



東北林業大學
NORTHEAST FORESTRY UNIVERSITY



東北林業大學
NORTHEAST FORESTRY UNIVERSITY

计算机系统结构

第5章：输入输出系统



5.1 引言

5.2 输入输出基本概念

5.3 通道处理机

5.4 输入输出处理机

5.1

引言

5.1 引言

1. 计算机处理的任务可分为计算密集型和输入输出密集型两种。
2. 输入输出系统的功能是在主机与外设之间进行数据传送以及对外设进行控制操作。数据的传送是将外设的指定存储区域与主存的指定地址空间进行数据交换。
3. 主机对输入输出的管理操作由操作系统实现，应用程序与外设打交道是通过操作系统的设备驱动程序进行的。

5.1 引言

设CPU处理的时间是 T_{CPU} ，I/O设备的影响时间是 $T_{I/O}$ ，CPU处理占总处理时间的90%，I/O处理占总处理时间的10%，总处理时间 $T_{WORK} = T_{CPU} + T_{I/O}$ 。如果CPU处理速度提高10倍，I/O处理速度没有提高，那么根据Amdahl定理，系统总的处理速度提高量 S 为：

$$S = 1 / (0.1 + 0.9 / 10) = 1 / (0.1 + 0.09) = 1 / 0.19 \approx 5$$

即在CPU处理速度提高10倍时，系统总的性能仅提高5倍。同理，如果CPU处理速度提高100倍，系统的性能也只能提高10倍。如果考虑CPU的处理和I/O处理的并行性，总处理时间为：

$$T_{WORK} = T_{CPU} + T_{I/O} - T_{OVERLAP}$$

其中， $T_{OVERLAP}$ 小于 $\min(T_{CPU}, T_{I/O})$ 。因此， T_{WORK} 大于 $\max(T_{CPU}, T_{I/O})$ 。在上例中，如果I/O的处理速度不提高，那么整个系统性能提高的上限为10。

5.2 输入输出基本概念

1. 通常把处理机与主存储器之外的部分统称为输入输出系统，包括输入输出设备、输入输出接口和输入输出软件等。
2. 实际上，运算器、控制器、主存储器和总线等也要通过输入输出系统来管理。

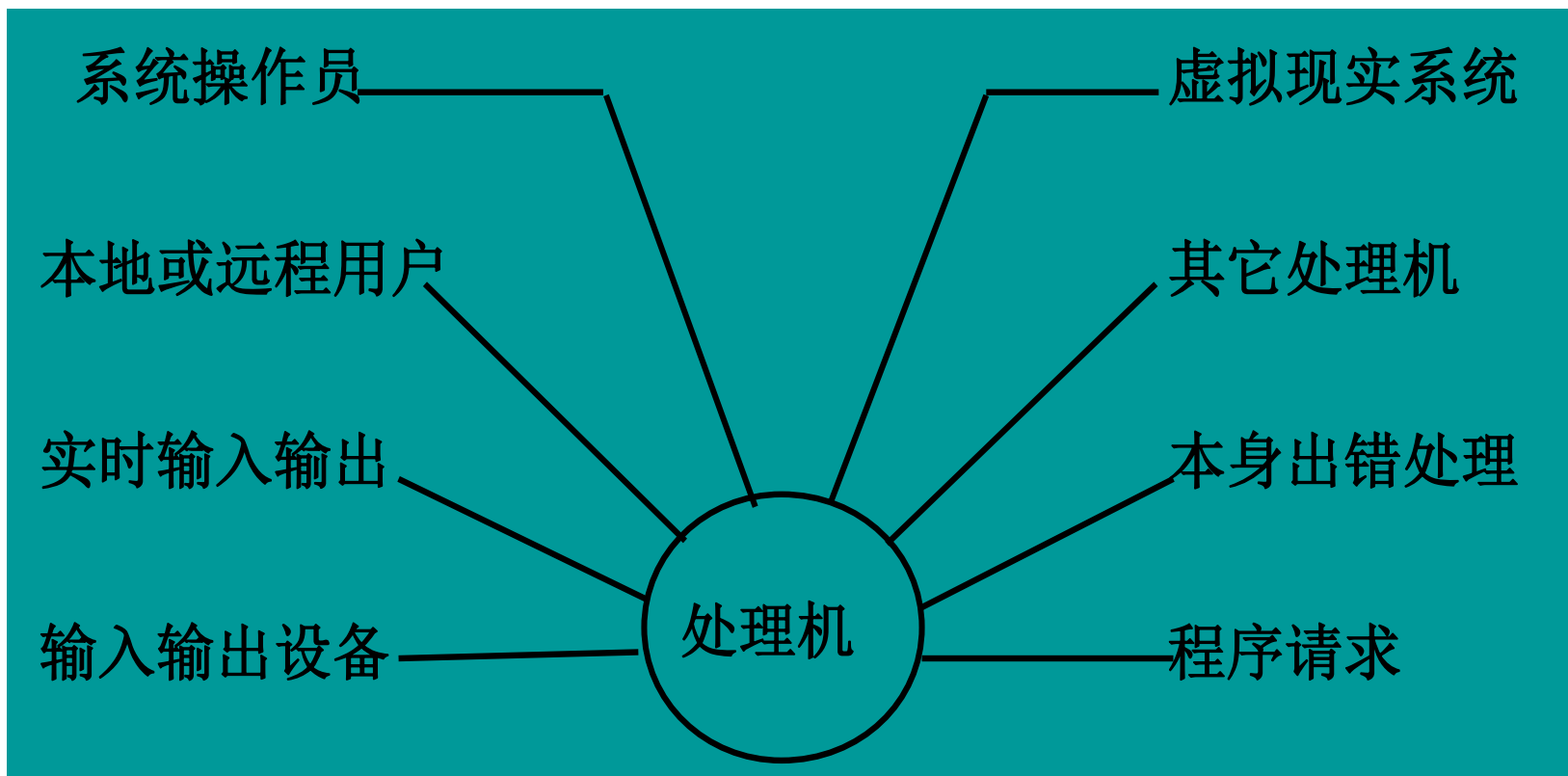
5.2 输入输出基本概念

5.2.1 输入输出系统的特点

输入输出系统是处理机与外界进行数据交换的通道。

- 输入输出系统是计算机系统中最具多样性和复杂性的部分。
- 输入输出系统涉及到机、光、电、磁、声、自动控制等多种学科。
- 输入输出系统最典型地反映着硬件与软件的相互结合。
- 输入输出系统的复杂性隐藏在系统软件中，用户无需了解输入输出设备的具体细节。

5.2 输入输出基本概念



5.2 输入输出基本概念

1. 实时性

- 对于一般输入输出设备, 如果处理机提供的服务不及时, **可能丢失数据**, 或造成外围设备工作的错误。
- 对于实时控制计算机系统, 如果处理机提供的服务不及时, **可能造成巨大的损失**, 甚至造成人身伤害。
- 对于**处理机本身的硬件或软件错误**: 如电源故障、数据校验错、页面失效、非法指令、地址越界等, 处理机必须及时处理。
- 对不同类型的设备, 必须具有与设备相配合的**多种工作方式**。

5.2 输入输出基本概念

2. 与设备无关性

- 独立于具体设备的标准接口。例如，串行接口、并行接口、SCSI (Small Computer System Interface) 接口等
- 计算机系统的使用者，在需要更换外围设备时，各种不同型号，不同生产厂家的设备都可以直接通过标准接口与计算机系统连接。
- 处理机采用统一的硬件和软件对品种繁多的设备进行统一管理。
- 某些计算机系统已经实现了即插即用技术。

5.2 输入输出基本概念

3. 异步性

- 输入输出设备通常不使用统一的中央时钟，各个设备按照自己的时钟工作，但又要在某些时刻接受处理机的控制。
- 处理机与外围设备之间，外围设备与外围设备之间能并行工作

针对实时性，采用层次结构的方法，

针对与设备无关性，采用分类处理的方法

针对异步性，采用自治控制的方法，



5.2 输入输出基本概念

5.2.2 输入输出系统的组织方式

1. 自治控制

- 输入输出系统是独立于CPU之外的自治系统处理机与外围设备之间要有恰当的分工

2. 层次结构

- 最内层是输入输出处理机、输入输出通道等，中间层是标准接口。
- 标准接口通过设备控制器与输入输出设备连接

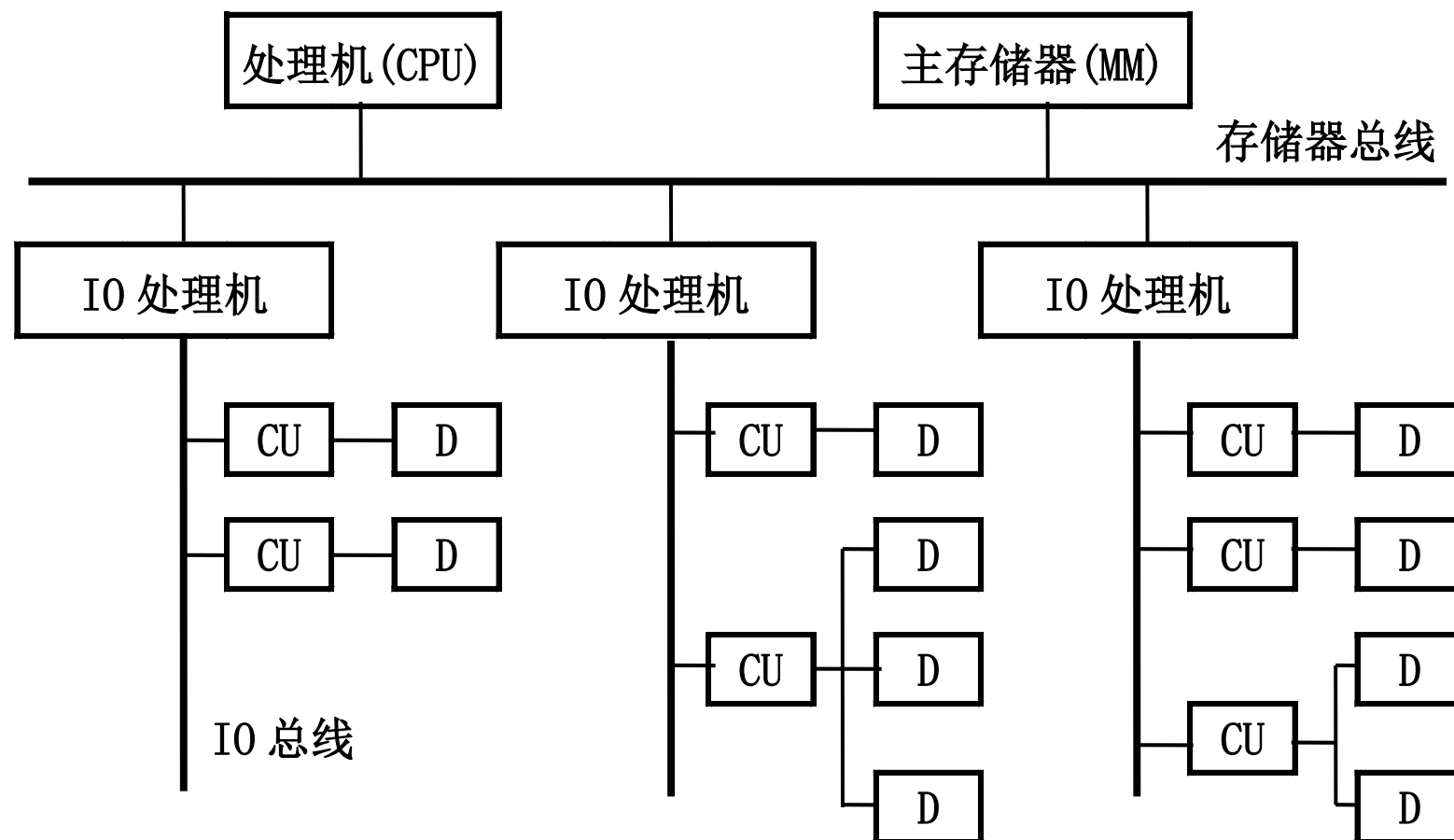
3. 分类组织

- 面向字符的设备，如字符终端、打字机等

计算机系统结构

- 面向数据块的设备，如磁盘、磁带、光盘等

5.2 输入输出基本概念



CU 是设备控制器，D 是外围设备
输入输出系统的层次结构



5.2 输入输出基本概念

5.2.3 基本输入输出方式

1. 程序控制输入输出方式

程序控制输入输出方式又称为状态驱动输入输出方式、应答输入输出方式、查询输入输出方式、条件驱动输入输出方式等，具有以下4个特点：

- (1) 何时对何设备进行输入输出操作**受CPU控制**
- (2) CPU要通过指令对设备进行测试才能知道设备的工作状态。空闲、准备就绪、忙碌等
- (3) 数据的输入和输出都要经过CPU
- (4) 用于连接低速外围设备，如终端、打印机等



5.2 输入输出基本概念

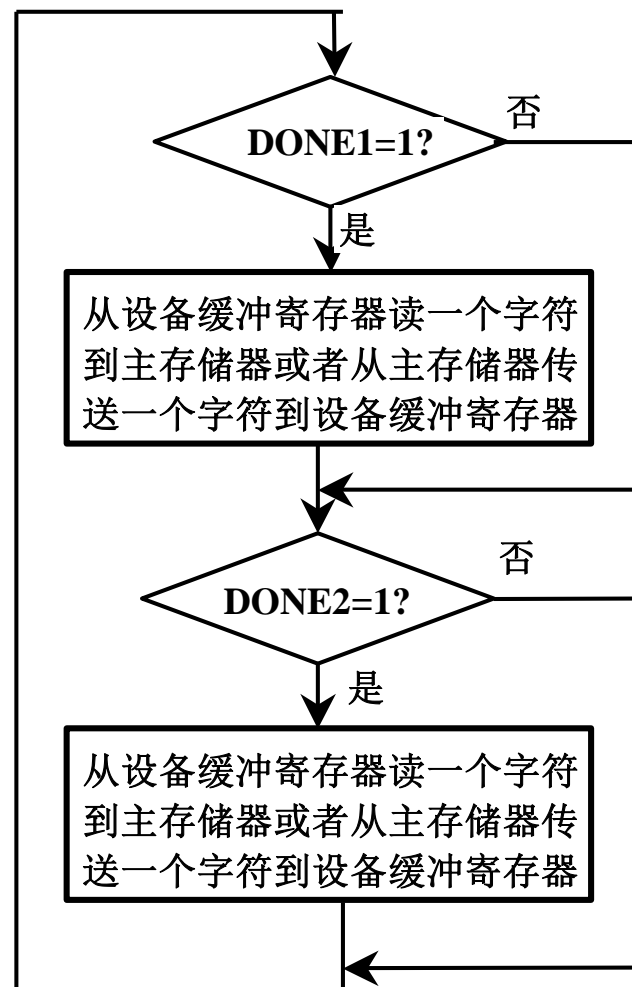
一个处理机管理多台外围设备。
处理机采用轮流循环测试方法，
分时为各台外围设备服务。

优点：

灵活性很好。可以很容易地
改变各台外围设备的优先级。

缺点：

不能实现处理机与外围设备
之间并行工作。



在程序控制方式中一个处理机管理多台外部设备的程序流程图

5.2 输入输出基本概念

2. 中断输入输出方式

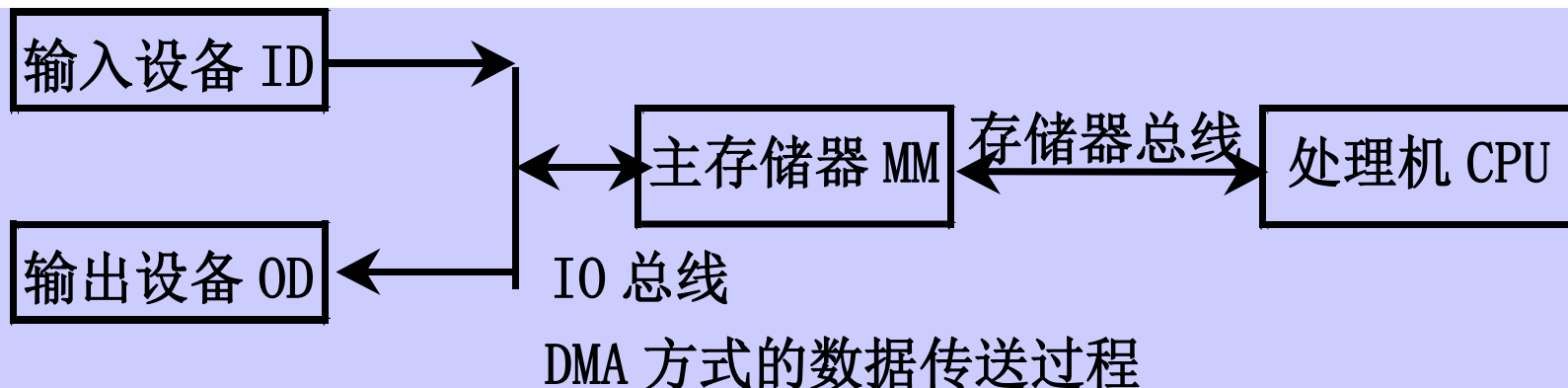
定义：当出现来自系统外部，机器内部，甚至处理机本身的任何例外的，或者虽然是事先安排的，但出现在现行程序的什么地方是事先不知道的事件时，CPU暂停执行现行程序，转去处理这些事件，等处理完成后再返回来继续执行原先的程序。具有以下特点：

- (1) CPU与外围设备能够并行工作。
- (2) 能够处理例外事件。
- (3) 数据的输入和输出都要经过CPU。
- (4) 用于连接低速外围设备。

5.2 输入输出基本概念

3. 直接存储器访问方式

直接存储器访问方式(DMA: Direct Memory Access), 主要用来连接高速外围设备。如磁盘存储器, 磁带存储器、光盘辅助存储器, 行式打印机等。(1) CPU与外围设备能够并行工作。



5.2 输入输出基本概念

DMA方式具有如下特点：

(1) 主存储器既可以被CPU访问，也可以被外围设备访问。申请排队外围设备的访问申请安排在最高优先级。

(2) 不需要做保存现场和恢复现场等工作，DMA方式的工作速度大大加快。

(3) 在DMA控制器中，除了需要设置数据缓冲寄存器、设备状态寄存器或控制寄存器之外，还要设置主存储器地址寄存器、设备地址寄存器和数据交换个数计数器。

(4) 在DMA方式开始之前要对DMA控制器进行初始化，包括向DMA控制器传送主存缓冲区首地址、设备地址、交换的数据块的长度等，并启动设备开始工作。在DMA方式结束之后，要向CPU申请中断，在中断服务程序中对主存储器中数据缓冲区进行后处理。如果需要继续传送数据的话，要再次对DMA控制器进行初始化。

(5) 在DMA方式中，CPU不仅能够与外围设备并行工作，而且整个数据的传送过程不需要CPU的干预。

5.2 输入输出基本概念

目前使用的DMA方式实际上有如下三种：

➤ (1) 周期窃取

- 在每一条指令执行结束时，CPU测试有没有DMA服务申请。借用CPU完成DMA工作流程。包括数据和主存地址的传送，交换个数计数器减1，主存地址的增值及一些测试判断等。
- 周期窃取方式与程序控制输入输出方式和中断输入输出方式的不同处主要在：它不需要使用程序来完成数据的输入或输出，只是借用了CPU的周期来完成DMA流程。因此，其工作速度是很快的。
- 周期窃取方式的优点是硬件结构简单，比较容易实现。缺点是在数据输入或输出过程种实际上占用了CPU的时间。



5.2 输入输出基本概念

➤ (2) 直接存取方式

- 整个工作流程全部用硬件完成。
- 优点与缺点正好与周期窃取方式相反。

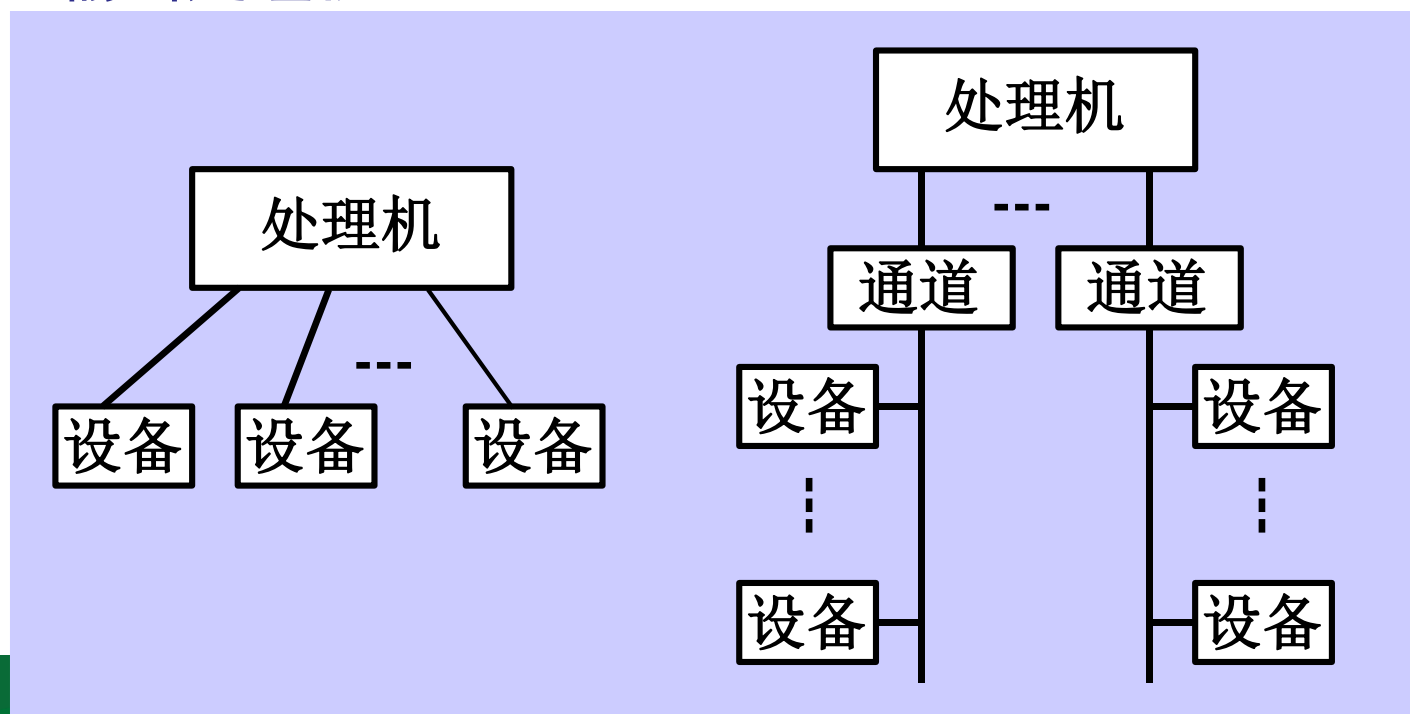
➤ (3) 数据块传送方式

- 在设备控制器中设置一个比较大的数据缓冲存储器。设备控制器与主存储器之间的数据交换以数据块为单位，并采用程序中断方式进行。
- 采用数据块传送方式的外围设备有软盘驱动器、行式打印机、激光打印机、卡片阅读机、绘图仪等。

5.3 通道处理机

处理机与外部设备的连接方式

- 直接连接
- 通道处理机
- 输入输出处理机



5.3 通道处理机

1. 三种基本输入输出方式存在的问题：

- CPU的输入输出负担很重，不能专心用于用户程序的计算工作。
- 低速外围设备，每传送每个字符都由CPU执行一段程序来完成。
- 高速外围设备的初始化、前处理和后处理等工作需要CPU来完成。
- 大型机中的外围设备台数很多，但一般并不同时工作。让DMA控制器能被多台设备共享，提高硬件的利用率。

5.3 通道处理机

2. 通道的主要功能：

- 接受CPU发来的指令，选择一台指定的外围设备与通道相连接。
- 执行CPU为通道组织的通道程序。
- 管理外围设备的有关地址。
- 管理主存缓冲区的地址。
- 控制外围设备与主存缓冲区之间数据交换的个数。
- 指定传送工作结束时要进行的操作。
- 检查外围设备的工作状态，是正常或故障。
- 在数据传输过程中完成必要的格式变换。

5.3 通道处理机

5.3.2 通道的工作过程

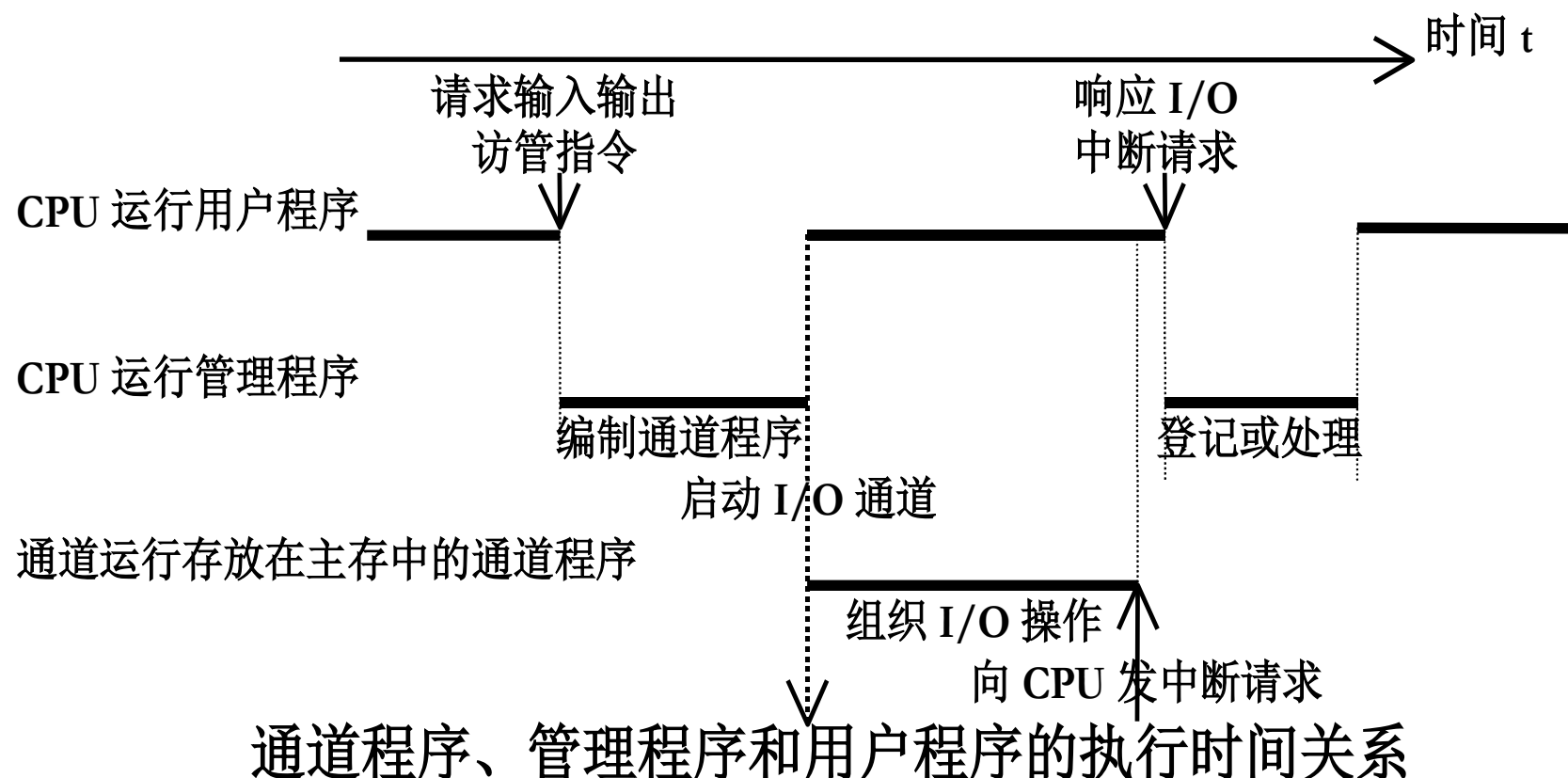
通道完成一次数据输入输出的过程分为三步：

- 在用户程序中使用访管指令进入管理程序，由CPU通过管理程序组织一个通道程序，并启动通道。
- 通道处理机执行通道程序，完成指定的数据输入输出工作。
- 通道程序结束后向CPU 发中断请求。CPU 响应这个中断请求后，第二次进入操作系统，调用管理程序对输入输出中断请求进行处理。



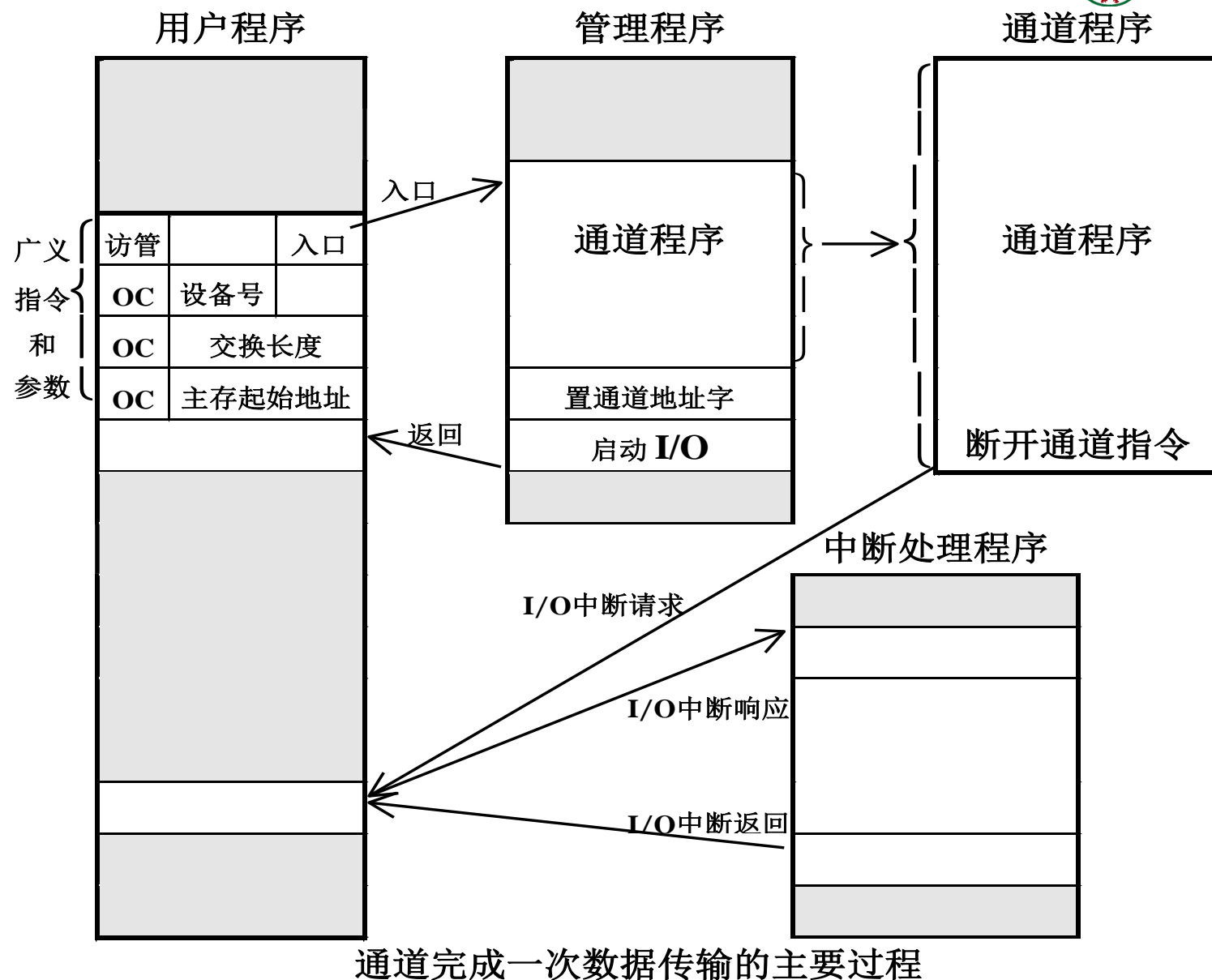
5.3 通道处理机

通道的工作过程

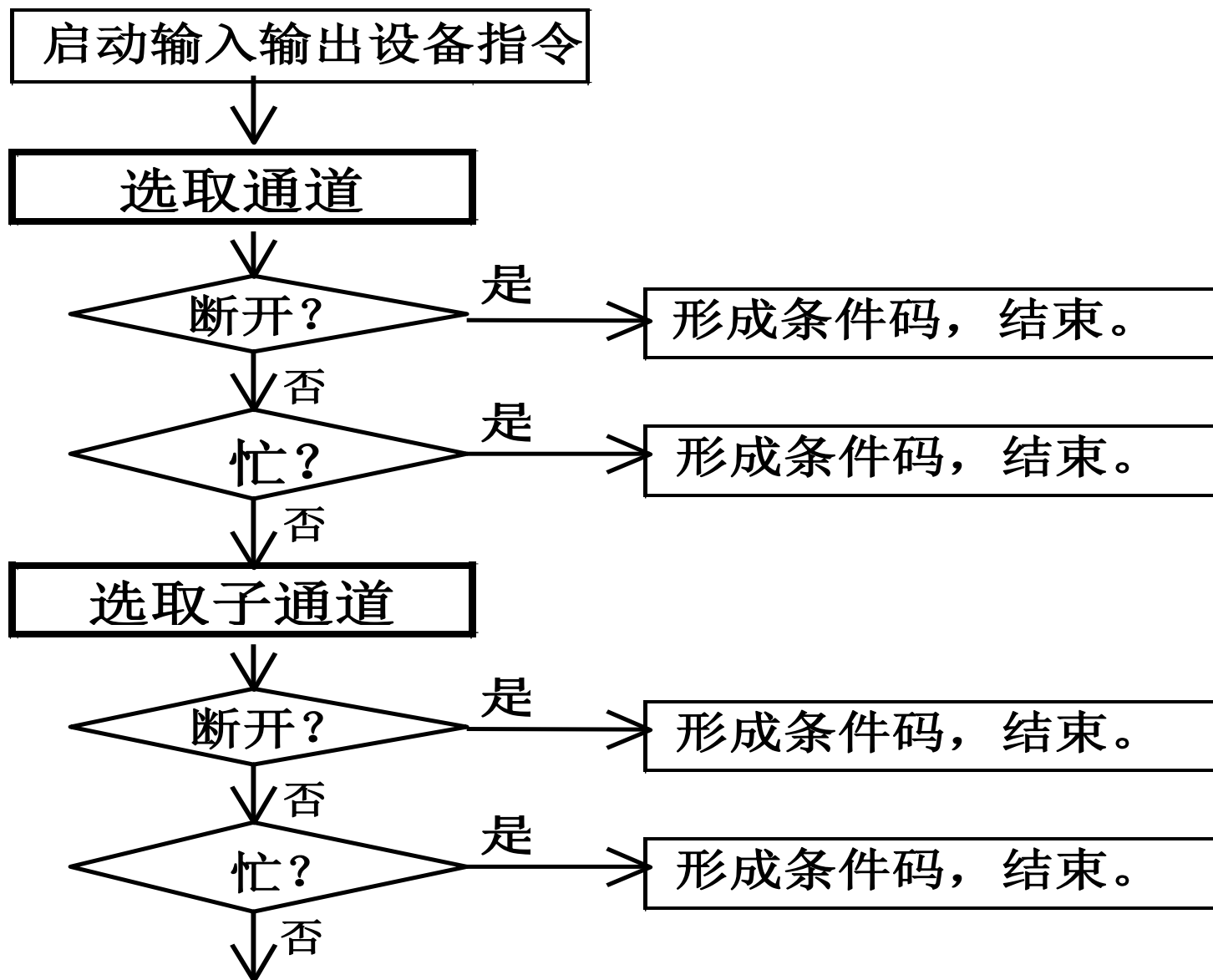




5.3 通道处理机

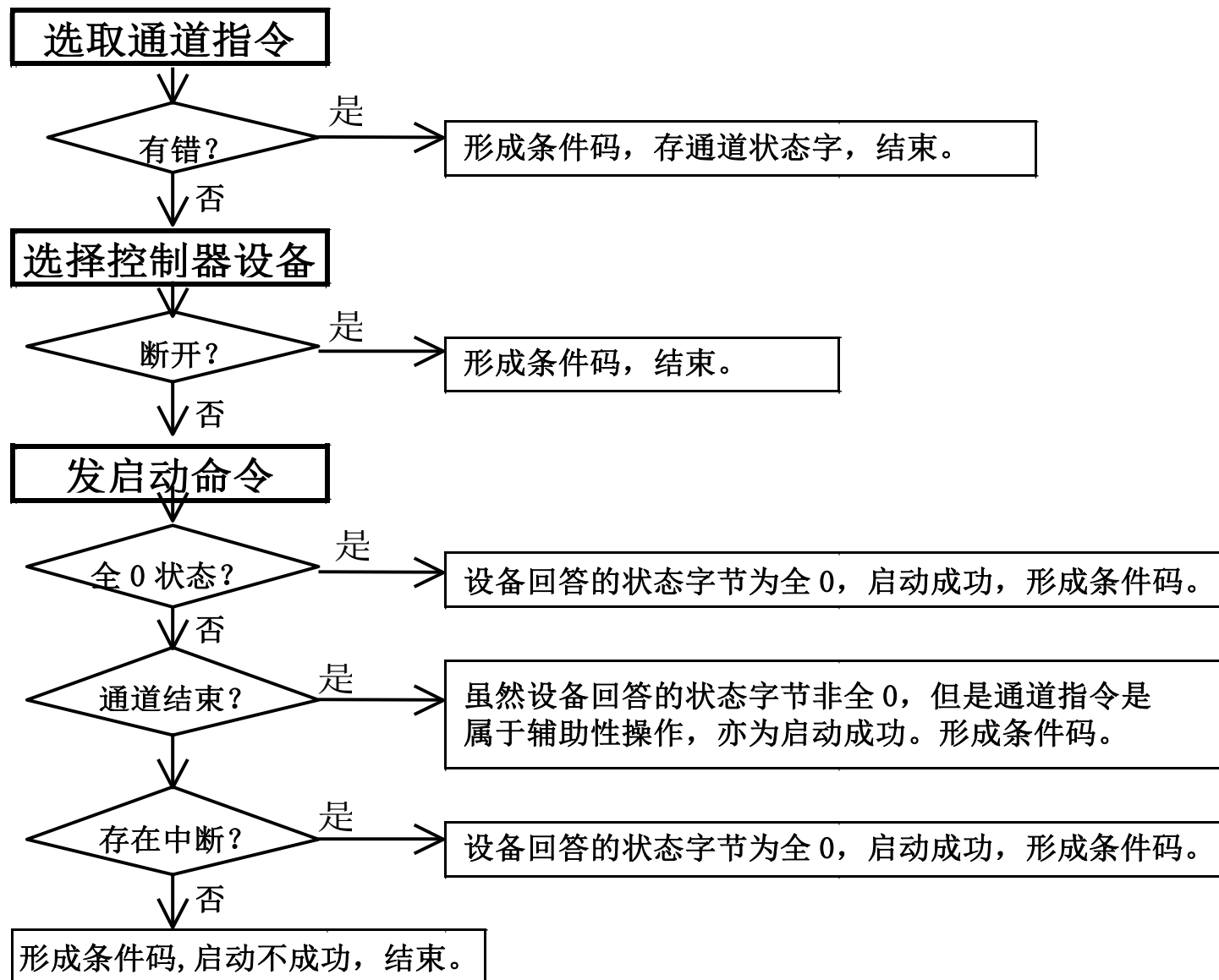


5.3 通道处理机





5.3 通道处理机



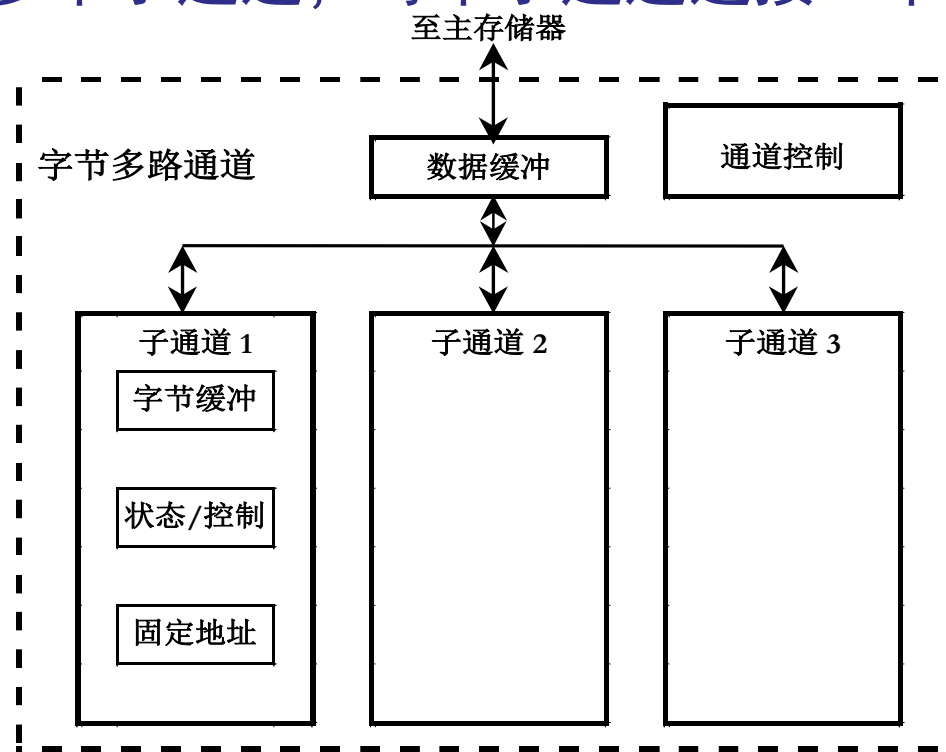


5.3 通道处理机

5.3.3 通道的种类

1. 字节多路通道：

- 为多台低中速的外围设备服务
- 有多个子通道，每个子通道连接一个控制器



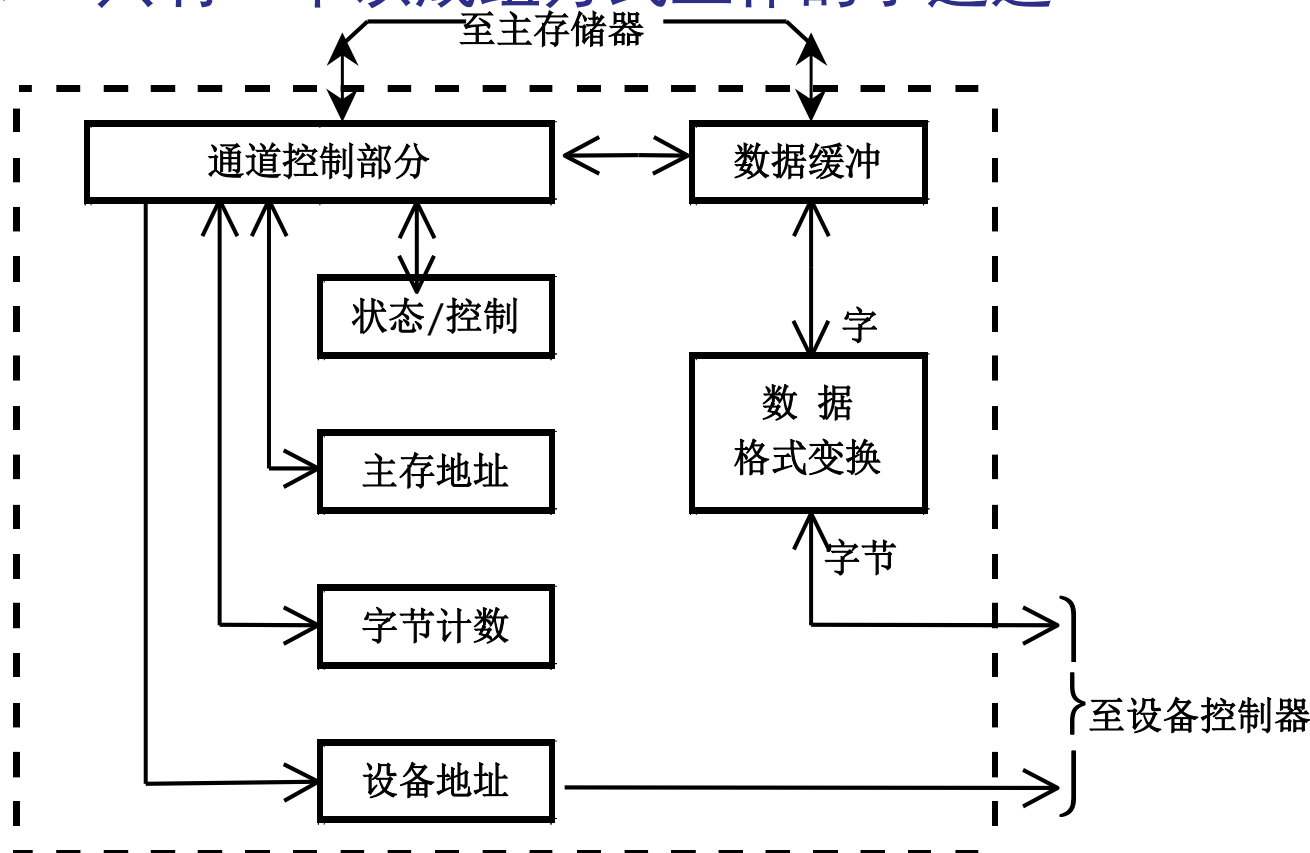
字节多路通道的结构



5.3 通道处理机

2. 选择通道:

- 为高速外围设备服务
- 只有一个以成组方式工作的子通道



5.3 通道处理机

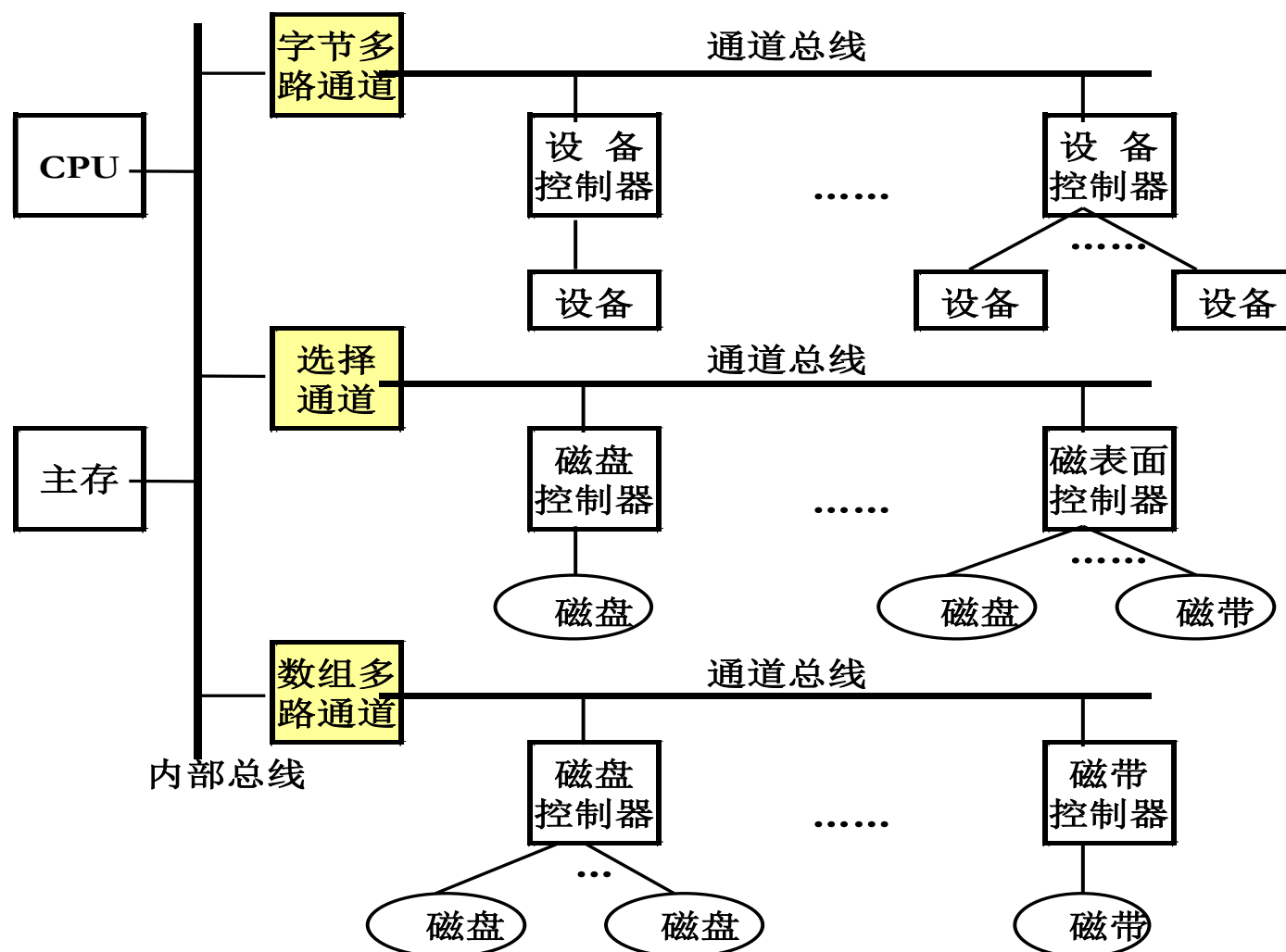
3. 数组多路通道：

- 字节多路通道和选择通道的结合。
- 每次为一台高速设备传送一个数据块，并轮流为多台外围设备服务。
- 从磁盘存储器读出文件的的过程分为三步：
 - 定位、找扇区、读出数据
- 数组多路通道的实际工作方式是：在为一台高速设备传送数据的同时，有多台高速设备可以在定位或者在找扇区。

与选择通道相比，数组多路通道的数据传输率和通道的硬件利用都很高，控制硬件的复杂度也高。



5.3 通道处理机



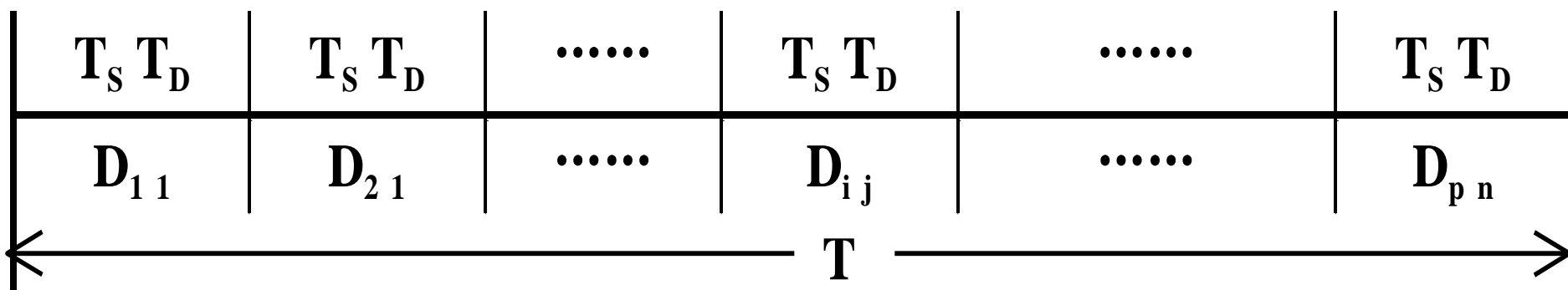
三种类型的通道与 CPU、设备控制器和外围设备的连接关系

5.3 通道处理机

5.3.4 通道中的数据传送过程

1. 字节多路通道的数据传送过程：

一个字节多路通道连接 P 台设备，每台设备都传送 n 个字节



T_S : 设备选择时间, T_D : 传送一个字节的的时间,

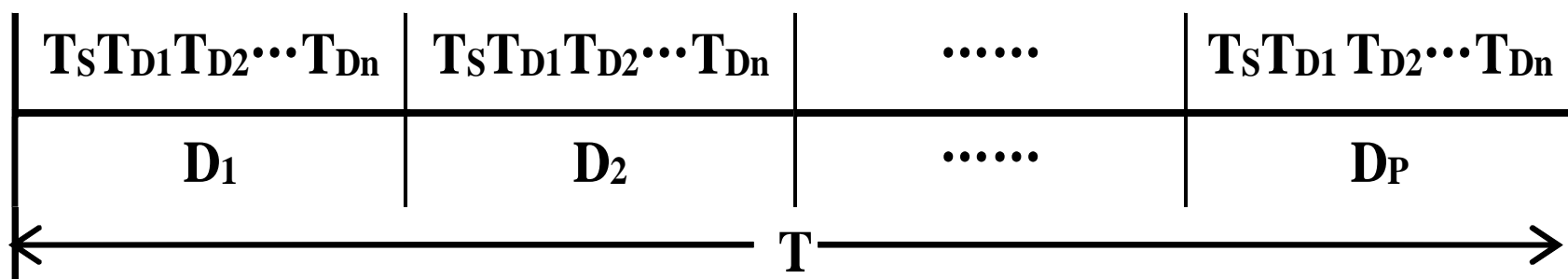
$D_{i\ j}$: 第 i 台设备的第 j 个数据, 其中有: $i=1,2,\cdots,p$, $j=1,2,\cdots,n$

总共所需要的时间: $T_{\text{BYTE}} = (T_S + T_D) \cdot P \cdot n$

5.3 通道处理机

2. 选择通道的数据传送过程：

选择通道连接 P 台设备，每台设备都传送 n 个字节



T_s : 设备选择时间,

T_{Di} : 通道传送第 i 个数据所用的时间, 其中有: $i=1,2,\cdots,n$

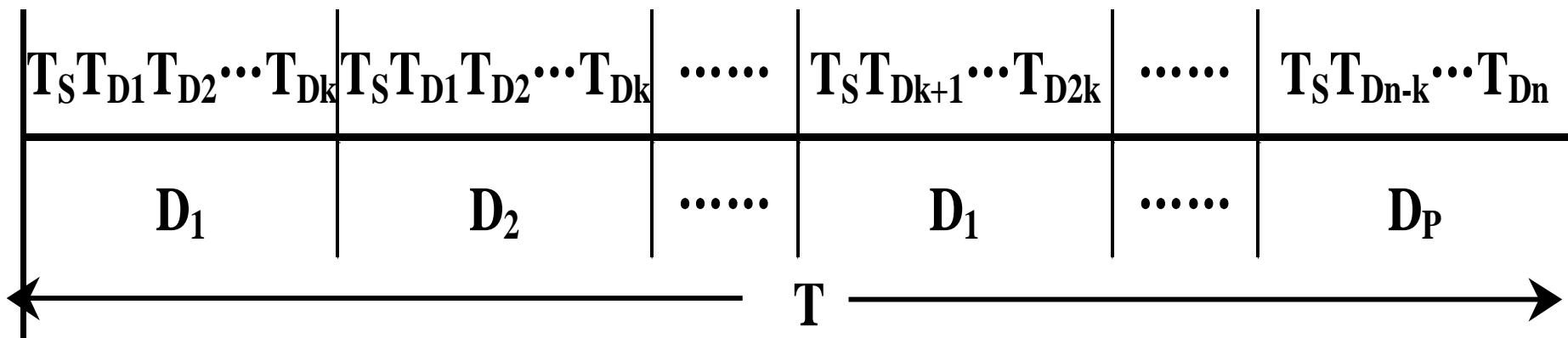
D_i : 通道正在为第 i 台设备服务, 其中有: $i=1,2,\cdots,p$

总共所需要的时间: $T_{SELETE} = (T_s / n + T_D) \cdot P \cdot n$

5.3 通道处理机

3. 数组多路通道的数据传送过程：

数组多路通道连接 P 台设备，每台设备都传送 n 个字节



T_S : 设备选择时间, k : 一个数据块中的字节个数,

T_{Di} : 通道传送第 i 个数据所用的时间, 其中有: $i=1,2,\dots,n$

D_i : 通道正在为第 i 台设备服务, 其中有: $i=1,2,\dots,p$

总共所需要的时间: $T_{\text{BLOCK}} = (T_S / k + T_D) \cdot P \cdot n$

5.3 通道处理机

5.3.5 通道流量分析

- **通道流量**：单位时间内能够传送的最大数据量。又称**通道吞吐率**，**通道数据传输率**等。
- **通道最大流量**：通道在满负荷工作状态下的流量。
- **通道流量与连接在通道上的设备的数据传输率的关系如下：**

$$f_{BYTE} = \sum_{i=1}^p f_i \quad f_{SELETE} = \underset{i=1}{Max}^p f_i \quad f_{BLOCK} = \underset{i=1}{Max}^p f_i$$

5.3 通道处理机

➤ 三种通道的最大流量计算公式：

$$f_{MAX.BYTE} = \frac{p \cdot n}{(T_s + T_D) \cdot p \cdot n} = \frac{1}{T_s + T_D} \text{ 字节 / 秒}$$

$$f_{MAX.SELETE} = \frac{p \cdot n}{(T_s / n + T_D) \cdot p \cdot n} = \frac{1}{T_s / n + T_D} \text{ 字节 / 秒}$$

$$f_{MAX.BLOCK} = \frac{p \cdot n}{(T_s / k + T_D) \cdot p \cdot n} = \frac{1}{T_s / k + T_D} \text{ 字节 / 秒}$$

➤ 为保证通道不丢失数据，通道的实际流量应不大于通道最大流量：
 $f_{BYTE} \leq f_{MAX.BYTE} \quad f_{SELETE} \leq f_{MAX.SELETE} \quad f_{BLOCK} \leq f_{MAX.BLOCK}$

5.3 通道处理机



东北林业大学
NORTHEAST FORESTRY UNIVERSITY

例5.1 一个字节多路通道连接D1、D2、D3、D4、D5共5台设备，这些设备分别每10 μ s、30 μ s、30 μ s、50 μ s和75 μ s发出一次数据传送请求。

(1) 计算这个通道的实际流量和工作周期。

(2) 如果这个字节多路通道的最大流量正好等于通道实际流量，并假设数据传输率高的设备，其优先级也高。5台设备在0时刻同时向通道发出第一次传送数据的请求，并在以后的时间里按照各自的数据传输率连续工作。画出通道分时为各台设备服务的时间图，并计算处理完各设备的第一次请求的时刻。

(3) 从时间图中发现什么问题？如何解决？

5.3 通道处理机

➤ (1) 通道的实际流量为：

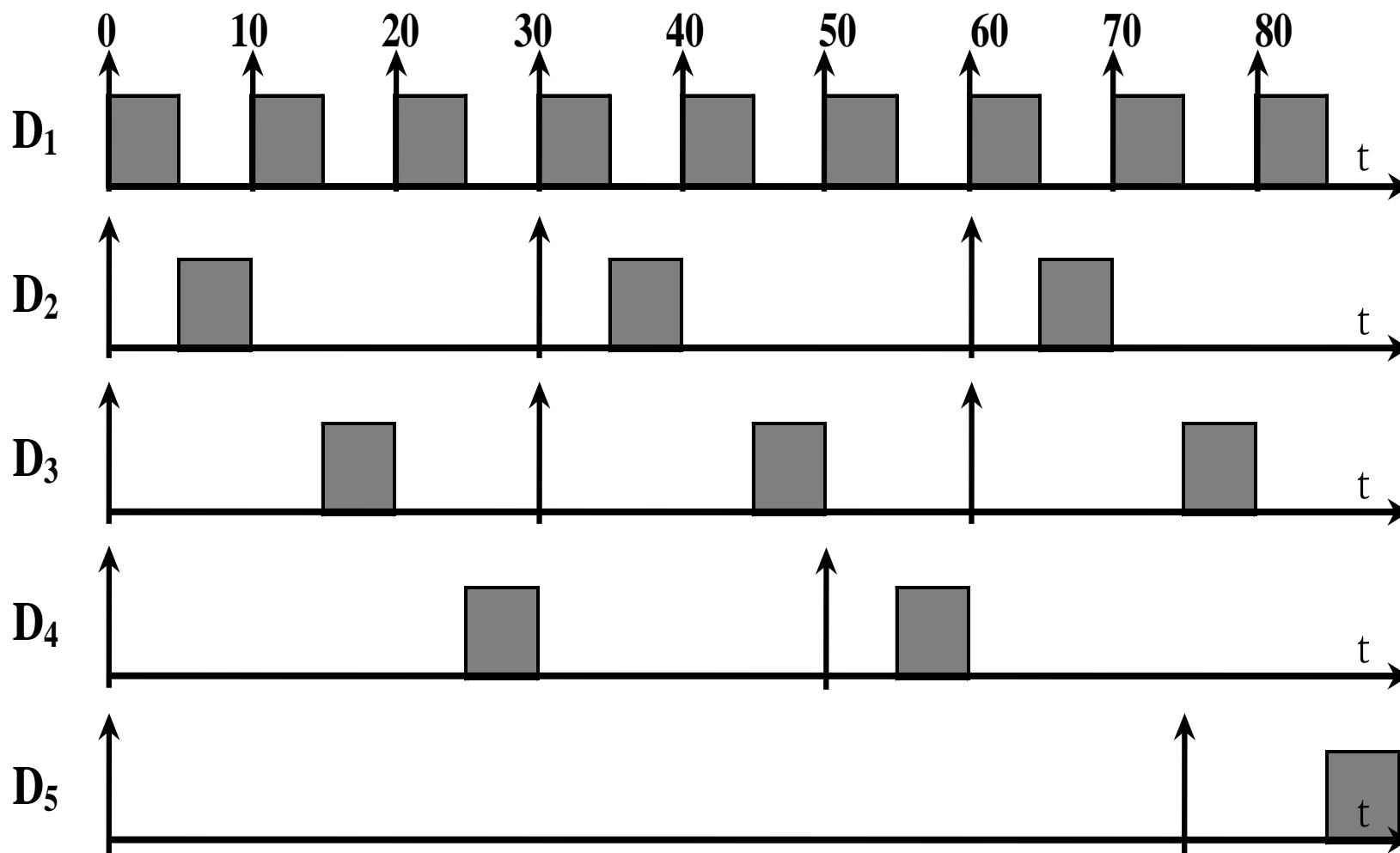
$$\begin{aligned}f_{\text{BYTE}} &= (1/10 + 1/30 + 1/30 + 1/50 + 1/75) \text{ MB/S} \\ &= 0.2 \text{ MB/S}\end{aligned}$$

通道的工作周期为：

$$\begin{aligned}t &= 1/f_{\text{BYTE}} \\ &= 5\mu\text{s}\end{aligned}$$

5.3 通道处理机

通道处理完各设备这个第一次请求的时间：



5.3 通道处理机

➤ (2) 处理完各设备这个第一次请求的时间：

D1: 5 μ s;

D2: 10 μ s;

D3: 20 μ s;

D4: 30 μ s。

D5的第一次请求没有响应，数据丢失。

➤ (3) D5的第一次请求没有得到响应的原因分析

对所有设备的请求时间间隔取最小公倍数，在这一段时间内通道的流量是平衡的。

5.3 通道处理机

➤ 可以采取下列方法：

- ❑ 方法一：增加通道的最大工作流量。例如，把通道的工作流量增加到0.25MB/S（工作周期为4 μ s）。
- ❑ 方法二：动态改变设备的优先级。例如，在30 μ s至70 μ s之间临时提高设备D5的优先级。
- ❑ 方法三：增加缓冲存储器。例如，只要为设备D5增加一个数据缓冲寄存器，它的第一次请求可以在第85 μ s处得到响应，第二次请求可以在第145 μ s处得到响应。

5.4 输入输出处理机

定义：能够独立承担输入输出工作的专用处理机

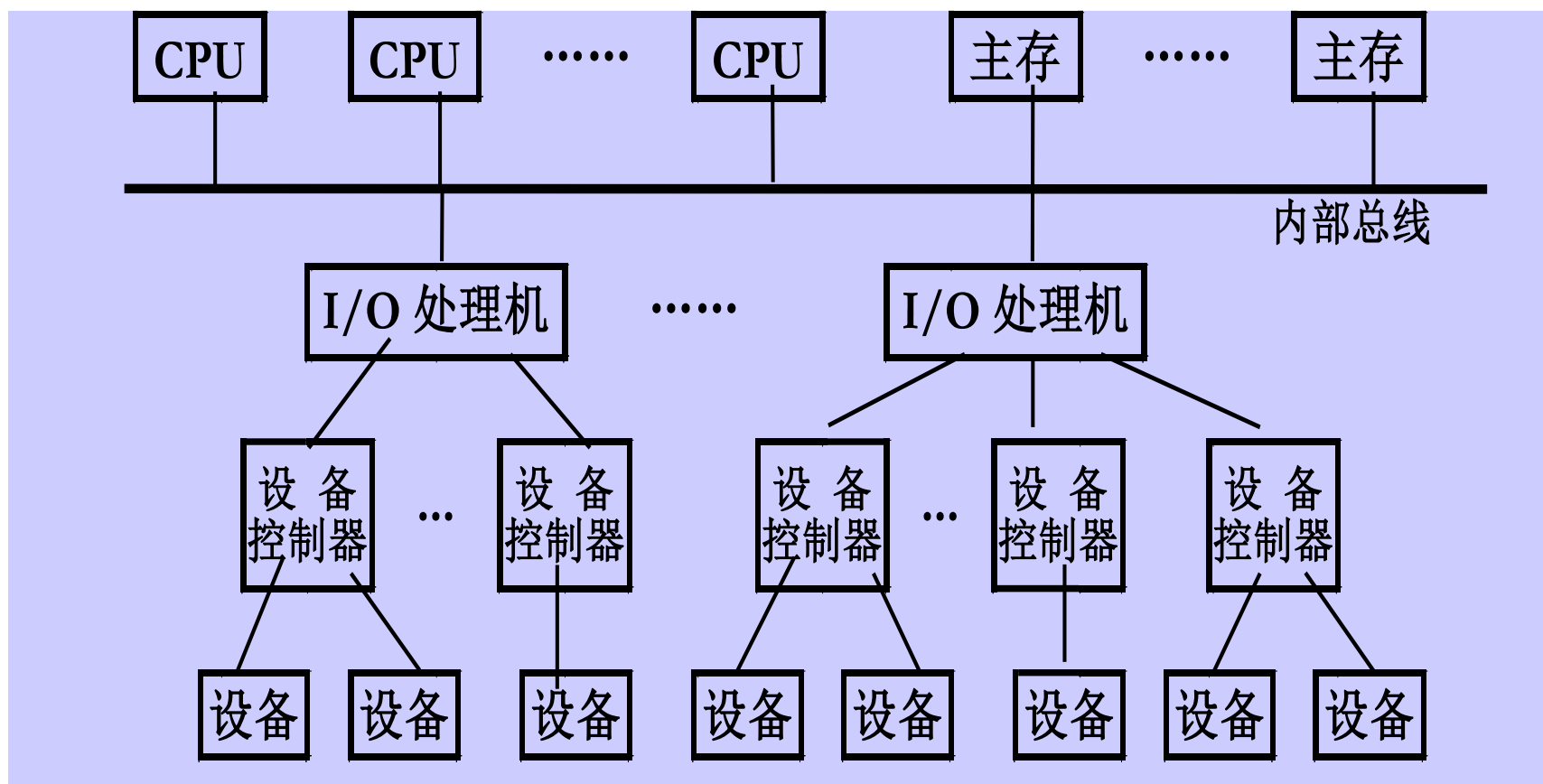
5.4 输入输出处理机

5.4.1 输入输出处理机的作用：

➤ 通道处理机存在的问题：

- (1) 每完成一次输入输出操作要两次中断CPU的现行程序。
- (2) 通道处理机不能处理自身及输入输出设备的故障。
- (3) 数据格式转换、码制转换、数据块检验等工作要CPU完
- (4) 文件管理、设备管理等工作，通道处理机本身无能为力。

典型的输入输出处理机





- 输入输出处理机除了能够完成通道处理机的全部功能之外，还具有如下功能：
 - (1) 码制转换。
 - (2) 数据校验和校正。
 - (3) 故障处理。
 - (4) 文件管理。
 - (5) 诊断和显示系统状态。
 - (6) 处理人机对话。
 - (7) 连接网络或远程终端。



- 输入输出处理机还可以根据需要完成分配给它的其它任务，如数据库管理等。
- 除了具有数据的输入输出功能之外，还具有运算功能和程序控制等功能。
- 不仅能够执行输入输出指令，还能够执行算术逻辑指令和程序控制指令等，就象一般的处理机那样。

5.4.2 输入输出处理机的种类

➤ 根据是否共享主存储器分为：

(1) 共享主存储器的输入输出处理机。CDC公司的CYBER，Texas公司的ASC，

(2) 不共享主存储器的输入输出处理机。STAT-100巨型机

➤ 根据运算部件和指令控制部件是否共享分为：

(1) 合用同一个运算部件和指令控制部件。造价低，控制复杂。如CDC-CYBER和ASC

(2) 独立运算部件和指令控制部件。独立运算部件和指令控制部件已经成为主流。如B-6700大型机和STAT-100巨型机等。



输入输出处理机的组织方式

- 多个输入输出处理机从功能上分工。
- 以输入输出处理机作为主处理机。
- 采用与主处理机相同型号的处理机作为输入输出处理机。
- 采用廉价的微处理机来专门承担输入输出任务。

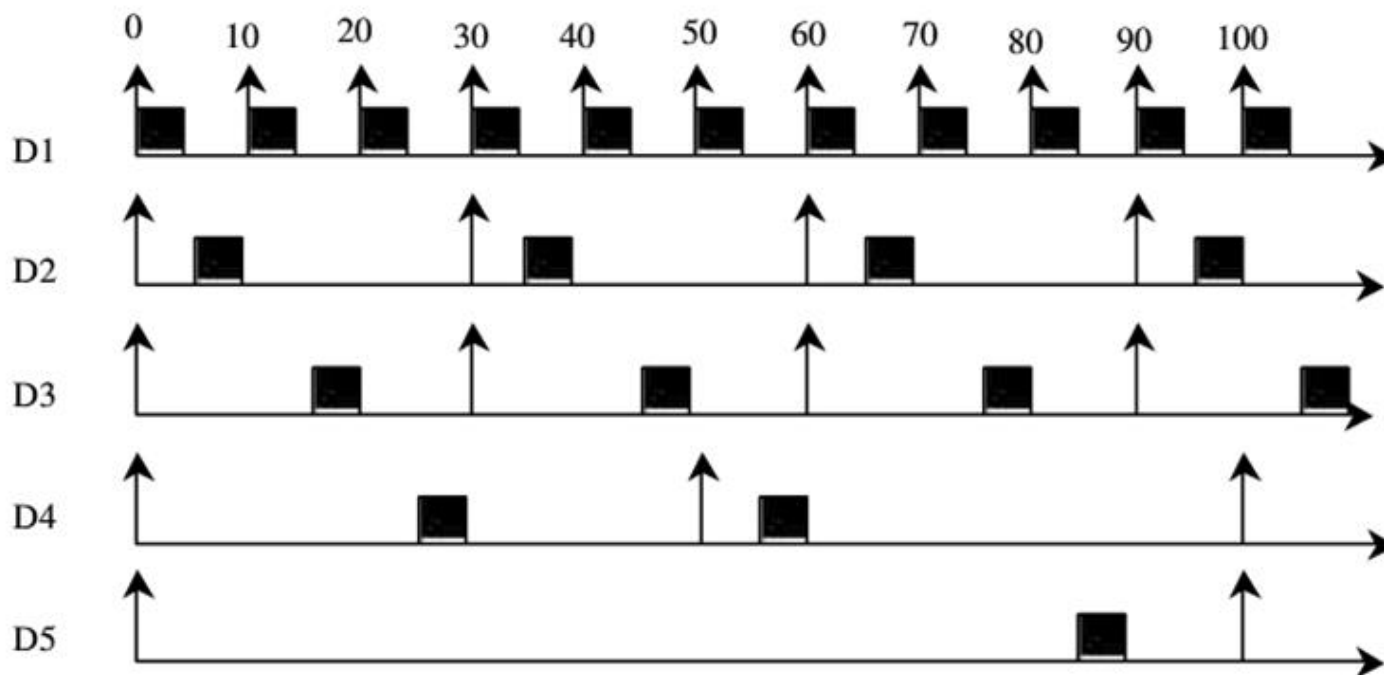
例5. 3 一个字节多路通道连接有5台设备，它们的数据传输率如下表：

设备名称	D1	D2	D3	D4	D5
数据传输速率 (KB/s)	100	33.3	33.3	20	10
服务优先级	1 (最高)	2	3	4	5

- (1) 计算这个字节多路通道的**实际工作流量**。
- (2) 为了使通道能够正常工作，请设计**通道的最大流量和工作周期**。
- (3) 当这个字节多拓通道工作在最大流量时，各台设备都在0时刻同时向通道发出第一次传送数据的请求，并在以后的时间里按照各自的数据传输速率连续工作。**画出通道分时为各台设备服务的时间关系图**，并计算这个字节多路通道处理完各台设备的第一次数据服务请求的时刻。

[解答]

- (1) 我们把数据传输速率理解为设备的数据产生速率，即设备对应的子通道数据传输速率，那么，通道的实际流量等于各子通道的流量之和：196.6KB/s。
- (2) 我们取流量上限为 200KB/s，则工作周期为 $5\mu\text{s}$ 。
- (3) 通道分时工作的时间关系图如下所示。通道处理完各设备第一次数据服务请求的时刻分别为： $5\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 、 $20\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ 、 $90\mu\text{s}$ 。





5. 4 - 一个字节多路通道连接有 4 台外围设备，每台设备发出输入输出服务请求的时间间隔、它们的服务优先级和发出第一次服务请求的时刻如下表：

设备名称	DEV1	DEV2	DEV3	DEV4
发服务请求间隔	10 微秒	75 微秒	15 微秒	50 微秒
服务优先级	1 (最高)	4	2	3
发出第一次请求时刻	0 微秒	70 微秒	10 微秒	20 微秒

- (1) 计算这个字节多路通道的实际流量和工作周期。
- (2) 在数据传送期间，如果通道选择一次设备的时间为 3 微秒，传送一个字节的时间为 2 微秒，画出这个字节多路通道响应各设备请求和为设备服务的时间关系图。
- (3) 从 (2) 的时间关系图中，计算通道处理完成各设备第一次服务请求的时刻。
- (4) 从 (2) 画出的时间关系图中看，这个字节多路通道能否正常工作（不丢失数据）？为什么？
- (5) 在设计一个字节多路通道的工作流量时，可以采用哪些措施来保证通道能够正常工作（不丢失数据）？



解:

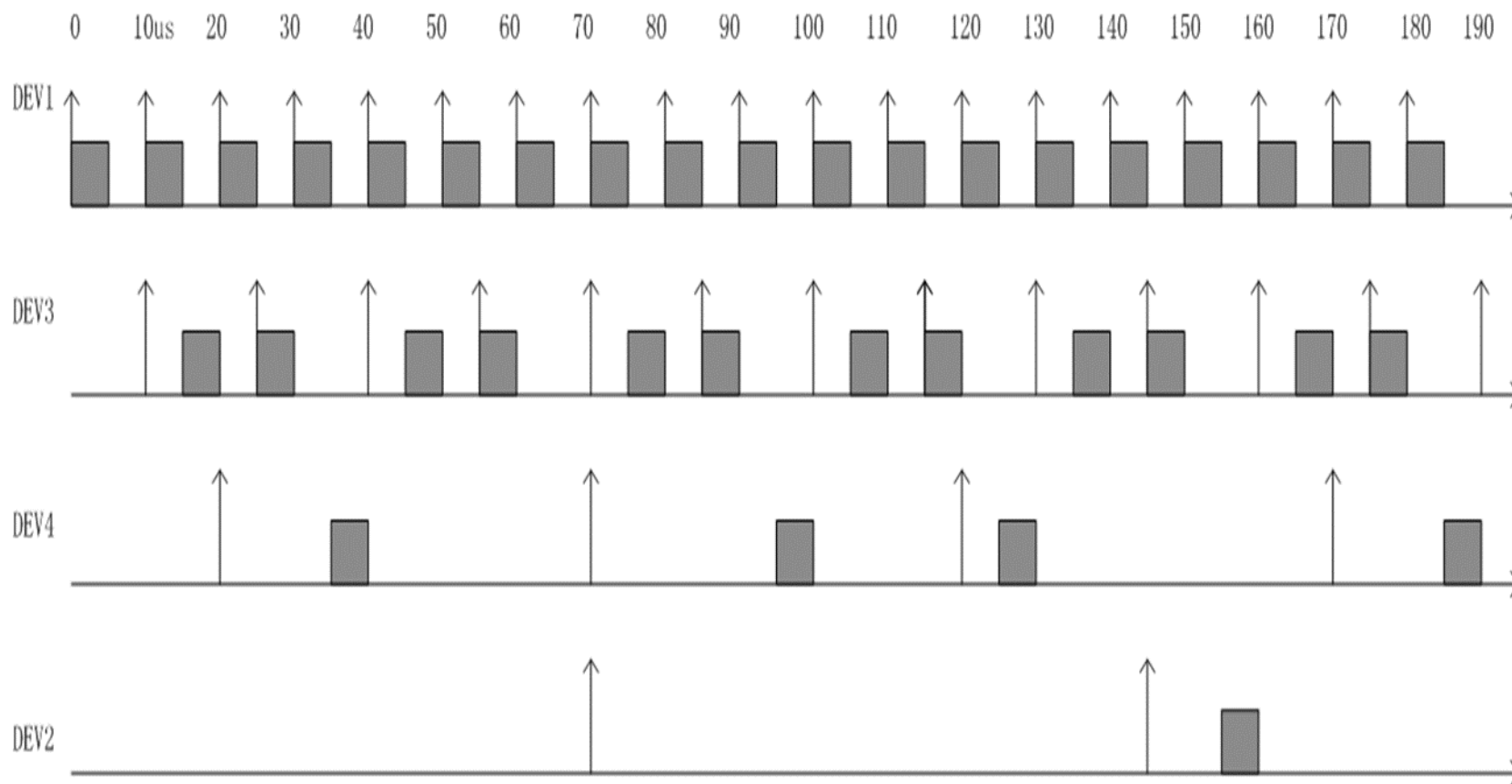
(1) 通道的实际流量为:

$$\begin{aligned} f_{\text{BYTE}} &= (1/10 + 1/75 + 1/15 + 1/50) \text{MB/S} \\ &= 0.2 \text{MB/S} \end{aligned}$$

通道的工作周期为:

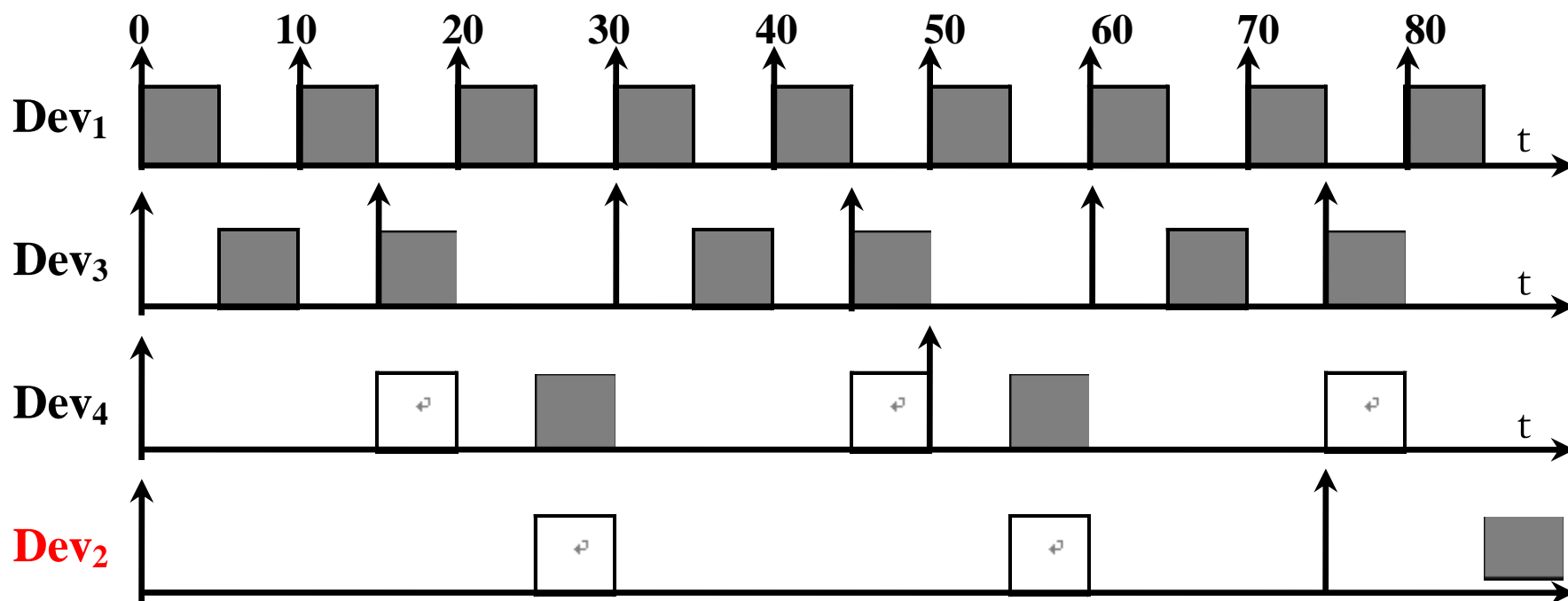
$$\begin{aligned} t &= 1/f_{\text{BYTE}} \\ &= 5\mu\text{s} \end{aligned}$$

(2)时空关系图





如果是在0时刻同时发出第一个请求，通道处理完各设备这个第一次请求的时间：





(3)处理完各设备这个第一次请求的时间:

Dev1: 5us;

Dev3: 20us;

Dev4: 40us;

Dev2: 的第一次请求没有响应, 数据丢失,
第二次服务请求响应完成时间160us处;

(4) Dev2的第一次请求没有得到响应, 造成数据丢失, 原因是通道最大流量设计与实际流量相等, 其请求被更高优先级设备抢用。

对所有设备的请求时间间隔取最小公倍数, 在
这一段时间内通道的流量是平衡的。



可以采取下列方法：

方法一：增加通道的最大工作流量。例如，把通道的工作流量增加到0.25MB/S（工作周期为4 μ s）。

方法二：动态改变设备的优先级。例如，在30 μ s至70 μ s之间临时提高设备Dev2的优先级。

方法三：增加缓冲存储器。例如，只要为设备Dev2增加一个数据缓冲寄存器，它的第一次请求可以在第85 μ s处得到响应。



東北林業大學
NORTHEAST FORESTRY UNIVERSITY



東北林業大學
NORTHEAST FORESTRY UNIVERSITY

THANK YOU!

2019.11.13

WWW.NEFU.EDU.CN