

# 河北省变网格数值预报 系统设计和试验<sup>①</sup>

徐国强 胡欣 张迎新

李晓燕

(河北省气象台, 石家庄 050021)

(河北省保定市气象局, 071000)

## 提 要

设计了一种将原 MM4 模式的均匀网格变换成非均匀网格的方案, 构造了一套适合河北省特点的变网格预报模式, 同时建立了一套可投入业务使用的变网格数值预报系统。最后通过对一次暴雨过程的模拟分析, 证明变网格数值预报优于均匀网格数值预报。

关键词: 均匀网格 变网格 模式 模拟

## 引 言

大多数数值天气预报模式都采用单一均匀的网格来进行计算。从 60 年代开始逐步研究使用不同格距的网格作预报。

对于有限区域, 如重点考虑某一局地天气, 在模式中使用嵌套网格技术是最常见的方法, 它是将更细的网格嵌套在所关心区域的粗网格上, 以此来提高局地空间分辨率。但是嵌套网格技术存在一个缺陷, 那就是在内边界附近, 由于网格距的突变而导致空间截断误差的突变, 造成波动由粗网格进入细网格(或相反)时产生较严重的折射、反射和寄生波现象<sup>[1]</sup>。

变网格(又称其为非均匀网格)能减轻网格之间差异带来的问题<sup>[2]</sup>, 而且以平缓渐变的网格为优<sup>[3]</sup>。设计有限区域变网格模式的计算方案, 可采用坐标变换使不均匀网格变成均匀网格再进行计算; 或利用人工构造变网格; 用有限元法求解等。

虽然现在对变网格研究较多, 但投入业务使用的只有加拿大气象中心和法国气象局。本文是将原来均匀网格的 MM4 模式改

造成非均匀变网格模式, 然后建立一套投入业务使用的客观分析系统、变网格数值预报系统、预报资料图形显示系统和网络自动化传输资料系统等。

## 1 变网格模式设计原理

本文的变网格设计采用的是坐标变换法。设  $G(\xi, \eta, \sigma)$  为变网格坐标,  $\Phi(x, y, \sigma)$  为均匀网格坐标。做变换使  $\xi = \xi(x), \eta = \eta(y), \sigma = \sigma$  显然此时有

$$\Delta\xi = \frac{\partial\xi}{\partial X}\Delta x \quad \Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial y}\Delta y \quad \Delta\sigma = \Delta\sigma$$

而对某一气象要素  $F$  有:

$$\frac{\partial F}{\partial\xi} = \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial\xi}$$

$$\frac{\partial F}{\partial\eta} = \frac{\partial F}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial\eta}$$

其中

$$\frac{\partial X}{\partial\xi} \frac{\partial\xi}{\partial X} = \frac{\partial Y}{\partial\eta} \frac{\partial\eta}{\partial Y} = 1$$

如果微商都用差商表示, 则上式中的  $\frac{\partial F}{\partial X}$ ,

$\frac{\partial F}{\partial Y}$  可用一般方法在  $\Phi(x, y, \sigma)$  中计算, 但

① 资助课题: 中国气象局青年基金 变网格数值预报系统的设计和试验

$\frac{\partial X}{\partial \xi}, \frac{\partial Y}{\partial \eta}$  需用不等距差分计算。如要求有二阶精度,  $\frac{\partial X}{\partial \xi}$  可表示为:

$$\frac{\partial X}{\partial \xi} \approx a \cdot X_{i+1} + b \cdot X_{i-1} - (a + b) \cdot X_i$$

其中

$$a = \frac{d_i}{d_{i+1}(d_i + d_{i+1})}$$

$$b = -\frac{d_{i+1}}{d_i(d_i + d_{i+1})}$$

$$d_i = \xi_i - \xi_{i-1}$$

$$d_{i+1} = \xi_{i+1} - \xi_i$$

$i$  是变网格  $G$  中沿  $X$  方向的网格点序号。

同理也可求出  $\frac{\partial Y}{\partial \eta}$ 。

可以证明, 用变网格时, 整个计算域的质量是守恒的, 并且也满足二次守恒(证明略)。

## 2 变网格预报模式的设计

### 2.1 MM4 模式简介

MM4 模式是美国宾州大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)研制的中尺度数值模式, 是目前国内外中尺度气象研究应用最广泛的模式之一。其动力学预报是采用三维、静力平衡、斜压原始方程组。坐标系为兰勃脱保角投影图上的直角坐标系, 垂直方向为  $\sigma$  坐标, 取 10 层。模式中主要物理过程的参数化包括: Kuo-Anthes 的积云对流参数化方案, 次网格水平、垂直扩散方案, 行星边界层方案等。模式还考虑了地形影响, 地形资料为经纬各  $1^\circ$  的实际地形资料。预报方程组采取通量形式。MM4 模式是均匀网格, 本文取  $41 \times 41$  个网格点, 网格距  $d = 60\text{km}$  (图

略)。

### 2.2 变网格 MM4 模式的设计方法

本文设计的变网格要求网格点数不变, 预报区域大小不变。据此, 设计出变网格变换关系如下:

$$\xi = (j - 1)d + \frac{L_x}{6\pi} \sin\left(\frac{2\pi(j - 1)d}{L_x}\right)$$

$$\eta = (i - 1)d + \frac{L_y}{6\pi} \sin\left(\frac{2\pi(i - 1)d}{L_y}\right)$$

其中  $L_x = 2400\text{km}$ , 是预报区域总长度,  $L_y = 2400\text{km}$ , 是预报区域总宽度; 参数  $d = 60\text{km}$ 。其网格点分布见图 1。从图中可知, 这种变网格是由区域边缘逐渐向中心加密。注意在 MM4 中  $j$  对应  $x$  坐标, 而  $i$  对应  $y$  坐标。

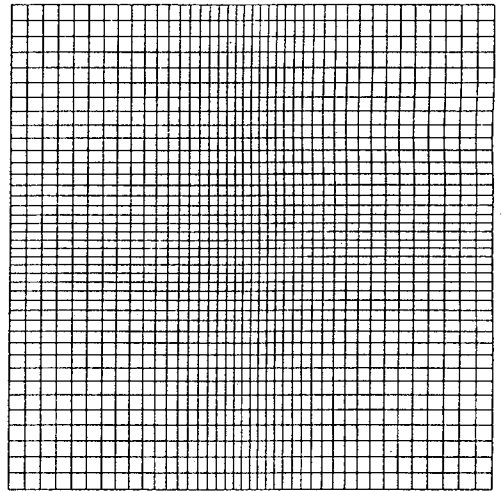


图 1 变网格 MM4 模式网格点分布

则可得到变网格 MM4 模式的通量形式方程组如下:

水平动量方程可写成:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* u}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{uu}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{vu}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial \sigma} \frac{u\sigma}{m} \\ & - mp^* \left[ \frac{RT_v}{p^* + \frac{p_i}{\sigma}} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right] + fp^* v + F_H(u) + F_v(u) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p^* v}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{uv}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{vv}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial \sigma} \frac{v\sigma}{m}$$

$$- m p^* \left[ \frac{RT_v}{p^* + \frac{p_t}{\sigma}} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] - f p^* u + F_H(v) + F_v(v)$$

连续方程和垂直速度  $\sigma$  方程为:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{u}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{v}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] - \frac{\partial p^* \sigma}{\partial \sigma}$$

$$\sigma = -\frac{1}{p^*} \int_0^\sigma \left[ \frac{\partial p^*}{\partial t} + m^2 \left[ \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{u}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{v}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] \right] d\sigma$$

地面气压倾向通过对连续方程垂直积分得:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = -m^2 \int_0^1 \left[ \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{u}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{v}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] d\sigma$$

热力学方程为:

$$\frac{\partial p^* T}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* u}{\partial x} \frac{T}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^* v}{\partial y} \frac{T}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial \sigma} \frac{\sigma T}{m}$$

$$+ \frac{RT_v \omega}{C_{pm} \left( \sigma + \frac{p_t}{p^*} \right)} + \frac{p^* Q}{C_{pm}} + F_H(T) + F_v(T)$$

$\omega$  方程为:

$$\omega = p^* \sigma + \sigma \frac{dp^*}{dt}$$

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial p^*}{\partial t} + m \left( u \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + v \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right)$$

水汽方程为:

$$\frac{\partial p^* q_v}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* u}{\partial x} \frac{q_v}{m} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial p^* v}{\partial y} \frac{q_v}{m} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right] - \frac{\partial p^* q_v \sigma}{\partial \sigma}$$

$$+ p^* (p_{pre} - p_{con}) + F_H(q_v) + F_v(q_v)$$

流体静力方程可写为:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \ln \left( \sigma + \frac{p_t}{p^*} \right)} = -RT_v \left( 1 + \frac{q_c + q_r}{1 + q_v} \right)^{-1}$$

这里  $p^*$  定义为  $p^* = p_s - p_t$ ,  $P_s$  为地面气压,  $P_t$  为模式顶气压。其它符号为气象中常用的。

### 3 变网格数值预报系统构造

河北省变网格数值预报系统主要由以下

(1)资料采集及译码系统。它是从网络直接读取所需的地面、高空报文,然后译码转换成分层资料,包括风场、高度场、气压场、温湿场等。

(2)资料检误及客观分析。即剔除错误的

步订正法插值到变网格的各网格点上。

(3) 网格点资料从  $P$  坐标转换成  $\sigma$  坐标。资料转换成  $\sigma$  坐标才能符合预报模式的要求。

(4) 变网格 MM4 模式积分预报。这是系统的核心部分,即将上述的动力学方程组用差分形式表示,积分做出所需时段的预报。

(5) 预报结果的后处理及图形显示。将各时段的预报结果分别进行处理。把  $\sigma$  坐标下的预报数值插回到  $P$  坐标,最后得到所需的要素预报场,并输出到计算机屏幕显示,供预报员参考。

(6) 网格自动化传输资料。将选定的部分客观分析场和要素预报场通过河北省气象信息网输送到下级台站,供预报员参考使用。

图 2 给出了变网格数值预报系统流程。

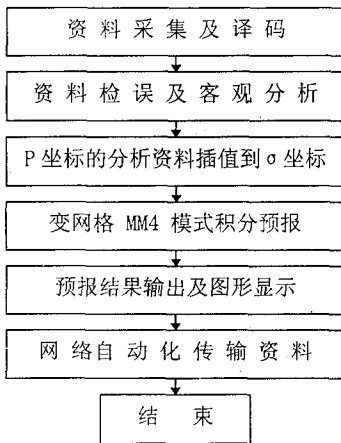


图 2 变网格数值预报系统流程

#### 4 变网格与均匀网格数值预报模式的对比试验

为了研究变网格与均匀网格数值预报的准确率,本文选取了河北省 1999 年 8 月的一次暴雨过程进行模拟对比分析。

1999 年 8 月 8 日 20 时~10 日 08 时,河北省自西向东先后降雨,唐山、秦皇岛、保定、石家庄、邢台、邯郸共有 27 个县市降暴雨、12 个县市降大暴雨,其它县市普降中到大雨。在

最强,石家庄市降 130mm,河北省中南部也普降大到暴雨。此次过程高空影响系统主要是中低层低涡和切变线,在 8 日 20 时 700hPa 图上,河北省中南部形成一个闭合低压,造成河北省中南部 8 日夜间的强降水,此外还有 9907 号热带风暴减弱的低压外围输送的低空暖湿气流。地面影响系统主要是冷锋和偏东风。

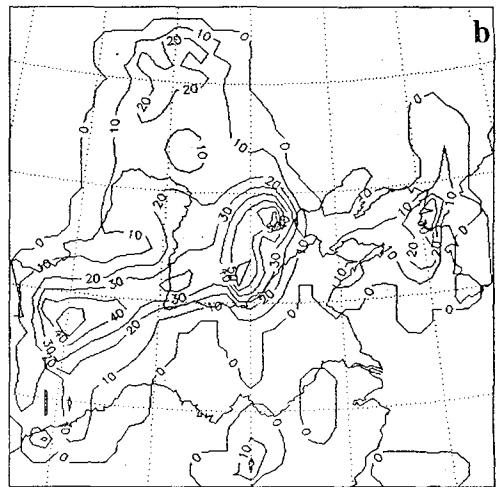
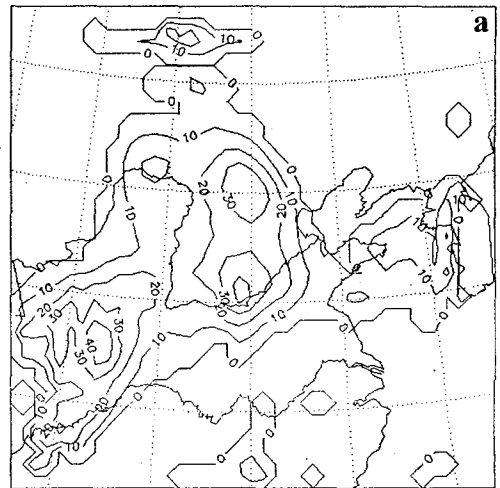


图 3 1999 年 8 月 8 日 08 时均匀网格(a)和变网格(b)24 小时雨量预报(单位:mm)

本文利用 1999 年 8 月 8 日 08 时的地面实况资料,分别给于变网格和均匀网格

值预报模式做了 48 小时的预报试验。

图 3a、b 分别为 8 月 8 日 08 时均匀网格和变网格的 24 小时雨量预报图。从图中可看到,两个模式在预报的雨区范围上是基本一致的,但均匀网格模式预报(图 3a)的降水在华北区域未达到暴雨的量级,且降水中心位于河北省的西北部和西南部及河南省北部;而变网格降水预报(图 3b)在华北区域中心强度为 75mm,暴雨落区位于河北省的中南部,更接近于降水的实况。

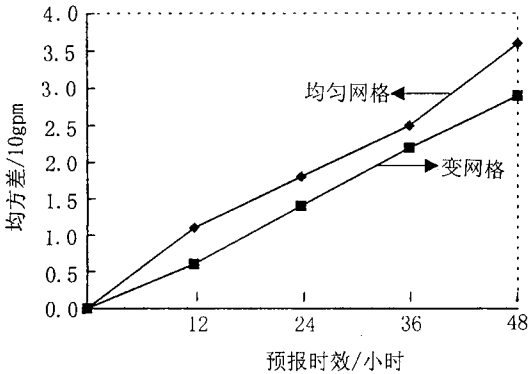


图 4 1999 年 8 月 8 日 08 时均匀网格和变网格 500hPa 高度场预报的均方差

图 4 给出变网格和均匀网格 500hPa 高度场预报的均方差随预报时间的演变图。从

图中可看出,两种网格模式预报的均方差都是随着预报时间的增加而增加的,变网格预报的均方差小于均匀网格预报的均方差,这说明变网格数值模式在天气形势预报上也是优于均匀网格的。

### 5 结论

(1)本文设计了河北省变网格数值预报系统,此系统设计简单合理,具有较好的使用性能,适用于范围较小的局地数值预报产品的制作。

(2)本系统经过实际数值预报检验,得到在基本没有增加计算量的情况下,变网格数值预报模式对所关心区域的环流形势和局部天气系统的预报明显优于传统的均匀网格预报,证明了变网格数值预报是提高数值预报准确率的一种非常有效的手段,开展变网格数值预报的研究和应用是非常有意义的。

### 参考文献

- 1 曾庆存,李荣凤. 不等距差分格式的计算紊乱问题. 大气科学,1982,6(4):345~354.
- 2 Staniforth A N, Mitchell. A variable-resolution finite-element technique for regional forecasting with the primitive equations. MonWea Rev,1978,106(4):439~447.
- 3 Gravel S, Staniforth A. Variable resolution and robustness. Mon Wea Rev,1992,120(11):2633~2640.

## Designing and Experiment of Nonuniform Numerical Weather Prediction System for Hebei Province

Xu Guoqiang Hu Xin Zhang Yingxin

(Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021)

Li Xiaoyan

(Baoding Meteorological Office, Baoding 071000)

### Abstract

A scheme for conversing uniform into nonuniform mesh in the MM4 model was designed. A inhomogeneous mesh version of the model fitting Hebei region was developed. A numerical weather forecast system for operational use was established. Finally, with the simulation experiment of a heavy rain process, it is certified that the inhomogeneous mesh model is better than the uniform mesh model.

**Key Words:** uniform mesh inhomogeneous mesh MM4 model simulation