第7章 波形产生与信号变换电路

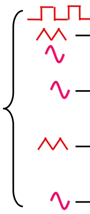
7.1 正弦波产生电路
7.2 电压比较器
7.3 非正弦波产生电路
7.4 信号变换电路
7.5 辅修内容
小 结

这些信号是怎么来的？

产生这些信号的电路？

你知道吗？

你想知道吗？



- → 电工,电子实验需要
- → 高频感应加热设备
- → 显像管场行扫描
- → 无线通信调制波

电压 → ？？？ → 电流　　电流 → ？？？ → 电压

电压 → ？？？ → 频率　　频率 → ？？？ → 电压

输入信号1、输入信号2 → 谁大？谁小？ → 输出信号

7.1 正弦波产生电路

- 7.1.1 正弦波振荡电路的起振与平衡条件
- 7.1.2 RC正弦波振荡电路
- 7.1.3 LC正弦波振荡电路
- 7.1.3 石英晶体正弦波振荡电路

概 述

信号产生电路（振荡器—Oscillators）

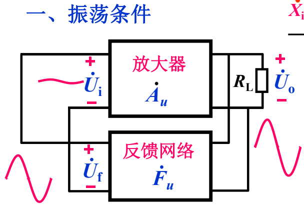
分类：

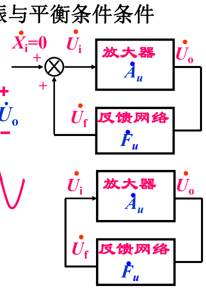
- 正弦波振荡：
  - RC 振荡器（1 kHz ~ 数百 kHz）
  - LC 振荡器（几百 kHz 以上）
  - 石英晶体振荡器（频率稳定度高）
- 非正弦波振荡：方波、三角波、锯齿波等

主要性要求能：
- 输出信号的幅度准确稳定
- 输出信号的频率准确稳定

7.1.1 正弦波振荡电路的起振与平衡条件条件

一、振荡条件

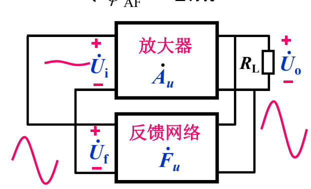




微弱的电扰动中，某一频率成分通过正反馈逐渐放大，则产生正弦振荡。

初始的微小信号从何而来？

起振条件：$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}|>1 \\ \varphi_{AF}=2n\pi \end{cases}$　　平衡条件：$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}|=1 \\ \varphi_{AF}=2n\pi \end{cases}$



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

➡ $\dot{A}_u\dot{F}_u=1$

$|\dot{A}_u\dot{F}_u|=1$ — 幅值平衡条件

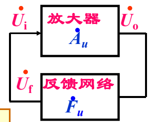
$\varphi_{AF}=\varphi_A+\varphi_F=2n\pi$ — 相位平衡条件

$n=0, 1, 2, \cdots$

【问题引导】为什么产生的是正弦波信号，而不是别的什么信号？

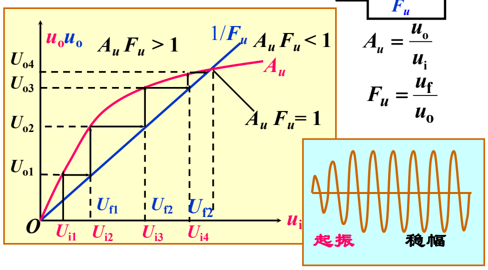
二、起振过程

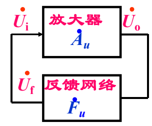
$$\begin{cases}|\dot{A}\dot{F}|>1\\ \varphi_{AF}=2n\pi\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}|\dot{A}\dot{F}|=1\\ \varphi_{AF}=2n\pi\end{cases}$$



$$A_u=\frac{u_o}{u_i}$$

$$F_u=\frac{u_f}{u_o}$$





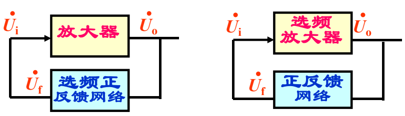
等幅振荡（稳幅）$\begin{cases}|\dot{A}\dot{F}|=1\\ \varphi_{AF}=2n\pi\end{cases}$

增幅振荡（起振）$\begin{cases}|\dot{A}\dot{F}|>1\\ \varphi_{AF}=2n\pi\end{cases}$

减幅振荡（停振）$\begin{cases}|\dot{A}\dot{F}|<1\\ \varphi_{AF}=2n\pi\end{cases}$

三、电路的组成和起振的判断

组成
1. 放大电路 $\dot{A}_u$ } 满足振荡条件
2. 正反馈网络 $\dot{F}_u$
3. 选频率网络—实现单一频率的振荡
4. 稳幅环节—使振荡稳定、波形好

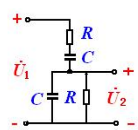


定性分析是否构成正弦波振荡：

1. 电路组成：包括4个基本环节？
2.放大电路是否有效？直流通路、交流通路有无开路、短路现象？“Q”是否合适？
3. 是否满足起振条件？只要是正反馈，就认为满足相位条件。

7.1.2 *RC* 正弦波振荡电路

1. *RC* 串并联选频网络



$$\dot{F}_u=\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}=\frac{R//\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}+(R//\frac{1}{j\omega C})}=\frac{1}{3+j(\omega RC-\frac{1}{\omega RC})}=\frac{1}{3+j(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega})}$$

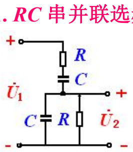
$$\begin{cases}|\dot{F}_u|=\dfrac{1}{\sqrt{9+(\omega/\omega_0-\omega_0/\omega)^2}}\\ \varphi_F=-\arctan\dfrac{\omega/\omega_0-\omega_0/\omega}{3}\end{cases}$$

式中：$\omega_0=1/RC$

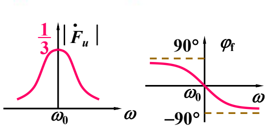
7.1.2 *RC* 正弦波振荡电路

1. *RC* 串并联选频网络

式中：$\omega_0=1/RC$



$$\begin{cases}|\dot{F}_u|=\dfrac{1}{\sqrt{9+(\omega/\omega_0-\omega_0/\omega)^2}}\\ \varphi_F=-\arctan\dfrac{\omega/\omega_0-\omega_0/\omega}{3}\end{cases}$$



当 $\omega=\omega_0$ 时

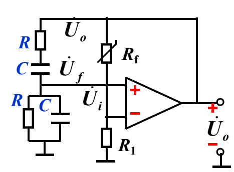
$|\dot{F}_u|=1/3$

$\varphi=0°$

【问题引导】RC串并联网络是怎样选频的？选的哪一频率？

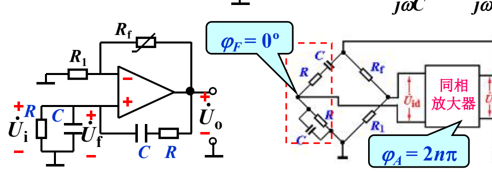
2. *RC* 桥氏振荡电路

该振荡电路的放大电路是？



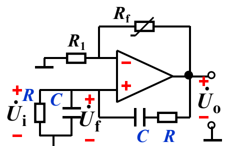
$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=(1+\frac{R_f}{R_1})$$

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



1) 振荡条件

相位条件：$\boxed{\varphi_{AF}=\varphi_A+\varphi_F=0}$



幅值条件：

$|\dot{A}_u\dot{F}_u|>1 \quad \because |\dot{F}|=\frac{1}{3} \quad \therefore |\dot{A}|>3$

应使： $R_f/R_1>2$ $\boxed{R_f>2R_1}$

R_f 不能太大，否则正弦波将变成方波

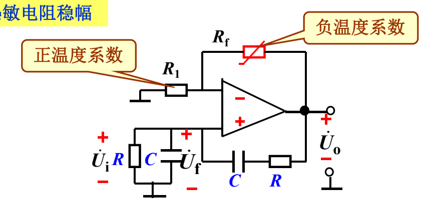
2) 振荡频率 $\boxed{f_0=\frac{1}{2\pi RC}}$

【问题引导】该振荡电路的放大倍数应满足什么条件？

3) 稳幅措施

为使电 A_u 为非线性，起振时，应使 $A_u>3$，稳幅后 $A_u=3$。

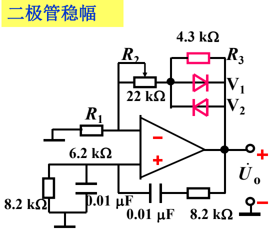
热敏电阻稳幅



$T\uparrow \rightarrow R_f\downarrow \rightarrow A_{uf}=(1+R_f/R_1)\downarrow$

【问题引导】如果没有稳幅环节，会如何？

二极管稳幅



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

$\boxed{f_0=1.94\text{ kHz}}$

起振时信号小，二极管电阻大，若视为开路：

$A_u\approx 1+(R_2+R_3)/R_1>3$

$R_2>2R_1-R_3$

稳幅时信号大，二极管电阻小，若视为短路：

$A_u\approx 1+R_2/R_1=3$

$R_2=2R_1$

考虑R_3并未完全短路：

$R_2<2R_1$

$\boxed{12.4\text{ k}\Omega>R_2>8.1\text{ k}\Omega}$

例7-1 图示为RC桥式正弦波振荡短路，已知运放的最大输出电压为±14V。(1) 振荡频率＝？ (2) 二极管D_1、D_2的作用？

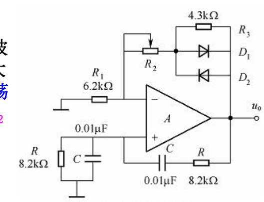


图 7-9 例 7.1 电路图

解 (1)

$f_0=\frac{1}{2\pi RC}=1940\text{Hz}$

解 (2)

两二极管起稳幅作用。 稳幅原理： 起振过程中， 振荡电路振幅小时， 二极管无电流或电流小，阻值大；随着振荡电路振幅增大，二极管电流增大，阻值减小，使振荡电路从起振到平衡时，放大电路 A_u 从大于 3 自动调整到等于 3。

例7-1 图示为RC桥式正弦波振荡短路，已知运放的最大输出电压为±14V。

(3) R_2的取值范围？

解 (3)

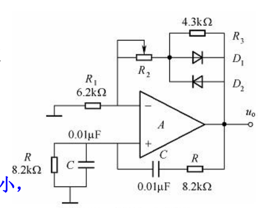


图 7-9 例 7.1 电路图

起振时振幅小，二极管电流小，电阻大，若视为开路：

$\dot{A}_u=1+\frac{R_2+R_3}{R_1}>3, R_2>2R_1-R_3=8.1\text{k}\Omega$

平衡时振幅大，二极管电流大，电阻小，若视为短路：

$\dot{A}_u=1+\frac{R_2}{R_1}=3, R_2=2R_1$

考虑二极管不能视为完全短路，应使 $R_2<2R_1=12.4\text{k}\Omega$

所以 $8.1\text{k}\Omega<R_2<12.4\text{k}\Omega$

例7-1 图示为RC桥式正弦波振荡短路，已知运放的最大输出电压为±14V。

(4) 若R_2 =10k Ω，当u_o处于正弦波波峰或波谷时，设二极管正向压降为0.7V， u_o振幅等于多少？

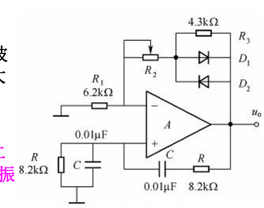


图 7-9 例 7.1 电路图

解 (4) 振荡电路平衡时，

$\dot{A}_u=1+\frac{R_2+R_3'}{R_1}=3, R_3'=2R_1-R_2=2.4\text{k}\Omega$

流过R_3′的电流 $I_{R_3}=\frac{0.7}{R_3'}=0.292.4\text{mA}$

u_o的振幅 $U_{OM}=0.7+I_{R_3}(R_1+R_2)=5.4\text{V}$

例7-1 图示为RC桥式正弦波振荡短路，已知运放的最大输出电压为±14V。(5) 说明 R_2短路时，输出电压 u_o的波形？

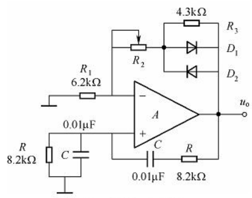


图 7-9 例 7.1 电路图

解 (5) R_2短路时

$$\dot{A}_u = 1 + \frac{R_2 + R_3'}{R_1} < 3$$

振荡电路停振，输出波形为 u_o=0的一条直线

例7-1 图示为RC桥式正弦波振荡短路，已知运放的最大输出电压为±14V。 (6) 画出$R2$开路时，输出电压 u_o 的波形？

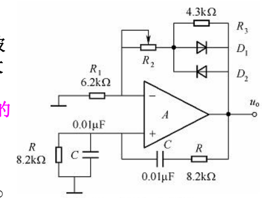


图 7-9 例 7.1 电路图

解 (6) R_2开路时 $\dot{A}_u \to \infty$

振荡电路输出波形为幅值很大的正弦波的波峰和波谷被削掉后而变成的近似方波。

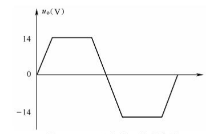
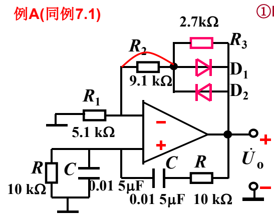


图 7-10 R_2 开路时 u_o 输出波形

例A(同例7.1)



①D_1D_2作为稳幅元件的稳幅原理？

U_O越大，二极管的电阻越小，负反馈越强，放大电路放大倍数越小，使AF>1→AF=1

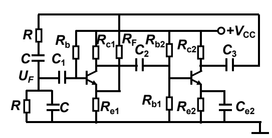
②R_2短路时U_O的波形？

R_2短路时，负反馈太强，A太小，使AF<1，电路停振。U_O输出恒值。

③R_2开路时U_O的波形？

R_2开路时，运放开环运行，A→∞，运放为正或负饱和输出状态，U_O输出方波。

例7-2



③已知R_{e1}＝1KΩ，应如何选择R_F才能使电路起振？

$$F = \frac{u_F}{u_O} = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F}$$

$$A_{uf} \approx \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_F}{R_{e1}} \ge 3$$

$$R_F \ge 2R_{e1} = 2\mathrm{k}\Omega$$

①振荡的总相位条件 φ＝？

$\Phi_A + \Phi_F = 360^\circ + 0^\circ = 360^\circ$

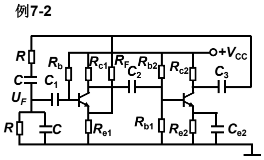
②设C=0.01μF，R=10k，振荡频率f_0=？

F_0=1/(2πRC)=1600Hz

不要被放大电路的复杂性所迷惑！

也就是一个电压串联负反馈放大电路而已！

例7-2



⑤若在R_F支路中串入热敏电阻R_t，用以稳定电路的输出幅值，试说明应选择何种温度系数的热敏电阻？若R_t串入T_1的发射极支路，它的温度系数又如何选择？

④若满足了振荡的两个条件后电路仍不能起振，试分析是什么原因？应采取什么措施？

说明RC串并联网络对基本放大电路有影响，应加一级射极跟随器作隔离级。

若在R_F支路中串入热敏电阻R_t，应选择具有负温度系数的热敏电阻。

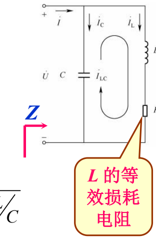
若R_t串入T_1的发射极支路，应选择具有正温度系数的热敏电阻。

7.1.3 LC 正弦波振荡电路 RC正弦波振荡电路的特点？

类型：变压器反馈式 、 电感三点式、 电容三点式

1. LC 并联回路的特性

$$\dot{Z} = \frac{\frac{1}{j\omega C}(r + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + (r + j\omega L)} \approx \frac{L/C}{r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$



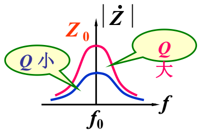
① 谐振频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$， $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

② 回路品质因数 $Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{r\omega_0 C} = \frac{1}{r}\sqrt{L/C}$

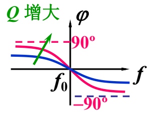
③ 谐振阻抗 $Z_0 = L/rC = Q\omega_0 L = Q/\omega_0 C$

LC并联网络是怎样选频的？选的哪一频率？

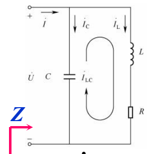
④ 频率特性

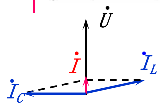


幅频特性



相频特性





⑤ 并联谐振的本质 — 电流谐振

$$|\dot I_C|=|\dot I_L|=\frac{Z_0}{Z_L}|\dot I|=\frac{Q\omega_0 L}{\omega_0 L}|\dot I|=Q|\dot I|$$

$$\dot I_C\approx-\dot I_L$$

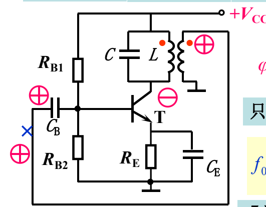
1） $Z=Z_0$ 呈纯阻

2) 形成环流，大小是总电流的 Q 倍

---

2. 变压器反馈式振荡电路 基本组成？

放大电路 选频网络 正反馈网络 稳幅环节



$\varphi_A=-180^\circ$ $\varphi_F=180^\circ$

$\varphi_{AF}=0^\circ$ —满足相位平衡条件

只要为正反馈就满足相位条件

$f_0\approx\frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}}$ L'—等效电感

同名端同极性 正反馈

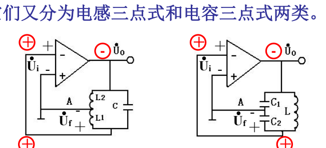
【问题引导】如何选频？选的哪一频率？

对于频率为f_0的信号，发生LC并联谐振，相当于三极管集电极接了一个阻值最大的纯电阻 R_C，因而放大倍数最大！

变压器太笨重，耦合也不紧，损耗也大，频率也不稳定，不用变压器！

电感三点式和电容三点式振荡电路

把并联LC回路中的C或L分成两个，则LC回路就有三个端点。把这三个端点分别与三极管的三个极相连，就形成了LC三点式正弦波发生电路。它们又分为电感三点式和电容三点式两类。



输入信号？

反馈信号？

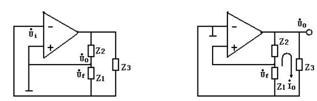
为正反馈？

LC三点式正弦波发生电路图

a）电感三点式 b）电容三点式

组成LC三点式正弦波发生电路的规律

LC三点式正弦波发生电路的一般结构如下图所示。



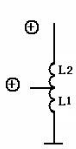
a）反相放大 b）同相放大

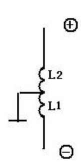
图 LC三点式正弦波发生电路的一般结构

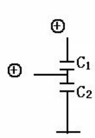
图a）为中点接地，图b）为一端接地

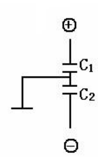
在LC三点式正弦波发生电路中，为了判断相位平衡条件，有：

对于判断反馈极性太重要了！





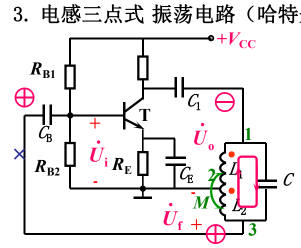




注意瞬时极性是相对于参考点而言

---

3. 电感三点式 振荡电路（哈特来振荡电路）



优点：

易起振（L 间耦合紧）；

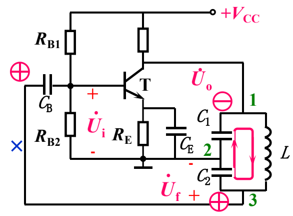
易调节（C 可调）。

缺点：

输出取自电感，对高次谐波阻抗大，意味着高次谐波放大倍数大，故输出波形差。

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

4. 电容三点式振荡电路 考毕兹振荡器（Colpitts）



优点：波形较好

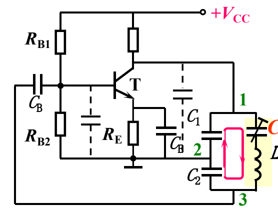
缺点：

1）调频时易停振

2）T 极间电容影响 f_0

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}L}}$$

5. 改进型电容三点式振荡电路



若要提高f_0，则要减小C_1、C_2，由于受极间电容的影响，当C_1、C_2减小到一定时，效果不再明显，为此，加一电容C_3

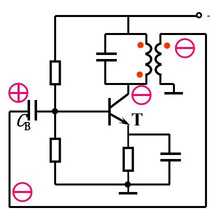
当$C_3 << C_1$、$C_3 << C_2$时，

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \approx \frac{1}{C_3}$$

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}L}}$$

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$$

主要看：放大电路有没有直流通路和交流通路开路、短路发生？是不是正反馈？



（a）

问题1：
基极电位为0。

改进：
加耦合电容

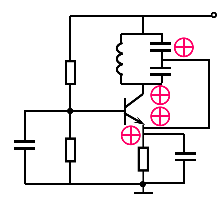
问题2：
为负反馈。

改进：
改变同名端。

放大电路？选频网络？正反馈网络？稳幅环节？

分压式共射　LC变压器反馈式　三极管非线性

例7-3 下列电路是否能振荡？若不能，试修改。



问题1：
发射极交流短路。

改进：
去掉发射极电容

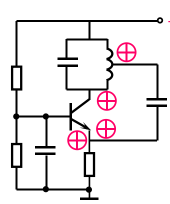
画交流通路时不要把LC选频网络中的电容也短路！

（b）　对正弦波振荡电路定性分析很重要！

放大电路？选频网络？正反馈网络？稳幅环节？

分压式共基　LC电容三点式　三极管非线性

例7-3 下列电路是否能振荡？若不能，试修改。



问题1：
发射极极电位为V_{CC}

改进：
加耦合电容

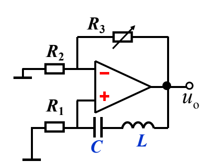
（c）　认清是共射还是共基放大电路！

放大电路？选频网络？正反馈网络？稳幅环节？

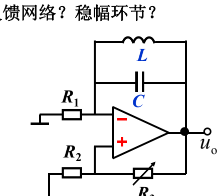
分压式共基　LC电感三点式　三极管非线性

例7-4 下列电路是否能振荡？若能振荡，其频率是多少？

放大电路？选频网络？正反馈网络？稳幅环节？



（a）



（b）

正反馈选频网络　　负反馈选频网络

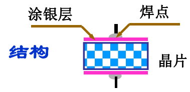
振荡频率：$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$　　振荡频率：$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

【问题引导】选频网络是？怎样选频的？选的哪一频率？

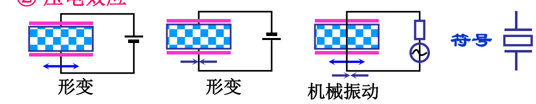
7.1.4 石英晶体(Crystal)振荡电路

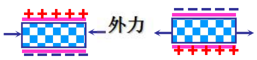
1. 石英晶体的基本特性

① 结构和符号　化学成分 SiO_2



② 压电效应



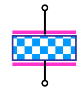


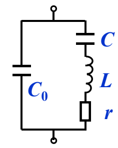
我现在需要一个频率很稳定的正弦波信号！

压电谐振—
外加交变电压的频率等于晶体固有频率时，机械振动幅度急剧加大的现象。

---

③ 等效电路





C_0 — 晶片静态电容（几～几十 pF）

L — 晶体的动态电感（10^{-3}～10^{2} H）(大)

r — 等效摩擦损耗电阻 (小)

C — 晶体的动态电容（< 0.1 pF）(小)

$$Q=\frac{\omega_0 L}{r}=\frac{1}{r\omega_0 C}=\frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

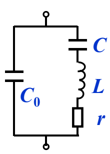
$$Q=\frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$$ （L、C 大；r、C 小）　$Q=10^4\sim10^6$

Q值很高，谐振频率很稳定。

C_0、C_0、L、r— 对于制作成型的石英晶体，这些参数都是固定不变的！

---

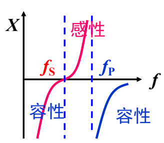
④ 频率特性和谐振频率



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

$$f_P=\frac{1}{2\pi\sqrt{L\dfrac{C_0C}{C_0+C}}} \approx f_S\sqrt{1+\frac{C}{C_0}}$$

（∵C_0>>C）



f_S — 串联谐振频率

f_P — 并联谐振频率

【问题引导】石英晶体振荡器是怎样选频的？选的哪一频率？

---

⑤ 使用注意

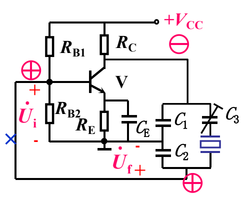
1) 要接一定的负载电容 C_L(微调)，以达标称频率。

2) 要有合适的激励电平。过大会影响频率稳定度、振坏晶片；过小会使噪声影响大，还能停振。

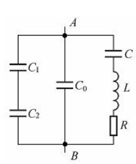
---

2. 石英晶体谐振电路

1. 并联型



选频网络是？
怎样选频的？
选的哪一频率？

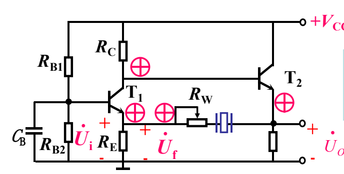


（b）选频网络等效电路

输入信号？　反馈信号？　为正反馈？

---

2. 串联型



选频网络是？
怎样选频的？
选的哪一频率？

$f=f_s$，晶体呈纯阻

输入信号？　反馈信号？　为正反馈？

放大电路是共基还是共射？

7.2 电压比较器

7.2.1 单限比较器

7.2.2滞回比较器

7.2.3 窗口比较器

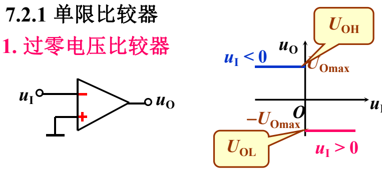
电压比较器（Comparer）的分类

功能：比较电压信号（被测试信号与标准信号）大小

类型：
- 基本比较器
  - 简单比较器（单门限）
  - 窗口比较器（双门限）
- 滞回比较器（施密特触发器）

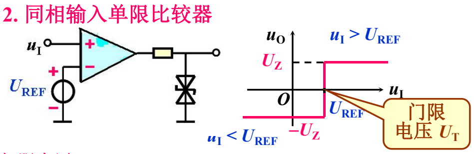
7.2.1 单限比较器

1. 过零电压比较器



---

2. 同相输入单限比较器



门限电压 $U_T = U_{REF}$

阈值电压（门限电压、门槛电压 ）U_T—

使u_o发生跳变时的u_I。当$u_P = u_N$时的u_I即为U_T

特点： 1）工作在非线性区

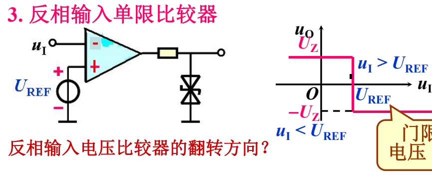
2）不存在虚短（除了$u_I = U_{REF}$ 时）

3）存在虚断

【问题引导】同相输入电压比较器的翻转方向如何？

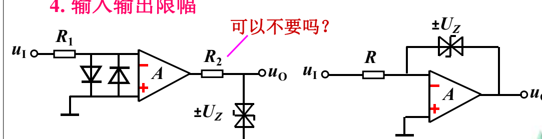
---

3. 反相输入单限比较器

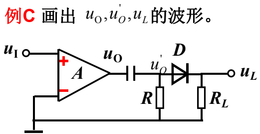


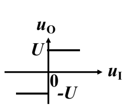
反相输入电压比较器的翻转方向？

4. 输入输出限幅

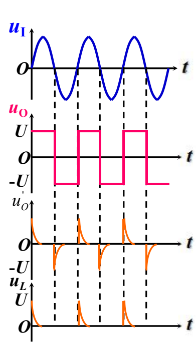


例C 画出 u_O, u_O', u_L 的波形。

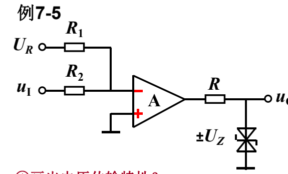




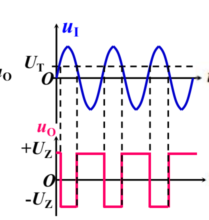
电压传输特性



例7-5



②画出u_O的波形？

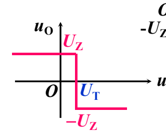


①画出电压传输特性？

$$u_N = \frac{u_I R_1}{R_1 + R_2} + \frac{U_R R_2}{R_1 + R_2}$$

由$u_N = u_P = 0$得

$$U_T = -\frac{R_2}{R_1} U_R$$



电压比较器能进行波形变换！

注意单限比较器的结构：开环电路！

7.2.2 滞回比较器

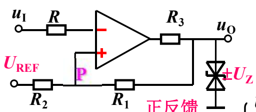
1. 反相型滞回比较器

1) 电路和门限电压

当 $u_I > u_P$ 时， $u_O = -U_Z$

当 $u_I < u_P$ 时， $u_O = +U_Z$

当 $u_I = u_P$ 时， 状态翻转



$u_P = u_N$时的u_I即为U_T

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

$$\begin{cases} U_{T+} = \dfrac{U_{REF}R_1 + U_Z R_2}{R_1 + R_2}, & u_O = +U_Z \\ U_{T-} = \dfrac{U_{REF}R_1 - U_Z R_2}{R_1 + R_2}, & u_O = -U_Z \end{cases}$$

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

$$U_N = u_I$$

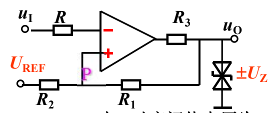
$u_O = +U_Z$时，对应阈值电压为U_{T+}；

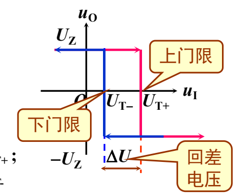
$u_O = -U_Z$时，对应阈值电压为U_{T-}

【问题引导】怎样求阈值电压？

注意滞回比较器的结构：正反馈电路！

2) 传输特性





$u_O = +U_Z$时，对应阈值电压为U_{T+}；

$u_O = -U_Z$时，对应阈值电压为U_{T-}

当 u_I 逐渐增大时

只要 $u_I < U_{T+}$，则 $u_O = U_Z$

一旦 $u_I > U_{T+}$，则 $u_O = -U_Z$

当 u_I 逐渐减小时

只要 $u_I > U_{T-}$，则 $u_O = -U_Z$

一旦 $u_I < U_{T-}$，则 $u_O = U_Z$

$\Delta U = U_{T+} - U_{T-}$

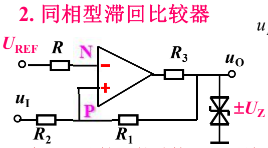
特点：

u_I 上升时与上门限比，

u_I 下降时与下门限比。

【问题引导】反相输入滞回比较器的翻转方向？

2. 同相型滞回比较器



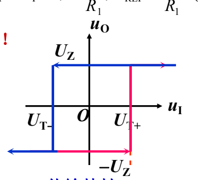
$$u_P = \frac{u_I R_1 + u_O R_2}{R_1 + R_2} \qquad u_N = U_{REF}$$

由$u_P = u_N$得

$$U_T = u_I = (1 + \frac{R_2}{R_1})U_{REF} - \frac{R_2}{R_1}u_O$$

注意滞回比较器的结构：正反馈电路！

$$\begin{cases} U_{T+} = (1 + \dfrac{R_2}{R_1})U_{REF} + \dfrac{R_2}{R_1}U_Z, & u_O = -U_Z \\ U_{T-} = (1 + \dfrac{R_2}{R_1})U_{REF} - \dfrac{R_2}{R_1}U_Z, & u_O = +U_Z \end{cases}$$



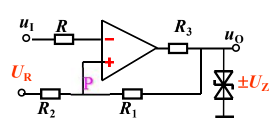
传输特性

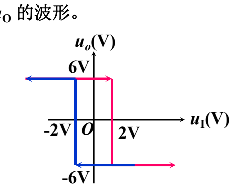
$u_O = +U_Z$时，对应阈值电压为U_{T-}；

$u_O = -U_Z$时，对应阈值电压为U_{T+}

【问题引导】同相输入滞回比较器的翻转方向？

例7-6 反相滞回比较器如图 所示，R_1= 30kΩ，R_2= 15kΩ，U_R= 0V，$\pm U_Z$= ±6V。（1）求阈值，画出电压传输特性曲线；（2）若 u_I= 6sin ω t （V），画出 u_O 的波形。



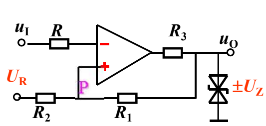


解(1)： 求阈值电压是关键！

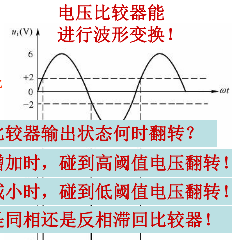
输出状态怎样翻转？

$$\begin{cases} U_{T+} = \dfrac{U_R R_1 + U_Z R_2}{R_1 + R_2} = 2\text{V}, & u_O = +6\text{V} \\ U_{T-} = \dfrac{U_R R_1 - U_Z R_2}{R_1 + R_2} = -2\text{V}, & u_O = -6\text{V} \end{cases}$$

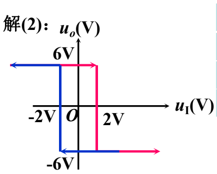
例7-6 反相滞回比较器如图 所示，R_1= 30kΩ，R_2= 15kΩ，U_R= 0V，$\pm U_Z$= ±6V。（1）求阈值，画出电压传输特性曲线；（2）若 u_I= 6sin ω t （V），画出 u_O 的波形。



电压比较器能进行波形变换！



解(2)：



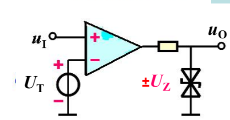
滞回比较器输出状态何时翻转？

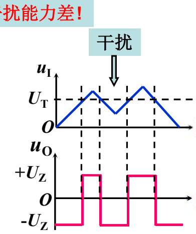
输入增加时，碰到高阈值电压翻转！

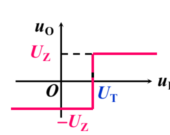
输入减小时，碰到低阈值电压翻转！

无论是同相还是反相滞回比较器！

单门限比较器 抗干扰能力差！

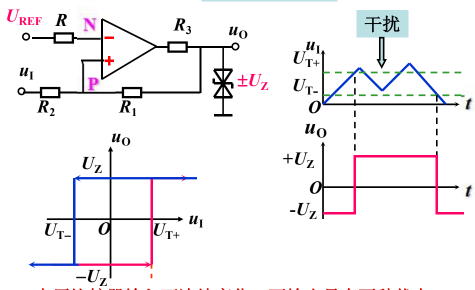






电压比较器输入可连续变化，而输出只有两种状态！

滞回比较　抗干扰能力强!



电压比较器输入可连续变化，而输出只有两种状态!

例7-7　已知输入波形，画出输出u_{o1}和u_{o2}的波形。

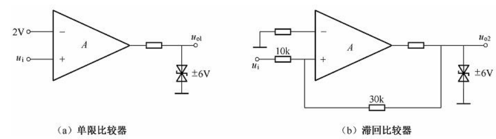


图 7-35　例 7.7 电路

解：先求同相输入滞回比较器图 (b)的阈值电压：

$$\begin{cases} U_{T+}=(1+\dfrac{R_2}{R_1})U_R+\dfrac{R_2}{R_1}U_Z=2\text{V}，\ u_O=-6\text{V} \\ U_{T-}=(1+\dfrac{R_2}{R_1})U_R-\dfrac{R_2}{R_1}U_Z=-2\text{V}，\ u_O=6\text{V} \end{cases}$$

图(a)和图(b)的电压传输特性如图所示：

u_{o1}和u_{o2}的波形如图所示。

单限比较器抗扰能力差!
滞回比较器抗扰能力强!

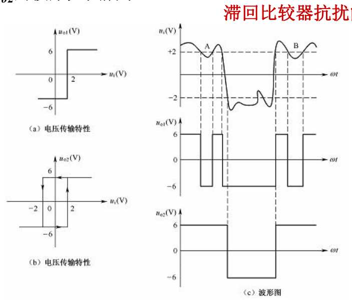
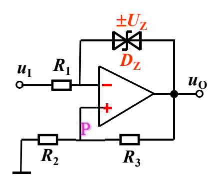


图 7-36　例 7.7 解答图

例7-8



①这是什么电路？

当D_Z不稳压（相当于断开）时，为反相滞回比较器。

$$u_P=\frac{R_2u_O}{R_2+R_3}，\ u_N=u_I$$

由u_N=u_P得阈值电压：

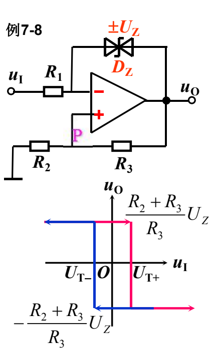
$$u_T=\frac{R_2u_O}{R_2+R_3}$$

双向稳压管接在负反馈回路也能输出限幅!

且避免运放饱和输出！翻转速度更快!

同时运放的差模输入也得到了限幅!

例7-8



②u_o=?

当D_Z起稳压作用时，引入负反馈，可用虚短和虚断的概念。

$$u_O=\pm U_Z+u_N=\pm U_Z+u_P$$

$$=\pm U_Z+\frac{R_2u_O}{R_2+R_3}$$

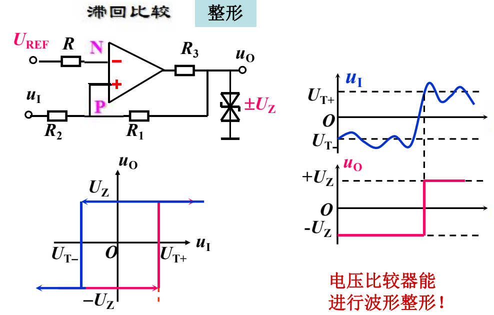
$$u_O=\pm\frac{R_2+R_3}{R_3}U_Z$$

③电压传输特性？

阈值电压：

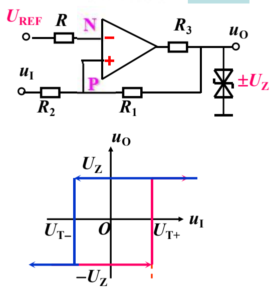
$$U_T=\frac{R_2u_O}{R_2+R_3}=\pm\frac{R_2}{R_3}U_Z$$

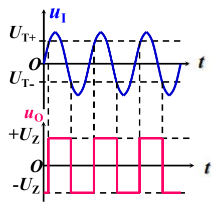
滞回比较　整形



电压比较器能
进行波形整形!

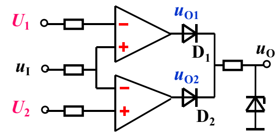
滞回比较 整形

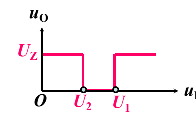




电压比较器能进行波形整形！

7.2.3 窗口比较器 设 $U_1 > U_2$，比较器采用单电源

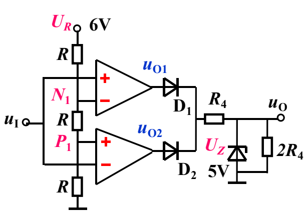




u_I	u_{O1} u_{O2}	D_1 D_2	u_O
$< U_2$	0 U_{Omax}	截止 导通	U_Z
$> U_1$	U_{Omax} 0	导通 截止	U_Z
$U_2 < u_I < U_1$	0 0	截止 截止	0

窗口比较器还能确定输入信号是否在某一范围！

例D 已知运放的工作电压为 $\pm 15V, u_I = 6\sin\omega t V$

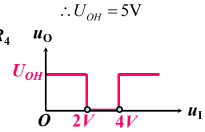


2) 画电压传输特性；

$U_{OL} = 0V$

$\because \dfrac{2R_4 \times 15}{R_4 + 2R_4} > 5V$

$\therefore U_{OH} = 5V$

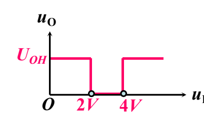


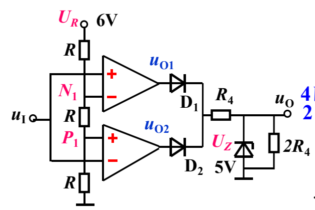
1) 求阈值电压；

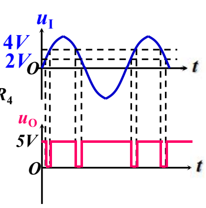
$U_{T1} = u_{P1} = \frac{1}{3}U_R = 2V \qquad U_{T2} = u_{N1} = \frac{2}{3}U_R = 4V$

例D 已知运放的工作电压为

± 15 V，$u_I = 6 \sin \omega t$ V



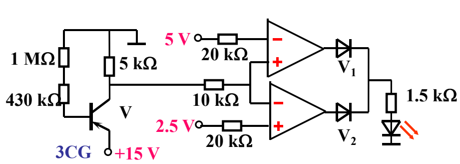




3) 画出 u_O 的波形

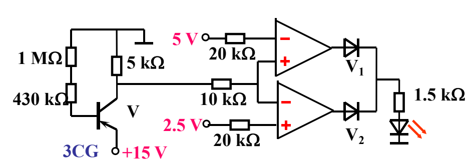
应用举例 (选讲)

— 三极管 β 值分选电路



分析电路是否满足要求： $\beta < 50$ 或 $\beta > 100$，LED 亮，

$50 \le \beta \le 100$，LED 不亮。



[解]

$I_B = (15 - 0.7) / 1430 = 0.01$ mA $\quad U_C = 5I_C = 5\beta I_B = 0.05\beta$

当 $\beta < 50$ 时，$U_C < 2.5$ V, V_2 导通，LED 亮

当 $\beta > 100$ 时，$U_C > 5$ V, V_1 导通，LED 亮

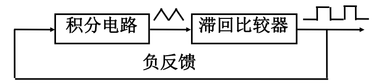
当 $50 \le \beta \le 100$ 时，$2.5\text{ V} \le U_C < 5$ V，LED 不亮

7.3 非正弦波产生电路

7.3.1 矩形波产生电路

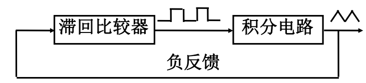
7.3.2 三角波发生电路

积分电路+滞回比较器+闭环→矩形波产生电路



矩形波产生电路

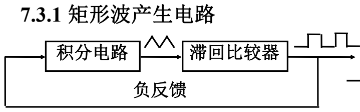
滞回比较器+积分电路+闭环→三角波产生电路

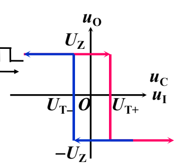


三角波产生电路

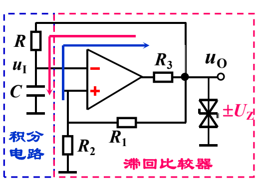
首先识别电路结构，非常重要！

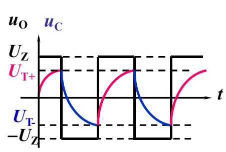
7.3.1 矩形波产生电路



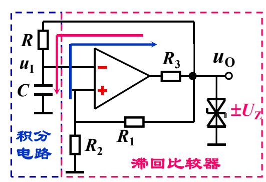


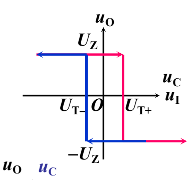
1. 方波产生电路 记得电路结构！





反向输入滞回比较器阈值电压 $U_T = \pm\dfrac{R_2}{R_1+R_2}U_Z$





$u_O=+U_Z$时，C正向充电：

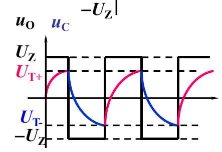
$u_C\uparrow\rightarrow u_C>U_{T+}\rightarrow u_O=-U_Z$

充电时间常数 $\tau_1=RC$

$u_O=-U_Z$时，C反向充电：

$u_C\downarrow\rightarrow U_C<U_{T-}\rightarrow u_O=+U_Z$

充电时间常数 $\tau_2=RC$



2. 振荡频率

根据三要素法 $u_c(t)=u_c(\infty)+[u_c(0)-u_c(\infty)]e^{-\frac{1}{RC}t}$

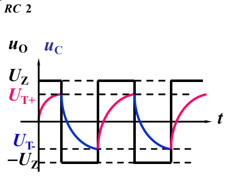
选取u_c的一个上升段计算，则

$U_{T+}=u_c(\infty)+[u_c(0)-u_c(\infty)]e^{-\frac{1}{RC}\frac{T}{2}}$

其中 $U_{T+}=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}U_Z$

$u_c(\infty)=U_Z$

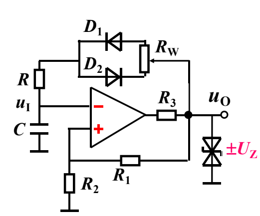
$u_c(0)=U_{T-}=-\dfrac{R_2}{R_1+R_2}U_Z$



解得 $T=2RC\ln(1+\dfrac{2R_2}{R_1})$ $f=\dfrac{1}{T}$ 占空比＝50%

3. 占空比可调的矩形波电路

为了改变输出方波的占空比，应改变电容器 C 的充电和放电时间常数。占空比可调的矩形波电路如下图。



7.3.2 三角波产生电路

获得三角波的基本方法

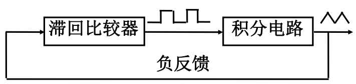
方波 → 积分电路 → 三角波

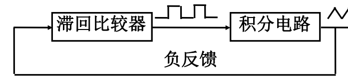
锯齿波产生电路

三角波是锯齿波的一种特例，锯齿波是三角波的一种变形。

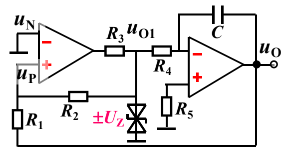
在三角波发生电路中，如果电容的充、放电回路不同，
充、放电时间常数不相等，则三角波发生电路输出为锯齿波。

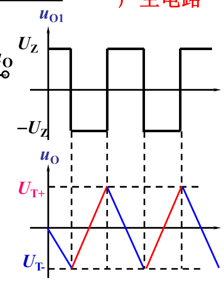
三角波产生电路的构成



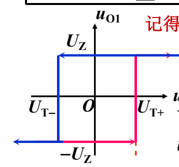


1. 对称三角波产生电路



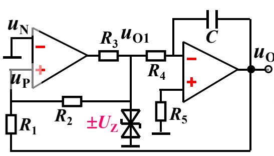


记得电路结构！

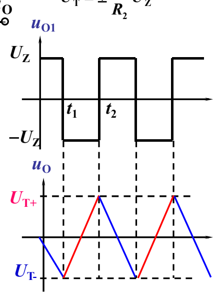


可求出阈值电压

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



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



当$t=t_1\sim t_2$时，$u_{O1}=-U_Z$

$$u_O=-\frac{1}{R_4C}\int_{t_1}^{t}u_{O1}dt+u_O(t_1)$$

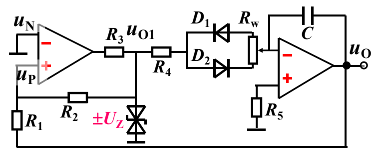
其中$u_O(t_1)=-(R_1/R_2)U_Z$

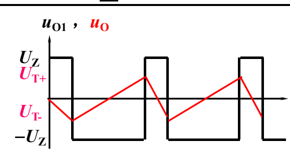
当$t=t_2$时，$u_O=(R_1/R_2)U_Z$　可解出：

$$T=2(t_2-t_1)=\frac{4R_4C\cdot R_1}{R_2}$$

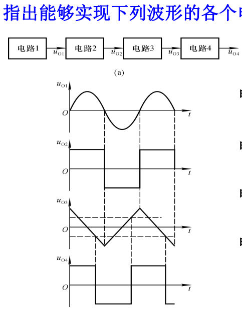
2. 任意三角波产生电路

当积分电路充、放电回路不同，也即充、放电时间常数不同时，产生锯齿波。





- 例E：指出能够实现下列波形的各个电路的名称



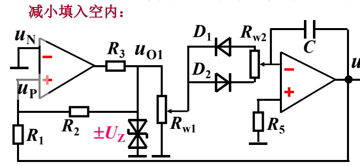
电路1：正弦波振荡电路

电路2：过零比较器

电路3：积分电路

电路4：滞回比较器

例F：设振荡周期为T，在一个周期内$u_{O1}=U_Z$的时间为T_1，则占空比为T_1/T；在电路某一参数变化时，其余参数不变。选择：①增大、②不变、③减小填入空内：



可求出阈值电压

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

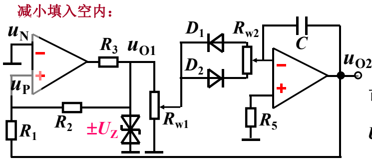
当R_2增大时：

u_{O1}的占空比将 ②；　(占空比取决于C的充放电回路，与R_2无关)

振荡频率将 ①；　(频率与$|U_T|$成反比，即与R_2成正比)

u_{O2}的幅值将 ③；　(u_{o2}幅值与$|U_T|$成正比，即与R_2成反比)

例F： 设振荡周期为T，在一个周期内$u_{O1}=U_Z$的时间为T_1，则占空比为T_1/T；在电路某一参数变化时，其余参数不变。选择：①增大、②不变、③减小填入空内：



可求出阈值电压

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

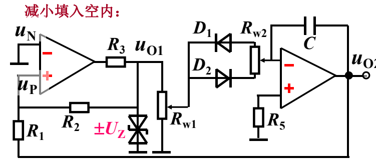
若R_{W1}的滑动端向上移动：

u_{O1} 的占空比将 ② ；（占空比取决于C的充放电回路，与R_{W1}无关）

振荡频率将 ① ；（频率与充放电速度成正比，充放电速度与积分电路输入电压成正比）

u_{O2} 的幅值将 ② ；（u_{o2}幅值与$|U_T|$成正比，与积分电路输入电压无关）

例F： 设振荡周期为T，在一个周期内$u_{O1}=U_Z$的时间为T_1，则占空比为T_1/T；在电路某一参数变化时，其余参数不变。选择：①增大、②不变、③减小填入空内：



可求出阈值电压

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

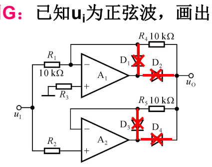
若R_{W2}的滑动端向上移动：

u_{O1} 的占空比将 ① ；（C向右充电变慢，u_{O2}高电平持续时间延长）

振荡频率将 ② ；（向左、向右充电时间常数之和不变）

u_{O2} 的幅值将 ② 。（输出幅值与阈值电压有关，与R_{W2}无关）

- **例G：** 已知u_i为正弦波，画出u_o波形



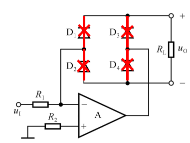
$u_I>0$: $u_O = u_{O2} = u_I$

$u_I<0$: $u_O = u_{O1} = -R_4/R_1 = -u_I$

为全波整流

u_I	D_1 D_2	A_1	u_{O1}	D_3 D_4	A_2	u_{O2}	u_O
>0	on off	电压跟随器	0	off on	电压跟随器	u_I	u_I
<0	off on	反相比例	$-u_I$	on off	电压跟随器	u_I	$-u_I$

- **例G：** 已知u_i为正弦波，画出u_o波形



$u_I>0$: $u_O = -u_A = R_L/R_1 \cdot u_I$

$u_I<0$: $u_O = u_A = -R_4/R_1 \cdot u_I$

为全波整流：$u_O = R_L/R_1 \cdot |u_I|$

u_I	D_1 D_4	D_2 D_3	A	u_{OA}	u_O
>0	on on	off off	负反馈	$-R_L/R_1 \cdot u_I$	$-u_A$
<0	off off	on on	负反馈	$-R_L/R_1 \cdot u_I$	u_A

7.4 信号转换电路

7.4.1 电压-电流转换电路

7.4.2 电压-频率转换电路

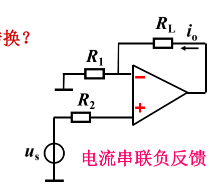
7.4.3 精密整流电路

7.4.1 电压电流转换电路

【问题引导】什么是信号转换？

转换后的信号与转换前的信号有确定的关系，与所接输出负载无关！

为了增加传送距离，减少传送干扰，先将电压信号转换成电流信号再传送！



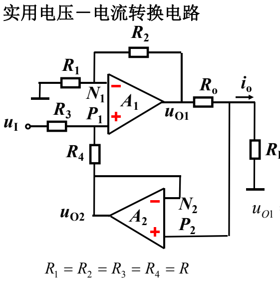
电流串联负反馈

电压—电流转换电路

$$i_o = \frac{u_s}{R_1}$$ i_o与R_L无关

该电路负载电阻无接地端！

实用电压—电流转换电路



P_1点的结点电流方程：

$$\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)u_{P1}=\frac{u_I}{R_3}+\frac{u_{O2}}{R_4}$$

$$u_{P1}=0.5u_I+0.5u_{P2}$$

$$(u_{O2}=u_{P2})$$

$$u_{O1}=\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)u_{P1}=2u_{P1}=u_I+u_{P2}$$

$$u_I=u_{O1}-u_{P2}$$

$$i_O=\frac{u_{O1}-u_{P2}}{R_0}=\frac{u_I}{R_0}$$

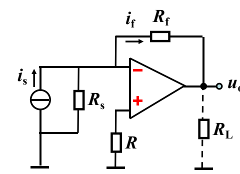
$R_1=R_2=R_3=R_4=R$

i_o与R_L无关！

该电路负载电阻有接地端，比较实用！

电流—电压转换电路

将电流信号传送到目的地后，再转换为电压信号！



$\because u_N=u_P=0,\ u_{R_s}=0$

$\therefore i_{R_s}=0,\ i_f=i_s$

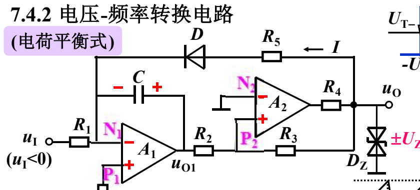
$u_o=-R_f i_f=-R_f i_s$

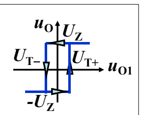
电压并联负反馈

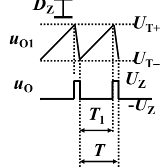
u_o与R_L无关！

7.4.2 电压-频率转换电路

(电荷平衡式)







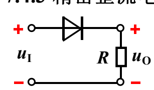
①$u_O=-U_Z$时，D截止，C正向充电；

②$u_O=U_Z$时，D导通，C反向充电。

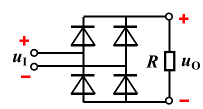
振荡周期 $T\approx T_1\propto|1/u_I|$ 振荡频率 $f\propto u_I$

用输入电压幅值来控制输出信号频率！

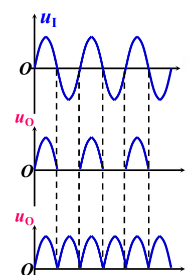
7.4.3 精密整流电源



半波整流



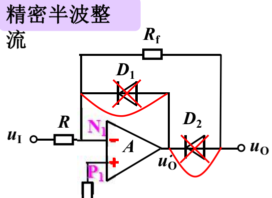
全波整流

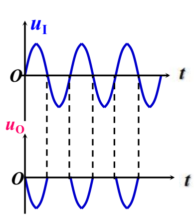


【问题引导】当u_I很小(如只有几毫伏)，还能整流吗？

精密整流？—对微小信号进行整流！

精密半波整流

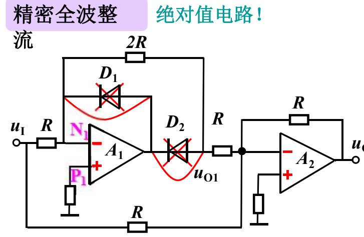


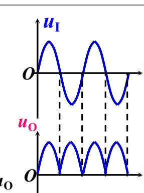


①$u_I>0$时，$u_O'<0$，D_1截止，D_2导通，$u_O=-(R_f/R)u_I$；

②$u_I<0$时，$u_O'<0$，D_1导通，D_2截止，$u_O=0$

精密全波整流 绝对值电路！



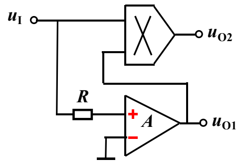


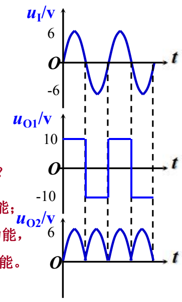
$u_O=-(u_{O1}+u_I)$

①$u_I>0$时，$u_{O1}=-2u_I$，（D_1止，D_2通） $u_O=-(u_{O1}+u_I)=u_I$

②$u_I<0$时，$u_{O1}=0$，（D_1通，D_2止） $u_O=-u_I$

例7-9 已知运放最大输出为±10V。$u_{O2}=0.1u_Iu_{O1}$。





①u_{O1}、u_{O2}的波形？ ②该电路的功能？

$$u_{O1}=\begin{cases}10\text{V},(u_I\geq 0)\\-10\text{V},(u_I<0)\end{cases}$$

$$u_{O2}=\begin{cases}u_I,(u_I\geq 0)\\-u_I,(u_I<0)\end{cases}$$

u_{O1}—过零比较功能；
u_{O2}—绝对值运算功能，
即精密全波整流功能。

小　结

一、信号产生电路的分类：

正弦波振荡：
- *RC* 振荡器（低频）
- *LC* 振荡器（高频）
- 石英晶体振荡器（振荡频率精确）

非正弦波振荡：
方波、三角波、锯齿波等。

二、正弦波振荡条件、电路结构和选频电路

1. 振荡条件

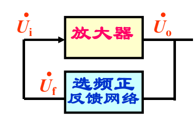
$$\begin{cases}|\dot{A}_u\dot{F}_u|=1 & \text{— 振幅平衡条件}\\ \varphi_{AF}=\varphi_A+\varphi_F=2n\pi & \text{— 相位平衡条件}\end{cases}$$

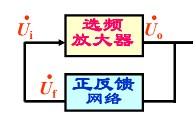
$n=0, 1, 2, \cdots$

判断电路是否起振采用瞬时极性法，即断开反馈网络，加一信号，如果信号极性逐级变化后，返回后与原信号同极性，则满足相位平衡条件。

---

2. 振荡电路的两种结构

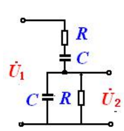




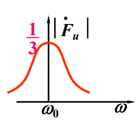
3. 选频电路及其特性

1）*RC* 串并联式

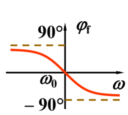
电路



幅频特性



相频特性

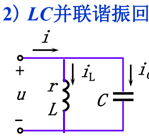


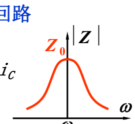
当 $\omega=\omega_0=1/RC$ 时

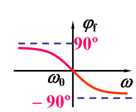
$|\dot{F}_u|=1/3$

$\varphi=0°$

2）*LC*并联谐振回路







电路　　阻抗幅频特性　　阻抗相频特性

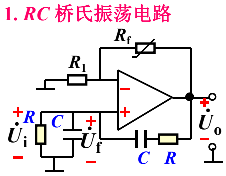
谐振频率 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

谐振阻抗 $Z_0=\dfrac{L}{rC}$

回路品质因数 $Q=\dfrac{\omega_0 L}{r}=\dfrac{1}{r\omega_0 C}=\dfrac{1}{r}\sqrt{\dfrac{L}{C}}$

三、正弦波振荡电路

1. RC 桥氏振荡电路



振荡频率 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi RC}$

振荡条件 $|\dot{A}_u| > 3$

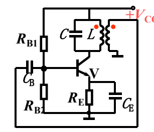
即 $R_f > 2R_1$

自动稳幅措施：

使电 A_u 成为非线性
- R_f 串接二极管（图略）
- R_f 串接负温度系数热敏电阻
- R_1 采用正温度系数热敏电阻

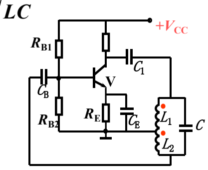
3. LC 振荡电路

变压器反馈式



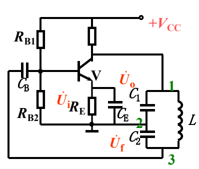
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

电感三点式



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

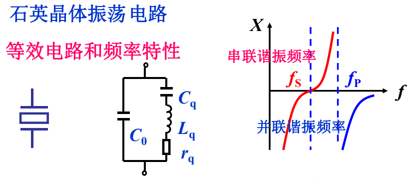
电容三点式



$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}L}}$$

四、石英晶体振荡电路

1. 等效电路和频率特性



符号　　等效电路　　频率特性

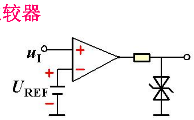
2. 石英晶体谐振电路

串联型　$f = f_s$，晶体呈纯阻

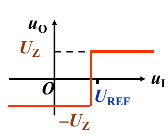
并联型　$f_s < f < f_p$，晶体呈感性

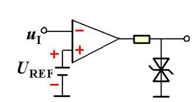
五、比较器

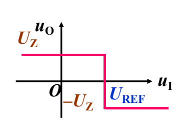
1. 单限电压比较器



传输特性







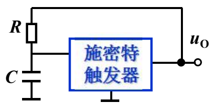
门限电压　$U_T = U_{REF}$

特点：
1）工作在非线性区
2）不存在虚短（除了 $u_I = U_{REF}$ 时）
3）存在虚断

六、非正弦波振荡电路

1. 产生方波振荡的基本原理

当施密特触发器输出高（低）电平时，电容 C 的充电方向不同，每当 u_C 超过上（下）门限电压时，施密特触发器的输出电平就发生跳变，使电容改变充电方向，于是形成 u_O 周而复始的高、低电平跳变，即 方波振荡。



施密特触发器的构成：

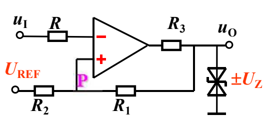
- 迟滞比较器（运放接成正反馈）
- 555 定时器的施密特触发器形式
- 集成施密特触发器

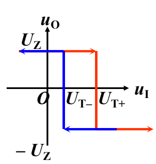
2. 获得三角波的基本方法

方波 → 积分电路 → 三角波

2. 滞回比较器（施密特触发器）

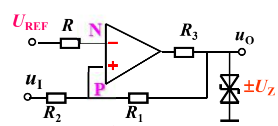
反相型滞回比较器



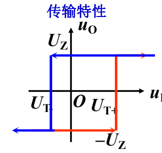


传输特性

同相型迟滞比较器



传输特性



门限电压的求法：

根据叠加定理求出同相端电压 u_P 的表达式，当输出状态变化时，与反相端电压 u_N 相等, 此时的输入电压 u_I 即为门限电压 U_{T+} 和 U_{T-} 。