清华大学2021春季学期

电路原理C

第2次应用介绍课

一阶动态电路的应用

内容

1. 脉冲序列作用下的RC电路
2. 能量变换
   – AC - DC　　利用电容
   – DC - DC　　利用电感
3. 运算放大器的动态电路应用
   – 积分器和微分器　　负反馈电路
   – 滞回比较器
   – 脉冲序列发生器　　正反馈电路

复习

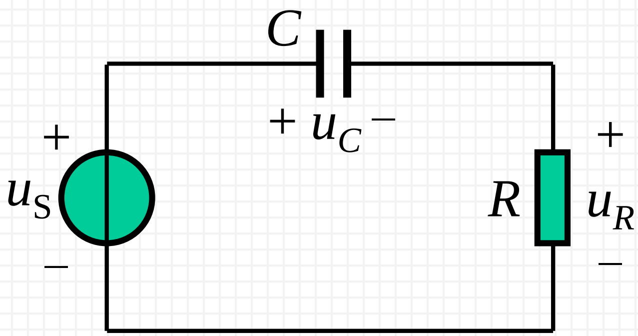
直流激励下一阶动态电路的直觉解法(**三要素法**)

$$f(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t > 0$$

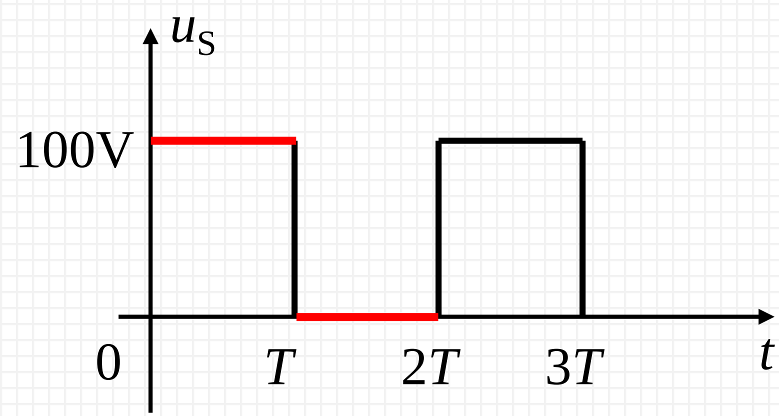
RC **电路** $\tau = R_{等}C$

RL **电路** $\tau = \frac{L}{R_{等}}$

1、脉冲序列作用下的RC电路



$u_C(0^-)=0$



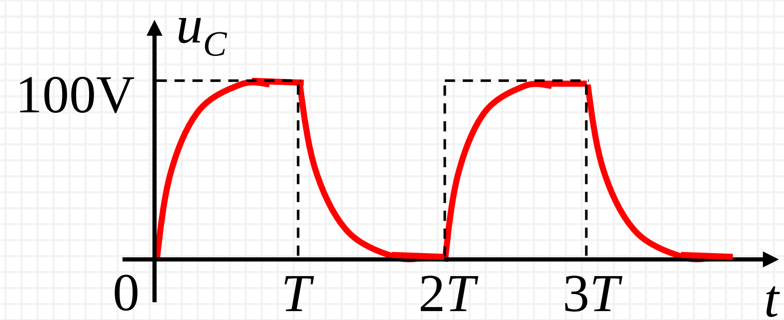
(1) $T >> \tau$

$0 < t < T$ $u_C(0^+)=0$ $u_C(\infty)=100\text{V}$

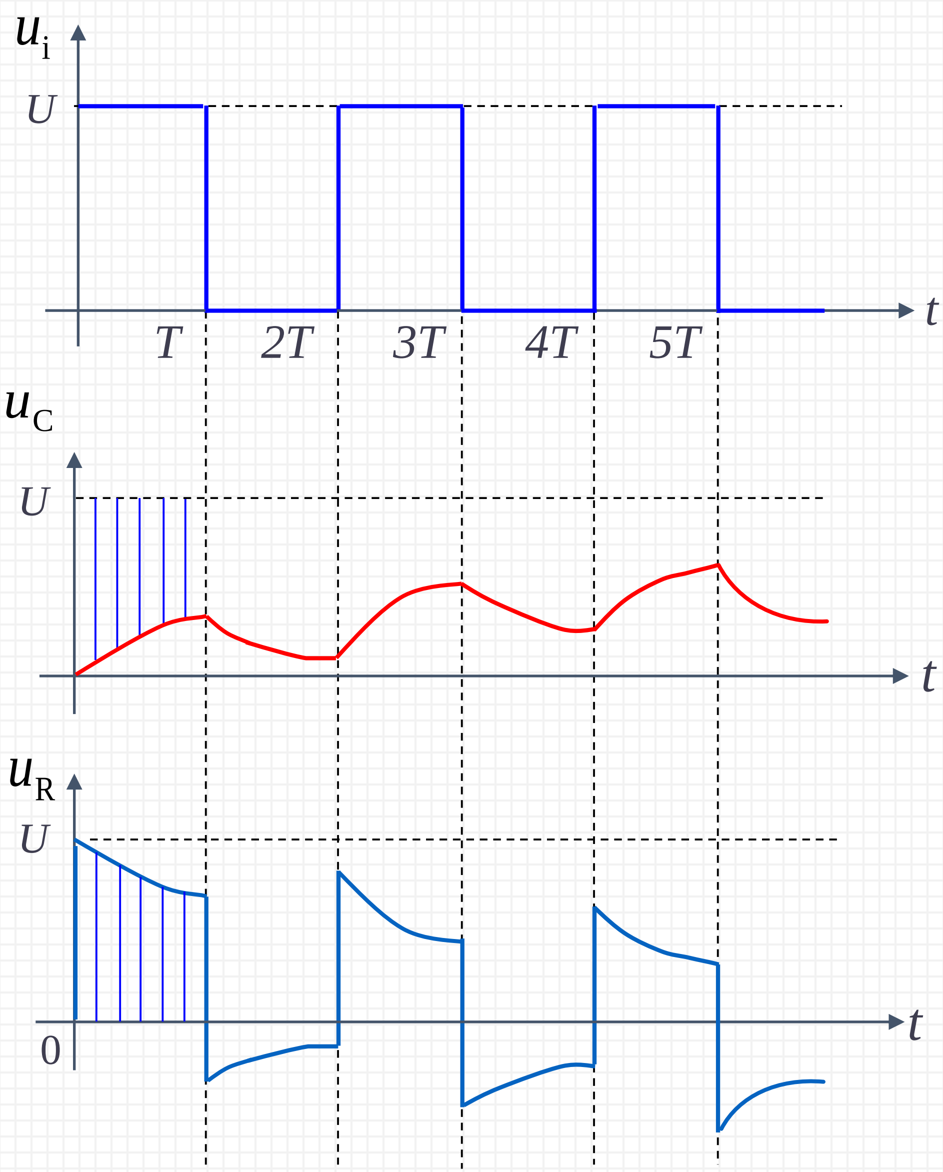
$$u_C = 100(1 - e^{-\frac{t}{RC}})\ \text{V}$$

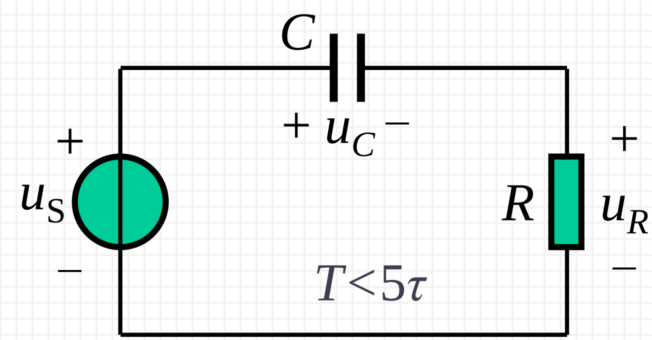
$T < t < 2T$ $u_C(T^+)=100\text{V}$ $u_C(\infty)=0$

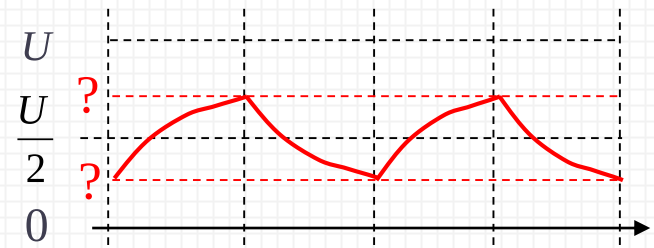
$$u_C = 100e^{-\frac{t-T}{RC}}\ \text{V}$$



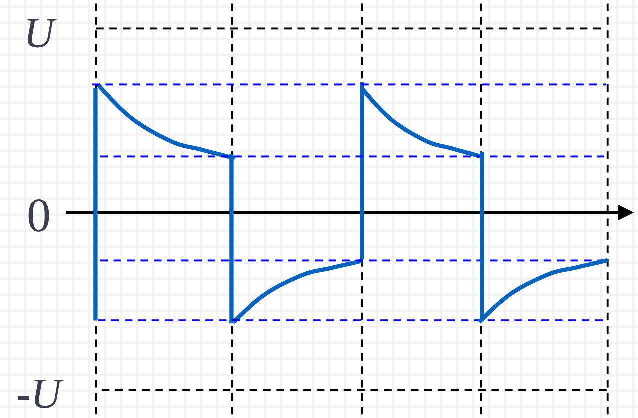
(2) T 与 τ 接近



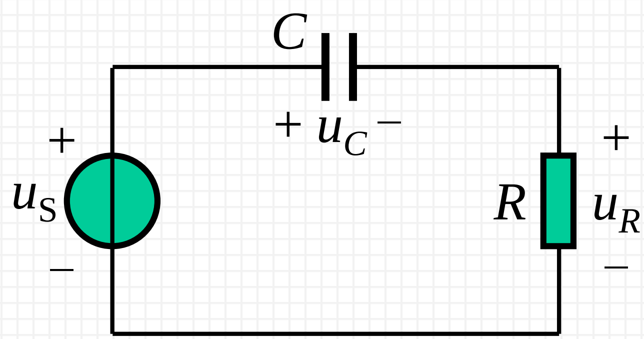




稳定后



(2) T 与 τ 接近



周期开始和结束两个时刻**支路量数值**相同

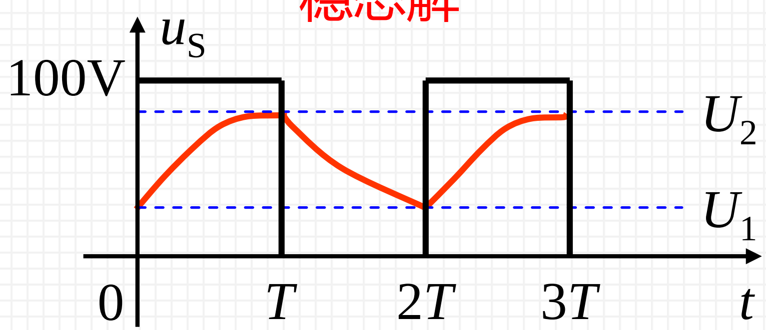
这类问题(周期激励下的一阶)的分析特点:

(1) 认为电路已经进入**稳态**

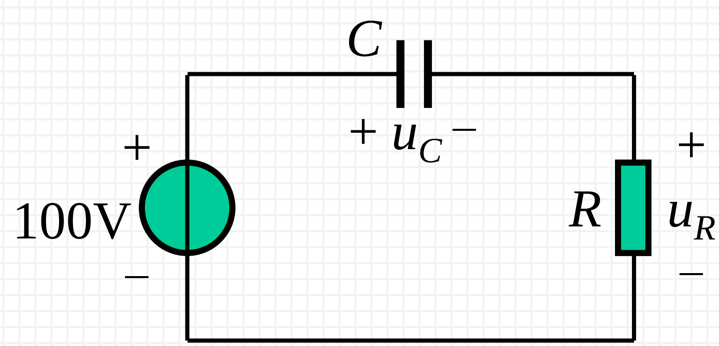
(2) 画不同状态下的电路图，求电路解

(3) 利用边界条件求出关键点电压/电流

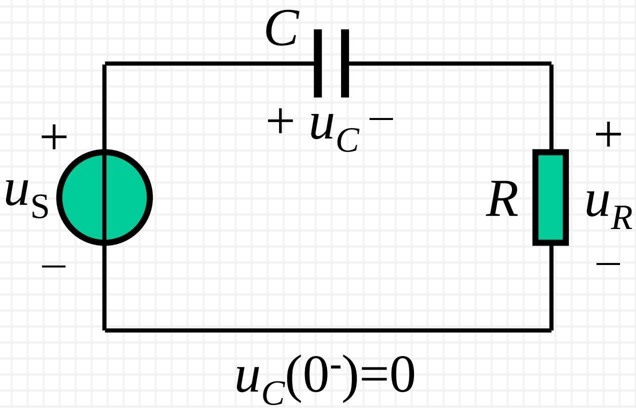
稳态解

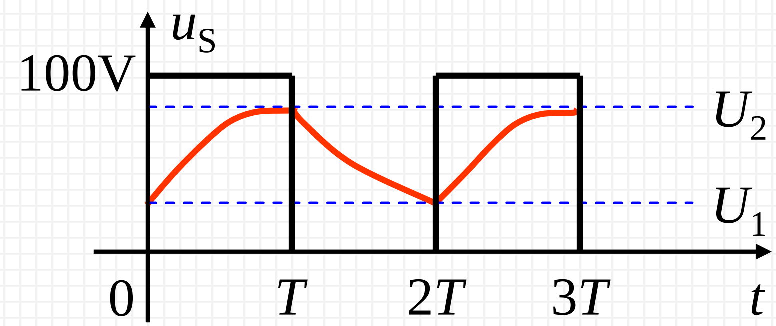


$0 < t < T$ 等效电路图

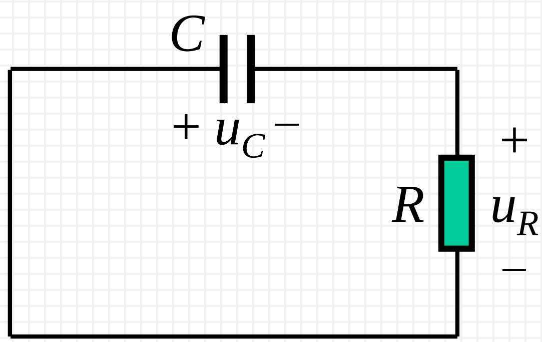


$$\left.\begin{aligned} u_C(0^+) &= U_1 \\ u_C(\infty) &= 100\ \text{V} \\ \tau &= RC \end{aligned}\right\} \Rightarrow u_C = 100 + (U_1 - 100)e^{-\frac{t}{RC}}\ \text{V}$$

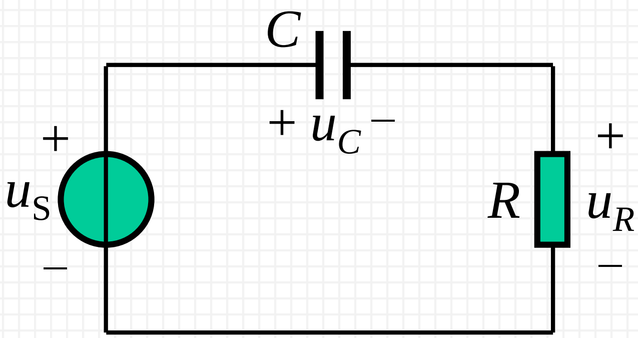




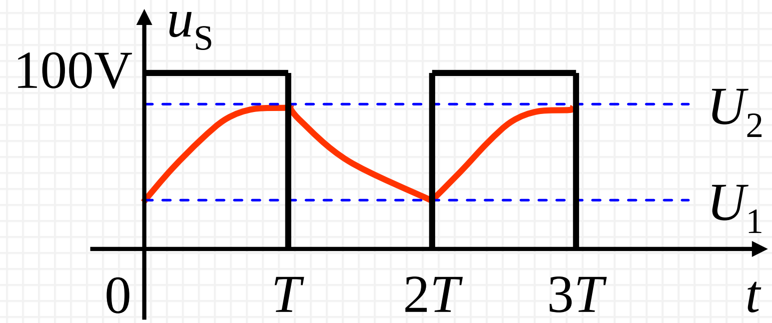
$T < t < 2T$ **等效电路图**



$$\left.\begin{aligned} &u_C(T^+) = U_2 \\ &u_C(\infty) = 0 \\ &\tau = RC \end{aligned}\right\} \Rightarrow u_C = U_2 e^{-\frac{t-T}{RC}}\ \text{V}$$



$u_C(0^-)=0$



$0 < t < T$

$$u_C = 100 + (U_1 - 100)e^{-\frac{t}{RC}}$$

$T < t < 2T$

$$u_C = U_2 e^{-\frac{t-T}{RC}}$$

$t = T$

$$u_C = U_2 = 100 + (U_1 - 100)e^{-\frac{T}{RC}}$$

$t = 2T$

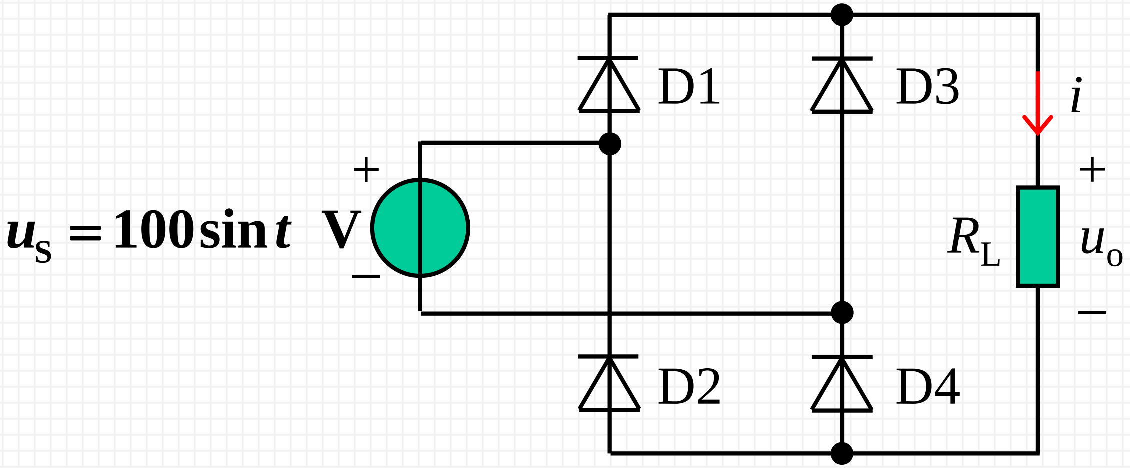
$$u_C = U_1 = U_2 e^{-\frac{2T-T}{RC}}$$

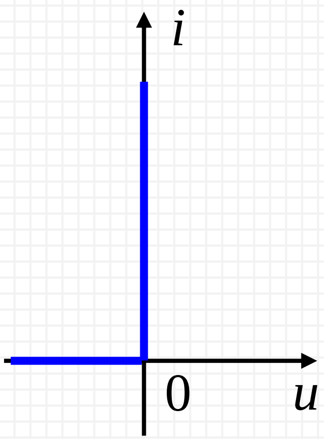
$$U_1 = \frac{100e^{-\frac{T}{RC}}}{1+e^{-\frac{T}{RC}}} \qquad U_2 = \frac{100}{1+e^{-\frac{T}{RC}}}$$

2、能量转换

2.1 AC - DC变换

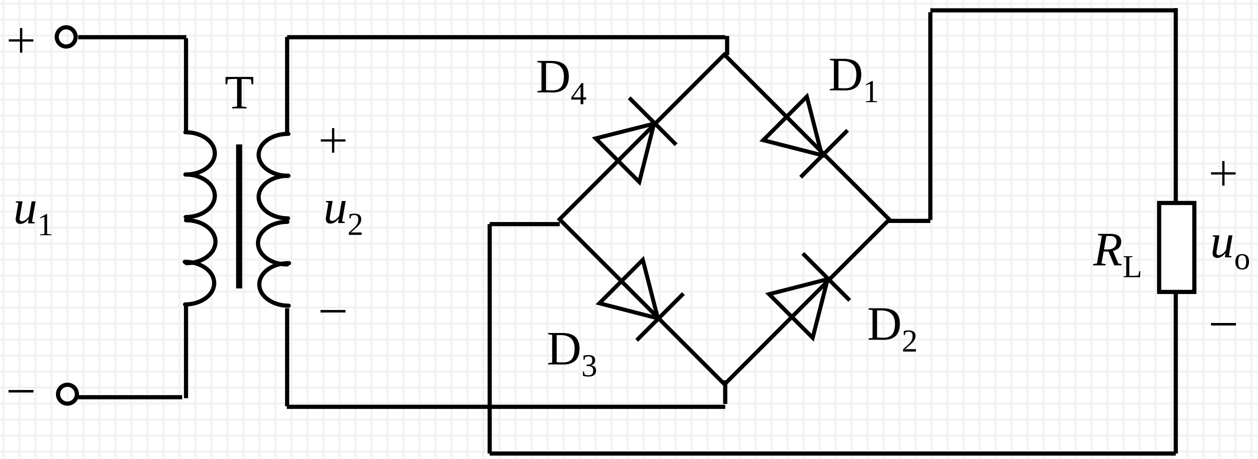
用二极管的**模型1**分析电路。

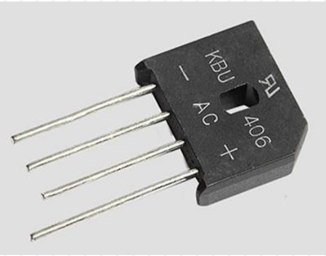


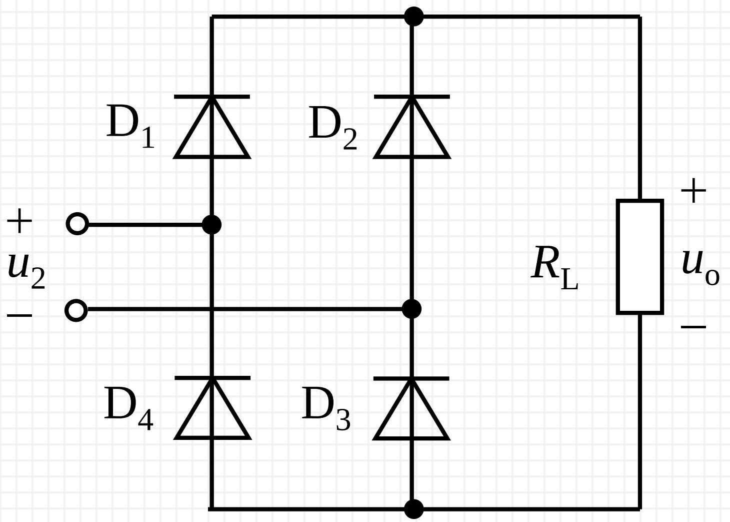


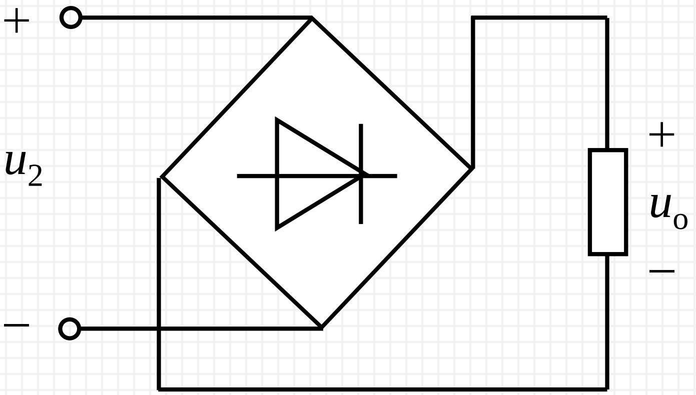
单相桥式整流电路

组成：由**四个二极管**组成**桥**路

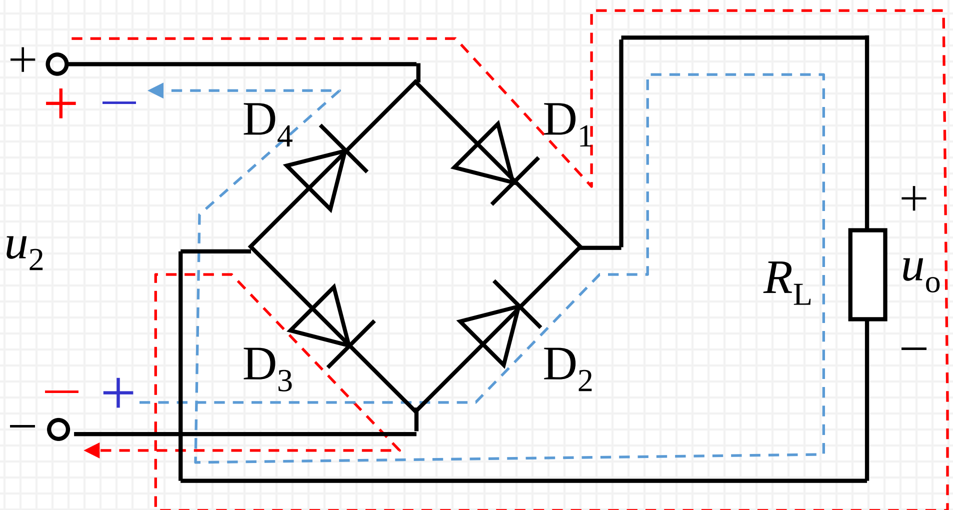


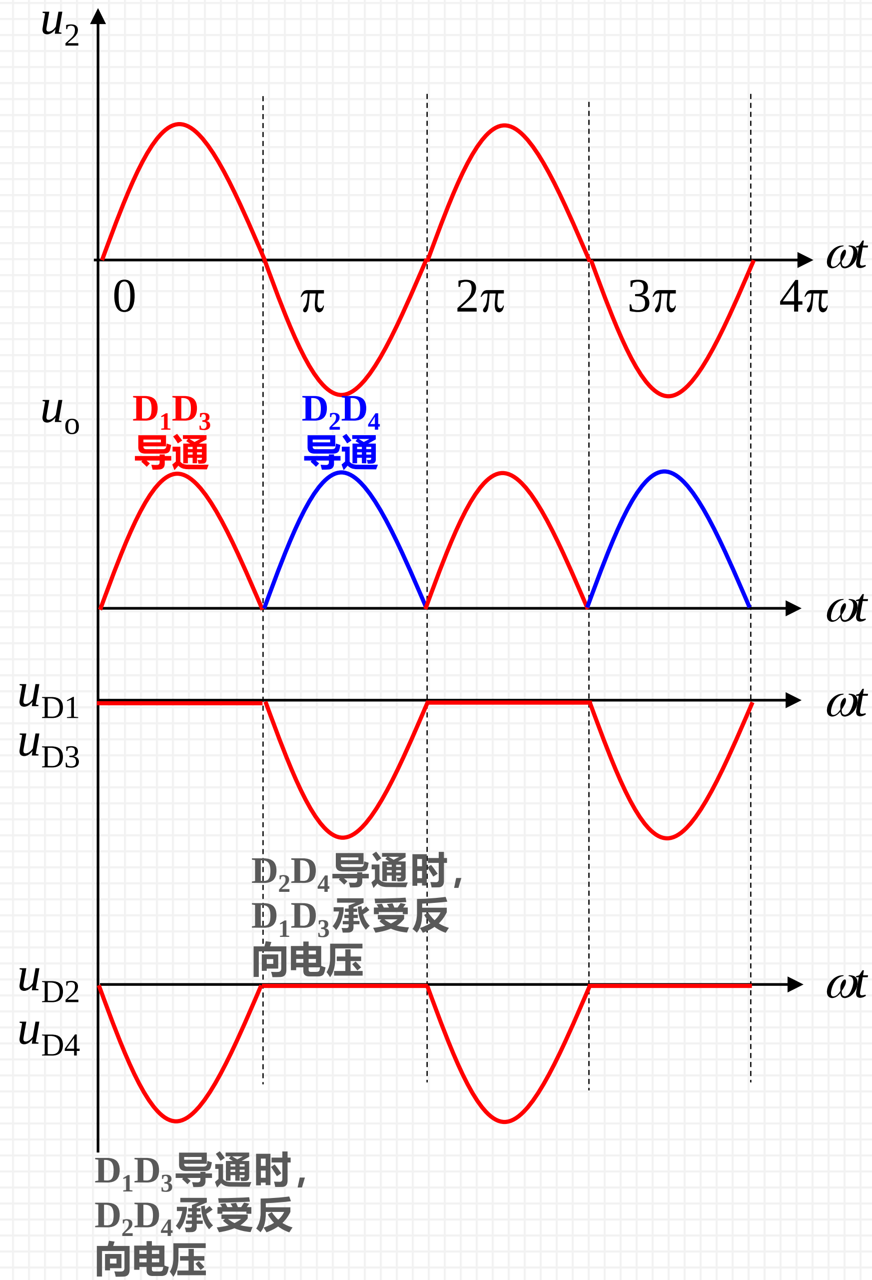






单相桥式整流电路原理





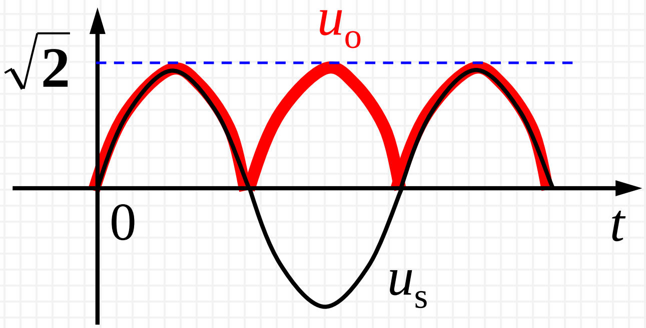
当u_2**正半周**时：

D_1、D_3导通，D_2、D_4截止。

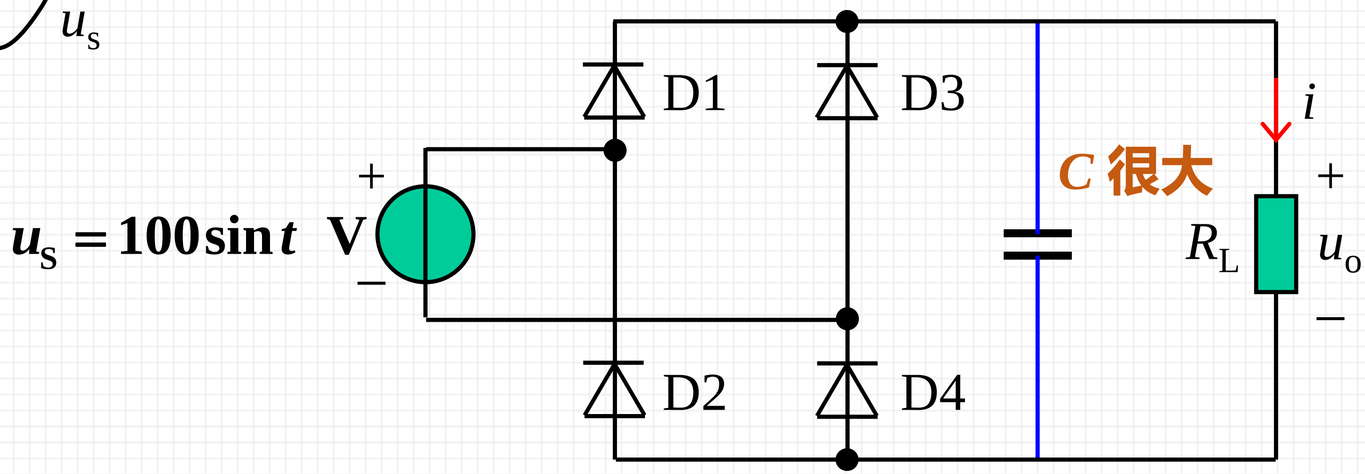
当u_2**负半周**时：

D_1、D_3截止，D_2、D_4导通。

2.1 AC - DC变换

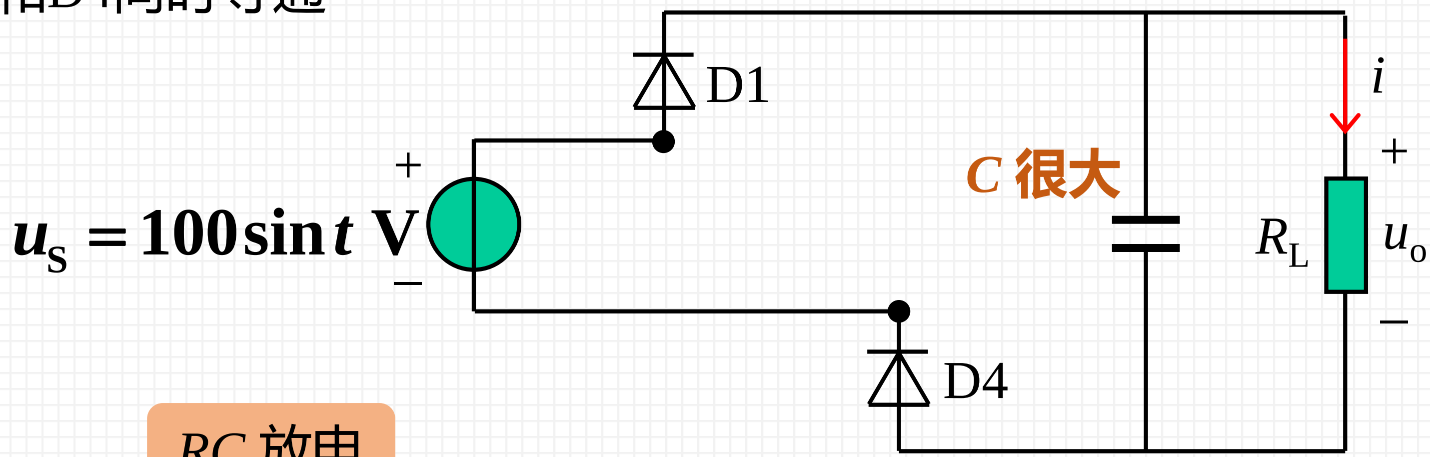


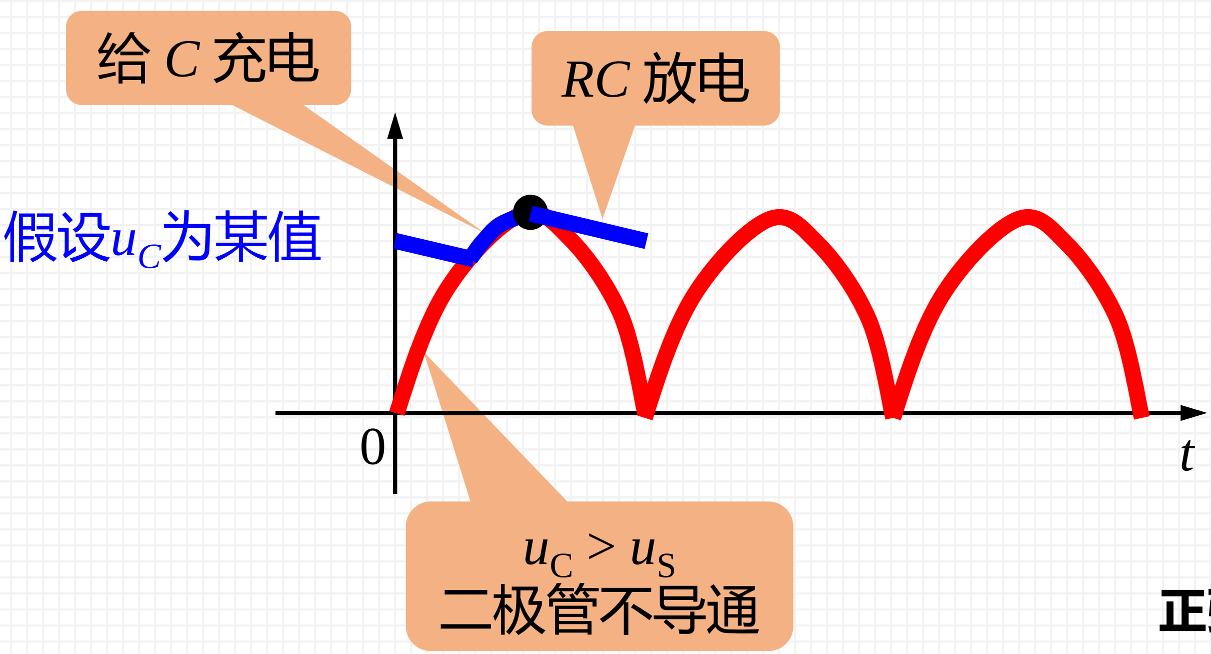
问题：如何改进该直流电压的质量?



电容具有维持电压的能力

$u_S > 0$时， D1和D4同时导通





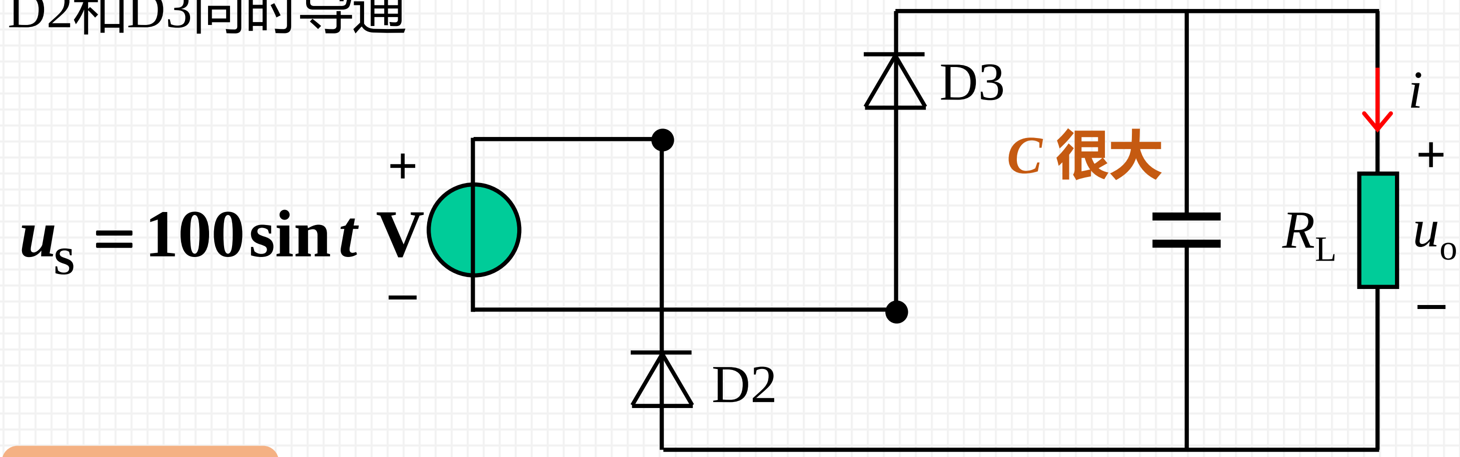
u_S下降，电容放电。

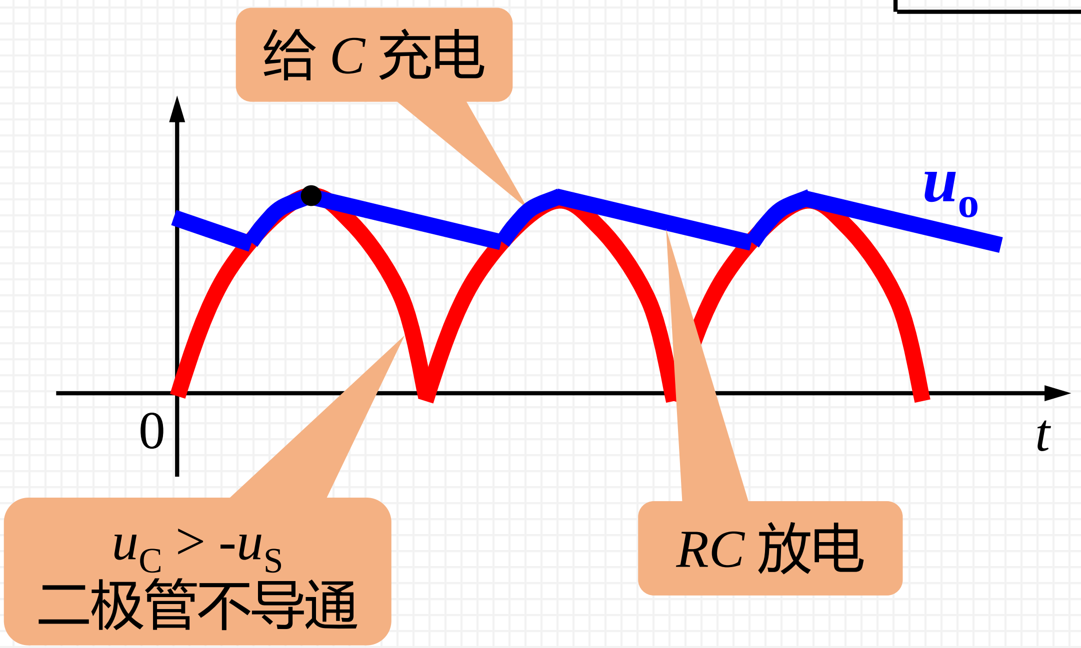
τ 很大，放电很缓慢。

正弦的衰减速度 > RC 放电速度。

$u_C > u_S$， D1和D4截止。

$u_S < 0$时， D2和D3同时导通





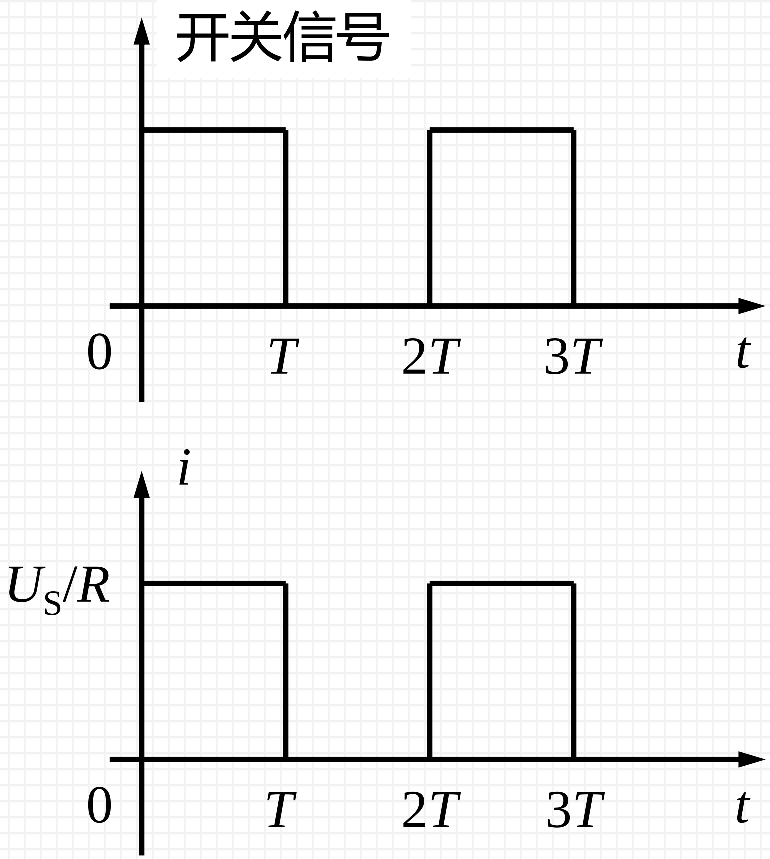
1. 直流电压平均值提高

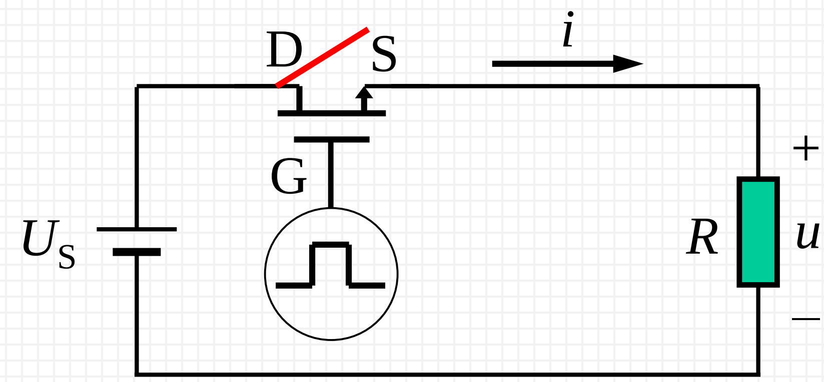
2. 直流电压脉动减小

2.2 DC - DC变换

问题：如何比分压更高效率地改变直流电压?

方法一



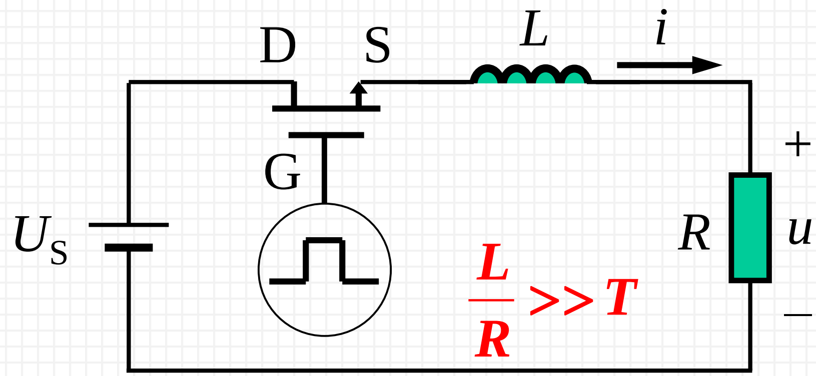


缺点：类似桥式整流，
直流质量较差。

改进思路：

利用**电感**维持电流的能力。

方法二



有问题吗?

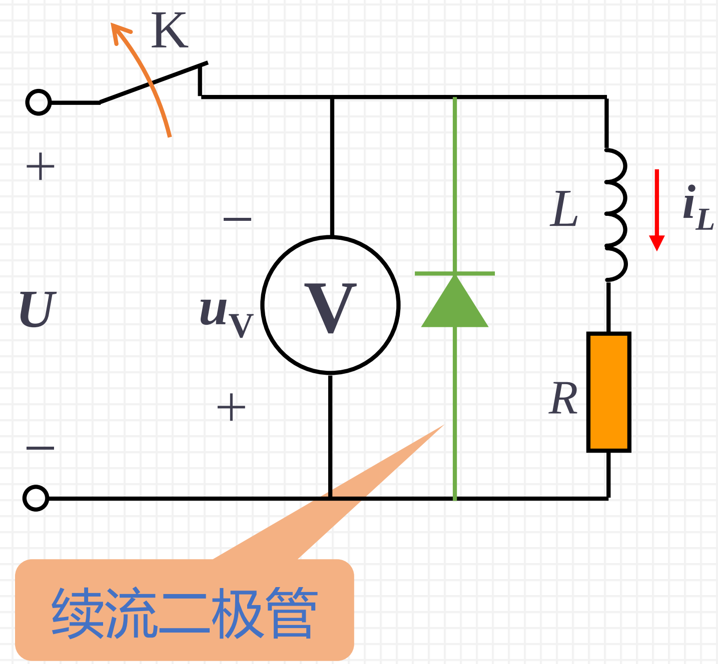
$U = 20\text{V}$、$R = 1\text{k}\Omega$、$L = 1\text{H}$

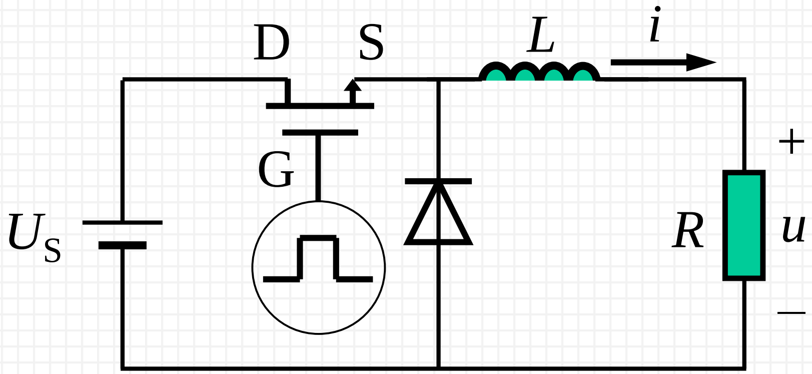
电压表内阻 $R_V = 500\,\text{k}\Omega$

……

$u_V(0^+) = 10000\text{V}$

回忆



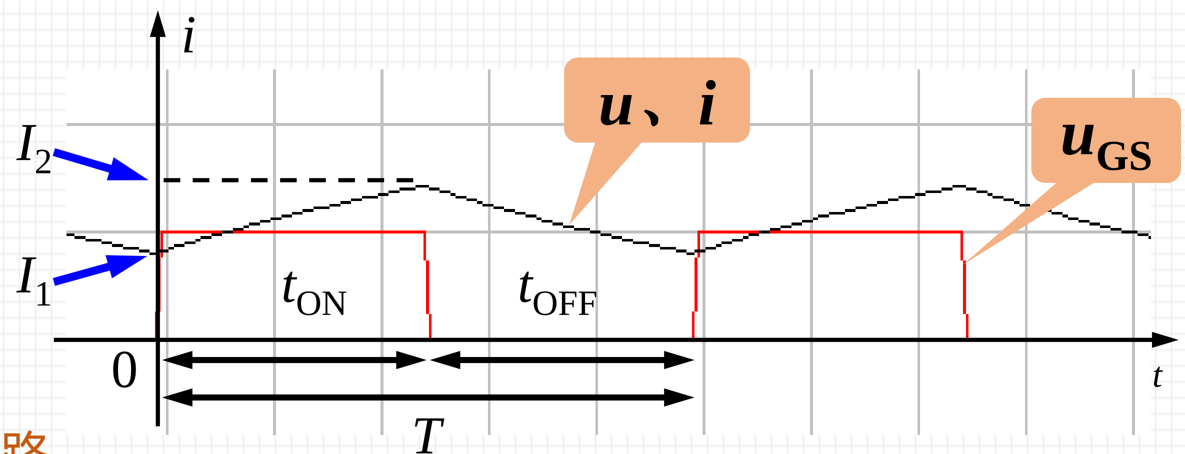


这类问题的分析特点：

（1）设电路已经进入稳态

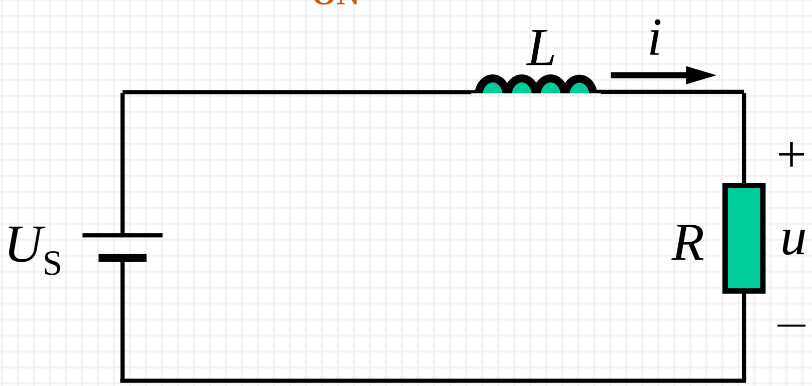
（2）画电路图，求电路解

（3）利用边界条件求出关键点电压/电流



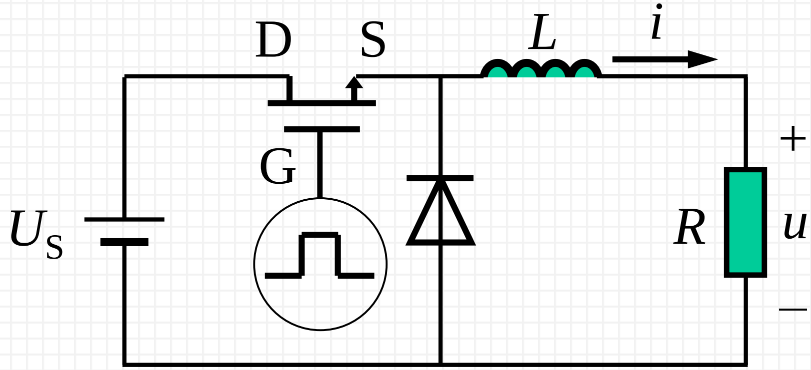
设电流连续

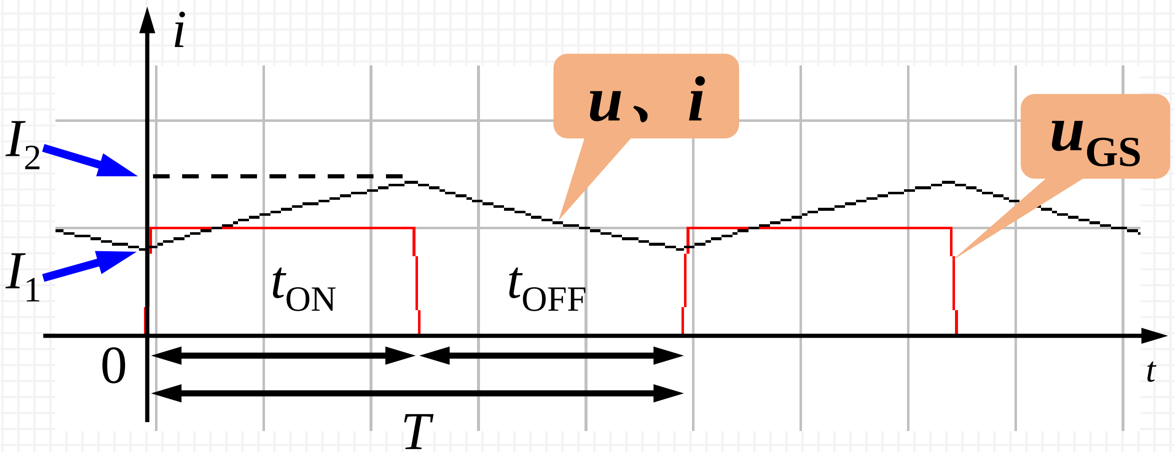
$0 < t < t_{ON}$ 时段等效电路



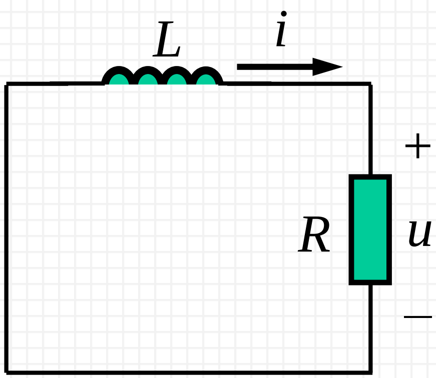
$$i'(0^+) = I_1 \qquad i'(\infty) = \frac{U_S}{R} \qquad \tau = \frac{L}{R}$$

$$i' = \frac{U_S}{R} + \left(I_1 - \frac{U_S}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

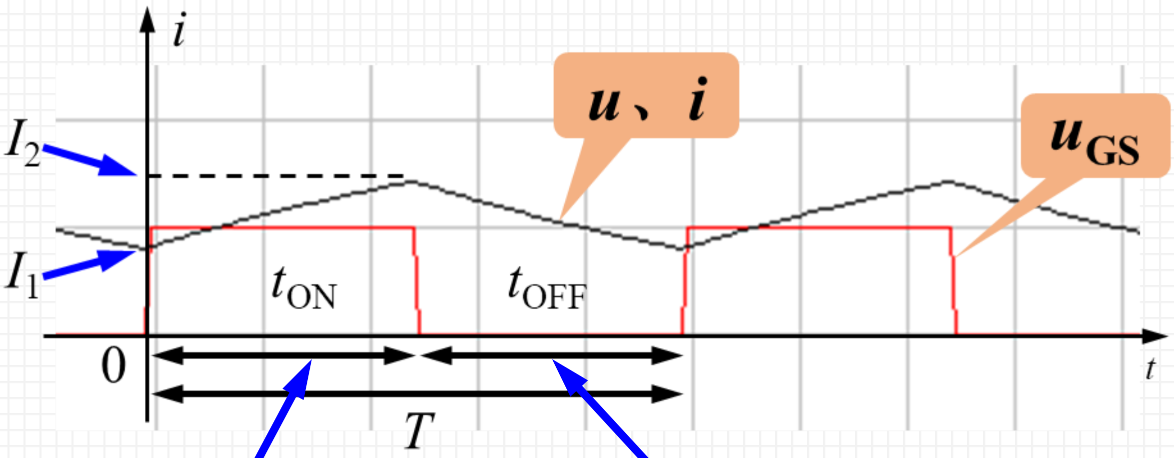




$t_{ON} < t <$ （$t_{ON} + t_{OFF}$） 时段等效电路



$$\left.\begin{aligned} & i''(t_{ON}^{+}) = I_2 \\ & i''(\infty) = 0 \\ & \tau = \frac{L}{R} \end{aligned}\right\} \Rightarrow i'' = I_2 e^{-\frac{(t-t_{ON})}{\tau}}$$



这类问题的分析特点：

（1）设电路已经进入稳态

（2）画电路图，求电路解

（3）利用边界条件求出关键点电压/电流

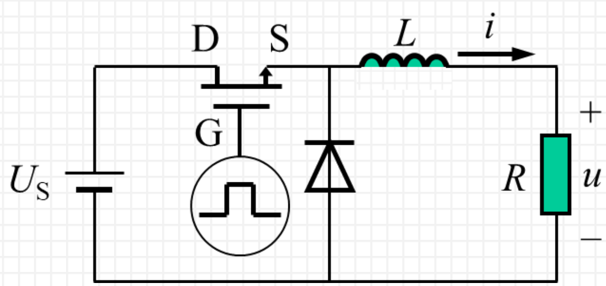
$$i' = \frac{U_S}{R} + \left(I_1 - \frac{U_S}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad i'' = I_2 e^{-\frac{(t-t_{ON})}{\tau}}$$

$$\begin{cases} i'(t_{ON}) = I_2 \\ i''\left(t_{ON} + t_{OFF}\right) = I_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{U_S}{R}\dfrac{1-e^{-t_{ON}/\tau}}{1-e^{-T/\tau}}e^{-\frac{t_{OFF}}{\tau}} \\ I_2 = \dfrac{U_S}{R}\dfrac{1-e^{-t_{ON}/t}}{1-e^{-T/t}} \end{cases}$$

I_{AVG}

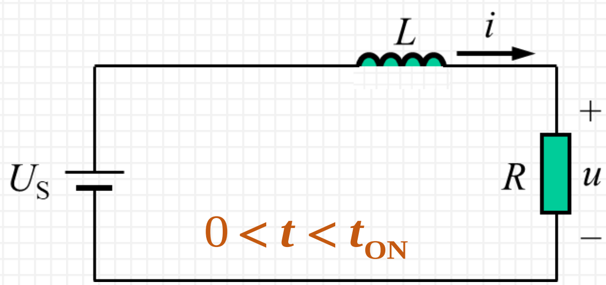
U_{AVG}

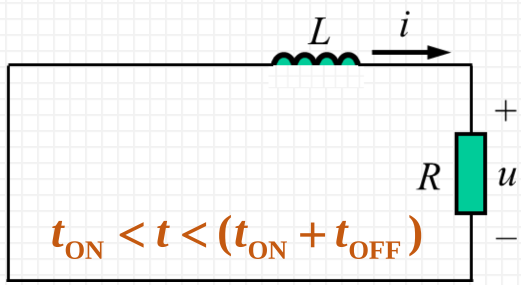


从**工程观点**来估计U

因为 L 值取得**较大**，
可看作 $i=I$ 不变，
因此 $u=U$ 也不变。

稳态时电感在前半个周期**吸收的能量**等于后半个周期**发出的能量**





电感吸收的能量为

$$W_{L\_abs}=(U_S-U)*I*t_{ON}$$

电感发出的能量为

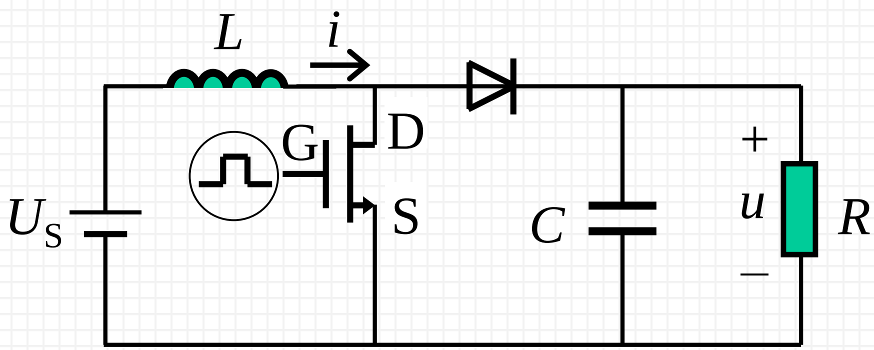
$$W_{L\_dis}=U*I*t_{OFF}$$

稳态时电感每周期能量守恒

$$(U_S-U)*I*t_{ON}=U*I*t_{OFF} \Rightarrow U=U_S\frac{t_{ON}}{T}$$

占空比

降压斩波器
Buck Converter



用**工程观点**分析这个电路

L、*C* 值取得**较大**，可看作 $i=I$ 不变，$u=U$ 不变。

该电路实现了怎样的功能?

稳态时电感在前半周期(t_{on})**吸收**的能量等于后半周期(t_{off})**发出**的能量

$$W_1 = U_S * I * t_{ON}$$

$$W_2 = (U - U_S) * I * t_{OFF}$$

$$U_S * t_{ON} = (U - U_S) * t_{OFF}$$

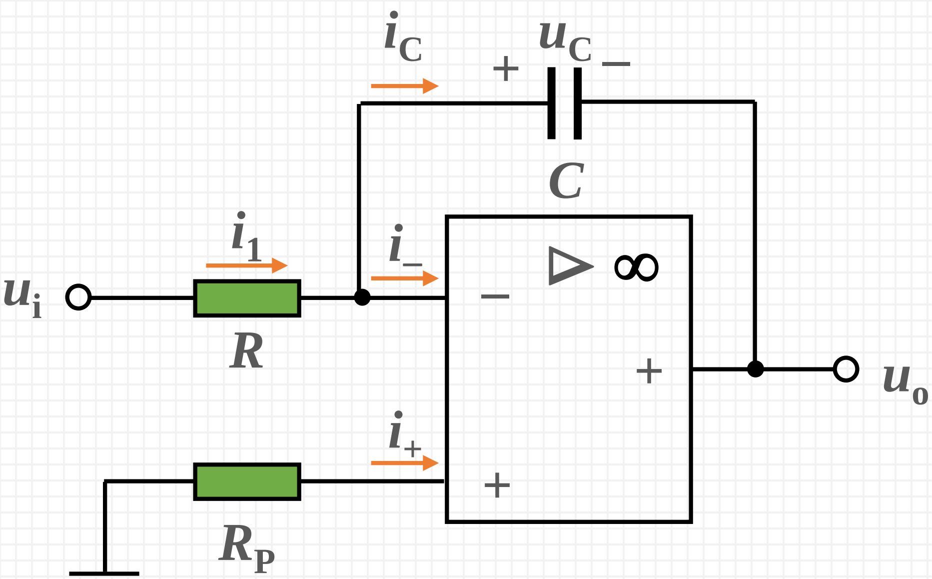
$$U = U_S \frac{T}{t_{OFF}}$$

升压斩波器

Boost Converter

3、运算放大器的动态电路应用

(1) 反相积分器



$$u_- = u_+ = 0$$

$$i_1 = \frac{u_i}{R}$$

$$i_C = C\frac{du_C}{dt}$$

$$u_C = -u_o$$

$$i_C = -C\frac{du_o}{dt}$$

$$i_+ = i_- = 0$$

$$i_1 = i_C$$

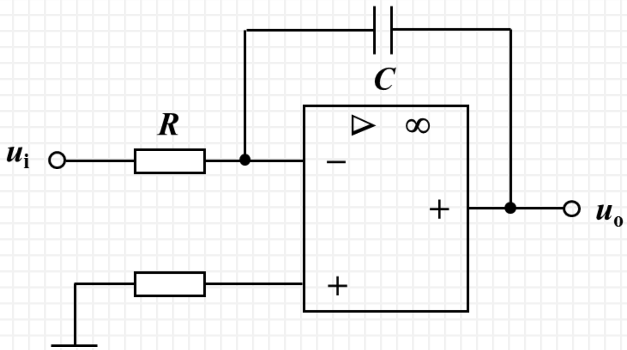
$$\frac{u_i}{R} = -C\frac{du_o}{dt}$$

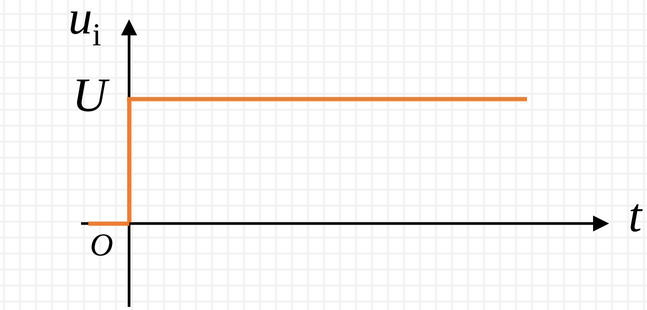
$$\boxed{u_o = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_i dt - u_C(0)}$$

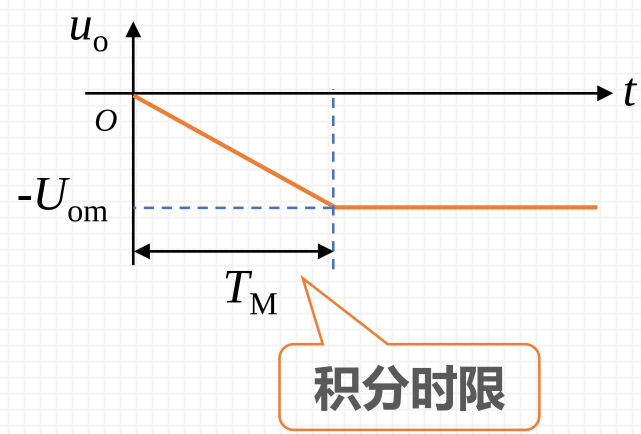
如果 $u_C(0) = 0$

$$\boxed{u_o = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_i dt}$$

例 反相积分器，如果输入电压u_i为直流电压U，确定u_o波形，根据给定参数，计算积分时限T_M。设$u_C(0)=0$。







$$\boxed{u_o=-\frac{1}{RC}\int u_i dt}$$

$$u_o=-\frac{1}{RC}\int_0^t U dt=-\frac{U}{RC}t$$

$$-U_{om}=-\frac{U}{RC}T_M$$

$$T_M=\frac{RCU_{om}}{U}=0.05\text{s}$$

设U_{om}=15V，U=+3V，

R=10kΩ，C=1μF

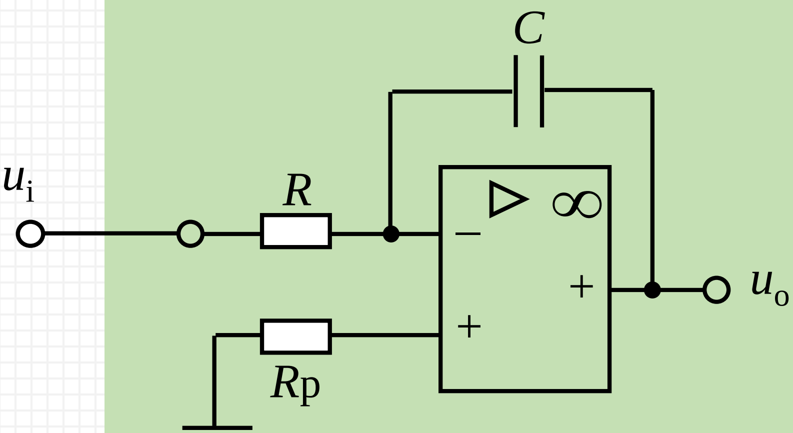
$$u_o = -\frac{1}{RC}\int u_i \mathrm{d}t$$

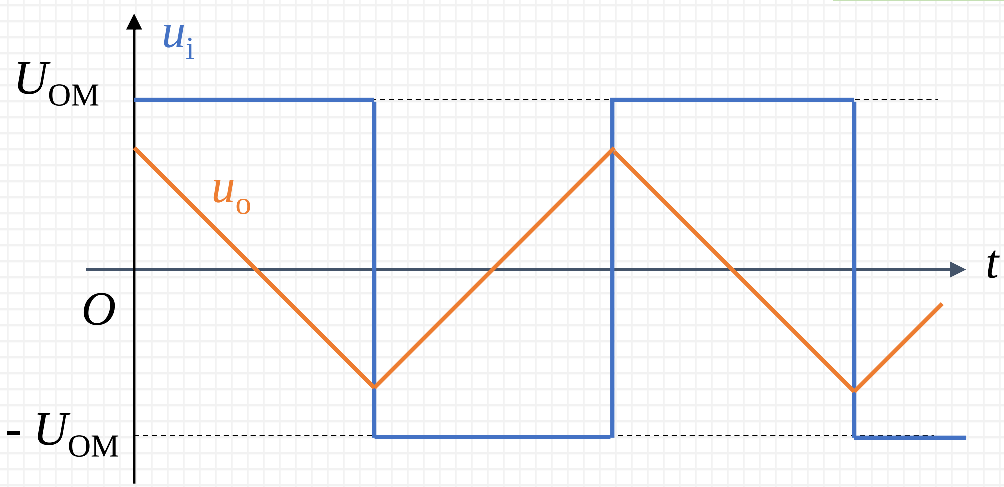
三角波发生器电路

方波 → 三角波

反相积分器

方波

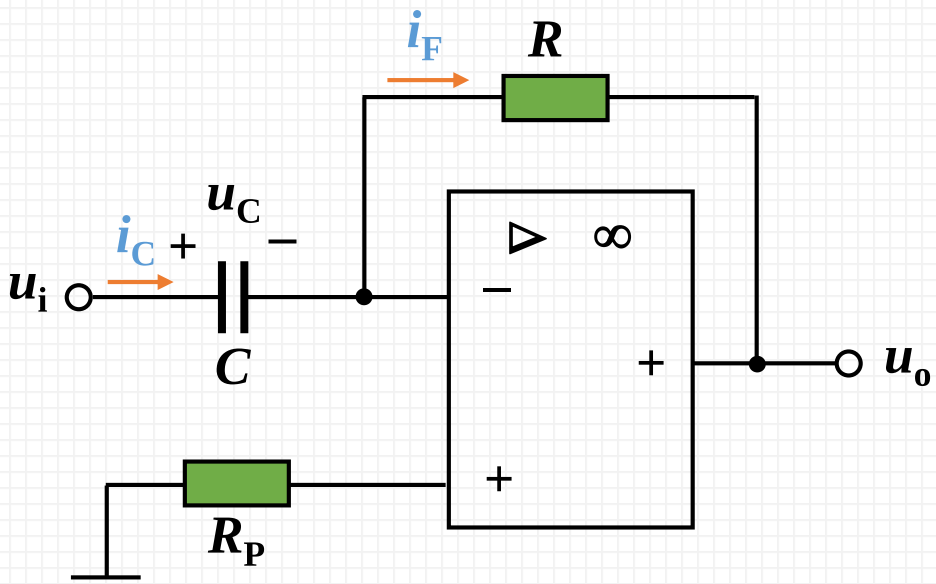




此电路的**问题**：

u_i 的周期相对于时间常数RC不能过大，否则积分器**会饱和。**

(2) 微分器



$$u_- = u_+ = 0$$

$$u_C = u_i$$

$$i_C = C\frac{du_C}{dt} = C\frac{du_i}{dt}$$

$$i_F = -\frac{u_o}{R}$$

$$i_- = 0$$

$$i_C = i_F$$

$$C\frac{du_i}{dt} = -\frac{u_o}{R}$$

$$u_o = -RC\frac{du_i}{dt}$$

如果 $u_i = t\,U_S$（线性函数），则

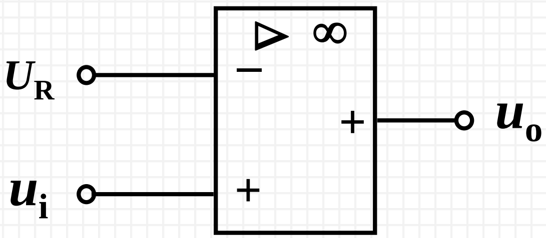
$$u_o = -RCU_S$$ 常数

三角波 → 方波

(3) 单限电压比较器

特点： 运放处于**开环**状态

(a) 同相端输入

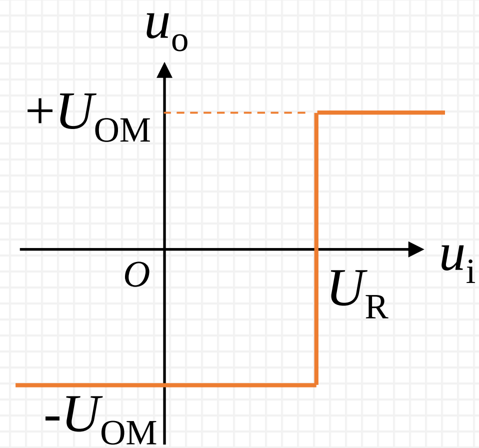


U_R为参考电压

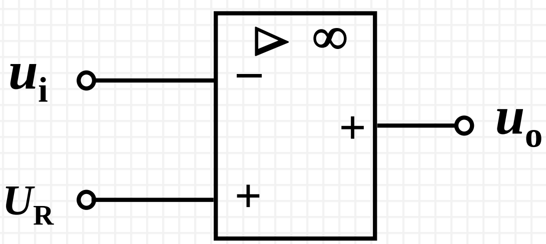
当$u_i > U_R$时，$u_o = +U_{sat}$

当$u_i < U_R$时，$u_o = -U_{sat}$

电压传输特性



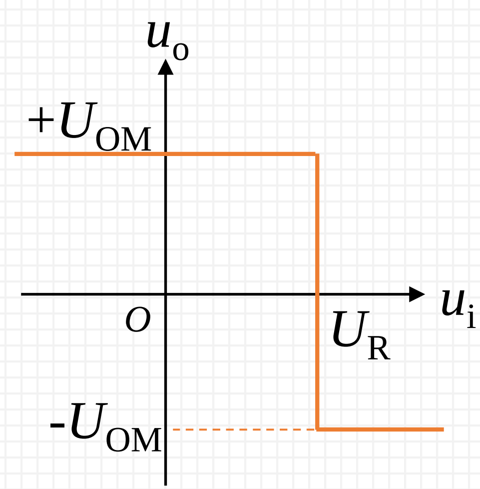
(b) 反相端输入



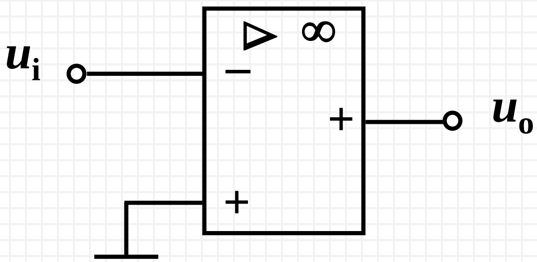
U_R为参考电压

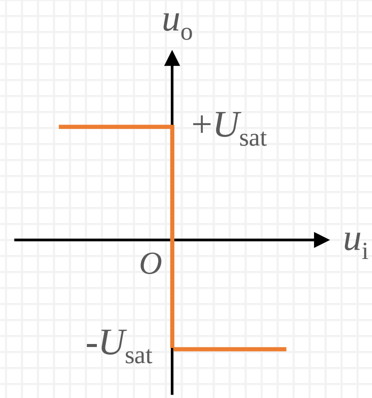
当$u_i < U_R$时，$u_o = +U_{sat}$

当$u_i > U_R$时，$u_o = -U_{sat}$



单限电压比较器：当U_R =0时，称为过零比较器



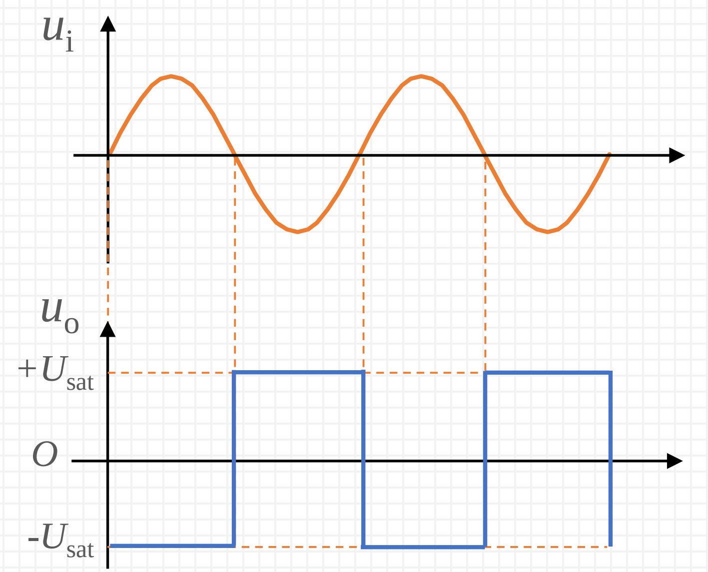


单限电压比较器可用于将模拟电压波形整形成方波电压波形。

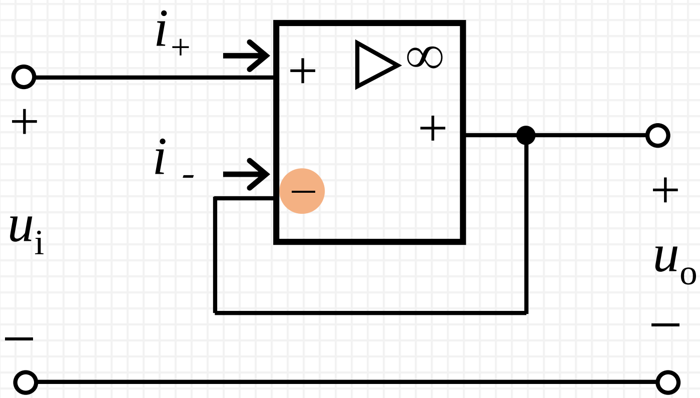
例 过零比较器，当输入为正弦波时，画出输出电压的波形。

当$u_i < 0$时，$u_o = +U_{sat}$

当$u_i > 0$时，$u_o = -U_{sat}$



负反馈



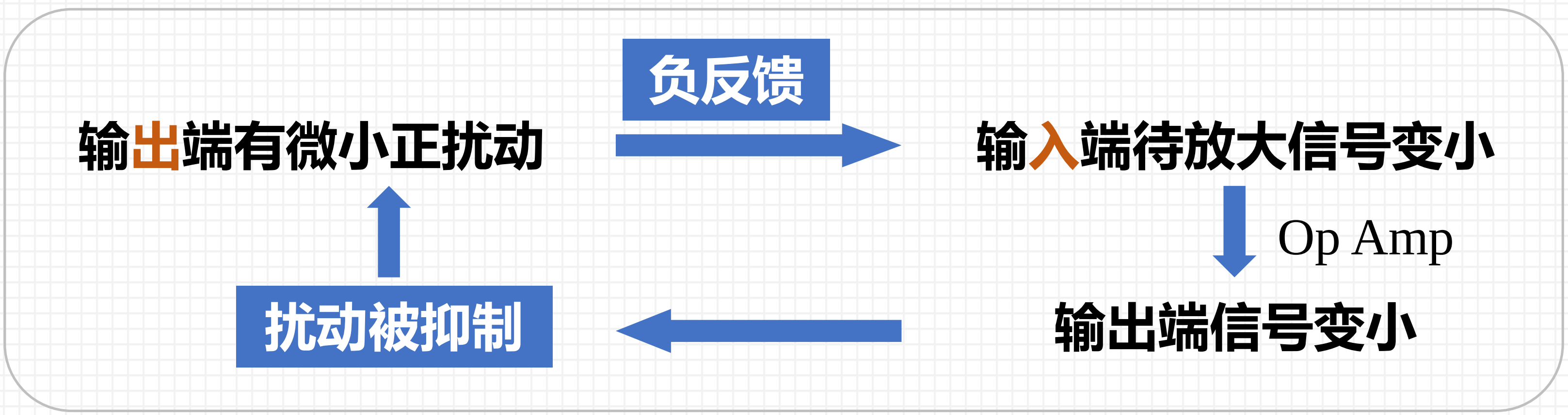
理想运算放大器：

(1) 放大倍数 ∞

(2) 输入电阻 ∞

(3) 输出电阻 0

将Op Amp的输出引到反相输入端（**负反馈**）



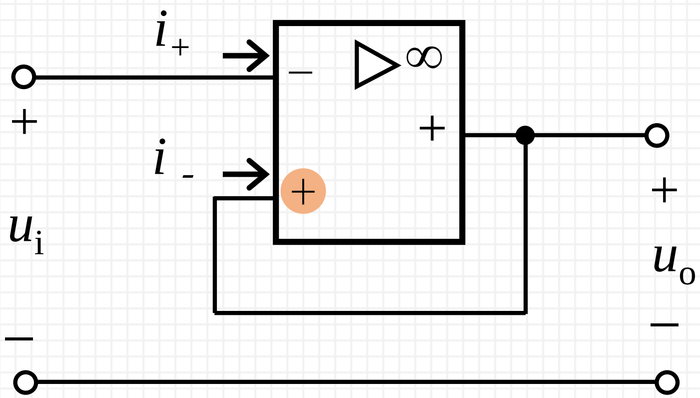
Op Amp负反馈电路分析方法：

(1) $u_+ = u_-$， **虚短** (放大倍数∞ + 线性工作区) → $\boldsymbol{u_o = u_i}$

(2) $i_+ = i_-$， **虚断** (输入电阻∞)

正反馈

将Op Amp的输出引到同相输入端



虚短不再适用

虚断适用吗?

输出端有微小正扰动 → **正反馈** → **输入端待放大信号变大**

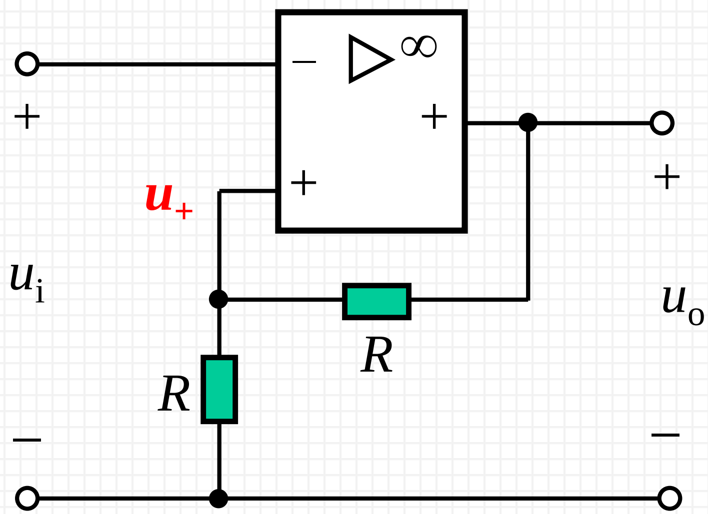
Op Amp ↓

输出端信号变大 → **扰动被放大** → **输出端有微小正扰动**

u_0 为 U_{sat} 或 $-U_{sat}$

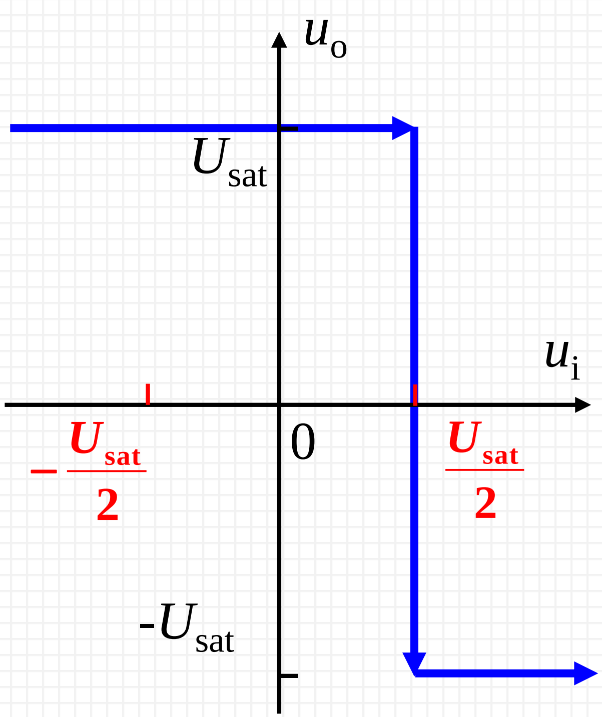
(4) 滞回比较器

正反馈，u_0为U_{sat}或-U_{sat}



虚短不再适用

虚断仍然适用

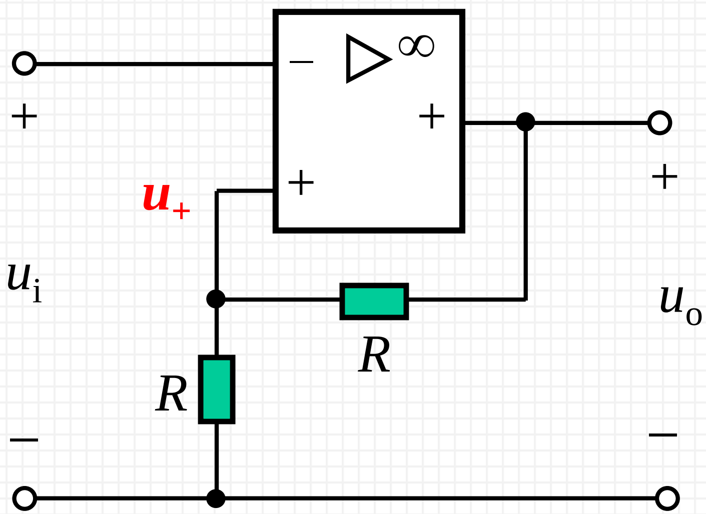


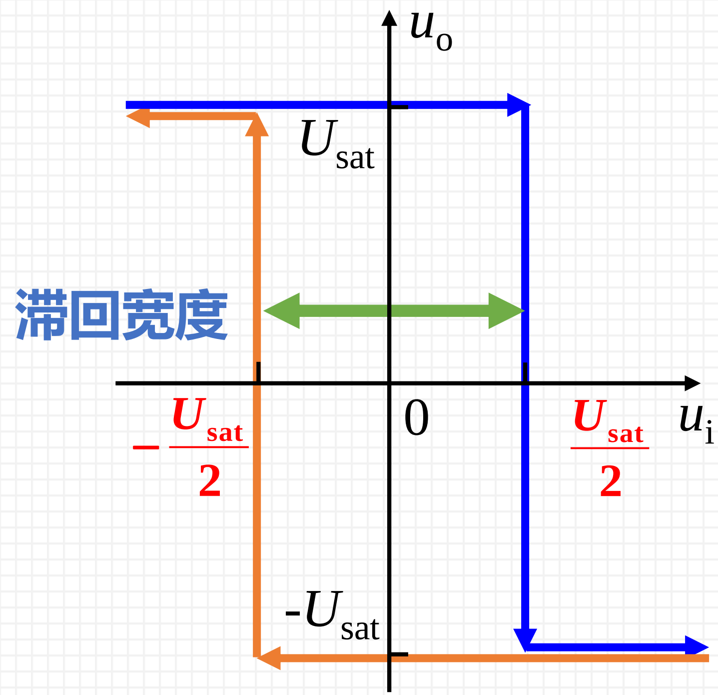
设$u_o=U_{sat}$，则$u_+=0.5U_{sat}$

$u_i< 0.5U_{sat}$时，u_o维持U_{sat}不变。

一旦$u_i > 0.5U_{sat}$，u_o变为-U_{sat}

此时$u^+ =$ - $0.5\ U_{sat}$





$u_i > -0.5U_{sat}$时，

u_o维持$-U_{sat}$不变。

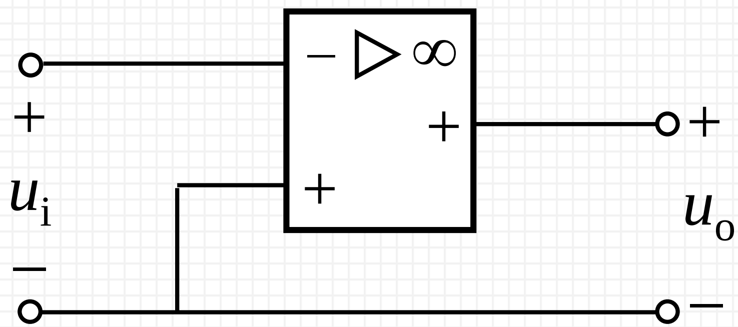
一旦$u_i < -0.5U_{sat}$，

u_o变为$+U_{sat}$

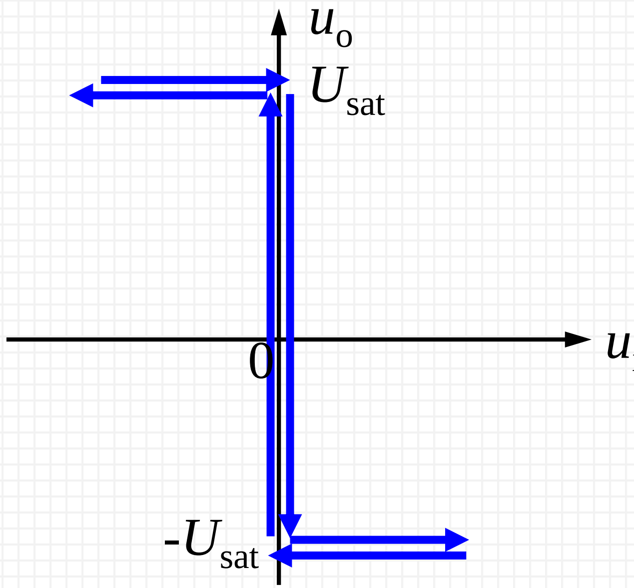
调整两个电阻阻值比可改变滞回宽度

输出滞后输入变化

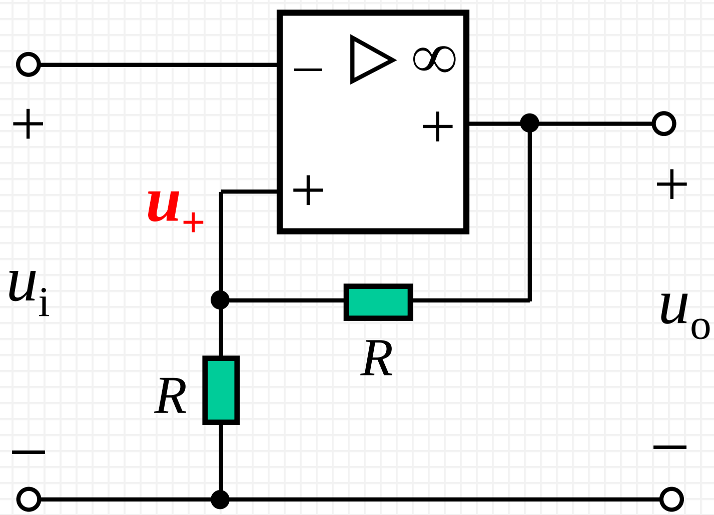
滞回比较器
(Hysteresis Comparator)



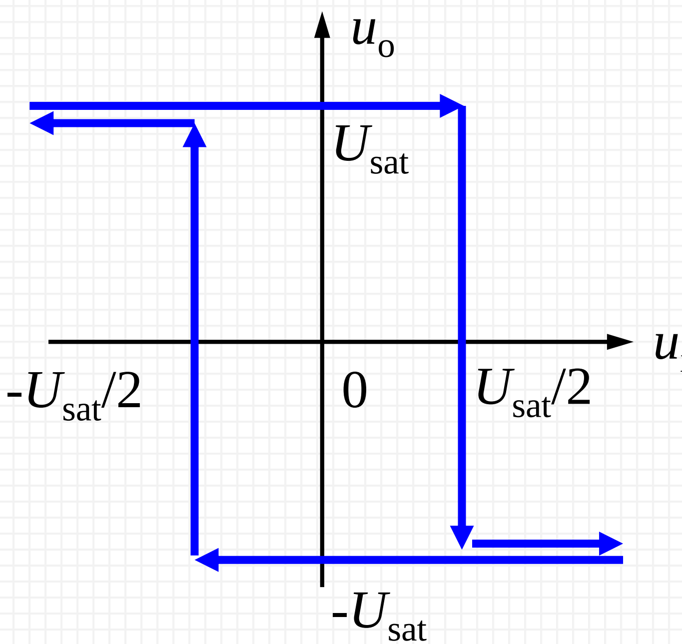
−
▷ ∞
+
+
+
u_i
−
u_o
+
−



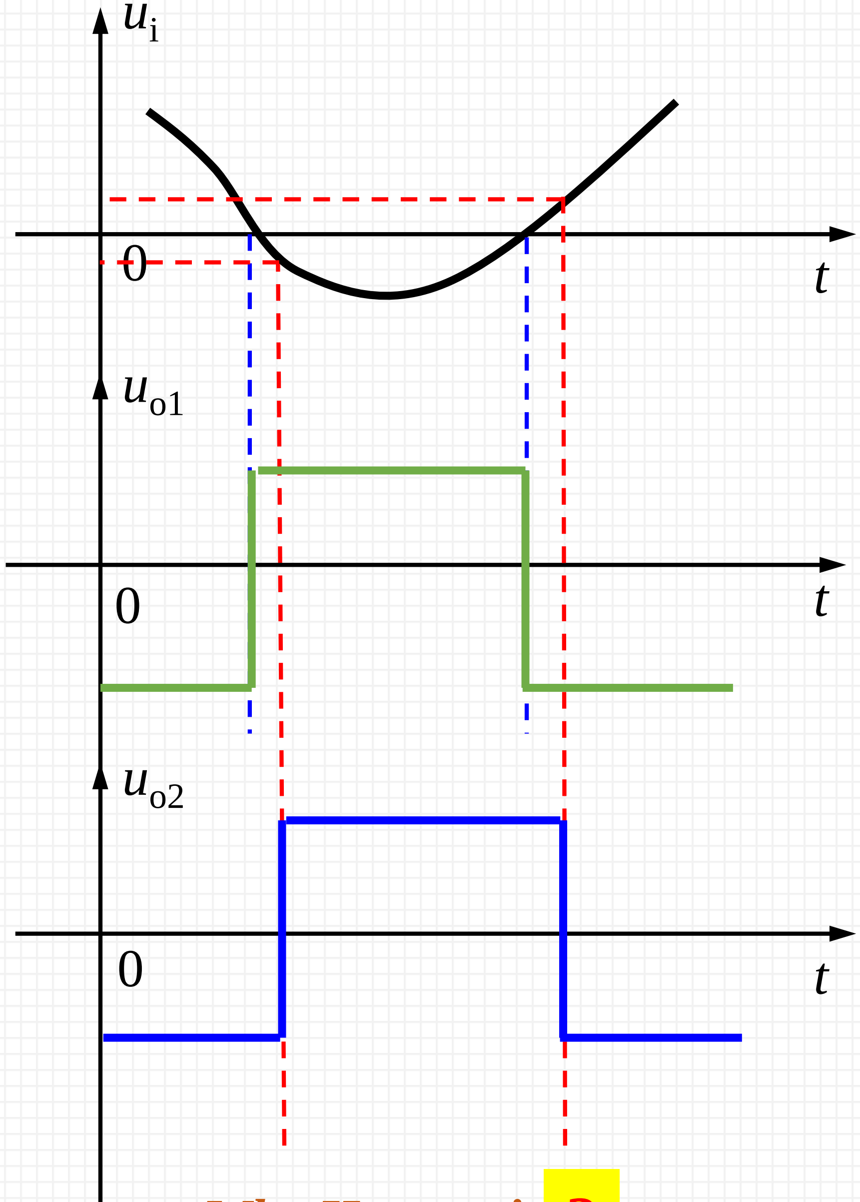
u_o
U_{sat}
0
u_i
$-U_{sat}$

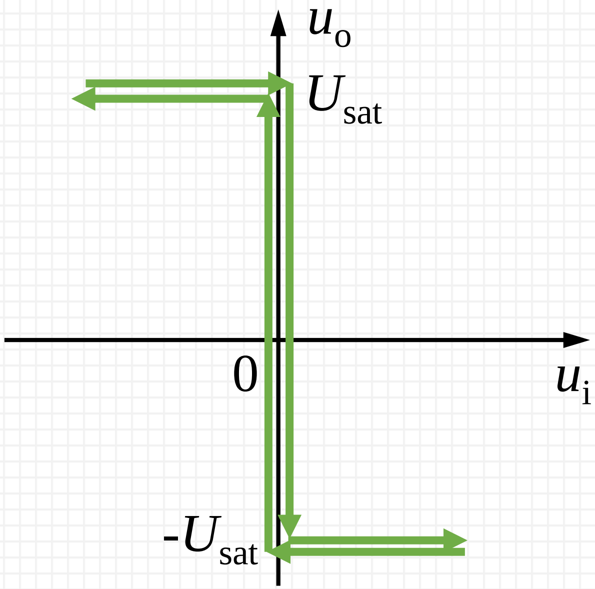


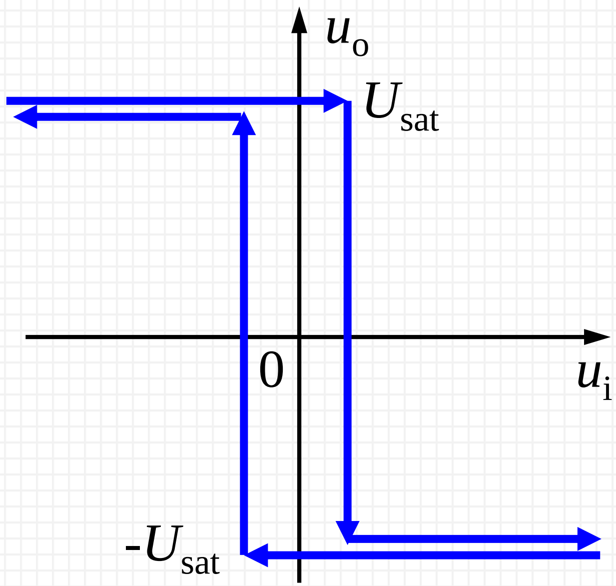
−
▷ ∞
+
+
+
u_+
u_i
R
R
u_o
+
−
−



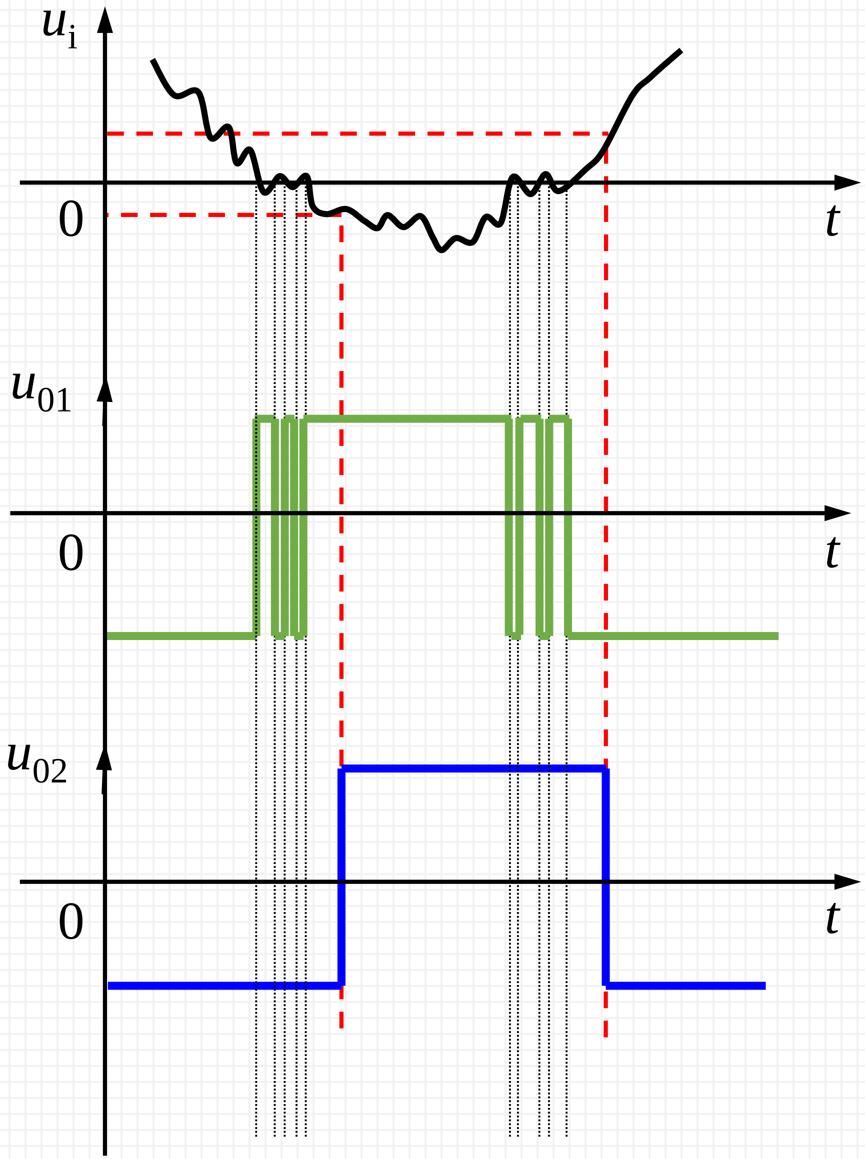
u_o
U_{sat}
$-U_{sat}/2$
0
$U_{sat}/2$
u_i
$-U_{sat}$

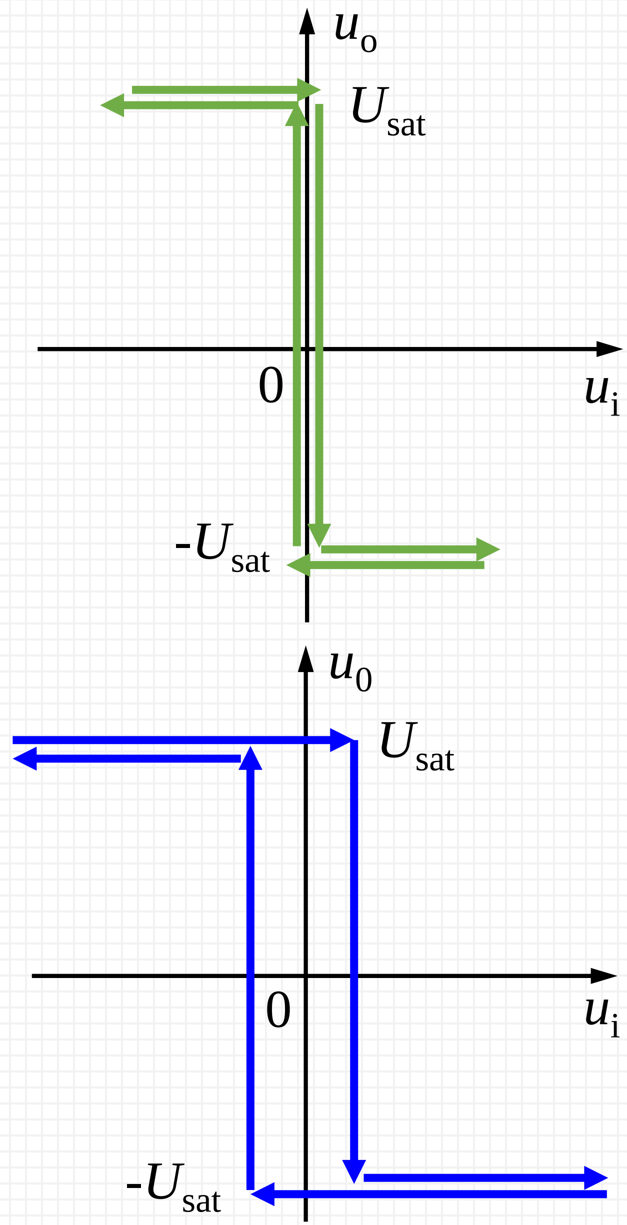






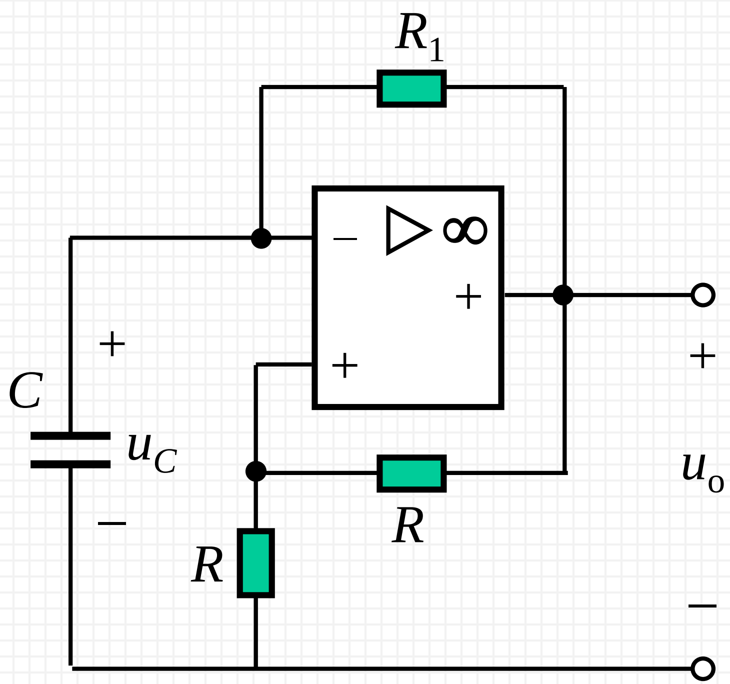
Why Hysteresis ?





滞回比较器能够在一定程度上抑制噪声

(5) 用Op Amp构成脉冲序列发生器



虚短不再适用

虚断仍然适用

是**正反馈**吗?

是!

电路开始工作时存在小扰动。

由于正反馈，u_0为$\boldsymbol{U_{sat}}$或 $\boldsymbol{-U_{sat}}$

设 $u_o=U_{sat}$，则 $u_+=\dfrac{U_{sat}}{2}$

$$u_C(0^+)=0$$

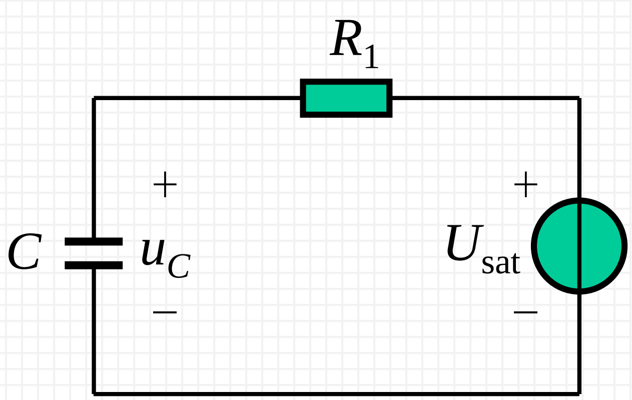
$$u_C(\infty)=U_{sat}$$

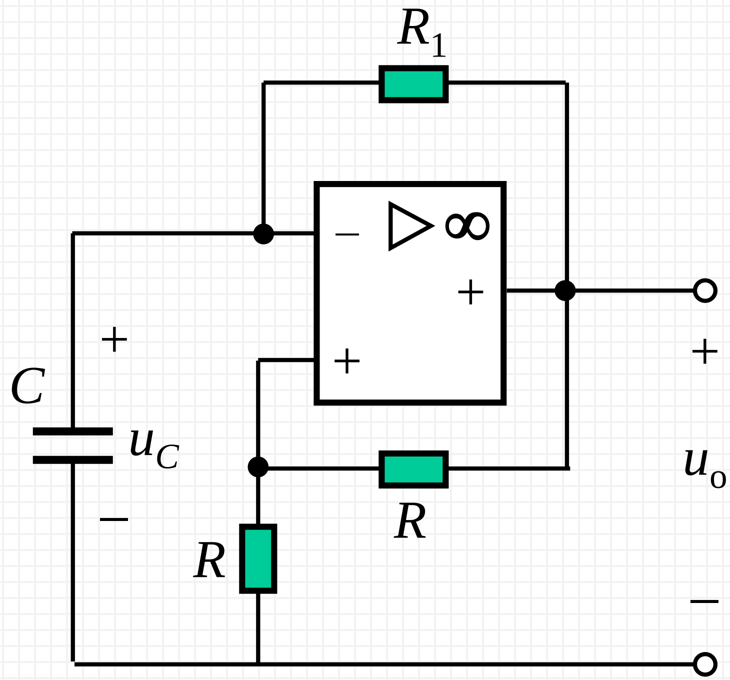
$$\tau=R_1C$$

$$u_C=U_{sat}(1-e^{-t/R_1C})$$

上升至 $u_C=\dfrac{U_{sat}}{2}$ 时， $u_o=-U_{sat}$

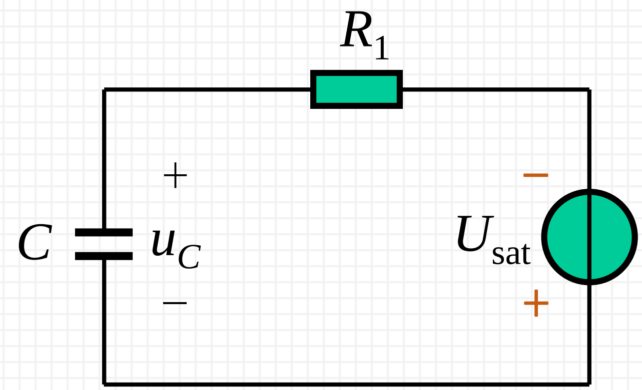
设此时u_C=0，等效电路为





$u_o = -U_{sat}$

此时$u_C=U_{sat}/2$，等效电路为

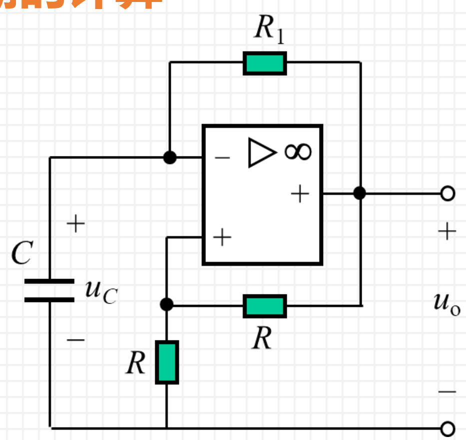


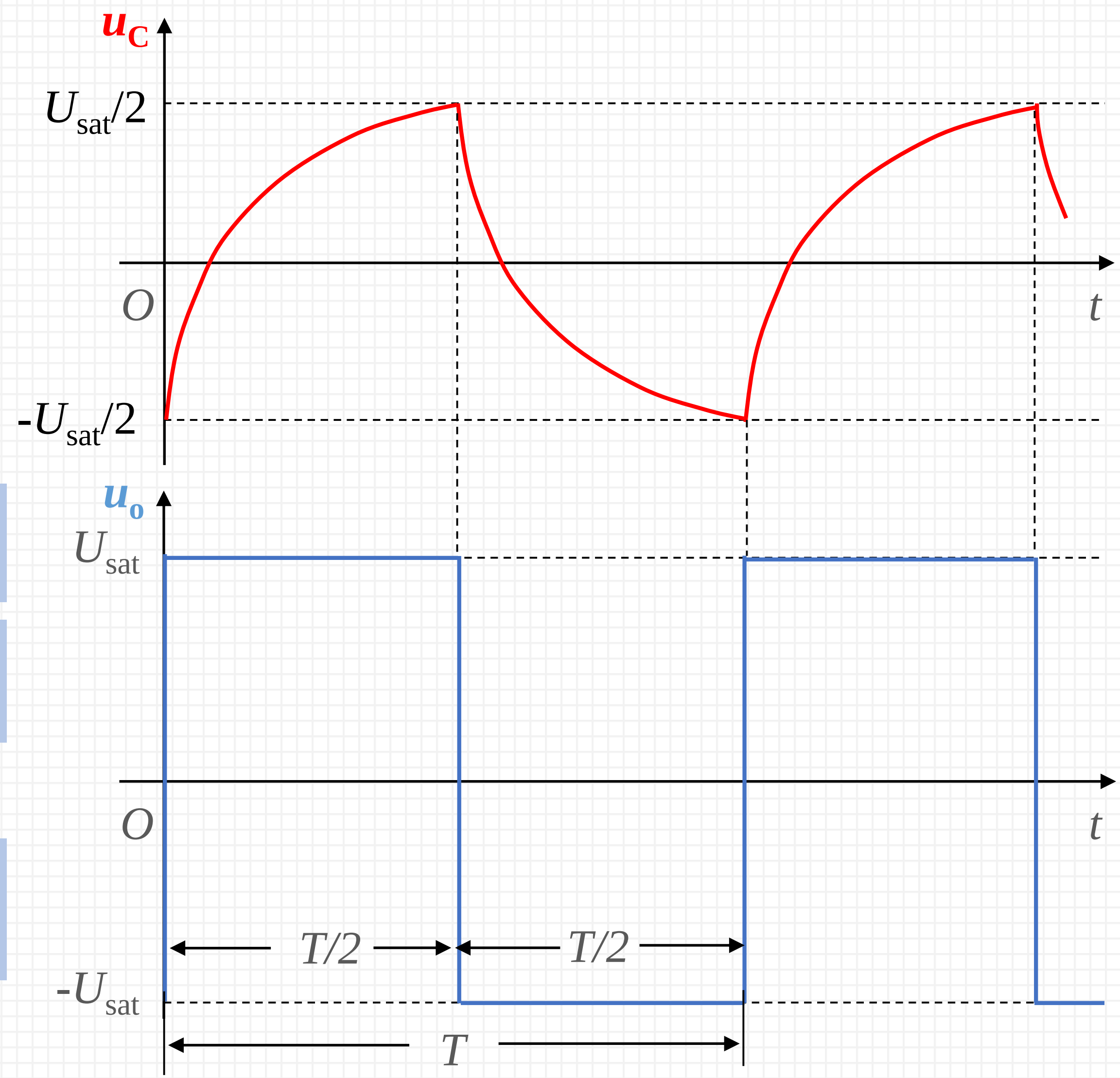
$$u_C(0^+)=\frac{U_{sat}}{2} \qquad u_C(\infty)=-U_{sat} \qquad \tau=R_1C$$

$$u_C=-U_{sat}+\left(U_{sat}/2+U_{sat}\right)e^{-t/R_1C}$$

下降至 $u_C=-\dfrac{U_{sat}}{2}$ 时，$u_o=+U_{sat}$

周期的计算





$$u_C = U_{sat} + (-U_{sat}/2 - U_{sat})e^{-t/R_1C}$$

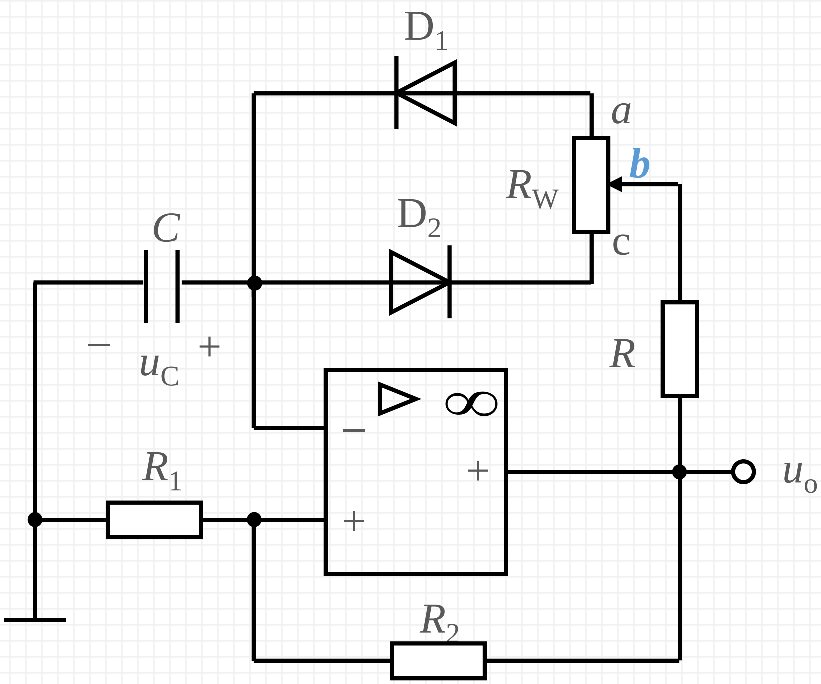
$$u_C = -U_{sat} + (U_{sat}/2 + U_{sat})e^{-(t-\frac{T}{2})/R_1C}$$

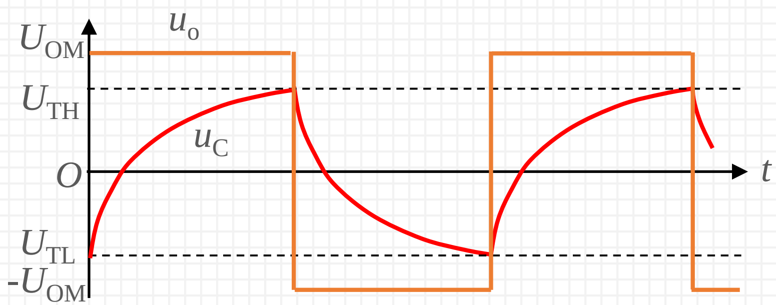
$t=T/2$时

$$U_{sat}/2 = U_{sat} - 3/2\,U_{sat}e^{-T/2R_1C}$$

$$T = 2R_1C\ln 3$$

思考题： 点 b 是电位器 R_W 的中点，点 a 和点 c 分别是电位器的上、下端点 。试定性画出电位器可动端分别处于 a、b、c 三点时的 u_o 、u_C 相对应的波形图。分析时忽略二极管导通时的正向电阻。





电位器位于b点时的u_o波形

电位器可动端位于b点， u_o波形?

电位器可动端位于c点， u_o波形?

电位器可动端位于a点， u_o波形?

判断：这是哪一种情况的波形?