

非静力中尺度模式的 现状及发展趋势^①

杨学胜 陈德辉 张红亮 胡江林

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

随着高性能计算机与大气探测技术的发展,使得非静力中尺度数值预报模式的业务化成为可能,世界上主要的气象中心最近几年纷纷发展非静力中尺度模式,并取得了重要进展,这其中尤以英国气象局新发展的非静力通用模式最为突出。基于此,介绍了近年来国际上发达国家的非静力中尺度预报模式的现状及发展方向,并对该类模式设计中应注意的一些问题进行了阐述。

关键词: 非静力 中尺度模式 半隐式半拉格朗日方案

引 言

在传统的原始方程动力模式框架设计中,大多数预报模式都采用静力平衡近似,静力近似在垂直尺度与水平尺度的比例较小时是成立的。但当水平尺度达到 10km 或更小的运动变得重要时,静力假定就变得有问题了^[1],通常认为静力原始方程对细的中尺度模拟是不适合的。当模式水平格距小于 5km 时,非静力平衡动力过程作用将是显著的、不可忽略的。

国际上非静力中尺度预报模式的研究已经有很多年了,如 ARPS^[2]; MM5^[3]; MESO-NH^[4]等。随着高性能计算机的发展以及雷达、卫星、GPS 等非常规资料的使用,使得非静力中尺度模式的业务化成为可能,世界上主要的气象中心最近几年纷纷发展非静力中尺度模式,并取得了重要进展,这其中尤以英国气象局最新发展的非静力统一模式最为突出。

基于此,本文对国际上 6 个发达国家的非静力中尺度模式的研究及应用现状进行了深入的调研,以期能对我国此类气象模式的设计有所启发和帮助。

1 非静力模式设计中应注意的问题

在非静力中尺度模式的设计中必须考虑如下的几个问题,包括方程组的选取、时间积分方案的使用、平流项的算法、声波的处理等。

目前非静力中尺度模式方程组的选取大致可分为两大类:第一类如大多数静力原始方程一样采用滞弹性近似^[5~7]来滤掉快速移动的声波。但滞弹性近似对中尺度模拟是否适合还存在争论,至少它对水平分辨率和垂直尺度较大的全球模式是不适合的。因此最新发展的非静力中尺度模式大多采用第二类即完全可压缩的模式方程组。

数值计算效率是大气模拟时必须考虑的一个问题。目前常用如下的两种时间离散方

① 中国气象科学研究院课题 7046/2001-9Y-2 和 863 项目 2002AA104210 资助。

案,一是时间分裂技术^[8]加隐式时间方案,一是半隐式半拉格朗日方案。时间分裂技术一般对声波和移动较慢的波用隐式处理方法,非声波项用“大”时间步长,或者在此基础上,水平平流项和垂直平流项又分别采取不同的时间步长。采用欧拉平流方案时,隐式或半隐式时间方案受到局地 Courant 数小于1的约束。而对那些包含有快波的项采用隐式或半隐式处理,可以取较长的时间步长也不会降低计算稳定性和精度^[9]。Staniforth^[10]指出隐式或半隐式时间差分方案还可延迟有限区域模式的侧边界误差或变网格模式的外区域误差向内的传播。对声波和重力波隐式时间处理的另一个好处是它可以大大地延缓大时间步长时来自有限区模式边界区域的误差的内在传播。

由于采用半隐式半拉格朗日方案不仅有助于提高空间离散差分的计算精度,同时也使得模式时间步长的选取主要是基于差分方案的计算精度而不再是计算稳定度,因此半隐式半拉格朗日平流方案最近几年已逐渐替代欧拉方案并成为时尚,并在 ECMWF、英国气象局 (United Kingdom of Meteorological Office, UKMO)、法国气象局、加拿大气象中心等模式中得到了广泛应用。模式采用半隐式半拉格朗日方案需要求解一个 Helmholtz 椭圆方程、多重网格法^[11]和预条件广义共轭余差法 GCR^[12]是目前较常用的求解变系数的椭圆问题的方法。

2 英国气象局的非静力中尺度模式

UKMO 一直是世界上数值预报业务模式颇具特色的一个中心。20 世纪 80 年代初,各国的全球模式纷纷采用谱技术,唯有 UKMO 坚持使用格点模式,并在此基础上发展了一个统一的预报模式系统,该模式既可支持气候预报,也可支持中期、短期数值天气预报。

1999 年初,UKMO 开始第五版本的统一模式的研制工作,其新发展的非静力新动力学模式框架^[13]的主要特点包括:采用完全可压缩的 Navier-Stokes 方程,保留了方程中所有的项,取深厚大气近似(绝大多数非静力模式采用浅薄大气近似)以满足一个尺度范围从全球到中尺度都通用的方程组的目的;高度作为垂直坐标;垂直方向采用 Charney-Phillips 跳层分布(绝大多数模式采用 Lorenz 跳层);水平方向采用 Arakawa C 网格;半隐式半拉格朗日时间积分方案^[14,15],时间步长可达 1800s;用 3 维的 Solver 即预条件 GCR 方法求解 Helmholtz 方程;无基本状态廓线等。为了避免参数化方案的多版本变化,UKMO 决定在新动力学模式中仅采用最先进的物理过程,即气候模式 HADAM4 最近发展的物理过程,包括 Edwards-Sling 辐射方案;大尺度降水包括新的预报冰微物理;对流可选 CAPE 闭合方案,动力传输和对流砧;新的不稳定边界层方案;次网格尺度地形;MOSES 地面水文和土壤模式方案等。

该模式不仅适用于模拟等温层和中间层,也为模拟深行星大气提供了一个良好的基础。不论是从其控制方程还是数值离散方法,该模式都是迄今为止世界上最为完整和最为先进的。

3 法国气象局的非静力中尺度模式 MESO-NH

法国气象局的非静力中尺度模式的预报变量包括水平风分量 u 、 v 、垂直速度、位温、水汽混合比及 5 类水物质。水平分辨率可达 1km,垂直方向 50~60 层,Arakawa-C 网格,双向网格嵌套;采用显式/隐式时间积分方案,Gal-Chen and Somerville^[16]垂直坐标,最低层间距 75m,在模式层 5km 采用 Raleigh 阻尼。

物理参数化方案包括:云水物理采用总

体方案,在 Kessler 方案中加入三类冰参数化方案;湍流方案为 3D 湍流动能(3DTKE) + 1.5 阶的闭合方案;混合辐射松弛方案;对 40km、10km 的分辨率模式,对流方案采用 Kain-Fristch^[17] 方案,2.5km 以下的模式用显式的对流方案;云微物理过程;还包括了大气化学过程。

另外,MESO-NH 还可用于环境、污染预报、扩散模式、城市热岛效应的预报。

4 德国气象局的 LM 模式

德国气象局则开发了一个高分辨率的中尺度局地模式 LM (Lokal Model)。主要特点包括采用完全压缩方程组,旋转经-纬度网格点设计;垂直方向取 35 层,高度垂直坐标;水平分辨率为 7km,每层格点数为 325×325 个格点;用欧拉法计算 T 、 u 、 v 、 w 、 P 、 q_v 、 q_c 等变量;水平方程采用分裂显式时间差分方案,垂直方向采用隐式时间差分方案;物理过程参数化方案主要引用其欧洲模式 EM/德国模式 DM 的方案,但 TKE 湍流动能作预报变量处理,并对地面交换过程和积云对流过程参数化方案进行了改进(7km 仍需用对流降水参数化方案)。德国气象局的静力中尺度模式在广东省气象局的台风、暴雨预报中取得了较好的效果。

5 美国的 WRF 模式

美国从事非静力中尺度模式的研究历史比较长,相继发展了 MM5、ARPS 等模式。1997 年提出了研究与预报通用的模式系统(WRF)开发计划,该系统开发完成后将直接业务化,并将取代 MM5 在全世界推广应用。

WRF 模式采用有限差分方案,完全可压缩非静力方程组,质量坐标,对声波项采用时间分裂小步长时间积分方案,对非声波项采用三阶龙格库塔技术,二阶至六阶平流算子;采用 Arakawa A 格点的半隐式半拉格朗日

模式也在发展中,最终达到 WRF 模式与开发中的新全球模式通用的目的。

WRF 的物理过程采用模块化三重结构,可任意插拔,从而使得不同物理软件包的交换更方便。WRF 的物理参数化大多来自其原来模式发展的一些方案,如 MM5、NCEP、中期模式、Eta 模式等,往往一个参数化方案有多个方案可供选择。一般包括微物理、积云参数化、长波辐射、短波辐射、边界层湍流、地面层、陆面过程等。微物理包括 Kessler 暖云方案^[18],Purdue Lin 方案,NCEP 的简单冰方案、NCEP 混合相方案、Eta 模式的微物理、2001 年版本的 Eta 模式云和降水方案等;对流方案包括新的 Kain-Fritsch 方案,Bett-Miller-Janic 方案;长波辐射包括 MM5 的 RRTM Mlawer 方案,Eta GFDL 长波辐射方案;短波辐射包括 MM5 的 Dudia(1989)方案、Eta GFDL 短波辐射方案、Goddard 短波辐射方案;地面层包括相似理论、MYJ 地面方案;陆面过程包括基于 MM5 的 5 层土壤温度模式的热扩散方案、MM5 方案;边界层包括 NCEP 中期模式的 Hong and Pan(1996)方案,Mellor and Yamada(1982),Janic(1990,1996b,2002)方案。

6 日本气象厅的非静力模式

日本气象研究所开发的非静力通用模式是一个业务与研究共用的中尺度模式。模式采用正形投影;完全压缩方程与滞弹性近似可选,完全压缩方程不含如由于使用参考大气引入的线性化和气压方程中忽略非绝热加热项等近似;半隐式时间积分方案和分裂显式方案;平流项采用二阶通量形式及修正后的中央差分方案^[19];四阶线性水平扩散方案(Ikawa and Saito, 1991);侧边界采用 Orlanski 的辐射开放边界,对降水率采用质量通量调整方案(Saito, 1998);上边界条件为刚体边界加上海绵吸收层;地面通量参数化方案

采用 Monin and Obukov 相似理论 (Ikawa and Saito, 1991), 四层土壤预报 (Kato, 1996); 辐射方案采用 Kato (1999) 和 Eito 等 (1996) 的方案; 云微物理取总体云微物理参数化方案包括了冰相 (Ikawa et al., 1991; Saito et al., 1996)、水汽、云水、雨、云冰、雪和软雹; 对流化方案采用湿对流调整 (Kato and Saito, 1995); 湍流闭合方案采用 Yamada-Mellor 2.5 级闭合方案, 湍流动能作为预报量, 混合长作为诊断量。

7 加拿大的非静力模式

加拿大气象中心开发的全球与区域统一模式 GEM (Global Environmental multi-scale Model) 为完全可压缩的非静力平衡原始方程模式, 分辨率可达 360~3600m, 时间差分采用半隐式半拉格朗日方法, 空间差分采用三维有限元方法, 采用经纬度格点的网格设计, 且全球模式和区域模式均为变网格; GEM 全球模式的时间积分步长为 2700s, 水平均匀网格分辨率为 0.9° (约 100km), 窗口区的水平分辨率为 0.33° (约 36km); GEM 区域模式的时间步长为 720s, 中心窗口区的水平分辨率为 0.22° (约 24km); 模式的侧边界使用周期边界条件, 上下边界上无运动通过; η 混合坐标, 垂直共 28 层, 模式层顶达 10hPa; 所有的预报量都加有水平扩散项。另外, 在统一模式框架的基础上, 还开发建立了一个“通用的”物理过程参数方案程序软件包, 供业务和科研调用。

8 总结与讨论

随着观测系统和通信手段的发展, 覆盖全球的、高分辨率的观测资料的获取已不存在本质困难, 这使非静力中尺度模式的业务化成为可能, 如 UKMO、美国、加拿大、法国、日本等最近几年纷纷加大科研力量致力于此类模式的研制开发, 并取得了显著效果, 这其中尤其以英国气象局最具代表性。

在新一代非静力中尺度模式框架设计中, 绝大多数模式采用完全可压缩的方程组, 也有一部分采用滞弹性近似。半隐式半拉格朗日方案以其对模式时间步长的选取主要基于差分方案的计算精度而不再是计算稳定性逐渐替代显式欧拉时间差分方案。Arakawa C 和 A 格点成为大多数非静力模式的选择。

目前国际上正处于一个新旧模式系统的更新换代时期, 中国气象界应抓住这一难得的历史机遇, 大力发展具有我国特色的非静力模式系统, 缩小与国际上发达国家的差距。另外非静力模式的开发及调试与静力模式有着本质上的区别, 而目前国内尚缺乏调试此类模式的经验, 因此在调试过程中应尽量借鉴国际上成熟的经验与技术, 以达到少走弯路、加快研制步伐的目的。

参考文献

- 1 A. Staniforth, A. White, N. Wood, J. Thuburn, M. Zerroukat, E. Cordero, Unified model documentation paper, No. 15, UKMO, 2002, Personal Communication.
- 2 M. Xue, K. K. Droegemeier, V. Wong, The advanced regional prediction system (ARPS) —— A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: model dynamics and verification. Meteorol. Atmos. Phys., 2000, 75: 161—193.
- 3 Anthes, R. A. and T. T. Warner: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. Mon. Wea. Rev., 1978, 106: 1045—1078.
- 4 P. Bougeault, P. Mascart, The MESO-NH atmospheric simulation system: scientific documentation. CNRS, Météo France, 2000, Personal Communication.
- 5 Miller M. J., Pearce R. P., A three-dimensional primitive equation model of cumulonimbus convection. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1974, 100: 133—154.
- 6 Schlesinger R. E., A Three-dimensional numerical model of an isolated deep convective cloud: preliminary results. J. Atmos. Sci., 1975, 32: 934—957.
- 7 Calrk T. L., A small-scale dynamic model using a terrain-

- following coordinate transformation. *J. Comput Phys.*, 1977, 24: 186—215.
- 8 Klemp J. B., Wilhelmson R. B., The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, *J. Atmos. Sci.*, 35: 1070—1096.
 - 9 Skamarock, W. C., and J. B. Klemp, The stability of time-split numerical methods for the hydrostatic and non-hydrostatic elastic equations. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, 120, : 2109—2127.
 - 10 Staniforth A., Regional Modeling: A theoretical discussion. *meteor. Atmos. Phys.*, 1997, 63: 15—29.
 - 11 Fulton S. R., Multigrid methods for elliptic problems: a review. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, 114: 943—959.
 - 12 Skamarock W. C., P. K. Smolarkiewicz, J. B. Klemp, Preconditioned conjugate-residual solvers for helmholtz equations in nonhydrostatic models. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 125: 587—599.
 - 13 Cullen, M. J. P., The unified forecast/climate model. *Meteor. Mag.*, 1993, 122: 81—94.
 - 14 Cullen M. J. P., A test of a semi-implicit integration technique for a fully compressible non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1990, 116: 1253—1258.
 - 15 Tanguay M., Robert A., Laprise R., A semi-implicit semi-lagrangian fully compressible regional forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 118: 1970—1980.
 - 16 Gal-Chen, T. And R. C. J. Somerville, 1975: On the use of a coordinate transformation for the solution of the navier-Stokes equations. *J. Comput. Phys.*, 17, 209—228.
 - 17 Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for meso-scale model: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. *Meteor. Monogr.*, 24, No. 46, Amer. Meteor. Soc., 165—170.
 - 18 Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Meteor. Monog.*, 10, No. 32, 84pp.
 - 19 Kato, T., 1998: Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed southern Kyushu, Japan on 1 August 1993. *J. Meteor. Soc. Japan*, 76, 97—128.

Current Status and Outlook of Non-hydrostatic Meso-scale Model

Yang Xuesheng Chen Dehui Zhang Hongliang Hu Jianglin

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

With the development of super-computer and the advances of new probing techniques, such as radar, satellite observations, GPS, and etc., it makes the non-hydrostatic meso-scale model operationally possible. Therefore, most of the meteorological centers are devoted to develop the non-hydrostatic model systems in order to replace the current hydrostatic model system, and some significant progress has been made, which is exemplified by the newly developed unified model system at the United Kingdom Meteorological Office.

Based on these, the current status and its outlook of the non-hydrostatic meso-scale model are described. And some aspects focus on various design issues are also discussed.

Key Words: non-hydrostatic meso-scale model semi-implicit semi-Lagrangian