


## 第 5 章 触发器 Flip-Flop (FF)

- 组合逻辑电路：

基本单元 — 逻辑门 — 无记忆功能

数字系统中，信息  处理

也需要存储  记忆器件或电路

- 时序逻辑电路：

基本单元 — FF — 记忆

触发器定义： **记忆元件**

它可以存储一位二进制信息，也称为**锁存器 (Latch)**

能储存一位二进制信息的基本单元。

**FF**

a) 双稳态： 1 and 0

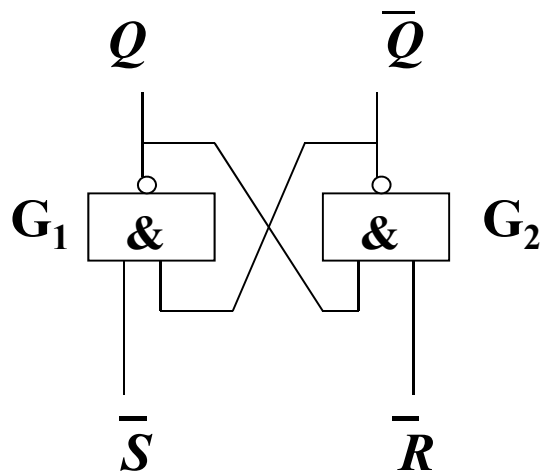
b) 置 1, 置 0

c) 原信号消失后，保持新状态

## § 5.1 基本 RS-触发器

### 5.1.1 与非门构成的基本RS-FF

#### 1. 电路



两个与非门交叉耦合

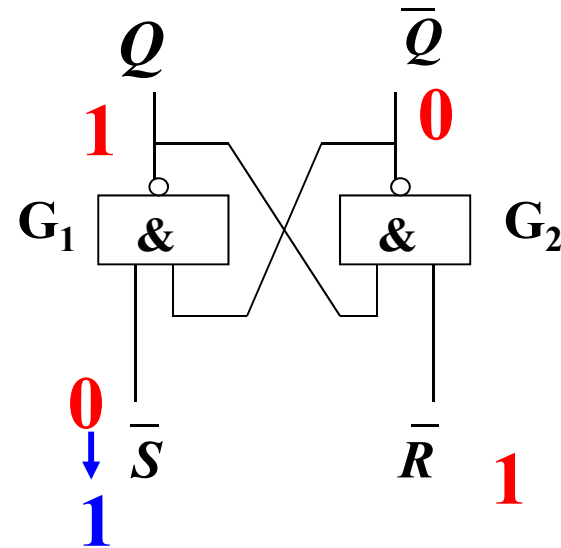
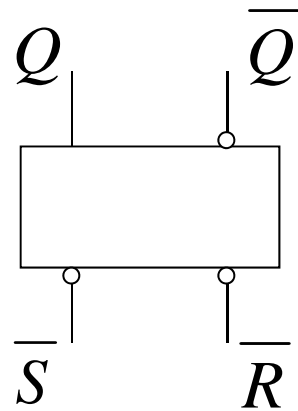
输入:  $\bar{S}$  Set 置位端  
 $\bar{R}$  Reset 复位端

输出:  $Q=1, \bar{Q}=0$  “1” 态  
 $Q=0, \bar{Q}=1$  “0” 态

Note:  $\left\{ \begin{array}{l} \bar{S} \sim Q \\ \bar{R} \sim \bar{Q} \end{array} \right.$

定义: 传感器的状态为  $Q$

符号



## 2. 工作原理

1)  $\bar{S}=0, \bar{R}=1$   $G_1$  锁住  $Q=1, \bar{Q}=0$  Set (置1)

如果  $\bar{S}$  转成 1, 因为  $\bar{Q}=0$ ,  $G_1$  锁住,  $Q=1$

$\bar{S}=\bar{R}=1$  保持原状态: No-change (NC)

传感器保持其目前的状态

2)  $\bar{S} = 1, \bar{R} = 0$

$G_2$  锁住

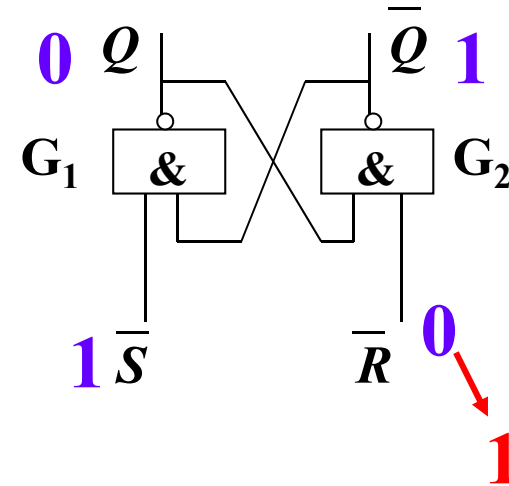
$\bar{Q} = 1, Q = 0$  Reset (置0)

If  $\bar{R}$  converts to 1,

$Q = 0$ ,  $G_2$  锁住

$\bar{S} = \bar{R} = 1$

保持  $Q = 0$



真值表

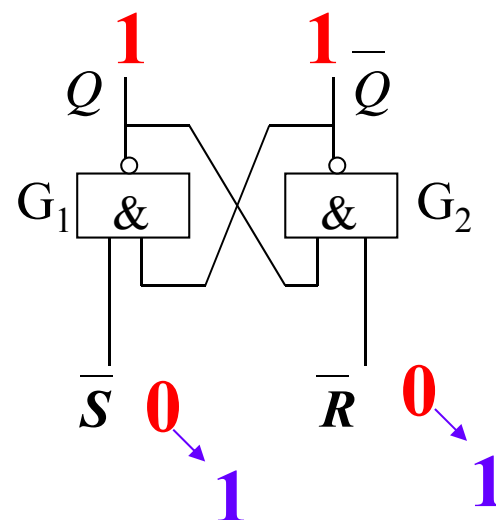
$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q$	$\bar{Q}$	FF 状态
0	0			
0	1	1	0	Set (1)
1	0	0	1	Reset (0)
1	1	NC	NC	No- change

3) 当  $\bar{S} = \bar{R} = 0$ ,  $Q = \bar{Q} = 1$ ,

强制为逻辑高电平

当  $\bar{R}, \bar{S}$  同时从 0 变到 1

此时要看逻辑门的延迟时间  $t_{pd}$  :



$\left\{ \begin{array}{l} t_{pd1} < t_{pd2} \quad (G_1 \text{ 快}) \\ t_{pd1} > t_{pd2} \quad (G_2 \text{ 快}) \end{array} \right.$	$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q$	$\bar{Q}$	FF 状态
	0	0	1	1	不确定 ( $\bar{S} \bar{R}$ 同时 0→1)
$Q = 0$	0	1	1	0	Set (1)
$Q = 1$	1	0	0	1	Reset (0)
	1	1	保持		No-change

都是稳定状态，但不知是哪种。在  $\bar{S} \bar{R}$  同时从 0 变到 1 时，状态不定

## 5.1.2 RS-FF的功能描述

### 状态和变量

$Q^{n+1}$  下一时刻稳定状态

$Q^n$  目前的稳定状态

输入变量 ( 对RS-FF为  $\bar{S}$   $\bar{R}$  )

描述逻辑关系  
的方法包括:

状态转移真值表 ( 状态表 )

状态方程 ( 特征方程 )

状态转移图和激励表

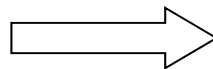
波形图 ( 时序图 )

# 基本 RS-FF功能描述

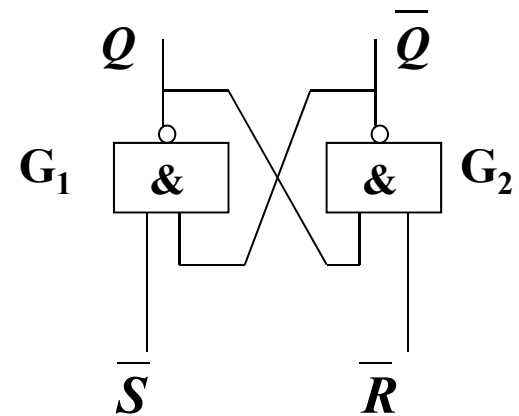
## 1. 功能表

### 真值表

$\bar{R}$	$\bar{S}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	uncertain
0	0	1	uncertain
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1



$\bar{R}$	$\bar{S}$	$Q^{n+1}$
0	0	uncertain
0	1	0
1	0	1
1	1	$Q^n$





## 2. 状态方程 (特征方程)

$\bar{R}$	$\bar{S}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	uncertain
0	0	1	uncertain
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

	$\bar{R}$	$\bar{S}$			
$Q^{n+1}$	$Q^n$				
		00	01	11	10
0		$\Phi$	0	0	1
1		$\Phi$	0	1	1

$$\begin{cases} Q^{n+1} = \bar{\bar{S}} + \bar{R}Q^n \\ \bar{S} + \bar{R} = 1 \end{cases}$$

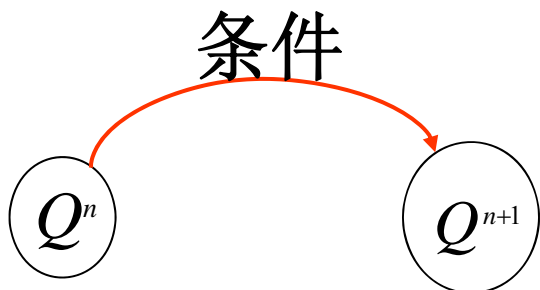
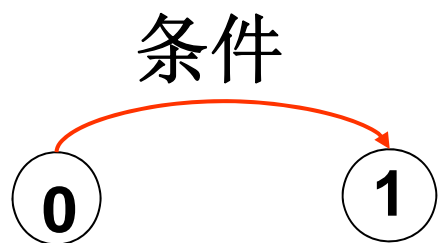
注意：将  $\bar{R}$  和  $\bar{S}$  看作整体输入信号  
符号上面的横线表示低电平有效

不同时为0

### 3. 状态图与状态表

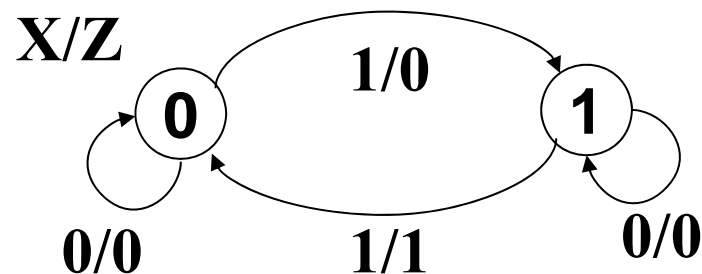
**状态图** 用图形表示输出状态转换的条件和规律

{ 组合电路：真值表 – 输入与输出关系  
时序电路：状态图 – 状态转换及转换条件



○ 状态，代码  
→ 转换 (从始态指向新态)

**X/Z** 转换条件



## 激励表

列出已知状态转换和所需要的输入条件的表称为激励表。  
激励表是以现态  $Q^n$  和次态  $Q^{n+1}$  为变量，以对应的输入  $\bar{R}$   $\bar{S}$  为函数的关系表。

表示出在什么样的激励下，才能使现态  $Q^n$  转换到次态  $Q^{n+1}$ 。

$$Q^n \longrightarrow Q^{n+1}$$

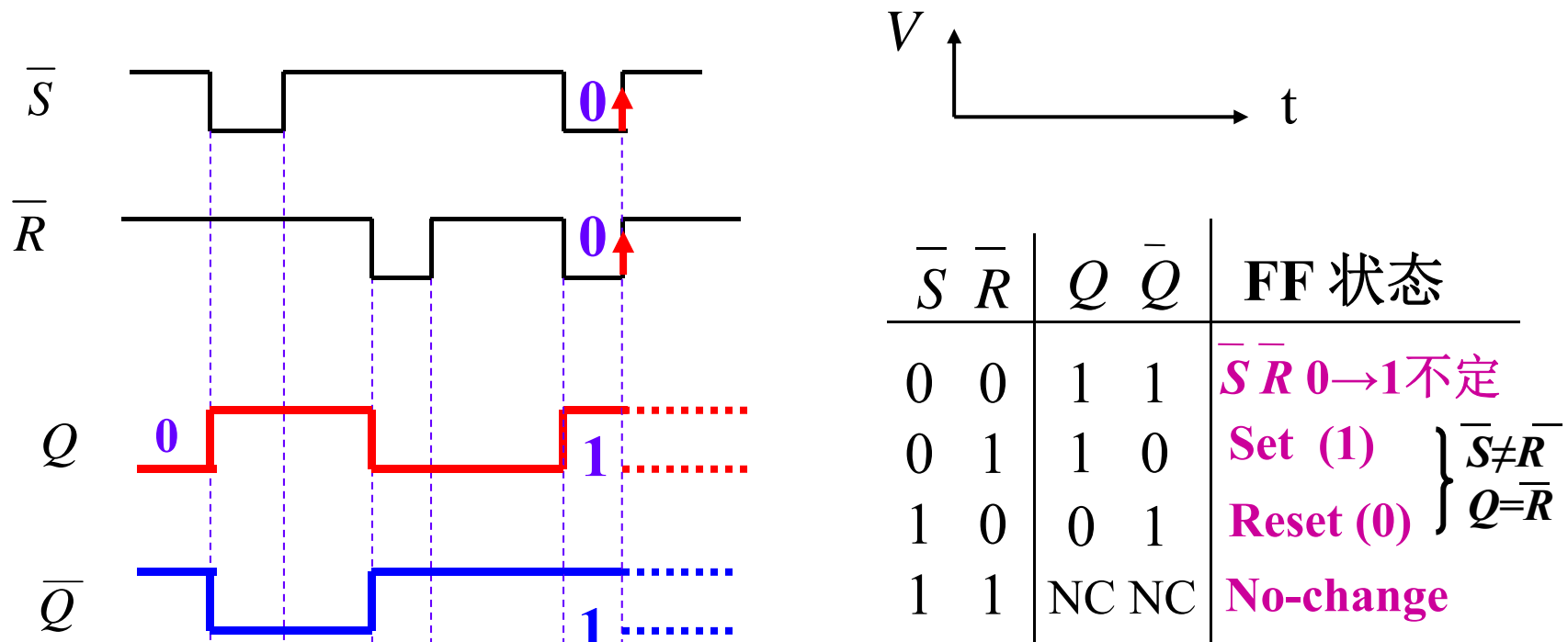
$\bar{R}$	$\bar{S}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	uncertain
0	0	1	uncertain
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

## 基本 RS-FF转换表

输出转换	FF 输入
$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$	$\bar{R}$ $\bar{S}$
0 0	$\Phi$ 1
0 1	1 0
1 0	0 1
1 1	1 $\Phi$

## 4. 时序图 (波形图)

输出波形要对应输入波形. (初始状态 **initially**  $Q = 0$ )

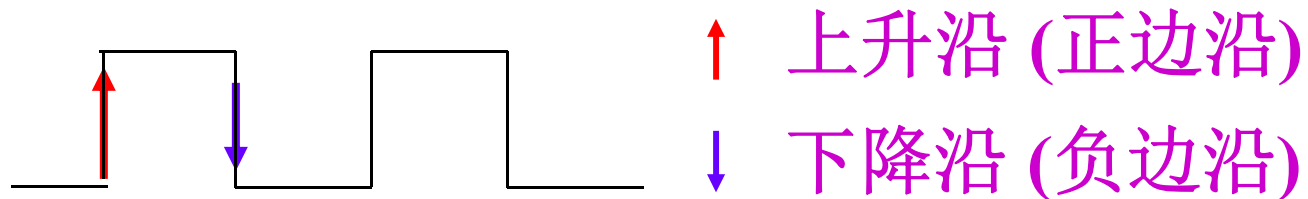


## § 5.2 时钟 FF (同步 FF)

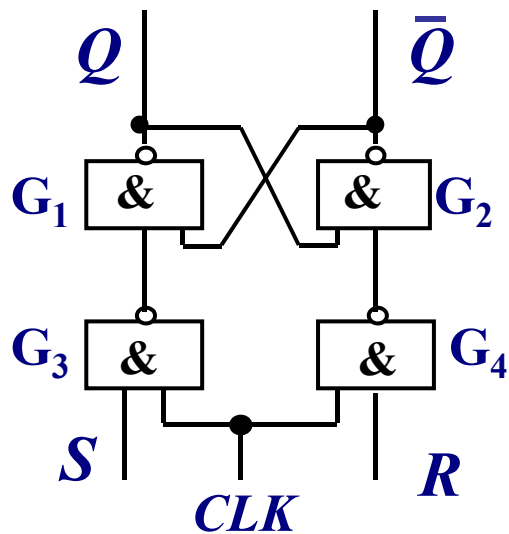
在数字系统中，为协调各部分动作，需要某些FF在同一时刻动作。引入一同步信号，使这些FF只有在同步信号到达时才按输入信号改变状态。同步信号被称时钟脉冲信号。

**CLK 信号: Clock**

**CLK 为周期性矩形脉冲波形**

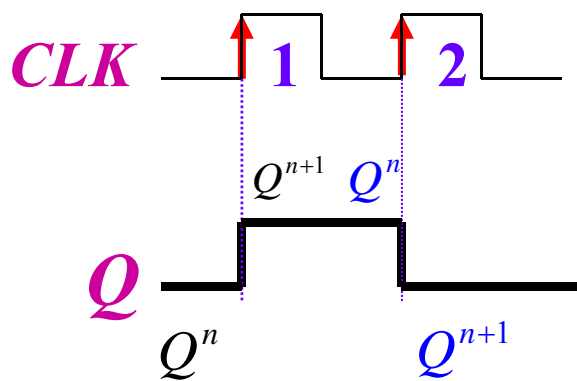


## 5.2.1 时钟 RS-FF



在基本RS-FF加  $G_3$ 、 $G_4$ , 只有当  $CLK=1$ ,  $G_3$  和  $G_4$  开门。  
当  $CLK=0$ ,  $G_3$  和  $G_4$  锁住。

讨论  $CLK=1$  时情况



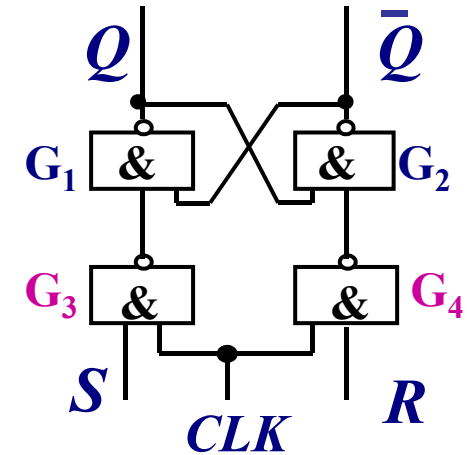
定义:

$\begin{cases} Q^n & CLK \text{ 到来之前 --- 原状态} \\ Q^{n+1} & CLK \text{ 到来之后 --- 新状态, 次态} \end{cases}$

$Q^n, Q^{n+1}$  for every  $CLK$

# 时钟 RS-FF 真值表

$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q$	$\bar{Q}$	FF state
0	0	1	1	$\bar{S} \bar{R} 0 \rightarrow 1$ 不定
0	1	1	0	Set (1)
1	0	0	1	Reset (0)
1	1	NC	NC	No-change



$S$	$R$	$Q^n$	$Q^{n+1}$	Comments
0	0	0	0	$S=R=0$ $Q^{n+1}=Q^n$
0	0	1	1	
0	1	0	0	$R \neq S$ $Q^{n+1}=S$
0	1	1	0	
1	0	0	1	
1	0	1	1	
1	1	0	$\phi$	$R=S=1$ , $Q=\bar{Q}=1$ $S R 1 \rightarrow 0 \phi$
1	1	1	$\phi$	

●  $S=R=0$  FF 保持  $Q^{n+1}=Q^n$

●  $S=0, R=1$

$G_3=1, G_4=0 \quad Q^{n+1}=0$

●  $S=1, R=0$

$G_3=0, G_4=1 \quad Q^{n+1}=1$

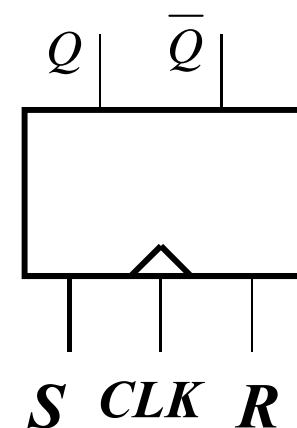
●  $S=1, R=1, Q=\bar{Q}=1$ ,

$S$  和  $R$   $1 \rightarrow 0$ ,  $Q$  不确定

## 输出与输入之间关系

$Q^{n+1}$		$SR$			
$Q^n$		00	01	11	10
	0	0	0	$\Phi$	1
	1	1	0	$\Phi$	1

符号



## 同步RS-FF特征方程

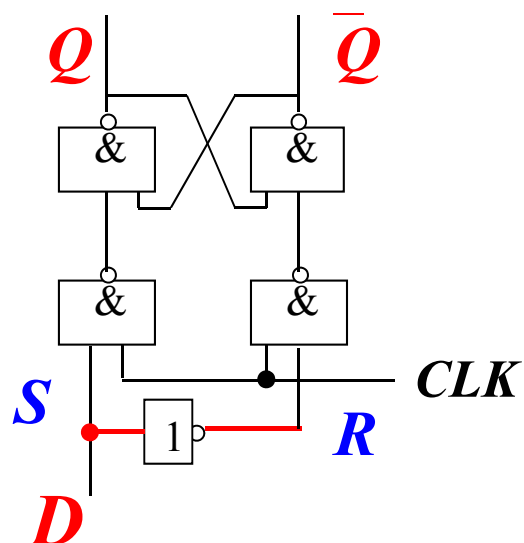
$$\begin{cases} Q^{n+1} = S + \bar{R}Q^n \\ S \cdot R = 0 \quad (\text{不同时为1}) \end{cases}$$

缺点:

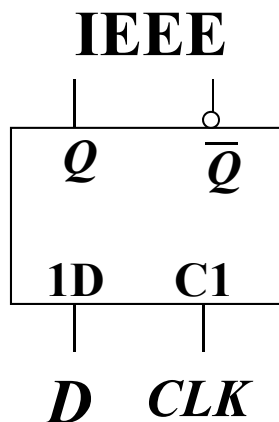
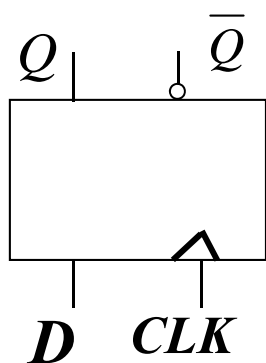
不确定状态



## 5.2.2 同步D-FF



符号



在  $S$  和  $R$  之间加一个非门，使  $S \neq R$

$S=D, R=\bar{D}$  无状态不定

工作原理：

$CLK=0$ , FF 保持

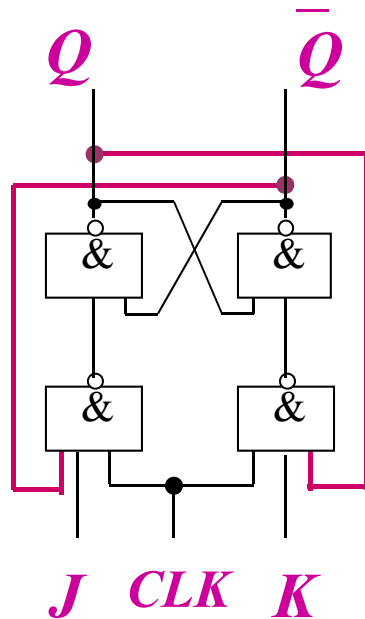
$CLK=1$ , FF 工作

$$\begin{cases} D=1, (S=1, R=0) & Q^{n+1} = 1 \\ D=0, (S=0, R=1) & Q^{n+1} = 0 \end{cases}$$

同步 D-FF 状态方程：

$$Q^{n+1} = D$$

## 5.2.3 同步 JK-FF



加两条反馈线到输入端

$$S = J\bar{Q}^n, \quad R = KQ^n$$

$Q, \bar{Q}$  不同时为1,  $RS$ 不同时  
 $1 \rightarrow 0$ , 无状态不定

两输入:  $J, K$

$CLK = 0$ , FF 停;

$CLK = 1$ , FF 工作

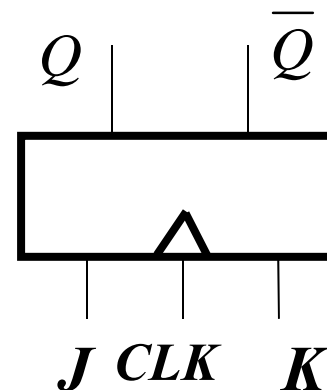
$J$	$K$	$Q^n$	$Q^{n+1}$	comments
0	0	0	0	$J=K=0$ $Q^{n+1}=Q^n$
0	0	1	1	
0	1	0	0	$J \neq K$ $Q^{n+1} = J$
0	1	1	0	
1	0	0	1	
1	0	1	1	
1	1	0	1	$J=K=1$ $Q^{n+1}=\bar{Q}^n$
1	1	1	0	

## JK-FF 特征方程

$Q^n \backslash JK$		00	01	11	10
		0	1	1	1
0		0	0	1	1
1		1	0	0	1

$$Q^{n+1} = \bar{J}Q^n + \bar{K}Q^n$$

符号:



从 RS-FF :

$$\begin{aligned}
 Q^{n+1} &= S + \bar{R}Q^n \\
 &= J\bar{Q}^n + \overline{KQ^n}Q^n \\
 &= J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n
 \end{aligned}$$

**CLK** 正边沿有效

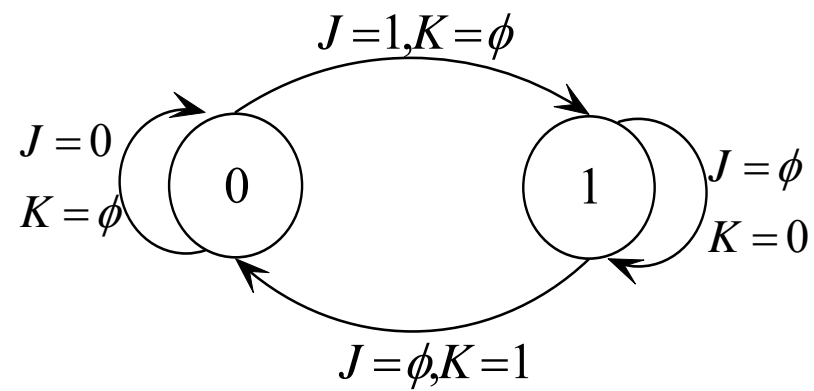
## 状态表

$J$	$K$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

## JK-FF 激励表

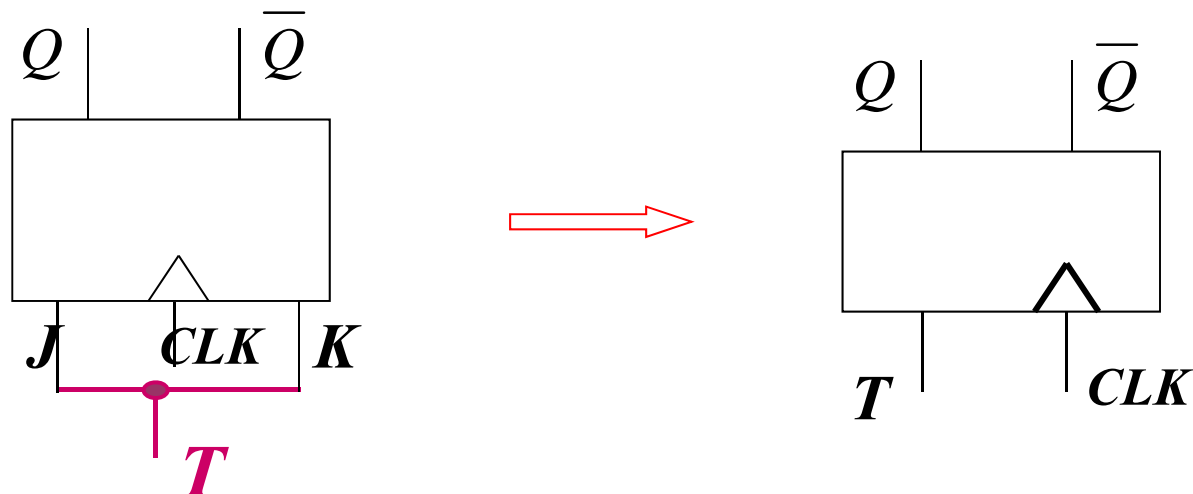
输出转换 $Q^n \rightarrow Q^{n+1}$	FF 输入 $J \quad K$	
0 0	0	$\Phi$
0 1	1	$\Phi$
1 0	$\Phi$	1
1 1	$\Phi$	0

## JK-FF状态图



## 5.2.4 同步T-FF

$$J = K = T$$



**T-FF**状态方程:

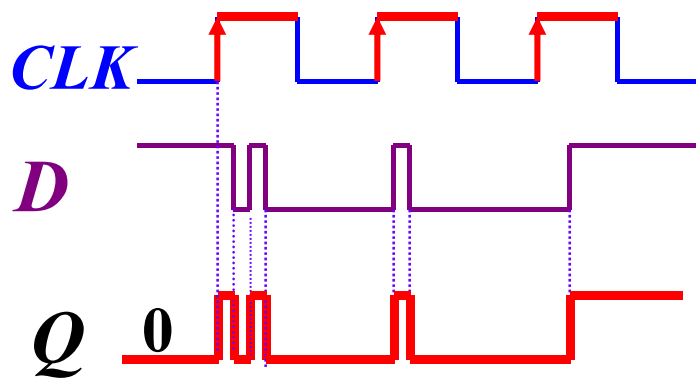
$$Q^{n+1} = T\bar{Q}^n + \bar{T}Q^n = T \oplus Q^n$$

$$\begin{cases} T=0, & Q^{n+1} = Q^n \\ T=1, & Q^{n+1} = \bar{Q}^n \end{cases}$$

## 5.2.5 同步触发器的缺点

在  $CLK=1$  期间, FF 处于触发状态,  $Q^{n+1}$  随着输入信号  $R, S, D, J, K, T$  的变化而变化, 出现空翻现象。

一个  $CLK$  周期内,  $Q$  端只能变化一次, 变化一次以上称为触发器的空翻。



$$Q^{n+1} = D$$

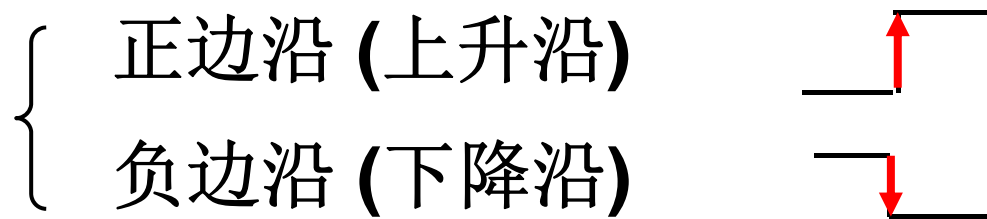
同步 FF 都存在空翻问题要克服, 用新结构

## § 5.3 主从-FF (Master-Slave FF)

为了克服 FF 的空翻，出现了几种结构的 FF

原理都是边沿触发：

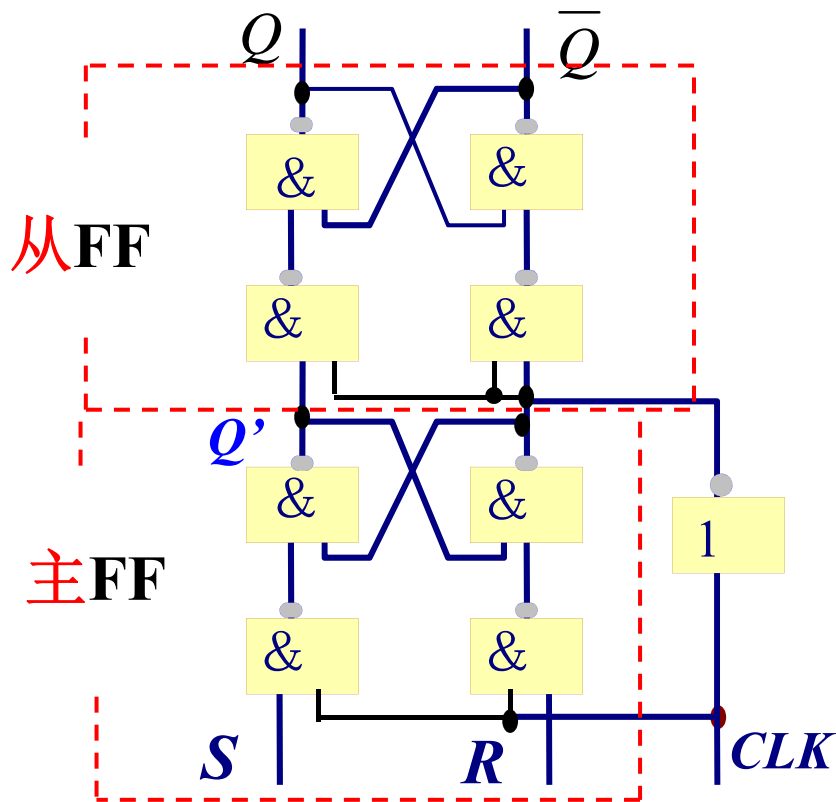
**FF 在触发脉冲边沿处改变状态**



边沿到来的瞬间触发，缩短触发时间

**Master-Slave FF is one of them**

### 5.3.1 主从 RS-FF



两个相同的同步RS-FF  
相连，两个CLK之间加一个  
非门 (一个FF工作，另  
一个停止)。

从触发器的状态  $Q$  为  
整个触发器的状态。

主触发器的状态为  $Q'$

$\underline{CLK=0}$ , M-FF 停,  $Q'$  保持  
 $\underline{CLK=1}$ , 从FF开门,

}  $\because Q'$  保持  $\therefore Q$  保持

$\underline{CLK=1}$ , M-FF 开门,  $S, R \rightarrow Q'$   
 $\underline{CLK=0}$ , 从FF关门

}  $\therefore Q$  保持

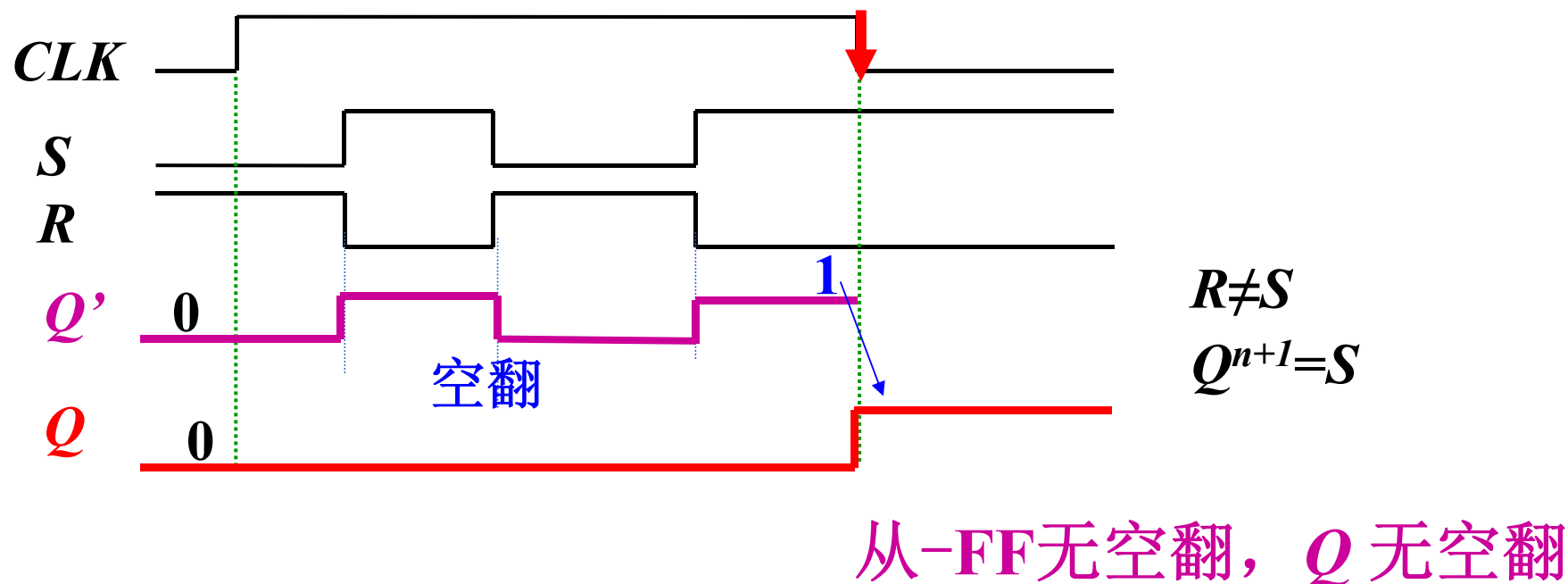


∴ 在  $CLK=0$  和  $CLK=1$  期间,  $Q$  保持

在  $CLK$  从 1 到 0 ( $CLK$  下降沿) 的时刻, 主FF内的信息传送到  $Q$

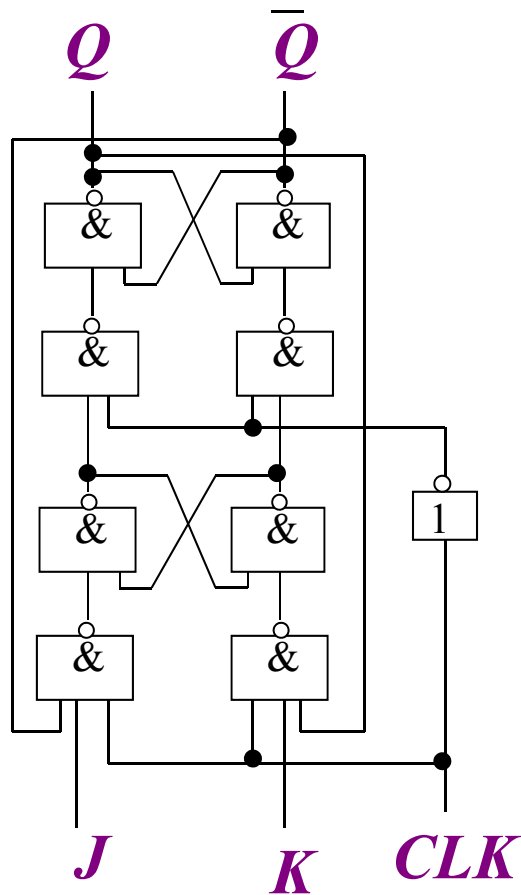
∴ 主从结构 RS-FF 是在  $CLK$  下降沿触发的FF

$Q$  是  $CLK$  有效边沿到达之前的最后信息



### 5.3.2 主从 JK-FF

在主从RS-FF上引出两条反馈线构成主从 JK-FF。



真值表  
特征方程 } 与同步JK-FF相同

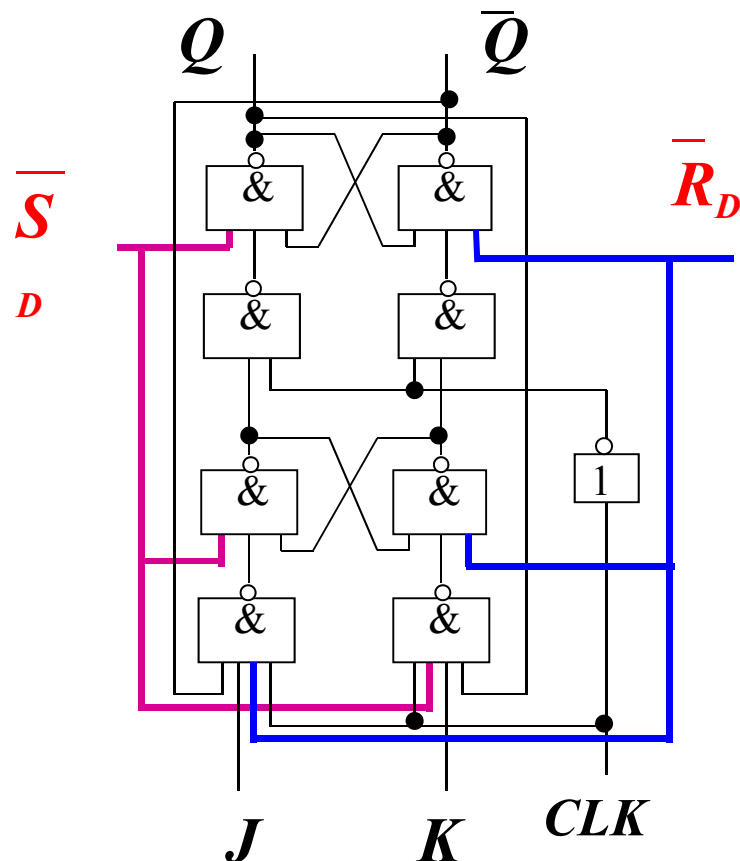
$J$	$K$	$Q^{n+1}$	
0	0	$Q^n$	$J=K=0$ , 保持
0	1	0	$J \neq K$ , $Q^{n+1} = J$
1	0	1	
1	1	$\bar{Q}^n$	$J=K=1$ , 翻转

$$Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$$

主从 JK-FF 是合格产品，无空翻，无状态不定

### 5.3.3 触发器的直接输入

FF { 同步输入:  $CLK, J, K, D, T, R, S$   
异步输入 (直接输入)



直接置位输入

(set 1)  $\bar{S}_D$

直接复位输入

(set 0)  $\bar{R}_D$

$\bar{R}_D = 0, \bar{S}_D = 1, Q = 0$

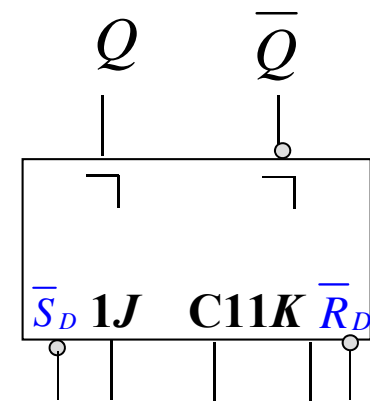
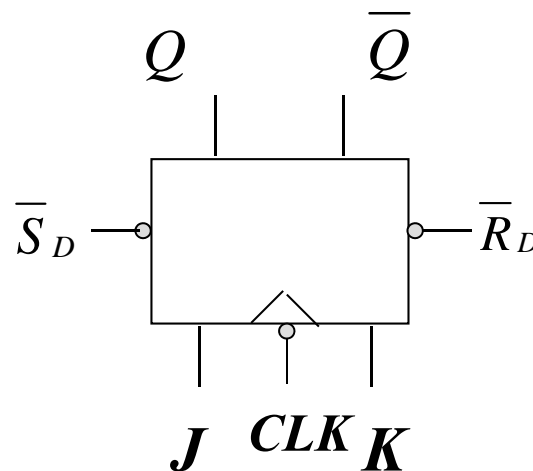
$\bar{S}_D = 0, \bar{R}_D = 1, Q = 1$

异步输入强制触发器的状态，绝对优先，与  $J$ ,  $K$ ,  $CLK$  等信号无关。

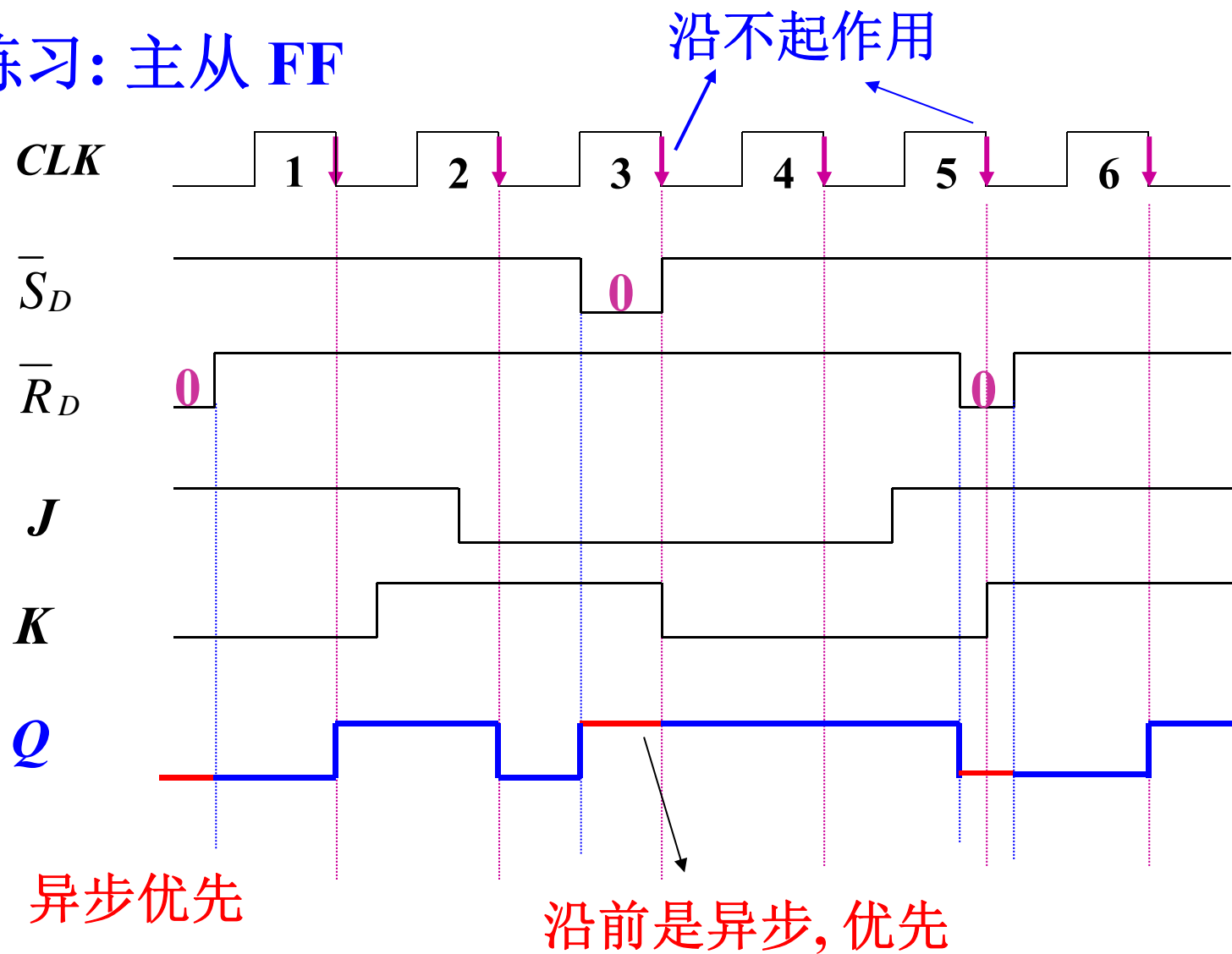
$\overline{S}_D$	$\overline{R}_D$	$CLK$	$J$	$K$	$Q^n$	$Q^{n+1}$	
0	1	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	1	$\overline{S}_D$ 直接置 1
1	0	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	0	$\overline{R}_D$ 直接置 (清0)
1	1						} 低有效
0	0						

FF 工作  
不允许

$$\begin{cases} Q^{n+1} = J\overline{Q}^n + \overline{K}Q^n \\ \overline{S}_D = \overline{R}_D = 1 \end{cases}$$



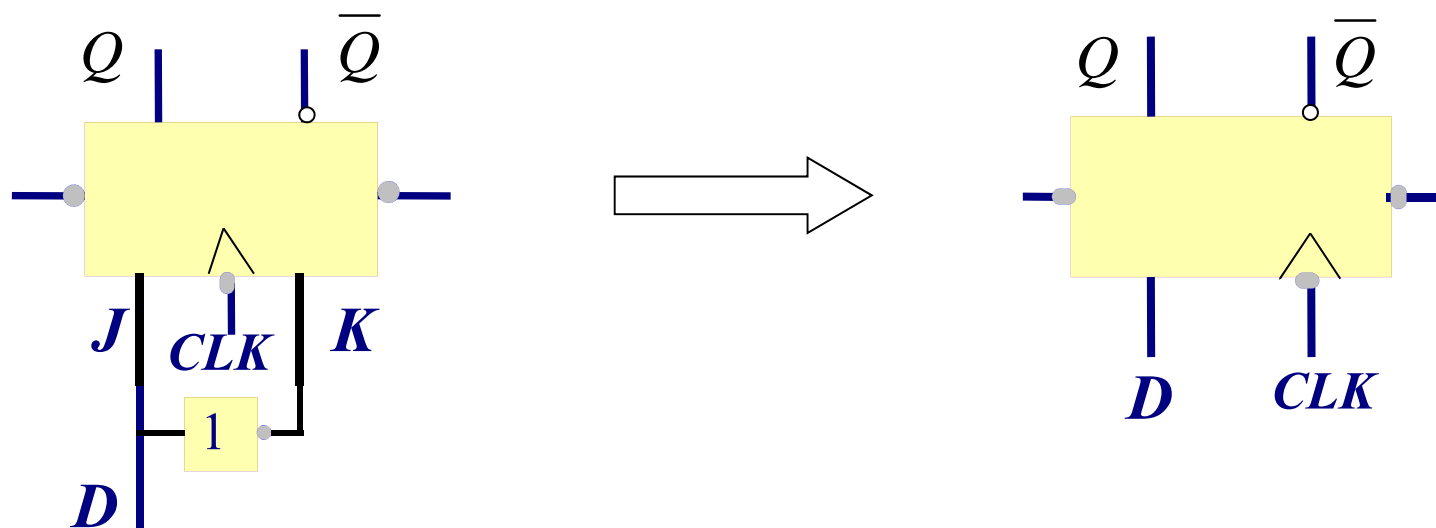
## 练习: 主从 FF



无  $\bar{S}_D$ ,  $\bar{R}_D$  波形时,  $\bar{S}_D = \bar{R}_D = 1$

### 5.3.4 主从 D-FF

主从 JK-FF 加一个非门:



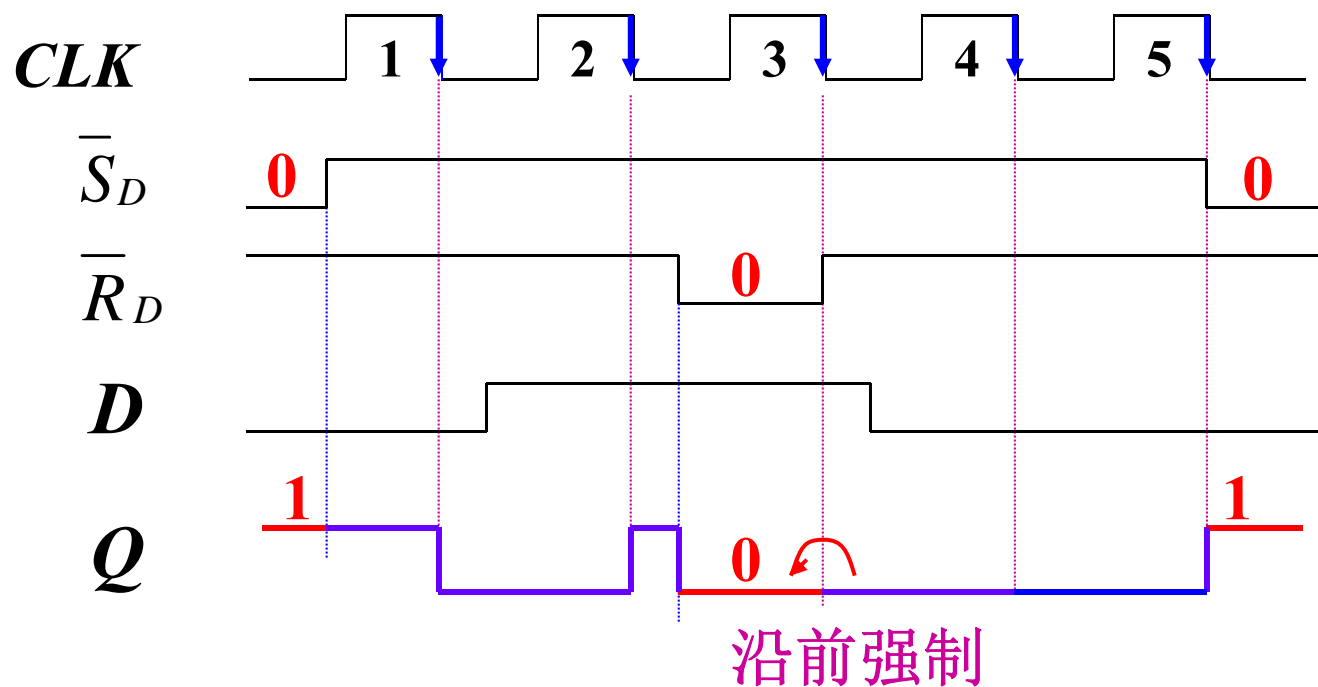
特征方程

$$\begin{cases} Q^{n+1} = D \\ \bar{S}_D = \bar{R}_D = 1 \end{cases}$$

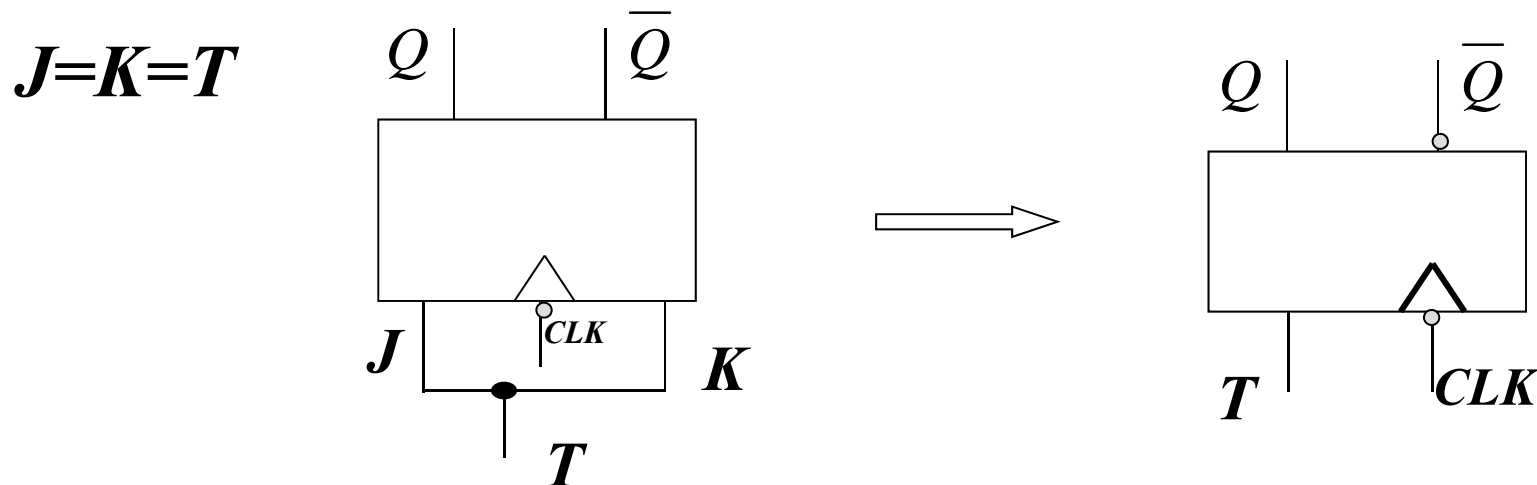
D-FF 是 JK-FF 中  $J \neq K$  的部分，是 JK-FF 的特例

在  $CLK$  下降沿到达之前, 若  $D=0$  ( $D=1$ ), 当  $CLK$  下降沿到达时,  $Q^{n+1}=0$  ( $Q^{n+1}=1$ ).

## 练习



### 5.3.5 主从 T-FF



**T-FF特征方程:**

$$\left. \begin{array}{l} Q^{n+1} = T\bar{Q}^n + \bar{T}Q^n = T \oplus Q^n \\ \bar{S}_D = \bar{R}_D = 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} T=0, \quad Q^{n+1} = Q^n \\ T=1, \quad Q^{n+1} = \bar{Q}^n \end{array}$$

**CLK 下降沿触发**

**T-FF 是 JK-FF 中  $J=K$  的部分，是 JK-FF 的特例**



### 5.3.6 主从结构 FF的问题

主从 FF:

$CLK=1$  期间, 输入信号数据 ( $J$ 、 $K$ 、 $D$ 、 $T$ ) 不允许变化, 否则会出现 “一次变化” 现象, 使 FF 输出状态不能反映  $CLK$  在从 1 到 0 前瞬间  $J$ 、 $K$  端的状态, 破坏了逻辑关系。主从式FF只适用于具有窄时钟脉冲的场合。

主从FF 只能用在 $CLK$  信号很窄的场合

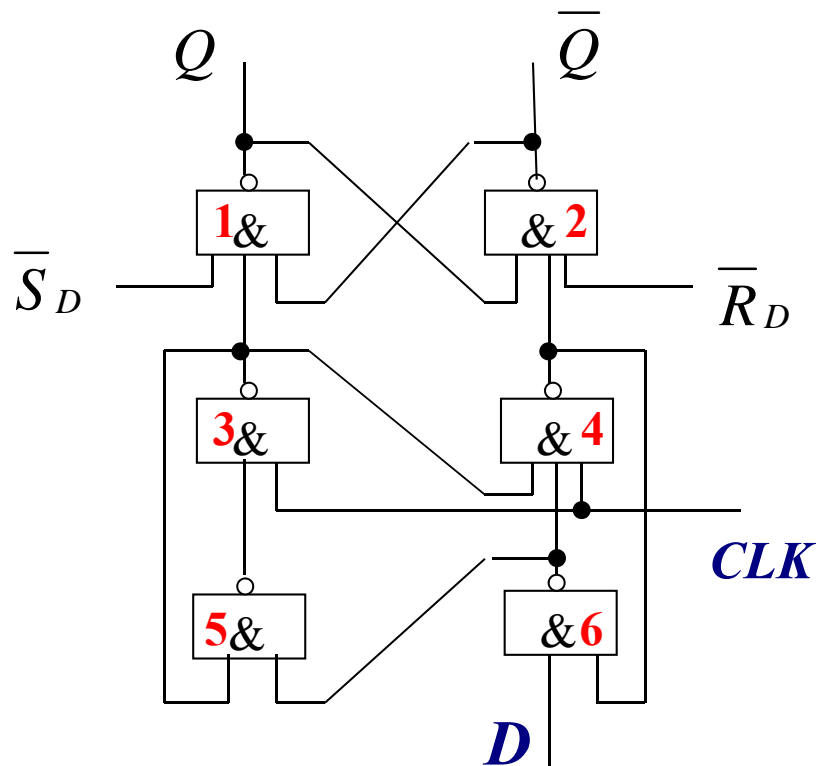
## § 5.4 正边沿触发触发器

正常工作时要求Master-Slave JK-FF 在 $CLK=1$ 期间 $J, K$ 信号不变, 但干扰信号仍能进入。

改进  $\longrightarrow$  正边沿触发



## 5.4.1 正边沿触发 D-FF



工作原理： ( $\overline{S}_D = \overline{R}_D = 1$ )

$CLK=0$ ,  $G_3=G_4=1$ ,  $Q$  保持

$D$  过  $G_6$ 、 $G_5$  等在  $G_3$ 、 $G_4$  入口

当  $CLK$  上升沿到达

$CLK$

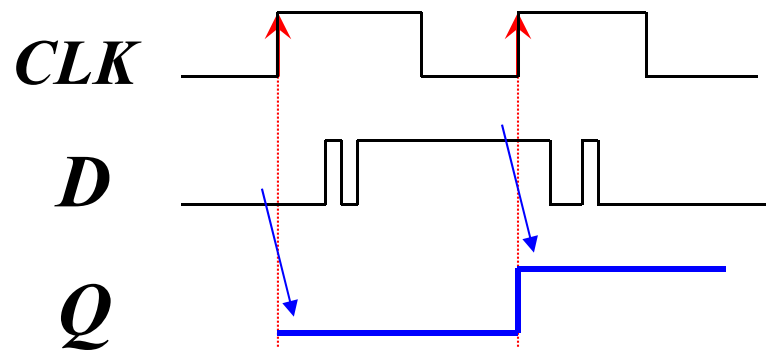
若  $D=0$ ,  $G_6=1$ ,  $G_5=0$ ,  
 $G_3=1$ ,  $G_4=0$ ,  $\therefore Q=0$

若  $D=1$ ,  $G_6=0$ ,  $G_5=1$ ,  
 $G_3=0$ ,  $G_4=1$ ,  $\therefore Q=1$

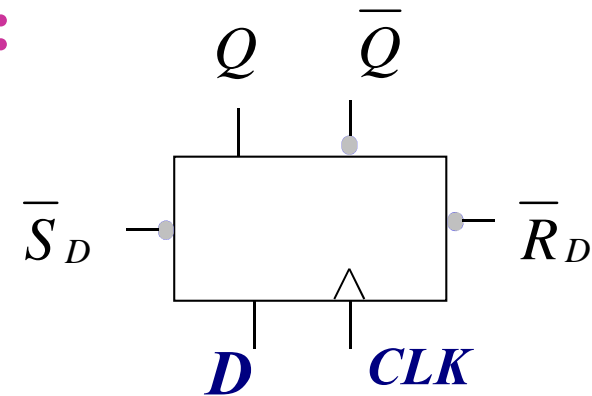
$$Q^{n+1} = D$$

维持一阻塞式FF在 $CLK$ 上升沿触发

$CLK$ 上升沿前 $D$ 的数据为 $CLK$ 上升沿到时  $Q^{n+1}$  的状态



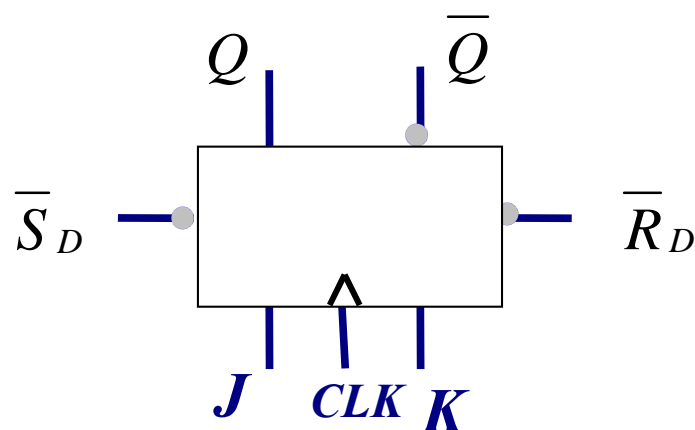
符号:



FF { 正边沿触发  
 $Q^{n+1} = D$

## 5.4.2 正边沿触发 JK-FF

符号：



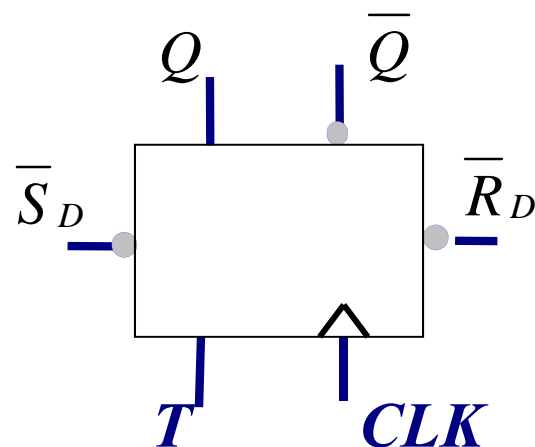
除了上升沿触发外，  
与主从JK-FF相同。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n \\ \bar{S}_D = \bar{R}_D = 1 \end{array} \right.$$

$J$	$K$	$Q^{n+1}$	
0	0	$Q^n$	$J=K=0$ , 保持
0	1	0	
1	0	1	
1	1	$\bar{Q}^n$	$J \neq K$ , $Q^{n+1} = J$
			$J=K=1$ , 翻转

### 5.4.3 正边沿触发 T-FF

符号:

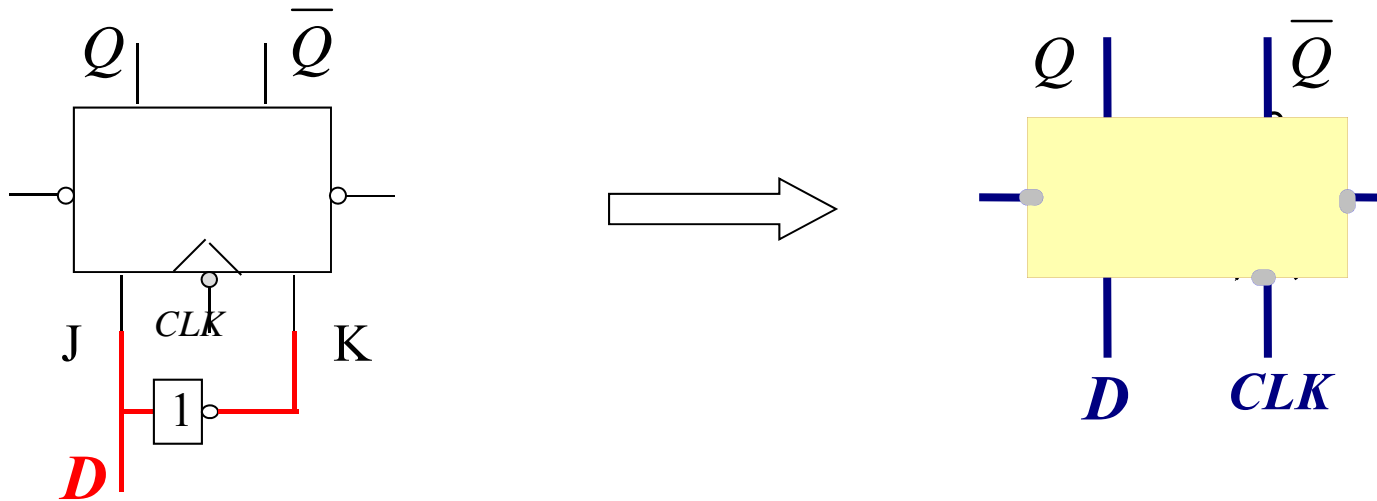


$$\begin{cases} Q^{n+1} = T \oplus Q^n \\ \bar{S}_D = \bar{R}_D = 1 \end{cases}$$

***CLK*** 正边沿触发

## § 5.5 触发器之间的转换

### 1. JK-FF 转成 D-FF



已知 FF:  $Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$   
目标 FF:  $Q^{n+1} = D$

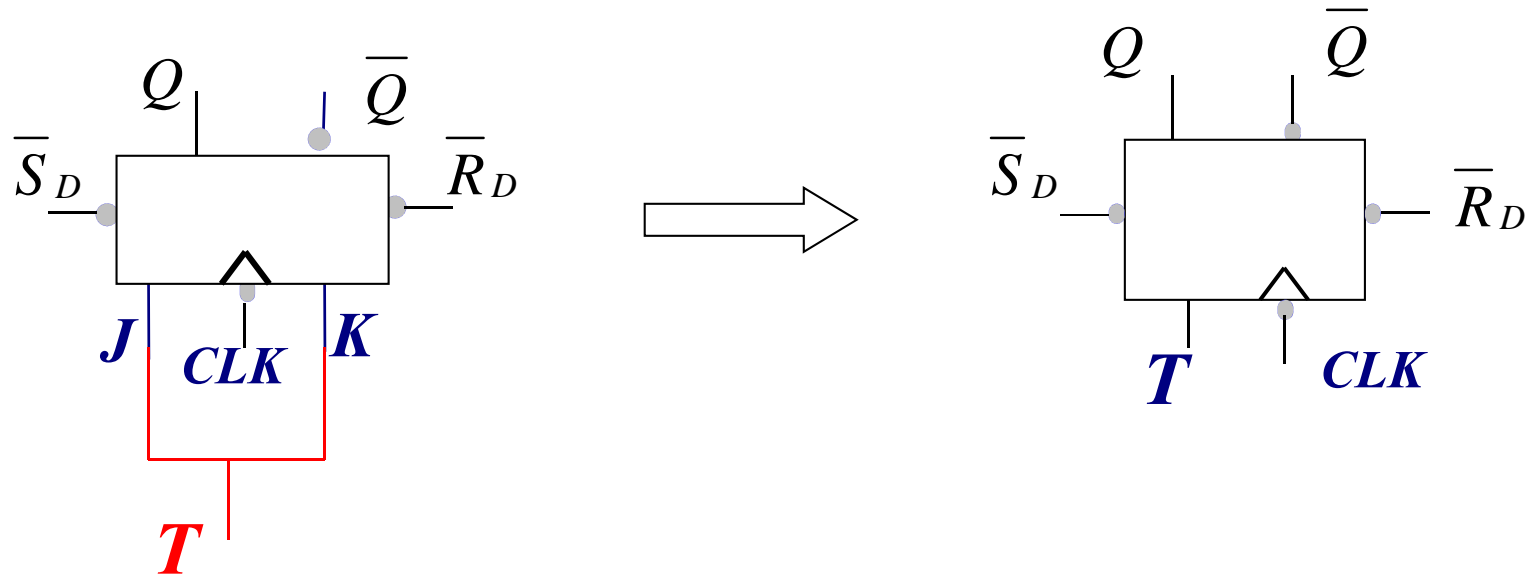
$$\begin{aligned} J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n &= D(\bar{Q}^n + Q^n) \\ &= D\bar{Q}^n + DQ^n \end{aligned}$$

$$\therefore J = D, \quad K = \bar{D}$$

加一个非门

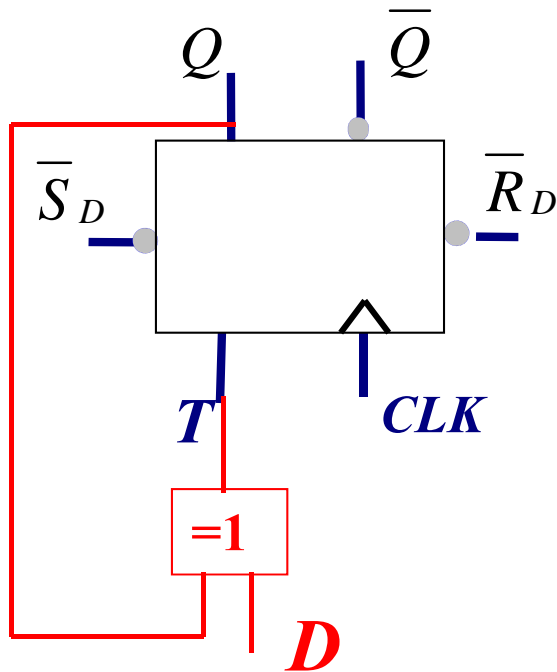
## 2. JK-FF 转成 T-FF

$$\left. \begin{array}{l} \text{已知 FF: } Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n \\ \text{目标 FF: } Q^{n+1} = T \oplus Q^n = T\bar{Q}^n + \bar{T}Q^n \end{array} \right\} J = K = T$$





### 3. T-FF 转成 D-FF



已知 FF:  $Q^{n+1} = T \oplus Q^n$   
目标 FF:  $Q^{n+1} = D$

$$T \oplus Q^n = D$$

$$T = D \oplus Q^n$$

## 4. T-FF 转成 JK-FF

**Given FF:**  $Q^{n+1} = T \oplus Q^n$

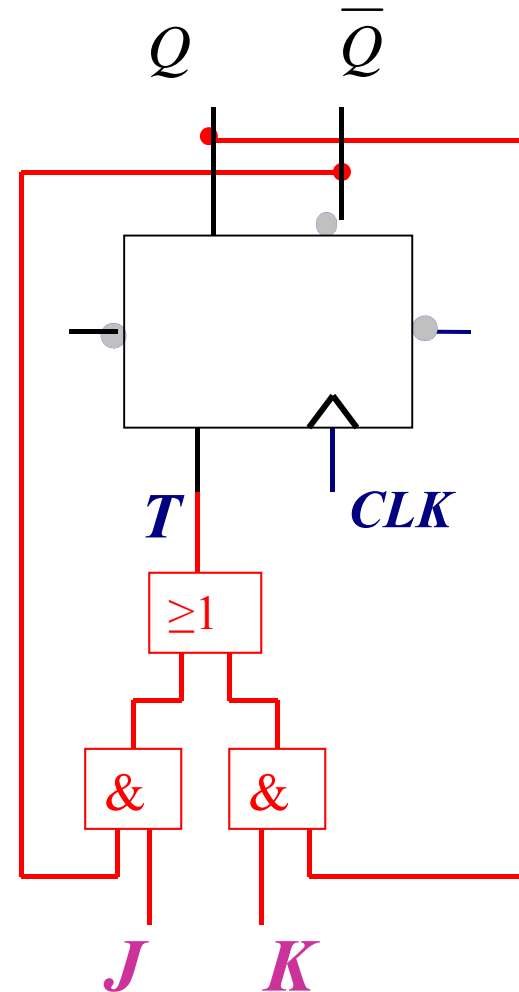
**Target FF:**  $Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$

$$T \oplus Q^n = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$$

$$\begin{aligned} T &= (J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n) \oplus Q^n \\ &= J\bar{Q}^n + KQ^n \end{aligned}$$

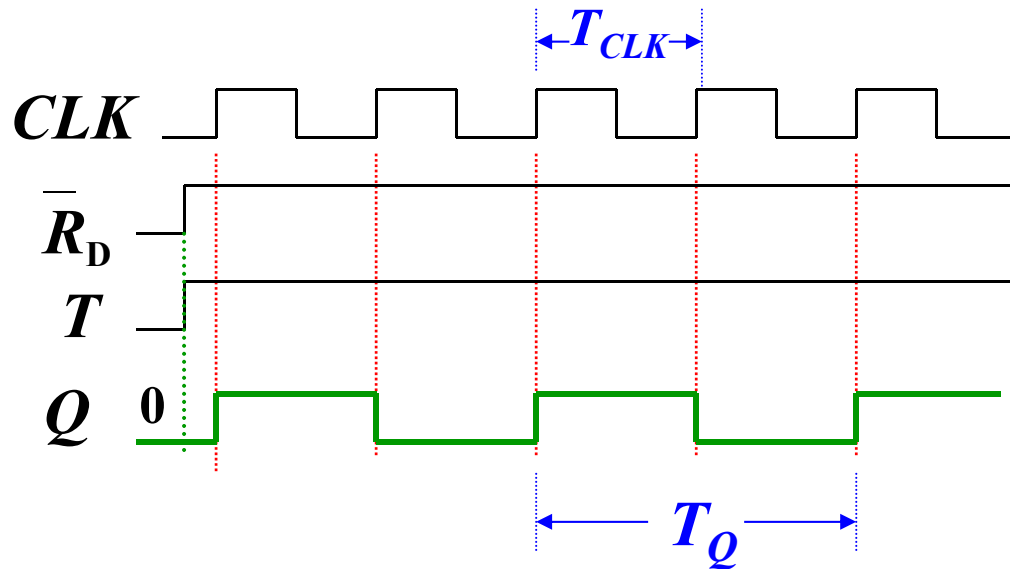
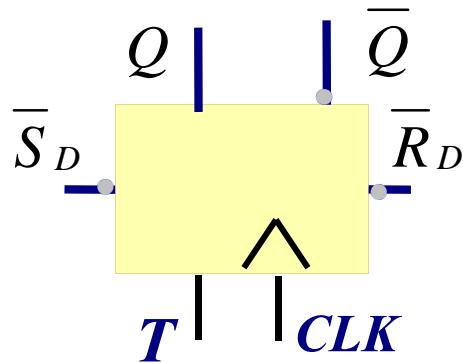
## 5. D-FF 转成 JK-FF

## 6. D-FF 转成 T-FF



## § 5.6 触发器应用

例1: 根据下图中触发器及  $CLK, \overline{R}_D, T$  波形, 对应画出  $Q$  波形.



$$Q^{n+1} = T \oplus Q^n$$

$$T = 1, \quad Q^{n+1} = \overline{Q}^n$$

二分频电路

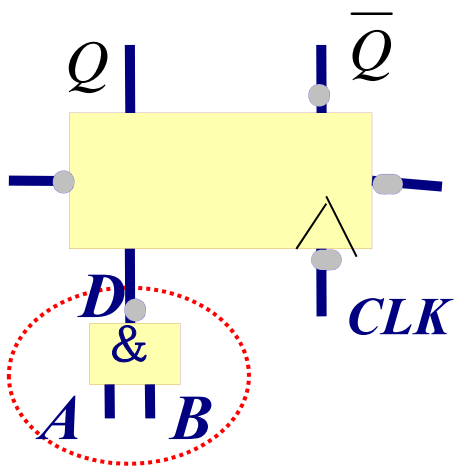
$$T_Q = 2T_{CLK}$$

$$f_Q = \frac{1}{2} f_{CLK}$$

Toggle FF 翻转

## 例 2:

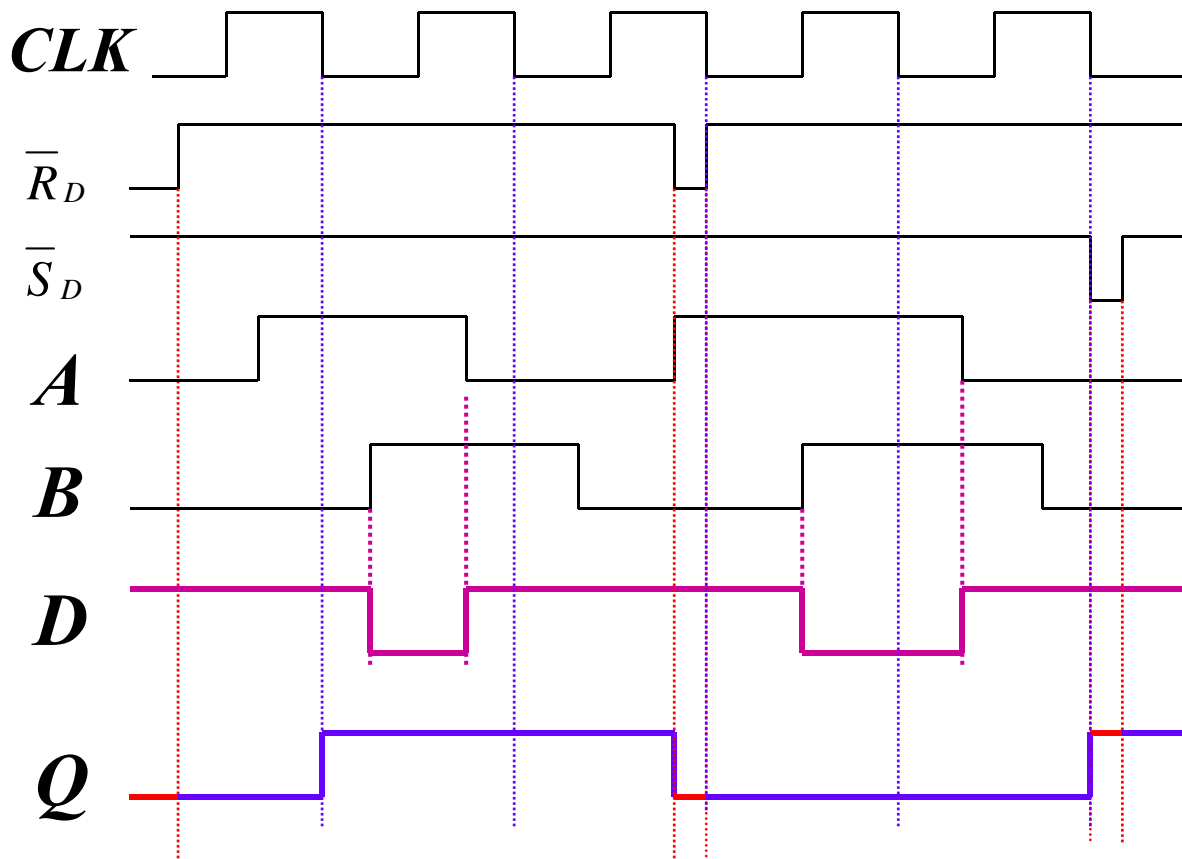
触发器如图所示，对应输入波形画出输出波形  $Q$ .



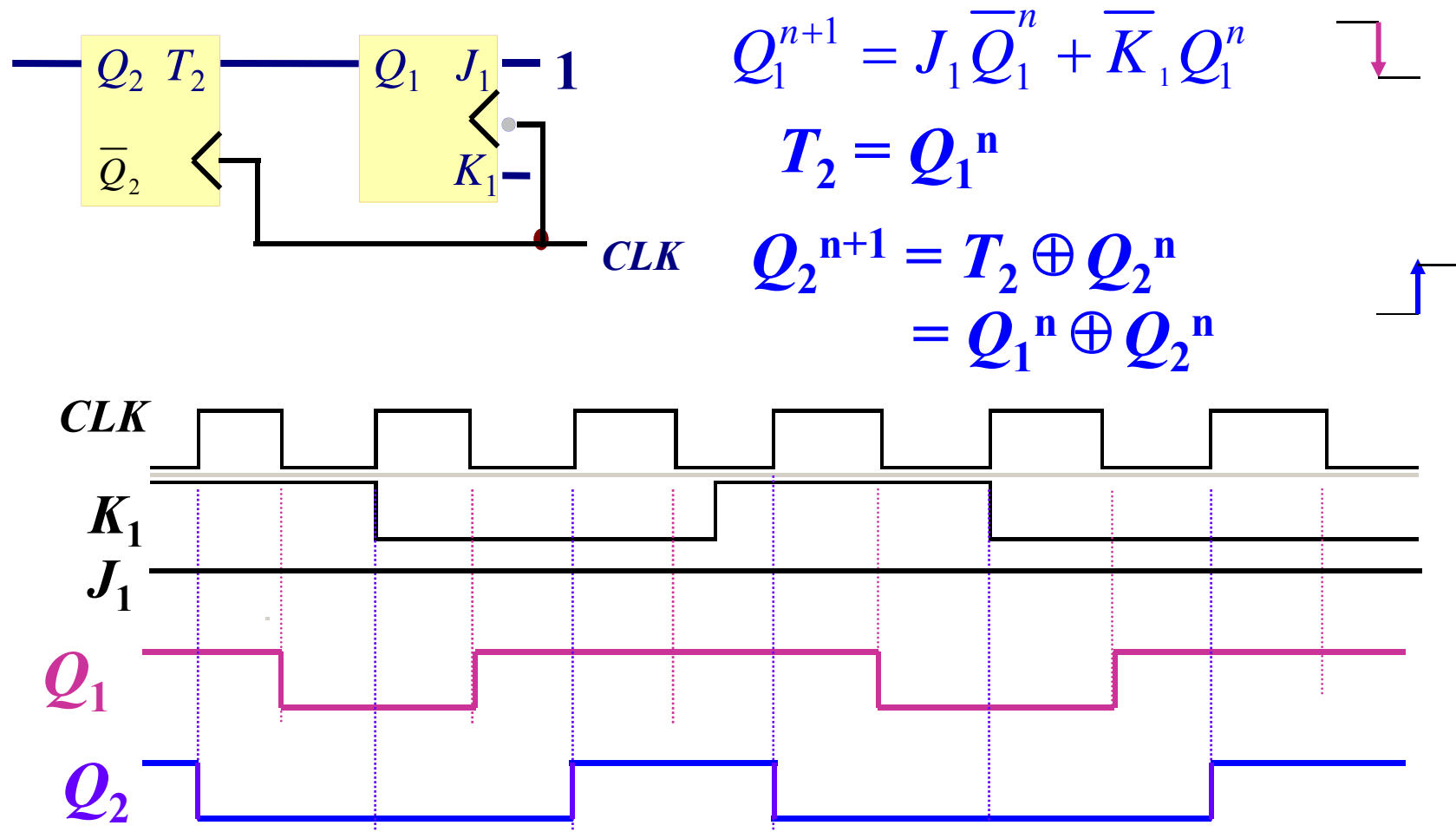
# 驱动电路

$$D = \overline{AB}$$

$$Q^{n+1} = D$$

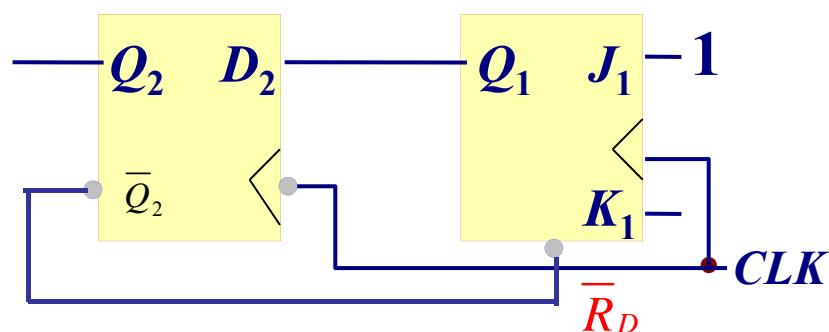


例 3：对应下图电路的输入  $CLK$  和  $K_1$  波形画出输出  $Q_1$  和  $Q_2$  的波形。初始  $Q_1$  和  $Q_2$  为高电平。



例 4. 根据下图电路及  $CLK$  和  $K_1$  输入波形，画出输出

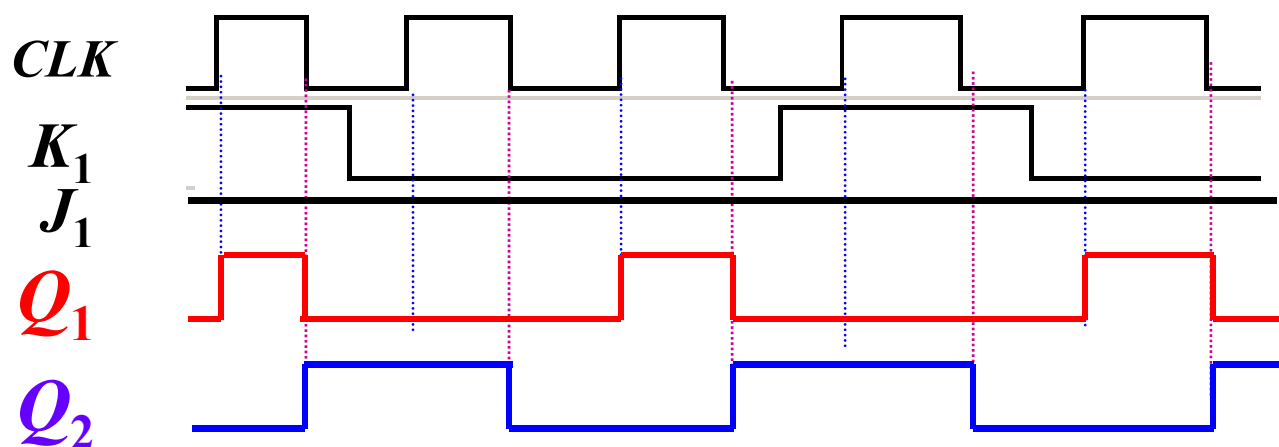
$Q_1$  和  $Q_2$  波形。初始状态  $Q_1=Q_2=0$ .



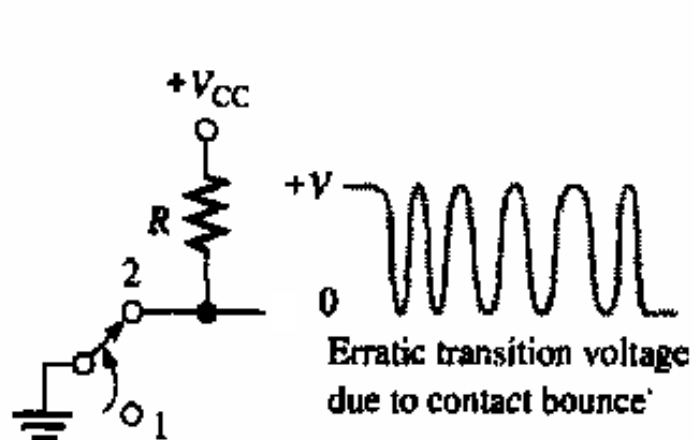
$$Q_1^{n+1} = J_1 \bar{Q}_1^n + \bar{K}_1 Q_1^n \quad \uparrow$$

$$Q_2^{n+1} = D_2 = Q_1^n \quad \downarrow$$

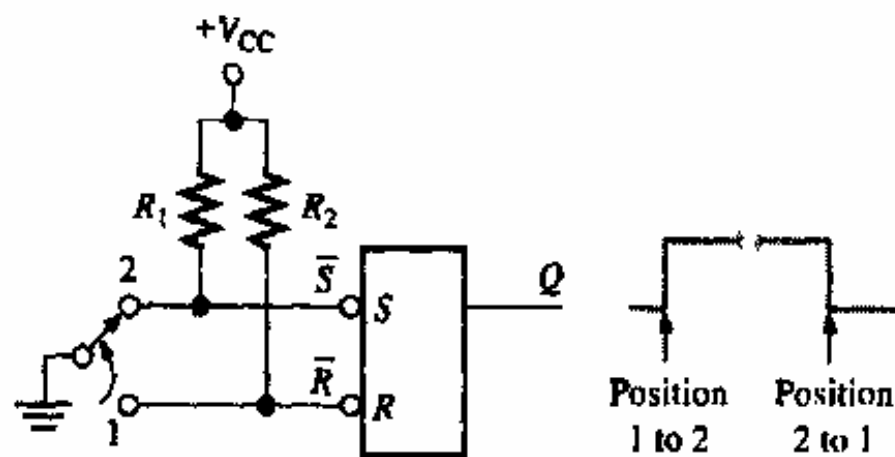
当  $Q_2=1, \bar{R}_D=0, Q_1=0$



**消除 (接触跳动) 噪声电路：** 当一个开关闭合时，在开关完全闭合之前几毫秒时间内，有时会发生金属接触点之间的碰撞和跳动，这样置位端将产生不正确的结果，导致机器的误动作。（图（a））



(a) Switch contact bounce



(b) Contact-bounce eliminator circuit

**用基本RS-FF：**

当开关第一次与2点相接时， $\bar{S}=0$ ,  $\bar{R}=1$ , 输出 $Q$ 为高电平；当开关跳开时， $\bar{S}=1$ ,  $\bar{R}=1$ , 输出 $Q$ 不变。（图(b)）