

# 第四章 处理器体系结构

教师：史先俊  
计算机科学与技术学院  
哈尔滨工业大学

# 第四章 处理器体系结构

## ——逻辑设计

教 师：史先俊  
计算机科学与技术学院  
哈尔滨工业大学

# 逻辑设计概述

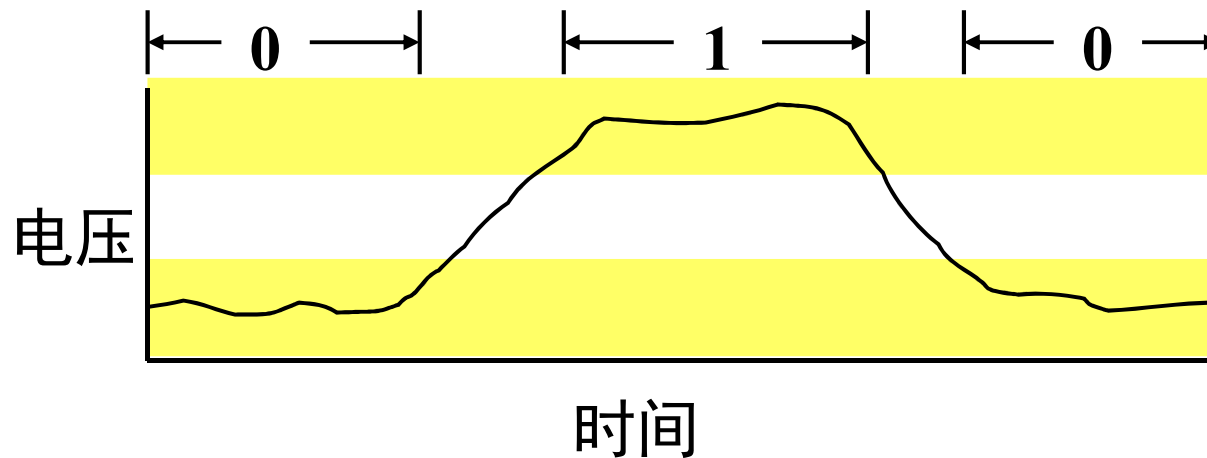
## ■ 基本的硬件需求

- 通讯
  - 如何将值从一个地方移动到另外一个地方
- 计算
- 存储

## ■ 比特是我们的朋友

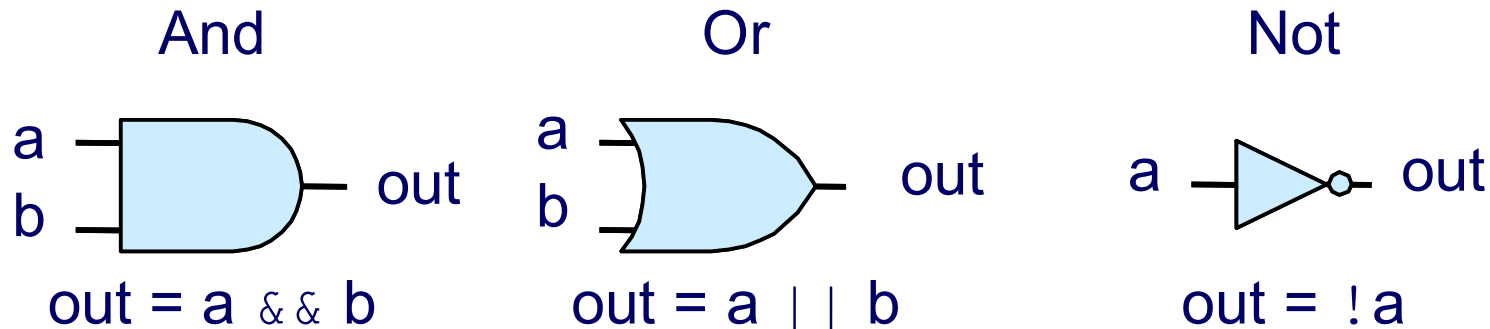
- 全部用0和1表示
- 通讯
  - 电线上的低或高电压
- 计算
  - 计算布尔函数
- 存储
  - 存储信息位

# 数字信号

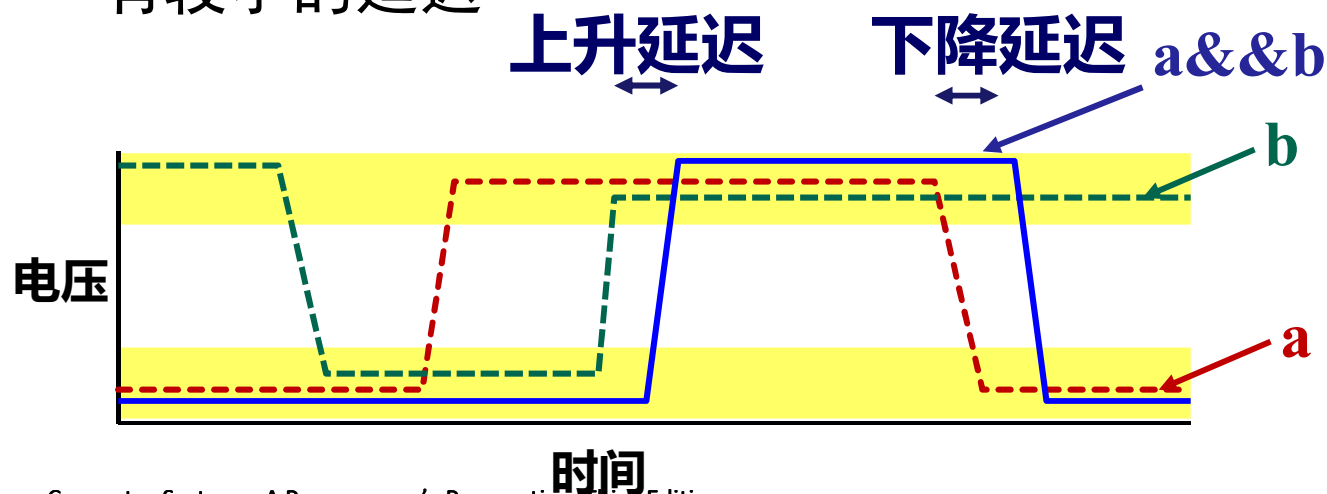


- 用电压阈值从连续信号中提取离散值
- 最简单版本：1位信号
  - 或者是高位，或者是低位
  - 在高位和低位之间有保护范围
- 不会收到噪音或者低质量的电路因素影响
  - 可以使得电路简单、规模小、速度快

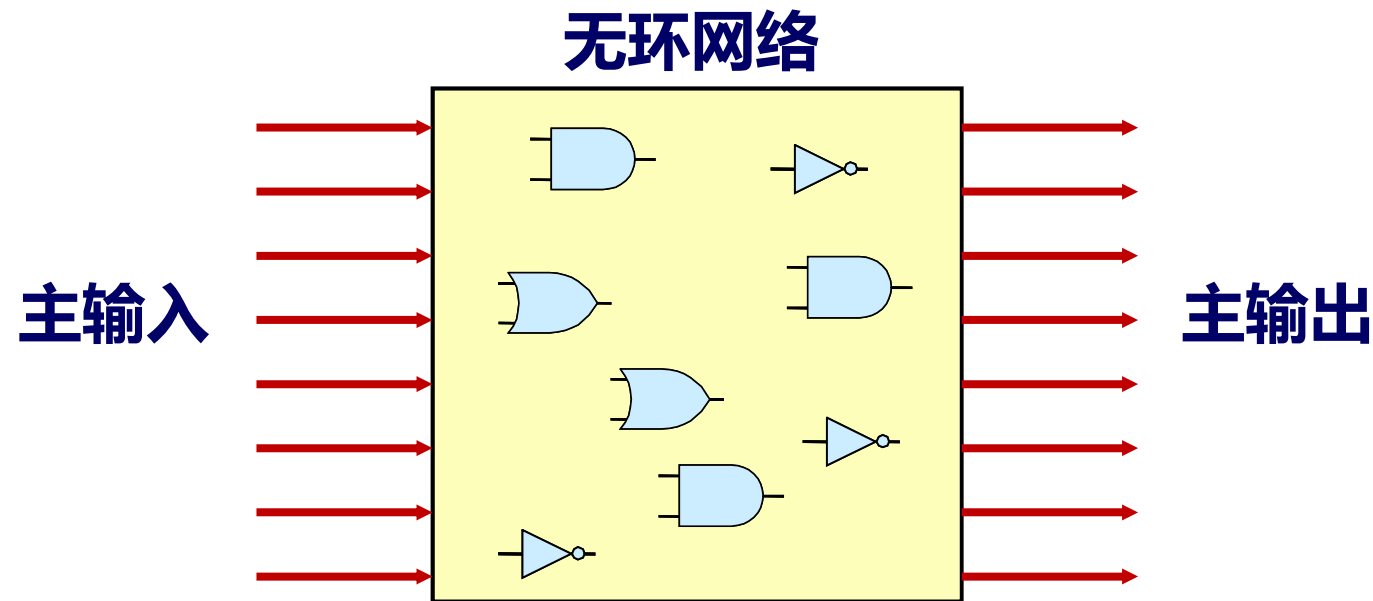
# 通过逻辑门进行计算



- 输出是输入的布尔函数
- 连续响应输入的变化
  - 有较小的延迟



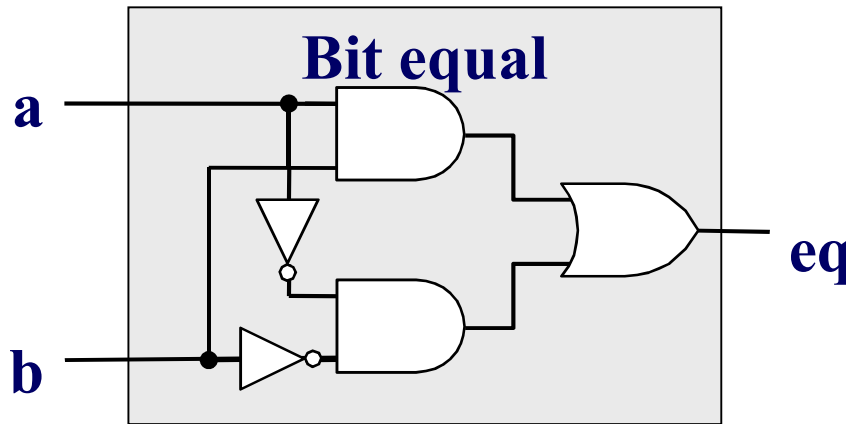
# 混合电路



## ■ 逻辑门无环网络

- 连续响应主输入的变化
- 主输出是主输入的布尔函数（有延迟）

# 位相等

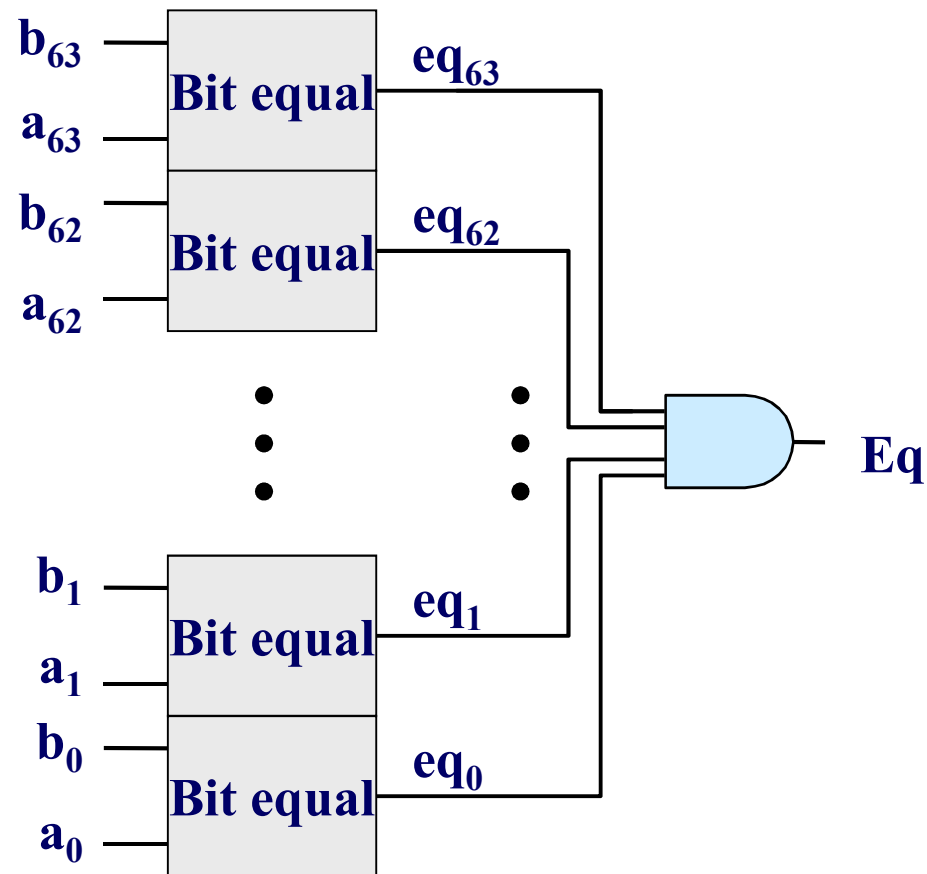


## 硬件控制语言(HCL)表达式

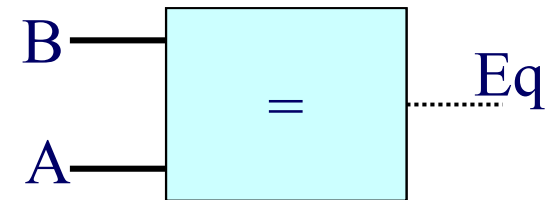
$\text{bool eq} = (a \& \& b) \parallel (!a \& \& !b)$

- 如果a和b相等就生成1
- 硬件控制语言(HCL, Hardware Control Language)
  - 非常简单的硬件描述语言
    - 布尔操作的语法和C语言逻辑运算相似
  - 将用HCL描述处理器的控制逻辑

# 字相等



## 字级表示



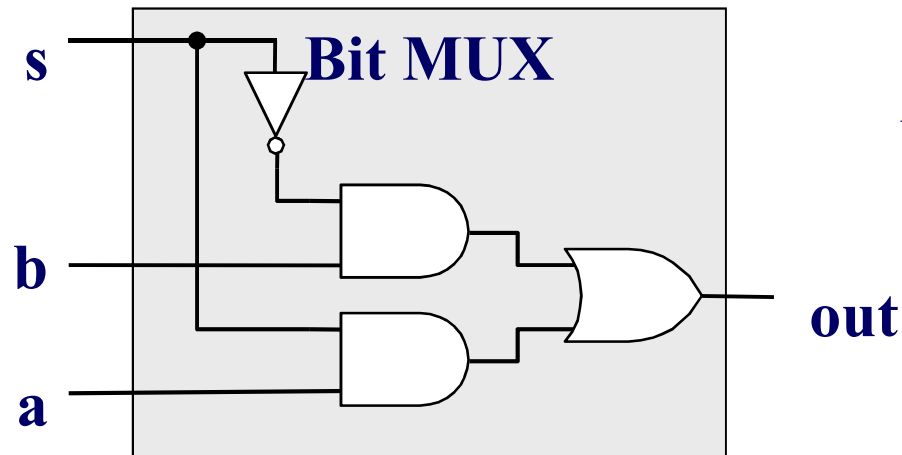
## HCL表示

**bool Eq = (A == B)**

- 64 位 字的大小
- HCL表示
  - 相等操作
  - 产生布尔值



# 位多路复用器

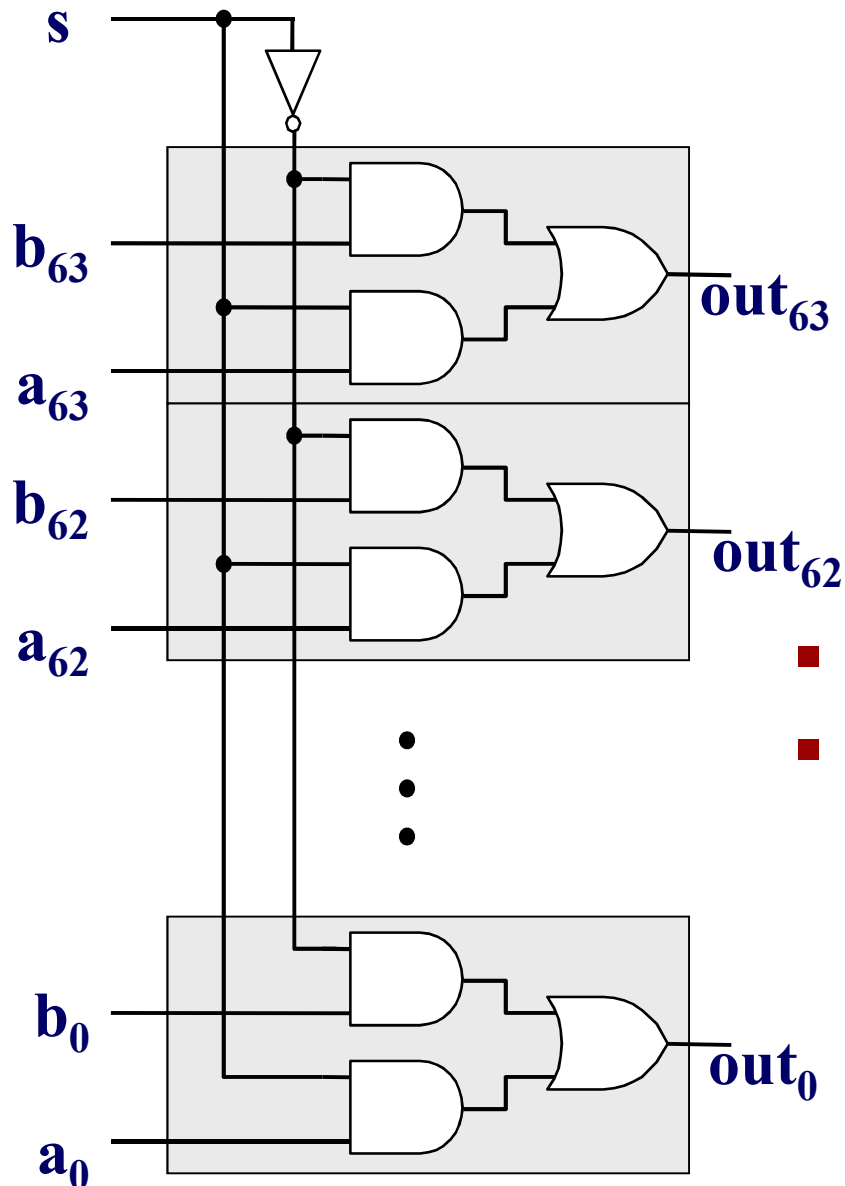


HCL表示

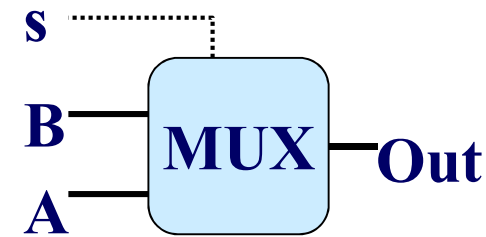
`bool out = (s&&a)||(!s&&b)`

- 控制信号  $s$
- 数据信号  $a$  和  $b$
- 当  $s=1$  时输出  $a$ ，当  $s=0$  时输出  $b$

# 字多路复用器



## 字级表示



## HCL表示

```
int Out = [
  s : A;
  1 : B;
];
```

- 根据控制信号s来选择输入字A或B
- 硬件控制语言表示
  - 情况表达式(case语句)
  - 一系列二元组“布尔表达式:整数表达式”
  - 第一个求值为1的情况会被选中

# 硬件控制语言(HCL)字级示例

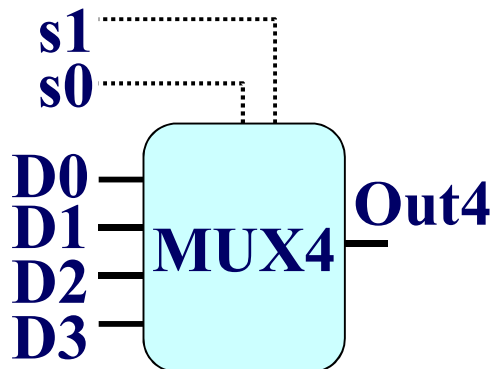
## 3个字的最小值



```
int Min3 = [
    A < B && A < C : A;
    B < A && B < C : B;
    1               : C;
];
```

- 找到三位输入中最小的字
- HCL情况表达式
- 最后的情况：保证有一个匹配值

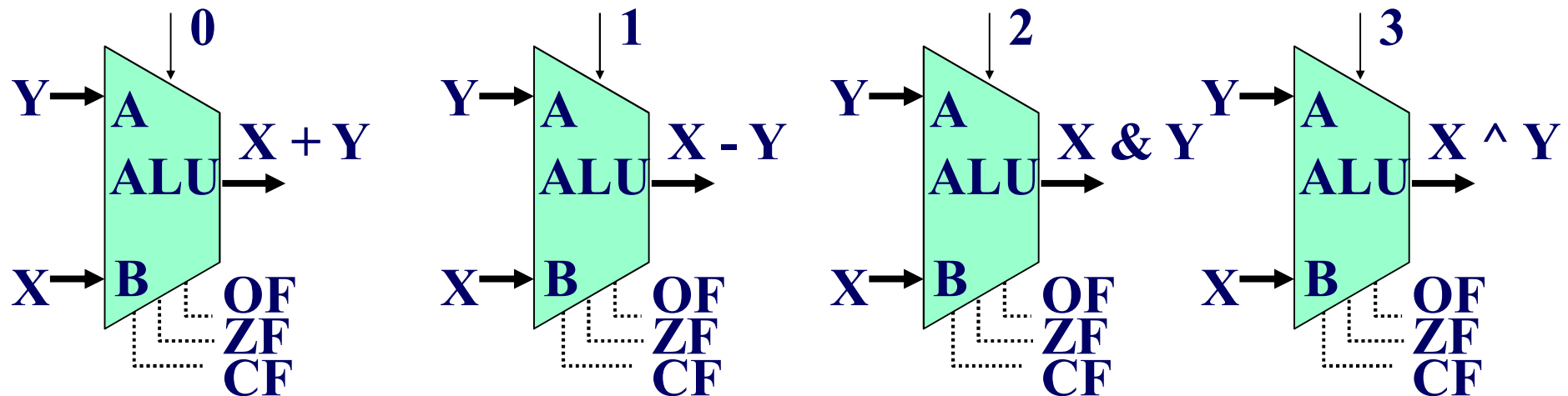
## 4路复用器



```
int Out4 = [
    !s1 && !s0 : D0;
    !s1       : D1;
    !s0       : D2;
    1         : D3;
];
```

- 根据两个控制位，从4个输入中选择一个（字）
- HCL情况表达式
- 通过假定顺序地匹配，简化测试

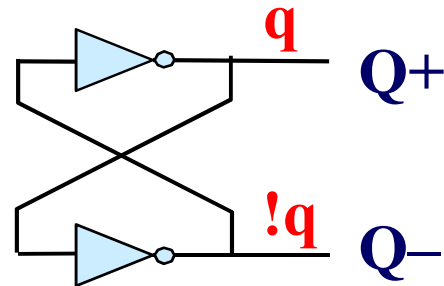
# 算术/逻辑单元(ALU)



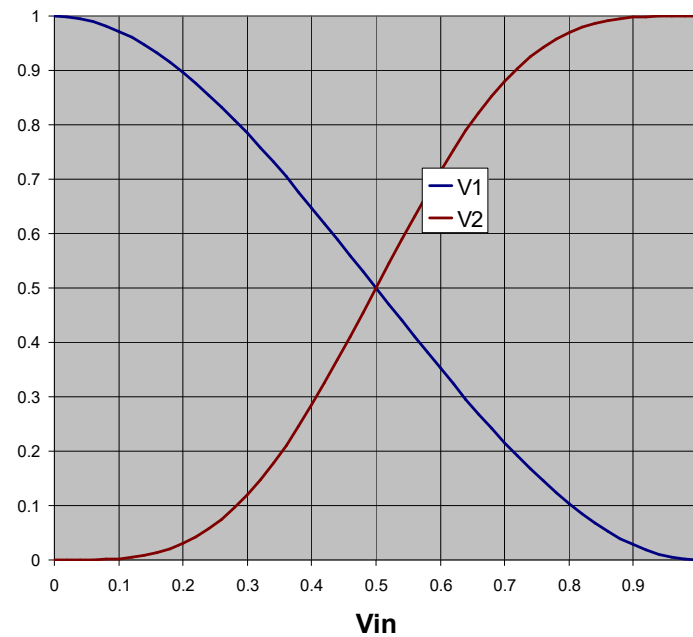
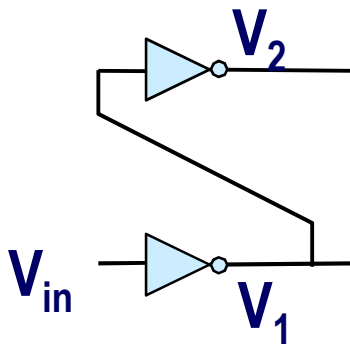
- 组合逻辑
  - 连续响应输入
- 控制信号选择计算函数
  - 对应Y86-64中4种算术/逻辑操作，控制值和操作的功能码对应
  - 也计算条件码的值

# 存储 1 位

## 双稳态元件

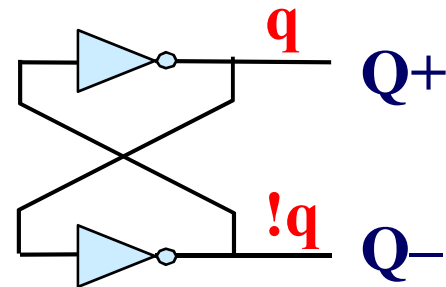


$q = 0 \text{ or } 1$

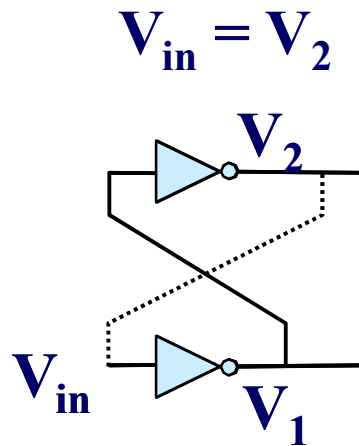


# 存储1位 (cont.)

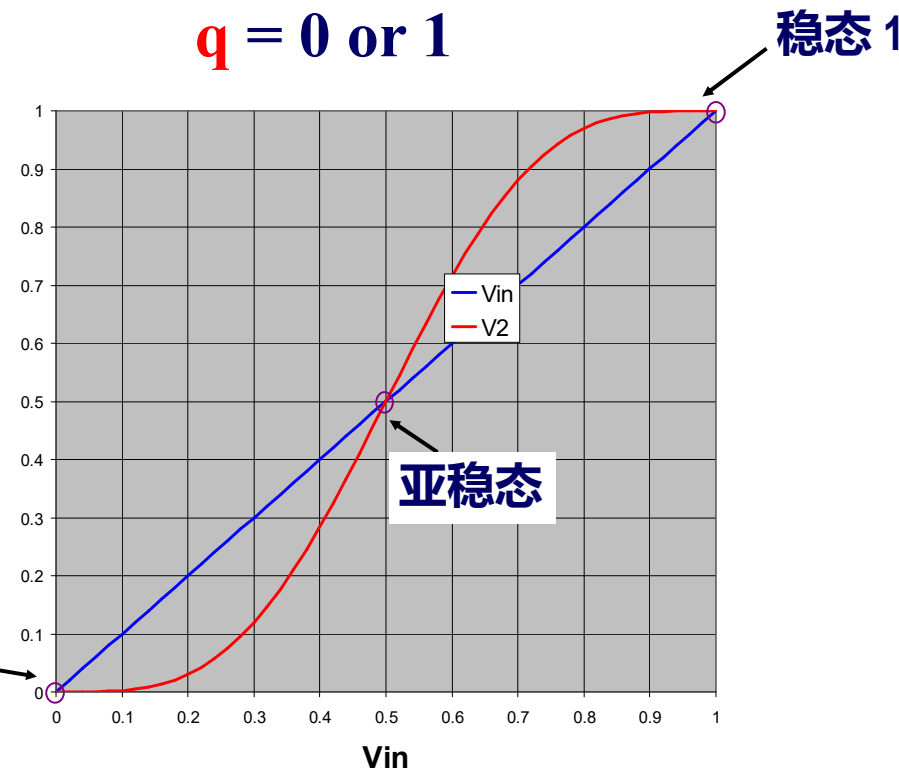
## 双稳态元件



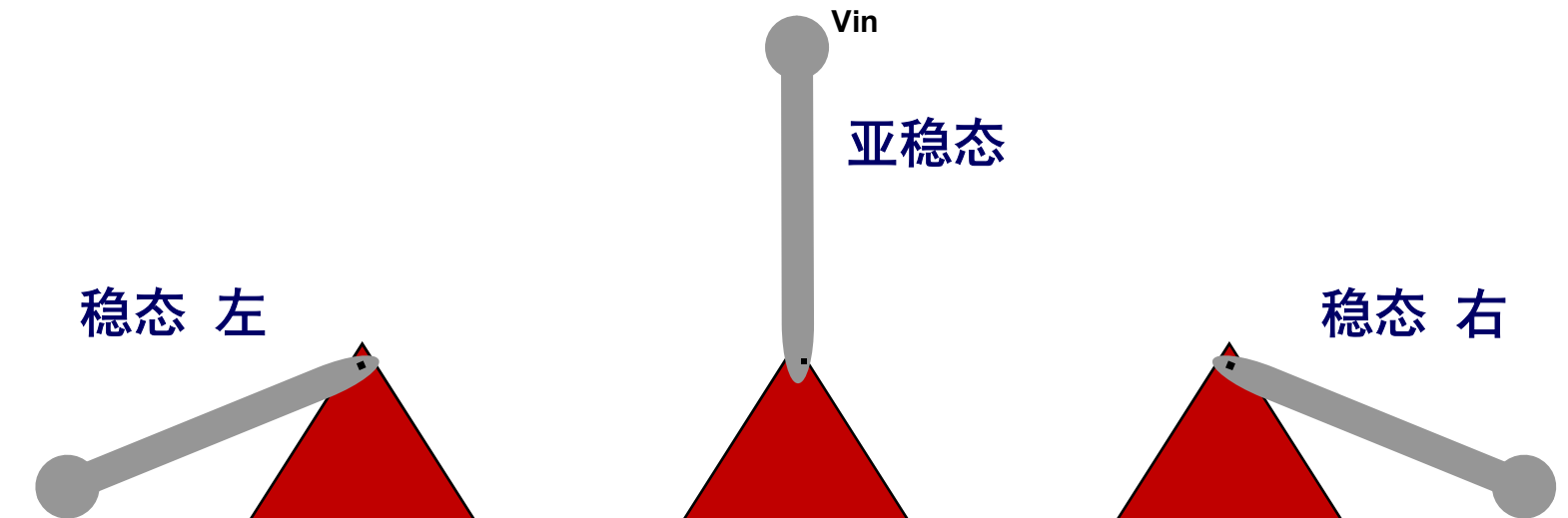
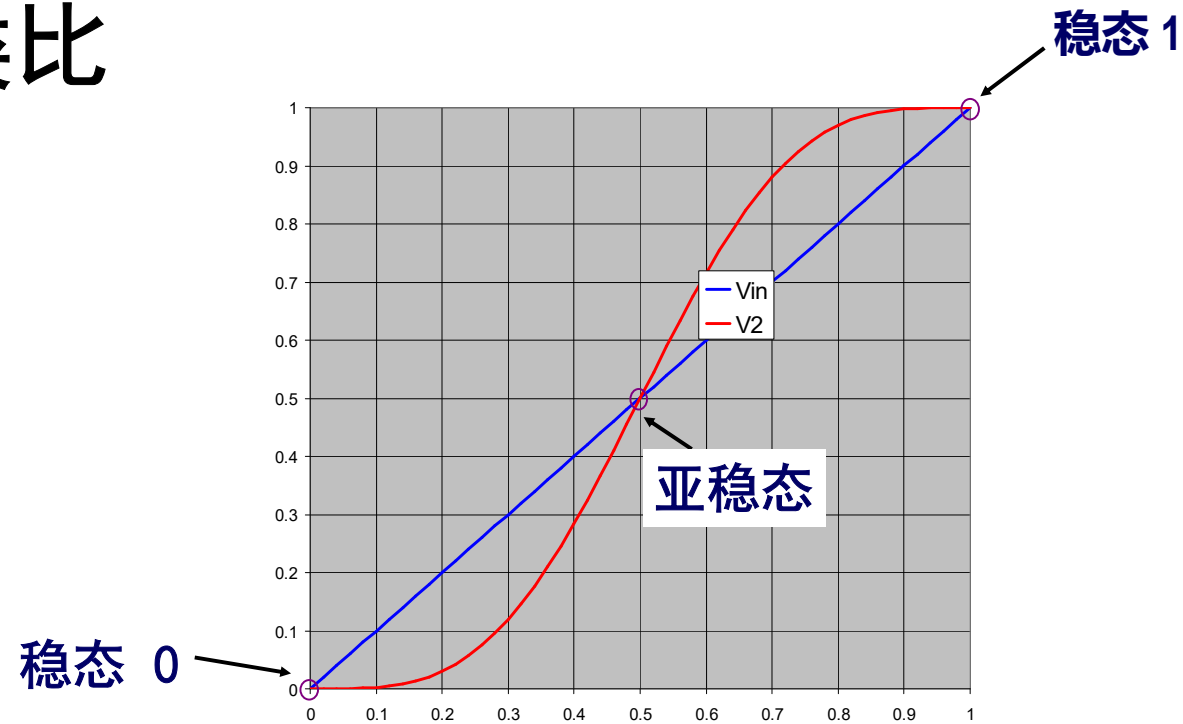
$q = 0 \text{ or } 1$



稳态 0

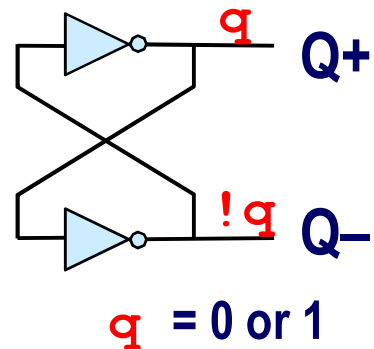


# 物理类比

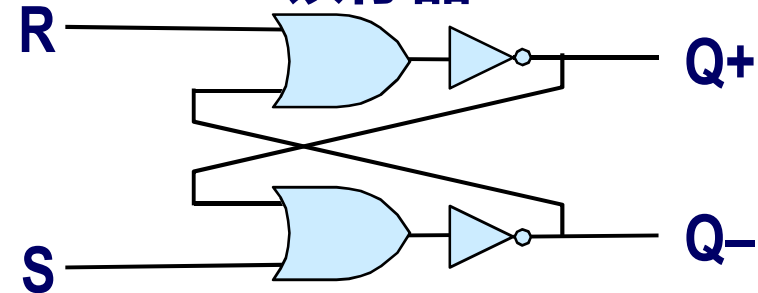


# 存储、访问1 位

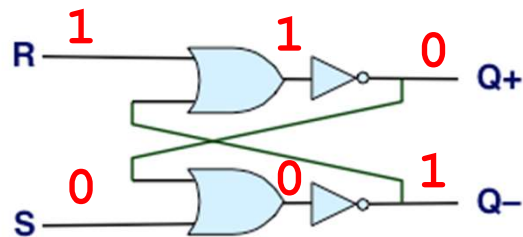
## 双稳态元件



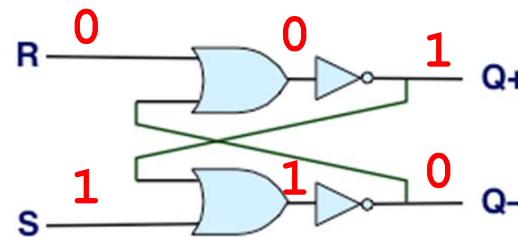
## R-S 锁存器



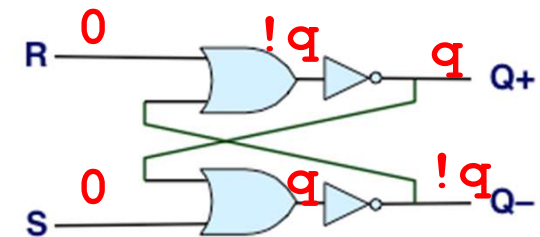
## 重新设置



## 设置

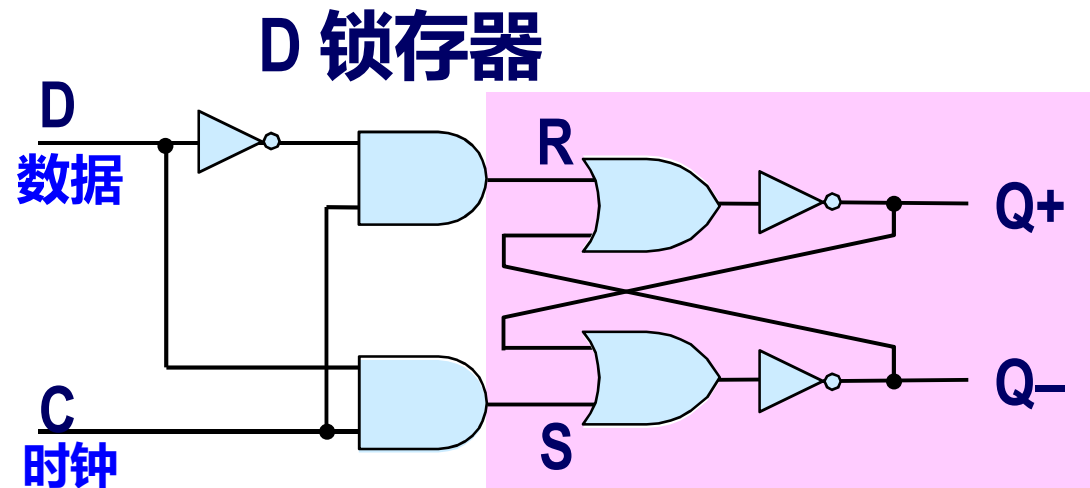


## 存储

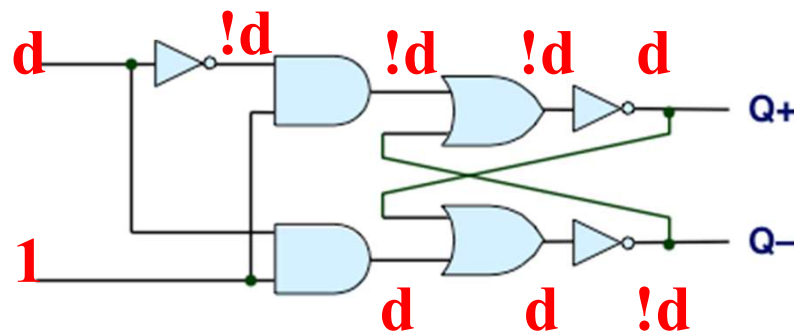




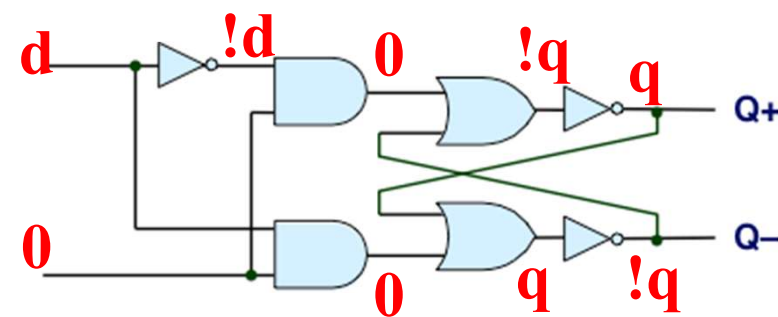
# 1位锁存器



## 锁存 Latching

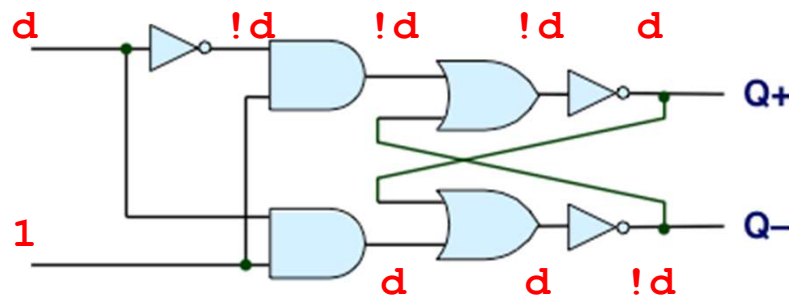


## 存储

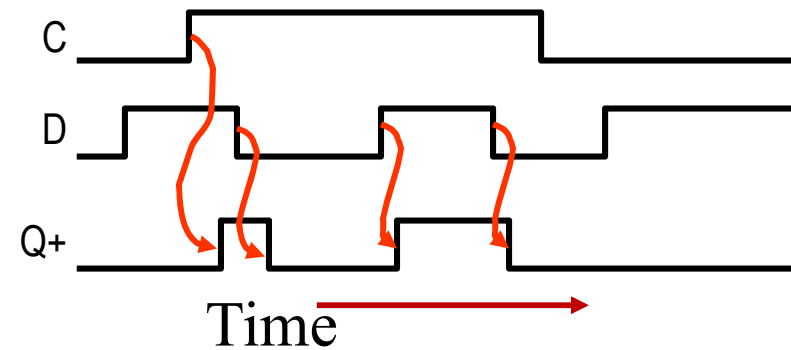


# 透明1位锁存器

## 锁存Latching

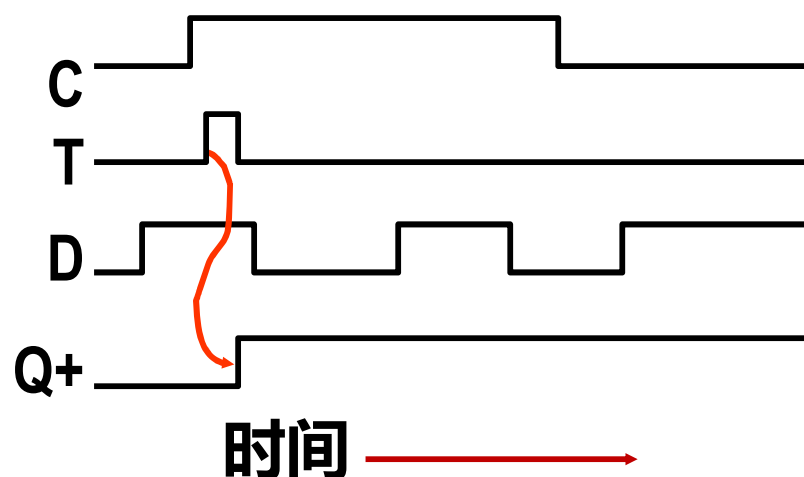
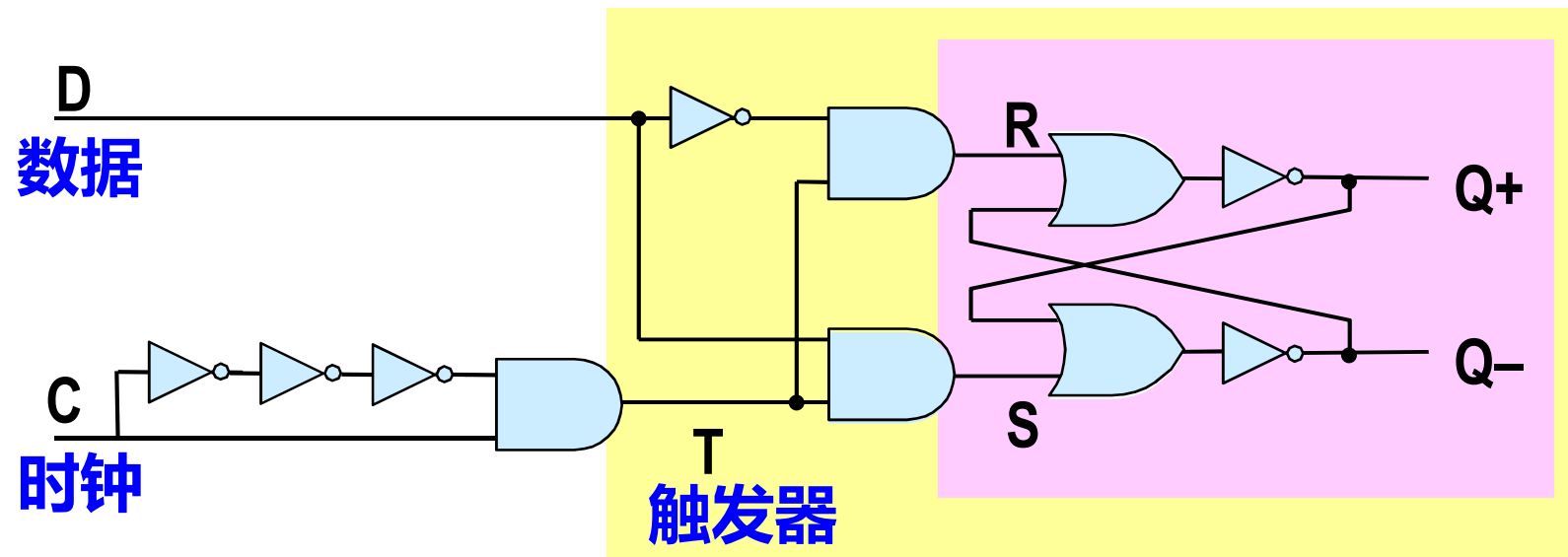


## 改变D



- 当在锁存模式时，D的信号会传递给Q+ 和 Q-
- 当C下降时，锁存的值取决于D

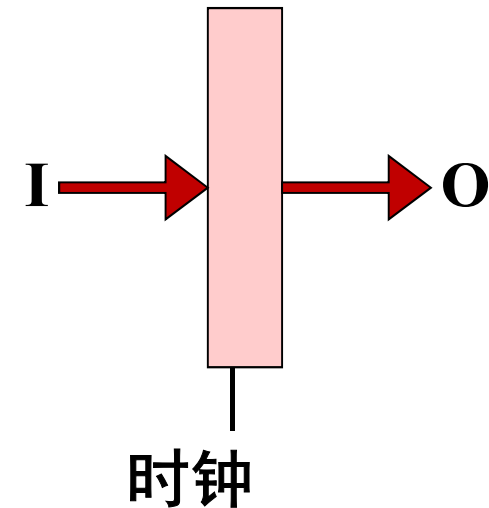
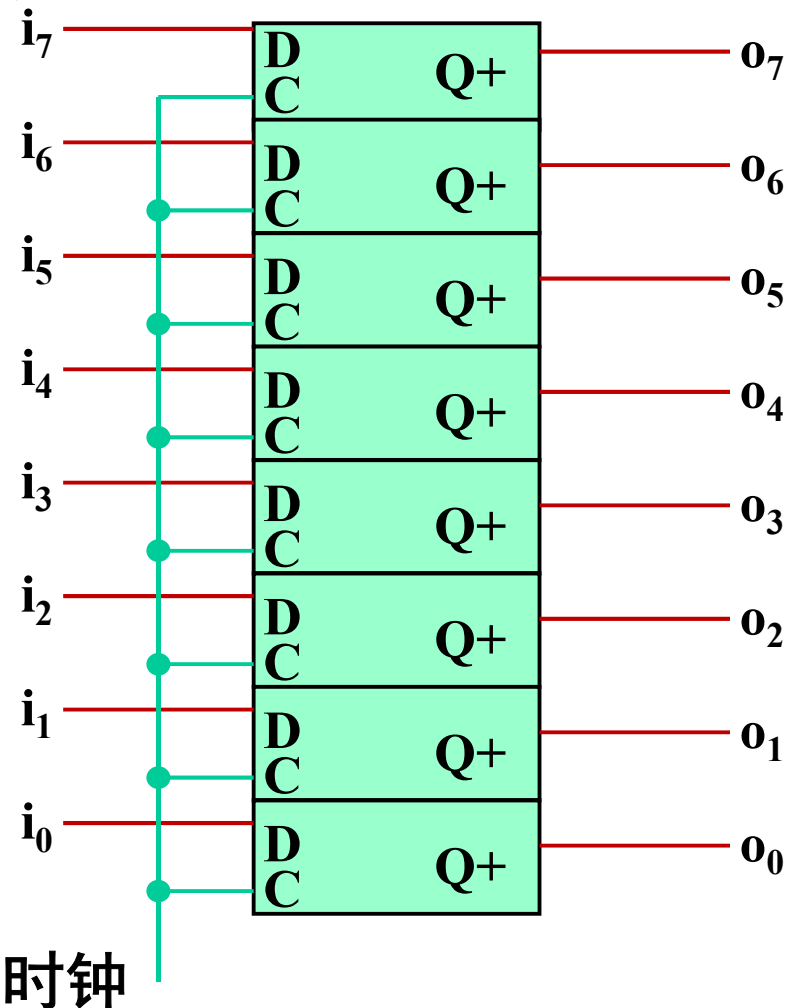
# 边缘触发锁存器



- 只在短暂的时间段处于锁存模式
  - 时钟上升沿 （下降沿？）
- 当时钟上升的时候，锁存的值取决于数据
- 在其他时候输出保持不变

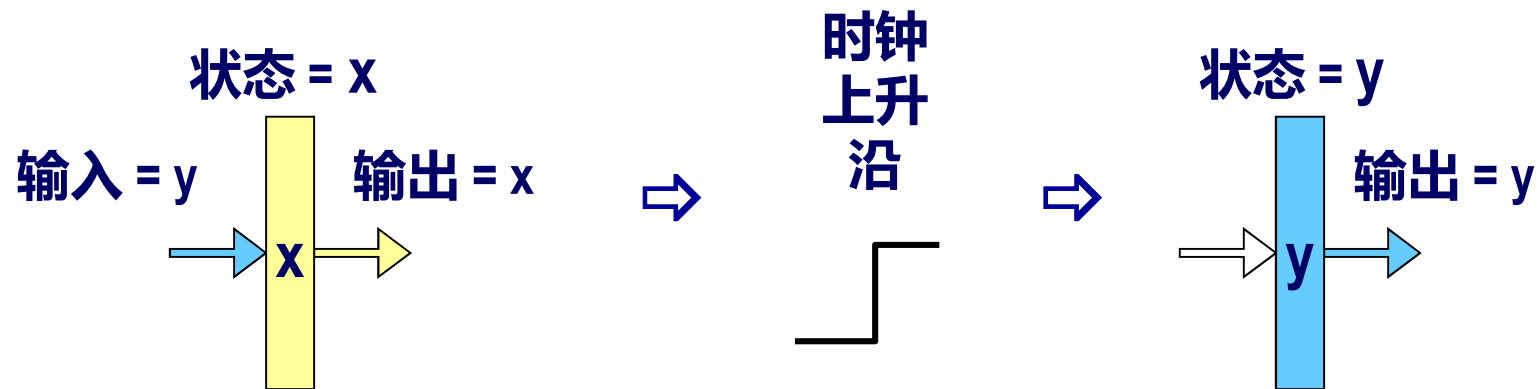
# 寄存器—时钟寄存器

结构



- 存储字数据
  - 和在汇编代码中看到的 *程序寄存器* 不同
- 边缘触发锁存器的集合
- 在时钟上升沿加载输入

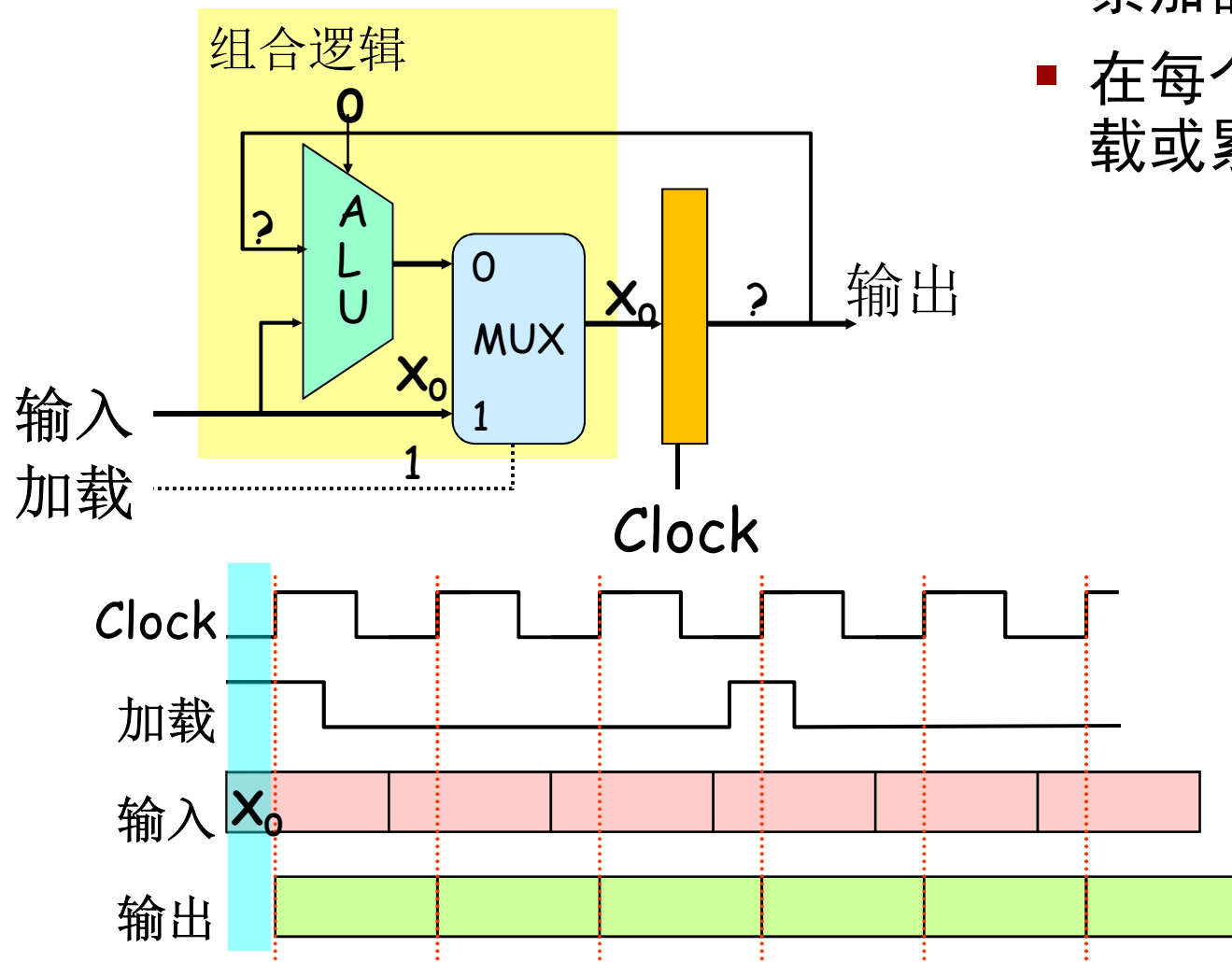
# 寄存器操作



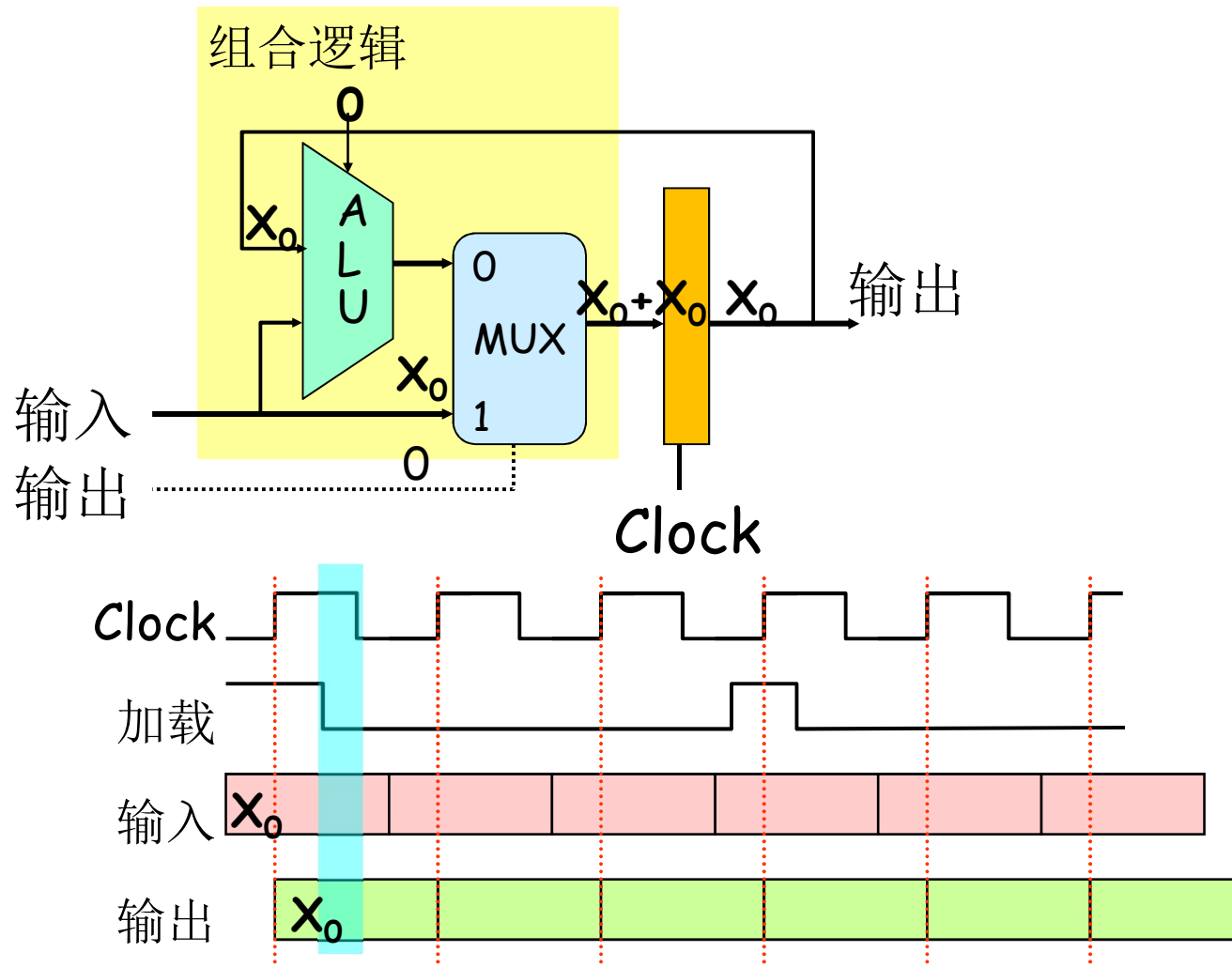
- 存储数据位
- 大多数时候作为输入和输出之间的栅栏（隔离）
- 当时钟上升的时候，加载输入

# 状态机示例

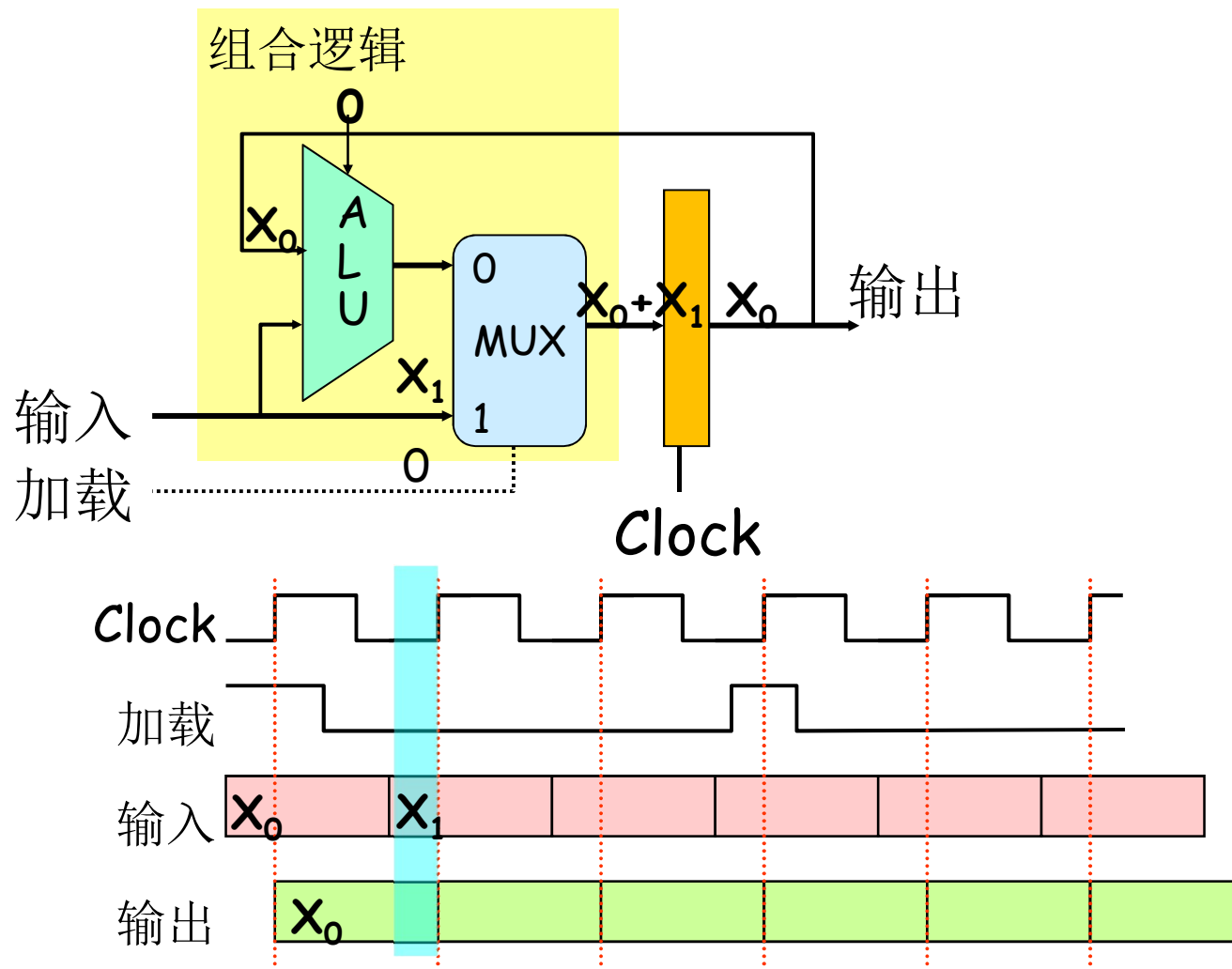
- 累加器示例
- 在每个时钟加载或累加



# 状态机示例

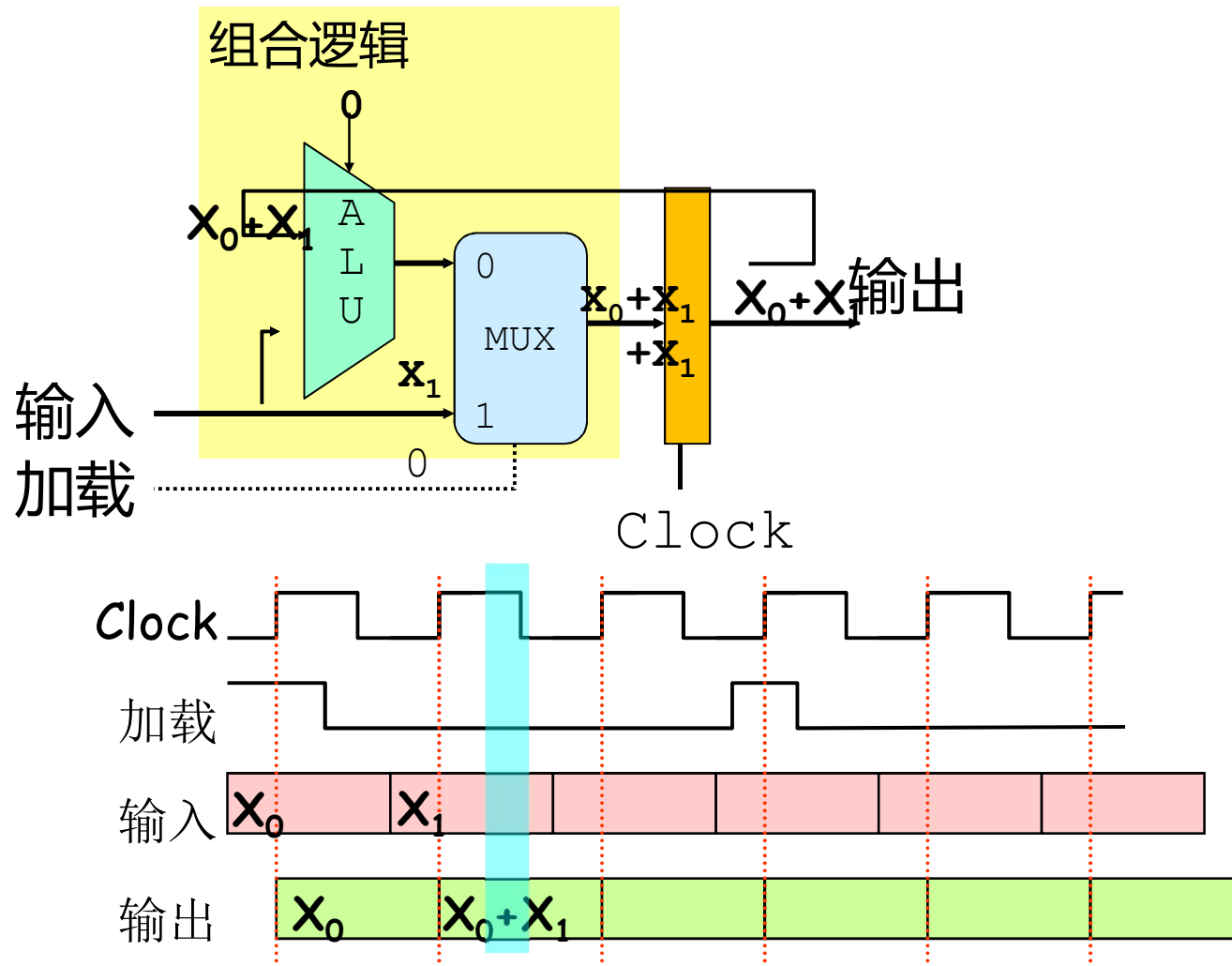


## 状态机示例

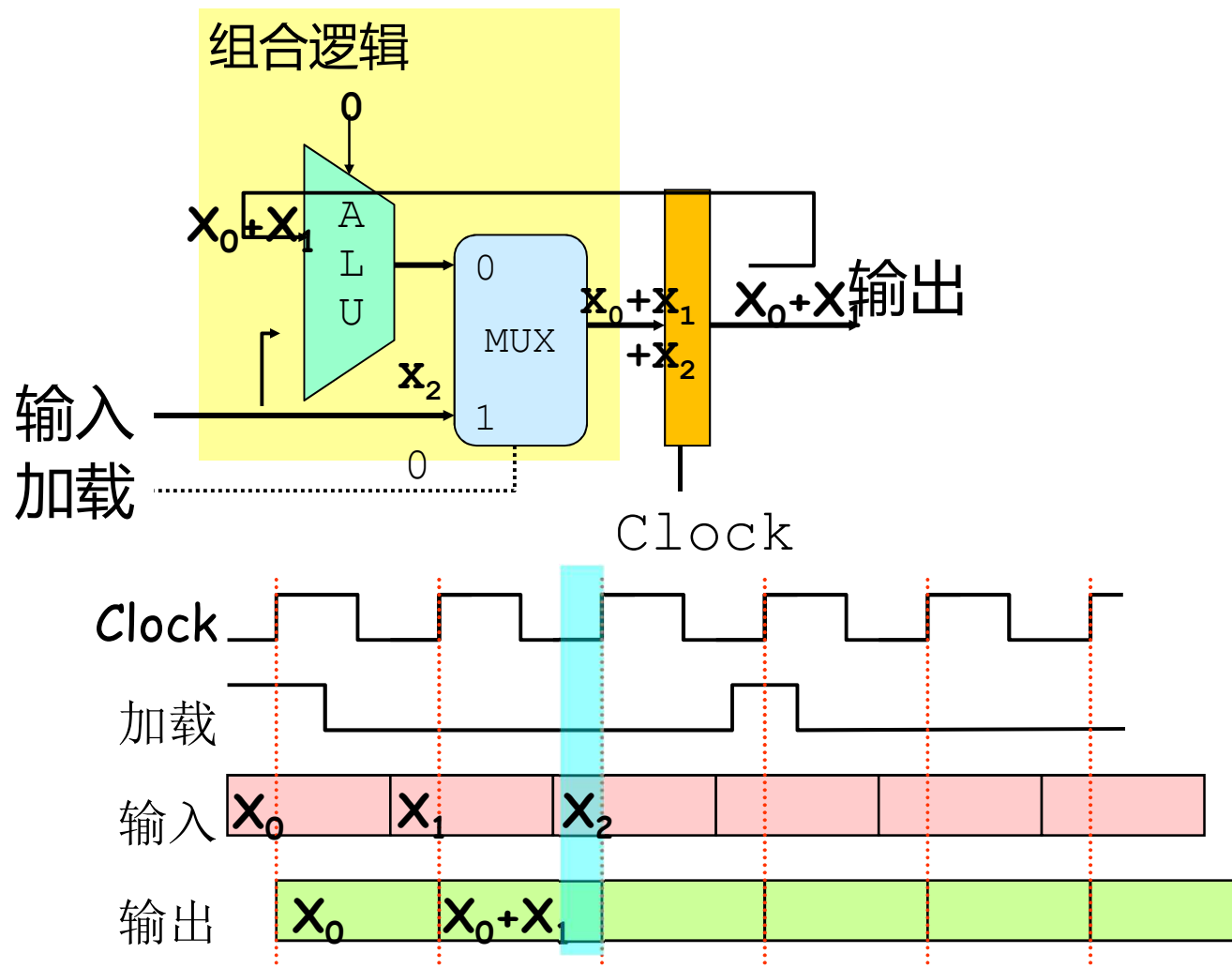




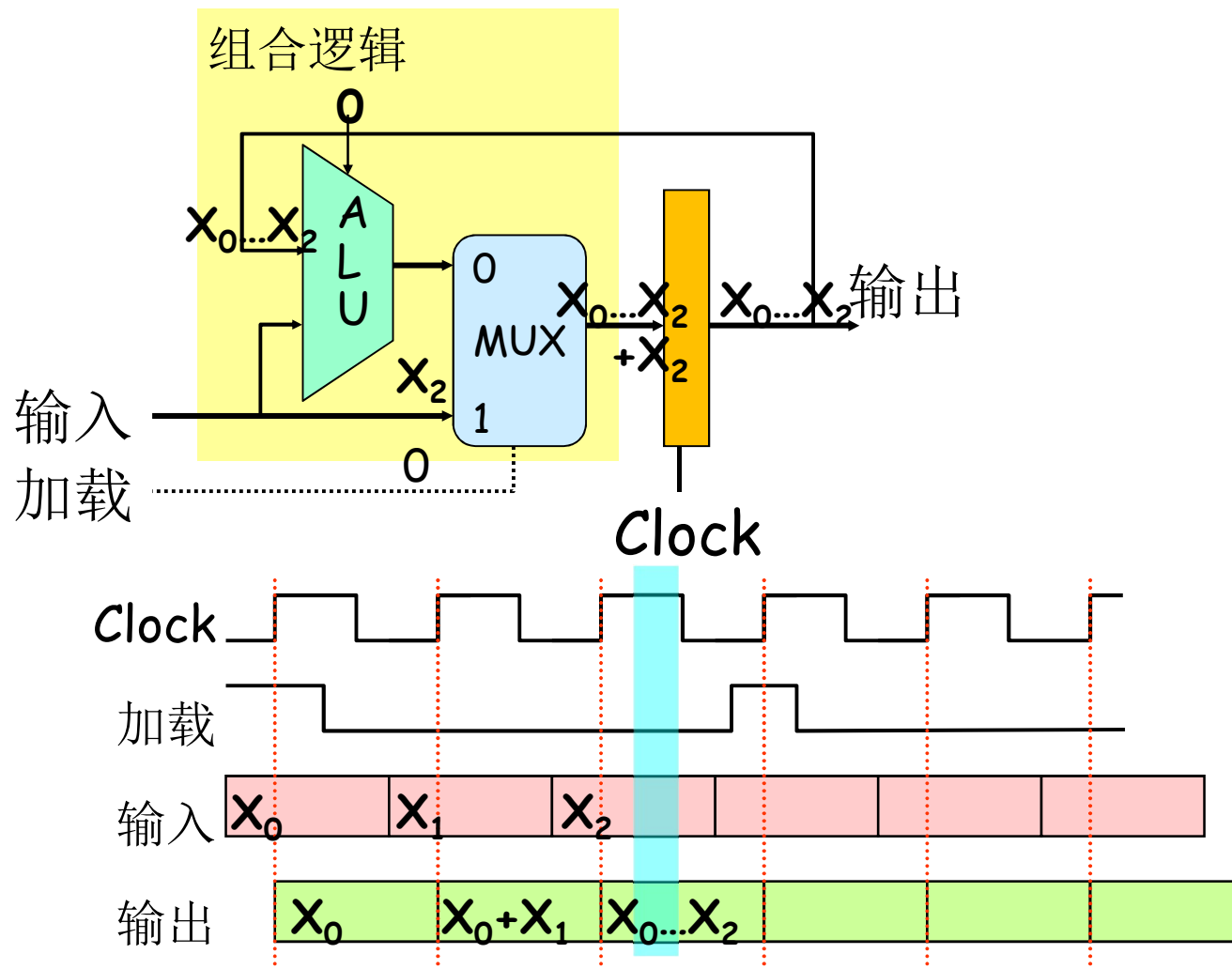
# 状态机示例



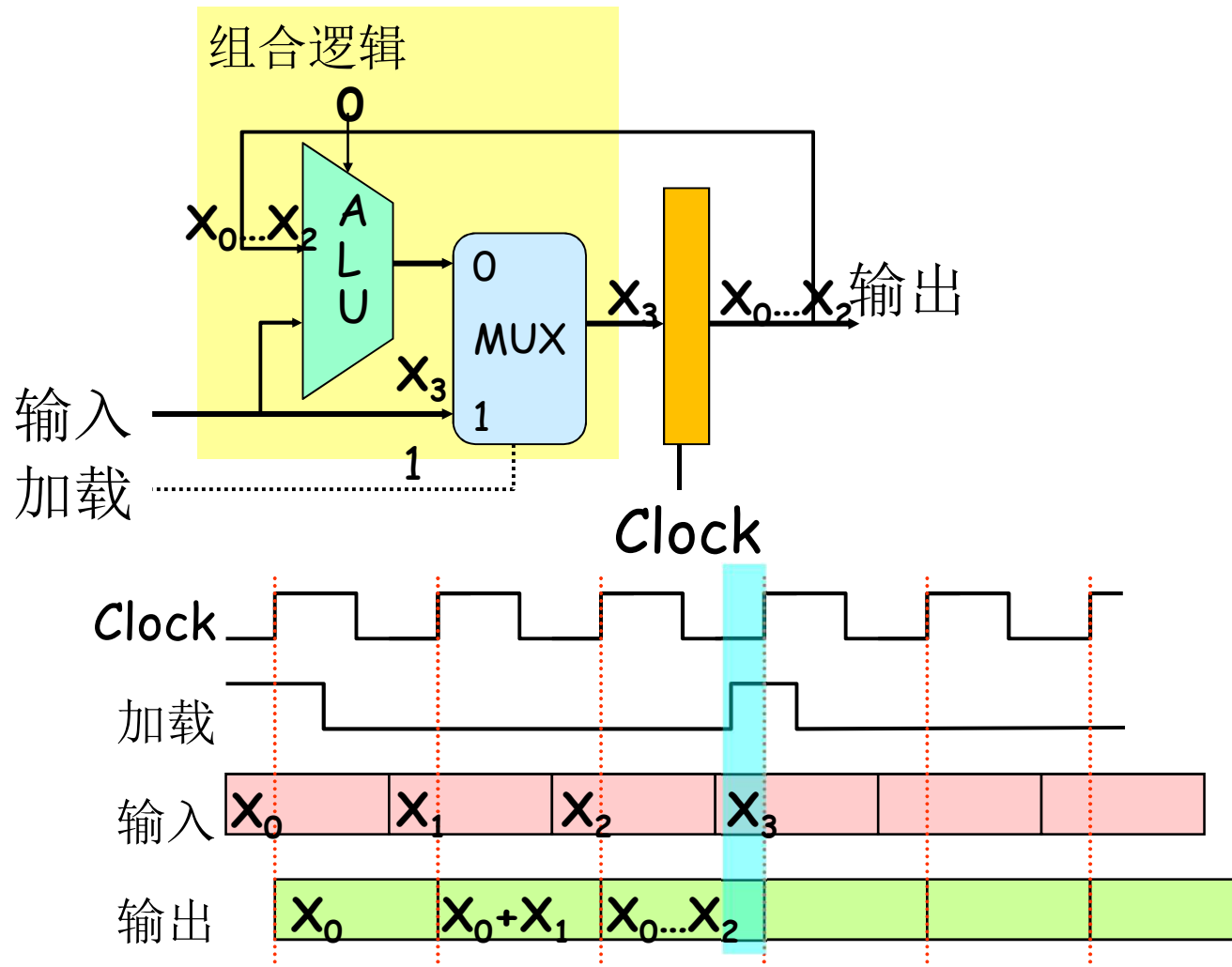
# 状态机示例



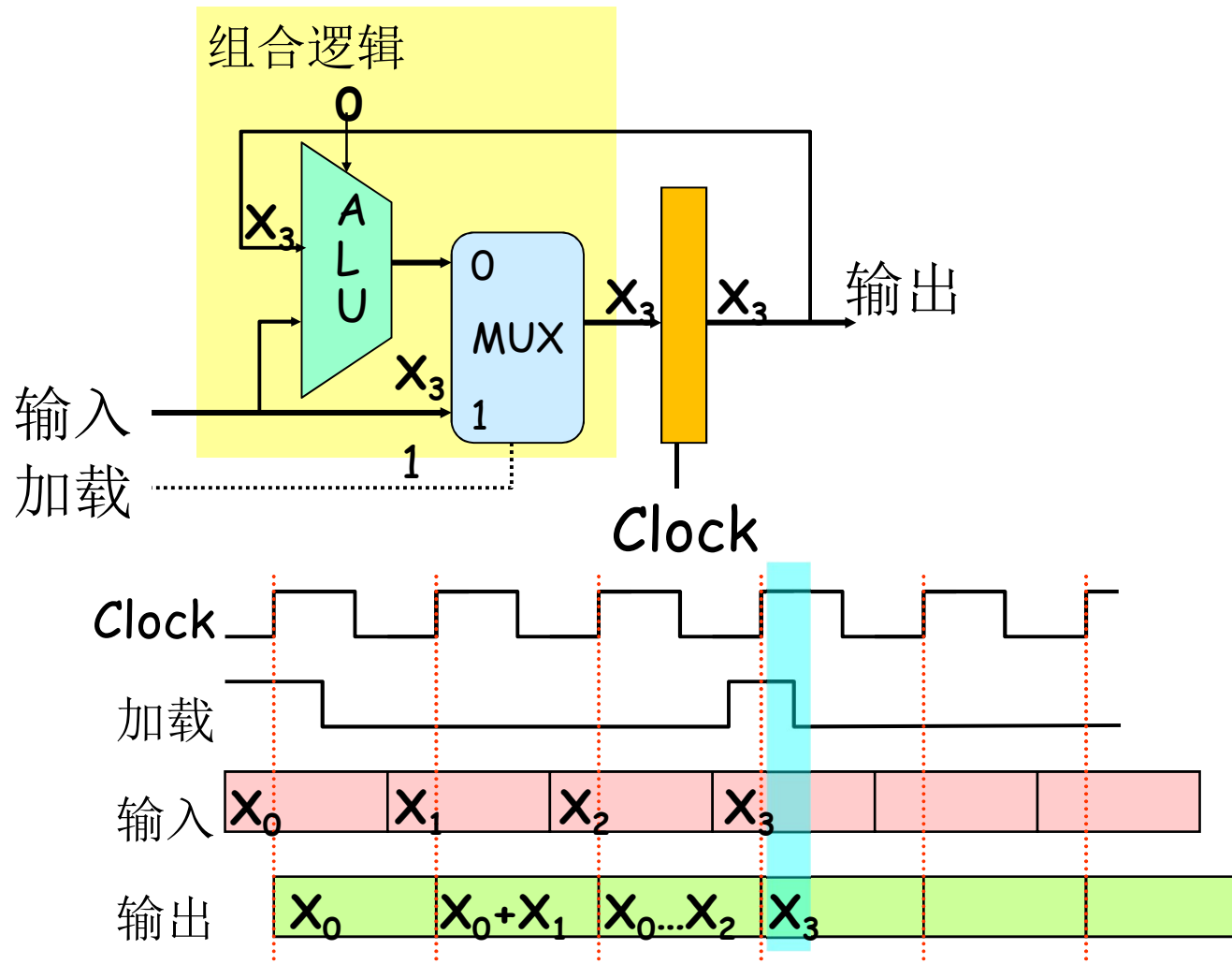
# 状态机示例



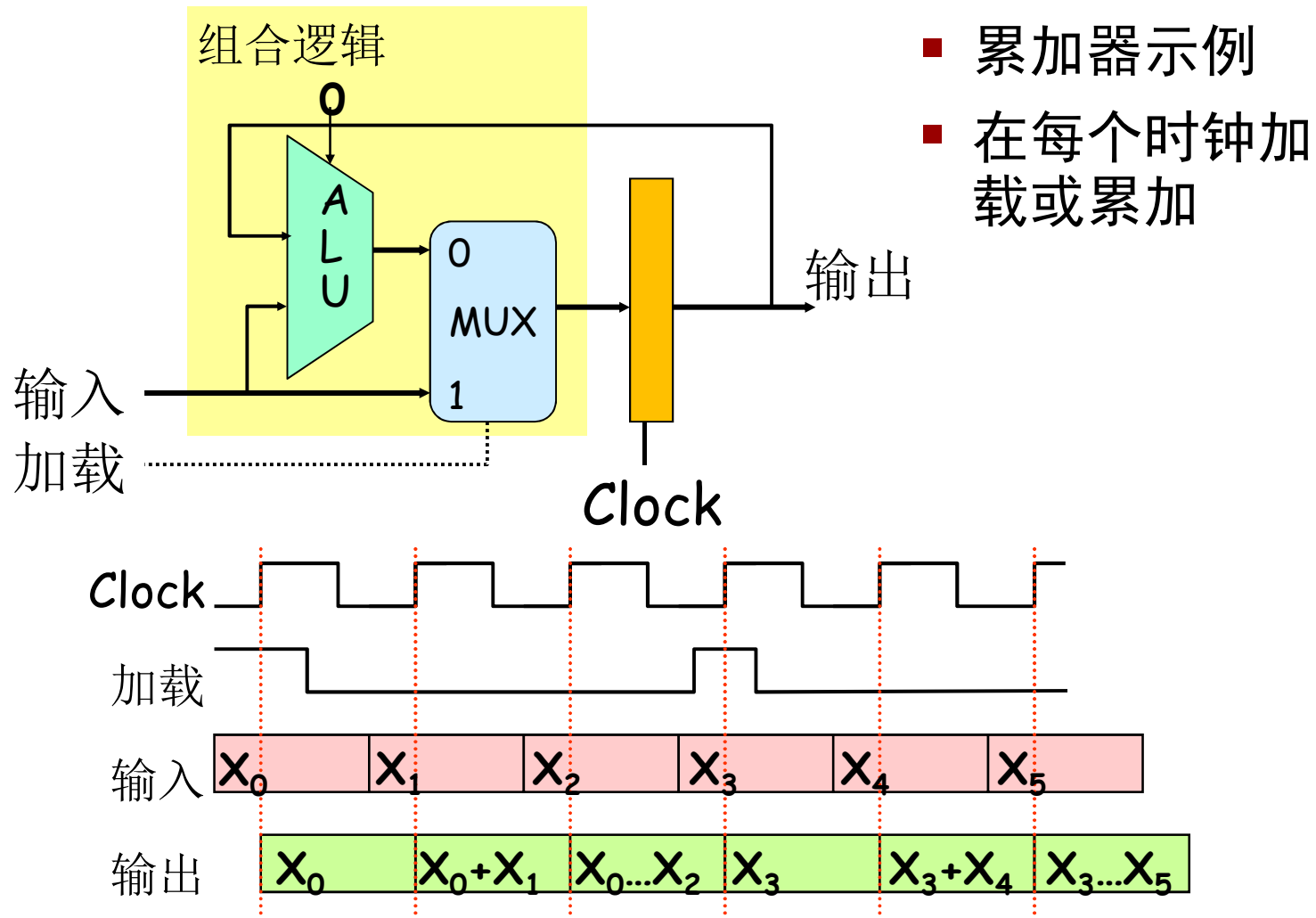
# 状态机示例



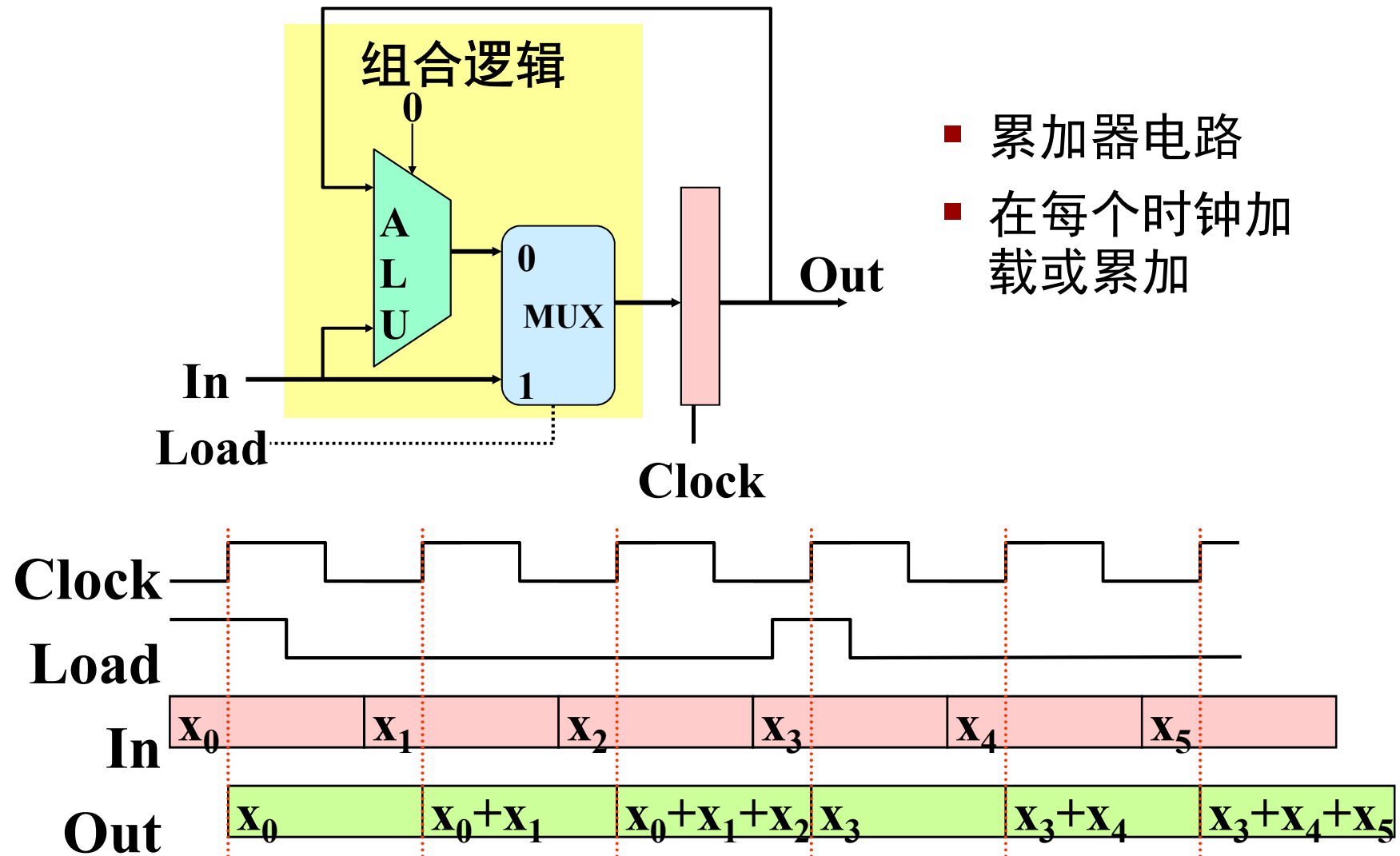
## 状态机示例

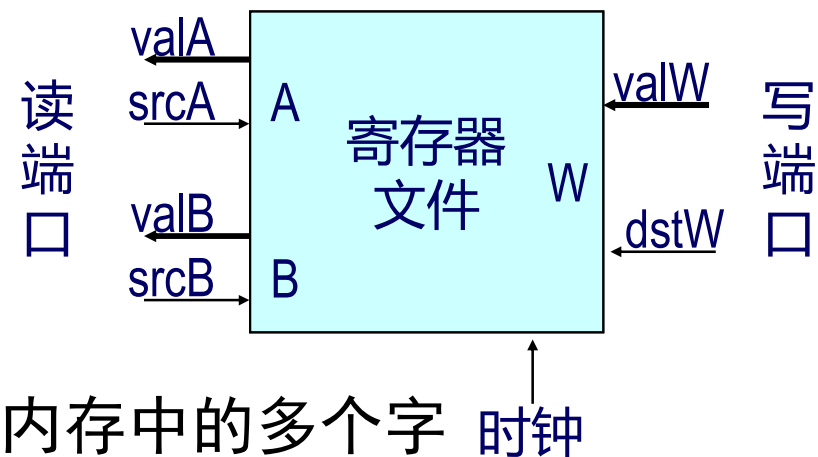
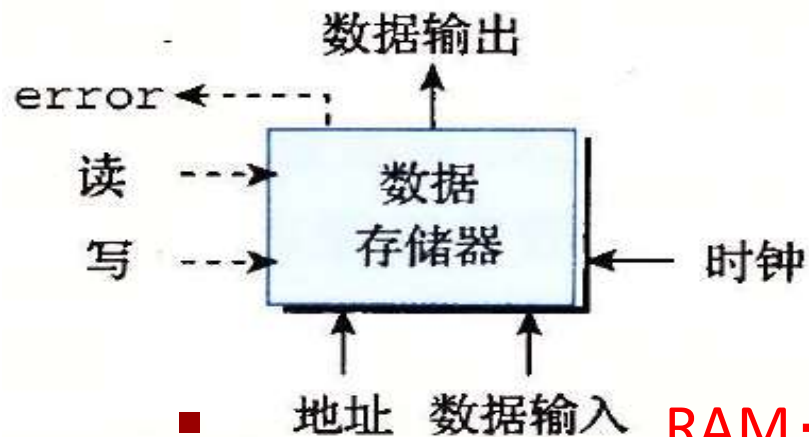


# 状态机示例



# 状态机示例





# 随机存取存储器

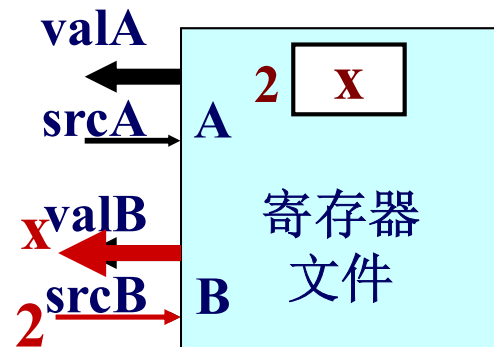
- **RAM: 存储内存中的多个字**
  - 通过输入的地址来决定读/写哪个字，写由clk控制。
- **RF: 寄存器文件**
  - **硬件寄存器:** 稳态、组合逻辑的屏障，CLK边沿触发。如：PC、CC、Stat 等
  - **程序寄存器:** 存储数据，可按ID读、写的存储单元。汇编级用 `%rax`, `%rsp`, `%r14` 等，机器级-寄存器ID标识符作为地址 (0000-1110) 15 (0xF) 表示不执行读写
- **PORTS: 多端口**
  - 在每个周期可以同时读/写多个字
    - 每个端口有单独的地址和数据输入/输出



# 寄存器文件时序

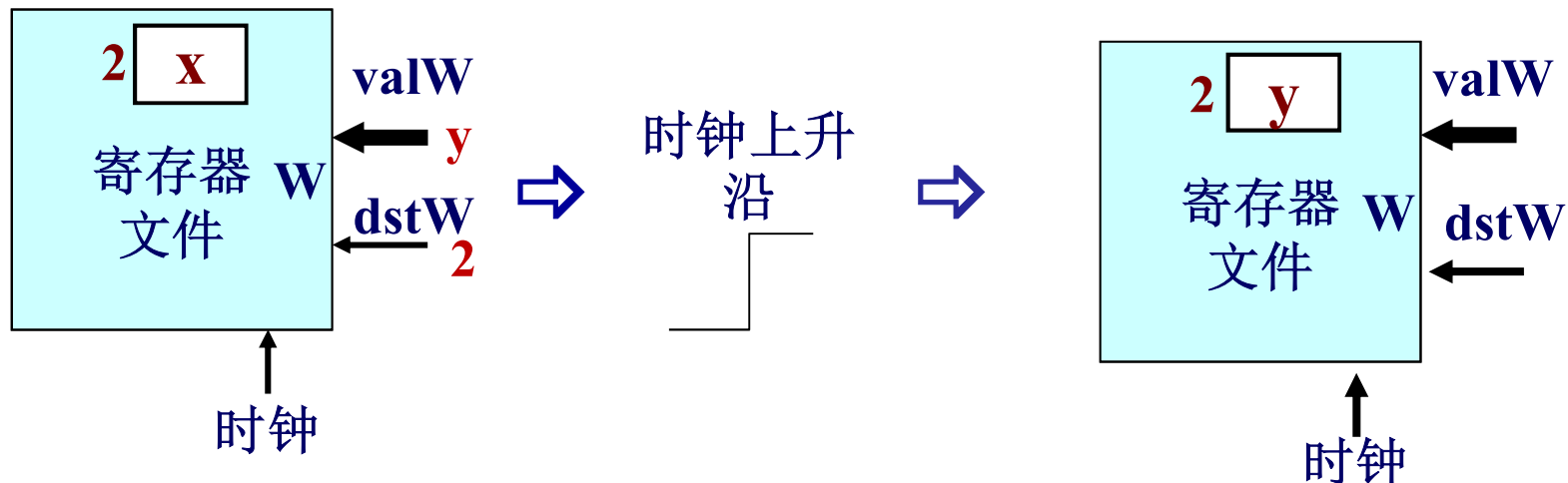
## ■ 读

- 类似组合逻辑
- 根据输入地址产生输出数据，
  - 有延迟



## ■ 写

- 类似寄存器
- 只在时钟上升沿更新



# 硬件控制语言(HCL)

非常简单的硬件描述语言，仅可描述硬件操作的一部分：我们将要研究和修改的部分

## ■ 数据类型

- bool: 布尔
  - a, b, c, ...
- int: 字
  - A, B, C, ...
  - 不指定字大小——字节, 64-位 字, ...

## ■ 声明

- **bool a = 布尔表达式;**
- **int A = 整数表达式;**

# HCL操作

## 通过返回值的类型分类

### ■ 布尔表达式

#### ■ 逻辑操作

- $a \ \&\& \ b, a \ || \ b, !a$

#### ■ 字比较

- $A == B, A != B, A < B, A <= B, A >= B, A > B$

#### ■ 集合成员

- $A \text{ in } \{ B, C, D \}$ 
  - 与  $A == B \ || \ A == C \ || \ A == D$  一样

### ■ 字表达式

#### ■ 情况表达

- $[ a : A; b : B; c : C ]$
- 按顺序评估测试表达式  $a, b, c, \dots$
- 返回和首次成功测试对应的字表达式  $A, B, C, \dots$

# 总结

## ■ 计算

- 通过组合逻辑实现
- 计算布尔函数
- 连续地对输入变化响应

## ■ 存储

- 寄存器
  - 存储单字
  - 当时钟上升时加载
- 随机存取存储器
  - 存储多字
  - 可能有多个读/写端口
  - 当输入地址变化时读取字
  - 当时钟上升时写入字