

# 第7章 波形的发生和信号的转换

## 本章要求：

- 一、掌握电路产生正弦波振荡的幅值平衡条件和相位平衡条件，以及RC桥式正弦波振荡电路的组成和工作原理；
- 二、了解变压器反馈式、电感反馈式、电容反馈式和石英晶体正弦波振荡电路的工作原理；
- 三、能够正确判断电路是否可能产生正弦波振荡；
- 四、理解单限和滞回电压比较器的电路组成、工作原理和性能特点，并会分析电路的电压传输特性和波形；
- 五、理解矩形波发生电路的组成和工作原理。

# 目 录

7.1 正弦波振荡电路

7.2 电压比较器

7.3 非正弦波发生电路

7.4 利用集成运放实现的信号转换电路

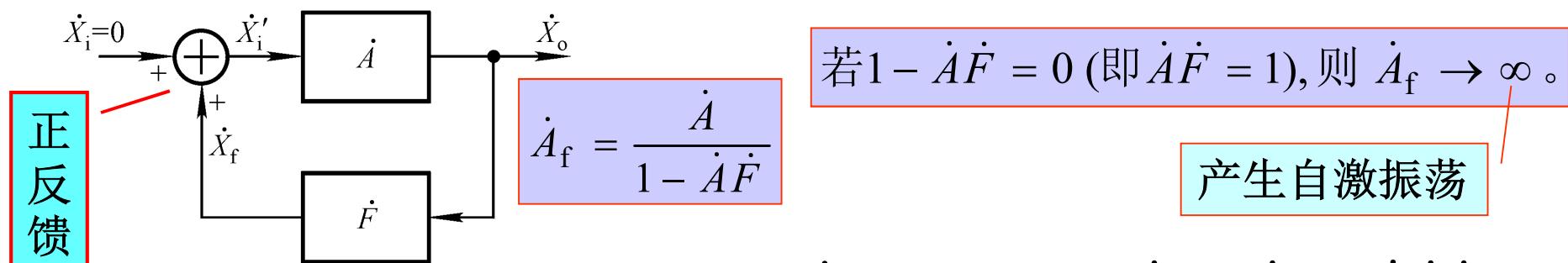
# 7.1 正弦波振荡电路

## 7.1.1 概述

### 1. 产生正弦波振荡的条件

无外加输入信号，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。



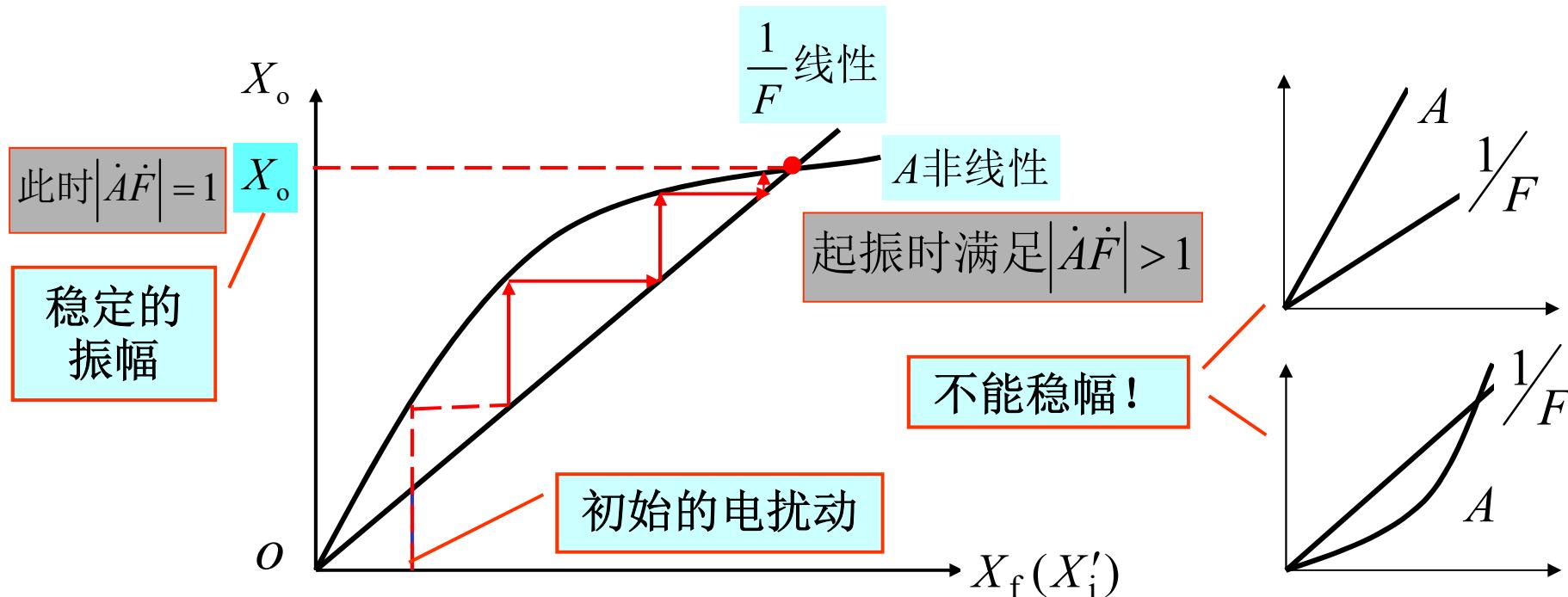
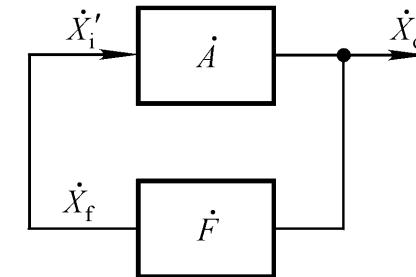
正反馈时， $\dot{X}'_i = \dot{X}_i + \dot{X}_f$  此时  $\dot{X}_i = 0$ ，所以  $\dot{X}'_i = \dot{X}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{X}'_i$

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

-----幅值平衡条件  
-----相位平衡条件

## 2. 起振与稳幅

要产生正弦波振荡，必须有满足相位条件的 $f_0$ ，且在合闸通电时对于 $f=f_0$ 信号有从小到大直至稳幅的过程，即满足起振条件： $|\dot{A}\dot{F}| > 1$



由于起振条件和半导体器件的非线性特性，最终达到动态平衡，**稳幅**。

### 3. 基本组成部分

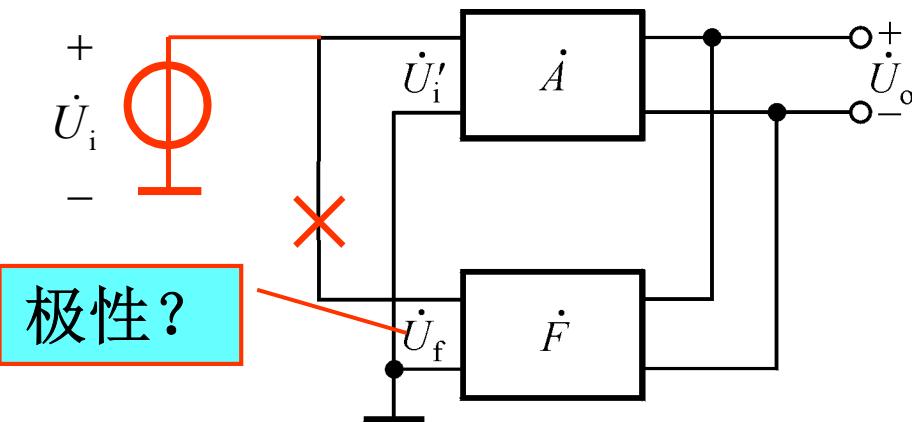
- 1) 放大电路：正常放大，并满足起振条件
- 2) 正反馈网络：满足相位条件
- 3) 选频网络：确定 $f_0$
- 4) 稳幅环节（非线性环节）：稳幅

} 常合二为一

### 4. 分析方法

- 1) 放大电路能否正常放大，即是否有合适的 $Q$ 点，动态信号是否能正常传递；
- 2) 是否满足相位条件，即存在选频网络，有 $f_0$ ，且为正反馈；
- 3) 是否满足起振条件，并存在稳幅环节。

## 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 $f=f_0$ 的输入电压 $U_i$ ，并给定其瞬时极性，然后根据 $U_i$ 的极性 $\rightarrow U_o$ 的极性；

找出在哪个元件上获得反馈电压 $U_f$ ，得到 $U_f$ 的极性；

若 $U_f$ 与 $U_i$ 极性相同，即反馈电压能取代输入电压，则为正反馈，电路可能产生正弦波振荡；否则电路不可能产生正弦波振荡。

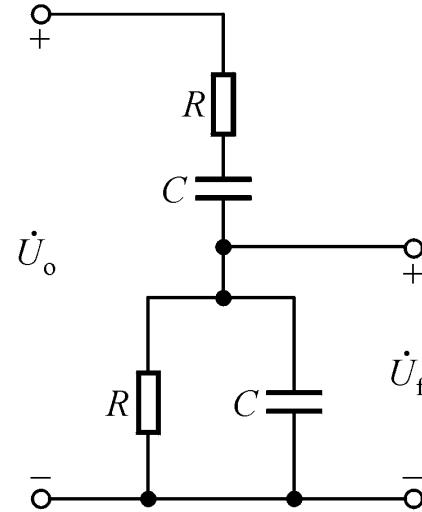
## 5. 分类

常用选频网络所用元件分类：

- 1)  $RC$ 正弦波振荡电路：振荡频率较低，一般在1MHZ以下
- 2)  $LC$ 正弦波振荡电路：振荡频率较高，多在1MHZ以上
- 3) 石英晶体正弦波振荡电路：振荡频率非常稳定

## 7.1.2 RC正弦波振荡电路 (文氏桥振荡电路)

### 1. RC串并联选频网络



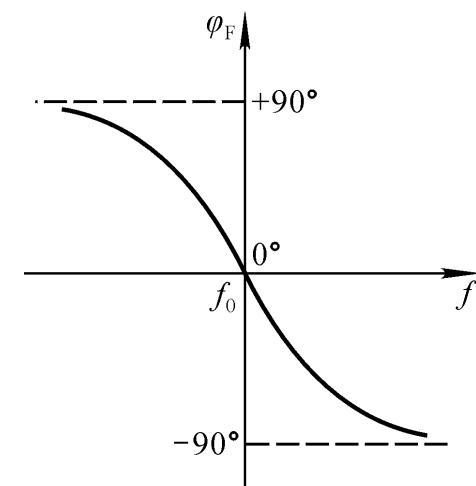
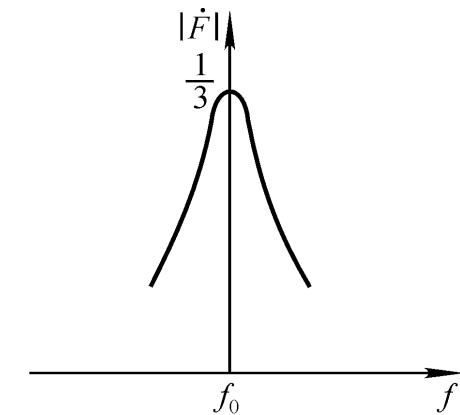
$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

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

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

当  $f=f_0$  时,  $|\dot{F}| = \frac{1}{3}$  最大,  $\phi_F = 0^\circ$  同相。

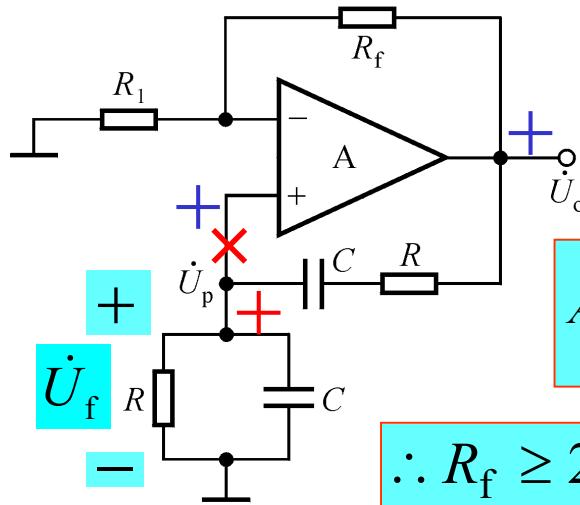
频率响应



## 2. RC桥式正弦波振荡电路

采用同相比例运算电路作放大电路

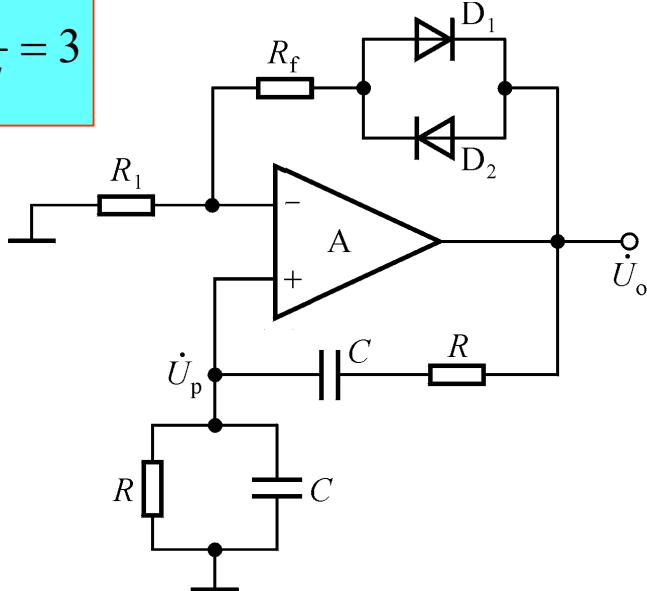
保证正反馈



$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1} \geq \frac{1}{F} = 3$$

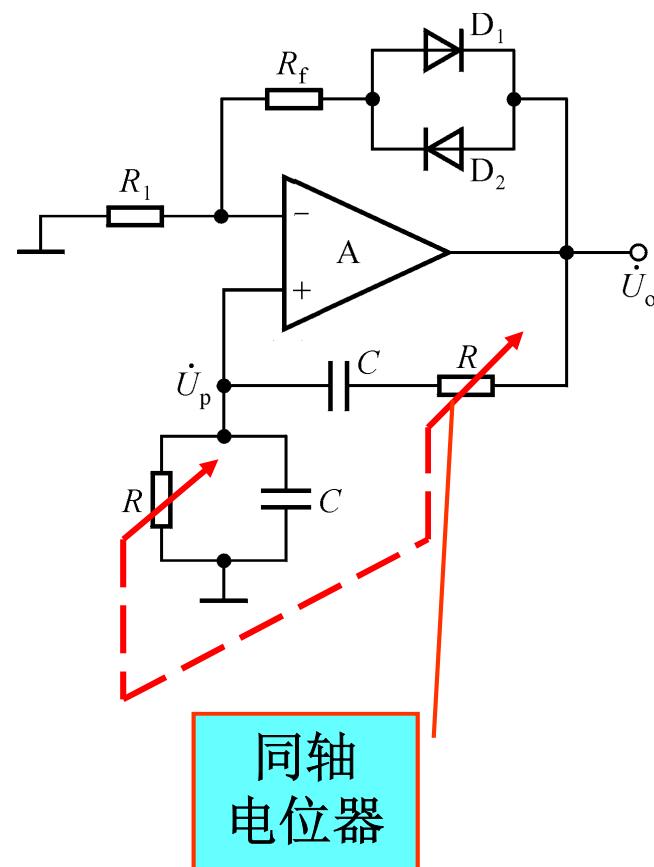
$$\therefore R_f \geq 2R_1$$

通常引入电压串联负反馈，使  $R_i$  大、 $R_o$  小，从而减小放大电路对选频特性的影响，使振荡频率  $f_0$  几乎仅仅决定于选频网络。



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。而对于分立元件放大电路，半导体器件本身具有非线性，所以不用另加非线性环节。

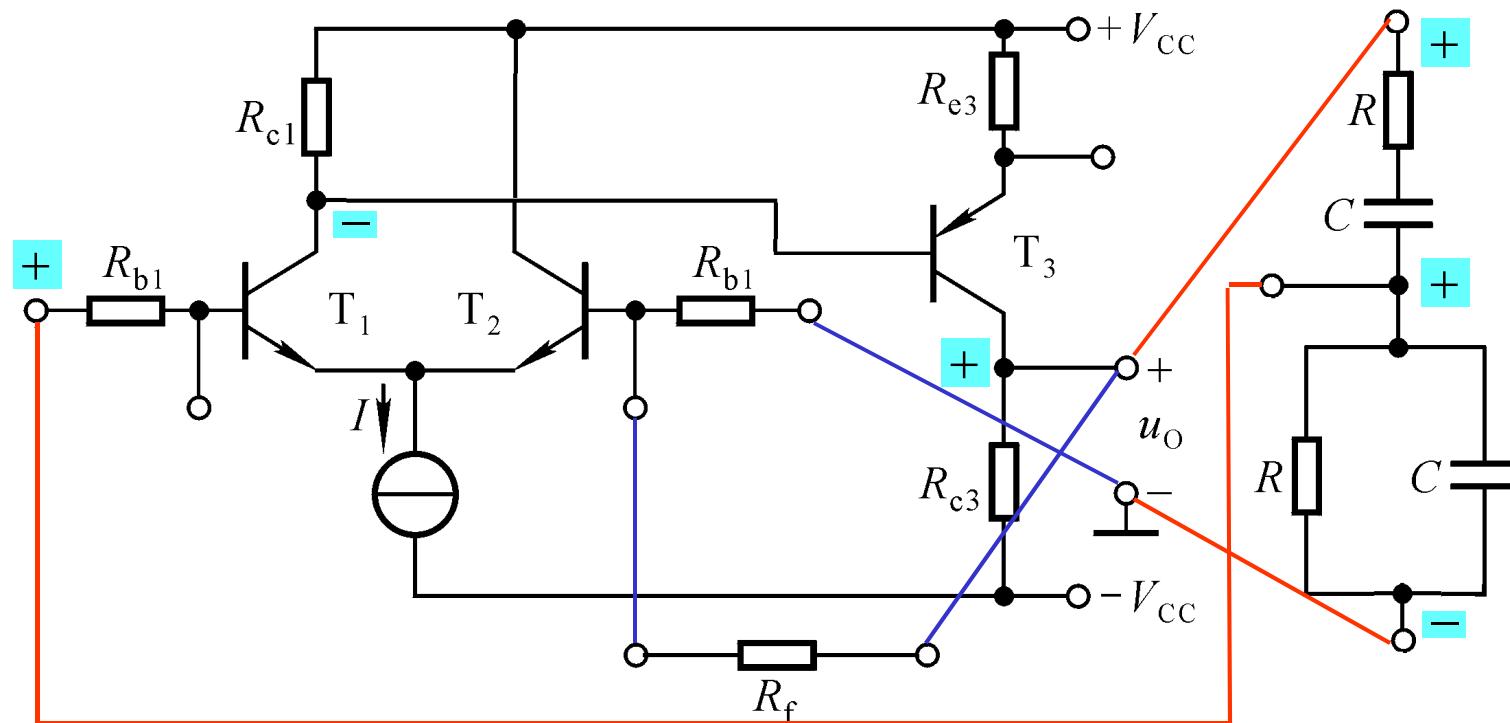
### 3. 振荡频率可调的RC桥式正弦波振荡电路



改变电容以粗调，改变电位器滑动端以微调。

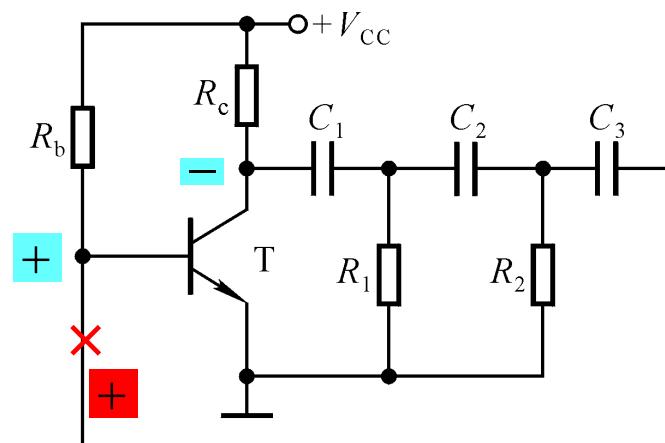
特点：

振荡频率稳定，带负载能力强，输出电压失真小；振荡频率不高。

**例** 合理连接电路，组成文氏桥振荡电路

## 习题7.4 判断图示电路有可能产生正弦波振荡吗？

**RC 移项式电路**



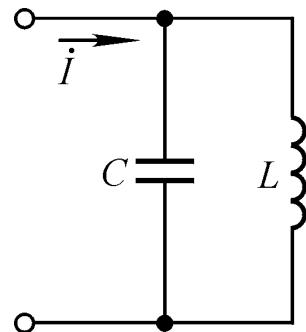
1) **RC 移相电路有几级才可能产生正弦波振荡？** 三级或者三级以上

2) 若  $R$  和  $C$  互换呢？

可能产生正弦波振荡

## 7.1.3 LC正弦波振荡电路

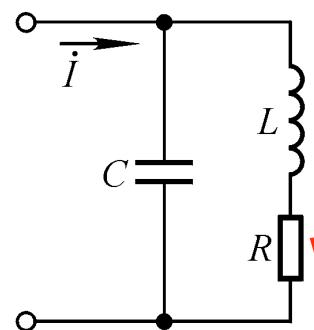
### 1. LC并联网络的选频特性



理想的LC并联网络在谐振时阻抗无穷大，电流I为零。

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

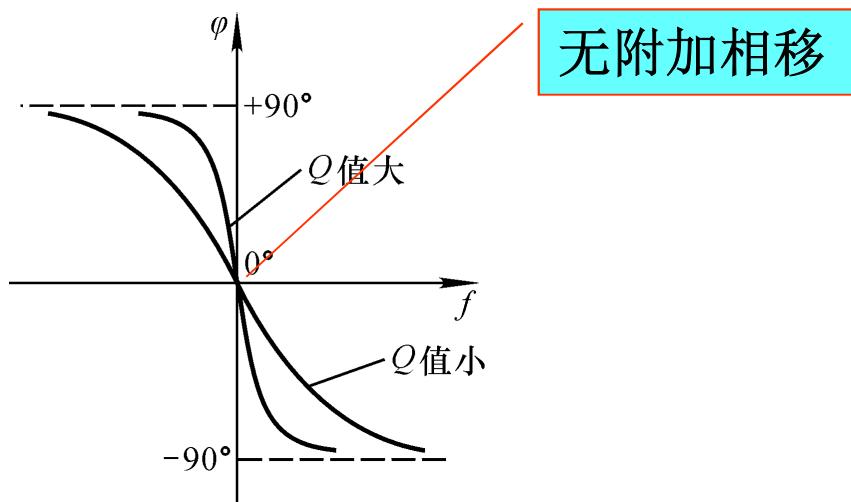
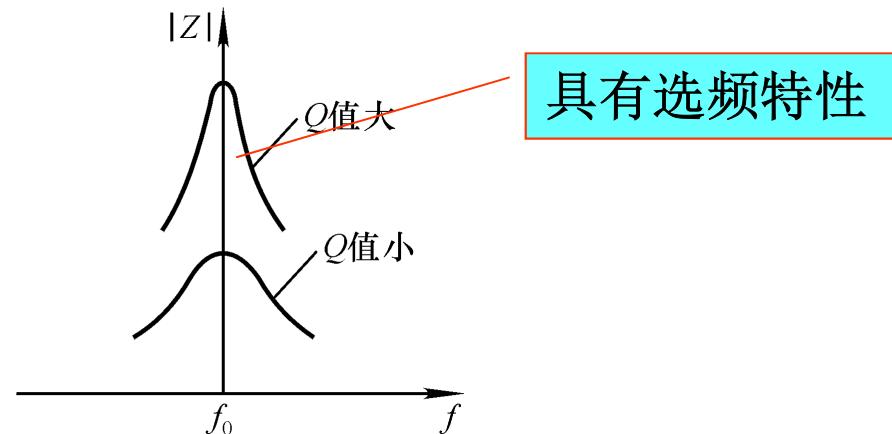


实际的LC并联网络在谐振时呈纯阻性，阻抗最大，电流I很小，若损耗较小，则品质因数及谐振频率：

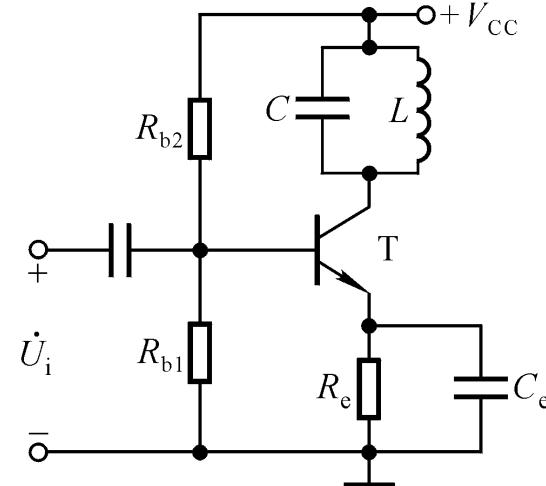
$$Q \approx \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \gg 1, f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

## 7.1 正弦波振荡电路

实际的 $LC$ 并联网络  
阻抗 $Z$ 的频率特性



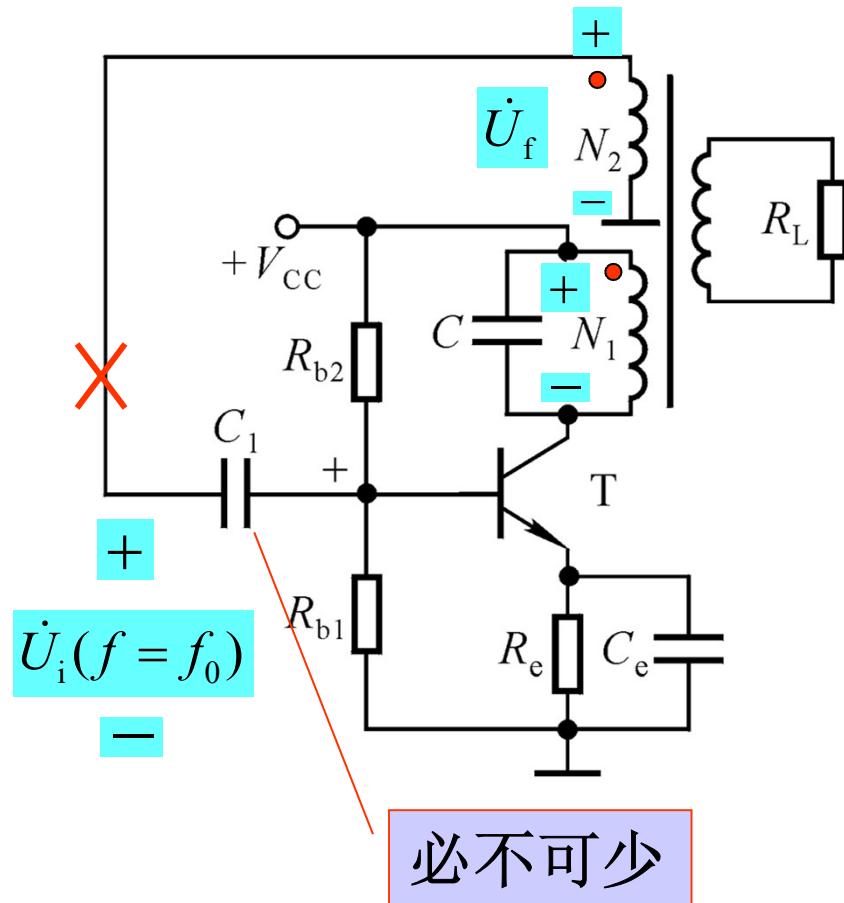
$LC$ 并联网络组成  
选频放大电路



当 $f=f_0$ 时，发生谐振，  
阻抗最大，所以电压  
放大倍数的数值最大，  
且无附加相移。

若在电路中引入正反馈，  
就可以构成正弦波振荡电路。

## 2. 变压器反馈式振荡电路



为使  $N_1$ 、 $N_2$  耦合紧密，将它们合二为一，组成电感反馈式振荡电路。

必须有合适的同名端！

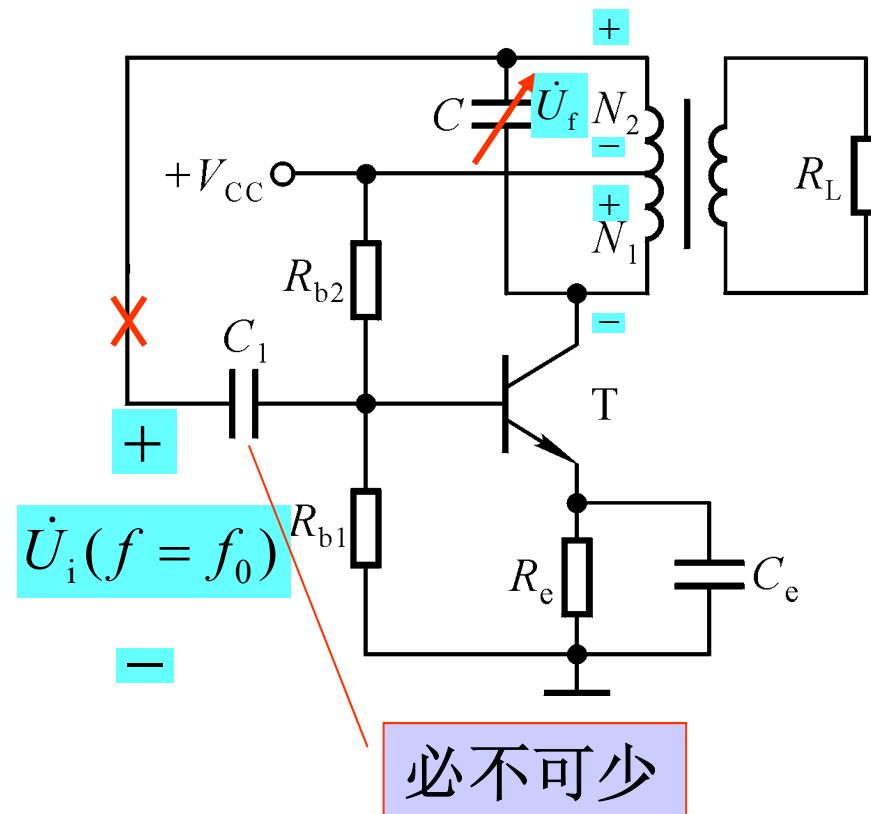
分析LC电路是否可能产生正弦波振荡的步骤：

- 1) 放大电路是否能正常放大
- 2) 是否存在选频网络，有  $f_0$ ，且为正反馈

特点：

易振，波形较好；磁路耦合不紧密，损耗大，振荡频率的稳定性不高。

### 3. 电感反馈式振荡电路



反馈电压取自哪个线圈?  
反馈电压的极性?

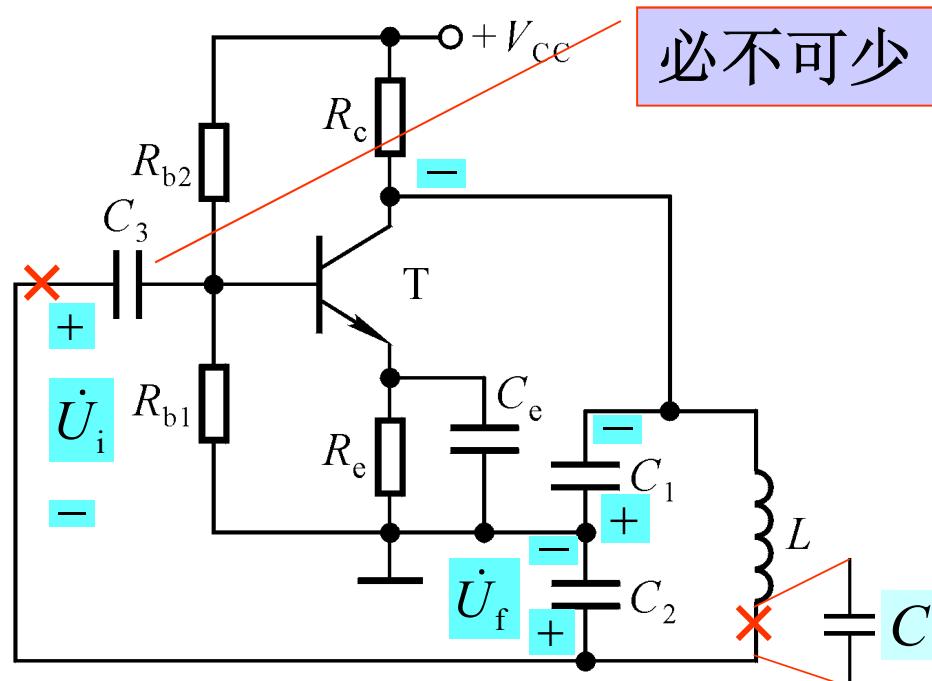
电感的三个抽头分别接晶体管的三个极，故称之为**电感三点式电路**。

**特点：**

耦合紧密，易振，振幅大，**C**用可调电容可获得范围较宽的振荡频率，最高振荡频率可达几十兆赫；波形较差，常含有高次谐波。

由于电感对高频信号呈现较大的电抗，故波形中含高次谐波，为使振荡波形好，采用电容反馈式电路。

## 4. 电容反馈式（电容三点式）振荡电路



$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}}$$

若  $C \ll C_1$  且  $C \ll C_2$ , 则

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

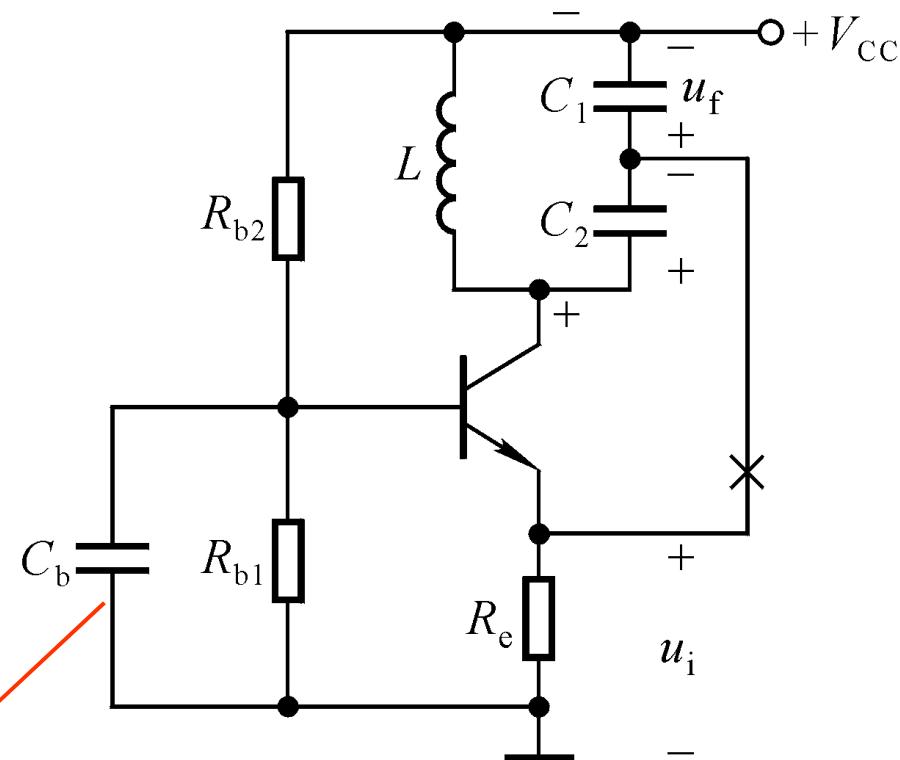
与极间电容无关

若要振荡频率高，则  $L$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  的取值就要小。当电容减小到一定程度时，晶体管的极间电容将并联在  $C_1$  和  $C_2$  上，影响振荡频率。

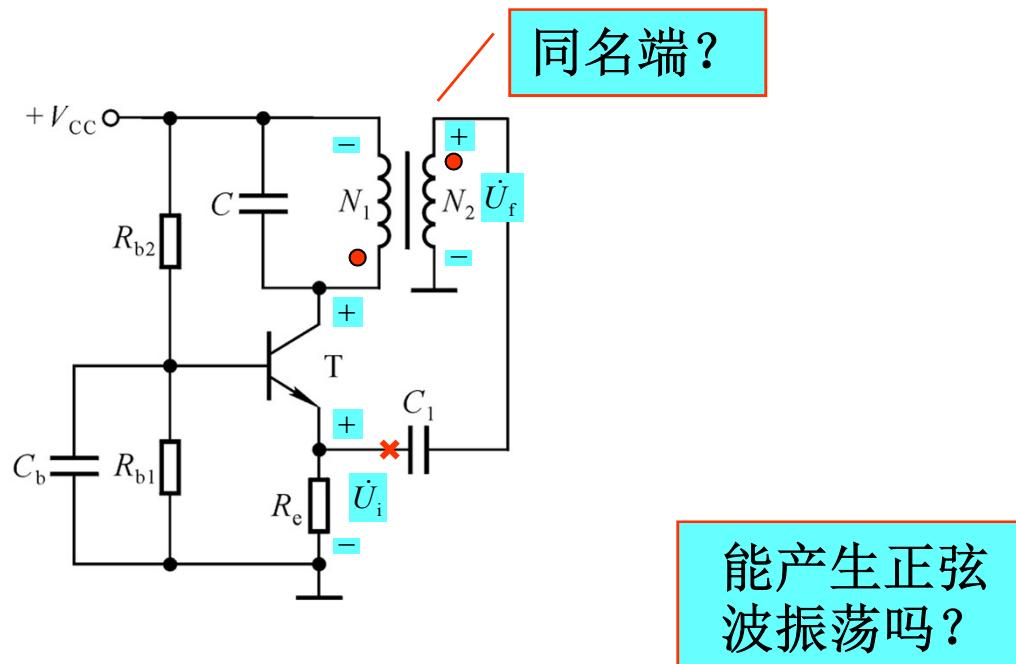
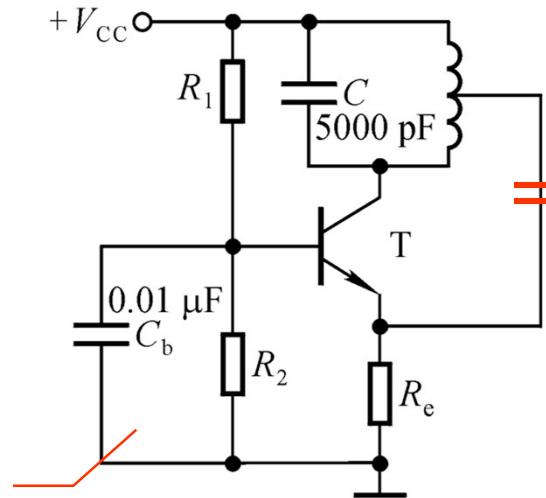
**特点：** 波形好，振荡频率调整范围小，适于频率固定的情况。

## 采用共基放大电路的电容反馈式振荡电路

若要求电容反馈式振荡电路的振荡频率高达一百兆赫以上，则要采用共基放大电路。

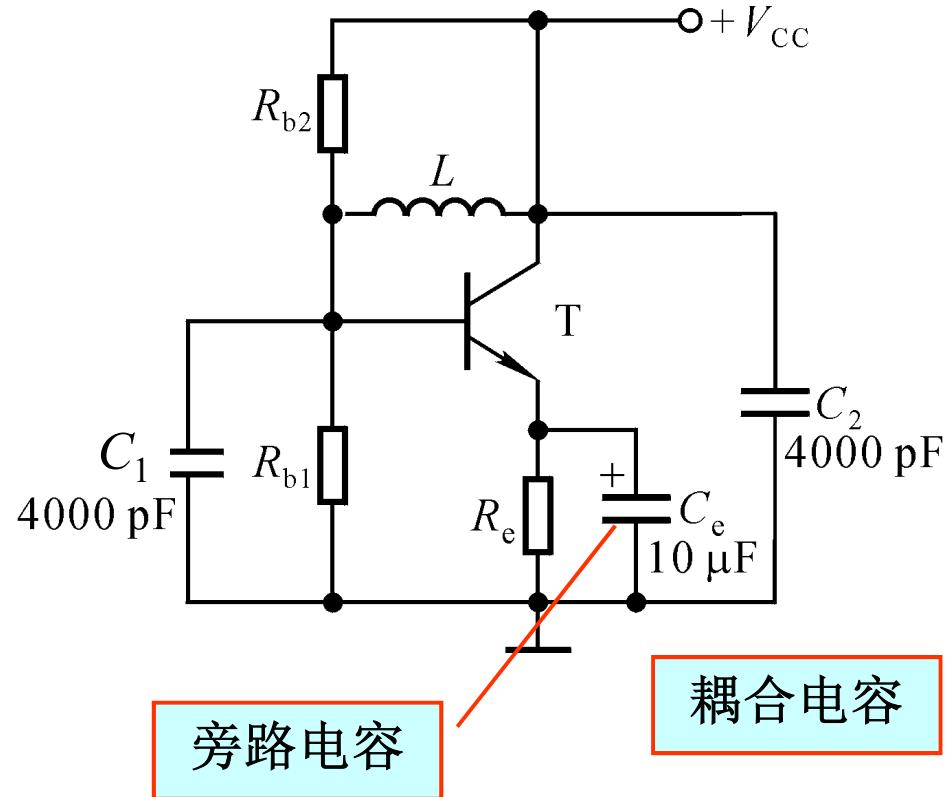


旁路电容，必不可少

**例7.1.2****例****注意事项:**

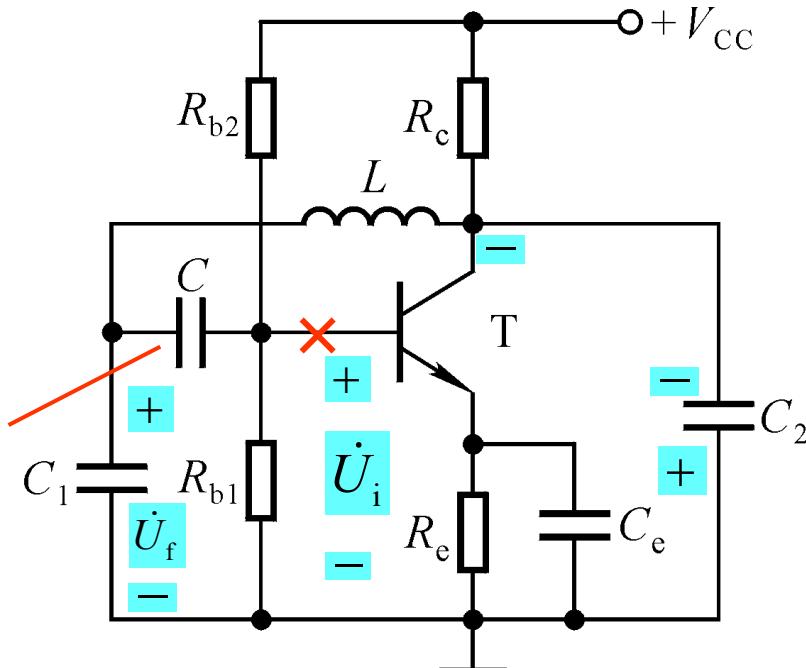
- 放大电路必须能够**正常放大**, 不改变放大电路的基本接法;
- 断开反馈**, 在断开处加  $f=f_0$  的输入电压;
- 找出在哪个元件上获得反馈电压, 是否能取代输入电压, 即为**正反馈**。

### 例7.1.3 改错



## 由LC( $C_2$ 和 $C_1$ )并联网络组成的电容反馈式振荡电路

放大电路能否正常放大?  
是否为正反馈?



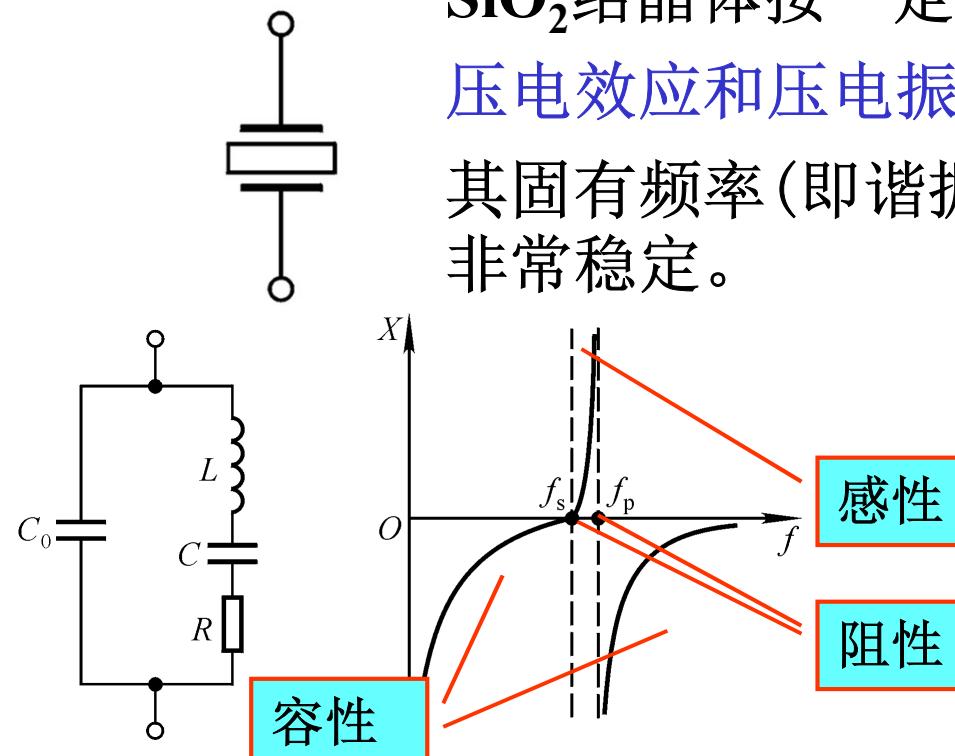
## 7.1.4 石英晶体正弦波振荡电路

### 1. 石英晶体的特点

$\text{SiO}_2$ 结晶体按一定方向切割的晶片。

压电效应和压电振荡：机械变形和电场的关系。

其固有频率(即谐振频率)只决定于其几何尺寸，非常稳定。



$$\text{串联谐振频率 } f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

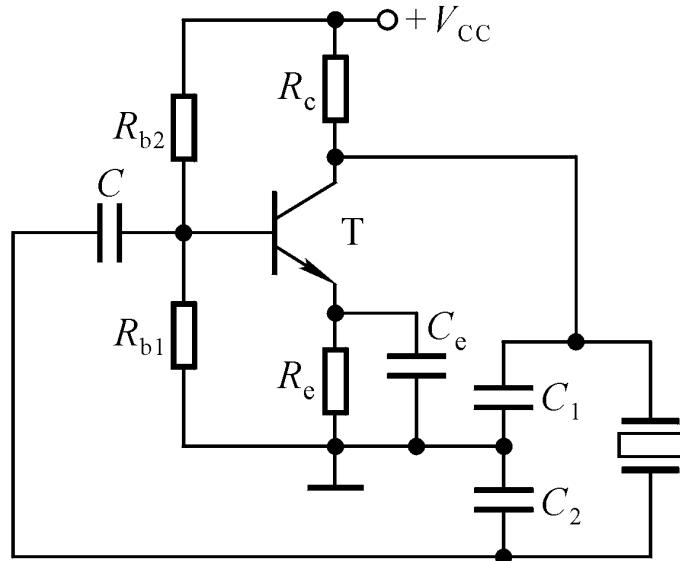
$$\text{并联谐振频率 } f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}}$$

因  $C \ll C_0$ , 故  $f_p \approx f_s$

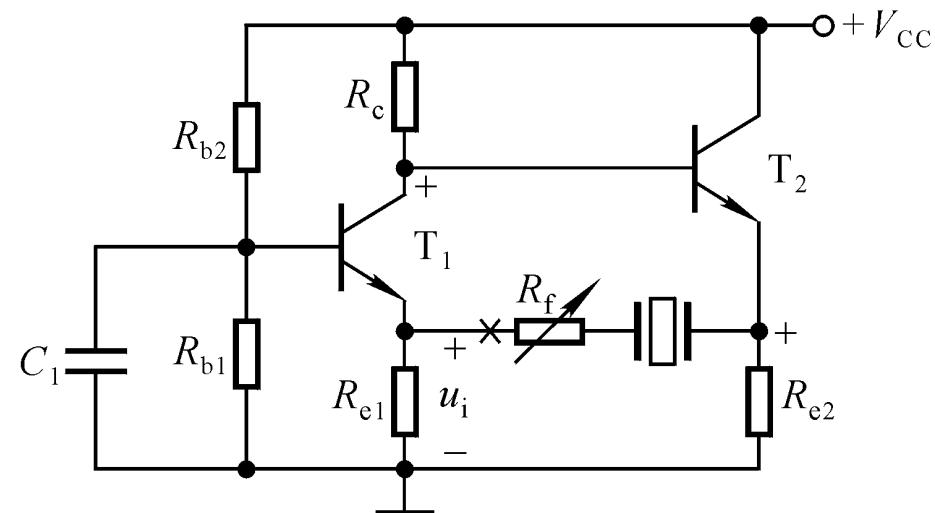
一般LC选频网络的 $Q$ 为几百，石英晶体的 $Q$ 可达 $10^4 \sim 10^6$ ；前者振荡频率的稳定性 $\Delta f/f$ 为 $10^{-5}$ ，后者最高可达 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 。

## 2. 电路

(1) 并联型电路



(2) 串联型电路



## 7.2 电压比较器

### 7.2.1 概述

1. 电压比较器的功能：比较电压的大小。

输入电压是连续的模拟信号；输出电压表示比较的结果，只有高电平和低电平两种情况。

使输出产生跃变的输入电压称为**阈值电压**。

2. 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：

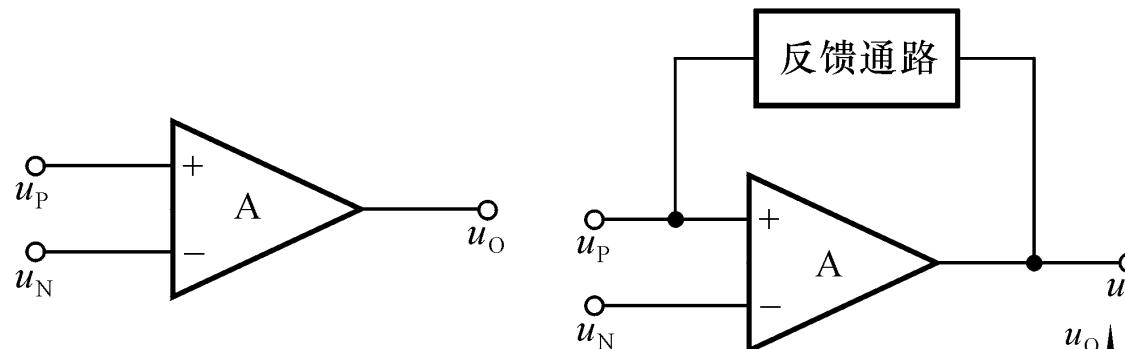
(1) **输出高电平**  $U_{OH}$  和 **输出低电平**  $U_{OL}$

(2) **阈值电压**  $U_T$

(3) 输入电压经过阈值电压时输出电压**跃变的方向**

### 3. 集成运放的非线性工作区

电路特征：集成运放处于开环或仅引入正反馈

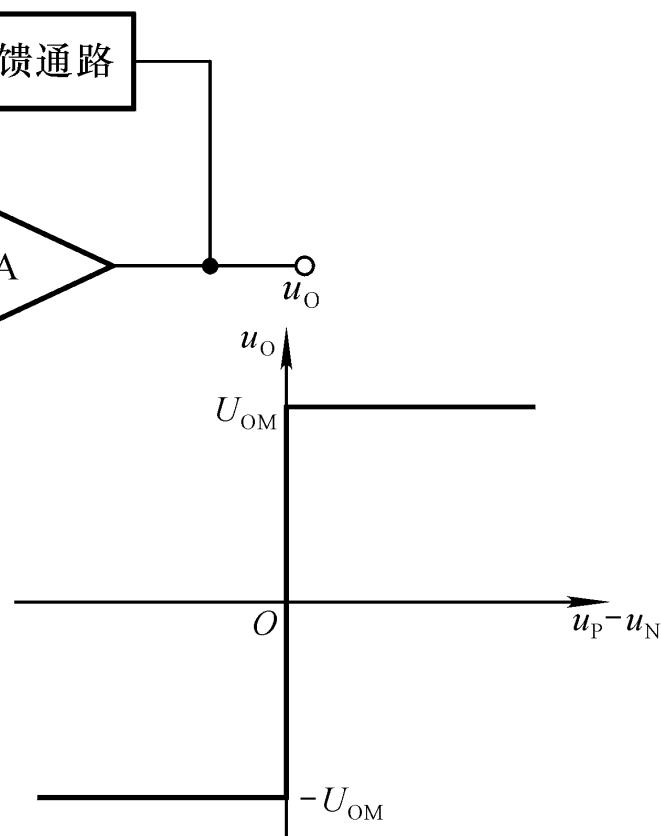


集成运放工作在非线性区的特点

1) 净输入电流为0，即虚断

2)  $u_P > u_N$  时，  $u_O = +U_{OM}$

$u_P < u_N$  时，  $u_O = -U_{OM}$

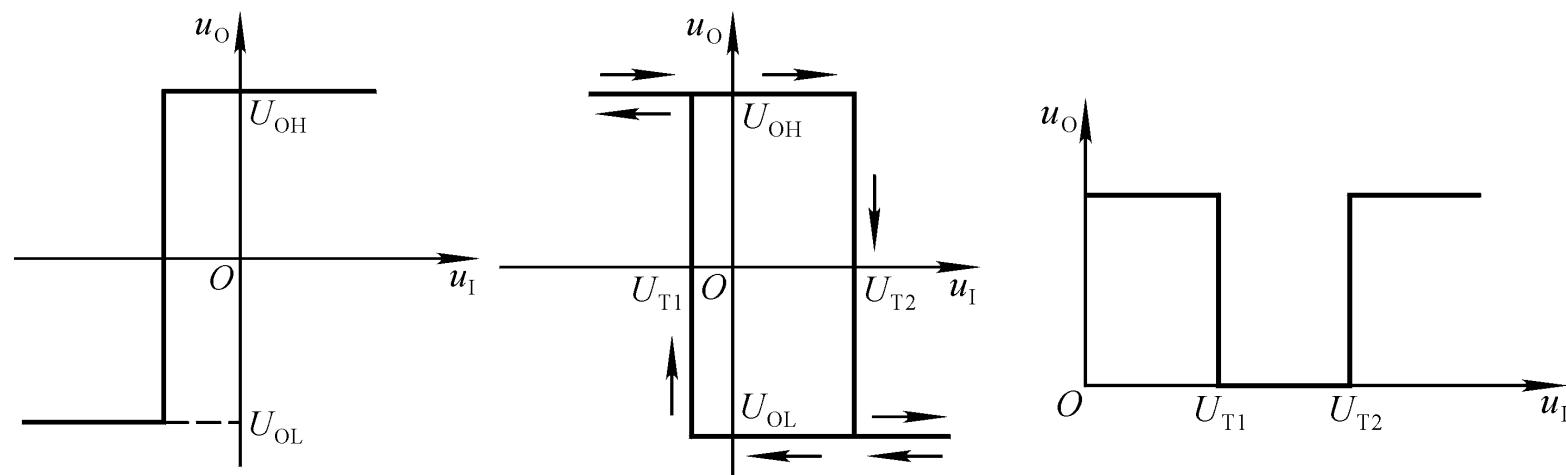


## 4. 几种常用的电压比较器

(1) 单限比较器: 只有一个阈值电压

(2) 滞回比较器: 有两个阈值电压, 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  $\Delta U = |U_{T1} - U_{T2}|$

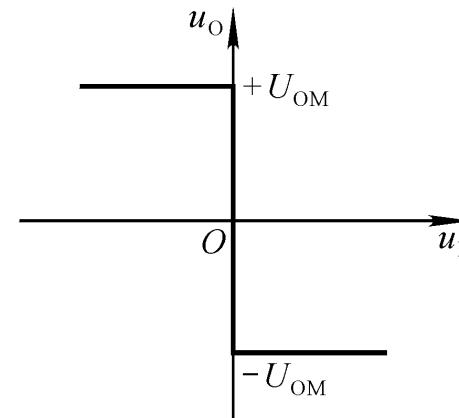
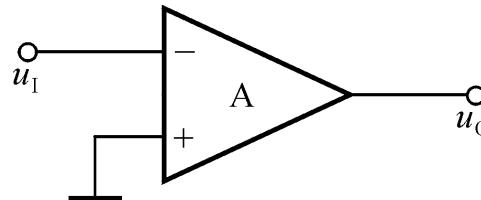


(3) 窗口比较器:

有两个阈值电压, 输入电压单调变化时输出电压跃变两次。

## 7.2.2 单限比较器

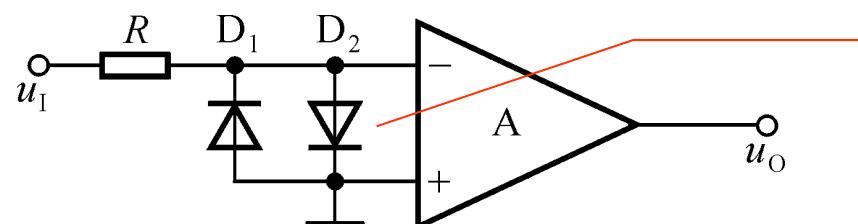
### 1. 过零比较器



(1)  $U_T = 0$

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

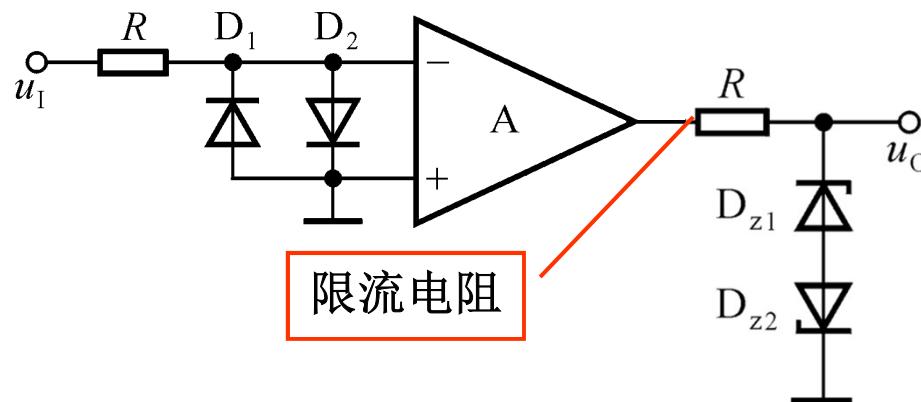
(3)  $u_I > 0$  时  $u_O = -U_{OM}$ ;  $u_I < 0$  时  $u_O = + U_{OM}$



集成运放的差模输入电压最大值为  
 $\pm U_D$

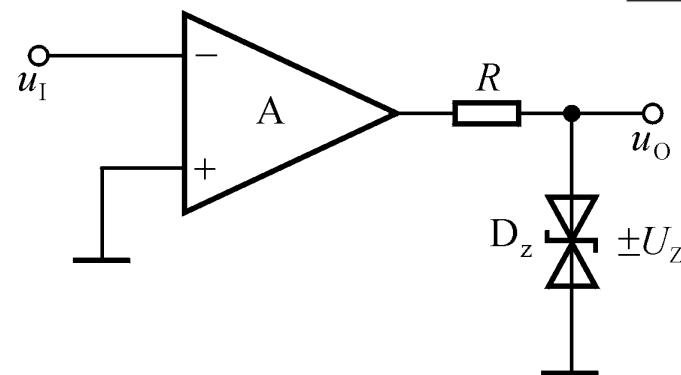
为了限制集成运放的净输入电压，保护其输入端，可加二极管限幅电路。

为适应负载对电压幅值的要求，输出端加限幅电路。



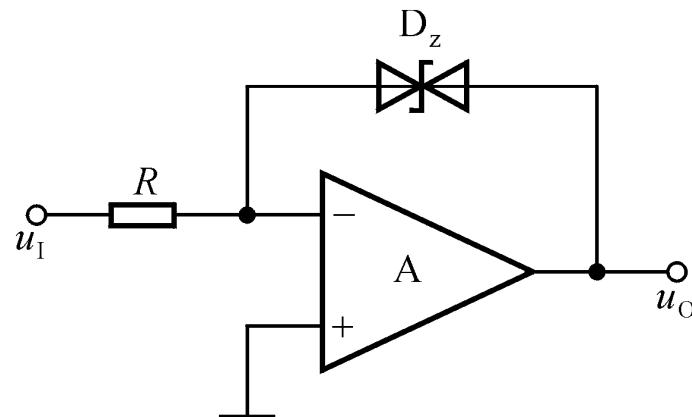
$$U_{OH} = + U_{Z1} + U_{D2}$$

$$U_{OL} = - (U_{Z2} + U_{D1})$$



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

## 输出限幅电路



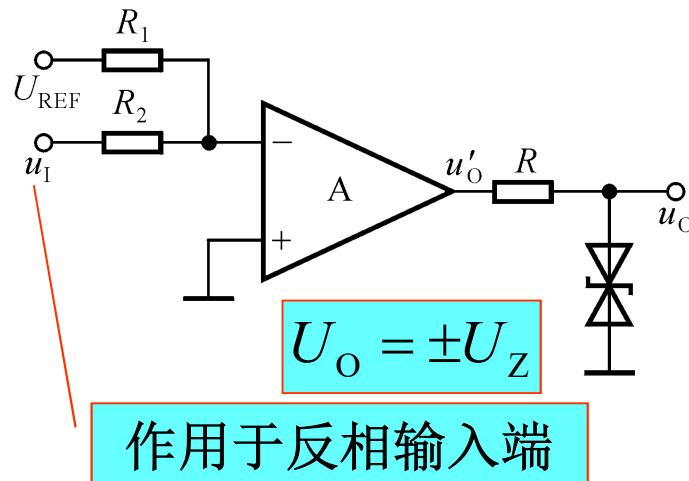
$$u_o = \pm U_z$$

- (1) 保护输入端
- (2) 加速集成运放状态的转换

### 电压传输特性的分析方法：

- (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。

## 2. 一般单限比较器



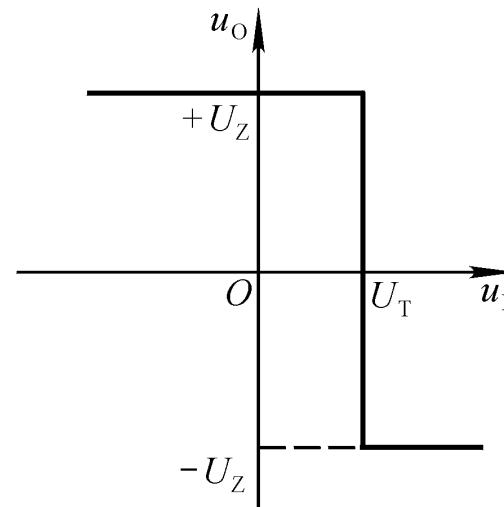
$$u_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{REF}} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_I$$

令  $u_N = u_P = 0$ , 得

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

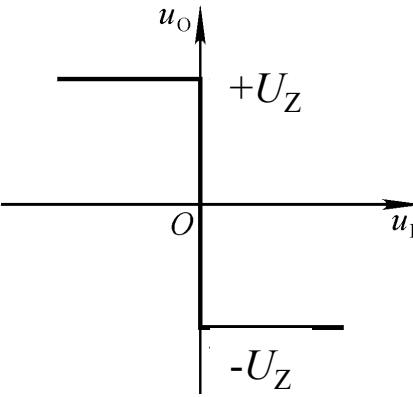
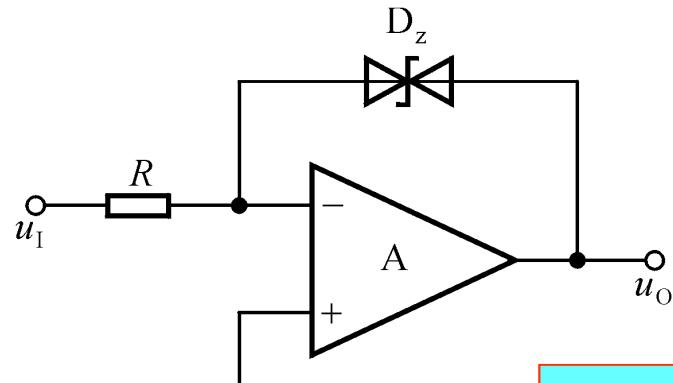
- (1) 若要改变  $U_T$ , 则应如何修改电路?
- (2) 若要改变曲线跃变方向, 则应如何修改电路?
- (3) 若要改变  $U_{OL}$ 、 $U_{OH}$  呢?

单限比较器的抗干扰能力比较差。

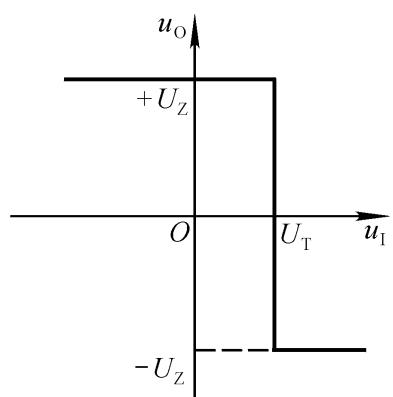
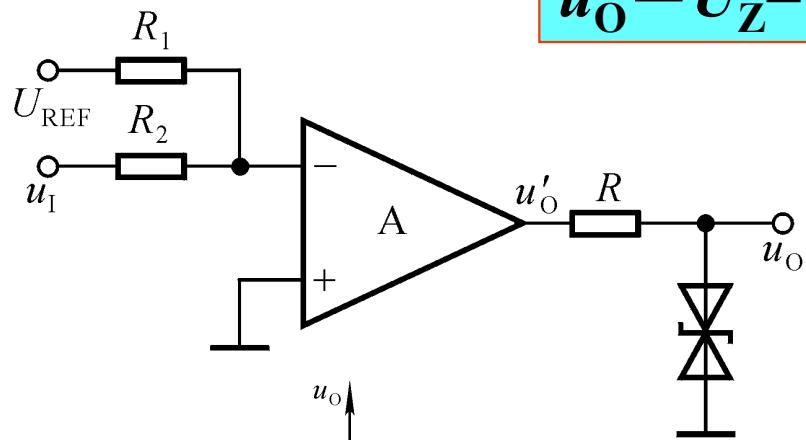


## 7.2 电压比较器

## 例7.2.1

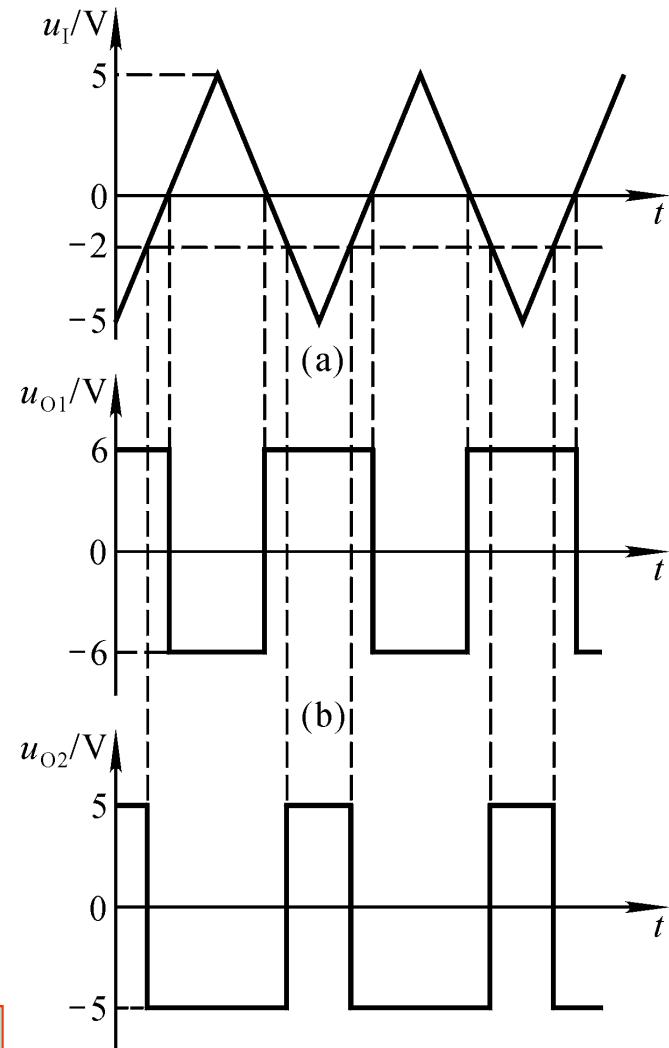


$$u_O = U_Z = \pm 6V$$



$$u_O = U_Z = \pm 5V$$

$$U_T = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{REF} = -2V$$



目录

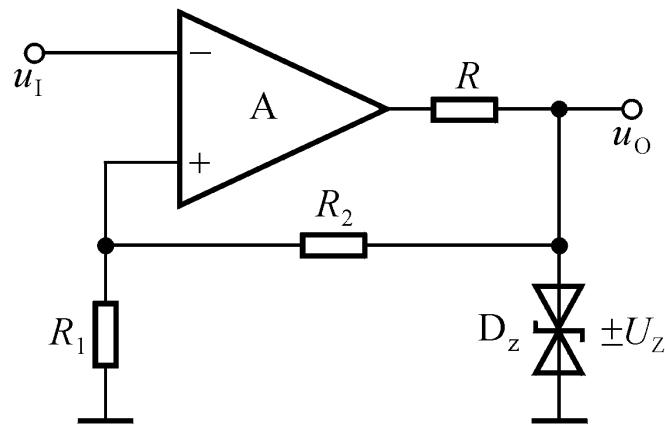
返回

上一页

下一页

## 7.2.3 滞回比较器

### 1. 阈值电压



电路特征：引入正反馈，既使集成运放工作在非线性区，又加快了 $u_O$ 的转换速度。

$$U_{OL} = -U_Z$$

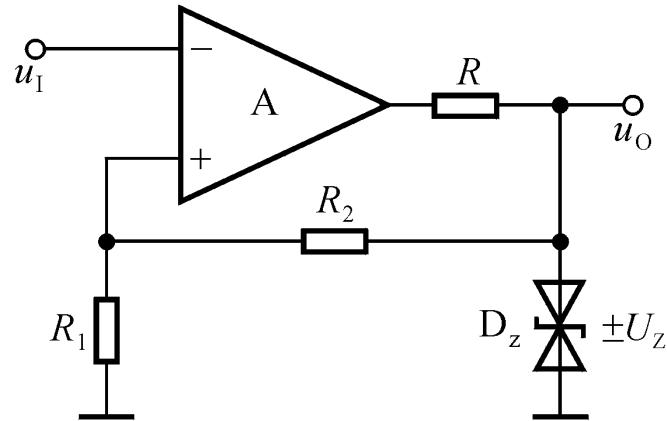
$$U_{OH} = +U_Z$$

$$u_N = u_I$$

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

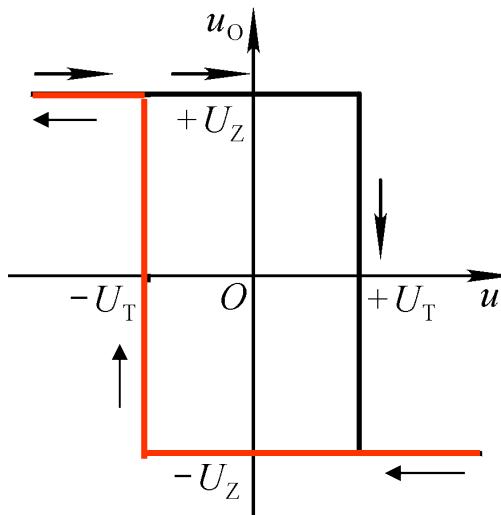
$$\pm U_T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$$

## 2. 工作原理及电压传输特性



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

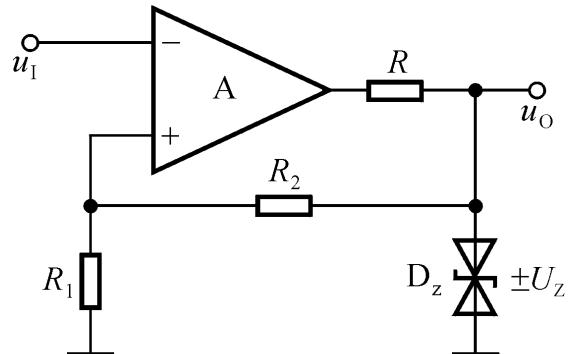
$$U_O = \pm U_Z$$



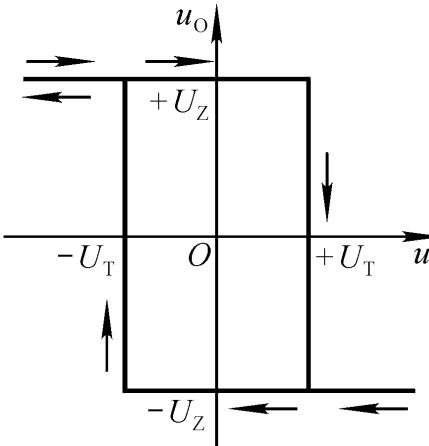
设  $u_I < -U_T$ , 则  $u_N < u_P$ ,  $u_O = +U_Z$ 。此时  $u_P = +U_T$ , 增大  $u_I$ , 直至  $+U_T$ , 再增大,  $u_O$  才从  $+U_Z$  跃变为  $-U_Z$ 。  
设  $u_I > +U_T$ , 则  $u_N > u_P$ ,  $u_O = -U_Z$ 。此时  $u_P = -U_T$ , 减小  $u_I$ , 直至  $-U_T$ , 再减小,  $u_O$  才从  $-U_Z$  跃变为  $+U_Z$ 。

滞回比较器有一定的抗干扰能力。

## 讨论一：如何改变滞回比较器的电压传输



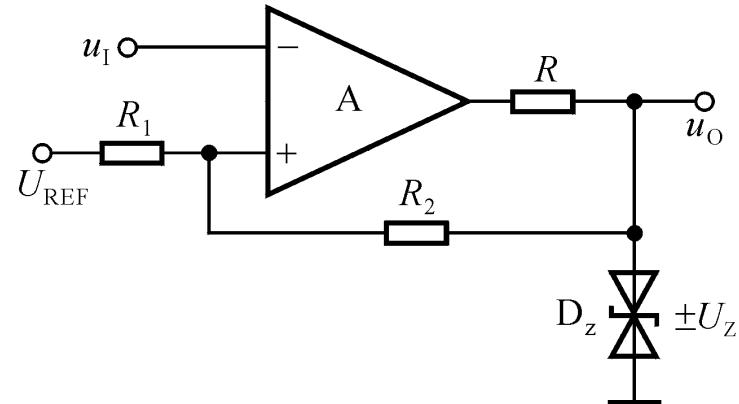
(a)



(b)

1. 若要电压传输特性曲线左右移动，则应如何修改电路？

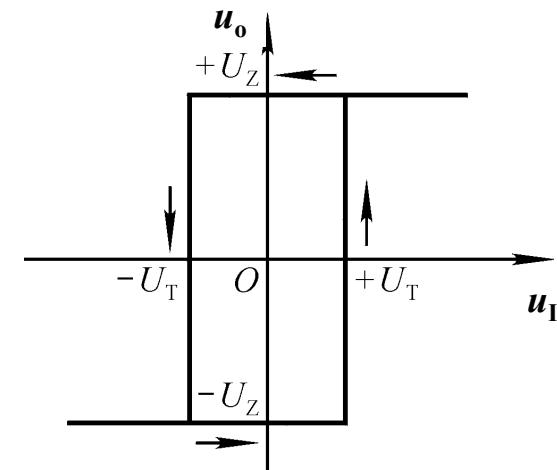
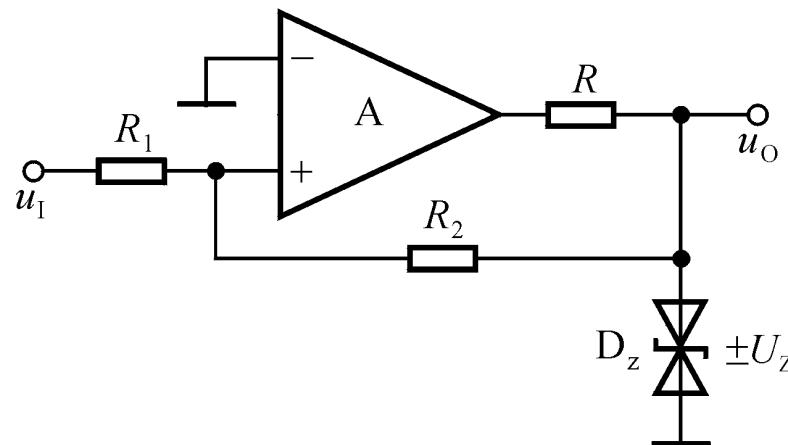
$$U_{T1(2)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{REF} \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$$



2. 若要电压传输特性曲线上下移动，则应如何修改电路？

改变输出  
限幅电路

3. 若要改变输入电压过阈值电压时输出电压的跃变方向，则应如何修改电路？



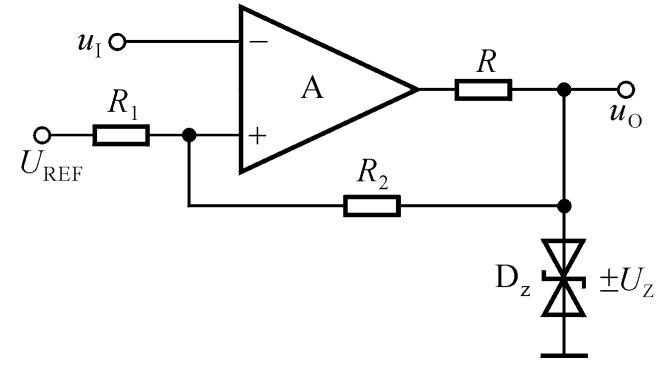
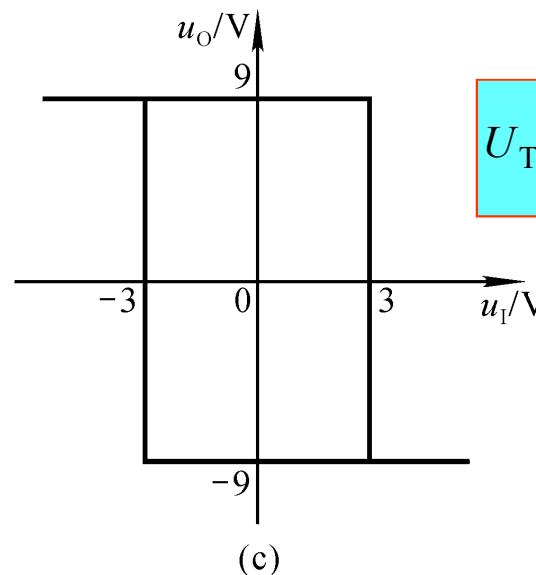
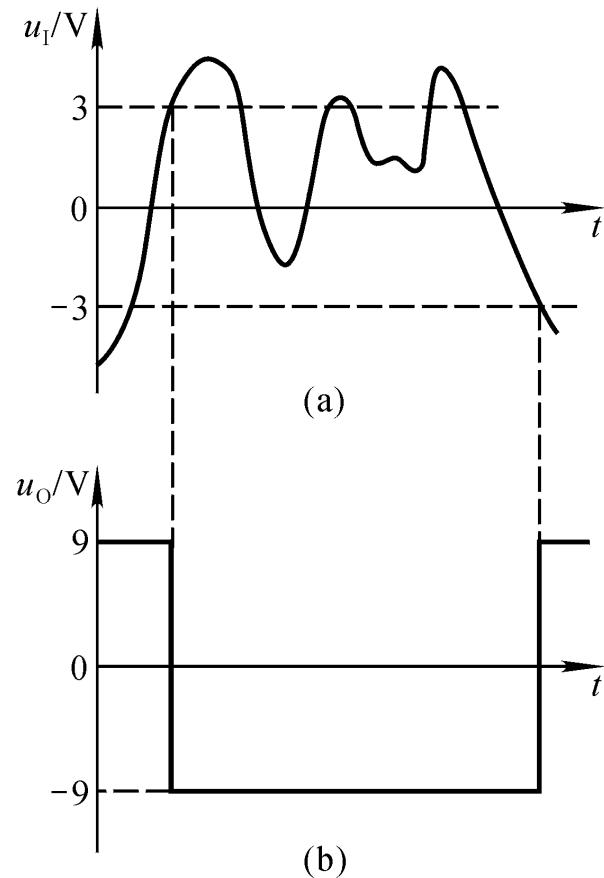
$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_I$$

令  $u_P = u_N = 0$ , 将  $u_O = \pm U_Z$  代入, 求出

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

## 7.2 电压比较器

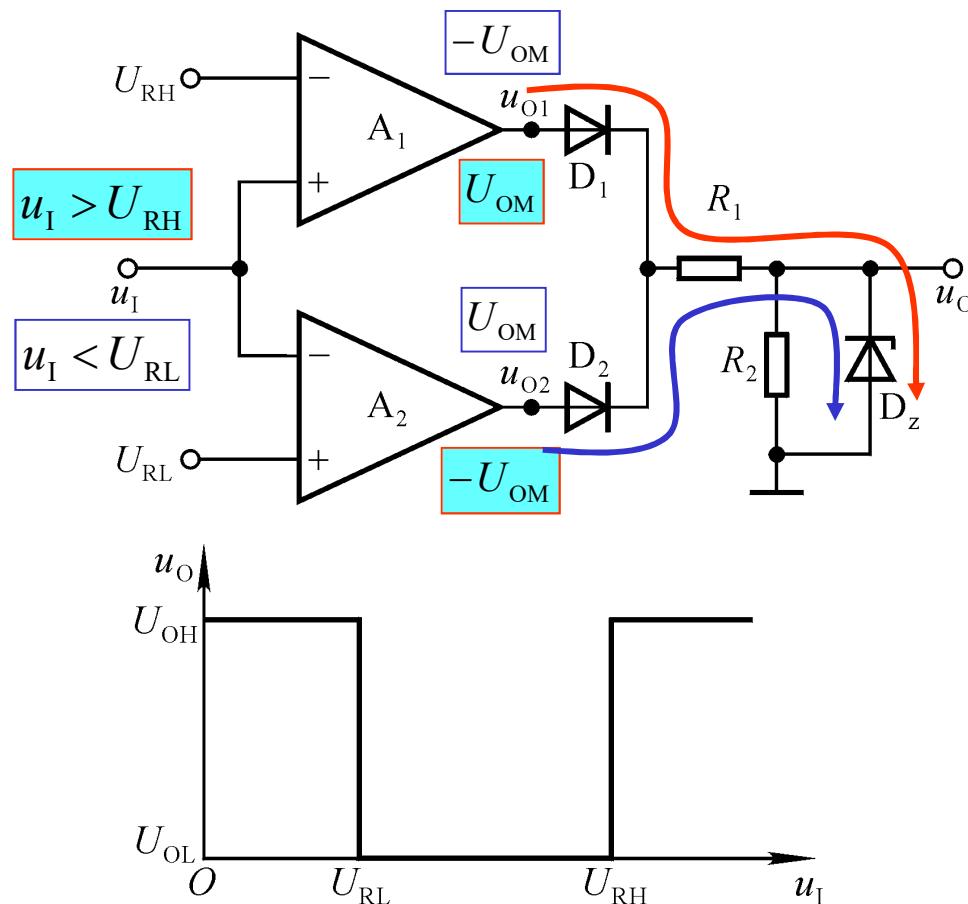
## 例7.2.2



$$U_{T1(2)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{REF} \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$$

等于-1

## 7.2.4 窗口比较器



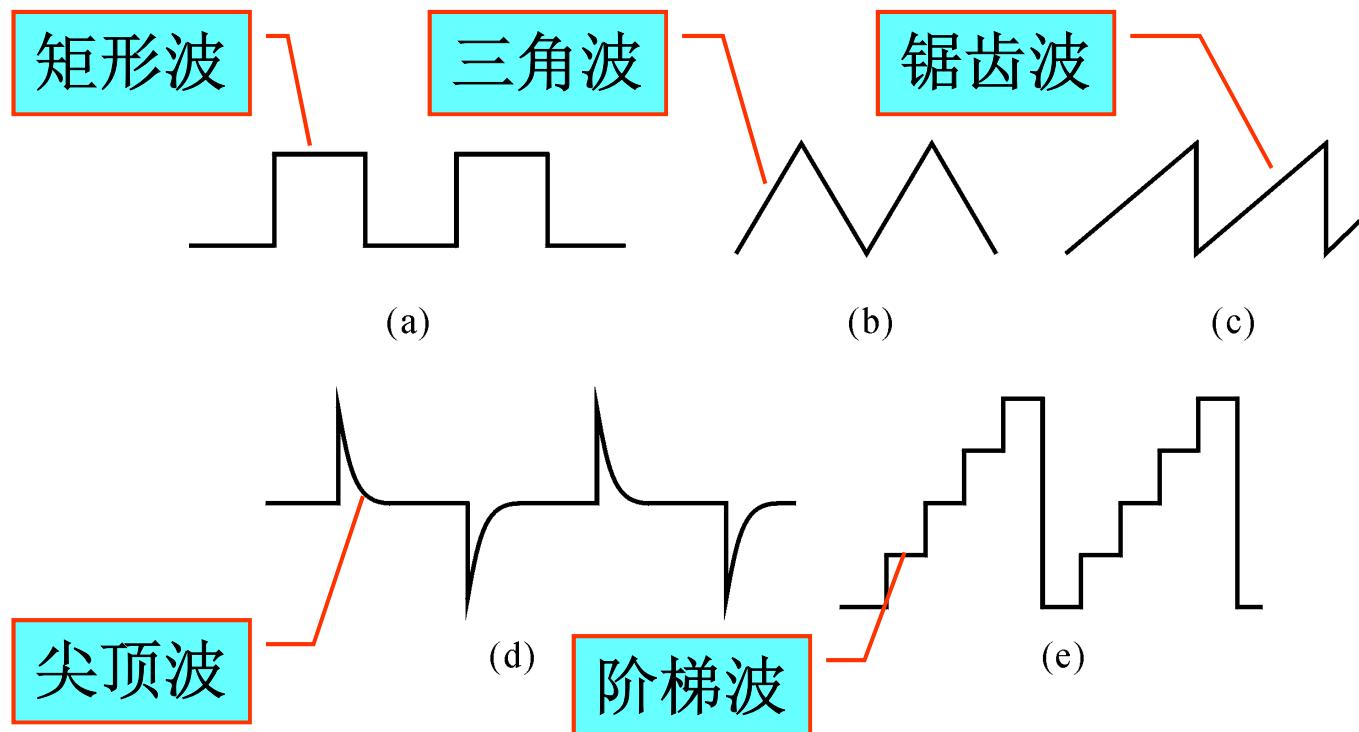
当 $u_I > U_{RH}$ 时， $u_{O1} = -U_{OM}$ ， $D_1$ 导通， $D_2$ 截止； $u_O = U_Z$ 。

当 $u_I < U_{RL}$ 时， $u_{O2} = U_{OM}$ ， $D_2$ 导通， $D_1$ 截止； $u_O = U_Z$ 。

当 $U_{RL} < u_I < U_{RH}$ 时， $u_{O1} = u_{O2} = -U_{OM}$ ， $D_1$ 、 $D_2$ 均截止； $u_O = 0$ 。

## 7.3 非正弦波发生电路

### 几种常见的非正弦波



矩形波发生电路是其它非正弦波发生电路的**基础**，  
可通过**波形变换**得到其它波形。

### 7.3.1 矩形波发生电路

#### 1. 基本组成部分

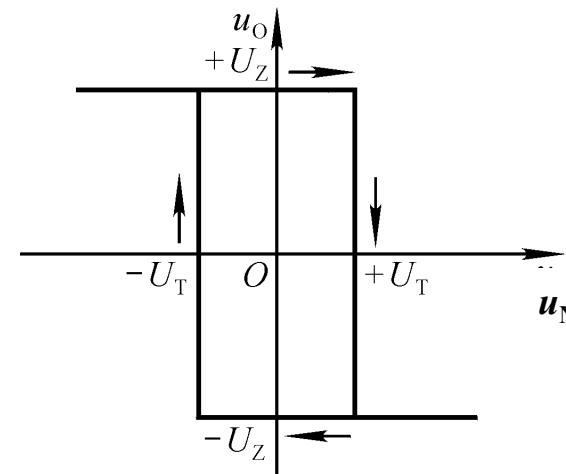
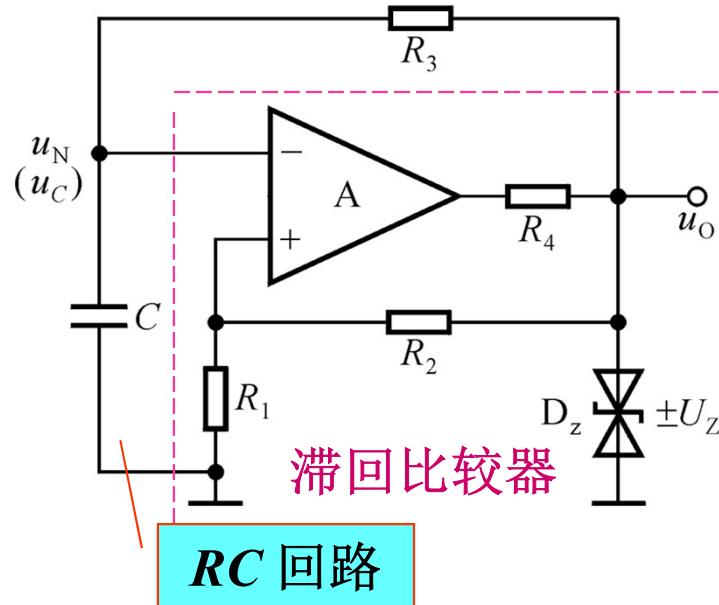
(1) 电压比较器：矩形波电压只有高电平和低电平两种状态，因而采用电压比较器。

(2) 反馈网络：为了产生自激振荡，在两种状态之间自动转换，应引入反馈。

(3) 延迟环节：为了产生周期性变化，使得两个状态均维持一定的时间，应采用延迟环节。由它决定振荡频率。

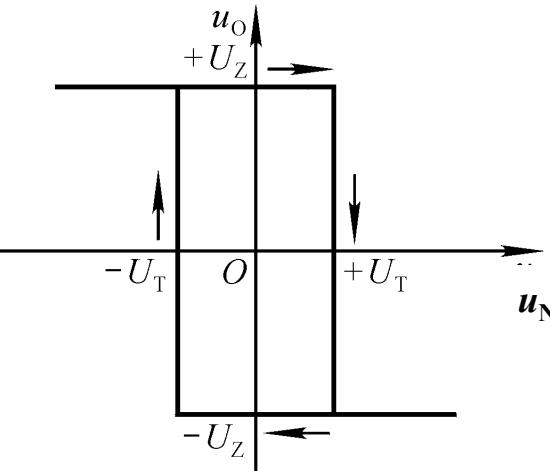
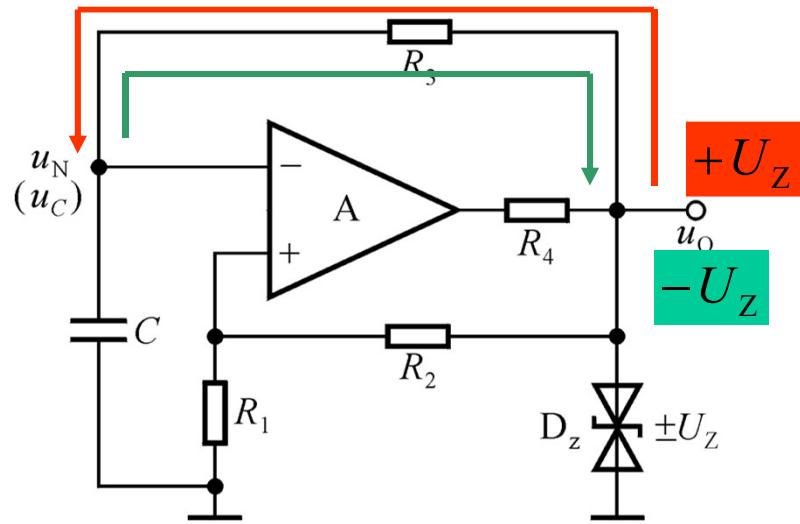
## 2. 电路组成

由反相输入的滞回比较器和RC电路组成，其中RC电路既作为延迟环节，又作为反馈网络。



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

### 3. 工作原理

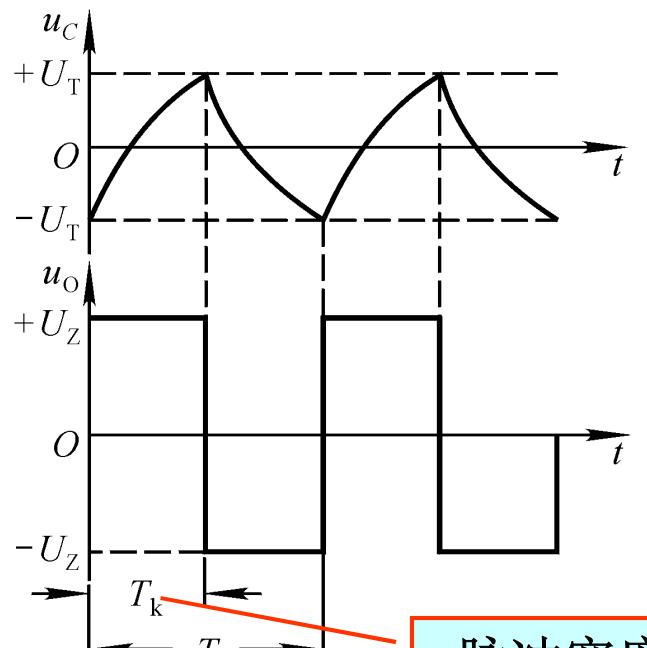
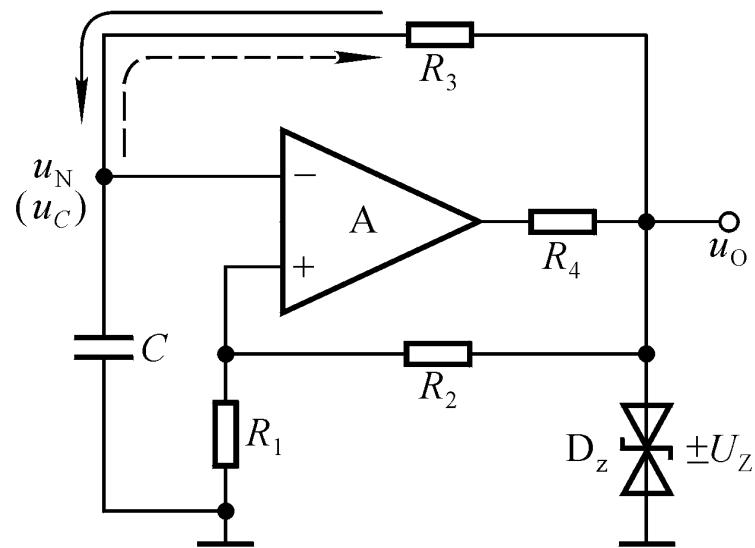


第一状态:  $u_O = +U_z, u_P = +U_T$

电容正向充电,  $t \uparrow \rightarrow u_N \uparrow$ , 当  $u_N = +U_T$  时, 再增大,  $u_O$  从  $+U_z$  跃变为  $-U_z$ ,  $u_P = -U_T$ , 电路进入第二状态;

电容反向充电(即放电),  $t \uparrow \rightarrow u_N \downarrow$ , 当  $u_N = -U_T$  时, 再减小,  $u_O$  从  $-U_z$  跃变为  $+U_z$ ,  $u_P = +U_T$ , 电路返回第一状态。

## 4. 波形分析及主要参数



利用三要素法，可求出振荡周期：

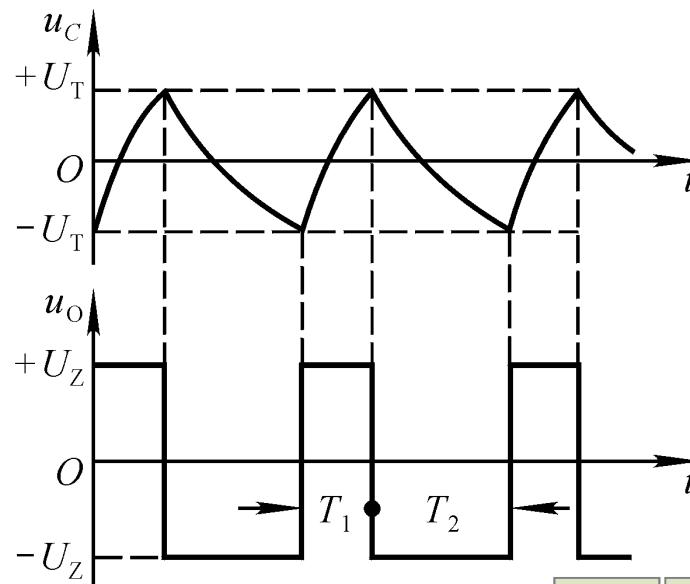
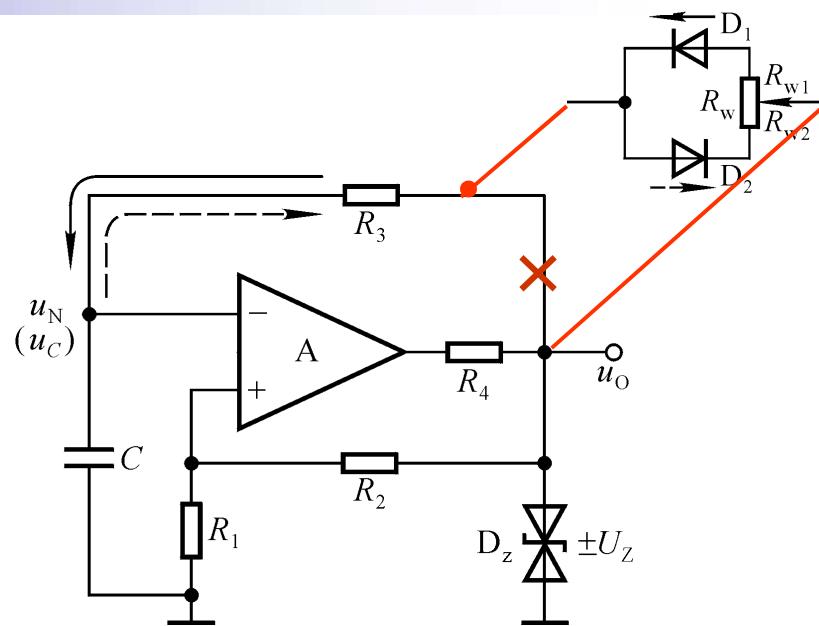
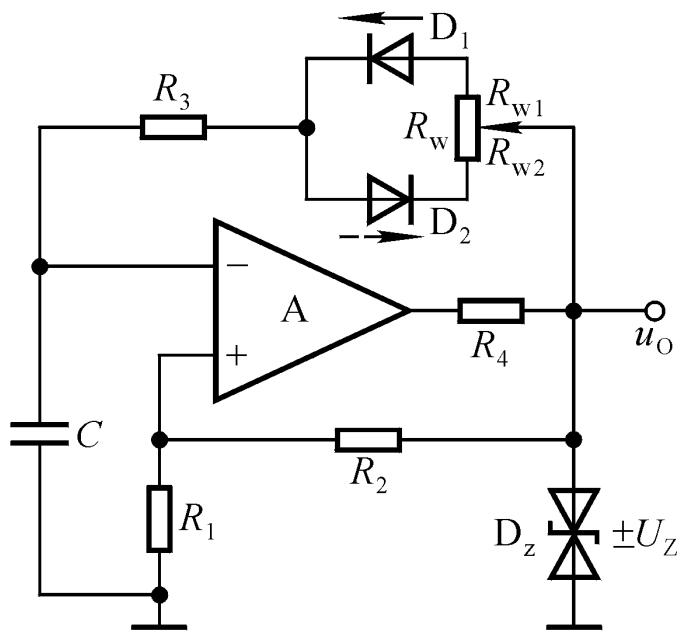
$$T = 2R_3C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

$$\text{占空比} q = \frac{T_k}{T} = 0.5$$

## 7.3 非正弦波发生电路

### 5. 占空比可调电路

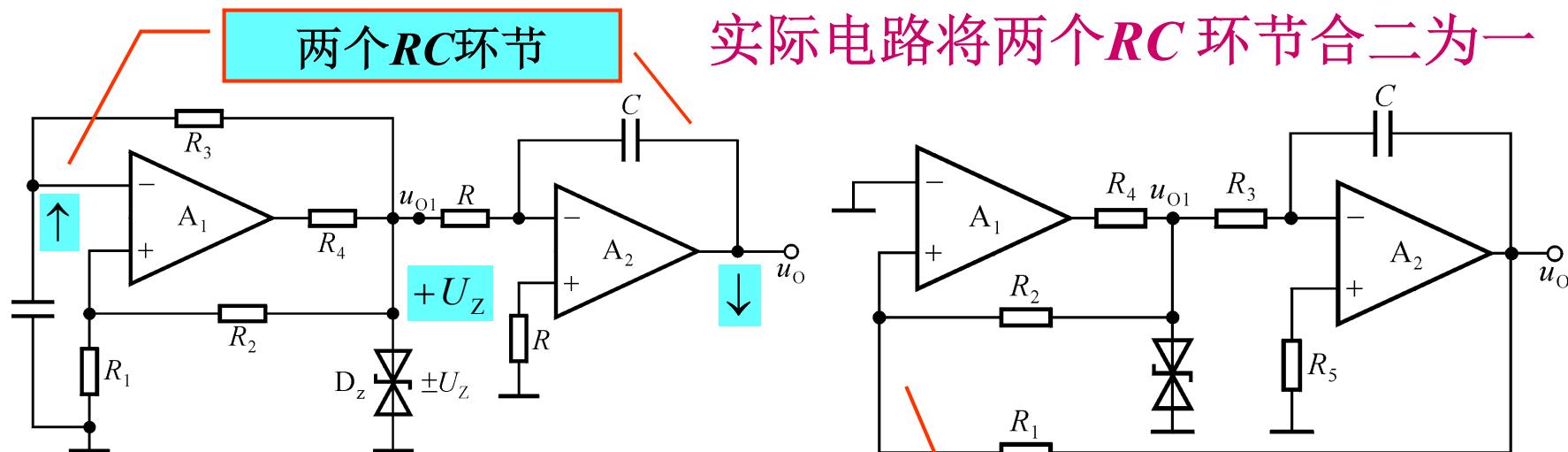
正向充电和反向充电时间常数可调，占空比就可调。



## 7.3.2 三角波发生电路

### 1. 电路组成

用积分运算电路可将方波变为三角波。



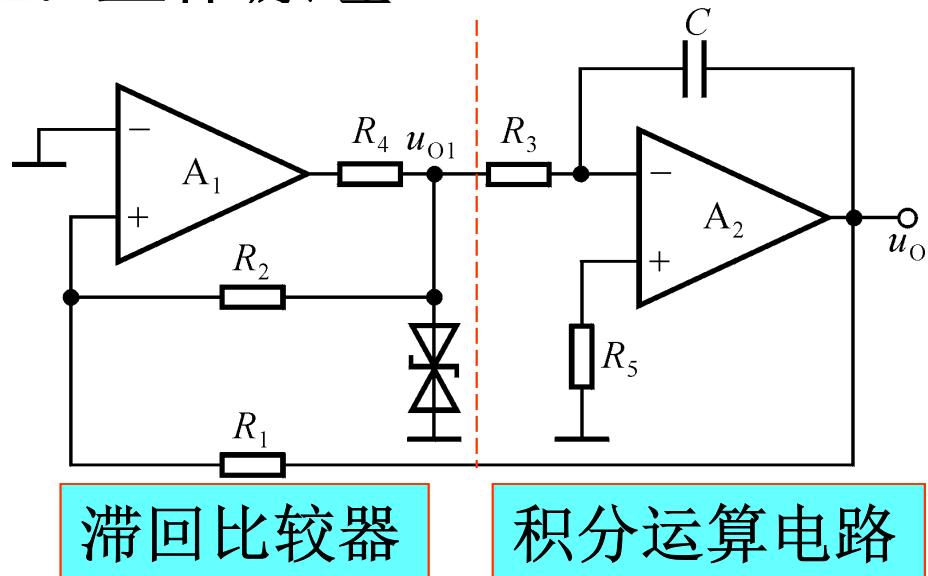
$u_o$ 要取代前面电路的 $u_c$ , 必须改变输入端。

为什么采用同相输入的滞回比较器?

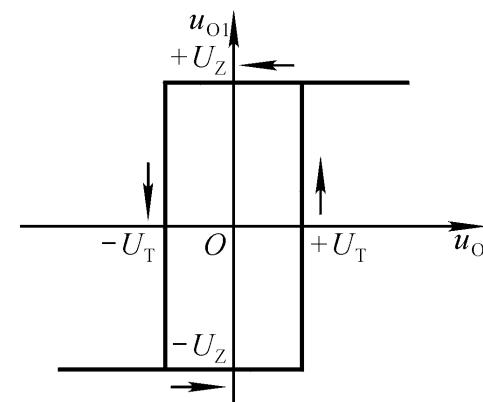
集成运放应用电路的分析方法:

化整为零(分块), 分析功能(每块),  
统观整体, 性能估算

## 2. 工作原理



$$u_O = -\frac{1}{R_3 C} \cdot u_{O1}(t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$



求滞回比较器的电压传输特性：三要素

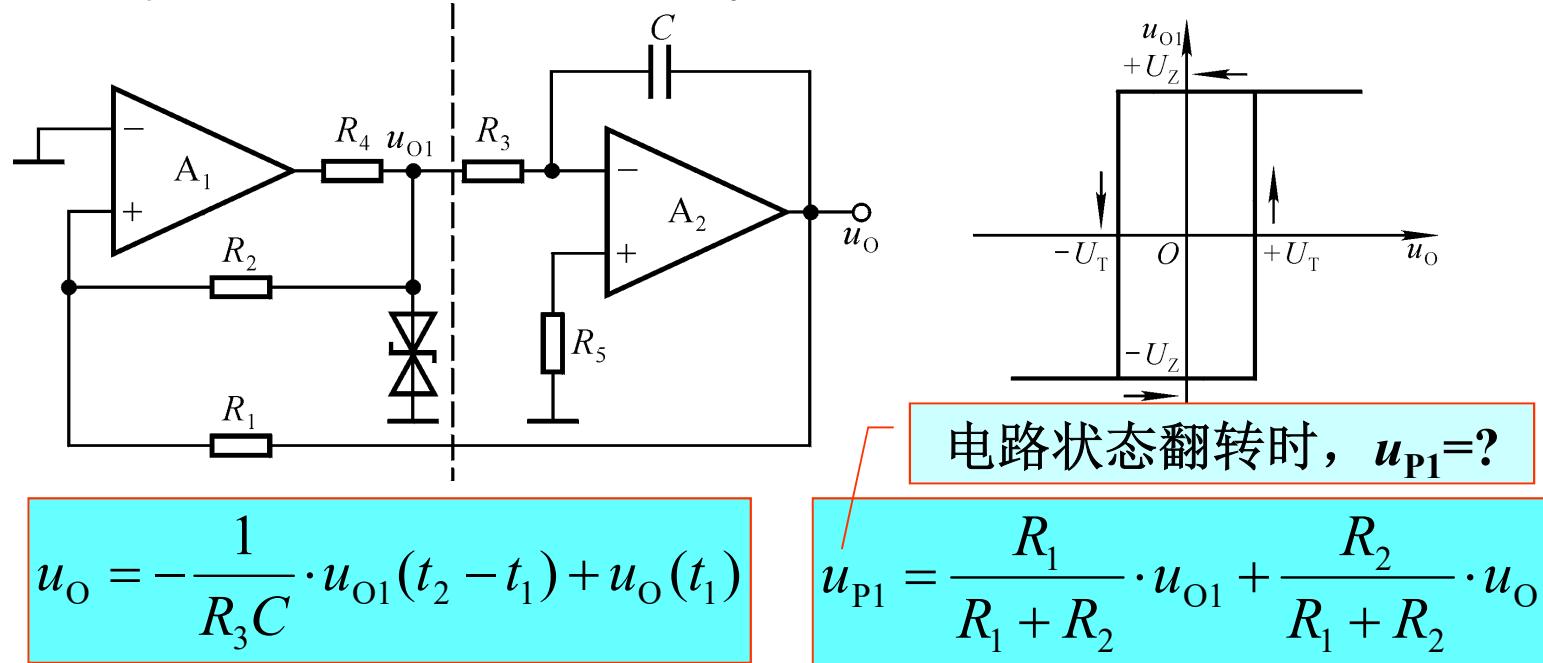
$U_{OH}$ 、 $U_{OL}$ ， $U_T$ ， $u_I$ 过 $U_T$ 时曲线的跃变方向。

$$u_{P1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{O1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_O$$

令 $u_{P1} = u_{N1} = 0$ ，将 $u_{O1} = \pm U_Z$ 代入，求出

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

## 三角波发生电路的振荡原理

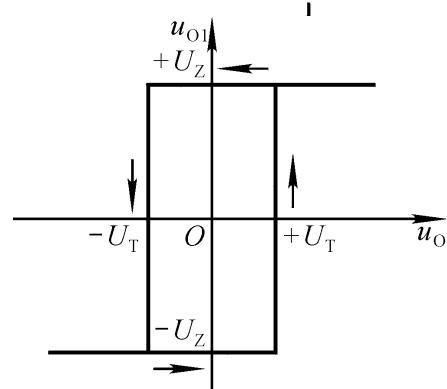
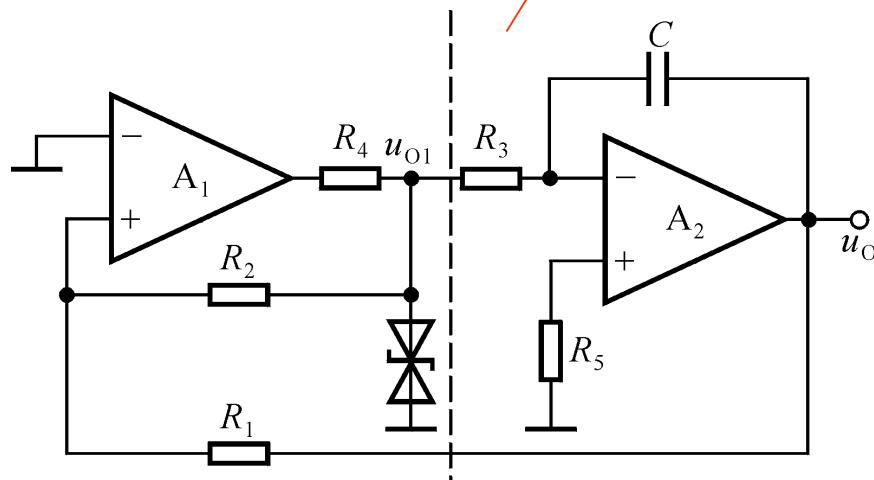


合闸通电，通常  $C$  上电压为 0。设  $u_{O1} \uparrow \rightarrow u_{P1} \uparrow \rightarrow u_{O1} \uparrow \uparrow$ ，直至  $u_{O1} = U_Z$ （第一暂态）；积分电路反向积分， $t \uparrow \rightarrow u_O \downarrow$ ，一旦  $u_O$  过  $-U_T$ ， $u_{O1}$  从  $+U_Z$  跃变为  $-U_Z$ （第二暂态）。

积分电路正向积分， $t \uparrow \rightarrow u_O \uparrow$ ，一旦  $u_O$  过  $+U_T$ ， $u_{O1}$  从  $-U_Z$  跃变为  $+U_Z$ ，返回第一暂态。重复上述过程，产生周期性的变化，即振荡。

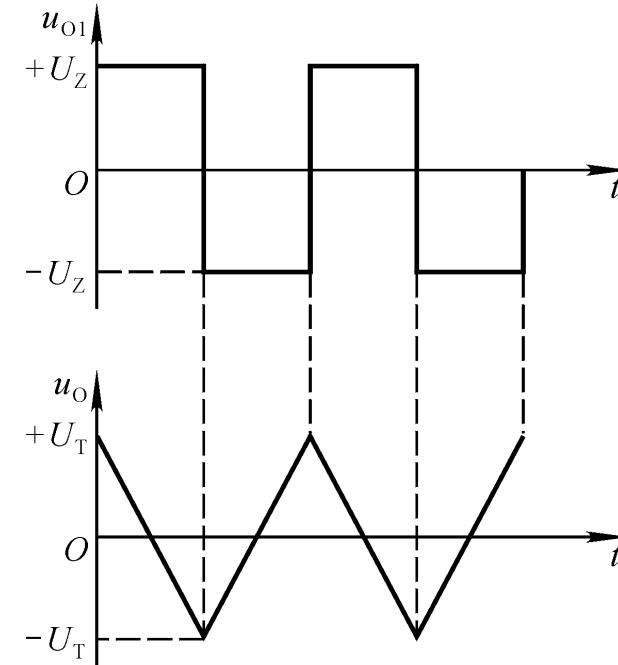
## 3. 波形分析

为什么为三角波？怎样获得锯齿波？



$$+U_T = \frac{1}{R_3 C} \cdot U_Z \cdot \frac{T}{2} + (-U_T)$$

$$T = \frac{4R_1 R_3 C}{R_2}$$

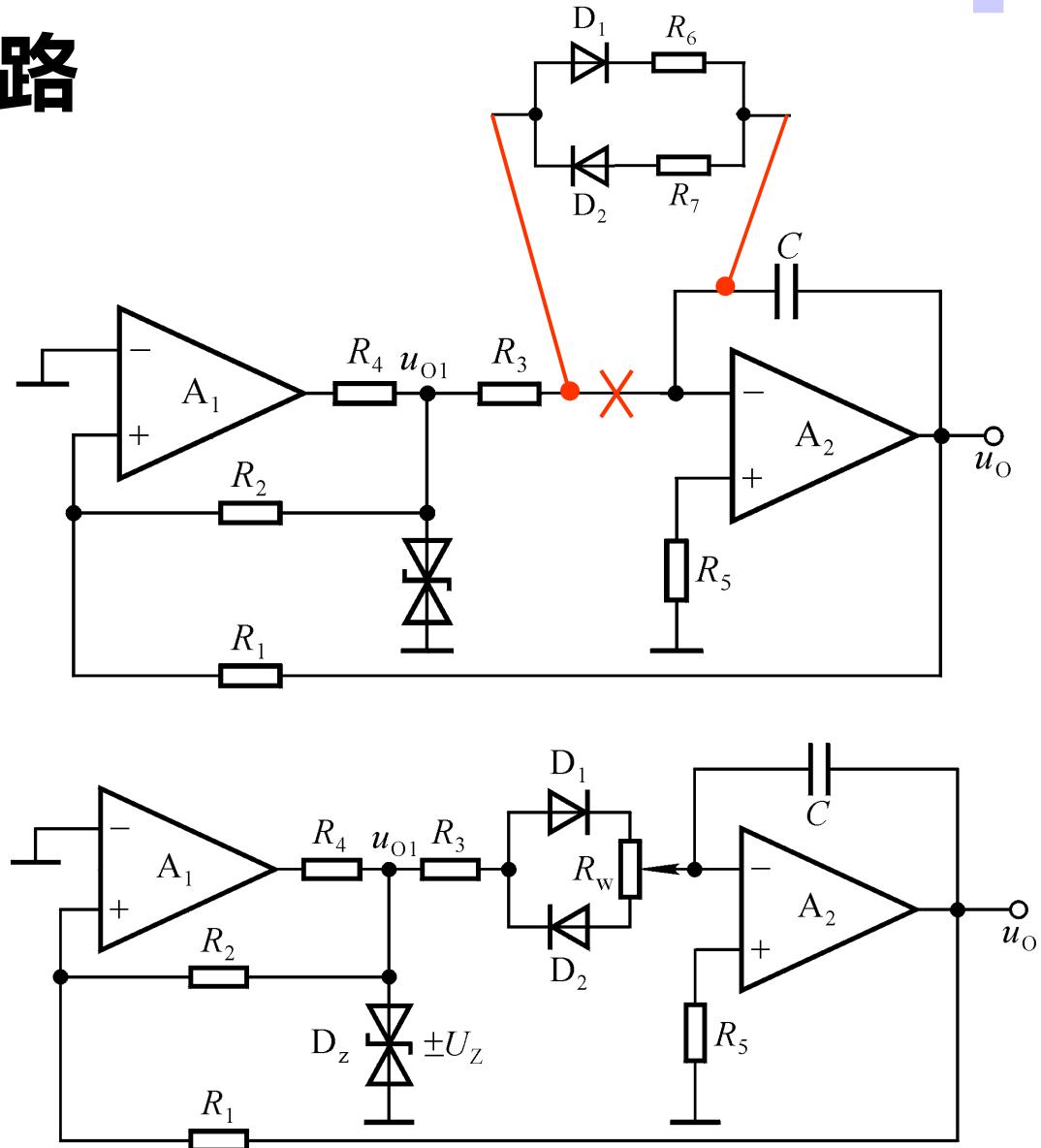
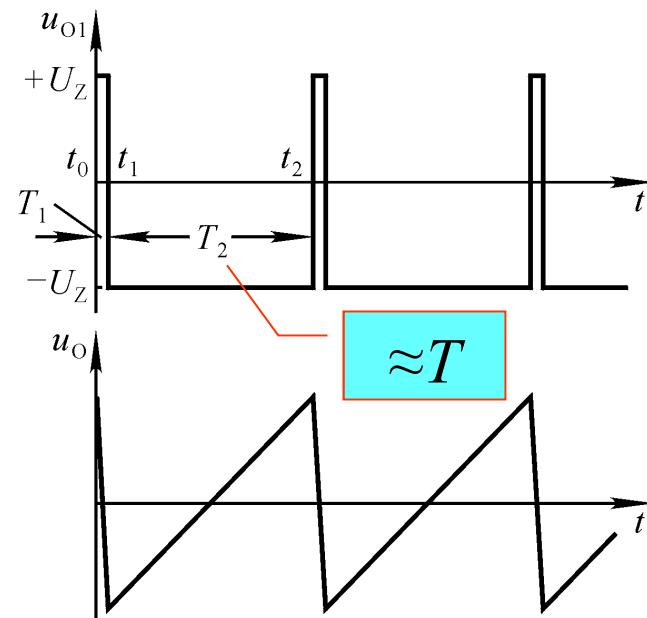


如何调整三角波的幅值和频率？

“理性地调试”：哪些参数与幅值有关？哪些参数与频率有关？先调哪个参数？

### 7.3.3 锯齿波发生电路

1.  $R_3$ 的阻值应远小于 $R_W$
2.  $R_W$ 的滑动端移到最上端时的波形如下

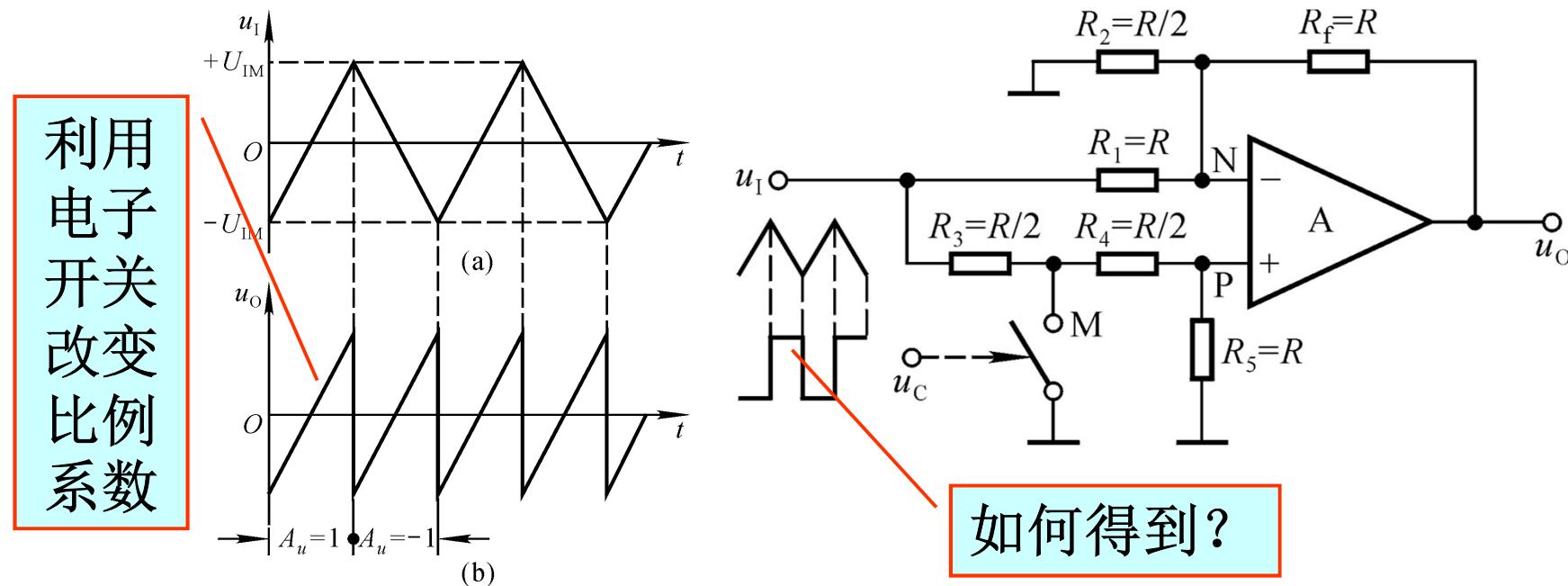


## 7.3.4 波形变换电路

### 1. 利用基本电路实现波形变换

利用电压比较器将正弦波变为方波，利用积分电路将方波变为三角波，利用微分电路将三角波变为方波，等等。

### 2. 三角波变锯齿波：二倍频

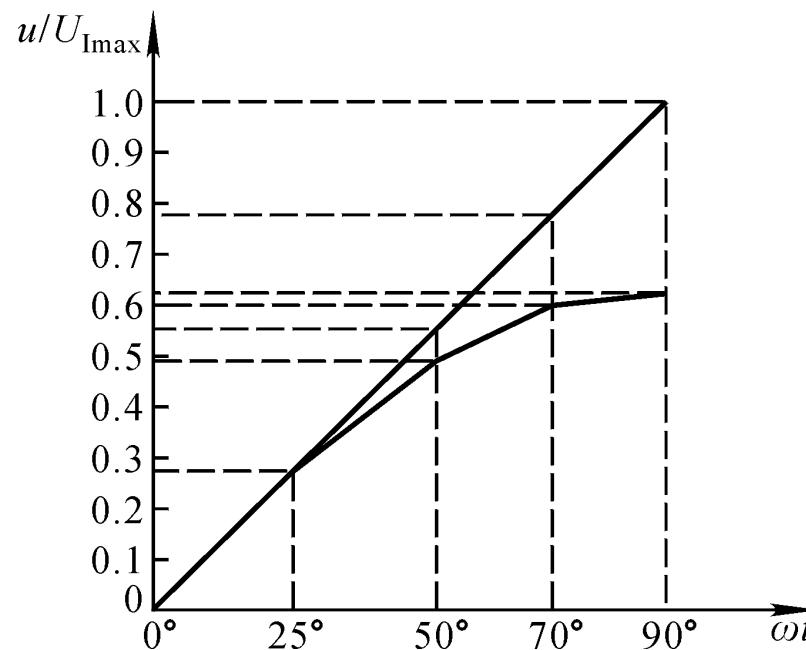


### 3. 三角波变正弦波

三角波用傅立叶级数展开，除基波外，还含有3次、5次.....谐波。

若三角波电压为固定频率或频率变化范围很小，则可用低通滤波或带通滤波的方法实现；

若三角波电压的频率变化较大，则可用折线法实现。



# 第 7 章

结 束