

# 第 5 章 触发器

## Flip-Flop (FF)

§5.1 电平触发的触发器 Level Triggered FF

§5.2 脉冲触发的触发器 Pulse Triggered FF

§5.3 边沿触发的触发器 Edge Triggered FF

§5.6 触发器的典型应用 Typical Application of FF

# 第 5 章 触发器 Flip-Flop (FF)

➤ 组合逻辑电路 { 基本单元：逻辑门  
输出：当前输入，无记忆功能

信息的处理/存储 → 记忆元件/电路

➤ 时序逻辑电路 { 基本单元：触发器  
输出：当前输入及过去的输出，  
具有记忆功能

过去的状态如何保存? → 触发器

## 触发器定义:

能储存一位二进制信息的基本单元。 **记忆元件**

## 触发器特点:

- ① 双稳态: 1 和 0
- ② 置 1, 置 0
- ③ 输入信号消失后, 实现状态保持

**重点1**  
工作原理

**重点2**  
记忆性

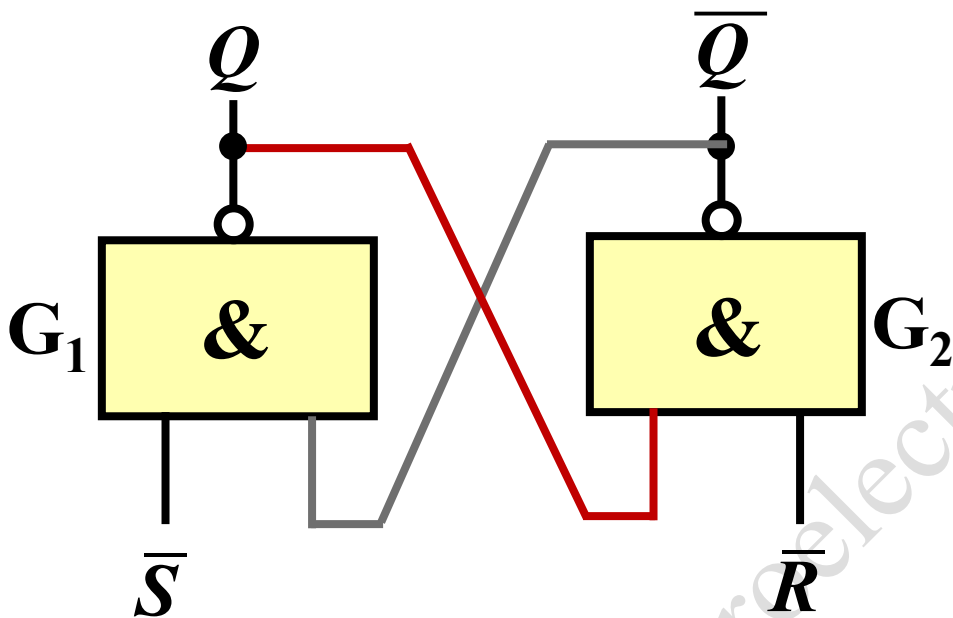
## §5.1 电平触发的触发器 Level Triggered FF

### § 5.1.1 与非门构成的基本RS-FF

- 电路结构是各种触发器中最简单的一种，同时也是其他复杂电路结构的一个**组成部分**
- 通常将这类简单结构的触发器成为锁存器(Latch)

# 两个与非门交叉耦合

## 1. 电路



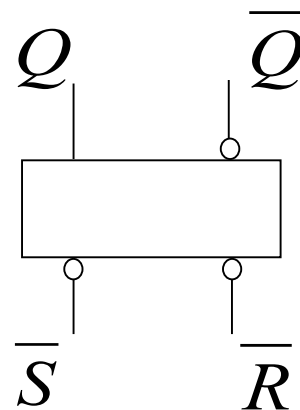
注意:  $\begin{cases} \bar{S} \rightarrow Q \\ \bar{R} \rightarrow \bar{Q} \end{cases}$

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

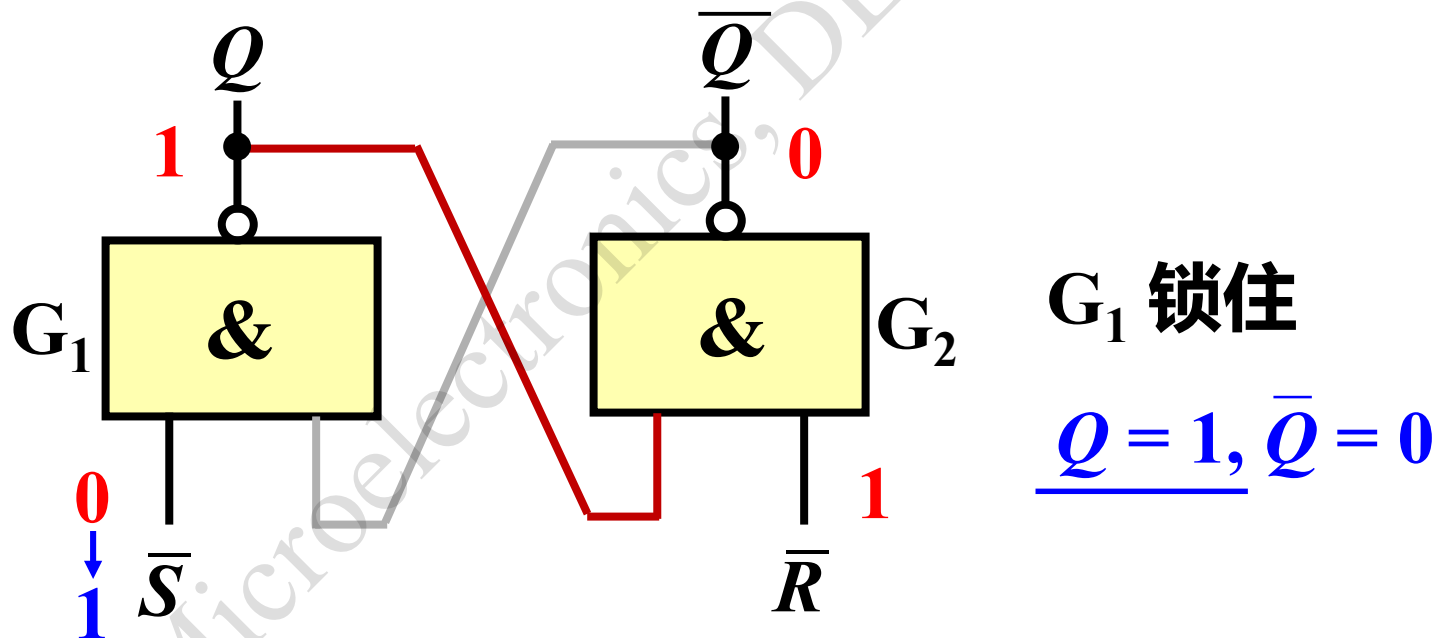
定义: 触发器的状态为  $Q$

符号



## 2. 工作原理 (State ~ Input)

①  $\bar{S} = 0, \bar{R} = 1 \longrightarrow \text{Set (置1)}$

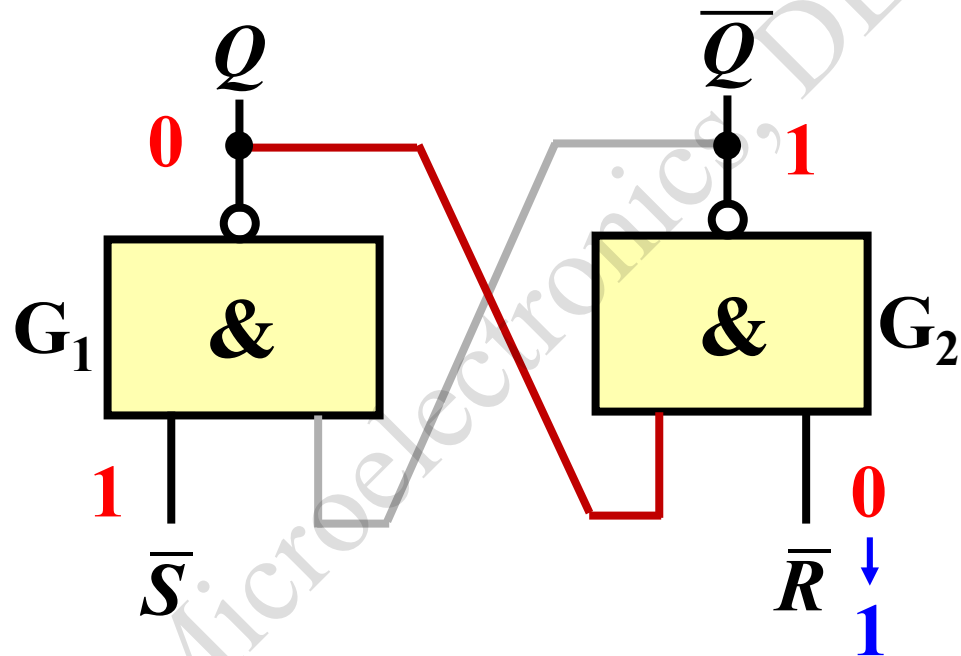


➤ 如果  $\bar{S}$  转成 1, 因为  $\bar{Q} = 0$ ,  $G_1$  锁住,  $Q = 1$

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

记忆  
功能

②  $\bar{S} = 1, \bar{R} = 0 \longrightarrow \text{Reset (置0)}$



$G_2$  锁住

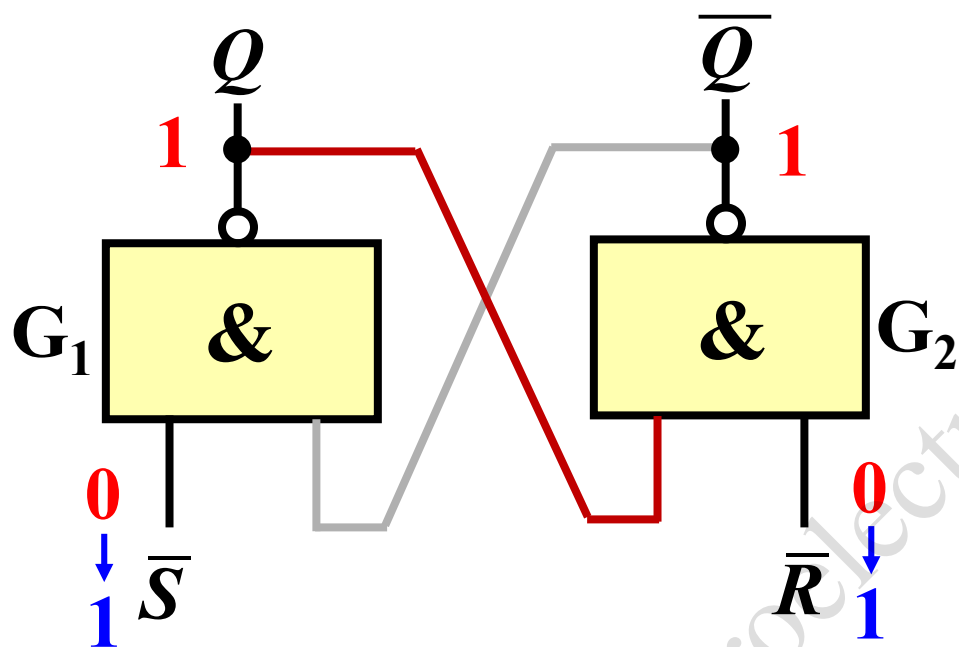
$\bar{Q} = 1, \underline{Q = 0}$

➤ 如果 $\bar{R}$ 转换成 1, 因为 $Q = 0$ ,  $G_2$  锁住,  $\bar{Q} = 1$

$\bar{S} = \bar{R} = 1$  保持  $Q = 0$

记忆  
功能

③  $\bar{S} = \bar{R} = 0 \longrightarrow$  不定状态



➤ 强制为高电平,  $\bar{Q} = Q = 1$

➤ 当  $\bar{S}, \bar{R}$  同时从 0 变到 1

输出取决于与非门的延迟时间  $t_{pd}$ :

$$\begin{cases} t_{pd1} < t_{pd2} \text{ (} G_1 \text{ 快)} & Q = 0 \\ t_{pd1} > t_{pd2} \text{ (} G_2 \text{ 快)} & Q = 1 \end{cases}$$

无法确定  $\bar{S}$ 、 $\bar{R}$  同时从 0 变到 1 时, 最终稳定状态为 0 还是 1, 即不定状态。

输入信号满足约束条件:  $\bar{S} + \bar{R} = 1$



## 2. 基本 RS-FF特点

真值表

$\overline{S}$	$\overline{R}$	$Q$	$\overline{Q}$	功 能
0	0	1	1	不定状态
0	1	1	0	Set (置1)
1	0	0	1	Reset (置0)
1	1	NC	NC	保持

(1) 输出互补：在稳定状态下两个输出端的状态必须是互补关系。

(2) 记忆性：触发器的状态不仅与输入信号有关，而且与触发器的原状态有关。

(3) 不确定性：由于输入条件限制，使用较少，但是其他各类复杂触发器的基础。

(4) 状态转换时刻由 $\overline{R}$ 、 $\overline{S}$ 确定，没有统一的控制信号（时钟， $CLK$ ）控制触发器的转换时刻，因此是异步时序电路。

### 3. 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) Truth Table

状态方程 (特征方程) State/Characteristics Table

状态转移图和激励表 State Diagram and Transition Table

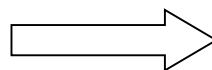
波形图 (时序图) Waveform (Timing Diagram)

# 基本 RS-FF功能描述

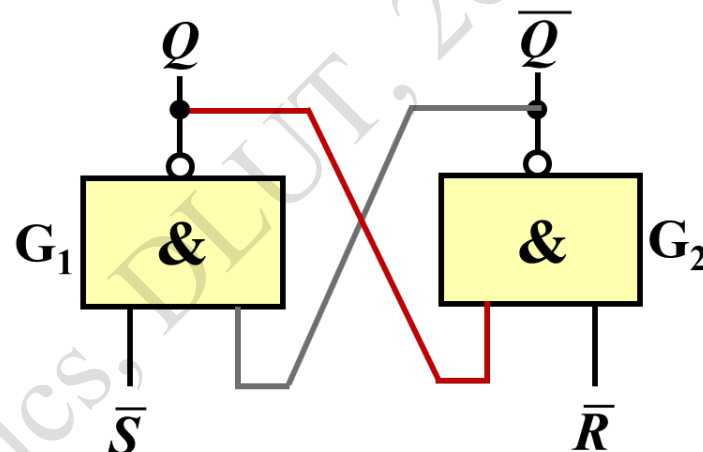
## (1) 状态表

真值表

$\overline{R}$	$\overline{S}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	$\Phi$
0	0	1	$\Phi$
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1



$\overline{R}$	$\overline{S}$	$Q^{n+1}$
0	0	$\Phi$
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	$\Phi$
0	0	1	$\Phi$
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

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

$\overline{R} \overline{S}$

00      01      11      10

0	$\Phi$	0	0	1
1	$\Phi$	0	1	1

## 状态方程 (特征方程)

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

**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**

## (2) 状态方程 (特征方程)

$\overline{R}$	$\overline{S}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	$\Phi$
0	0	1	$\Phi$
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

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

$\overline{R}$   $\overline{S}$

00      01      11      10

0	$\Phi$	0	0	1
1	$\Phi$	0	1	1

## 状态方程 (特征方程)

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

**注意：将  $\overline{R}$  和  $\overline{S}$  看作整体输入信号**

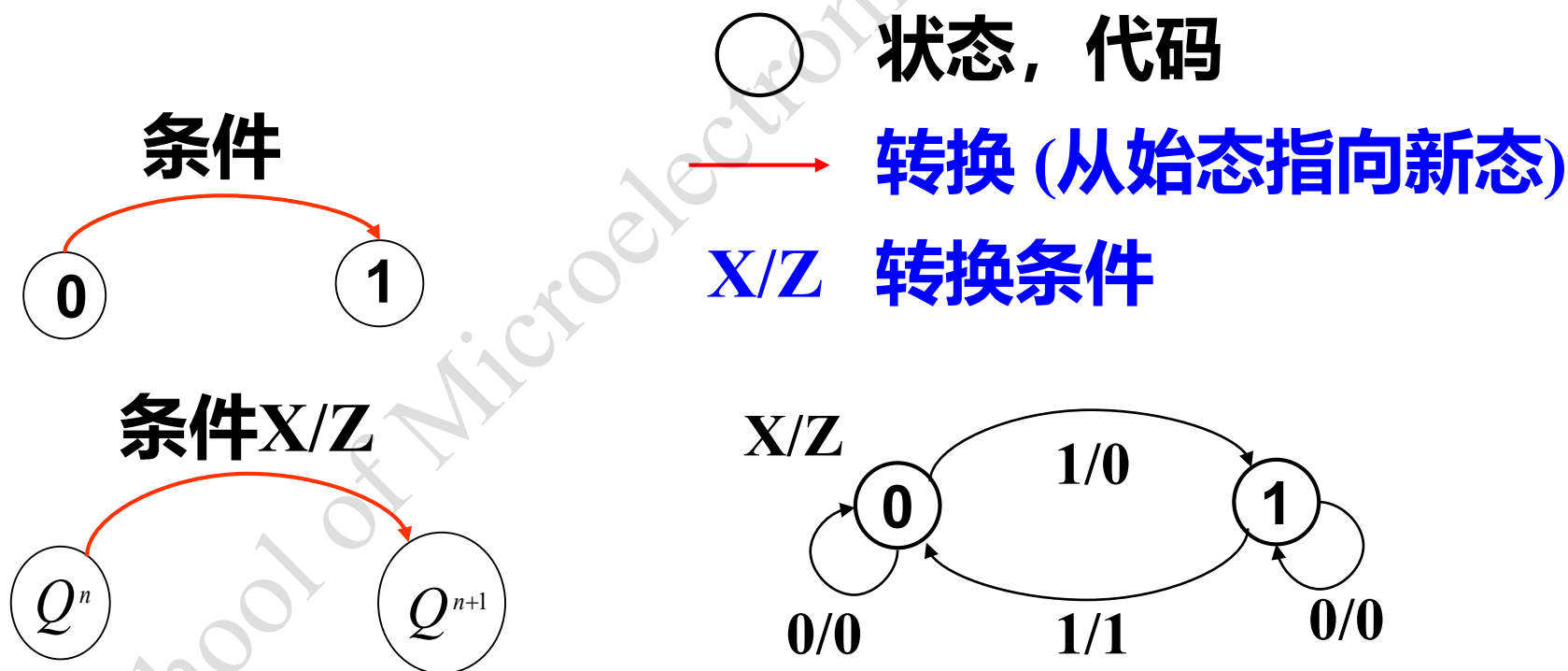
**符号上面的横线表示低电平有效**

**不同时为0**

### (3) 状态图与激励表

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

**状态图** 用图形表示输出状态转换的条件和规律



# 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  $\overline{R}$   $\overline{S}$  为函数的关系表。

$\overline{R}$	$\overline{S}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	$\Phi$
0	0	1	$\Phi$
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

表示在什么样的激励下，能够使得现态  $Q^n$  转换到次态  $Q^{n+1}$ 。

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

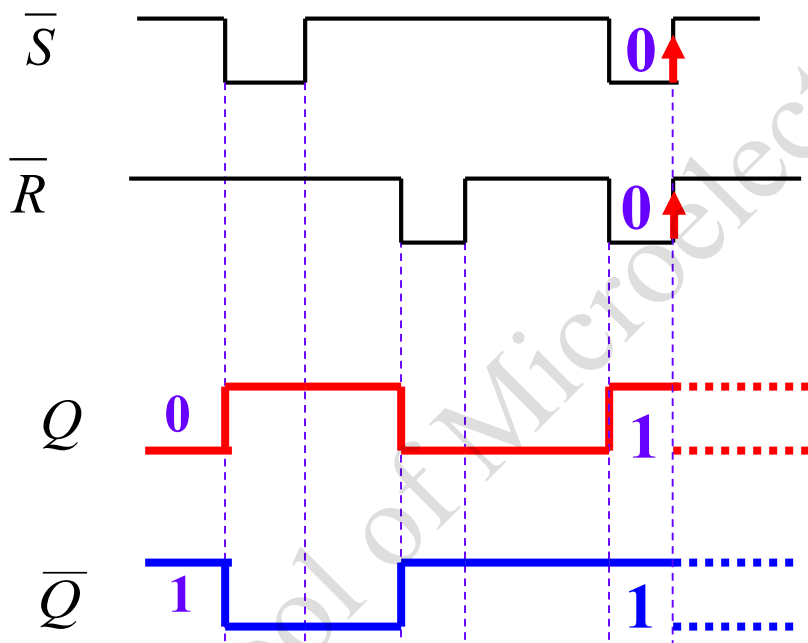
## 基本 RS-FF激励表

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

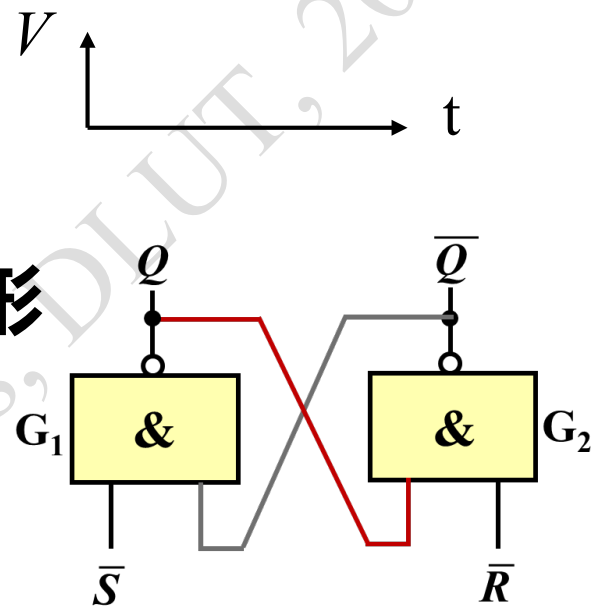
## (4) 时序图 (波形图)

输出波形要对应输入波形

对应输入画出基本RS - FF输出波形  
(初始状态  $Q = 0$ )



不确定



$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q$	$\bar{Q}$	FF 状态
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	保持



## §5.1.2 时钟 FF (同步 FF)

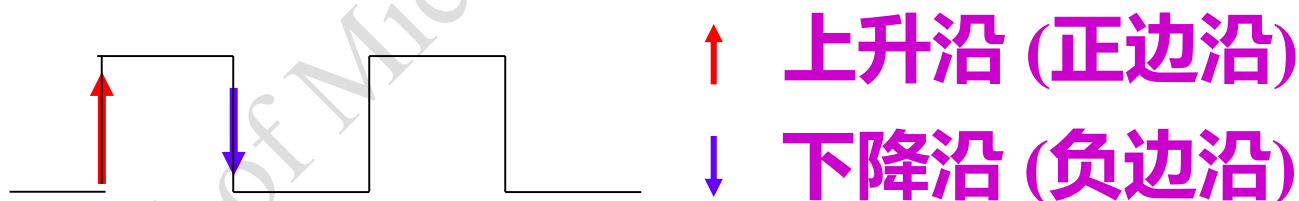
### Gated FF (Synchronous FF)

- 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**

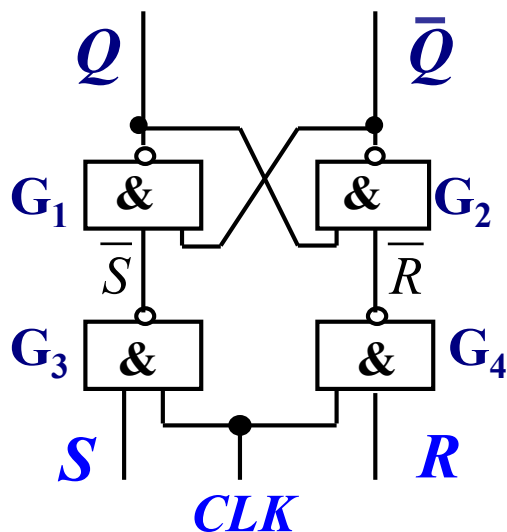
- 时钟触发器 (Gated-Latch) 的状态只允许在时钟脉冲  $CLK=1$  时发生改变。
- 从触发方式上, 时钟触发器和基本RS触发器都属于电平触发的触发器 (Level Triggered Latch)。

**CLK 信号: Clock**

**CLK 为周期性矩形脉冲波形**

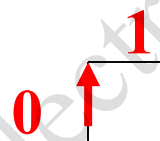


# 1. 时钟 RS-FF (Gated RS-FF)



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

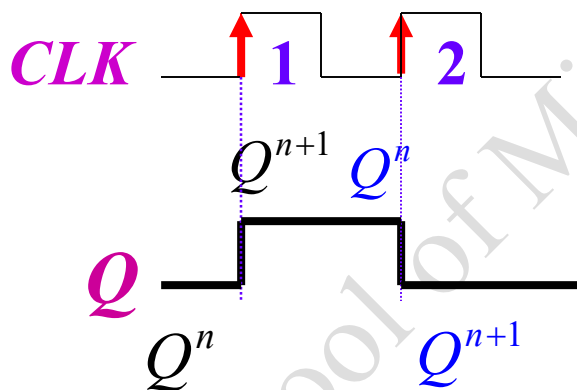


$CLK$  变为高电平

定义:

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

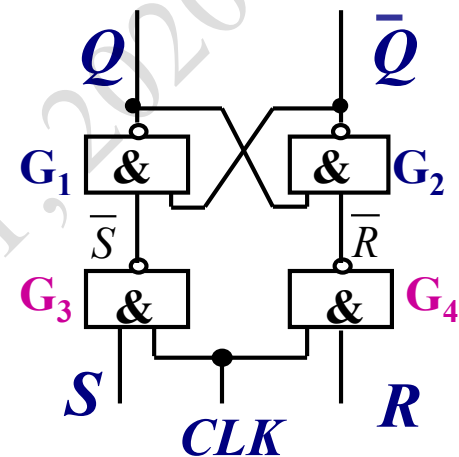
对每一个  $CLK$ , 都有  $Q^n, Q^{n+1}$



## 时钟 RS-FF真值表

$S$ $R$ $Q^n$	$Q^{n+1}$	描述
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	$\varphi$	$R=S=1,$ $Q=\bar{Q}=1$
1 1 1	$\varphi$	
		$S R 1 \rightarrow 0 \varphi$

$\bar{S}$ $\bar{R}$	$Q$ $\bar{Q}$	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	保持



●  $S=R=0$  FF 保持  $Q^{n+1}=Q^n$

●  $S=0, R=1$

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

●  $S=1, R=0$

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

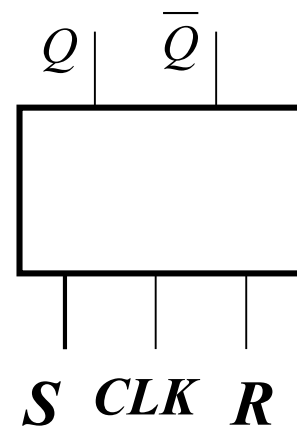
●  $S=1, R=1, Q=\bar{Q}=1,$

$S$  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	0	$\Phi$	1
1	1	1	0	$\Phi$	1

符号



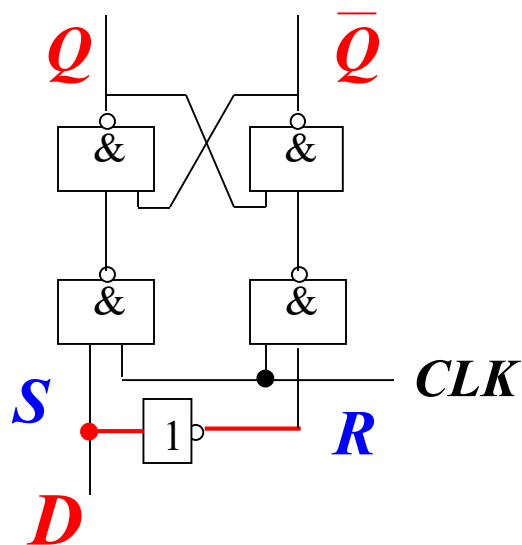
## 同步RS-FF特征方程

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

缺点:

不确定状态

## 2. 时钟D-FF (Gated D-FF)



在  $S$  和  $R$  之间加一个非门, 使  $S \neq R$

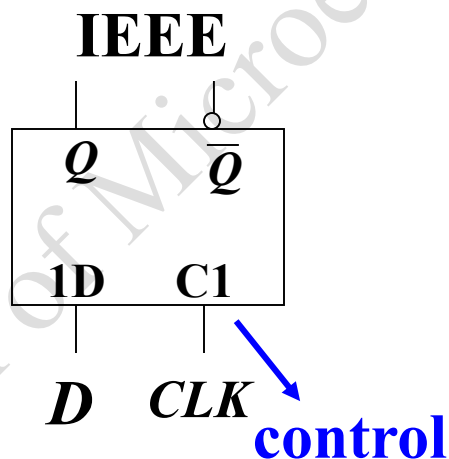
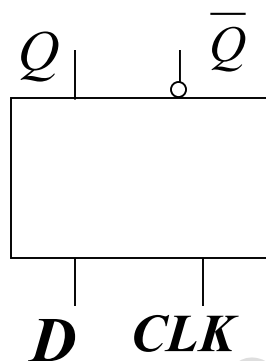
$S=D, R=\bar{D}$  无状态不定

工作原理:

$CLK=0$ , FF 保持

$CLK=1$ , FF 工作

符号

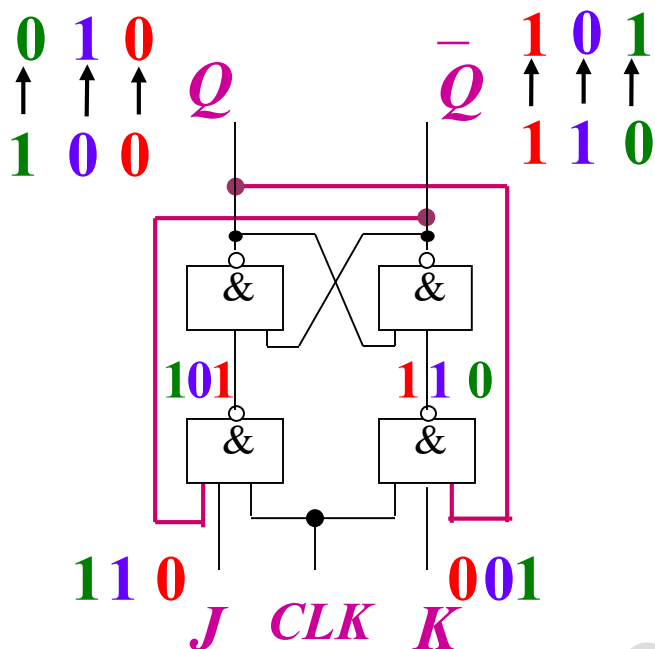


$$\begin{cases} D=1, (S=1, R=0) & Q^{n+1} = 1 \\ D=0, (S=0, R=1) & Q^{n+1} = 0 \end{cases}$$

同步 D-FF 状态方程:

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

### 3. 时钟 JK-FF (Gated JK-FF)



两输入:  $J, K$

$CLK=0$ , FF 保持

$CLK=1$ , FF 工作

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→0, 无状态不定

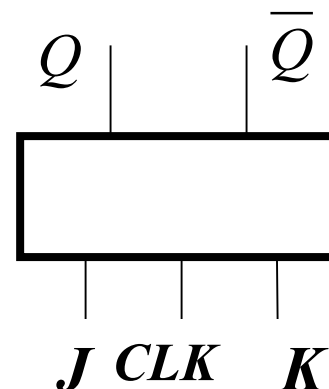
$J$	$K$	$Q^n$	$Q^{n+1}$	描述
0	0	0	0	$J=K=0$ $Q^{n+1}=Q^n$
0	0	1	1	
0	1	0	0	$J \neq K$ $Q^{n+1} = J$
0	1	1	0	
1	0	0	1	
1	0	1	1	
1	1	0	1	$J=K=1$ $Q^{n+1}=\bar{Q}^n$
1	1	1	0	

# JK-FF 特征方程

$Q^{n+1}$		$JK$			
$Q^n$		00	01	11	10
0		0	0	1	1
1		1	0	0	1

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

符号



从 RS-FF推导：

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



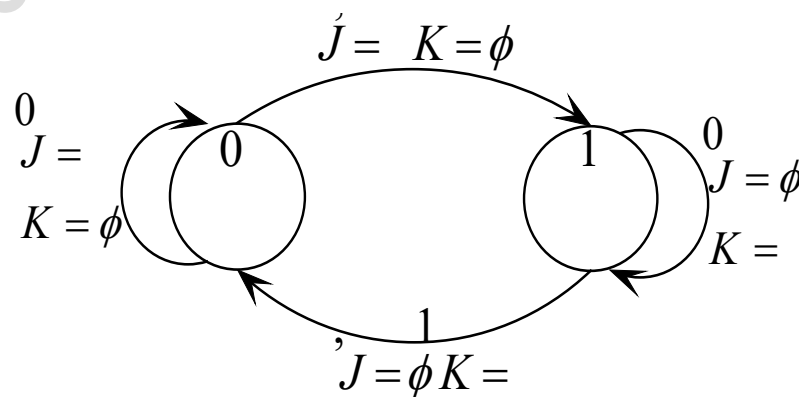
## 状态表

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

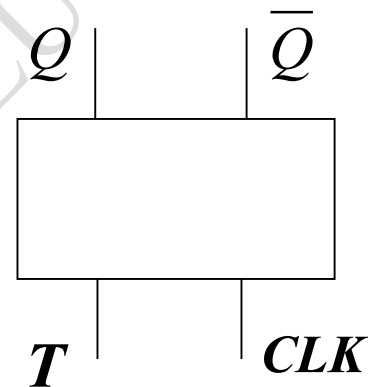
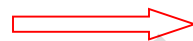
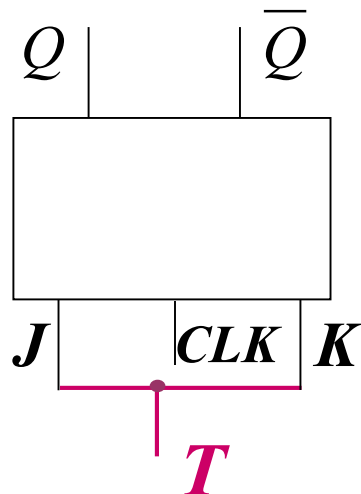
输出转换 $Q^n \rightarrow Q^{n+1}$	FF 输入 $J \quad K$	
0 0	0	$\Phi$
0 1	1	$\Phi$
1 0	$\Phi$	1
1 1	$\Phi$	0

## JK-FF状态图



## 4. 时钟T-FF

$$J = K = T$$



**T-FF状态方程:**

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

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