

多线程并行程序设计

汤善江 副教授

天津大学智能与计算学部

tashj@tju.edu.cn

<http://cic.tju.edu.cn/faculty/tangshanjiang/>

Outline

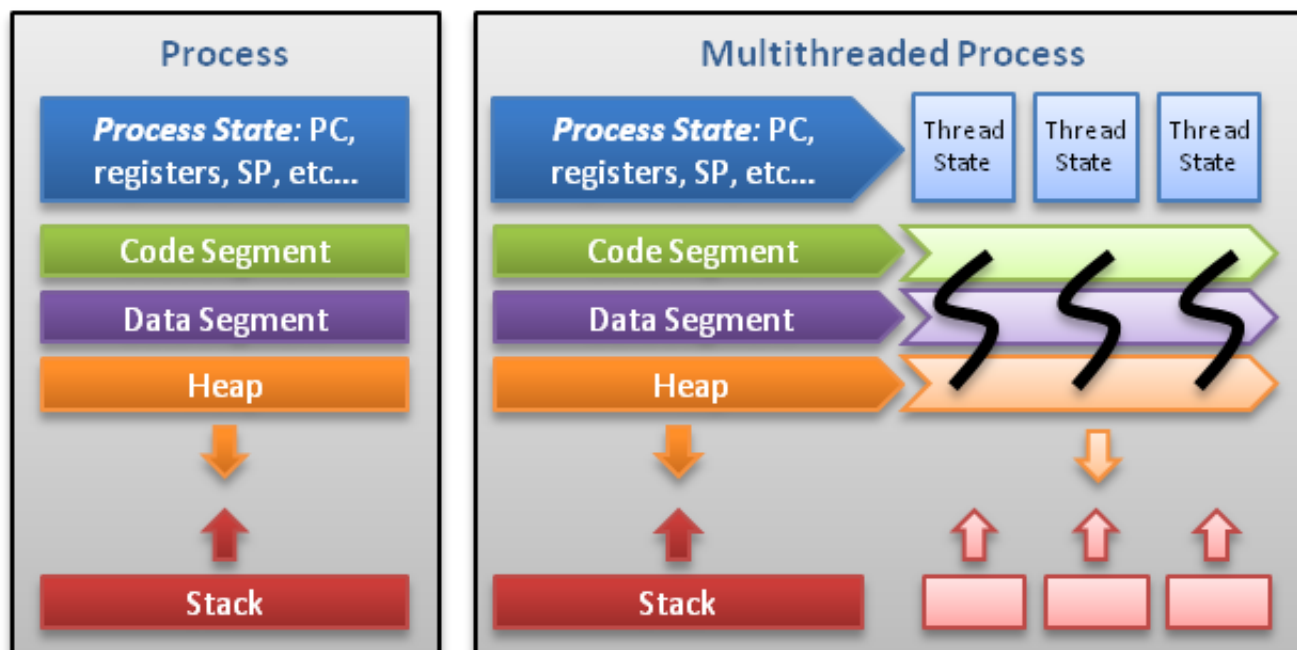
- 多线程基本概念
- 多线程计算实例分析
 - 竞态条件
 - 伪共享（缓存一致性问题）
- PThread 多线程
- Java 多线程

Outline

- 多线程基本概念
- 多线程计算实例分析
 - 竞态条件
 - 伪共享（缓存一致性问题）
- PThread 多线程
- Java 多线程

多线程概念

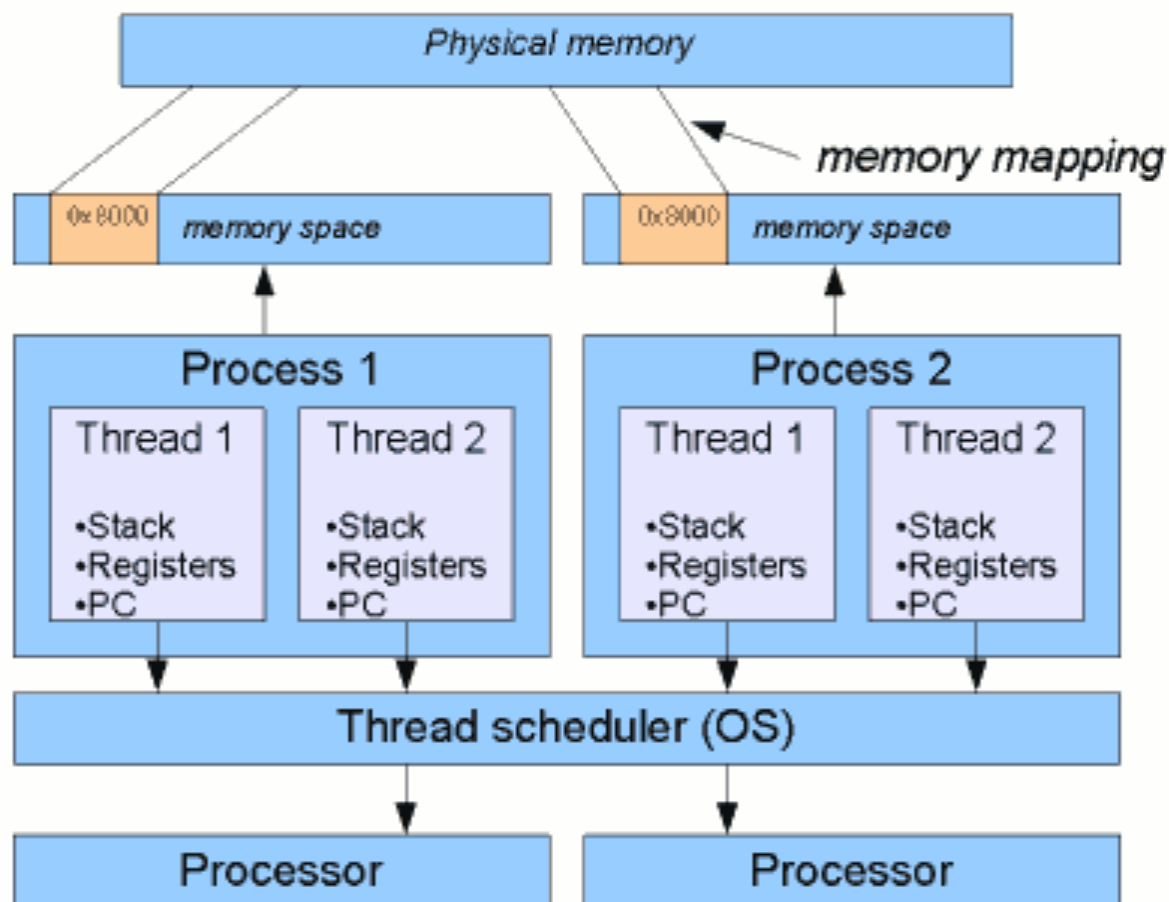
- 线程 (thread) 是进程上下文 (context) 中执行的代码序列，又被称为轻量级进程 (light weight process)
- 在支持多线程的系统中，进程是资源分配的实体，而线程是被调度执行的基本单元。



Threads contain only necessary information, such as a stack (for local variables, function arguments, return values), a copy of the registers, program counter and any thread-specific data to allow them to be scheduled individually. Other data is shared within the process between all threads.

线程与进程的区别

- 调度
- 并发性
- 拥有资源
- 系统开销



调度

- 在传统的操作系统中，CPU调度和分派的基本单位是进程。
- 在引入线程的操作系统中，则把线程作为CPU调度和分派的基本单位，进程则作为资源拥有的基本单位，从而使传统进程的两个属性分开，线程便能轻装运行，这样可以显著地提高系统的并发性。
- 同一进程中线程的切换不会引起进程切换，从而避免了昂贵的系统调用。
 - 但是在由一个进程中的线程切换到另一进程中的线程时，依然会引起进程切换。

并行性

- 在引入线程的操作系统中，不仅进程之间可以并发执行，而且在一个进程中的多个线程之间也可以并发执行，因而使操作系统具有更好的并行性，从而能更有效地使用系统资源和提高系统的吞吐量。
 - 例如，在一个未引入线程的单CPU操作系统中，若仅设置一个文件服务进程，当它由于某种原因被封锁时，便没有其他的文件服务进程来提供服务。
- 在引入了线程的操作系统中，可以在一个文件服务进程中设置多个服务线程。
 - 当第一个线程等待时，文件服务进程中的第二个线程可以继续运行；当第二个线程封锁时，第三个线程可以继续执行，从而显著地提高了文件服务的质量以及系统的吞吐量。

拥有资源

- 进程

- 不论是引入了线程的操作系统，还是传统的操作系统，进程都是拥有系统资源的一个独立单位，它可以拥有自己的资源。

- 线程

- 线程自己不拥有系统资源（除部分必不可少的资源，如栈和寄存器），但它可以访问其隶属进程的资源。亦即一个进程的代码段、数据段以及系统资源（如已打开的文件、I/O设备等），可供同一进程的其他所有线程共享。

系统开销

- 进程
 - 创建或撤消进程时，系统都要为之分配或回收资源，如内存空间、I/O 设备等。
 - 在进行进程切换时，涉及到整个当前进程CPU 环境的保存环境的设置以及新被调度运行的进程的CPU 环境的设置。
- 线程
 - 切换只需保存和设置少量寄存器的内容，并不涉及存储器管理方面的操作。
 - 此外，由于同一进程中的多个线程具有相同的地址空间，致使它们之间的同步和通信的实现也变得比较容易。在有的系统中，线程的切换、同步和通信都无需操作系统内核的干预。

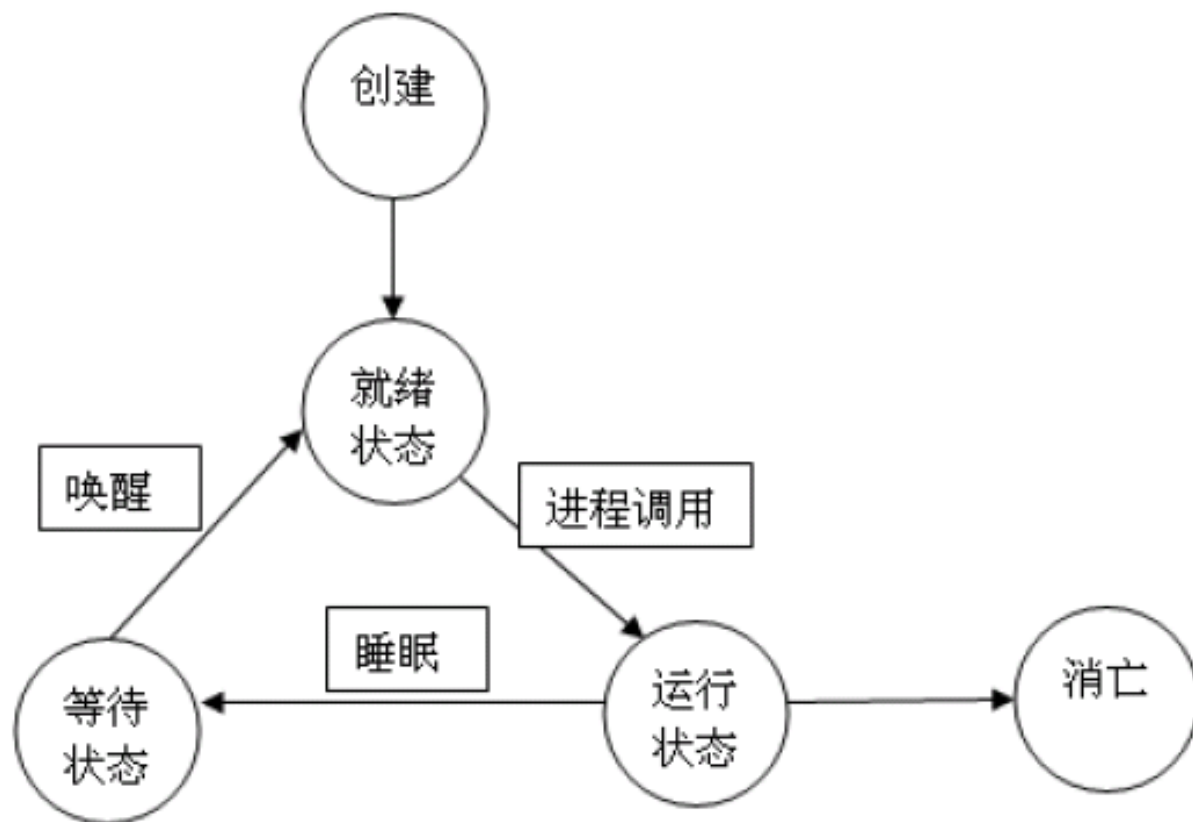
创建进程与线程的开销对比

平台	fork()			pthread_create()		
	real	user	sys	real	user	sys
AMD 2.4 GHz Opteron (8cpus/node)	41.07	60.08	9.01	0.66	0.19	0.43
IBM 1.9 GHz POWER5 p5-575 (8cpus/node)	64.24	30.78	27.68	1.75	0.69	1.10
IBM 1.5 GHz POWER4 (8cpus/node)	104.05	48.64	47.21	2.01	1.00	1.52
INTEL 2.4 GHz Xeon (2 cpus/node)	54.95	1.54	20.78	1.64	0.67	0.90
INTEL 1.4 GHz Itanium2 (4 cpus/node)	54.54	1.07	22.22	2.03	1.26	0.67

线程层次

- **用户级线程**在用户层通过线程库来实现。对它的创建、撤销和切换都不利用系统的调用。
- **核心级线程**由操作系统直接支持，即无论是在用户进程中的线程，还是系统进程中的线程，它们的创建、撤销和切换都由核心实现。
- **硬件线程**就是线程在硬件执行资源上的表现形式。
- 单个线程一般都包括上述三个层次的表现：用户级线程通过操作系统被作为核心级线程实现，再通过硬件相应的接口作为硬件线程来执行。

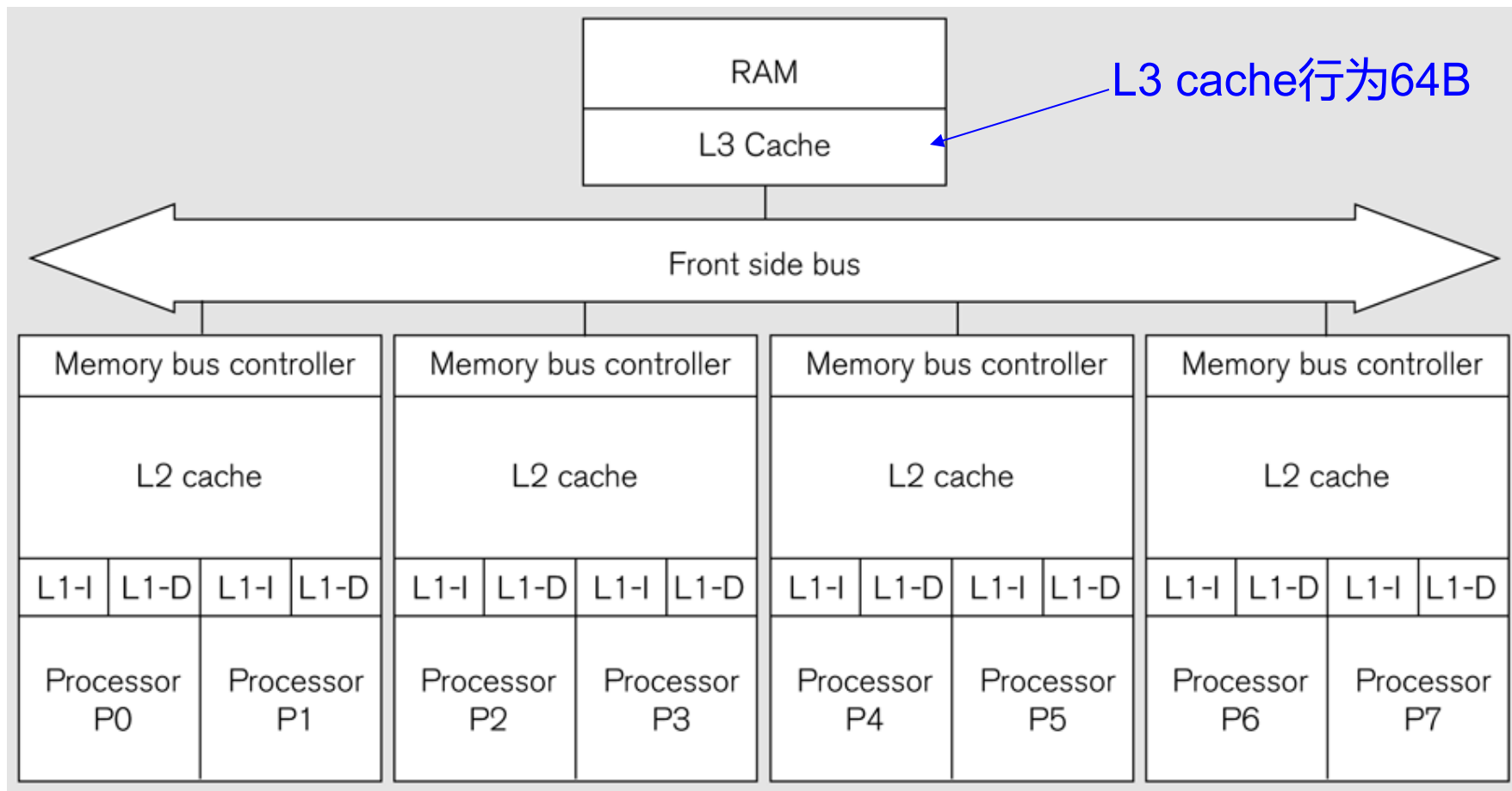
线程的生命周期（简化描述）



Outline

- 多线程基本概念
- 多线程计算实例分析
 - 竞态条件
 - 伪共享（缓存一致问题）
- PThread 多线程
- Java 多线程

实验环境中多核计算机系统结构

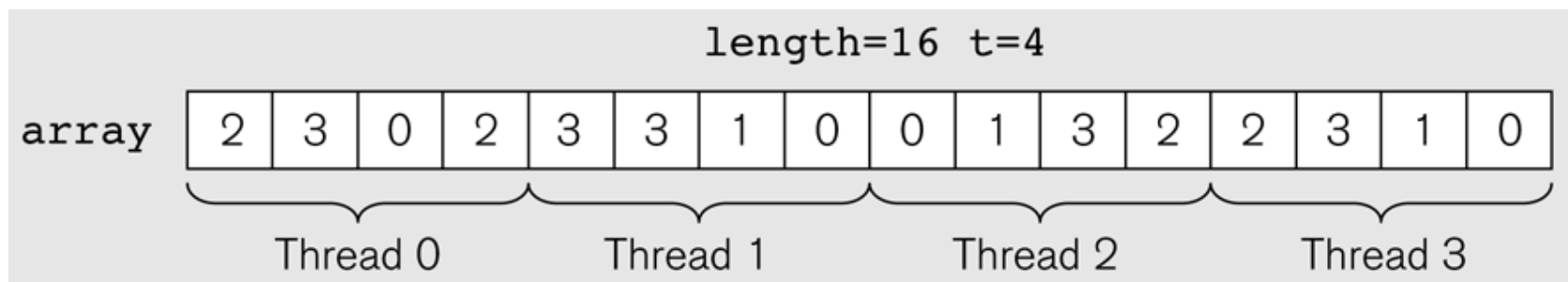


统计3的个数：串行代码（伪代码）

```
int *array;  
int length;  
int count;  
int count3s()  
{  
    int i;  
    count=0;  
    for (i=0; i<length; i++)  
    {  
        if(array[i]==3)  
        {  
            count++;  
        }  
    }  
    return count;  
}
```

对数组的划分

- 长度为16，线程数为4



- 实际实验中数组规模为50M，随机分布30%的数值3。实验结果是1000次运行的均值。

并行算法1

共享变量

创建线程

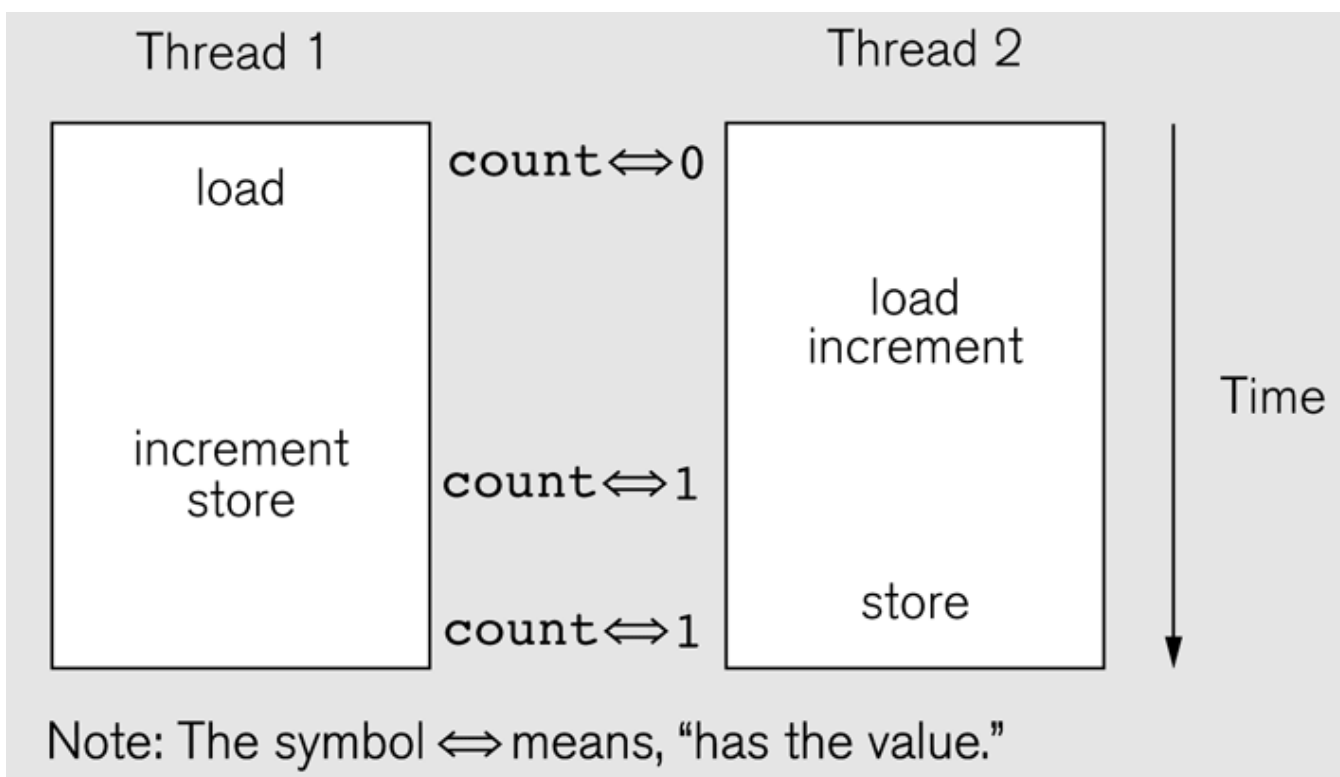
线程函数

此算法不能获得
正确的结果

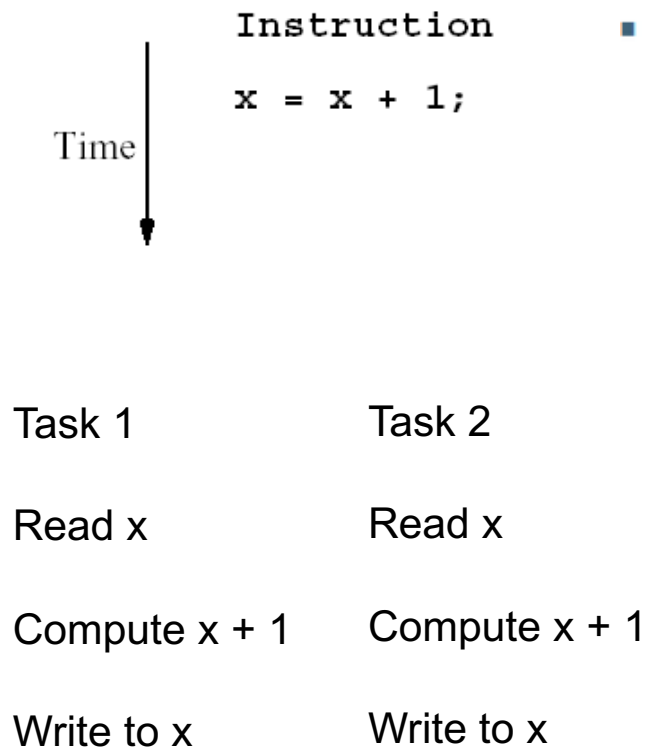
```
1  int t;                                /* number of threads */
2  int *array;
3  int length;
4  int count;
5
6  void count3s()
7  {
8      int i;
9      count = 0;
10     /* Create t threads */
11     for(i=0; i<t; i++)
12     {
13         thread_create(count3s_thread, i);
14     }
15
16     return count;
17 }
18
19 void count3s_thread(int id)
20 {
21     /* Compute portion of the array that this thread
22        should work on */
23     int length_per_thread=length/t;
24     int start=id*length_per_thread;
25
26     for(i=start; i<start+length_per_thread; i++)
27     {
28         if(array[i]==3)
29         {
30             count++;
31         }
32     }
```

竞态条件

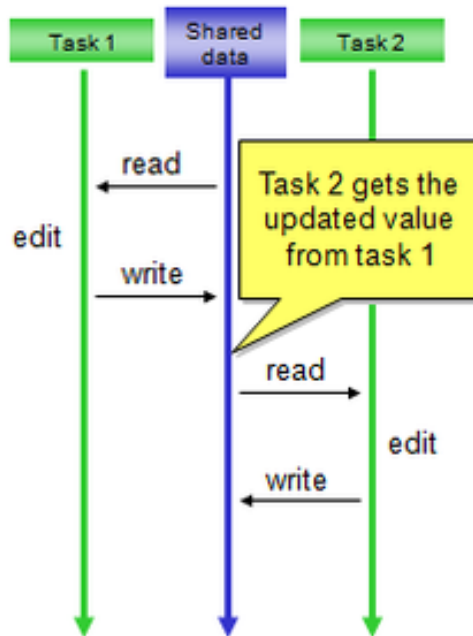
- 当两个或多个进程试图在同一时刻访问共享内存，或读写某些共享数据，而最后的结果取决于线程执行的顺序(线程运行时序)，就称为竞态条件(Race Conditions)



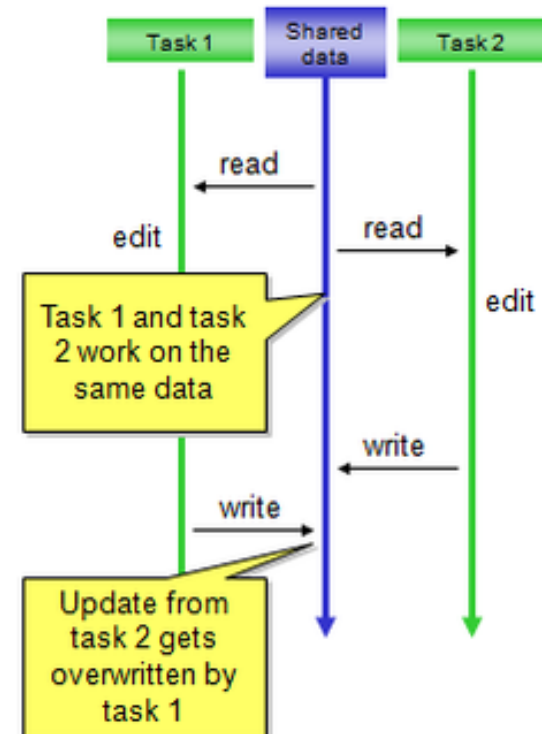
竞态条件示例



Correct behavior



Incorrect behavior



竞态条件示例

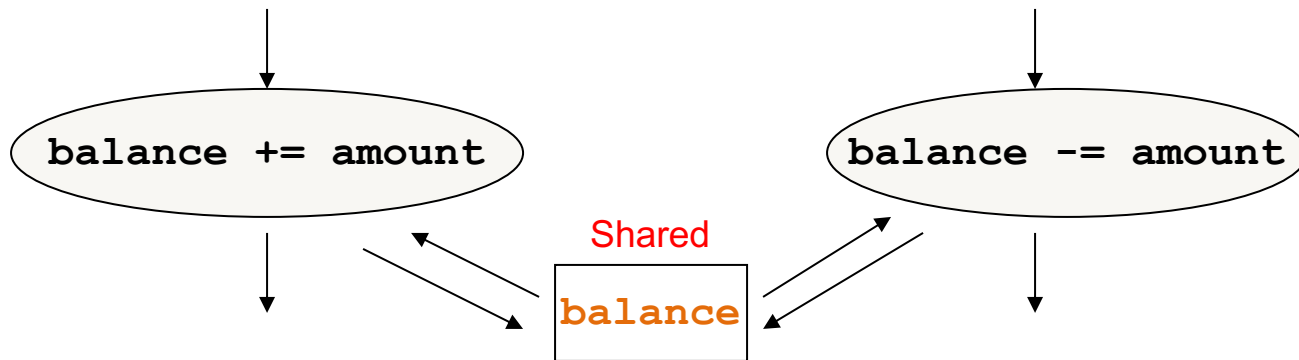
shared double **balance**;

Code for DEPOSIT (p₁)

```
. . .  
balance = balance + amount;  
. . .
```

Code for WITHDRAWAL (p₂)

```
. . .  
balance = balance - amount;  
. . .
```



Assembly code for p₁

```
load    R1, balance  
load    R2, amount  
→ add    R1, R2  
store   R1, balance
```

Assembly code for p₂

```
load    R1, balance  
load    R2, amount  
sub     R1, R2  
store   R1, balance
```

临界区

- 临界区(critical section)
 - 指包含有共享数据的一段代码，这些代码可能被多个线程执行。
 - 临界区的存在就是为了保证当有一个线程在临界区内执行的时候，不能有其他任何线程被允许在临界区执行。
- 设想有A,B两个线程执行同一段代码，则在任意时刻至多只能有一个线程在执行临界区内的代码。
 - 如果A线程正在临界区执行，B线程则只能在进入区等待。
 - 只有当A线程执行完临界区的代码并退出临界区，原先处于等待状态的B线程才能继续向下执行并进入临界区。

进入区

临界区

退出区

Busy-waiting

```
shared boolean lock = FALSE;  
shared double balance;
```

Code for p₁

```
/* Acquire the lock */  
while (lock) /* loop */ ;
```



```
    lock = TRUE;  
/* Execute critical sect */  
    balance = balance + amount;  
/* Release lock */  
    lock = FALSE;
```

Code for p₂

```
/* Acquire the lock */  
while (lock) /* loop */ ;
```

```
    lock = TRUE;  
/* Execute critical sect */  
    balance = balance - amount;  
/* Release lock */  
    lock = FALSE;
```



- 对**lock** 的访问并不是原子操作（**atomic**），可能会出错！

新方案

```
shared boolean lock = FALSE;  
shared list L;
```

Code for p_1

```
. . .  
get(lock);  
    <execute critical section>;  
release(lock);  
. . .
```

Code for p_2

```
. . .  
get(lock);  
    <execute critical section>;  
release(lock);  
. . .
```

get(lock) 和 **release(lock)** 必须是原子操作 (**atomic**) 。

互斥锁

- 互斥锁（mutex 是 MUTual EXclusion 的缩写）是实现线程间同步的一种方法。
- 互斥锁是一种锁，线程对共享资源进行访问之前必须先获得锁；否则线程将保持等待状态，直到该锁可用。
- 只有其他线程都不占有它时一个线程才可以占有它，在该线程主动放弃它之前也没有另外的线程可以占有它。
- 占有这个锁的过程就叫做**锁定**或者**获得互斥锁**。

互斥锁

```
thread A
void someMethod()
{
    print("A Hello one");
    print("A Hello two");
}
```

```
thread B
void someMethod()
{
    print("B Hello one");
    print("B Hello two");
}
```

- 两个线程A和B，如果不加任何同步原语的话，线程A和B的输出将产生交错，即可能产生类似

```
A Hello one
B Hello one
B Hello two
A Hello one
```

互斥锁

```
thread A
void someMethod()
{
    mutex.lock();
    print("A Hello one");
    print("A Hello two");
    mutex.unlock();
}
```

```
thread B
void someMethod()
{
    mutex.lock();
    print("B Hello one");
    print("B Hello two");
    mutex.unlock();
}
```

- 可能的输出结果：

```
A Hello one
A Hello two
B Hello one
B Hello two
```

或

```
B Hello one
B Hello two
A Hello one
A Hello two
```

多个锁

```
shared lock1 = FALSE;  
shared lock2 = FALSE;
```

Code for p_1

```
. . .  
  
/* Enter CS-1 */  
  get(lock1);  
  <critical section 1>;  
  release(lock1);  
  
<other computation>;  
  
/* Enter CS-2 */  
  get(lock2);  
  <critical section 2>;  
  release(lock2);  
  
. . .
```

```
shared lock1 = FALSE;  
shared lock2 = FALSE;
```

Code for p_2

```
. . .  
  
/* Enter CS-2*/  
  get(lock2);  
  <critical section 2>;  
  release(lock2);  
  
<other computation>;  
  
/* Enter CS-1 */  
  get(lock1);  
  <critical section 1>;  
  release(lock1);  
  
. . .
```

死锁


```
shared boolean lock1 = FALSE;  
shared boolean lock2 = FALSE;
```

Code for p_1

. . .

```
get(lock1);
```

```
<delete element>;
```



```
/* Enter CS to update length */
```

```
get(lock2);
```

```
<update length>;
```

```
release(lock2);
```

```
release(lock1);
```

. . .

Code for p_2

. . .

```
get(lock2);
```

```
<update length>;
```

```
/* Enter CS to add element */
```



```
get(lock1);
```

```
<add element>;
```

```
release(lock1);
```

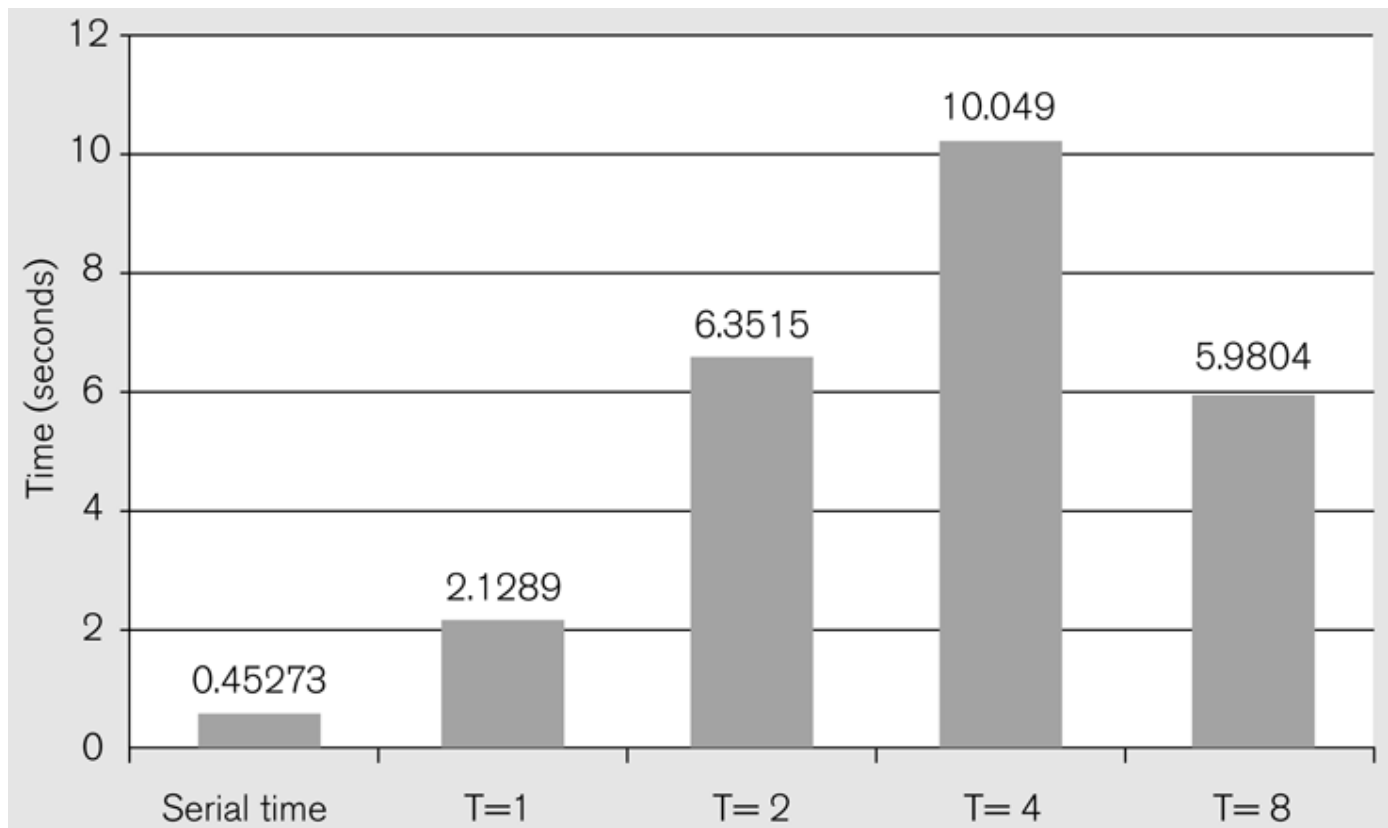
```
release(lock2);
```

. . .

并行算法2：加互斥锁

```
1  mutex m;
2
3  void count3s_thread(int id)
4  {
5      /* Compute portion of the array that this thread
6         should work on */
7      int length_per_thread=length/t;
8      int start=id*length_per_thread;
9
10     for(i=start; i<start+length_per_thread; i++)
11     {
12         if(array[i]==3)
13         {
14             mutex_lock(m);
15             count++;
16             mutex_unlock(m);
17         }
18     }
```

并行算法2的性能

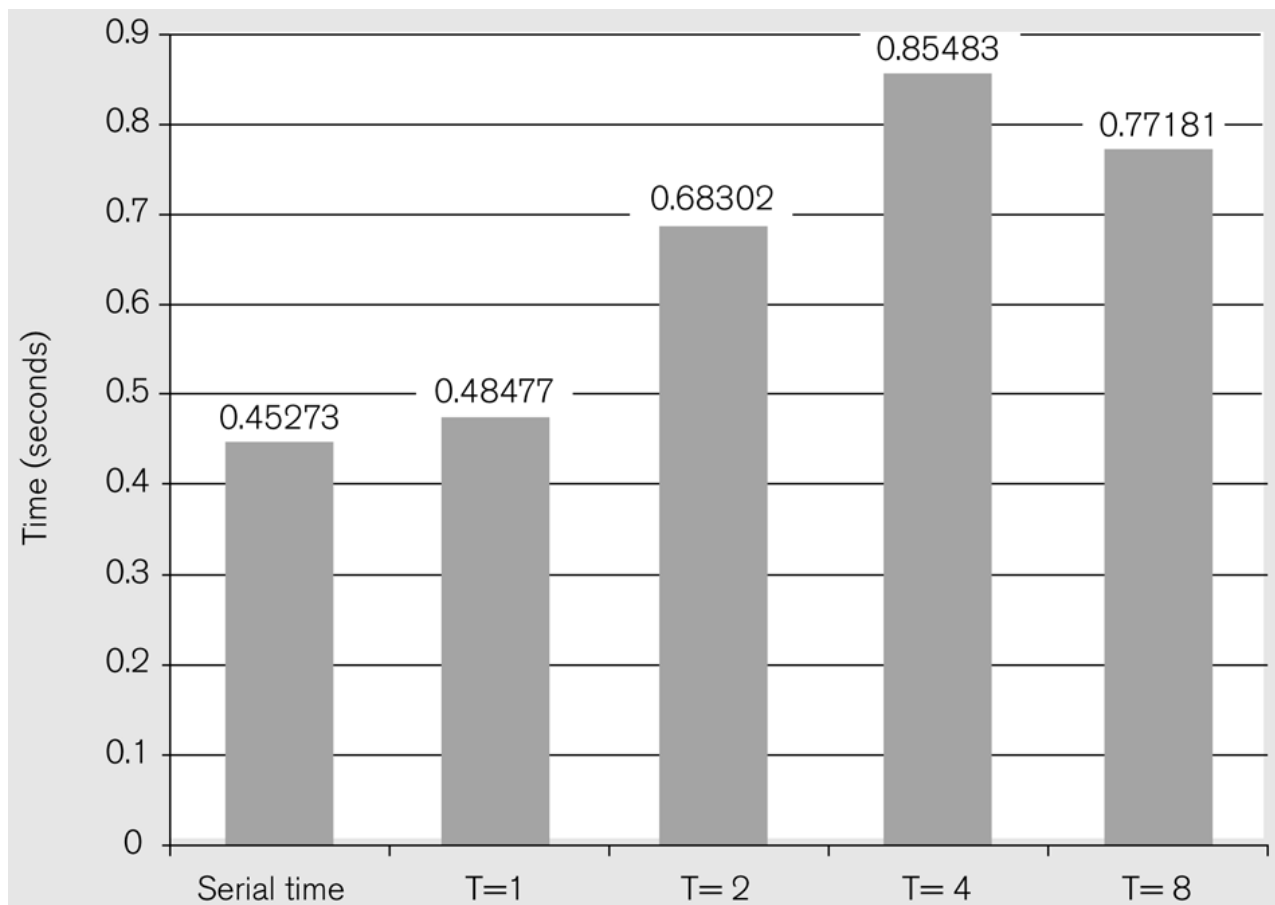


并行算法3

共享数组

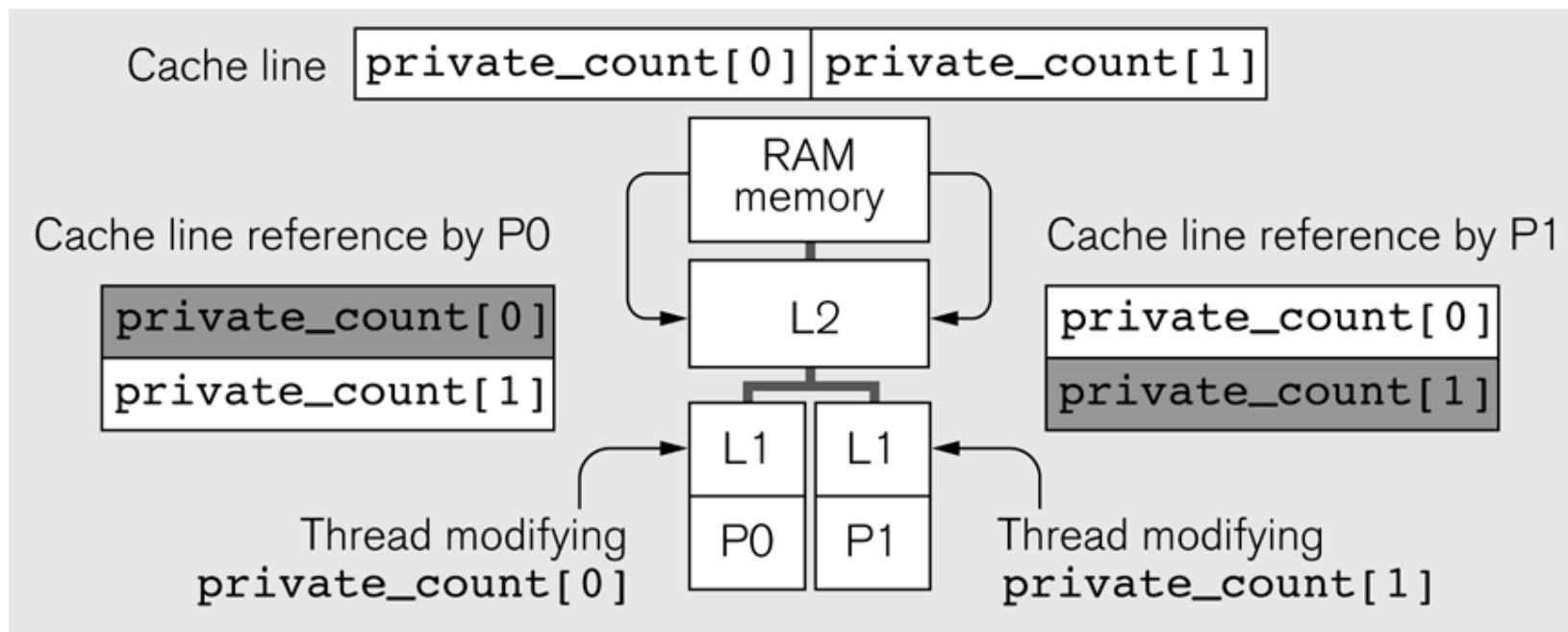
```
1 private_count[MaxThreads];
2 mutex m;
3
4 void count3s_thread(int id)
5 {
6     /* Compute portion of array for this thread to
7        work on */
8     int length_per_thread=length/t;
9     int start=id*length_per_thread;
10
11     for(i=start; i<start+length_per_thread; i++)
12     {
13         if(array[i] == 3)
14         {
15             private_count[id]++;
16         }
17     }
18     mutex_lock(m);
19     count+=private_count[id];
20     mutex_unlock(m);
21 }
```

并行算法3的性能



cache一致性与伪共享 (false sharing)

- cache一致性的单位是行（本例中一行为64B）
 - 对cache行中的任意部分的修改等同于对整个行的修改
 - L3 cache行修改后将触发L2、L1缓存的更新
- 处理器P0和P1上的线程对private_count[0]或private_count[1]进行互斥访问，但底层系统将它们置于同一个64B的cache行中。

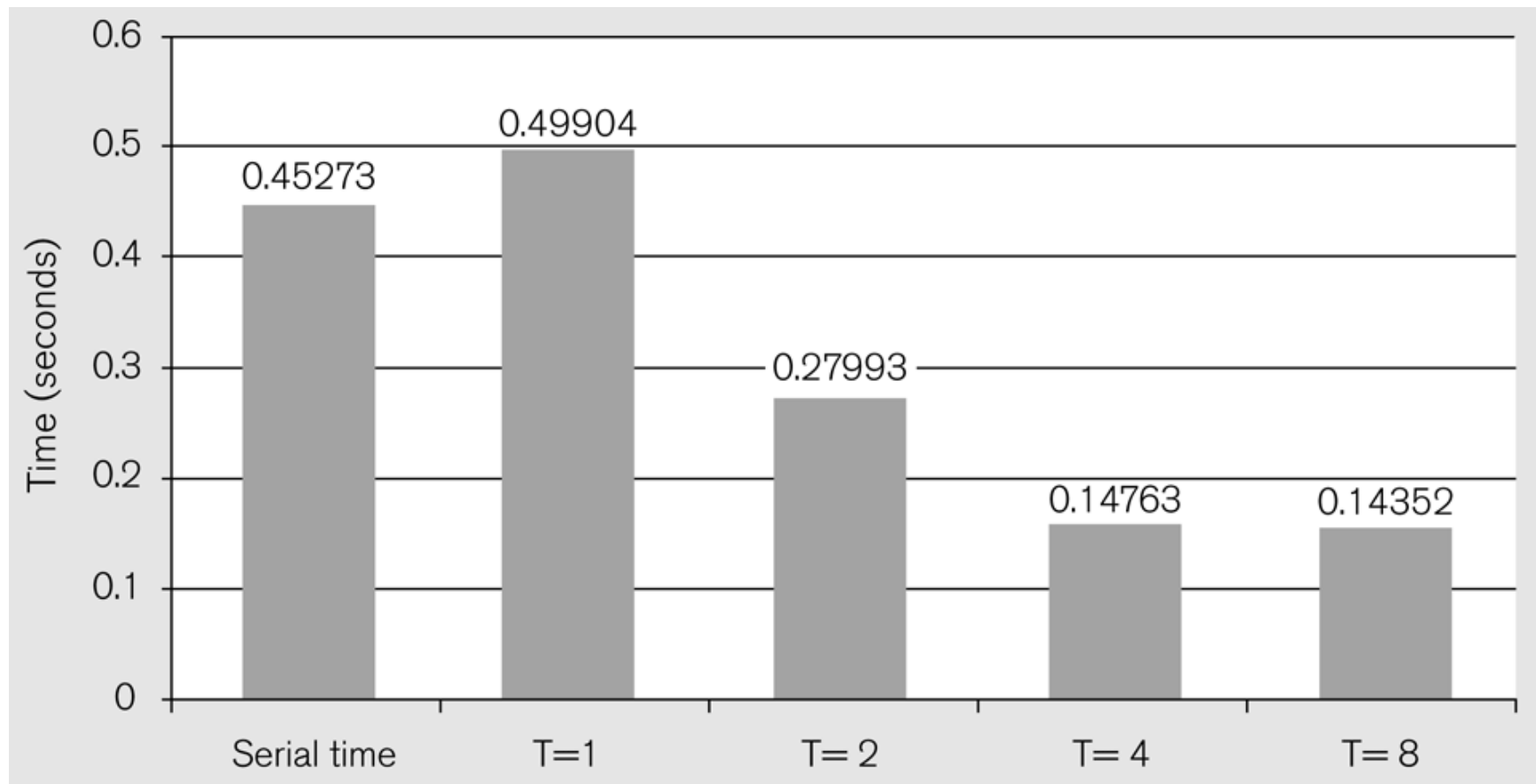


并行算法4：避免false sharing

cache行大小为
64B

```
1 struct padded_int
2 {
3     int value;
4     char padding[60];
5 } private_count[MaxThreads];
6
7 void count3s_thread(int id)
8 {
9     /* Compute portion of the array this thread should
10      work on */
11     int length_per_thread=length/t;
12     int start=id*length_per_thread;
13     for(i=start; i<start+length_per_thread; i++)
14     {
15         if(array[i] == 3)
16         {
17             private_count[id]++; (private_count[id].value++);
18         }
19     }
20     mutex_lock(m);
21     count+=private_count[id].value;
22     mutex_unlock(m);
23 }
```

并行算法4的性能



Outline

- 多线程基本概念
- 多线程计算实例分析
 - 竞态条件
 - 伪共享（缓存一致性问题）
- **PThread 多线程**
- Java 多线程

POSIX Thread API

- POSIX : Portable Operating System Interface
- POSIX 是基于UNIX 的，这一标准意在期望获得源代码级的软件可移植性。为一个POSIX 兼容的操作系统编写的程序，应该可以在任何其它的POSIX 操作系统（即使是来自另一个厂商）上编译执行。
- POSIX 标准定义了操作系统应该为应用程序提供的接口：系统调用集。
- POSIX是由IEEE（Institute of Electrical and Electronic Engineering）开发的，并由ANSI（American National Standards Institute）和ISO（International Standards Organization）标准化。

程序示例

线程函数

创建线程（并运行）

等待线程结束

```
#include <pthread.h>

/*
 * The function to be executed by the thread should take a
 * void* parameter and return a void* exit status code.
 */
void *thread_function(void *arg)
{
    // Cast the parameter into what is needed.
    int *incoming = (int *)arg;

    // Do whatever is necessary using *incoming as the argument.

    // The thread terminates when this function returns.
    return NULL;
}

int main(void)
{
    pthread_t thread_ID;
    void      *exit_status;
    int       value;

    // Put something meaningful into value.
    value = 42;

    // Create the thread, passing &value for the argument.
    pthread_create(&thread_ID, NULL, thread_function, &value);

    // The main program continues while the thread executes.

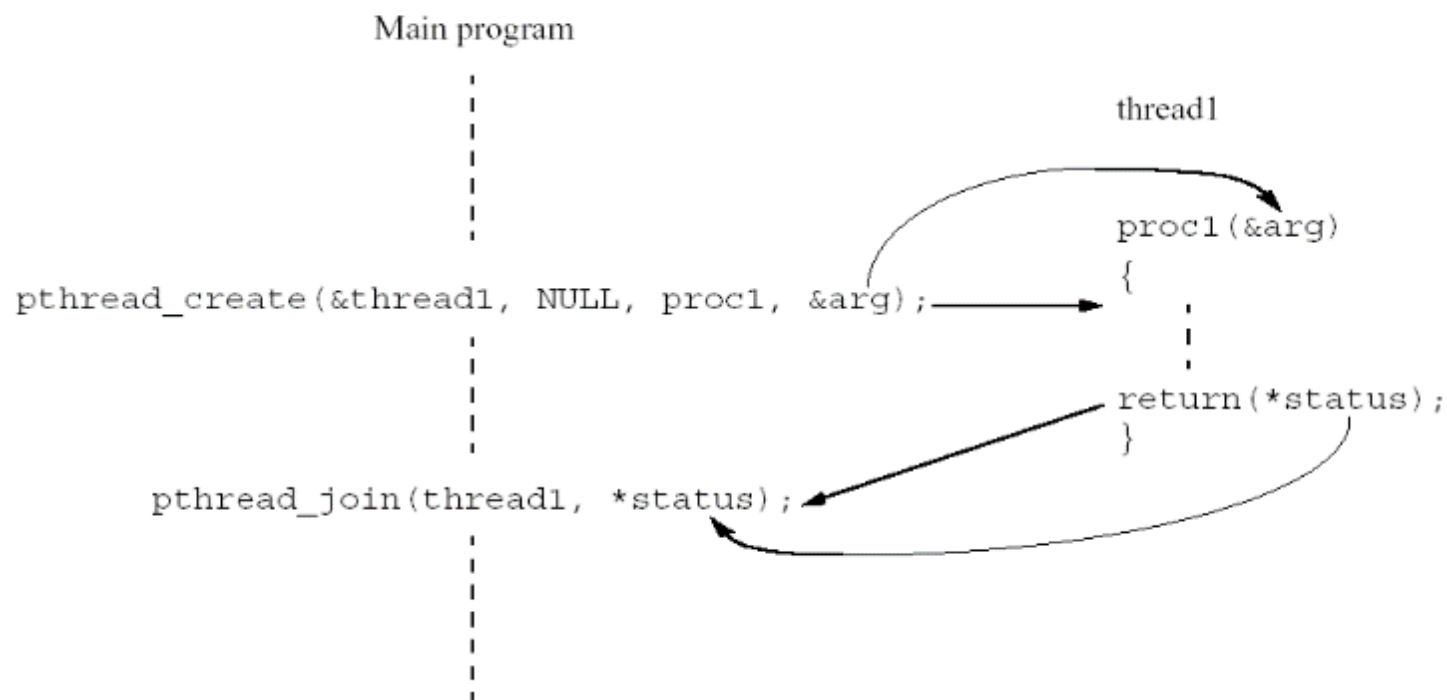
    // Wait for the thread to terminate.
    pthread_join(thread_ID, &exit_status);

    // Only the main thread is running now.
    return 0;
}
```

执行 Pthread 线程

IEEE Portable Operating System Interface, POSIX, section 1003.1 standard

Executing a Pthread Thread



Pthread线程主要操作函数

POSIX 函数	描述
pthread_cancel	终止另一个线程
pthread_create	创建一个线程
pthread_detach	设置线程以释放资源
pthread_equal	测试两个线程 ID 是否相等
pthread_exit	退出线程，而不退出进程
pthread_join	等待一个线程
pthread_self	找出自己的线程 ID

pthread_create(): 创建线程

```
pthread_create()  
  
int pthread_create(  
    pthread_t *tid,           // create a new thread  
    const pthread_attr_t *attr, // thread ID  
    void *(*start_routine)(void *), // thread attributes  
    void *arg,                // pointer to function to execute  
                                // argument to function  
);
```

Arguments:

- The thread ID of the successfully created thread.
- The thread's attributes, explained below; the NULL value specifies default attributes.
- The function that the new thread will execute once it is created.
- An argument passed to the start_routine().

Return value:

0 if successful. Error code from <errno.h> otherwise.

Notes:

Use a structure to pass multiple arguments to the start routine.

pthread_join(): 等待线程结束

pthread_join()

```
int pthread_join(                // wait for a thread to terminate
    pthread_t tid,               // thread ID to wait for
    void **status                // exit status
);
```

Arguments:

- The ID of the thread to wait for.
- The completion status of the exiting thread will be copied into `*status` unless `status` is `NULL`, in which case the completion status is not copied.

Return value:

0 for success. Error code from `<errno.h>` otherwise.

Notes:

Once a thread is joined, the thread no longer exists, its thread ID is no longer valid, and it cannot be joined with any other thread.

pthread_self(): 获取自己的 ID

pthread_self()

```
pthread_t pthread_self();           // Get my thread ID
```

Return value:

The ID of the thread that called this function.

pthread_equal(): 两个线程是否是同一个

```
pthread_equal()  
  
int pthread_equal(  
    pthread_t t1,  
    pthread_t t2  
);  
// Test for equality  
// First operand thread ID  
// Second operand thread ID
```

Arguments:

Two thread IDs

Return value:

- Nonzero if the two thread IDs are the same (following the C convention).
- 0 if the two threads are different.

pthread_exit(): 线程退出

```
void pthread_exit()  
void pthread_exit(          // terminate a thread  
    void *status           // completion status  
);
```

Arguments:

The completion status of the thread that has exited. This pointer value is available to other threads.

Return value:

None.

Notes:

When a thread exits by simply returning from the start routine, the thread's completion status is set to the start routine's return value.

pthread_cancel(): 取消其他线程

```
int pthread_cancel(pthread_t thread);
```

- 参数thread 是要取消的目标线程的线程ID。该函数并不阻塞调用线程，它发出取消请求后就返回。如果成功，pthread_cancel 返回0，如果不成功，pthread_cancel 返回一个非零的错误码。
- 线程收到一个取消请求时会发生什么情况取决于它的状态和类型。
 - 如果线程处于PTHREAD_CANCEL_ENABLE 状态，它就接受取消请求，
 - 如果线程处于PTHREAD_CANCEL_DISABLE 状态，取消请求就会被保持在挂起状态。
 - 默认情况下，线程处于PTHREAD_CANCEL_ENABLE 状态。

pthread_detach(): 分离线程

```
int pthread_detach(pthread_t thread)
```

- 设置线程的内部选项来说明线程退出后，其所占有的资源可以被回收。参数thread是要分离的线程的ID。被分离的线程退出时不会报告它们的状态。
- 如果函数调用成功，pthread_detach 返回0，如果不成功，pthread_detach 返回一个非零的错误码。

错误	原因
EINVAL	thread 对应的不是一个可分离的线程.
ESRCH	没有 ID 为 thread 的线程

算法示例：积分法求 π

- 公式：

$$\pi = 4 \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \cdots + (-1)^n \frac{1}{2n+1} + \cdots \right)$$

- 串行代码：

```
double factor = 1.0;
double sum = 0.0;
for (i = 0; i < n; i++, factor = -factor) {
    sum += factor/(2*i+1);
}
pi = 4.0*sum;
```


线程函数

```
1 void* Thread_sum(void* rank) {
2     long my_rank = (long) rank;
3     double factor;
4     long long i;
5     long long my_n = n/thread_count;
6     long long my_first_i = my_n*my_rank;
7     long long my_last_i = my_first_i + my_n;
8
9     if (my_first_i % 2 == 0) /* my_first_i is even */
10        factor = 1.0;
11    else /* my_first_i is odd */
12        factor = -1.0;
13
14    for (i = my_first_i; i < my_last_i; i++, factor = -factor) {
15        sum += factor/(2*i+1);
16    }
17
18    return NULL;
19 } /* Thread_sum */
```

数据个数,
起始位置,
终止位置

sum 是共享变量

- 可能的结果:

	<i>n</i>			
	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸
π	3.14159	3.141593	3.1415927	3.14159265
1 Thread	3.14158	3.141592	3.1415926	3.14159264
2 Threads	3.14158	3.141480	3.1413692	3.14164686

Busy-waiting 方法

- 示例：

```
1 y = Compute(my_rank);  
2 while (flag != my_rank);  
3 x = x + y;  
4 flag++;
```

- 关闭编译器自动优化，否则可能被编译为

```
y = Compute(my_rank);  
x = x + y;  
while (flag != my_rank);  
flag++;
```

使用Busy-waiting的线程

```
1 void* Thread_sum(void* rank) {
2     long my_rank = (long) rank;
3     double factor;
4     long long i;
5     long long my_n = n/thread_count;
6     long long my_first_i = my_n*my_rank;
7     long long my_last_i = my_first_i + my_n;
8
9     if (my_first_i % 2 == 0)
10         factor = 1.0;
11     else
12         factor = -1.0;
13
14     for (i = my_first_i; i < my_last_i; i++, factor = -factor) {
15         while (flag != my_rank);
16         sum += factor/(2*i+1);
17         flag = (flag+1) % thread_count;
18     }
19
20     return NULL;
21 } /* Thread_sum */
```

如果 flag 不是自己的编号，则等待

本轮计算结束，flag 增1

Busy-waiting 改进

```
void* Thread_sum(void* rank) {
    long my_rank = (long) rank;
    double factor, my_sum = 0.0;
    long long i;
    long long my_n = n/thread_count;
    long long my_first_i = my_n*my_rank;
    long long my_last_i = my_first_i + my_n;


    if (my_first_i % 2 == 0)
        factor = 1.0;
    else
        factor = -1.0;

    for (i = my_first_i; i < my_last_i; i++, factor = -factor)
        my_sum += factor/(2*i+1);

    while (flag != my_rank);
    sum += my_sum;
    flag = (flag+1) % thread_count;

    return NULL;
} /* Thread_sum */
```

使用线程
私有变量



Pthread 中的互斥锁

- 在 Pthreads 中，锁实现为 *mutually exclusive lock* 变量或者 “mutex” 变量。
- 要使用 mutex，必须将其声明为 *pthread_mutex_t* 类型，并初始化：

```
pthread_mutex_t mutex1;                                pthread_mutex_lock(&mutex1);  
    .                                                    .  
    .                                                    critical section  
    .                                                    .  
pthread_mutex_init(&mutex1, NULL);                    pthread_mutex_unlock(&mutex1);
```

- 使用 *pthread_mutex_destroy()* 销毁 mutex。

Mutex

```
1 void* Thread_sum(void* rank) {
2     long my_rank = (long) rank;
3     double factor;
4     long long i;
5     long long my_n = n/thread_count;
6     long long my_first_i = my_n*my_rank;
7     long long my_last_i = my_first_i + my_n;
8     double my_sum = 0.0;
9
10    if (my_first_i % 2 == 0)
11        factor = 1.0;
12    else
13        factor = -1.0;
14
15    for (i = my_first_i; i < my_last_i; i++, factor = -factor) {
16        my_sum += factor/(2*i+1);
17    }
18    pthread_mutex_lock(&mutex);
19    sum += my_sum;
20    pthread_mutex_unlock(&mutex);
21
22    return NULL;
23 } /* Thread_sum */
```

Mutex与Busy-waiting效率比较

Table 4.1 Run-Times (in Seconds) of π Programs Using $n = 10^8$ Terms on a System with Two Four-Core Processors

Threads	Busy-Wait	Mutex
1	2.90	2.90
2	1.45	1.45
4	0.73	0.73
8	0.38	0.38
16	0.50	0.38
32	0.80	0.40
64	3.56	0.38

条件变量

- 条件变量(Condition variable)是用来通知共享数据状态信息的。
 - 当特定条件满足时，线程等待或者唤醒其他合作线程。
- 条件变量不提供互斥，需要一个互斥锁来同步对共享数据的访问。

条件变量主要操作

- `pthread_cond_signal`
 - 使在条件变量上等待的线程中的一个线程重新开始。如果没有等待的线程，则什么也不做。如果有多个线程在等待该条件，只有一个能重新启动，但不能指定哪一个。
- `pthread_cond_broadcast`
 - 重新启动等待该条件变量的所有线程。如果没有等待的线程，则什么也不做。

条件变量主要操作

- pthread_cond_wait
 - 自动解锁互斥锁 (如同执行了 pthread_unlock_mutex), 并等待条件变量触发。
 - 这时线程挂起, 不占用 CPU 时间, 直到条件变量被触发。
 - 在调用 pthread_cond_wait 之前, 应用程序必须加锁互斥锁。
 - pthread_cond_wait 函数返回前, 自动重新对互斥锁加锁 (如同执行了 pthread_lock_mutex)。
- 互斥锁的解锁和在条件变量上挂起都是自动进行。
 - 在条件变量被触发前, 如果所有的线程都要对互斥锁加锁, 这种机制可保证在线程加锁互斥锁和进入等待条件变量期间, 条件变量不被触发。

条件变量示例

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

```
pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER; /*初始化互斥锁*/
pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER; /*初始化条件变量*/
```

```
void *thread1(void *);
void *thread2(void *);
```

```
int i=1; //全局变量
```

```
int main(void)
{
    pthread_t t_a;
    pthread_t t_b;

    pthread_create(&t_a, NULL, thread2, (void *)NULL); /*创建线程t_a*/
    pthread_create(&t_b, NULL, thread1, (void *)NULL); /*创建线程t_b*/
    pthread_join(t_b, NULL); /*等待线程t_b结束*/
    pthread_mutex_destroy(&mutex);
    pthread_cond_destroy(&cond);
    exit(0);
}
```

条件变量示例

```
void *thread1(void *junk)
{
    for(i=1;i<=9;i++)
    {
        pthread_mutex_lock(&mutex);/*锁住互斥锁*/
        if(i%3==0)
            pthread_cond_signal(&cond);/*条件改变，发送信号，通知t_b进程*/
        else
            printf("thead1:%d\n",i);
        pthread_mutex_unlock(&mutex);/*解锁互斥锁*/
        sleep(1);
    }
}

void *thread2(void *junk)
{
    while(i<9)
    {
        pthread_mutex_lock(&mutex);
        if(i%3!=0)
            pthread_cond_wait(&cond,&mutex);/*等待*/
        printf("thread2:%d\n",i);
        pthread_mutex_unlock(&mutex);
        sleep(1);
    }
}
```

输出结果:
thread1:1
thread1:2
thread2:3
thread1:4
thread1:5
thread2:6
thread1:7
thread1:8
thread2:9

Outline

- 多线程基本概念
- 多线程计算实例分析
 - 竞态条件
 - 伪共享（缓存一致问题）
- PThread 多线程
- **Java 多线程**

创建多线程的方法

- 方法1：通过Thread类的子类实现多线程。
- 方法2：定义一个实现Runnable接口的类实现多线程。

创建多线程的方法（续）

• 方法1：通过创建Thread类的子类实现多线程，步骤如下：

1. 定义Thread类的一个子类。
2. 定义子类中的方法run()，覆盖父类中的方法run()。
3. 创建该子类的一个线程对象。
4. 通过start()方法启动线程。

```
class UserThread extends Thread{  
    int sleepTime;
```

```
    public UserThread(String id) { // 构造函数  
        super(id);
```

```
        sleepTime=(int)(Math.random()*1000);  
        System.out.println("线程名: "+getName()+  
                            ", 睡眠: "+sleepTime+" 毫秒");
```

```
}
```



```
public void run() {  
    try{ // 通过线程睡眠模拟程序的执行  
        Thread.sleep(sleepTime);  
    }catch(InterruptedException e) {  
        System.err.println("运行异常:" +  
            e.toString());  
    }  
  
    System.out.println("运行的线程是: "+  
        getName());  
}  
}
```

```
public class multThreadTest{  
    public static void main(String args[ ]) {  
        UserThread      t1,t2,t3,t4;  
  
        t1=new UserThread("NO 1");  
        t2=new UserThread("NO 2");  
        t3=new UserThread("NO 3");  
        t4=new UserThread("NO 4");  
  
        t1.start( );      t2.start( );  
        t3.start( );      t4.start( );  
    }  
}
```

程序某次的运行结果：

线程名： NO 1， 睡眠： 885 毫秒

线程名： NO 2， 睡眠： 66 毫秒

线程名： NO 3， 睡眠： 203 毫秒

线程名： NO 4， 睡眠： 294 毫秒

目前运行的线程是： NO 2

目前运行的线程是： NO 3

目前运行的线程是： NO 4

目前运行的线程是： NO 1

注意： Thread类中的run()方法具有public属性， 覆盖该方法时， 前面必须带上public。

创建多线程的方法（续）

- 方法2：通过接口创建多线程，步骤如下：

1. 定义一个实现Runnable接口的类。
2. 定义方法run()。Runnable接口中有一个空的方法run()，实现它的类必须覆盖此方法。
3. 创建该类的一个线程对象，并将该对象作参数，传递给Thread类的构造函数，从而生成Thread类的一个对象。
// 注意这一步！
4. 通过start()方法启动线程。例如：

```
class UserMultThread implements Runnable{  
    int num;  
    UserMultThread(int n) {  
        num=n;  
    }  
  
    public void run( ) {  
        for(int i=0;i<3;i++)  
            System.out.println("运行线程: "+num);  
  
        System.out.println("结束: "+num);  
    }  
}
```

```
public class multThreadZero {  
    public static void main(String args[ ])  
        throws InterruptedException {  
        Thread mt1=new Thread(  
            new UserMultThread(1));  
        Thread mt2=new Thread(  
            new UserMultThread(2));  
  
        mt1.start( );  
        mt2.start( );  
        mt1.join( );    // 等待线程死亡  
        mt2.join( );  
    }  
}
```

程序运行某次的输出结果：

运行线程： 1

运行线程： 2

运行线程： 1

运行线程： 2

运行线程： 1

运行线程： 2

结束： 1

结束： 2

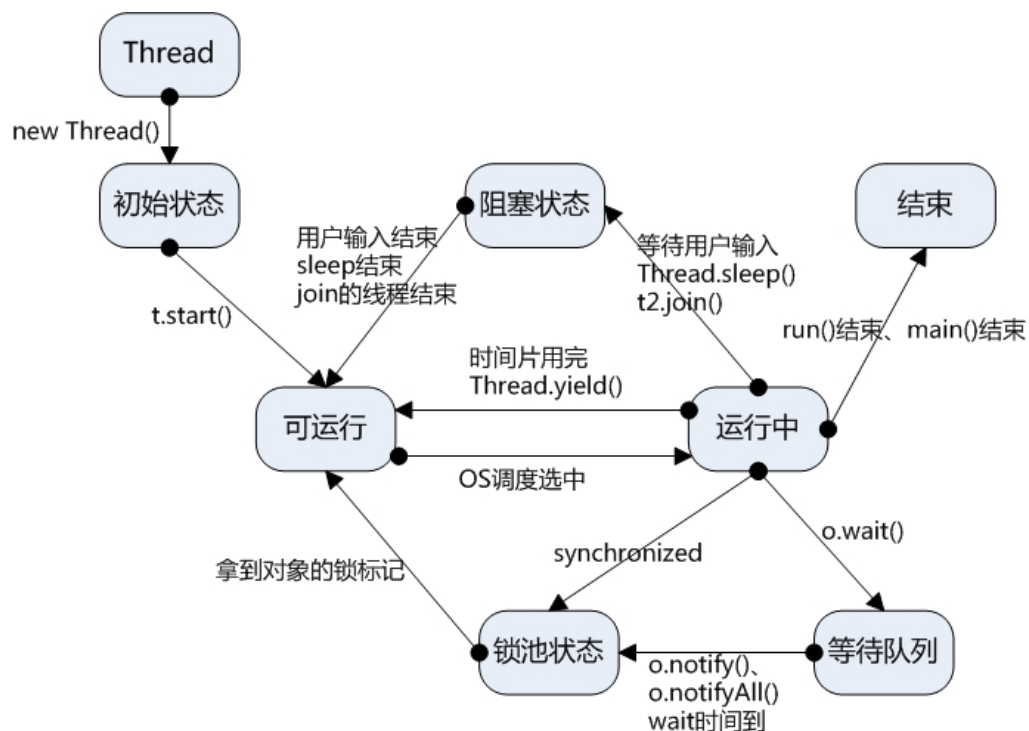
创建多线程的方法(续)

- 需要注意的2点:

1. `mt1.join()`是等待线程死亡, 对该方法必须捕捉异常, 或通过throws关键字指明可能要发生的异常。
2. 对一个线程不能调用`start()`两次, 否则会产生`IllegalThreadStateException`异常。

Java线程调度模型

- 线程调度程序挑选线程时，将选择处于就绪状态且优先级最高的线程。
- 如果多个线程具有相同的优先级，它们将被轮流调度。



同步方法

- Java通过关键字synchronized实现同步。
- 当对一个对象(含方法)使用synchronized, 这个对象便被锁定或者说进入了监视器。在一个时刻只能有一个线程可以访问被锁定的对象。它访问结束时, 让高优先级并处于就绪状态的线程, 继续访问被锁定的对象, 从而实现资源同步。
- 加锁的方法有**两种**: 锁定冲突的对象, 或锁定冲突的方法。

同步方法(续)

1. 锁定冲突的对象。语法格式:

```
synchronized ( ObjRef ){  
    Block    // 需要同步执行的语句体  
}
```

锁定对象可以出现在**任何**一个方法中。

同步方法(续)

2. 锁定冲突的方法。语法格式:

synchronized 方法的定义

```
synchronized void Play(int n) {  
    ..... // 中间的程序代码略  
}
```

注意:

1. 对方法run()无法加锁, 不可避免冲突;
2. 对构造函数不能加锁, 否则出现语法错误。