



OpenMP 并行编程

(一)

- 并行编程介绍
- 并行域与工作共享

目录页

Contents

1

OpenMP 介绍

2

并行编程模式

3

并行域操作

4

工作共享结构

- ❑ OpenMP Specifications, <https://www.openmp.org/specifications>
- ❑ Using OpenMP – The Next Step, van der Pas et al, 2017
- ❑ Using OpenMP, Chapman, Jost, and Van Der Pas, 2007

1

OpenMP 介绍

1 OpenMP介绍

2 并行编程模式

3 并行域操作

4 工作共享结构

OpenMP 简介



<https://www.openmp.org>

- ❑ 通过在源代码（串行）中**添加 OpenMP 指令和调用 OpenMP 库函数**来实现在共享内存系统上的并行。
- ❑ 为**共享内存并行**程序员提供了一种简单灵活的开发并行应用的接口模型，使程序既可以在台式机上执行，也可以在超级计算机上执行，具有良好的可移植性。

Jointly defined by a group of major computer hardware and software vendors and major parallel computing user facilities, the OpenMP API is a portable, scalable model that gives shared-memory parallel programmers a simple and flexible interface for developing parallel applications on platforms ranging from embedded systems and accelerator devices to multicore systems and shared-memory systems. <https://www.openmp.org>

API: Application Programming Interface

使用说明

- ❑ FORTRAN/C/C++ 自带程序库，无需另外安装
- ❑ 编译时不打开 OpenMP 编译选项，则编译器将忽略 OpenMP 指令，从而生成串行可执行程序（串行等价性）
- ❑ 打开 OpenMP 编译选项，编译器将对 OpenMP 指令进行处理，编译生成 OpenMP 并行可执行程序
- ❑ 并行线程数可以在程序启动时利用环境变量等方法进行动态设置
- ❑ 编程方式：增量并行
- ❑ 支持与 MPI 混合编程

发展历史

- ❑ 起源于 ANSI X3H5 (1994) 草案, 1997年, 部分设备商和编译器开发商组成 ARB (架构审查委员会), 着手制定 OpenMP 标准化规范
- ❑ 目标: 编程简单, 增量化并行, 移植性好, 扩展性好, 支持主流编译器
- ❑ 支持 Unix, Linux, Windows 等操作系统
- ❑ ARB 成员: AMD, ARM, Intel, IBM, Cray, NEC, HP, NVIDIA, ...

OpenMP

OpenMP
Application Programming
Interface

Version 5.2 November 2021

- ▶ FORTRAN version 1.0 (1997), C/C++ version 1.0 (1998)
- ▶ FORTRAN version 2.0 (2000), C/C++ version 2.0 (2002)
- ▶ OpenMP 3.0 – (May 2008)
- ▶ OpenMP 3.1 – (July 2011)
- ▶ OpenMP 4.0 – (July 2013) // gcc 4.9.1 全面支持
- ▶ OpenMP 4.5 – (Nov 2015)
- ▶ OpenMP 5.0 – (Nov 2018) // gcc 12 支持大部分
- ▶ OpenMP 5.2 – (Nov 2021)

2

并行编程模式

1 OpenMP介绍

2 并行编程模式

3 并行域操作

4 工作共享结构

- OpenMP 并行方式
- OpenMP 编译指导
- 子句
- 变量属性

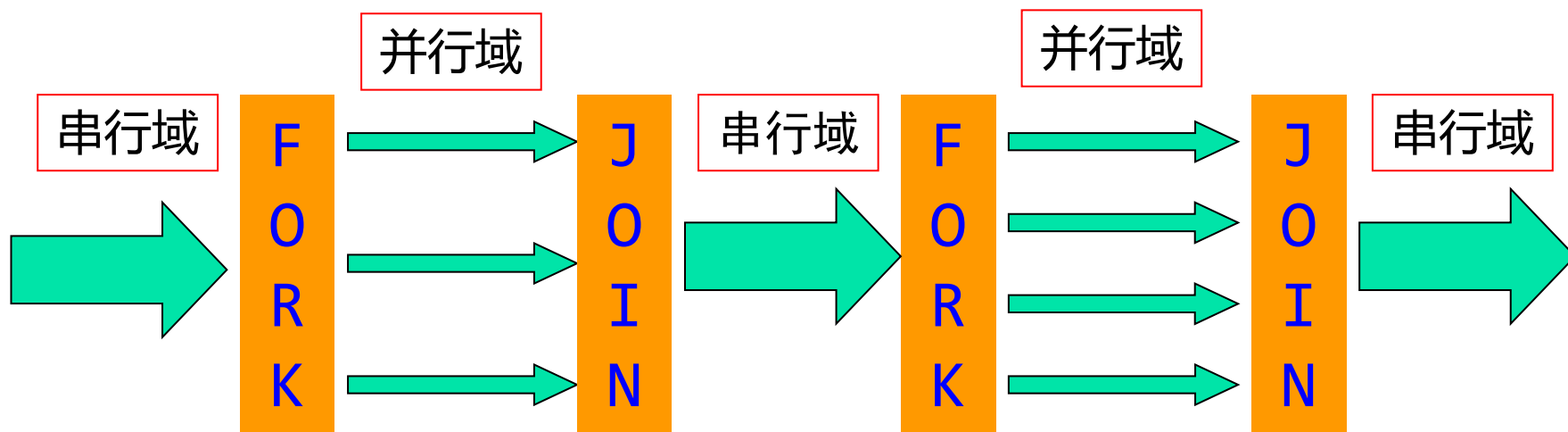
OpenMP 并行方式

OpenMP 是基于**线程**的并行编程模型。

OpenMP 采用 **Fork-Join** 并行执行方式

- ① OpenMP 程序开始于一个单独的主线程（Master Thread），然后主线程一直**串行**执行（**串行域**）
- ② 直到遇见第一个**并行域**（Parallel Region），然后开始并行执行并行域
- ③ 并行域代码执行完后再回到主线程，执行**串行域**，直到遇到下一个并行域
- ④ 以此类推，直至程序运行结束。

Fork-Join



- **Fork:** 主线程创建一个并行线程队列，然后并行域中的代码在不同的线程上并行执行
- **Join:** 当并行域执行完之后，它们或被同步，或被中断，最后只有主线程继续执行

† 并行域可以嵌套

C 举例

```
#include <omp.h>
#include <stdio.h>
int main()
{
    int nthreads, tid;
    #pragma omp parallel private(nthreads,tid)
    {
        tid=omp_get_thread_num(); // 获取线程号
        printf("Hello world from OpenMP thread %d\n", tid);
        if (tid==0)
        {
            nthreads=omp_get_num_threads(); // 获取线程个数
            printf("Number of threads %d\n", nthreads);
        }
    }
    return 0;
}
```

- 头文件: `omp.h`
- OpenMP 指令标识符 `#pragma omp`

- 编译
`gcc -fopenmp OMP_hello.c`

几点说明

□ OpenMP 程序编写

- ▶ 通常采用**增量并行**方法：逐步改造现有的串行程序，每次只对部分代码进行并行化，这样可以逐步改造，逐步调试。
- ▶ C/C++ 的 OpenMP 指令标识符为 **#pragma omp**
- ▶ C/C++ 程序中，OpenMP 指令**区分大小写**
- ▶ 每个 OpenMP 指令后是一个结构块（用大括号括起来）

□ 源程序编译

```
gcc -fopenmp OMP_hello.c -o OMP_hello  
icc -openmp OMP_hello.c -o OMP_hello // Intel C
```

OpenMP 编程三要素

- ❑ 编译指导指令 (Compiler Directive)
- ❑ 运行库函数 (Runtime Library Routines)
- ❑ 环境变量 (Environment Variables)

编译指导指令

OpenMP 通过对串行程序添加**编译指导指令**实现并行化

编译指导指令分类

- **并行域指令**：创建并行域，即产生多个线程以并行方式执行任务，所有并行任务必须放在并行域中才能被并行执行
- **工作共享指令**：负责任务划分，并分发给各个线程，工作共享指令不能产生新线程，因此必须位于并行域中
- **同步指令**：负责并行线程之间的同步
- **数据环境**：负责并行域内的变量的属性（共享或私有），以及边界上（串行域与并行域）的数据传递

并行域

● 并行域指令 **Parallel Constructs**

<code>parallel</code>	创建一个并行域
-----------------------	---------

```
#pragma omp parallel private(tid)
{
    tid = omp_get_thread_num(); // Obtain thread id
    printf("Hello world from OpenMP thread %d\n", tid);
    if (tid == 0) // Only master thread does this
    {
        nthreads = omp_get_num_threads();
        printf("Number of threads: %d\n", nthreads);
    }
}
```

OMP_hello.c

工作共享

● 工作共享结构 Work-Sharing Constructs

for	创建循环共享结构，代表典型的数据并行
sections /section	创建 sections 结构，将任务划分成独立的子任务(section)，每个子任务由一个线程执行，典型的任务并行
single	创建仅由一个线程执行的任务，先到先执行，其他线程等待其执行结束后再一起执行后面的任务
master	与 single 类似，但指定由主线程执行，而且其他线程无需等待
task taskyield	创建一个显式任务，可以立即被执行，也可以挂起并推迟执行，便于实现一些复杂结构，如递归。
workshare	仅适用 Fortran

同步结构

● 同步结构 Synchronization Constructs

<code>critical</code>	避免线程竞争，其包含的代码同一时刻只能有一个线程执行
<code>barrier</code>	障碍同步：用在并行域内，所有线程执行到 <code>barrier</code> 都要停下等待，直到所有线程都执行到 <code>barrier</code> ，然后再继续往下执行
<code>atomic</code>	确保一个特殊存储单元只能原子更新，即不允许许多线程同时去写，只能用于单一赋值语句等特殊情况
<code>flush</code>	确保线程存储的临时视图与共享存储中的数据一致，并且保证一个变量在共享存储中的读/写顺序
<code>ordered</code>	指定并行域的循环按迭代顺序执行
<code>taskwait</code>	可配合 <code>task</code> 结构使用，创建任务调度点

数据环境

● 数据环境指令 **Data Environment Constructs**

`threadprivate(list)`

将一个或多个私有变量声明为全局的，即在多个并行域中使用时，保留私有变量在上次并行域中的值；

可以与 `copyin` 子句联合使用，将主线程的值广播给其他线程。

OpenMP子句

子句（**Clause**）：

出现在编译制导指令之后，负责添加一些补充设置

```
#pragma omp parallel private(tid)
{
    tid = omp_get_thread_num(); // Obtain thread id
    printf("Hello world from OpenMP thread %d\n", tid);
    . . .
}
```

数据共享属性子句

● 数据作用域属性子句 Data Sharing Attribute Clauses

<code>private(list)</code>	创建一个或多个变量的私有拷贝，即在每个线程中都创建一个同名局部变量，但没有初始值； 列表中的变量必须已定义，且不能是常量和引用； 列表中的多个变量用逗号隔开。
<code>firstprivate(list)</code>	private 的扩展，创建私有拷贝的同时，将主线程中的同名变量的值作为初值。
<code>lastprivate(list)</code>	退出并行域时，将指定的私有拷贝的“最后”值复制到主线程中的同名变量中； “最后”：循环的最后一次迭代（按串行方式），或 sections 的最后一个 section （代码中）； 可能会增加额外开销，一般不建议使用，可以用共享变量等方式实现。

数据共享属性子句

- 数据作用域属性子句 Data Sharing Attribute Clauses

<code>shared(list)</code>	指定一个或多个变量为共享变量，即所有线程都可以访问这些变量
<code>default(...)</code>	指定并行域内的变量的缺省属性，C 语言支持 shared 和 none

变量的属性

- 如何决定哪些变量是共享哪些是私有？
 - 通常循环变量、临时变量、写变量一般应设置成私有的；
 - 数组变量、仅用于读的变量通常是共享的；
 - 能设置成共享的变量建议设置成共享的。
 - `default(none)`：所有变量必须显式指定是私有或共享

✦ 紧跟 for 结构后面的循环变量默认是私有的，其他循环的循环变量可能需显式声明成私有的。

数据缺省属性

● 结构内变量的缺省属性

threadprivate 指定的变量	私有
紧跟 for 或 parallel for 的循环变量	私有
结构内声明的自动存储持续变量	私有
结构内声明的静态存储持续变量	共享
持续动态存储变量	共享
静态数据成员	共享
常量	共享

数据缺省属性

- 在并行域内，但不在结构内

threadprivate 指定的变量	私有
在调用函数中声明的静态存储持续变量	共享
在调用函数中声明的常量	共享
在调用函数中声明的其他变量	私有
持续动态存储变量	共享
静态数据成员	共享
引用方式的形参	与实参相同

数据共享属性子句

● 数据作用域属性子句（续）

<code>copyin(list)</code>	配合 threadprivate ，用主线程同名变量的值对 threadprivate 的私有拷贝进行初始化
<code>copyprivate(list)</code>	配合 single ，将 single 块中串行计算得到的变量值广播到并行域中其它线程的同名变量中
<code>reduction(op:list)</code>	创建一个或多个变量的私有拷贝，在并行结束后对这些变量执行指定的归约操作（如求和），并将结果返回给主线程中的同名变量

REDUCTION

● 归约操作 **reduction**

```
#pragma omp parallel reduction(+:mysum) private(i,tid)
{
    nthreads = omp_get_num_threads();
    tid = omp_get_thread_num();

    for (i=tid+1; i<=n; i=i+nthreads)
    {   mysum = mysum + i;   }
}
```

OMP_reduction.c

- 在 **reduction** 子句中，编译器为每个线程创建变量 **mysum** 的私有拷贝
- 退出并行域时，将这些值加在一起并把结果加到原始变量 **mysum** 中
- **reduction** 中的 **op** 操作可以是：**+**，**-**，*****，**&&**，**||**，**&**，**|**，**^** 和内置函数 **max**，**min**

REDUCTION

- 规约操作时私有变量的初始值

+	0
*	1
-	0
&&	1
	0
&	~ 0
	0
^	0
max	相应变量类型的最小值
min	相应变量类型的最大值

OpenMP子句

● 其它字句

<code>if(log_expr)</code>	条件并行，满足指定条件时才执行相关操作
<code>num_threads(int)</code>	指定并行域内线程的个数
<code>nowait</code>	忽略并行线程或其它制导指令中暗含的障碍同步，使用时需小心
<code>schedule(type,chunk)</code>	指定循环任务的分配规则
<code>ordered</code>	指定循环内的代码按循环顺序执行
<code>collapse(int)</code>	将多重循环转换为一层循环，然后进行任务划分

3

并行域

- 1 并行编程介绍
- 2 OpenMP 概述
- 3 并行域
- 4 工作共享结构

- 并行域创建
- 并行域举例
- 并行域嵌套

并行域

■ 并行域的创建

```
#pragma omp parallel // 创建并行域
```

- 产生多个线程，即生成一个并行域
- 并行域中的所有代码默认都将被所有线程并行执行
- 可以通过线程 **id** 给不同线程手工分配不同的任务
- 也可以利用**工作共享指令**给每个线程分配任务
- 并行域可以嵌套
- 并行域结束后，将回到主线程

PARALLEL

Fortran	<code>!\$omp parallel</code> [clause clause ...] <i>structured-block</i> <code>!\$omp end parallel</code>
C/C++	<code>#pragma omp parallel</code> [clause clause ...] { <i>structured-block</i> }

● 结尾处有隐式同步，可用的子句包括：

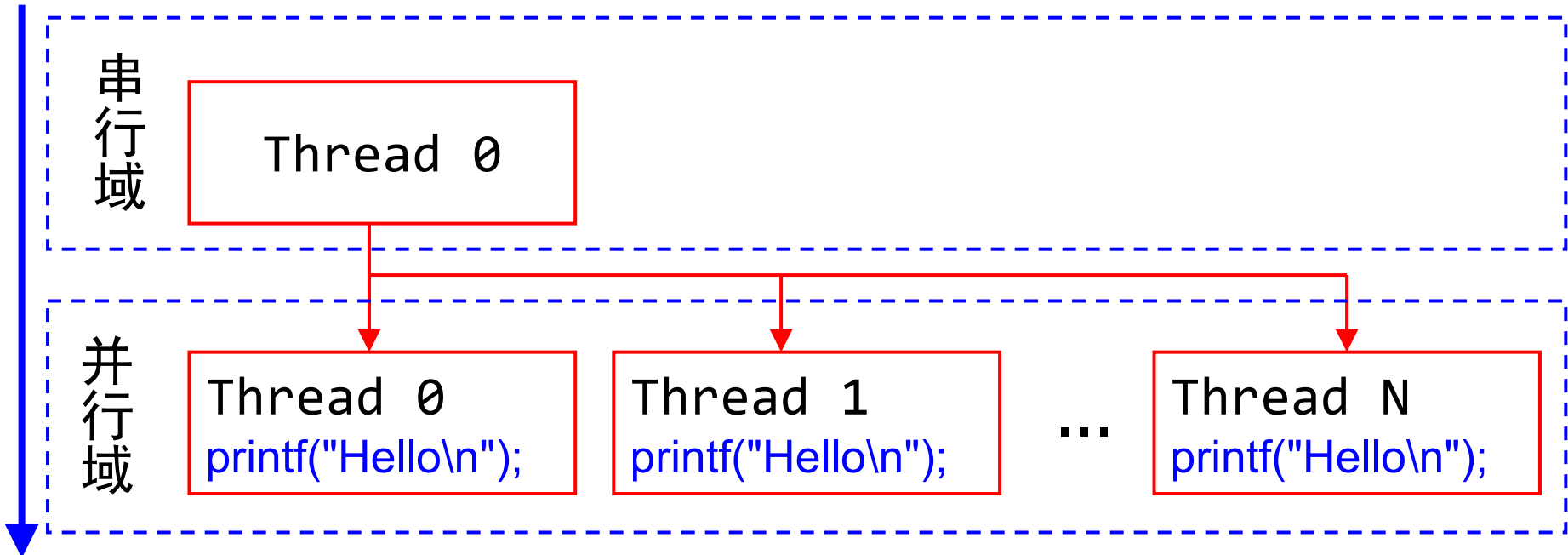
`if (scalar-logical-expression)`
`num_threads(scalar-integer-expression)`
`default(shared | none)`
`private(list), firstprivate(list)`
`shared(list)`
`copyin(list)`
`reduction(op : list)`

子句用来添加一些补充信息。
若有多个，则用空格隔开。

若没有指定线程个数，则产生最大可能的线程个数。

PARALLEL举例

```
#pragma omp parallel
{
    printf("Hello\n");
}
```



PARALLEL举例

例：指定线程个数，设置变量属性

```
#pragma omp parallel private(tid) num_threads(3)
{
    . . . . .
}
```

OMP_parallel_01.c

PARALLEL 嵌套

● PARALLEL 可以嵌套

OMP_parallel_02.c

```
omp_set_nested(1); // 打开并行域嵌套功能
#pragma omp parallel private(tid) num_threads(2)
{
    tid=omp_get_thread_num();
    printf("Hello world from OpenMP thread %d\n", tid);

    #pragma omp parallel private(tid) num_threads(3)
    {
        tid=omp_get_thread_num();
        printf("Hello math from OpenMP thread %d\n", tid);
    }
}
```

† 缺省不支持嵌套，需要利用 OpenMP 的 API 过程 **omp_set_nested** 开启嵌套功能（该过程的缺省值是 **false**）

4

工作共享结构

1 并行编程介绍

2 OpenMP 简介

3 并行域

4 工作共享结构

- 工作共享指令分类
- 循环共享结构
- SCHEDULE 任务调度
- 数据的共享和私有
- 归约操作

工作共享指令

■ 工作共享指令

- 负责任务的划分和分配,
 - 在每个工作分享结构入口处无需同步
 - 每个工作分享结构结束处会**隐含障碍同步** (master 除外)
-
- **for** 指令: 自动划分和分配循环任务
 - **sections** 指令: 手动划分任务
 - **single** 指令: 指定并行域中的串行任务
 - **master** 指令: 指定仅由主线程执行的串行任务

循环共享

Fortran	<code>!\$omp do</code> [clause clause ...] <i>do-loops</i> <code>!\$omp end do</code>
C/C++	<code>#pragma omp for</code> [clause clause ...] { <i>for-loops</i> }

- 只负责工作分享，不负责并行域的产生和管理，一般需放在并行域中
- 如果不放在并行域内，则只能串行执行
- 结尾处有隐式同步，可用的子句（clause）包括：

`private(list), firstprivate(list), lastprivate(list)`
`reduction(op : list)`
`schedule(kind[, chunk_size])`
`ordered`
`nowait`

循环

串行循环

- 将循环变量从初始值开始，逐次递增或递减，直至满足结束条件，其间对每个循环变量的取值都将执行一次循环体内的代码，且循环体内的代码是依次串行执行的

OpenMP 并行循环

- 假定总共有 N 次循环，**OpenMP** 对循环的任务分配就是将这 N 次循环进行划分，然后让每个并发线程各自负责其中的一部分循环工作，因此必须确保每次循环之间的数据的**相互独立性**！

† 循环变量只能是整型或指针

† 将任务划分后分发给并发进程称为“调度”（schedule）

循环共享举例

OMP_for.c

```
#include <omp.h>
#include <stdio.h>
#define N 10000
int main()
{
    int A[N], B[N], i;
    #pragma omp parallel num_threads(4)
    {
        if (!omp_get_thread_num())
            printf("Number of threads: %d\n", omp_get_num_threads());
        #pragma omp for
        for(i=0; i<N; i++)
        {   B[i]=i; A[i]=2*B[i];   }
    }
    printf("A[n]=%d, B[n]=%d\n", A[N-1], B[N-1]);
    return 0;
}
```

for (循环变量赋初值; 循环条件; 循环变量增量)
 循环体 // 循环体中不能修改循环变量的值

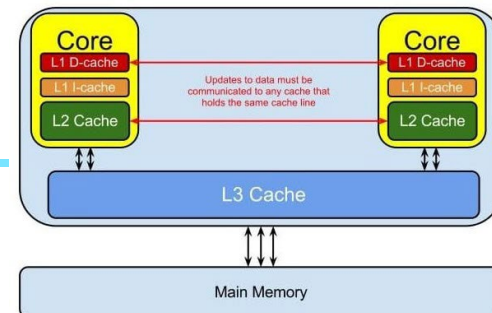
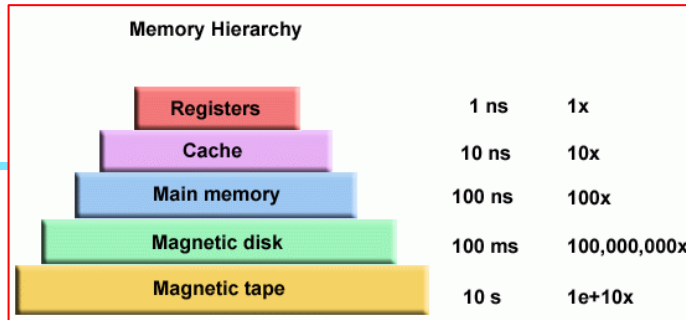
SCHEDULE

- 在循环共享结构中，将任务划分后分发给各个线程称为**调度**(schedule)
- 任务调度的方式直接影响程序的效率：（1）任务的均衡程度；（2）循环体内数据访问顺序与相应的 cache 冲突情况。

循环体任务的调度基本原则

- 分解代价低：分解方法要快速，尽量减少分解任务而产生的额外开销
- 任务计算量要均衡
- 尽量避免高速缓存（cache）冲突，提高 cache 命中率。

高速缓存

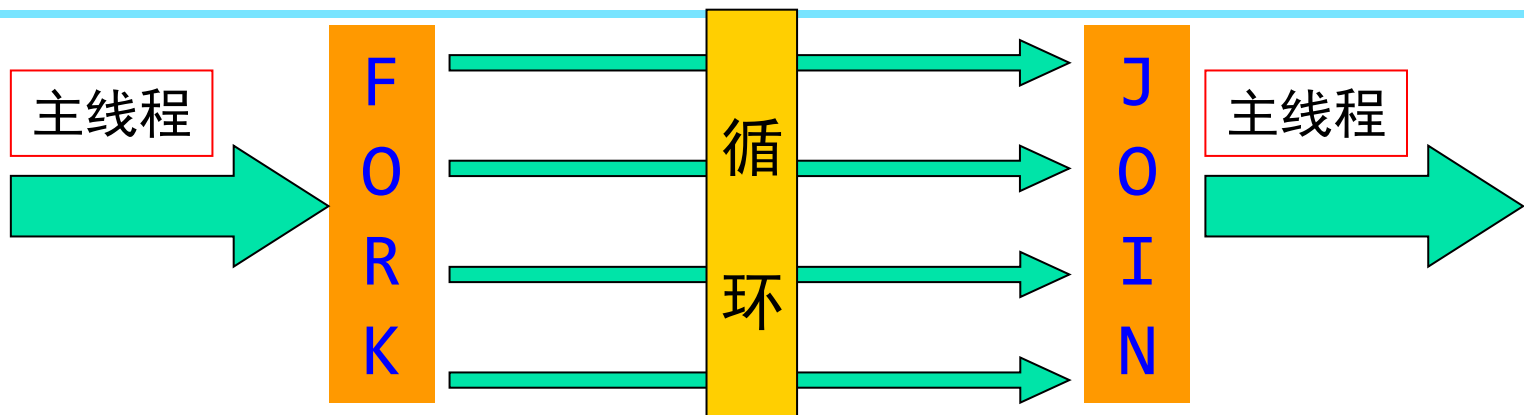


高速缓存 (cache) 的关键特性是以连续单元的数据块的形式组成的，当处理器需要引用某个数据块的一个或几个字节时，这个块的所有数据就会被传送到高速缓存中。因此，如果接下来需要引用这个块中的其他数据，则不必再从主内存中调用它，这样就可以提高执行效率。

在多处理器系统中，不同处理器可能需要同一个数据块的不同部分，尽管实际数据不共享（处理器有各自的高速缓存），但如果一个处理器对该数据块的其他部分写入，由于高速缓存的一致性协议，这个块在其他高速缓存上的拷贝就要全部进行更新或者使无效，这就是所谓的“假共享”，系统的性能有负面的影响。

比如：处理器 A 和 B 访问同一个数据块的不同部分，如果处理器 A 修改了数据，则高速缓存一致协议将更新或者使处理器 B 中的高速缓存块无效。而在此时处理器 B 可能也修改了数据，则高速缓存一致协议反过来又要将处理器 A 中的高速缓存块进行更新或者使无效。如此往复，就会导致高速缓存块的乒乓效应 (ping-pong effect)。

SCHEDULE



■ 任务调度 SCHEDULE

- SCHEDULE(**static**, chunk)
静态分配, chunk 为任务块的大小, 每个任务块被轮转分配给各线程
- SCHEDULE(**dynamic**, chunk)
动态分配, chunk 为任务块的大小, 按先来先服务原则分配
- SCHEDULE(**guided**, chunk)
动态分配, 任务块大小可变, 先大后小, chunk 指定最小任务的大小
- SCHEDULE(**runtime**)
具体调度方式到运行时才进行, 由环境变量 OMP_SCHEDULE 确定

SCHEDULE方式

SCHEDULE(static, chunk)

SCHEDULE(static)

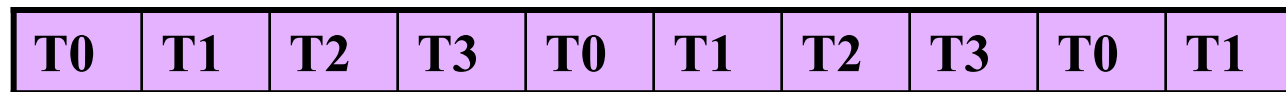
- 循环任务被划分为 chunk 大小的子任务，然后被轮转的分配给各个线程
- 省略 chunk，则循环任务被划分成（近似）相同大小的子任务，每个线程被分配一个子任务；

例：假如线程数为 4，总任务量为 40，则

schudule(static)



schudule(static, 4)



SCHEDULE方式

SCHEDULE(dynamic, chunk)

SCHEDULE(dynamic)

- 基于先来先服务方式分配给各线程；
- 当省略 chunk 时，默认值为 1

SCHEDULE(guided, chunk)

SCHEDULE(guided)

$$S_k = \frac{R_k}{N}$$

- 类似 dynamic，但任务块开始较大，然后变小，划分方式取决于编译器
- chunk 指定最小任务的大小，省略时默认值为 1

GCC: S_k 第 k 块任务大小， N 线程个数， R_k 剩余循环次数

SCHEDULE(runtime)

- 调度延迟到运行时，调度方式取决于环境变量 OMP_SCHEDULE 的值

并行域与循环合并

- 如果并行域中只有循环共享结构，则可以合写在一起

Fortran	<code>!\$omp parallel do</code> [clause clause ...] <i>do-loops</i> <code>!\$omp end parallel do</code>
C/C++	<code>#pragma omp parallel for</code> [clause clause ...] { <i>for-loops</i> }

循环举例

OMP_parallel_for.c

```
#define N 100000000
int main()
{
    static int A[N], B[N], i;
    clock_t t0, t1;

    t0 = clock();
    #pragma omp parallel for num_threads(4)
        for(i=0; i<N; i++)
            { B[i]=i; A[i]=2*B[i]; }

    t1 = clock();
    printf("A[n]=%d, B[n]=%d\n", A[N-1], B[N-1]);
    printf("Elapsed time: %.2e\n", (double)(t1-t0)/CLOCKS_PER_SEC);
}
```

举例：PI

$$\pi = \int_0^1 \frac{4}{x^2 + 1} dx$$

■ 中点公式： $\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{i=1}^n f\left(\frac{x_{i-1} + x_i}{2}\right)$

$$h = \frac{b-a}{n}$$

$$x_i = a + ih$$

■ 梯形公式： $\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{i=1}^n \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2}$

$$= \frac{h}{2} (f(x_0) + f(x_n)) + h \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$$

PI 串行程序

C_pi.c

```
const int n=1000000;  
inline double f(double x)  
{ return 4/(x*x+1); }  
  
int main()  
{  
    double a=0.0, b=1.0, h=(b-a)/n, mypi=0.0;  
    int i;  
  
    mypi = f(a) + f(b);  
    for(i=1; i<=n; i++)  
    { mypi = mypi + f(a+i*h); }  
    mypi = h*mypi;  
    printf("mypi=%.10f\n", mypi);  
    return 0;  
}
```

PI 并行: for + critical

```
#pragma omp parallel for private(i) shared(a,h,mypi)
for(i=1; i<n; i++)
{
    #pragma omp critical
    mypi = mypi + f(a+i*h);
}
mypi = mypi + (f(a) + f(b))/2;
mypi = h*mypi;
```

OMP_pi_critical.c

几个常用函数

`omp_get_num_threads()` 返回当前并行域中的线程个数

`omp_get_thread_num()` 返回当前线程的线程号, 0号为主线程

`omp_get_wtime()` 获取 **wall time**, 以秒为单位, 双精度型的实数

PI 并行: for

```
double mypi[nthreads];
#pragma omp parallel num_threads(nthreads) private(i,tid) shared(a,h,mypi)
{
    tid = omp_get_thread_num();
    #pragma omp for
    for(i=1; i<n; i++)
    {
        mypi[tid] = mypi[tid] + f(a+i*h);
    }
}
for(i=1; i<nthreads; i++)
    mypi[0] = mypi[0] + mypi[i];
mypi[0] = mypi[0] + (f(a) + f(b))/2;
mypi[0] = h*mypi[0];
```

OMP_pi_for.c

课堂练习

课堂练习（30 分钟）：

编写程序，使用 `reduction` 并行计算 π 的近似值，采用梯形法。

（程序取名 `quiz01_xxx.c`，其 `xxx` 为学号最后三位，程序第一行：`//学号-姓名`）

（发送至 `hwmath@126.com`，邮件主题：`quiz01-学号-姓名`）

[illegible]