

# 第七章 波形的发生和信号的转换

§ 7.1 电压比较器

§ 7.2 非正弦波发生电路

§ 7.3 信号的转换

§ 7.4 正弦波振荡电路





# § 7.1 电压比较器

- 一、概述
- 二、单限比较器
- 三、滞回比较器
- 四、窗口比较器
- 五、集成电压比较器



# 一、概述

## 1. 电压比较器的功能：比较电压的大小。

广泛用于各种报警电路。

输入电压是模拟信号；输出电压表示比较的结果，只有高电平和低电平两种情况，为二值信号。

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) 输入电压过阈值电压时输出电压跃变的方向

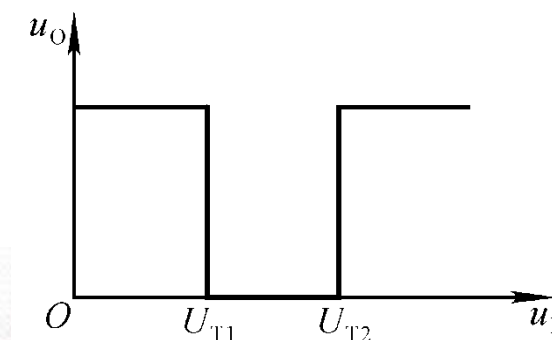
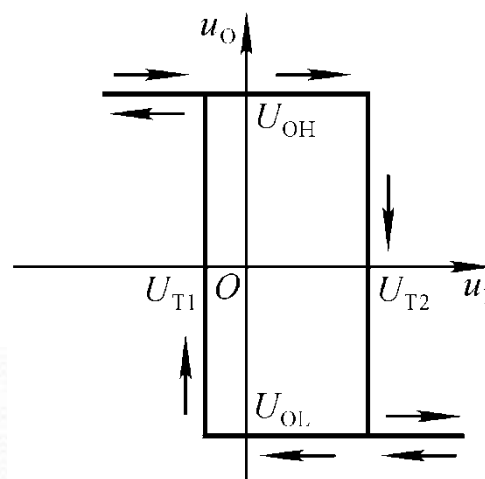
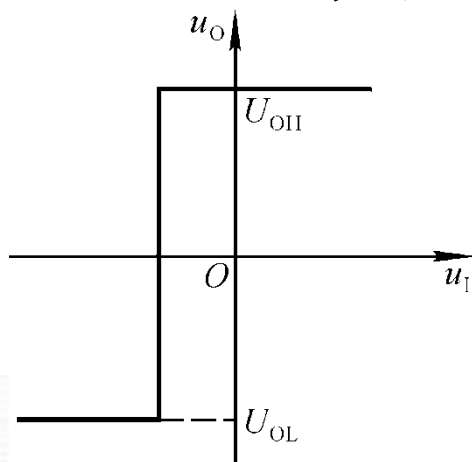
### 3. 几种常用的电压比较器

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： $\Delta U = |U_{T1} - U_{T2}|$



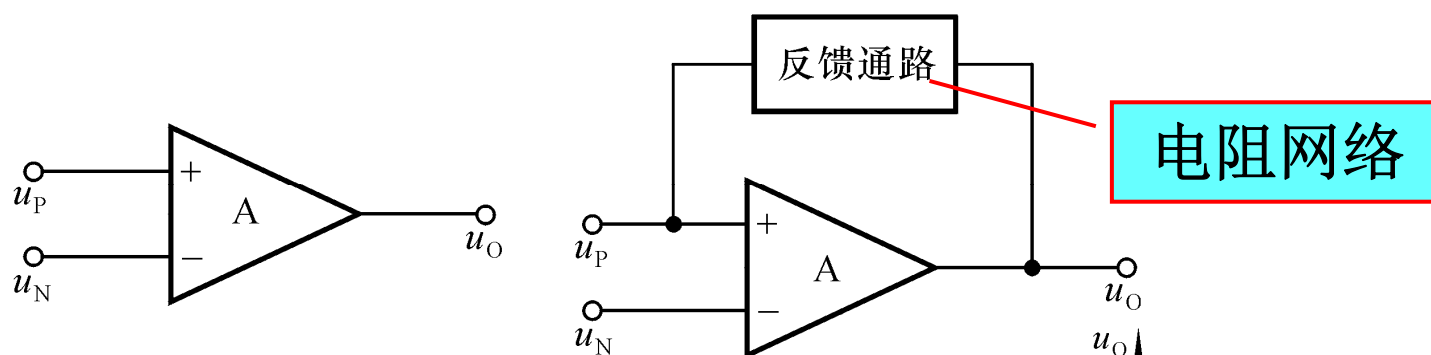
3) 窗口比较器：

有两个阈值电压，输入电压单调变化时输出电压跃变两次。



## 4. 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

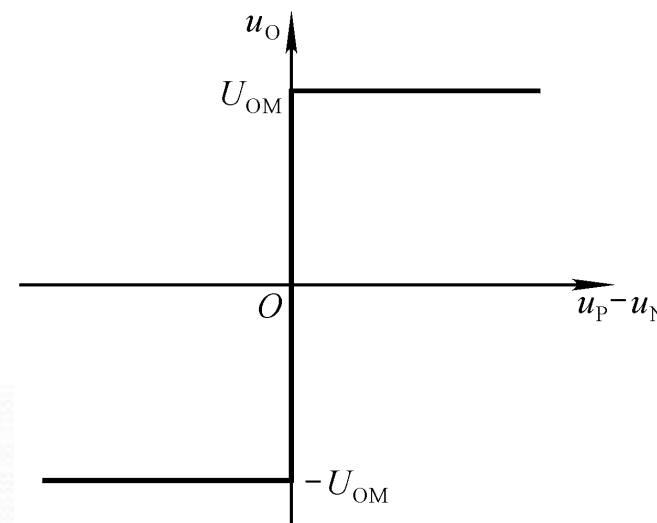


理想运放在非线性区的特点：

1) 净输入电流为0

2)  $u_P > u_N$  时,  $u_O = +U_{OM}$

$u_P < u_N$  时,  $u_O = -U_{OM}$



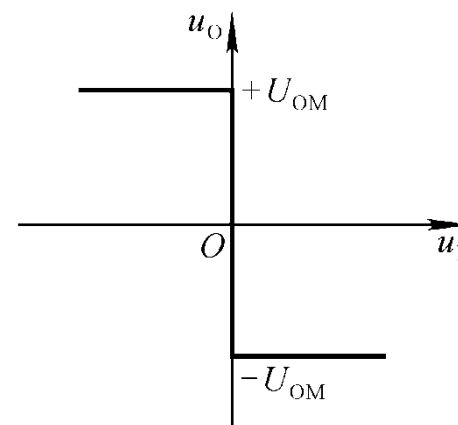
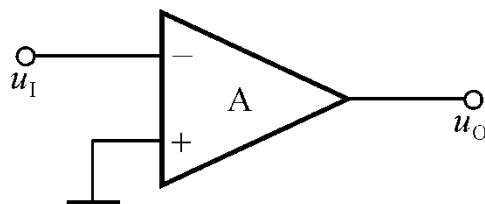
教学要求：1) 电路的识别和选用；2) 电压传输特性的分析





## 二、单限比较器

### 1. 过零比较器

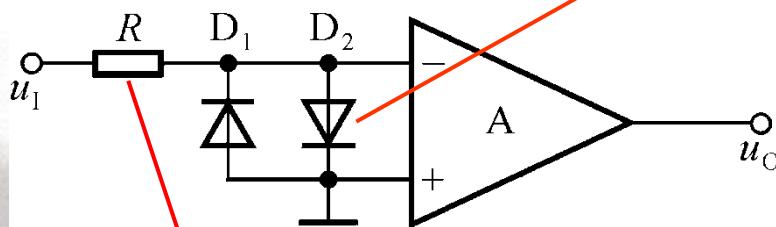


1)  $U_T = 0$

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

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

集成运放的净输入电压等于输入电压，为保护集成运放的输入级，需加输入端限幅电路。

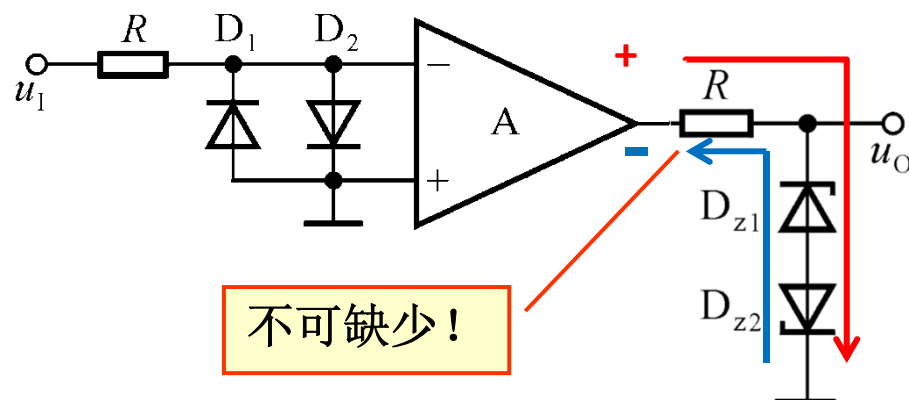


二极管限幅电路使净输入电压最大值为  $\pm U_D$

必要吗?

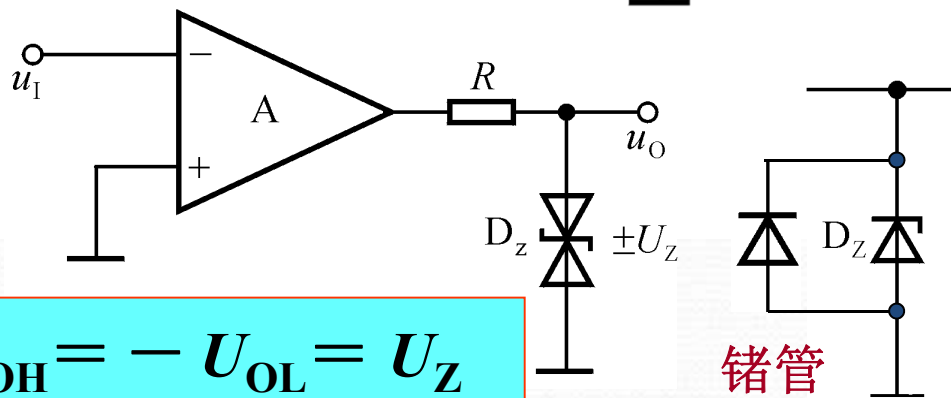
## 输出限幅电路

为适应负载对电压幅值的要求，输出端加限幅电路。



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

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



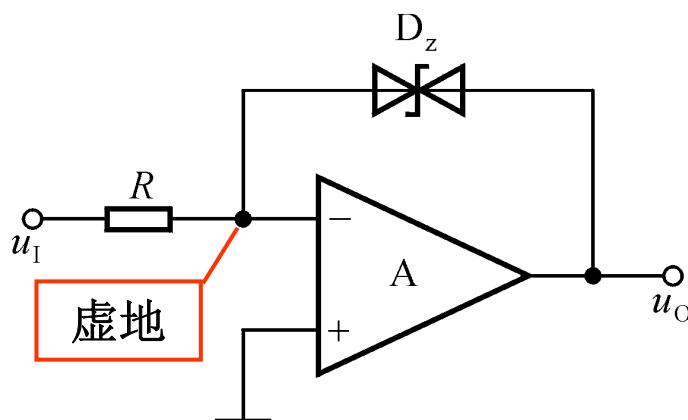
$$U_{OH} = -U_{OL} = U_Z$$

$$U_{OH} = U_Z$$

$$U_{OL} = -U_D$$

如何使  $U_{OL}$  更接近 0?

## 输出限幅电路



$$u_O = \pm U_Z$$

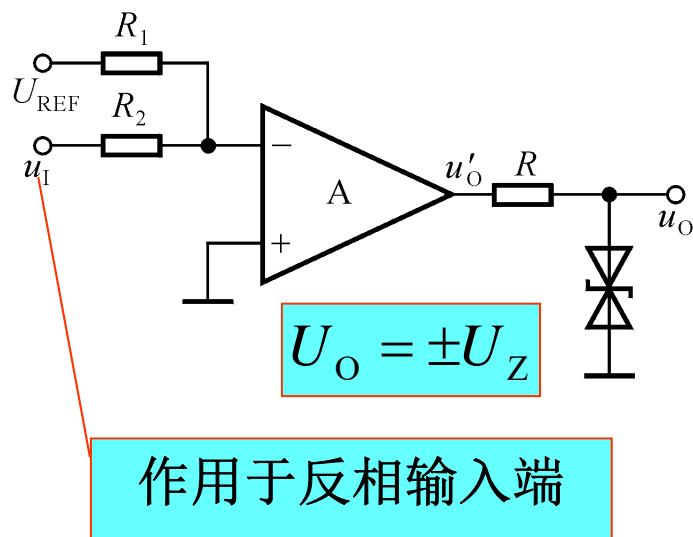
- (1) 保护输入端
- (2) 加速集成运放状态的转换

### 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。



## 2. 一般单限比较器

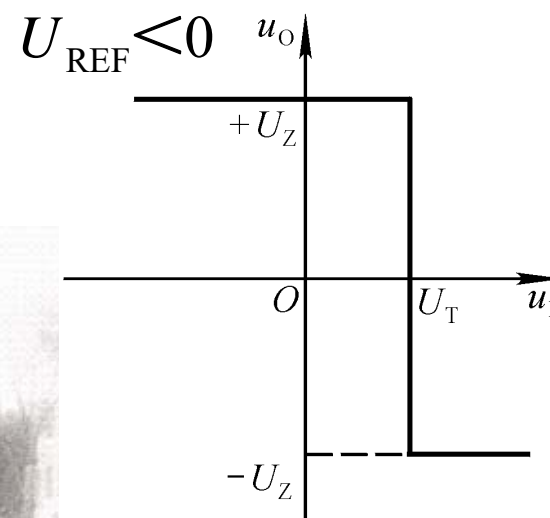


$$u_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_I$$

令  $u_N = u_P = 0$ , 得

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

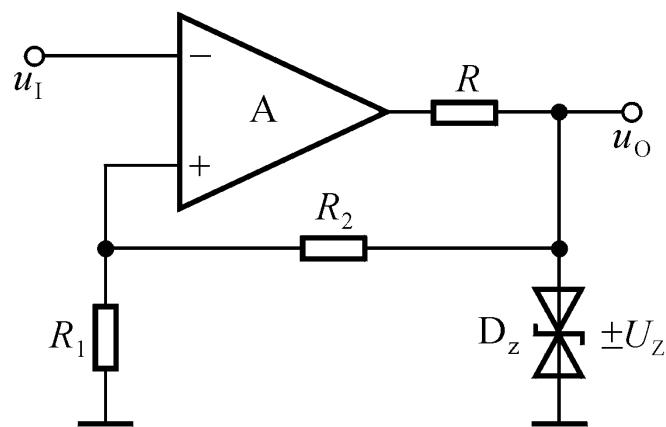
- 1) 若要  $U_T < 0$ , 则应如何修改电路?
- 2) 若要改变曲线跃变方向, 则应如何修改电路?
- 3) 若要改变  $U_{OL}$ 、 $U_{OH}$  呢?





### 三、 滞回比较器

#### 1. 阈值电压



$$U_{OL} = -U_Z$$

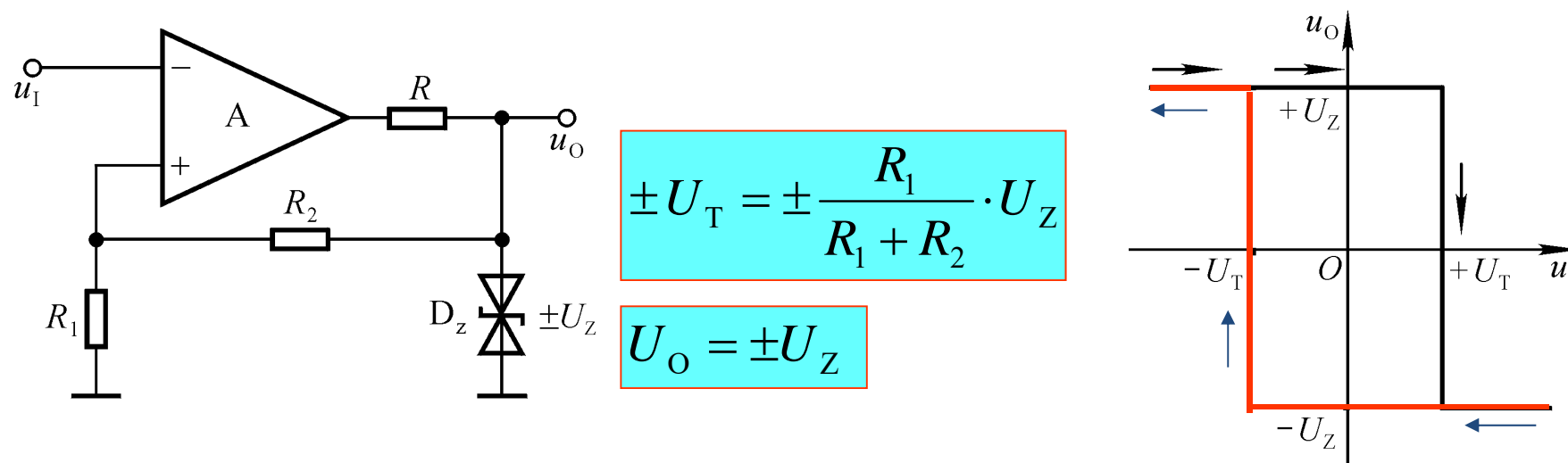
$$U_{OH} = +U_Z$$

$$u_N = u_I$$

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

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

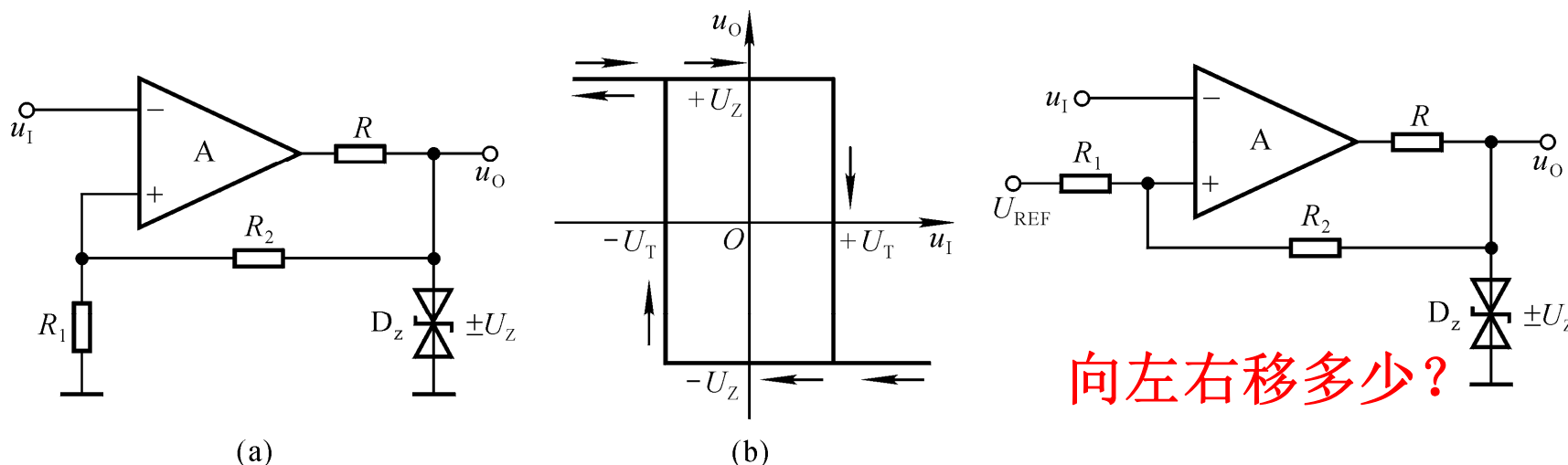
## 2. 工作原理及电压传输特性



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  $-U_Z$ 。

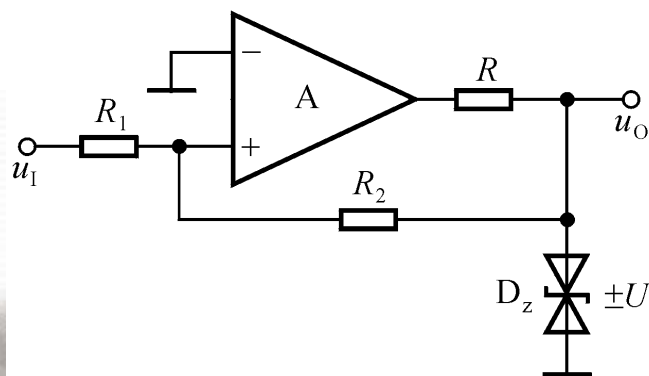
设  $u_I > +U_T$ , 则  $u_N > u_P$ ,  $u_O = -U_Z$ 。此时  $u_P = -U_T$ , 减小  $u_I$ , 直至  $-U_T$ , 再减小,  $u_O$  才从  $-U_Z$  跃变为  $+U_Z$ 。

## 讨论一：如何改变滞回比较器的电压传输特性



向左右移多少？

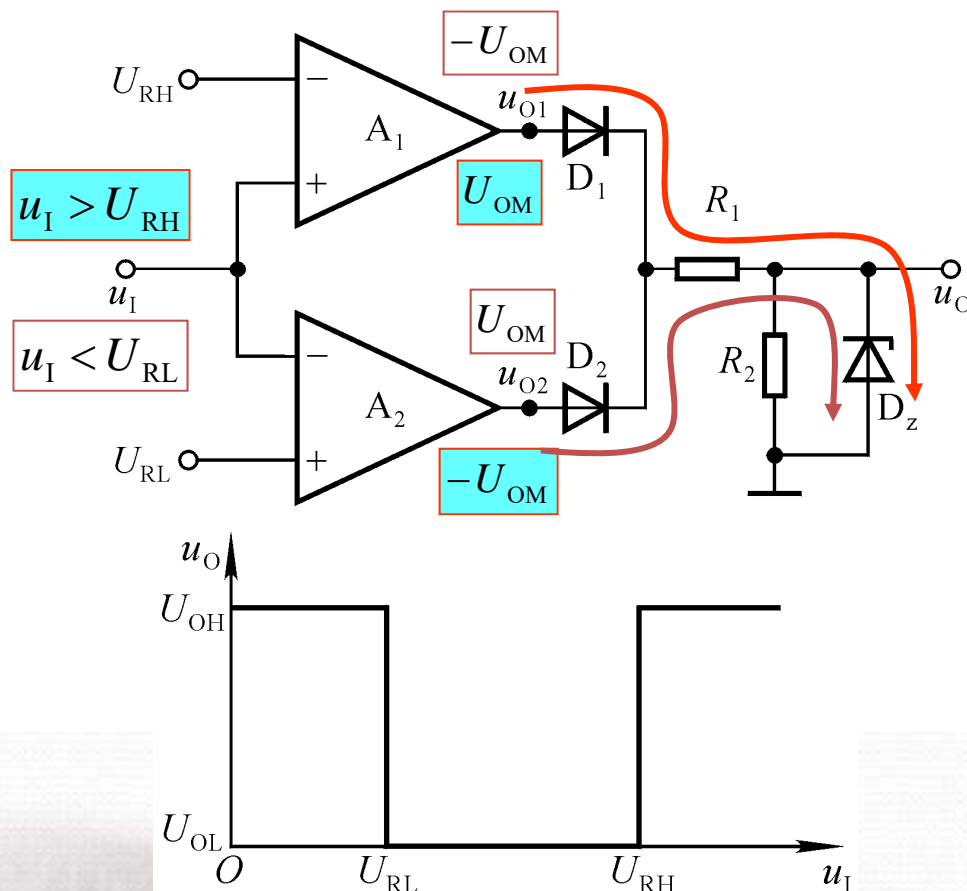
- 1) 若要电压传输特性曲线左右移动，则应如何修改电路？
- 2) 若要电压传输特性曲线上下移动，则应如何修改电路？
- 3) 若要改变输入电压过阈值电压时输出电压的跃变方向，则应如何修改电路？



改变输出  
限幅电路



## 四、窗口比较器



当  $u_I > U_{RH}$  时,  $u_{O1} = -u_{O2} = U_{OM}$ ,  $D_1$  导通,  $D_2$  截止;  
 $u_O = U_Z$ 。

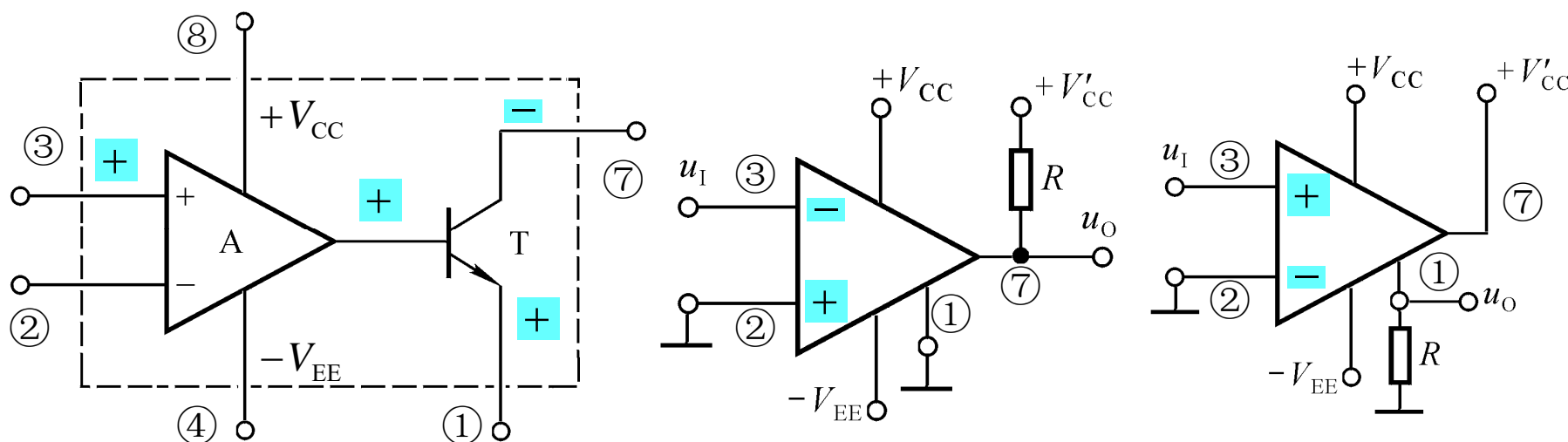
当  $u_I < U_{RL}$  时,  $u_{O2} = -u_{O1} = U_{OM}$ ,  $D_2$  导通,  $D_1$  截止;  
 $u_O = U_Z$ 。

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



## 五、集成比较器

### 某型号集成比较器的等效电路

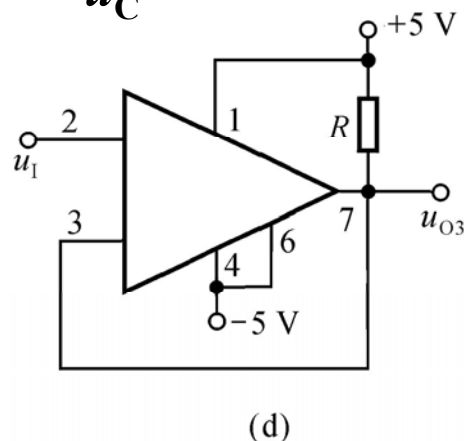
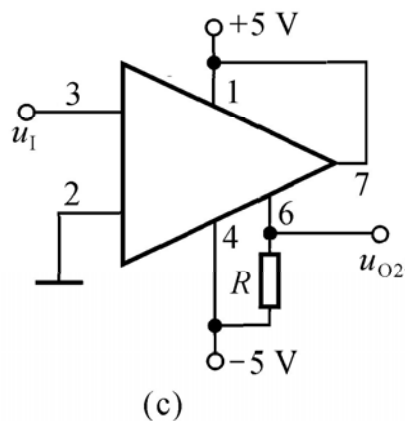
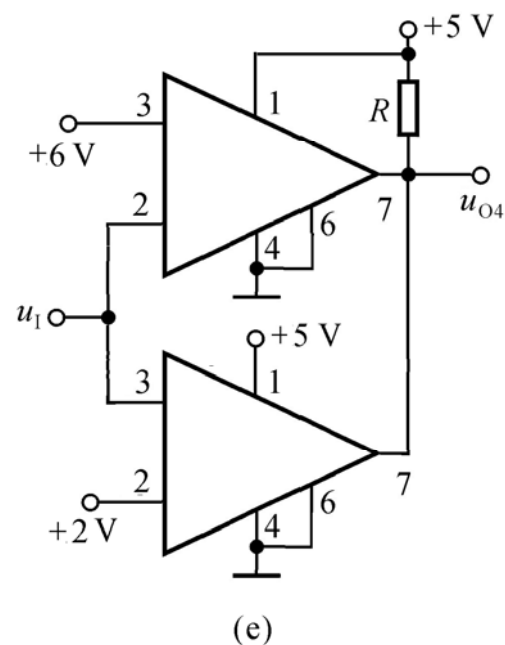
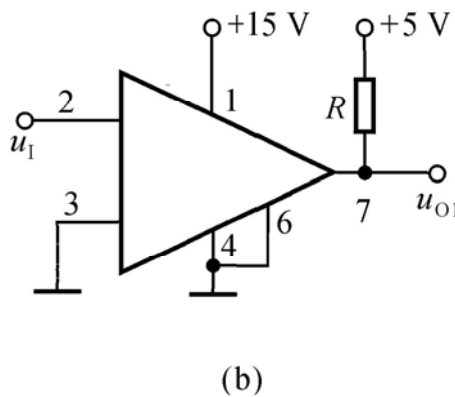
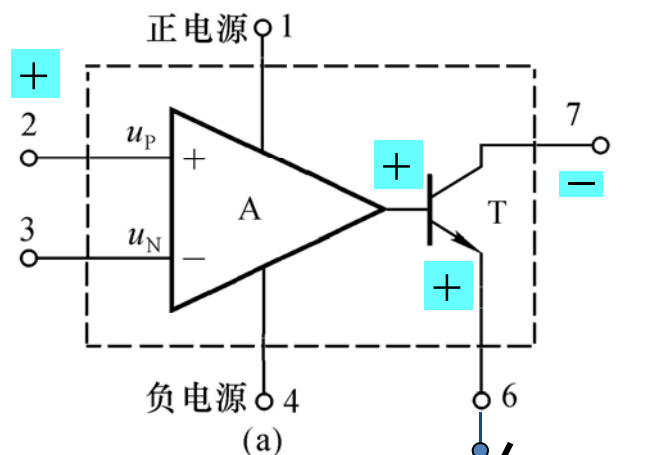


特点:

- 1) 无需限幅电路，根据所需输出高、低电平确定电源电压；
- 2) 可直接驱动集成数字电路；
- 3) 应用灵活，可具有选通端；
- 4) 响应速度快；
- 5) 电源电压升高，工作电流增大，工作速度加快。

## 讨论二：读电路判断其属于哪种类型

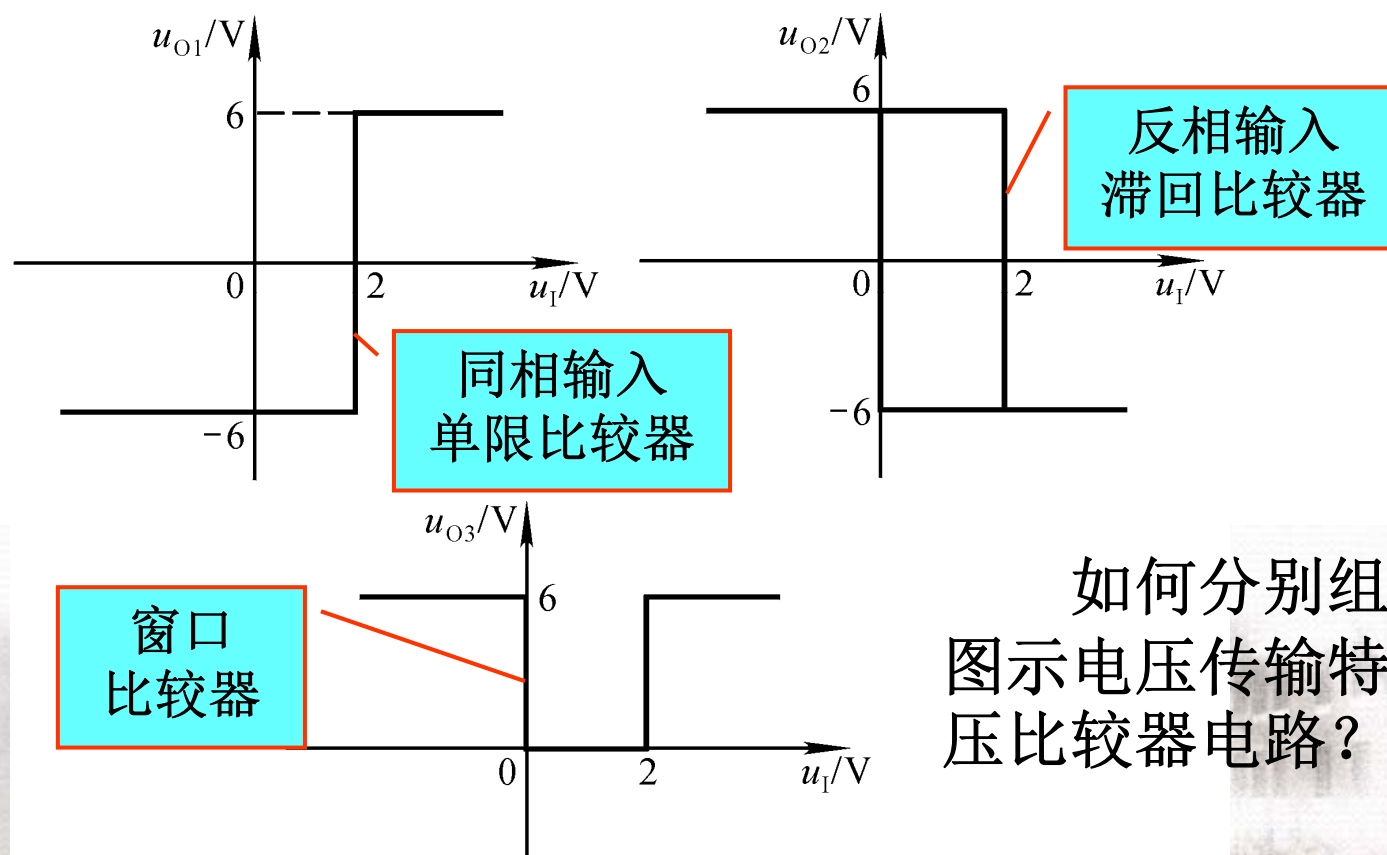
已知某型号集成电压比较器内部等效电路如图（a）所示，试判断各电路属于哪种类型电压比较器，标出2、3的极性，并求解图（b）~（e）各电路的电压传输特性。



若要有选通端，  
则应如何修改？

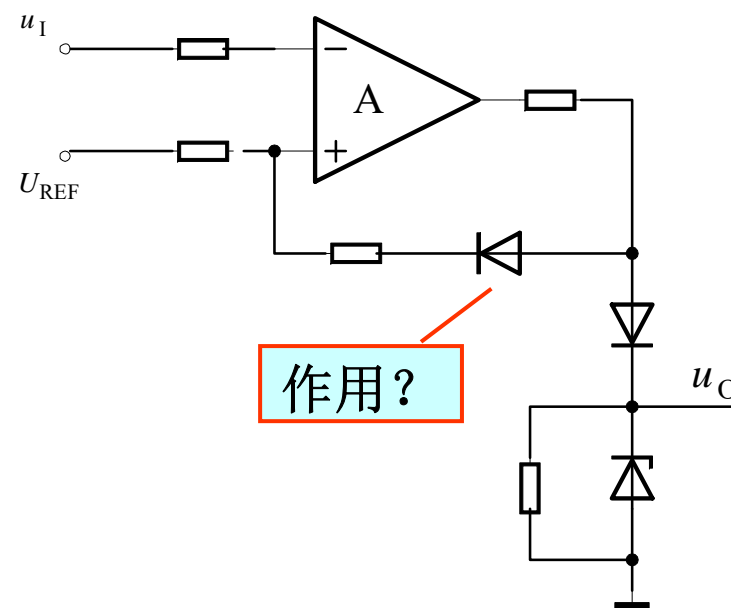
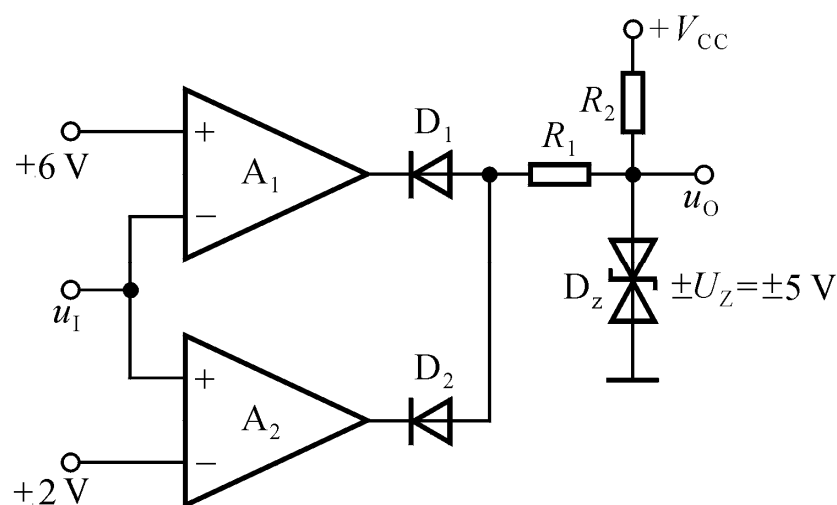
## 讨论三：从电压传输特性识别电路，画波形

已知各电压比较器的电压传输特性如图所示，说出它们各为哪种电压比较器；输入电压为 $5\sin\omega t$  (V)，画出各电路输出电压的波形。



如何分别组成具有图示电压传输特性的电压比较器电路？

## 讨论四：带有二极管电路的分析方法



$$U_T = ? \quad U_{OL} = ? \quad U_{OH} = ?$$

首先应判断二极管的工作状态，它们决定于集成运放的输出电压是高电平还是低电平。

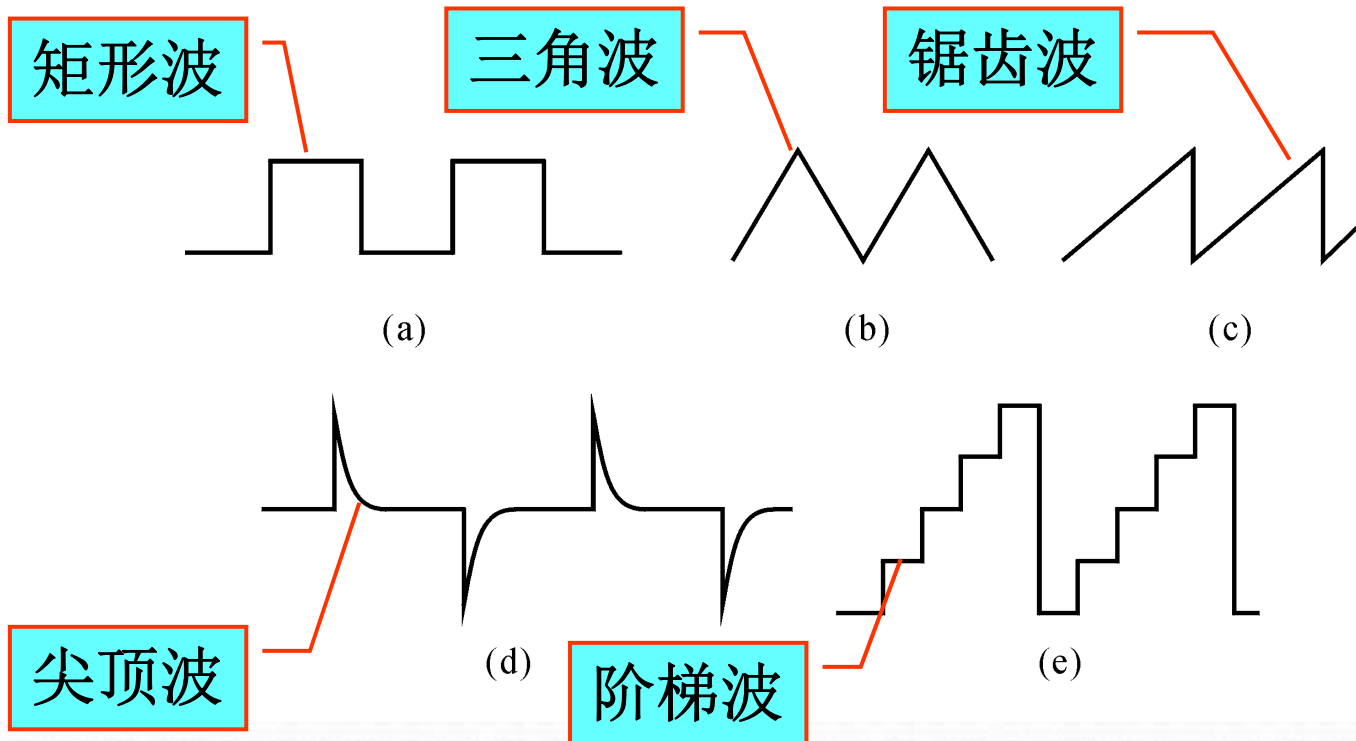
## § 7.2 非正弦波发生电路

- 一、常见的非正弦波
- 二、矩形波发生电路
- 三、三角波发生电路
- 四、锯齿波发生电路
- 五、波形变换电路





# 一、常见的非正弦波



矩形波是基础波形，可通过波形变换得到其它波形。



## 二、矩形波发生电路

输出无稳态，有两个暂态；若输出为高电平时定义为第一暂态，则输出为低电平为第二暂态。

### 1. 基本组成部分

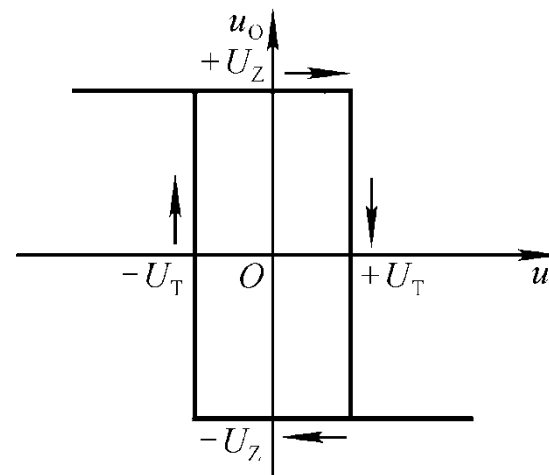
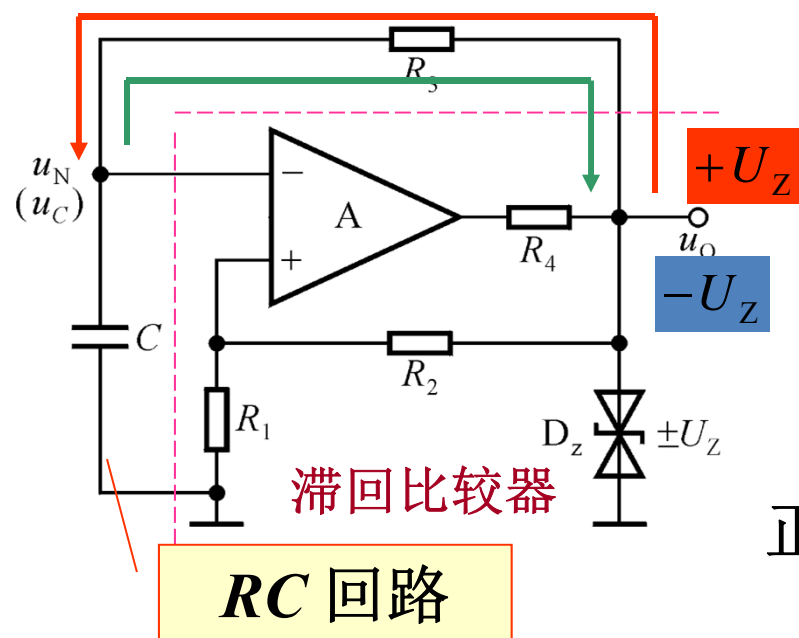
(1) 开关电路：因为输出只有高电平和低电平两种情况，即两个暂态；故要用电压比较器。

(2) 反馈网络：需自控，在输出为某一暂态时孕育翻转成另一暂态的条件，故应引入反馈。

(3) 延迟环节：要使两个暂态均维持一定的时间，故需要采用 $RC$ 环节实现，从而决定振荡频率。



## 2. 电路组成



### 正向充电:

$$u_o \ (+U_Z) \rightarrow R \rightarrow C \rightarrow \text{地}$$

## 反向充电:

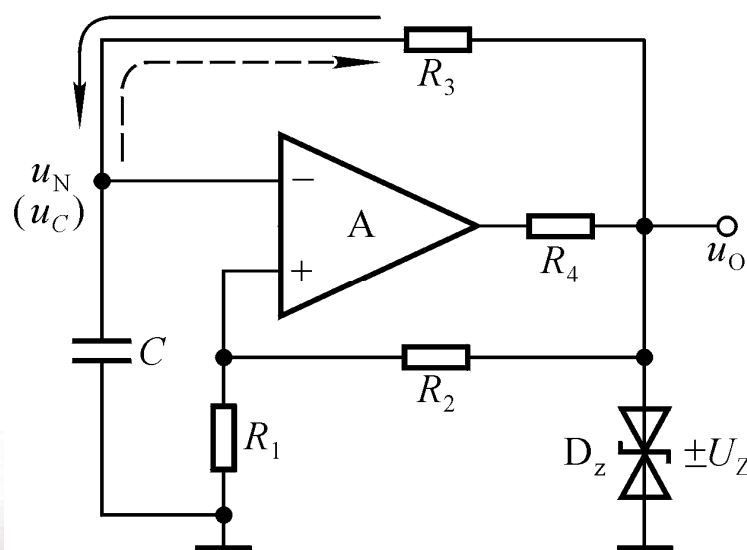
$$\text{地} \rightarrow C \rightarrow R \rightarrow u_0 \quad (-U_Z)$$

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

### 3. 工作原理：分析方法

方法一：设电路已振荡，且在某一暂态，看是否能自动翻转为另一暂态，并能再回到原暂态。

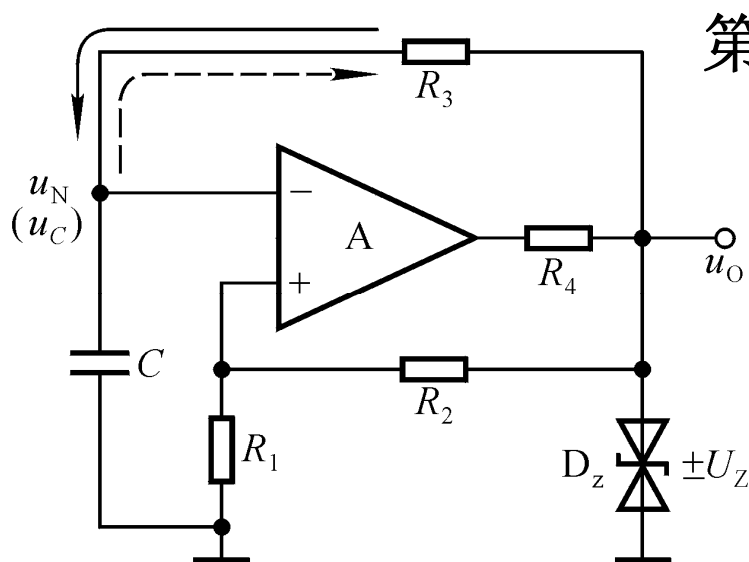
方法二：电路合闸通电，分析电路是否有两个暂态，而无稳态。



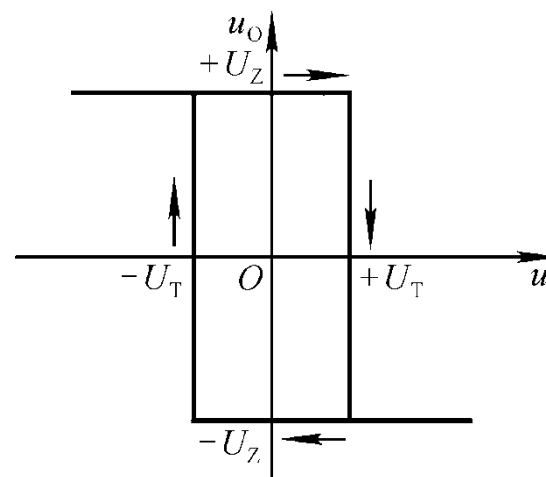
设合闸通电时电容上电压为0， $u_O$ 上升，则产生正反馈过程：

$u_O \uparrow \rightarrow u_P \uparrow \rightarrow u_O \uparrow \uparrow$ ，直至  $u_O = U_Z$ ， $u_P = +U_T$ ，为第一暂态。

### 3. 工作原理：分析过程



第一暂态： $u_O = U_Z$ ,  $u_P = +U_T$ 。

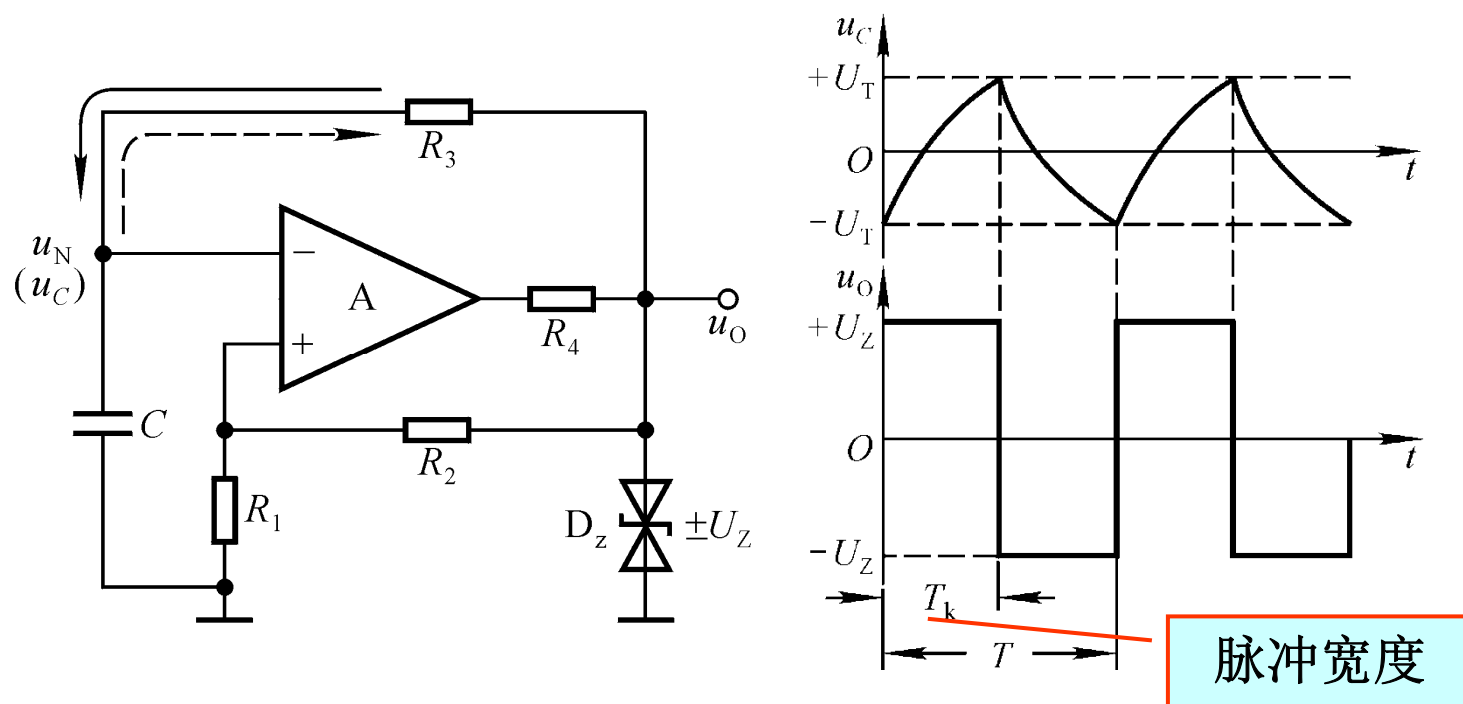


电容正向充电， $t \uparrow \rightarrow u_N \uparrow$ ， $t \rightarrow \infty$ ， $u_N \rightarrow U_Z$ ；但当 $u_N = +U_T$ 时，再增大， $u_O$ 从 $+U_Z$ 跃变为 $-U_Z$ ， $u_P = -U_T$ ，电路进入第二暂态。

电容反向充电， $t \uparrow \rightarrow u_N \downarrow$ ， $t \rightarrow \infty$ ， $u_N \rightarrow -U_Z$ ；但当 $u_N = -U_T$ 时，再减小， $u_O$ 从 $-U_Z$ 跃变为 $+U_Z$ ， $u_P = +U_T$ ，电路返回第一暂态。



## 4. 波形分析



根据三要素，即起始值、终了值、时间常数、求出

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

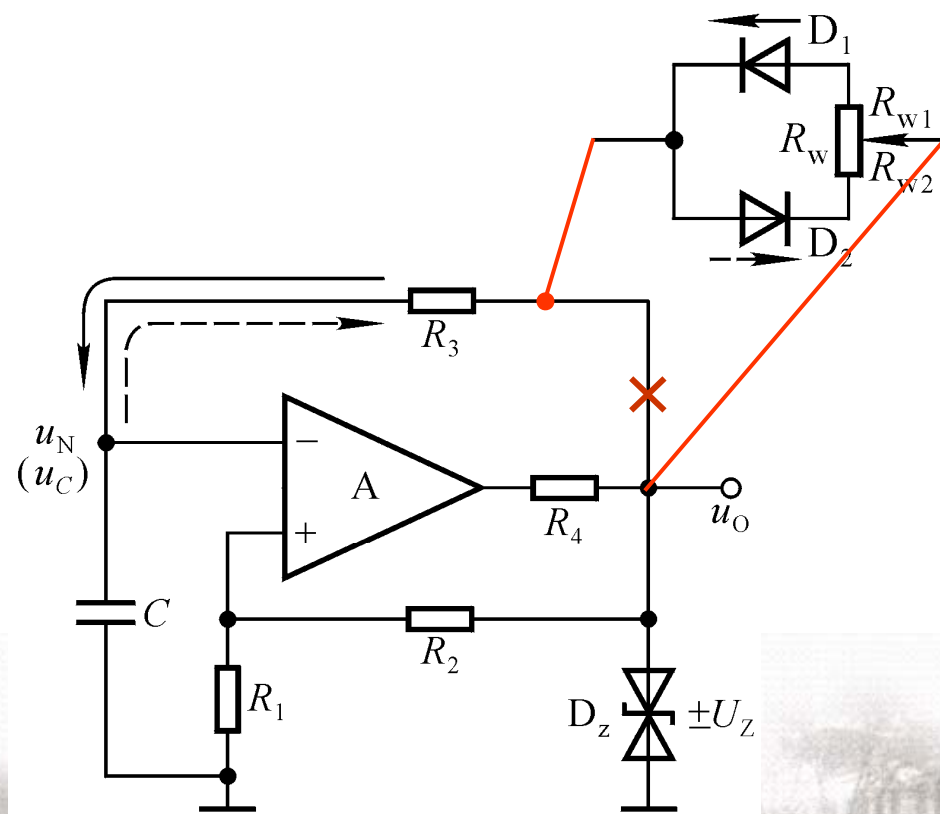
占空比  $q = \frac{T_k}{T} = 50\%$

如何改变占空比？



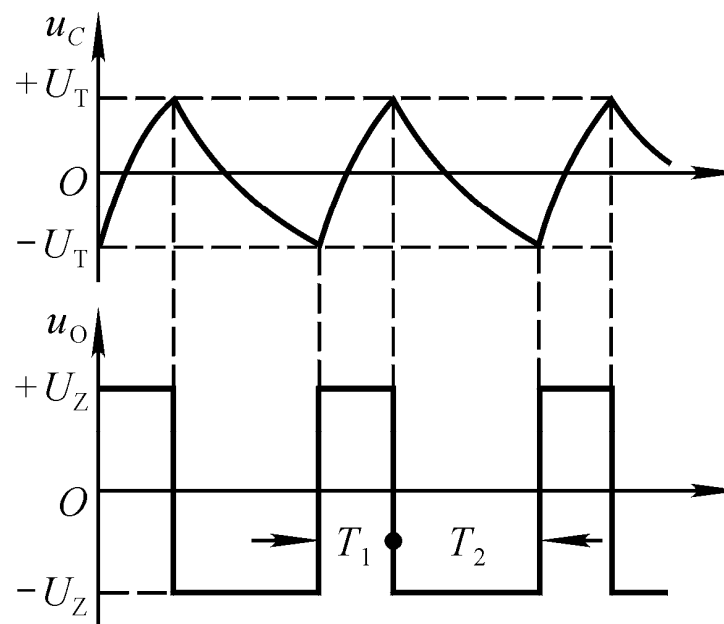
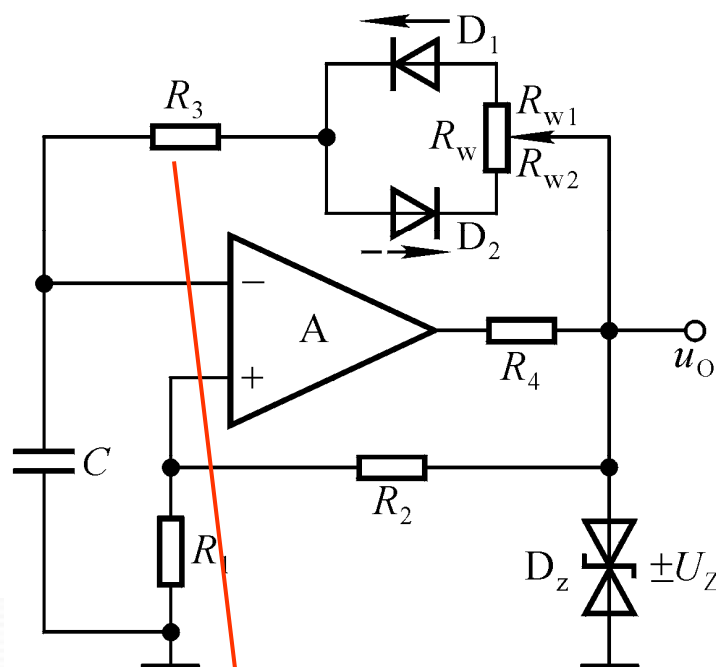
## 5. 占空比可调电路

正向充电和反向充电时间常数可调，占空比就可调。



## 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。

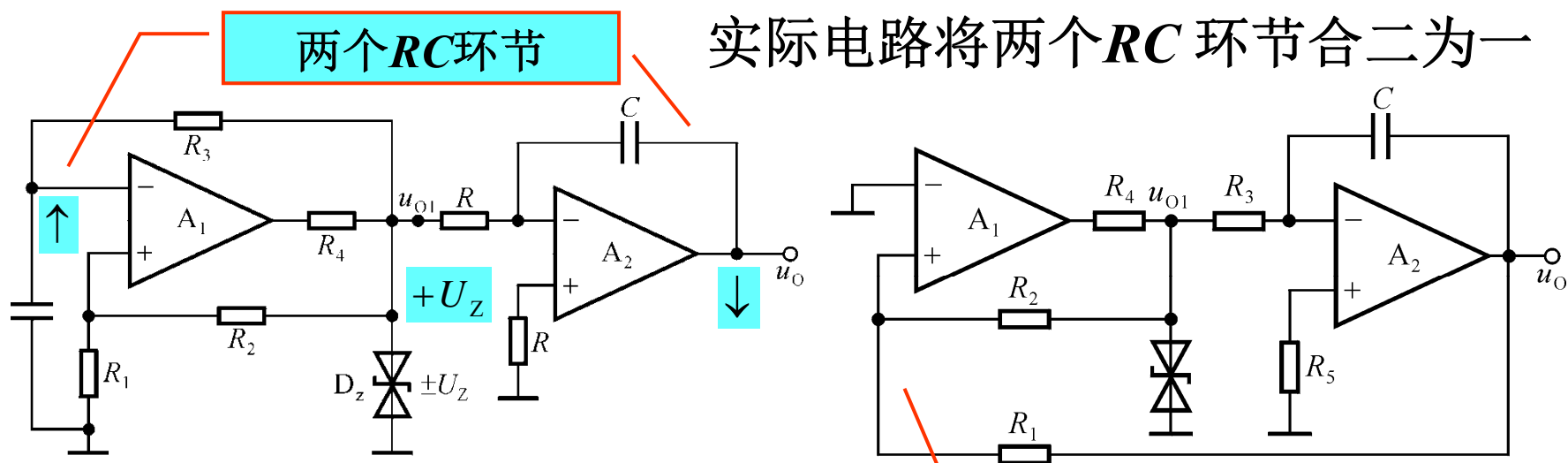


为了占空比调节范围大， $R_3$ 应如何取值？

### 三、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。



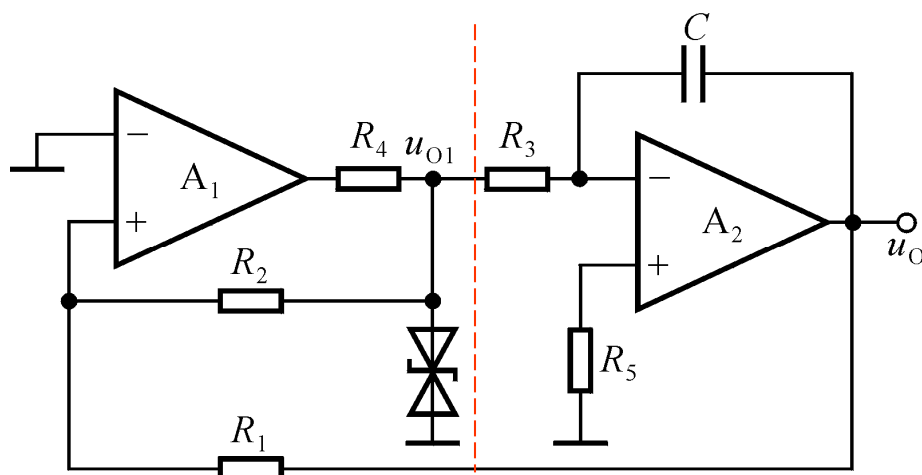
$u_O$ 要取代 $u_C$ ，必须改变输入端

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

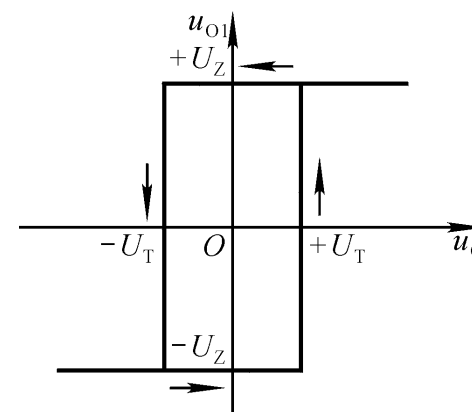
## 2. 工作原理



滞回比较器

积分运算电路

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



求滞回比较器的电压传输特性：三要素

$U_{OH} = -U_{OL} = U_Z$ ， $u_I$  作用于集成运放的同相输入端，求  $U_T$ ：

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

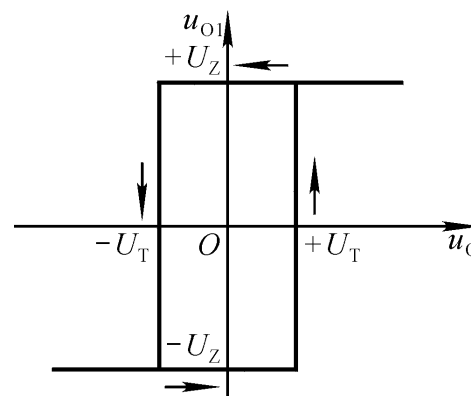
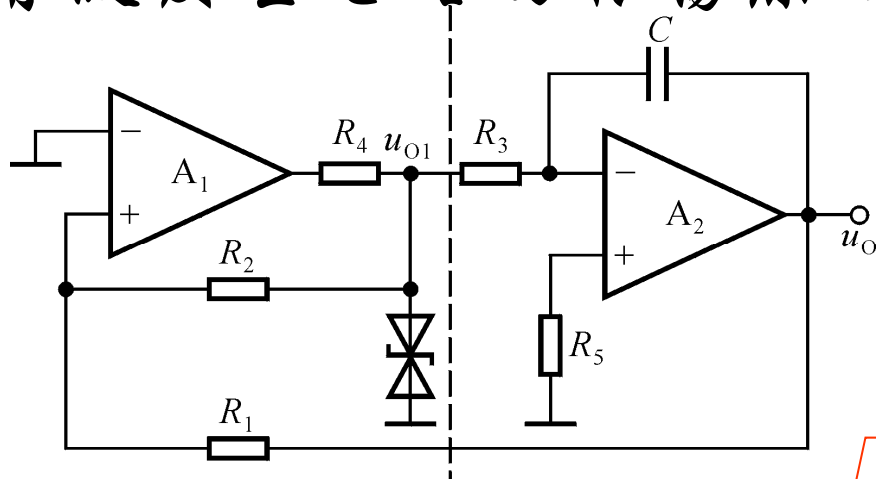
令  $u_{P1} = u_{N1} = 0$ ，将  $u_{O1} = \pm U_Z$  代入，求出  $\Rightarrow$

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





## 三角波发生电路的振荡原理



电路状态翻转时,  $u_{P1}=?$

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

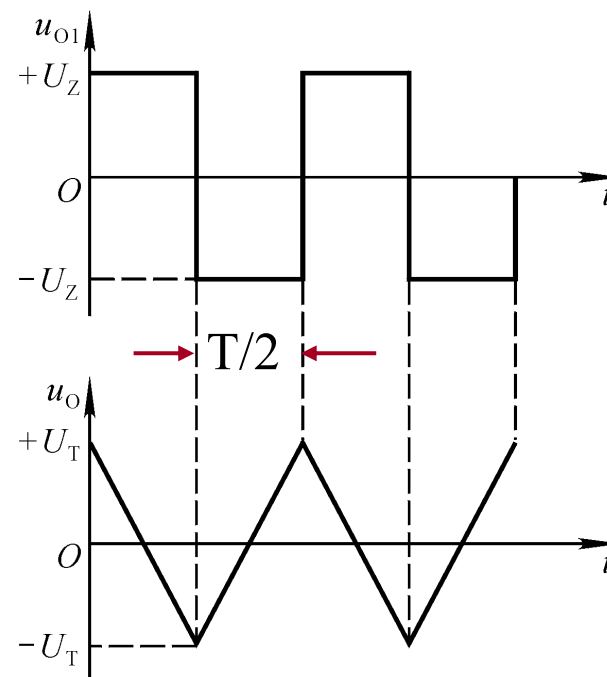
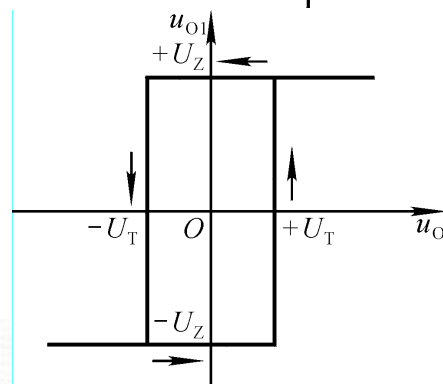
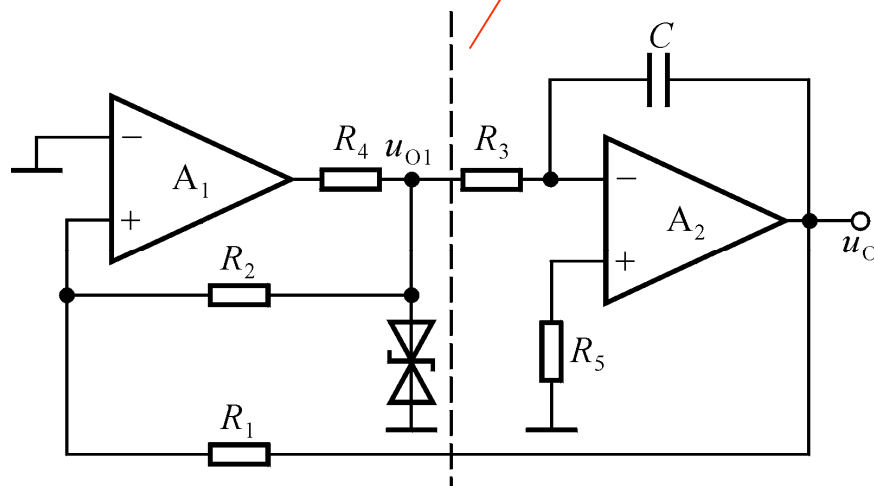
$$u_{P1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{O1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_O$$

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？



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？

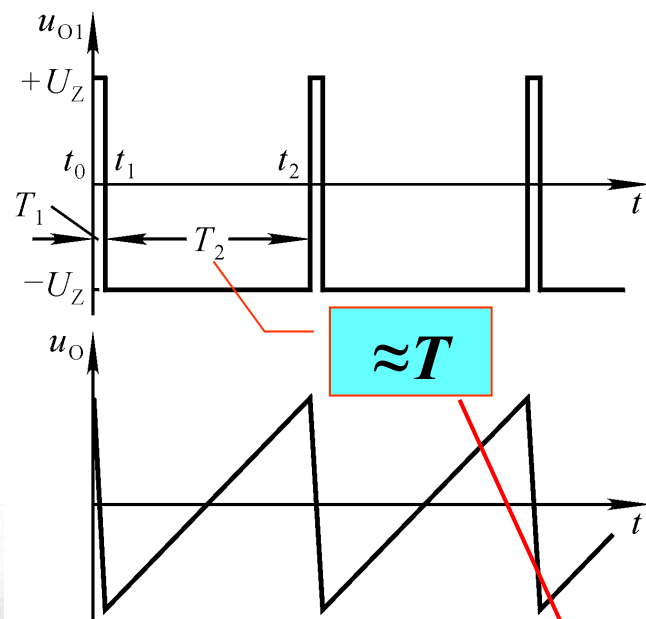
$$+U_T = \frac{1}{R_3 C} \cdot U_Z \cdot \frac{T}{2} + (-U_T)$$

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

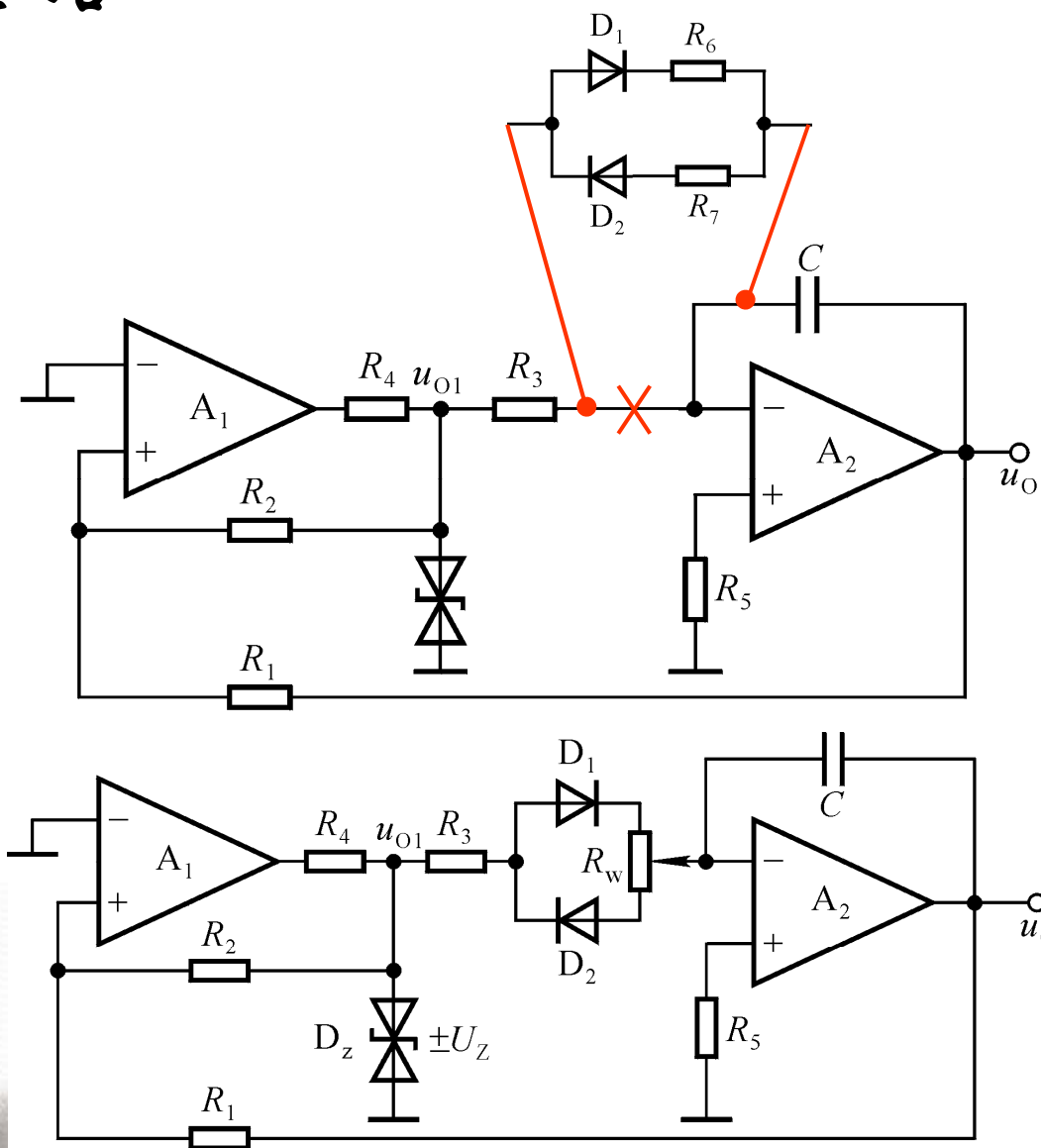


## 四、锯齿波发生电路

- 1)  $R_3$ 应大些？小些？
- 2)  $R_w$ 的滑动端在最上端和最下端时的波形？



- 3)  $R_3$ 短路时的波形？



若由输入电压确定，则将电压转换为频率

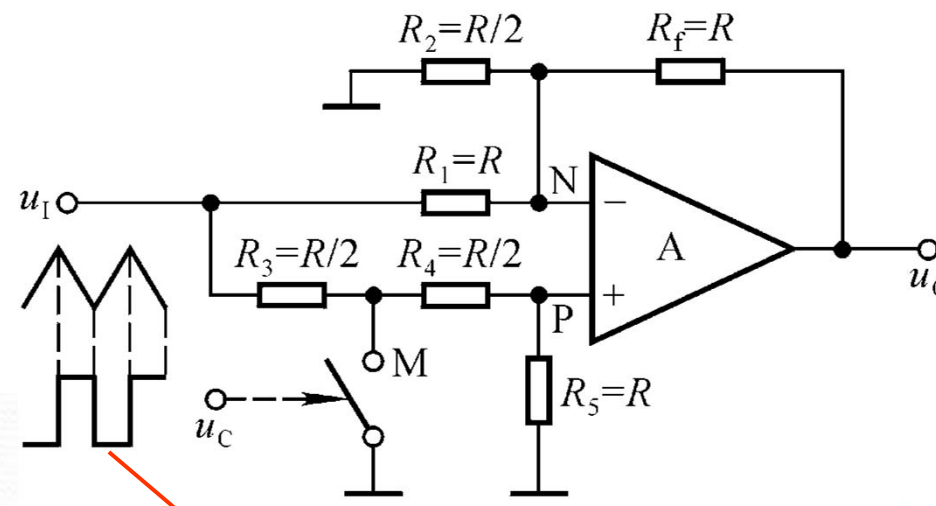
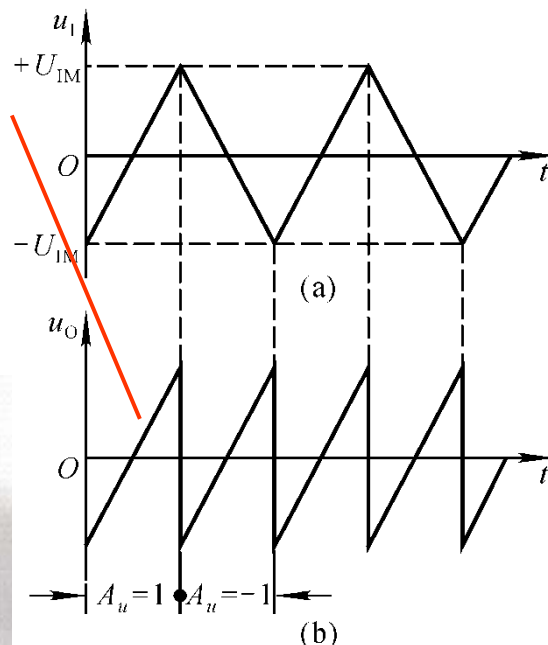
## 五、波形变换电路

### 1. 利用基本电路实现波形变换

正弦波变方波，变矩形波，变二倍频，方波变三角波，  
三角波变方波，固定频率的三角波变正弦波

### 2. 三角波变锯齿波：二倍频

利用  
电子  
开关  
改变  
比例  
系数



如何得到？

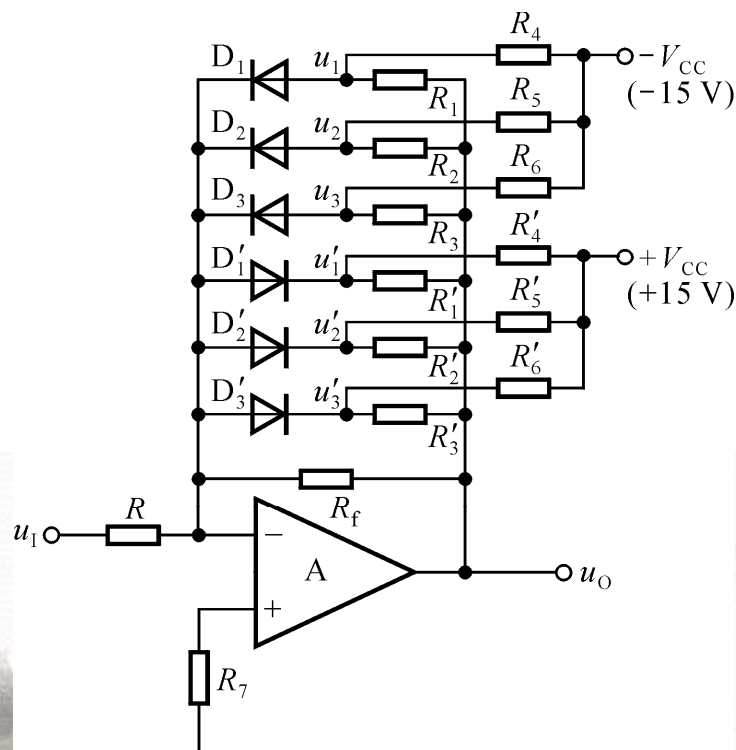
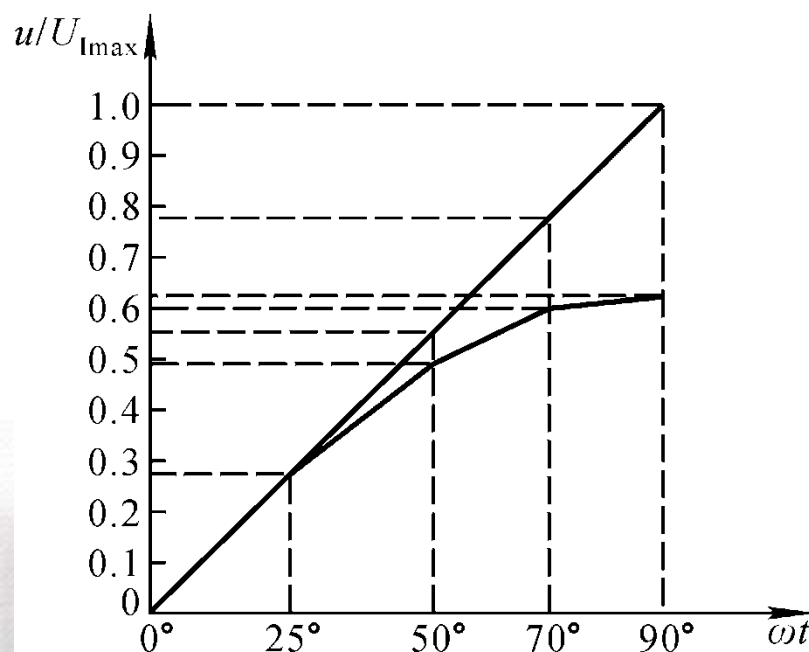
### 3. 三角波变正弦波

三角波用傅立叶级数展开，除基波外，还含有3次、5次.....谐波。

范围是什么？

若输入信号的频率变化不大，则可用滤波法实现。

若输入信号的频率变化较大，则可用折线法实现。

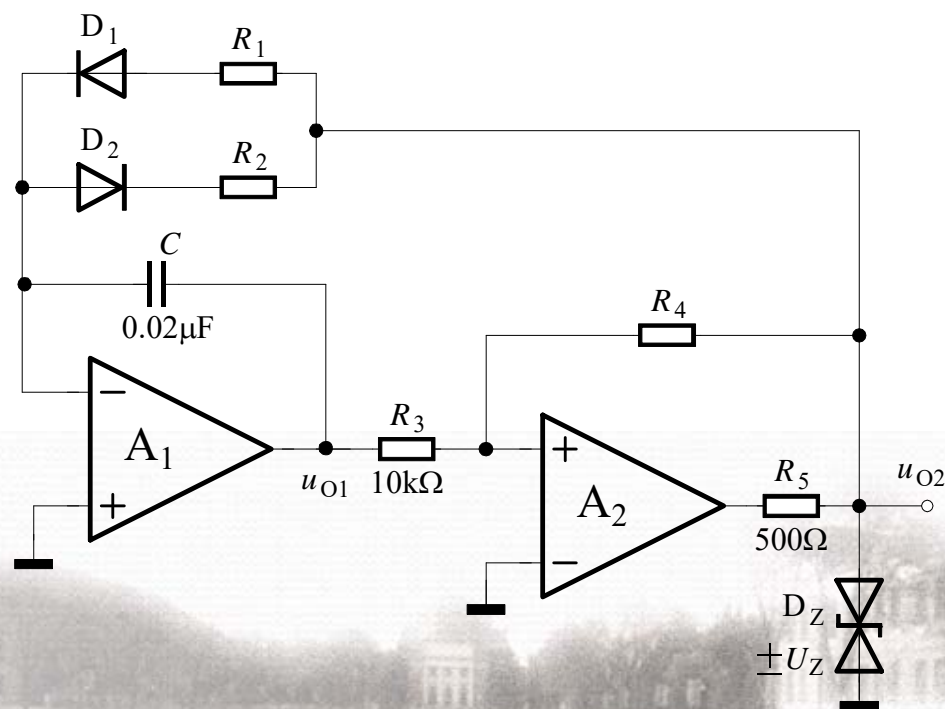




## 讨论一

已知 $u_{O1}$ 和 $u_{O2}$ 的峰-峰值均为10V，二极管为理想二极管。

- 1) 求出稳压管的稳压值 $U_Z$ 和 $R_4$ 的阻值；
- 2) 定性画出 $u_{O1}$ 、 $u_{O2}$ 的波形图；
- 3) 求解 $q$ 的表达式。



## 讨论二

1、现有频率为1kHz的正弦波 $u_i$ ，实现下列变换：

1kHz的正弦波 $u_i$



2kHz的正弦波



2kHz的方波



2kHz的三角波

2、设计实现将峰值为1V、频率为100Hz的正弦波输入电压变换为峰值为5V、频率为200Hz锯齿波电压的电路。



## § 7.3 信号的转换

一、概述

二、 $u-i$  转换电路

三、精密整流电路

四、 $u-f$  转换电路



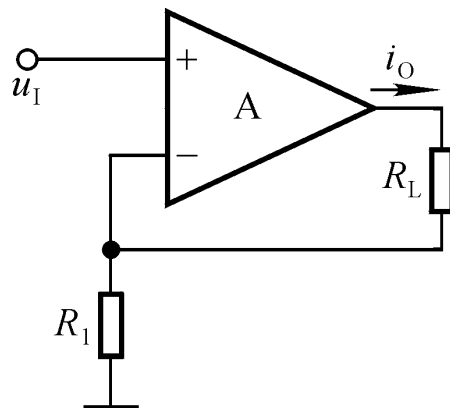
# 一、概述

信号转换电路的应用需求

- 1) 信号的发送：调幅、调频、调相
- 2) 信号的接收：解调
- 3) 信号对负载的驱动： $i-u$ ,  $u-i$
- 4) 信号的预处理：AC-DC（整流、检波、滤波）  
DC-AC（斩波）
- 5) 信号的接口： $A-D$ （如  $u-f$ ）,  $D-A$

## 二、 $u-i$ 转换电路

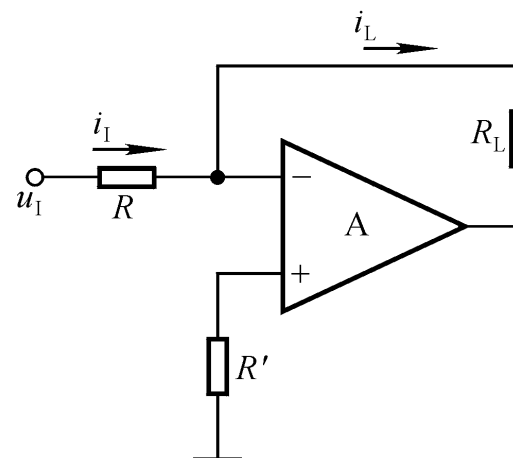
电路一



引入了电流串联负反馈

$$i_O = \frac{u_I}{R}, \quad R_i = \infty$$

电路二



引入了电流并联负反馈

$$i_L = -\frac{u_I}{R}, \quad R_i = R$$

若信号源不能输出电流，则选电路一。

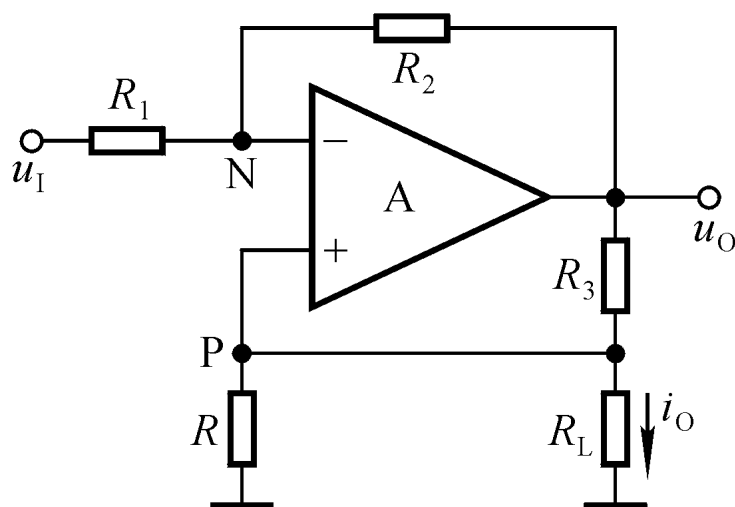
若信号源能够输出一定的电流，则可选电路二。

若负载需接地，则上述两电路均不符合要求。



## 二、 $u-i$ 转换电路

两个负载接地的  $u-i$  转换电路



豪兰德电流源电路

理想运放情况下：

$$i_{R1} = i_{R2}, \quad i_{R3} = i_R + i_O$$

$$\frac{u_I - u_P}{R_1} = \frac{u_P - u_O}{R_2}, \quad \frac{u_O - u_P}{R_3} = \frac{u_P}{R} + i_O$$

$$\text{若 } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R}, \text{ 则 } i_O = -\frac{u_I}{R}$$

电路既引入了负反馈，又引入了正反馈

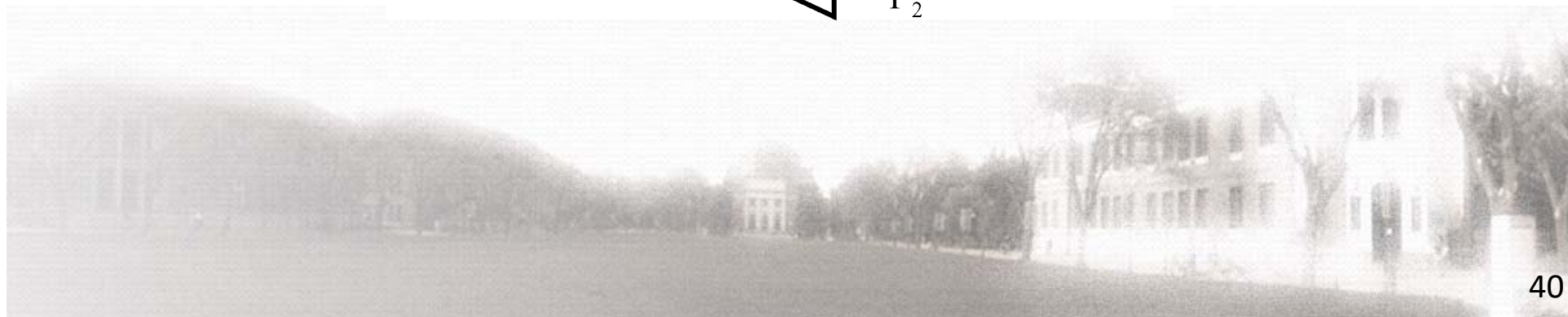
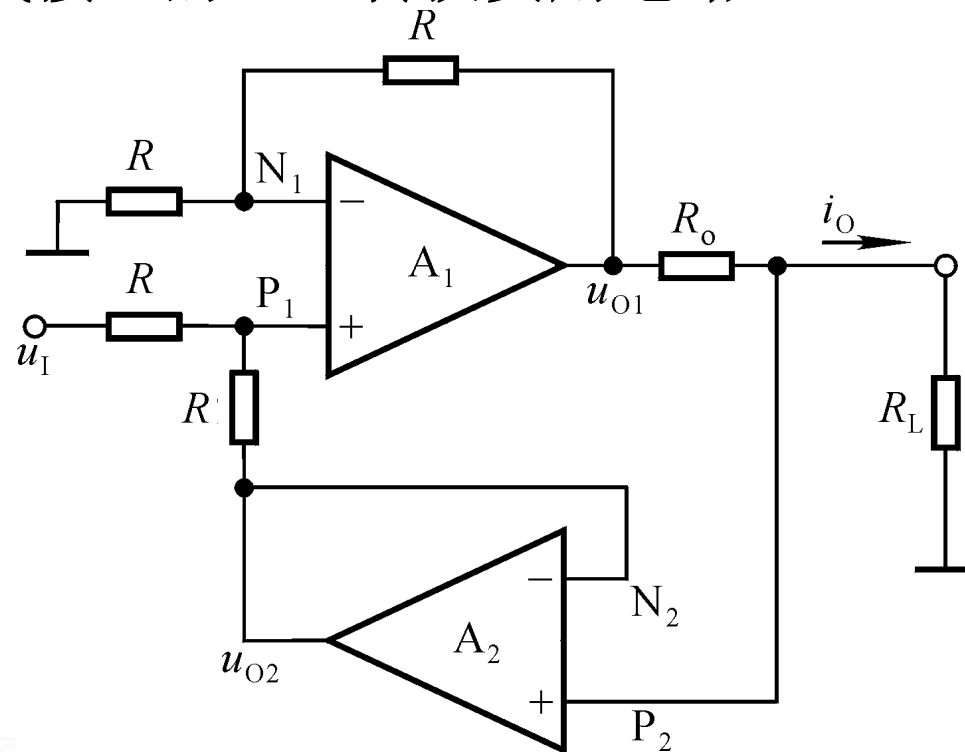
$$\left. \begin{array}{l} R_L \downarrow \rightarrow i_O \uparrow \\ R_L \downarrow \rightarrow u_P \downarrow \rightarrow u_O \downarrow \rightarrow i_O \downarrow \end{array} \right\} \text{相互抵消, 则 } i_O \text{ 稳定}$$

如何求解  
输出电阻？



## 二、 $u-i$ 转换电路

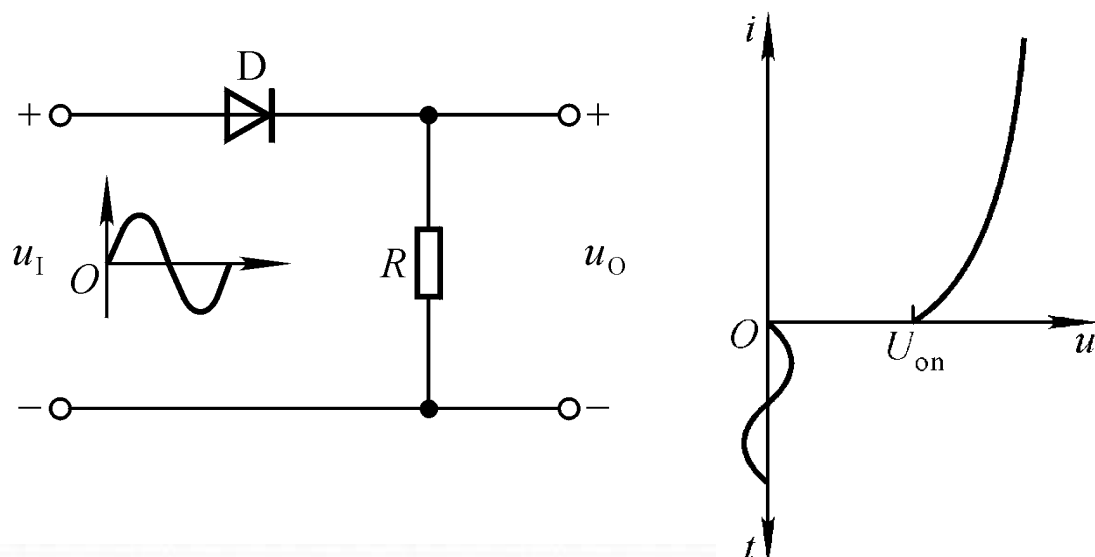
一个负载接地的 $u-i$  转换实用电路



### 三、精密整流电路

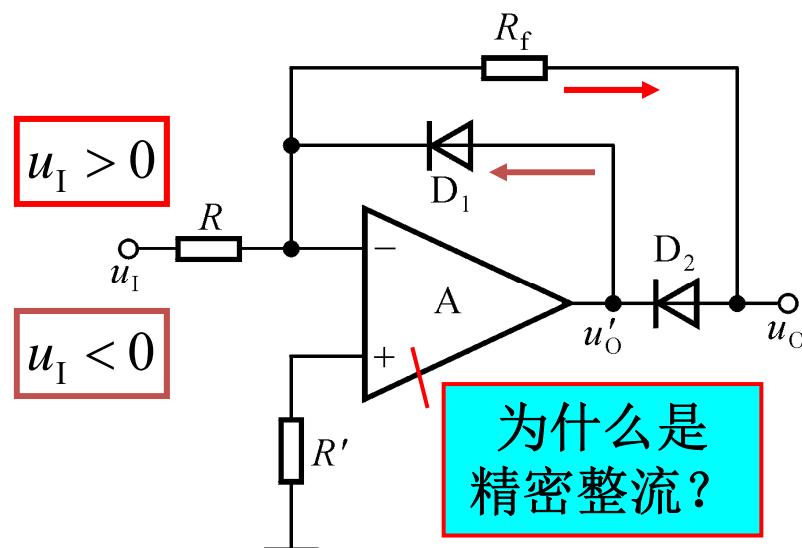
精密整流电路是信号处理电路，不是电源中AC-DC的能量转换电路：实现微小信号的整流。

为什么一般的整流电路不能作为精密的信号处理电路？



若  $u_{I\max} < U_{on}$ ，则在  $u_I$  的整个周期中  $u_O$  始终为零；若  $u_{I\max} > U_{on}$ ，则  $u_O$  仅在大于  $U_{on}$  近似为  $u_I$ ，失真。

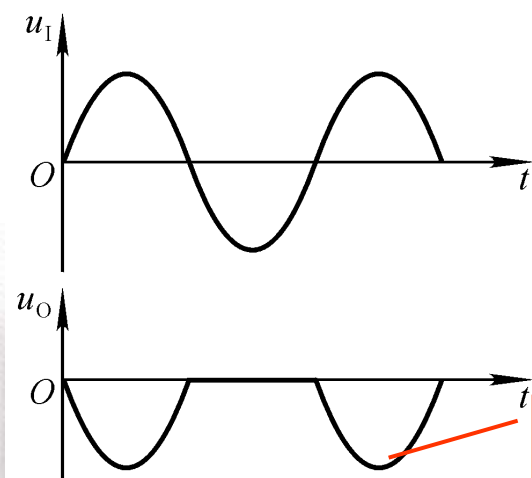
# 半波精密整流电路



设  $R = R_f$

$u_I > 0$  时,  $u'_O < 0$ ,  $D_1$  截止,  $D_2$  导通,  $u_O = -u_I$ 。

$u_I < 0$  时,  $u'_O > 0$ ,  $D_2$  截止,  $D_1$  导通,  $u_O = 0$ 。

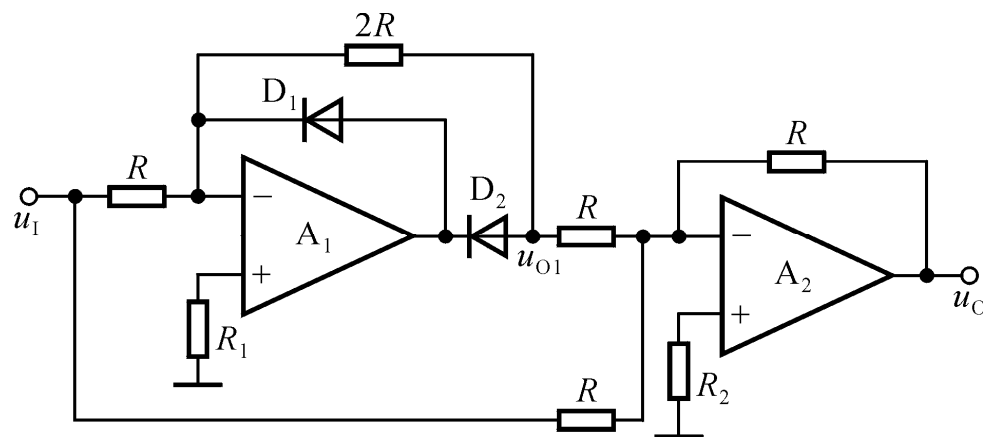


对于将二极管和晶体管作电子开关的集成运放应用电路, 在分析电路时, 首先应判断管子相当于开关闭合还是断开, 它们的状态往往决定于输入信号或输出信号的极性。

半波整流, 若加  $u_I$  的负半周, 则实现全波整流



# 全波精密整流电路



$$\begin{cases} u_{O1} = -2u_I & (u_I > 0) \\ u_{O1} = 0 & (u_I < 0) \end{cases}$$

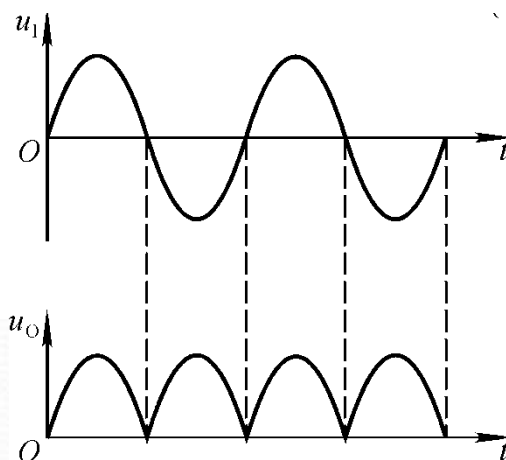
$$u_O = -u_{O1} - u_I$$

$$u_I > 0 \text{ 时, } u_O = u_I$$

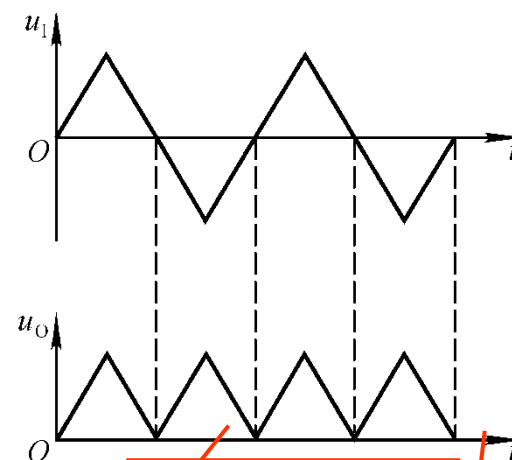
$$u_I < 0 \text{ 时, } u_O = -u_I$$

$$u_O = |u_I|$$

绝对值运算电路



二倍频三角波



如何去掉  
直流分量?

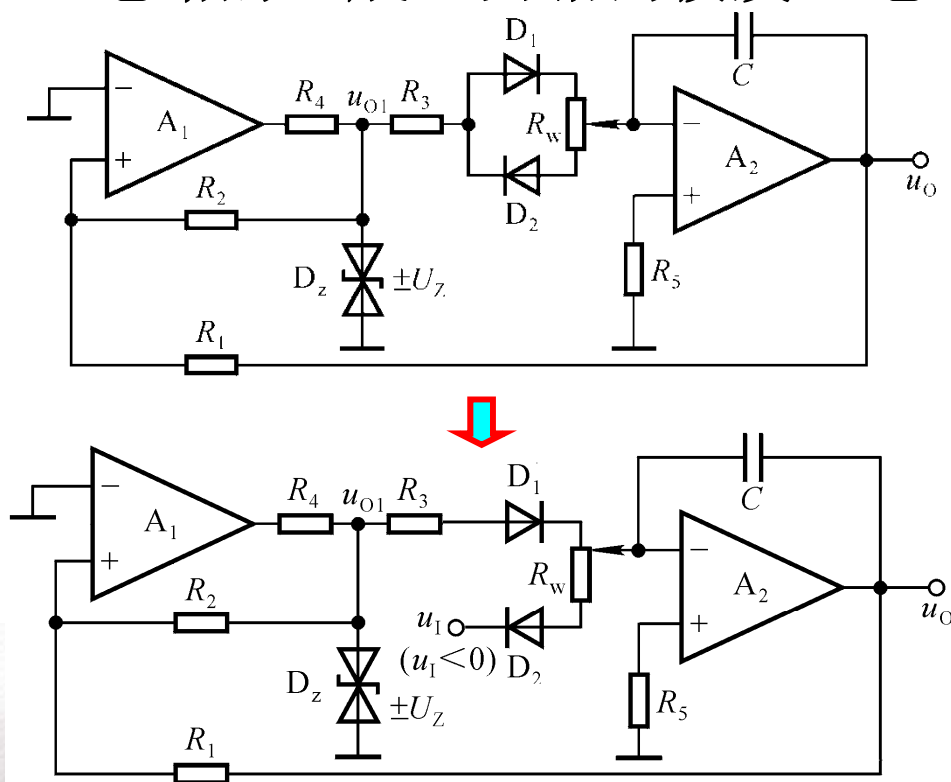




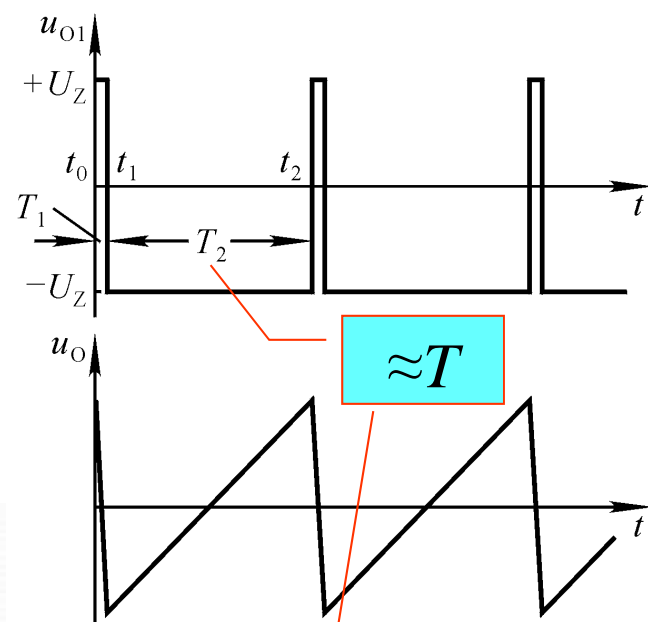
## 四、 $u$ - $f$ 转换电路（压控振荡器）

### 1. 电荷平衡式压控振荡器

电路的组成：由锯齿波发生电路演变而来。



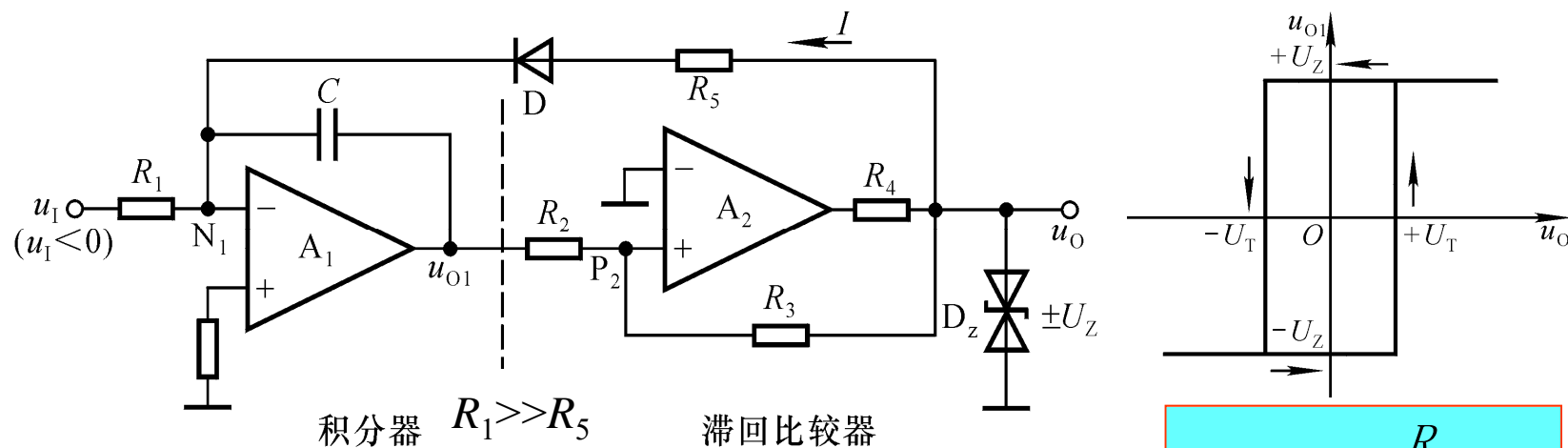
电位器滑动端在最上端时：



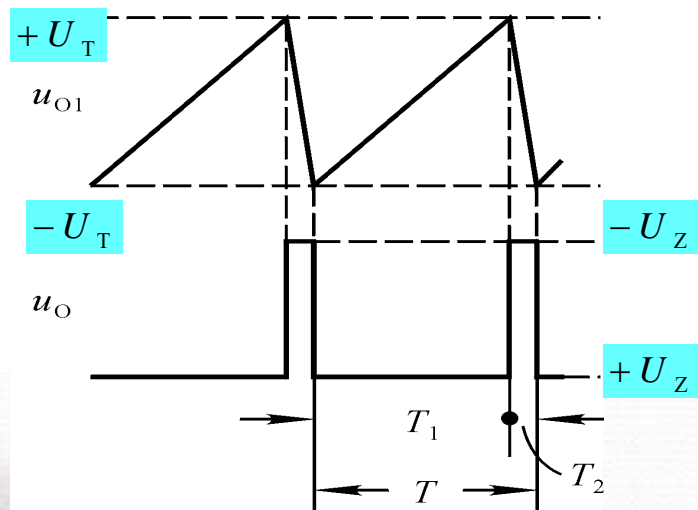
若  $T_2$  决定于外加电压，则电路的振荡频率就几乎仅仅受控于外加电压，实现了  $u \rightarrow f$  的转换。



# 1. 电荷平衡式压控振荡器



$$\pm U_T = \pm \frac{R_2}{R_3} \cdot U_Z$$



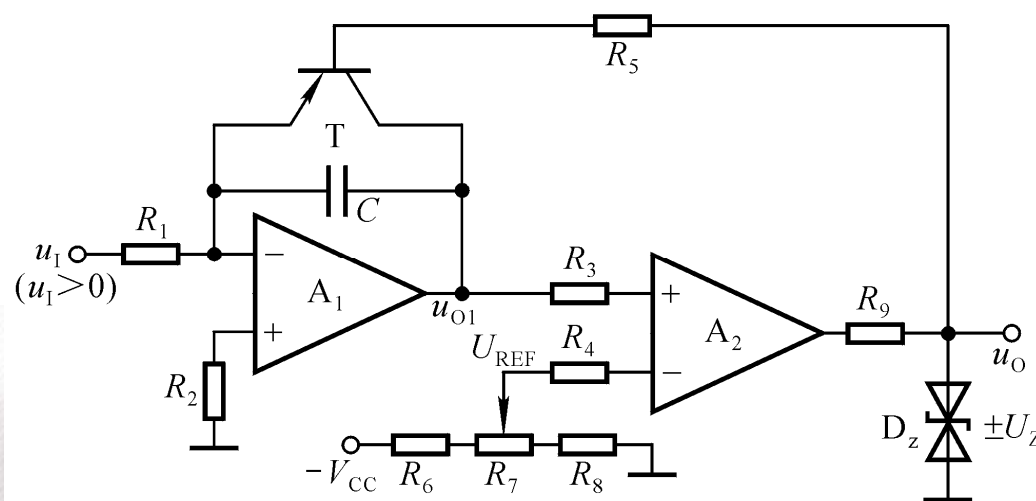
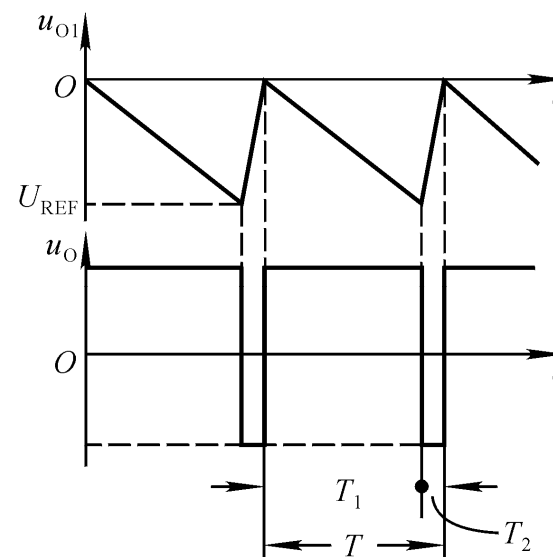
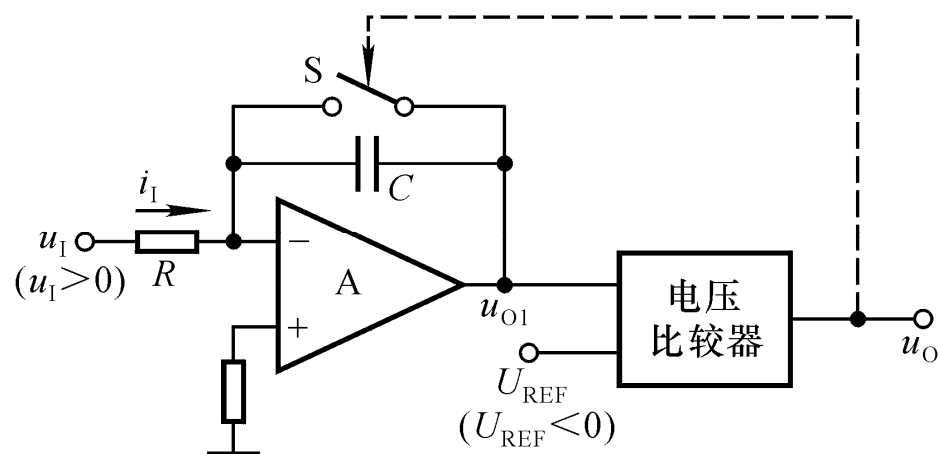
$$U_T = -\frac{1}{R_1 C} \cdot u_I T_1 - U_T \approx -\frac{1}{R_1 C} \cdot u_I T - U_T$$

$$f \approx \frac{1}{T_1} = \frac{R_3}{2R_1 R_2 C} \cdot \frac{u_I}{U_Z}$$

若  $u_I > 0$ ，则电路作何改动？

单位时间内脉冲个数表示电压的数值，故实现A/D转换

## 2. 复位式压控振荡器



$u_O = U_Z$  时, T截止。

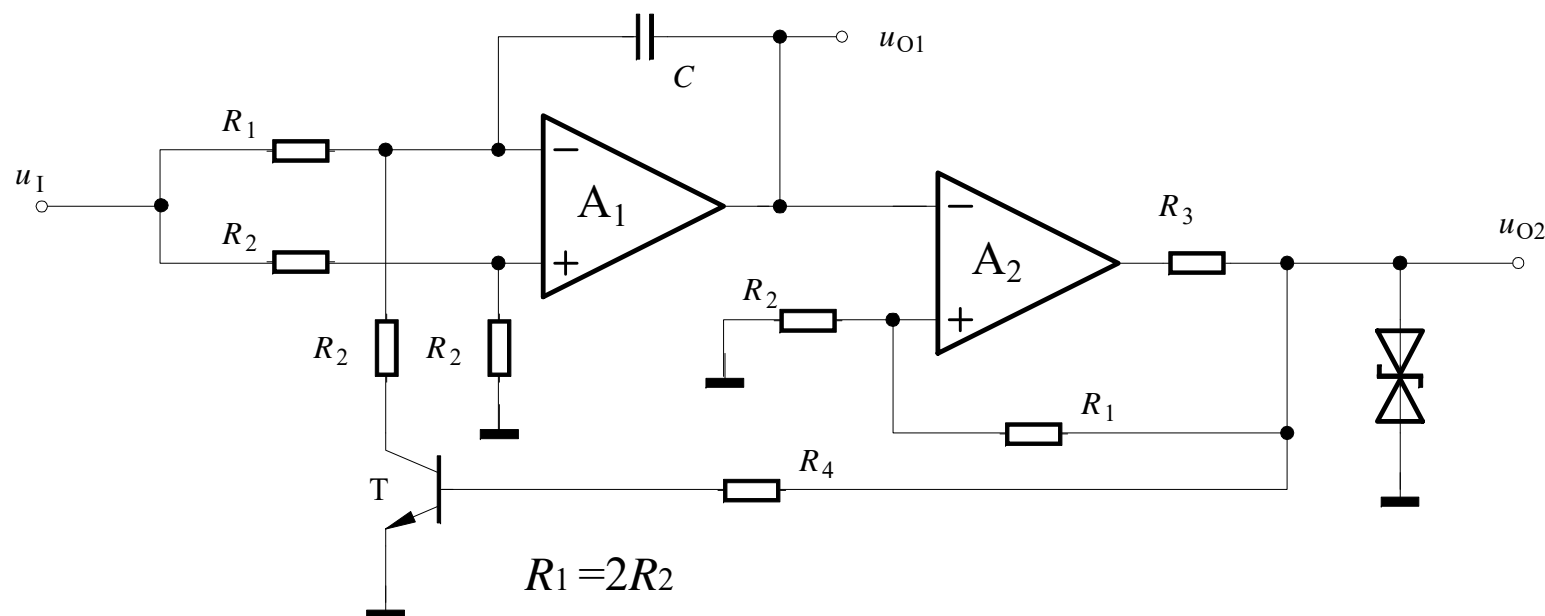
$u_O = -U_Z$  时, T导通。

$$f \approx \frac{R_1 C u_I}{|U_{REF}|}$$

开关T何时断开, 何时闭合?

# 讨论一

已知晶体管饱和压降近似为0。

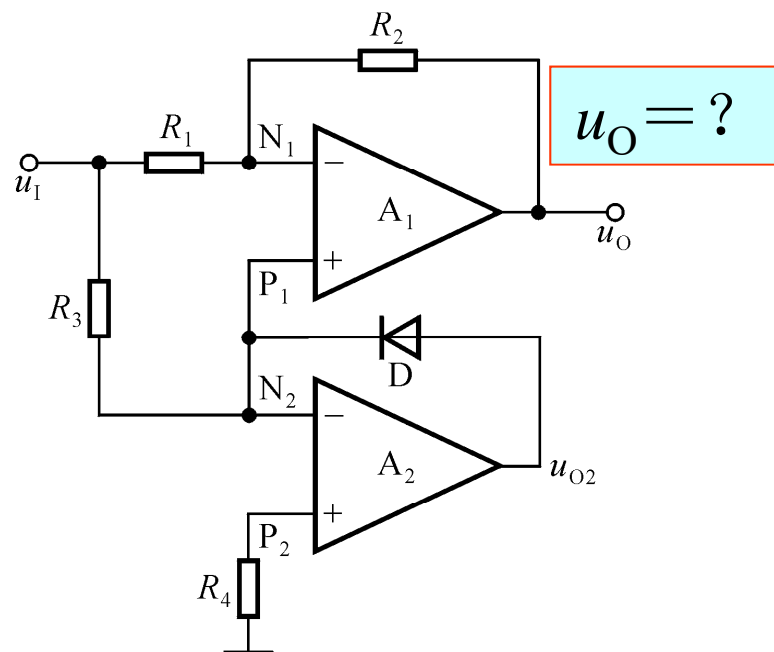
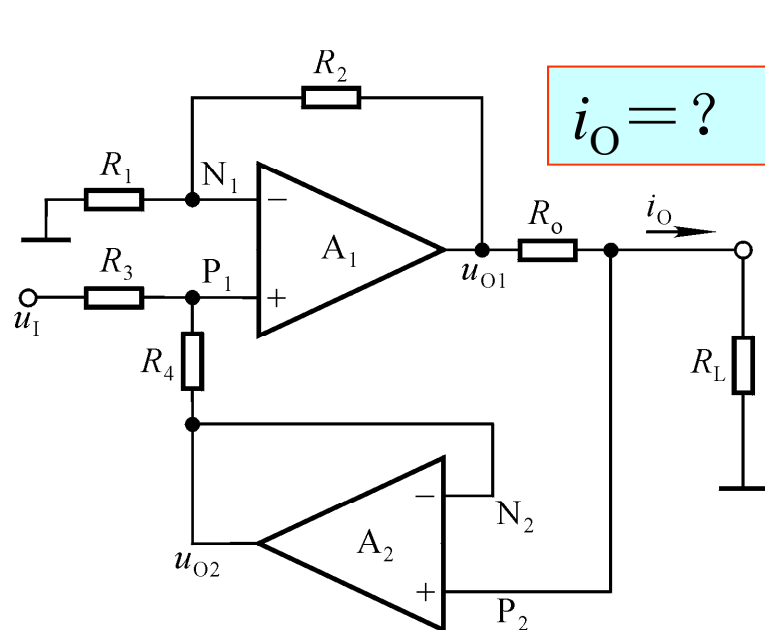


- 1) 晶体管什么情况下导通？什么情况下截止？
- 2) 晶体管饱和导通和截止  $u_{O1}$  和  $u_I$  的运算关系？
- 3)  $u_I$  的极性？
- 4)  $u_{O1}$ 、 $u_{O2}$  的波形？
- 5)  $u_I$  与振荡频率的关系？



## 讨论二

分析图示两个电路的功能。



$u-i$  转换电路

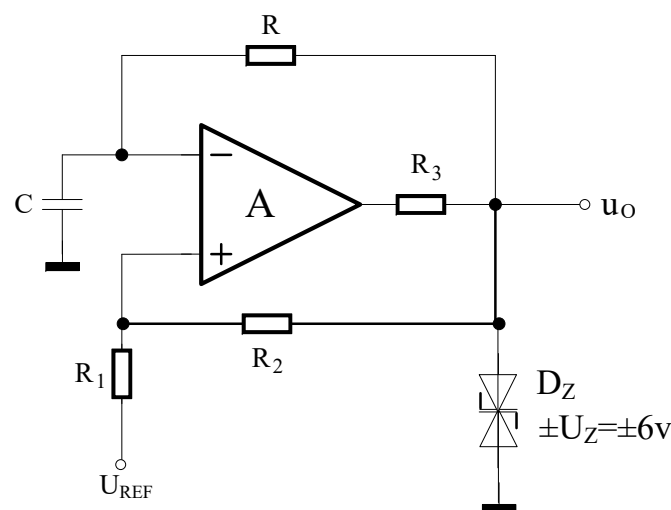
绝对值运算电路-精密整流电路





## 讨论三

已知 $R_1=10\text{k}\Omega$ ,  $R_2=20\text{k}\Omega$ ,  $R=10\text{k}\Omega$ ,  $C=0.01\mu\text{F}$ , 稳压管的稳压值为 $6\text{V}$ ,  $U_{\text{REF}}=0$ 。

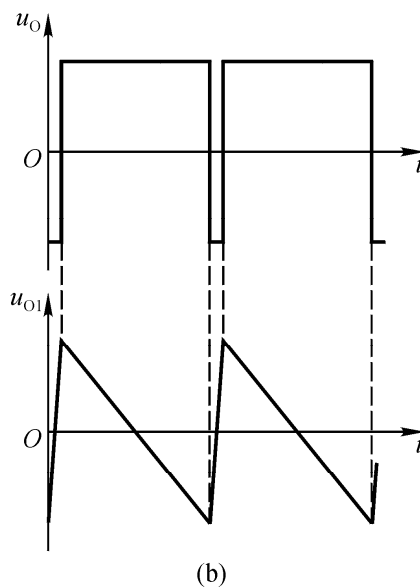
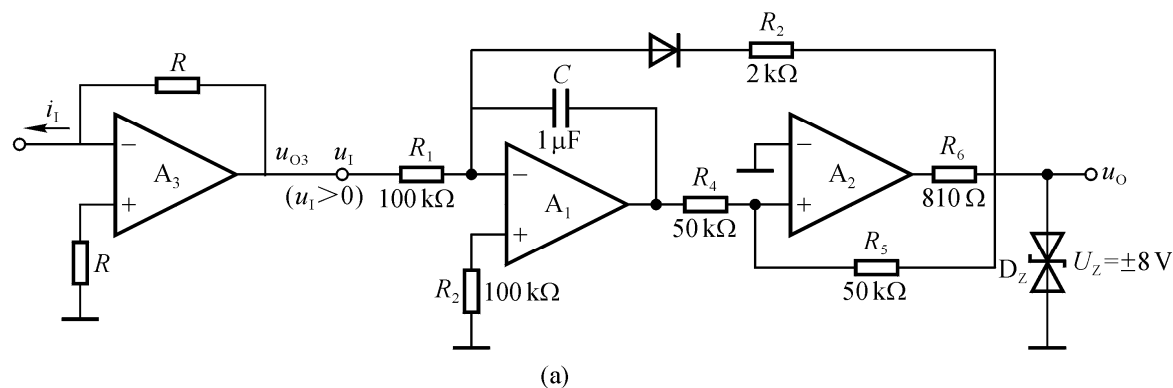


- (1) 分别求输出电压 $u_0$ 和电容两端电压 $u_C$ 的最大值和最小值。
- (2) 计算输出电压 $u_0$ 的周期。
- (3) 若增大 $R_1$ 的阻值, 将如何影响 $u_0$ 的幅值和周期。
- (4) 若增大 $R$ 的阻值, 将如何影响 $u_0$ 的幅值和周期。
- (5) 若增大 $U_Z$ , 将如何影响 $u_0$ 的幅值和周期。
- (6) 若 $U_{\text{REF}}=3\text{V}$ , 将如何影响 $u_0$ 的幅值和周期。



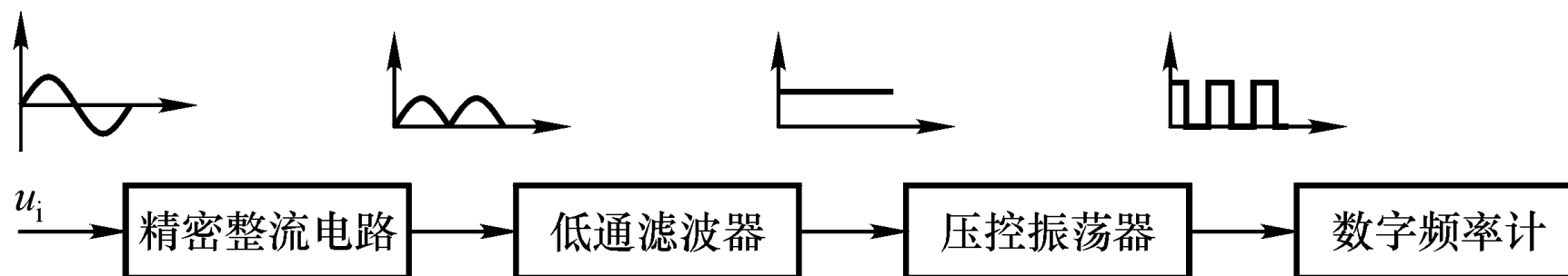
## 讨论四

试将直流电流信号转换成频率与其幅值成正比的矩形波，  
要求画出电路来，并定性画出各部分电路的输出波形。



## 讨论五

试设计一个交流电压信号的数字式测量电路，要求仅画出原理框图





## § 7.4 正弦波振荡电路

- 一、正弦波振荡的条件和电路的组成
- 二、 $RC$ 正弦波振荡电路
- 三、 $LC$ 正弦波振荡电路
- 四、石英晶体正弦波振荡电路

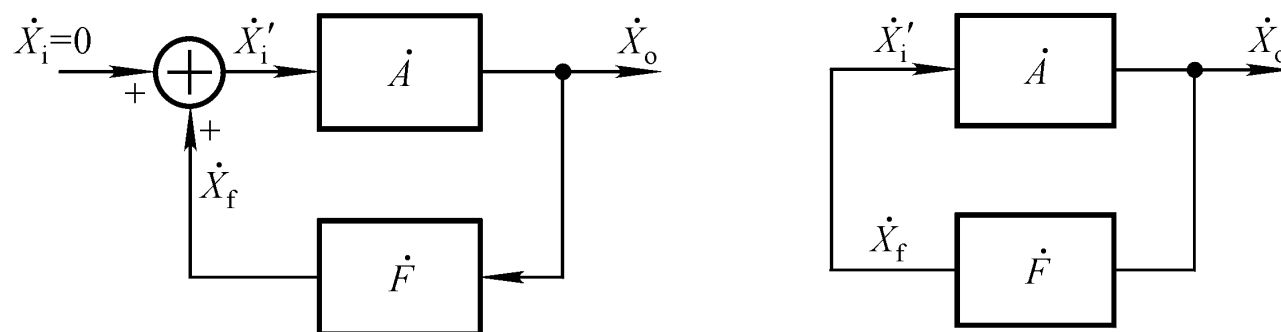


# 一、正弦波振荡的条件和电路的组成

## 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：

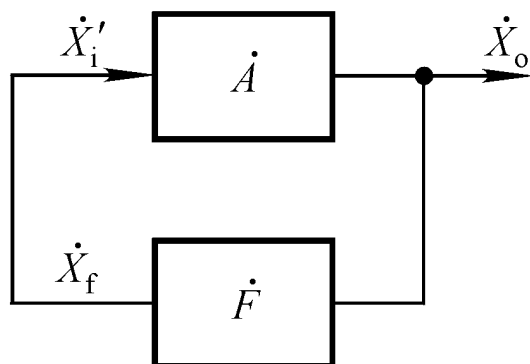
$$X_o \uparrow \rightarrow X_i' \rightarrow X_o \uparrow \uparrow$$

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。





## 幅值和相位条件



一旦产生稳定的振荡，则  
电路的输出量自维持，即

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

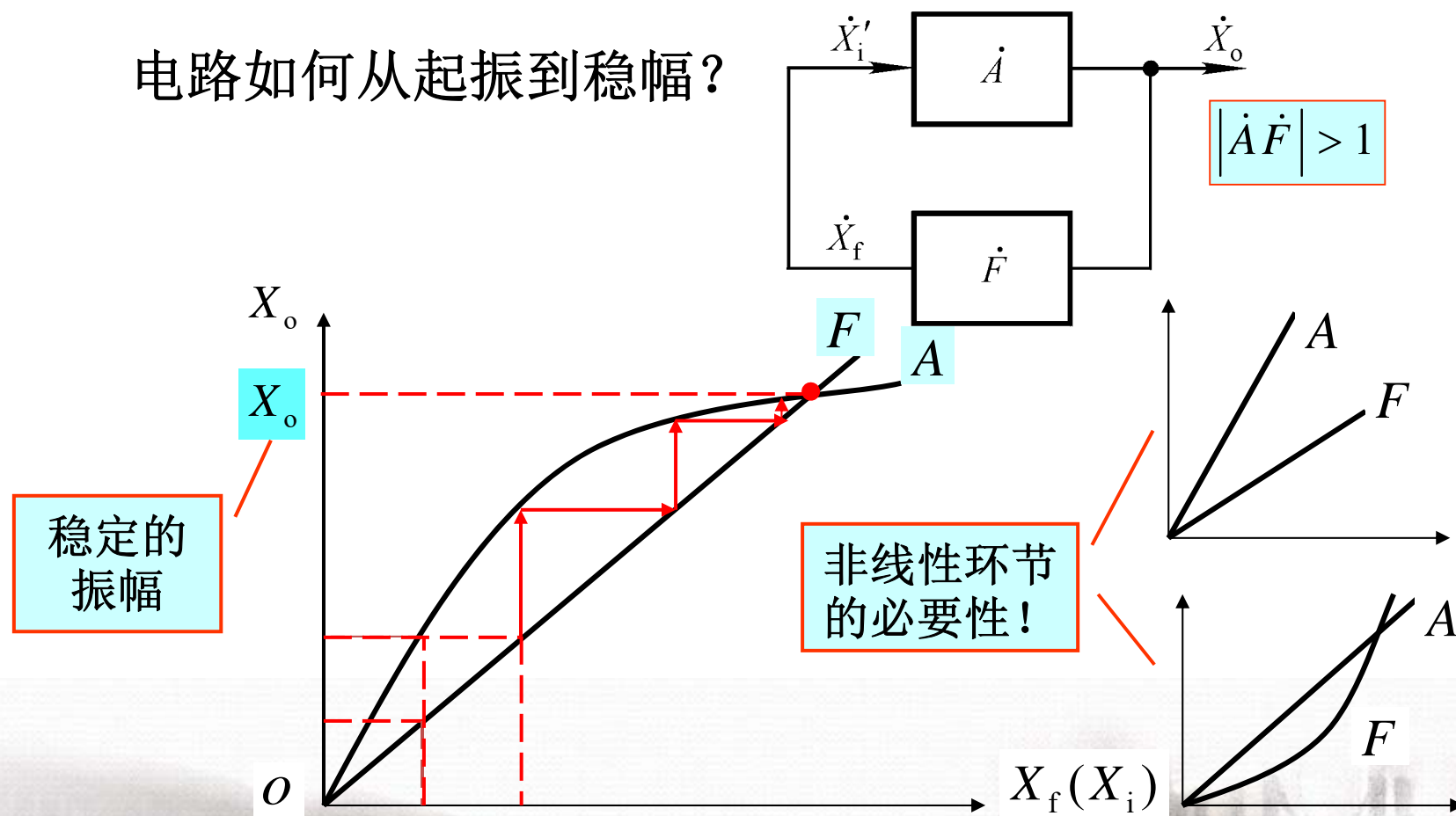
$$\dot{A}\dot{F} = 1 \Rightarrow \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 & \text{-----幅值平衡条件} \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi & \text{-----相位平衡条件} \end{cases}$$

起振条件:  $|\dot{A}\dot{F}| > 1$

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。

## 2. 起振与稳幅

电路如何从起振到稳幅？





### 3. 基本组成部分

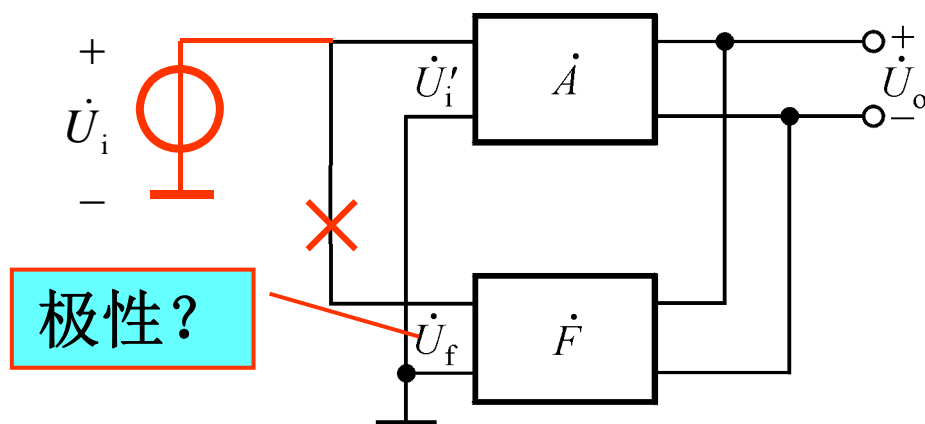
- 1) 放大电路：放大作用
- 2) 正反馈网络：满足相位条件
- 3) 选频网络：确定 $f_0$ ，保证电路产生正弦波振荡
- 4) 非线性环节（稳幅环节）：稳幅

常合二为一

### 4. 分析方法

- 1) 是否存在四个主要组成部分
- 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，则电路可能产生振荡；否则电路不可能产生振荡

## 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

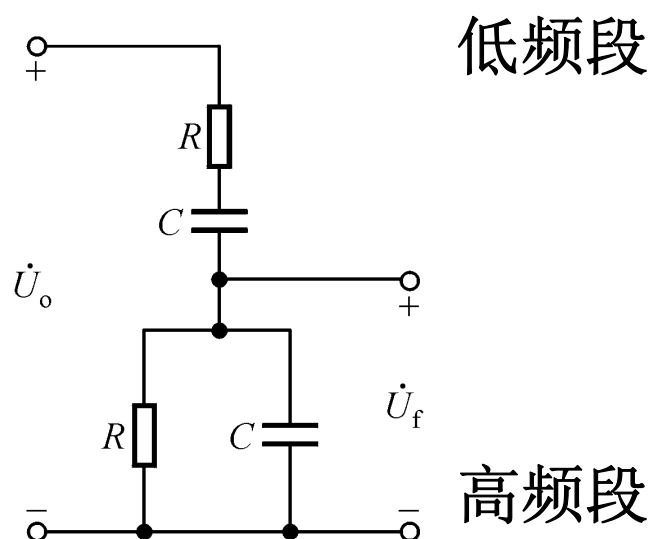




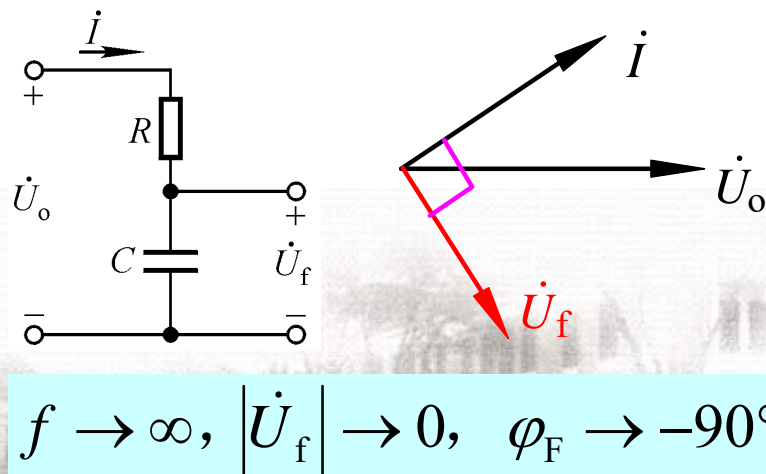
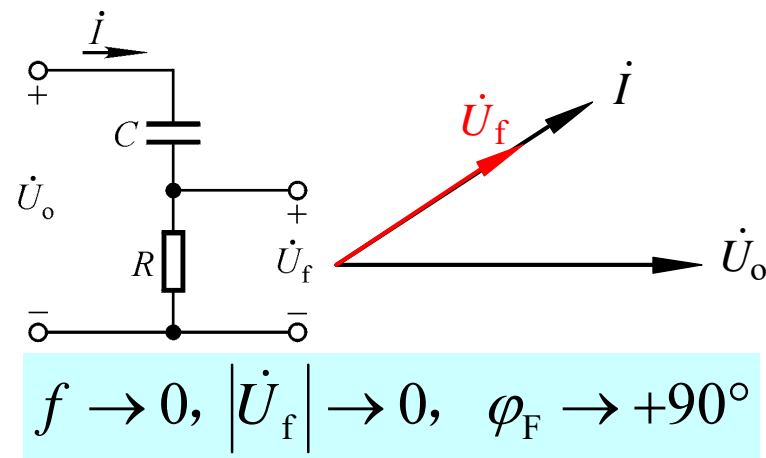


## 二、RC 正弦波振荡电路

### 1. RC 串并联选频网络

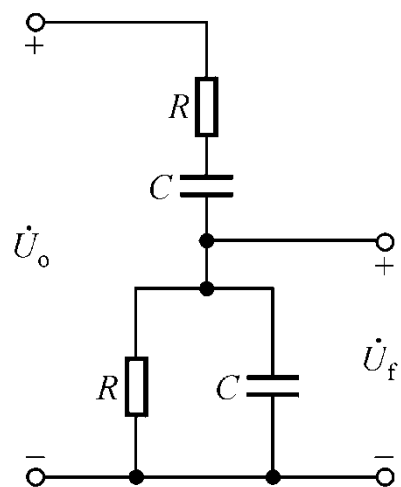


在频率从  $0 \sim \infty$   
中必有一个频率  
 $f_0$ ,  $\varphi_F = 0^\circ$





## RC串并联选频网络的频率响应

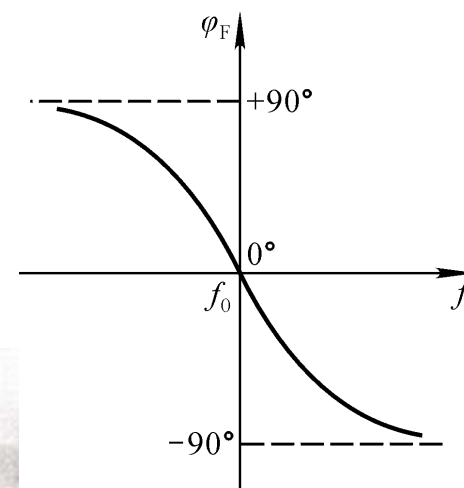
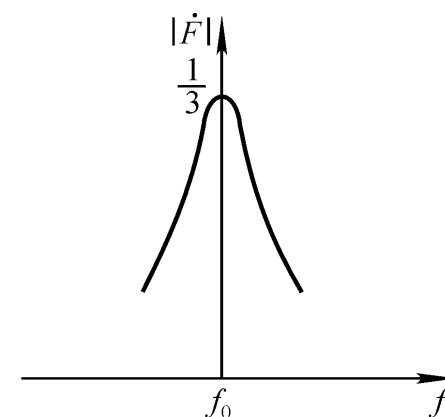


$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

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

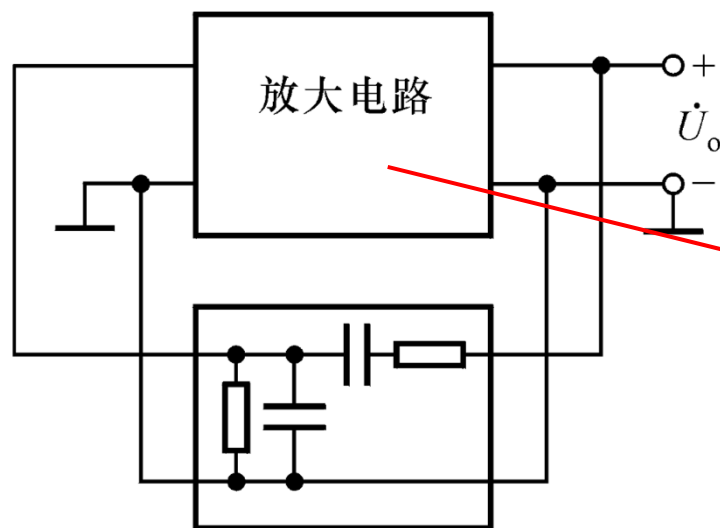
$$\text{令 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ 则 } \dot{F} = \frac{1}{3 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$$

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





## 2. 电路组成



不符合相位条件

不符合幅值条件

输入电阻小、输出电阻大，影响 $f_0$

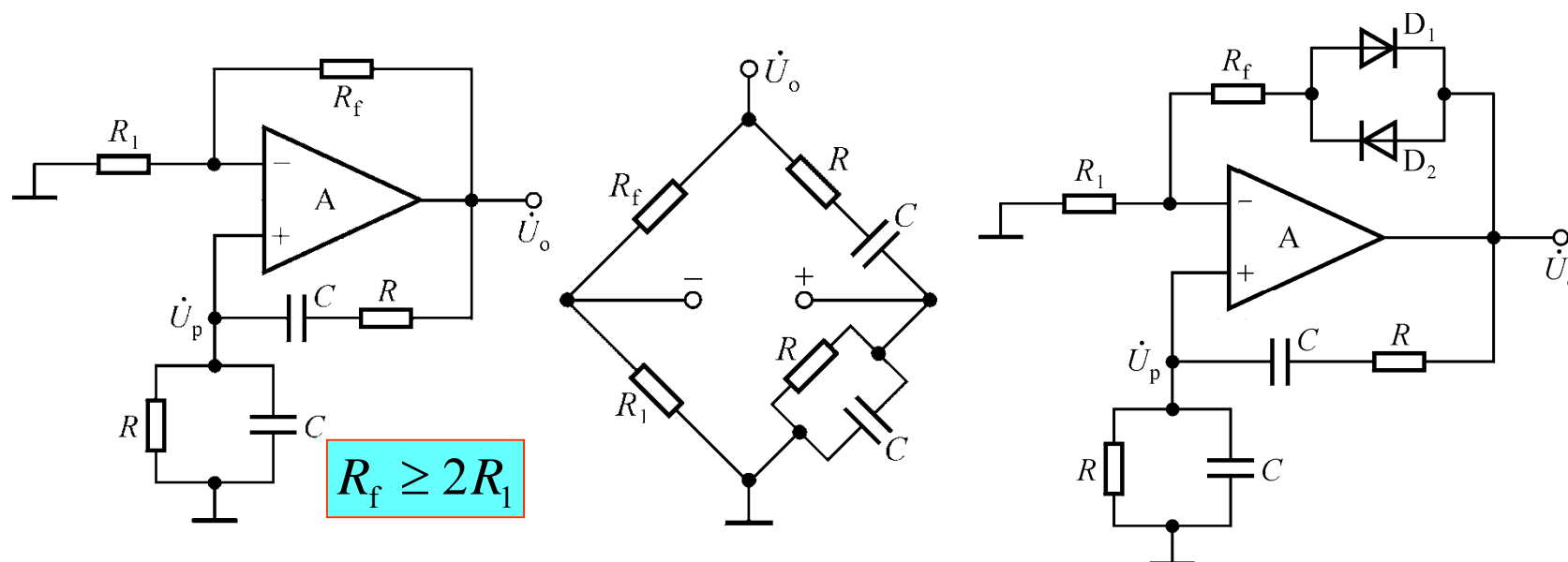
- 1) 是否可用共射放大电路?
- 2) 是否可用共集放大电路?
- 3) 是否可用共基放大电路?
- 4) 是否可用两级共射放大电路?

可引入电压串联负反馈，使电压放大倍数大于3，且 $R_i$ 大、 $R_o$ 小，对 $f_0$ 影响小

应为 $RC$  串并联网络配一个电压放大倍数略大于3、输入电阻趋于无穷大、输出电阻趋于0的放大电路

### 3. RC桥式正弦波振荡电路 (文氏桥振荡器)

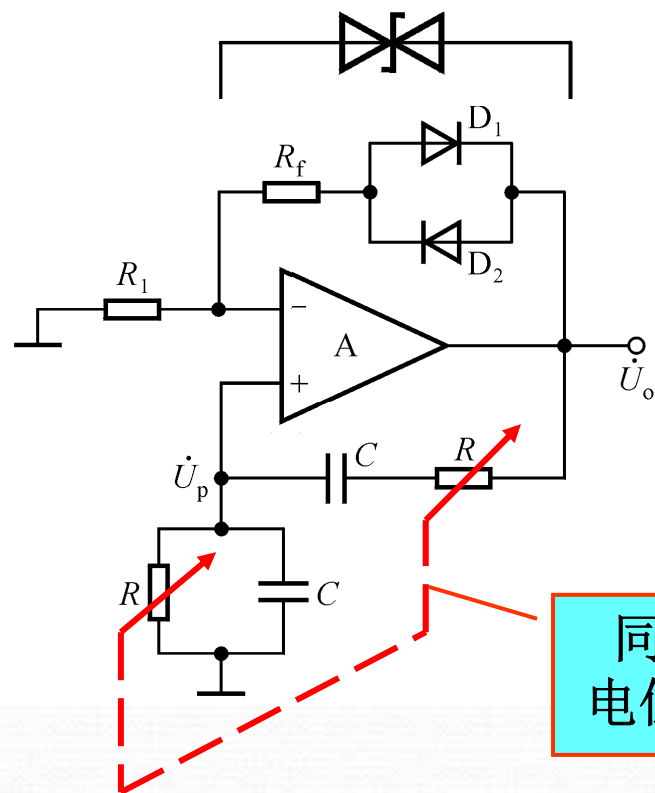
用同相比例运算电路作放大电路



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

文氏桥振荡器的特点？

## 频率可调的文氏桥振荡器



改变电容以粗调，改变电  
位器滑动端以微调

加稳压管可以限制输出电  
压的峰-峰值

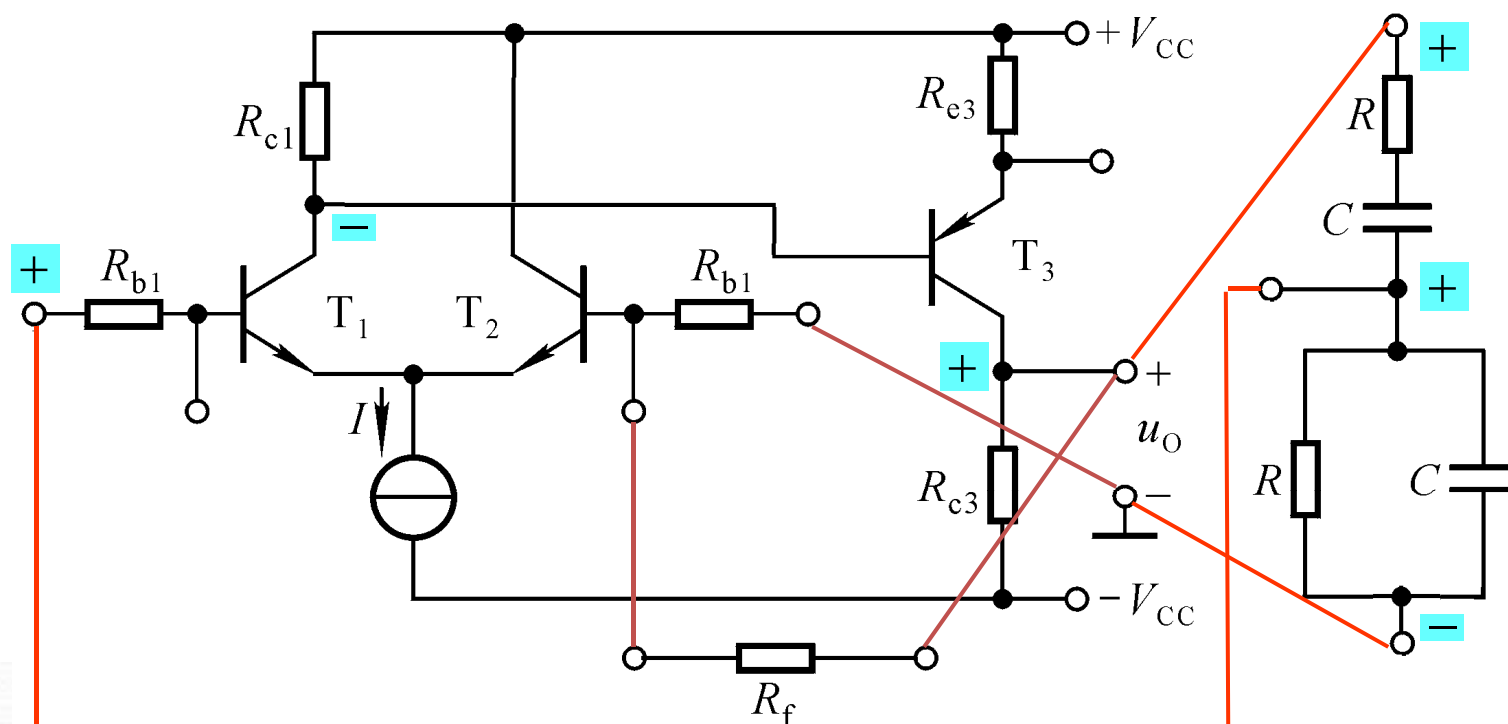
同轴  
电位器





## 讨论一

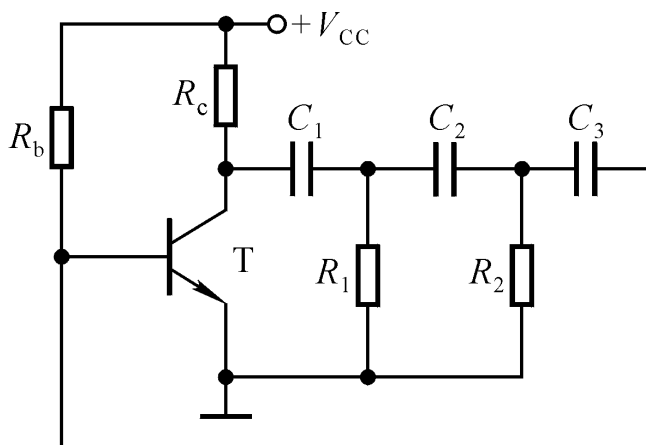
合理连接电路，组成文氏桥振荡电路



## 讨论二

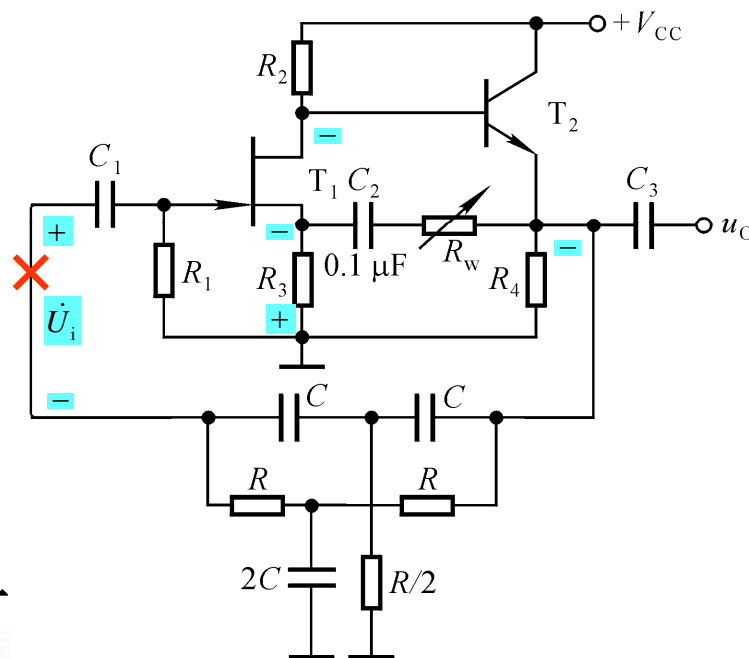
判断图示电路有可能产生正弦波振荡吗？

### RC 移相式电路



- 1) RC 移相电路有几级才可能产生正弦波振荡？
- 2) 若  $R$  和  $C$  互换呢？

### RC 双T选频网络



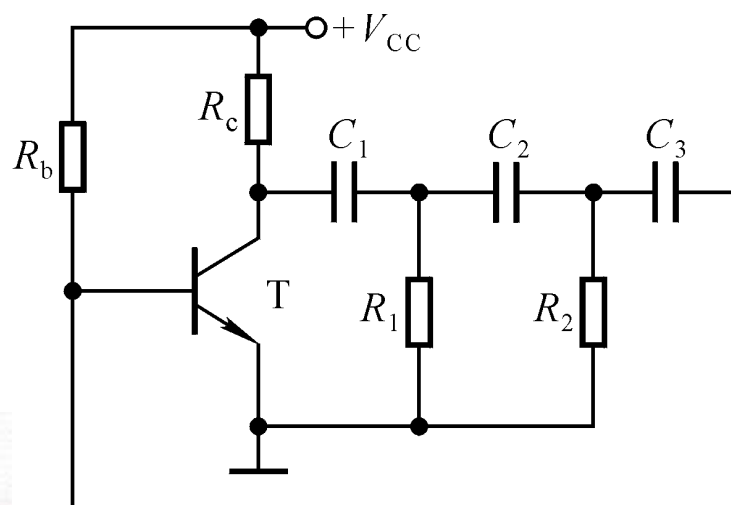
选频网络和正反馈网络是两个网络

## 讨论三

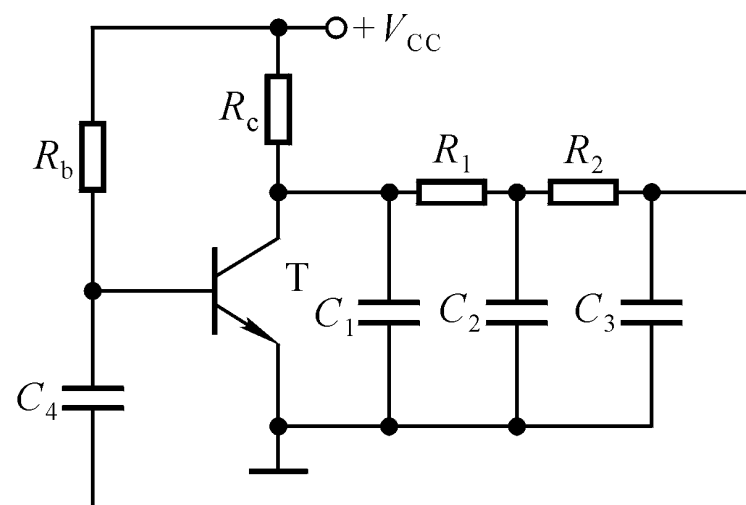
电路如图所示，试问：

(1) 若去掉两个电路中的 $R_2$ 和 $C_3$ ，则两个电路是否可能产生正弦波振荡？为什么？

(2) 若在两个电路中再加一级RC电路，则两个电路是否可能产生正弦波振荡？为什么？



(a)



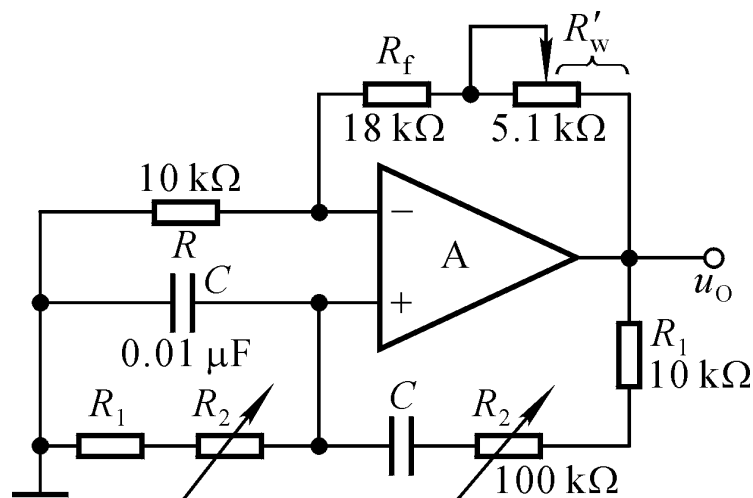
(b)



## 讨论四

电路如图所示，试求解：

- (1)  $R_w$ 的下限值；
- (2) 振荡频率的调节范围。





## § 7.4 正弦波振荡电路

- 一、正弦波振荡的条件和电路的组成
- 二、 $RC$ 正弦波振荡电路
- 三、 $LC$ 正弦波振荡电路
- 四、石英晶体正弦波振荡电路

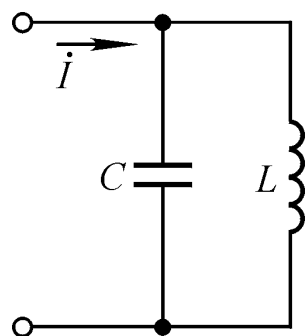






### 三、LC 正弦波振荡电路

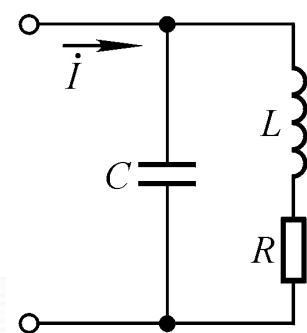
#### 1. LC 并联网络的选频特性



理想LC并联网络在谐振时呈纯阻性，且  
阻抗无穷大

谐振频率为

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



在损耗较小时，品质因数及谐振频率

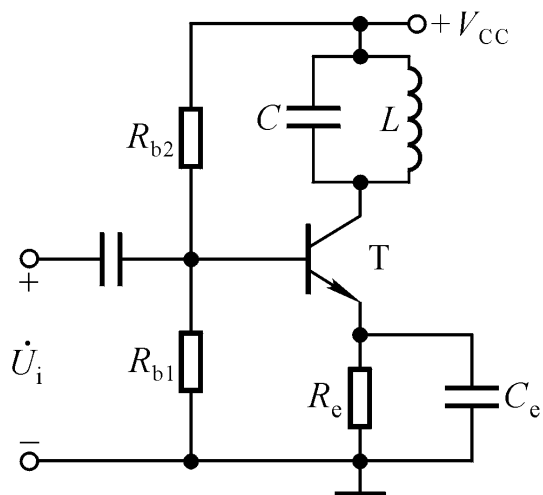
$$Q \approx \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

损耗

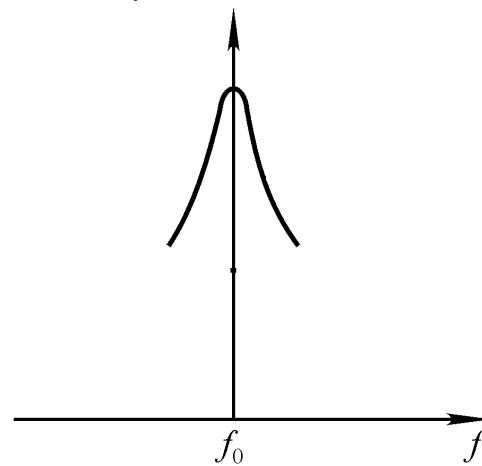
在 $f=f_0$ 时，网络的阻抗为多少？电容和电感中电流各约为多少？



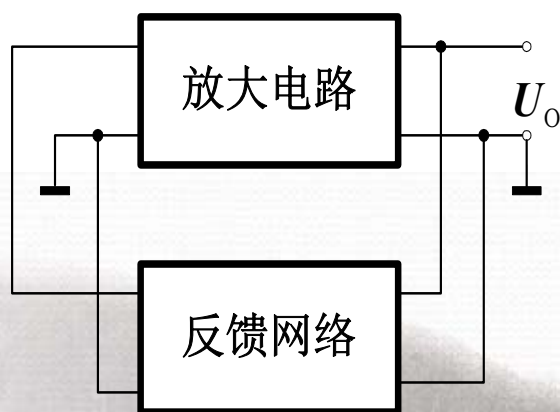
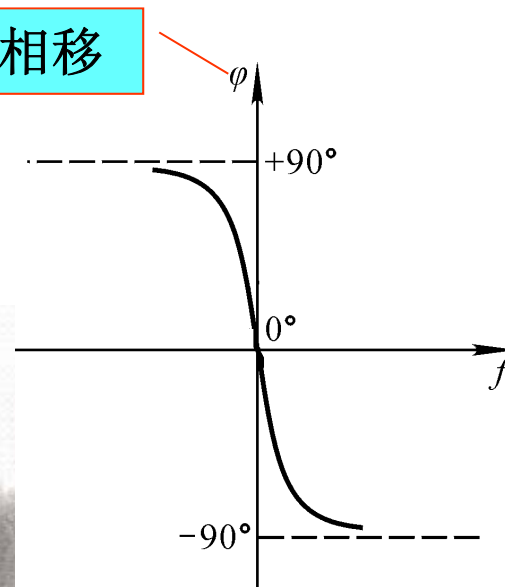
## LC选频放大电路→正弦波振荡电路



当 $f=f_0$ 时,  
电压放大倍  
数的数值最  
大, 且附加  
相移为**0**

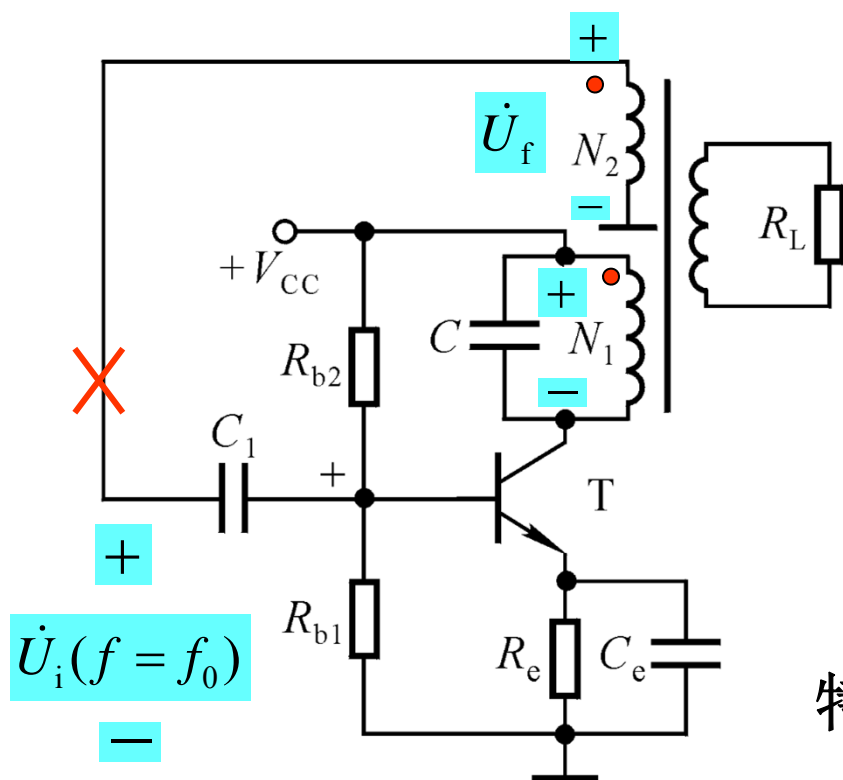


附加相移



构成正弦波  
振荡电路最简  
单的做法是通  
过变压器引入  
反馈

## 2. 变压器反馈式电路



为什么用分立元件  
构成放大电路？

必须有合适的同名端！

分析电路是否可能产生正  
波振荡的步骤：

- 1) 是否存在四个组成部分
- 2) 放大电路是否能正常工作
- 3) 是否可能满足相位条件
- 4) 是否可能满足幅值条件

$C_1$ 和 $C_e$ 是必要的吗？

特点：

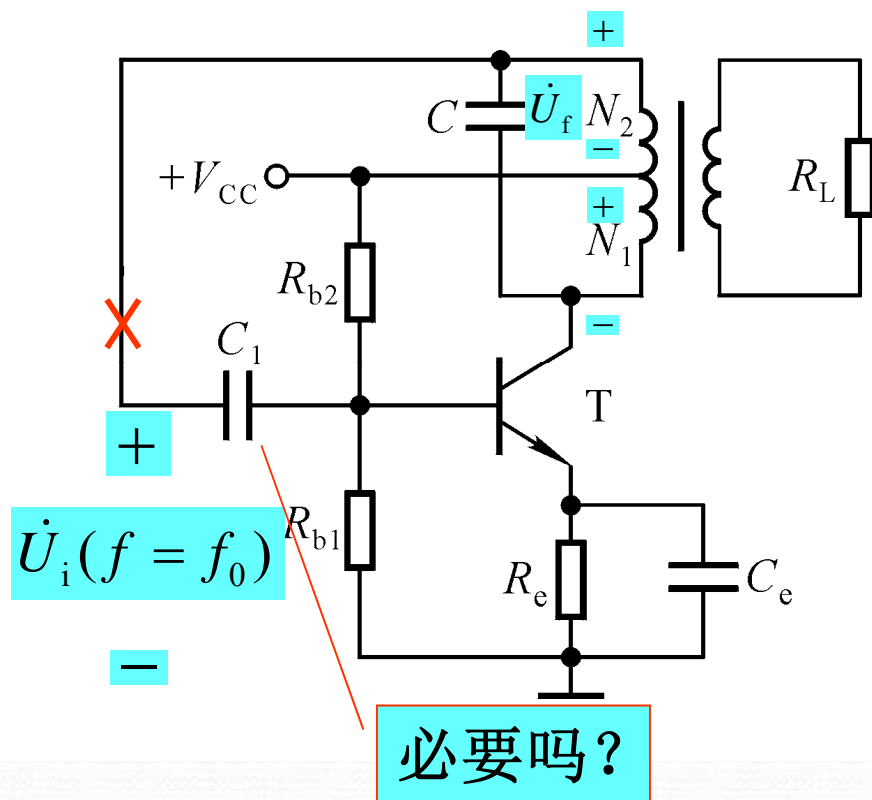
易振，波形较好；耦合不紧密，  
损耗大，频率稳定性不高

为使 $N_1$ 、 $N_2$ 耦合紧密，将它们合二为一组成电感反馈式电路

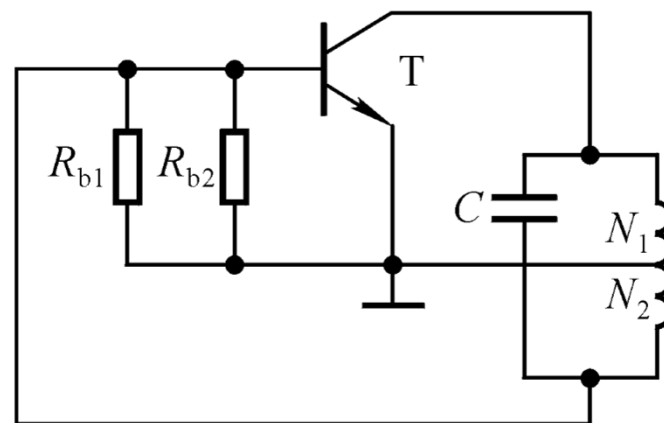


### 3. 电感反馈式电路

电路结构的特点？

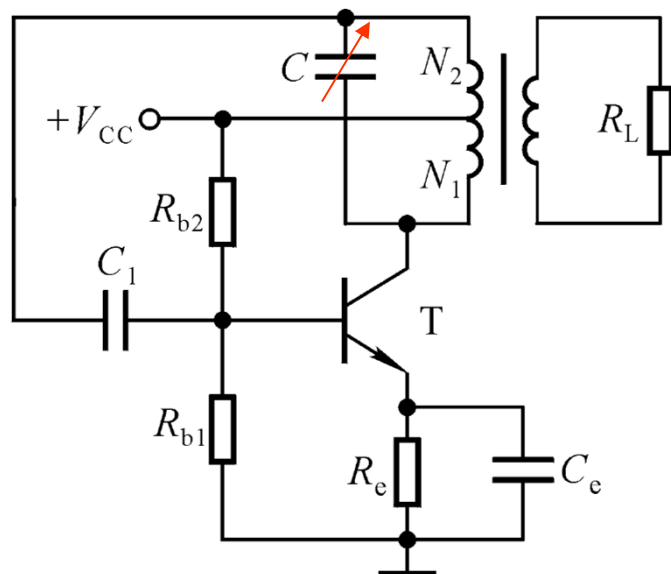


反馈电压取自哪个线圈？  
反馈电压的极性？



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

## 电感反馈式电路



特点：耦合紧密，易振，振幅大， $C$  用可调电容可获得较宽范围的振荡频率。波形较差，常含有高次谐波

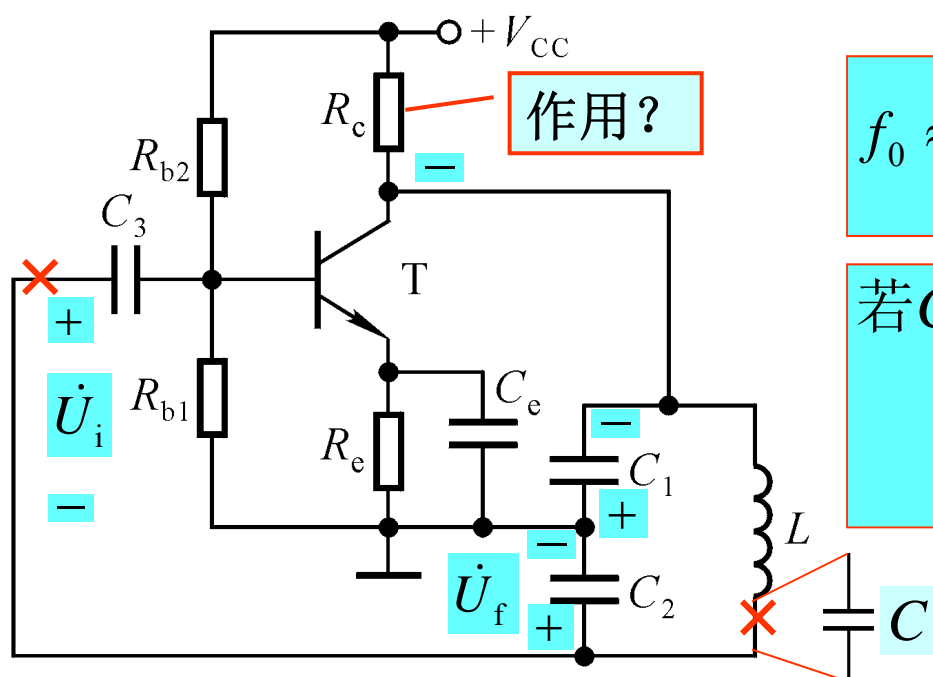
因为放大电路的输入电阻就是它自身的负载，故  $\dot{A}$  与  $\dot{F}$  具有相关性；若增大  $N_1$ ，则  $|\dot{A}|$  增大， $|\dot{F}|$  减小

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) 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

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

与放大电路参数无关

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, 适于频率固定的场合



## 四、石英晶体正弦波振荡电路

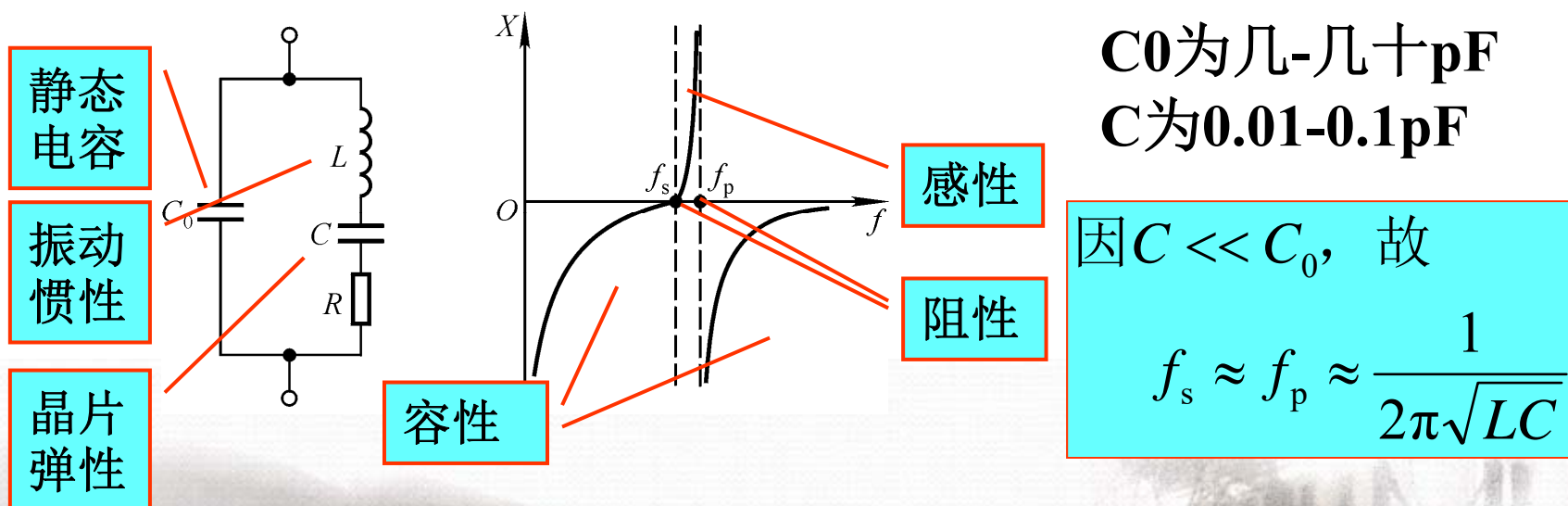
### 1. 石英晶体的特点



$\text{SiO}_2$  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

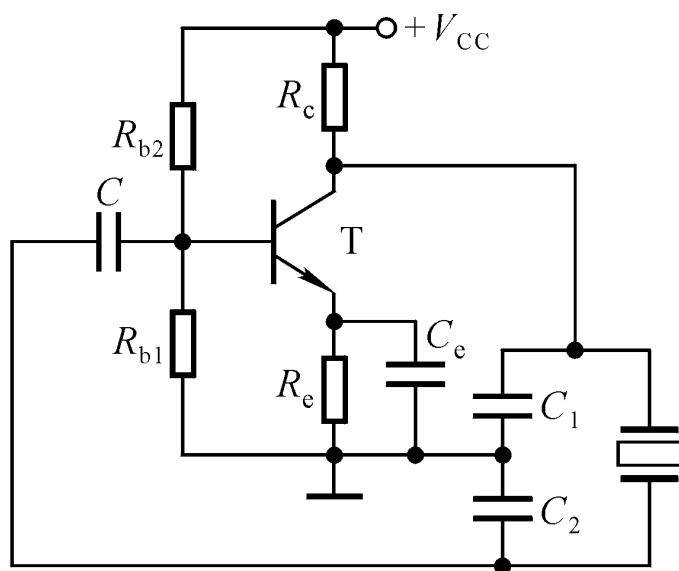
固有频率只决定于其切割方向和几何尺寸，故非常稳定



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 $\Delta f/f$ 为 $10^{-5}$ ，后者可达 $10^{-10} \sim 10^{-11}$

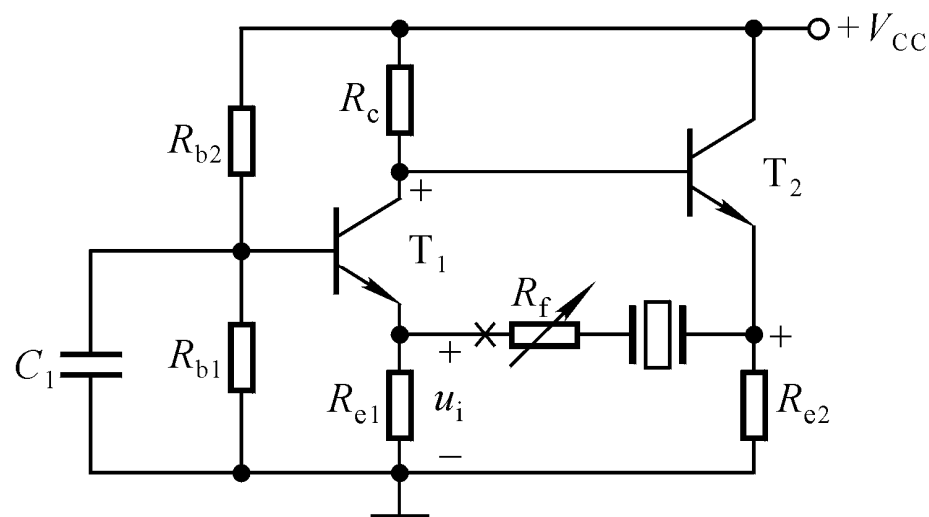
## 2. 电路

### (1) 并联型电路



- 1) 石英晶体工作在哪个区?
- 2) 是哪种典型的正弦波振荡电路?

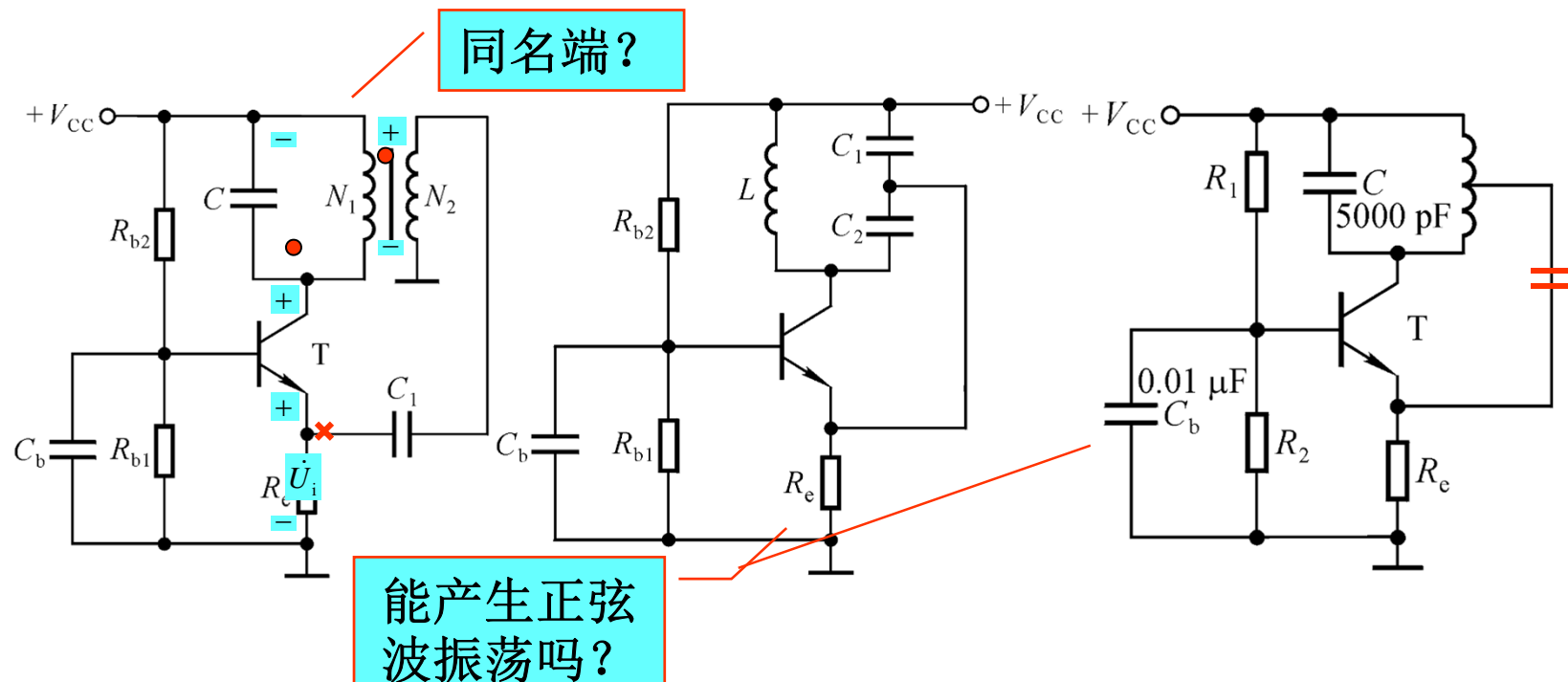
### (2) 串联型电路



- 1) 两级放大电路分别为哪种基本接法?
- 2) 石英晶体工作在哪个区?
- 3)  $C_1$ 的作用?

# 讨论一

三个电路有何共同之处？这样的电路形式有何好处？

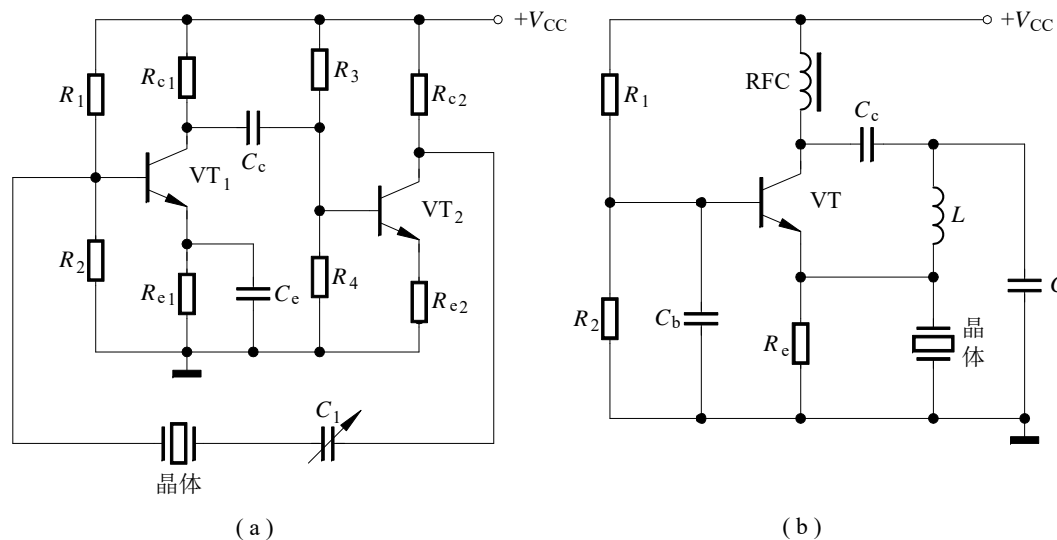


“判振”时的注意事项：

- 1) 放大电路必须能够正常工作，放大电路的基本接法
- 2) 断开反馈，在断开处加  $f=f_0$  的输入电压
- 3) 找出在哪个元件上获得反馈电压，是否能取代输入电压

## 讨论二

石英晶体正弦波振荡电路如图所示， $C_b$ 、 $C_e$ 为旁路电容， $C_c$ 、 $C_1$ 为耦合电容， $R_{FC}$ 为高频扼流圈。选择填空：



(1) 图 ( a ) 所示电路若能产生正弦波振荡，则振荡时石英晶体呈现\_\_\_\_\_性；图 ( b ) 所示电路若能产生正弦波振荡，则振荡时石英晶体呈现\_\_\_\_\_性。

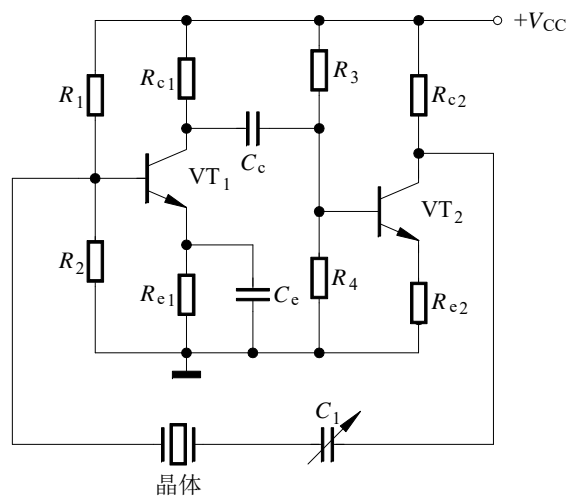
A. 电阻

B. 电容

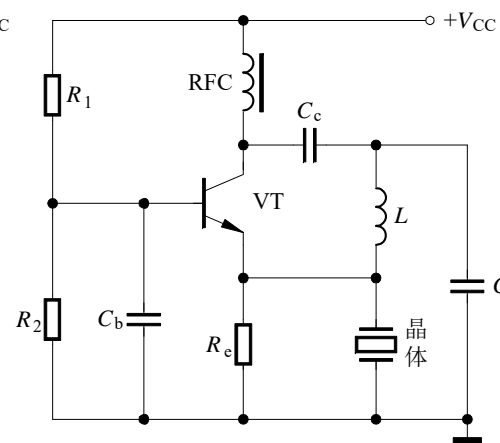
C. 电感



## 讨论二



(a)



(b)

(2) 图 (a) 所示电路\_\_\_\_\_产生正弦波振荡；图 (b) 所示电路\_\_\_\_\_产生正弦波振荡；

A. 不能

B. 可能

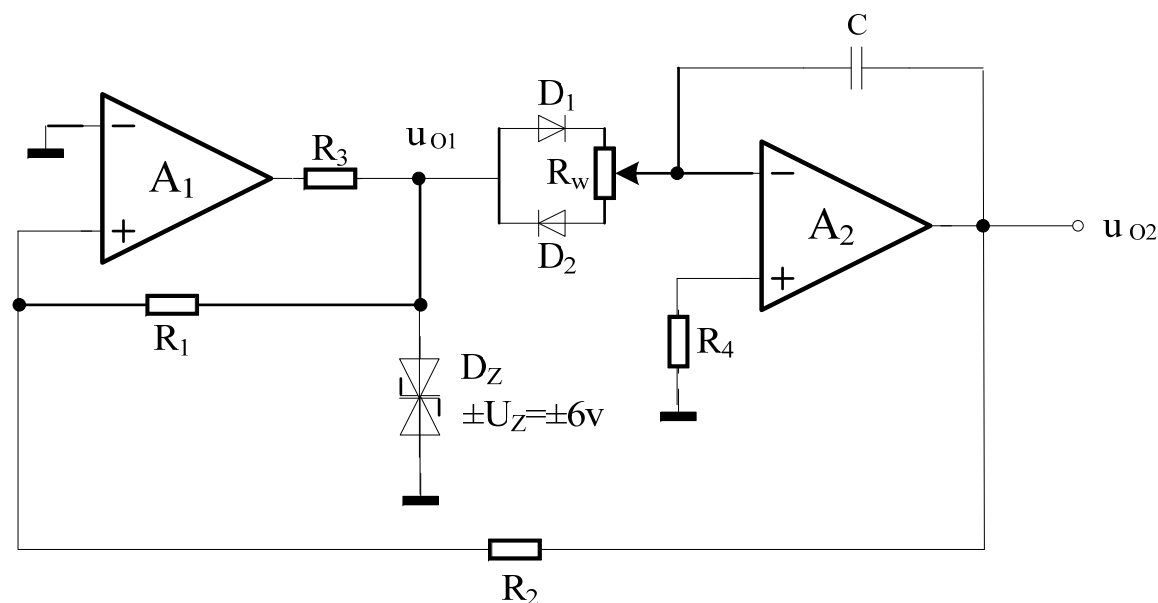
(3) 图 (a) 所示电路若能产生正弦波振荡，则为\_\_\_\_\_型石英晶体振荡电路；图 (b) 所示电路若能产生正弦波振荡，则为\_\_\_\_\_型石英晶体振荡电路；

A. 串联

B. 并联

### 讨论三

已知 $R_w$ 的滑动端位于中点。选择填空：增大，不变，减小



当 $R_1$ 增大时， $u_{O1}$ 的占空比将\_\_，振荡频率将\_\_， $u_{O2}$ 的幅值将\_\_；  
当 $R_2$ 增大时， $u_{O1}$ 的占空比将\_\_，振荡频率将\_\_， $u_{O2}$ 的幅值将\_\_；  
当 $U_z$ 增大时， $u_{O1}$ 的占空比将\_\_，振荡频率将\_\_， $u_{O2}$ 的幅值将\_\_；  
若 $R_w$ 滑动端向上移动，则 $u_{O1}$ 的占空比将\_\_，振荡频率将\_\_， $u_{O2}$ 的幅值将\_\_。



## 讨论四

已知 $R_1=10\text{k}\Omega$ ,  $R_2=20\text{k}\Omega$ ,  $R=10\text{k}\Omega$ ,  $C=0.01\mu\text{F}$ , 稳压管的稳压值为 $6\text{V}$ ,  $U_{\text{REF}}=0$ 。

(1) 分别求输出电压 $u_O$ 和电容两端电压 $u_C$ 的最大值和最小值;

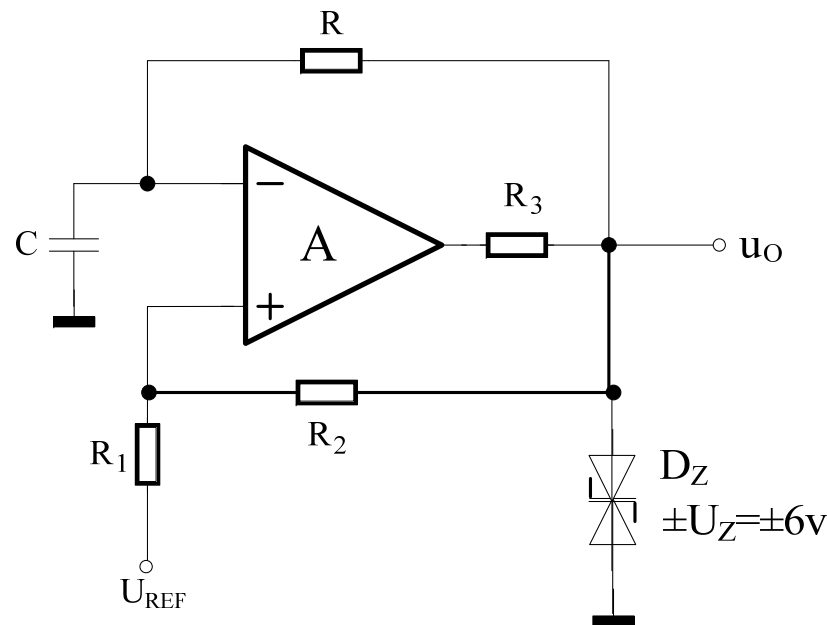
(2) 计算输出电压 $u_O$ 的周期, 对应画出 $u_O$ 和 $u_C$ 的波形, 标明幅值和周期;

(3) 若增大 $R_1$ 的阻值, 将如何影响 $u_O$ 的幅值和周期;

(4) 若增大 $R$ 的阻值, 将如何影响 $u_O$ 的幅值和周期;

(5) 若增大 $U_Z$ , 将如何影响 $u_O$ 的幅值和周期;

(6) 电阻 $R_3$ 的作用;



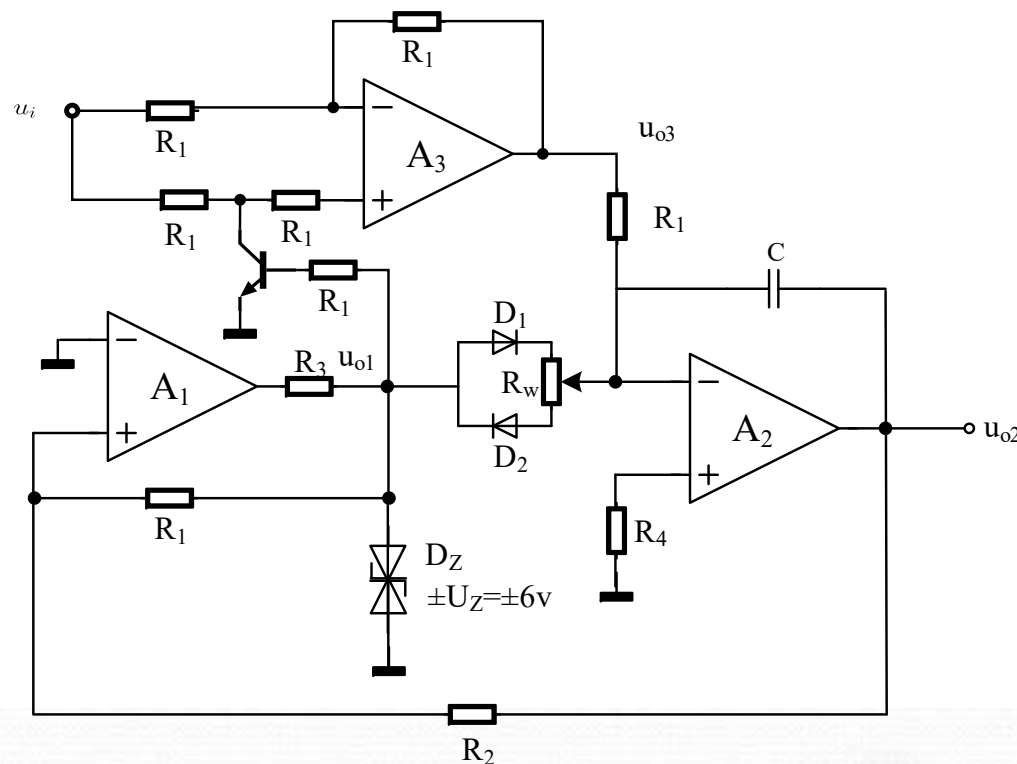
(7) 若增大 $U_{\text{REF}}$ , 输出波形周期如何变化;

(8) 若减小 $U_{\text{REF}}$ , 输出波形周期如何变化;

(9) 若提高输出波形的占空比, 应该如何调整 $U_{\text{REF}}$ 。

## 讨论五

已知  $R_1=1k\Omega$  ,  $R_2=2k\Omega$  ,  $R_3=3k\Omega$  ,  $R_W=10k\Omega$  ,  $u_i>0$  ,  $C=1\mu F$  , 三极管饱和管压降可忽略, 二极管导通压降为  $0.7V$  。



- (1)  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  的输出波形;
- (2) 计算  $u_{o1}$  和  $u_i$  的传递关系;
- (3) 输出波形的占空比。