

变网格一体化模式的研究进展¹⁾

陈德辉

(国家气象中心数控室, 北京 100081)

提 要

作者介绍了近年来在数值天气预报领域的一个新动向——变网格一体化模式的进展。这种模式可以替代目前业务数值天气预报的有限区模式和全球谱模式, 降低业务数值天气预报的计算成本。网格距离的可变性, 以及采用半隐式-半拉格朗日式时间差分方案是该模式的主要特点。法国的变网格一体化模式自1992年已投入业务使用, 其可行性已得到了预报检验的初步证实。

关键词: 数值天气预报 变网格模式 物理过程参数化

引 言

近一、二十年来数值天气预报取得了显著进展, 现在, 数值天气预报已成为世界上许多国家业务天气预报不可缺少的重要手段。

在数值天气预报方面, 已经提出了各式各样的模式: 按预报时段分, 有气候模式、长期模式、短期模式和超短期模式; 按预报区域分, 有全球模式、半球模式和有限区模式; 除此之外, 高层大气模式、海气模式以及非静力平衡模式等等 (Shuman, 1989; Anthes, 1990; Wagner, 1989; Imbard 等, 1987; 郭肖容等, 1989; 皇甫雪官, 1990; 廖洞贤和王俩铭, 1986)。近几年来, 人们又提出了一种“新的”数值天气预报业务模式——变网格一体化模式(以下简称“变网格模式”)。本文试图就变网格模式提出的原因、目的、意义及其研究进展的情况作一介绍, 并结合我国的情况作一些讨论。

1 现行数值天气预报业务模式的基本问题

目前, 世界上许多国家的数值天气预报业务模式, 一般都同时维持两套模式: 全球

(或半球)的大尺度谱模式和有限区细网格模式。前者主要用于大尺度形势预报, 时段可达5—7天, 并为后者提供侧边界条件(和初始场)。而后者主要用于某一有限区域内的较细致的天气预报(如降雨预报), 时段一般为1—2天。有限区模式的分辨率一般都较谱模式的高, 但由于模式区域的“有限性”, 决定了我们必须人为地给定模式区域的侧边界条件。若所给侧边界条件稍有不妥, 就会引起波动在边界上“反射”, 迭加到区域内的其它正常波动上, 使原有的正常波动“变形”, 以致造成预报的失败。这是有限区模式中较突出的问题之一。目前处理侧边界问题较常用的办法主要有: 单向作用(one-way-interaction)侧边界条件和双向作用(two way interaction)侧边界条件。单向作用侧边界条件中较常用的是 Davies 海绵式侧边界条件 (Davies, 1976), 它是通过给定的侧边界海绵吸收效应, 以减缓、抑制波动在边界上的反射作用。双向作用侧边界条件 (Zhang 等, 1986), 也即粗网格区域内嵌套一细网格区域, 把细网格区域的边界作为粗网格区域的“开放边界”, 允许内、外区域的波动在一定时间内作双向相互作用。然而, 一些计算不

¹⁾ 本项目得到国家教育委员会留学回国人员资助费支持。

稳定的问题也常会出现在两区域的交界处(即内区域的侧边界处),当两区域的分辨率相差较大时,这个问题就更为突出(Zhang等,1986)。而且,对于外区域也同样存在侧边界的波动反射问题。总之,目前仍未找到一个能很好地解决有限区模式的侧边界条件的办法。

对于一个全球谱模式来说,由于模式区域是全球的,所以,不存在侧边界条件的适定问题。同时又由于模式采用了谱系数展开的方法,使其计算精度得以大大提高。然而,现行的业务谱模式一般来说其分辨率都不高,即使欧洲中心的 T_{213} 模式,其网格距离也在60km以上(这时的计算量已相当大)。在这样的分辨率条件下,要用数值模拟的方法对较小尺度的天气过程进行模拟和预报,是非常困难的。全球谱模式的分辨率不高、有限区模式的侧边界适定问题,是目前业务数值天气预报模式中的两个最突出的问题。

2 变网格模式及其研究

在现有的计算机条件下,全球谱模式的分辨率不可能取得足够高,使得人们不得不引进有限区模式,“局部地”提高某一区域的分辨率;进而提高区域的数值天气预报水平。这是目前世界上许多国家同时存在两套数值天气预报模式的主要原因。两套模式同时并存,这意味着人们必须建立两套从资料同化、初值化、动力模式到物理过程参数化和预报检验的业务分析预报系统,同时占用两套系统的计算机存储空间,每天的业务数值天气预报必须花费运转两套系统的计算成本,平时还必须维护、开发、优化两套几乎相互独立的模式系统等等。这是不经济的,甚至是浪费。因此,很有必要从现有的业务模式——全球谱模式和有限区模式出发,取长补短,建立起一个统一的、经济有效的、网格距离可变的模式,以替代现有的全球谱模式和有限区模式。

一个变网格模式,具体说来,就是该模

式要使得某一区域的空间分辨率明显地提高,达到一个有限区模式的分辨率水平,其余区域的分辨率则较低。每天的业务预报,只需运转变网格模式一次,就可以达到运转原谱模式和有限区模式两套模式的效果(如形势预报和区域降雨预报)。

2.1 空间变网格分布的设计

变网格模式的网格分布指的是一个全球(或大区域)模式中某一区域的空间分辨率明显地高于其它区域,也就是说在同一模式中存在着两个空间分辨率明显不同的区域。目前用得较多的空间变网格分布设计方案有两个:加拿大的有限元差分方案和法国的Schmidt空间变换方案。后一方案是首先作一特定的地球投影技术处理,以显著地提高法国区域的空间分辨率。然后,再把这样设计的真实格点空间,通过某一数学变换的方法,变换到另一虚拟的高斯格点空间上,以便使谱模式中的方程可以在这一“规则的”高斯格点空间上展开。这一方法的最大优点之一是原谱模式中的动力框架几乎不需作任何大的修改,就可以把谱模式和变网格模式联系起来,建立起一个“变网格”模式(Schmidt,1977;Courtier和Geleyn,1991)。而有限元方法则是对某一纬圈带和某一经圈带的格点同时进行加密,两带相交区域即为“较高分辨”的预报区域(Côté等,1993)。显然,这样的格点分布,有些加密点是不必要的。但有限元方法的一个优点是可以避免高分辨率的谱模式所可能带来的大计算量问题(Côté等,1991)。图1给出了法国的变网格业务模式的格点分布图,图2给出了加拿大未来的变网格模式的格点分布图。比较两图,可以看出图1的格点分布比图2的更合理些。

其实,早在70年代,就已经有人提出了空间网格距离可变的模式(Schmidt,1977;Staniforth和Mitchell,1978)。最近,我国学者也提出了类似的变网格模式:自适应网格模式(刘卓,1991)、台风暴雨套网格模式(八

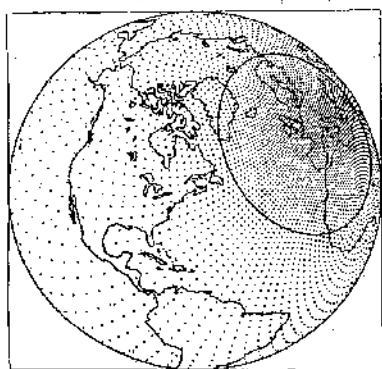


图1 法国的变网格业务模式的网格点分布
(选自 Courtier 和 Geleyn, 1991)

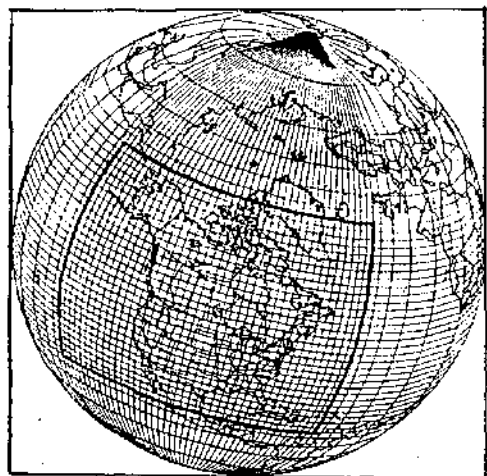


图2 加拿大的变网格业务模式的网格点分布
(选自 Côté 等, 1993)

五攻关课题)。但是由于这些模式采用的都是所谓的欧拉式时间差分方案, 因此, 为了确保计算稳定, 其时间步长必须满足一个严格条件(CFL 条件): 模式中所取的时间步长不得超过模式中所包含的最快波动经过一个格点距离所需的时间, 即时间步长与网格距离有关, 格距越小, 时间步长越短。这样一来, 一个采用欧拉式时间差分方案的“变网格模式”, 其实际应用意义就不大了。因为这样的模式, 为确保计算稳定, 其所取时间步长的大小就受限于模式中高分辨区的最小格点距离, 这显然是不合算的。因此, 一个具有实

际应用意义的变网格模式, 还必须解决一个关键问题: 时间差分方案问题。

2.2 时间差分方案的选择

确保计算稳定、降低计算成本(或增大时间步长)、提高模式的计算精度和空间分辨率, 这是建立一个数值动力模式的主要思想, 也是模式选择时间差分方案的依据。在70年代的滤波模式中, 人们通过滤掉模式中包含的快波, 只保留对天气影响较大的慢波的办法, 增大模式的时间步长, 降低计算成本。加拿大学者 Robert 等(1972)提出了半隐式时间差分方案, 使模式中一些较有意义的快波得以保留, 并在不致于降低分辨率、减小时间步长、增加计算成本的条件下, 提高了模式的计算精度。他们的这一方案直至今天仍得到广泛的应用。人们还提出了一种快慢波(线性项、非线性项)分离处理的办法(Gadd, 1978; 陈秋士, 1980; 曾庆存, 1984), 也使模式中所取的平均时间步长增大, 降低计算成本。然而, 所有的这些方法(滤波法、半隐式法、快慢波分离法)都属欧拉式方法。因此, 都不能体现出一个变网格模式的真正优越性来。

很久以来, 人们从数学物理方法理论中就知道, 在处理气象上的这类数学物理方程的时间差分问题时, 除了日前在数值天气预报模式中应用得较多的欧拉方法外, 还存在着另一种非欧拉方法——拉格朗日方法。相比较而言, 欧拉方法是一种“静态”的方法, 即观察者在某一固定点来观察其周围环境的变化, 而拉格朗日方法则是一种“动态”的方法, 即观察者随质点一起运动来观察其周围环境的变化。

1982年, 加拿大学者 Robert 首次把欧拉方法的半隐式方案和拉格朗日方法结合起来, 成功地应用到数值天气预报模式中, 并通过试验证明这种模式(以下简称半隐-半拉模式), 不仅能使所取时间步长与格点距离无关(只取决于所选时间数值方案的计算精

度),并保持计算稳定,而且所取时间步长远比欧拉方法的大。但是,由于模式采用了“半拉格朗日”时间差分方案,这样,对于模式的每一格点,都必须计算空气质点的轨迹,并确定参数值。同时还由于质点轨迹不可能恰好经过模式的格点,因此,又必须进行一些较复杂的插值计算。这样自然使每一时间步长的计算机时增加,计算过程也会复杂些。不过,由于半隐-半拉模式所取的时间步长与模式格距无关,时间步长可以取得很长。据试验证实(Ritchie, 1991),在同样的空间分辨率、同样的预报精度条件下,半隐-半拉模式所取时间步长至少为欧拉方法的5—8倍,甚至10倍以上(理论上还可以取得更长,但时间步长取得过长,会因质点轨迹的插值计算引起较大的误差,使预报精度下降)。因此,总的来说,用半隐-半拉模式作同一时段的预报,其总的计算成本不是增加了,而是大大降低了。

2.3 物理过程参数化方案的考虑

变网格模式中另一个需要解决的问题是物理过程参数化问题。我们知道,所谓数值天气预报模式中的物理过程参数化问题,严格地说是所有的次网格物理过程参数化问题。显然,在一个变网格模式中,由于其格点距离是非均匀分布的,这样,从理论上来说每一格点尺度范围内所包含的,需作参数化处理的次网格过程应该是各异的。但是,又不可能据此在同一数值模式中采用几套不同的物理过程参数化方案。这就要求我们必须建立起一套全新的、整体一致的、既适用于粗网格区域也适用于细网格区域的物理过程参数化方案,或者至少应对现行的物理过程参数化方案进行重新检验和修改。其中较突出的问题之一,是积云对流参数化问题。

许多研究表明(Bougeault 和 Geleyn, 1989; Degardin 和 Imbard, 1987; Chen, 1989),当模式的格点距离缩小后,采用现行的积云对流参数化方案的数值天气预报模

式,其预报降雨量往往会增大,且远大于实际观测值。当格距小于20km后,这种增大变化尤为激烈,甚至会出现虚假的“格点暴雨”(“grid-point storm”)。出现这类问题的主要原因可能有两个(Chen 和 Bougeault, 1993):一是现行积云对流参数化的理论基础——“准平衡假设”(Arakawa 和 Schubert, 1974),该假设忽略了次网格积云对流过程本身的时间变化,而后者则恰恰当模式分辨率提高到一定程度后,将会显得重要起来。二是静力平衡近似假设(现有的业务数值天气预报模式几乎都是静力平衡模式)。当模式格距缩小到一定程度后(如 $\Delta x < 50\text{km}$),在静力平衡假设条件下,将会夸大网格尺度的水汽辐合量,造成模式预报降雨量虚假的增加。Chen 和 Bougeault (1993)针对以上两个原因,提出了一个新的、预报性的深对流参数化方案。该方案的特点是“非准平衡假设的”和当模式格距缩小后(相当于在一个变网格模式中,从粗网格区域过渡到细网格区域),具有抑制由于静力平衡假设引起的网格尺度总水汽辐合量虚假增长的能力。图3给出了采用该方案的实况资料检验的结果。

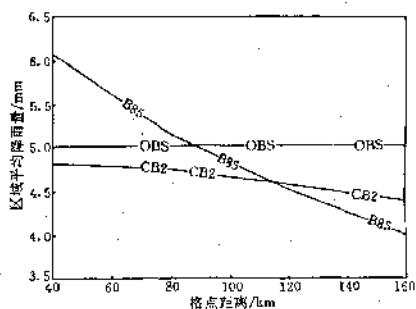


图3 区域平均降雨量随网格距离的变化
(选自 Chen 和 Bougeault, 1993)

OBS: 观测值(理想变化曲线); B85: 传统的积云对流参数化方案(Bougeault, 1985); CB2: 新的积云对流参数化方案(Chen 和 Bougeault, 1993)。

另外,变网格模式中水平扩散系数的处理、所有物理过程参数化方案间协调一致的整体考虑等等都有待进一步研究。

3 结束语

把现有的有限区模式和谱模式合二为一,建立起一个统一的变网格数值天气预报业务模式的前景是诱人的。它不仅能大大节省人力物力,而且从业务到应用、科研都会带来更大的方便。目前,世界上建立了(或正在建立)变网格业务模式的国家还不多,主要有法国、欧洲中期天气预报中心、加拿大。变网格模式作为业务模式,仍处于最初的试验应用阶段,仍会有不少问题有待发现、研究、解决。据WMO的数值天气预报进展报告(1993),法国的变网格模式已于1992年9月投入业务使用。该模式不仅大大地节省了计算机CPU时间,而且其预报结果也令人鼓舞。一典型的个例是1992年9月22日发生在法国南部地区(Vaison la Romaine)的一次强暴雨过程(36小时降雨量达200mm)。他们同时用新建立的 $T_{127} L_{21}$ 变网格模式(加密的法国区域分辨率为 $\Delta x \approx 35\text{km}$,约为普通 T_{127}

谱模式的3倍)和法国原有限区业务模式PERIDOT($\Delta x \approx 35\text{km}$),对这一强暴雨过程作模拟预报,结果是 $T_{127} L_{21}$ 变网格模式的预报降雨量为222mm,而PERIDOT的预报降雨量只有77mm。

结合我国未来数值天气预报业务系统的发展方向,似乎应该着手考虑这样的一个问题:我们应该建立一个什么样的业务分析预报系统。摆在我们面前的选择有两个:一是发展、完善经七五、八五攻关建立起来的有限区模式和谱模式,即维持现有的两套模式,只对模式分辨率作简单的升级和对物理过程参数化方案作进一步的完善、改进,这是一个较有基础、省力易行的选择。二是放弃现有的双模式并存的格局,从现有的谱模式出发,开发、建立一套新的模式系统——变网格模式业务系统,即把现有的有限区模式和谱模式合二为一,这是一个较费力气,但经济合算,很有发展前途的选择。这一问题应该引起足够的重视和深入的研究。

参考文献(略)

Research Progress in the Unified NWP Model with Variable Resolution

Chen Dehui

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract

A brief introduction to a new advance in the NWP field: unified global NWP models with variable resolution is given. The principal purpose is to decrease the calculation cost of the NWP by unifying the limited area NWP model and the global spectral NWP model as an only operational one. A horizontal resolution, and a semi-implicit and semi-Lagrangian integration scheme were used in this unified NWP model. The French unified model went into operation in 1992. The results were very encouraging!

Key Words: NWP model variable resolution physical process parameterization