

基于矩阵嵌套的 CESM 负载均衡优化方案检索策略*

董润婷, 吴利, 黄建强, 王晓英

(青海大学 计算机技术与应用系, 青海 西宁 810016)

摘要: 通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)是一种定量描述气候系统模式变化的数值模式, 庞大的科学计算体量已使其成为高性能计算领域的重要研究对象之一。CESM 各个气象子模块及组件之间的负载不均衡问题使其计算性能一直不理想, 且由于其可用的进程布局方案本身的多样性会导致的巨大检索量, 因此通过人工调参枚举寻找最优布局本身并不现实。为解决这个问题, 提出并实践了一种基于矩阵嵌套思想的负载均衡优化方案检索策略帮助完成进程布局优化过程, 并介入基于模式并行要求的筛查保证检索结果具有可行性, 最终通过实验证明通过这种检索策略搜索获得的最优布局与默认布局相比平均计算性能提升达到 47.3%, 并在 5 个节点上实现了 1.419 的加速比。

关键词: 高性能计算; 通用地球系统模式; 矩阵嵌套; 负载均衡

中图分类号: TP311

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212426

中文引用格式: 董润婷, 吴利, 黄建强, 等. 基于矩阵嵌套的 CESM 负载均衡优化方案检索策略[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 24-30.

英文引用格式: Dong Runting, Wu Li, Huang Jianqiang, et al. A retrieval strategy of load balancing optimization scheme for CESM based on matrix nesting[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 24-30.

A retrieval strategy of load balancing optimization scheme for CESM based on matrix nesting

Dong Runting, Wu Li, Huang Jianqiang, Wang Xiaoying

(Department of Computer Technology and Application, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The Community Earth System Model(CESM) is a numerical model to quantitatively describe the change of climate system model, which is one of the most important research objects in the field of high-performance computing because of its huge volume of scientific computing. The load imbalance between each meteorological sub module and component of CESM makes its computing performance unsatisfactory. It is not realistic to retrieve the optimal layout manually by enumerating parameters because the diversity of available process layout schemes will lead to a huge amount of retrieval. In order to solve this problem, this paper proposed and implemented a retrieval strategy based on the matrix-nesting idea of load balancing optimization scheme to help the process layout and intervenes in the screening work based on the parallel requirements of the original model. Finally, the experiment proved that the optimal layout obtained by this search strategy search had a performance improvement of 47.3% compared with the default layout and achieved an acceleration ratio of 1.419 on 5 nodes.

Key words: high performance computing; community earth system model; matrix-nesting; load balancing

0 引言

在全球变暖的背景下, 极端天气事件发生频率显著增加, 严重影响社会经济和人民的生命财产安全, 天气预报以及对重大气候异常事件预测的重要性日益凸显。通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)作为一种定量描述气候系统模式变化的数值模式是气候模拟的重要工具, 也是全球领先的地球系统模型之一。

由于全球气候变化是一个长期且包含各种物理原理的过程, 因此使用地球系统模型进行气候变化模拟通常需要对数十年甚至数百年的模型进行整合推演, 并且对计算资源的需求量巨大, 地球系统模型也因而成为高性能计算在科学计算领域内极为重要的应用之一, 但模型的各个模块在 CPU 上不均匀的负载分布对整个气象模式的计算速度有非常严重的影响。

* 基金项目: 国家自然科学基金(62062059, 62162053); 国家重点实验室开放基金(2020-ZZ-03); 青海省高端创新人才千人计划; 青海大学 2021 年研究生课程建设项目——计算机体系结构(qdyk-210413)

因此,本文在基于已有研究经验的基础上,设计了一种有效利用矩阵嵌套思想优化负载均衡检索策略的算法,帮助优化整体进程布局。本文选择 21 世纪初的观测实验 B(B_2000)作为算法模型的验证对象,重点研究了利用这种基于矩阵嵌套的新型优化算法生成的布局优化策略,并对预期的负载均衡方案建议进行筛选。本文的主要工作内容如下:

(1)本文在矩阵嵌套算法的基础上,根据“最左、最低”的原则附加由进程总数确定的主要约束条件得到组件分布的思想,实现了一种自动检索进程布局优化策略。

(2)对于由 CESM 模块和工作原理之间的依赖关系导致不可行的解决方案,根据原始模型的并行要求介入筛选以降低搜索维度,保证了生成的策略模型的可行性。

(3)本文使用 PMPI(the MPI standard Profiling Interface)作为性能采集接口来分析性能数据,并优化性能,以进一步降低解决方案的搜索维度和时空消耗。

(4)本文通过保留一个缓存空间的方式来存储上次循环检索的负载均衡方案,以避免重复搜索过滤进程布局的同构结果。

最后,通过在多台服务器(1/2/5/9)上进行的实验,证明了根据上述工作内容建立的综合布局检索策略获得的最优结果相比默认进程分配情况,性能均得到了不同程度的提高,总体性能最高相比原始方案提升了 47.3%,综合考虑性能与计算资源的综合最优结果是在 5 个节点上实现了 1.419 的加速比。

1 CESM 简介

通用地球系统模式 CESM 是由美国国家大气中心(National Center For Atmospheric Research,NCAR)根据 CCSM4.0 开发的地球系统模型,它以海洋、大气、陆地表面和冰圈为主要研究对象,考虑了大气化学、生物地球化学和人类活动,能够广泛应用于气候与环境的演化机制、人与自然的相互作用、气候变化的预测研究等诸多方面^[1]。

CESM 采用模块化框架,如图 1 所示,其主体由几个模块组成,如大气(Community Atmosphere Model,CAM)、海洋(Parallel Ocean Program,POP)、陆面(Community Land Model,CLM)、海冰(Los Alamos sea ice model,CICE),模块

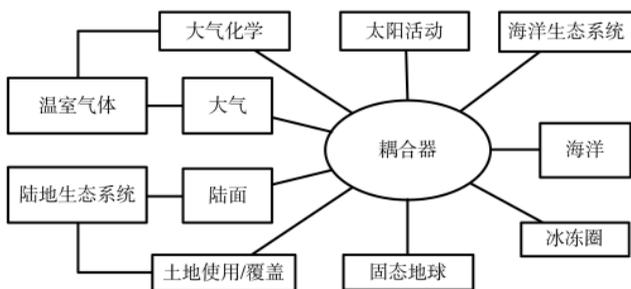


图 1 通用地球系统模式框架

之间的数据交换和模式操作由耦合器(CPL7)管理。耦合器通过 MPI 同步协调和控制模块之间交换的数据流控制整个系统运行的时间,根据磁通守恒在控制模块之间交换面间磁通,并通过控制子模式间的数据消息交换来控制整个模式系统的操作,这种耦合框架的结构已被认为是当前气候系统模型设计的最佳解决方案^[2]。

图 2 显示了 CESM 运行的主要流程^[3],包括耦合过程中最重要的过程。其中,流程图上方的标题栏指示流程的每列所属的通信区域;左侧的标签则是按照在模式驱动模块中的调用顺序进行标识;箭头指示数据流行进的方向。

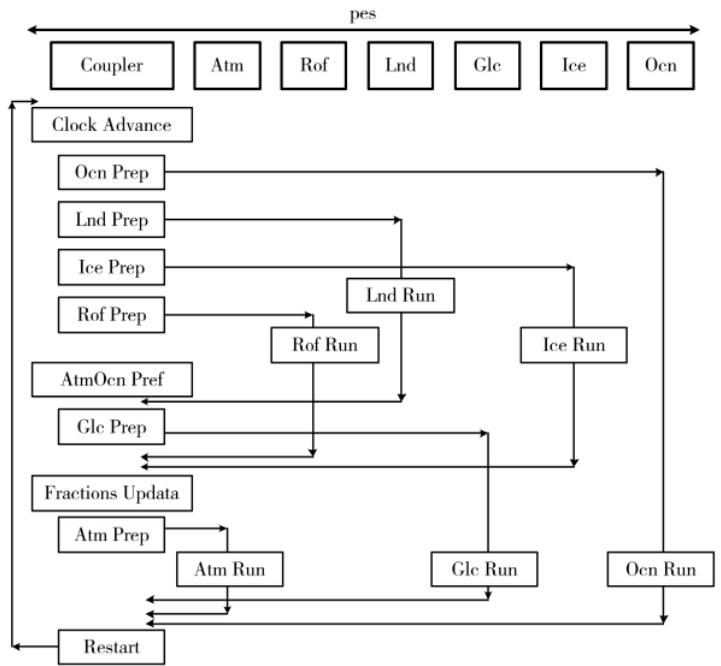


图 2 CESM 的主要耦合流程

2 相关工作

到目前为止,各个领域的科学家对 CESM 模式中各个组件的数据和结构均做了大量的分析,对各个组件的可扩展性也进行了详细的研究,此外,Gan L 等人将大气模型移植至神威太湖之光,通过使用 OpenACC 重构和细粒度的 Athread 方法进行优化^[4],并总结了将 HPC 技术转化为高效的地球科学解决方案而采取的措施和吸取的经验教训^[5]。

CESM 性能低下的主要原因是其组件、依赖项和各种计算特性之间的复杂交互^[6],而简单地增加进程数量可能不仅无法满足性能要求,且会消耗巨大的计算资源。因此,近几年来,高性能计算研究人员也在关注组件模型之间的功能并行、空间维度的并行以及共享内存多处理器计算节点或单个处理器中的循环级并行。Wan 等人对高性能计算机上 CESM 负载均衡的实际操作进行了详细的实验介绍,并对模型进行了一系列稳定性测试^[7]。Balaprakash 等人为 CICE 开发了一种基于机器学习的负

载平衡算法,该算法与先前基于专家知识的枚举可行配置方案相比,比评估结果低约六倍^[8]。Wang 等人提出的优化算法在一定程度上解决了 METGRID 的负载不平衡问题,优化后的算法在 64 个 CPU 核上运行 METGRID 和 REAL 模块的计算速度比优化前快 7.2 倍^[9]。

在进程分配方案的研究方面,丁楠等人提出了一种易于使用、易于移植的自动调整框架,有效降低了 CESM 进程布局的搜索开销,使模型的性能提高了 38.23%^[10],之后又通过构建一个轻量级、准确的性能模型,有效地捕获和预测具有给定仿真配置的端到端 CESM 组件的异构解决时间性能,最终使运行时间减少 58%^[11]。Wang Y 等人提出了一种高效的耦合并行算法^[12],包括输入数据的初始化、计算网格和过程的分解、组件模型的并行计算以及通过耦合器进行的数据交换,在 1 024 个 CPU 核上的并行效率达到 70%,并在此基础上从最优负载均衡和效率的角度提出了一种通用的 ESMS 性能评估方法^[13]。Li H 等人提出的协调进程调度算法(CPSA)允许组件在次优设置上执行且仍保持相对较高的并行加速,与 CESM 默认策略相比减少了 52.6% 的执行时间^[14];并在一年后将算法的执行时间优化至比默认策略减少 58% (CPSA-B)^[15]。

综合以上研究背景,负载均衡是实现 CESM 高效计算不得忽略的问题,但通过人工枚举的方式调整 CESM 进程布局方案需要大量计算资源,这是不现实的。因此,需要设计和实现更好的搜索策略来检索流程布局,以帮助在提高性能的同时替换繁琐和重复的工作。

3 性能分析

进行 CESM 性能数据收集是为了更好地分析其长期模拟的时间分布和负载条件,并在提高效率方面找到突破^[16],而性能分析的一个步骤就是收集性能数据,性能收集工具 CrayPat^[17]或 HPCToolkit^[18]提供了针对不同精度对性能进行分析的技术,布伦斯特等人也详细解释过如何在 CESM 上使用 Vampir 框架来收集陆地模块的性能信息^[19]。

本文使用通用的 PMPI 接口^[20]进行性能获取,性能采集流程如图 3 所示:首先初始化采集工具,每个进程创建一个记录用于记录进程内发生的 MPI 操作;随后定义 127 个 MPI 操作,通过 PMPI 接口拦截这些操作。这里,使用 bash 脚本语言来控制全局和子模块的配置。

在拦截到 PMPI 接口的 MPI_Send 后,则立即启动各种 MPI 操作记录,同时累加每个测试代码段中每个通信操作的各自时间消耗和每个 MPI 操作发生的总次数。当程序运行完毕后,每个进程都会汇总所有收集到的信息并写入所设定的文件中,作为评估通信性能的依据;而性能数据的统计标准,取决于模式组件的布局方式^[21]。

这里假设 T_{tot} 用于评估布局,并且集合 C 表示使用动态版本的动态地球系统的所有模式分量,而总量则计为 m 。

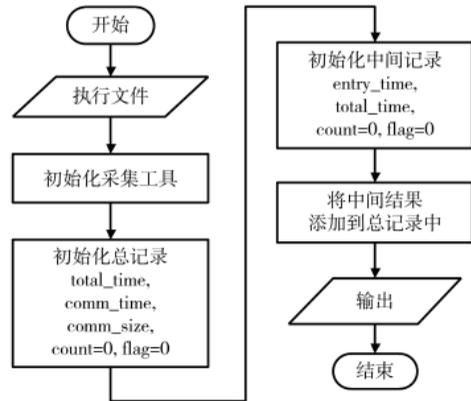


图 3 PMPI 性能采集流程图

$$T_{tot} = \max \{x_1, x_2, \dots, x_k | x_i \in C_2\}, k = m - n \quad (1)$$

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m | c_i \in \text{active components}\} \quad (2)$$

$$C_p = \{p_1, p_2, \dots, p_n | p_i \in \text{parallel parts}\} \quad 0 \leq n < m \quad (3)$$

$$C_s = C - C_p \quad (4)$$

其中, C_p 表示并行布局的组件,共 $n(0 \leq n < m)$ 个; C 代表串行布局的模式组件,它们的总运行时间由较差的一方决定^[22]。

串行部分 T_s 的运行时间是所有串行布局的模式组件的运行时间的总和:

$$T_s = \sum_{i=1}^n \{t_1, t_2, \dots, t_n | t_i \in C_s\} \quad (5)$$

4 方法与原理

4.1 负载均衡优化原理

负载均衡是指针对给定模型配置(组件集、网格等)优化处理器布局,从而使成本和吞吐量最大。虽然与大多数模型一样,增加总处理器通常会导致吞吐量增加和成本增加,对于固定总量的处理器,最优的处理器布局即为能够达到最大吞吐量的负载分配;对于不同处理器数量的配置,这意味着要找到模型空闲最少、成本相对较低且吞吐量相对较高的几个“最优点”^[24]。

例如,将布局更改为使用 128 个处理器进程(如图 4 所示),在 ATM 模块同时运行 ICE、LND 和 CPL 模块(这里由于海洋(OCN)模块在原则上是否可以与其他模块并行仍存在争议,因此 OCN 模型设定在自己独立的一组处

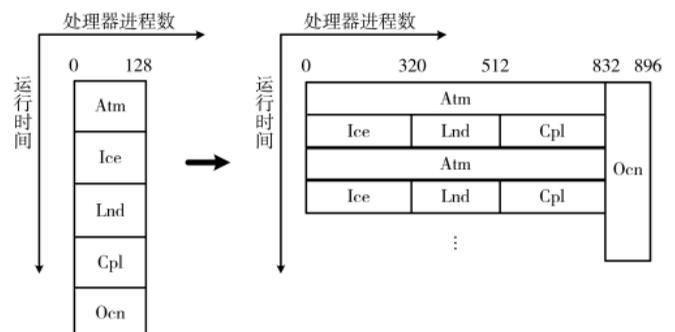


图 4 流程布局优化示例

理器上运行),则更改后的计算成本虽然有所提高,但运行速度提高到 2.5 倍以上。

4.2 矩阵嵌套思想

嵌套矩阵意味着矩阵的每个元素也是一个子矩阵, QBD (Quasi-Birth-and-Death) 过程^[25]和马尔可夫模型^[26]经常使用无限循环的嵌套矩阵。如图 5 所示,矩阵嵌套问题可以描述为内容布局在固定范围内的嵌套排列,这样得到的模型可以尽快将内容集中在最左下角。模型的任务是在一定范围内选择尽可能多的矩形,使每个矩形除了子矩形外还可以被嵌套在下一个更大的矩形内。

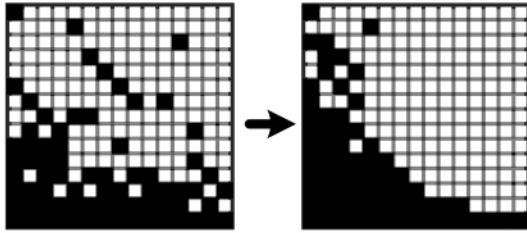


图 5 矩阵嵌套排列实例

本文将布局优化问题抽象为矩阵嵌套问题,即把每个模块看作是由“分配给每个部分的进程数”和“每个模块的起始位置”组成的镶嵌矩形,分别用矩形的“长”和“宽”表示。以一个坐标系为参考,其中横坐标代表使用的进程数,纵坐标代表时间,而最外面的矩形象征着对布局选择的约束,即给定的进程总数(如图 6 所示);另一个约束是地球模拟系统本身的原理决定的可用方案,即需要提前筛选出来的布局,例如海洋模块(OCN)根据气象原理中各模块的科学关系,是否可以与其他模块并行化一直存在争议。不过,由于海洋模块本身的时间成本就不小,因此在这里所研究的问题中不考虑将其与其他模块同时计算的情况。

总的来说,就是将相对碎片化的流程布局状态转化为抽象的集中科学的流程布局预分配方案,然后找到一个最优解最小化最外层嵌套矩阵的维数使得纵坐标的值最小,而这种优化思路本质上是矩阵嵌套的动态规划问题。

4.3 检索策略算法设计

本文提出的 CESM 负载均衡优化方案检索策略实现的主要过程如下:

- (1)根据模块之间的逻辑依赖关系,确定一些模块与其他模块之间的操作关系;
- (2)确定以固定模块运行时间为纵向维度,可用进程总数为横向维度的矩形矩阵;
- (3)依次循环尝试嵌套剩余模块,并加入通用优化方

案的相关子布局的权重来学习不同的方案;

(4)最后得到如图 6 所示的优化嵌套方案,作为实验者优化工艺布局方向的参考。

首先在第一阶段根据 CESM 本身的运行原理确定算法,在以并行方案输出的结果与默认布局输出结果相同的基础条件下,综合上述根据矩阵嵌入生成所有非重复的流程布局(如图 6 所示)。这里集合的约束原则不包括相对位置上下对称、左右对称和对角对称的重复布局^[27]。为了对生成的替代布局进行最佳筛选搜索,也需要离散化所有布局的坐标以消除不同过程数量的影响。

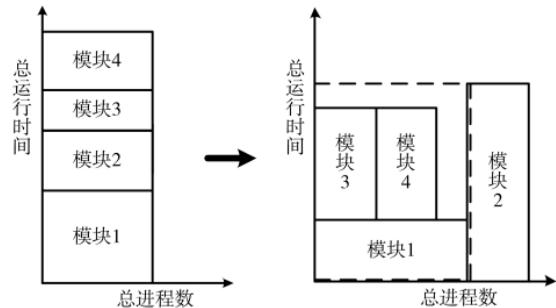


图 6 优化嵌套示意图

5 实验与结果

5.1 组件集

本文的观测实验基于 21 世纪初 B_2000 的 CESM 组件集,简称 B。

表 1 列出了每个模块类型的详细信息^[29],可以发现算例的每个模块的状态均为 active。在本实验的案例中,分辨率设置为 0.47×0.63_gx1v6,模块分辨率的详细信息如表 2 所示。

表 1 测试用例中每个模型的组件集

| 模式类型 | 模式名称 | 组件名称 | 类型 |
|------------|------|------|--------|
| atmosphere | atm | cam | active |
| land | lnd | clm | active |
| sea-ice | ice | cice | active |
| land-ice | glc | sglc | active |
| ocean | ocn | pop | active |

5.2 实验环境

本实验完成的实验环境记录如下,硬件配置如表 3 所示,所用服务器每个节点有 2 个 CPU,1 个 GPU 节点配置两张 Nvidia 显卡。软件环境配置如表 4 所示。

5.3 实验过程

本实验基于通用地球系统模式在服务器的移植运行进行性能采集以及实验进程布局的配置。图 7 展示了

表 2 测试用例中每个模型的分辨率

| Grid(Shortname) | Atm_grid | Lnd_grid | Ice_grid | Ocn_grid | Atm_grid_type | Ocn_grid_type |
|--------------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------------|----------------|
| 0.47×0.63_gx1v6(f05_g16) | 0.47×0.63 | 0.47×0.63 | gx1v6 | gx1v6 | Finite volume | Displaced pole |

表 3 实验硬件环境

| CPU | GPU |
|--|----------------------|
| Intel® Xeon® CPU E5-2680 v3 @2.50 GHz Haswell(24 cores) | Nvidia GTX Titan X |
| Memory : 128 GB | Video memory : 12 GB |
| Network : Mellanox InfiniBand | |

表 4 实验软件环境

| | 详细 | 版本 |
|--------|--------------------|------------|
| 编译器 | Intel® C Intel® 64 | 18.0.1.163 |
| MPI 库 | OpenMPI | 3.0.1 |
| Netcdf | netCDF-C | 4.6.1 |
| | netCDF-Fortran | 4.4.4 |
| 系统模式 | CESM | 1.2.2 |
| 数学库 | Intel MKL | 2018.1.163 |

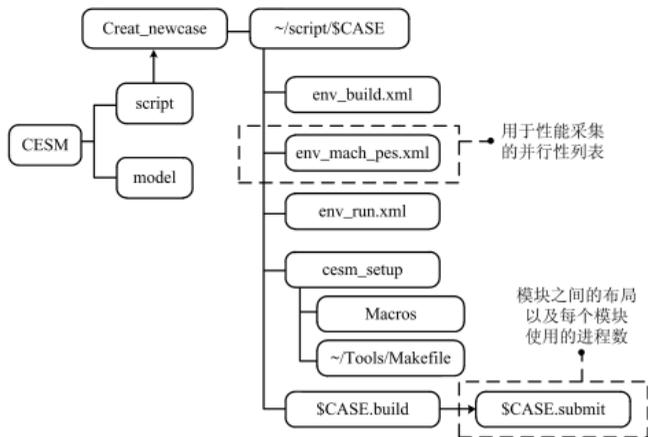


图 7 移植过程中的实验参与流程

实验在移植过程中的介入。

首先在 CESM 移植运行过程中利用 PMPI 接口工具进行性能数据采集,对数据进行分析并对 MPI 通信作简单优化,在针对实验案例配置 CESM 每个子模块的运行起始位置时,通过矩阵嵌套检索方式得到进程布局方案并执行,存储运行时间记录以及各个气象模块进程分配数据。

5.4 性能采集结果

在每个模式组件中,运行时间的最小单位是模拟步,之后是模拟小时(Mode hour)、模拟日(Mode day)。根据负载分析模拟发现模拟步与模拟小时之间的时间波动很大,图 8 和图 9 分别展示了大气模式(ATM)、海冰模式(ICE)与地表模式(LND)分别模拟第 1 个月首日(0101)和第 5 个月首日(0501)所消耗的运行时间,其中每月第 1 天因为需要进行模式诊断以确保模式正常运行,通常耗时较长。

根据图中给出的信息,能够明显发现模式三个模块在进行模拟时,中午的计算量均普遍大于同一天的其他时段,与昼半球相比夜半球不涉及太阳短波辐射过程^[23],因此分布在夜半球的网格的计算量远小于昼半球,而计算的负载不均主要来自辐射计算。

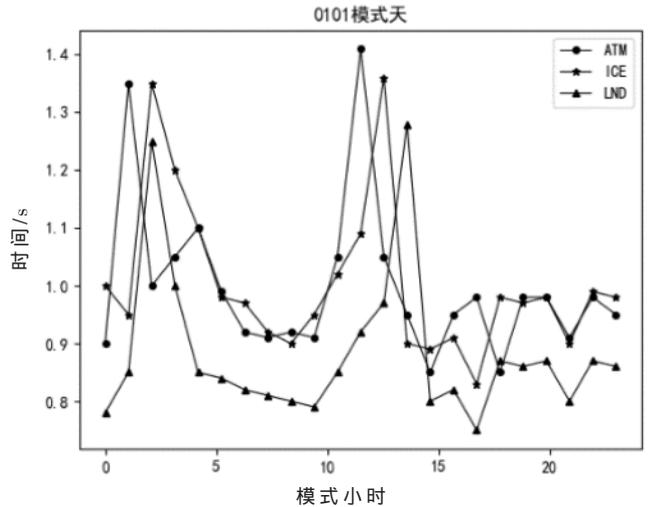


图 8 模式小时耗时情况(第 1 个月首日)

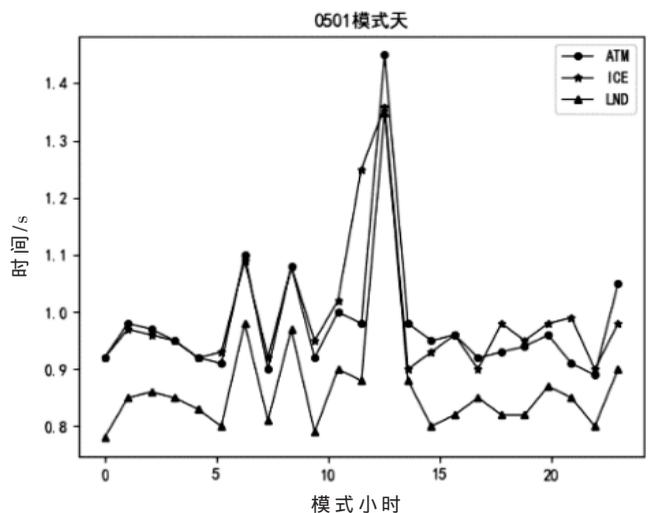


图 9 模式小时耗时情况(第 5 个月首日)

5.5 进程布局优化结果

CESM 的 CPU 配置中需要设置的参数有:MPI 任务数、线程数、起始位置。由于模块分辨率和模块状态对每个配置参数都有不同的要求,因此参数配置会对模式速度和效率产生重大影响。本文实验的关注点即为不同的 CPU 配置策略及其对模型速度和效率的影响,以找到尽可能完成模式模块负载均衡的最佳配置策略。由于陆地模块和大气模块只能在 CESM 模式下依次运行,海洋模块在原则上是否可以与其他模块并行也存在争议,因此布局方案基于海洋模块和其余模块的并行情况进行进程分配^[30]。

该算法为该实验总结了多种负载平衡方案,根据具体的实验验证,本文选择了三套性能较好的布局图作为最终指导进程分配的方案,如图 10 所示。

根据所选的性能模型,本文根据记录的时间统计了不同布局策略的推导时间,图 11 展示了集群上案例 B_2000_0.47x0.63_gx1v6 的布局调整后每种方案的模拟时间。根据实验结果显示,以上提到的三种布局方案

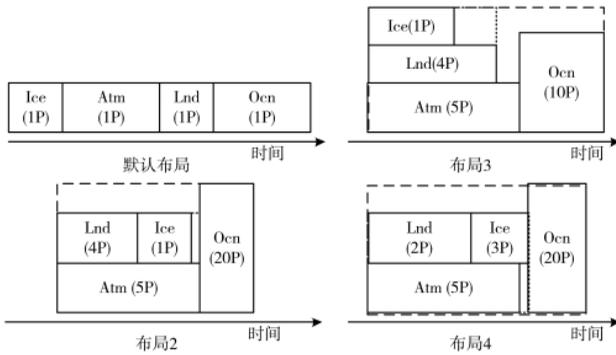


图 10 三种合理的进程布局方案图示

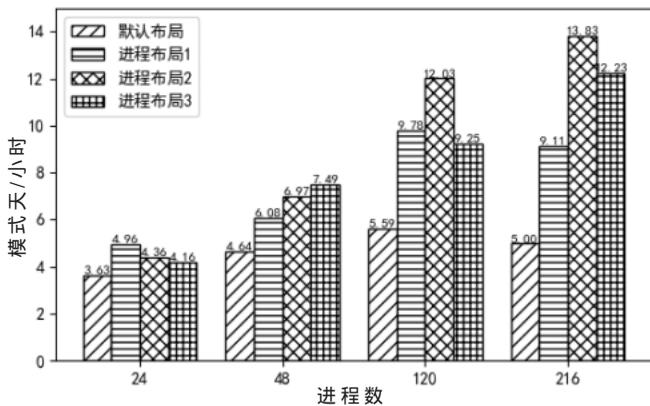


图 11 使用四种不同组件布局方式进行实验的时间消耗

都有不同程度的性能提升。其中,进程布局 2 的性能提升最为显著,为本次实验得到的最优布局,相比默认的顺序执行各个模块的布局方式,得到了 47.3% 的性能提升。性能计算方式为三种进程布局的总运行时间与默认布局运行时间之比。

根据图 12 所示的三种模型的性能提升和加速效率结果不难发现,随着进程数的增加,优化布局的并行效率优势变得更加明显,但由于计算资源增多并行效率下降,最佳平衡点应是在 5 个节点上实现了 1.419 的加速比的结果。图中加速效率的计算方式为加速比与核数之比。

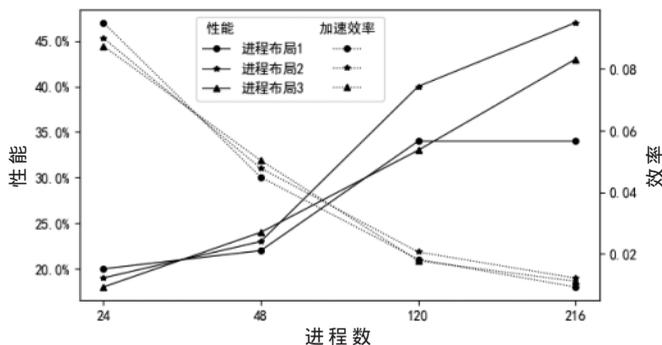


图 12 三种布局方案相比默认布局得到的性能提升和加速效率

6 结论

首先,本文对近几年来与 CESM 优化策略相关的重要工作进行了整合和总结,为 CESM 设计并实现了通

用地球系统模型负载均衡优化方案的检索策略,以帮助进程布局。针对 CESM 的负载均衡优化策略,本文主要做了以下工作:

(1) 提出并实现了基于矩阵嵌套的方法构建 CESM 负载均衡布局的检索策略,检索方法高效快速、原理科学可行。

(2) 对于 CESM 运行原理确定的不可行方案,基于原模型并行要求的筛选工作,使得检索出的模型可行,降低了搜索维度。

(3) 使用 PMPI 作为性能获取接口,分析性能数据,并优化性能,进一步降低了总体方案的搜索维度。

最后,本文证明了这种搜索策略搜索得到的最优布局相比默认布局有 47.3% 的性能提升,在 5 台个节点上实现了 1.419 的加速比。

接下来,将继续优化这个检索策略,通过使用 CUDA Fortran 编程实现基于 GPU 的 CESM 模型,并在更多组件集、更多平台甚至更多系统模型上验证该策略,以提高模型的准确性、计算效率以及可扩展性。

参考文献

- [1] WANG B, ZHOU T, YU T, et al. A perspective on earth system model development[J]. Acta Meteor Sinica, 2008, 66: 857-869.
- [2] CRAIG T. CPL7 user's guide[DB/OL]. [2021-12-05]. http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cpl7/doc/book1.html.
- [3] ZHOU T, YU Y, YU R, et al. Coupled climate system model coupler review[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(6): 993-1008.
- [4] GAN L, FU H, YANG G. Translating novel HPC techniques into efficient geoscience solutions[J]. Journal of Computational Science, 2021, 52: 101212.
- [5] LI Y, DUAN X, GAN L, et al. Enabling large-scale simulation of CAM on the sunway taihu light supercomputer[J]. IEEE Transactions on Computers, 2021(3).
- [6] JIN Z, DUN M, YOU X, et al. Improving the parallelism of CESM on GPU[C]//International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing. Springer, Cham, 2019: 11-18.
- [7] WAN X, LIU Z, SHEN B, et al. Introduction to the community earth system model and application to high performance computing[J]. Advances In Earth Science, 2014, 29: 482-491.
- [8] BALAPRAKASH P, ALEXEEV Y, MICKELSON S A, et al. Machine-learning-based load balancing for Community Ice CodE component in CESM[C]//International Conference on High Performance Computing for Computational Science, Springer, 2014: 79-91.
- [9] WANG Y, JIANG J, YE H, et al. A distributed load balancing algorithm for climate big data processing over a multi-core CPU cluster[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2016, 28: 4144-4160.
- [10] NAN D, WEI X, XU J, et al. CESMTuner: an auto-tuning

- framework for the community earth system model[C]//2014 IEEE Intl. Conf. on High Performance Computing and Communications, 2014 IEEE 6th Intl. Symp. on Cyberspace Safety and Security, 2014 IEEE 11th Intl. Conf. on Embedded Software and Syst. (HPCC, CSS, ICSS). IEEE, 2014: 282-289.
- [11] DING N, XUE W, SONG Z, et al. An automatic performance model-based scheduling tool for coupled climate system models[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2019, 132: 204-216.
- [12] WANG Y, JIANG J, ZHANG J, et al. An efficient parallel algorithm for the coupling of global climate models and regional climate models on a large-scale multi-core cluster[J]. The Journal of Supercomputing, 2018, 74(8): 3999-4018.
- [13] WANG Y, HAO H, ZHANG J, et al. Performance optimization and evaluation for parallel processing of big data in earth system models[J]. Cluster Computing, 2019, 22(1): 2371-2381.
- [14] LI H, XU Z, TANG F, et al. CPSA: a coordinated process scheduling algorithm for coupled earth system model[C]//2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). IEEE, 2020: 1-9.
- [15] WEI X, XU Z, LI H, et al. Coordinated process scheduling algorithms for coupled earth system models[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021, 33(20): e6346.
- [16] STOITSOV M, NAM H, NAZAREWICZ W, et al. UNEDF: advanced scientific computing transforms the low-energy nuclear many-body problem[J]. arXiv preprint arXiv:1107.4925, 2011.
- [17] KAUFMANN S, HOMER B. Craypat-cray x1 performance analysis tool[Z]. Cray User Group, 2003.
- [18] ADHIANTO L, BANERJEE S, FAGAN M, et al. HPCToolkit: tools for performance analysis of optimized parallel programs[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2010, 22: 685-701.
- [19] KALYANARAMAN A, HAMMOND K, NIEPLOCHA J, et al. Encyclopedia of parallel computing[M]. Springer, 2011: 2125-2129.
- [20] MINTCHEV S, GETOV V. MPI: high-level message passing in Fortran77 and C[C]//International Conference on High-Performance Computing and Networking. Springer, 1997: 601-614.
- [21] PADUA D. Encyclopedia of parallel computing[M]. Springer Science & Business Media, 2011.
- [22] Performance modeling of the earth system model[Z]. HPC China, 2013.
- [23] DING N, XUE W, SONG Z, et al. An automatic performance model-based scheduling tool for coupled climate system models[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2019, 132: 204-216.
- [24] NCAR. CESM User's Guide (CESM 1.2 Release Series User's Guide)[DB/OL]. [2019-05-05]. http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cesm/doc/usersguide/book1.html.
- [25] LI Q L, ZHAO Y Q. Block-structured fluid queues driven by QBD processes[J]. Stochastic Analysis and Applications, 2005, 23: 1087-1112.
- [26] LU L. Perron complement and perron root[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2002, 341: 239-248.
- [27] WU G, LU L, DENG X, et al. A new method of constructing regularized matrix[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39: 61-65.
- [28] DONG Y, SHI X, WANG X, et al. On accessibility of fibonacci tree optimization algorithm for global optima of multi-modal functions[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44: 1679-1689.
- [29] MARIANA V, TONY C. CESM 1.0.4 User's Guide[DB/OL]. [2019-05-05]. http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cesm/cesm_doc_1_0_4/book1.html.
- [30] BAUER G, GOTTLIEB S, HOEFLER T. Performance modeling and comparative analysis of the MILC lattice QCD application su3_rmd[C]//12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID 2012). IEEE, 2012: 652-659.

(收稿日期: 2021-12-05)

作者简介:

董润婷(1998-),女,硕士研究生,主要研究方向:高性能计算、人工智能。

吴利(1992-),通信作者,女,硕士,助教,主要研究方向:高性能计算、人工智能, E-mail: wuli_qhu@163.com。

黄建强(1985-),男,博士,副教授,主要研究方向:高性能计算、大规模图计算。



扫码下载电子文档

(上接第 23 页)

- [20] 师廷伟,金长江.基于 FPGA 的并行全比较排序算法[J].数字技术与应用,2013(10):126-127.

(收稿日期: 2021-12-06)

作者简介:

寇远博(2000-),男,本科,主要研究方向:基于 FPGA 的

图加速系统。

邱泽宇(1999-),男,本科,主要研究方向:基于 FPGA 的图加速系统。

黄建强(1985-),通信作者,男,博士,副教授,主要研究方向:主要研究方向:高性能计算、大数据处理框架、计算机视觉, E-mail: hjqxaly@163.com。



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