

文章编号: 1671-1114(2001)04-0065-05

# 数值天气预报与并行计算<sup>\*</sup>

解以扬<sup>1</sup>, 庞璐<sup>2</sup>, 孟冬梅<sup>1</sup>

(1. 天津市气象科学研究所, 天津 300000; 2. 天津市师范大学计算机系, 天津 300074)

**摘要:** 从社会需求出发, 论述了开展中尺度数值预报的重要性, 及数值预报对高性能计算机的要求; 介绍了中尺度气象模式 MM5 的结构特征; 给出中尺度模式的差分近似算法; 分析了数值天气预报模式并行计算的可行性。

**关键词:** 数值天气预报; 中尺度模式; 差分近似; 并行计算

**中图分类号:** TP274

**文献标识码:** A

## 0 引言

提高数值天气预报的准确率和尽可能延长预报时效, 一直是国际上公认的大气科学方面极具挑战性的课题之一。数值预报求解的难度较大, 计算量巨大。长期以来, 计算机的计算能力一直是制约气象数值模拟和预报发展的瓶颈。为实现数值天气预报业务化, 往往采取简化大气运动方程和物理过程的不得以而为之的办法, 以牺牲预报准确率来换取预报时效。天津市是我国第三大直辖市, 北方重要工业城市和商贸中心, 海陆空的交通枢纽。在防汛、排水、航空、海运、陆运、仓储、制盐、商贸活动、污染治理等方面, 都需要定时定量的天气预报。解决定时定点定量预报的唯一办法是采用数值模拟与预报技术。天津市北依燕山, 东临渤海, 又位于九河下梢, 是典型的退海湿地, 灾害性天气的发生、演变, 常常受地形特点影响, 而不同于其它地方。因此, 要做好天津地方的预报, 有必要建立适合天津特点的中尺度数值天气预报模式, 此类模式针对某一局部地区的地理环境特点, 以较高的时空分辨率进行时间为 24 h 到 48 h 的短期数值天气预报。

目前, 为了搞好气象服务, 全国各省市都在研制地方中尺度数值预报业务模式。业务中尺度数值模式的发展对计算机速度提出更高的要求。为此, 1997 年北京市政府投资 800 万元用于购置 SGI 分布存储并行处理机, 1999 年上海市气象局准备购置银河 III 并行计算机, 分别解决当地中尺度预报问题。就天津经济情况而言, 高额购置并行处理系统并不现实。然而, 随着计算机单机性能的迅速提高和设备价格不断下降, 网络技术的日臻成熟和速度提高, 采用群机并行计算方案, 解决中尺度数值预报问题, 则是一个经济实用的方案。

## 1 中尺度数值预报模式结构

为了对中尺度数值天气预报进行群机并行计算的研究, 选用中尺度数值模式 MM5。MM5 是美国宾州大学和 NCAR 在 20 世纪 80 年代末、90 年代初研制发展的新一代中尺度天气模式。MM5 同其它常用模式的最重要差别在于, 该模式除了保留静力平衡方案外, 还增加了非静力平衡方案。MM5 对降水和辐射等物理过程的描述和处理更为周密合理。在降水物理过程的积云参数化方案中, 除了一般采用的 Anthes-Kuo 方案外, 增加了改进的 Arakawa-Schubert 方案和 Grell 方案; 在显式方案中增加了冰相过程; 在辐射物理方案中除了在用地面能量平衡方程计算地面温度时考虑辐射过程外, 在模式各高度层上均考虑了辐射过程的能量收支, 包括云水、云冰、雪和 CO<sub>2</sub> 对辐射的吸收、散射和反射等。

\* 收稿日期: 2001-05-10

\* 基金项目: 天津市自然科学基金项目 (99360111)

作者简介: 解以扬 (1955-), 女, 天津市人, 高级工程师, 研究方向: 中尺度数值预报、动力气象以及气象灾害。

MM 5的三维非静力基本控制方程组如下:

水平动量守恒方程:

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uu}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* \dot{e}u}{\partial \epsilon} + uDIV - \frac{mp^*}{d} \left[ \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{e}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \epsilon} \right] +$$

$$fp^* v - p^* ew \cos \theta + Du \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial p^* v}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uv}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* \dot{e}v}{\partial \epsilon} + vDIV - \frac{mp^*}{d} \left[ \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{e}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \epsilon} \right] +$$

$$fp^* u - p^* ew \sin \theta + Dv \quad (1.2)$$

垂直动量守恒方程:

$$\frac{\partial p^* w}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uw}{\partial x} + \frac{\partial p^* vw}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* \dot{e}w}{\partial \epsilon} + wDIV + \frac{gp^*}{d} \left[ \frac{1}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \epsilon} + \frac{T'_v}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} \right] +$$

$$p^* g(q + q_r) - p^* e(u \cos \theta - v \sin \theta) + Dw \quad (1.3)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial p^* p'}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* up'}{\partial x} + \frac{\partial p^* vp'}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* p' \dot{e}}{\partial \epsilon} + p'DIV -$$

$$m^2 p^* Vp \left[ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{e}{mp^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \epsilon} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{e}{mp^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \epsilon} \right] + d_0 g Vp \frac{\partial w}{\partial \epsilon} + p^* gw \quad (1.4)$$

热力学能量守恒方程:

$$\frac{\partial p^* T}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uT}{\partial x} + \frac{\partial p^* vT}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* T \dot{e}}{\partial \epsilon} + TDIV + \frac{1}{d_0} p^* \frac{dp'}{dt} -$$

$$p^* d_0 gw - Dp' + p^* \frac{\dot{Q}}{c_p} + D\tau \quad (1.5)$$

上式中

$$DIV = m^2 \left[ \frac{\partial p^* uu}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* \dot{e}}{\partial \epsilon} \quad (1.6)$$

$$\dot{e} = \frac{d_0}{p^*} w - \frac{m^e}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m^e}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad (1.7)$$

$$\tan \theta = -\cos \phi \frac{\partial \lambda / \partial y}{\partial h / \partial y} \quad (1.8)$$

其中  $\lambda$  为经度,  $h$  为纬度,  $e = 2K \cosh$ ,  $K$  为地球自转角速度.

水汽守恒方程:

$$\frac{\partial p^* q_v}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uq_v}{\partial x} + \frac{\partial p^* vq_v}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* q_v \dot{e}}{\partial \epsilon} +$$

$$p^* (P_{re} - P_{con} - P_{II} - P_{ID}) + F(q_v) \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial p^* q_{iw}}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uq_{iw}}{\partial x} + \frac{\partial p^* vq_{iw}}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* q_{iw} \dot{e}}{\partial \epsilon} +$$

$$p^* (-P_{ra} - P_{rc} + P_{II} + P_{ID} + P_{con}) + F(q_{iw}) \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial p^* q_r}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uq_r}{\partial x} + \frac{\partial p^* vq_r}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* q_r \dot{e}}{\partial \epsilon} +$$

$$p^* (P_{ra} + P_{rc} + P_{re}) + \frac{V_s d_0 g q_r}{\partial \epsilon} + F(q_r) \quad (1.11)$$

其中  $q_v$ ,  $q_{iw}$ ,  $q_r$  分别是水汽、云冰(云水)和雪(雨水)的混合比,  $P_{con}$ ,  $P_{ra}$ ,  $P_{rc}$ ,  $P_{re}$  是水汽、云水、雨水、云冰和雪之间的转换率.  $V_s$  是雨水或雪的落速.  $P_{II}$  是冰核浓度决定的冰晶核化生成项,  $P_{ID}$  是由核化生成的冰晶在达到冰面过饱和时的凝化项.

此外, MM 5 还设计了多重可移动套网格方案, 因而在做模拟研究中可以方便地跟踪系统, 模式的四维资料同化系统进一步改进了预报效果. 在实际研究中, 采用二重自嵌套结构, 二层网格距分别为 45 km, 15 km, 格点数分别为  $10^8$ ,  $10^1$ ,  $10^3$ ,  $10^3$ . 模式采用随地形变化的  $\sigma$  坐标, 垂直分层为 23 层. 采用国家气

象中心的 T106 数值预报产品作为初始场和侧边界条件,并用 08 h 和 20 h 的探空和地面的实况气象资料对模式初始场进行订正. 在降水物理过程的积云参数化方案中,外层采用 Anthes-Kuo 方案,内层采用 Grell 方案. 对地形的处理采用 10 间隔的地形资料. 海温资料采用月平均资料,每月自动更替. 模式提供 0~36 h 的逐小时网格点气象要素预报产品.

## 2 中尺度数值预报模式的差分近似算法

MM5 中尺度数值模式控制方程组都是非线性的,目前在数学上还没有一个普遍的解析求解方法. 通常采用差分近似的方法,把微分方程化为差分方程,然后在网格上求数值解.

以一维平流方程为例,讨论数值解的计算方法. 该方法容易推广到二维和三维情形中去. 设下列一维平流方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \frac{\partial A}{\partial x} \tag{2.1}$$

方程中  $A$  为需要计算的气象要素. 方程左边为气象要素的局地变化项,方程右边为气象要素的平流项. 求解在  $x$  轴上线段  $AB$  间的气象要素  $A$  的分布. 在数值解法中实际上是把  $AB$  分成有限个区域——网格,在网格点上求气象要素的数值解. 具体解法是:从  $t=0$  开始,先给出气象要素在各网格点上的初始值  $A_i^0$ ,然后计算 (2.1) 式中右端项,得出初始时刻各格点上的  $\left.\frac{\partial A_i}{\partial t}\right|_{t=0}$ . 下一时刻,  $t=\Delta t$  的气象要素  $A_i^1$  则为

$$A_i^1 = A_i^0 + \Delta t \times \left.\frac{\partial A_i}{\partial t}\right|_{t=0}.$$

按这种方法依次向前推进,可以求得任意时刻的气象要素分布. 下标  $i$  表示差分格式中的第  $i$  个格点. 图 1 为数值解步骤的流程图. 数值解计算的关键是如何把平流方程中的气象要素局地变化项和平流项用有限差分格式表示出来.

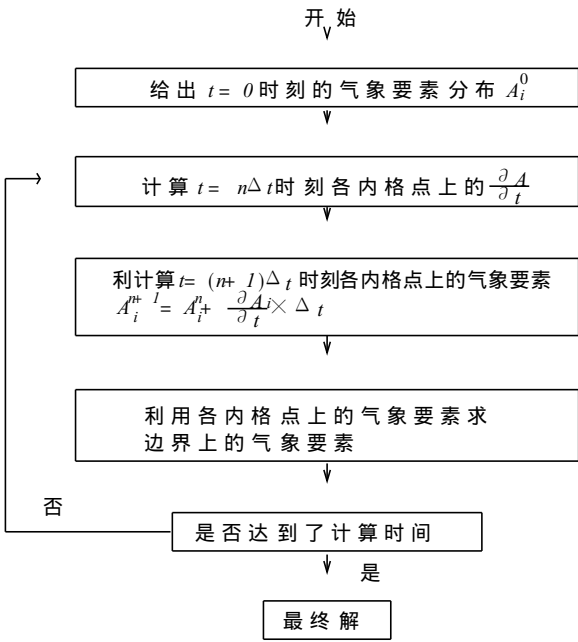


图 1 数值解步骤的流程图

$\frac{\partial A}{\partial t}$  和  $\frac{\partial A}{\partial x}$  是气象要素  $A$  的时间导数和空间导数,采用不同的有限差分方法,所计算出的导数的精度也不同. 在数值预报中,将来的状态是未知的,要通过模式的计算来获取,因而要求设计的差分格式必须是计算

稳定的. 而用差商代替微商, 误差是不可避免的, 只有将计算误差控制在一定范围内, 才能保证数值积分的正常进行.

在离散的等距网格点  $x$  上, 由气象要素  $A(x)$  的泰勒展开可得:

$$A(x + \Delta x) = A(x) + \left. \frac{\Delta A}{\Delta x} \right|_x \Delta x + \left. \frac{\Delta^2 A}{\Delta x^2} \right|_x \frac{\Delta x^2}{2} - \dots \quad (2.2)$$

利用上述两式可以导出  $\left. \frac{\Delta A}{\Delta x} \right|_x$  的三个表达式, 即

$$\left. \frac{\Delta A}{\Delta x} \right|_x = \frac{A(x + \Delta x) - A(x)}{\Delta x} \quad \text{误差量级是 } \Delta x$$

$$\left. \frac{\Delta A}{\Delta x} \right|_x = \frac{A(x) - A(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \text{误差量级是 } \Delta x$$

$$\left. \frac{\Delta A}{\Delta x} \right|_x = \frac{A(x + \Delta x) - A(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad \text{误差量级是 } \Delta x^2$$

上面三个差分式分别是向前差分、向后差分和中央差分, 截断误差的阶数越高, 则有限差分近似式越精确. 对于平流方程 (2.1), 在时间和空间上都采用中央差分, 可以得到:

$$\frac{A_i^{n+1} - A_i^{n-1}}{2\Delta t} = - \frac{u_{i+1} A_{i+1}^n - u_{i-1} A_{i-1}^n}{2\Delta x} \quad (2.3)$$

这种差分格式也称为蛙跃格式, 在一定条件下是稳定的.

上述方法可以扩展到多维差分方程的求解. 利用时间分裂的概念, 可将任意多维差分方程分解成若干个一维差分方程, 逐个去积分求解.

如二维平流方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \frac{\partial A}{\partial x} - v \frac{\partial A}{\partial y} \quad (2.4)$$

可以分解为两个平流方程:

$$\left. \frac{\partial A}{\partial t} \right|_x = -u \frac{\partial A}{\partial x} \quad \text{和} \quad \left. \frac{\partial A}{\partial t} \right|_y = -v \frac{\partial A}{\partial y} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \left. \frac{\partial A}{\partial t} \right|_x + \left. \frac{\partial A}{\partial t} \right|_y \quad (2.6)$$

对上式按中央差分方法分别求解. 如果一个格式对于一维是稳定的, 用分步法计算多维时仍然是稳定的, 稳定性条件并不发生变化. 采用分布法还能改进解的精度.

中尺度大气运动模式方程组的数值求解方法很多, 除了差分方法外, 还常采用有限元方法、样条函数方法以及谱方法等. 在差分方法中为了抑制计算的不稳定, 还采用隐式格式和半隐式格式等.

### 3 气象数值模式并行计算的可行性

并行计算给气象模拟与预报技术的发展带来极好的机遇, 国内外都在积极开展这方面研究. 研究人员关心的是并行计算技术在大气科学领域应用的可行性问题. 这个问题不仅取决于计算机技术人员和气象工作者的勤奋与聪明才干, 而且也与大气科学的性质有关.

大气运动的物理特征是适合于并行处理的. 如大气中的水平、垂直运动, 各种非绝热物理过程, 在一定程度上都可以看作是相互独立的. 由于大气的水平尺度远远大于垂直尺度, 在数值模式的设计中, 可以把大气的运动在水平和垂直方向适当加以分解. 水平方向上主要是与大气水平运动有关的不同尺度或同一尺度的平流运动以及非线性相互作用; 垂直方向主要是与大气层结有关的非绝热过程. 可以以此为基础设计大气运动数值模式的并行计算方案.

大气的水平结构尤其相对独立. 对于天气系统的研究, 如气团、雨带、锋面等都可以分块隔离式地进行模拟. 还可以根据天气系统发生发展的扰动特征, 分别按照超常波、长波、短波系统来研究天气现象发生、发展、维持、崩溃的机制. 对影响大气运动的物理过程而言, 也可以单独计算某一物理过程.

大气结构具有明显的垂直层结特征, 如热力学层结、层流和湍流特征等, 在垂直方向上通常把大气分为

边界层、中间层和热层等,各层间有明显的分界面. 考虑到大气层结的不同特征,可分别建立相应的模型方程,以内外边界相联结,构成多层整体模式.

对于采用显式时间积分和有限差分方法的大气模式,可采用分区域并行计算. 把一个格点上的垂直气柱看成一个柱体,把整个预报区域分成若干子区域,并行地进行各子区域的计算,通过某种方式,在各子区域之间交换必要的信息,基于这样特点的模式有很高的并行度. 目前,大多数中尺度数值模式都采用有限差分方法,因此更容易实现并行计算(见图 2). 每个圆柱体为一个格点位置,先依次对每个柱体由下向上积分,再分片由南向北积分. 上述大气的可分性是相对的,大气模式的可分性与耦合性与预报对象的时间尺度和空间尺度有关. 但这也同时表明,大气科学问题的可分性与耦合性是实现此类问题并行计算的物理基础.

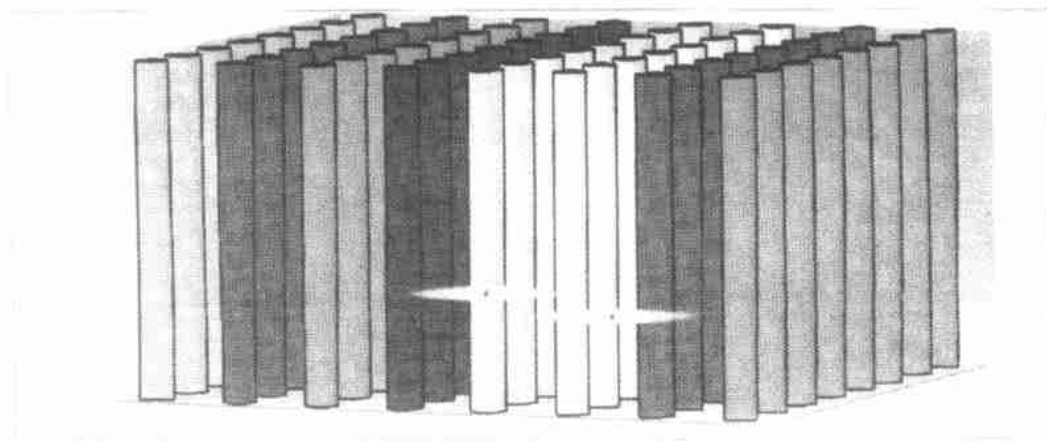


图 2 中尺度模式格点结构

综上所述,在气象预报数值模式中实现并行计算是可行的,尽管在算法及模式结构上还有许多问题需要探索,但其技术在数值天气预报领域仍有着广泛的应用前景. 在新的计算机环境中开展气象领域的高技术竞争,已成为当今国际气象界的热点问题之一. 我国的计算机界科技人员和气象工作者,正不失时机地跟踪这一世界性发展趋势,发展我国的并行计算技术,促进气象事业的发展,更好地为经济建设服务.

#### 参考文献:

- [1] 程麟生. 中尺度大气数值模式和模拟 [M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] 桑建国. 大气扩散的数值计算 [M]. 北京: 气象出版社, 1992.
- [3] 丁一汇. 天气动力学中的诊断方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1989.
- [4] 廖洞贤主编. 数值天气预报中的若干新技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1995.

## Numerical Weather Forecast and Parallel Computing

XIE Yi yang<sup>1</sup>, PANG Lu<sup>2</sup>, MENG Dong mei<sup>1</sup>

(1. Tianjin Meteorology Science Institution, Tianjin 300000, China;

2. Dept. of Computer Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300074, China)

**Abstract** In this article, we proceed from social demand, discuss the importance of developing mesoscale numerical forecast and the requirement which numerical forecast put forward to high performance computer. We introduce the characteristics of mesoscale meteorology model MM5, give the difference approximate algorithm of mesoscale model and analyse the feasibility of parallel computing numerical forecast model.

**Key words** numerical weather forecast; mesoscale meteorology model; difference approximate; parallel computing