

文章编号: 1001-2486(2003)02-0056-04

# 中尺度数值天气预报模式 MM5 分布式并行计算\*

朱小谦, 张卫民, 宋君强

(国防科技大学计算机学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 中尺度数值预报模式是进行中尺度天气预报的有效手段。中尺度模式 MM5 是国际上应用最广泛的中尺度预报模式之一。数值天气预报的巨大计算量和实效性要求必须通过高性能分布式并行计算来实现。分析了 MM5 串行算法的特点, 研究了其并行算法的实现, 讨论了算法的一些改进, 给出了 MM5 模式在分布式并行巨型计算机上的测试结果。

**关键词:** 中尺度数值天气预报; MM5 模式; 分布式并行计算

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A

## Research on the Distributed Parallel Computation of the Mesoscale Numerical Weather Prediction Model MM5

ZHU Xiao-qian, ZHANG Wei-min, SONG Jun-qiang

(College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Mesoscale numerical weather prediction model is the efficient way to the weather forecast. MM5 model is the most popular mesoscale model in the world. It is necessary to implement by means of high performance distributed parallel computation because of the large amount of calculation. This paper analyzed the sequential algorithm, studied the implement of the parallel algorithm, discussed some improvements, and presented some results of the experiment of MM5 implemented on the distributed parallel computer.

**Key words:** mesoscale numerical weather prediction; MM5 model; distributed parallel computation

随着大气科学理论、数值计算方法和高性能计算机技术的不断发展, 现代天气预报方法已从传统的建立在大气定性理论、数理统计与预报员经验基础上的半经验方法, 发展到以大气科学理论为基础, 综合现代科学技术的最新成果, 通过高性能计算平台的模拟计算得到预测结果的数值预报方法。数值天气预报有效地解决了过去预报产品不够丰富、可用预报时效太短、各类气象探测资料综合处理能力不强等问题, 已经成为气象部门制作天气预报的重要基础和根本途径, 具有其它预报方法不可替代的地位和作用<sup>[1]</sup>。

中尺度强对流天气系统尺度小, 具有突发性和多发性特点, 且天气变化激烈, 造成的灾害范围广, 危险性大。国内外气象工作者对区域中尺度数值天气预报的研究极为重视。从 20 世纪 80 年代起, 美国组织实施了“中尺度外场观测试验 STORM 计划”, 在多个业务预报部门进行了一系列的强对流系统数值模拟试验, 大大提高了对强对流灾害天气形成机理的了解、监测和预测能力。

中尺度区域数值预报模式 MM5 是目前气象领域应用最广泛的中尺度预报模式之一, 在我国已经建成的有限区域数值天气预报业务系统中, 上海区域预报中心、沈阳区域预报中心、北京市气象局和天津气象局等均采用该模式作为业务模式。MM5 模式水平分辨率可达到 5km, 垂直分辨率可达 40 层, 网格嵌套层数最多可达 10 层<sup>[2]</sup>。业务上使用的 MM5 模式分辨率高, 计算规模巨大。为了满足天气预报精度的不断提高和时效性要求, 必须借助于高性能巨型计算机, 采用分布并行计算平台来实现。

\* 收稿日期: 2002-06-14

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (863-306-ZD11-03-8)

作者简介: 朱小谦 (1974-), 男, 助理研究员, 博士生。

## 1 模式基本方程

MM5 中尺度数值天气预报模式是建立在多重嵌套网格上的格点差分模式。垂直方向采用  $\sigma$  坐标, 水平方向采用 Arakawa B 型跳点坐标, 垂直分辨率和水平分辨率可以根据具体应用进行调整。

### 1.1 气压方程

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \nabla_p \cdot \dot{y} \cdot V = - V \cdot \dot{y} p' + \frac{\nabla_p}{T} \left( \frac{\mathcal{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_0 \right)$$

### 1.2 动力学方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) &= - V \cdot \dot{y} u + v \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - ew \cos \alpha - \frac{uw}{R} + D_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) &= - V \cdot \dot{y} v + u \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + ew \sin \alpha - \frac{vw}{R} + D_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0 g}{\rho p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g p'}{\nabla_p} &= - V \cdot \dot{y} w + g \frac{\rho_0 T'}{p T_0} - \frac{g R_d p'}{c_p p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{R} + D_w \end{aligned}$$

### 1.3 热力学方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - V \cdot \dot{y} T + \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + V \cdot \dot{y} p' - \rho_0 g w \right) + \frac{\mathcal{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_0$$

### 1.4 水平对流项

$$V \cdot \dot{y} A = mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \mathcal{Q} \frac{\partial A}{\partial \sigma}$$

其中

$$\mathcal{Q} = - \frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v$$

### 1.5 散度项

$$\dot{y} \cdot V = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma}$$

上述方程空间离散采用水平 B 型网格的第二类有限中心差分格式; 采用第二类“蛙跳格式”进行时间离散。对于变化较快的部分变量(所谓“快波”, 如声波等)采用分离时间步方法。

## 2 串行算法分析

### 2.1 嵌套区域模型

MM5 模式是一种双向嵌套有限差分预报模式, 其计算域按照模式预报的不同要求和分辨率分成母域和嵌套域(母域和嵌套域的网格距分辨率之比为 1:3), 嵌套域层数可以达到 9 层(如图 1)。MM5 模式计算涉及到粗网格(母域)和细网格(嵌套域)两个计算区域, 数据关系复杂, 计算量大。MM5 有限区域差分模式的所有物理量的计算都是在网格空间上进行的。每一个物理量的模式积分在每个水平经纬网格点是相互耦合的, 但在垂直层上无数据相关性。母域和嵌套域之间在一个时间积分步开始和结束时重叠相关部分存在数据交换<sup>[3]</sup>(母域 1 个网格对应嵌套域 9 个网格, 如图 2)。

### 2.2 区域计算流程

MM5 模式嵌套区域计算流程如图 3 所示。

## 3 并行计算实现

计算主要包括计算域分解、域通讯、负载平衡和计算/通讯时间等等。对于域通讯, 不仅要考虑各个计算域内部的数据通讯, 而且要分析粗、细网格不同计算域之间的数据相关性。有效地解决各处理机上

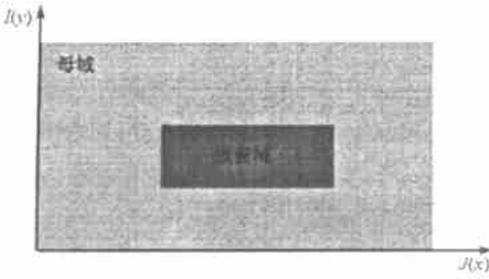


图 1 两层嵌套网格  
Fig. 1 Two levels of nesting

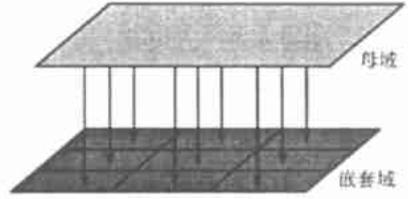


图 2 区域数据交换  
Fig. 2 Exchange data between overlay domains

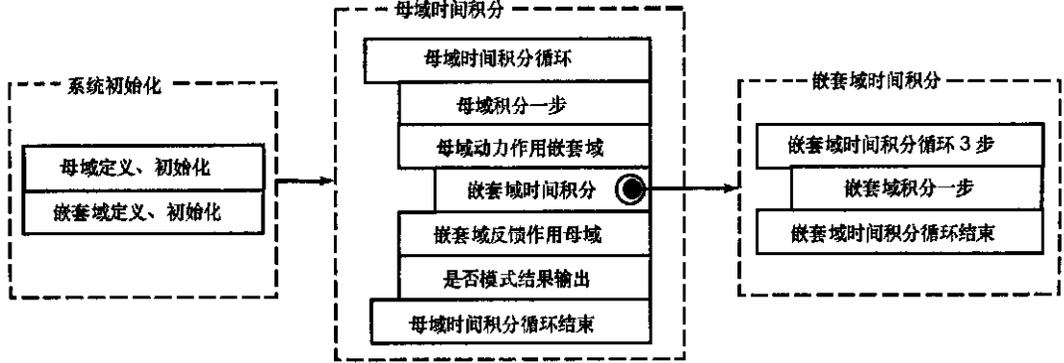


图 3 MM5 模式嵌套区域(2 层) 计算流程

Fig. 3 Flow chart of MM5 model computing (two levels of nesting domains)

数据划分和通讯, 保证计算负载均衡, 是 MM5 模式并行计算的关键。

### 3.1 RSL 库

MM5 模式消息传递并程序序设计是通过 RSL( Runtime System Library) 库实现的。RSL 库是基于消息传递标准 MPI 之上的并行计算应用程序接口, 它除了封装 MPI 基本的数据通信功能外, 还针对有限差分格式网格计算, 实现了对计算域的定义、域的分解、域的内部通讯及域间通讯等等。RSL 库按经纬网格对计算域进行二维数据剖分, 将计算分布到各个处理机上进行。

### 3.2 数据划分

基于前面的数据相关性分析, MM5 模式采用水平二维数据划分实现分布式并行计算。算法的基本思想是: (1) 将处理机划分为  $N_x \times N_y$  的逻辑网格单元, 分别对母域和嵌套域的计算网格点进行经向 ( $x$  方向) 和纬向 ( $y$  方向) 二维剖分, 将各个网格层上的计算划分为  $N_x \times N_y$  个逻辑计算单元, 分布到各处理机上进行; (2) 采用 RSL 库特殊的数据结构, 计算出每个逻辑计算单元之间存在数据相关性的网格点, 实现网格层内部及粗/细网格层之间的通讯。

### 3.3 数据通讯

主要包括域内通讯和域间通讯两种。域内通讯是指计算域(母域或嵌套域)内部由于数据划分, 使计算分布在各个处理结点上, 相邻计算子域之间需要调用 RSL 库显式地通过消息传递来进行数据的通讯。这种数据通讯是显然的, 而且在许多差分格式并行计算中都存在。域间通讯是指母域和嵌套域之间由于“动力”和“反馈”的相互作用而进行的数据交换, 这种数据交换体现了 MM5 模式作为双向嵌套中尺度模式的特点。域间通讯由于是分布在各个处理结点上的母域的逻辑计算子域和嵌套域的逻辑计算子域之间的数据通讯而变得十分复杂, RSL 库的底层大量工作也正是在于此。

### 3.4 负载均衡

通常的数据划分策略是将处理机数  $N$  分解为  $N = N_x \times N_y$ , 将计算域分解为  $P_x \times P_y$  个面积尽量

相等的区域。这种方法简单直观, 使用比较普遍。但是当处理机数与计算网格点数不能很好匹配时, 会导致分布到各个处理机上的网格点数相差较大, 造成计算负载不平衡。当处理机数较多, 而整个计算域较小的情况下, 导致的负载不平衡情况会更严重。

MM5 模式采用一种基于不规则区域的数据划分策略<sup>[4]</sup>, 使用该方法能够基本保证负载平衡。理想情况下, 采用不规则区域数据划分方法, 分布到各个处理机上的网格点数相差不超过 2。

### 3.5 优化策略

MM5 模式并行程序设计是基于 RSL 库实现的, RSL 库是遵循 MPI 消息传递标准的应用程序接口。RSL 库底层调用 MPI 函数, 封装了 MPI 的点通讯、用户自定义数据、全局通讯、通讯器和组操作、进程拓扑等功能, 尤其是针对差分格式网格点并行计算, 提供了许多关于数据划分、数据通讯的高层接口, 为解决此类问题, 并行程序设计提供了极大的方便。但是, 程序的封装性降低了程序设计的灵活性。MM5 调用 RSL 库对某一个预报变量的计算流程如图 4 所示。

这种计算方案采用先准备数据, 后计算的模式对所有变量进行一次运算。在准备数据阶段, 通过调用 RSL 库函数, 采用阻塞的消息发送/接收方式同相邻计算子域(分布在相关的其它处理机上)进行数据通讯, 然后在整个本地逻辑子域上进行计算。事实上, 需要进行数据通讯的网格点仅仅是逻辑子域的边界点, 内部网格点不需要进行数据交换, 所以可以设计成如图 5 所示的计算流程, 将边界点的数据通讯和内部点的计算在时间上重叠。

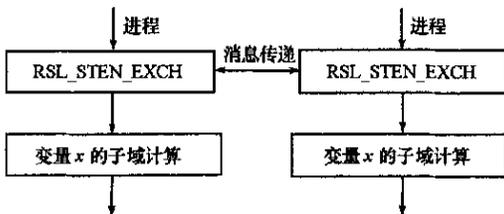


图 4 MM5 模式变量计算流程

Fig. 4 Flow chart of MM5 model variable computing

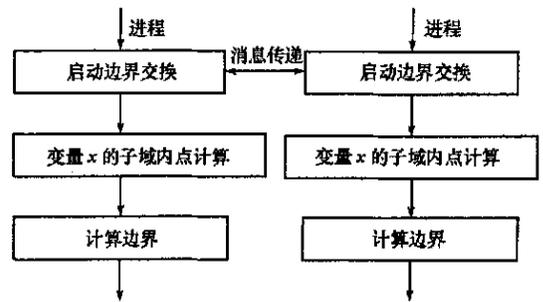


图 5 优化的模式变量计算流程

Fig. 5 Flow chart of improved MM5 variable computing

## 4 数值实验结果

在国产高性能分布式并行计算机上采用某气象业务部门的中尺度 MM5 业务模式进行 6h 预报, 模式运行的墙钟时间、每一模式积分步的运行时间及加速比如表 1 所示。

表 1 MM5 业务模式测试结果

Tab. 1 Test result of MM5 operational model

处理机数目	墙钟时间(s)	平均每步积分运行时间 ( $\times 0.001s$ )	加速比
1	3795.37	26240.78	1
2	1973.09	13580.28	1.93
4	1114.79	7631.34	3.44
8	636.95	4316.39	6.08
16	411.72	2729.27	9.61
32	262.42	1658.06	15.83

从实验数据可以看出基于 MPI 消息传递的 MM5 模式分布式并行计算是可行的, 其时效性也满足气象业务预报的要求。由于业务运行时有大量的数据 I/O, 限制了其加速比的进一步提高, 但总体并行效率是令人满意的。

(下转第 67 页)

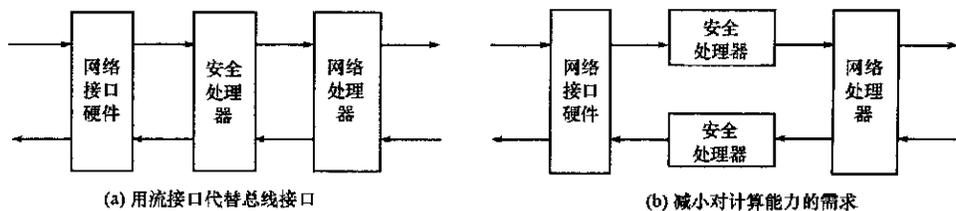


图 3 采用流接口的安全处理器的应用

Fig. 3 Application of security processor using stream interface

随着半导体工艺的进步, 单个芯片的集成度越来越高, 这使网络处理器和安全处理器的集成和融合成为可能, 加密和解密硬件加速器将以网络处理器内部的协处理器形式存在。

### 3 结束语

针对目前安全处理器性能无法满足安全路由器高速接口设计需要的特点, 分析了下一代高性能安全处理器的体系结构, 并指出与网络处理器的集成和融合将是高速安全处理器发展的最终形式。

### 参考文献:

- [1] Security Architecture for the Internet Protocol [S]. RFC2401.
- [2] The Internet Key Exchange [S]. RFC2409.
- [3] 7854 Network Security Processor Device Specification [R]. <http://www.hifn.com>.
- [4] Craig Partridge, et al. A 50 Gbps IP Router [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, March 1998, 6(3).

(上接第 59 页)

### 参考文献:

- [1] 田永祥, 沈桐立, 葛孝贞, 等. 数值天气预报教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- [2] PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3[R]. National Center for Atmospheric Research, January 2002.
- [3] Michalaks J. A Runtime System Library for Parallel Finite Difference Models with Nesting[C]. Argonne National Laboratory Mathematics and Computer Science Division, ANL/MCS TM-197, 1995.
- [4] 金之雁, 王鼎兴. 一种有限差分格式负载均衡区域分解方法[C]. 数值预报与并行计算会议论文汇编, 2000: 150-155.