第3次应用介绍课
——一阶动态电路的应用

本讲练习题需要用到
计算器，
也许要用点纸笔

1. 脉冲序列作用下的*RC*电路(已预习)
2. 主动：能量变换
   - AC－DC　　电容+二极管
   - DC－DC　　电感+二极管
3. 主动：信号处理
   - 积分器和微分器　　负反馈运放(线性段)
   - 滞回比较器　　正反馈运放(非线性段)
   - 脉冲序列发生器　　正反馈运放(非线性段)
4. 被动：MOSFET的传播延迟(课后学习)

本讲重难点

- 脉冲激励下动态电路的稳态分析
- 正反馈理想运放电路的分析

复习

直流激励下一阶动态电路的直觉解法(三要素法)

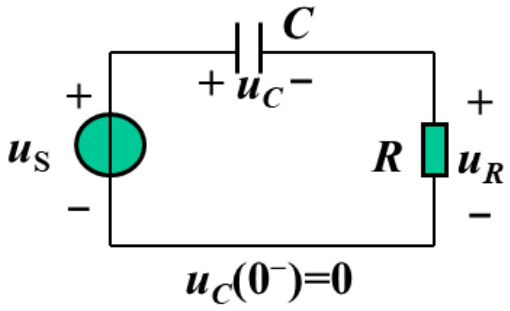
$$f(t)=f(\infty)+[f(0^+)-f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t>0$$

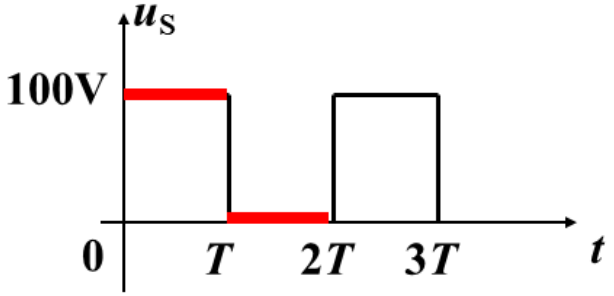
RC电路 $\quad \tau=R_{eq}C$

RL电路 $\quad \tau=\dfrac{L}{R_{eq}}$

1　复习：脉冲序列作用下的RC电路

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





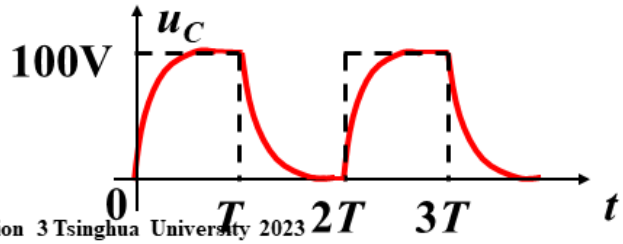
（1）　$T >> \tau$

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

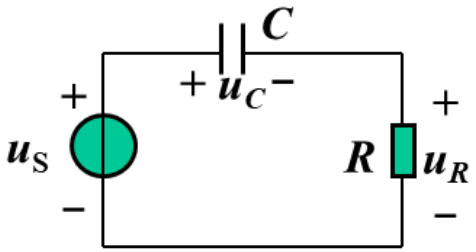
$$u_C = 100(1-e^{-\frac{t}{RC}})\ \text{V}$$

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

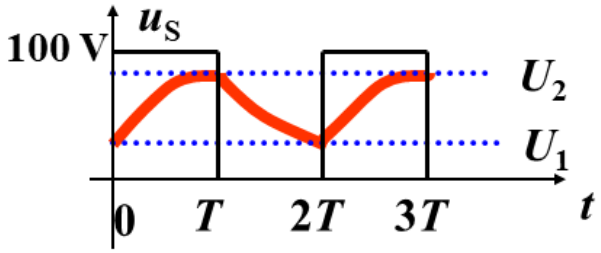
$$u_C = 100e^{-\frac{t-T}{RC}}\ \text{V}$$



（2） T 与 τ 接近



稳态解



$u_C(0^+) = U_1$

$u_C(\infty) =$

弹幕

周期开始和结束两个
时刻支路量数值相同

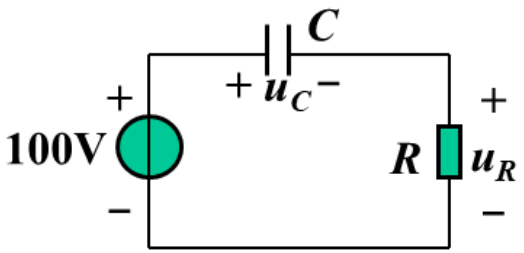
这类问题(周期激励下一阶电路)的分析特点:

（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

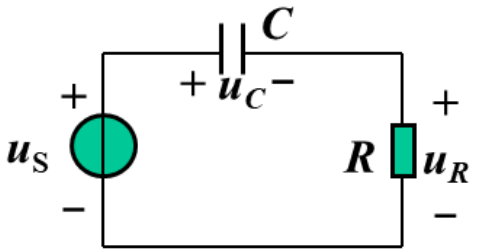
（3）利用边界条件求出关键点电压/电流

$0 < t < T$ 等效电路图

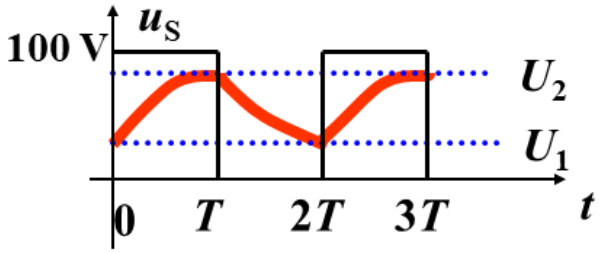


$$f(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

（2） T 与 τ 接近



稳态解



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

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

$$\tau = RC$$

周期开始和结束两个时刻支路量数值相同

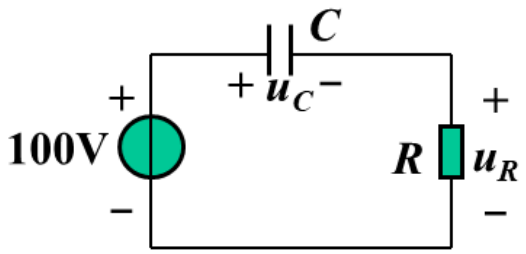
这类问题(周期激励下一阶)的分析特点:

（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

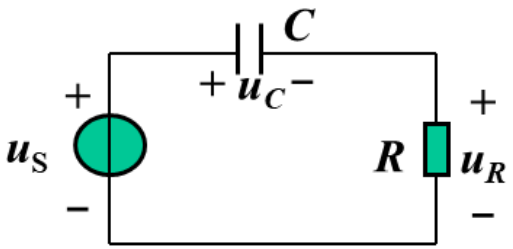
（3）利用边界条件求出关键点电压/电流

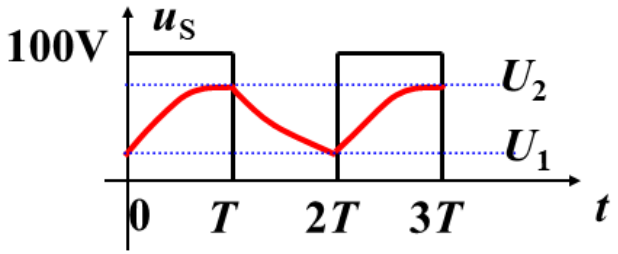
$0 < t < T$ 等效电路图



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

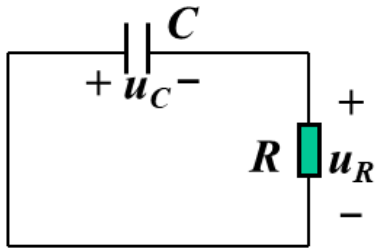
$$f(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)]\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}$$





$T < t < 2T$

等效电路图

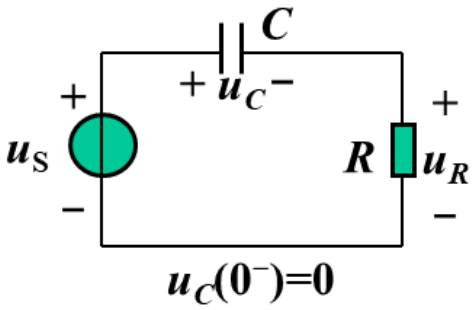


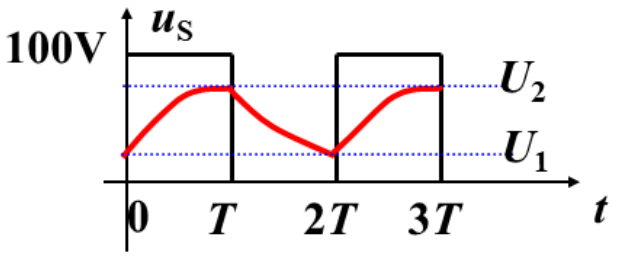
$$u_C(T^+) = U_2$$

$$u_C(\infty) = 0 \quad \Rightarrow \quad u_C = U_2 e^{-\frac{t-T}{RC}} \text{ V}$$

$$\tau = RC$$

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





这类问题的分析特点：

（1）电路已经进入稳态

（2）求不同状态下的电路

（3）用边界条件求出关键点

$0 < t < T$

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

$T < t < 2T$

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

$t = T$

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

$t = 2T$

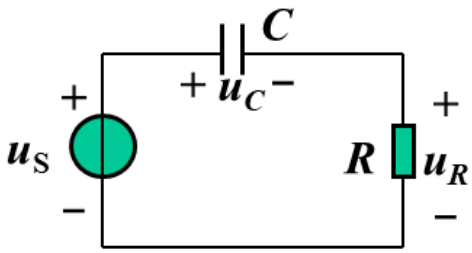
$$u_C = U_1 = U_2\mathrm{e}^{-\frac{2T-T}{RC}}$$

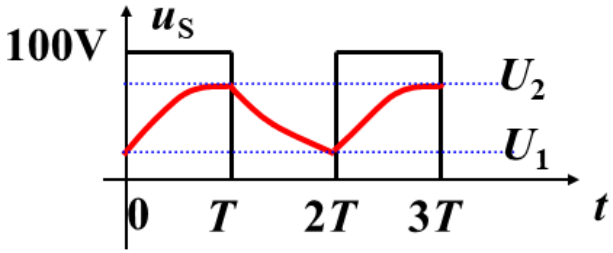
$$U_1 = \frac{100\mathrm{e}^{-\frac{T}{RC}}}{1+\mathrm{e}^{-\frac{T}{RC}}} \qquad U_2 = \frac{100}{1+\mathrm{e}^{-\frac{T}{RC}}}$$

单选题 1分

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 $T<\ln(1.2)RC$

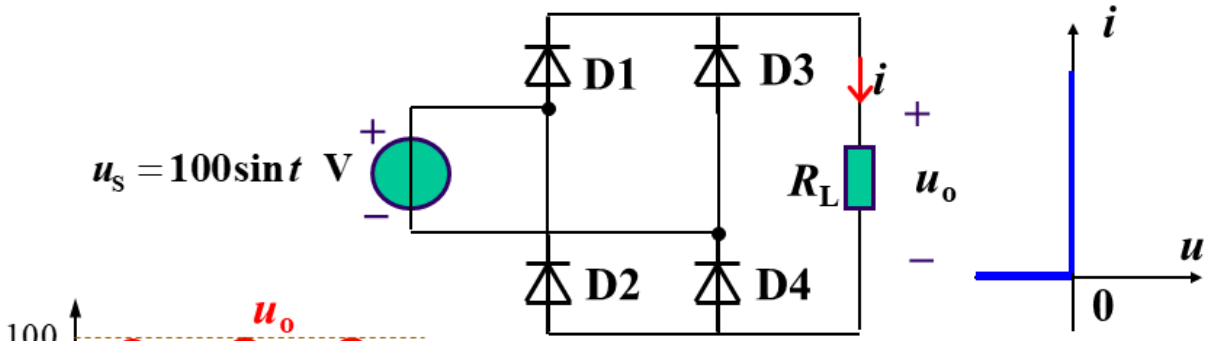
B $T>\ln(1.2)RC$

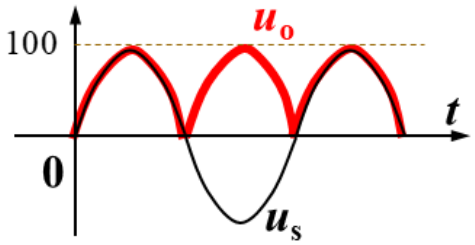
C $T<RC/1.2$

D $T>RC/1.2$

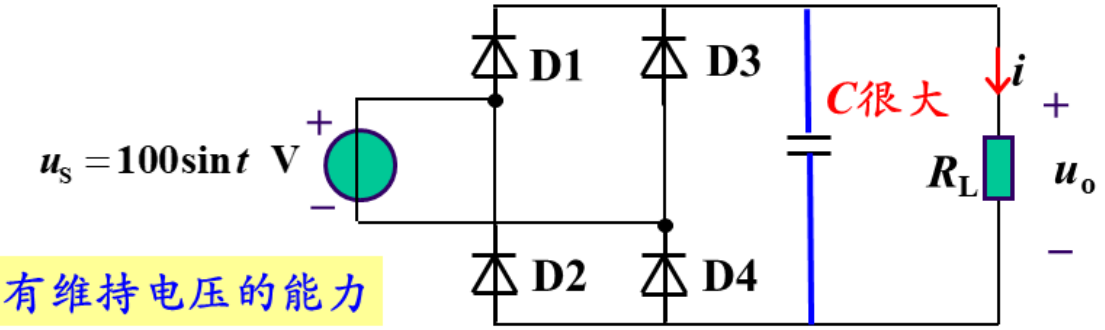
2 AC—DC变换

用二极管的模型1分析电路。



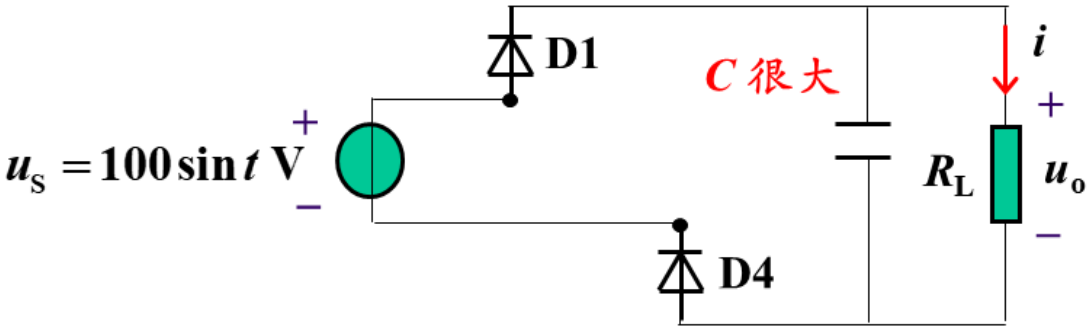


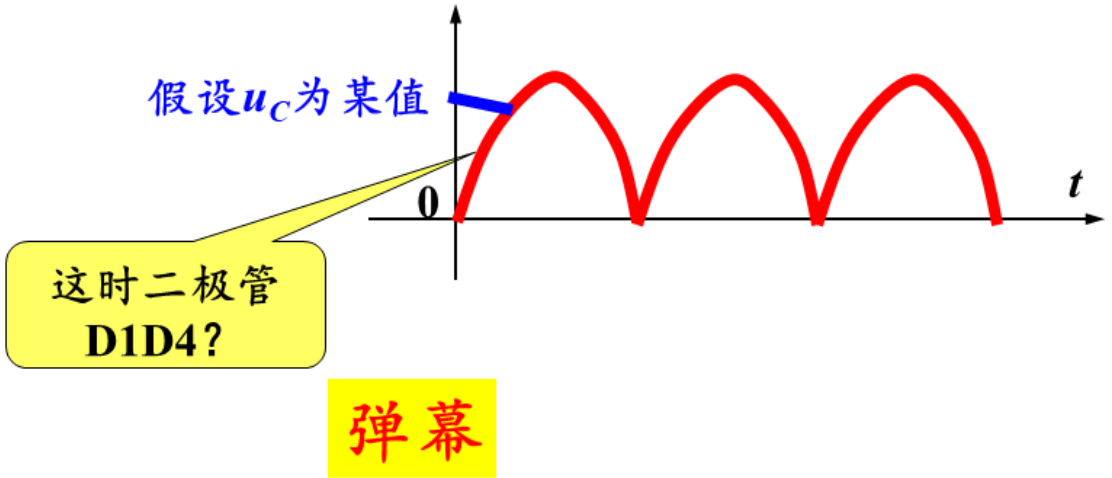
问题：如何改进该直流电压的质量？



电容具有维持电压的能力

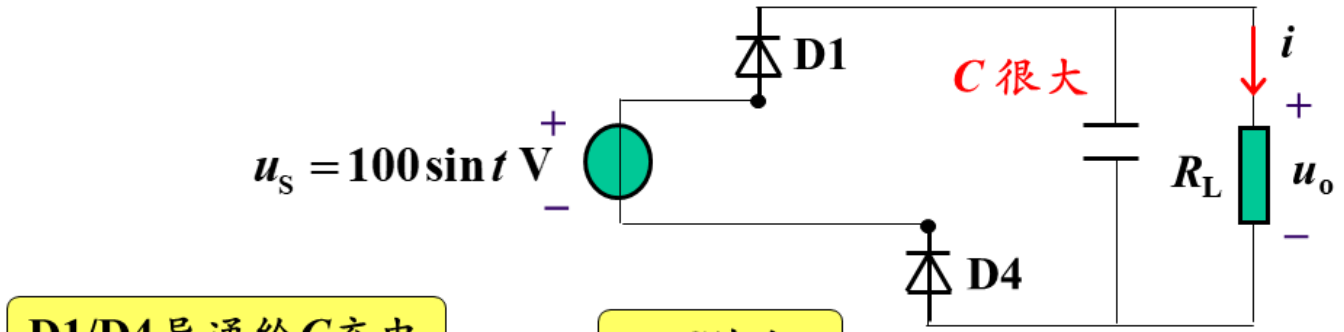
$u_S > 0$时　原本D1和D4同时导通





弹幕

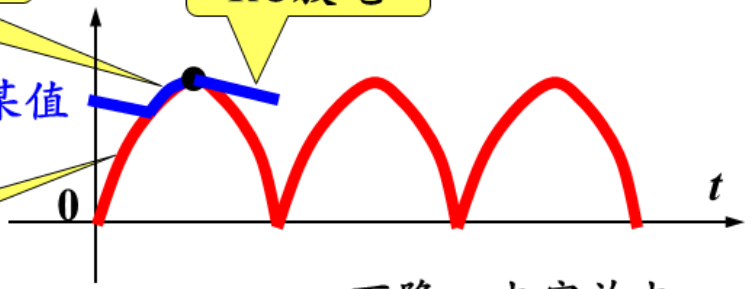
$u_S > 0$时　D1和D4可能同时导通



D1/D4导通给C充电

RC放电

假设u_C为某值



$u_C > u_S$，二极管D1/D4不导通

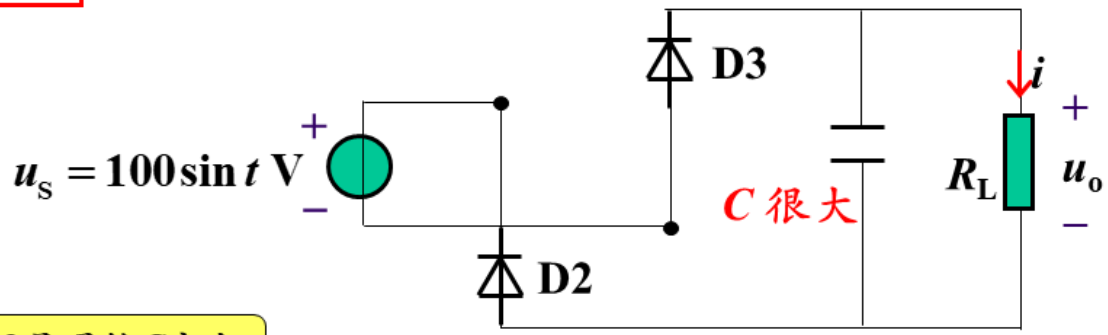
u_S下降，电容放电。

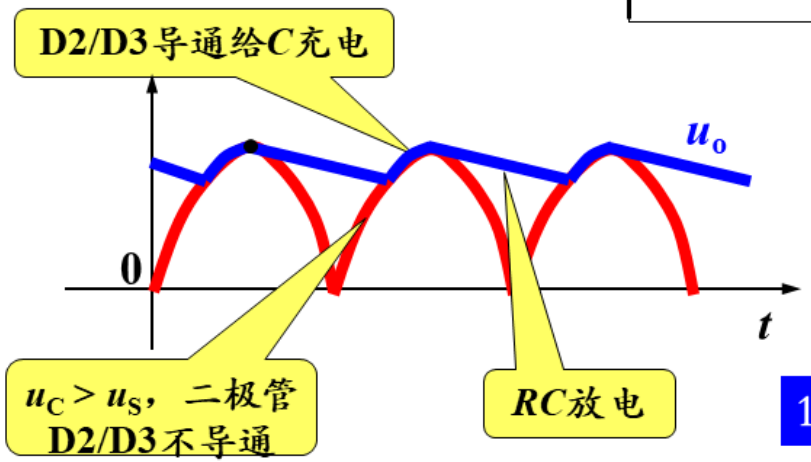
τ很大，放电很缓慢。

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可能同时导通





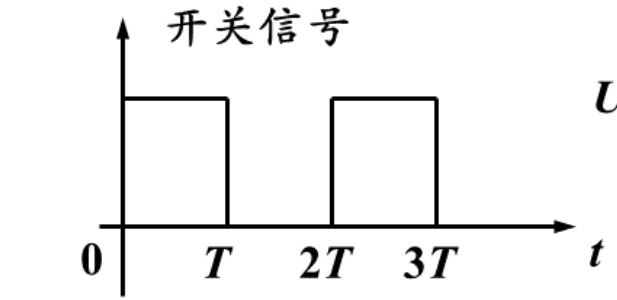
1. 直流电压平均值提高

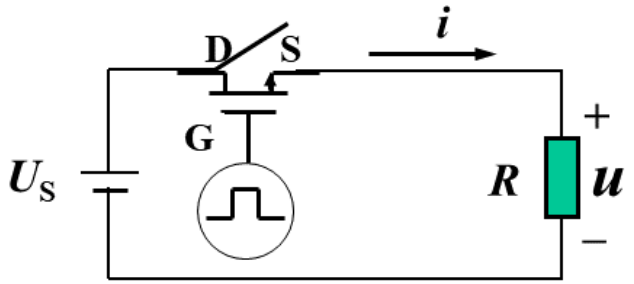
2. 直流电压脉动减小

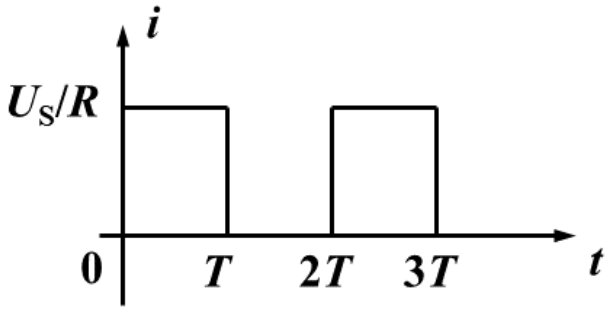
3　DC－DC变换

问题：如何比分压更高效率地改变直流电压？

方法一



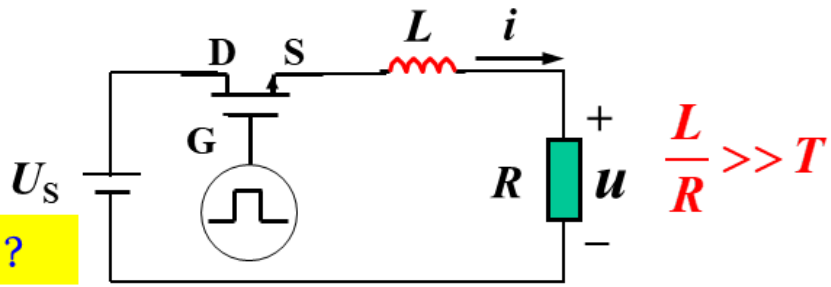




缺点：类似桥式整流，
直流质量较差。

改进思路：
利用电感维持电流的能力。

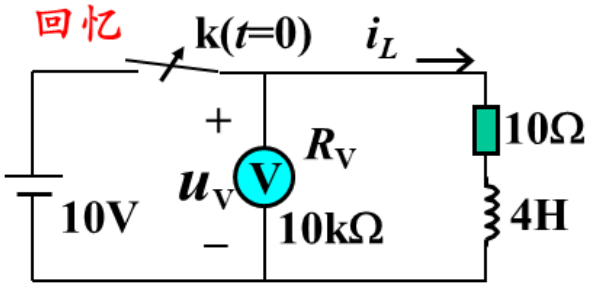
方法二



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

有问题吗?

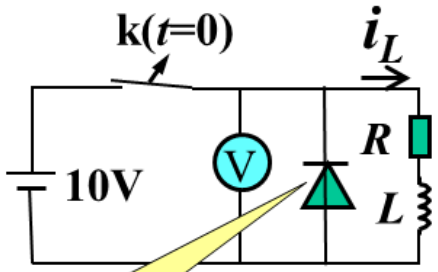
回忆



t=0 时刻 k 打开，求 u_v。

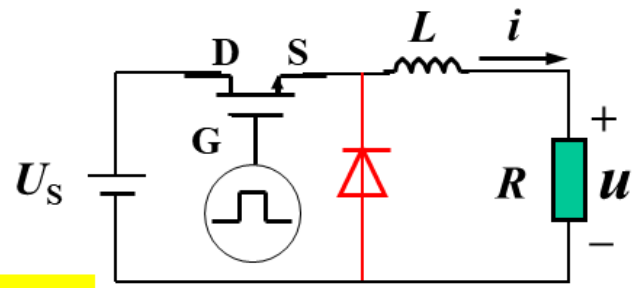
电压表量程为 50V。

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



V 坏了！

续流二极管



这类问题的分析特点：

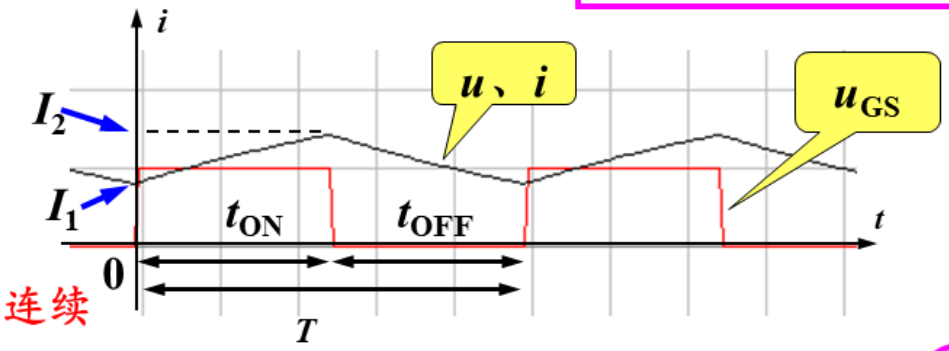
（1）设电路已经进入稳态

（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

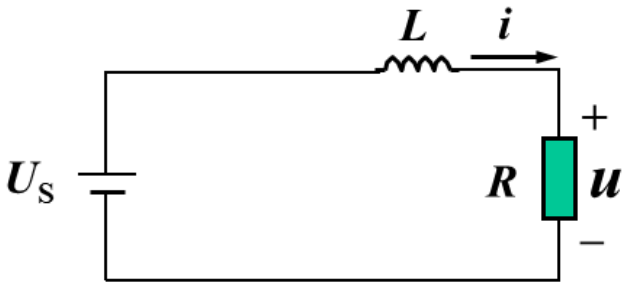
看仿真



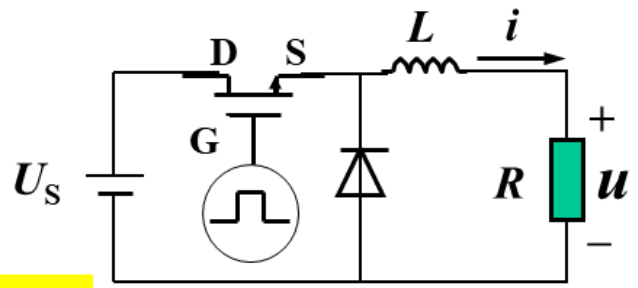
设电流连续

$0 < t < t_{ON}$ 时段等效电路

$i'(0^+) = I_1$　　$i'(\infty) =$



弹幕



这类问题的分析特点：

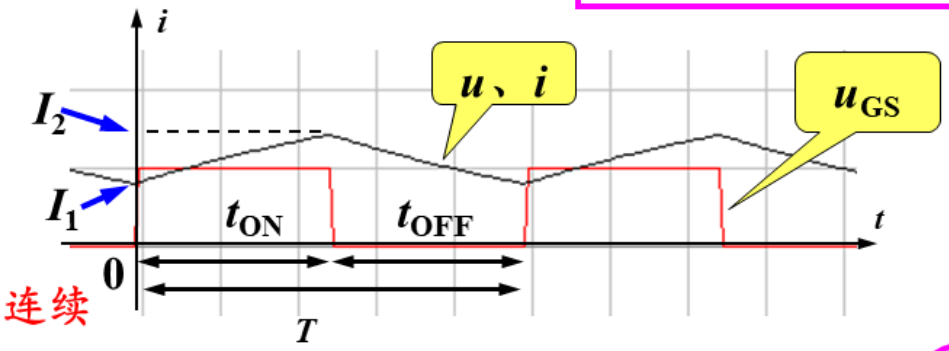
（1）设电路已经进入稳态

（2）画电路图，求电路解

（3）利用边界条件求出

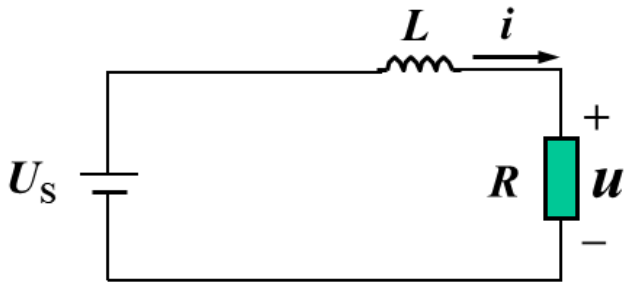
关键点电压/电流

看仿真



设电流连续

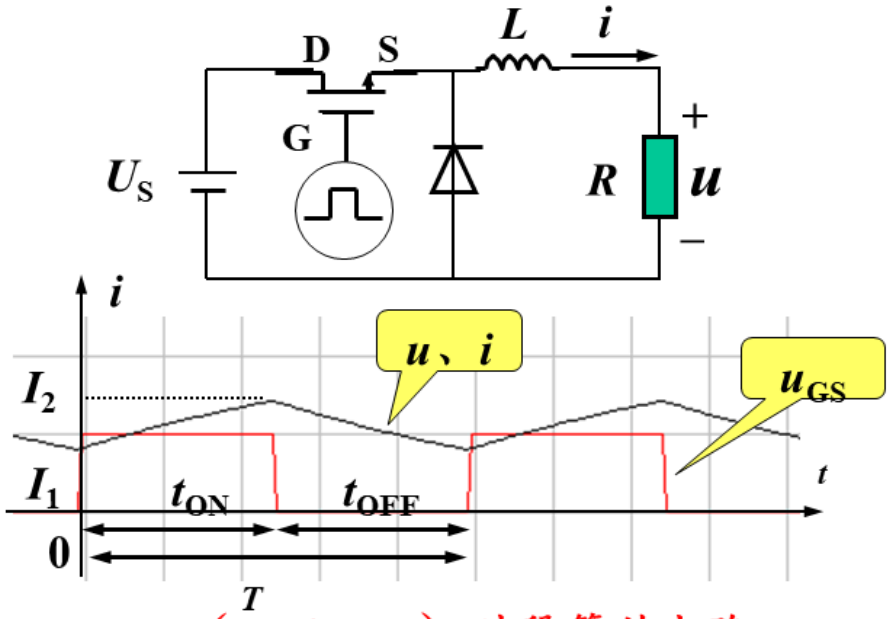
$0 < t < t_{ON}$ 时段等效电路



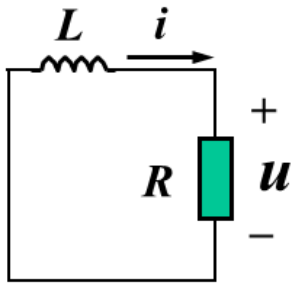
$$i'(0^+) = I_1 \quad i'(\infty) = \frac{U_S}{R}$$

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

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



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

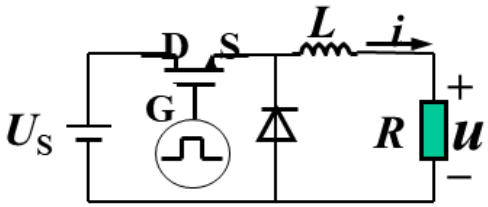


$$i''(t_{ON}^{+}) = I_2$$

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

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

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



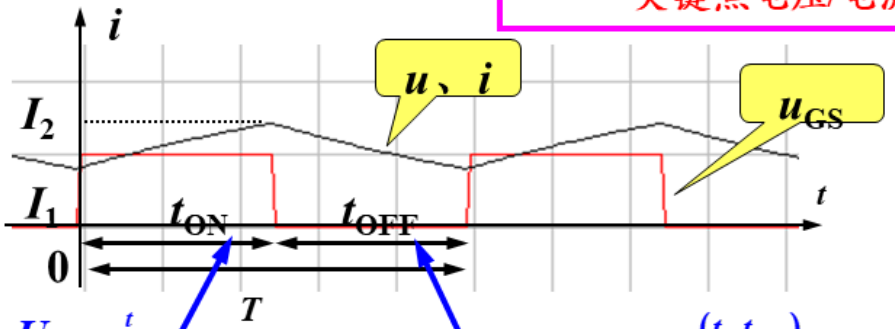
这类问题的分析特点：

（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



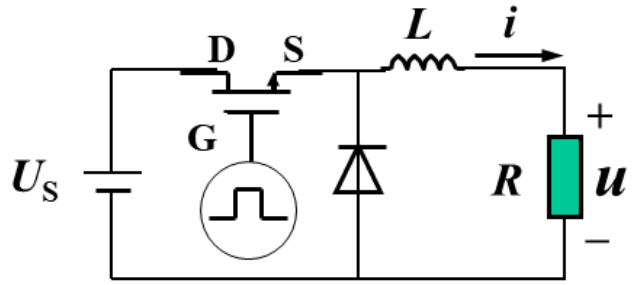
$$i' = \frac{U_S}{R} + (I_1 - \frac{U_S}{R})e^{-\frac{t}{\tau}}$$

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

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

I_{AVG}

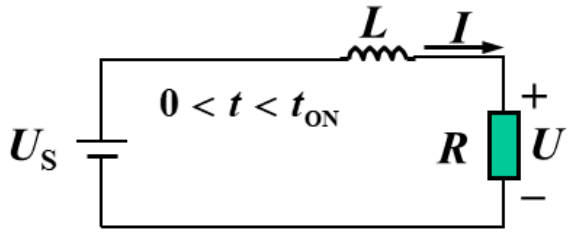
U_{AVG}



从工程观点来估计U

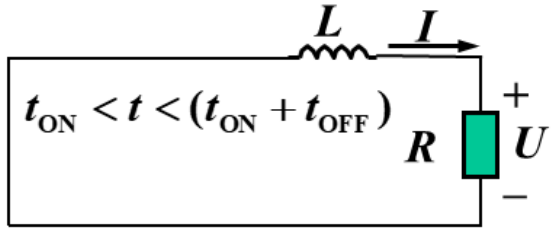
因为L值取得较大，
可看作$i=I$不变，
因此$u=U$也不变。

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

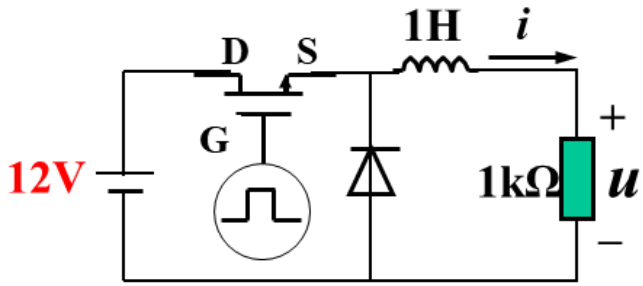
$$(U_S - U) * I * t_{ON} = U * I * t_{OFF} \Rightarrow U = U_S \frac{t_{ON}}{T}$$

占空比

降压斩波器
Buck Converter

单选题 1分

对仿真中的降压斩波器
占空比为_____时，
输出电压为5V



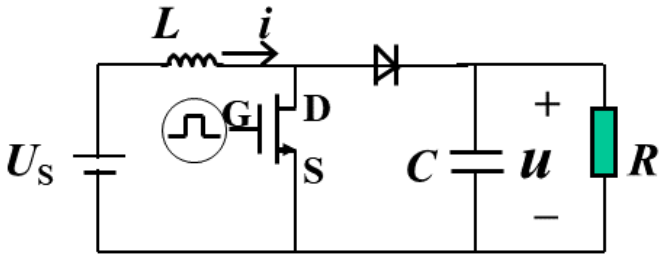
A 0.32

B 0.42

C 0.5

D 1.0

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



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。

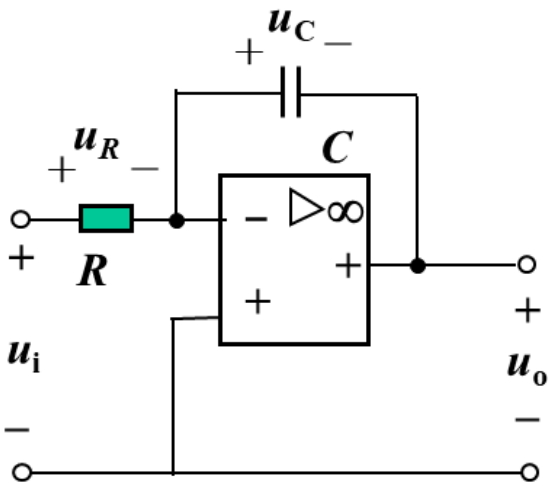
稳态时电感在前半周期(t_{on})吸收的能量等于其后半周期(t_{off})发出的能量

该电路实现了怎样的功能？

此处可以有投稿(和弹幕)

4 用Op Amp构成微分器和积分器

（1）积分器



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

$$u_o=-u_C$$

$$u_R=u_i$$

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

设C零状态

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

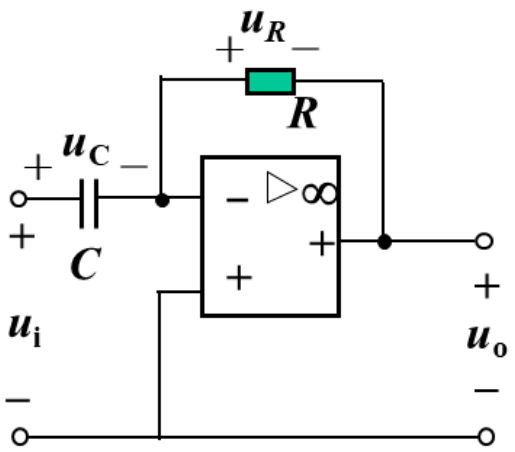
如果$u_i=U_S$（常数），则

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

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$u_i=tU_S$（线性函数），则

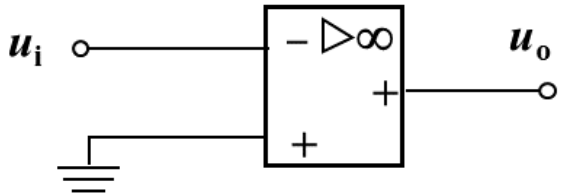
$$u_o=-RCU_S$$

常数

三角波 ⟶ 方波

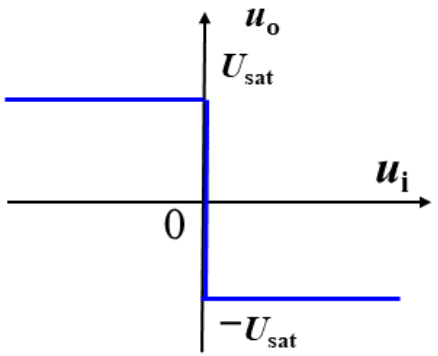
5 Op Amp的滞回比较器
运算放大器正反馈电路的分析

这个电路有什么用?



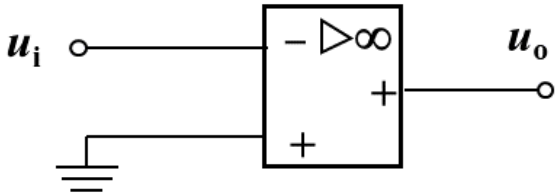
$u_i < 0$ $\quad u_o = U_{sat}$

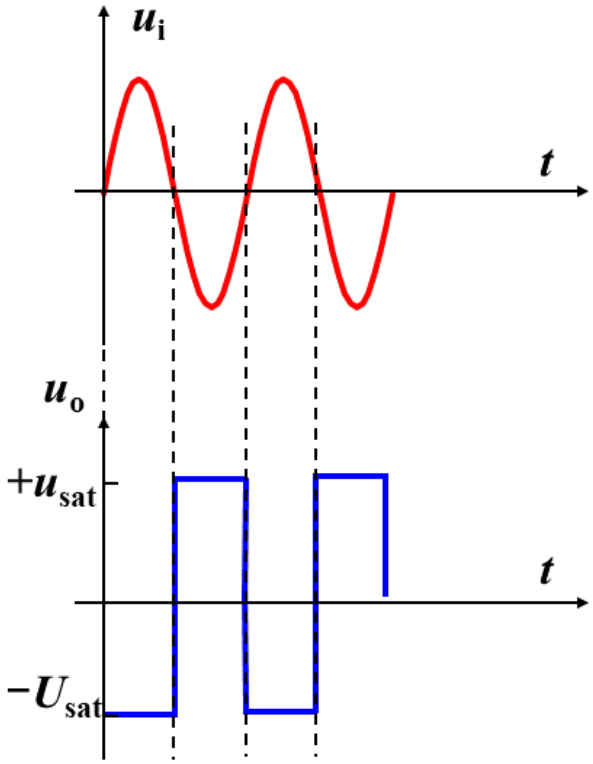
$u_i > 0$ $\quad u_o = -U_{sat}$



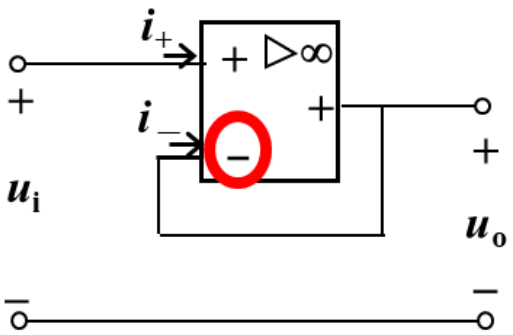
过零电压比较器

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）

输出端有微小正扰动 → 负反馈 → 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：

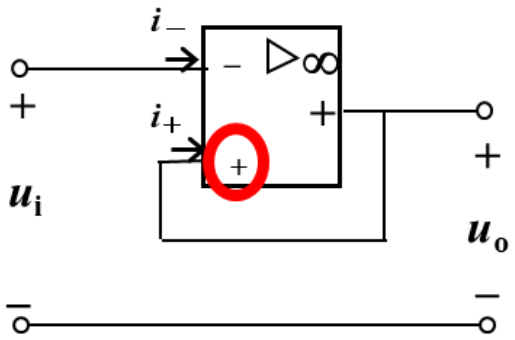
（1）$u_+ = u_-$，虚短（放大倍数∞＋线性工作区）

（2）$i_+ = i_-$，虚断（输入电阻∞）

$u_o = u_i$

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?

正反馈

输出端有微小正扰动 → 输入端待放大信号变大

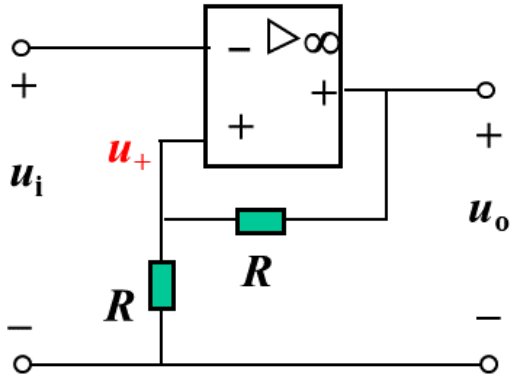
Op Amp

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$-U_{sat}$

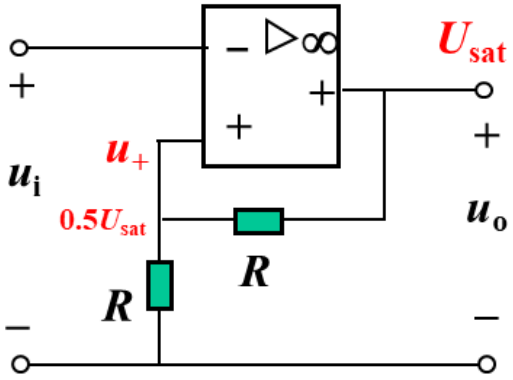


虚短不再适用
虚断仍然适用

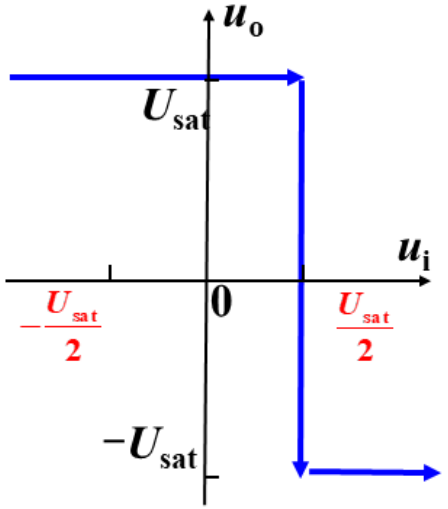
设$u_o=U_{sat}$，则$u_+=$

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

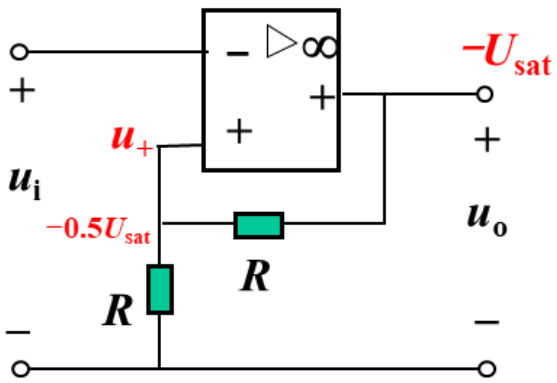


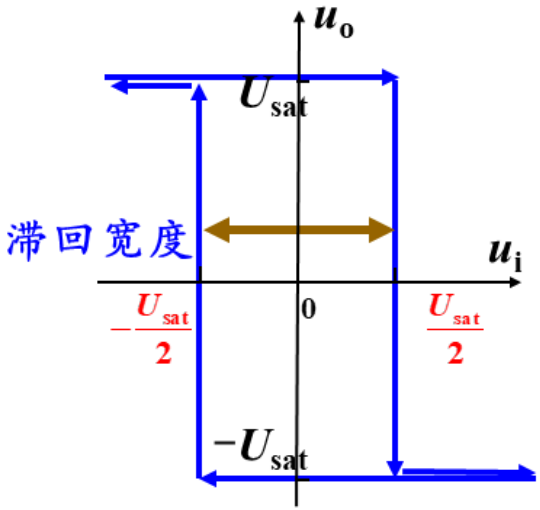
设$u_o=U_{sat}$，则$u_+=0.5U_{sat}$

$u_i<0.5U_{sat}$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 $+U_{sat}$

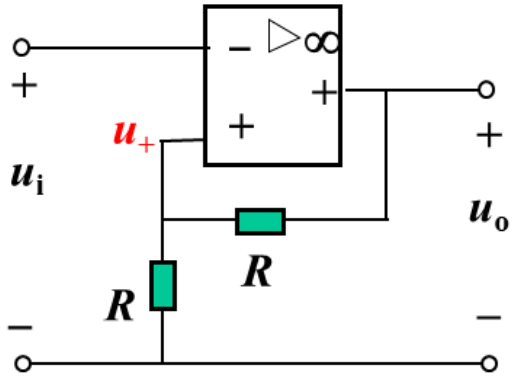
调整两个电阻阻值比可改变滞回宽度

输出滞后输入变化

滞回比较器
(Hysteresis Comparator)

单选题 1分

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

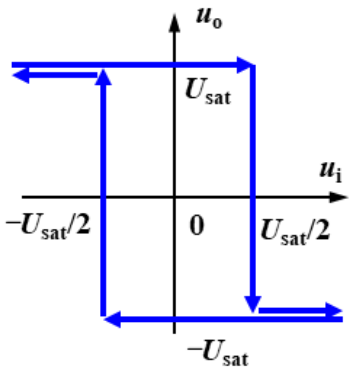


A U_{sat}

B $-U_{sat}$

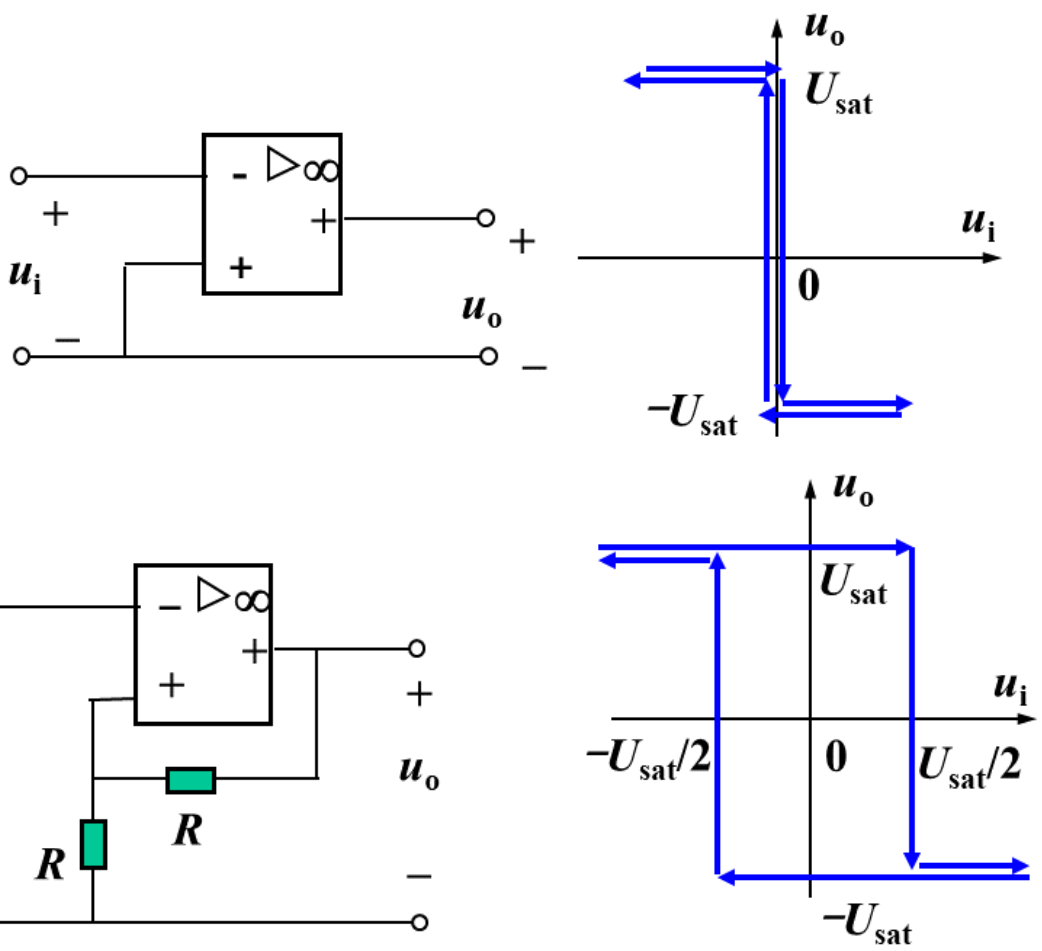
C 不好说

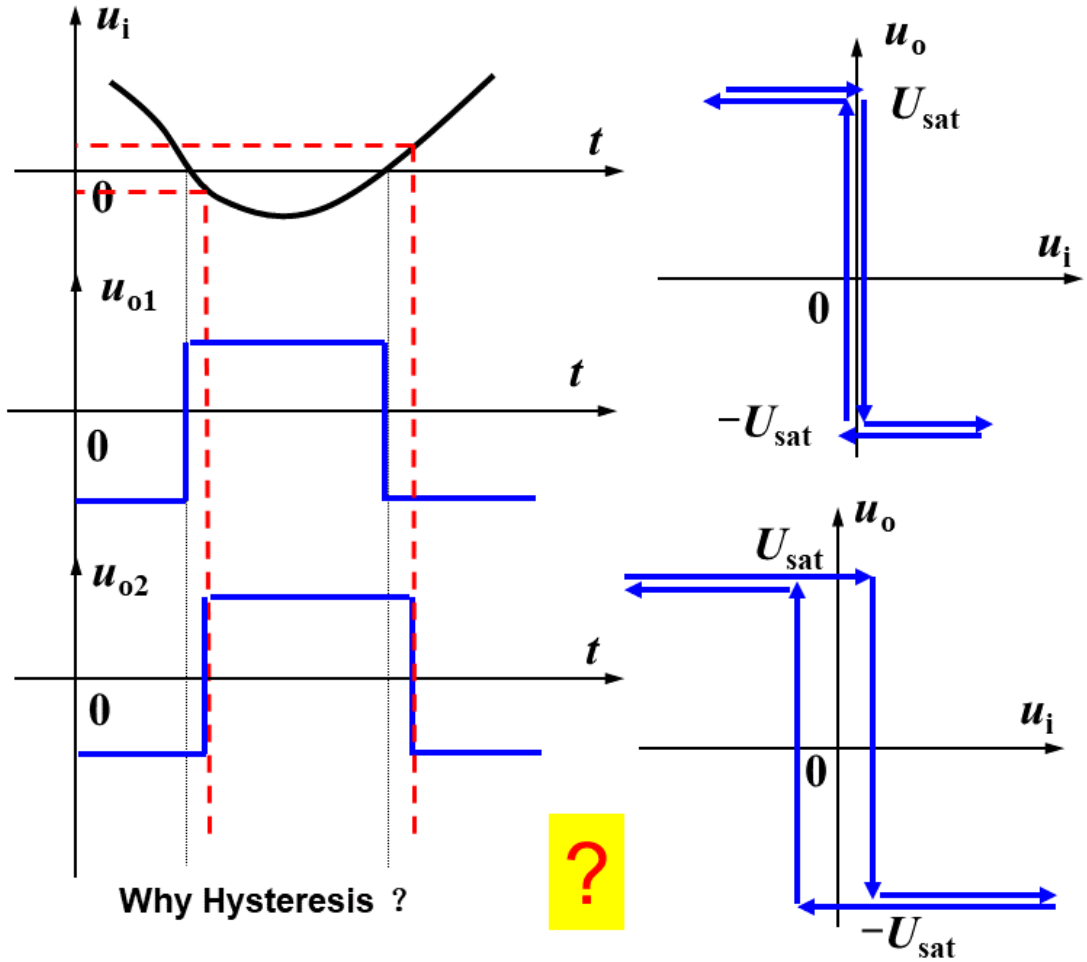
滞回特性可能存在的问题：
给某输入：不唯一对应输出

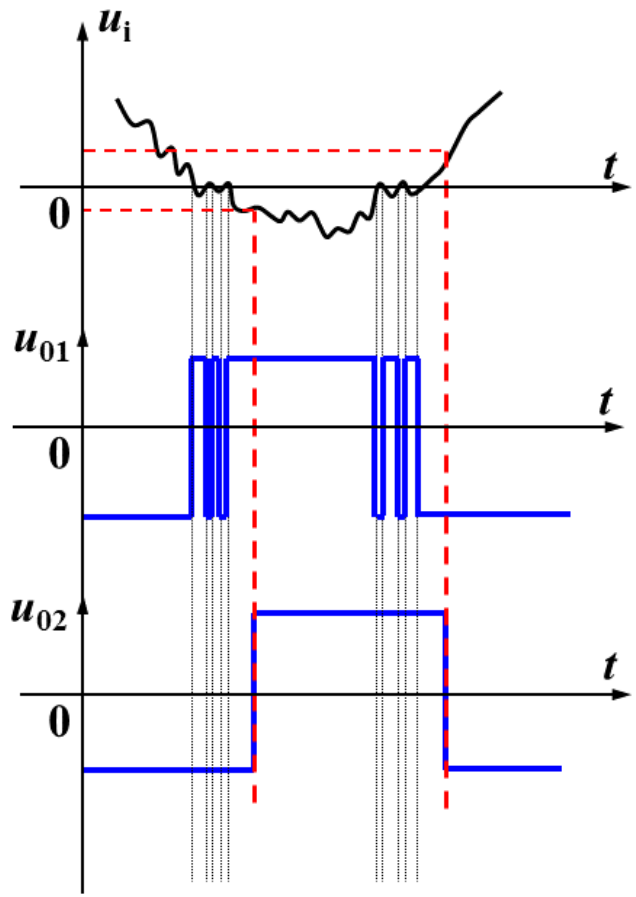


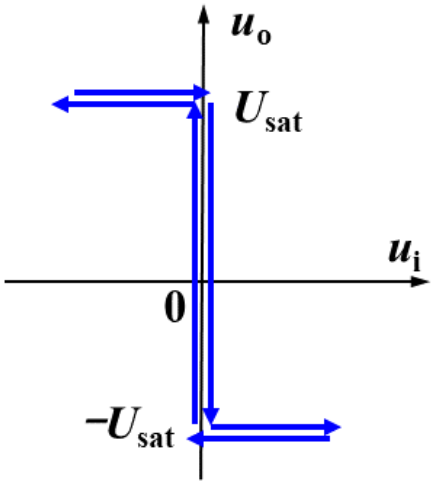
32

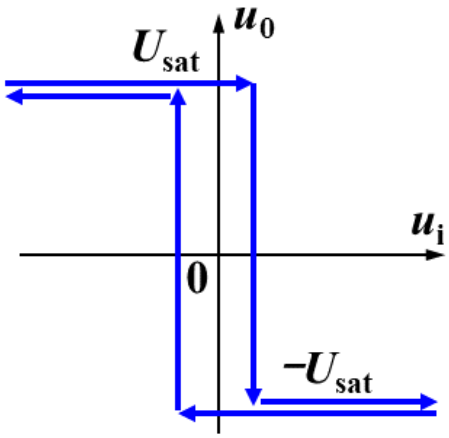
Principles of Electric Circuits Application 3 Tsinghua University 2023


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


u_i
t
0
u_{o1}
t
0
u_{o2}
t
0
Why Hysteresis ?
?
u_o
U_{sat}
u_i
0
$-U_{sat}$
u_o
U_{sat}
u_i
0
$-U_{sat}$

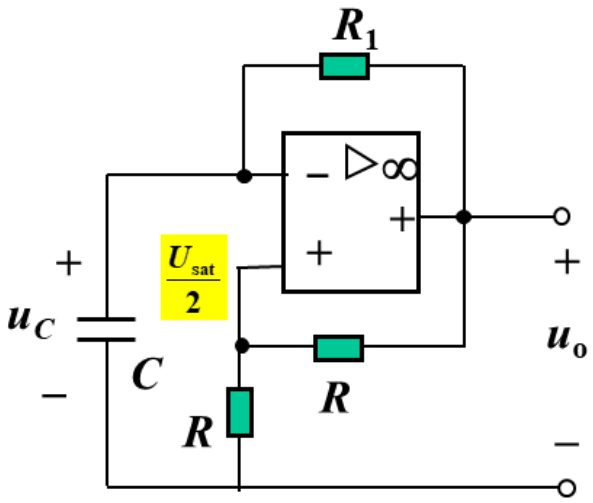






滞回比较器能够在一定程度上抑制噪声

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$-U_{sat}$

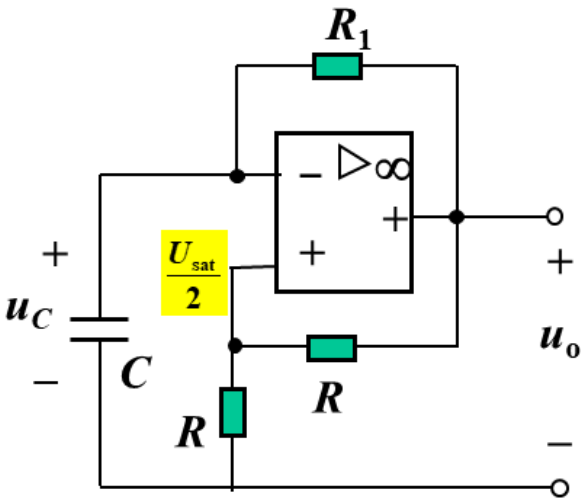
设 $u_o=U_{sat}$

则 $u_+=\frac{U_{sat}}{2}$

设此时$u_C=0$，（负反馈路径上的）等效电路为

投稿

6 用Op Amp构成脉冲序列发生器



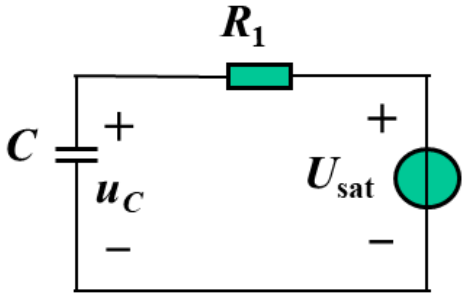
虚短不再适用
虚断仍然适用

是正反馈吗？

是！L13讲

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

设此时u_C=0，等效电路为



设 $u_o=U_{sat}$

则 $u_+=\frac{U_{sat}}{2}$

$u_C(0^+)=0$

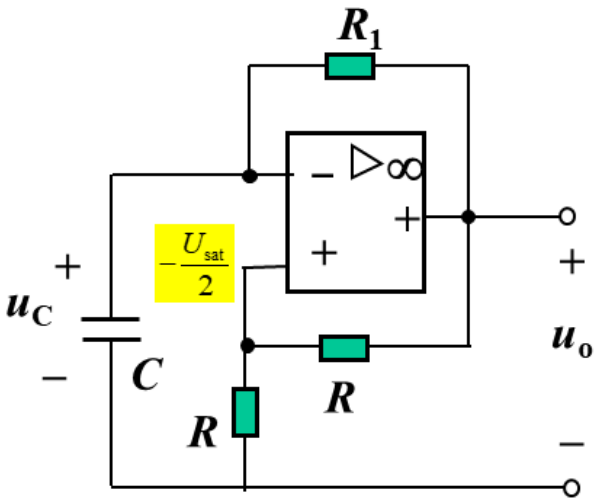
$u_C(\infty)=U_{sat}$

$\tau=R_1C$

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

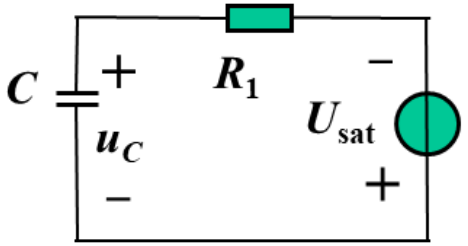
上升至 $u_C=\frac{U_{sat}}{2}$ 时

$u_o=-U_{sat}$



$u_o = -U_{sat}$ $\quad u_+ = -\frac{U_{sat}}{2}$

此时$u_C = U_{sat}/2$，（负反馈路径上的）等效电路为

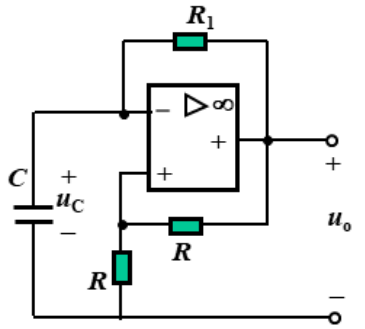


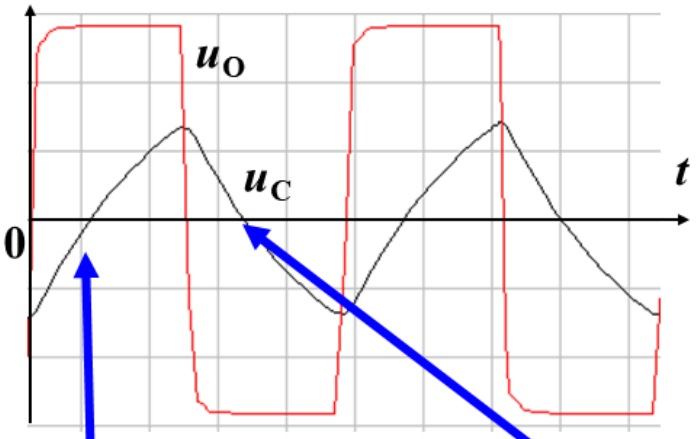
$$u_C(0^+) = \frac{U_{sat}}{2} \qquad u_C(\infty) = -U_{sat} \qquad \tau = R_1 C$$

$$u_C = -U_{sat} + (U_{sat}/2 + U_{sat})e^{-t/R_1 C}$$

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

看仿真





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

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

$t=T/2$时

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

$$T = 2R_1C\ln 3$$

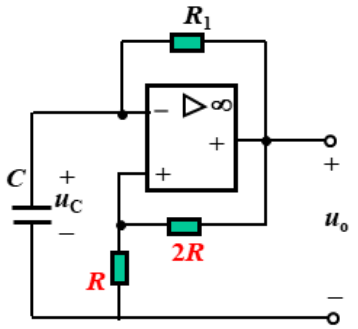
占空比：$D=t_{on}/T$

如何使占空比可调?

如何产生三角波?

单选题 1分

与前页电路相比，本页电路的特点是
“红包”



A 周期更短

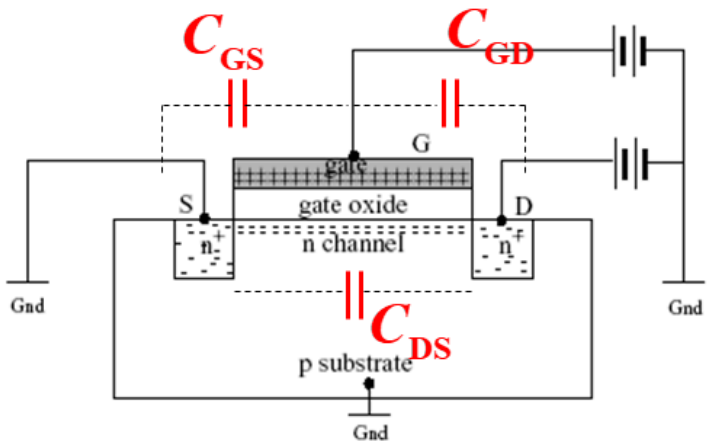
B 周期更长

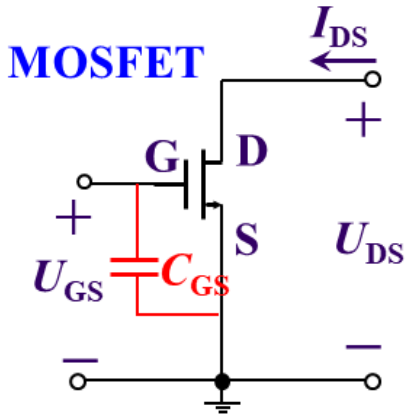
C 输出幅值更高

D 输出幅值更低

7　MOSFET门电路的传播延迟

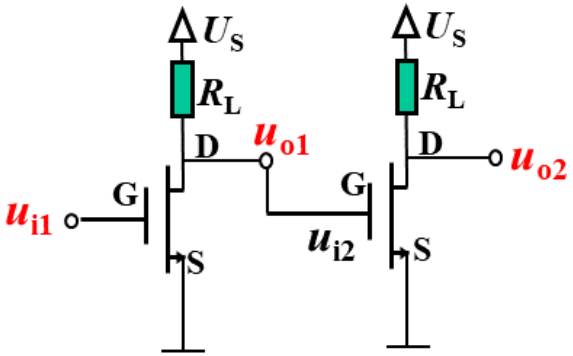
MOSFET的寄生电容

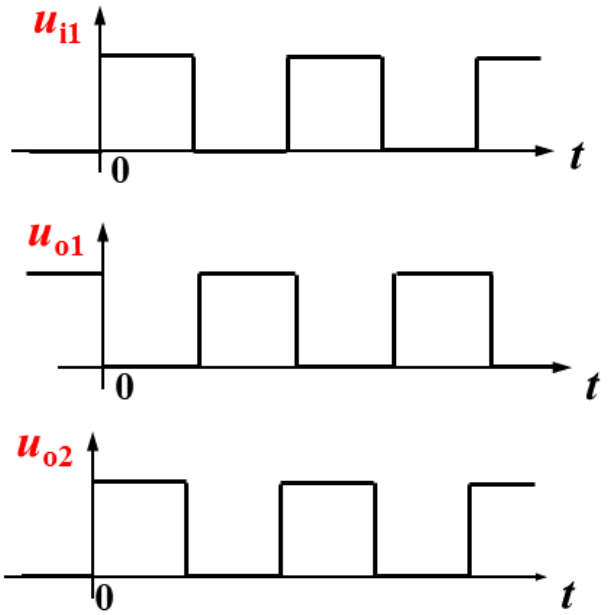




为突出主要矛盾，我们只考虑C_{GS}

缓冲器电路　　如果不考虑寄生电容





看仿真

具体分析，参见课后推送视频