

卡尔曼滤波在沿海冬半年 风力预报中的应用

卢峰本

(广西防城港市气象台, 538001)

提 要

应用卡尔曼滤波方法,制作1995年11月和1996年1月防城港市逐日最大风力36~132小时预报,预报结果精度高,表明该方法在沿海冬半年风力的预报上很有实用价值。

关键词: 卡尔曼滤波 沿海风力 预报

引 言

冬半年由于受冷空气影响,沿海及海面常出现偏北强风天气,对海洋捕捞、海洋运输、港口作业等影响很大。冬半年沿海风力的预报,传统的天气学方法较为主观定性,预报质量不稳定,预报时效短,服务效果不甚理想。我国新一代数值预报产品 T63 模式投入业务使用已有两年多,实践证明,其预报精度有了较大提高,可用预报已达5天。随着数值预报产品的不断增加以及精度的不断提高,如何应用数值预报产品,提高冬半年沿海风力尤其是强风天气过程的预报服务水平,是沿海各台站业务工作的一项重要内容。近年来,卡尔曼滤波方法在我国天气预报业务中逐步得以推广应用,与 MOS 方法相比,它具有精度高,预报质量稳定,受数值预报模式更替的影响不大,所需样本资料少等特点。本文在多元回归预报模式的基础上,利用卡尔曼滤波方法,对 T63 数值预报产品进行解释应用,制作1995年11月和1996年1月逐日36~132小时的日最大风力的定量预报,并对预报效果作初步的分析研究。

1 多元线性回归模型的建立

1.1 因子的选择及处理

研究表明^[1],影响冬半年北部湾沿海及

海面风力的主要因素是气压梯度力,此外,850hPa 温度锋区与偏北强风天气过程有较明显的相关性。风力预报因子的选择,主要是从这两方面考虑。经筛选,使用兴仁、桂林与北海的海平面气压差,桂林与海口850hPa 温差以及1000hPa 防城港市附近格点的 V 分量作预报因子。为减少误差及消去扰动,对所选用的气压及温度的格点值进行九点空间平滑,对 V 分量值进行五点空间平滑,平滑公式分别为^[2]:

$$A_9 = \frac{A \times 8 + S_8}{16}$$

$$A_5 = \frac{A \times 4 + S_4}{8}$$

A 为所要平滑的格点值, S_8 、 S_4 分别为该格点周围 8 个格点和 4 个格点值之和。利用经平滑后的因子,建立与预报量的多元线性回归关系。

1.2 回归模型的建立及回归效果的分析检验

线性方程组采用平方根法求解^[3]。选用1995年12月 T63 模式的逐日48~144小时预报产品,选取经平滑处理的上述因子,分时效建立36~132小时日最大风力预报方程,各时效预报方程如下:

$$Y_{36} = 1.997437 - 5.078733X_1 +$$

$$\begin{aligned}
 &5.510676X_2 - 0.368553X_3 - 0.213169X_4 \\
 Y_{60} &= 3.235368 - 3.955066X_1 + \\
 &9.816444X_2 + 0.338448X_3 - 0.202086X_4 \\
 Y_{84} &= 1.873680 - 5.525564X_1 + \\
 &3.309531X_2 - 0.496473X_3 - 0.266865X_4 \\
 Y_{108} &= 3.095713 - 5.738860X_1 + \\
 &2.047300X_2 - 0.222795X_3 - 0.391307X_4 \\
 Y_{132} &= 3.842401 - 2.870544X_1 + \\
 &2.628506X_2 + 0.154080X_3 - 0.470093X_4
 \end{aligned}$$

X_1, X_2, X_3, X_4 分别为兴仁与北海气压差、桂林与北海气压差、桂林与海口 850hPa 温差、1000hPa 防城港市附近的 V 分量。

各方程的方差比、复相关系数、因子重要性通过信度为 0.05 以上的 F 检验。

2 卡尔曼滤波的应用^[4]

2.1 基本思想及递推方法

卡尔曼滤波在数学上是一种统计估算方法,通过处理一系列带有误差的实际量测数据而得到物理参数的最佳估算。在气象应用上,根据滤波的基本思想,利用前一时刻预报误差的反馈信息,及时修正预报方程,以提高下一时刻的预报精度。卡尔曼滤波不需要太长的数值预报产品的样本资料,易于适应新的数值预报模式及新引入的站点。主要用来制作连续性预报量,如风、温度、湿度等。其递推关系为:

$$\begin{aligned}
 e &= Y_t - X_t B_{t-1} \\
 R &= C_{t-1} + W \\
 S &= X_t R X_t^T + V \quad A = R X_t^T S^{-1} \\
 B_t &= B_{t-1} + A \quad C_t = R - A S A^T
 \end{aligned}$$

e 是预报误差, R 为递推值 B_{t-1} 的误差方差阵, C_{t-1} 是 B_{t-1} 的误差方差阵, W 是动态噪声的方差; V 是量测噪声的方差, X_t^T 是 X_t 的转置矩阵, S^{-1} 是 S 的逆矩阵。利用以上递推关系,根据新增的量测 Y_t, X_t 值,推算出下一步的 B_t 估计值,不断更新预报方程中的系数 B_t 。

B_0, C_0, W, V 是卡尔曼滤波递推起步的 4 个重要参数,其确定方法为:

① B_0 的确定

选用回归效果较好的 1995 年 12 月样本建立的预报方程的系数作为 B_0 向量。

② W 的确定

根据白噪声假定, W 是对角矩阵。本文中对应于各时效预报方程的 W 皆是五阶对角矩阵。

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & & & & \\ & w_2 & & & \\ & & w_3 & & \\ & & & w_4 & \\ & & & & w_5 \end{bmatrix}$$

为了估算 W 各对角元素值,以同样方法分别用 1995 年 12 月和 1996 年 1 月两组样本资料建立预报方程,得到 B_0 和 B_1 :

$$\begin{aligned}
 B_0 &= [b_{1,0} \quad b_{2,0} \quad b_{3,0} \quad b_{4,0} \quad b_{5,0}]^T \\
 B_1 &= [b_{1,1} \quad b_{2,1} \quad b_{3,1} \quad b_{4,1} \quad b_{5,1}]^T
 \end{aligned}$$

由此即得 W 各对角元素估计值:

$$W_i = \frac{(b_{i,1} - b_{i,0})^2}{30}, \quad (i = 1 \dots 5)$$

其中 30 是两样本的时间间距。

③ C_0 的确定

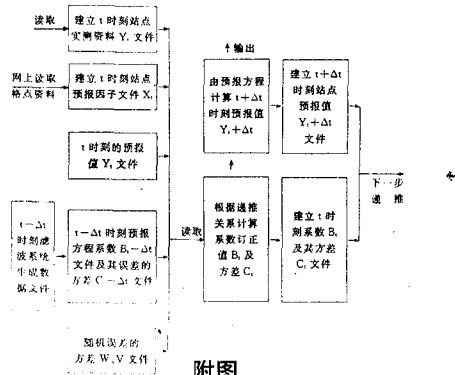
递推起步时,可认为 B_0 是精确的,因而其误差方差阵 C_0 为零矩阵。

④ V 的确定

V 为回归方程的剩余标准差,选用 1995 年 12 月回归方程的剩余标准差作为递推起步的 V 值。

2.2 卡尔曼滤波的制作流程

递推滤波系统在微机实现准自动化的工作流程。工作流程如附图。



附图

2.2.1 建立实时基本数据文件

从网上读取数值预报产品的格点值,经平滑处理,建立实时站点的数值预报产品的因子文件(X_i),同时,输入站点的实时观测值,建立预报量的实测数据文件 $Y_{(i)}$ 。

2.2.2 建立滤波系统生成的重要数据文件

滤波系统生成的数据文件有:预报量的预报值文件,方程系数及其误差的方差文件(B_i, C_i),随机误差的方差(W, V)文件。这些参数中,只有(W, V)不随递推过程变化。

2.2.3 递推举例

1月5日使用4日20时的72小时预报产品制作60小时(7日)最大风力预报。首先建立上述两类数据文件;然后读取参数 B, C, W, V 值,读取1日20时60小时(即4日)的最大风力预报值及4日最大风力的实测值,读取72小时(即7日20时)的预报因子值,根据递推关系,计算订正的方程系数 B 及方差 C 并存入相应文件,作为下一次预报的输入信息;根据系数订正值,应用回归方程,计算7日最大风力预报并存入相应文件,作为下一次预报的输入信息;最后输出预报结果。

2.3 卡尔曼滤波的应用效果分析

确定各方程的 B_0, C_0, W, V ,利用48~144小时的T63数值预报产品,应用卡尔曼滤波方法,制作1995年11月、1996年1月逐日最大风力36~132小时预报。表1、表2为预报误差情况。

表1 1995年11月卡尔曼滤波日最大风力预报
误差/ $m \cdot s^{-1}$

预报时效	36小时	60小时	84小时	108小时	132小时
均方根	2.02	1.93	2.08	2.02	1.93
平均	1.50	1.56	1.71	1.51	1.56

表2 1996年1月卡尔曼滤波日最大风力预报
误差/ $m \cdot s^{-1}$

预报时效	36小时	60小时	84小时	108小时	132小时
均方根	1.47	1.82	1.95	2.10	2.21
平均	1.17	1.34	1.43	1.64	1.70

由表1、表2可见,预报精度达到了较高水平。从两个月的预报情况来看,卡尔曼滤波各时次日最大风力的预报均方根误差在 $1.47 \sim 2.21 m \cdot s^{-1}$ 之间,预报平均绝对误差在 $1.17 \sim 1.71 m \cdot s^{-1}$ 之间,1996年1月预报误差随时效的增加而增大,1995年11月预报误差随时效的增加不明显。

由于卡尔曼滤波理论本身存在滞后现象,对于重要转折天气过程,卡尔曼滤波的预报比实况的出现要落后一些,时效越长,这种情形越加明显(图略)。从两个月的风力预报来看,对于明显的转折天气过程,预报比实况普遍要落后一天。对强风天气过程的预报效果作进一步的分析,规定实况有连续 $\geq 8 m \cdot s^{-1}$ 及预报有连续 $\geq 8 m \cdot s^{-1}$ 的均作为一次过程进行分析(过程中间有一天 $< 8 m \cdot s^{-1}$ 的仍作为一次过程统计,一天以上 $< 8 m \cdot s^{-1}$ 的作为两次过程统计)。考虑到卡尔曼滤波对于明显转折天气过程存在滞后现象,在进行误差统计时,若实况出现的第一天,但预报仍 $\leq 8 m \cdot s^{-1}$,或者实况已经结束,但预报仍 $\geq 8 m \cdot s^{-1}$ (指预报 $\geq 8 m \cdot s^{-1}$ 过程的最后一天),则把这一天剔除。表3、表4为误差情况。可见,卡尔曼滤波对于冬半年沿海偏北强风天气过程有较好的预报效果,各时次的平均绝对误差最小为 $0.92 m \cdot s^{-1}$,最大为 $1.99 m \cdot s^{-1}$,其中以84、108小时的预报效果较好。此外,对于 $\geq 10 m \cdot s^{-1}$ 的过程,从两个月的预报情况看,各时次都作出了准确或基本准确的预报,其中以36~84小时的预报误差较小(图略),两个月的空报次数只有一次。

表3 1995年11月强风过程预报平均绝对
误差/ $m \cdot s^{-1}$

预报时效	36小时	60小时	84小时	108小时	132小时
平均绝对误差	1.64	1.54	1.38	1.26	1.99

表4 1996年1月强风过程预报平均绝对误差/ $m \cdot s^{-1}$

预报时效	36小时	60小时	84小时	108小时	132小时
平均绝对误差	1.17	1.16	0.92	0.97	1.14

3 结语

3.1 应用卡尔曼滤波技术制作的风力预报有较高的精度,对于冬半年沿海强风天气过程有较好的预报效果。尽管预报还有一定的误差,但随着数值预报模式的不断改进,应用数值预报产品和卡尔曼滤波方法对于冬半年沿海强风天气过程的预报能力也将随之提高。

3.2 由于卡尔曼滤波是在多元回归模式的

基础上进行的,因此,选择更好的因子,建立更为精确的多元回归模式,确定递推初值,是进一步提高卡尔曼滤波预报水平的关键。

3.3 对于明显的转折天气过程,卡尔曼滤波的预报比实况要滞后一些,在实际应用中应引起重视,结合其他预报手段进行必要的订正。

参考文献

- 1 黄香杏等. 北部湾北部海面强风成因分析及其预报. 广西气象, 1993, 14(3): 39~43.
- 2 余剑莉. 统计气象预报. 北京: 气象出版社, 1994: 246.
- 3 徐萃薇. 计算方法引论. 北京: 高等教育出版社, 1985: 136~138.
- 4 陆如华, 何于班. 卡尔曼滤波在天气预报中的应用. 气象, 1994, 20(9): 41~43.

The Application of Kalman Filter to the Coastal Wind Forecast in Winter

Lu Fengben

(Fangchenggang Meteorological Observatory, Guangxi Autonomy Region 538001)

Abstract

The daily maximum wind forecast ahead 36h to 132h was given at Fangchenggang city in Guangxi Autonomy Region during the period from Nov. 1995 to Jan 1996 with the Kalman filter method. The forecast accuracy proved that the Kalman filter was mostly practical in the coastal wind forecast in winter.

Key Words: Kalman filter coastal wind daily maximum wind forecast