数字电路
Digital Circuits and System

李文明
liwenming@ict.ac.cn

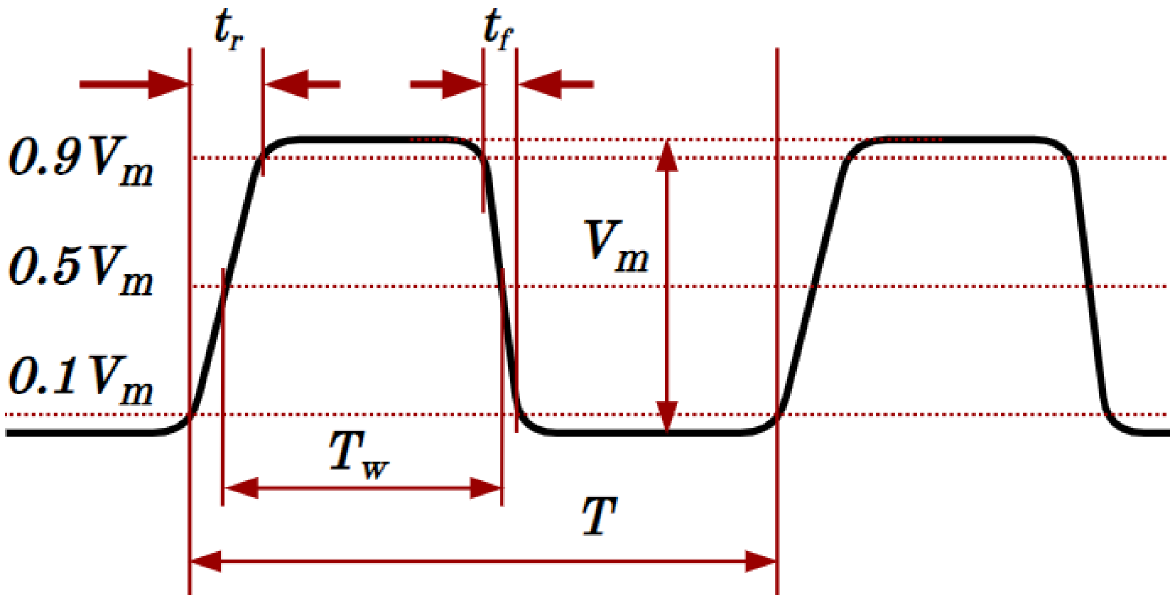
脉冲波形的产生和变换

提纲

- 脉冲信号参数定义
- 反馈的概念
- 施密特触发电路
- 单稳态电路
- 多谐振荡电路

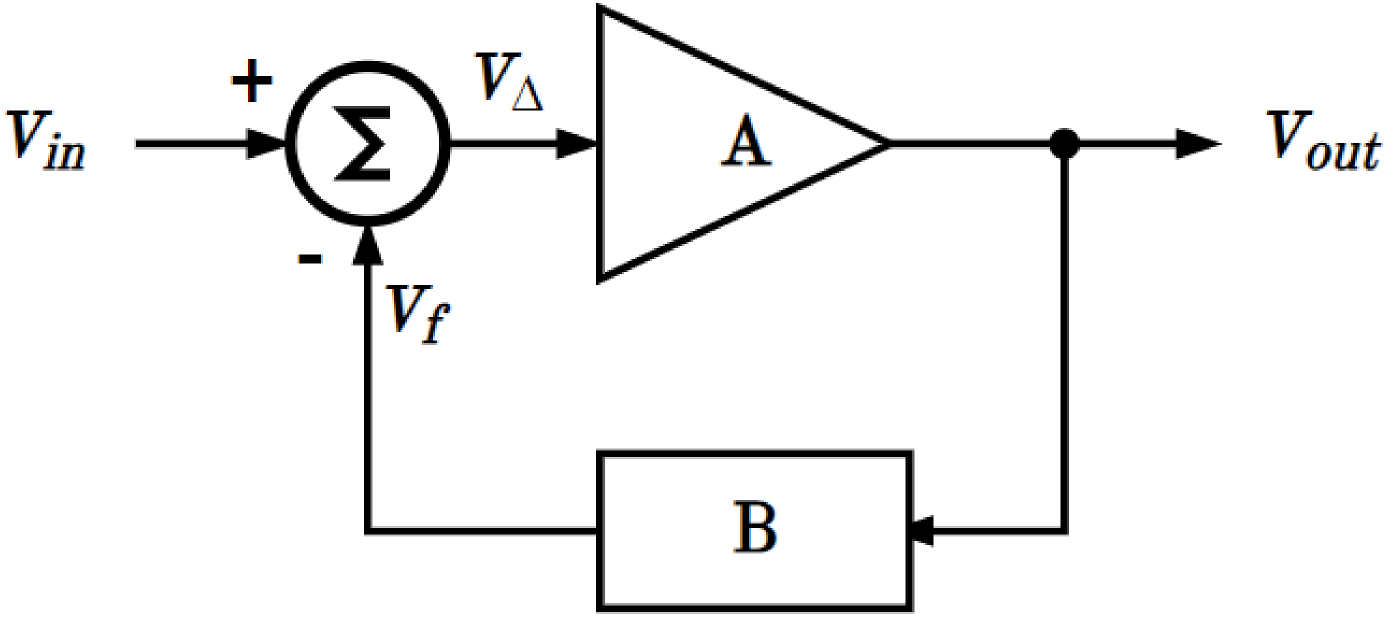
脉冲信号参数定义

- 周期：T
- 频率：$f = 1/T$
- 脉冲宽度：T_w
- 上升时间：t_r
- 下降时间：t_f
- 脉冲幅度：V_m
- 占空比：$q = T_w/T$



反馈的概念

- 带有反馈环路的电路结构
  - A：前向增益(Gain)
  - B：反馈系数
  - ∑：相加节点



- 反馈分类
  - 相加节点：正、负
  - 输出：电压、电流
  - 输入：并联、串联

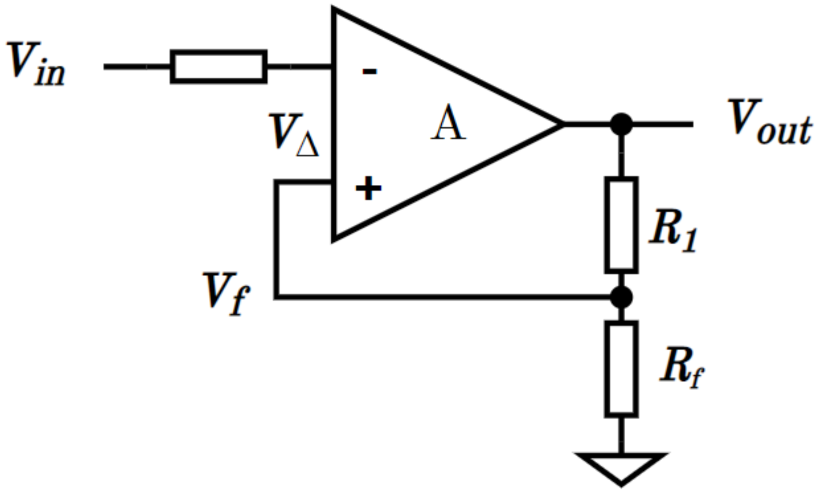
$$\begin{cases} V_\Delta = V_{in} - V_f \\ V_{out} = A \cdot V_\Delta \\ V_f = B \cdot V_{out} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{V_{out}}{V_{in}} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{A} + B} \\ A \gg 1 \end{cases}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{1}{B}$$

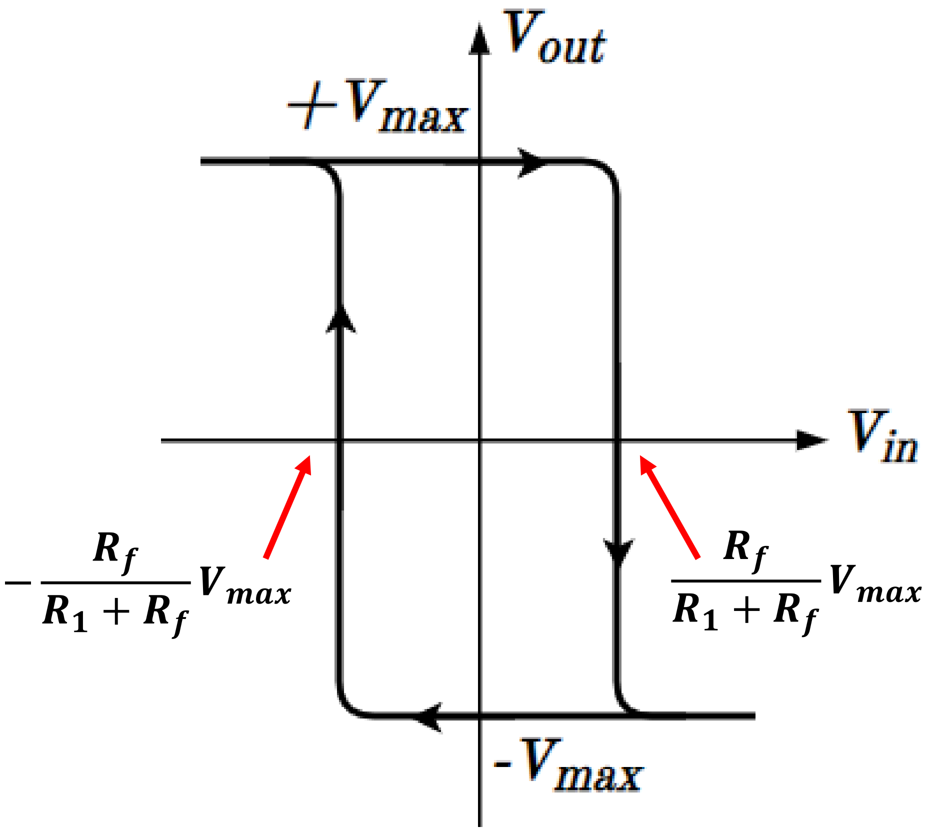
施密特触发电路(Schmitt Trigger)

$$\begin{cases} V_\Delta = V_{in} - V_f \\ V_f = \dfrac{R_f}{R_1 + R_f} V_{out} \\ V_{out} = -A \cdot V_\Delta \\ B = \dfrac{R_f}{R_1 + R_f} \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_\Delta > 0,\ V_{out} < 0 \rightarrow -V_{max} \\ V_{in} = V_\Delta + \varepsilon \rightarrow V_{out}\downarrow \rightarrow V_f\downarrow \rightarrow V_\Delta\uparrow \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_\Delta < 0,\ V_{out} > 0 \rightarrow +V_{max} \\ V_{in} = V_\Delta - \varepsilon \rightarrow V_{out}\uparrow \rightarrow V_f\uparrow \rightarrow V_\Delta\downarrow \end{cases}$$



CMOS门构成的施密特触发电路

假设非门的状态转换开启电压为：$V_{TH} = \frac{1}{2}V_{DD}$

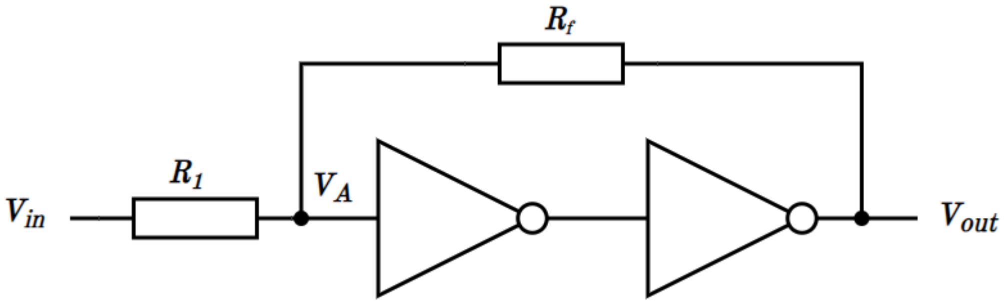
非门工作在线性区时：$\frac{V_{in}-V_A}{R_1} = \frac{V_A-V_{out}}{R_f}$

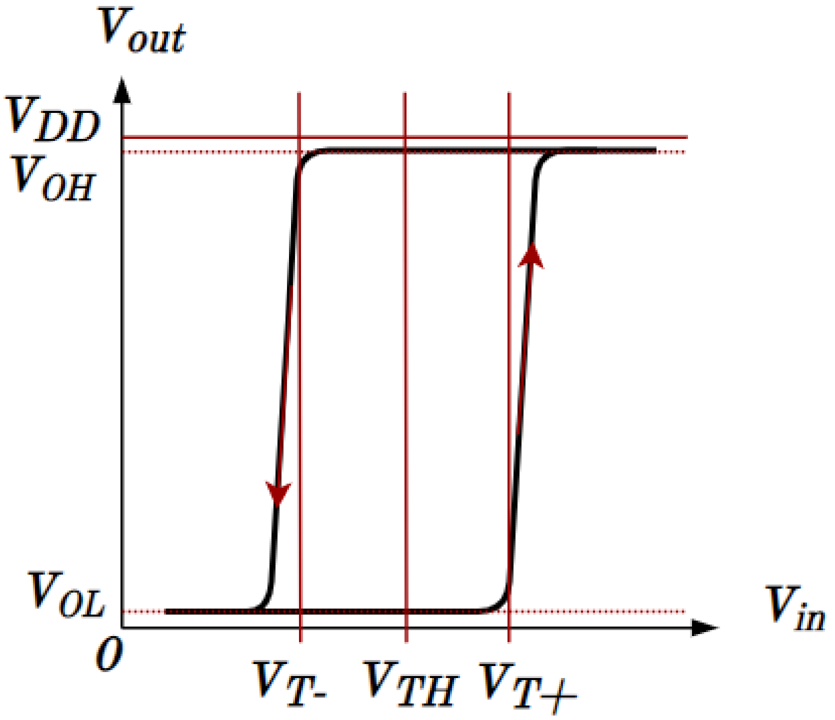
输入电压从低到高的变化过程中，假设变化发生在：$V_{in} = V_{T+}$时刻，此时：$\begin{cases} V_{out} \approx 0 \\ V_A = V_{TH} \end{cases}$

则：$V_{T+} = (1 + \frac{R_1}{R_f})V_{TH}$

输入电压从高到低的变化过程中，假设变化发生在：$V_{in} = V_{T-}$时刻，此时：$\begin{cases} V_{out} \approx V_{DD} \\ V_A = V_{TH} \end{cases}$

则：$V_{T-} = (1 - \frac{R_1}{R_f})V_{TH}$





CMOS施密特触发电路实现

- I. M. Filanovsky and H. Bakes,CMOS Schmitt Trigger Design, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-1:FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS, VOL. **41.** NO. **1,** JANUARY **1994**

- Pranay Kumar Rahi, Shashi Dewangan, Tanuj Yadav, Md Muzaherul Haque, Design and Simulation of CMOS Schmitt Trigger, International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 3 Issue 8, August 2016

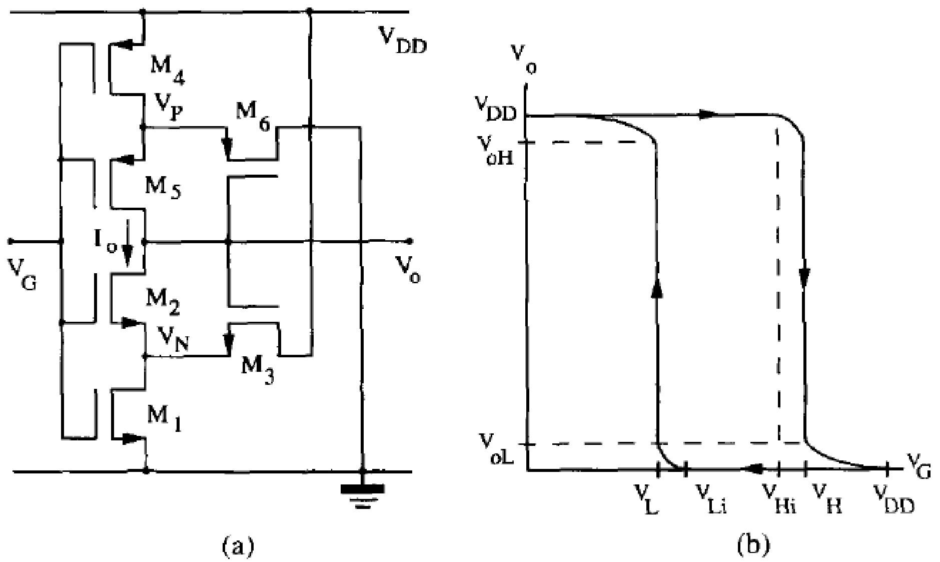
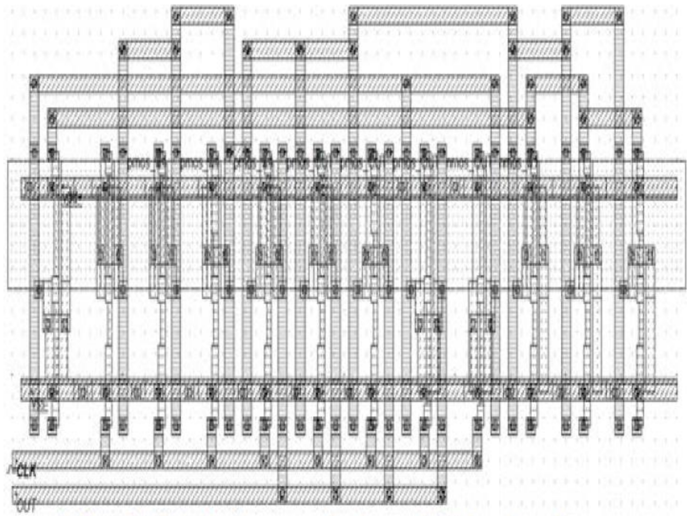


Fig. 1. CMOS Schmitt trigger and its transfer characteristic.

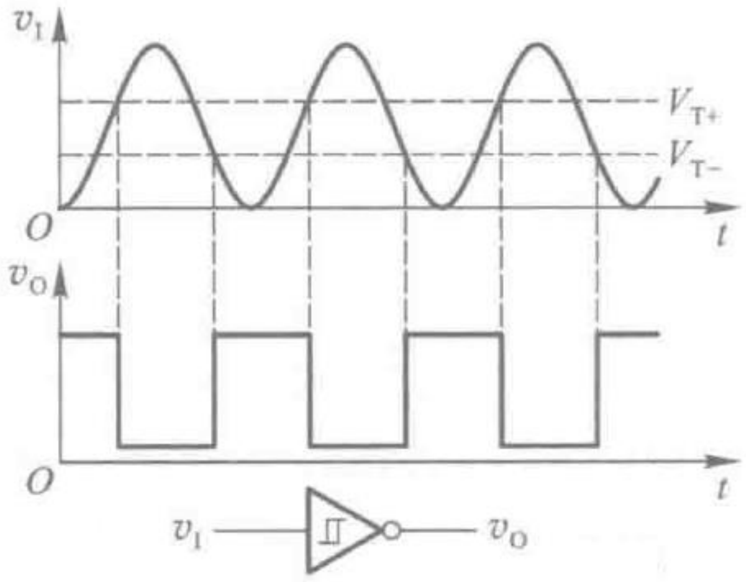


MICROWIND Layout design of Schmitt trigger

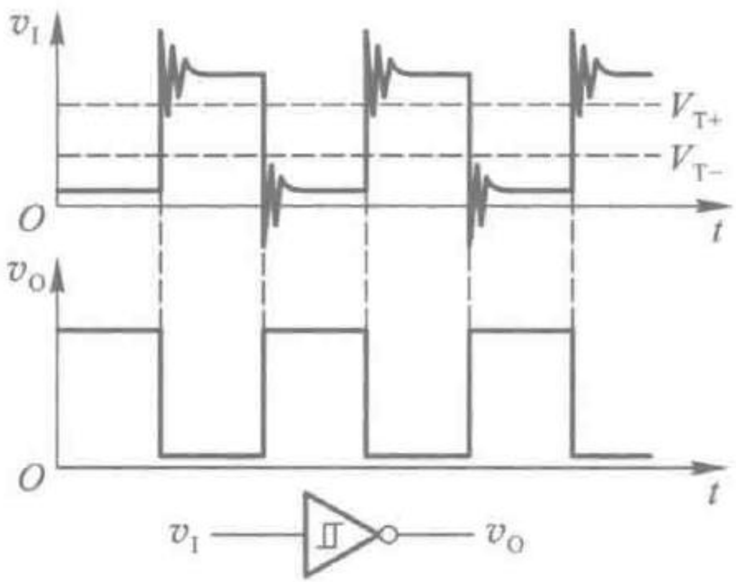
Parameters \ CMOS Technology	90 nm	65 nm	45 nm
Power (in µW)	455	57.135	3.260
Surface Area (in μm^2)	88.7	43.5	22.2

施密特触发电路应用

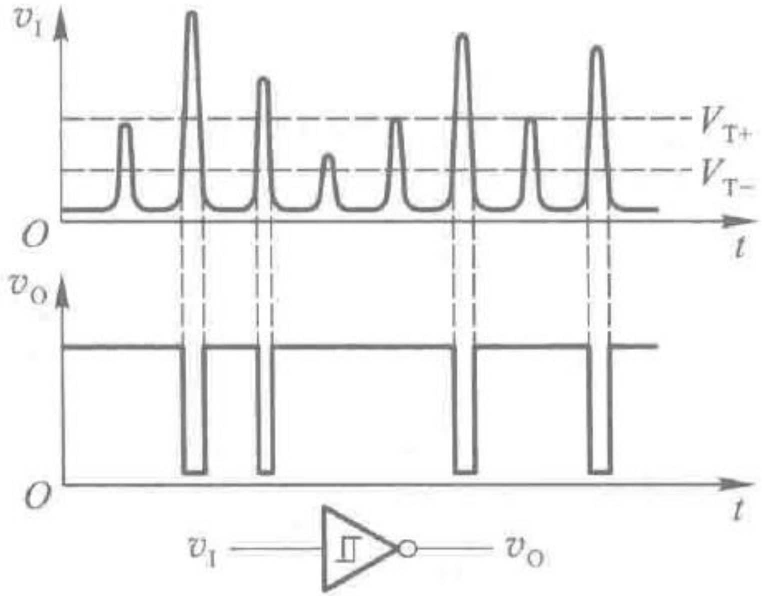
波形变换



信号整形



脉冲鉴幅



- 用于芯片输入Pads，滤除噪声

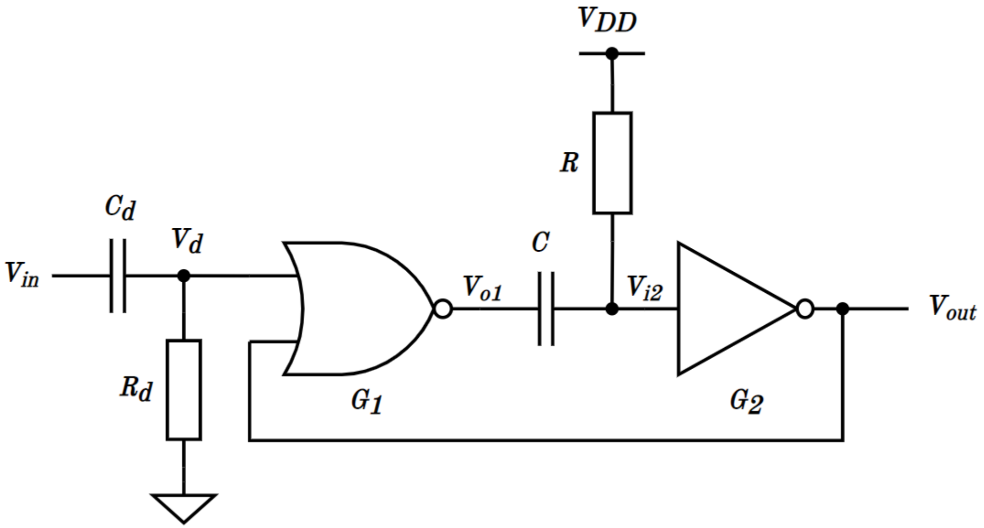
单稳态电路

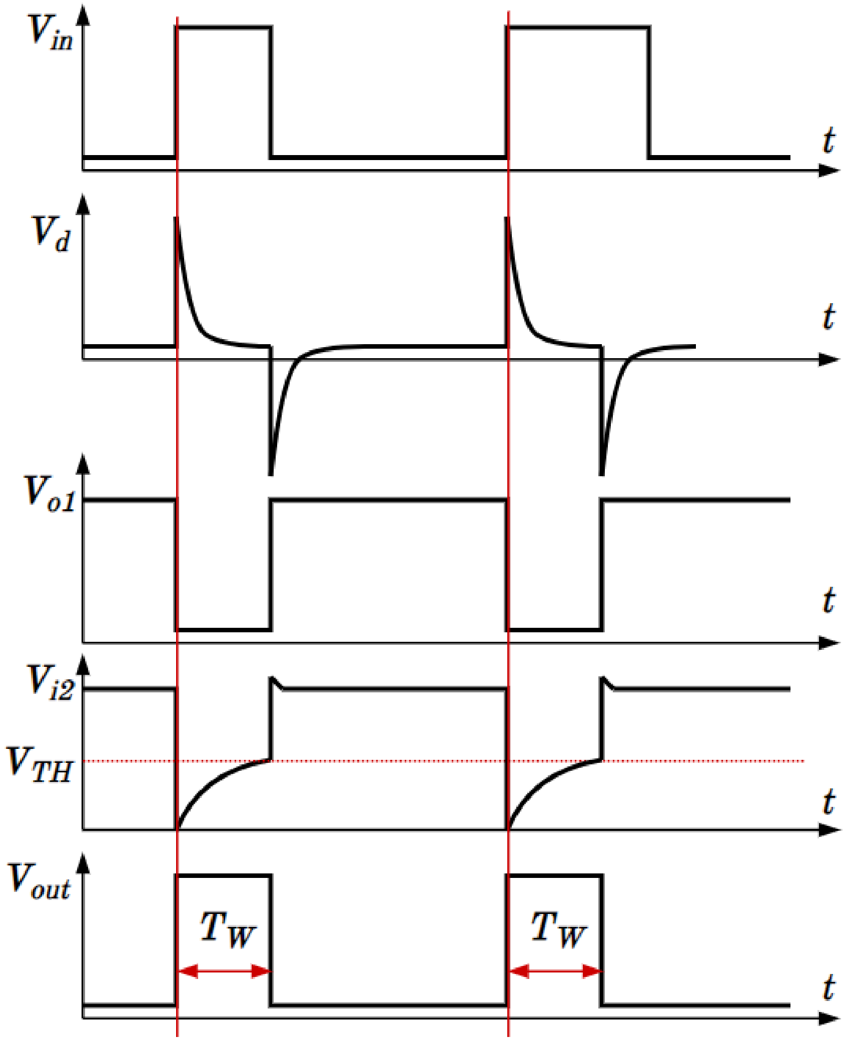
- Monostable Multivibrator, One-Shot电路特点
  - 两个状态：稳态、暂态
  - 触发脉冲可以使电路从稳态进入暂态
  - 暂态的持续时间由电路参数决定（RC），与触发脉冲宽度无关

- 应用
  - 定时器
  - 脉冲宽度变换（整形）

微分型单稳态电路

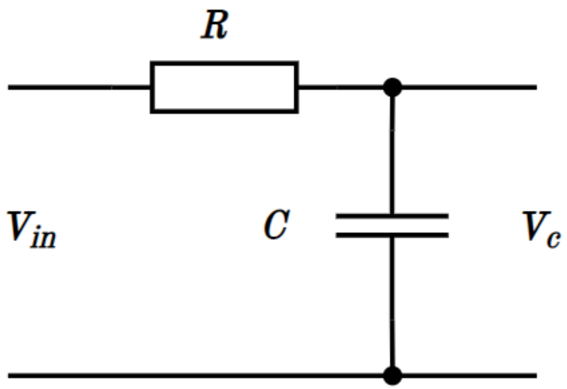
- 暂态持续时间依靠微分电路的时间常数决定
  - G_1与G_2之间存在正反馈通路，假设：$\begin{cases} V_{OL} = 0 \\ V_{OL} = V_{DD} \\ V_{TH} = V_{DD}/2 \end{cases}$
  - 稳态：$V_{out} = 0$，$V_{o1} = 1$
  - 暂态：$V_{out} = 1$，$V_{o1} = 0$
  - 电容充电到V_{TH}所需时间：$T = RC\ln\frac{V_c(\infty)-V_c(0)}{V_c(\infty)-V_{TH}} = 0.69RC$

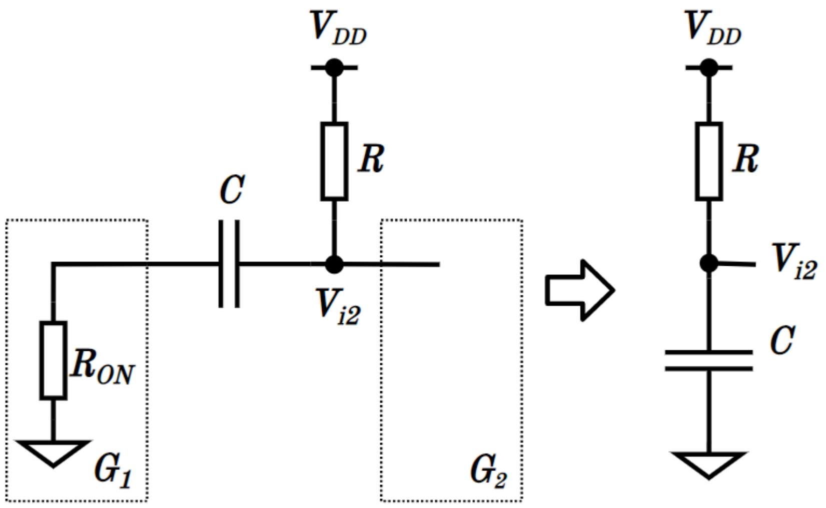




微分型单稳电路的状态变化过程

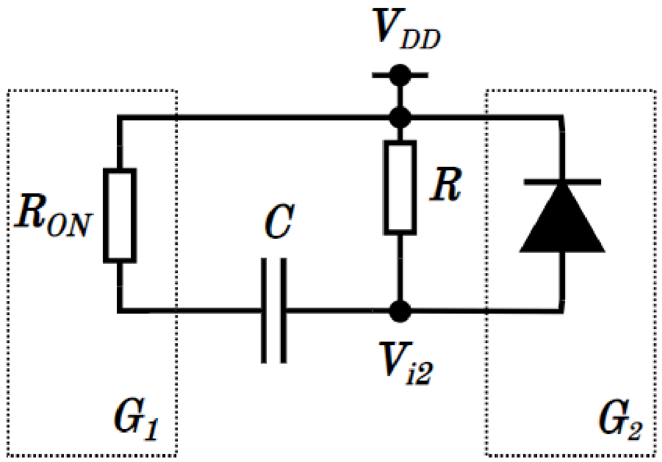
- 电容充放电方程（$\tau = RC$）：$\begin{cases} \text{充电过程：} V_c = V_{in}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ \text{放电过程：} V_c = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases}$





电容充电等效电路

充电到V_{TH}的时间：$t_w = 0.69RC$



电容放电等效电路

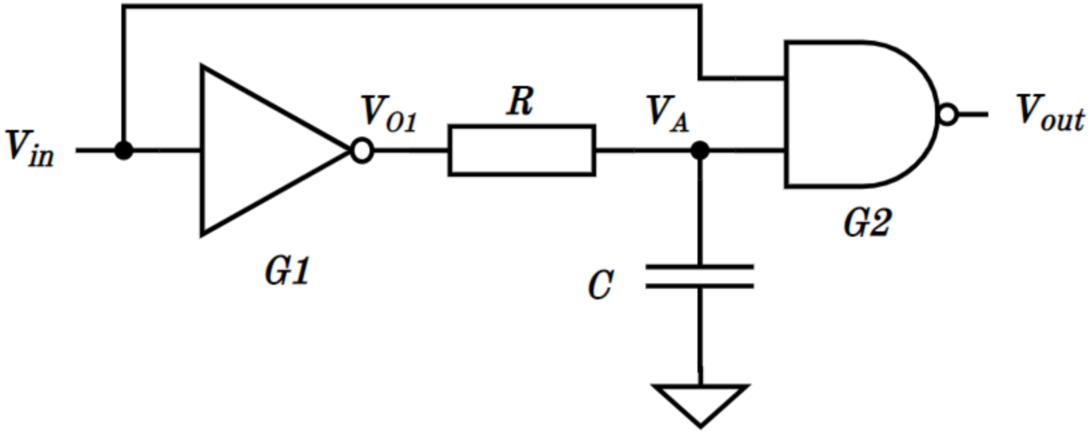
放电到稳态的时间：$t_{re} = (3 \sim 5)R_{ON}C$

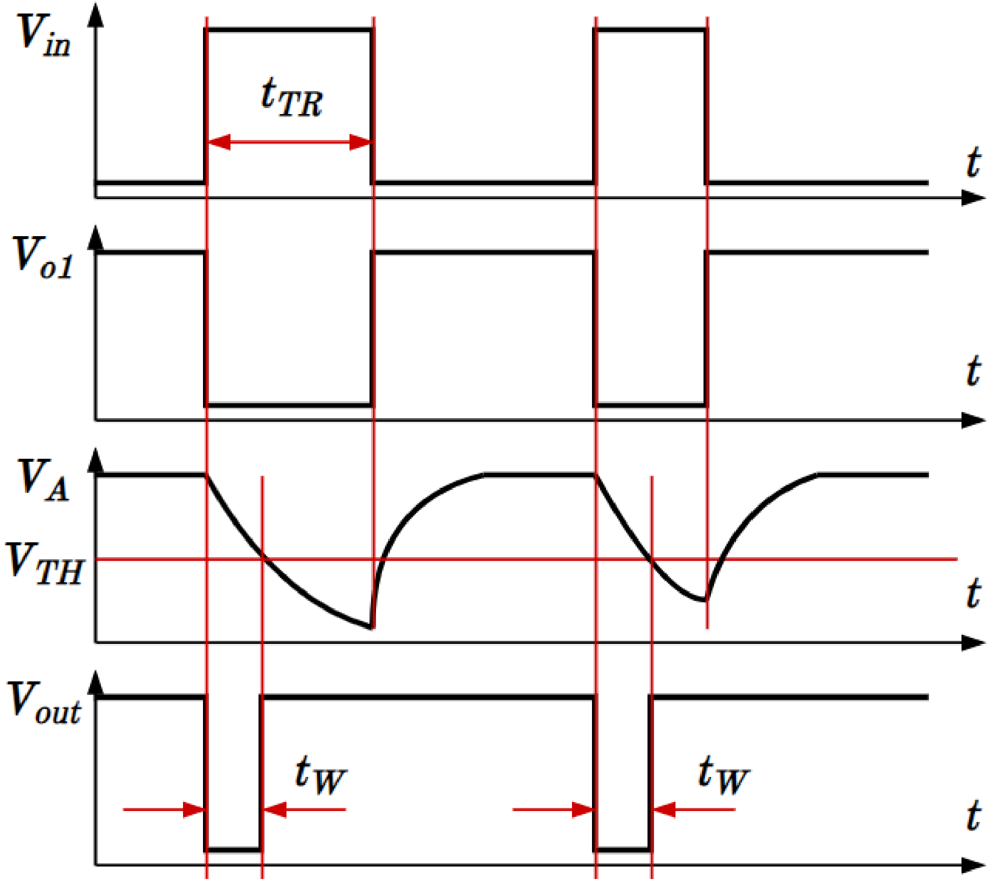
相邻触发脉冲的间隔时间，称为分辨时间：$t_d = t_w + t_{re}$

积分型单稳态电路

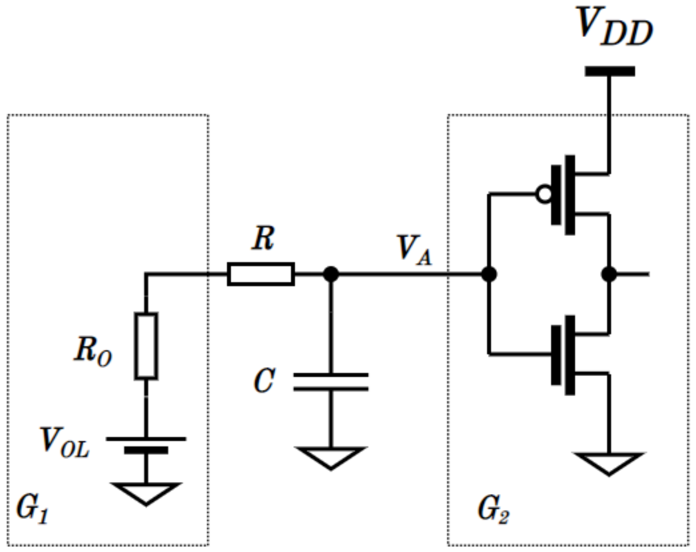
- 电路特点
  - 抗干扰
  - 对触发脉冲宽度有要求
  - 输出波形边沿不好

- 稳态下：$\begin{cases} V_{in} = 0, V_{out} = V_{OH} \\ V_{O1} = V_A = V_{OH} \end{cases}$

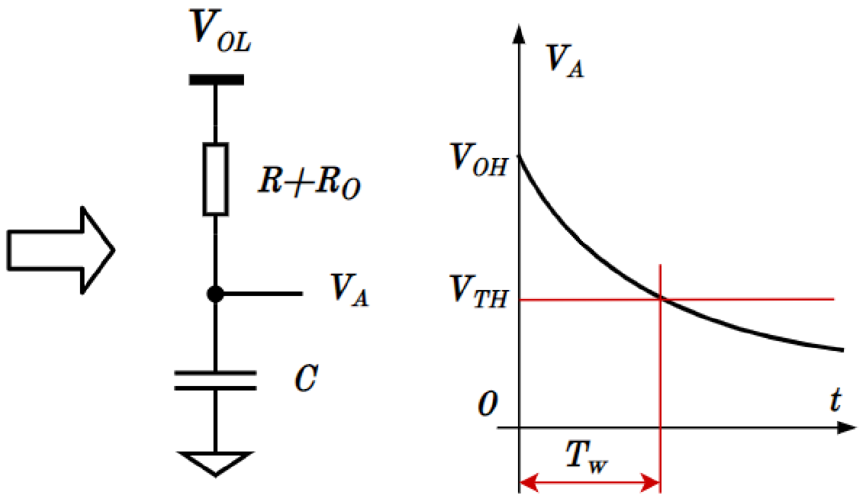




积分型单稳电路的状态变化过程

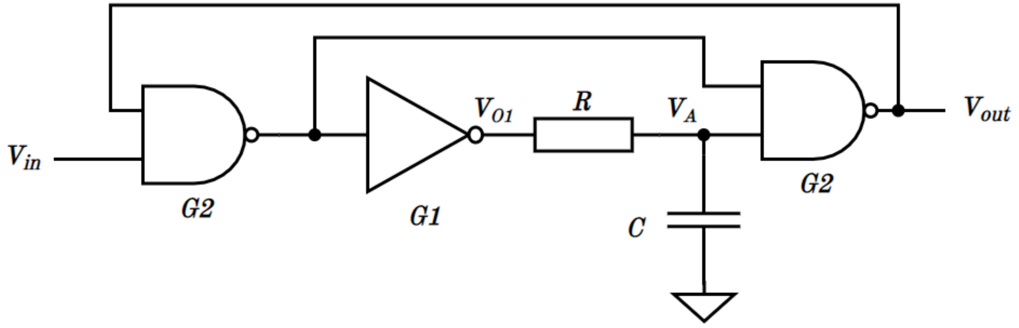


放电回路



放电波形

- 放电到V_{TH}所需时间：$t_w = (R + R_o)C \ln\frac{V_{OL}-V_{OH}}{V_{OL}-V_{TH}}$
- 恢复时间：$t_{re} = (3\sim5)(R + R_o')C$
- 电路的分辨时间：$t_d = t_{TR} + t_{re}$



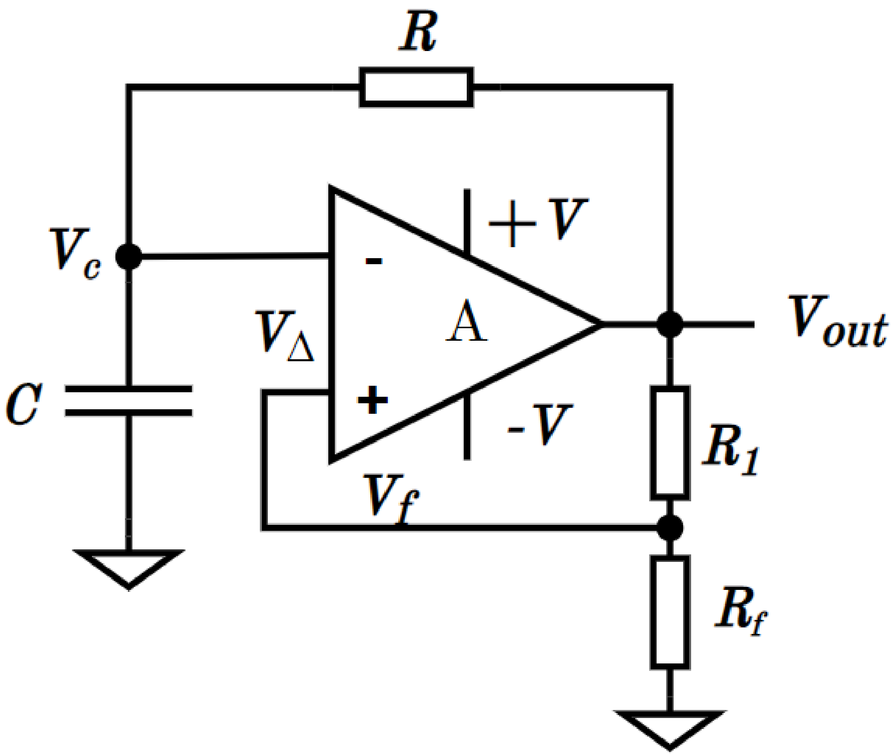
带反馈、可窄脉冲触发的单稳态电路

多谐振荡电路

- 无需触发信号，电路自主产生矩形波（包含多次谐波）

- 产生振荡的条件
  – 电路存在反馈
  – 存在产生过渡过程的原件（电感、电容）

$$\begin{cases} V_f = \dfrac{R_f}{R_1 + R_f} V_{out} = \dfrac{R_f}{R_1 + R_f} (\pm V_{SAT}) \\ V_c = (1 - e^{-t/RC}) V_{out} \\ V_\Delta = V_c - V_f \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_\Delta = 0 + \varepsilon, V_{out} \to -V_{SAT} \\ V_\Delta = 0 - \varepsilon, V_{out} \to +V_{SAT} \end{cases}$$

门电路构成的多谐振荡器

- 第一暂稳态及其变化过程，初始状态：

$$\begin{cases} V_c = 0 \\ V_{in} = 0 \\ V_{o1} = V_{OH} \\ V_{out} = V_{OL} \end{cases}$$

$$V_{in} = V_c = \left(1 - e^{-t/RC}\right)(V_{OH} - V_{OL})$$

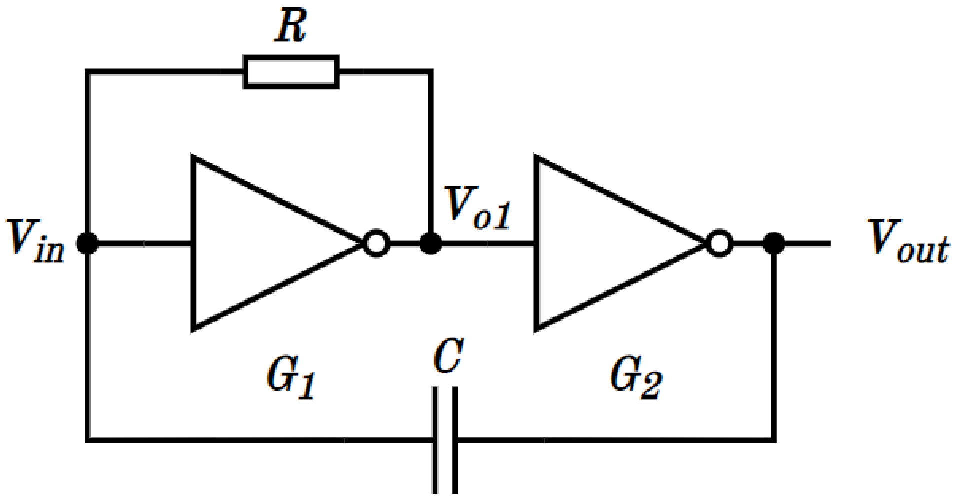
$$V_{in} \uparrow \rightarrow V_{in} = V_{TH} \rightarrow V_{O1} = V_{OL} \rightarrow V_{out} = V_{OH}$$

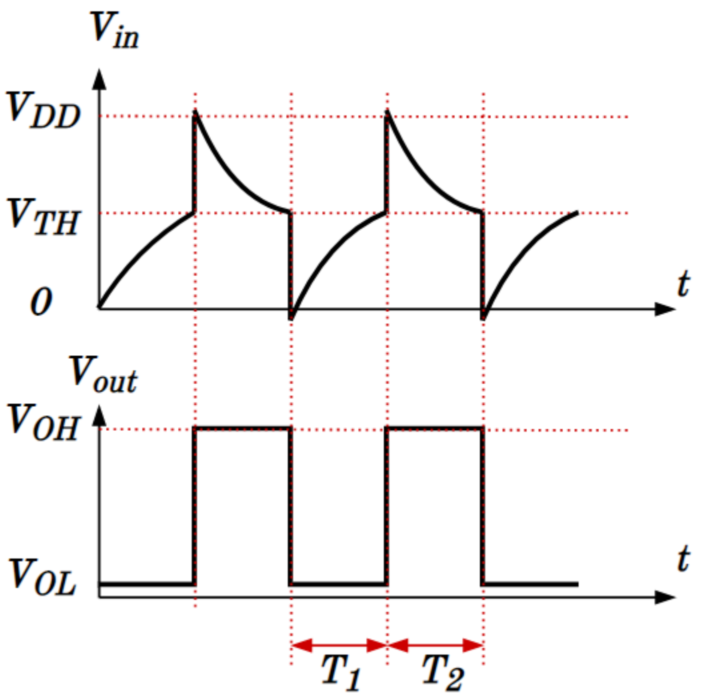
- 第二暂稳态及其变化过程，初始状态：

$$\begin{cases} V_c = V_{TH} \\ V_{in} = V_{TH} + V_{OH} \\ V_{o1} = V_{OL} \\ V_{out} = V_{OH} \end{cases}$$

$$V_{in} = V_c + V_{OH} = V_{OL} + (V_{OH} - V_{OL})e^{-t/RC}$$

$$V_{in} \downarrow \rightarrow V_{in} = V_{TH} \rightarrow V_{O1} = V_{OH} \rightarrow V_{out} = V_{OL}$$





门电路振荡器周期计算

- **假设：** $\begin{cases} V_{OH} \approx V_{DD} \\ V_{OL} \approx 0 \\ V_{TH} = {}^{1}\!/_{2}\, V_{DD} \end{cases}$

- **第一**暂稳态的持续时间：从$V_C = 0$充电到$V_C = V_{TH}$所需要的时间 T_1

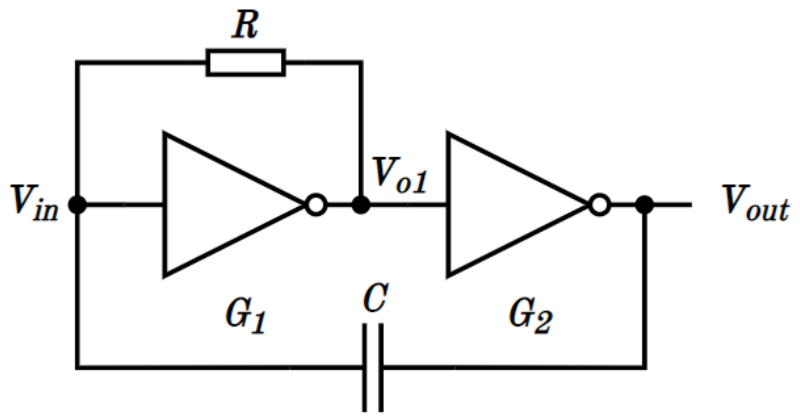
$$V_{in} = V_c = \left(1 - e^{-t/RC}\right)(V_{OH} - V_{OL}) = V_{TH}$$

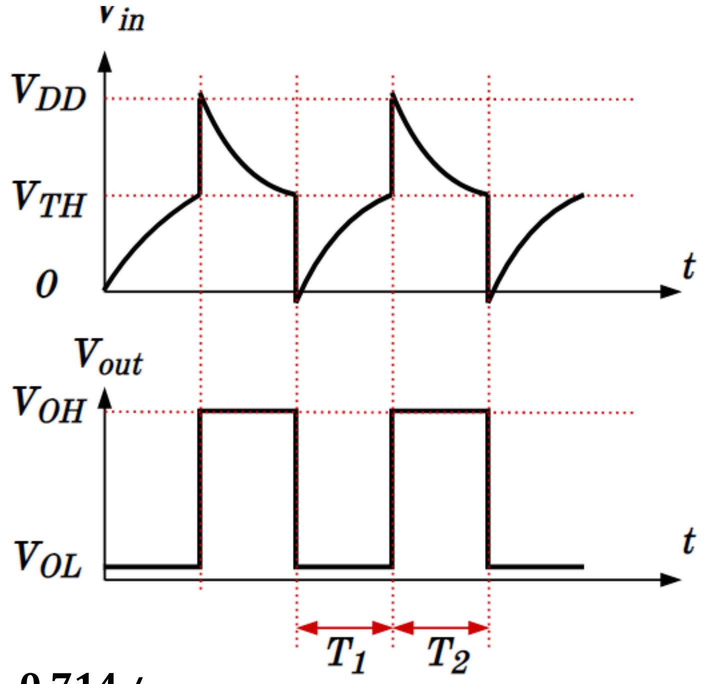
$$T_1 = RC\ln\frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \approx RC\ln 2 = 0.69RC$$

- **第二**暂稳态的持续时间：从$V_C = V_{DD}$放电到$V_C = V_{TH}$所需要的时间 T_2

$$V_{in} = V_c + V_{OH} \approx V_{OL} + (V_{OH} - V_{OL})e^{-t/RC} = V_{TH}$$

$$T_2 = RC\ln\frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{TH} - V_{OL}} \approx RC\ln 2 \approx 0.69RC$$

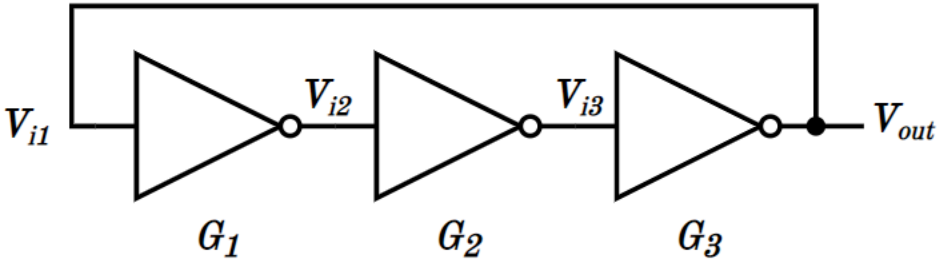




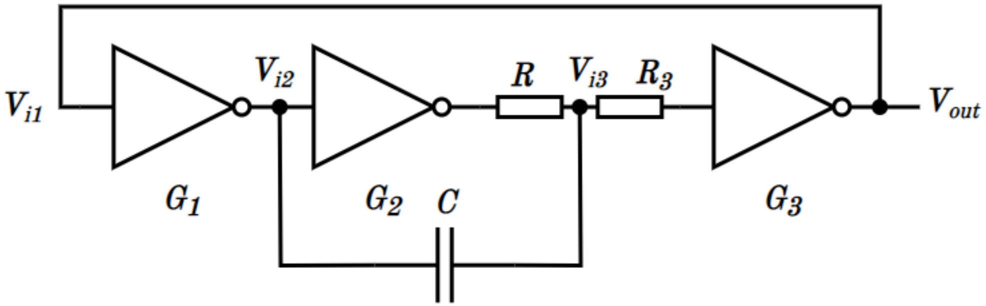
- **振荡器产生的矩形脉冲信号周期** $T \approx 1.4RC$,频率：$f = {}^{1}\!/_{T} = {}^{0.714}\!/_{RC}$

环形振荡电路

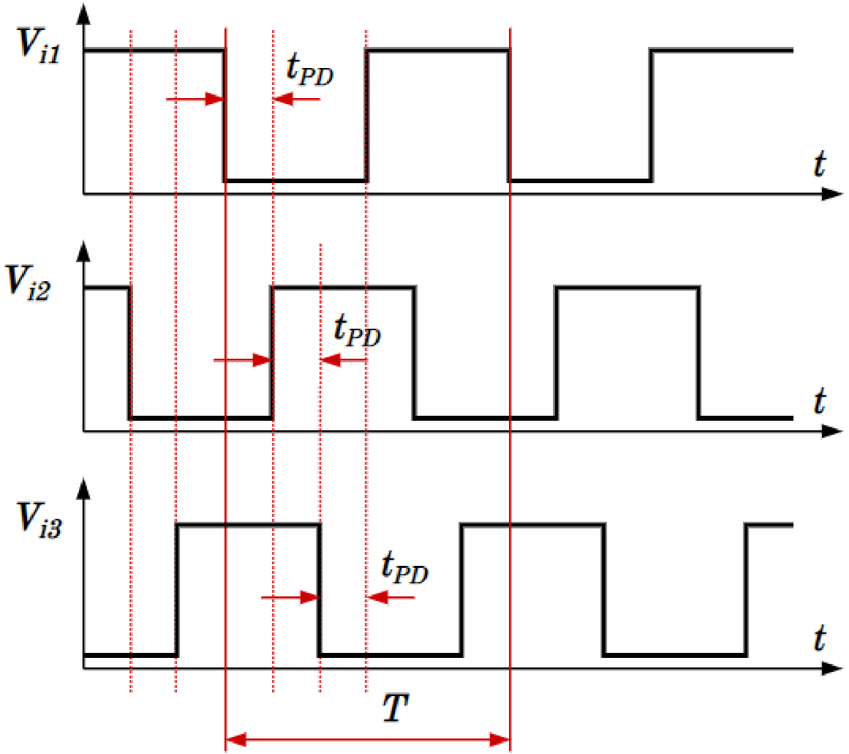
- 把奇数个非门首尾连接构成环形电路，能产生自激振荡
  - 假设每级门的传输延迟为 t_{PD}
  - 振荡周期 $T = 2nt_{PD}$



环形振荡电路



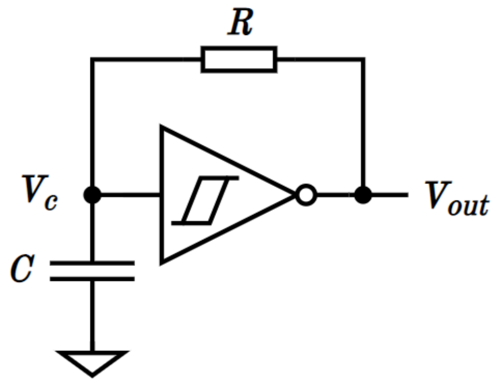
带有延迟网络的环形振荡电路

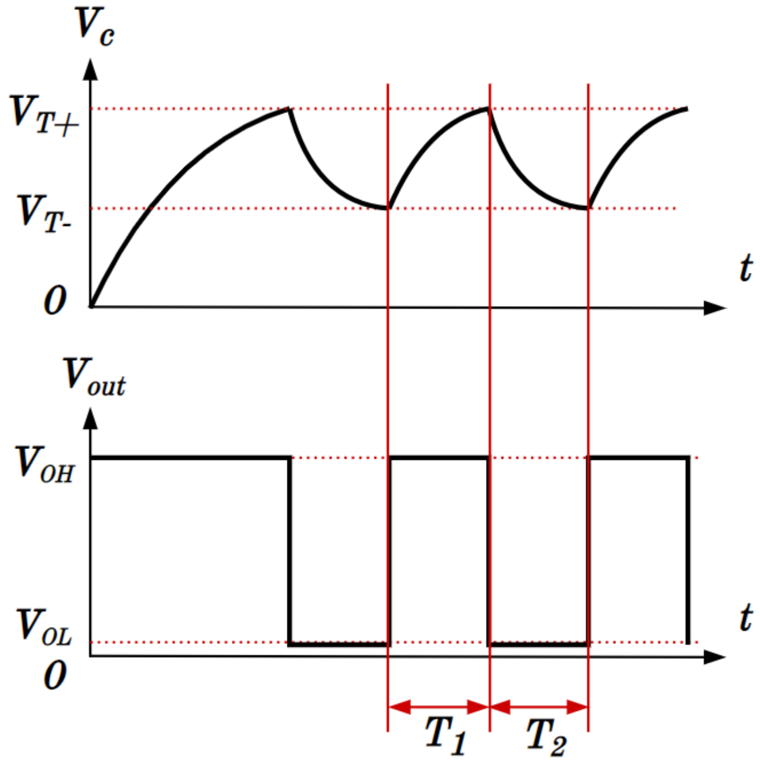


用施密特电路构成的多谐振荡器

- 施密特电路本身具有正反馈，增加储能元件就可构成振荡电路

- 振荡周期计算
  - T_1计算：$T_1 = RC\ln\frac{V_{DD}-V_{T-}}{V_{DD}-V_{T+}}$
  - T_2计算：$T_2 = RC\ln\frac{V_{T+}}{V_{T-}}$
  - $T = T_1 + T_2 = RC\left(\ln\frac{V_{DD}-V_{T-}}{V_{DD}-V_{T+}} \cdot \frac{V_{T+}}{V_{T-}}\right)$





施密特振荡电路举例

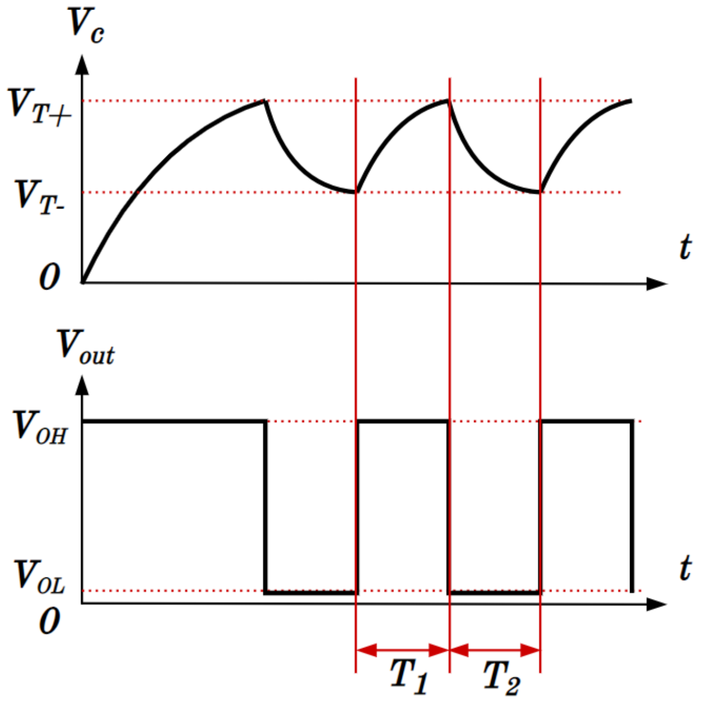
- 举例：$R=10k\Omega, C=0.022\mu F$，$CMOS$施密特电路 $V_{DD}=5V, V_{OH}\approx 5V, V_{OL}=0V$，$V_{T+}=2.75V$，$V_{T-}=1.67V$，试计算输出波形的高、低电平的持续时间$t_{pH}$、$t_{pL}$，占空比 q

解：

$$t_{pH}=T_1=RC\ln\frac{V_{DD}-V_{T-}}{V_{DD}-V_{T+}}=10k\Omega\times 0.022\mu F\cdot\ln\frac{5-1.67}{5-2.75}=86.2\mu s$$

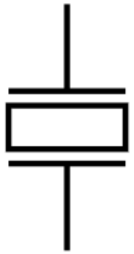
$$t_{pL}=T_2=RC\ln\frac{V_{T+}}{V_{T-}}=10k\Omega\times 0.022\mu F\cdot\ln\frac{2.75}{1.67}=110\mu s$$

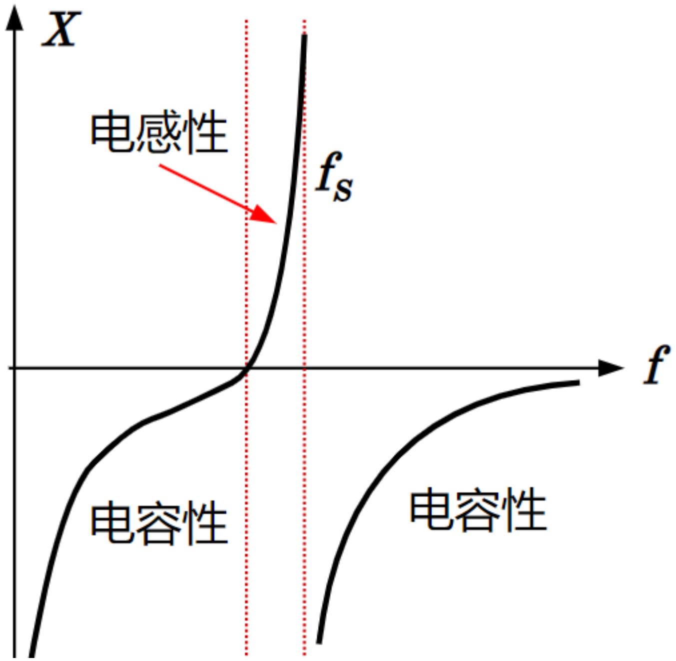
$$q=\frac{t_{pH}}{t_{pH}+t_{pL}}=\frac{86.2}{86.2+110}=43.9\%$$

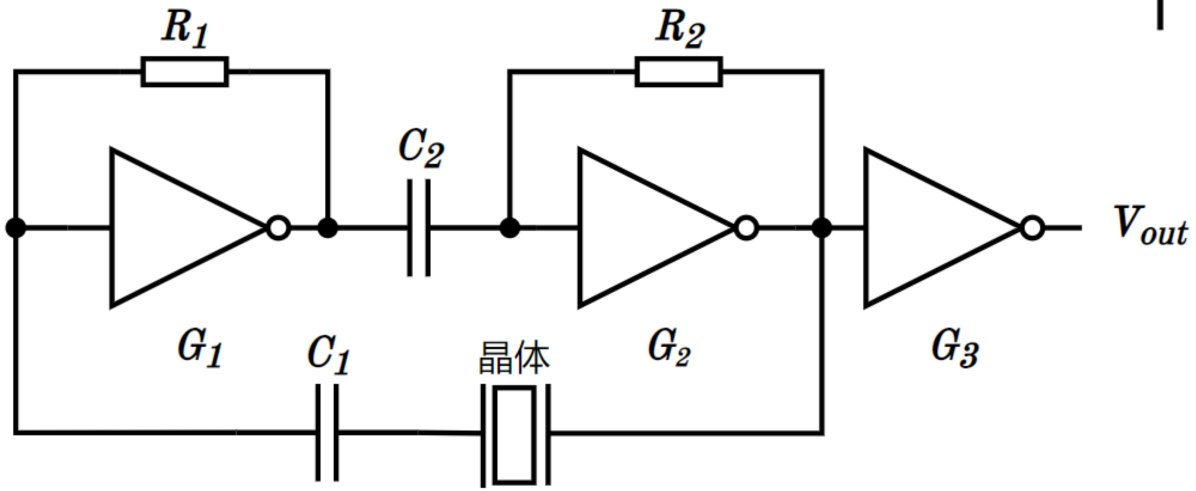


石英晶体多谐振荡器

- RC振荡器的特点
  - RC振荡器输出频率较低
  - 稳定性较差，与阈值电压有关，易产生飘移
- 石英晶体振荡器
  - 稳定性高：$\Delta f_s / f_s$可达10^{-10}~10^{-11}
  - 产生的频率较高：~$100MHz$



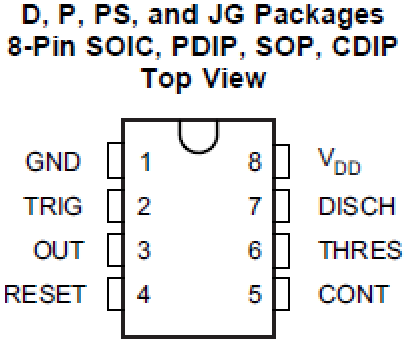


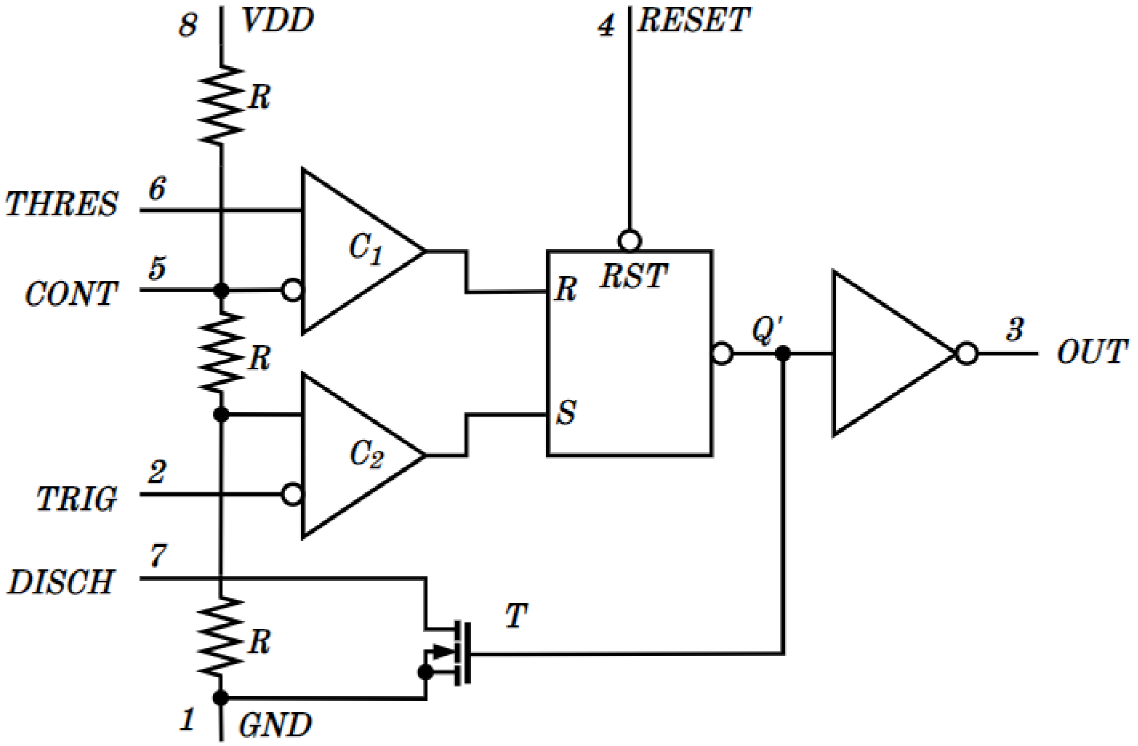


- R_1, R_2使反相器工作在线性区
- C_1, C_2是耦合电容，高频下阻抗很小
- 晶体在特征频率点阻抗很小，形成正反馈，产生自激振荡
- 输出门增加驱动能力

555定时器(TLC555)

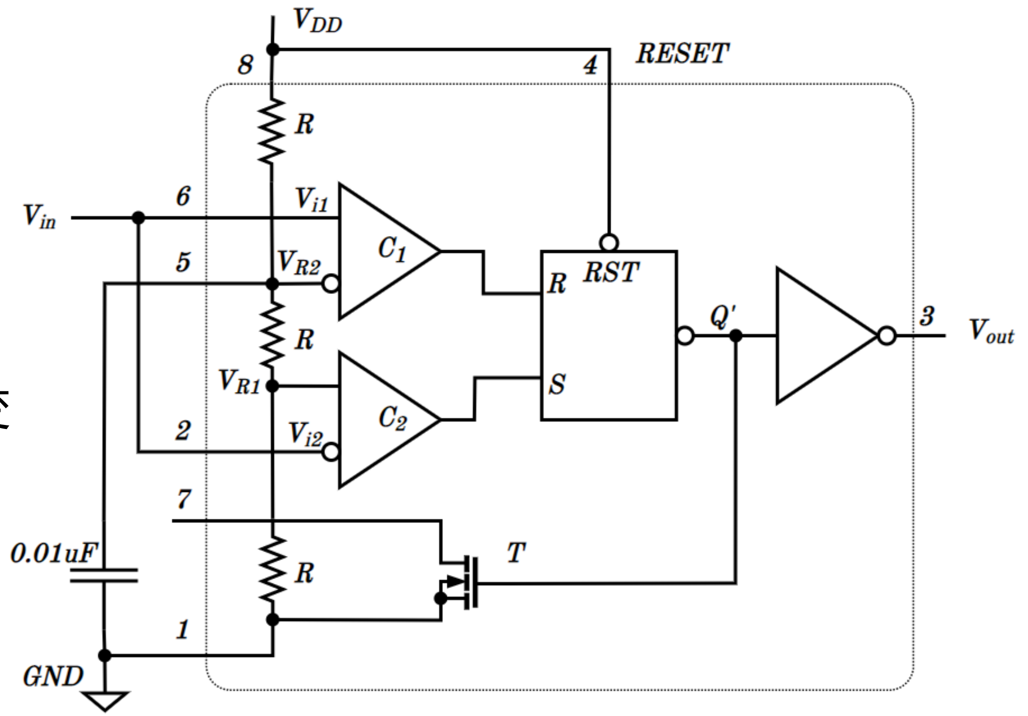
- 多用途数字、模拟混合集成电路
- 可实现多种功能
  - 精准定时
  - 脉冲生成
  - 时序控制
  - 延时产生
  - 脉冲宽度调制
  - 脉冲相位调制
  - 线性斜坡信号发生

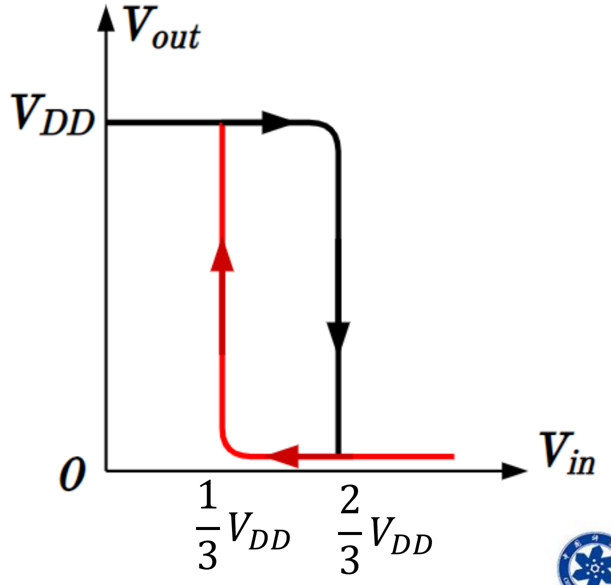




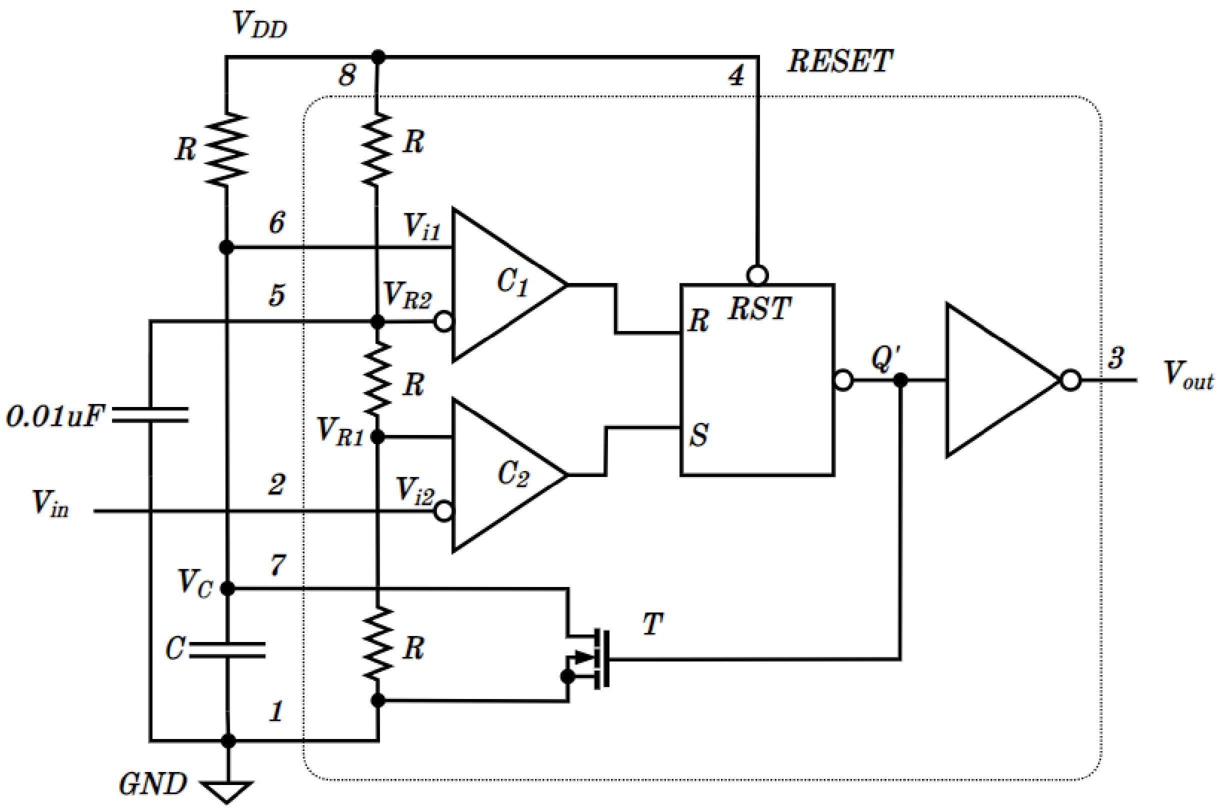
555定时器实现施密特触发器

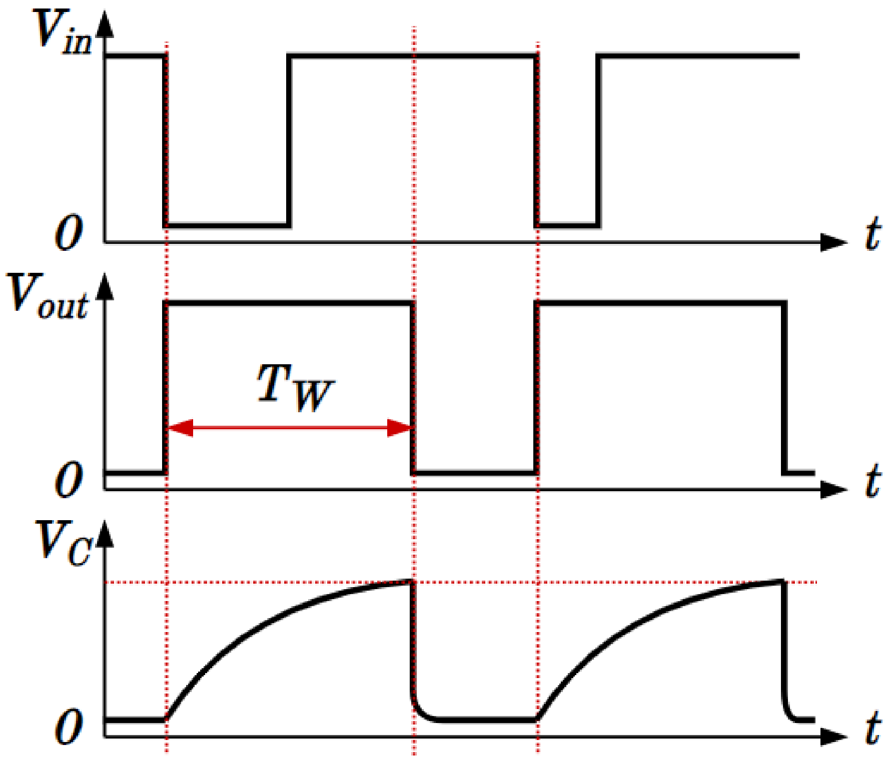
- 把输入V_{i1}和V_{i2}连在一起，就构成了施密特电路
- V_{in}从0升高的过程中
  - $0 < V_{in} < \frac{1}{3}V_{DD}$, $V_{C1} = 0, V_{C2} = 1$, $Q' = 0$, $V_{out} = V_{OH}$
  - $\frac{1}{3}V_{DD} < V_{in} < \frac{2}{3}V_{DD}$, $V_{C1} = V_{C2} = 0$, $Q' = 0$, $V_{out} = V_{OH}$，不变
  - $\frac{2}{3}V_{DD} < V_{in} < V_{DD}$, $V_{C1} = 1$，$V_{C2} = 0$, $Q' = 1$, $V_{out} = V_{OL}$
  - 因此$V_{T+} = \frac{2}{3}V_{DD}$
- V_{in}从高于$^2/_3\,V_{DD}$开始下降的过程中
  - $\frac{2}{3}V_{DD} < V_{in} < V_{DD}$, $V_{C1} = 1$，$V_{C2} = 0$, $Q' = 1$, $V_{out} = V_{OL}$
  - $\frac{1}{3}V_{DD} < V_{in} < \frac{2}{3}V_{DD}$, $V_{C1} = V_{C2} = 0$, $Q' = 0$, $V_{out} = V_{OL}$，不变
  - $0 < V_{in} < \frac{1}{3}V_{DD}$, $V_{C1} = 0, V_{C2} = 1$, $Q' = 0$, $V_{out} = V_{OH}$
  - 因此：$V_{T-} = \frac{1}{3}V_{DD}$
- 回差电压：$\Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = \frac{1}{3}V_{DD}$





555定时器构成单稳电路



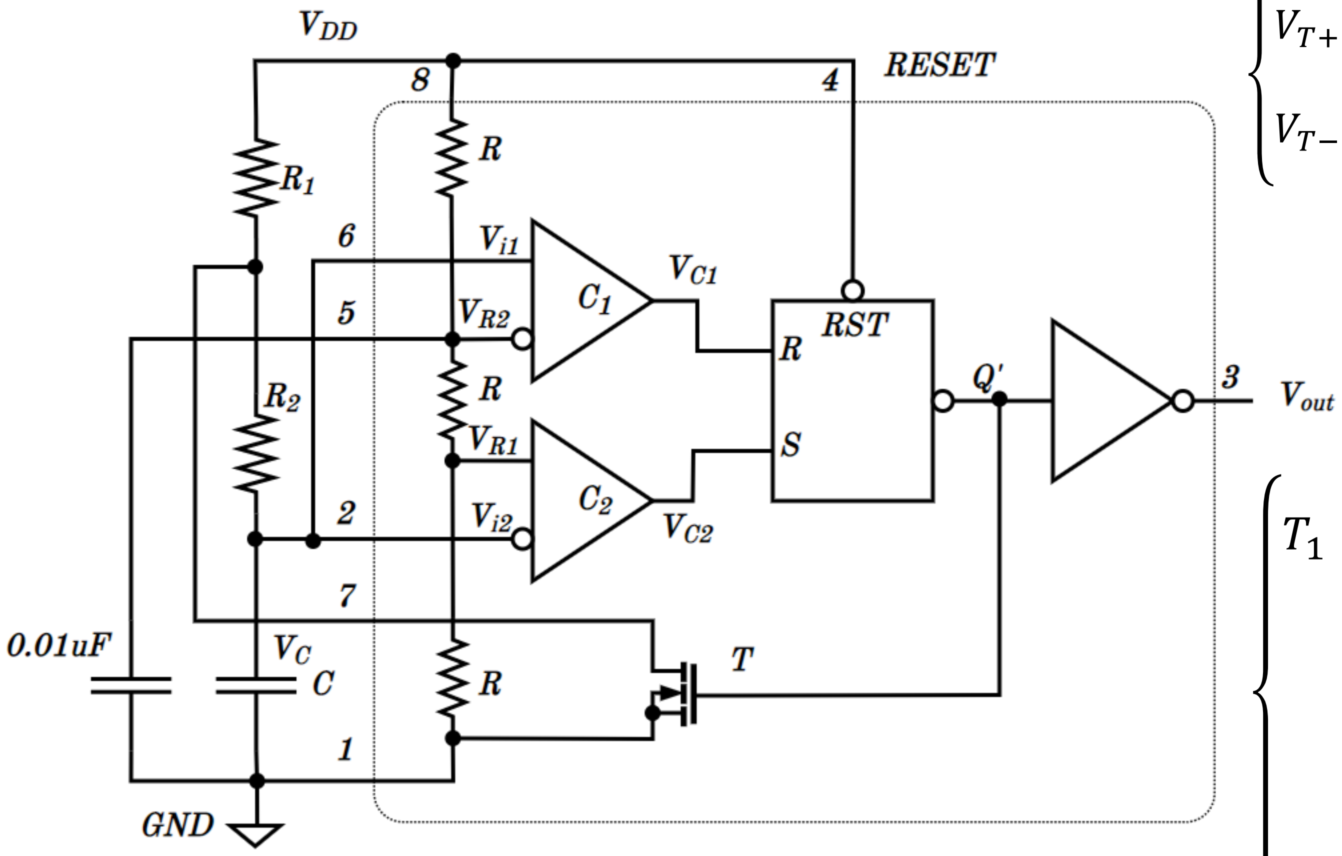


- 稳态：$V_{in}=1, V_{C2}=0, Q'=1, V_{out}=0$
- 暂态：$V_{in}=0, V_{C2}=1, Q'=0, V_{out}=1$
- 暂态开始后：T截止，C 开始通过 R 充电

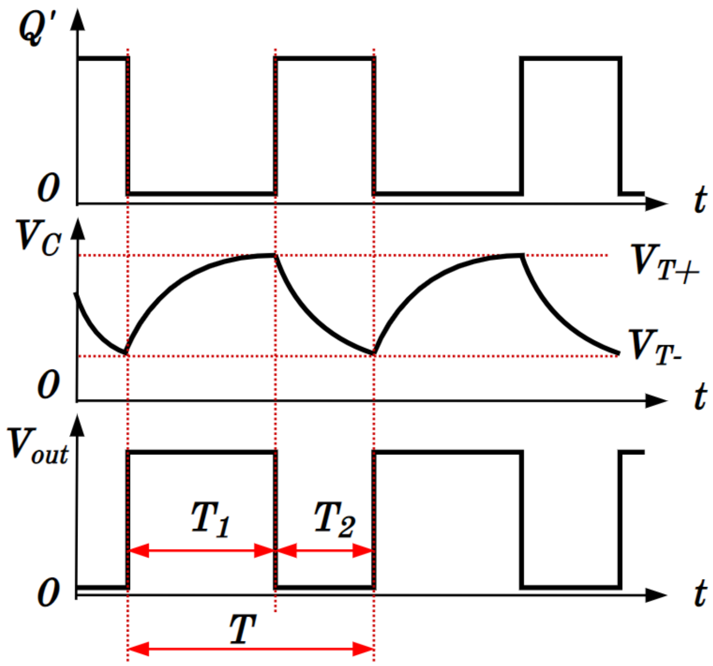
- 充电过程：$V_c=V_{DD}(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$，**达到** $\frac{2}{3}V_{DD}$时，$V_{i1}>V_{R2}\rightarrow Q'=1, V_{out}=0$, V_C快速放电
- **充电时间** $T_W=RC\ln\frac{V_{DD}-0}{V_{DD}-\frac{2}{3}V_{DD}}=RC\ln 3=1.1RC$

555定时器构成多谐振荡器

- V_{i1}与V_{i2}相连，构成施密特电路，R_1, R_2, C 构成的积分电路连到V_{i1}、V_{i2}



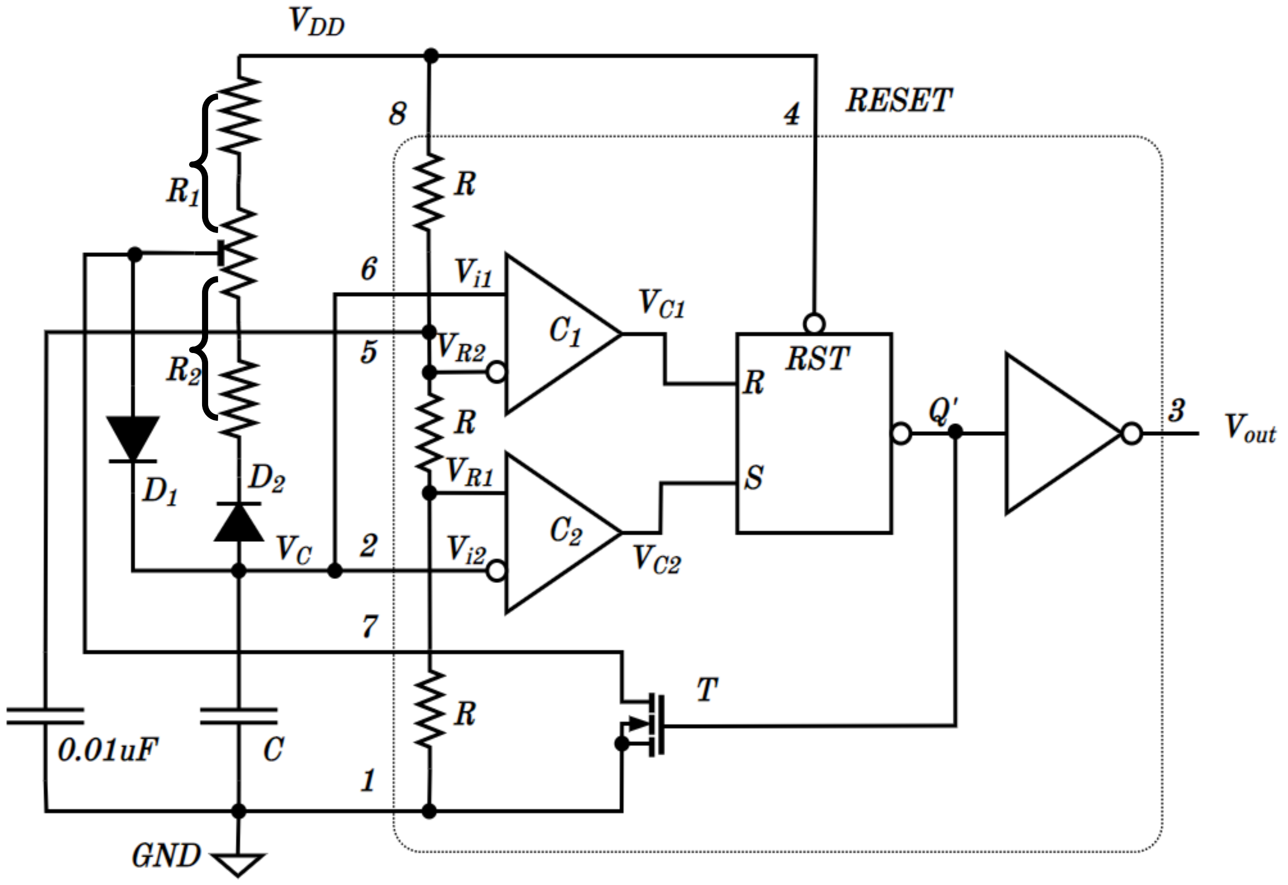
$$\begin{cases} V_{T+} = \dfrac{2}{3} V_{DD} \\ V_{T-} = \dfrac{1}{3} V_{DD} \end{cases}$$



$$\begin{cases} T_1 = (R_1 + R_2) C \ln \dfrac{V_{DD} - V_{T-}}{V_{DD} - V_{T+}} = (R_1 + R_2) C \ln 2 \\ T_2 = R_2 C \ln \dfrac{0 - V_{T+}}{0 - V_{T-}} = R_2 C \ln 2 \\ T = T_1 + T_2 = (R_1 + 2R_2) C \ln 2 \\ q = \dfrac{T_1}{T_1 + T_2} = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \end{cases}$$

555构成的多谐振荡器改进

- 原型振荡器：$q=\frac{T_1}{T_1+T_2}=\frac{R_1+R_2}{R_1+2R_2}>50\%$
- 增加二极管D_1和D_2，充电时D_1导通，放电时D_2导通：$\begin{cases} T_1=R_1C\ln 2 \\ T_2=R_2C\ln 2 \\ T=(R_1+R_2)C\ln 2 \end{cases}$



- 改进后的振荡器：
  - $q=\frac{T_1}{T_1+T_2}=\frac{R_1}{R_1+R_2}$，如果$R_1=R_2$，$q=50\%$
- 通过改变滑动电阻的位置，可以调节占空比：q

小结

- 施密特电路
  - 具有正反馈，正向阈值电压与负向阈值间存在回差
  - 用于整形、波形变换、以及幅值鉴别
- 单稳态电路
  - 存在一个稳态和一个暂态
  - 在触发信号的作用下，可以从稳态进入暂态
  - 暂态持续时间结束后，还会回到问题，暂态持续时间由电路RC参数决定
- 多谐振荡电路
  - 电路没有稳态，自发从一个暂态调到另一个暂态
  - 产生振荡的条件：电路中存在反馈，存在选频网络（RC、石英晶体、LC）
  - 施密特振荡器、奇数门环形振荡、门电路+RC网络/石英晶体
- 一个应用广泛的定时器555
  - 基本构成：两个比较器+RS触发器+充放电开关
  - 可构成：施密特电路、单稳电路、振荡电路、脉冲调制等

思考问题

- 时序数字电路是否可以实现555定时器的功能?
  - 定时器
  - 可调占空比矩形脉冲信号产生

问题和建议？