

# 数字集成电路基础

## ——时序逻辑电路

张悦

微电子学院

费尔北京研究院 / 自旋电子交叉学科中心

2020-11-10

## 6.3 时序电路设计方法

### 6.3.1 同步时序电路设计

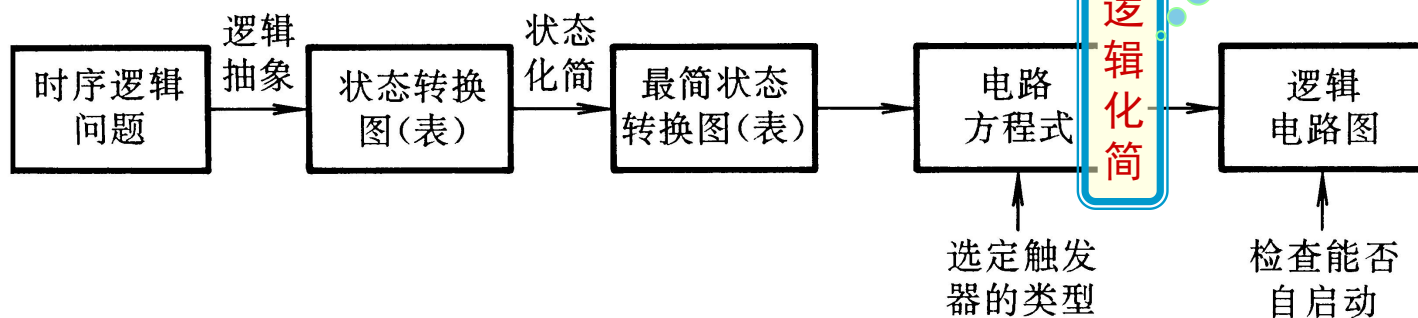
### 6.3.2 异步时序电路设计

## 6.3.1 同步时序电路设计方法

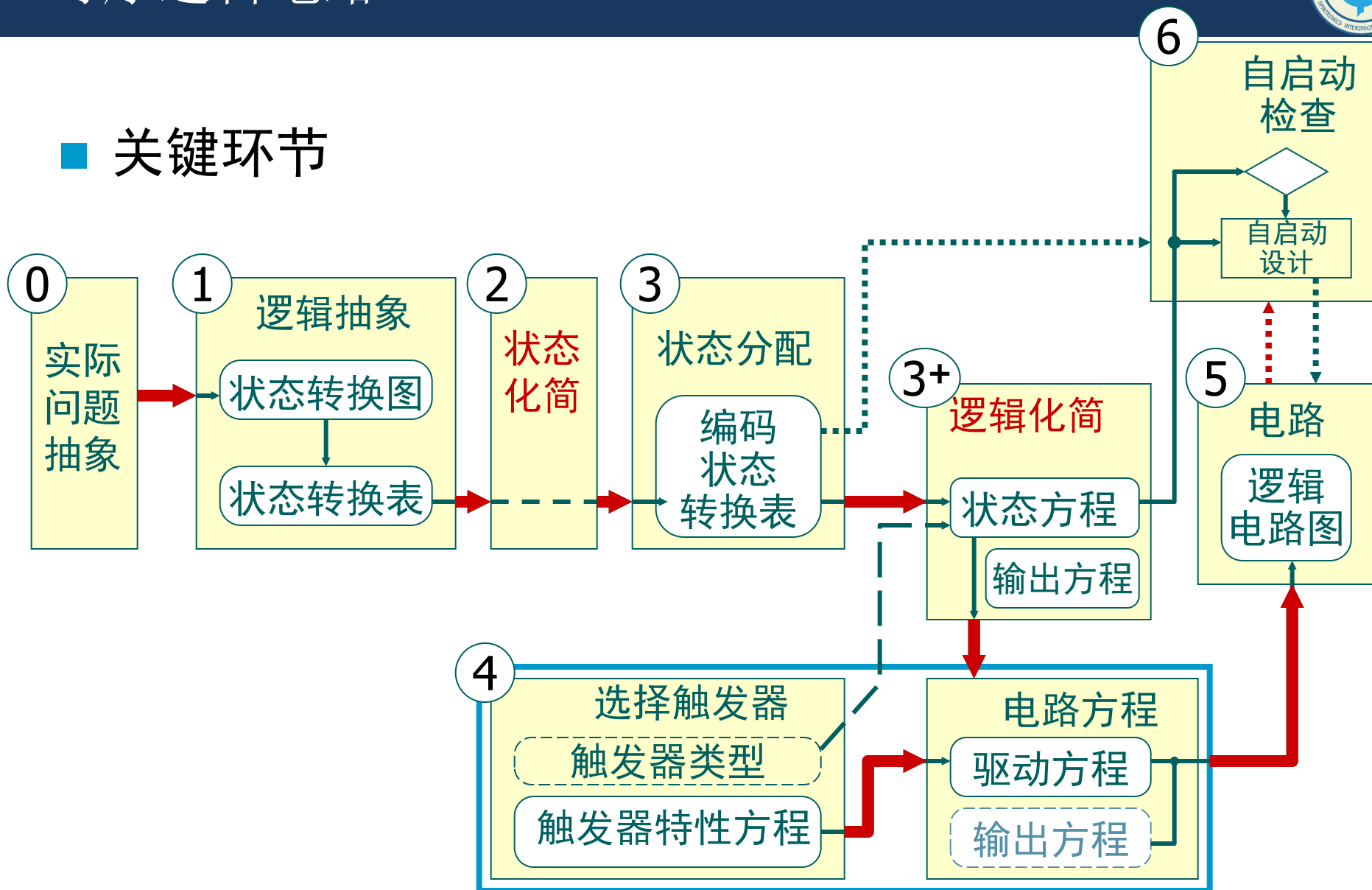
### 设计步骤：

1. 逻辑抽象：根据逻辑问题设定状态，导出对应的状态转换图或状态转换表；
  2. \* **状态化简**；
  3. 状态分配，又称状态编码；
  4. 选择触发器的类型；
- 根据编码状态转换表和触发器特性方程，导出输出方程和驱动方程；
5. 根据输出方程和驱动方程画出逻辑电路图；
  6. 检查电路能否自启动。

3+. 根据触发器类型对  
状态方程进行**逻辑化简**

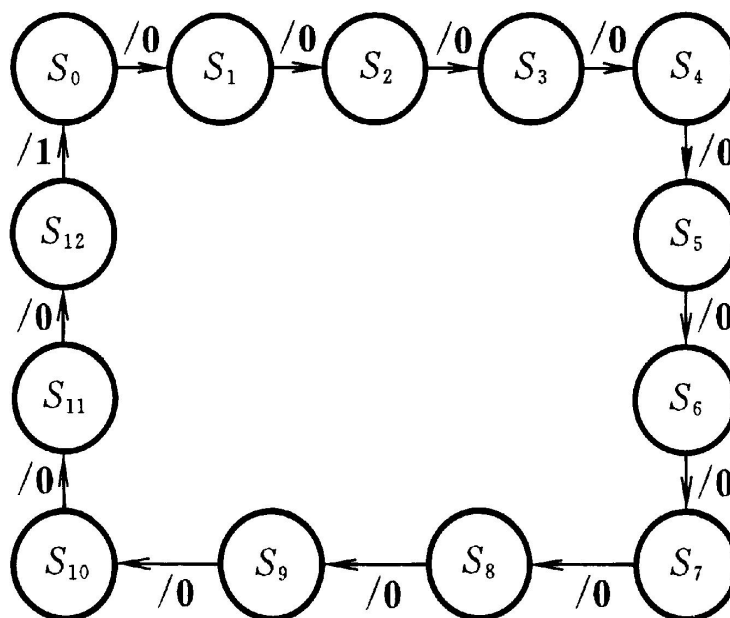


## ■ 关键环节



例4：设计一个同步13进制加法计数器  
解：

1. 设定状态，画出状态转换图



例4:

## 2. 状态化简:

❖ 13个状态已经是最简;

## 3. 状态分配:

❖ 列出状态转换表;

❖ 注意: 这种电路状态转换表的形式: (给出下一个时钟信号作用下一系列电路状态转换的顺序。)

状态 顺序	状态编码				进位输出 $C$
	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	
$S_0$	0	0	0	0	0
$S_1$	0	0	0	1	0
$S_2$	0	0	1	0	0
$S_3$	0	0	1	1	0
$S_4$	0	1	0	0	0
$S_5$	0	1	0	1	0
$S_6$	0	1	1	0	0
$S_7$	0	1	1	1	0
$S_8$	1	0	0	0	0
$S_9$	1	0	0	1	0
$S_{10}$	1	0	1	0	0
$S_{11}$	1	0	1	1	0
$S_{12}$	1	1	0	0	1
$S_0$	0	0	0	0	0

# 时序逻辑电路

例4: **3+**. 对于原状态和输入, 列出次状态和输出的卡诺图

说明: 卡诺图  $\leftrightarrow$  真值表  $\leftrightarrow$  状态转换表

$Q_1Q_0$					
$Q_3Q_2$		00	01	11	10
	00	0001/0	0010/0	0100/0	0011/0
	01	0101/0	0110/0	1000/0	0111/0
	11	0000/1	xxxx/x	xxxx/x	xxxx/x
	10	1001/0	1010/0	1100/0	1011/0

$Q_1Q_0$					
$Q_3Q_2$		00	01	11	10
	00	0	0	0	0
	01	0	0	0	0
	11	1	X	X	X
	10	0	0	0	0

$C$

$Q_1Q_0$					
$Q_3Q_2$		00	01	11	10
	00	0	0	0	0
	01	0	0	1	0
	11	0	X	X	X
	10	1	1	1	1

$Q_3^{n+1}$

$Q_1Q_0$					
$Q_3Q_2$		00	01	11	10
	00	0	0	1	0
	01	1	1	0	1
	11	0	X	X	X
	10	0	0	1	0

$Q_2^{n+1}$

$Q_1Q_0$					
$Q_3Q_2$		00	01	11	10
	00	0	1	0	1
	01	0	1	0	1
	11	0	X	X	X
	10	0	1	0	1

$Q_1^{n+1}$

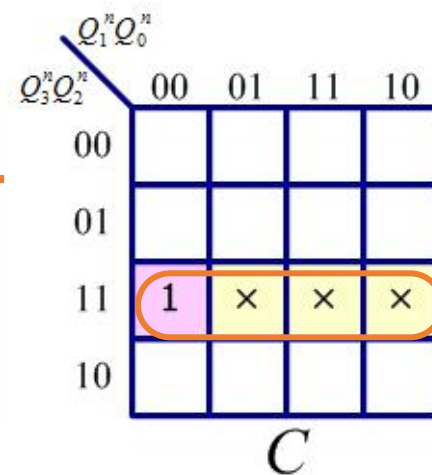
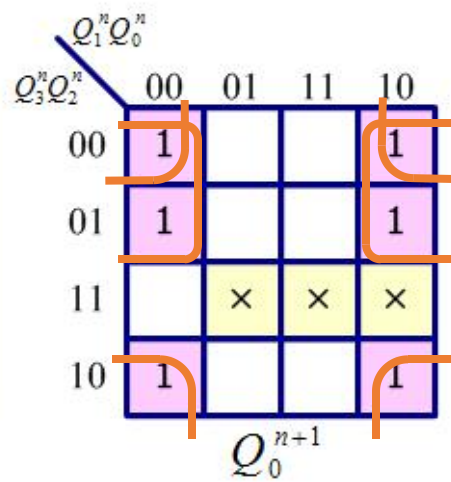
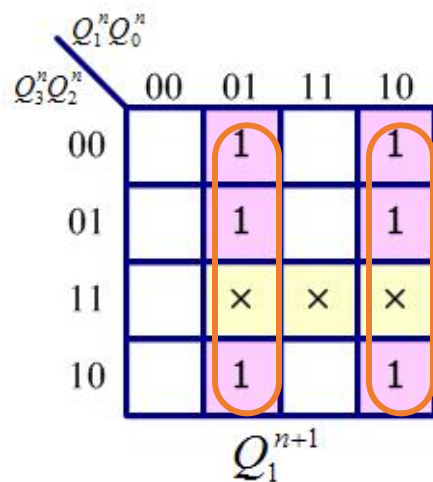
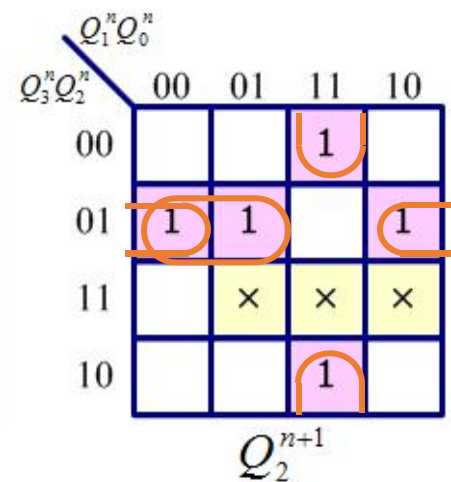
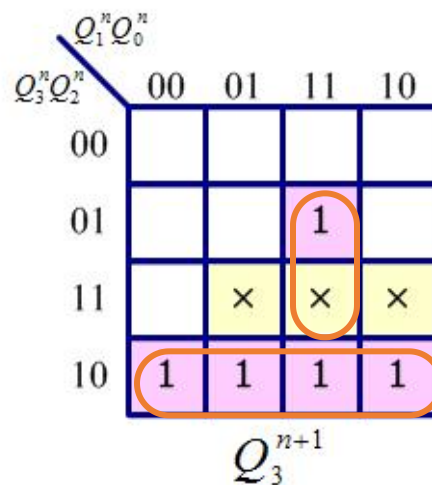
$Q_1Q_0$					
$Q_3Q_2$		00	01	11	10
	00	1	0	0	1
	01	1	0	0	1
	11	0	X	X	X
	10	1	0	0	1

$Q_0^{n+1}$

## 例 4

3+, 4.

卡诺图化简





- 求状态方程和输出方程

- 选用JK触发器，求驱动方程

$$Q_3^{n+1} = (Q_2 Q_1 Q_0) \bar{Q}_3 + (\bar{Q}_2 + Q_2 Q_1 Q_0) Q_3$$

?

$$Q_3^{n+1} = (Q_2 Q_1 Q_0) \bar{Q}_3 + \bar{Q}_2 Q_3$$

$$Q_2^{n+1} = \bar{Q}_3 Q_2 \bar{Q}_1 + \bar{Q}_3 Q_2 \bar{Q}_0 + \bar{Q}_2 Q_1 Q_0$$

$$Q_2^{n+1} = (Q_1 Q_0) \bar{Q}_2 + (\bar{Q}_3 \cdot \bar{Q}_1 \bar{Q}_0) Q_2$$

$$Q_1^{n+1} = \bar{Q}_1 Q_0 + Q_1 \bar{Q}_0$$

$$Q_1^{n+1} = Q_0 \bar{Q}_1 + \bar{Q}_0 Q_1$$

$$Q_0^{n+1} = \bar{Q}_3 \bar{Q}_0 + \bar{Q}_2 \bar{Q}_0$$

$$Q_0^{n+1} = (\bar{Q}_3 \bar{Q}_2) \bar{Q}_0 + 1 Q_0$$

因为 $Q_3 Q_2 Q_1 Q_0$ 是无关项，  
可以被删除！

$$C = Q_3 Q_2$$

$$J_3 = Q_2 Q_1 Q_0 \quad K_3 = Q_2$$

$$J_2 = Q_1 Q_0 \quad K_2 = \bar{Q}_3 \cdot \bar{Q}_1 \bar{Q}_0$$

$$J_1 = Q_0 \quad K_1 = Q_0$$

$$J_0 = \bar{Q}_3 \bar{Q}_2 \quad K_0 = 1$$

## 例4:

3+, 4.

状态方程

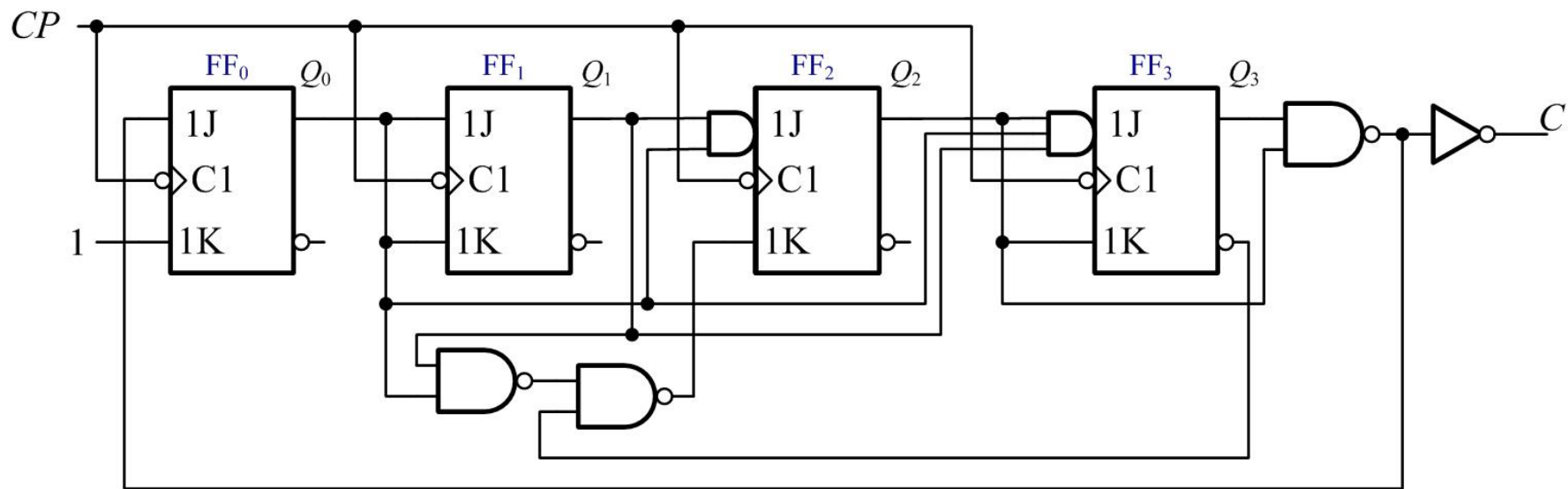
❖ 输出方程

❖ 选择触发器类型，求驱动方程

关键处理环节

- **强调：**如果是J-K触发器，处理的关键环节是——
- ✓ 将 $Q_i^{n+1}$ 的状态方程展开，使“与或”组合逻辑表达式中的每个与项中都含有 $Q_i$ 的现态的原变量 $Q_i$ 或反变量 $\overline{Q_i}$ ；
  - ✓ 考察每个与项，如果完完全全是无关项，则可被删除。

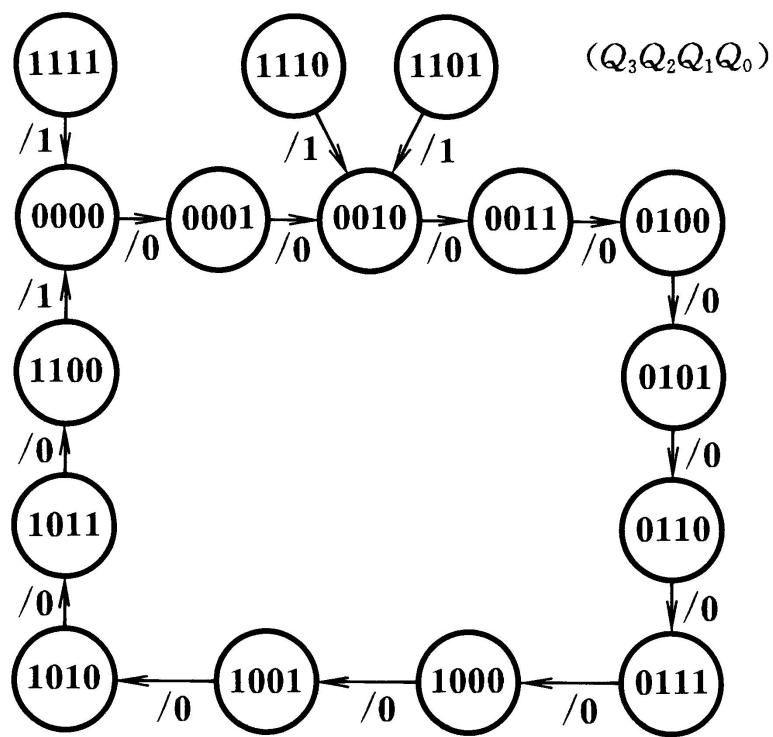
## 5. 画出电路原理图



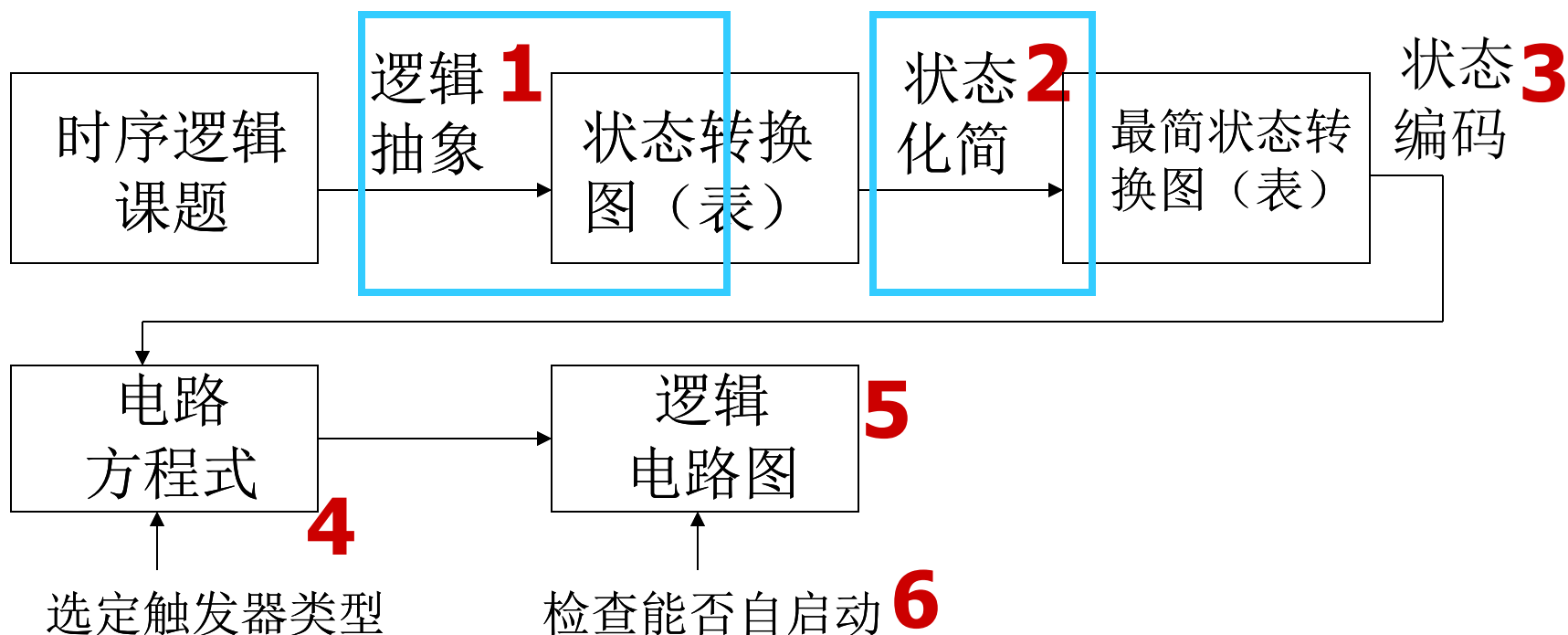
## 例4： 同步13进制加法计数器

### 6. 检查是否能够自启动

❖ 自启动（绘出完全的状态转换图）



例5：（{111}序列滤波器）设计一个串行数据检测器，连续输入3个或3个以上的“1”，则输出“1”，否则输出为0。



**“步骤0”**. 实际问题抽象

**步骤1**. 逻辑抽象→设定状态

1) 把题目“形象地”再现一下  
找到一个“Case”作示范:

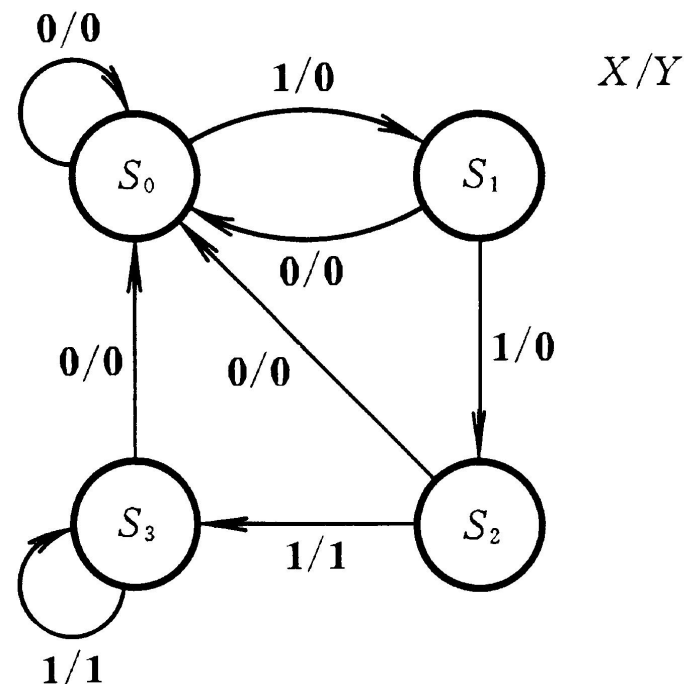
CP	1111	1111	111
X	0001	1011	110
	<u>        </u>	<u>        </u>	
	<u>        </u>	<u>        </u>	
	<u>        </u>	<u>        </u>	
	<u>        </u>	<u>        </u>	
Y	0000	0011	0

## 步骤1. 设定状态，画出状态转换图

### 2) 找到状态

——状态与问题本身有自然的对应关系吗？有最好。  
如没有，就要参照“Case”列出）。就本例而言：

- 刚来的是一个0 （初态） **S0**
- 来一个1 **S1**
- 来两个1 **S2**
- 来三个1 **S3**
- 来三个以上的1 **S3**



## 例5:

### 步骤2: 状态化简

- ❖ **等价状态（定义）**——若两个电路状态在相同的输入下有相同的输出，并且转换到相同的次态上去，则称这两个状态为等价状态；
- ❖ 等价状态是重复的，可以合并为一个；
- ❖ 将等价状态合并，以求得最简单的状态转换图。

$X \backslash S^n$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
0	$S_0 / 0$	$S_0 / 0$	$S_0 / 0$	$S_0 / 0$
1	$S_1 / 0$	$S_2 / 0$	$S_3 / 1$	$S_3 / 1$

$S^{n+1} / Y$

### 状态等价的定义

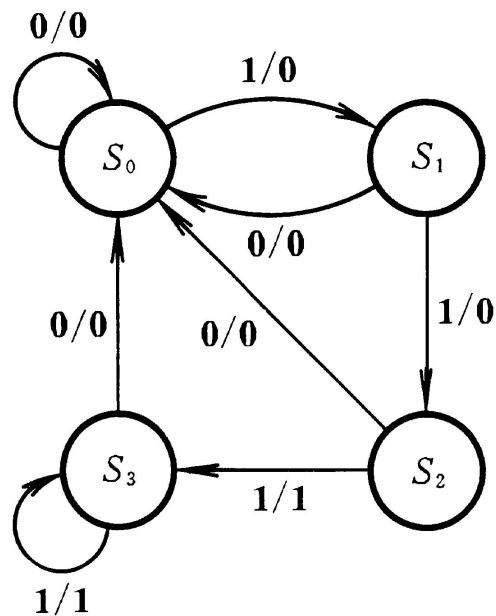
$S_2$ 、 $S_3$  在相同的输入下有相同的输出，并转向相同的新状态，**等价**，可以合并

- 状态化简的目标——剔除冗余状态
- 状态化简的方法——合并等价状态

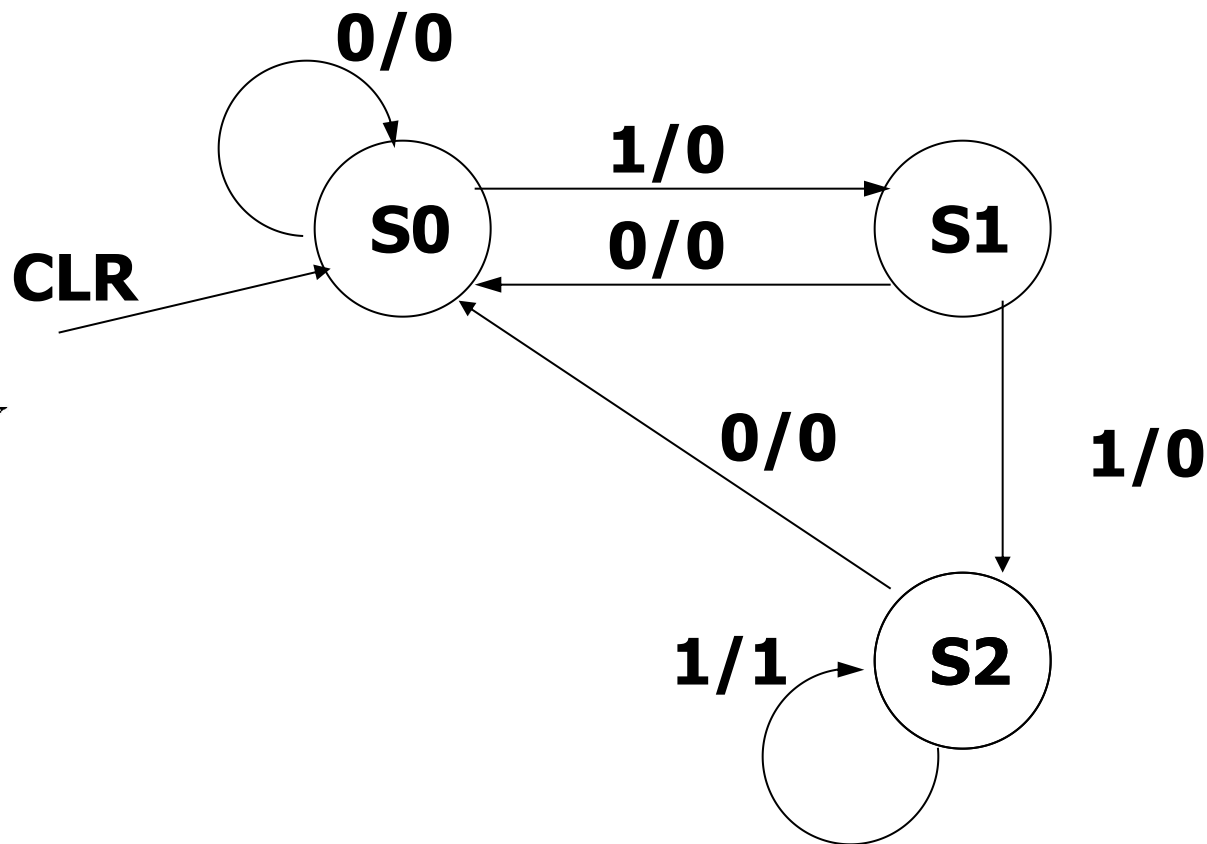


例5:

**步骤2:** 状态化简  
画出化简后的  
状态转换图



X/Y



例5:

**步骤3:** 状态分配 (状态编码)

$S_0 \rightarrow 00$

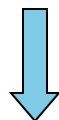
$S_1 \rightarrow 01$

$S_2 \rightarrow 10$

❖ 将编码赋给状态

❖ 列状态真值表

❖ 列状态真值表 (卡诺图)



$Q_1^n Q_0^n \backslash X$		$Q_1^{n+1} Q_0^{n+1} / Y$	
		0	1
0	0	0 0 / 0	0 1 / 0
0	1	0 0 / 0	1 0 / 0
1	0	0 0 / 0	1 0 / 1
1	1	x x / x	x x / x

- 卡诺图 也是真值表—— **直接** 列 卡诺图

$\begin{matrix} & X \\ Q_2^n Q_1^n \end{matrix}$	$Q_1^{n+1} Q_0^{n+1} / Y$	
	0	1
0 0	0 0 / 0	0 1 / 0
0 1	0 0 / 0	1 0 / 0
1 0	0 0 / 0	1 0 / 1
1 1	X X / X	X X / X

$\begin{matrix} & X \\ Q_1^n Q_0^n \end{matrix}$	$Q_1^{n+1}$		$Q_0^{n+1}$		Y	
	0	1				
00	0	0	0	1	0	0
01	0	1	0	0	0	0
11	x	x	x	x	x	x
10	0	1	0	0	0	1

注意：卡诺图（真值表）的排步次序

## 例5:

**步骤4:** 选择触发器类型,  
根据触发器特性方程和  
状态表导出驱动方程和  
输出方程

$Q_1^n Q_0^n$	$Q_1^{n+1}$		$Q_0^{n+1}$		$Y$	
	0	1	0	1	0	1
00	0	0	0	1	0	0
01	0	1	0	0	0	0
11	x	x	x	x	x	x
10	0	1	0	0	0	1

$$\begin{aligned}
 Q_1^{n+1} &= XQ_1 + XQ_0 \\
 &= XQ_1 + XQ_0(Q_1 + \overline{Q_1}) \\
 &= (XQ_0)\overline{Q_1} + XQ_1
 \end{aligned}$$

$$Q_0^{n+1} = X\overline{Q_1}\overline{Q_0} = X\overline{Q_1}\overline{Q_0} + \overline{1}Q_0$$

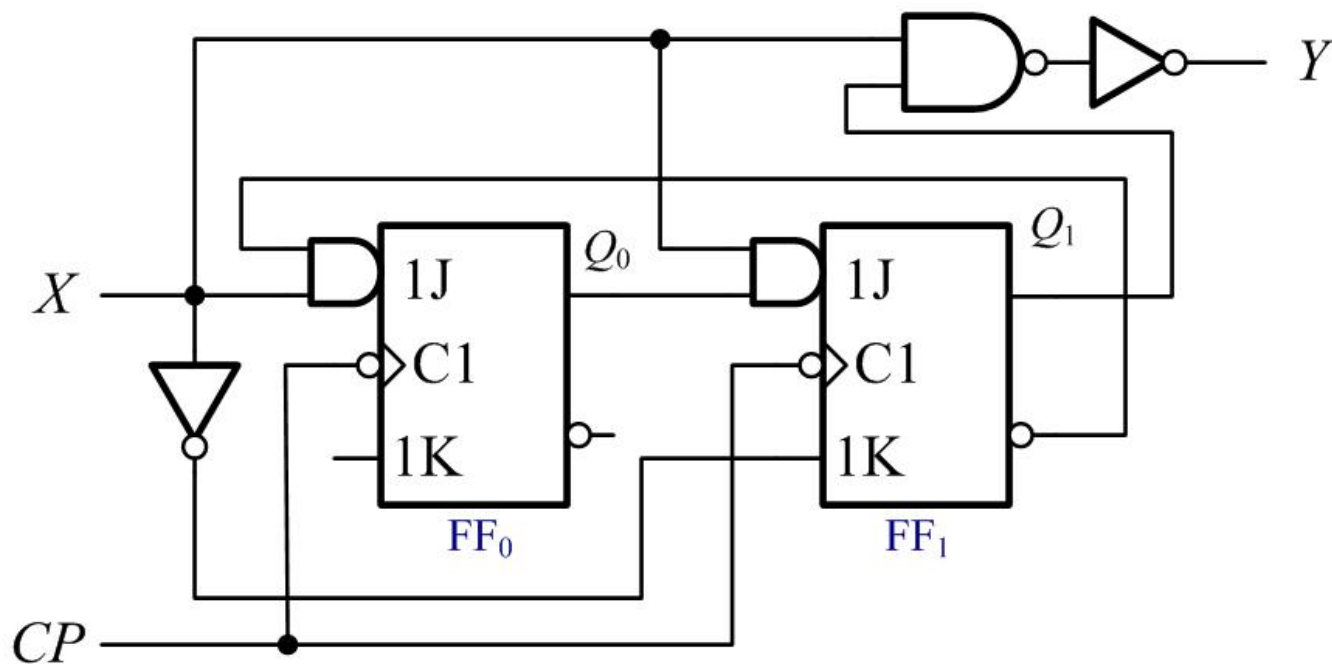
$$J_1 = XQ_0 \quad K_1 = \overline{X}$$

$$J_0 = X\overline{Q_1} \quad K_0 = 1$$

$$Y = XQ_1$$

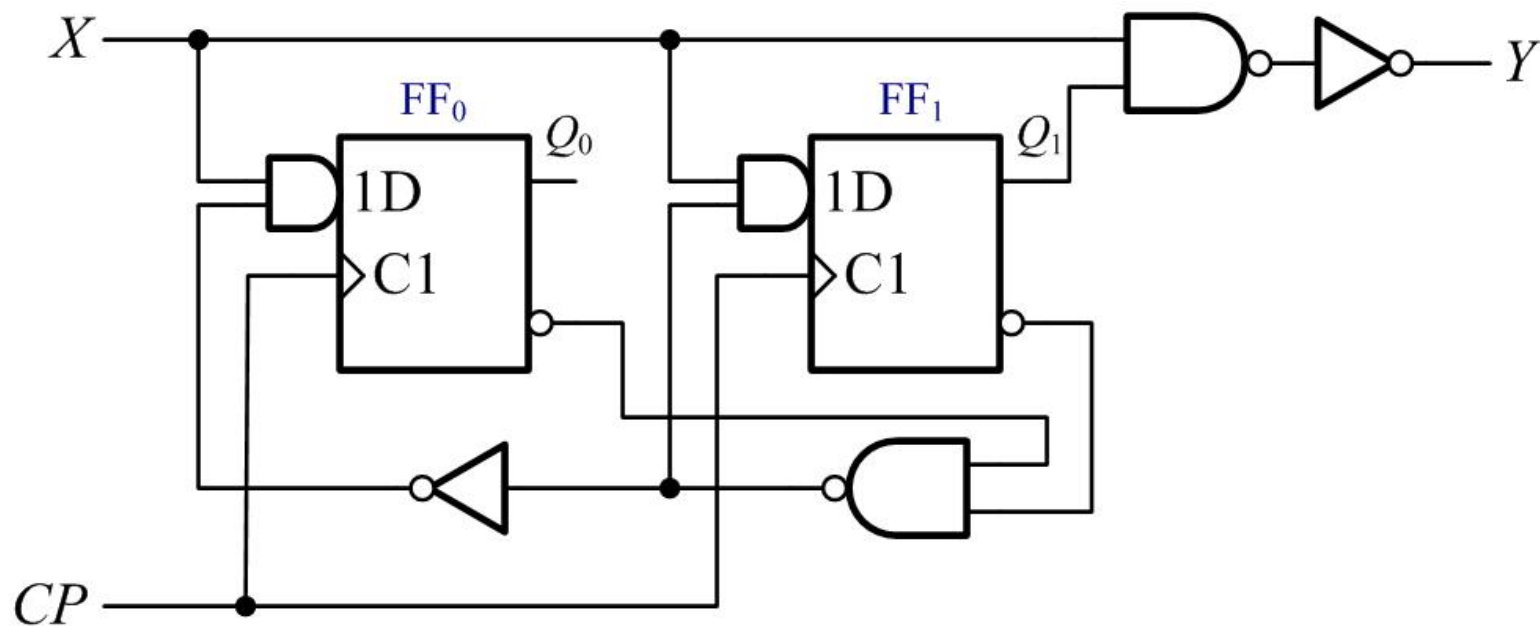
例5:

步骤5: 电路实现



例5:

步骤4,5: 如果选择D触发器, 电路图



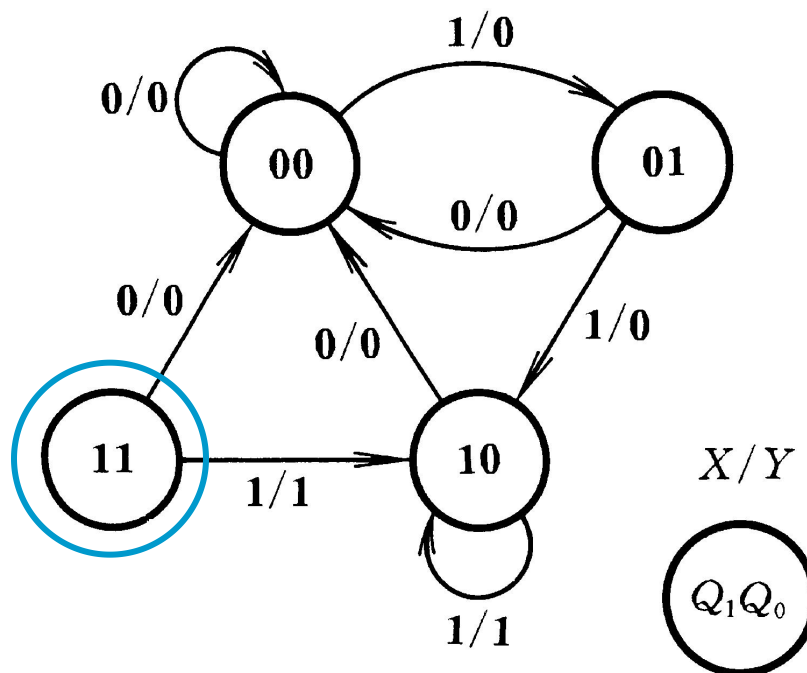
例5:

**步骤6:** 检查是否可以自启动

对于D触发器, 将无关状态代入状态方程

$$Q_1^{n+1} = XQ_1 + XQ_0$$

$$Q_0^{n+1} = X\overline{Q_1}\overline{Q_0}$$



例5:

**步骤6:** 检查是否可以自启动

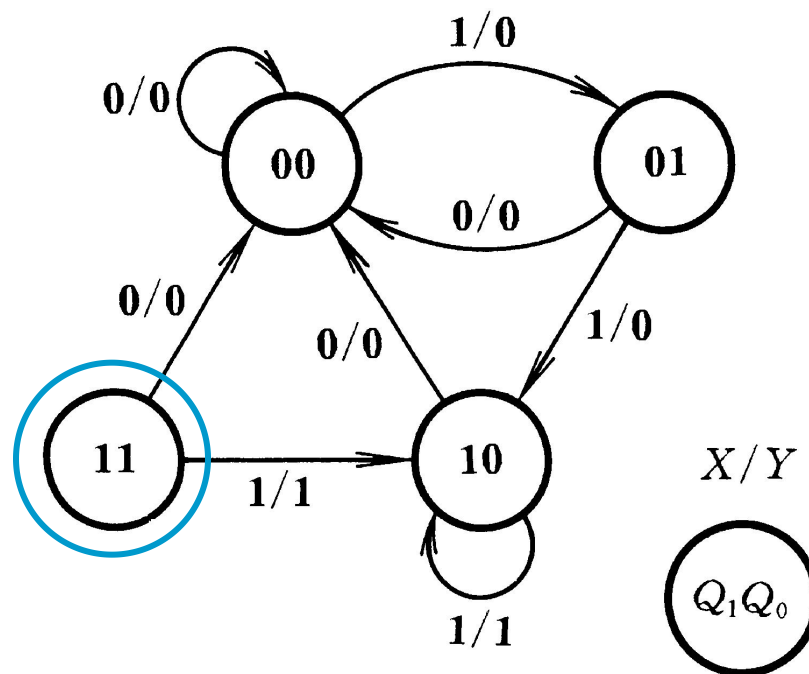
对于**J-K触发器**，将无关状态代入状态方程

$$Q_1^{n+1} = XQ_1 + X\overline{Q_1}Q_0$$

$$Q_0^{n+1} = X \cdot \overline{Q_1} \cdot \overline{Q_0}$$

当 $Q_1=1, Q_0=1$ 时

$$\begin{cases} Q_1^{n+1} = X \\ Q_0^{n+1} = 0 \end{cases}$$

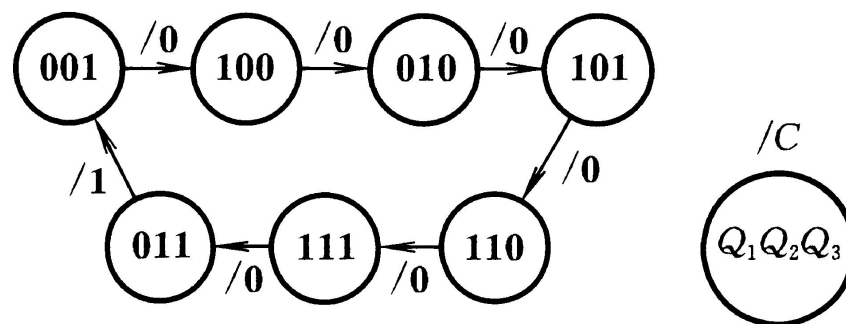




## 自启动设计

- 自启动可以在电路设计过程中保证

例6. 设计一个可自启动的7进制计数器



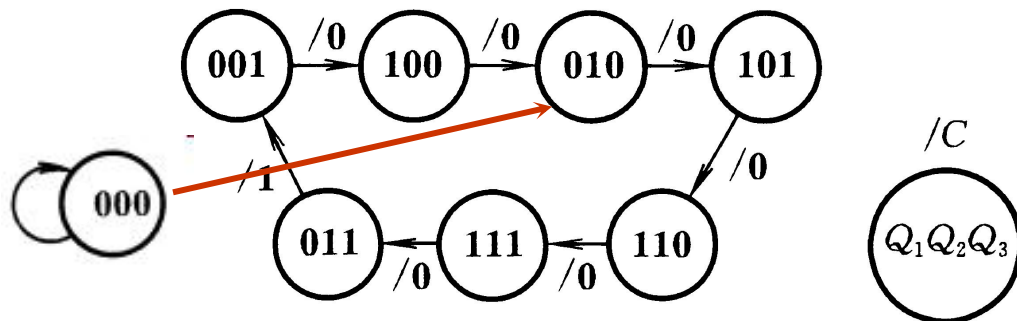
## 例6.

### • 最简状态方程

$$Q_1^{n+1} = Q_2 \oplus Q_3$$

$$Q_2^{n+1} = Q_1 \quad Q_2^{n+1} = Q_1 + \overline{Q_2} \overline{Q_3}$$

$$Q_3^{n+1} = Q_2$$



		$Q_2^n Q_3^n$			
		00	01	11	10
$Q_1^n$	0	× × ×	100	001	101
	1	010	110	011	111

		$Q_2^n Q_3^n$			
		00	01	11	10
$Q_1^n$	0	×	1	0	1
	1	0	1	0	1

(a)  $Q_1^{n+1}$

		$Q_2^n Q_3^n$			
		00	01	11	10
$Q_1^n$	0	×	0	0	0
	1	1	1	1	1

(b)  $Q_2^{n+1}$

		$Q_2^n Q_3^n$			
		00	01	11	10
$Q_1^n$	0	×	0	1	1
	1	0	0	1	1

(c)  $Q_3^{n+1}$

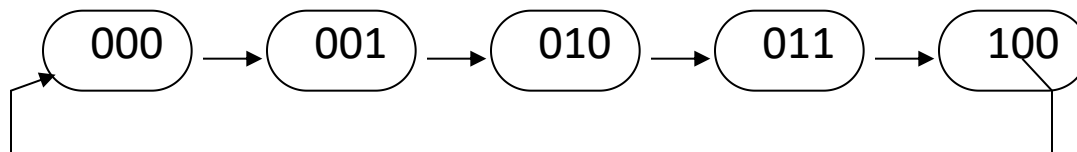
## 6.3.2 异步时序电路设计方法

例7. 用JK触发器设计异步五进制计数器

步骤1. 逻辑抽象。

步骤2. 状态化简。

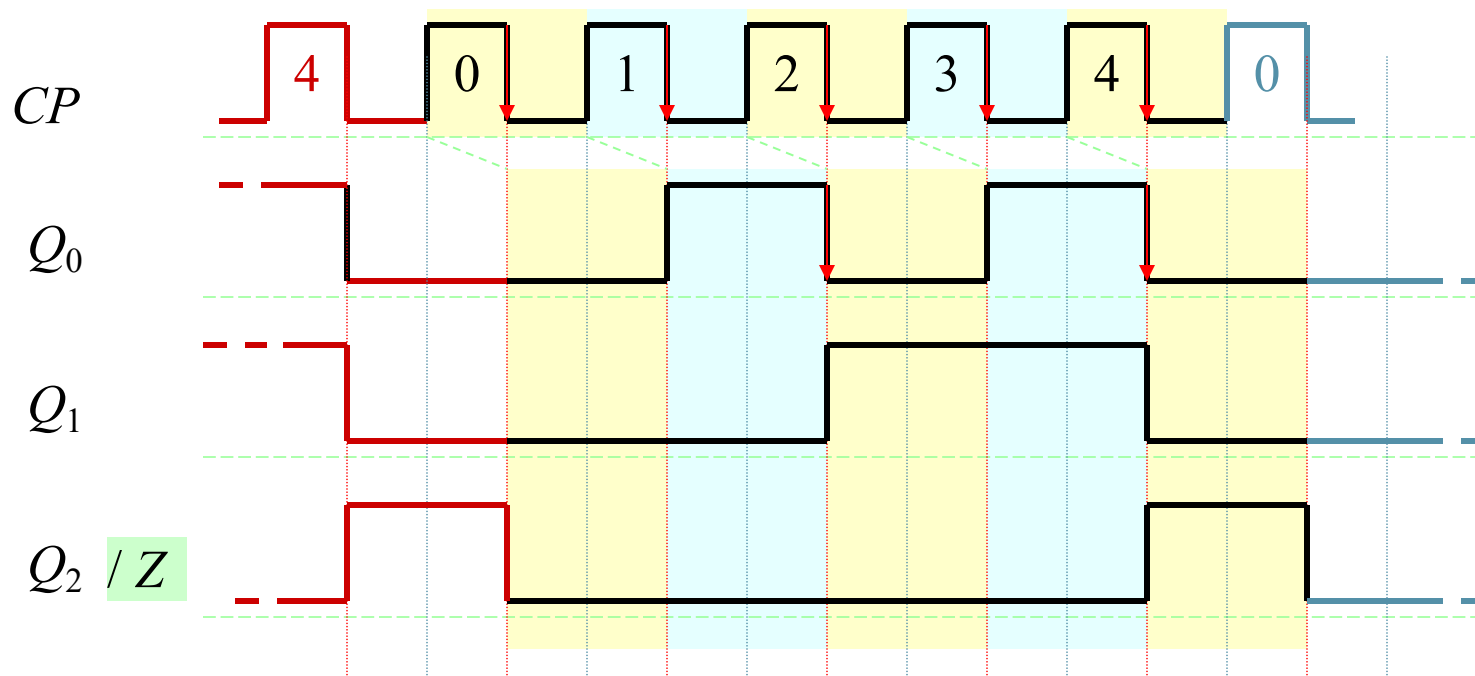
步骤3. 从最简的状态转换图出发，状态编码。



本例：状态变化时必有 $\downarrow$ ，状态不变时...（可有 $\downarrow$ 可无 $\downarrow$ ）

步骤4. 通过时序图对状态转换进行观察；

准则：在保证状态变化的时候必有触发脉冲的**前提条件下**，**选择在状态不变的时候触发脉冲最少的**，使得JK的输入条件简化。



## 例7.

**步骤4.** 选定各触发器的触发信号源；列写状态转移表。

❖ 注意：触发信号的选择**必须**满足“**准则**”！

$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	$Q_2^{n+1}$	$Q_1^{n+1}$	$Q_0^{n+1}$	$cp_2$	$cp_1$	$cp_0$	$Z = Q_2$
0	0	0	0	0 <sup>x</sup>	1	↓		↓	
0	0	1	0	1	0	↓	↓	↓	
0	1	0	0	1 <sup>x</sup>	1	↓		↓	
0	1	1	1	0	0	↓	↓	↓	
1	0	0	0	0 <sup>x</sup>	0	↓		↓	
1	0	1	x	x	x	↓		↓	
1	1	0	x	x	x	↓		↓	
1	1	1	x	x	x	↓		↓	

无时钟脉冲时为保持状态，**驱动信号**为无关项！

## 例7.

**步骤5.** 由卡诺图形式的状态转换表，逻辑化简得到状态方程；根据JK特性方程和状态方程，经过适当处理后得到驱动方程。

$Q_1 Q_0$					
		00	01	11	10
$Q_2$	0	0	0	1	0
	1	0	x	x	x

$Q_2^{n+1}$

$Q_1 Q_0$					
		00	01	11	10
$Q_2$	0	X	1	0	X
	1	X	x	x	x

$Q_1^{n+1}$

$Q_1 Q_0$					
		00	01	11	10
$Q_2$	0	1	0	0	1
	1	0	x	x	x

$Q_0^{n+1}$

# 时序逻辑电路

$Q_1 Q_0$	00	01	11	10
$Q_2$	00	01	11	10
0	0	0	1	0
1	0	X	X	X

$Q_2^{n+1}$

$Q_1 Q_0$	00	01	11	10
$Q_2$	00	01	11	10
0	X	1	0	X
1	X	X	X	X

$Q_1^{n+1}$

$Q_1 Q_0$	00	01	11	10
$Q_2$	00	01	11	10
0	1	0	0	1
1	0	X	X	X

$Q_0^{n+1}$

➤ 提示：为了使化简简便易行，只合并“1”格；

状态方程：  $Q_2^{n+1} = Q_1 Q_0 \cdot \overline{Q_2}$

$Q_1^{n+1} = \overline{Q_1}$

$Q_0^{n+1} = \overline{Q_2} \cdot \overline{Q_0}$

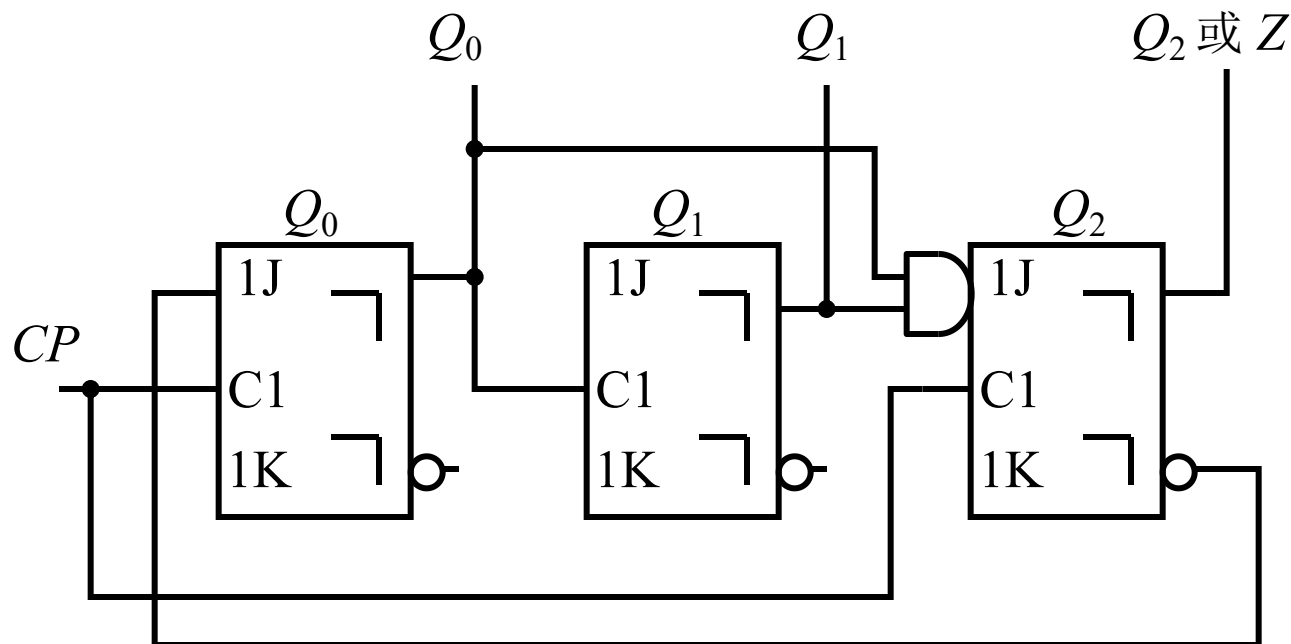
驱动方程：  $\begin{cases} J_2 = Q_1 Q_0 \\ K_2 = 1 \end{cases}$

$\begin{cases} J_1 = 1 \\ K_1 = 1 \end{cases}$

$\begin{cases} J_0 = \overline{Q_2} \\ K_0 = 1 \end{cases}$

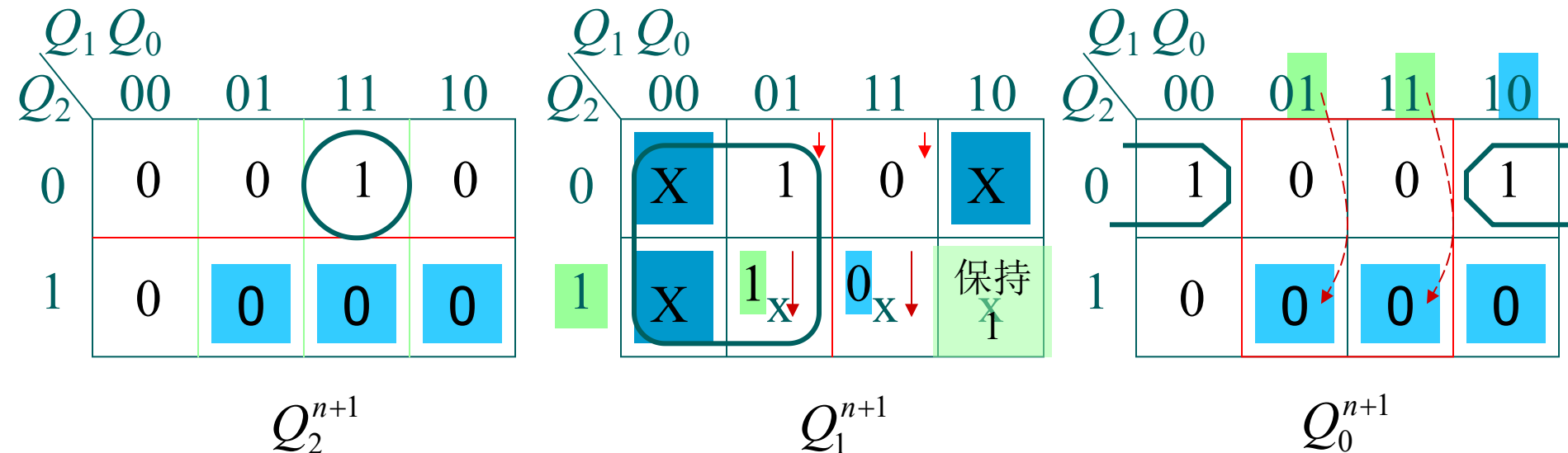
例7.

**步骤6.** 根据驱动方程和输出方程，绘出电路逻辑图。



思考：异步时序逻辑电路的自启动检查...





## ■ 自启动检查

➤ 注意：异步时钟——没有时钟脉冲的状态保持。

101 → 010, 110 → 010, 111 → 000,  
可以自启动。

## ■ 归纳：异步时序逻辑电路设计步骤

1. 逻辑抽象。
2. 状态化简。
3. 从最简的状态转换图出发，状态编码。
4. 通过时序图对状态转换进行观察，依照“准则”，选定各触发器的触发信号源。
5. 由卡诺图形式的状态转换表，逻辑化简得到状态方程；根据触发器（JK或D）特性方程和状态方程，经过适当处理后得到驱动方程。
6. 根据驱动方程和输出方程，绘出电路逻辑图。

## 第六版

- 6.5; 6.7
- 6.35
- 6.10; 6.12;
- 6.19; 6.22; 6.29

## 第五版

- 6.5; 6.7
- 6.35
- 6.10; 6.12;
- 6.19; 6.22; 6.29

## 第四版

- 5.3; 5.5
- 5.29
- 5.7; 5.9;
- 5.15; 5.18; 5.24