

# 操作系统      *Operating System*

## 第四章 进程与并发程序设计(1) ——进程与线程

沃天宇

woty@buaa.edu.cn

2020年3月26日

# 内容提要

- 进程概念的引入
- 进程状态与控制
- 线程概念的引入
- 线程的实现方式
- 小结

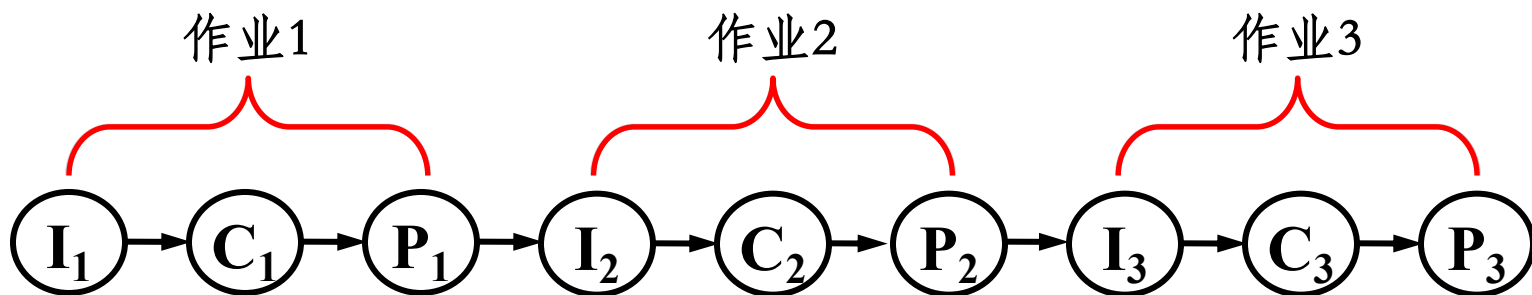
# 两个基本概念：并发与并行

- 顺序执行
- 并发Concurrent：设有两个活动a1和a2，如果在某一指定的时间t，无论a1和a2是在同一处理机上还是在不同的处理机上执行，只要a1和a2都处在各自的起点和终点之间的某一处，则称a1和a2是并发执行的。
- 并行Parallel：如果考虑两个程序,它们在同一时间度量下同时运行在不同的处理机上，则称这两个程序是并行执行的。

并发可能是伪并行，也可能是真并行。

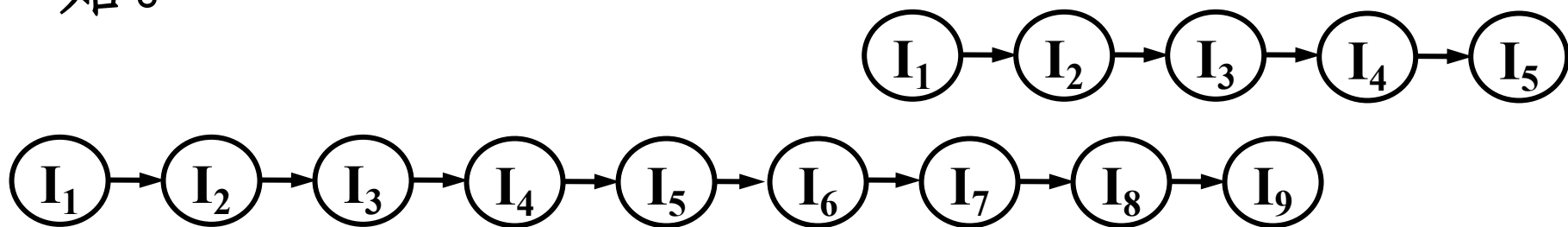
# 程序的顺序执行与特征

- **顺序性**：按照程序结构所指定的次序（可能有分支或循环）
- **封闭性**：独占全部资源，计算机的状态只由于该程序的控制逻辑所决定
- **可再现性**：初始条件相同则结果相同。



# 程序的并发执行

- 程序的并发执行是指若干个程序（或程序段）同时在系统中运行，这些程序（或程序段）的执行在时间上是重叠的。
- 所谓执行在时间上是重叠的，是指执行一个程序（或程序段）的第一条指令是在执行另一个程序（或程序段）的最后一条指令完成之前开始。



# 前趋图

- 前趋图是一个有向无循环图，图中的每个结点可以表示一条语句、一个程序段或进程，结点间的有向边表示语句或程序段的执行次序。

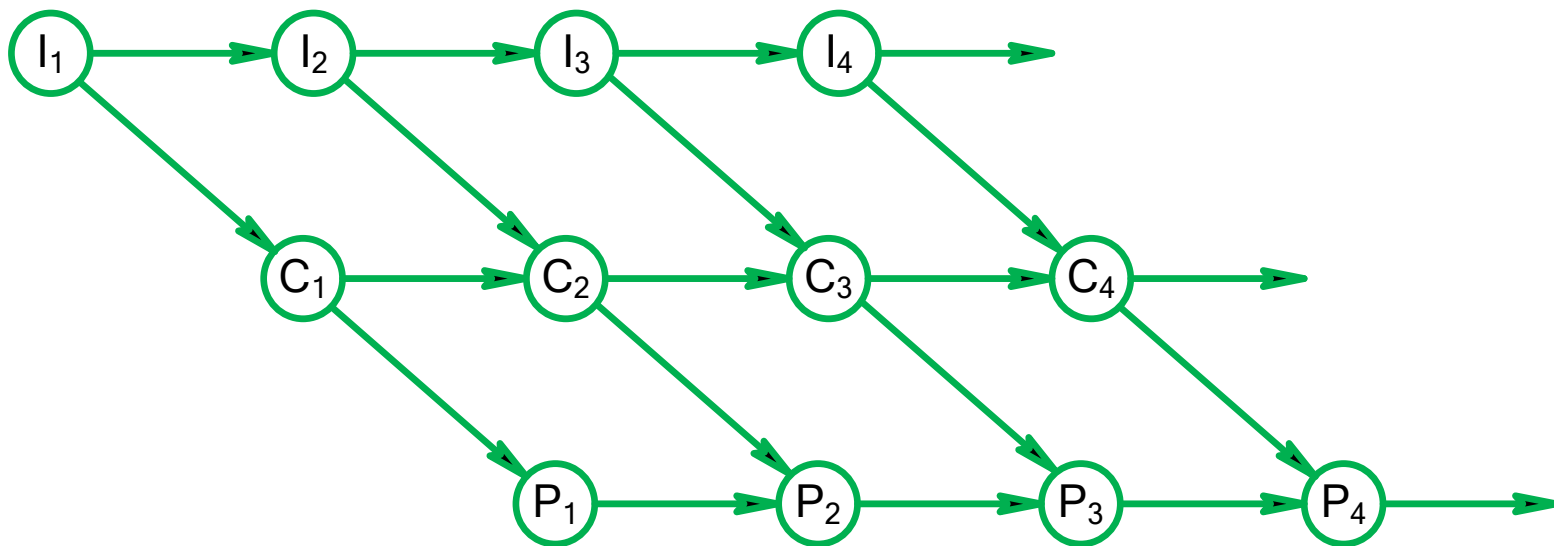


**表示A和B的执行顺序为：先A后B，可写成： $A \rightarrow B$**

# 并发执行例子

- 例如：程序1、2、3...并发执行。对每个程序而言，其输入、计算和输出这三个操作必须顺序执行；三个程序间存在如下关系：

- $I_i \rightarrow C_i, I_i \rightarrow I_{i+1}, C_i \rightarrow P_i, C_i \rightarrow C_{i+1}, P_i \rightarrow P_{i+1}$
- $I_{i+1}$ 和 $C_i$ 及 $P_{i-1}$ 可并发。



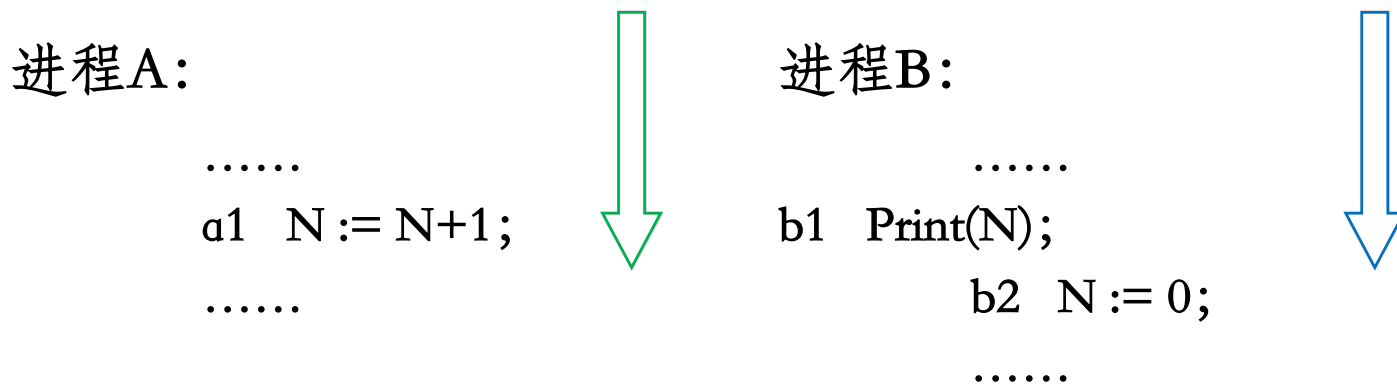
# 程序并发执行时的特征

- **中断性**：并发程序具有“执行---暂停----执行”这种中断性的活动规律。
- **非封闭性**：多个程序共享系统中的资源，这些资源的状态将由多个程序来改变，致使程序之间相互影响。
- **不可再现性**：在初始条件相同的情况下，程序的执行结果依赖于执行的次序。



# 不可再现性的例子

- 程序并发执行时可能出现与时间有关的错误。
- 例如：



- 设在两进程运行之前，N的值为2。则两进程运行结束后，打印出的结果及N值可为：
  - 若顺序为a1,b1,b2 → 打印结果为3，N=0;
  - 若顺序为b1,b2,a1 → 打印结果为2，N=1;
  - 若顺序为b1,a1,b2 → 打印结果为2，N=0;

# 什么情况？

发生了竞争：

- 竞争：多个进程在读写一个共享数据时结果依赖于它们执行的相对时间，这种情形叫做竞争。
- 竞争条件（Race Condition）：多个进程并发访问和操作同一数据且执行结果与访问的特定顺序有关，称为竞争（发生）条件。

什么条件下两个进程不会发生竞争？

- 并发进程的无关性是进程与时间无关的一个充分条件，这一条件在1966年首先由Bernstein提出，称为Bernstein条件。

# 并行性的确定—Bernstein条件

定义：

- $R(S_i)$ :  $S_i$ 的读子集, 其值在 $S_i$ 中被引用的变量的集合
- $W(S_i)$ :  $S_i$ 的写子集, 其值在 $S_i$ 中被改变的变量的集合

Bernstein条件：

- 两个进程 $S_1$ 和 $S_2$ 可并发，当且仅当下列条件同时成立：
  - $R(S_1) \cap W(S_2) = \Phi$
  - $W(S_1) \cap R(S_2) = \Phi$
  - $W(S_1) \cap W(S_2) = \Phi$

# Bernstein条件举例

- S1:  $c := a + b;$
- S2:  $d := a - b;$
- 读集:  $R(S1) = \{a, b\}$ ,  $R(S2) = \{a, b\};$
- 写集:  $W(S1) = \{c\}$ ,  $W(S2) = \{d\};$

Bernstein条件:

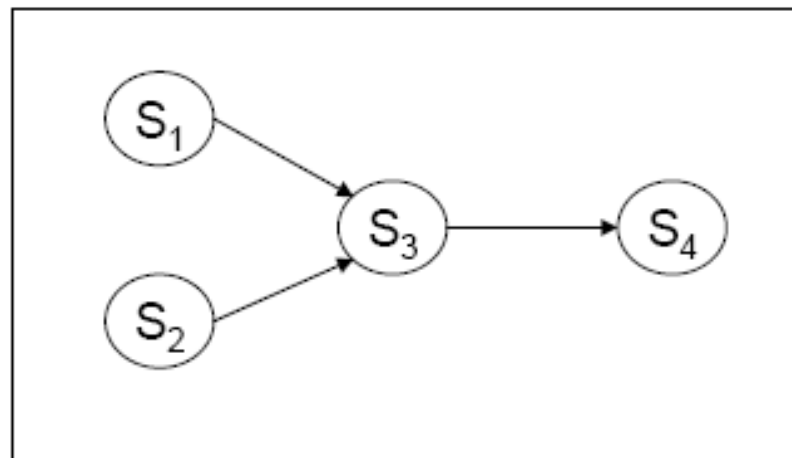
$$\begin{aligned} & [R(S1) \cap W(S2)] \cup [R(S2) \cap W(S1)] \cup [W(S1) \cap W(S2)] \\ &= [\{a, b\} \cap \{d\}] \cup [\{a, b\} \cap \{c\}] \cup [\{c\} \cap \{d\}] = \Phi \end{aligned}$$

判断程序并发执行结果是否可再现的充分条件。

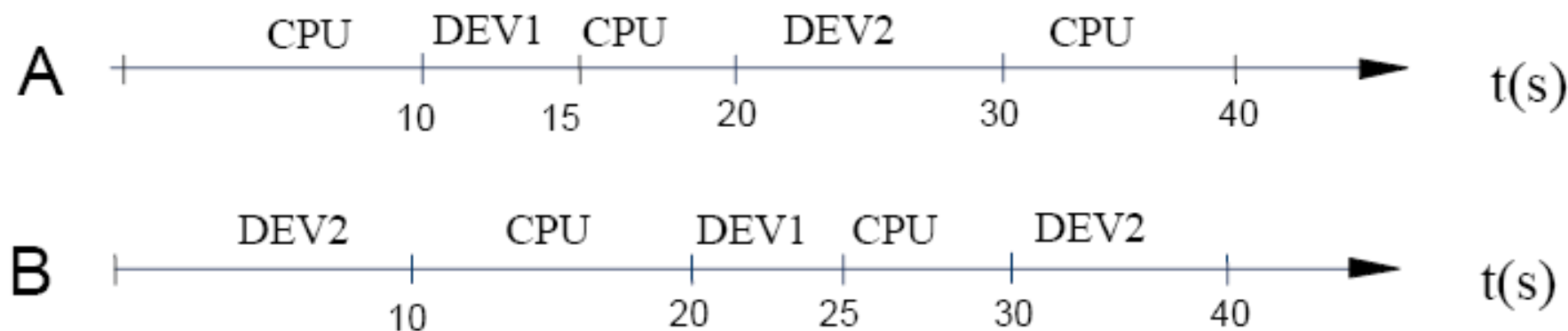
# Bernstein条件举例

- 一个复杂点的例子

- $S_1: a:=x+y$
- $S_2: b:=z+1$
- $S_3: c:=a-b$
- $S_4: w:=c+1$



# 举例：顺序执行的结果



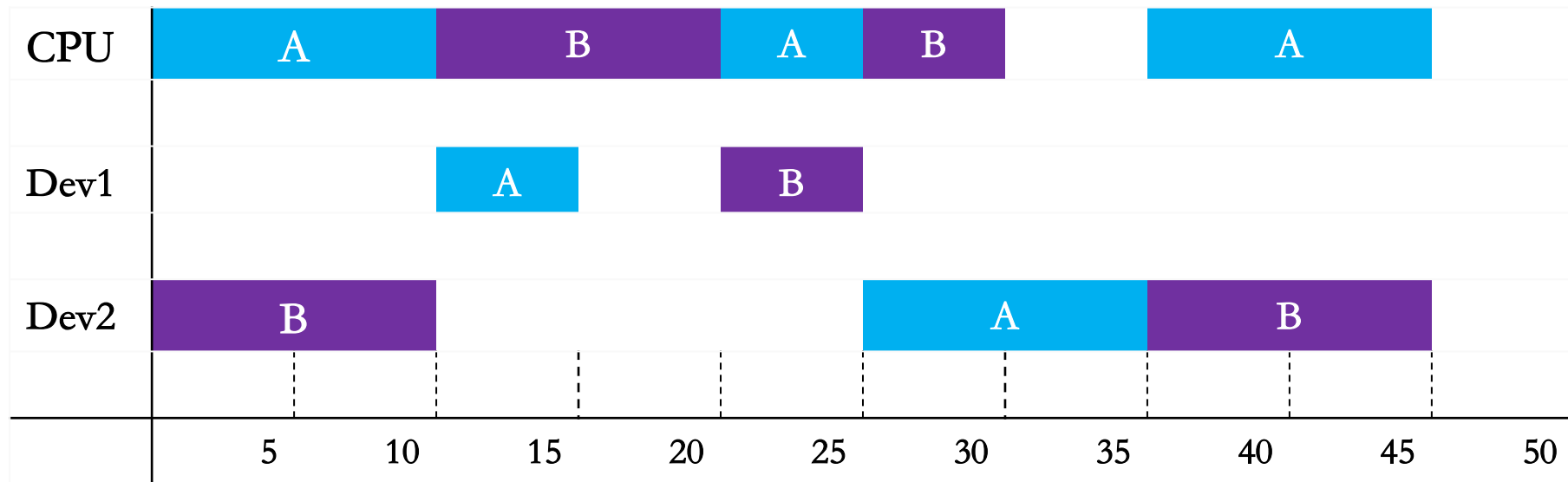
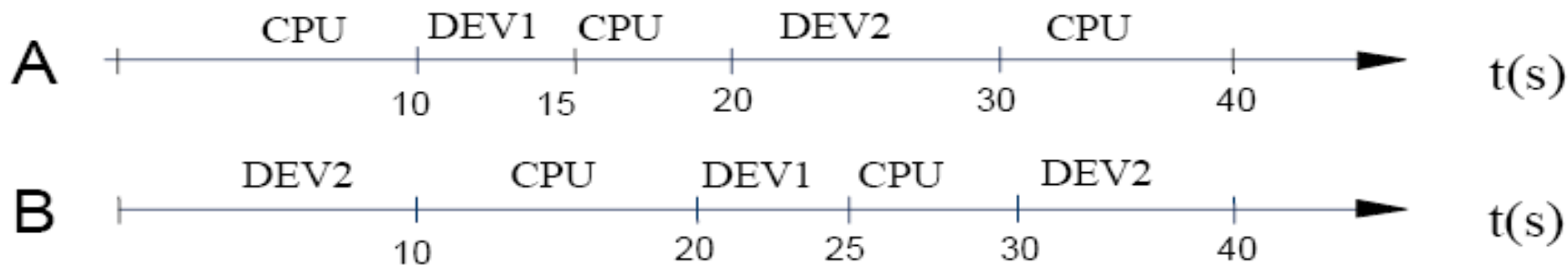
## ■ 顺序环境下

CPU利用率： $40/80 = 50\%$

DEV1利用率： $10/80 = 12.5\%$

DEV2利用率： $30/80 = 37.5\%$

# 并发执行的结果1(B优先使用CPU)

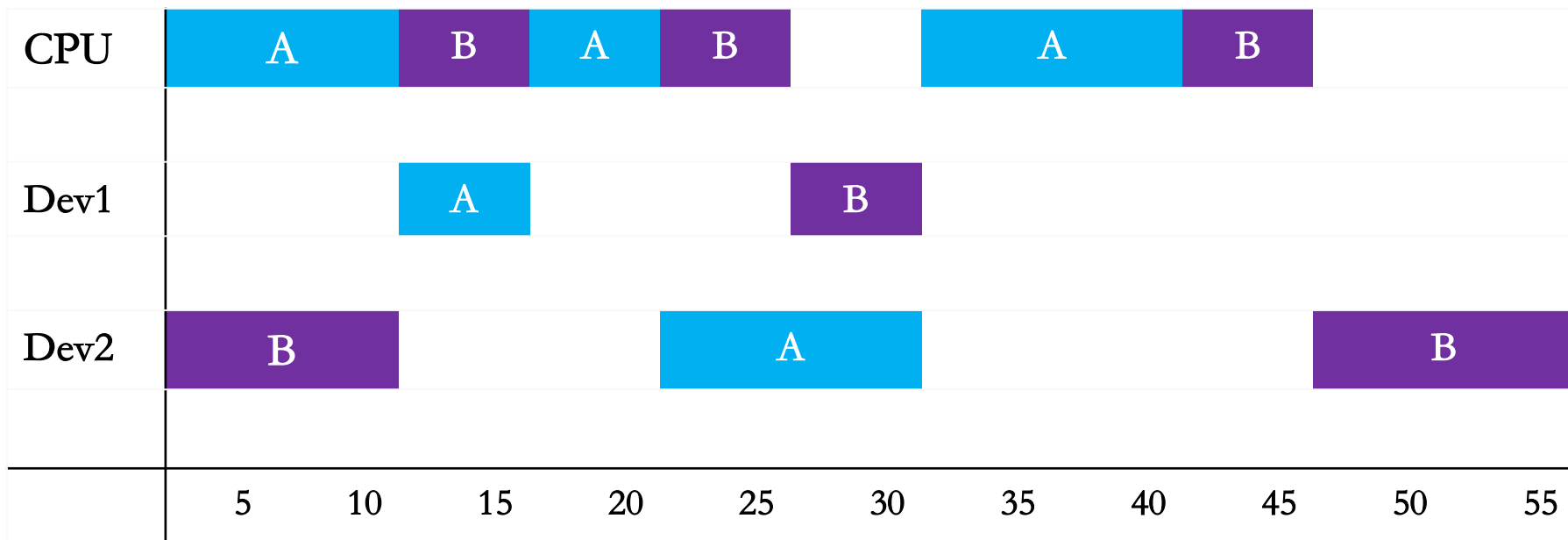
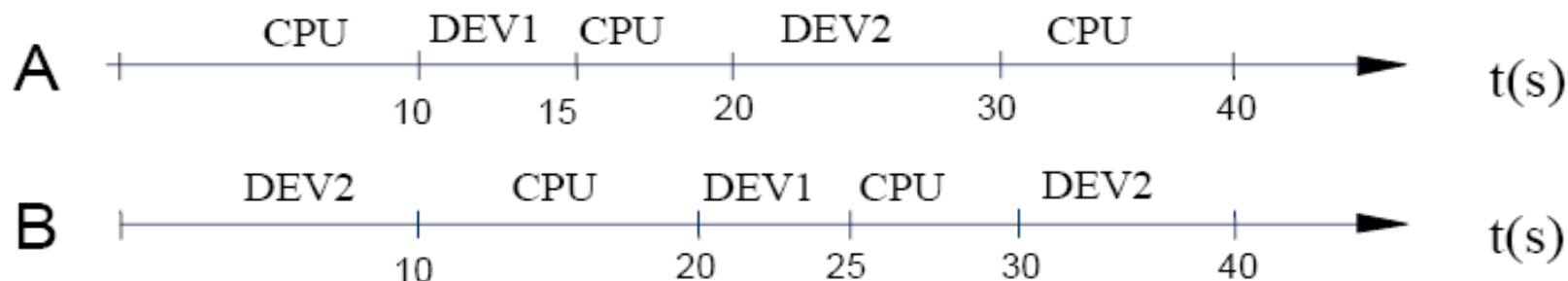


CPU利用率 :  $40/45 = 88.9\%$  ( 顺序 : 50% )

DEV1利用率 :  $10/45 = 22.2\%$  ( 顺序 : 12.5% )

DEV2利用率 :  $30/45 = 66.7\%$  ( 顺序 : 37.5% )

# 并发执行的结果2(A优先)



CPU利用率： $40/55=72.7\%$ （顺序：50%）

DEV1利用率： $10/55=18.1\%$ （顺序：12.5%）

DEV2利用率： $30/55=54.6\%$ （顺序：37.5%）



# 进程的引入

- “程序”与“计算”不是一一对应的关系：一个程序段可能对应多个“计算”
- 多道程序+资源的限制：执行-暂停-执行
  - 直接制约：逻辑上相互依赖
  - 间接制约：等待资源
- 使用“程序”不能揭示多道程序、分时系统引发的动态特性，因此引入“进程”（Process）

**MULTICS和IBM的CTSS360中首先引入了进程的概念。**

# 进程的定义和特征

- 进程是程序的一次执行；
- 进程是可以和别的计算并发执行的计算；
- 进程可定义为一个数据结构，及能在其上进行操作的一个程序；
- 进程是一个程序及其数据，在处理机上顺序执行时所发生的活动；
- 进程是程序在一个数据集合上运行的过程，它是系统进行资源分配和调度的一个独立单位。

# 进程的特征

- 动态性：进程是程序的一次执行过程。动态性还表现为它因创建而产生，因调度而执行，因无资源而暂停，因撤消而消亡。而程序是静态实体。
- 并发性：多个进程实体同时存在于内存中，能在一段时间内同时运行。
- 独立性：在传统OS中，进程是独立运行的基本单位
- 异步性：也叫制约性，进程之间相互制约，进程以各自独立的不可预知的速度向前推进。

# 进程的结构特征

- 结构特征：程序段，数据段，进程控制块PCB
- 一个进程应该包括：
  - 程序的代码；
  - 程序的数据；
  - PC中的值，用来指示下一条将运行的指令；
  - 一组通用的寄存器的当前值，堆、栈；
  - 一组系统资源（如打开的文件）

# 引入进程的利弊

- 利：提高效率
- 弊：空间开销、时间开销。

# 进程与程序的区别与联系

- **进程是动态的，程序是静态的**：程序是有序代码的集合；进程是程序的执行。通常进程不可在计算机之间迁移；而程序通常对应着文件、静态和可以复制。
- **进程是暂时的，程序是永久的**：进程是一个状态变化的过程，程序可长久保存。
- **进程与程序的组成不同**：进程的组成包括程序、数据和进程控制块（即进程状态信息）。
- **进程与程序的对应关系**：通过多次执行，一个程序可对应多个进程；通过调用关系，一个进程可包括多个程序。

有一个计算机科学家，有一天女儿过生日，想亲手给女儿做一个生日蛋糕。所以他就找了一本有关做蛋糕的食谱，买了一些原料，面粉、鸡蛋、糖、香料等，然后边看边学边做。

食谱=程序；科学家=CPU；

原料=数据；做蛋糕=进程；

这时小儿子哭着跑进来，说手被蜜蜂蛰了。教授只好把蛋糕先放在一边。他在食谱上做了个标记，把状态信息记录了起来。然后又去找了一本医疗手册，查到了相关的内容，按照上面的指令一步步地执行。当伤口处理完之后，又回到厨房继续做蛋糕。

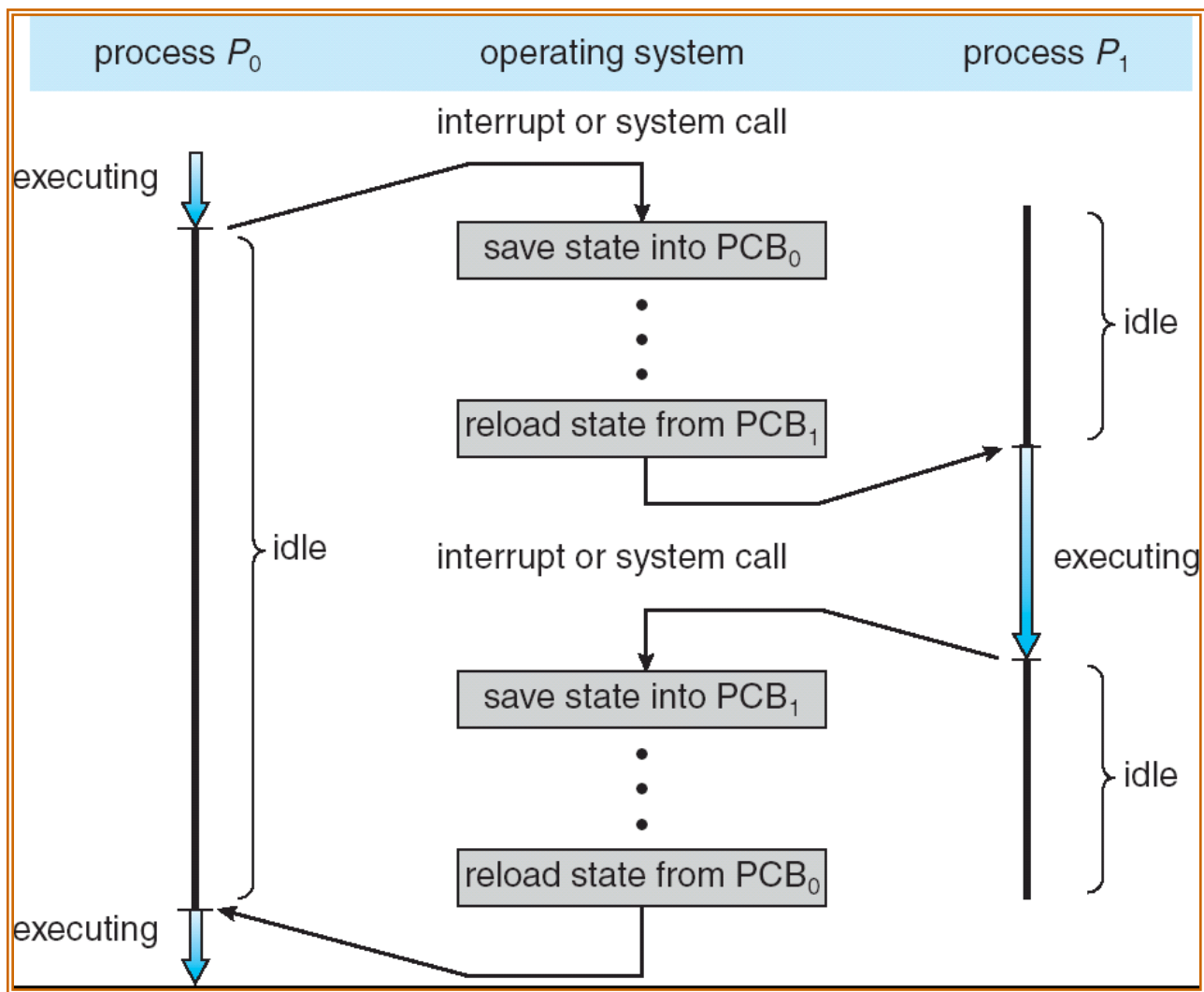
CPU从一个进程（做蛋糕）切换到另一个进程（医疗救护）。

# 内容提要

- 进程概念的引入
- 进程状态与控制
- 线程概念的引入
- 线程的实现方式
- 小结



# 进程的状态与控制：示例



# 进程控制

- 进程控制的主要任务是创建和撤消进程
- 以及实现进程的状态转换
- 由内核来实现。

# 进程的创建

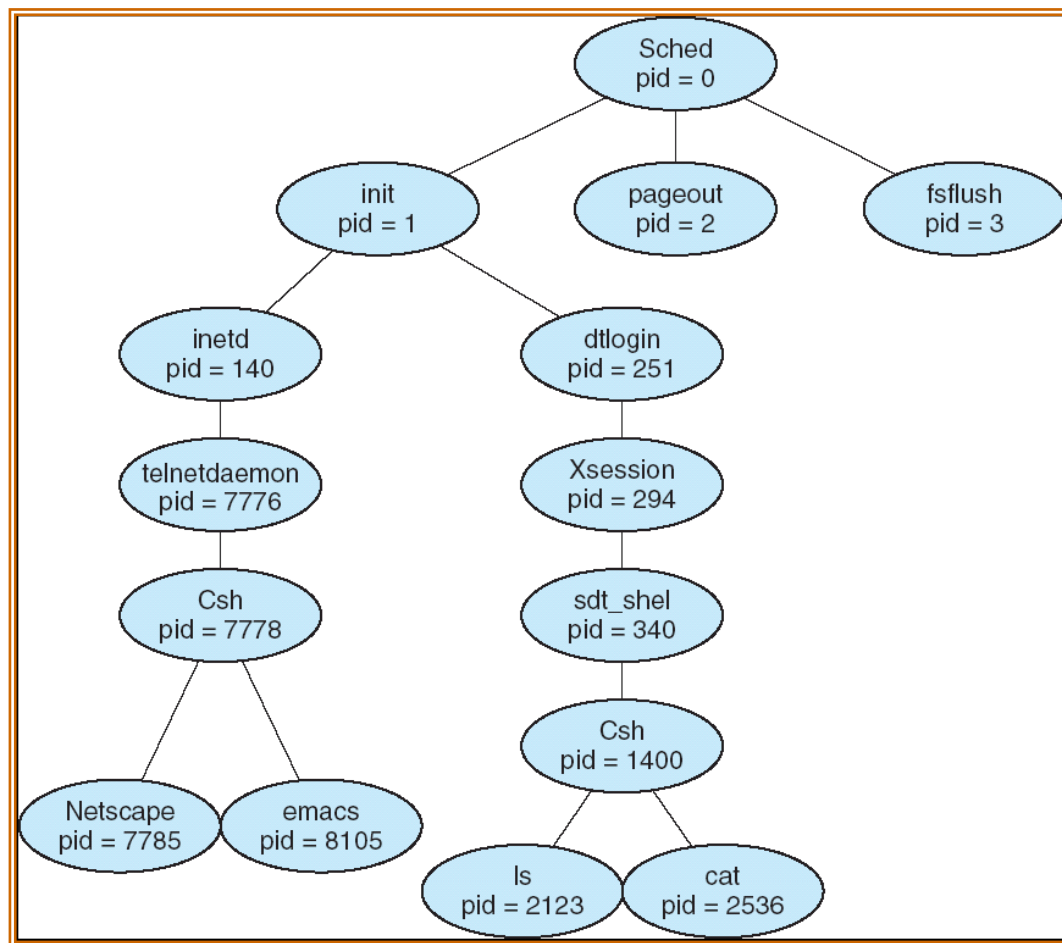
- 提交一个批处理作业
- 用户登录
- 由OS创建，用以向一用户提供服务
- 由已存在的一进程创建

# 进程撤消

- 用户退出登录
- 进程执行一中止服务请求
- 出错及失败因素
- 正常结束
- 给定时限到
- .....

# Unix中的进程层次结构

- 进程图
- 创建原语(fork, exec)
- 撤消原语(kill)
  - 释放资源、撤消子进程、重新调度。



# 进程控制的实现：原语

- 原语：由若干条指令所组成的指令序列，来实现某个特定的操作功能
  - 指令序列执行是连续的，不可分割
  - 是操作系统核心组成部分
  - 必须在管态（内核态）下执行，且常驻内存
- 与系统调用的区别

```
#include <unistd.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
int main ()
```

```
{
```

```
    pid_t fpid; //fpid表示fork函数返回的值
```

```
    int count = 0;
```

```
    fpid = fork();
```

```
    if (fpid < 0)
```

```
        printf("error in fork!");
```

```
    else if (fpid == 0) {
```

```
        printf("i am the child process, my process id is %d/n", getpid());
```

```
        printf("我是爹的儿子/n");
```

```
        count++;
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        printf("i am the parent process, my
```

```
        printf("我是孩子他爹/n");
```

```
        count++;
```

```
    }
```

```
    printf("统计结果是: %d/n", count);
```

```
    return 0;
```

```
}
```

# Fork()函数 使用举例

运行结果是：

i am the child process, my process id is 5574

我是爹的儿子

统计结果是: 1

i am the parent process, my process id is 5573

我是孩子他爹

统计结果是: 1

# Fork()函数使用举例

- 在语句`fpid=fork()`之前，只有一个进程在执行这段代码，但在这条语句之后，就变成两个进程在执行了。
- 在`fork`函数执行完毕后，如果创建新进程成功，则出现两个进程，一个是子进程，一个是父进程。在子进程中，`fork`函数返回0，在父进程中，`fork`返回新创建子进程的进程ID。我们可以通过`fork`返回的值来判断当前进程是子进程还是父进程。



# Fork()函数使用举例

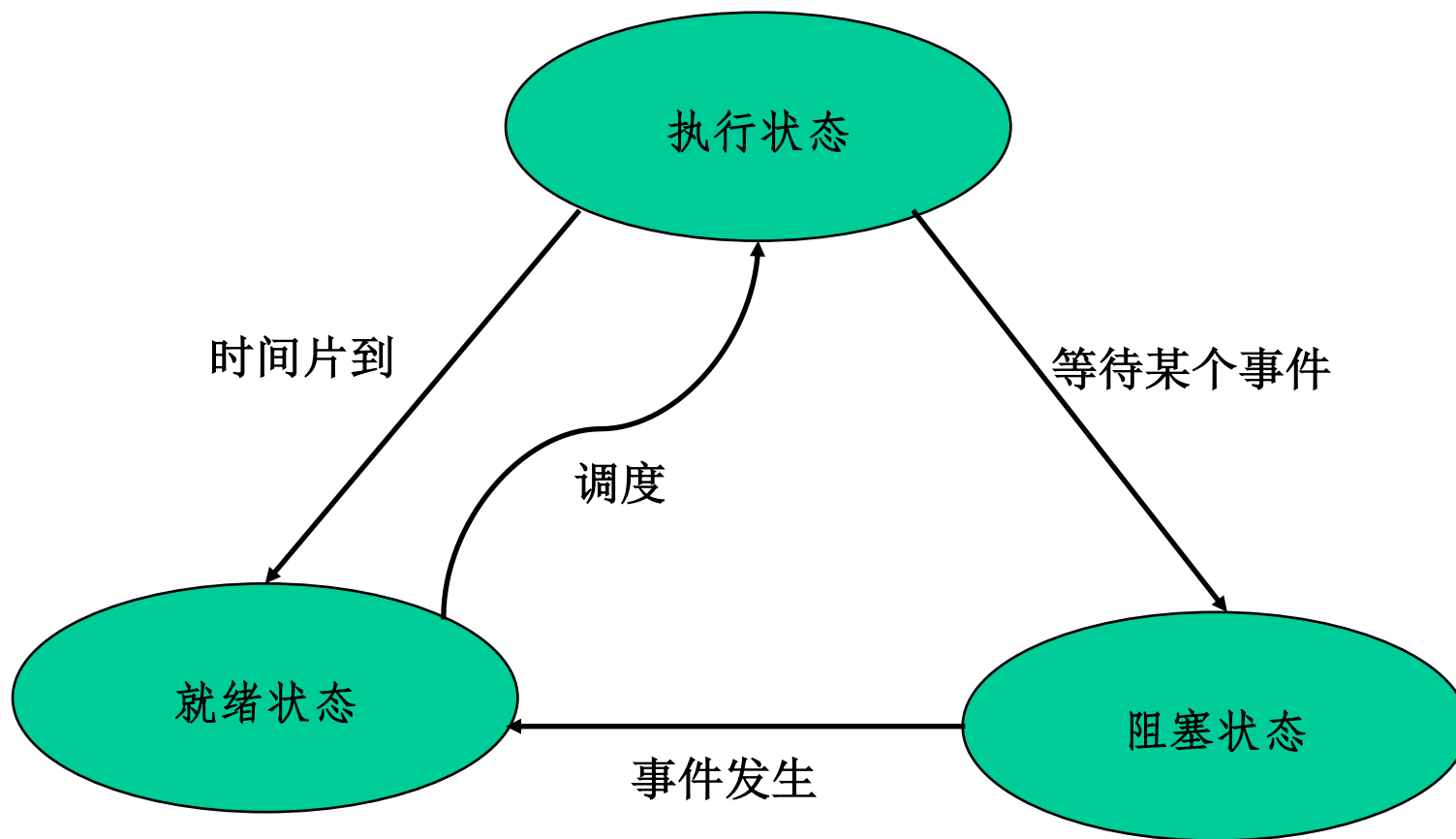
- 为什么两个进程的fpid不同呢，这与fork函数的特性有关。fork调用的一个奇妙之处就是它仅仅被调用一次，却能够返回两次，它可能有三种不同的返回值：
  - a) 在父进程中，fork返回新创建子进程的进程ID；
  - b) 在子进程中，fork返回0；
  - c) 如果出现错误，fork返回一个负值；
- fpid的值为什么在父子进程中不同。其实就相当于链表，进程形成了链表，父进程的fpid指向子进程的进程id, 因为子进程没有子进程，所以其fpid为0.

# 进程状态及其演变

## ■ 进程的三种基本状态

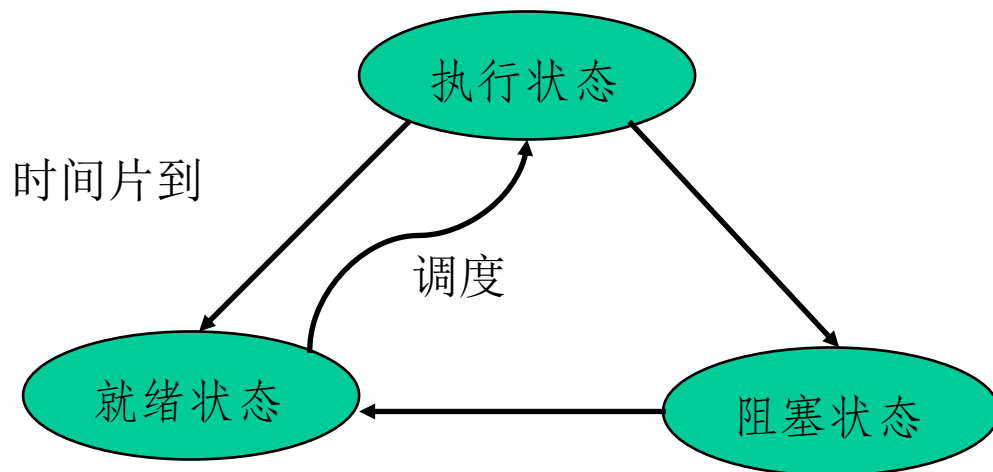
- **就绪状态**：进程已获得除处理机外的所需资源，等待分配处理机资源；只要分配CPU就可执行。
- **执行状态**：占用处理机资源；处于此状态的进程的数目小于等于CPU的数目。在没有其他进程可以执行时（如所有进程都在阻塞状态），通常会自动执行系统的idle进程（相当于空操作）。
- **阻塞状态**：正在执行的进程，由于发生某种事件而暂时无法执行，便放弃处理机处于暂停状态。

# 状态转换★



# 状态转换

- 就绪--> 运行
  - 调度程序选择一个进程运行
- 运行--> 就绪
  - 运行进程用完了时间片
  - 运行进程被中断，因为一高优先级进程处于就绪状态



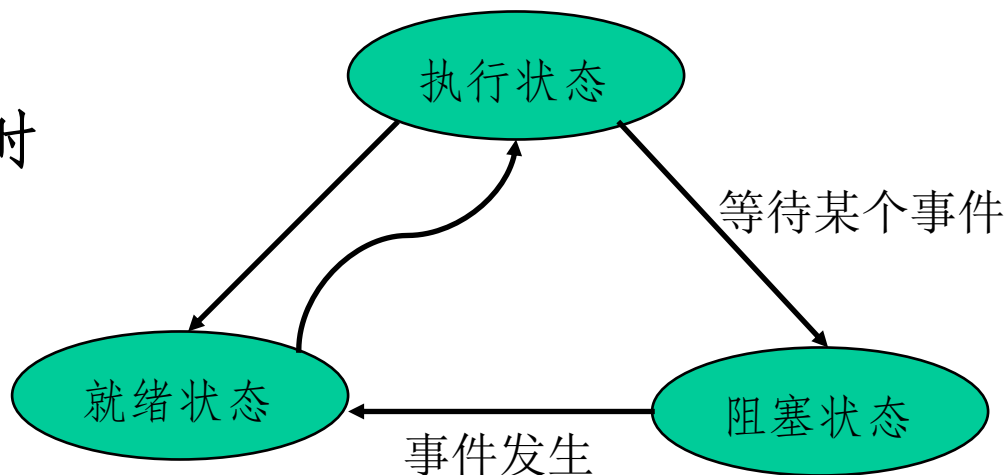
# 状态转换

## ■ 运行--> 阻塞

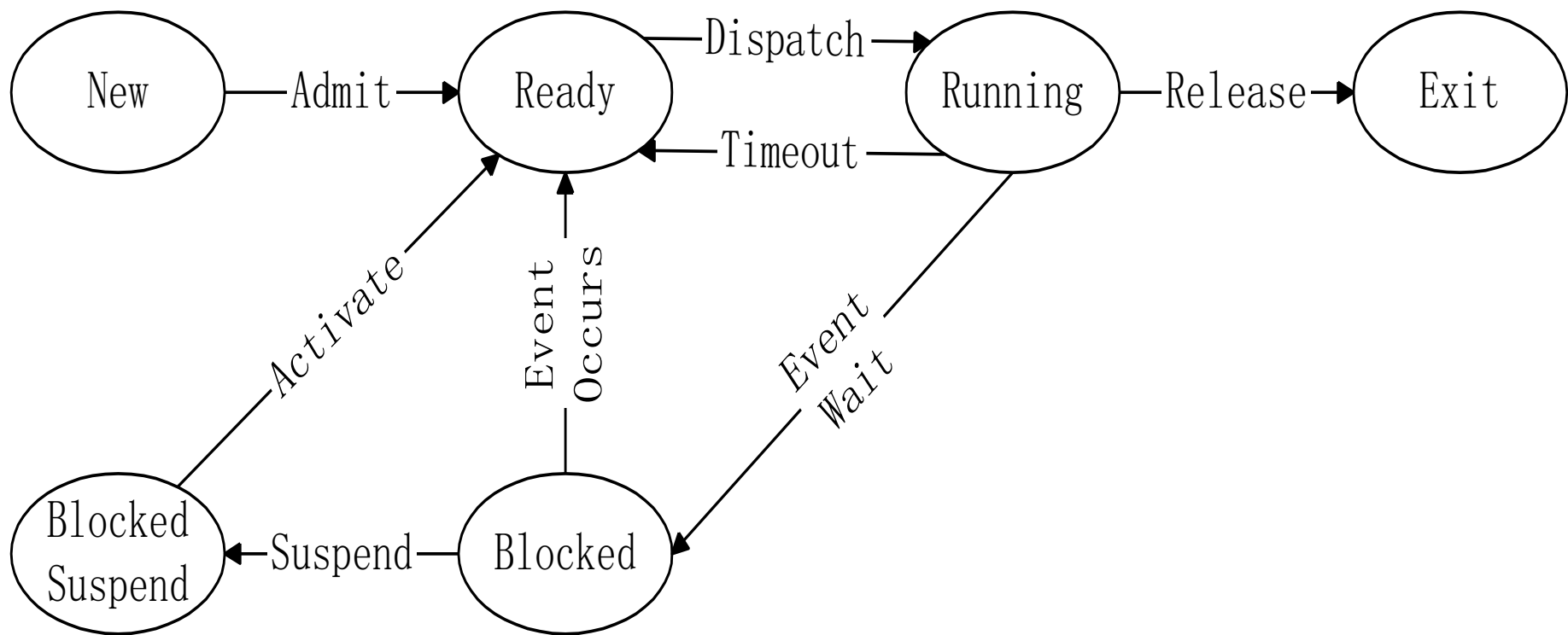
- 当一进程所需的资源必须等待时
- OS尚未完成服务
- 对一资源的访问尚不能进行
- 初始化I/O 且必须等待结果
- 等待某一进程提供输入(IPC)

## ■ 阻塞--> 就绪

- 当所等待的事件发生时



# 挂起进程模型



- **问题：**如果你要设计一个OS，怎么样来实现其中的进程机制？
  - 包括进程的创建、进程的管理、进程的终止、进程的状态转换等等。

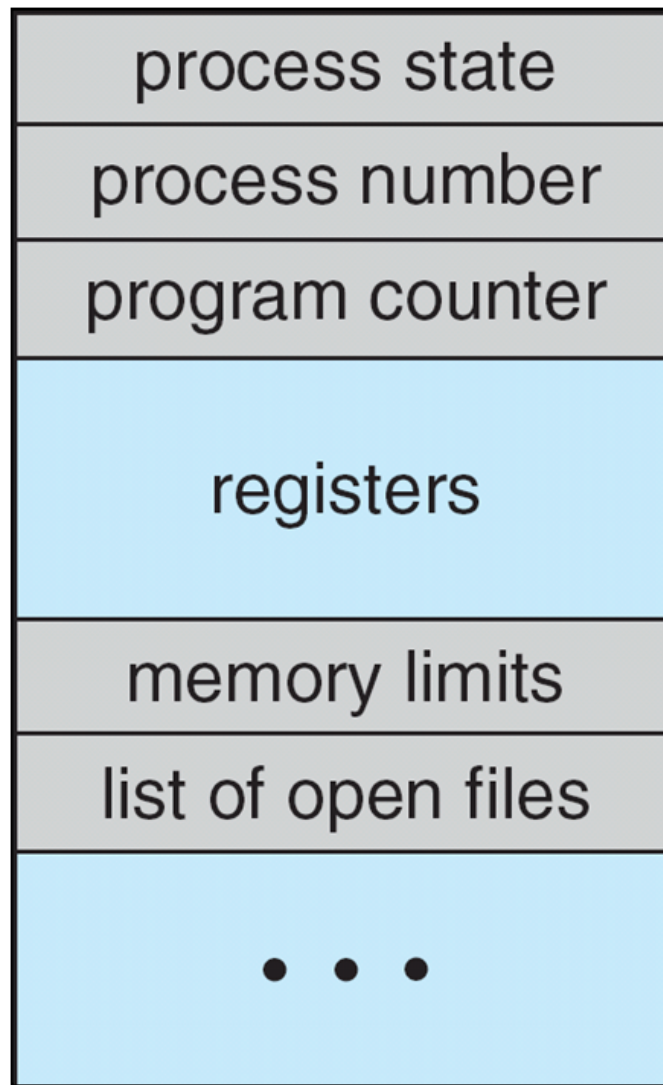
# 进程控制块

- 系统为每个进程定义了一个数据结构：  
进程控制块PCB（Process Control Block）。
- 作用：
  - 进程创建、撤消；
  - 进程唯一标志；
  - 限制系统进程数目。
- 进程控制块是进程管理和控制的最重要的数据结构，每一个进程均有一个PCB，在创建进程时，建立PCB，伴随进程运行的全过程，直到进程撤消而撤消。



# 进程控制块的内容

- 进程标识符
- 程序和数据地址
- 现行状态
- 现场保留区
- 互斥和同步机制
- 进程通信机制
- 优先级
- 资源清单
- 链接字
- 家族关系 ...



# 进程控制块的内容

进程标识符:

- 每个进程都必须有一个唯一的标识符，可以是字符串，也可以是一个数字。Linux系统中就是一个整型数。在进程创建时由系统赋予。

程序和数据地址:

- 把PCB与其程序和数据联系起来。

当前状态:

- 为了管理的方便，系统设计时会将相同的状态的进程组成一个队列，如就绪进程队列，等待进程则要根据等待的事件组成多个等待队列，如等待打印机队列、等待磁盘I/O完成队列等等。

# 进程控制块的内容

现场保护区:

- 当进程因某种原因不能继续占用CPU时（等待打印机），释放CPU，这时就要将CPU的各种状态信息保护起来，为将来再次得到处理机恢复CPU的各种状态，继续运行。

同步与同步机制:

- 用于实现进程间互斥、同步和通信所需的信号量等。

优先级:

- 进程的优先级反映进程的紧迫程度，通常由用户指定和系统设置。Linux系统采用用户设置和系统计算相结合的方式确定进程的优先级。

# 进程控制块的内容

资源清单：

- 列出所拥有的除CPU外的资源记录，如拥有的I/O设备，打开的文件列表等。

链接字：

- 根据进程所处的现行状态，进程相应的PCB参加到不同队列中。PCB链接字指出该进程所在队列中下一个进程PCB的首地址。

其他信息：

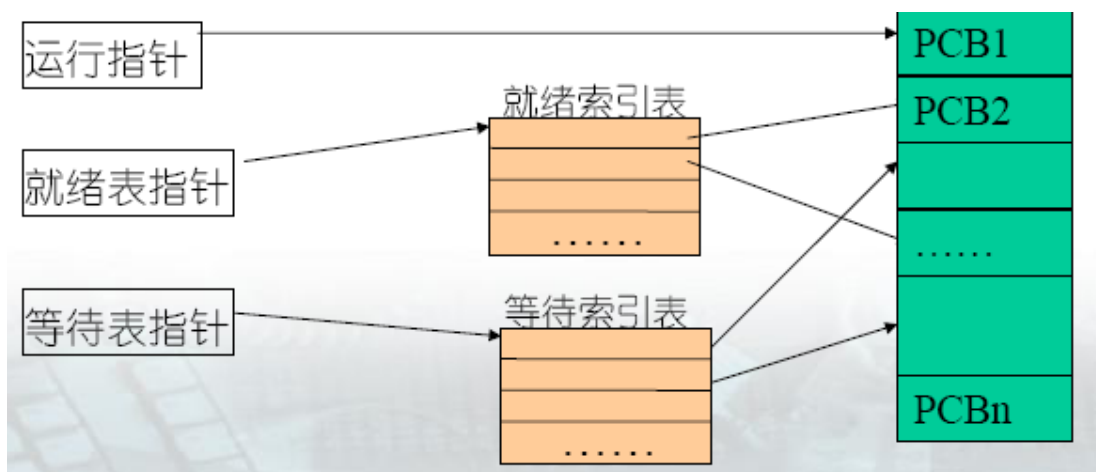
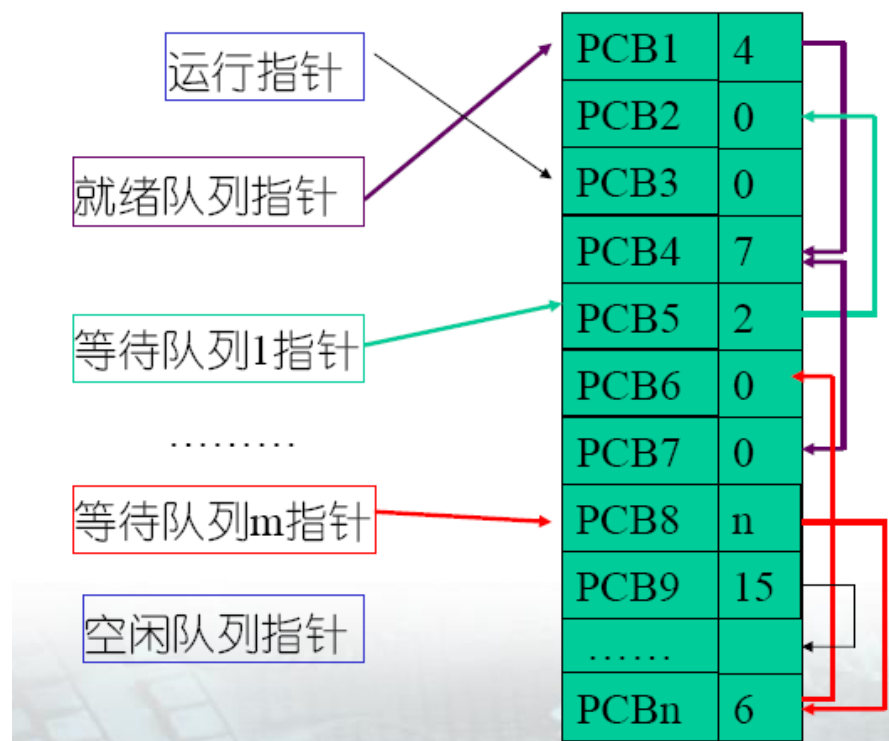
- 如进程记账信息，进程占用CPU的时间等。

在linux 中每一个进程都由task\_struct 数据结构来定义，task\_struct就是我们通常所说的PCB。

OS实验中的Env结构

# PCB的组织方式

- 线性表
- 链接方式
- 索引方式



# 辨析：进程上下文切换 vs 陷入内核

- 进程上下文切换 (Process Context Switch)
  - 通常由调度器执行
  - 保存进程执行断点
  - 切换内存映射 (页表基址、flush TLB)
- 陷入内核
  - CPU状态改变
  - 由中断、异常、Trap指令 (系统调用) 引起
  - 需要保存执行现场 (寄存器、堆栈等)
- 系统调用涉及到进程从用户态到内核态的切换 (mode switch)，这个时候涉及到的切换主要是寄存器上下文的切换，和通常所说的进程上下文切换 (Process Context Switch) 不同，mode switch 的消耗相对要小很多。

# 内容提要

- 进程概念的引入
- 进程状态与控制
- 线程概念的引入
- 线程的实现方式
- 小结

# 案例

编写一个MP3播放软件。核心功能模块有三个：

- (1) 从MP3音频文件中读取数据；
- (2) 对数据进行解压缩；
- (3) 把解压缩后的音频数据播放出来。



# 案例

```
main() {  
    while(TRUE) {  
        Read();  
        Decompress();  
        Play();  
    }  
}  
Read() { ...}  
Decompress() { ...}  
Play() { ...}
```

## ■ 问题：

- 播放出来的声音能否连贯？
- 各个函数之间不是并发执行，影响资源的使用效率；

# 多进程方案

程序1

**main()**

{

**while(TRUE)**

    {

**Read();**

    }

}

**Read() { ... }**

程序2

**main()**

{

**while(TRUE)**

    {

**Decompress();**

    }

}

**Decompress() { ... }**

程序3

**main()**

{

**while(TRUE)**

    {

**Play();**

    }

}

**Play() { ... }**

- 进程拥有各自独立的空间.....

# 这样做有什么问题吗？



# 线程 (thread)

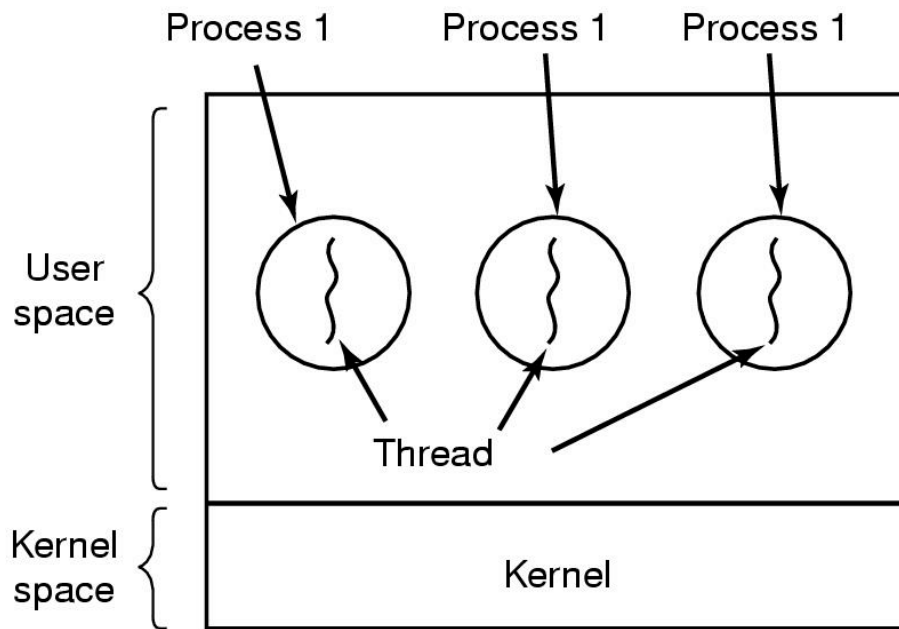
- 进程的不足：
  - 进程只能在一个时间干一件事，如果想同时干两件事或多件事，进程就无能为力了。
  - 进程在执行的过程中如果阻塞，例如等待输入，整个进程就会挂起，即使进程中有些工作不依赖于输入的数据，也将无法执行。
- 需要提出一种新的实体，满足以下特性：
  - 实体之间可以并发地执行；
  - 实体之间共享相同的地址空间；

# 进程与线程

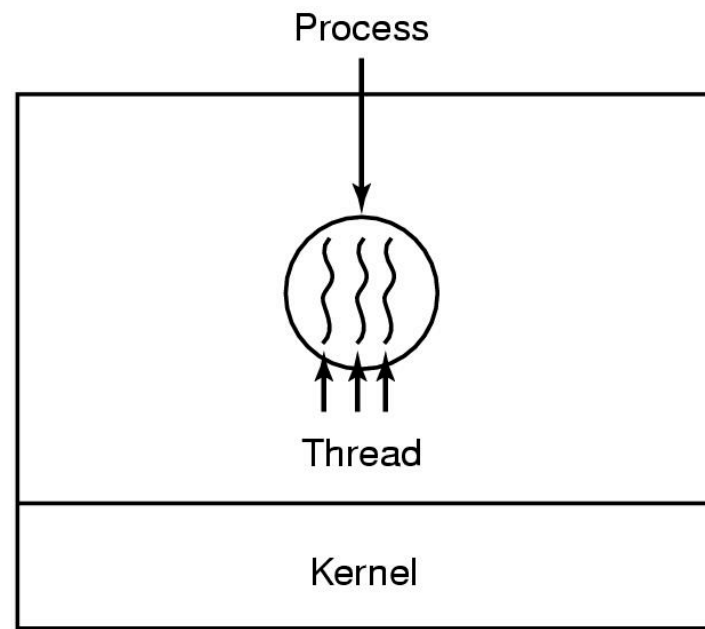
- 进程包含了两个概念：资源拥有者和可执行单元
- 现代操作系统将资源拥有者称为进程（process, task）
- 可执行单元称为线程（thread）

线程：将资源与计算分离，提高并发效率。

# 多进程 v.s. 多线程



(a)



(b)

# 引入线程的目的

- 减小进程切换的开销
- 提高进程内的并发程度
- 共享资源

# 引入线程的目的

## ■ 进程：

- 创建进程
- 撤消进程
- 进程切换

## ■ 线程：

- 进程中的一个实体
- 是一个CPU调度和分派的单位
- 基本上不拥有资源，只有必不可少的少量资源
- 可以与其他同进程的线程共享进程拥有的所有资源



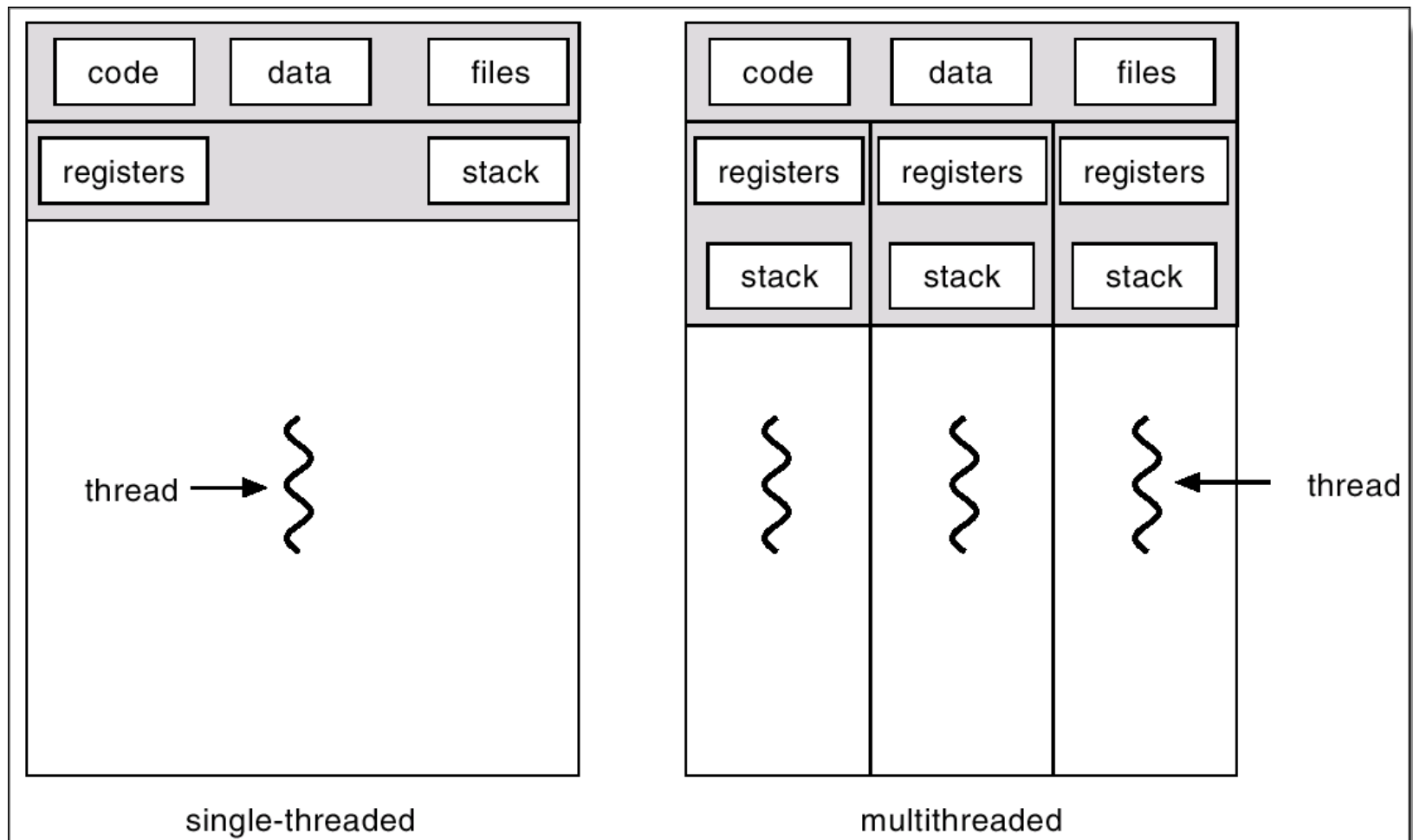
# 进程 vs 线程

- 引入进程好处

- 多个程序可以并发执行，改善资源使用率，提高系统效率

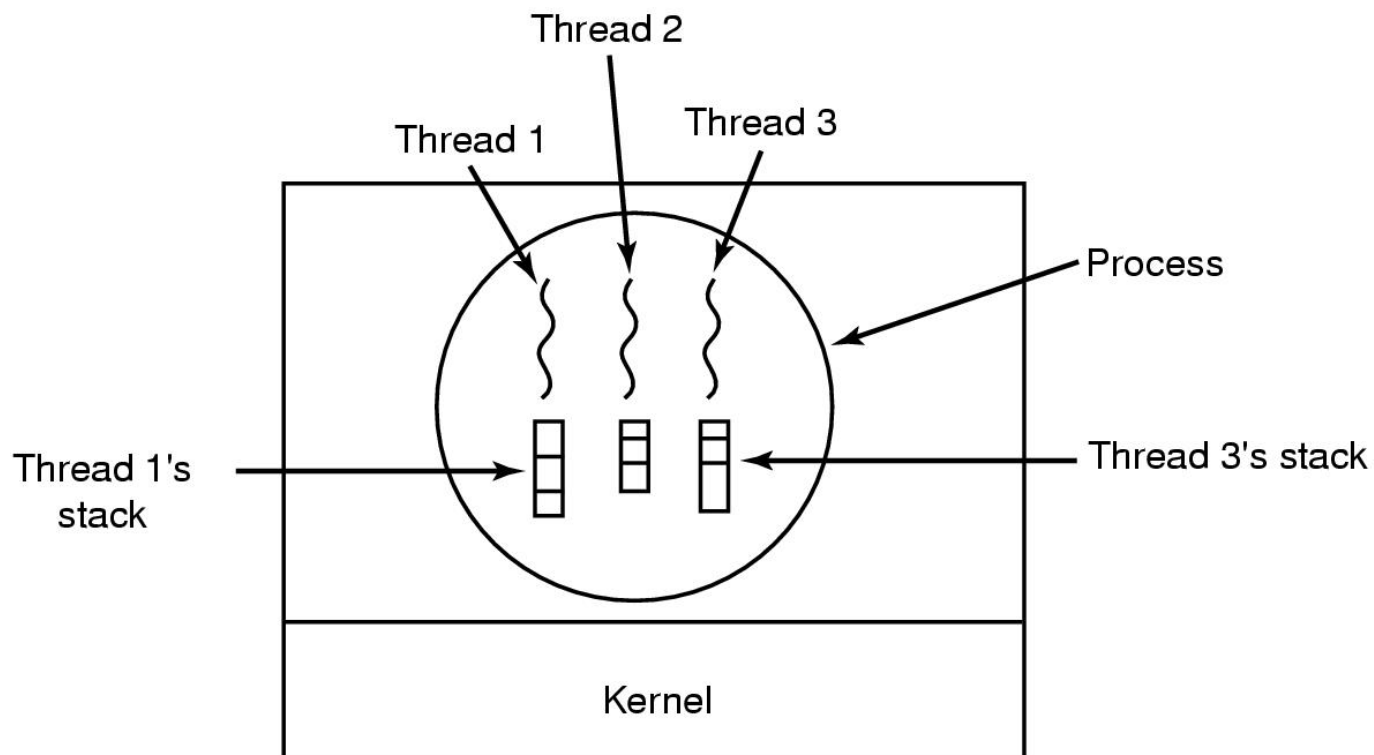
- 引入线程好处

- 减少并发程序执行时所付出的时空开销，使得并发粒度更细、并发性更好



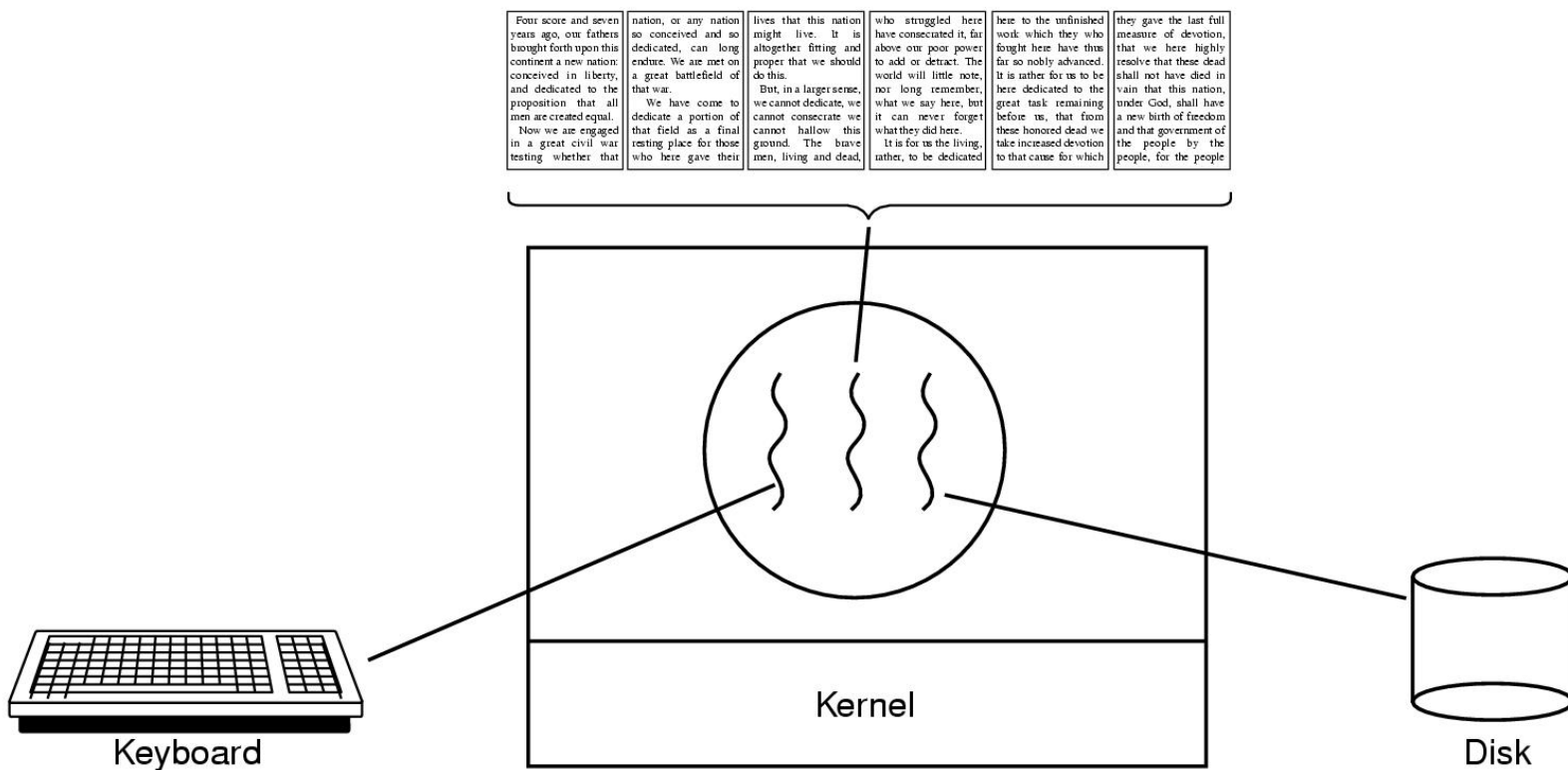
进程拥有虚空间、进程映像、处理机保护、文件、I/O空间。  
线程额外的资源：运行状态、保存上下文（程序计数器）、执行栈、资源共享机制。

# 每个线程有自己的栈



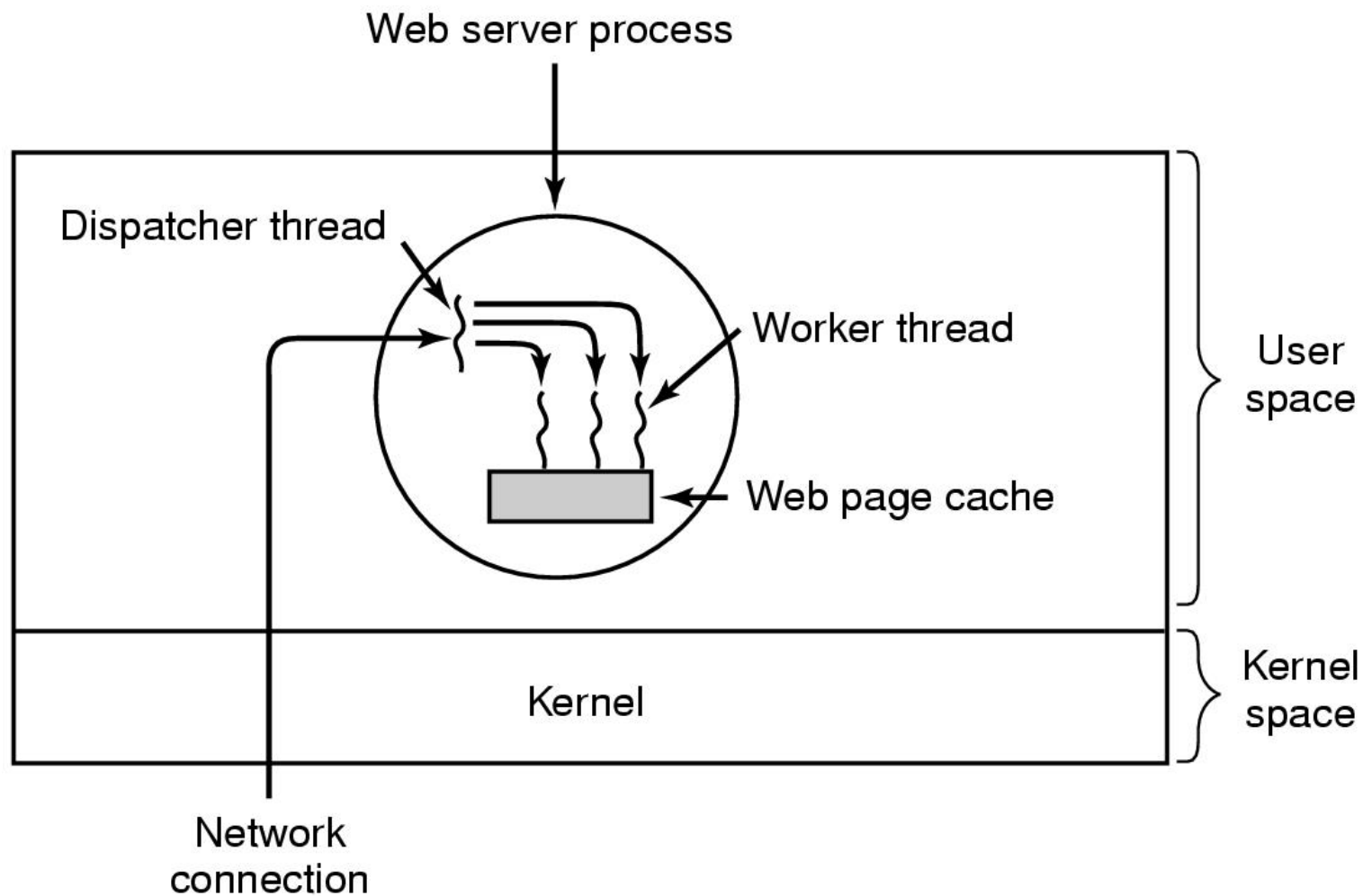
# 为什么一定要线程？ 字处理软件

- 同时进行字符输入、拼写检查（分词检查）、按排版格式显示、定时存盘、打印等事情。



《现代操作系统》P54

# Web



《现代操作系统》 P55

# 典型系统

- MS DOS是单进程、单线程系统；
- 早期UNIX是多进程系统，但每个进程一个线程；
- JAVA是单进程、多线程系统；
- NT、OS/2、SALORIS、MACH是多进程和多线程系统，每个进程有多个线程。

# 小结：引入线程的好处

- 线程比进程轻量：容易创建、撤销
  - 有些应用要求并行实体共享同一个地址空间和所有可用数据的能力
  - 创建一个线程比一个进程快10-100倍
  - 对于存在大量计算和大量I/O处理的应用，大幅度提高性能
  - 在多CPU/多核CPU系统中更有优势

# 小结：线程 v.s. 进程

- 一个进程可以拥有多个线程，而一个线程同时只能被一个进程所拥有。
- 进程是资源分配的基本单位，线程是处理机调度的基本单位，所有的线程共享其所属进程的所有资源与代码。
- 线程执行过程之中很容易进行协作同步，而进程需要通过消息通信进行同步。
- 线程的划分尺度更小，并发性更高。
- 线程共享进程的数据的同时，有自己私有的堆栈。
- 线程不能单独执行，但是每一个线程都有程序的入口、执行序列以及程序出口。它必须组成进程才能被执行。





谢谢！

沃天宇

woty@buaa.edu.cn