

大气环流数值模式的一种并行化方案

王鹏飞¹ 王在志²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

摘 要 从一般计算机并行计算理论出发, 结合大气科学模式的特点, 总结出一套对数值模式适用的并行化编程方案, 而且提出了并行计算过程中应该注意的一些问题。利用文中提到的方案, 可以帮助刚开始接触并行计算的模式编程人员快速完成串行数值模式的并行编程。最后, 以一个串行的大气环流模式 SAMIL 并行化编程作为实例, 对其并行计算过程和并行计算效率进行了描述和分析。

关键词 数值模式 并行计算 编程方案

文章编号 1006-9895(2006)03-0519-07

中图分类号 P435

文献标识码 A

A Parallelization Scheme for Atmospheric General Circulation Model

WANG Peng-Fei¹ and WANG Zai-Zhi²

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080*

Abstract An efficient scheme suitable to convert a serial numerical model to parallelized one is summed up based on the general parallel computing theory and the common characteristics of atmosphere models, and the associated problems needing to be dealt with carefully are also discussed. The proposed scheme includes four steps: model structure analysis, time cost analysis, data decomposition with communication design and uniform debugging. These steps can help the numerical model programmer to complete the model's parallelization effectively. As an example, this scheme is used in the parallelization of the climate Spectral Atmosphere Model (SAMIL) with the resolution of R42L26 recently developed at the State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics of Chinese Academy Sciences (LASG/IAP). According to the calculating structure in this model, different parallel skills are adopted in the Gaussian-grid and spectral spaces respectively. First, the radiation process which costs most according to the time-cost analysis is parallelized in OPENMP method since it is carried through the vertical column without data communication on other horizontal grids. Then in order to get better speedup, MPI is used to parallelize the physical grid-space calculating including all physical processes by dividing latitudes into several sections based on the model structure analysis. Moreover, some other processes such as time-integral and spectral-space calculations are also parallelized to improve the whole performance. Though this procedure is simple and can be implemented easily, the tested performances show that the parallel efficiency is acceptable.

Key words numerical model, parallel computing, parallelization scheme

收稿日期 2005-03-07, 2005-05-31 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-SW-210、INF105-SDB-1-25, 国家自然科学基金资助项目 40231004、40233031

作者简介 王鹏飞, 男, 1973 年出生, 硕士, 主要从事数值模式并行计算、网格并行计算、大气科学数据信息系统等方面的研究。E-mail: wpf@mail.iap.ac.cn

1 引言

超级计算机的发展对传统数值模式的研究产生了深远的影响,计算机硬件和网络条件的改善,为大气科学提供了更大的发展空间,同时也要求软件系统能够与硬件系统相适应。为了使数值模式能够充分利用超级计算机的计算能力,需要数值模式在大气科学研究中逐渐向并行化和高性能方向转变,也就是把原来串行运行的模式改为能够并行计算的程序。

虽然并行计算机的总计算能力几乎提高了上万亿倍,但是,很多实际应用到气象领域的数值模式计算能力并没有提高多少。产生这种现象的原因是由于不能有效利用计算机的并行处理能力,也就是说没有很好地解决并行计算中的并行程序设计的问题。一部分中等规模的模式,根本没有考虑并行化的问题,只能利用并行计算机系统中的一个处理器。当数值模型日趋复杂,分辨率更加细化之后,原来在单个处理器上完成的计算任务,计算时间将变得越来越长。

充分利用现有超级计算机的关键是数值模式由“串行”到“并行”的改进,不仅要强调模式并行后的模拟效果,还应注意并行化过程本身的方法和技术问题。在数值模式研究中充分利用现有并行计算资源不是一件容易的事情,一般的模式组没有专业的计算机人员帮助,只能自己边学边改,把原来的串行模式并行化,工作周期长,并行效率是问题。另一方面,纯计算机程序人员,可能不了解数值模式的原理和实现方法,对原来的串行模式并行化也比较困难。因此,如果能从一般计算机并行计算理论出发,结合大气科学数值模式的特点,找出适用于一般数值模式设计人员的并行化编程方案,对提高数值模式编程效率和充分利用并行计算机的计算资源是有意义的。

2 并行程序设计基础

并行计算机按访问内存的方式不同,主要可分为共享内存(SMP)和分布式内存(DMC)并行计算机两种,相应的并行程序计算方式也分为共享与分布式内存两种,二者在并行程序的设计与编程方式上有很大不同。OpenMP^[1]与MPI^[2]的并行编程方法是这两种并行计算机中常用的并行程序设计方

法,在分布式内存计算机上主要使用MPI的方法,而共享内存计算机上两种方法都可以利用。随着集群计算机(Cluster)的兴起,使MPI成为适应范围更广、用户更多的方法。

MPI的另一个优势是,互联网和超级计算机正在融合,进入网格并行计算时代,网格计算能够充分利用未来的计算资源。在网络上部署MPICH-G2^[3]就能够实现从传统的MPI并行计算向网格并行计算的过渡。

并行程序编程的困难在于:计算模型不统一,并行编程语言还不成熟完善,环境和工具缺乏,需要较长的开发周期。近些年,在并行计算方面取得了很大的进展,已有很多并行算法,特别是在大气科学领域有一些好的范例^[4, 5]。

在国际和国内的数值模式研究中,很多大型模式已经实现了并行化,例如NCAR的全球耦合模式CCSM^[6]、中尺度大气科学模式MM5^[7],国内的中国科学院大气物理研究所海洋模式LICOM^[8]、格点模式大气GAMIL^[9],国家气象中心运行的T213L31^[10]等都已经可以使用并行方式计算,并行效果良好。

3 数值模式并行计算的一般方案

3.1 结构分析

对数值模式的理论了解和程序结构的分析是模式并行计算时总体设计方案和具体处理流程的依据。如果数值模式的设计者在设计阶段就考虑到并行的问题,无疑对后面的并行工作大有好处,但事实上很多模式最初只考虑到串行的运行。不过,即使其原始版本是串行的,如果并行人员能够熟悉掌握模式中用到的主要算法和计算顺序等特点,可以从理论的高度指导具体的并行开发工作,往往能够取得很好的并行效果。

孙安香等^[4]总结了常见的几类数值模式的并行算法,包括经典网格点方法、谱变换方法、最优插值、变分法等并行实现。如果需要并行化的模式,其算法与上述成熟的算法类似,那么可以借鉴上述方法,只需根据模式数据特点适当调整,一般就能达到比较好的效果;反之,如果其算法无现成的并行方案,就需要根据问题和算法的特点,逐步改写成并行算法。

3.2 耗时分析

数值模式耗时的分析是数值模式并行计算中的策略问题, 我们不可能也没有必要将模式的所有程序都改成并行方式, 通常只要抓住模式中最费时的部分加以并行, 解决重点问题, 就能取得事半功倍的效果。另外, 通过对模式各部分耗时的分析, 能够对模式最终能达到的并行效果进行预估。

由于不能假定进行程序并行化的人员就是模式的原始设计者, 因此, 前者对模式的理论和实现结构的掌握可能并不像后者一样透彻, 但是只要抓住了模式耗时分布的规律, 就能在恰当的地方对其并行, 而且可以大大缩短并行工作的周期。

实际工作中, 本步骤可以和上一步骤调换顺序, 最开始就分析模式的耗时也是一种方法。另外, 在并行计算的各个环节中都可以分析该步骤的耗时分布情况, 以加快重点工作的进度和获得尽可能高的并行效率。

3.3 数据分解和通讯设计

数据分解和通讯组织是数值模式并行计算中的技巧问题, 模式由串行到并行的改进, 主要工作量不在前两项分析性质的内容, 而在于实际模式中的数据分解和组织。本步骤当然是基于上述两项模式特性的分析, 而实现时可能要根据具体情况来相应处理。

对于并行计算而言, 数据分解是一个至关重要的问题, 它的好坏直接影响到并行计算效率。良好的数据分解应该满足这些要求: (1) 计算负载平衡; (2) 最大限度的局部计算和尽量少的通讯; (3) 尽量避免冗余计算^[11]。

并行程序中数据分解和通讯的设计取决于编程的方式, 常见的有: (1) 共享内存, 如 OpenMP; (2) 消息传递库, 如 MPI; (3) 并行编译器, 如 High-performance Fortran (HPF)^[12]; (4) 高级的基于库的工具, 像 Runtime System Library (RSL)^[13]和 the Nearest Neighbor Tool (NNT)^[14], 它们是建立在其他底层库之上; (5) 模式框架, 如 WRF 模式使用的中间层封装通讯调用的方式^[15]; (6) 基于指示语句的并行工具, 如 SMS^[16]。

虽然, OpenMP 与 MPI 在数值模式设计中最常用到, 但由于其编程有一定难度, 处理模式中的不同程序时, 需要设计者参与到具体的通讯模块, 为了保证结果的一致性还需要额外的考虑。

为了简化模式并行的设计, 产生了一些基于底层协议的中间层库或编程工具, 其中 NOAA 的高性能计算研究实验室开发的 Scalable Modeling System(简称 SMS)提供的编程工具很有代表性, SMS 可以运行于多种计算机平台, 多个数值模式已经采取 SMS 方式的并行, 取得了良好的效果^[17]。SMS 的优点表现在: 比 MPI 编程简单, 性能与 MPI 方式相当, 在进行规约操作时, SMS 更容易保持并行结果与串行结果的一致性。另外, SMS 广泛利用聚合通讯的办法来减少程序的通讯量, 通过高性能的异步 IO 操作来大幅度提高程序的性能。

3.4 统调纠错

模式的设计是理论工作者和程序人员共同的工作, 在模型框架和程序主体工作之后, 更多的优化和调试任务是程序人员完成。只有充分利用调试分析工具提高性能, 检查排除可能的各种错误, 模式才能快速良好的运行。

数值模式并行计算过程中可能会遇到各种问题, 比如数组越界、通讯错误等, 有些错误是很难判断的, 这时使用优秀的调试工具可能取得事半功倍的效果。现在流行的大部分数值模式都是基于 UNIX/Linux 平台, 设计者可以利用 Fortran 的语句输出计算过程中的数据来进行调试, 也可以使用编译系统提供的工具如 GDB (GNU Debugger)、PGPROF (PGI Profiler) 来做分析。如果需要图形化的界面, TOTALVIEW^[18]调试工具是个不错的选择, 不但能够单步跟踪程序的运行, 而且能够显示每一步的数据变化, 对排除程序错误很有帮助。特别是对于 MPI 的并行程序的调试, TOTALVIEW 提供了比较好的支持。

在模式框架完成投入测试运行之前, 对模式还有重要的一项常规检测就是浮点溢出测试。只有在运算环节无懈可击的模式才具有可信性, 否则其模拟结果可能与理论上的期待模拟结果有出入。关于浮点溢出原因的解析需要用到对 IEEE^[19]浮点运算系统的知识, 其上溢、下溢的具体范围和系统处理办法同硬件平台和操作系统的体系特点有关, 这里不作仔细叙述。

现代气象的模式系统是复杂的, 很多是模块化的, 系统的各部分可能由不同的作者提供, 因此模式的众多程序配合中可能有些小错误 (BUG) 存在。

有些 BUG 不容易被发现、排除，特别是在模式已经业务运行或作为研究系统运行很长时间后才被发现的 BUG。如何评估这些 BUG 对计算结果的影响，以及对过去由此模式派生的研究结果的影响，尚需进一步研究。

4 对 FGOALS 大气模式分量 SAMIL 进行并行化的实例

中国科学院大气物理研究所的气候模式系统 (FGOALS)^[20] 大气模式分量 SAMIL (Spectral Atmosphere Model of IAP LASG) 的水平分辨率由 15 波增加到 42 波，垂直分辨率由 9 层提高到 26 层，模式的模拟性能也有了很大的改进^[21]。但随之也产生计算量大增的问题。气候模式的运行虽然没有中、短期业务数值预报时效性的要求，但气候研究要做长时间的积分，模式的运行效率依然很重要。而如果要进行气候预测，或参加国际上的气候模式比较计划，如“AMIP”(The Atmospheric Model Intercomparison Project)，仍存在长期积分的时效性问题。因此，模式的并行化显得很有必要。下面按第 3 节中提出的 4 个步骤，实现 SAMIL 的并行化。

4.1 模式结构分析

通过对模式算法结构的分析，可见谱模式需要在球体上进行格点到谱空间的转换，所以每一个点都与全球所有点的数据相关，这就引起在分布式内存计算机上进行并行的困难。但是，模式计算过程中各个阶段数据的相关性是不同的，即在格点计算、傅里叶变换、勒让德变换和谱系数计算等各阶段中，其数据相关有一定规律，在各个阶段内将有相关性的数据放在同一处理机上，不需要通讯，而在阶段之间数据需要在各个节点之间重新分配。这种分配事实上是矩阵的转置过程，也称之转置并行法。

SAMIL 的计算过程主要包括以下几个步骤：(1) 谱系数转换成格点场，对应于表 1 中的 sptofr 函数。(2) 在格点空间的计算，包括物理过程、动力过程非线性项的计算等，对应于表 1 中的 PHYSPKG 函数。(3) 格点场转换成谱系数，对应于表 1 中的 frtosp 函数。(4) 在谱空间的计算，包括动力过程线性项、水平扩散、时间滤波以及时间积分等的计算，对应于表 1 中的其他函数。由上述 4 步完成模式的一步循环，进入下一步积分。

表 1 SAMIL 主要函数耗时分析
Table 1 SAMIL functions time cost

文件名	函数	调用次数	耗时	耗时比例
File name	Function	Calls	Cost	Cost proportion
MAIN. f	lgcm	1	1037.810	100.00%
stepon. f	stepon	1	1037.210	99.94%
PHYSPKG. f	PHYSPKG	721	991.961	95.58%
IMPT. f	impt	1640	657.056	63.31%
CALTMA. f	caltma	78720	656.729	63.28%
DPESFT. f	dpesft	820545	478.189	46.08%
TMA. f	tma	5582112	158.255	15.25%
frtosp. f	frtosp	14420	84.004	8.09%
convad. f	convad	28840	50.649	4.88%
VRFLUX. f	vrflux	28840	39.594	3.82%
sptofr. f	sptofr	28840	33.757	3.25%
vertig. f	vertig	28840	28.083	2.71%
tbar1. f	tbar1	28840	26.180	2.52%

注：当模式取不同层数时，耗时的数值比例是不同的，本表仅列出 SAMIL 中部分函数的耗时

Note: The time cost of each function is different at different vertical level, and this table only shows some major function of SAMIL

在格点空间计算中，数据之间互不相关，而谱空间计算的谱系数间也几乎不相关，涉及数据相关主要在由谱系数转成格点场和由格点场转成谱系数。这样模式的并行可以根据这些特点采取不同的策略。

4.2 模式耗时分析

利用前面提到的分析工具 PGPROF，可以很方便的对这个 SAMIL 串行版本的模式进行分析。统计数据包括：文件名、函数名、调用次数、耗时(函数及其调用的下级函数时间和)、耗时所占比例。

表 1 列出了 SAMIL 中耗时超过 2.5% 的计算过程。通过表 1 中的实测数据，可见该模式本身 95% 以上的 CPU 计算时间在 STEPON 函数控制的主循环内，是用于格点空间的计算 (PHYSPKG) 上，其中辐射过程计算 (IMPT) 又超过总计算时间的 60%。另外，FFT 等底层函数也占用了相当的计算时间，这部分函数改进算法也能提高总体的计算性能。

4.3 并行实现方案及效果

通过对该模式的结构和上述耗时分析，采取了对模式纬圈物理过程计算以并行为主，同时对一些其他小循环进行适当并行的方案。测试的机器为 IBM-P690 和联想 PC-cluster。

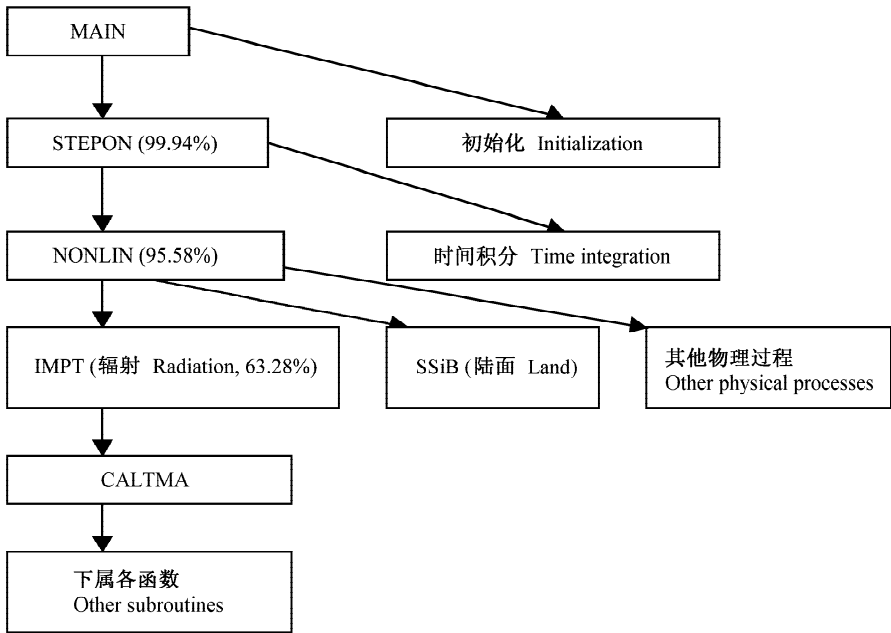


图1 SAMIL 的主要函数调用流程
Fig. 1 SAMIL major function call

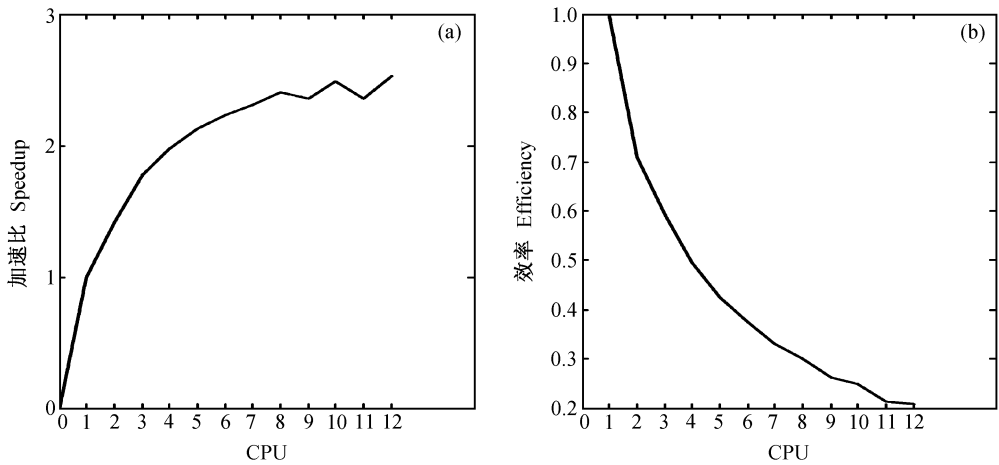


图2 SAMIL 采用 OPENMP 方式对辐射部分并行时的加速比和并行效率(测试机为 IBM-P690)
Fig. 2 SAMIL performance with OPENMP in radiation process (tested at IBM-P690)

在实际的并行编程过程中，我们按照由易到难的顺序，依次对模式中耗时较多的几个部分进行并行。首先处理的是模式中的辐射部分，从表 1 中的数据和图 1 的调用流程可以看出，辐射部分(IMPT)占用了全部计算时间的约三分之二，由于辐射过程的计算是在格点的垂直方向进行，与其他水平格点之间无数据交换，我们采用编程比较容易的 OPENMP 方式对其并行。在使用 2~6 个 CPU 计算时，可以明显减少模式的总计算时间，但由于该

部分占总体计算时间有限，当 CPU 数量继续增加时，加速比增加并不明显(见图 2)。

为了保证在更多 CPU 计算时的并行效率，我们又对模式中非线性物理过程(PHYSPKG)为主的格点空间计算模块进行并行编程。按照 4.1 节的算法分析，模式中对 PHYSPKG 中的物理过程的计算是沿纬圈进行，除转换成谱系数时存在数据相关外，其他运算各纬圈间的数据不相关。因此，此部分可以采用 MPI 的编程方式，并按经圈方向划分

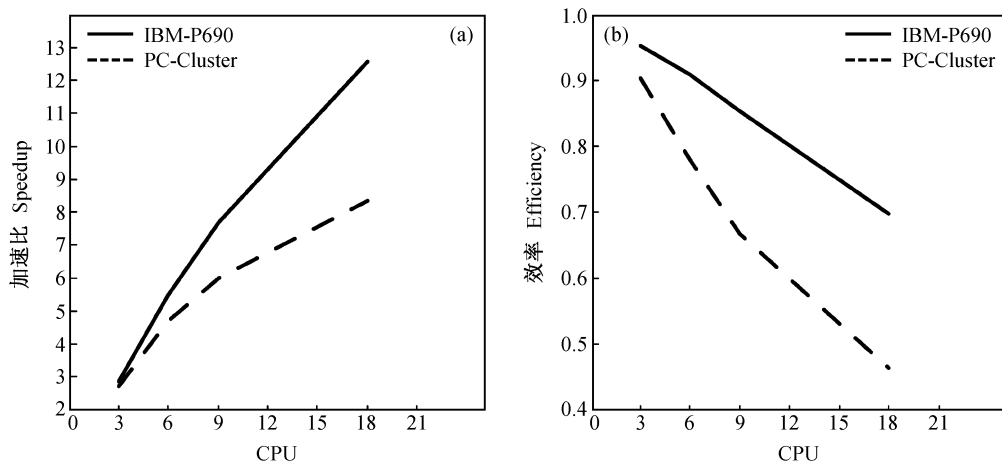


图3 大气模式 SAMIL 采用不同数目的处理机时并行计算性能测试结果(测试机为 IBM-P690 和联想 PC-cluster)

Fig. 3 Atmosphere model SAMIL performance with different CPU numbers (the tests run on IBM-P690 and Lenovo PC-cluster)

计算区域。在对 PHYSPKG 并行计算时, 剩余的占约 4% 计算时间的程序没有并行的, 当不考虑并行通讯本身的延迟时, Amdahl 形式的加速比^[22]接近 $1/(0.04+0.96/n)$, 其中 n 为参与计算的 CPU 数。如果考虑通讯所占用的时间, 根据实际使用的 CPU 数量, 实测加速比在 10~20 之间。

最后, 对 SAMIL 模式中 PHYSPKG 循环外的其他耗时较大的模块(如时间积分部分), 也采取了并行处理, 保证了对该模式在取各种不同计算方案和初值参数时能达到 10 倍以上的加速比, 计算性能见图 3。可见, 在 IBM 上采用 18 个 CPU 时, 加速比在 12 以上, 并行效率可达到 70% 左右。

SAMIL 大气模式使用 MPI 和 OPENMP 方式并行, 利用上述方案进行并行化编程, 在短期内完成了代码改写的工作。在此并行代码的基础上, 进行了进一步的优化和结构调整, 使该模式顺利地与耦合器协同工作^[21], 为中国科学院大气物理研究所新一代气候系统耦合模式的顺利完成提供了帮助。

4.4 并行调试和检验

在 SAMIL 的并行化过程中, 我们碰到了并行计算时计算结果与串行结果不一致的问题, 经过分析发现, 在由格点场求谱系数时存在不同纬圈数据的累加, 由 MPI 程序进行累加操作(如调用 Reduce 等函数)时, 与串行计算时的累加顺序不同。为了保证并行的正确性, 专门编写了特别的处理程序, 将各计算节点上的结果收集到主节点, 然后按照串行计算的顺序累加。这样得到的结果与串行版本完全相同, 说明验证 SAMIL 的并行处理是正确的。

但在保证原顺序累加时, 进行了额外的数据传输操作, 计算速度有一定下降。作为气候模式, SAMIL 模式研究的是一定时间内的气候变量平均态, 累加顺序引起的误差为随机误差而不是系统误差, 从长时间的平均来看对结果影响不大。

5 讨论

根据并行计算的要求和气象数值模式的特点, 本文提出了将模式由串行转为并行的比较通用、有效的方案。按照方案中“结构分析-耗时分析-数据分解-统调纠错”这几个步骤, 可以较快地实现复杂的数值模式从串行到并行的转换, 并且能够达到可接受的加速比。同时也应该看出, 更高效的并行模式设计应该在模式研制阶段就予以考虑, 不能只考虑串行设计, 以免为日后的模式改进工作带来困难。

如果能将一般的并行方案和 SMS 等先进的并行优化工具结合起来, 对数值模式的并行效率和标准化以及可扩展性会有更大的帮助。

致谢 感谢俞永强研究员、周天军研究员对本文提出的建议。文中所用模式的计算主要是在中国科学院大气物理研究所的 IBM-P690 和联想 1800 计算机完成, 部分计算任务还用到了中国科学院网络中心的深腾 6800 计算机, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] <http://www.openmp.org/>
- [2] 都志辉. 高性能计算并行编程技术——MPI 并行程序设计. 北京: 清华大学出版社, 2001
Du Zhihui. *Parallel Program with MPI* (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2001

- [3] Karonis N, Toonen B, Foster I. MPICH-G2: A grid-enabled implementation of the message passing interface. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2003, **5**: 551~563
- [4] 孙安香, 宋君强, 李晓梅. 数值气象预报中的并行计算研究. 高技术通讯, 2001, **12**: 33~36
Sun Anxiang, Song Junqiang, Li Xiaomei. The studies of parallel computing in numerical weather forecasting. *High Technology Letters* (in Chinese), 2001, **12**: 33~36
- [5] Rivier L, Loft R, Polvani L M. An efficient spectral dynamical core for distributed memory computers. *Monthly Weather Review*, 2002, **130**: 1384~1396
- [6] <http://www.cesm.ucar.edu/>
- [7] <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>
- [8] 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0) 参考手册. 北京: 科学出版社, 2004. 107pp
Liu Hailong, Yu Yongqiang, Li Wei, et al. *LASG/IAP Climate System Ocean Model Reference* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004. 107pp
- [9] Zhang Xin, Wang Bin, Ji Zhongzhen. Performance of a parallel finite difference atmospheric general circulation model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**(6): 1175~1184
- [10] 李金才, 龚西平, 赵文涛. 基于 T213/L31 并行计算和数值天气预报研究. 计算机工程与应用, 2004, **17**: 195~197
Li Jincai, Gong Xiping, Zhao Wentao. The studies of parallel computing and numerical weather forecasting based on T213/L31. *Computer Engineering and Applications* (in Chinese), 2004, **17**: 195~197
- [11] 张天刚, 徐金秀. T63 全球海气耦合预报模式的并行计算. 计算机工程与应用, 2004, **25**: 193~195
Zhang Tiangang, Xu Jinxiu. The parallel implementation of the T63 global air-sea coupled model. *Computer Engineering and Applications* (in Chinese), 2004, **25**: 193~195
- [12] Koelbel C, Loverman D, Shreiber R, et al. *The High-Performance Fortran Handbook*. MIT Press, 1994
- [13] Michalakes J. RSL: A Parallel Runtime System Library for Regular Grid Finite Difference Models Using Multiple Nests. Tech. Rep. ANL/MCS-TM-197, Argonne National Laboratory, 1994
- [14] Michalakes J, Dudhia J, Gill D, et al. Design of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Proceedings of the Eighth ECMWF Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1998
- [15] Rodriguez B, Hart L, Henderson T. Parallelizing operational weather forecast models for portable and fast execution. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 1996, **37**: 159~170
- [16] <http://www-ad.fsl.noaa.gov/ac/sms.html>
- [17] Govett M, Hart L, Henderson T, et al. The scalable modeling system: Directive-based code parallelization for distributed and shared memory computers. *Parallel Computing*, 2003, **29** (8): 995~1020
- [18] <http://www.etnus.com/>
- [19] <http://www.math.byu.edu/~schow/work/IEEEFLoat-ingPoint.htm>
- [20] 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究. 应用气象学报, 1997, **8**(增刊): 15~28
Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1997, **8** (Suppl.): 15~28
- [21] 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s. 北京: 气象出版社, 2005. 288pp
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. *Atmospheric General Circulation Model SAMIL and the Corresponding Coupled Model FGOALS-s* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 288pp
- [22] 谢超, 麦联叨, 都志辉, 等. 关于并行计算系统中加速比的研究与分析. 计算机工程与应用, 2003, **26**: 66~68
Xie Chao, Mai Liandao, Du Zhihui, et al. Research and analysis of parallel computing system speedup. *Computer Engineering and Applications* (in Chinese), 2003, **26**: 66~68