



第五章 振荡电路

oscillator

第一节 RC 正弦波振荡器

第二节 LC 正弦波振荡器

第三节 石英晶体正弦波振荡器

第四节 非正弦波振荡器



- **自激振荡(oscillation)**: 在一个电子线路中, 不加输入信号就有信号输出, 这种现象称为自激振荡。
- **振荡器(oscillator)**: 实现振荡的电路。
- 常见的振荡器有两类, 一类是正弦波振荡器, 另一类是非正弦波振荡器。
- **调制(modulation)**: 用频率较高的电磁波携带低频信息的过程。
- **解调(demodulation)**: 从已调波中恢复原低频信息的过程。



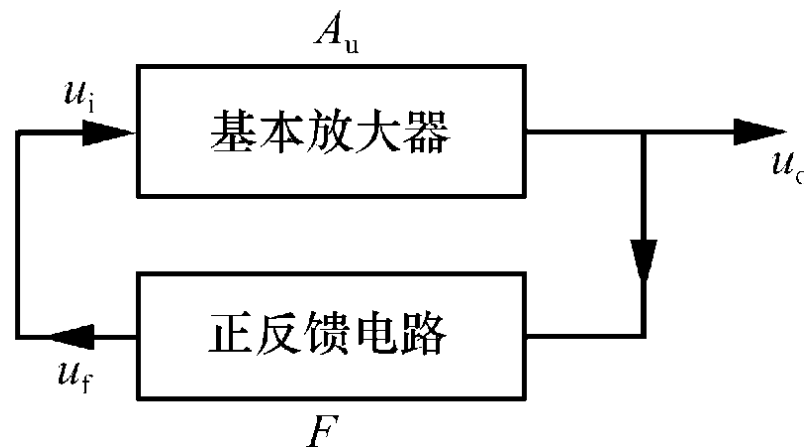
第一节 RC 正弦波振荡器

- 一、自激振荡的基本原理
- 二、 RC 串并联选频电路
- 三、文氏桥式 RC 振荡器

一、自激振荡的基本原理



自激振荡器组成：
基本放大器
反馈电路



1、自激振荡的基本条件

(1) 相位平衡条件：反馈信号 u_f 与输入信号 u_i 同相位，即：

$$\varphi = \pm 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

(2) 幅度平衡条件：反馈信号 u_f 应大于输入信号 u_i ，即： $u_f \geq u_i$

因为
固有

$$u_f = Fu_o = FA_u u_i$$

$$FA_u \geq 1$$



- 2、正弦波振荡器的基本组成
- (1) 基本放大器：包括负反馈放大电路。
- (2) 正反馈网络：引入正反馈，使放大电路的输入信号等于反馈信号。
- (3) 选频网络：选择满足相位平衡条件的一个频率，获得单一频率的正弦波。
- (4) 稳幅环节：作用是使输出信号幅值稳定。

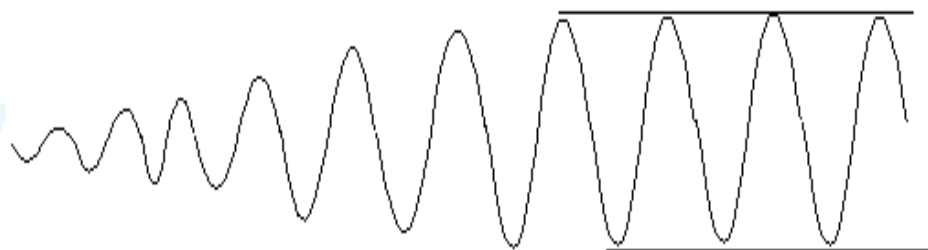
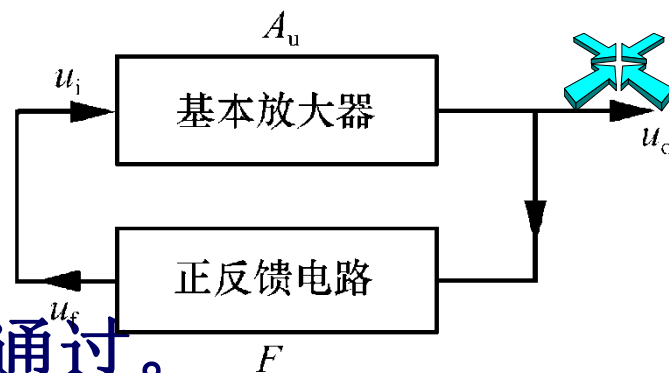
依据选频网络，正弦波振荡器可划分为：

*RC*正弦波振荡器、*LC*正弦波振荡器、
石英晶体正弦波振荡器。

• 3、振荡的建立和稳定

• 初始输入电压

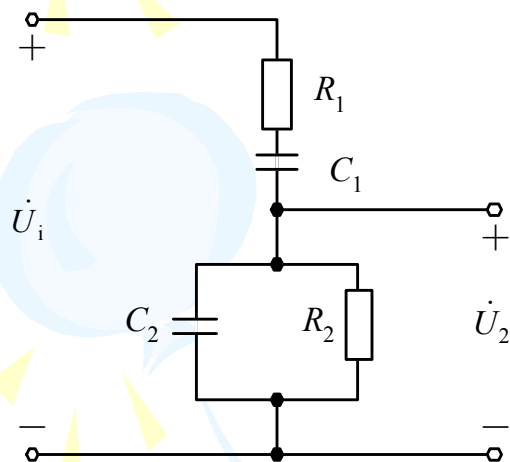
- 选频电路：特定频率分量可以通过。
- 被选出的频率分量放大的后经反馈电路又送回到基本放大器的输入端，形成正反馈。
- 多次循环后，被选频率分量的幅度迅速增大，振荡建立。
- 振荡的稳定：基本放大器放大倍数降低，使信号幅度增长减缓最后达到**等幅振荡**。



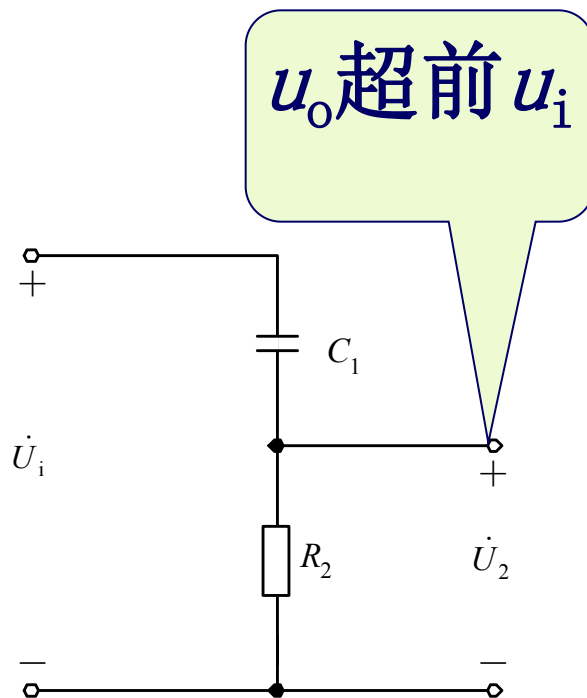
起振

稳幅

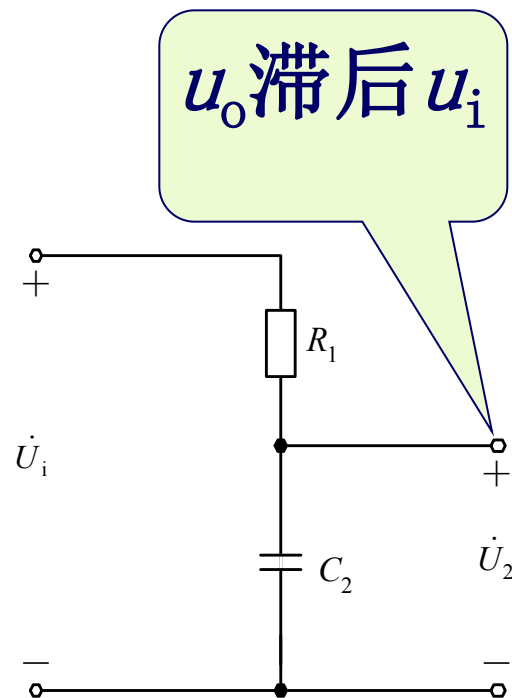
二、RC串并联选频电路



(a) RC串并联电路



(b) 低频等效电路



(c) 高频等效电路

RC串并联网络及其高低频等效电路



中间频率 f_0 处，输出电压 u_o 与输入电压 u_i 同相位，而且这时输出电压幅度最大。

取 $R_1 = R_2 = R$ ， $C_1 = C_2 = C$ ，则 f_0 等于：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

这时电压的传输系数 T 最大，并等于 $1/3$ ，即输出电压获得最大值，且与输入电压同相位。

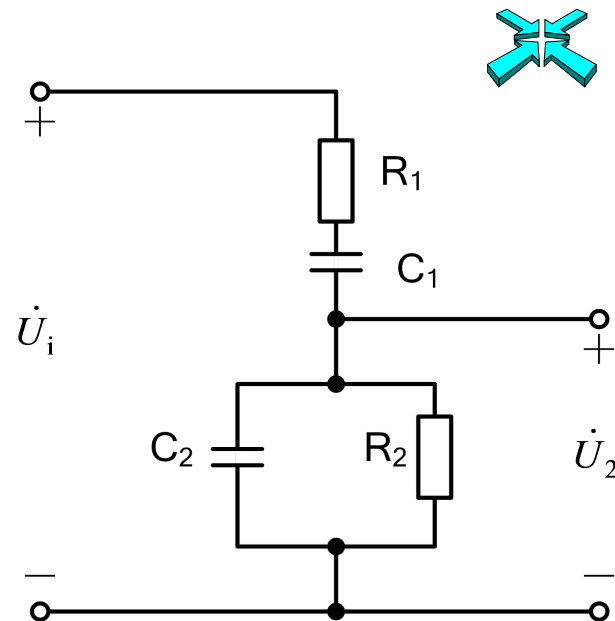
由图可得

R_1C_1 串联阻抗:

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

R_2C_2 并联阻抗:

$$Z_2 = \frac{R_2 \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$





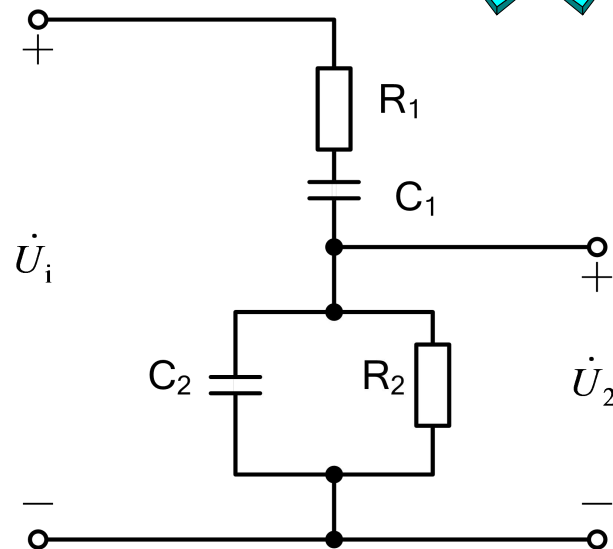
通常取 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 则

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_i} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_i} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)}$$

其中 $\omega_o = \frac{1}{RC}$, 即

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$



幅频特性为

$$\left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}}$$

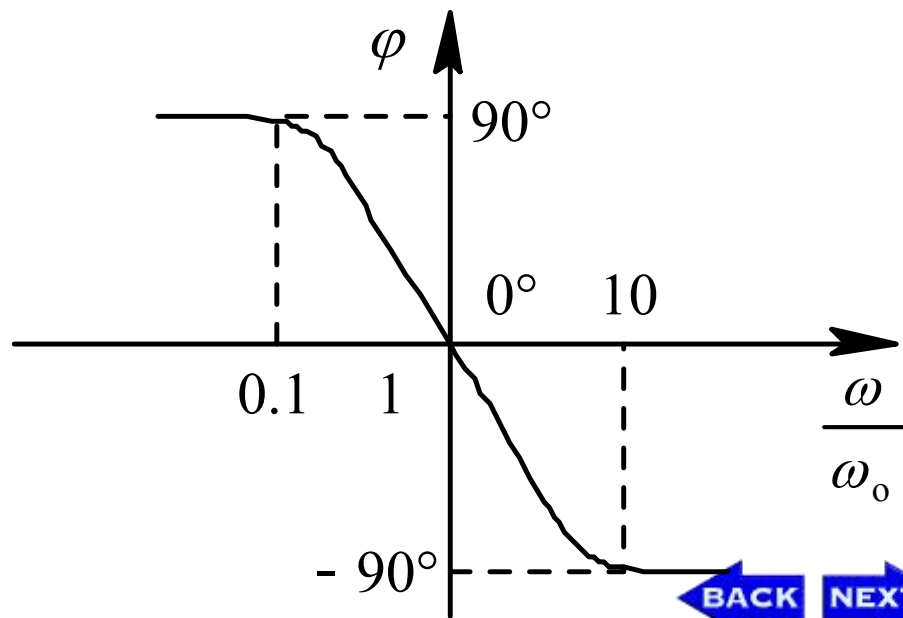
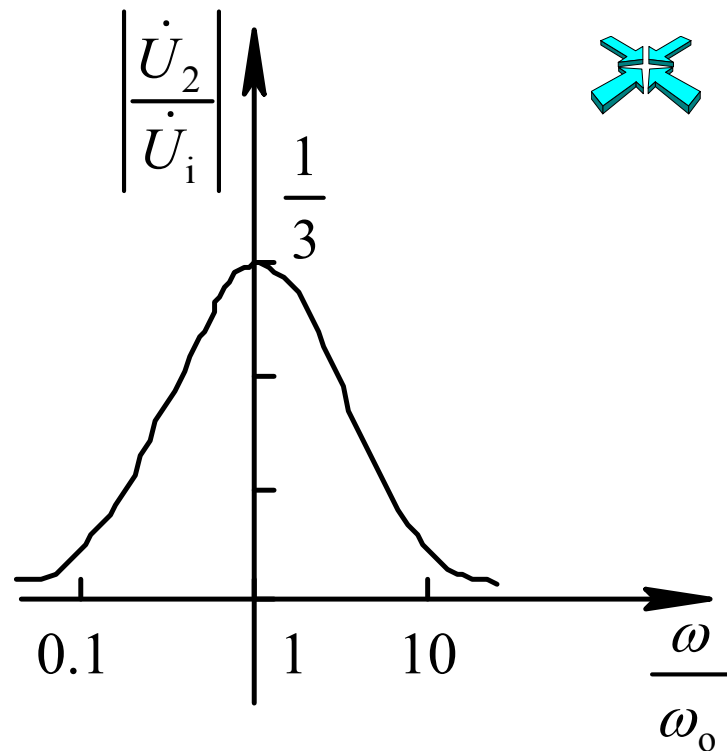
相频特性为

$$\varphi = -\arctan \frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)$$

可见,当 $\omega = \omega_o = 1/RC$

时, $\left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_i} \right|$ 达到最大值,
且等于 $1/3$, 而相移 ϕ

$= 0^\circ$ 。

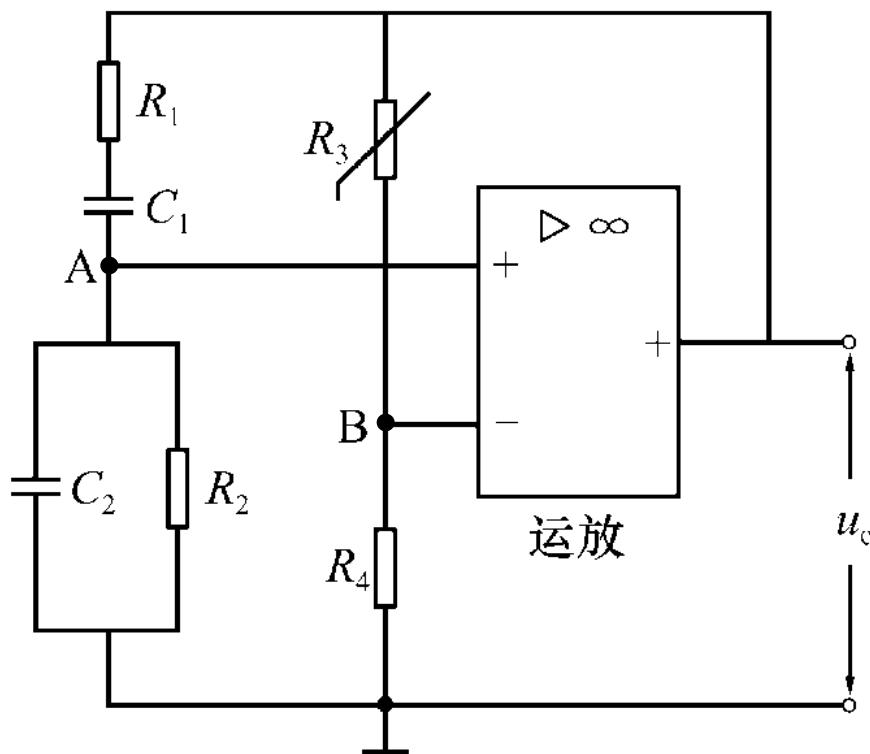


三、文氏桥式RC振荡器



运放的输出电压 u_o 分两路反馈，一路加于RC串并联选频电路，其输出端A与运放同相端(+)相连，构成一个正反馈支路。

另一路经电阻 R_3 、 R_4 分压，反馈到运放反相端(-)，构成电压串联负反馈支路。





当 $f=f_0$ 时，选频电路
满足相位平衡条件。

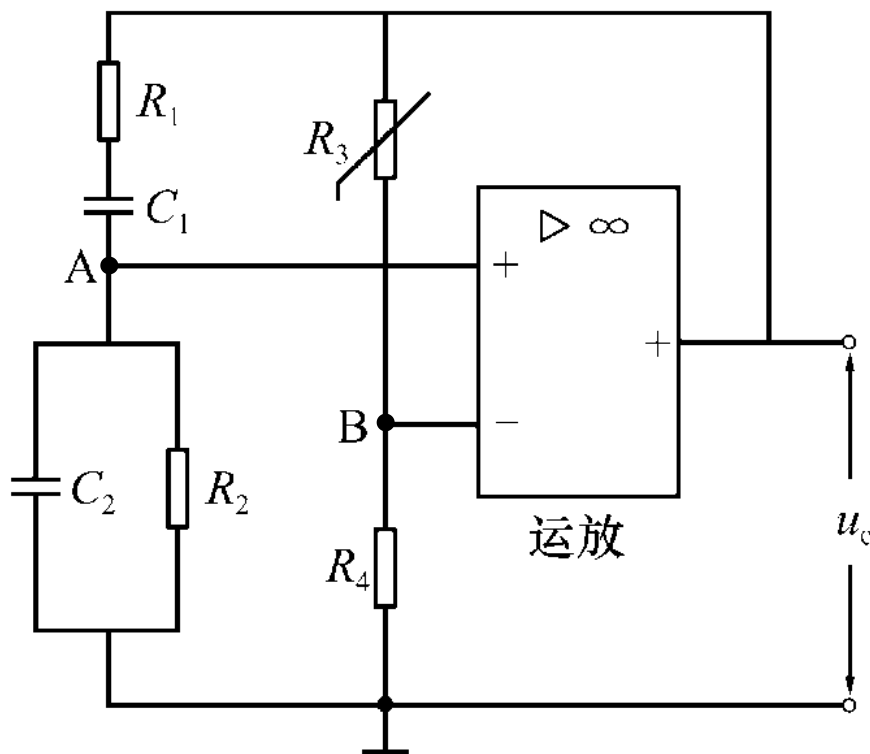
运放的电压放大倍数：

$$A_u = 1 + \frac{R_3}{R_4} \geq 3$$

就可满足幅度平衡条件。

该电路的振荡频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$



稳幅措施：

半导体热敏电阻 R_3 ：（负温度系数）

$$A_u = 1 + \frac{R_3}{R_4} \geq 3$$

起振时， R_3 略大于 $2R_4$ ，
使 $|AF| > 1$ ，以便起振；

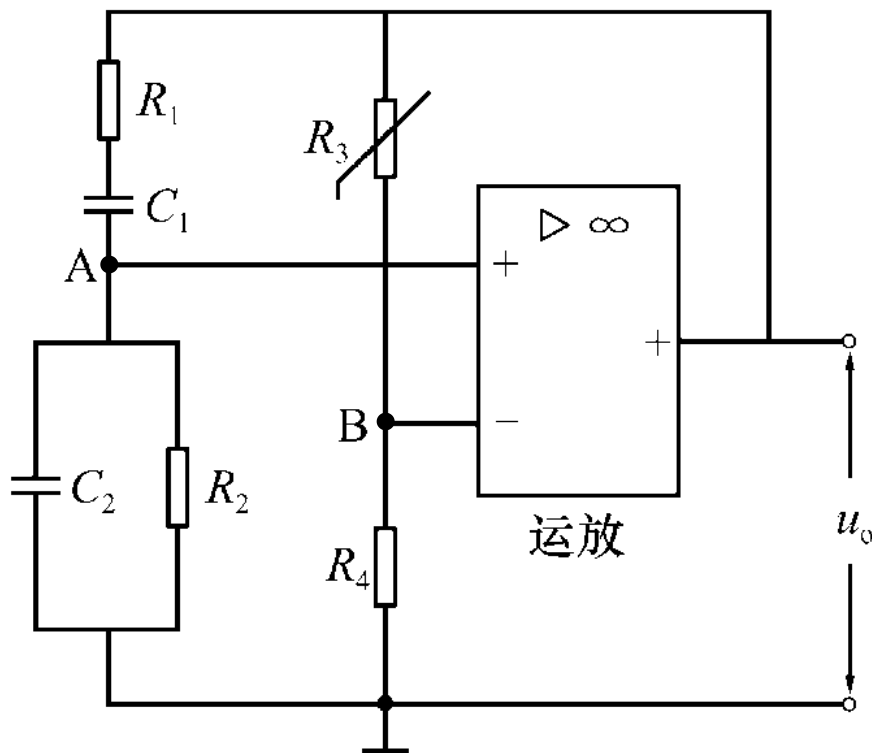
起振后， u_o 逐渐增大则
 R_3 逐渐减小，使得输出
 u_o 为某值时， $|AF| = 1$ ，
从而稳幅。

$$|u_o| \uparrow \rightarrow P_{R_3} \uparrow \rightarrow T \uparrow$$

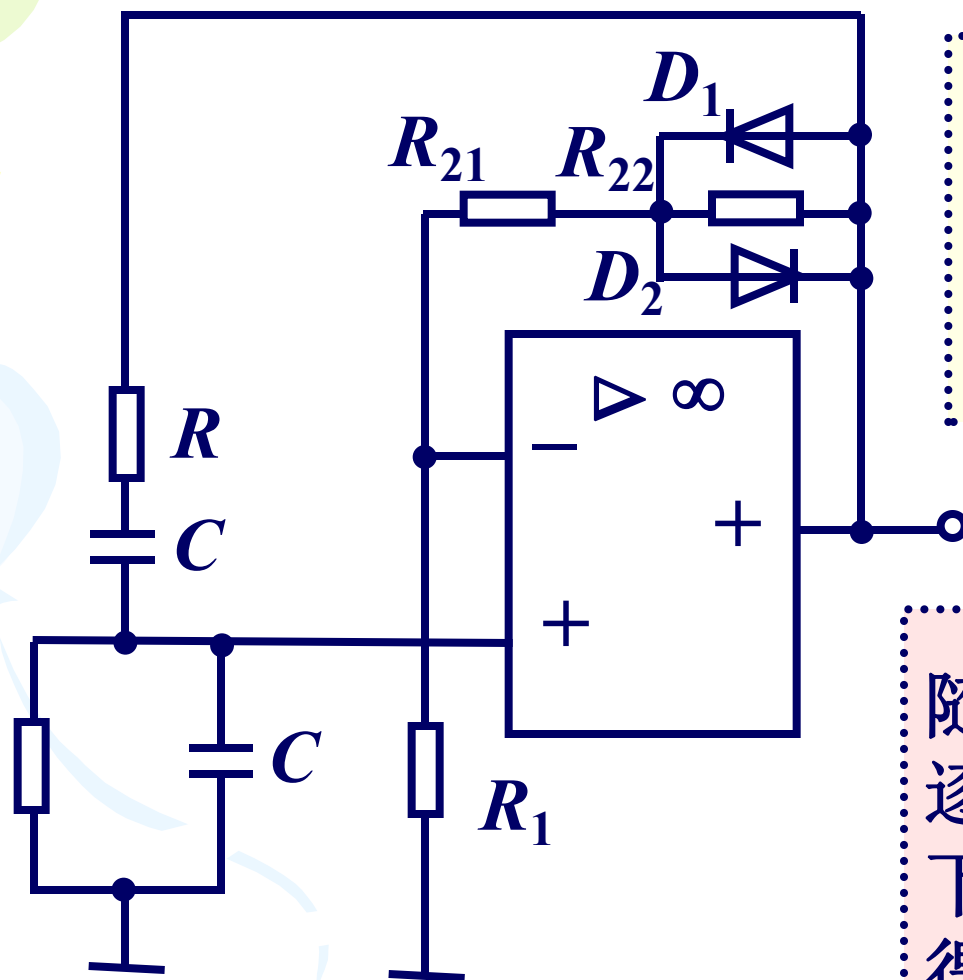
↑

↓

$$|u_o| \downarrow \leftarrow |A_v| \downarrow \leftarrow R_3 \downarrow$$



振荡的稳定 (2)



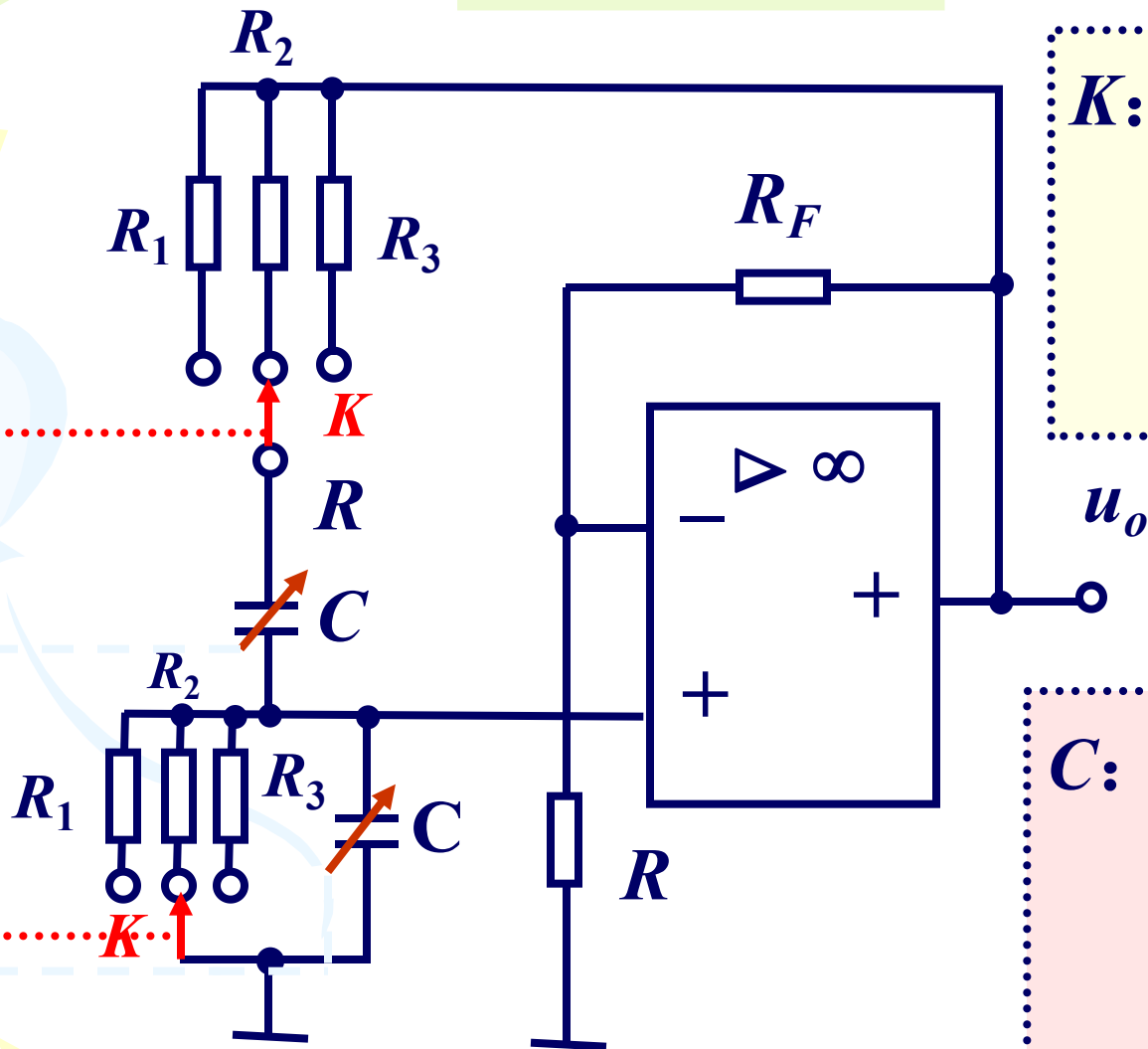
R_{22} 为一小电阻，
使 $(R_{21}+R_{22})$ 略大于
 $2R_1$ ， $|AF|>1$ ，以
便起振；

随着 u_o 的增加， R_{22}
逐渐被短接， A 自动
下降到使 $|AF|=1$ ，使
得输出 u_o 稳定在某值。

输出频率的调整:

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

通过调整 R 或/和 C 来调整频率。



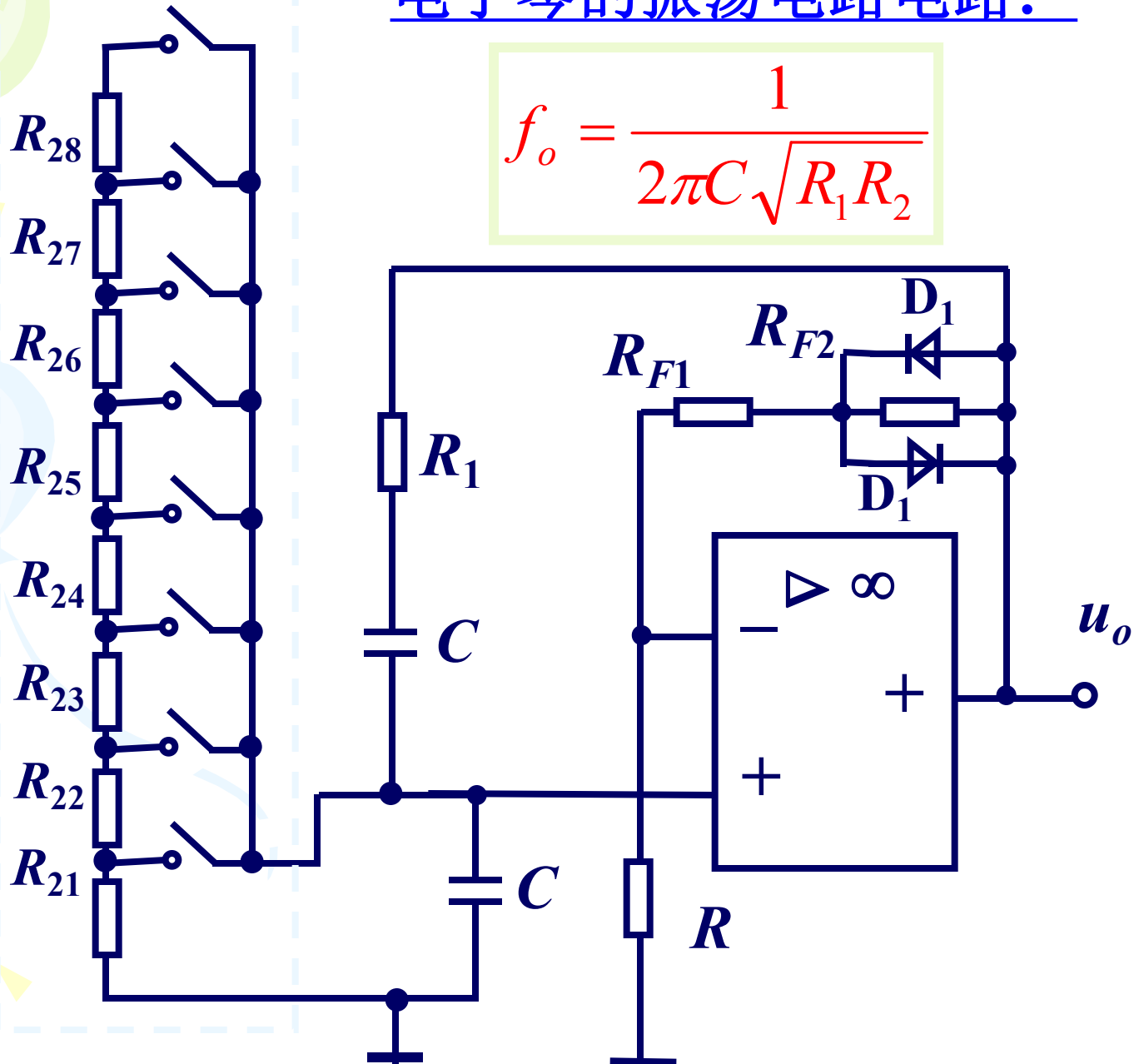
K : 双联波段开关, 切换 R , 用于粗调振荡频率。

C : 双联可调电容, 改变 C , 用于细调振荡频率。

电子琴的振荡电路电路：



$$f_o = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}$$





- ***RC*桥式振荡器的特点：**
- 振荡频率和输出幅度比较稳定，波形失真小；
- 可产生几千赫到0.001HZ的低频正弦波信号；
- 频率调节方便；
- ***RC*选频电路体积小，价格低，利于电路微型化。**
- 振荡频率一般不超过1MHz，若要产生更高的振荡频率，可采用LC正弦波振荡器。



第二节 LC 正弦波振荡器

- 一、变压器反馈式振荡器
- 二、电感三点式振荡器
- 三、电容三点式振荡器



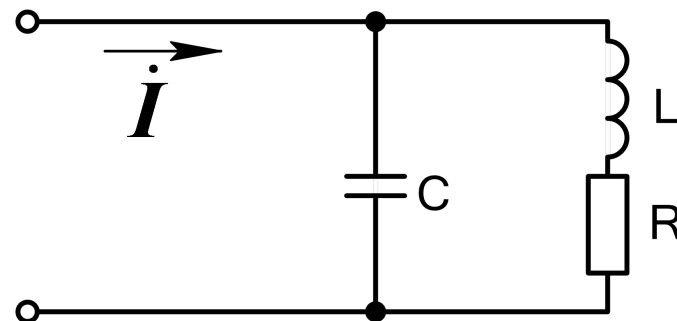
LC 并联回路的选频特性

对于某个特定频率 ω_o , 满足 $\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$, 即

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

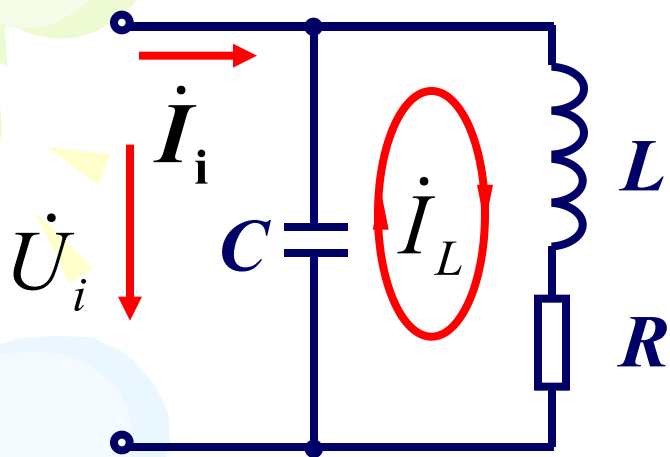
$$Z_o = \frac{L}{RC} = Q\omega_o L = \frac{Q}{\omega_o C} = Q\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{R\omega_o C} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$





LC并联回路谐振时的输入电流为



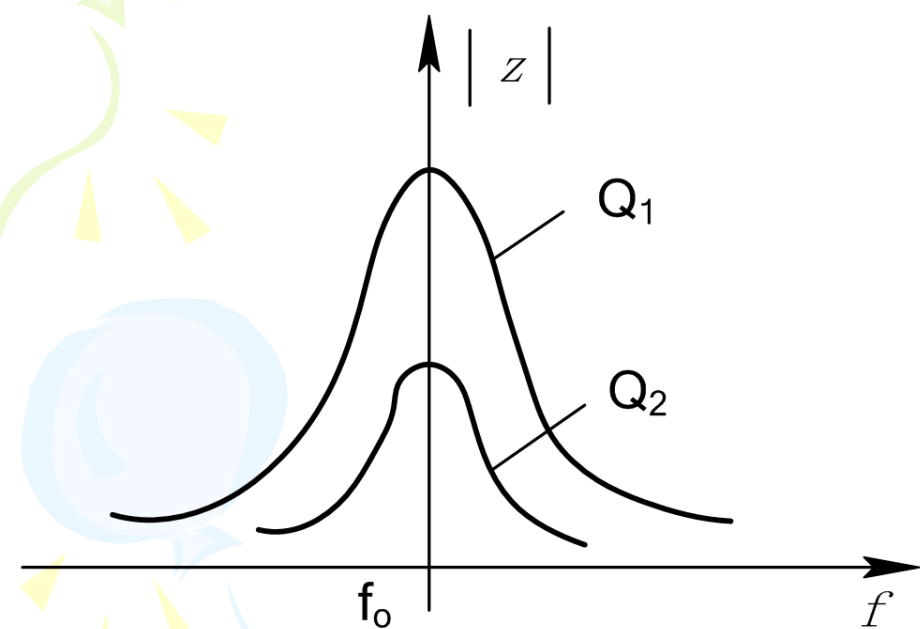
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_o} = \frac{\dot{U}}{Q\omega_o L}$$

$$|\dot{I}_L| = \frac{\dot{U}}{\omega_o L} = Q |\dot{I}|$$

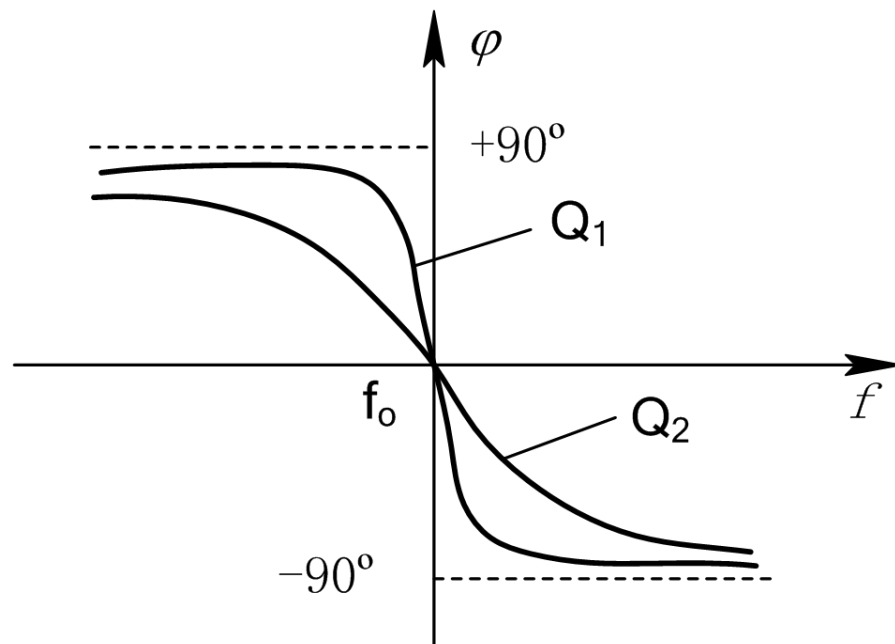
谐振时回路电流
比总电流大的多，
外界对谐振回路
的影响可以忽略！

$$I_L \approx I_C = Q I_i$$

谐振时相移为零。



(a) 阻抗频率特性($Q_1 > Q_2$)



(b) 相频特性($Q_1 > Q_2$)

*LC*并联回路的频率特性

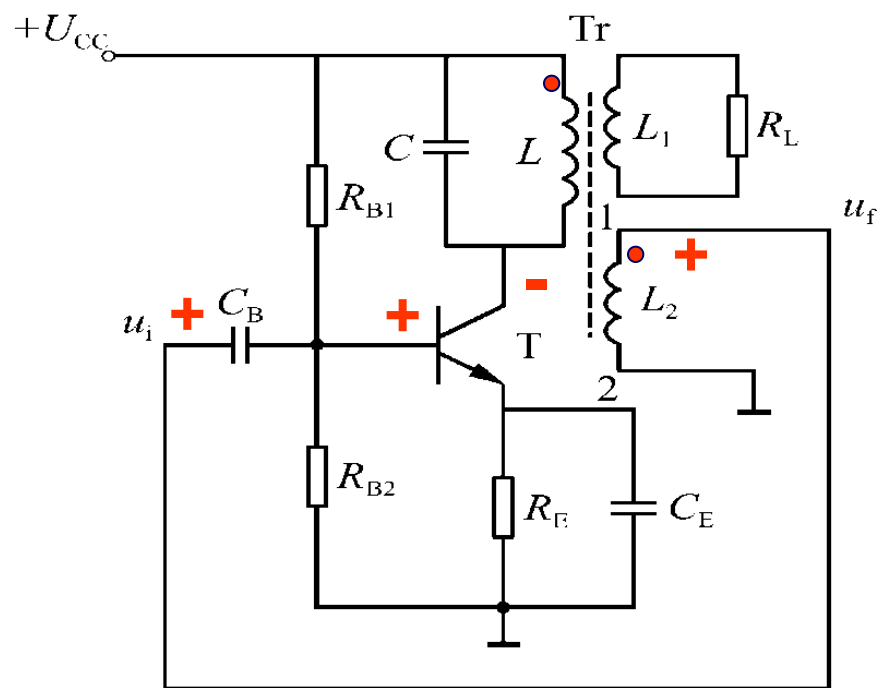


一、变压器反馈式振荡器

- 电感线圈 L 与电容 C 组成并联谐振回路，作为晶体三极管的集电极负载，起选频作用。

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

适用于频率约为几十kHz到几MHz的情况。

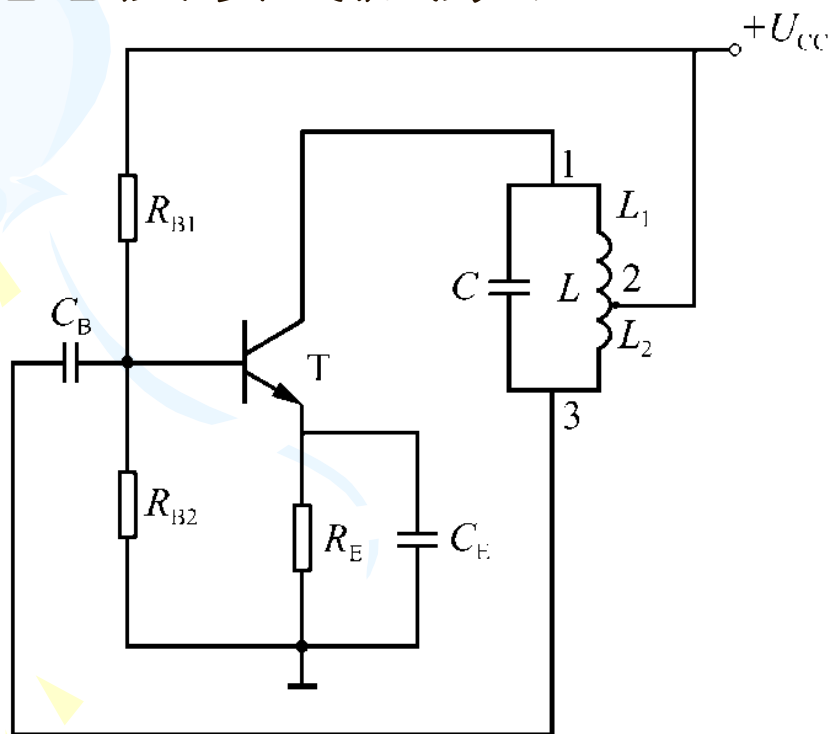


• 同名端

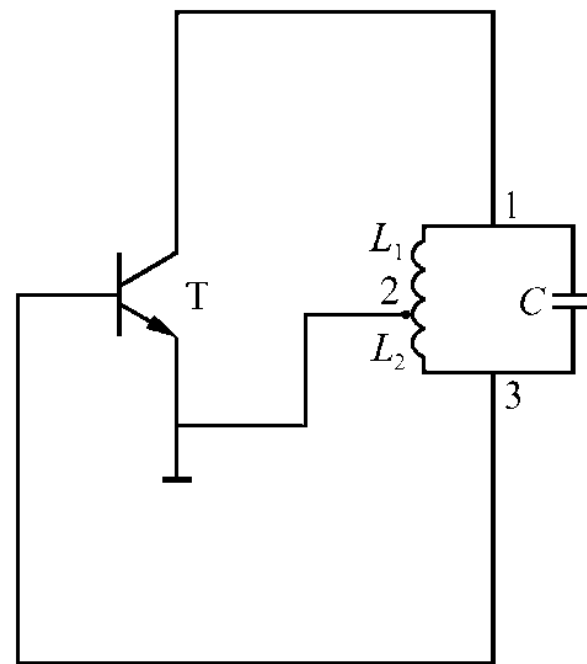


二、电感三点式振荡器

LC并联谐振回路的电感线圈的三个端点分别与三极管的三个电极相连，所以称为电感三点式振荡器。反馈信号 u_f 来自线圈 L_2 上的电压，故又称为电感反馈式振荡器。



(a) 电路



(b) 交流等效电路



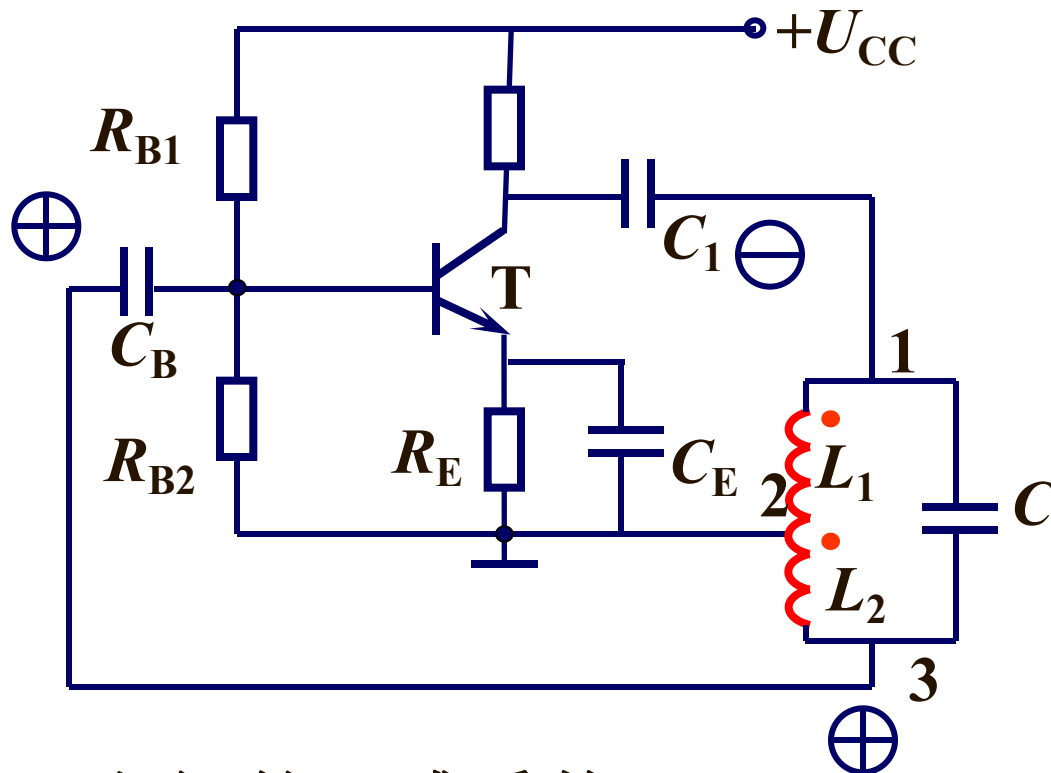
满足相位平衡条件:

振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}}$$

式中 M 是线圈 L_1 和 L_2 之间的互感系数。

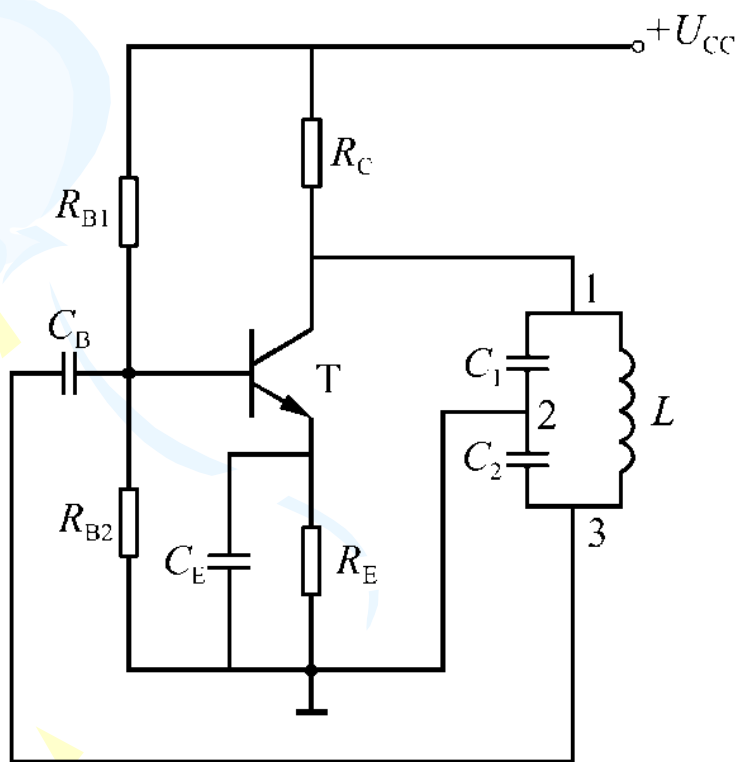
该电路振荡频率中等，一般可达到几十MHz。



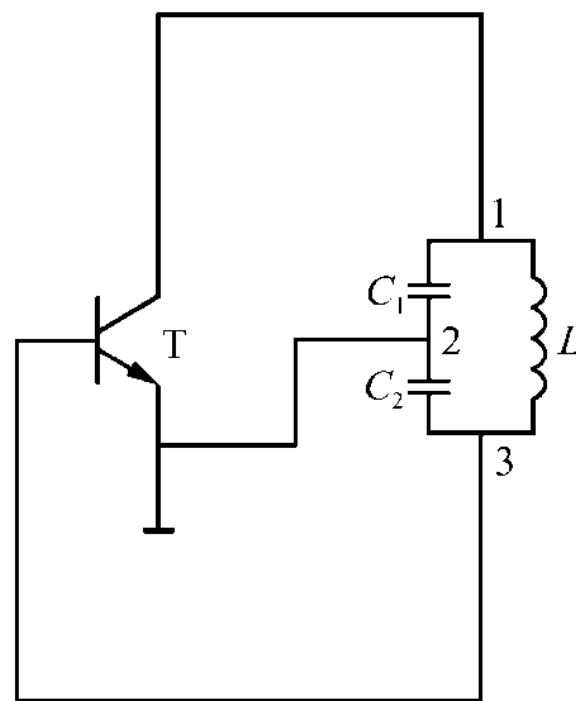


三、电容三点式振荡器

LC 并联谐振回路的电容的三个端点分别与三极管的三个电极相连，所以称为电容三点式振荡器。反馈信号 u_f 来自电容 C_2 的电压，故又称为电容反馈式振荡器。



(a) 电路



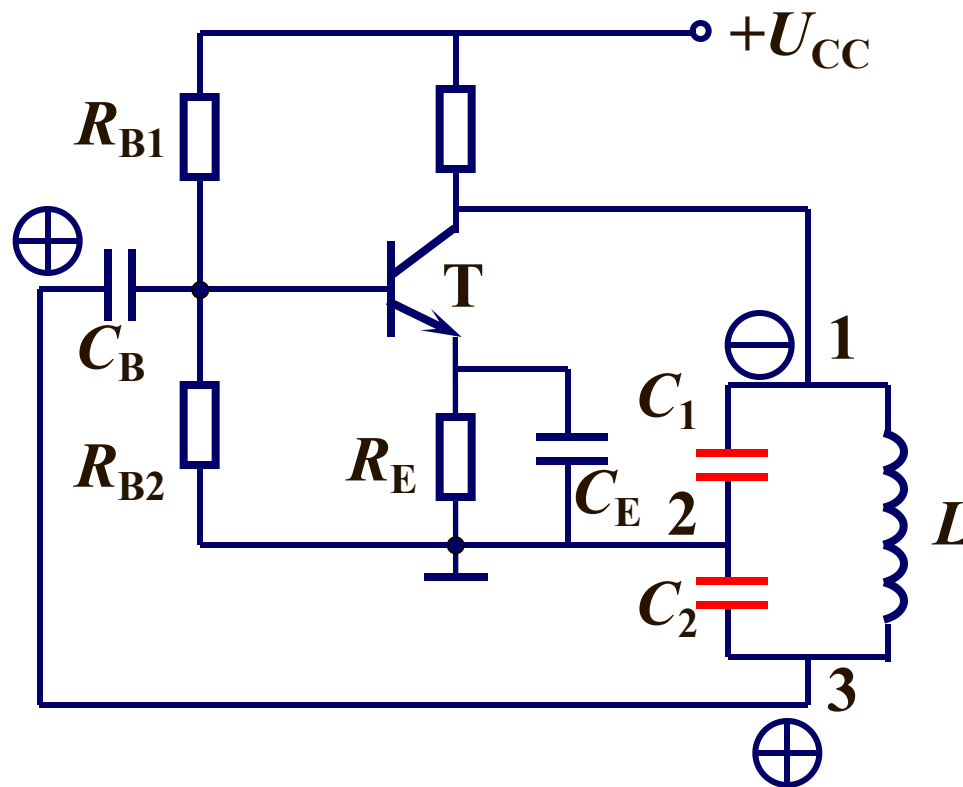
(b) 交流等效电路



满足相位平衡条件:

振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}\right)}}$$

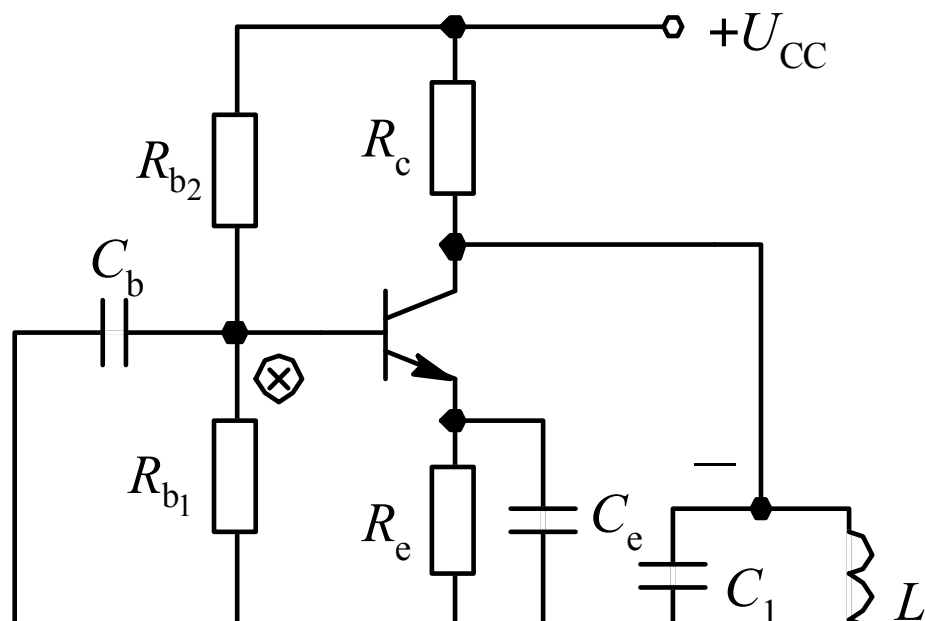


这种电路振荡频率较高，一般可达到100MHz以上。



$$f_o \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}}$$

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$



克拉泼
电容

f_o 仅取决于电感 L 和电容 C , 与 C_1 、 C_2 和管子的极间电容关系很小, 因此振荡频率的稳定度较高, 其频率稳定度 $\Delta f/f_o$ 的值可小于0.01%。

电容三点式改进型正弦波振荡电路



第三节 石英晶体正弦波振荡器

- 一、石英晶体的结构和电特性
- 二、并联型晶体振荡器
- 三、串联型晶体振荡器



一. 石英晶体的结构和电特性

1. 频率稳定问题

频率稳定度一般由 $\frac{\Delta f}{f_0}$ 来衡量

Δf —— 频率偏移量。

f_0 —— 振荡频率。

Q值越高，选频特性越好，频率越稳定。

LC振荡电路 **Q** — 数百

石英晶体振荡电路 **Q** — **10000 ~ 500000**



2. 石英晶体的基本特性与等效电路

结构

极板间加电场

晶体机械变形 逆压电效应

极板间加机械力

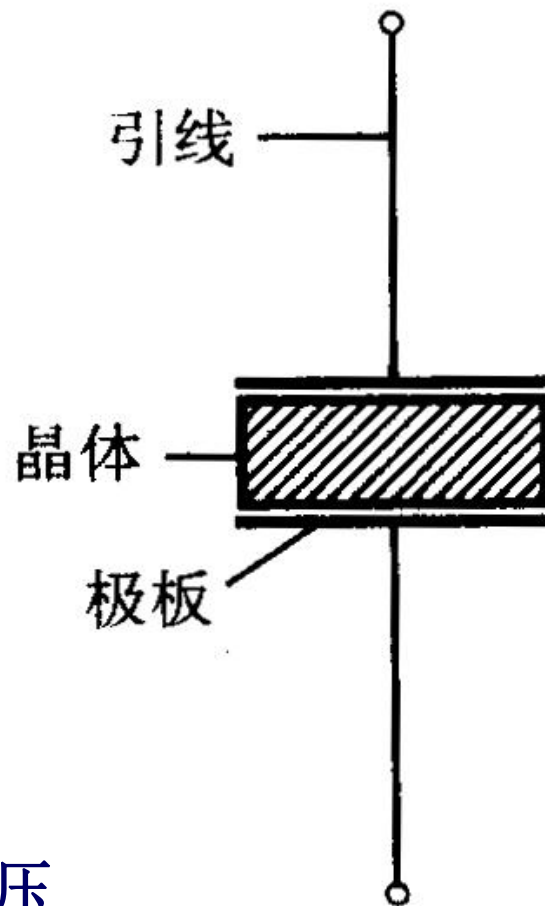
晶体产生电场

压电效应

交变电压 $\rightarrow$ 机械振动 $\rightarrow$ 交变电压

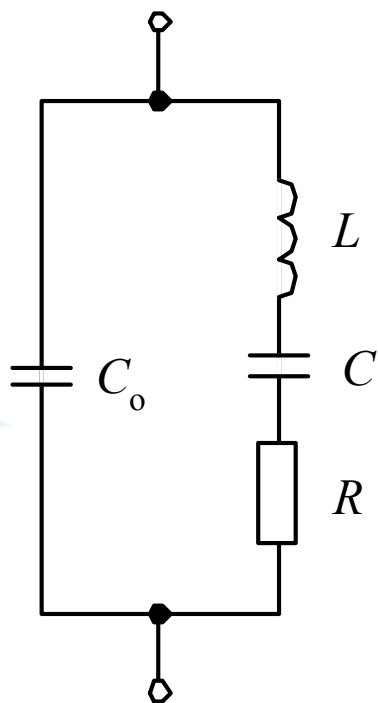
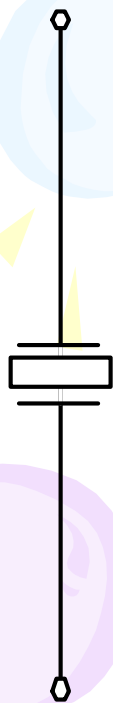
机械振动的固有频率与晶片尺寸有关，稳定性高

当交变电压频率 = 固有频率时，振幅最大。压电谐振

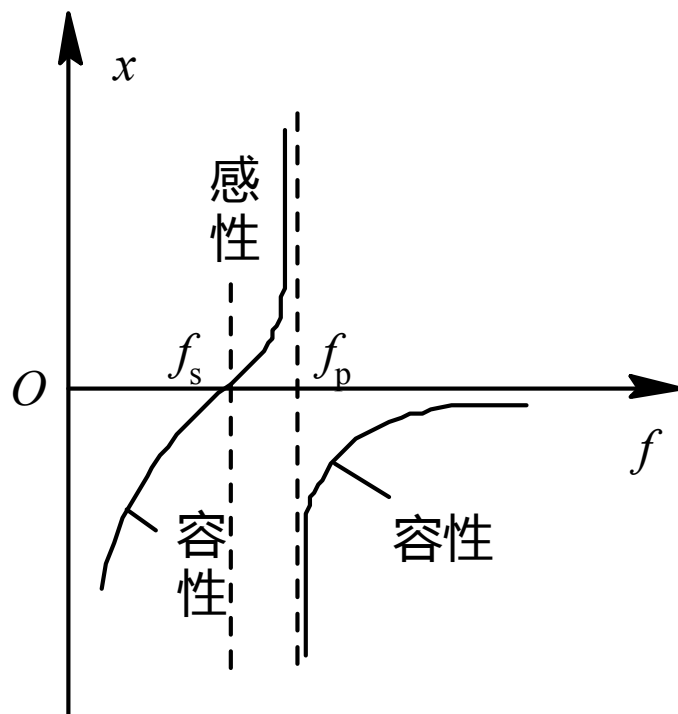


- 静态电容 C_0 为几皮法到几十皮法;
- 等效电感 L 为 $10^{-3} \sim 10^2$;
- 等效电容 C 为 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{pF}$;
- 等效电阻 R 表示振动时的磨擦损耗, 约为 $1 \sim 10 \Omega$ 。
- 由于石英晶片的等效电感 L 很大, 而 C 、 R 都很小, 所以石英谐振回路的 Q 值很大, 可达 $10^4 \sim 10^6$ 。

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{R \omega_o C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$



(b) 等效电路



(c) 电抗—频率特性



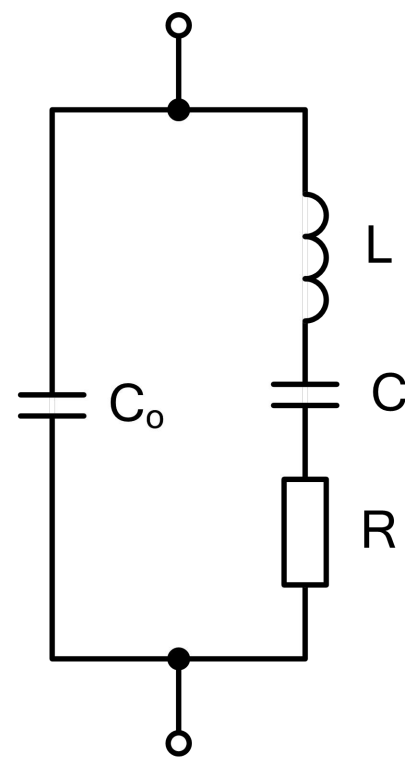
石英晶体谐振器有两个谐振频率。当 L 、 C 、 R 支路串联谐振时，谐振频率为

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

当频率高于 f_s 时， L 、 C 、 R 支路呈感性，与电容 C_0 发生并联谐振，并联谐振频率为

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}} = f_s\sqrt{1+\frac{C}{C_0}}$$

由于 $C \ll C_0$ ，因此 f_s 和 f_p 非常接近。



等效电路

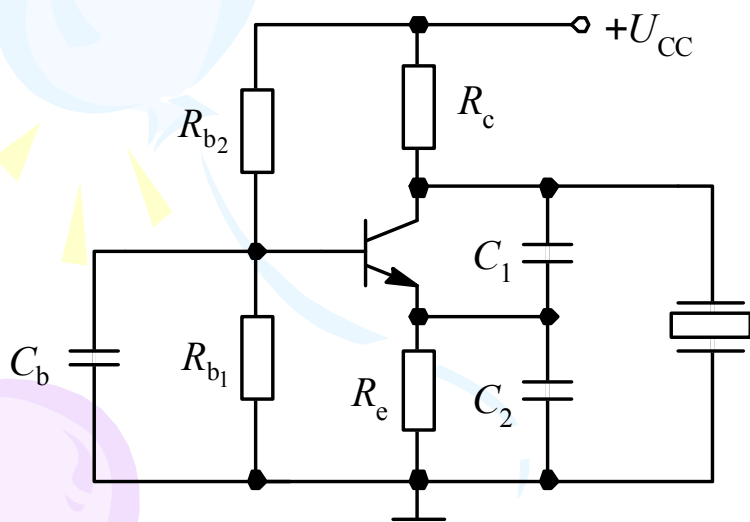
二. 并联型晶体振荡器



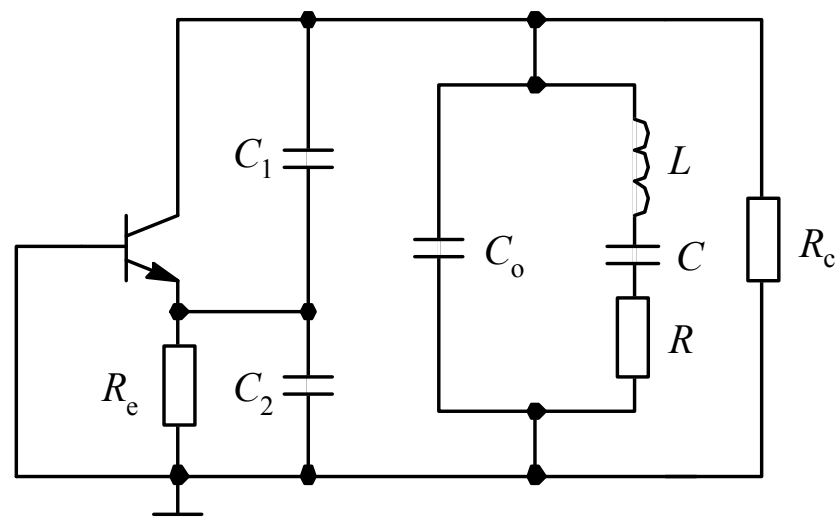
式中 $C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$. 由于

石英晶体工作在 f_s 与 f_p 之间, 相当一个大电感, 与 C_1 、 C_2 组成电容三点式振荡器。由于石英晶体的 Q 值很高, 电路可以获得很高的振荡频率稳定性。

此时石英晶体的阻抗呈感性。

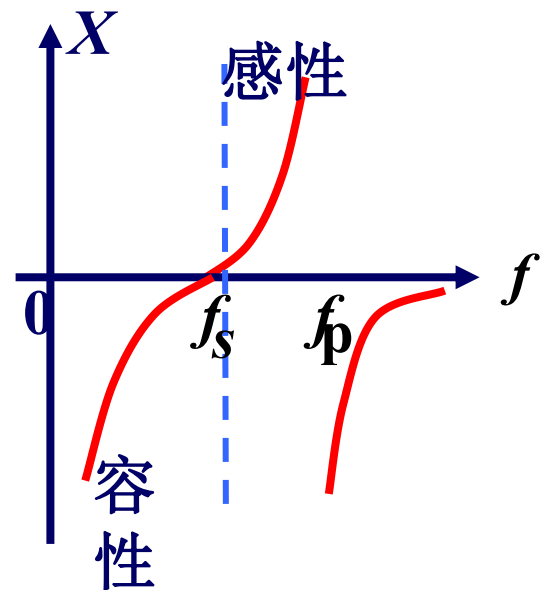
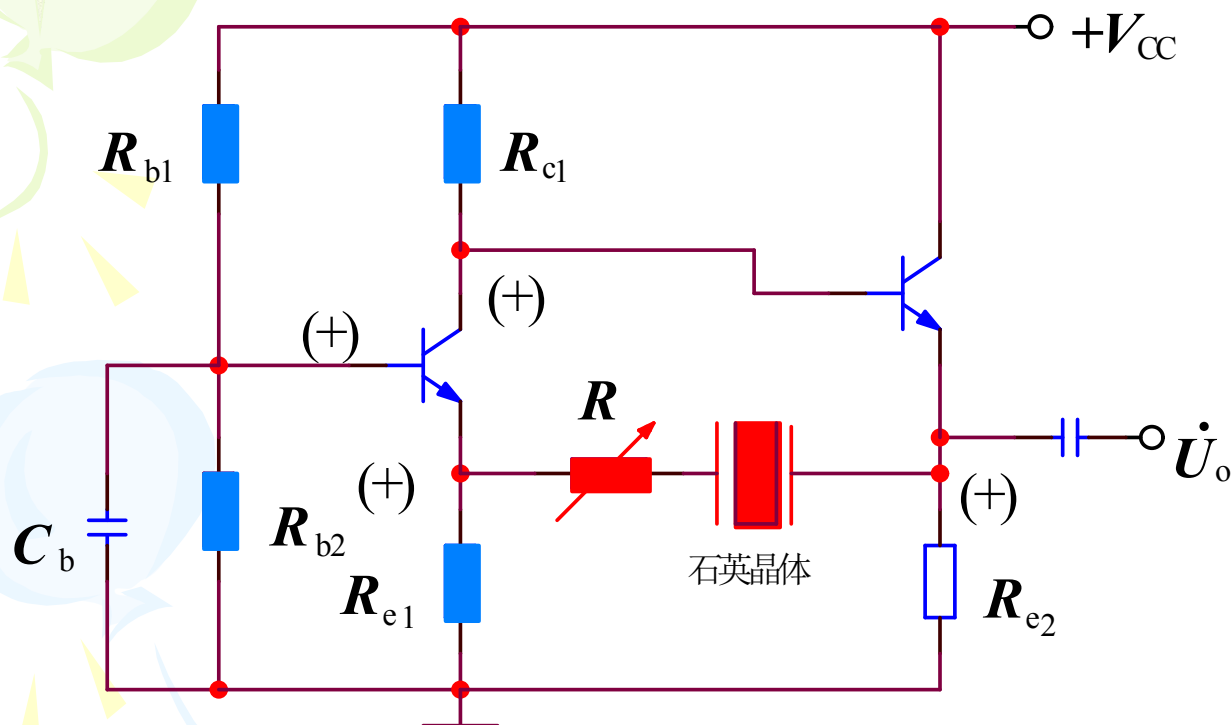


(a) 电路



(b) 石英晶体等效电路

三. 串联型晶体振荡器



石英晶体工作在 f_s 处，呈电阻性，而且阻抗最小，正反馈最强，相移为零，满足振荡的相位平衡条件。

对于 f_s 以外的频率，石英晶体阻抗增大，且相移不为零，不满足振荡条件，电路不振荡。

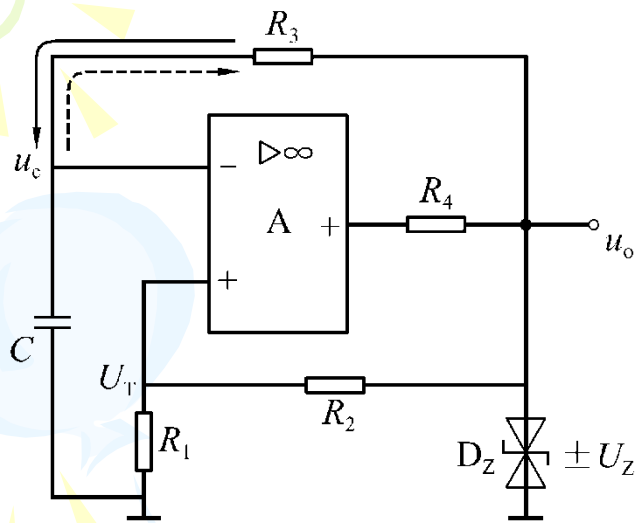


第四节 非正弦波发生器

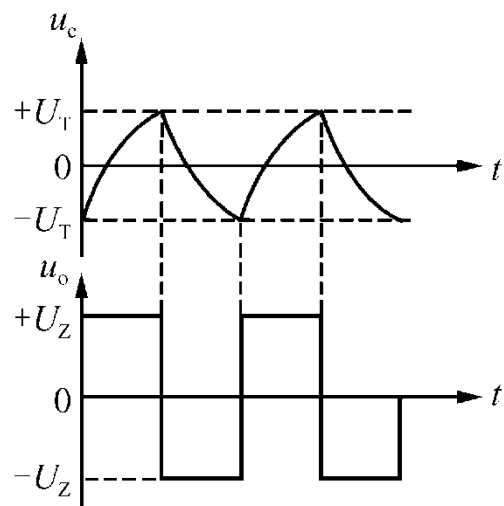
- 一、矩形波发生器
- 二、三角波发生器
- 三、锯齿波发生器
- 四、集成函数发生器



一、矩形波发生器



(a) 电路



(b) 输出波形

振荡周期:

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

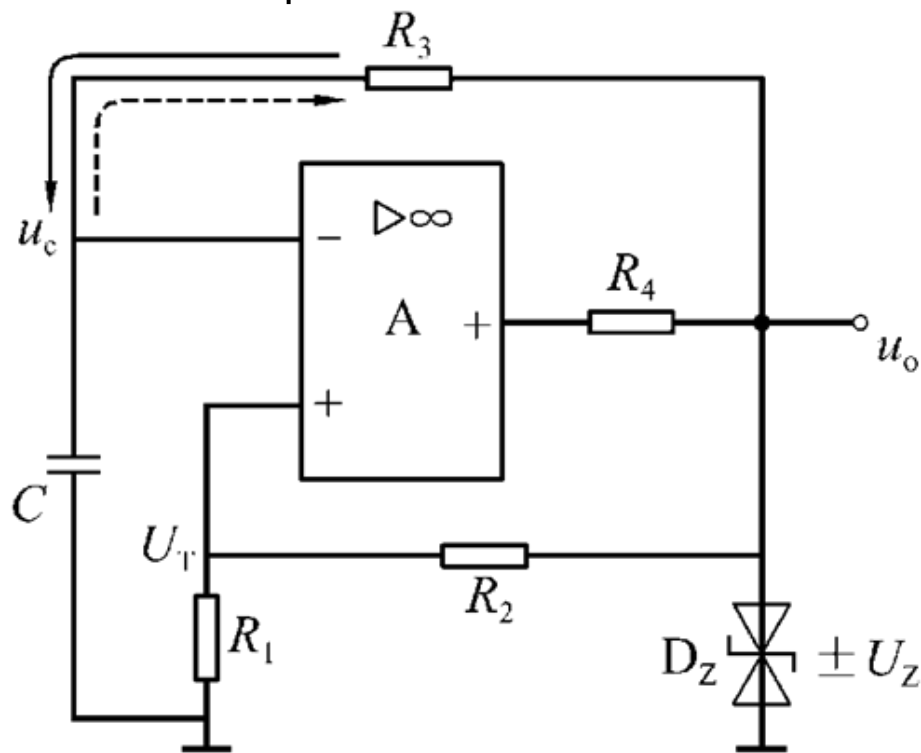
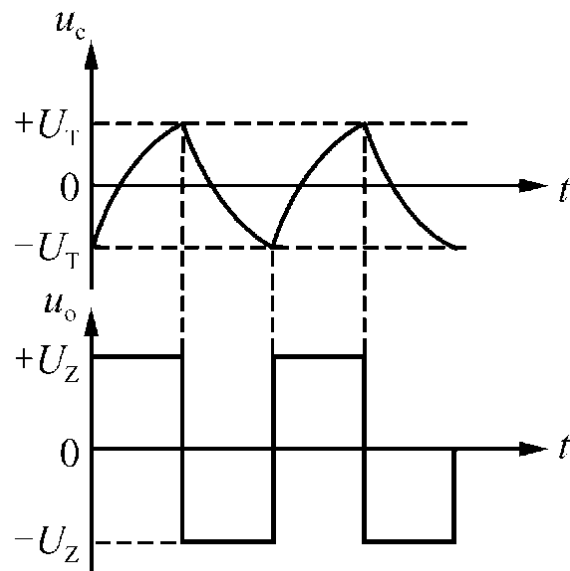
调整电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和电容 C 的数值，可以改变振荡频率；而改变 U_Z 值可以调整输出矩形波的幅度。

电路产生矩形波的的工作过程:

设初态 $u_C = u_- = 0$ ，电路处于工作稳定状态；

当 $u_o = +U_Z$ 时，则 $u_+ = +U_T$ ， $u_C < U_T$ ； u_o 通过 R_3 对电容器 C 正向充电， $u_C \uparrow$ ；

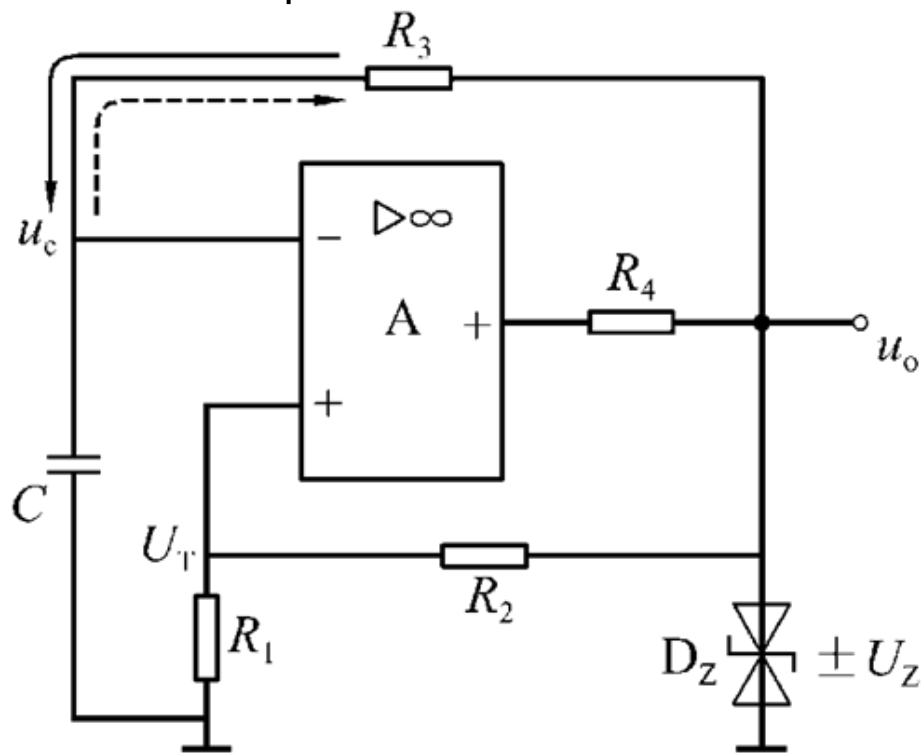
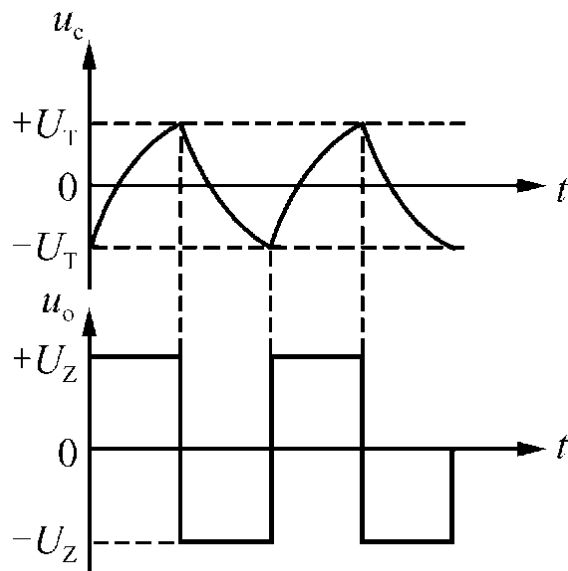
当 $u_C > +U_T$ 时， $u_o = -U_Z$ ，则 $u_+ = -U_T$ ；电容 C 开始通过 R_3 放电， $u_C \downarrow$ ；



电路产生矩形波的的工作过程:

当 $u_C < -U_T$ 时,
 $u_o = +U_Z$, 则 $u_+ = +U_T$;
 u_o 又通过 R_3 对电容
 器 C 正向充电。

如此周期地变化, 电路
 产生自激振荡, 在输出
 端得到矩形波电压, 在
 电容器两端产生三角波
 电压。

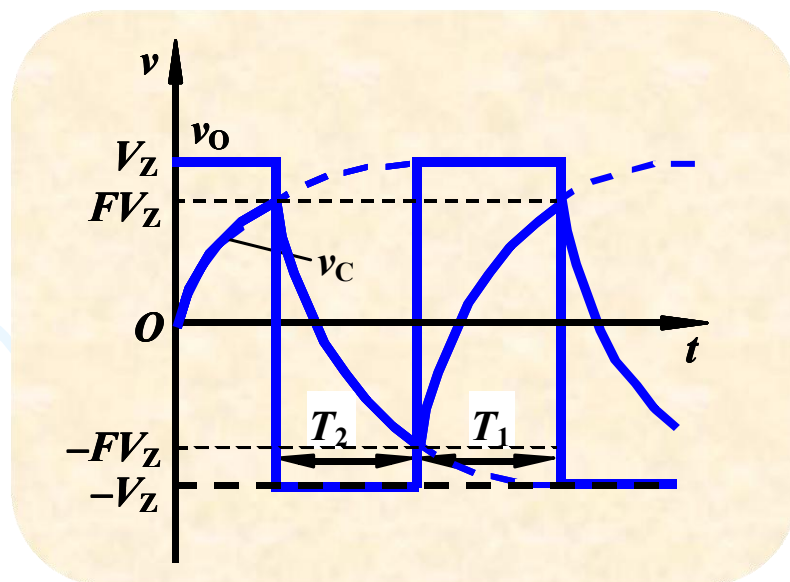
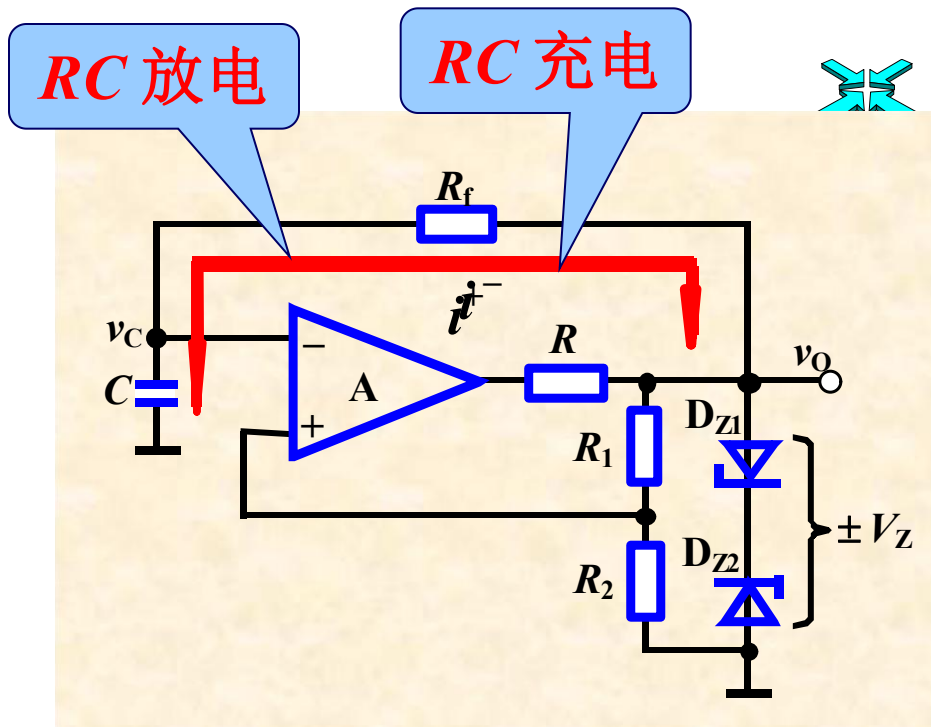


方波产生电路

工作原理

由于迟滞比较器中正反馈的作用，电源接通后瞬间，输出便进入饱和状态。

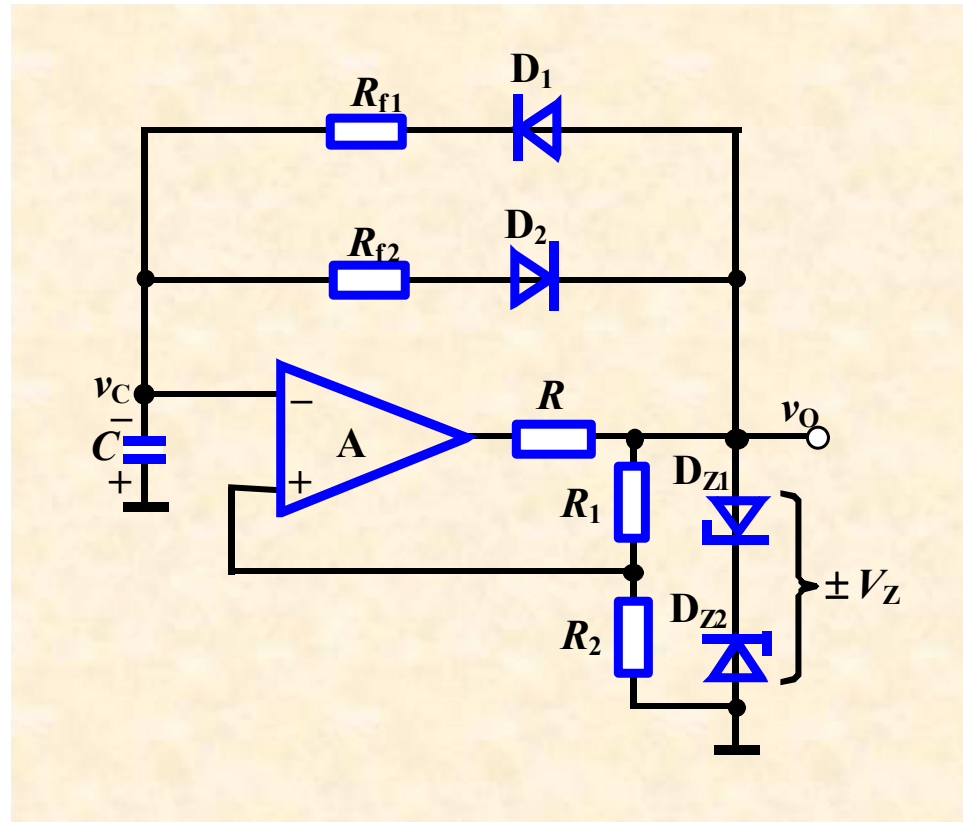
假设为正向饱和状态



方波产生电路

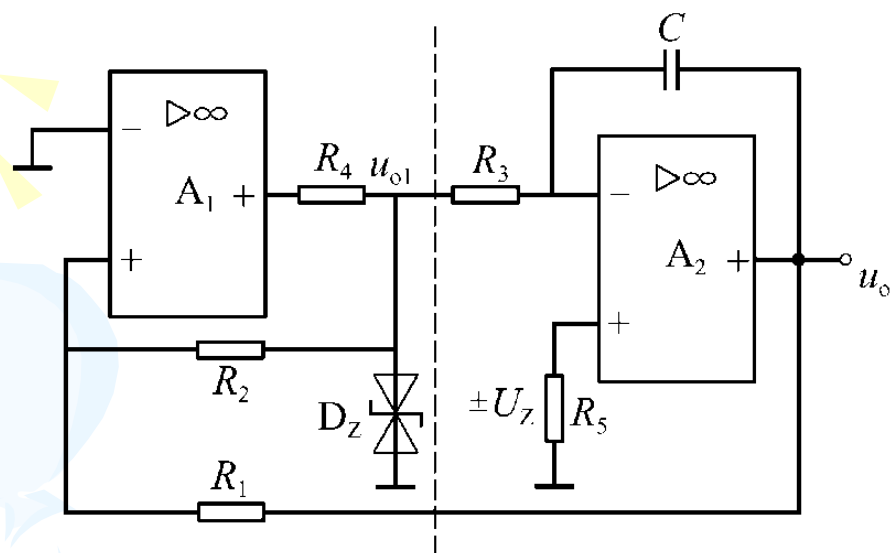


占空比可变的方波产生电路

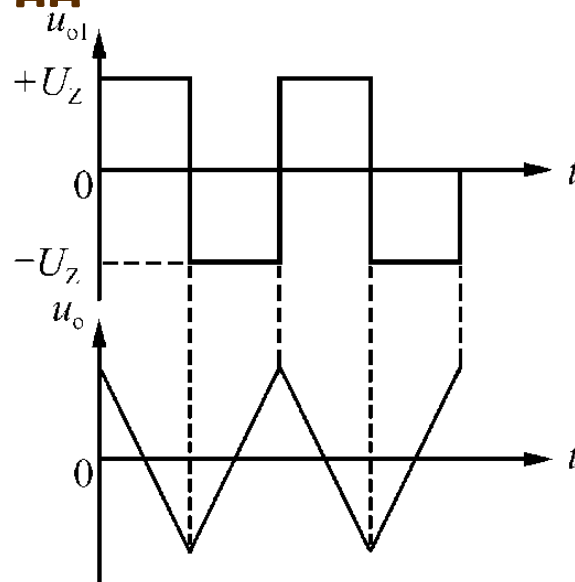




二、三角波发生器



(a) 电路

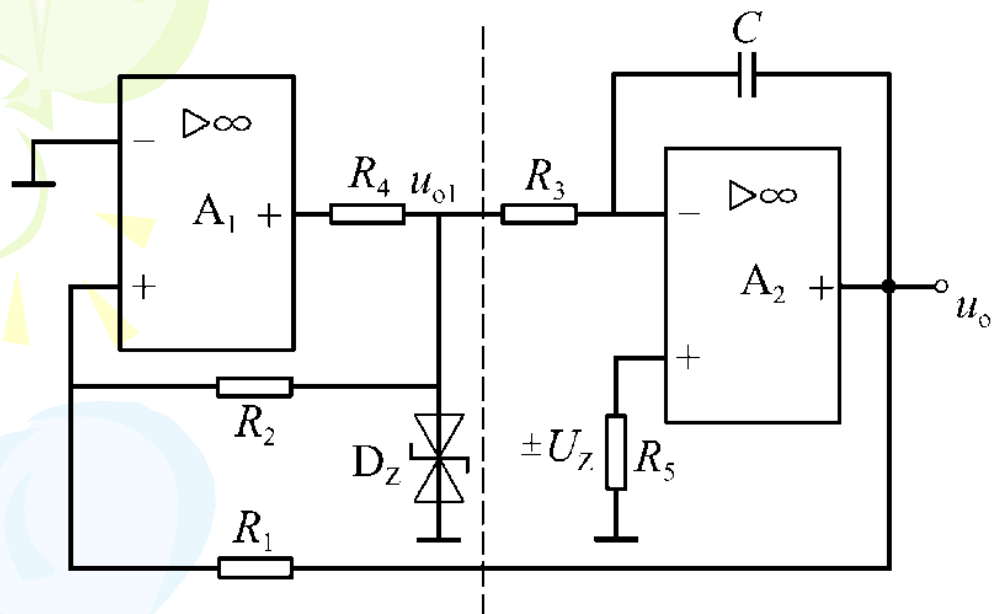


(b) 输出波形

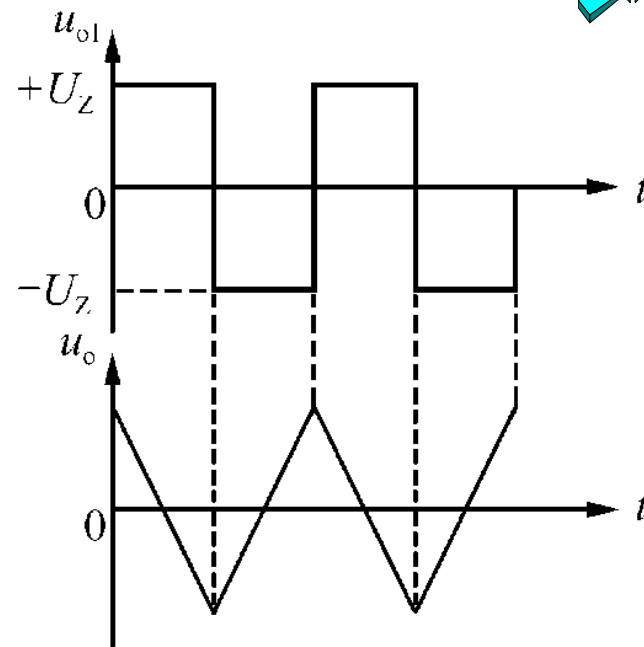
该电路的振荡周期：
$$T = \frac{4R_1R_3C}{R_2}$$

调节 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值和 C 的容量，可改变振荡频率；调节 R_1 、 R_2 的阻值，可改变三角波幅度。

电路产生三角波的的工作过程:



(a) 电路



(b) 输出波形

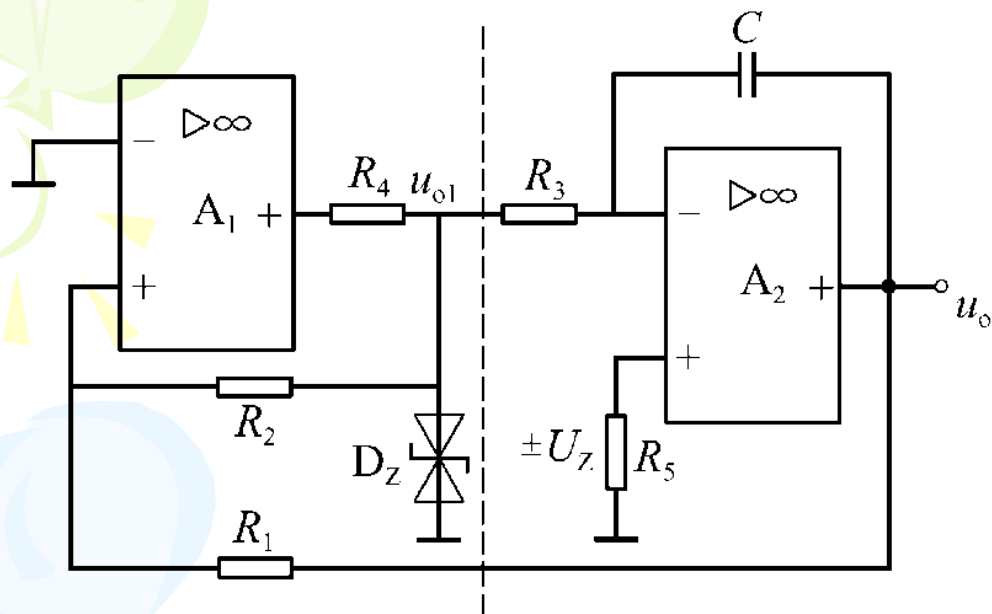
电路工作稳定后，在 $u_{01} = -U_Z$ 期间，电容 C 通过 R_3

放电， $u_0 \uparrow \rightarrow u_{+1} \uparrow \rightarrow u_{01} \uparrow$ ；

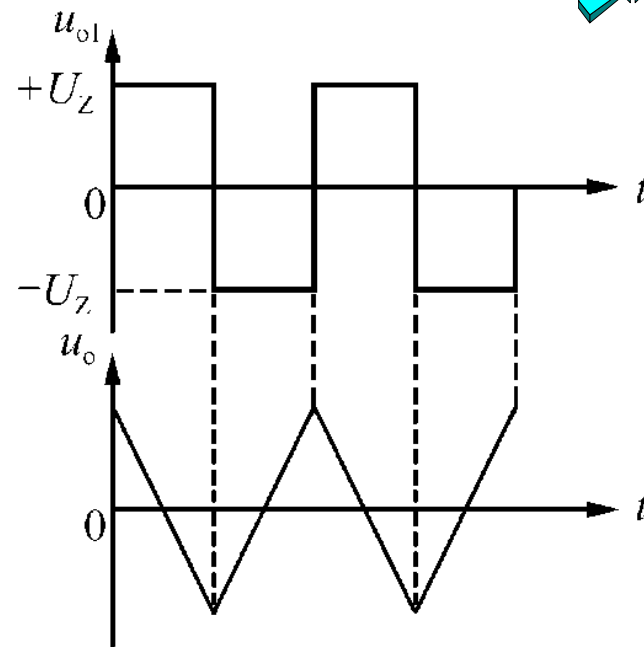
(由于 $I \equiv -\frac{U_Z}{R_3}$ ，而 u_{01} 从 $-U_Z$ 跳变为 $+U_Z$ 时，

$u_0 = \frac{R_1}{R_2} U_Z$ ，则 u_0 线性上升。)

电路产生三角波的的工作过程:



(a) 电路



(b) 输出波形

在 $u_{01} = +U_Z$ 期间, $+U_Z$ 通过 R_3 对电容 C 进行充电,

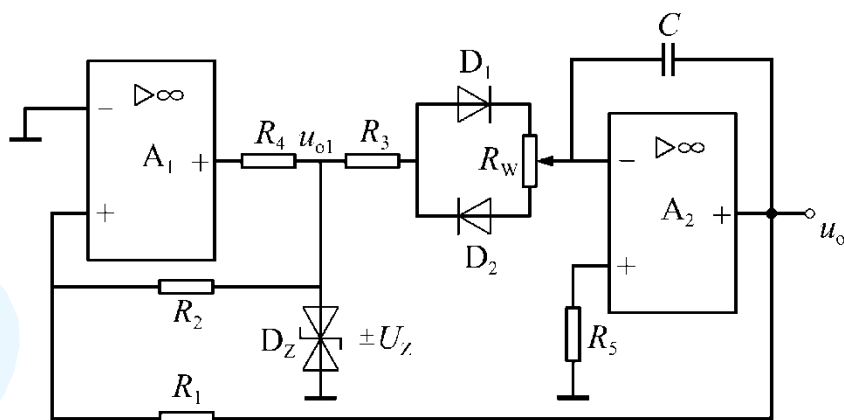
$u_0 \downarrow \rightarrow u_{+1} \downarrow \rightarrow u_{01} \downarrow$;

(当 u_{01} 从 $+U_Z$ 跳变为 $-U_Z$ 时, $u_0 = -\frac{R_1}{R_2} U_Z$, 则 u_0 线性下降。)

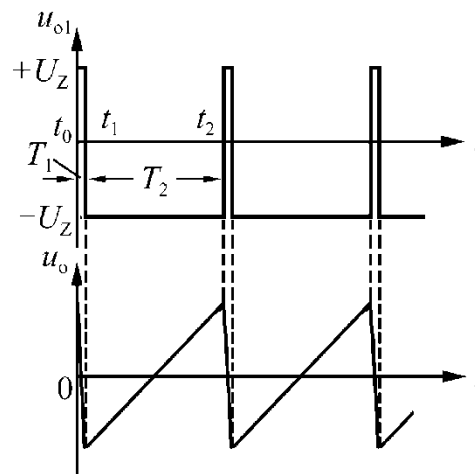
从而输出的是线性度很好的三角波电压 u_0 。



三、锯齿波发生器



(a) 电路



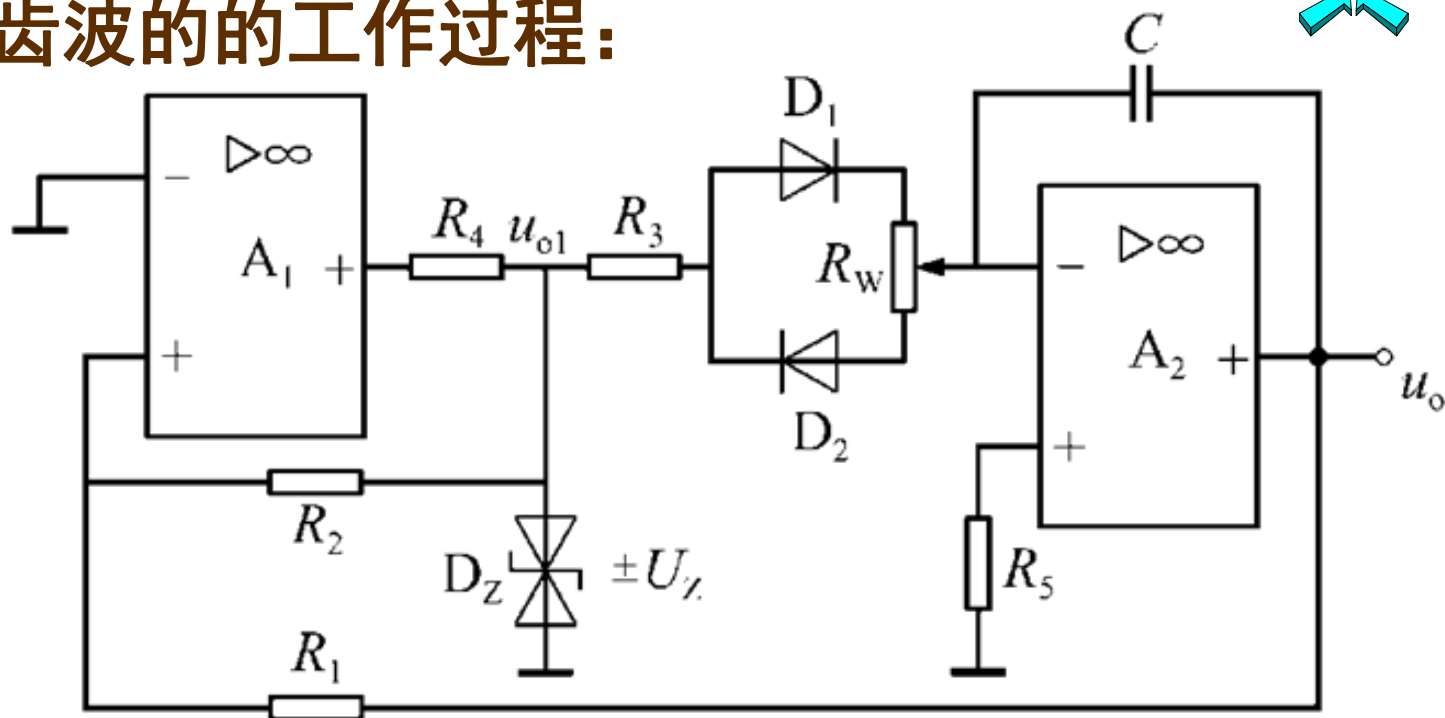
(b) 输出波形

该电路的振荡周期:
$$T = T_1 + T_2 = \frac{2R_1(2R_3 + R_W)C}{R_2}$$

矩形波的占空比:
$$\frac{T_1}{T} = \frac{R_3}{2R_3 + R_W}$$

调整 R_1 、 R_2 的阻值，可改变锯齿波幅值；调整 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值以及 C 的容量，可以改变振荡周期。

电路产生锯齿波的工作过程：

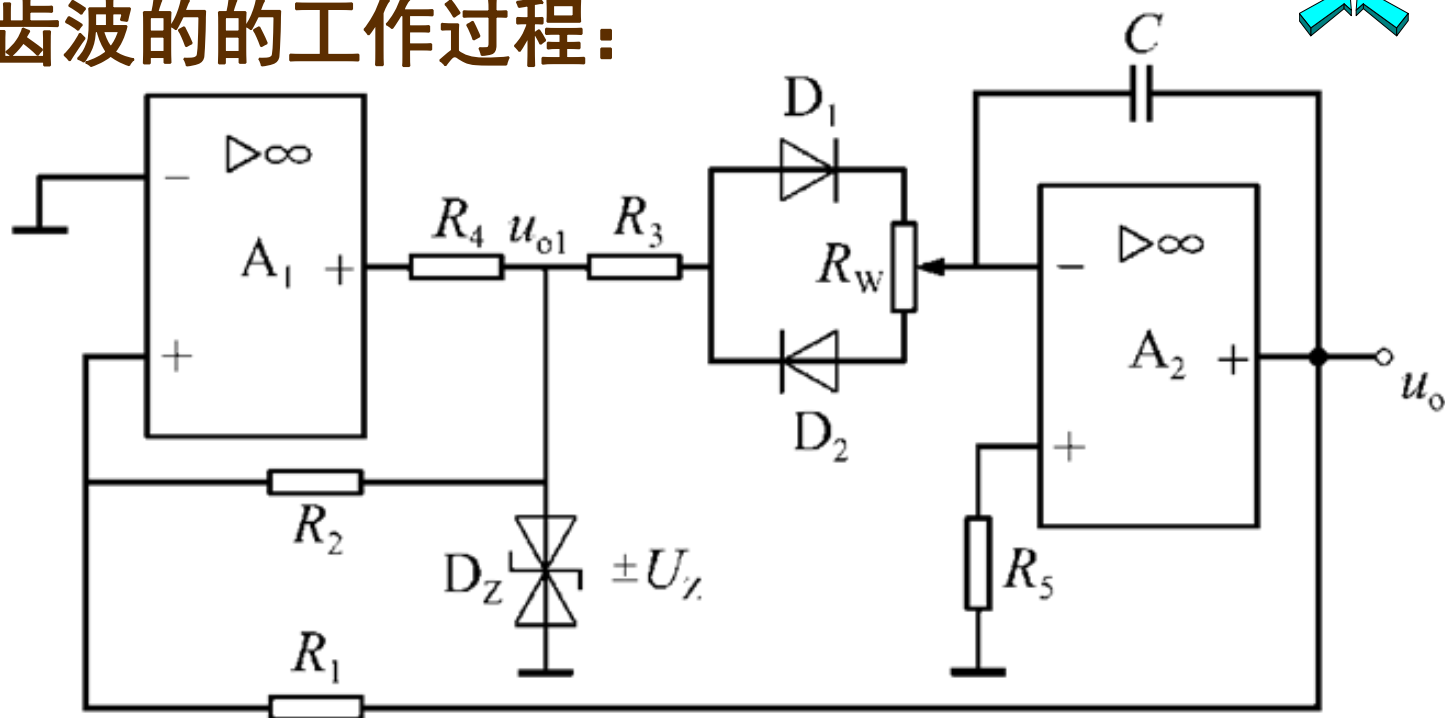


设二极管导通时的等效电阻可忽略不计，电位器的滑动端移到最上端。

当 $u_{o1} = +U_Z$ 时，

D_1 导通， D_2 截止， $+U_Z$ 通过 R_3 、 D_1 对积分电容器 C 充电， $u_o \downarrow$ 。

电路产生锯齿波的工作过程：

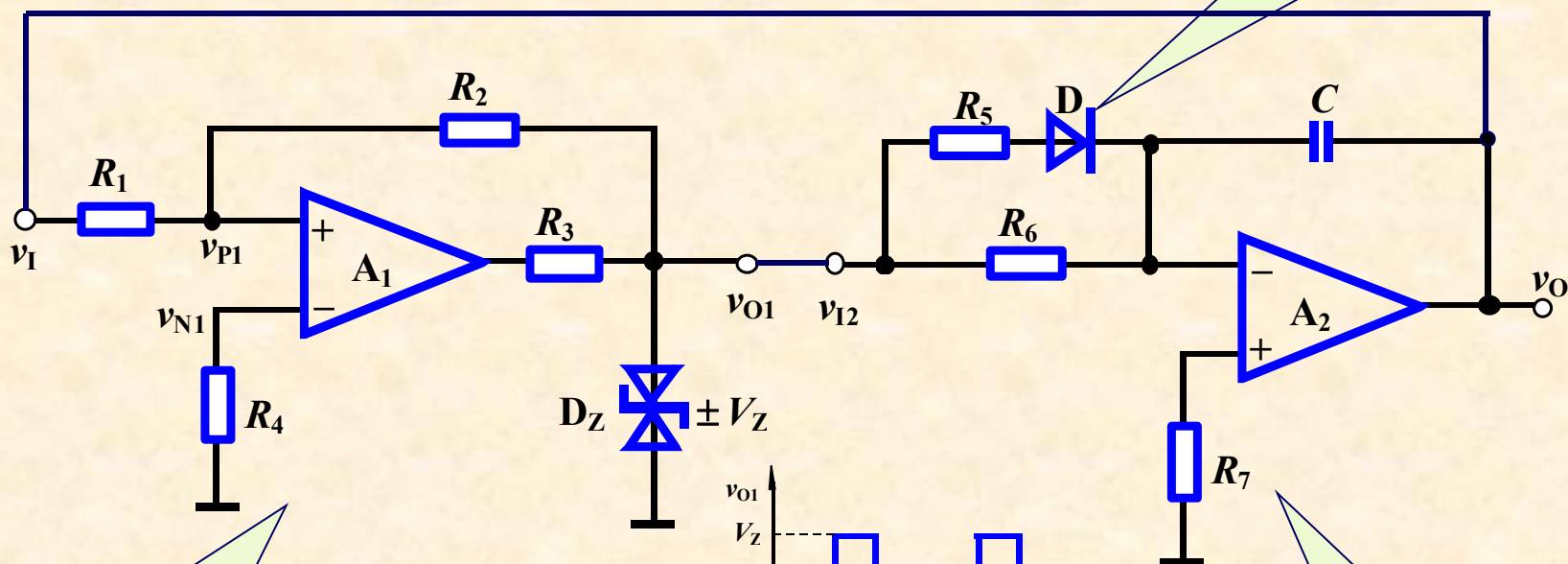


当 $u_{o1} = -U_Z$ 时， D_1 截止， D_2 导通，电容器 C 通过 R_3 、 D_2 、 R_W 进行放电， $u_o \uparrow$ ；

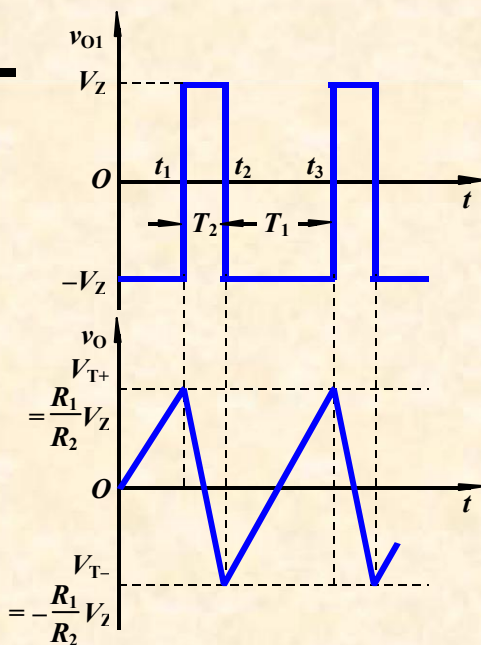
由于 $R_W \gg R_3$ ，使锯齿波上升段持续的时间长，下降段持续的时间很短。

锯齿波产生电路

充放电时间
常数不同



同相输入迟
滞比较器



积分电路

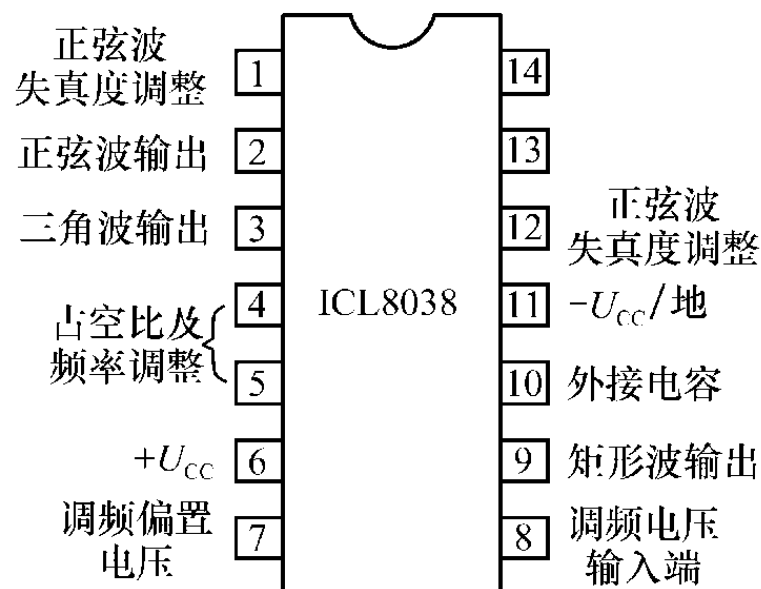


四、集成函数发生器

函数发生器(function generator):

是一种可以同时产生正弦波、方波和三角波的专用集成电路。当调节外部电路参数时，还可以获得占空比可调的矩形波和锯齿波，因而广泛用于各种医疗仪器中。

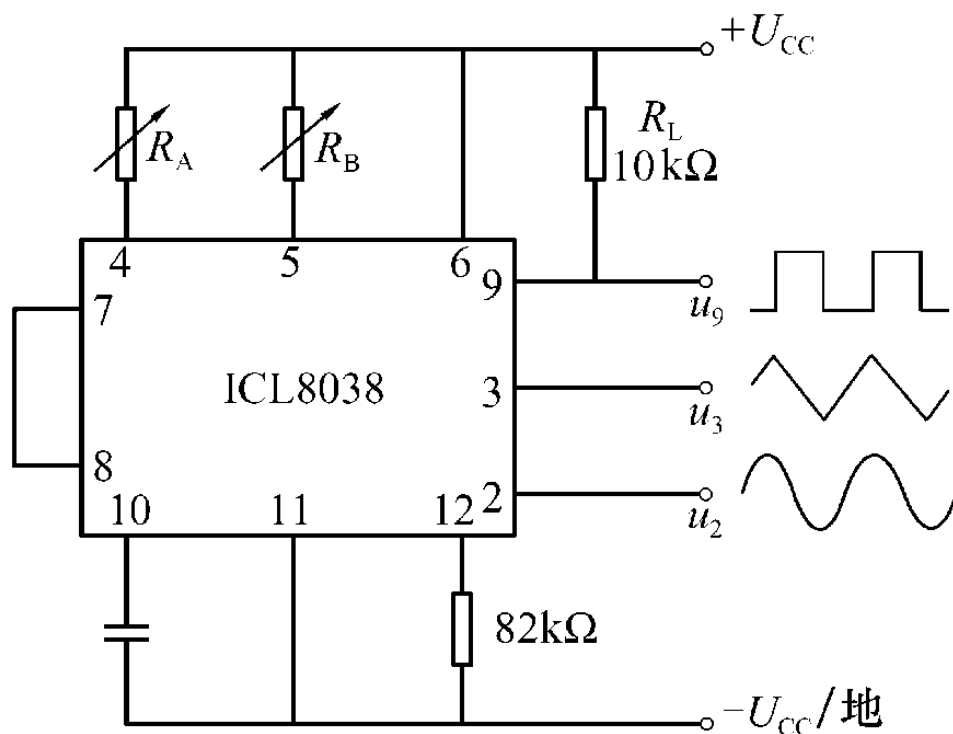
集成函数发生器 ICL8038 是单片多用途发生器，下面以它为例，介绍集成函数发生器性能特点和实用电路。





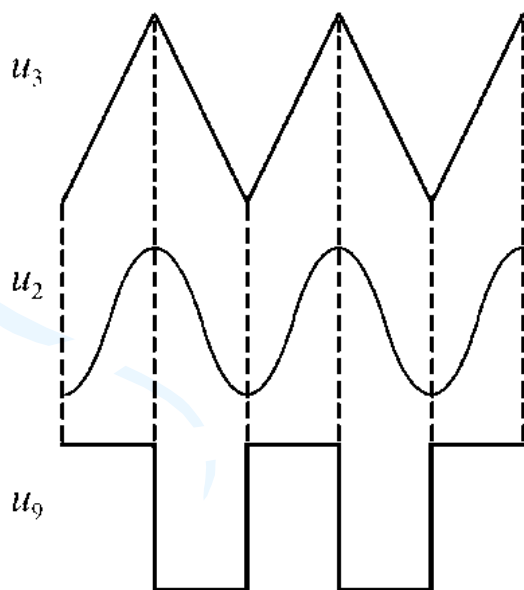
如图所示是ICL8038是一种常见的接法。

矩形波输出端
为集电极开路形式
，需外接电阻 R_L 至
电源 $+U_{cc}$ ，电阻 R_A
和 R_B 可分别独立调
节。

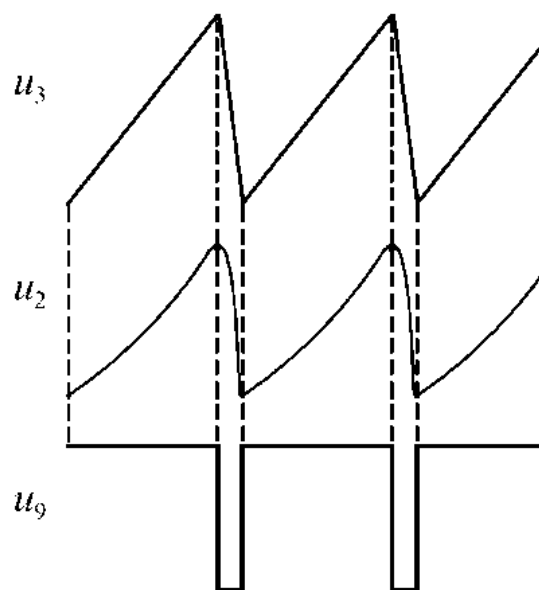




当 $R_A=R_B$ 时，各输出端的波形如图所示(a)，9脚输出矩形波，占空比为50%；3脚和2脚分别输出三角波和正弦波。



(a) 占空比为50%



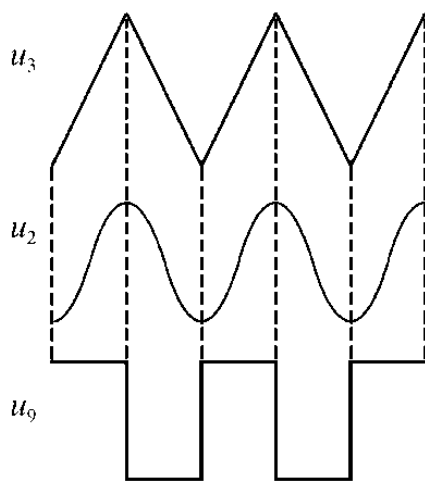
(b) 占空比为15%



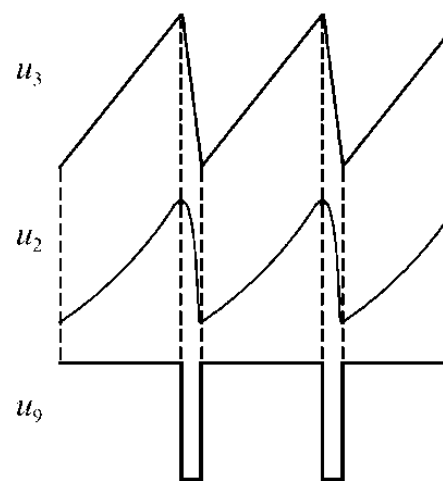
当 $R_A \neq R_B$ 时，矩形波不再是占空比对称的矩形波，引脚2的输出也不再是正弦波了，引脚3输出的是锯齿波，图(b)为占空比15%时的输出波形。根据其内部电路和外接电阻，可以导出占空比为：

$$\frac{T_1}{T} = \frac{2R_A - R_B}{2R_A} = 1 - \frac{R_B}{2R_A}$$

故必须 $R_B < 2R_A$



(a) 占空比为50%



(b) 占空比为15%

习 题

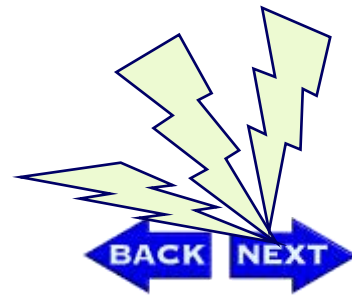


5 振荡电路

P141: 5-1, 5-2, 5-4, 5-5, 5-8

HOME

end



电压比较器

1. 单门限电压比较器

特点：开环，**虚短**不成立

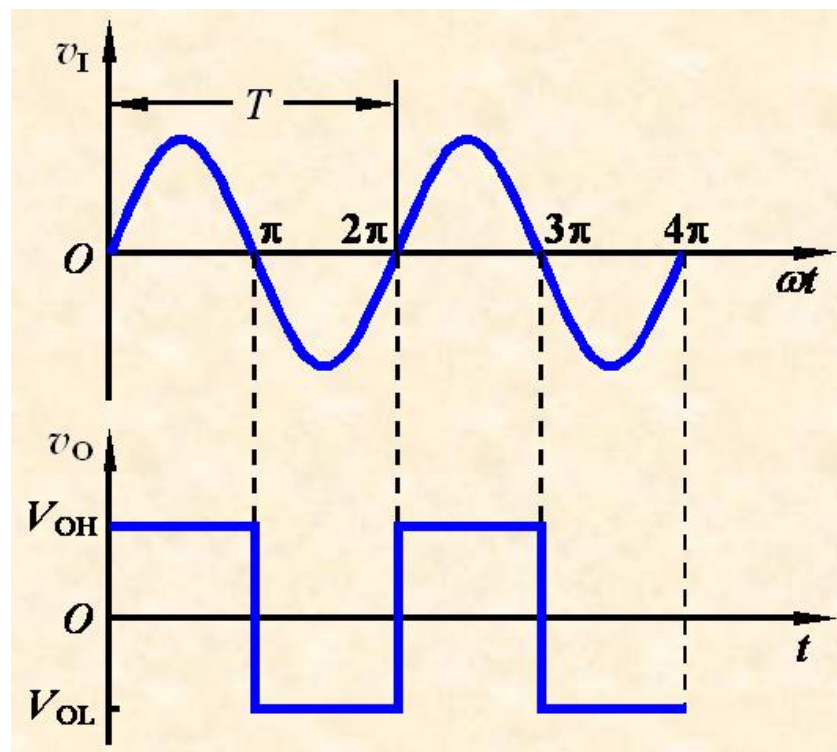
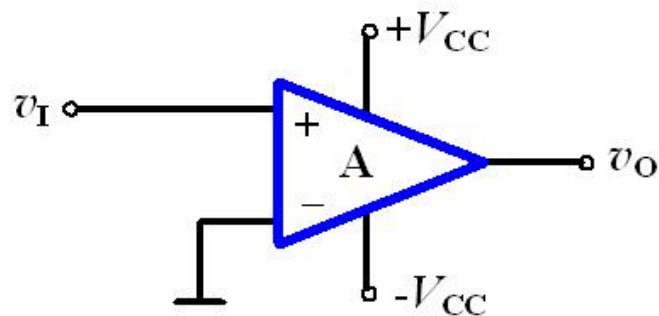
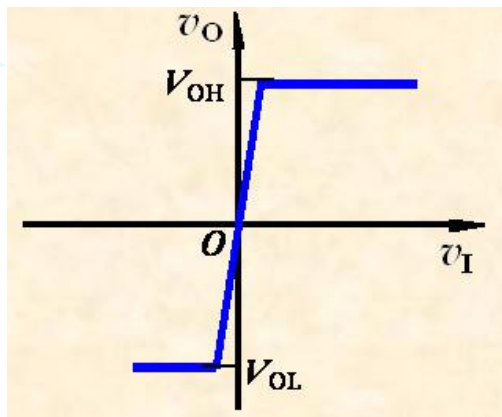
增益 A_0 大于 10^5

$$-V_{CC} \leq v_O \leq +V_{CC}$$

(1) 过零比较器

输入为正负对称的正弦波时，输出为方波。

电压传输特性



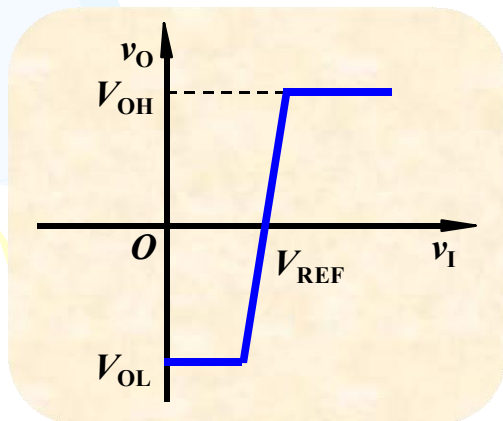
电压比较器

1. 单门限电压比较器

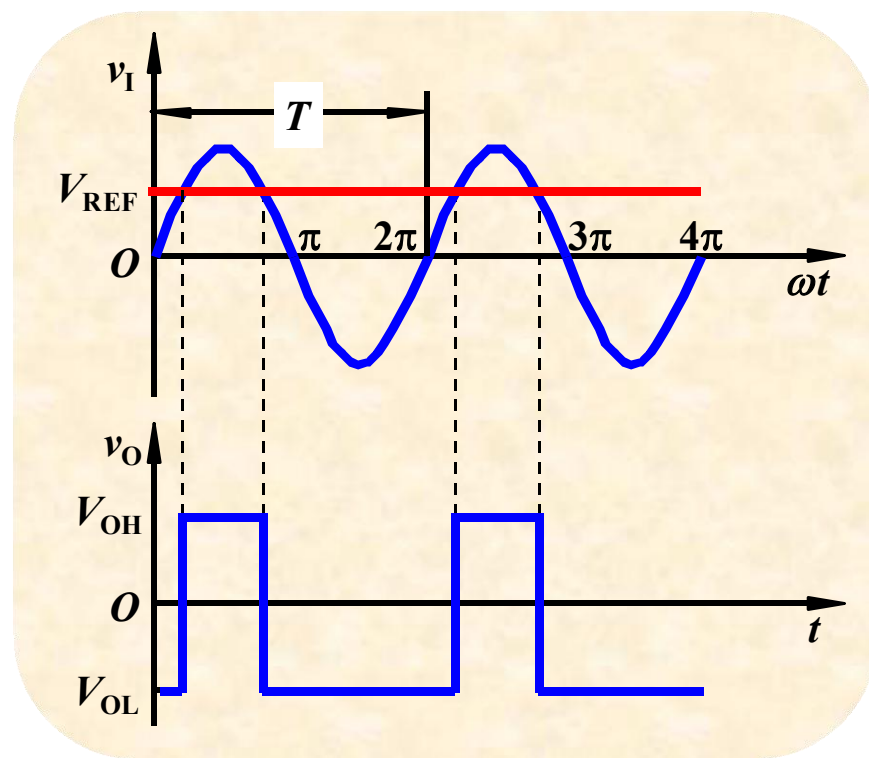
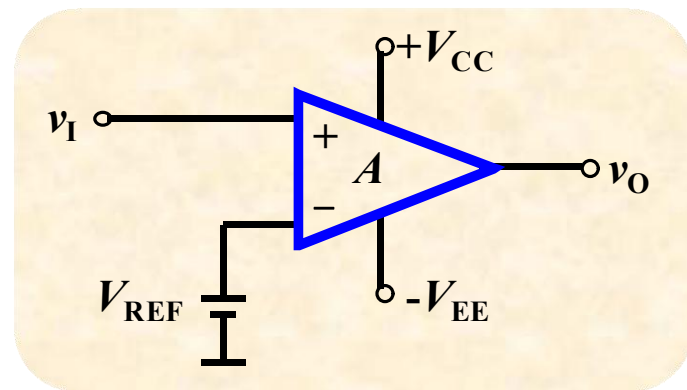
(2) 门限电压不为零的比较器

(门限电压为 V_{REF})

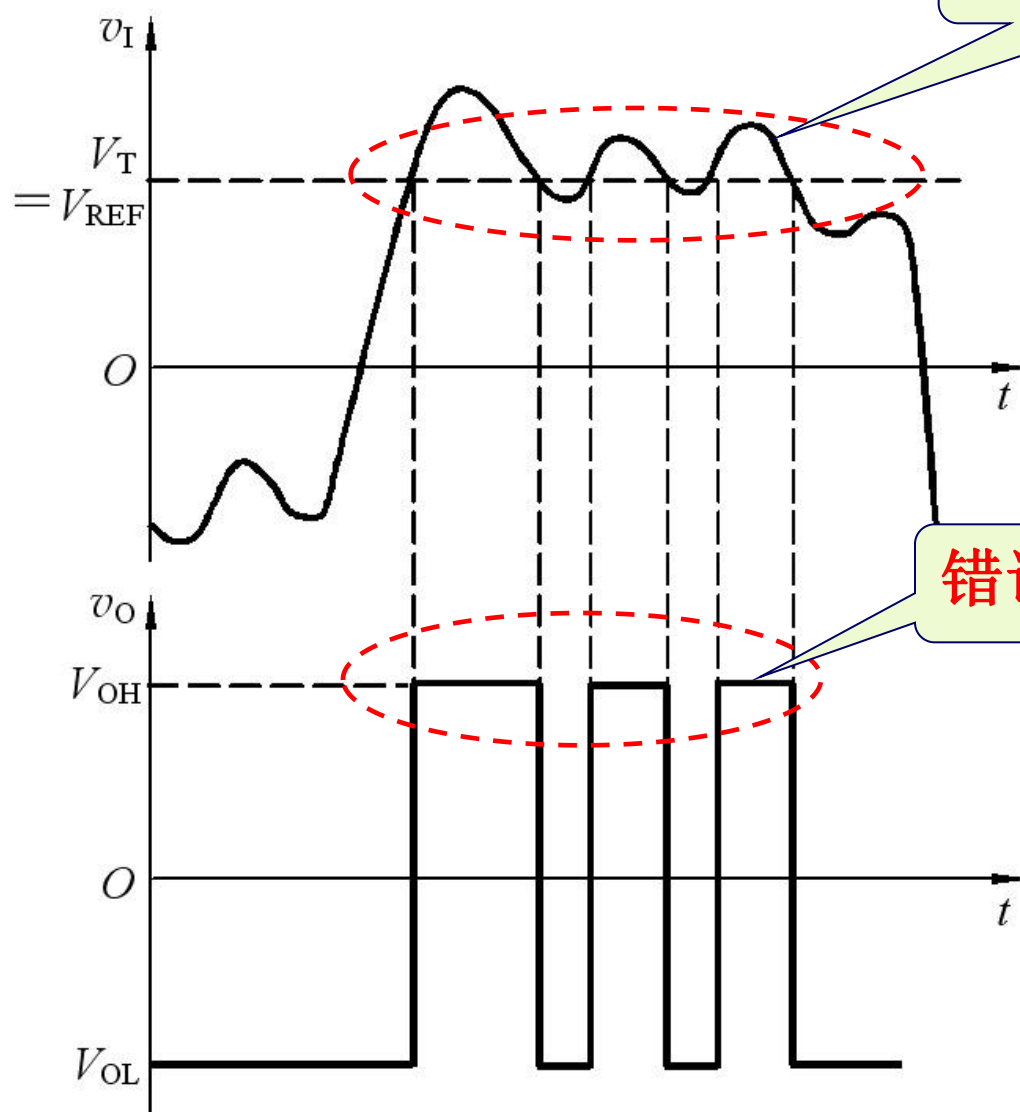
电压传输特性



输入为正负对称的正弦波时，输出波形如图所示。



单门限比较器的抗干扰能力



应为高电平

错误电平

电压比较器

2. 迟滞比较器

(1) 电路组成

(2) 门限电压 v_P 为门限电压,

$v_I > v_P$ 时, $v_O = V_{OL}$ (低电平) $v_I < v_P$ 时, $v_O = V_{OH}$ (高电平)

而 v_P 与 v_O 有关, 对应于 v_O 的两个电压值可得 v_P 的两个门限电压

$$V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2}$$

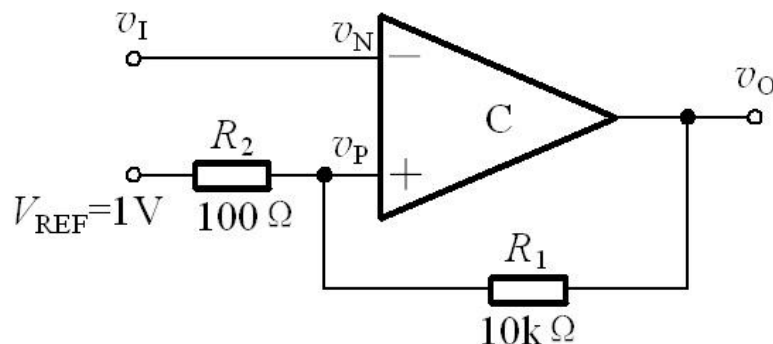
上门限电压

$$V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2}$$

下门限电压

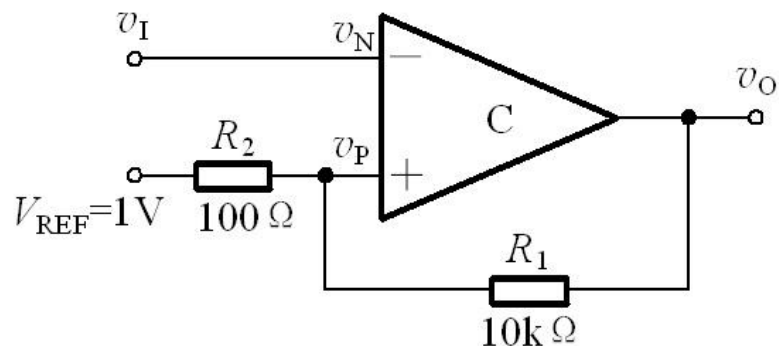
回差电压

$$\Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = \frac{R_2 (V_{OH} - V_{OL})}{R_1 + R_2}$$



电压比较器

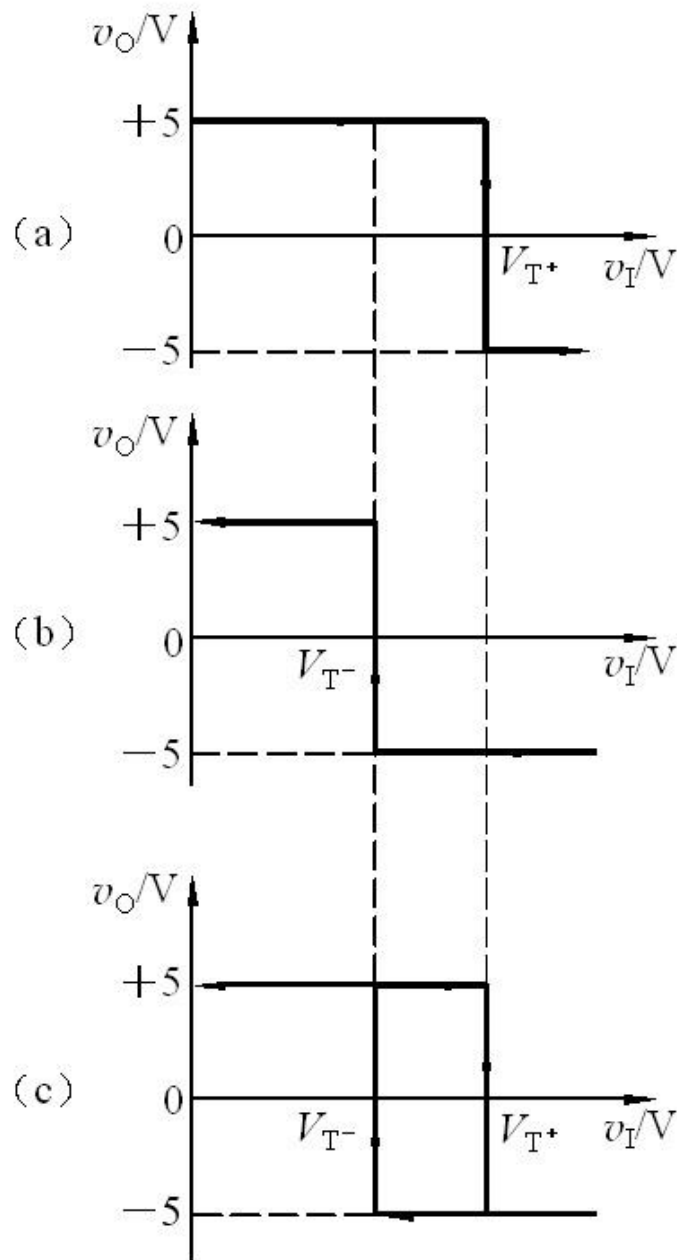
2. 迟滞比较器



(3) 传输特性

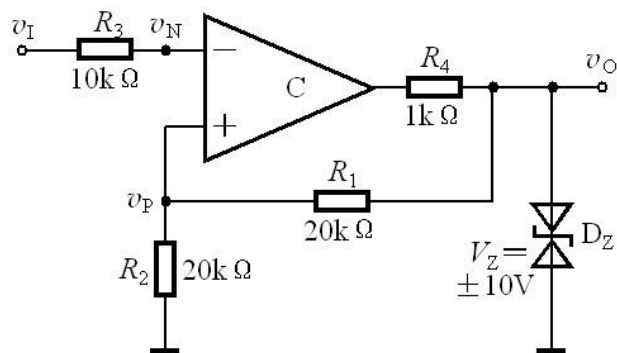
$$V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2}$$

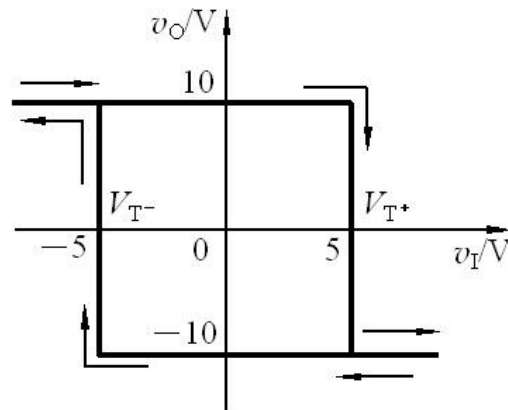


例

电路如图所示，试求门限电压，画出传输特性和图c所示输入信号下的输出电压波形。



(a)



(b)

解： (1) 门限电压

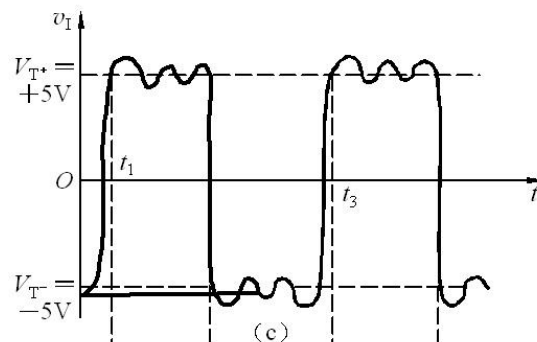
$$V_{REF} = 0 \quad V_O = \pm 10V$$

$$V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2} = 5V$$

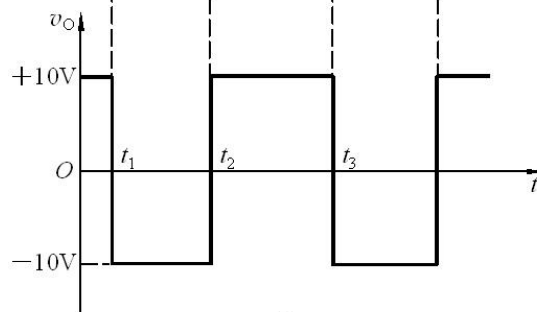
$$V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2} = -5V$$

(2) 传输特性

(3) 输出电压波形



(c)



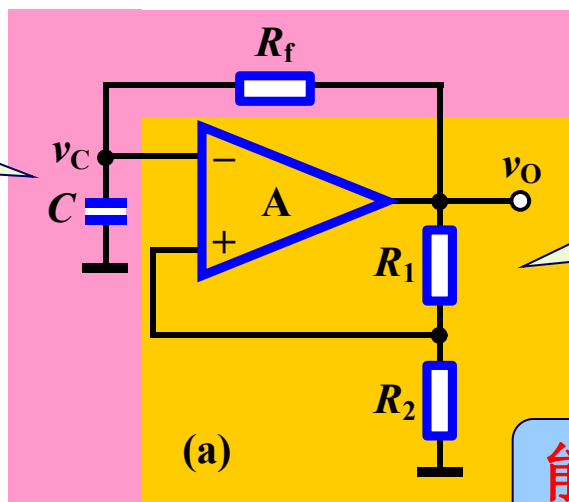
(d)

1 方波产生电路



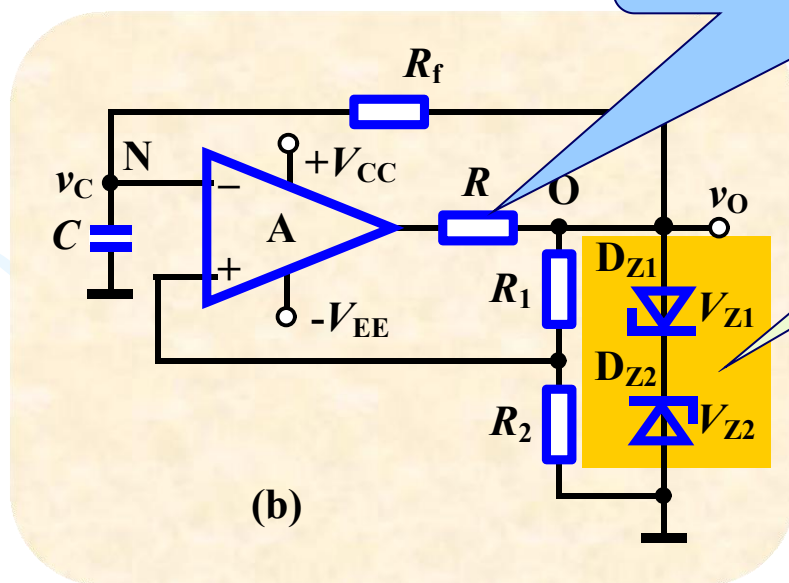
1. 电路组成（多谐振荡电路）

RC充放电支路



迟滞比较器

能否不串入该电阻？



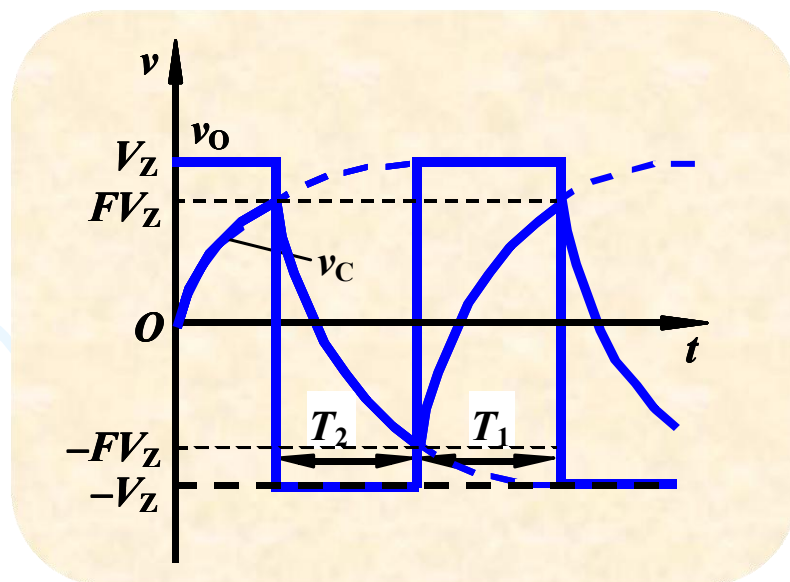
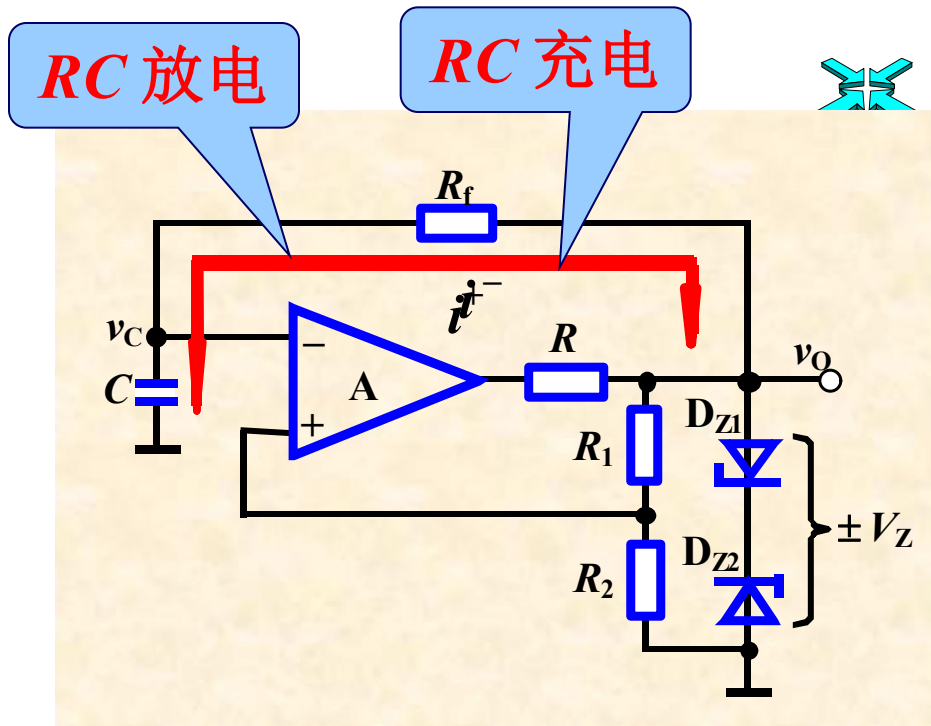
稳压管双向限幅

1 方波产生电路

2. 工作原理

由于迟滞比较器中正反馈的作用，电源接通后瞬间，输出便进入饱和状态。

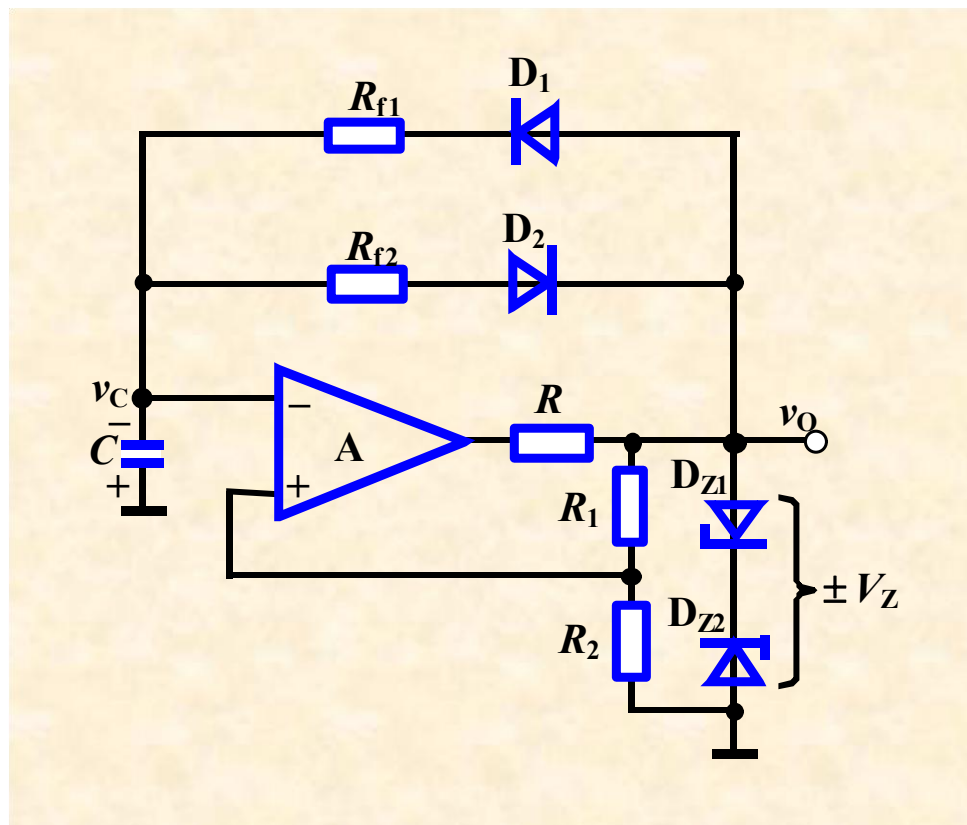
假设为正向饱和状态



1 方波产生电路

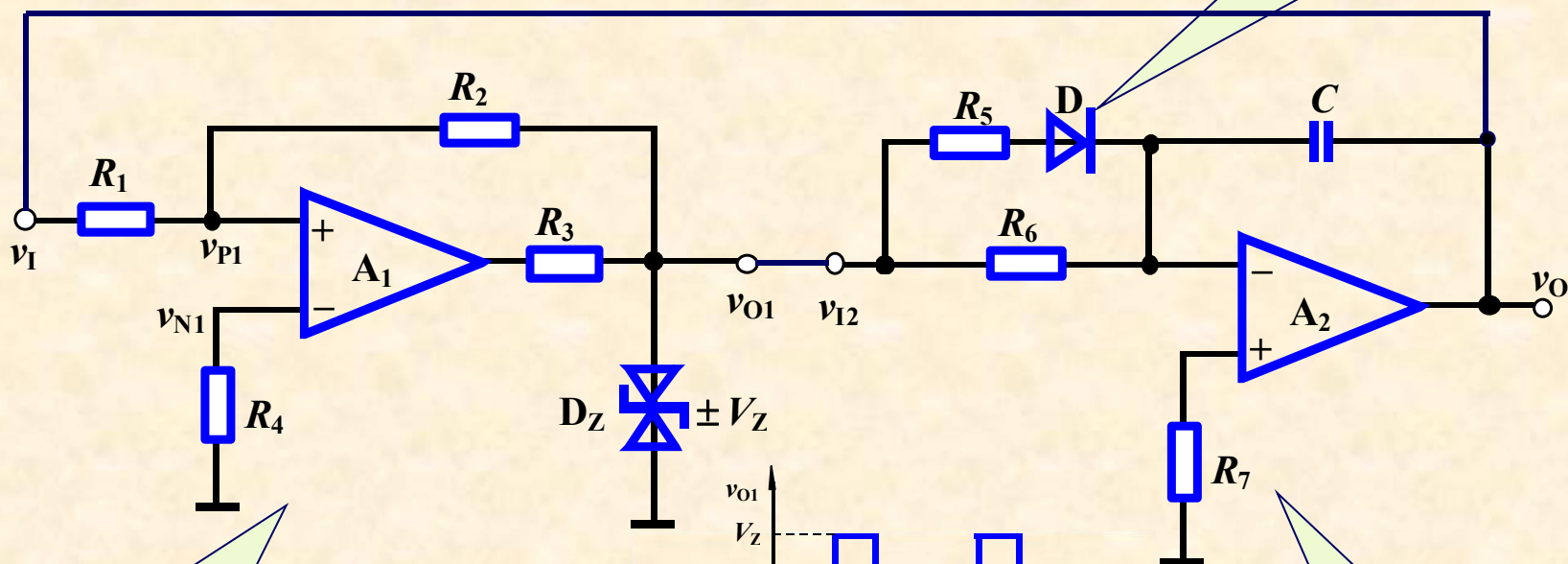


3. 占空比可变的方波产生电路

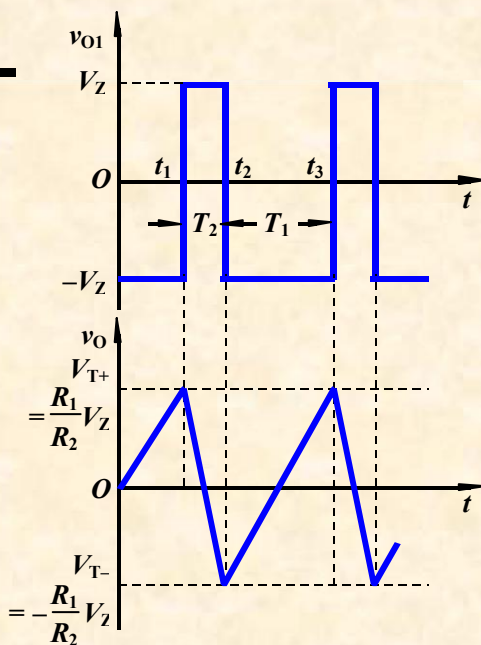


2 锯齿波产生电路

充放电时间
常数不同



同相输入迟
滞比较器



积分电路