并发进程的正确性

- 独立进程
  - 不和其他进程共享资源或状态
  - 确定性⇒ 输入状态决定结果
  - 可重现⇒ 能够重现起始条件
  - 调度顺序不重要
- 并发进程
  - 在多个进程间有资源共享
  - 不确定性
  - 不可重现
- 并发进程的正确性
  - 执行过程是不确定性和不可重现的
  - 程序错误可能是间歇性发生的

进程并发执行的好处

- 进程需要与计算机中的其他进程和设备进行协作
- **好处1：共享资源**
  - 多个用户使用同一台计算机
  - 银行账号存款余额在多台ATM机操作
  - 机器人上的嵌入式系统协调手臂和手的动作
- **好处2：加速**
  - I/O操作和CPU计算可以重叠（并行）
  - 程序可划分成多个模块放在多个处理器上并行执行

好处3：模块化

- 将大程序分解成小程序

  以编译为例，gcc会调用cpp，cc1，cc2，as，ld
- 使系统易于复用和扩展

并发创建新进程时的标识分配

- 程序可以调用函数fork()来创建一个新的进程
  - 操作系统需要分配一个新的并且唯一的进程ID
  - 在内核中，这个系统调用会运行

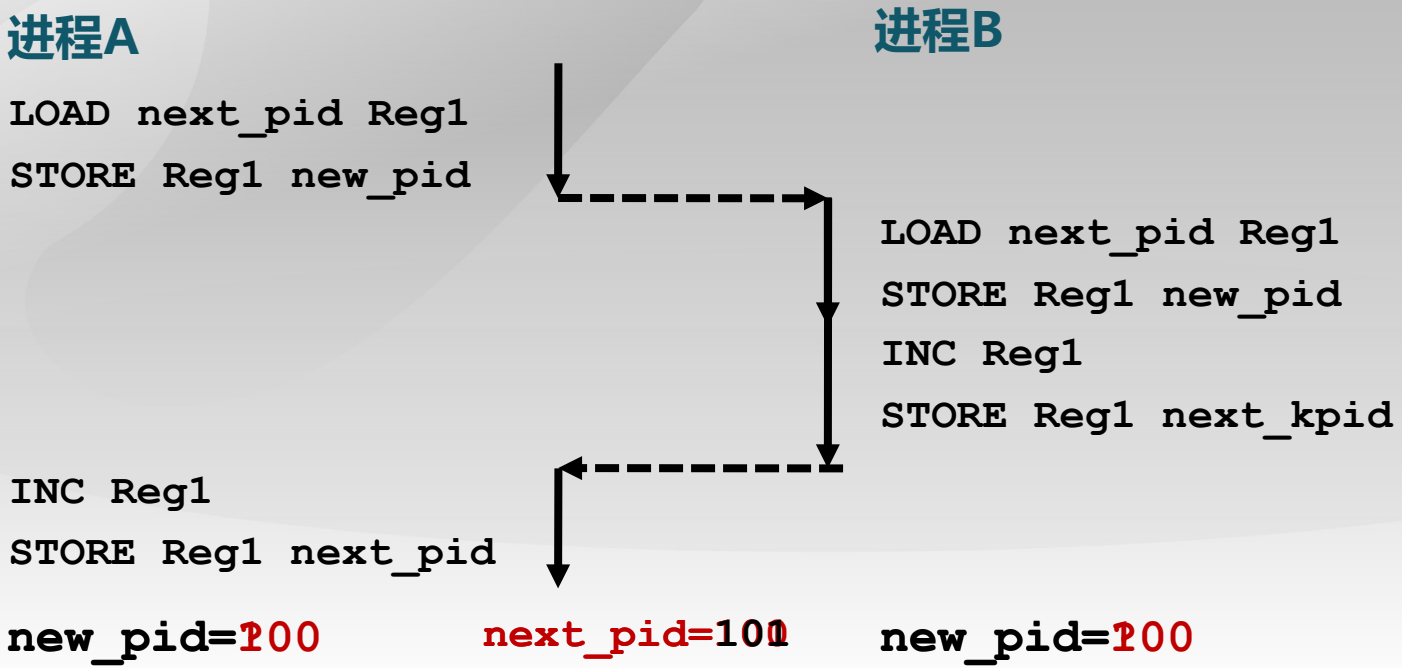
```
new_pid = next_pid++
```

  - 翻译成机器指令

```
LOAD next_pid Reg1
STORE Reg1 new_pid
INC Reg1
STORE Reg1 next_pid
```

- 两个进程并发执行时的预期结果(假定next_pid=100)
  - 一个进程得到的ID应该是100
  - 另一个进程的ID应该是101
  - next_pid应该增加到102

新进程分配标识中的可能错误



原子操作（Atomic Operation）

- 原子操作是指一次不存在任何中断或失败的操作
  - 要么操作成功完成
  - 或者操作没有执行
  - 不会出现部分执行的状态
- 操作系统需要利用同步机制在并发执行的同时，保证一些操作是原子操作

操作系统

Operating Systems

现实生活中的同步问题

- 操作系统和现实生活的问题类比
  - 利用现实生活问题帮助理解操作系统同步问题
  - 同时注意，计算机与人的差异
- 例如: 家庭采购协调

时 间	A	B
3:00	查看冰箱，没有面包了	
3:05	离开家去商店	
3:10	到达商店	查看冰箱，没有面包了
3:15	购买面包	离开家去商店
3:20	到家，把面包放进冰箱	到达商店
3:25		购买面包
3:30		到家，把面包放进冰箱

家庭采购协调问题分析

- 如何保证家庭采购协调的成功和高效
  - 有人去买
    需要采购时，有人去买面包
  - 最多只有一个人去买面包
- 可能的解决方法
  - 在冰箱上设置一个锁和钥匙（lock&key）
  - 去买面包之前锁住冰箱并且拿走钥匙
- 加锁导致的新问题
  - 冰箱中还有其他食品时，别人无法取到

方案一

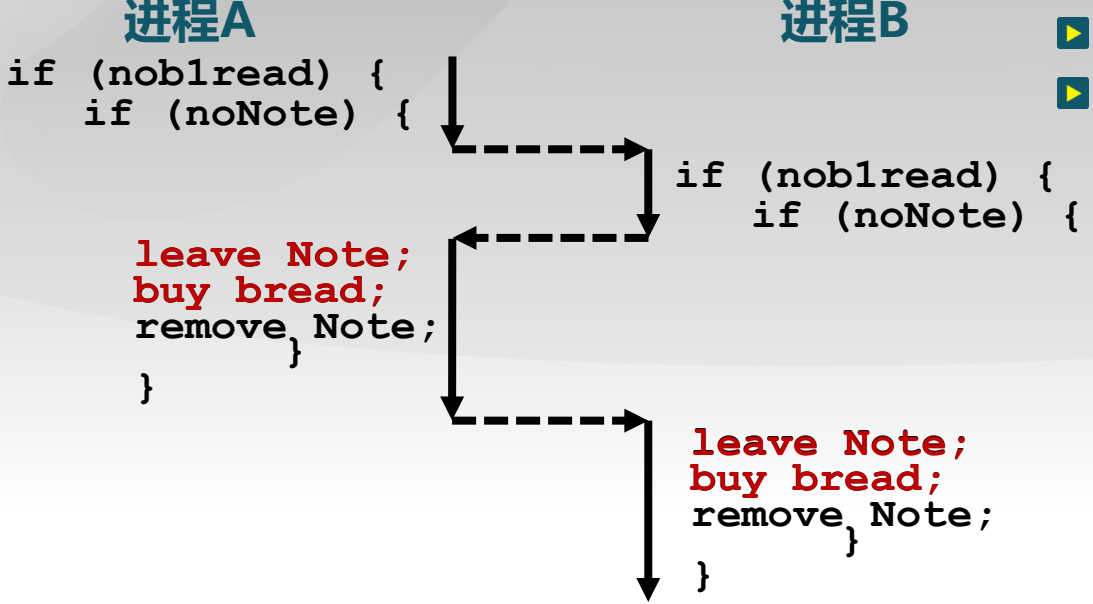
- 使用便签来避免购买太多面包
  - 购买之前留下一张便签
  - 买完后移除该便签
  - 别人看到便签时，就不去购买面包

```
if (nobread) {
   if (noNote) {
      leave Note;
      buy bread;
      remove Note;
   }
}
```

- 有效吗?

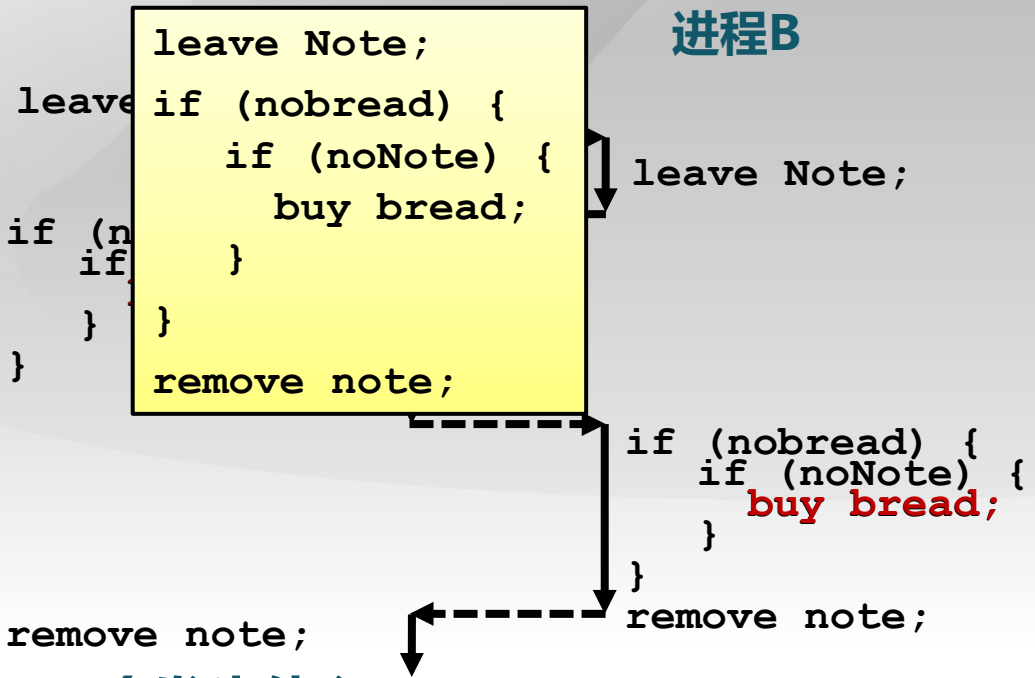
方案一分析

- 偶尔会购买太多面包
  - 检查面包和便签后帖便签前，有其他人检查面包和便签
- 解决方案只是间歇性地失败
  - 问题难以调试
  - 必须考虑调度器所做的事情



方案二

- 先留便签，后检查面包和便签



- 会发生什么?
  - 不会有人买面包

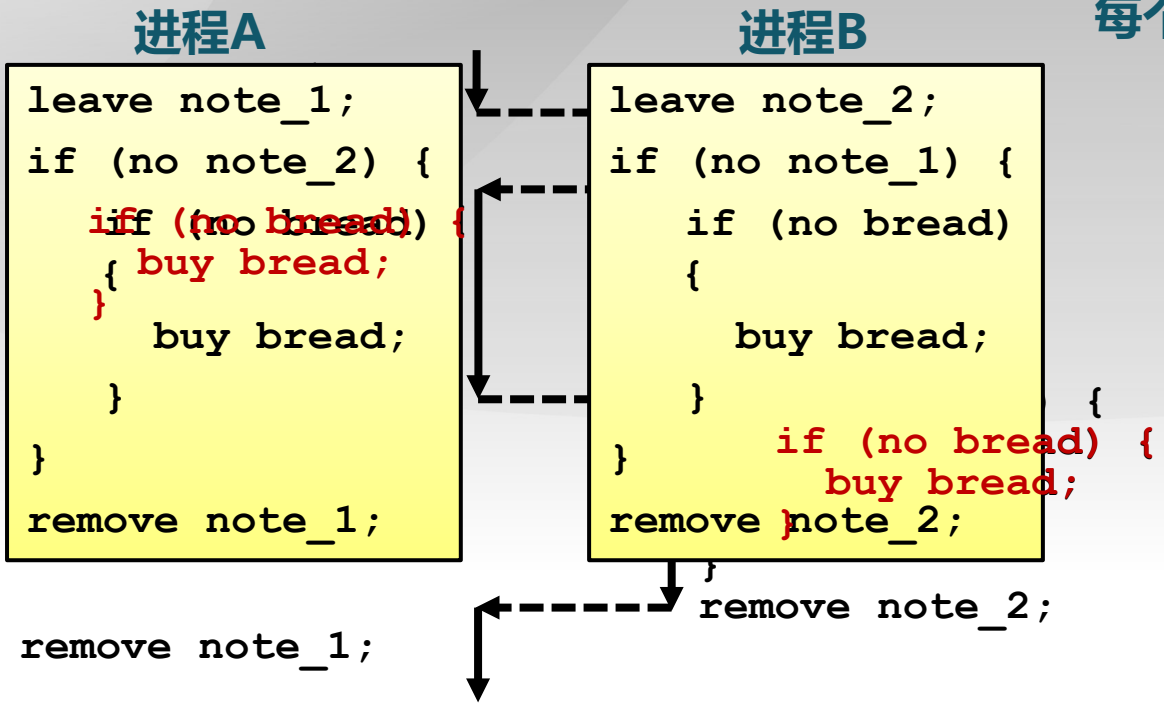
方案三

- 为便签增加标记，以区别不同人的便签
  - 现在可在检查之前留便签

- 会发生什么?

可能导致没有人去买面包

每个人都认为另外一个去买面包



方案四

- 两个人采用不同的处理流程

进程A

```
leave note_1;
while(note_2) {
    do nothing;
}
if(no bread){
  buy bread;
}
remove note_1;
```

如果没有便签2,那么A可以去买面包,否则等待B离开

进程B

```
leave note_2;
if(no note_1) {
    if(no bread){
       buy bread;
    }
}
remove note_2;
```

如果没有便签1,那么B可以去买面包,否则B离开并且再试一次

- 现在有效吗?
  - 枚举所有可能后，可以确认它是有效的
- 这种解决方案你满足吗?

方案四分析

- 它有效，但太复杂
  - 很难验证它的有效性
- A和B的代码不同
  - 每个进程的代码也会略有不同
  - 如果进程更多，怎么办?
- 当A在等待时，它不能做其他事
  - 忙等待（busy-waiting）
- 有更好的方法吗?

方案五

- 利用两个原子操作实现一个锁(lock)
  - Lock.Acquire()
    - 在锁被释放前一直等待，然后获得锁
  - Lock.Release()
    - 解锁并唤醒任何等待中的进程
    - 如果两个线程都在等待同一个锁，并且同时锁被释放了，那么只有一个能够获得锁
- 基于原子锁的解决方案
  - Lock.Release()

```
breadlock.Acquire();    进入临界区
if (nobread) {
  buy bread;            临界区
 }
breadlock.Release();    退出临界区
```

进程的交互关系：相互感知程度

相互感知的程度	交互关系	进程间的影响
相互不感知（完全不了解其它进程的存在）	独立	一个进程的操作对其他进程的结果无影响
间接感知（双方都与第三方交互，如共享资源）	通过共享进行协作	一个进程的结果依赖于共享资源的状态
直接感知（双方直接交互，如通信）	通过通信进行协作	一个进程的结果依赖于从其他进程获得的信息

- 互斥（mutual exclusion）
- 死锁（deadlock）
- 饥饿（starvation）

进程的交互关系：相互感知程度

相互感知的程度	交互关系	进程间的影响
相互不感知（完全不了解其它进程的存在）	独立	一个进程的操作对其他进程的结果无影响
间接感知（双方都与第三方交互，如共享资源）	通过共享进行协作	一个进程的结果依赖于共享资源的状态
直接感知（双方直接交互，如通信）	通过通信进行协作	一个进程的结果依赖于从其他进程获得的信息

- 互斥（mutual exclusion）
  - 一个进程占用资源，其它进程不能使用
- 死锁（deadlock）
- 饥饿（starvation）

进程的交互关系：相互感知程度

相互感知的程度	交互关系	进程间的影响
相互不感知（完全不了解其它进程的存在）	独立	一个进程的操作对其他进程的结果无影响
间接感知（双方都与第三方交互，如共享资源）	通过共享进行协作	一个进程的结果依赖于共享资源的状态
直接感知（双方直接交互，如通信）	通过通信进行协作	一个进程的结果依赖于从其他进程获得的信息

- 互斥（mutual exclusion）
- 死锁（deadlock）
  - 多个进程各占用部分资源，形成循环等待
- 饥饿（starvation）

进程的交互关系：相互感知程度

相互感知的程度	交互关系	进程间的影响
相互不感知（完全不了解其它进程的存在）	独立	一个进程的操作对其他进程的结果无影响
间接感知（双方都与第三方交互，如共享资源）	通过共享进行协作	一个进程的结果依赖于共享资源的状态
直接感知（双方直接交互，如通信）	通过通信进行协作	一个进程的结果依赖于从其他进程获得的信息

- 互斥（mutual exclusion）
- 死锁（deadlock）
- 饥饿（starvation）
  - 其他进程可能轮流占用资源，一个进程一直得不到资源

操作系统

Operating Systems

临界区(Critical Section)

```
entry section
    critical section
exit section
    remainder section
```

- 临界区(critical section)
  - 进程中访问临界资源的一段需要互斥执行的代码
- 进入区(entry section)
  - 检查可否进入临界区的一段代码
  - 如可进入，设置相应"正在访问临界区"标志
- 退出区(exit section)
  - 清除“正在访问临界区”标志
- 剩余区(remainder section)
  - 代码中的其余部分

临界区的访问规则

- 空闲则入
- 忙则等待
- 有限等待
- 让权等待（可选）

临界区的访问规则

- 空闲则入
  - 没有进程在临界区时，任何进程可进入
- 忙则等待
- 有限等待
- 让权等待（可选）

临界区的访问规则

- 空闲则入
- 忙则等待
  - 有进程在临界区时，其他进程均不能进入临界区
- 有限等待
- 让权等待（可选）

临界区的访问规则

- 空闲则入
- 忙则等待
- 有限等待
  - 等待进入临界区的进程不能无限期等待
- 让权等待（可选）

临界区的访问规则

- 空闲则入
- 忙则等待
- 有限等待
- 让权等待（可选）
  - 不能进入临界区的进程，应释放CPU（如转换到阻塞状态）

临界区的实现方法

- 禁用中断
- 软件方法
- 更高级的抽象方法

- 不同的临界区实现机制的比较
  - 性能：并发级别

提纲

- 背景
- 现实生活中的同步问题
- 临界区
- **方法1：禁用硬件中断**
- 方法2：基于软件的解决方法
- 方法3：更高级的抽象方法

方法1：禁用硬件中断

- 没有中断，没有上下文切换，因此没有并发
  - 硬件将中断处理延迟到中断被启用之后
  - 现代计算机体系结构都提供指令来实现禁用中断

```
local_irq_save(unsigned long flags);
critical section
local_irq_restore(unsigned long flags);
```

- 进入临界区
  - 禁止所有中断，并保存标志
- 离开临界区
  - 使能所有中断，并恢复标志

缺点

- 禁用中断后，进程无法被停止
  - 整个系统都会为此停下来
  - 可能导致其他进程处于饥饿状态
- 临界区可能很长
  - 无法确定响应中断所需的时间（可能存在硬件影响）
- 要小心使用

操作系统

Operating Systems

基于软件的同步解决方法

两个线程，T0和T1

线程Ti的代码

```
do {
   enter section   进入区
         critical section
   exit section    退出区
         reminder section
} while (1);
```

线程可通过共享一些共有变量来同步它们的行为

第一次尝试

- 共享变量

```
int turn = 0;
turn == i // 表示允许进入临界区的线程
```

- 线程Ti的代码

```
do {
     while (turn != i) ;
     critical section
     turn = j;
     reminder section
} while (1);
```

- 满足“忙则等待”，但是有时不满足“空闲则入”
  - Ti不在临界区，Tj想要继续运行，但是必须等待Ti进入过临界区后

第二次尝试

- 共享变量

```
int flag[2];
flag[0] = flag[1] = 0;
flag[i] == 1 //表示线程Ti是否在临界区
```

- 线程Ti的代码

```
do {
     while (flag[j] == 1) ;
     flag[i] = 1;
     critical section
     flag[i] = 0;
     remainder section
} while (1);
```

- 不满足“忙则等待”

第三次尝试

- 共享变量

```
int flag[2];
flag[0] = flag[1] = 0;
flag[i] == 1 // 表示线程Ti想要进入临界区
```

- 线程Ti的代码

```
do {
    flag[i] = 1;
    while (flag[j] == 1) ;
    critical section
    flag[i] = 0;
    remainder section
} while (1);
```

- 满足“忙则等待”，但是不满足“空闲则入”

Peterson算法

- 满足线程Ti和Tj之间互斥的经典的基于软件的解决方法（1981年）
- 共享变量

```
int turn; //表示该谁进入临界区
boolean flag[];//表示进程是否准备好进入临界区
```

- 进入区代码

```
flag[i] = true;
turn = j;
while (flag[j] && turn ==j)
```

- 退出区代码

```
flag[i] = false;
```

Peterson算法实现

线程Ti 的代码

```
do {
        flag[i] = true;
        turn = j;
        while ( flag[j] && turn == j);

                CRITICAL SECTION

        flag[i] = false;

                REMAINDER SECTION

    } while (true);
```

Dekkers算法

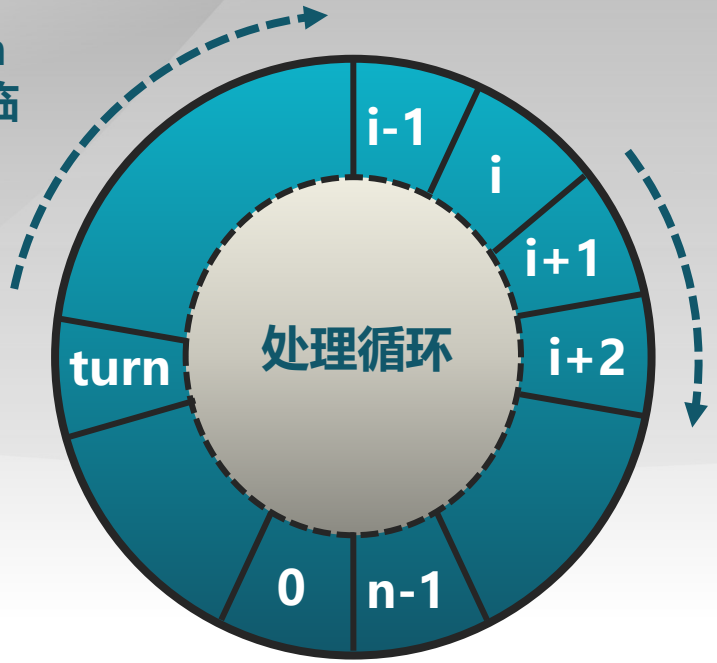
线程Ti 的代码

```
flag[0]:= false; flag[1]:= false; turn:= 0;//or1

do {
        flag[i] = true;
        while flag[j] == true {
             if turn ≠ i {
                flag[i] := false
                while turn ≠ i { }
                flag[i] := true
             }
         }
         CRITICAL SECTION
        turn := j
        flag[i] = false;
         EMAINDER SECTION
   } while (true);
```

N线程的软件方法（Eisenberg和McGuire）

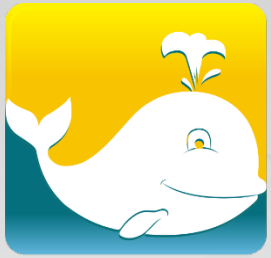
线程Ti要等待从turn到i-1的线程都退出临界区后访问临界区



线程Ti退出时，把turn改成下一个请求线程

基于软件的解决方法的分析

- 复杂
  - 需要两个进程间的共享数据项
- 需要忙等待
  - 浪费CPU时间



操作系统

Operating Systems

方法3：更高级的抽象方法

- 硬件提供了一些同步原语
  - 中断禁用，原子操作指令等
- 操作系统提供更高级的编程抽象来简化进程同步
  - 例如：锁、信号量
  - 用硬件原语来构建

锁(lock)

- 锁是一个抽象的数据结构
  - 一个二进制变量（锁定/解锁）
  - Lock::Acquire()
  - 锁被释放前一直等待，然后得到锁
  - Lock::Release()
- 使用锁来控制临界区访问

Lock::Release()

释放锁，唤醒任何等待的进程

```
lock_next_pid->Acquire();
new_pid = next_pid++ ;
lock_next_pid->Release();
```

原子操作指令

- 现代CPU体系结构都提供一些特殊的原子操作指令
- 测试和置位（Test-and-Set ）指令
  - 从内存单元中读取值
  - 测试该值是否为1（然后返回真或假）
  - 内存单元值设置为1

```
boolean TestAndSet (boolean *target)
            {
                  boolean rv = *target;
                  *target = true;
                  return rv:
            }
```

原子操作指令

- 现代CPU体系结构都提供一些特殊的原子操作指令
- 测试和置位（Test-and-Set ）指令
- 交换指令（exchange）
  - 交换内存中的两个值

```
void Exchange (boolean *a, boolean *b)
          {
                boolean temp = *a;
                *a = *b;
                *b = temp:
          }
```

使用TS指令实现自旋锁(spinlock)

```
class Lock {
    int value = 0;
}
```

```
Lock::Acquire() {
   while (test-and-set(value))
      ; //spin
}
```

```
Lock::Release() {
    value = 0;
}
```

如果锁被释放，那么TS指令读取0并将值设置为1

- 锁被设置为忙并且需要等待完成

如果锁处于忙状态，那么TS指令读取1并将值设置为1

- 不改变锁的状态并且需要循环

- 线程在等待的时候消耗CPU时间

无忙等待锁

忙等待

```
Lock::Acquire() {
    while (test-and-set(value))
        ; //spin
}
Lock::Release() {
    value = 0;
}
```

无忙等待

```
class Lock {
    int value = 0;
    WaitQueue q;
}

Lock::Acquire() {
    while (test-and-set(value)) {
        add this TCB to wait queue q;
        schedule();
    }
}

Lock::Release() {
    value = 0;
    remove one thread t from q;
    wakeup(t);
}
```

如何使用交换指令来实现?

原子操作指令锁的特征

- 优点
  - 适用于单处理器或者共享主存的多处理器中任意数量的进程同步
  - 简单并且容易证明
  - 支持多临界区
- 缺点
  - 忙等待消耗处理器时间
  - 可能导致饥饿

    进程离开临界区时有多个等待进程的情况
  - 死锁

    拥有临界区的低优先级进程

    请求访问临界区的高优先级进程获得处理器并等待临界区

同步方法总结

- 锁是一种高级的同步抽象方法
  - 互斥可以使用锁来实现
  - 需要硬件支持
- 常用的三种同步实现方法
  - 禁用中断（仅限于单处理器）
  - 软件方法（复杂）
  - 原子操作指令（单处理器或多处理器均可）