



第二章 交换网络(1)

袁 泉

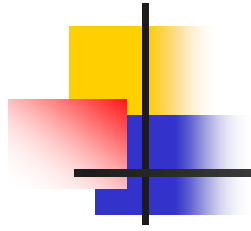
yuanquan@foxmail.com

2023年2月26日



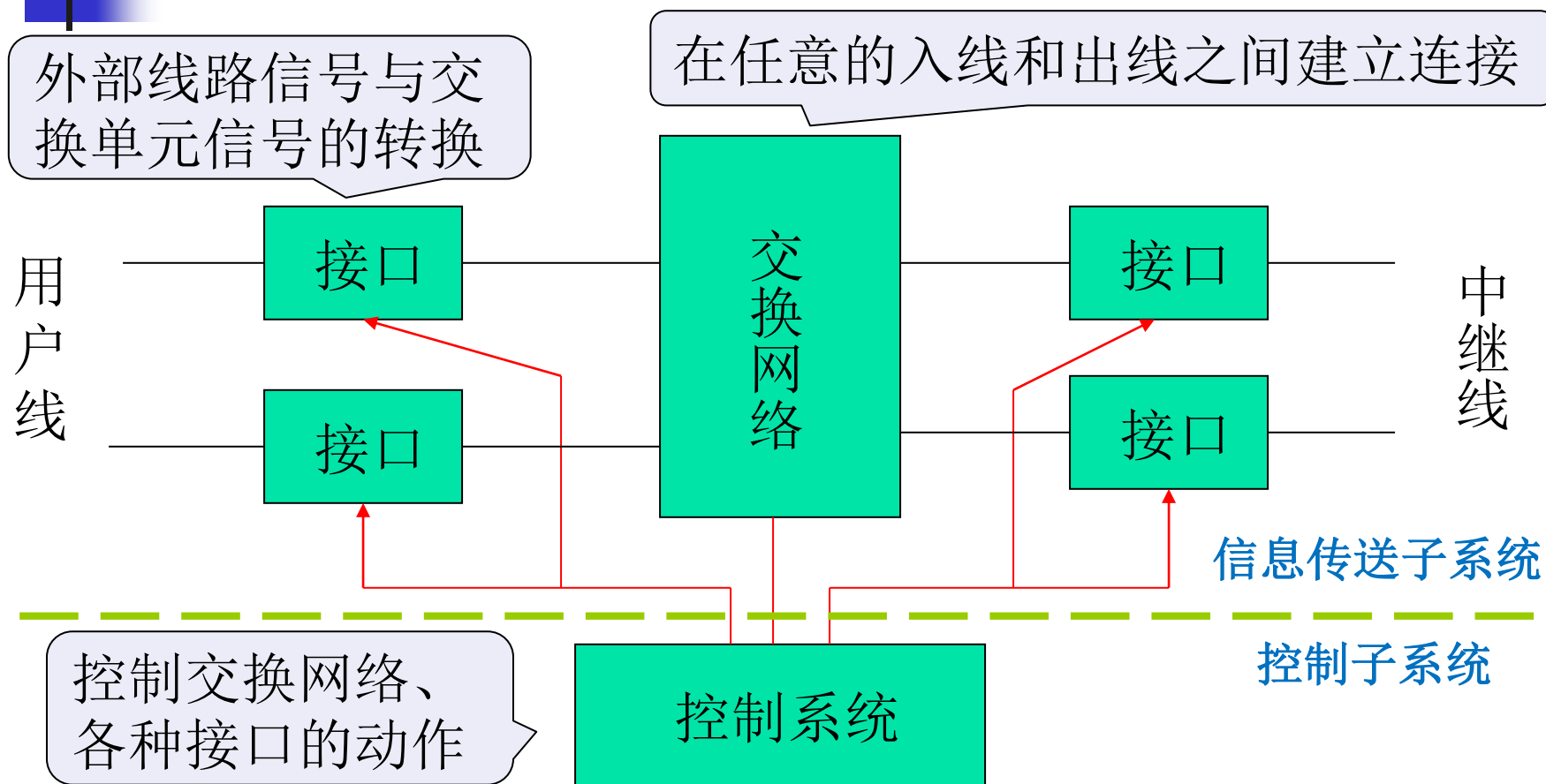
提要

- 1. 交换网络的构成
- 2. 交换单元的基本概念和数学模型
- 3. 各类交换单元
 - 开关阵列与空间交换单元（重点）
 - 共享存储器型的交换单元（重点）
 - 共享总线型的交换单元



1.交换网络的构成

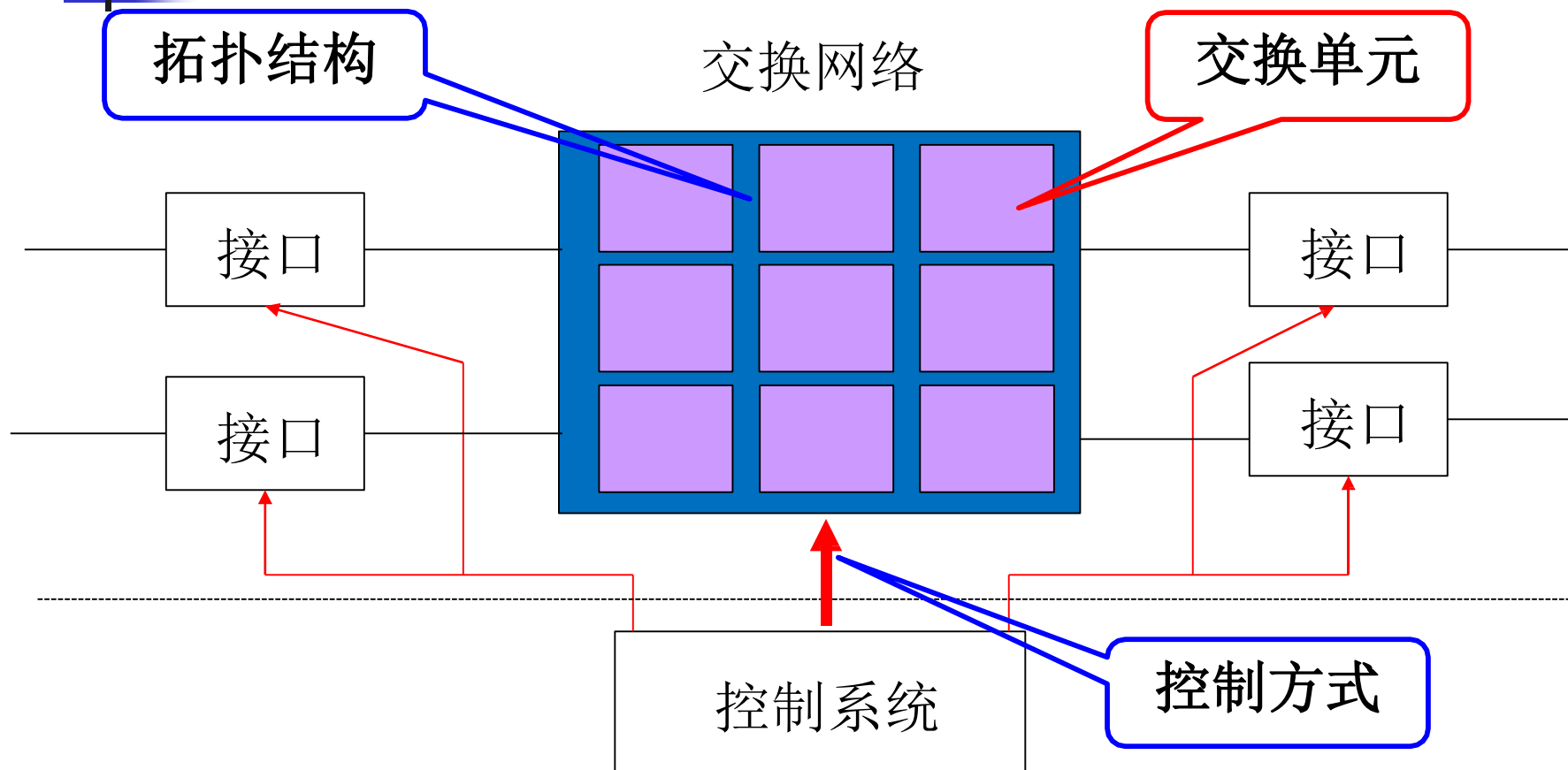
回顾：交换系统的基本结构



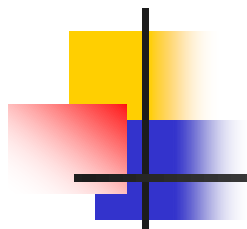
在交换系统中完成**交换**这一基本功能的部件就是交换网络(交换结构, Switching Fabric), 是**交换系统的核心**

交换网络的构成

交换单元是构成交换网络的最基本的部件



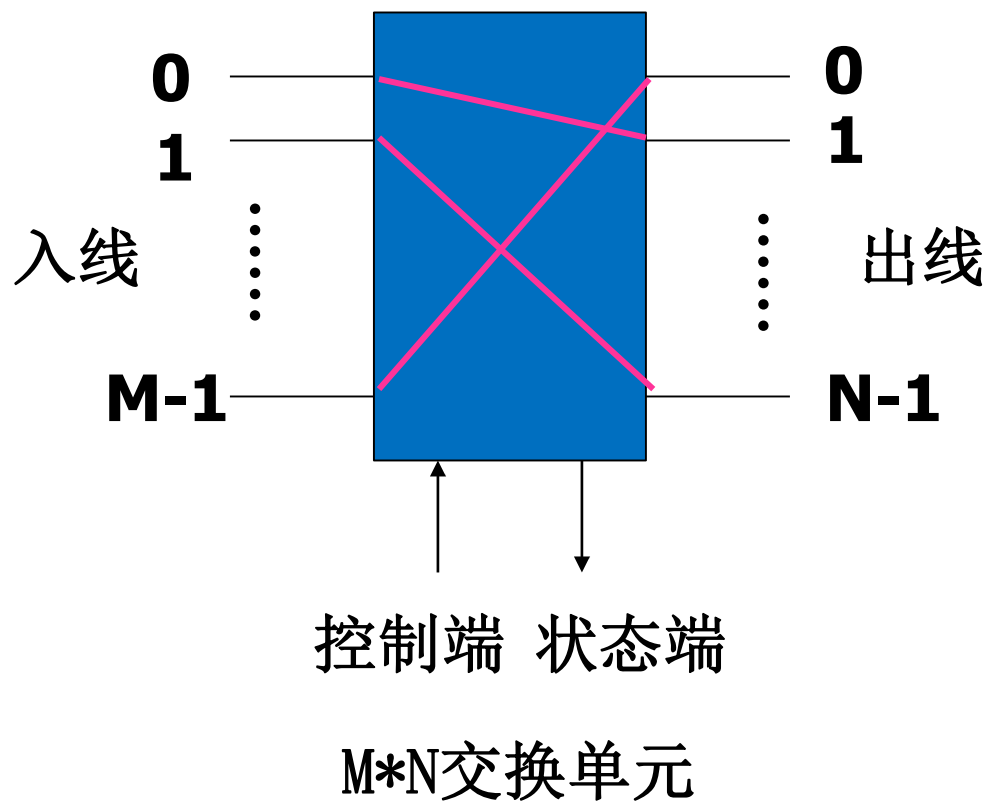
交换网络是由若干个交换单元按照一定的拓扑结构和控制方式构成的



2. 交换单元的基本概念 和数学模型

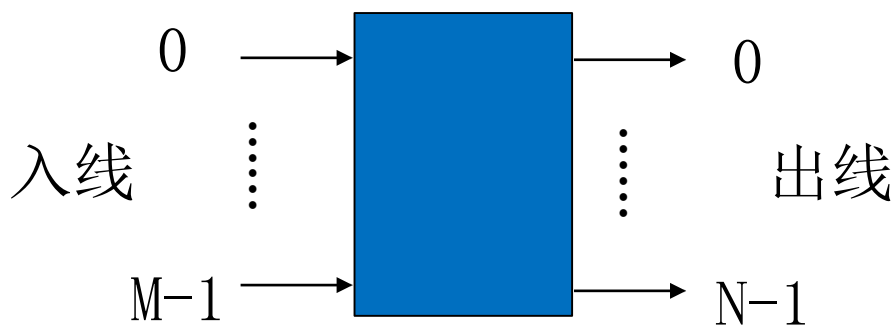
交换单元的基本概念

- 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
- 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**



交换单元的分类（按入出线的信息传送方向）

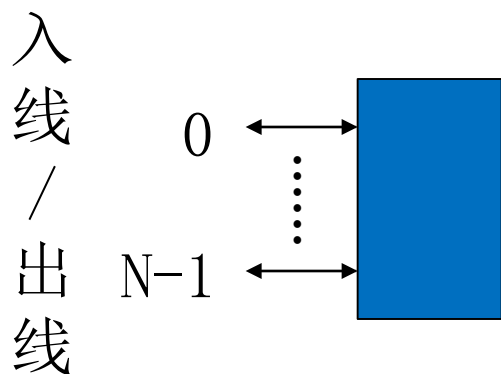
- 有向交换单元：当信息经过交换单元时只能从入线进、出线出，具有唯一确定的方向
- 无向交换单元：交换单元的每条线即可入也可出



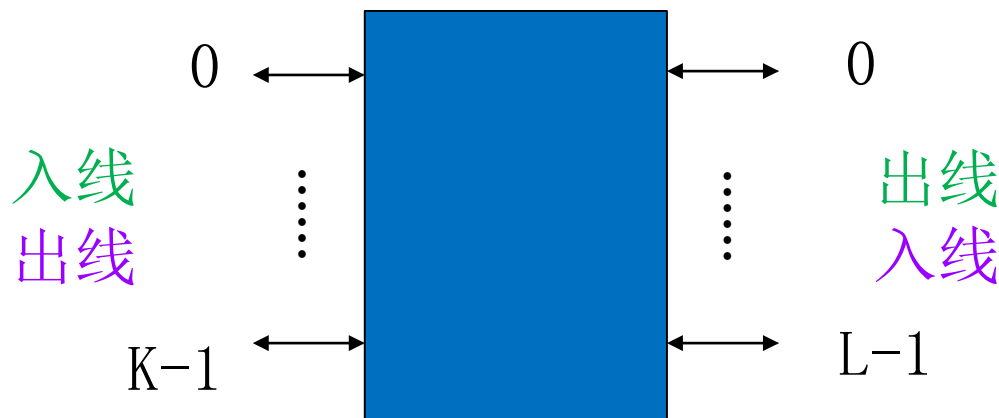
$M \times N$ 有向交换单元

交换单元的分类（按入出线的数量关系）

- 有向交换单元：当信息经过交换单元时只能从入线进、出线出，具有唯一确定的方向
- 无向交换单元：交换单元的每条线即可入也可出

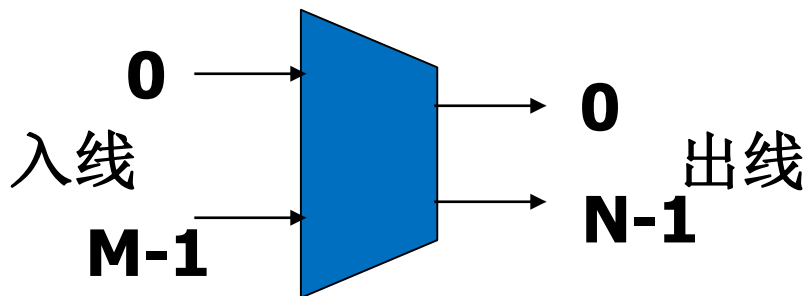


N无向交换单元

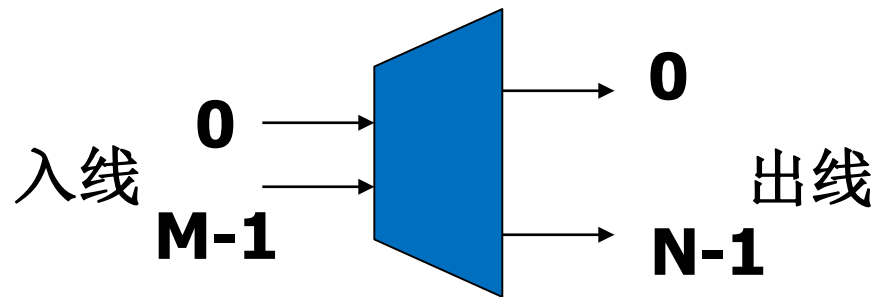


$K \times L$ 无向交换单元 ($N=K+L$)

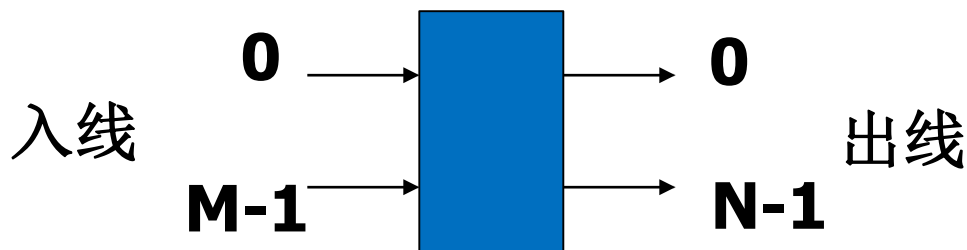
交换单元的分类 (按入出线的信息传送方向)



集中型 ($M > N$)

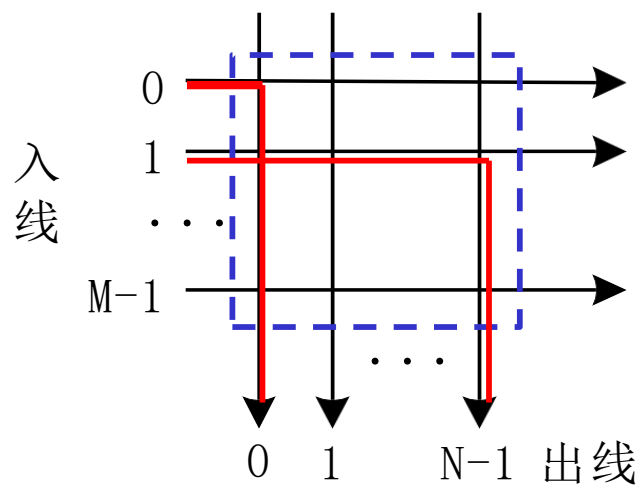


扩散型 ($M < N$)

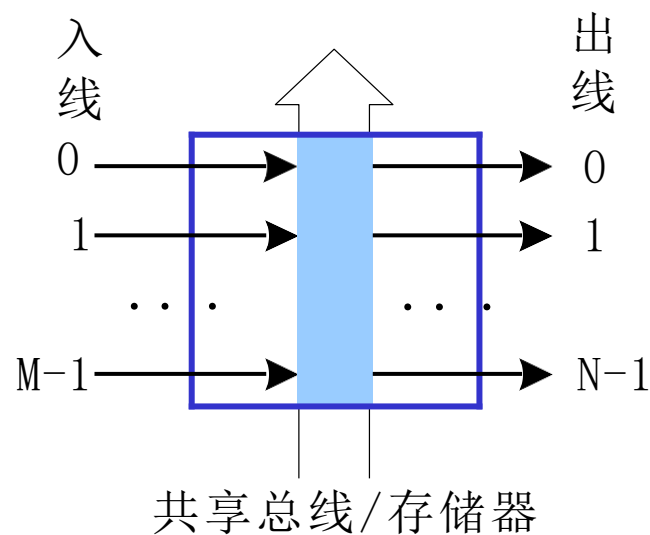


连接型 ($M = N$)

交换单元的分类 (按入出线之间是否共享单一通路)



(a) 空分交换单元 (开关阵列)



(b) 时分交换单元

交换单元的数学模型——连接

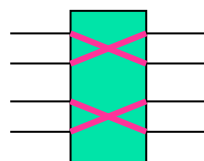
- $M \times N$ 交换单元的入线集合与出线集合分别为
 - 入线集合 $T = \{ 0, 1, 2 \dots M-1 \}$ 出线集合 $R = \{ 0, 1, 2 \dots N-1 \}$
- 连接的定义
 - 对于一个入端 t ($t \in T$) 和一组出端 R_t ($R_t \subseteq R$) , $c = \{ t, R_t \}$ 称为一个连接。其中 t 称连接的起点, $r \in R_t$ 称连接的终点
 - 若 R_t 中只含有一个元素, 则称该连接是一对一 (点对点) 连接
 - 若 R_t 中含有多个元素, 则称该连接是一对多 (点对多点) 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 ($R_t = R$) , 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

交换单元的数学模型——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；否则处于空闲状态
若出端 $r \in R_c$ ，称其处于占用状态；否则处于空闲状态

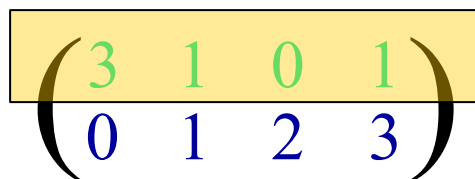
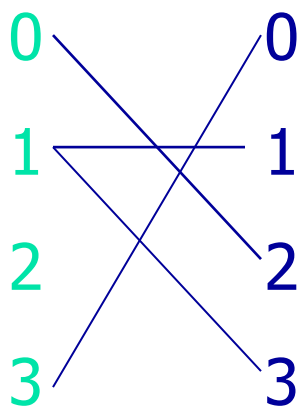
交换单元的数学模型——连接方式

■ M*N交换单元在任意时刻的连接方式的表示

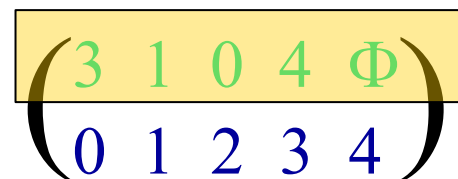
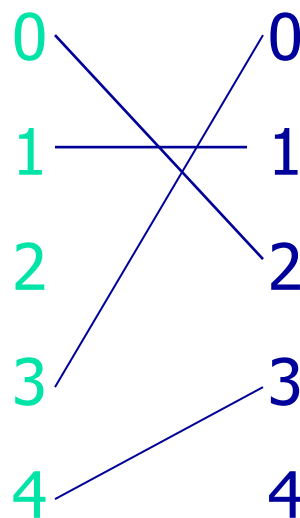
■ 图形表示法

■ 排列表示法（入线排列表达式、出线排列表达式）

■ 函数表示法：连接函数 $f(t) = R_t$ ，表示入线集合与出线集合的映射关系，如直接连接、交叉连接、蝶式连接、均匀洗牌连接、间隔交叉连接



入线排列表达式
及其简化

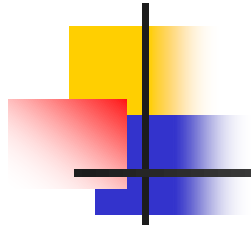


入线排列表达式
及其简化



思考

- 一个交换单元，若满足以下条件，则有多少种连接方式？ N^2
 - 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。
- 对于M*N($N \leq M$)的交换单元，没有空闲的出端
 - 不存在同发时，最多有多少种连接方式？ A_M^N
 - 存在同发时，最多有多少种连接方式？ M^N



3. 各类交换单元

- 3.1. 开关阵列与空间交换单元
- 3.2. 共享存储器型的交换单元
- 3.3. 共享总线型的交换单元



交换单元的性能

■ 性能指标

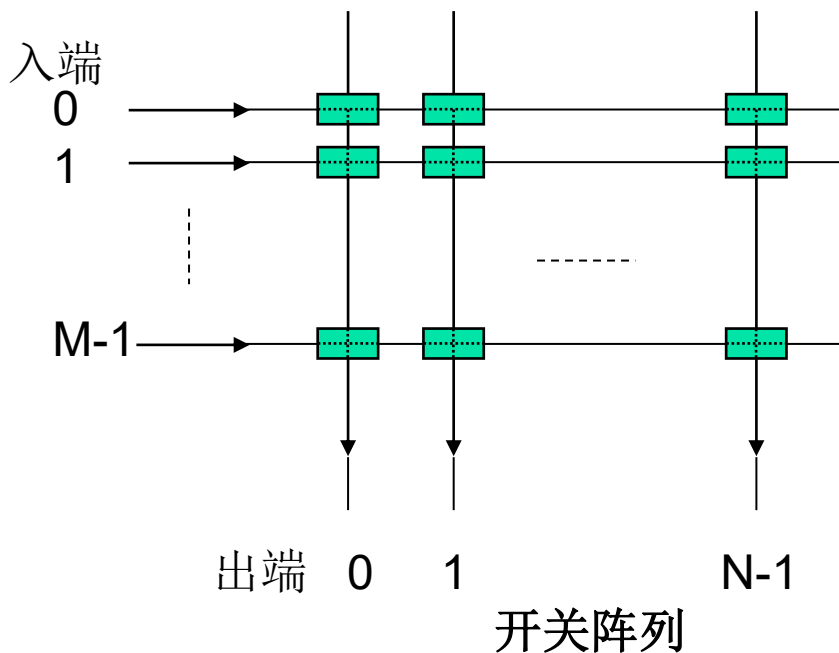
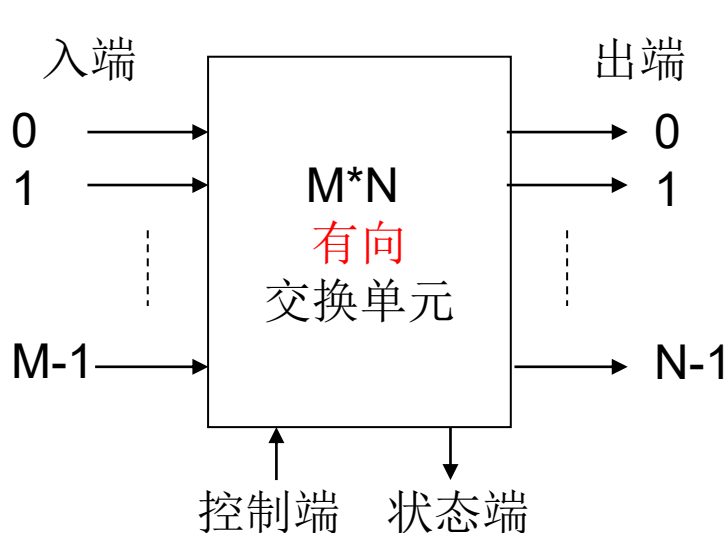
- 容量——可交换的信息量，或出入线数量
- 接口——单向/双向，数字/模拟
- 交换功能——点到点，同发，广播
- 质量——时延，内部阻塞

■ 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
- } 时分交换

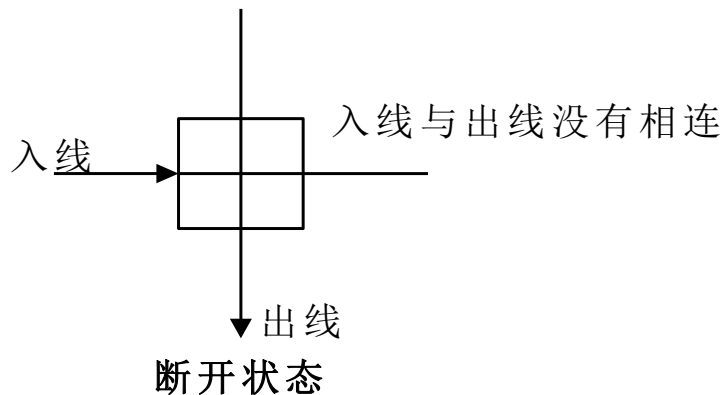
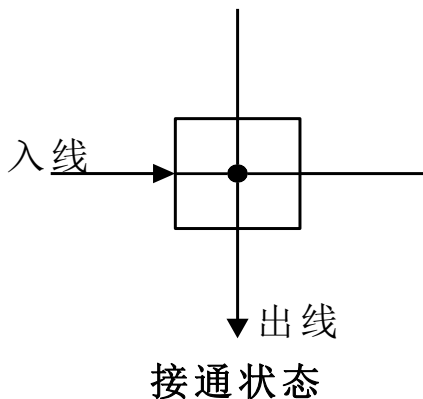
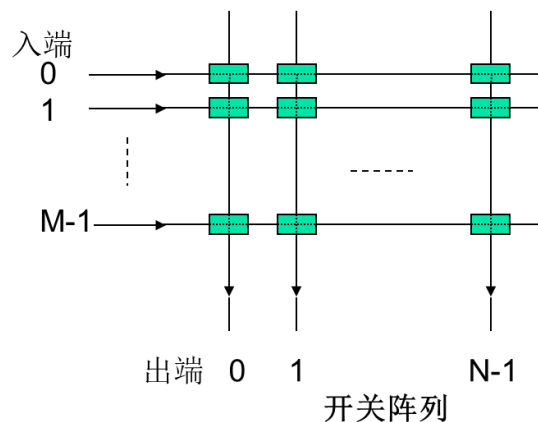
3.1 开关阵列与空间交换单元

- 在交换单元内部，要建立任意入线和任意出线之间的连接，可以在每条入线和每条出线之间都各自接上一个开关，所有开关就构成了交换单元内部的开关阵列



开关

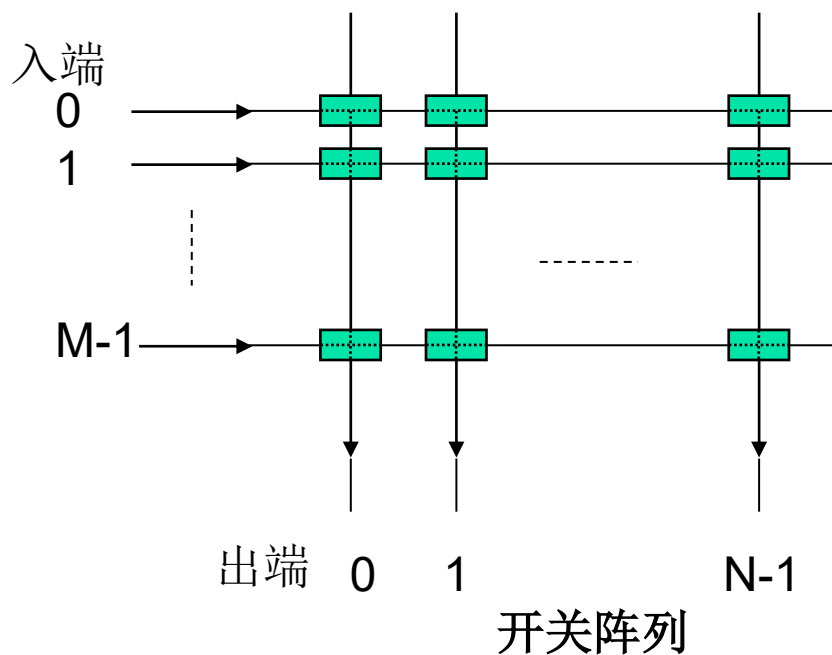
- 开关的位置：入、出线交叉点
- 开关的表示： K_{ij} （ i 为入线， j 为出线）
- 开关的状态：通、断
- 开关的种类：单向、双向
 - 双向开关用于构造无向交换单元（自学）



开关阵列的工作原理

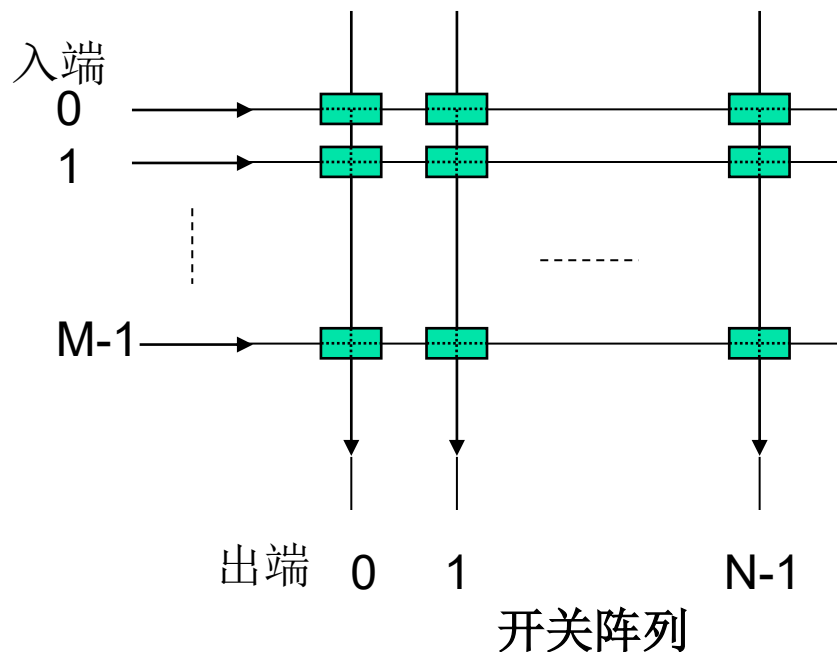
- 每个开关都有一个控制端和一个状态端，分别用于控制和表示开关的通断状态
- 开关阵列的控制端构成控制矩阵
- 开关阵列的状态端构成状态矩阵

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



开关阵列的特性

- 由空间上分离的多个开关部件构成，可构建空间交换单元
- 优点
 - 交换动作控制简单，具有均匀的单位延迟时间
 - 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
- 缺点
 - 交叉接点开关数量巨大
 - 交叉接点开关利用率低



实际的开关阵列

- 继电器

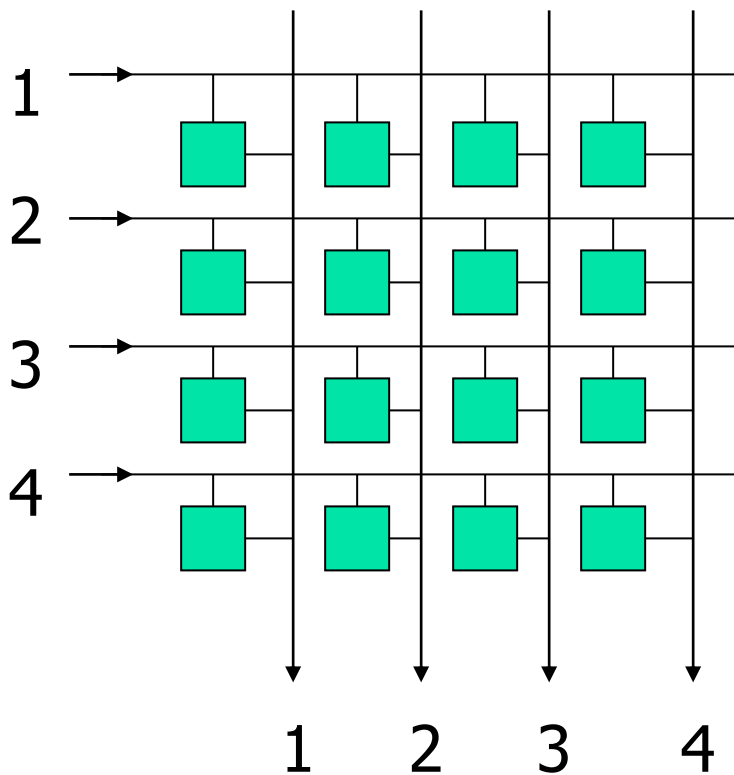
- 噪声大、动作慢（ms级）、体积大（cm级）

- 模拟电子开关

- 衰减和延时大

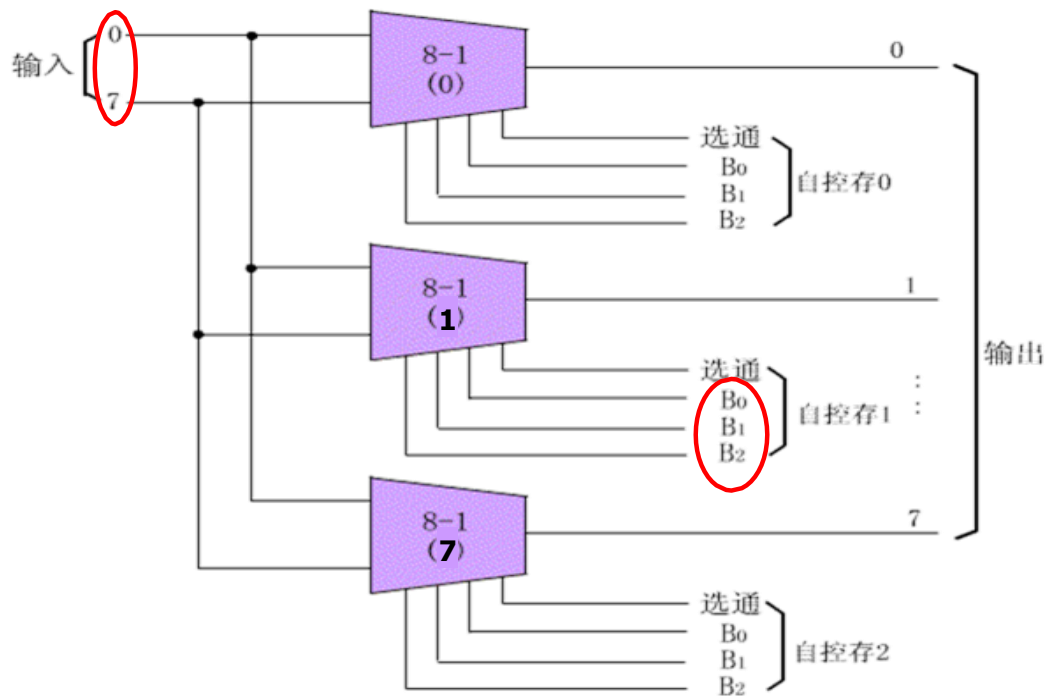
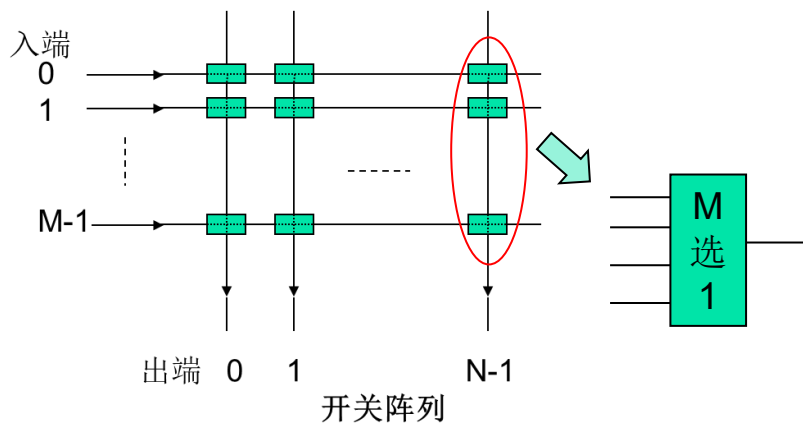
- 数字电子开关

- 逻辑门，动作迅速
- 只用于交换数字信号



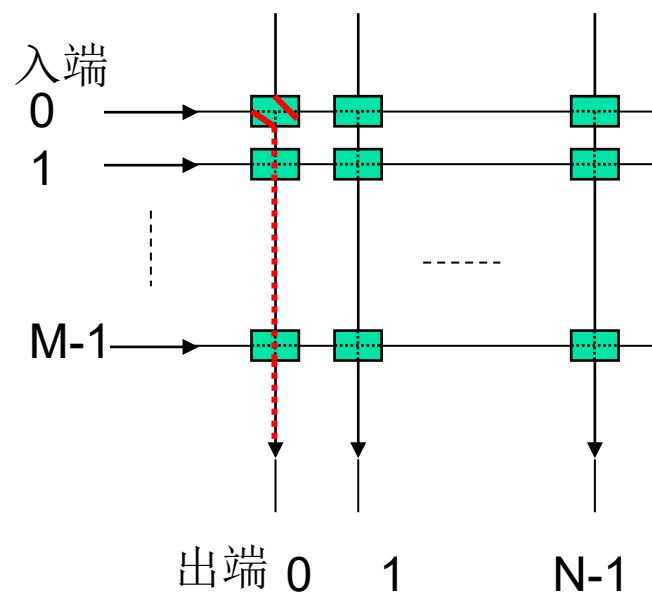
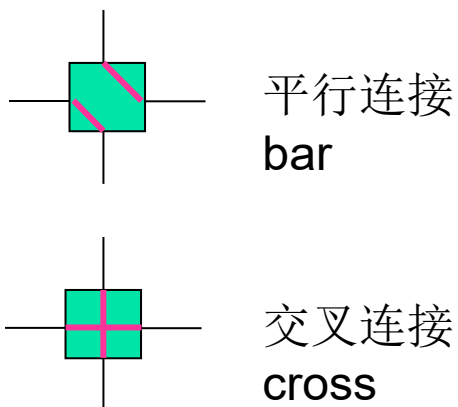
实际的开关阵列

- 继电器
- 模拟电子开关
- 数字电子开关
- 多路选择器
 - 可有效避免冲突



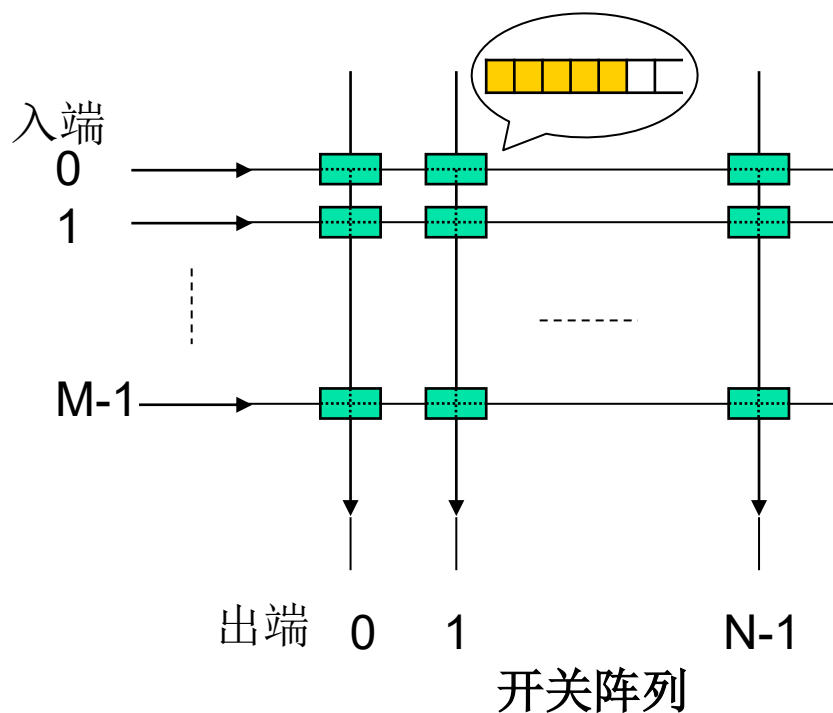
实际的开关阵列

- 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
 - 不支持同发



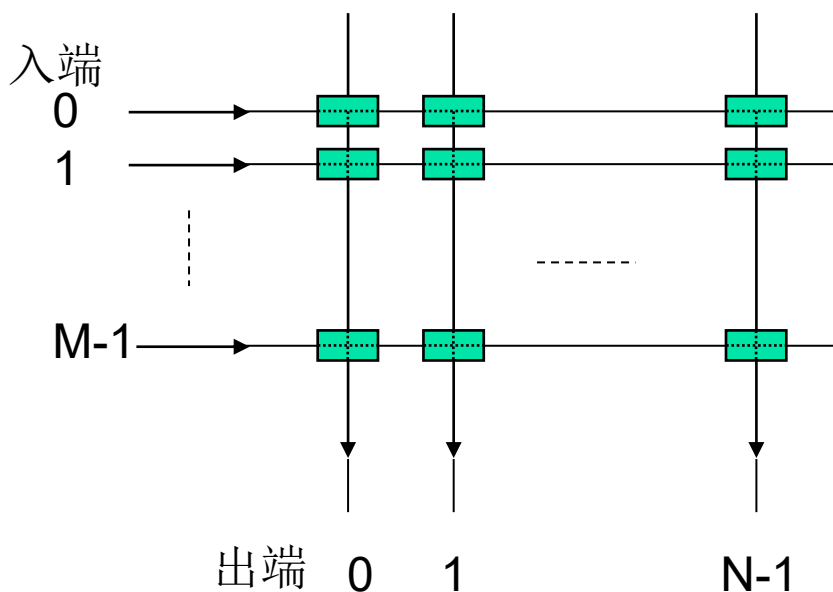
实际的开关阵列

- 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
- 带缓冲器的开关
 - 没有呼损，有排队时延



开关阵列实现空间交换单元

- 例：入线1的TS1交换到出线0，入线1的TS2交换到出线1



模拟空分网络能不能通过数字信号？

为开关阵列加上控制存储器就可以构造空间交换单元

空间交换单元

- 空间交换单元也称为空间接线器（Space Switch），简称为S单元或S接线器

构成



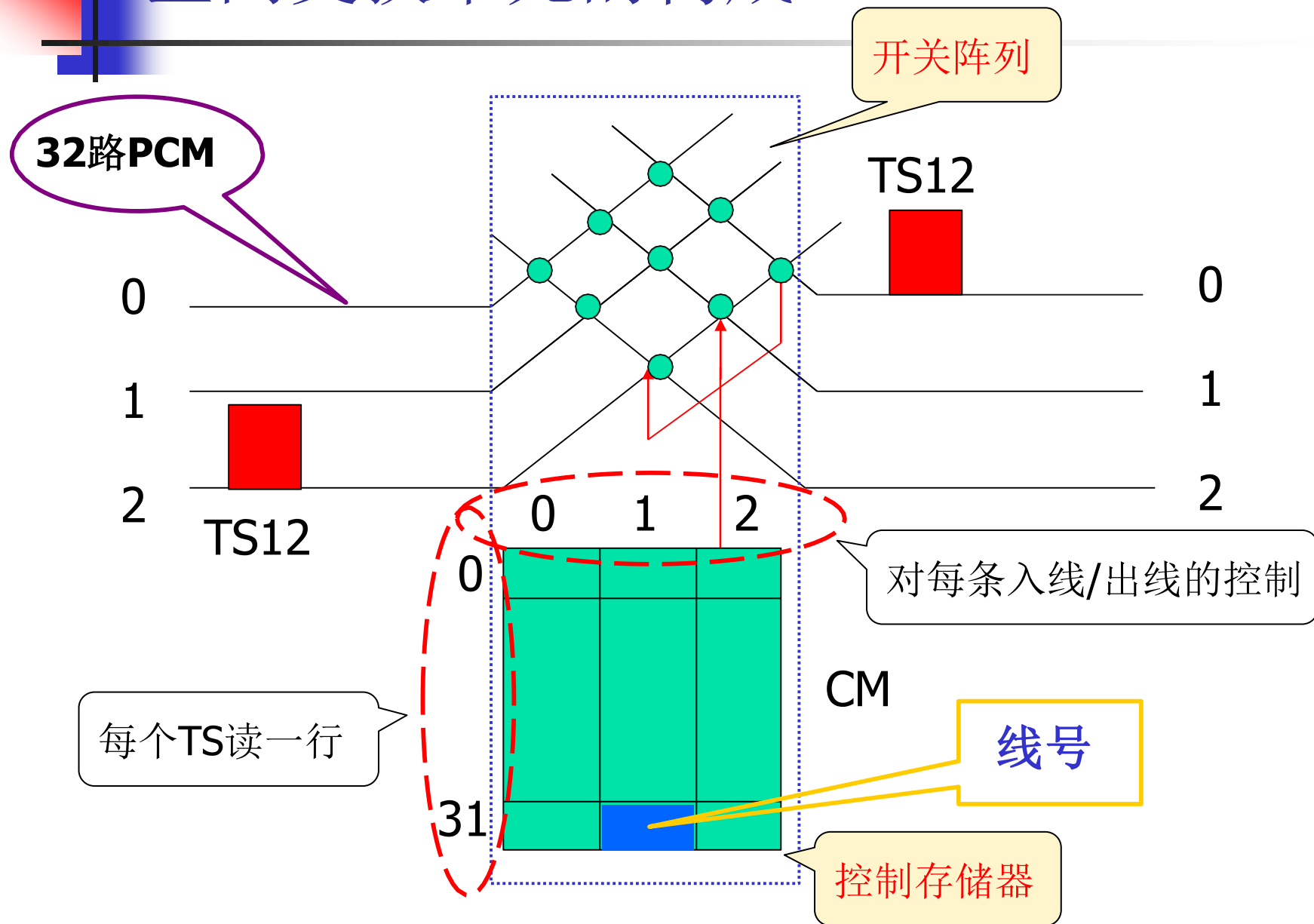
- 1、交叉点矩阵（开关阵列）
- 2、控制存储器

功能



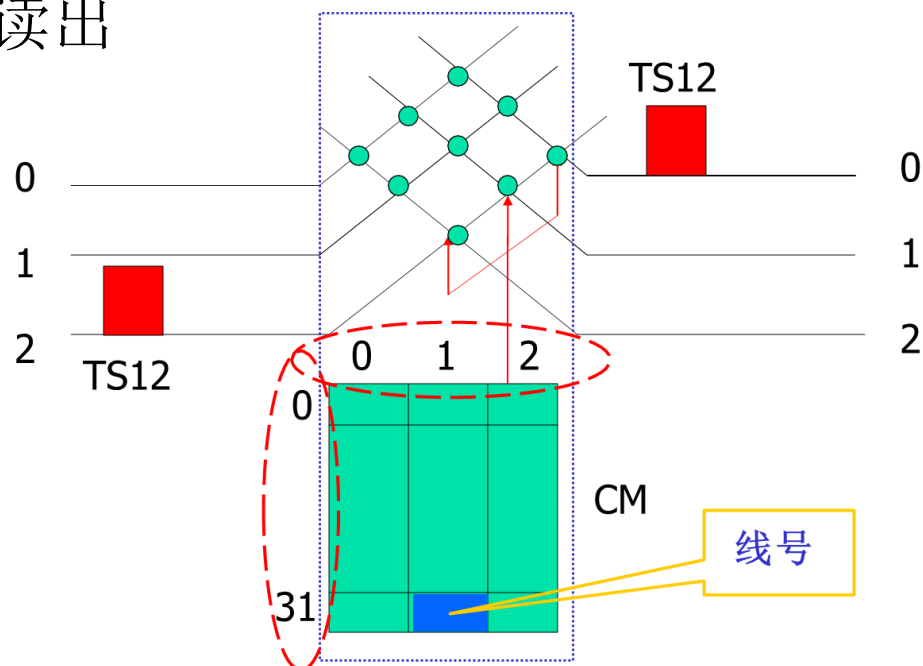
输入输出线之间的空间交换

空间交换单元的构成

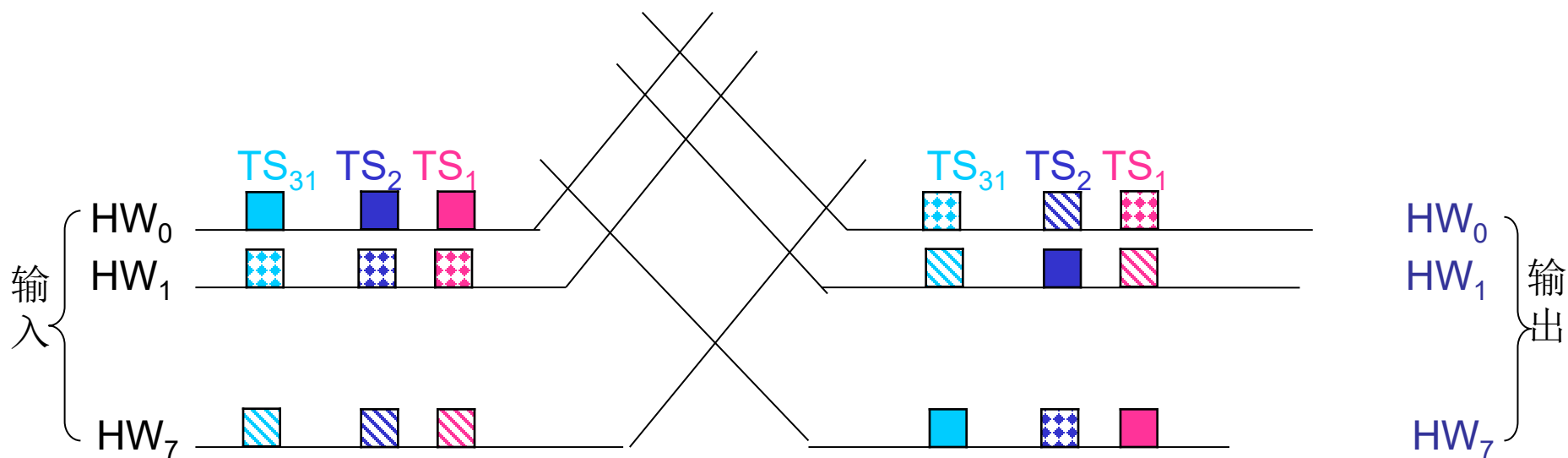


空间交换单元结构特点

- 控制方式分为：**输入控制**和**输出控制**
- S接线器所含**CM**数量等于入（出）线数
- 每个**CM**所含存储单元个数等于入（出）线上的复用时隙数
- 每个存储单元为 $\lceil \log_2 N \rceil$ bit，N为接线器的出（入）线数
- CM为控制写入、顺序读出

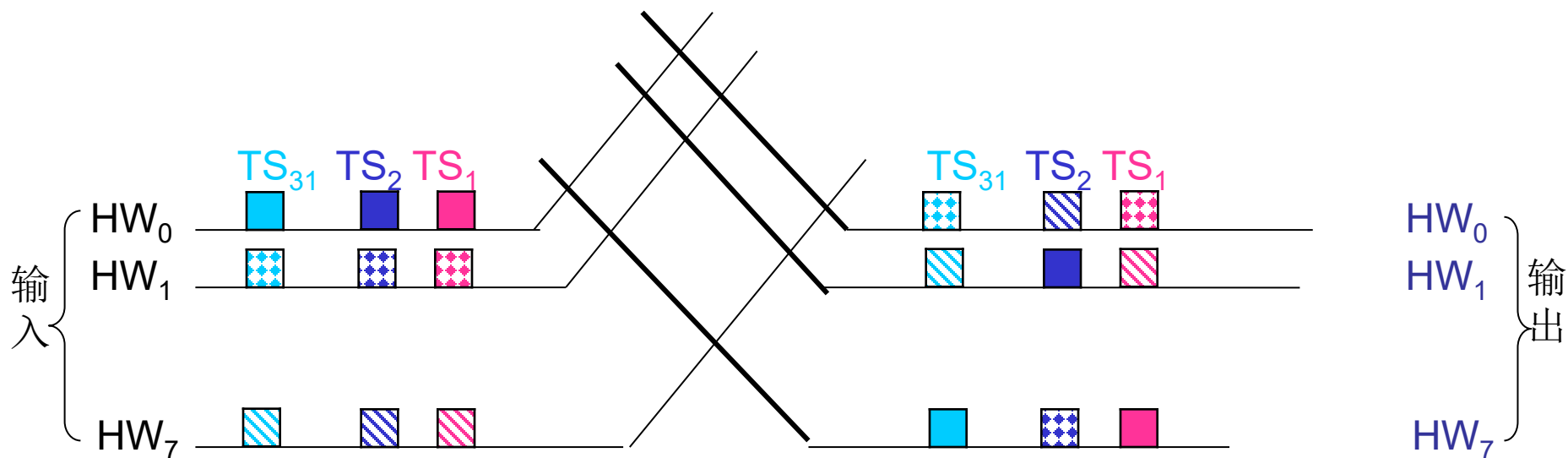


空间交换单元的~~输出~~控制方式



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

空间交换单元的~~输出~~控制方式

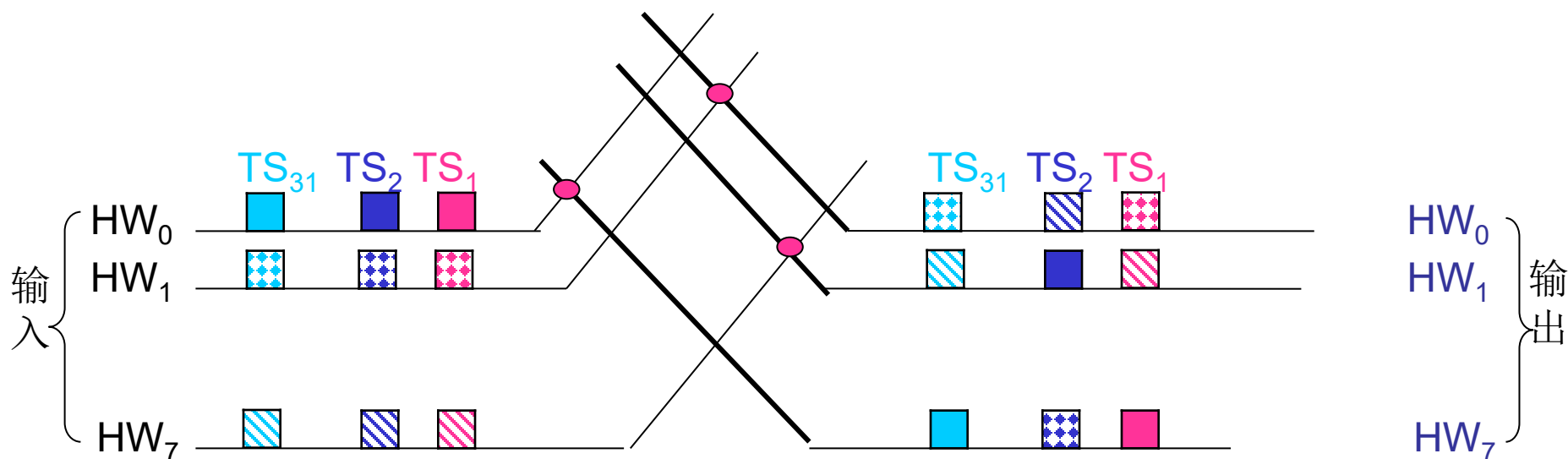


	0	1	7
0			
1	1	7	0
2	7	0	1
31	1	7	0

出线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的输出生控制方式

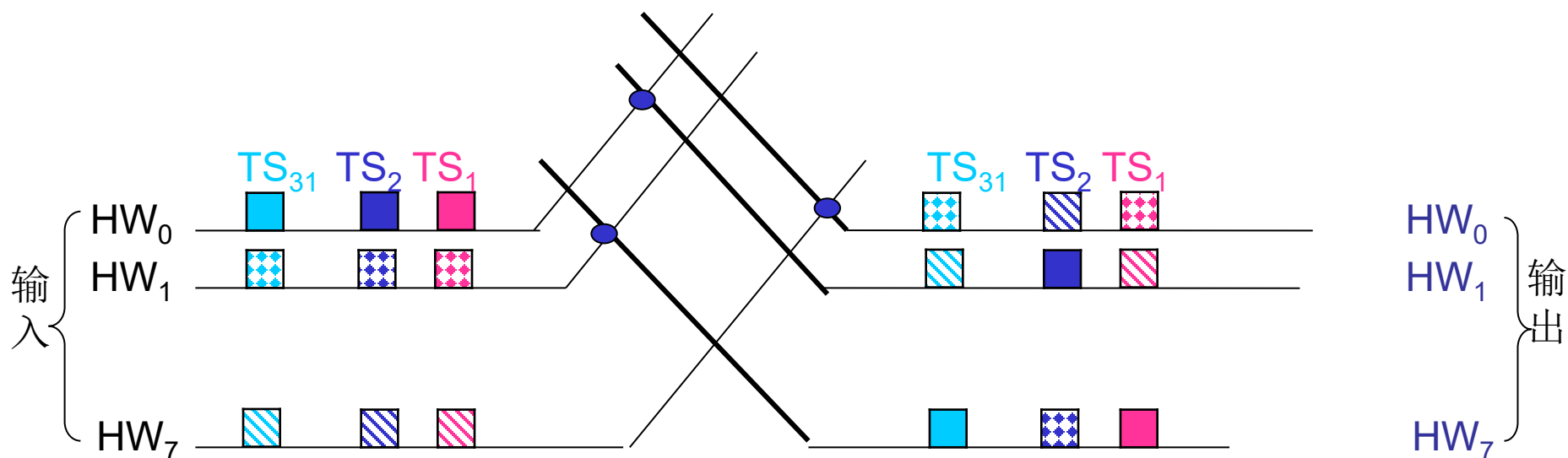


	0	1	7
0			
1	1	7	0
2	7	0	1
31	1	7	0

出线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的输出生控制方式

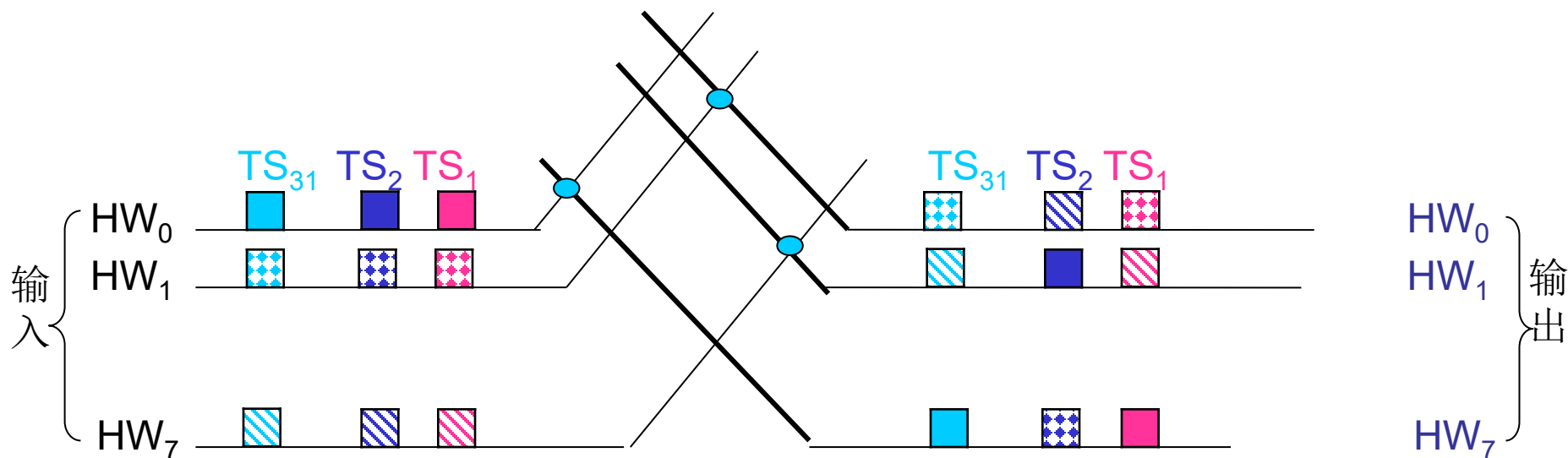


	0	1	7
0			
1	1	7	0
2	7	0	1
31	1	7	0

出线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的输出生控制方式



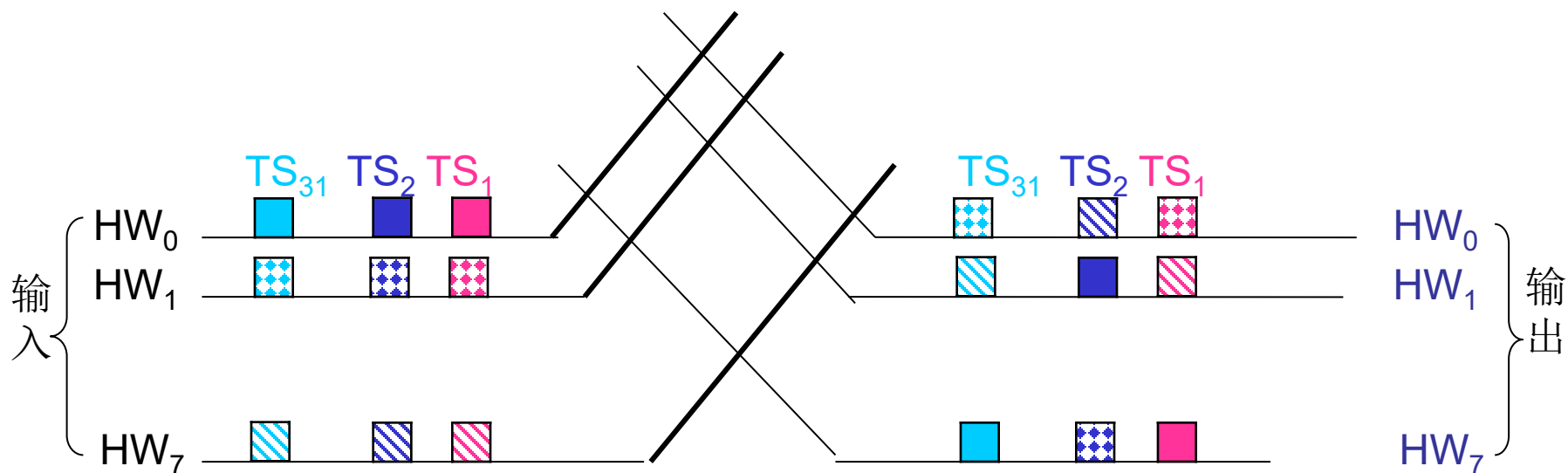
易于实现同发！
可自动避免出线冲突！

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

出线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的输入控制方式



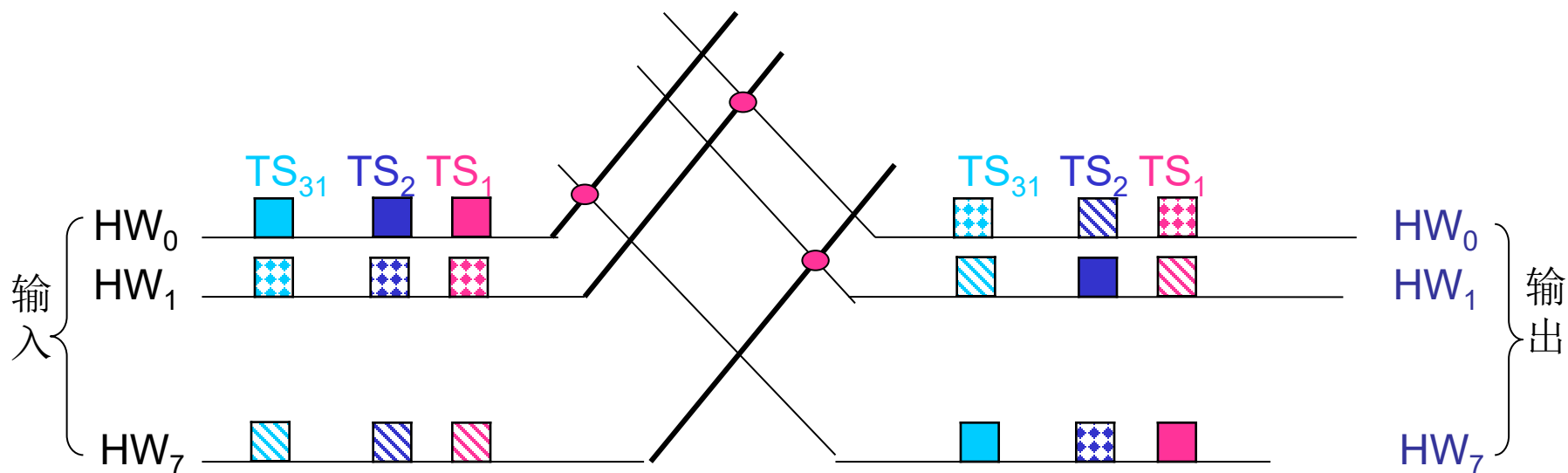
	0	1	7
0			
1	7	0	1
2	1	7	0
31	7	0	1

入线

控存填写的内容为‘线号’

每一行有什么约束?

空间交换单元的输入控制方式

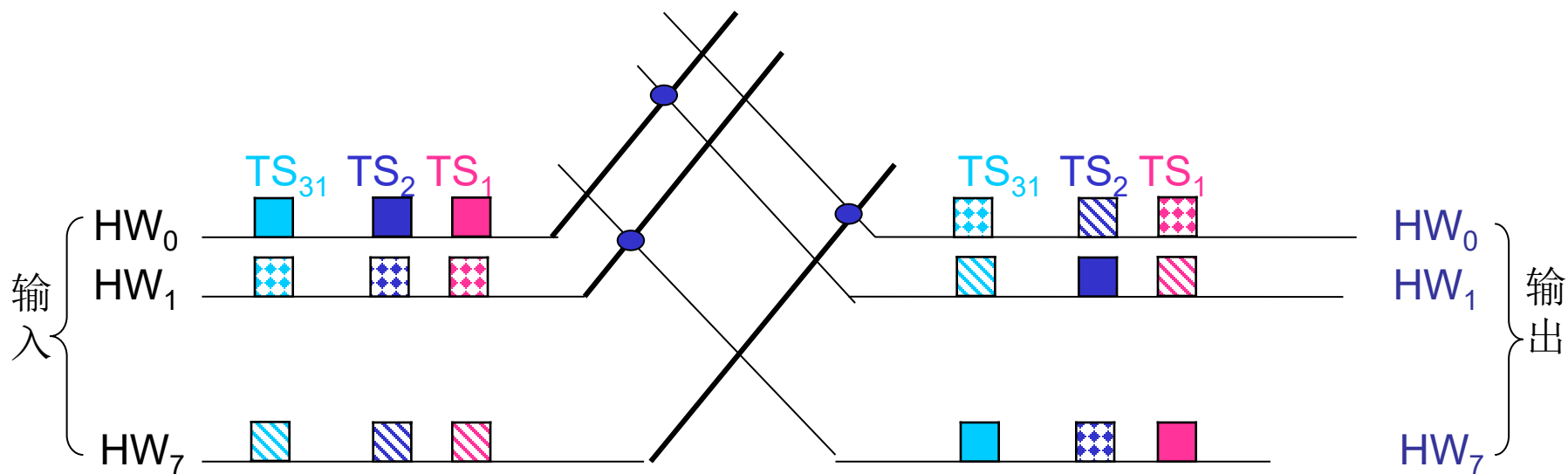


	0	1	7
0			
1	7	0	1
2	1	7	0
31	7	0	1

入线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的输入控制方式

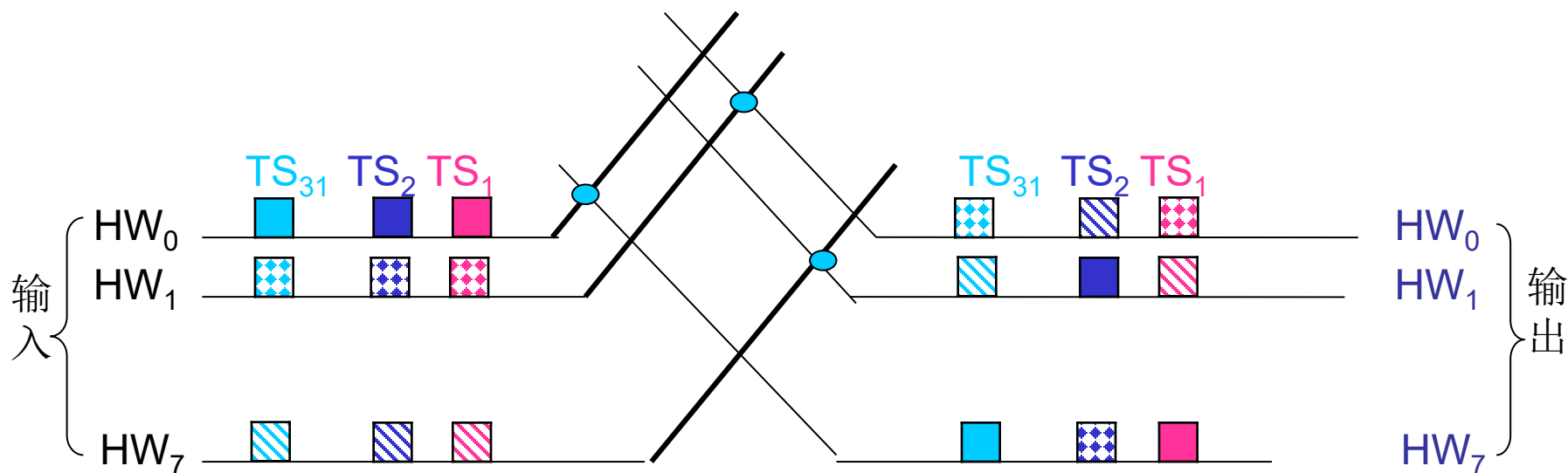


	0	1	7
0			
1	7	0	1
2	1	7	0
31	7	0	1

入线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的输入控制方式



不易实现同发！
需注意避免出线冲突！

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

入线

控存填写的内容为‘线号’

空间交换单元的基本特点

- 只完成**空间交换**，不进行时隙交换
- 空间接线器按时分方式工作
- **交换时延小，且稳定**
- **严格无阻塞**
 - 任何一对空闲的入线和出线之间，可以建立一个连接
- 可避免出线冲突（怎么避免？）
- 输出控制方式易于实现同发和广播（怎么实现？）

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

出线

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

入线

开关数量大、成本高！
时间交换单元、交换网络

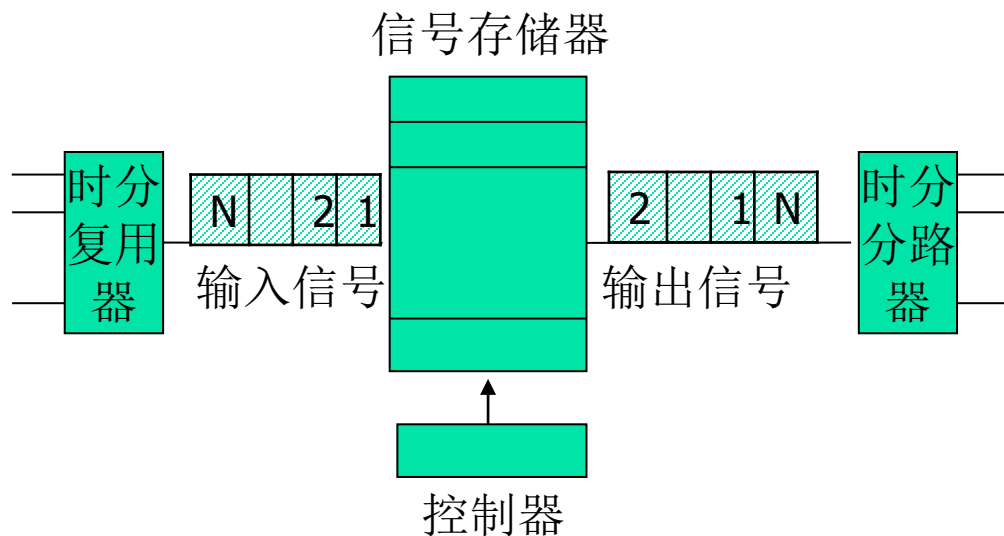
3.2 共享存储器型的交换单元

- 基本结构

- 信号存储器
- 控制器

- 工作方式

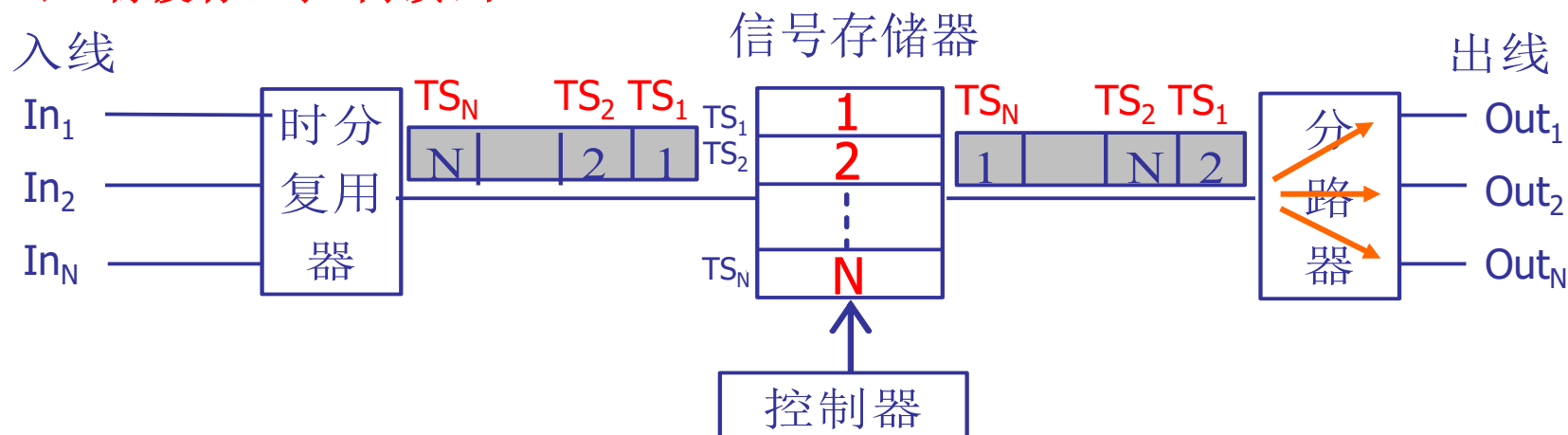
- 输出控制：入线缓冲，控制读出
- 输入控制：出线缓冲，控制写入



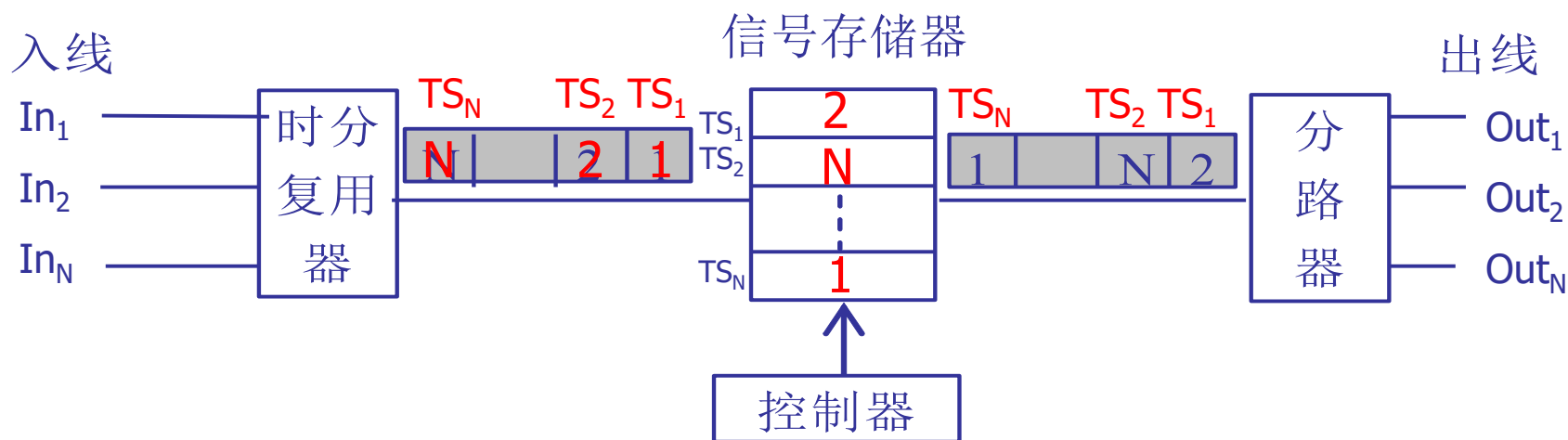
共享存储器结构——工作方式

交换要求: $TS_1 \rightarrow TS_N$, $TS_2 \rightarrow TS_1$, $TS_N \rightarrow TS_2$

■ 入端缓存, 控制读出

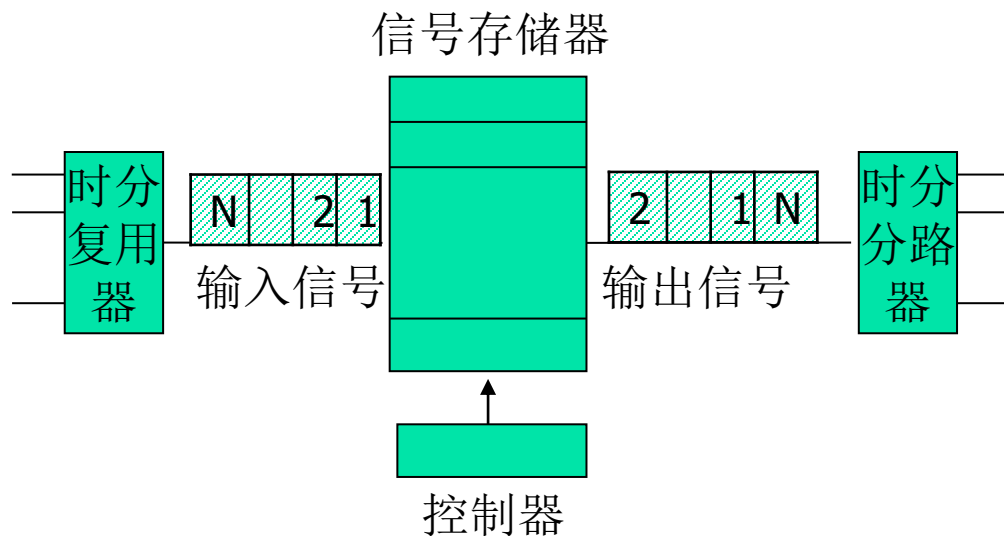


■ 出端缓存, 控制写入



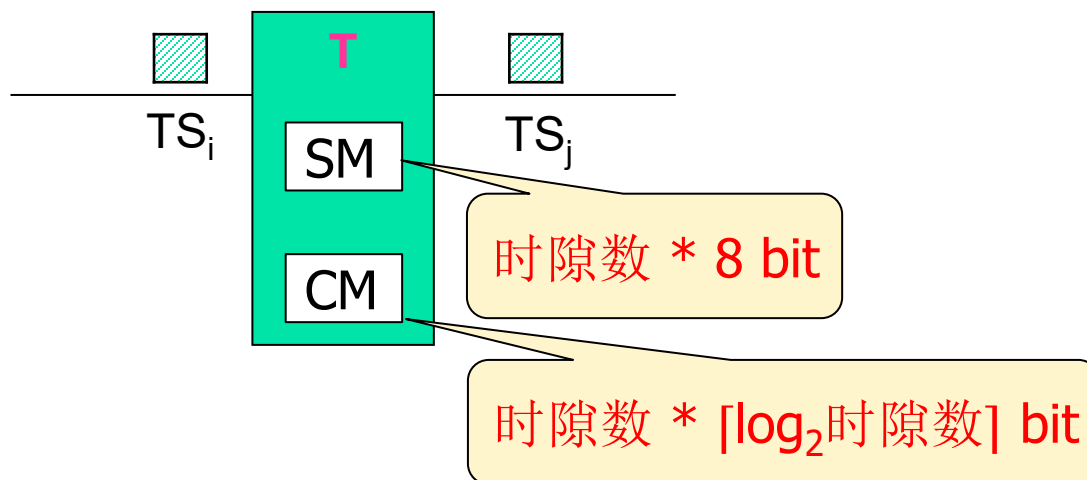
共享存储器结构——性质

- 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



共享存储器结构（在同步时分复用下的应用）

- 时间接线器，简称**T接线器**
 - 实现一条**同步时分复用线/母线上的时隙交换**
 - 由**话音存储器（SM）**、**控制存储器（CM）**、控制电路组成
 - SM：存放入线上各个时隙的话音数据
 - CM：存放各个时隙的交换要求，控制SM的读写过程
 - 控制方式分为：**输出控制**和**输入控制**



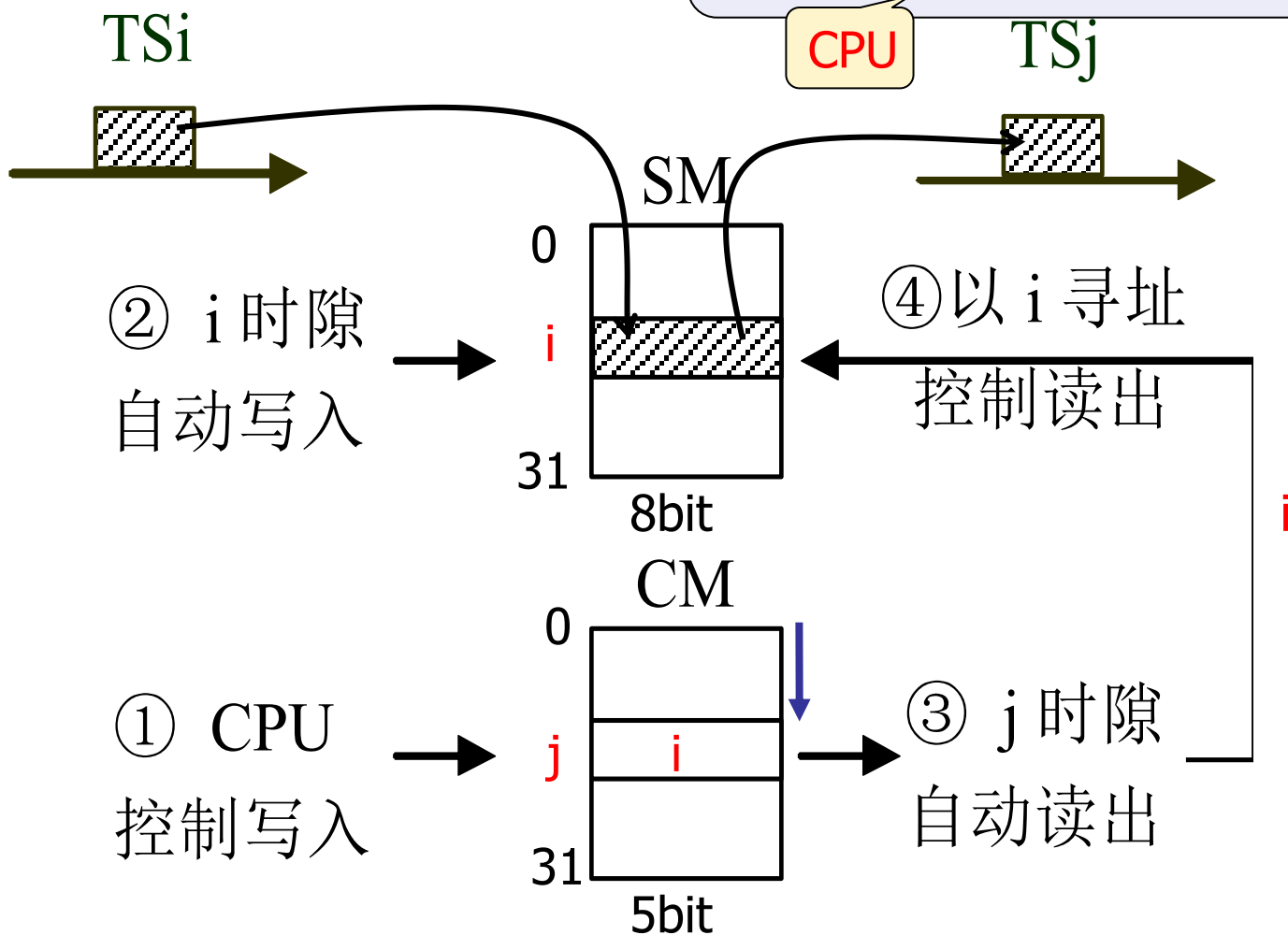
时间接线器—输出控制

时隙脉冲

CM

- ✓ SM: 顺序写入、控制读出
- ✓ CM: 控制写入、顺序读出

CPU



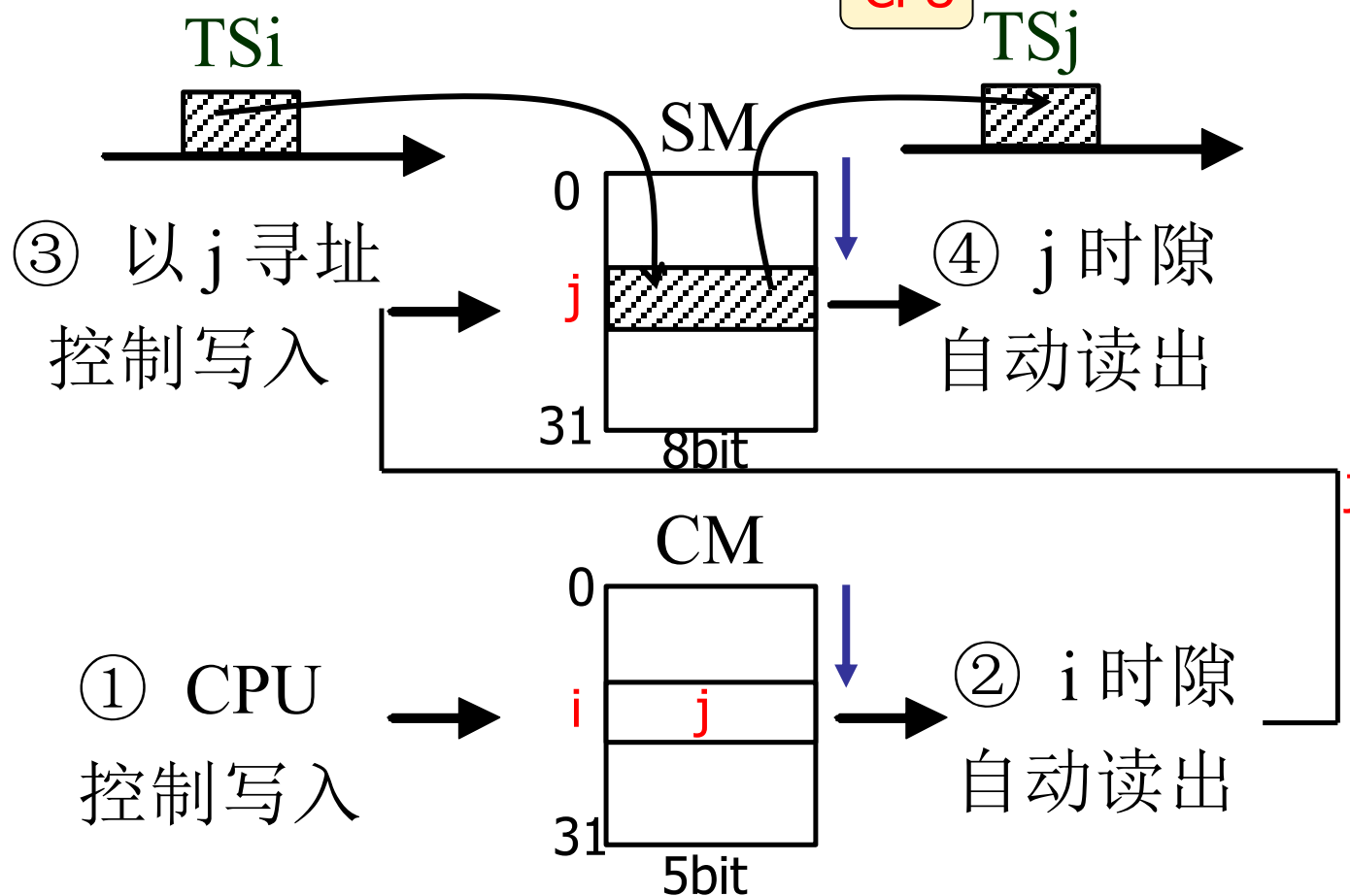
时间接线器—输入控制

CM

时隙脉冲

- ✓ SM: 控制写入、顺序读出
- ✓ CM: 控制写入、顺序读出

CPU





思考

- 上一帧的信息会来不及取走，丢失吗？

不会丢失，但有延迟

- 如果TS1和TS2用户通话一分钟，交换多少次？

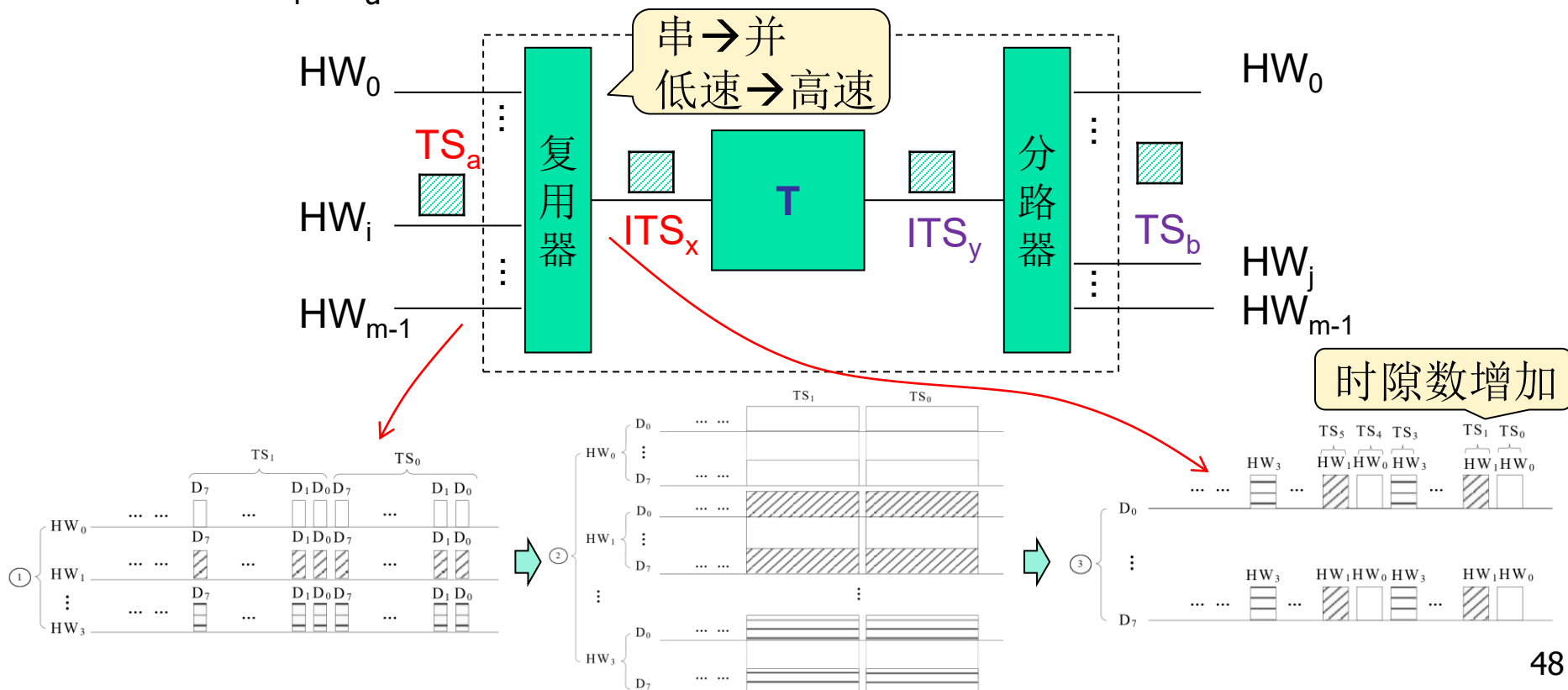
$60 * 8000$ (每秒8000帧) = 48万次

时间接线器的基本特点

- 用于交换同步时分复用的信号
- SM划分为N个（时隙数量）区域，每个区域一个字节，存放一个8bit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 分析交换时延？
- 严格无阻塞
- 输出控制方式可自动避免出线冲突 输入控制方式呢？
- 输出控制方式易于实现同发和广播 输入控制方式呢？
- 带宽（速率）固定为64kb/s

时间接线器的扩展

- 多个PCM基群，实现多条母线间的时隙交换（时空一体）
- 内部时隙ITS号与外部时隙TS号的换算
 - HW_i TS_a的ITS号 $x = TS$ 号 $a * HW$ 线总数 $m + HW$ 号 i



3.3 共享总线型的交换单元（自学）

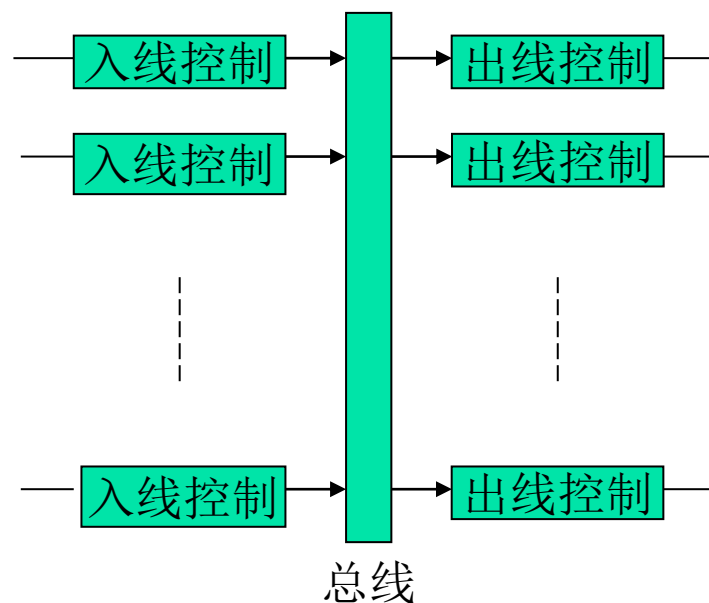
■ 基本结构

■ 总线

- **入线控制部件**：接收入线信号，进行相应的格式变换，放在**缓冲存储器**中，并在分配给该部件的时隙上把收到的信息送到总线上
- **出线控制部件**：检测总线上的信号，并把属于自己的信息读入一个**缓冲存储器**中，进行格式变换，由出线送出，形成出线信号

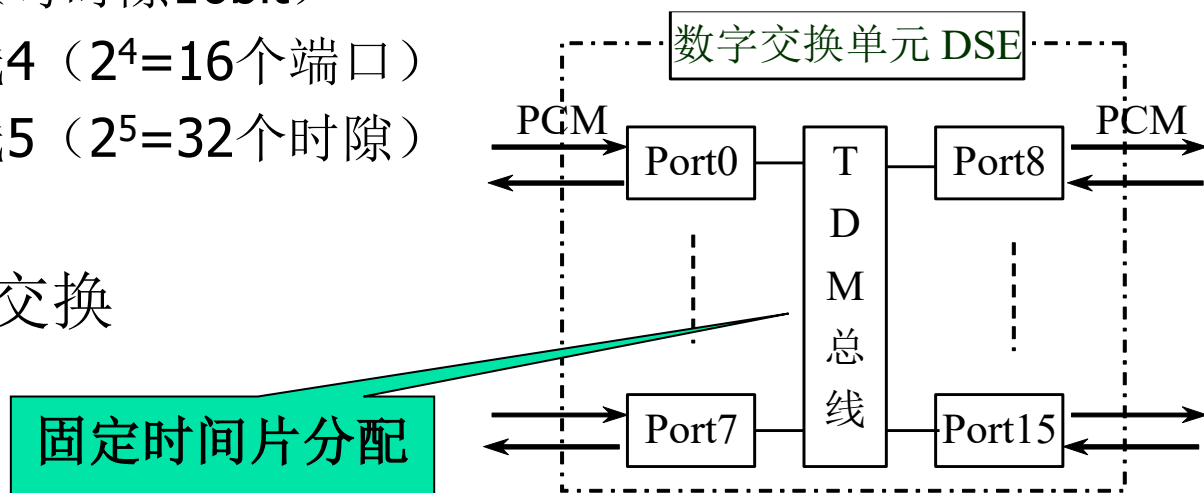
■ 工作方式（总线控制权的分配）

- 时隙分配
 - 固定时隙分配
 - 按需时隙分配
- 令牌法
- 冲突检测



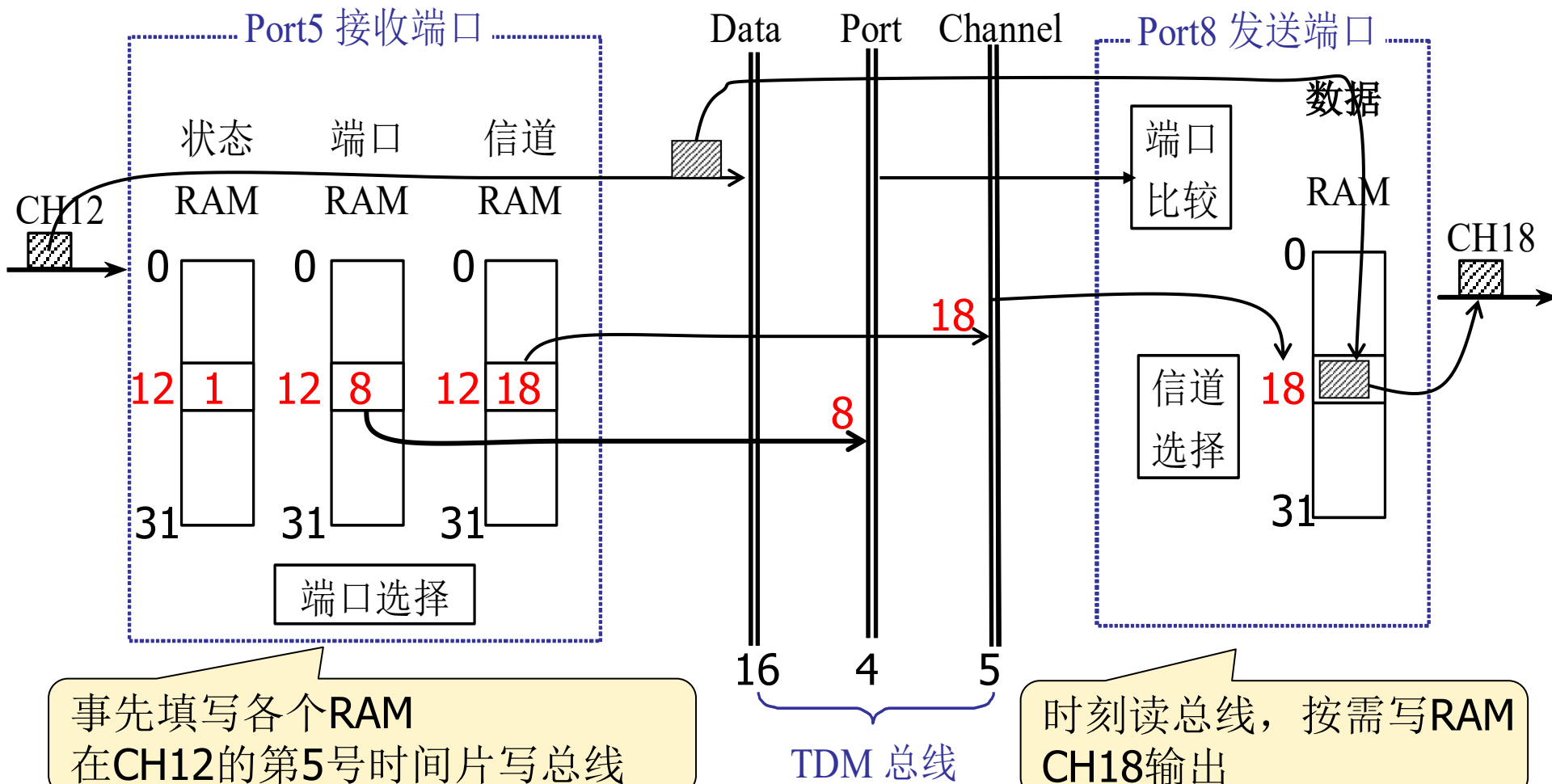
数字交换单元DSE

- 512*512交换单元
 - $16 \text{ (端口数)} * 32 \text{ (PCM线时隙数)} = 512$
- 16个端口时分复用TDM总线
 - 在每个信道时隙 ($3.9\mu\text{s}$) 内16个端口分时占用1/16的时间
- 总线宽度39
 - 数据总线16 (每时隙16bit)
 - 端口地址总线4 ($2^4=16$ 个端口)
 - 信道地址总线5 ($2^5=32$ 个时隙)
 - 控制总线14
- 实现时空一体交换



数字交换单元DSE——交换过程

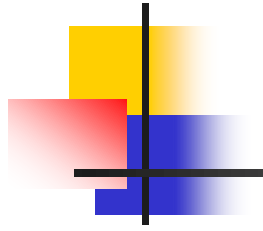
Port5 CH12 → Port8 CH18



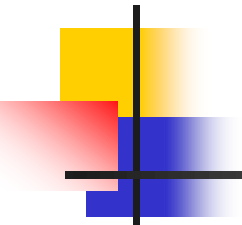


共享总线型的交换单元——性质

- 无内部阻塞
- 有时延，不同工作方式时延有差别
- 易于实现广播（使用专用广播地址）
- 交换速度与总线宽度（特别是数据总线）有关
- 受总线上速率的限制，不能构造大规模的交换单元



作业



■ 作业

- 试比较空分交换单元、共享存储器型时分交换单元和共享总线型时分交换单元的异同。
- 构造 8×8 的有向交换单元，采用基本开关阵列需要多少个开关？如果构造8无向交换单元，采用基本开关阵列分别需要多少个单向开关和双向开关？
- 一个S接线器的交叉点矩阵为 16×16 ，设有TS10要从母线7交换到母线5，试分别按输出控制方式和输入控制方式画出此时控制存储器相应单元的内容，说明控制存储器的容量和单元的大小（比特数）。
- 一个T接线器可完成一条PCM上的512个时隙之间的交换，现有TS31要交换到TS86，试分别按输出控制方式和输入控制方式画出此时话音存储器和控制存储器相应单元的内容，说明话音存储器和控制存储器的容量和每个单元的大小（比特数）。

■ 利用第二章MOOC复习



Q & A

袁 泉

yuanquan@foxmail.com

2023年2月26日