2019-2020学年秋季学期

第六部分-B
高级时序逻辑设计

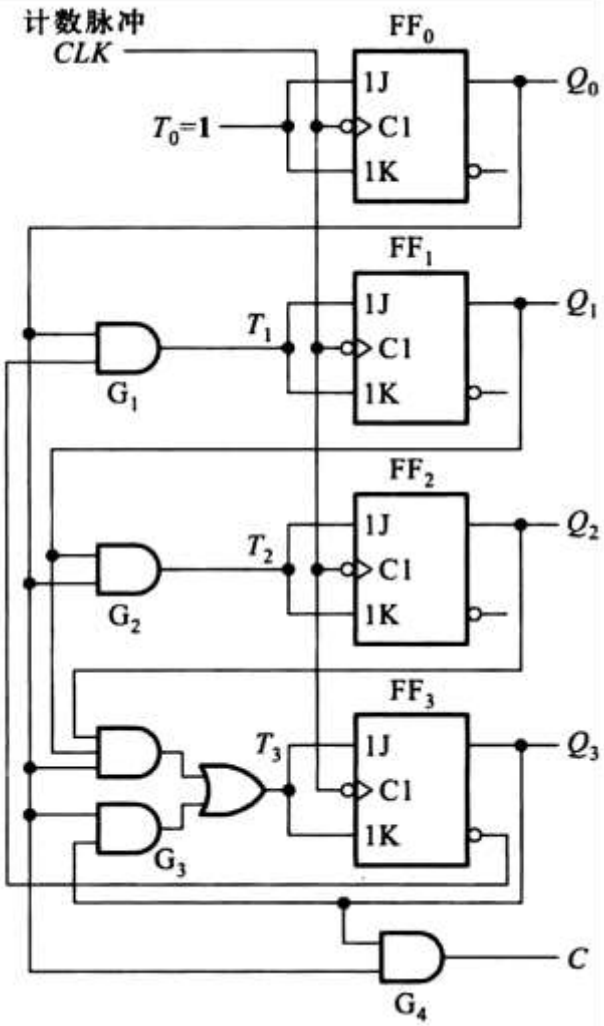
高级时序逻辑设计

- 使用Verilog HDL设计时序逻辑电路
  - 任意数制计数器、随机数发生器、簇发数据检测器、自动贩卖机
  - 参数（parameter）的使用
- 时序逻辑电路的测试设计
  - 时钟和复位的产生、断言检查、自启
- 复杂时序逻辑电路设计
  - 循环仲裁器（round-robin arbiter）
  - 指针型的FIFO缓冲
- 时序逻辑电路的时序分析
  - 路径时间检查
  - 时钟树

常用时序逻辑—计数器（十进制）

```
module counter10(
  input clk,
  output [3:0] q,
  output c);

  reg [3:0] q;
  always @(negedge clk)
    if(q < 4'd9) q <= q + 1;
    else         q <= 0;

  assign c = q == 4'd9;
endmodule
```

如果我们在设计时还不确定计数器的计数数值怎么办？



任意计数数值计数器-端口

```
module counterN(
  input clk,
  input [3:0] num,  // 计数数值
  output [3:0] q,
  output c);

  reg [3:0] q;
  always @(negedge clk)
    if(c)  q <= 0;
    else   q <= q + 1;

  assign c = q == num - 1;
endmodule

wire [3:0] q;
wire c;

counter cnt(.clk(clk), .num(10), .q(q), .c(c)); // 使用计数器
```

将计数数值定为端口上的一个输入。

任意计数数值计数器-参数(parameter)

```
module counterN #(parameter num=10) (
  input clk,
  output [3:0] q,
  output c);

  reg [3:0] q;
  always @(negedge clk)
    if(c)   q <= 0;
    else    q <= q + 1;

  assign c = q == num - 1;
endmodule

wire [3:0] q;
wire c;

counter #(.num(10)) cnt(.clk(clk), .q(q), .c(c)); // 使用计数器
```

将计数数值定为一个参数。

端口和参数的比较

- 端口
  - 端口是真实的硬件实现
  - 需要手动连接一个信号作为输入（不过可以接常量）
  - 允许在运行时改变
- 参数
  - 参数是综合时优化技术，在实例化时必须设定为一个常数
  - 方便了综合器对电路优化
  - 不允许在运行时改变
  - 有默认值

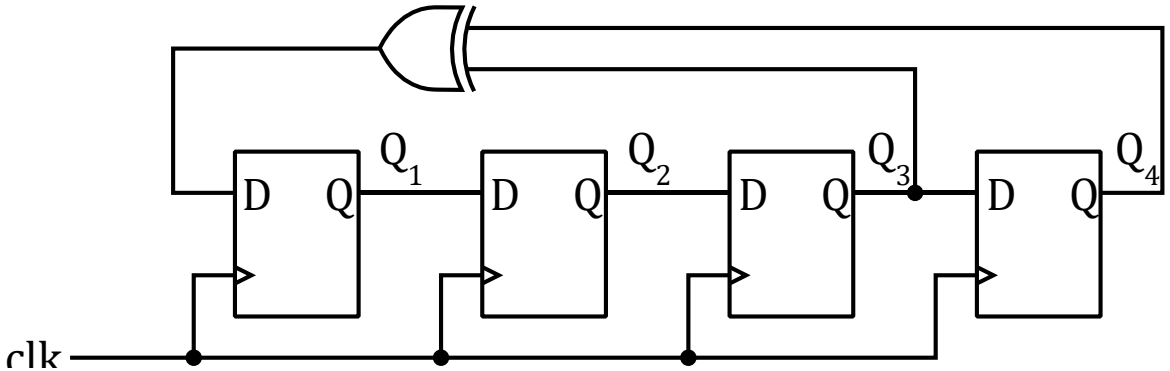
伪随机数发生器

- 使用特定的反馈函数，对于N位的移位寄存器，我们总是能生成长度为$2^N - 1$的伪随机数序列。

N	F()	N	F()
3	$Q_3 \oplus Q_2$	4	$Q_4 \oplus Q_3$
5	$Q_5 \oplus Q_3$	6	$Q_6 \oplus Q_5$
7	$Q_7 \oplus Q_6$	8	$Q_8 \oplus Q_6 \oplus Q_5 \oplus Q_4$
9	$Q_9 \oplus Q_5$	10	$Q_{10} \oplus Q_7$
11	$Q_{11} \oplus Q_9$	12	$Q_{12} \oplus Q_6 \oplus Q_4 \oplus Q_1$
13	$Q_{13} \oplus Q_4 \oplus Q_3 \oplus Q_1$	14	$Q_{14} \oplus Q_5 \oplus Q_3 \oplus Q_1$
15	$Q_{15} \oplus Q_{14}$	16	$Q_{16} \oplus Q_{15} \oplus Q_{13} \oplus Q_4$

https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp210.pdf

4位移位寄存器：伪随机数发生器（异或）



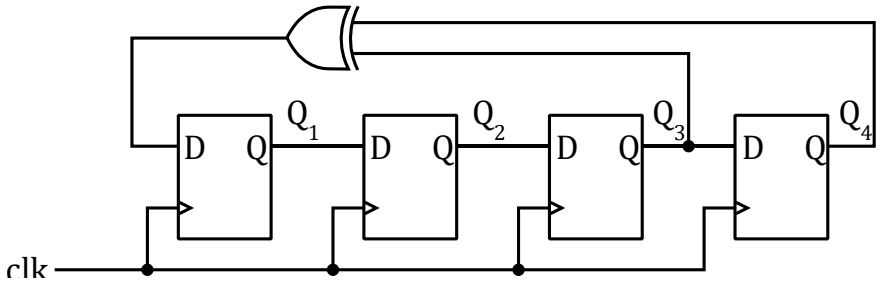
$$D_1 = Q_3 \oplus Q_4$$

1	2	3	4	5	6	7	8
0001,	1000,	0100,	0010,	1001,	1100,	0110,	1011
0101,	1010,	1101,	1110,	1111,	0111,	0011,	0001
1	8	4	2	9	12	6	11
5	10	13	14	15	7	3	1

0000为非法状态

4位伪随机数发生器

```
module lfsr4 (
  input clk,
  output [3:0] q);

  reg [3:0] q;
  always @(posedge clk)
    q <= {q[2:0], q[3]^q[2]};

endmodule
```



如何做一个通用模块呢？

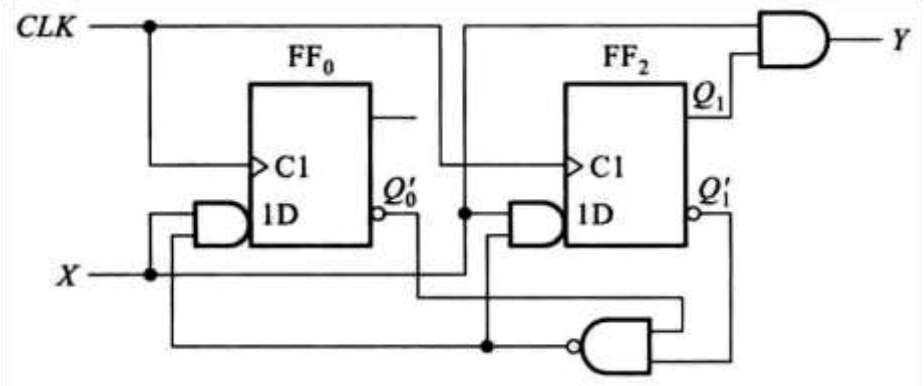
n位伪随机数发生器

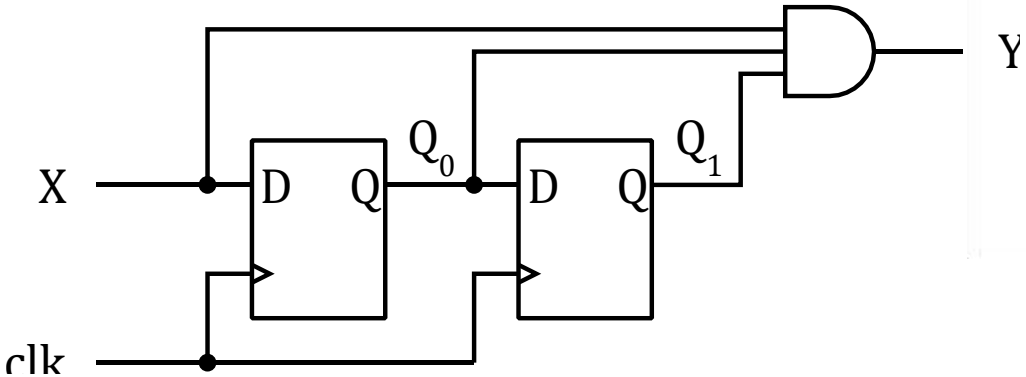
```
module lfsrN #(parameter N=4) (
  input clk,
  output [N-1:0] q);

  reg [N-1:0] q;
  always @(posedge clk) begin
    q[N-1:1] <= q[N-2:0];
    if(N==3) q[0] <= q[2]^q[1];
    if(N==4) q[0] <= q[3]^q[2];
    if(N==5) q[0] <= q[4]^q[2];
    if(N==6) q[0] <= q[5]^q[4];
    if(N==7) q[0] <= q[6]^q[5];
    if(N==8) q[0] <= q[7]^q[5]^q[4]^q[3];
  end
endmodule
```

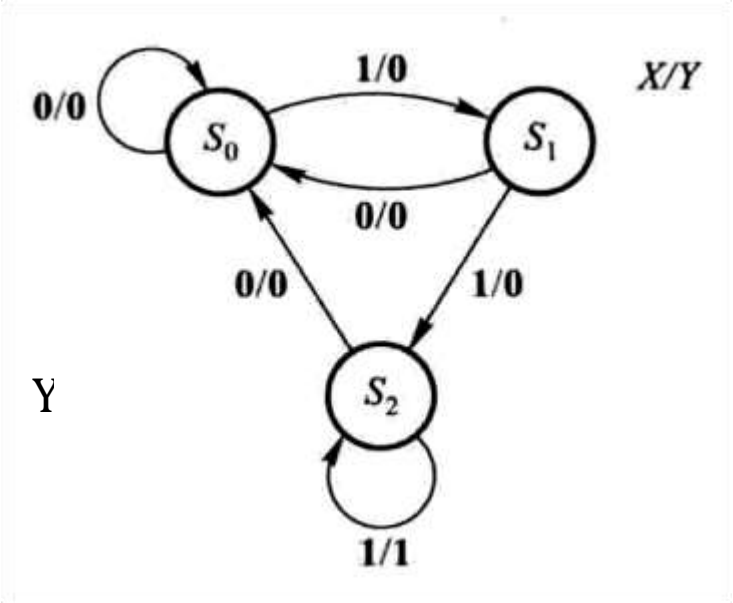
N	F()	N	F()
3	$Q_3 \oplus Q_2$	4	$Q_4 \oplus Q_3$
5	$Q_5 \oplus Q_3$	6	$Q_6 \oplus Q_5$
7	$Q_7 \oplus Q_6$	8	$Q_8 \oplus Q_6 \oplus Q_5 \oplus Q_4$

时序逻辑电路设计：簇发检测器

- 设计一个串行数据检测器，当连续输入3个或以上的1时输出1，其他为0。
  - 定义状态：S_n表示连续检测到n个输入1周期

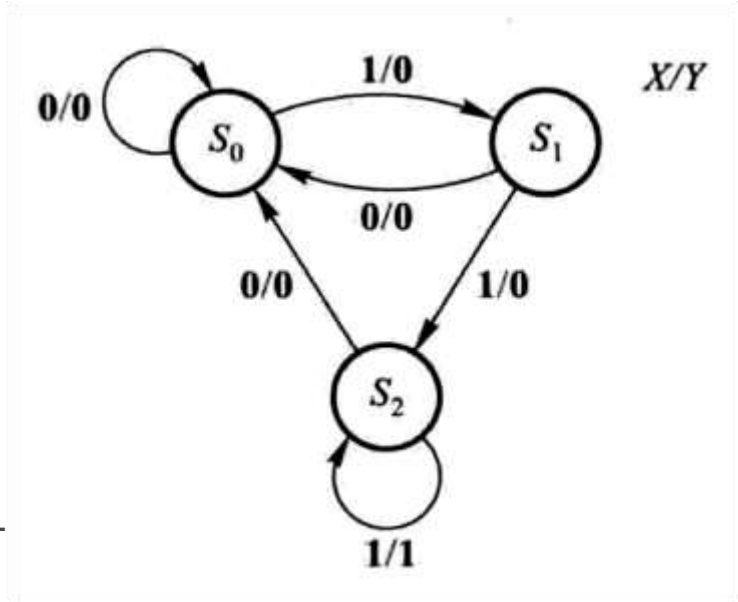






时序逻辑电路设计：簇发检测器

- 设计一个串行数据检测器，当连续输入3个或以上的1时输出1，其他为0。




```
module burst_detect3 (
  input clk,
  input x,
  output y);

  reg [1:0] cnt;  // 计数器
  always @(posedge clk) begin
    if(x==0) cnt <= 0;
    else if(cnt != 2) cnt <= cnt + 1
  end

  assign y = (cnt == 2) & x;

endmodule
```

推广到N位

时序逻辑电路设计：N位簇发检测器

```
module burst_detect #(parameter N=3) (
  input clk,
  input x,
  output y);

  reg [N-1:0] cnt;  // 计数器
  always @(posedge clk) begin
    if(x==0) cnt <= 0;
    else if(cnt != N-1) cnt <= cnt + 1;
  end

  assign y = (cnt == N-1) & x;

endmodule
```

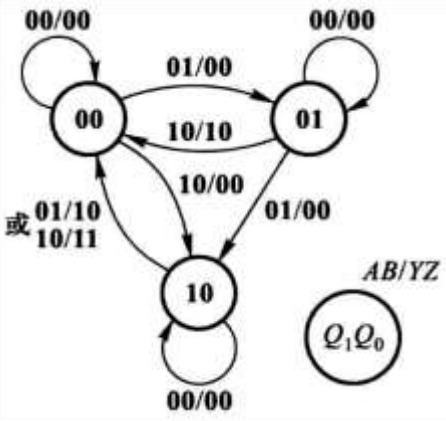
时序逻辑电路设计：贩卖机

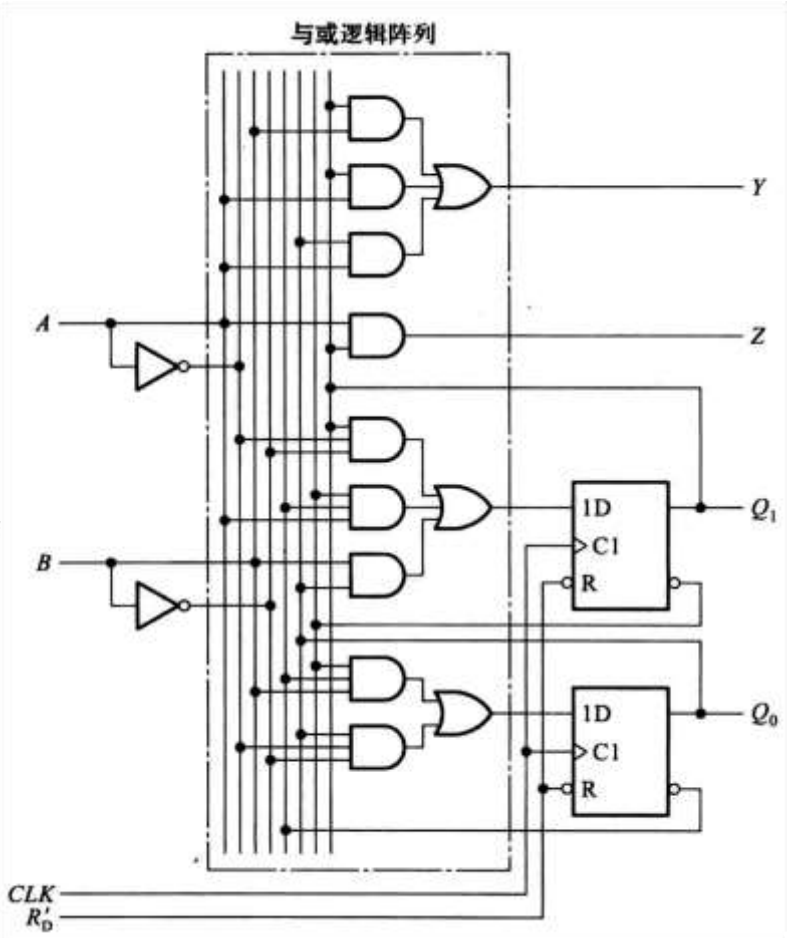
- 设计一个饮料贩卖机，售价1.5元，每次接受一个硬币（1元/05毛）。如果投入1.5元，给一杯饮料。如果投入2元，给一杯饮料，吐出5毛。
  - A：投入1元硬币
  - B：投入5毛硬币
  - Y：给饮料
  - Z：退还5毛硬币

$$\begin{cases} Q_1^* = Q_1A'B' + Q_1'Q_0'A + Q_0B \\ Q_0^* = Q_1'Q_0'B + Q_0A'B' \end{cases}$$

$$\begin{cases} D_1 = Q_1A'B' + Q_1'Q_0'A + Q_0B \\ D_0 = Q_1'Q_0'B + Q_0A'B' \end{cases}$$

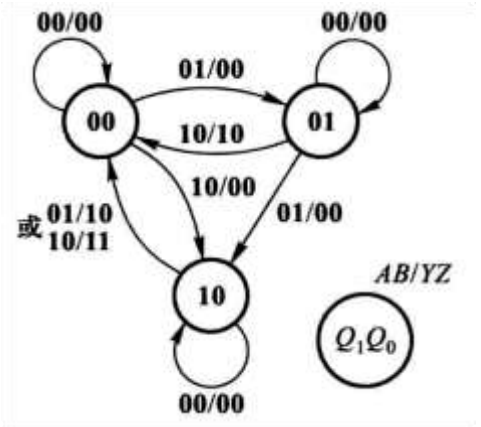
$$\begin{cases} Y = Q_1B + Q_1A + Q_0A \\ Z = Q_1A \end{cases}$$





时序逻辑电路设计：贩卖机

- 设计一个饮料贩卖机，售价1.5元，每次接受一个硬币（1元/05毛）。如果投入1.5元，给一杯饮料。如果投入2元，给一杯饮料，吐出5毛。
  - A：投入1元硬币、B：投入5毛硬币、Y：给饮料
  - Z：退还5毛硬币

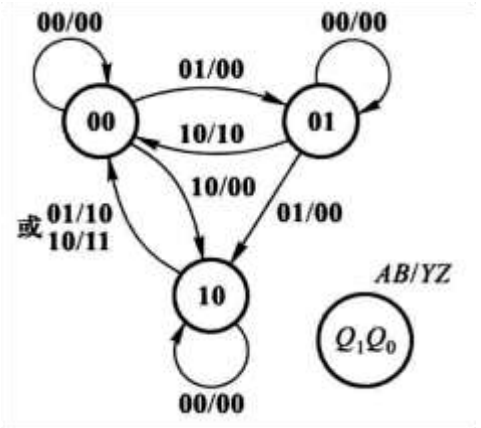


状态机描述形式

```
module vending_machine (
  input clk, rstn,
  input a, b,
  output y, z);

  reg  [1:0] state;  // 状态
  always @(posedge clk or negedge rstn) begin
    if(rstn == 0) state <= 0;
    else case(state)
    0: state <= a ? 2 : (b ? 1 : 0);
    1: state <= a ? 0 : (b ? 2 : 1);
    2: state <= a ? 0 : (b ? 0 : 2);
    default: state <= 0;
    endcase
  end
  assign y = ((state == 1) & a) | ((state == 2) & (a|b));
  assign z = (state == 2) & a;
endmodule
```

时序逻辑电路设计：贩卖机

- 设计一个饮料贩卖机，售价1.5元，每次接受一个硬币（1元/05毛）。如果投入1.5元，给一杯饮料。如果投入2元，给一杯饮料，吐出5毛。
  - A：投入1元硬币、B：投入5毛硬币、Y：给饮料
  - Z：退还5毛硬币



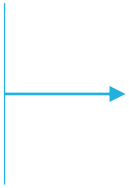

```
module vending_machine (
  input clk, rstn,
  input a, b,
  output y, z);

  reg  [1:0] paid_pre;  // 之前已投钱数*2
  wire [2:0] paid;      // 当前已投钱数*2

  assign paid = {1'b0, paid_pre} + {1'b0, a, 1'b0} + {2'b00, b};
  assign y = paid >= 3;
  assign z = paid == 4;

  always @(posedge clk or negedge rstn) begin
    if(rstn == 0) paid_pre <= 0;
    else if(y==0) paid_pre <= paid;
    else          paid_pre <= 0;
  end
endmodule
```

使用Verilog HDL设计时序逻辑电路总结

- 时序逻辑电路
  - 沿触发的always块
  - 时钟、复位信号（逻辑）
- 扩展
  - 在RTL级描述电路具有一定的可扩展性
  - 利用端口或参数来扩展电路功能
- 状态机的描述
  - 单独一个always块专门描述状态机
  - 其他的电路根据状态机的当前状态进行取值
  - 可以不严格按照状态机实现（各有利弊）
- 新引入的Verilog关键字
  - parameter
  - 条件三元运算符？:

测试N位簇发检测器：时钟驱动

```
module test;

  reg clk, x;
  wire y;

  burst_detect #(3) dut(clk, x, y);

  initial begin
    clk = 0;
    forever #5 clk = ~clk;
  end

  always @(posedge clk)
    x <= $random;

  initial begin
    $dumpfile("test.vcd");
    $dumpvars(0);
    #1000 $finish();
  end
endmodule
```



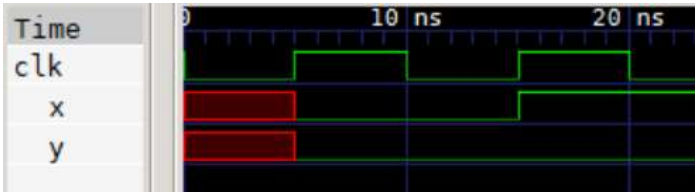
时钟驱动

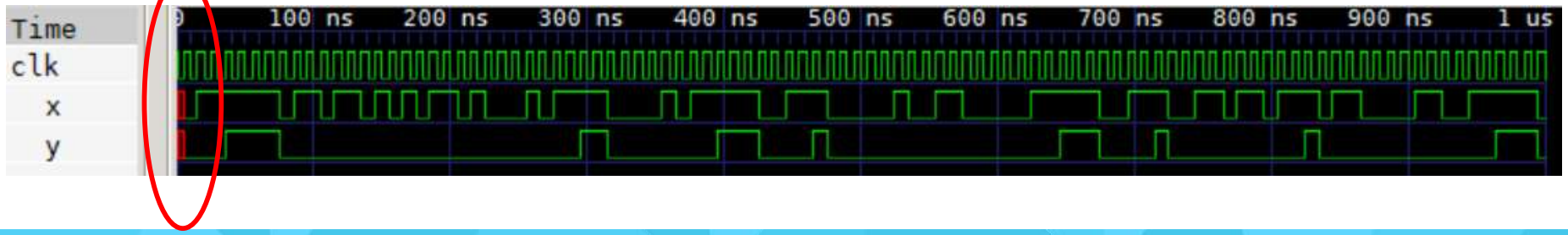
设置结束时间

测试N位簇发检测器：时钟驱动

```
module test;

  reg clk, x;
  wire y;

  burst_detect #(3) dut(clk, x, y);

  initial begin
    clk = 0;
    forever #5 clk = ~clk;
  end

  always @(posedge clk)
    x <= $random;

  initial begin
    $dumpfile("test.vcd");
    $dumpvars(0);
    #1000 $finish();
  end
endmodule
```

时钟驱动



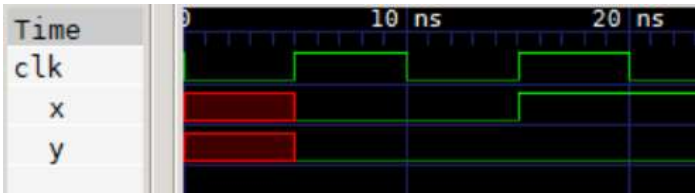


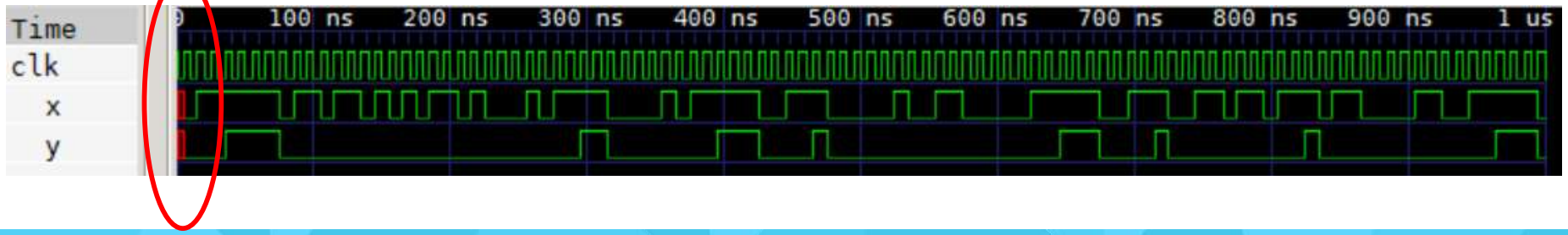
测试N位簇发检测器：无需复位信号（仿真自启）

```
module burst_detect #(parameter N=3) (
  input clk,
  input x,
  output y);

  reg [N-1:0] cnt;  // 计数器
  always @(posedge clk) begin
    if(x==0) cnt <= 0;
    else if(cnt != N-1) cnt <= cnt + 1;
  end

  assign y = (cnt == N-1) & x;

endmodule
```

cnt也无需复位

当x=0时，y被强制为0



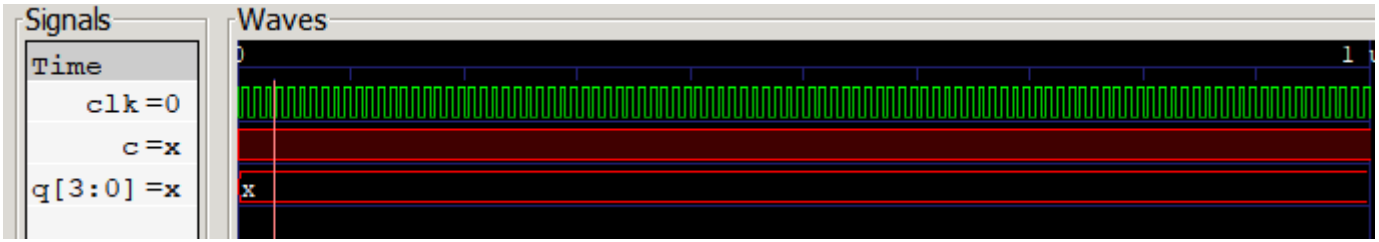


测试任意计数器：需要复位信号

```
module test;
  reg clk;
  wire [3:0] q;
  wire c;

  counterN #(12) dut(clk, q, c);

  initial begin
    clk = 0;
    forever #5 clk = ~clk;
  end

  initial begin
    $dumpfile("test.vcd");
    $dumpvars(0);
    #1000 $finish();
  end
endmodule
```

```
module counterN #(parameter num=10) (
  input clk,
  output [3:0] q,
  output c);

  reg [3:0] q;
  always @(negedge clk)
    if(c)  q <= 0;
    else   q <= q + 1;

  assign c = q == num - 1;
endmodule
```

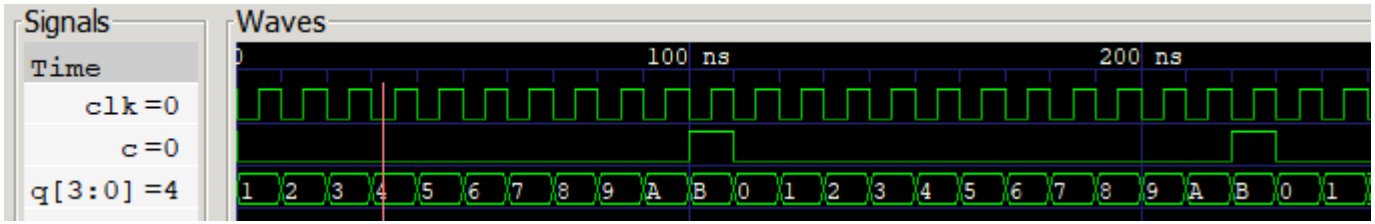
c的初始值是x



复位方法一：$deposit()

```
module test;
  reg clk;
  wire [3:0] q;
  wire c;

  counterN #(12) dut(clk, q, c);

  initial begin
    $deposit(dut.q, 0);
    clk = 0;
    forever #5 clk = ~clk;
  end

  initial begin
    $dumpfile("test.vcd");
    $dumpvars(0);
    #1000 $finish();
  end
endmodule
```

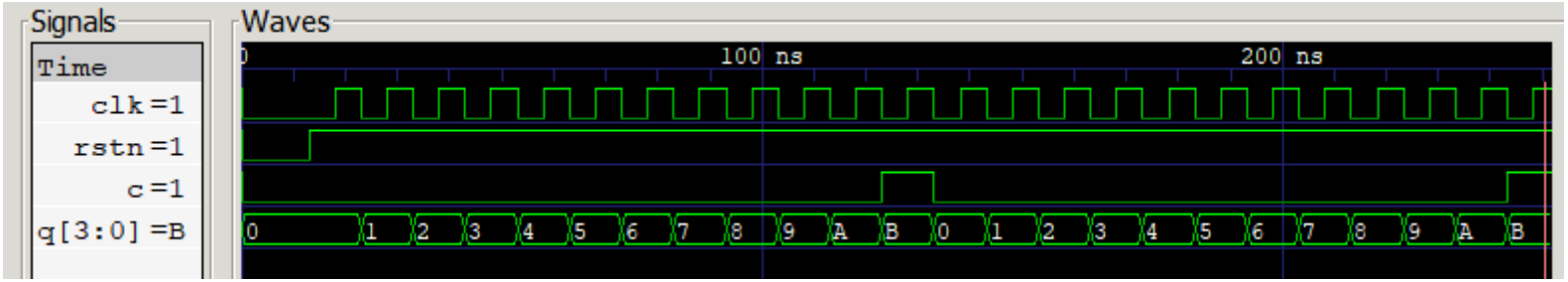
```
module counterN #(parameter num=10) (
  input clk,
  output [3:0] q,
  output c);

  reg [3:0] q;
  always @(negedge clk)
    if(c)  q <= 0;
    else   q <= q + 1;

  assign c = q == num - 1;
endmodule
```



复位方法二：硬件复位

```
module test;
  reg clk, rstn;
  wire [3:0] q;
  wire c;

  counterN #(12) dut(clk, rstn, q, c);

  initial begin
    clk = 0; rstn = 0;
    #13 rstn = 1;
    forever #5 clk = ~clk;
  end

  initial begin
    $dumpfile("test.vcd");
    $dumpvars(0);
    #1000 $finish();
  end
endmodule
```

```
module counterN #(parameter num=10) (
  input clk, rstn,
  output [3:0] q,
  output c);

  reg [3:0] q;
  always @(negedge clk or negedge rstn)
    if(~rstn)  q <= 0;
    else if(c) q <= 0;
    else       q <= q + 1;

  assign c = q == num - 1;
endmodule
```



电路复位比较

- $deposit() 系统函数
  - Verilog HDL的运行时函数，将特定信号赋值
  - 不生成任何硬件（不可综合）
  - 往往用于设置初始值和仿真时注入错误
  - 实际硬件应当能够自启

- 使用硬件复位信号（推荐）
  - 一般使用寄存器异步复位设置初始状态
  - 也可以使用同步复位（同步/异步之间的争端）
  - 生成带复位的电路
  - 确保仿真和实际硬件行为一致

运行时电路功能检测（断言）

```
module test;
  reg clk, rstn;
  wire [3:0] q;
  wire c;

  counterN #(12) dut(clk, rstn, q, c);

  initial begin
    clk = 0; rstn = 0;
    #13 rstn = 1;
    forever #5 clk = ~clk;
  end

  always @(posedge clk)
    if(c & (q != 11)) begin // 断言判断
      $display("error!\n");
      $finish();
  end

  initial begin
    $dumpfile("test.vcd");
    $dumpvars(0);
    #1000 $finish();
  end
endmodule
```

断言：
在合适的时间，对电路的输出/状态警醒检测，如果检测失败，报错。

优势：

- 在测试程序中，不生成实际硬件。
- 可以直接报告出现错误的时间、信号、状态。
- 可以作为VIP复用/打包/出售。

在SystemVerilog中，被更强大的$assert()函数代替。

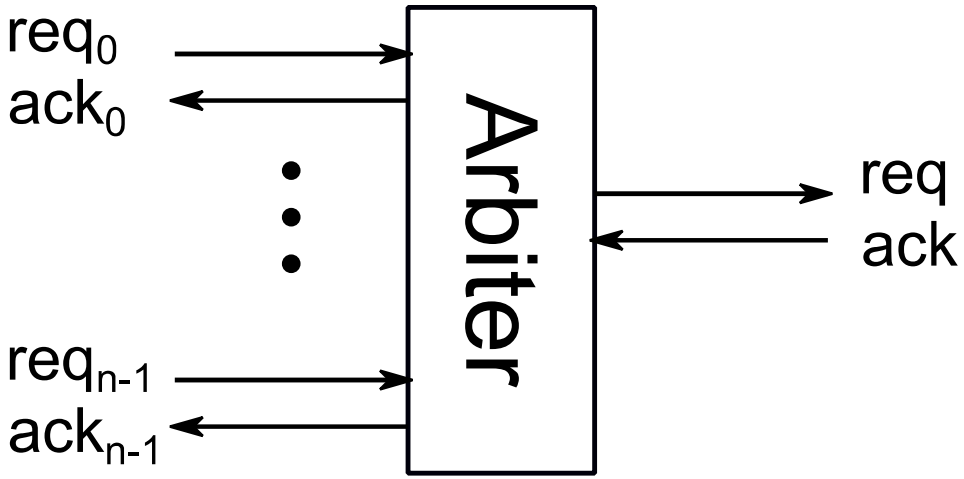
时序逻辑电路的测试设计总结

- 时钟和复位的产生
  - 时钟信号由 forever 语句产生，注意时钟的初始信号。
  - 复位信号在initial块中设置，注意复位信号不要和时钟信号同时变化。
- 自启
  - 要区分硬件自启和仿真能够自启的区别。
  - 硬件自启：状态空间中的无效状态可以在有限时间内回到有效状态。
  - 仿真自启：信号能够在有限时间能摆脱初始x状态。
  - 当硬件可自启但是仿真不能自启的时候，可以用$deposit()复位。
  - 当硬件不能自启时，必须使用硬件复位。
- 断言检查
  - 运行时利用测试代码直接检测电路状态的方法。
- 增加的Verilog HDL关键字

  forever, $deposit(), $display

复杂时序逻辑电路设计：仲裁器

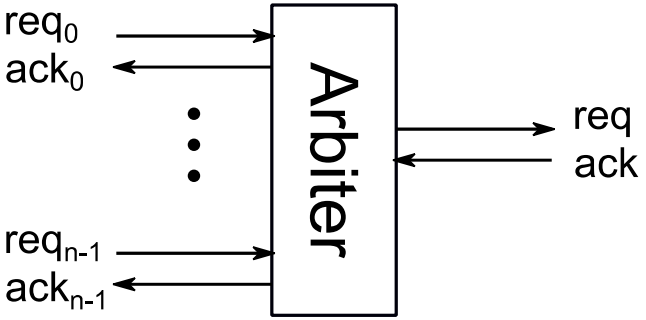
- 仲裁器（Arbiter）
  - 当一个共享的资源被多个电路争用时，我们需要仲裁器在可能同时出现的多个请求中选出一路请求，让其使用资源。

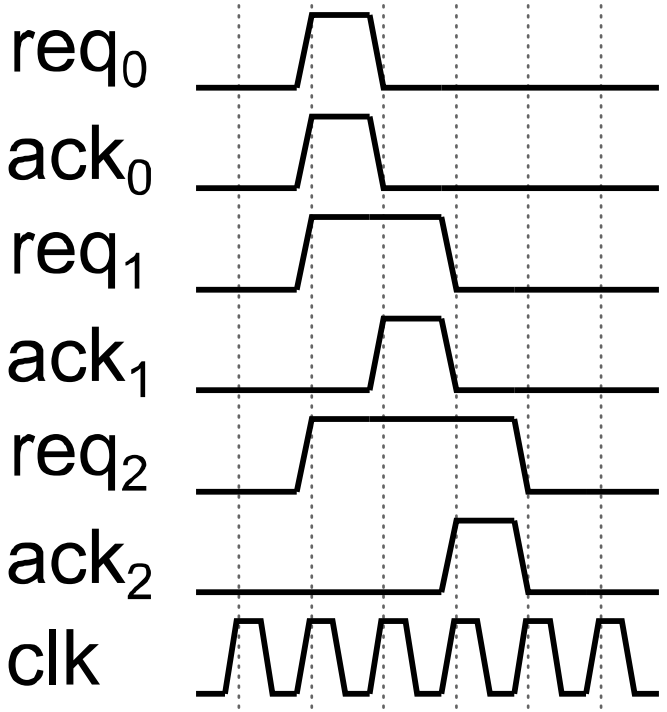


  - 如何知道哪一路信号正在请求资源?
  - 如何通知被选中的那一路信号?
  - （请求，响应）： (request, acknowledge) 或者 (req, ack)

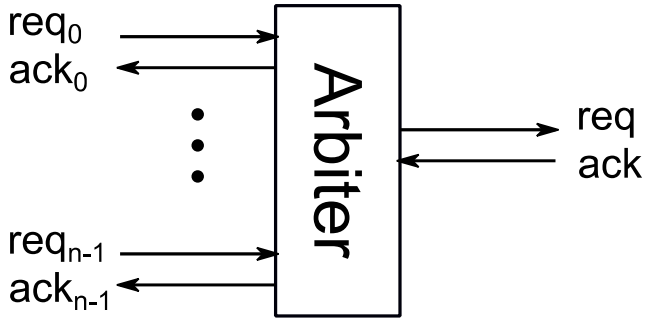
仲裁器

- 假设
  - 每个周期，$req_0 \sim req_{n-1}$都可能发出请求（将其信号置为1）
  - 当req_i变为1之后，在ack_i为1之前，req_i不能擅自归位为0
  - 一次请求的持续时间为1周期
  - 响应信号的高电平只维持1周期

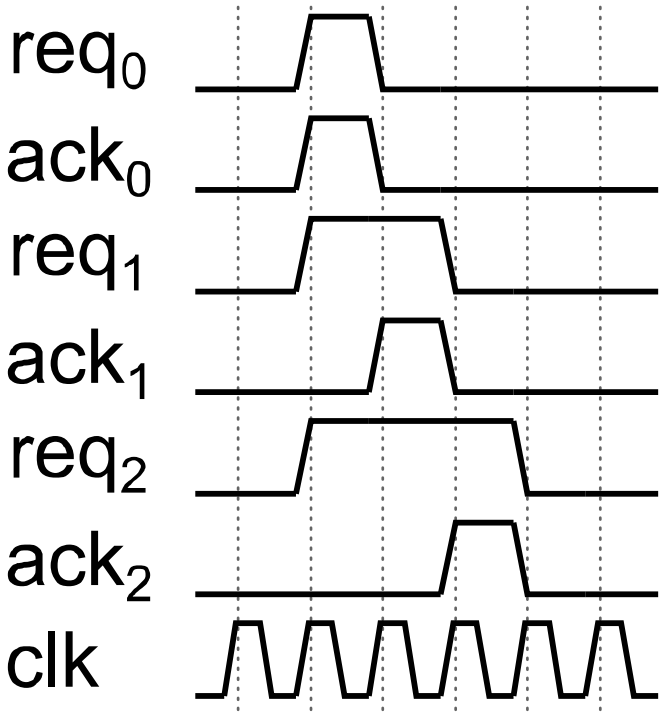


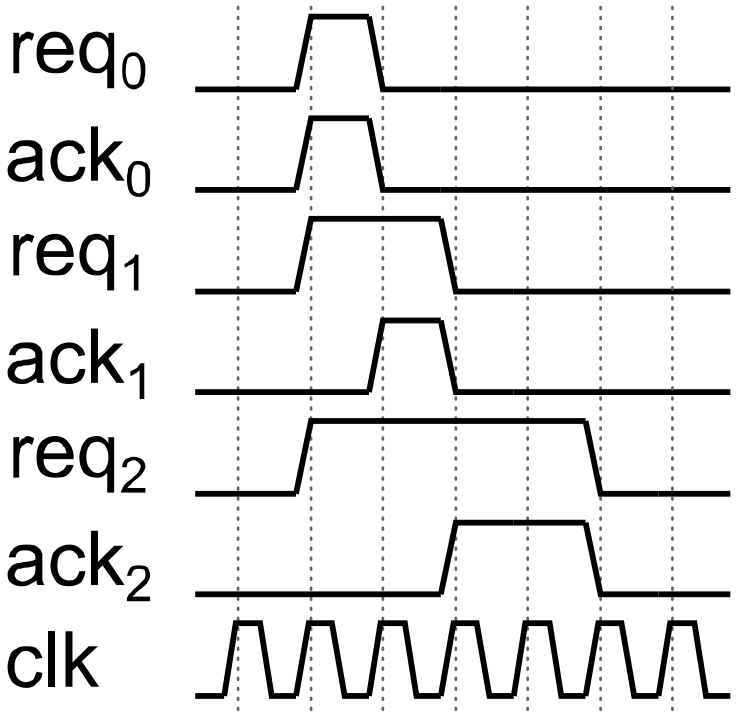


仲裁器输入

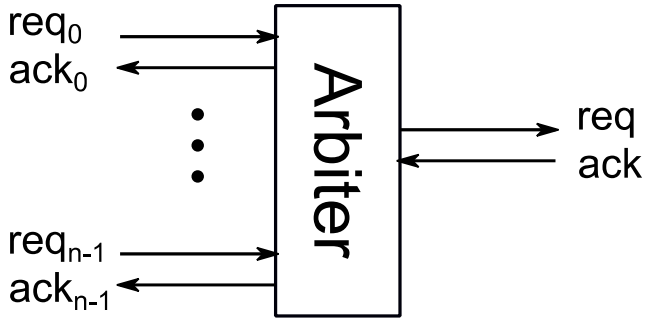

req0
ack0
reqn-1
ackn-1
Arbiter
req
ack

对吗？

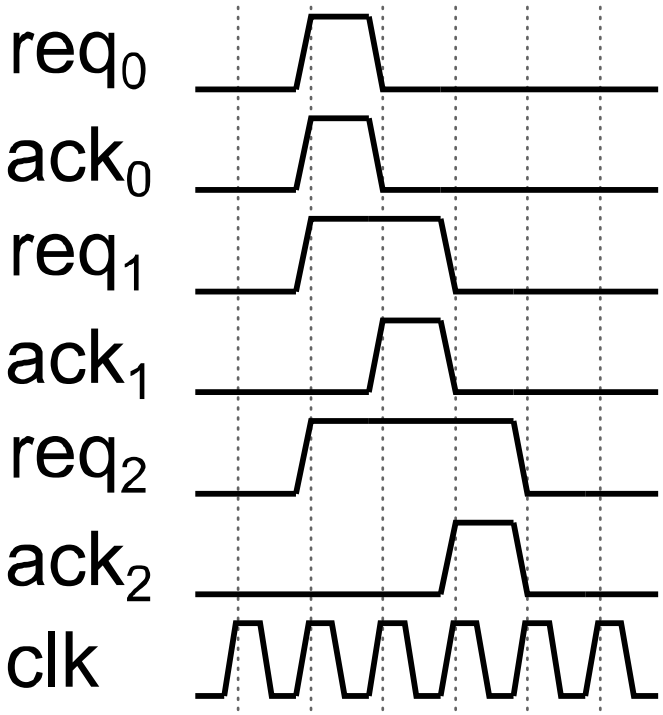

req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

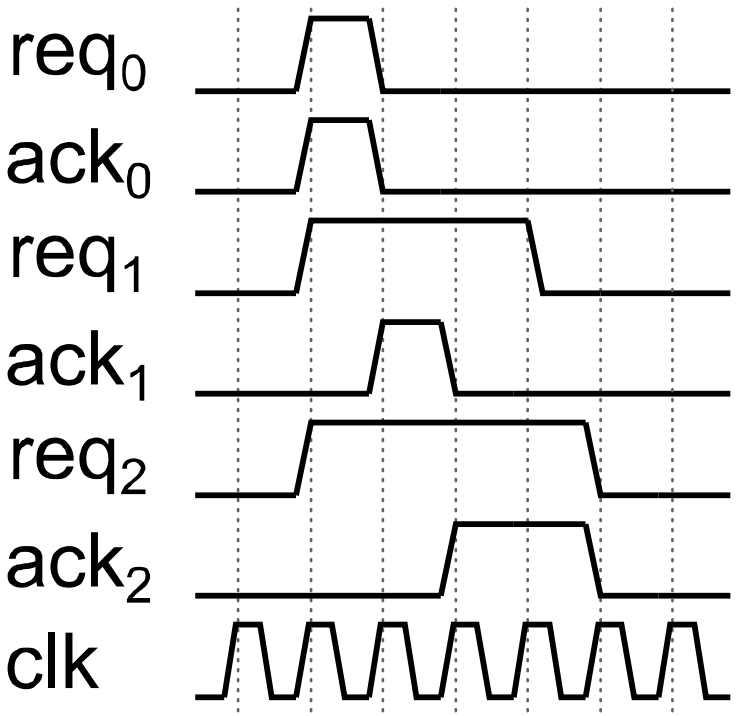

req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

仲裁器输入

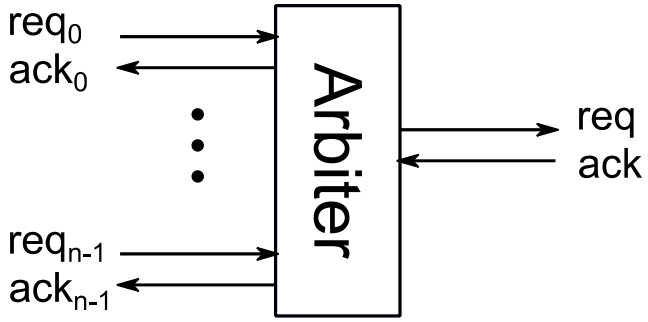

req0
ack0
reqn-1
ackn-1
Arbiter
req
ack

对吗？

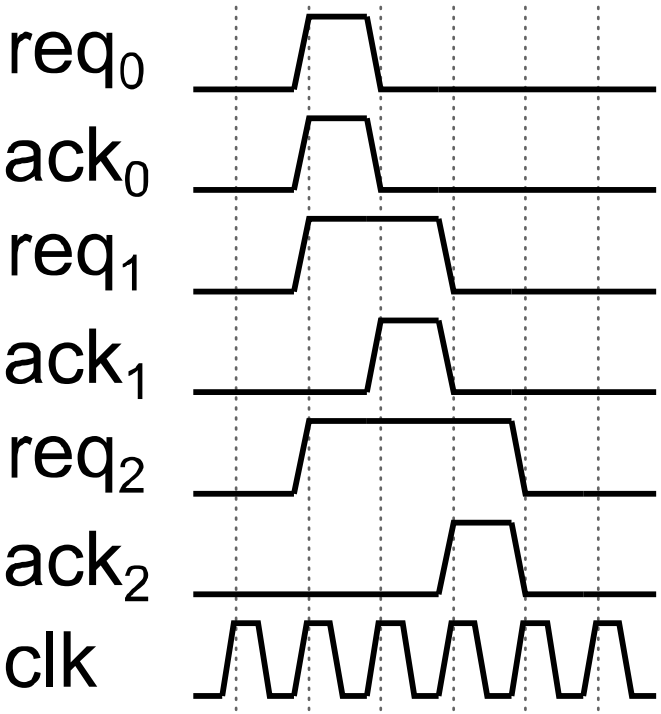

req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

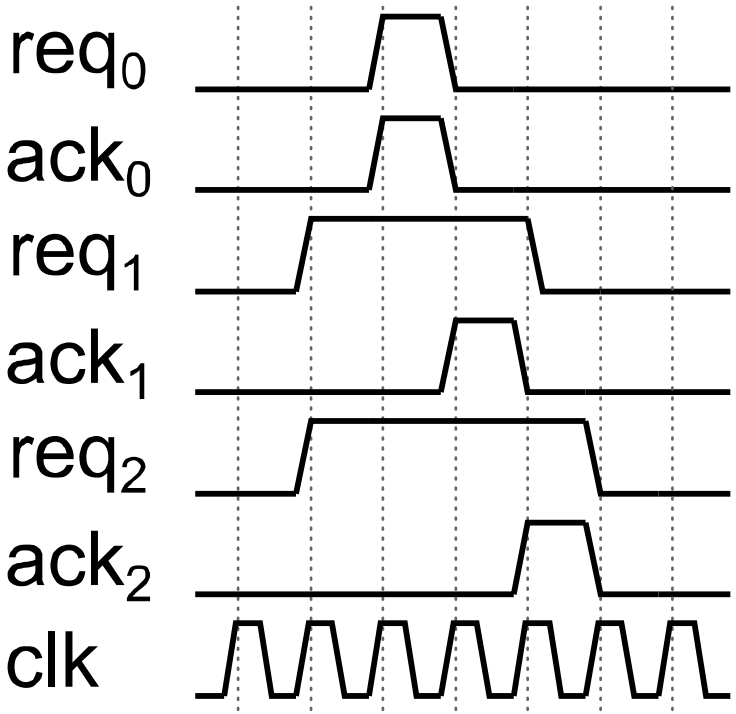

req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

仲裁器输入

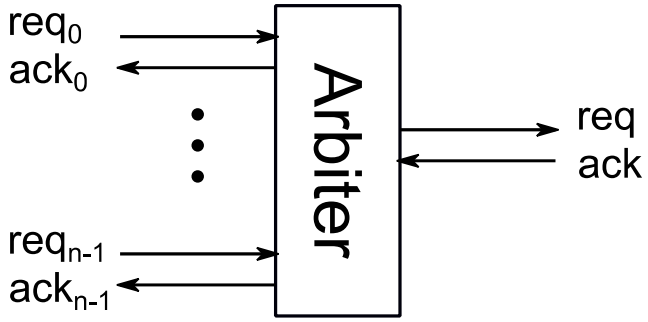

req0
ack0
reqn-1
ackn-1
Arbiter
req
ack

对吗？

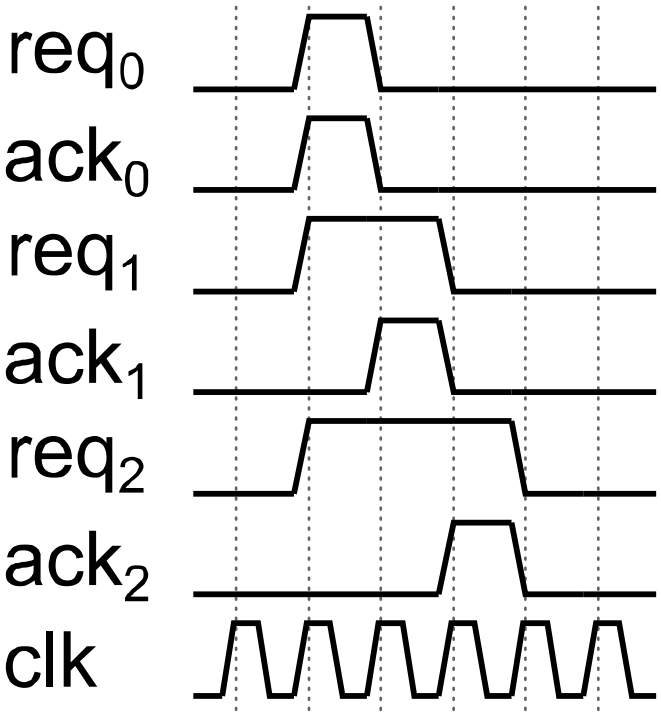

req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

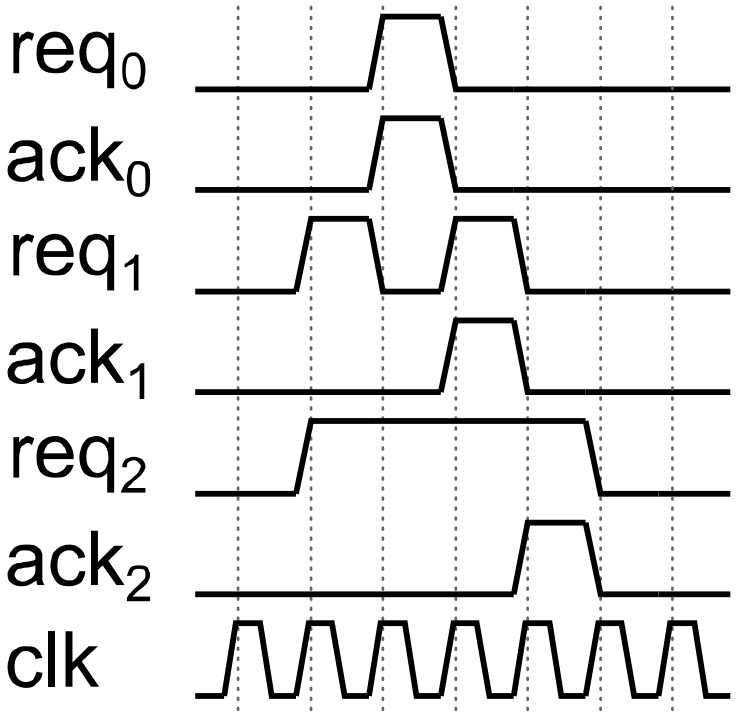

req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

仲裁器输入


req0
ack0
reqn-1
ackn-1
Arbiter
req
ack

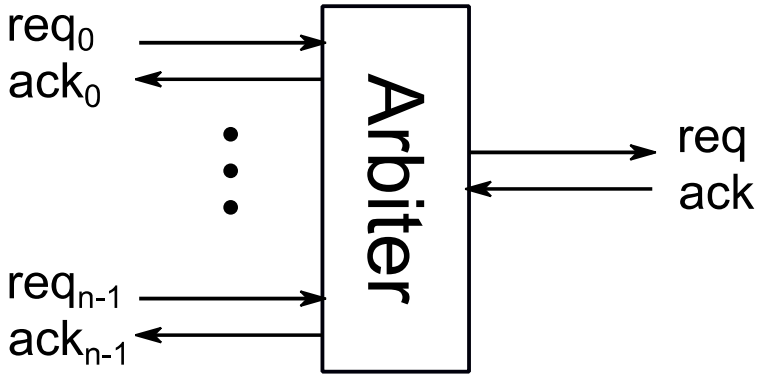
对吗？


req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk


req0
ack0
req1
ack1
req2
ack2
clk

仲裁器：仲裁规则

- 当多路请求同时有效时，如何选择哪一路请求来响应?
  - 随机选择
  - 静态优先级
  - 动态优先级
    - 循环仲裁器（round-robin arbiter）
    - 伪随机仲裁器?



3路静态优先级仲裁器

- 三路输入（0~2），0路优先级最高，2最低

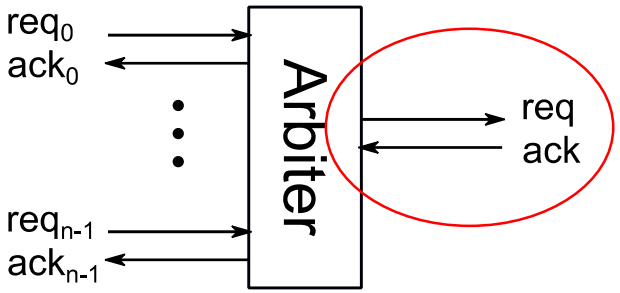
```
module ArbStatic3 (input clk, rstn,
                   input [2:0] req,
                   output [2:0] ack);
  reg [2:0] ack;

  always @(req) begin
    casez(req)
    3'b??1:  ack = 3'b001;
    3'b?10:  ack = 3'b010;
    3'b100:  ack = 3'b100;
    default: ack = 3'b000;
    endcase
  end

endmodule
```

任何情况下，先响应req[0]，然后req[1]，最后req[2]。

3路静态优先级仲裁器(考虑输出端状态)

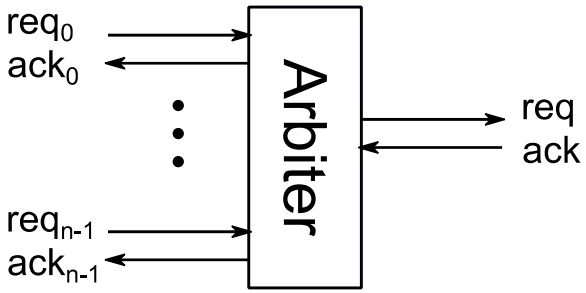
- 如果考虑输出端可能暂时不能响应呢?

```
module ArbStatic3 (input clk, rstn,
                   input [2:0] req_i,
                   output [2:0] ack_i,
                   output req_o,
                   input ack_o);
  reg [2:0] ack_i;

  assign req_o = |req_i;

  always @(req_i, ack_o) begin
    if(ack_o)
      casez(req_i)
      3'b??1:  ack_i = 3'b001;
      3'b?10:  ack_i = 3'b010;
      3'b100:  ack_i = 3'b100;
      default: ack_i = 3'b000;
      endcase
    else
      ack_i = 3'b000;
  end

endmodule
```



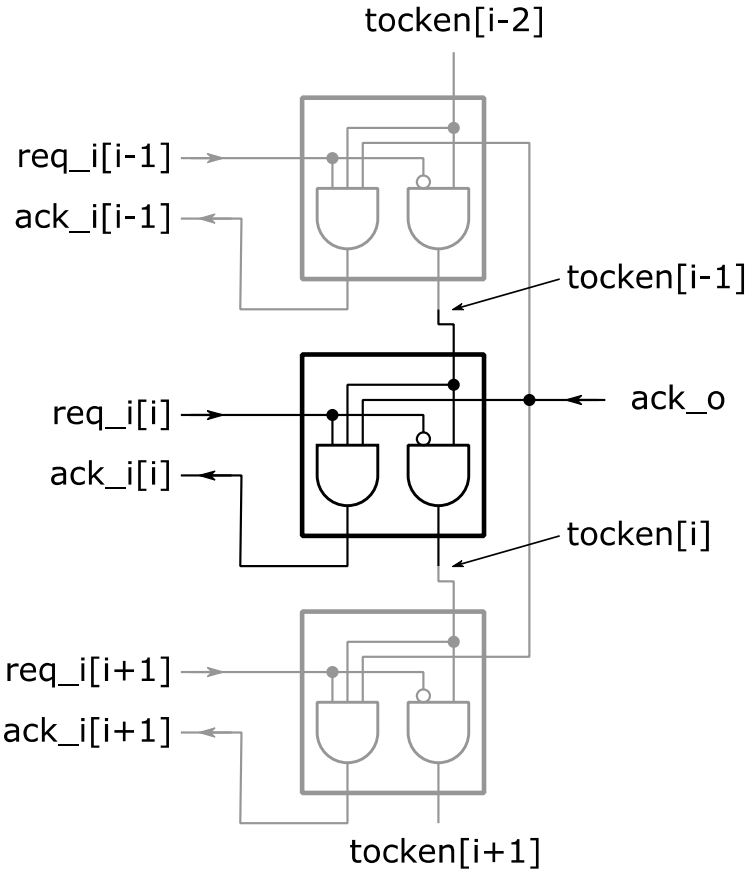
N路静态优先级仲裁器

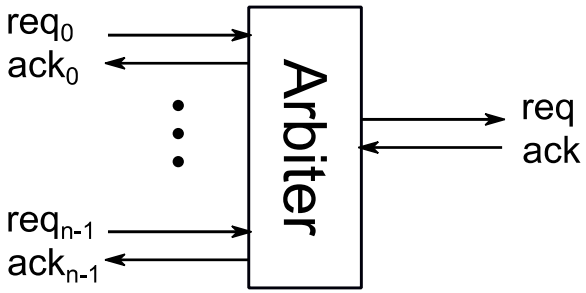
- 我们如何从3路扩展到N路?
  - 是否可以将各路拆开，推导每一路的响应信号的表达式?



N路静态优先级仲裁器

- 我们如何从3路扩展到N路?

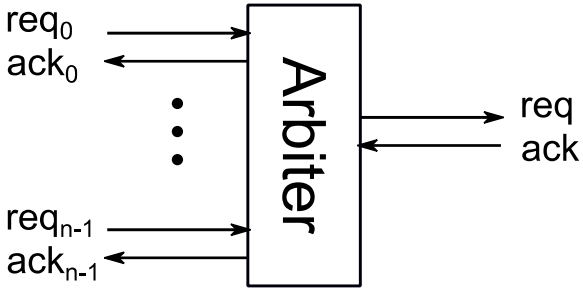




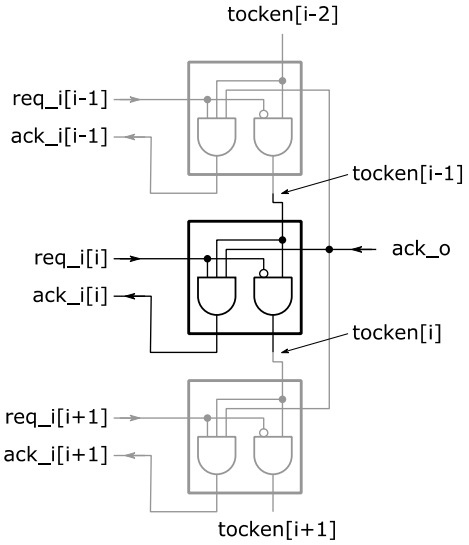

```
ack_i[i] = token[i-1] & req_i[i] & ack_o;
token[i] = token[i-1] & ~req_i[i];
```

N路静态优先级仲裁器

- 我们如何从3路扩展到N路?




```
module ArbStatic
  #(parameter N=8)
   (input clk, rstn,
   input [N-1:0] req_i,
   output [N-1:0] ack_i,
   output req_o,
   input ack_o);

  genvar i;
  wire token[N-1:0];

  assign req_o = |req_i;
  generate for(i=0; i<N; i=i+1) begin
    if(i==0) begin
      assign ack_i[0] = req_i[0] & ack_o;
      assign token[0] = ~req_i[0];
    end else begin
      assign ack_i[i] = token[i-1] & req_i[i] & ack_o;
      assign token[i] = token[i-1] & ~req_i[i];
    end
  end endgenerate

endmodule
```

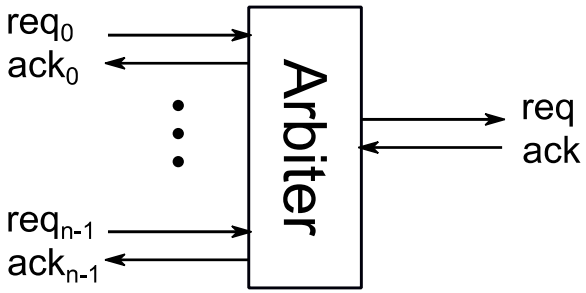


N路动态优先级仲裁器

- 我们如何动态设定优先级?

原有优先级: $7 \leftarrow 6 \leftarrow 5 \leftarrow 4 \leftarrow 3 \leftarrow 2 \leftarrow 1 \leftarrow 0$

$7 \quad 6 \quad 5 \quad 4 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 0$



- 添加一个优先级的输入端

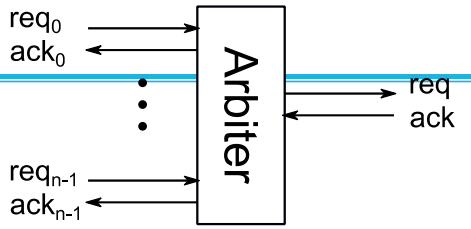
```
prio[7:0] = 8'b0001_0000;
```

req[4] 有最高优先级

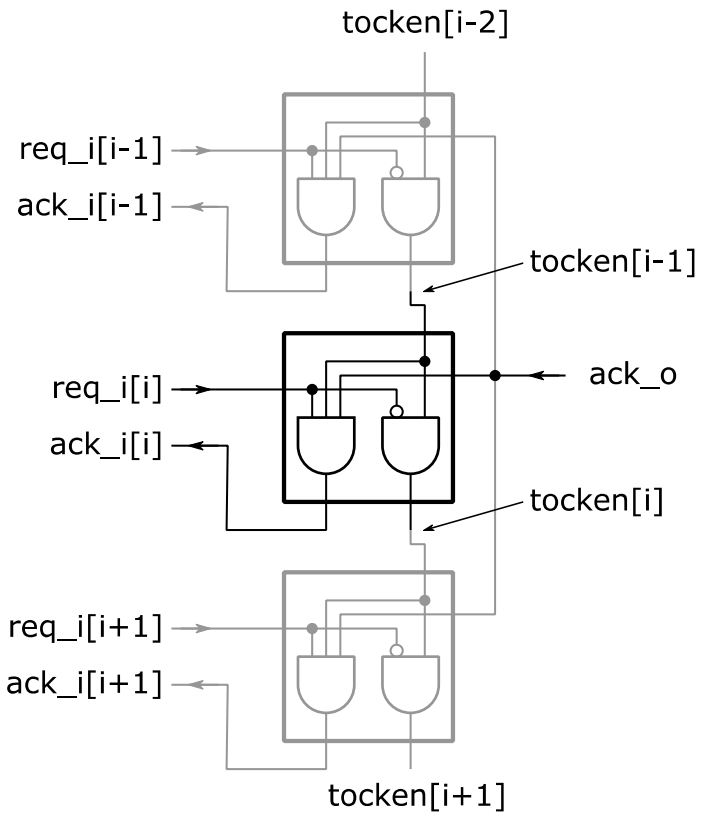
优先级排序: $3 \leftarrow 2 \leftarrow 1 \leftarrow 0 \leftarrow 7 \leftarrow 6 \leftarrow 5 \leftarrow 4$

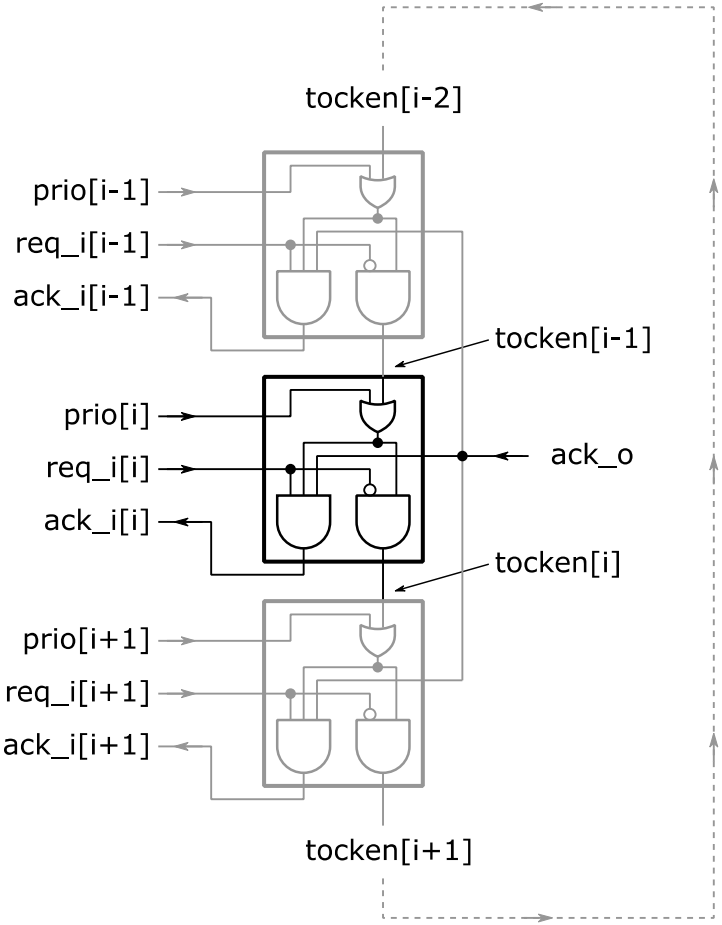
$7 \quad 6 \quad 5 \quad 4 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 0$

N路动态优先级仲裁器



- 我们如何动态设定优先级?

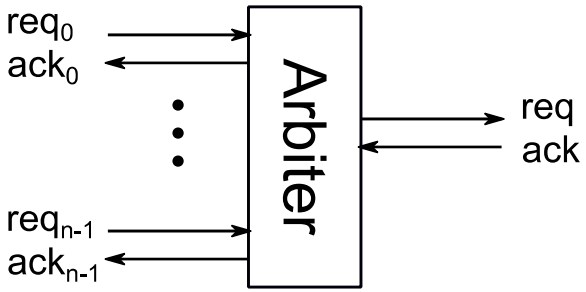


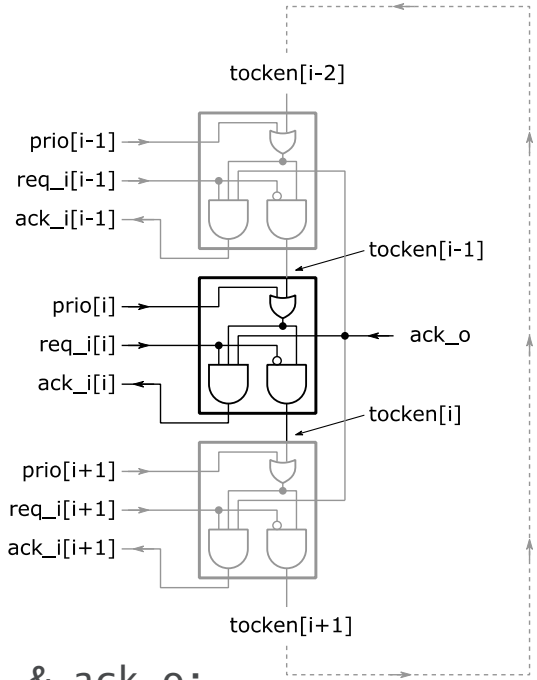



```
ack_i[i] = (token[i-1] | prio[i]) & req_i[i] & ack_o;
token[i] = (token[i-1] | prio[i]) & ~req_i[i]
```

N路动态优先级仲裁器

```
module ArbPriority
  #(parameter N=8)
   (input clk, rstn,
   input [N-1:0] req_i,
   input [N-1:0] prio,
   output [N-1:0] ack_i,
   output req_o,
   input ack_o);

  genvar i;
  wire token[N-1:0];

  assign req_o = |req_i;
  generate for(i=0; i<N; i=i+1) begin
    if(i==0) begin
      assign ack_i[0] = (token[N-1] | prio[0]) & req_i[0] & ack_o;
      assign token[0] = (token[N-1] | prio[0]) & ~req_i[0];
    end else begin
      assign ack_i[i] = (token[i-1] | prio[i]) & req_i[i] & ack_o;
      assign token[i] = (token[i-1] | prio[i]) & ~req_i[i];
    end
  end endgenerate

endmodule
```

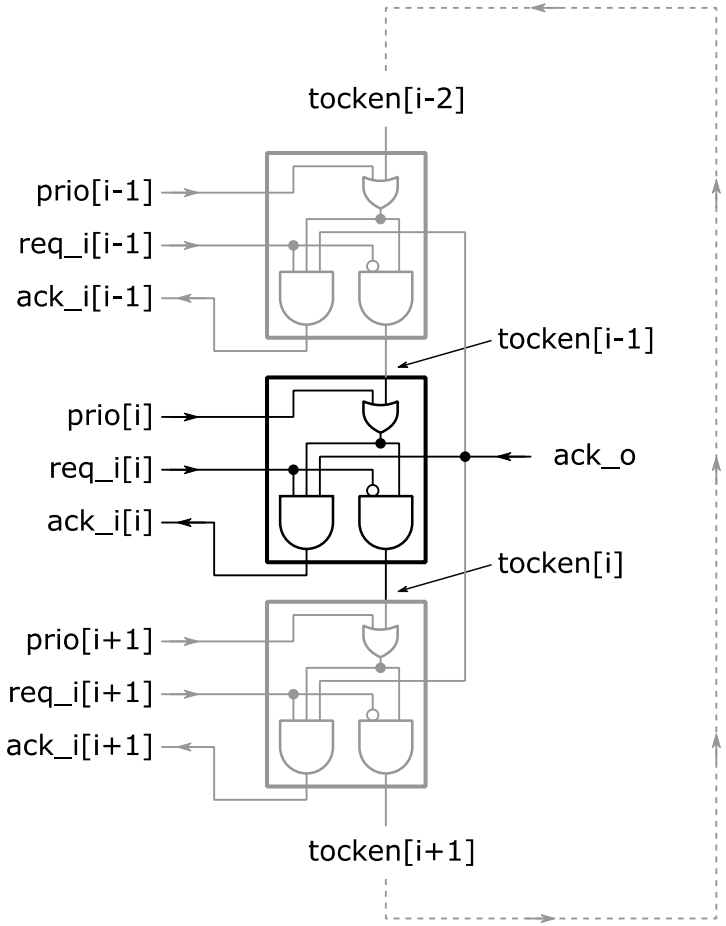


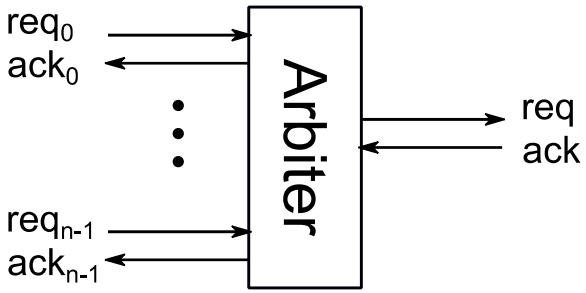


组合逻辑环

N路动态优先级仲裁器

- 我们如何动态设定优先级?



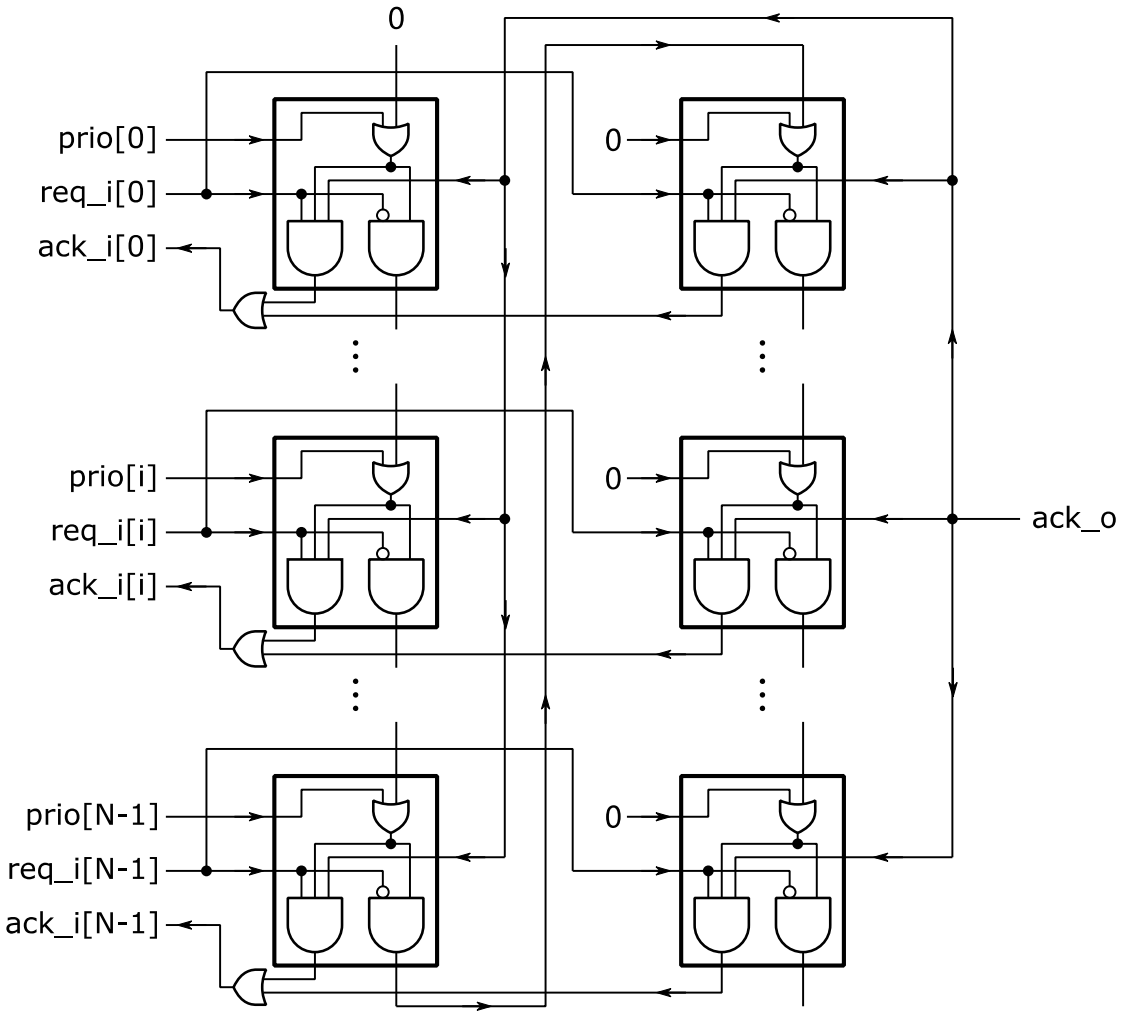


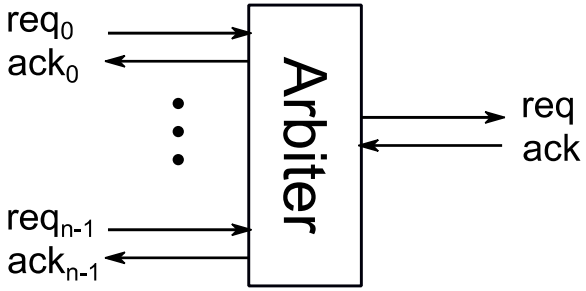
如何解决环的问题?

```
ack_i[i] = (token[i-1] | prio[i]) & req_i[i] & ack_o;
token[i] = (token[i-1] | prio[i]) & ~req_i[i]
```

N路动态优先级仲裁器

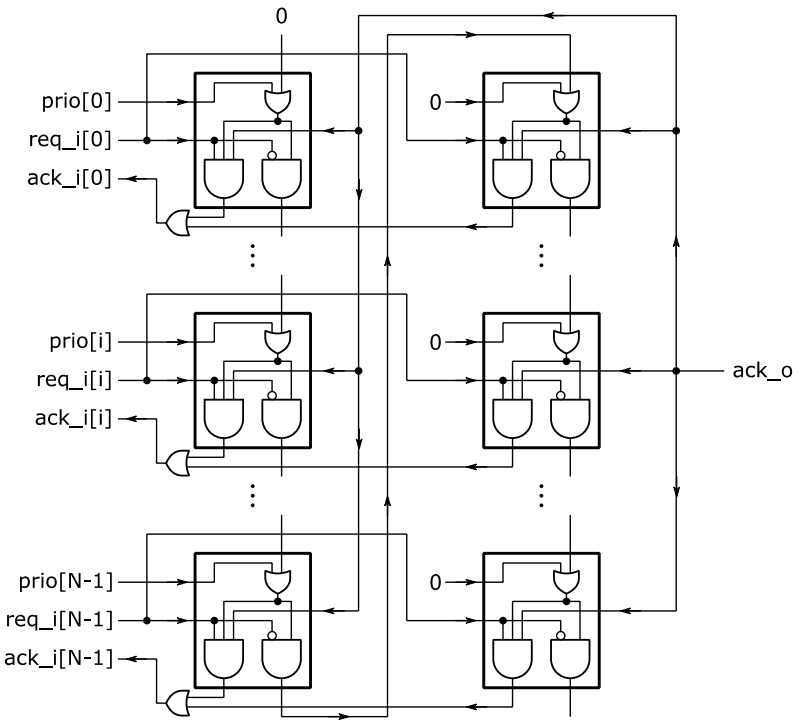
- 我们如何动态设定优先级?





N路静态优先级仲裁器

```
module ArbPriority
  #(parameter N=8)
   (input clk, rstn,
   input [N-1:0] req_i,
   input [N-1:0] prio,
   output [N-1:0] ack_i,
   output req_o,
   input ack_o);

  genvar i;
  wire token[2*N-1:0];


  assign req_o = |req_i;
  generate for(i=0; i<N; i=i+1) begin
    if(i==0) begin
      assign ack_i[0] = (prio[0] | token[N-1]) & req_i[0] & ack_o;
      assign token[0] = prio[0] & ~req_i[0];
      assign token[N] = token[N-1] & ~req_i[0];
    end else begin
      assign ack_i[i] = (token[i-1] | prio[i] | token[N+i-1]) &
                        req_i[i] & ack_o;
      assign token[i] = (token[i-1] | prio[i]) & ~req_i[i];
      assign token[N+i] = token[N+i-1] & ~req_i[i];
    end
  end endgenerate
endmodule
```



N路循环优先级仲裁器

- 循环优先级仲裁器（round-robin arbiter）
  - 一个8路循环优先级仲裁器

第一周期：$req = 8'b01100101$

$ack = 8'b00000001$

第二周期：$req = 8'b01100100$

$ack = 8'b00000100$

第三周期：$req = 8'b01100010$

$ack = 8'b00100000$

第四周期：$req = 8'b01001010$

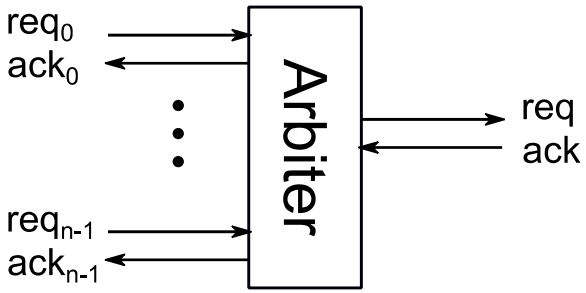
$ack = 8'b01000000$

第五周期：$req = 8'b01001010$

$ack = 8'b00000010$

第六周期：$req = 8'b01001001$

$ack = 8'b00001000$

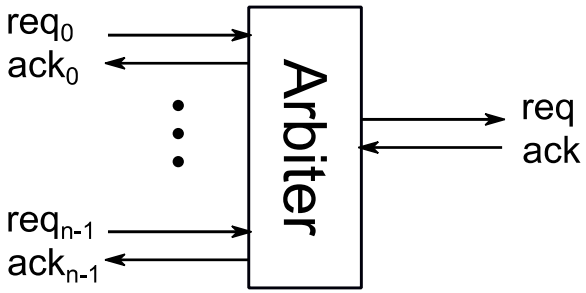


当多个请求同时有效时，循环响应。

N路循环优先级仲裁器

循环优先级仲裁器（round-robin arbiter）

```
module ArbRR #(parameter N=8)
   (input clk, rstn,
   input [N-1:0] req_i,
   output [N-1:0] ack_i,
   output req_o,
   input ack_o);

  genvar i;
  wire token[2*N-1:0];
  reg [N-1:0] prio;

  always @(posedge clk or negedge rstn)
    if(~rstn)      prio <= 1;
    else if(|ack_i) prio <= {ack_i[N-2:0], ack_i[N-1]};

  assign req_o = |req_i;
  generate for(i=0; i<N; i=i+1) begin
    if(i==0) begin
      assign ack_i[0] = (prio[0] | token[N-1]) & req_i[0] & ack_o;
      assign token[0] = prio[0] & ~req_i[0];
      assign token[N] = token[N-1] & ~req_i[0];
    end else begin
      assign ack_i[i] = (token[i-1] | prio[i] | token[N+i-1]) & req_i[i] & ack_o;
      assign token[i] = (token[i-1] | prio[i]) & ~req_i[i];
      assign token[N+i] = token[N+i-1] & ~req_i[i];
    end
  end endgenerate
endmodule
```



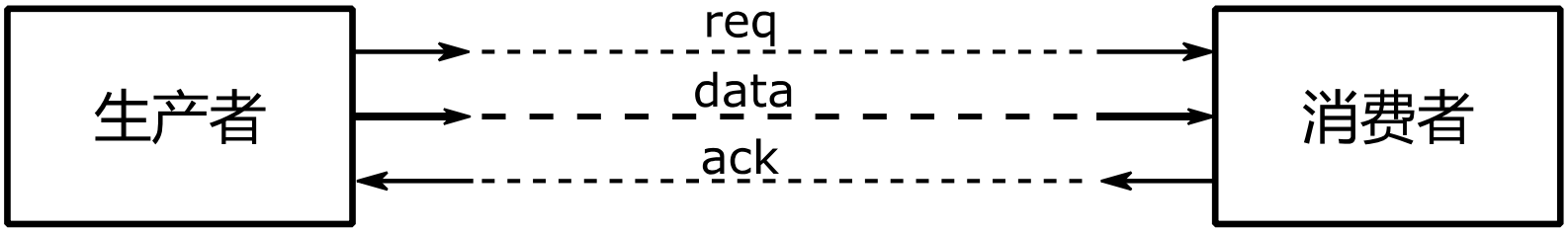
仲裁器总结

- 仲裁器
  - 仲裁器的概念
  - 仲裁器的类型
    - 静态优先级
    - 循环优先级
  - 仲裁器的设计
    - 拆分，按位推逻辑表达式
    - 拆解组合逻辑环

- 问题
  - 循环优先级仲裁器是否一定是公平的?
  - 如何实现一个随机仲裁器?

复杂时序逻辑电路设计：FIFO缓冲

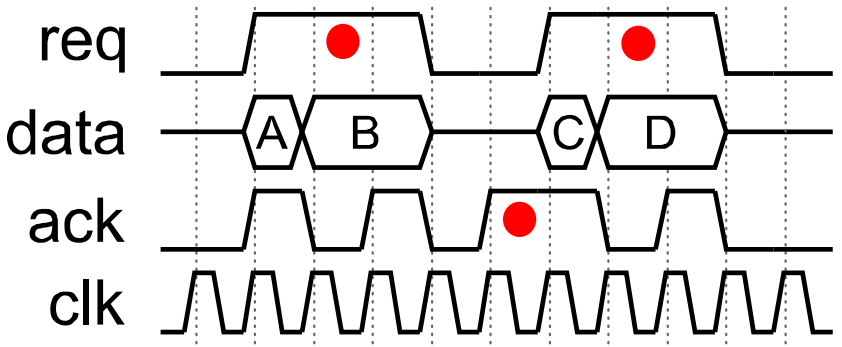
- FIFO缓冲（Buffer）
  - **当一个数据流的产生者和消费者的步调不统一，直接连接会导致数据吞吐率下降**
    - 生产者产生了数据消费者不能立即接收
    - 消费者可以消费数据却没有



生产者空闲2个周期产生2个数据。

消费者每空闲1个周期接受1个数据。

直接连接：6个周期传输2个数。



复杂时序逻辑电路设计：FIFO缓冲

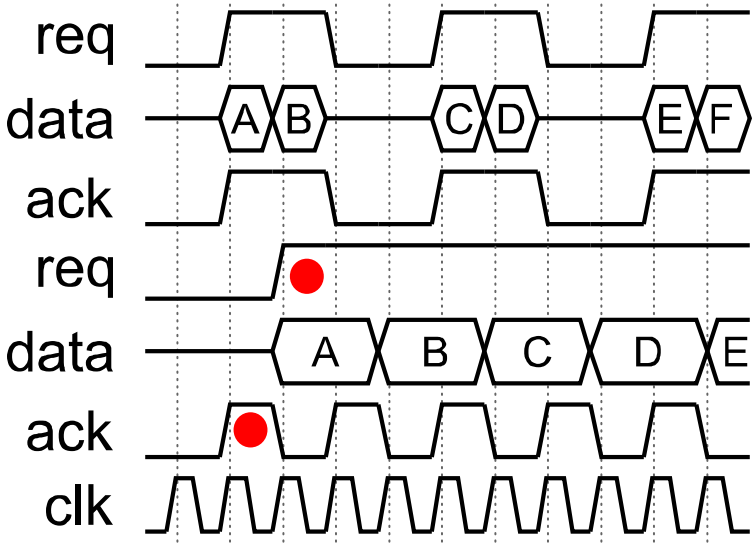
- FIFO缓冲（Buffer）
  - **在这种情况下，插入一个FIFO缓冲可以协调两边的步调**
    - 生产者产生数据消费者不能接受时，先保存在缓冲器内。
    - 当消费者可以消费数据而生产者没有数据时，可以从缓冲区拿数。

假设缓冲区有至少2个数据的空间

缓冲区可以在缓冲区未满时随时接受数据

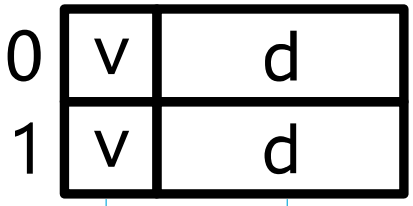
缓冲区可以在有数据时一直输出数据

数据传输：4个周期传输2个数



深度为2的FIFO缓冲

让我们暂时只考虑输入端和数据输出选择

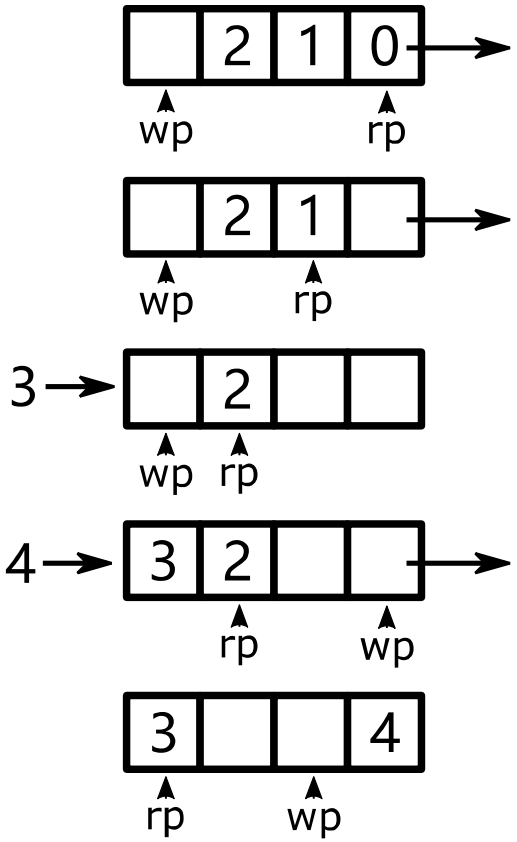


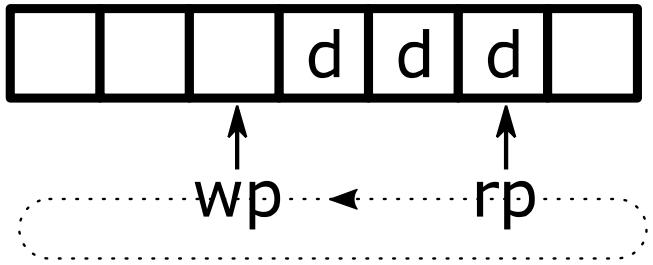

```
module fifo2 #(parameter dw=8) ( input clk, rstn,
  input [dw-1:0] d_in, input req_in, output ack_in,
  output [dw-1:0] d_out, output req_out, input ack_out);

  reg [dw-1:0] data [1:0];
  reg [1:0] valid;

  assign req_out = |valid;
  assign ack_in = ~&valid;

  always @(posedge clk or negedge rstn)
    if(~rstn) valid <= 2'b00;
    else if(req_in)
      case(valid)
      2'b00: begin valid <= 2'b01; data[0] <= d_in; end
      2'b01: begin valid <= 2'b11; data[1] <= d_in; end
      2'b10: begin valid <= 2'b11; data[0] <= d_in; end
      default: // do nothing
      endcase

  reg [dw-1:0] d_out;
  always @(data, valid)
    case(valid)
    2'b00, 2'b01: d_out = data[0];
    2'b10:        d_out = data[1];
    2'b11: ???   // 无法区分了!
    endcase

endmodule
```

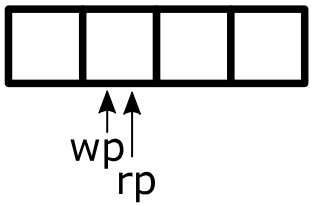
仅依赖于缓冲区数据的状态位还不足以完成控制。

深度为L的FIFO缓冲

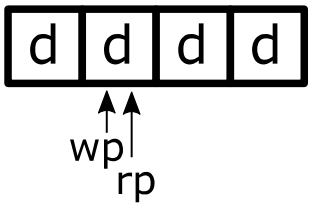
我们需要引入指针！







空



满

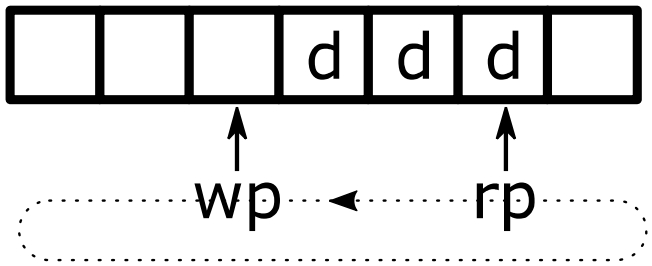
数据存入：wp自增，数据保存并使能。
数据读出：rp自增，数据读出并作废。
缓冲区满：wp等于rp并且valid[wp]有效。
缓冲区空：wp等于rp并且valid[rp]无效。

FIFO最小延迟1周期。

深度为L的FIFO缓冲

我们需要引入指针！

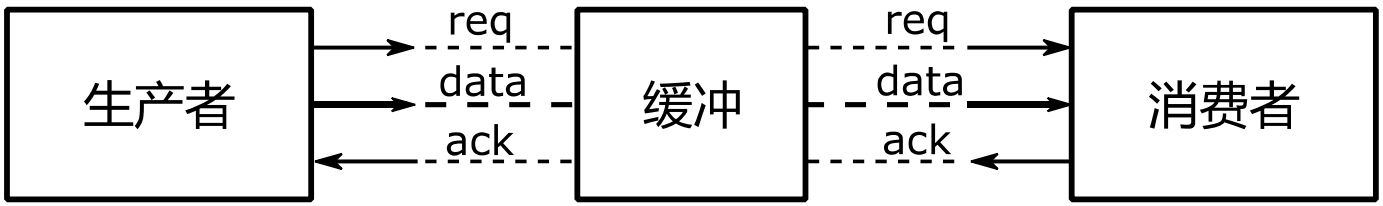
```
module fifo2 #(parameter dw=8, L=7)
( input clk, rstn,
  input [dw-1:0] d_in, input req_in, output ack_in,
  output [dw-1:0] d_out, output req_out, input ack_out);

  reg [dw-1:0] data [L-1:0];
  reg [L-1:0] valid;
  reg [L-1:0] wp, rp;

  assign d_out = data[rp];
  assign req_out = valid[rp];
  assign ack_in = ~valid[wp];

  always @(posedge clk or negedge rstn)
    if(~rstn) begin
      wp <= 0; rp <= 0; valid <= 0;
    end else begin
      if(req_in & ack_in) begin
        wp <= wp == L-1 ? 0 : wp + 1;
        valid[wp] <= 1'b1;
        data[wp] <= d_in;
      end

      if(req_out & ack_out) begin
        rp <= rp == L-1 ? 0 : rp + 1;
        valid[rp] <= 1'b0;
      end
    end
endmodule
```

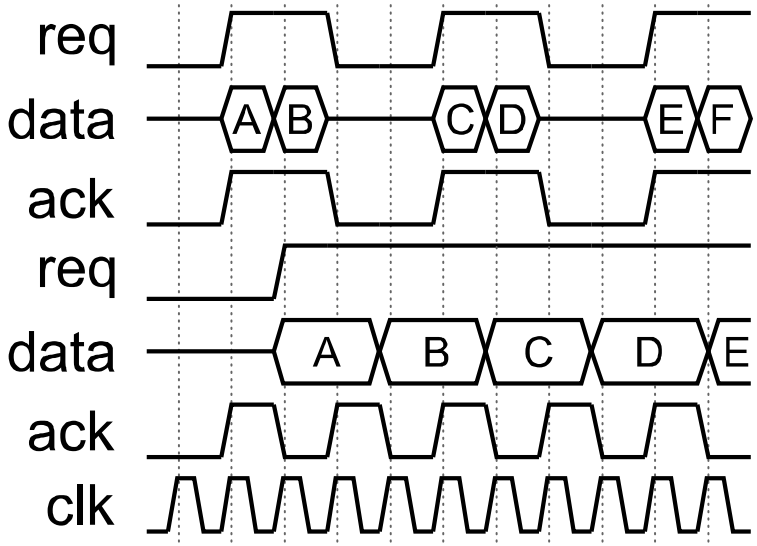


数据存入：wp自增，数据保存并使能。
数据读出：rp自增，数据读出并作废。
缓冲区满：wp等于rp并且valid[wp]有效。
缓冲区空：wp等于rp并且valid[rp]无效。

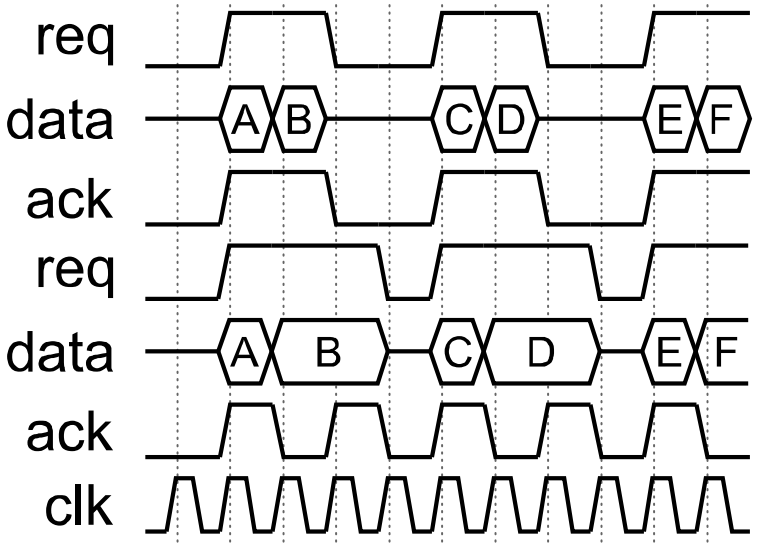
FIFO最小延迟1周期。

是否可以将最小延迟将为0周期?





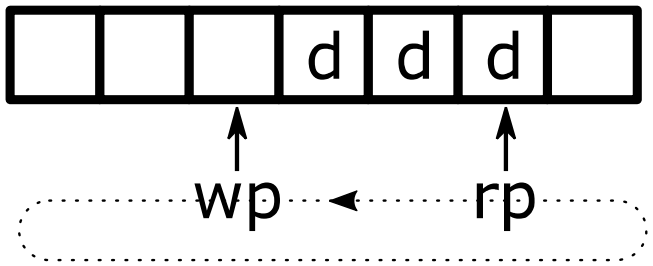
1周期传输延时
缓冲深度至少为2



0周期传输延时
缓冲深度至少为1

深度为L的FIFO缓冲：0最小延时

```
module fifo0 #(parameter dw=8, L=7)
( input clk, rstn,
  input [dw-1:0] d_in, input req_in, output ack_in,
  output [dw-1:0] d_out, output req_out, input ack_out);

  reg [dw-1:0] data [L-1:0];
  reg [L-1:0] valid;
  reg [L-1:0] wp, rp;
  wire empty;

  assign empty = (wp == rp) & ~valid[rp];
  assign d_out = empty ? d_in : data[rp];
  assign req_out = empty ? req_in : valid[rp];
  assign ack_in = ~valid[wp];

  always @(posedge clk or negedge rstn)
    if(~rstn) begin
      wp <= 0; rp <= 0; valid <= 0;
    end else begin
      if(req_in & ack_in & (~empty | ~ack_out))
      begin
        wp <= wp == L-1 ? 0 : wp + 1;
        valid[wp] <= 1'b1;
        data[wp] <= d_in;
      end

      if(req_out & ack_out & ~empty) begin
        rp <= rp == L-1 ? 0 : rp + 1;
        valid[rp] <= 1'b0;
      end
    end
endmodule
```



数据穿越缓冲：
生产者和消费者同时活跃，
同时缓冲为空。

FIFO缓冲器总结

- FIFO缓冲器
  - **缓冲器的作用**
  - **指针型缓冲器的实现**
    - 如何确定缓冲器的深度
    - 空/满的条件
    - 如何降低最小延迟
- 问题
  - **缓冲器的时序问题**
    - （等我们讲完了时序逻辑电路的时序分析）

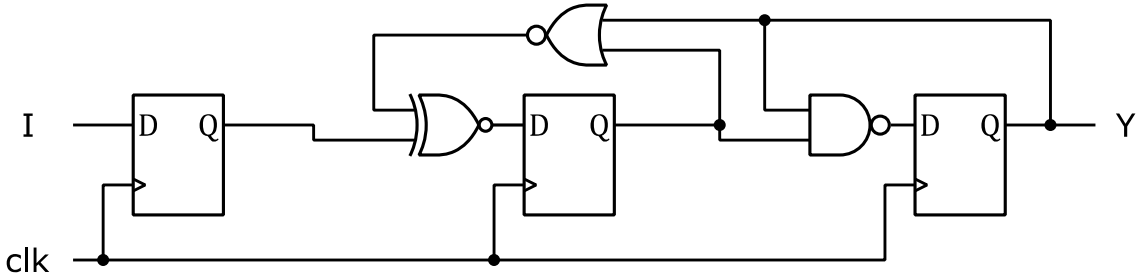
时序逻辑电路的时序分析

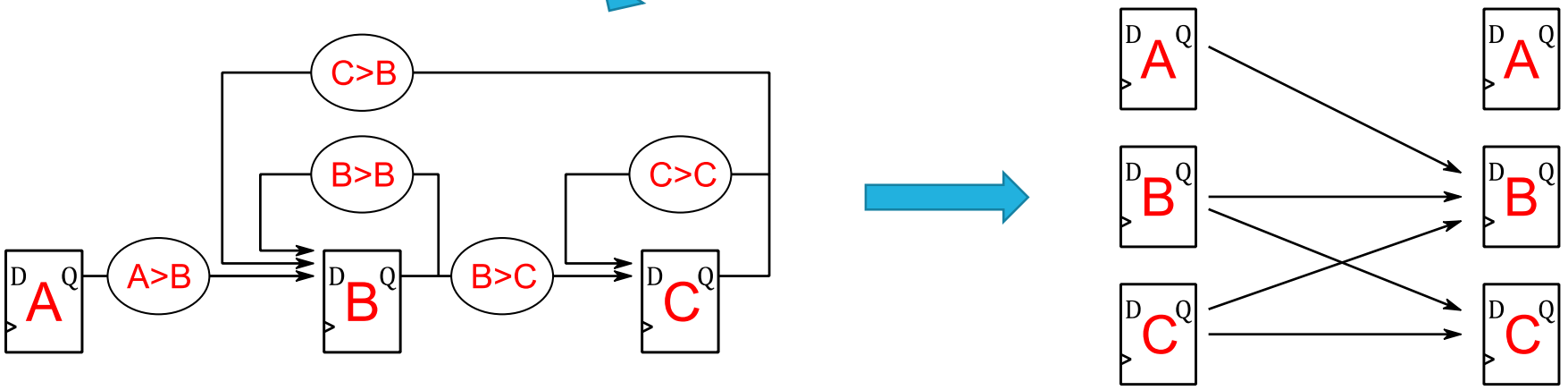
- 已有知识
  - **组合逻辑电路的时序分析**
    - 电路的关键路径
    - 电路的延时计算
  - **寄存器的时序分析**
    - 寄存器的保持和建立时间
    - 寄存器的传输延时

- 时序逻辑电路的时序分析
  - **分析带寄存器的电路的时间特性**
  - **目的：**
    - 电路的最高频率
    - 电路是否能正常工作

时序逻辑电路的简化电路模型

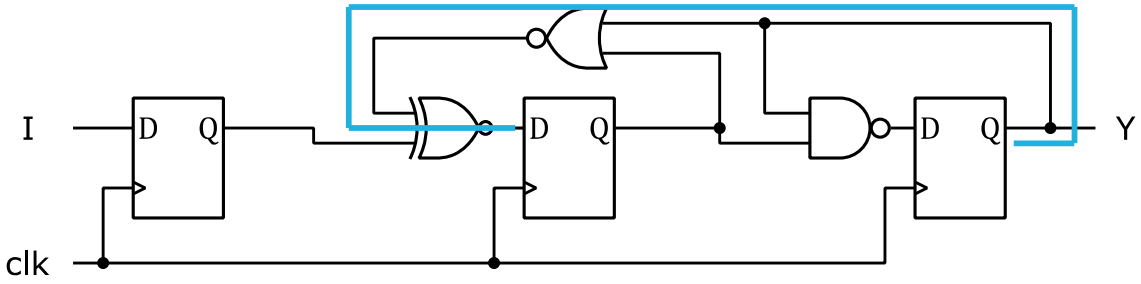
- 我们如何能知道最高频率?





X>Y: 从X到Y的路径群。

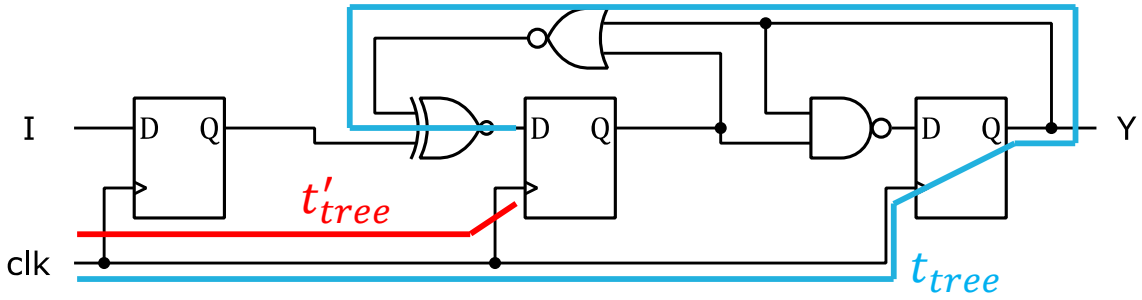
分析一条路径的延时



- $t = t_p(NOR) + t_p(NXOR)$

- 但是该时间还不能直接和时钟频率结合起来

通过路径延时分析时钟频率



- 我们知道寄存器建立时间t_{su}和传输时间t_{pd}的概念

$$t_{tree} + t_{pd}(R) + t_p(NOR) + t_p(NXOR) + t_{su} < t'_{tree} + T$$

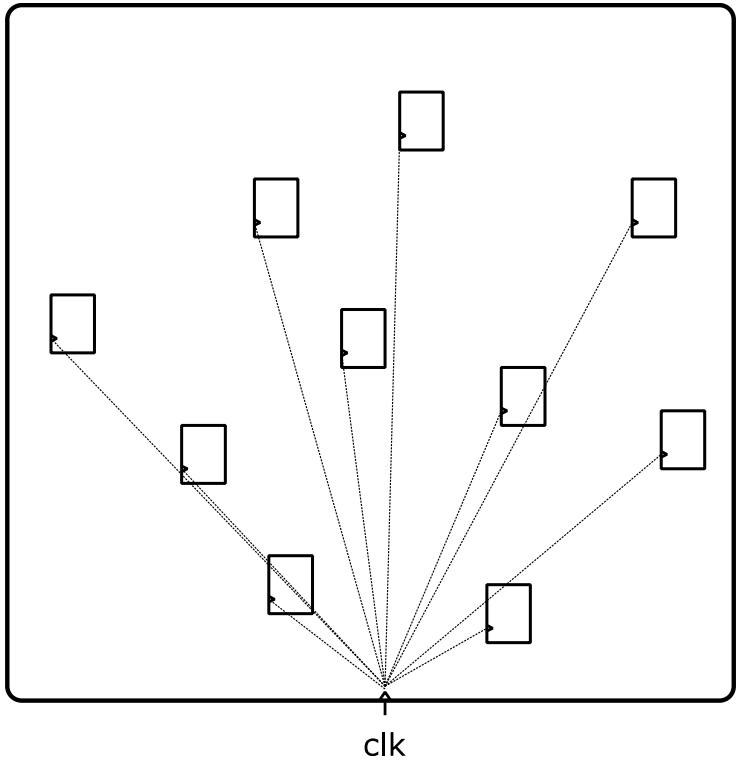
所以

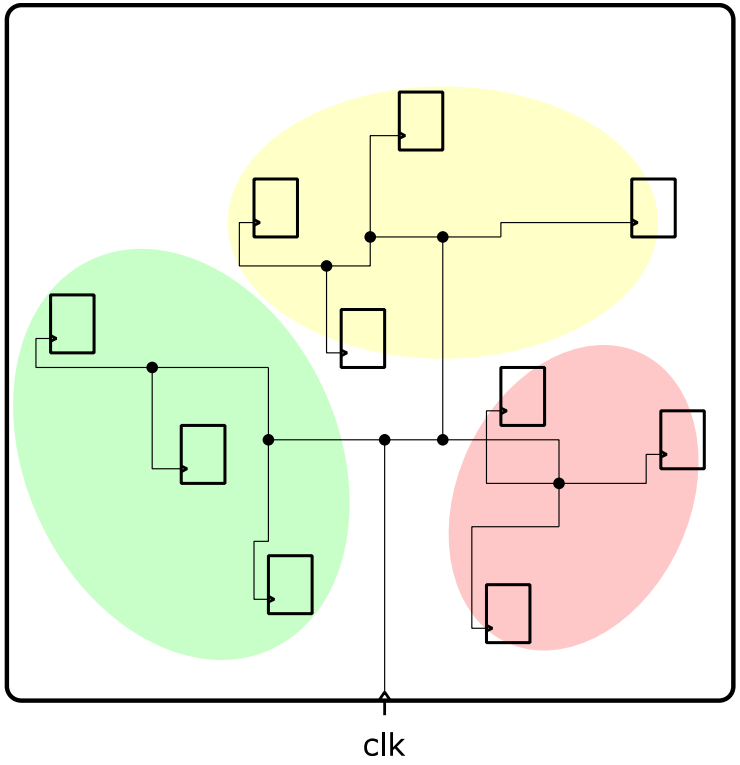
$$T_{min} > \underbrace{(t_{tree} - t'_{tree})}_{\text{时钟树偏差}} + \underbrace{t_{su}}_{\text{建立时间}} + \underbrace{t_{pd}(R)}_{\text{传输时间}} + \underbrace{t_p(NOR) + t_p(NXOR)}_{\text{路径延时}}$$

$$f_{max} = \frac{1}{T_{min}}$$

时钟树的构造与平衡

- 时钟树的平衡，影响电路的频率



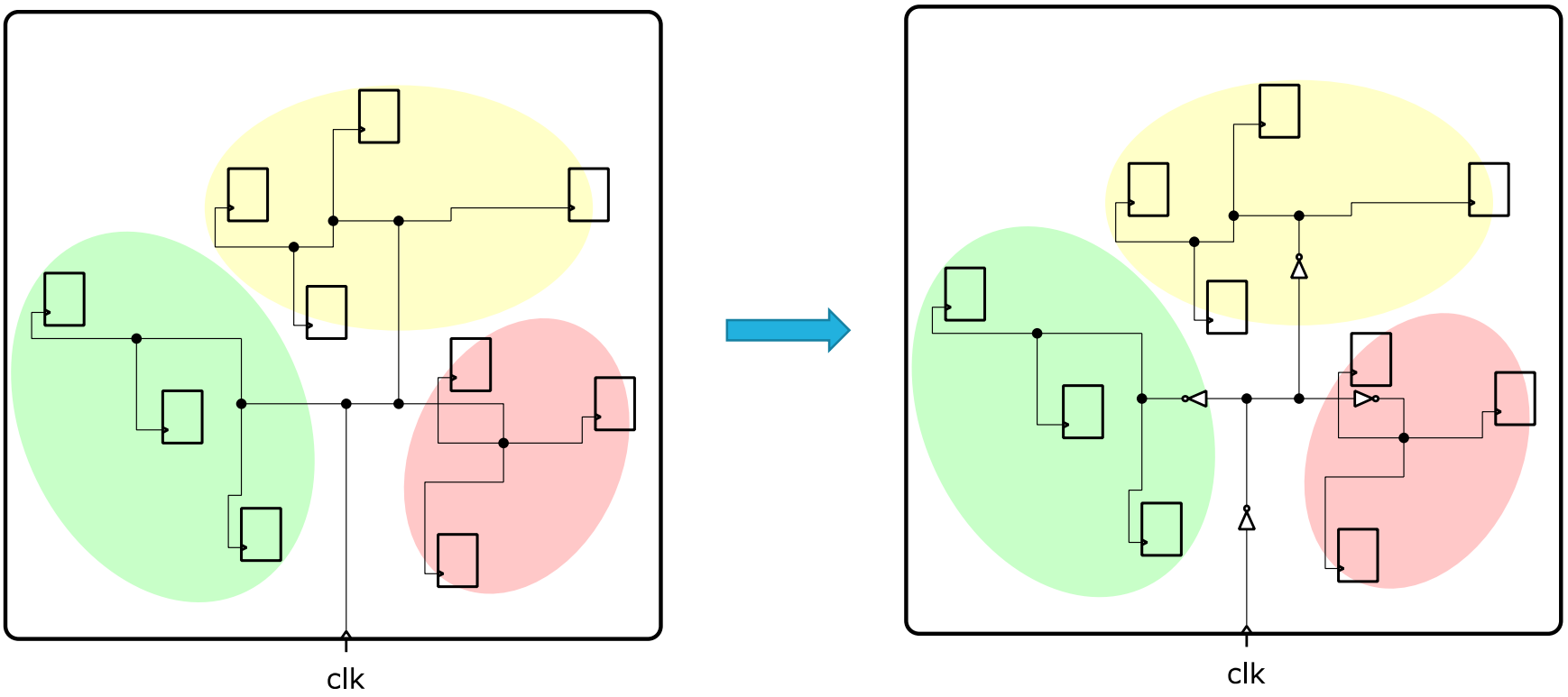


- 将时钟引到芯片中间
- 寄存器分片，片内时钟继续均匀分布
- 形成一个树形结构

时钟信号的负载很大，
导致翻转时间长！

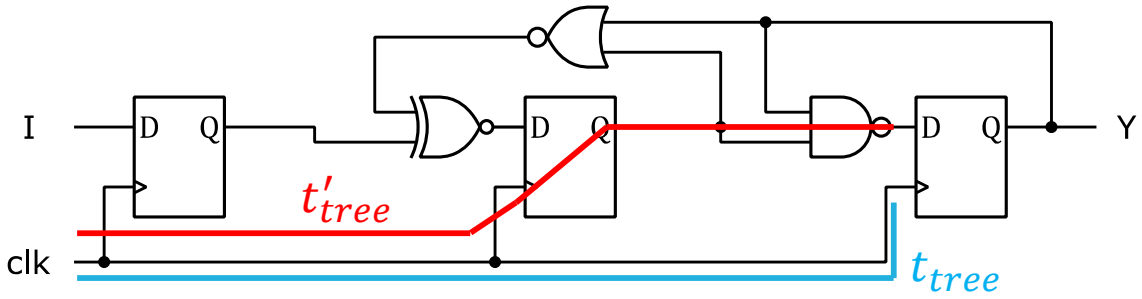
时钟树的构造与平衡

- 时钟树的平衡，影响电路的频率



- 在时钟树上添加缓冲器（反门）
- 减小时钟信号的翻转时间，增大其驱动能力

寄存器正常工作的条件：保持时间



- 我们知道寄存器保持时间t_h的概念

$$t_{tree} + t_h < t'_{tree} + t_{pd}(R) + t_p(NAND)$$

所以

$$\underbrace{t_p(NAND)}_{\text{路径延时}} > \underbrace{(t_{tree} - t'_{tree})}_{\text{时钟树偏差}} + \underbrace{t_h(R)}_{\text{保持时间}} - \underbrace{t_{pd}(R)}_{\text{传输时间}}$$

路径延时也不能太短，否则寄存器不能正常工作。

时序逻辑电路时序分析总结

- 如何分析时序逻辑电路
  - 将电路化简为时序路径
  - 最长的时序路径决定了电路的速度
- 分析最长时序路径

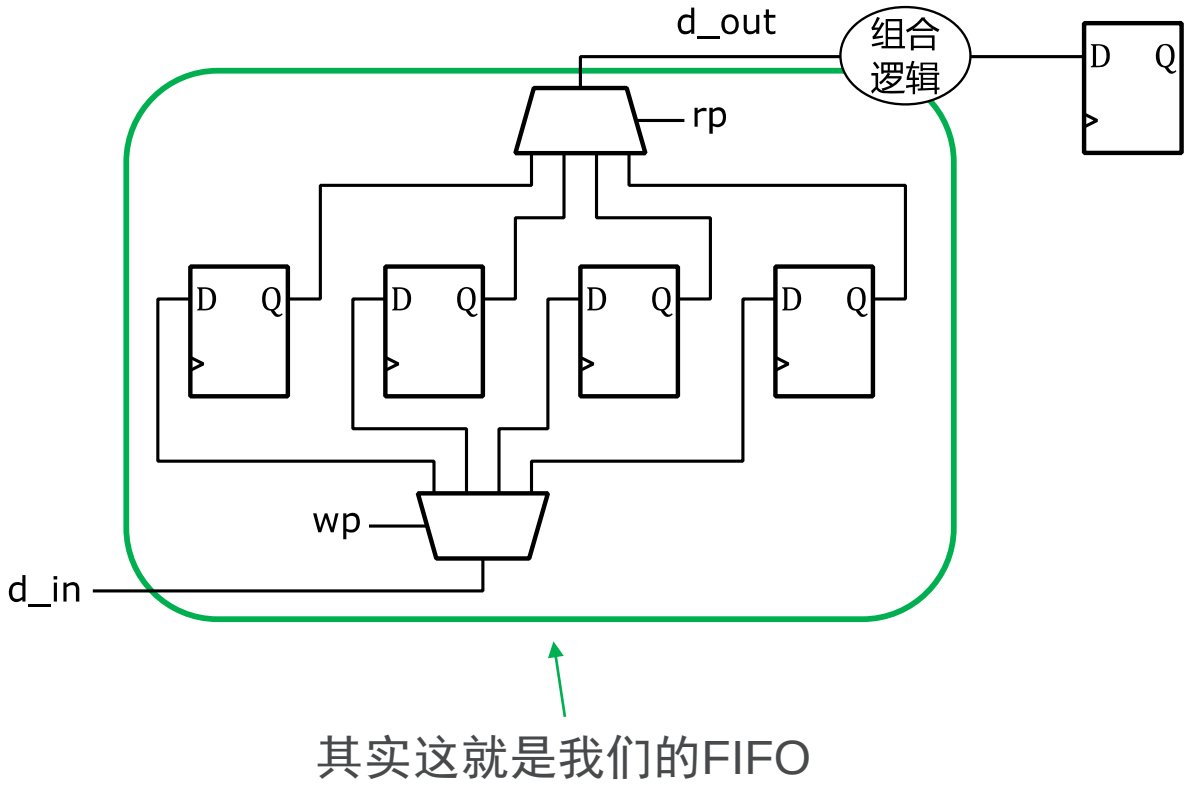
$$T_{min} > (t_{tree} - t'_{tree}) + t_{su} + t_{pd}(R) + t_{path}$$

- 时钟树
  - 时钟树的平衡是为了降低时钟偏差$(t_{tree} - t'_{tree})$
  - 时钟树上使用缓冲器（反门）提高时钟的驱动能力
- 时序电路正常工作的条件

$$t_{path} > (t_{tree} - t'_{tree}) + t_h(R) - t_{pd}(R)$$

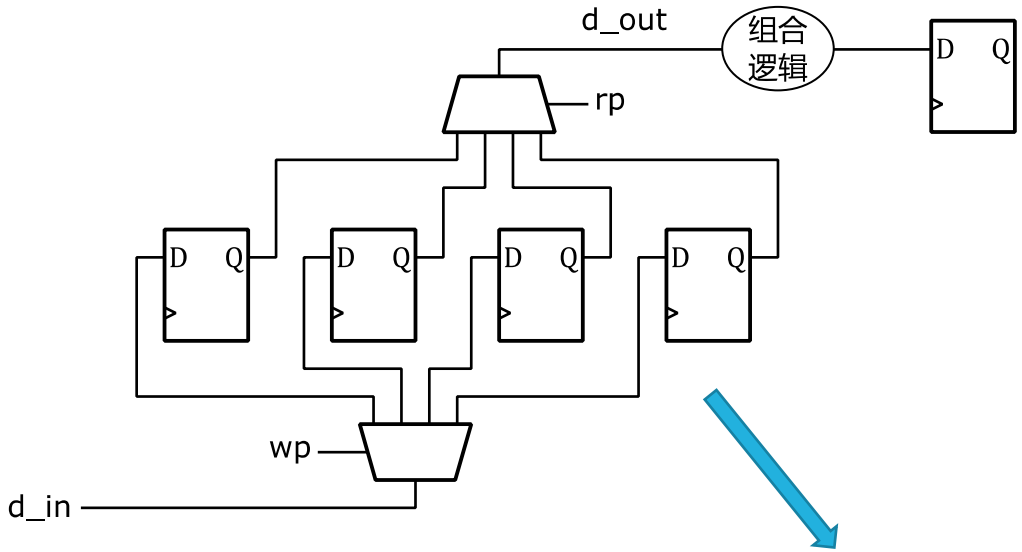
FIFO缓冲器的时序问题

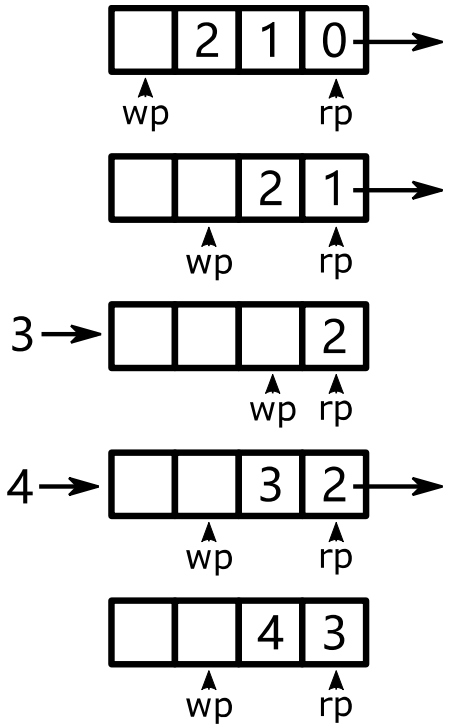
- 如果FIFO的输出级时序紧张怎么办？

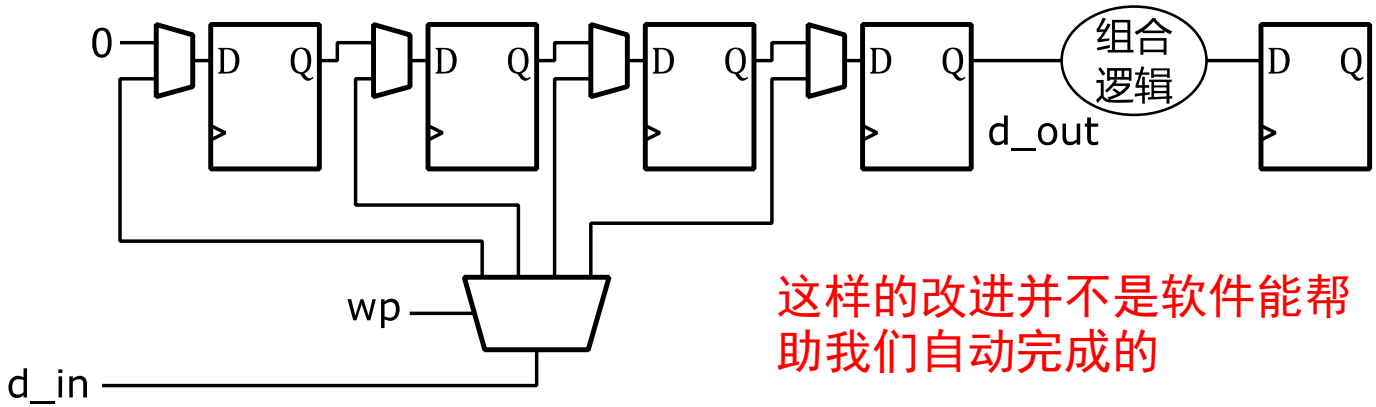


FIFO缓冲器的时序问题

- 如果FIFO的输出级时序紧张怎么办？



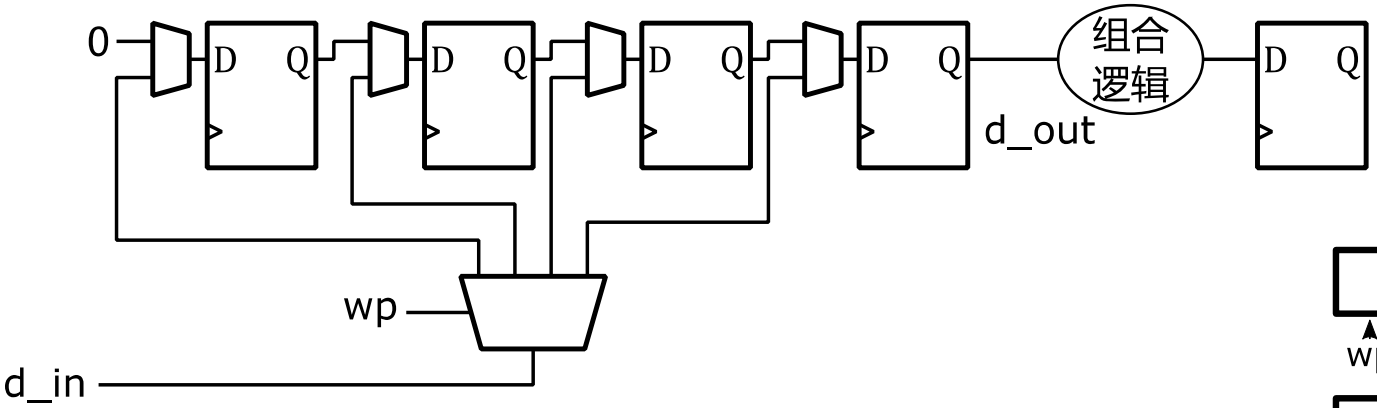


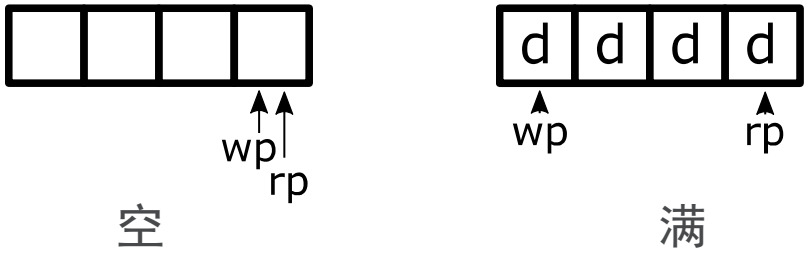


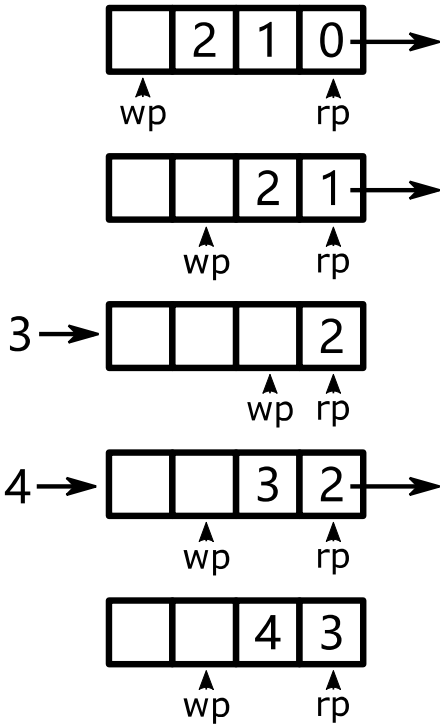
这样的改进并不是软件能帮助我们自动完成的

FIFO缓冲器的时序问题

- 如果FIFO的输出级时序紧张怎么办？







这样的改进并不是软件能帮助我们自动完成的

考试范围

- 使用Verilog HDL设计时序逻辑电路
  - 会使用Verilog HDL设计基本的时序逻辑电路
- 时序逻辑电路的测试设计
  - 能够设计测试来验证时序逻辑电路
- 复杂时序逻辑电路设计
  - 循环仲裁器（round-robin arbiter）
  - 指针型的FIFO缓冲
  - 只是介绍，了解基本概念
- 时序逻辑电路的时序分析
  - 路径时间检查
  - 时钟树
  - 只是介绍，了解基本概念

任何问题?

作业

编程题 1：

用Verilog HDL编写一个4路随机仲裁器。
只提交设计电路，测试模块不提交。

编程题 2：

用Verilog HDL编写一个输出为寄存器直接输出的FIFO缓冲，缓冲深度为8，数据宽度为4位。只提交设计电路，测试模块不提交。

编程题 3：

用Verilog HDL编写一个交通灯，按照红灯10个时钟周期，黄灯1个时钟周期，绿灯9个时钟周期，黄灯2个时钟周期的顺序循环。只提交设计电路，测试模块不提交。

课堂习题（课堂提问方式）

对于下面的时序逻辑电路：

（1）寻找该电路的关键路径

（2）分析可能优化该关键路径时序的方法，以及其优缺点。