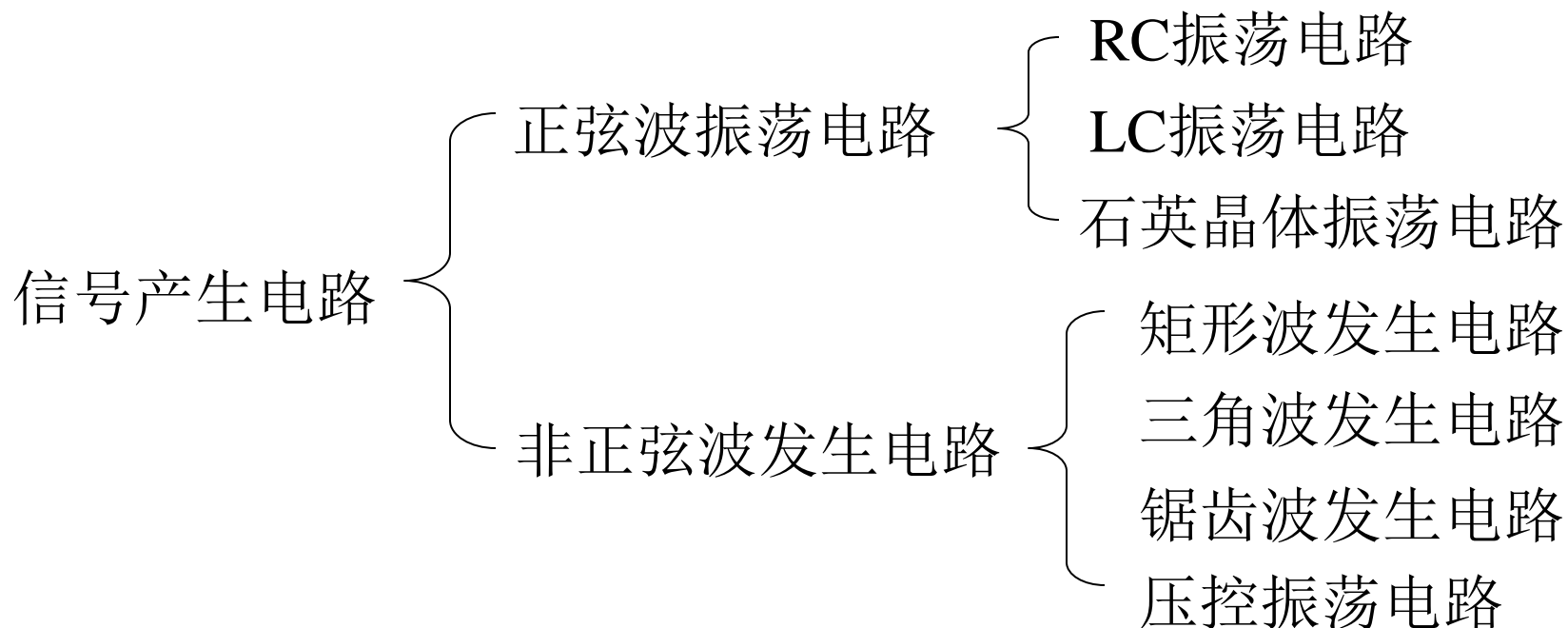


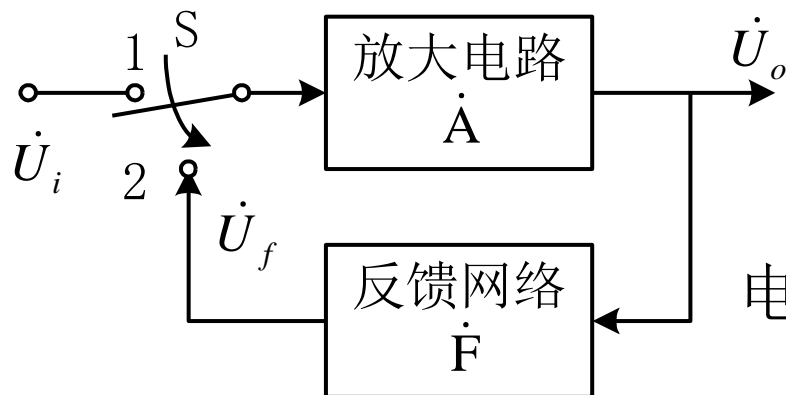
## 第九章 信号产生电路

信号产生电路也称**波形发生电路**，是无线通信、自动测量以及自动控制系统中不可缺少的一种电路。



## § 9.1.1 产生正弦振荡的条件

正弦波振荡电路是依靠电路的自激振荡产生一定幅度、一定频率正弦信号的电路。



如  $\dot{U}_f = \dot{U}_i$

开关S从1倒向2后，放大电路的输出电压将保持不变

电路“无中生有”地产生了一个信号

产生自激振荡的条件

$$\dot{U}_f = \dot{F}\dot{U}_o = \dot{A}\dot{F}\dot{U}_i = \dot{U}_i$$

$$\dot{A}\dot{F} = 1 \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 & \text{幅度平衡条件} \\ \varphi_{\dot{A}} + \varphi_{\dot{F}} = \pm 2n\pi & \text{相位平衡条件} \end{cases}$$

相位平衡条件保证了反馈信号与放大电路的输入信号同相。

$A$ 或 $F$ 一般是频率的函数，为了得到单一频率的正弦波，在放大电路或反馈网络中就必须包含一个由动态元件组成的选频网络。

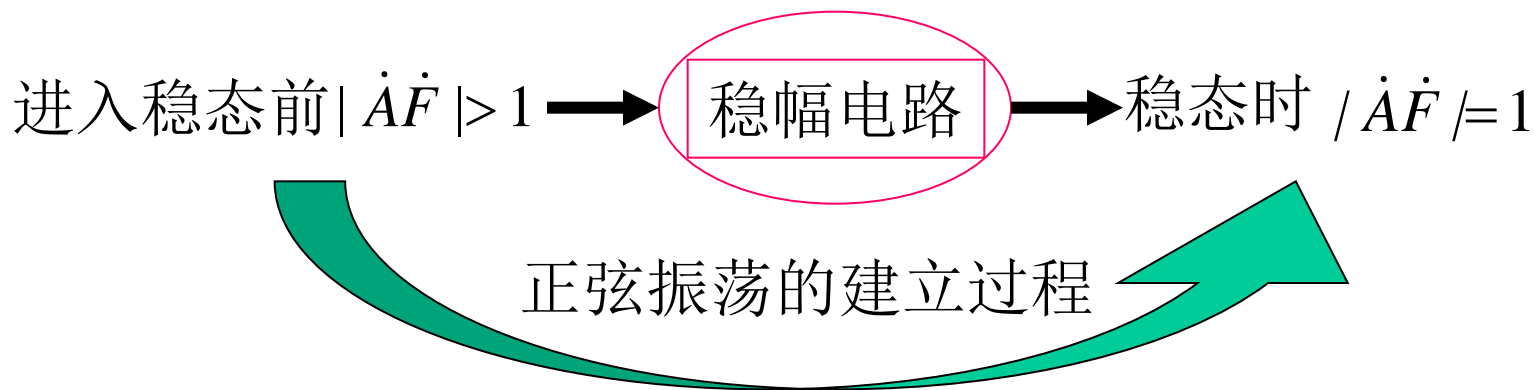
选频网络由RC元件组成，称RC振荡电路 产生1MHz以下信号

选频网络由LC元件组成，称LC振荡电路 产生1MHz以上信号

$|\dot{A}\dot{F}| = 1$  这个幅度平衡条件是指电路已进入稳态振荡后而言的。

要使电路能自行建立振荡，在电路进入稳态前还必须满足

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1 \quad \leftarrow \quad \text{起振条件}$$



➤ **结论：** 正弦波振荡电路是一个具有正反馈的放大电路，电路中包含**选频网络**和**稳幅电路**。

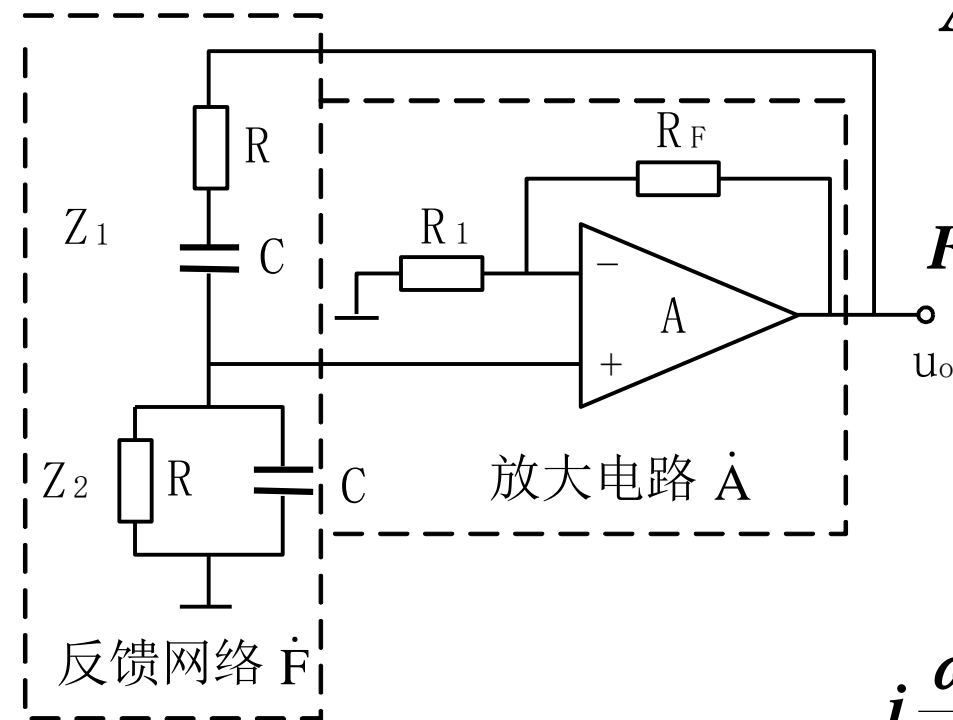
➤ 选频网络决定了电路的振荡频率 $\omega_0$ 。

$$\omega_0 \text{ 满足 } \varphi_{\dot{A}}(\omega_0) + \varphi_{\dot{F}}(\omega_0) = \pm 2n\pi$$

➤ 稳幅电路控制放大倍数**A**或反馈系数**F**的大小，从而控制输出信号的幅值。

## § 9.1.2 RC正弦振荡电路

### ► 文氏电桥振荡电路



$$\dot{A} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

$$\dot{F} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

$$= \frac{j\omega RC}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + 3j\omega RC}$$

令  $\omega_0 = 1/RC$

$$\dot{F} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + 3j \frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{1}{3 + j \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

➤ 振荡的稳态条件:

$$\text{由 } \dot{A}F = \frac{1 + \frac{R_F}{R_1}}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)} = 1 \text{ 得}$$

$$\omega = \omega_o = \frac{1}{RC}$$

$$R_F = 2R_1$$

➤ 起振条件:

$$R_F > 2R_1$$

$$\omega = \omega_o = \frac{1}{RC}$$

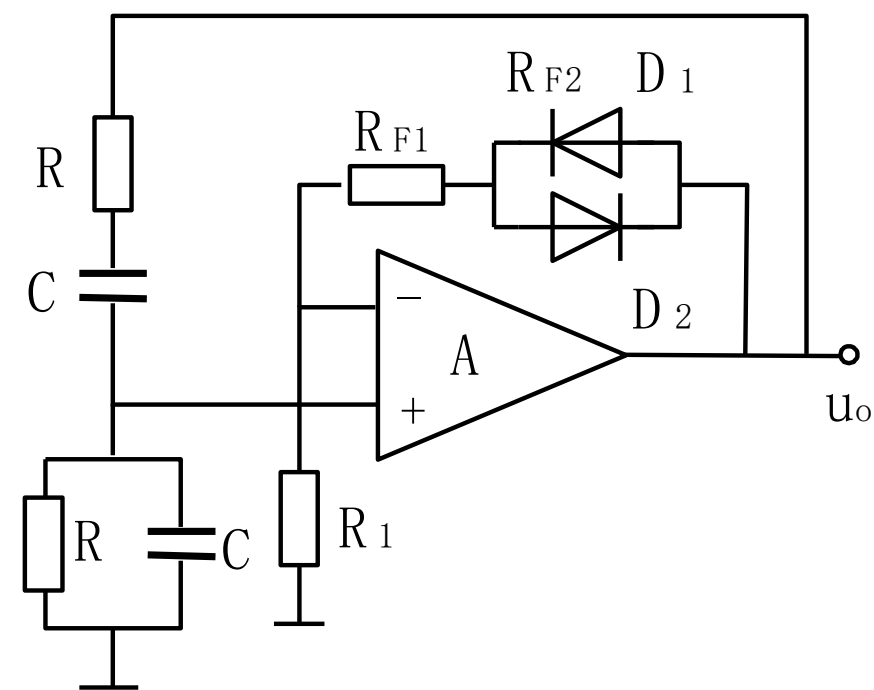
①  $R_F$  采用温度系数为负值的热敏电阻

当  $U_O$  很小时,  $I_{R_F}$  也很小,  $R_F$  较大,  $R_F > 2R_1$ , 对满足相位平衡条件的正弦信号 ( $f = f_o = 1/2\pi RC$ ),  $AF > 1$ ,  $U_O$  增加;

$$U_O \uparrow \rightarrow I_{R_F} \uparrow \rightarrow R_F \downarrow \rightarrow A \downarrow。$$

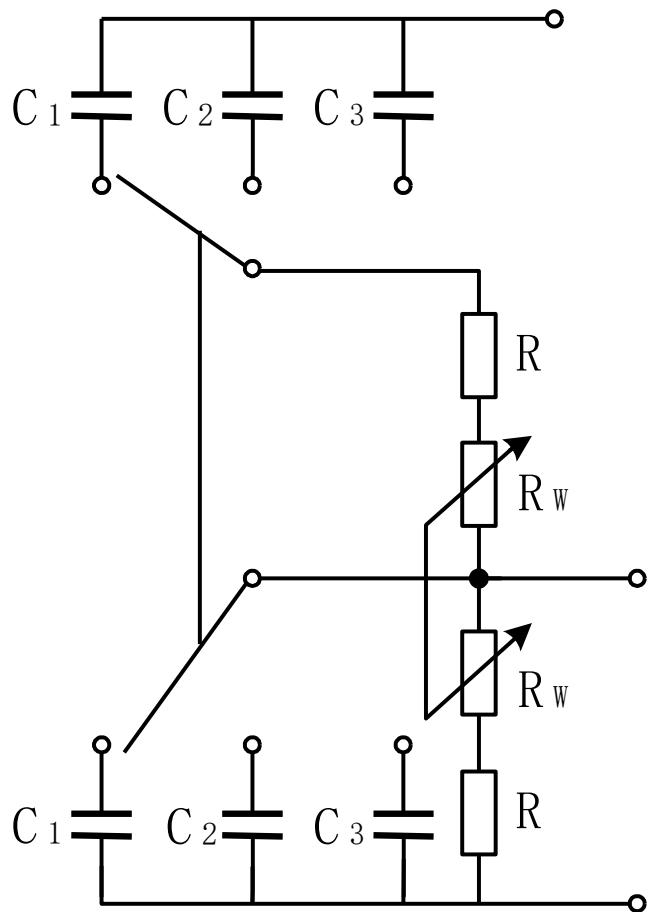
当输出电压增大到一定值时, 热敏电阻的阻值减至  $2R_1$ , 这时  $AF = 1$ , 输出电压不再增加, 电路达到稳定平衡状态。

## ②利用二极管正向伏安特性的非线性



- $D_1$ 和 $D_2$ 分别在输出电压的正、负半周内导通。
- 输出电压很小时，加在二极管上的电压也很小，二极管呈现很大的电阻， $R_{F1}+R_{F2}>2R_1$ ，输出电压增大；
- 随着输出电压的增大，二极管的正向电阻逐渐减小，直至 $R_{F1}+R_{F2}=2R_1$ ，电路达到稳定状态。

## ➤ $RC$ 正弦波振荡电路的频率可通过 $C$ 和 $R$ 调节

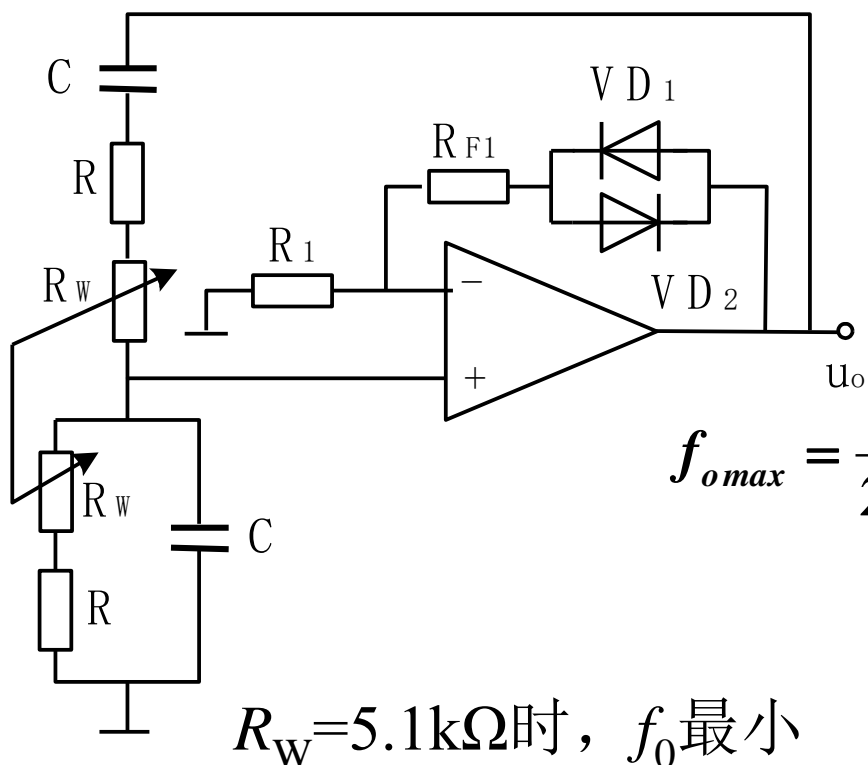


- 通过波段开关切换不同电容可以实现频率粗调;
- $R_w$ 为同轴电位器, 调节 $R_w$ 可对频率进行细调;



**例：** 正弦波振荡电路中，设  $R=1\text{k}\Omega$ ， $R_w=5.1\text{k}\Omega$ ， $C=0.033\mu\text{F}$ ， $R_{F1}=9.1\text{k}\Omega$ ， $R_1=5.1\text{k}\Omega$ ，二极管的正向压降为 $0.6\text{V}$ ，集成运放的最大输出电压为 $\pm 14\text{V}$ 。

(1) 计算振荡频率的调节范围； (2) 估算输出电压的幅值。



解： (1) 电路的振荡频率为

$$f_o = \frac{1}{2\pi(R + R_w)C}$$

$R_w=0$ 时， $f_o$ 最大

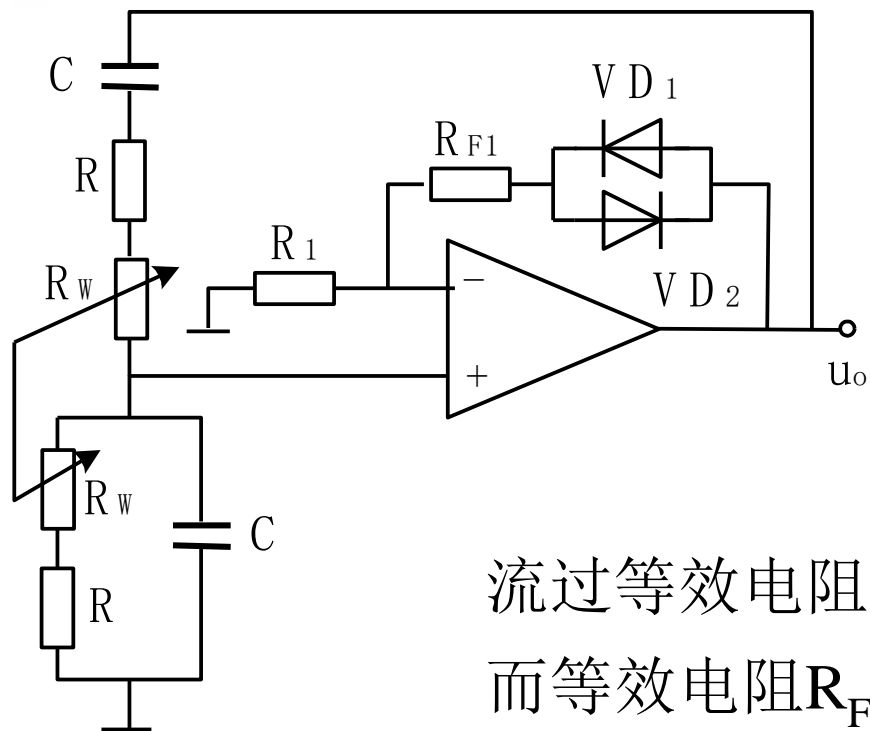
$$f_{o\max} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10^3 \times 0.033 \times 10^{-6}} \text{ Hz}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.033} \text{ kHz} = 4.82 \text{ kHz}$$

$R_w=5.1\text{k}\Omega$ 时， $f_o$ 最小

$$f_{o\min} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times (1 + 5.1) \times 10^3 \times 0.033 \times 10^{-6}} = 791 \text{ Hz}$$

振荡电路的频率调节范围为 $791\text{Hz} \sim 4.82\text{kHz}$



(2) 当电路达到稳定状态时，由集成运放、 $R_1$ 、 $R_F$ 以及二极管组成的放大电路的电压放大倍数等于3

$$R_{F1} + R_{F2} = 2R_1$$

$$R_{F2} = 2R_1 - R_{F1} = 1.1k\Omega$$

流过等效电阻 $R_{F2}$ 的电流等于流过 $R_{F1}$ 和 $R_1$ 的电流，而等效电阻 $R_{F2}$ 上的压降为0.6V

$$\frac{0.6}{1.1} = \frac{U_{om}}{1.1 + 9.1 + 5.1}$$

$$U_{om} = \frac{0.6}{1.1} \times 15.3 = 8.3V$$

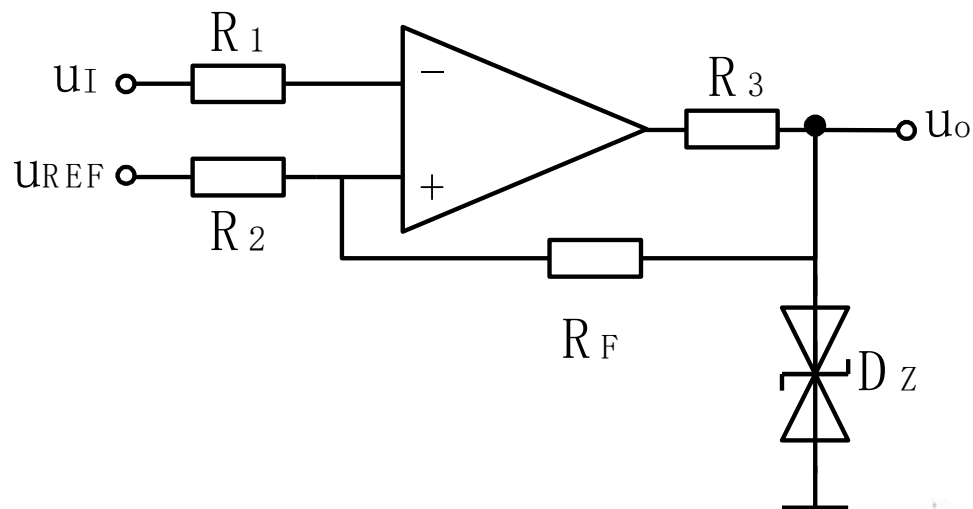
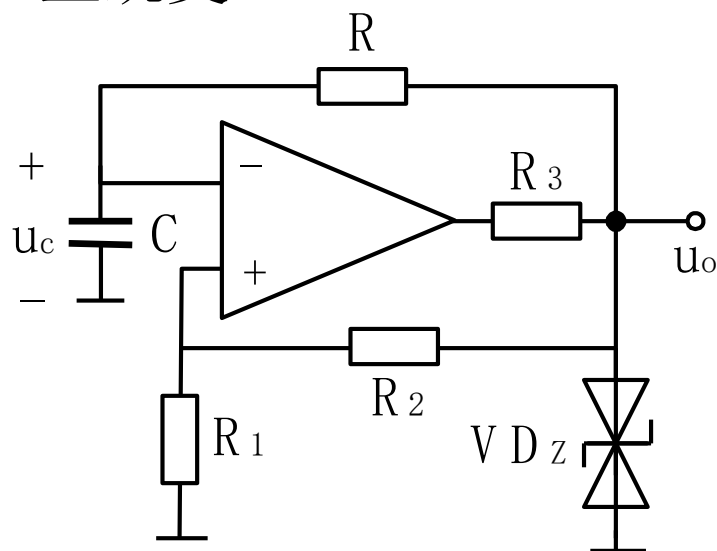
当 $U_{om} > 8.3V$ 时，二极管上的电压保持为0.6V，流过 $R_{F1}$ 的电流将增大，从而使二极管的等效电阻减小， $A < 3$ ， $AF < 1$ ，输出电压下降。

## § 9.2 非正弦波产生电路

- 非正弦波产生电路：产生矩形波、三角波及锯齿波等信号的电路。
- 在非正弦波产生电路中，集成运放主要工作在饱和区。

## § 9.2.1 矩形波产生电路

- 矩形波产生电路指能直接产生矩形波和方波的电路；
- 矩形波包含丰富的高次谐波，也称为 **多谐振荡器**；
- 基本电路是在**滞回比较器**的基础上增加一个**RC充放电回路**，并将电容电压作为滞回比较器的输入电压，控制其输出电压发生跳变。



## 工作原理

设刚接通电源时,  $u_C=0$ ,  $U_O=+U_Z$

$+U_Z$ 通过R向C充电,  $u_C \uparrow$

$$U'_+ = + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$$

$u_C = u'_+$ 时, 输出电压发生跳变,

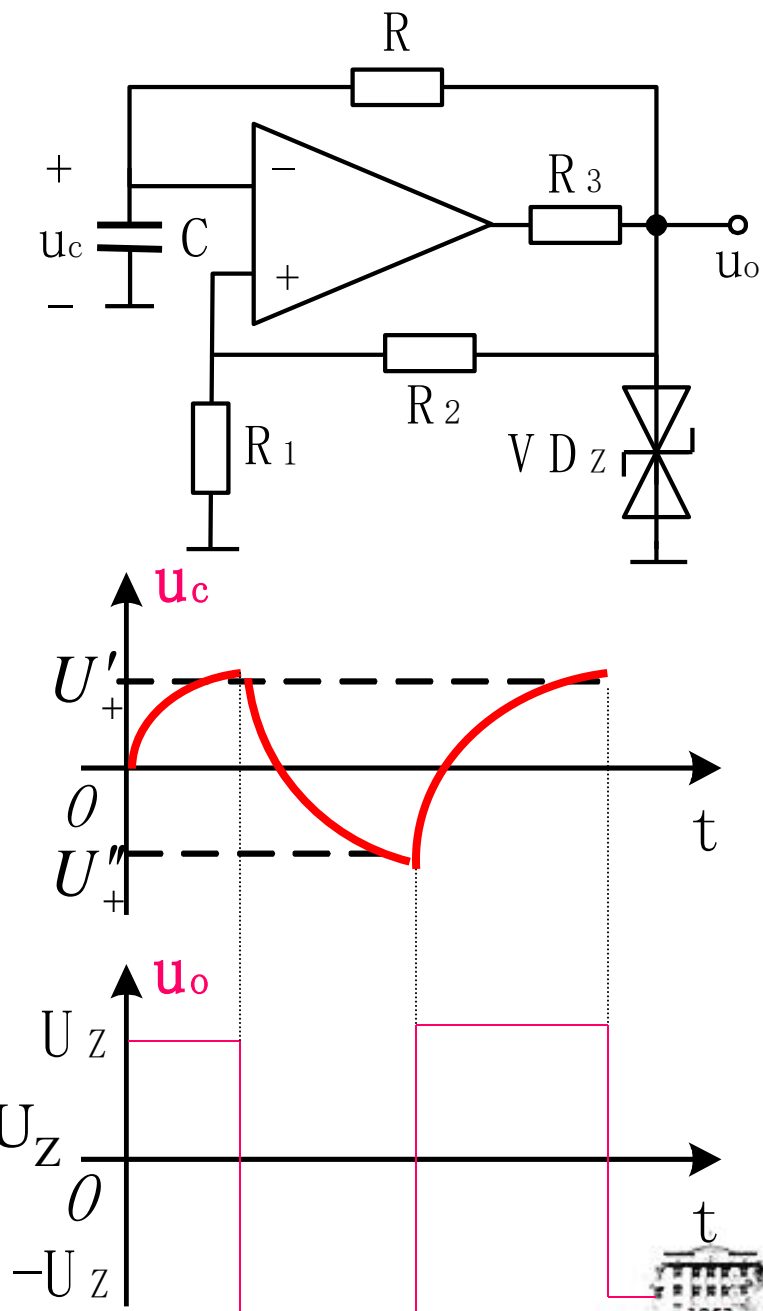
$$u_O = -U_Z$$

电容开始放电,  $u_C \downarrow$

此时 
$$U''_+ = - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$$

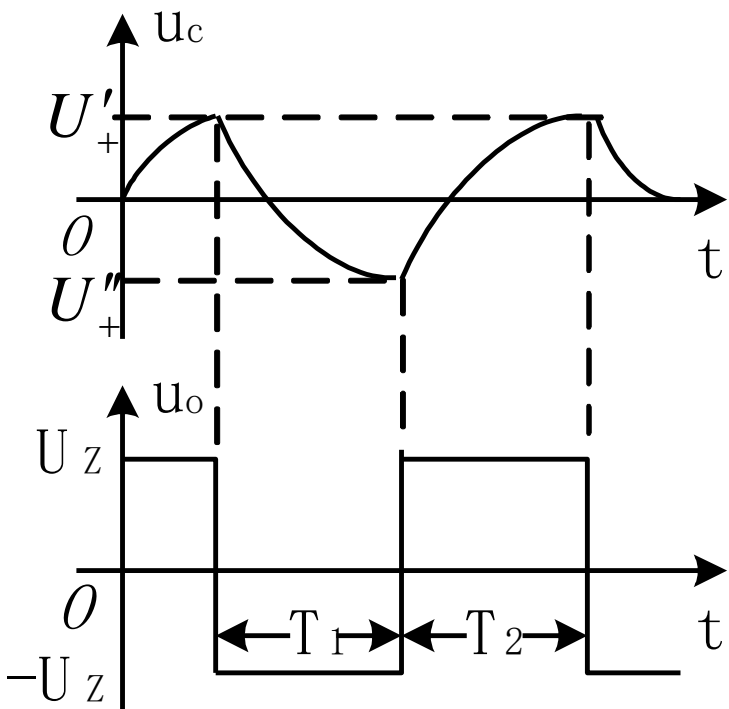
$u_C = u''_+$ 时, 输出电压又发生跳变,  $u_O = +U_Z$

电容又开始下一个周期的变化



## 推导周期公式

将电容开始放电的瞬间作为计时起点。



电容放电时

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(o_+) - u_C(\infty)]e^{-t/\tau}$$

$$u_C(o_+) = U'_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$$

$$u_C(\infty) = -U_Z \quad \tau = RC$$

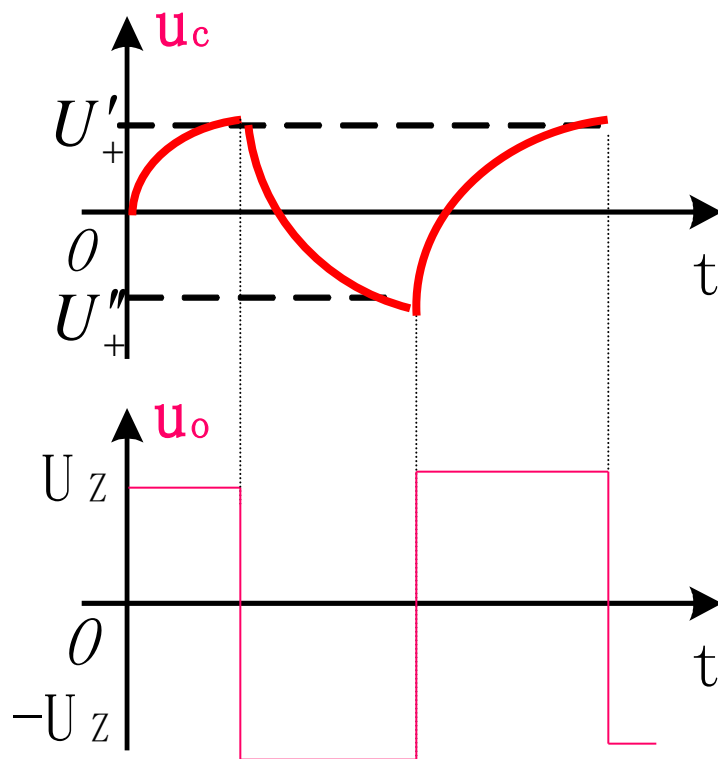
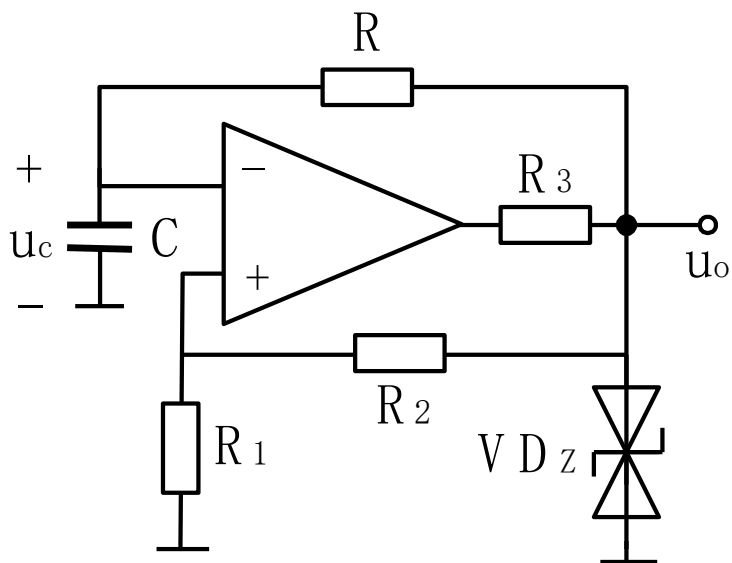
$$u_C(t) = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z + U_Z \right) e^{-t/RC} - U_Z$$

$$t = T/2 \text{ 时 } u_C(t) = U''_+ = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$$

$$-\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z = U_Z \frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{T}{2RC}} - U_Z$$

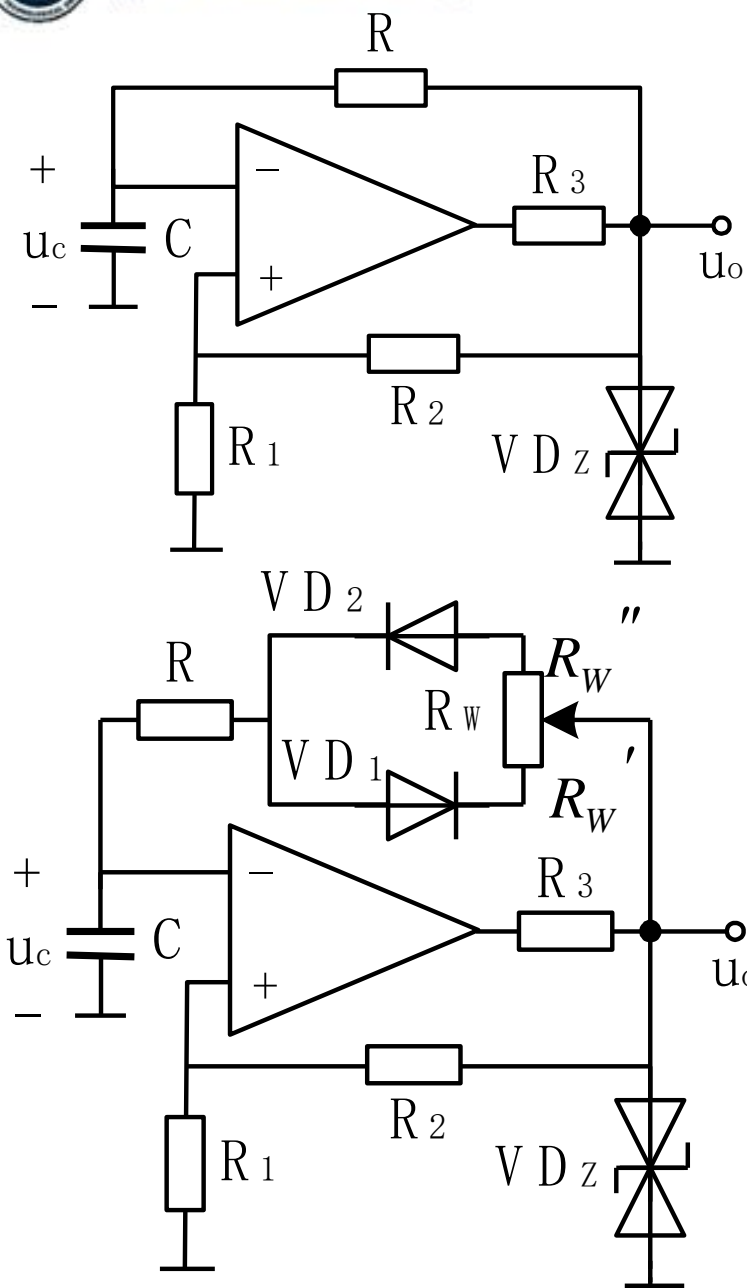


$$T = 2RC \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$



- 高电平的持续时间与周期的比称为 **占空比**
- 改变电容的充放电的时间常数即可 调节电路的占空比

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



充电时间常数为:  $(R_w'' + R)C$

高电平持续时间为

$$T_2 = (R + R_w'')C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

放电时间常数为:  $(R_w' + R)C$

低电平持续时间为

$$T_1 = (R + R_w')C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

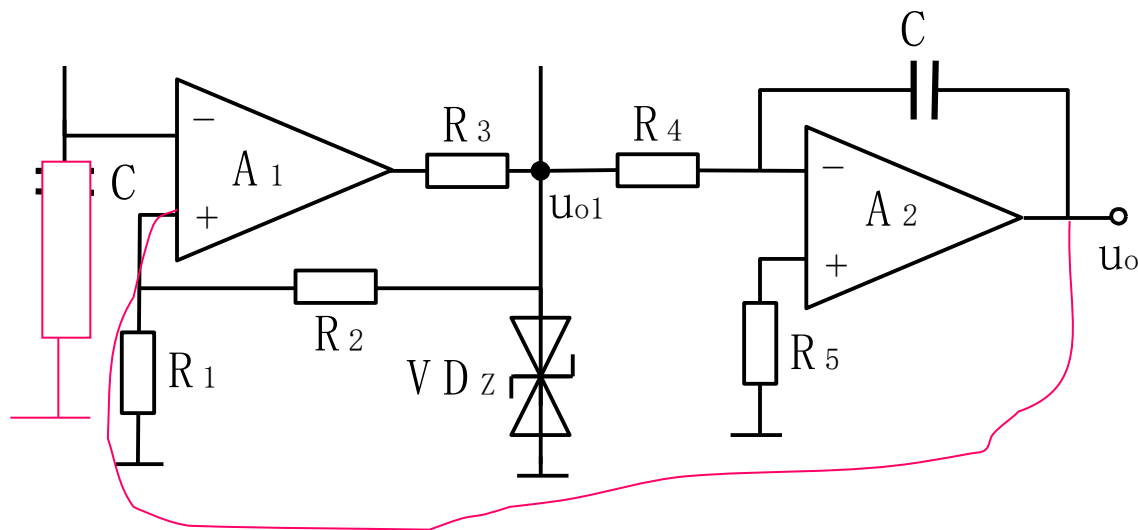
$$T = T_1 + T_2 = (2R + R_w)C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

占空比为

$$D = \frac{T_2}{T} = \frac{R + R_w''}{2R + R_w}$$

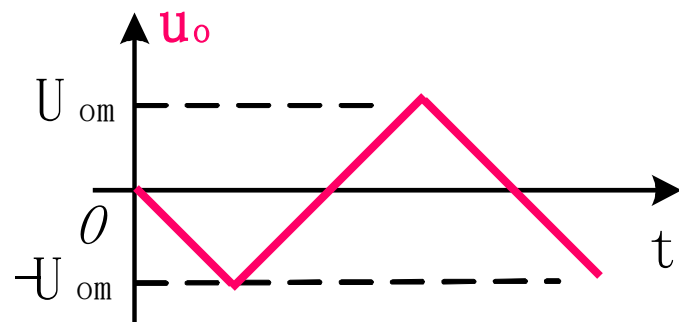
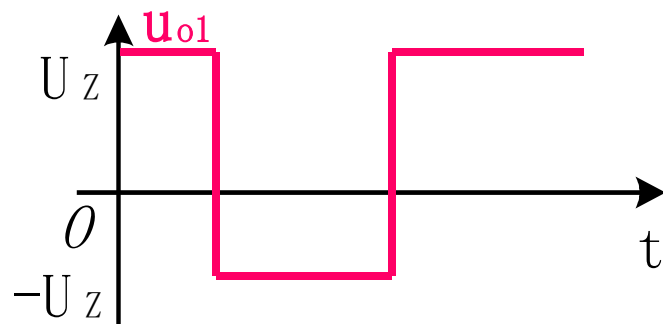
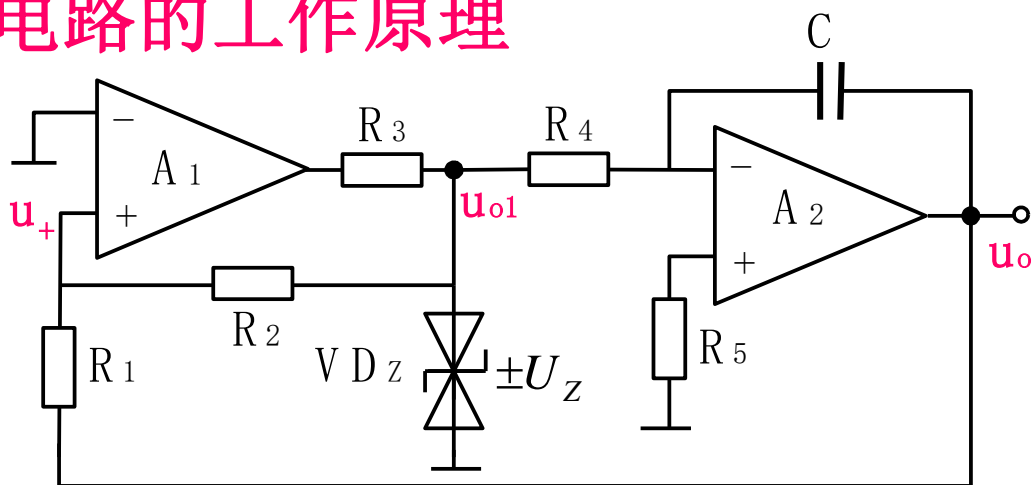


## § 9.2.2 三角波产生电路



- 矩形波经积分电路便可产生三角波，但是此电路要求前后电路的时间常数配合好，不能让积分器饱和。
- 解决问题的关键是  **$A_1$ 的净输入电压变化**。
- $u_0$ 渐变，如果把 $u_0$ 直接引回到 $A_1$ 的一个输入端，而 $A_1$ 的另一个输入端电压固定，则同样可使 $A_1$ 的净输入电压渐变。

## 电路的工作原理



$$u_{o1} = +U_Z, u_o \downarrow; u_{o1} = -U_Z, u_o \uparrow$$

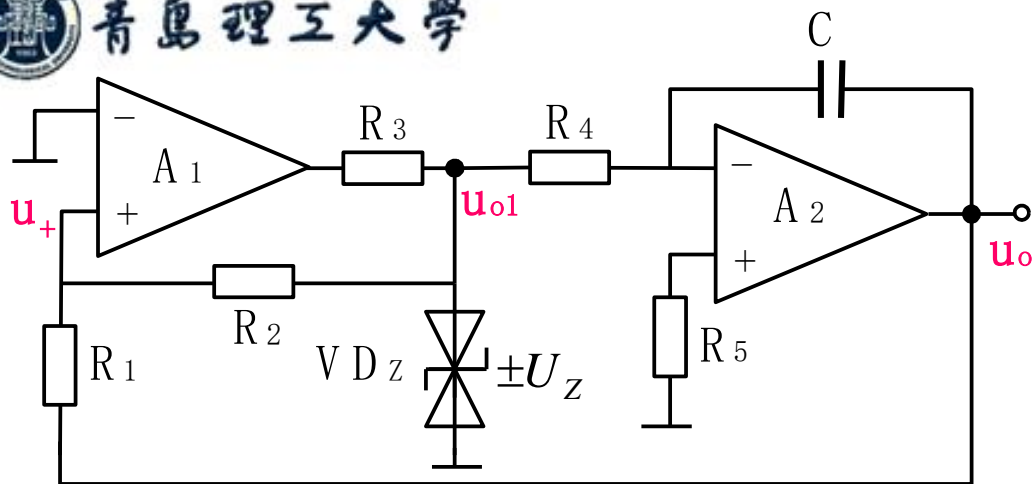
$u_+$  随  $u_o$  变化

$A_1$  接成正反馈，设电源接通后， $u_{o1} = +U_Z$

$u_o$  由零下降  $u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o \downarrow$

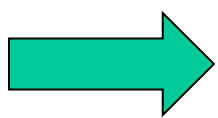
$u_+$  降至零时， $u_{o1}$  跳变为  $-U_Z$   $u_o$  上升  $u_+ = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o \uparrow$

当  $u_+$  增大至零时，比较器输出电压  $u_{o1}$  又跳变为  $+U_Z$ ， $u_o \downarrow$   
进入下一个周期的变化



三角波的幅值  $U_{om}$  为  $A_1$  输出跳变时即  $u_+ = 0$  时  $A_2$  的输出电压值

$$u_+ = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o = 0$$



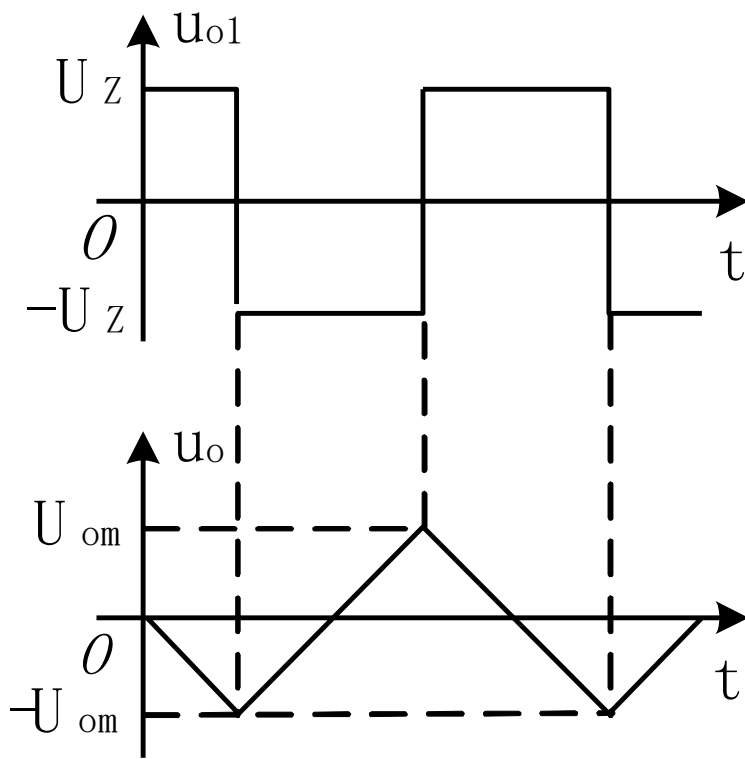
$$U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$

积分电路对  $-U_Z$  进行积分时，在半个周期的时间内，输出电压  $u_o$  从  $-U_{om}$  上升至  $+U_{om}$

由积分电路的输出电压公式得  $-\frac{1}{R_4 C} \int_0^{\frac{T}{2}} (-U_Z) dt = \Delta u_o = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} U_Z$

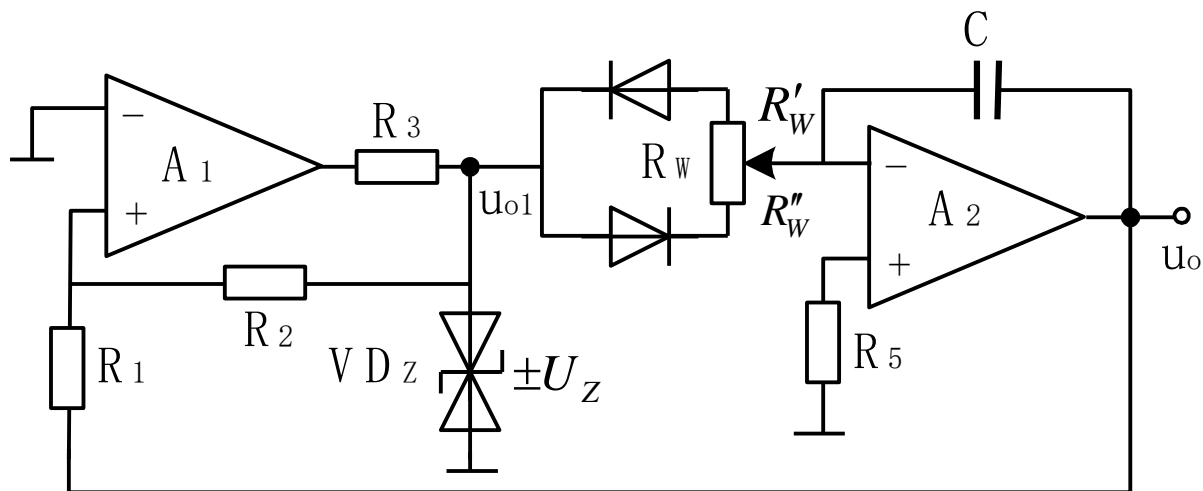
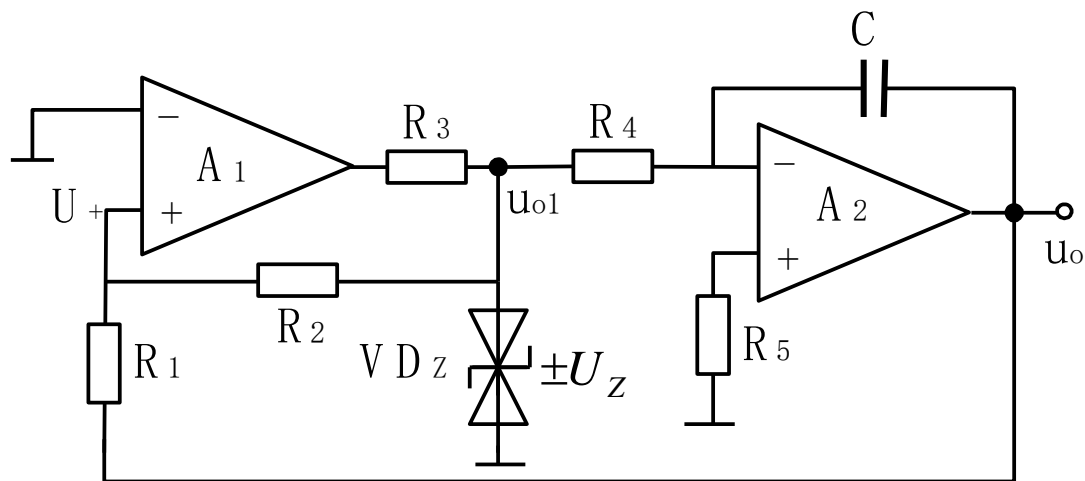
矩形波和三角波的**振荡周期**为

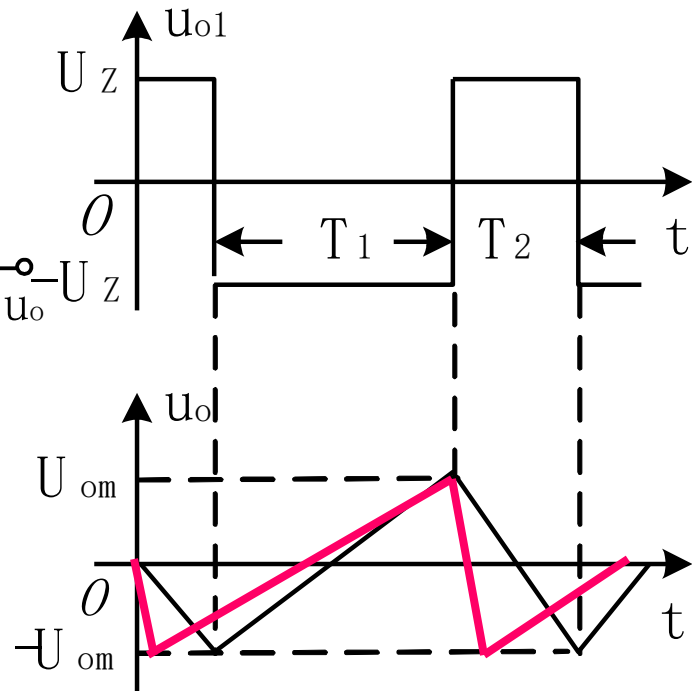
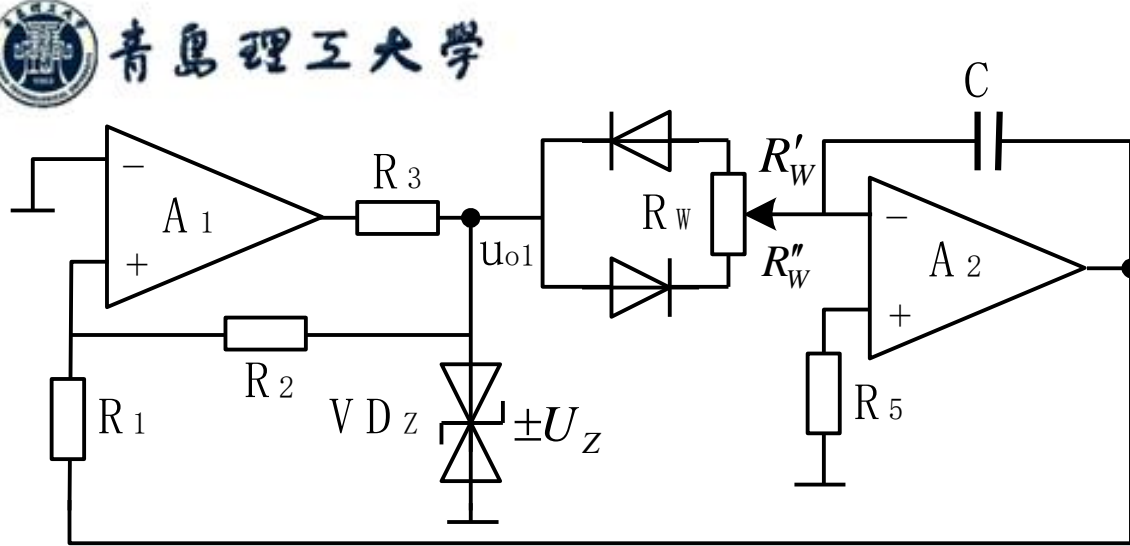
$$T = \frac{4R_1 R_4 C}{R_2}$$



## § 9.2.3 锯齿波产生电路

改变积分电路的时间常数，即可使积分电路的输出电压上升和下降的速率不同，从而使对称的三角波变成不对称的锯齿波。





$R'_w \gg R''_w$  时

充电时间常数很小，输出电压  $u_o$  下降很快

锯齿波的幅值与三角波相同

$$U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_z$$

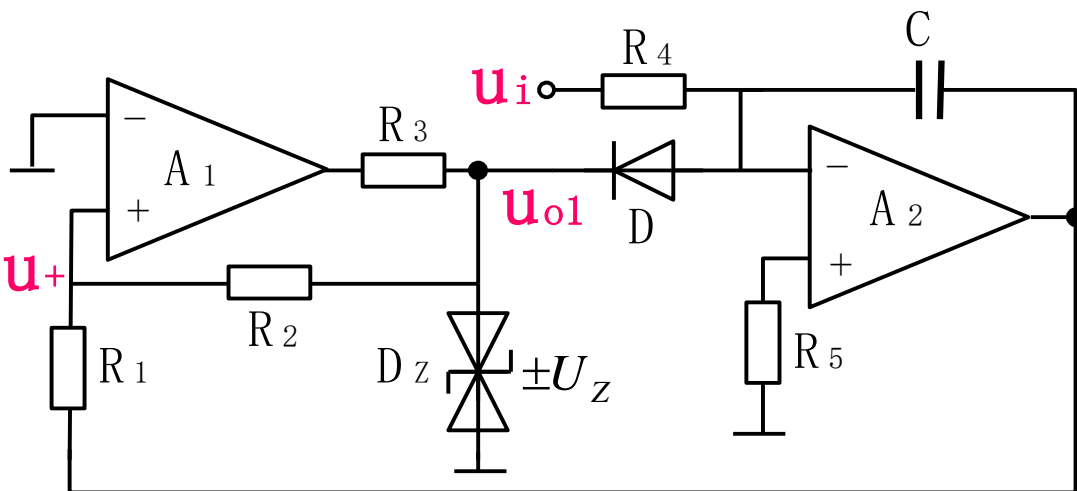
波形的上升时间为  $T_1 = \frac{2R_1 R'_w C}{R_2}$

波形的下降时间为  $T_2 = \frac{2R_1 R''_w C}{R_2}$

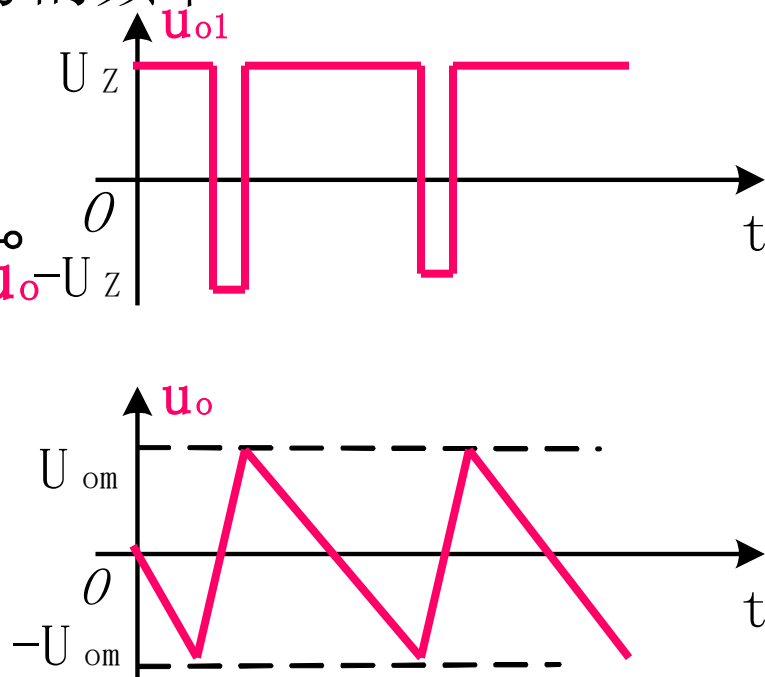
周期  $T = T_1 + T_2 = \frac{2R_1 R_w C}{R_2}$

## § 9.3.4 压控振荡电路

通过外加的电压控制端来控制输出信号的频率



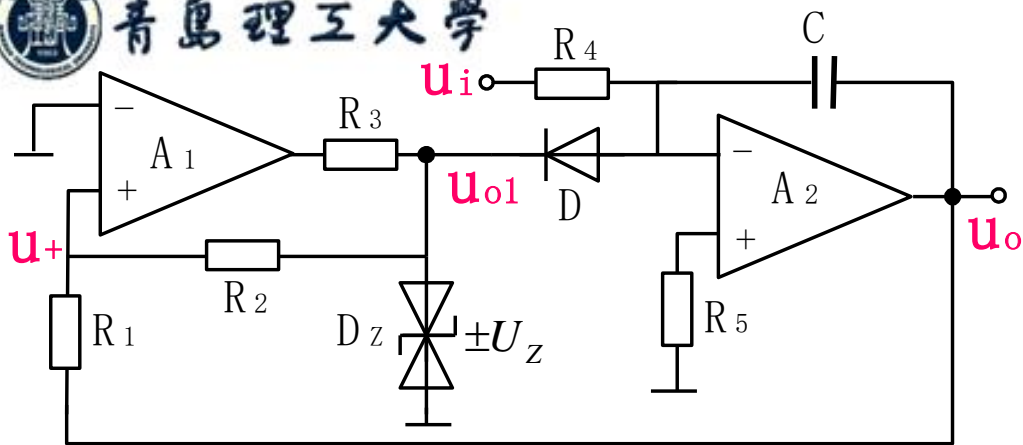
控制电压  $u_i > 0$



设电源接通时， $u_{o1} = +U_Z$ ， $D$ 截止， $C$ 充电， $u_o$ 从零开始线性下降

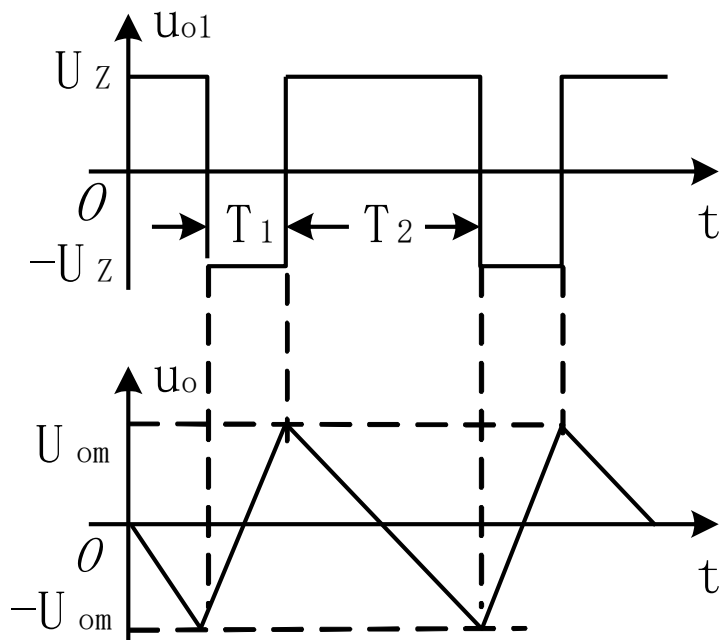
$u_+$ 随之下落，当 $u_+$ 降至零时， $u_{o1}$ 跳变为 $-U_Z$ ，(同时 $u_+$ 跳变成一个负值)，二极管导通，电容 $C$ 快速放电， $u_o$ 直线上升， $u_+$ 也随之增大

如此反复，在积分电路的输出端，得到一个锯齿波，在比较器的输出端得到一个矩形波。



锯齿波的幅值为 $u_+=0$ 时的输出电压值，与三角波的幅值相同，为

$$U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_Z$$



$u_o$ 从 $U_{om}$ 下降至 $-U_{om}$ 所需的时间 $T_2$ 为

$$-\frac{1}{R_4 C} \int_0^{T_2} u_I dt = -2U_{om} = -2 \frac{R_1}{R_2} U_Z$$

$$T_2 = \frac{2R_1 R_4 C}{R_2} \frac{U_Z}{u_I}$$

二极管的正向电阻很小，因此电容的放电时间 $T_1$ 很短，可忽略不计

$$T = T_1 + T_2 \approx T_2 = \frac{2R_1 R_4 C}{R_2} \frac{U_Z}{u_I}$$

$$f = \frac{R_2}{2R_1 R_4 C} \frac{u_I}{U_Z}$$

作业

9.1、9.2、9.7