

第 5 章 触发器

5.1 基本 RS 触发器

5.2 时钟触发器

5.3 主从触发器

5.4 正边沿触发器

5.5 触发器间的相互转换

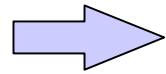
5.6 触发器的典型应用

第五章 触发器 (FF)

- 组合电路:

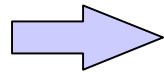
基本单元 — 逻辑门 — 无记忆函数

在数字系统中, 信息



运算或处理

还需要存储



存储器件或单元

- 时序电路:

基本单元 — 触发器 — 存储器

触发器定义： 存储部件

能存储一位二进制信息的基本单元，也称作锁存器。

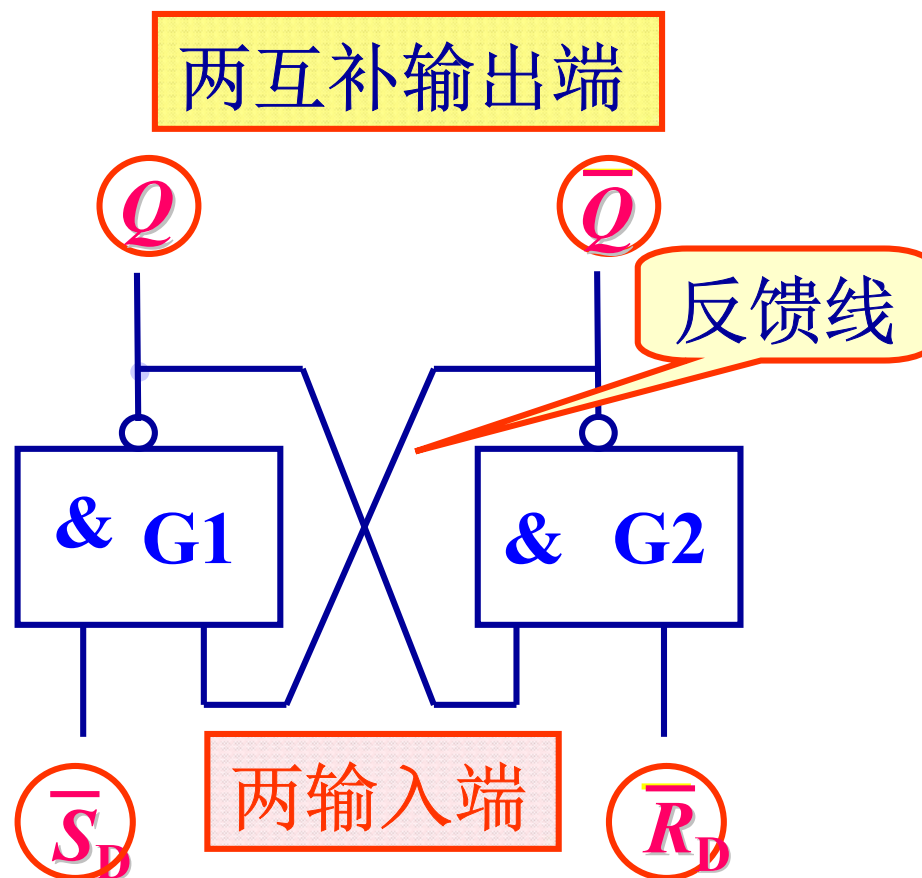
触发器 {
a) 双稳态： 1 和 0
b) 置1, 置 0
c) 在信号消失后，保持新状态

§ 5.1 基本RS触发器

5.1.1 由与非门构成的基本RS触发器

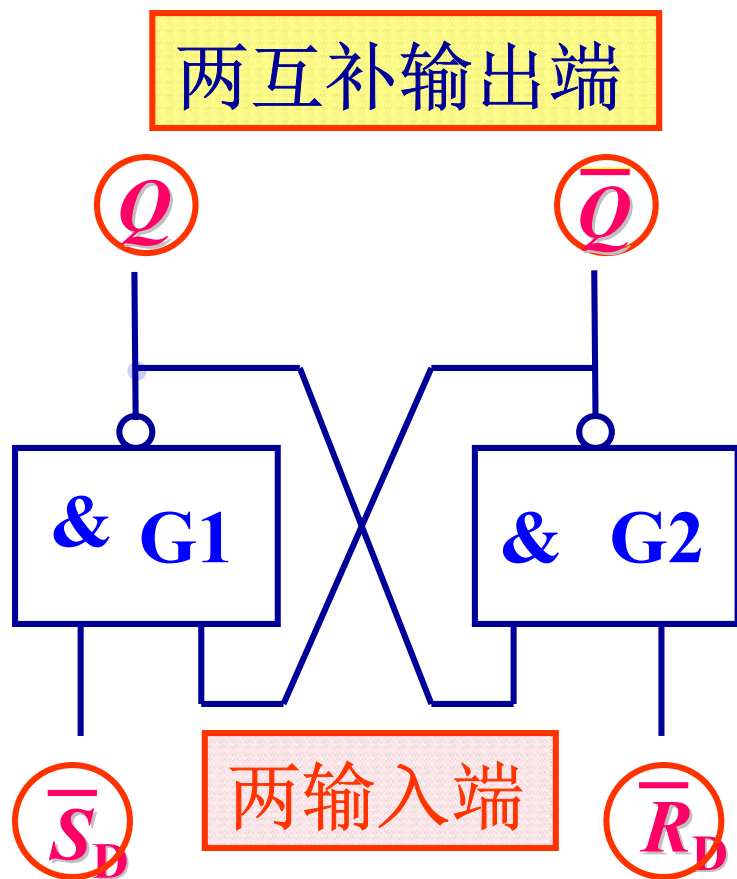
\bar{S} : 置位 (置1) 端

\bar{R} : 复位 (置0) 端



逻辑功能

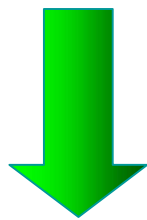
正常情况下，两输出端的状态保持相反。通常以 Q 端的逻辑电平表示触发器的状态，即 $Q=1$ ， $\bar{Q}=0$ 时，称为“1”态；反之为“0”态。



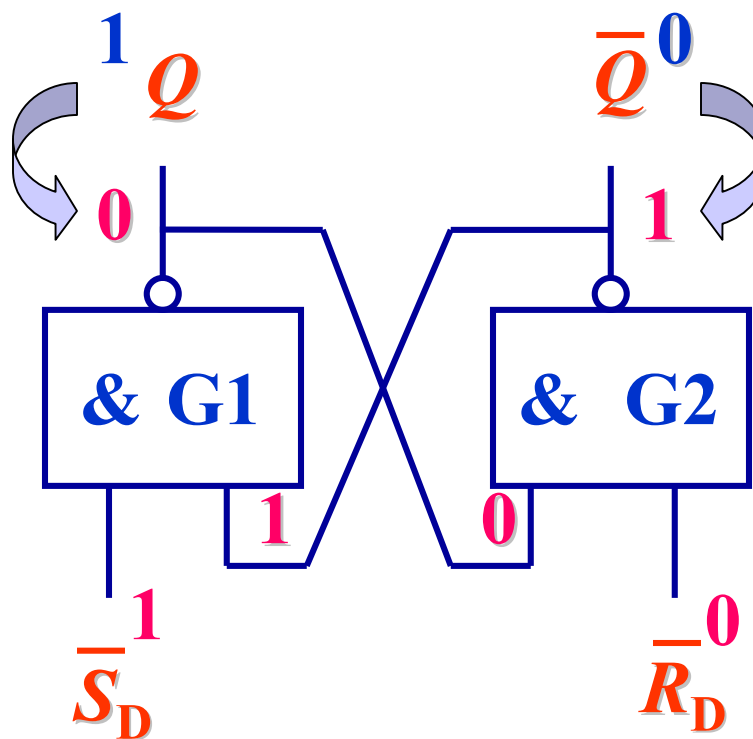
触发器输出与输入的逻辑关系

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

设触发器原态
为“1”态。



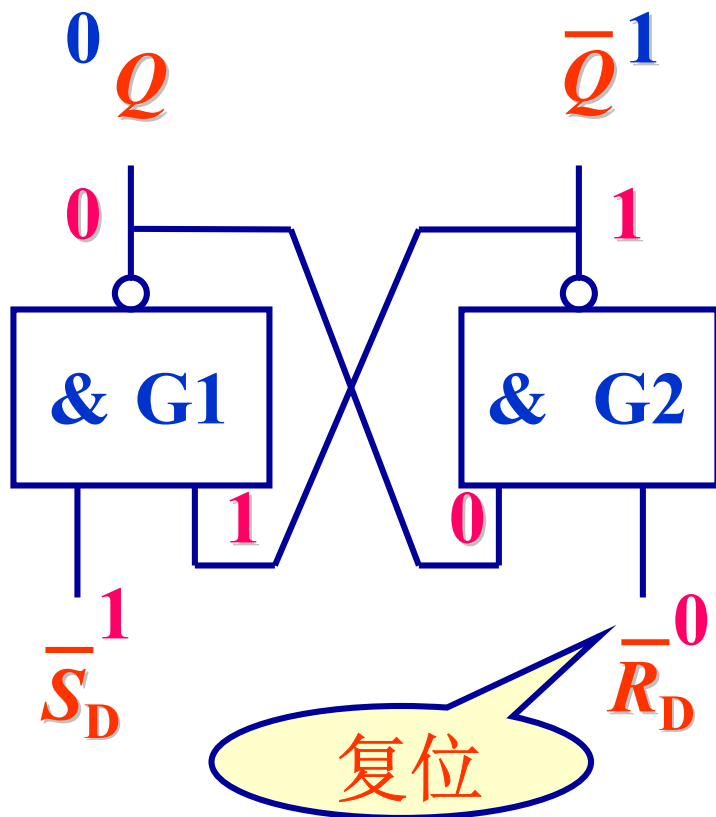
翻转为“0”态



设原态为“0”态

结论：不论
触发器原来
为何种状态，
当 $\bar{S}_D=1$ ，
 $\bar{R}_D=0$ 时，
将使触发器
置“0”或称
为复位。

触发器保持
“0”态不变

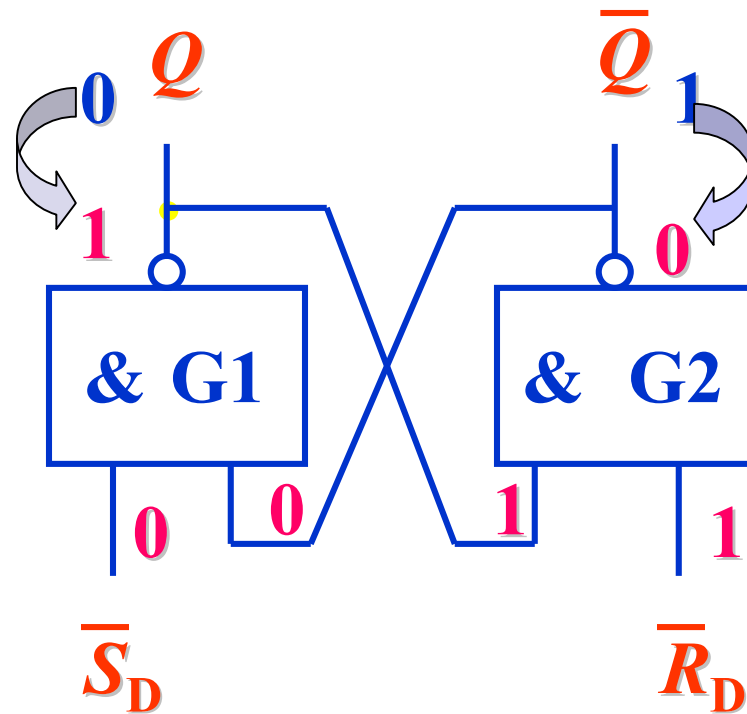


$$(2) \bar{S}_D=0, \bar{R}_D=1$$

设原态为“0”态



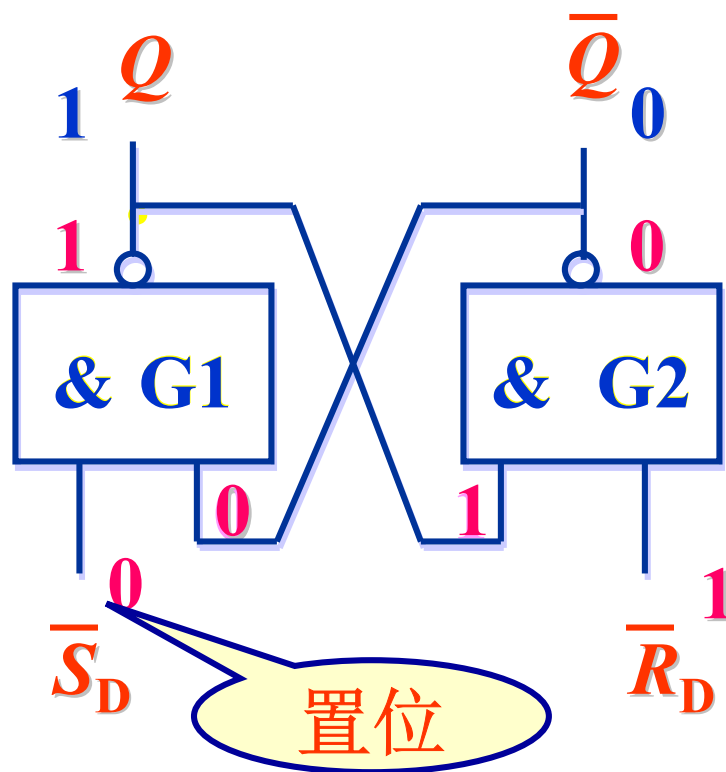
翻转为“1”态



设原态为“1”态

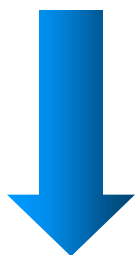
结论：不论
触发器原来
为何种状态，
当 $\bar{S}_D=0$ ，
 $\bar{R}_D=1$ 时，
将使触发器
置“1”或称
为置位。

触发器保持
“1”态不变

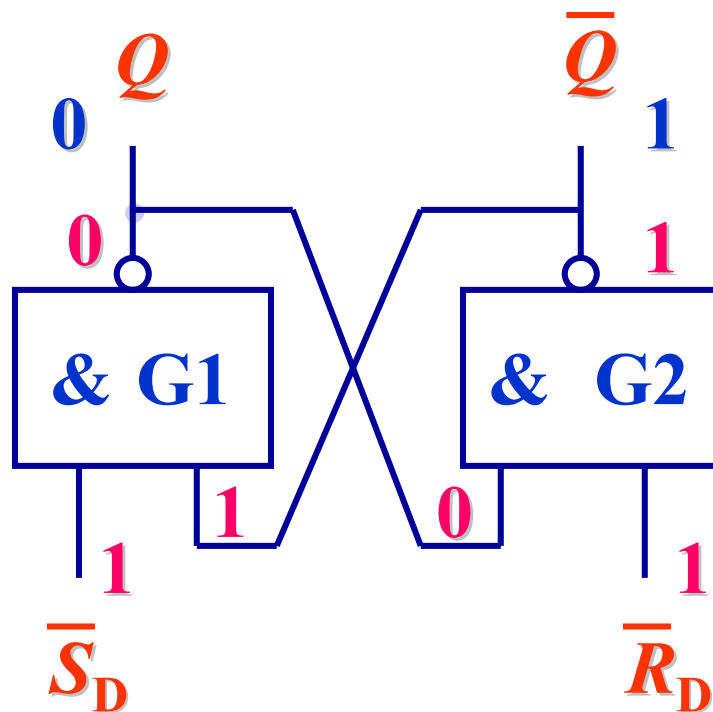


(3) $\overline{S}_D=1$, $\overline{R}_D=1$

设原态为“0”态



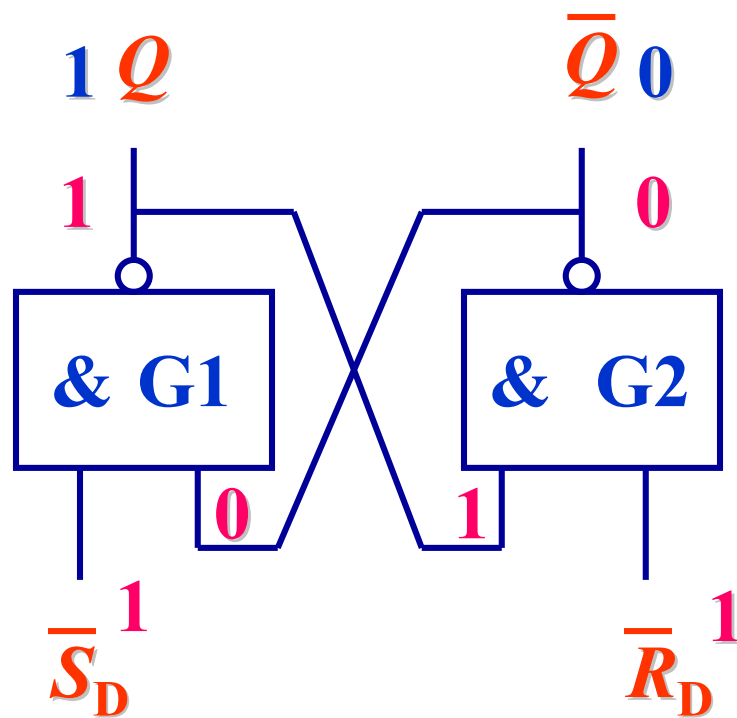
保持为“0”态



设原态为“1”态

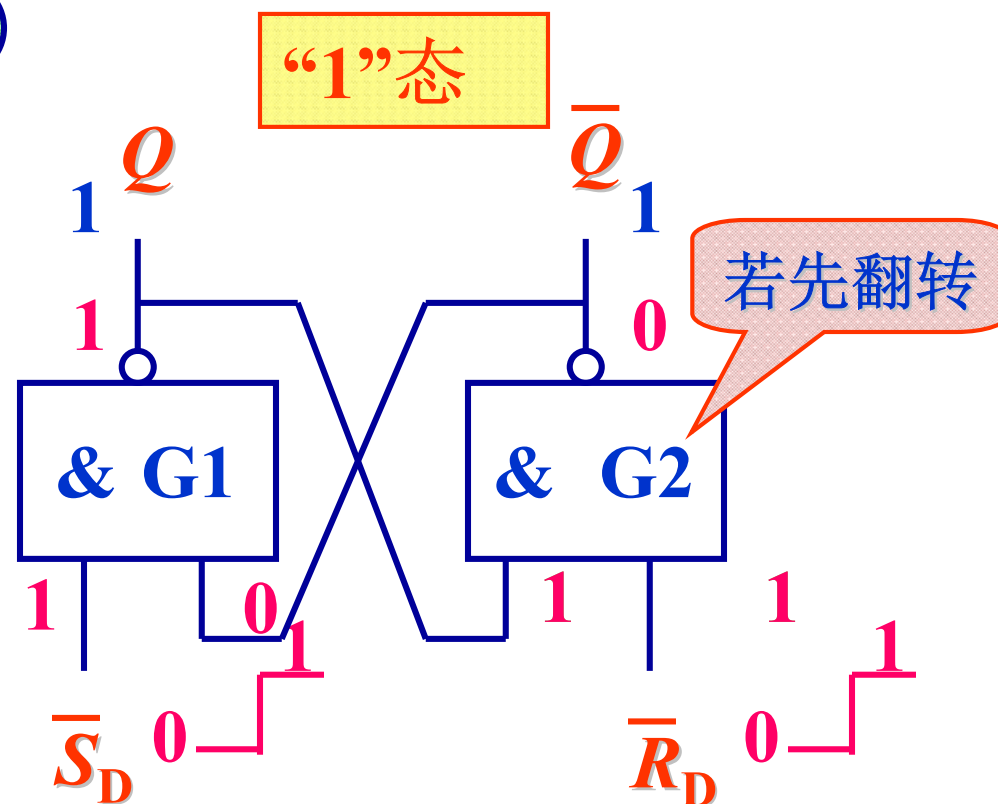
当 $\bar{S}_D=1$,
 $\bar{R}_D=1$ 时,
触发器保持
原来的状态,
即触发器具
有保持、记
忆功能。

触发器保持
“1”态不变



(4) $\bar{S}_D=0$, $\bar{R}_D=0$

当信号 $\bar{S}_D=\bar{R}_D=0$ 同时变为1时，由于与非门的翻转时间不可能完全相同，触发器状态可能是“1”态，也可能是“0”态，不能根据输入信号确定。



若 G_1 先翻转，则触发器为“0”态

基本 $R-S$ 触发器

\bar{S}_D	\bar{R}_D	Q^{n+1}	功能
1	0	0	置0
0	1	1	置1
1	1	Q^n	保持
0	0	1*	不定

次态

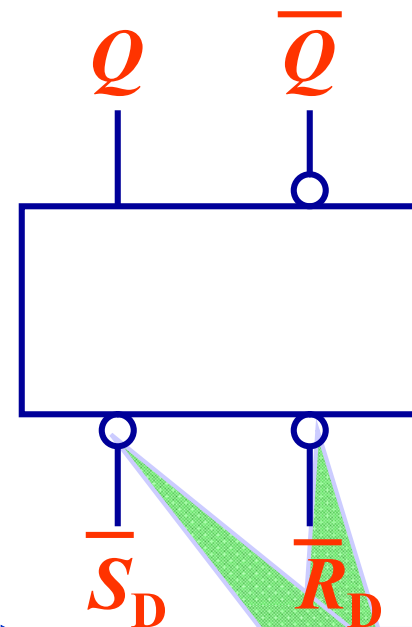
现态

R_D (Reset Direct)-直接置“0”端(复位端)

S_D (Set Direct)-直接置“1”端(置位端)

注意：1*表示不正常状态，0信号消失后，触发器状态不定。

逻辑符号



低电平有效

5.1.2 基本RS触发器的逻辑功能描述方法

逻辑功能描述方法

Q^{n+1} 下一个稳定状态

Q^n 当前稳定状态

输入信号 (RS触发器为 \bar{S} \bar{R})

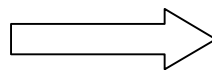
- 状态转移真值表 (状态表)
- 状态方程 (特征方程)
- 状态转移图和激励表
- 波形图 (时序图)

基本RS-FF触发器的功能描述

1. 状态表

真值表

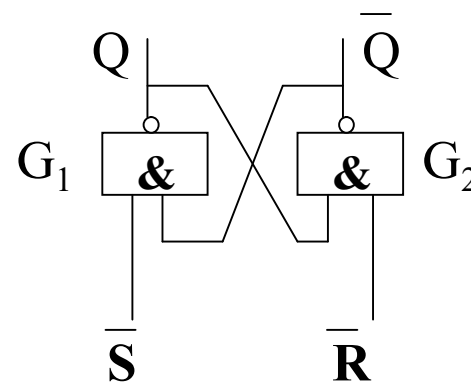
\bar{R}	\bar{S}	Q^n	Q^{n+1}
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1
0	0	0	不确定
0	0	1	不确定



\bar{R}	\bar{S}	Q^{n+1}
0	1	0
1	0	1
1	1	Q^n
0	0	不确定

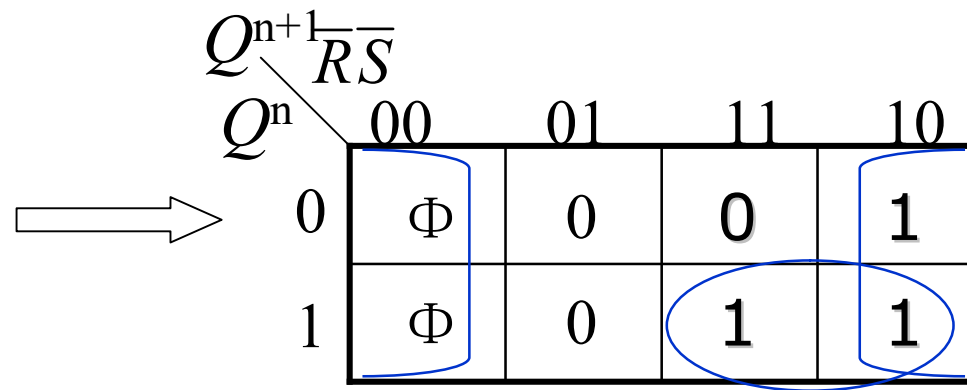
定义:

$\left\{ \begin{array}{l} Q^n \text{ --- 原状态} \\ Q^{n+1} \text{ --- 新状态, 次态} \end{array} \right.$



2. 状态方程 (特征方程)

\bar{R}	\bar{S}	Q^n	Q^{n+1}
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1
0	0	0	不确定
0	0	1	不确定



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

状态方程 (特征方程)

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

不同时为0

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

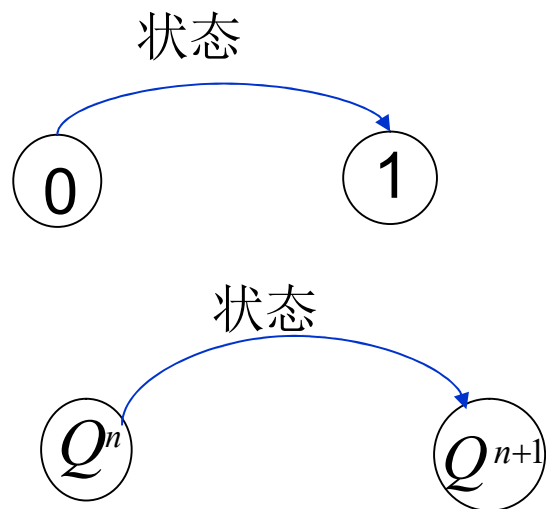
3. 状态转移图和激励表

用图形表示输出状态转换的条件和规律

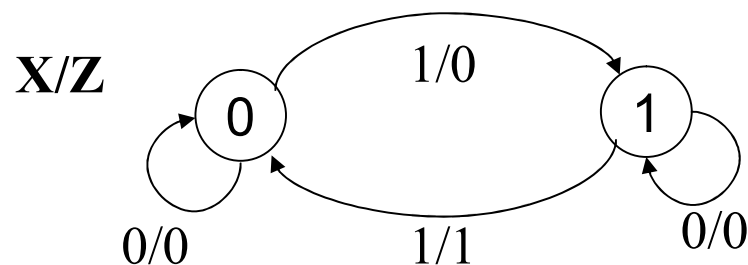
状态转移图

描述状态间的转换和转换条件

- 组合电路：真值表 —— 输入和输出的关系
- 时序电路：状态转移图 —— 状态转换及其条件



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} 。

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

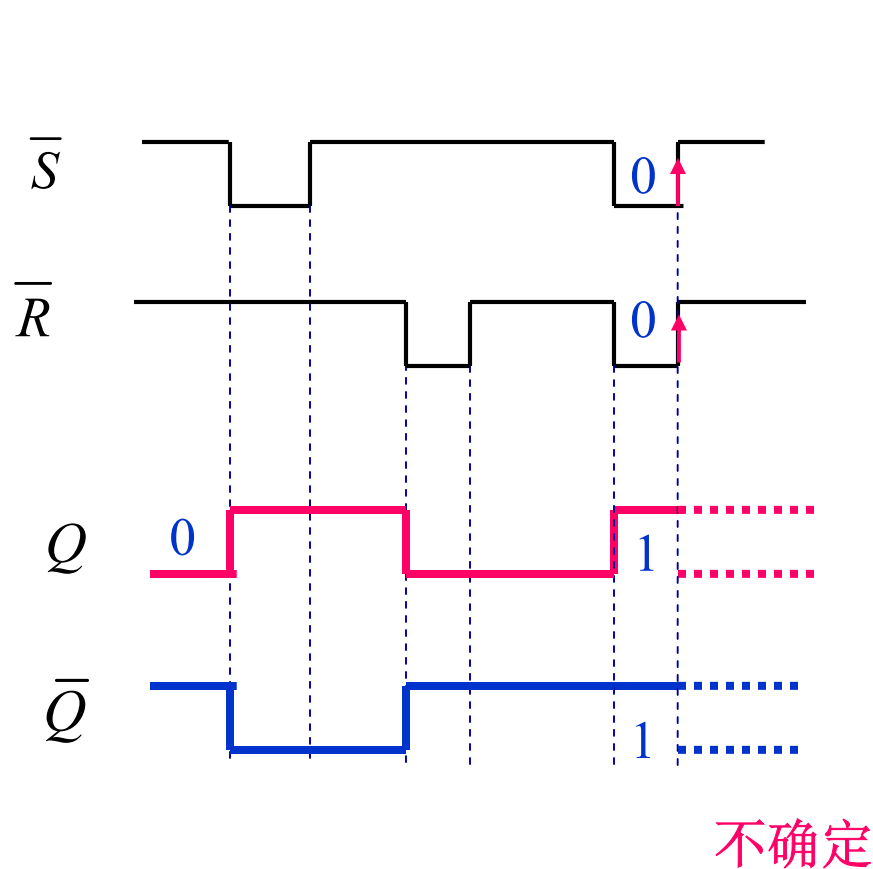
\bar{R}	\bar{S}	Q^n	Q^{n+1}
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1
0	0	0	不确定
0	0	1	不确定

基本RS触发器激励表

输出激励表		输入	
$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$		\bar{R}	\bar{S}
0	0	Φ	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	1	Φ

4. 时序图 (波形图)

根据输入波形确定输出波形 (初始状态 $Q = 0$)



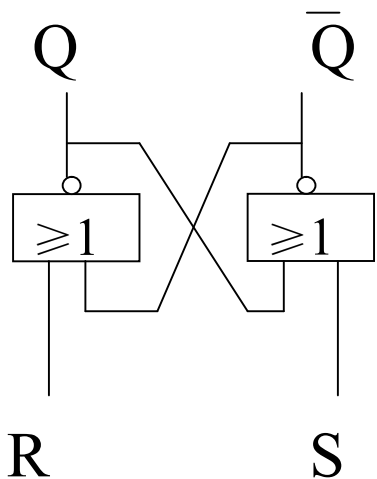
V

t

\bar{S}	\bar{R}	Q	\bar{Q}	触发器状态
0	0	1	1	$\bar{S} \bar{R} 0 \rightarrow 1$ 不定
0	1	1	0	置位 (1)
1	0	0	1	复位 (0)
1	1	NC	NC	不变

$\bar{S} \neq \bar{R}$
 $Q = \bar{R}$

5.1.3 由或非门组成的基本RS触发器



真值表

S	R	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	1	0
1	0	1
1	1	不确定

输入S, R : 高电平有效

S = 1, R = 0, Q = 1, S: 置 1

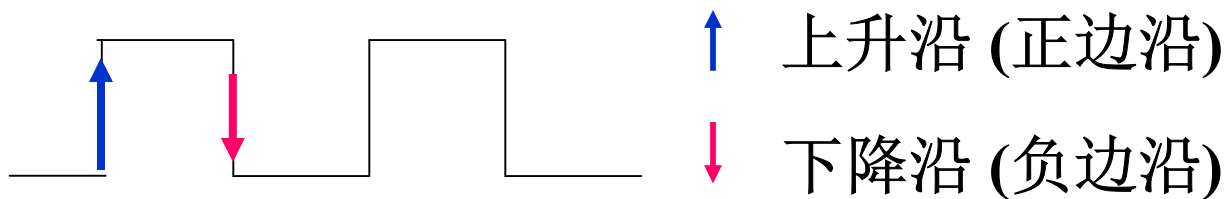
R = 1, S = 0, Q = 0, R: 置 0

§ 5.2 时钟触发器(同步触发器)

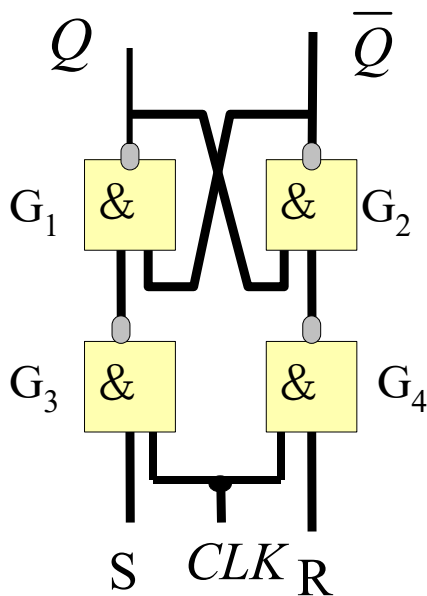
在数字系统中，为协调各部分动作，需要某些触发器在同一时刻动作。引入一同步信号，使这些触发器只有在同步信号到达时才按输入信号改变状态。同步信号被称时钟脉冲信号。

CLK 信号：时钟

CLK 是周期矩形波

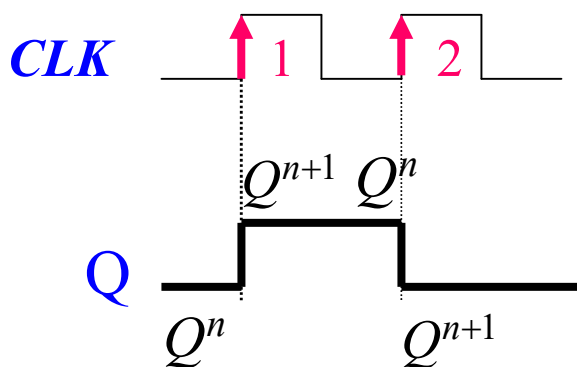


5.2.1 同步RS触发器



将 G_3 、 G_4 加到基本 RS 触发器中，仅当时钟脉冲 $CLK=1$ 时， G_3 和 G_4 打开。当 $CLK=0$ ， G_3 和 G_4 封锁。

讨论时钟脉冲 $CLK=1$ 时的情况

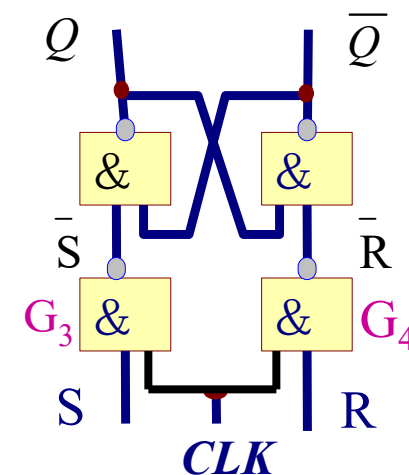


$\begin{cases} Q^n & \text{在} CLK \text{之前} \\ Q^{n+1} & \text{在} CLK \text{之后} \end{cases}$

Q^n, Q^{n+1} 针对每个 CLK

真值表

\bar{S}	\bar{R}	Q	\bar{Q}	触发器状态
0	0	1	1	$\bar{S} \bar{R} 0 \rightarrow 1$ 不定
0	1	1	0	置位 (1)
1	0	0	1	复位 (0)
1	1	NC	NC	不变



S	R	Q^n	Q^{n+1}	说明
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	ϕ	$R=S=1,$ $Q=\bar{Q}=1$
1	1	1	ϕ	

● $S=R=0$ 触发器状态不变
 $Q^{n+1}=Q^n$

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

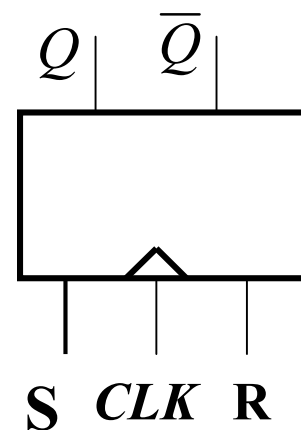
● $S=1, R=0$
 $G_3=0, G_4=1$ $Q^{n+1}=1$

● $S=1, R=1$ $G_3=G_4=0, Q=\bar{Q}=1$
 S 和 R $1 \rightarrow 0$, Q 状态不定

输入和输出的关系

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

符号



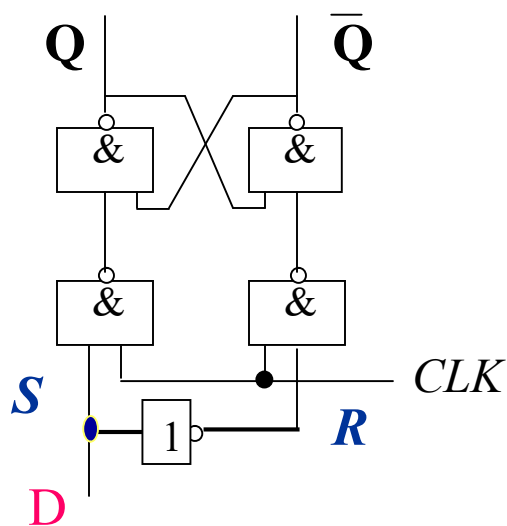
同步RS-FF特征方程

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

缺点:

有不稳定状态

5.2.2 时钟 D 触发器 (同步 D 触发器)



在 **S** 和 **R** 之间有一个非门

$$S \neq R$$

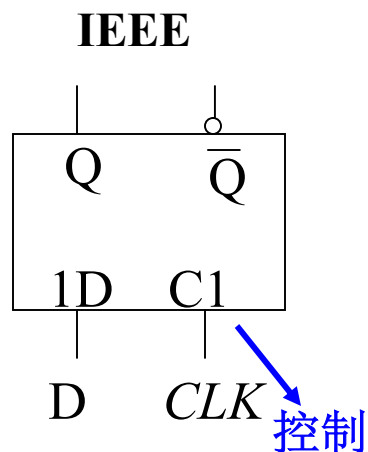
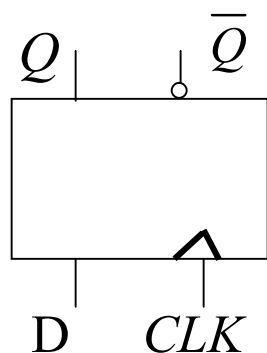
$S=D, R=\bar{D}$ 无不确定状态

运算:

CLK=0, 触发器状态改变

CLK=1, 触发器工作

符号



$$\left\{ \begin{array}{l} D=1, (S=1, R=0) \quad Q^{n+1} = 1 \\ D=0, (S=0, R=1) \quad Q^{n+1} = 0 \end{array} \right.$$

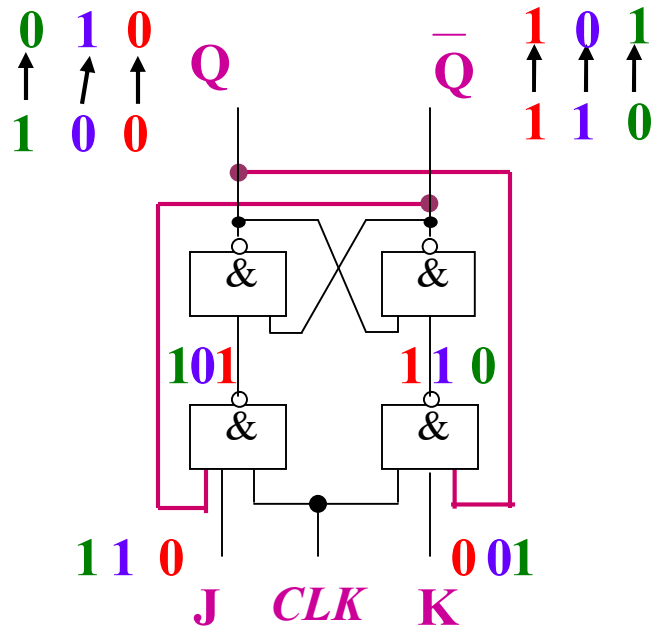
时钟 D 触发器的状态方程:

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

5.2.3 时钟JK触发器

两个输入端: J, K

$CLK=0$, 停止; $CLK=1$, 工作



在输入端添加两个反馈线

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

Q, \overline{Q} 不同时为1, R, S 不同时1→0
没有不确定状态

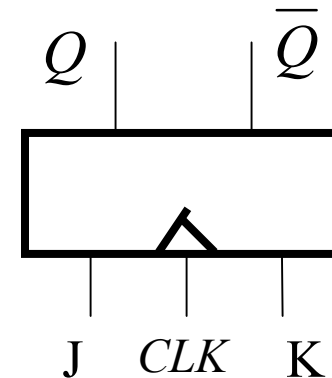
J	K	Q^n	Q^{n+1}	说明
0	0	0	0	$J=K=0$ $Q^{n+1}=Q^n$
0	0	1	1	
0	1	0	0	$J \neq K$ $Q^{n+1} = J$
0	1	1	0	
1	0	0	1	
1	0	1	1	
1	1	0	1	$J=K=1$ $Q^{n+1}=\overline{Q}^n$
1	1	1	0	

时钟触发器的 JK 状态方程

JK		Q ⁿ⁺¹			
		00	01	11	10
Q ⁿ	0	0	0	1	1
	1	1	0	0	1

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

逻辑符号:



从RS 触发器得到：

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

CLK 正边沿有效

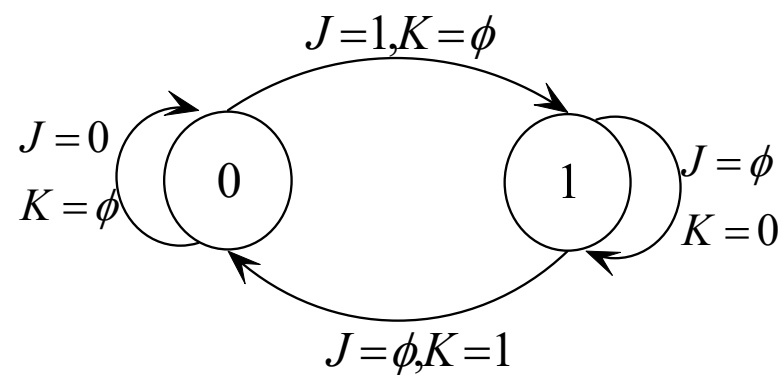
状态表

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触发器激励表

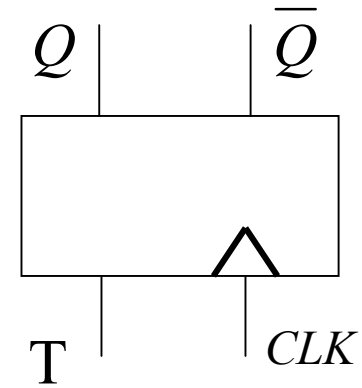
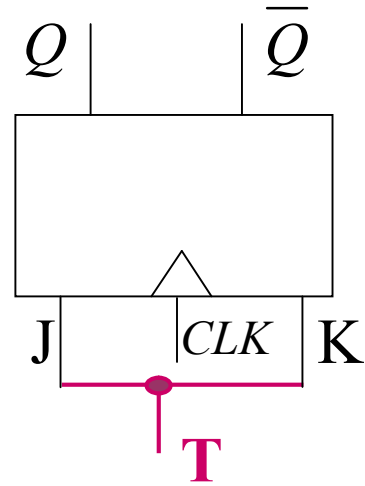
状态转移 $Q^n \rightarrow Q^{n+1}$	激励输入	
	J	K
0 0	0	Φ
0 1	1	Φ
1 0	Φ	1
1 1	Φ	0

JK触发器状态图



5.2.4 时钟 T 触发器

$$J = K = T$$



T 触发器状态方程

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

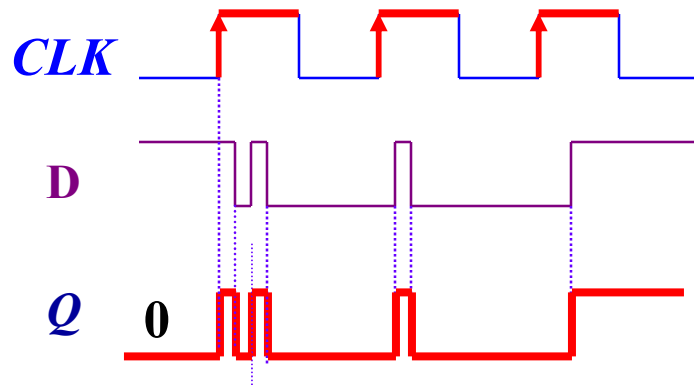
$$\begin{cases} T=0, & Q^{n+1} = Q^n & \text{状态不变} \\ T=1, & Q^{n+1} = \bar{Q}^n & \text{状态翻转} \end{cases}$$

5.2.5 时钟触发器的特点

当 $CLK=1$, 触发器状态 Q^{n+1}
根据输入 R, S, D, J, K, T 改变 } 出现 空翻

空翻:

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



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

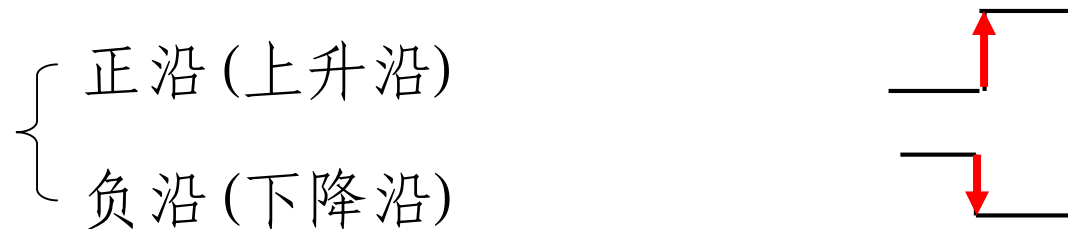
时钟触发器都存在空翻问题
要克服, 用新结构

§ 5.3 主从触发器

为了克服触发器的空翻，出现了几种结构的触发器

原理都是：边沿触发

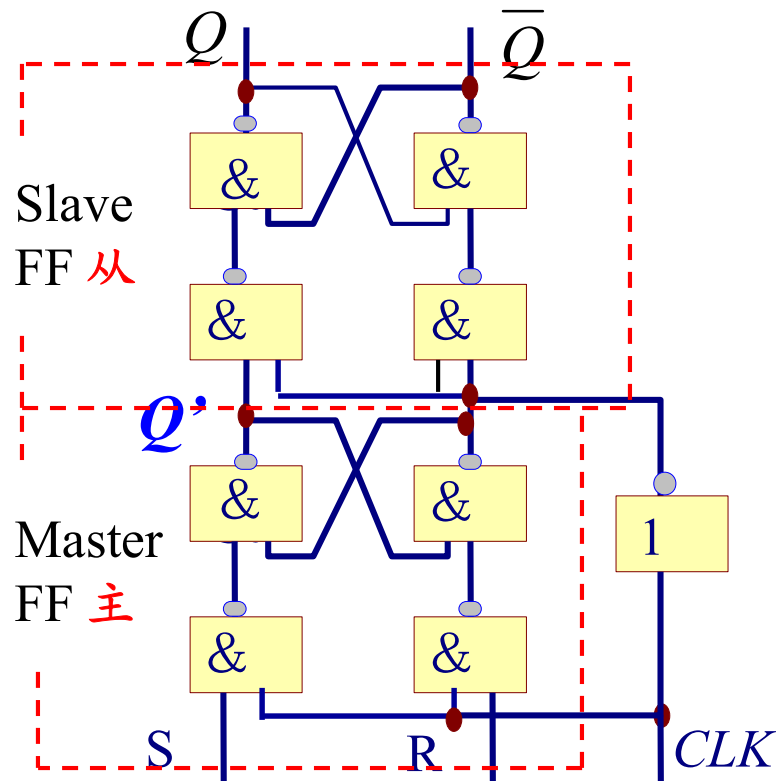
触发器在时钟脉冲边缘改变状态



边沿到来的瞬间触发，缩短触发时间

主从触发器是其中的一种

5.3.1 主从 RS 触发器



两个相同的门 RS 触发器
在两个CLK中有一个非门
(一个触发器工作, 另一个保持)

从触发器 Q 的状态是触发器的状态

主触发器输出是 Q'

$CLK=0$, 主触发器保持, Q' 不改变
 $CLK=1$, 从触发器工作, $\left. \begin{array}{l} \therefore Q' \text{ 不变} \\ \therefore Q \text{ 不变} \end{array} \right\}$

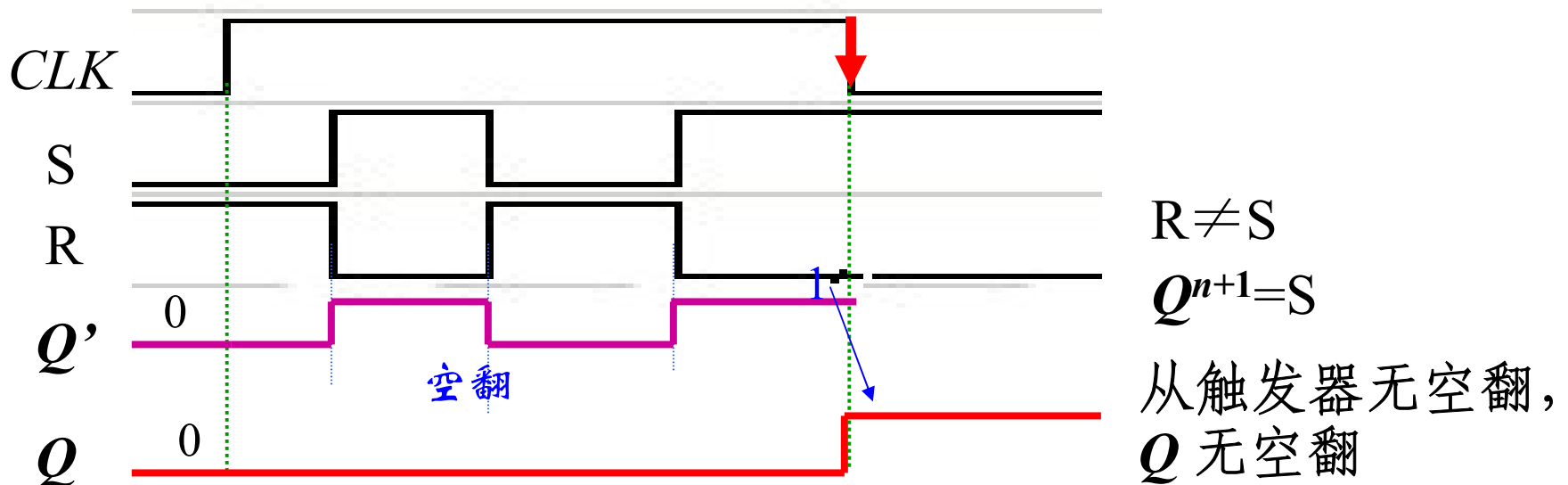
$CLK=1$, 主触发器工作, $S, R \rightarrow Q'$
 $CLK=0$, 从触发器保持 $\left. \begin{array}{l} \therefore Q \text{ 不变} \end{array} \right\}$

∴ 当 $CLK=0$ 和 $CLK=1$ 时, Q 没有改变

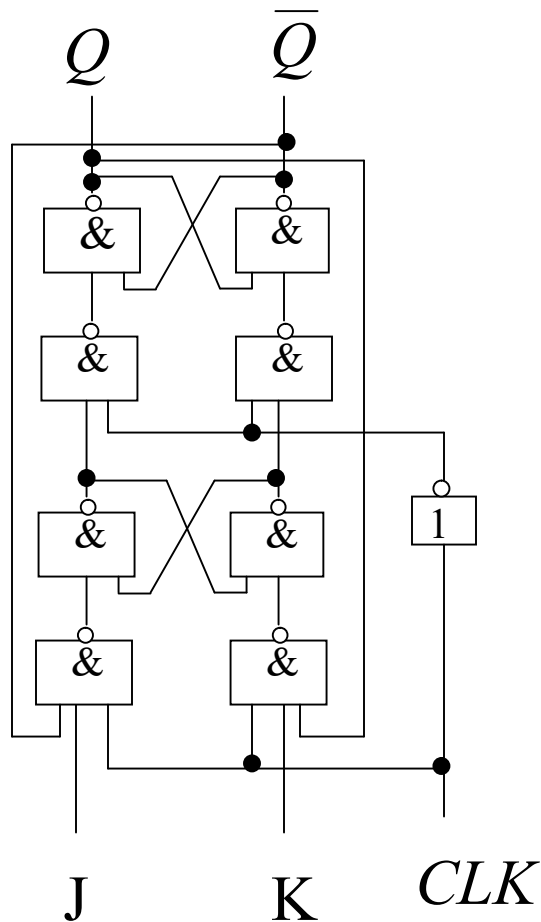
在 CLK 从 1 变为 0 的瞬间 (CLK 下降沿), 状态从主触发器反应到从触发器 Q

∴ 主从 RS 触发器是 CLK 在下降沿时触发的触发器

Q 与 CLK 有效边沿到来之前 Q' 的最后状态一致



5.3.2 主从 JK 触发器



在主从RS触发器上接两条反馈线构成主从JK触发器。

真值表
特征方程

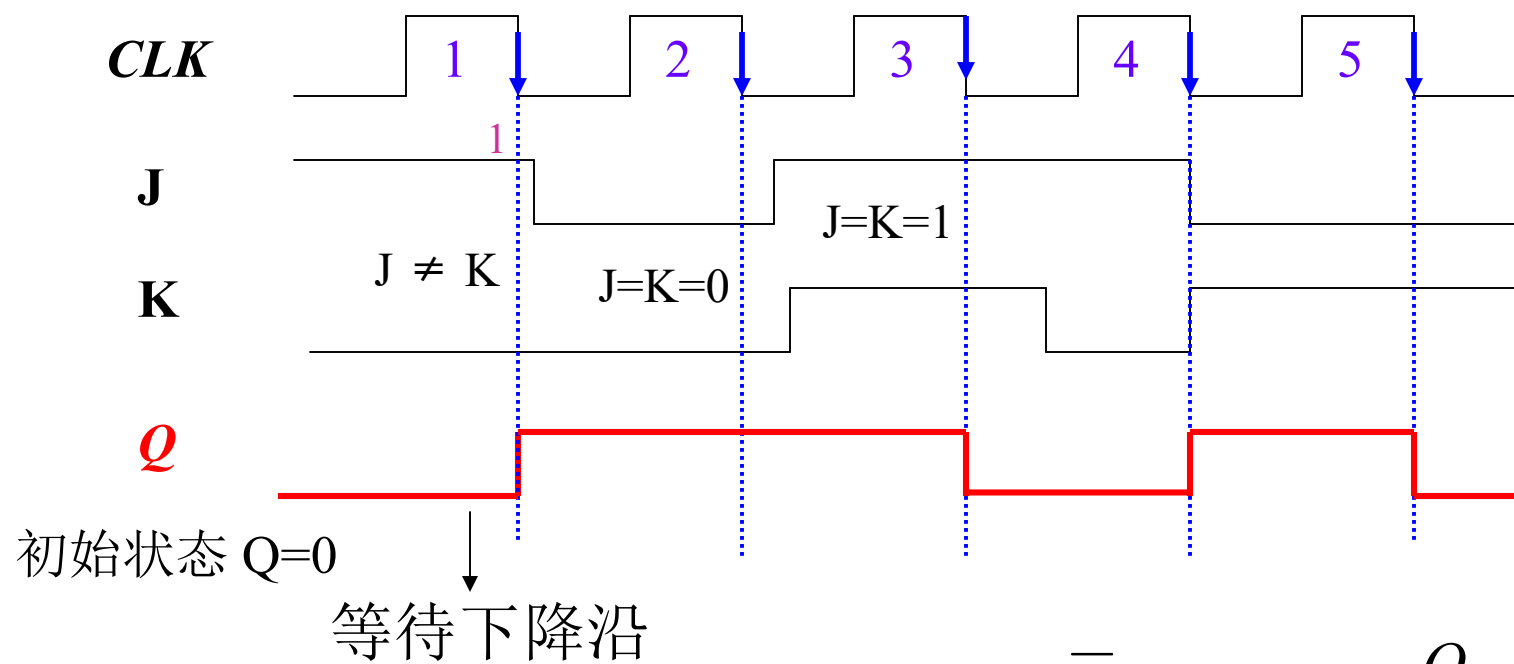
与JK触发器相同

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触发器特点： 无空翻， 无不定状态

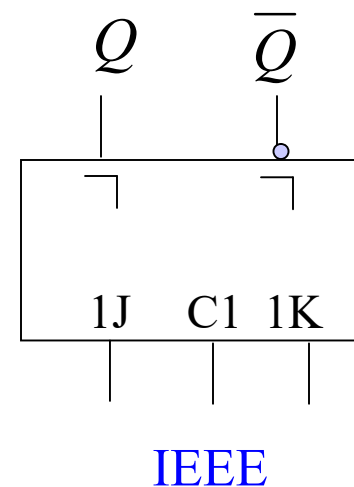
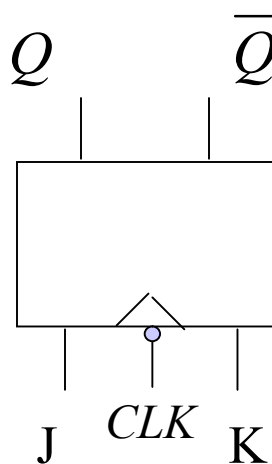
练习



符号

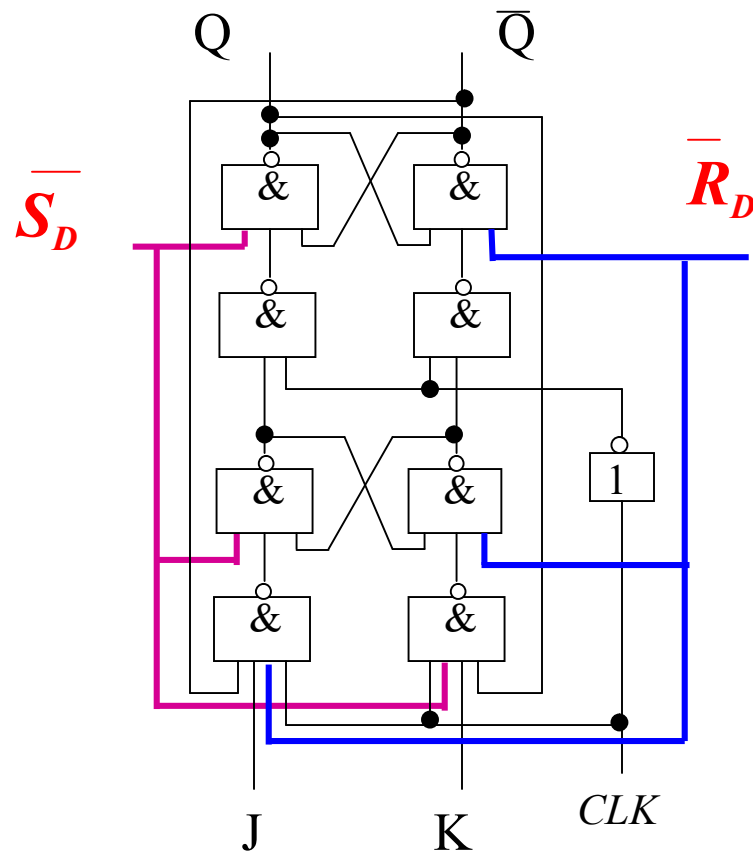
$Q, J \rightarrow$ 同侧

$\bar{Q}, K \rightarrow$ 同侧



5.3.3 触发器的直接输入端

触发器 { 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
(置为 1) \bar{S}_D

直接复位输入
(置位 0) \bar{R}_D

强制

直接输入端强制改变触发器的状态，有最高优先级，独立于J，K，CLK

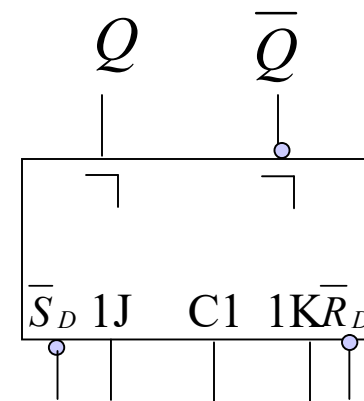
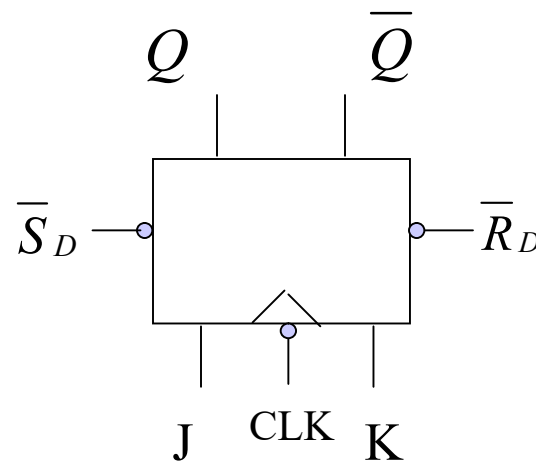
\overline{S}_D	\overline{R}_D	CLK	J	K	Q^n	Q^{n+1}	
0	1	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	1	\overline{S}_D 直接置1
1	0	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	0	\overline{R}_D 直接清0
1	1						触发器工作
0	0						不允许

低电平有效

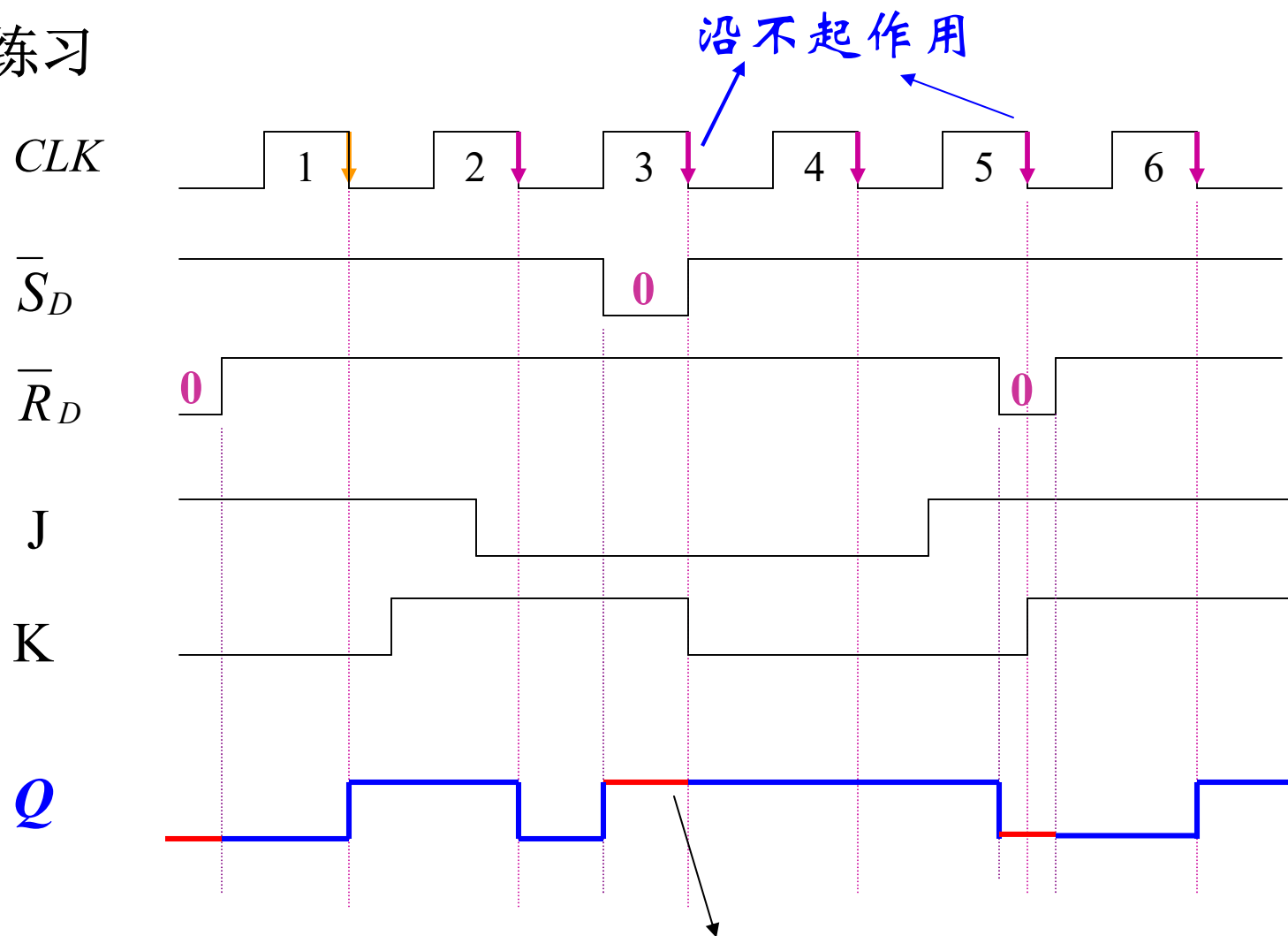
$$\begin{cases} Q^{n+1} = J\overline{Q}^n + \overline{K}Q^n \\ \overline{S}_D = \overline{R}_D = 1 \end{cases}$$

Q, J, $\overline{S}_D \rightarrow$ 同侧

\overline{Q} , K, $\overline{R}_D \rightarrow$ 同侧



练习



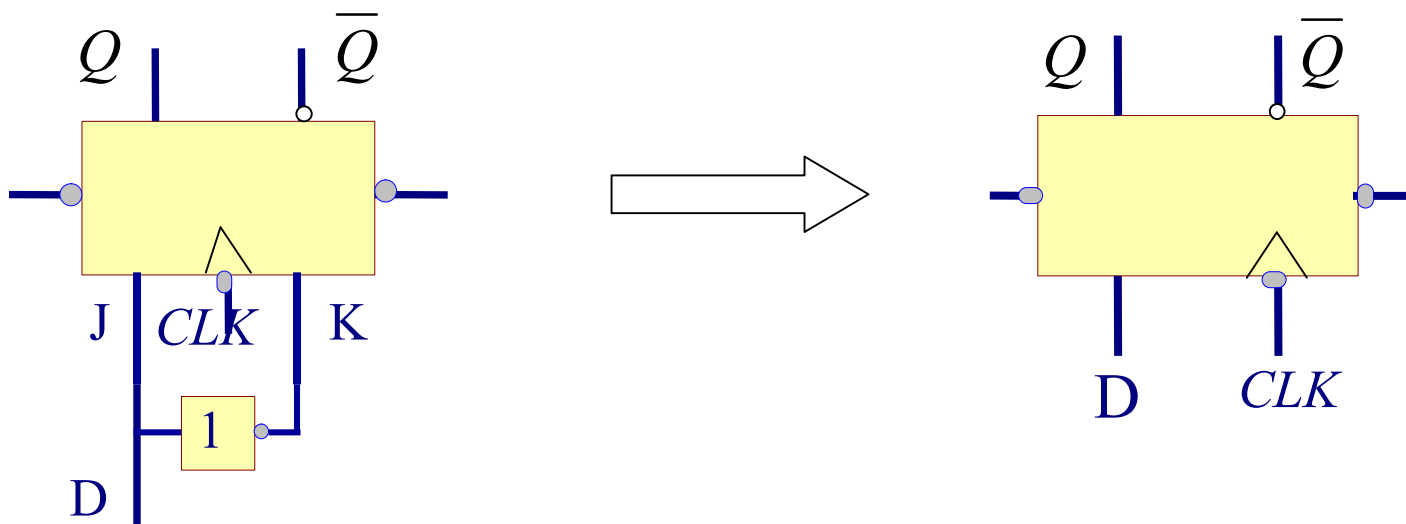
异步优先

沿前是异步, 优先

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

5.3.4 主从 D 触发器

主从JK触发器输入端加非门：



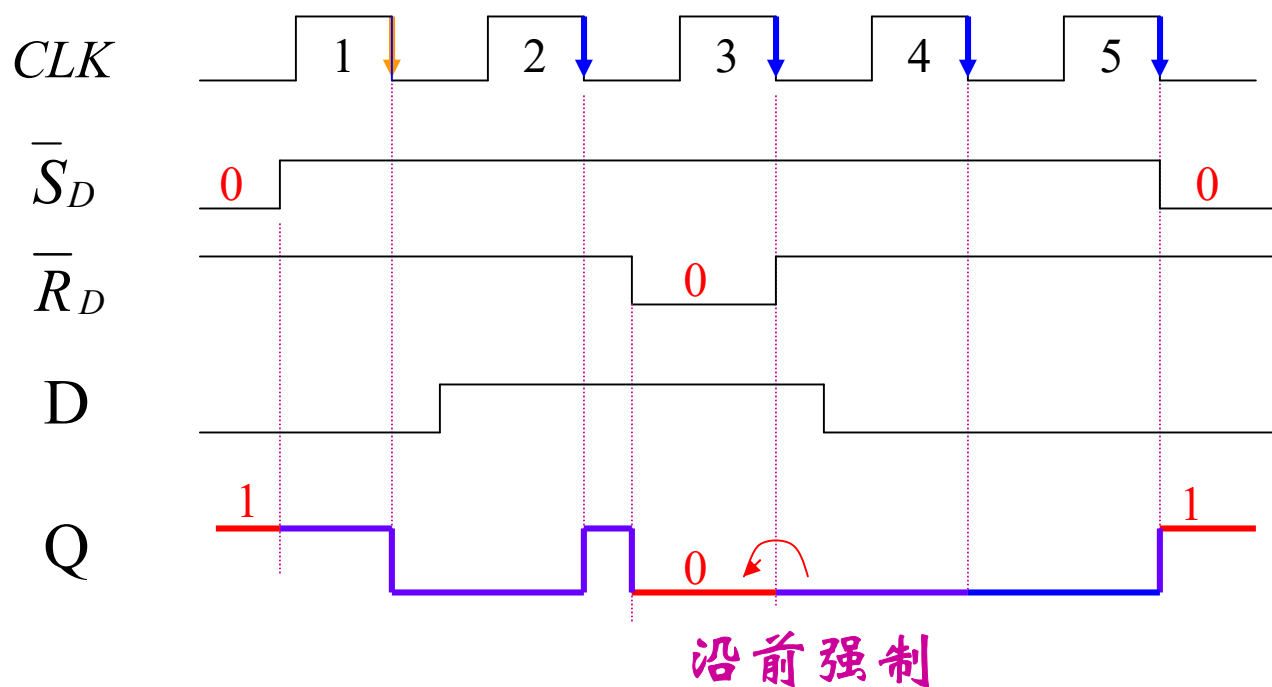
特征方程

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

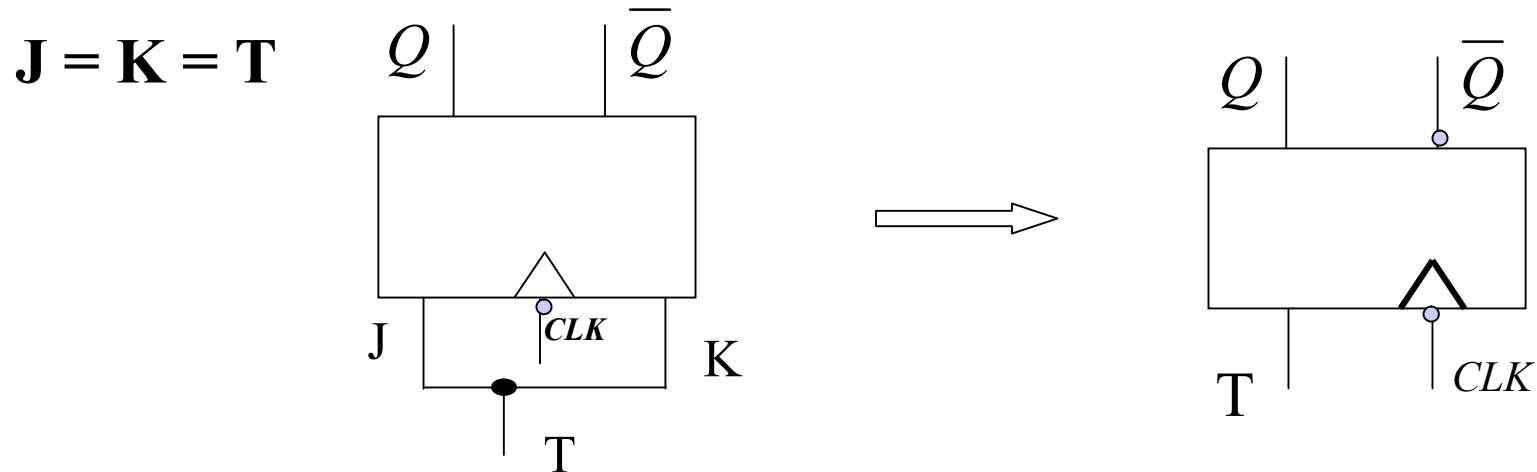
D-FF 是 JK-FF 中 $J \neq K$ 的部分，是 JK-FF 的特例

在 CLK 下降沿之前, $D=0$ ($D=1$), 那么 CLK 下降沿到来之后
 $Q^{n+1}=0$ ($Q^{n+1}=1$)

练习



5.3.5 主从 T 触发器



T触发器的特征方程:

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

CLK 下降沿触发

T-FF 是 JK-FF 中 J=K 的部分，是 JK-FF 的特例

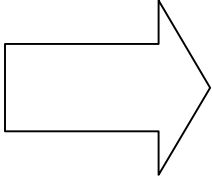
5.3.6 主从触发器的特点

$CLK=1$ 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，使触发器输出状态不能反映 CLK 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。

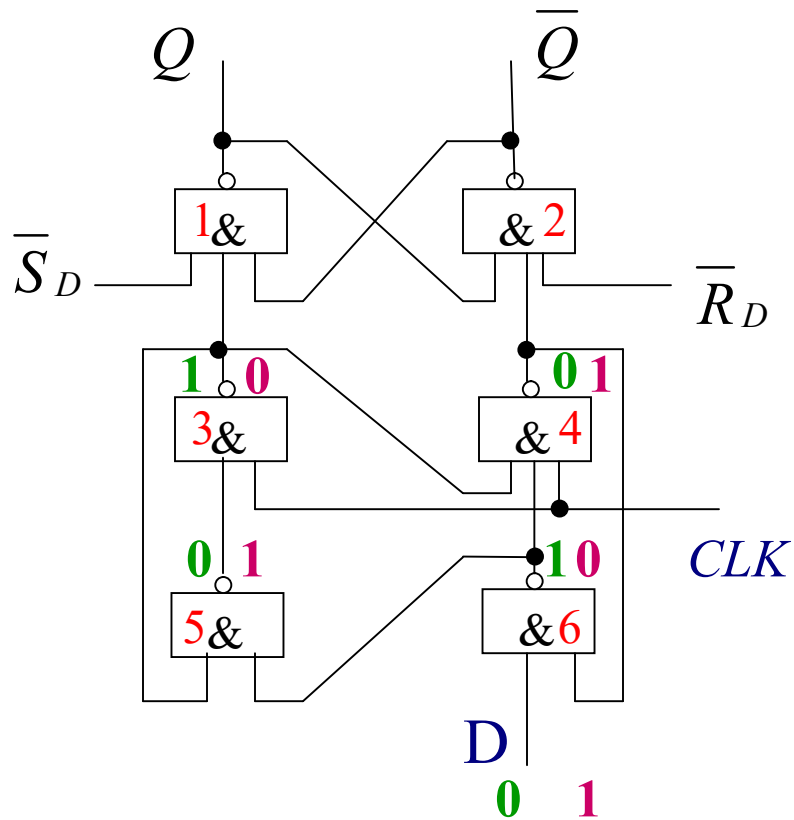
§ 5.4 边沿触发器

正常工作时要求主从触发器 在 $\text{CLK} = 1$ 期间
输入信号不变，但干扰信号仍能进入。

改进  边沿触发器

CLK 

5.4.1 维持阻塞结构D触发器



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

运算: $(\bar{S}_D = \bar{R}_D = 1)$

$CLK=0$, $G_3=G_4=1$, Q 不变

D 过 G_6 、 G_5 等在 G_3 、 G_4 入口

当 CLK 上升沿到来

CLK

如果 $D=0$, $G_6=1$, $G_5=0$,

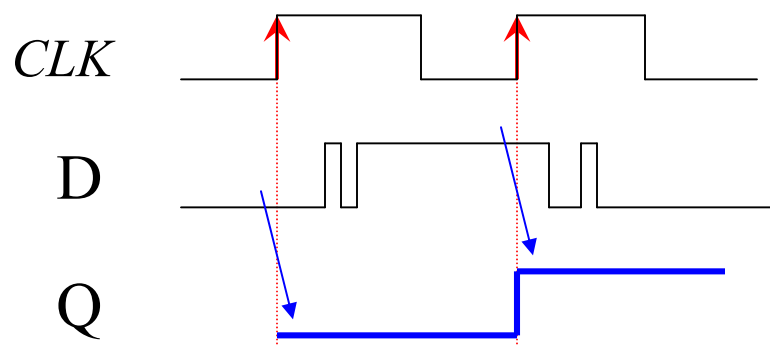
$G_3=1$, $G_4=0$, $\therefore Q=0$

如果 $D=1$, $G_6=0$, $G_5=1$,

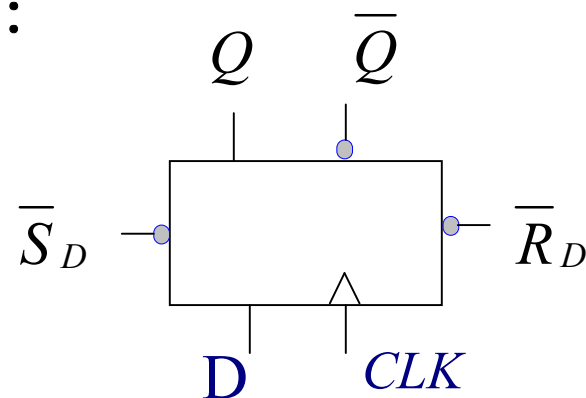
$G_3=0$, $G_4=1$, $\therefore Q=1$

维持 - 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



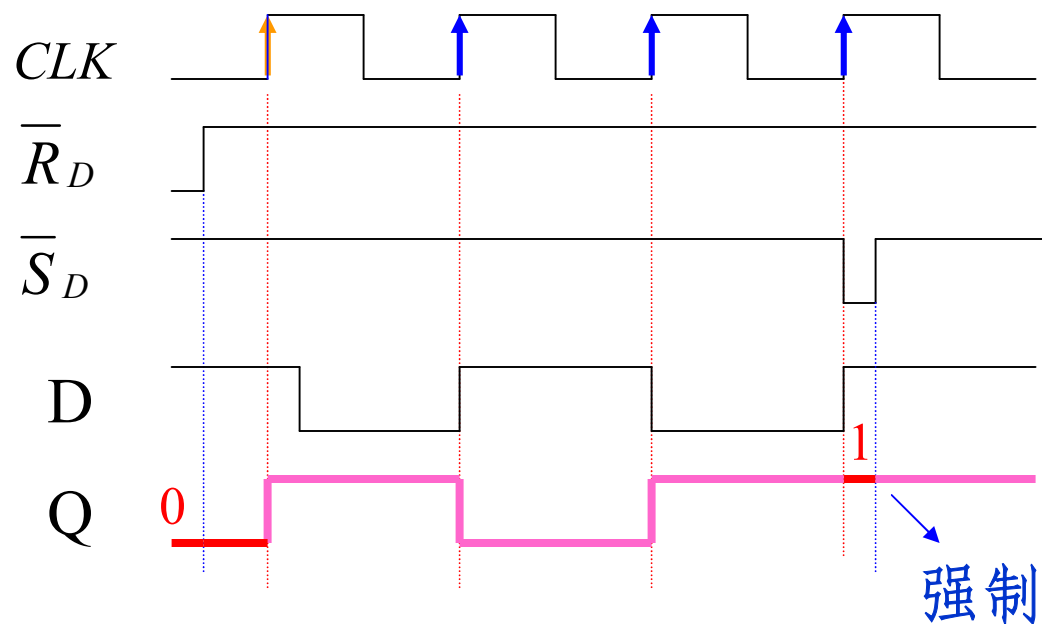
符号:



触发器 { 上升沿触发
 $Q^{n+1} = D$

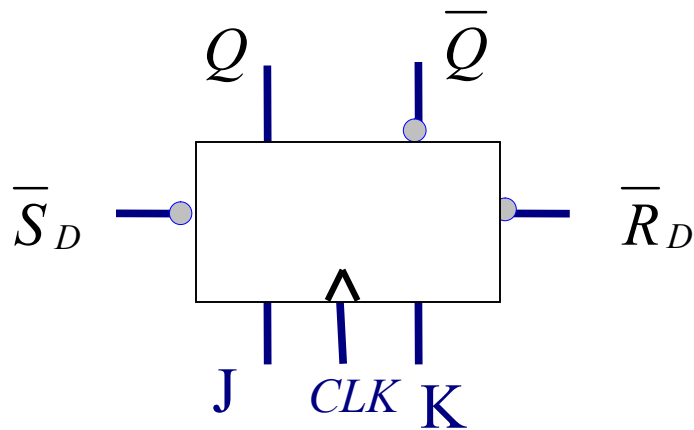


例：画出上升边沿触发的D-FF波形



5.4.2 上升沿触发 JK 触发器

符号:



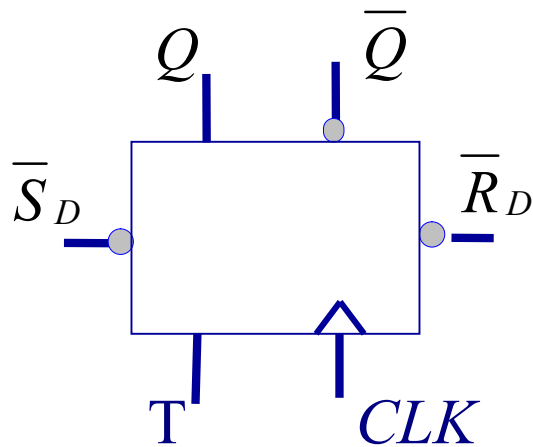
除了上升沿触发，其它与主从 **JK** 触发器相同

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

J K	Q^{n+1}	
0 0	Q^n	$\left. \begin{array}{l} \mathbf{J=K=0, 保持} \\ \mathbf{J \neq K, Q^{n+1}=J} \end{array} \right\}$
0 1	0	
1 0	1	
1 1	\overline{Q}^n	$\mathbf{J=K=1, 翻转}$

5.4.3 上升沿触发的T触发器

符号:



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

CLK 上升沿触发

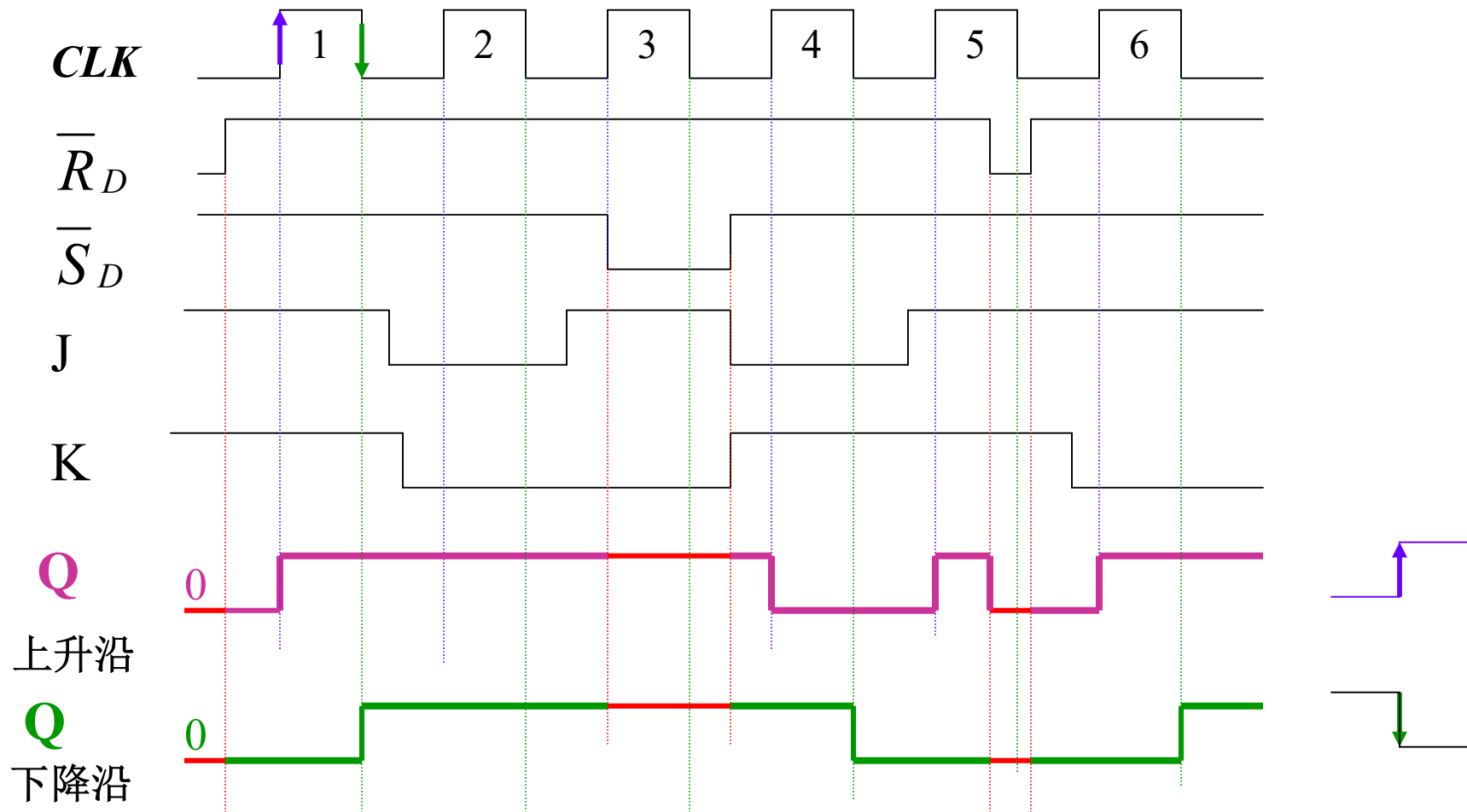
6 种常用边沿触发器电路:

下降沿触发 **JK**触发器, **D**触发器, **T**触发器

上升沿触发 **JK**触发器, **D**触发器, **T**触发器

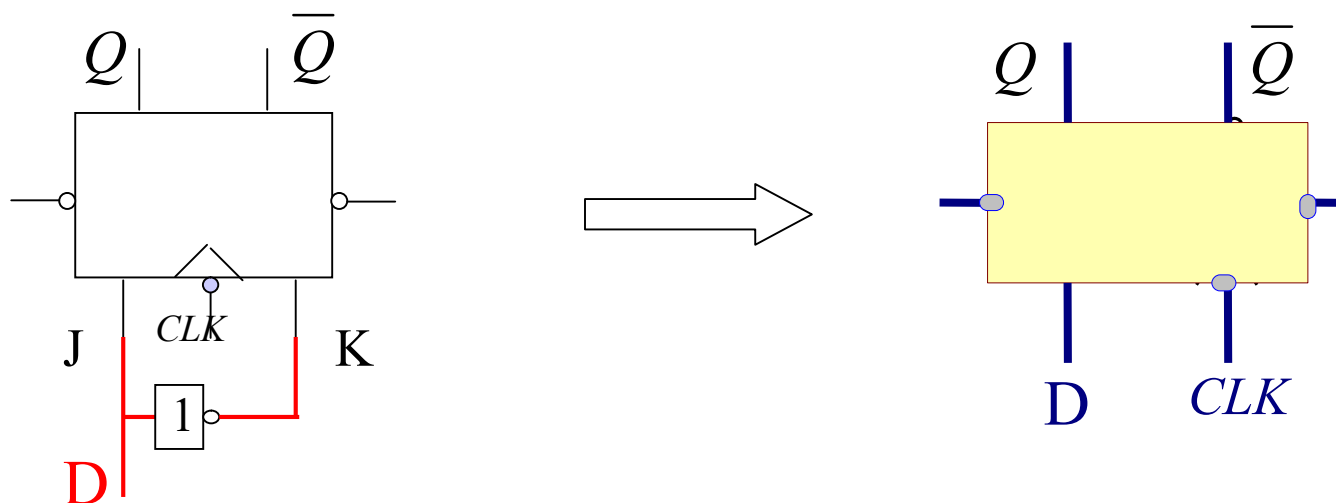
练习:

分别画出上升沿JK触发器和下降沿JK触发器的波形图



§ 5.5 触发器间的相互转换

1. JK 触发器转换为 D 触发器



给定触发器:

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

目标触发器:

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

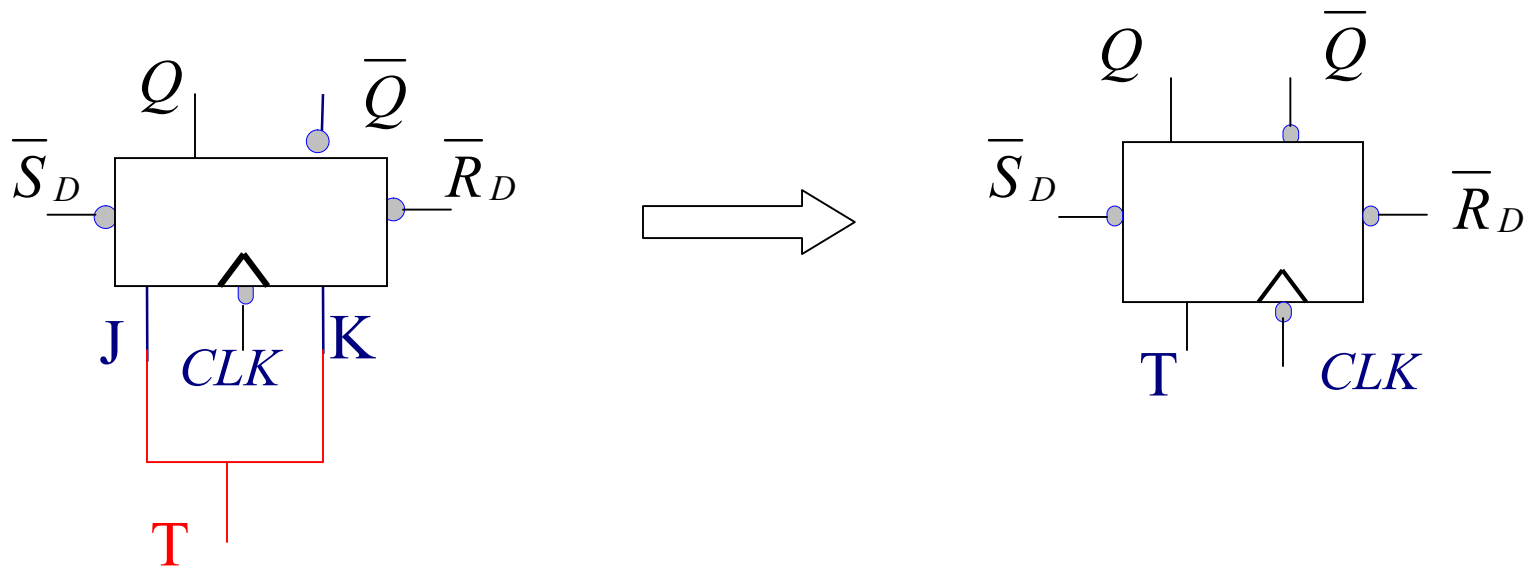
$$\begin{aligned} J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n &= D (\bar{Q}^n + Q^n) \\ &= D\bar{Q}^n + DQ^n \end{aligned}$$

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

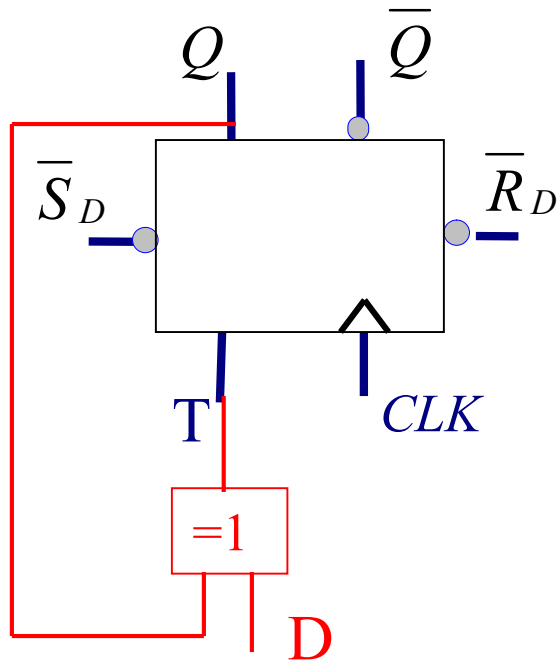
添加非门

2. JK 触发器转换为 T 触发器

$$\left. \begin{array}{l} \text{给定触发器: } Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n \\ \text{目标触发器: } Q^{n+1} = T \oplus Q^n = T\bar{Q}^n + \bar{T}Q^n \end{array} \right\} J = K = T$$



3. T 触发器转换为 D 触发器



给定触发器: $Q^{n+1} = T \oplus Q^n$ }
目标触发器: $Q^{n+1} = D$

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

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

4. T 触发器转换为 JK 触发器

给定触发器: $Q^{n+1} = T \oplus Q^n$

目标触发器: $Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$

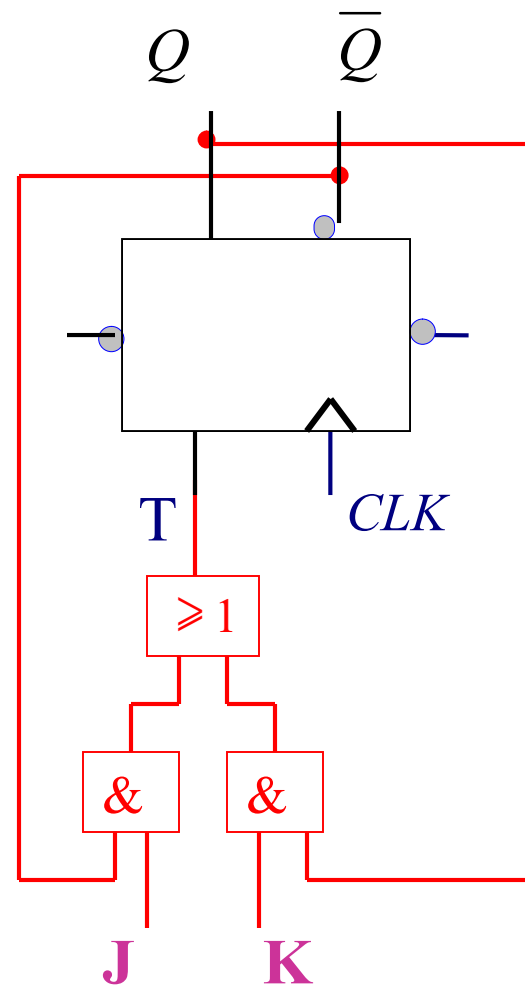
$$T \oplus Q^n = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$$

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

$$= J\bar{Q}^n + KQ^n$$

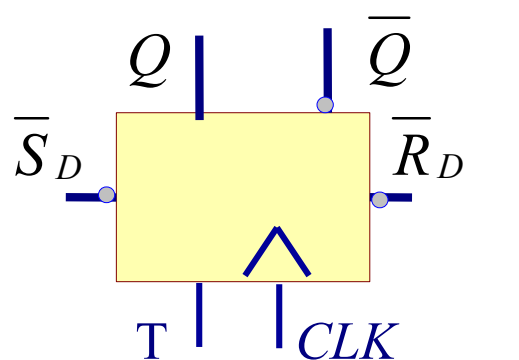
5. D 触发器转换为 JK 触发器

6. D 触发器转换为 T 触发器



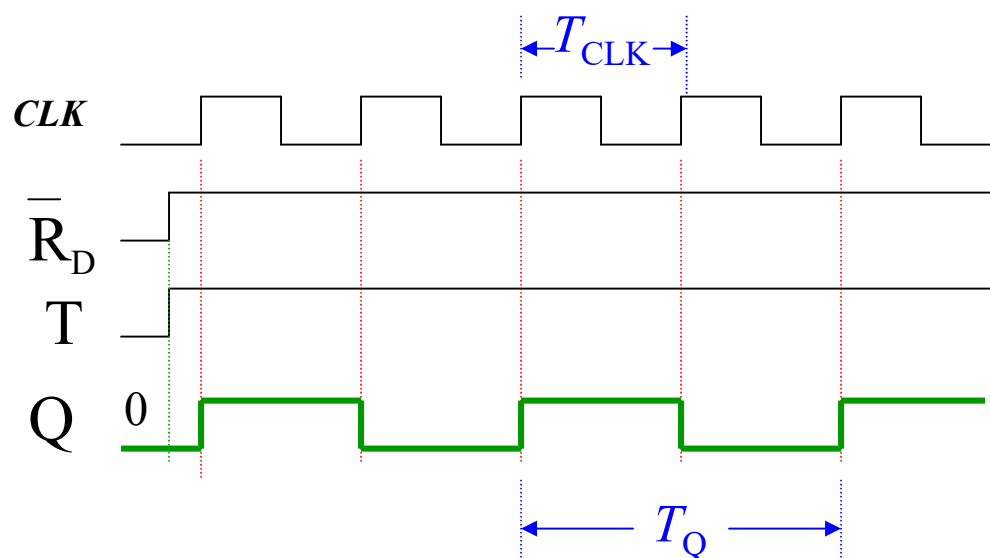
§ 5.6 触发器典型应用

例 1: 通过图中 CLK, \bar{R}_D, T 的波形图画出 Q 的波形图



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

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

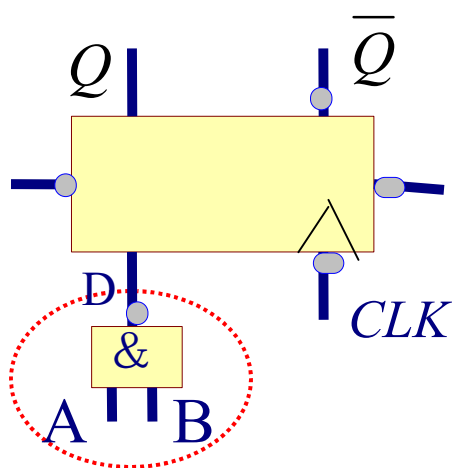


电路: 二分频电路

$$T_Q = 2T_{CLK}$$

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

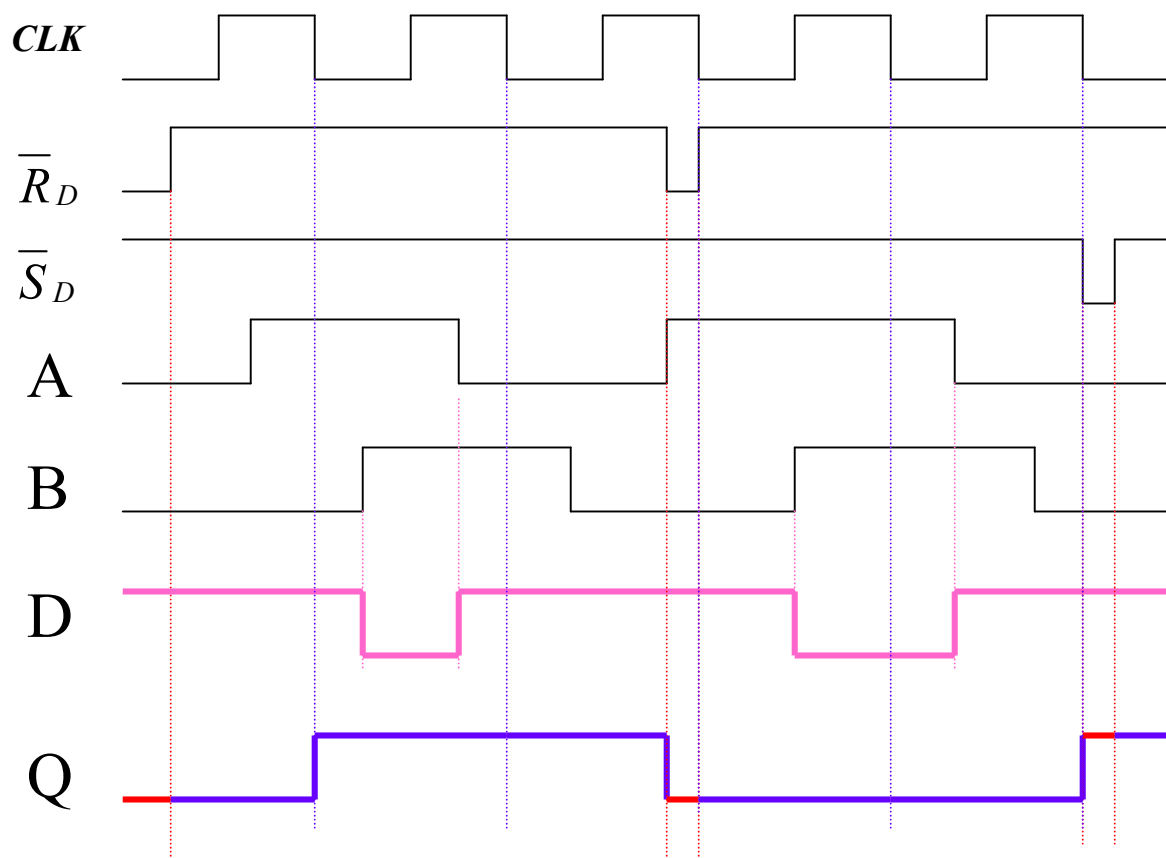
例 2：如图所示电路，根据输入画出Q的波形图。



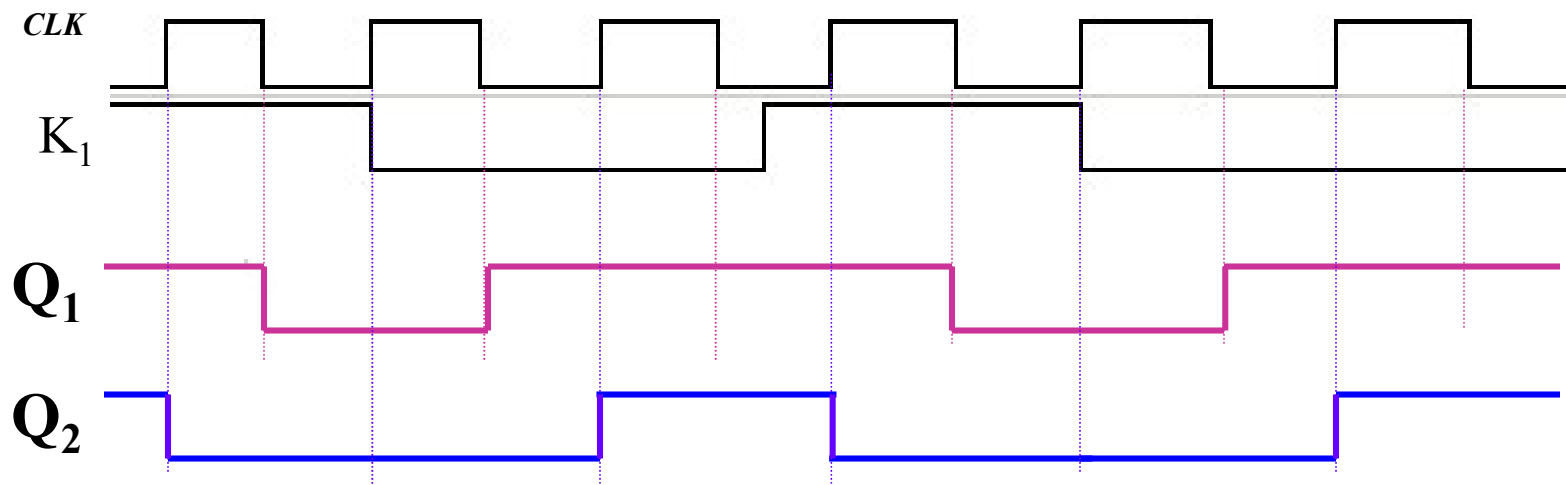
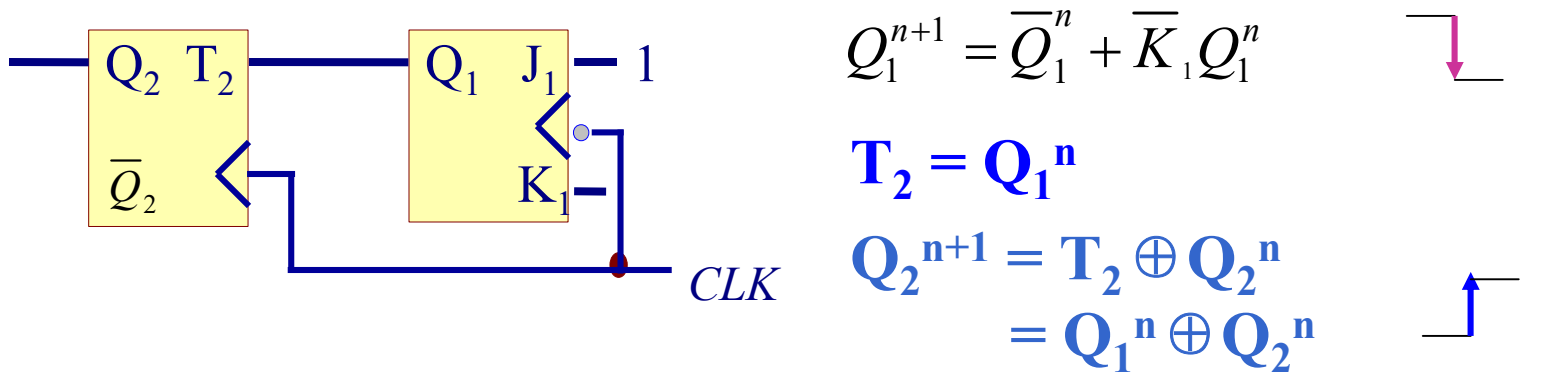
驱动电路

$$D = \overline{AB}$$

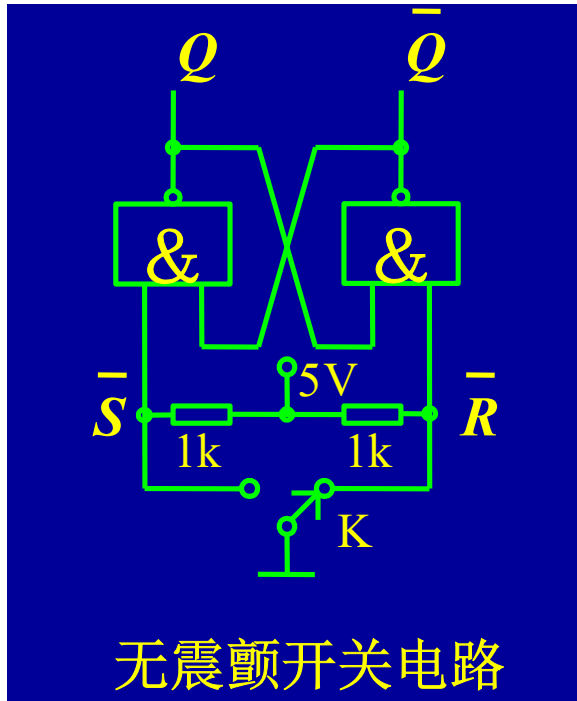
$$Q^{n+1} = D$$



例 3：根据以下电路 CLK 和 K_1 的波形，画出 Q_1 和 Q_2 的波形，假设 Q_1 和 Q_2 初始为高电平



例 4: 无震颤开关电路

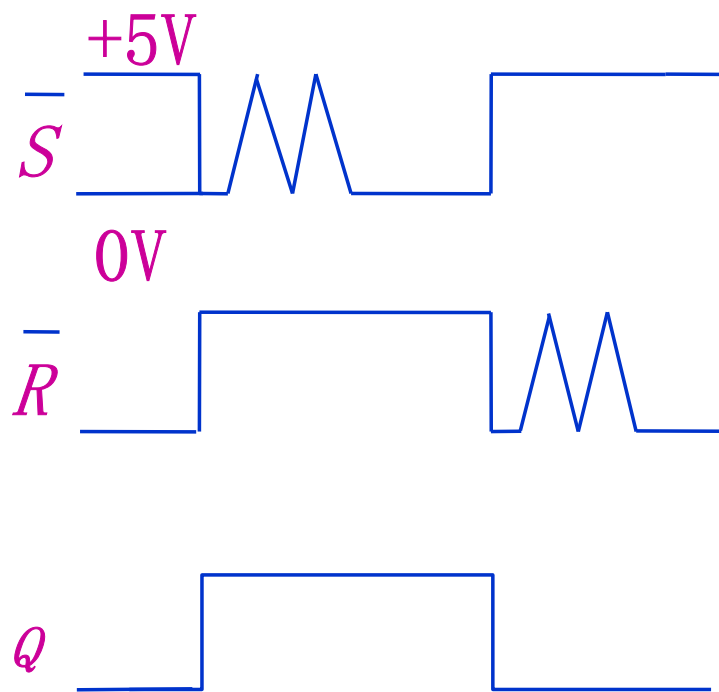
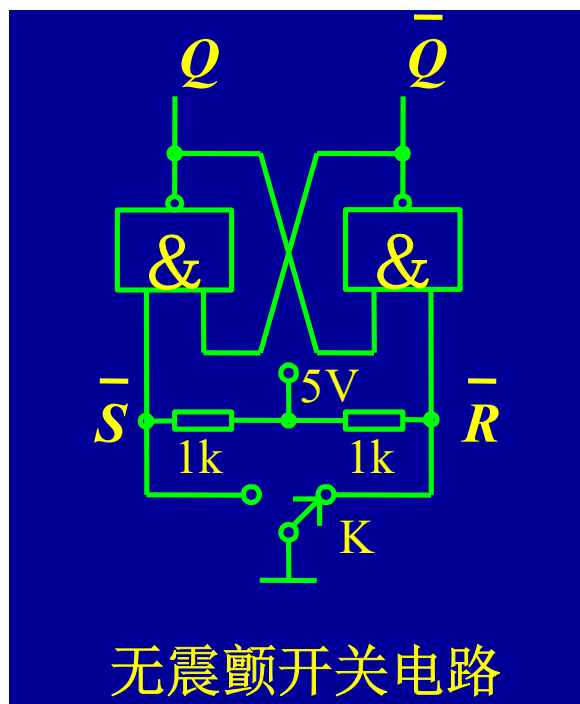


机械开关在静止到新的位置之前其机械触头将要震颤几次。图示电路可以解决震颤问题。

设初始时 K 接 \bar{R} 端，基本原理如下：

a. K 由右扳向左端，并且震颤几次，
相当于 $\bar{R} \bar{S} = 1 \ 0$ （或 $1 \ 1$ ）

b. K 由左扳向右端，并且震颤几次，相当于 $\bar{R} \bar{S} = 0 \ 1$
（或 $1 \ 1$ ）原理如图



波形图

小 结

- **RS, JK, D, T触发器**
 - 工作原理、符号、特征方程、波形
- 时钟触发器
- 主从触发器
- 边沿触发器
- **JK, D, T触发器之间的转换**
- 触发器应用

作业:

5.7

5.9

5.10

5.14

5.17

5.18

5.21

作业题

维持阻塞D触发器接成如图所示电路， $\overline{R_d}$ 为异步复位端， CP 、 R_d 、 A 的波形图如图所示，写出状态方程，画出的 Q 的波形图，并指出电路构成何种触发器。

