

应用 GEM 模式作北京地区航空气象 要素逐时预报的探讨*

王 炳 仁 刘 健 文

(空军气象研究所)

提 要

本文给出了应用 Generalized Equivalent Markov model (简称 GEM 模式) 作北京地区航空气象要素逐时预报的数学模式、制作步骤、试验结果及其分析, 并展望了在航空气象要素短时预报中应用 GEM 模式的发展前景。

一、引 言

航空事业的迅速发展, 对航空气象保障业务提出了工作和服务自动化的要求。能否找到一个有效的途径, 对航空气象要素进行短时客观定量预报, 已经成为航空气象工作者面临的重要课题。鉴于此, 我们进行了用 GEM 模式作航空气象要素逐时预报的试验研究。

GEM 模式是美国国家气象局技术发展实验室(NWS TDL) Robert G. Miller 等 1977 年提出的一个对局地地面气象要素逐时概率分布进行预报的统计技术方法。它仅以局地地面气象要素为预报因子, 从其预报概率分布中作出相应各要素的类型决策预报。

二、数 学 模 式

当用气象要素的前期量来预测它的未来变化时, 在无后效性的假定下, 可以把其变化过程看作是时间离散、状态离散的马尔科夫过程, 采用马尔科夫链来作预报。在 GEM 模式中, 建立了一个用来估计一个时间步长所有随后事件概率的多元回归系统, 其中要求预报因子和预报量取 0-1 化值。这样, 回归估计的概率就代替了一般马尔科夫链中的转移概率。

设观测个例为 N , 预报因子为 $Z_1, Z_2, \dots, Z_p, \dots, Z_p$, 预报变量为 $Y_1, Y_2, \dots, Y_q, \dots, Y_q$ 。我们可以建立一组依 q 排列的多元线性函数方程:

$$\begin{cases} \hat{Y}_1 = a_{1,0} + a_{1,1}z_1 + a_{1,2}z_2 + \dots + a_{1,p}z_p + \dots + a_{1,p}z_p \\ \hat{Y}_2 = a_{2,0} + a_{2,1}z_1 + a_{2,2}z_2 + \dots + a_{2,p}z_p + \dots + a_{2,p}z_p \\ \vdots \\ \hat{Y}_q = a_{q,0} + a_{q,1}z_1 + a_{q,2}z_2 + \dots + a_{q,p}z_p + \dots + a_{q,p}z_p \\ \vdots \\ \hat{Y}_q = a_{q,0} + a_{q,1}z_1 + a_{q,2}z_2 + \dots + a_{q,p}z_p + \dots + a_{q,p}z_p \end{cases} \quad (1)$$

* 本文于 1985 年 10 月 12 日收到, 1986 年 2 月 27 日收到修改稿。

由历史资料得到的误差平方和为:

$$E_q^2 = \sum_{i=1}^N (Y_{i,q} - \hat{Y}_{i,q})^2$$

$$= \sum_{i=1}^N (Y_{i,q} - a_{q,0} - a_{q,1}z_{i,1} - \cdots - a_{q,p}z_{i,p} - \cdots - a_{q,Q}z_{i,Q})^2 \quad (2)$$

($q=1, 2, \cdots, Q$)

我们可以用最小二乘法来确定 $a_{q,p}$ ($q=1, 2, \cdots, Q; p=1, 2, \cdots, P$) 的值, 使 E_q^2 最小。对 E_q^2 取 a 的导数, 并使每个导数等于零。求解 a 的过程可以得出一组正规方程, 其矩阵形式为:

$$(\underline{Z}'\underline{Z})\underline{A} = \underline{Z}'\underline{Y} \quad (3)$$

式中 $\underline{Z}$ 为预报因子矩阵 (一撇表示矩阵转置), $\underline{Y}$ 为预报量矩阵, $\underline{A}$ 为 $P \times Q$ 的回归系数矩阵。记 $\underline{S} = \underline{Z}'\underline{Z}$, $\underline{SI} = \underline{Z}'\underline{Y}$ 。前者是正规方程的对称系数矩阵, 后者是常数项矩阵, 上述正规方程写成:

$$\underline{S}\underline{A} = \underline{SI} \quad (4)$$

假定 $N > P$, $\underline{S}$ 满秩, 则 (4) 式可写成:

$$\underline{A} = \underline{S}^{-1}\underline{SI} \quad (5)$$

因此, 欲求回归系数 $\underline{A}$, 既可从 (4) 式直接解线性方程组, 也可先计算逆矩阵 $\underline{S}^{-1}$ 再从 (5) 式求解。

解出 $\underline{A}$ 后, 则有:

$$a_{q,0} = \bar{Y}_q - \sum_{j=1}^P a_{q,j} \bar{Z}_j \quad (q=1, 2, \cdots, Q) \quad (6)$$

求解回归系数时, Miller 等用克劳特 (Crout) 分解法, 我们采用了线性对称方程组解的分解法。这样做的目的是为了避开大矩阵求逆时可能遇到的计算不稳定。在我们的对比试验中后者的计算效果比前者好。其方法是将对称系数矩阵分解为一个下三角形矩阵、一个对角线矩阵和一个上三角形矩阵的乘积, 其中两个三角形矩阵互为转置矩阵, 即:

$$\underline{S} = \underline{L} \underline{D} \underline{L}^T \quad (7)$$

矩阵 $\underline{L}$ 和 $\underline{D}$ 的元素可逐次确定如下:

$$\begin{cases} d_{11} = S_{11}, & d_{ii} = S_{ii} - \sum_{r=1}^{i-1} l_{ir}^2 d_{rr} \\ l_{ij} = 0 \quad (j > i), & l_{ij} = \frac{1}{d_{jj}} \left(S_{ij} - \sum_{r=1}^{j-1} l_{ir} l_{jr} d_{rr} \right) \quad (j < i) \end{cases} \quad (8)$$

矩阵 $\underline{L}$ 和 $\underline{D}$ 决定后, 令:

$$\underline{G} = \underline{D} \underline{L}^T \underline{A} \quad (9)$$

则:

$$\underline{L} \underline{G} = \underline{L} \underline{D} \underline{L}^T \underline{A} = \underline{SI} \quad (10)$$

回代求出 $\underline{G}$, 进而解 $\underline{A}$ 。 $\underline{G}$ 和 $\underline{A}$ 的计算由下列公式给出:

$$g_{i,1} = SI_{i,1}, \quad g_{i,i} = SI_{i,i} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} SI_{i,k} \quad (i > 1) \quad (11)$$

$$a_{i,p} = g_{i,p} / d_{pp}, \quad a_{i,i} = \left[g_{i,i} - \sum_{k=i+1}^p d_{ik} l_{ki} a_{i,k} \right] / d_{ii} \quad (12)$$

对于已确定的 $\underline{A}$, 在给出零时刻 Z 值的数列后, 能用来估计下一时刻的 Y 值:

$$\hat{Y}_1 = Z'_0 \underline{A} \quad (13)$$

根据马尔科夫过程无后效性的假定, 逐次迭代, 则 T 时刻的 Y 估计值可表示成:

$$\hat{Y}_T = Z'_{T-1} \underline{A} \quad (14)$$

与此等效, T 时刻 Y 的估值还可利用 $\underline{A}$ 的 T 次幂表示为:

$$\hat{Y}_T = Z'_0 \underline{A}^T \quad (15)$$

实际计算时, 我们可以视计算机条件分别采用 (14) 式或 (15) 式。

三、应用 GEM 模式制作航站预报的步骤

依照数学模式处理了历史资料, 建立起预报模型后, 我们就可以根据实时观测资料制作航站预报了。具体步骤如下:

1. 输入实时观测资料值, 按照设计好的气象要素分类标准, 将其转换为“0”或“1”。
2. 用回归方程估计下一小时各个气象要素的条件概率。进而以概率估值为初值, 逐时重复直至期望的预报时效, 产生广义等效马尔科夫矩阵 (GEMTRIX)。
3. 用临界概率将 GEMTRIX 中的概率值转化为最优类型决策值, 从而产生类型矩阵 (CATRIX)。
4. 由类型矩阵可以给出通常条件下的航站统计预报。
5. 预报员在研究了航站统计预报和其它实时气象情报信息 (如卫星、雷达、探空及天气图等资料) 之后, 接受或通过反馈改变类型矩阵, 得出航站最终预报。

图 1 是制作航站实时预报的流程图。

四、北京地区航站气象要素逐时预报试验结果及其分析

我们选择了北京南苑和西郊两站冬季 12 月、1 月的能见度等九类航空气象要素作为逐时预报对象 (同时为预报因子, 见表 1)。两站分别以 72, 74, 76, 78, 80 年和 71—79 年资料为样本, 建立进行 1 小时预报的回归系数矩阵。

试报中, 有些要素是以出现或不出现为特征的, 如天气现象; 有些要素是以其数值的变化和延续为特征的, 如能见度、风速等。下面以能见度为例, 从演变趋势和拟合程度上作一分析。

图 2 给出了南苑 1979 年 1 月 1 日 04 时—15 时能见度预报值 (图中阴影区) 和实况值 (图中圆点, 下同) 的对照。起报时刻 03 时能见度 6 km, 8 时 0.5 km, 11 时后逐渐转好, 12—14 时为 2.5 km, 15 时后大于 6 km, 这个能见度转坏, 尔后转好的过程和强度基本上都报出来了, 只是在转好的时间上, 预报稍偏晚。

再如 1979 年 1 月 2 日, 03 时能见度 2 km, 尔后逐渐小于 1 km, 13 时稍有好转, 但始

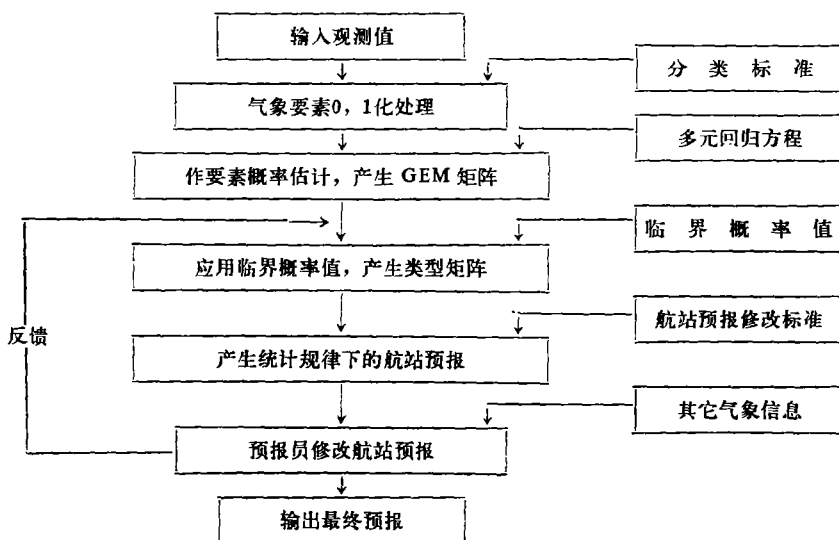


图 1 应用 GEM 模式制作航站预报操作步骤流程图

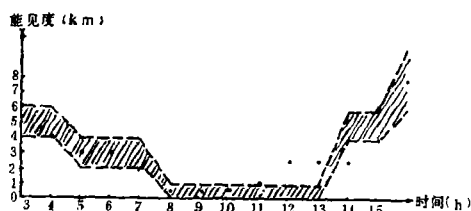


图 2 1979 年 1 月 1 日 04—15 时南苑能见度
预报与实况
(03 时为起报时刻, 阴影区为预报值, 圆点为实况值)



图 3 1979 年 1 月 2 日 04—15 时南苑能见度
预报与实况

终不到 2 km, 与 1 日相比, 能见度变化的幅度小得多, 预报和实况基本一致 (图 3), 只是预报 6 时能见度短时好转是个失误。

对于能见度一直较好或一直不好的情况, 通常都能很好地预报出来 (图 4、图 5)。

当有冷锋过境时, 单站气象要素往往发生急剧变化, 此时, 仅根据某一时刻单站要素值, 一般难以正确地预报出这种变化。如 1979 年 1 月 6 日, 该日 12—13 时之间有冷锋过境, 锋前有雾、毛毛雨间有降雪, 能见度在 1.5 km 以下, 冷锋过境后西北风 10—13 m/s, 有扬沙, 随后能见度迅速好转。用 GEM 模式从 03 时作预报, 上述各项除雾外都没能报出来。这是一次预报基本失误的例子 (见图 6)。国外有关资料亦指出, 预报锋面过境的尝试尚没有获得成功, 我们的试验也没有解决这个问题。

对上述有明显系统影响的情况, 目前除了应用预报原则进行统计预报的订正之外, 增加了考虑其它气象情报资料 (如天气图、卫星、雷达及探空、测风等资料), 实施预报员干预这一环节。根据情况预报员可以人工改变类型矩阵中某一时刻某些要素的预报值, 使之反馈回去。将来这可以在卫星、雷达等资料客观分析预报的基础上, 通过电脑联机, 自动修正类型矩阵, 实现反馈。

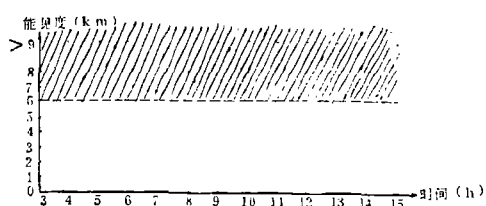


图 4 1979 年 1 月 14 日 04—15 时南苑能见度预报与实况



图 5 1979 年 1 月 3 日 04—15 时南苑能见度预报与实况

对时效为数小时的预报,持续法目前还是不容忽视的。而与之相比, GEM 模式不仅有技巧,还兼备了它的短时效预报优点。表 3 给出了几类主要航空气象要素分别以 GEM 和持续法预报时的效果对比。试报样本为南苑 1983, 1984 年 12 月逐时资料。

我们可以看到,除 3 小时的云量预报外,所有要素在各时效中均是 GEM 法优于持续法,尤以能见度和天气现象更为明显。

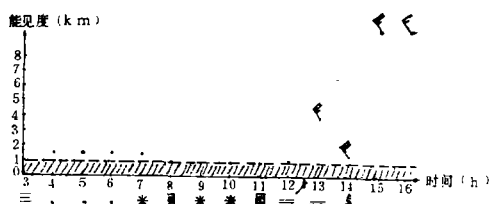


图 6 1979 年 1 月 6 日 04—15 时南苑能见度预报与实况

表 2 用 GEM 模式作西郊 1980 年 1, 12 月逐时地面气象要素预报拟合结果

天气要素 \ 拟合率 (%) \ 时间 (小时)	1	3	6	12	24	1—3	1—6	1—12
天气现象	95.00	83.33	73.33	88.33	81.67	89.44	82.22	81.25
能见度	93.33	80.00	71.66	75.00	80.00	86.67	79.44	73.89
风向	85.00	86.67	78.33	71.67	70.00	86.11	83.33	69.44
风速	88.33	88.33	88.33	71.67	75.00	87.78	88.89	81.89
云量	88.33	83.33	76.67	66.67	83.33	85.56	82.22	76.81
温度	88.33	70.00	60.00	41.67	55.00	77.78	67.22	53.61
温度露点差	91.67	81.67	78.33	96.67	66.67	86.67	83.61	87.22
气压	96.67	88.33	75.00	70.00	61.67	92.77	86.94	81.11
三小时变压	100.00	93.33	81.67	85.00	80.00	95.56	89.44	85.83%

表 3 GEM 法和持续法的预报效果对比

时效	天气要素		天气现象	能见度	风 向	风 速	云 量
	预 报 次数	对 次 数					
3 小 时	2160	GEM	1951	1799	1823	1920	1882
		持续法	1895	1751	1822	1904	1889
		差 值	+56	+48	+1	+16	-7
6 小 时	4320	GEM	3698	3461	3516	3750	3598
		持续法	3525	3256	3428	3688	3597
		差 值	+173	+205	+88	+62	+1
12 小 时	8640	GEM	6721	6421	6600	7260	6824
		持续法	6421	5888	6197	7052	6776
		差 值	+300	+533	+403	+208	+48

五、GEM 模式在航空气象要素短时客观定量 预报中的应用前景

试验表明, GEM 模式不失为当前航空气象要素短时客观定量预报的较好方法。我们分别在 PDP-11/24 和 IBM-PC/XT 计算机上实施了操作。当实时观测数据输入计算机后,在十几分钟内即能给出航站未来 1—24 小时气象要素的逐时预报。这样,可以迅速向预报员、指挥员或者其他用户提供天气的未来演变情况。从时效上看,业务工作中应用 GEM 模式作航站气象要素逐时预报,是完全可行的。

GEM 模式具有及时更新预报的能力。它能以新的信息为基础及时作出预报。这样,发布一次预报的时间跨度不再是 12 小时、24 小时,而可以是 1 小时。依赖它,国外在自动观测的基础上,已经开展了几分钟到 15 分钟、30 分钟、60 分钟不等的逐段时间预报业务。

GEM 模式有两种不同算式,应用时有很大灵活性。它既可在大型机上也可在小、微型机上运算。前者可以组网,实施对众多航站的短时天气预报指导;后者可以对某一航站作气象要素的逐时定量预报。

此外, GEM 模式作为一种统计预报技术还具有很强的反馈能力,它可以兼容各种气象情报信息,并及时反馈到预报中去。这在一定程度上弥补了单站要素统计预报的不足,使短时天气预报服务具有更强的生命力。在短时天气监测和完善人机对话系统中,它有可能成为兼容各种渠道气象资料,进行短时天气预报服务的载体。

GEM 模式不仅能单独发挥作用,而且目前在美国气象业务和服务自动化系统 (AF-OS) 中,担当着独特的角色。它填补了该系统短时客观定量指导预报的不足,与 MOS 预报相互补充,使 AFOS 系统得到了充实。这对创建中的我国预报业务自动化工作,无疑是个值得重视的信息。

参 考 文 献

- [1] 王炳仁, 低云、雾、能见度预报和研究的现状,《航空气象科技》4—5期, 191—200, 1984。
- [2] Robert G. Miller, Conditional climatology given the local observation, National weather digest, vol. 4, No. 4, 2—15, 1979.
- [3] Robert G. Miller, The generalized equivalent markov (GEM) model, seventh conference on probability and statistics in atmospheric sciences, 159—165, 1981.
- [4] Robert G. Miller, GEM: A statistical weather forecasting procedure, NOAA, Technical report, NWS, 28, 1981.
- [5] Robert G. Miller, Thomas J. Perrone and William C. Herrmann, Details on the application of GEM, seventh conference on probability and statistics in atmospheric sciences, 166—169, 1981.

AN ATTEMPT TO FORECASTING THE AVIATION WEATHER ELEMENTS HOUR-BY-HOUR IN BEIJING REGION BY USING GEM MODEL

Wang Bingren Liu Jianwen

(Air Force Meteorological Research Laboratory)

Abstract

In this paper, the mathematical model and the procedures of the Generalized Equivalent Markov model (GEM) are given along with the experimental result of the experiment in hour-by-hour forecasting of aviation weather elements in Beijing region. We also show the prospects of the GEM model in the shortrange forecasting of aviation weather elements.

大气环流和中期天气预报学术交流会在广州召开

中国气象学会天气专业委员会于1986年11月25—29日在广州召开了大气环流和中期天气预报学术交流会。与会的有一百多名学者、专家和预报员,提交论文近百篇,中期预报方面占半数以上。这次学术讨论内容基本上反映了当前我国中期预报的发展现状。卫星观测的 OLR 资料 and 低频波的研究应用获得一些新事实,中期数值预报产品和谱分析方法在业务中得到广泛应用,常规预报方法得到充实和提高。在这次会议上关于大气环流中期变化方面的工作,虽然质量较高,但数量不多。会议交流主要内容有:

(1) 热带大气超长波中期变化和低频振荡机制的分析,揭示出各类振荡周期物理量输送的特点及其天气学过程。通过对副热带准定常涡旋的数值模拟和控制性试验,获得诸如加热场、地形、水汽等影响环流变化的敏感因子。

(2) 通过计算气块三维轨迹,追踪南北半球空气交换过程的差异,并从中期角度出发,探讨我国东部暴雨的水汽来源。

(3) 根据卫星观测的 OLR 资料,研究低频振荡特征、强度变化和季节差异等。有的工作还研究了全球 OLR 场同中国冬季气温的遥相关。

(4) 在进一步分析中期数值预报产品性能的基础上,提出了更有效的要素预报的动力统计模式,改善和扩充因子的性能和数量,并实现了预报过程自动化。

(5) 通过诊断方法,分析大形势发展的物理过程,应用波数域能量参数、纬图谱、能量谱、时空谱以及功率谱和交叉谱等方法,作出大气中期演变趋势,并预报严重天气现象,这样,在一定程度上克服了中期预报的盲目性。

(6) 在应用长波、超长波和低频波概念的基础上,结合各种物理量的特征,制作出预报灾害性、转折性和关键性天气过程的专用模式。

会 报 书