



第5章 集成运算放大器的应用

5.1 理想集成运算放大器

*5.2 模拟信号运算电路

5.3.2 电压比较器

5.4 波形产生电路



本章重点和考点

- 1.运放的线性应用特点：虚短、虚断
- 2.比例、加法、减法等运算电路及综合应用。
- 3.单门限电压比较器和滞回比较器的分析
- 4.**RC**串并联式正弦波振荡电路的工作原理、起振条件、稳幅原理及振荡频率的计算。

5.1 理想集成运算放大器

理想运放:

$$A_o \rightarrow \infty$$

$$R_i \rightarrow \infty$$

$$R_o \rightarrow 0$$

$$KCMR \rightarrow \infty$$

实际运放:

$$A_o \text{ 很大: } 10^4 \text{ 以上} \sim 10^7$$

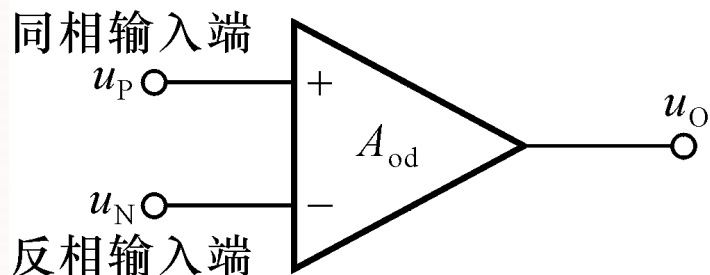
$$R_i \text{ 高: 几十k} \sim \text{几百k}\Omega$$

$$R_o \text{ 小: 几十} \sim \text{几百}\Omega$$

$$KCMR \text{ 很大}$$

实际运放的技术指标与理想运放比较接近，因此用理想运放代替实际运放分析所产生的误差并不大，在工程计算中是允许的，由此却带来了分析的大大简化

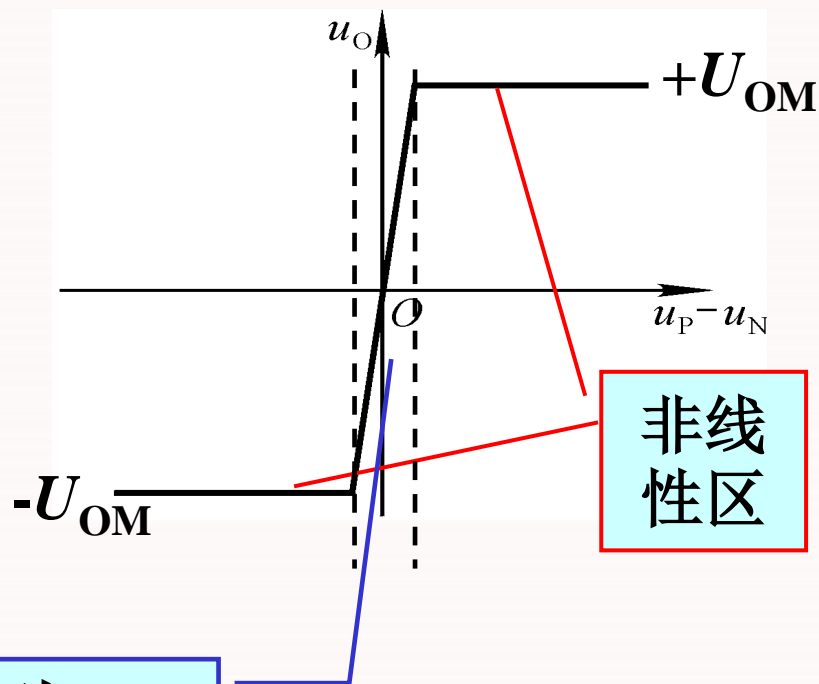
5.1.2 理想运放的线性工作状态及其特点



在线性区：

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N)$$

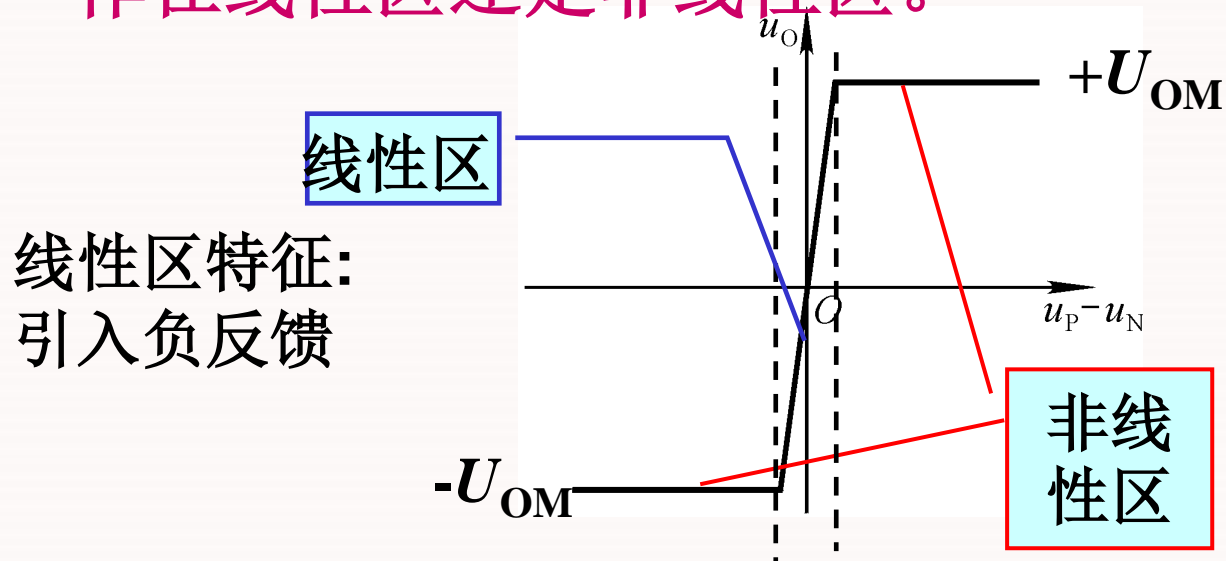
A_{od} 是开环差模放大倍数。



线性区，曲线斜率为 A_{od}

由于 A_{od} 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 $(u_P - u_N)$ 的数值仅为几十~一百多微伏。

分析应用电路的工作原理时，首先要分清运放工作在线性区还是非线性区。



线性区特征：
引入负反馈

非线性区电路特征：
开环或引入正反馈

$(u_P - u_N)$ 的数值大于一定值时，集成运放的输出不是 $+U_{OM}$ ，就是一 $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。

$+U_{OM}$ 为正向输出饱和电压

$-U_{OM}$ 为负向输出饱和电压

其数值接近运放的正负电源电压

理想运放线性区的特征:

(1) 虚短 (似短, 不是真短)

$$A_0 = \infty \longrightarrow u_o = A_0(u_+ - u_-)$$

虚短路

$$u_+ = u_-$$

(2) 虚断 (似断, 不是真断)

$$R_i = \infty \longrightarrow i_+ = i_- = 0$$

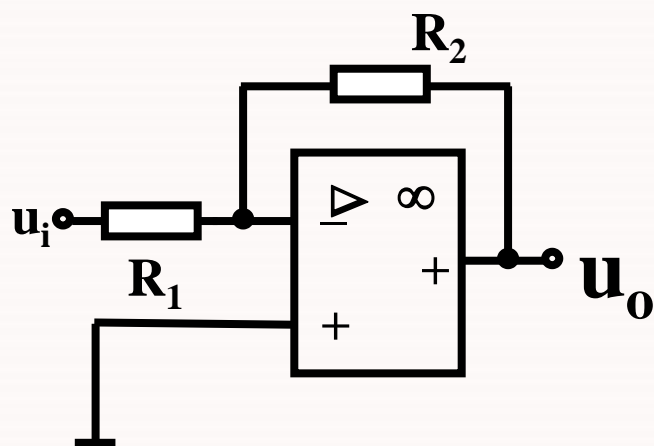
虚开路

(3) $R_o = 0$ \longrightarrow 放大倍数与负载无关,
可以分开分析。

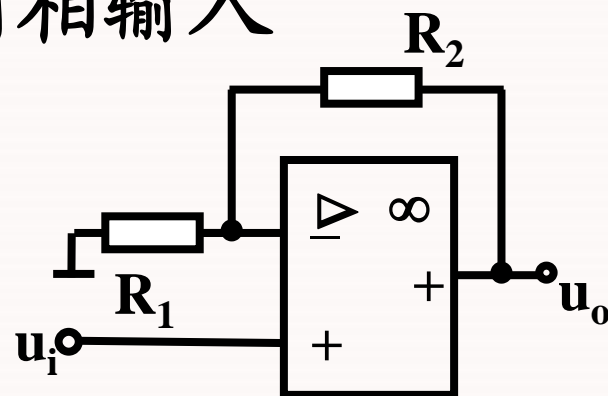
虚短和虚断的特点, 在分析或设计集成运放组成的运算电路时很有用。

集成运放的三种基本输入形式:

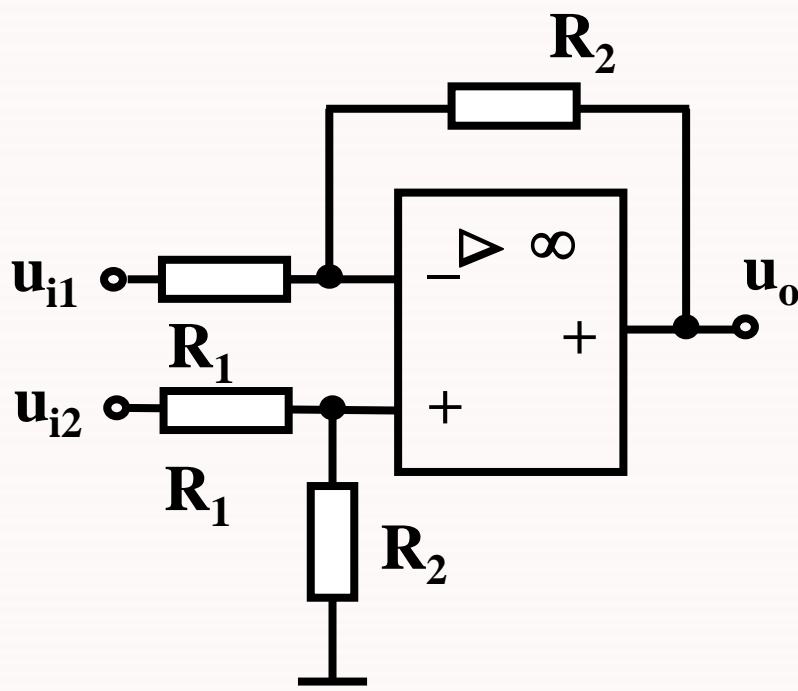
1、反相输入:



2、同相输入



3、差动输入:



5.2 模拟信号运算电路

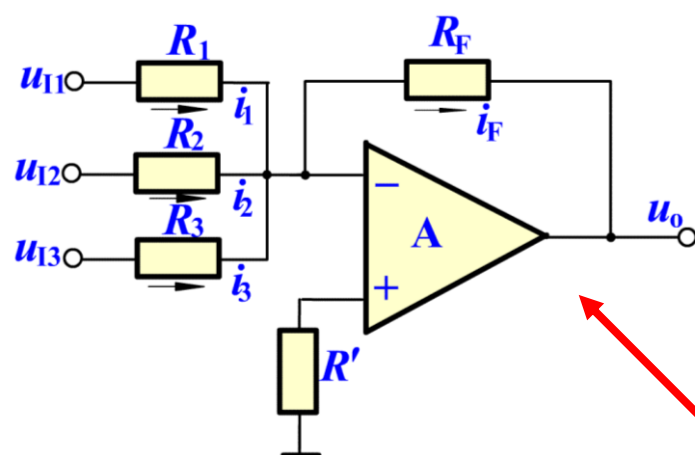
*5.2.1 比例运算电路

*5.2.2 加减运算电路

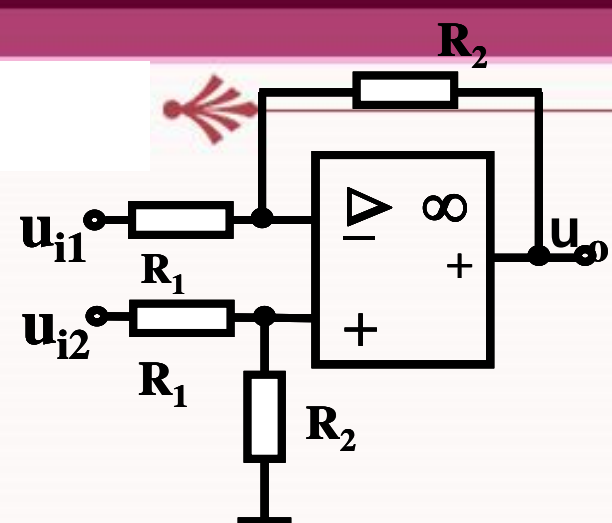
5.2.3 积分运算电路和微分运算电路

5.2.4 对数运算电路和指数运算电路

分析方法：“虚短”和“虚断”是基本出发点。



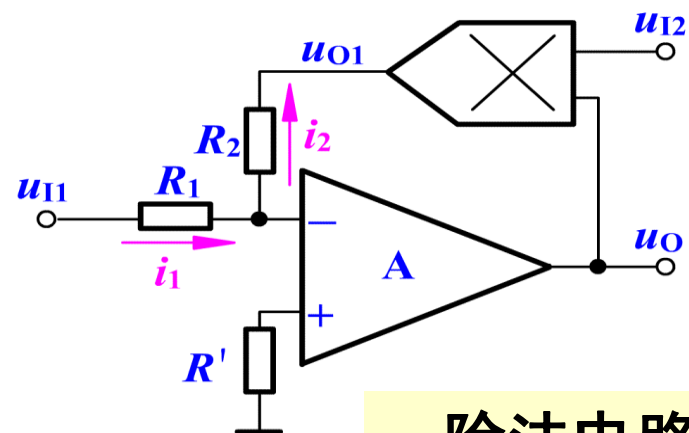
加法电路



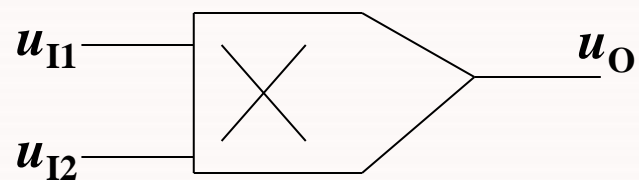
减法电路



各种运算电路



除法电路



乘法电路

5.2.1 比例运算电路

1. 反相比例运算电路

平衡电阻 $R' = R // R_F$

由于“虚断”， $i_P = 0$ ， $u_P = 0$ ；

由于“虚短”， $u_N = u_P = 0$ —— “虚地”

在节点N：

$$i_R = i_F$$

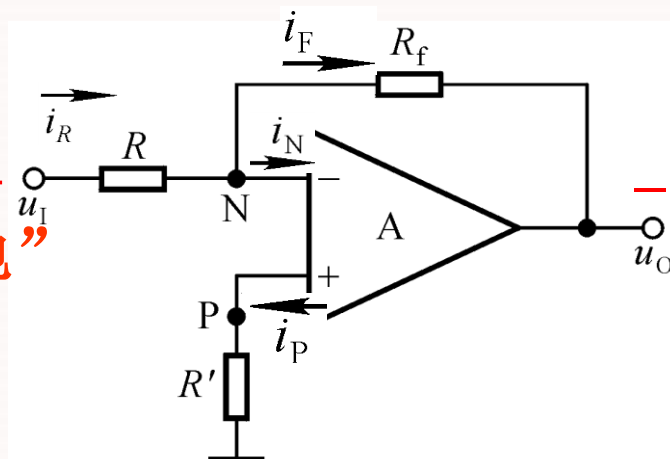
$$\frac{u_I - u_N}{R} = \frac{u_N - u_O}{R_F}$$

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

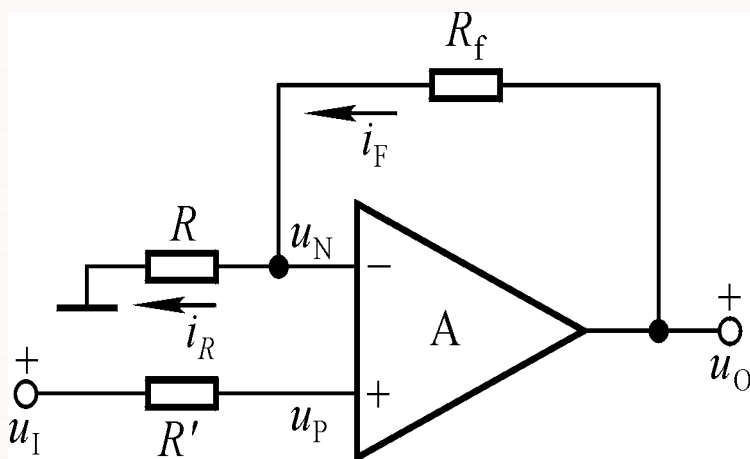
反相输入端“虚地”，电路的输入电阻为 $R_{if} = R$

引入深度电压并联负反馈，电路的输出电阻为 $R_{of} = 0$

若要 $R_i = 100\text{k}\Omega$ ，比例系数为 -100 ， $R = ?$ $R_f = ?$



2. 同相比例运算电路



$$R' = R // R_F$$

根据“虚短”和“虚断”的特点，可知

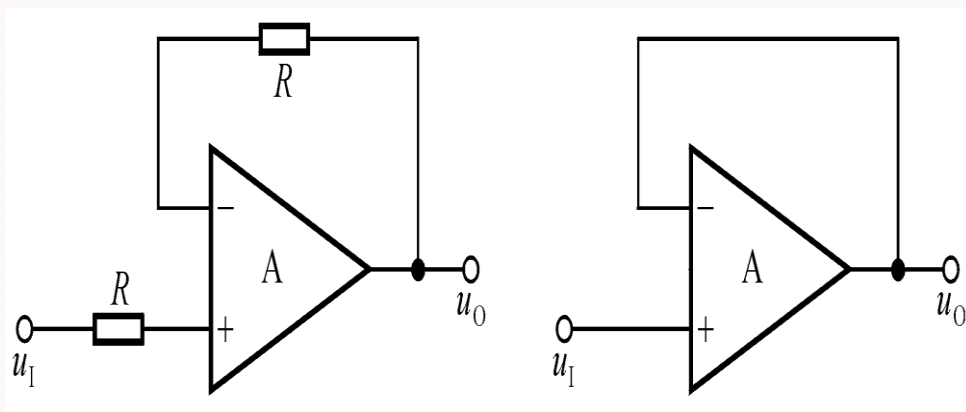
$$i_N = 0; \quad \text{所以} \quad u_N = \frac{R}{R + R_F} u_O$$

$$\text{又 } u_N = u_P = u_I \quad \text{所以} \quad \frac{R}{R + R_F} u_O = u_I$$

$$u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot u_N = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot u_I$$

由于该电路为电压串联负反馈，所以输入电阻很高。

同相输入比例运算电路的特例：电压跟随器



$$u_O = u_N = u_P = u_I$$

$$1) \dot{F} = ?$$

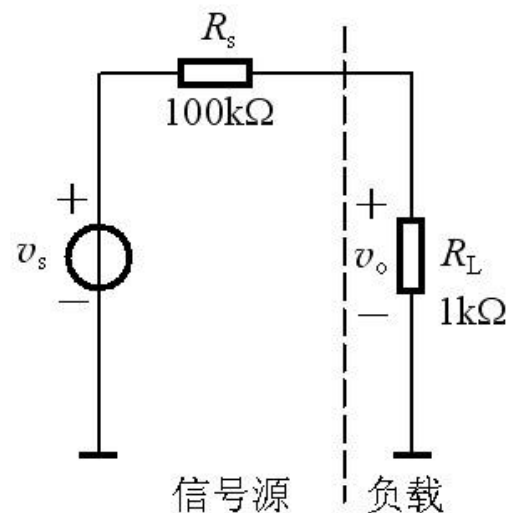
$$2) R_i = ? R_o = ?$$

$$3) u_{Ic} = ?$$

计算方法小结

1. 列出关键结点的电流方程，如N点和P点。
2. 根据虚短(地)、虚断的原则，进行整理。

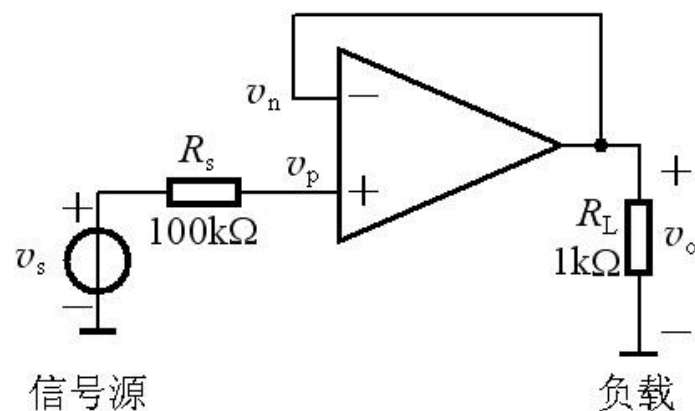
电压跟随器的作用



(a)

无电压跟随器时
负载上得到的电压

$$v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot v_s$$
$$= \frac{1}{100 + 1} \cdot v_s \approx 0.01v_s$$



(b)

电压跟随器时

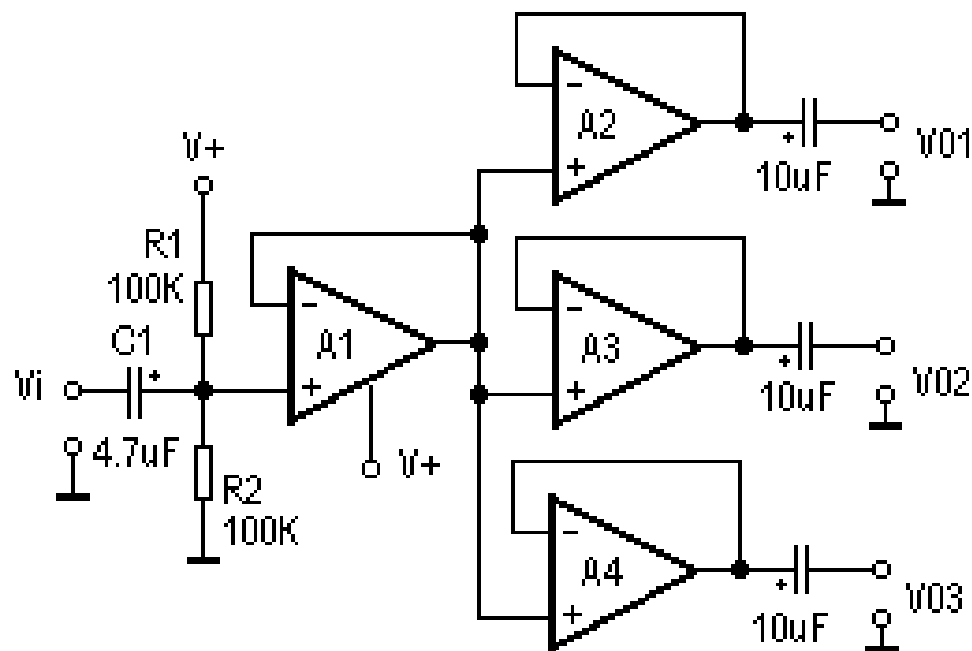
$$i_p \approx 0, \quad v_p = v_s$$

根据虚短和虚断有

$$v_o = v_n \approx v_p = v_s$$

交流信号三分配放大器 此电路可将输入交流信号分成三路输出，三路信号可分别用作指示、控制、分析等用途。而对信号源的影响极小。

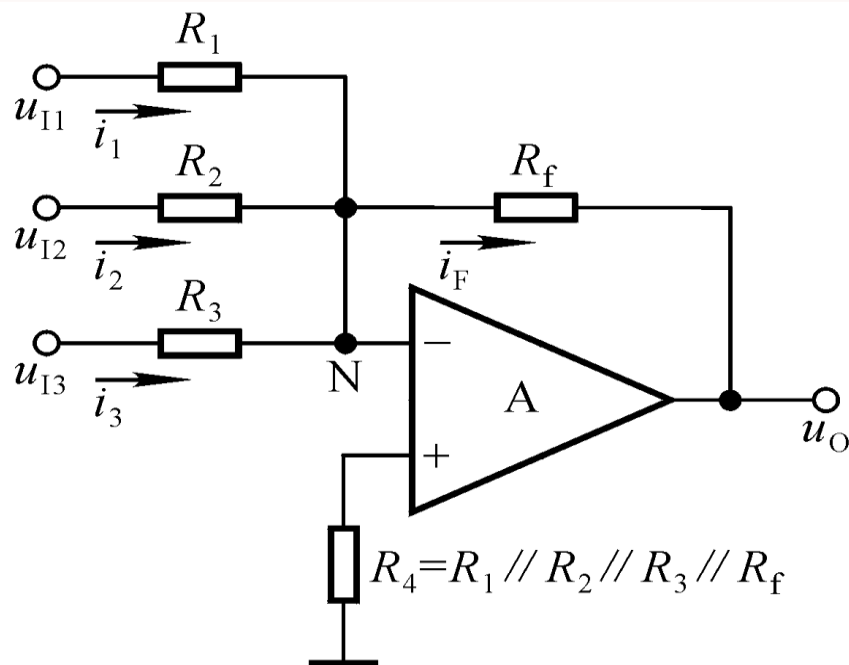
R1、R2组成 $1/2V_+$ 偏置，静态时A1输出端电压为 $1/2V_+$ ，故运放A2-A4输出端亦为 $1/2V_+$ ，通过输入输出电容的隔直作用，取出交流信号，形成三路分配输出。



5.2.2 加减运算电路

1. 反相加法运算电路

节点电流法



$$u_N = u_P = 0$$

$$i_F = i_{R1} + i_{R2} + i_{R3}$$

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

$$u_O = -i_F R_f = -R_f \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} \right)$$

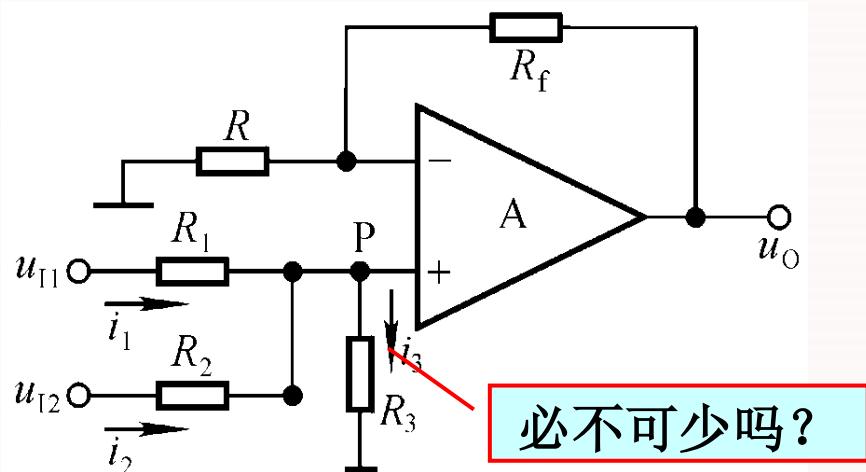
2. 同相加法运算电路 设 $R_1 // R_2 // R_3 = R // R_f$

由于“虚断”， $i_+ = 0$ ，所以：

$$i_1 + i_2 = i_3$$

$$\frac{u_{I1} - u_P}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_P}{R_2} = \frac{u_P}{R_3}$$

$$\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) u_P$$



必不可少吗?

由于“虚短”， $u_P = u_N$

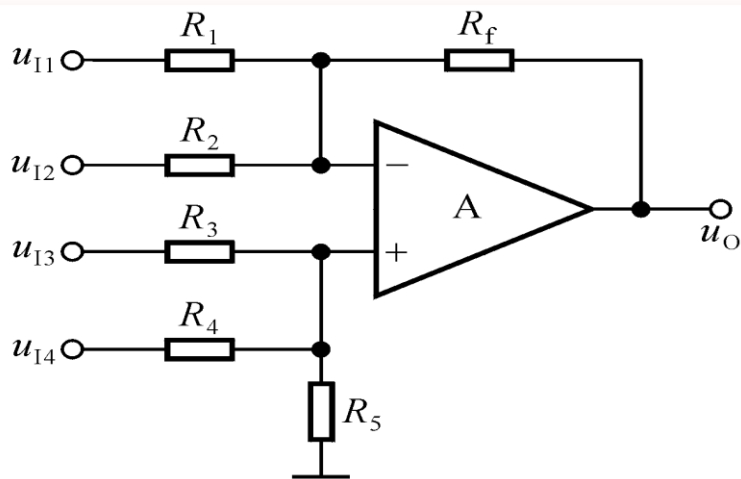
$$u_P = R_P \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right) \quad (R_P = R_1 // R_2 // R_3)$$

$$u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) \cdot u_N = \frac{R + R_f}{R} \cdot R_P \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right) \cdot \frac{R_f}{R_f}$$

$$u_O = R_f \cdot \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

与反相求和运算电路的结果差一负号

讨论

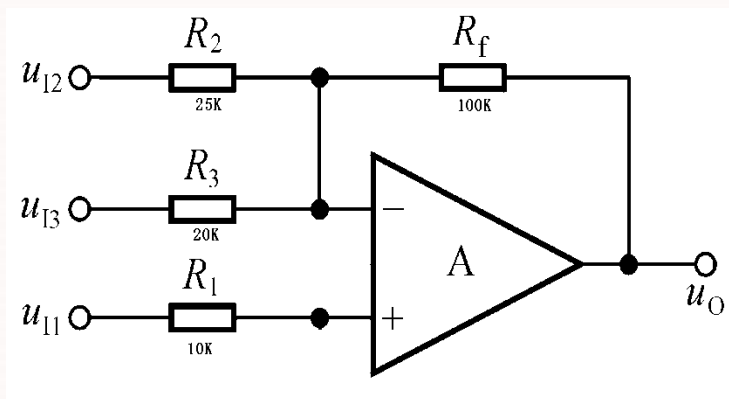


设 $R_1 // R_2 // R_f = R_3 // R_4 // R_5$

$$u_O = R_f \cdot \left(\frac{u_{I3}}{R_3} + \frac{u_{I4}}{R_4} - \frac{u_{I1}}{R_1} - \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

例：用集成运放实现以下运算关系

$$u_O = 10u_{I1} - 5u_{I2} - 4u_{I3}$$



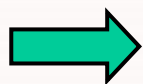
3. 利用差分式电路以实现减法运算

从结构上看，它是反相输入和同相输入相结合的放大电路。

$$R_1 // R_f = R_2 // R_3$$

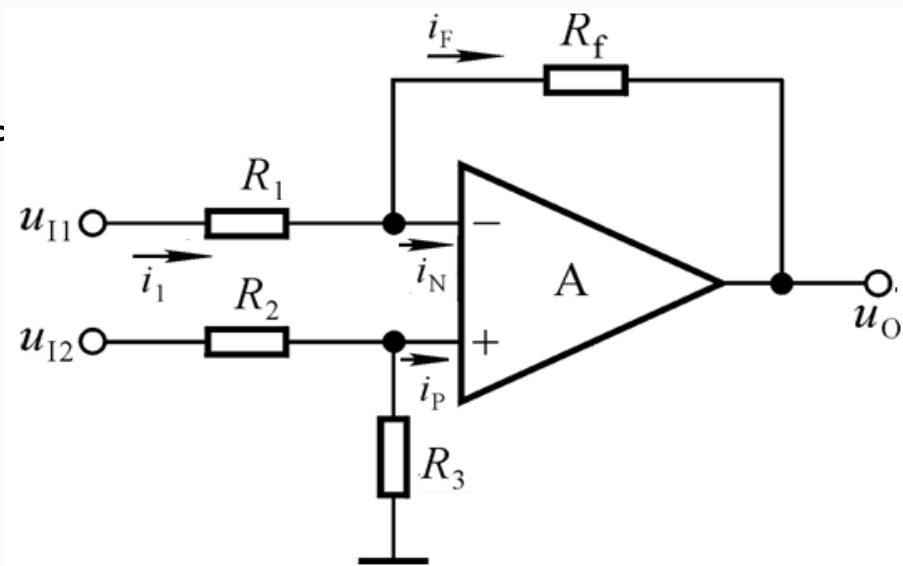
根据虚短、虚断和N、P点的KCL得：

$$\begin{cases} u_N = u_P \\ \frac{u_{I1} - u_N}{R_1} = \frac{u_N - u_O}{R_f} \\ \frac{u_{I2} - u_P}{R_2} = \frac{u_P - 0}{R_3} \end{cases}$$



$$u_O = \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) u_{I2} - \frac{R_f}{R_1} u_{I1}$$

$$\text{当 } \frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}, \text{ 则 } u_O = \frac{R_f}{R_1} (u_{I2} - u_{I1})$$





当 U_1 单独作用时:

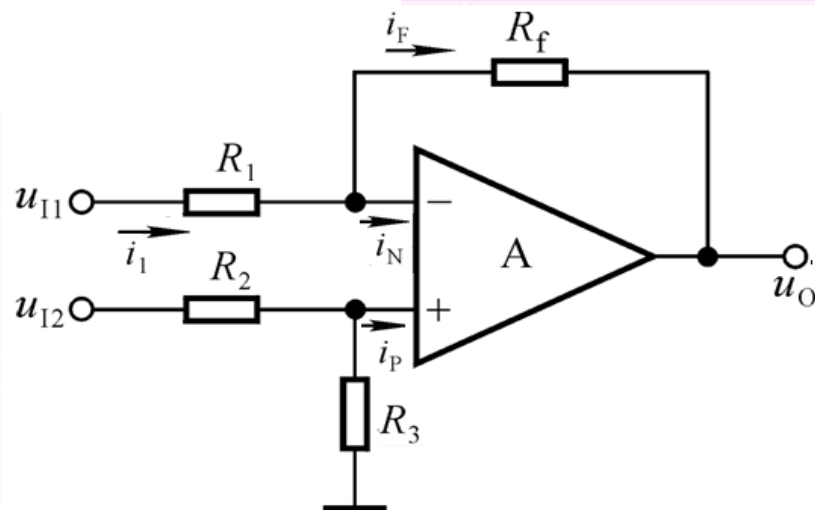
$$u'_o = -\frac{R_f}{R_1} u_{I1}$$

当 U_2 单独作用时:

$$u''_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{I2}$$

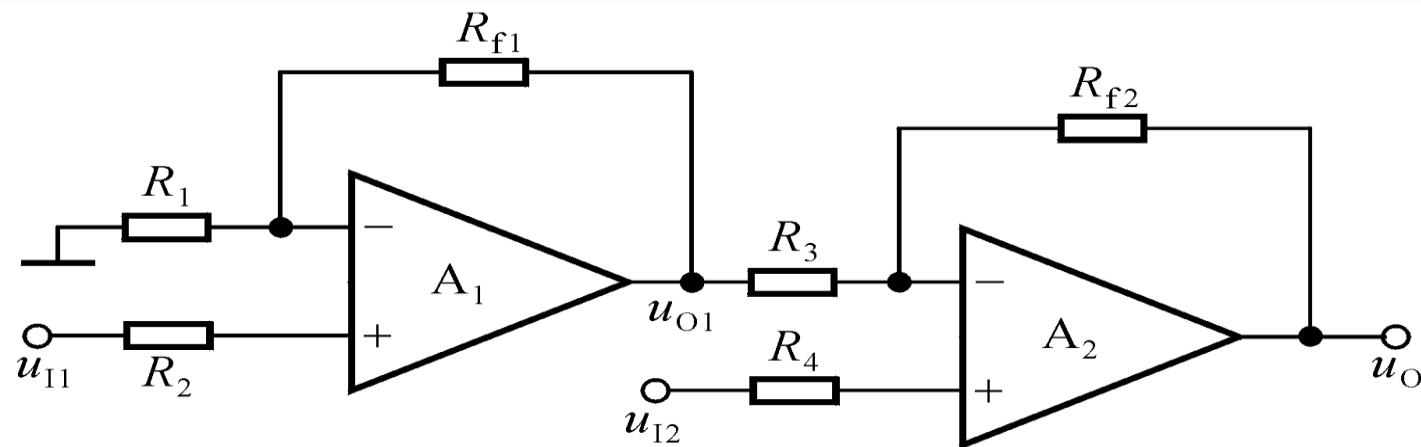
$$u_o = u'_o + u''_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{I2} - \frac{R_f}{R_1} u_{I1}$$

当 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$, $\rightarrow u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{I2} - u_{I1})$



- 减法器的输出电压为两个输入信号之差乘以放大系数 R_f/R_1 , 故又称它为差分放大器。
- 为减小失调误差 $R_1//R_f=R_2//R_3$

4. 高输入电阻差分比例运算电路



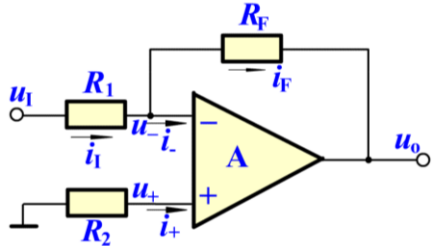
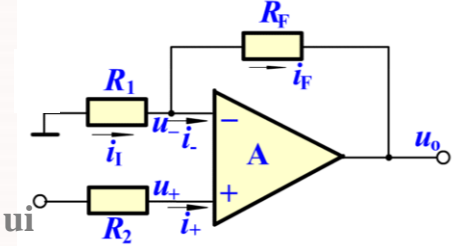
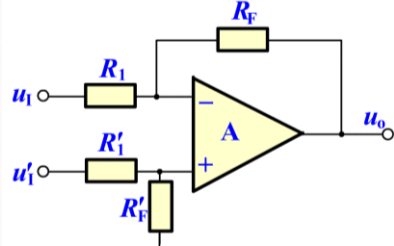
$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_{F1}}{R_I}\right) u_{I1}$$

$$u_o = -\frac{R_{F2}}{R_3} u_{o1} + \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_3}\right) u_{I2}$$

若 $R_1 = R_{F2}$, $R_3 = R_{F1}$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_3}\right) (u_{I2} - u_{I1})$$

三种比例运算电路之比较

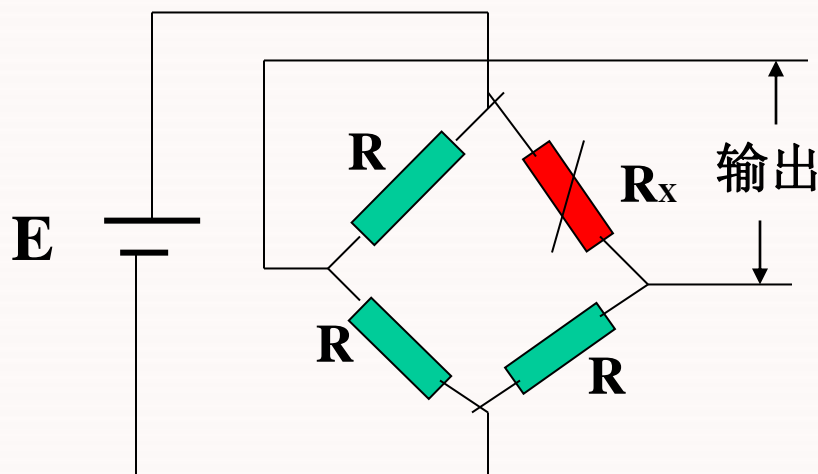
	反相输入	同相输入	差分输入
电路组成	 <p>要求 $R_2 = R_1 // R_F$</p>	 <p>要求 $R_2 = R_1 // R_F$</p>	 <p>要求 $R_1 = R'_1$ $R_F = R'_F$</p>
电压放大倍数	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = -\frac{R_F}{R_I}$ <p>u_O 与 u_I 反相, A_{uf} 可大于、小于或等于 1</p>	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_F}{R_I}$ <p>u_O 与 u_I 同相, 放大倍数可大于或等于 1</p>	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I - u'_I} = -\frac{R_F}{R_1}$ <p>(当 $R_1 = R'_1$, $R_F = R'_F$ 时)</p>
R_{if}	$R_{if} = R_1$ 不高	$R_{if} = u_i / i_+$ 高	$R_{if} = 2R_1$ 不高
R_o	低	低	低
性能特点	实现反相比值运算; 电压并联负反馈; “虚地”	实现同相比值运算; 电压串联负反馈; “虚短”但不“虚地”	实现差分比例运算(减法) “虚短”但不“虚地”

比例电路应用实例

由三运放组成的仪表放大器

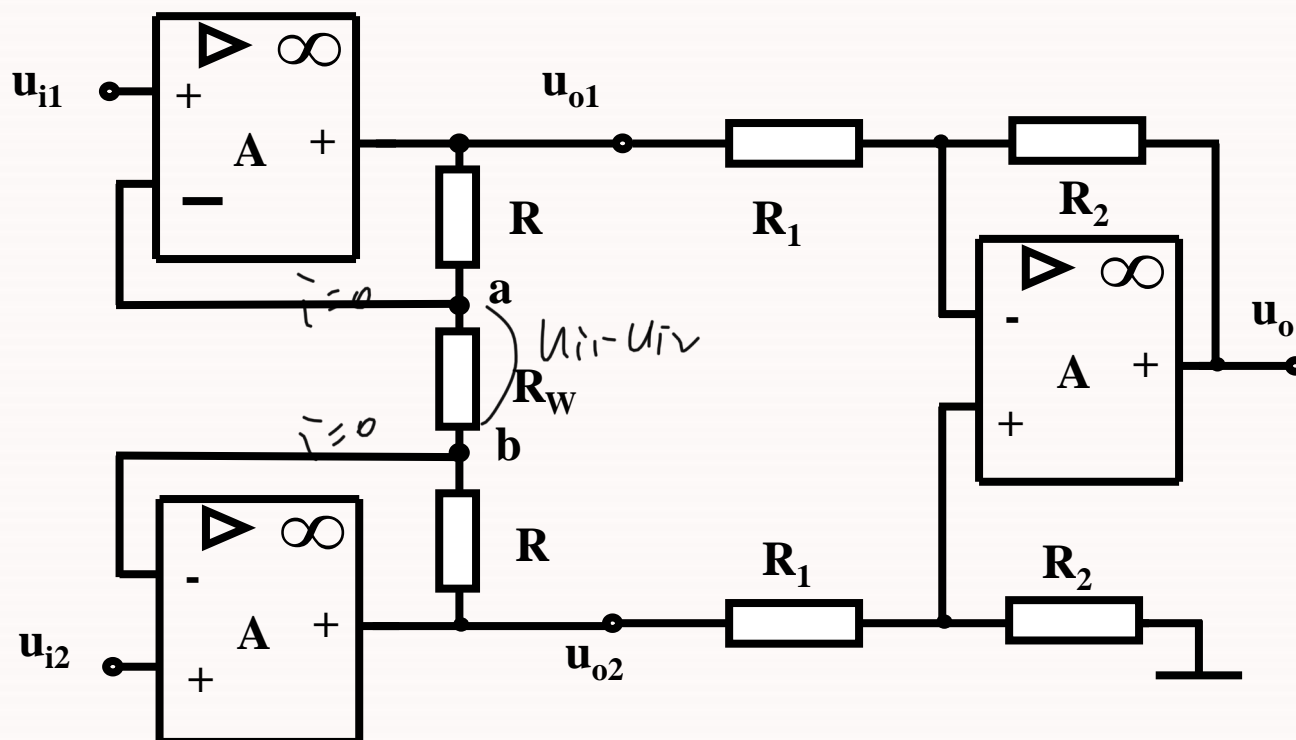
当传感器工作环境恶劣时，传感器的输出存在着各种噪声，且共模干扰信号很大，而传感器输出的有用信号又比较小，输出阻抗又很大，此时，一般运算放大器已不能胜任，这时可考虑采用仪表放大器（数据放大器、测量放大器）。

例如用于对温度、流量、压力等物理量的测量，一般传感器是利用电阻或电容的变化，用电桥把他们转换成电压的变化，如图。

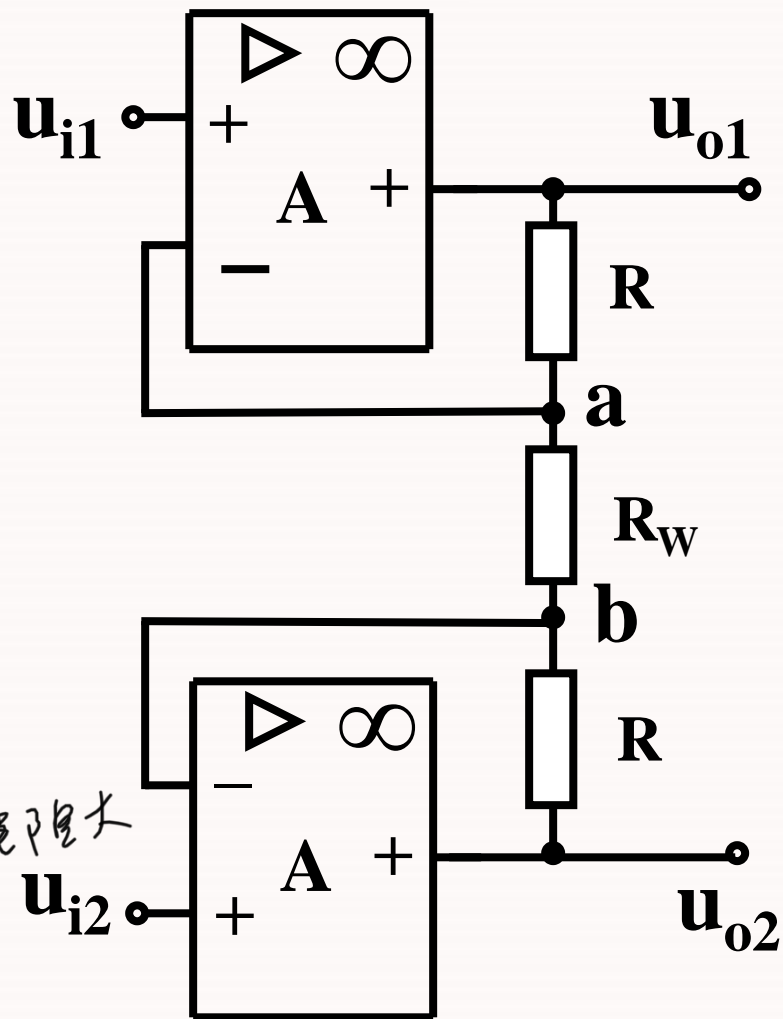




两个放大级。结构对称的 A_1 、 A_2 组成第一级，互相抵消漂移和失调。



A_3 组成差分放大级，将差分输入转换为单端输出。



$$u_a = u_{i1} \quad u_b = u_{i2}$$

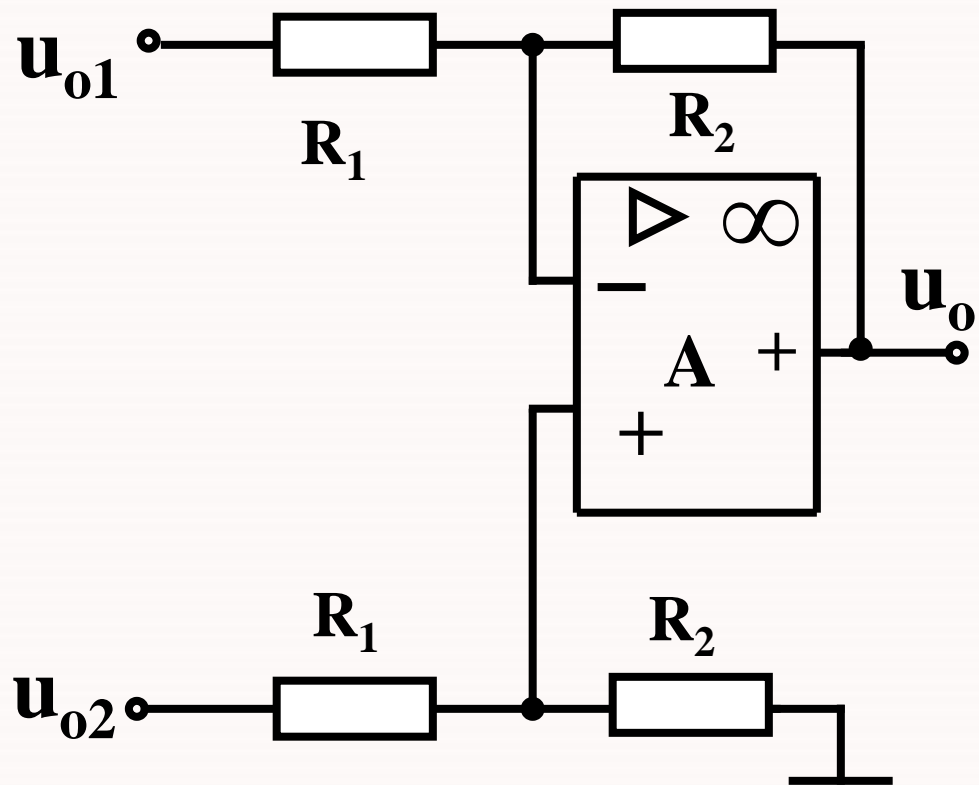
$$\frac{u_{o1} - u_{o2}}{2R + R_w} = \frac{u_a - u_b}{R_w}$$

$$= \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_w}$$

$$u_{o2} - u_{o1} =$$

$$\frac{2R + R_w}{R_w} (u_{i2} - u_{i1})$$

输入电阻大



$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{o2} - u_{o1})$$



$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R + R_w}{R_w} (u_{i2} - u_{i1})$$



三运放电路是差动放大器，放大倍数可调。

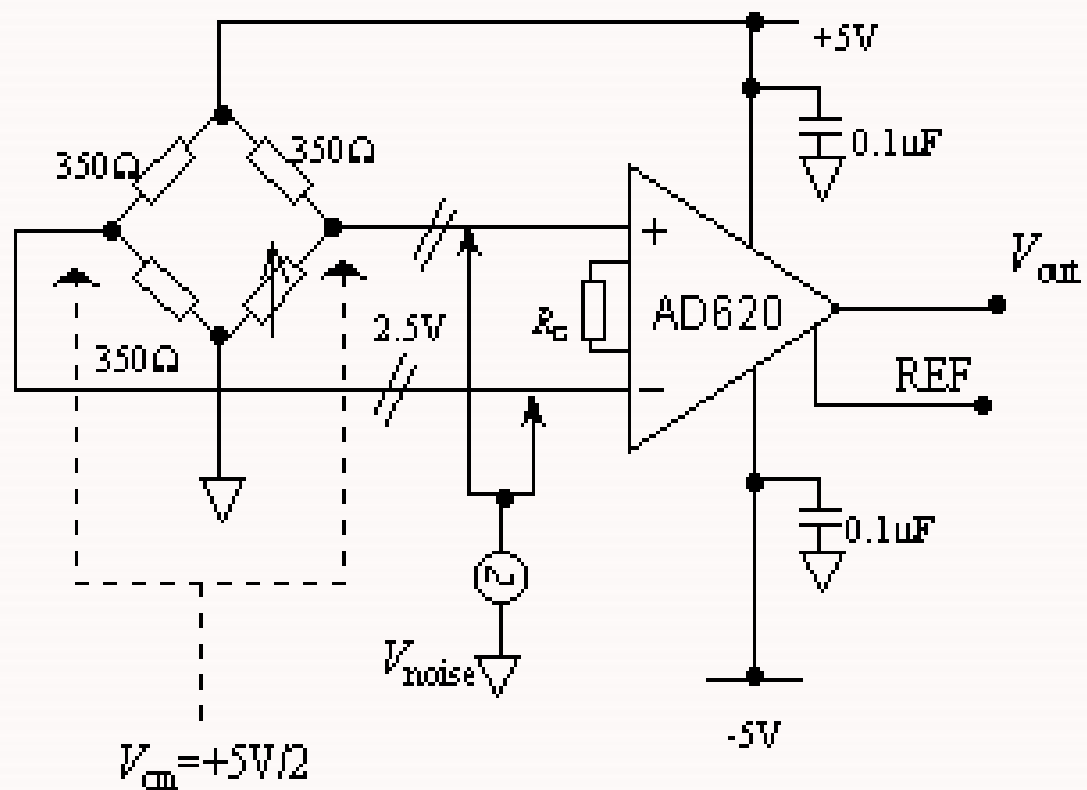


由于输入均在同相端，此电路的输入电阻高。



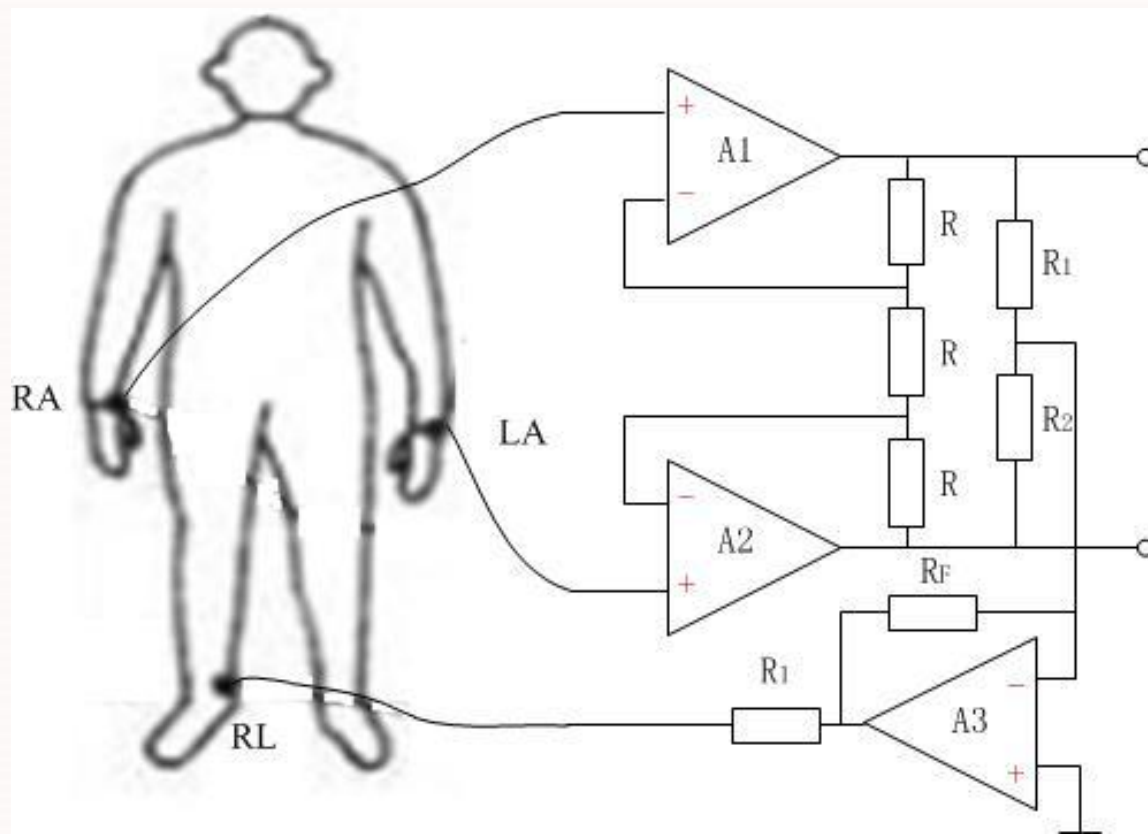
25

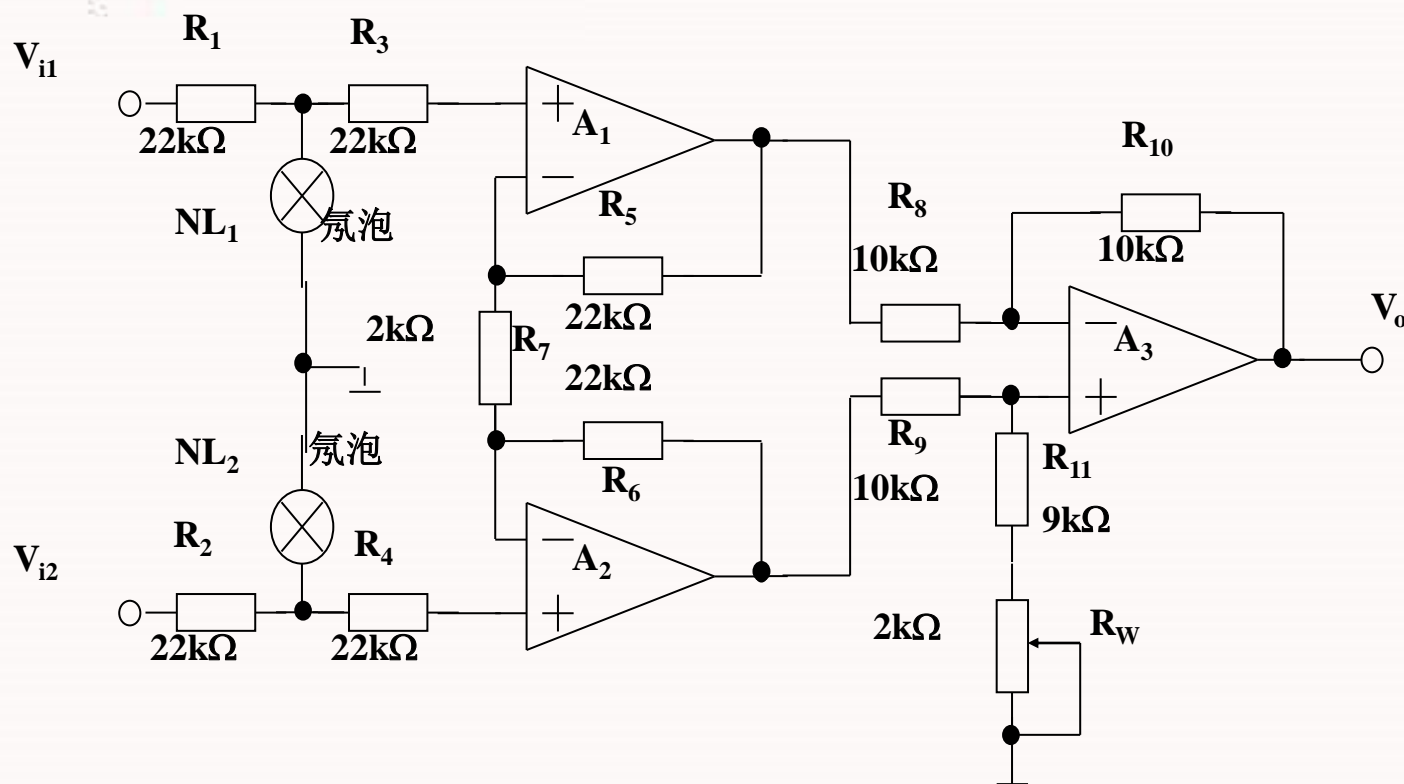
来自电阻桥的差模电压被AD620（低功耗，低成本，集成仪表放大器）放大。事实上，抑制共模分量是使用仪表放大器的唯一原因。共模抑制比（*CMRR*）是用来衡量共模信号被放大器抑制程度的一个综合指标。



心电图放大器。将脉搏传感器提取的微弱信号进行放大并显示、打印。

心电信号十分微弱，频率一般在0.5—100Hz之间，能量主要集中在17Hz附近，幅度大约在10 μ V（胎儿）~5mV（成人）之间，所需放大倍数大约为500-1000倍。



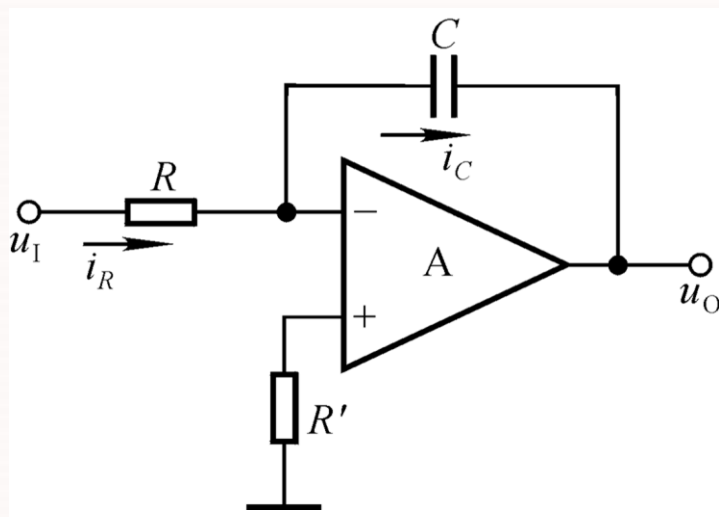


图中电位器
RW用于调
整电阻的比
例使得电路
的共模抑制
比最大。

图为用于**人体心电信号检测**的实用三运放电路。为了避免外科手术过程中可能存在的高电压进入放大器造成损坏，图中使用了两个微型的氖灯 NL_1 、 NL_1 (击穿电压为60V)，作为**电压限幅器**。

5.2.3 积分运算电路和微分运算电路

1. 积分运算电路



由于“虚断” $i_C = i_R = \frac{u_I}{R}$

由于“虚地”， $u_- = 0$ ，故

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

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

$$u_O = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_I dt + u_O(t_1)$$

若 u_I 在 $t_1 \sim t_2$ 为常量，则 $u_O = -\frac{1}{RC} \cdot u_I(t_2 - t_1) + u_O(t_1)$

积分电路的输入、输出波形

(1) 输入电压为阶跃信号

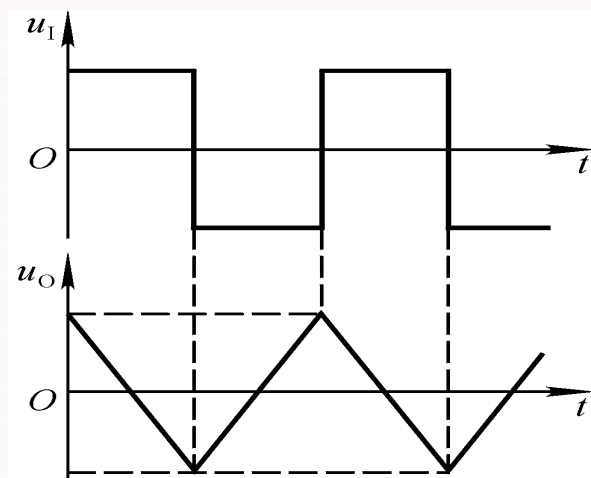
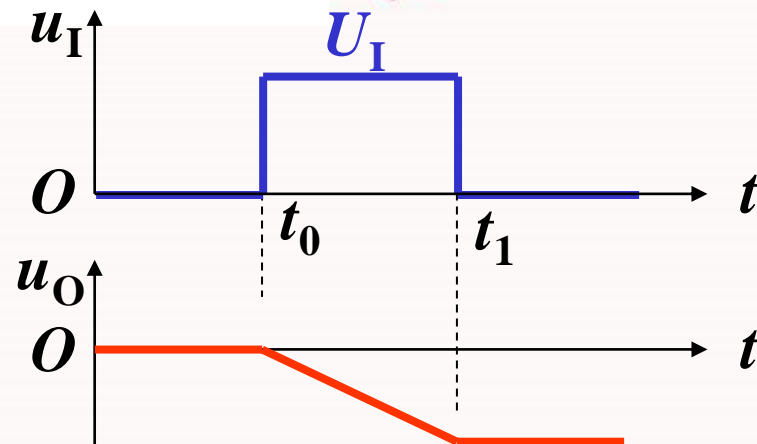
当 $t \leq t_0$ 时, $u_I = 0$, 设 $u_O = 0$;

当 $t_0 < t \leq t_1$ 时, $u_I = U_I = \text{常数}$

$$u_O = -\frac{1}{RC} \int u_I dt = -\frac{U_I}{RC} (t - t_0)$$

即输出电压随时间而向负方向线性积分

当 $t > t_1$ 时, $u_I = 0$, u_O 保持 $t = t_1$ 时的输出电压值不变。

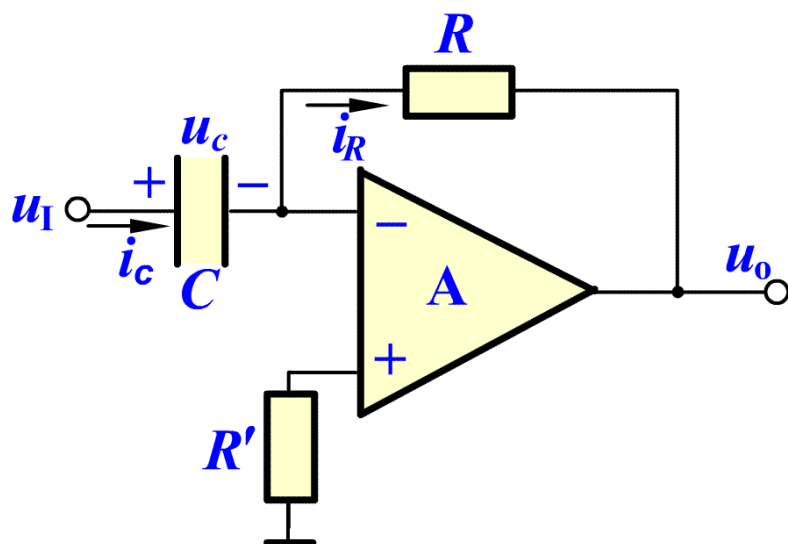


(2) 如输入波形为方波, 输出波形为何波?

波形变换

微分电路

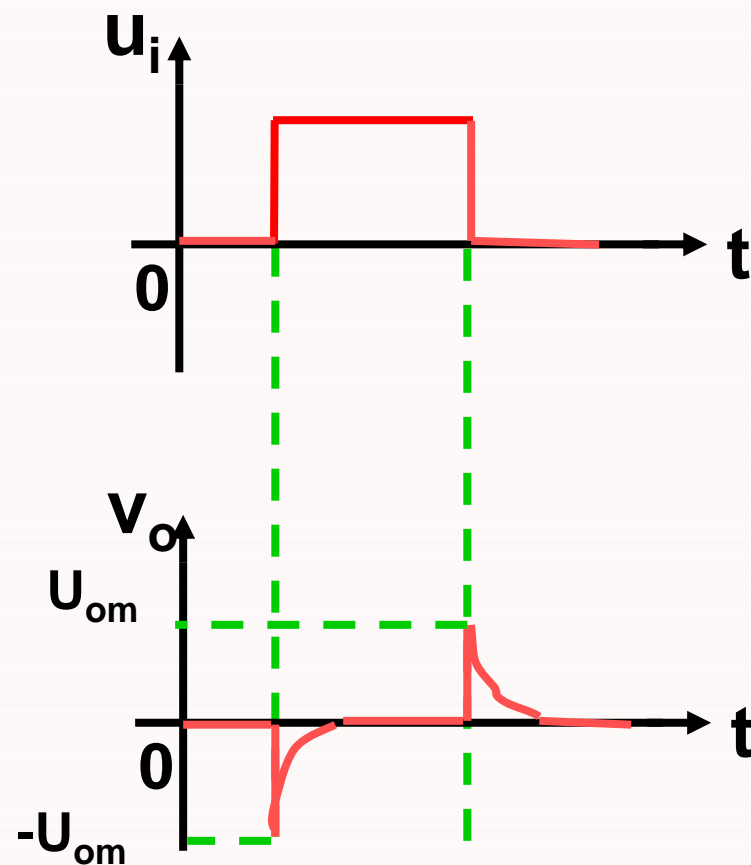
微分电路的作用：实现波形变换。



$$i_C = i_R$$

$$u_O = -i_R R = -i_C R = -RC \frac{du_C}{dt}$$

输出电压正比于输入电压对时间的微分。





5.3 信号处理电路

5.3.1 有源滤波电路

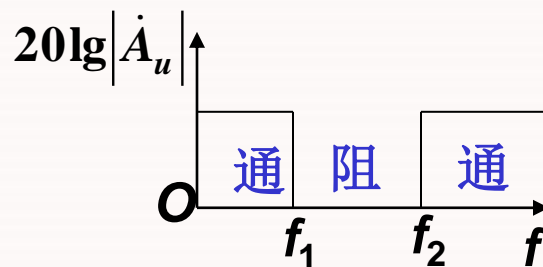
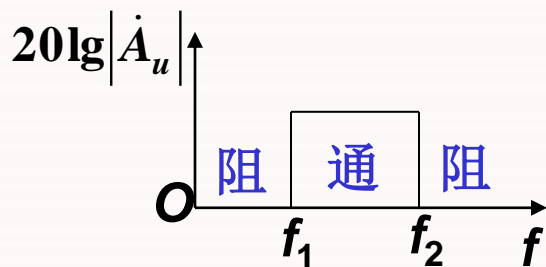
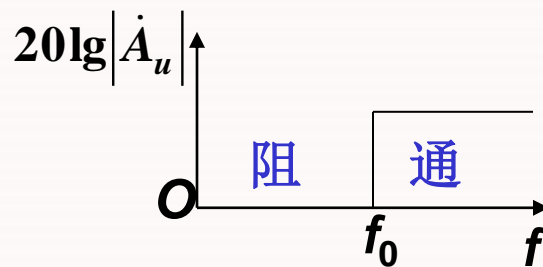
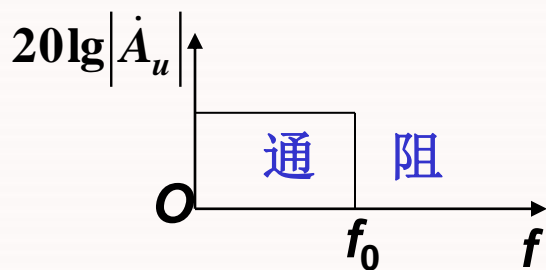
*5.3.2 电压比较器

5.3.1 有源滤波器

滤波电路的作用和分类

作用：选频。

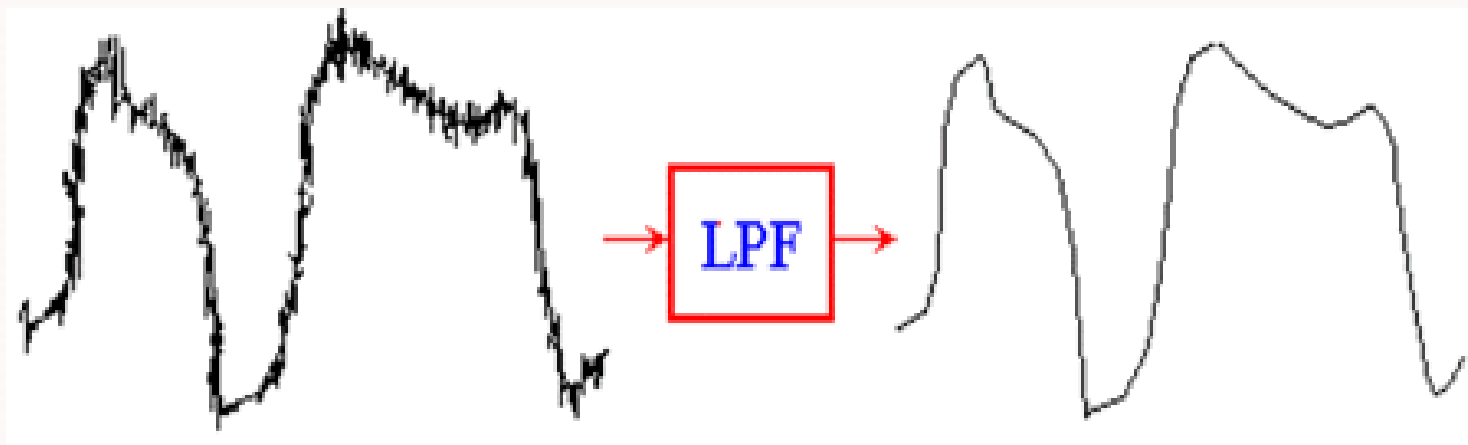
分类(按频率分)： 低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。





25

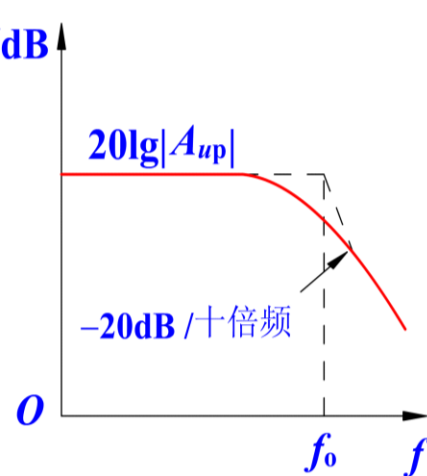
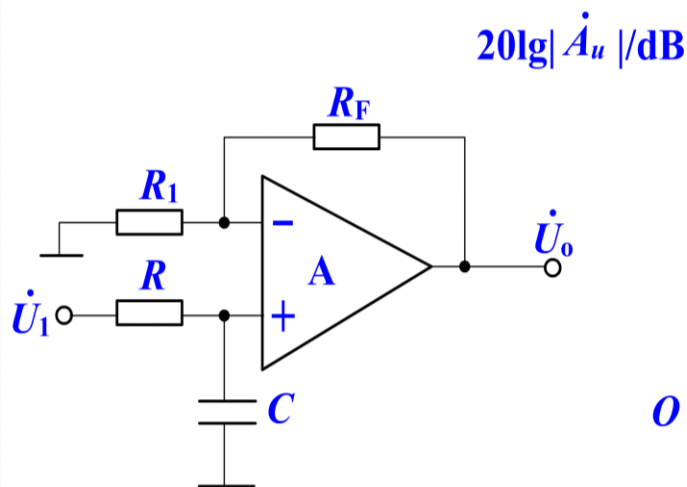
滤波器主要用来滤除信号中无用的频率成分，例如，有一个较低频率的信号，其中包含一些较高频率成分的干扰。滤波过程如图所示。



一阶低通有源滤波器：

电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{1 + j\frac{f}{f_0}} = \frac{A_{up}}{1 + j\frac{f}{f_0}}$$



$$A_{up} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad \text{——通带电压放大倍数}$$

可见：一阶低通有源滤波器与无源低通滤波器的**通带截止频率**相同；但**通带电压放大倍数**得到提高。

缺点：一阶低通有源滤波器在 $f > f_0$ 时，滤波特性不理想。对数幅频特性下降速度为 **-20 dB / 十倍频**。

解决办法：采用二阶低通有源滤波器。

5.3.2 电压比较器

电压比较器将一个模拟量输入电压与一个参考电压进行比较，输出只有两种可能的状态：高电平或低电平。

用途：模数转换、越限报警、自动控制，以及波形产生及变换等场合。

电压比较器的描述方法

电压传输特性 $u_o = f(u_i)$

电压传输特性的三个要素：

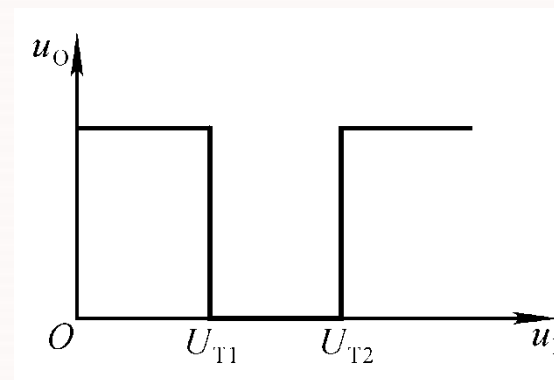
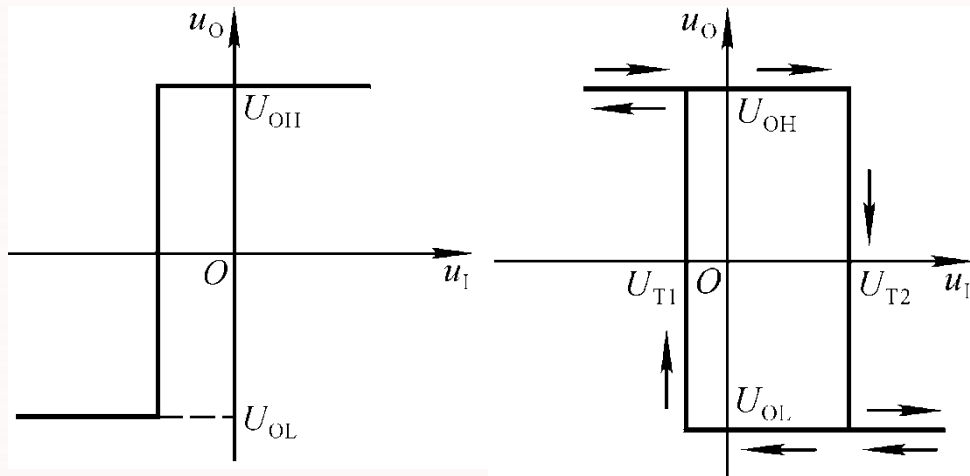
- (1) 输出高电平 U_{OH} 和输出低电平 U_{OL}
- (2) 阈值电压 U_T
- (3) 输入电压过阈值电压时输出电压跃变的方向

几种常用的电压比较器

(1) 单限比较器：只有一个阈值电压

(2) 滞回比较器：具有滞回特性

输入电压的变化方向不同，阈值电压也不同，但输入电压单调变化使输出电压只跃变一次。回差电压 $\Delta U = |U_{T1} - U_{T2}|$

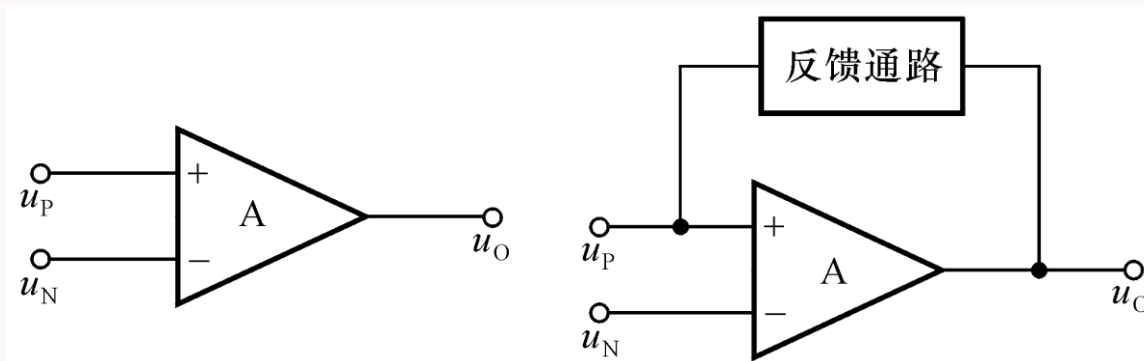


(3) 窗口比较器：

有两个阈值电压，输入电压单调变化时输出电压跃变两次。

电压比较器的电路特征

电路特征：集成运放处于开环或仅引入正反馈



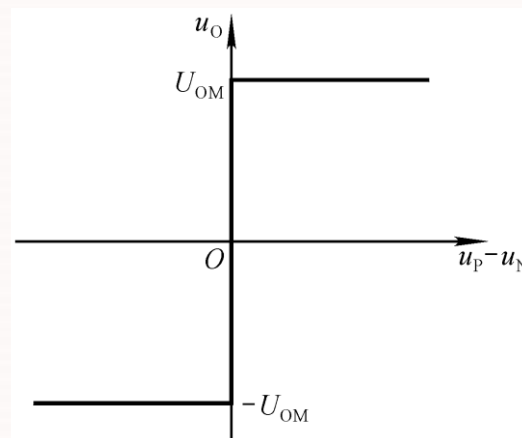
集成运放工作在非线性区的特点

1) 净输入电流为0 $I_+ = I_- \approx 0$

2) $u_P > u_N$ 时, $u_O = +U_{OM}$

$u_P < u_N$ 时, $u_O = -U_{OM}$

其数值接近运放的正负电源电压





电压比较器的分析方法

(1) 写出 u_p 、 u_N 的表达式，令 $u_p = u_N$ ，求解出的 u_i 即为 U_T ；



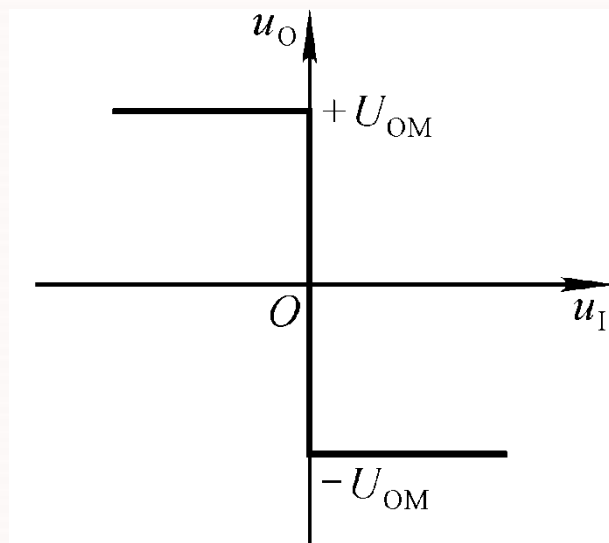
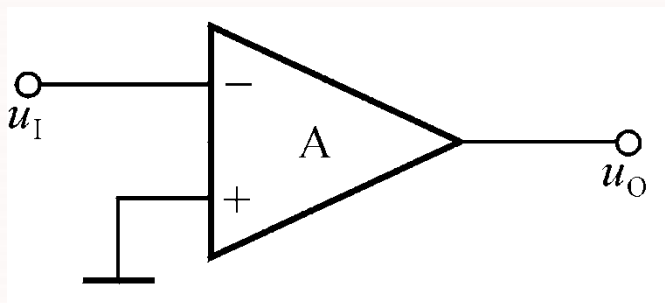
(2) 根据输出端限幅电路决定输出的高、低电平；



(3) 根据输入电压作用于同相输入端还是反相输入端决定输出电压的跃变方向。

二、单门限电压比较器

1. 反向过零比较器

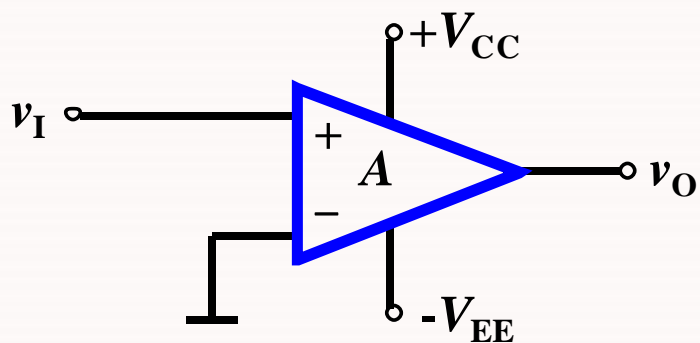


(1) $U_T = 0$

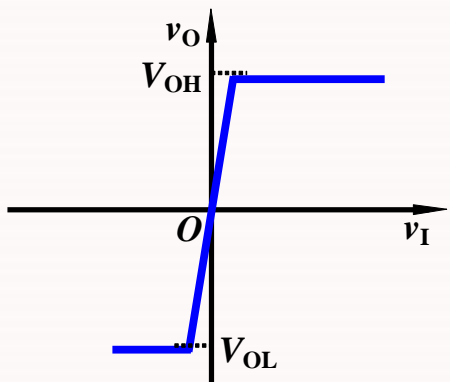
(2) $U_{OH} = +U_{OM}, U_{OL} = -U_{OM}$

(3) $u_I > 0$ 时 $u_O = -U_{OM}$; $u_I < 0$ 时 $u_O = +U_{OM}$

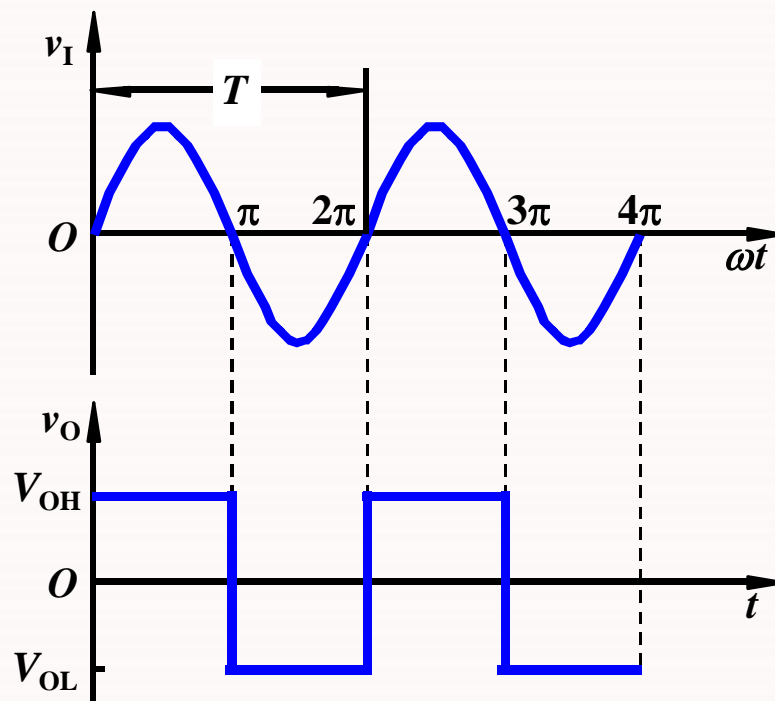
2. 同相过零比较器



电压传输特性

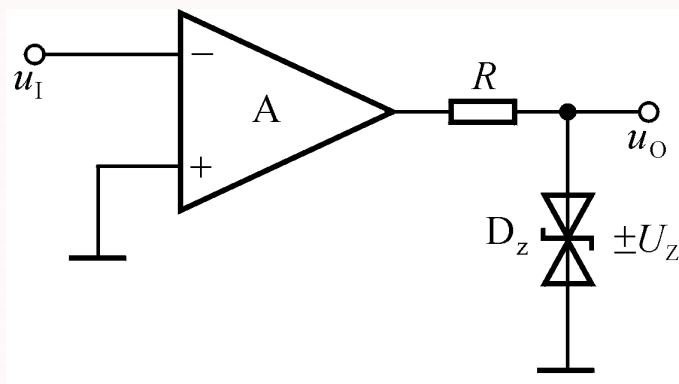


输入为正负对称的正弦波时，
输出为方波。



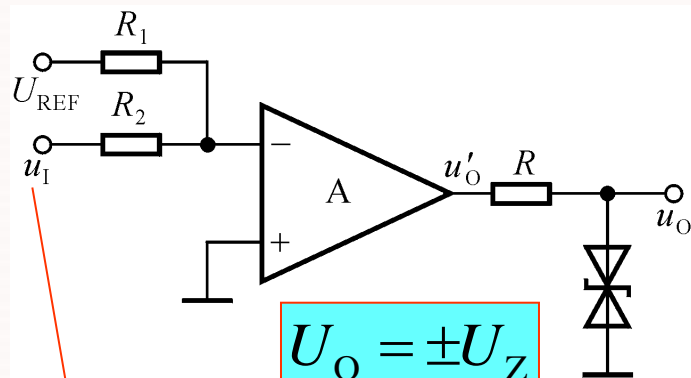
3.输出限幅电路

为适应负载对电压幅值的要求，输出端加限幅电路。



$$U_{OH} = -U_{OL} = U_Z$$

4. 一般单限比较器



$$U_O = \pm U_Z$$

作用于反相输入端

$$u_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_I$$

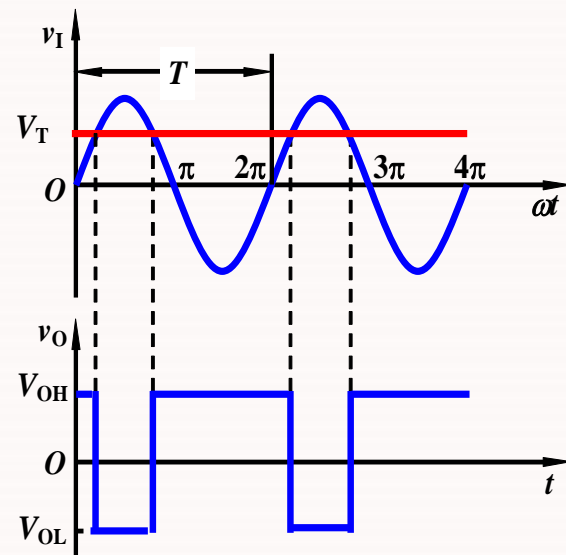
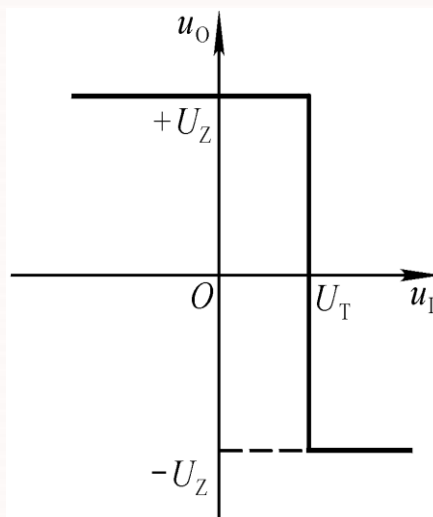
令 $u_N = u_P = 0$, 得

$$U_T = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{REF}$$

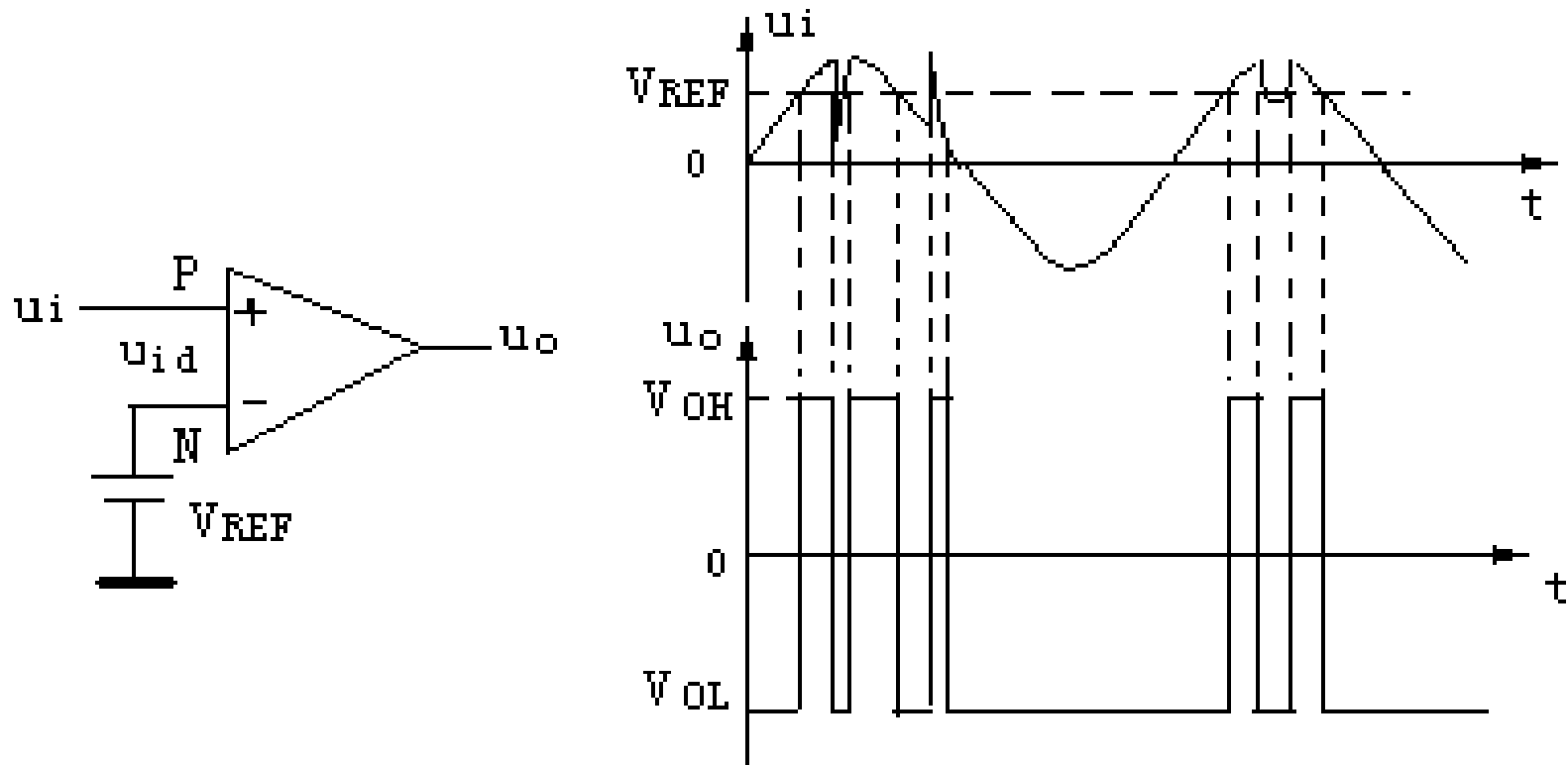
(1) 若要 $U_T < 0$, 则应如何修改电路?

(2) 若要改变曲线跃变方向, 则应如何修改电路?

(3) 若要改变 U_{OL} 、 U_{OH} 呢?



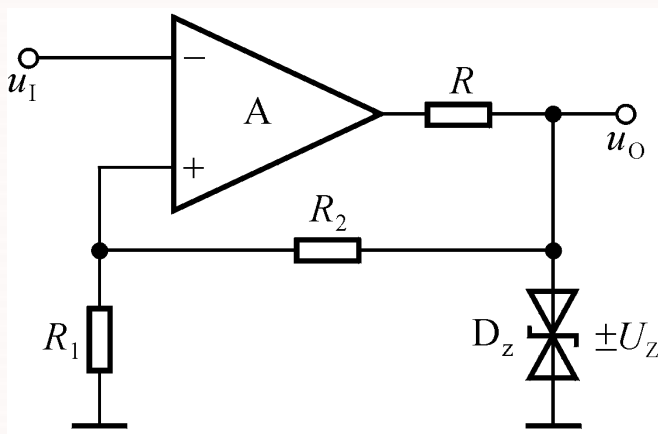
单门限电压比较器存在的问题



如果在 $u_i = V_T = V_{REF}$ 附近出现干扰, u_o 将时而为 V_{OH} , 时而为 V_{OL} , 导致比较器输出不稳定。

三、滞回电压比较器

1. 阈值电压



$$U_{OL} = -U_Z$$
$$U_{OH} = +U_Z$$

$$u_N = u_I$$

$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O, \text{ 令 } u_N = u_P, \text{ 得}$$

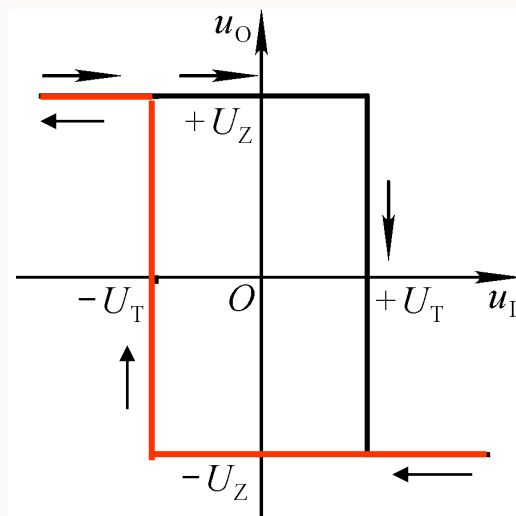
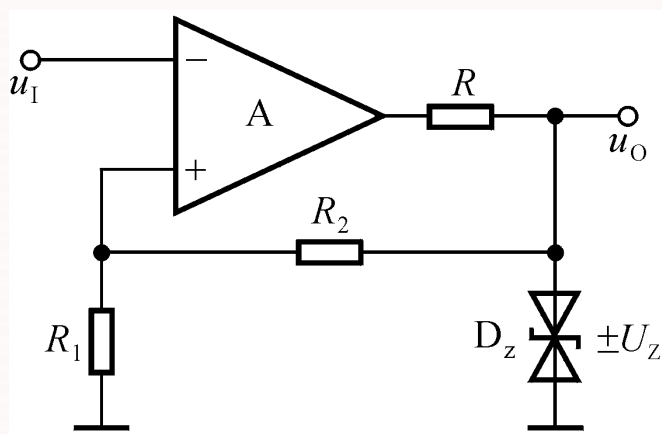
$$\pm U_T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$$

三、滞回比较器

$$U_O = \pm U_Z$$

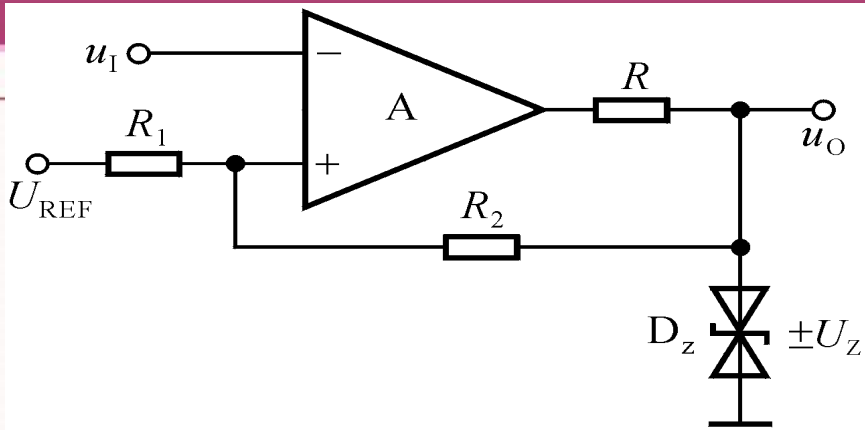
$$\pm U_T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$$

2. 工作原理及电压传输特性



设 $u_I < -U_T$ ，则 $u_N < u_P$ ， $u_O = +U_Z$ 。此时 $u_P = +U_T$ ，增大 u_I ，直至 $+U_T$ ，再增大， u_O 才从 $+U_Z$ 跃变为 $-U_Z$ 。

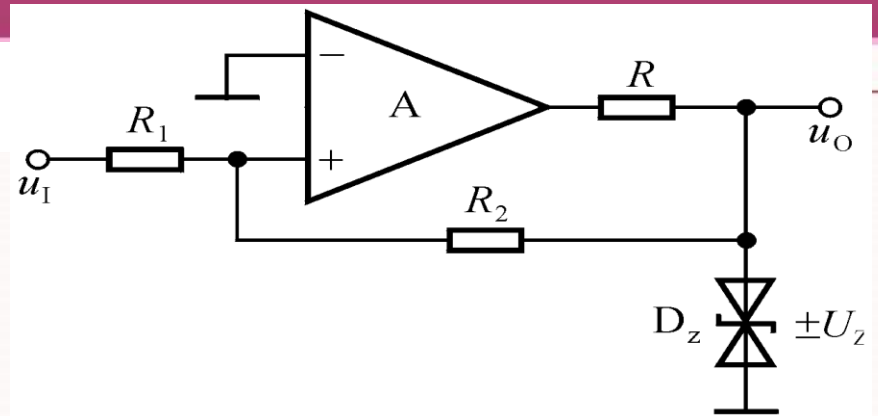
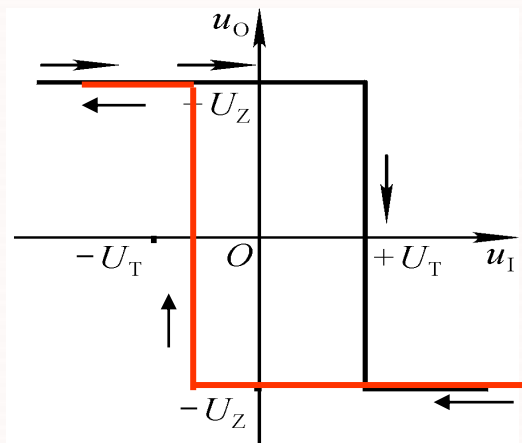
设 $u_I > +U_T$ ，则 $u_N > u_P$ ， $u_O = -U_Z$ 。此时 $u_P = -U_T$ ，减小 u_I ，直至 $-U_T$ ，再减小， u_O 才从 $-U_Z$ 跃变为 $+U_Z$ 。



$$U_P = \frac{R_2 U_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 U_o}{R_1 + R_2}$$

$$U_N = U_i$$

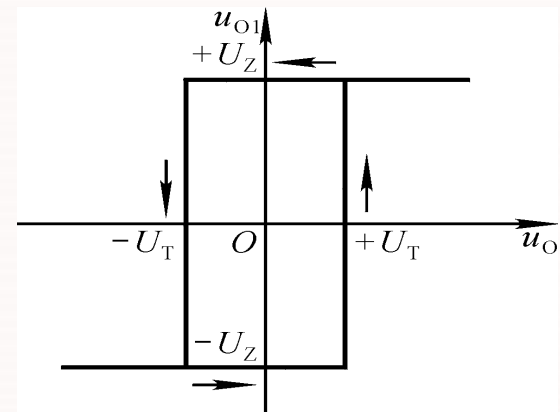
$$U_T = \frac{R_2 U_{REF}}{R_1 + R_2} \pm \frac{R_1 U_Z}{R_1 + R_2}$$



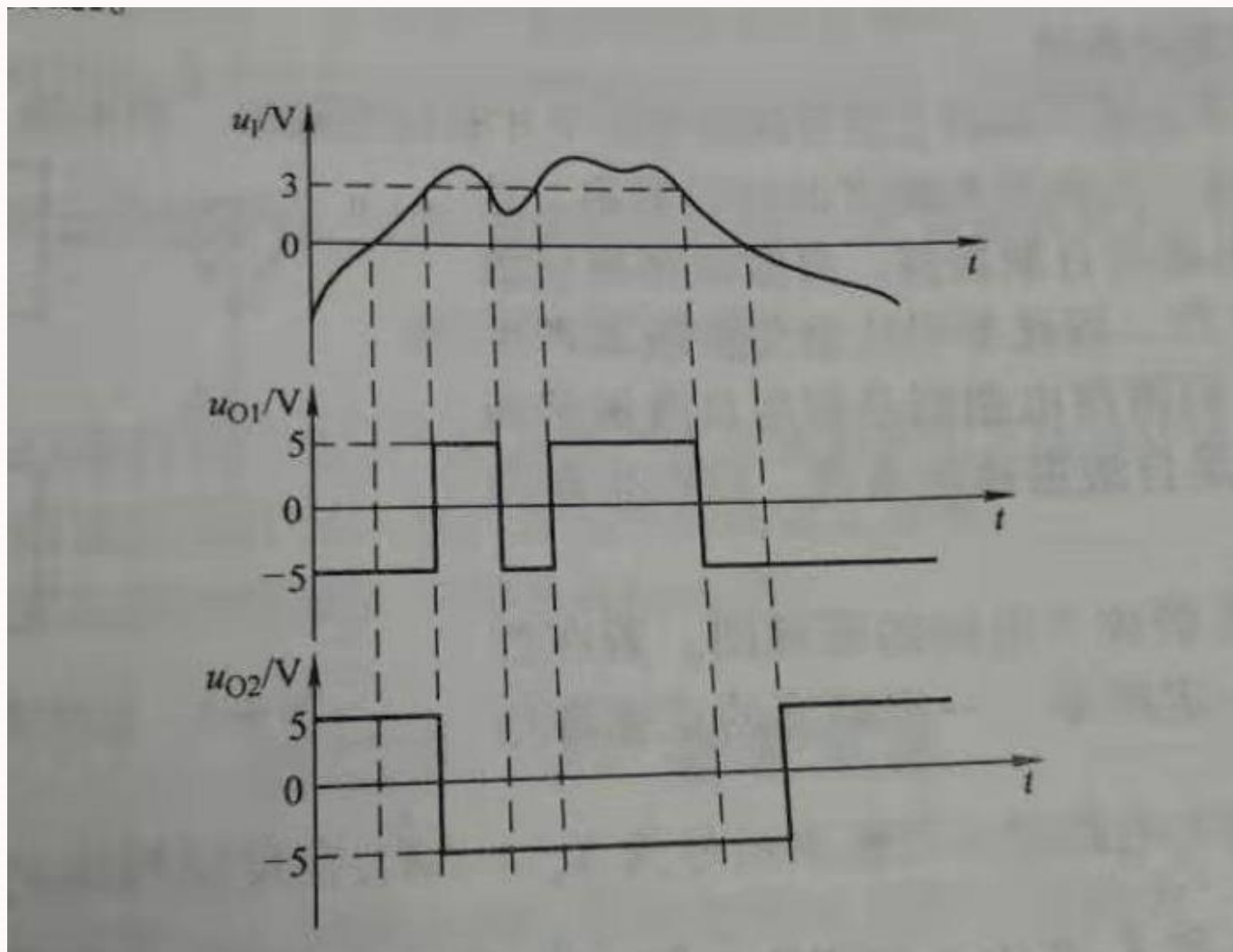
$$U_P = \frac{R_2 U_i}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 U_o}{R_1 + R_2}$$

$$U_N = 0$$

$$u_i = u_T = \pm \frac{R_1}{R_2} U_o = \pm \frac{R_1}{R_2} U_Z$$

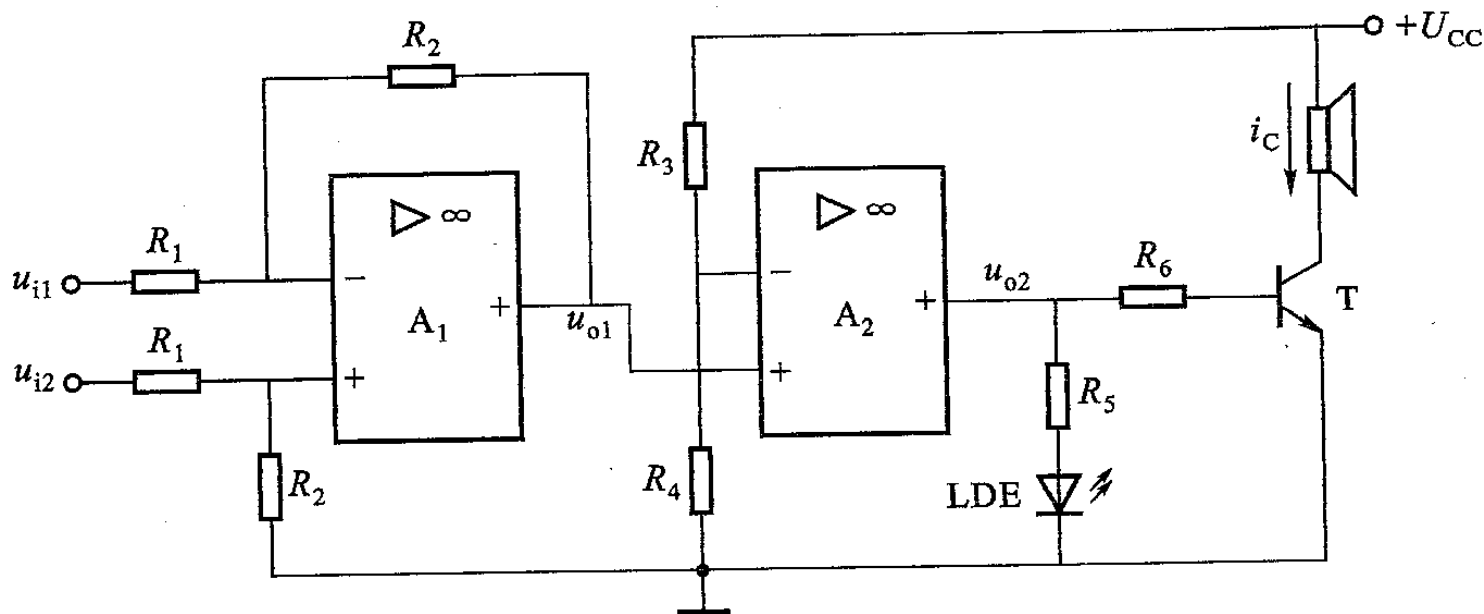
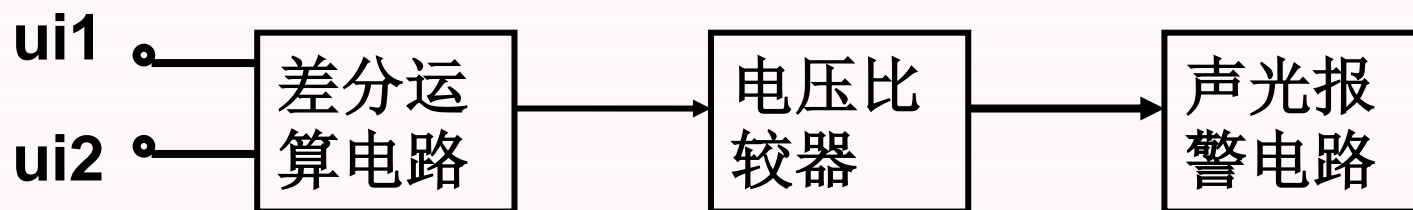


U_{01} , U_{02} 分别是什么电路?



火灾报警电路

U_{i1} 和 u_{i2} 分别来自两个温度传感器。一个安装在塑料壳内，另一个安装在金属板上。



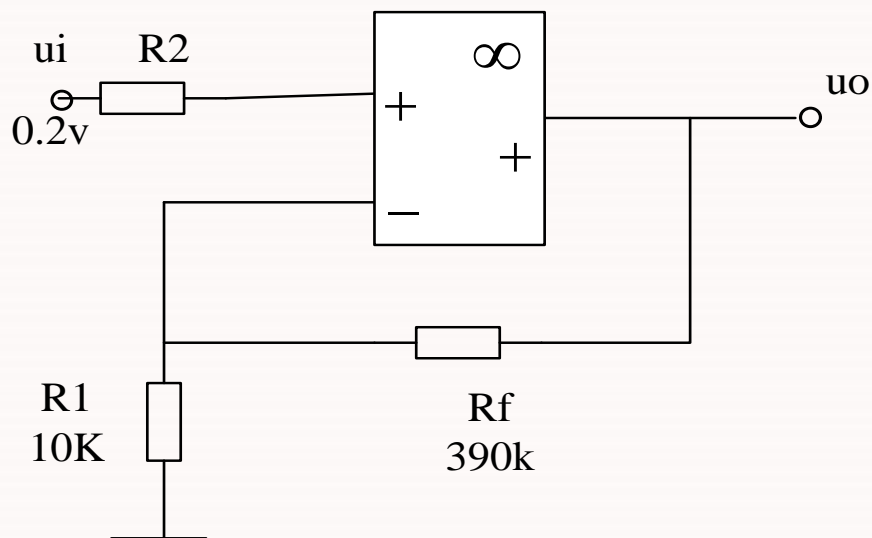
例：

电路如图所示，设运放的最大输出电压

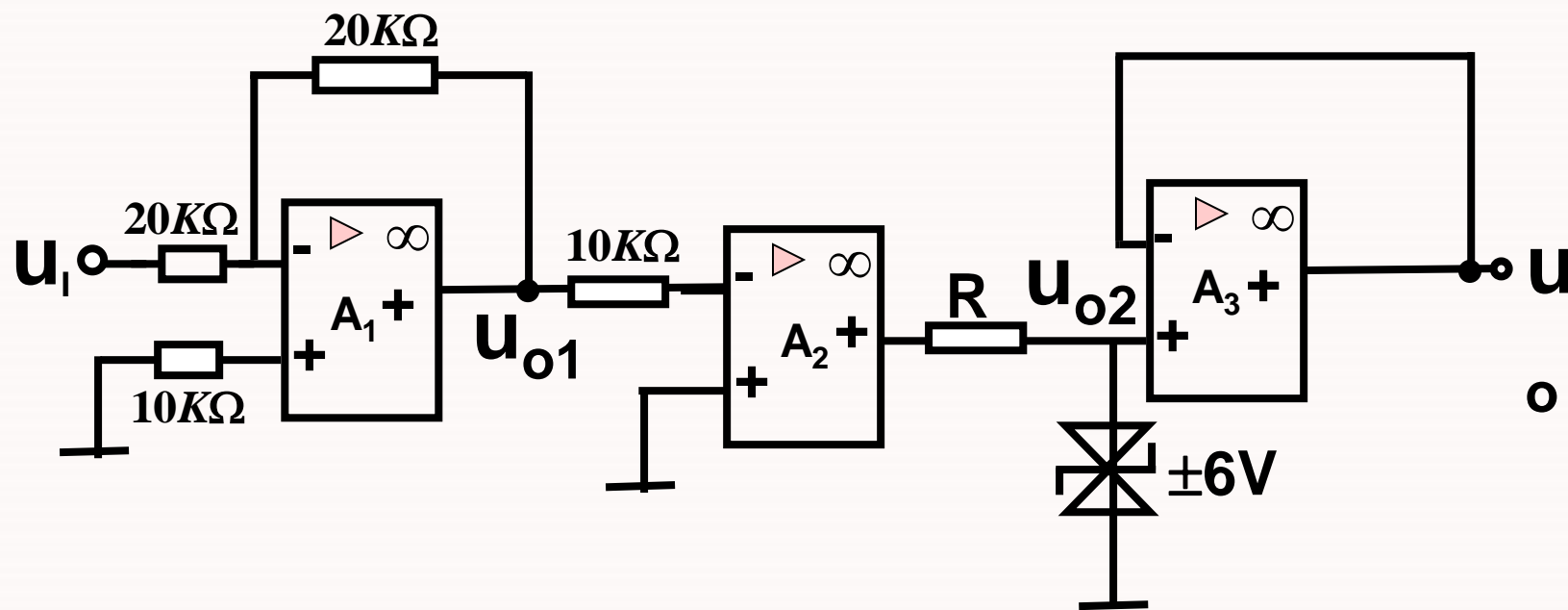
$$U_{OPP} = \pm 12V, R_2 = R_1 // R_f,$$

试求下列各种情况下的输出电压。

- (1) 正常工作；(2) R_1 开路；(3) R_1 短路；
(4) R_f 开路；(5) R_f 短路。

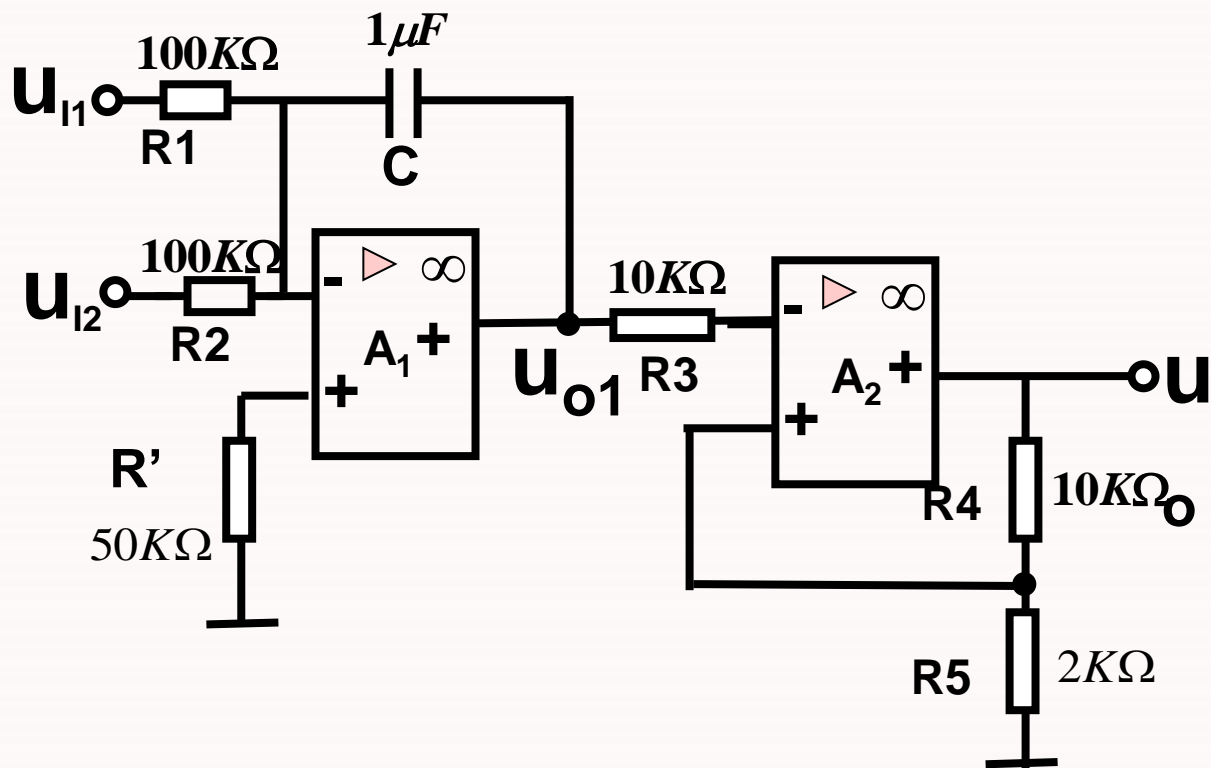


例:





25





5.4 波形产生电路

*5.4.1 正弦波振荡电路

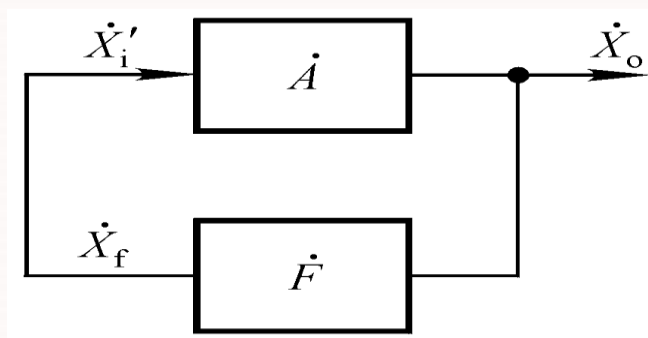
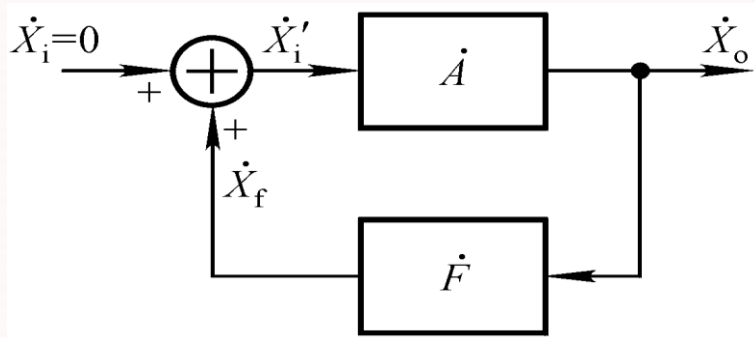
5.4.2 非正弦波发生电路

一、正弦波振荡的条件和电路的组成

1. 正弦波振荡的条件

无外加信号，输出一定频率一定幅值的信号。

与负反馈放大电路的振荡的不同之处：在正弦波振荡电路中引入的是正反馈，且振荡频率可控。

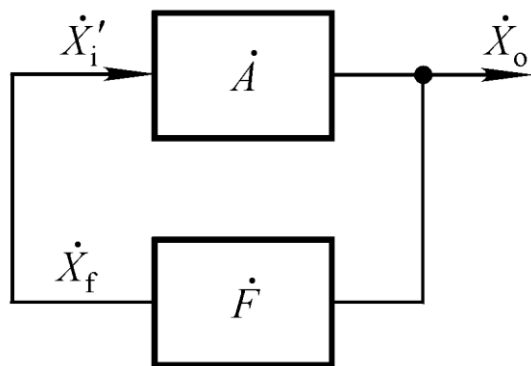


在电扰动下，对于某一特定频率 f_0 的信号形成正反馈：

$$X_o \uparrow \rightarrow X_i' \rightarrow X_o \uparrow \uparrow$$

由于半导体器件的非线性特性及供电电源的限制，最终达到动态平衡，稳定在一定的幅值。

1. 正弦波振荡的条件



一旦产生稳定的振荡，则
电路的输出量自维持，即

$$\dot{X}_o = \dot{A}\dot{F}\dot{X}_o$$

$$\dot{A}\dot{F} = 1 \Rightarrow \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \end{cases}$$

-----幅值平衡条件

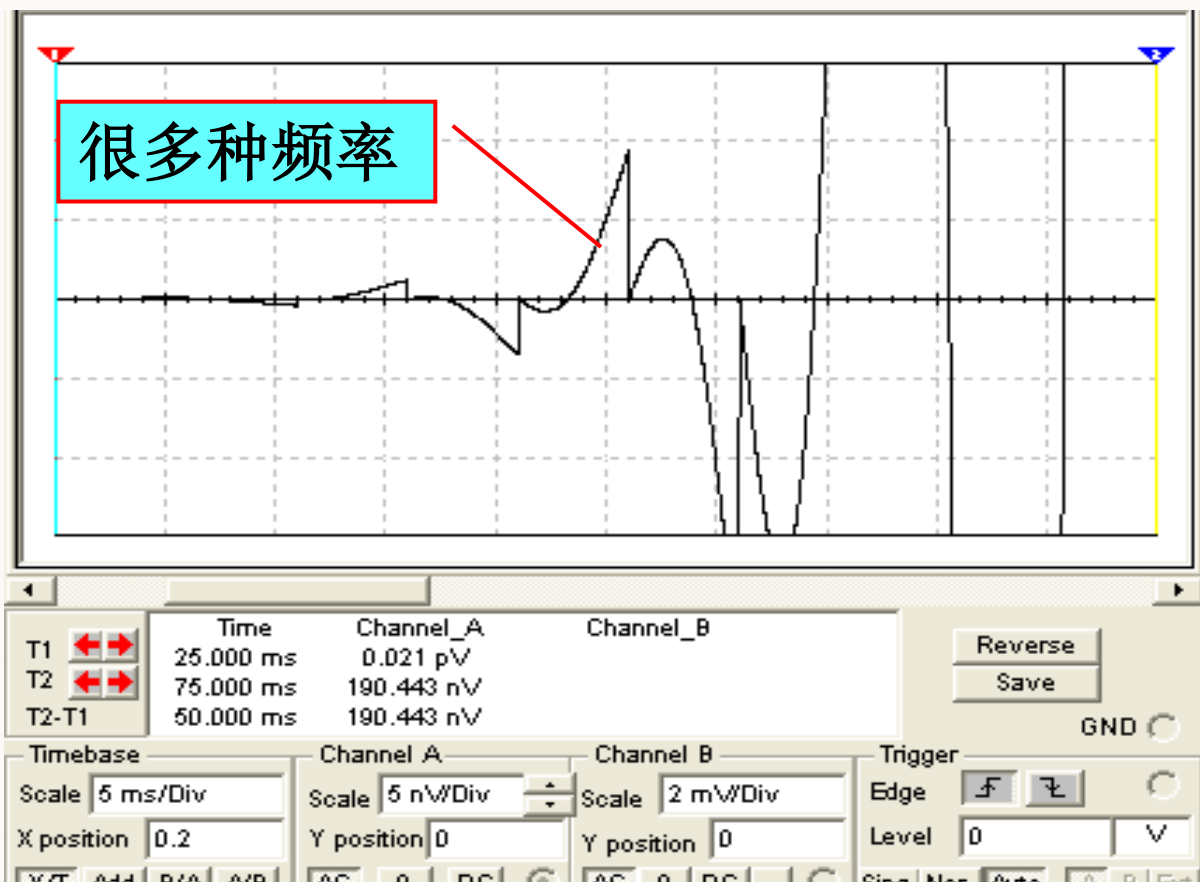
-----相位平衡条件

起振条件: $|\dot{A}\dot{F}| > 1$

荡秋千一要“顺势”二要用力足够

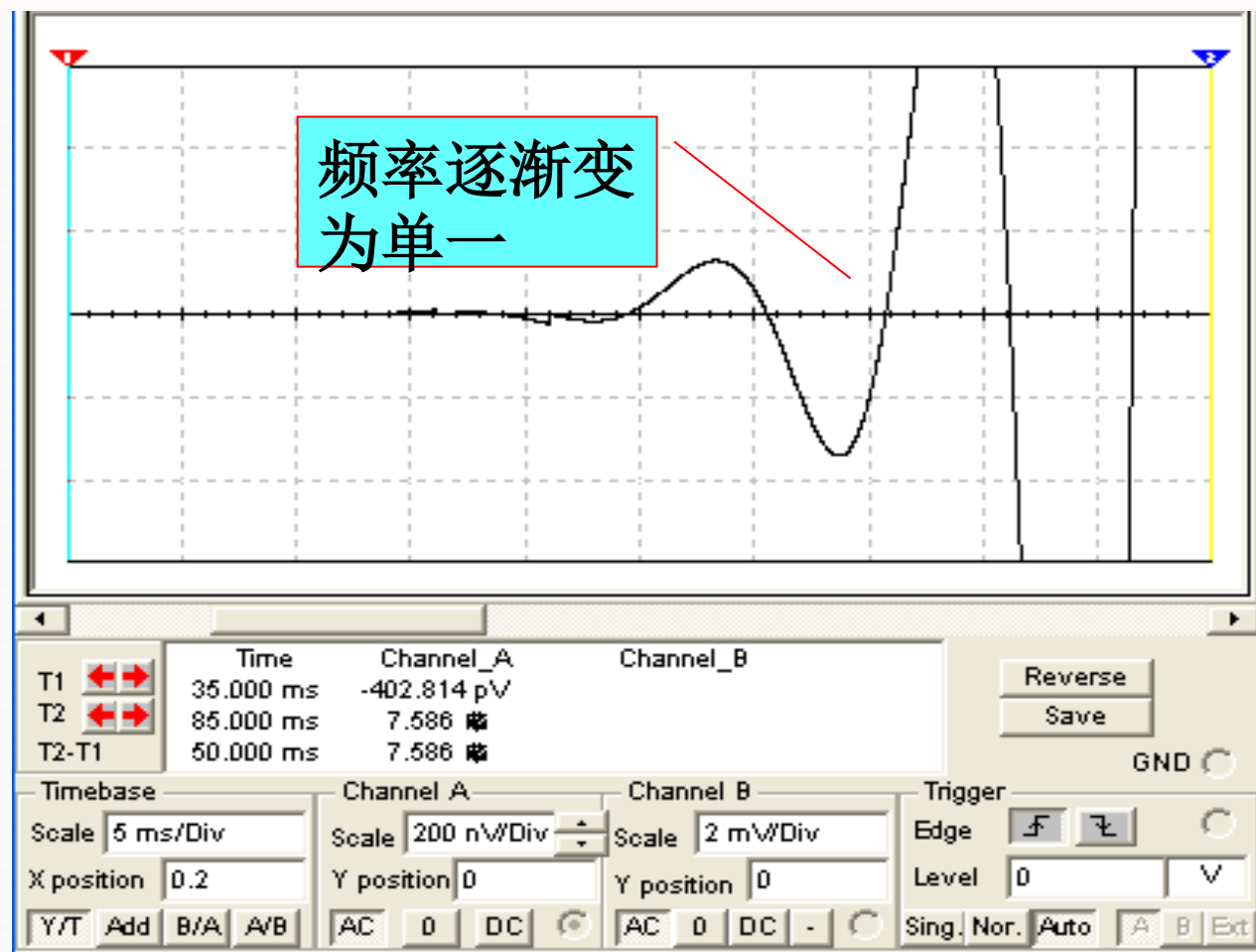
2. 起振与稳幅:

输出电压从幅值很小、含有丰富频率，到仅有一种频率且幅值由小逐渐增大直至稳幅。



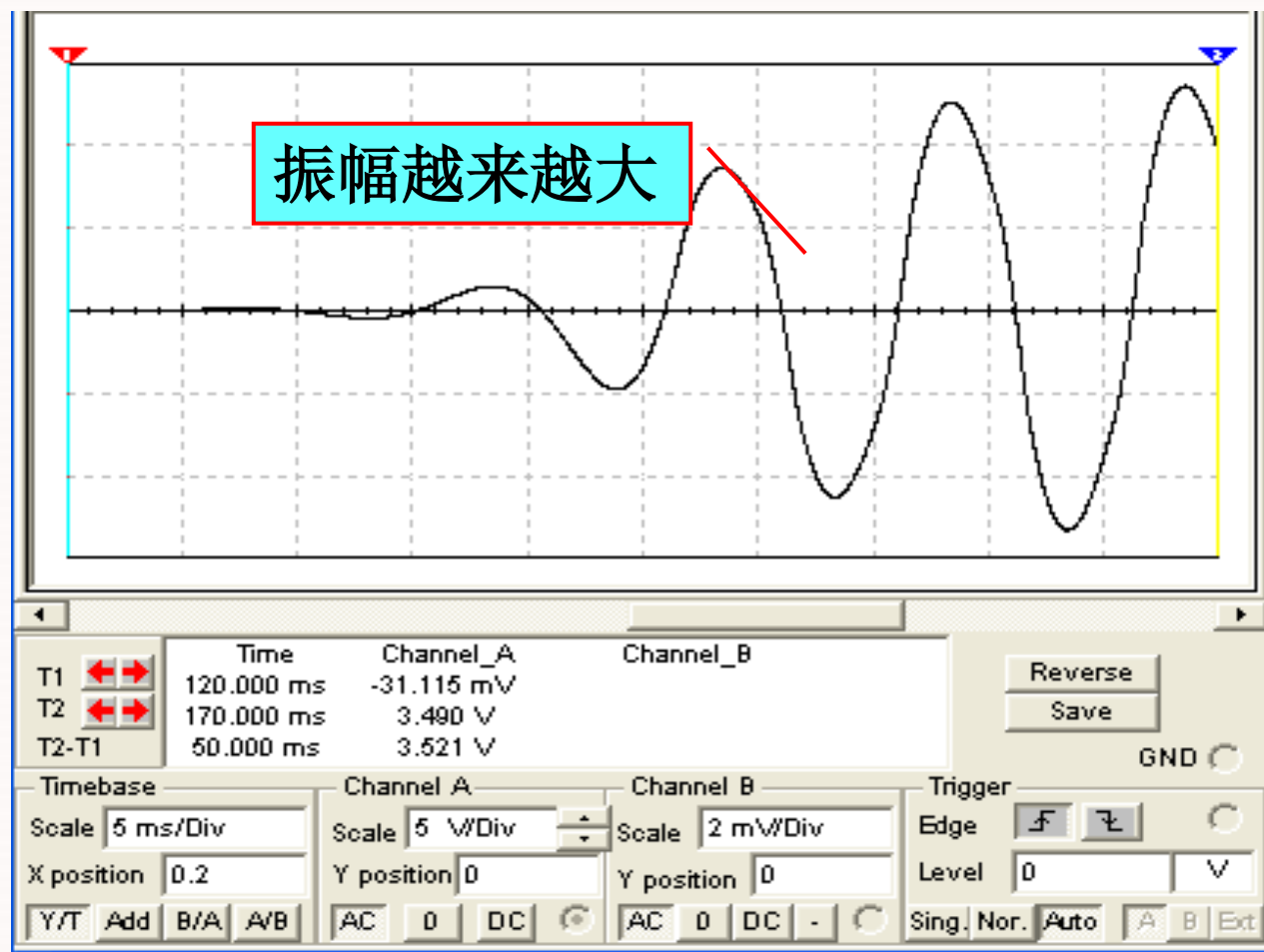


23

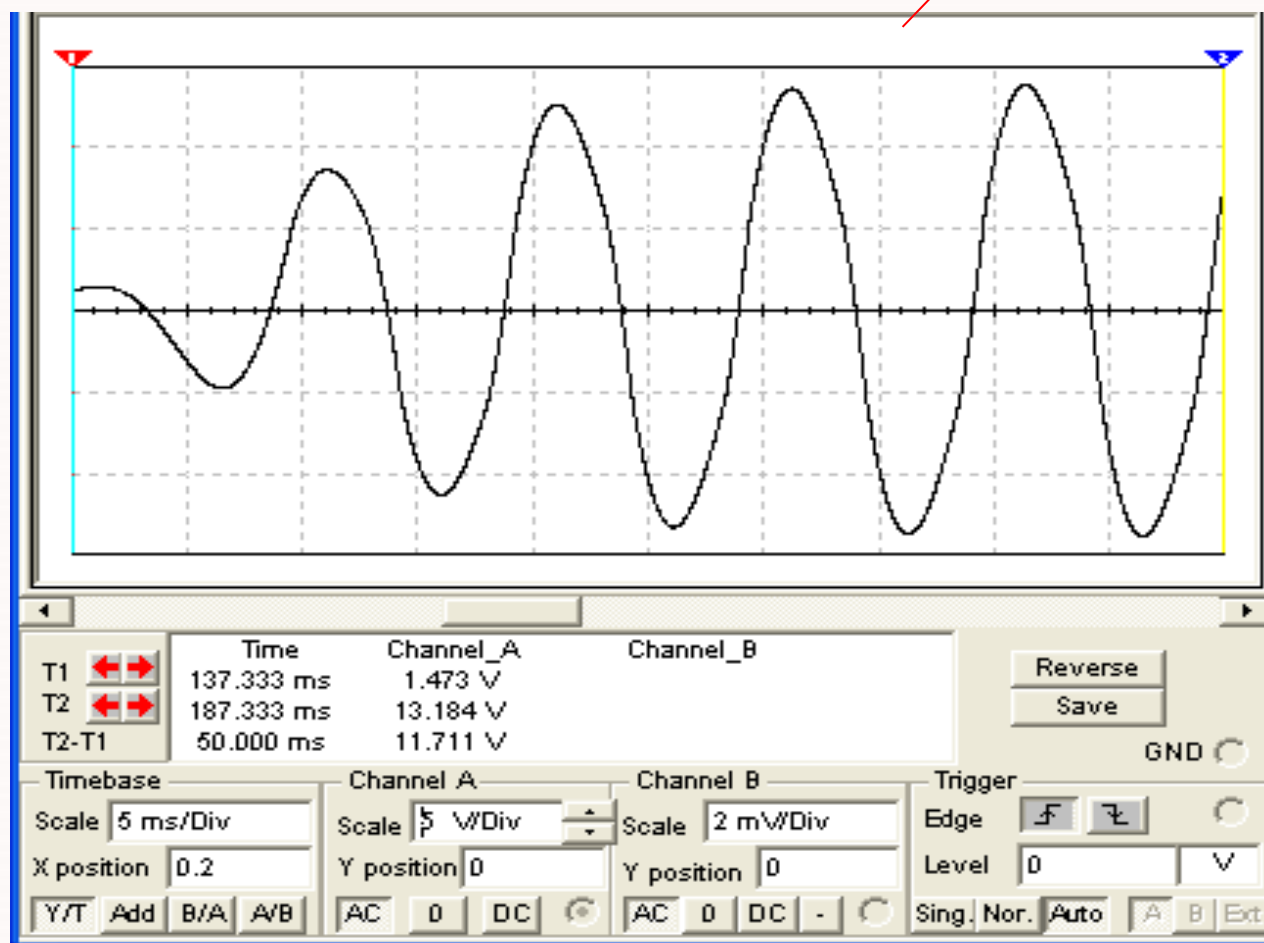




25

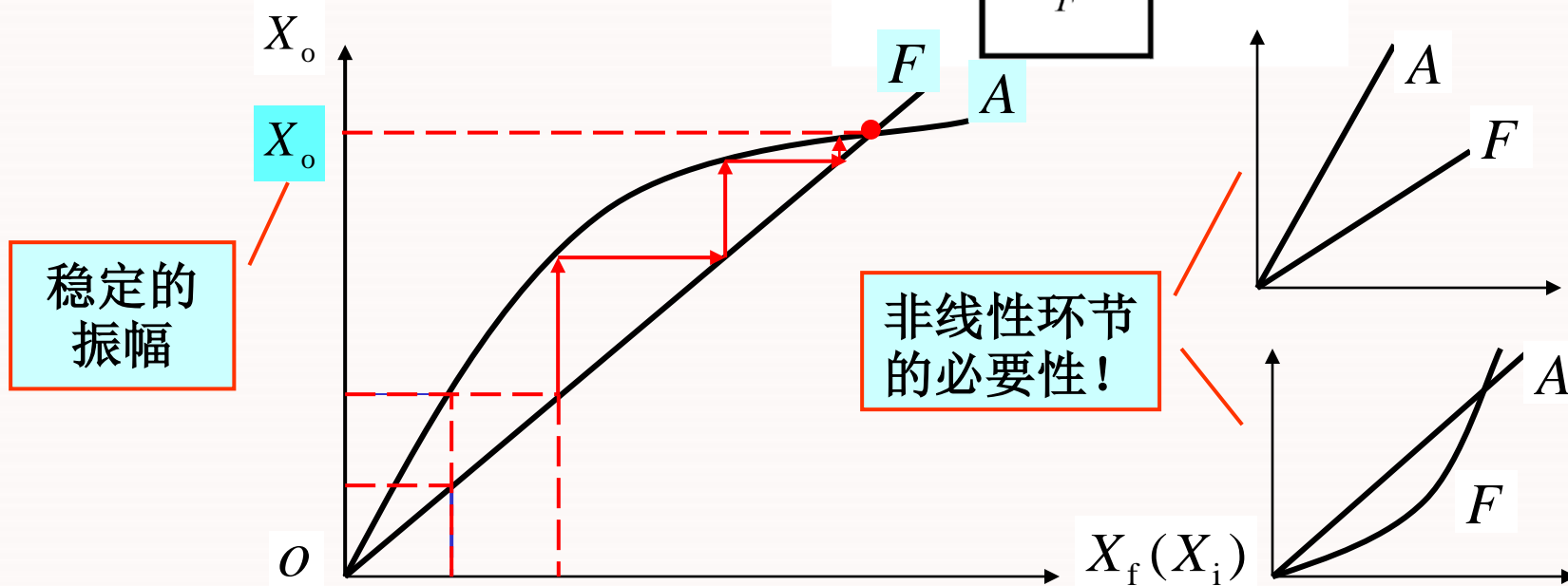
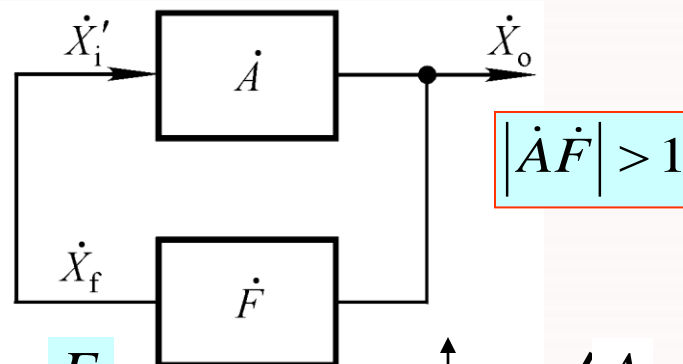


趋于稳幅



2. 起振与稳幅

电路如何从起振到稳幅？



3. 基本组成部分

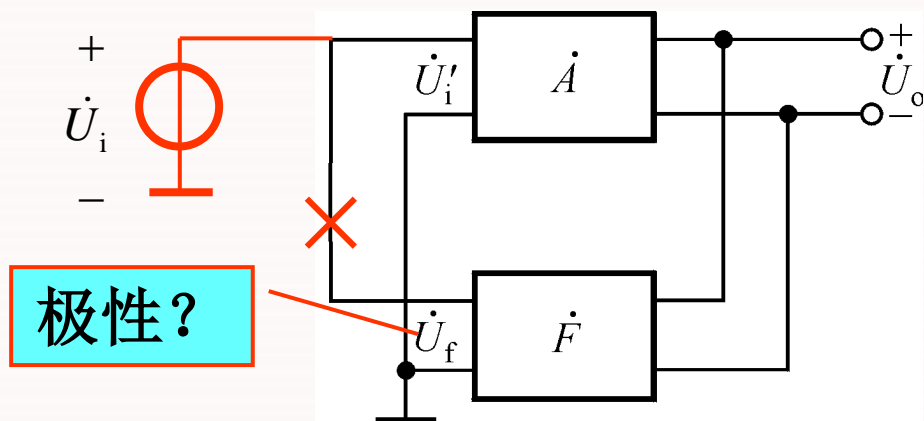
- 1) 放大电路：放大作用,保证 U_o 从起振到动态平衡
- 2) 正反馈网络：满足相位条件,使 $U_i=U_f$
- 3) 选频网络：确定振荡频率 f_0 ，保证电路产生正弦波振荡
- 4) 非线性环节（稳幅环节）：稳幅

常合二为一

4、分析方法

- 1) 是否存在主要组成部分；
- 2) 放大电路能否正常工作，即是否有合适的 Q 点，信号是否可能正常传递，没有被短路或断路；
- 3) 是否满足相位条件，即是否存在 f_0 ，是否可能振荡；
- 4) 是否满足幅值条件，即是否一定振荡。

相位条件的判断方法：瞬时极性法



在多数正弦波振荡电路中，输出量、净输入量和反馈量均为电压量。

断开反馈，在断开处给放大电路加 $f=f_0$ 的信号 U_i ，且规定其极性，然后根据

U_i 的极性 $\rightarrow U_o$ 的极性 $\rightarrow U_f$ 的极性

若 U_f 与 U_i 极性相同，则电路可能产生自激振荡；否则电路不可能产生自激振荡。

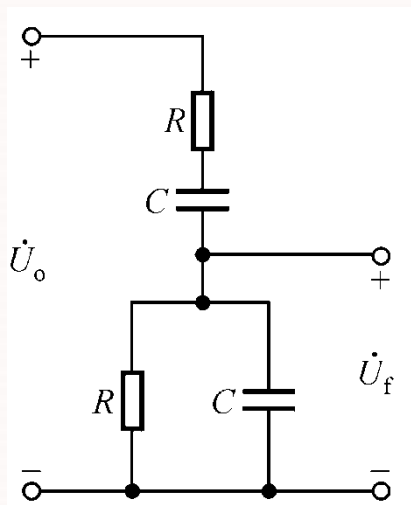
5. 分类

常用选频网络所用元件分类。

- 1) RC 正弦波振荡电路：几百千赫以下
- 2) LC 正弦波振荡电路：几百千赫~几百兆赫
- 3) 石英晶体正弦波振荡电路：振荡频率稳定

二、RC 正弦波振荡电路

1. RC串并联选频网络的频率响应

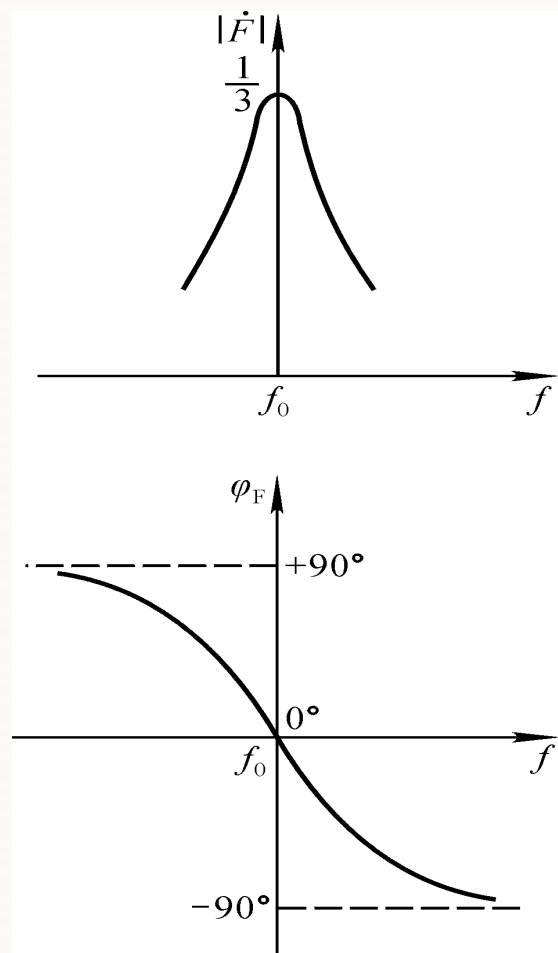


$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

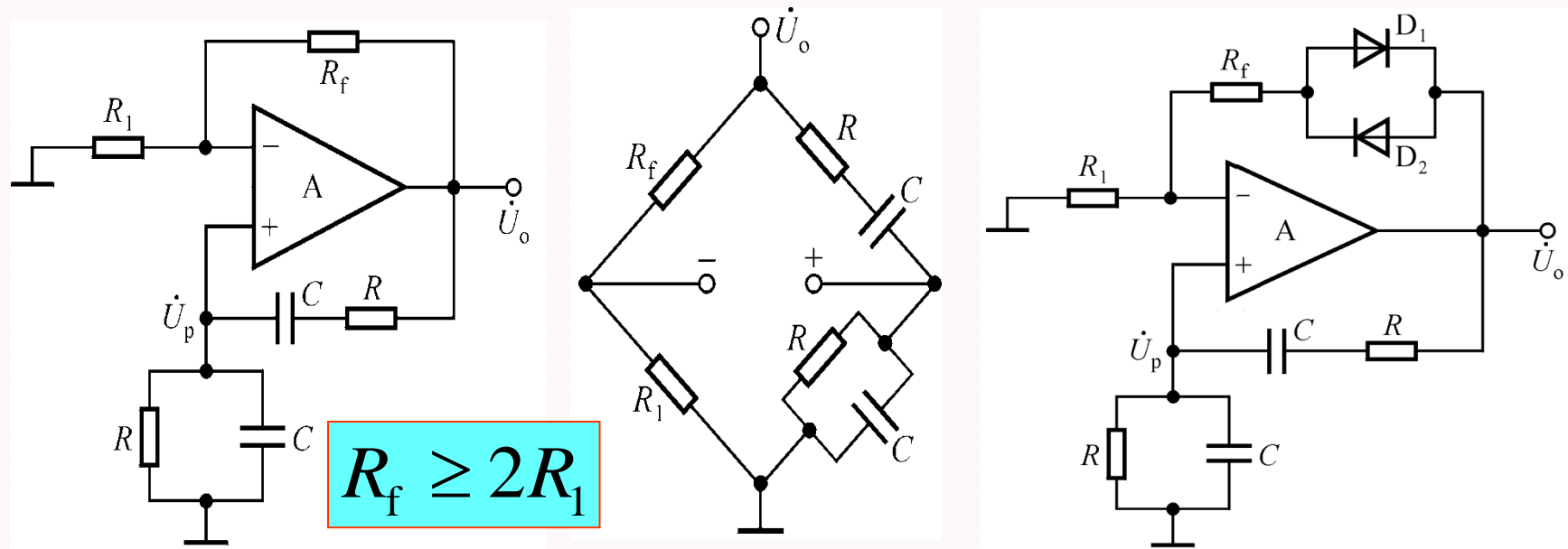
$$\text{令 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ 则 } \dot{F} = \frac{1}{3 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$$

当 $f=f_0$ 时, 不但 $\varphi=0$, 且 $|\dot{F}|$ 最大, 为 $1/3$ 。



2. RC 桥式正弦波振荡电路（文氏桥振荡器）

用同相比例运算电路作放大电路。



因同相比例运算电路有非常好的线性度，故 R_1 或 R_f 可用热敏电阻，或加二极管作为非线性环节。

电路组成

(1) 放大电路 (R_i 大、 R_o 小)

由运放A、 R_1 、 R_f 组成

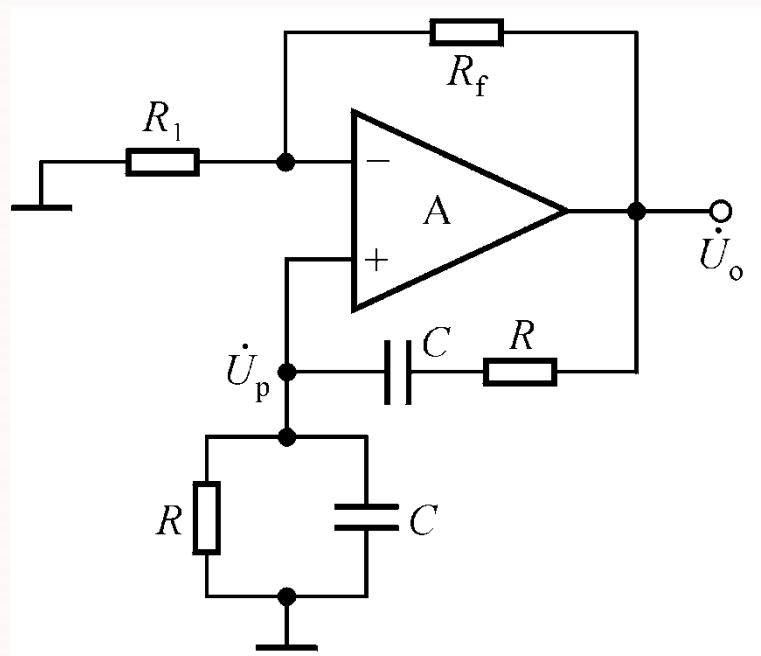
同相比值运算电路

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

(2) 反馈网络 (正反馈)

由RC串并联网络组成

(3) 反馈网络兼做选频网络



工作原理

当 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, $\varphi_f = 0$

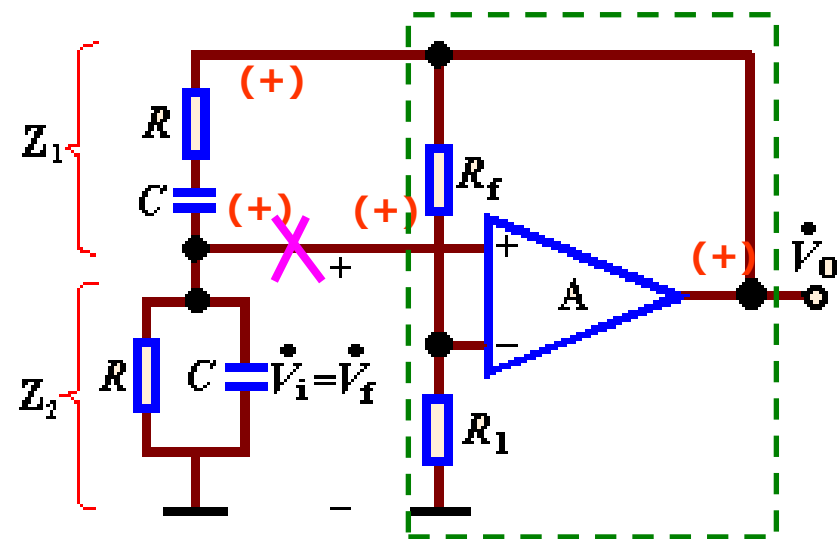
用瞬时极性法判断可知,
电路满足相位平衡条件

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$$

此时若放大电路的电压增益为 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 3$

则振荡电路满足振幅平衡条件 $A_v F_v = 3 \times \frac{1}{3} = 1$

电路可以输出频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 的正弦波



RC正弦波振荡电路一般用于产生频率低于 1 MHz 的正弦波

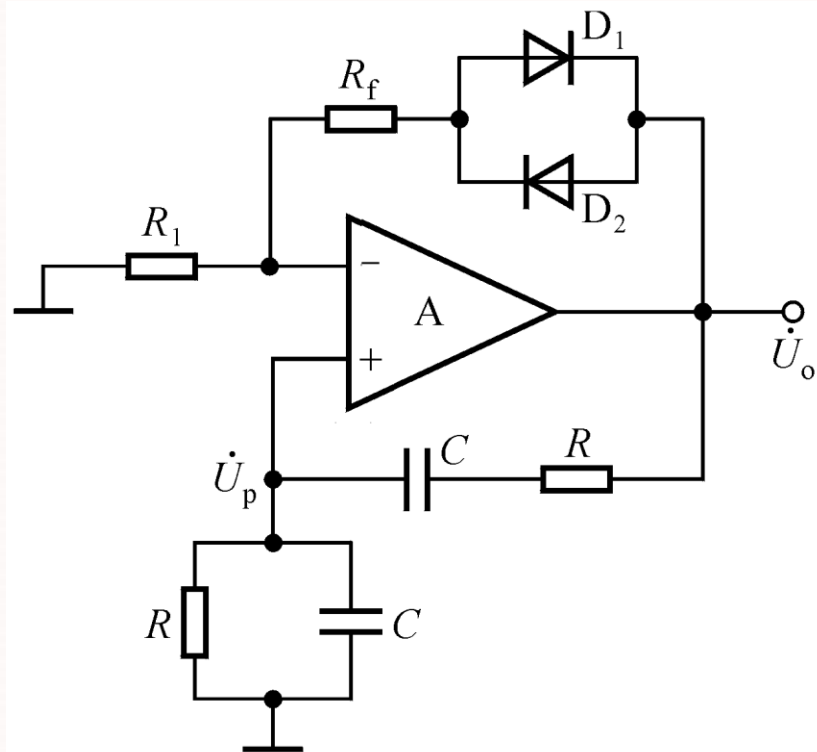
稳幅措施

采用非线性元件：二极管

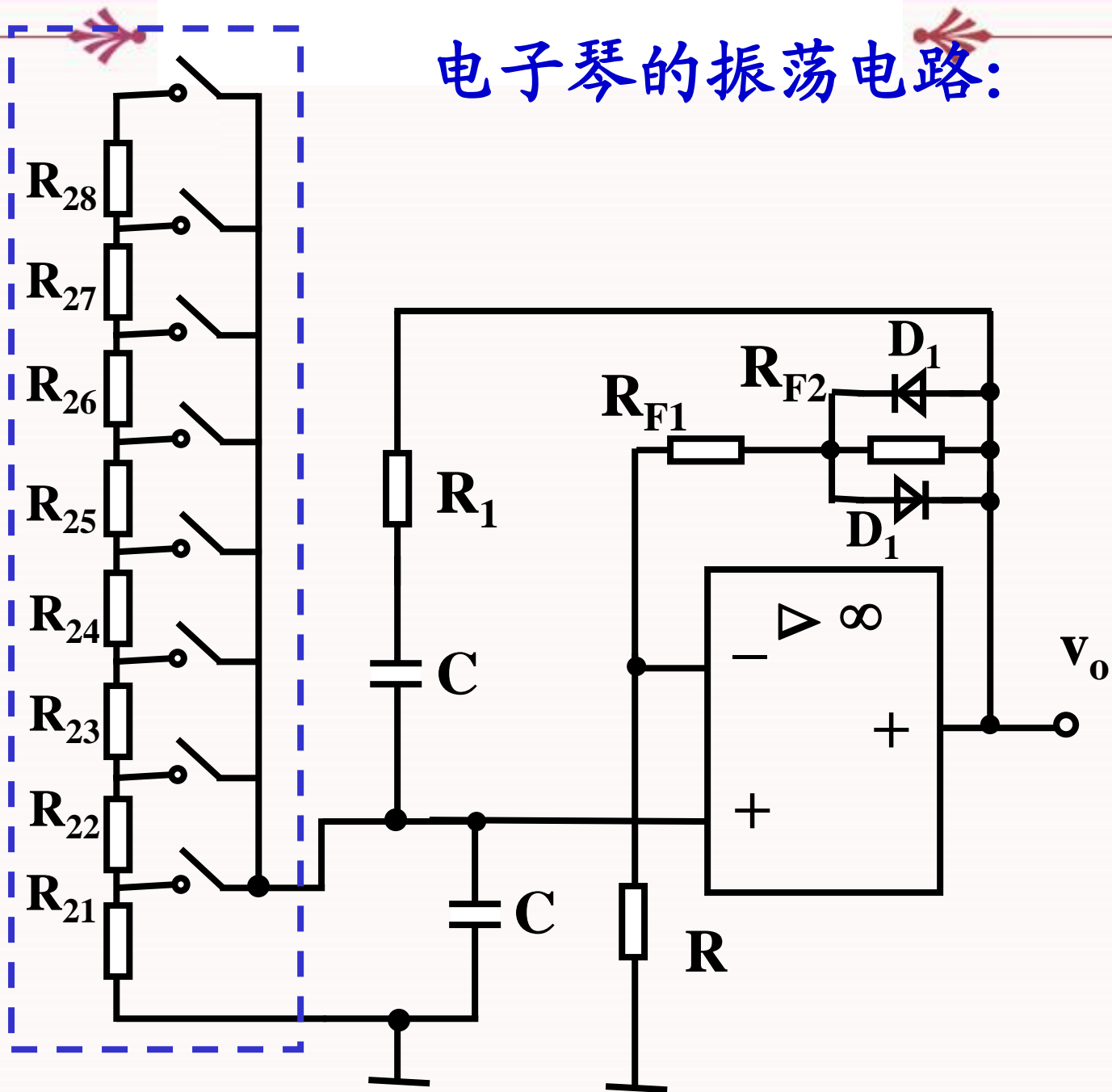
$$A_V = 1 + \frac{R_f + r_D}{R_1}$$

当输出幅值很小时，电流小，二极管动态电阻大， $A > 3$ ，有利于起振。

当输出幅值较大时，电流大，二极管动态电阻小， A 随之下降，输出幅值趋于稳定。



电子琴的振荡电路:



讨论：合理连接电路，组成文氏桥振荡电路

