

# 数字集成电路基础

## —脉冲波形的产生与变换

张悦

微电子学院



## 目 录

9. 1 概述

9. 2 施密特触发器

9. 3 单稳态触发器

9. 4 多谐振荡器

9. 5 555定时器电路



# 脉冲波形的产生与变换

## 9.1 概述

### 脉冲波形的产生与整形

- 仅限于“矩形脉冲”

- 获得矩形脉冲的途径

1. 通过整形电路把已有周期性变化的波形  
**整形**为矩形脉冲（频率和振幅）；
2. 利用多谐振荡器直接**产生**。



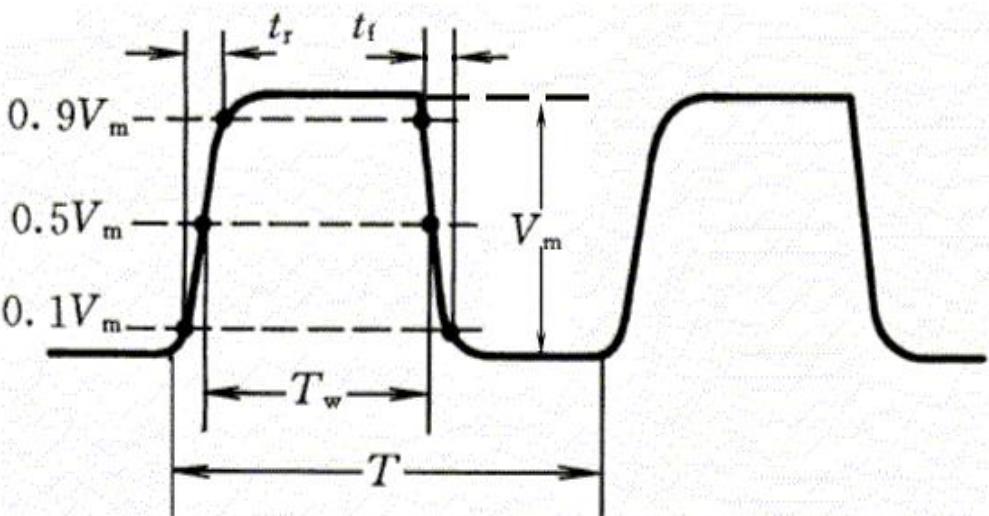
# 脉冲波形的产生与变换

## ➤ 矩形脉冲的特性

- 脉冲周期/频率

$$f = 1/T$$

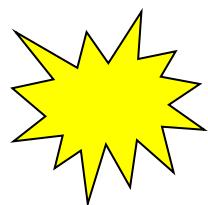
- 脉冲幅度  $V_m$
- 脉冲宽度  $T_w$
- 上升时间  $t_r$
- 下降时间  $t_f$
- 占空比 (duty factor)  $q = \frac{T_w}{T}$



# 脉冲波形的产生与变换

## 9.2 施密特触发器

- Schmitt Trigger
- 用门电路组成的施密特触发器
- 集成施密特触发器
- 施密特触发器的应用



“触发器” —trigger 区别 flip-flop (FF)



# 脉冲波形的产生与变换

## 9.2 施密特触发器

- 输入信号从低电平上升的过程中电路状态转换时对应的输入电平，与输入信号从高电平下降过程中对应的输入转换点评不同；
- 在电路状态转换时，通过电路内部的正反馈过程使输出电压波形的边沿变得很陡。
  
- 能将边沿变化缓慢的信号波形整形为边沿陡峭的矩形波，而且可以将叠加的噪音有效地清除。

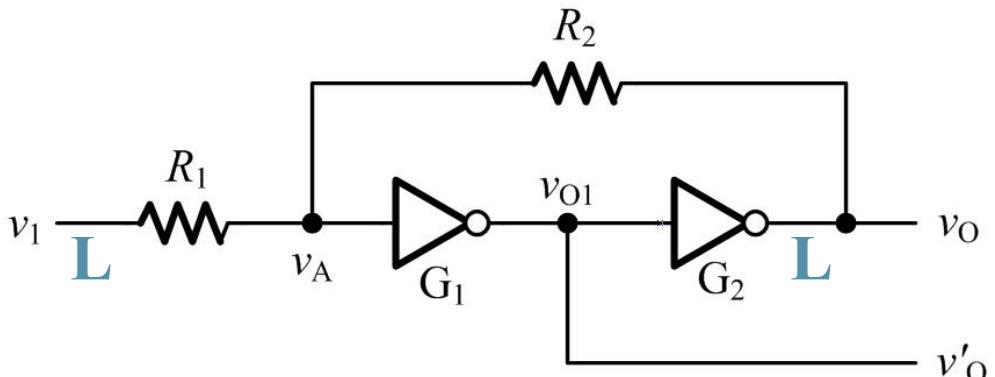
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 用门电路组成的施密特触发器

- CMOS门电路
  - 阈值  $V_{TH} = 0.5V_{DD}$
- 电路设计：

$$R_1 < R_2$$

- $R_1$  输入电阻，  $R_2$  正反馈电阻



**稳态：确定输入为0时电路的状态（即电路中各点的电压值）**

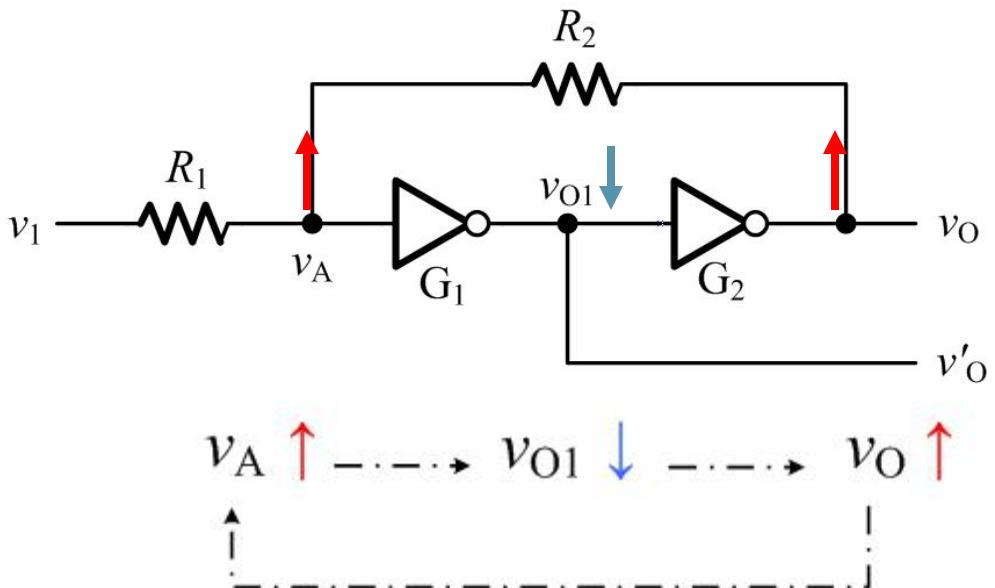
### ❖ 稳态（之一）

$v_I$ 与 $v_O$ 同相；  $v_I = 0$ 时，  $v_O = V_{OL} \approx 0$

# 脉冲波形的产生与变换

## ➤ 动态

- $v_I$  从0逐渐升高超过阈值  $V_{TH}$ ，并不会立即触发
- 当  $v_I$  继续升高并使  $v_A$  超过阈值  $V_{TH}$  的时候，
- 正反馈过程：



**动态：**找出输入电压上升过程中，电路状态发生转换是由哪一点电压控制的。

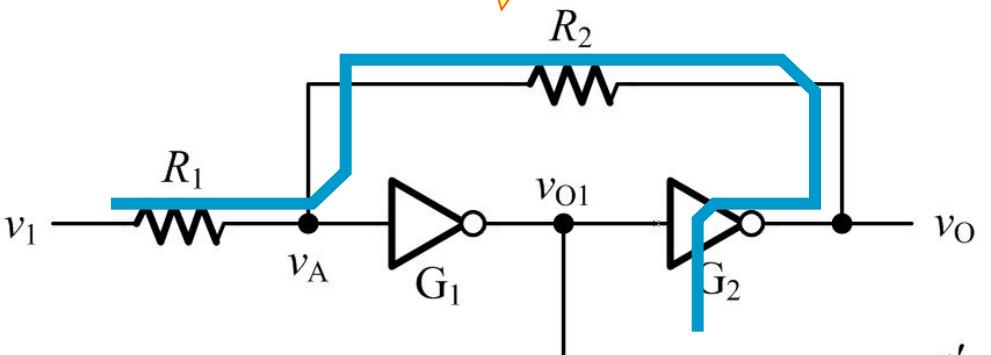
**触发条件：**计算该点电压引起电路状态发生变化时所对应的输入电压值。（定性分析→定量计算）

# 脉冲波形的产生与变换

➤ 触发条件：（“ $t$  - 时刻”）

$$v_A = V_{TH} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{T+}$$

$$V_{T+} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{TH} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{TH}$$



$V_{T+}$  被称为 “正向阈值电压”



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 同理：对于输出电平从高到低变化的过程

- **稳态**：确定输入高于  $V_T^+$  时电路的状态。
- **动态**：找出输入电压下降过程中电路状态发生转换是由哪一点的电压控制的。
- **触发条件**：计算该点电压引起电路状态发生变化时所对应的输入电压值。



# 脉冲波形的产生与变换

同理：

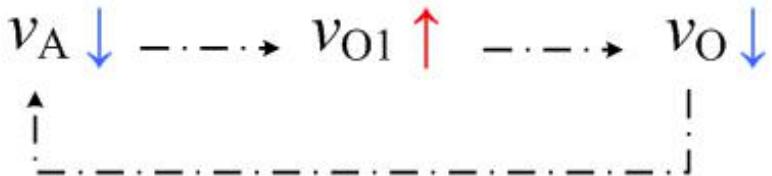
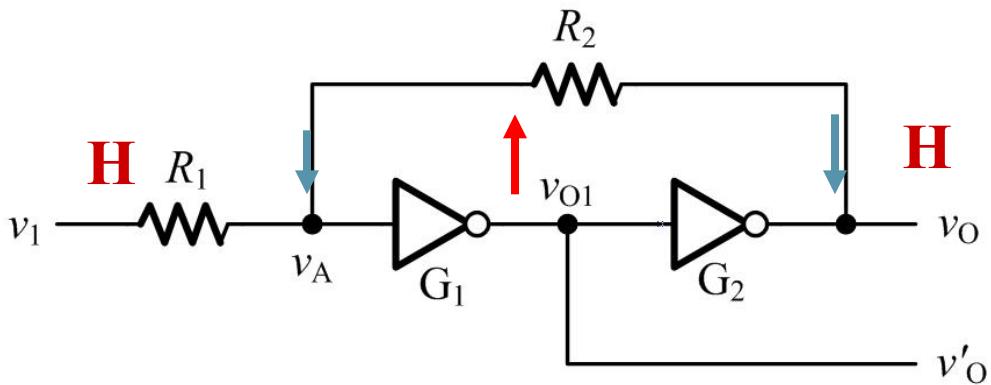
❖ 稳态：

$v_I$  与  $v_O$  同相

$v_I = V_{DD}$  时,  $v_O = V_{OH} \approx V_{DD}$

❖ 动态：

$v_I$  从  $V_{DD}$  逐渐降低, 使  $v_A = V_{TH}$  时, 电路状态迅速转换为  $v_O = 0$



# 脉冲波形的产生与变换

➤ 触发条件：

$$v_A = V_{TH} \approx V_{T^-} + (V_{DD} - V_{T^-}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{“ } t^- \text{ 时刻 ”}$$

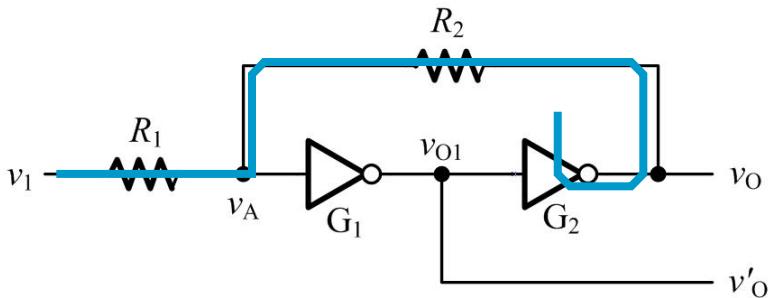
$$\left\{ \approx V_{DD} - (V_{DD} - V_{T^-}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right\}$$

或：以输出端为电位参考点

$V_{T^-}$  被称为 “负向阈值电压”

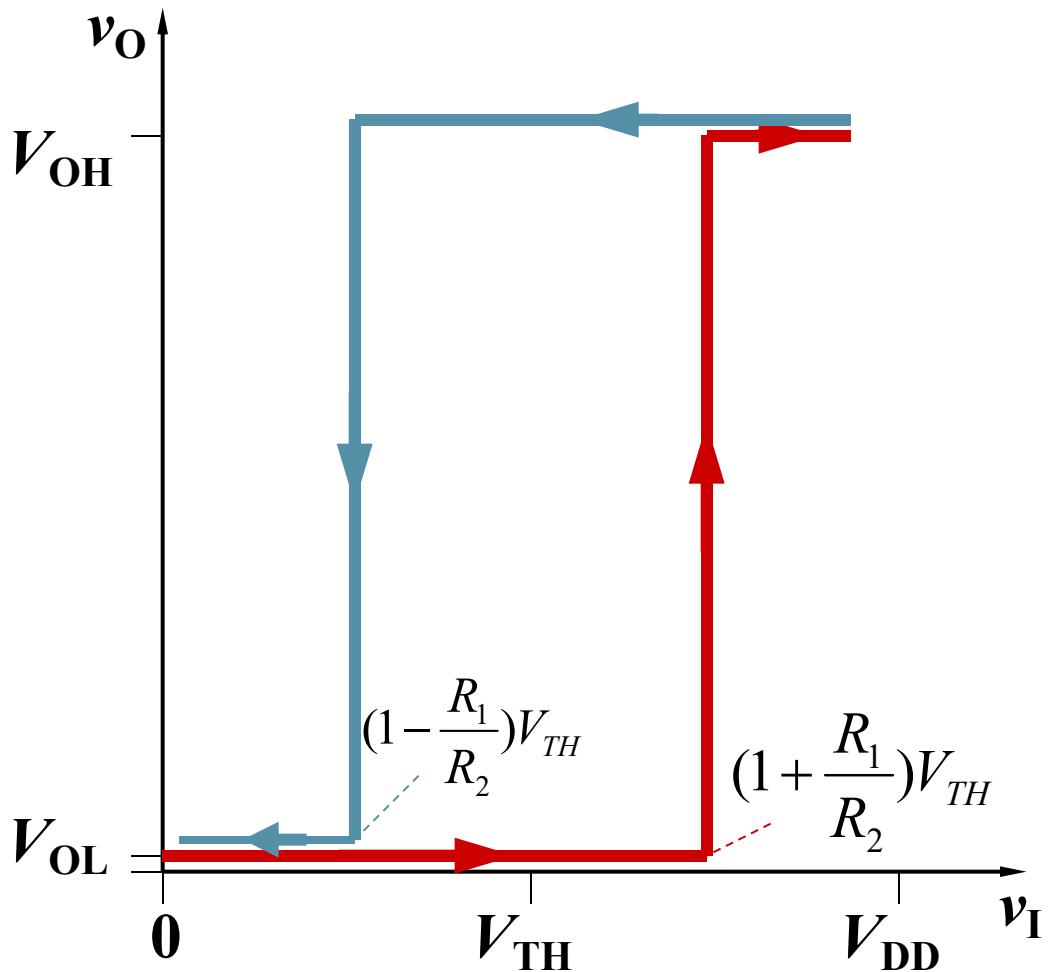
$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{T^-} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} \quad \Rightarrow$$

$$V_{T^-} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{TH} - \frac{R_1}{R_2} V_{DD} = \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) V_{TH}$$



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 电压传输特性



# 脉冲波形的产生与变换

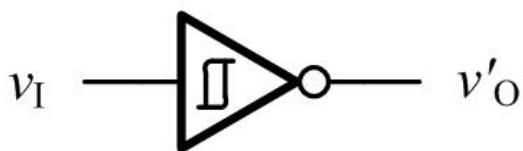
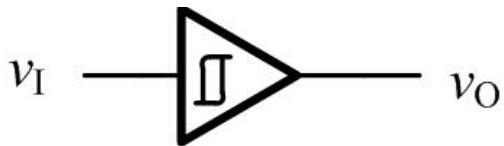
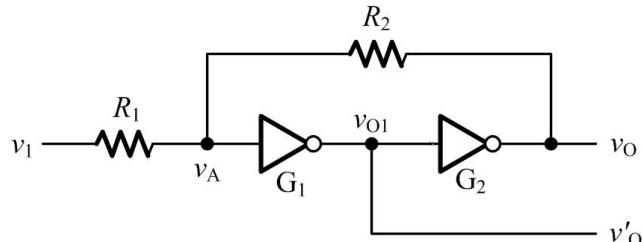
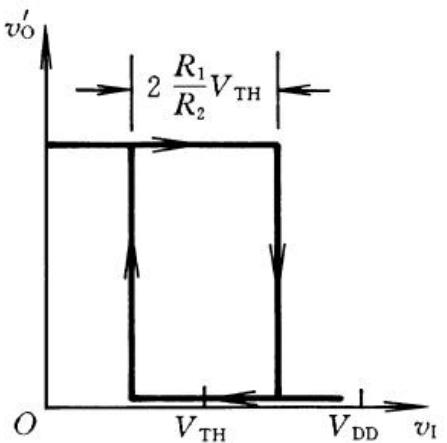
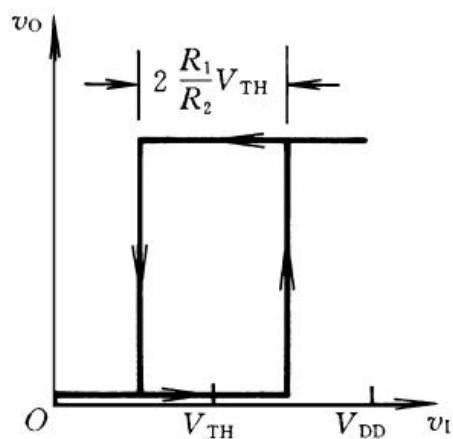
## ■ 滞回特性：

回差电压  $\Delta V_T = V_{T+} - V_{T-}$

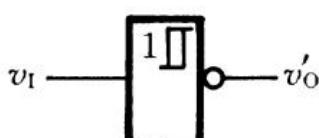
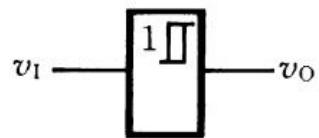
调节  $R_1$  和  $R_2$  的比值；

思考  $R_2 \gg R_1$  和  $R_1 \geq R_2$  电路的工作状态

## ■ 同相输出与反相输出



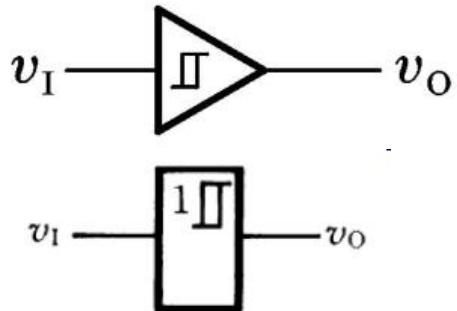
美标



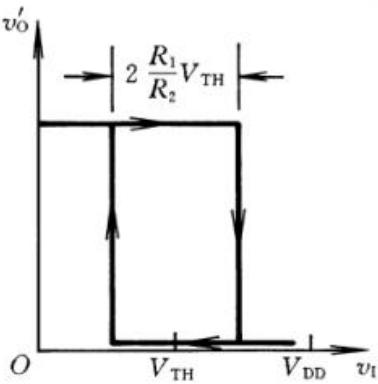
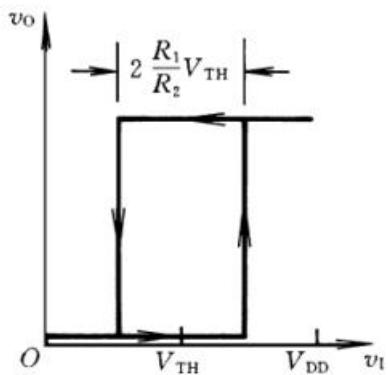
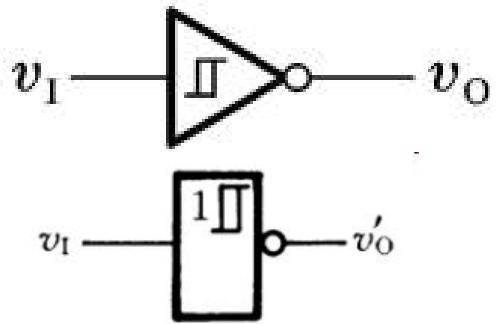
国标

# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 图形符号



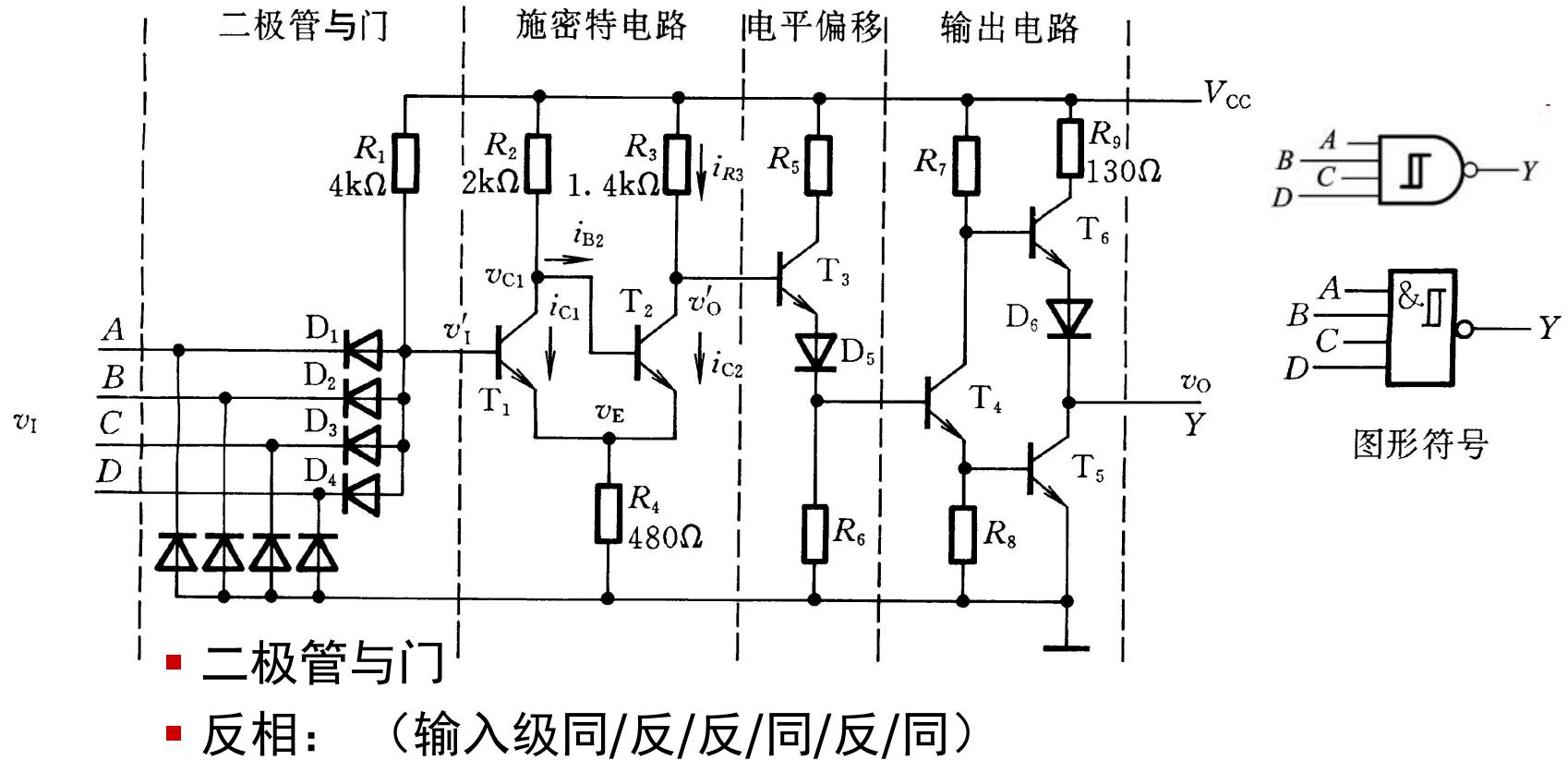
## ■ 对应：同相输出与反相输出



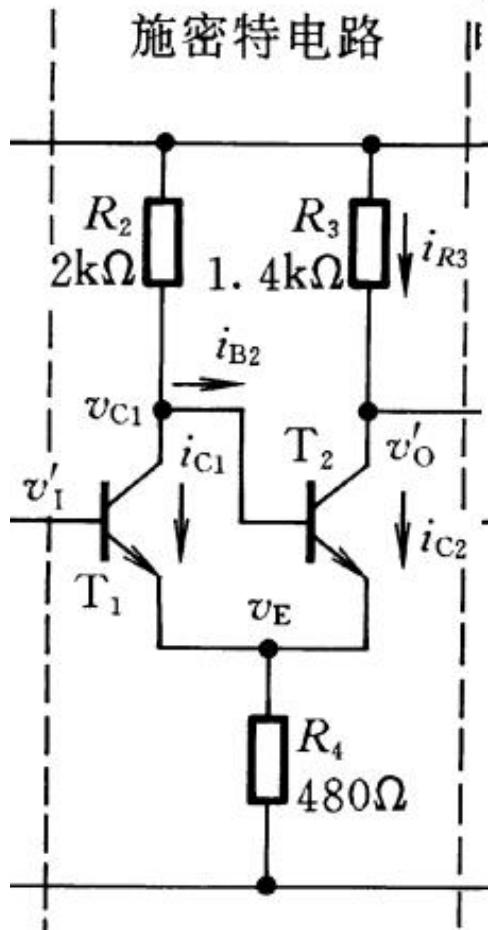
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 集成施密特触发器

➤ DTL——7413 “施密特触发的‘与非门’”



# 脉冲波形的产生与变换

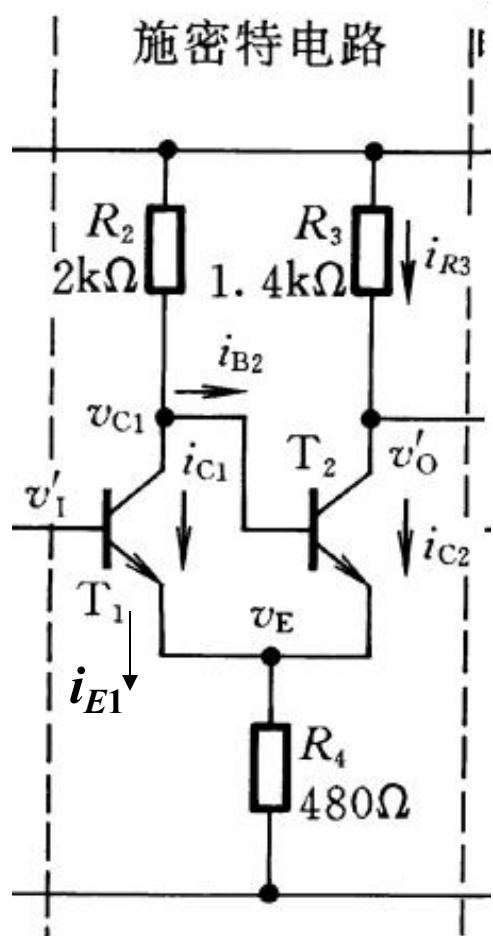


## ➤ 施密特电路

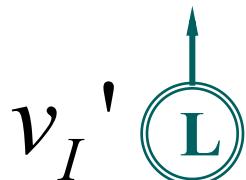
- 公共发射极电阻耦合的两极正反馈放大器
- 稳定工作状态：T1截止T2饱和；T1饱和T2截止
- 阈值电压：

$$v'_I \sim V'_{T+}, V'_{T-}$$

# 脉冲波形的产生与变换

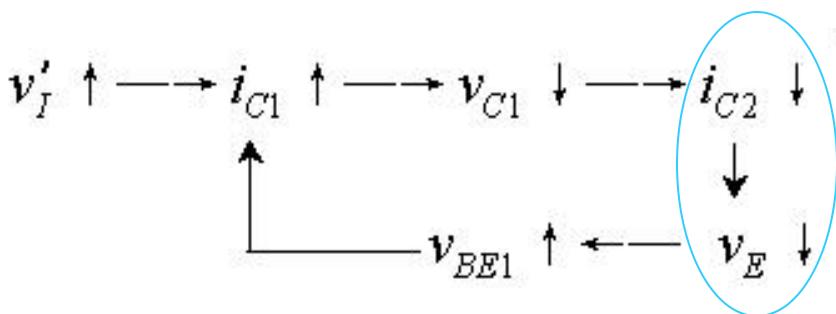


- (1-1) 稳态: T1截止, T2饱和,



- (1-2) 动态:

当 $v'_I$ 大于 $v_E$ 电平0.5~0.6V的时候，触发正反馈，T1开启



问题: 但是 $i_{C1}$  ( $i_{E1}$ )增大了, 如何解释 $v_E$ 下降?

# 脉冲波形的产生与变换

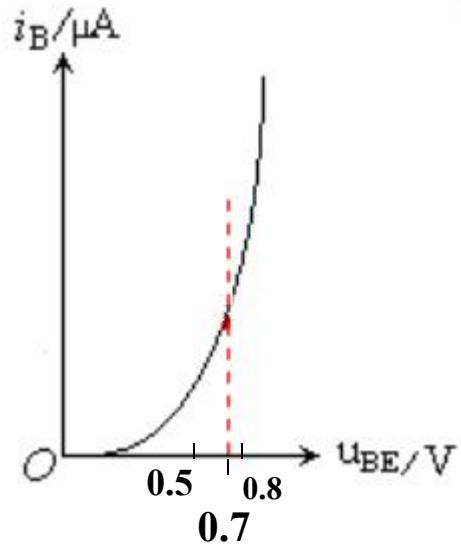
- (1-2) 动态:

(a) 分析T1和T2的工作状态:

- ❖ T1进入放大区
- ❖ T2退出饱和区

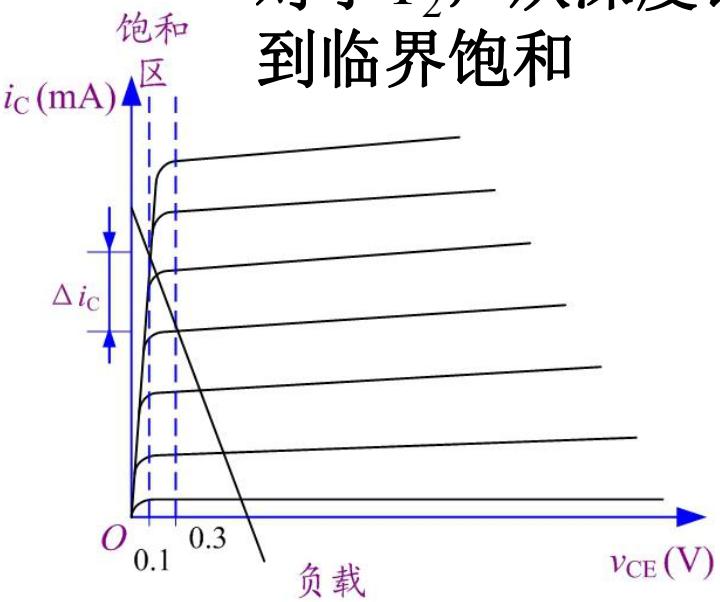
∴ 尽管  $i_{C1}$  相对增加量很大，但绝对增加量与的  $i_{C2}$  减小量相比很小。

对于  $T_1$ ,  $i_{C1} = \beta i_{B1}$



三极管输入特性曲线

对于  $T_2$ , 从深度饱和到临界饱和

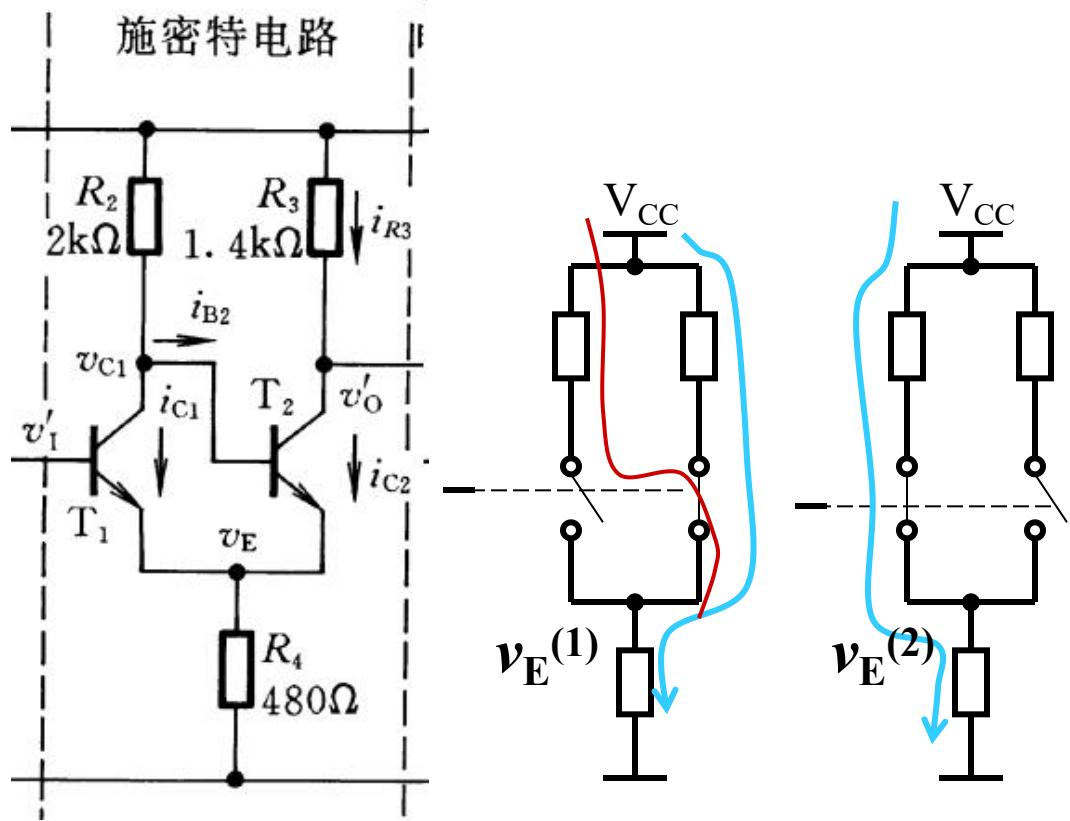


三极管输出特性曲线

# 脉冲波形的产生与变换

- (1-2) 动态： (续)

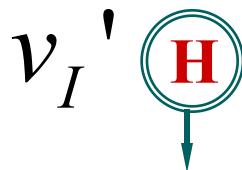
可以将两种稳态相互对比：



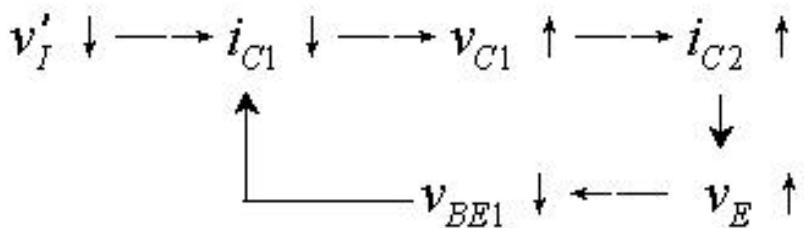
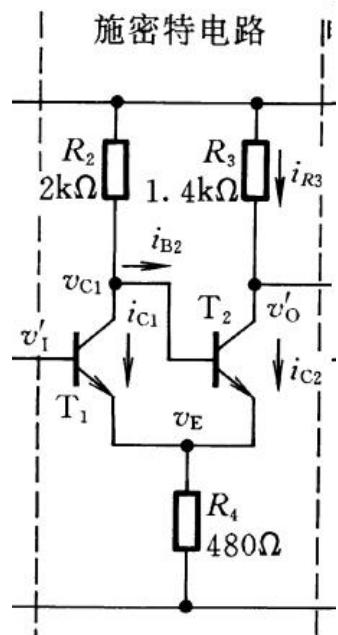
即使不考虑  $i_{B2}$ , 由于  $R_3 < R_2$ , 也会使  $v_E^{(1)} > v_E^{(2)}$ ,  
 所以: (1) → (2) 时,  
 $v_E \downarrow$

# 脉冲波形的产生与变换

- (2-1) 稳态: T1饱和, T2截止,

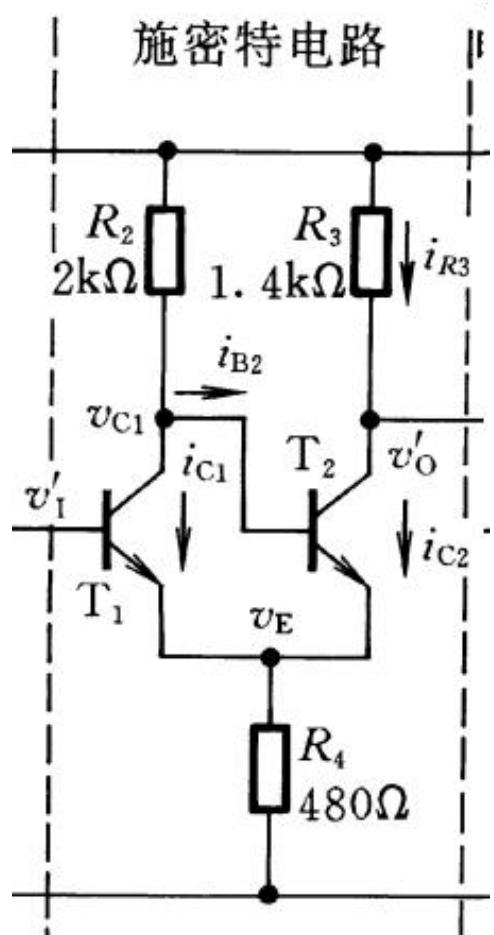


- (2-2) 动态: 当 $v'_I$ 下降到使 $v_{BE1}$ 电平低于0.7V的时候



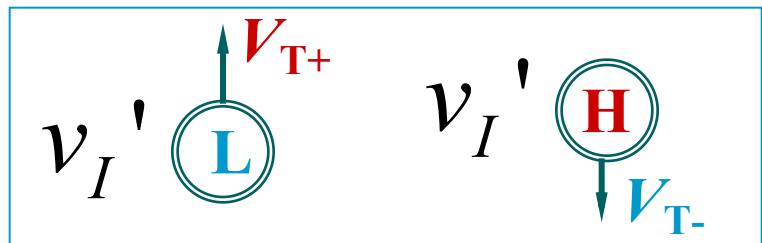
电路迅速进入T1截止, T2饱和导通

# 脉冲波形的产生与变换



定量求解阈值 →

- (3) 阈值电压



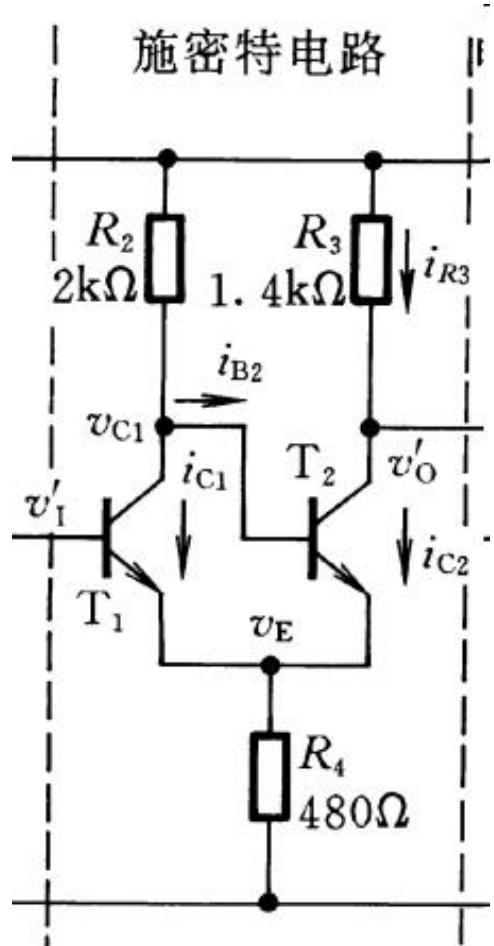
施密特触发特性： $V_{T+} > V_T$

由于  $R_2 > R_3$ , T1饱和导通时  
 $v_E$  较 T2饱和导通时低,

由  $v_E^{(1)} > v_E^{(2)}$  可以推导出:

$$V_{T+} > V_T$$

# 脉冲波形的产生与变换



定量求解阈值 →

T1截止、T2导通时电路方程

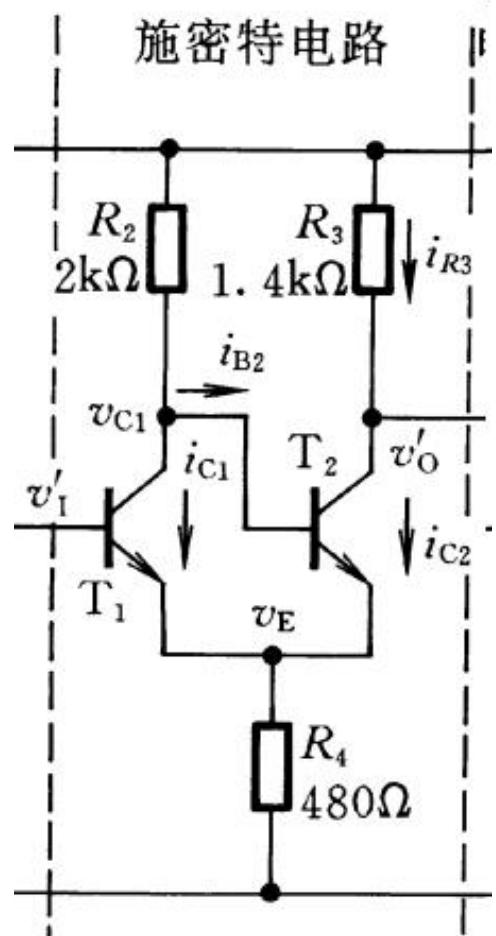
$$R_2 i_{B2} + V_{BE(sat)2} + R_4(i_{B2} + i_{C2}) = V_{CC}$$

$$R_3 i_{R3} + V_{CE(sat)2} + R_4(i_{B2} + i_{C2}) = V_{CC}$$

$$(i_{R3} \approx i_{C2}, V_{BE(sat)} = 0.8V, V_{CE(sat)} = 0.2V)$$

$$V'_{T+} = V_{E2} + 0.7V \approx 2.4V$$

# 脉冲波形的产生与变换



$v_I'$ 从高电平下降的转换点

$$v_{BE2} = v_{CE1} \approx 0.7V$$

R4上压降

$$v_{E1} = (V_{CC} - v_{CE1}) \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

$$V_{T+}' = v_{E1} + 0.7V \approx 1.5V$$

❖ 整个电路 $v_I$ 为 $v_I'$ 减去输入端二极管压降

$$V_{T+} = V_{T+}' - V_D \approx 1.7V, \quad V_{T-} = V_{T-}' - V_D \approx 0.8V, \quad \Delta V_T \approx 0.9V$$

# 脉冲波形的产生与变换

## ➤ 输入输出

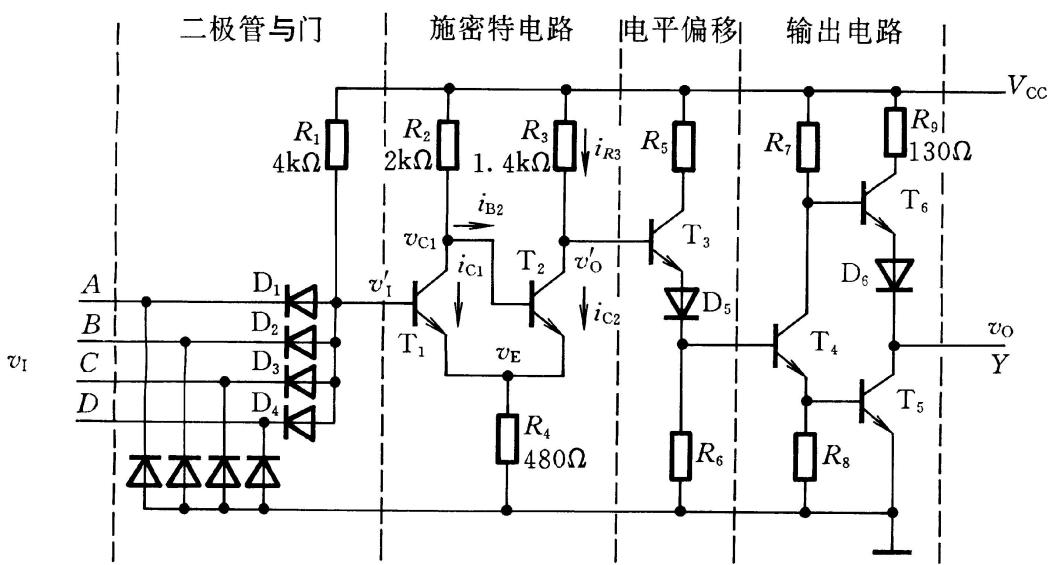
- 整个电路  $v_I$  为  $v_I'$  减去输入端二极管压降

$$V_{T+} \approx 1.7, V_{T-} \approx 0.8$$

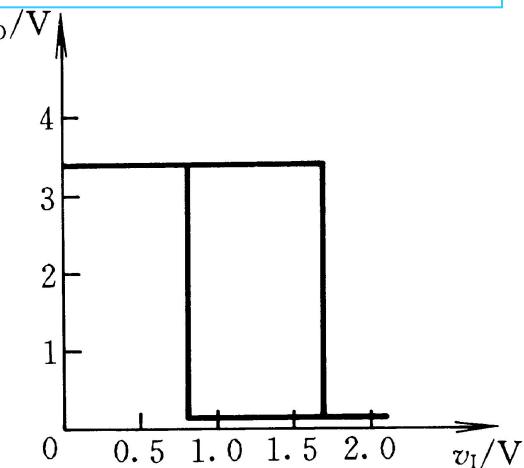
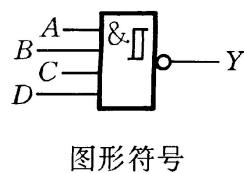
- 电平偏移

考虑  $v'_O$  的“高”、“低”电平

$$\text{低电平 } v'_O = v_E (\text{T2饱和}) + v_{CE2(\text{sat})} = 1.9\text{V}$$



- 射随电平偏移，两个PN结；
- 传输特性，→



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 小结：施密特触发器的性能特点

1. 输入信号从低电平上升到高电平 → 输出转换，  
从高电平下降到低电平 → 触发阈值不同
2. 电路状态转换时，电路内部的正反馈过程使输出电压波形的边沿陡直。

## ■ 施密特触发器的应用

- 从 施密特触发器的性能特点 入手，可以发现...

回差电压 抗干扰

转换波形边沿陡直



在应用中相辅相承

# 脉冲波形的产生与变换

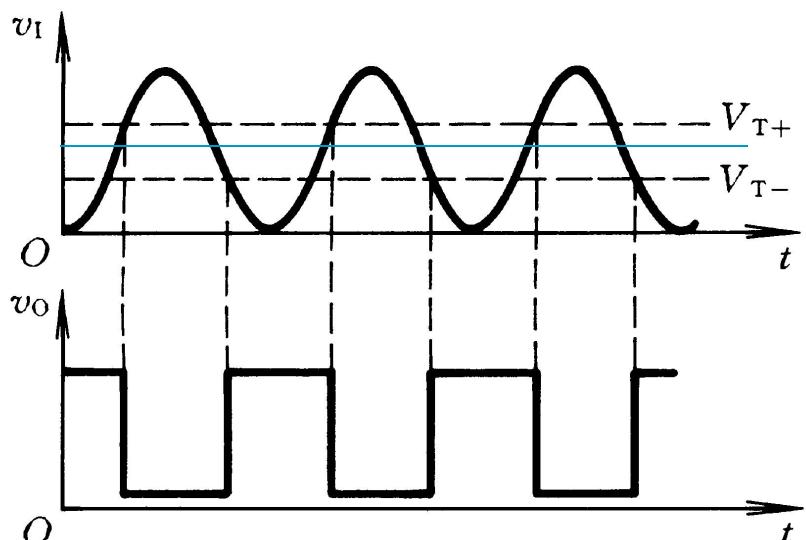
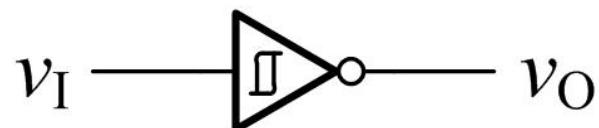
## ■ 施密特触发器的应用

### ➤ 波形变换

将缓慢变化的输入信号，转换成脉冲波形

回差电压越大，抗干扰能力越强，但...

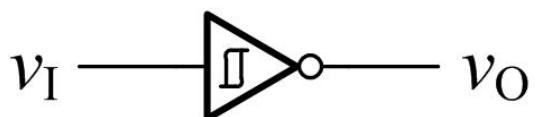
波形的对称性越差，设计上要权衡考虑。



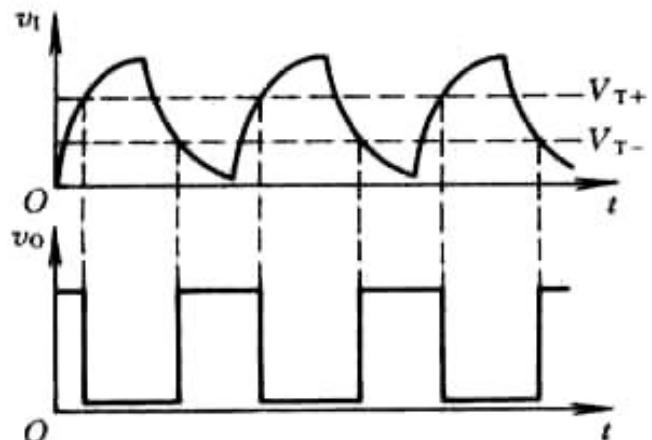
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 施密特触发器的应用

### ➤ 脉冲整形

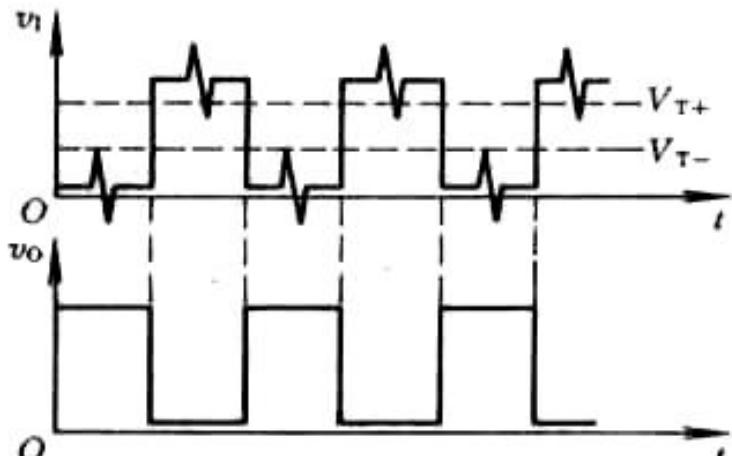


把不规则的输入信号  
整形成为矩形脉冲



(a)

电容较大



(c)

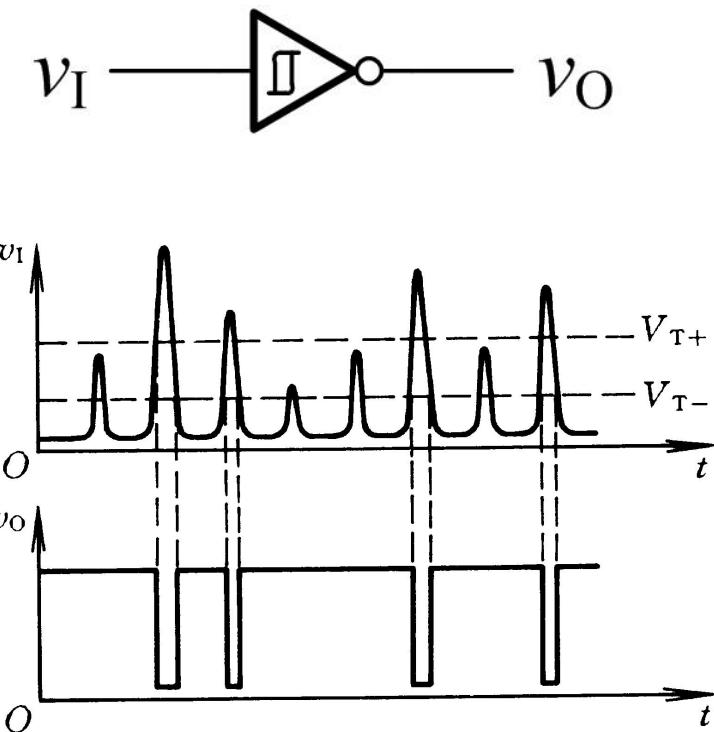
阻抗不匹配

# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 施密特触发器的应用

### ➤ 脉冲鉴幅

从一系列幅度不同的脉冲信号中，选出那些幅度大于 $V_{T+}$ 的输入脉冲





## 9.3 单稳态触发器

### ■ Mono-stable

➤ 又称：one-shot

### ■ 单稳态触发器的工作特性：

➤ 一个稳态，一个暂稳态；

➤ 在外界脉冲的作用下，能从稳态翻转到暂稳态，在暂稳态维持一段时间后，再自动返回稳态；

➤ 暂稳态维持时间的长短取决于电路本身的参数，与触发脉冲的宽度  $t_{TR}$  和幅度无关。



# 脉冲波形的产生与变换

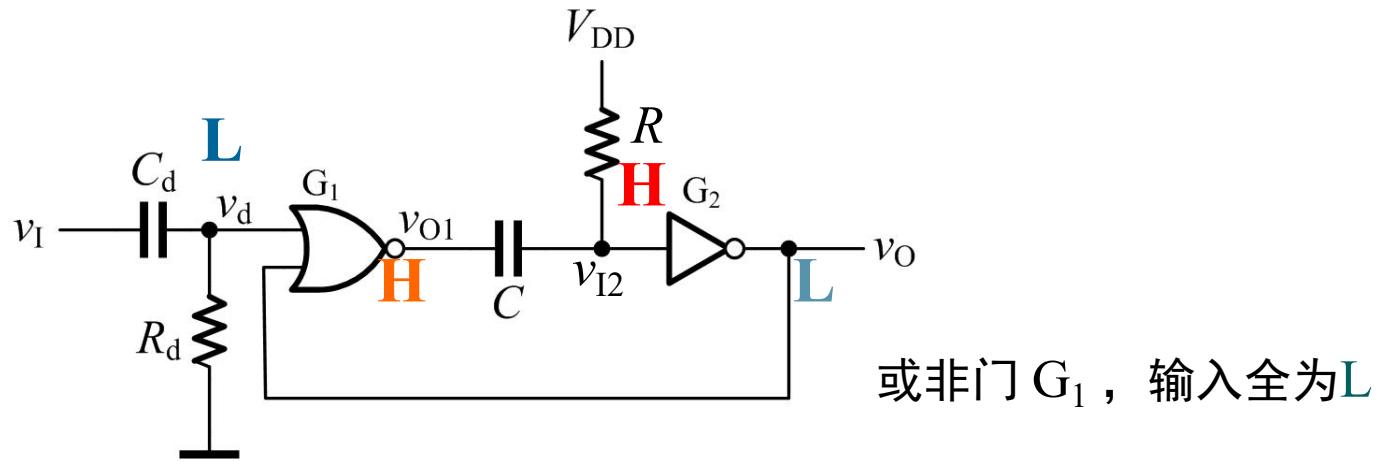
- 门电路组成的单稳态触发器
  - 微分型单稳
  - 积分型单稳
- 集成单稳态触发器
- 单稳态触发器的应用
- \*用施密特触发器构成单稳态触发器



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 门电路组成的单稳态触发器

### ➤ CMOS 门电路 微分型单稳态触发器



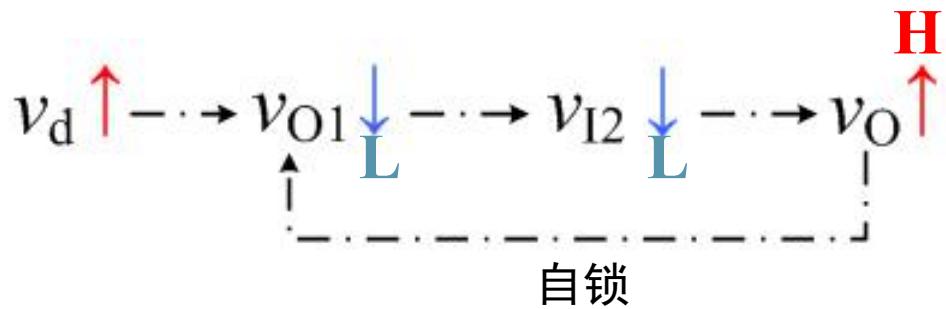
### (1) 静态（状态判断、电路等效）

判断出稳态： $v_d = 0, v_{I2} = V_{DD}, v_O = 0, v_{O1} = V_{DD}$

# 脉冲波形的产生与变换

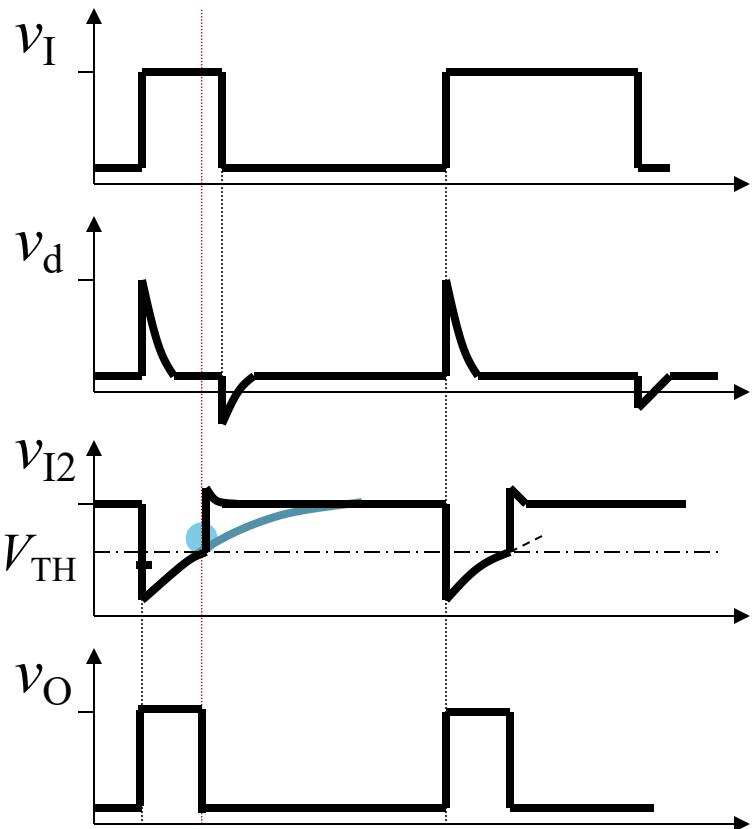
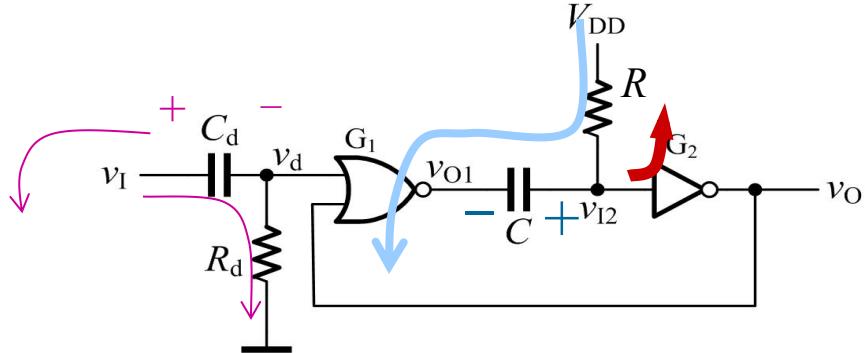
状态转换：

电容两端间的电压不会突变



$v_{I2}$  超过阈值  $\rightarrow v_O \text{ L} \rightarrow v_{O1} \text{ H}$

注意：CMOS输入端有保护电路



# 脉冲波形的产生与变换

## (3) 定量计算

——针对 充放电 定时电路

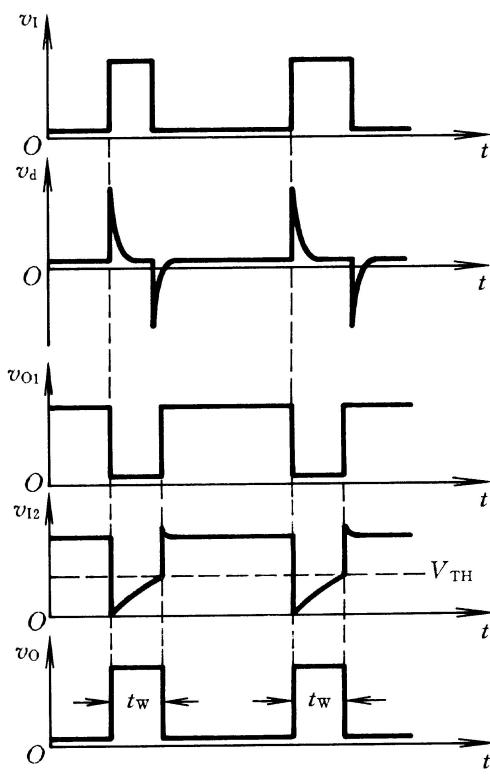
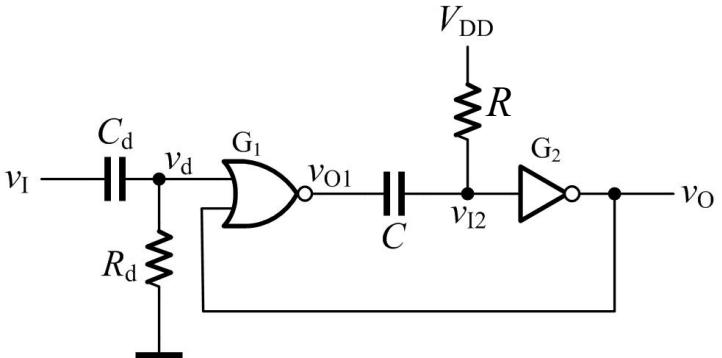
- 解RC电路的微分方程，可得动态方程

$v(t)$ 为状态变量

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

$$V_{TH} = v(\infty) + (v(0) - v(\infty))e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$t = RC \ln \frac{v(\infty) - v(0)}{v(\infty) - V_{TH}}$$



# 脉冲波形的产生与变换

## (3) 定量计算

- 充电回路

- 参数

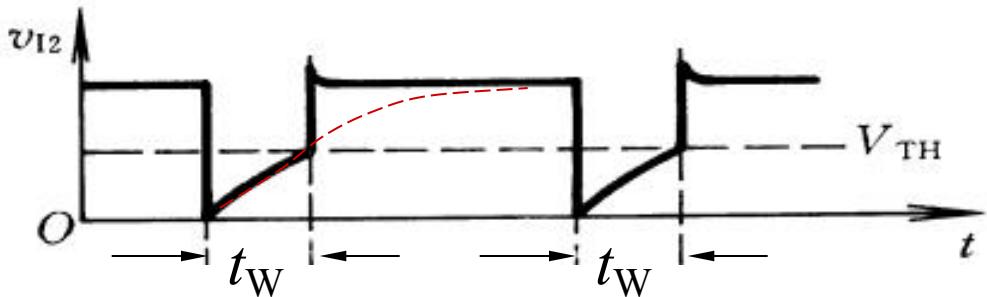
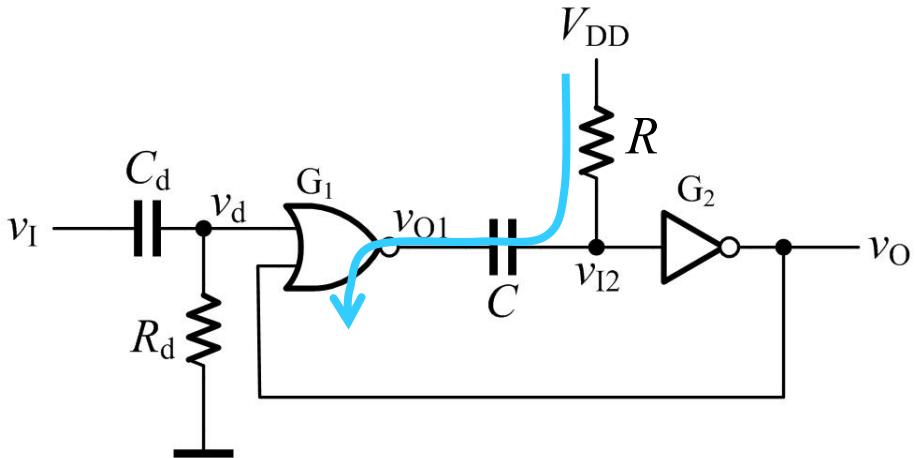
充电常数  $\tau = RC$

起始值  $v(0^+) = 0$

终了值  $v(\infty) = V_{DD}$

- 代入计算：

$$t_W = R \ln 2 \sim 0.69RC$$



# 脉冲波形的产生与变换

## (3) 定量计算

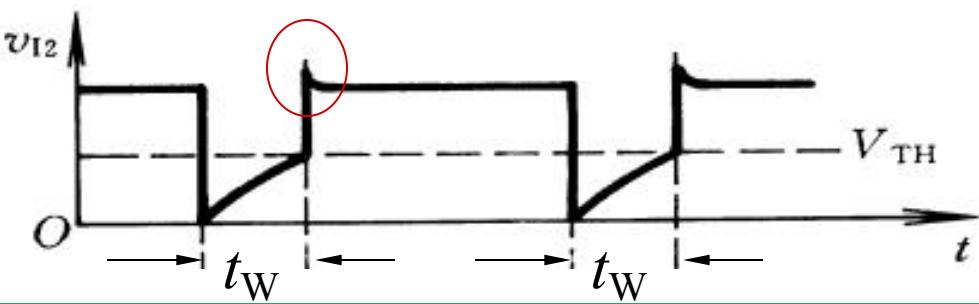
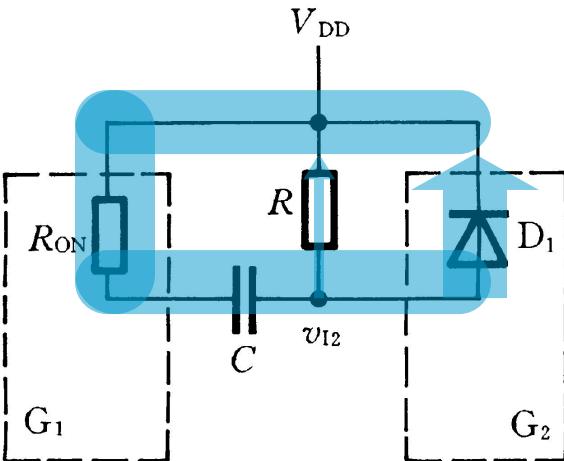
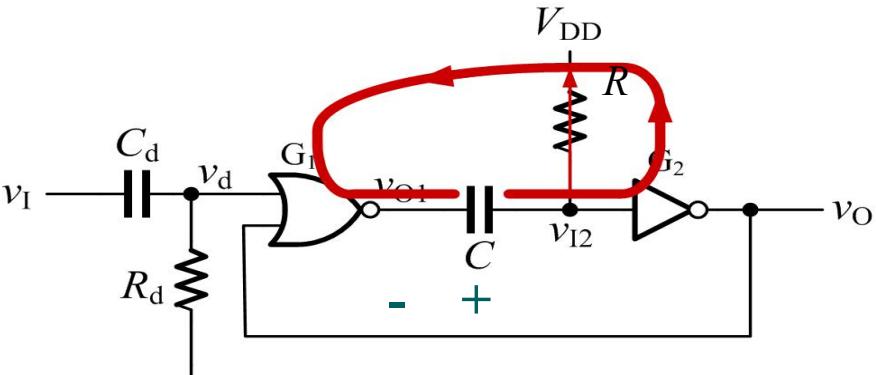
- 其它：（内部状态恢复）  
恢复时间

$$t_{\text{re}} \approx (3 \sim 5) R_{\text{ON}} C$$

分辨时间  $t_d$ : 保证电路能正常工作的前提下，允许两个相邻的触发脉冲之间的最短时间间隔

$$t_d = t_w + t_{\text{re}}$$

设计中，使微分器输出脉冲  $v_d$  的宽度远远小于输出脉冲宽度

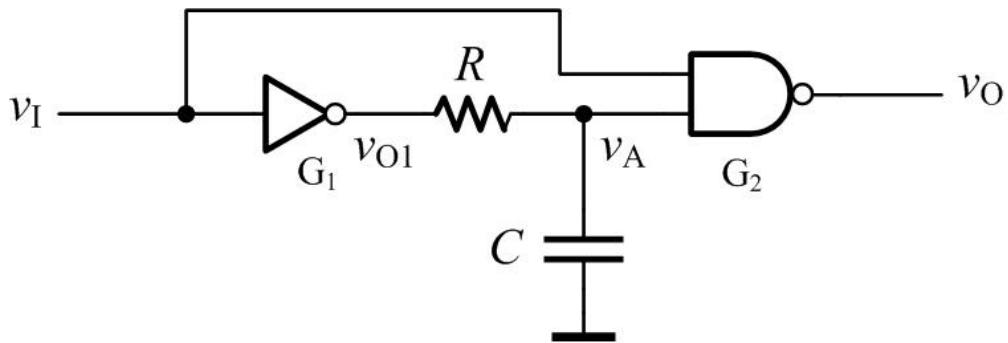


# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 门电路组成的单稳态触发器

➤ TTL 门电路 积分型单稳态触发器：

- 为了保证 $v_{O1}$ 为低电平时， $v_A$ 在 $V_{TH}$ 以下， $R$ 的阻值不能取得很大



设用正脉冲触发

# 脉冲波形的产生与变换

(1) 稳态:  $v_I = 0$ ,  $v_A = v_{O1} = V_{OH}$ ,  $v_O = V_{OH}$

## (2-1) 触发转换

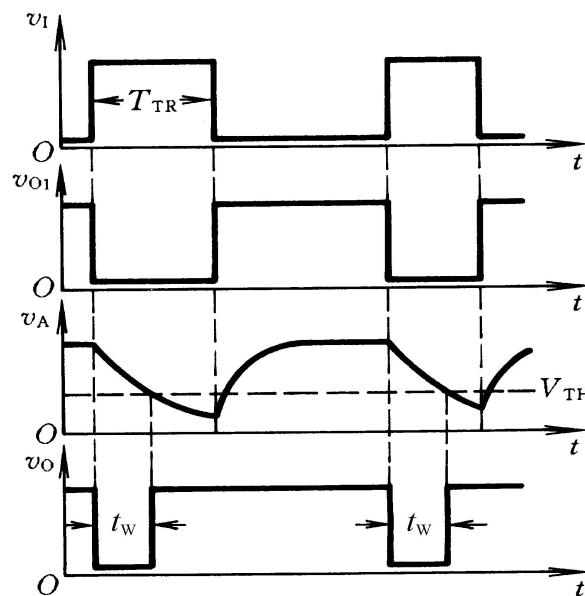
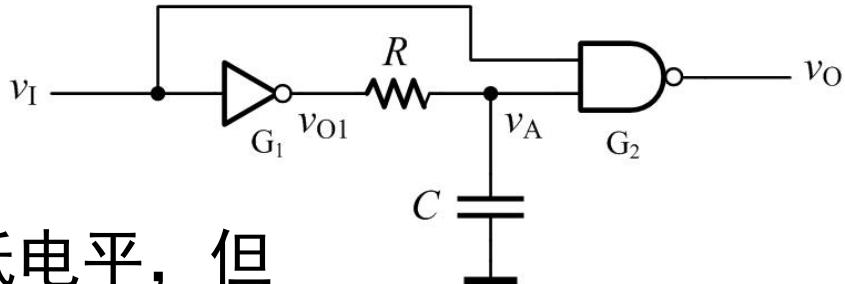
当输入正脉冲后,  $v_{O1}$ 跳变为低电平, 但由于C上的电压不能突变, 所以 $v_A > V_{TH}$ , 这段时间内G2的两个输入端电压同时高于 $V_{TH}$ ,  $v_O = V_{OL}$ , 电路进入暂稳态

## (2-2) 自发转换

同时C开始放电。随着C放电 $v_A$ 不断下降, 至 $v_A = V_{TH}$ 以后,  $v_O$ 回到高电平

## (2-3) 内部状态的恢复

当 $v_I$ 返回低电平以后,  $v_{O1}$ 重新变成高电平, 并向C充电, 经过恢复时间 $t_{re}$ 以后,  $v_A$ 恢复为高电平, 电路回到稳态



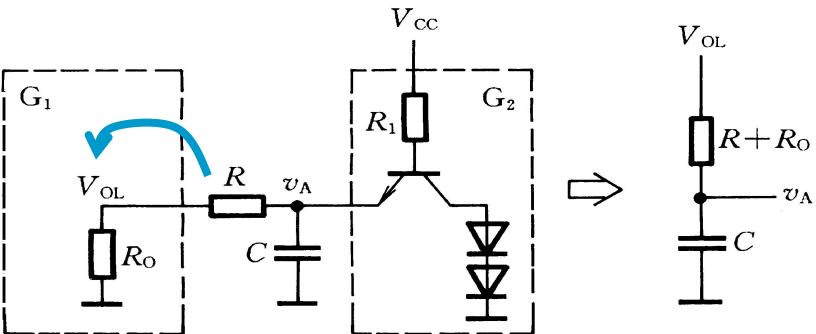
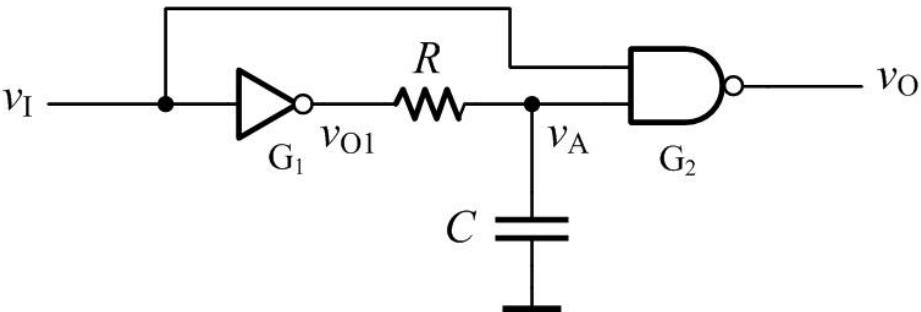
设定稳态:  $v_I$  L,  $v_O$  H,  $v_A$  L, 电容储能

# 脉冲波形的产生与变换

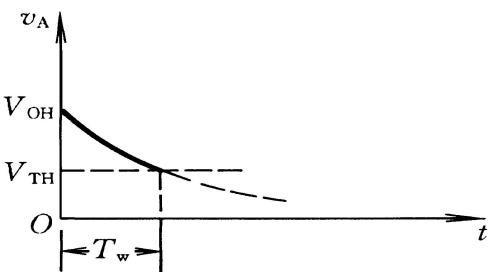
## (3-1) 自发转换的充放电等效电路

- 脉冲宽度

$$t_w = (R + R_o)C \ln \frac{V_{OL} - V_{OH}}{V_{OL} - V_{TH}}$$



(a)

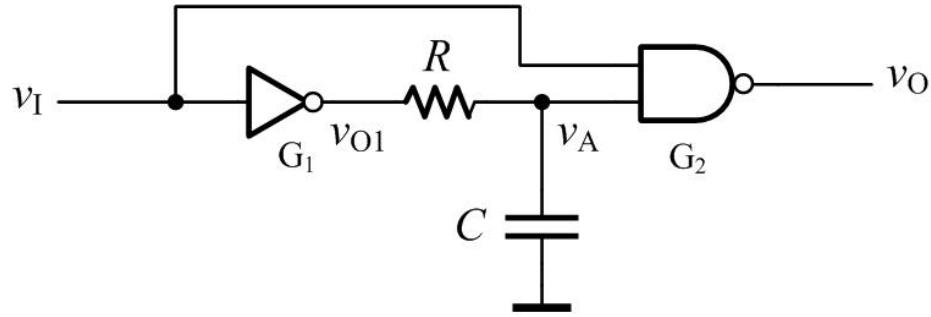


(b)

# 脉冲波形的产生与变换

## (3-2) 内部电容恢复的充放电等效电路

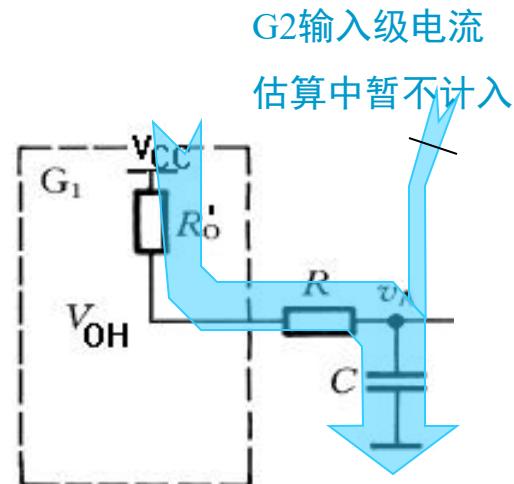
$$t_{re} \approx (3 \sim 5)(R + R_O')C$$



- 电路的分辨时间

触发脉冲宽度  $t_{TR}$  与恢复时间之和

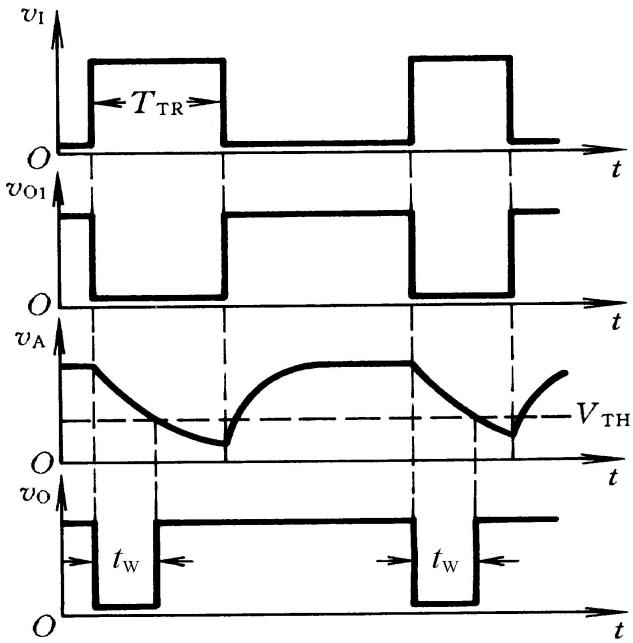
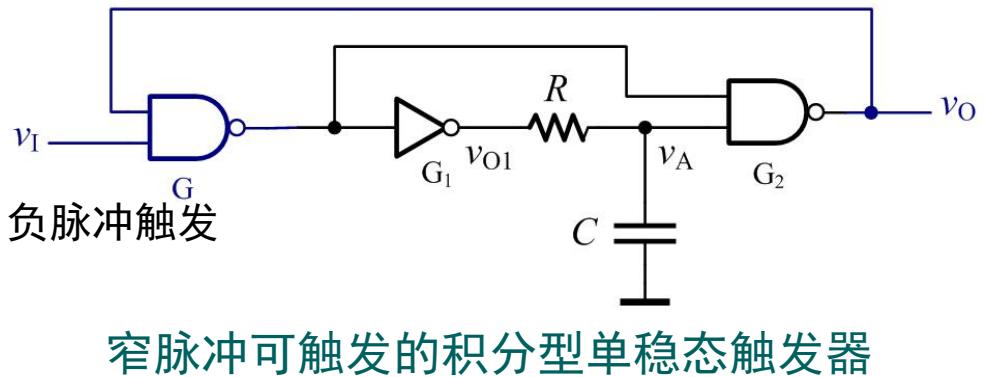
$$t_d = t_{TR} + t_{re}$$



# 脉冲波形的产生与变换

## ➤ 积分型单稳态触发器的特点

- 缺点：必须在触发脉冲的宽度大于输出脉冲宽度时方能正常工作；
- 优点：抗干扰能力较强，因为干扰多为尖峰脉冲的形式，而积分型单稳态触发器在这种脉冲的作用下比较迟钝。
- 缺点：恢复时间长





# 脉冲波形的产生与变换

## ➤ 习题（第五版）

- 10.1、10.2、10.3、10.7、10.8、10.11、10.13、  
10.20、10.26

41



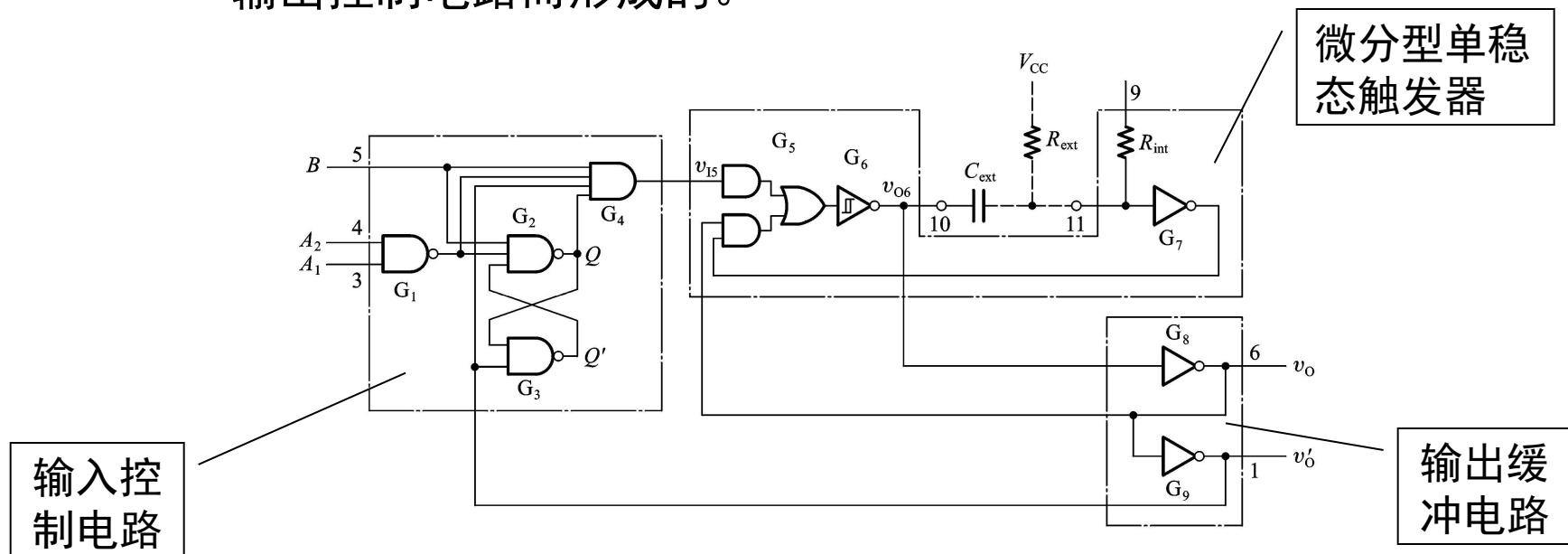
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 集成单稳态触发器

外接储能、定时元件

### ➤ TTL 集成单稳态触发器 —— 74121

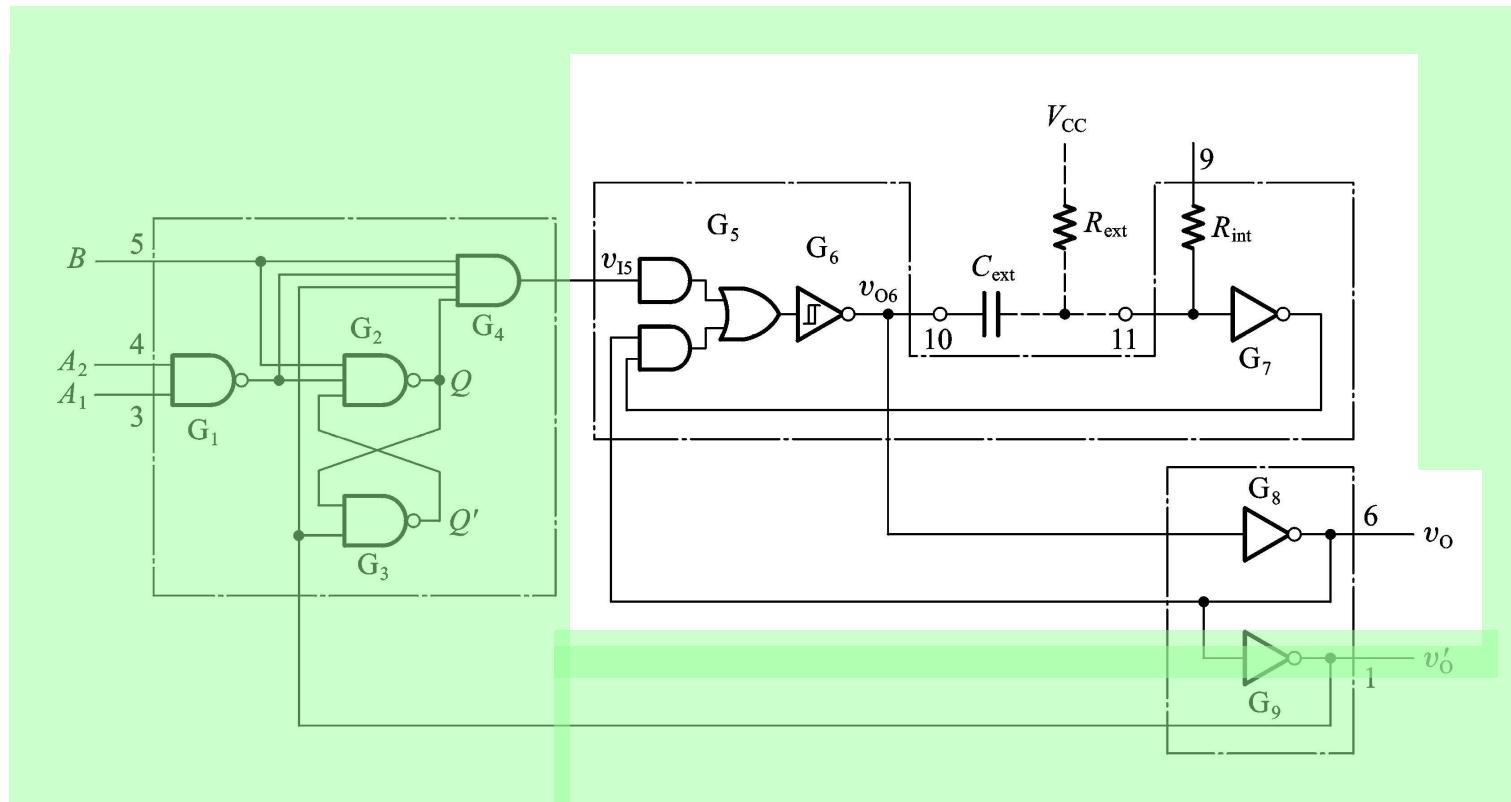
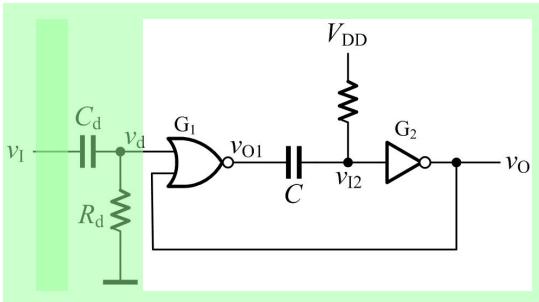
- 在普通的微分型单稳态触发器的基础上附加以输入控制电路和输出控制电路而形成的。



# 脉冲波形的产生与变换

## ➤ TTL 微分单稳态电路

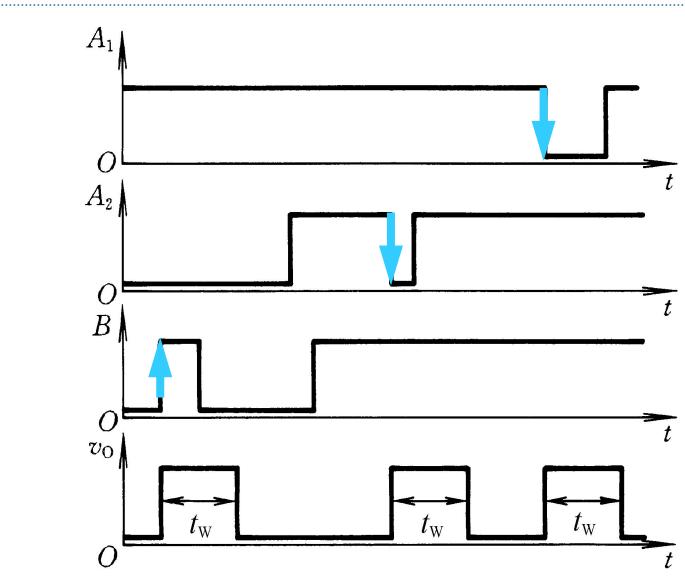
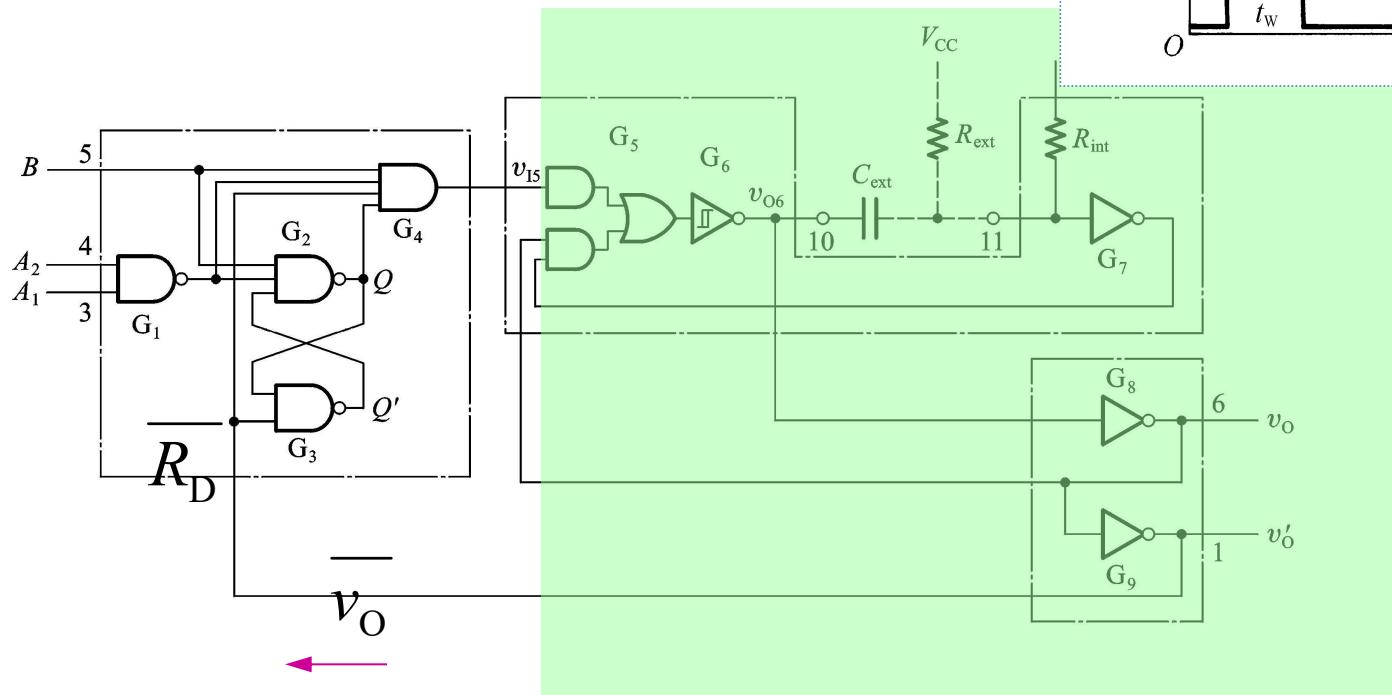
- 施密特“与或非门”（G5和G6）
- 类似于 CMOS 的微分单稳电路



# 脉冲波形的产生与变换

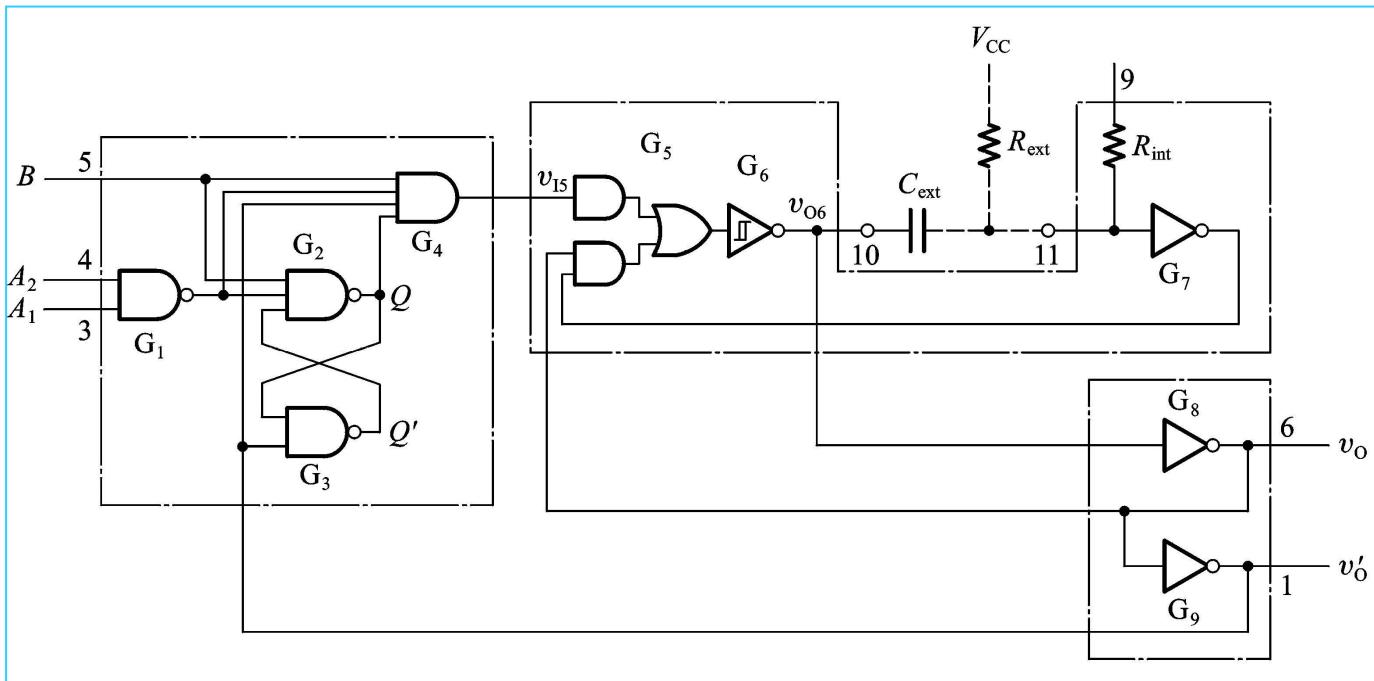
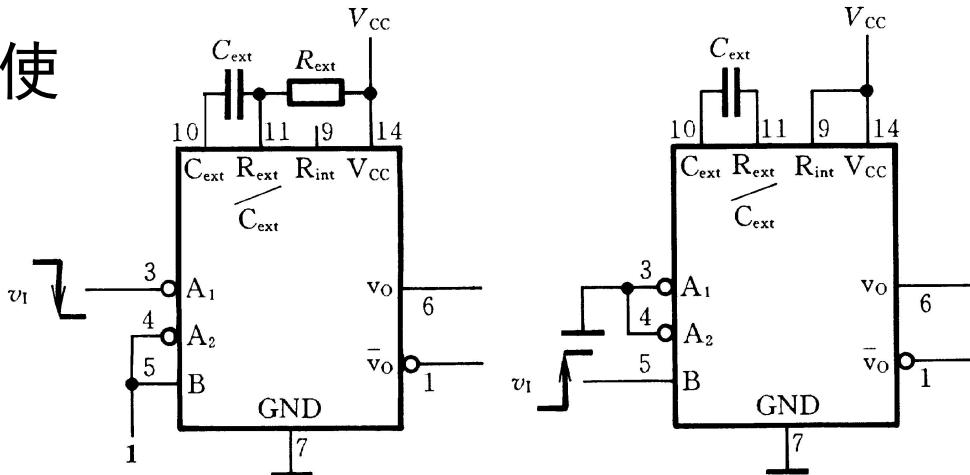
## ● 输入控制电路

- 基本RS触发器（“门闩”）
- 上升沿或下降沿触发的控制
- 上升沿触发:  $B$  输入,  $A_1A_2=0$
- 下降沿触发:  $A_1$  输入,  $B=1$ ,  $A_2=1$
- 触发  $\rightarrow$  输出脉冲  $\sim$  门闩置位  $\rightarrow$  被复位



# 脉冲波形的产生与变换

✓ 使用外接电阻与使用内部电阻

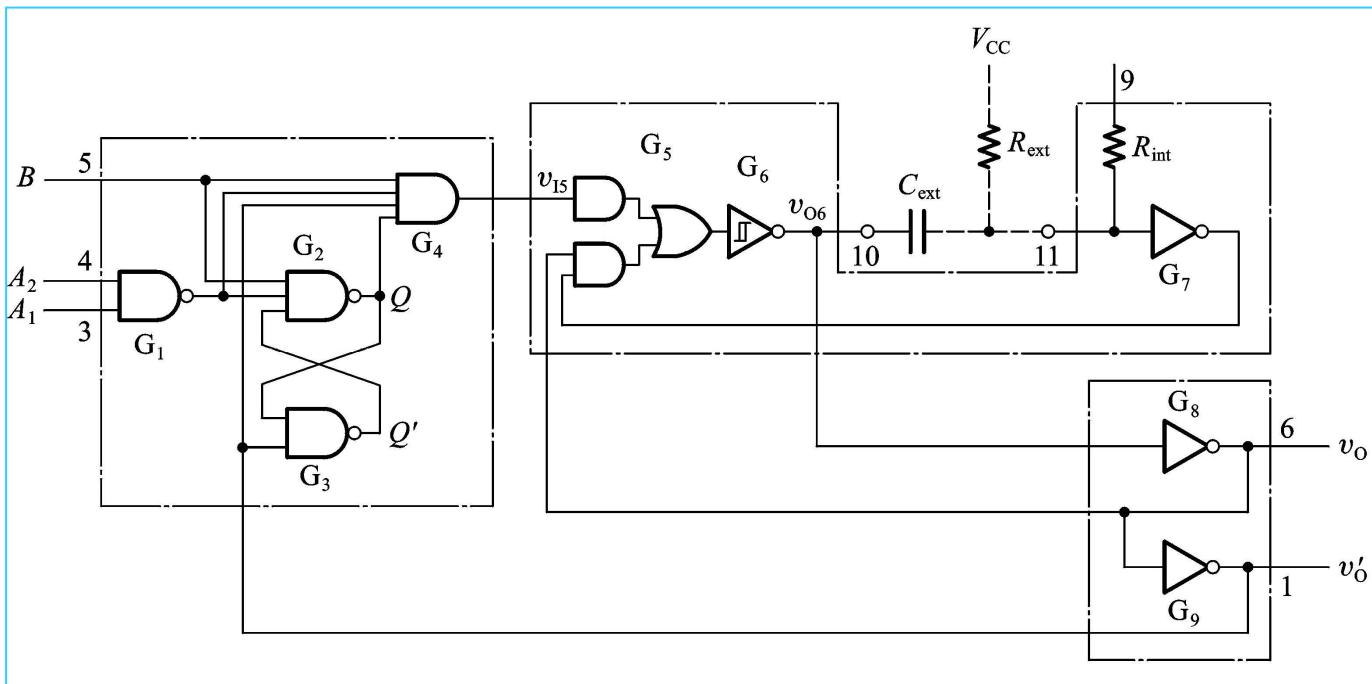


# 脉冲波形的产生与变换

- 脉冲宽度

$$t_W = R_{\text{ext}} C_{\text{ext}} \ln 2 = 0.69 R_{\text{ext}} C_{\text{ext}}$$

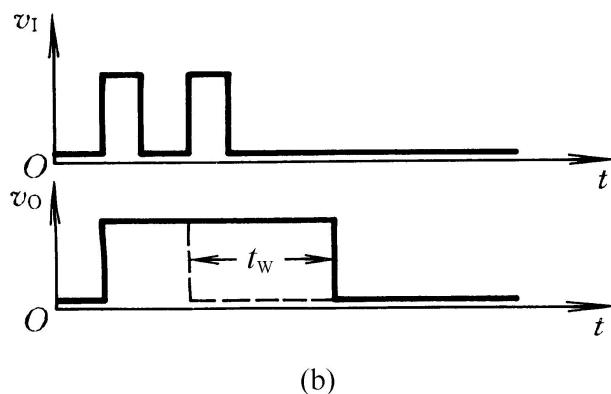
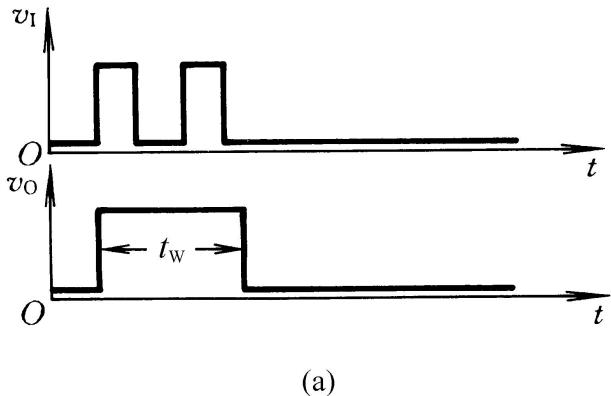
- 取值范围:  $R_{\text{ext}}$  2k~30k,  $C_{\text{ext}}$  10pF~10uF, 20ns~200ms



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 可重复触发 与 不可重复触发

- 可：122,123
  - 不可：121
- 区别：在暂稳态到达的触发脉冲会不会起作用





# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 单稳态电路的应用

- 脉冲整形
- 延时
- 定时





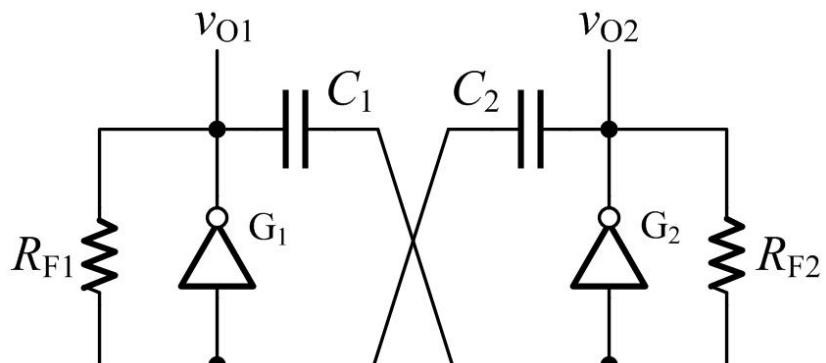
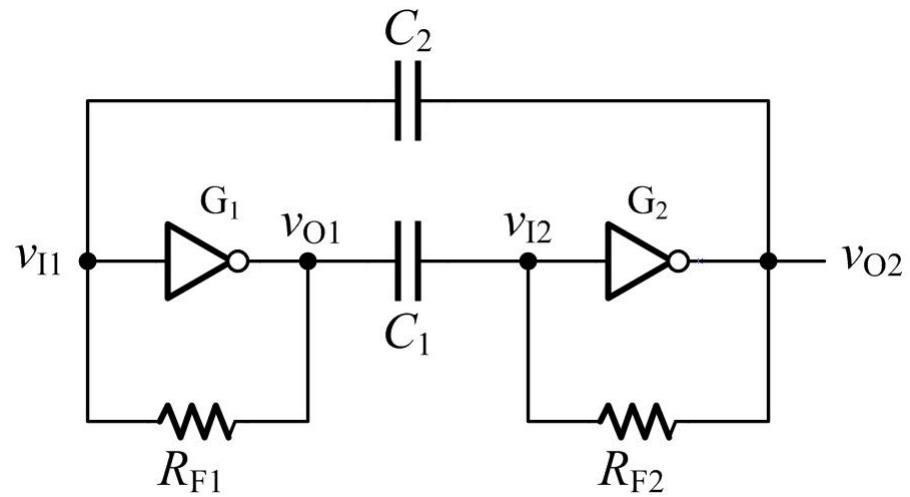
## 9.4 多谐振荡器

### Astable Multi-Vibrator

- 对称式多谐振荡器
- 非对称式多谐振荡器
- 环形多谐振荡器
- 用施密特触发器构成的多谐振荡器
- 石英晶体多谐振荡器

# 脉冲波形的产生与变换

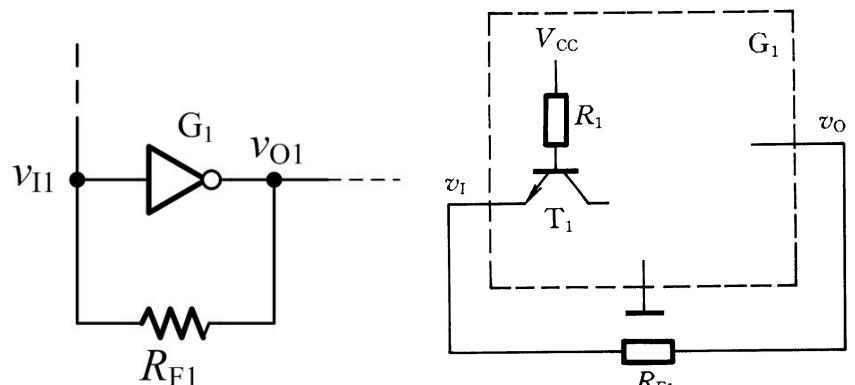
## ■ 对称式多谐振荡器



# 脉冲波形的产生与变换

## (1) 静态 (无稳态电路)

➤ G1和G2分别被反馈电阻偏置到放大状态，输入电压有极微小的扰动，就会引起自激振荡。



$$v_I = \frac{R_{F1}}{R_1 + R_{F1}}(V_{CC} - V_{BE}) + \frac{R_1}{R_1 + R_{F1}}v_O$$

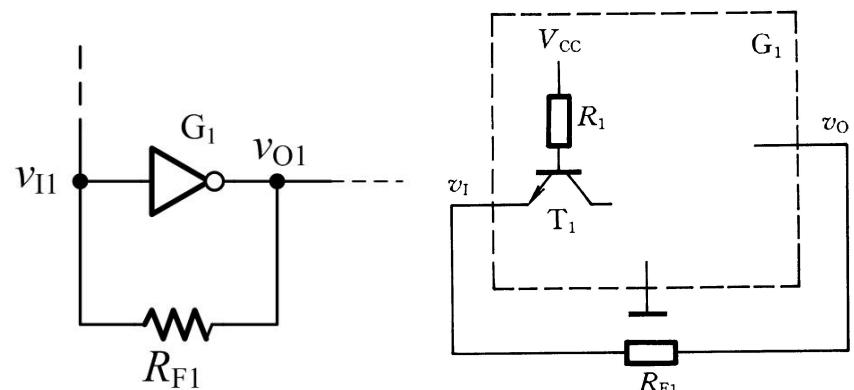
由叠加原理

(见闫石老师 第三/四版, 第五/六版 用图示法)

# 脉冲波形的产生与变换

## (1) 静态 (无稳态电路)

- G1和G2分别被反馈电阻偏置到放大状态，输入电压有极微小的扰动，就会引起自激振荡。



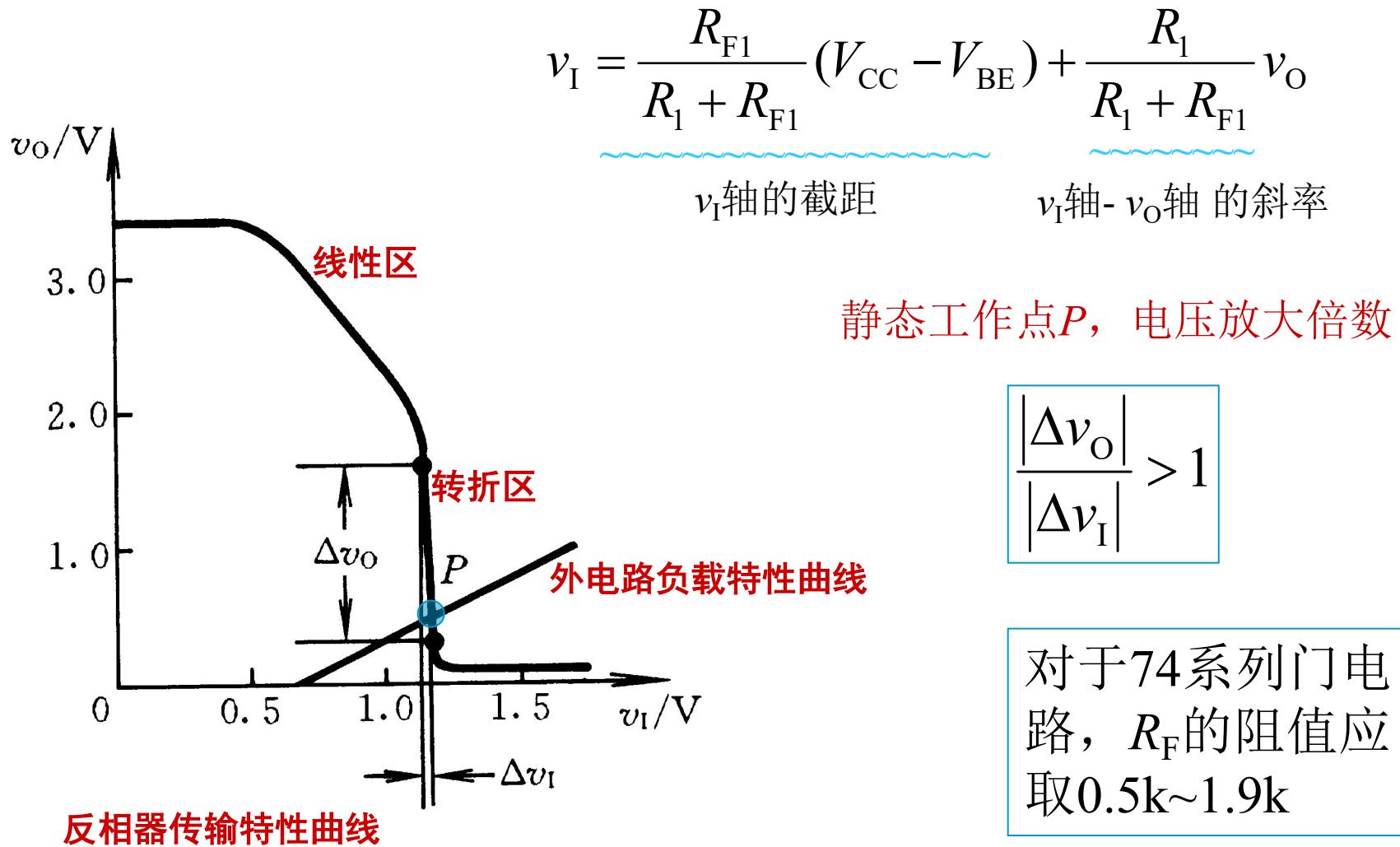
由叠加原理

$$v_I = \frac{R_{F1}}{R_1 + R_{F1}}(V_{CC} - V_{BE}) + \frac{R_1}{R_1 + R_{F1}}v_O$$

$$v_I = \frac{R_{F1}}{R_1 + R_{F1}}(V_{CC} - V_{BE} - v_O) + v_O$$

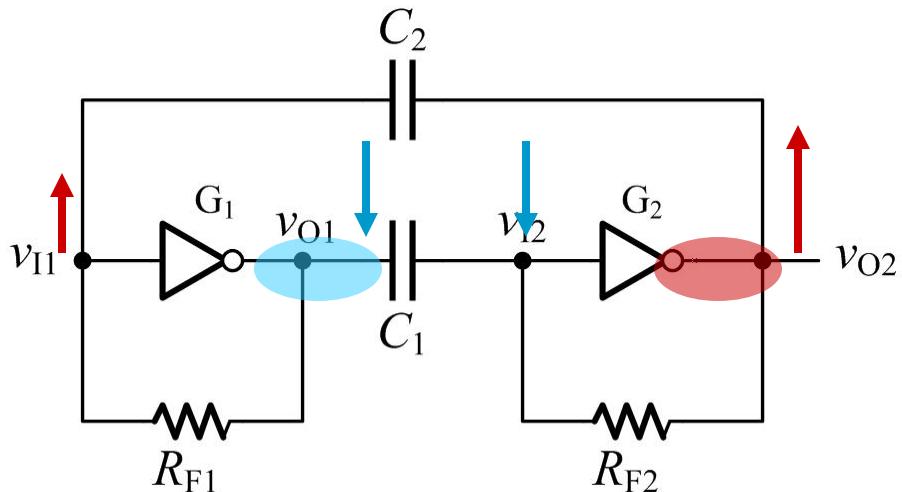
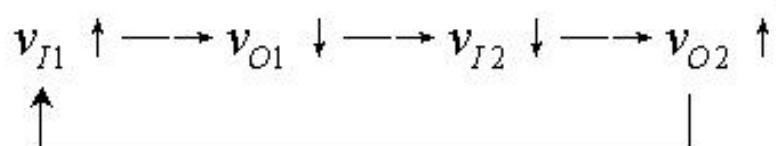
其实不用这么费解，... (这里，也可不用叠加原理)

# 脉冲波形的产生与变换



# 脉冲波形的产生与变换

## (2-1) 从**不稳定平衡态**到**暂稳态**的状态转换

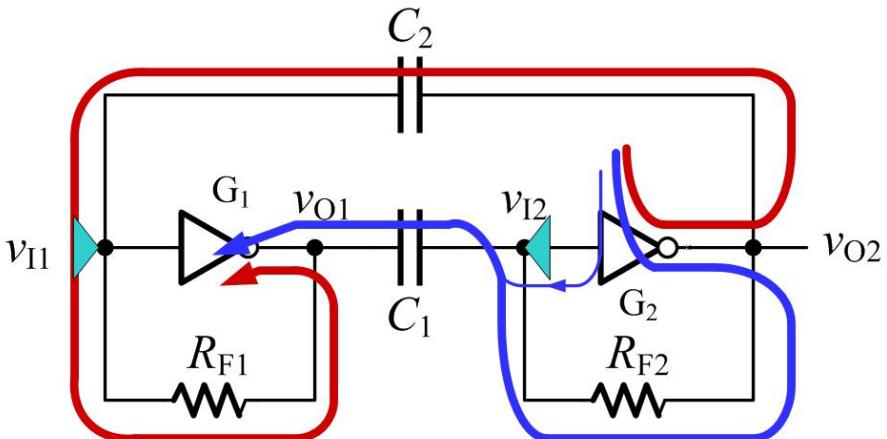
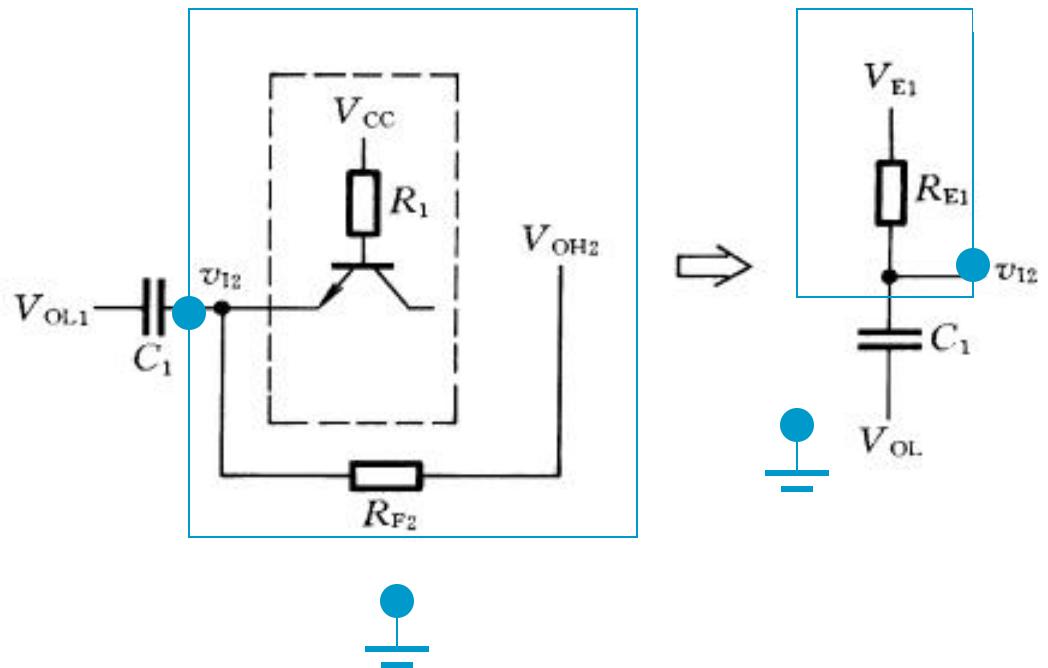


$v_{O1} \downarrow L$ ,  $v_{O2} \uparrow H$ ; 进入第一个暂稳态，同时电容C1开始充电，C2开始放电

- 如何观察到所谓的“充”、“放”电？
- 根据逻辑门的设计（输入阻抗大，输出阻抗小），
- 所以，从输出级“找电源”。
- 对于输入级的处理，电流是否可以被忽略？

# 脉冲波形的产生与变换

## (2-2) 暂稳态 — 电路等效 C1充电的等效电路



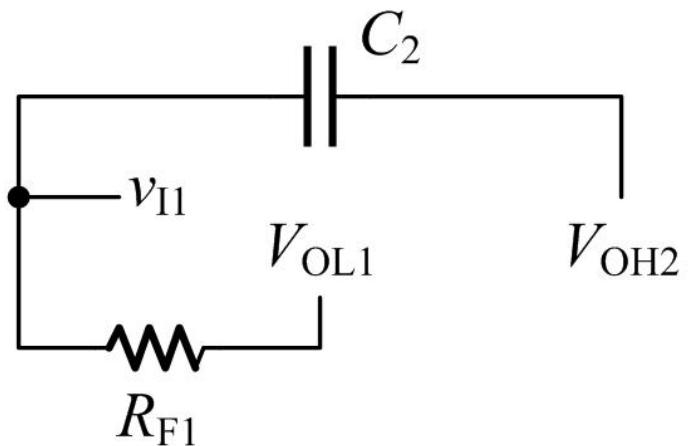
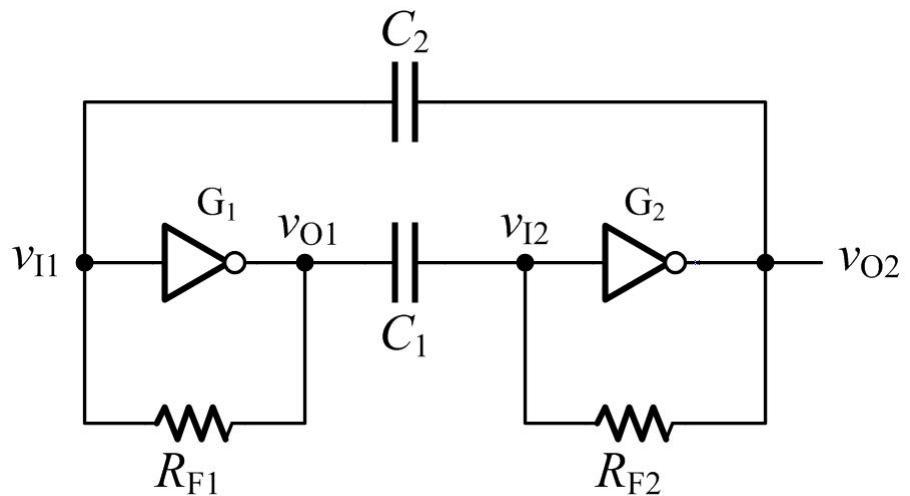
戴维南定理等效得：

$$R_{E1} = \frac{R_1 R_{F2}}{R_1 + R_{F2}}$$

$$V_{E1} = V_{OH} + \frac{R_{F2}}{R_1 + R_{F2}} (V_{CC} - V_{OH} - V_{BE})$$

# 脉冲波形的产生与变换

## (2-2) 暂稳态电路等效 C2放电的等效电路



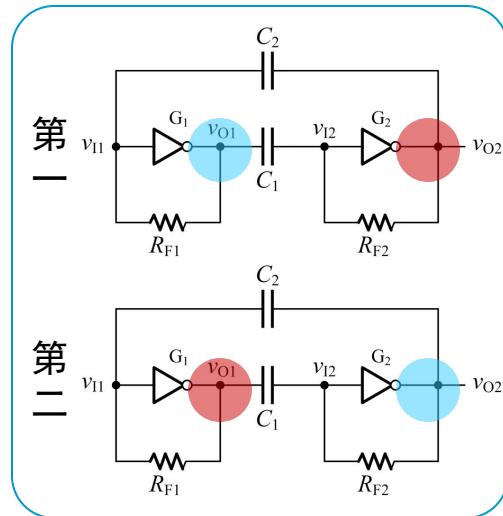
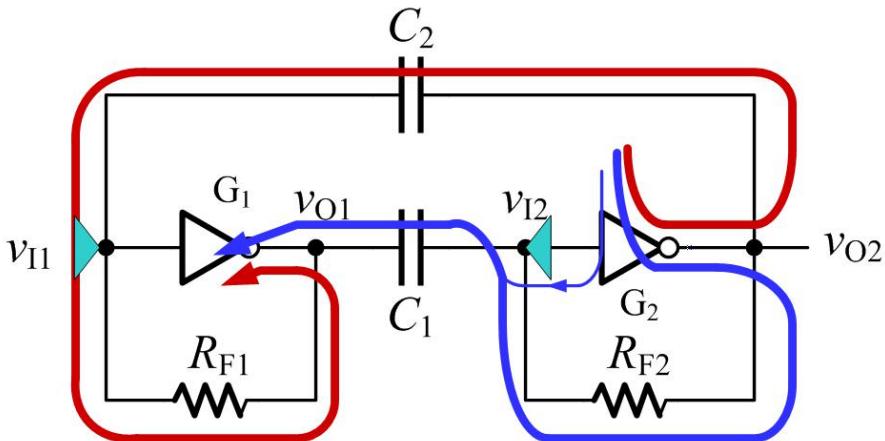
# 脉冲波形的产生与变换

## (2-3)两个暂稳态之间的状态转换

由于C1经过 $R_1$ 和 $R_{F2}$ 两条支路充电，充电速度较快， $v_{I2}$ 首先到达G2的阈值 $V_{TH}$ ，引起了正反馈

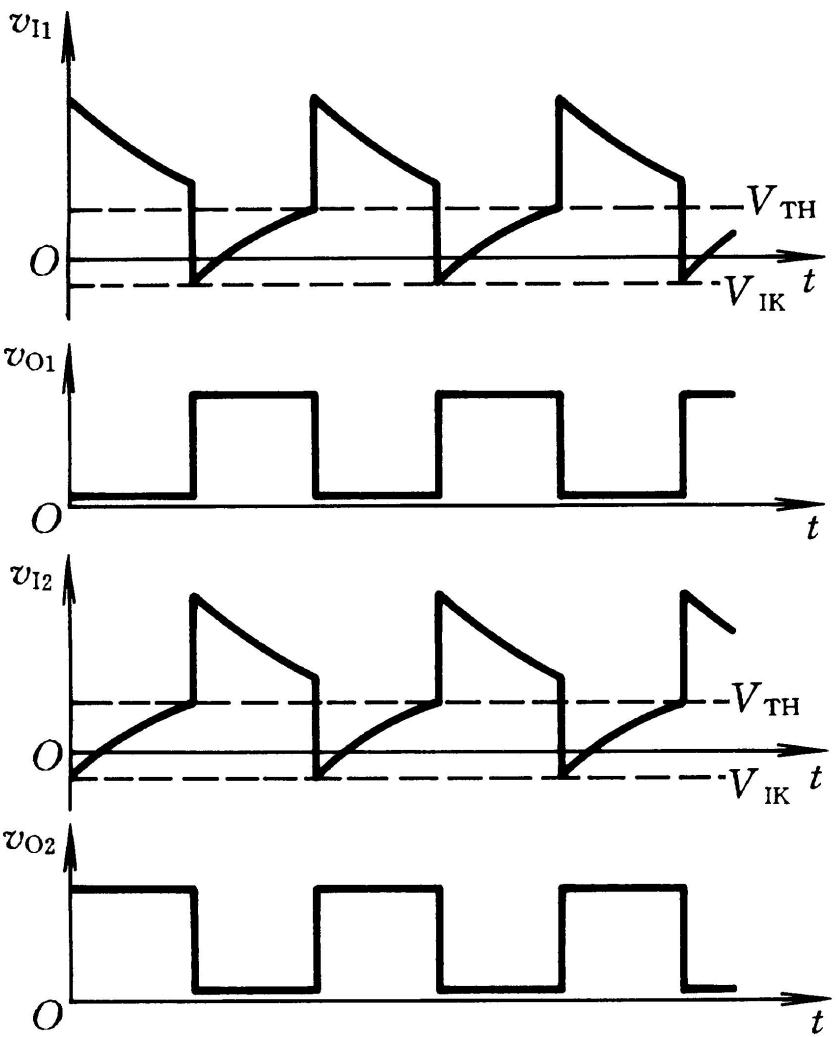
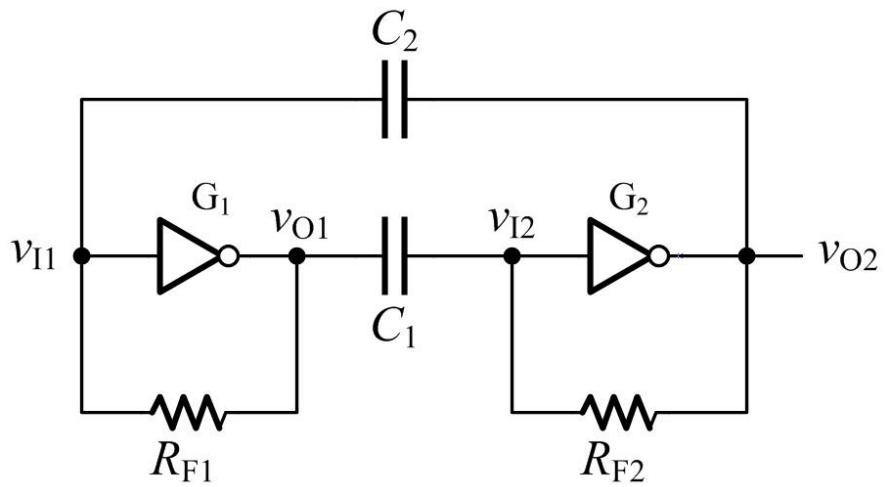
$$v_{I2} \uparrow \rightarrow v_{O2} \downarrow \rightarrow v_{II} \downarrow \rightarrow v_{O1} \uparrow$$

$v_{O1} \uparrow H$ ， $v_{O2} \downarrow L$ ；进入第二个暂稳态，同时电容C2开始充电，C1开始放电



# 脉冲波形的产生与变换

## (2-4) 各点电压的波形



# 脉冲波形的产生与变换

## (3) 定量计算：振荡周期

第一个暂稳态的持续时间  $T_1$  等于  $v_{I2}$   
从  $C_1$  开始充电到上升到  $V_{TH}$  的时间

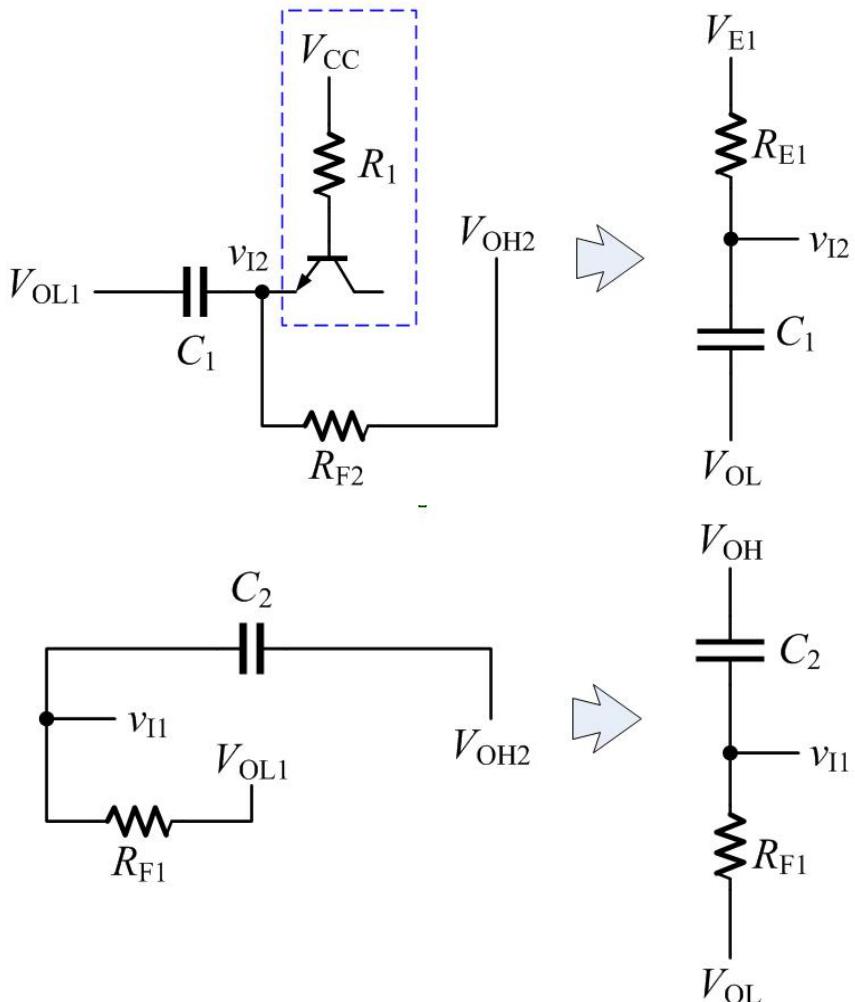
$$R_{E1} = \frac{R_1 R_{F2}}{R_1 + R_{F2}}$$

$$V_{E1} = V_{OH} + \frac{R_{F2}}{R_1 + R_{F2}} (V_{CC} - V_{OH} - V_{BE})$$

$$T_1 = RC \ln \frac{v(\infty) - v(0)}{v(\infty) - V_{TH}}$$

$$T_1 = R_{E1} C_1 \ln \frac{V_{E1} - V_{IK}}{V_{E1} - V_{TH}}$$

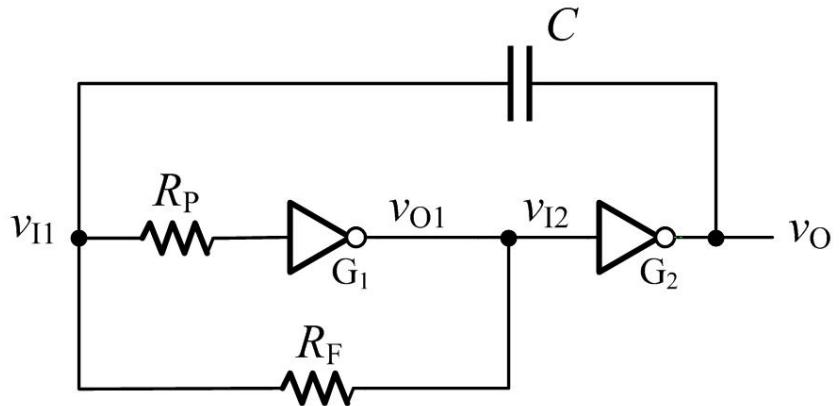
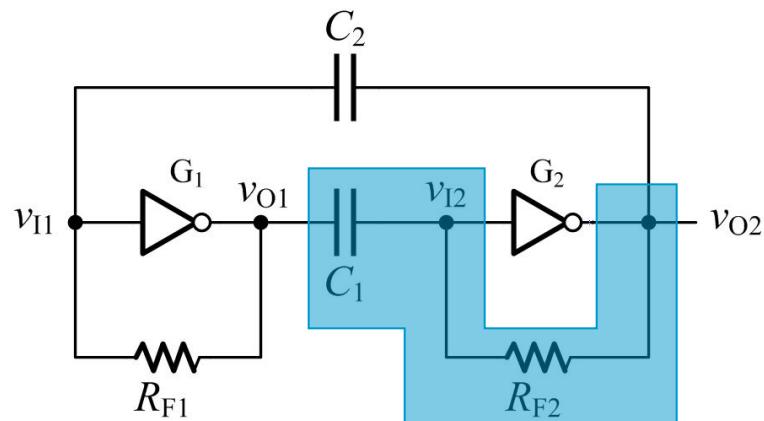
由于电路完全对称，总振荡周期  $T=2T_1$



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 非对称式多谐振荡器

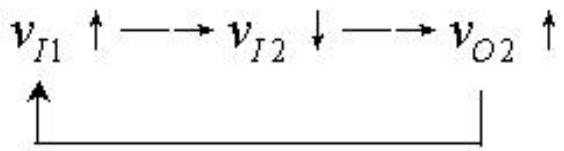
- G1被偏置在转折区，则其输出馈入G2的输入，也将G2偏置到转折区。
- 讨论：振荡电路对储能元件的要求
- 注意保护电阻...



✓ CMOS门电路构成的非对称式多谐振荡器

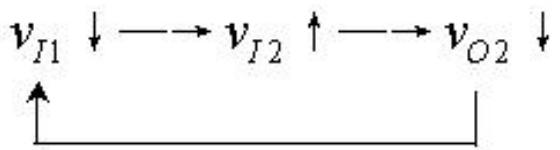
# 脉冲波形的产生与变换

由于某种原因使得 $v_{I1}$ 有微小正跳变时，发生正反馈



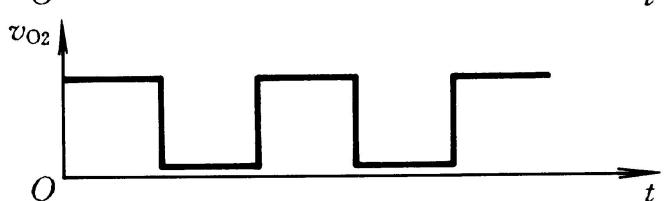
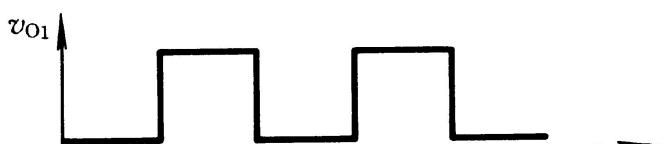
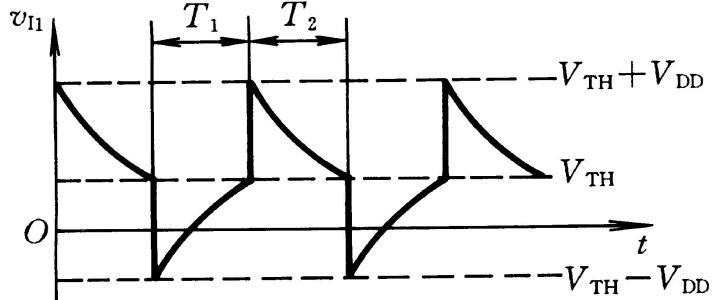
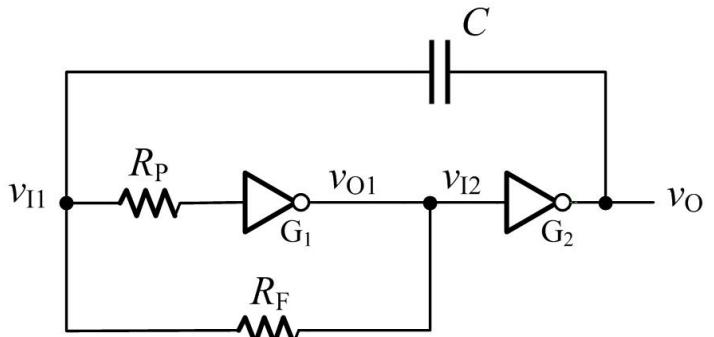
使得 $v_{O1} \downarrow$ 低， $v_{O2} \uparrow$ 高，进入第一个暂稳态，同时C开始放电

随着C的放电， $v_{I1}$ 下降，当 $v_{I1}=V_{TH}$ ，引起



使得 $v_{O2} \downarrow$ 低， $v_{O1} \uparrow$ 高，进入第二个暂稳态，

同时C开始充电，当 $v_{I1}=V_{TH}$ 电路返回到 $v_{O1}$ 低， $v_{O2}$ 高，又回到第一个暂稳态



思考：如何确定是充电还是放电？

# 脉冲波形的产生与变换

$$t = RC \ln \frac{v(\infty) - v(0)}{v(\infty) - v(t)}$$

✓ 放电时间 (考察 暂稳态一)

$$T_2 \approx R_F C \ln \frac{0 - (V_{TH} + V_{DD})}{0 - V_{TH}}$$

$$= R_F C \ln 3$$

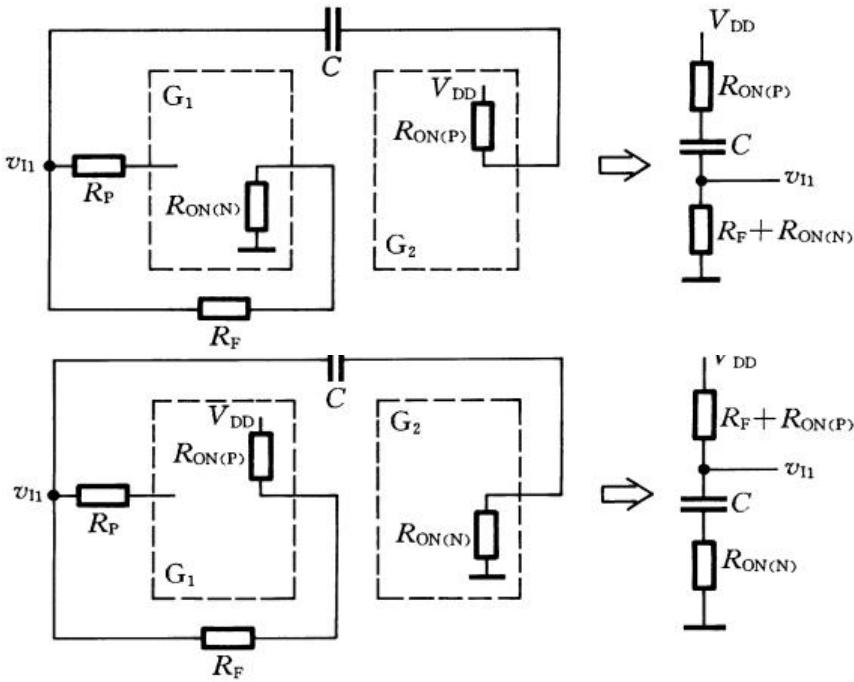
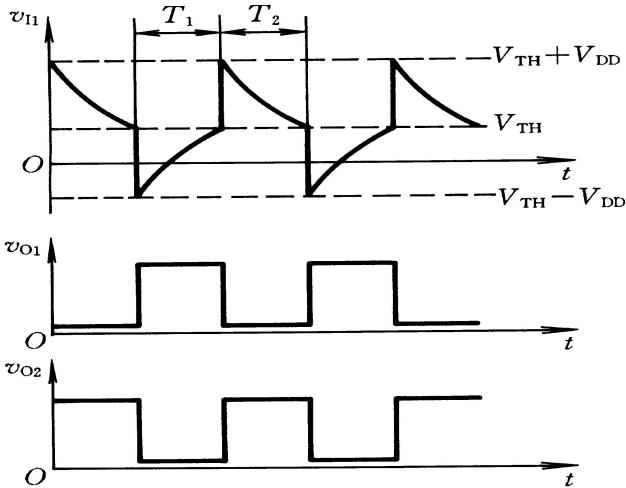
✓ 充电时间 (考察 暂稳态二)

$$T_1 \approx R_F C \ln \frac{V_{DD} - (V_{TH} - V_{DD})}{V_{DD} - V_{TH}}$$

$$= R_F C \ln 3$$

✓ 振荡周期

$$T = T_1 + T_2 \approx 2R_F C \ln 3 = 2.2R_F C$$

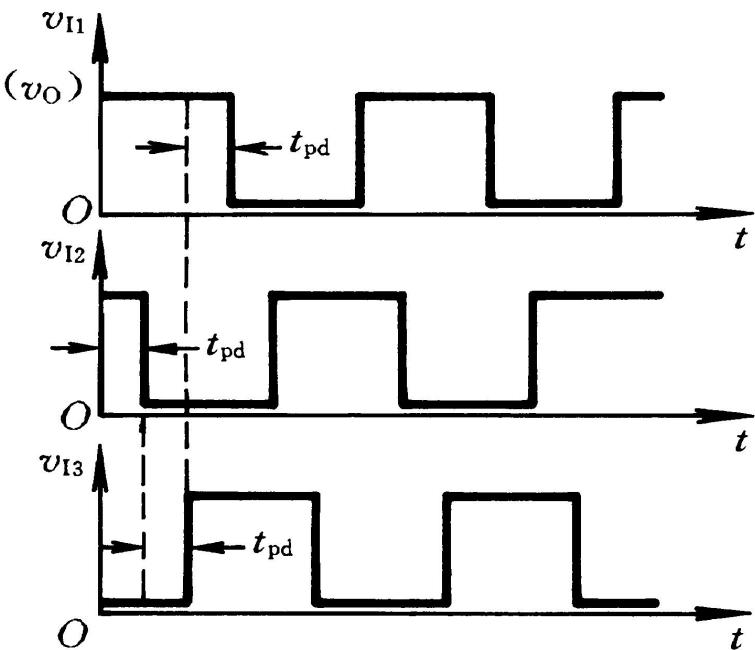
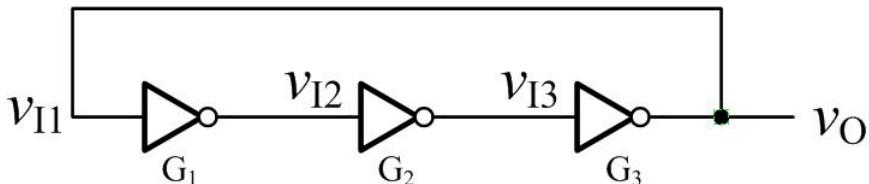


# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 环形多谐振荡器

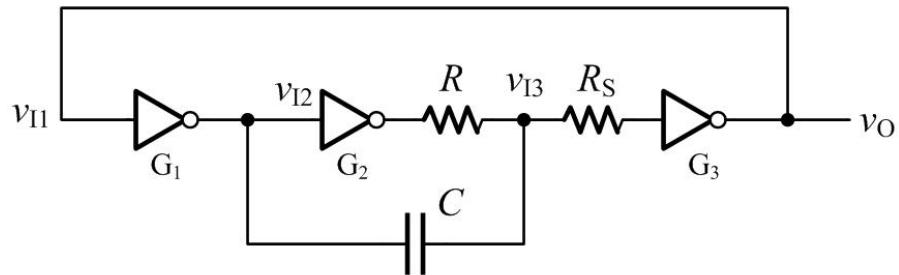
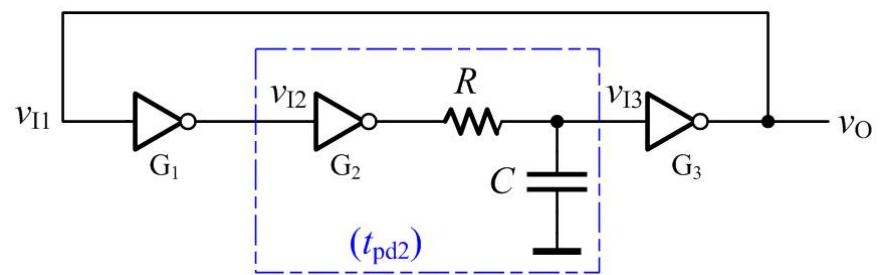
- ✓ 利用延迟负反馈产生振荡
- ✓ 奇数个反相器首尾相连

- ✓ 振荡周期为  $T=2 n t_{pd}$  ( $n$  为奇数)
- ✓ 传输延迟时间极短，振荡频率太高，而且不易调节



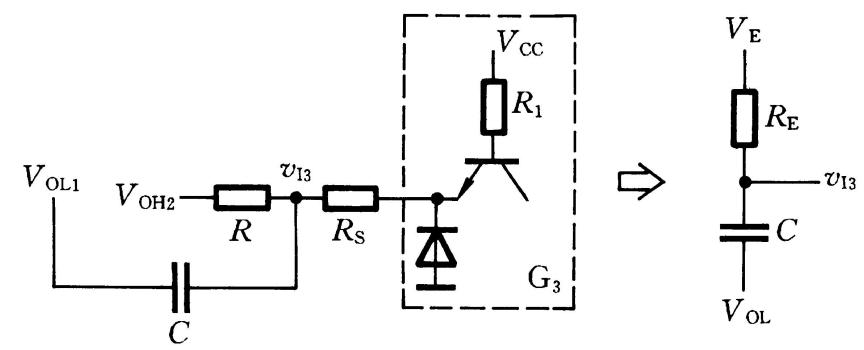
# 脉冲波形的产生与变换

- 附加RC充放电延迟环节

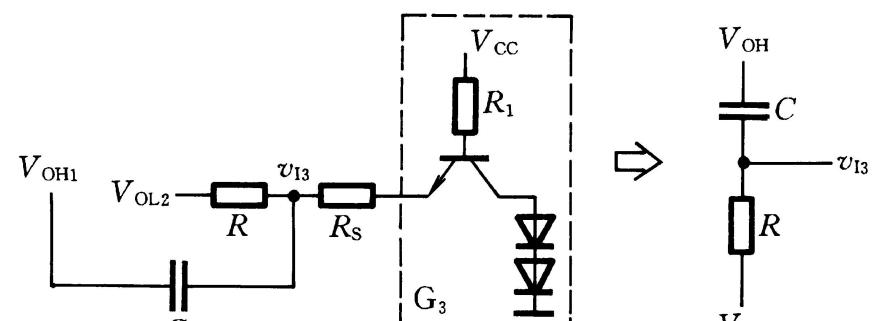


- 加入积分器，通过RC的充放电控制周期
- 进一步改进，对C能够更“大幅度”地充放电

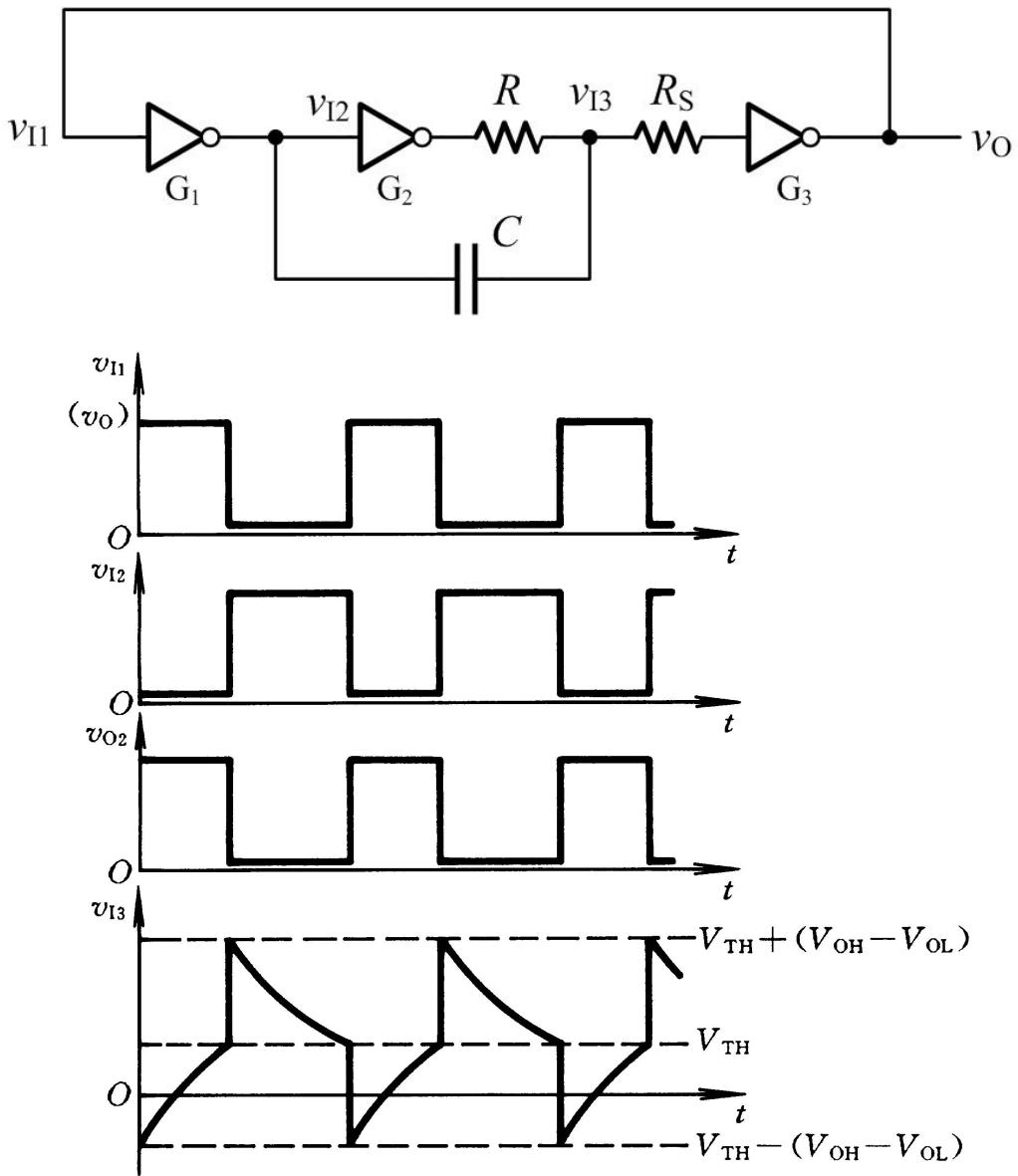
# 脉冲波形的产生与变换



(a)



(b)



# 脉冲波形的产生与变换

✓ 充电时间

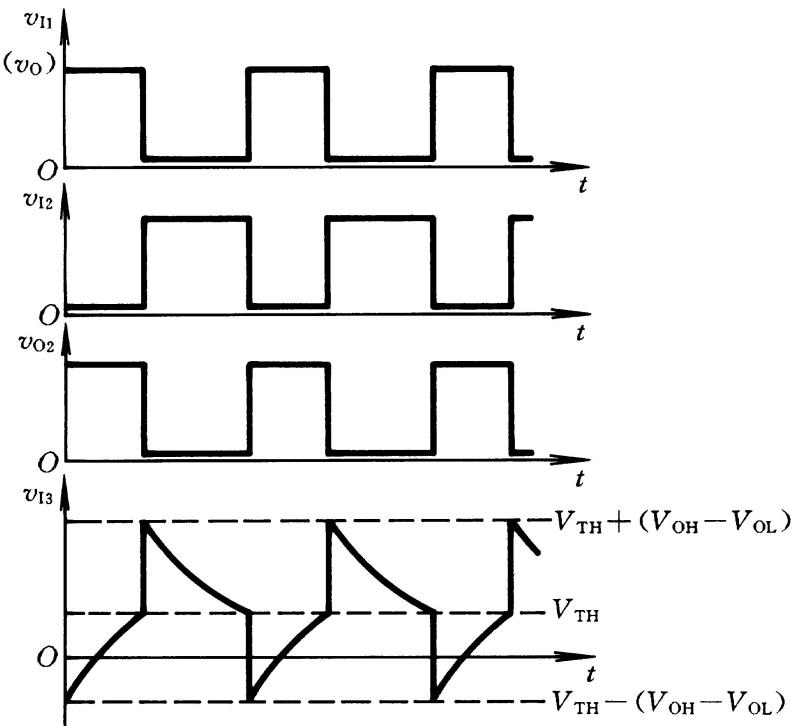
$$T_1 = R_E C \ln \frac{V_E - [V_{TH} - (V_{OH} - V_{OL})]}{V_E - V_{TH}}$$

✓ 放电时间

$$T_2 = RC \ln \frac{V_{OL} - [V_{TH} + (V_{OH} - V_{OL})]}{V_{OL} - V_{TH}}$$

✓ 振荡周期（简化后）

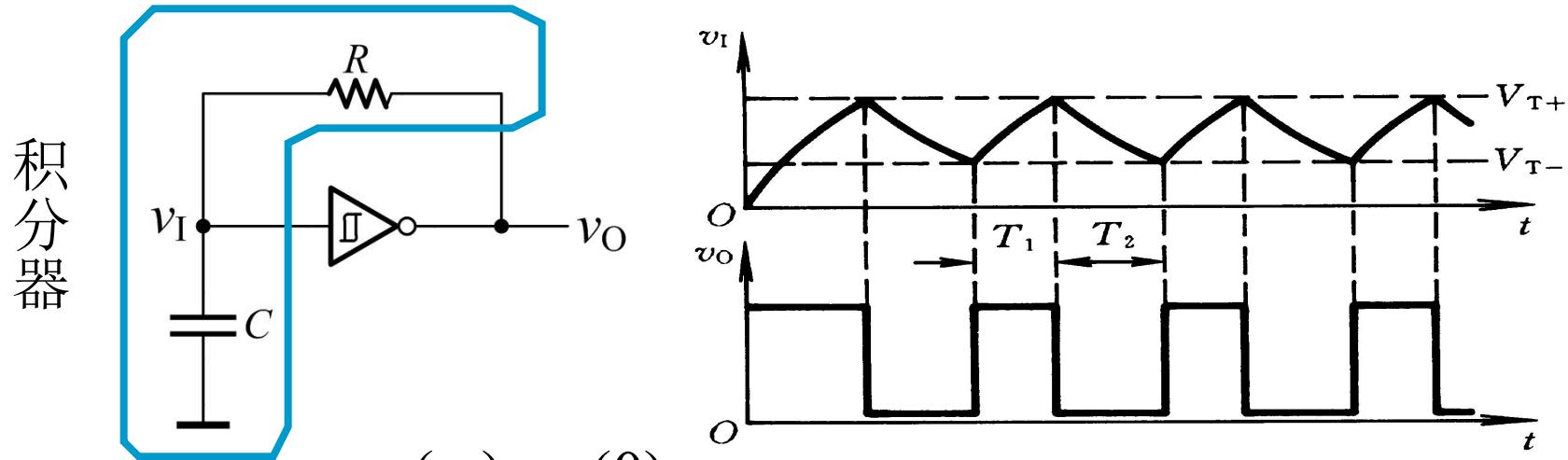
$$T = T_1 + T_2 \approx RC \ln \left( \frac{2V_{OH} - V_{TH}}{V_{OH} - V_{TH}} \cdot \frac{V_{OH} + V_{TH}}{V_{TH}} \right)$$



另外，实际上，阈值由于 $R_s$ 的存在而偏小一些。

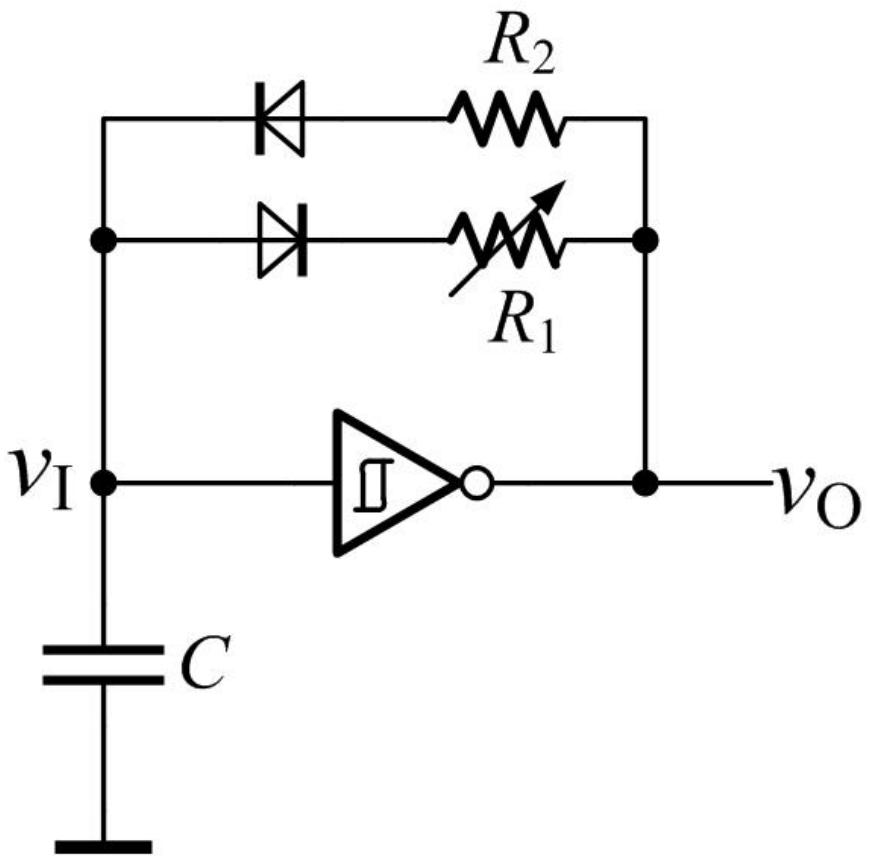
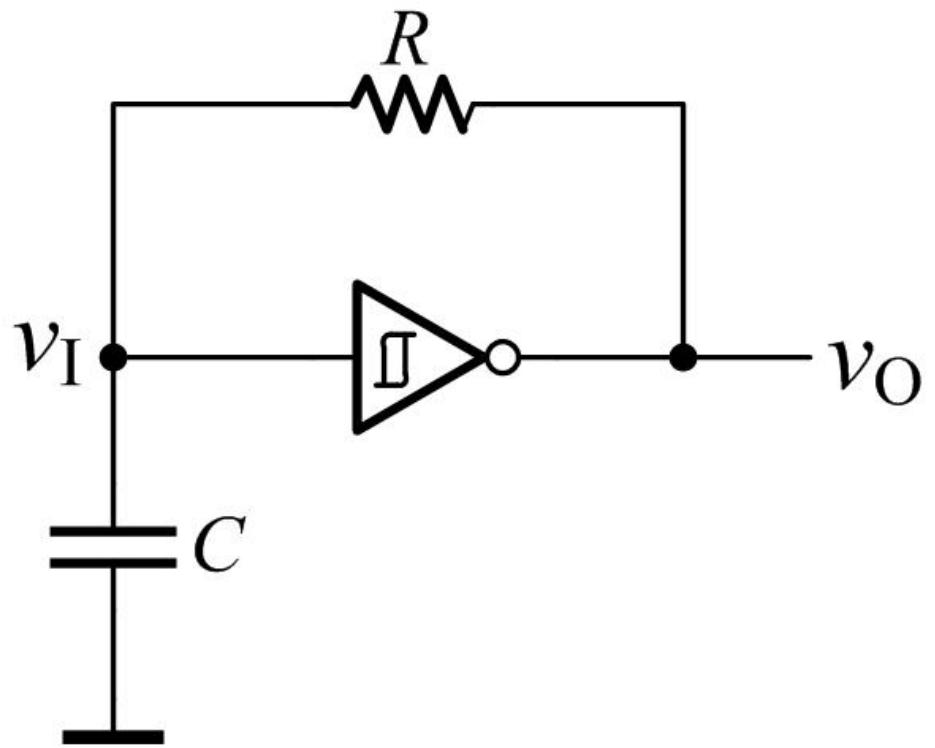
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 用施密特触发器构成的多谐振荡器



$$T = T_1 + T_2 = RC \ln\left(\frac{V_{DD} - V_{T-}}{V_{DD} - V_{T+}}\right) + RC \ln\frac{V_{T+}}{V_{T-}}$$

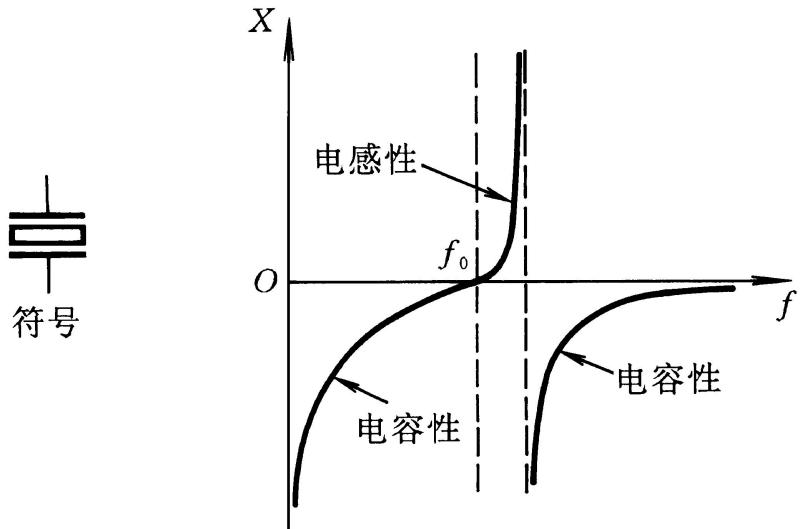
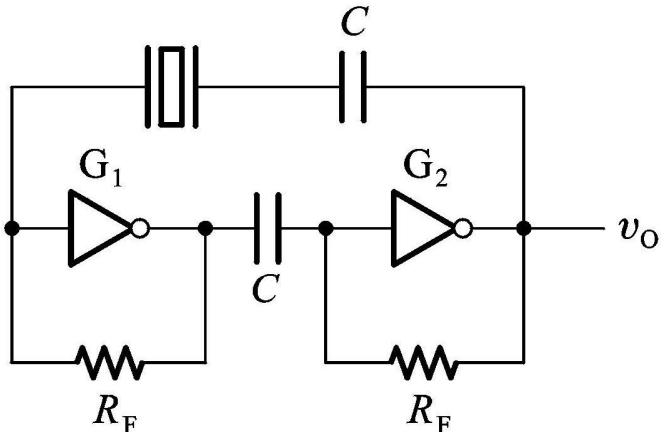
# 脉冲波形的产生与变换



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 石英晶体多谐振荡器

- ✓ 普通多谐波振荡器的问题：转换电平不稳定，转换电平微小的变化或者轻微的干扰都会严重影响振荡周期，易受干扰
- ✓ 频率稳定性不高



- ✓ 石英晶体的谐振频率由石英晶体的结晶方向和外形尺寸决定，具有极高的频率稳定性
- ✓ 频率稳定度可达 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ （未考虑温度漂移）

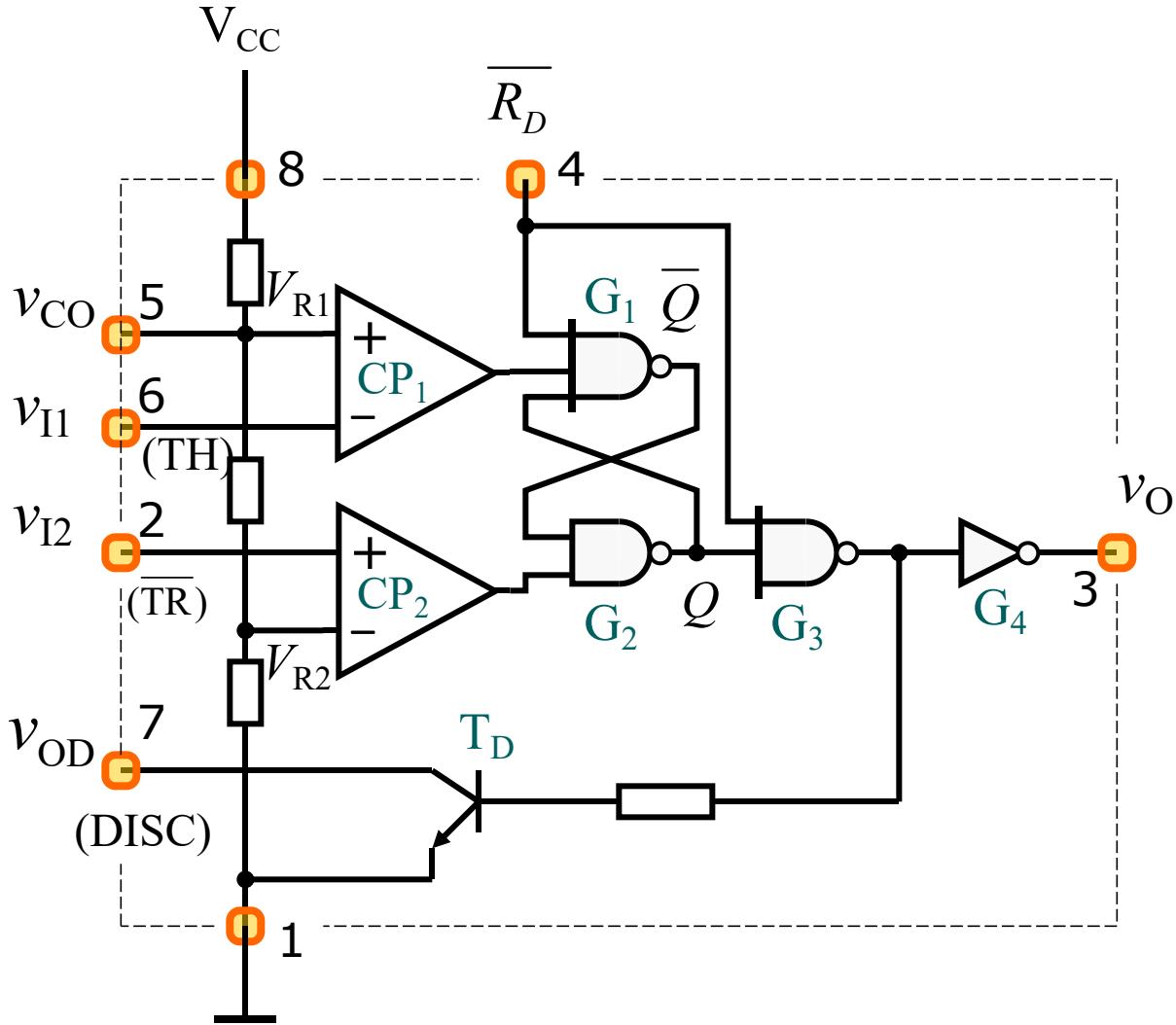
- ✓ 石英晶体多谐振荡器的振荡频率取决于石英晶体的固有谐波频率 $f_0$ ，而与外接电阻电容无关。

## 9.5 555定时器电路

- 555定时器电路结构及功能
- 用555定时器接成施密特触发器
- 用555定时器接成单稳态触发器
- 用555定时器接成多谐振荡器

# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 电路结构



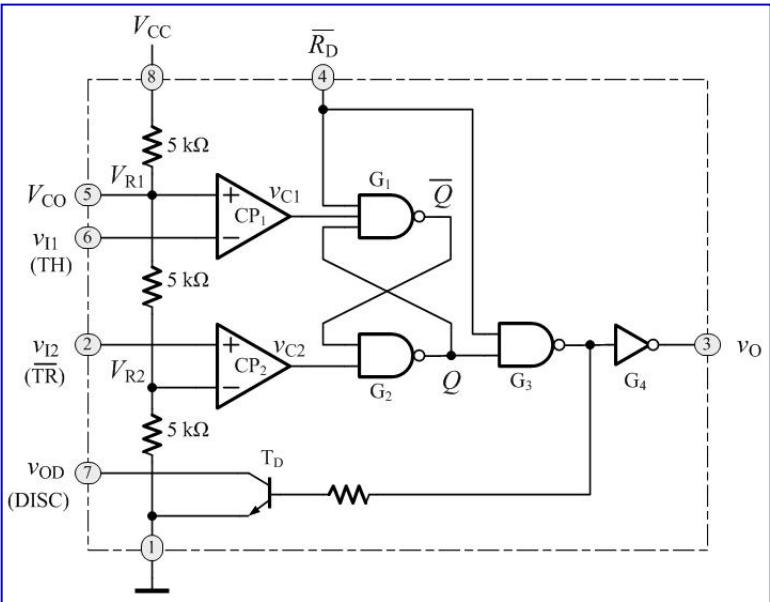
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 电路结构

- 三个5k的电阻组成分压器，提供基准电压，“555”得名
- 比较器，参考电压...
- 基本RS触发器
- 集电极开路（三极管 $T_D$ ），电流泄放回路，DISCharge
- $v_{CO}$ 参考电压控制端
- TH 被称为“阈值端”
- TR 被称为“触发端”

## ■ 电路功能

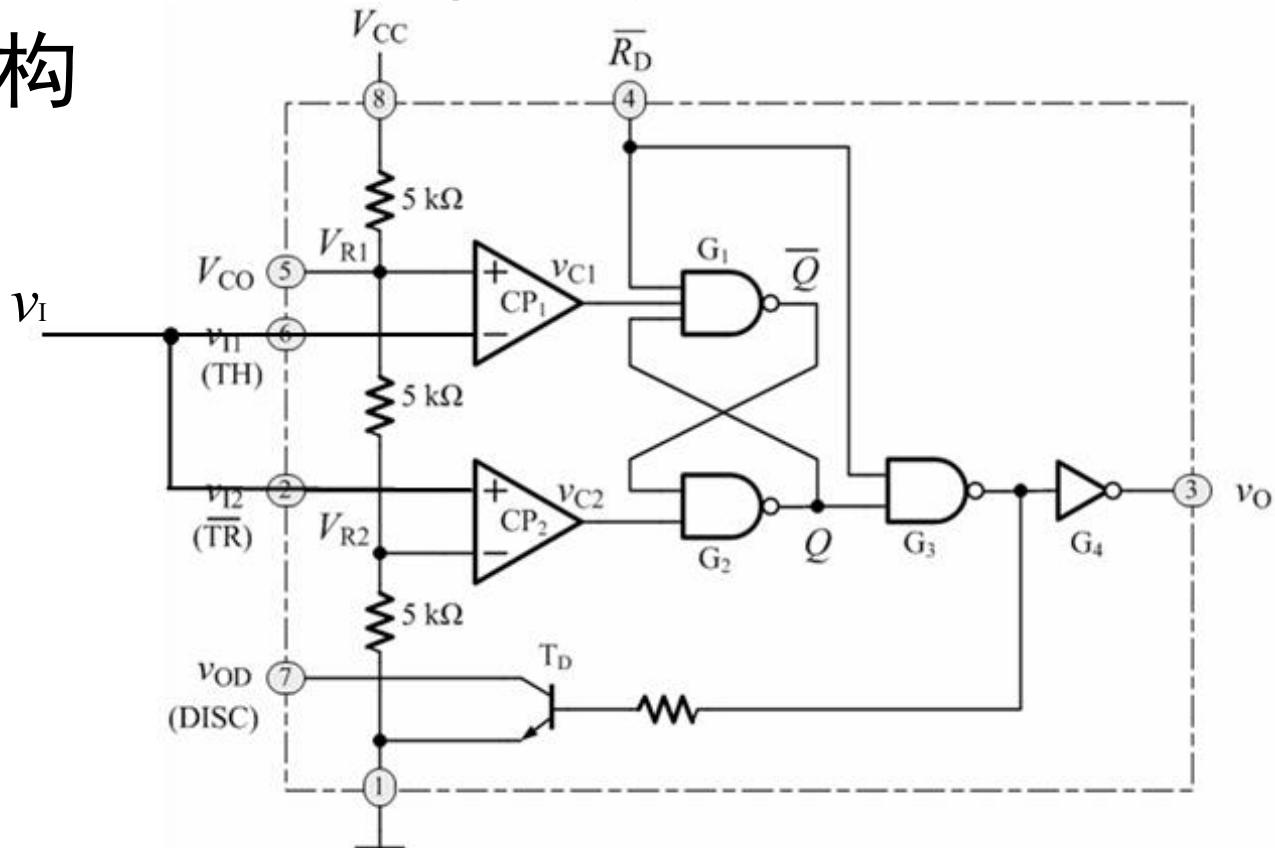
- SR锁存器（“基本RS触发器”）



$v_{I1}$	$v_{I2}$	$\bar{R}$	$\bar{S}$	$Q^{n+1}$	$\bar{Q}^{n+1}$
$>V_{R1}$	$>V_{R2}$	0	1	0	
$<V_{R1}$	$>V_{R2}$	1	1	$Q^n$	
$<V_{R1}$	$<V_{R2}$	1	0	1	
$>V_{R1}$	$<V_{R2}$	0	0	1	1

# 脉冲波形的产生与变换

- 用555定时器接成施密特触发器
- 电路结构



如果参考电压由外接电压V<sub>CO</sub>供给，则V<sub>T+</sub>=V<sub>CO</sub>, V<sub>T-</sub>=0.5V<sub>CO</sub>, ΔV<sub>T</sub>=0.5V<sub>CO</sub>

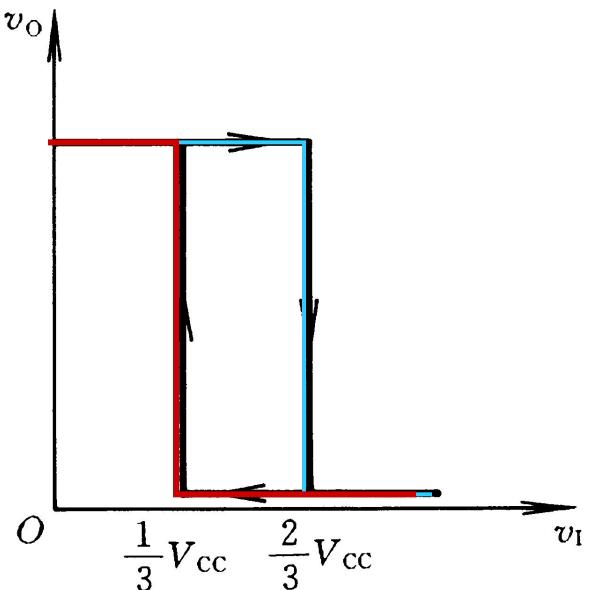
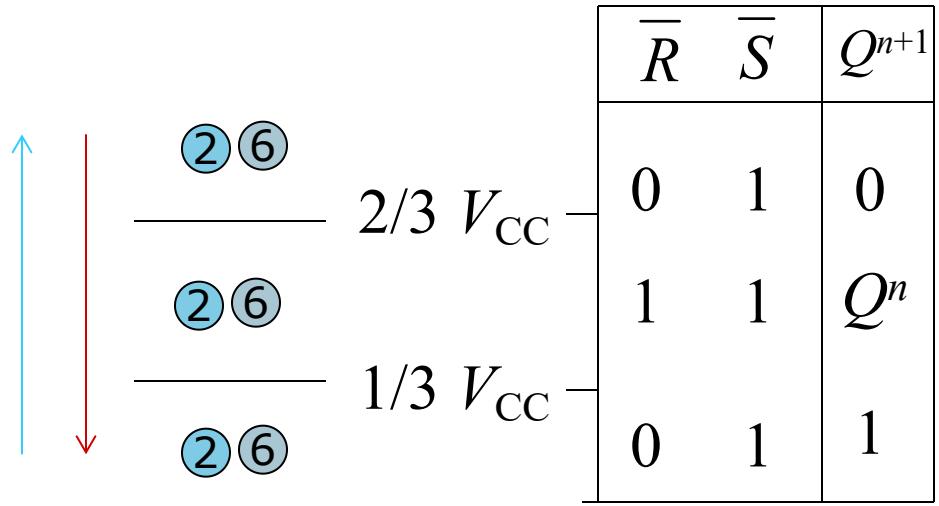
所以改变V<sub>CO</sub>可以调整回差电压的大小

加入滤波电容抗干扰

# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 输入输出的传输特性曲线

### ➤ 反相施密特触发器

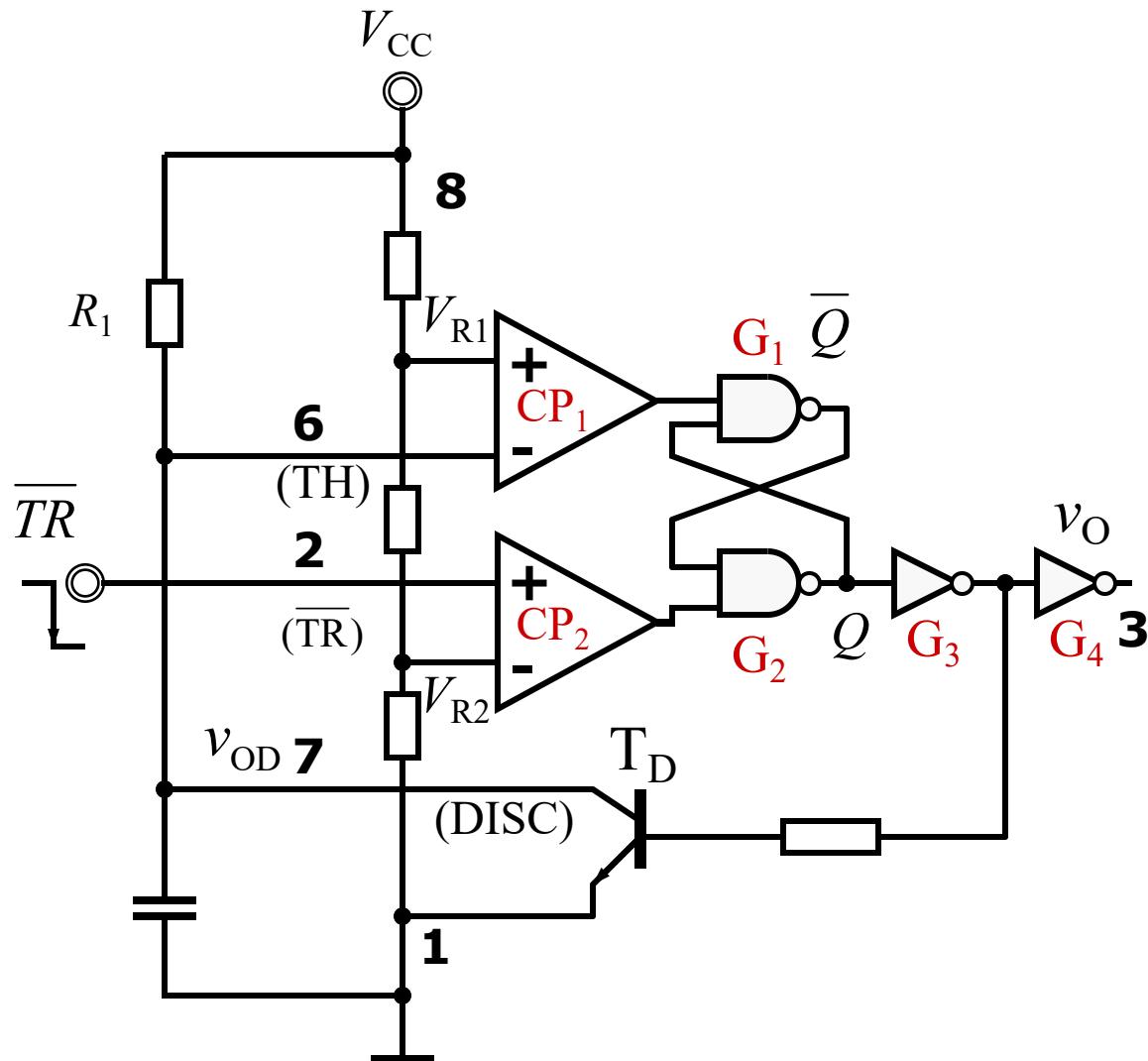


# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 用555定时器接成单稳态触发器

### ■ 电路结构

1. OC管的上拉电阻
2. TH 接  $v_{OD}$
3.  $v_{OD}$  端接一个电容C
4. 触发端  $\overline{TR}$  负脉冲触发



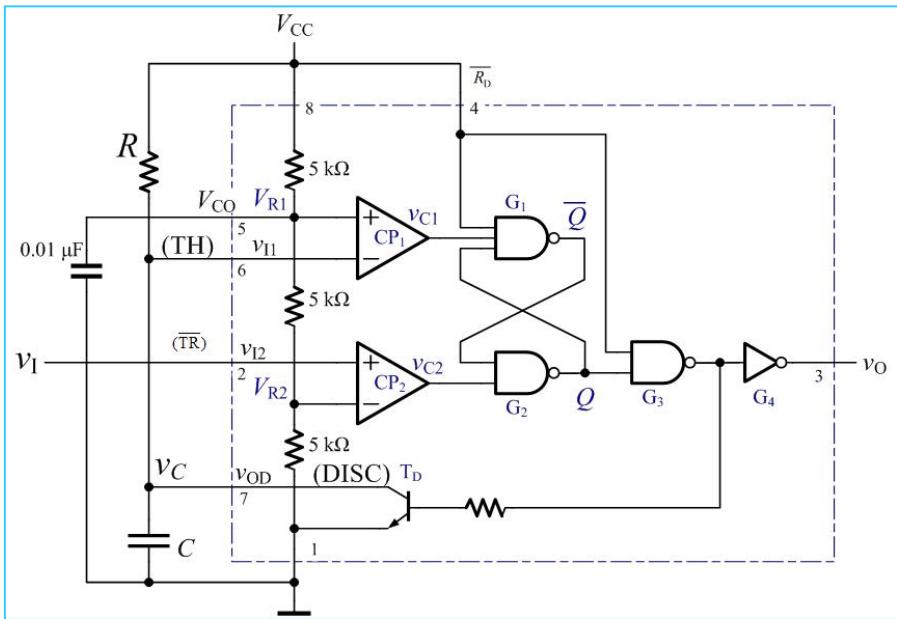
# 脉冲波形的产生与变换

## (1) 静态

如认为未触发时 $v_1=1$ , 这时:

- i. 假设 TH (即 $v_{OD}$ )  $> V_{R1}$ ,  
则  $\left(\begin{matrix} \bar{R} \\ \bar{S} \end{matrix}\right)$  为  $\left(\begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}\right)$ ,  $Q=0$ ,  
 $v_O$  ( $v_{OD}$ ) 为低, 矛盾!
- ii. 假设 TH (即 $v_{OD}$ )  $< V_{R1}$ ,  
则  $\left(\begin{matrix} \bar{R} \\ \bar{S} \end{matrix}\right)$  为  $\left(\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}\right)$ , 基本RS

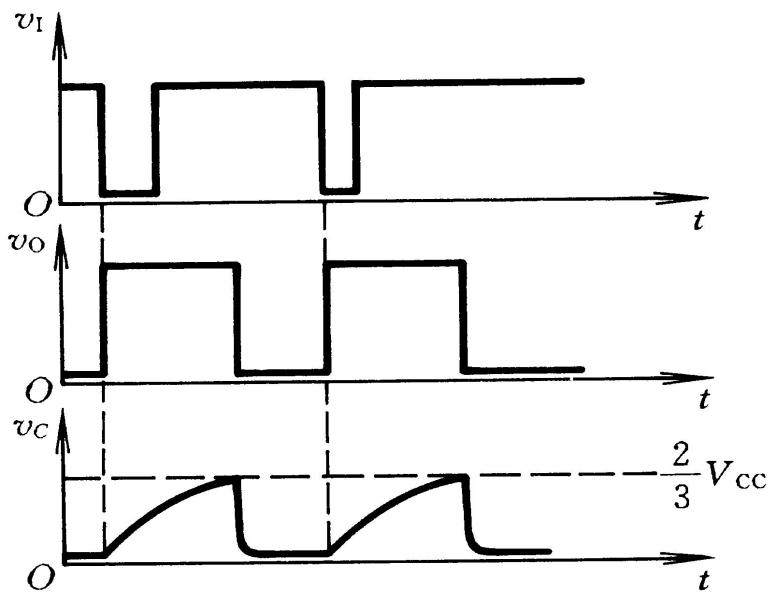
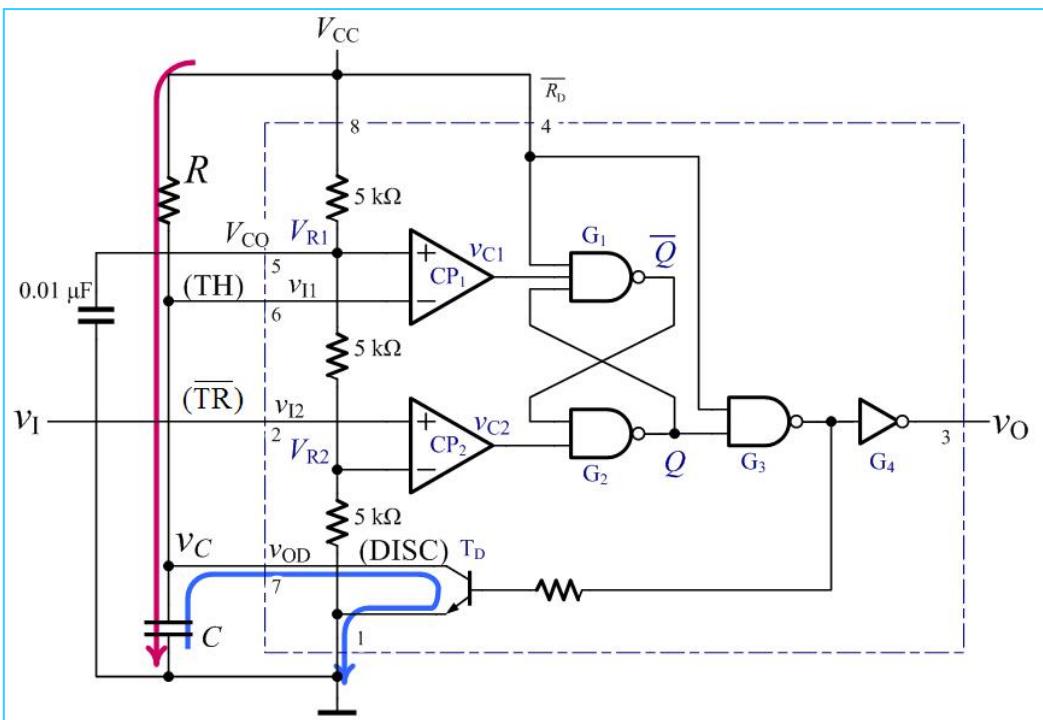
触发器状态保持, 所以在稳态,  $v_{OD}$  为低是合理的。



# 脉冲波形的产生与变换

## (2) 动态——波形与充放电回路

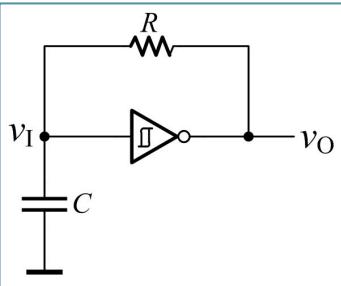
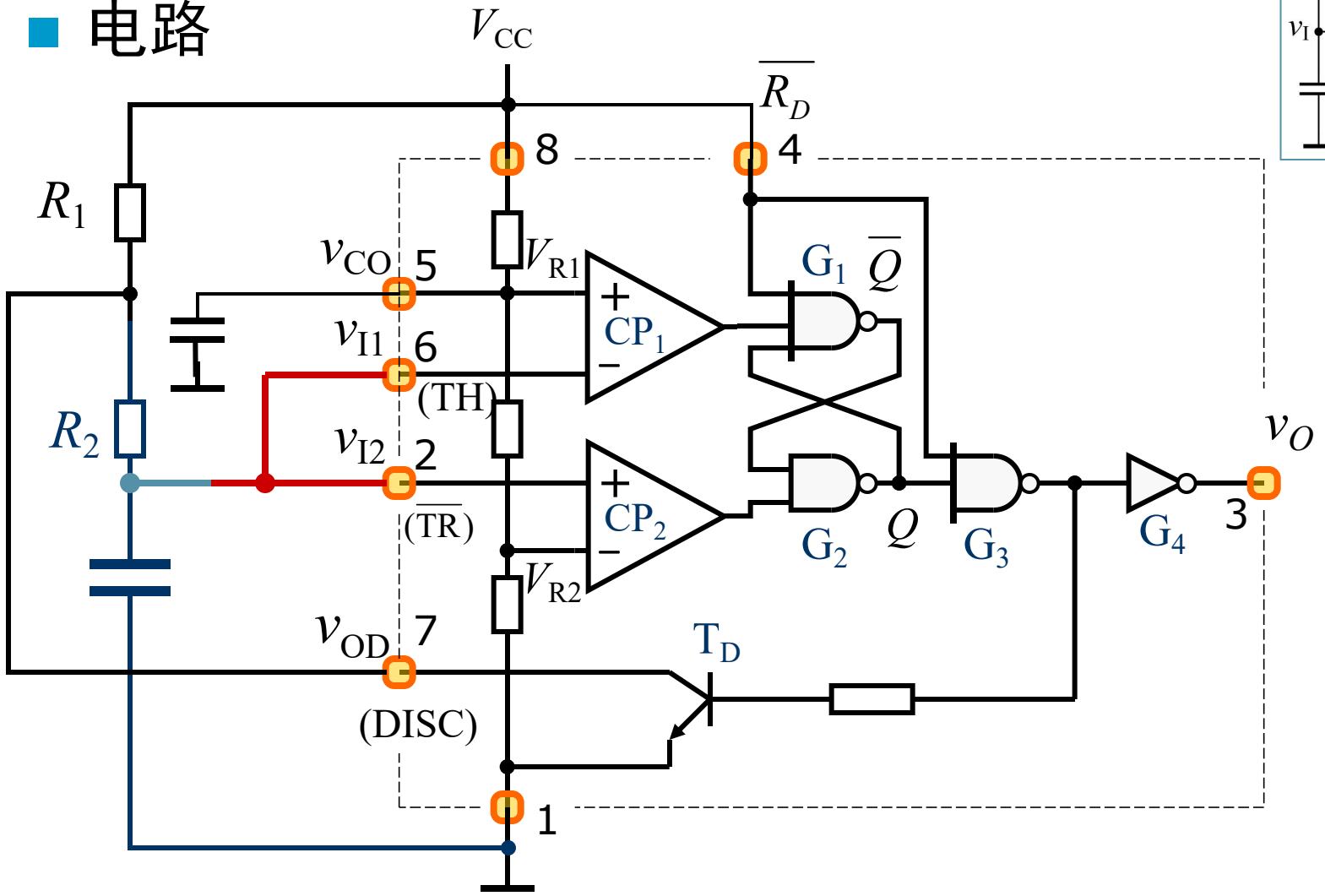
先设 $v_I$ , 即触发端的输入负脉冲, 宽度较窄。



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 用555定时器接成多谐振荡器

### ■ 电路



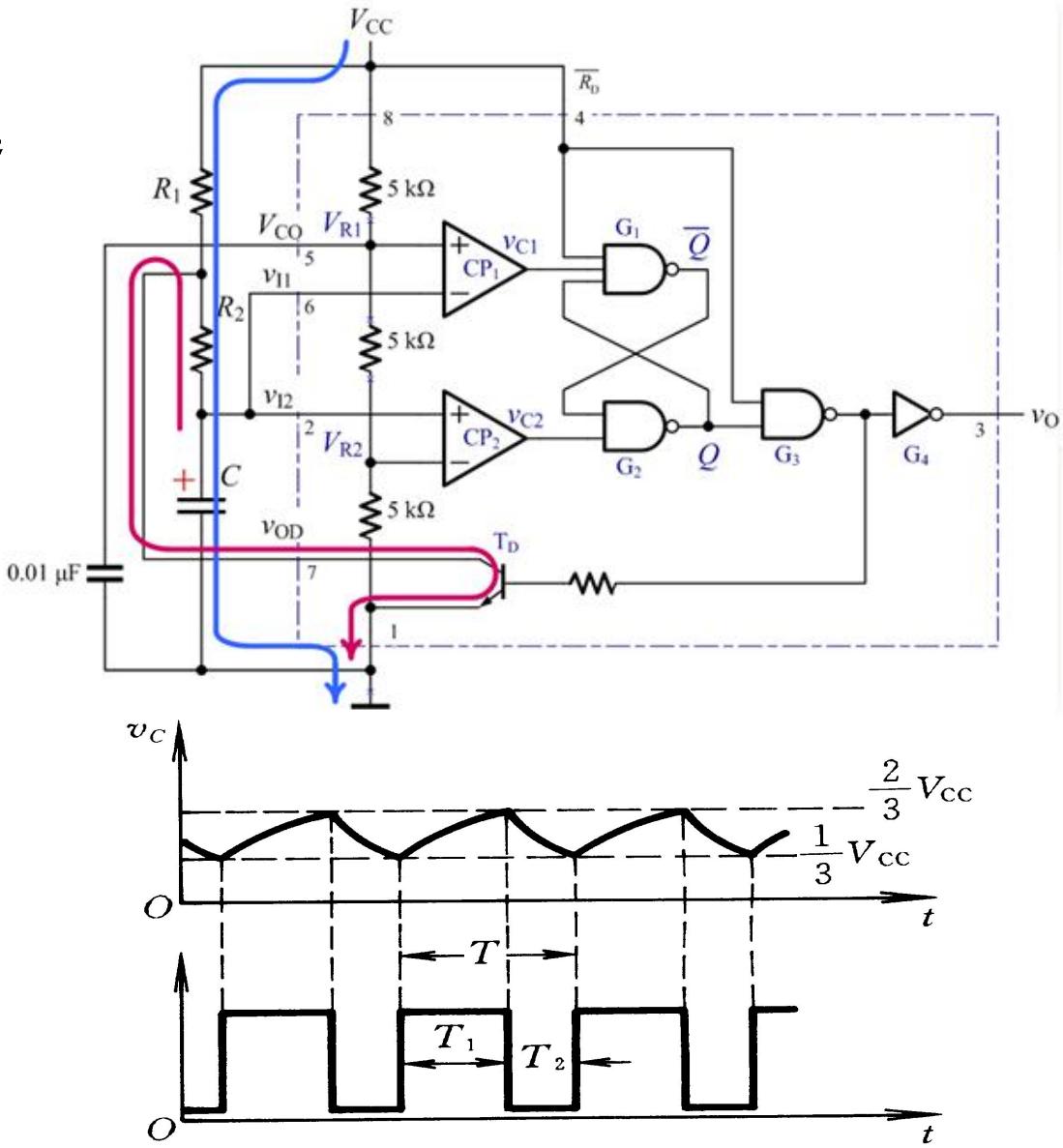
# 脉冲波形的产生与变换

555定时器 → 施密特触发器  
 → 多谐振荡器

$v_{I1}$  和  $v_{I2}$  连接在一起接成施密特触发器

$T_D$  与  $R_1$  接成反相器，输出为  $v'_o$

$v'_o$  经  $R_2$  和  $C$  组成的积分电路接到施密特触发的输入端



# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 计算：

充电时间

$v_O$ 输出高电平

$$T_1 = (R_1 + R_2)C \ln \frac{V_{CC} - V_{T-}}{V_{CC} - V_{T+}} = (R_1 + R_2)C \ln 2$$

放电时间

$v_O$ 输出低电平

$$T_2 = R_2 C \ln \frac{0 - V_{T+}}{0 - V_{T-}}$$

振荡周期（如果  $V_{CO}$  通过电容接地）

$$T = T_1 + T_2 = (R_1 + 2R_2)C \ln 2$$

振荡频率

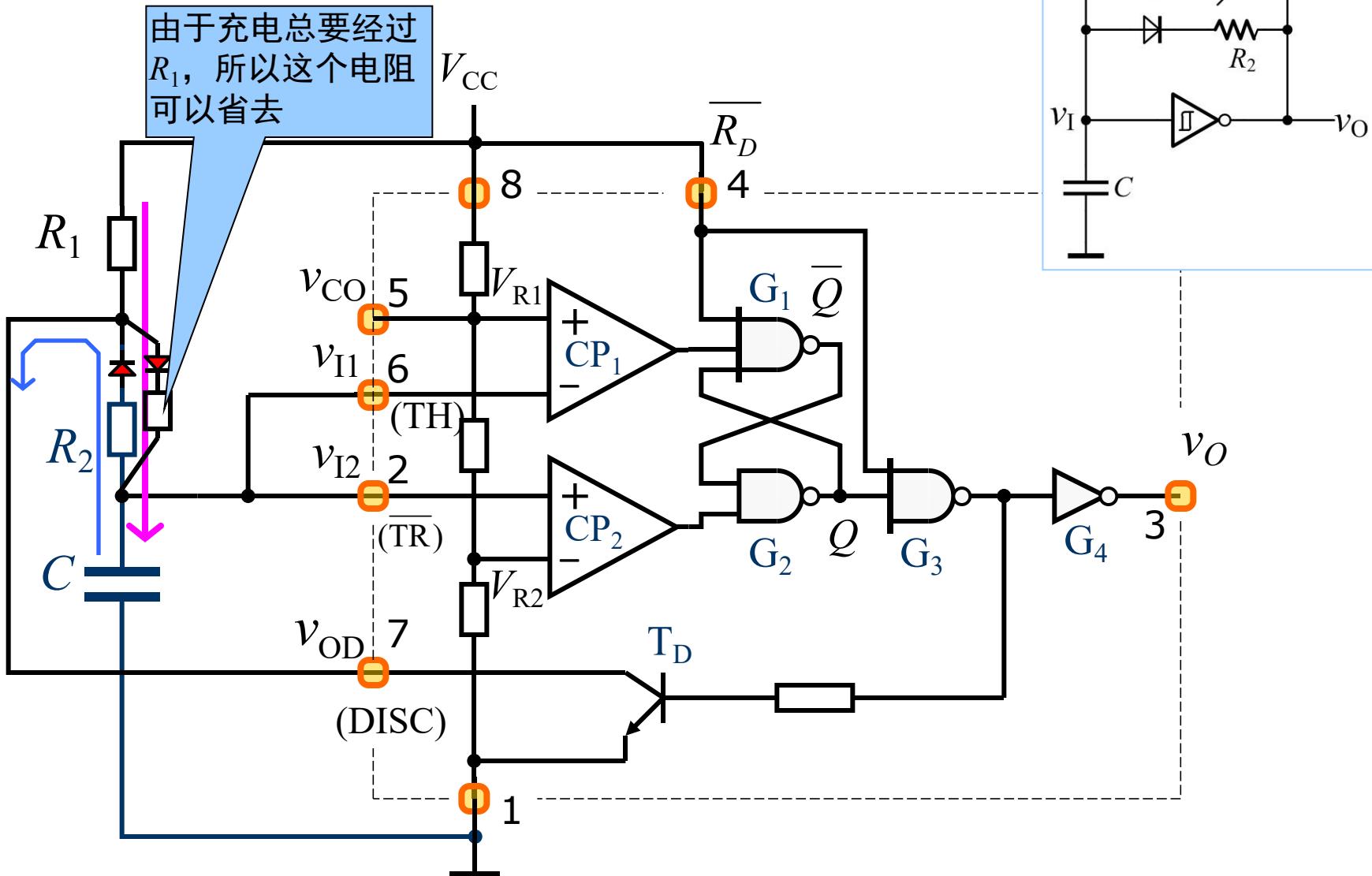
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(R_1 + 2R_2)C \ln 2}$$

占空比

$$q = \frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + (R_1 + R_2)} > 50\%$$

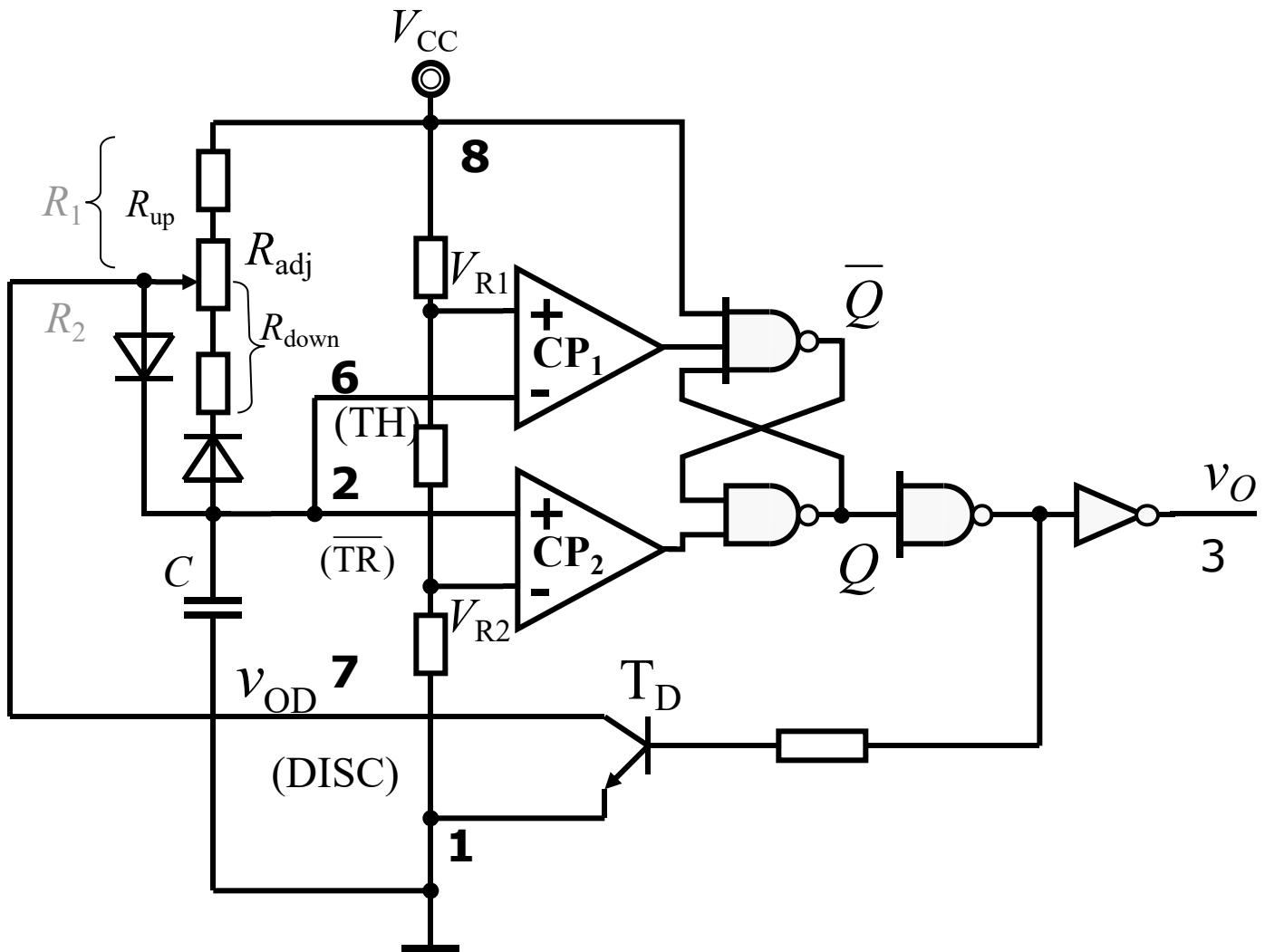
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 占空比可调的多谐振荡器



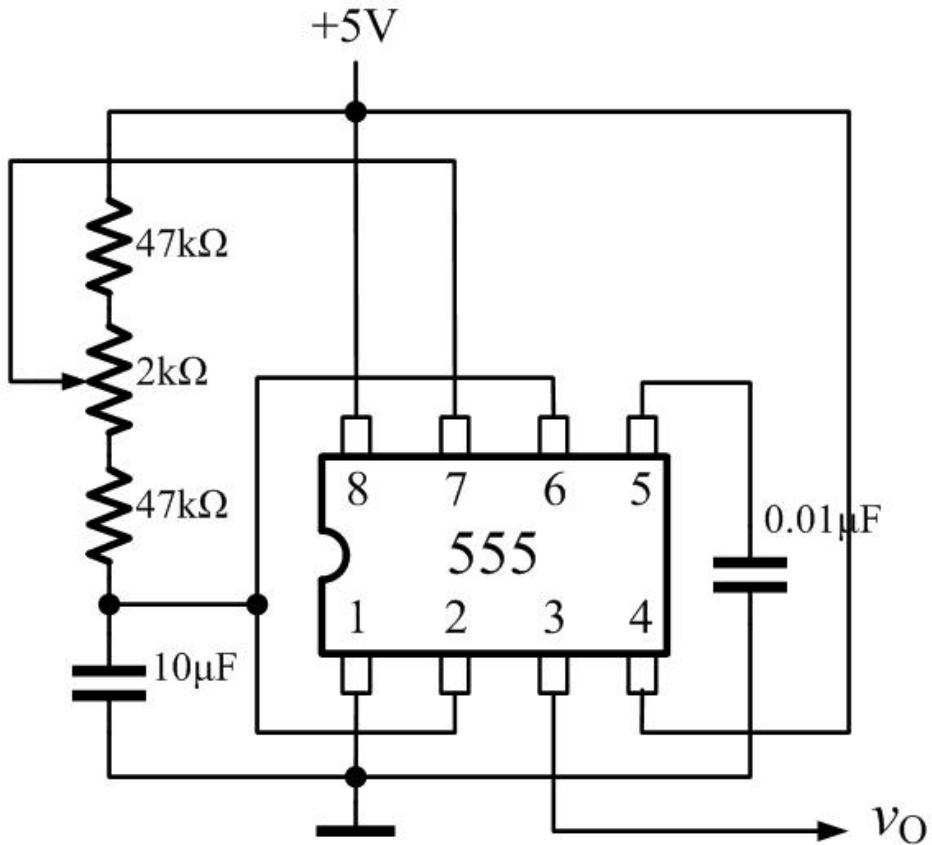
# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 占空比可调的多谐振荡器



# 脉冲波形的产生与变换

- 占空比为2/3、振荡周期为1秒的多谐振荡器





# 脉冲波形的产生与变换

## ■ 其它

555定时器是一种用途很广的集成电路，除了能组成施密特触发器、单稳态触发器和多谐振荡器以外，还可以接成各种灵活多变的应用电路。



## 全章小结

- ✓ 施密特触发器和单稳态触发器，虽然不能自动地产生矩形脉冲，但却可以把其它形状的信号变换成为矩形波，为数字系统提供标准的脉冲信号。
- ✓ 多谐振荡器是一种自激振荡电路，不需要外加输入信号，就可以自动地产生出矩形脉冲。石英晶体多谐振荡器，利用石英晶体的选频特性，只有频率为 $f_0$ 的信号才能满足自激条件，产生自激振荡，其主要特点是 $f_0$ 的稳定性好。
- ✓ 555定时器能够组成施密特触发器、单稳态触发器和多谐振荡器。



## 全章小结

### ■ 矩形脉冲生成与整形电路分析的基本方法

#### 1. 电路特点

对于一时不明了的电路，不要忙下结论，等步骤 2 完成后才能作结论。此时，本步骤要作的是分清单元电路，识别那些是关键的功能部件。

#### 2. 工作状态分析 之 静态

#### 3. 工作状态分析 之 动态

- 定性分析触发时的情形
- 动态分析：工作状态的转换

#### 4. 从动态分析自然过渡到定量计算

**忠告：**不要只盯着定量计算，切忌死记公式；实际上，静下心来 分析清楚电路机理才是常胜之道。