

# OS 笔记

卢雨轩 19071125

2021 年 10 月 20 日

## 目录

<b>第一部分 操作系统简介</b>	<b>2</b>
1.1 什么是操作系统	2
1.2 操作系统的历史	2
1.3 操作系统的基本特征	2
1.4 操作系统的结构	3
1.5 操作系统的运行环境	3
1.5.1 程序状态字	3
1.5.2 双重模式	3
1.5.3 中断	3
<b>第二部分 进程管理</b>	<b>4</b>
2.1 进程的概念	4
2.1.1 什么是进程	4
2.1.2 进程的状态及其转换	4
2.1.3 进程的实体与特征	5
2.1.4 进程的调度	6
2.1.5 进程的特点	6
2.2 进程的控制	6
2.2.1 进程的创建	6
2.2.2 进程终止	7
2.2.3 进程的阻塞与唤醒	7
2.3 进程间通信 (IPC)	7
2.4 线程	7
2.5 进程的同步	8
2.5.1 基础理论	8
2.5.2 硬件方法	9
2.5.3 死锁	13
<b>第三部分 内存管理</b>	<b>15</b>
3.1 内存管理概述	15
3.1.1 分级存储体系	15
3.2 内存管理技术	15
3.2.1 内存管理相关概念	15
3.2.2 交换与覆盖	16
3.2.3 分区	16
3.2.4 分页	17

第一部分 操作系统简介	2
3.2.5 段式内存管理	17
3.2.6 段页内存管理	18
3.3 虚拟内存管理	18
3.3.1 程序局部性原理	18
3.3.2 按需调页	19
3.3.3 换页算法	19
第四部分 设备管理	19
4.1 概述	19
4.2 I/O 硬件	19
4.2.1 设备分类	19
4.2.2 I/O 设备的组成	20
4.3 I/O 软件	20
4.3.1 I/O 软件的目标	20
4.3.2 I/O 控制方式的演变	20
4.3.3 I/O 软件的层次	20

## 第一部分 操作系统简介

### 1.1 什么是操作系统

**系统观点** 操作系统作为资源管理器。记录、协调各个程序对资源的请求。

- 硬件资源：处理器资源、内存、IO 设备...
- 信息资源：文件管理、锁...

**用户观点** 作为机器的拓展。

### 1.2 操作系统的历史

- 无操作系统
- 单道批处理系统
- 多道批处理系统
- 分时系统、抢占式调度
- 现代操作系统

### 1.3 操作系统的基本特征

- 并发 Concurrency
- 共享 Sharing
- 虚拟 Virtual
- 异步性 Asynchronism

## 1.4 操作系统的结构

- 整体式结构如 MS-DOS, Unix。是一系列过程的集合, 可以互相调用。
- 层次式结构层次式系统的各种功能可以划分为几个层次, 每个层次建立在下面的层次之上。  
优点: 模块化  
缺点: 对层的定义; 相对效率差  
例子: OS/2
- 微内核结构把部分属于操作系统的功能放到内核的外面, 使内核更小, 称为微内核。
  - 操作系统微内核之外的进程都是服务进程
  - 用户进程是客户进程
  - 微内核中只提供进程管理、内存管理和通讯功能
  - 系统效率较低 (信息传递性能损耗) 优点:
  - 易于维护
  - 易于扩充

## 1.5 操作系统的运行环境

### 1.5.1 程序状态字

程序状态字 (Program State Word, PSW) 处于 CPU, 用于包含状态信息。

- Flags (OF, CR, ZERO, ...)
- 指令优先级
- 模式 (用户、内核)
- 其他控制位

### 1.5.2 双重模式

- 监督程序模式 (Monitor mode, M Mode): 执行 OS 任务
  - Kernel / System / Privileged/ Supervisor mode
  - 内核模式、系统模式、特权模式、管态
- 用户模式 (User mode, U mode): 执行用户程序
  - 目态
- 区分两种模式的原因:
  - 提供保护操作系统和其他用户程序的首段
  - 特权指令: 可以引起损害的指令

### 1.5.3 中断

- 现代操作系统是中断驱动的
- 定义: 由外部事件引起的暂停过程。
- 中断与陷阱:
  - 中断 (Interrupt) 指硬中断, 如外设、事件
  - 陷入 (Trap) 指软中断

## 第二部分 进程管理

### 2.1 进程的概念

#### 2.1.1 什么是进程

进程（Process）是一个正在执行的程序，除了程序代码段等之外包括堆栈段。

可重入指能被多个程序同时调用的程序。纯代码，执行过程中不会改变。

#### 2.1.2 进程的状态及其转换

- 两状态进程模型

- 进程要么正在被处理器执行，要么没有被处理器执行。
- 只有两种状态：
  - \* 运行状态
  - \* 非运行状态
- 无法区分等待与就绪

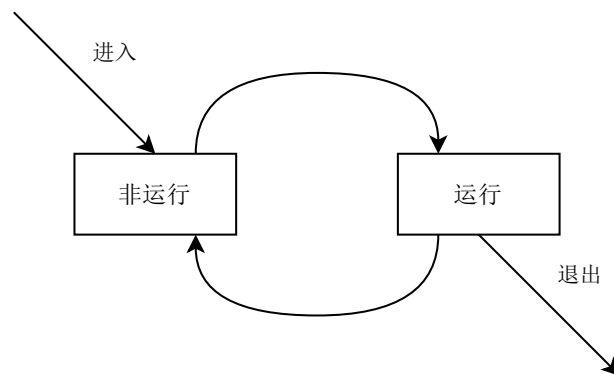


图 1: 两状态进程模型

- 三状态进程模型

- 三种状态
  - \* 就绪（Ready）
  - \* 运行（Running）
  - \* 等待（Waiting）

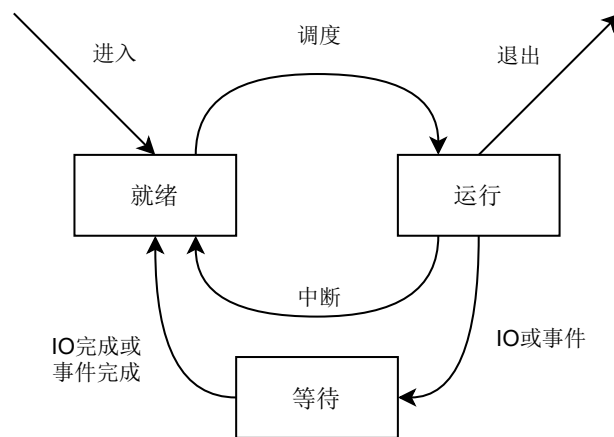


图 2: 三状态进程模型

- 五状态进程模型

### — 五种状态

- \* 新 (New): 进程正在被创建
- \* 就绪 (Ready)
- \* 运行 (Running)
- \* 等待 (Waiting)
- \* 终止 (Stopped): 进程已经停止

— 缺点: 如果所有进程都在等待, CPU 利用率低

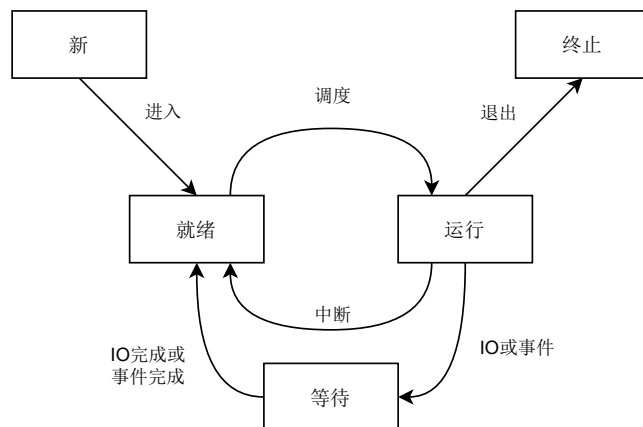


图 3: 五状态进程模型

### • 七状态进程模型

#### — 七种状态

- \* 新 (New): 进程正在被创建
- \* 就绪 (Ready)
- \* 运行 (Running)
- \* 等待 (Waiting)
- \* 终止 (Stopped): 进程已经停止
- \* 就绪挂起: 进程在外存中, 等待的事情已经发生
- \* 等待挂起: 进程在外存中, 等待的事情还未发生

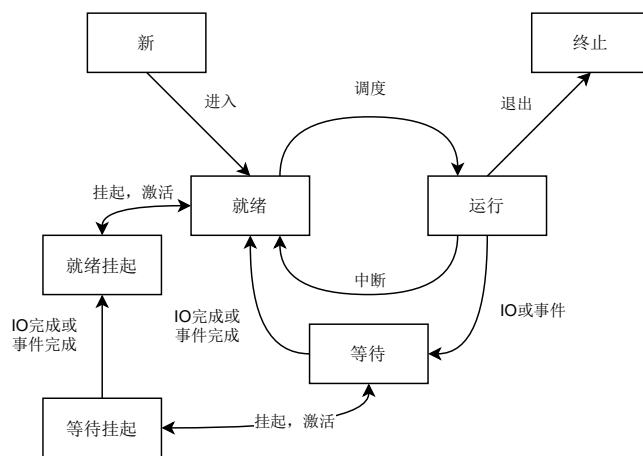


图 4: 七状态进程模型

— 提高 CPU、内存利用率

— 挂起等待中的进程

### 2.1.3 进程的实体与特征

#### • 进程实体

- 程序代码
- 当前的活动
- 数据段 (data, bss, etc.)
- 栈
- 堆

#### • 进程映像: 进程在内存中的组成

- 进程控制块 (PCB, Process Control Block)
- 程序
- 数据
- 堆栈

#### • 进程控制块的内容

- ID

- \* 进程 ID
- \* 父进程 ID
- \* 用户 ID
- 当前状态
  - \* 寄存器
  - \* 栈指针
- 常规信息（调度信息，IPC 信息，FD，...）

#### 2.1.4 进程的调度

- 长期调度
  - 从进程池中选择进程进入内存
    - \* 控制内存中进程的数量
  - 搭配选择 I/O bound 和 CPU bound 程序
  - 频率低（几分钟一次），有些系统不用
- 中期调度
  - 从换出到外存中挂起的进程选择进程进入内存
- 短期调度
  - 从就绪队列中选择进程到 CPU 上执行
  - 频繁（100ms）

#### 2.1.5 进程的特点

- 动态性：状态在变化
- 并发性：多个进程可以同时运行
- 独立性：是独立运行的基本单位
- 异步性：可以独立的、以不可知的速度运行

### 2.2 进程的控制

#### 2.2.1 进程的创建

- 进程通过系统调用创建进程，前者称为父进程，后者称为子进程
  - 进程树
- 系统调用：
  - fork
    - \* 共享地址空间，Copy On Write
  - execve
    - \* 替代地址空间
  - spawn
  - CreateProcess

### 2.2.2 进程终止

- 进程终止自己 exec 系统调用
  - 父进程使用 wait
- 父进程终止子进程
  - SIGTERM, SIGKILL
  - TerminateProcess
- 操作系统终止进程

### 2.2.3 进程的阻塞与唤醒

- 阻塞操作阻塞的系统调用（调用资源）
- 进程唤醒等待的事件到来

## 2.3 进程间通信 (IPC)

- 管道通讯
  - 管道是一个环形缓冲区
  - Producer - Consumer Model
- 共享内存
  - 最快
  - 共享一个内存块
- 消息传递
  - 直接通讯：给指定进程发送消息
  - 间接通讯：『邮箱』
- 同步性问题：同步、异步

## 2.4 线程

- 什么是线程
  - 线程是调度的单位
  - 进程是资源的拥有者
  - 轻量级线程，是进程内部的一条运行线
  - 共享地址空间，拥有线程 ID、PC、寄存器和堆栈
- 线程的优点
  - 响应度高：不会阻塞整个进程
  - 资源共享
  - 通信简单
  - 经济

- 线程的分类
  - 用户级线程
  - 内核级线程
  - 混和

## 2.5 进程的同步

### 2.5.1 基础理论

- 进程之间的关系
  - 独立的多个进程异步执行，仿佛没有关系
    - \* 独立进程不影响其他进程，也不被其他进程影响？
    - \* 资源有限！
  - 协作的多个进程需要同步
    - \* 进程之间可以相互影响
    - \* 原因：信息共享；加跨计算；模块化；方便
    - \* 例子：Producer-Consumer Model

- 进程同步问题的提出

打印机问题。

- 竞争条件

这种两个以上的进程共享数据，而最终的执行结果是根据执行次序决定的，称为竞争条件 (*Data Race*)。

如何解决 Data Race? 控制对资源的访问。

- 临界资源和临界区

为了避免竞争条件，必须找到一种方法来阻止多个进程同时读写共享的数据。

- 这种共享的数据称为临界资源 (*Critical Resource*)
  - 程序中访问临界资源的部分称为临界区 (*Critical Section*)
  - 互斥 (*mutual exclusion*):
    - \* 如果有进程在临界区中执行，那么其他进程都不能在临界区中执行。
    - \* 可以避免 data race 的产生。
  - 有空让进
  - 有限等待
  - 不对进程的相对执行速度进行任何假设
- 如何解决临界区互斥的问题?
    - 软件的解决方案 (Raft 等一致性算法?)
    - 硬件的解决方案
    - 信号量的解决方案
    - 管程的解决方案



### 2.5.2 硬件方法

- 硬件的解决方案之一：关中断

进入临界区之前关中断，离开之后开中断

- 线代操作系统是中断驱动的，没有了中断操作系统就失去了控制系统的能力
- 只有一个 CPU 时有效

- 硬件的解决方案之二：原子指令

系统提供了特殊的硬件指令，原子的检查和修改字的内容或者交换两个字。

- TestAndSet  
IBM370 中称为 TS 指令
- Swap  
在 Intel8086 中称为 XCHG 指令

- *TestAndSet*

```
1  bool TestAndSet(bool *target){
2      bool value = *target;
3      *target = True;
4      return value;
5  }
6  .....
7  bool lock;
8  do {
9      // Try to acquire the lock.
10     // If can't, busy spin.
11     while(TestAndSet(&lock));
12     // Lock acquired.
13     // Do CRITICAL STUFF.
14     lock = False;
15     // Release lock for other process.
16     // Do REMAINING STUFF.
17 }
```

- *Swap*

```
1  void Swap(bool *a, bool *b){
2      bool value = *a;
3      *a = *b;
4      *b = value;
5  }
6  .....
7  bool lock;
8  do {
9      bool key = True;
10     // Try to acquire the lock.
11     // If can't, busy spin.
```

```

12     while(Swap(&lock, &key));
13     // Lock acquired.
14     // Do CRITICAL STUFF.
15     lock = False;
16     // Release lock for other process.
17     // Do REMAINING STUFF.
18 }

```

- 互斥锁 (Mutex Locks)

- 底层用 TestAndSet 或者 Swap 实现
- acquire()
- release()

- 软件和硬件解决方案的问题:

- 忙等待 (busy waiting) 浪费 CPU
  - \* 解决方案: 让出 CPU
- 优先级反转
  - \* 解决方案: 优先级捐献

- 信号量方法

- 两个或多个进程可以用信号进行协作
- 进程可以在任何地方停下来等信号
- 信号通过 Semaphore 特殊变量传递信号
- Semaphore 操作:
  - \* 有一个整形
  - \* wait (P) 用来接受信号
  - \* signal (V) 用来发送信号
  - \* 初值设置为资源数量
- 错误使用:
  - \* 死锁
  - \* 饥饿

- 生产者消费者问题

- 生产者将任务放入缓冲区
- 消费者从缓冲区取出任务
- 缓冲区要互斥
  - \* 否则会出错
- 生产者消费者问题的解决

```

1 semaphore n=0; // 防止 consumer 消费空队列
2 semaphore s=1; // 保证 put 和 take 操作原子性
3 semaphore e=N; // 防止 producer 写入满队列
4 void producer(){

```

```

5     while(true){
6         a=produce();
7         wait(e); // 等待“队列中剩余空位数量”
8         wait(s); // 获取队列锁
9         put(a);
10        signal(s); // 释放队列锁
11        signal(n); // 增加“等待处理的任务数量”
12    }
13 }
14 void consumer(){
15     while(true){
16         wait(n); // 等待“等待处理的任务数量”
17         wait(s); // 获取队列锁
18         a=take();
19         signal(s); // 释放队列锁
20         signal(e); // 增加“队列中剩余空位数量”
21         consume(a);
22     }
23 }

```

- 哲学家进餐问题

- 5 个哲学家住在一起，每个人的生活由吃饭和思考组成
- 桌子上有一盘菜，每人一个盘子一支叉子
- 想吃饭的哲学家会走到桌子变的位置，拿起左右的叉子，从中间的盘子中去菜放到自己的盘子中
- 要求：
  - \* 保证叉子互斥
  - \* 防止死锁和饥饿

- 读者写者问题

- 可以同时读，有人写别人就不能读/写
- 读者优先：

```

1  int readcount=0;
2  semaphore x=1; // 保证 readcount 操作原子性
3  semaphore wsem=1;
4  void reader()
5  {
6      while(1){
7          wait(x);
8          readcount++;
9          if(readcount==1)
10             wait(wsem); // 第一个读者锁住锁
11             signal(x);
12
13             READUNIT();

```

```
14
15     wait(x);
16     readcount--;
17     if(readcount==0)
18         signal(wsem);
19     signal(x);
20 }
21 }
22 void writer()
23 {
24     while(1)
25     {
26         wait(wsem);
27         WRITEUNIT();
28         signal(wsem);
29     }
30 }
```

— 写者优先:

```
1  int readcount=0, writecount=0;
2  semaphore x=1, y=1, z=1, wsem=1, rsem=1;
3  void reader()
4  {
5      while(1){
6          wait(z);
7          wait(rsem);
8          wait(x);
9          readcount++;
10         if(readcount==1)
11             wait(wsem);
12         signal(x);
13         signal(rsem);
14         signal(z);
15         READUNIT();
16         wait(x);
17         readcount--;
18         if(readcount==0)
19             signal(wsem);
20         signal(x);
21     }
22 }
23 void writer()
24 {
25     while(1){
26         wait(y);
27         writecount++;
28         if(writecount==1)
```

```
29         wait(rsem);
30         signal(y);
31         wait(wsem);
32         WRITEUNIT();
33         signal(wsem);
34         wait(y);
35         writecount--;
36         if(writecount==0)
37             signal(rsem);
38         signal(y);
39     }
40 }
```

- 信号量的问题:

- 操作系统提供
- 有效, 灵活
- 容易死锁

- 管程

- 管程用条件变量的方法支持同步。
- 条件变量在管程内部, 只能由管程访问。
- 在条件变量 C 上可以有两种操作:

### 2.5.3 死锁

- 死锁的定义

- 如果一个进程集合中每一个进程都在等待只能由本集合中的另一个进程才能引发的事件, 则称这种状态为死锁。

- 死锁的条件

- 互斥
  - \* 一个资源同时只让一个进程使用
- 拥有并等待
  - \* 进程在拥有一个资源时又申请另一个资源, 并等待分配给它。
- 资源不可抢占
  - \* 分配给一个进程的资源是不可抢占的, 只能由占有它的进程释放
- 环路等待
  - \* 进程和资源之间存在一个拥有和需求的闭环

- 资源分配图:

- 有环就可能有死锁
- 需要每个资源有一个实例

- 死锁的解决

- 忽略
- 预防死锁
- 避免死锁
- 死锁的检测和恢复
- 死锁的避免系统能按某种顺序如  $\langle P_1, P_2, \dots, P_n \rangle$  为每个进程分配所需资源, 直到最大需求, 使每个进程都可顺序完成称系统处于安全状态, 此序列称为安全序列
  - 安全序列不唯一
  - 要求预知进程所有资源。
    - \* 在资源分配过程中, 采用某种策略防止系统进入不安全状态, 避免发生死锁
    - \* 若满足一个进程新提出的一项资源请求导致系统不在安全状态 拒绝分配资源
    - \* 方法
      - 资源分配图算法: 每类资源只有一个实例
      - 银行家算法
      - 保证处于安全状态
      - 获取新资源时, 如果不安全, 不分配。
- 死锁的检测与解除
  - 中心思想
    - \* 死锁的检测方法并不限制对资源的访问
    - \* 进程可以在可能的情况下获得它所需要的资源, 只是检测死锁是否存在
    - \* 如果存在, 则想办法恢复
  - 对于死锁的检测可以在以下两种情况下执行
    - \* 在每次进行资源申请而不被满足后进行
    - \* 定期检测死锁

---

**Algorithm 1** 死锁的检测
 

---

```

1: Initially, all processes are untagged.
2: Tag all processes whose Allocation is zero.
3:  $w \leftarrow \text{Available}$ 
4: while Exists some process whose Request is smaller or equal than  $w$  do
5:   Tag that process.
6: end while
7: if There are untagged process then
8:   There is dead lock.
9: else
10:  There isn't dead lock.
11: end if
  
```

---

- 死锁的恢复
  - \* 终止所有死锁进程
  - \* 一次只终止一个进程直到取消死锁循环为止
  - \* 抢占一个进程的资源, 让这个进程回滚到进程占有资源之前的状态

## 第三部分 内存管理

### 3.1 内存管理概述

#### 3.1.1 分级存储体系

内存是计算机系统中的一种十分重要的资源。内存的价格也十分昂贵。所以通过分成 (L1 cache, L2 cache, ..., Memory, Disk, NAS)

### 3.2 内存管理技术

#### 3.2.1 内存管理相关概念

- 基本术语
  - 内存单元的地址是物理地址
  - 符号名是符号地址
  - 源程序经编译链接生成可装入程序，从 0 开始编址，其他地址都相对起始地址计算。此地址称为逻辑地址
  - 程序生成的逻辑地址的集合是逻辑地址空间
  - 所有物理地址的集合是物理地址空间
- 重定位
  - 逻辑地址向物理地址的转换过程就是重定位
  - 时机：
    - \* 编译时  
编译时就知道进程将在内存中驻留的地址，可以直接生成绝对代码。例如，MS-DOS 的 COM 文件
    - \* 加载时  
编译生成可重定位代码，捆绑/重定位在加载时进行静态重定位
    - \* 执行时  
若进程在执行时允许移动，则捆绑/重定位在执行时进行动态重定位
- 动态重定位的硬件实现
  - 动态重定位是由内存管理单元 (MMU) 实现
  - 设置专门的寄存器
  - 基址寄存器 (重定位寄存器) 和界限寄存器。
  - 程序指令地址的重定位在指令执行的时候实现
- 保护
  - 保护操作系统不受用户进程的影响
  - 保护用户进程不受其它用户进程影响
  - 用基址寄存器 (重定位寄存器) 和界限寄存器

### 3.2.2 交换与覆盖

- 覆盖  
在任何时候只能在内存中保留所需要的指令和数据。新的指令和数据可覆盖不用的指令和数据
- 交换
  - 在内存不足的情况下，需要把一个进程整个换入和换出，称为交换
  - 交换空间的分配
    - \* 进程在被换出时分配交换空间  
每次换到不同的位置
    - \* 进程分配固定的交换空间

### 3.2.3 分区

- 采用多道程序设计可以提高 CPU 利用率
- 为了让主存中尽量多地保存进程而不会相互干扰，最简单的方法是将这一部分内存分为有固定边界的区域。
- 把内存分为大小相等的区
- 所需空间小于等于分区大小的进程可以调入可用分区
- 进程换入换出
  - 所有的分区都是满的
  - 没有进程处于就绪状态或运行状态
- 缺点
  - 程序可能太大而不能放入一个分区
    - \* 程序员要设计一种覆盖的方法。
  - 主存的应用效率低
    - \* 小程序也要占用整个分区
  - 限制了系统中可以激活的进程数目
- 位图
- 将内存按一定大小划分成分配单位，每个分配单位对应位图中的一位
- 用 0 表示空闲，1 表示使用（或者反过来）
- 在内存大小确定的情况下，分配单位的大小决定了位图的大小。
- Buddy
- 每次/2，直到恰好能容纳
- 类似二叉树



### 3.2.4 分页

- 通过页表维护
- 页表在内存中
- 通过 MMU 管理
  - 页表寄地址寄存器
  - 效率变低: TLB
- TLB (Translation Lookaside Buffer)
  - 缓存页表项
  - 现代计算机系统中, TLB 和页表的查询可以同时进行。
  - 命中率 (hit ratio): 可在 TLB 中找到页码的概率
  - 有效访问时间: 平均访问到数据的时间
- 单级页表过大, 大部分闲置:
  - 多级页表, 按需分配
- 通过页表的内存保护:
  - 可以设置每个页的权限 (r/w/x)
- 通过页表共享内存:
  - 可重入代码
- 反向页表
  - 反向页表的每一个页框设置一个表项, 并按页框编码排序, 表项的内容是页号, 及此页所属进程的标识符。
  - 虚拟地址到物理地址的转换是用进程标识和页号去查反向页表。
  - 仅在页表项很少的时候好用? 查询时间固定为物理页框数
- 优点:
  - 碎片小, 节省存储器空间
  - 分页对程序员是透明的
- 缺点:
  - 共享和保护不容易实现
  - 程序员不能按照自己的方式组织程序

### 3.2.5 段式内存管理

- 原理
  - 让内存提供多个相互独立的空间, 称为段 (segment)
  - 每个段由 0 到最大的线性地址构成。
  - 不同的段的长度不同, 段的长度可以在运行期间改变。

- 分段硬件负责将逻辑地址转换成物理地址
- 优点：
  - 共享和保护容易实现
  - 程序员可以按照自己的方式组织程序
- 缺点：
  - 有碎片，浪费存储器空间

### 3.2.6 段页内存管理

- 原理
  - 段页式管理是将用户的地址空间分段，段内按内存页框的大小分页。
  - 逻辑地址由段号、段内页号和页内位移三部分组成。
  - 操作系统在进行管理时，为每个进程维护一个段表和多个页表。
  - 页表的结构与页式管理中的页表一样
  - 段表中包含的是页表的起始地址和页表的长度及其它控制位。

## 3.3 虚拟内存管理

### 3.3.1 程序局部性原理

- 局部性原理
  - 1969 年 P.Denning 提出局部性原理
  - 在较短时间内
  - 程序的执行仅限于某个部分
  - 程序所访问的存储空间也局限于某个区域。
- 具体内容
  - 大多数情况顺序执行
  - 函数调用会限制在调用范围内
  - 循环会反复执行
- 结论
  - 进程运行前，没必要全部放入内存
    - \* 先放在硬盘上
    - \* 访问的时候，由缺页中断放入内存
    - \* 如果满了，置换
  - 从用户的角度看：系统内存容量扩大了
    - \* 称为 虚拟储存器/虚拟内存
- 虚拟内存
  - 指仅把作业的一部分装入内存就可以运行作业的存储系统。
  - 它具有请求调入功能和置换功能，是从逻辑上对内存容量进行扩充的一种存储系统。

### 3.3.2 按需调页

- 一个进程调入内存时只调入部分页
  - 当需要的页面不在内存时，请求调入所需的页面
  - 如果内存不足，可以把内存中的某个页面换出到外部辅存中
  - 也称 请求页式存储管理
- 页表
  - Frame ID
  - Present bit
  - Secondary Storage Address
  - Dirty(Changed) bit
  - Accessed bit
- 缺页中断
  - 把所需页面放入内存
  - 指令重新执行

### 3.3.3 换页算法

- 最优页面置换算法
  - 每个页面都会有该页面下次要被访问之前所要执行的指令数目进行标记。
  - 置换算法是淘汰标记最大的页面。
- FIFO
  - 缺点：替代的也可能会很快使用
- LRU

## 第四部分 设备管理

### 4.1 概述

- OS 为外设提供统一的读写接口
- 用翻译程序将读/写指令翻译成设备指令
- 翻译程序由谁提供？OS？设备生产厂商？

### 4.2 I/O 硬件

#### 4.2.1 设备分类

- 块设备
  - 每次读取一个块
  - 有地址，任意读写
- 字符设备
  - 以字符为单位发送或接收字符流
  - 不编址，无法寻址

### 4.2.2 I/O 设备的组成

- 设备控制器
  - 操作系统只和设备控制器打交道
  - 功能：
    - \* 设备控制器用几个寄存器与 CPU 通讯
    - \* CPU 通过读控制寄存器中的一个或多个字节的信息，得到操作结果和设备状态。
    - \* CPU 给设备控制器发送请求来进行 I/O。
    - \* 请求后，控制器进行 I/O 之后，给 cpu 发中断
- 机械部分

## 4.3 I/O 软件

### 4.3.1 I/O 软件的目标

- 实现设备独立性
  - 应用设备使用抽象的逻辑设备
  - 由操作系统对抽象的逻辑设备映射到具体的物理设备
    - \* 设备名称应该是简单字符串/整数

### 4.3.2 I/O 控制方式的演变

- 轮询 (polling)
  - busy-waiting
- 中断驱动
  - 异步
- DMA
  - 直接放入内存

### 4.3.3 I/O 软件的层次

- 中断处理程序
- 设备驱动程序
- 设备独立性软件
- 用户空间的 I/O 软件