中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

操作系统课程 B0911010Y-01

信号量、条件变量与屏障

中国科学院大学计算机学院

2025-11-05

内容提要

- 信号量
- 条件变量与管程
- 屏障

有锁就足够了么？

- 生产者-消费者问题

  - 一个生产者在生成数据后，将数据写入一个缓冲区中
  - 一个消费者从缓冲区读出数据进行处理
  - 任何时刻只能有一个生产者或消费者可访问缓冲区
  - 应用场景：驱动程序从设备获取数据后写入缓冲区，内核模块从缓冲区读取数据
- 锁方案
  - 临界区：读写缓冲区
  - 保证只有一个线程访问缓冲区
  - 问题：生产者线程释放锁后，可能仍然是生产者线程获得锁

有锁就足够了么？

- 生产者-消费者问题

- 锁方案
  - 锁保护共享资源互斥访问
  - 无法提供线程按某些条件进行同步
- 所需的同步机制的特征
  - 表示资源状态: 缓冲区空 vs. 缓冲区满
  - 条件同步：使得多线程根据资源状态执行
    - 缓冲区空时，生产者可以写入数据
    - 缓冲区满时，消费者可以读取数据

信号量 Semaphores (Dijkstra, 1965)

- 信号量是操作系统提供的一种协调共享资源访问的方法
- 信号量组成
  - 一个整形变量，表示系统资源的数量
  - 两个原子操作：P操作（Wait操作）和V操作（Signal操作）

P 操作(又名 Down 或 Wait)

- 等待信号量为正，信号量减1

```
P(s) {
  while (s <= 0);
  s--;
}
```

V 操作(又名 Up 或 Signal)

- 信号量加1

```
V(s) {
  s++;
}
```

信号量的实现与使用

```
Class Semaphore {
  int sem;
  WaitQueue q;
}
```

```
Semaphore::P() {
    sem--;
    if (sem < 0) {
        Add this thread t to q;
        block(t);
    }
}
```

```
Semaphore::V() {
    sem++;
    if (sem<=0) {
        Remove a thread t from q;
        wakeup(t);
    }
}
```

- 信号量的使用
  - 互斥访问：保护临界区互斥访问，Semaphore(1)
  - 条件同步：多线程之间同步, Semaphore (N>=0)

用信号量实现生产者-消费者问题

- 有界缓冲区的生产者-消费者问题
  - 一个或多个生产者在生成数据后放在一个缓冲区里
  - 单个消费者从缓冲区取出数据处理
  - 任何时刻只能有一个生产者或消费者可访问缓冲区

- **要求**
  - **任何时刻只能有一个线程操作缓冲区（互斥访问）**
  - **缓冲区空时，消费者必须等待生产者（条件同步）**
  - **缓冲区满时，生产者必须等待消费者（条件同步）**

用信号量实现生产者-消费者问题

- 设计
  - 缓冲区空：信号量emptyBuffers
  - 缓冲区满：信号量fullBuffers

```
Class BoundedBuffer {
    fullBuffers = new Semaphore(0);
    emptyBuffers = new Semaphore(1);
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    emptyBuffers->P();
    Add c to the buffer;
    fullBuffers->V();
}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    fullBuffers->P();
    Remove c from buffer;
    emptyBuffers->V();
}
```

用信号量实现生产者-消费者问题

- 设计
  - 缓冲区空：信号量emptyBuffers
  - 缓冲区满：信号量fullBuffers

```
Class BoundedBuffer {
    fullBuffers = new Semaphore(0);
    emptyBuffers = new Semaphore(n);
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    emptyBuffers->P();
    Add c to the buffer;
    fullBuffers->V();
}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    fullBuffers->P();
    Remove c from buffer;
    emptyBuffers->V();
}
```

用信号量实现生产者-消费者问题

- 设计
  - 缓冲区空：信号量emptyBuffers
  - 缓冲区满：信号量fullBuffers

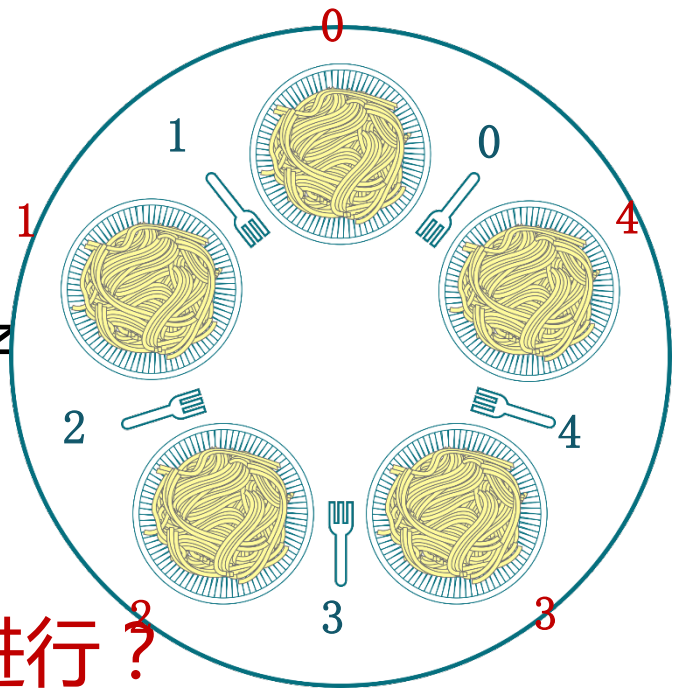
```
Class BoundedBuffer {
    mutex = new Semaphore(1);
    fullBuffers = new Semaphore(0);
    emptyBuffers = new Semaphore(n);
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    emptyBuffers->P();
    mutex->P();
    Add c to the buffer;
    mutex->V();
    fullBuffers->V();
}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    fullBuffers->P();
    mutex->P();
    Remove c from buffer;
    mutex->V();
    emptyBuffers->V();
}
```

示例1：哲学家就餐问题

- 5个哲学家围绕一张圆桌而坐
  - 桌子上放着5支叉子
  - 每两个哲学家之间放一支叉子
- 哲学家的动作包括思考和进餐
  - 进餐时需同时拿到左右两边的叉子
  - 思考时将两支叉子放回原处



- 如何保证哲学家们的动作有序进行？
- 不出现有人永远拿不到叉子

方案1

- 二值信号量（锁）

```
#define N 5                                  // 哲学家个数
semaphore fork[5];                           // 信号量初值为1
void   philosopher(int   i)                  // 哲学家编号：0 - 4
    while(TRUE)
    {
      think( );                              // 哲学家在思考
      P(fork[i]);                            // 去拿左边的叉子
      P(fork[(i + 1) % N]);                  // 去拿右边的叉子
      eat( );                                // 吃面条中....
      V(fork[i]);                            // 放下左边的叉子
      V(fork[(i + 1) % N ]);                 // 放下右边的叉子
    }
```

不正确，可能导致死锁

方案2

- 一把大锁。。。

```
#define    N    5                          // 哲学家个数
semaphore  fork[5];                        // 信号量初值为1
semaphore    mutex;                        // 互斥信号量，初值1
void    philosopher(int    i)              // 哲学家编号：0 - 4
    while(TRUE){
        think( );                          // 哲学家在思考
        P(mutex);                          // 进入临界区
        P(fork[i]);                        // 去拿左边的叉子
        P(fork[(i + 1)  % N]);             // 去拿右边的叉子
        eat( );                            // 吃面条中....
        V(fork[i]);                        // 放下左边的叉子
        V(fork[(i + 1)  % N]);             // 放下右边的叉子
        V(mutex);                          // 退出临界区
    }
```

互斥访问正确，但每次只允许一人进餐

方案3

- 调整执行顺序

```
#define    N    5                              // 哲学家个数
semaphore fork[5];                             // 信号量初值为1
void    philosopher(int    i)                  // 哲学家编号：0 - 4
    while(TRUE)
    {
        think( );                              // 哲学家在思考
        if (i%2 == 0) {
            P(fork[i]);                        // 去拿左边的叉子
            P(fork[(i + 1) % N]);              // 去拿右边的叉子
        } else {
            P(fork[(i + 1) % N]);              // 去拿右边的叉子
            P(fork[i]);                        // 去拿左边的叉子
        }
        eat( );                                // 吃面条中....
        V(fork[i]);                            // 放下左边的叉子
        V(fork[(i + 1) % N]);                  // 放下右边的叉子
    }
```

没有死锁，可有多人同时就餐

示例2：读者-写者问题

- 共享数据的两类使用者
  - 读者：只读取数据，不修改
  - 写者：修改数据
- 读者-写者问题描述：对共享数据的读写
  - “读 - 读”允许
    - 同一时刻，允许有多个读者同时读
  - “读 - 写”互斥
    - 没有写者时读者才能读
    - 没有读者时写者才能写
  - “写 - 写”互斥
    - 没有其他写者时写者才能写

用信号量解决读者-写者问题

- 用信号量描述每个约束
- 信号量WriteMutex
  - 控制读写操作的互斥
  - 初始化为1
- 读者计数Rcount
  - 正在进行读操作的读者数目
  - 初始化为0
- 信号量CountMutex
  - 控制对读者计数的互斥修改
  - 初始化为1

用信号量解决读者-写者问题

- 写互斥
- 读写互斥

Writer

```
P(WriteMutex);

  write;

V(WriteMutex);
```

此实现中，读者优先

Reader

```
P(CountMutex);
 if (Rcount == 0)
   P(WriteMutex);
 ++Rcount;
V(CountMutex);

read;

P(CountMutex);
 --Rcount;
 if (Rcount == 0)
  V(WriteMutex);
V(CountMutex)
```

内容提要

- 信号量
- 条件变量与管程
- 屏障

条件变量原语操作

- 条件变量是一种用于条件同步的等待和唤醒机制
  - 每个条件变量表示一种等待原因，对应一个等待队列
- Wait()原语操作
  - 将自己阻塞在等待队列中
  - 等待被唤醒
- Signal()原语操作
  - 将等待队列中的一个线程唤醒
  - 如果等待队列为空，则等同空操作
- Broadcast()原语操作
  - 唤醒所有等待的线程

条件变量实现

- 实现示例

```
Class Condition {
    int numWaiting = 0;
    WaitQueue q;
}
```

```
Condition::Wait(lock){
    numWaiting++;
    Add this thread t  to q;
    release(lock);
    schedule();
    acquire(lock);
}
```

```
Condition::Signal(){
    if (numWaiting > 0) {
        Remove a thread t from q;
        wakeup(t);
        numWaiting--;
    }
}
```

用条件变量实现生产者-消费者问题

- 示例

```
Class BoundedBuffer {
    …
    Lock lock;
    int count = 0;
    Condition full, empty;
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {

    Add c to the buffer;
    count++;

}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {

    Remove c from buffer;
    count--;

}
```

用条件变量实现生产者-消费者问题

- 示例

```
classBoundedBuffer {
    …
    Lock lock;
    int count = 0;
    Condition full, empty;
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    lock->Acquire();

    Add c to the buffer;
    count++;

    lock->Release();
}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    lock->Acquire();

    Remove c from buffer;
    count--;

    lock->Release();
}
```

用条件变量实现生产者-消费者问题

```
classBoundedBuffer {
    …
    Lock lock;
    int count = 0;
    Condition full, empty;
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    lock->Acquire();
    while (count == n)
        full.Wait(&lock);
    Add c to the buffer;
    count++;

    lock->Release();
}
```

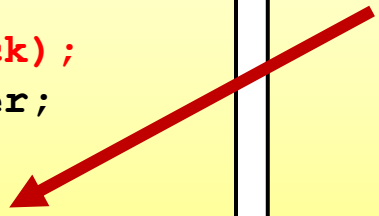
```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    lock->Acquire();


    Remove c from buffer;
    count--;
    full.Signal();
    lock->Release();
}
```

用条件变量实现生产者-消费者问题

```
Class BoundedBuffer {
    …
    Lock lock;
    int count = 0;
    Condition full, empty;
}
```

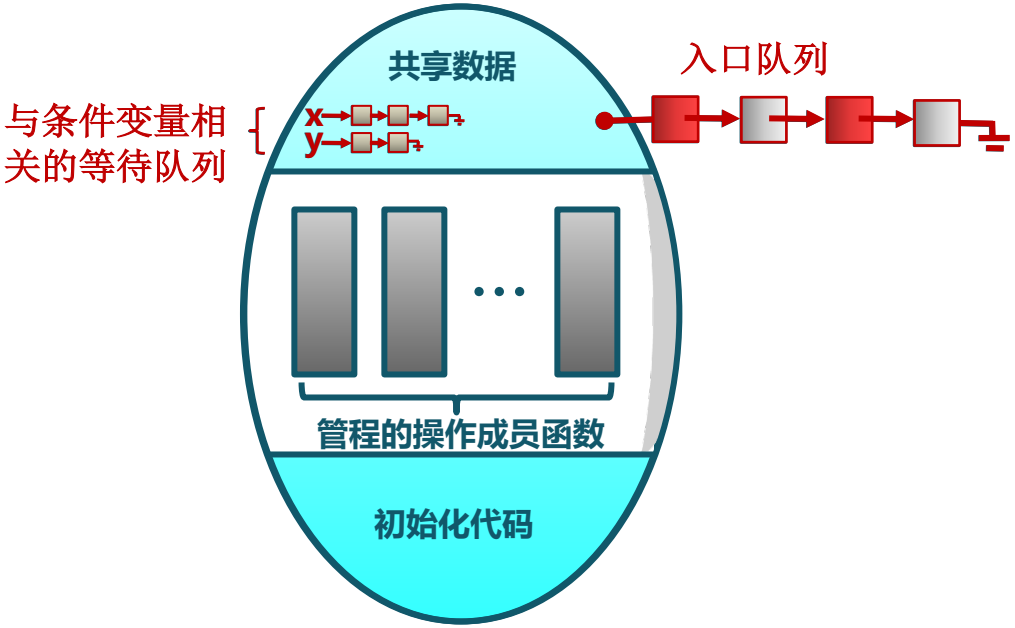
```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    lock->Acquire();
    while (count == n)
        full.Wait(&lock);
    Add c to the buffer;
    count++;
    empty.Signal();
    lock->Release();
}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    lock->Acquire();
    while (count == 0)
      empty.Wait(&lock);
    Remove c from buffer;
    count--;
    full.Signal();
    lock->Release();
}
```



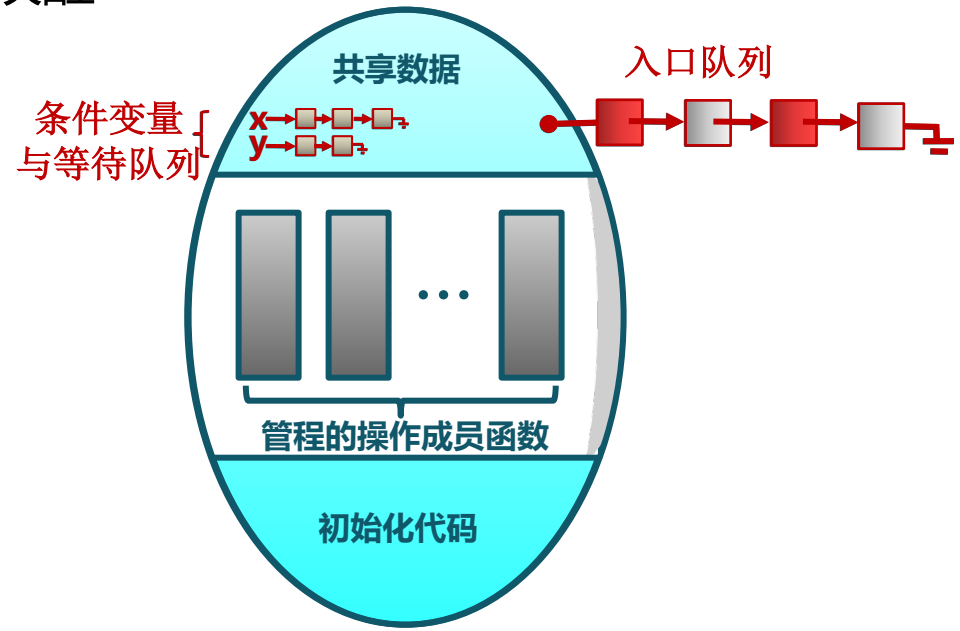
管程(Monitors)

- **管程**是一种用于多线程互斥访问共享资源的程序结构/编程范式
  - 采用面向对象方法，提供了一个封装共享资源及其操作的机制，使得共享资源的访问模块化、易维护
  - 任一时刻最多只有一个线程执行管程代码
  - 正在管程中的线程可临时放弃管程的互斥访问，等待条件满足时恢复



管程组成

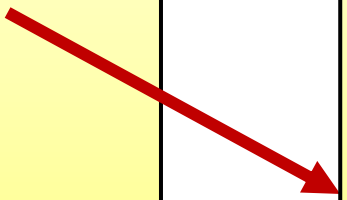
- 组成
  - 一个锁
    - 控制管程代码的互斥访问
  - 条件变量(Condition Variables)
    - 提供原语操作，实现等待和唤醒
    - 实现共享数据的条件同步
  - 等待原因
    - 是否需要等待的条件



管程示例

可能需要等待的线程

```
Acquire(mutex);
while (等待条件满足)
   cond.wait(mutex);
...
(使用资源)
...
Release(mutex);
```

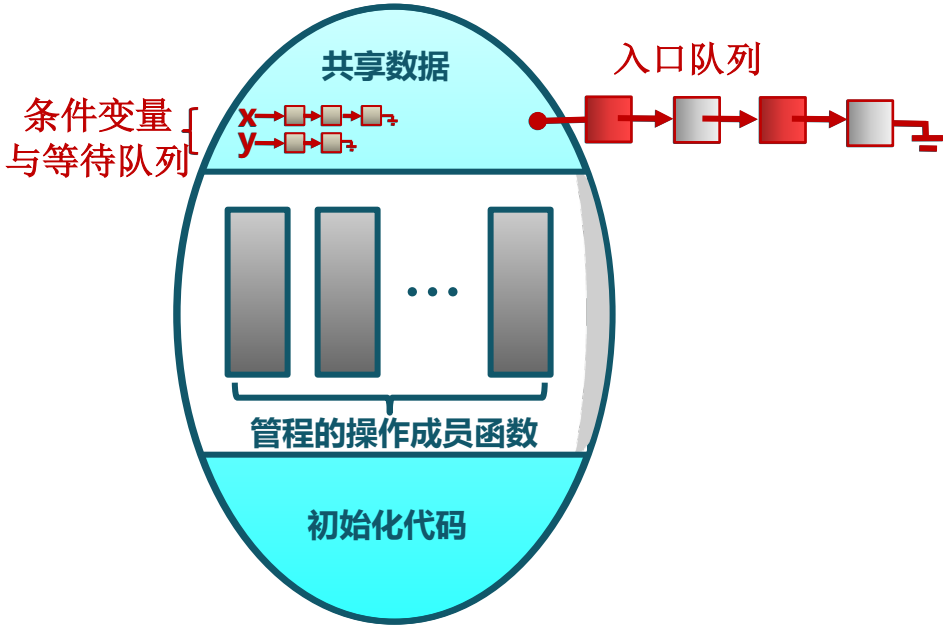


改变等待条件的线程

```
Acquire(mutex);
...
(使资源可用，使等待条件不满足)
...
Signal(cond);
/* 或 Broadcast(cond); */
Release(mutex);
```

管程组成

- 面向对象封装
  - 成员变量
    - 等待原因（例如某个共享变量）
    - 条件变量
  - 成员函数
    - 资源操作代码，供并发调用



管程示例

- 面向对象封装
  - ExampleMonitor.op1()
  - ExampleMonitor.op2()

```
Monitor ExampleMonitor
    condition cv1;
    bool flag;

    procedure op1()
    begin
        acquire(mutex)
        while(flag)
            cv1.wait(mutex)
        use resource
        release(mutex)
    end

    procedure op2()
    begin
        acquire(mutex)
        use resource
        flag = false
        cv1.signal()
        release(mutex)
    end
```

管程类型

- 生产者-消费者问题的另一种实现
  - 问题：signal后被唤醒线程是否立即运行？

```
Class BoundedBuffer {
    …
    Lock lock;
    int count = 0;
    Condition full, empty;
}
```

```
BoundedBuffer::Deposit(c) {
    lock->Acquire();
    if (count == n)
        full.Wait(&lock);
    Add c to the buffer;
    count++;
    empty.Signal();
    lock->Release();
}
```

```
BoundedBuffer::Remove(c) {
    lock->Acquire();
    if (count == 0)
      empty.Wait(&lock);
    Remove c from buffer;
    count--;
    full.Signal();
    lock->Release();
}
```

Signal 之后的三种选择

- 关键：要保证管程代码只有一个线程在执行
- 被唤醒的线程立即执行，发送方挂起(**Hoare管程**)
  - 被唤醒的线程执行完后再唤醒发送方
  - 如果发送方发送signal后，仍然有其他工作要做，会因挂起，而无法立即执行
  - 一般实现时，发送方应在发送signal前把工作做完
- 发送方继续执行 (**Mesa管程**)
  - 被唤醒的线程不一定立即执行
  - 被唤醒的线程实际回到wait()执行时，条件可能不为真，需要重新判断等待原因条件
  - 易于实现
- 发送方退出管程 (**Hansen管程**)
  - 规定Signal 必须是管程中的过程的最后一个语句
  - 例如，signal函数后就执行exit退出

Hoare管程解决生产者-消费者问题

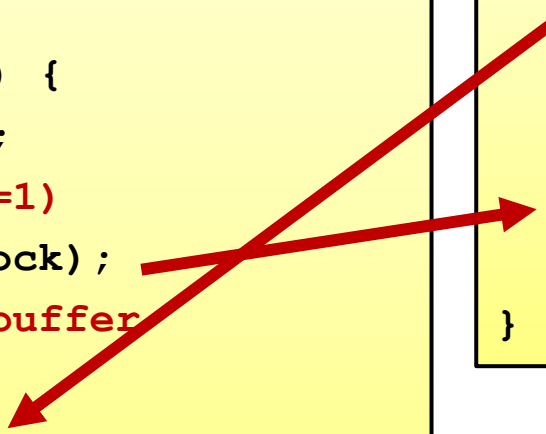
```
static count = 0;
static Cond full, empty;
static Mutex lock;

Enter(Item item) {
  Acquire(lock);
  if (count==1)
    full.wait(lock);
  Add c to the buffer
  count++;
  Signal(empty);
  Release(lock);
}
```

```
Remove(Item item) {
  Acquire(lock);
  if (!count)
    empty.wait(lock);
  Revmoe c from buffer
  count--;
  Signal(full);
  Release(lock);
}
```

Mesa管程解决生产者-消费者问题

```
static count = 0;
static Cond full, empty;
static Mutex lock;

Enter(Item item) {
  Acquire(lock);
  while (count==1)
    full.wait(lock);
  Add c to the buffer
  count++;
  Signal(empty);
  Release(lock);
}
```

```
Remove(Item item) {
  Acquire(lock);
  while (!count)
    empty.wait(lock);
  Revmoe c from buffer
  count--;
  Signal(full);
  Release(lock);
}
```



Java、Python、C++采取Mesa管程要求的编程模式

编程语言对管程的支持

- Java内置管程
  - 参考MESA模型实现，支持一个条件变量
  - 使用synchronized关键字修饰代码块，编译时自动生成加、解锁的代码
  - 提供wait()，notify()，notifyAll()
- pthread库
  - 提供相关原语，用于实现管程
  - pthread_mutex_lock、pthread_cond_wait、pthread_cond_signal、pthread_cond_broadcast

信号量与管程对比

- 信号量
  - 控制对多个共享资源的访问，用于进程/线程间条件同步
  - 可以并发，取决于sem初始值
  - sem表示资源数量
  - P操作可能导致阻塞，也可能不阻塞
  - V操作唤醒其他进程/线程后，当前进程/线程与被唤醒者可以并发执行
- 管程
  - 一种程序结构、共享资源访问的封装方法
  - 管程内部同一时刻只有一个线程执行
  - 自行判断资源可用性（等待原因判断）
  - wait操作一定会阻塞
  - signal操作后，被唤醒线程是否立即执行取决于管程类型

用管程解决读者-写者问题

- 管程封装
  - **两个基本方法**

```
Database::Read() {
        Wait until no writers;
        read database;
        check out - wake up waiting writers;
}
```

```
Database::Write() {
        Wait until no readers/writers;
        write database;
        check out - wake up waiting readers/writers;
}
```

  - **管程的状态变量**

```
AR = 0;                 // # of active readers
AW = 0;                 // # of active writers
WR = 0;                 // # of waiting readers
WW = 0;                 // # of waiting writers
Lock lock;
Condition okToRead;
Condition okToWrite;
```

读者实现

- 对写友好

```
AR = 0;    // # of active readers
AW = 0;    // # of active writers
WR = 0;    // # of waiting readers
WW = 0;    // # of waiting writers
Lock lock;
Condition okToRead;
Condition okToWrite;
```

```
Public Database::Read() {
  //Wait until no writers;
  StartRead();
  read database;
  //check out - wake up waiting writers;
  DoneRead();
}
```

```
Private Database::StartRead() {
    lock.Acquire();
    while ((AW+WW) > 0) {
        WR++;
        okToRead.wait(&lock);
        WR--;
    }
    AR++;
    lock.Release();
}
```

```
Private Database::DoneRead() {
    lock.Acquire();
    AR--;
    if (AR ==0 && WW > 0) {
        okToWrite.signal();
    }
    lock.Release();
}
```

写者

```
AR = 0;    // # of active readers
AW = 0;    // # of active writers
WR = 0;    // # of waiting readers
WW = 0;    // # of waiting writers
Lock lock;
Condition okToRead;
Condition okToWrite;
```

```
Public Database::Write() {
  //Wait until no readers/writers;
  StartWrite();
  write database;
  //check out-wake up waiting readers/writers;
  DoneWrite();
}
```

```
Private Database::StartWrite() {
    lock.Acquire();
    while ((AW+AR) > 0)  {
        WW++;
        okToWrite.wait(&lock);
        WW--;
    }
    AW++;
    lock.Release();
}
```

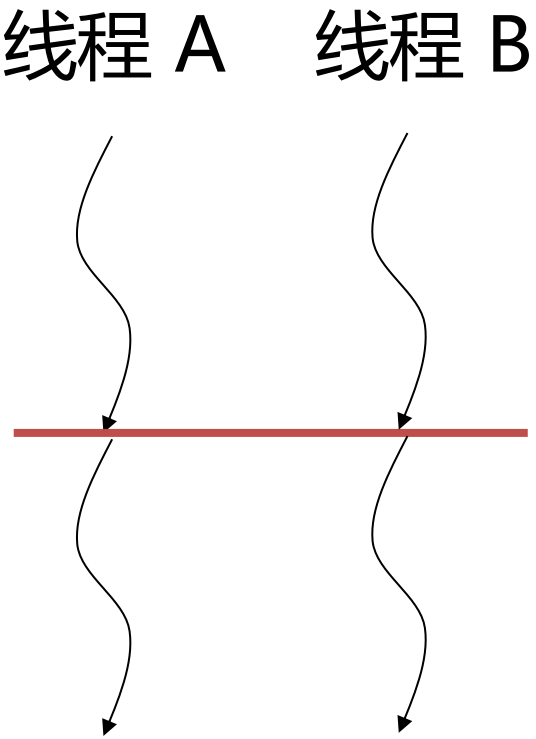
```
Private Database::DoneWrite() {
    lock.Acquire();
    AW--;
    if (WW > 0) {
        okToWrite.signal();
    }
    else if (WR > 0) {
        okToRead.broadcast();
    }
    lock.Release();
}
```

内容提要

- 信号量
- 条件变量与管程
- 屏障

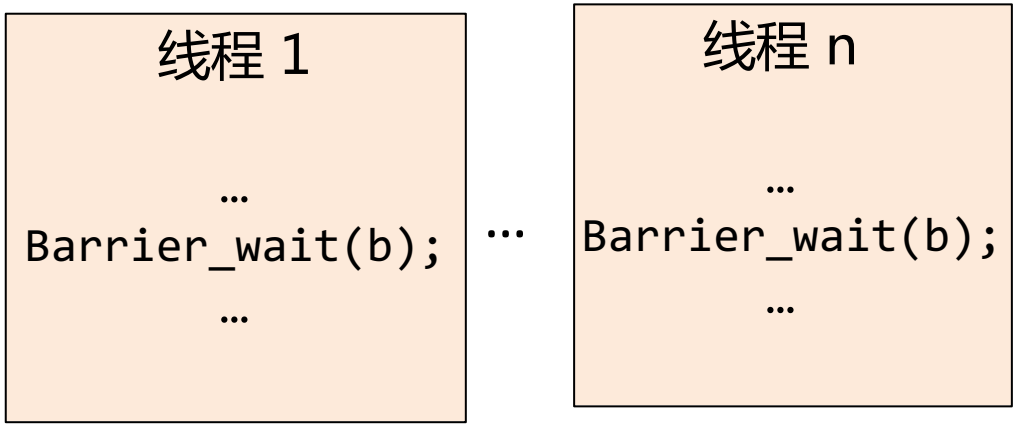
屏障 (Barrier)

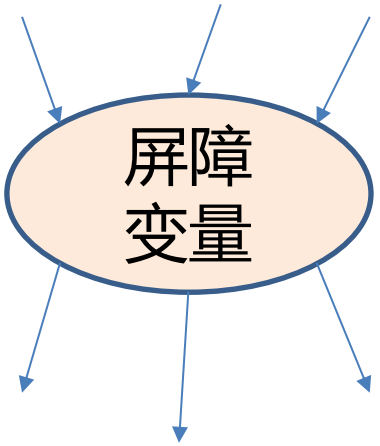
- 线程 A 和线程 B 希望在某个特定的点交会并继续执行
  - 示例1
    - 父线程调用pthread_join等待
    - 直到子线程调用pthread_exit退出
  - 示例2
    - 多线程map-reduce操作



屏障原语（Barrier）

- 功能
  - 协调多个线程并行共同完成某项任务
  - 设定一个屏障变量b及其初始值n
  - 若屏障变量值小于n，则线程等待
  - 若屏障变量的值达到 n，则唤醒所有线程，所有线程继续工作
- 操作原语
  - barrier_wait



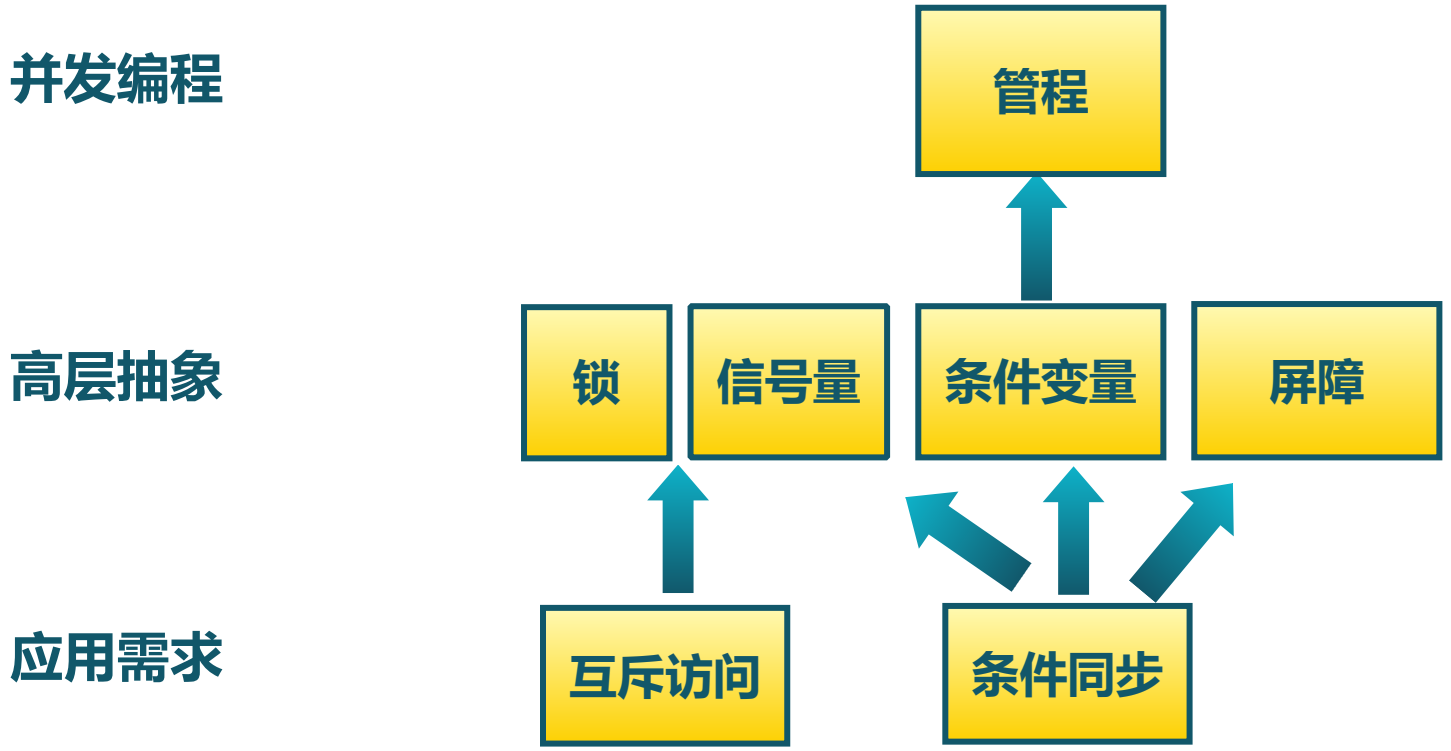


屏障实现

- 使用管程实现
  - 等待原因：抵达屏障的线程数量没有达到n
- 可以使用信号量来实现么？

同步机制

- 同步机制总结



总结

- 锁方案的不足
- 线程间的条件同步
  - 信号量
    - 使用信号量表明可用资源和等待线程数量
    - 提供P/V操作
  - 条件变量与管程
    - 条件变量：一种用于条件同步的等待和唤醒机制
    - 管程：一种编程范式，使用条件变量实现对资源并发访问的封装，包括Mesa、Hoare、Hansen三种类型
  - 屏障
    - 协调多线程在屏障点进行同步