

## 面向国产神威众核架构的区域气候模式 CWRf 性能优化技术\*

吕小敬<sup>1,2</sup>, 刘 钊<sup>2,3</sup>, 蔡蕙伊<sup>2</sup>, 李锦薇<sup>2</sup>

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214000; 2. 国家超级计算无锡中心, 江苏 无锡 214000;

3. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:** 区域气候模式 CWRf(Climate-Weather Research and Forecasting model) 是国家气候中心区域气候预测系统的重要组成部分, 也是系统最耗时的程序。高性能计算是提高 CWRf 数值预报计算性能的关键技术, 开展 CWRf 模式在国产神威众核架构上的移植和优化, 提高模式的模拟效率, 对模式的扩展、开发能力和可持续发展具有重要意义。基于国产众核 SW26010 处理器, 完成了 CWRf 区域气候模式的移植、性能分析和深入性能优化, 采用访存优化、Cache 命中率优化及众核加速优化等方法, 对 CWRf 模式动力过程、物理过程和 I/O 过程计算代码进行重构及众核加速。结果表明: 优化技术可使 CWRf 动力过程平均加速 2 倍, 最高加速 6.4 倍, 物理过程平均加速 1.7 倍, 最高加速 5.4 倍, I/O 过程加速 1.2 倍, 程序整体最高加速 1.4 倍, 计算误差在合理范围内。

**关键词:** CWRf; 高性能计算; 神威; SW26010

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212397

中文引用格式: 吕小敬, 刘钊, 蔡蕙伊, 等. 面向国产神威众核架构的区域气候模式 CWRf 性能优化技术[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 31-38.

英文引用格式: Lv Xiaojing, Liu Zhao, Cai Huiyi, et al. Optimization technology for regional climate model-CWRf based on domestic Sunway many-core architecture[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 31-38.

Optimization technology for regional climate model-CWRf  
based on domestic Sunway many-core architectureLv Xiaojing<sup>1,2</sup>, Liu Zhao<sup>2,3</sup>, Cai Huiyi<sup>2</sup>, Li Jinwei<sup>2</sup>

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214000, China;

2. National Supercomputing Center in Wuxi, Wuxi 214000, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100080, China)

**Abstract:** CWRf(Climate-Weather Research and Forecasting model) is a component of the regional climate prediction system built in the National Climate Center, and consumes the largest proportion of time. High performance computing is a key technology used to improve the compactional performance of CWRf. Carrying out the configuration and optimization of the CWRf model based on the domestic Sunway many-core system, improving the simulation efficiency are of great significance for the speedup, as well as the development capability and sustainable development of the model. This paper completed the configuration and performance evaluation of CWRf based on the SW26010 many-core architecture. Memory access optimization, Cache hit rate optimization, many-core acceleration models are introduced to speedup CWRf relating to the dynamic-core process, physical process and I/O process. The results show that the average speed of the dynamic process is 2 times and the highest speed is 6.4 times, the average speed of the physical process is 1.7 times and the highest speed is 5.4 times, the I/O process speeds up 1.2 times, the overall program speeds up to 1.4 times, and the calculation error is reasonable.

**Key words:** CWRf; high performance computing; Sunway; SW26010

## 0 引言

随着社会经济技术的快速发展, 人民生活水平不断提高, 国家和社会对短期气候预测精准度的需求越来越高。我国地处东亚季风区, 受全球变暖的影响, 灾害性极端气候事件日益频发, 对我国经济生产和人民生活造成

了严重影响, 因此高质量的中短期天气预报, 季节内-季节-年代际尺度的气候预测和预估, 对于减灾防灾, 促进我国国民经济持续增长和社会发展有重要而迫切的意义<sup>[1-2]</sup>。

数值预报预测是提升气候模式预测能力的核心技

\* 基金项目: 国家重点研发计划资助(2020YFB0204800); 国家自然科学基金项目(51877115); 无锡市太湖人才计划创新领军人才项目(融合人工智能技术的新一代精细化区域气候观测系统研制)

术,数值预报预测的研究依赖于高性能计算设备<sup>[3-4]</sup>,大的气候气象中心都拥有自己的高性能计算设备专门用于气象气候方面的研究,如美国 NCAR(美国国家大气科学研究中心)<sup>[5]</sup>、ORNL(美国橡树岭国产实验室)<sup>[6]</sup>、德国 DKRZ(气候计算研究中心)<sup>[7]</sup>等。同时世界各地很多超级计算机系统都部署了气候气象数值预报应用,如意大利投入并使用超级计算机用于支持高分辨率气象气候建模<sup>[8]</sup>,英国拥有国家超级计算机 Cray XC40 系统,并用于气象学、气候变化等的研究<sup>[9]</sup>。

与此同时,数值模式也向着更高分辨率、更复杂物理配置集合、更精细化预测能力、更复杂地形模拟等方向发展,而模式地形越复杂,物理配置集合越多,模式分辨率越高,对高性能计算机的计算能力、数据存储和处理的需求也越高<sup>[10-11]</sup>。近年来,高性能计算呈现由同构多核到异构众核的转变和发展态势,异构众核成为高性能计算中最主要的组成部分<sup>[12-13]</sup>。为了提高气候气象模式的兼容性和高效性,科研人员针对异构众核高性能计算机进行模式进行移植和优化。如 Jarno Mielikainen 和 Melin Huang 等都针对 GPU 架构平台实现了 WRF 移植,并采用 CUDA 对个别物理过程方案进行优化,单 GPU 加速 100~200 倍<sup>[14-15]</sup>,魏敏等针对 BCC-AGCM 模式分别在 MIC 卡、GPU 及神威众核进行移植和加速,加速效果分

别达到 14 倍、3 倍和 3 倍<sup>[16-18]</sup>,清华大学针对神威太湖之光系统进行 CAM 模式进行移植,并将应用扩展至全机 40 960 节点<sup>[19]</sup>。

区域气候模式 CWRf 由 Liang 等研制和开发<sup>[20]</sup>,针对气候模拟进行研究,具有模拟东亚季风主要特征的能力<sup>[21-22]</sup>。CWRf 模式目前是国家气候中心区域气候预测系统的重要组成部分,也是系统中最耗时的程序。将 CWRf 模式移植到国产超级计算机系统——神威·太湖之光系统,并针对神威·太湖之光系统对 CWRf 进行移植和优化,提高 CWRf 模式的扩展和开发能力,提高 CWRf 的模拟效率,对增强中国区域精细化集合月/季短期气候预测能力和 CWRf 模式短期气候预测的可持续发展都具有重要意义。

### 1 神威·太湖之光系统介绍

#### 1.1 神威·太湖之光系统简介

神威·太湖之光系统成立于 2016 年,是世界上首台峰值性能超过 10 亿亿的超级计算机系统。

##### 1.1.1 SW26010 处理器

神威·太湖之光系统计算机峰值运算速度为 125.436 PFLOPS,内存总容量为 1 024 TB,全机共 40 个机柜,每个机柜 1 024 个 SW26010 节点,SW26010 处理器架构如图 1 所示。

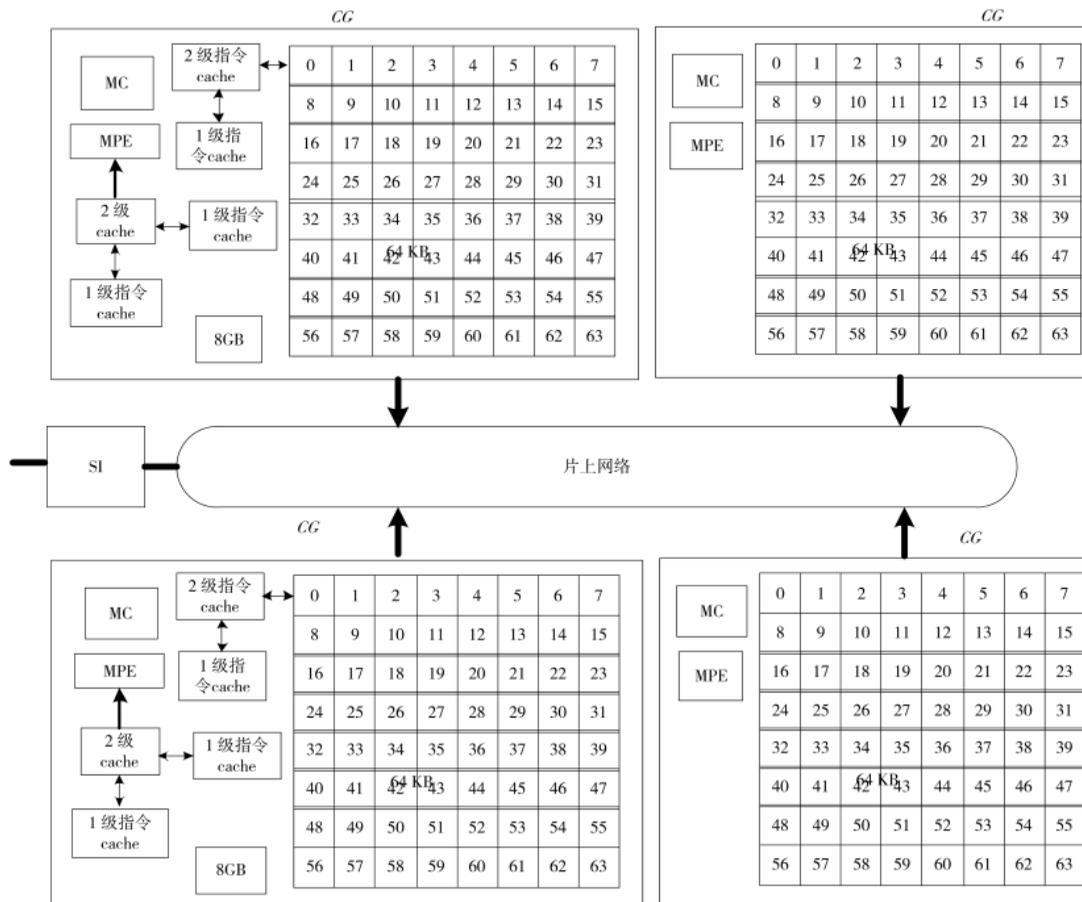


图 1 SW26010 节点

SW26010 处理器由上海高性能集成电路设计中心研制,一个节点包含 4 个核组,每个核组内包含 65 个核心(1 个主核,64 个从核)。主核可作为控制核心,进行任务调用、I/O 和通信,从核作为加速核,完成计算核心段的计算加速。

SW26010 处理器中每个主核 8 GB 内存,同时具有 32 KB 一级指令 Cache,32 KB 一级数据 Cache,512 KB 二级 Cache。从核中仅有 16 KB 的一级指令缓存,同一核组内从核共享的 64 KB 二级指令 Cache 和每个从核内的 64 KB 局部缓存,因此 SW26010 处理器无法像其他众核处理器一样通过软 Cache 机制实现主从核之间的数据共享,而是需要通过精细化的算法核数据控制才能实现运算控制核心和运算核心之间的高效数据交互。

1.1.2 神威·太湖之光系统语言环境

神威·太湖之光计算机系统语言环境由 4 部分组成(图 2 所示):(1)基础语言;(2)并行编程语言/接口;(3)用户使用环境;(4)基础编程环境/工具。

基础语言和基础编程环境/工具保障神威·太湖之光系统支持 C、C++、Fortran 等常用语言及这些语言及编程所需要的基础函数库和编译优化功能,满足实际应用课题的编译需求。

并行编程语言/接口和用户使用环境提供不同的编程环境和并行编程模型,满足实际课题开发和移植的开发需求,不同编译支持的编译模型如图 2 所示。

用户使用环境			
并行开发环境	SWACC*	MPI支撑环境	
并行编程语言			
MPI3.0	OpenMP3.1	OpenACC2.0	Athread
基础编程语言			
C	C++	Fortran	
基础编程环境			
基础编译器	基础函数库	性能优化工具	

图 2 神威·太湖之光系统编程环境及并行编程模型

神威·太湖之光系统不同编译器编译的目标文件能通过基础编译器进行耦合,提高了编程的灵活。

2 CWRF 区域气候模式

CWRF(Climate-weather Research and Forecasting Model)是 WRF 的一个延伸拓展,它继承了 WRF 在数值天气预报中的全部功能,并且强化了气候预测能力。CWRF 中融合了多种物理过程参数化方案,并且做到了多物理方案的“即插即用”,在天气-气候模式上有着很强的适用性,同时 CWRF 能具有全球模式矫正能力和高精度模拟能力,能与全球气候模式耦合,对不同场景的气候模式进行降尺度模拟,提高科学研究的能力。

2.1 计算框架

CWRF 内计算流程如图 3 所示。

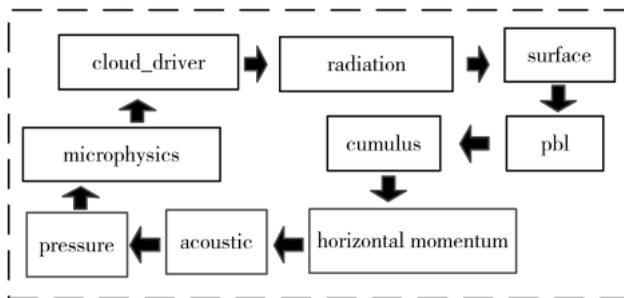


图 3 CWRF 计算流程

CWRF 动力框架沿用 WRF 的动力框架,时间积分方案采用龙格库塔 RK3 算法,通过采用完全可压缩、非静力平衡欧拉模型,计算水平动量,声波模态积分及大气标量。

CWRF 中物理过程主要有云过程、辐射过程、陆面过程、积云过程、辐射过程等,不同物理过程计算特征不同,同时各物理过程间互相影响,同一物理过程内不同方案计算模式相差很大,计算框架和计算算法都需要单独分析。

2.2 移植策略

CWRF 中已实现 MPI 进程级别并行,因此在 MPI 级别移植时只需考虑编译器,依赖库及语法兼容问题。通过配置环境变量,加载依赖库,修改不支持语法及修改部分配置文件可实现 CWRF 主核版本移植。

由于 CWRF 代码量巨大,约百万行,且程序内模块众多,同时计算耗时十分分散,手动实现所有核心段众核加速难度很大,因此需要制定合适的移植优化策略,减少任务量的同时尽可能地增加程序的优化效率。

神威·太湖之光系统支持两种众核加速模式:(1)OpenACC\*,它基于标准的 OpenACC2.0 开发,可通过添加编译指示,将计算核心段自动加载至从核运行,便于快速实现核心段的加速;(2)Athread 加速线程库,该库类似 Pthread 线程库,支持代码级别的重构,便于利用 SW26010 处理器内的硬件加速设备,可最大限度地提高核心段的加速性能。鉴于 CWRF 代码量太大,CWRF 采用 OpenACC+Athread 混合众核并行模式。

3 CWRF 优化方案

本文测试的算例配置如表 1 所示。

表 1 CWRF 算例配置

Time step	嵌套层数	分辨率	网格数	垂直层数
30	1	30	232×172	36

3.1 CWRF 性能分析

CWRF 中采用两种模式统计性能:SWLU 和 SWGPTL。SWLU 是由国家超级计算无锡中心开发的针对神威

芯片主核的性能统计工具包,通过在程序源码中添加 swlu\_prof\_init、swlu\_prof\_start、swlu\_stop 及 swlu\_prof\_stop 四个函数,并在编译时链接 swlu 库文件,程序运行技术后即可自动统计出整个程序中性能占比超过 1% 的函数。CWRF 中主要耗时函数及运行时间占比如图 4 所示。

采用 SWLU 工具可以迅速得到 CWRF 的主要的耗时占比,然而由于各物理过程仍包含不同的方案及运行分支,且物理过程内代码量仍然很大,不能实现全部代码的评估,仍然需要针对具体的代码进行详细的性能分析及评估,因此采用插装统计工具 SWGPTL。该工具通过在待统计段前后插装,运行结束即可打印待统计段的累计耗时及调用开销。SWGPTL 统计辐射物理过程耗时及调用关系如图 5 所示。

CWRF 中动力过程占比约 25%,物理过程占比约 35%,通信占比约 25%,I/O 占比 5%。因此 CWRF 的并行优化主要集中在耗时较多动力过程、物理过程、I/O 及通信过程。

3.2 CWRF 并行优化方案

3.2.1 CWRF 动力过程优化

动力过程主要完成 RK3 积分功能模块、声波模态积分模块、水平动量积分模块核大气标量等物理模块的计算,根据计算数据的相关度,可以分为两类:

(1)典型多柱循环计算

该类计算计算模式较为简单,多以二维或者三维循环模式出现,通过一个或者多个数组计算其他物理量。计算数据不需要周围网格点数据信息,且数据连续访问。针对该种计算类型,可采用 OpenACC\* 编译指示语句,较快实现核心计算段的众核加速,保证加速效率的情况下大规模实现核心段的快速并行,适合代码量大且核心

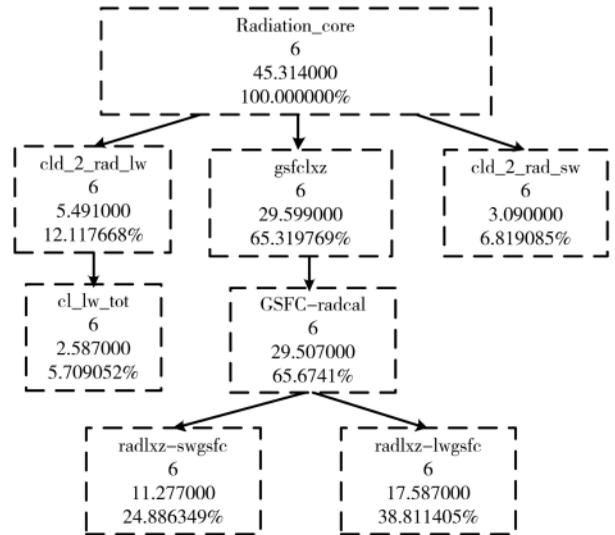


图 5 CWRF 辐射过程调用关系及占比

段分散的函数或核心段并行。CWRF 中多柱非stencil 计算的 OpenACC\* 众核加速示意图如图 6 所示。

COPYOUT 指示数据传输模式仅从从核拷出到主核, LOCAL 指示数据为从核局存数据,PACKIN 指示数据为打包拷入从核,tile 指示将循环进行分块,collapse 指示将循环进行合并。

(2)多柱 stencil 计算

CWRF 插值计算时,根据插值函数的不同,一个网格点的数据计算需要依赖周围一个或者多个网格点的数据(stencil,图 7 所示),采用 OpenACC\* 众核加速时数据容易发生冲突,且动力过程中多柱 stencil 计算耗时一般较多,故采用定制化 Athread 加速线程库。

CWRF 中存在多种 stencil 计算模式(一维 stencil 计算,

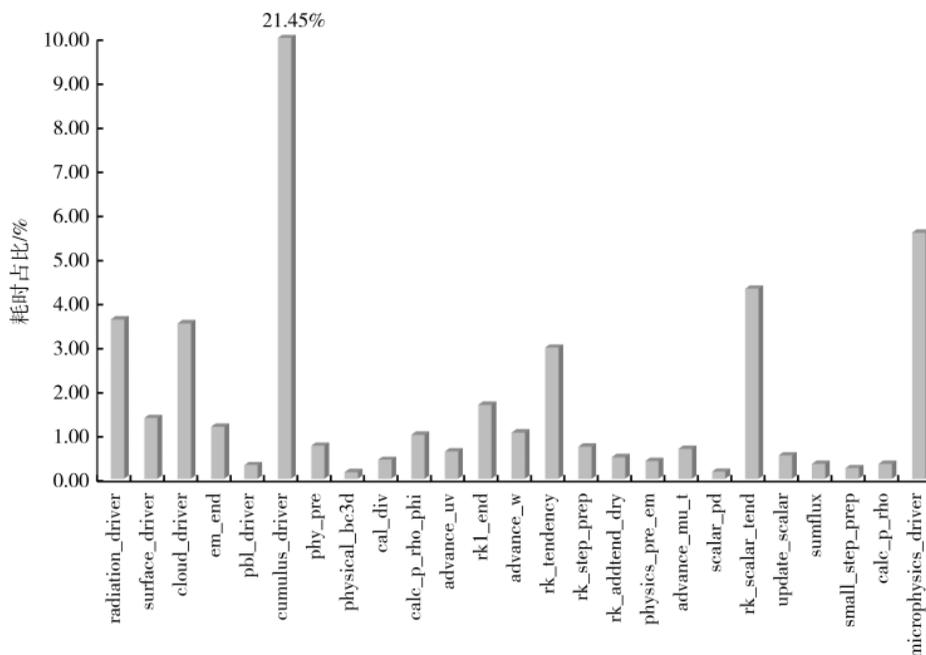


图 4 CWRF 动力过程及物理过程内主要耗时函数占比图

```

!$ACC COPYOUT(pm1) LOCAL(j,k,i)&
!$ACC PACKIN(j_start,j_end,k_start,k_end,i_start,i_end)&
!$ACC annotate(readonly(j_start,j_end,k_start,k_end,i_start,i_end))&
!$ACC tile(k:34) collapse(2)
DO j=j_start,j_end
DO k=k_start,k_end
DO i=i_start,i_end
    pm1(i,k,j)=p(i,k,j)+...
ENDDO
ENDDO
ENDDO
!$ACC END PARALLEL LOOP
    
```

图6 动力过程非 stencil 型多柱计算 OpenACC\* 加速示意图

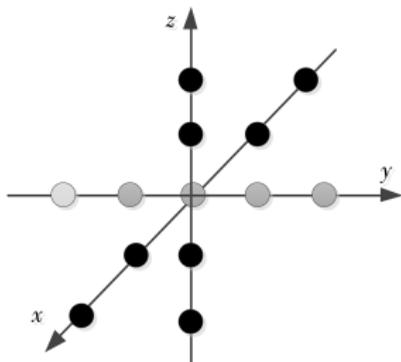


图7 stencil 计算模式

二维 stencil 计算, 三维 stencil 计算), 且由于数据规模的限制, 单纯的主从数据传输效率较低, 可采用以下策略进行优化。

①多核心段融合策略

CWRF 动力过程计算时, 多个核心段循环模式相同, 依赖数据部分重复, 可以将多个计算融合到一个核心段中, 减少中间数据的主从传输, 如图 8 所示。

②并行度与访存均衡策略

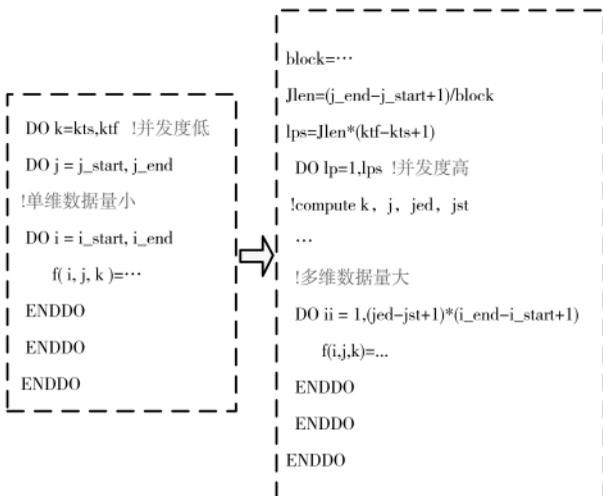


图8 CWRF 动力过程多核心段融合示意图

由于 CWRF 模拟区域数据, 整体网格量为  $232 \times 172 \times 36$ , 采用 MPI 并行后, 进程内的数据量随着进程的增加逐渐减少。众核并行时, 仅放置进程内的某一维全部数据, 此时使用的从核局存远远小于 64 KB, 同时仅对循环的最外层循环进行任务划分, 循环的并行度不够, 从核间的负载不均衡率较高, 因此需要根据循环情况, 合适地将中间层循环进行分解, 提高众核并发度, 同时保证局存的高效利用(如图 9 所示)。

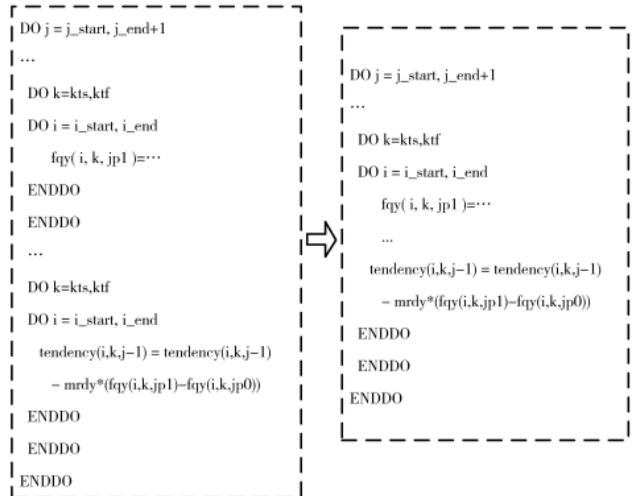


图9 并行度与访存均衡策略

图 7 中 stencil 计算模式中一次 stencil 计算需要  $(J-2)$ 、 $(J-1)$ 、 $(J)$ 、 $(J+1)$ 、 $(J+2)$  维度数据, 则下一次  $J'=J+1$  维 stencil 计算时,  $(J'-1)$ 、 $(J)$ 、 $(J'+1)$ 、 $(J'+2)$  可复用上一次的数据, (图 7 中灰色部分为可复用维度), 复用数据达总数据量的 4/5(不同 stencil 模式比例不同), 数据复用可进一步减少主从数据传输次数, 提高程序加速性能。

通过对 CWRF 动力过程中不同计算特征的核心段分类化众核并行, 可以保证动力过程典型循环的快速众核并行和 stencil 类型计算的定制化细粒度并行, 最大可能地提高动力过程的运行效率。

3.2.2 CWRF 物理过程优化

CWRF 中物理过程主要为单柱计算或双柱计算, 模块内子模块/函数众多, 耗时十分分散, 同时计算效率低。针对 CWRF 物理过程, 主要采用以下优化方案:

(1)物理过程代码重构

CWRF 中物理过程由于继承于 WRF, 代码中有较多的分支判断和 goto 语句, 同时物理过程内代码冗余, 重复计算或无效计算较多, 因此可根据代码循环架构, 重构访存不连续、冗余计算较多或 Cache 命中率的代码段, 提高数组访问效率(图 10 所示), 提高代码段 Cache 命中率(图 11 所示)。

(2)众核加速优化

CWRF 物理过程众核加速类似动力过程众核加速, 将核心计算段加载至从核运行, 同时从访存、并行度等

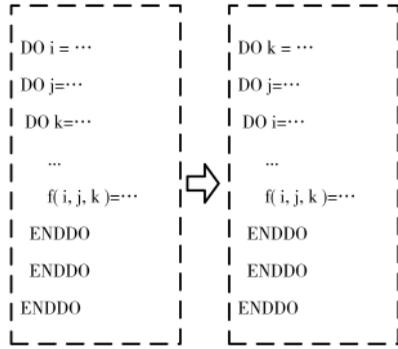


图 10 CWRP 物理过程提高数组访问效率示意图

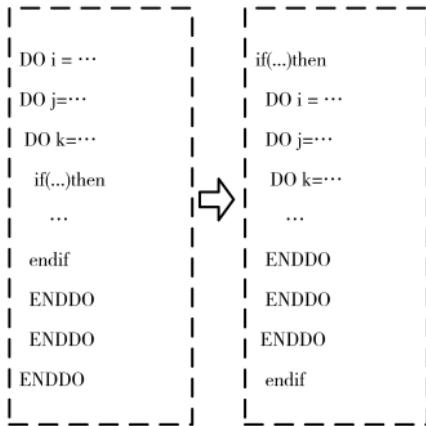


图 11 CWRP 提高代码段 Cache 命中率示意图

方便提高众核并行效率。由于 CWRP 物理过程存在多种高性能数学函数使用,同时子函数/模块调用较多,需要对数学函数计算效率进行优化,同时采用函数内联,减少函数调用耗时。物理过程优化技术如表 2 所示。

表 2 物理过程优化技术

物理过程	优化技术
微物理过程	代码重构,数学函数优化,众核
积云	代码重构,众核
辐射	数学函数优化,众核
云	Cache 优化,众核
陆面	代码重构,访存优化

3.2.3 并行支撑技术优化

CWRP 采用区域分解方式,每个进程维护子区域的计算和数据更新,0 进程作为主进程,收集其他非主进程内的区域数据,拼接为全局数组后,再将全局数据写到输出文件中。全局数据收集过程如图 12 所示。

整个数据收集过程共分为 3 个步骤:

- (1)进程内将多维局部数据整理为一维连续数据碎片。
- (2)主进程收集各子进程一维连续数据碎片为一维全局数据。
- (3)主进程将一维全局数据拼接回多维全局数据。

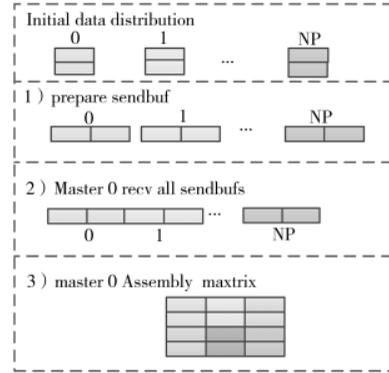


图 12 CWRP 主进程数据收集过程

(1)与(3)过程内均为一段段连续块循环赋值,主核每次只能实现一个连续块的循环赋值。采用众核加速时,主从间 DMA 每次将 64 个连续块加载至 64 个从核,每个从核控制一个数据块,从核再通过 DMA 块操作将不同数据块放置到相应多维全局数据位置,一次可以实现 64 个数据块的拼接,提高数据拼接速度。

4 优化效果

4.1 主从核结果对比

采用表 1 配置,测试时间 2003.03.02-2004.03.02,参数化方案及变量保持一致,测试纯主核 196 进程和主从优化 196 进程,主核-观测 2003 年 3 月主核-观测平均 2 米温度及相同时间段主从核-观测分布如图 13、图 14 所示。结果表明主从核与主核模拟结果总体趋势一致,误差趋势也一致,输出结果是正确且合理的。

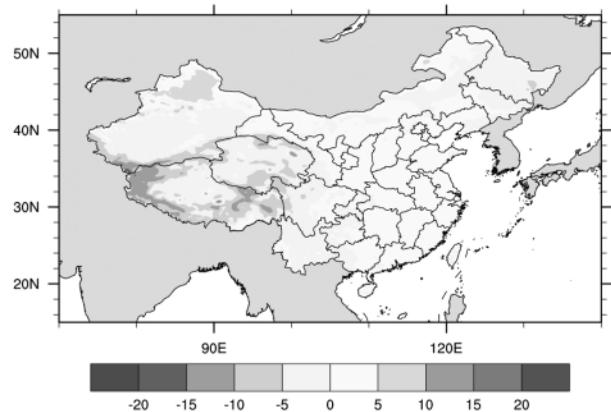


图 13 CWRP 2003 年 3 月的月平均 2 米温度(K)主核-观测结果差值分布

4.2 加速效果测试

经过众核优化后,CWRP 动力过程加速效果如图 15 所示。

可以看到,经过众核加速后,CWRP 动力过程平均加速 2 倍,最高加速 6.4 倍。CWRP 各物理过程加速效果如图 16 所示。

经过优化,CWRP 物理过程平均加速 1.8 倍,最高

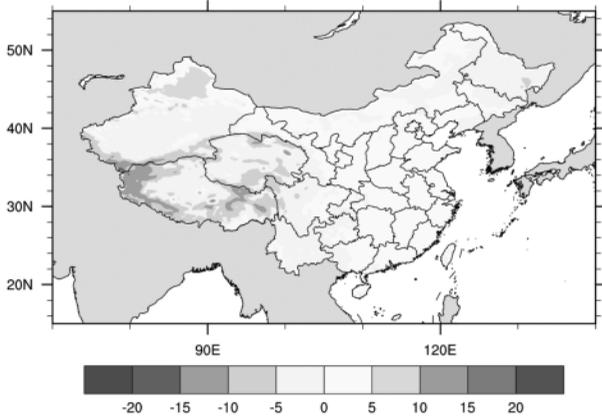


图 14 CWRF 2003 年 3 月的月平均 2 米温度 (K) 主从核-观测结果差值分布

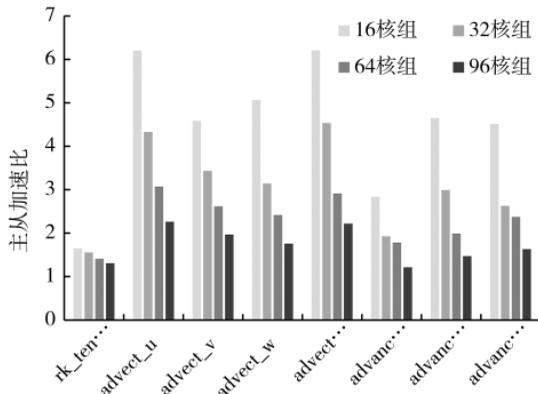


图 15 CWRF 动力过程加速效果图

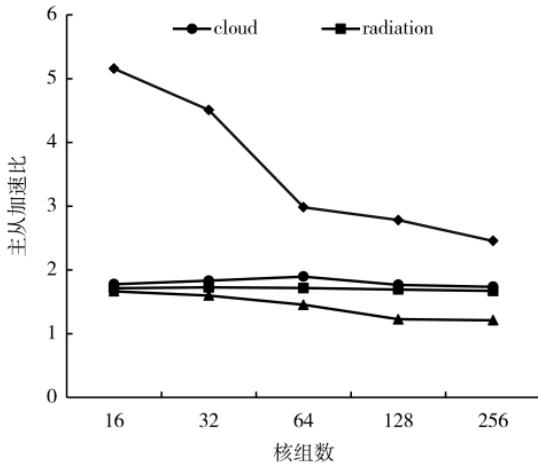


图 16 CWRF 物理过程加速效果图

加速 5.2 倍。由于测试算例分辨率和网格规模较小 (232×172×36 网格), 且随着进程数的增加, 进程内分配到的网格数大幅减少, 而 SW26010 处理器计算密度高, 进程增加时众核存储和计算能力不能充分利用, 故众核加速倍数与 SW26010 处理器核数还存在一定差距, 且众核加速效果随着进程数的增加会有所下降, 动力过程和 I/O 过程也均存在类似的情况。

CWRF-I/O 过程加速前后写文件耗时如图 17 所示。经过众核优化, CWRF-I/O 过程加速 1.2 倍。

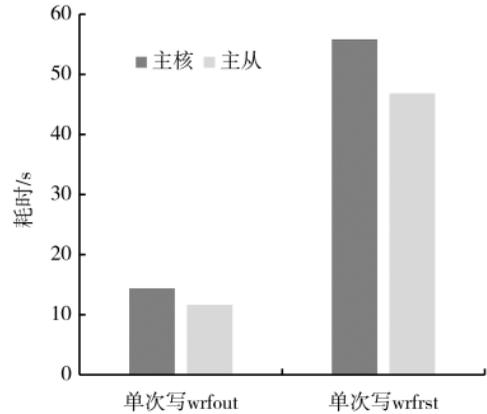


图 17 CWRF-I/O 过程加速效果图

将优化后的核心段进行集成, 形成 CWRF 主从优化集成版本, 采用 16 核组~96 核组并行规模进行测试, 由图 18 可知, CWRF 主从优化集成版本最高加速 1.4 倍左右, 平均加速 1.2 倍以上。

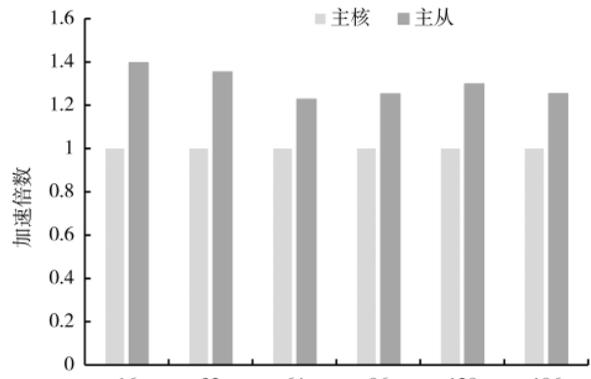


图 18 CWRF 主从优化集成版本相较主核版本加速效果

图 19 为算例在不同并行规模下, 采用主核版本、主从版本模式模拟的加速比。

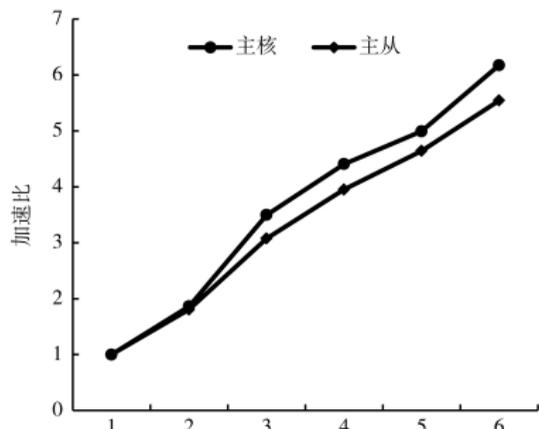


图 19 CWRF 模式计算加速比

由图 19 可知,模式采用主核、主从核加速趋势一致,但是随着进程数的增加,主从并行加速比降低,这是由于 CWRP 测试算例分辨率较低(30 km),总体网格规模较小,随着进程数的增加,进程内计算量大幅下降,而 SW26010 处理器计算密度高,进程增加时,众核无法充分发挥高计算密度特性。

## 5 结论

本文基于神威·太湖之光系统对 CWRP 区域气候模式进行了移植,采用整体性能统计和插装系统统计工具对 CWRP 区域气候模式进行了详细的性能分析,开展了 CWRP 模式内大量函数及模块的高性能计算优化,提高了 CWRP 区域气候模式的计算效率,缓解了 CWRP 高性能计算平台的计算压力,同时也对 CWRP 高性能版本进行了检验和测试,研究表明:

(1)CWRP 区域气候模式动力过程经过众核优化,核心段平均加速约 2 倍,最高加速约 6.4 倍;

(2)CWRP 区域气候模式物理过程经过访存优化,Cache 命中率优化、冗余计算删减和众核优化,核心段平均加速 1.7 倍,最高加速 5.2 倍;

(3)CWRP-I/O 过程经过众核优化加速 1.2 倍;

(4)CWRP 区域气候模式整体最高加速达 1.4 倍。

通过 CWRP 区域气候模式的移植核优化,项目组对 CWRP 区域气候模式的移植和优化积累了一定的经验,为未来高分辨率 CWRP 区域气候模式的数值模拟和研究工作提供了技术支撑。

## 参考文献

- [1] 贾小龙,陈丽娟,高辉,等.我国短期气候预测技术进展[J].应用气象学报,2013,24(6):641-655.
- [2] 王会军,孙建奇,郎梅梅,等.几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果[J].大气科学,2008,32(4):806-814.
- [3] 赵立成,沈文海,肖华东,等.高性能计算技术在气象领域的应用[J].应用气象学报,2016,27(5):550-558.
- [4] 王彬.高性能计算技术在气象部门的应用[J].计算机工程与设计,2014,35(4):1476-1479.
- [5] KALNAY E, JENNE R. Summary of the nmc/ncar reanalysis workshop of April 1991[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1991, 72(12): 1897-1904.
- [6] RUSSELL L B. In situ air temperature and humidity measurements over diverse land covers in Greenbelt, Maryland, November 2013 - November 2015 [J]. Mutation Research - Reviews in Mutation Research, 2016, 732(2): 69-90.
- [7] FICHTEL H. File service in a supercomputing environment[C]// Fourth International Exhibition and Conference on High-Performance Computing. Super Computing Europe '92, 1992: 44-47.
- [8] BOTTAZZI M, SCIPIONE G. The Italian open data meteorological portal; MISTRAL[J]. Meteorological Applications, 2021, 28(4): e2004.
- [9] Sam Clarke. rust separation on the Cray XC40 using PBS Pro[J]. Concurrency and Computation - Practice & Experience. 2018, 30: e4296.
- [10] 陈德辉,薛纪善.数值天气预报业务模式现状与展望[J].气象学报,2004(5):623-633.
- [11] 黎慧琦,张大林.中小尺度对流系统的高分辨率数值模拟近况和未来挑战[J].气象科技进展,2021,11(3):75-91.
- [12] 黄国睿,张平,魏广博.多核处理器的关键技术及其发展趋势[J].计算机工程与设计,2009,30(10):2414-2418.
- [13] 廖湘科,肖依.新型高性能计算系统与技术[J].中国科学:信息科学,2016,46(9):1175-1270.
- [14] MIELIKAINEN J, HUANG B, HUANG H A, et al. Improved GPU/CUDA based parallel weather and research forecast(WRF) single moment 5-Class(WSM5) cloud microphysics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(4): 1256-1265.
- [15] MELIN H, JARNO M. GPU-based parallel implementation of 5-Layer thermal diffusion scheme[J]. Conference on High-Performance Computing in Remote Sensing II, 2012, 8539 (853908): 0277-786X.
- [16] 方宝辉,徐金秀,魏敏,等.BCCAGCM106 在 Intel 众核上混合异构编程与优化研究[J].计算机科学与探索,2015,9(9):1093-1099.
- [17] 肖洒,魏敏,邓帅,等.基于 GPU-OpenACC 的气候模式加速优化研究[J].气象,2019,45(7):1001-1008.
- [18] 魏敏,王彬.BCCAGCM 模式在神威·太湖之光系统的优化[J].应用气象学报,2019,30(4):502-512.
- [19] FU H H, LIAO J F. Redesigning CAM-SE for peta-scale climate modeling performance and ultra-high resolution on sunway taihuLight[C]// International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), 2017: 1-12.
- [20] LIANG X Z, XU M, YUAN X, et al. Regional climate-weather research and forecasting model[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(9): 1363-1387.
- [21] 刘冠州,梁信忠.新一代区域气候模式(CWRP)国内应用进展[J].地球科学进展,2017,32(7):781-787.
- [22] JIANG R, SUN L, SUN C, et al. CWRP downscaling and understanding of China precipitation projections[J]. Climate Dynamics, 2021, 57: 1079-1096.

(收稿日期:2021-11-29)

## 作者简介:

吕小敬(1989-),女,博士研究生,工程师,主要研究方向:并行计算及应用。

刘钊(1986-),通信作者,男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:高性能计算应用和计算机系统结构,E-mail:liuz18@mails.tsinghua.edu.cn。

蔡蕙伊(1992-),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向:气候气象模式。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所