

新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展*

陈德辉 沈学顺

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要

中国气象科学研究院(灾害天气国家重点实验室)自 2000 年起,先后在科技部“973”重大基础项目“我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究”和“十五”重点攻关项目“中国气象数值预报系统技术创新研究”支持下,主持承担了中国气象局新一代全球/区域多尺度通用同化与数值预报系统 GRAPES(Global/Regional Assimilation and PrEdiction System)的研究开发,围绕着资料同化、模式动力框架、物理过程、大型软件工程等核心技术开展了自主创新研究,取得了非静力中尺度模式、三维变分资料同化、标准化、模块化、并行化模式程序软件等方面的突出成果,部分成果已在业务上得到了应用,显示了良好的技术性能和业务发展潜力。GRAPES 系统是完全依靠中国科学家的力量自主研究发展的、先进的新一代数值预报系统。该文简要介绍 GRAPES 的研究内容、主要研究进展和初步应用,以及未来发展的初步计划。

关键词: 数值天气预报; 资料同化; 全球/区域多尺度一体化模式

引 言

在 21 世纪之初,为了满足国家经济建设与社会发展对气象服务的需求和加快我国数值预报的发展步伐,在科技部“973”重大基础理论研究项目“我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究”和“十五”国家重点科技攻关项目“中国气象数值预报系统技术创新研究”的强有力支持下,在中国气象局领导下,中国气象科学研究院组织联合气象业务与科研部门、中国科学院及教委多所大学,依靠中国科学家自己的力量,自主研究建立了新一代多尺度通用资料同化与数值预报系统(GRAPES)^①,把目标定位在改变现有多个数值天气预报系统并存,造成业务系统运行维护、改进、发展成本高和时间周期长的局面,在有效提高业务数值预报准确率的同时,为加速我国数值天气预报发展速度,缩小与世界发达国家的差距,赶上国际先进水平打下坚实的基础。经过过去 5 年多的科技攻关,初步自主研究建立了中国新一代多尺度通用的同化与数值预报系统。该系统

的核心技术包括三维变分同化,并可向四维变分同化拓展;半隐式-半拉格朗日全可压非静力平衡动力模式;可自由组合的、优化的物理过程参数化方案;全球、区域一体化的同化与预报系统;标准化、模块化、并行化的同化与模式程序^[1-2]。

下面将对 GRAPES 系统的研究内容、进展与应用结果等作简要介绍。

1 GRAPES 研究开发计划

GRAPES(Global/Regional Assimilation and PrEdiction System)为全球/区域一体化数值预报系统。中国气象局于 2000 年开始组织实施 GRAPES 研究开发计划^①,旨在研究发展中国气象局新一代数值预报系统。中国气象科学研究院(灾害天气国家重点实验室)主持承担了该项研究计划,并得到了科技部“十五”国家重点科技攻关项目“中国气象数值预报系统技术创新研究”和科技部“973”国家重大基础研究项目“我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究”的联合支持。

* 国家自然科学基金课题(40575050)及“973”国家重大基础研究项目课题(2004CB418306)共同资助。

2006-11-14 收到,2006-11-24 收到修改稿。

①陈德辉,薛纪善,杨学胜,等.面向 21 世纪的中国气象数值预报.“面向 21 世纪的中国气象数值预报”创新技术工程体系预研究课题组.2001.

GRAPES 研究开发计划的主要目的包括: ①充分吸收大气科学的最新研究成果, 研究建立我国新一代研究与业务通用的数值预报系统; ②为短期气候预测业务与气候变化研究的模式发展奠定基础; ③加强业务部门与研究机构的联系, 加速研究成果的业务转化。

GRAPES 研究开发计划的内容包括: ①变分资料同化系统, 重点在于卫星与雷达资料的同化应用; ②多尺度通用模式动力框架及物理过程; ③新一代全球/区域数值天气预报系统研究建立; ④模块化、并行化的数值预报系统程序软件的研发。

2 GRAPES 系统的主要研究进展

自 2000 年中国气象局新一代数值预报系统的研究开发计划正式启动以来, GRAPES 系统的研发已取得了显著的进展, 包括资料同化系统^[1,3]、动力框架^[2,4]、物理过程参数化方案优化、业务化与研究应用。

2.1 资料同化

资料同化是数值预报的关键技术之一。三维/四维变分同化技术是当前世界各国气象数值预报中心广泛应用的有效技术^[1,3]。变分同化技术的优点之一是可以直接地、更多地同化应用非常规资料, 如卫星资料、雷达资料、中尺度观测网资料等。这对常规观测稀少的洋面、高原、荒漠地区尤为重要。下面介绍 GRAPES_3DVAR 三维变分框架设计。

一般地, 三维变分的目标函数可以定义为:

$$J = J_b + J_o$$

$$J_b = \frac{1}{2} (x_b - x)^T \mathbf{B}^{-1} (x_b - x) \quad (1)$$

$$J_o = \frac{1}{2} [H(x) - y_o]^T \mathbf{O}^{-1} [H(x) - y_o]$$

式(1)中, x 为模式变量场; x_b 为背景场; \mathbf{B} 为背景误差协方差矩阵; \mathbf{O} 为观测误差协方差矩阵; y_o 为观测场; $H(x)$ 为观测算子。

为了求解未知变量 x 需要对目标函数进行极小化。像大部分 3DVAR 三维变分方案一样, 为了实际求解分析问题, GRAPES_3DVAR 也采用具有预调变换的增量分析方法。GRAPES_3DVAR 方案^[1,5]的主要特点是: 分析为标准等压面上的增量分析; 分析网格为经纬度网格; 采用非跳点的 Arakawa-A 网格设置水平分析变量; 观测算子包括

从 GTS 获取的常规资料(如 TEMP, SYNOP, SHIP, AIREP, SATOB, SATEM 等), 同时包括非常规资料(如 ATOVS 亮温资料, Doppler 雷达资料等); 模式变量定义为 ϕ, T, U, V, q 或 RH 。分析变量定义为 Ψ, χ, ϕ_u, RH 或 q 。控制变量定义为 w , 用于求解 \mathbf{B} ; 采用简单的地转平衡关系或线性平衡关系作为质量场和风场的平衡; 区域版本用递归滤波、全球版本用谱滤波来表示背景误差协方差的水平相关; 垂直相关用气候平均的垂直误差的 EOF 特征模的投影来表示; 应用预条件 $\delta x = Uw = \sqrt{\mathbf{B}w}$, 减少迭代次数, 加速极小化的收敛; 极小化采用有限记忆 BFGS 算法。

2.2 数值模式

半隐式-半拉格朗日方案已在世界各国气象业务中心得到广泛应用^[3,6]。该方案是一个无条件计算稳定的方案, 意味着理论上时间步长的选取不受限制, 这对降低模式积分计算成本是有好处的, 特别是每天运行的业务预报系统更需要降低计算成本。

2.2.1 模式动力框架设计

GRAPES 模式动力框架采用全可压的完全方程组^[2,4,7-8], 其中运动方程为:

$$\frac{du}{dt} = - \frac{1}{\rho \cdot r \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + fv + F_u + \frac{u \cdot v \cdot \tan \varphi}{r} - \delta_1 \left[\frac{u \cdot w}{r} + f_{\omega v} \right] \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho \cdot r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} - fu + F_v - \frac{u^2 \cdot \tan \varphi}{r} - \delta_1 \left[\frac{v \cdot w}{r} \right] \quad (3)$$

$$\delta_{NH} \frac{dw}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - g + F_w + \delta_1 \left[\frac{u^2 + v^2}{r} + f_{\omega u} \right] \quad (4)$$

连续方程为:

$$(\gamma - 1) \frac{d\Pi}{dt} = - \Pi \cdot D_3 + \frac{F_\theta^*}{\theta} \quad (5)$$

热力学方程写成以位温为预报变量的形式:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{F_\theta^*}{\Pi} \quad (6)$$

这里 F_θ^* 为净热源热汇项; $\gamma = \frac{C_p}{R}$; 位温 θ 为:

$$\theta = T \left[\frac{p_0}{p} \right]^{\frac{R}{C_p}} \quad (7)$$

Π 是气压变量 (Exner pressure variable) 为:

$$\Pi = \begin{pmatrix} p \\ C_p \\ p_0 \end{pmatrix}^R \quad (8)$$

$D_3 = \nabla \cdot \vec{V}$, 为三维散度:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{r \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{r \cos \varphi} \frac{\partial (v \cos \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 w)}{\partial r} \quad (9)$$

描述温度 T 、气压 p 和密度 ρ 之间变化关系的大气状态方程为:

$$p = \rho R T \quad (10)$$

其中, $\vec{V} = (u \vec{i}, v \vec{j}, w \vec{k})$ 为三维风场; $f = 2\Omega \sin \varphi$ 为科氏力, $f_\varphi = \frac{\partial f}{\partial \varphi} 2\Omega \cos \varphi$ 为科氏力导数; $r = a + z$

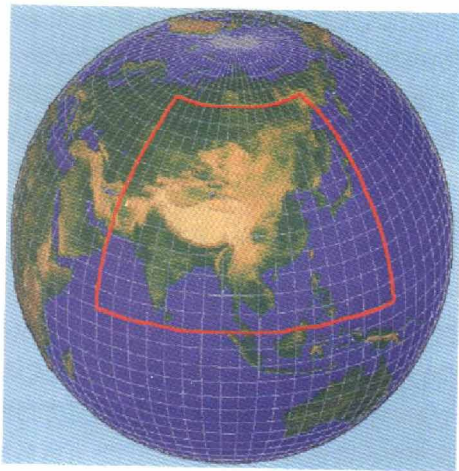


图 1 经-纬度模式格点分布
(红线框表示有限区域)

为球面半径, $a \approx 6371 \text{ km}$ 为地球半径; $F_x (x = u, v, w, T)$ 为摩擦耗散(或湍流扩散)项; φ 为纬度; $\delta_{\text{NH}} = \begin{cases} 1 & \text{非静力平衡} \\ 0 & \text{静力平衡} \end{cases}$ 。

在连续性条件下, 即非差分离散条件下, 以上方程组满足总角动量守恒、总动能位能守恒、位涡守恒。GRAPES 模式动力框架的主要特点包括: ① 半隐式-半拉格朗日差分方案^[7]; ② 经纬度格点(图 1); ③ 区域/全球一体化(图 1); ④ 静力/非静力平衡可选; ⑤ 模式变量的水平放置采用 Arakawa-C 格式^[9](图 2); ⑥ 模式变量的垂直放置采用 Charney-Phillips 方法(表 1); ⑦ 采用高度地形追随坐标^[10];

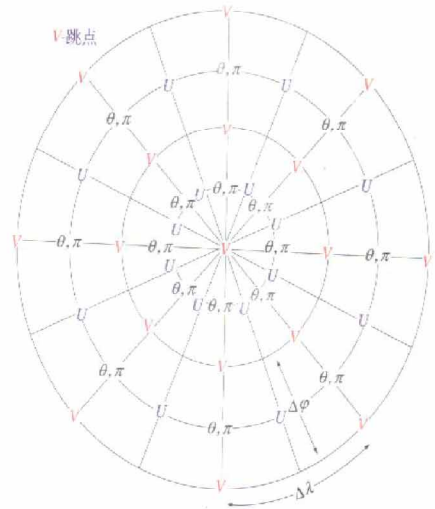


图 2 Arakawa-C 格式的模式变量水平分布

表 1 Charney-Phillips 方法的模式变量垂直配置

Charney-Phillips 分层	垂直层次	Lorentz 分层	
上边界	$z, \hat{z}, \theta, w, \hat{w}$	$k = N$	z, \hat{z}, w, \hat{w}
	$z, \hat{z}, \rho, p, u, v$	$k = N - 0.5$	$z, \hat{z}, \theta, \rho, p, u, v$
	$z, \hat{z}, \theta, w, \hat{w}$	$k = N - 1.0$	z, \hat{z}, w, \hat{w}
	$z, \hat{z}, \rho, p, u, v$	$k = N - 1.5$	$z, \hat{z}, \theta, \rho, p, u, v$
	⊗	⊗	⊗
	⊗	⊗	⊗
	⊗	⊗	⊗
	$z, \hat{z}, \theta, w, \hat{w}$	$k = 2.0$	z, \hat{z}, w, \hat{w}
	$z, \hat{z}, \rho, p, u, v$	$k = 1.5$	$z, \hat{z}, \theta, \rho, p, u, v$
	$z, \hat{z}, \theta, w, \hat{w}$	$k = 1.0$	z, \hat{z}, w, \hat{w}
	$z, \hat{z}, \rho, p, u, v$	$k = 0.5$	$z, \hat{z}, \theta, \rho, p, u, v$
地面	$z, \hat{z}, \theta, w, \hat{w}$	$k = 0$	z, \hat{z}, w, \hat{w}

⑧ 三维矢量离散化^[11]; ⑨ 准单调正定水汽平流计算方案。

2.2.2 Helmholtz 方程求解

半隐式-半拉格朗日模式动力框架的主要问题之一就是如何有效地求解 Helmholtz 方程。为了解 GRAPES-SISL 的 Helmholtz 方程, 尝试了两种方法, 即多重网格法(Multi-Grid method, MG)和共轭余差法^[12](Generalized Conjugate Residual method, GCR)。目前, 对外释放的版本采用 GCR 共轭余差法, 多重网格法正在调试中。

2.2.3 物理过程参数化

和世界上其他气象业务中心的新一代数值天气预报系统研究开发一样, 物理过程参数化方案基本采用现有的方案, 理由之一是物理过程参数化方案

的发展是独立于模式动力框架和资料同化方案的,具有一定的通用性;理由之二是已有的物理过程参数化方案经过长时间的业务应用检验,具有很好的可靠性。所以 GRAPES 模式主要以现有数值模式(WRF, HLAFS, T213L31 等)的物理过程参数化方案为参考,并引入新的物理过程参数化方案,经过优化优选试验,解决新模式动力框架、新资料同化方案与物理过程参数化方案的协调性问题,从而形成适合 GRAPES 动力框架和同化框架的物理过程参数化方案。GRAPES 模式目前包含了积云对流、微物理、辐射、垂直扩散、边界层、陆面、重力波拖曳等全套物理过程参数化方案。每种物理过程参数化方案有多种选择,用于不同应用目的(如全球模拟、区域模拟等)。

图3简要概述了新一代数值预报系统 GRAPES 的理论与技术要点,即变分同化、全可压非静平衡动力框架、区域/全球多尺度模拟通用、经纬度网格、完整物理过程等等。

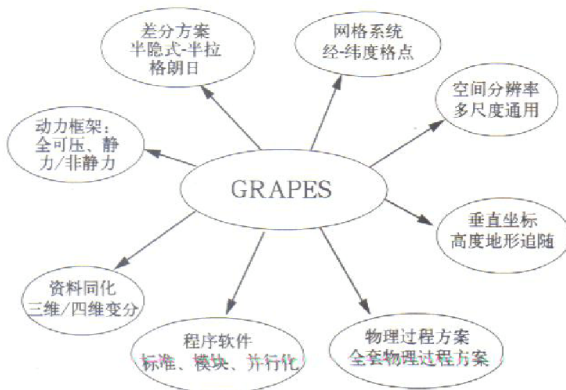


图3 GRAPES 系统的主要特点

3 GRAPES 系统的应用

2004年3月上旬, GRAPES_Meso 区域中尺度预报系统(2.0版本)正式对外释放使用。至今, GRAPES_Meso 区域中尺度预报系统已在国家气象中心、上海台风研究所、广州区域气象中心以及部分省台、研究所、大学等50多个单位得到了推广应用,其用途目的包括科学研究、教学培训、业务应用。应用领域也从传统数值天气预报拓展到中尺度数值集合预报、观测系统试验、环境与沙尘暴预报、大气科学研究、闪电模拟、气候系统模式等(图4)。

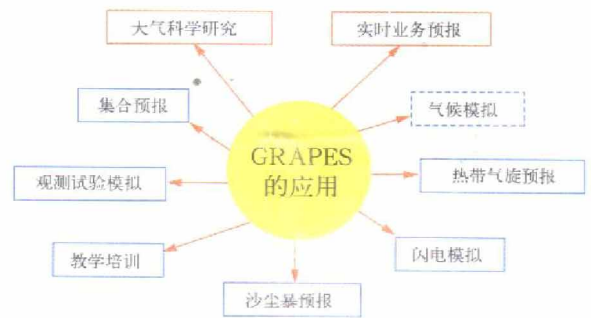


图4 GRAPES 系统的应用

4 GRAPES 系统的未来发展方向

GRAPES 未来将朝三大方向发展,一是区域中尺度 GRAPES_Meso 和全球中期预报 GRAPES_Global 等的数值天气预报系统不断完善、发展(包括分辨率不断提高、四维变分同化的业务化实现),为业务数值预报天气预报系统的不断更新换代提供技术支撑;二是以 GRAPES_FN 高分辨率系统为基础,发展建立精细数值预报系统,并实现业务化应用,包括短时临近天气预报系统、雷电数值预报系统;三是以全球 GRAPES_Global 模式为基础,发展 GRAPES_AGCM 模式,并使之与陆面模式、海洋模式等分量模式耦合,逐步建立新一代气候系统模式。目前,这三方面的工作已经取得较大的进展,特别是 GRAPES 有限区域数值预报系统已经实现业务化,全球模式正在进行批量评估改进试验向业务化的目标迈进;参加 WMO/B08FDP/RDP 计划的 GRAPES_SWIFT (Severe Weather Integrated Forecast Tools) 短时临近天气预报系统已进入实际应用试验阶段; GRAPES_AGCM 模式的 Held and Suarez 试验已完成,朝向高分辨率全球模式的阴阳网格设计和试验结果令人鼓舞。

最近,科技部组织专家论证通过了“十一五”国家科技支撑计划重点项目“灾害天气精细数值预报系统与短期气候集合预测研究”的立项,继续支持中国科学家自主研究发展 GRAPES 系统。该项目研究开发内容包括“我国新一代数值预报系统 GRAPES 的改进与业务化应用”、“灾害天气精细数值预报技术”、“交互式观测-预报系统创新技术”以及“短期气候集合预测技术”,重点在于第一课题的全球 GRAPES_Global 系统和区域 GRAPES_Regional 系统的全面业务化,进一步推进 GRAPES_Meso 向精细预报方向的深入发展,同时探索数值预报的国际前沿技术——交

互式观测-预报系统。可以预见,再经过 5 年的持续研究,中国自己的 GRAPES 数值预报系统将使我国的数值预报业务水平跃上一个新的台阶。

参考文献

- [1] Xue Jishan. Progresses of researches on numerical weather prediction in China: 1999—2002. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 467-474.
- [2] 陈德辉, 杨学胜, 胡江林, 等. 多尺度通用动力模式框架的设计策略. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 452-461.
- [3] Kalnay E. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Maryland: University of Maryland, 2003: 4-12.
- [4] 陈德辉, 胡志晋, 徐大海, 等. CAMS 大气数值预报模式系统研究. 北京: 气象出版社, 2004: 1-190.
- [5] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. *气象学报*, 2004, 62(1): 31-41.
- [6] Staniforth A, Cote J J. Semi-lagrangian integration schemes for atmospheric models—review. *Mon Wea Rev*, 1991, 119: 2206-2223.
- [7] Qian Jianhua, Semazzi F H M, Scroggs J S. A global nonhydrostatic semi-Lagrangian atmospheric model with orography. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 747-770.
- [8] Semazzi H F M, Qian Jianhua, Scroggs J. A global semi-lagrangian semi-implicit atmospheric model. *Mon Wea Rev*, 1995: 123.
- [9] Arakawa Lamb. *Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Model, Methods in Computational Physics // General Circulation Models of the Atmosphere*. Academic Press, New York Press, 1977.
- [10] Ga-Chen T, Somerville R C J. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations. *J Comput Phys*, 1975, 17: 209-228.
- [11] Bates J R, Semazzi F H M, Higgins R W, et al. Integration of the shallow water equation on the sphere using a vector semi-Lagrangian scheme with a multigrid solver. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 615-627.
- [12] Eisenstat S C, Elman H C, Schultz M H. Variational iterative methods for nondymmetric systems of linear equations. *SIAM J Numer Anal*, 1983, 20: 345-357.

Recent Progress on GRAPES Research and Application

Chen Dehui Shen Xueshun

(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Since 2000, in the support of two national key projects of “Chinese Heavy Rain Research Experiment” and “Research on Meteorological Numerical Prediction System Techniques”, LaSW/CAMS has been in charge of developing new generation NWP system GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System). GRAPES’ project is mainly focused on data assimilation, dynamical core, physical parameterization schemes, and infrastructure software. The main achievements include 3 dimensional variational data assimilation; standardized, modularized and parallelized coding infrastructure; full-compressible and non-hydrostatic meso-scale NWP system and its various applications. The operational results are highly encouraging and promoting for further developments. Also, a brief introduction to GRAPES research project, main progresses and some applications with future plan of GRAPES development is given.

Key words: numerical weather prediction; data assimilation; global/regional multi-scale unified model