



## 第二部分      交换网络

---

计算机学院

段鹏瑞

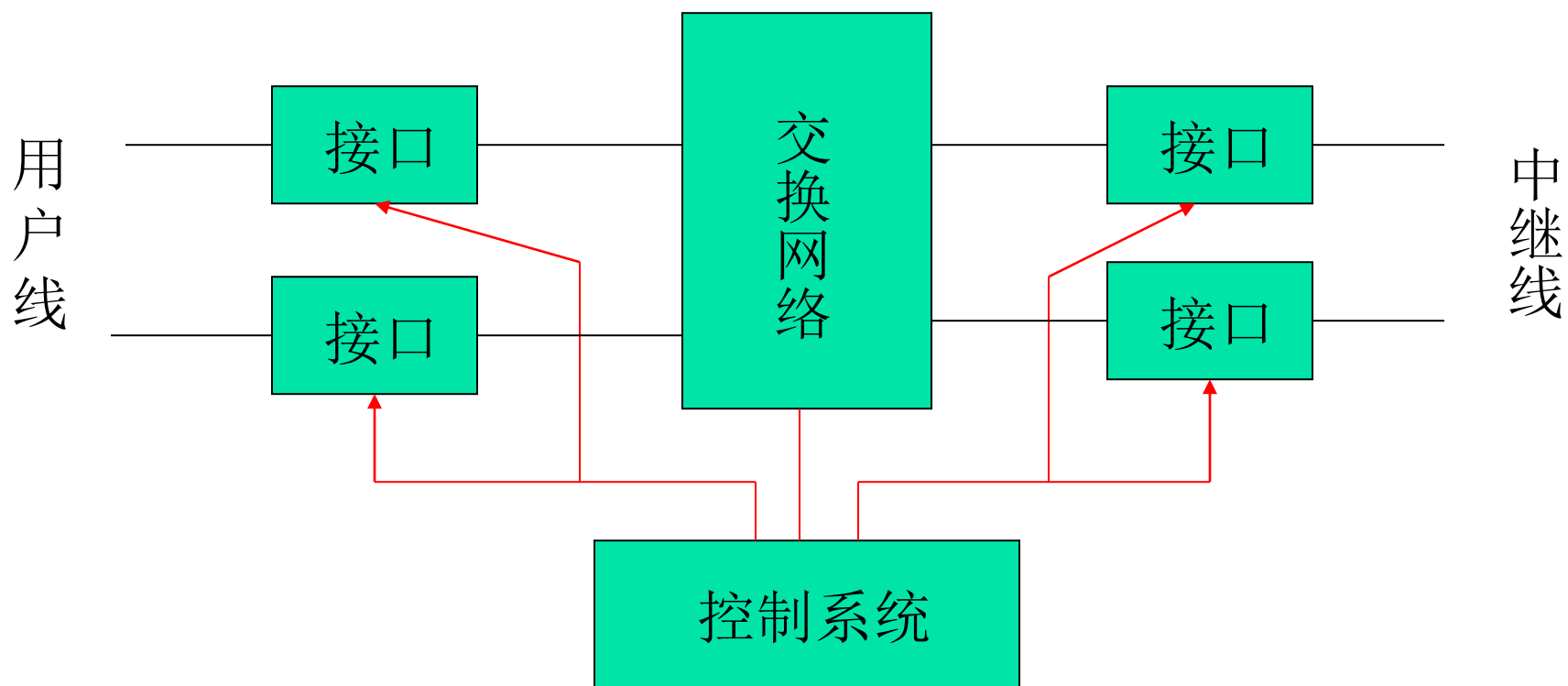


# 主要内容

---

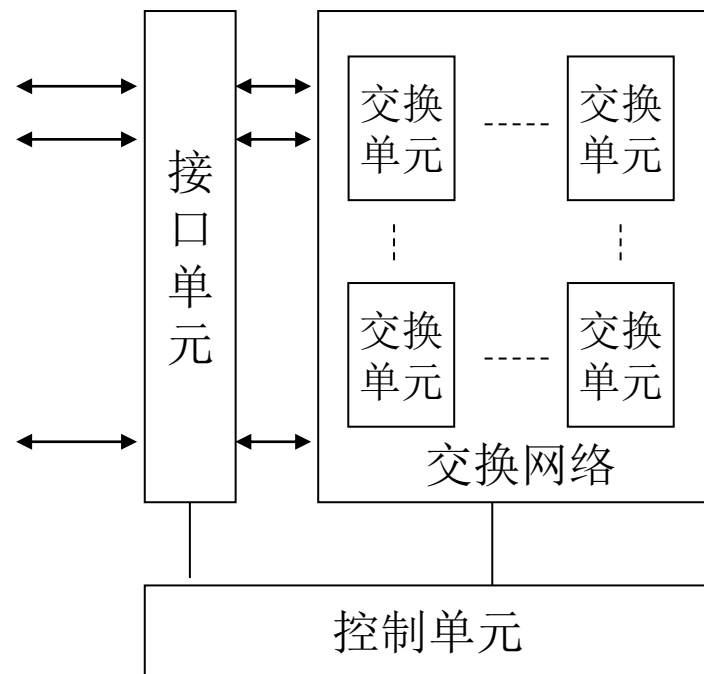
- **1 交换单元的基本概念和数学模型**
- **2 各类交换单元**
  - 基本开关阵列、共享存储器、总线型
- **3 交换网络**
  - **CLOS BENES TST BANYAN DSN**

# 电信交换系统的基本结构



# 交换设备的结构

- 交换单元
  - 在入线和出线间建立连接，将入线上的信息发送到出线上
- 控制单元
  - 对信号进行译码，控制交换单元的动作
- 接口单元
  - 外部线路信号与交换单元信号的转换

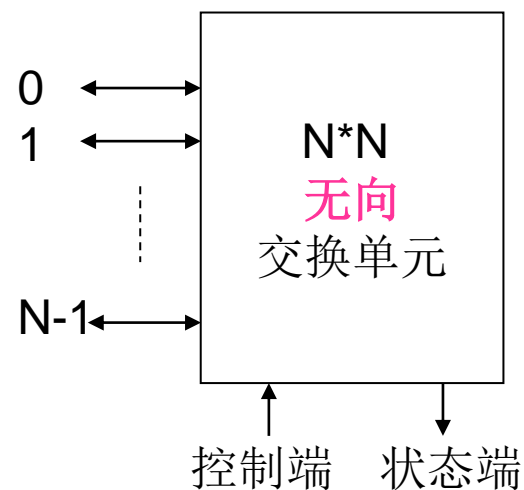
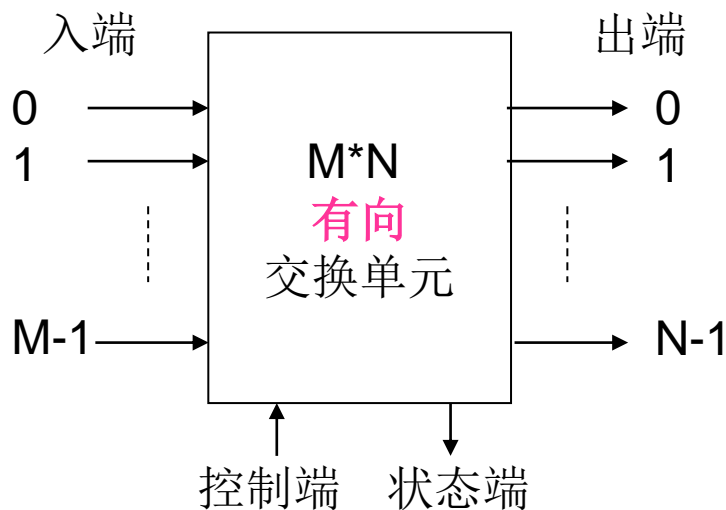


# 1 交换单元

- 交换单元

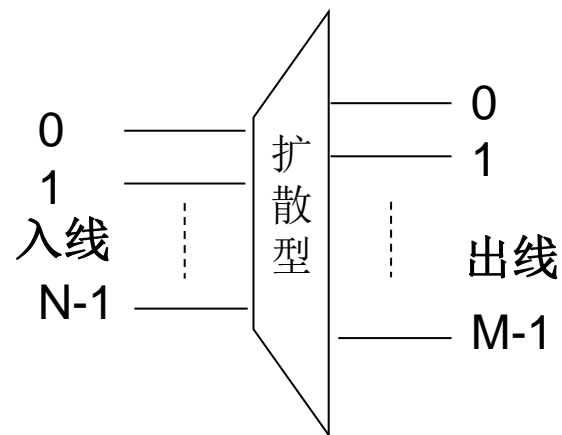
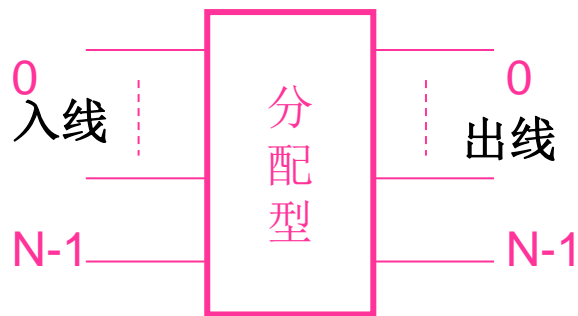
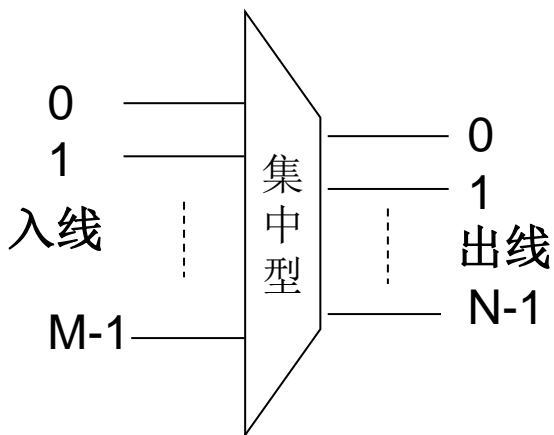
- 完成交换功能的基本部件，能按照一定的要求，将入线上的信息发送到指定的出线

- 按照信息流向分类



# 1 交换单元

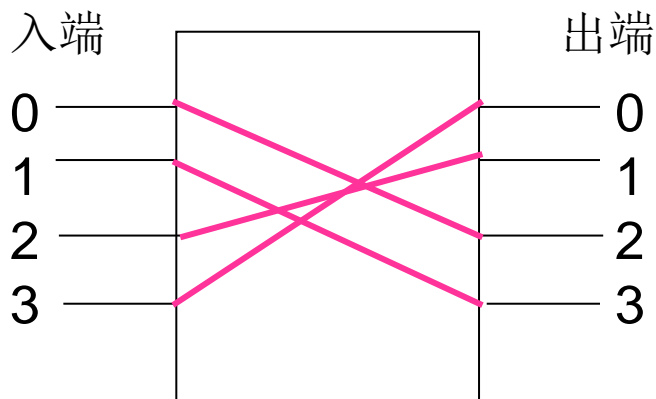
- 按照使用需求分类



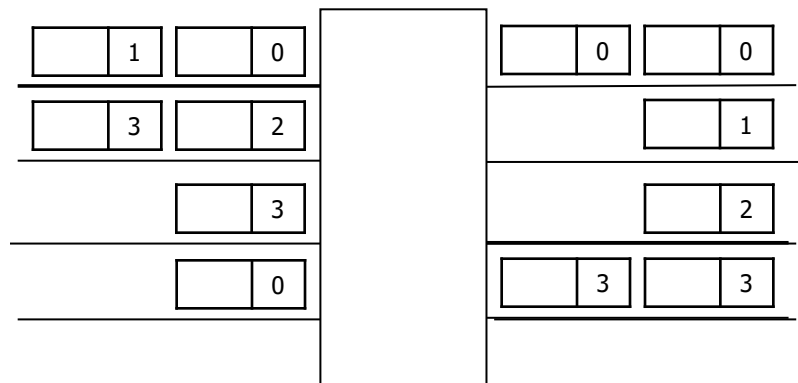
# 1 交换单元

## ■ 交换过程

- 建立内部通道，完成入线与出线上的信息交换
- 在完成信息交换后，拆除内部通道



同步时分复用信号的交换



统计复用信号的交换

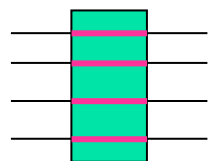
# 1 交换单元---连接

- **M\*N**交换单元的入线集合与出线集合分别为  
入线集合  $T = \{ 0, 1, 2 \dots M-1 \}$     出线集合  $R = \{ 0, 1, 2 \dots N-1 \}$
- 连接的定义  
对于一个入端  $t$  ( $t \in T$ ) 和一组出端  $R_t$  ( $R_t \subseteq R$ ) ,  $c = \{ t, R_t \}$  称为一个  
**连**  
**接**。  
其中  $t$  称连接的起点,  $r \in R_t$  称连接的终点  
若  $r \in R_t$  ,  $R_t$  中只含有一个元素, 则称该连接是一对一 (**点对点**) 连接  
若  $r \in R_t$  ,  $R_t$  中含有多个元素, 则称该连接是一对多 (**点对多点**) 连接
- 同发与广播  
一个交换单元中, 若允许点对多点的连接, 则称具有**同发** 功能;  
若允许一个入端对全体出端的连接 (即  $R_t = R$ ) , 则称具有**广播** 功能。
- 交换单元中不允许多对多或多对一连接, 该种情况称出线冲突。

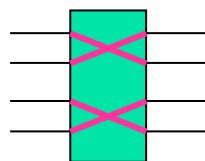


# 1 交换单元---连接方式

- 交换单元的连接方式： $C = \{ c_1, c_2, \dots \}$  为由若干个连接组成的集合。  
连接方式对应于某一时刻



$T_0$ 时刻



$T_1$ 时刻

- 起点集：**  $T_c = \{ t; t \in c_i, c_i \in C \}$  为该连接方式中所有连接的起点组成的集合。
- 终点集：**  $R_c = \{ r; r \in R_t, R_t \in c_i, c_i \in C \}$  为该连接方式中所有连接的终点组成的集合。
- 若入端  $t \in T_c$ ，称其处于**占用**状态；否则称其处于**空闲**状态。  
若出端  $r \in R_c$ ，称其处于**占用**状态；否则称其处于**空闲**状态。



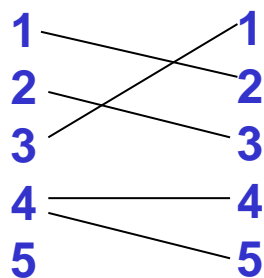
# 1 交换单元---连接函数

- 连接函数  
入线集合与出线集合的映射关系
- $M \times N$ 交换单元的连接函数表示  
排列表示法

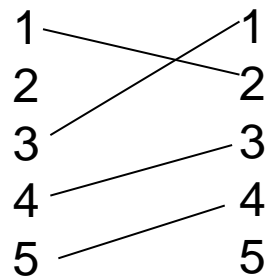
$$\left[ \begin{array}{cccc} r_1 & r_2 & \dots & r_n \\ t_1 & t_2 & \dots & t_n \end{array} \right] \quad (n \leq N) \text{ 表示}$$

# 1 交换单元---连接函数

## ■ 排列表示法举例



$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 1 & 2 & 4 & 4 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 1 & 4 & 5 & \emptyset \end{bmatrix}$$

# 1 交换单元---连接函数

- 连接函数

入线集合与出线集合的映射关系

- M\*N交换单元的连接函数表示

排列表示法

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r_1} & r_2 & \dots & r_n \\ \mathbf{t_1} & t_2 & \dots & t_n \end{bmatrix} \quad (n \leq N) \text{ 表示}$$

当不存在同发时，上式可写作

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{2} & \dots & \mathbf{n} \\ \mathbf{t_1} & \mathbf{t_2} & \dots & \mathbf{t_n} \end{bmatrix}$$

简写作  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ ，称**入端重排表示**

# 1 交换单元---连接函数

## ■ 入端重排表达式举例

1 ——— 1  
2 ——— 2  
3 ——— 3  
4 ——— 4  
5 ——— 5  
6 ——— 6

(1, 2, 3, 4, 5, 6)

1 ——— 2  
2 ——— 1  
3 ——— 4  
4 ——— 3  
5 ——— 6  
6 ——— 5

(2, 1, 4, 3, 6, 5)

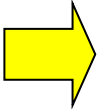


# 1 交换单元---连接函数

- 当不存在同发时，上式可写作

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ t_1 & t_2 & \dots & t_n \end{bmatrix}$$

简写作  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ ，称**入端重排表示**

- 
- 若满足：

- 交换单元的入端数M等于出端数N；
- 没有空闲的入端和出端；
- 没有点对多点的连接。

**一个N\*N的交换单元有 N! 种不同的点对点连接方式。**



# 1 交换单元---连接函数

函数表示法举例----直线连接:

函数表示法:  $I(x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0) = x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0$

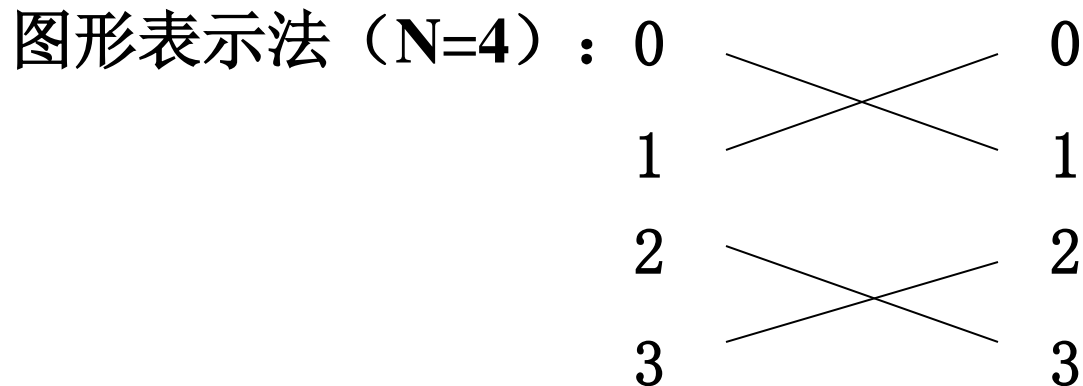
图形表示法 (N=4) :

0	—————	0
1	—————	1
2	—————	2
3	—————	3

# 1 交换单元---连接函数

函数表示法举例----交叉连接:

函数表示法:  $E(x_{n-1}x_{n-2}\cdots x_1x_0) = x_{n-1}x_{n-2}\cdots x_1\overline{x_0}$

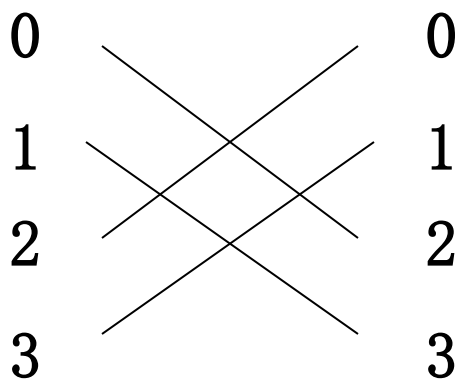




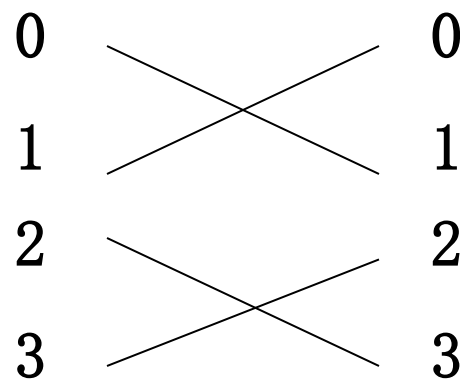
# 1 交换单元---连接函数

函数表示法举例----间隔交叉连接:

$$C_k(x_{n-1}x_{n-2}\dots x_k \dots x_1x_0) = x_{n-1}x_{n-2}\dots \overline{x_k} \dots x_1x_0$$



N=4 k=1



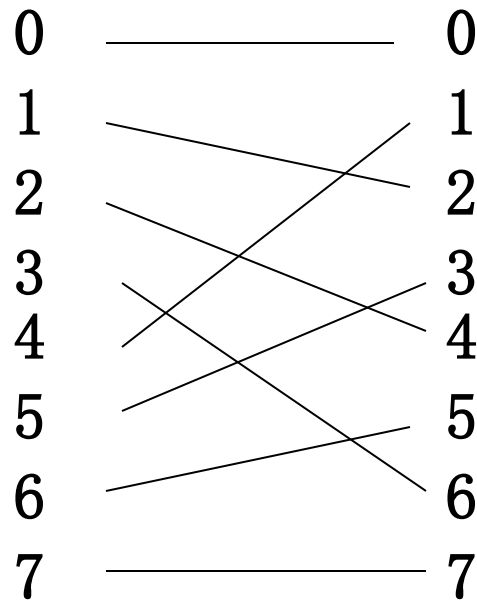
N=4 k=0

# 1 交换单元---连接函数

函数表示法举例----均匀洗牌连接:

$$\sigma(x_{n-1}x_{n-2}\cdots x_k \cdots x_1x_0) = x_{n-2}\cdots x_k \cdots x_1x_0x_{n-1}$$

N=8

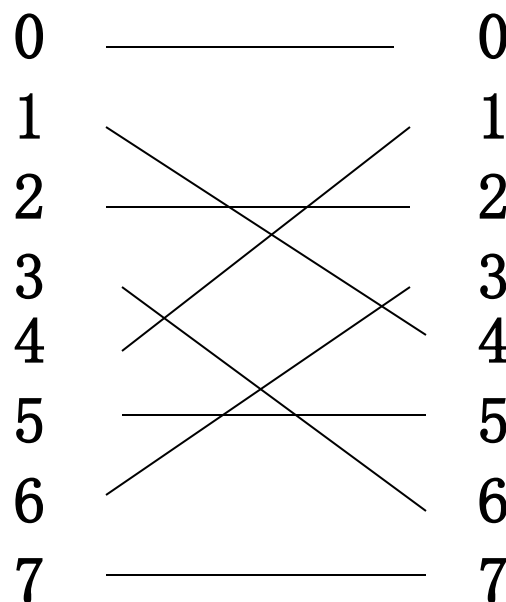


# 1 交换单元---连接函数

函数表示法举例----蝶式连接:

$$\beta(x_{n-1} x_{n-2} \dots x_k \dots x_1 x_0) = x_0 x_{n-2} \dots x_k \dots x_1 x_{n-1}$$

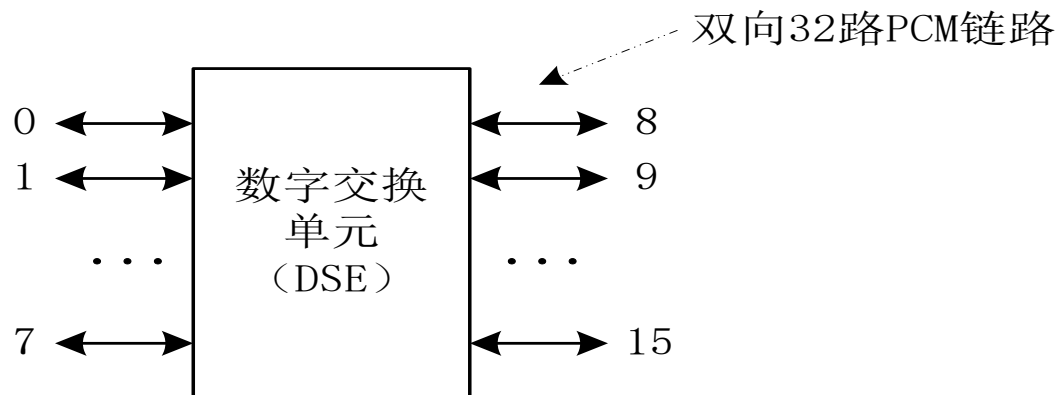
N=8



## 2 各类交换单元

### ■ 性能指标

- 容量——可交换的信息量，或出入线数量
- 接口——单向/双向，数字/模拟
- 交换功能——点到点，同发，广播
- 质量——时延，内部阻塞



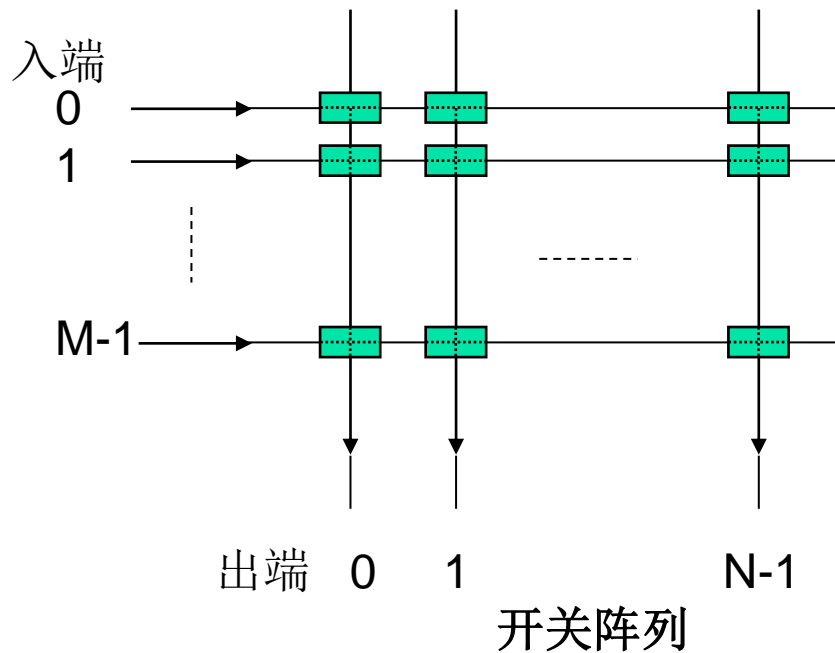
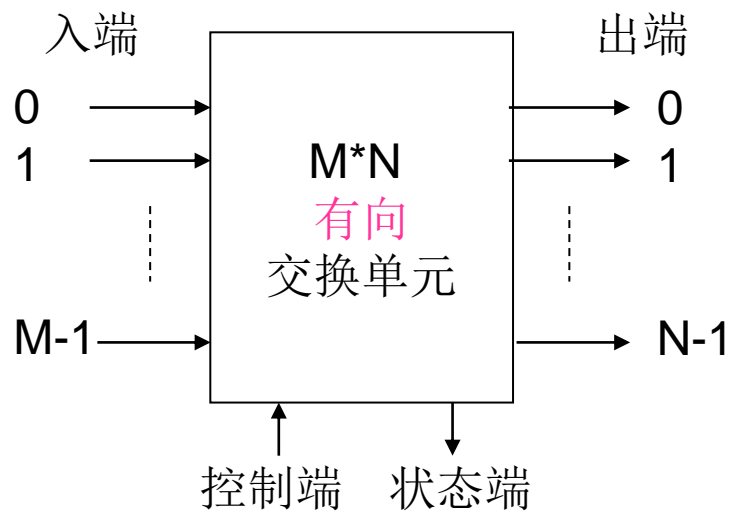


## 2 各类交换单元

---

- 种类
  - 基本开关阵列——空分交换
  - 共享存储器结构
  - 共享总线型结构

## 2 各类交换单元---基本开关阵列



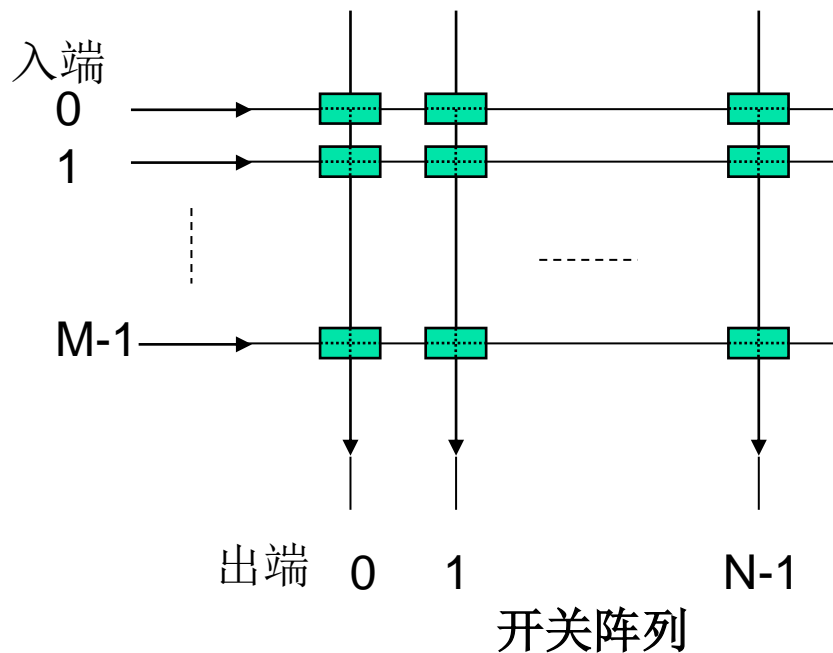
## 2 各类交换单元---基本开关阵列

### 工作原理

- 开关有 **接通**、**断开** 两种状态。开关接通则对应的入线和出线连接；否则入线和出线就不连接。
- 每个开关都有一个控制端和一个状态端，分别用于控制和表示开关的通断状态。
- 开关阵列的控制端构成控制方阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

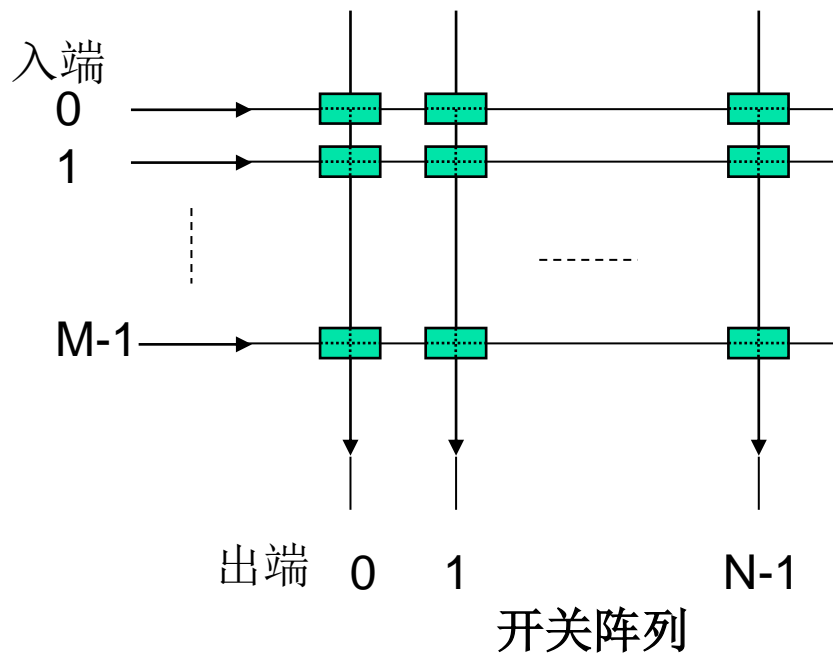
- 开关阵列的状态端构成状态方阵



## 2 各类交换单元---基本开关阵列

### ■ 特性

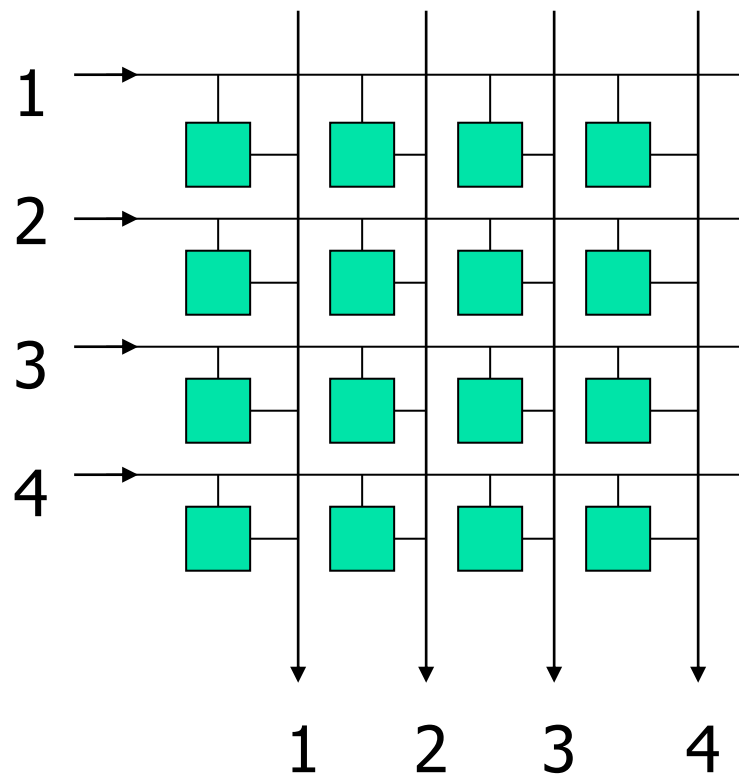
- 由空间上分离的多个开关部件构成，是一种空分交换单元。
- 交换动作控制简单，具有均匀的单位延迟时间
- 交叉点（开关）数为入线数与出线数的乘积。适合构造小的交换单元
- 同发与广播易于实现
- 无内部阻塞





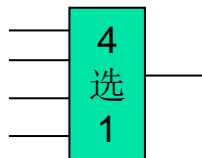
## 2 各类交换单元---基本开关阵列

- 实际开关阵列
  - 继电器
    - 噪声大、动作慢
  - 模拟电子开关
    - 衰耗和延时大
  - 数字电子开关
    - 逻辑门，动作迅速



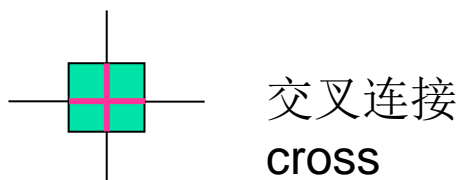
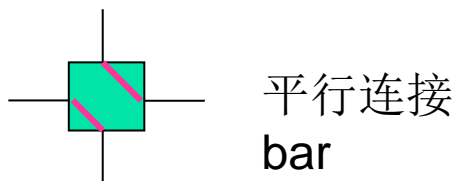
## 2 各类交换单元---基本开关阵列

- 实际开关阵列
  - 继电器
    - 噪声大、动作慢
  - 模拟电子开关
    - 衰耗和延时大
  - 数字电子开关
    - 逻辑门，动作迅速
  - 多路选择器
    - 可有效避免冲突



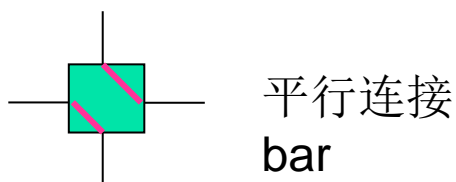
## 2 各类交换单元---基本开关阵列

- 实际开关阵列
  - 继电器
  - 模拟电子开关
  - 数字电子开关
  - 多路选择器
  - **2\*2交叉连接单元**
    - 可以避免出线冲突，不支持同发

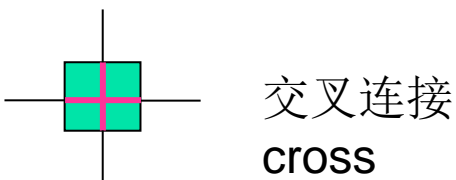


## 2 各类交换单元---基本开关阵列

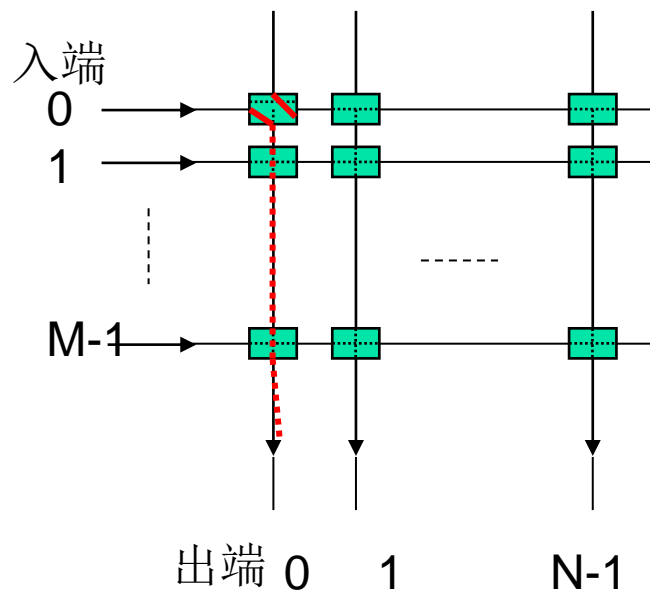
- 实际开关阵列
  - 继电器
  - 模拟电子开关
  - 数字电子开关
  - 多路选择器
  - **2\*2交叉连接单元**
    - 可以避免出线冲突，不支持同发



平行连接  
bar



交叉连接  
cross





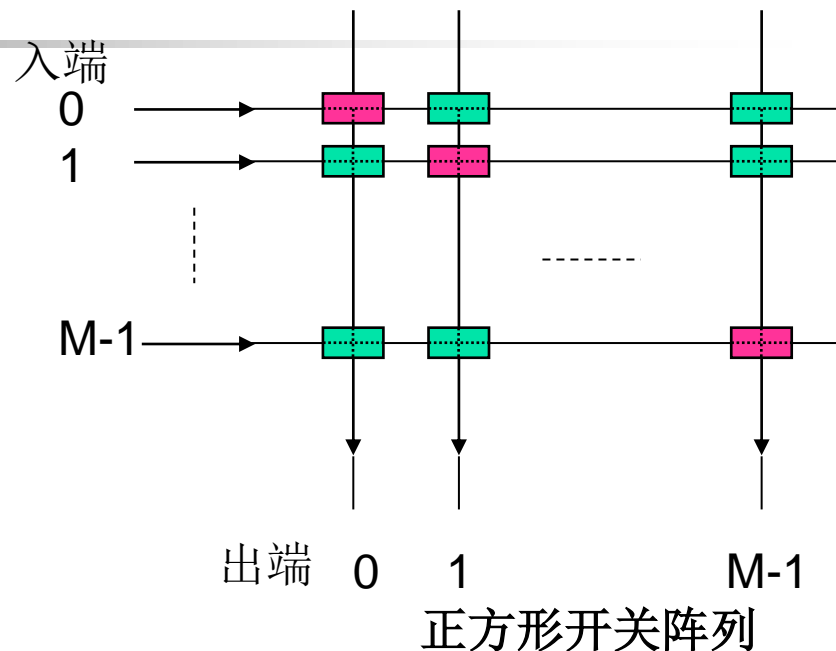
## 2 各类交换单元---基本开关阵列

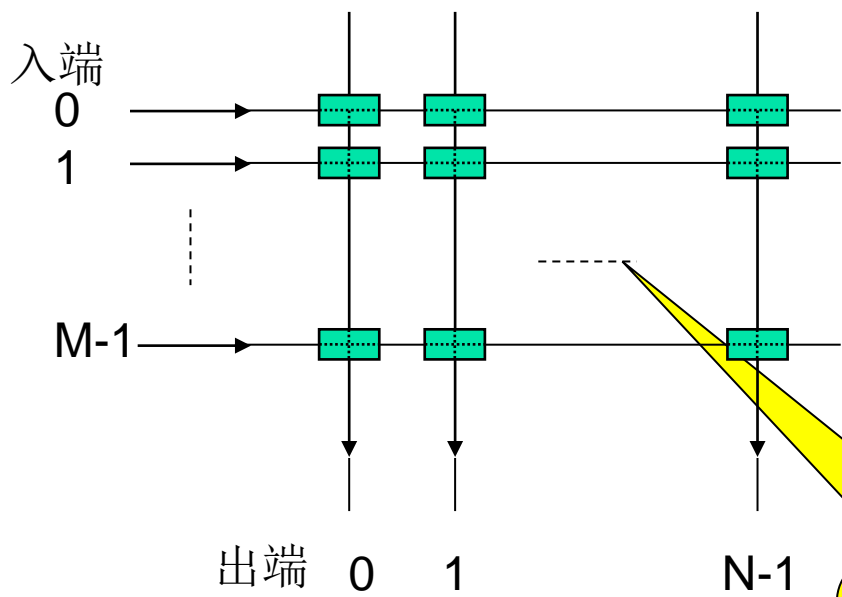
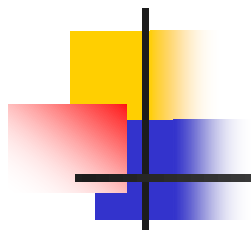
---

- 实际开关阵列
  - 继电器
  - 模拟电子开关
  - 数字电子开关
  - 多路选择器
  - **2\*2交叉连接单元**
    - 可以避免出线冲突，不支持同发
  - 带缓冲器的开关
    - 没有呼损，有排队时延

## 2 各类交换单元---基本开关阵列

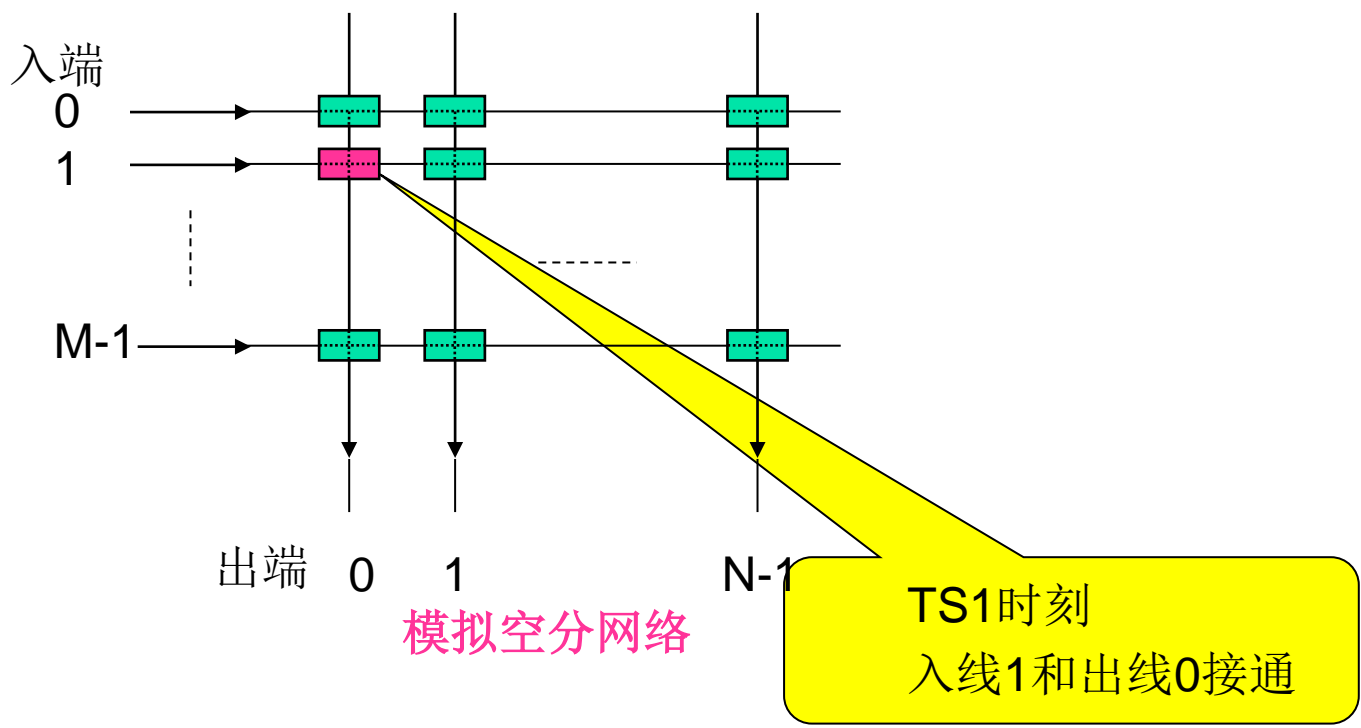
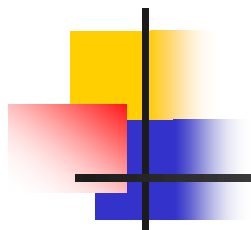
- 缺点
  - 交叉接点开关数量巨大
  - 交叉接点开关利用率低
- 克服缺点的方法
  - 时分交换
  - 多级网络



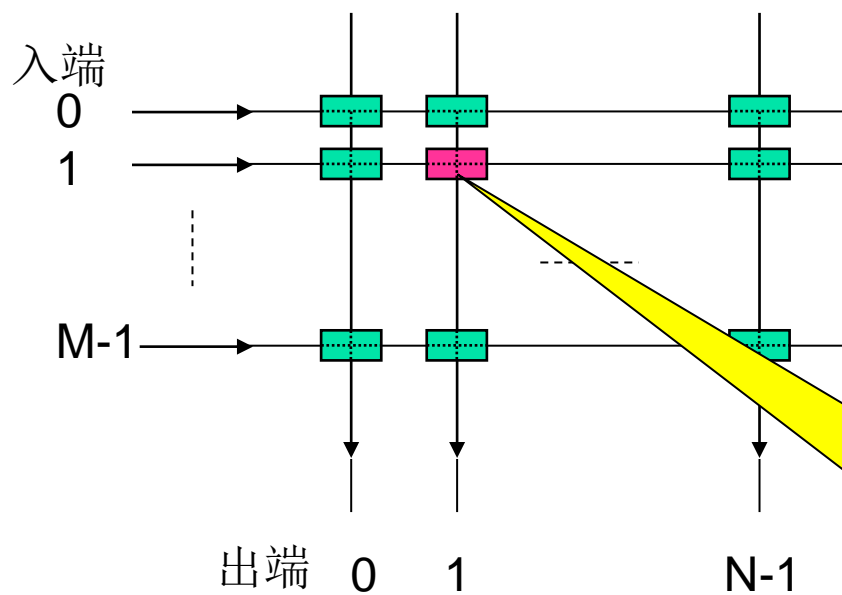
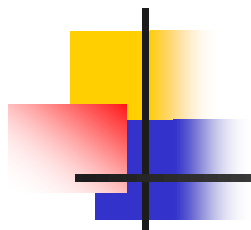


模拟空分网络

模拟空分网络能不能通过数字信号？







模拟空分网络

TS2时刻  
入线1和出线1接通

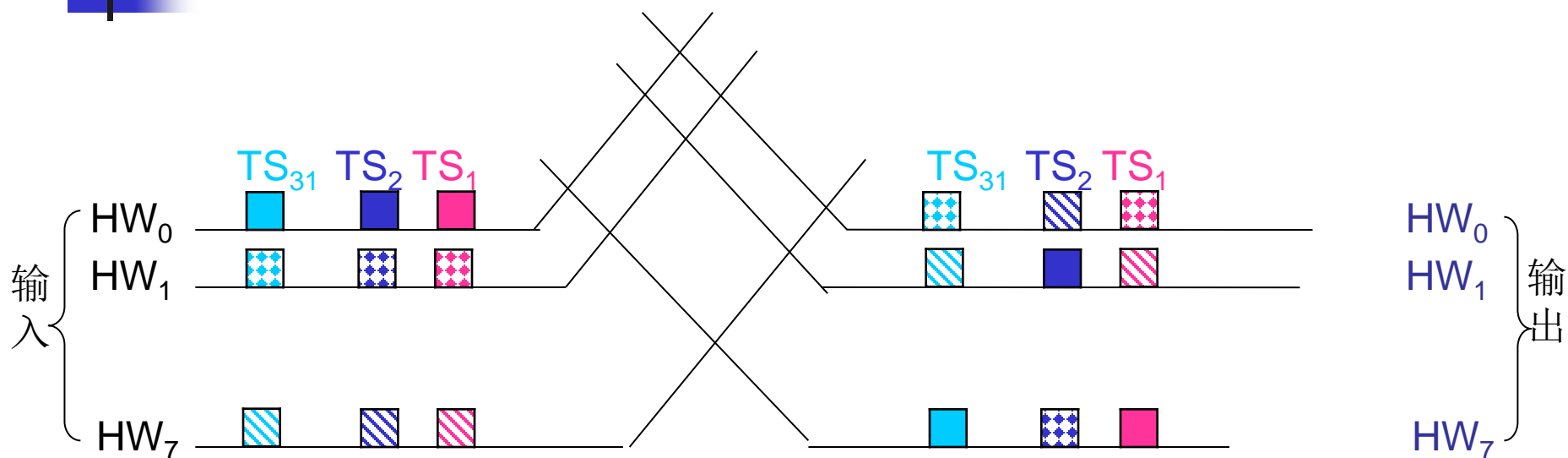


## 2 各类交换单元---基本开关阵列

---

- 空间(S)接线器
  - 实现一个时隙内任意母线间的交换。
  - 由电子交叉点矩阵、控制存贮器CM和控制电路组成。
  - 控制方式分为：输入控制和输出控制

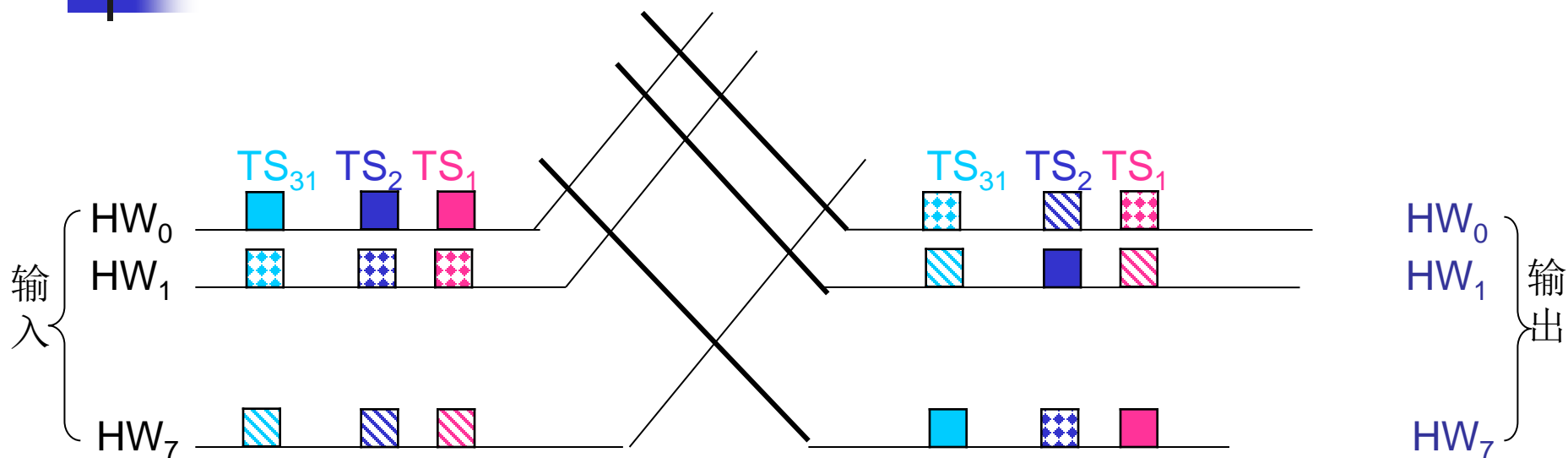
## 空间(S)接线器—输出控制方式



	0	1		7
0				
1	1	7		0
2	7	0		1
31	1	7		0

控存填写的内容为‘线号’

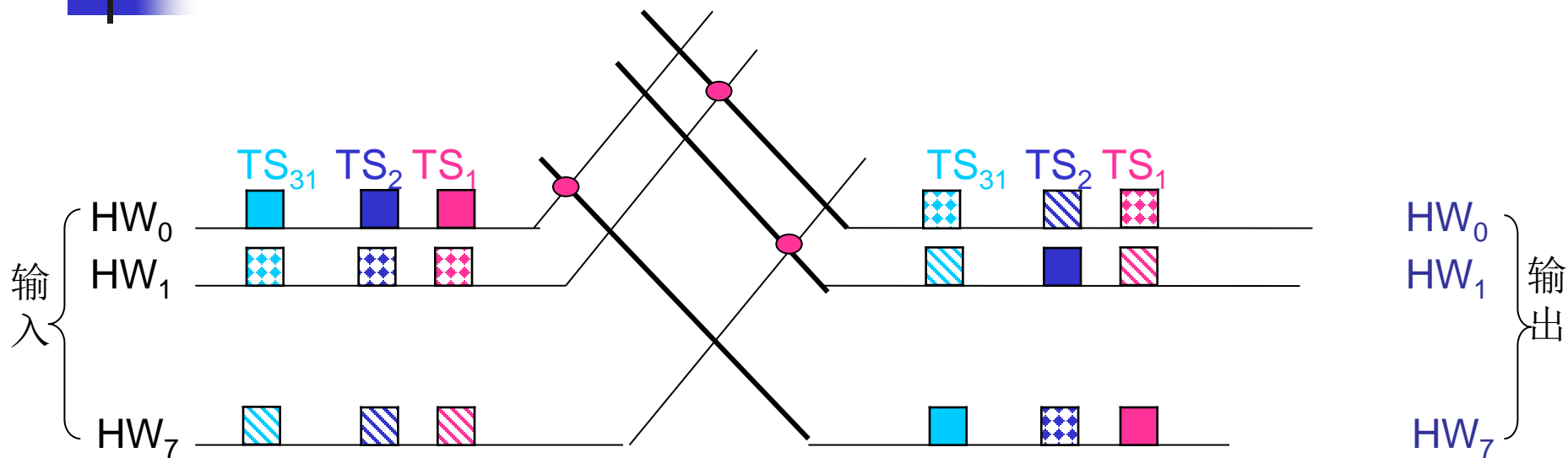
# 空间(S)接线器—输出控制方式



	0	1		7
0				
1	1	7		0
2	7	0		1
31	1	7		0

控存填写的内容为‘线号’

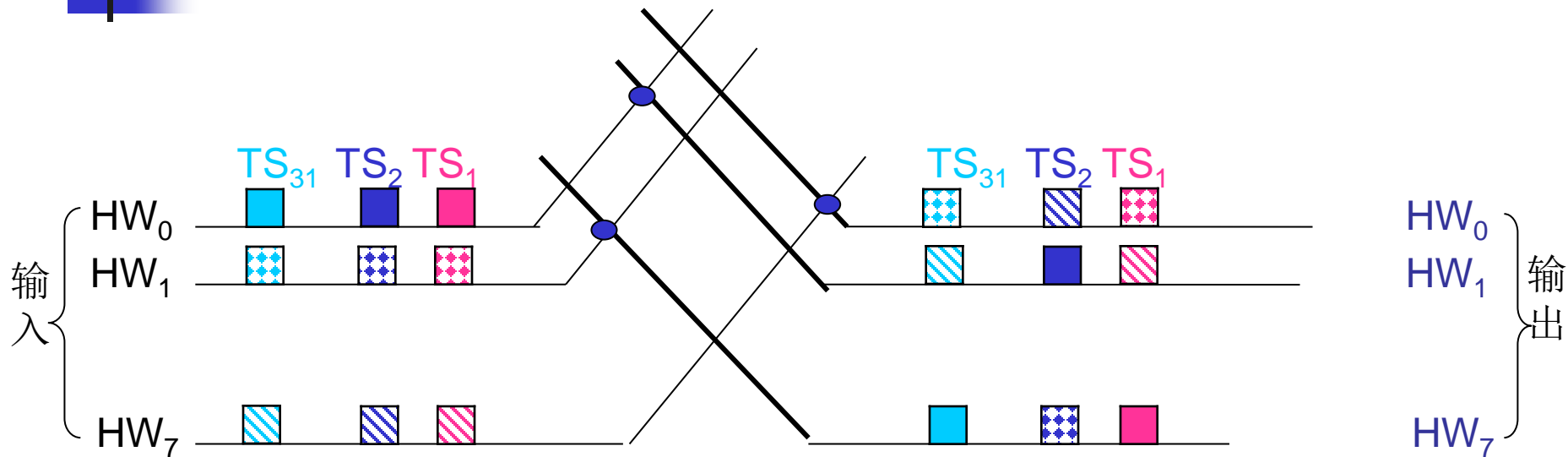
# 空间(S)接线器—输出控制方式



	0	1		7
0				
1	1	7		0
2	7	0		1
31	1	7		0

控存填写的内容为‘线号’

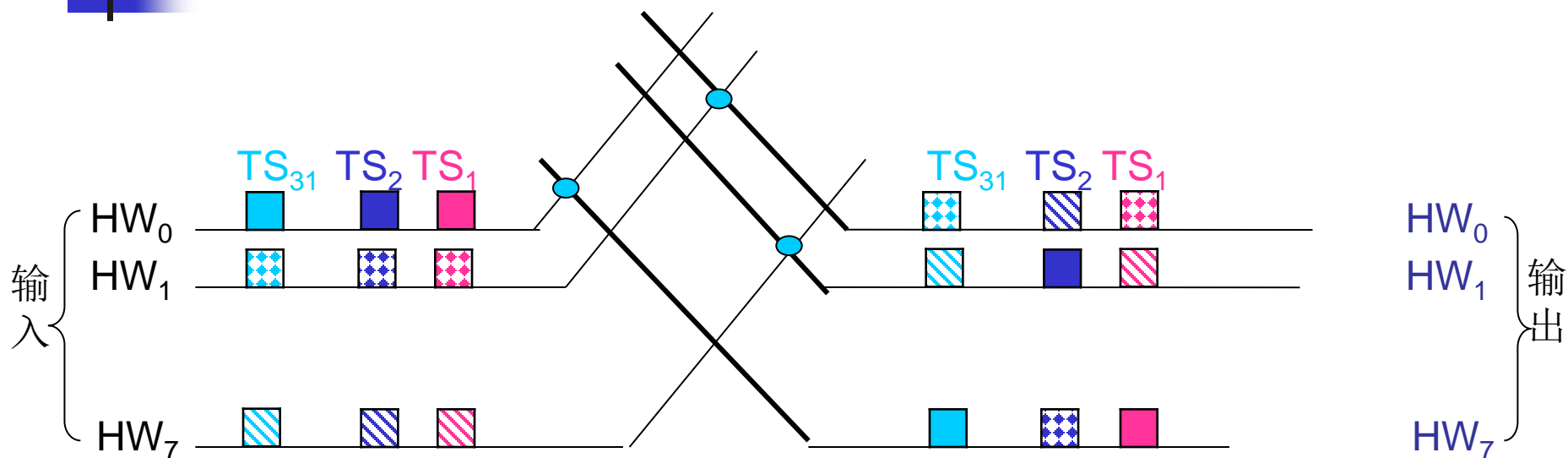
# 空间(S)接线器—输出控制方式



	0	1	7
0			
1	1	7	0
2	7	0	1
31	1	7	0

控存填写的内容为‘线号’

# 空间(S)接线器—输出控制方式

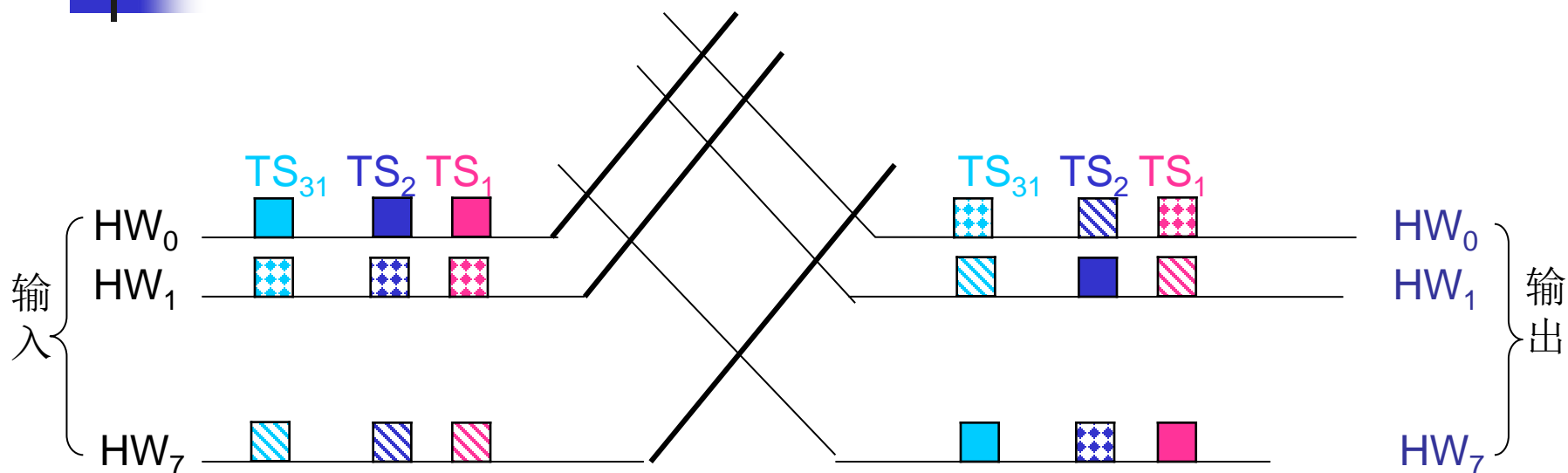


0 1 7

0				
1	1	7		0
2	7	0		1
31	1	7		0

控存填写的内容为‘线号’

# 空间(S)接线器—输入控制方式

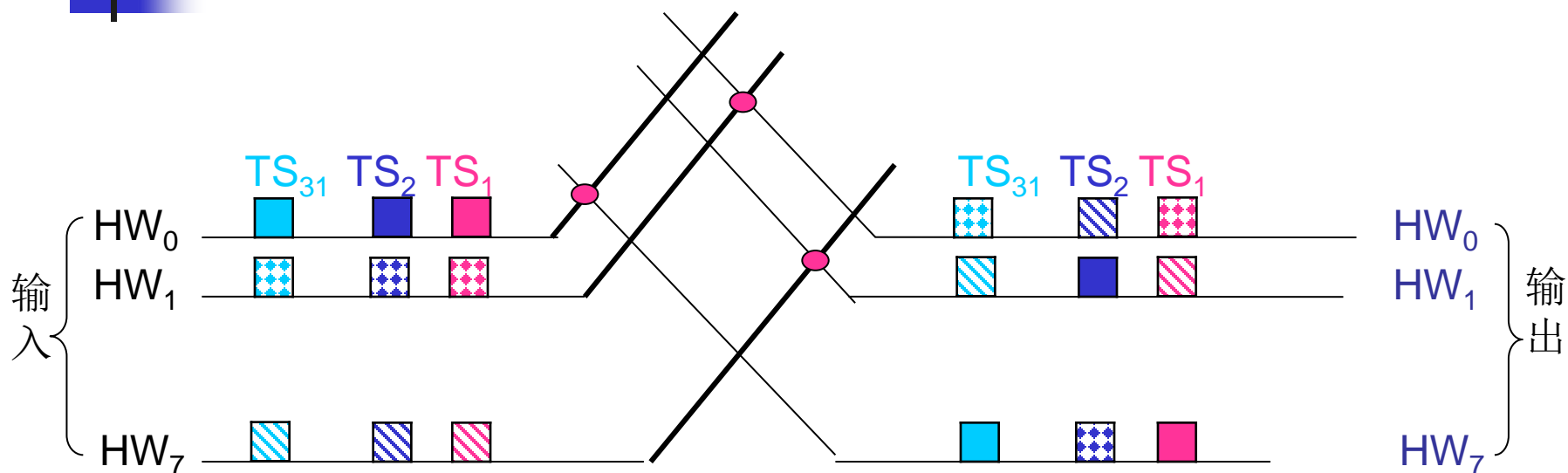


	0	1		7
0				
1				
2				
31				

控存填写的内容为‘线号’



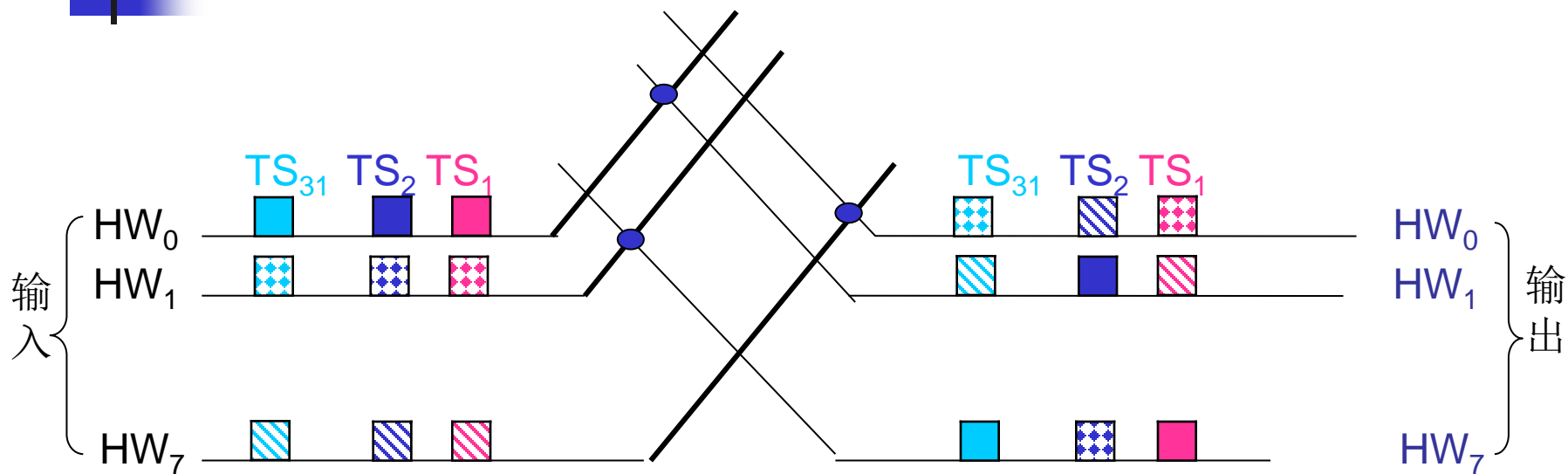
# 空间(S)接线器—输入控制方式



	0	1		7
0				
1	7	0		1
2				
31				

控存填写的内容为‘线号’

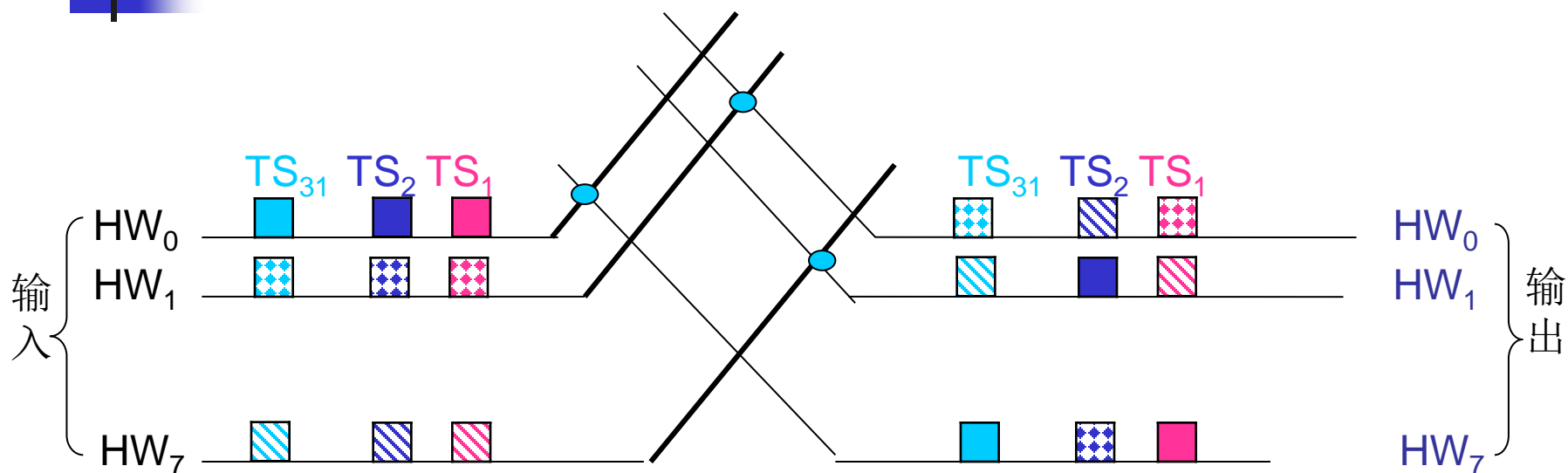
## 空间(S)接线器—输入控制方式



	0	1		7
0				
1	7	0		1
2	1	7		0
31				

控存填写的内容为‘线号’

## 空间(S)接线器—输入控制方式



	0	1		7
0				
1	7	0		1
2	1	7		0
31	7	0		1

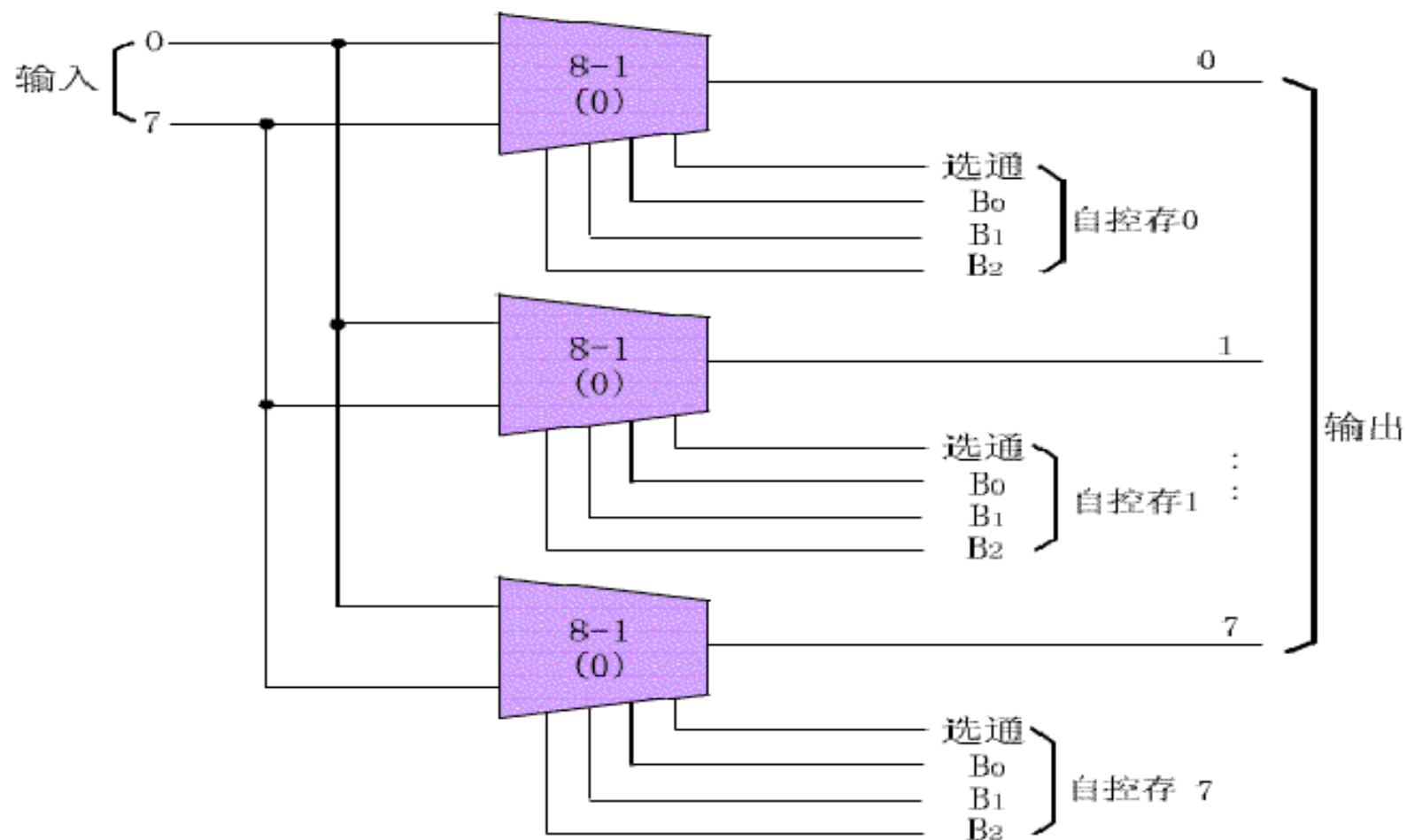
控存填写的内容为‘线号’



## 2 各类交换单元---基本开关阵列

- 空间(**S**)接线器的特点
  - 以时分方式完成复用线之间的空间交换。
  - 每个交叉点仅接通一个时隙。
  - 交换的控制过程由硬件**CM**实现，速度快。
  - 交换时延小，且稳定。
  - 严格无阻塞。
  - 可避免出线冲突。
  - 易于实现同发和广播。
- 空间(**S**)接线器的工作原理

# 空间交换单元的工作原理



电子交叉接点矩阵的组成



# 主要内容

---

- **1 交换单元的基本概念和数学模型**
- **2 各类交换单元**
  - 基本开关阵列、共享存储器、总线型
- **3 交换网络**
  - **CLOS BENES TST BANYAN DSN**

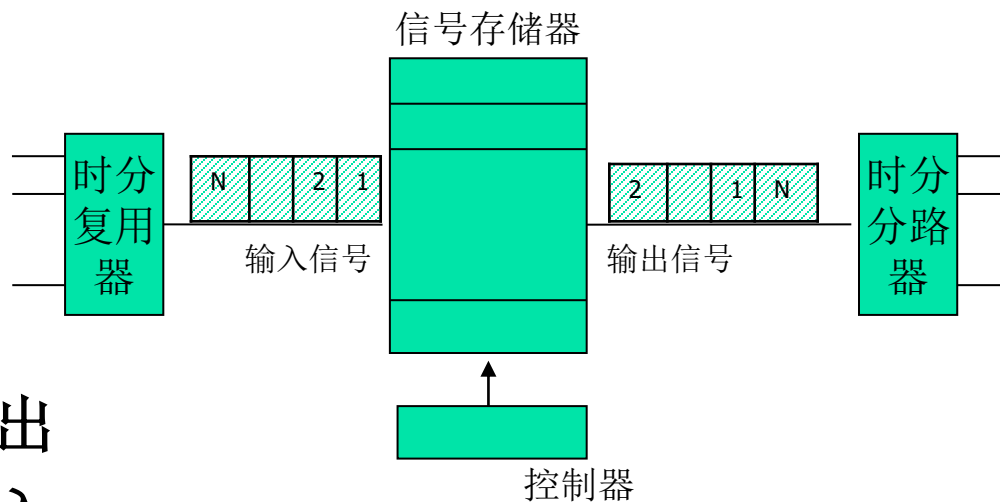
## 2 各类交换单元--共享存储器结构

- 基本结构

- 信号存储器
- 控制器

- 工作方式

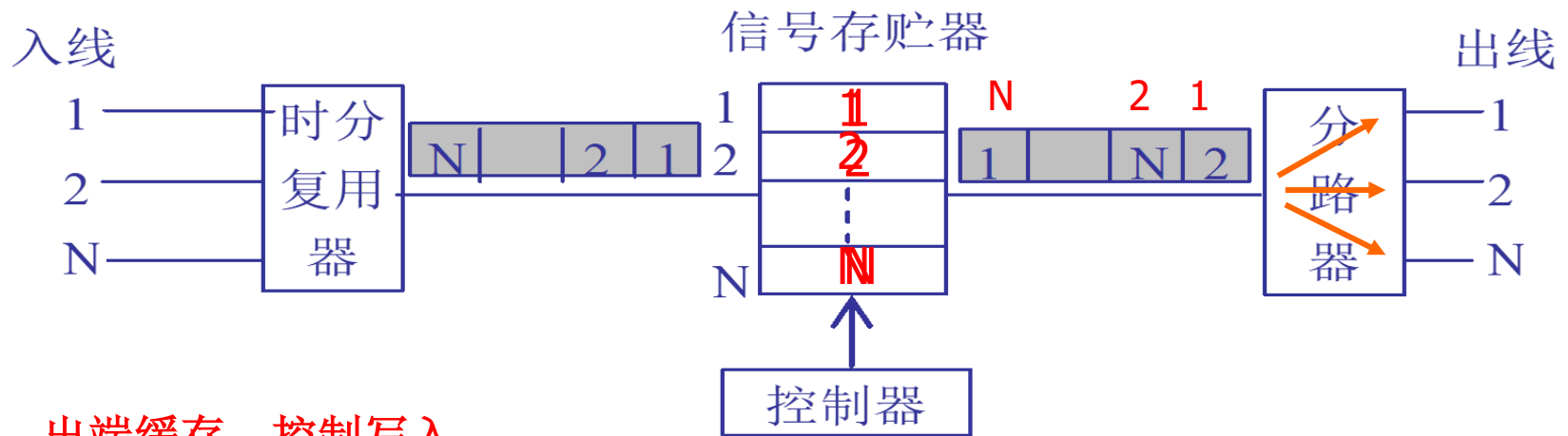
- 入线缓冲，控制读出
- 出线缓冲，控制写入



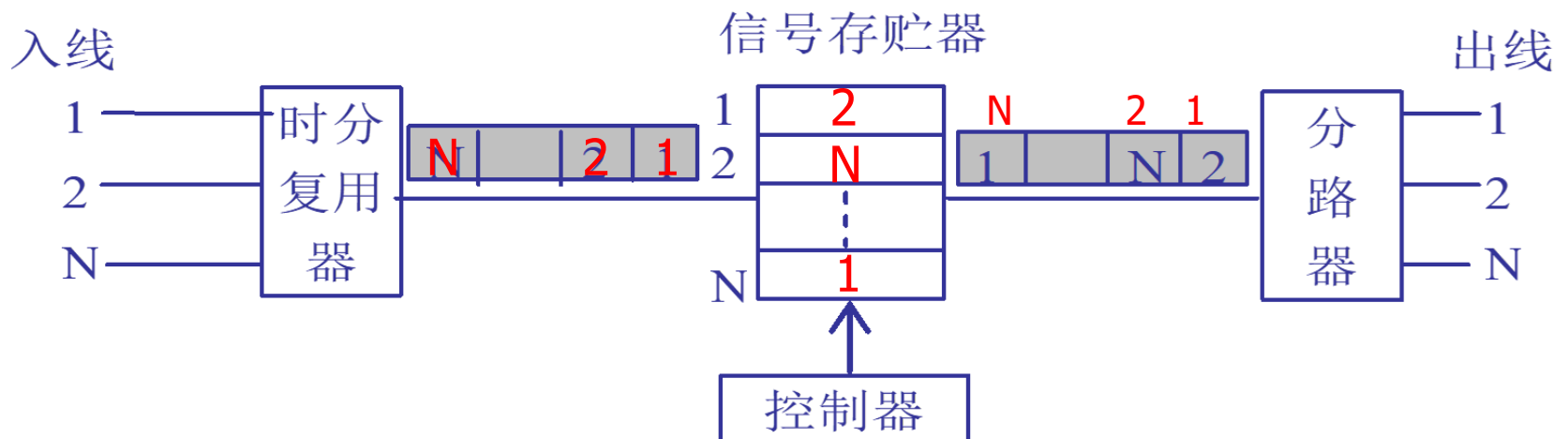
# 共享存储器结构——工作方式

交换要求:  $1 \rightarrow N, 2 \rightarrow 1, N \rightarrow 2$

- 入端缓存, 控制读出



- 出端缓存, 控制写入





## 2 各类交换单元--共享存储器结构

- 基本结构

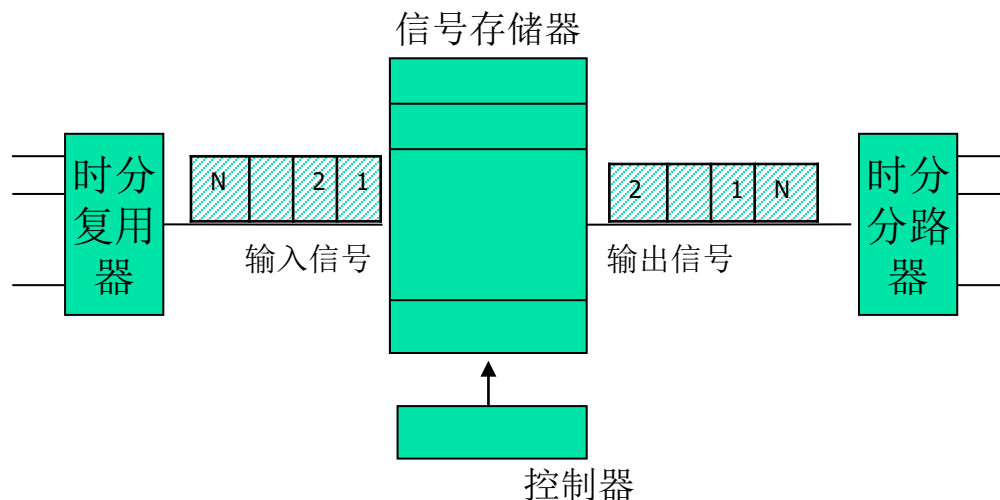
- 信号存储器
- 控制器

- 工作方式

- 入线缓冲，控制读出
- 出线缓冲，控制写入

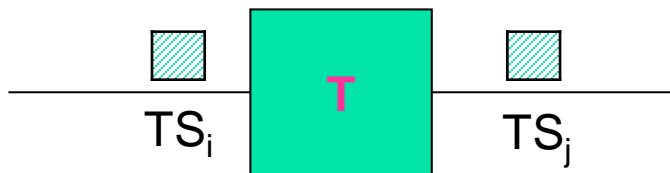
- 特性

- 时分交换单元，适用于三类时分复用信号
- 延迟时间不均匀
- 可以实现同发与广播
- 存储容量足够大时，无内部阻塞
- 容量受到信号存储器工作速度和控制器工作速度的限制

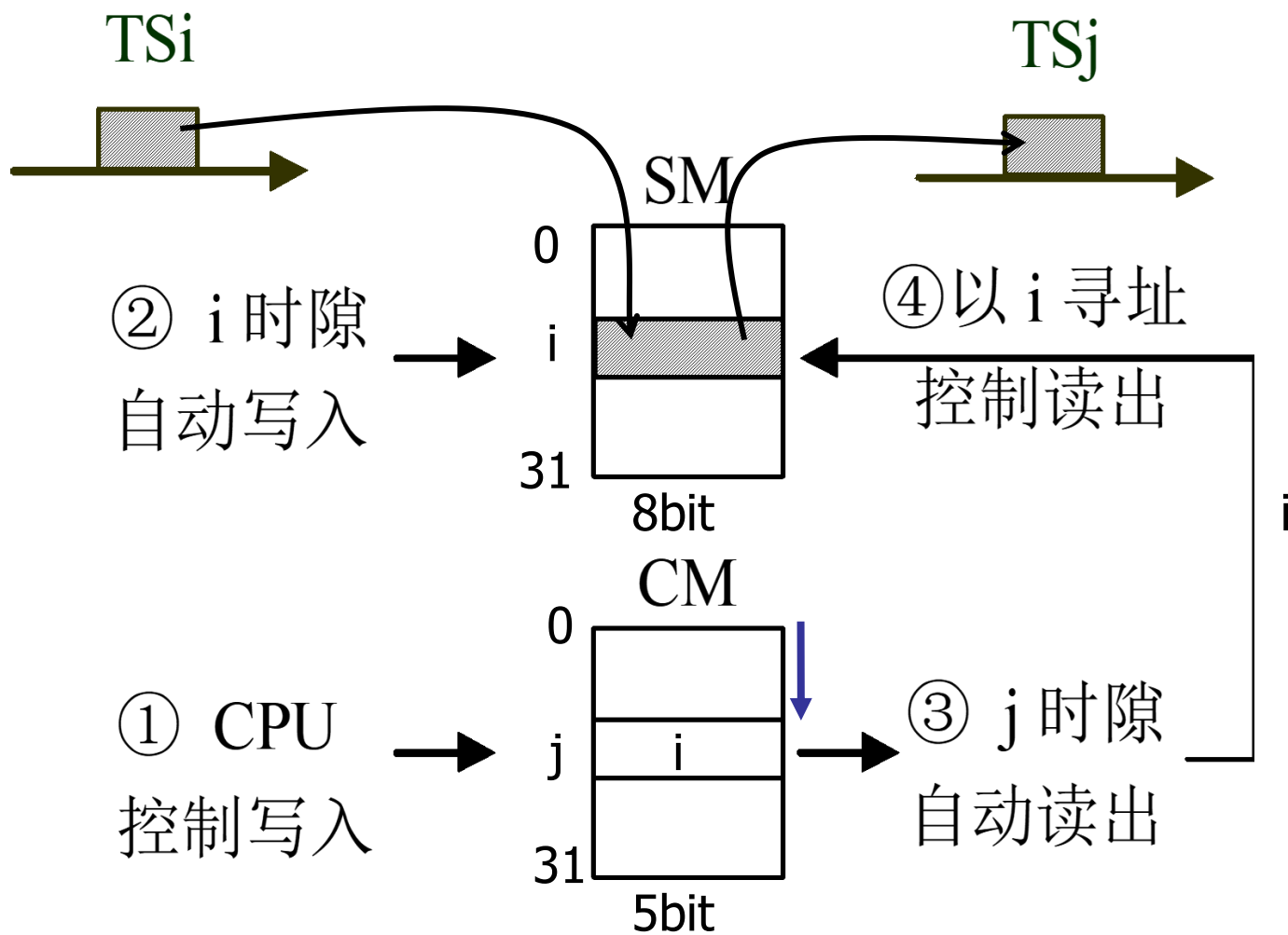


## 2 各类交换单元--共享存储器结构—同步时分复用

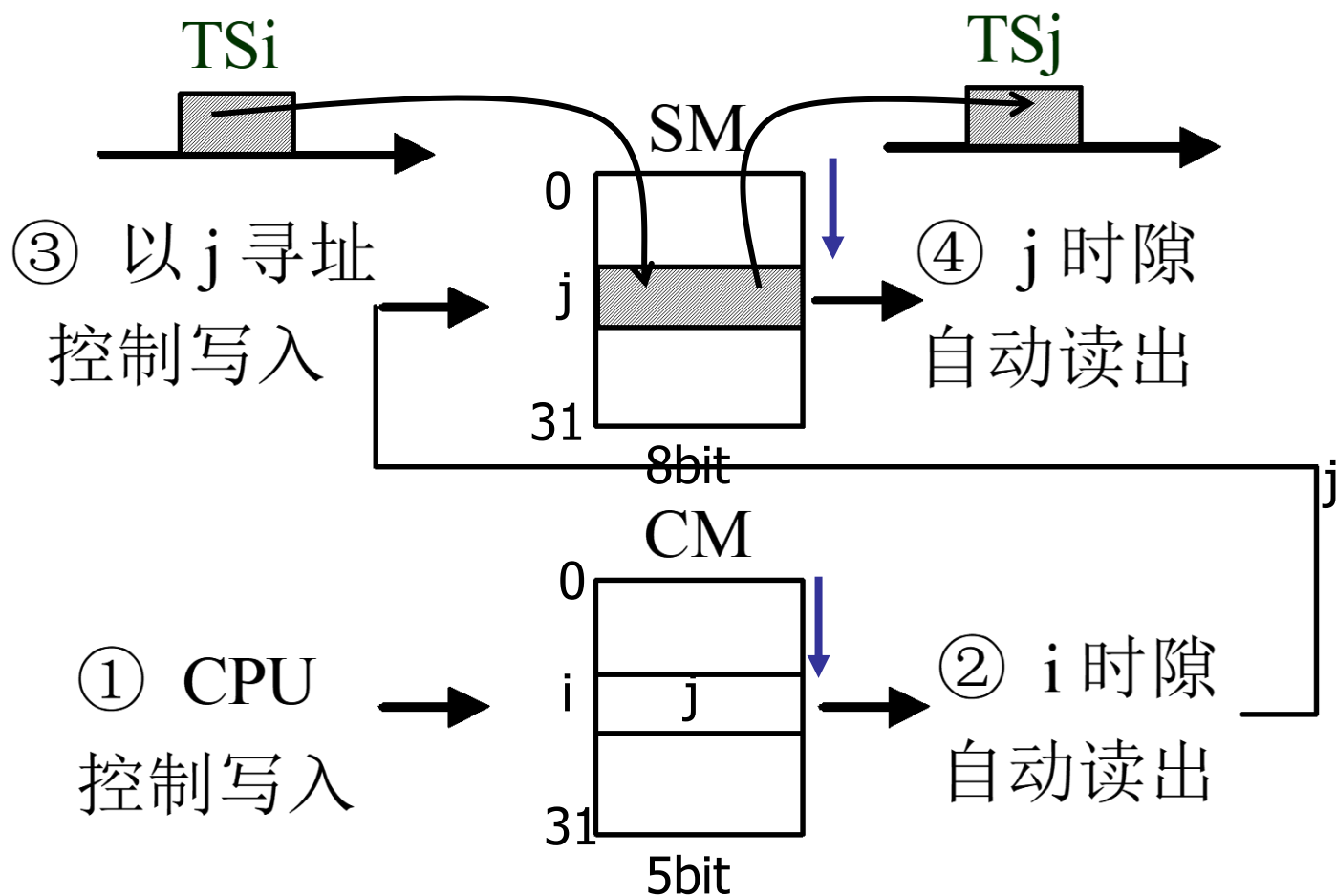
- 时间(T)接线器
  - 实现一条母线上的时隙交换
  - 由话音存储器、控制存储器和控制电路组成
  - 控制方式分为：输出控制和输入控制



- 时间(T)接线器—输出控制
  - 话音存储器SM 顺序写入，控制读出
  - 控制存储器CM 控制写入，顺序读出



- 时间(T)接线器—输入控制
  - 话音存储器SM 控制写入，顺序读出
  - 控制存储器CM 控制写入，顺序读出





## 2 各类交换单元--共享存储器结构—同步时分复用

---

- 时间(T)接线器
  - 上一帧的信息会来不及取走，丢失吗？



## 2 各类交换单元--共享存储器结构—同步时分复用

- 时间(**T**)接线器的特点

- 以空间位置的划分实现时隙交换
- **SM**划分为**N**个区域，每个区域一个字节，存放一个话音数据。各个区域间不共享，各个区域内无排队缓冲。
- 交换的控制过程由硬件**CM**实现，速度快。
- 交换时延小，且稳定。
- 严格无阻塞。
- 可避免出线冲突。
- 易于实现同发和广播。
- 带宽（速率）固定为**64kb/s**。



## 2 各类交换单元--共享存储器结构—同步时分复用

- 时间(T)接线器的工作原理
  - 建立连接
    - 前半周期写入 后半周期读出 写控存持续**125μS**
  - 拆除连接
    - 接静音
  - 如果**TS1** 和**TS2** 用户通话一分钟，交换次数 **万次?**



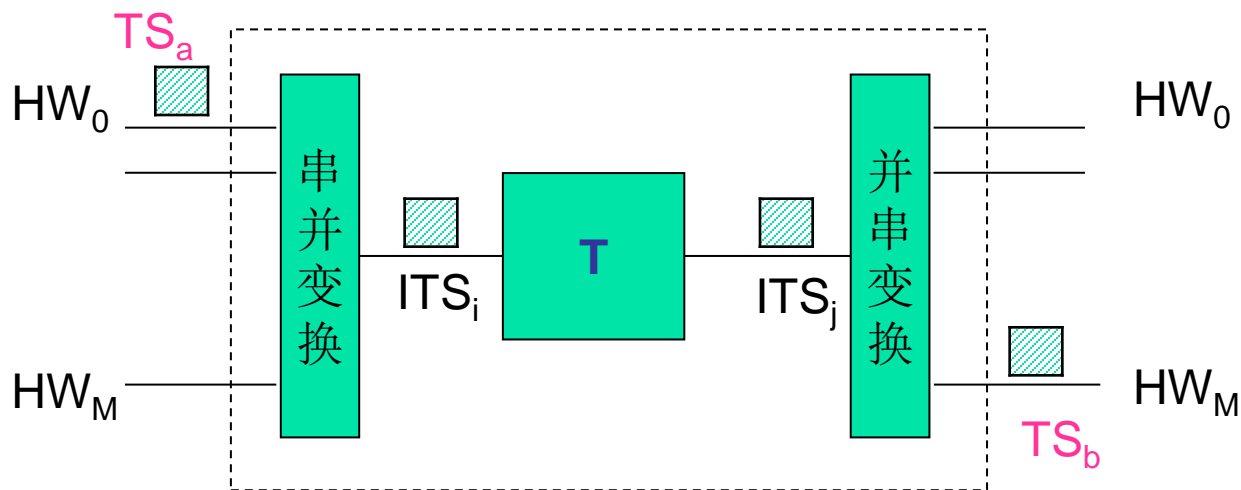
## 2 各类交换单元--共享存储器结构—同步时分复用

- 时间(T)接线器的工作原理
  - 建立连接
    - 前半周期写入 后半周期读出 写控存持续**125μS**
  - 拆除连接
    - 接静音
  - 如果**TS1** 和**TS2** 用户通话一分钟，交换次数 **48 万次**?



## 2 各类交换单元--共享存储器结构—同步时分复用

- 时间(T)接线器的扩展
  - 多个PCM基群
  - 内部时隙号与外部时隙号的换算
    - $HW_i$  TS<sub>j</sub> 的ITS号 = TS号<sub>j</sub> \* HW线总数 $m$  + HW号 $i$





## 2 各类交换单元--共享存储器结构

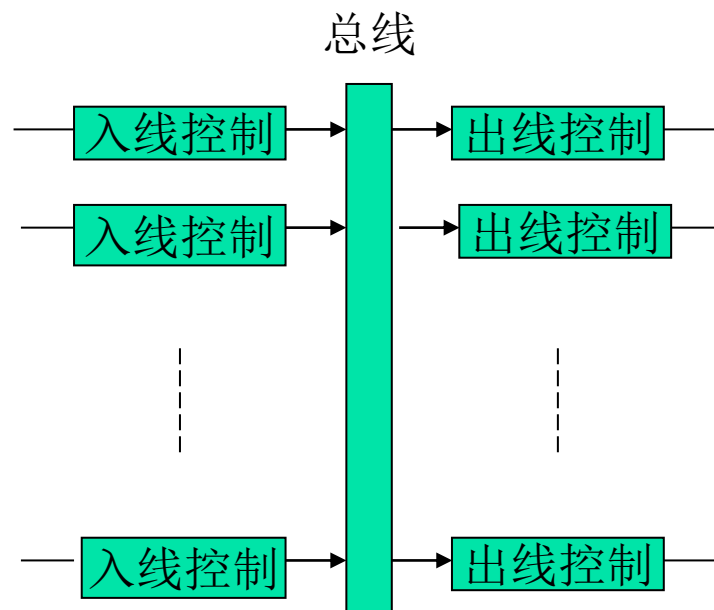
---

统计时分复用

异步时分复用

## 2 各类交换单元 — 总线型

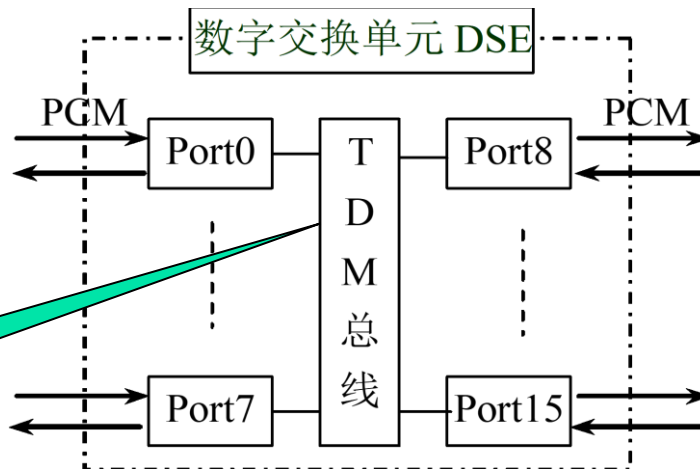
- 基本结构
  - 总线、入线控制部分、出线控制部分
- 工作方式（总线控制权的分配）
  - 时隙分配
    - 固定时隙分配
    - 按需时隙分配
  - 令牌法
  - 冲突检测
- 特性
  - 易于实现广播
  - 有时延，不同工作方式时延有差别
  - 交换速度与总线宽度有关
  - 受总线上速率的限制，不能构造大规模的交换单元



## 2 各类交换单元—总线型

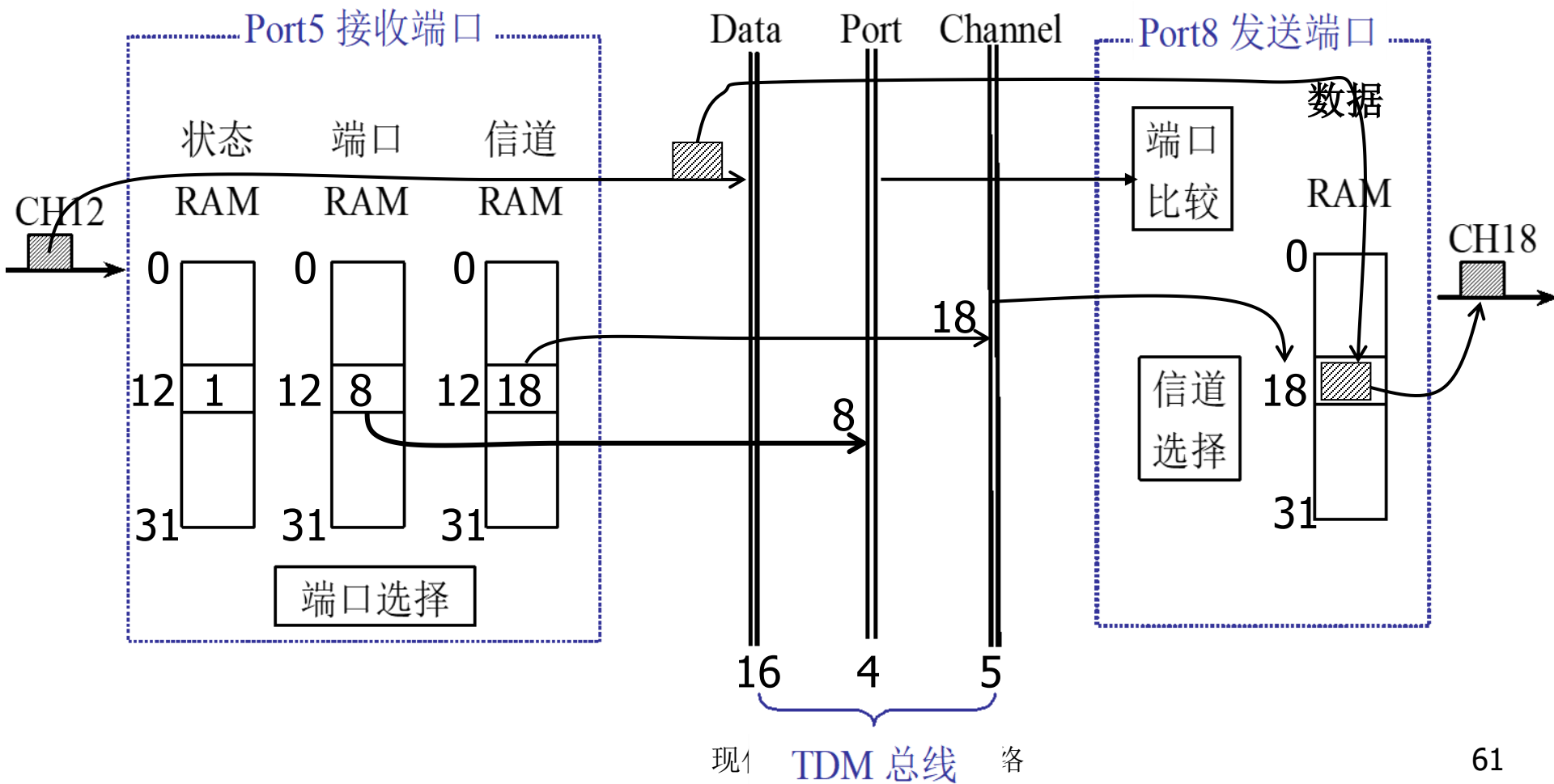
- 数字交换单元DSE
  - 16个端口  $16 \times 32 = 512$   $512 \times 512$  交换单元。
  - 时钟  $4\text{Mb/s} \times 16$ 
    - 16个端口时分复用TDM总线，即在每个信道时隙Chi内（ $3.9\mu\text{s}$ ）16个端口分时占用 $1/16$ 的时间。
  - 总线宽度39
    - 数据总线16
    - 端口地址总线4
    - 信道地址总线5
    - 控制总线14

固定时间片  
分配



**125us/帧**  
**32CHs/帧**  
**16bits/CH**

# 数字交换单元DSE 交换过程





## 2 各类交换单元----比较

---

- 基本开关阵列
  - 共享存储器结构
  - 总线型
- } 空分交换
- } 时分交换

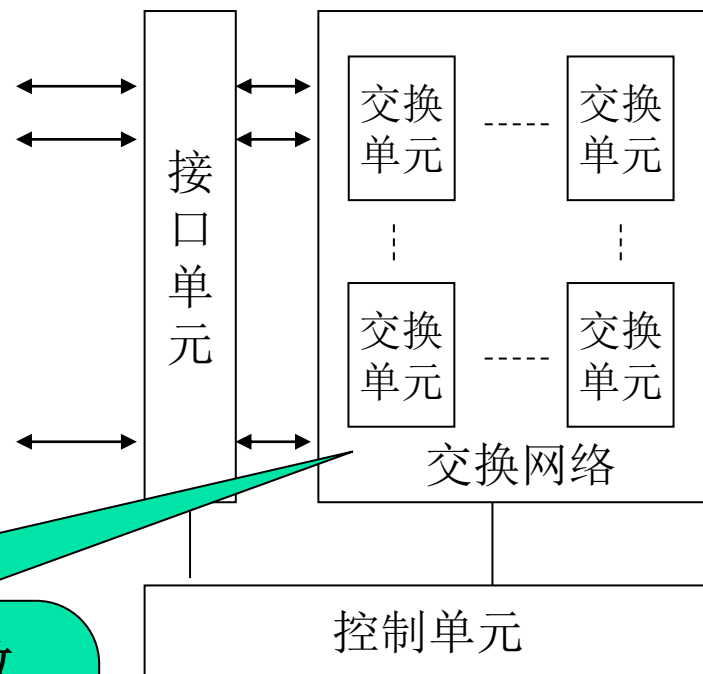


## 2 各类交换单元---课后思考题

- 对于共享存贮器结构的交换单元，当采用不同的时分复用技术时，信号存贮器在设计上有何不同？会影响到交换单元的哪些特性？
- 对于共享总线结构的交换单元，三种总线控制权分配方法会影响到交换单元的哪些特性？
- 比较基本开关阵列、共享存储器结构、总线型这三类交换单元的工作原理和特性，并搜集使用不同交换单元实现的交换设备实例。

### 3 交换网络

- 交换网络
  - CLOS网络
  - BENES
  - TST
  - BANYAN网络
  - DSN



多级交换网络的拓扑结构可用三个参数来说明：

每个交换单元的容量  
交换单元的级数  
交换单元间的连接通路（链路）

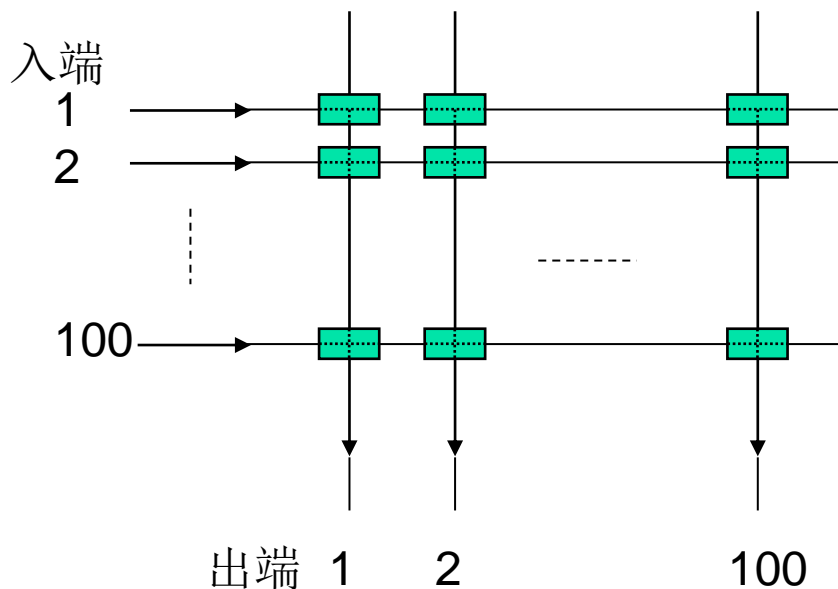


# 3 交换网络

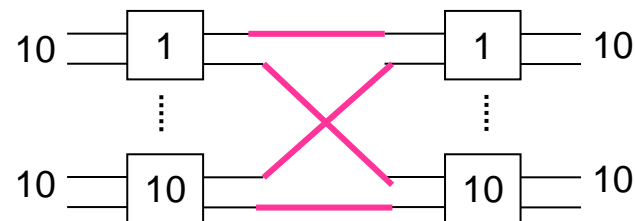
- 交换网络

- 多级网络

- 相同容量的多级网络比单级网络的交叉点数量减少



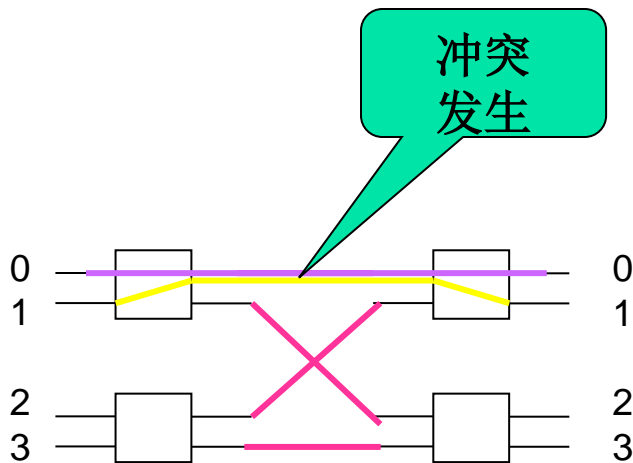
上图为采用基本开关阵列构造的100\*100 交换网络



上图为采用二级级连方式构造的100\*100 交换网络

### 3 交换网络

- 交换网络
  - 多级网络
    - 相同容量的多级网络比单级网络的交叉点数量减少



内部阻塞！

由于入线找不到交换网络的空闲内部通道而不能到达空闲的出线，叫做交换网络的‘内部阻塞’



## 3 交换网络

- 交换网络
  - 多级网络
    - 相同容量的多级网络比单级网络的交叉点数量减少
  - 无阻塞网络
    - 严格无阻塞网络
      - 只要入端与出端空闲时，就可以通过交换网络建立一个连接
    - 可重排无阻塞网络
      - 只要入端与出端空闲时，通过对已有连接的重排，就可以通过交换网络建立一个连接
    - 广义无阻塞网络
      - 一个给定的网络存在着固有的阻塞可能，但又可能存在着一一种精巧的选路方法，使得所有的阻塞均可避免，而不必重新安排网络中已建立起来的连接

# 3 交换网络

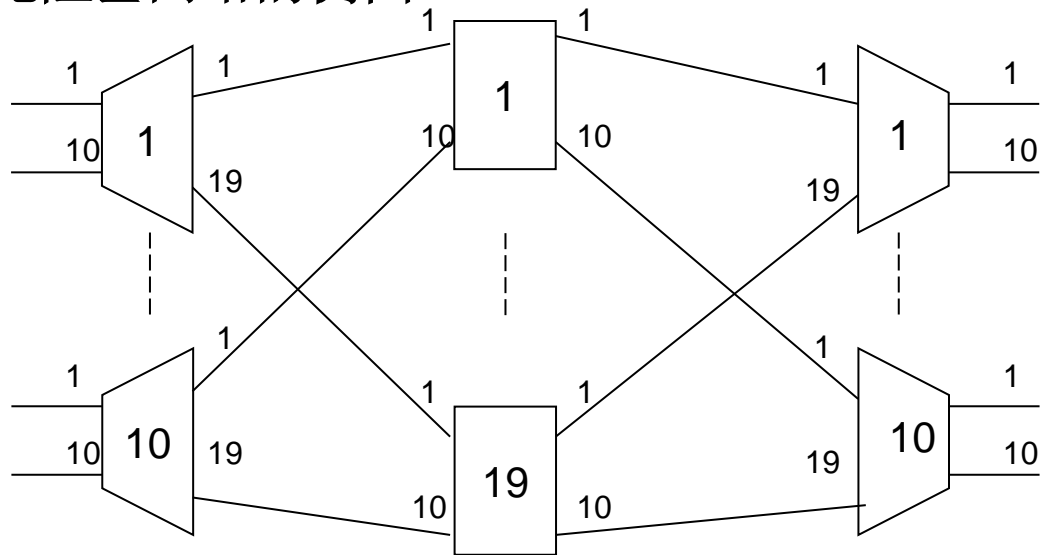
- 交换网络

- 多级网络

- 相同容量的多级网络比单级网络的交叉点数量减少

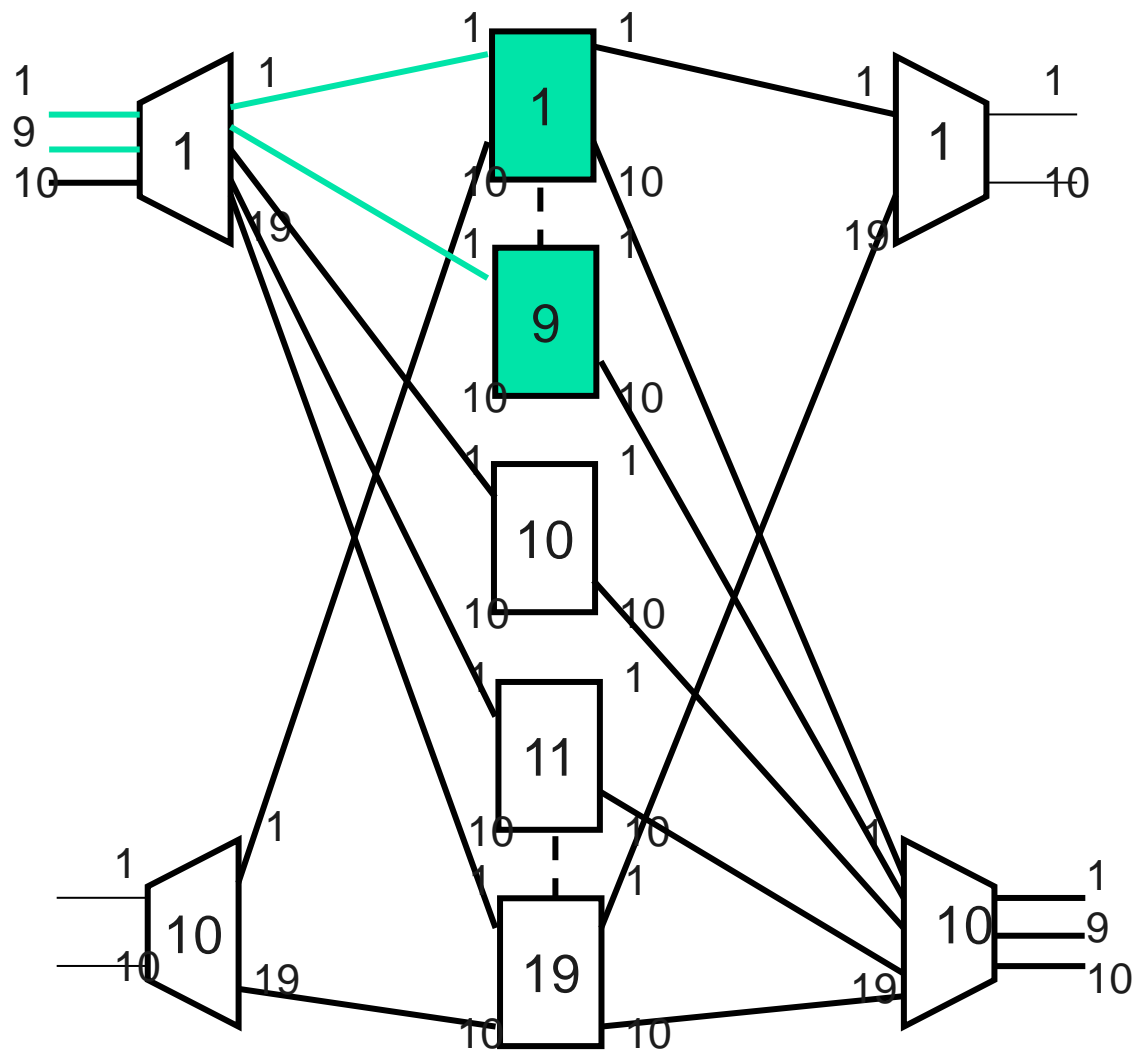
- 无阻塞网络

- 无阻塞网络的例图



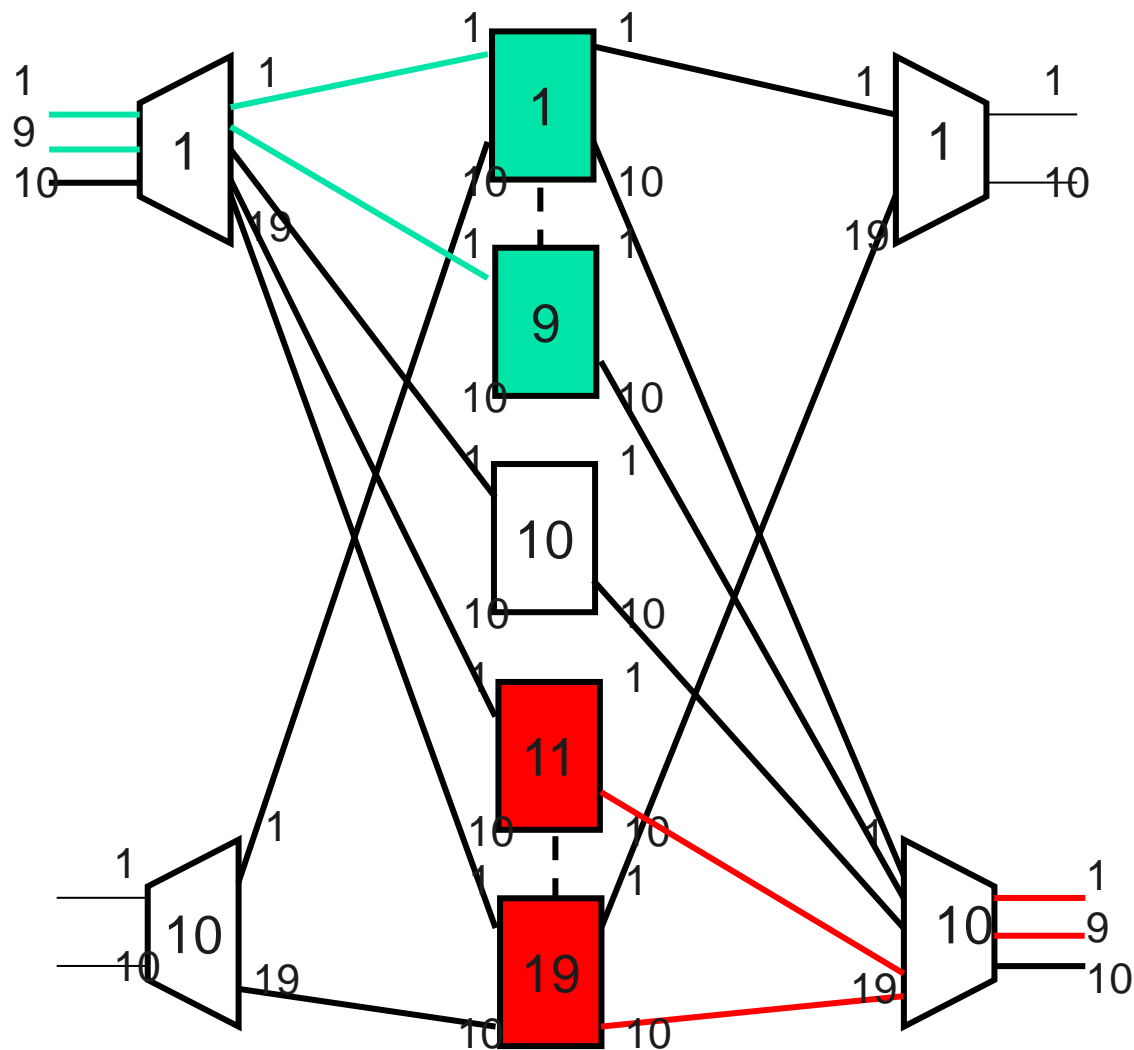
# 极限情况

- 入口级I的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线I



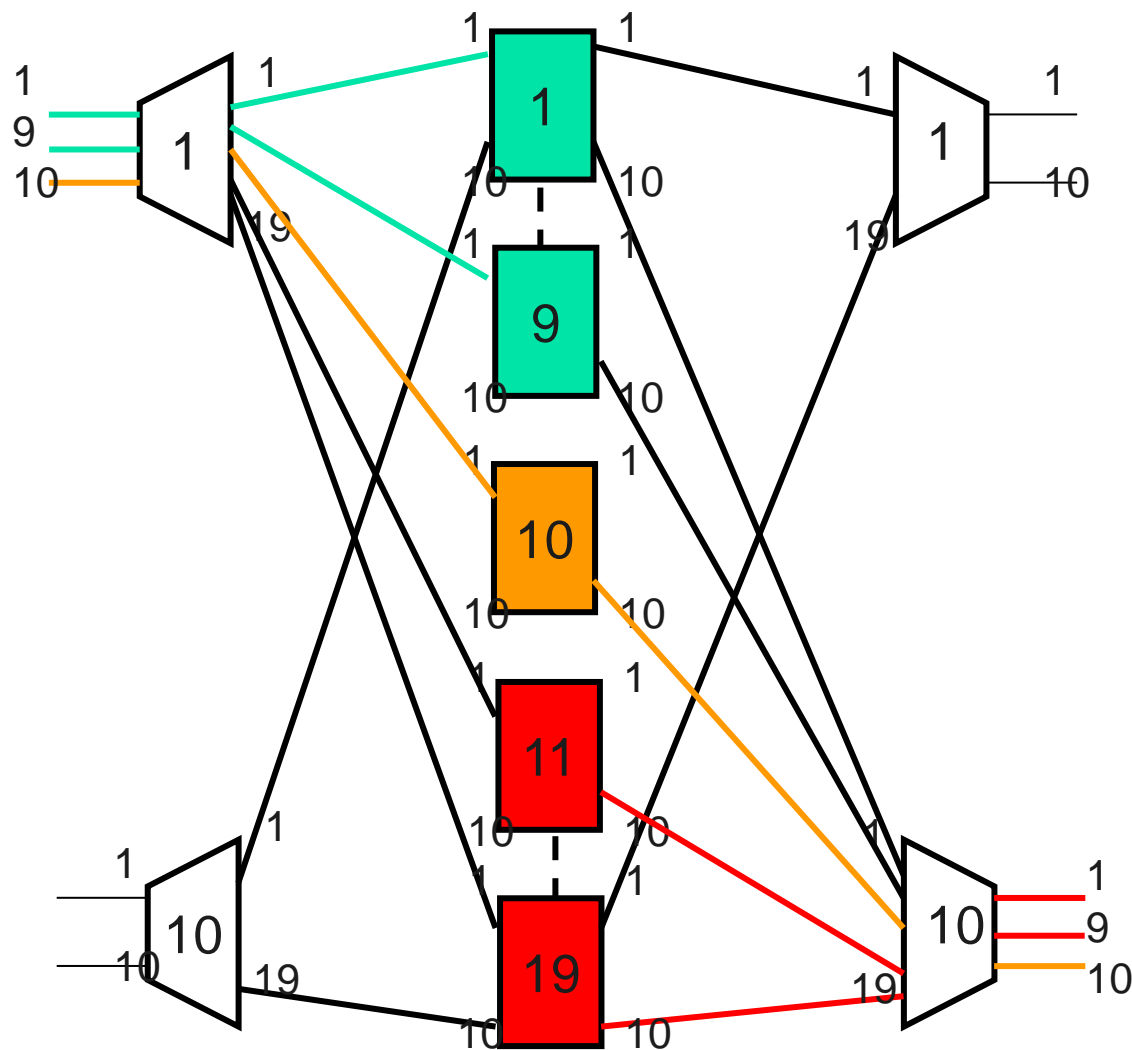
# 极限情况

- 入口级**I**的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线**I**
- 出口级**J**的**9**条出线都连接，占用**另9**个中间级的**9**条出线**J**

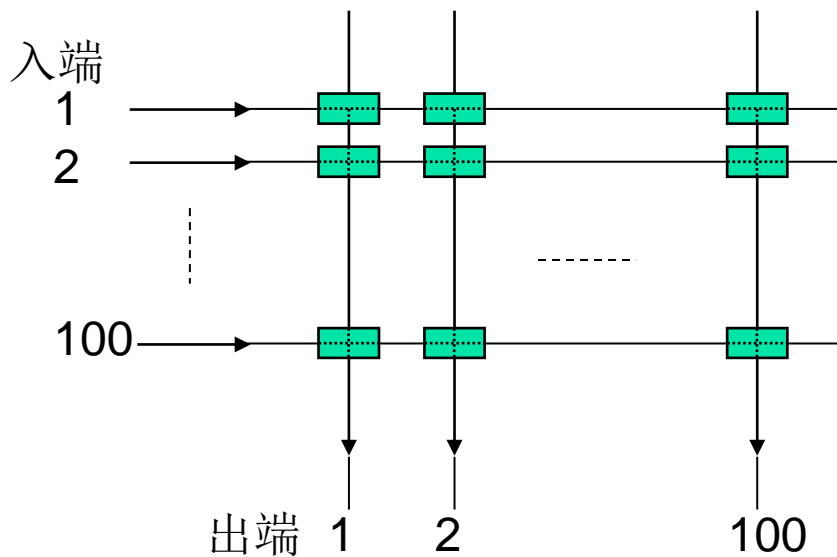


# 极限情况

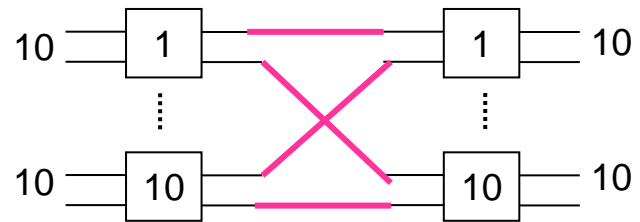
- 入口级**I**的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线**I**
- 出口级**J**的**9**条出线都连接，占用**另9**个中间级的**9**条出线**J**
- 入口级**I**的**10**号入线<->出口级**J**的**10**号出线



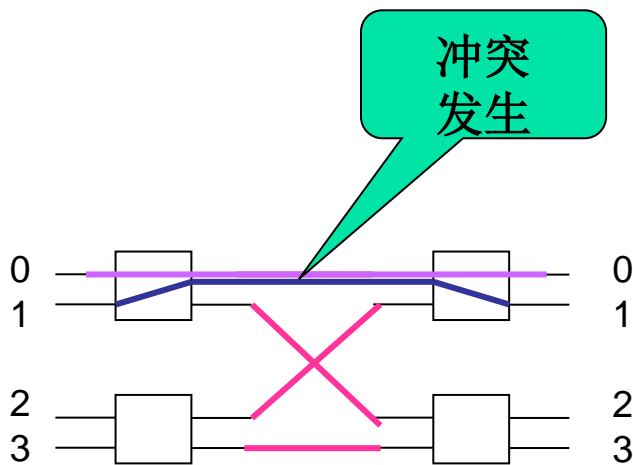
**结论：增加级数，可以消除阻塞**



采用基本开关阵列构造的100\*100 交换网络



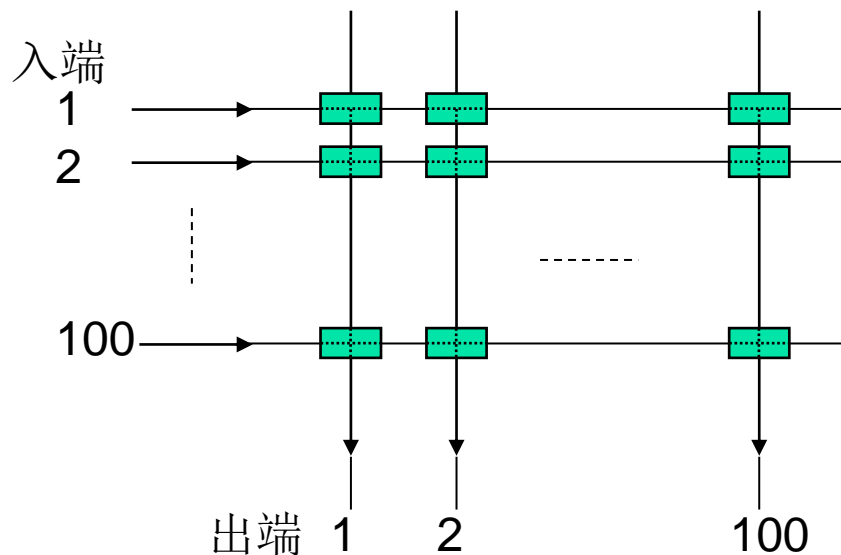
采用二级级连方式构造的100\*100 交换网络



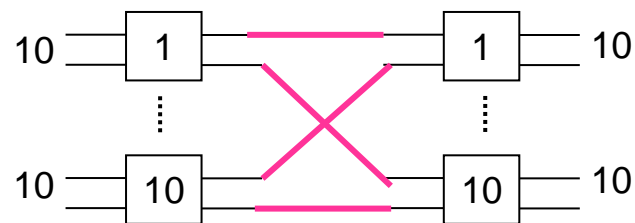
内部阻塞！

由于入线找不到交换网络的空闲内部通道而不能到达空闲的出线，叫做交换网络的‘内部阻塞’

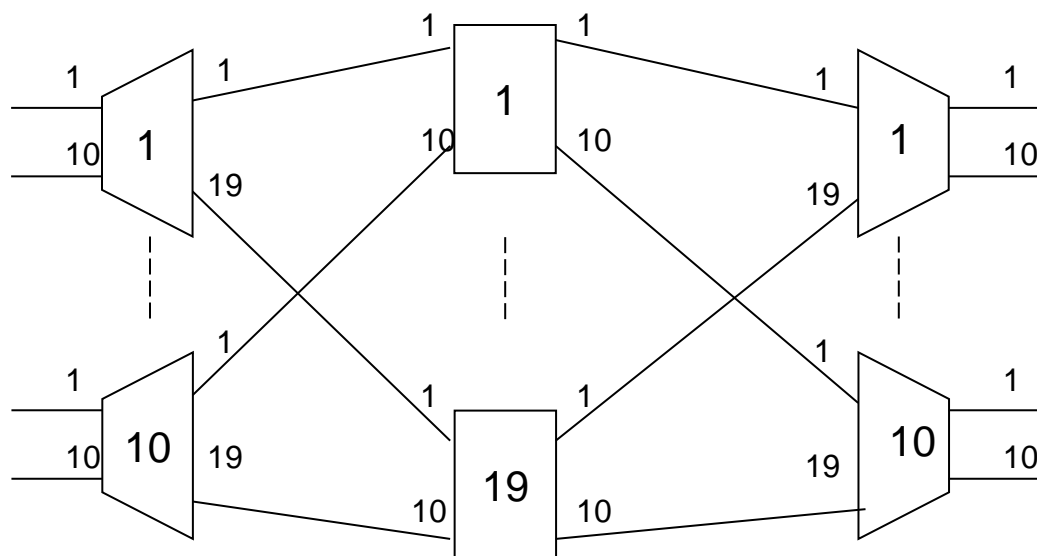




采用基本开关阵列构造的**100\*100** 交换网络  
需要开关个数**10000**，无内部阻塞



采用二级级连方式构造的**100\*100** 交换网络  
需要开关个数**2000**，有内部阻塞



采用三级级连方式构造的**100\*100** 交换网络  
需要开关个数**5700**，无  
内部阻塞

### 3 交换网络---CLOS网络

- K级互连网络

- 第k级 ( $1 \leq k \leq K$ ) 有 $r_k$ 个交换节点, 第j个节点表示为S (j, k), 假设同一级的各个交换节点具有相同的入线数和出线数, 则S (j, k)的入线数可记为 $m_k$ 。出线数可记为 $n_k$ 。

如果一个多级互连网络的每个交换节点都与下一级的 $r_{k+1}$ 个交换节点有且只有一条连线, 则 $n_k = r_{k+1}$ ,  $m_k = r_{k-1}$ 。

- CLOS网络

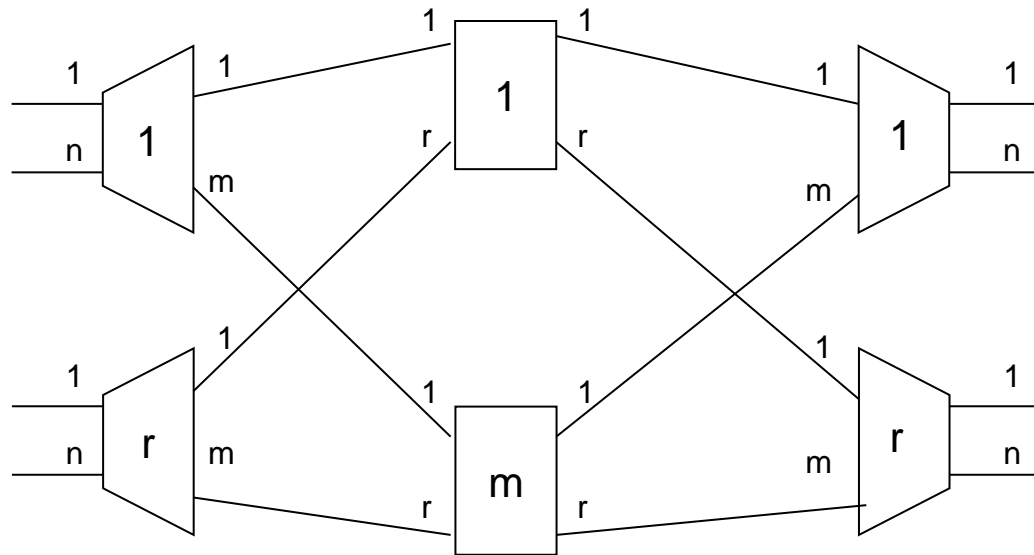
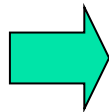
- 一个三级互连网络, 若满足: 三级交换节点数为 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ , 且 $n_1 = r_2$ ,  $m_2 = r_1$ ,  $n_2 = r_3$ ,  $m_3 = r_2$ , 则称为三级CLOS网络, 用五元组  $(m_1, n_3, r_1, r_2, r_3)$  表示
- 既减少交叉开关数,又要做到无阻塞

### 3 交换网络---CLOS网络

#### ■ CLOS网络

- 一个三级互连网络，若满足：三级交换节点数为 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ，且 $n_1 = r_2$ ， $m_2 = r_1$ ， $n_2 = r_3$ ， $m_3 = r_2$ ，则称为三级CLOS网络，用五元组 $(m_1, n_3, r_1, r_2, r_3)$ 表示

$m_1 = n_3 = n$   
 $r_1 = r_3$   
对称CLOS网络



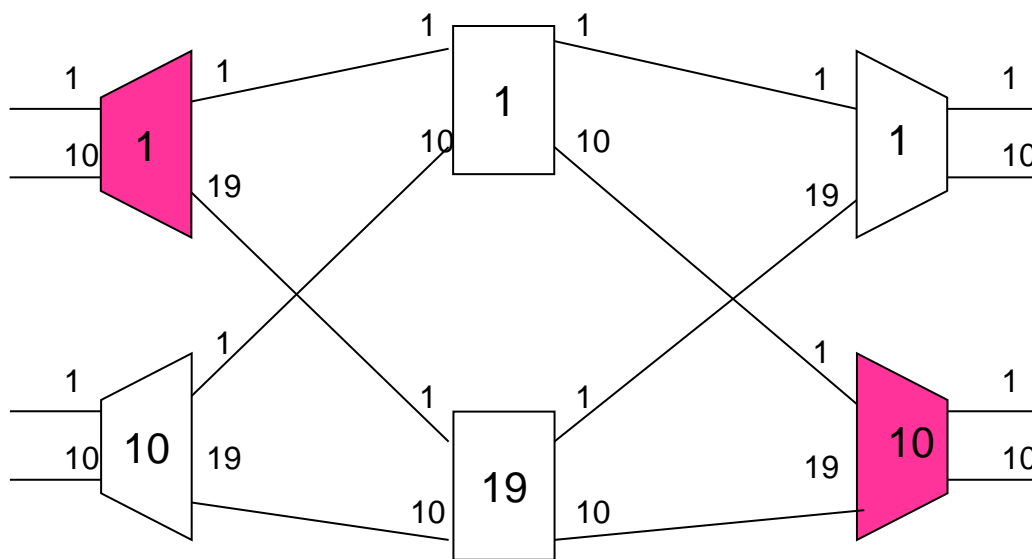
### 3 交换网络---CLOS网络

- **CLOS网络** 无阻塞条件

- 严格无阻塞条件

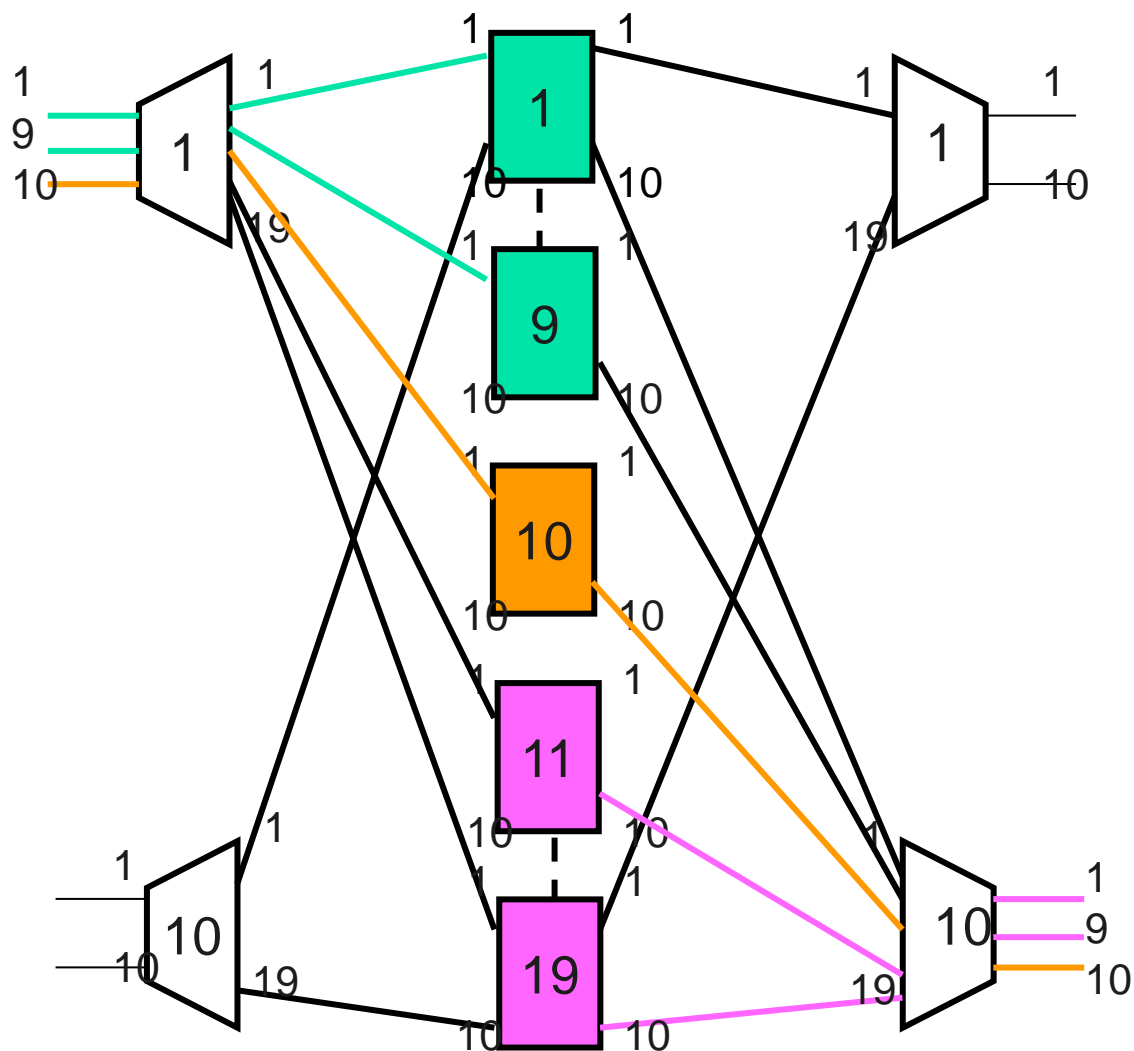
- 充要条件是:  $r_2 \geq m_1 + n_3 - 1$

- 当网络对称, 即  $m_1 = n_3 = n$  时,  $r_2 \geq 2n - 1$

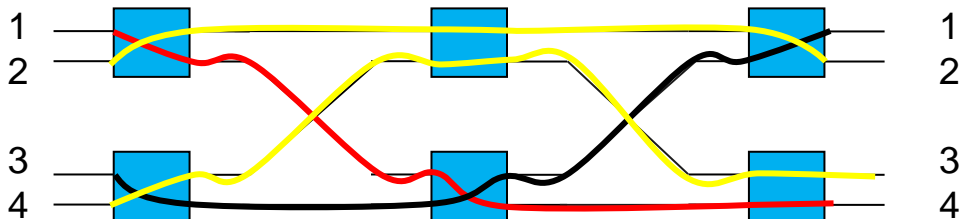
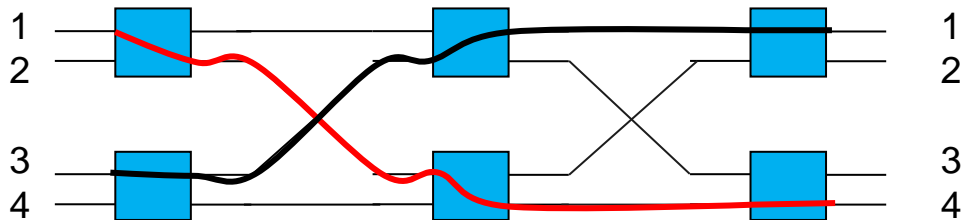
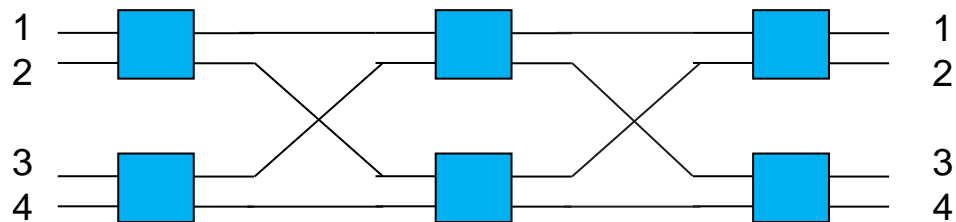


# 极限情况( $r_2 \geq m_1 - 1 + n_3 - 1 + 1$ )

- 入口级**I**的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线**I**
- 出口级**J**的**9**条出线都连接，占用**另9**个中间级的**9**条出线**J**
- 入口级**I**的**10**号入线<->出口级**J**的**10**号出线



# 可重排无阻塞



已经有  $1 \rightarrow 4$   $3 \rightarrow 1$  的连接  
无法建立  $2 \rightarrow 2$   $4 \rightarrow 3$  的连接

### 3 交换网络---CLOS网络

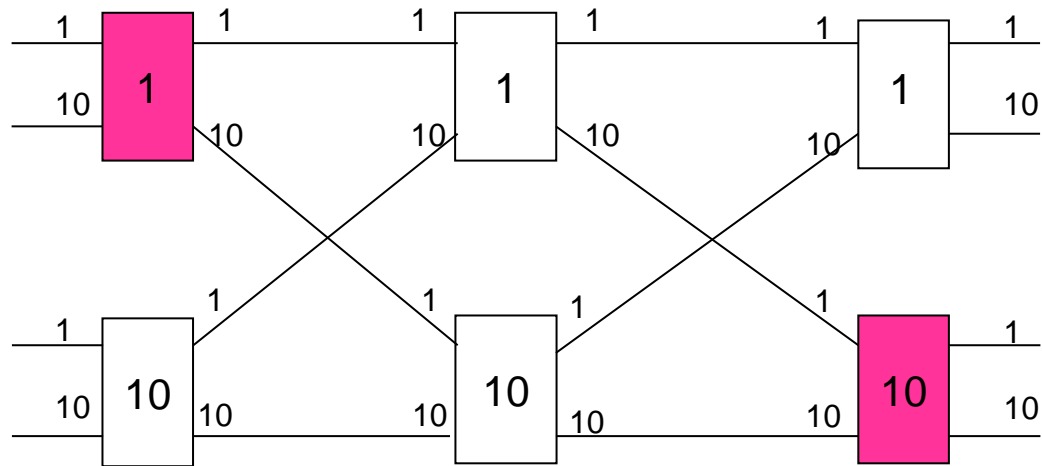
- CLOS网络 无阻塞条件

- 可重排无阻塞条件

- 充要条件是:  $r_2 \geq \text{Max}(m_1, n_3)$

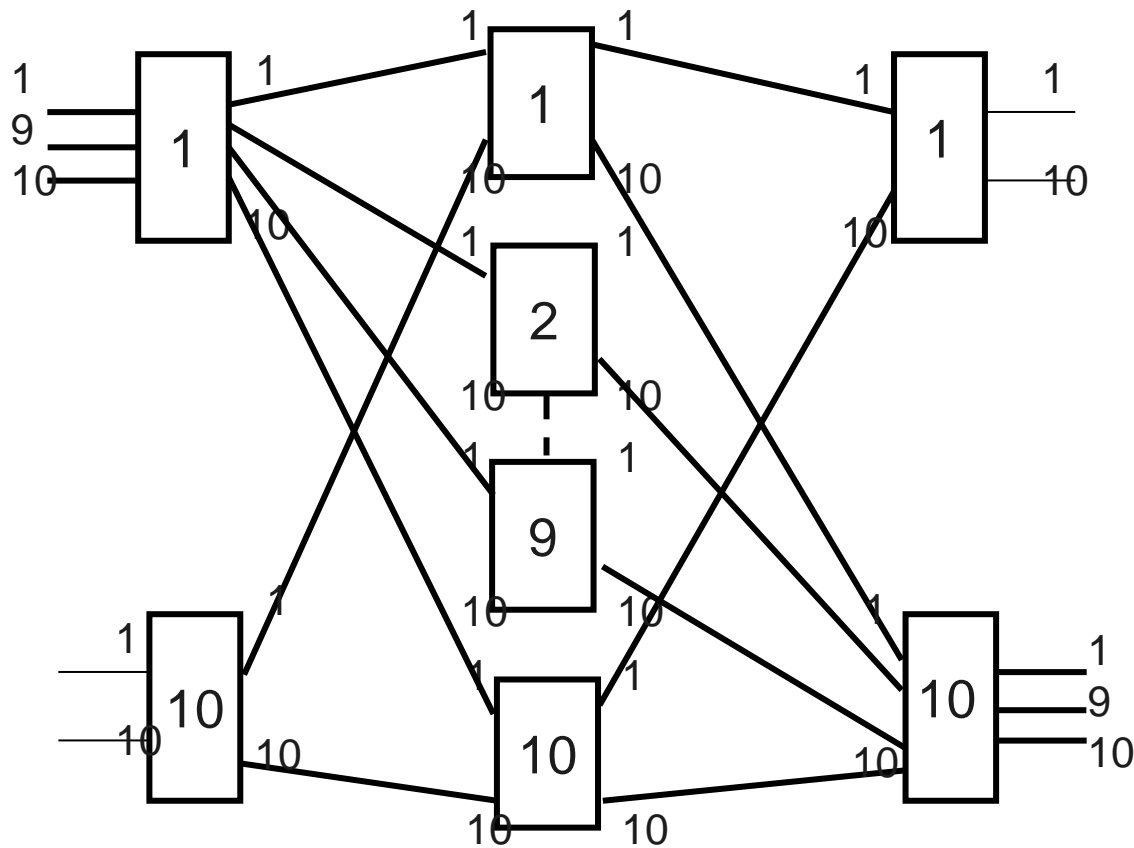
- 当网络对称, 即  $m_1 = n_3 = n$  时,  $r_2 \geq n$ 。

- 重排次数  $\leq r_1 + r_3 - 2$



# 极限情况( $r_2 \geq \text{Max}(m_1, n_3)$ )

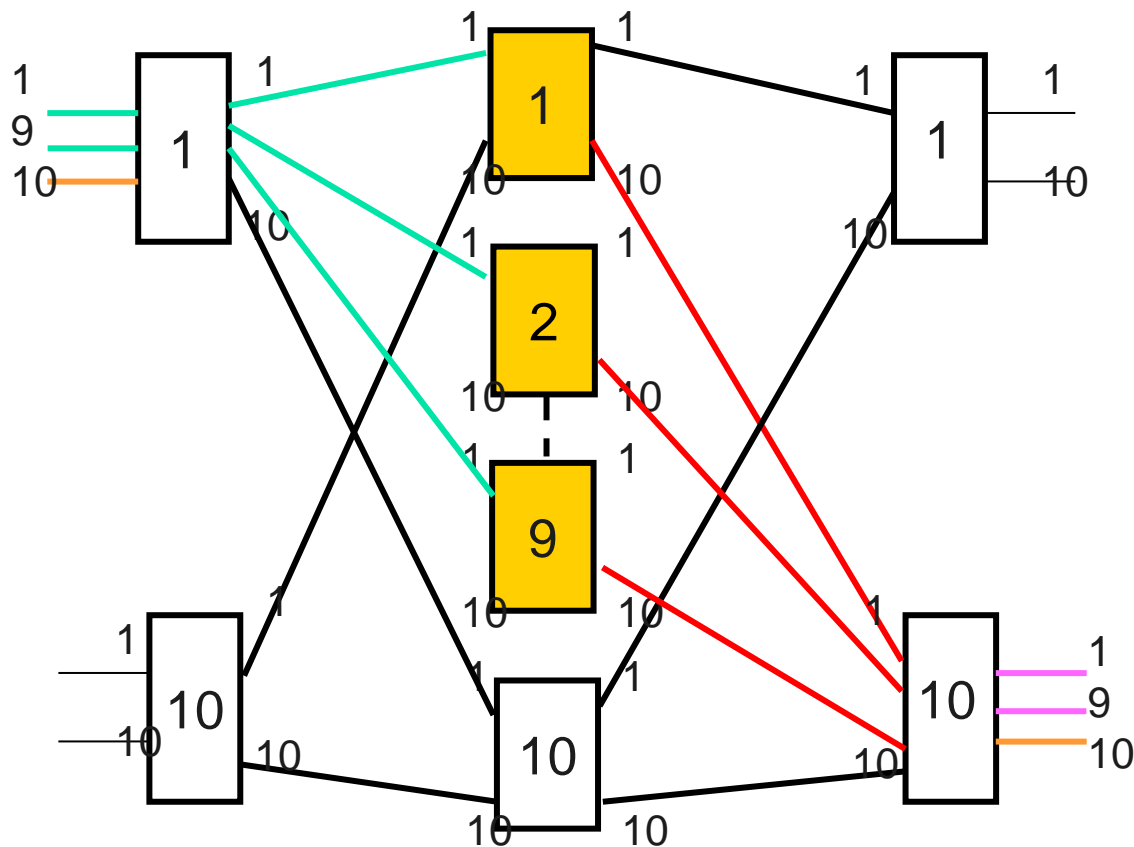
- 入口级I的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线I
- 出口级J的**9**条出线都连接，占用**同9**个中间级的**9**条出线J
- 入口级I的**10**号入线 $\leftrightarrow$ 出口级J的**10**号出线





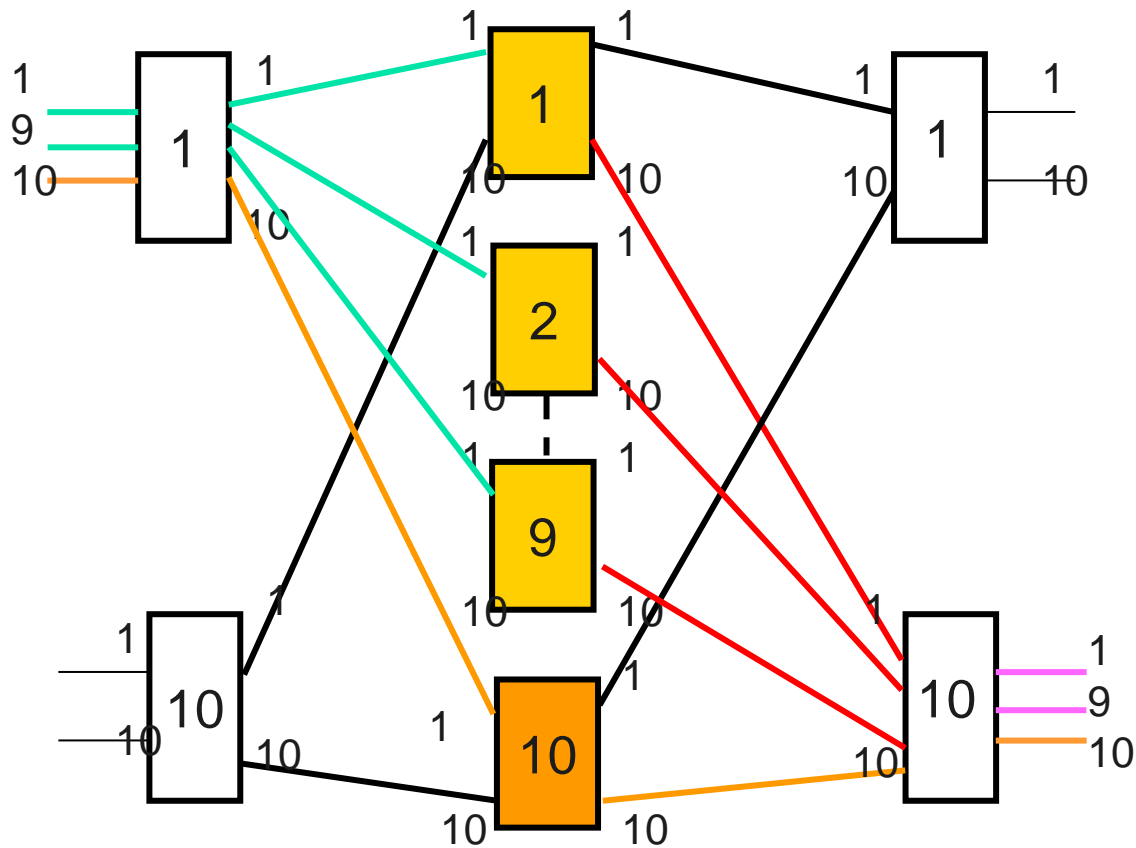
# 极限情况( $r_2 \geq \text{Max}(m_1, n_3)$ )

- 入口级I的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线I
- 出口级J的**9**条出线都连接，占用**同9**个中间级的**9**条出线J
- 入口级I的**10**号入线 $\leftrightarrow$ 出口级J的**10**号出线



# 极限情况( $r_2 \geq \text{Max}(m_1, n_3)$ )

- 入口级I的**9**条入线都连接，占用**9**个中间级的**9**条入线I
- 出口级J的**9**条出线都连接，占用**同9**个中间级的**9**条出线J
- 入口级I的**10**号入线<->出口级J的**10**号出线





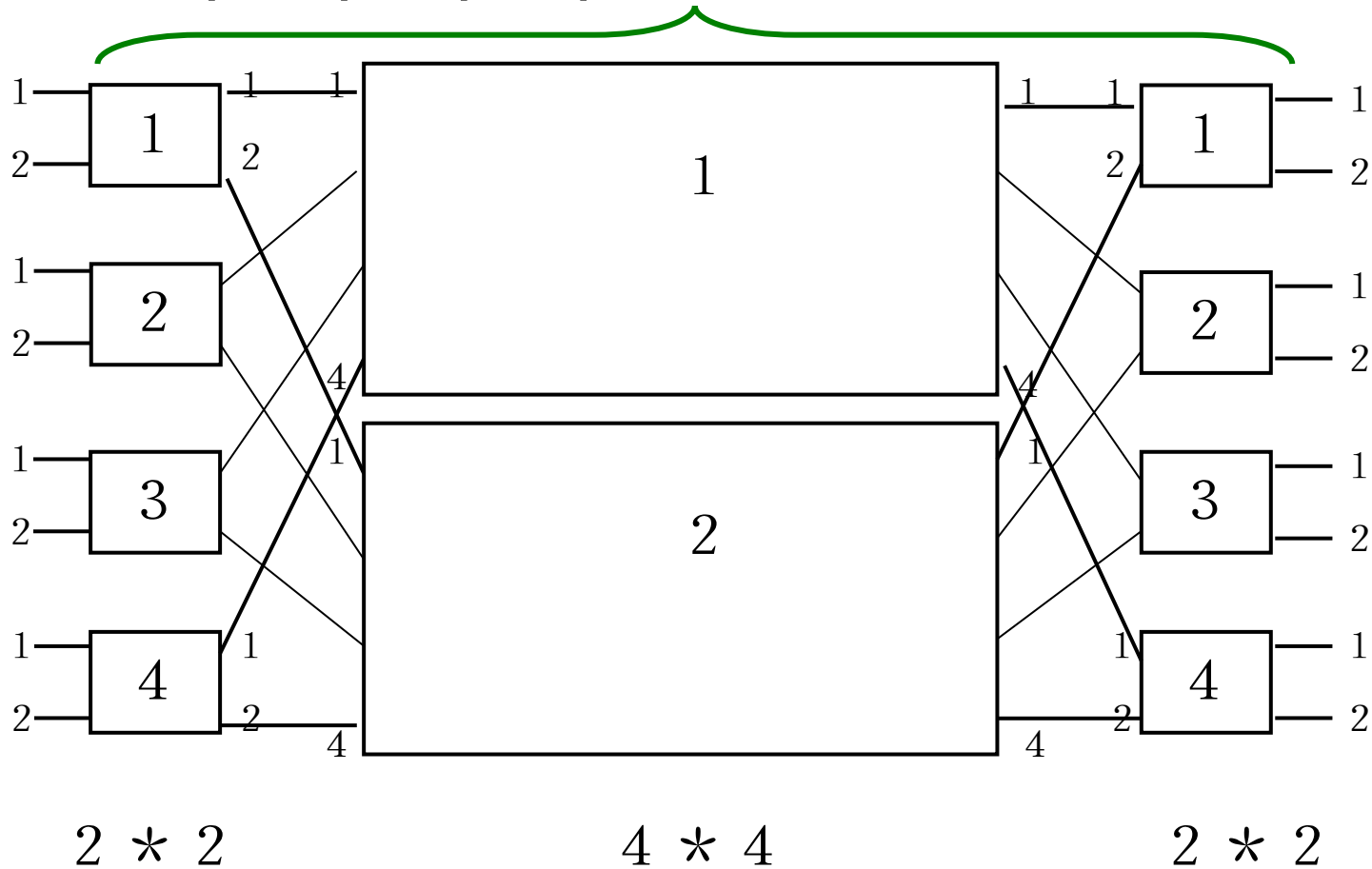
# CLOS网络——递归构造

---

- 按照CLOS网络原则，可以构造3级无阻塞网络
- 网络中的每一个交换单元又可以用CLOS网络实现
- 举例：构造 $8*8$ 的可重排无阻塞CLOS网络

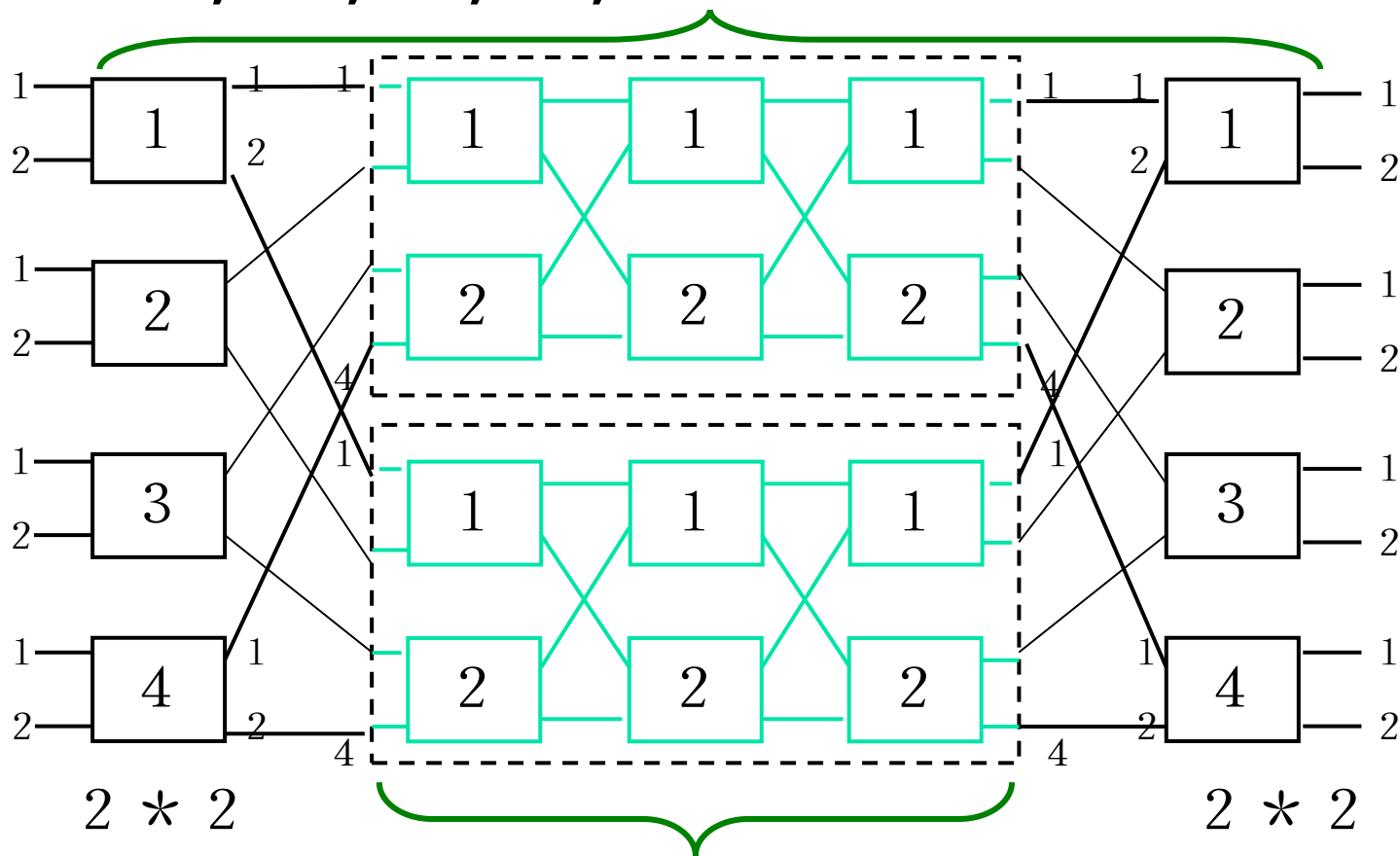
# 8 \* 8 可重排无阻塞网络的构造

$$(m1, n3, r1, r2, r3) = (2, 2, 4, 2, 4)$$




# 8 \* 8 可重排无阻塞网络的构造

$$(m_1, n_3, r_1, r_2, r_3) = (2, 2, 4, 2, 4)$$



$$(m_1, n_3, r_1, r_2, r_3) = (2, 2, 2, 2, 2)$$

**Benes 网络**

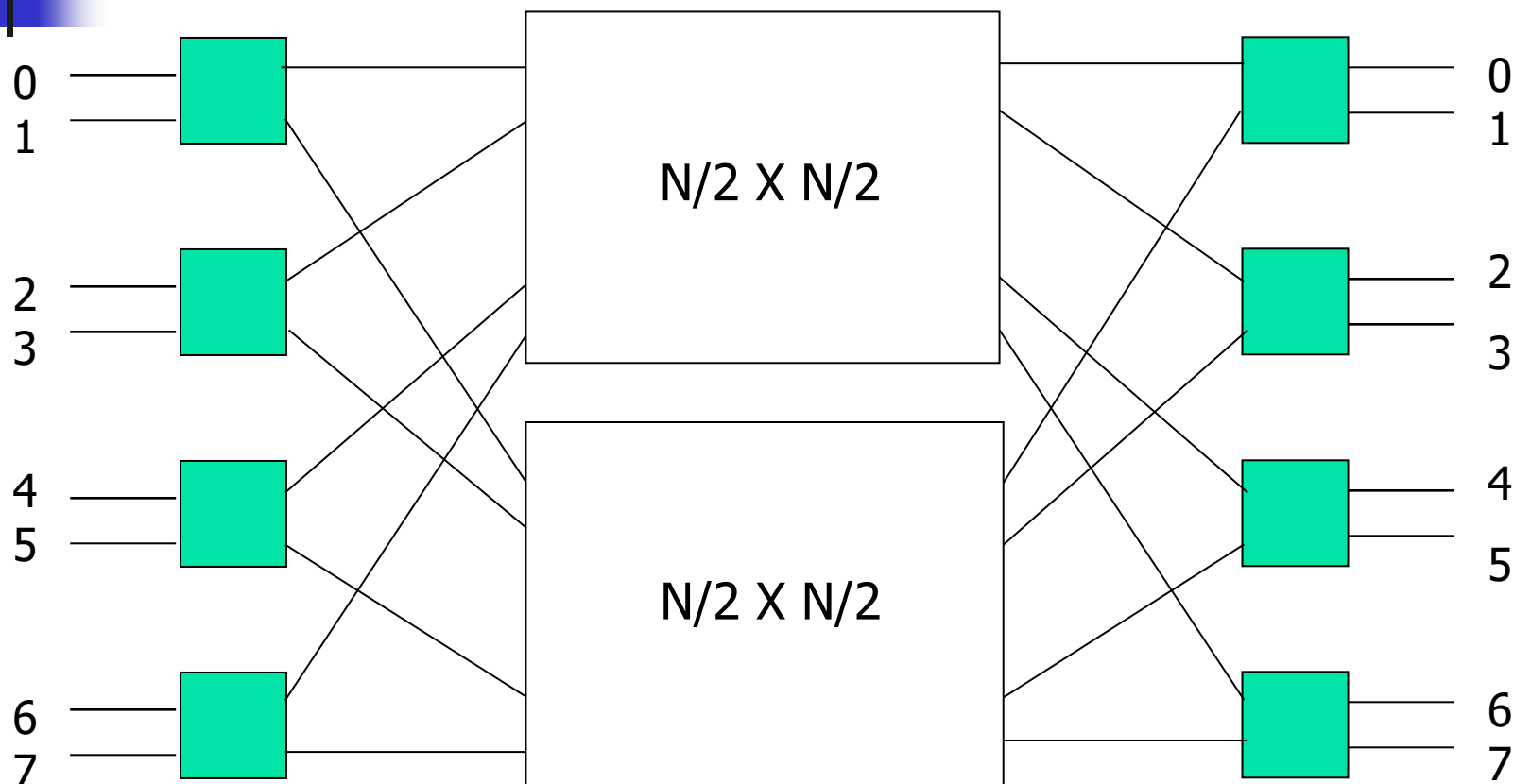


### 3 交换网络---BENES网络

---

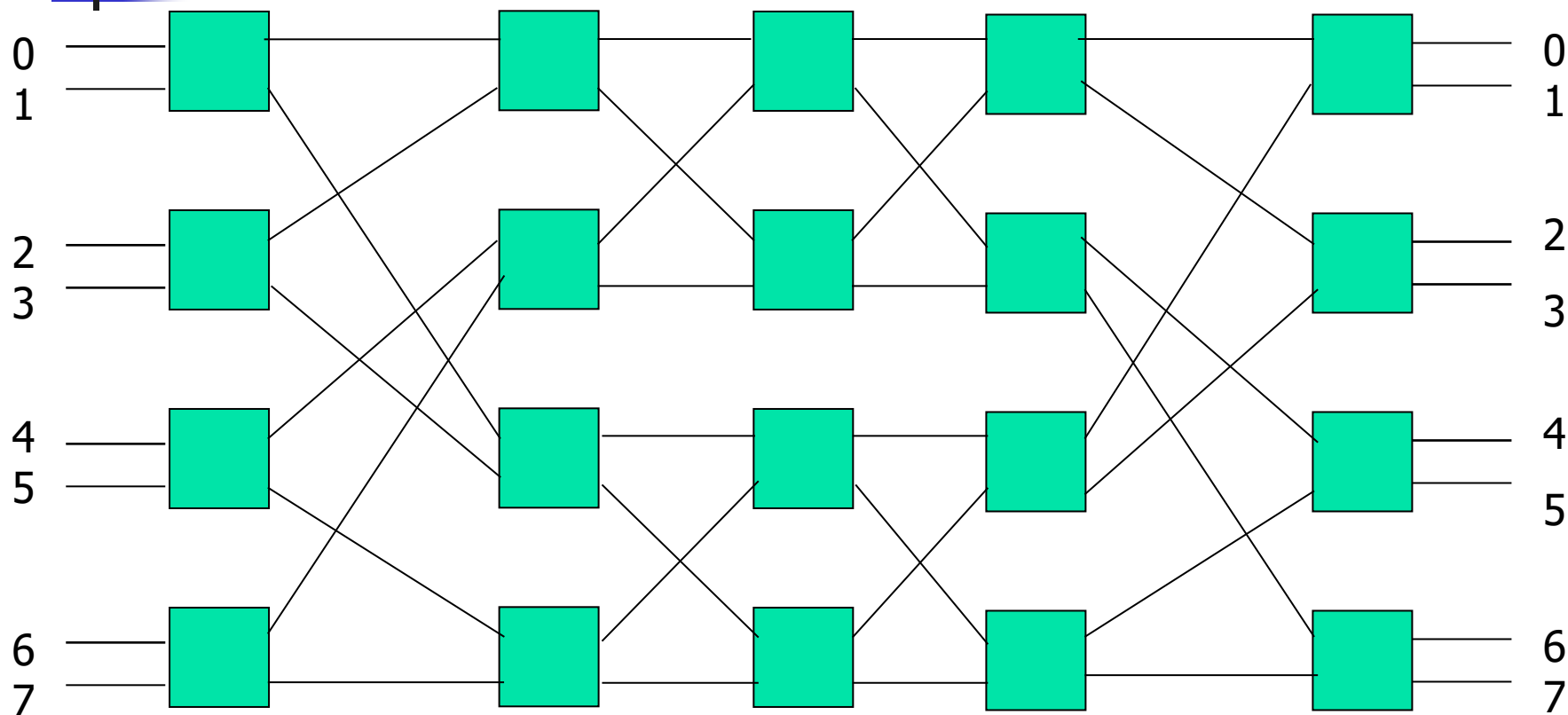
- **benes**网络是多通路网络，具有可重排无阻塞的特点。
- **benes**网络的构成有一定的规律。使用**2X2**交换单元来构成的**N X N benes**网络的方法为：
  - 两侧各有**N/2**个**2X2**交换单元，中间为两个**N/2 X N/2**的子网络，每个交换单元以一条链路连到每个子网络；再将中间子网络按上述方法继续分解，直到中间子网络就是**2X2**交换单元为止。

# ***BENES*** 网络构成方法



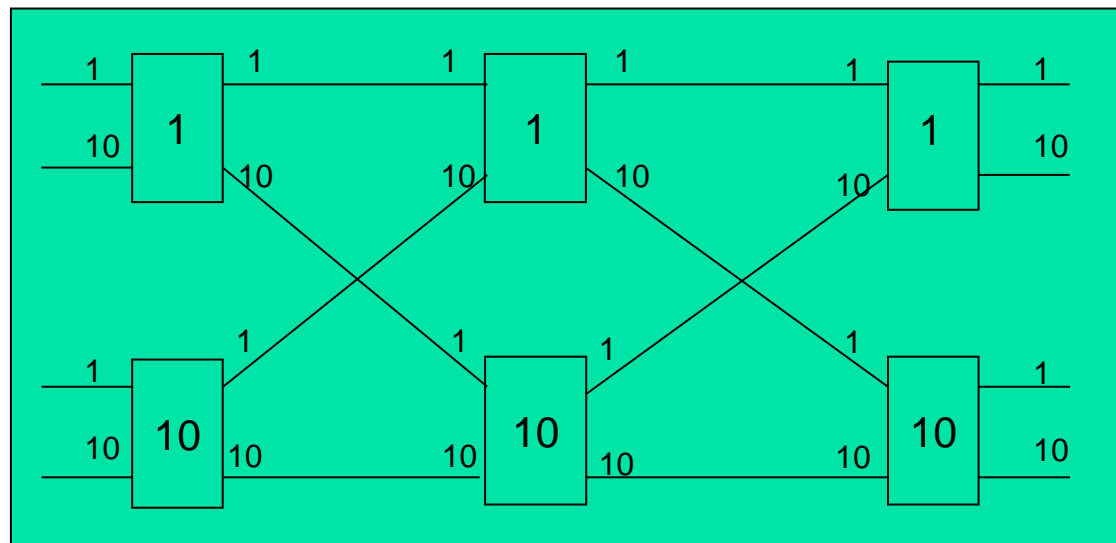
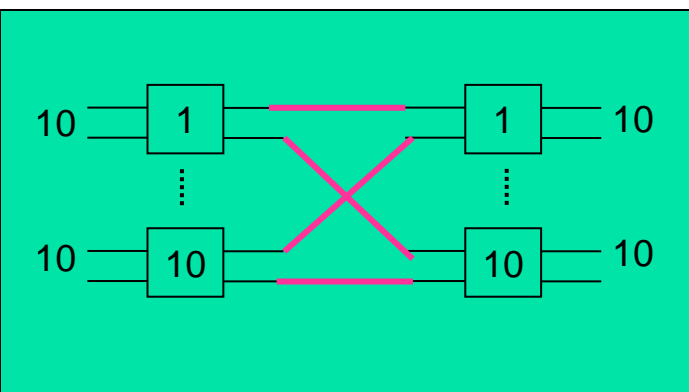
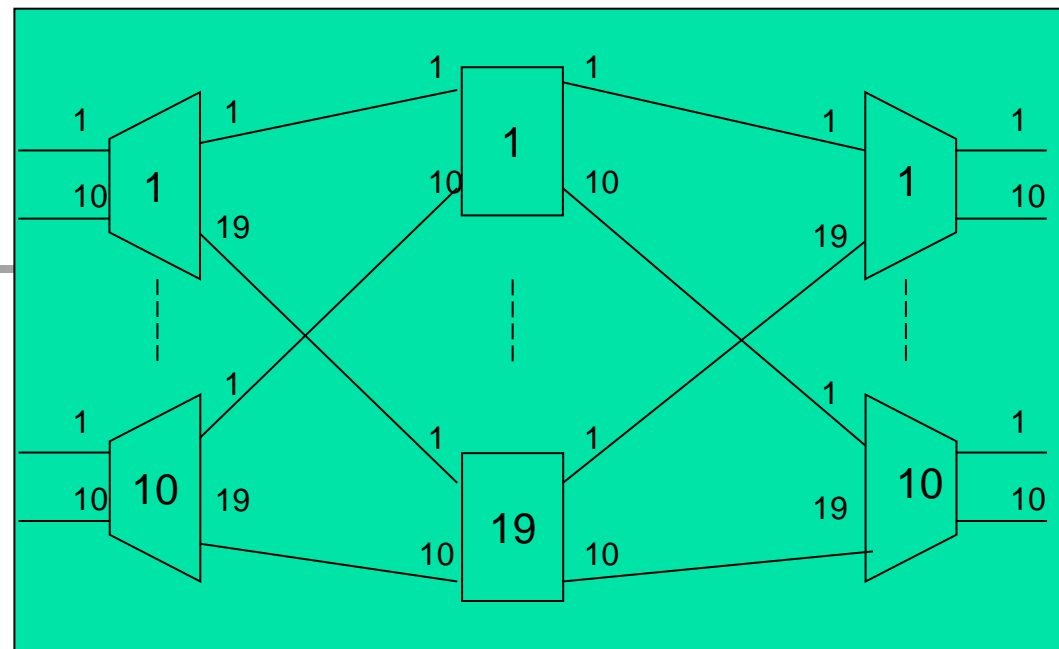
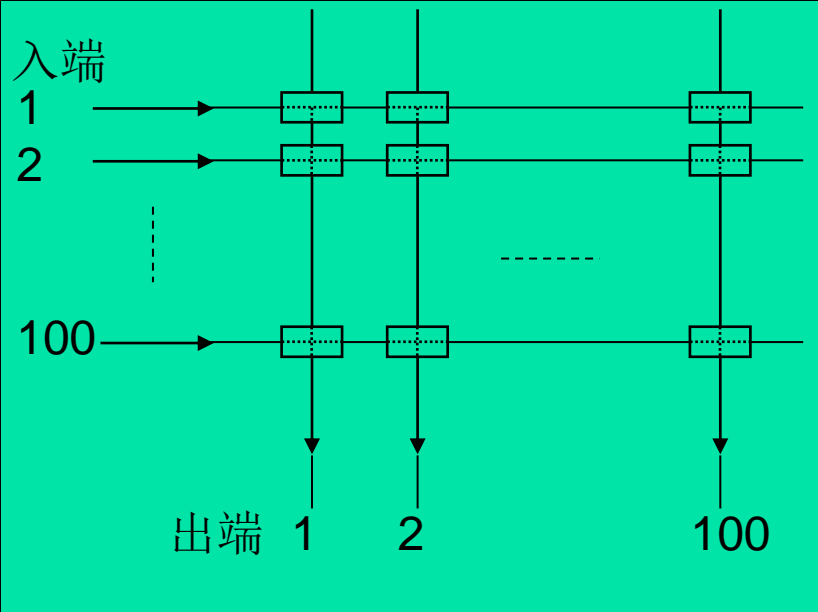
benes网络构成方法

# 8 X 8 BENES 网络



8 X 8 benes网络







# 作业

---

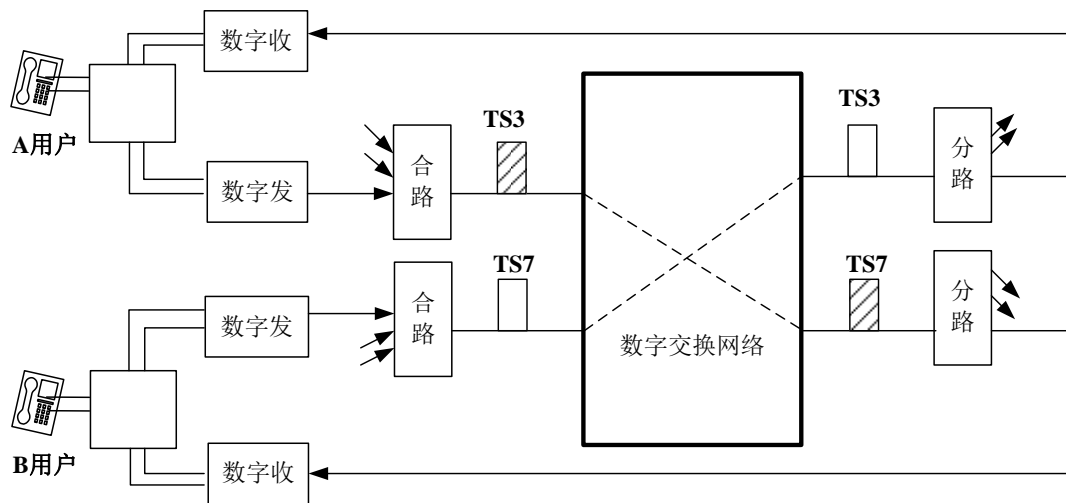
- 构造 $256 \times 256$ 的三级严格无阻塞CLOS网络。要求：入口级选择8入线的交换单元，出口级选择8出线的交换单元。画出该网络连接示意图（标出各级交换单元的个数，入出线）



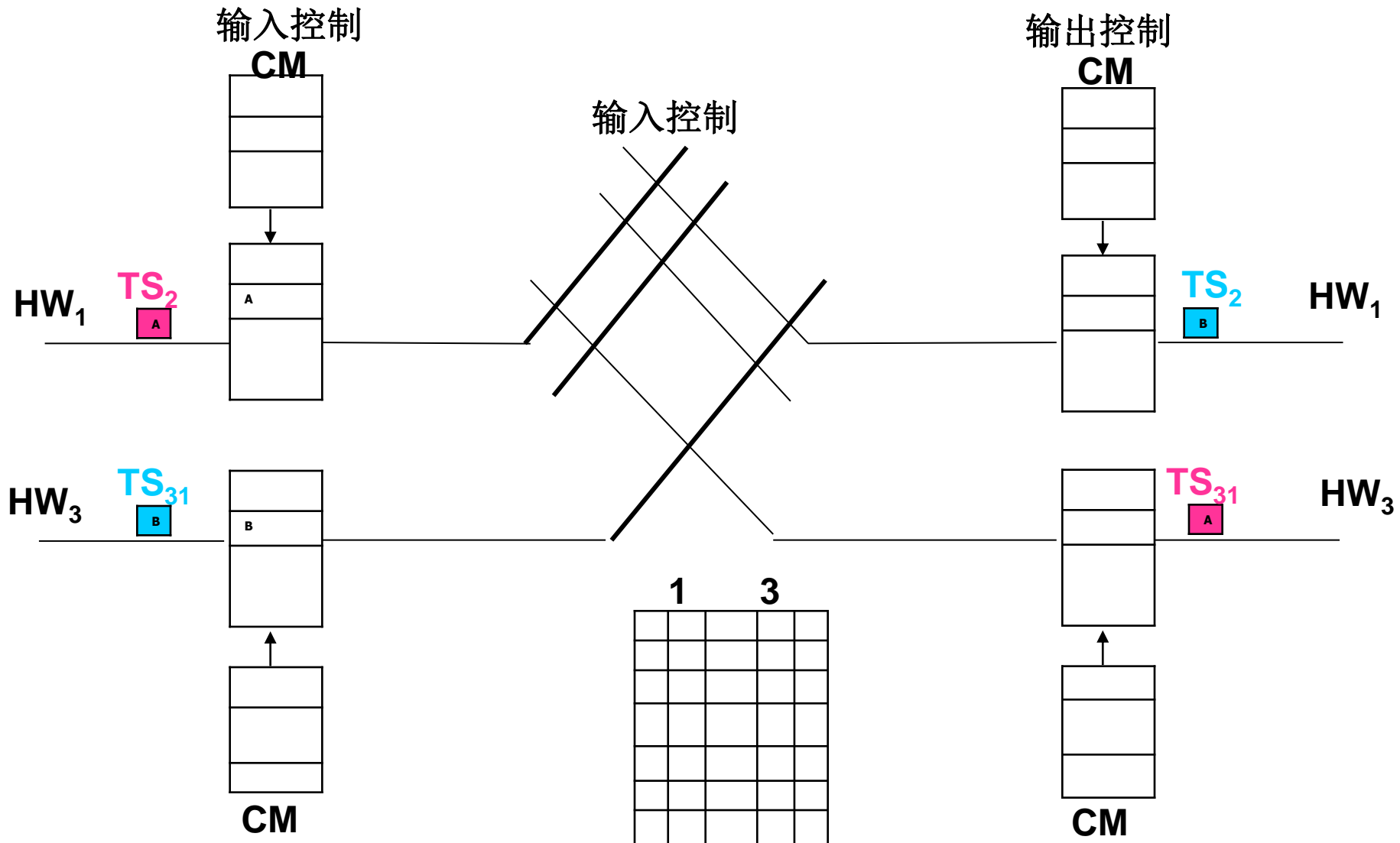
## 3 交换网络---TST网络

---

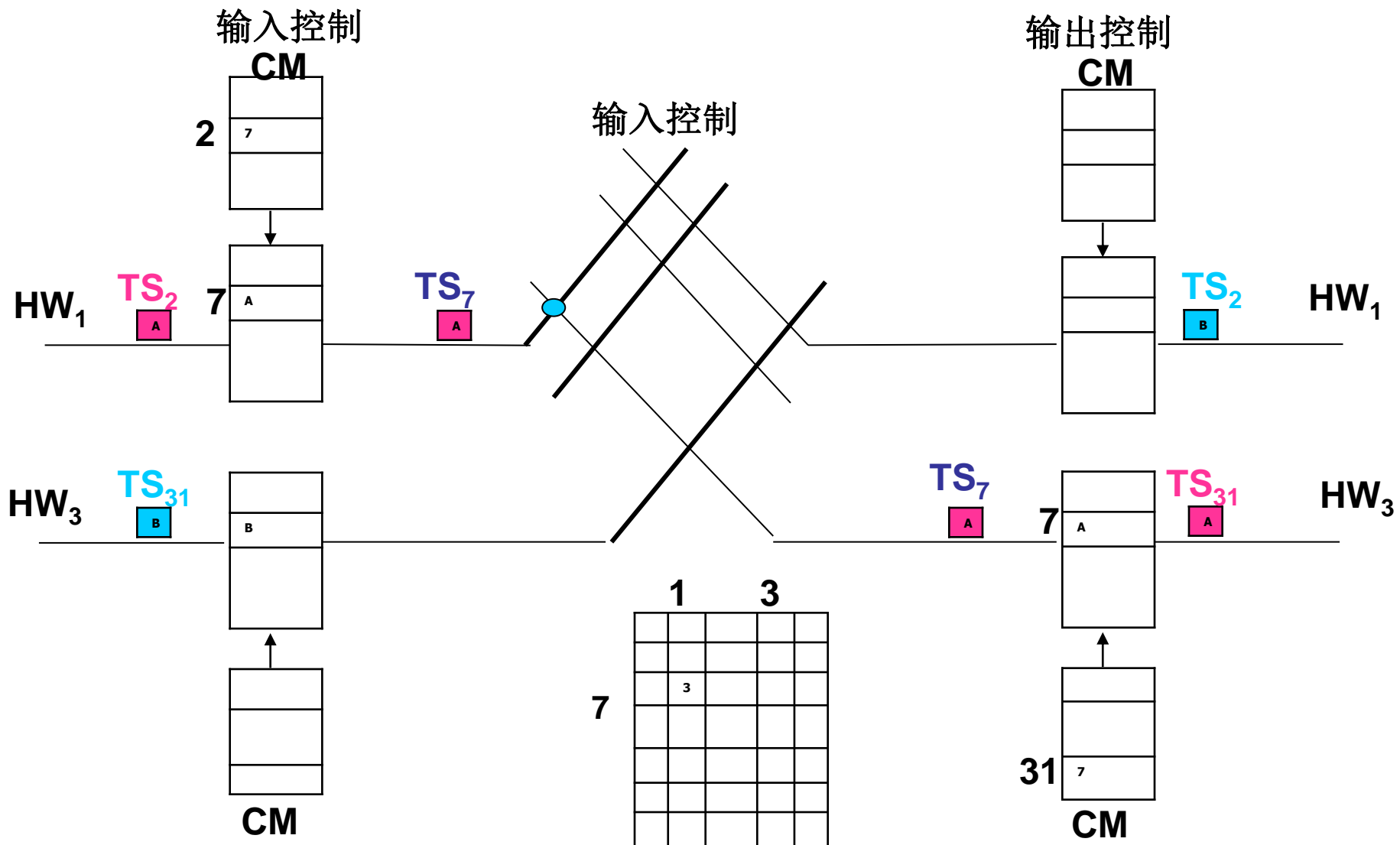
- T-S-T组合交换网络
  - 由时间(T)接线器和空间(S)接线器组成
  - TST结构
  - 反向路由的半帧选择
  - 控制存储器的合用
  - 阻塞



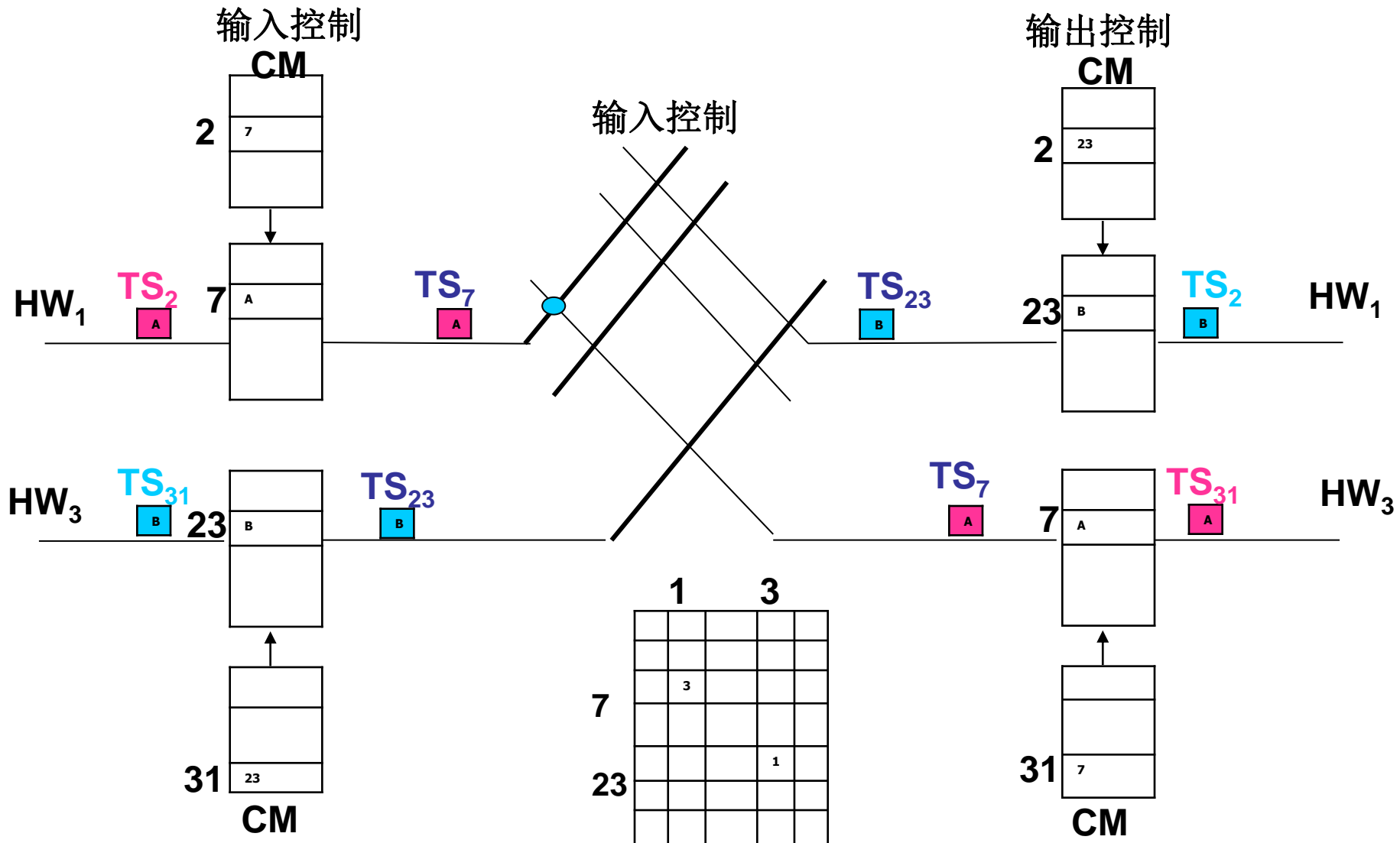
# TST



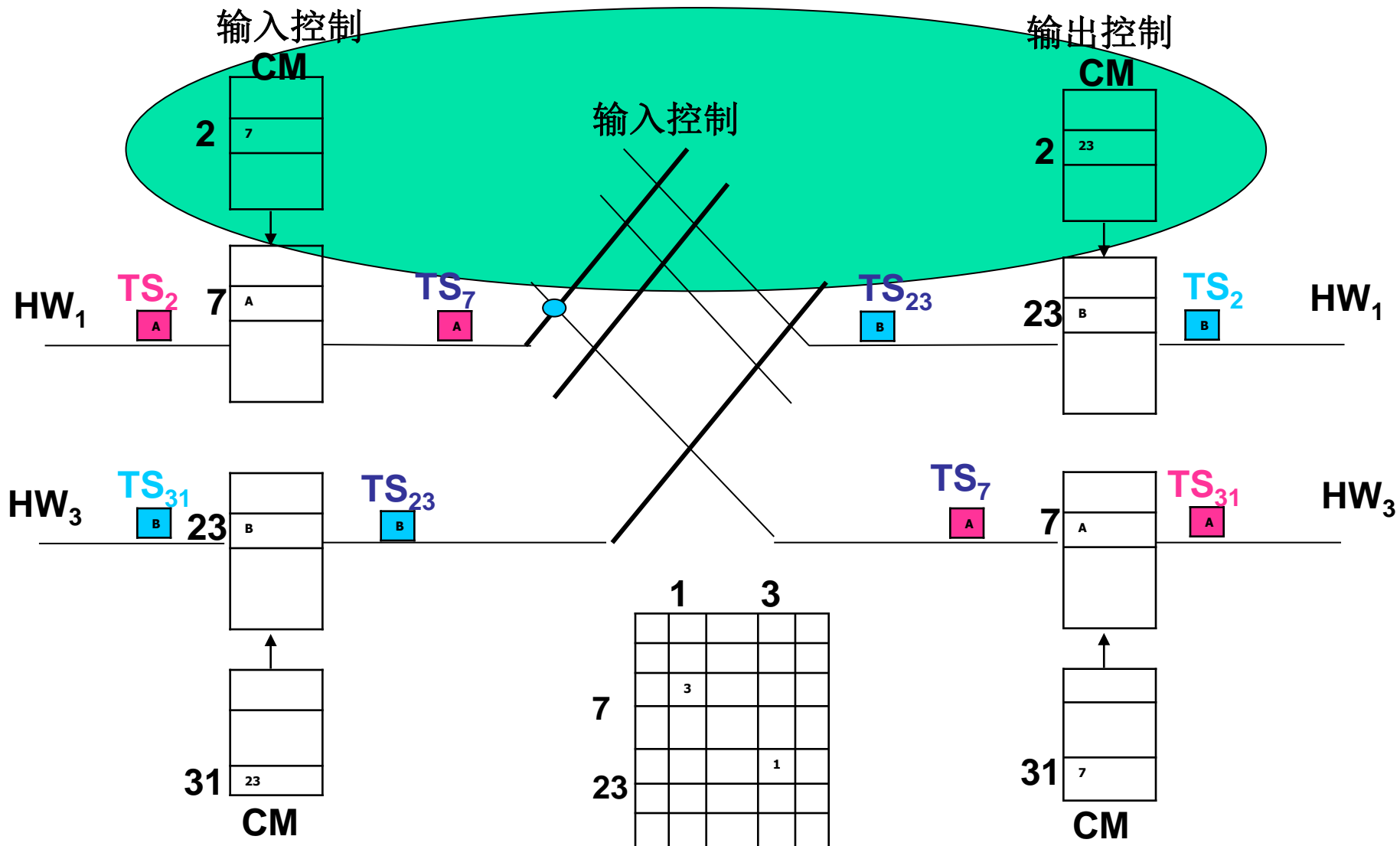
# TST



# TST



# TST





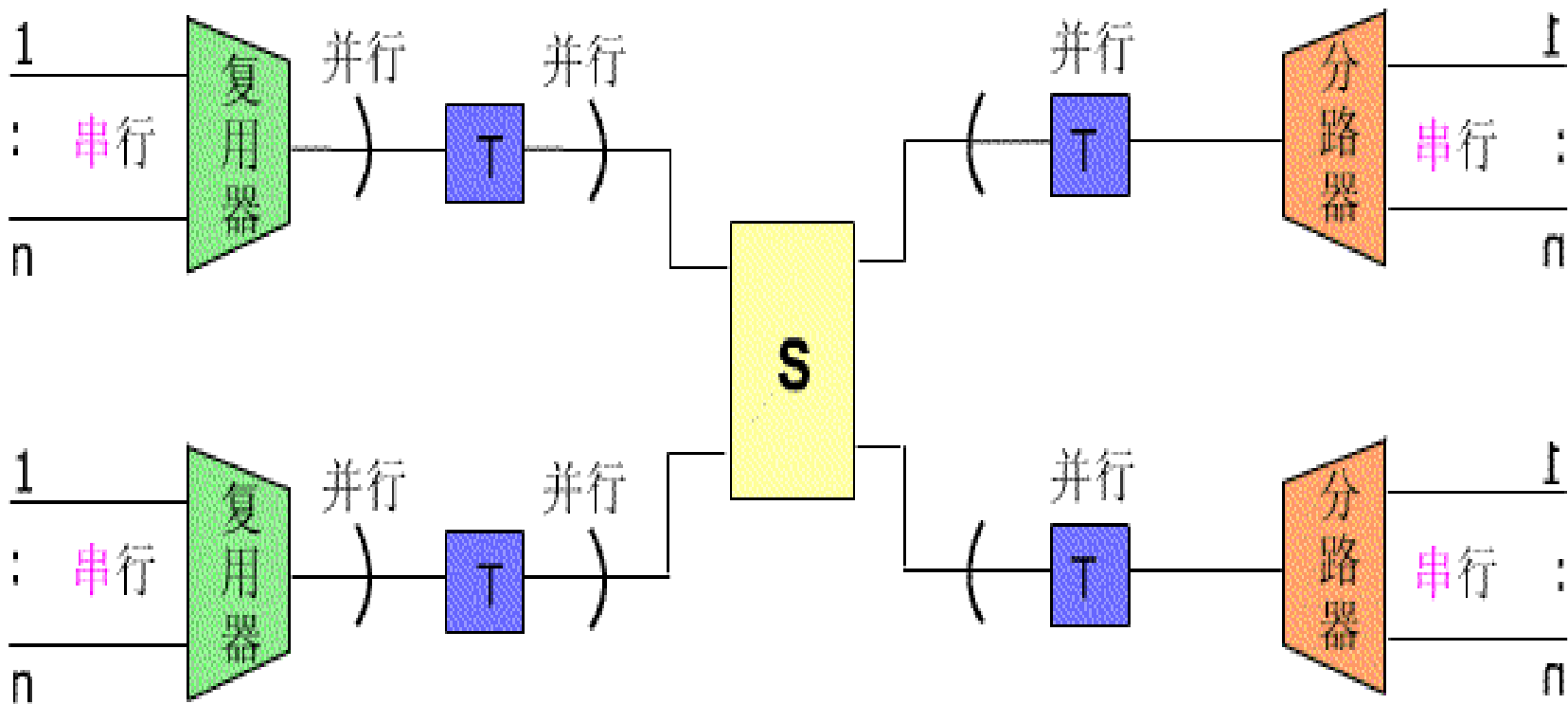


## 3 交换网络---TST网络

---

- T-S-T组合交换网络
  - TST结构
  - 反向路由的半帧选择
  - 控制存储器的合用
  - 阻塞

# 复用和分路

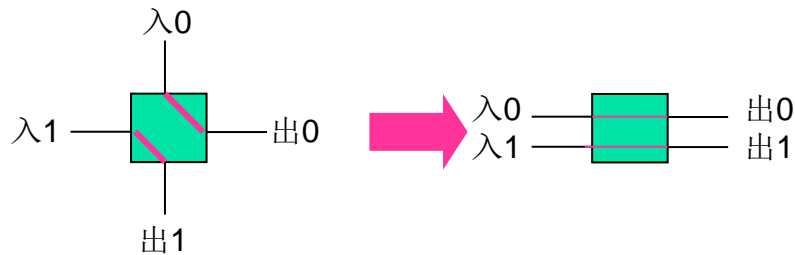


复用器分路器与T-S-T网络的连接

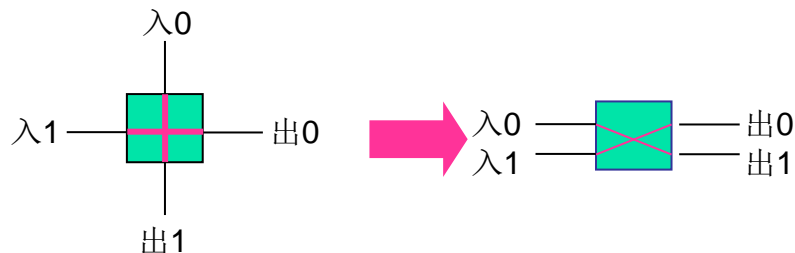
### 3 交换网络---BANYAN网络

- BANYAN网络的结构
  - 基本单元
    - 2\*2交叉连接单元

平行连接  
Bar状态



交叉连接  
Cross状态



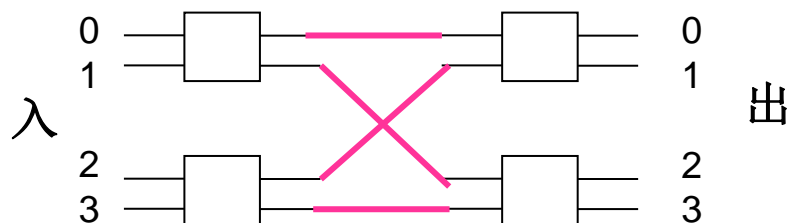
# 3 交换网络---BANYAN网络

- BANYAN网络的结构

- 基本单元

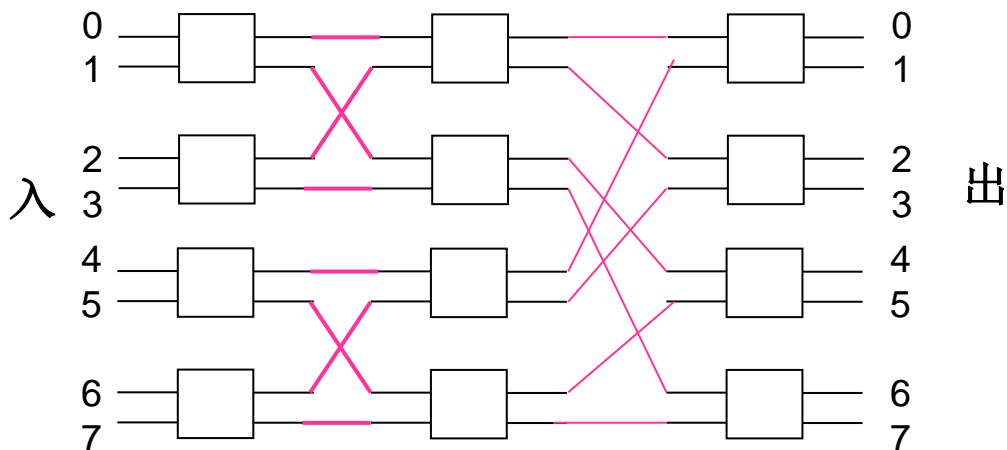
- 2\*2交叉连接单元

- 4\*4交换网络



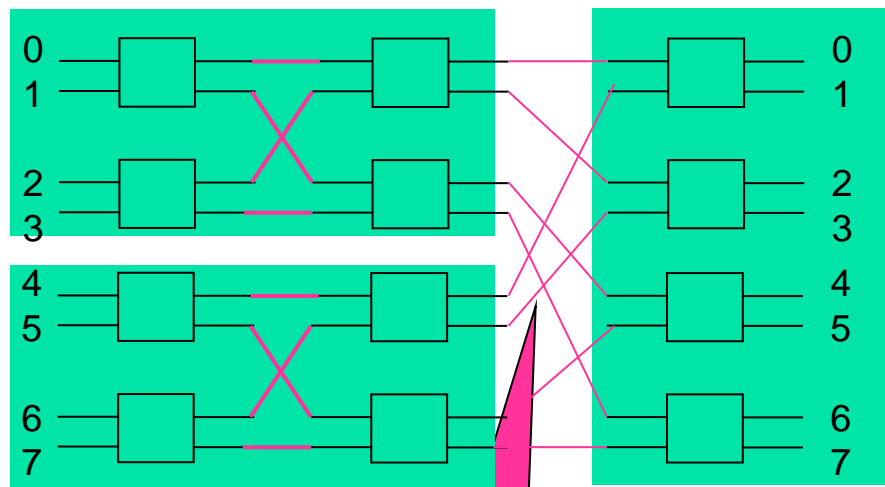
- 8\*8交换网络

- 16\*16交换网络?



### 3 交换网络---BANYAN网络

- **BANYAN网络的构造方法**
  - 构造 $2N \times 2N$ 的**BANYAN**网络，可以用两个 $N \times N$ 的**BANYAN**网络和 $N$ 个 $2 \times 2$ 交换单元组成
  - 前一级 $N \times N$  **BANYAN**网络的出线分别连接最后 $N$ 个 $2 \times 2$ 交换单元的相同序号的入线
  - $N \times N$ 的**BANYAN**网络，级数为 $\log_2 N$ ；每一级需要 $N/2$ 个 $2 \times 2$ 交换单元。共需要  $(N/2) * \log_2 N$  个交换单元



8\*8交换网络

从BANYAN的任一入线引出的一组通路形成了2叉树

### 3 交换网络---BANYAN网络

- **BANYAN网络的特性**

- 树型结构特性

- 从任一输入端口引出的一组通道形成了**2叉树**

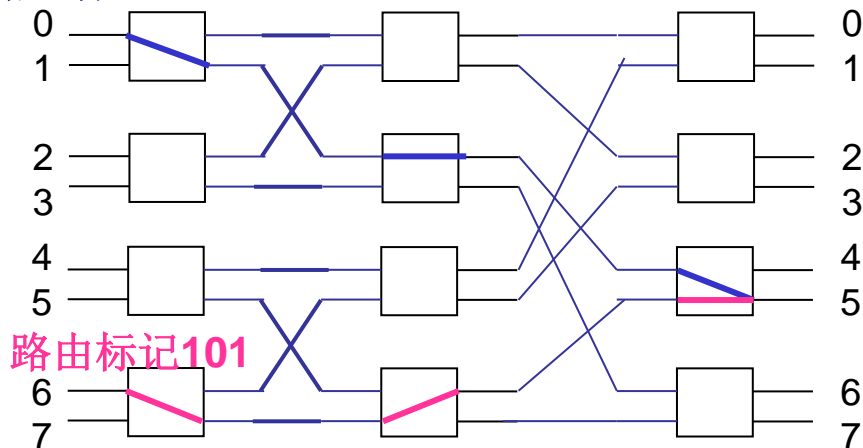
- 唯一路径

- 每个入线与出线之间有且只有一条路径

- 自动选路

- 适用于统计时分复用信号的交换

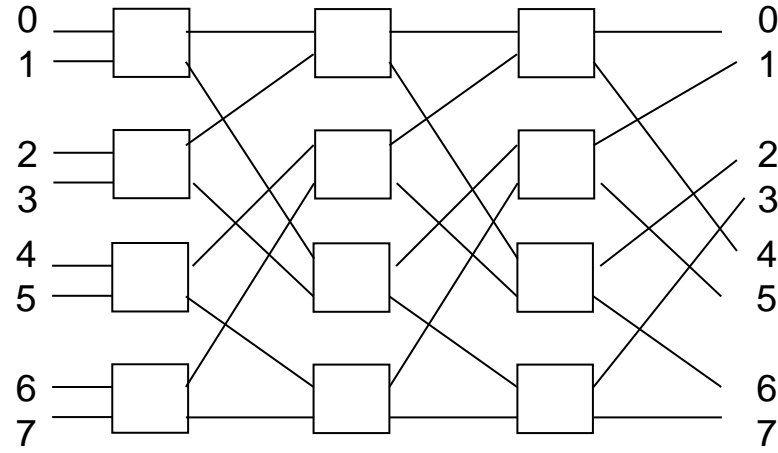
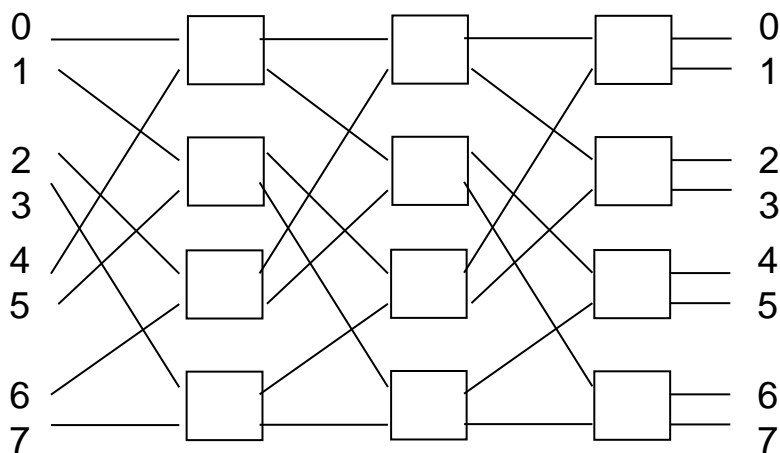
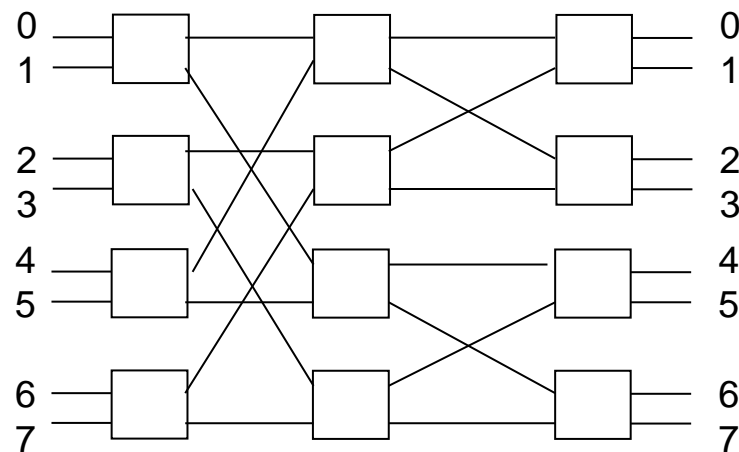
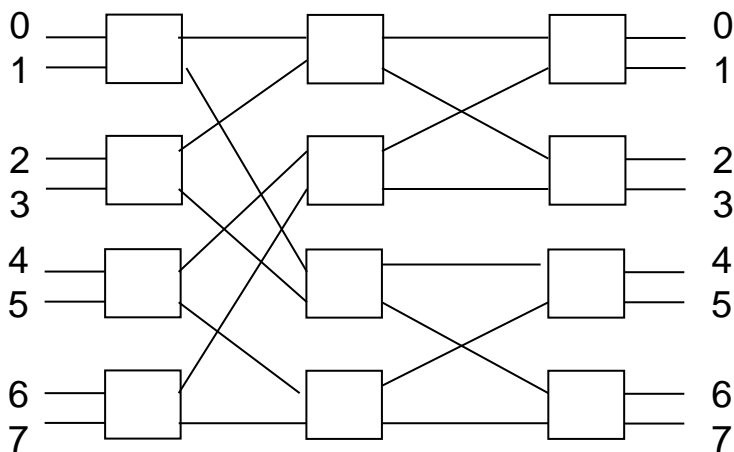
路由标记101



8\*8交换网络

# 3 交换网络---BANYAN网络

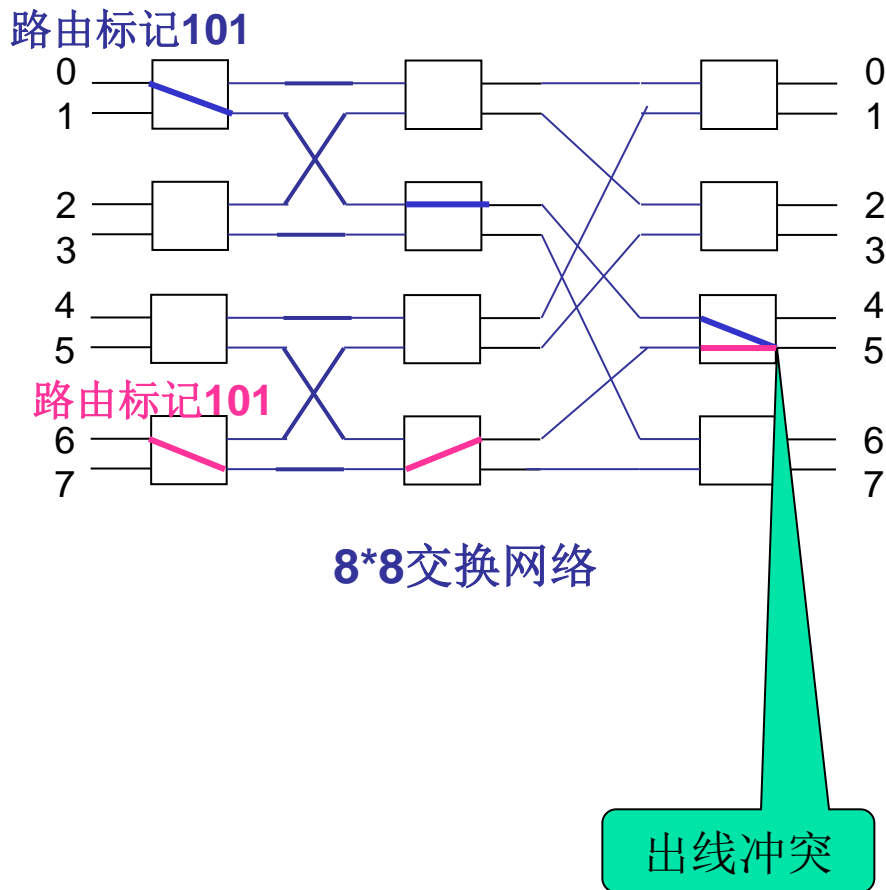
## ■ BANYAN网络的变形



### 3 交换网络---BANYAN网络

- **BANYAN网络的阻塞**

- 出线冲突
- 内部阻塞

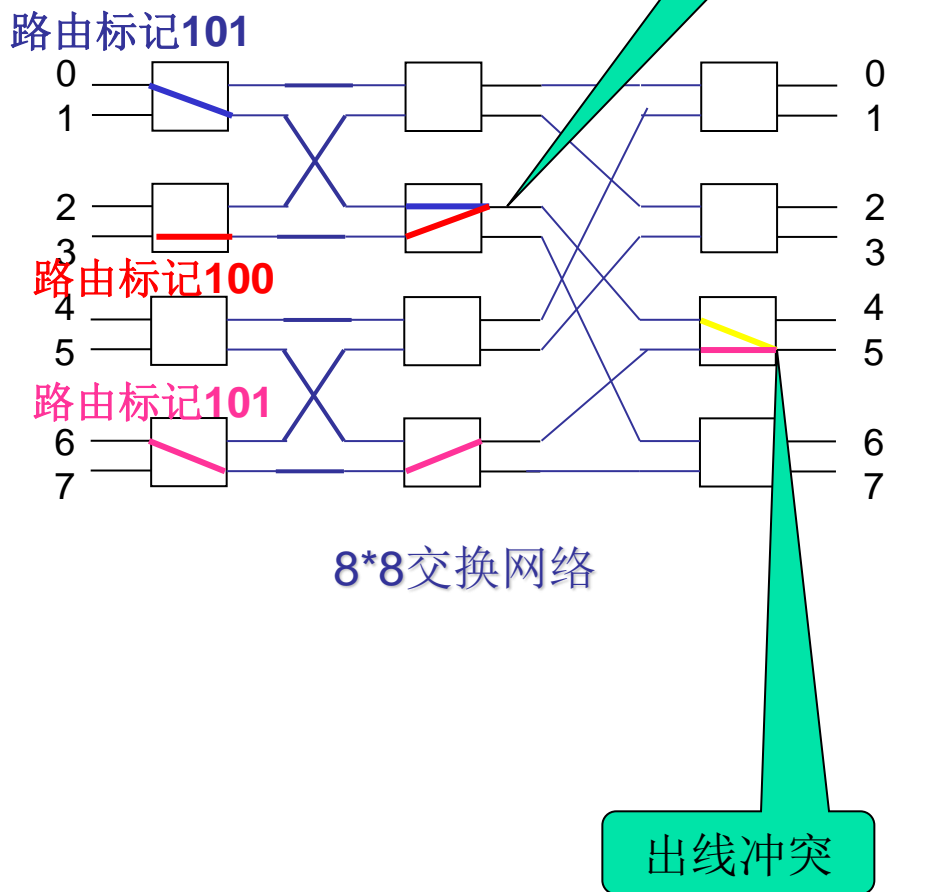




### 3 交换网络---BANYAN网络

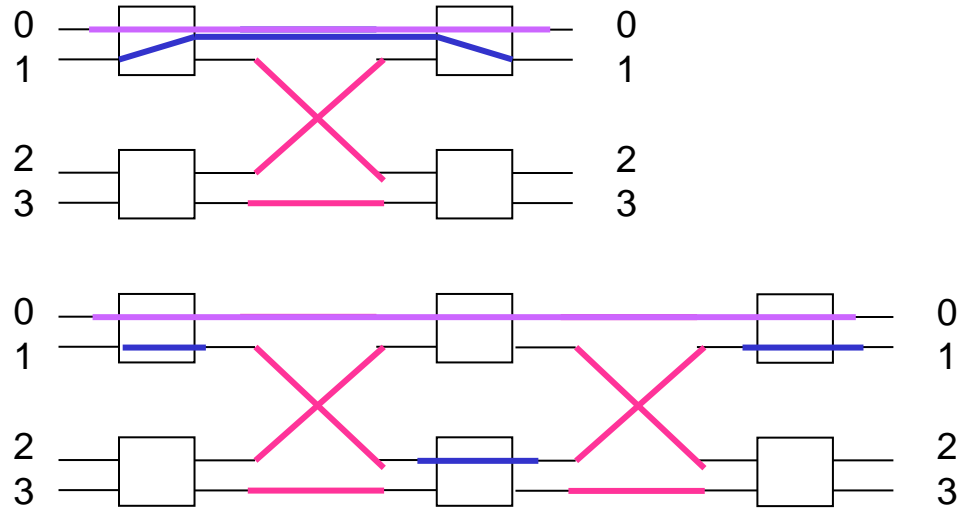
- **BANYAN网络的阻塞**

- 出线冲突
- 内部阻塞

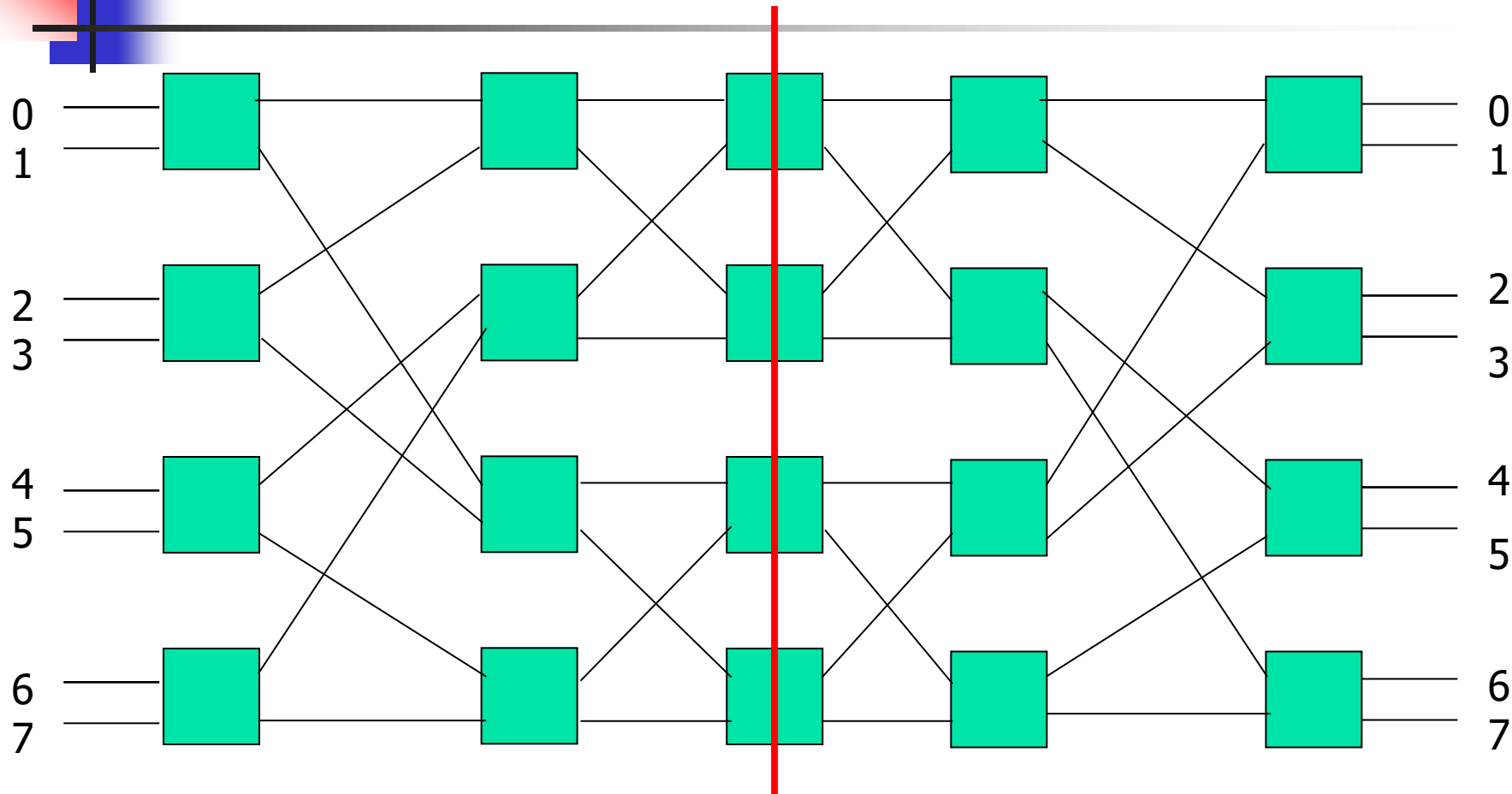


### 3 交换网络---BANYAN网络

- 降低 **BANYAN**网络的内部阻塞概率的方法
  - 增加级数



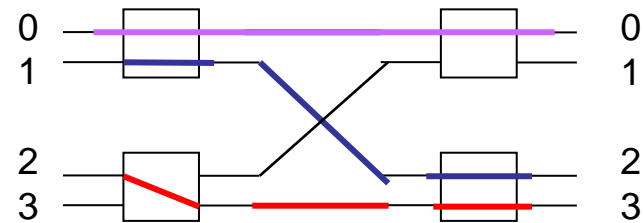
# 8 X 8 BENES 网络



8 X 8 benes网络

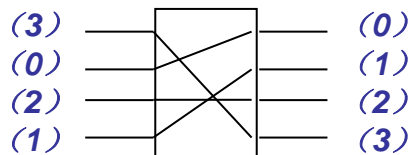
### 3 交换网络---BANYAN网络

- 降低 **BANYAN**网络的内部阻塞概率的方法
  - 增加级数
  - 引入排序网络
    - **BANYAN**网络在那种输入下不会产生内部阻塞？
      - 设交换网络的入线和出线各按自上而下的顺序编号，入线 $a$ 到出线 $b$ 的连接称为连接 $a \rightarrow b$ 。若网络中有两个连接 $a \rightarrow b$ 和 $a' \rightarrow b'$ ，并且编号满足条件： $a' > a, b' > b, b' - b \geq a' - a$ ，则这两个连接的路径是**完全不重叠**的。



### 3 交换网络---BANYAN网络

- 降低 **BANYAN**网络的内部阻塞概率的方法
  - 增加级数
  - 引入排序网络
    - **BANYAN**网络在那种输入下不会产生内部阻塞？
      - 设交换网络的入线和出线各按自上而下的顺序编号，入线 $a$ 到出线 $b$ 的连接称为连接 $a \rightarrow b$ 。若网络中有两个连接 $a \rightarrow b$ 和 $a' \rightarrow b'$ ，并且编号满足条件： $a' > a, b' > b, b' - b \geq a' - a$ ，则这两个连接的路径是完全不重叠的。
    - 排序网络
      - 一个具有 $N \times N$ 的交换网络，对于任意给定的 $N$ 个输入，交换网络可以按照目的地址进行交换，最后可以得到一个有序的排列。

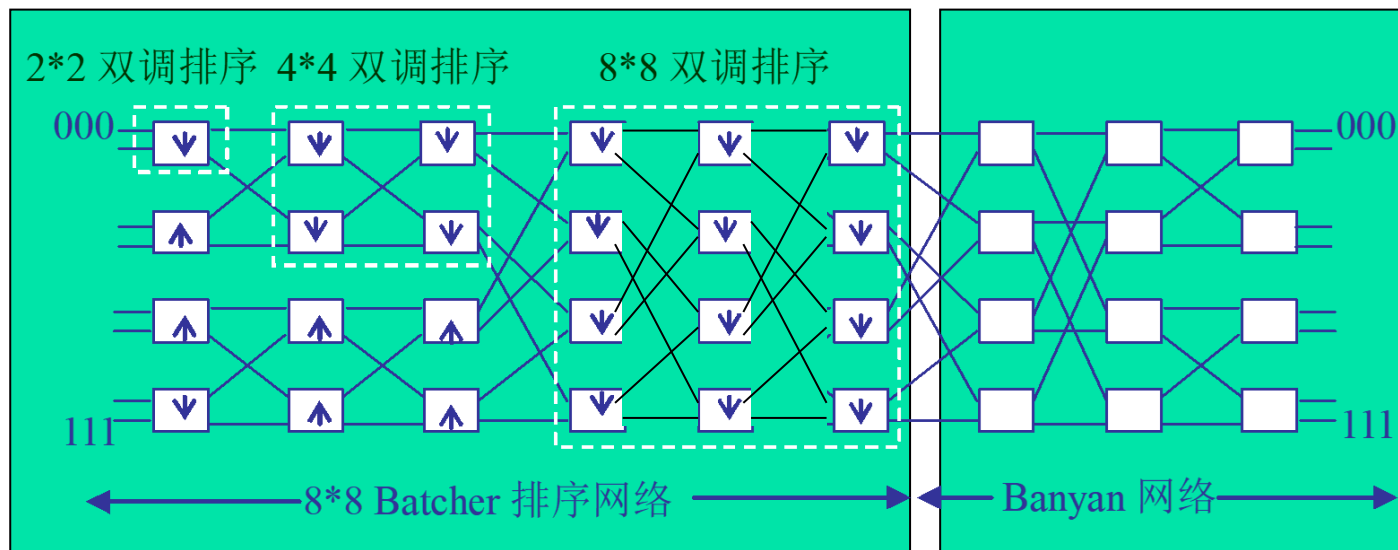


# 3 交换网络---BANYAN网络

## BATCHER --- BANYAN网络

### ■ BATCHER网络

根据连接的目的地址将其按升序排列，每个节点比较两个连接目的地址，并将高地址连接送到高端，低地址连接送到低端。仅有一个连接时，送到低端。



⬇ 2\*2 排序，大值向下

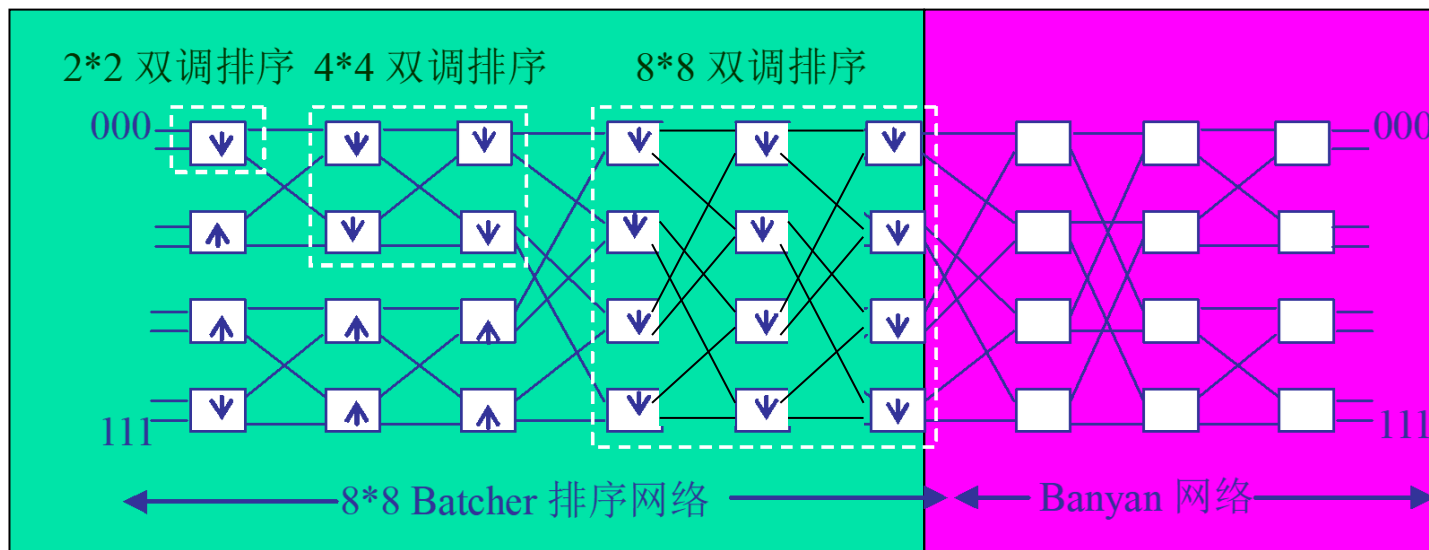
⬆ 2\*2 排序，大值向上

# 3 交换网络---BANYAN网络

## BATCHER --- BANYAN网络

### ■ BATCHER网络

根据连接的目的地址将其按升序排列，每个节点比较两个连接目的地址，并将高地址连接送到高端，低地址连接送到低端。仅有一个连接时，送到低端。



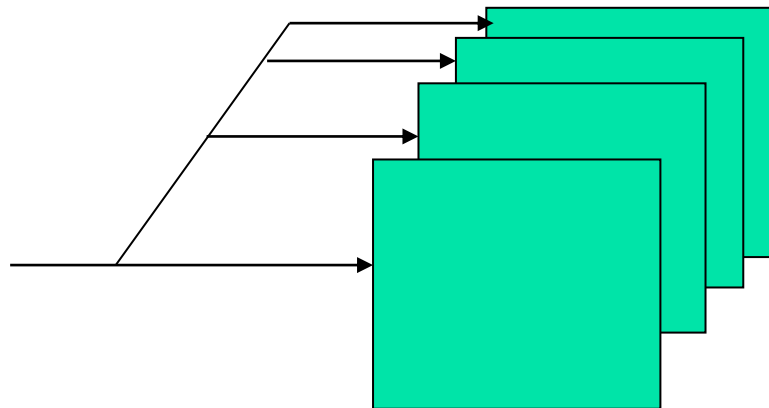
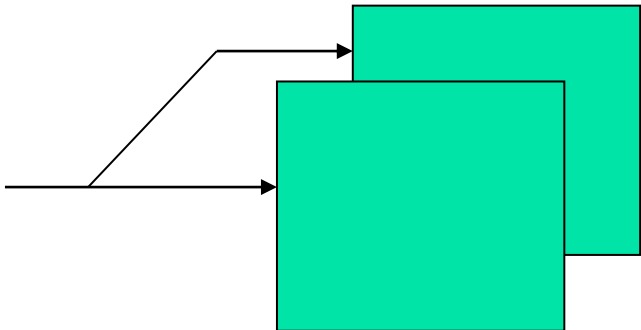
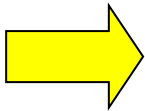
⬇ 2\*2 排序，大值向下

⬆ 2\*2 排序，大值向上

### 3 交换网络---BANYAN网络

- 降低 **BANYAN**网络的内部阻塞概率的方法

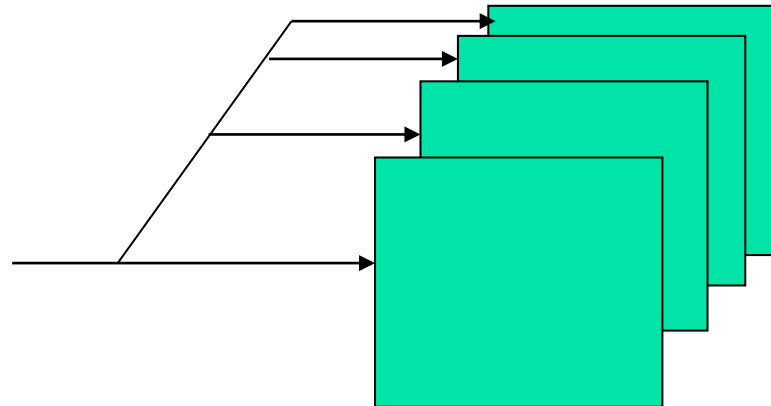
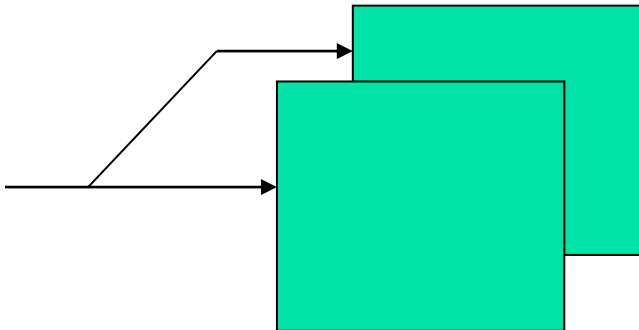
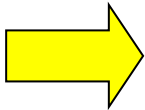
- 增加级数
- 引入排序网络
- 限制入线上的信息量，加大缓冲存储器
- 增加**BANYAN**网络的平面数，构成多通道交换网络





### 3 交换网络---BANYAN网络

- 降低 **BANYAN**网络的内部阻塞概率的方法
  - 增加级数
  - 引入排序网络
  - 限制入线上的信息量，加大缓冲存储器
  - 增加**BANYAN**网络的平面数，构成多通道交换网络





# 作业

---

- 构造**16\*16**的交换单元：采用基本开关阵列时，需要多少个开关？
- 用**2\*2**交叉单元构造**16\*16**的可重排无阻塞**benes**网络;用**2\*2**交叉单元构造**16\*16**的**BANYAN**网络,画出这两个网络,并比较两者的异同和相关性.



## 3 交换网络---DSN网络

---

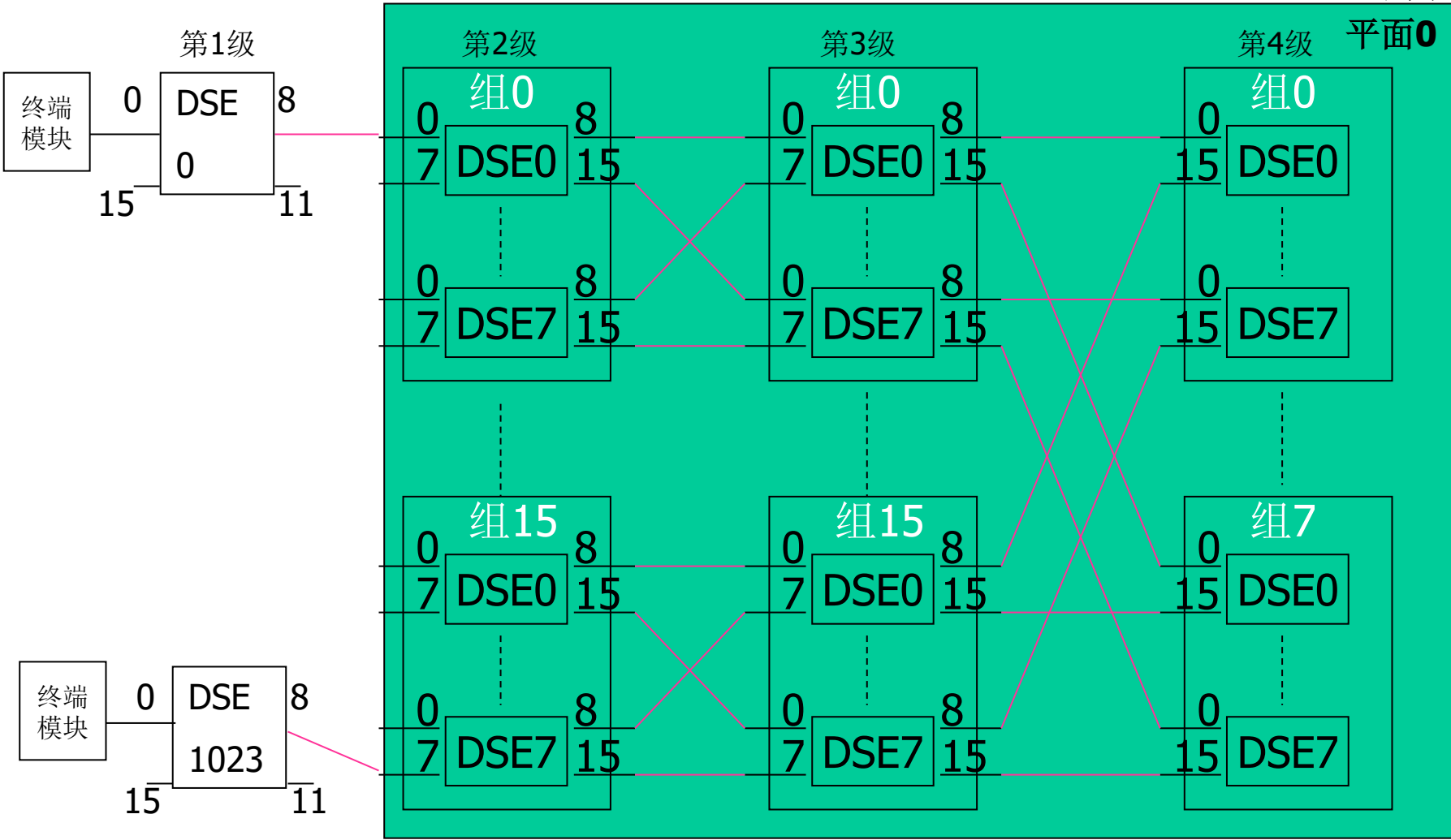
# 总线单元级连交换网络

平面3

平面2

平面1

平面0



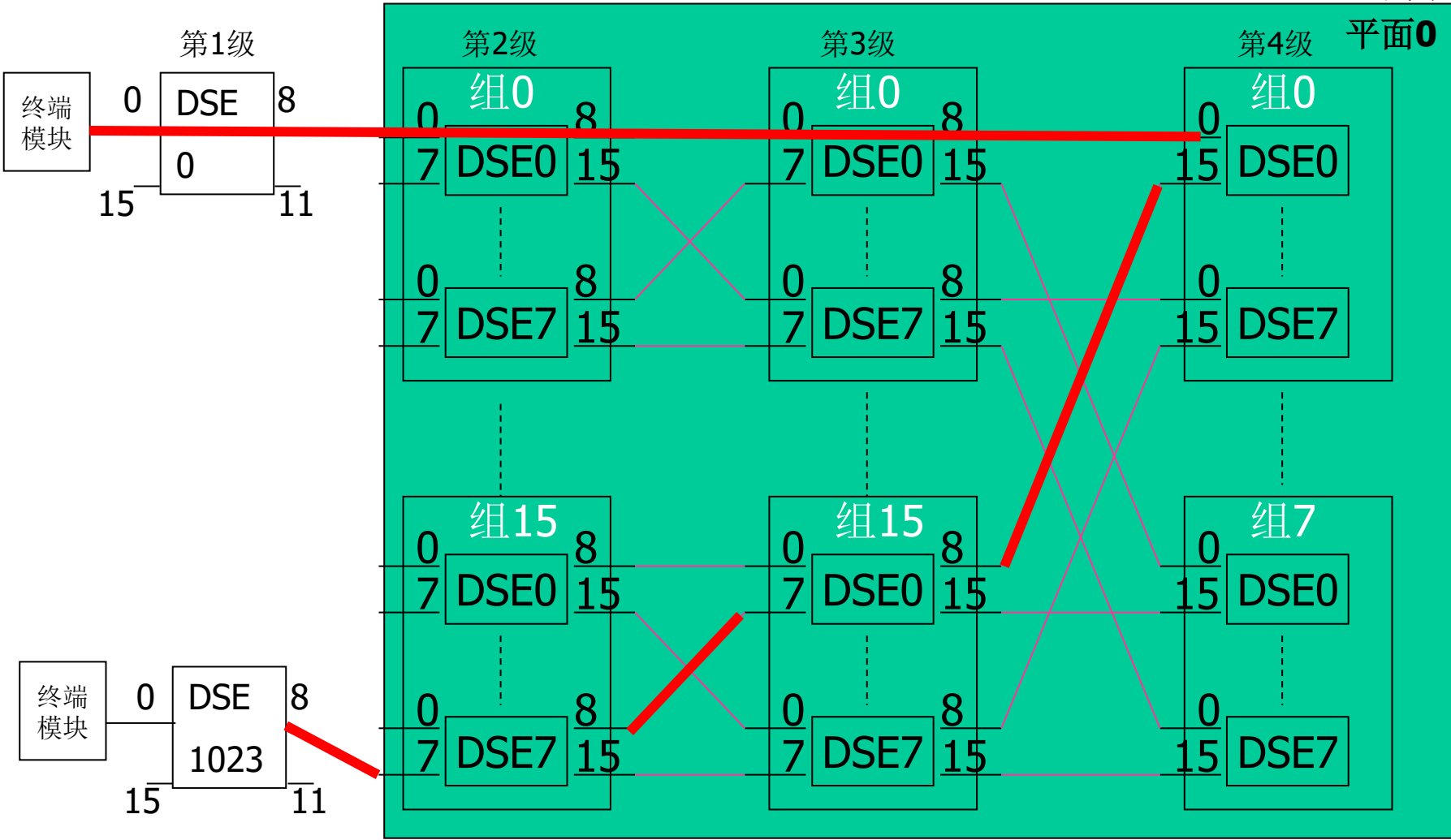
# 总线单元级连交换网络

平面3

平面2

平面1

平面0



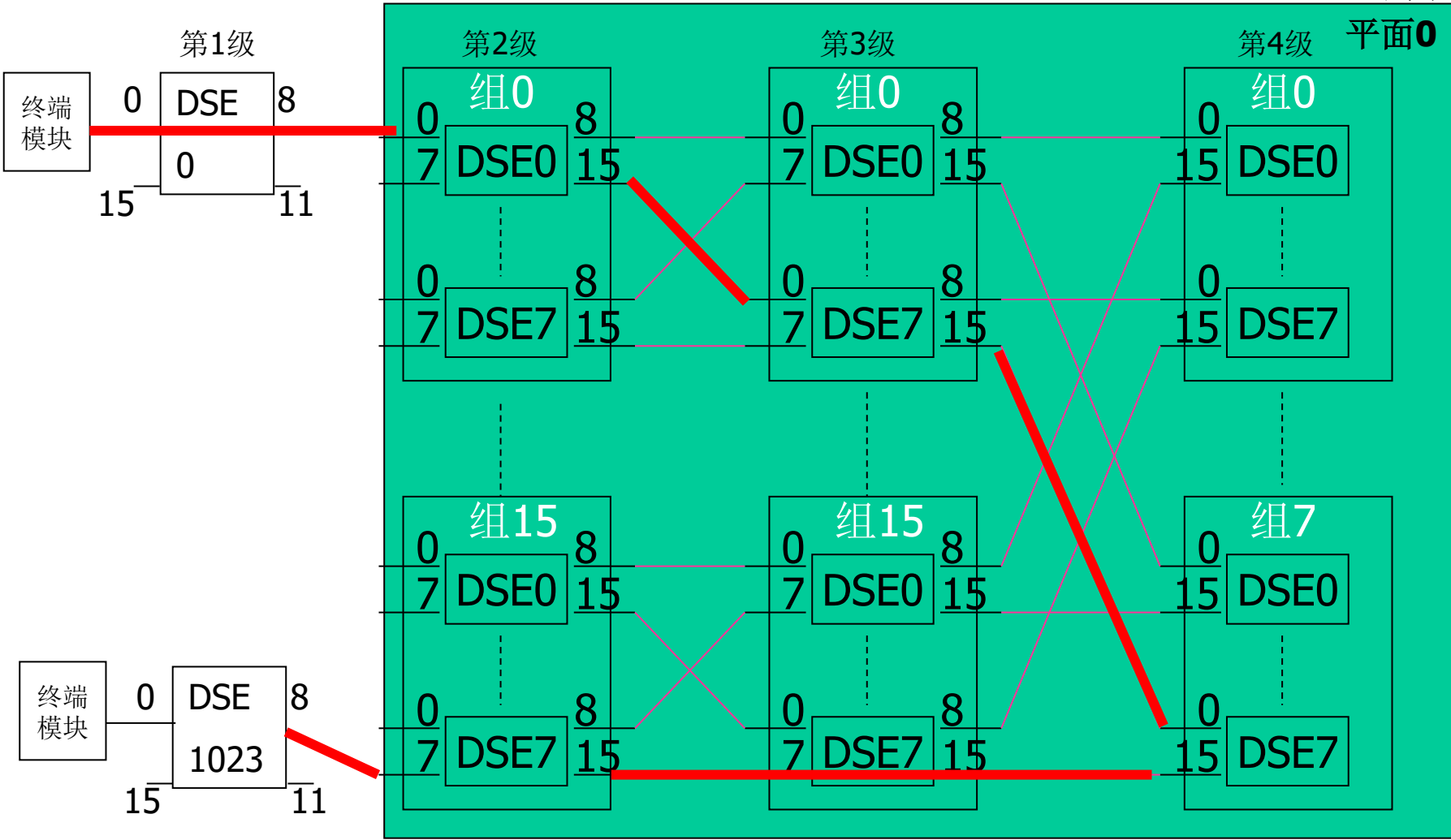
# 总线单元级连交换网络

平面3

平面2

平面1

平面0



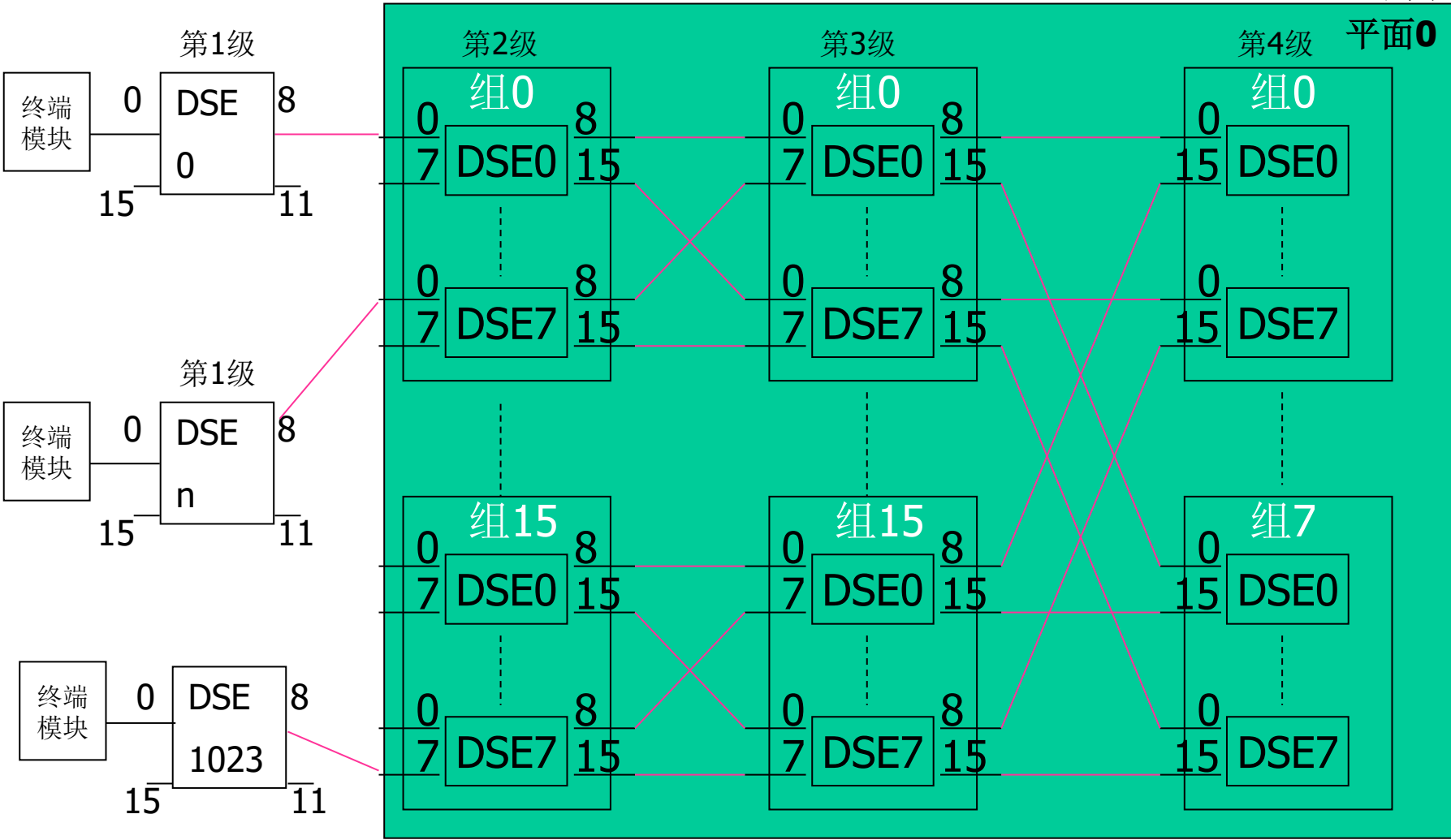
# 总线单元级连交换网络

平面3

平面2

平面1

平面0



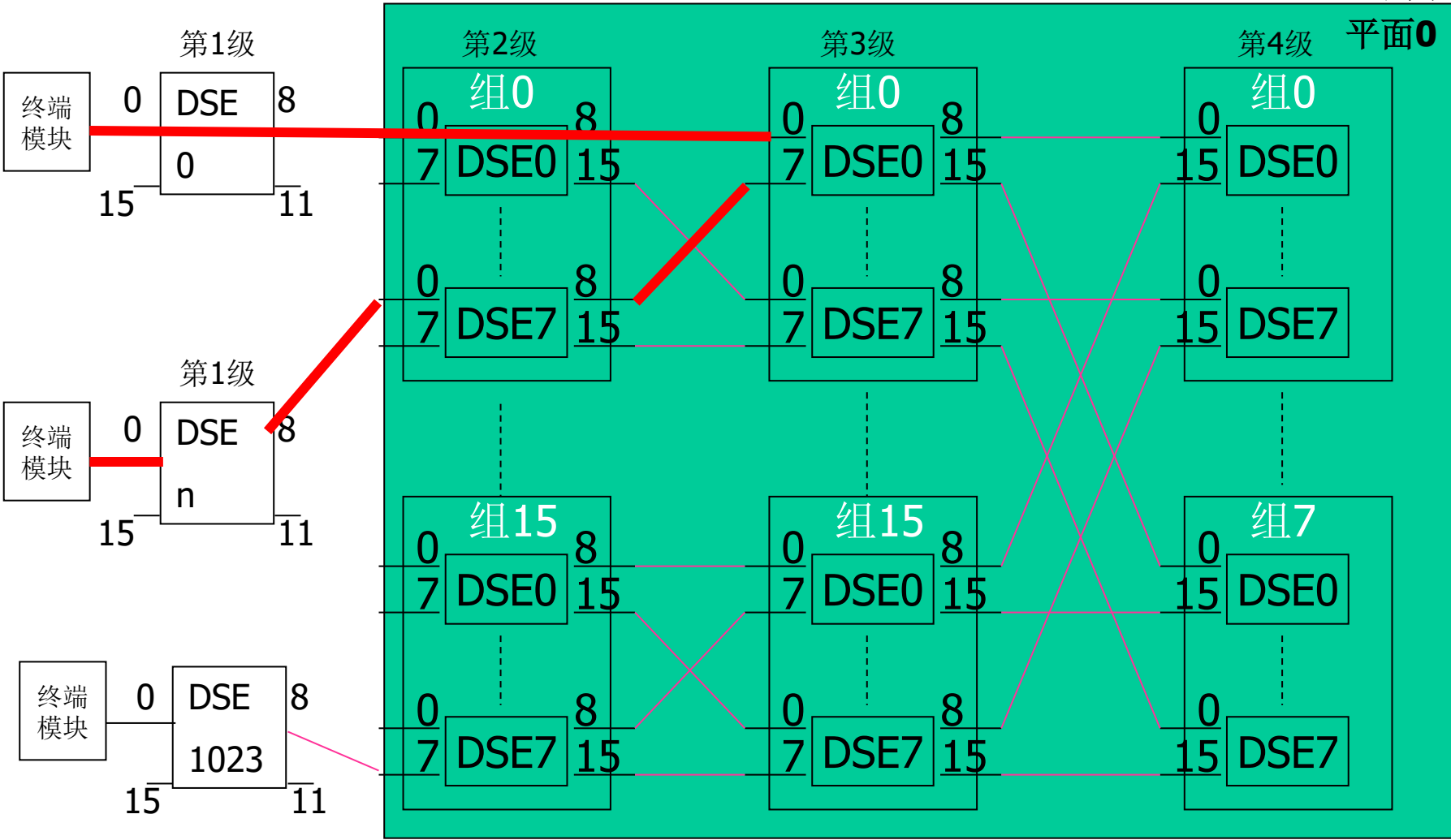
# 总线单元级连交换网络

平面3

平面2

平面1

平面0





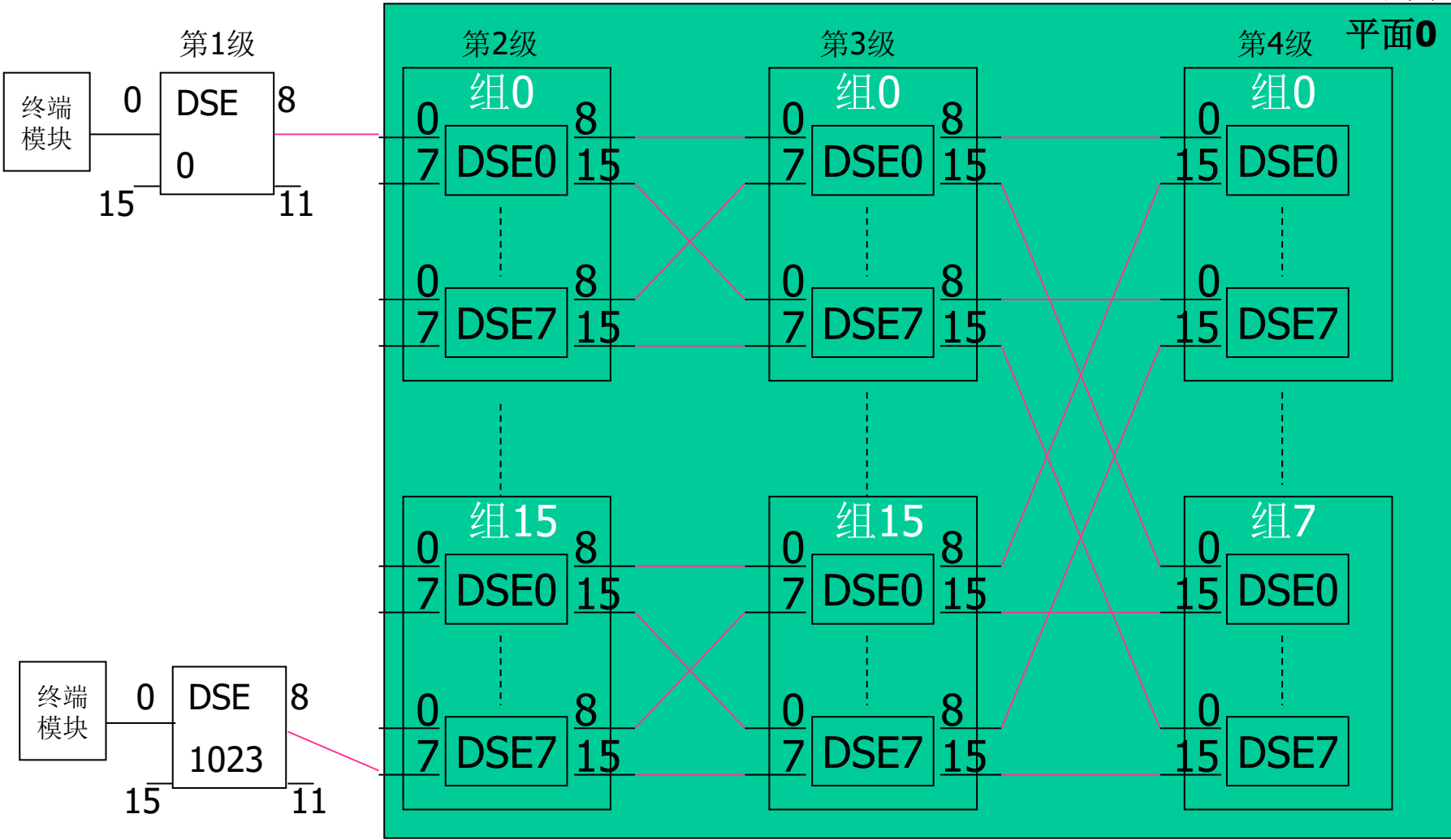
# 总线单元级连交换网络

平面3

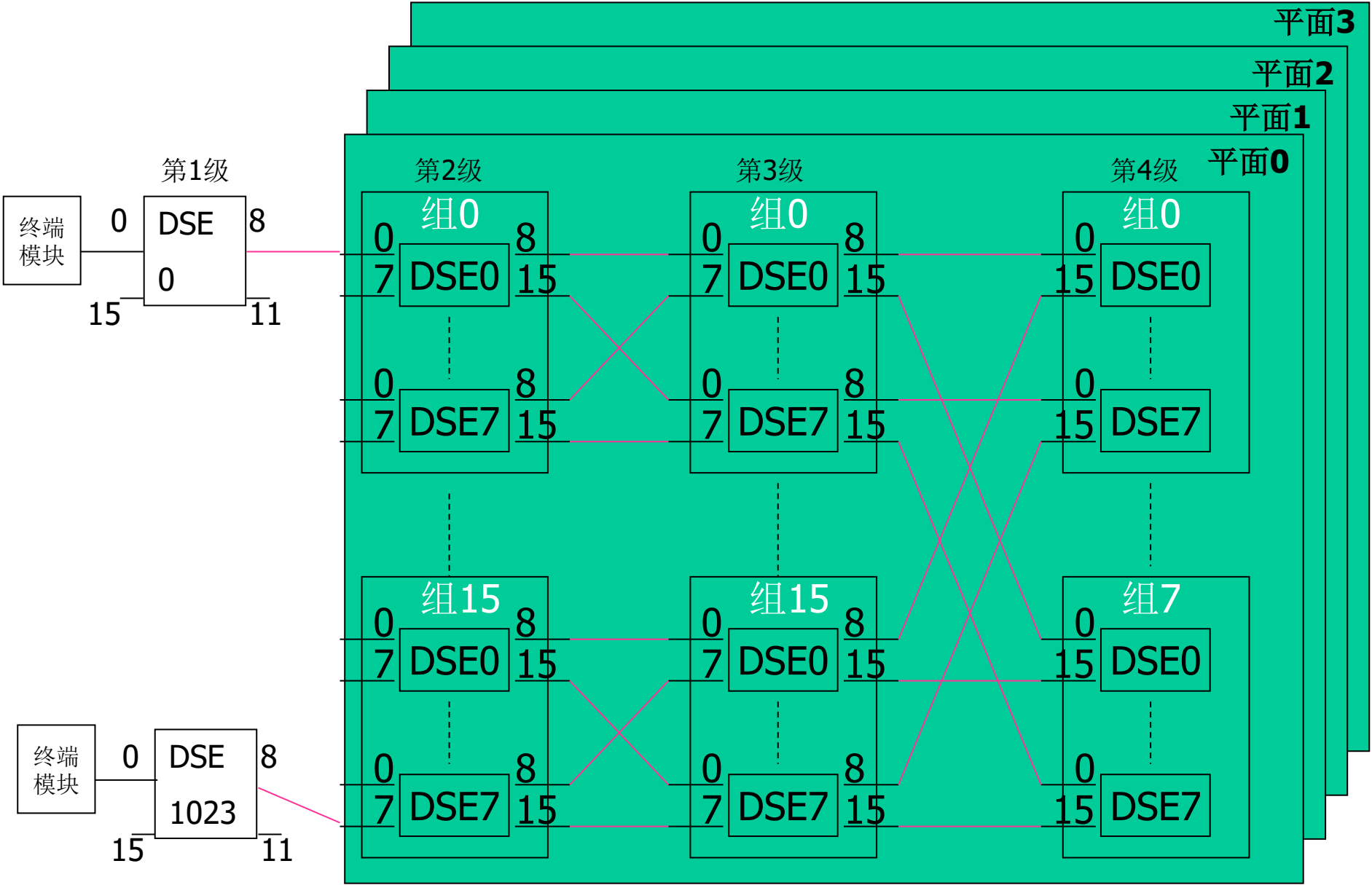
平面2

平面1

平面0



# 总线单元级连交换网络





# 交换设备---性能评价

---

- 支持业务的广泛性
  - 多速率交换方面
  - 多点交换方面
  - 多媒体业务方面
- 交换系统的容量
  - 主要体现在交换单元的容量上。交换单元的容量等于所有入线可同时送入的总信息量。
- 交换时延
  - 基本传输时延
  - 附加时延：排队时延，处理时延等



# 交换设备---性能评价

---

- 交换差错率
  - 丢失信息的概率
  - 错误交换的概率
  - 信息被损伤的概率
- 连接阻塞及呼损
  - 内部阻塞
  - 出线冲突



# 交换设备性能评价

---

- 接口单元
- 交换单元
- 控制单元
- 支持业务的广泛性
- 交换系统的容量
- 交换时延
- 连接阻塞
- 交换差错率
- 系统可靠性
- 处理能力



# 小结

- 交换设备、交换网络、交换单元
- 交换单元的描述方法
- 三种基本交换单元的结构、特性、工作原理
- **Banyan, CLOS, TST**交换网络的构造方法和特点
- 几个概念
  - 连接、连接方式
  - 点对点、同发、广播
  - 空分交换、时分交换
  - 出线冲突、内部阻塞
  - 严格无阻塞、可重排无阻塞、广义无阻塞
- 课外扩展
  - 各类交换机的交换网络、时间敏感网络...