



第二章 交换网络(2)

袁 泉

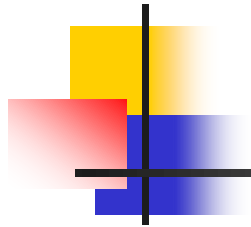
yuanquan@foxmail.com

2023年3月6日



提要

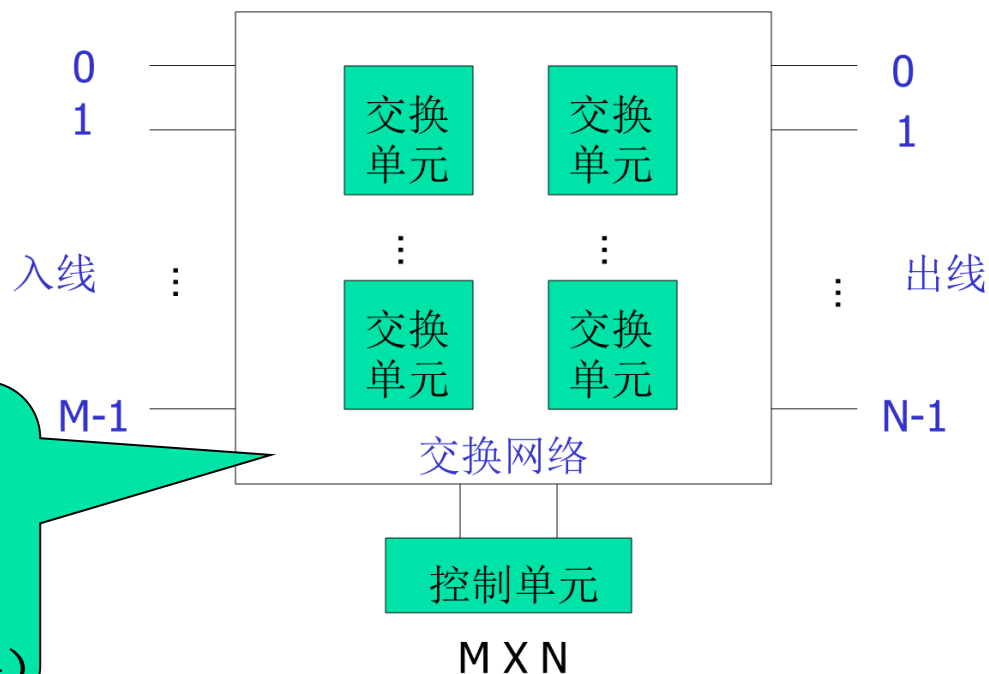
- 1. 交换网络的基本概念
- 2. 交换网络的结构和特点（重点）
 - CLOS
 - Benes
 - Banyan
 - DSN
 - TST
- 3. 交换设备的性能评价



1. 交换网络的基本概念

回顾：交换网络三要素

- 交换网络是由若干个交换单元按照一定的拓扑结构和控制方式构成的网络
- 交换网络的三个基本要素是：**交换单元**、不同交换单元间的**拓扑连接**和**控制方式**

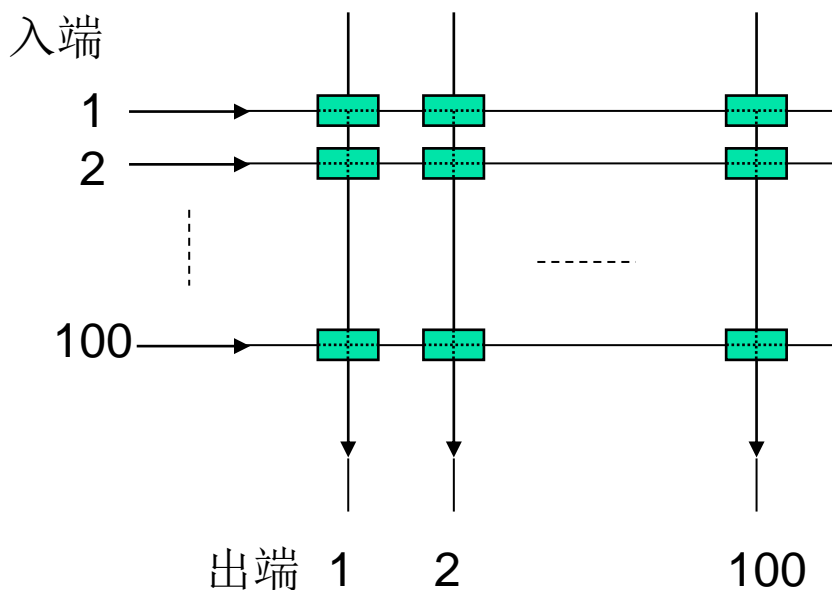


多级交换网络的拓扑结构可用三个参数来说明：
每个交换单元的容量
交换单元的级数
交换单元间的连接通路（链路）

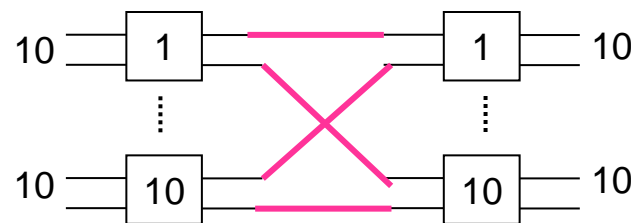
交换网络的基本概念

■ 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



采用基本开关阵列构造的**100*100**交换网络，交叉点数量为**100*100**

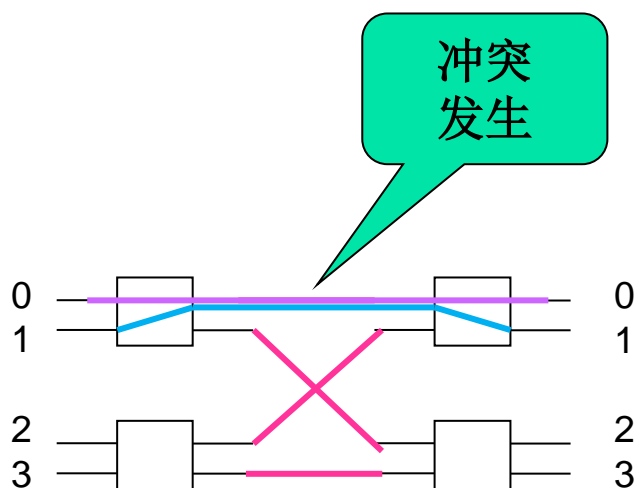


采用二级级连方式构造的**100*100**交换网络，交叉点数量为**10*10*10*2**

交换网络的基本概念

■ 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
- 但是可能出现内部阻塞!



4*4交换网络

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”



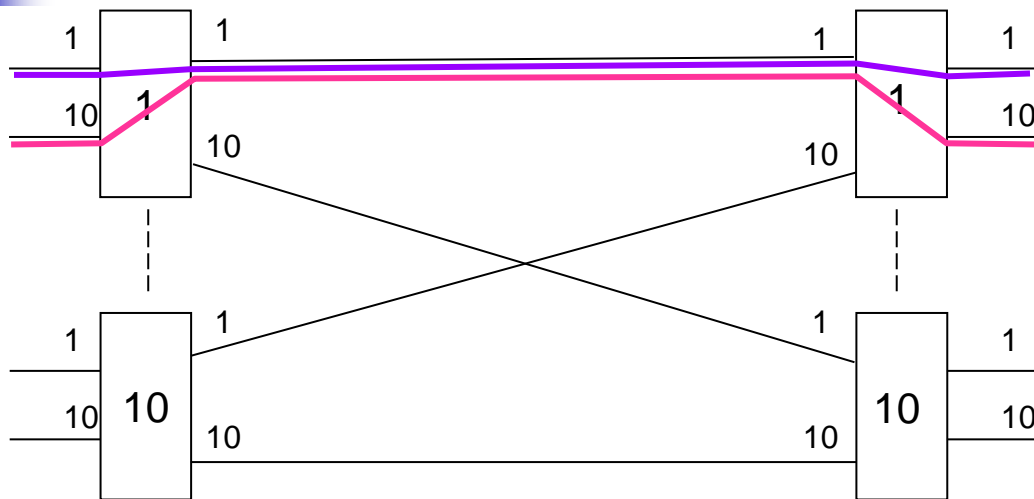
交换网络的基本概念

■ 无阻塞网络

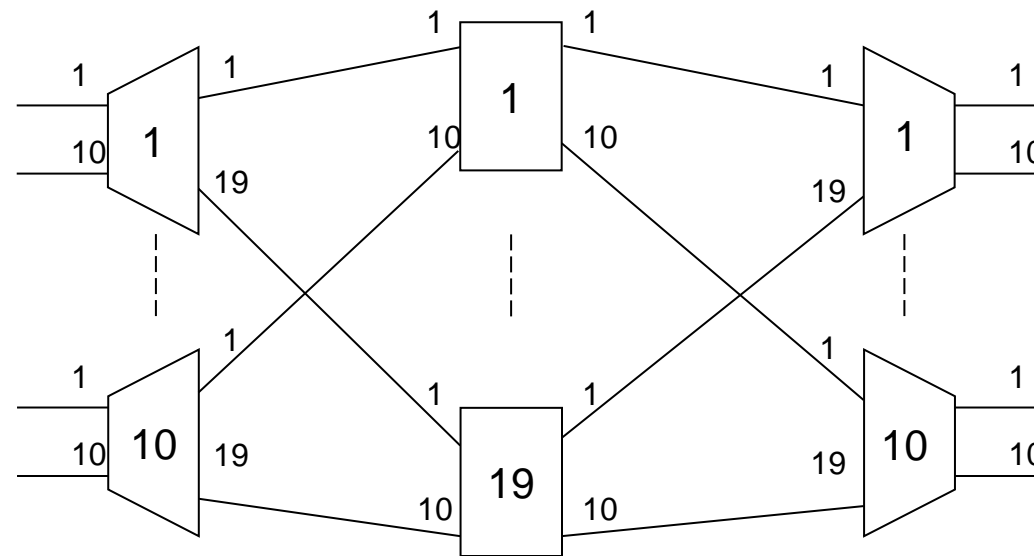
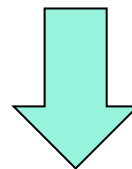
- **严格无阻塞网络**：只要**入端与出端空闲时**，就可以通过交换网络建立一个连接
- **可重排无阻塞网络**：只要**入端与出端空闲时**，通过对已有连接的重排，就可以通过交换网络建立一个连接
- **广义无阻塞网络**：一个给定的网络存在着固有的阻塞可能，但又可能存在着一种**精巧的选路方法**，使得所有的阻塞均可避免，而**不必重新安排**网络中已建立起来的连接

严格无阻塞（例）

100*100交换网络，
是否会出现内部阻塞？



交换单元间路径
单一，有阻塞！



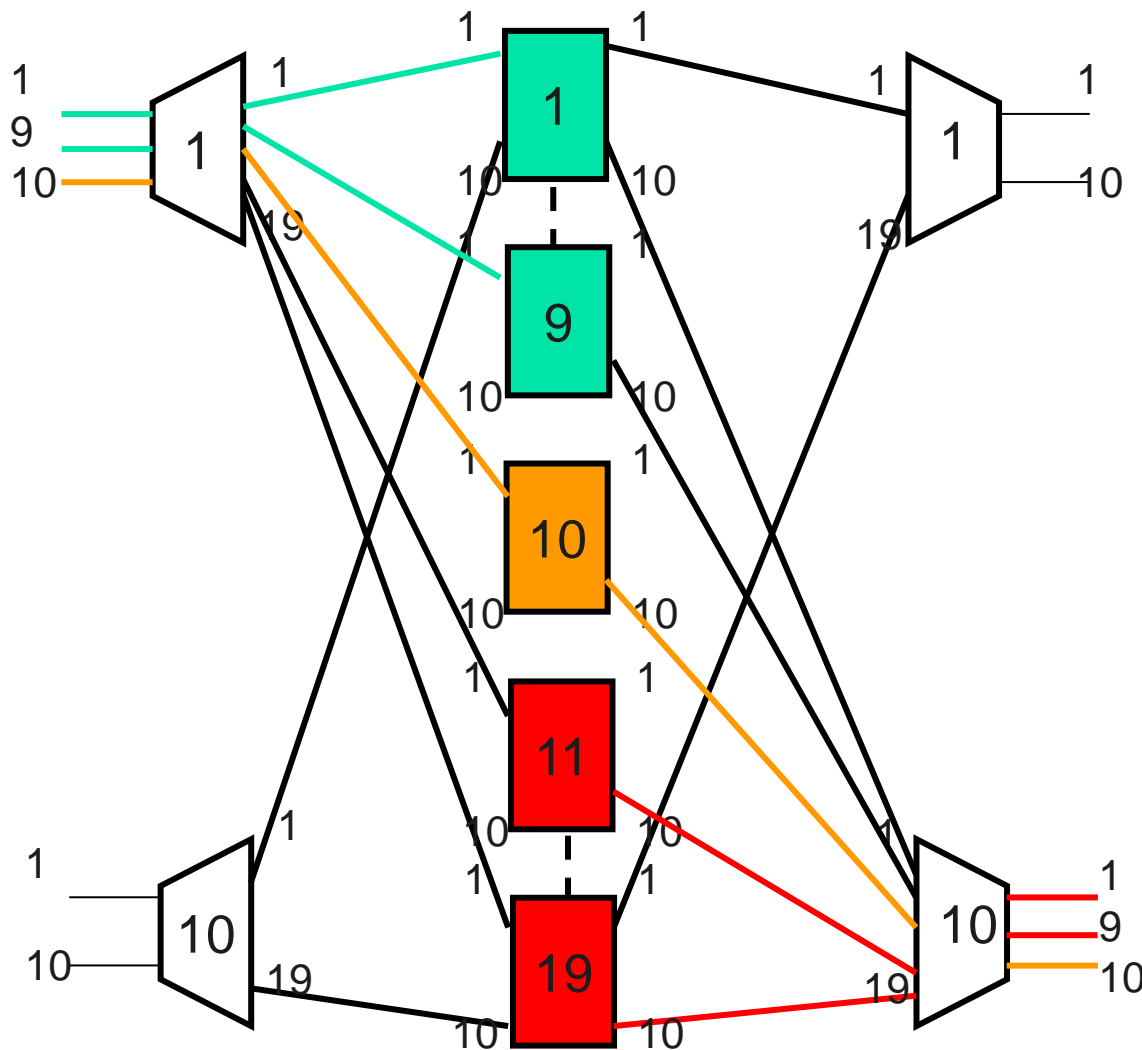
增加一级，可以
扩充交换单元间的
路径，能否解决
内部阻塞？

严格无阻塞（例）

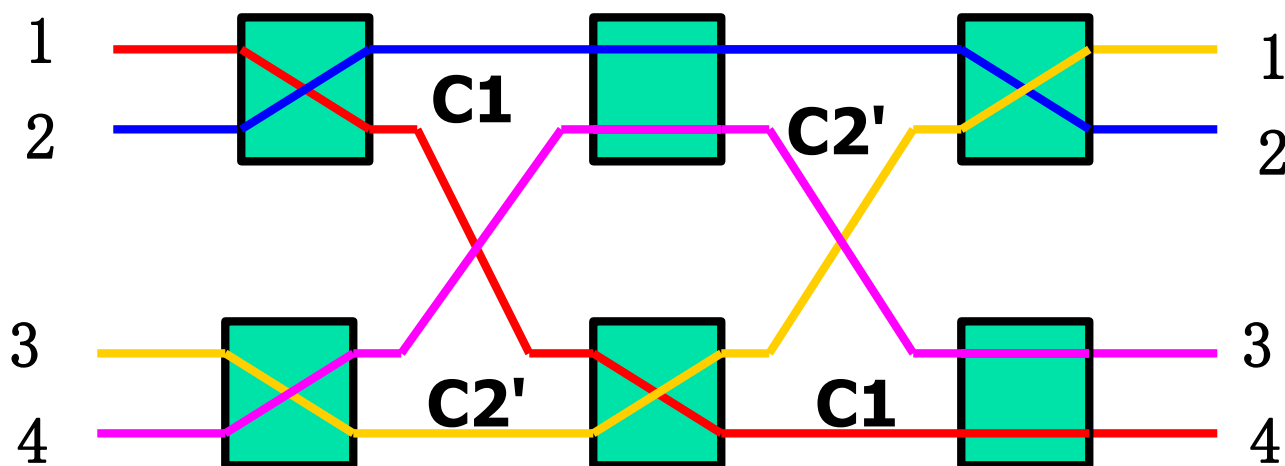
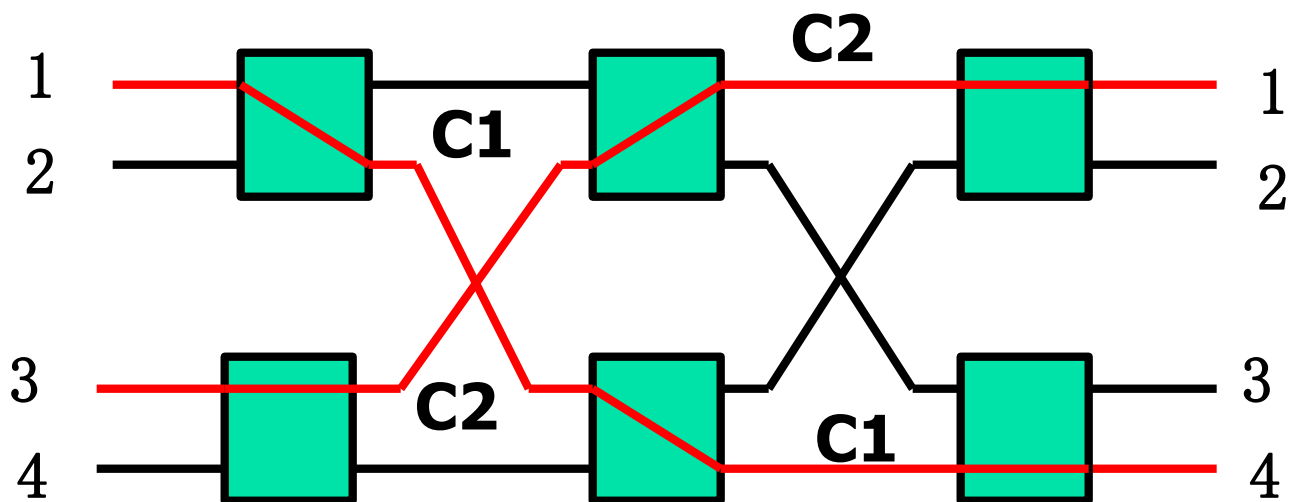
结论：增加级数，可以消除阻塞！
问题：中间级的数量？

■ 极限情况

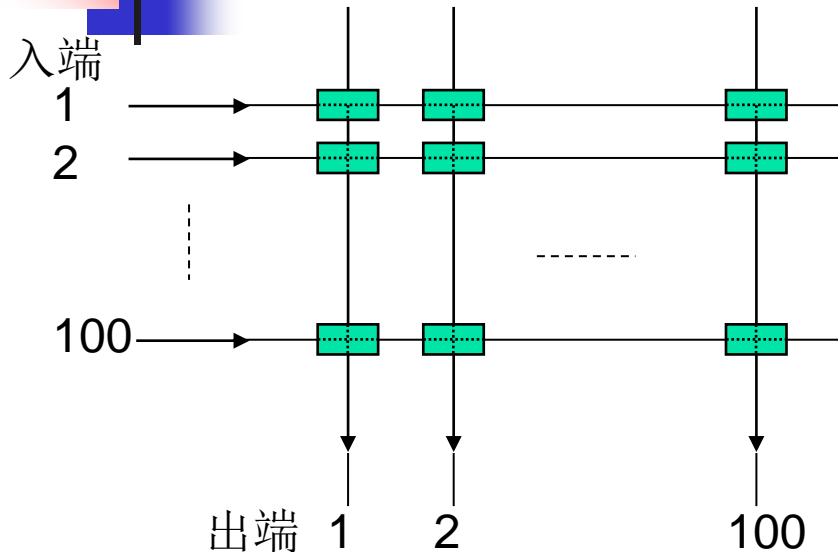
- 入口级I的9条入线都连接，占用9个中间级的9条入线
- 出口级J的9条出线都连接，占用另9个中间级的9条出线
- 入口级I的10号入线 → 出口级J的10号出线，占用最后1个中间级



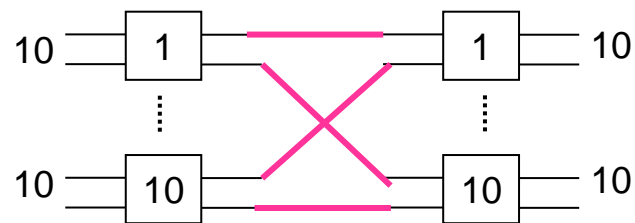
可重排无阻塞（例）

$$\begin{bmatrix} 3, 2, 4, 1 \\ 1, 2, 3, 4 \end{bmatrix}$$


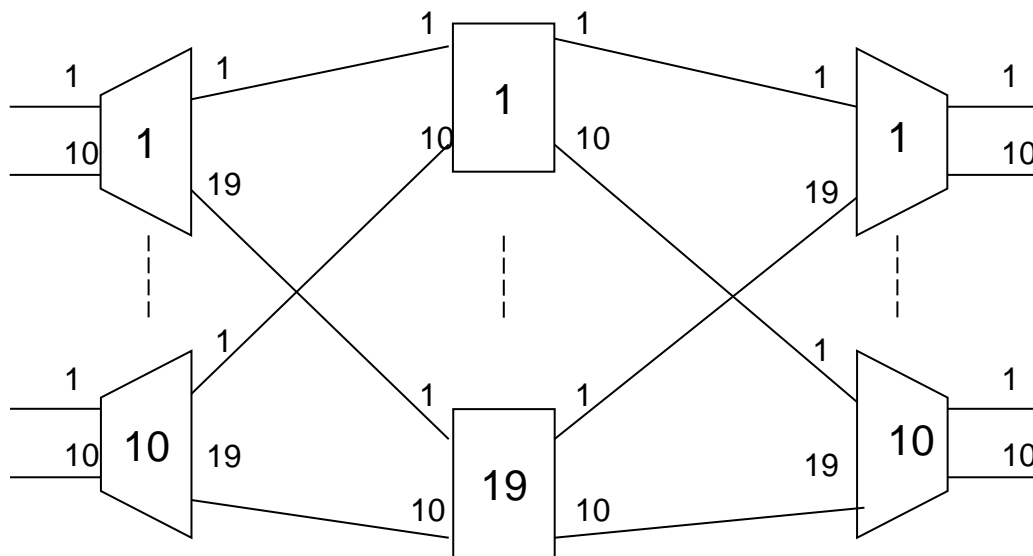
理解多级网络的意义



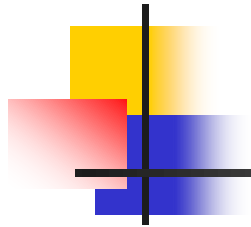
采用基本开关阵列构造的**100*100** 交换网络
需要开关个数**10000**，**无内部阻塞**



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**

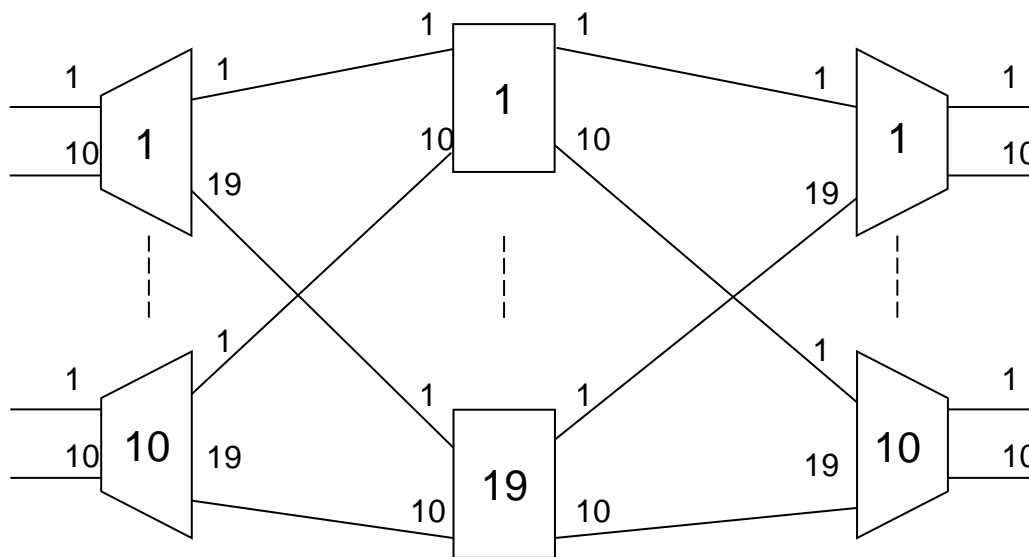


2. 交换网络的结构和特点

CLOS、Benes、Banyan、DSN、TST

CLOS网络

- 为了减少交叉点总数而同时具有严格的无阻塞特性，CLOS C.很早就提出一种多级结构，推出了严格无阻塞的条件，这就是著名的CLOS网络



3级对称严格无阻塞CLOS网络

CLOS网络的定义

■ 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

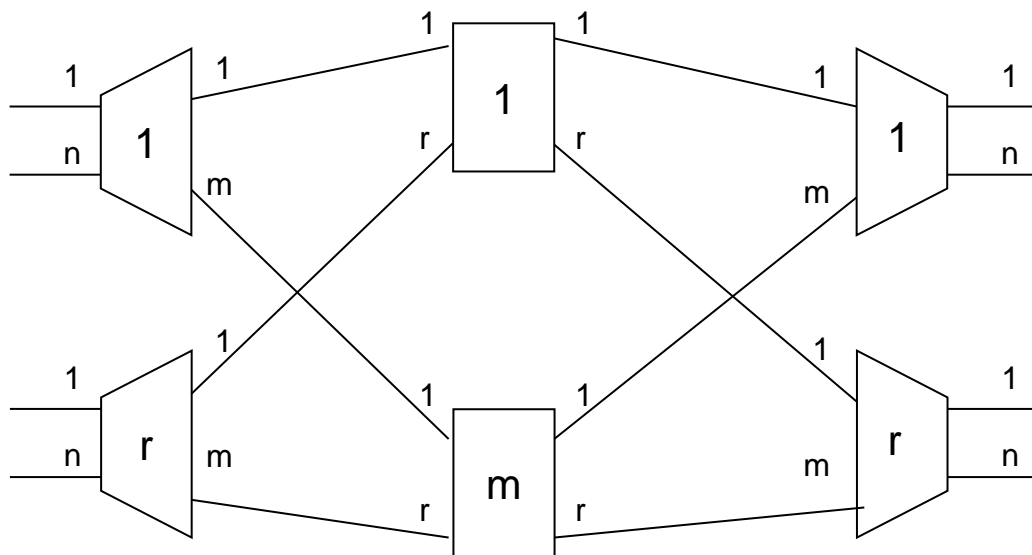
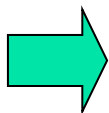
- 一个三级互连网络, 若满足: 三级交换节点数为 r_1 、 r_2 、 r_3 , 且 $n_1 = r_2$, $m_2 = r_1$, $n_2 = r_3$, $m_3 = r_2$, 则称为三级CLOS网络, 用五元组 $(m_1, n_3, r_1, r_2, r_3)$ 表示
- 目标: 既减少交叉开关数, 又要做到无阻塞

CLOS网络的定义

■ 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

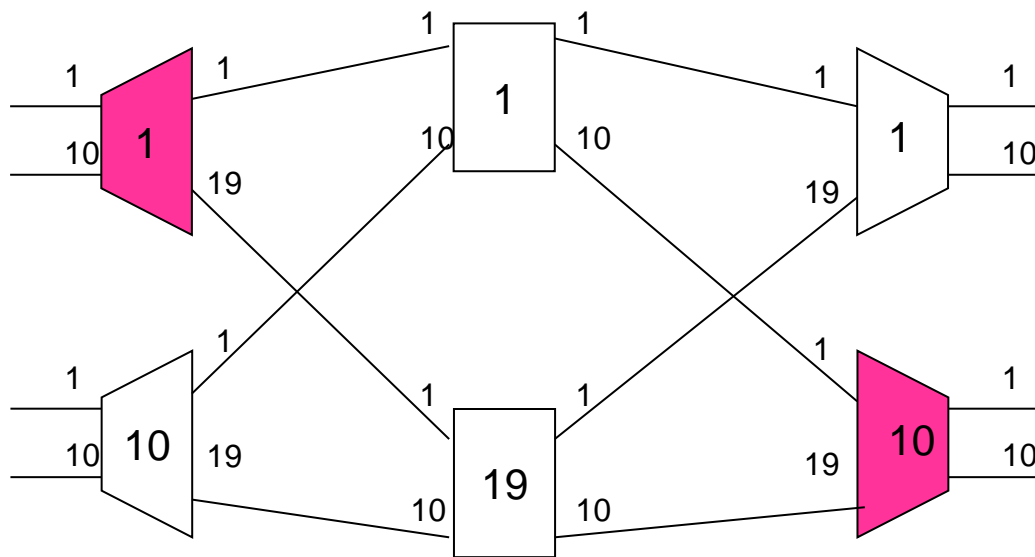
$m_1 = n_3 = n$
 $r_1 = r_3$
对称CLOS网络



CLOS网络的无阻塞条件

■ 严格无阻塞条件

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

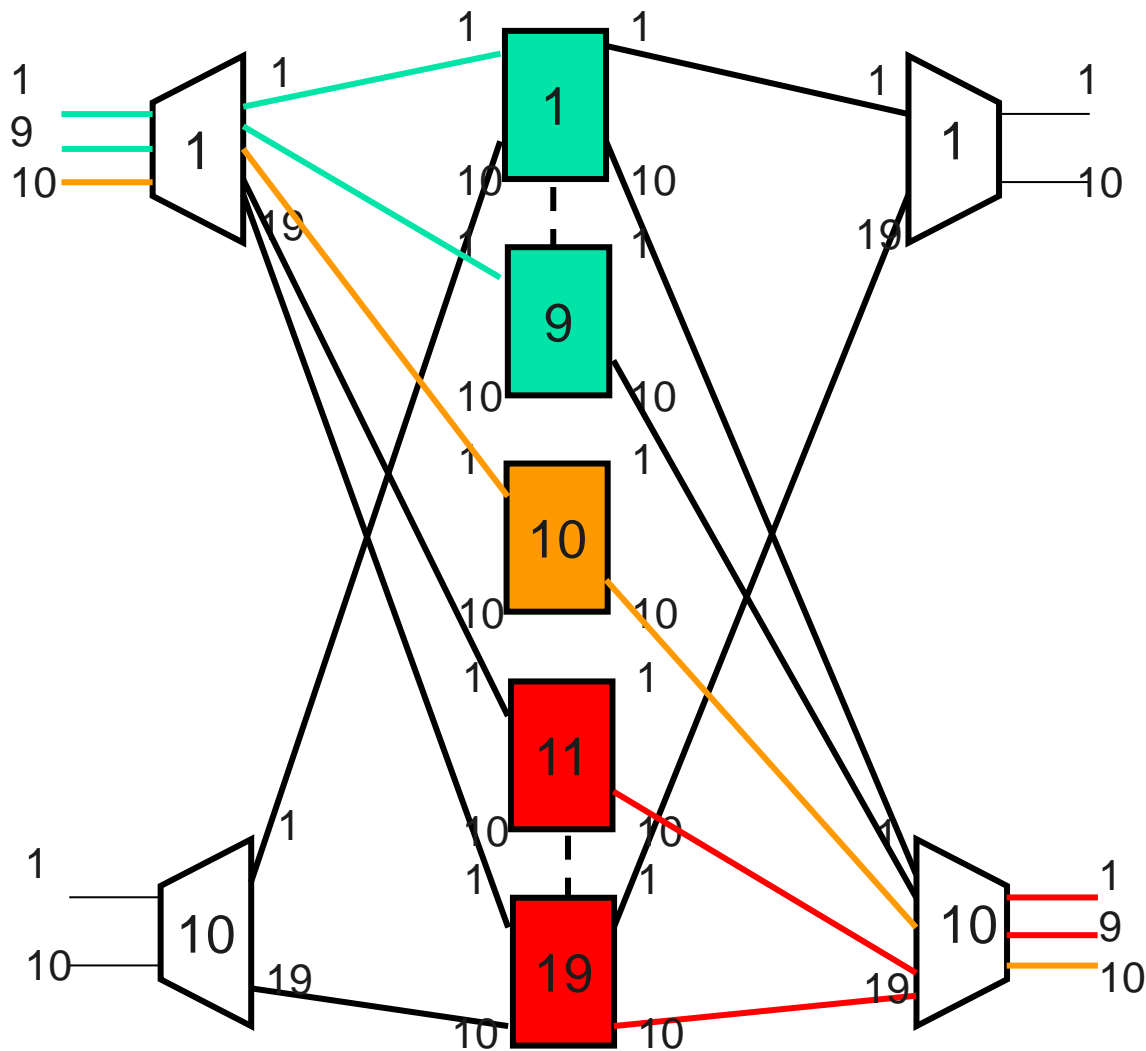


CLOS网络的无阻塞条件

$$r_2 \geq m_1 + n_3 - 1$$

■ 严格无阻塞理解

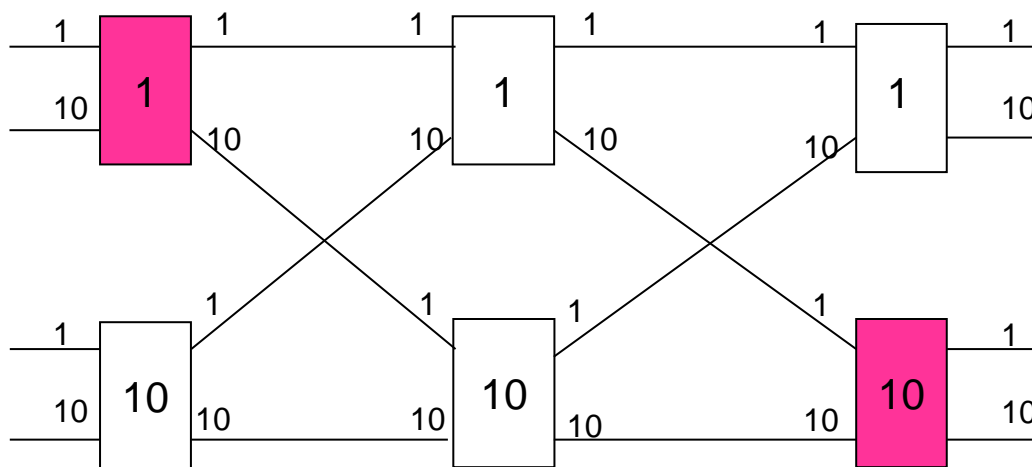
- 入口级I的9条入线都连接，占用9个中间级的9条入线
- 出口级J的9条出线都连接，占用另9个中间级的9条出线
- 入口级I的10号入线 → 出口级J的10号出线，占用最后1个中间级



CLOS网络的无阻塞条件

■ 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 $\leq \min (r_1 , r_3) - 1$ (Paull's theorem)

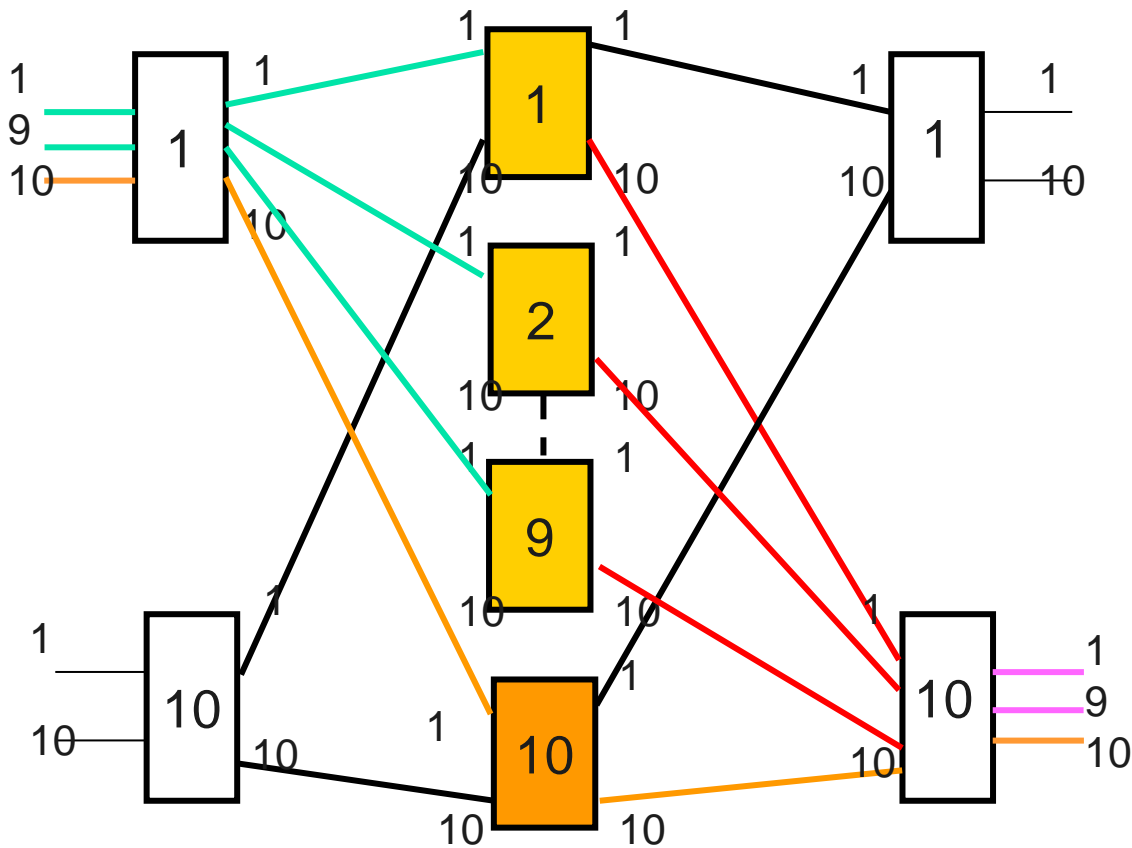


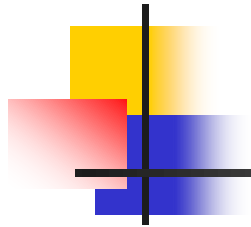
CLOS网络的无阻塞条件

$$r_2 \geq \text{Max}(m_1, n_3)$$

■ 可重排无阻塞理解

- 入口级I的9条入线都连接，占用9个中间级的9条入线
- 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
- 入口级I的10号入线 → 出口级J的10号出线，占用最后1个中间级
- 若I和J占用的中间级不重复，则通过重排调整成重复的





2. 交换网络的结构和特点

CLOS、Benes、Banyan、DSN、TST

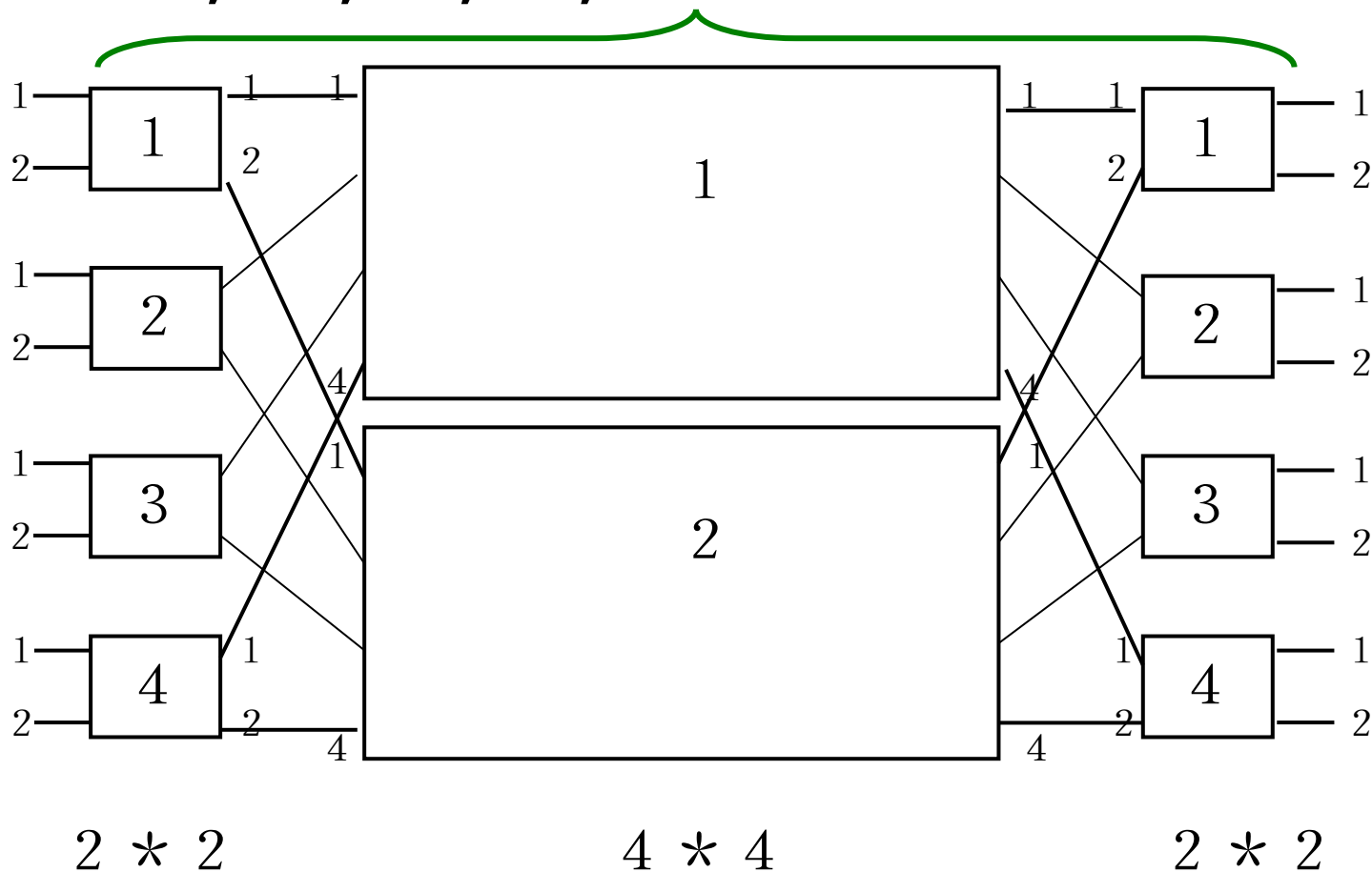


CLOS网络——递归构造

- 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：若入口级用入线=2的单元，出口级用出线=2的单元，如何构造8*8的可重排无阻塞CLOS网络？

CLOS网络——递归构造

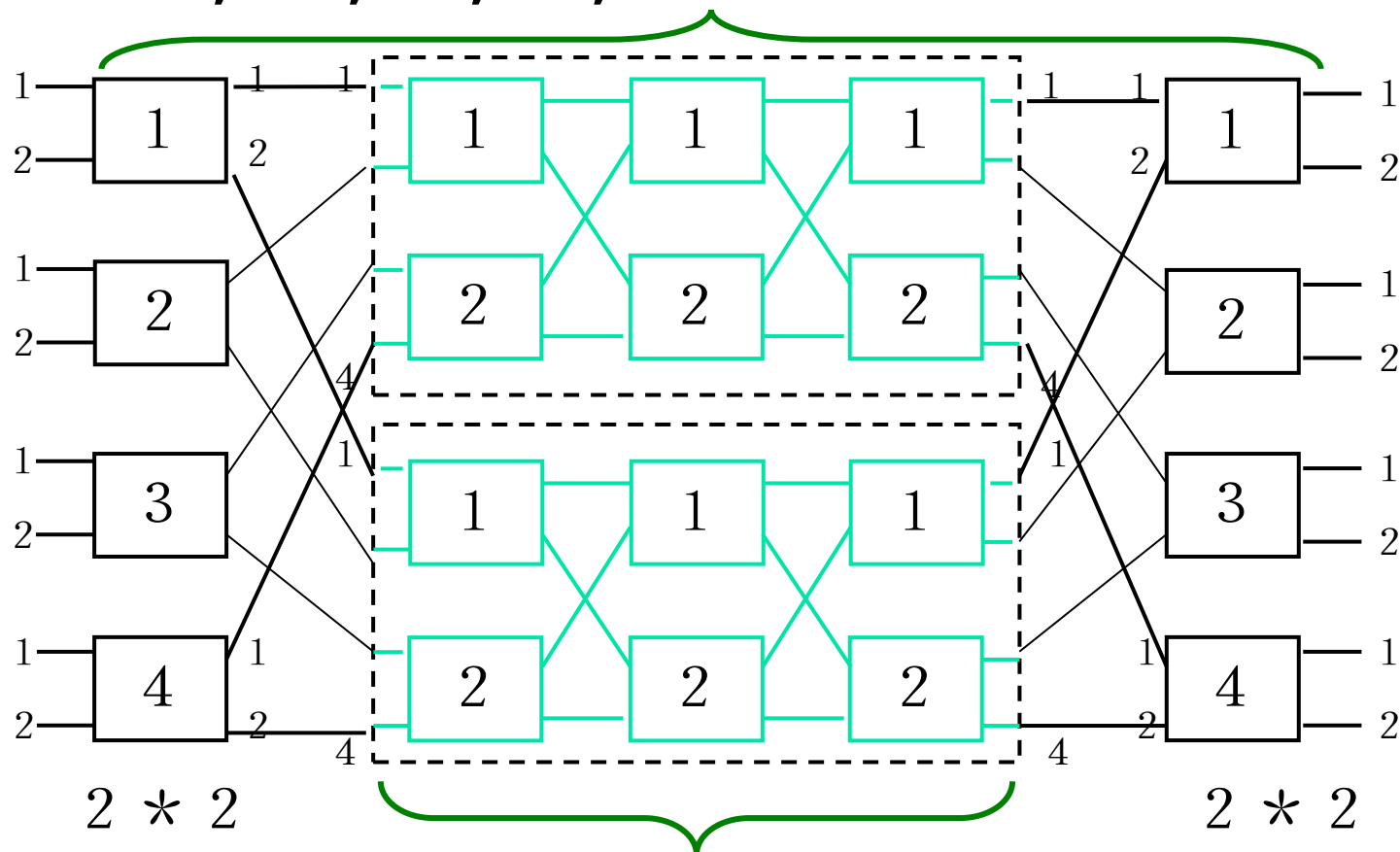
$$(m1, n3, r1, r2, r3) = (2, 2, 4, 2, 4)$$



CLOS网络——递归构造

Benes网络

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



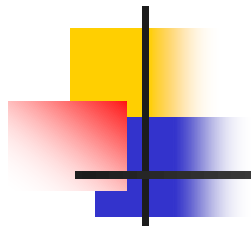
$$(m_1, n_3, r_1, r_2, r_3) = (2, 2, 2, 2, 2)$$



Benes网络的特点和构造

- Benes网络是多通路网络，具有可重排无阻塞的特点
- Benes网络的构成有一定规律，使用 2×2 交换单元来构成 $N \times N$ Benes网络的方法为：

- ✓ 两侧各有 $N/2$ 个 2×2 交换单元，中间为两个 $N/2 \times N/2$ 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 2×2 交换单元为止



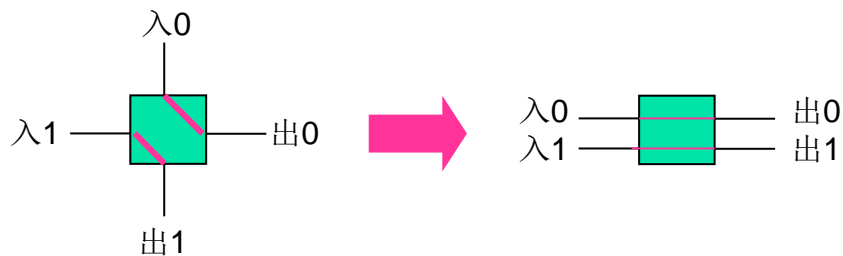
2. 交换网络的结构和特点

CLOS、Benes、**Banyan**、DSN、TST

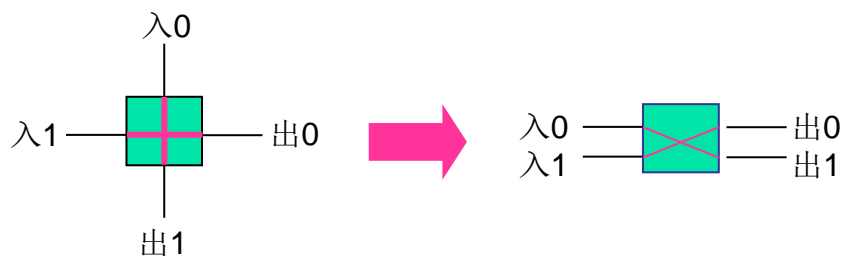
Banyan网络——基本单元

- 以**2*2交叉连接单元**为基本单元，可实现任意入线到任意出线的连接

平行连接
Bar状态



交叉连接
Cross状态

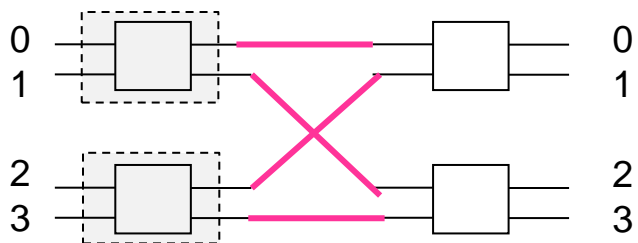


Banyan网络——多级互连

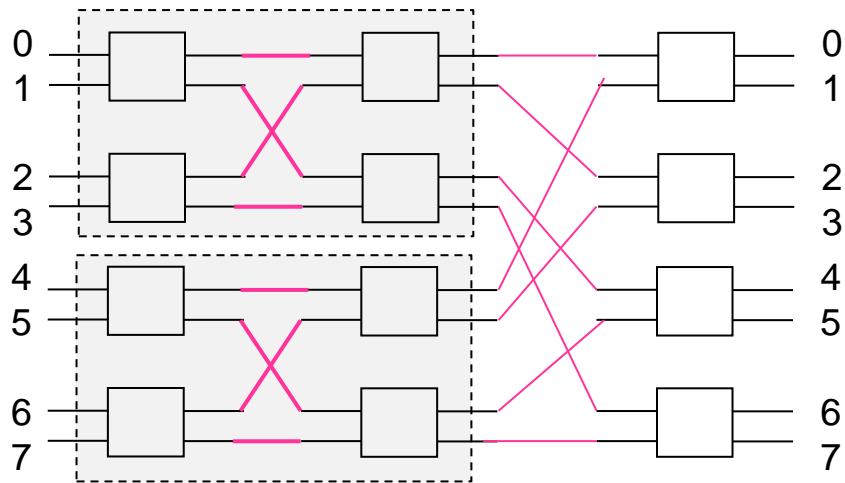
■ Banyan网络的结构

- 基本单元：2*2交叉连接单元

- 4*4交换网络



- 8*8交换网络



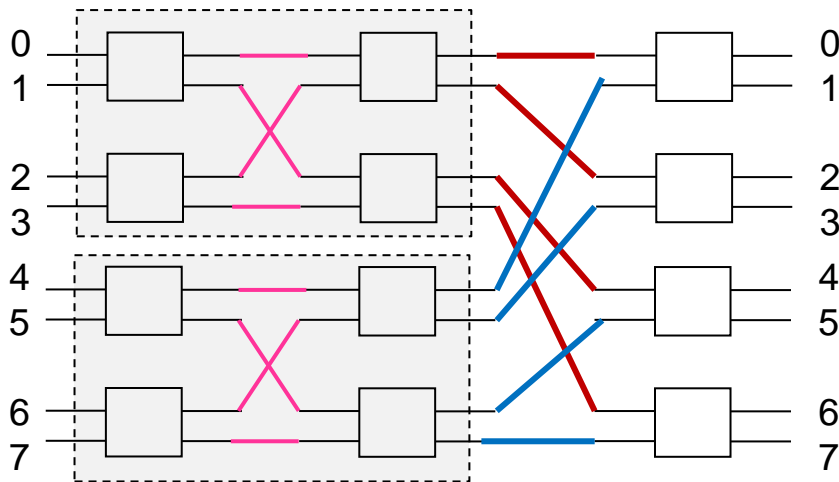
- 16*16交换网络？

Banyan网络——多级互连

- Banyan网络的结构：递归构造 $2N \times 2N$
 - 2个 $N \times N$ 的Banyan网络 + N 个 2×2 交换单元
 - 前一级 $N \times N$ 的Banyan网络的出线分别连接最后 N 个 2×2 交换单元的相同序号的入线

$N \times N$ 的Banyan网络：

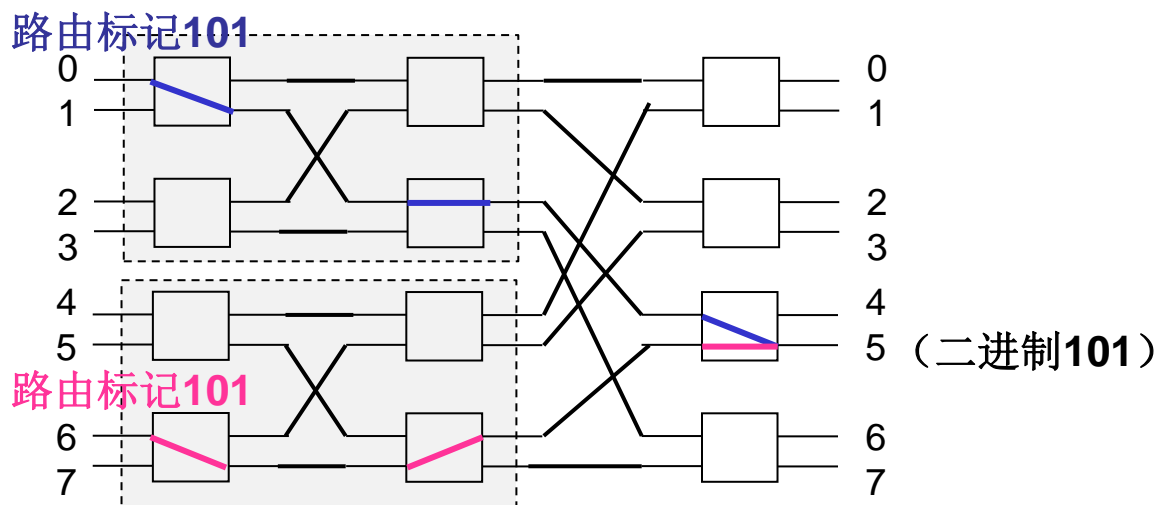
- ✓ 级数为 $\log_2 N$
- ✓ 每级 $\frac{N}{2}$ 个 2×2 交换单元



Banyan网络——性质（1）

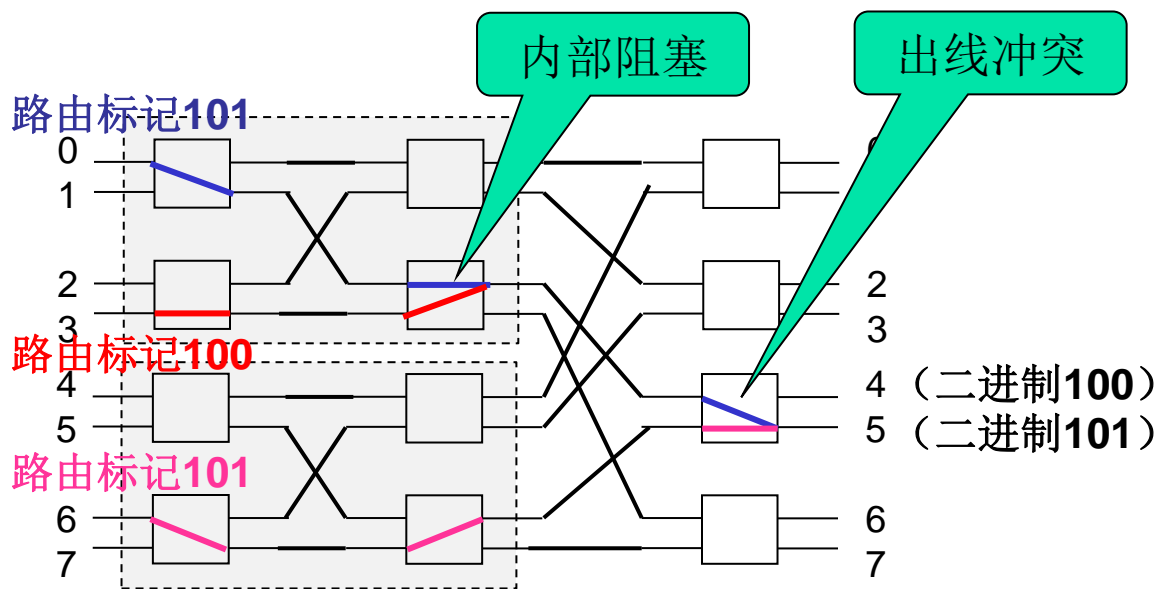
- **树型结构**：从Banyan的任一输入端口引出的一组通路形成了二叉树
- **自动选路**：给定出线地址（出端号的二进制码作为路由标记），不用外加控制命令，就可选到出线
- **唯一路径**：每个入线与出线之间有且只有一条路径

不需要控制方阵，适于统计时分复用信号的交换



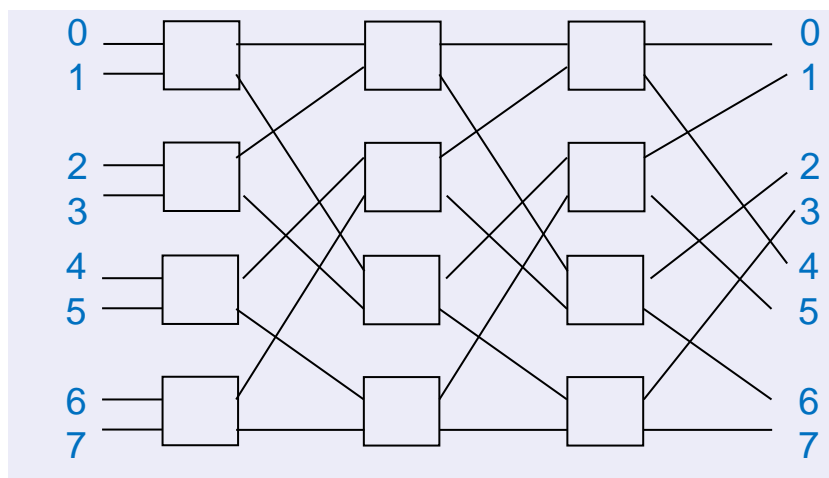
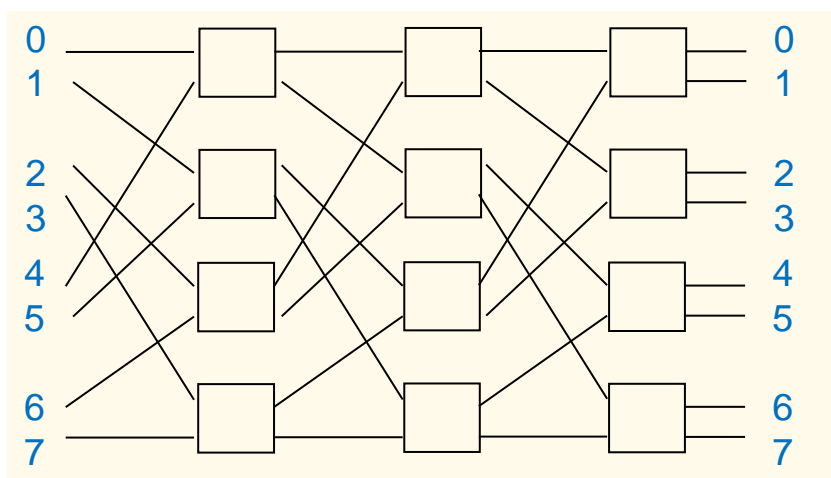
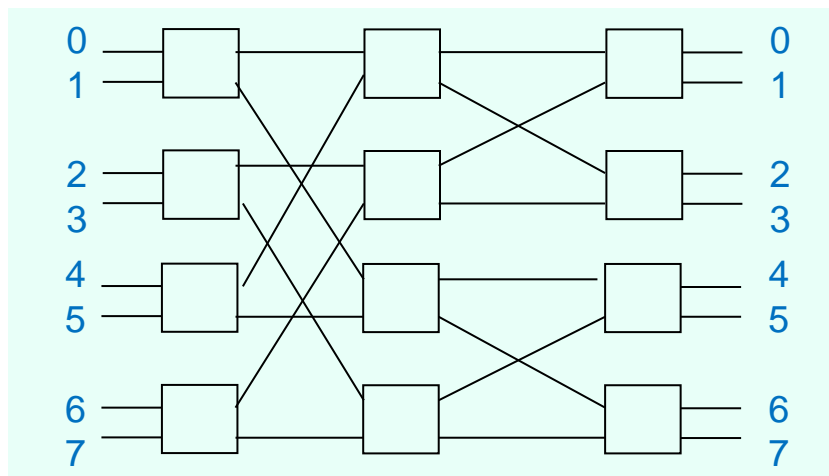
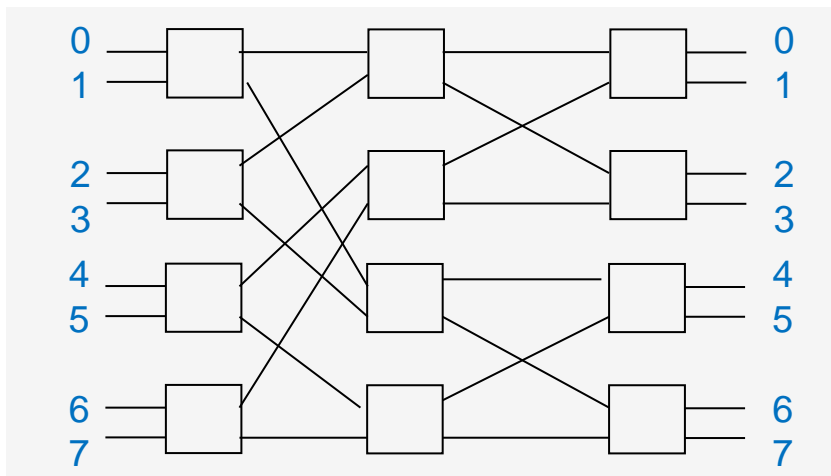
Banyan网络——性质（2）

- **内部阻塞**：Banyan是具有内部竞争的有阻塞网络，但存在多种解决内部阻塞的方法
- **出线冲突**：Banyan无法自动避免出线冲突



Banyan网络——性质（3）

■ 多种变形





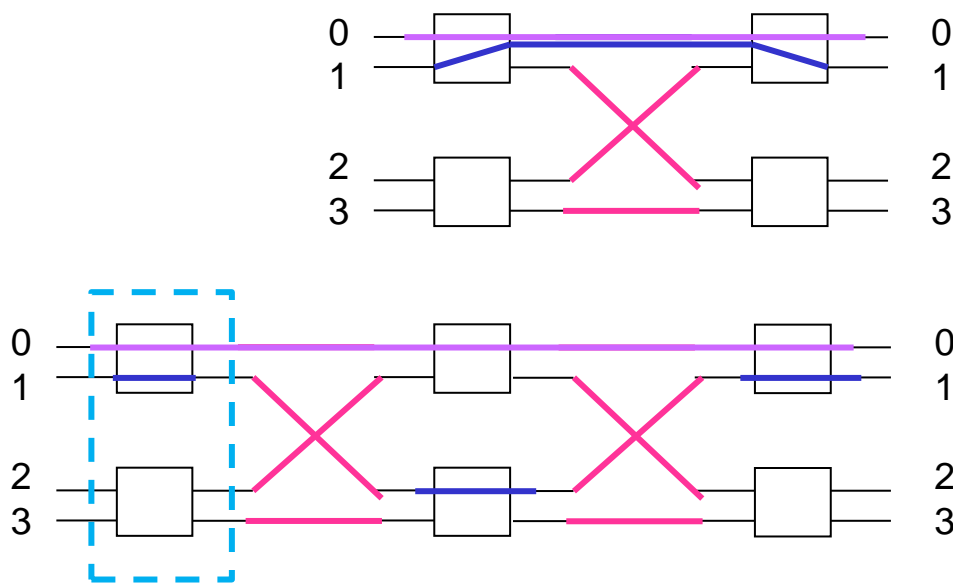
Banyan网络——解决内部阻塞的方法

- 构造多通路
 - 增长型Banyan
 - 扩展型Banyan
 - 膨胀型Banyan
 - 复份型Banyan
- 使用排序-Banyan网络

增长型Banyan

■ 增加级数

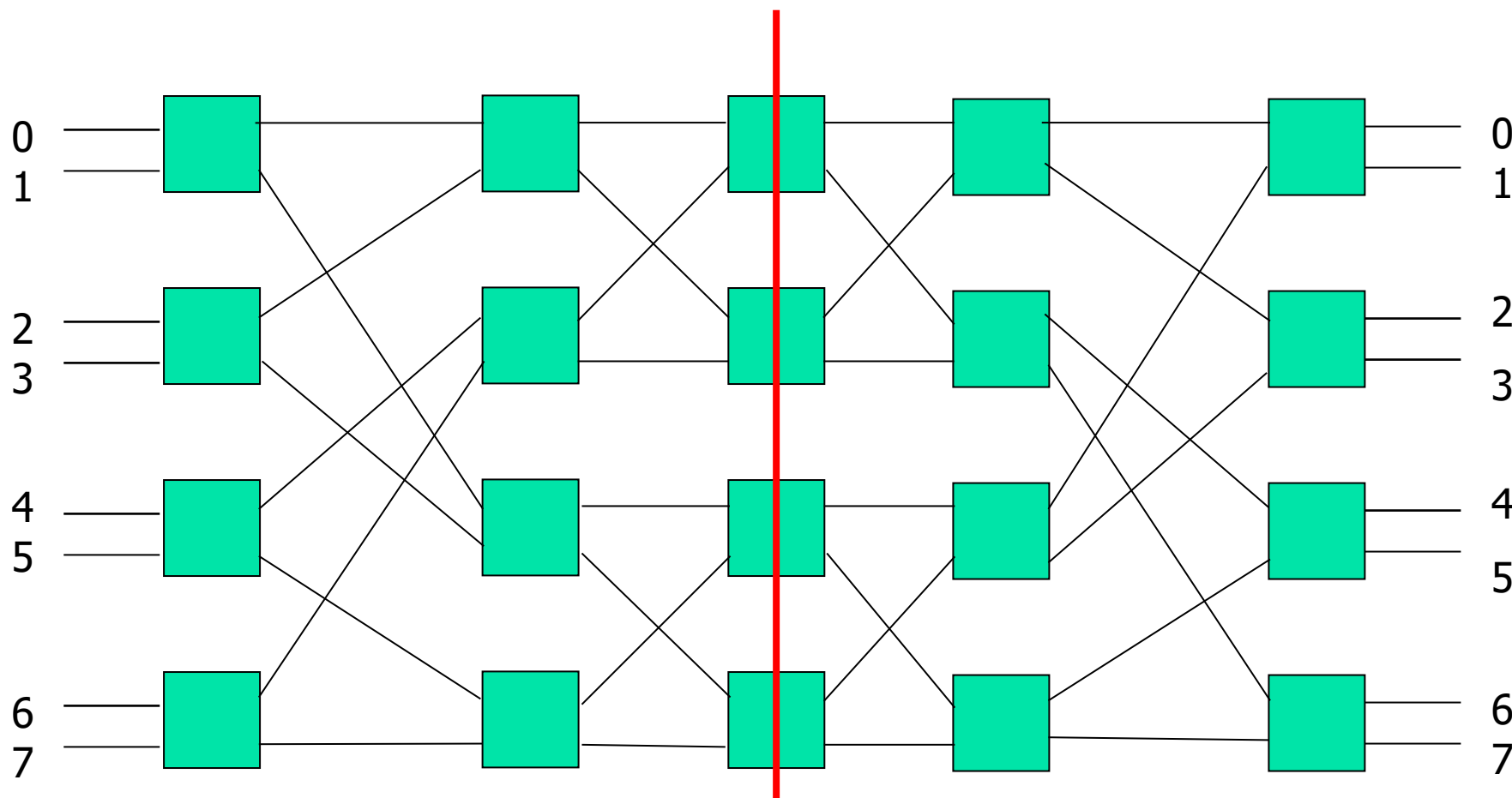
- 每增加1级，每个入端与每个出端之间的通路数就增加1倍
- 已有证明，若要完全消除 $N \times N$ 的Banyan网络的内部阻塞，至少需要 $2\log_2 N - 1$ 级



似曾相识?

增长型Banyan

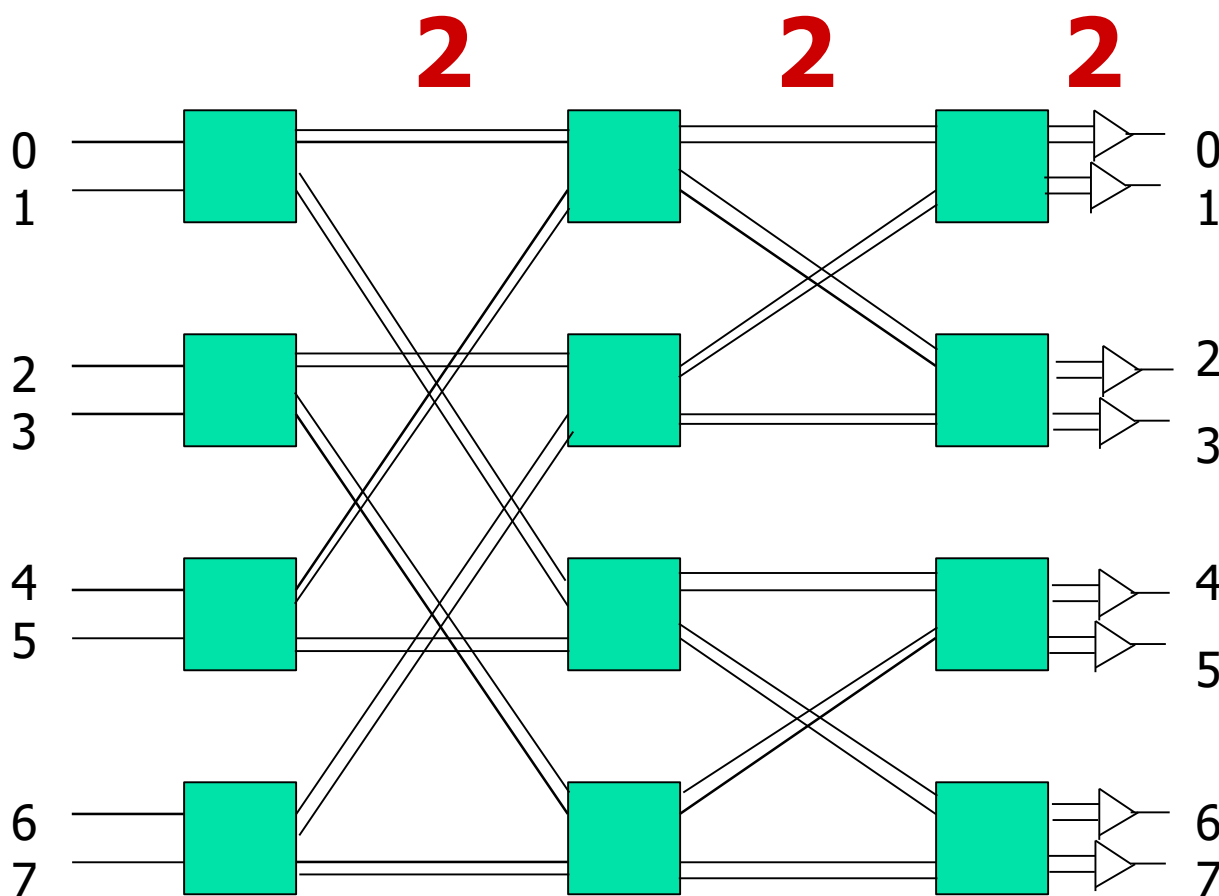
- ① Benes网络
- ② 可重排CLOS网络的递归构造
- ③ 两个Banyan（Banyan与反转Banyan）的背对背相连



扩展型Banyan

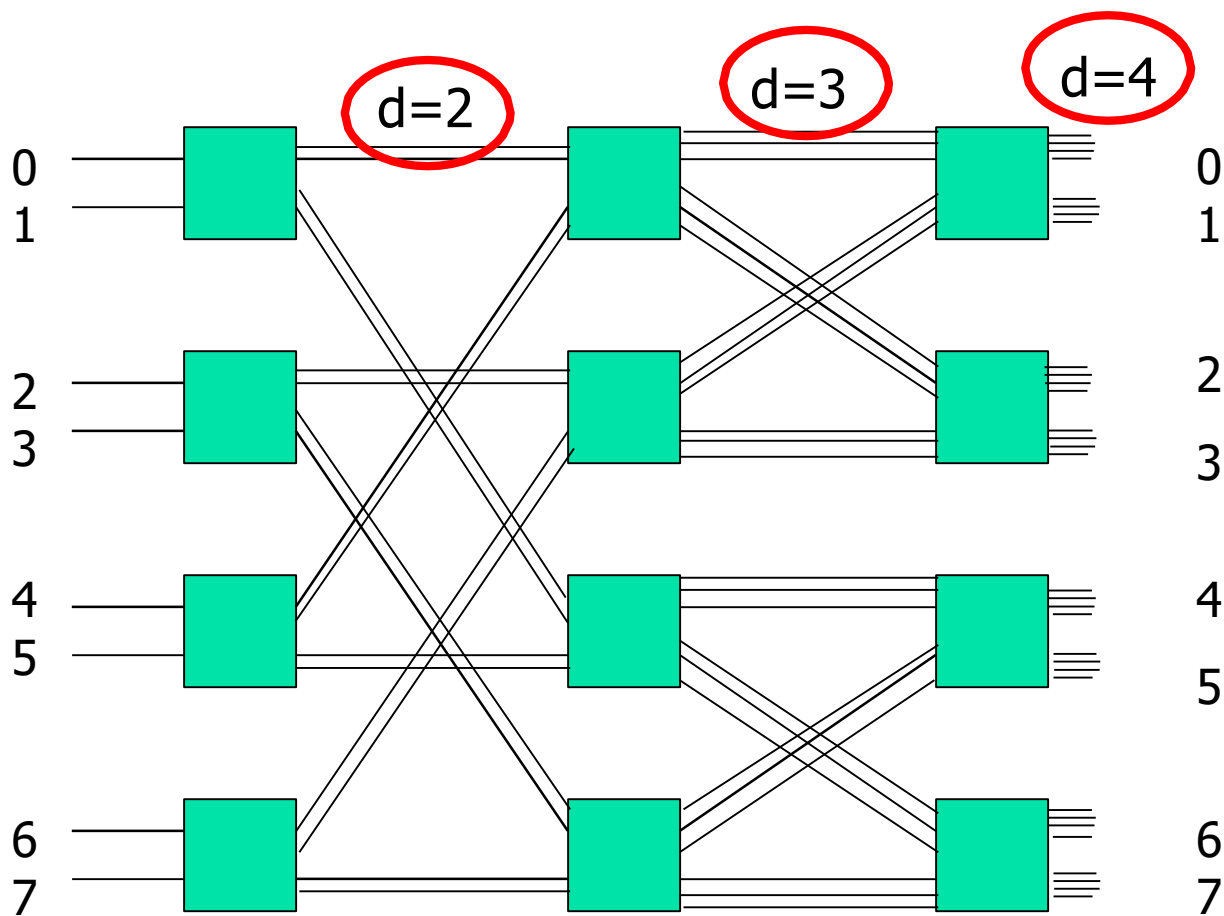
- 对应一个输出地址有多条链路

每个输出地址
1条链路→2条链路



膨胀型Banyan

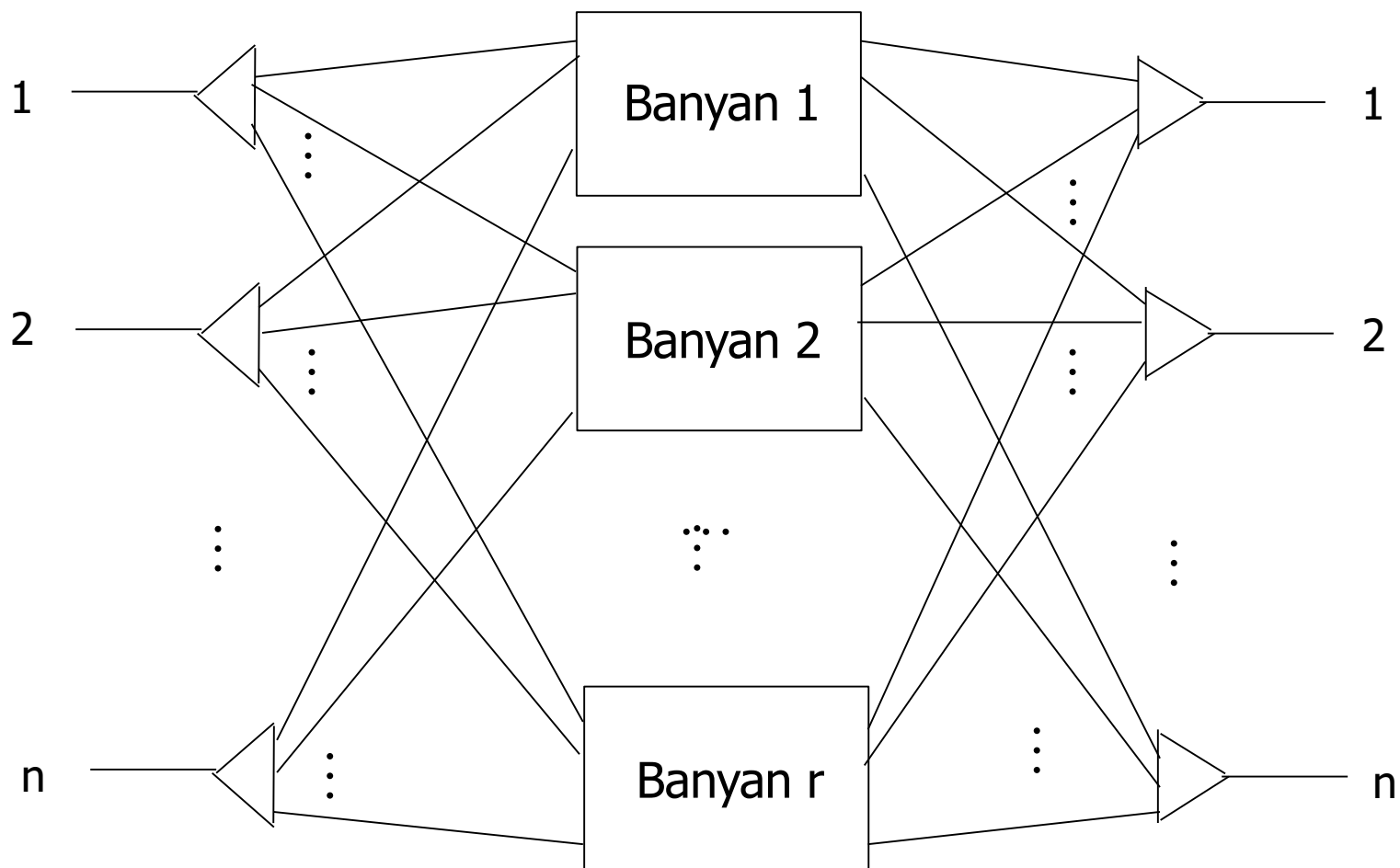
膨胀度 d 在各级可变化
扩展型Banyan的特例



复份型Banyan

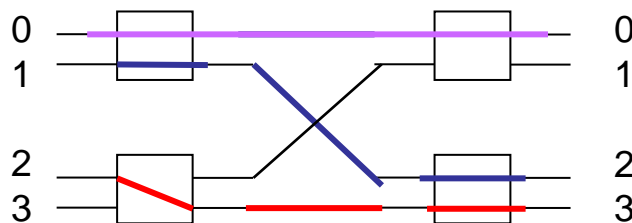
多平面Banyan网络结构
负荷均分、广播功能

- 增加Banyan网络的平面数



排序-Banyan网络

- Banyan网络在何种输入下**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

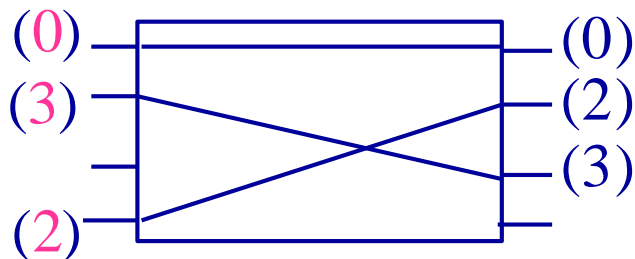


排序-Banyan网络

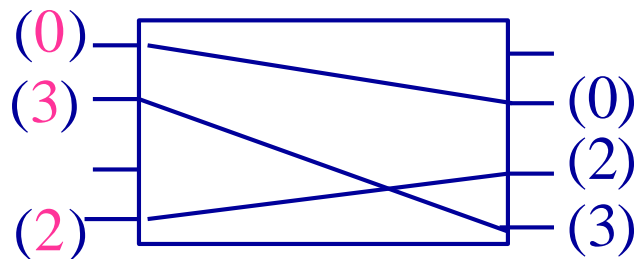
■ 排序网络

- 把一组 (k 个, $k \leq N$) 无序的数字随意指定给 $N \times N$ 交换单元的 k 个入端, 交换单元选择 k 个相邻的出端与那 k 个入端相连, 且 k 个入端上的数字交换到 k 个出端后, 是从小到大顺序排列的, 则称该交换单元是排序网络

目标出端号



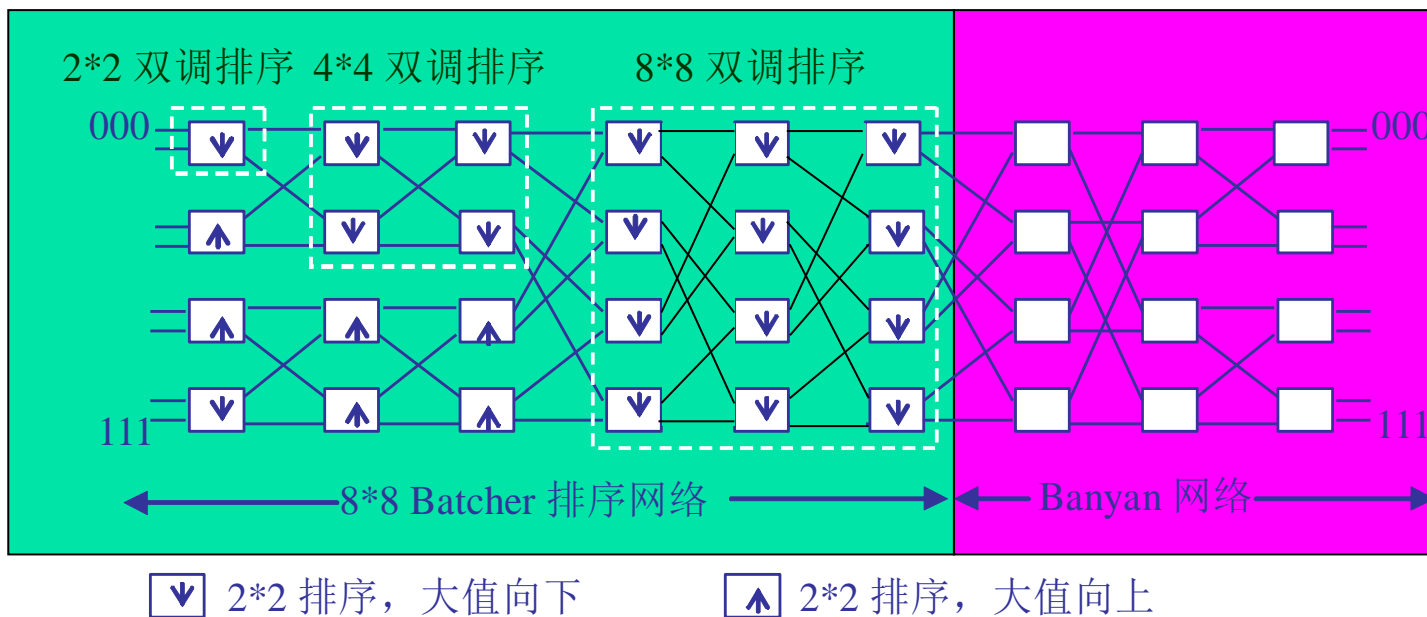
目标出端号



排序-Banyan网络

■ Batcher-Banyan网络

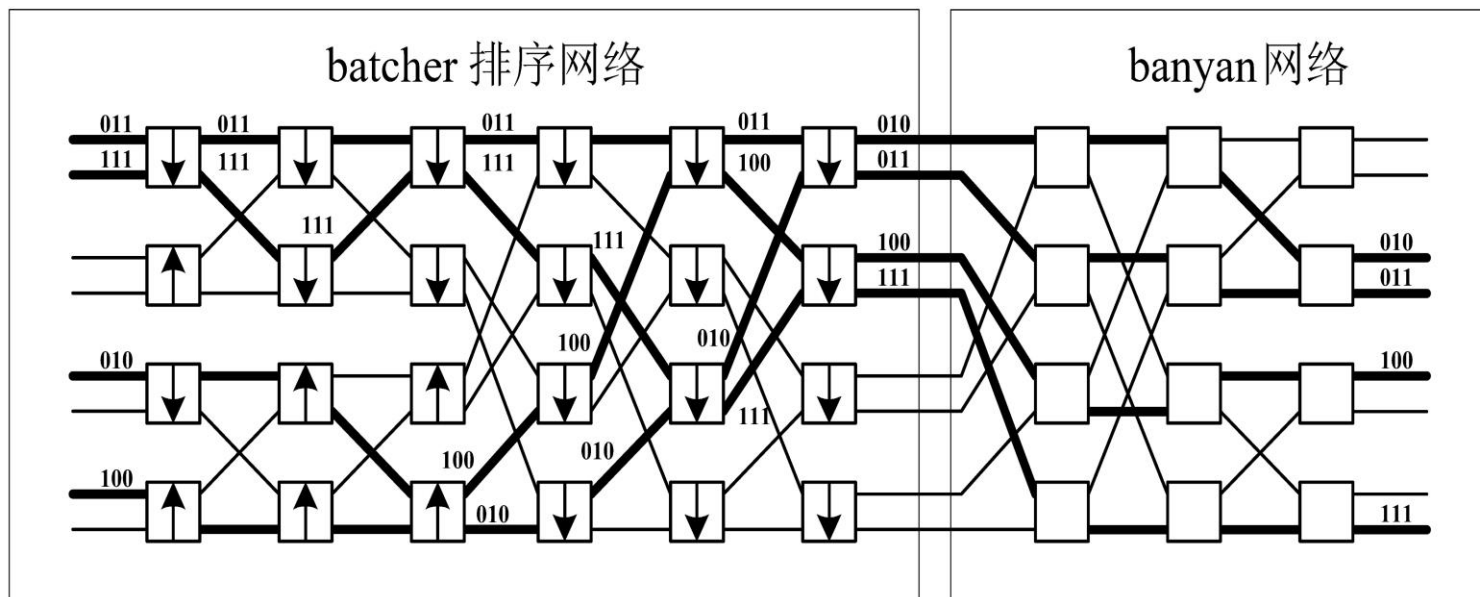
- Batcher排序网络根据连接的目的地址将其按升序排列，每个节点比较两个连接的目的地址，并将高地址连接送到高端，低地址连接送到低端。仅有一个连接时，送到低端。

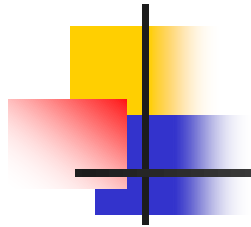


排序-Banyan网络

■ Batcher-Banyan网络

- Batcher排序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的目的地址，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。
- 使Banyan的任两个连接 $a \rightarrow b$ 和 $a' \rightarrow b'$ ，满足 $a' > a$, $b' > b$, $b' - b \geq a' - a$

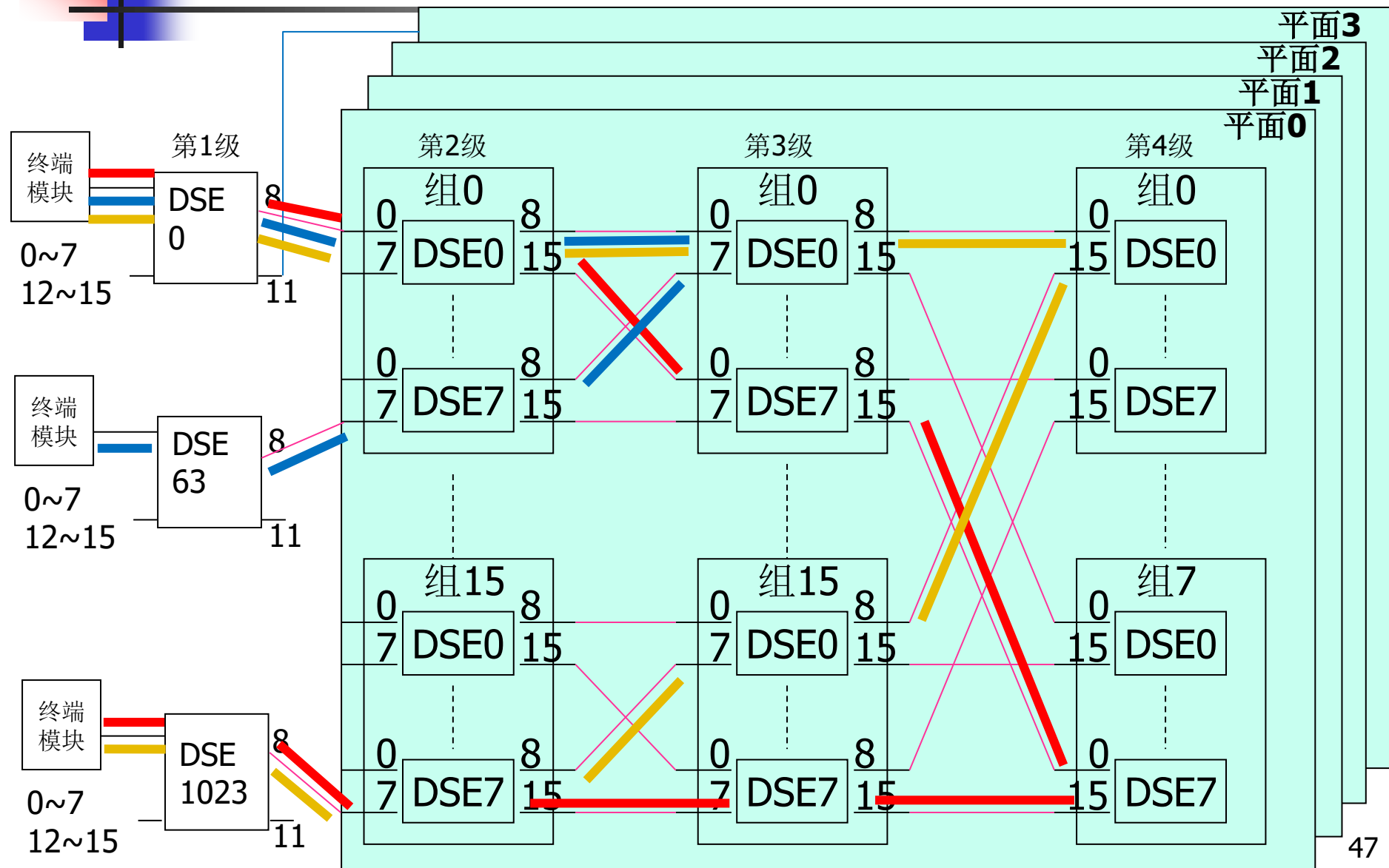


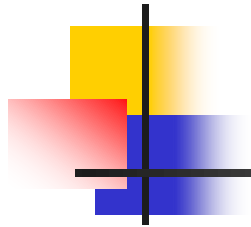


2. 交换网络的结构和特点

CLOS、Benes、Banyan、DSN（自学）、TST

DSN网络：DSE构成多级多平面网络





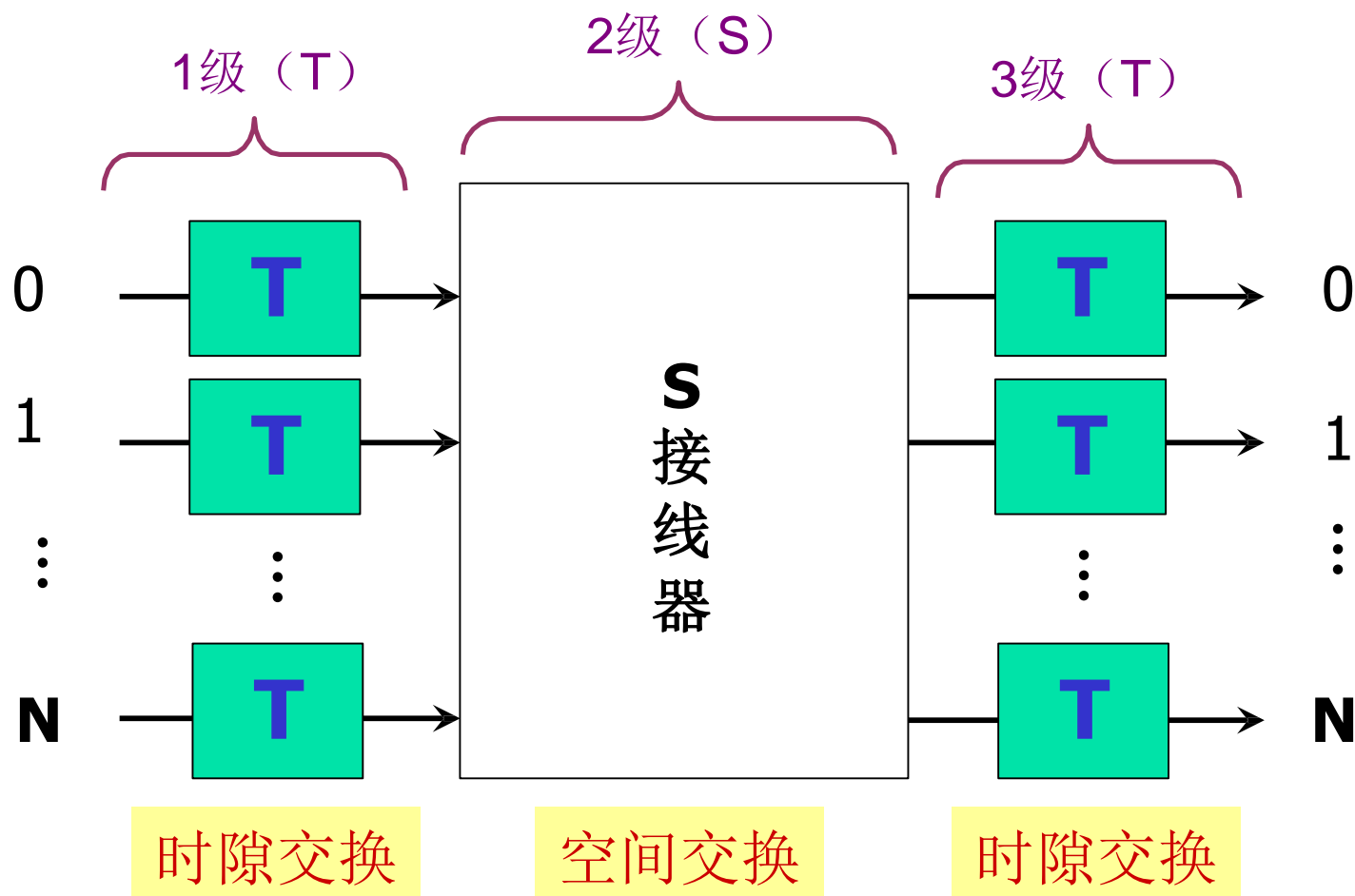
2. 交换网络的结构和特点

CLOS、Benes、Banyan、DSN、TST

TST网络的构成

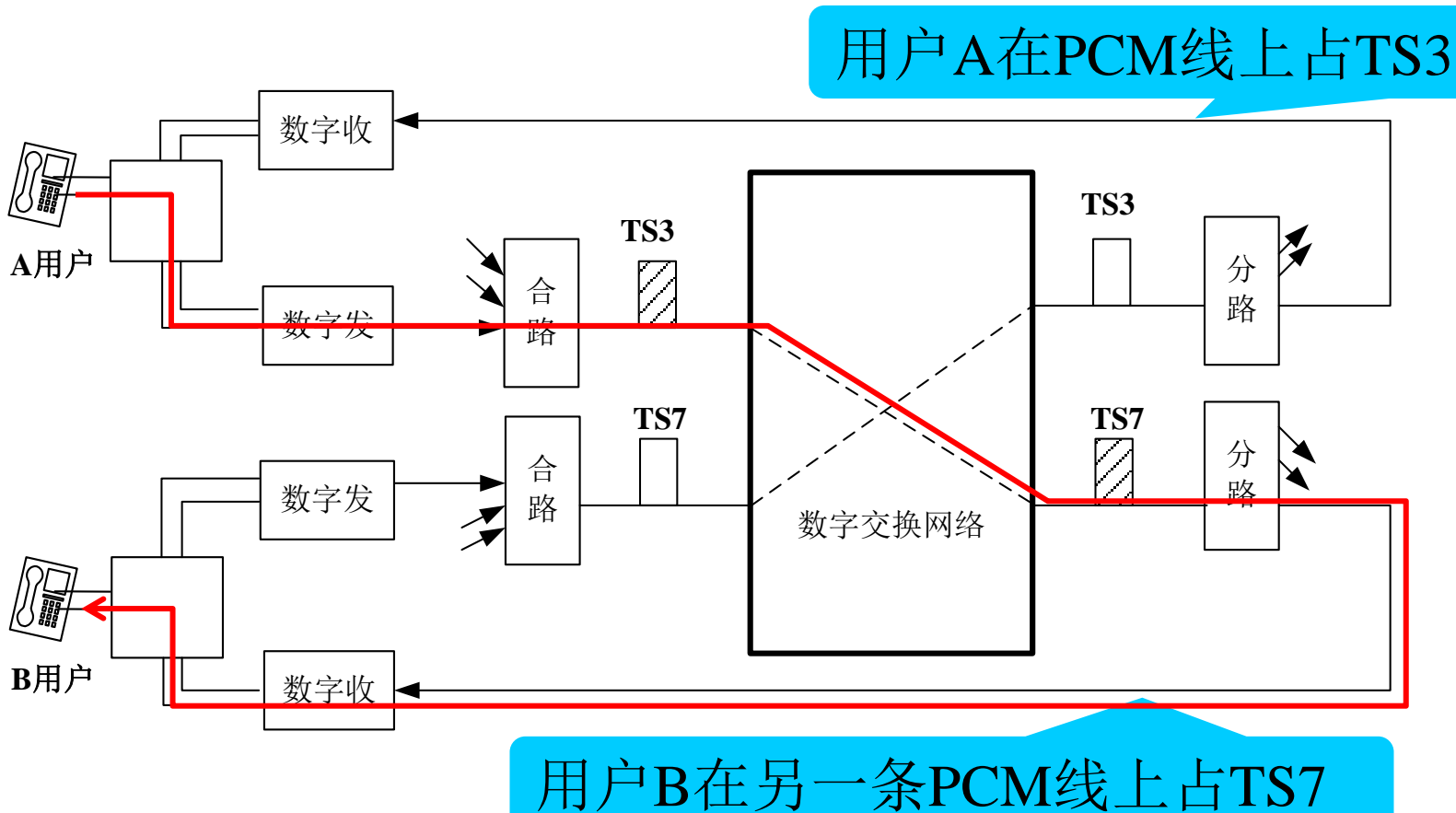
- ✓ 每一条PCM线路连接到一个T接线器，有多少条输入或输出PCM线路，就有多少个T接线器
- ✓ S级的出入线数决定于两侧T接线器的数量，即等于输入输出线数

- 由时间(T)接线器和空间(S)接线器组成



TST网络的应用——中央交换网络

■ A用户-B用户的双向话路建立



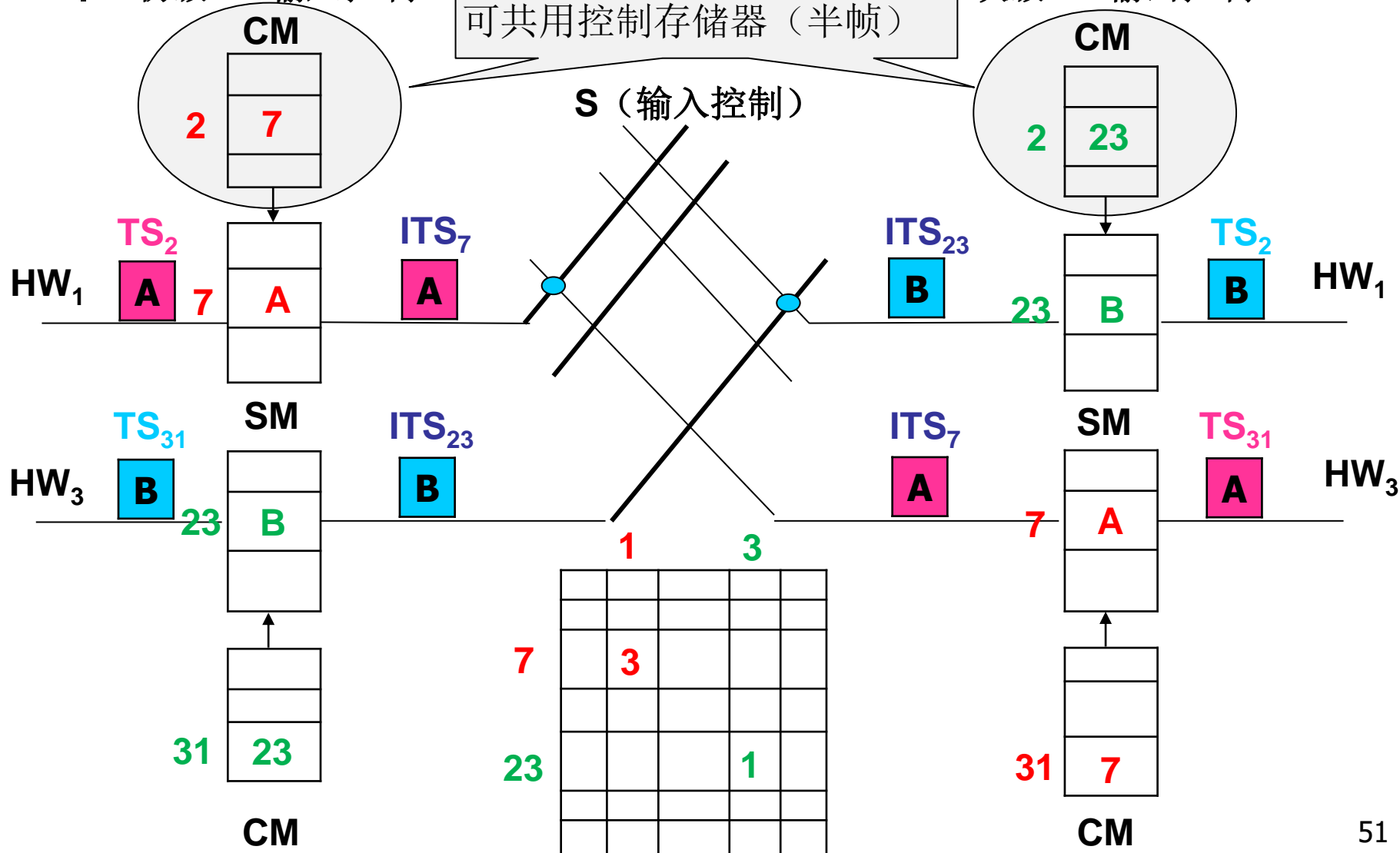
TST网络的工作过程

$HW_1 TS_2 \rightarrow HW_3 TS_{31}$: ITS_7
 $HW_3 TS_{31} \rightarrow HW_1 TS_2$: $ITS_{(7+32/2)}$

初级T（输入控制）

同一序号入线出线的T可共用控制存储器（半帧）

次级T（输出控制）



TST网络的性质

■ 双向通路的建立

- 为减少选路次数，简化控制，可使两个方向的内部时隙具有一定的对应关系，通常可相差半帧，俗称**反相法**（或对偶原理）

■ 阻塞特性

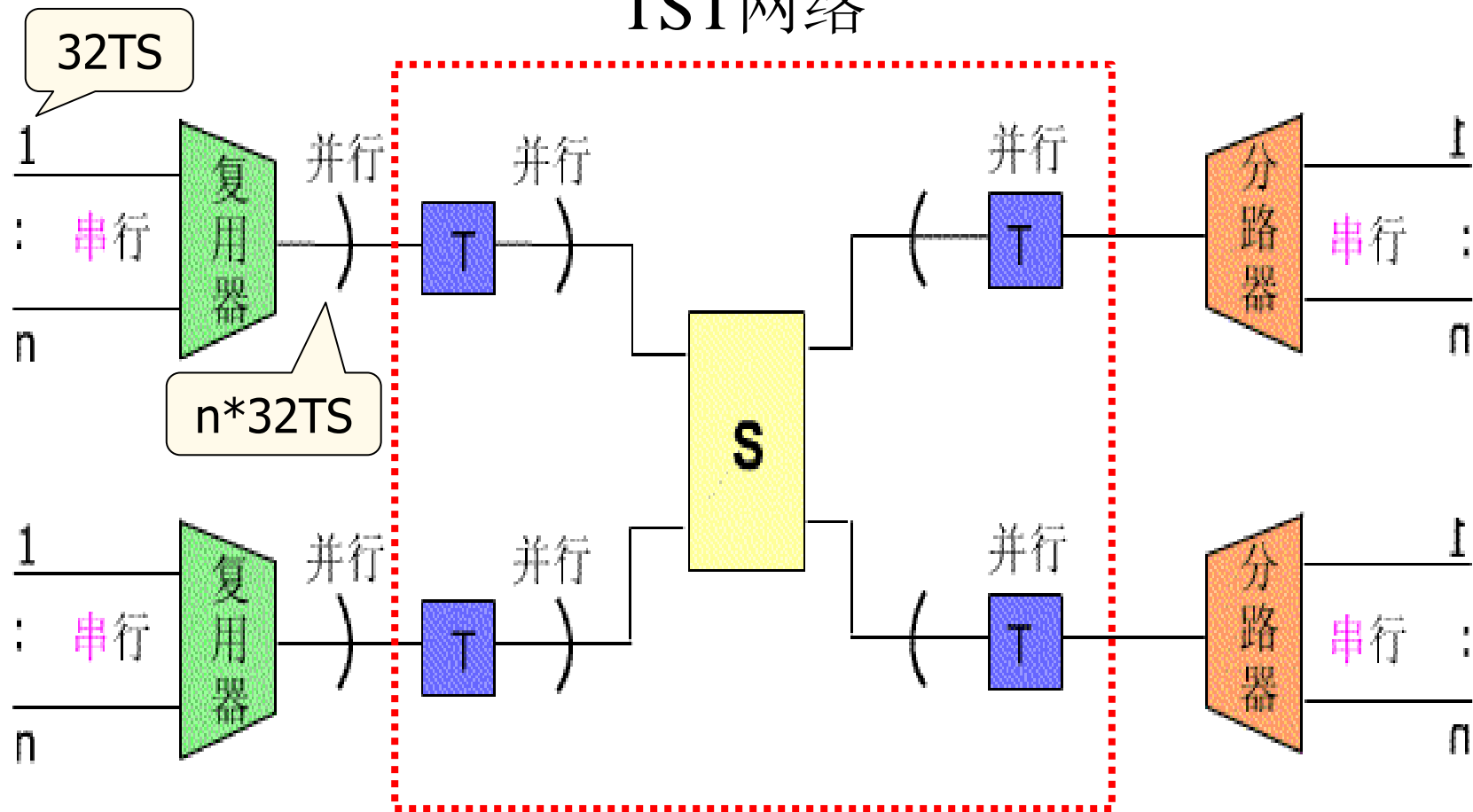
- 若内部时隙数和输入时隙数相等，则存在阻塞 结合前一页，自己举例
- 严格无阻塞的条件： $m = 2n - 1$ 似曾相识？
 - m 为内部时隙数
 - n 为输入时隙数

■ 控制方式

- 初级T接线器和次级T接线器一般**采用不同控制方式**（CM合用）
- S接线器可输入或输出控制

TST外接复用/分路器

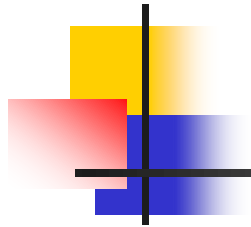
TST网络





T-S组合的形式

- T-S⁽ⁿ⁾-T
- S-T⁽ⁿ⁾-S
- 为什么一般不采用T-S或者S-T形式？
 - 例如：32条速率2M的HW线，每条HW线32个时隙
 - 要把HW₀的TS₀-TS₃₁分别交换到HW₀-HW₃₁的TS₀上，T-S网络就无法实现，只能用S-T网络
 - 要把HW₀-HW₃₁的TS₀分别交换到HW₀的TS₀-TS₃₁上，S-T网络就无法实现，只能用T-S网络

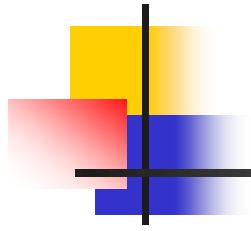


3.交换设备的性能评价

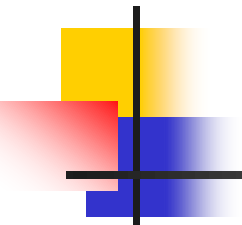


交换设备的性能评价

- 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



作业



■ 作业

- 若入口级选择8入线的交换单元，出口级选择8出线交换单元，试构造 64×64 的三级严格无阻塞CLOS网络，并画图说明。
- 已知一个TST数字交换网络，每个T接线器完成一条PCM上的128个时隙之间的交换，初级T接线器为输出控制方式，次级T接线器为输入控制方式，S接线器为输入控制方式，其交叉点矩阵为 8×8 型。试画图说明PCM2的TS7和PCM5的TS31的交换（内部时隙为TS15并采用反相法）。
- 画图说明用 2×2 的交换单元，构造 16×16 的Banyan网络。举例说明其自选路特性和内部阻塞的情况。
- 画出用 2×2 交叉单元构造的 16×16 可重排无阻塞Benes网络，分析与 16×16 的Banyan网络的异同。

■ 利用第二章MOOC复习，并完成测验



Q & A

袁 泉

yuanquan@foxmail.com

2023年3月6日