第二次应用介绍课

——动态电路的应用

- 脉冲序列作用下的RC电路(已预习)
- 能量变换
  - AC－DC
  - DC－DC
- 运算放大器的动态电路应用
  - 积分器和微分器
  - 滞回比较器
  - 脉冲序列发生器
- MOSFET的传播延迟

负反馈电路

正反馈电路

本讲练习题需要用到计算器，
也许要用点纸笔，请提前准备好

复习

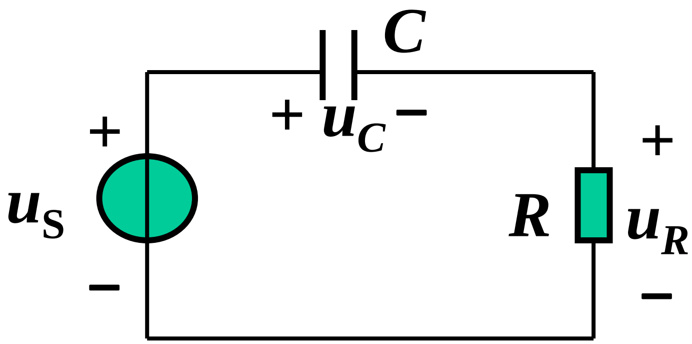
直流激励下一阶动态电路的直觉解法(三要素法)

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

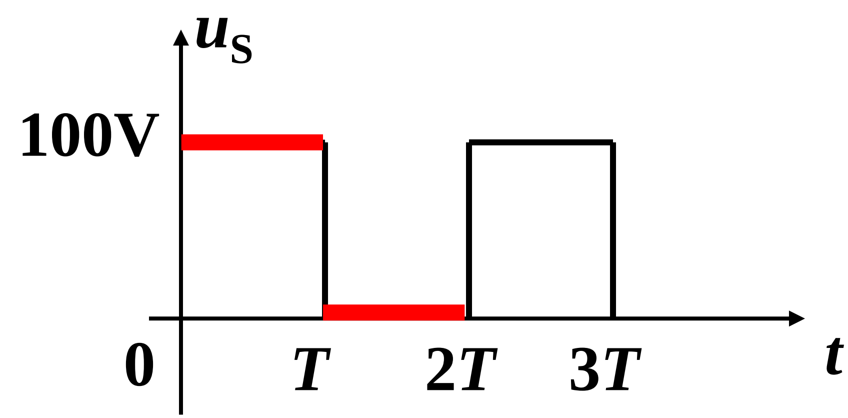
RC 电路 $\tau=R_{等}C$

RL 电路 $\tau=\dfrac{L}{R_{等}}$

1　脉冲序列作用下的RC电路



$u_C(0^-)=0$



（1）　$T >> \tau$

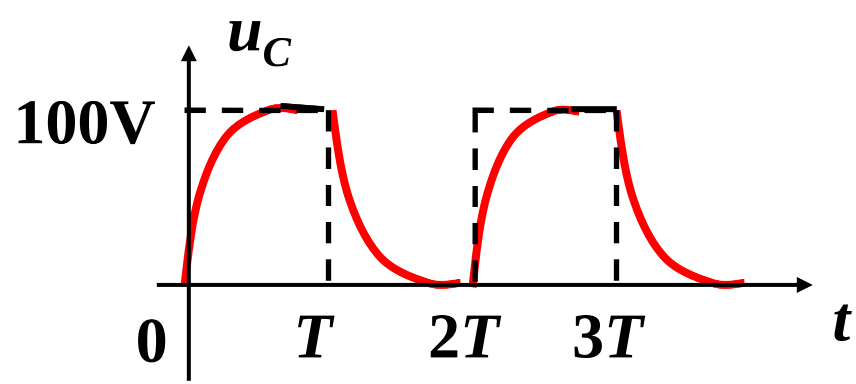
$0 < t < T$

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

$u_C(0^+)=0$

$u_C(\infty)=100\text{V}$

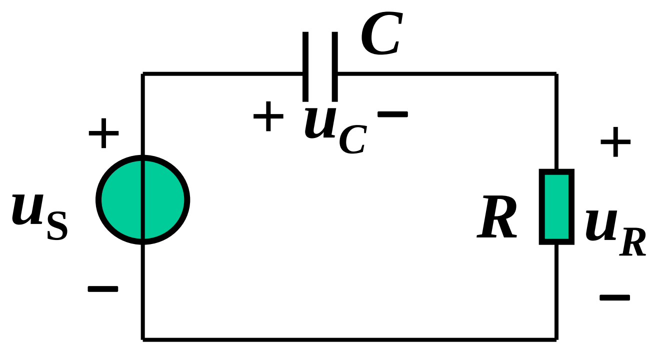
$\tau = RC$



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

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

（2） T 与 τ 接近



周期开始和结束两个时刻支路量数值相同

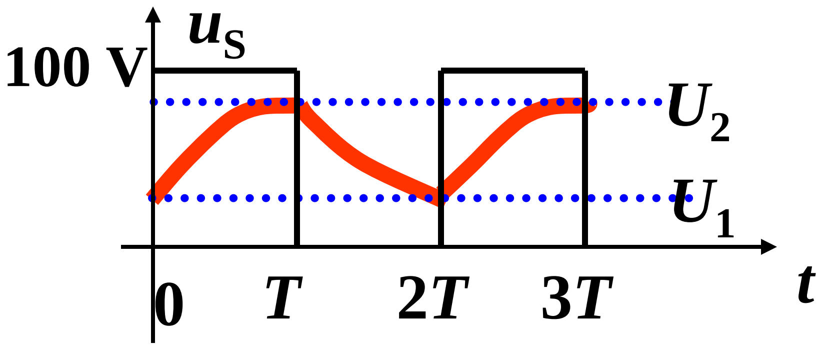
这类问题的分析特点：

（1）认为电路已经进入稳态

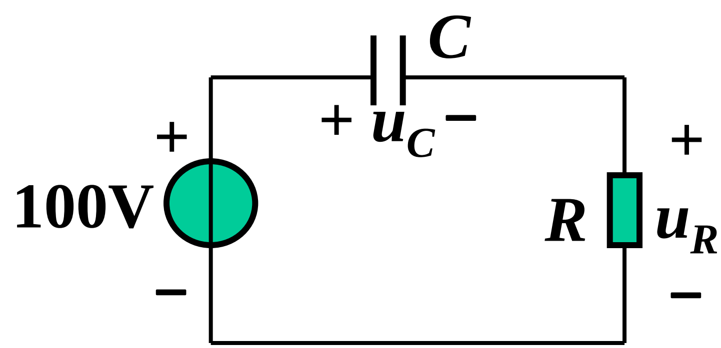
（2）画不同状态下的电路图，求电路解

（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

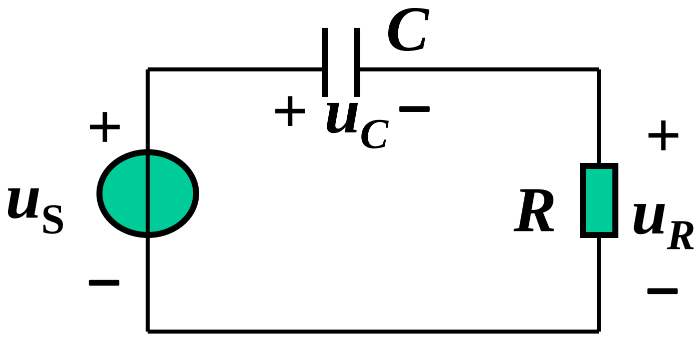


$$u_C(0^+) = U_1$$

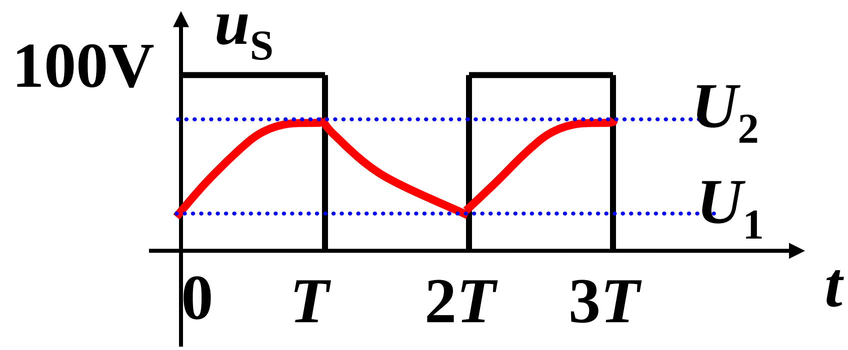
$$u_C(\infty) = 100\ \text{V}$$

$$\tau = RC$$

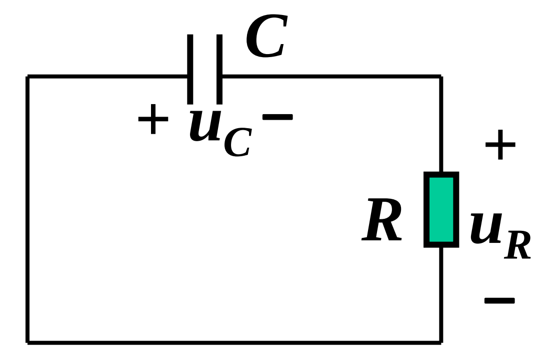
$$u_C = 100 + (U_1 - 100)e^{-\frac{t}{RC}}\ \text{V}$$



$u_C(0^-)=0$



等效电路图



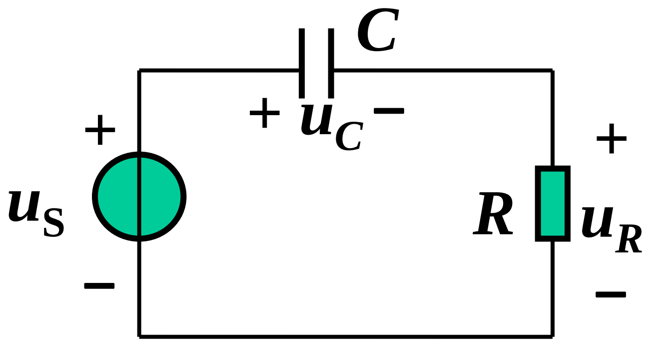
$T < t < 2T$

$$u_C(T^+) = U_2$$

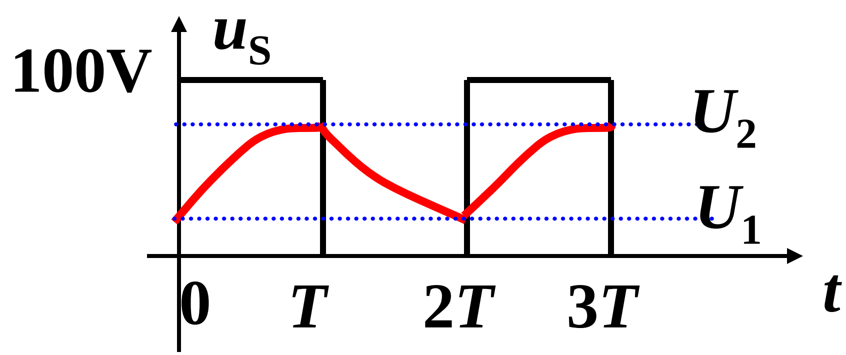
$$u_C(\infty) = 0$$

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

$$\tau = RC$$



$u_C(0^-)=0$



$0 < t < T$

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

$T < t < 2T$

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

$t = T$

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

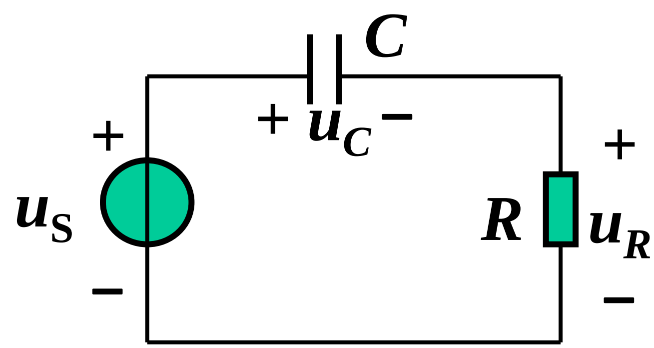
$t = 2T$

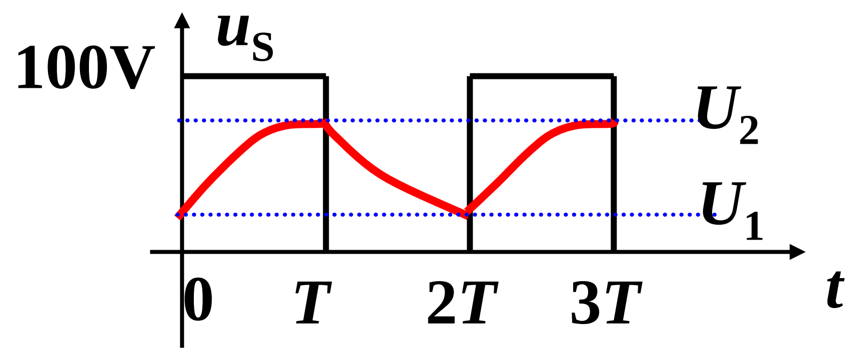
$$u_C = U_1 = U_2 \mathrm{e}^{-\frac{2T-T}{RC}}$$

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

满足怎样的条件，才能使得$U_2<1.2U_1$?

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





A $T<\ln(1.2)RC$

B $T>\ln(1.2)RC$

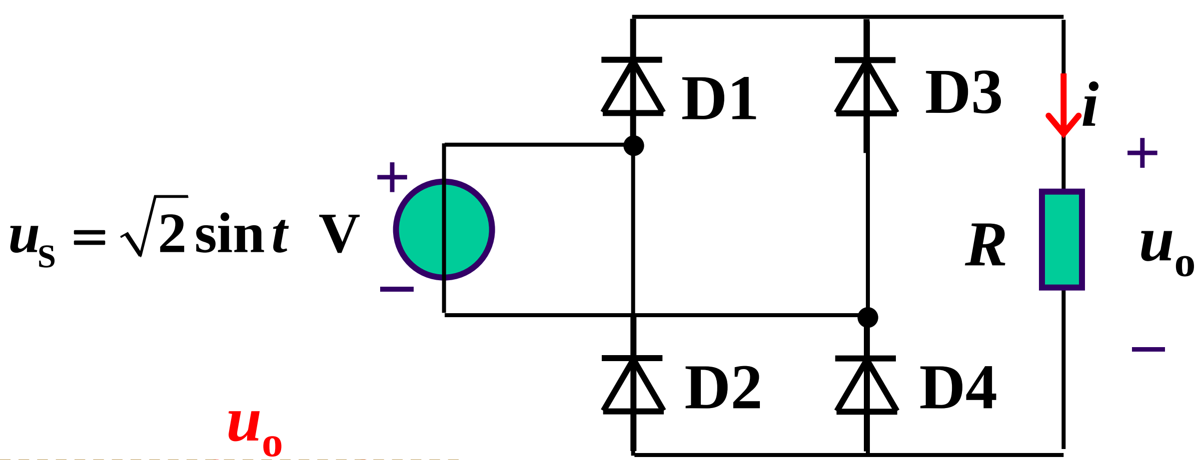
C $T<RC/1.2$

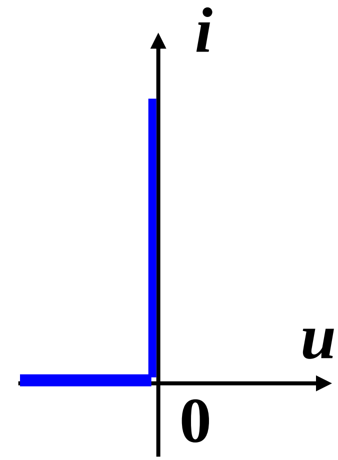
D $T>RC/1.2$

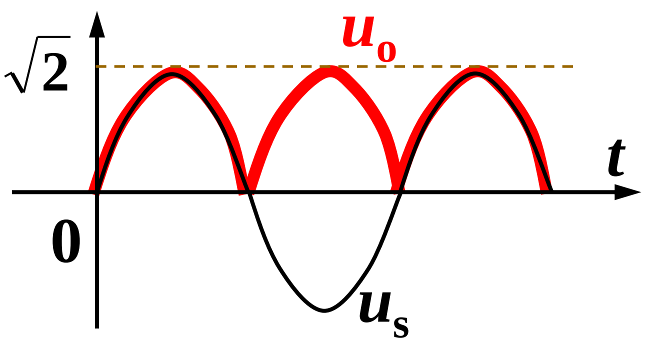
提交

2 AC—DC变换

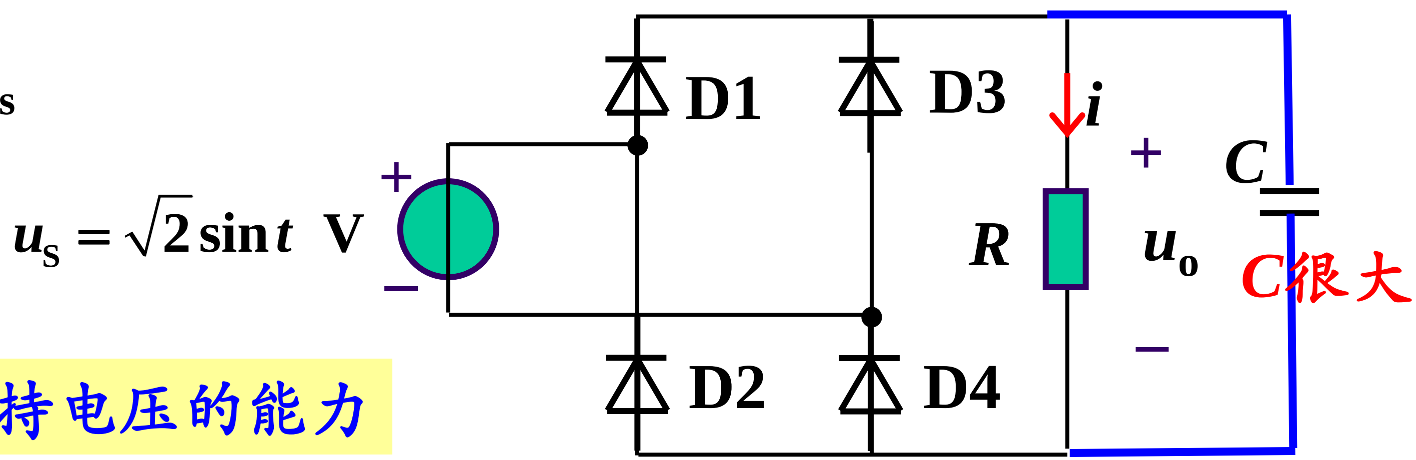
用二极管的模型1分析电路。





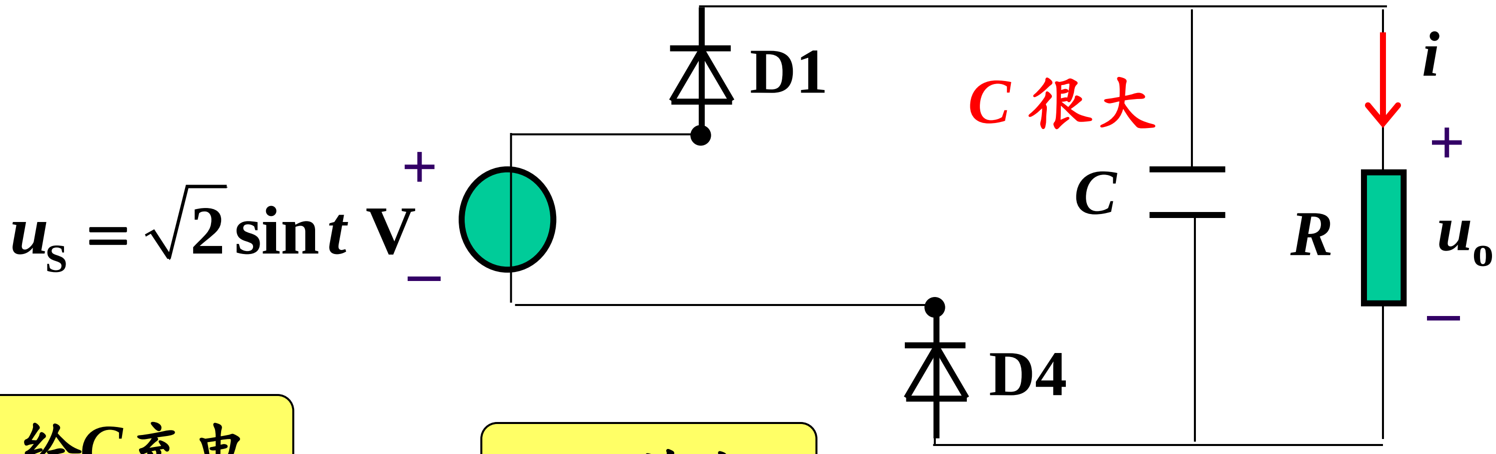


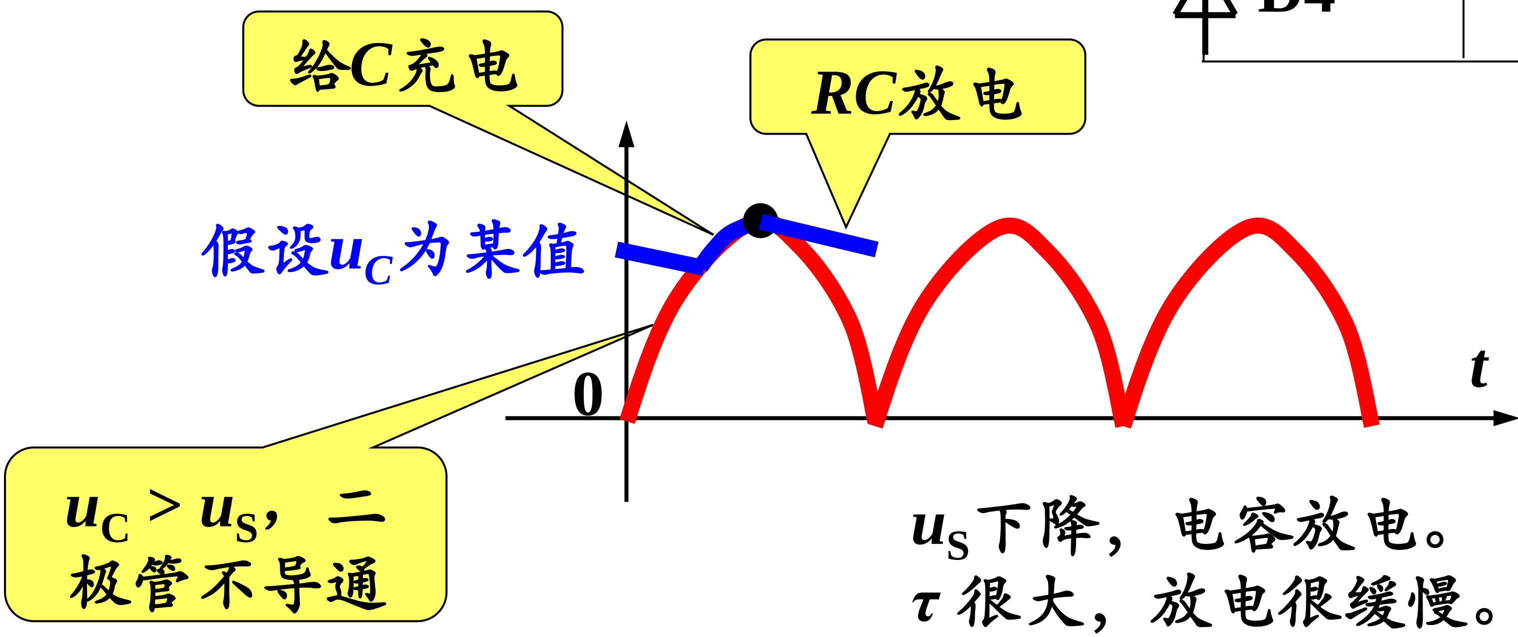
问题：如何改进该直流电压的质量?



电容具有维持电压的能力

$u_S > 0$时　D1和D4同时导通





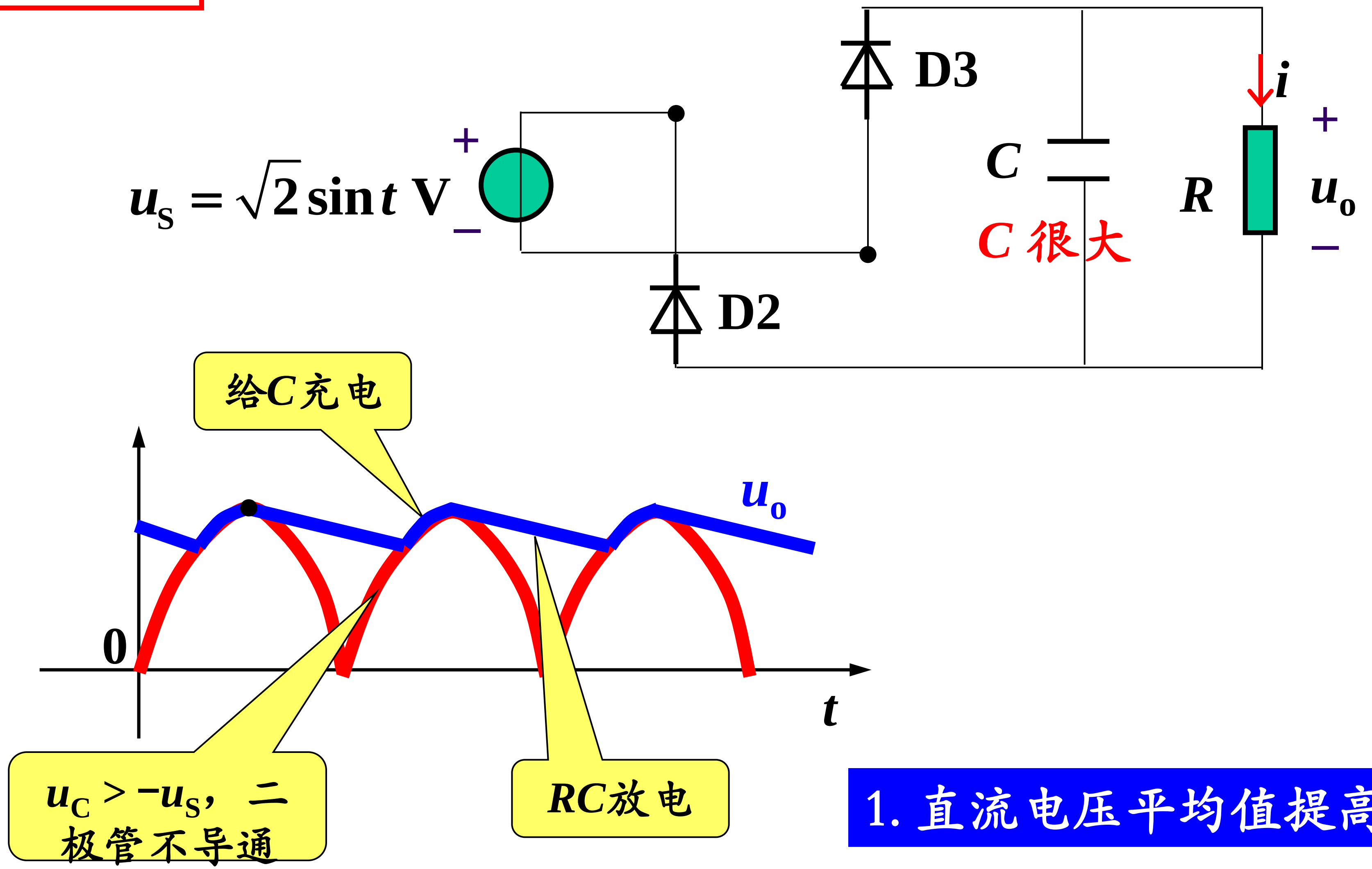
u_S下降，电容放电。

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



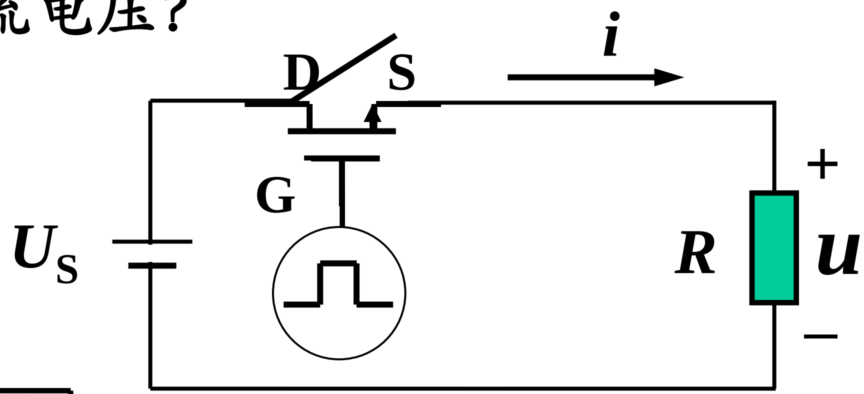
1. 直流电压平均值提高

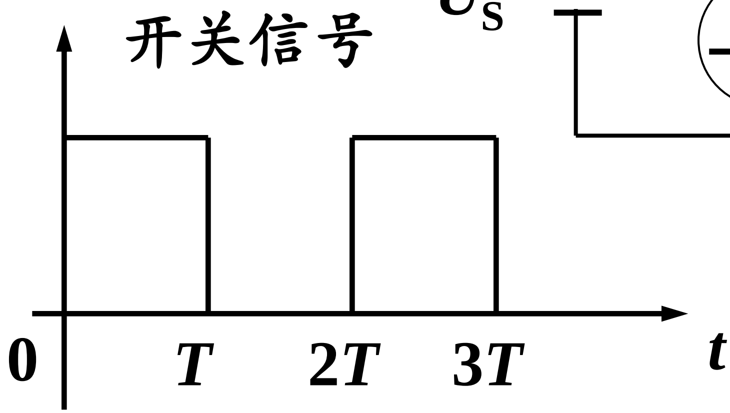
2. 直流电压脉动减小

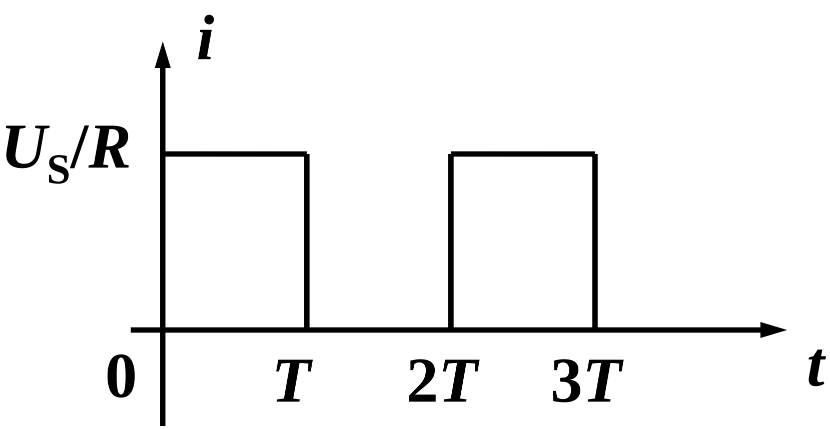
3　DC—DC变换

问题：如何改变直流电压？

方法一



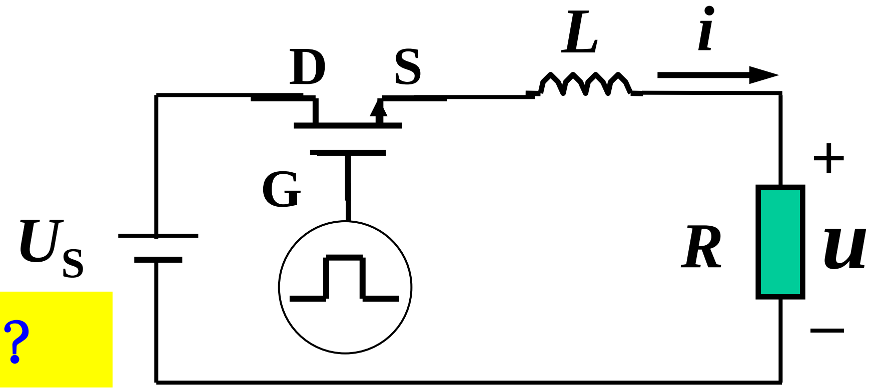




缺点：类似桥式整流，
　　　直流质量较差。

改进思路：
利用电感维持电流的能力。

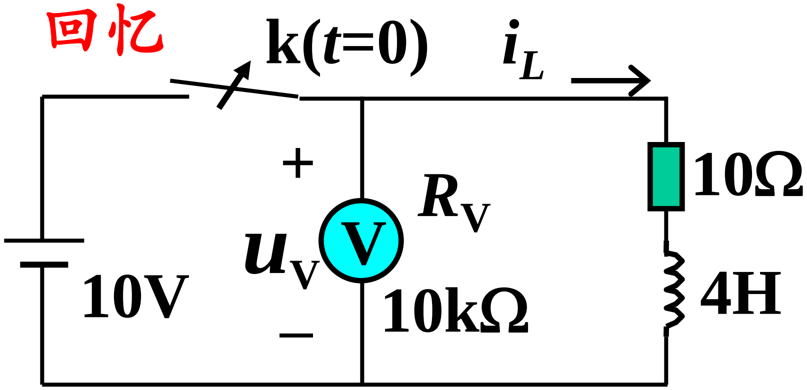
方法二



$$\frac{L}{R} >> T$$

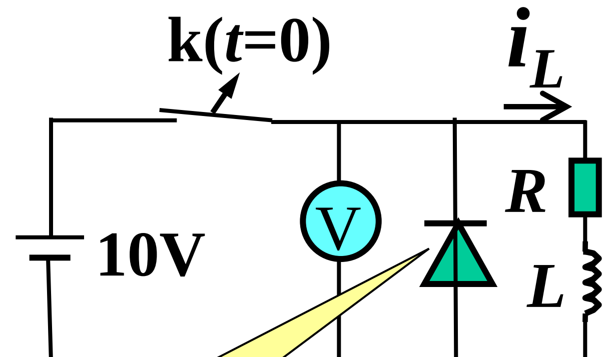
有问题吗?

回忆



t=0 时刻 k 打开，求 u_v。

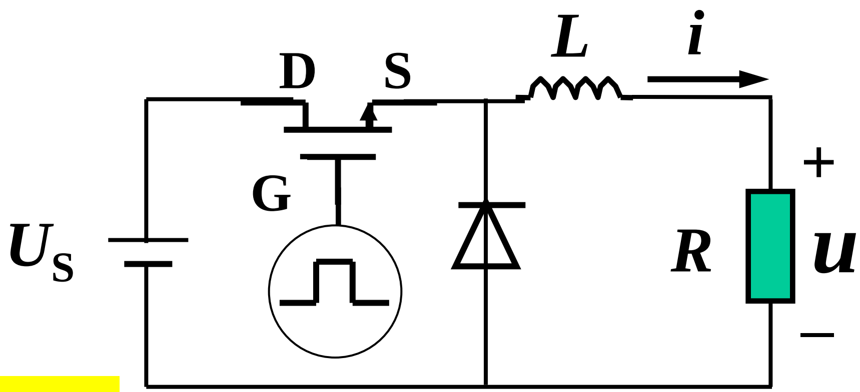
电压表量程为 50V。



续流二极管

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

V 坏了！



这类问题的分析特点：

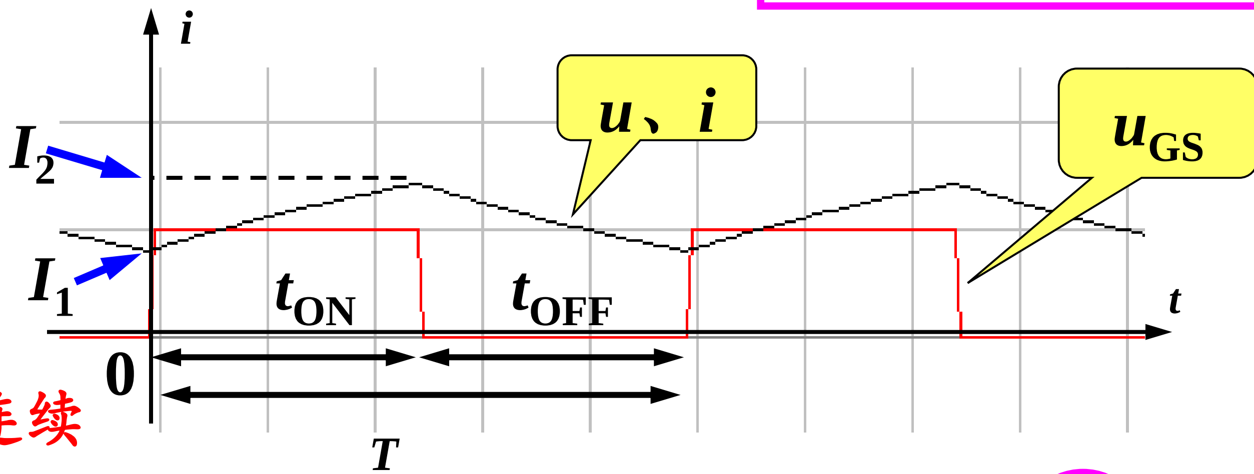
（1）设电路已经进入稳态

（2）画电路图，求电路解

（3）利用边界条件求出

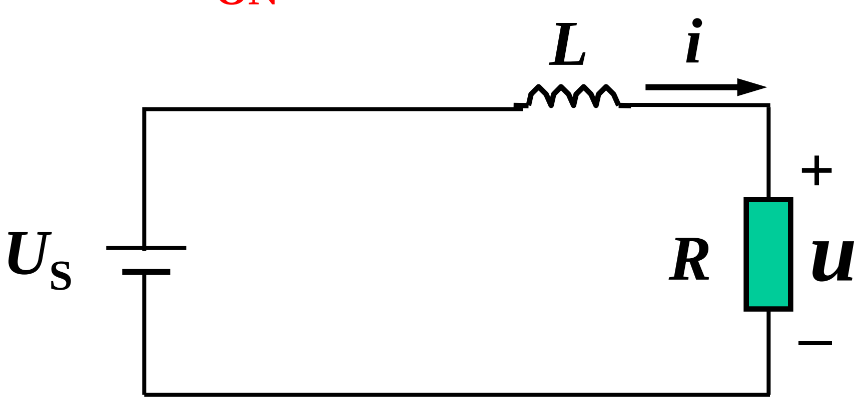
关键点电压/电流

看仿真



设电流连续

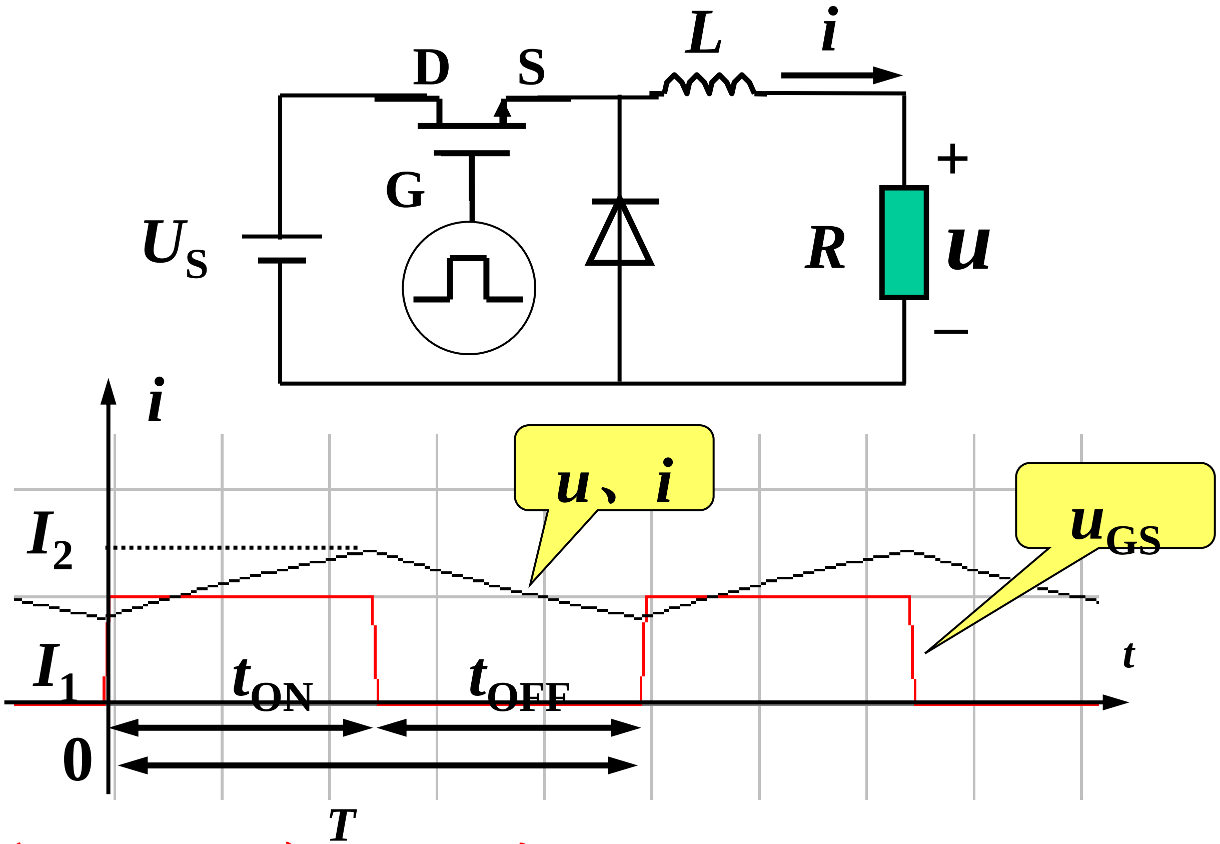
$0 < t < t_{ON}$ 时段等效电路



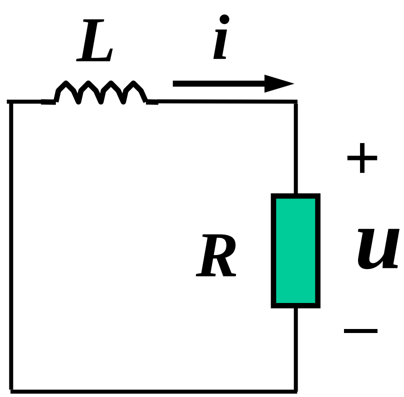
$$i'(0^+) = I_1 \qquad i'(\infty) = \frac{U_S}{R}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

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



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

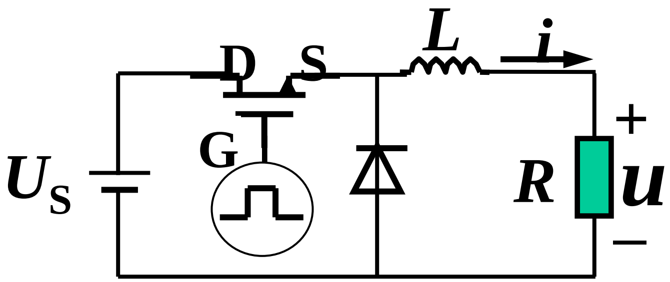


$$i''(t_{ON}^{+}) = I_2$$

$$i''(\infty) = 0$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$i'' = I_2 e^{-\frac{(t-t_{ON})}{\tau}}$$

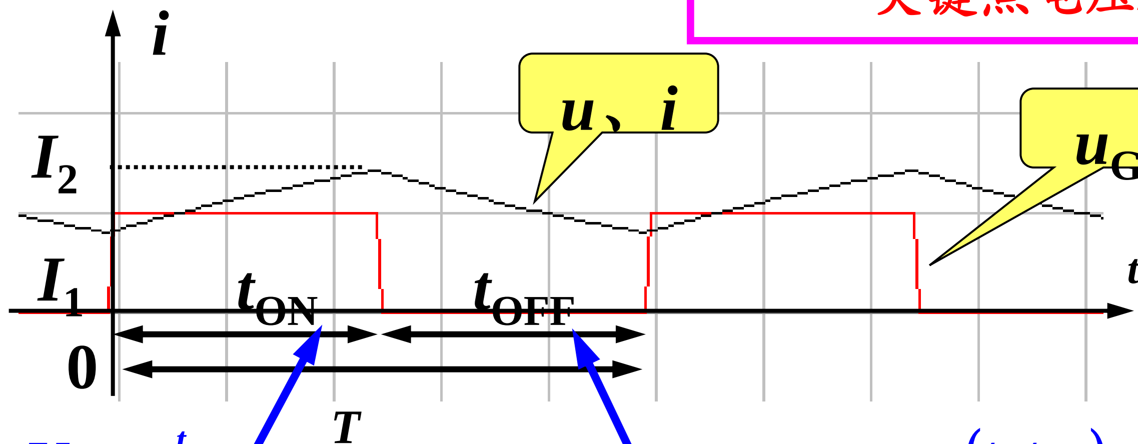


这类问题的分析特点：

（1）设电路已进入稳态

（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



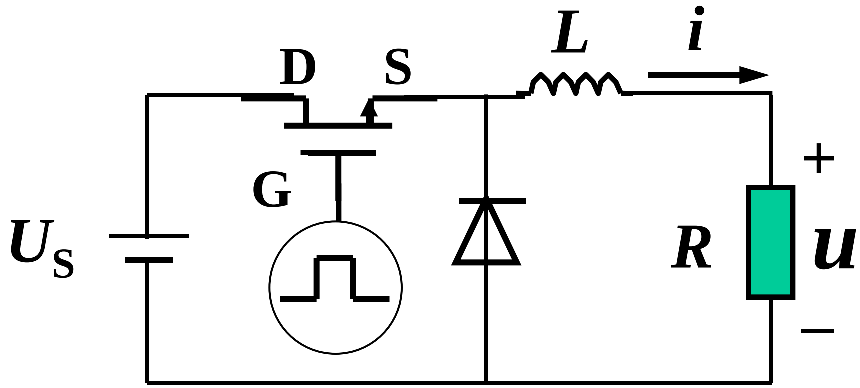
$$i' = \frac{U_S}{R} + \left(I_1 - \frac{U_S}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i'' = I_2 e^{-\frac{(t - t_{ON})}{\tau}}$$

$$\begin{cases} i'(t_{ON}) = I_2 \\ i''(t_{ON} + t_{OFF}) = I_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = \dfrac{U_S}{R}\dfrac{1 - e^{-t_{ON}/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} e^{-\frac{t_{OFF}}{\tau}} \\ I_2 = \dfrac{U_S}{R}\dfrac{1 - e^{-t_{ON}/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} \end{cases}$$

I_{AVG}

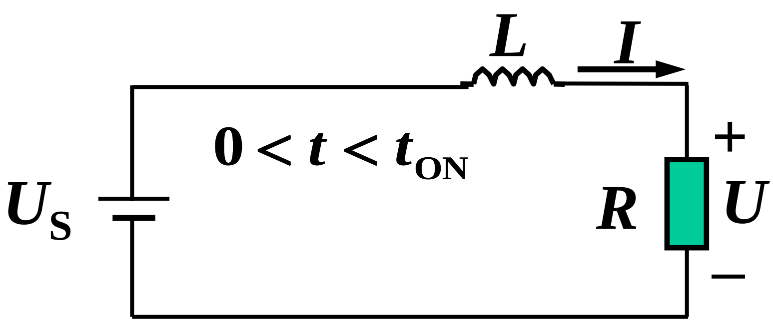
U_{AVG}

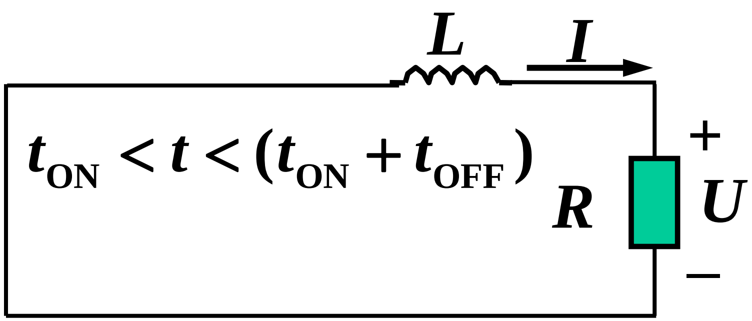


从工程观点来估计U

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

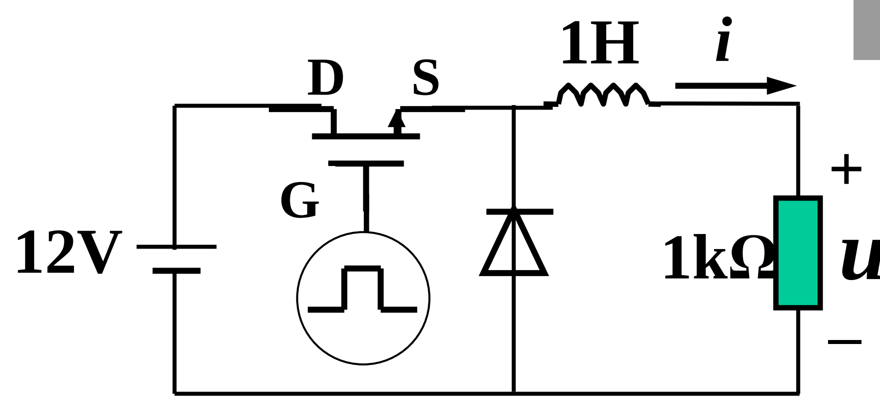
降压斩波器
Buck Converter

单选题 1分

设置

设置

对仿真中的降压斩波器
占空比为_____时，
输出电压为5V



A 0.32

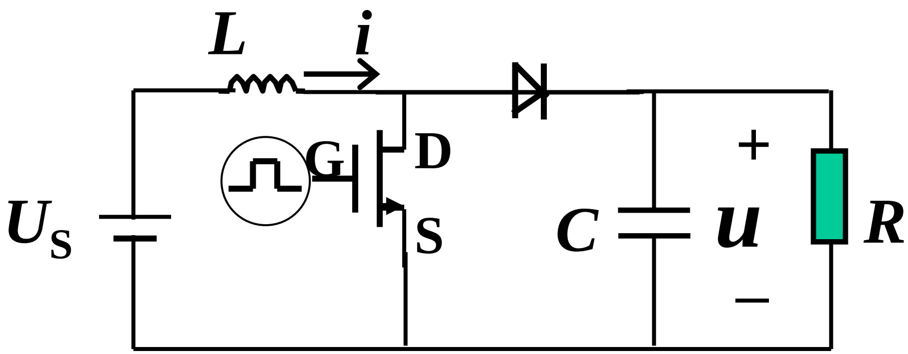
B 0.42

C 0.5

D 1.0

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

提交



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。

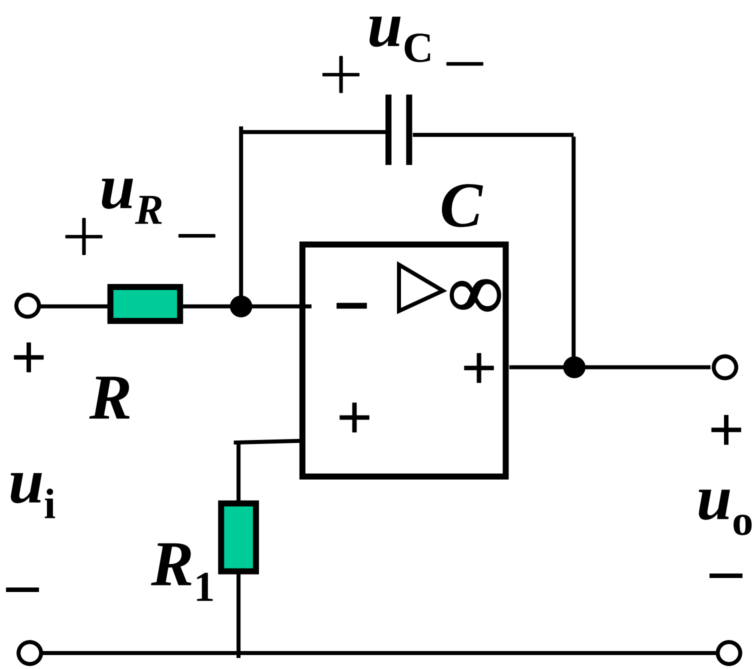
稳态时电感在前半周期(t_{on})吸收的能量等于后半周期(t_{off})发出的能量

该电路实现了怎样的功能？

此处可以有弹幕

4 用Op Amp构成微分器和积分器

（1）积分器



$$\frac{u_R}{R} = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}$$

$$u_o = -u_C$$

$$u_R = u_i$$

$$\frac{u_i}{R} = -C\frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t}$$

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

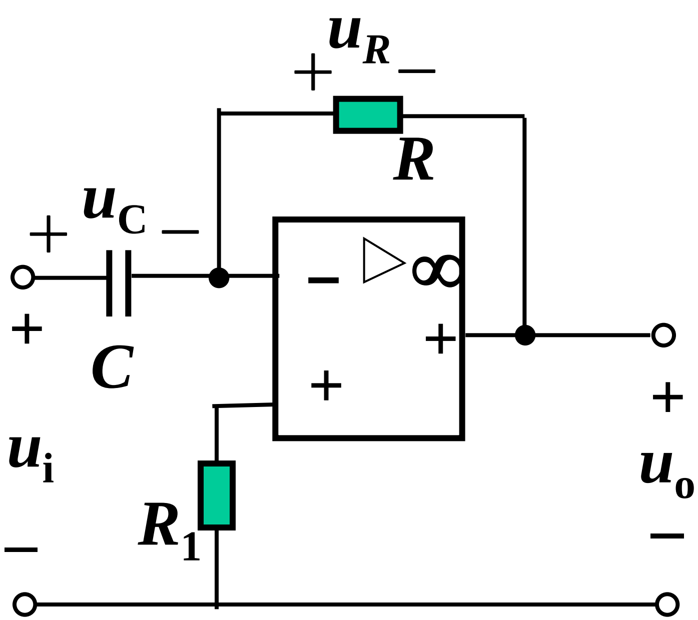
如果$u_i = U_S$（常数），则

$$u_o = -\frac{U_S}{RC}t$$

线性函数

方波 ⟶ 三角波

（2）微分器



$$C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=\frac{u_R}{R}$$

$$u_o=-u_R$$

$$C\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{u_o}{R}$$

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

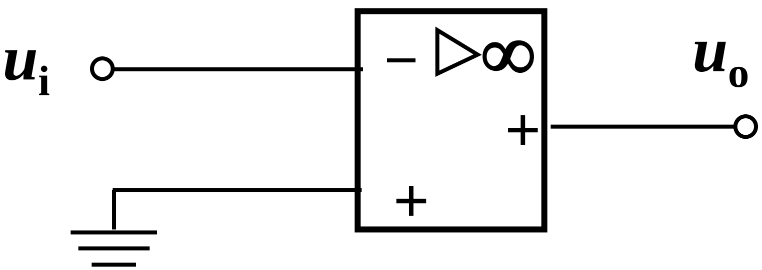
如果$u_i = t\,U_S$（线性函数），则

$$u_o=-RCU_S$$

常数

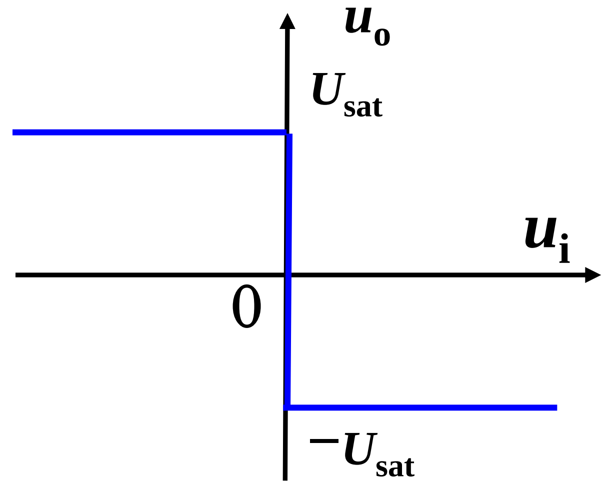
三角波 → 方波

5 Op Amp的滞回比较器
运算放大器正反馈电路的分析



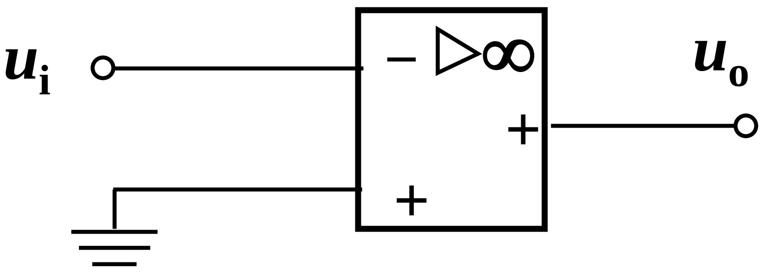
$u_i < 0$ $\qquad$ $u_o = U_{sat}$

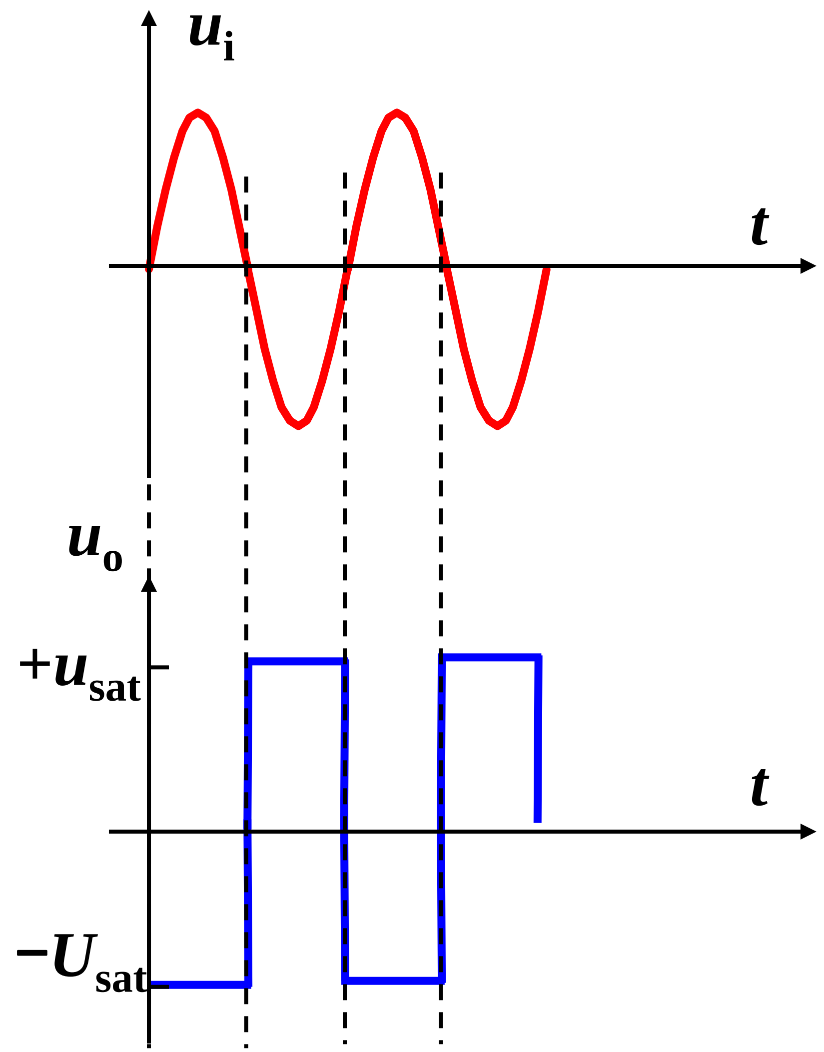
$u_i > 0$ $\qquad$ $u_o = -U_{sat}$



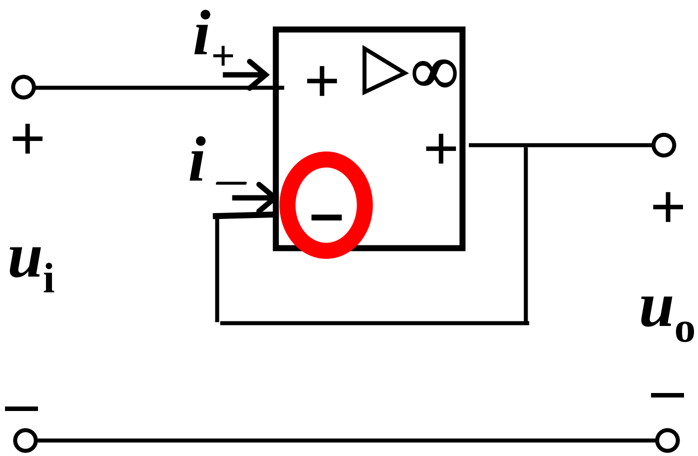
过零电压比较器

利用电压比较器将正弦波变为方波





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）

负反馈

输出端有微小正扰动 → 输入端待放大信号变小

Op Amp

输出端信号变小

扰动被抑制

Op Amp 负反馈电路分析方法：

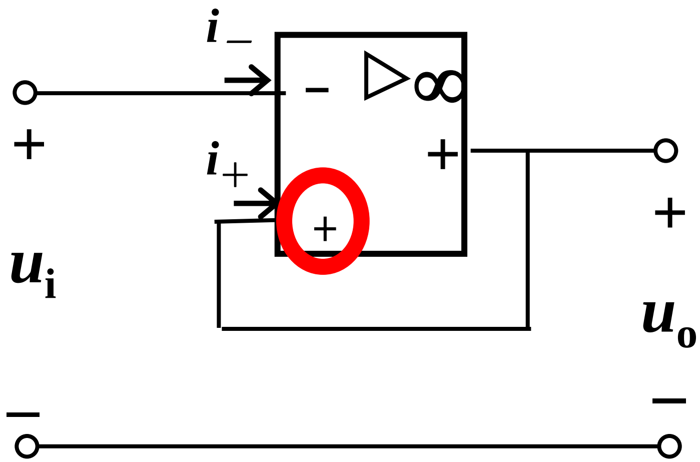
（1）$u_+ = u_-$，虚短（放大倍数∞＋线性工作区）

（2）$i_+ = i_-$，虚断（输入电阻∞）

$\Rightarrow u_o = u_i$

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

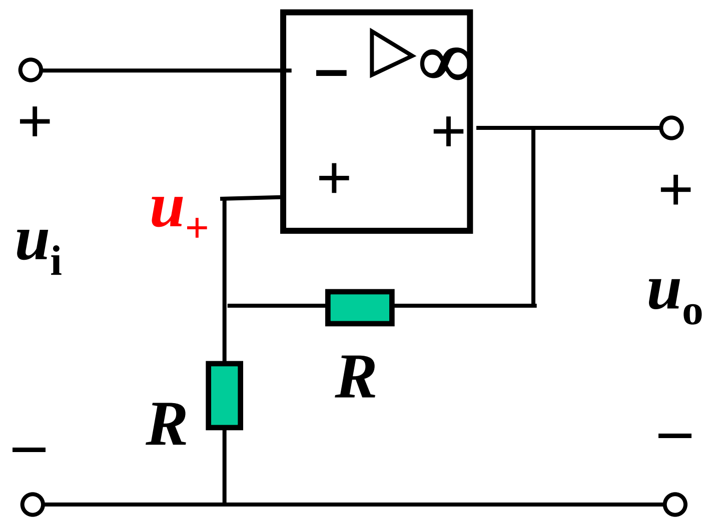
输出端信号变大

扰动被放大

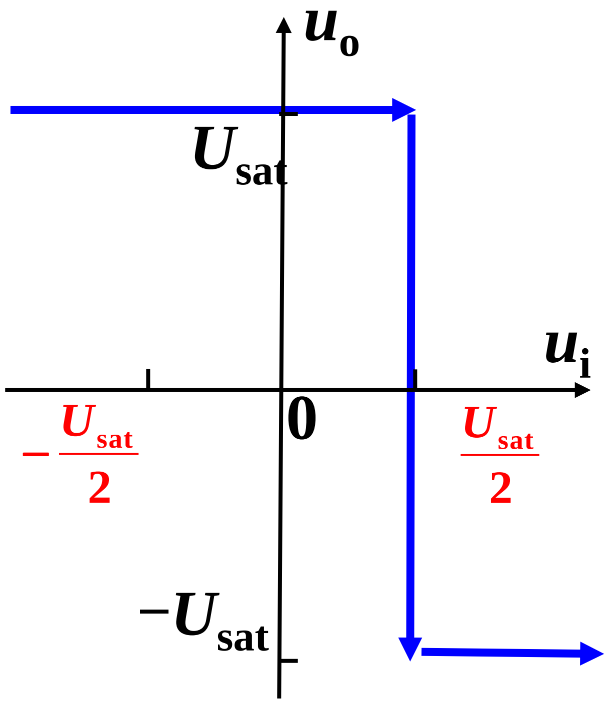
u_0为U_{sat} 或 $-U_{sat}$

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

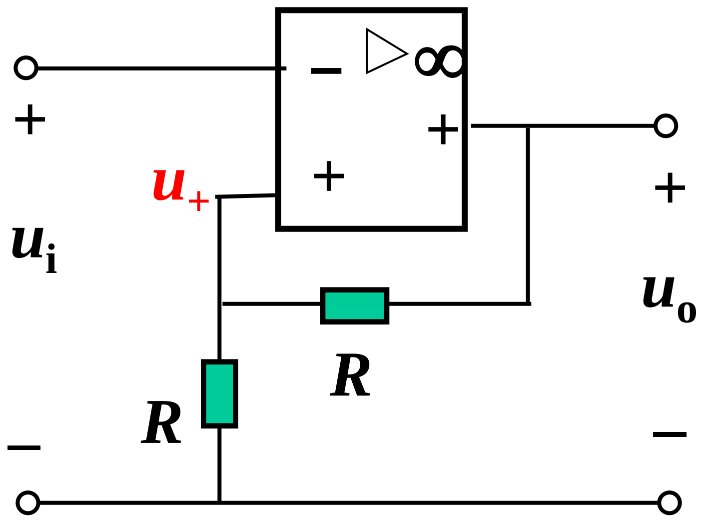


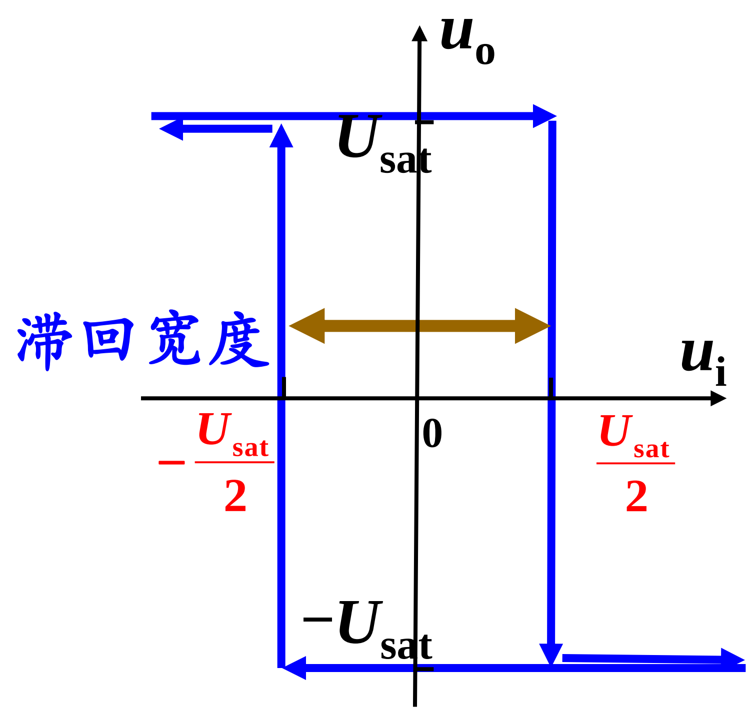
设$u_o=U_{sat}$，则$u_+=0.5U_{sat}$

$u_i< 0.5U_{sat}$ 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)

单选题 1分

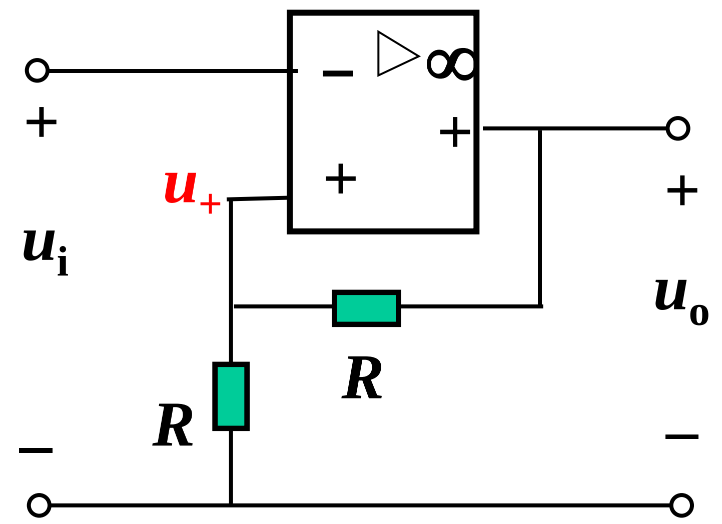
设置

对题图所示滞回比较器 $u_i=0.3U_{sat}$时，$u_o=$______。

A U_{sat}

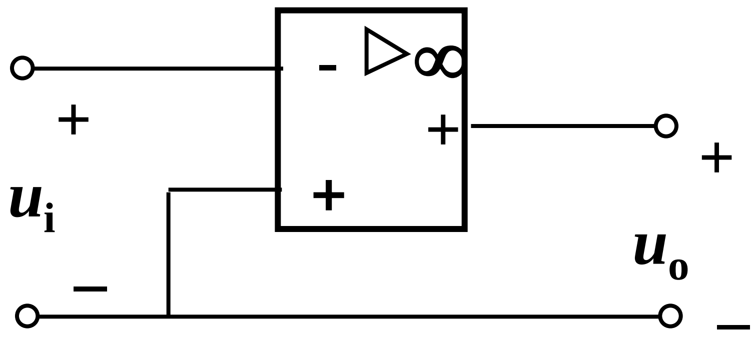
B $-U_{sat}$

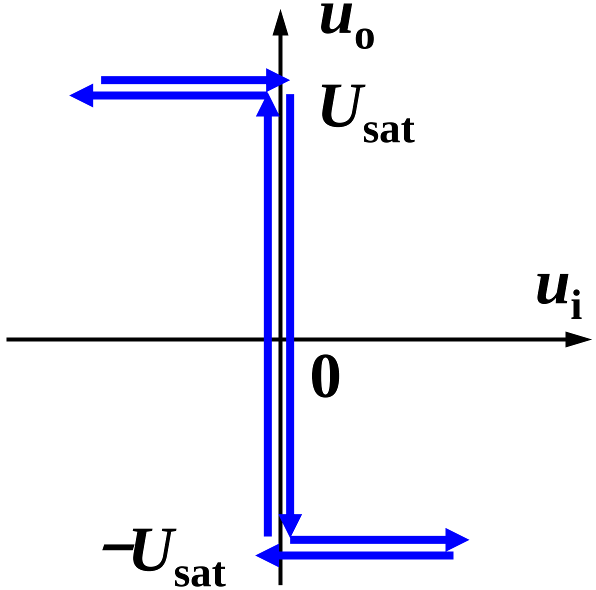
C 不好说

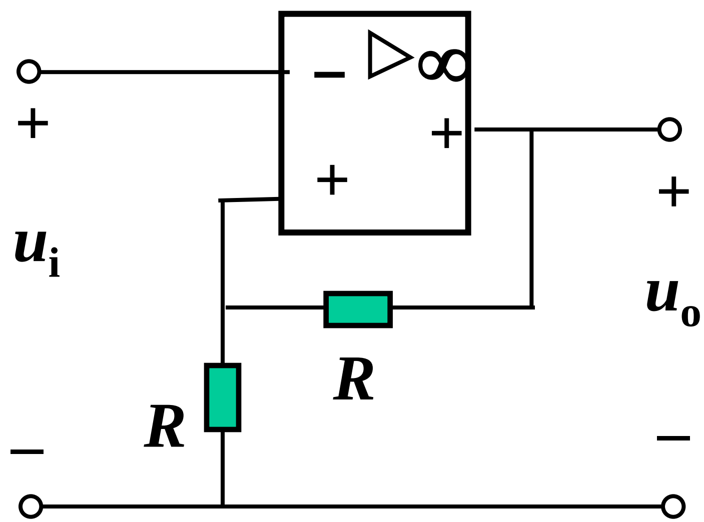


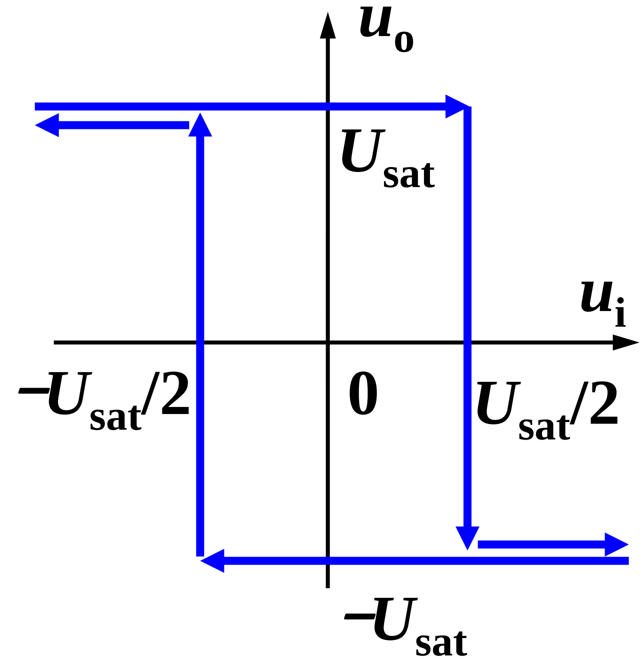
滞回特性可能存在的问题：
给某输入：不唯一对应输出

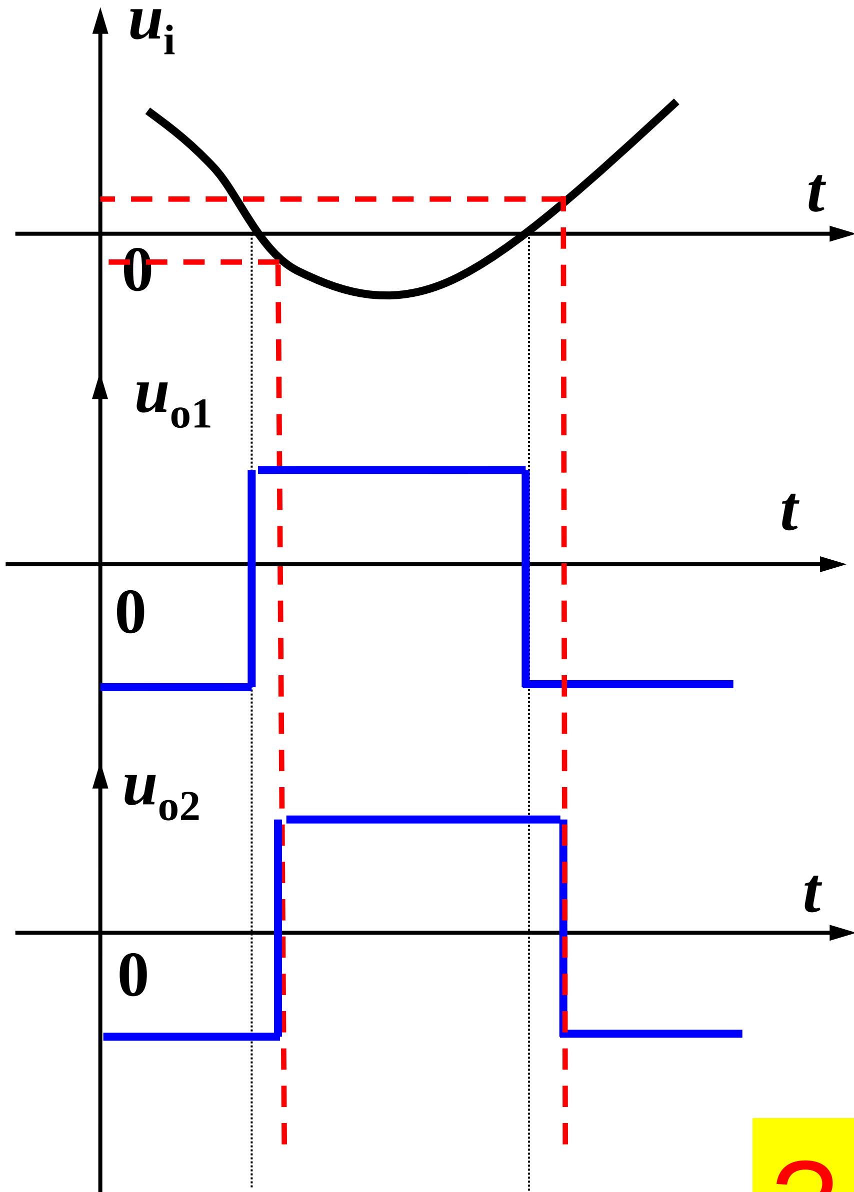
提交

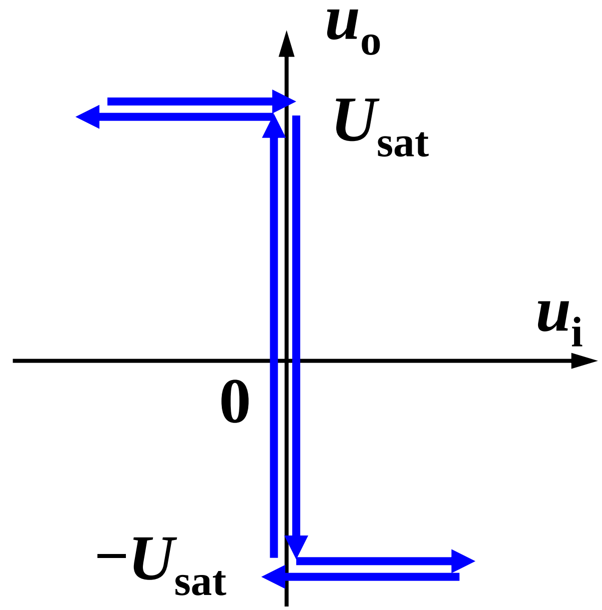

-
▷∞
+
+
+
u_i
−
+
u_o
−

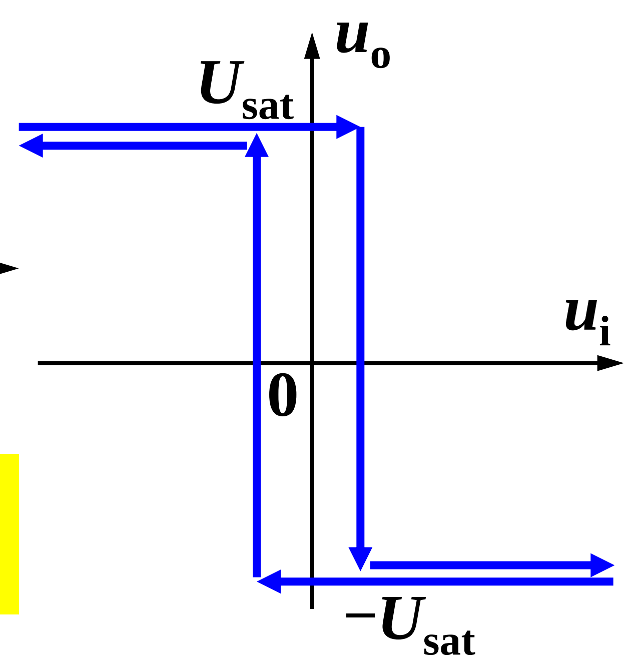

u_o
U_{sat}
u_i
0
$-U_{sat}$


−
▷∞
+
+
+
u_i
+
u_o
R
R
−
−


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

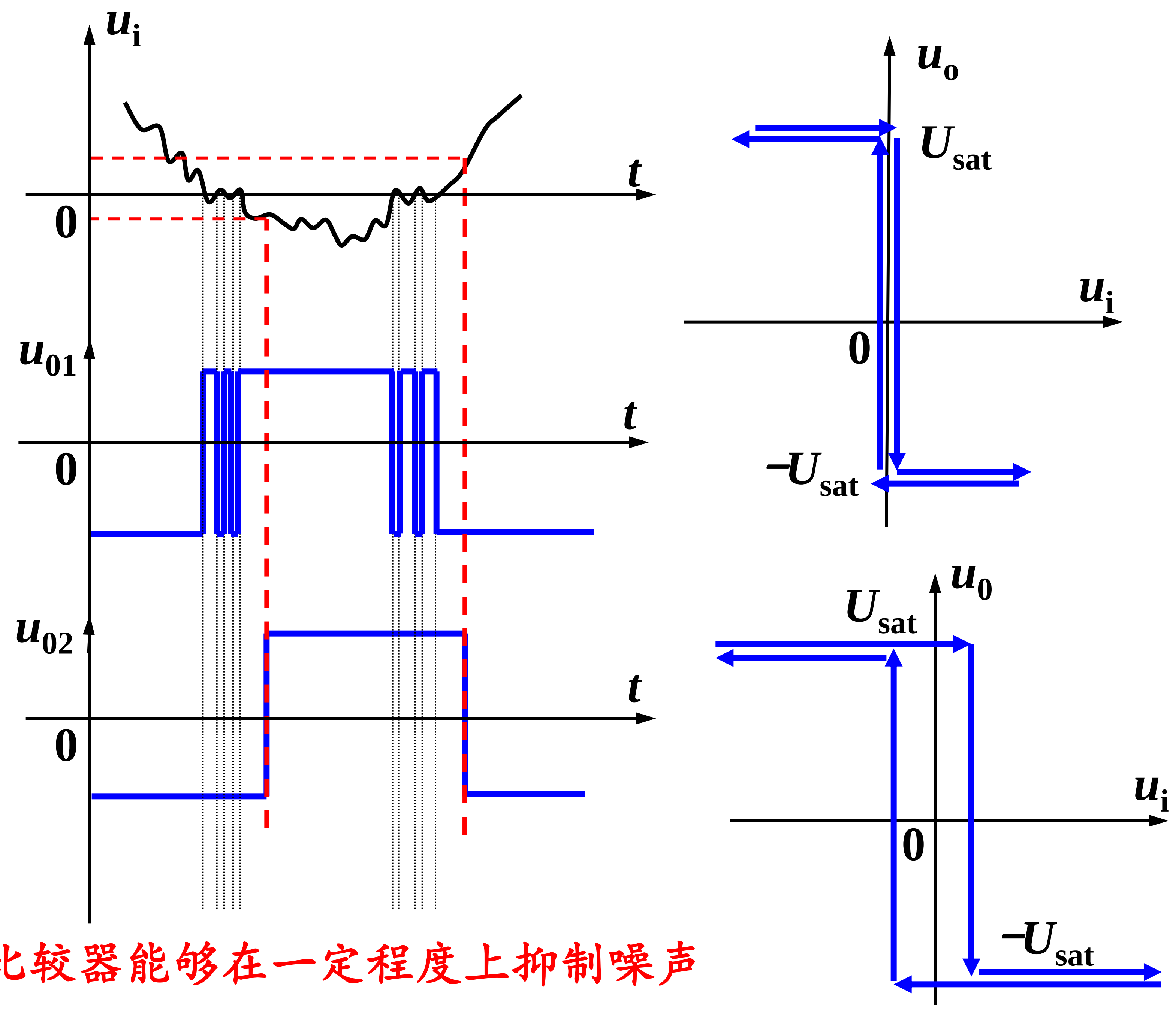






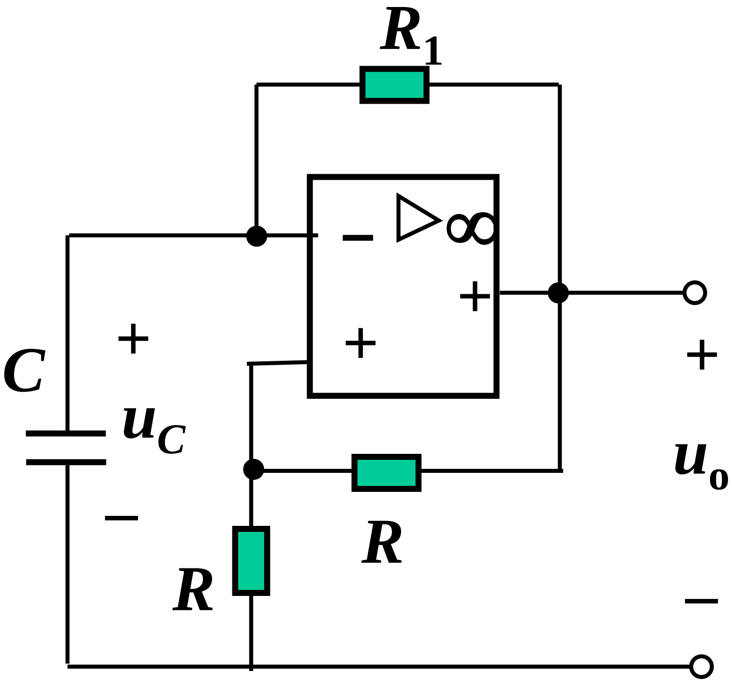
Why Hysteresis ？

?



滞回比较器能够在一定程度上抑制噪声

6 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？

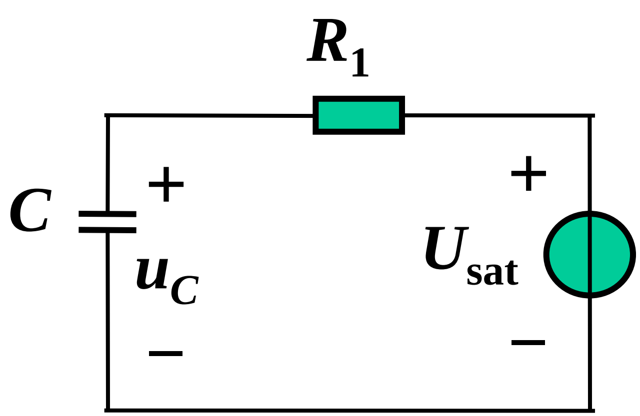
是！L15讲

电路开始工作时存在小扰动。
由于正反馈，u_0为U_{sat}或$-U_{sat}$

设 $u_o=U_{sat}$

则 $u_+=\dfrac{U_{sat}}{2}$

设此时u_C=0，等效电路为



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

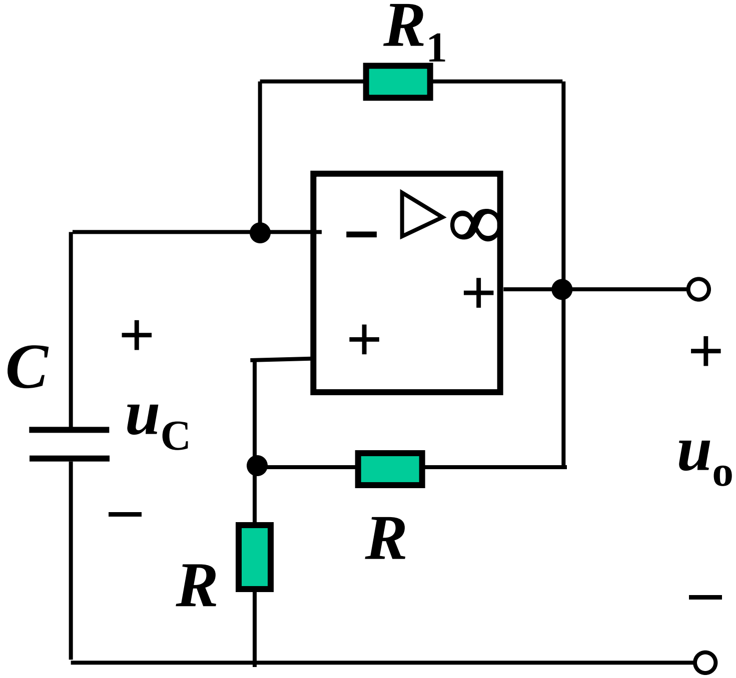
$$u_C(\infty)=U_{sat}$$

$$\tau=R_1C$$

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

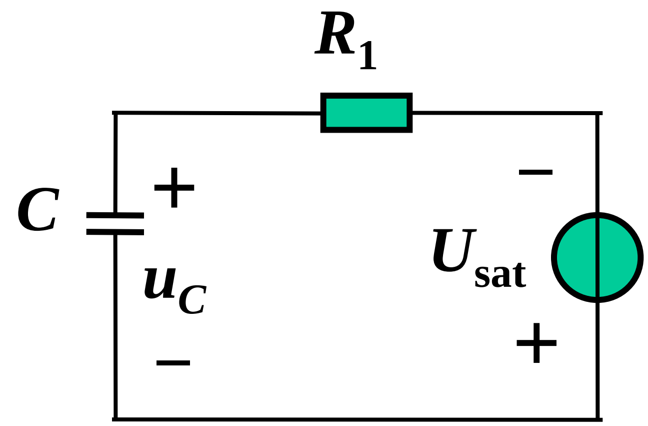
上升至 $u_C=\dfrac{U_{sat}}{2}$ 时

$$u_o=-U_{sat}$$



$u_o = -U_{sat}$

此时$u_C=U_{sat}/2$，等效电路为

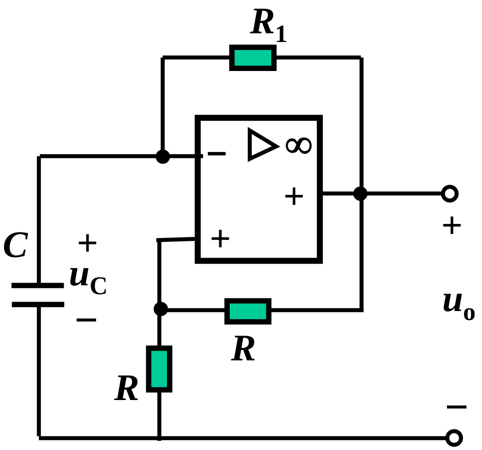


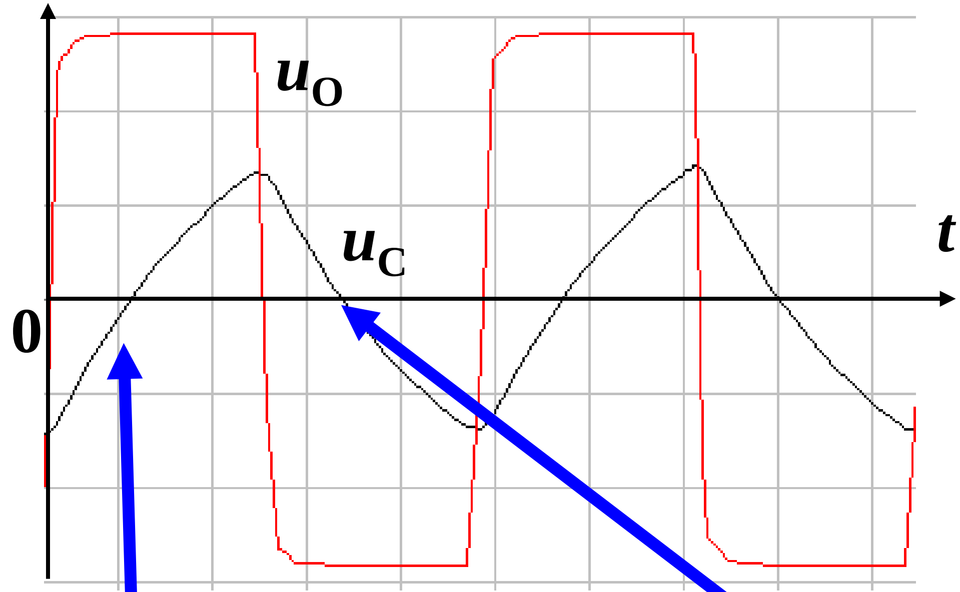
$$u_C(0^+)=\frac{U_{sat}}{2} \qquad u_C(\infty)=-U_{sat} \qquad \tau=R_1C$$

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

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

看仿真





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

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

$t=T/2$时

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

也可以得到

$$T = 2R_1C\ln 3$$

占空比：$D=t_{on}/T$

如何使占空比可调?

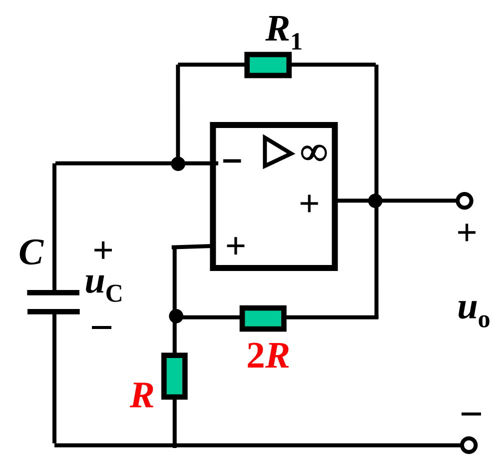
如何产生三角波?

单选题 1分

设置

与前页电路相比，本页电路的特点是

“红包”



A 周期更短

B 周期更长

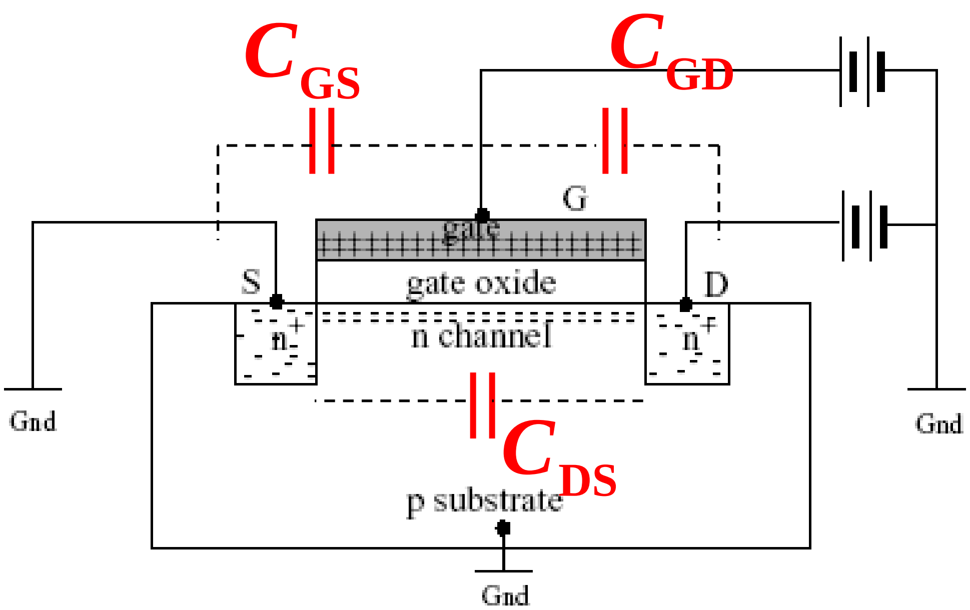
C 输出幅值更高

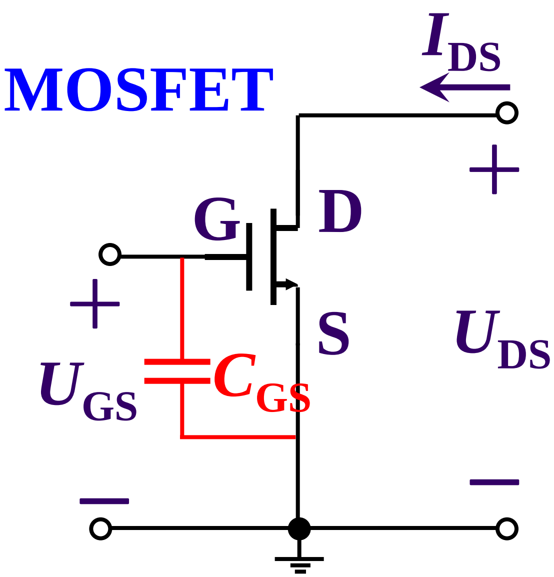
D 输出幅值更低

提交

7　MOSFET门电路的传播延迟

MOSFET的寄生电容

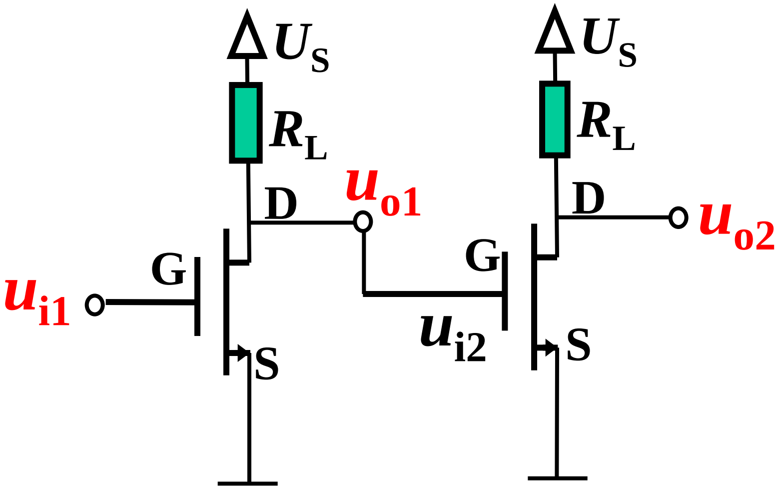


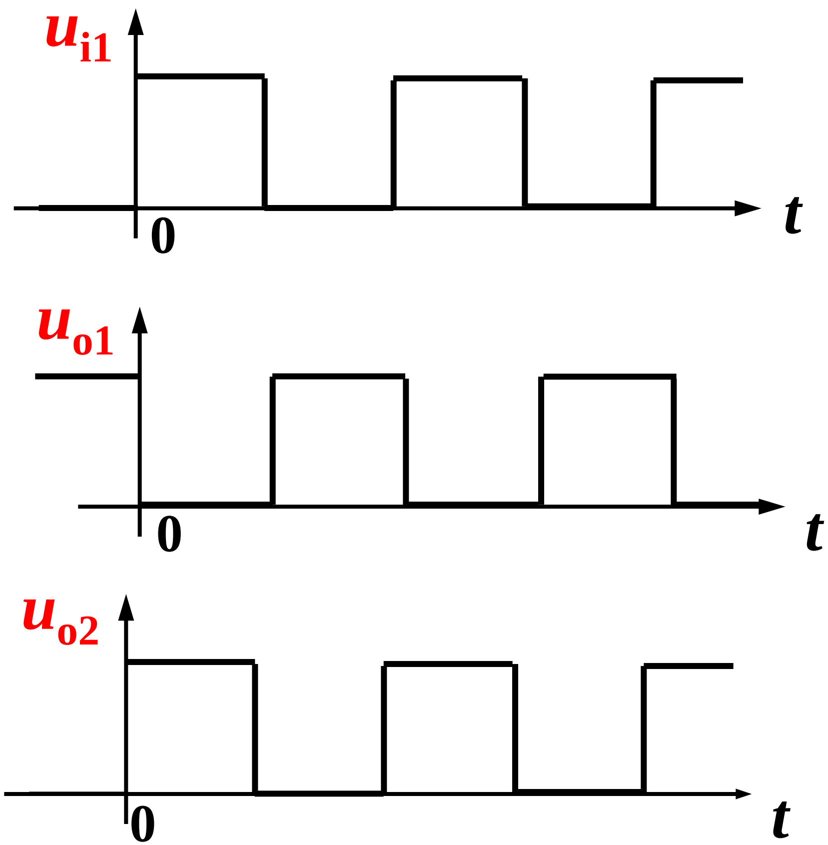


为突出主要矛盾，我们只考虑C_{GS}

缓冲器电路

如果不考虑寄生电容

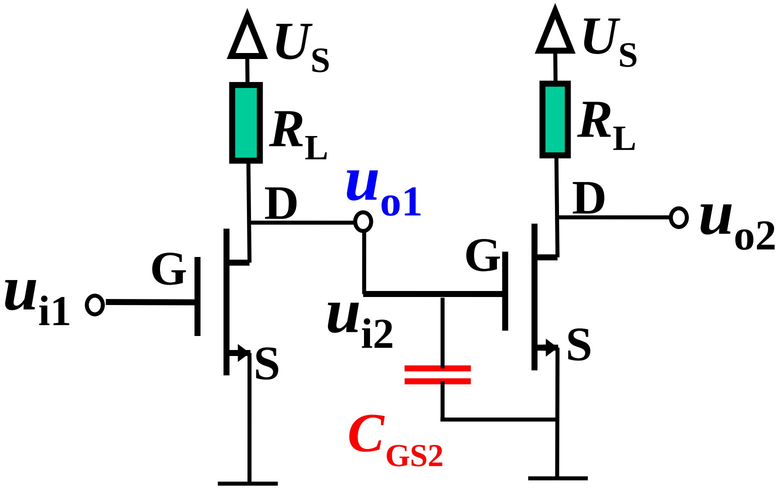


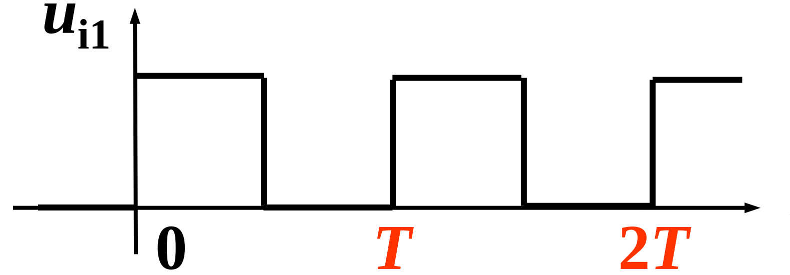


看仿真

接下来只考虑C_{GS2}的影响

考虑寄生电容：输入“0”→“1”

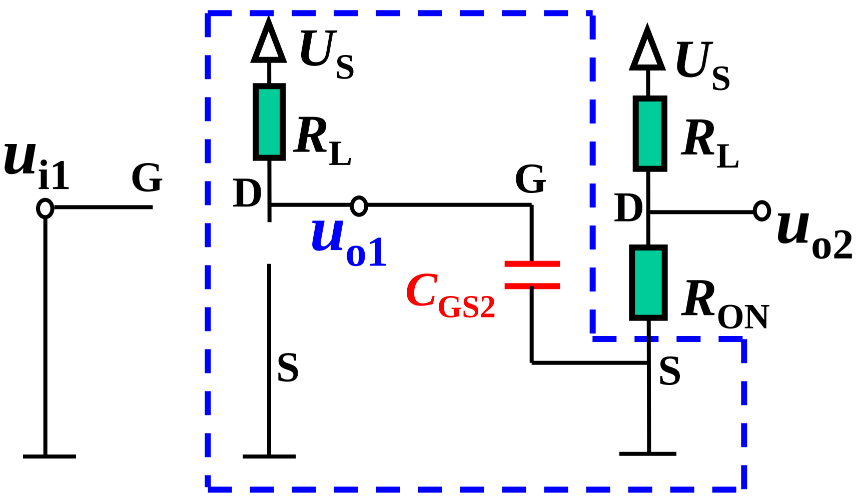


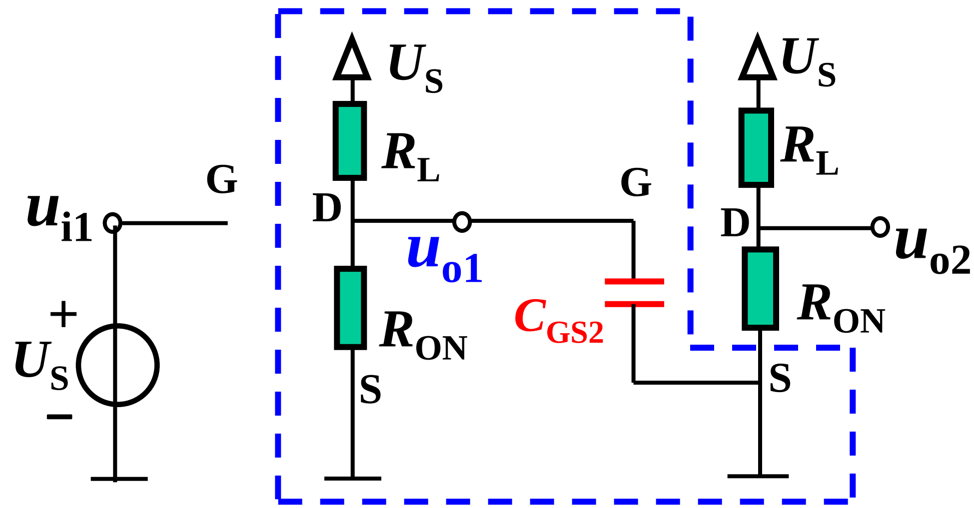


设 $T >> \tau$

u_{i1} 由“0”变为“1”后瞬间，MOSFET(左)由关断变为导通

0^-（换路前）电路

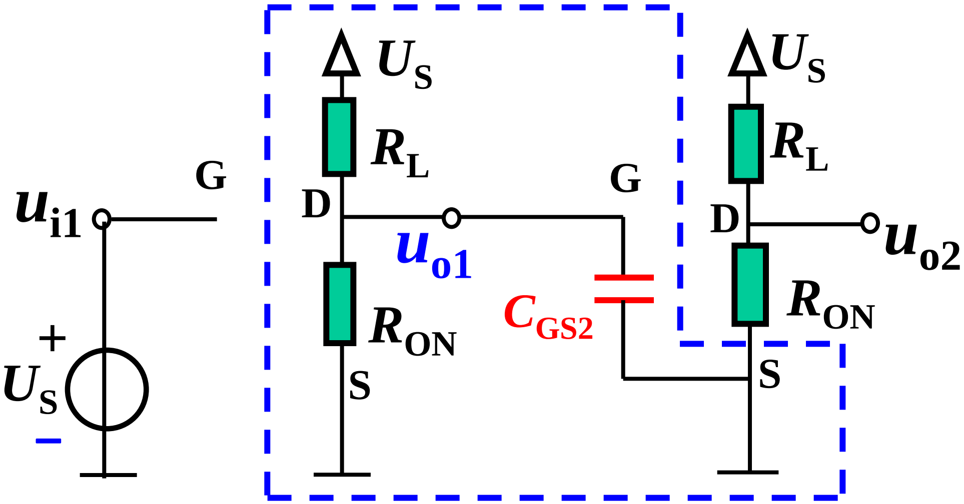




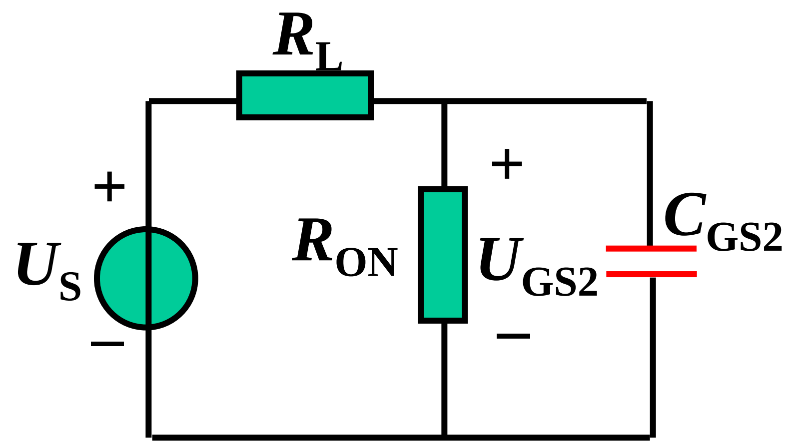
$$u_{GS2}(0^+) = u_{GS2}(0^-) = U_S$$

C_{GS2}有维持电压的性质，导致 u_{o1}不能立刻变为接近0

输入从“0”变为“1”时



0^+时刻等效电路



C_{GS2} 放电至

$u_{GS2} = U_{OL}$ 关断阈值

MOSFET(右)由导通变为关断

$$t_{pd,0\to 1} = C_{GS2}R_{ON}\left(\ln U_S - \ln U_{OL}\right)$$

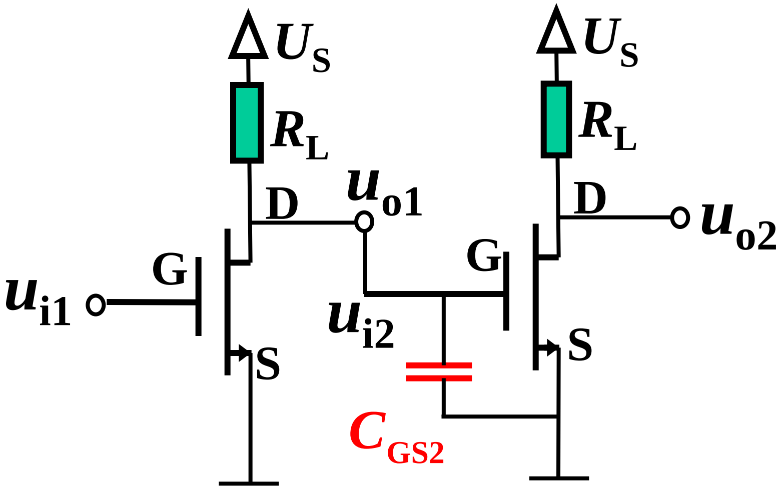
$$u_{GS2}(0^+) = U_S$$

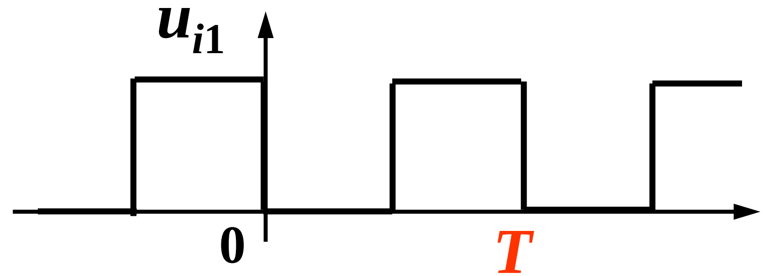
$$u_{GS2}(\infty) = U_S \frac{R_{ON}}{R_{ON} + R_L} \approx 0$$

$$\tau = \left(R_{ON} // R_L\right)C_{GS2} \approx R_{ON}C_{GS2}$$

$$u_{GS2}(t) = U_S e^{-t/R_{ON}C_{GS2}}$$

考虑寄生电容：输入“1”→“0”

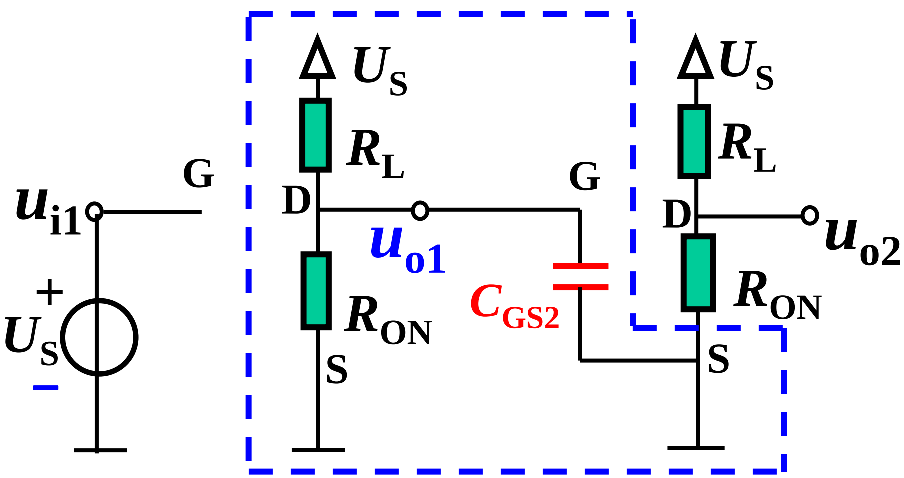


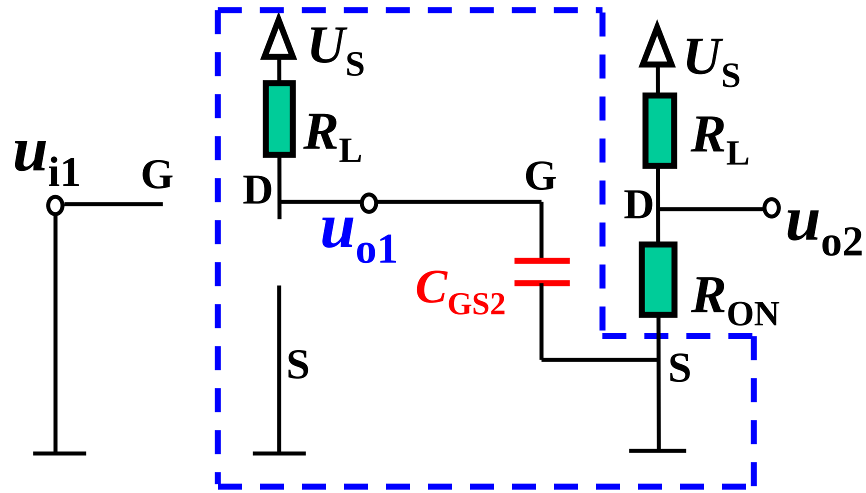


设 $T >> \tau$

u_{i1} 由“1”变为“0”后瞬间，MOSFET(左)由导通变为关断。

0^-换路前电路

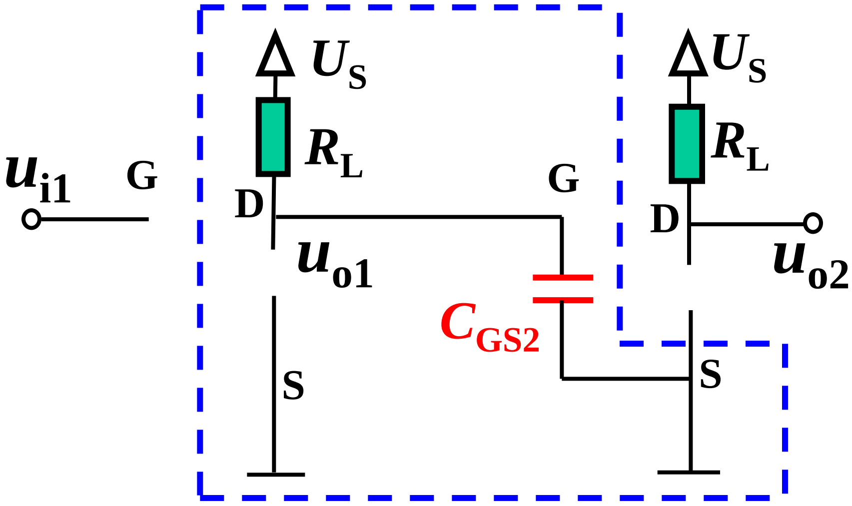




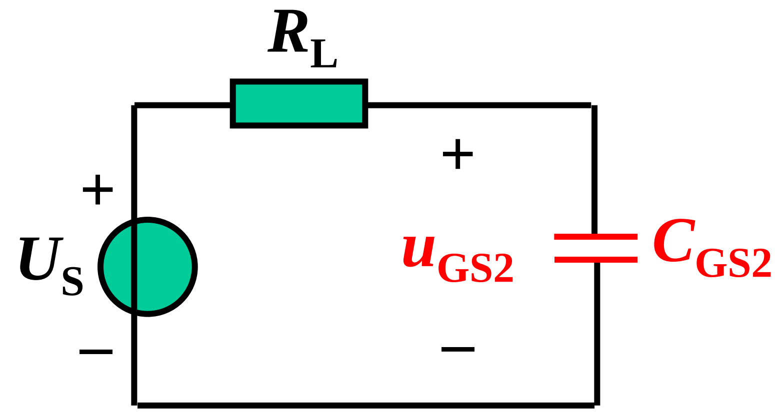
$$u_{GS2}(0^+) = u_{GS2}(0^-) \approx 0$$

C_{GS2}有维持电压的性质，导致u_{o1}不能立刻变为接近5V

输入从“1”变为“0”时



0+时刻等效电路



$$u_{GS2}(0^+) \approx 0$$

$$u_{GS2}(\infty) = U_S$$

$$\tau = R_L C_{GS2}$$

$$u_{GS2}(t) = U_S\left(1 - e^{-t/R_L C_{GS2}}\right)$$

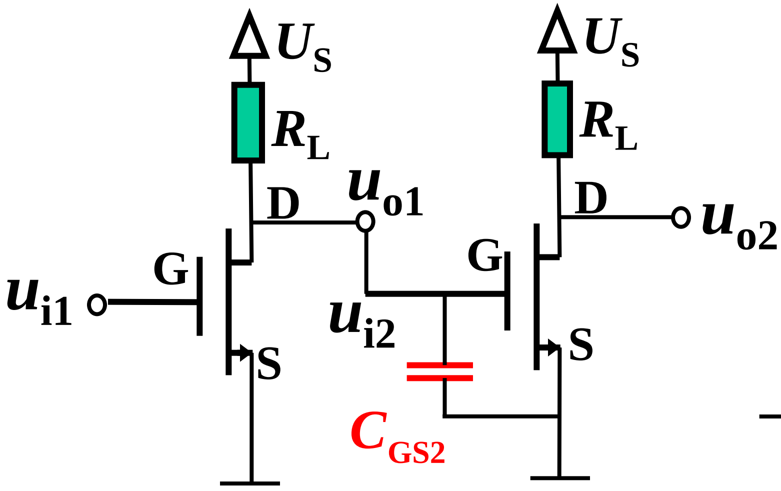
C_{GS2} 充电至

$u_{GS2} = U_{OH}$

导通阈值

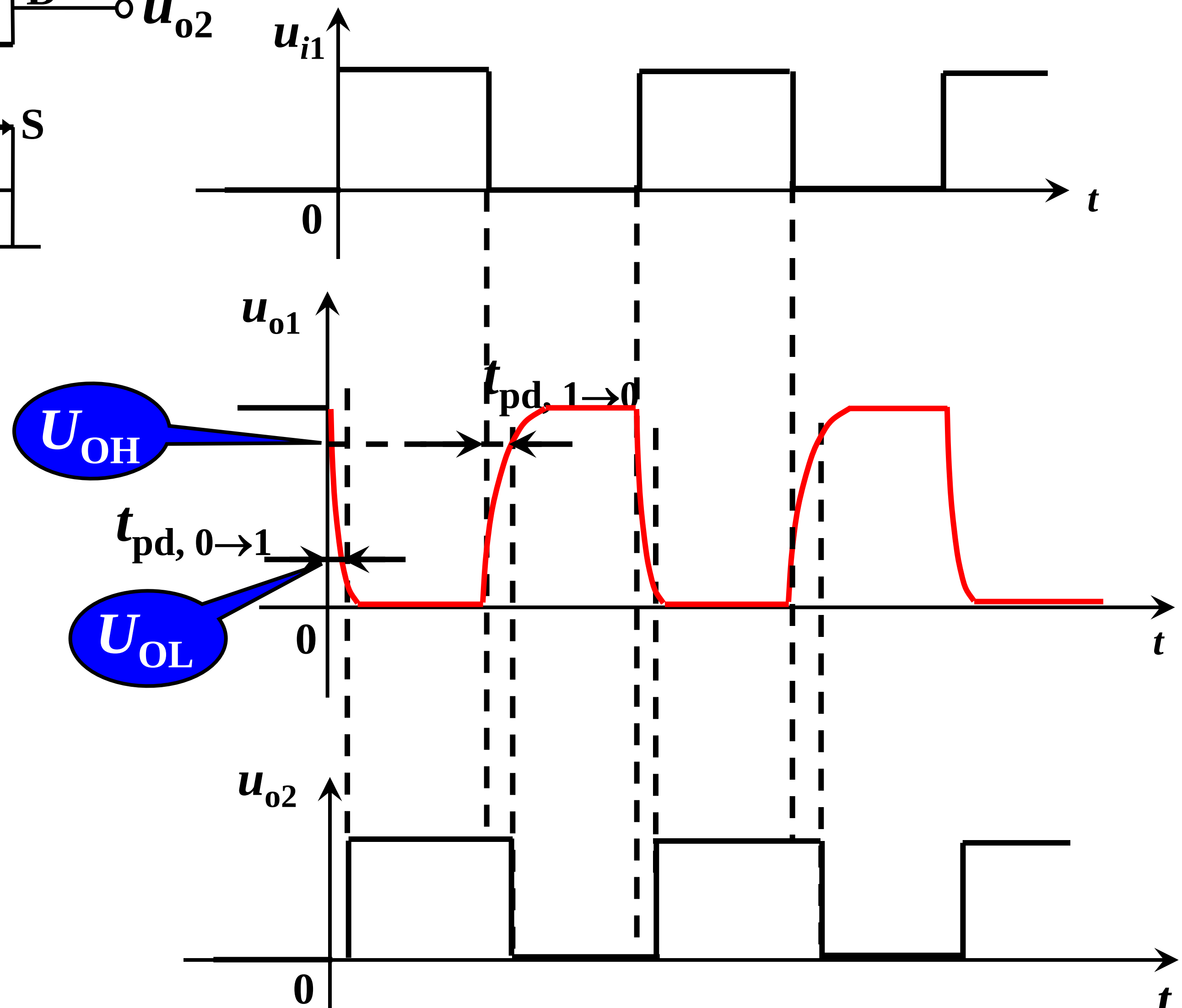
MOSFET(右)由关断变为导通

$$t_{pd,1\to 0} = C_{GS2} R_L \left(\ln U_S - \ln\left(U_S - U_{OH}\right)\right)$$



$$t_{pd,0\to1} = R_{ON}C_{GS2}\left(\ln U_S - \ln U_{OL}\right)$$

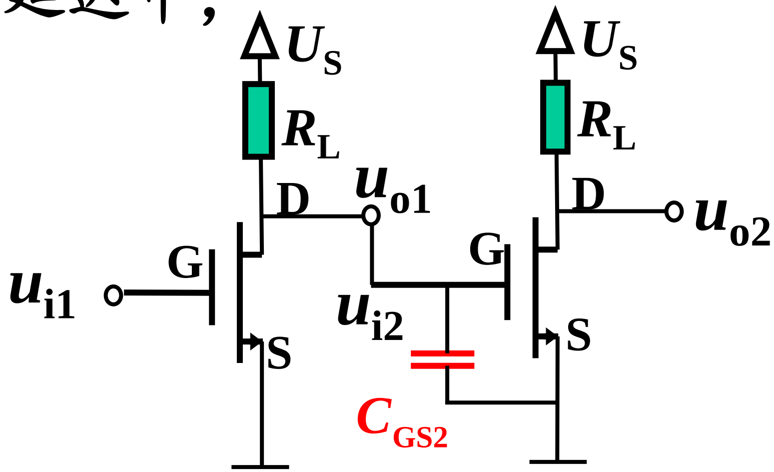
$$t_{pd,1\to0} = R_L C_{GS2}\left(\ln U_S - \ln\left(U_S - U_{OH}\right)\right)$$

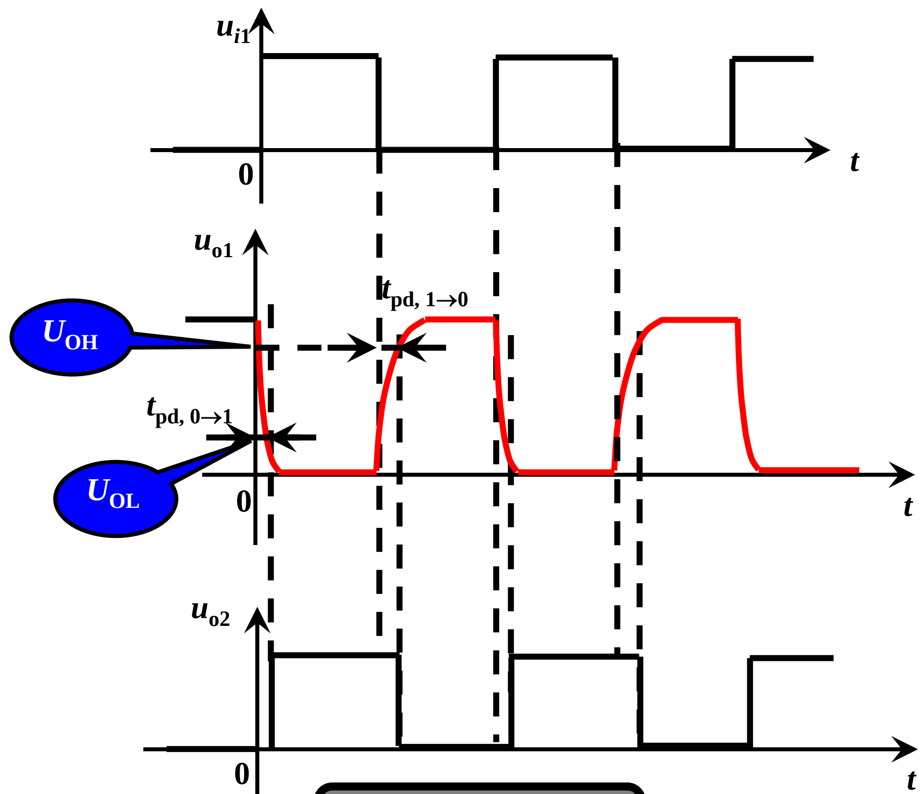


单选题 1分

设置

两个传输延迟中，哪个更长

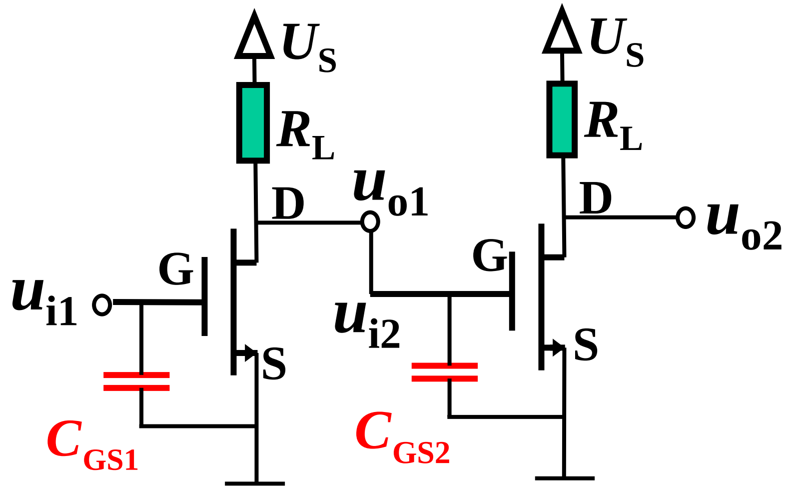




A $t_{pd,0\to1} < t_{pd,1\to0}$

B $t_{pd,0\to1} > t_{pd,1\to0}$

提交



课后思考：考虑C_{GS1}会怎么样？