

业务集合预报系统的现状及展望<sup>①</sup>

杨学胜

(国家气象中心,北京 100081)

## 提 要

集合预报系统从原理上讲也可称之为概率预报系统,其最终目的是要提供所有大气变量的完全概率预报。近几年集合预报技术已从以前仅考虑初值的不确定性发展为也考虑模式的不确定性,进而发展了多模式-多分析集合预报技术等。阐述了目前业务集合预报的一些问题,如扰动初值的生成、多模式集合预报、集合预报产品的应用、检验评价等,介绍了近几年集合预报的新的进展及该技术的未来发展趋势。

**关键词:** 集合预报系统 概率预报系统 扰动初值的生成 多模式-多分析集合

## 引 言

集合预报的主要理论依据是基于大气是一个混沌系统<sup>[1]</sup>,初始条件或模式方程中的任何误差都会导致模式在积分一定的时间后失去可预报性。集合预报系统,从原理上讲也可称之为概率预报系统,其最终目的就是要提供所有大气变量的完全概率预报,可定义为一个模式或多个模式从稍加扰动的初始条件出发运行多次,从而达到估计由于初始条件和模式本身的误差引起的预报不确定性的目的。该技术已在国际上一些气象中心如 NCEP(1992)<sup>[2]</sup>、ECMWF(1992)<sup>[3]</sup>、加拿大气象中心(1996)、JMA(1996)、南非气象局(1996)等投入业务使用,并在日益增长的天气预报服务中发挥越来越大的作用。

集合预报技术在近几年取得了一些重大进展,其中最显著的是从以前仅考虑初值的不确定性发展为也考虑模式的不确定性,进而发展了多模式-多分析集合预报技术等。最近,由于工作上的原因对国外的集合预报系统进行了调研,感触颇深。在这里奉献给大家

以供分享。

## 1 集合预报技术

集合预报中有 4 大类问题需要解决:初值扰动的生成、数值模式的运用、集合预报产品的应用和预报产品的检验。

初值的生成是集合预报系统关键的第一步,也是整个系统的难点。通常是采用某种扰动方法,生成一系列小扰动量分别叠加到分析场上,形成模式初始数据集,并由此制作集合数值预报。

## 1.1 初值扰动技术

早期集合预报系统的初始扰动大都采用随机扰动法,如蒙特卡罗法<sup>[4]</sup>、时间滞后法<sup>[5]</sup>,但这些方法都受到样本数的限制。目前各业务中心主要用到了以下 3 种初值扰动技术。

①增长模繁殖法(BGM):以 NCEP 为代表,在芬兰、南非气象局得到应用。该方法试图找出那些能够最快速增长的分析误差,模拟了实际气象资料分析处理的过程,既考虑了资料中可能出现的误差,同时又考虑了快

① 本文得到 863 项目“扰动初值形成方案的优化改进”ZD-11-03-02-02 专题的资助

速增大的动力学结构。

②奇异向量法(SV):以 ECMWF 为代表,找出在预报中增长最快的扰动结构。该方法所侧重的是抽样演变的分离程度,而没有考虑这种抽样是否对初始状态误差概率分布有较为准确的估计。SV 通过伴随模式得到,因此需要大量的计算时间。

③扰动观测技术(PO):在加拿大应用,对每一个扰动的分析,运行一个独立的分析循环,其中对所有的观测都用代表观测误差的随机噪音进行扰动。

其中 BGM 和 PO 在原理上是相似的,都试图捕捉住分析中的误差形势。但 BGM 忽略了那些初始不增长的扰动形势。BGM 和 SV 在忽略不增长形势上是相似的,但 BGM 不考虑瞬时的扰动增长,仅捕捉住了那些能保持扰动振幅是分析误差代表性估计的增长扰动。3 种方法都有其优点,有必要对其进行对比研究。但 BGM 是 3 种方法中最简单和最经济的方法。

NCEP 的全球集合预报系统 1992 年 12 月份投入业务运行,能够提供比高分辨率预报更为经济有效的预报。2000 年其成员数量已增加到 24 个,其中包括 20 个扰动预报,扰动来自 10 个独立的 breeding 循环,同时 NCEP 还运行一个短期集合预报系统,预计 2001 年投入业务运行。该系统是一个两模式集合预报系统,共 10 个成员。一个是 ETA 模式,分辨率为 48km,另一个是区域谱模式,侧边界用的是全球的初始扰动。

目前 ECMWF 集合预报系统的模式分辨率为  $T_L159L40$ ,包括 50 个集合扰动成员和一个控制预报,预报时效为 10 天。

## 1.2 模式扰动

集合预报最初在业务应用时的主要目的是用于估计由于初始条件中的误差引起的预报不确定性。实际应用中,由于预报模式在一定程度上都采用了一些简化,如时间、空间差

分及物理过程参数化方案等,都会带来预报的不确定性。

基于此,近几年集合预报的概念已从单纯的初值问题的不确定性延伸到了模式的不确定性,如某些物理过程(如积云对流参数化)、下垫面的作用(如土壤湿度等)都包含有大量的不确定性,而预报结果如降水却对这些过程非常敏感。所以在模式的积分过程中可以在一定的范围内把这些过程当作随机过程处理。

集合预报中曾尝试过用各种不同的方法来反映模式的不确定性,这方面最具代表性的是加拿大气象中心,开发了同一数值模式的多个版本,这些版本的模式或分辨率不同,或对地形处理不同,或对流和辐射参数方案不同,等等。其现行的业务数值预报系统共有 16 个成员,涉及到两个模式,一个是全球有限元谱模式,一个是多尺度环境模式,每个模式有 8 个成员。初始条件有的是加上了扰动观测,有的则用控制分析。其目的就是要抓住模式预报中的系统偏差或误差。

1996 年 ECMWF 的集合预报系统也开始考虑模式物理过程的不确定性。其做法是在每一积分步后,将随机的噪音以不同的倍数加到非绝热强迫项中。当所有的参数化过程的强迫加上后,净的强迫项乘上一个  $[0.5, 1.5]$  区间内的任一选取的随机数,从而使得完整的物理参数化过程的影响是随机的。其目的是要表示模式积分时,随机的次网格尺度过程参数化的内在的不确定性。试验结果表明,新方案使系统的预报有了一定程度的提高。

NCEP 的集合预报系统目前还没有考虑模式方面的误差,但它对集合预报的概率预报产品进行了系统误差订正,在提供直接可用的输出产品方面非常有用,消除了概率预报的偏差。

## 2 多模式集合预报的应用

### 2.1 多分析-多模式集合预报技术

首先,一个好的集合预报系统一定是建立在好的数值模式基础上。考虑模式不确定性的另一个方法是在集合预报系统中引入另一个模式,理想情况下用到的模式应该是相互独立的,这样其误差也是相互独立的。

最近几年发展了“多分析-多模式集合预报”系统,就是同时使用两个或两个以上业务中心的分析场及两个或两个以上业务中心的模式制作集合预报。每个模式都有其自身的集合预报系统,然后把这几个子集合预报加在一起成为总集合预报。这一方法既考虑了初值误差的影响,又考虑了模式物理过程中不确定性因素的影响。结果表明,无论从概率意义上还是从决定论意义上,多模式集合预报所提供的信息均比单个模式集合预报更准确。

这方面最具代表性的是英国气象局 UKMO<sup>[6]</sup>,其“多分析-多模式集合预报”系统用到了两个模式,一个是 UKMO 的业务模式 UM,一个是 ECMWF 集合预报模式系统。UM 模式和 ECMWF 模式是完全独立的两个模式系统,有不同的动力学和物理参数化方案。其中 UM 是统一的格点模式,ECMWF 的模式是谱模式,但在预报技巧上

两者是相当的。UKMO 的集合预报系统包括:(1)UU27:在 UKMO 的分析场上加上 ECMWF 集合预报系统的前 27 个初始扰动,用 UM 模式进行预报;(2)EE27:取 ECMWF 集合预报系统的前 27 个扰动预报。 $UUEE54 = UU27 + EE27$ ,这样共有 54 个成员,它既包括了初始条件的不确定性,又包括了模式的不确定性。 $EEUU78 = UU27 + EE51$ ,其中 EE51 表示 51 个成员的 ECMWF 集合预报系统。

图 1 给出了 UKMO 的集合预报系统在北大西洋和欧洲的平均海平面气压的 BSS 在 1999 年 1 月份和 1998 年 12 月相对于 ECMWF 的集合预报系统的改进的百分比。从图 1 看,1998 年 1 月 UU27 单个模式集合预报系统在头 2 天的效果明显低于 51 个成员的 ECMWF 集合预报系统,这与检验时使用 ECMWF 的分析有关;从第三天开始, UU27 与 EE51 相当或略低于 EE51。而  $EEUU54$  或  $EEUU78$  的 BSS 评分在 48~192 小时比 EE51 提高了约 6%~10%。1998 年 12 月份的效果没有 1 月的明显, UU27 的效果相对较差,但  $UUEE54$  在 48~120 小时的效果比 EE51 提高了 2%~5%。

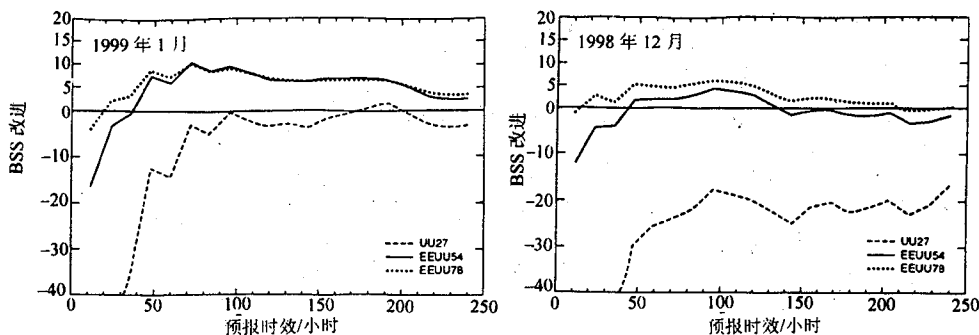


图 1 多模式-多分析集合预报系统相对于 ECMWF 集合预报系统在北大西洋和欧洲地区平均海平面气压 BSS 评分上的改进

总体上看,在基本上不增加预报成员的前提下,与 ECMWF 的集合预报系统相比,“多分析-多模式集合预报”系统中期预报技巧有了明显的提高。同单一的模式系统相比,“多分析-多模式集合预报”系统在维护上需要投入更多的精力。

### 2.2 “Poor Man”集合预报技术

“Poor Man”集合预报技术是将来自几个业务中心的决定性预报作为集合预报的成员。相对于发展并运行一个集合预报系统来讲,该方法比较便宜,也容易实现。

图 2 给出了“Poor Man”集合预报与 ECMWF 的集合预报的 BSS 偏差随预报时效和温度距平的演变情况。可以看出,“Poor Man”集合预报技术在表达短期预报的不确定性方面非常有效,在前 3 天“Poor Man”预报技巧高于 ECMWF 的集合预报系统。事实上,“Poor Man”在一定程度上是一个多分析-多模式集合预报系统,它对 3 天以后的预报效果较差,与 ECMWF 和 NCEP 的扰动生成技术主要是考虑前 48 小时的误差增长最大有关。

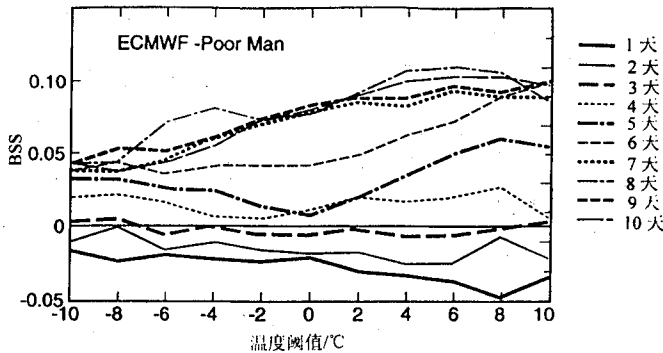


图 2 ECMWF 的集合预报系统与“Poor-Man”集合预报系统的 BSS 评分之差随时间和温度距平的演变

### 2.3 多模式超级集合 (Super-Ensemble) 技术

该方法由 Krishnamurti (1999)<sup>[7]</sup> 提出,实际上它是“Poor Man”集合预报系统的进一步发展,但它用的是多个业务决定性预报的输出结果,不将多个模式的预报结果直接作为集合预报系统,而是根据这些模式过去的性能对其预报进行统计订正,以获得最好的决定性预报。

与其它的集合预报技术不同,超级集合技术仅仅提供了一个决定性预报,不是一个概率预报。结果显示,超级集合给出了最好的决定性预报,它比所有的单个模式或模式的集合平均效果要好。

### 3 集合预报产品

集合预报在原理上又被称之为概率预报系统,其产品在实际应用中也不断得到扩展。除传统的“邮票”图,还有:

①集合平均:集合预报最基本的产品。将集合平均与集合发散或面条图结合起来,可反映出集合中的各个成员对集合平均的贡献。

②集合发散:集合预报另一种基本指导产品,是集合平均的标准偏差,表示集合成员在集合平均周围的变化。

③面条图:将所有成员的特征等值线如 500hPa 高度场的 588 线绘在一张图上,给出集合预报的可信程度。一般来说,特征线发散

表示其可信度较低,反之特征线集中表示其可信度较高。

④聚类法:对大量的预报产品进行处理、合成、压缩。目前用到的有:ECMWF 早期使用的 Ward<sup>[8]</sup>(1963)聚集法,一般用均方差来度量;瑞典气象局使用的神经元法(Eckert 等,1995);NCEP 的聚类法把集合预报中相似的成员合并成一类,一般用相关系数来度量;法国气象局用的自动划分方法<sup>[9]</sup>,根据位移和最大相关系数距离对影响法国的天气形势进行分类,给出各种天气形势发生的概率;ECMWF 的 Atger<sup>[10]</sup>(1999)管子法,它更注重集合的平均及其极值,用统计方法导出的产品,试图找出集合预报中占主导地位 and 重要的部分。

这些方法对集合预报系统的产品释用提供了一种更直观、更有效的方法。但不论用何种方法,最终都给出每个分类的发生概率。

⑤要素概率预报:集合预报最重要和最综合的产品,如降水、10m 的风速、2m 温度及 850hPa 温度距平在某一范围内的概率分布平面图。

⑥概率烟羽图:给出如降水、850hPa 湿度在所选站点的集合预报的离散度随预报时间的演变情况。

#### 4 集合预报产品的检验

集合预报检验的基础是假定每个集合成员发生的概率是相同的,所有的评分都是针对样本在网格点上累计计算。目前的客观检验通常包括集合平均的均方根误差、集合的发散度、Talagrand 图、Brier 技巧评分、等级概率技巧评分(RPSS)等等。

##### 4.1 Talagrand 分布

O. Talagrand<sup>[11]</sup>认为一个好的 EPS 的标准应是每个预报成员发生的概率是相同的。一个理想的集合预报系统的 Talagrand 图应是直平的。图 3 为加拿大集合预报系统 500hPa 高度场在 2000 年 8 月在北半球温带的 Talagrand 图。可看出在大多数情况下,落在两端的概率要比落在中间的概率稍大,这说明集合预报各成员的发散度不够,这是世界上集合预报系统的通病。

##### 4.2 发散度

R. Buizza<sup>[12]</sup>将发散度定义为各扰动预

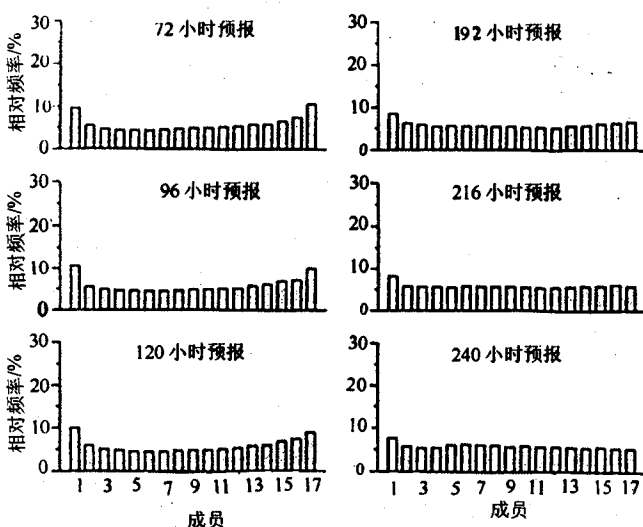


图 3 加拿大集合预报系统 500hPa 高度在 2000 年 8 月在北半球温带的 Talagrand 图

报与控制(未扰动,或集合预报的平均)预报之间的平均距离。一般来讲离散度小,可预报性大;离散度大,可预报性小。从 ECMWF 和 NCEP 的结果来看,集合平均的预报效果要比控制预报好。

#### 4.3 集合预报系统的概率预报检验

集合预报系统是一种概率预报系统,其检验按世界气象组织在 1989 年规定的方法<sup>[13]</sup>。

① Brier 评分: Brier<sup>[14]</sup>定义了一种均方概率误差,称之为 Brier 评分(简称 BS)。BS = 0 表示概率预报最佳;BS = 1 表示最坏的评分。

② Brier 技巧评分(Brier Skill Score, 简称 BSS),它是基于 BS 定义的,表示预报对气候预报改进的程度。与 BS 相反,BSS 值越大预报就越好。

③ 相对作用特征(Relative Operating Characteristic, 简称 ROC):信号探测理论在数值天气预报中的一种应用。它考虑一个事件发生或不发生两种状态,根据命中率和假警报率绘成一曲线,称之为 ROC 曲线。ROC 曲线越靠近图的左上方,命中率高而假警报率低,预报越好;反之亦然。图 4 给出 ECMWF 集合预报系统的 96、144、240 小时

预报的 24 小时累积降水超过 1mm 的 ROC 曲线,可以看出其命中率大于假警报率,效果较好。

#### 5 集合预报的发展趋势

毫无疑问,集合预报系统对极端天气现象或罕见天气事件的预报能力在未来的数值预报业务系统的作用将越来越大。为了更好地使用集合预报产品,对预报员适当的培训是必要的,WMO 也意识到了这一问题,并将在未来的几年内付诸实施。

ECMWF 认为,一个完整的预报系统应具备 5 个条件,而其中之一就是集合预报系统。在 1999~2008 的发展战略中,ECMWF 计划通过用降阶的卡尔曼滤波来产生更好的初始扰动,并通过对集合预报系统中物理过程和模式分辨率的提高、成员个数的增加来提高集合预报系统对极端天气的预报能力及天气要素的概率预报能力;并对 20 至 30 天的预报时效的集合预报系统进行评估。针对“超级集合”的概念,要对多分析和多模式集合的作用以及物理参数化随机扰动的作用进行评估,尝试在初始扰动中加入物理过程,以改进集合预报系统对热带和副热带的预报质量。

NCEP 计划在计算机资源允许的情况下进一步提高模式的分辨率,在 06UTC 和 18UTC 增加集合成员数量。由于没有考虑随机误差和模式的系统性偏差,造成其中期和延伸预报中扰动振幅的不足,NCEP 计划将来自不同中心的、经过偏差订正的集合组合起来,建立多模式集合预报系统,或开发一个能考虑随机和系统误差的模式,开发足够的预报指导产品,提供站点的概率预报。

因此,基于一个好的预报模式和好的扰动初值基础上的集合预报系统,由于其对天气预报的连续性、对可能发生的天气事件的包容性以及突发性天气事件的预报能力使其成为未来数值预报的一个重要发展方向,

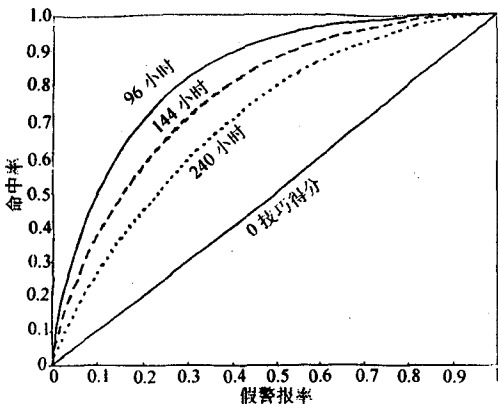


图 4 ECMWF 集合预报系统的 24 小时降水超过 1mm 的 ROC 曲线

而它的发展也取决于决定性预报模式的质量,因此两者是相辅相成的,并不是对立的。

**参考文献**

- 1 Lorenz, E. N. Atmospheric Predictability Experiments with a large scale numerical model. *Tellus*, 1982, 34: 505-513.
- 2 Toth, Z. and E. Kalnay. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 125:3297-3319.
- 3 Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petrolia. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, 122:73-119.
- 4 Hollingsworth, A. An experiment in Monte Carlo forecasting procedure. *Proc. Workshop on Stochastic Dynamic Prediction*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 1980, 65-86.
- 5 Hoffman, R. N. and Kalnay, E. Lagged Average Forecasting, an alternative to Monte-Carlos forecasting. *Tellus*, 1983, 35A:100-118.
- 6 Mylne, K. R., Evans, R. E and Clark, R. T. Multi-model multi-analysis ensembles in quasi-operational

- medium-range forecasting, to be submitted to *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2000.
- 7 Krishnamurti et al. Multi-model super-ensemble forecasts for weather and seasonal climate FSU. Report 99-8, July 1999.
- 8 Yang Xuesheng. Classification des run de la prevision d'ensemble par rapport a des types de temps. *ENM, METEO FRANCE*. 1998.
- 9 Atger F. Tubing: an alternative to clustering for ensemble prediction classification. *Weather and Forecasting*, 1998, 14(5):741-757.
- 10 Talagrand O and Vautard R. Evaluation of probabilistic prediction systems. *Workshop on predictability ECMWF 20-22, 10, 1997*.
- 11 Buizza, R. Potential Forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 99-119.
- 12 Stanski H R, Wilson L J and Burrows W R. Survey of common verification methods in Meteorology, WMO/TD, No. 1989, 358.
- 13 Brier. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon. Wea. Rev.*, 1950, 78:1-3.

## The New Development and the Outlook of the Operational Ensemble Prediction System

Yang Xuesheng

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract**

The Ensemble Prediction System (EPS) in principle can be called the Probabilistic Prediction System (PPS) of which its ultimate goal is to provide the full probabilistic forecast for all variables. Compared to the beginning of EPS era in 1992 that just considered the uncertainties existed in the initial conditions, one of the most significant progresses made on ensemble techniques during the past few years, is that the model uncertainties have been taken into account, and then is the development of the multi-model and multi-analysis ensembles. Some problems existed in the operational EPS such as the generation of initial perturbations, multi-model ensembles, the application of ensemble products and its verifications are described, and the outlook of this perspective technique is exhibited.

**Key Words:** ensemble prediction system    probabilistic prediction system    initial perturbations    multi-model multi-analysis