

数字电路

Digital Circuits and System

李文明

liwenming@ict.ac.cn



时序逻辑电路



时序逻辑电路知识点

- 同步时序电路，异步时序电路
- 寄存器，移位寄存器
- 计数器



时序逻辑电路

- 时序逻辑电路概述
- 时序逻辑电路的分析方法
- 若干常用的时序逻辑电路
- 时序逻辑电路的设计方法
- 时序逻辑电路的竞争-冒险现象



时序逻辑电路

- 时序逻辑电路概述
- 时序逻辑电路的分析方法
- 若干常用的时序逻辑电路
- 时序逻辑电路的设计方法
- 时序逻辑电路的竞争-冒险现象



时序逻辑电路特点

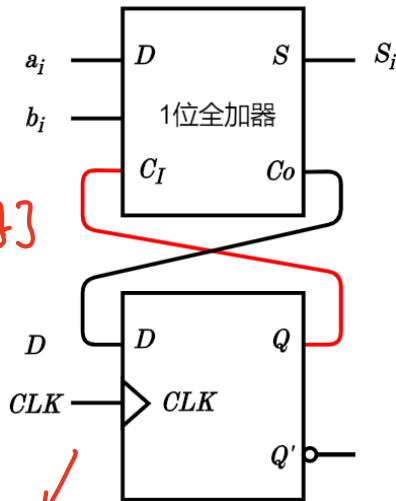
● 时序电路功能特点

- 与组合逻辑电路（只取决于当时的输入信号）不同
- 输出不仅取决于输入信号，还与电路的原来状态相关
- 串行加法器，可实现两个多位数从低位到高位逐位相加

同一时刻只有一个加法器在工作 能到70%-90%就很好了

● 时序电路结构特点

- 通常包含组合电路和存储电路两个组成部分
- 存储电路的输出状态必须反馈到组合电路的输入端，与输入信号一起，共同决定组合逻辑电路的输出



节省面积，但牺牲了速度

时序电路描述方法

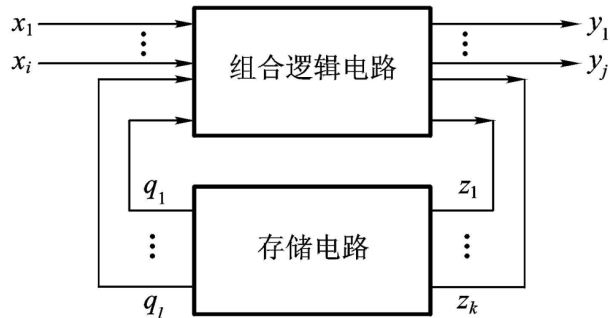
- 可以用三个方程组来描述信号间的逻辑关系

输出方程

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_i, q_1, q_2, \dots, q_l) \\ \vdots \\ y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_i, q_1, q_2, \dots, q_l) \\ Y = F(X, Q) \end{cases}$$

驱动方程

$$\begin{cases} z_1 = g_1(x_1, x_2, \dots, x_i, q_1, q_2, \dots, q_l) \\ \vdots \\ z_k = g_k(x_1, x_2, \dots, x_i, q_1, q_2, \dots, q_l) \\ Z = G(X, Q) \end{cases}$$



状态方程

$$\begin{cases} q_1^* = g_1(x_1, x_2, \dots, x_i, q_1, q_2, \dots, q_l) \\ \vdots \\ q_l^* = g_l(x_1, x_2, \dots, x_i, q_1, q_2, \dots, q_l) \\ Q^* = Q(X, Q) \end{cases}$$

三类表达式以描述时序电路



时序逻辑电路分类

• 按动作特点分类

- 同步时序电路：触发器在单一时钟源信号控制下，同时发生状态变化
- 异步时序电路：没有统一的时钟信号，触发器状态的变化有先有后

设计起来十分困难，也难以调试。电路较大时易产生蝴蝶效应

• 按输出信号特点分类

- 米利 (Mealy) 型： $Y = F(X, Q)$ ，存储电路的状态和输入变量共同决定输出

- 穆尔 (Moore) 型： $Y = F(Q)$ ，输出信号仅仅取决于存储电路的状态

常提前 1TCLK 但在功耗方面收益较大 (时钟翻转的功耗)

Mealy 会更快，而 Moore 状态更多 (浪费资源)，优点是稳定 (只有信号到来才会输出)

功耗

- 静态功耗 (漏电功耗)
- 动态功耗 (占大部分)

一个 CPU 里多个模块间的交互

很多是不同主频的，须用三态门等进行缓冲。



时序逻辑电路

翻转产生的功耗

- 时序逻辑电路概述
- 时序逻辑电路的分析方法
- 若干常用的时序逻辑电路
- 时序逻辑电路的设计方法
- 时序逻辑电路的竞争-冒险现象



同步时序逻辑电路的分析方法

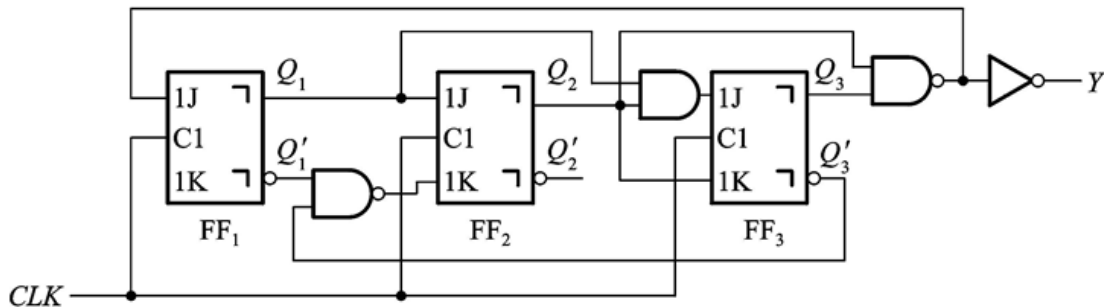
- 时序电路分析目标
 - 找出电路的逻辑功能
 - 即要求找出电路的**状态和输出**在输入变量和时钟（CLK）作用下的**变化规律**
- 分析步骤
 1. 从给定逻辑图写出存储电路中每个触发器的**驱动方程**（输入的逻辑式），得到整个电路的驱动方程
 2. 将驱动方程代入触发器的特性方程，得到**状态方程** $\rightarrow Q_{n+1} = f(Q_n) \dots$
 3. 根据逻辑图写出电路的**输出方程**
 4. 画出**状态转换表、状态转换图或波形图**
 5. 根据输出和输入的关系确定电路的**逻辑功能**



同步时序逻辑电路分析举例(1)

- 分析图中电路的逻辑功能，写出它的驱动方程、状态方程和输出方程。 FF_1 、 FF_2 、 FF_3 是三个主从结构的TTL触发器，下降沿动作，输入端悬空时和逻辑1状态等效

Moore 型电路 (不由输入决定, 仅由状态决定)



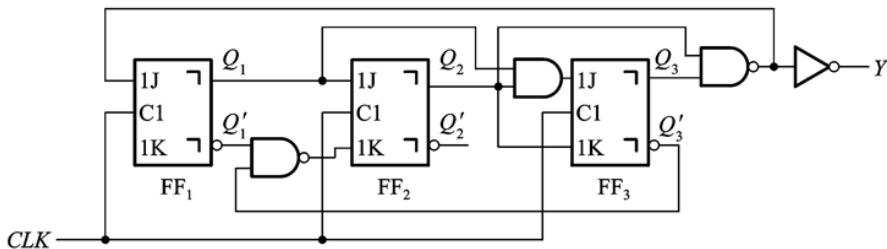
事实上, 该电路没有输入

$$Y = Q_2 \cdot Q_3$$

写出电路的3个方程组

● 触发器驱动方程

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 = (Q_2 Q_3)', \quad K_1 = 1 \\ J_2 = Q_1, \quad K_2 = (Q'_2 Q'_3)' \\ J_3 = Q_1 Q_2, \quad K_3 = Q_2 \end{array} \right.$$



- 将驱动方程代入JK触发器特性方程:

$$Q^* = JQ' + K'Q, \text{ 得到状态方程}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1^* = (Q_2 Q_3)' \cdot Q_1' \\ Q_2^* = Q_1 Q_2' + Q_1' Q_2 Q_3' \\ Q_3^* = Q_1 Q_2 Q_3' + Q_2' Q_3 \end{array} \right.$$

- 输出方程: $Y = Q_2 \cdot Q_3$

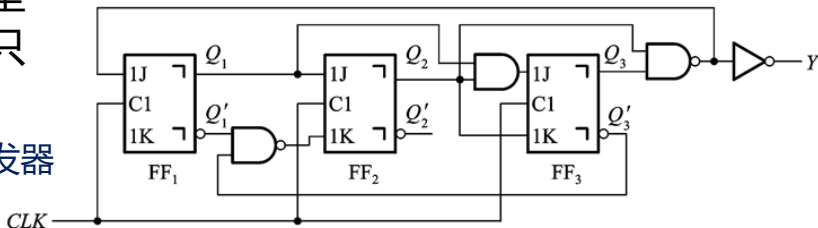
分析时序逻辑电路的状态转换过程

- **状态转换表**（也称状态转换真值表）：将所有输入变量和电路初态的取值，代入电路的状态方程和输出方程，得到电路次态(新态)的输出值，列成表
- 状态转换图（状态机流程图）：状态转换表以图形的方式直观表示出来，即为状态转换图
- 时序图



根据状态方程列出状态转换表(1)

- 此电路没有输入变量，属于穆尔型的时序逻辑电路，输出端的状态只决定于电路的初态
- CLK不是输入逻辑变量。它只是控制触发器状态转换的操作信号



一般默认全0

设电路的初始状态是 $Q_3Q_2Q_1 = 000$ ，代入状态方程，得：

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = Q_2Q_3 \\ Q_1^* = (Q_2Q_3)' \cdot Q_1' \\ Q_2^* = Q_1Q_2' + Q_1'Q_2Q_3' \\ Q_3^* = Q_1Q_2Q_3' + Q_2'Q_3 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y = 0 \\ Q_1^* = 1 \\ Q_2^* = 0 \\ Q_3^* = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y = 0 \\ Q_1^* = 0, \dots, \\ Q_2^* = 1 \\ Q_3^* = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y = 1 \\ Q_1^* = 0 \\ Q_2^* = 1 \\ Q_3^* = 1 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y = 0 \\ Q_1^* = 1 \\ Q_2^* = 0 \\ Q_3^* = 0 \end{array} \right.$$

根据状态方程列出状态转换表(2)

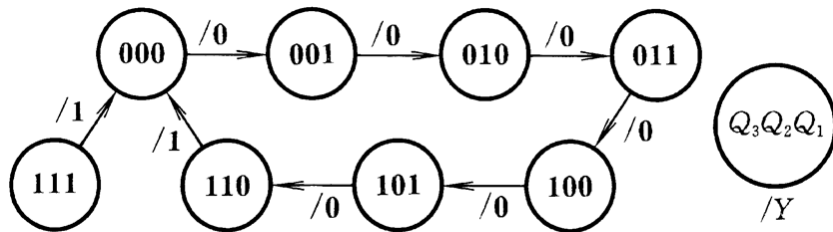
- 根据上页的计算结果，画出状态转换表
- 检查一下状态转换表是否包含了电路所有可能出现的状态？
- 缺少的补充进去，得到完整的状态转换表
- 该电路是七进制加法计数器

CLK	Q_3	Q_2	Q_1	Q_3^*	Q_2^*	Q_1^*	Y
0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1	1	0
3	0	1	1	1	0	0	0
4	1	0	0	1	0	1	0
5	1	0	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	0	0	1
7	1	1	1	0	0	0	1



时序逻辑电路的状态转换图

- 将状态转换表以图形的方式直观表示出来，即为状态转换图
 - 圆圈表示电路的各个状态
 - 箭头表示状态转换的方向
 - 箭头上标注输入/出变量
 - 将输入变量写在斜线以上，输出变量写在斜线以下

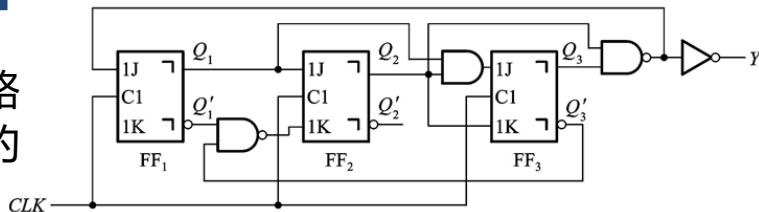


CLK	Q_3	Q_2	Q_1	Q_3^*	Q_2^*	Q_1^*	Y
0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1	1	0
3	0	1	1	1	0	0	0
4	1	0	0	1	0	1	0
5	1	0	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	0	0	1
7	1	1	1	0	0	0	1

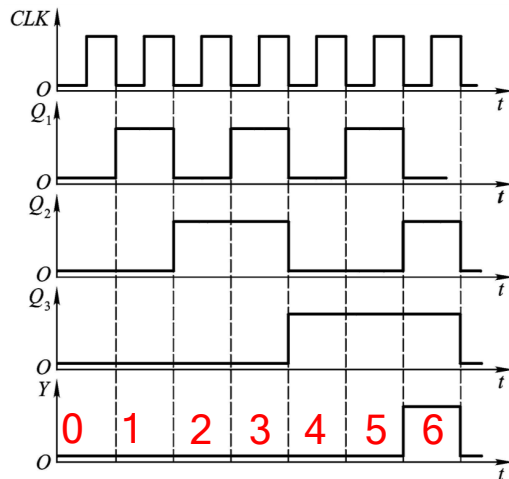
↓
无法达到

时序逻辑电路的时序图

- 在时钟脉冲序列的作用下，电路的状态、输出状态随时间变化的波形



CLK	Q_3	Q_2	Q_1	Q_3^*	Q_2^*	Q_1^*	Y
0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1	1	0
3	0	1	1	1	0	0	0
4	1	0	0	1	0	1	0
5	1	0	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	0	0	1
7	1	1	1	0	0	0	1



同步时序逻辑电路分析举例(2)

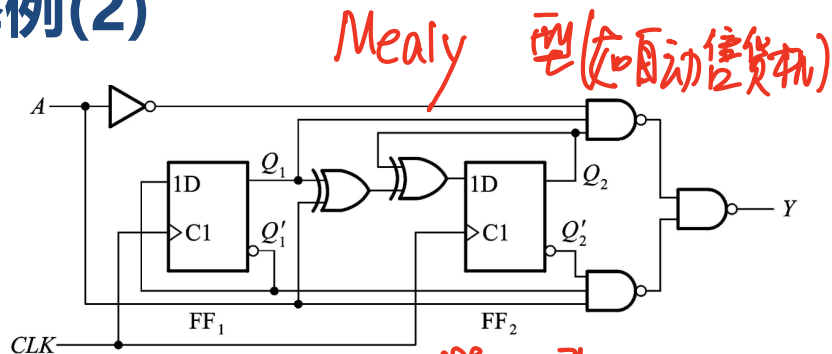
- 分析下图的时序逻辑电路的功能，写出电路的驱动方程、状态方程和输出方程，画出电路的状态转换图

- 驱动方程：

$$\begin{cases} D_1 = Q_1' \\ D_2 = A \oplus Q_1 \oplus Q_2 \end{cases}$$
- 状态方程：

$$\begin{cases} Q_1^* = D_1 \\ Q_2^* = A \oplus Q_1 \oplus Q_2 \end{cases}$$
- 输出方程：

$$Y = ((A'Q_1Q_2)' \cdot (AQ_1'Q_2'))' \\ = A'Q_1Q_2 + AQ_1'Q_2'$$



特征方程 $Q = D$

Q_2Q_1	$Q_2=0$		$Q_2=1$	
A	00	01	11	10
0	01/0	10/0	00/1	11/0
1	11/1	00/0	10/0	01/0
	$Q_2^*Q_1^*/Y$			

根据状态转换表画状态图

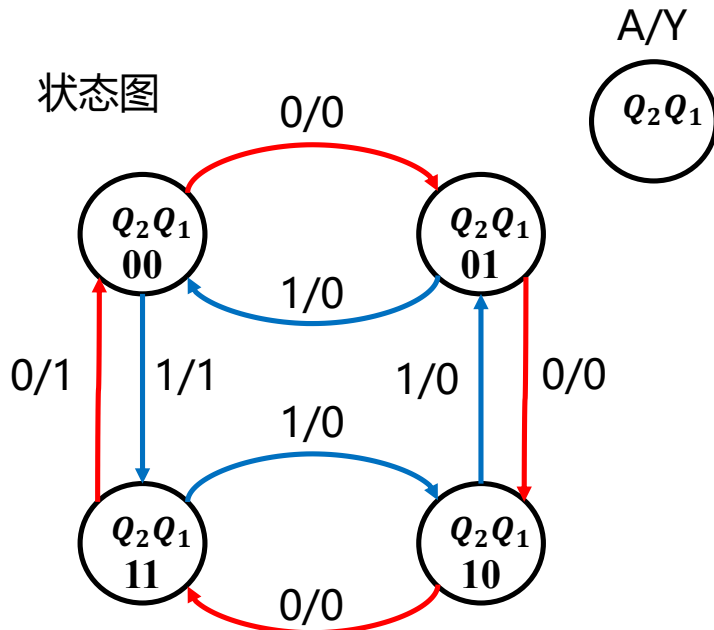
状态转换表的另一种形式

CLK	A	Q_2	Q_1	Q_2^*	Q_1^*	Y
0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0
2	0	1	0	1	1	0
3	0	1	1	0	0	1
4	1	0	0	1	1	1
5	1	0	1	0	0	0
6	1	1	0	0	1	0
7	1	1	1	1	0	0

此电路是有输入控制的可逆计数器

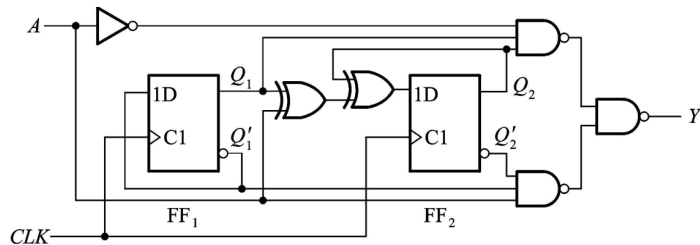
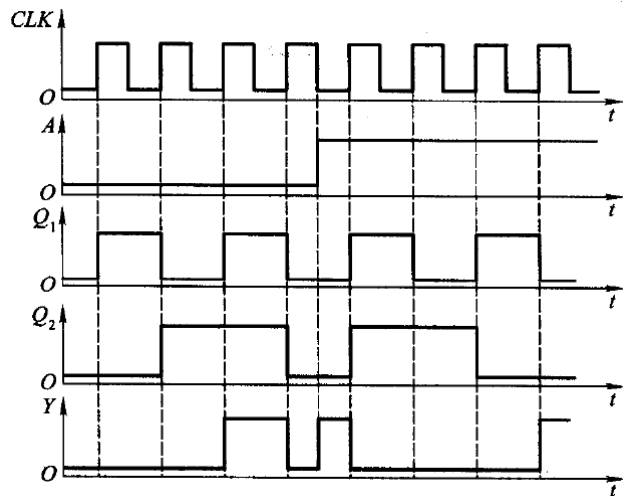
A = 0为加法计数器，A = 1为减法计数器

状态图



根据状态转换表画波形图

有输入控制的2位可逆计数器



$Q_2 Q_1$		$Q_2=0$		$Q_2=1$	
A		00	01	11	10
		00	01	11	10
0		01/0	10/0	00/1	11/0
1		11/1	00/0	10/0	01/0
		$Q_2^* Q_1^* / Y$			

异步时序电路的分析方法

- 与同步时序电路的结构区别
 - 电路中的触发器用不同的时钟信号驱动
 - 触发器不在同一时钟信号控制下同时翻转
- 与同步电路分析方法的差别
 - 除了写出驱动方程、状态方程和输出方程等外
 - 还需写出各个触发器的时钟信号驱动方程
 - 计算触发器次态时要考虑是否有时钟引起触发器翻转，如果没有，触发器状态不变



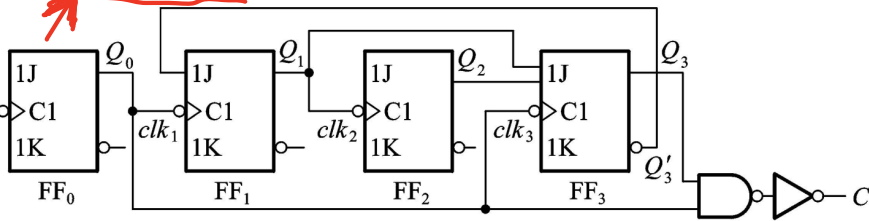
异步时序电路的分析举例

异步就是1

- 试分析逻辑功能，画出状态转换图和时序图

- 驱动方程

$$\left\{ \begin{array}{l} J_0 = K_0 = 1 \\ J_1 = Q_3', \quad K_1 = 1 \\ J_2 = K_2 = 1 \\ J_3 = Q_1 Q_2, \quad K_3 = 1 \end{array} \right.$$



- 将驱动方程代入JK触发器特性方程：

$Q^* = JQ' + K'Q$ ，得到状态方程， clk_i

表示时钟信号，不是一个逻辑变量

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_0^* = Q_0' \cdot clk_0 \\ Q_1^* = Q_3' Q_1' \cdot clk_1 \\ Q_2^* = Q_2' \cdot clk_2 \\ Q_3^* = Q_1 Q_2 Q_3' \cdot clk_3 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} clk_0 = clk \\ clk_1 = Q_0 \\ clk_2 = Q_1 \\ clk_3 = Q_0 \end{array} \right.$$

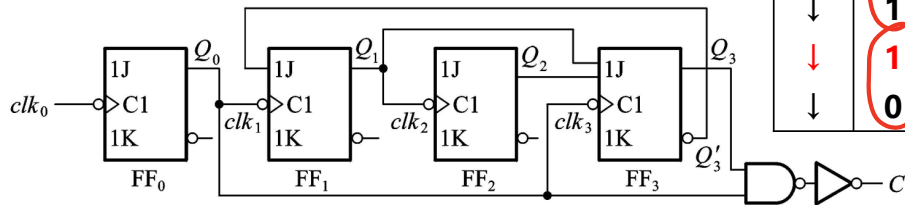
- 输出方程 $C = Q_0 Q_3$

异步电路的状态转换表

- 设 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$ 为初态，依据状态方程和时钟方程，推算电路中触发器的次态，结果如右表

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_0^* = Q_0' \cdot clk_0 \\ Q_1^* = Q_3' Q_1' \cdot clk_1 \\ Q_2^* = Q_2' \cdot clk_2 \\ Q_3^* = Q_1 Q_2 Q_3' \cdot clk_3 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} clk_0 = clk \\ clk_1 = Q_0 \\ clk_2 = Q_1 \\ clk_3 = Q_0 \end{array} \right.$$

- $Q_3^*Q_2^*Q_1^*Q_0^* = 0001, 0010, \dots, 1001, 0000$



找下降沿

	触发器状态				时钟信号			输出
clk_0	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	clk_3	clk_2	clk_1	C
↓	0	0	0	0	0	0	0	0
↓	0	0	0	1	1	0	1	0
↓	0	0	1	0	0	1	0	0
↓	0	0	1	1	1	1	1	0
↓	0	1	0	0	0	0	0	0
↓	0	1	0	1	1	0	1	0
↓	0	1	1	0	0	1	0	0
↓	0	1	1	1	1	1	1	0
↓	1	0	0	0	0	0	0	0
↓	1	0	0	1	1	0	1	1
↓	0	0	0	0	0	0	0	0

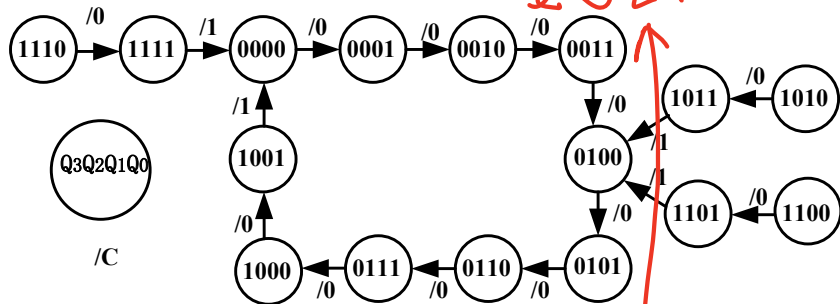
异步十进制加法计数器

妙啊 妙啊

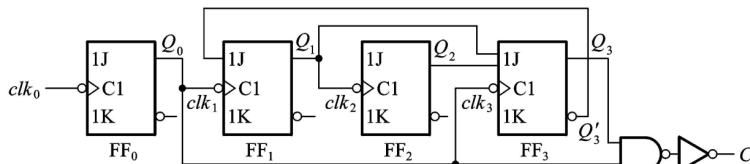


异步时序电路的状态图

● 状态转换图



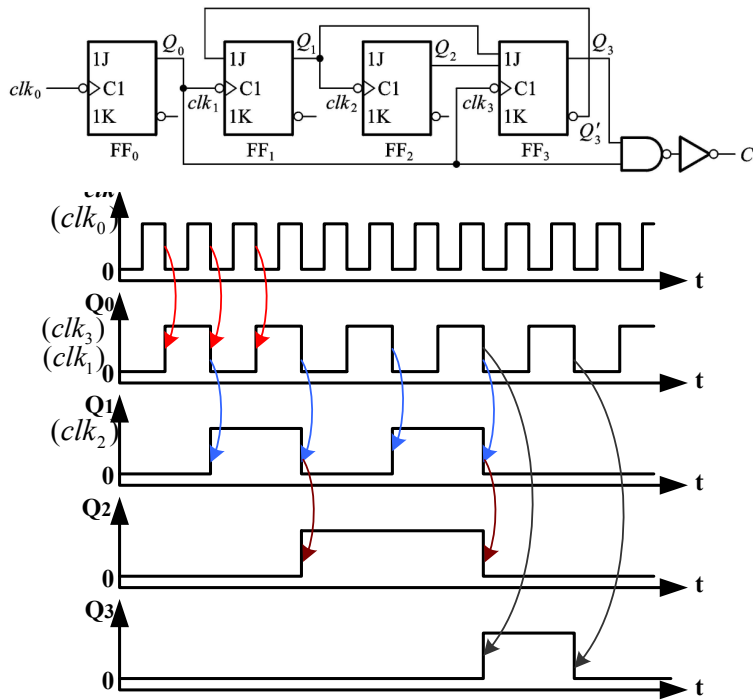
- 10个状态0000~1001是在循环内
- 其它6个状态1010~1111在时钟作用下，都可以进入此内循环，具有这种特点的称为能**自启动**的时序逻辑电路



	触发器状态				时钟信号			输出
clk_0	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	clk_3	clk_2	clk_1	C
↓	0	0	0	0	0	0	0	0
↓	0	0	0	1	1	0	1	0
↓	0	0	1	0	0	1	0	0
↓	0	0	1	1	1	1	1	0
↓	0	1	0	0	0	0	0	0
↓	0	1	0	1	1	0	1	0
↓	0	1	1	0	0	1	0	0
↓	0	1	1	1	1	1	1	0
↓	1	0	0	0	0	0	0	0
↓	1	0	0	1	1	0	1	1
↓	0	0	0	0	0	0	0	0

异步时序电路波形图

触发器状态					时钟信号			输出
clk_0	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	clk_3	clk_2	clk_1	C
↓	0	0	0	0	0	0	0	0
↓	0	0	0	1	1	0	1	0
↓	0	0	1	0	0	1	0	0
↓	0	0	1	1	1	1	1	0
↓	0	1	0	0	0	0	0	0
↓	0	1	0	1	1	0	1	0
↓	0	1	1	0	0	1	0	0
↓	0	1	1	1	1	1	1	0
↓	1	0	0	0	0	0	0	0
↓	1	0	0	1	1	0	1	1
↓	0	0	0	0	0	0	0	0



习题 6.3、6.5、6.8

问题和议?

