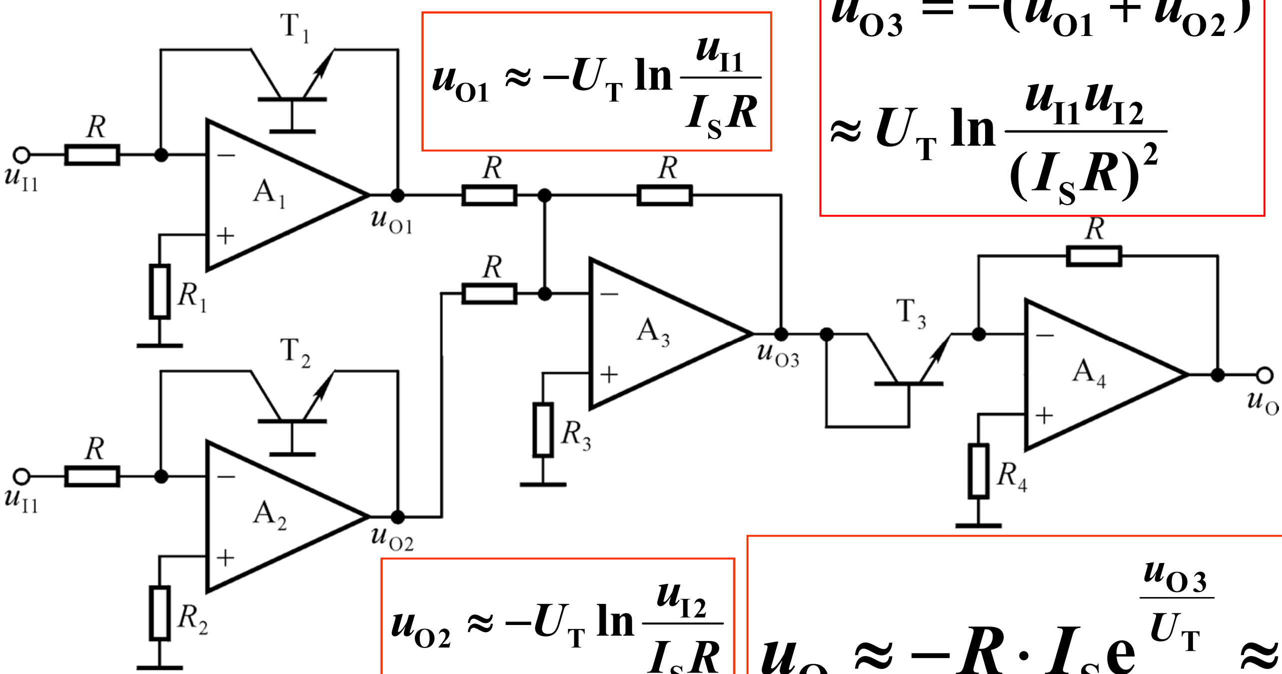
- 运算关系受温度影响
- 运算精度受输入电流影响

三、利用对数和指数运算电路实现乘法和除法运算电路



实现乘法运算

除法运算采用加减运算电路



$$u_{O1} \approx -U_T \ln \frac{u_{I1}}{I_S R}$$

$$u_{O2} \approx -U_T \ln \frac{u_{I2}}{I_S R}$$

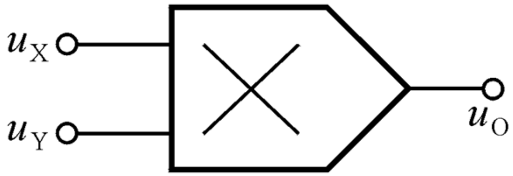
$$u_{O3} = -(u_{O1} + u_{O2})$$

$$\approx U_T \ln \frac{u_{I1} u_{I2}}{(I_S R)^2}$$

$$u_O \approx -R \cdot I_S e^{\frac{u_{O3}}{U_T}} \approx -\frac{u_{I1} u_{I2}}{(I_S R)^2}$$

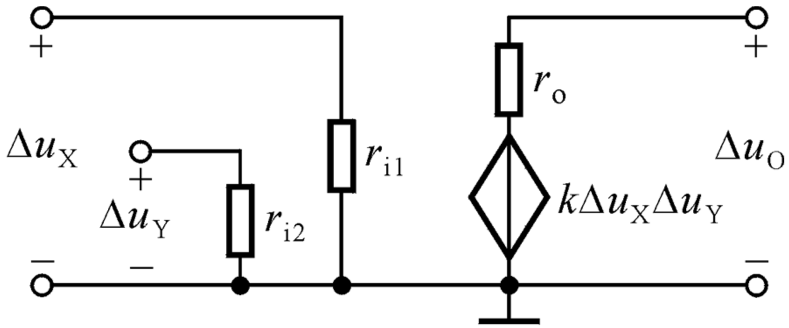
7.6 模拟乘法器及其在运算电路中的应用

一、模拟乘法器(Multiplier)



$u_O = k\, u_X * u_Y$　　k为常数

符号

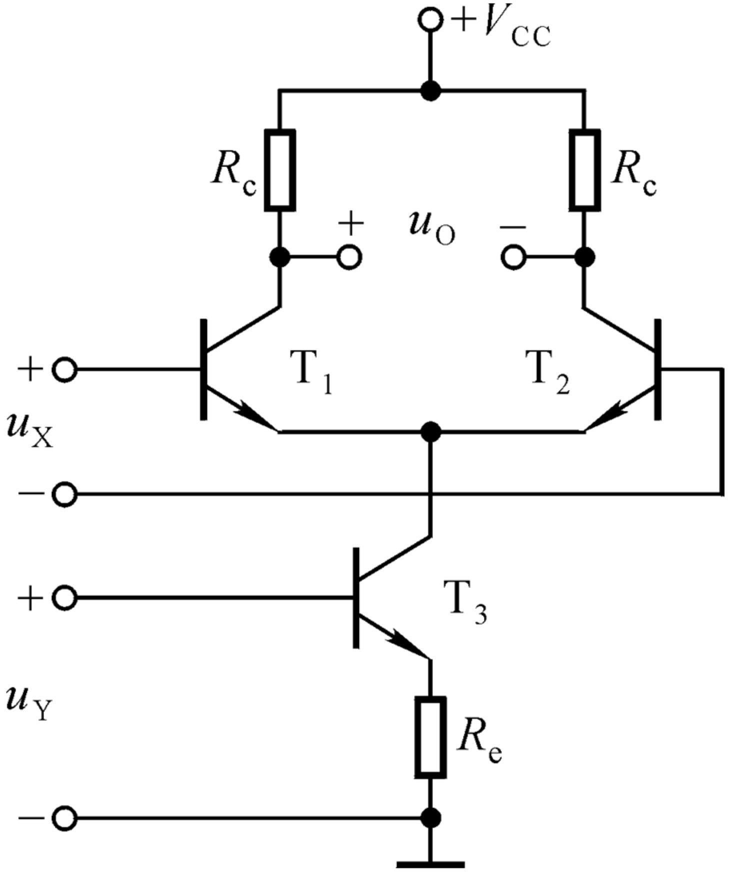


等效电路

理想模拟乘法器：

- r_{i1}, r_{i2} 为无穷大
- $r_o = 0$

两象限模拟乘法器



$$A_d = -\frac{\beta R_c}{r_{be}} = \frac{u_O}{u_X}$$

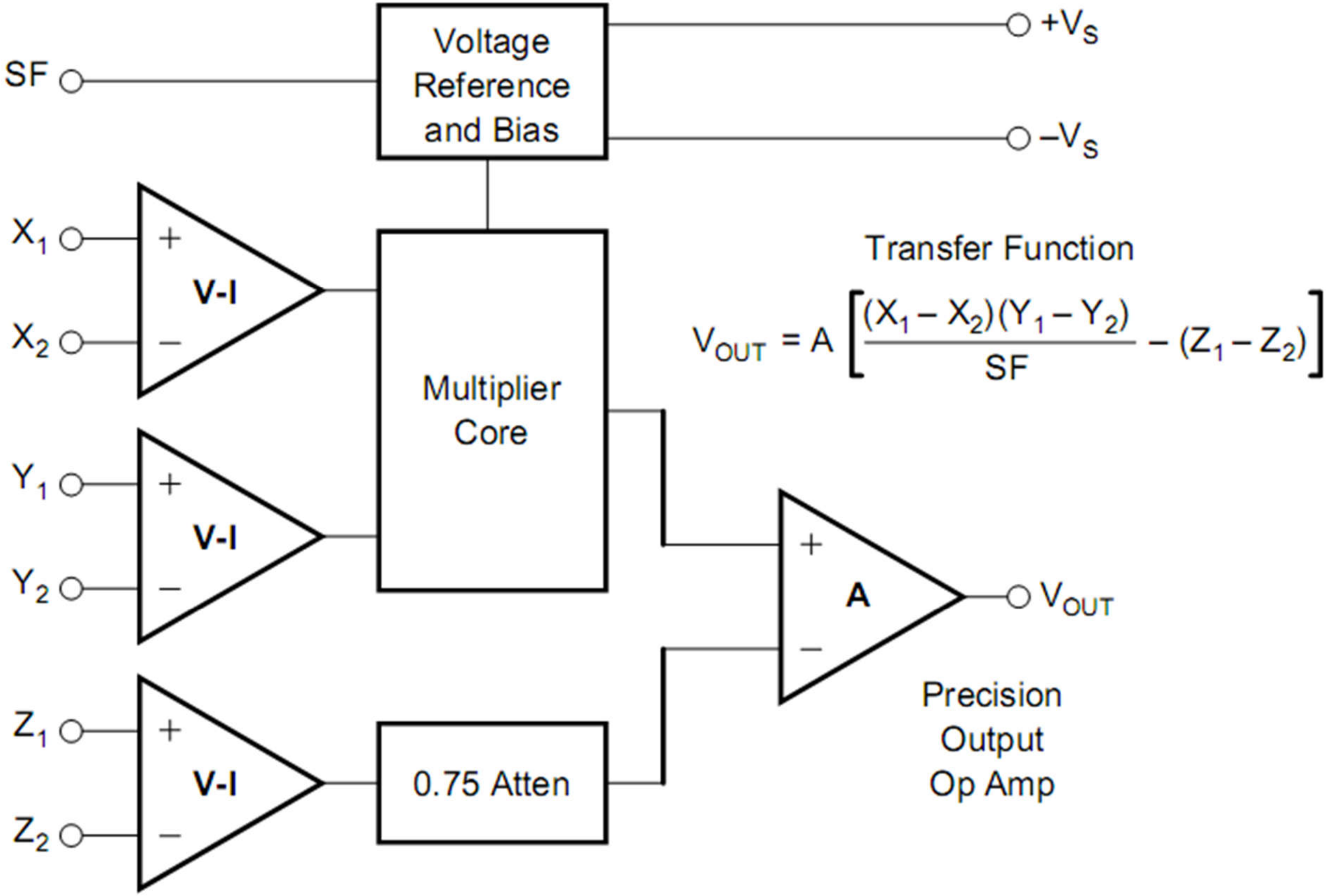
$$I_{C3} \approx \frac{u_Y}{R_e}$$

$$r_{be} \approx \beta \frac{U_T}{\frac{1}{2} I_{C3}} \approx \beta \frac{2U_T R_e}{u_Y}$$

$$u_O \approx -\frac{\beta R_c}{\beta \frac{2U_T R_e}{u_Y}} u_X$$

$$\approx -\frac{R_c}{2U_T R_e} u_X u_Y \approx k u_X u_Y$$

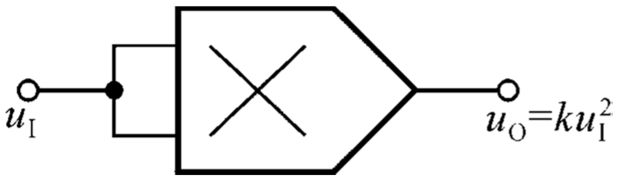
四象限模拟乘法器MPY634



$$V_{OUT} = A\left[\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{SF} - (Z_1 - Z_2)\right]$$

二、模拟乘法器在运算电路中的应用

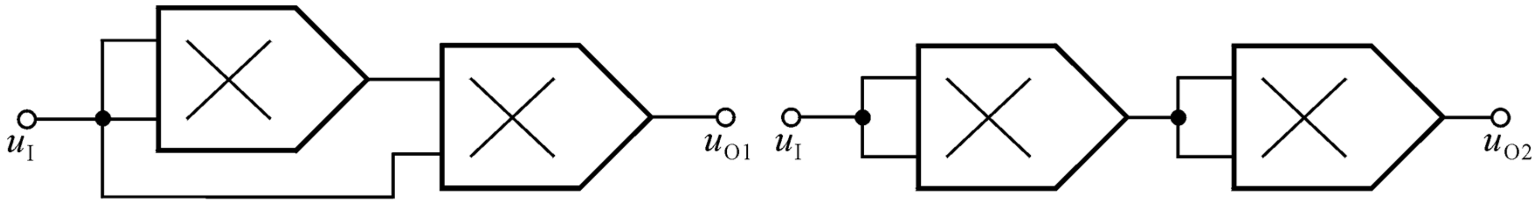
1．平方运算　　N次方运算



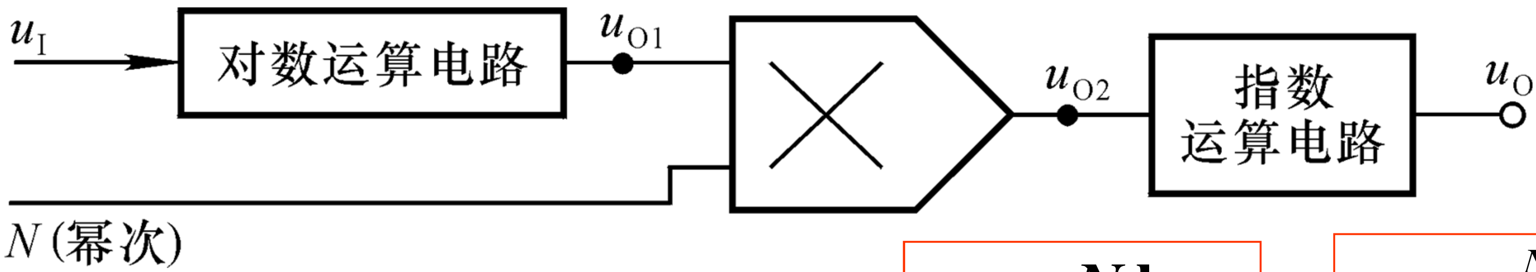
$u_I=\sin\omega t$

$u_O=k(1-\cos 2\omega t)$

实现正弦波倍频



3次方和4次方运算电路



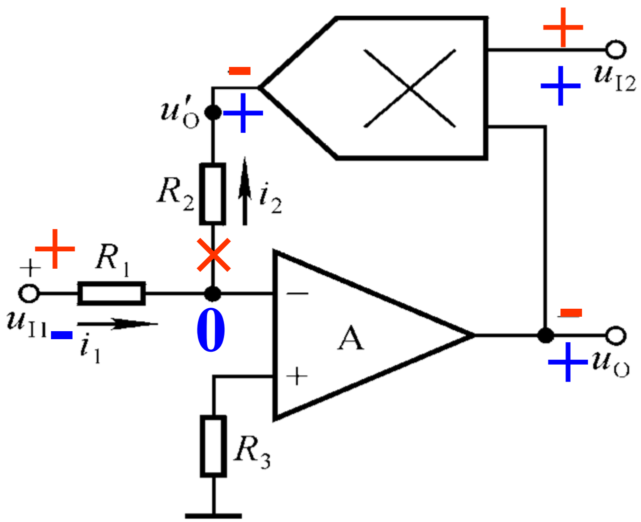
N次方运算电路

$u_{O2} \approx N \ln u_I$

$u_O \approx u_I^N$

注意

2. 除法运算(Divider)



设k>0

- 首先必须保证电路中引入的反馈为负反馈

$u_{I1}>0 \quad u_O<0 \quad u_{I2}>0$

$u_{I1}<0 \quad u_O>0 \quad u_{I2}>0$

- 然后求解运算关系

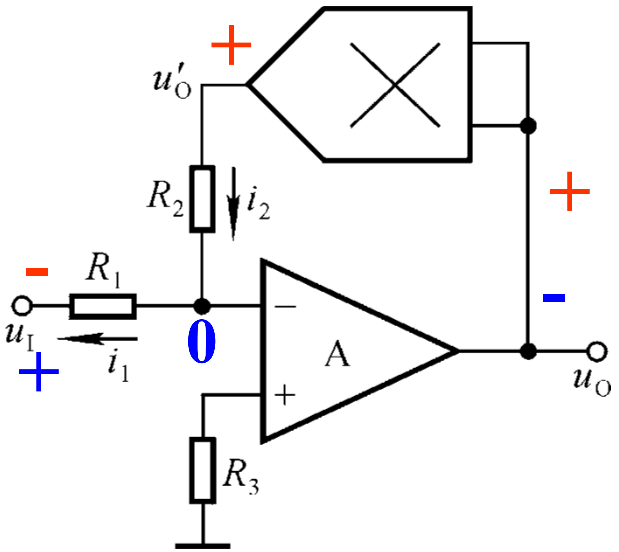
$i_1=i_2$

$$\frac{u_{I1}}{R_1} = -\frac{u_O'}{R_2} = -\frac{k u_O u_{I2}}{R_2}$$

$$\boxed{u_O = -\frac{R_2}{kR_1}\frac{u_{I1}}{u_{I2}}}$$

逆函数型运算电路:
采用乘法器作为反馈回路实现除法运算

3．开方运算电路（平方根）



- 首先必须保证电路中引入的反馈为负反馈（设k>0）

$u_I<0 \quad u_O>0 \quad k>0$

若$u_I>0$，则要求$k<0$，此时$u_O<0$

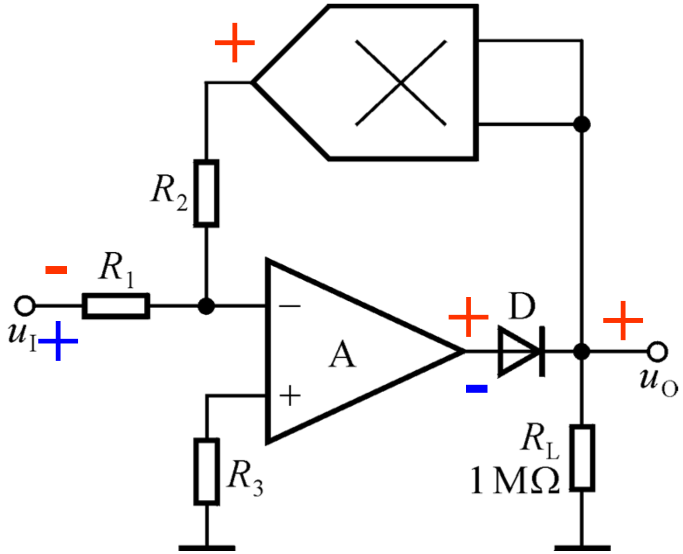
- 运算关系（设k>0）

$$-\frac{u_{I1}}{R_1}=\frac{u_O'}{R_2}=\frac{ku_O^{\ 2}}{R_2}$$

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

逆函数型运算电路：采用平方运算电路作为反馈回路实现平方根运算

当干扰信号使u_I>0而使反馈变为正反馈时，运放将出现闭锁现象

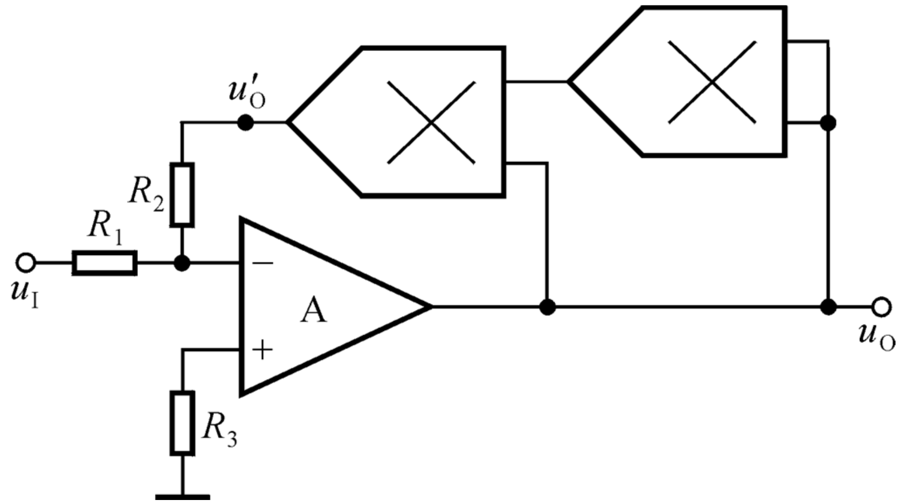


采用二极管限制输出电压极性，阻止正反馈形成，防止运放出现闭锁现象

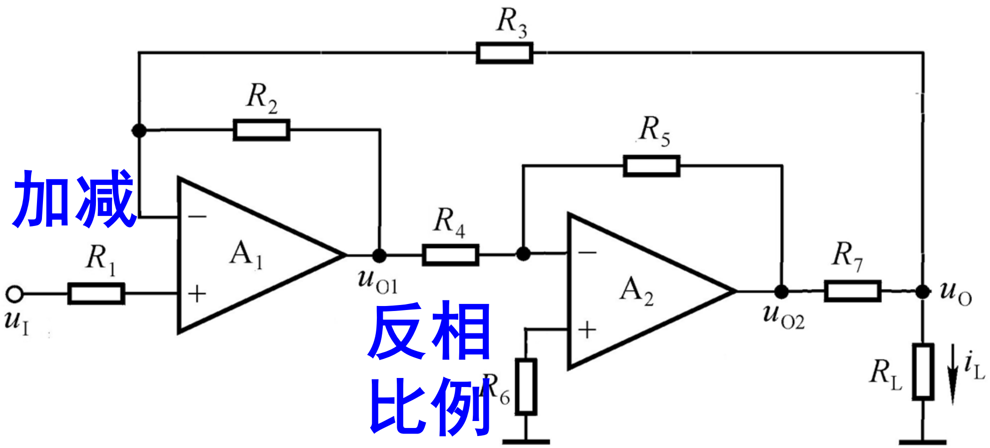
4. 立方根运算电路

（采用立方运算电路作为反馈回路）

$$u_O=\sqrt[3]{-\frac{R_2u_I}{k^2R_1}}$$



电压－电流转换电路如图所示，已知集成运放为理想运放，$R_2=R_3=R_4=R_7=R$，$R_5=2R$。求解i_L与u_I之间的函数关系。

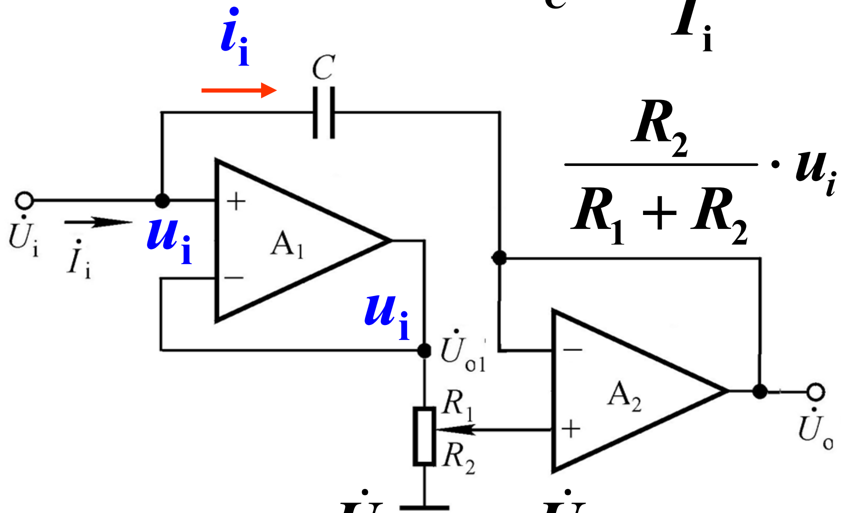


$$u_{O1}=(1+\frac{R_2}{R_3})u_I-\frac{R_2}{R_3}u_O=2u_I-u_O$$

$$u_{O2}=-\frac{R_5}{R}\cdot u_{O1}=-4u_I+2u_O$$

$$i_L=\frac{u_I-u_O}{R_3}+\frac{u_{O2}-u_O}{R_7}=-\frac{3u_I}{R}$$

电路如图所示，已知集成运放为理想运放，求解等效输入电容的表达式：$X_{C'}=\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$



$$X_{C'}=\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}=\frac{\dot{U}_i}{\frac{\dot{U}_i-\dot{U}_o}{Z_c}}$$

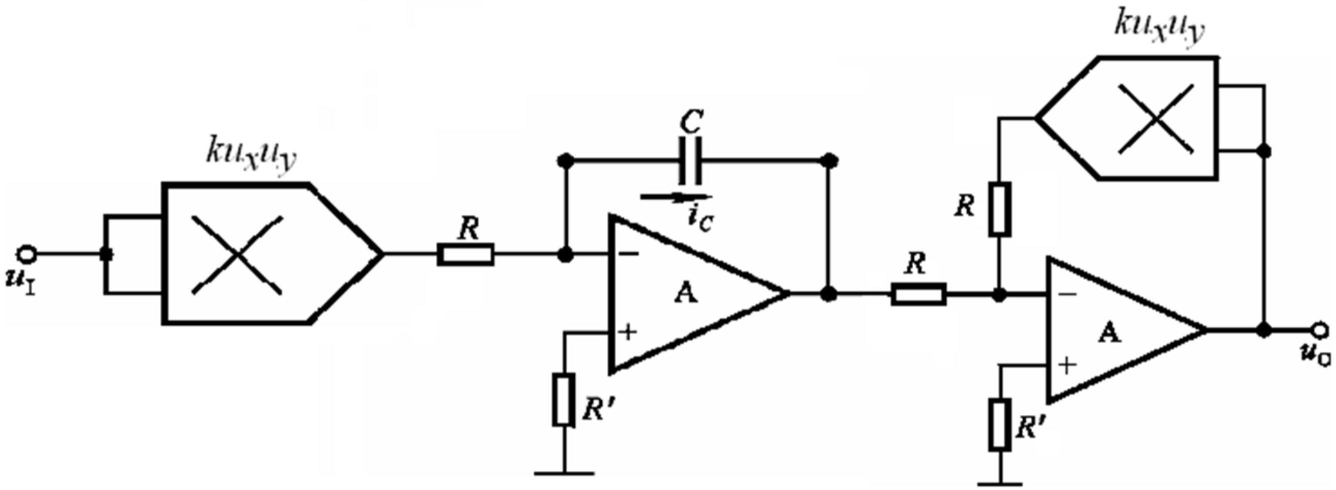
$$=\frac{R_1+R_2}{R_1}\cdot Z_C$$

$$C'=\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot C$$

课外兴趣题1

1. 有效值检测电路

设u_I为正弦波，周期为$T=RC$



验证：$u_O = \sqrt{\frac{1}{RC}\int_0^T u_I^{\,2}\mathrm{d}t}$

课外兴趣题2

2. 可以利用运算电路解方程$x^2+6x+2=0$吗？请设计该电路。

课外兴趣题3

3. 随着手持和移动设备应用的日益增多，对可单电源供电的运放的需求增多。请用运放设计和研究放大电路，电源为+5V，信号源要求如下：

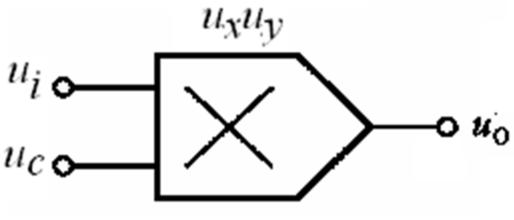
（1）幅值为10mV左右、直流偏置为0的交流信号，信号源内阻约为50Ω；

（2）幅值为10mV左右、直流偏置为2V的交流信号，信号源内阻约为2kΩ。

课外兴趣题4

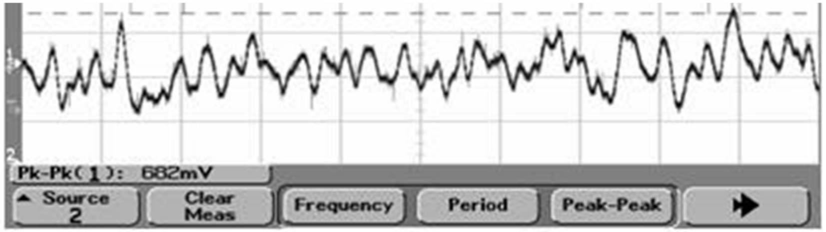
4. 调幅电路

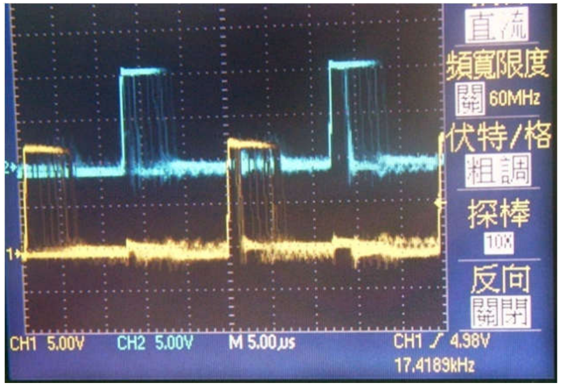
设高频载波信号$u_c=U_{cm}\sin(2\pi f_c t)$，被调制的音频信号为$u_i=U_{im}\sin(2\pi f_0 t)$。其中$f_c$=1MHz, f_0=1kHz

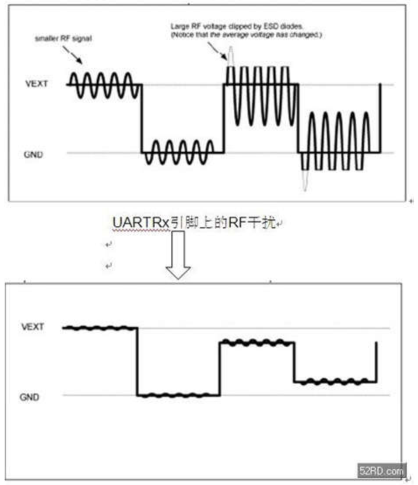


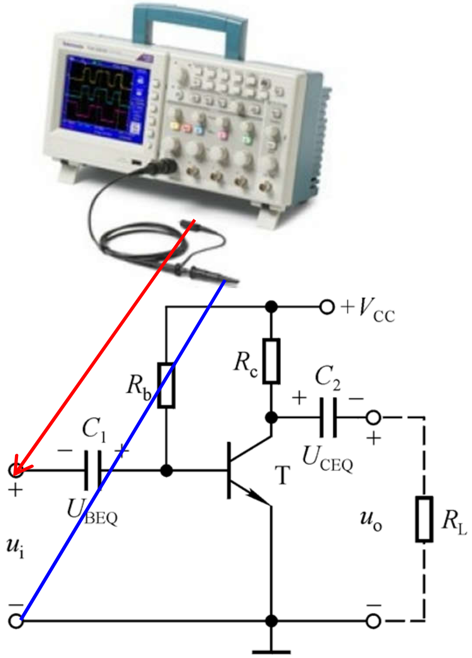
验证：$u_O=\dfrac{U_{im}U_{cm}}{2}[\cos2\pi(f_c-f_0)-\cos2\pi(f_c+f_0)]$

干扰信号

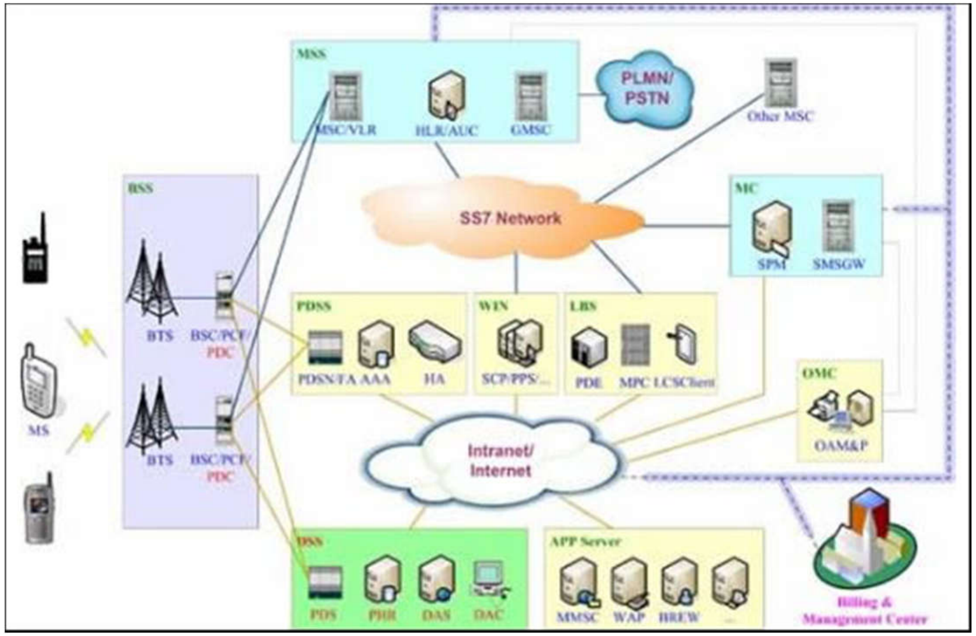

Pk-Pk(1): 682mV
Source 2
Clear Meas
Frequency
Period
Peak-Peak

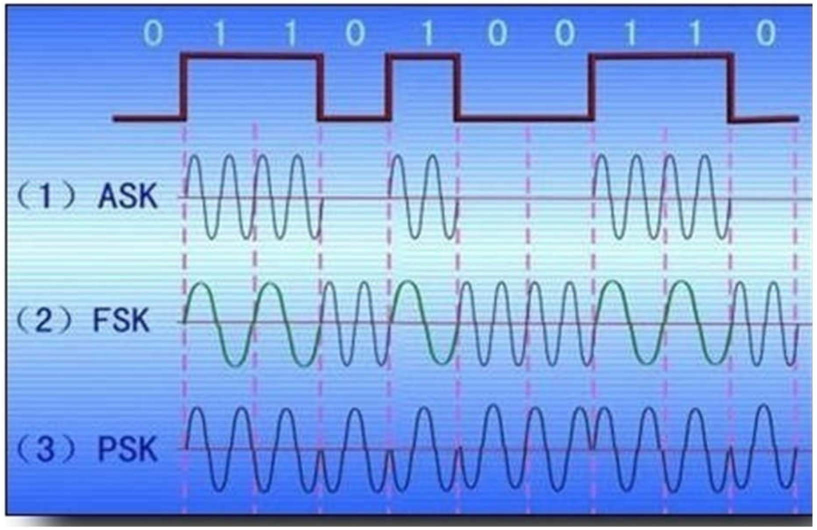

直流
頻寬限度
關 60MHz
伏特/格
粗調
探棒
10X
反向
關閉
CH1 5.00V
CH2 5.00V
M 5.00µs
CH1 ∫ 4.98V
17.4189kHz


VEXT
GND
UARTRx引脚上的RF干扰
VEXT
GND


$+V_{CC}$
R_c
R_b
C_2
C_1
U_{CEQ}
T
U_{BEQ}
u_i
u_o
R_L

通信载波信号

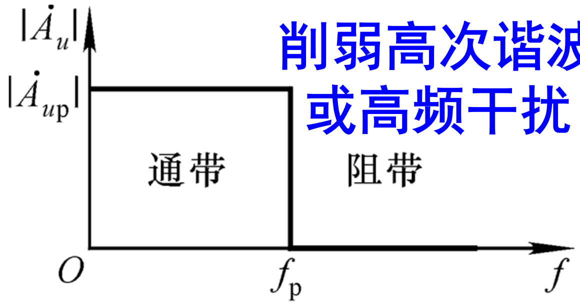

MSS
MSC/VLR
HLR/AUC
GMSC
PLMN/ PSTN
Other MSC
BSS
SS7 Network
MC
SPM
SMSGW
BTS
BSC/PCF/ PDC
PDSS
WIN
LBS
MS
Intranet/ Internet
OMC
OAM&P
APP Server
Billing & Management Center


0 1 1 0 1 0 0 1 1 0
(1) ASK
(2) FSK
(3) PSK

7.7 有源滤波电路(Active Filter)

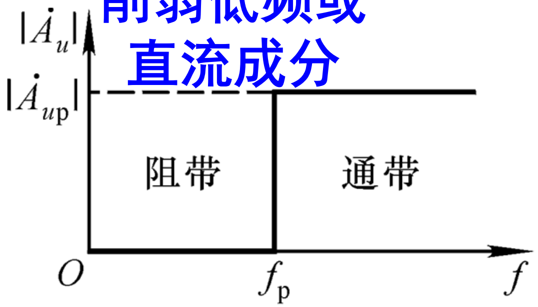
一、滤波电路的基本知识

- **滤波电路**是指让特定频率范围内的信号能够正常放大，而阻止其它频段信号通过的电路。



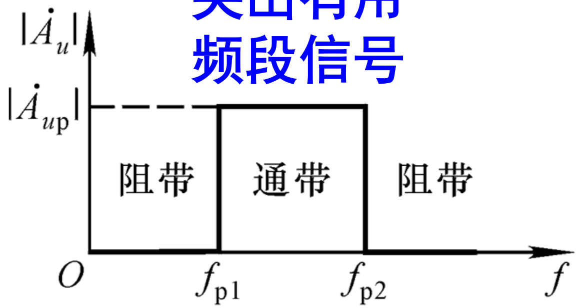
削弱高次谐波或高频干扰

低通滤波器（LPF）



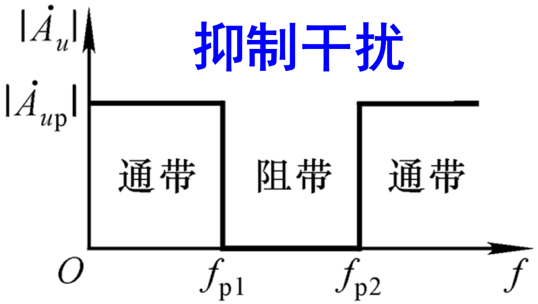
削弱低频或直流成分

高通滤波器（HPF）



突出有用频段信号

带通滤波器（BPF）



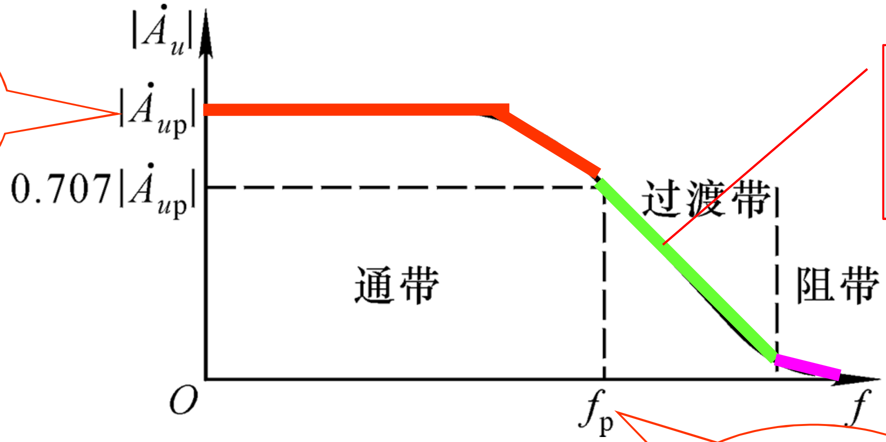
抑制干扰

带阻滤波器（BEF）

全通滤波器
(移相滤波器)

• 低通滤波器的实际幅频特性

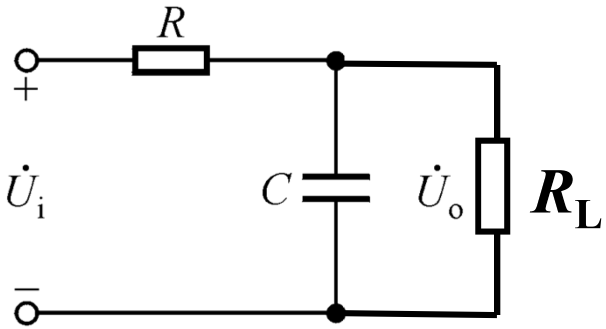
通带电压
放大倍数



过渡带越窄，
滤波性能越好

通带截止
频率

• 无源滤波电路

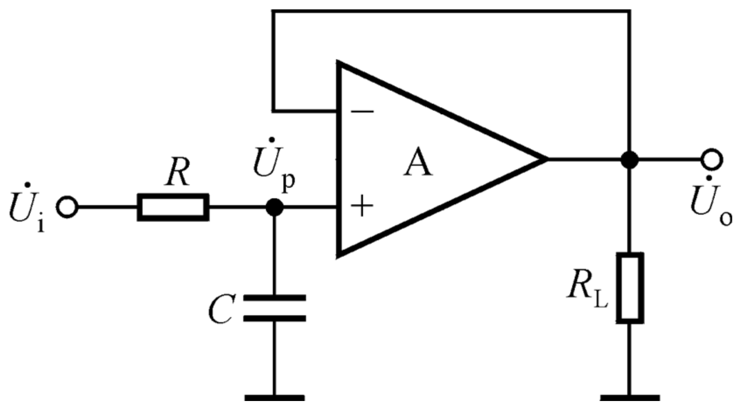


$$\dot{A}_u = \frac{1}{1+\mathrm{j}\dfrac{f}{f_H}}$$

无源滤波电路带负载后：

- 相同频率信号作用下输出电压幅值减小；
- 通带截止频率增大。

- **有源滤波电路**　无源滤波电路＋电压跟随器



有源滤波电路带负载能力强

$$Z_c(s)=\frac{1}{sC}$$

$$A_u(s)=\frac{U_o(s)}{U_i(s)}=\frac{\frac{1}{sC}}{R+\frac{1}{sC}}=\frac{1}{1+sRC}$$

传递函数分母中s的最高指数称为滤波器的阶数

- **有源滤波电路传递函数一般表达式**

一阶LPF、HPF：

$$A_u(s)=\frac{a_0+a_1\frac{s}{\omega_0}}{1+\frac{s}{\omega_0}}$$

二阶$A_u(s)=\dfrac{a_0+a_1\left(\frac{s}{\omega_0}\right)+a_2\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{1+\frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_0}\right)+\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$