

Part III 触发器与时序逻辑 *OK*

Lecture 08 触发器

触发器就是一种具有记忆功能的逻辑器件，
用来存储二进制信息。

触发器的结构特点：逻辑门加上适当的反馈
线耦合而成。

触发器的特点：

1) 有两个互补的输出端 Q 和 \bar{Q} 。

2) 有两个稳定状态：

“1” 状态： $Q=1$ 、 $\bar{Q}=0$

“0” 状态： $Q=0$ 、 $\bar{Q}=1$

3) 当输入信号不发生变化时，触发器状态稳定不变。

4) 在一定输入信号作用下，触发器可以从一

个稳定状态转移到另一个稳定状态。

现态与次态的概念： 输入信号作用前的状态称为**现态**，记作 Q^n 、 \bar{Q}^n ，一般简记为 Q 和 \bar{Q} ；输入信号作用后的状态称为**次态**，记作 Q^{n+1} 、 \bar{Q}^{n+1} 。

次态是现态和输入的函数，这一时刻的次态就是下一时刻的现态。

一、基本 R-S 触发器

基本 R-S 触发器是直接复位置位触发器的简称，是构成其他各种功能触发器的基本部件，故称为**基本 R-S 触发器**。

（一）用与非门构成的基本 R-S 触发器

1、电路结构

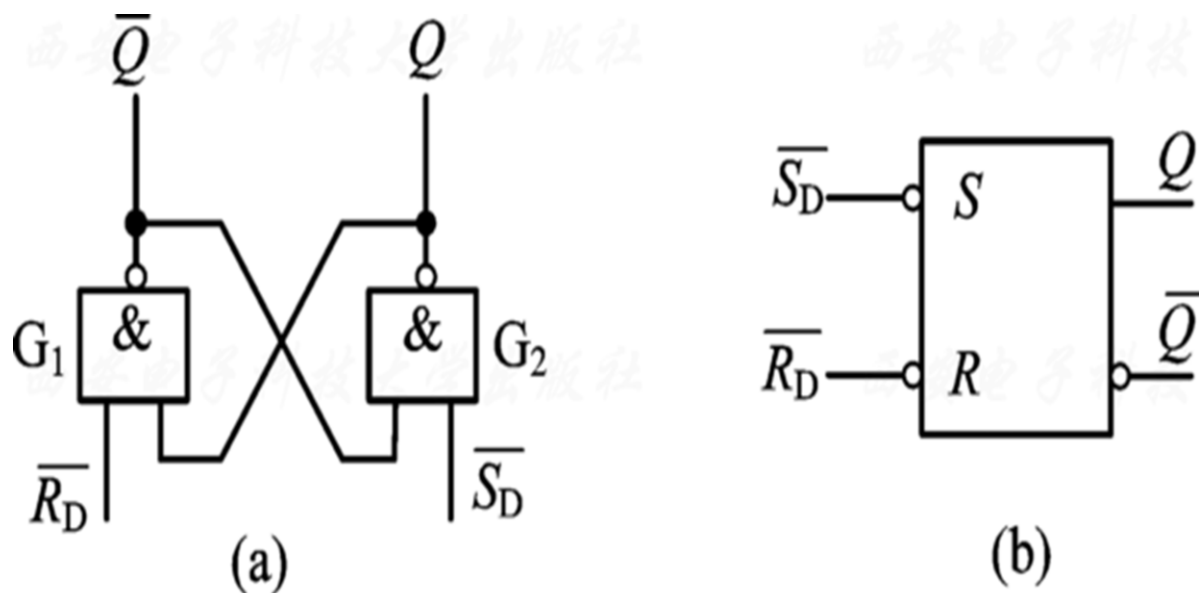
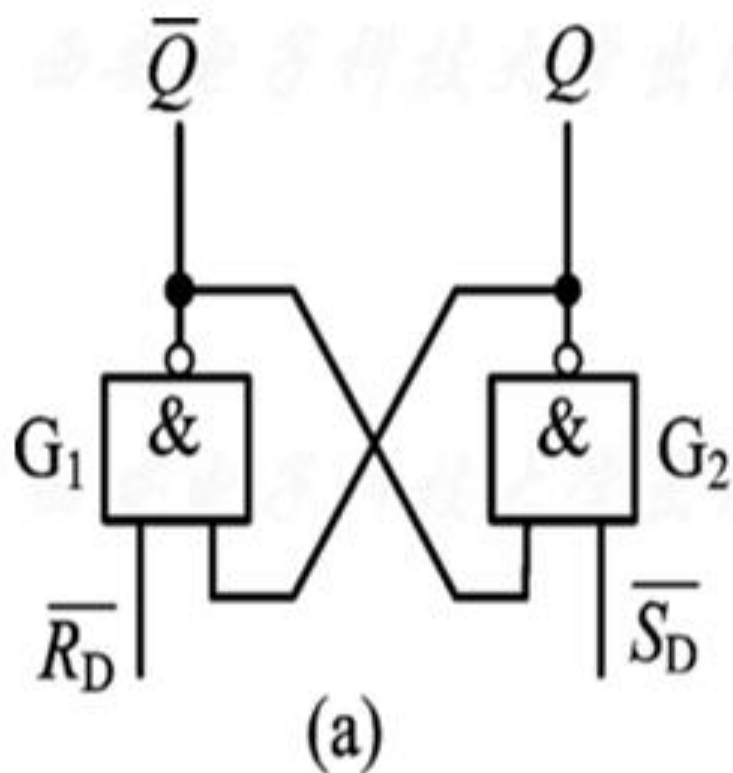


图5.2.1 与非门构成的基本R-S触发器

由两个与非门交叉耦合构成， \bar{R}_D 称为置0端或者复位端， \bar{S}_D 称为置1端或置位端；逻辑符号输入端加的小圆圈表示低电平或负脉冲有效。

2、工作原理



\bar{R}_D	\bar{S}_D	Q^{n+1}	\bar{Q}^{n+1}	描述
0	0	1	1	不确定
0	1	1	0	置“0”
1	0	0	1	置“1”
1	1	Q^n	\bar{Q}^n	保持

$\bar{R}_D = 0, \bar{S}_D = 0$ 时理论上会出现 $Q = 1$ 、 $\bar{Q} = 1$ 的情况，而实际中这种情况是不允许出现的，会导

致触发器出现**不确定状态**。

触发器的**不确定状态**有两层含义：第一， $Q=1$ 、 $\bar{Q}=1$ 触发器既不是 0 状态，也不是 1 状态；第二，当出现 \bar{R}_D 、 \bar{S}_D 同时从 0 变化到 1 的情况时，由于两个与非门的延迟时间不同，触发器的新状态不能预先确定。

因此，规定 \bar{R}_D 、 \bar{S}_D 不能同时为 0，用**约束条件**来表示： $\bar{R}_D + \bar{S}_D = 1$ 。

3、逻辑功能描述

描述触发器的逻辑功能的常用方法有：状态转移真值表、特征方程、状态转移图和状态激励表等。

(1) 状态转移真值表

状态转移真值表：反映次态和现态、输入之间关系的表格，简称**状态表**。

表5.2.1 基本R-S触发器的状态转移真值表

控制端		现态	次态	功能描述
\bar{R}_D	\bar{S}_D	Q^n	Q^{n+1}	
0	0	0	1	禁止
		1	1	
0	1	0	0	置 0
		1	0	
1	0	0	1	置 1
		1	1	
1	1	0	0	保持
		1	1	

表5.2.2 基本R-S触发器的简化真值表

\bar{R}_D	\bar{S}_D	Q^{n+1}
0	0	禁止
0	1	0
1	0	1
1	1	Q^n

若把次态 Q^{n+1} 表示成现态 Q 和输入 R 、 S 的函数，则卡诺图如下：

RS					
Q		00	01	11	10
	0	d	0	0	1
	1	d	0	1	1

由与非门构成的R-S触发器的次态卡诺图

(2) 特征方程

特征方程：也叫**状态方程**、**次态方程**，是次态和现态、输入之间的逻辑函数表达式。

用卡诺图化简后，可得到该触发器的**次态方**

程: $Q^{n+1} = \bar{S} + RQ$, 约束方程: $R + S = 1$ 。

(3) 状态图:

状态图: 是反映

次态和现态、输入之
间关系的有向图。习

惯上, 用**圆圈**表示状态 (包括现态和次态), 用**箭
线**表示状态之间的转换 (从现态到次态) 并在箭
线的两侧标明条件 (即输入)。状态图是分析和设

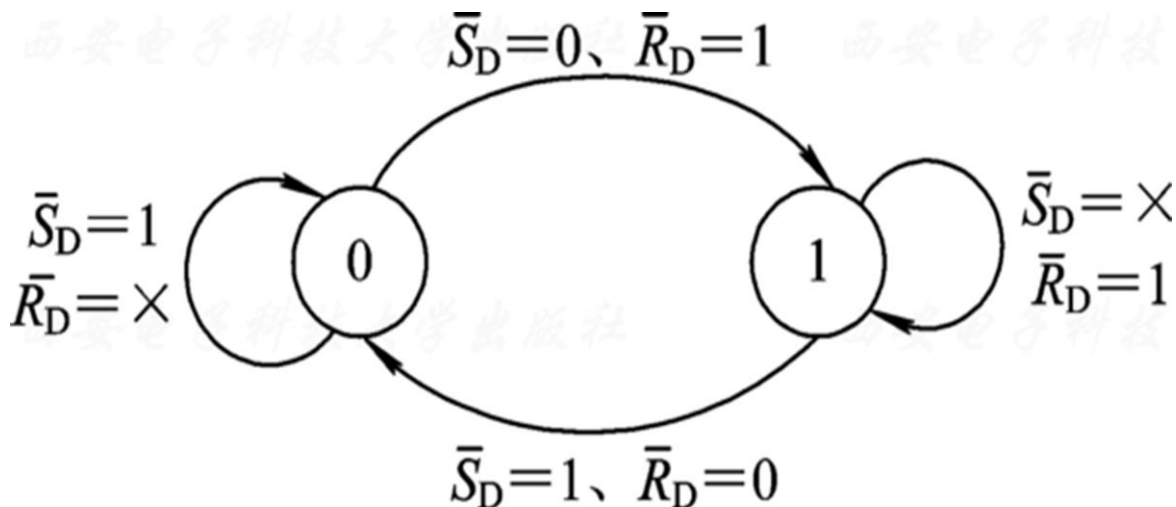


图5.2.4 基本R-S触发器的状态转移图

计时序电路的一个重要工具。

(4) 状态激励表

激励表： 反映输入和现态、次态之间关系的表格

表5.2.3 基本 R - S 触发器的激励表

状态转移		激励输入	
$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$		\bar{R}_D	\bar{S}_D
0	0	×	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	1	×

(二) 或非门构成的基本 R-S 触发器

由两个或非门交叉耦合组成，其逻辑图和逻辑符号分别如图 (a) 和图 (b) 所示：

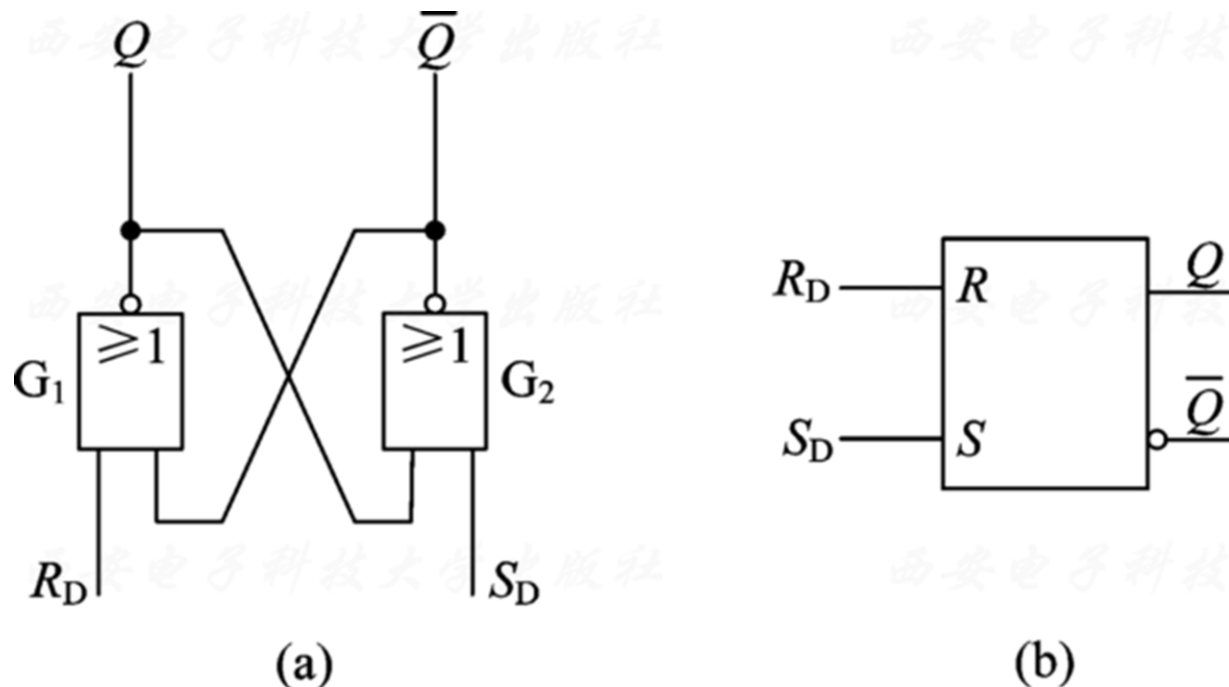
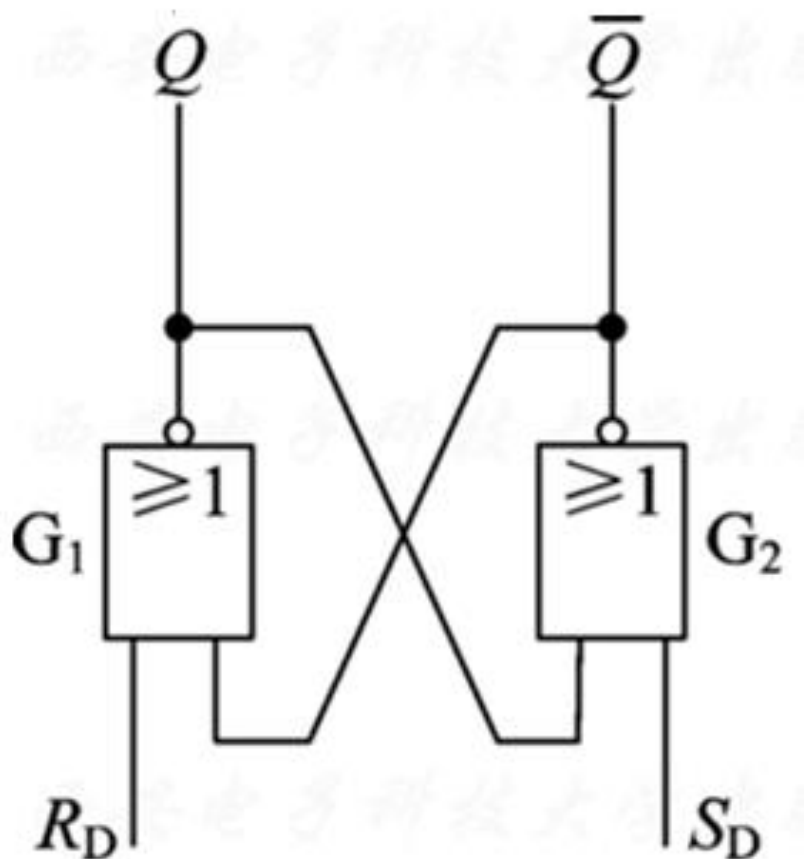


图5.2.5 由或非门构成的基本R-S触发器

(a) 电路图; (b) 逻辑符号



基本R-S触发器功能表

RS	Q^{n+1}	功能说明
0 0	Q	不变
0 1	1	置 1
1 0	0	置 0
1 1	d	不定

次态方程和约束方程如下：

$$Q^{n+1} = S + \bar{R}Q \quad (\text{次态方程})、\quad R \cdot S = 0 \quad (\text{约束方程})$$

二、常用触发器

(一) 钟控 R - S 触发器

1、电路结构

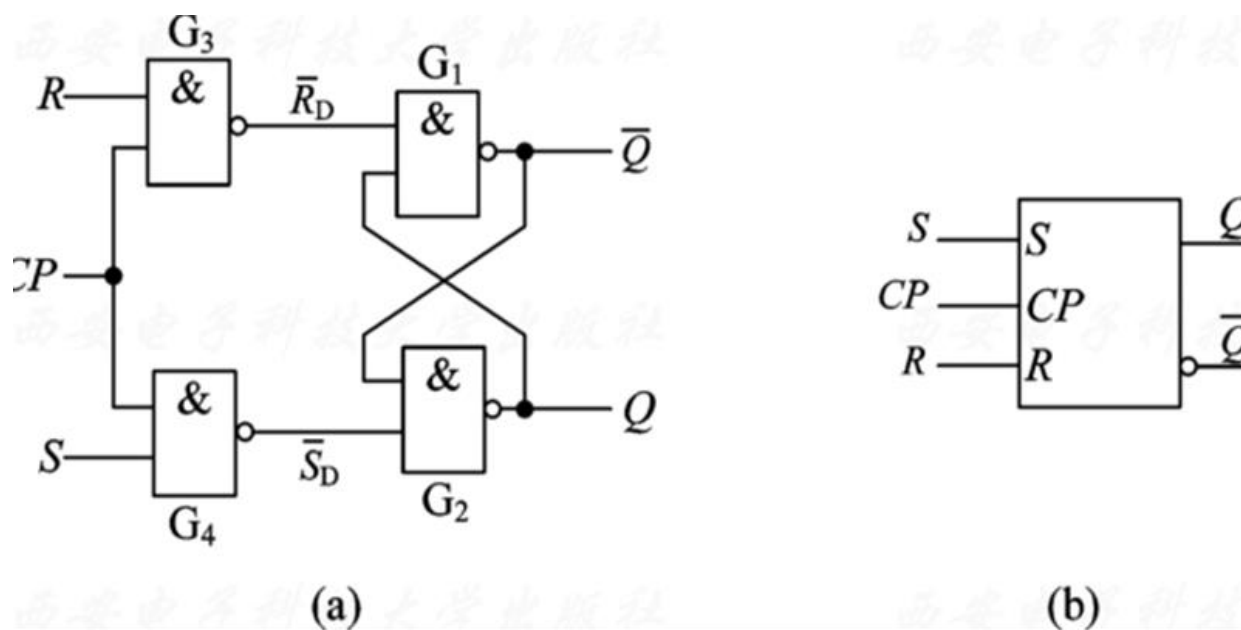
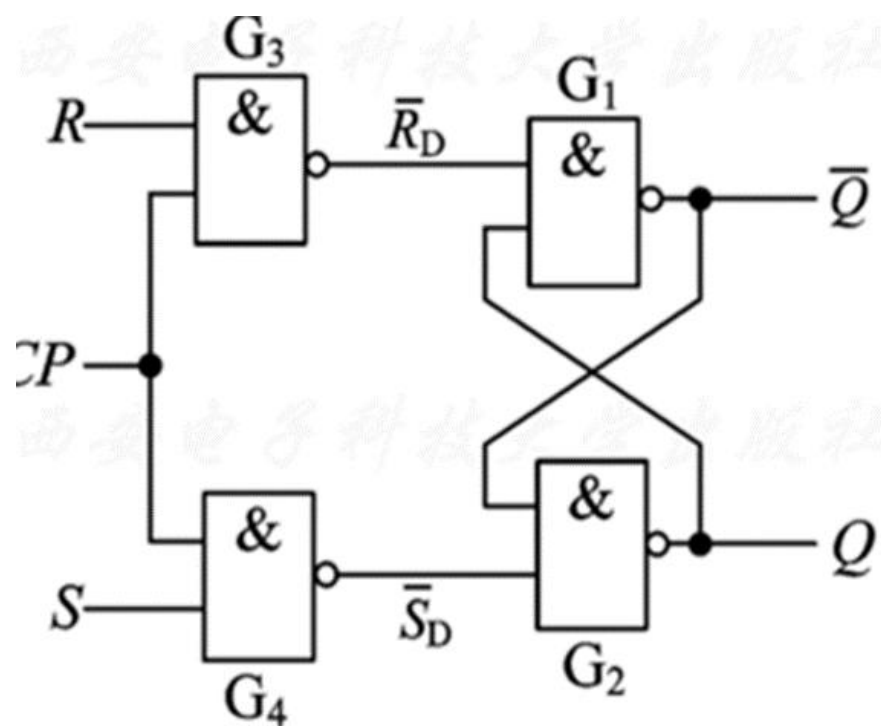


图 5.2.7 钟控 R - S 触发器

(a) 电路图; (b) 逻辑符号

2、工作原理



CP	R	S	\bar{R}_D	\bar{S}_D	Q^{n+1}	\bar{Q}^{n+1}
0	x	x	1	1	Q^n	\bar{Q}^n
1	0	0	1	1	Q^n	\bar{Q}^n
1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1
1	1	1	0	0	11 (不确定)	

3、功能描述

表5.2.4 钟控R-S触发器的状态转移真值表

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

表5.2.5 钟控R-S触发器的激励表

状态转移		激励输入	
$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$		S	R
0	0	0	×
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	×	0

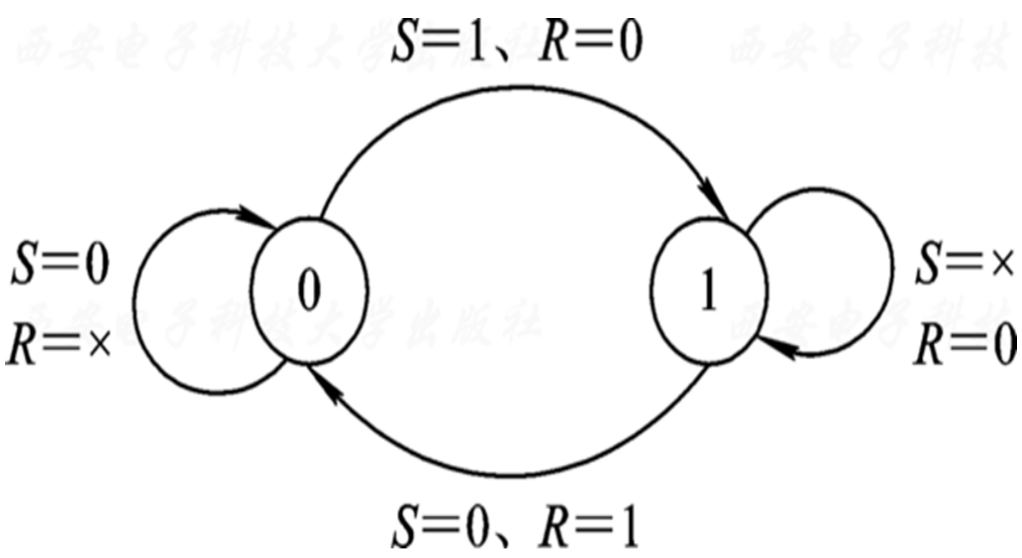


图5.2.8 钟控R-S触发器状态转移图

根据基本 R-S 触发器的状态方程,可以得到当 CP=1 时, 钟控 R-S 触发器的状态方程:

$$\begin{cases} Q^{n+1} = S + \bar{R}Q^n \\ SR = 0 \end{cases}$$

其中, $SR=0$ 为约束条件, 控制输入端 R、S 不能同时为 1。

根据钟控 R-S 的工作原理可画出其时序图, 如图 5.2.9 所示。

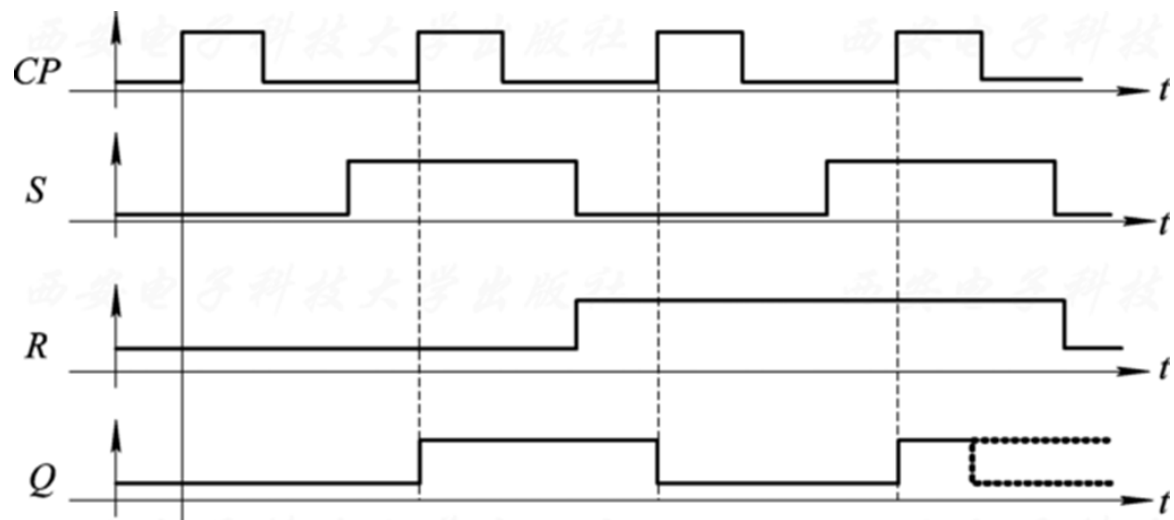


图5.2.9 钟控R-S触发器的时序图

钟控 R-S 触发器虽然解决了触发器**状态转换时刻的控制**，但是依旧存在**两个问题**：

①输入信号存在约束条件，即 R、S 不能同时为 1；

②在时钟 $CP=1$ 期间，R、S 信号依然直接控制着触发器的状态变化，从而使得一个时钟脉冲有效期间会引起状态的多次翻转。

这种翻转现象又称为“**空翻**”，空翻可能是由于输入信号的变化或受干扰造成的，会造成系统状态的不确定性。

克服空翻现象的最简单的方法就是控制时钟脉冲的宽度。

(二) 钟控 D 触发器

1、电路结构

将钟控 R-S 触发器的输入端按照图 5.2.11 (a) 所示连接就成了

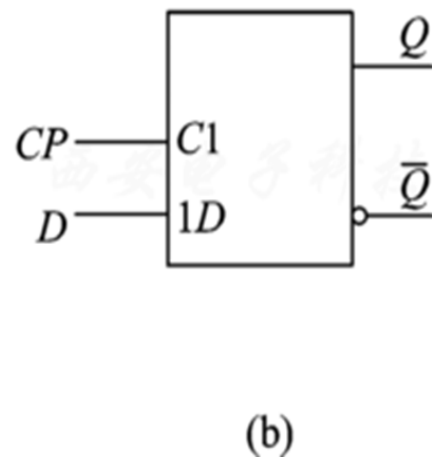
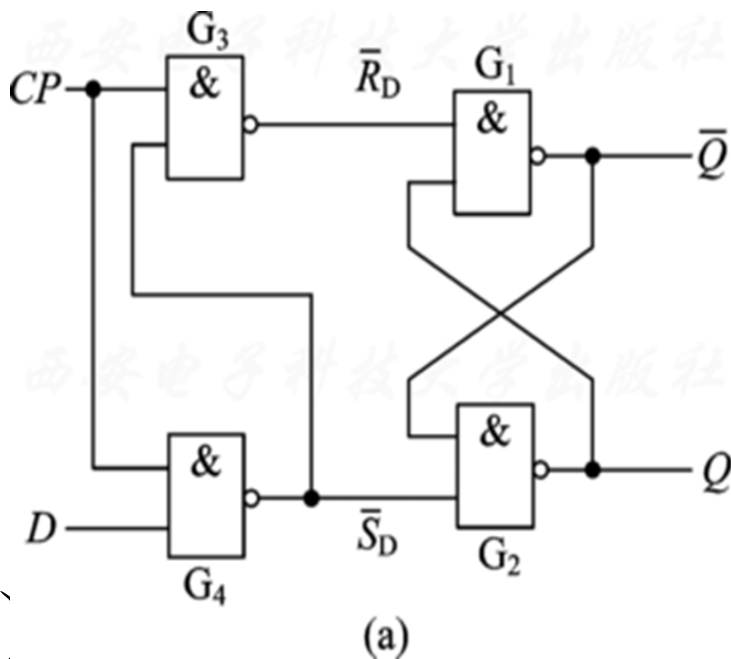


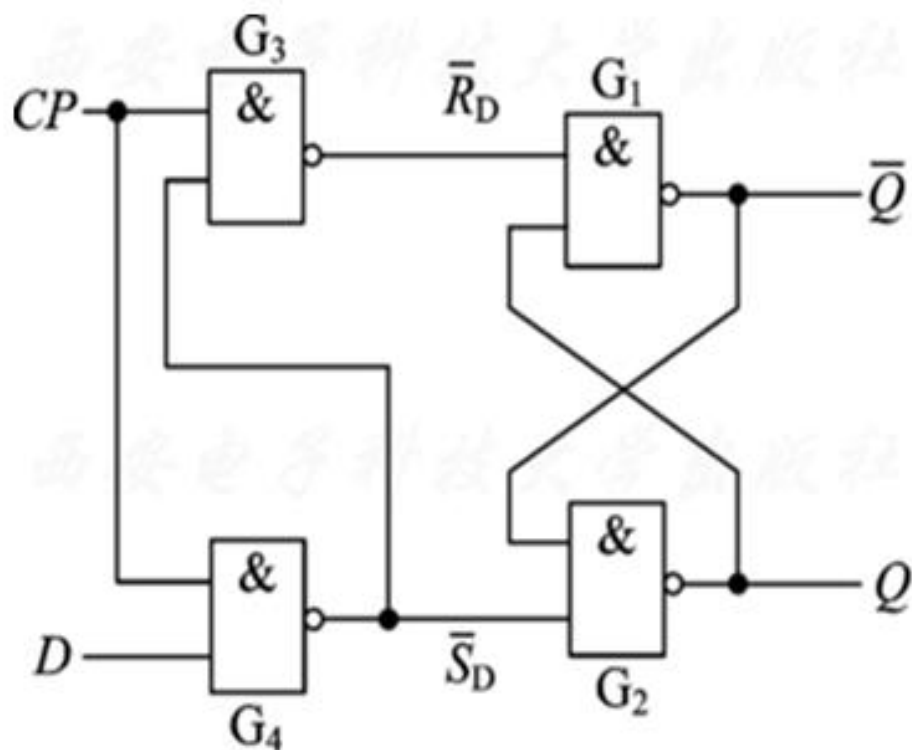
图5.2.11 钟控D触发器

(a) 电路图; (b) 逻辑符号

钟控 D 触发器。这样，电路的控制输入端只有 D，从而保证了后端的基本 R-S 触发器的两个输入

\bar{R}_D 、 \bar{S}_D 始终保持相反的状态，从而解决了电路的输入约束问题。

2、工作原理



CP	D	\bar{R}_D	\bar{S}_D	Q^{n+1}	\bar{Q}^{n+1}
0	x	1	1	Q^n	\bar{Q}^n
1	0	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0

3、功能描述

状态方程： $Q^{n+1}=D$ ，无约束条件。

表5.2.6 D 触发器的状态转移真值表

D	Q^{n+1}
0	0
1	1

表5.2.7 D 触发器的激励表

$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$		D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

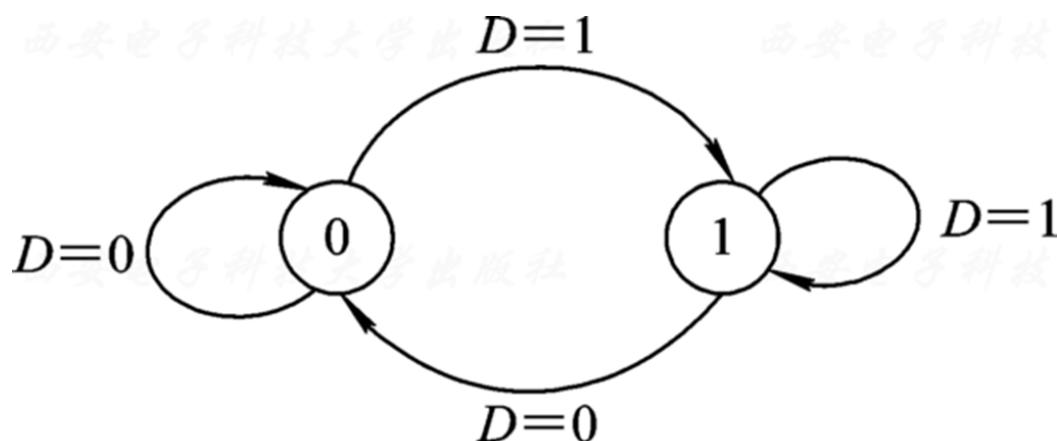


图5.2.12 钟控 D 触发器的状态转移图

(三) 边沿 D 触发器

上述 D 触发器在时钟信号 CP 作用期间仍然存在“空翻”现象，因此要求 D 在时钟信号有效期间（如高电平）不能发生变化。

为了解决“空翻”问题，在工程中往往采用**维持阻塞触发器**，这种触发器仅在时钟信号的上升沿或下降沿接受输入控制，实现状态转换。

1、电路结构

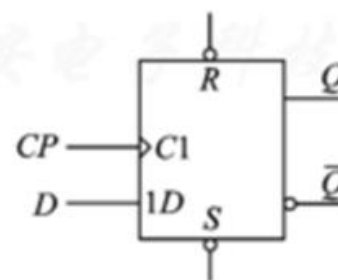
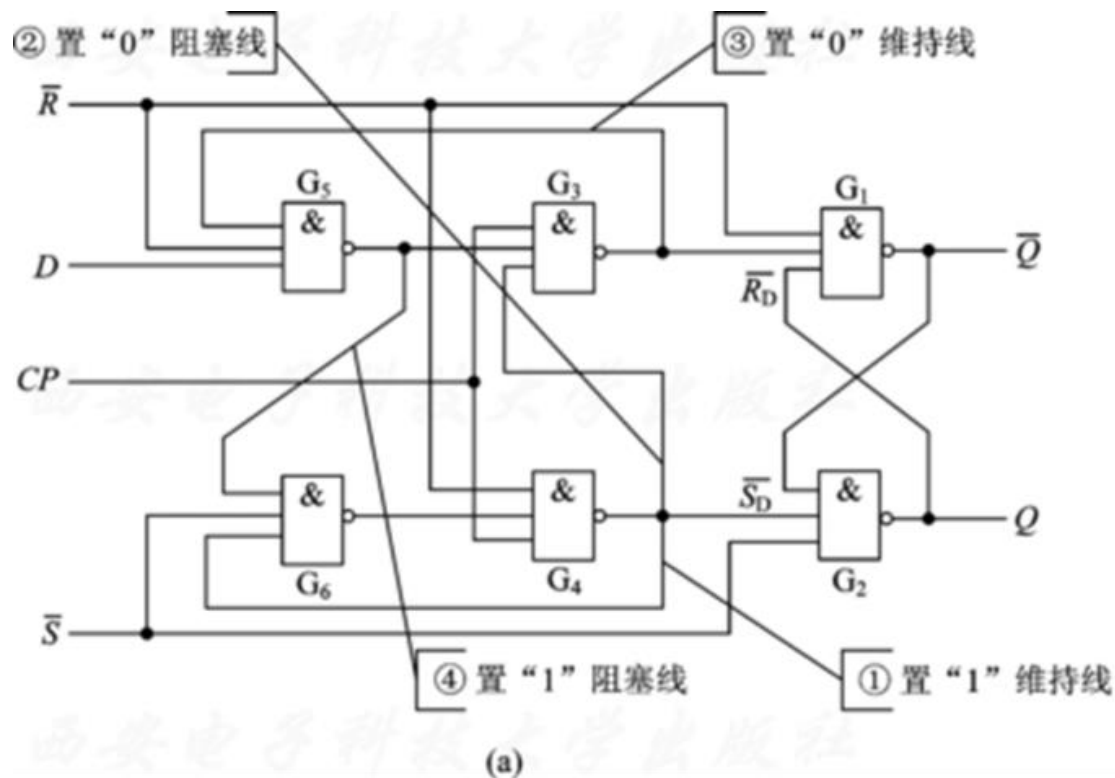


图5.2.13 维持阻塞D触发器

(a) 电路图; (b) 逻辑符号

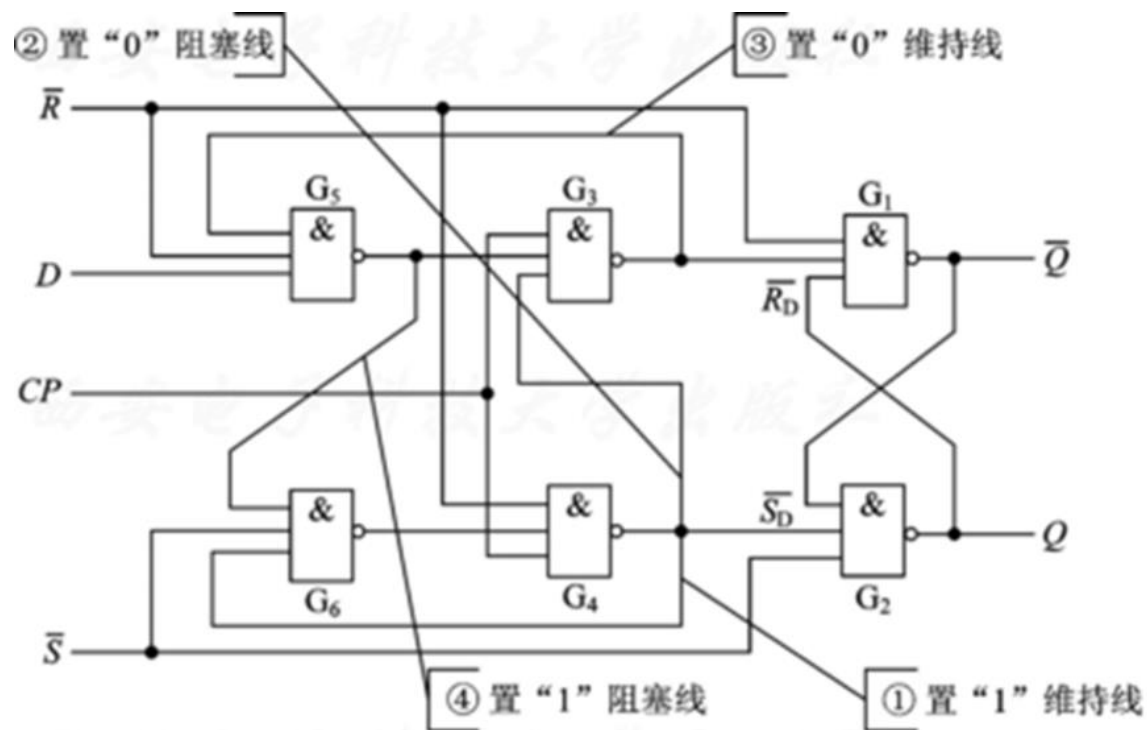
典型的时
钟信号 CP
上升沿触
发的维持
阻塞 D 触
发器的逻

辑电路图和逻辑符号如图 5.2.13 (a)、(b) 所示。

图 5.2.13(a) 中的 \bar{R} 、 \bar{S} 分别称为**异步复位(置 0)端**和**异步置位(置 1)端**，均为低电平有效。所谓“**异步**”，是指该信号对电路的作用与时钟信号无关。

图 5.2.13(b) 中，**CP** 端带有小三角符号，表示上升沿触发。

2、工作原理



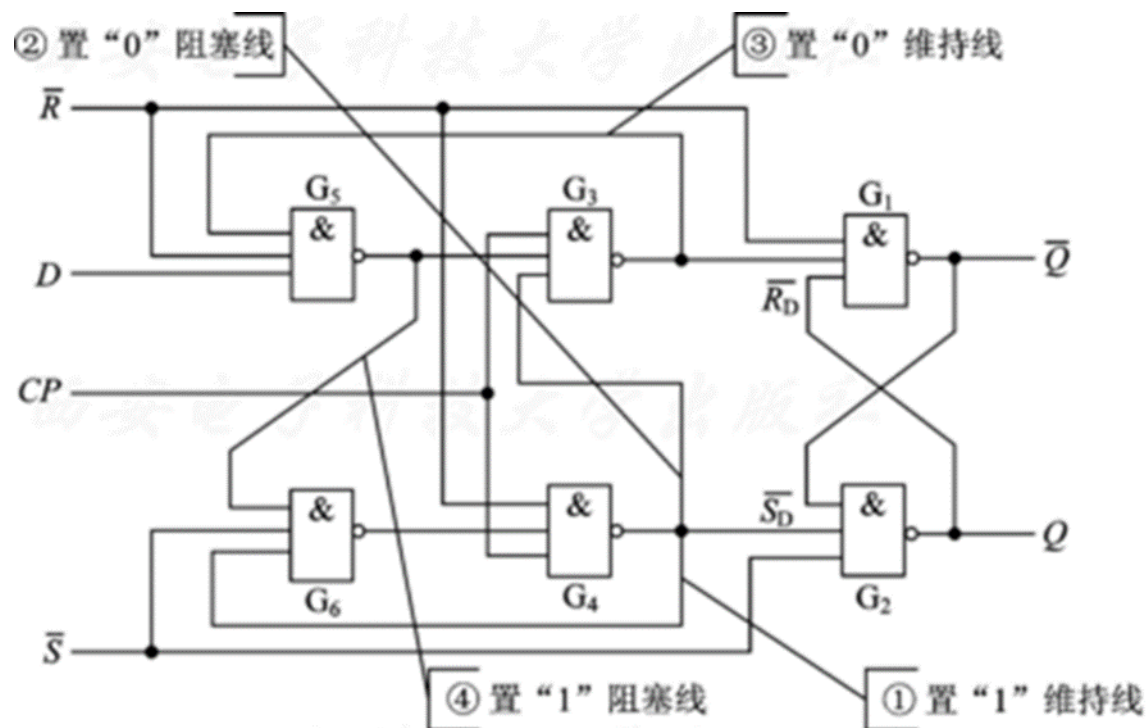
当 $\bar{R}=0$ 、 $\bar{S}=1$ 时，
 $G_5=1$ 、 $G_4=1$ ，使 $\bar{S}_D=1$ ，
 保证触发器可靠置 0。

当 $\bar{R}=1$ 、 $\bar{S}=0$ 时，

$G_6=1$ ：在 $CP=1$ 期间，

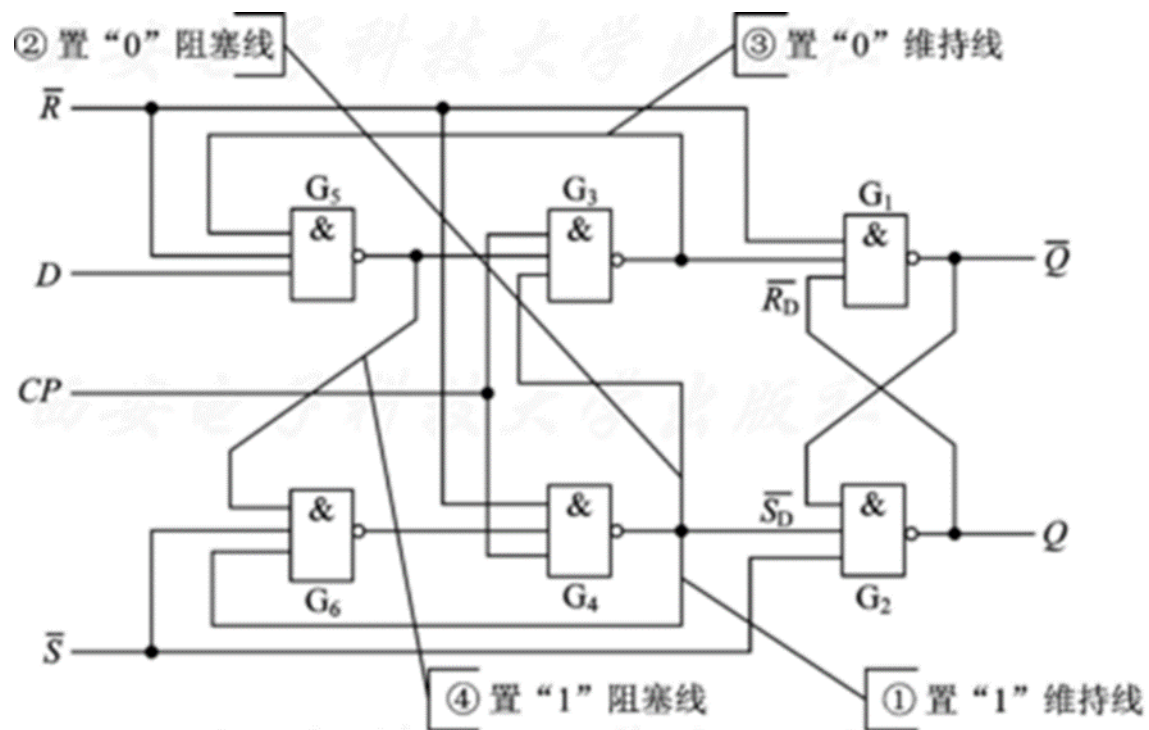
$G_4=0$ 、 $G_3=1$ ，即使 $\bar{R}_D=1$ 、 $\bar{S}_D=0$ ，触发器可靠置 1；

在 $CP=0$ 期间， $G_3=1$ 、 $G_4=1$ ，也使触发器可靠置 1。



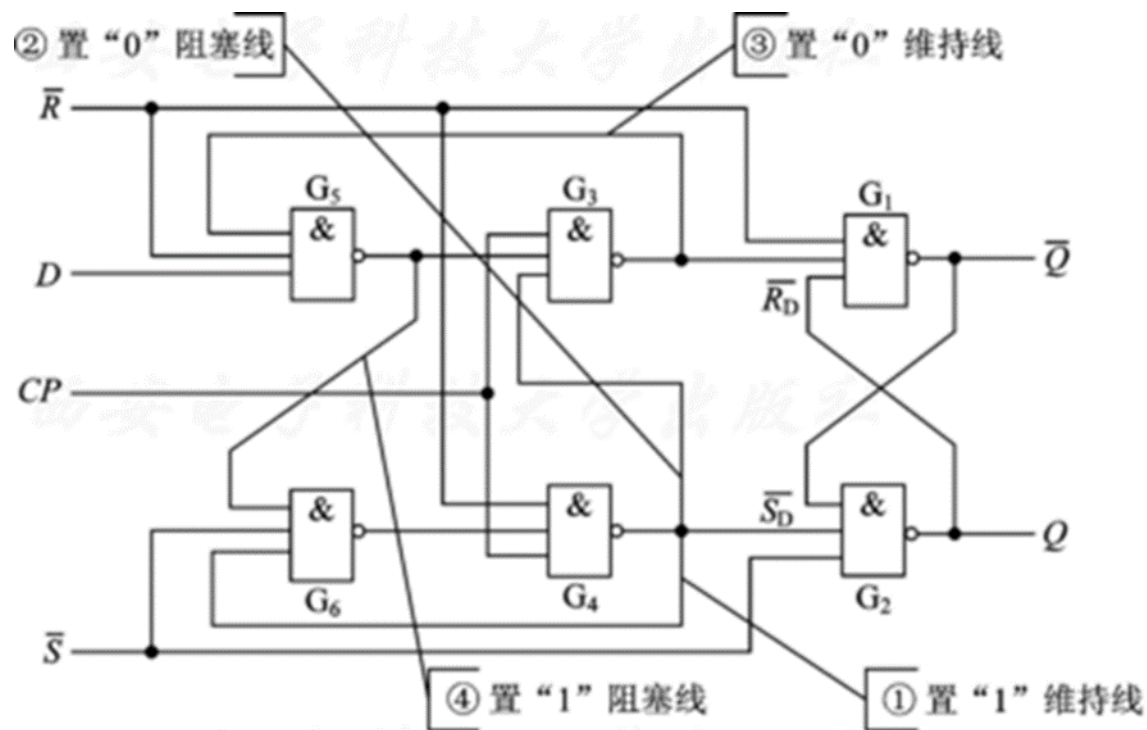
当 $\bar{R}=1$ 、 $\bar{S}=1$ 时，
触发器的状态变化受
时钟信号 CP 控制。

在 $CP=0$ 期间，
 G_3 、 G_4 门被封锁，其
输出都为 1，使基本触发器 G_1 、 G_2 保持原状态不
变。这时， G_5 、 G_6 门跟随输入值 D 变化， $G_5 = \bar{D}$ 、
 $G_6 = D$ 。



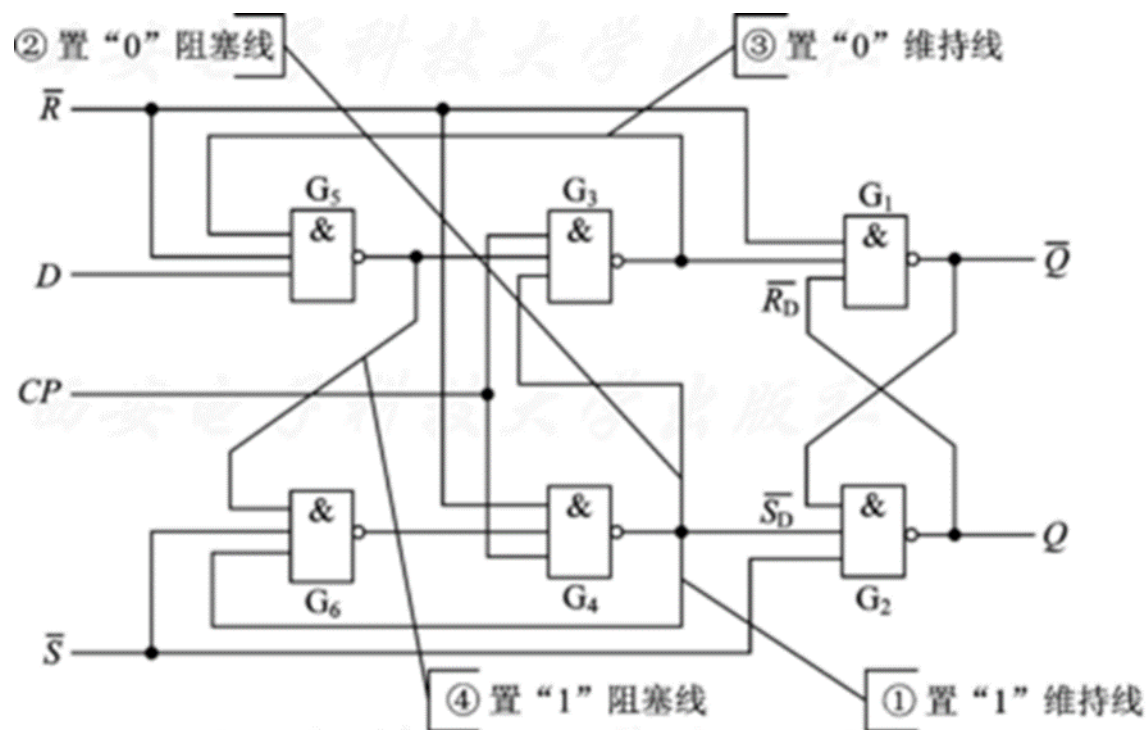
当 CP 正边沿到来时, G_3 、 G_4 门打开, 接收 G_5 门和 G_6 门的输出信号, 使 G_3 门和 G_4 门的输出分别为

$$G_3 = D, \quad G_4 = \bar{D}。$$



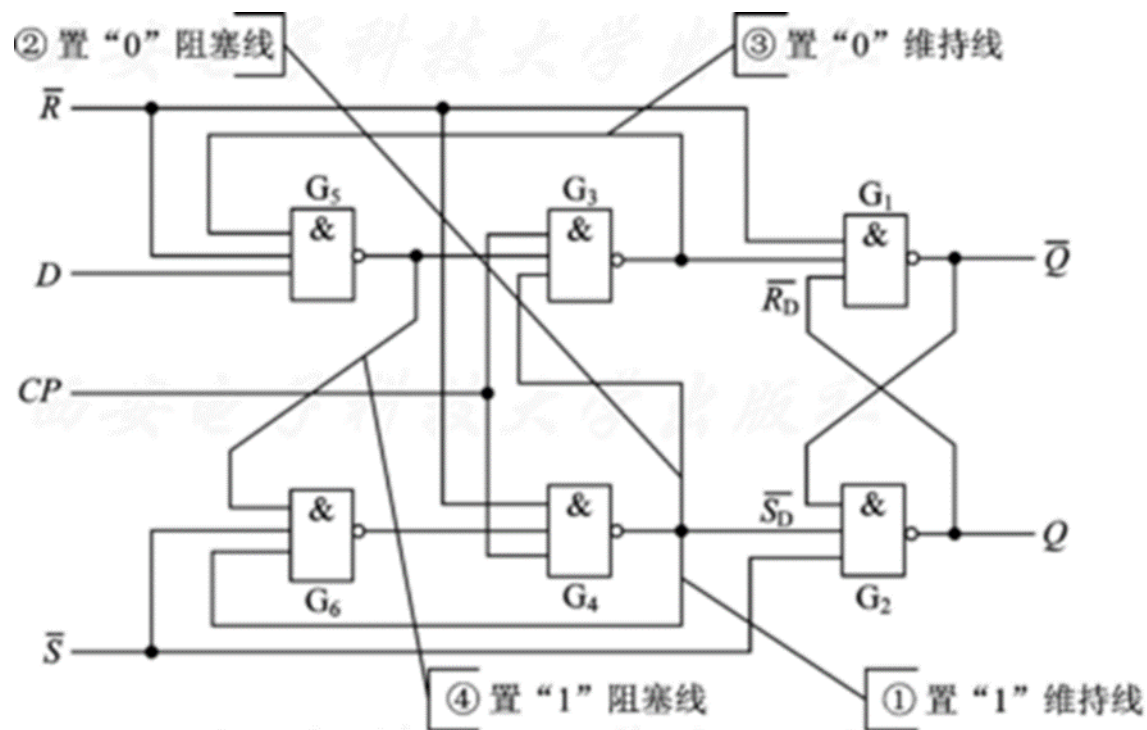
①若 $D=0$ ，使 $G_3=0$ ，则 $\bar{R}_D=0$ ，一方面使触发器状态置“0”，另一方面，这个“0”又经过置“0”

维持线反馈至 G_5 的输入端，这样就封锁了 G_5 ，使 G_5 输出保持为 1，从而克服了空翻，使触发器状态在 CP 高电平期间维持“0”不变。



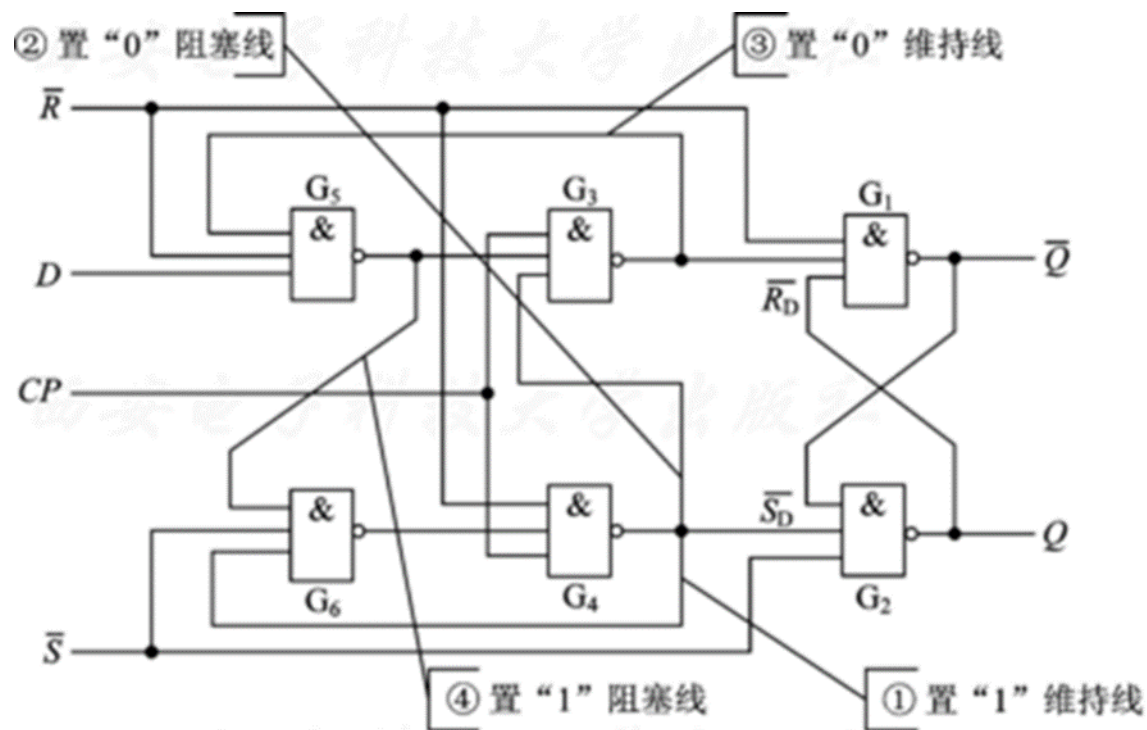
在 $CP=1$ 期间， G_5 输出的“1”还通过置“1”阻塞线反馈至 G_6 的输入端，使 G_6 输出为 0，从而可

靠地保证 G_4 输出为“1”，阻止触发器状态向“1”翻转。



②若 $D=1$, 使 $G_4=0$, 则 $\bar{S}_D=0$, 这不仅使触发器状态置“1”, 而且这个“1”又经过置“1”维持线

反馈至 G_6 的输入端, 这样又使 G_4 的输出为 0, 从而使触发器状态维持“1”不变。



在 $CP=1$ 期间， G_4 输出的“0”通过置“0”阻塞线反馈至 G_3 的输入端，从而可靠地保证 G_3 输出为

“1”，阻止触发器状态向“0”翻转。

结论：维持阻塞 D 触发器在 CP 上升沿到达前，建立输入信号 D，在 CP 上升沿到达时，接收输入改变触发器的状态；CP 上升沿过后，D 信号不起作用，即使 D 发生改变，触发器状态也不变，而保持上升沿到达时的 D 信号状态。

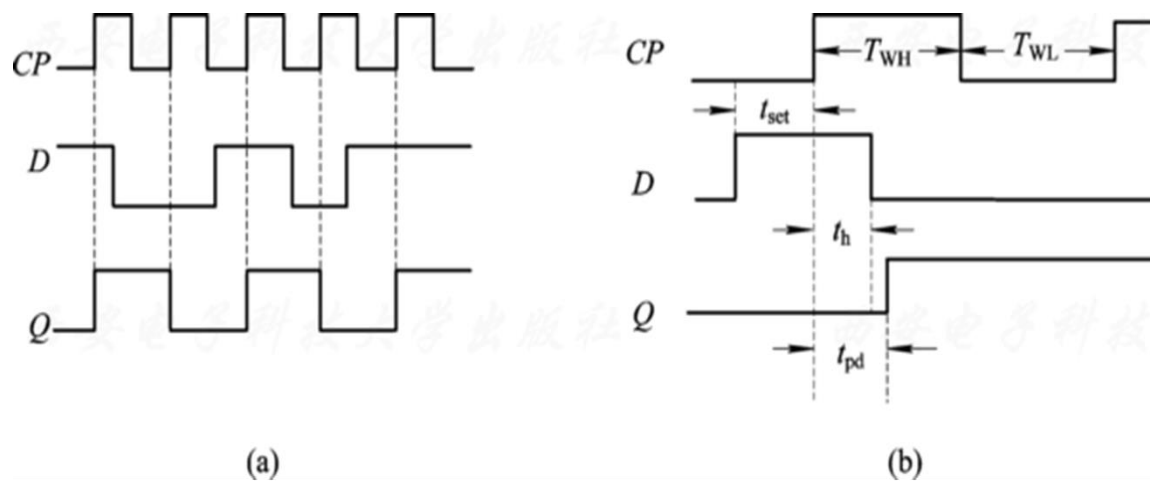


图5.2.14 维持阻塞D触发器的时序图和脉冲特性

(a) 时序图； (b) 脉冲特性

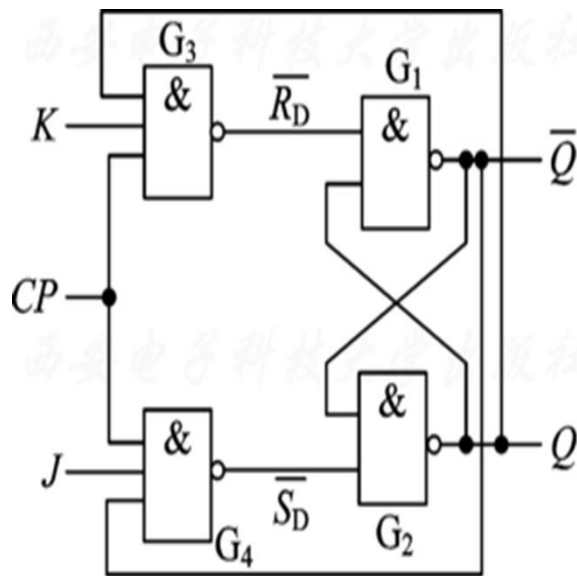
因此，**维持阻塞 D 触发器是正边沿触发器。**

(四) 钟控 $J-K$ 触发器

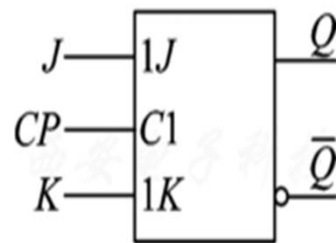
1、电路结构

钟控 $J-K$ 触发器的电路和逻辑符号如图 5.2.18 (a)、(b) 所示。

由图可见， G_1 和 G_2 构成基本触发器， G_3 和 G_4 构成控制电路。



(a)

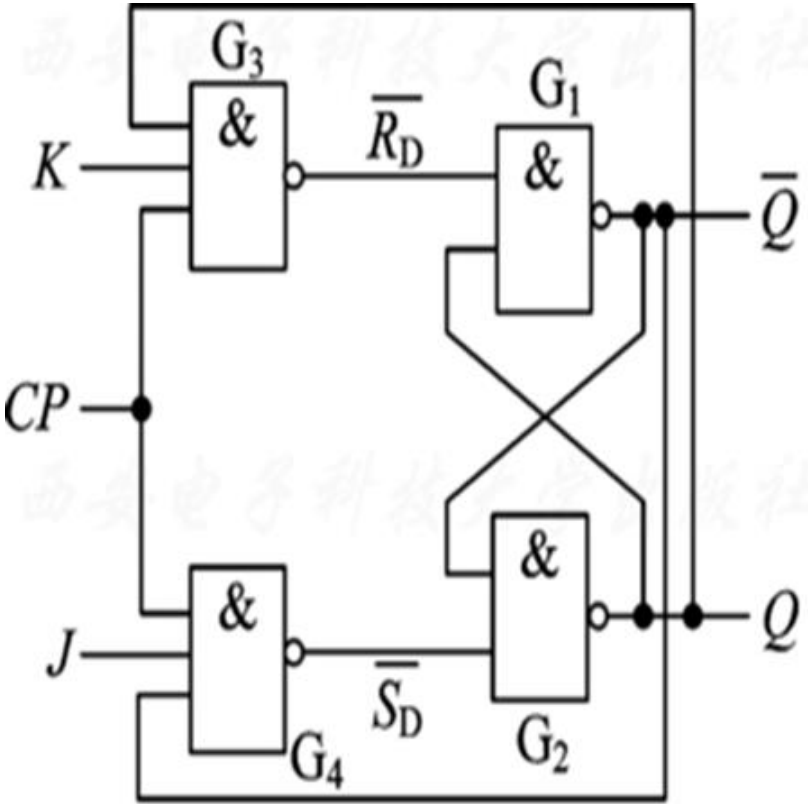


(b)

图5.2.18 钟控 $J-K$ 触发器

(a) 电路图; (b) 逻辑符号

2、工作原理



CP	J	K	$\overline{R_D}$	$\overline{S_D}$	Q^n	Q^{n+1}	\overline{Q}^{n+1}	描述
0	x	x	1	1	x	Q^n	\overline{Q}^n	保持
1	0	0	1	1	x	Q^n	\overline{Q}^n	保持
1	0	1	1	1	0	0	1	置“0”
1	0	1	0	1	1	0	1	
1	1	0	1	0	0	1	0	置“1”
1	1	0	1	1	1	1	0	
1	1	1	1	0	0	1	0	翻转
1	1	1	0	1	1	0	1	

3、功能描述

表5.2.8 J-K触发器的状态转移真值表

J	K	Q^{n+1}	功能
0	0	Q^n	保持
0	1	0	置 0
1	0	1	置 1
1	1	\bar{Q}^n	翻转

表5.2.9 J-K触发器的激励表

$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$		J	K
0	0	0	×
0	1	1	×
1	0	×	1
1	1	×	0

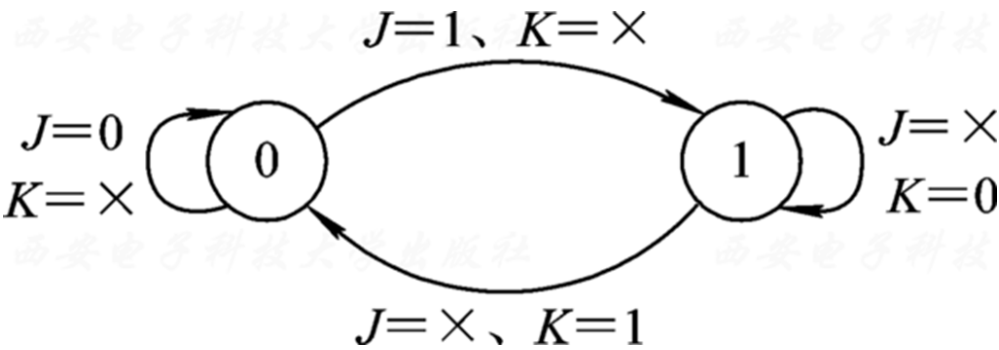


图5.2.19 钟控J-K触发器的状态转移图

状态方程: $Q^{n+1} = S_D + \bar{R}_D Q^n = J\bar{Q}^n + \overline{KQ^n}Q^n$

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

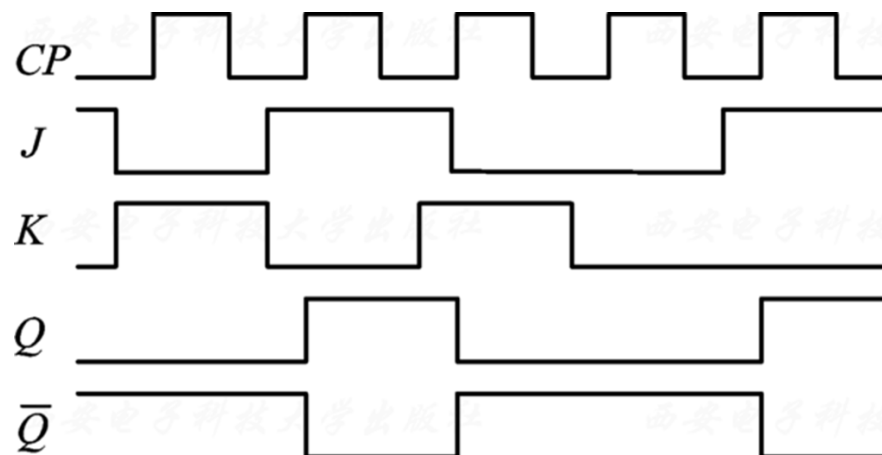


图5.2.20 钟控J-K触发器的时序波形图

（五）主从 J-K 触发器

钟控 J-K 触发器的输入信号没有约束条件的限制，而且可以在 J、K 信号的控制下实现保持、置 1、置 0 和翻转的功能，相比 D 触发器功能较强，但同样存在“空翻”问题。

为了解决这个问题，一种方法是采用主从结构，这样的触发器又称为主从 J-K 触发器。

1、电路结构

主从 J-K
触发器逻辑
电路图和逻辑
符号如图
5.2.21 所示。

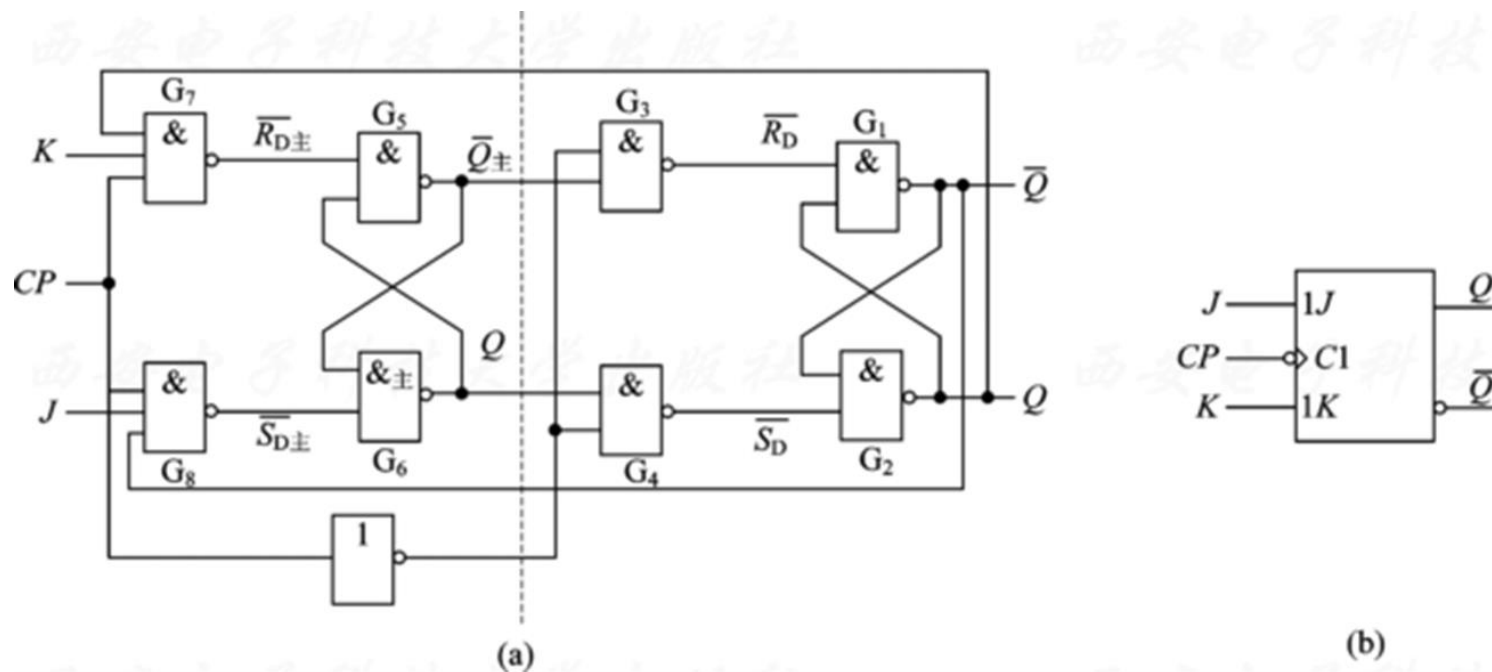


图5.2.21 主从J-K触发器
(a) 电路图； (b) 逻辑符号

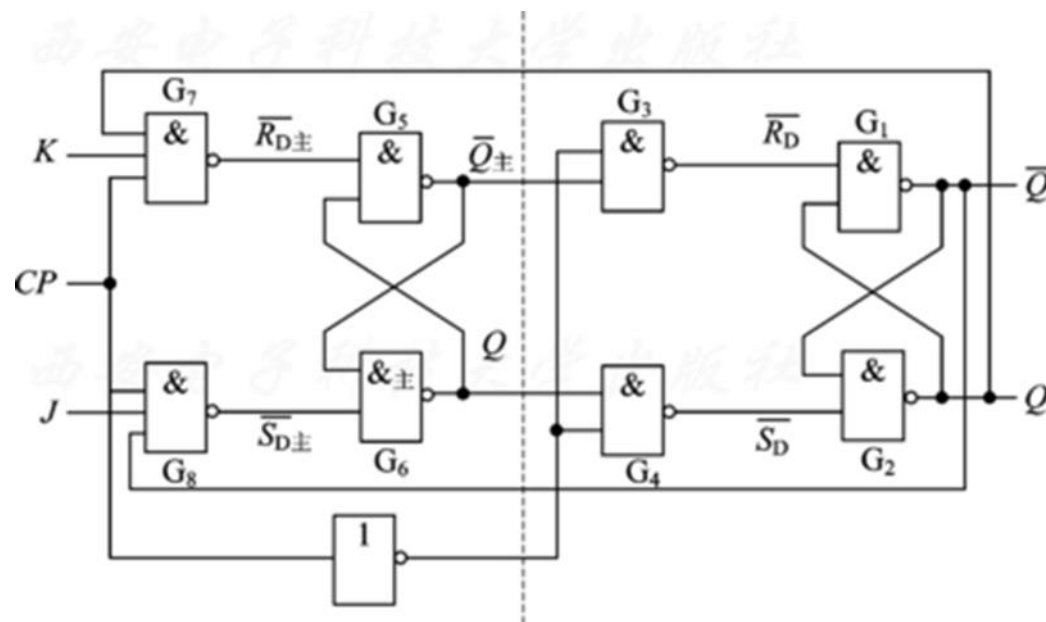
主、从触发器的时钟信号是反相的。逻辑符号中时钟端的小圆圈和三角表示触发器的状态改变是在时钟信号的下降沿。

2、工作原理

在 CP 为上升沿和高电平期间，主触发器接收

输入信号的控制，并将

状态存储在主触发器中，此时从触发器保持不变。



当 **CP** 下降沿到来时，主触发器状态传送到从触发器，使从触发器状态跟随主触发器变化，而此时主触发器本身不受输入的控制，保持状态不变。在 **CP** 为低电平期间，由于主触发器的状态不变，因此从触发器的状态也保持不变。

可见，由于整个触发器状态的改变是由 **CP** 下降沿时刻主触发器的状态决定的，因而克服了“空翻”现象。

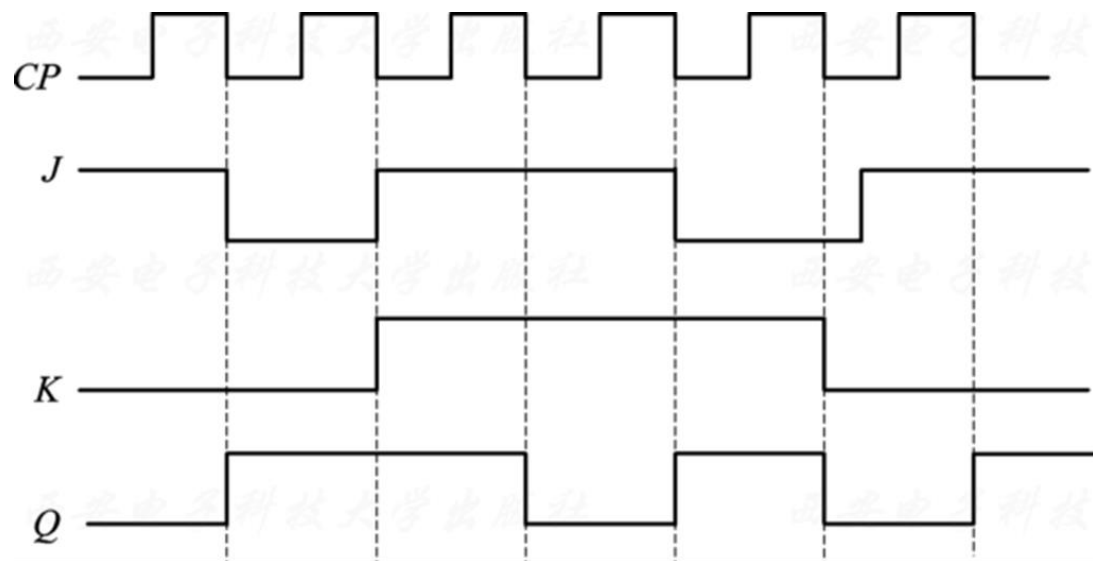


图5.2.22 主从 J - K 触发器的时序波形图

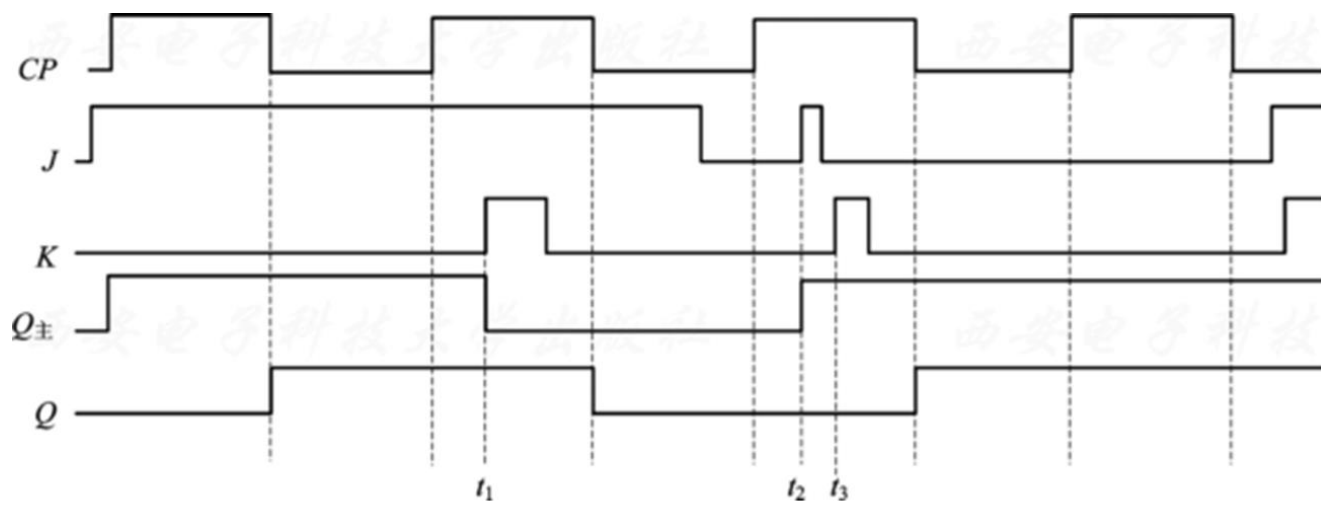


图5.2.23 主从 J - K 触发器的时序波形图

在应用主从 J-K 触发器中要注意“一次翻转”现象。所谓“一次翻转”，是指在 $CP=1$ 期间，主触发器的状态一旦发生一次状态改变后，就被“锁死”，保持不变，不会再受输入激励信号 J、K 的控制。

(六) 钟控 T 触发器

1、电路结构

把 J - K 触发器的两个输入端 J 、 K 连接起来并命名为 T ，就得到了钟控 T 触发器。

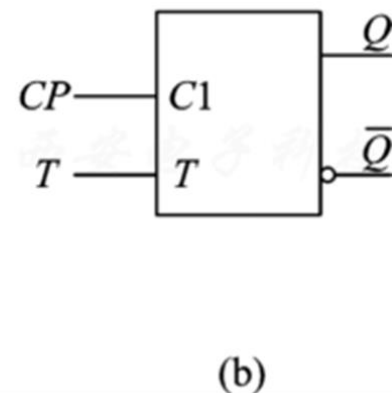
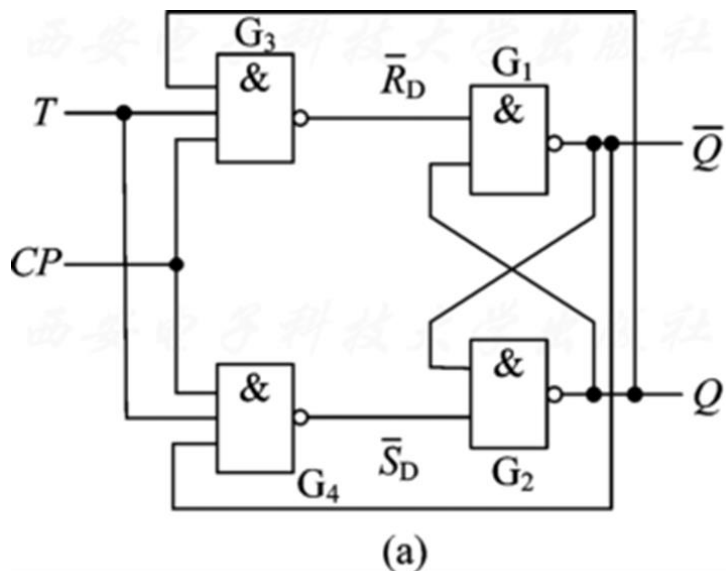


图5.2.25 T 触发器

(a) 电路图; (b) 逻辑符号

2、工作原理

参考钟控 J-K 触发器，从略！

3、功能描述

状态方程： $Q^{n+1} = T\bar{Q}^n + \bar{T}Q^n = T \oplus Q^n$

表5.2.10 T 触发器的状态转移真值表

T	Q^{n+1}	功能
0	Q^n	保持
1	\bar{Q}^n	翻转

表5.2.11 T 触发器的激励表

$Q^n \rightarrow Q^{n+1}$		T
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

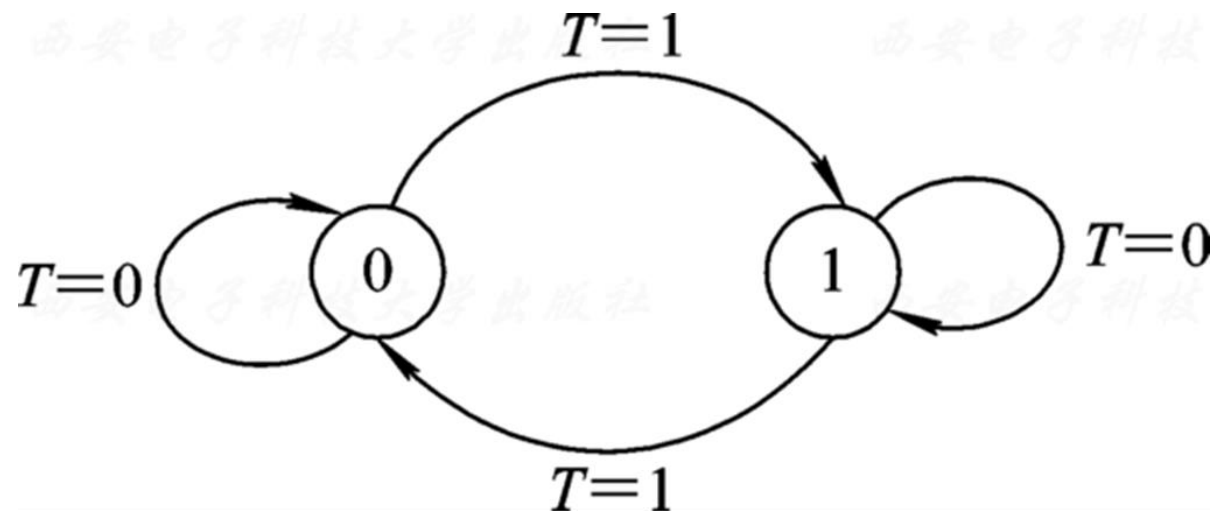


图5.2.26 T 触发器的状态转移图

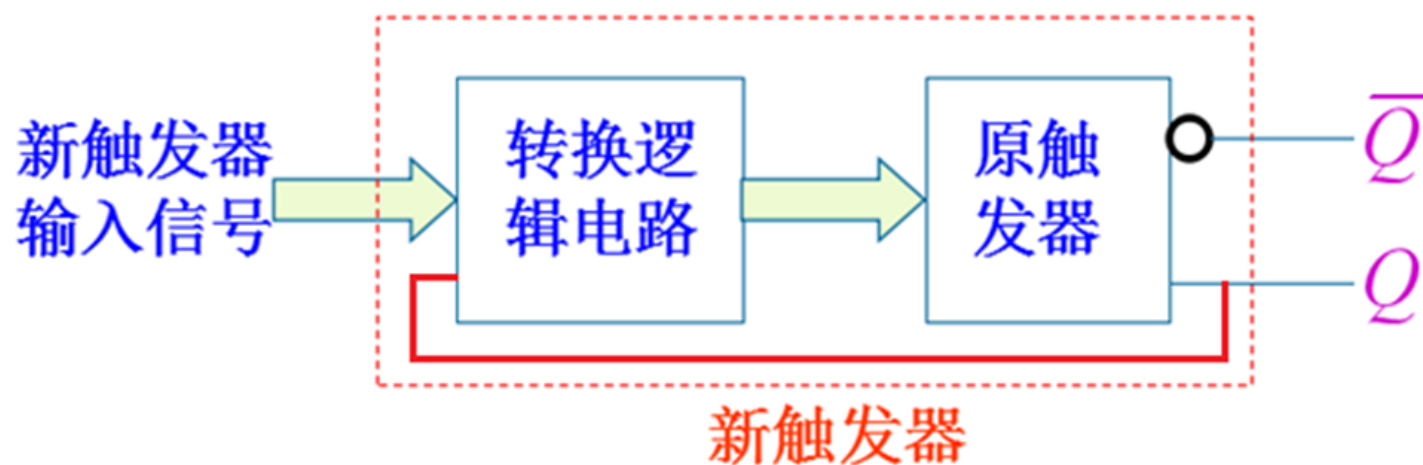
三、不同类型时钟控制触发器的相互转换

上面介绍了四种不同类型的时钟控制触发器：**R-S** 触发器、**J-K** 触发器、**T** 触发器和 **D** 触发器，这些触发器之间可以进行逻辑功能的转换。

实际中最常用的现成产品是 **J-K** 触发器和 **D** 触发器，我们主要讨论如何把这两种触发器转换成其他类型的触发器。

(一) 转换方法

一般来说，在原触发器的输入端加上一定的**转换逻辑**电路，就可以构成具有新的逻辑功能的触发器。所以，转换的关键是设法求出转换逻辑电路。



触发器转换示意图

由于触发器的逻辑功能有多种描述方法，所以，触发器之间的转换就有各种不同的方法，如直接观察分析法、次态方程联立法、功能表与激励表联立法等。

所谓**次态方程联立法**，是将原触发器和新触发器的次态方程联系起来，找出原输入信号与新输入信号及现态之间的函数关系。

（二）J-K 触发器转换成 D、T、R-S 触发器

1、J-K 触发器转换成 D 触发器

要确定的函数关系是：

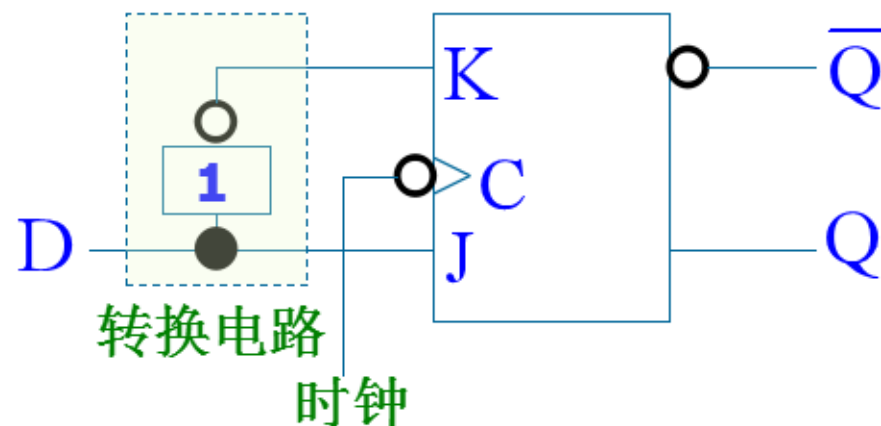
$$J = f_1(D, Q), \quad K = f_2(D, Q)$$

J-K 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = J\bar{Q} + \bar{K}Q$

D 触发器的次态方程：

$$Q^{n+1} = D = D\bar{Q} + DQ$$

比较得： $J = D, K = \bar{D}$



2、J-K 触发器转换成 T 触发器

要确定的函数关系是：

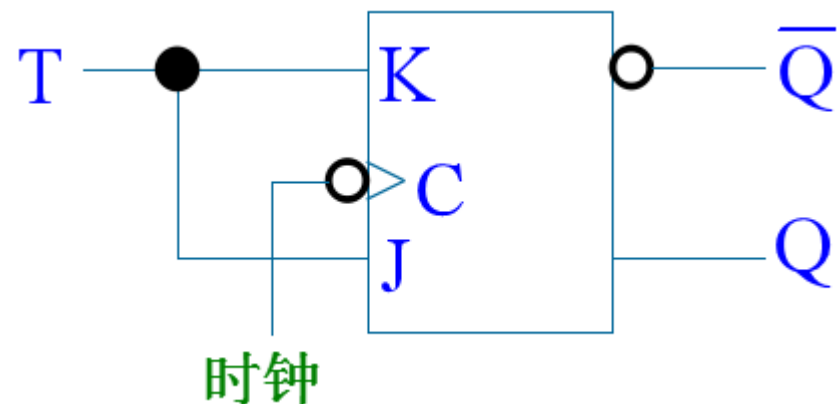
$$J = f_1(T, Q), \quad K = f_2(T, Q)$$

J-K 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = J\bar{Q} + \bar{K}Q$

T 触发器的次态方程：

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

比较得： $J = T, K = T$



3、J-K 触发器转换成 R-S 触发器

要确定的函数关系是：

$$J = f_1(R, S, Q), \quad K = f_2(R, S, Q)$$

J-K 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = J\bar{Q} + \bar{K}Q$

R-S 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = S + \bar{R}Q$

$$\begin{aligned} Q^{n+1} &= S + \bar{R}Q = S(\bar{Q} + Q) + \bar{R}Q \\ &= S\bar{Q} + SQ + \bar{R}Q \end{aligned}$$

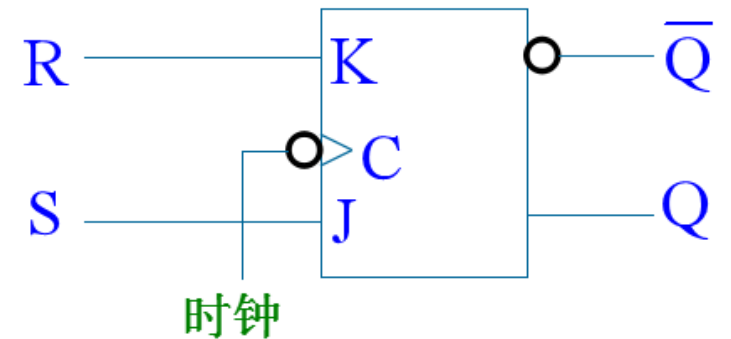
$$= S\bar{Q} + SQ + \bar{R}Q$$

$$= S\bar{Q} + (\bar{R} + R)SQ + \bar{R}Q$$

$$= S\bar{Q} + \bar{R}SQ + RSQ + \bar{R}Q$$

$$= S\bar{Q} + \bar{R}SQ + \bar{R}Q = S\bar{Q} + \bar{R}Q \text{ (约束 } RS = 0 \text{)}$$

比较得： $J = S, K = R$



(三) D 触发器转换成 J-K、T、R-S 触发器

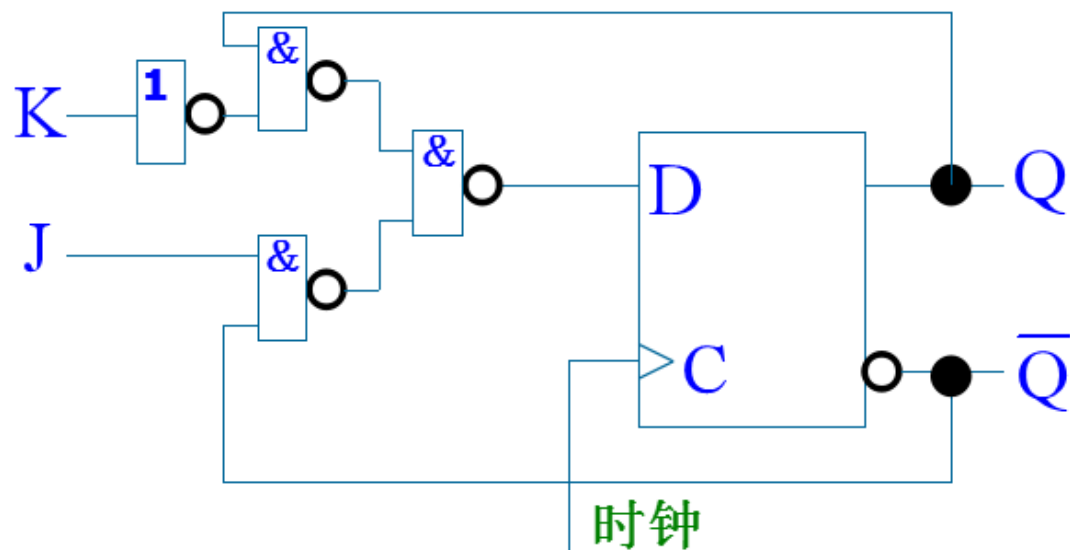
1、D 触发器转换成 J-K 触发器

要确定的函数关系： $D = f(J, K, Q)$

D 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = D$

J-K 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = J\bar{Q} + \bar{K}Q$

比较得： $D = J\bar{Q} + \bar{K}Q$



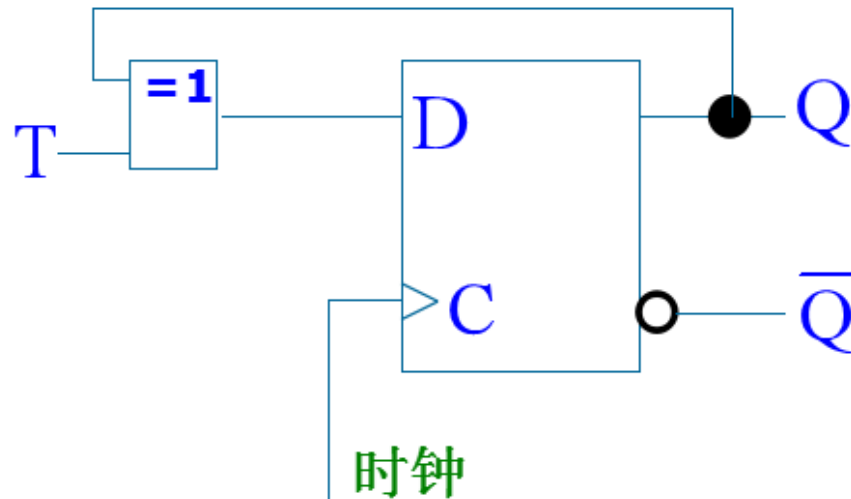
2、D 触发器转换成 T 触发器

要确定的函数关系： $D = f(T, Q)$

D 触发器的次态方程： $Q^{n+1} = D$

T 触发器的次态方程: $Q^{n+1} = T\bar{Q} + \bar{T}Q$

比较得: $D = T\bar{Q} + \bar{T}Q = T \oplus Q$



3、D 触发器转换成 R-S 触发器

要确定的函数关系: $D = f(R, S, Q)$

D 触发器的次态方程: $Q^{n+1} = D$

R-S 触发器的次态方程: $Q^{n+1} = S + \bar{R}Q$

比较得: $D = S + \bar{R}Q = \overline{\bar{S}(R + \bar{Q})}$

注意: 转换后的新触发器, 其触发方式与原触发器相同。

