



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# Ch8-IO系统

王超

中国科学技术大学计算机学院  
高能效智能计算实验室

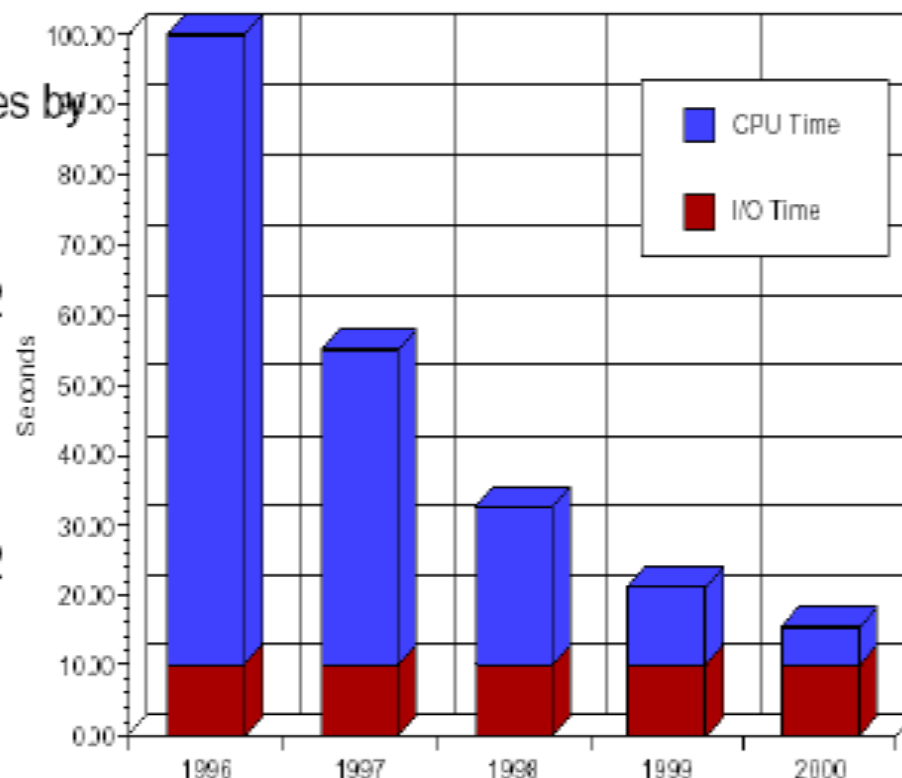
2024年春

1. I/O系统概述
  - 1.1 I/O系统的组成
  - 1.2 I/O系统的发展概况
  - 1.3 I/O系统与主机的联系
2. I/O接口
  - 2.1 I/O接口概述
  - 2.2 I/O接口的功能与组成
  - 2.3 I/O接口类型
3. I/O信息交换方式
  - 3.1 程序查询方式
  - 3.2 程序中断方式
  - 3.3 DMA方式
  - 3.4 通道方式
4. I/O设备
  - 4.1 IO设备概述
  - 4.2 常见的输入和输出设备
5. 辅助存储器
  - 5.1 辅存概述
  - 5.2 磁记录原理与记录方式
  - 5.3 磁盘存储器
  - 5.4 光盘存储器
  - 5.5 FLASH存储器

# IO逐渐形成瓶颈

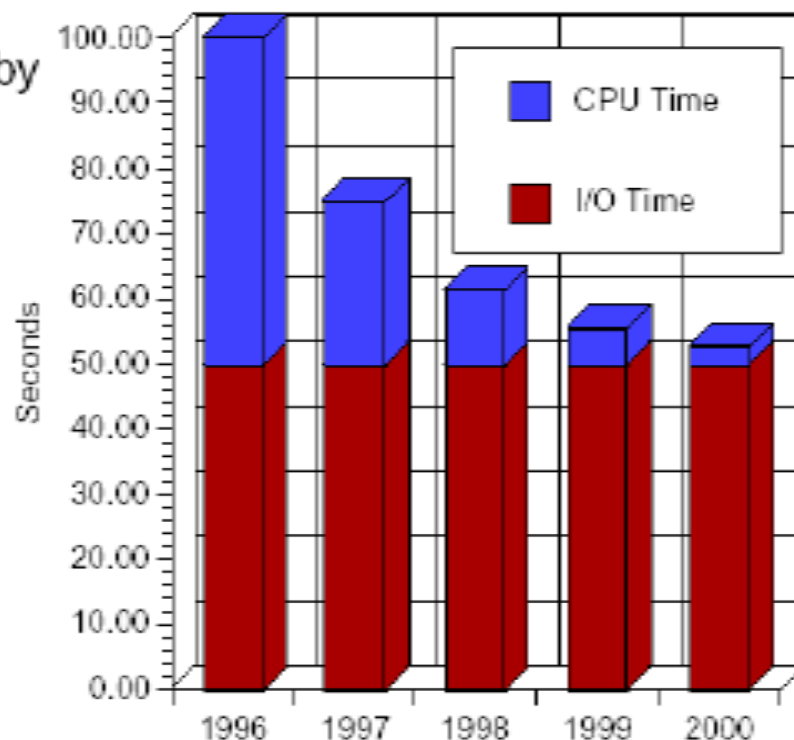


- ◆ 1996 - 1997
  - CPU performance improves by
    - $N = 400/200 = 2$
  - program performance improves by
    - $N = 100/55 = 1.81$
- ◆ 1997 - 1998
  - CPU performance - factor of 2
  - program performance
    - $N = 55/32.5 = 1.7$
- ◆ 1998 - 1999
  - CPU performance - factor of 2
  - program performance
    - $N = 32.5 / 21.25 = 1.53$
- ◆ 1999 - 2000
  - CPU Performance - factor of 2
  - program performance
    - $N = 21.25 / 15.6 = 1.36$



## Performance for Web Surfing

- ◆ Assume 50 seconds CPU & 50 seconds I/O
- ◆ 1996 - 1997
  - CPU performance improves by
    - $N = 400/200 = 2$
  - program performance improves by
    - $N = 100/75 = 1.33$
- ◆ 1997 - 1998
  - CPU performance - factor of 2
  - program performance
    - $N = 75/62.5 = 1.2$
- ◆ 1998 - 1999
  - CPU performance - factor of 2
  - program performance
    - $N = 62.5/56.5 = 1.11$



# 1.1 I/O系统的组成



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □ I/O软件

### ✓ 主要任务

- 将用户程序或数据**输入**主机
- 将运算结果**输出**给用户
- 实现输入输出系统与主机工作的协调等

### ✓ I/O指令

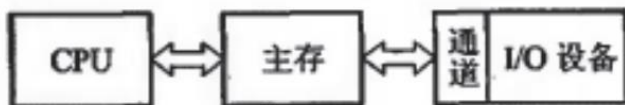
- **机器指令**的一类，反映CPU与I/O设备交换信息的各种特点 (IN/OUT)
- 一般格式



命令码：体现I/O设备的具体操作  
设备码：相当于设备地址，用于在多台I/O设备中进行选择

### ✓ 通道指令(通道控制字 Channel Control Word)

- 对具有通道的I/O系统专门设置的指令，由通道执行，不属于CPU指令集
- CPU执行了相应I/O指令后，将由通道指令来接管I/O设备的管理
- 位数一般较长，一般用于指明数据首地址、传送字数及设备码、命令码等

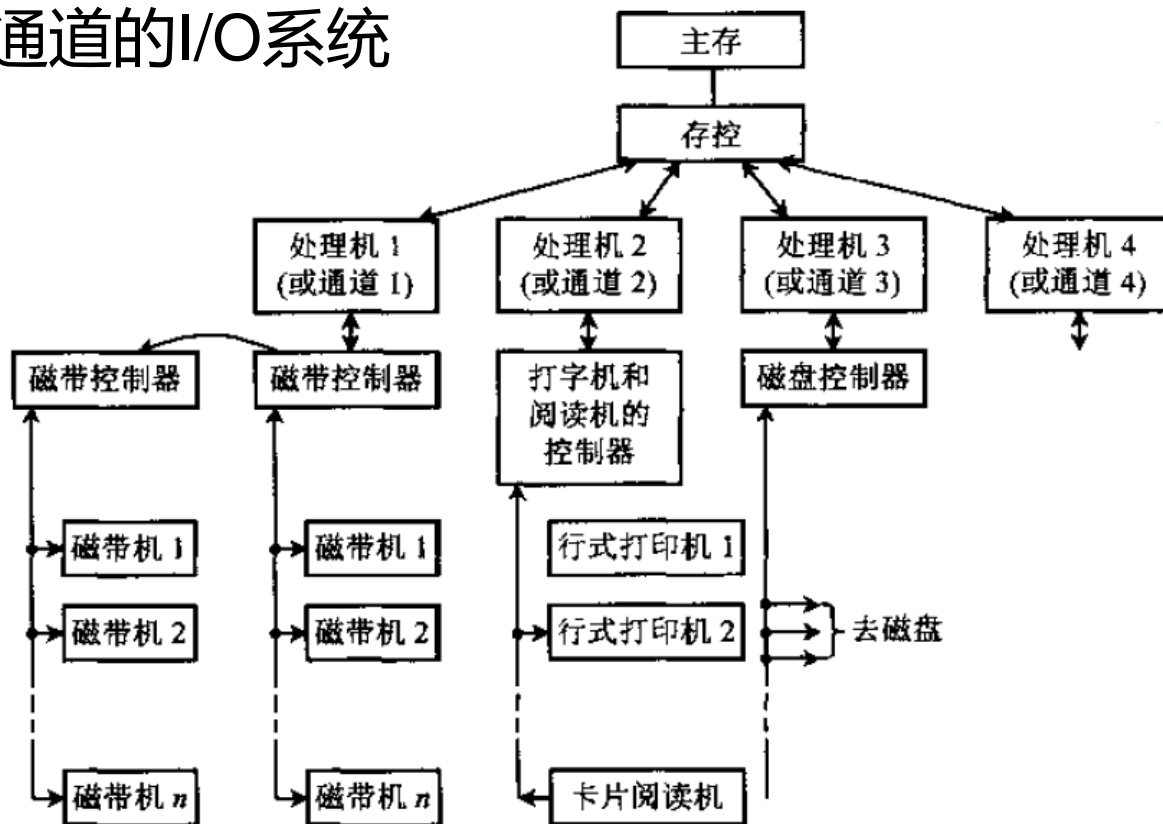


# 1.1 I/O系统的组成



## □ I/O硬件 (2)

- ✓ 带接口的I/O系统，一般包括接口模块及I/O设备两部分
  - 接口电路一般包含数据传送通路、控制信号通路及相应逻辑电路
- ✓ 具有通道的I/O系统

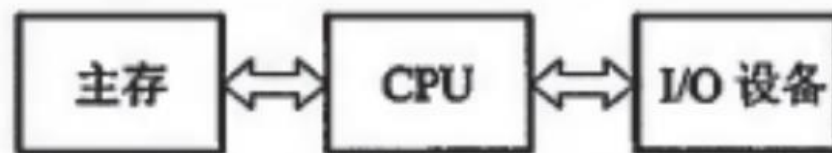


# 1.2 I/O系统的发展概况



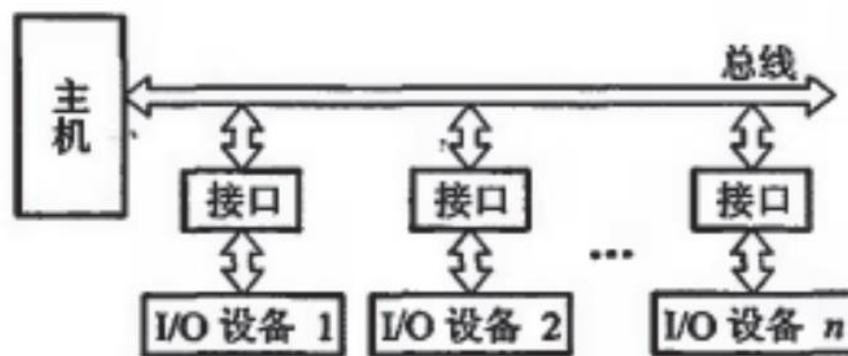
## □ 早期阶段

- ✓ I/O设备种类少，与主存交换信息都必须通过CPU
- ✓ 当时I/O设备的特点
  - 每个I/O设备都必须由一套独立的逻辑电路与CPU相连，分散连接
  - 输入输出过程穿插在CPU执行过程进行，CPU与I/O设备**串行工作**



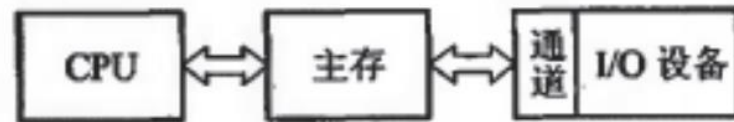
## □ 接口模块和DMA（ Direct Memory Access ）阶段

- ✓ I/O设备通过接口模块与主机连接，系统采用**总线结构**
- ✓ 接口提供缓冲和数据转换功能，并支持中断请求处理，I/O设备与CPU可以并行工作
- ✓ DMA：I/O设备与主存之间使用一条直接的数据通路





## 1.2 I/O系统的发展概况 (2)



### □ 具有通道结构的阶段

- ✓ 在I/O设备繁多、数据传送频繁的情况下，DMA方式同样带来硬件成本增加、控制复杂化和占用CPU时间等问题
- ✓ 通道
  - 用来负责管理I/O设备以及实现主存与I/O设备之间交换信息的部件，可以认为是具有特殊功能的**处理器**
  - 专门的**通道指令**，构成独立地输入输出程序
  - 依赖CPU的I/O指令启动、停止或改变工作状态，是从属于CPU的专用处理部件

### □ 具有I/O处理机的阶段

- ✓ 外围处理机，独立于主机工作
- ✓ 可完成I/O通道要完成的I/O控制，以及**数据处理、转换、检错纠错**等操作
- ✓ 与CPU工作的并行性更高



## 1.3 I/O设备与主机的联系



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

### □ I/O设备编址方式

#### ✓ 统一编址

- 将I/O设备地址看做存储器地址的一部分

如在64K地址的存储空间中，划出8K地址作为I/O设备地址，凡对这8K地址范围的访问，就是对I/O设备的访问

- I/O指令与访存指令类似

#### ✓ 独立编址

- I/O地址和存储器地址分开，使用专门的I/O指令访问I/O设备

#### ✓ 优缺点

- 统一编址：占用存储空间，减少主存容量，但无须专用I/O指令
- 独立编址：不占用主存容量，但需设置专用的I/O指令

## 1.3 I/O设备与主机的联系 (2)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

### □ 传送方式

- ✓ 并行传送 V.S. 串行传送

### □ 联络方式

- ✓ 用于I/O设备与主机相互了解彼此工作状态
- ✓ 按I/O设备的工作速度，分为三种
  - 立即响应方式—对工作速度缓慢的I/O设备,无控制信号
  - 异步应答信号方式—I/O设备与CPU工作速度不匹配的情况
  - 同步联络方式—I/O设备与CPU工作速度完全同步

## 1. I/O系统概述

- 1.1 I/O系统的发展概况
- 1.2 I/O系统的组成
- 1.3 I/O系统与主机的联系

## 2. I/O接口

- 2.1 I/O接口概述
- 2.2 I/O接口的功能与组成
- 2.3 I/O接口类型

## 3. I/O信息交换方式

- 3.1 程序查询方式
- 3.2 程序中断方式
- 3.3 DMA方式
- 3.4 通道方式

## 4. I/O设备

- 4.1 IO设备概述
- 4.2 常见的输入和输出设备

## 5. 辅助存储器

- 5.1 辅存概述
- 5.2 磁记录原理与记录方式
- 5.3 磁盘存储器
- 5.4 光盘存储器
- 5.5 FLASH存储器

## 2.1 I/O接口概述



### □ I/O接口概述

- ✓ 接口：两个系统或两个部件之间的交接部分
  - 可以是两种**硬设备之间的连接电路**
  - 也可以是两个**软件之间的共同逻辑边界**
- ✓ I/O接口
  - 也叫**适配器**，指主机与I/O设备间设置的硬件电路及其相应的软件控制
- ✓ 为什么需要I/O接口
  - CPU可能连接多个不同设备号的I/O设备，可以通过接口实现**设备的选择**
  - 利用接口实现I/O设备与CPU的**数据缓冲**，减缓两者的速度差
  - 利用接口实现数据的**串-并转换、电平转换**
  - 通过接口传送**控制命令**
  - 通过接口监视**设备工作状态**并保存，供CPU查询使用

## 2.1 I/O接口概述 (2)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

21	文件传输服务器(控制连接)(FTP)
23	远程终端服务器(TELNET)
25	简单邮件传输服务器(SMTP)
80	万维网服务器(HTTP)

### □接口与端口

- ✓端口：指接口电路中的一些**寄存器**
  - 这些寄存器用于存放数据、控制命令、状态信息等
- ✓接口与端口的关系
  - **若干端口加上相应的控制逻辑组成接口**
- ✓CPU对I/O接口（或I/O设备）的信息读写，实际上都是对端口的操作

## 2.2 I/O接口的功能与组成



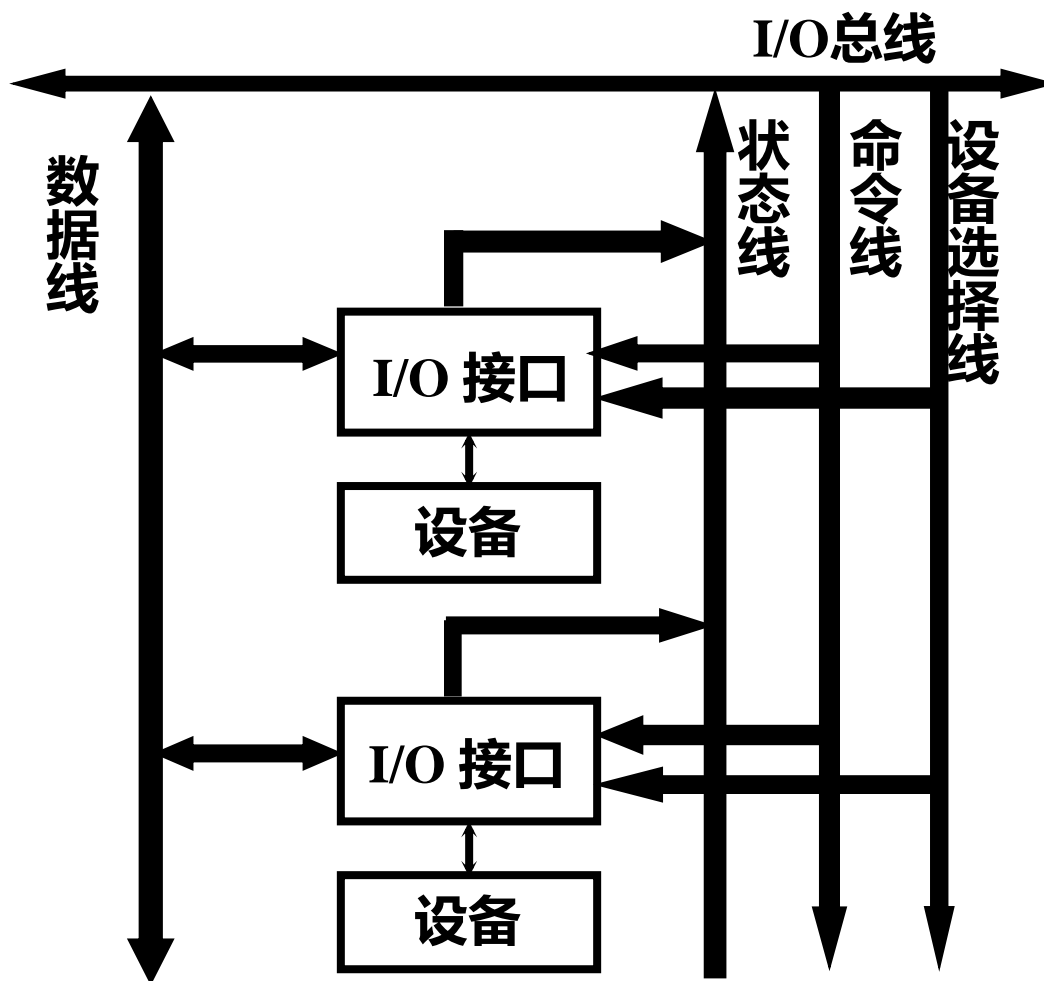
### □ 总线连接方式的I/O接口电路

(1) 设备选择线

(2) 数据线

(3) 命令线

(4) 状态线



## 2.2 I/O接口的功能与组成 (2)



### □ I/O接口的功能

#### ✓ 选址功能

- 利用接口的设备选择电路实现

#### ✓ 传送命令的功能

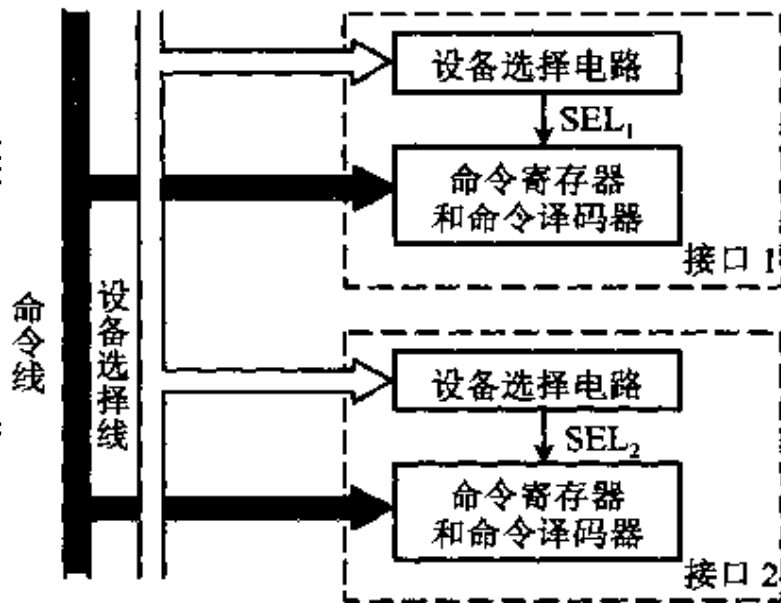
- 存放命令的命令寄存器、命令译码器等

#### ✓ 传送数据的功能

- 设置数据缓冲寄存器，与数据线相连

#### ✓ 反映I/O设备状态的功能

- 设置相关的状态触发器  
如中断请求触发器、中断屏蔽触发器  
工作标志触发器等
- 完成触发器D，工作触发器B





## 2.2 I/O接口的功能与组成 (3)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

### □ I/O接口的基本组成



## 2.3 I/O接口类型



### □ 按数据传送方式分类

- ✓ 并行接口：如Intel 8255
- ✓ 串行接口：如Intel 8251

### □ 按功能选择的灵活性分类

- ✓ 可编程接口：接口功能及操作方式可通过程序来改变或选择，如Intel 8255/8251
- ✓ 不可编程接口：只能通过硬连线逻辑来实现不同功能，如Intel 8212

### □ 按通用性分类

- ✓ 通用接口：可以供多种I/O设备使用
- ✓ 专用接口：专门为某类外设或某种用途而设计

### □ 按数据传送的控制方式分类

- ✓ 程序型接口：用于连接速度较慢的I/O设备，采用程序中断方式
- ✓ DMA接口：用于连接高速I/O设备

## 1. I/O系统概述

- 1.1 I/O系统的发展概况
- 1.2 I/O系统的组成
- 1.3 I/O系统与主机的联系

## 2. I/O接口

- 2.1 I/O接口概述
- 2.2 I/O接口的功能与组成
- 2.3 I/O接口类型

## 3. I/O信息交换方式

- 3.1 程序查询方式
- 3.2 程序中断方式
- 3.3 DMA方式
- 3.4 通道方式

## 4. I/O设备

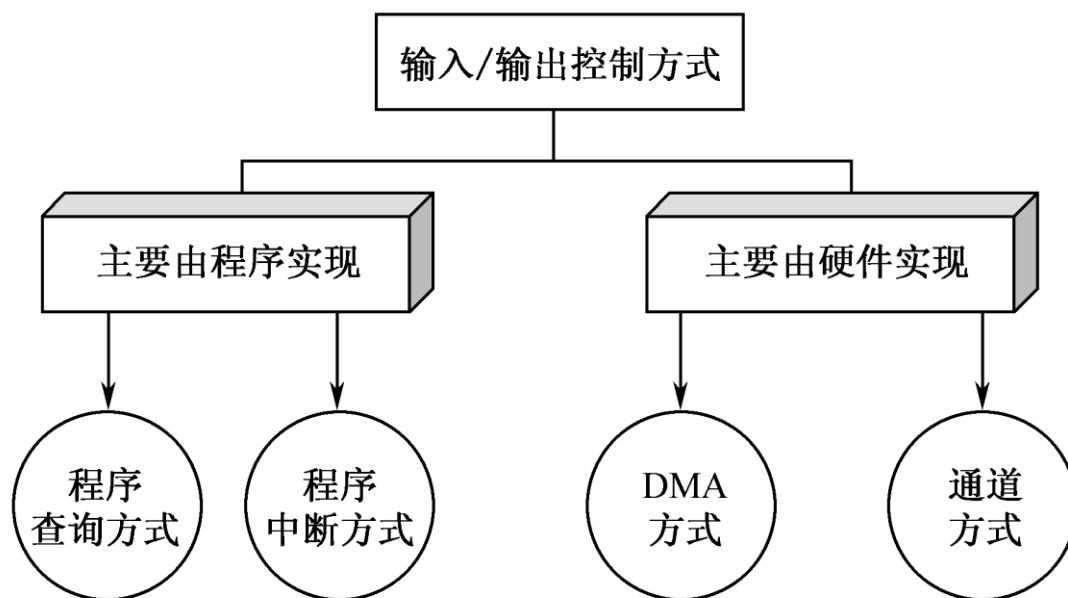
- 4.1 IO设备概述
- 4.2 常见的输入和输出设备

## 5. 辅助存储器

- 5.1 辅存概述
- 5.2 磁记录原理与记录方式
- 5.3 磁盘存储器
- 5.4 光盘存储器
- 5.5 FLASH存储器

## □信息交换方式

✓程序查询方式、程序中断方式、DMA方式、通道方式



# 3.1 程序查询方式



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □ 程序查询方式的特点

- ✓ 最简单的输入输出方式
- ✓ 数据在CPU和外设之间的传送靠计算机程序控制
  - 在CPU的主动控制下进行
  - 有I/O操作时，CPU暂停主程序，转去执行设备I/O的服务程序
- ✓ 优缺点
  - 优点：CPU与外设的操作能够同步，硬件结构简单
  - 缺点：CPU循环查询，浪费CPU周期和资源
- ✓ 一般用于单片机或数字信号处理DSP中

## □ 查询通过I/O指令完成

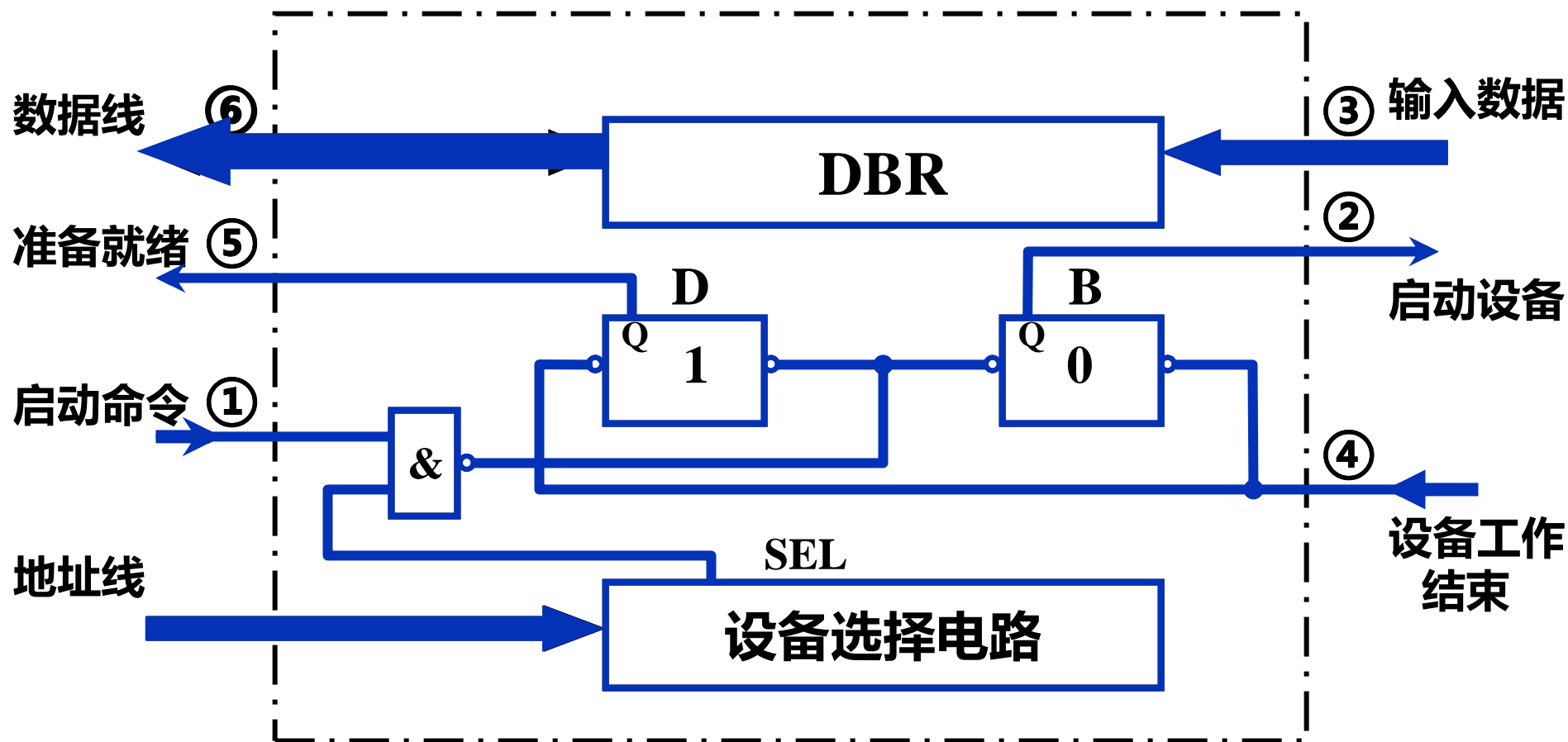
- ✓ 对I/O接口的某些控制寄存器置“0”或“1”，用于控制设备进行相关工作
- ✓ 测试设备的某些状态，如“忙”、“就绪”等，以便决定下一步操作
- ✓ 传送数据

## 3.1 程序查询方式 (2)



### □ 程序查询方式的接口

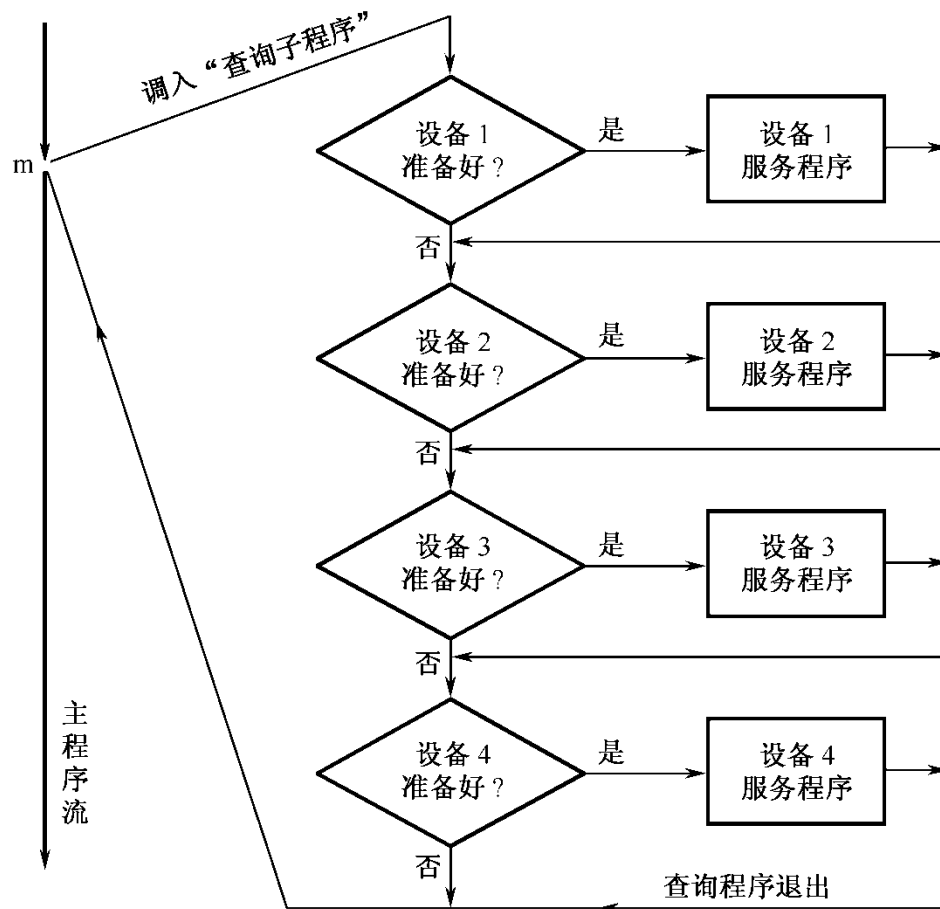
✓ 设备选择电路、数据缓冲寄存器、设备状态标志



# 3.1 程序查询方式 (3)



## □程序查询方式的过程



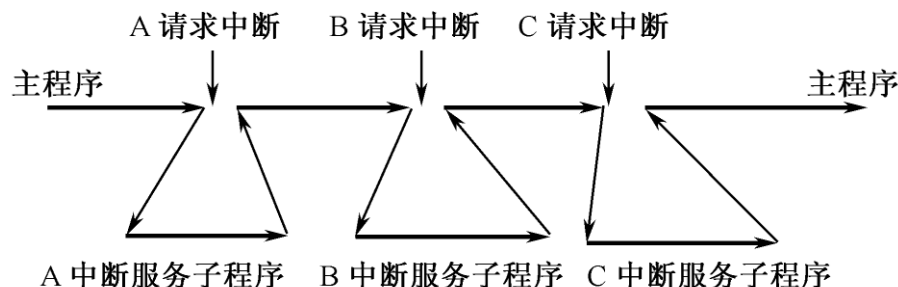


## 3.2 程序中中断方式



### □ 中断的概念

- ✓ 指CPU暂时中止现行程序，转去处理随机发生的紧急事件，处理完后自动返回原程序的功能和技术
- ✓ 原理与调用子程序类似，不过中断请求是由外设发出的

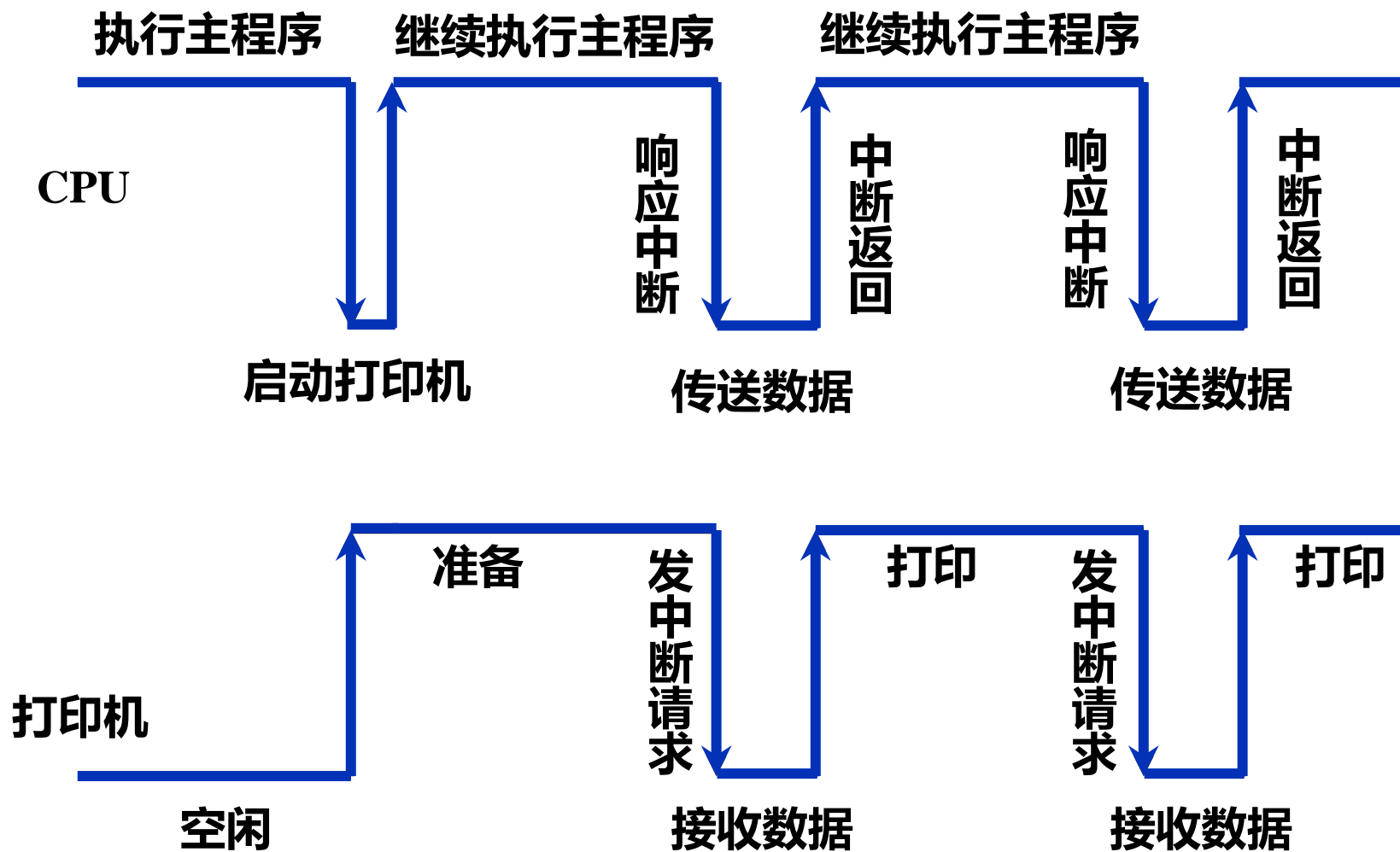


### □ 中断系统

- ✓ 计算机实现中断功能的软硬件总称
- ✓ 一般在CPU中设置中断机构，在外设接口中设置中断控制器，在软件上设置相应的中断服务程序

## 以打印机为例

## CPU 与打印机并行工作



# 总结：中断系统已解决的问题



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- (1) 各中断源如何向CPU提出请求？ (INTR, INTA)
- (2) 各中断源同时提出请求怎么办？  
(中断判优-程序查询，硬件排队-集中、分布)
- (3) CPU什么条件、什么时间、以什么方式响应中断？  
(指令周期结束，中断隐指令)
- (4) 如何保护现场？ (中断隐指令断点、ISR、堆栈)
- (5) 如何寻找入口地址？ (硬件向量，软件查询)
- (6) 如何恢复现场，如何返回？ (中断隐指令断点、ISR、堆栈)
- (7) 处理中断的过程中又出现新的中断怎么办？  
(多重中断，可屏蔽，设置屏蔽字)

## 1. I/O系统概述

- 1.1 I/O系统的发展概况
- 1.2 I/O系统的组成
- 1.3 I/O系统与主机的联系

## 2. I/O接口

- 2.1 I/O接口概述
- 2.2 I/O接口的功能与组成
- 2.3 I/O接口类型

## 3. I/O信息交换方式

- 3.1 程序查询方式
- 3.2 程序中断方式
- 3.3 DMA方式
- 3.4 通道方式

## 4. I/O设备

- 4.1 IO设备概述
- 4.2 常见的输入和输出设备

## 5. 辅助存储器

- 5.1 辅存概述
- 5.2 磁记录原理与记录方式
- 5.3 磁盘存储器
- 5.4 光盘存储器
- 5.5 FLASH存储器

## 3.3 DMA方式



### □ DMA

- ✓ 直接内存访问，一种完全由硬件执行I/O交换的工作方式
- ✓ 主存与I/O设备间高速交换批量数据，传送速度快
- ✓ 基本思想
  - 硬件DMA控制器从CPU完全接管对总线的控制，数据交换**不经过CPU**，直接在主存和I/O设备之间进行

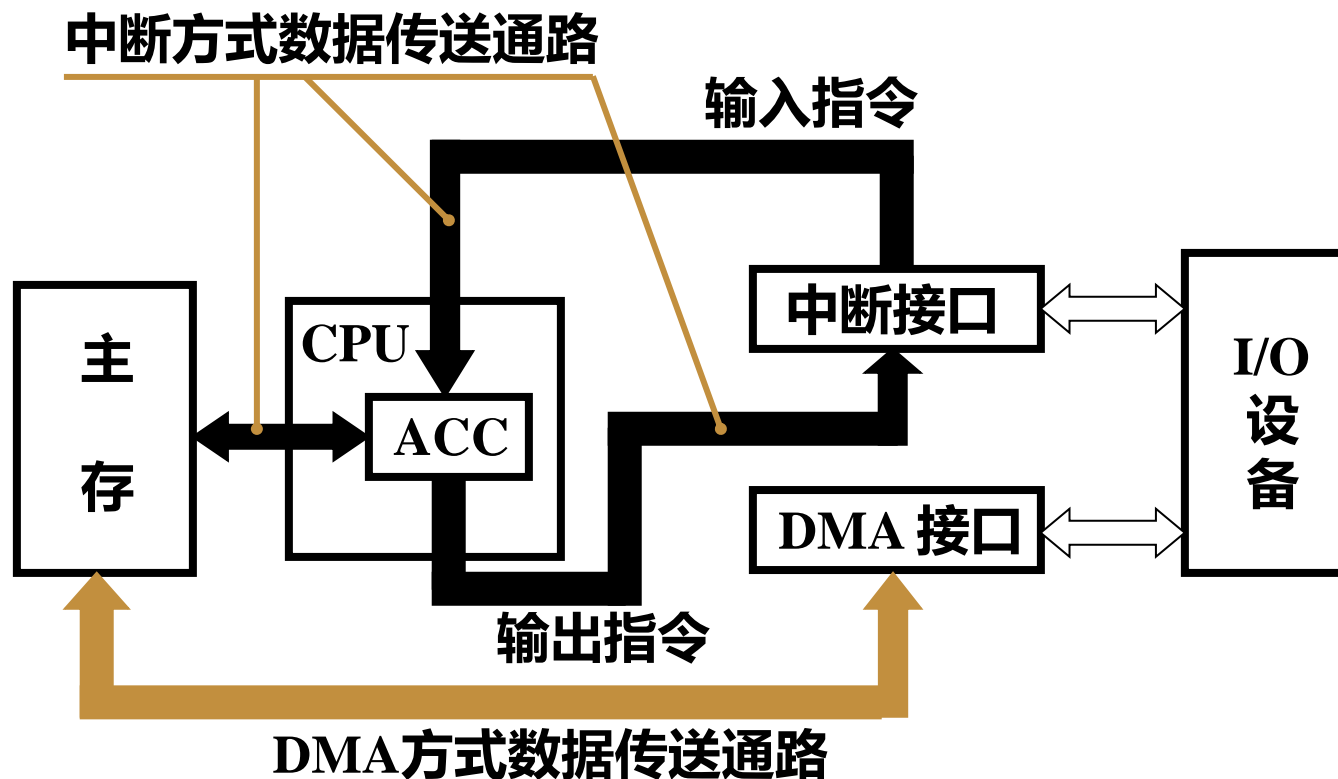
### □ 工作过程描述

- 在主存中要开辟连续地址的专用缓冲器，用来提供或接收传送的数据。在数据传送前和结束后CPU要通过**程序或中断方式**对缓冲器和DMA控制器进行预处理和后处理。
- 由DMA控制器给出当前正在传送的数据的主存地址，并统计传送数据的个数以确定一组数据的传送是否已结束。

# DMA 和程序中断两种方式的数据通路



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



## 3.3 DMA方式 (2)



### □DMA控制器

- ✓通过大规模集成电路**硬件实现**

### □DMA的基本操作

- ✓从外设发出DMA请求
- ✓CPU响应请求，DMA控制器接管总线控制
- ✓DMA控制器对内存寻址，决定数据传送的内存单元地址及数据传送个数的计数，并执行数据传送操作
- ✓向CPU报告DMA操作结束

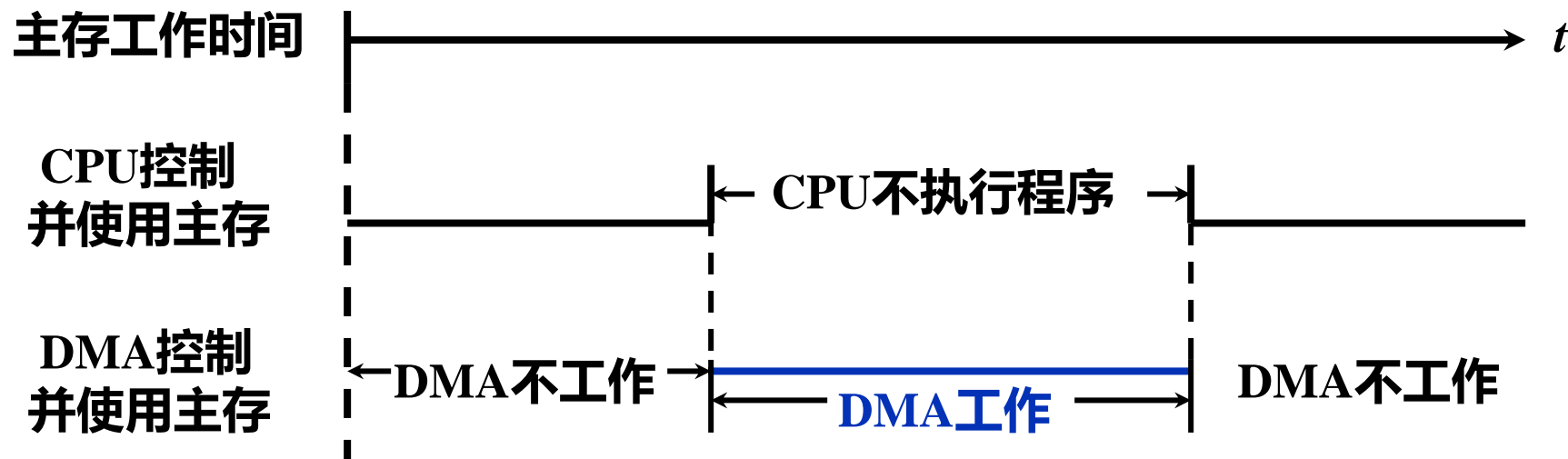
**在DMA方式中，数据传送前后的准备和处理工作，由CPU上的管理程序负责，DMA控制器仅负责数据传送工作**



### 3.3 DMA方式— DMA 与主存交换数据的三种方式1

#### □停止CPU访问内存

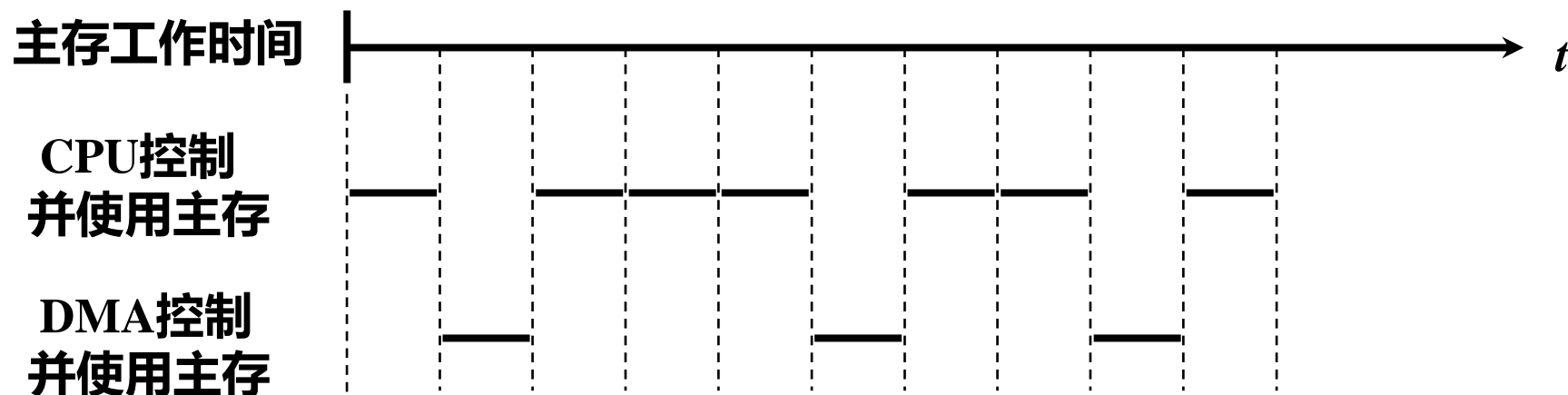
- ✓CPU处于不工作状态或保持状态，未能发挥CPU对主存的利用率
- ✓控制简单，适用于数据传输率很高的设备进行成组传输



## 3.3 DMA方式— DMA 与主存交换数据的三种方式2

### □ 周期挪用（周期窃取）

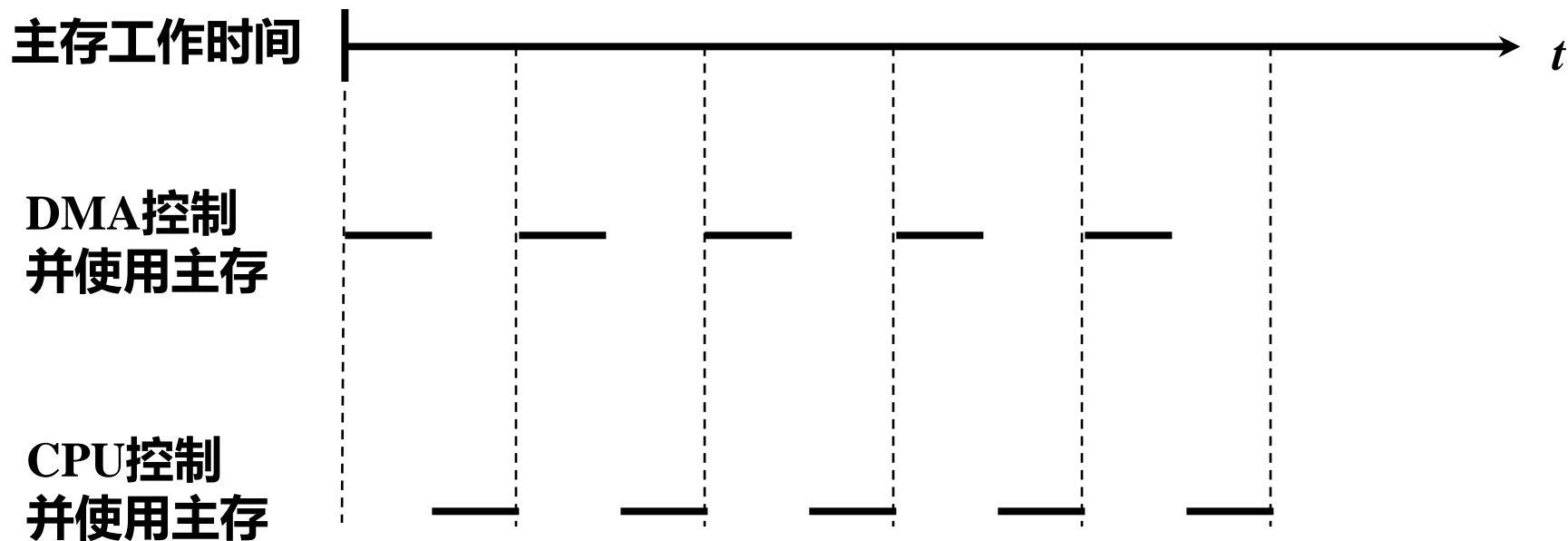
- ✓ DMA控制器与主存间传送一个数据时，占用（窃取）一个或多个CPU周期。即CPU暂停工作一个周期，然后继续执行程序
- ✓ I/O设备通过DMA访问主存有三种可能情况
  - CPU此时不访存——无冲突（执行复杂ALU指令）
  - CPU正在访存——待访问结束后，让出总线
  - CPU和DMA同时请求访存——**DMA优先**
- ✓ 较常采用的方法：异步、需申请总线访问，比较适合于**I/O读写周期大于主存周期**的情况



## 3.3 DMA方式— DMA 与主存交换数据的三种方式3

### □ DMA与CPU交替访存

- ✓ CPU周期分为两部分，一部分**专用于**CPU访存，另一部分**专用于**DMA访存
- ✓ 不需要申请和归还总线使用权，总线控制权的转移速度快，DMA效率高，控制复杂



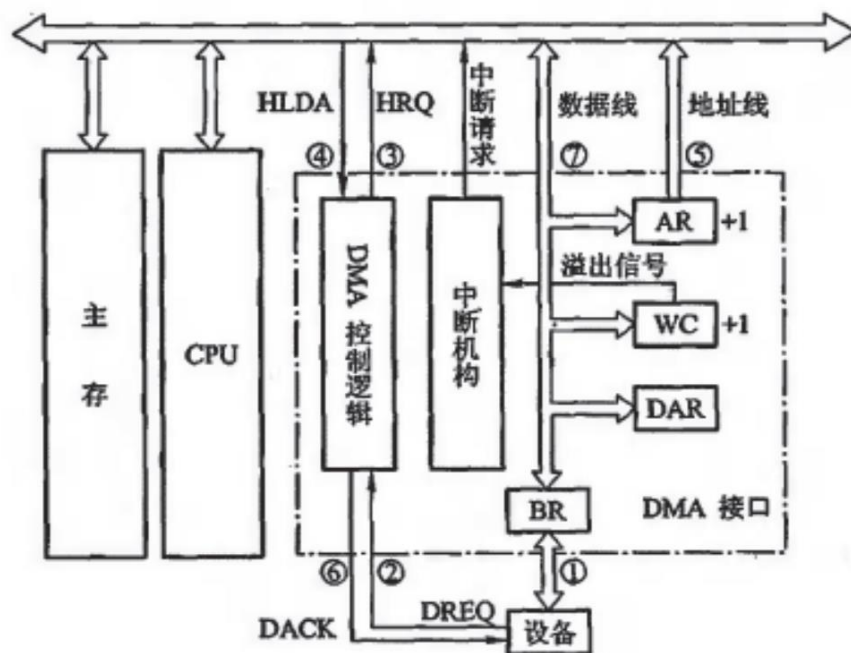
### 3.3 DMA方式 (3)



#### □ DMA控制器基本组成

- ✓ 内存地址寄存器(计数器)AR: 用于存放内存中要交换的数据的地址, DMA传送时, 每交换一次数据, 寄存器值加“1”
- ✓ 字计数器WC: 用于记录传送数据块长度
- ✓ 数据缓冲寄存器BR: 用于暂存每次传送的数据
- ✓ 设备地址寄存器DAR: IO设备码或辅存寻址信息
- ✓ 控制/状态逻辑: 负责管理DMA传送过程, 用于修改相关信息和状态

**中断机构: 字计数器溢出时, 表示一组数据传送完毕, 触发中断**



## 3.3 DMA方式 (4)



### □ DMA数据传送过程

✓ 分为三个阶段：预处理、数据传送、后处理

✓ 预处理阶段

- CPU通过I/O指令给DMA控制器预置初值，取状态和设置传送需要的有关参数

- 1) 通知DMA控制器传送方向
- 2) 设备地址写入DMA设备地址寄存器
- 3) 主存地址写入内存地址寄存器
- 4) 传送字数写入字计数器

✓ 数据传送阶段

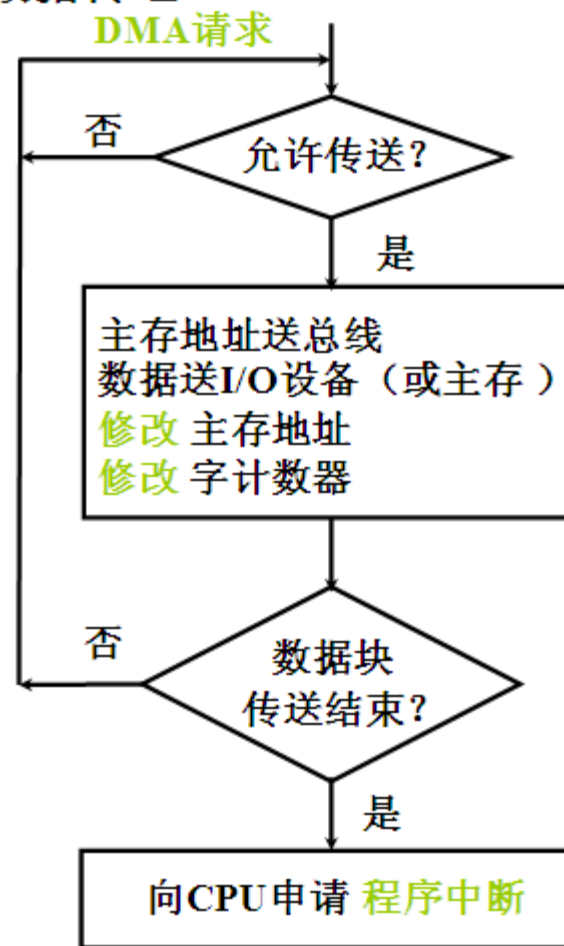
- 以数据块为基本单位
- 通过循环来实现

✓ 后处理阶段

- 校验送入主存的数据是否正确
- 是否继续用DMA

**由中断服务程序完成**

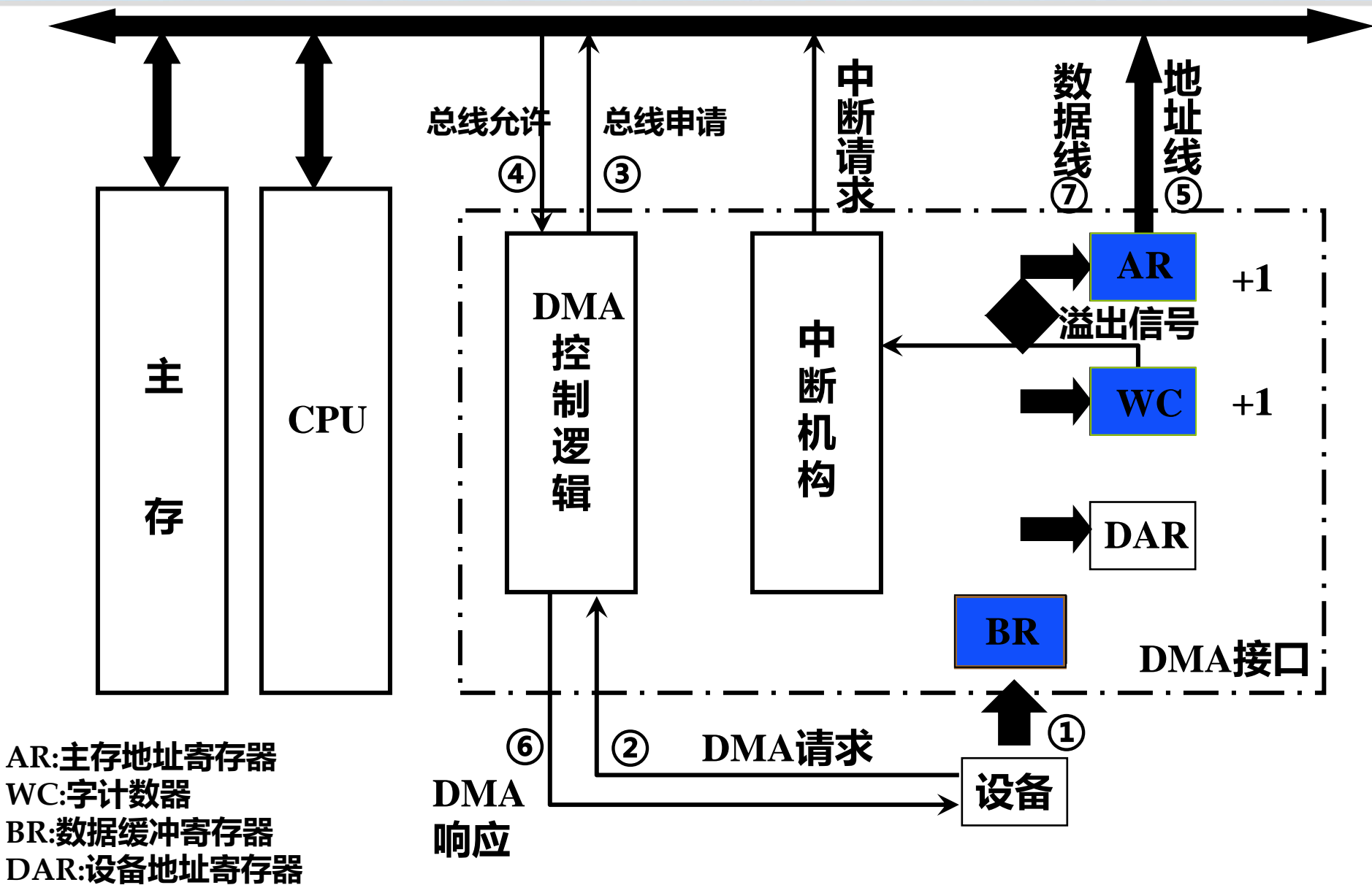
数据传送



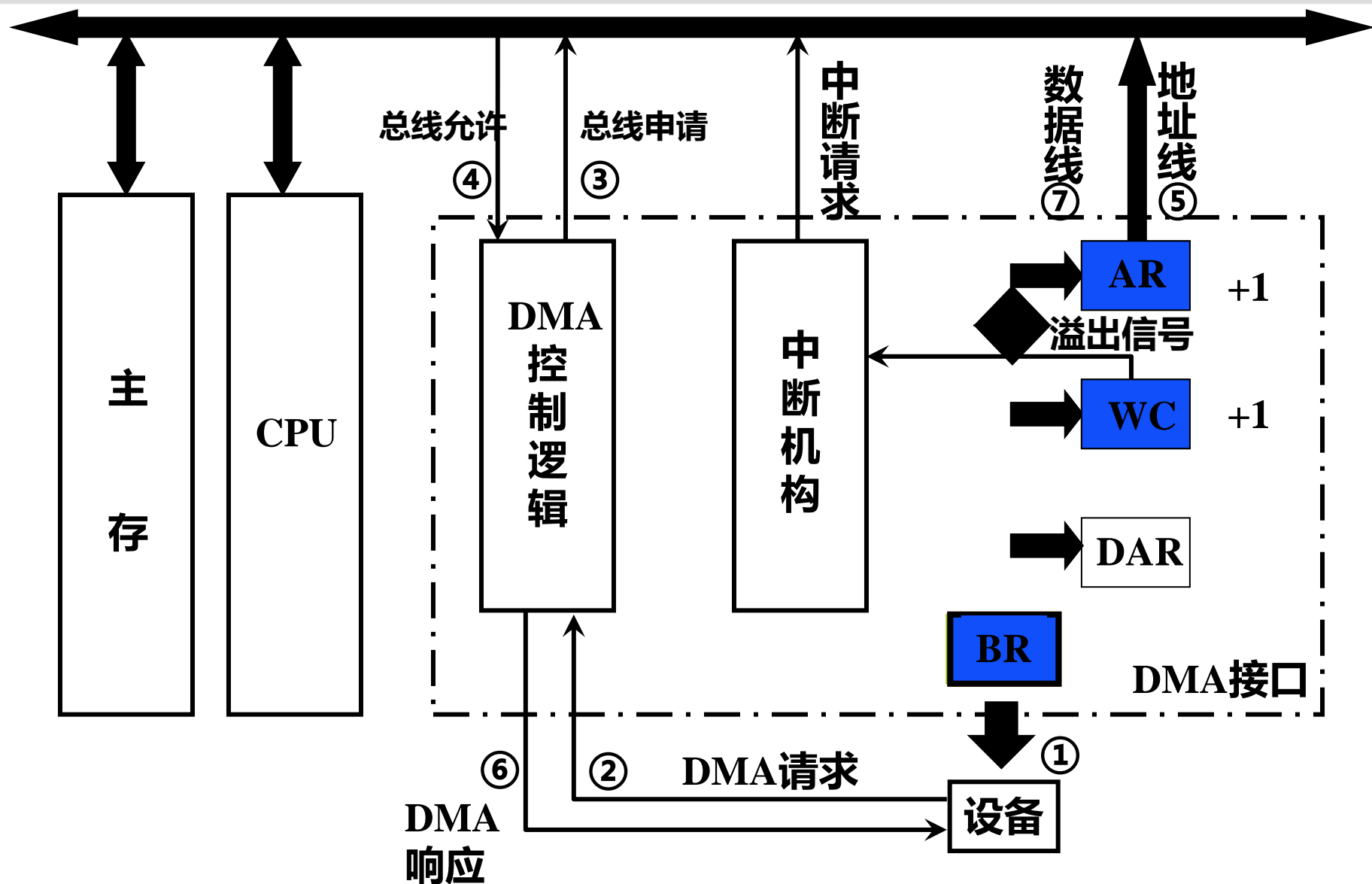
# 输入数据传送过程



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



# 输出数据传送过程



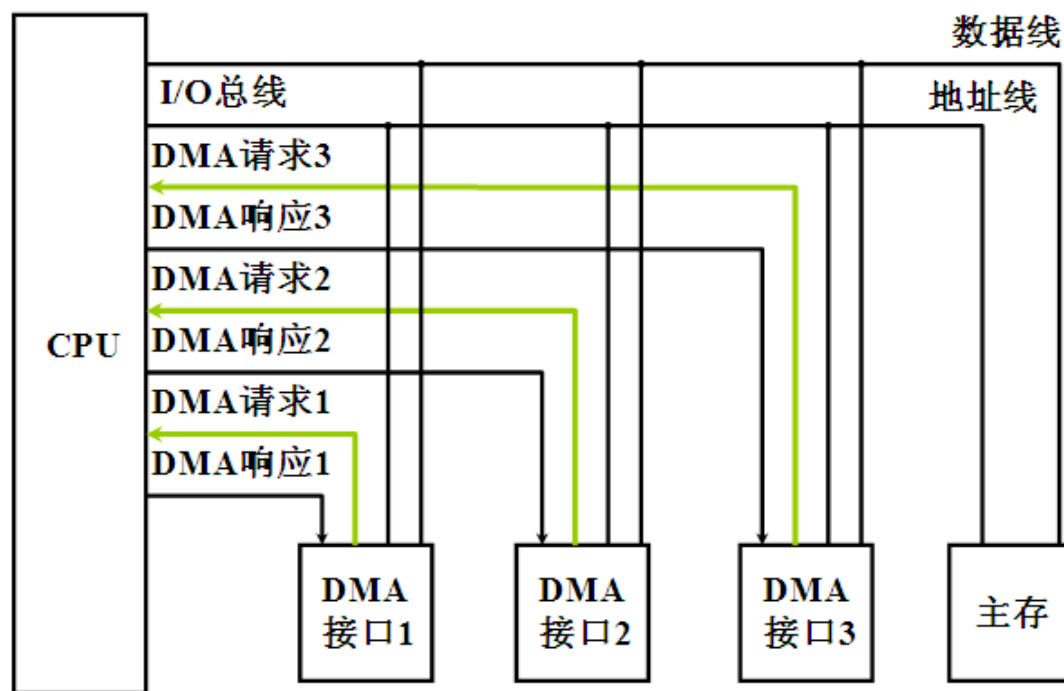
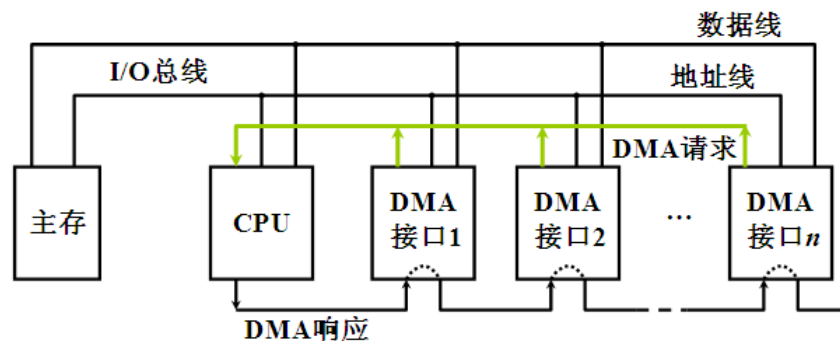


### 3.3 DMA方式 (5)



## □DMA接口与系统的连接方式

- ✓公用DMA请求方式
- ✓独立DMA请求方式



### 3.3 DMA方式 (6)



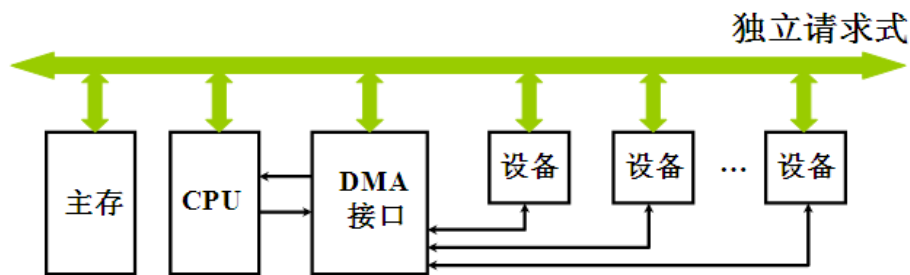
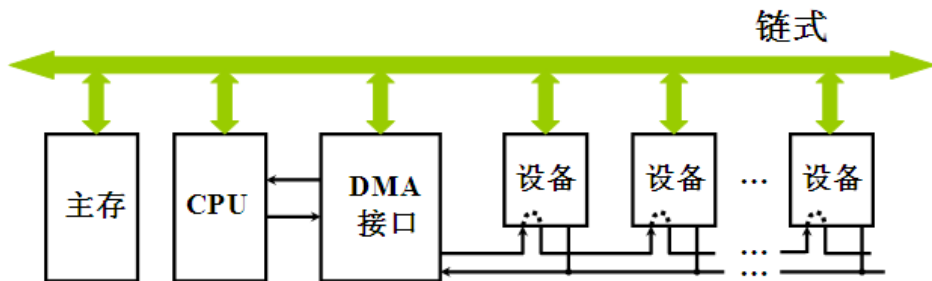
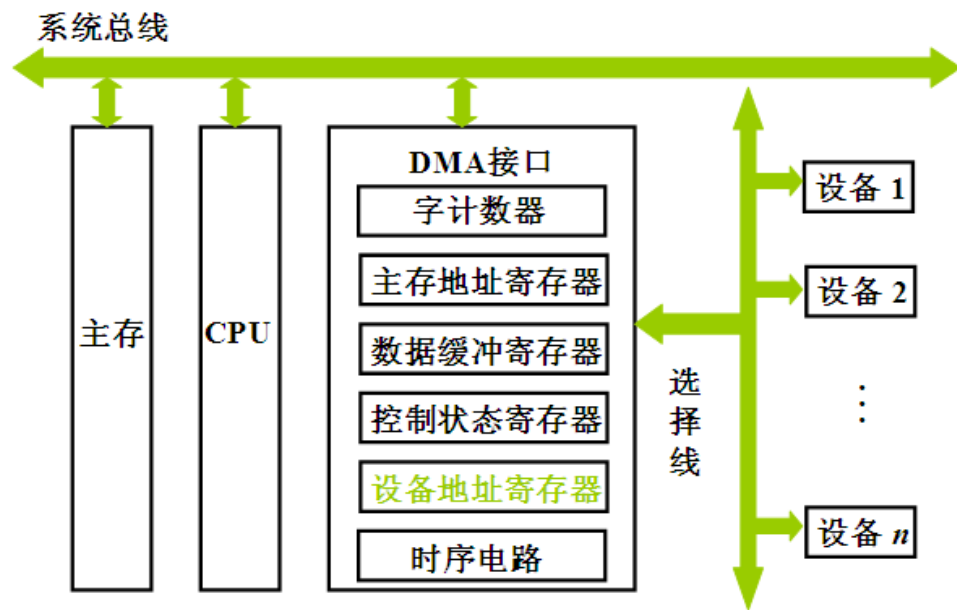
## □DMA控制器的类型

### ✓选择型

- 在物理上连接多个设备，在逻辑上只允许连接一个设备

### ✓多路型

- 在物理上连接多个设备，在逻辑上允许连接多个设备同时工作



# DMA 方式与中断方式的比较



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 中断方式

## DMA 方式

(1) 数据传送

程序

硬件

(2) 响应时间

指令执行结束

存取周期结束

(3) 处理异常情况

能

不能

(4) 中断请求用途

传送数据

溢出、后处理

(5) 优先级

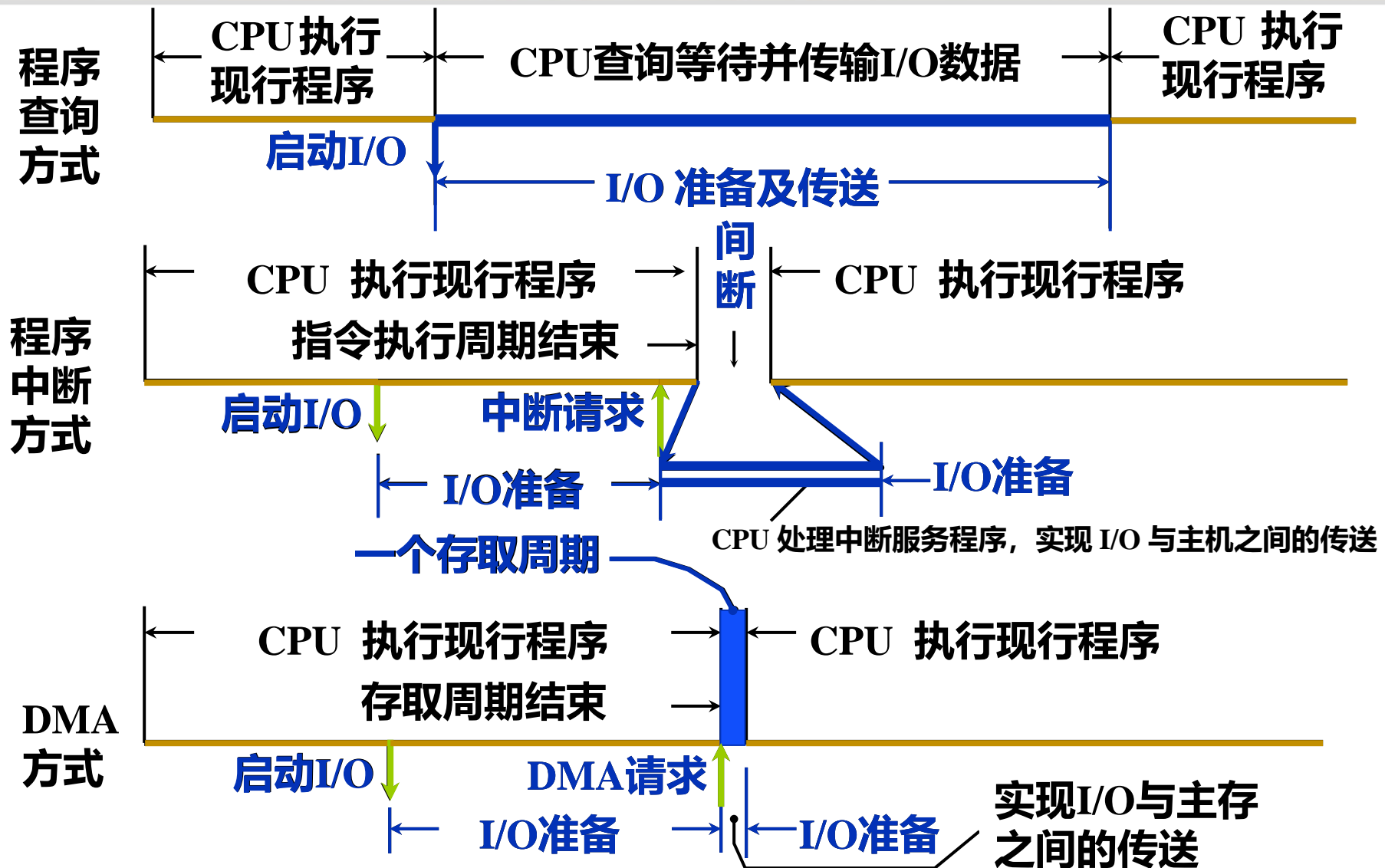
低

高

# 三种方式的CPU效率比较



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



## 3.4 通道方式



### □ 通道的基本概念

- ✓ **通道**：计算机系统中代替CPU管理控制外设的独立部件，是一种能执行有限I/O指令集合——通道命令的I/O处理部件
- ✓ 在通道控制方式中，**一个主机可以连接几个通道。每个通道又可连接多台I/O设备**
  - 这些设备可具有不同速度，可以是不同种类。
  - 这种输入输出系统增强了主机与通道操作的并行能力以及各通道之间、同一通道的各设备之间的**并行操作能力**。
  - 为用户提供了增减外设的**灵活性**
- ✓ 采用通道方式组织输入输出系统，多使用**主机—通道—设备控制器—I/O设备**四级连接方式。
- ✓ 在CPU启动通道后，通道自动地去内存取出通道指令并执行。直到数据交换过程结束向CPU发出中断请求，进行通道结束处理工作

## 3.4 通道方式 (2)



### □ 通道的功能

- ✓ 执行通道指令，组织外设和内存进行数据传输，按I/O指令要求启动外设，向CPU报告中断等
- ✓ 具体5项任务
  - 接受CPU的I/O指令，按指令要求与指定的外设进行通信
  - 从内存选取属于该通道程序的通道指令，经译码后向设备控制器和设备发送各种命令
  - 组织外设和内存之间进行数据传送，并根据需要提供数据缓存的空间，以及提供数据存入内存的地址和传送的数据量
  - 从外设得到设备的状态信息，形成并保存通道本身的状态信息，根据要求将这些状态信息送到内存的指定单元，供CPU使用
  - 将外设的中断请求和通道本身的中断请求，按次序及时报告CPU

## 3.4 通道方式 (3)



### □通道的发展

#### ✓IO处理机 (IOP)

- 不是一台独立的计算机，而是计算机系统中的一个部件
- 可以和CPU并行工作，提供**高速的DMA处理能力**，实现数据的高速传送
- 有些IOP还提供**数据的变换、搜索和字装配/分拆能力**。  
如8位和16位微机中使用的Intel 8089 I/O处理器就是这种通道型I/O处理器

## 1. I/O系统概述

- 1.1 I/O系统的发展概况
- 1.2 I/O系统的组成
- 1.3 I/O系统与主机的联系

## 2. I/O接口

- 2.1 I/O接口概述
- 2.2 I/O接口的功能与组成
- 2.3 I/O接口类型

## 3. I/O信息交换方式

- 3.1 程序查询方式
- 3.2 程序中断方式
- 3.3 DMA方式
- 3.4 通道方式

## 4. I/O设备

- 4.1 IO设备概述
- 4.2 常见的输入和输出设备

## 5. 辅助存储器

- 5.1 辅存概述
- 5.2 磁记录原理与记录方式
- 5.3 磁盘存储器
- 5.4 光盘存储器
- 5.5 FLASH存储器

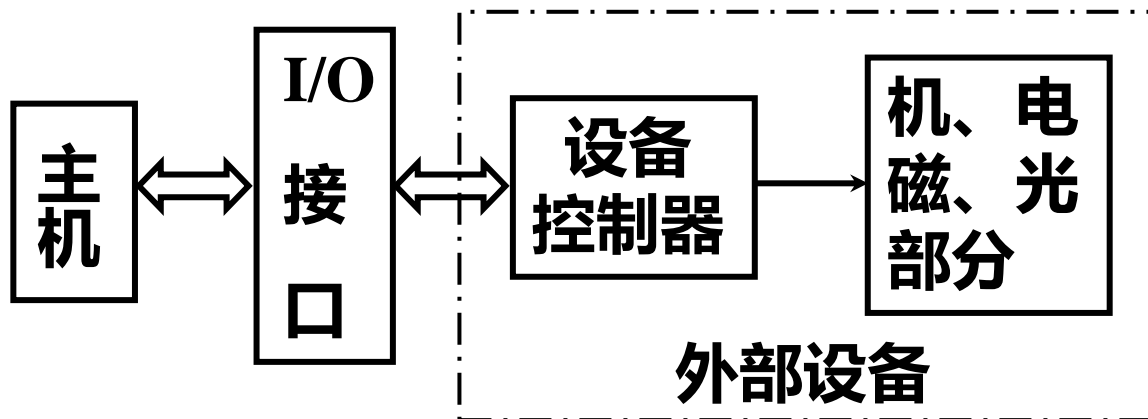


# 4 I/O设备



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 一、概述



### 外部设备大致分三类

1. 人机交互设备

键盘、鼠标、打印机、显示器

2. 计算机信息存储设备

磁盘、光盘、磁带

3. 通信设备

调制解调器等

# 4 I/O设备 (2)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 二、输入设备

### 1. 键盘

**按键**

**判断哪个键按下**

**将此键翻译成 ASCII 码 (编码键盘法)**

### 2. 鼠标

**机械式**

**金属球 电位器**

**光电式**

**光电转换器**

### 3. 触摸屏

# 4 I/O设备 (3)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 三、输出设备

### 1. 显示器

(1) 字符显示      字符发生器

(2) 图形图像显示

### 2. 打印机

(1) 击打式      点阵式 (逐字、逐行)

(2) 非击打式      激光 (逐页)      喷墨 (逐字)

## 四、其他

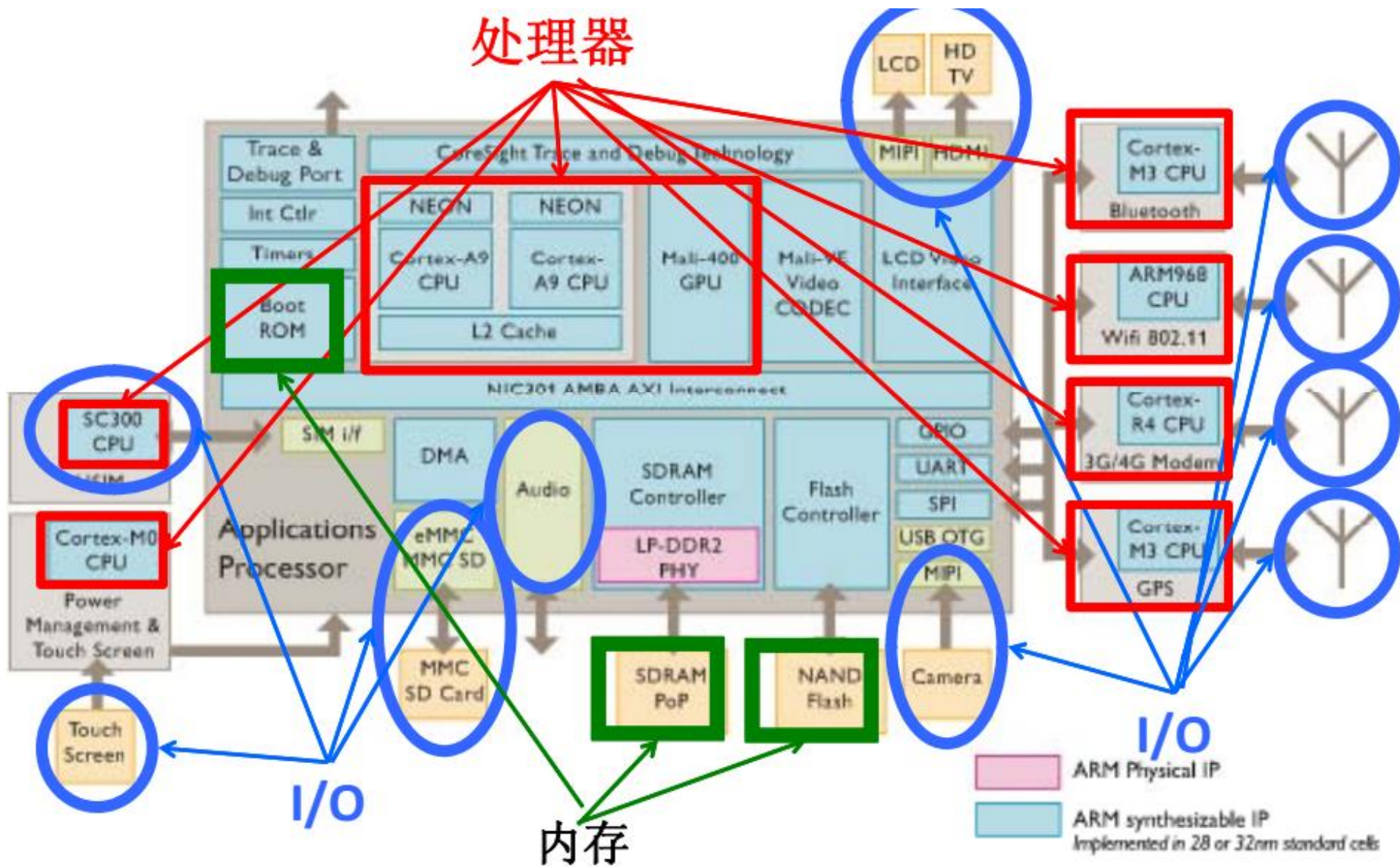
模拟/数字 (数字/模拟) 转换器

汉字处理

# iPhone



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



## 1. I/O系统概述

- 1.1 I/O系统的发展概况
- 1.2 I/O系统的组成
- 1.3 I/O系统与主机的联系

## 2. I/O接口

- 2.1 I/O接口概述
- 2.2 I/O接口的功能与组成
- 2.3 I/O接口类型

## 3. I/O信息交换方式

- 3.1 程序查询方式
- 3.2 程序中断方式
- 3.3 DMA方式
- 3.4 通道方式

## 4. I/O设备

- 4.1 IO设备概述
- 4.2 常见的输入和输出设备

## 5. 辅助存储器

- 5.1 辅存概述
- 5.2 磁记录原理与记录方式
- 5.3 磁盘存储器
- 5.4 光盘存储器
- 5.5 FLASH存储器

# 5.1 辅存概述



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □辅存概述

✓又叫外部存储器，简称外存

✓辅存特点

- 容量大、速度慢、价格低、可脱机保存信息等
- 不直接与CPU交换信息

✓辅存种类

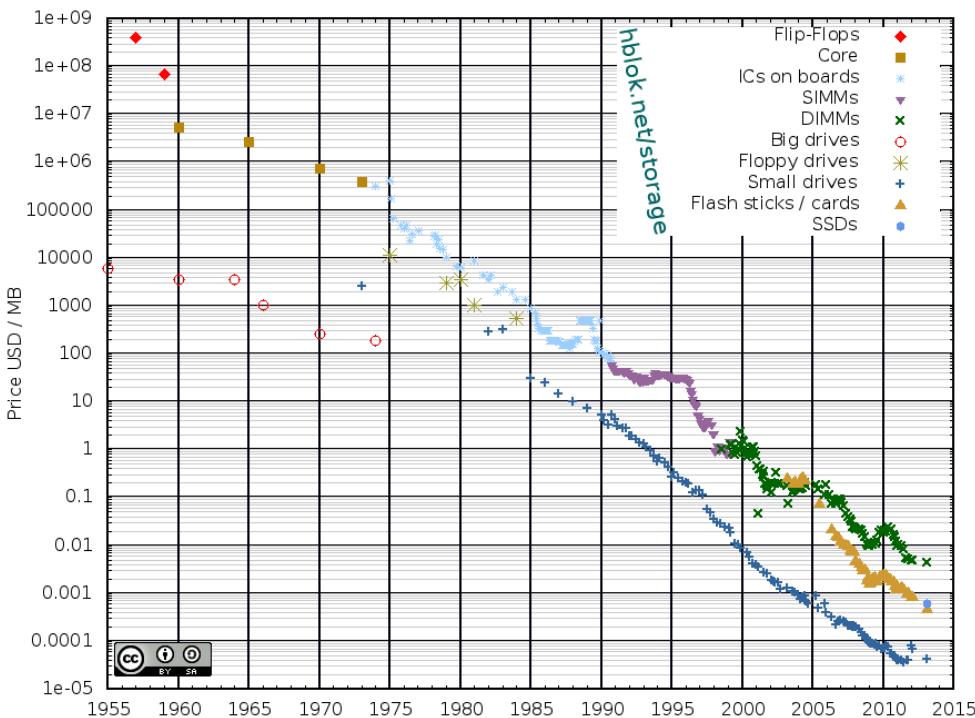
- 硬盘、软盘、磁带、光盘、U盘、闪存等



# 5.1 辅存的性能

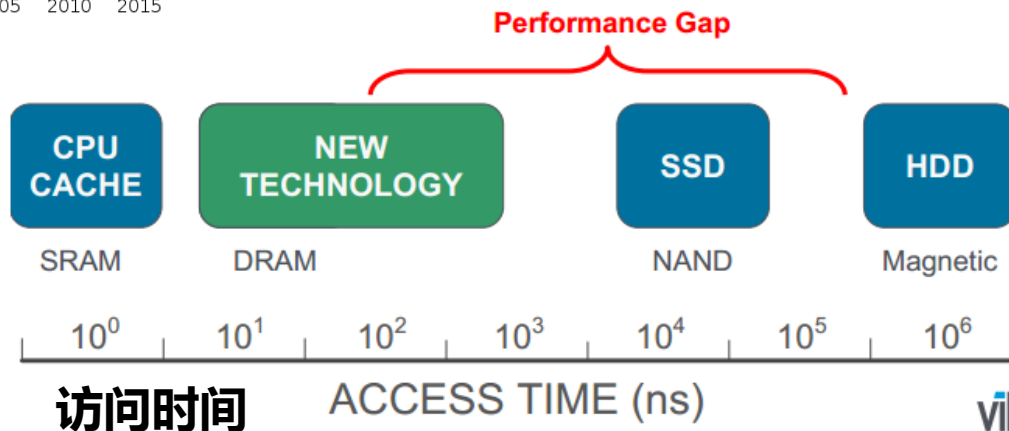
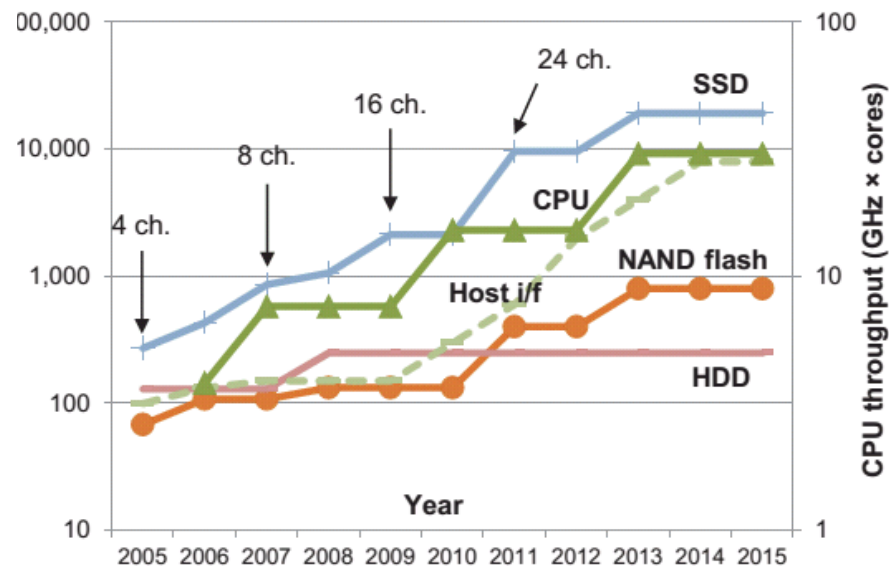


Historical Cost of Computer Memory and Storage



成本逐渐降低

带宽不断升高



## 5.2 磁记录设备



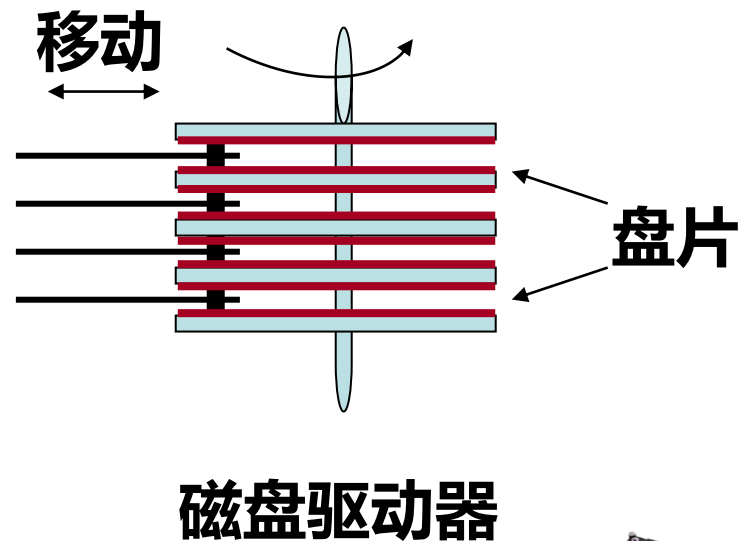
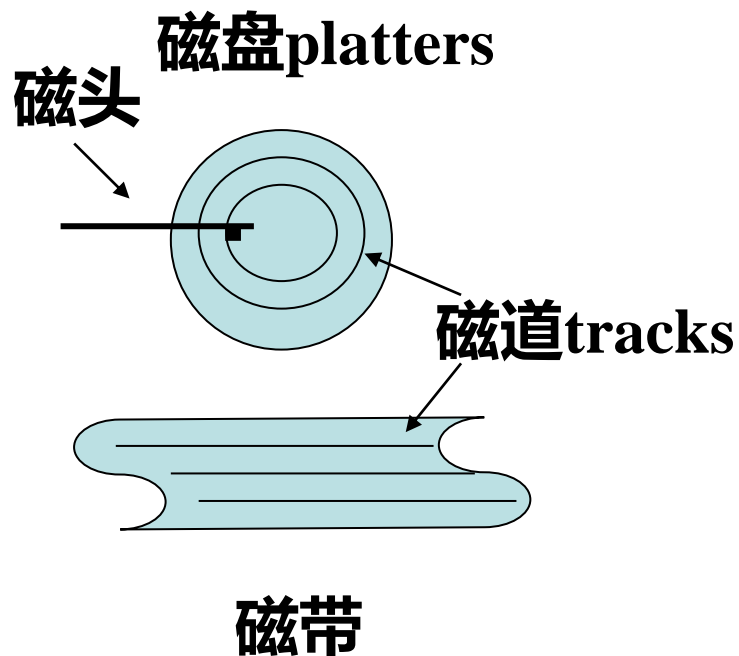
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

### •设备读写方式

•随机方式：RAM

•顺序方式：磁带（稳定，安全，速度慢，成本低）

•直接方式：磁盘（扇区的定位采用**随机**方式，依靠磁盘旋转可直接找到某一扇区，而扇区内则采用**顺序**读写方式）





## □记录密度：道密度（磁盘）、位密度（磁盘、磁带）

✓道密度：沿半径方向**单位长度磁道数**

• 单位：道/英寸（TPI, Tracks Per Inch）      P：道距

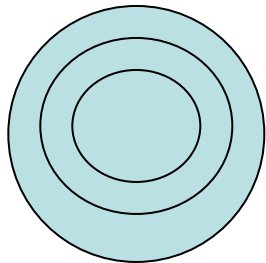
$$D_t = \frac{1}{P}$$

✓位密度：**单位长度磁道所记录的数据位数**，单位为位/英寸（bpi）或位/毫米（bpm）

$$D_b = \frac{f_t}{\pi \cdot d_{\min}}$$

每道总位数，各道相同

同心圆最小直径



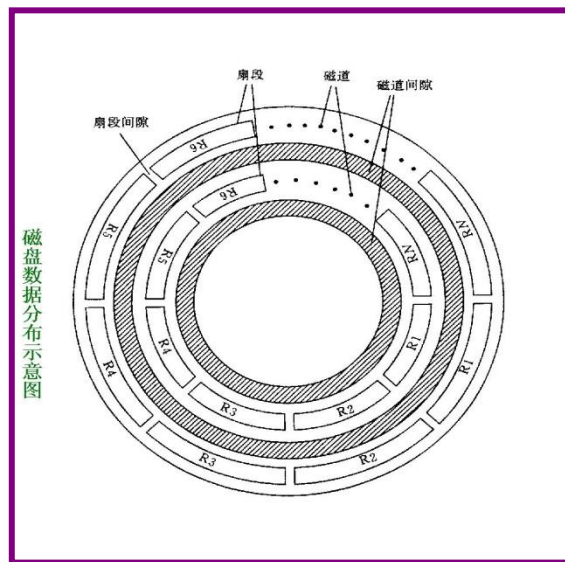
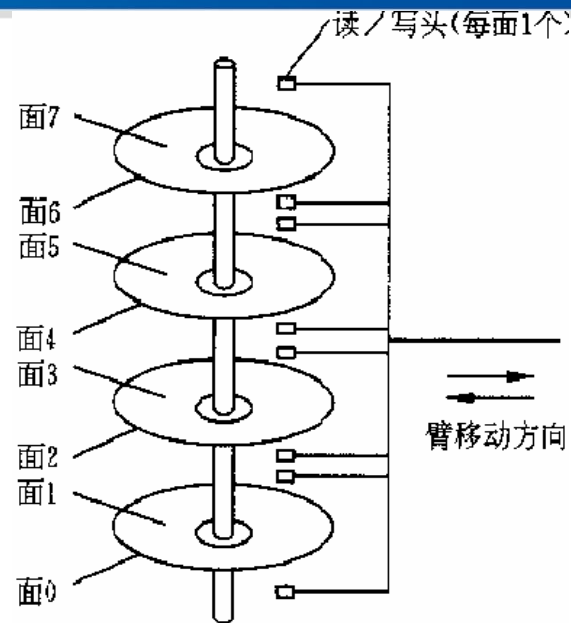
## □容量：存储的信息总量

✓ 磁盘总容量  $C = n \times k \times s$

- $n$ : 盘面数
- $k$ : 每面磁道数
- $s$ : 每道记录代码数

✓ 非格式化容量：磁表面可以利用的磁化单元总数。

✓ 格式化容量：按某种特定的记录格式所能存储信息的总量，  
约为非格式化容量的70%~80%  
(校验同步码、空闲、分区表、二进制转换)



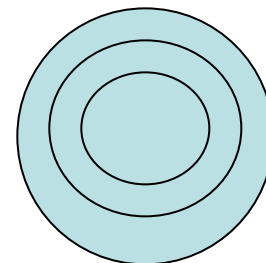
# 技术指标3 - 寻址时间



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □ 磁盘寻址过程：直接**存取**

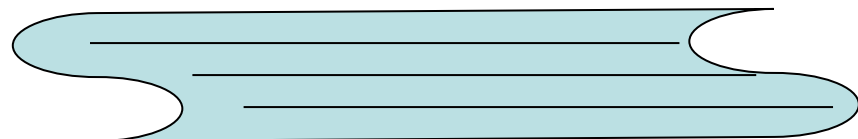
- ✓ 随机寻道，顺序定位记录
- ✓ 寻址时间 = 寻道时间 ( $t_s$ ) + 等待时间 ( $t_w$ )
- ✓ 平均寻址时间
  - 寻道：最外、最内、相邻，各不相同
  - 等待时间：外道、内道长度不同



$$T_a = t_{sa} + t_{wa} = \frac{t_{s \max} + t_{s \min}}{2} + \frac{t_{w \max} + t_{w \min}}{2}$$

## □ 磁带寻址过程：**顺序存取**

- ✓ 磁头不动，磁带空转到指定位置。
- ✓ 寻址时间 = 空转时间



## □传输率：

- ✓ 单位时间传输的数据量（字节、位）
- ✓  $D_r = \text{记录密度 (D)} \times \text{介质运行速度 (V)}$

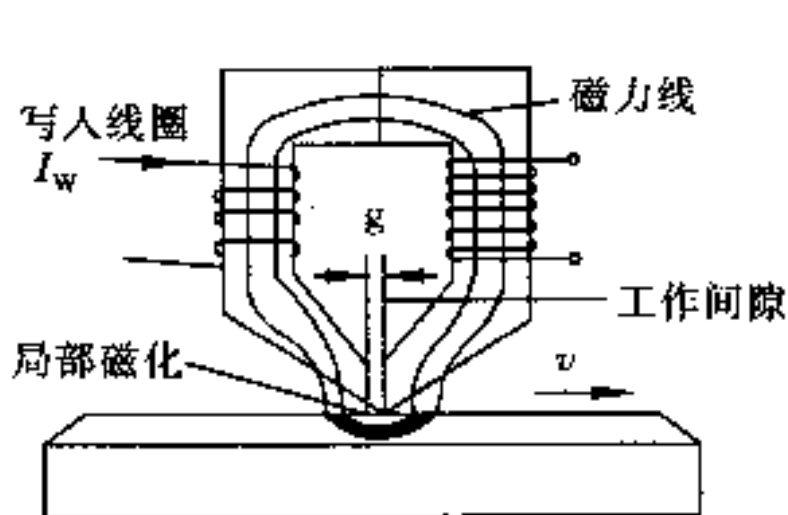
## □误码率：

- ✓ 读出时，出错位数/读出的总位数
- ✓ 为了减少出错率，磁表面存储器通常采用循环冗余码CRC来发现并纠正错误。

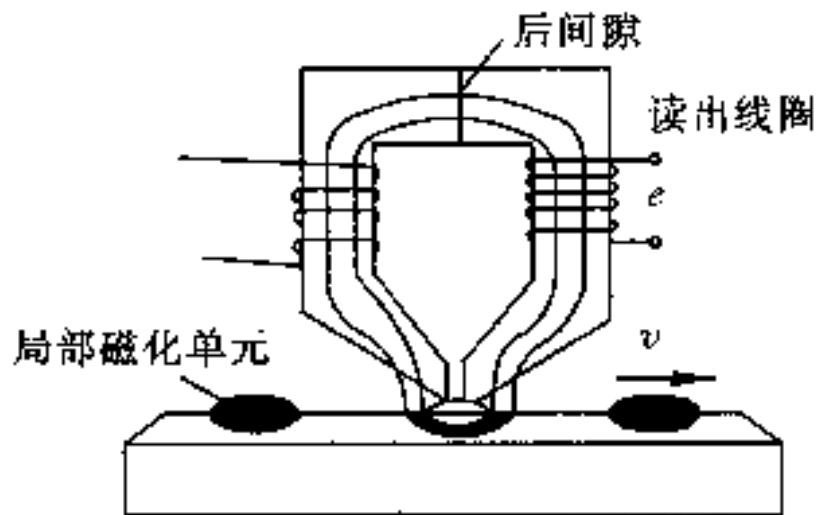
# 磁记录原理—读、写过程



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



(a) 写入



(b) 读出

- **写入：**记录介质在磁头下匀速通过,磁头线圈中通入一定方向和大小的电流,则会在介质上形成一个磁化单元. 电流方向不同,则磁化方向也不同. 一个磁化方向规定为“0”,另一个磁化方向就规定为“1”.
- **读出：**记录介质在磁头下匀速通过时,读出线圈会感应出电压,磁化方向不同,则感应电压就不同,对感应电压进行放大和整型,就可以读出“0”或“1”.

## □ 磁记录方式：又称编码方式

- ✓ 即按某种规律，将一串二进制数字信息变换成磁表面相应的磁化状态。
- ✓ 对记录**密度**和**可靠性**有很大影响。

## □ 常用的编码方式有：

1. 归零制 (NZ)
2. 不归零制 (NRZ)
3. 见1就翻的 NRZ1
4. 调相制-曼彻斯特编码 (PM)
5. 调频制 (FM)
6. 改进调频制 (MFM)

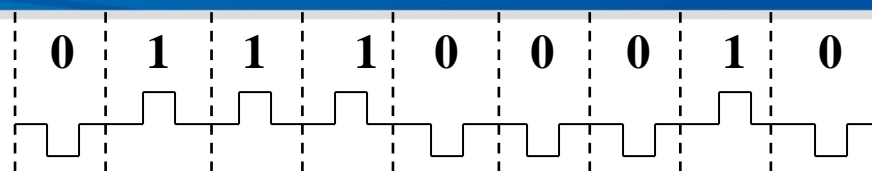
# 磁表面存储器的磁记录原理



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

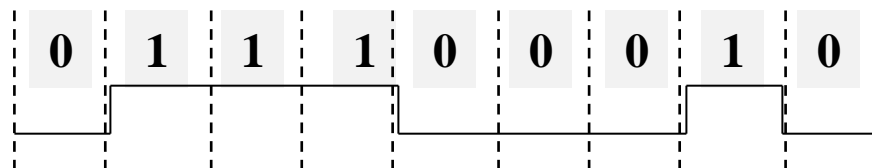
## □ (1) 归零制 (RZ)

- ✓ 正脉冲电流表示“1”，负脉冲电流表示“0”；
- ✓ 不论记录“0”或“1”，在记录下一个信息前，**记录电流恢复到零电流。**
- ✓ 简单易行，记录密度低
- ✓ 改写磁层上的记录比较困难，一般是先去磁后写入。
- ✓ **有自同步能力**（能从磁头读出信号中分离获得同步信号）



## □ (2) 不归零制 (NRZ)

- ✓ 磁头线圈始终有电流，电流方向“见变就翻”
- ✓ 对连续记录的“1”和“0”，写电流的方向是不改变的。
- ✓ 无自同步能力。

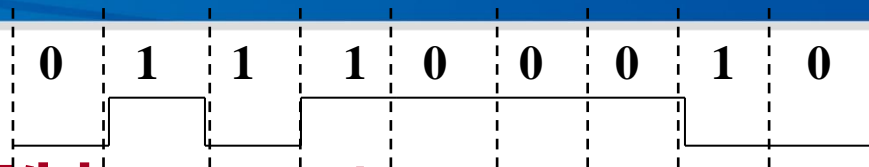


**自同步能力**指：从单个磁道读出的脉冲序列中提取时钟信号频率的难易程度

# 磁表面存储器的磁记录原理



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

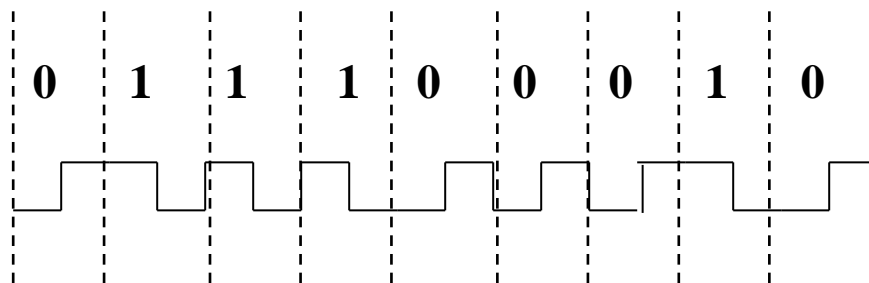


## □ (3) 见“1”就翻的不归零制 (NRZ1)

- ✓ 磁头线圈始终有电流通过。
- ✓ 在记录“1”时，电流改变方向，写“0”电流保持不变。
- ✓ 不具备自同步能力，需要引用外同步信号

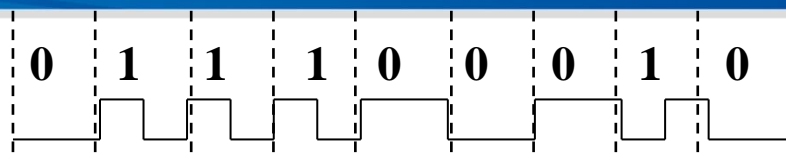
## □ (4) 调相制 (PM)：相位编码 (PE)、曼彻斯特码

- ✓ 记录数据“0”时，规定磁化翻转的方向由负变为正，记录数据“1”时从正变为负
- ✓ “0”，“1”的读出信号相位不同，抗干扰能力强
  - 磁带多用此方式
- ✓ 具有自同步能力





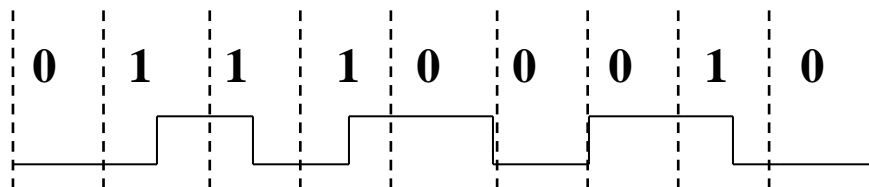
## □ (5) 调频制 (FM)



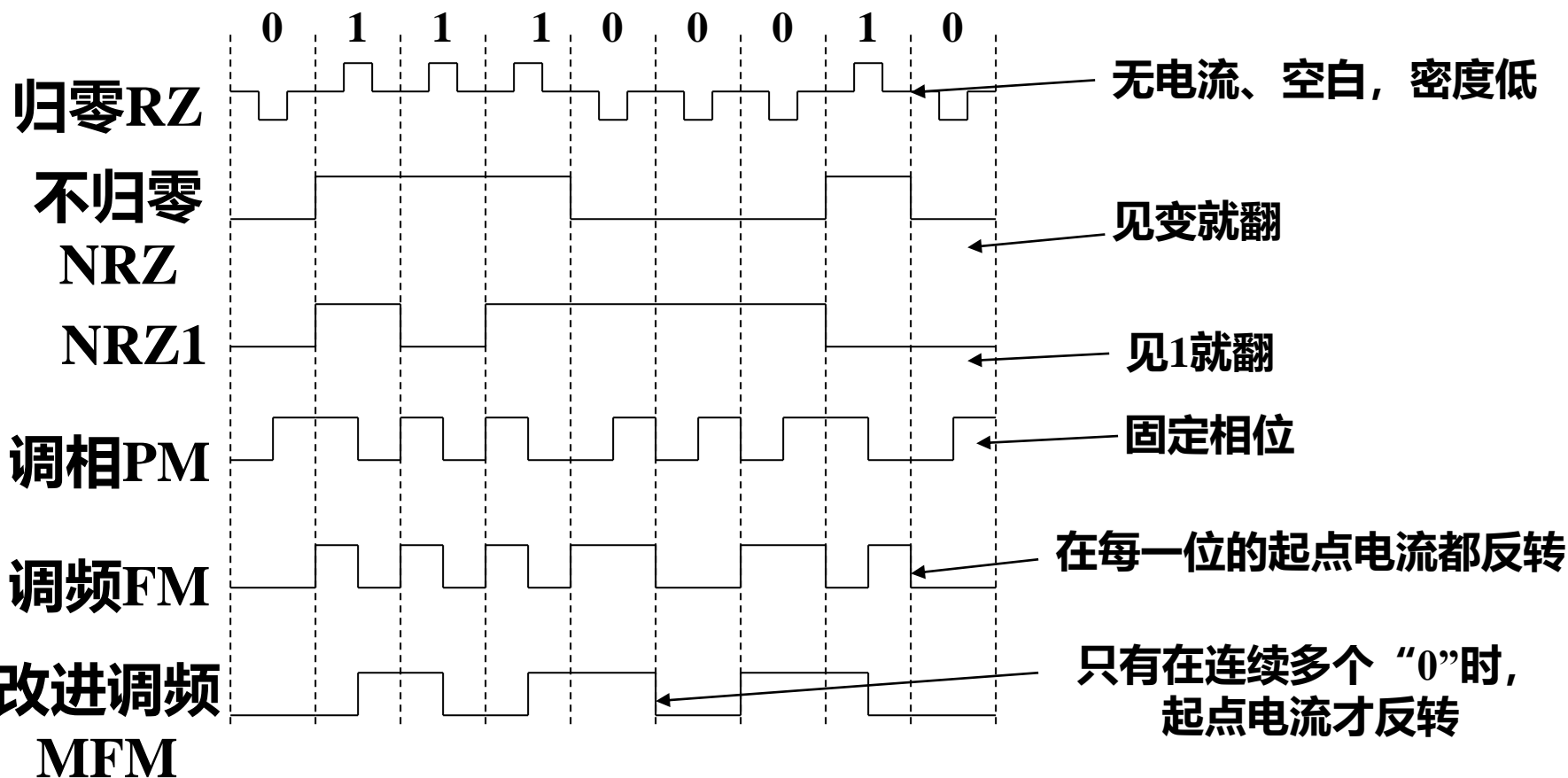
- ✓ 频率变化 (“1”的频率是 “0”的两倍)
- ✓ 在位与位之间的边界处都要翻转一次
- ✓ 具有自同步能力
- ✓ 用于软硬磁盘

## □ (6) 改进调频制 (MFM)

- ✓ 不是在每个位周期的起始处都翻转。当连续两个或两个以上 “0”时，在位周期的起始位置翻转一次。
- ✓ 具有自同步能力



## □写电流波形的形式

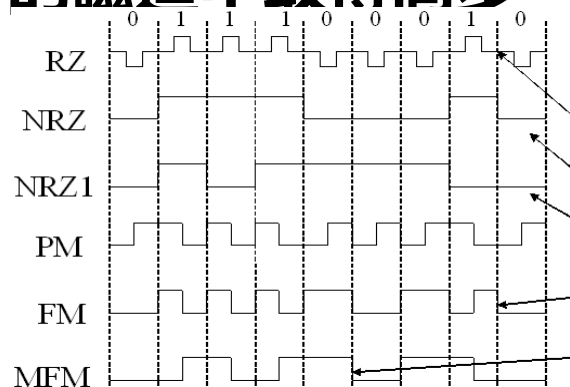


**□ 编码效率：** 位密度与磁化翻转密度的比值，用记录一位信息的最大反转次数表示

- ✓ FM、PM：最多需反转2次，效率50%
- ✓ NRZ、NRZ1、MFM：最多只需反转1次，效率100%

**□ 自同步能力**

- ✓ 指：从单个磁道读出的脉冲序列中提取同步脉冲的难易程度
- ✓ 外同步：从专门设置的用来记录同步信号的磁道中取得同步脉冲。
  - NRZ、NRZ1
- ✓ 自同步：记录方式中隐含同步信息
  - RZ、PM、FM、MFM

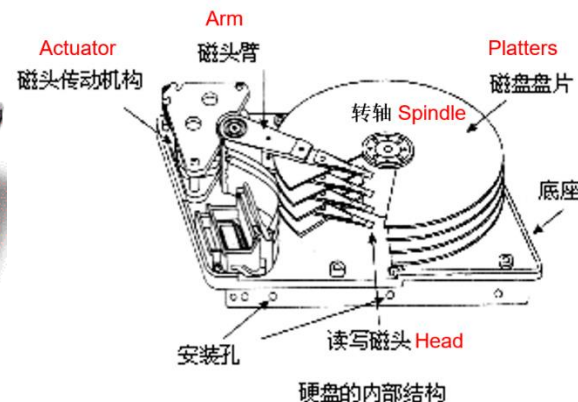
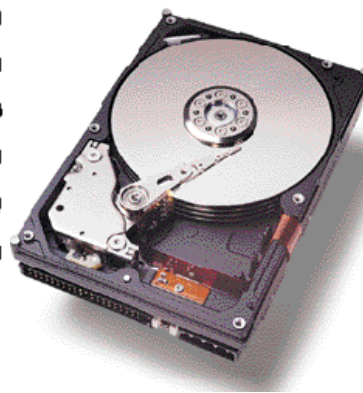
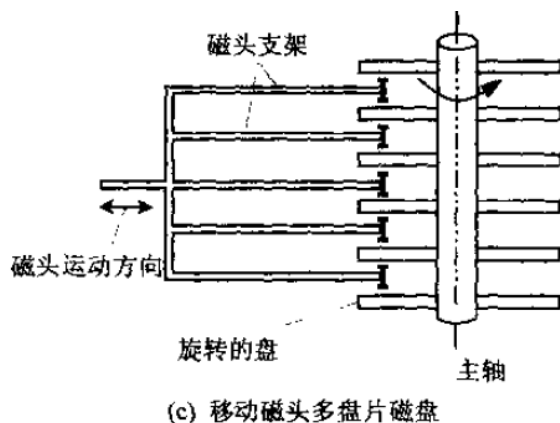
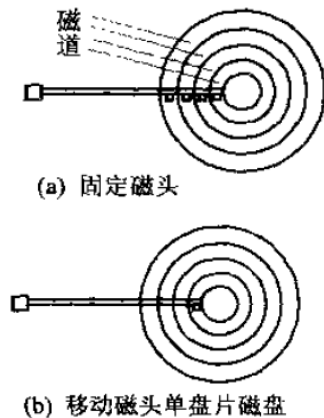


## 5.3 磁盘存储器



### □ 硬磁盘存储器类型

- ✓ 硬磁盘：记录介质为硬质圆形盘片的磁表面存储器，铝合金材料制成
- ✓ 按磁头工作方式分类：固定磁头和可移动磁头
- 按磁盘是否可换分类：可换盘片式和固定盘片式



### 温彻斯特磁盘，简称温盘

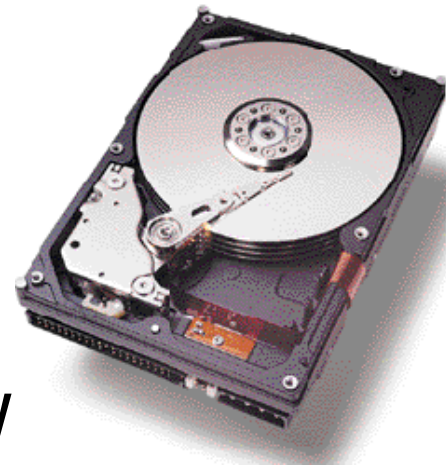
- 一种IBM采用先进技术研制的可移动磁头固定盘片的磁盘机
- 一种密封组合式的硬磁盘，即磁头、盘片、电机等驱动部件乃至读写电路等组装成一个不可随意拆卸的整体
- 工作时，高速旋转在盘面上**形成的气垫将磁头平稳浮起**
- 优点是防尘性能好，可靠性高，对使用环境要求不高，成为最有代表性的硬磁盘存储器。而普通的硬磁盘要求具有超净环境，只能用于大型计算机中

# 硬盘的发展和几个指标



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 1956年，IBM公司研制成第一个商品化的硬磁盘
- 1973年，IBM发明了温彻斯特(温氏)磁盘，简称温盘
- **体积**：5.25英寸/全高、**3.5英寸**/半高(台式PC)；2.5英寸(笔记本PC)
- **容量**：3TB（盘片数3，单碟容量1T，磁头数6）
- 缓存：64MB
- 转速：7200rpm
- 接口类型：SATA3.0，接口速率6Gb/秒
- 平均寻道时间：读<8.5ms，写<9.5ms
- 功率：运行8W，空闲5.4W，待机0.75W



# 350磁盘存储单元



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □ IBM公司1956年推出的首台硬磁盘存储器

### ✓ 用于RAMAC计算机：人口普查

- Random Access Method of Accounting and Control

### ✓ 50个直径为24英寸的盘片组成

### ✓ 每分钟1200转

- 比磁带机快200倍
- 在几秒内找到数据

### ✓ 容量5MB

### ✓ 约有两个冰箱大

### ✓ \$100w



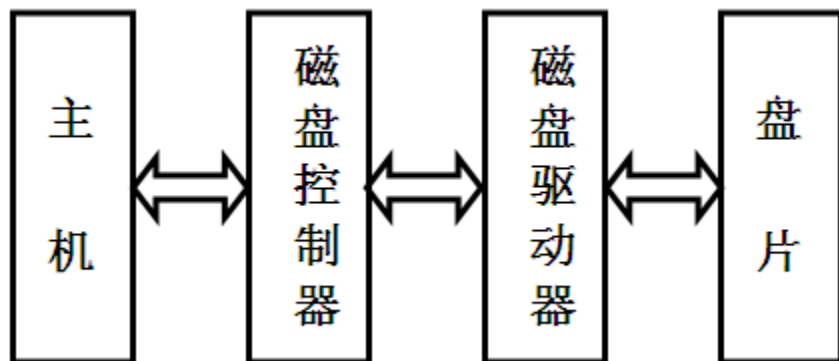
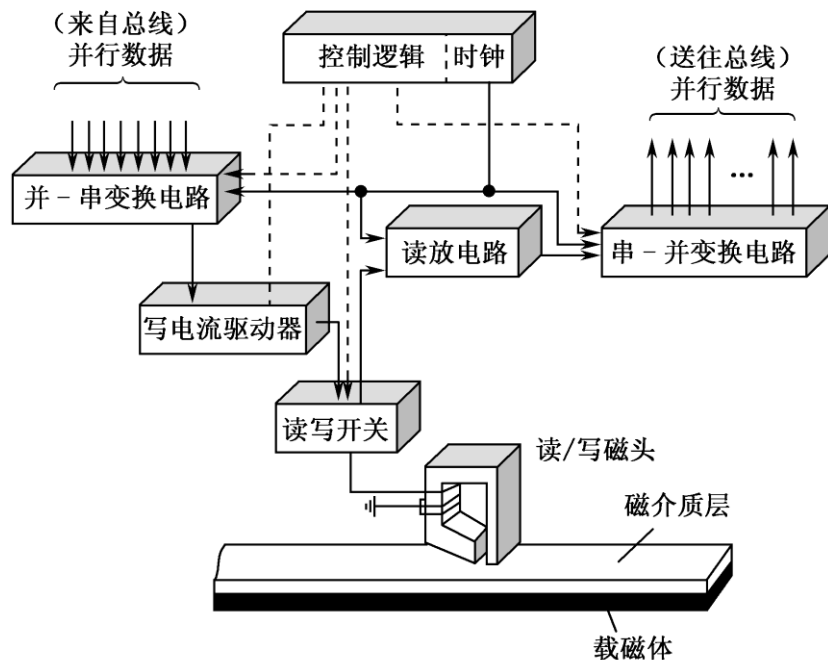


## 5.3 磁盘存储器 (2)



### □ 磁盘存储器的组成结构

- ✓ 磁记录介质：盘片
- ✓ 磁盘控制器
  - 包括控制逻辑与时序、数据并-串 / 串-并变换电路
- ✓ 磁盘驱动器
  - 包括写入/读出电路、读写转换开关、读写磁头和磁头定位伺服系统等



□ 1987年, Patterson等@UCB

- ✓ 将多只容量较小的、相对廉价的硬盘组合, 使其性能超过一只昂贵的大硬盘

□ Redundant Array of **Inexpensive** Disk

□ Redundant Array of **Independent** Disk

- ✓ 支持自动检测故障硬盘;
- ✓ 支持重建硬盘坏轨信息;
- ✓ 支持不须停机的硬盘备援(Hot Spare)
- ✓ 支持不须停机的硬盘替换(Hot Swap)
- ✓ 支持扩充硬盘容量





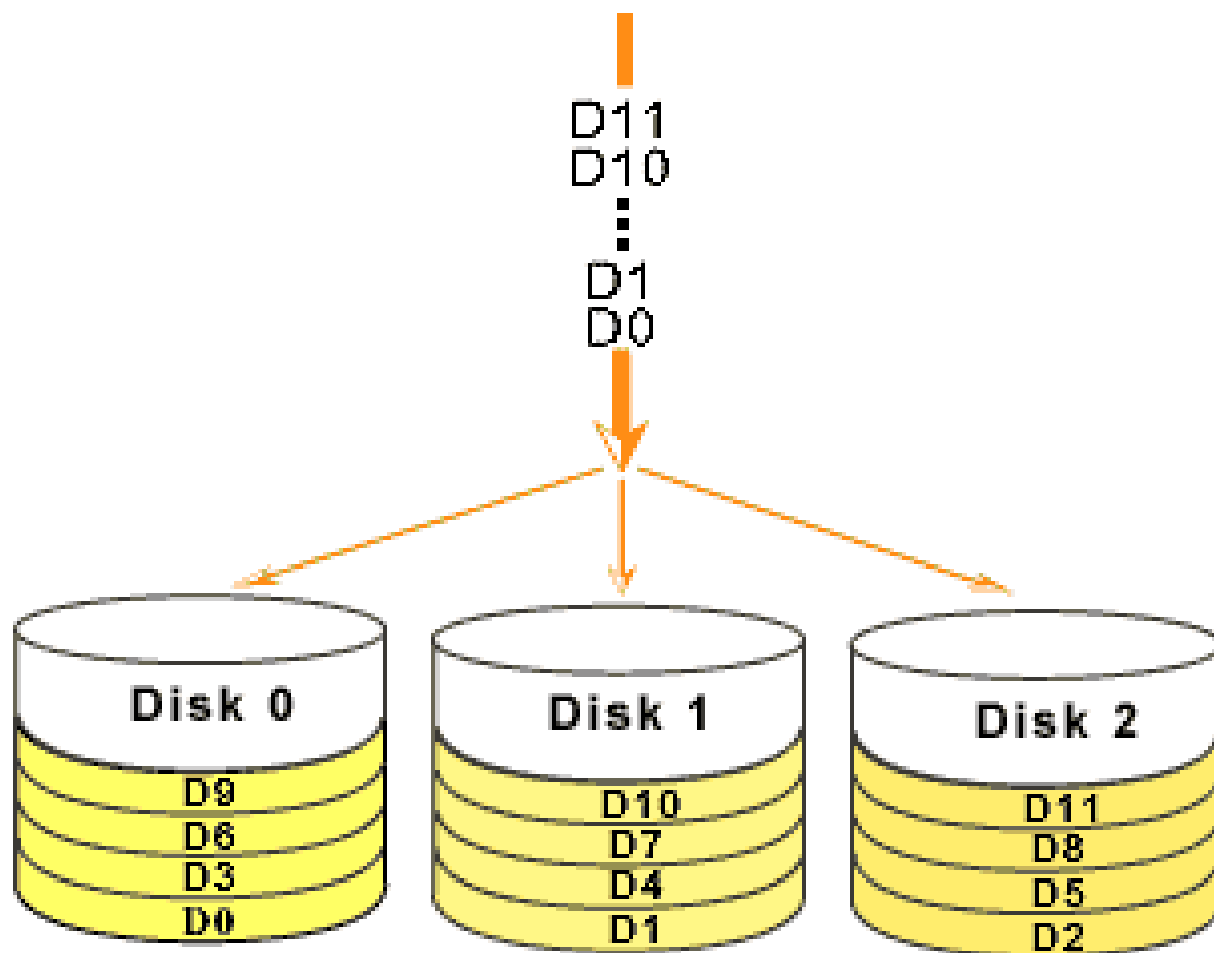
- ❑ RAID0: 无差错控制的区组
- ❑ RAID1: 镜象结构
- ❑ RAID2: 带海明码校验
- ❑ RAID3: 带奇偶校验码的并行传送
- ❑ RAID4: 带奇偶校验码的独立磁盘结构
- ❑ RAID5: 分布式奇偶校验的独立磁盘结构
- ❑ RAID6: 带有两种分布存储的奇偶校验码的独立磁盘结构
  - ✓ 对RAID5的扩展
- ❑ RAID7: 优化的高速数据传送磁盘结构
  - ✓ 采用并行和Cache技术

# RAID 0 (无差错控制的区组)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

□目的：利用多体并行提高存储性能

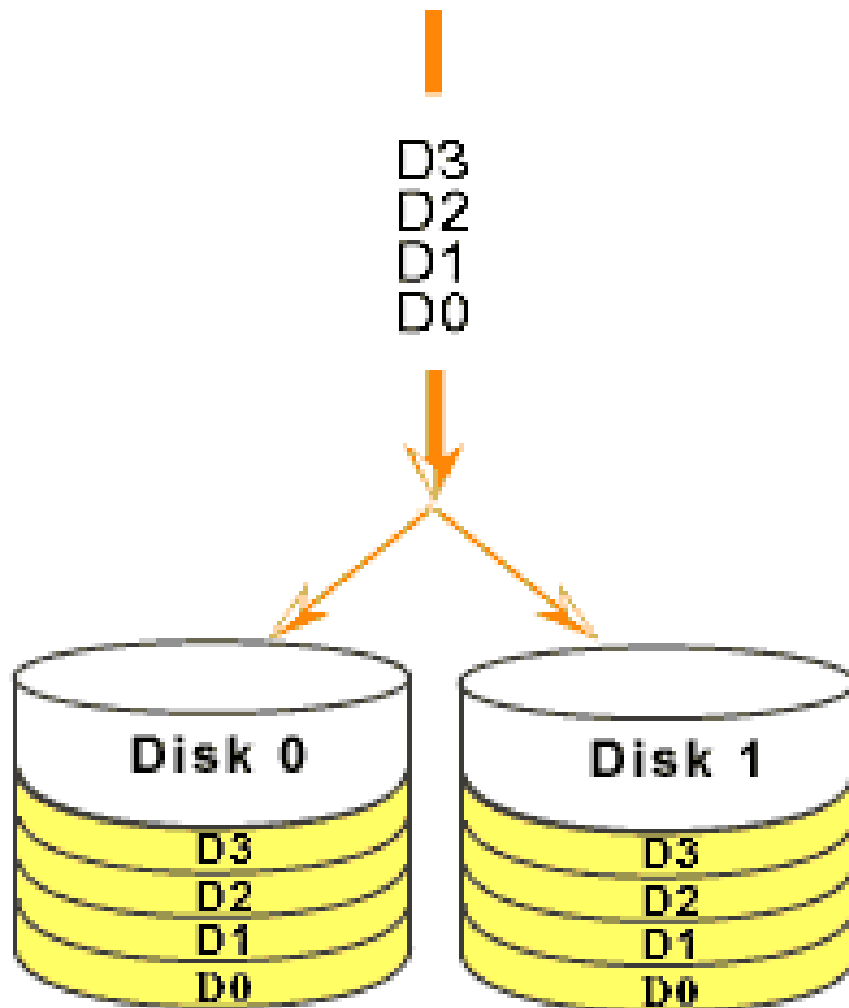


# RAID 1 (别名: 镜像)



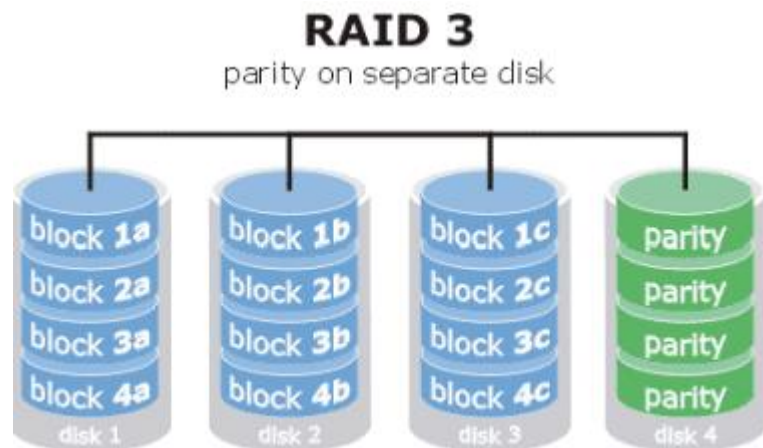
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

□ 目标: 保证数据的可用性和可修复性



## □ RAID3：带奇偶校验码的并行传送（检错）

- ✓ 将数据条块化分布于不同的硬盘上
  - 条块单位为位或字节。
  - RAID4（少用）：按数据块访问数据
  - RAID2（少用）：带海明码校验
- ✓ 必须要有三个以上的驱动器
- ✓ 校验码在写入数据时产生，保存在另一个磁盘上。
- ✓ 根据奇偶校验数据可以恢复



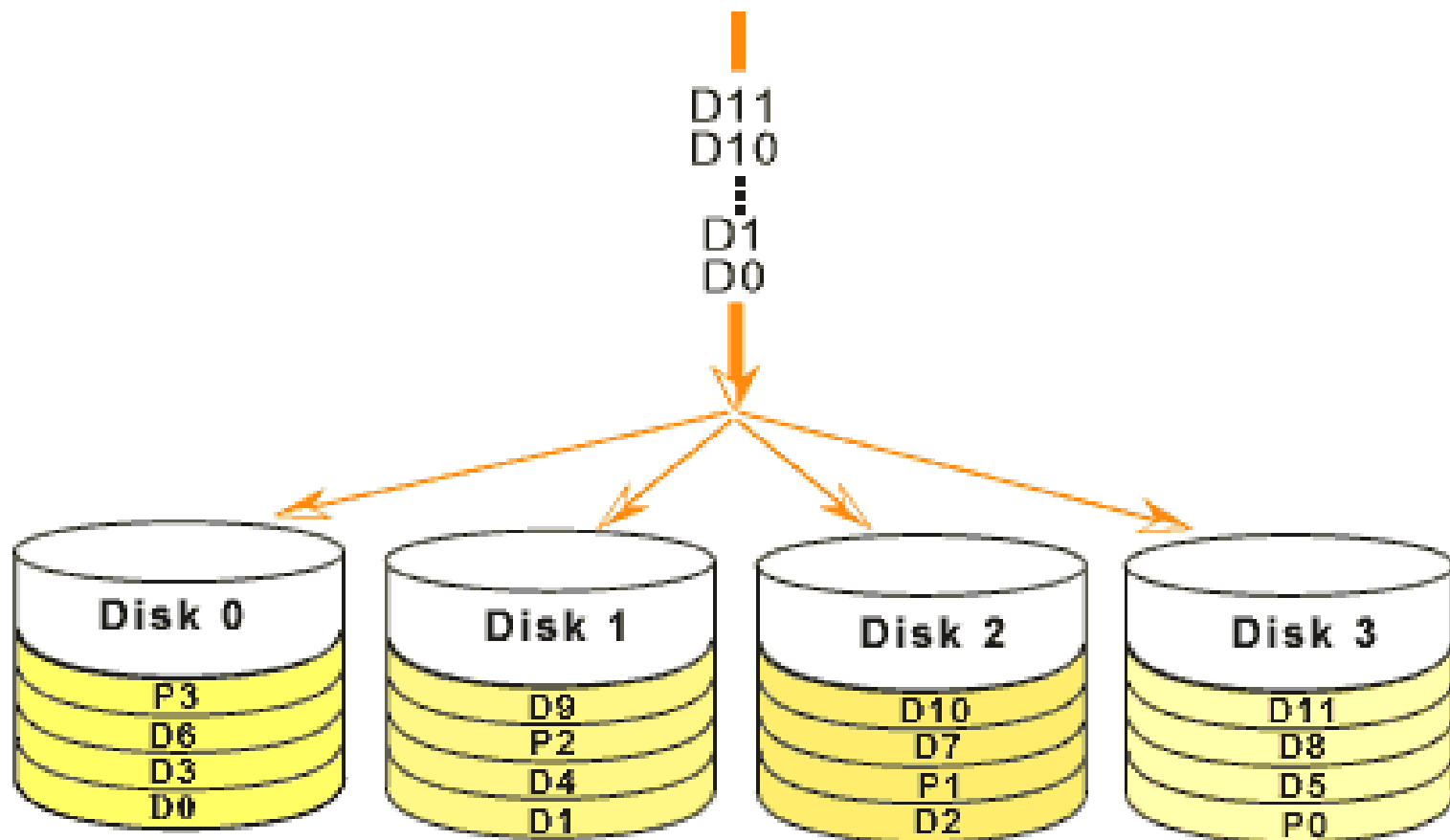
# RAID 5



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □ 分布式奇偶校验的独立磁盘结构

✓ 奇偶校验码存在于所有磁盘上

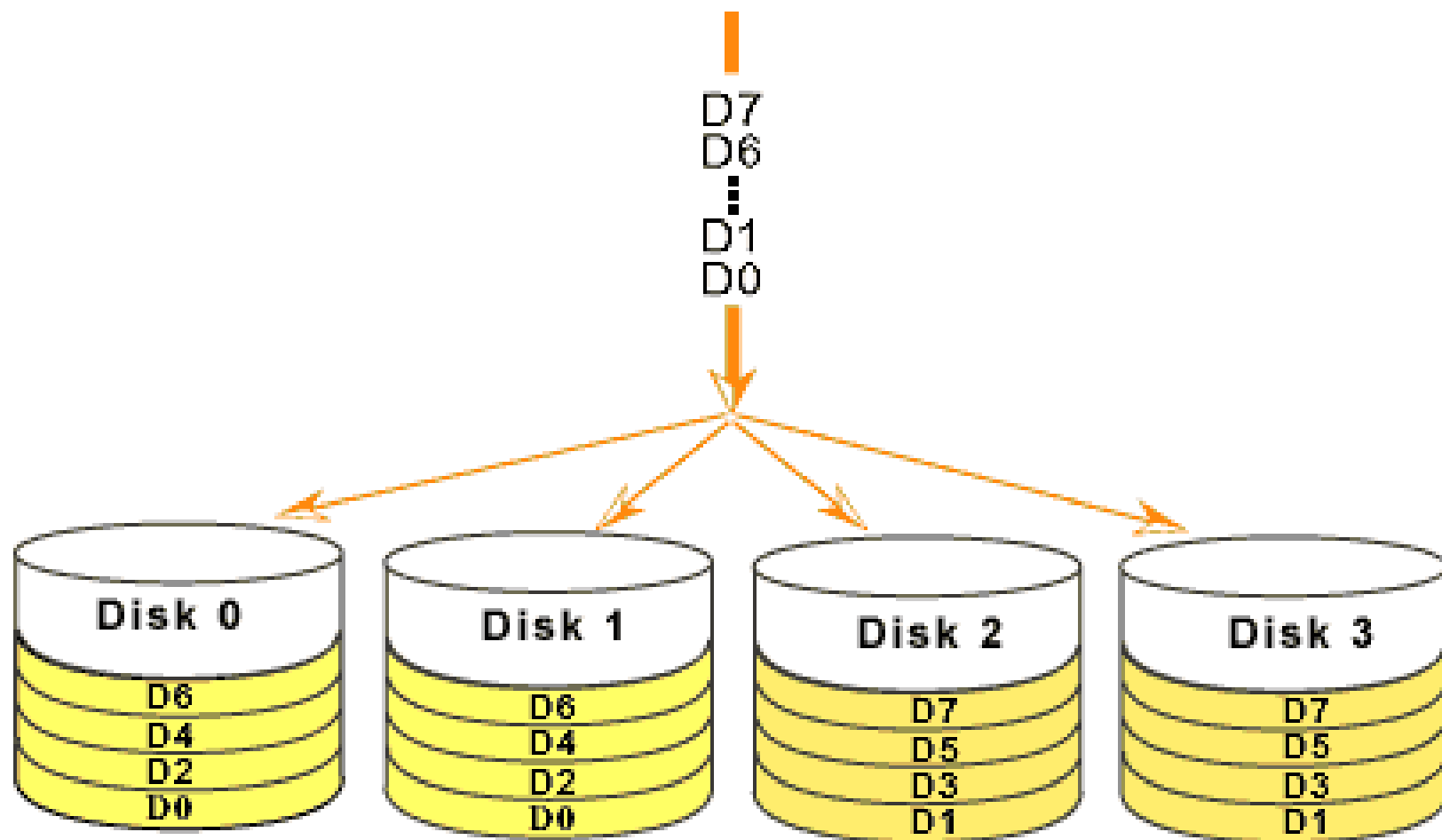


# RAID 10 = RAID 0 + RAID 1

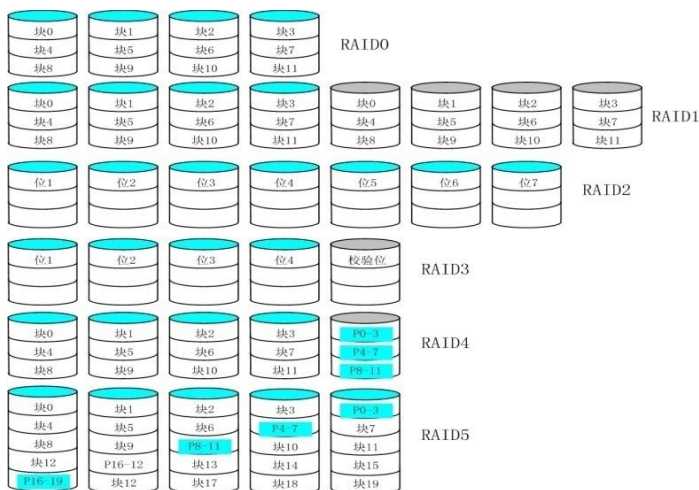


中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □多体并行 (RAID0) + 镜像(RAID1)



# RAID选择



RAID级别	RAID-0	RAID-1	RAID-3	RAID-5	RAID-10
别名	条带	镜像	专用奇偶位条带	分布奇偶位条带	镜像阵列条带
容错性	没有	有	有	有	有
冗余类型	没有	复制	奇偶校验	奇偶校验	复制
热备盘选项	没有	有	有	有	有
读性能	高	低	高	高	中间
随机写性能	高	低	最低	低	中间
连续写性能	高	低	低	低	中间
需要的磁盘数	一个或多个	只需2个或 $2 \times N$ 个	三个或更多	三个或更多	只需4个或 $4 \times N$ 个
可用容量	总的磁盘容量	只能用磁盘容量的50%	$(n-1)/n$ 的磁盘容量。其中 $n$ 为磁盘数	$(n-1)/n$ 的总磁盘容量。其中 $n$ 为磁盘数	磁盘容量的50%
典型应用	无故障的迅速读写, 要求安全性不高, 如图形工作站等	随机数据写入, 要求安全性高, 如服务器、数据库存储领域	连续数据传输, 要求安全性高, 如视频编辑、大型数据库等	随机数据传输, 要求安全性高, 如金融、数据库, 存储等	要求数据量大, 安全性高, 如银行、金融等领域



# 磁盘存储器例题 (1)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 例 磁盘存储器有6个盘片，最外两侧盘面不能记录，每面有204条磁道，每条磁道有12个扇段，每个扇段512B，磁盘机以7200rpm的速度旋转，平均寻道时间为8ms
- 1) 计算该磁盘存储器的存储容量
  - 2) 计算该磁盘存储器的平均寻址时间

解：

- 1) 6个盘面有10个记录面，总容量为 $512\text{B} \times 12 \times 204 \times 10 = 12\,533\,760\text{B}$
- 2) 磁盘平均寻址时间包括平均寻道时间和平均等待时间。平均寻道时间为8ms；平均等待时间与磁盘转速有关，磁盘转一周的平均时间为 $(1/7200\text{rpm}) \times 0.5 = 0.0000694\text{ min} = 4.167\text{ms}$   
平均寻址时间为

$$8\text{ms} + 4.167\text{ms} = 12.167\text{ms}$$



## 5.4 光盘存储器



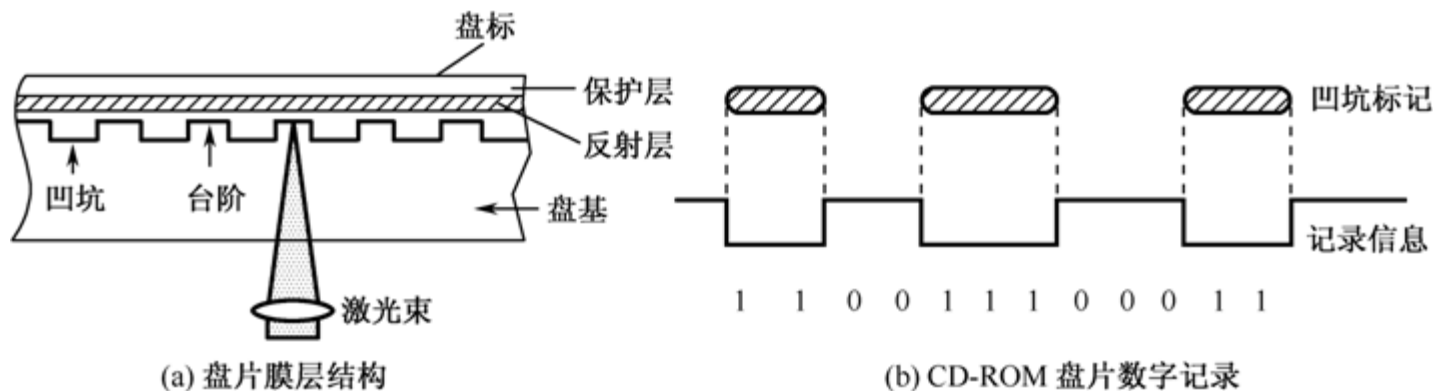
### □CD-ROM光盘

✓只读型光盘，容量约为680MB

✓存储原理

- 光盘上的信息以坑点的形式分布，有坑点表示1，无坑点表示0

✓信息记录的轨迹称为光道，光道划分为多个扇区。扇区是光盘的最小可寻址单位



## 5.4 光盘存储器 (2)



### □ WORM光盘

- ✓ 一次写多次读，数据写到光盘后不可擦除但可多次读取
- ✓ 记录信息通过低功率激光束在光盘表面灼烧形成微小的凹陷区

### □ CD-R光盘

- ✓ WORM的一种，只是CD-R允许多次分段写数据
- ✓ CD-R光盘通过激光烧和不烧斑点来表示1或0，CD-ROM通过凹凸区来表示

### □ CD-RW光盘

- ✓ 可重复写光盘，采用特殊水晶复合物作为记录介质
- ✓ 利用温度来控制水晶的结晶或熔化状态

### □ DVD-ROM光盘

- ✓ 数字化通用光盘，与CD光盘相比，其双面都可用于写数据

### □ 磁光盘存储设备

- ✓ 通过高温来改变磁极从而记录信息

## 5.5 Flash存储器



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

### □Flash存储器

- ✓ 闪速存储器，高密度非易失性的读/写存储器
  - ✓ Flash存储元
    - 在EPROM存储元基础上发展而来
  - ✓ 闪存基本操作
    - 编程操作（写操作）
      - 以页为单位，1页为512B、2KB、4KB或者更大
    - 读取**操作**
      - 以页为单位，1页为512B、2KB、4KB或者更大
    - 擦除操作
      - 以块为单位，1块为 64K、256K、512KB或者更大
- 写入操作无法实现**原地覆盖**，写入之前必须进行额外的擦除

# USB闪存盘（小容量）



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □ USB2.0接口传输速率480Mbps

- ✓ 目前还无法达到（20-40MB/s）。
- ✓ USB 3.0标准由Intel公司提出，其传输速率在5GBps以上。



## □ 数据传输率

- ✓ 数据读取最大速率可达900KB/s
- ✓ 数据写入速率最大可达700KB/s

## □ 数据类型：三种

- ✓ 命令块包（CBW）、命令执行状态包（CSW）、数据包



闪存盘的内部结构图



## □方案一： FTL (Flash Translation Layer)

- ✓ 将NAND Flash通过闪存转换层FTL模拟成类似磁盘的块设备
  - FTL主要实现地址映射，磨损均衡，垃圾回收，坏块管理，ECC校验，缓存算法
- ✓ 通过块设备层驱动提供对文件系统透明的块设备操作接口，使用传统的文件系统进行管理。

## □方案二：采用Flash存储器的专用文件系统

- ✓ 对Flash硬件特性的处理直接交给Flash 文件系统完成
  - JFFS (The Journaling Flash File System)、YAFFS (Yet Another Flash File System)、UBIFS (Unsorted Block Image File system) 等



# 固态硬盘 (SSD-大容量)



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## □极其坚固耐用

- ✓ 扩展的工作温度 (0°C 到 70°C)
- ✓ 冲击和震动方面比较稳定

## □卓越的读取性能

- ✓ > 50x SATA 随机读取性能
- ✓ > 15x SAS 随机读取性能
- ✓ 无需搜索时间, 因此 IOPS 很高
- ✓ 写入性能有限

## □增强的可靠性

- ✓ 无移动部件

## □功耗降低 10 倍

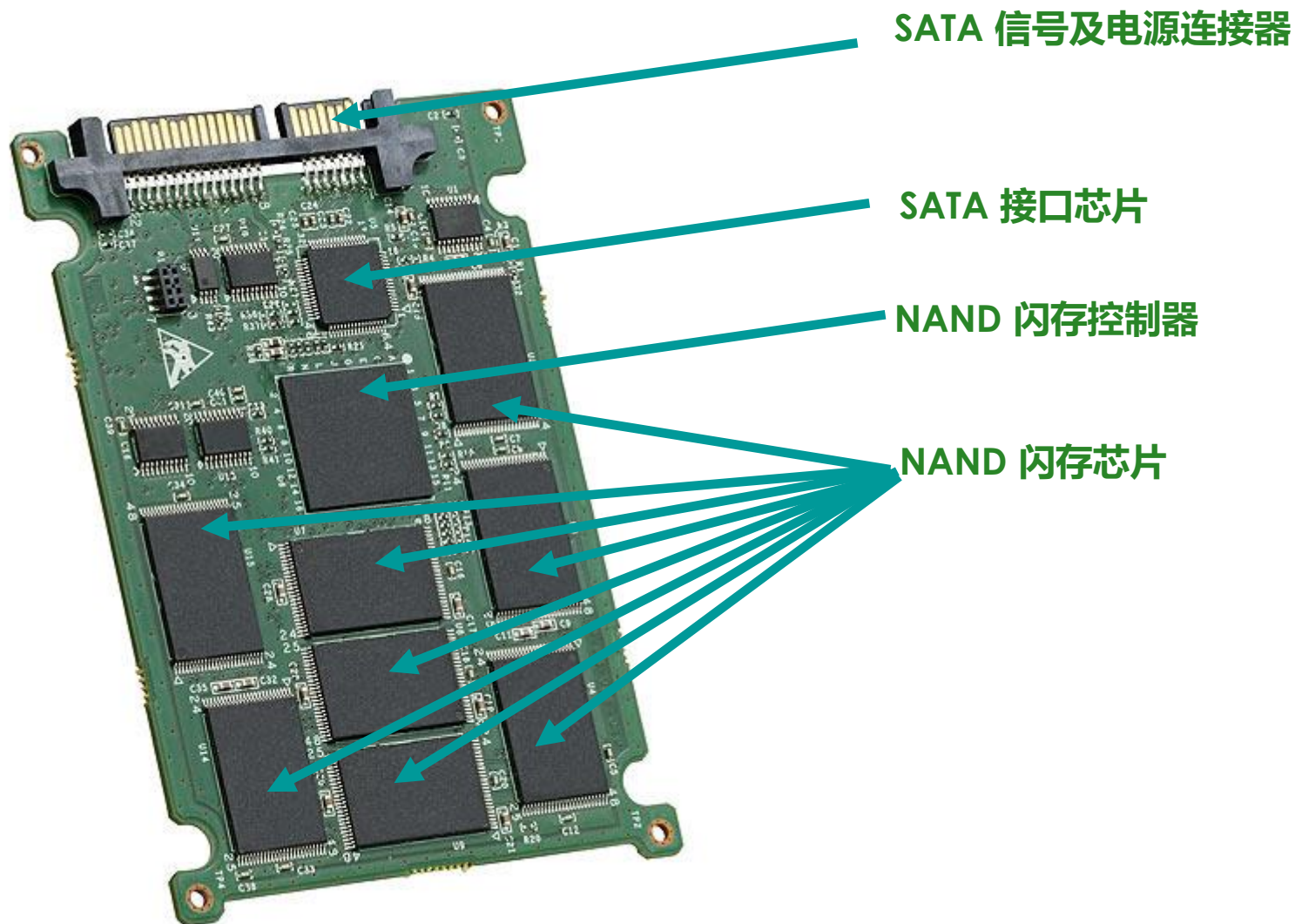
- ✓ 不到 2 瓦

## □散热、尺寸和噪音优势

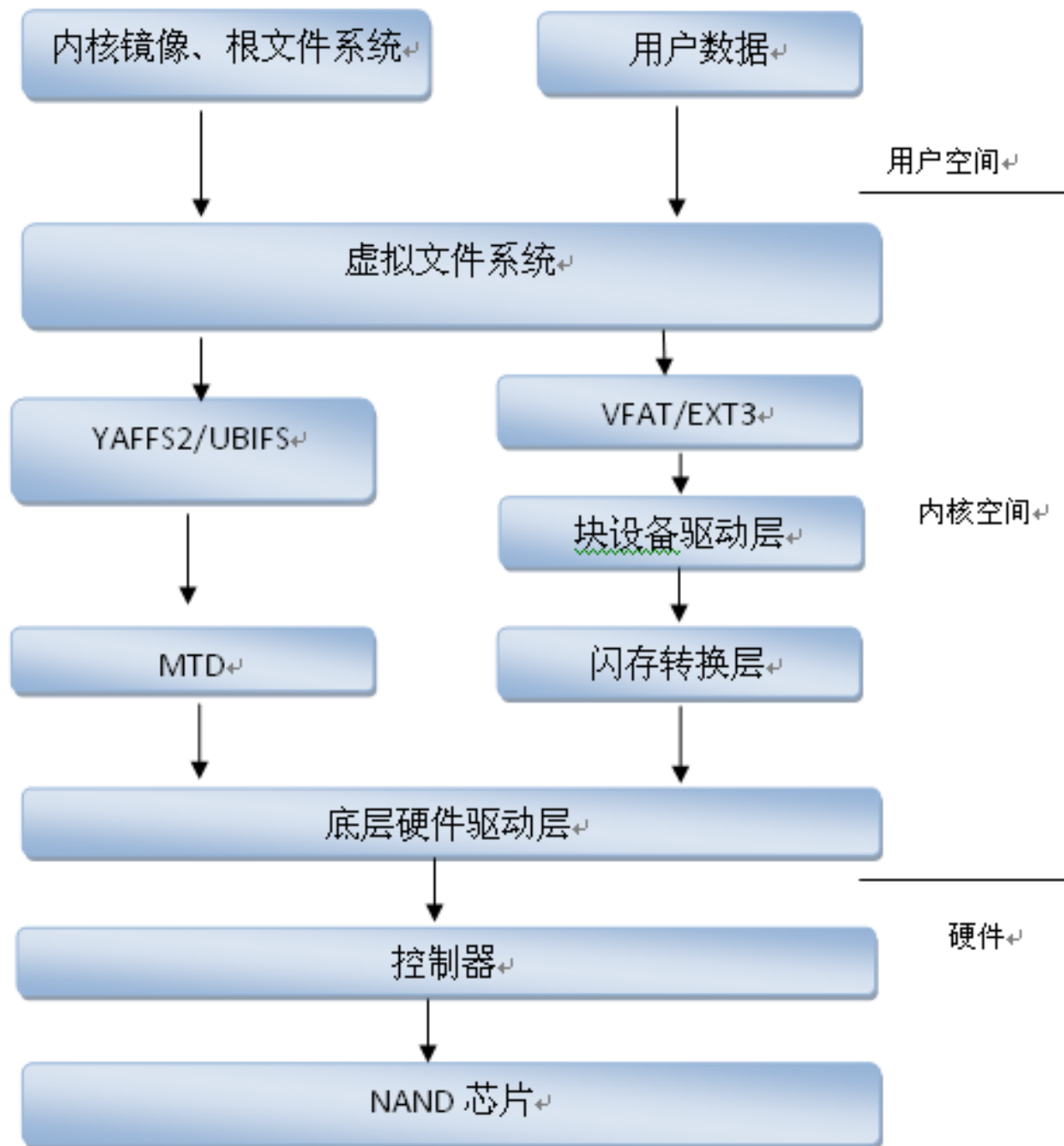
- ✓ 无噪音, 低热量
- ✓ 轻盈小巧



# 固态硬盘 (SSD, Solid State Disks)



## 方案二：





## □ 内容

- ✓ I/O系统组成
- ✓ I/O接口的基本工作机制
  - 信息交换方式
- ✓ 辅助存储器
  - 磁盘的性能评估，访问数据流程
  - RAID技术

## □ 作业（不交）

- ✓ 5.4、5.8、5.11、8.23、4.38、4.44



*"study the past if you would define the  
future."*

*by Confucius*