



北京航空航天大学

Beijing University of Aeronautics and Astronautics

进程同步-3

内容提要

- 同步与互斥问题
- 基于忙等待的互斥方法
- 基于信号量的方法
- 基于管程的同步与互斥
- 进程通信的主要方法
- 经典的进程同步与互斥问题

经典进程同步问题

- 生产者—消费者问题(the producer-consumer problem)
- 读者—写者问题(the readers-writers problem)
- 哲学家进餐问题(the dining philosophers problem)

OS和应用开发中，常常遇到类似的问题

生产者消费者问题

- 典型的类似应用场景-事件驱动的程序
- 事件-需要用户响应的事情
 - 用户的按键、磁盘数据返回
 - 网络数据到达、异步的操作完成
- 当事件发生时：
 - 生产者线程创建一个事件对象，放入事件缓冲区
 - 消费者线程（event handlers）从缓冲区取出事件，进行响应处理

生产者消费者问题

生产者

P(mutex);

P(empty);

one >> buffer

V(full)

V(mutex)

消费者

P(mutex);

P(full);

one << buffer

V(empty)

V(mutex)

典型的可能导致死锁的同步错误：
在获取到一个mutex的情况下，等待信号量。

读者—写者问题(the readers-writers problem)

- 问题描述：对共享资源的读写操作，任一时刻“写者”最多只允许一个，而“读者”则允许多个——“读—写”互斥，“写—写”互斥，“读—读”允许
- 实际应用场景，对共享数据结构、数据库、文件的多线程并发访问。

读者-写者问题分析

- 生活中的实例：火车/飞机定票
 - 读者：？
 - 写者：？
- 多个线程/进程共享内存中的对象
 - 有些进程读，有些进程写
 - 同一时刻，只有一个激活的写进程
 - 同一时刻，可以有多个激活的读进程
- 分类互斥问题：
 - 当写线程在临界区中，其他任何线程不能进入
 - 当读线程在临界区中，写线程不能进入，读线程可以

采用信号量机制-信号量定义

读线程在临界区中，写线程不能进入，读线程可以
- 要记录读线程的数目，只有第一个读者要申请锁

`int readers = 0` //记录临界区内读者的数目

`mutex = Semaphore(1)` //保护对readers的访问

`roomEmpty = Semaphore(1)`

roomEmpty: 1 表示临界区没有任何线程（读或写），0表示有线程在临界区

wait: 等待条件为真； **signal**: 通知条件为真了。

采用信号量机制-PV操作的版本

`int readers = 0`

`Semaphore mutex = 1`

`Semaphore roomEmpty = 1`

Writer

```
P(roomEmpty);  
    write  
//critical region  
V(roomEmpty);
```

Reader

保证有写者，读者不能进入
没有写者，开始加锁

```
P(mutex);  
    readers=readers+1;  
    if readers == 1 : //第一个读者  
        P(roomEmpty)  
V(mutex);  
  
read //critical region  
  
P(mutex);  
    readers = readers-1;  
    if readers == 0:  
        V(roomEmpty);  
V(mutex);
```

最后一个读者，解锁，
让写者能够进入。

Writer

```
roomEmpty.wait();  
    write  
    //critical region  
roomEmpty.signal();
```

Reader

保证有写者，读者不能进入
没有写者，开始加锁

```
mutex.wait();  
    readers=readers+1;  
    if readers == 1 : //第一个读者  
        roomEmpty.wait()  
mutex.signal();  
  
read //critical region  
  
mutex.wait();  
    readers = readers-1;  
    if readers == 0:  
        roomEmpty.signal();  
mutex.signal();
```

Writer

```
roomEmpty.wait();  
    write  
    //critical region  
roomEmpty.signal();
```

Reader

```
mutex.wait();  
    readers=readers+1;  
    if readers == 1 : //第一个读者  
        roomEmpty.wait()  
mutex.signal();  
  
read //critical region  
  
mutex.wait();  
    readers = readers-1;  
    if readers == 0:  
        roomEmpty.signal();  
mutex.signal();
```

最后一个读者，解锁，
让写者能够进入。

读者-写者- 灯开关模式

- 读者（分类互斥）算法的模式：
 - 第一个读线程加锁，最后一个读线程解锁。
- 通常也称为灯开关模式(Lightswitch)
 - 第一个进屋的人开灯（对mutex加锁）
 - 最后一个离开屋的人关灯（对mutex解锁）

读者-写者- 灯开关模式

```
class Lightswitch:
```

```
    def __init__(self):
```

```
        self.counter = 0
```

```
        self.mutex = Semaphore(1)
```

```
    def lock(self, semaphore):
```

```
        self.mutex.wait()
```

```
        self.counter += 1
```

```
        if self.counter == 1:
```

```
            semaphore.wait()
```

```
        self.mutex.signal()
```

```
    def unlock(self, semaphore):
```

```
        self.mutex.wait()
```

```
        self.counter -= 1
```

```
        if self.counter == 0:
```

```
            semaphore.signal()
```

```
        self.mutex.signal()
```

第一个进入者对
semaphore加锁

最后一个离开者对
semaphore解锁

读者-写者- 使用lightswitch

信号量初始化

```
readLightswitch = Lightswitch()  
roomEmpty = Semaphore(1)
```

Reader

```
readLightswitch.lock(roomEmpty)  
    read # critical section  
readLightswitch.unlock(roomEmpty)
```

Writer 代码不变

```
roomEmpty.wait();  
    write //critical region  
roomEmpty.signal();
```

一般“信号量集”机制

- 一般“信号量集”是指同时需要多种资源、每种占用的数目不同、且可分配的资源还存在一个临界值时的信号量处理。
- 一次需要N个某类临界资源时，就要进行N次wait操作——低效且容易死锁
- 基本思想：在AND型信号量集的基础上进行扩充：进程对信号量 S_i 的测试值为 t_i （用于信号量的判断，即 $S_i \geq t_i$ ，表示资源数量低于 t_i 时，便不予分配），资源的申请量为 d_i （用于信号量的增减，即 $S_i = S_i - d_i$ 和 $S_i = S_i + d_i$ ）

SP(S1, t1, d1, ... , Sn, tn, dn)

if $S1 \geq t1$ and ... and $Sn \geq tn$ then

for $l := 1$ to n do

$Si := Si - di;$

endfor

else

wait in Si ;

endif

SV(S1, d1, ... ,Sn, dn)

for $l := 1$ to n do

$Si := Si + di;$

wake waited process

endfor

- 原语：
- $SP(S1, t1, d1; \dots; Sn, tn, dn);$
- $SV(S1, d1; \dots; Sn, dn);$

特殊情况：

- $SP(S, d, d)$
 - 表示每次申请 d 个资源，当资源数量少于 d 个时，便不予分配
- $SP(S, 1, 1)$
 - 表示互斥信号量
- $SP(S, 1, 0)$
 - 可作为一个可控开关(当 $S \geq 1$ 时，允许多个进程进入临界区；当 $S=0$ 时禁止任何进程进入临界区)

采用一般“信号量集”机制

- 增加一个限制条件：同时读的“读者”最多RN个
- mx表示“允许写”，初值是1
- L表示“允许读者数目”，初值为RN

Writer

```
SP(mx, 1, 1; L, RN, 0);  
write  
SV(mx, 1);
```

Reader

```
SP(mx, 1, 0 ; L, 1, 1);  
read  
SV(L, 1);
```

$L \geq RN$ 允许写

SP(S, 1, 0):可作为一个可控开关：(当 $S \geq 1$ 时，允许多个进程进入临界区；当 $S=0$ 时禁止任何进程进入临界区)

“读者-写者”算法的问题

Reader

```
P(mutex);  
    readers=readers+1;  
    if readers == 1 : //第一个读者  
        P(roomEmpty)
```

```
V(mutex);
```

```
read //critical region
```

```
P(mutex);  
    readers = readers-1;  
    if readers == 0:  
        V(roomEmpty);
```

```
V(mutex);
```

Writer

```
P(roomEmpty);  
    write
```

```
//critical region
```

```
V(roomEmpty);
```

该算法是对读者有利，还是对写者有利？

“读者-写者”算法的问题

Reader

P(mutex);

readers=readers+1;

if readers == 1 : //第一个读者

Writer

P(

//c

V(

写者可能被饿死 (Starvation) !
当系统负载很低, 可以工作,
当系统负载很高, 写者会几乎没机会。

P(mutex);

readers = readers-1;

if readers == 0:

V(roomEmpty);

V(mutex);

该算法是对读者有利, 还是对写者有利?

读者写者算法的特性

- 给定读写序列： $r_1, w_1, w_2, r_2, r_3, w_3 \dots$
 - 读者优先： $r_1, r_2, r_3, w_1, w_2, w_3 \dots$
 - 写者优先： $r_1, w_1, w_2, w_3, r_2, r_3 \dots$
 - 读写公平： $r_1, w_1, w_2, r_2, r_3, w_3 \dots$
- 如何设计写者优先？
- 如何设计公平读写？

“读者-写者”公平读写算法

信号量初始化

readLightswitch = Lightswitch()

roomEmpty = Semaphore(1)

Reader

readLightswitch.lock(roomEmpty)

read # critical section

readLightswitch.unlock(roomEmpty)

Writer 代码不变

问题：如何扩展当前算法，当一个写者到达，已进入的读者可以结束，但是新的读者无法进入？

一种低级通信原语：屏障Barriers

■ 思考：如何使用PV操作实现Barrier?

- `n = the number of threads`
- `count = 0` //到达汇合点的线程数
- `mutex = Semaphore(1)` //保护count
- `barrier = Semaphore(0)` //线程到达之前都是0或者负值。到达后取正值
- ...
- `if count == n: barrier.signal()` # 唤醒一个线程
- **`barrier.wait()`**
- **`barrier.signal()`** # 一旦线程被唤醒，有责任唤醒下一个线程

Turnstile-闸机

- `barrier = Semaphore(0)`
- `barrier.wait()`
- `barrier.signal()`



- Turnstile: 连续的wait和signal组成
- 它可以关闭以阻止所有线程，也可以让线程轮流通过
 - 初值为0，闸机关闭，任何线程不能进入
 - 当值为1，多个线程可以轮流通过

```
int readers = 0
Semaphore mutex = 1
Semaphore roomEmpty = 1
Semaphore turnstile = 1
```

Writer

```
P(turnstile);
    P(roomEmpty);
    write //critical region
V(turnstile);
V(roomEmpty);
```

Reader

```
P(turnstile)
V(turnstile)
P(mutex);
```

```
    readers=readers+1;
```

```
    if readers == 1 : //第一个读者
```

```
        P(roomEmpty)
```

```
V(mutex);
```

```
    read //critical region
```

```
P(mutex);
```

```
    readers = readers-1;
```

```
    if readers == 0:
```

```
        V(roomEmpty);
```

```
V(mutex);
```

读者需要在闸机排队

```
int readers = 0
Semaphore mutex = 1
Semaphore roomEmpty = 1
Semaphore turnstile = 1
```

Writer

```
P(turnstile);
    P(roomEmpty);
    write //critical region
V(turnstile);
V(roomEmpty);
```

写者也在闸机排队，
在通过闸机后，
必须等待roomEmpty，
才会离开闸机，
后续reader才能进入

Reader

```
P(turnstile)
V(turnstile)
P(mutex);
```

读者需要在闸机排队

```
    readers=readers+1;
    if readers == 1 : //第一个读者
        P(roomEmpty)
V(mutex);

    read //critical region

P(mutex);
    readers = readers-1;
    if readers == 0:
        V(roomEmpty);
V(mutex);
```

非饥饿版本的读者写者算法-公平读写

```
readSwitch = Lightswitch()
```

```
roomEmpty = Semaphore(1)
```

```
turnstile = Semaphore(1)//对写者互斥锁，对读者闸机
```

Writer

```
turnstile.wait()
```

```
roomEmpty.wait()
```

```
    # critical section for writers
```

```
turnstile.signal()
```

```
roomEmpty.signal()
```

Reader

```
turnstile.wait()
```

```
turnstile.signal()
```

```
readSwitch.lock(roomEmpty)
```

```
    # critical section for readers
```

```
readSwitch.unlock(roomEmpty)
```

非饥饿版本的读者写者算法-公平读写

```
readSwitch = Lightswitch()  
roomEmpty = Semaphore(1)  
turnstile = Semaphore(1)
```

Writer

```
turnstile.wait()  
    roomEmpty.wait()  
    # critical section for writers  
turnstile.signal()
```

调度器会决定闸机外排队的那个进程先被调度

Reader

```
turnstile.wait()  
turnstile.signal()  
readSwitch.lock(roomEmpty)  
    # critical section for readers  
readSwitch.unlock(roomEmpty)
```

理发师问题

- Dijkstra首先提出
- 理发店里有一位理发师、一把理发椅和 n 把供等候理发的顾客坐的椅子；
- 如果没有顾客，理发师便在理发椅上睡觉，当一个顾客到来时，叫醒理发师；
- 如果理发师正在理发时，又有顾客来到，则如果有空椅子可坐，就坐下来等待，否则就离开。

互斥访问资源：排队的顾客数（计数器 `waiting`）

同步：顾客唤醒理发师、理发师唤醒下一个位等待顾客

理发师问题

```
semaphore customers = 0; //等待理发的顾客  
semaphore barbers = 0; //等待顾客的理发师  
int waiting = 0; //等待的顾客数 (不包含正在理发的顾客)  
semaphore mutex = 1; //互斥访问waiting
```

算法描述

信号量: customers=0;barbers=0;mutex=1

整型变量: waiting=0;

假设: CHIRS=10

理发师进程:

```
begin
  While(true)then
    begin
      P(customers);
      P(mutex);
      waiting=waiting-1;
      V(mutex);
      V(barbers);
      Cut hair();
    end
  end
end
```

服务下一个排队顾客
若顾客为0, 睡觉

准备好剪发

顾客进程:

```
begin
  P(mutex);
  If (waiting<CHIRS)
    then
      begin
        waiting=waiting+1;
        V(mutex);
        V(customers);
        P(barbers);
        Get_haircut();
      end
    else
      begin
        V(mutex);
      end
    end
end
```

有座位等么?

开始排队

等待理发师

没座位离开

理发师问题

```
#define CHAIRS 5 //chairs for waiting customers
typedef int semaphore;
semaphore customers = 0; //# of customers waiting service
semaphore barbers = 0; //# of barbers waiting customers
semaphore mutex = 1; //for mutual exclusion of waiting
int waiting = 0; //customer are waiting (not being cut)
```

理发师问题

```
void barber(void) {  
    while (TRUE) {  
        down(&customers); /* go to sleep if # of customers is 0 */  
        down(&mutex); /* acquire access to 'waiting' */  
        waiting = waiting - 1; /* decrement count of waiting customers */  
        up(&mutex); /* release 'waiting' */  
        up(&barbers); /* one barber is now ready to cut hair */  
        cut_hair(); /* cut hair (outside critical region) */  
    }  
}
```

理发师问题

```
void customer(void) {
    down(&mutex); /* enter critical region */
    if (waiting < CHAIRS) {
        /* if there are no free chairs, leave */
        waiting = waiting + 1; /* increment count of waiting customers */
        up(&mutex); /* release access to 'waiting' */
        up(&customers); /* wake up barber if necessary */
        down(&barbers); /* go to sleep if # of free barbers is 0 */
        get_haircut(); /* be seated and be served */ }
    else {
        up(&mutex); /* shop is full; do not wait */
    }
}
```

“生产者-消费者”扩展问题

- 某银行有 n 个服务柜台。每个顾客进店后先取一个号，并且等待叫号。当一个柜台人员空闲下来时，就叫下一个号。试设计一个使柜台人员和顾客同步的算法。
- 谁是生产者？
- 谁是消费者？

“生产者-消费者”扩展问题

- 某银行有 n 个服务柜台。每个顾客进店后先取一个号，并且等待叫号。当一个柜台人员空闲下来时，就叫下一个号。试设计一个使柜台人员和顾客同步的算法。
- 谁是生产者？
- 谁是消费者？

算法描述-基于信号量同步

int cstmr_cnt = 0; //下一个要服务的客户

Semaphore s_mutex=1; //服务器进程互斥访问**cstmr_cnt**

Semaphore next_cstmr = 0; //客户服务器进程同步

process customer i
Begin

v(next_cstmr);

}

end

process servers i(i=1,...,n)
begin

while(true){

p(s_mutex);

p(next_cstmr);

cstmr_cnt ++;

v(s_mutex);

为持有next_cstmr的客户服务;

}

end

另外一种算法描述-基于忙等同步

```
int cstmr_id = 0; //当前客户编号
semaphore mutex=1; //对cstmr_id互斥访问
int next_cstmr = 0; //下一个要服务客户编号
semaphore s_mutex=1; //服务器进程互斥访问next_cstmr
```

```
process customer i
Begin
    p(mutex);
    cstmr_id ++;
    v(mutex);
}
end

process servers i(i=1,...,n)
begin
    while(true){
        p(s_mutex);
        p(mutex);
        if(next_cstmr < cstmr_id)
            next_cstmr ++;
        v(mutex)
        v(s_mutex);
        为next_cstmr号码持有者服务;
    }
end
```

构建水分子(H₂O)问题

- Berkeley OS 课程习题.
- Gregory R. Andrews. Concurrent Programming: Principles and Practice. Addison-Wesley, 1991.
- 存在两种线程，一个线程提供氧原子O，一个线程提供氢原子H。为了构建水分子，我们需要使用barrier让线程同步从而构建水分子(H₂O)。
- 当线程通过barrier，需要调用bond（形成化学键），需要保证构建同一个分子的线程调用bond。
 - 当氧原子线程到达barrier，而氢原子线程还没到达，需要等待氢原子。
 - 当1个氢原子到达而没有其他线程到达，需要等待1个氢原子1个氧原子
- 只需要保证成组通过barrier

构建水分子(H₂O)问题

- Berkeley OS 课程习题.

如何构建同步原语?

- 存在两种线程，一个线程提供氧原子O，一个线程提供氢原子H。为了构建水分子，我们需要使用barrier让线程同步从而构建水分子(H₂O)。
- 当线程通过barrier，需要调用bond（形成化学键），需要保证构建同一个分子的线程调用bond。
 - 当氧原子线程到达barrier，而氢原子线程还没到达，需要等待氢原子。
 - 当1个氢原子到达而没有其他线程到达，需要等待1个氢原子1个氧原子
- 只需要保证成组通过barrier，不需要

构建水分子(H₂O)问题

■ 信号量定义

oxygen = 0 //氧原子的计数器

hydrogen = 0 //氢原子的计数器

Semaphore mutex = 1 //保护计数器的mutex

Barrier barrier(3) //3表示需要调用3次wait后barrier才开放

//3个线程调用bond后的同步点，之后允许下一个线程继续

Semaphore oxyQueue = 0 //氧气线程等待的信号量

Semaphore hydroQueue = 0 //氢气线程等待的信号量

//用在信号量上睡眠来模拟队列

P(oxyQueue) 表示加入队列

V(oxyQueue) 表示离开队列

构建水分子(H₂O)问题

■ 氧气线程

P(mutex)

oxygen += 1

if hydrogen >= 2:

 V(hydroQueue)

 V(hydroQueue)

 hydrogen -= 2

 V(oxyQueue)

 oxygen -= 1

else:

 V(mutex)

P(oxyQueue) //入队等待

bond()

barrier.wait()

V(mutex)

构建H₂O成功

■ 氢气线程

P(mutex)

hydrogen += 1

if hydrogen >= 2 and oxygen >= 1:

 V(hydroQueue)

 V(hydroQueue)

 hydrogen -= 2

 V(oxyQueue)

 oxygen -= 1

else:

 V(mutex)

P(hydroQueue) //入队等待

bond()

barrier.wait()

构建H₂O成功

不成功释放mutex

同步以生成水分子

构建水分子(H₂O)问题

■ 氧气线程

P(mutex)

oxygen += 1

if hydrogen >= 2:

 V(hydroQueue)

 V(hydroQueue)

 hydrogen -= 2

 V(oxyQueue)

 oxygen -= 1

else:

 V(mutex)

P(oxyQueue)

bond()

barrier.wait()

V(mutex)

■ 氢气线程

P(mutex)

hydrogen += 1

if hydrogen >= 2 and oxygen >= 1:

 V(hydroQueue)

 V(hydroQueue)

 hydrogen -= 2

 V(oxyQueue)

 oxygen -= 1

else:

 V(mutex)

P(hydroQueue)

bond()

barrier.wait()

构建H₂O成功，最后一个原子对应mutex没释放，需要释放

当三个线程离开barrier时候，最后那个线程拿着mutex还没释放，虽然我们不知道那个线程hold mutex，但是我们一定要释放一次。
因为氧气只有一个线程，就放在氧气线程中做了。

```
P(mutex)
oxygen += 1
if hydrogen >= 2:
    V(hydroQueue)
    V(hydroQueue)
    hydrogen -= 2
    V(oxyQueue)
    oxygen -= 1
else:
    V(mutex)
P(oxyQueue)
bond()
barrier.wait()
V(mutex)
```

```
P(mutex)
hydrogen += 1
if hydrogen >= 2 and oxygen >= 1:
    V(hydroQueue)
    V(hydroQueue)
    hydrogen -= 2
    V(oxyQueue)
    oxygen -= 1
else:
    V(mutex)
P(hydroQueue)
bond()
barrier.wait()
```

2025第13次课堂小测试

