

钱燕珍, 孙军波, 余晖, 等. 用支持向量机方法做登陆热带气旋站点大风预报[J]. 气象, 2012, 38(3): 300-306.

用支持向量机方法做登陆热带气旋站点大风预报^{* 1}

钱燕珍¹ 孙军波² 余晖³ 陈佩燕³

1 浙江省宁波市气象台, 宁波 315012

2 浙江省慈溪市气象局, 慈溪 315300

3 上海台风研究所, 上海 200030

提 要: 将支持向量机(SVM)回归方法应用于在登陆热带气旋影响下, 每天 00、06、12、18 UTC 4 时次 2 分钟平均的站点风速预报。从 2002—2007 年热带气旋本身强度、站点地形情况和站点附近高低空环境场要素, 设计相关因子, 建立了 4 种预报模式, 其中模式 4 的风速拟合误差的标准差为 $1.591 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。用 2008 年 8 个登陆热带气旋做独立样本检验, 预报风速与实际风速的平均绝对值误差为 $1.750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 标准差为 $2.367 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结果表明, 在适当的样本截取和预报因子选取后, SVM 方法建模的风速预报 48 小时内效果较好。

关键词: 支持向量机, 登陆热带气旋, 站点大风预报, 地形

Application of SVM Method to the Station Strong Wind Forecast in Landfalling Tropical Cyclones

QIAN Yanzhen¹ SUN Junbo² YU Hui³ CHEN Peiyan³

1 Ningbo Meteorological Observatory of Zhejiang Province, Ningbo 315012

2 Cixi Meteorological Office of Zhejiang Province, Cixi 315300

3 Shanghai Typhoon Institute/CMA, Shanghai 200030

Abstract: In this paper we choose the SVM (support vector machine) method for forecasting 2-min average wind speed four times daily (00, 06, 12 and 18 UTC) when it is affected by landfalling tropical cyclones. First we select related factors based on the intensity of the tropical cyclones during 2002—2007, the landform and the environment element variables at low-level and upper-level around the station. And then we establish numerical weather prediction models. The standard deviation of the wind speed fitting error in Model 4 is $1.591 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. By testing with 8 landfalling tropical cyclones in 2008 as independent samples, the difference of the actual average absolute wind speed from the forecast one is $1.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the standard deviation is $2.367 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The precision of wind speed forecast in 48 h can be better when the SVM method is used under conditions of selecting appropriate forecast factors and sample truncation.

Key words: support vector machine (SVM), landfalling tropical cyclone, station wind speed forecast, landform

引 言

的小样本理论, 基于这一理论近年提出的支持向量机(support vector machines, SVM)方法, 避免了人工神经网络等方法的网络结构难于确定、过学习和欠学习以及局部极小等问题, 为解决非线性问题提

Vapnik 等^[1-2]提出的统计学习理论是一种专门

* 国家科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J104)资助

2011 年 2 月 22 日收稿; 2011 年 9 月 19 日收修定稿

第一作者: 钱燕珍, 从事天气预报和服务. Email: qian-y-z@163.com

供了一个新思路。SVM 回归方法是依据支持向量(关键样本)来建立最终的决策函数,这一特征与基于确定因子的权重系数来明确表达各个因子的权重组合与预报对象变化的常规统计方法(如逐步回归、卡尔曼滤波和神经网络)有显著的区别。SVM 方法是在大量样本数据中,将数据提到高维空间中,采用处理线性问题的方法进行分析,得到支持向量。SVM 方法考究的是因子群构造的样本空间与预报对象的关系。

气象上应用 SVM 方法做各种要素的预报,做数值释用预报,已有了许多尝试,如温度预报、能见度预报、降水预报^[3-4]等,取得了很好的效果和应用。本文利用 SVM 方法,做在登陆热带气旋影响下,站点风预报的一些尝试,为登陆热带气旋影响时,预报员做风的预报多提供一个工具。

另外许多数值预报的产品结果都是格点形式,预报服务过程中预报员还要进行内插,因而不够客观和直接。再加上站点地形因素对风预报的影响,更是增加了误差。本模式试图在考虑热带气旋的影响、环境场要素的影响及地形等影响的前提下,直接对站点做大风预报,结果可以直接为预报员做站点大风预报提供参考。

1 资料

本文用 2002—2008 年的 NCEP 再分析场资料,来自台风年鉴的台风路径、强度资料,来自国家气象中心的 MICAPS 实时站点资料,经纬度分辨率达 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的地形资料。其中 2002—2007 年资料用于建立模型,2008 年 8 个登陆热带气旋作为独立样本,检验模型的预报能力。

2 预报思路及预报因子的设计

2.1 思路

根据热带气旋影响下,产生站点大风的一些机理和业务预报实践中的预报经验,从热带气旋本身强度、天气系统对站点环境场气象要素的影响及站点周围的地形情况三方面考虑^[5-7],找出并设计与站点大风预报可能相关的因子,利用历史实况资料、NCEP 再分析场资料和 SVM 径向机函数的拟合方法,建立在登陆热带气旋影响范围内站点的一天 4 时次正点 2 分钟风速拟合预报模式^[8-10]。本文采用

的是完全预报方法的思路。建模资料采用的是 NCEP 再分析场资料和台风位置实况。模式中除地形资料外的相关因子,都是与预报量相同时刻的资料。在实际应用中需要用数值预报资料代替相应的再分析场资料,台风预报位置代替实况位置,就可以实现在登陆热带气旋影响范围内站点的风的一天 4 时次的正点 2 分钟风速预报^[11-12]。

由台风引起的台站大风具有一定的区域性。如果要按区域细分的话,可以给每个站点建立一个独立的预报模式,由于资料限制,每个站点的建模样本就比较稀少,而且工作量也很大。本文为了增加模式的样本数量,通过地形数据和不同地区高低空气象要素的差异来反映这些区域性,以增加预报结果的针对性。

2.2 相关因子设计和计算方法

相关因子主要从三方面设计。

2.2.1 影响热带气旋

从台风路径资料中可以直接获得台风中心附近的最大风速和最低气压。由于热带气旋风场分布存在不对称性结构^[13-15],构造了站点到台风中心的距离和相对方位角。

假定站点的风速与到台风中心的距离和台风中心的最低气压成反比,跟台风中心附近最大风速成正比,为了反映台风本身强度和站点离台风中心的远近对站点的风所造成的影响,又构造了两个因子,一个因子是中心气压乘以距离,另一个最大风速除以距离。但是考虑实际情况中,台风中心附近的风速并不大,而且为了避免当距离趋向于零时,因子值迅速增大,对距离作了适当处理:距离小于 25 km 时,都作 25 km 计算。

2.2.2 站点地形资料

站点地形资料包括站点的海拔高度、站点附近地形的粗糙度、站点离最近海岸线的远近,共 3 个因子。

粗糙度:读取以站点为中心,边长为 0.1° 矩形范围内的地形格点资料(共 121 个点)。粗糙度自定义为站点海拔与矩形范围内所有各点的海拔高度平均值的比值。

站点离最近海岸线的远近:站点到海岸线的最近距离除以 100 km,超过 100 km 的作 100 km 处理。在大陆上的为负,在海上的为正。

这些反映的是台站周围相对大的一个地形平均状况。一定时间内,可以看作是常量。

2.2.3 根据 NCEP 再分析场资料构造的环境场要素

(a) 站点上的 925、850 和 700 hPa 上的风速。读取站点所在网格上的格点的 U 、 V 风场资料,通过距离倒数法内插到站点,然后合成计算风速 ($\sqrt{U^2+V^2}$)。

(b) 850 和 700 hPa 上的温度、高度;海平面上的 6 和 24 h 变温和变压。通过内插和前一时次相减获得。

(c) 850 和 700 hPa 上的高度梯度。计算方法如图 1: NCEP 资料的分辨率为 1° , 读取资料,内插 5 个点的值。高度梯度为: ∇h ; 纬向差分为: $\frac{lat_{y_2} - lat_{y_1}}{2d}$; 经向差分为: $\frac{lon_{x_2} - lon_{x_1}}{2d}$; 高度梯度大小为: $\sqrt{\text{纬向}^2 + \text{经向}^2}$ 。

(d) 站点周围四个方位,即东北、东南、西南、西北四个方位,每个方位上 9 个网格点上的各环境场气象要素平均值因子,如图 2。

4 个方位上的环境场气象要素因子有: 700 和 850 hPa 高度、温度、高度梯度和 24、6 h 的变温、变高,以及海平面上 24 和 6 h 的变温和变高,共 72 个因子。格点上高度梯度计算与站点类似。

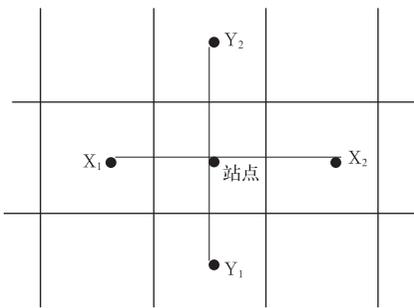


图 1 站点上的高度梯度

Fig. 1 The altitude gradient at a site

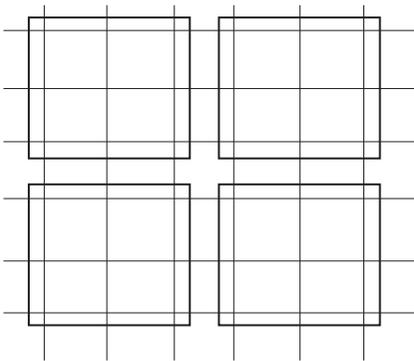


图 2 站点周围四方位包括区域

Fig. 2 Quadruple sectors surrounding a site

2.3 各因子的相关性分析

整理 2002—2007 年的所有资料,获得 51397 样本,这里的样本可以看作是一个向量,一个样本包含两部分内容:一是台站的观测风速,也就是要预报的量;另一部分是观测风速相对应的相关因子的值。每种相关因子与台站的观测风速都有一个对应的值,所以确切地说是每个样本有 94 个因子的对应值。

建模样本集包含了登陆台风影响范围内的所有台站不同时次的所有实测风速。从空间分布上看:是以台风中心为中心一定范围内的所有站点风速,时间分布上,则包括台站在台风影响期间内所有时次的风速。所以样本选取是连续的,整个样本集的数量比较多,有 51397 个。

计算一天中 4 个时次,在同一时次下,各因子与站点的正点风速(2 分钟平均风速)的相关系数,并作显著性检验。取显著性水平: $\alpha=0.05$,查 t -分布表,计算具有显著性的最小相关系数绝对值: 0.00865。

其中绝大部分因子都可以通过 0.05 显著性水平检验。通过对各因子相关系数进行分析,得到:

(1) 地面站点的风与高空风有着较好的直接相关性,且越低层风与地面相关越大。

(2) 站点的地理因子的相关性仅次于少数几个气象因子。说明站点的风有很大的地域特征。站点所处的地理位置对风速大小有直接的影响。所以对具体站点的风速预报,须考虑当地的地理情况。

(3) 反映台风强度的两个组合因子都比单独因子的相关性好。

(4) 气象因子中,各层的高度梯度除风速外,要明显好于其他因子。这也与大气运动方程中,气压梯度力是大气运动主要动力的观点相一致。

(5) 在 4 个方位因子中,东北、西北、西南的变温和变压因子的相关性要明显好于东南方向。这可能与大部分热带气旋都来自于东南面的海上,相关因子变化比较大有关。而其他三个方向的变温、变压因子,尤其是西北面的因子相关性更好一些,这也反映了冷空气等其他天气系统对站点风速的影响。

(6) 各气象要素的 6 和 24 h 变化相比较,24 h 的差相关性要好一些,但相差不大,且不是主要的相关因子。但考虑实际情况, NCEP 数值预报资料时间包括实况分析场和预报场,间隔 6 h。如果使用 24 h 变量,势必下载预报时次之前的 3 个时次的

资料,给实际应用带来麻烦。所以在以下的拟合预报中 24 h 变量不作为预报相关因子。

模式最终选取的具有物理意义和统计意义的因子列于表 1。

表 1 具有物理意义和统计意义的因子

Table 1 The factors with physical and statistical meanings

编号	相关因子	相关系数	编号	相关因子	相关系数
X ₁	850 hPa 风速	0.390	X ₁₁	海平面气压 6 小时变压	-0.112
X ₂	925 hPa 风速	0.492	X ₁₂	850 hPa 站点西北角 6 小时变高	-0.174
X ₃	700 hPa 位势高度	-0.233	X ₁₃	850 hPa 位势高度梯度	0.434
X ₄	热带气旋中心最低气压	-0.135	X ₁₄	700 hPa 位势高度梯度	0.400
X ₅	热带气旋中心到站点的距离	-0.228	X ₁₅	站点粗糙度	0.335
X ₆	热带气旋中心最低气压乘以中心到站点的距离	-0.234	X ₁₆	850 hPa 站点西南角位势高度梯度	0.377
X ₇	热带气旋中心附近最大风速除以中心到站点的距离	0.283	X ₁₇	850 hPa 站点东北角位势高度梯度	0.320
X ₈	850 hPa 站点西北角高度梯度	0.431	X ₁₈	850 hPa 站点西南角位势高度	-0.262
X ₉	热带气旋中心距离海岸线的程度	0.389	X ₁₉	700 hPa 站点东南角位势高度梯度	0.314
X ₁₀	站点西北角海平面 6 小时变压	-0.162	X ₂₀	850 hPa 东南角位势高度梯度	0.320

3 样本拟合

3.1 线性逐步回归方法

首先运用线性逐步回归方法对样本做了拟合,部分线性回归模式的拟合效果如表 2。

表 2 部分线性逐步回归模式的拟合效果

Table 2 The fitting results by part of the linear regression models

逐步回归模式中采用的相关因子个数	复相关系数绝对值	风速拟合误差的标准差
3	0.600	2.325
6	0.645	2.220
10	0.660	2.184
14	0.665	2.170
20	0.670	2.157
25	0.672	2.154
30	0.673	2.151
40	0.674	2.148

从表 2 中可以看到:回归方程随着所采用的相关因子数的增加,拟合效果也在提升。但是因子越多,提升效果越不明显。因子数超过 20 个,再增加其他相关性较差的因子,已经没有实际意义,而且只会对以后的预报起到干扰作用,降低回归方程的泛化能力。

3.2 SVM 方法

本文采用 SVM 的函数回归模式,核函数采用

径向基函数,训练工具采用了台湾大学林智仁等开发的 LibSVM 软件中的 ν -SVM 回归模式。基本参数设置 C:100, ν :0.04, 径向基函数: $\exp(-0.5|U-V|^2)$ 。

根据线性逐步回归模式中的因子组合,参考各因子之间的相关性,选择了 5 种因子组合模式。其中模式 1 和 4 的相关因子相同,具体有:站点粗糙度、热带气旋中心到站点的距离、距离海岸线的程度、最大风速除以距离、热带气旋中心最低气压乘以中心到站点的距离、925 hPa 风速、850 hPa 位势高度梯度、700 hPa 位势高度梯度、700 hPa 位势高度、站点西北角海平面 6 h 变压、站点西北角 850 hPa 6 h 变高。但模式 4 把样本分成离最近海岸线小于 50 km(包括海岛站)的沿海部分和内陆部分,分别做拟合训练。

模式 2 选取的相关因子共有 14 个,分别是:925 hPa 风速、站点粗糙度、最大风速除以距离、热带气旋中心到站点的距离、距离海岸线程度、海平面 6 h 变压、站点西北角海平面 6 h 变压、850 hPa 的风速、站点西北角 850 hPa 高度梯度、热带气旋中心最低气压乘以中心到站点的距离、850 hPa 位势高度梯度、热带气旋最低气压、站点东南角 700 hPa 高度梯度、站点西北角 850 hPa 高度梯度。

模式 3 选取的相关因子共有 17 个,分别是:925 hPa 风速、站点粗糙度、最大风速除以距离、热带气旋中心到站点的距离、距离海岸线的程度、海平面 6 h 变压、站点西北角海平面 6 h 变压、850 hPa 风速、站点西北角 850 hPa 高度梯度、热带气旋中心最低

气压乘以中心到站点的距离、850 hPa 高度梯度、热带气旋最低气压、站点东南角 700 hPa 高度梯度、站点西北角 850 hPa 高度梯度、站点东北角 850 hPa 位势高度梯度、站点西南角 850 hPa 位势高度、站点东南角 850 hPa 高度梯度。

在拟合训练之前需要对样本数据进行预处理,

把所有样本的相关因子的值进行标准化处理。

4 种模式的训练结果列在表 3 中。从表 3 中可以看到:比较 4 种模式,拟合效果随着支持向量数和采用的相关因子数增加而有所改善。这种效果的改善主要是由于支持向量数增加引起的。此外随着因子数的增加,模式计算量也迅速上升。

表 3 4 种模式的拟合效果

Table 3 The fitting results by 4 models

编号	模式采用的相关因子个数	支持向量站总样本数的百分比	复相关系数绝对值	风速拟合误差的标准差/ $m \cdot s^{-1}$
1	11	17.8%	0.842	1.622
2	14	27.2%	0.885	1.391
3	17	34.2%	0.906	1.276
4	11(分沿海,内陆两部分)	18.9%(沿海:28.0%, 内陆:14.2%)	0.798(沿海:0.879, 内陆:0.757)	1.591(沿海:1.741, 内陆:1.514)

从模式 4 样本拟合误差分布散点图(图 3)中可以看到:绝大部分的误差分布还是比较集中的,但实际风速较大的样本的误差偏大。

比较两种方法,显然 SVM 的拟合效果要比线性回归好很多。

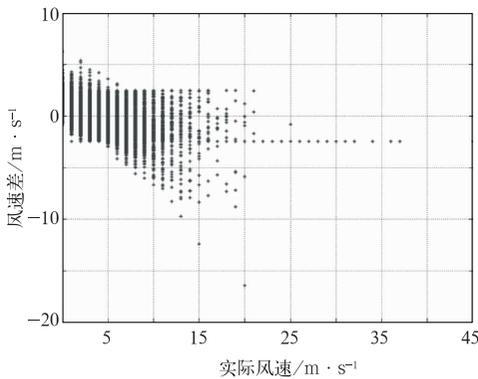


图 3 所有样本拟合误差分布图(模式 4)

Fig. 3 The distribution of the fitting errors of all samples

4 独立样本检验

使用 2008 年 8 个登陆热带气旋:0801、0806、0807、0808、0809、0812、0813 和 0814 作为样本,样本数为 7998 个,对使用相同相关因子的 SVM 的 4 种模式和线性回归的 3 种模式做了检验(表 4)。实况极值为 $35 m \cdot s^{-1}$ 。

表 4 中的“检验风速极大值”是指检验样本集中预报风速最大的一个。其实大风速出现概率相对较小,单列出来是为说明模式对大风速的预报反应能力。

线性模式,有的平均效果比较好,预报极值比较

差;有的极值预报效果好,平均效果又很差。线性回归中模式 2 的平均检验效果相对与 1 和 3 差很多,显然是模式 2 中多了非线性相关因子,SVM 模式就能很好地利用这些非线性因子,取得比较稳定的效果。

综合考虑拟合效果和独立样本检验情况,以 SVM 模式 4 作为以后的预报模式。预报因子由站点地理因素、台风情况和环境场要素三部分组成,且比例接近。其中西北的两个因子可以在一定程度上反映冷空气等其他系统的影响。其他几个模式中,由于所采用的 NCEP 再分析场的气象要素因子比例增加,而目前的数值预报精度还不能很好地反映热带气旋风场的中尺度结构,经过平滑的气象要素因子增加,使得各站点之间的风速差异变小。所以检验效果反而变差,风速极值明显减小。

从所有独立样本的检验风速误差分布图(图 4)和每个热带气旋的风速检验风速误差分布图(图 5)上看:

- (1) 总体上对每个热带气旋的检验效果比较稳定。
- (2) 实际风速大的样本的误差相对大一些。
- (3) 热带气旋强度强的,误差相对大一些。
- (4) 风速大于 $20 m \cdot s^{-1}$ 的情况是个别现象,很少出现,出现时误差偏大。

比较 2008 年 9 月 14 日 08 时 13 号强台风森拉克的风速独立检验预报和实况图(图 6)。除了个别站点误差较大外,绝大多数情况下,误差值都在 $2 \sim 3 m \cdot s^{-1}$ 以下,风速预报的结果基本可以反映同一时刻内站点实况风速的空间分布情况。

检验风速是指检验样本集中的某个站点所有时

次的预报风速。是检验样本集的一个子集。

选择两个比较典型的海岛站和内陆站的检验风速和实际风速检验结果(图 7 和 8)对比:预报风速

与实际风速随时间变化的趋势还是比较一致,但海岛站检验风速的极值比实际小一些,内陆站检验风速极值偏大一些。

表 4 各种模式对 2008 年 8 个登陆热带气旋的独立样本检验效果

Table 4 Test results of models for independent samples of 8 landfalling tropical cyclones in 2008

	模式采用的相关因子个数	风速平均绝对值误差/ $m \cdot s^{-1}$	标准差/ $m \cdot s^{-1}$	均方差/ $m^2 \cdot s^{-2}$	检验风速极大值/ $m \cdot s^{-1}$
SVM 模式 1	11	1.762	2.382	5.675	23.42
SVM 模式 2	14	1.968	2.630	6.915	17.90
SVM 模式 3	17	2.175	2.818	7.943	14.19
SVM 模式 4	11(分沿海, 内陆两部分)	1.750	2.367	5.602	23.42
线性回归模式 1	11	1.772	2.316	5.635	17.64
线性回归模式 2	14	3.46	7.183	51.589	37.84
线性回归模式 3	17	1.64	2.27	5.154	15.39

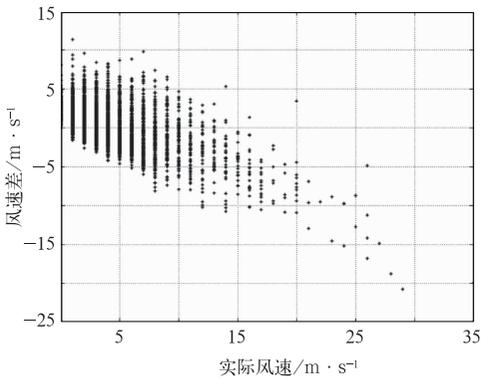


图 4 2008 年登陆热带气旋独立样本的检验风速误差分布图

Fig. 4 The distribution of the check wind velocity errors to independent samples of 8 landfalling tropical cyclones in 2008

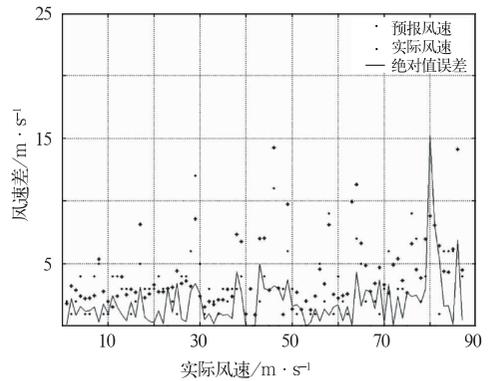


图 6 2008 年 9 月 14 日 08 时 13 号强台风森拉克的风速独立检验预报和实况图

Fig. 6 A chart of the independent testing forecasting versus live wind speed for super typhoon Sinlaku (No. 13) at 08:00 BT September 14, 2008

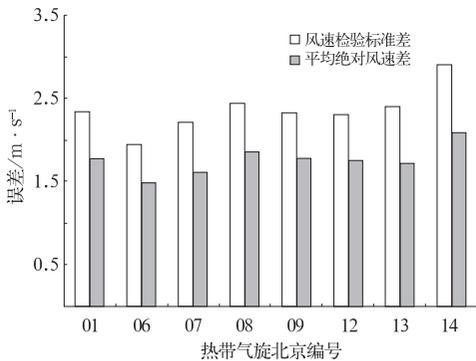


图 5 2008 年 8 个台风的独立样本的检验风速误差逐个分布图

Fig. 5 The one by one distribution of the check wind velocity errors to independent samples of 8 tropical cyclones in 2008

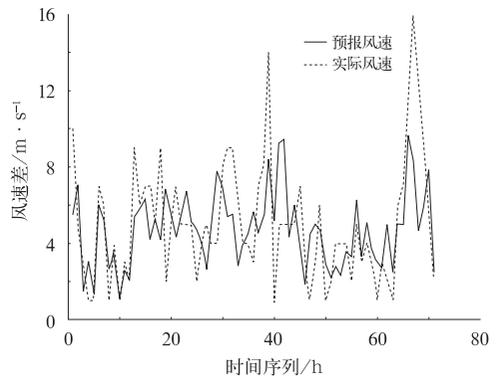


图 7 福建东山站的所有检验样本的预报风速和实际风速时间序列图

Fig. 7 Time series chart for forecasting (solid) and live wind speed (dashed) to all test samples at Dongshan Station of Fujian Province

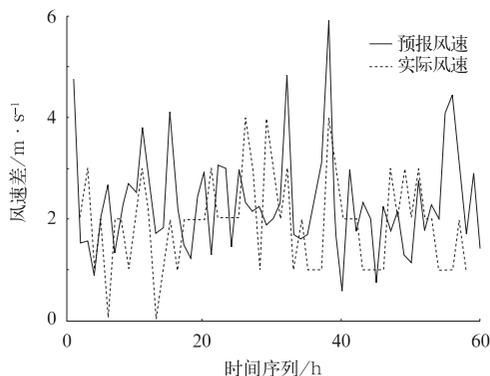


图 8 广东梅县的所有检验样本的
预报风速和实际风速时间序列图

Fig. 8 As in Fig. 7, but for Meixian
Station of Guangdong Province

5 小 结

本文利用格点资料做站点预报,预报站点涵盖了我国沿海地区和海上的绝大部分测站,在热带气旋登陆期间,可以做到风场由点及面的预报。在构造预报因子时,考虑了热带气旋给站点带来的影响,站点本身的地形因素,以及站点附近高低空环境场。应该说比较全面地反映了影响站点风的因子。而且直接对站点做预报,更加直观,减少了数值预报网格资料的内插和修正的环节,有利于在实际预报工作中的应用。

5.1 关于预报精度

用 SVM 模式 4 的方法做受登陆热带气旋影响时,站点风速预报,风速拟合误差的标准差为 $1.591 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,独立样本检验,风速平均绝对值误差为 $1.750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相比其他模式、线性逐步回归等方法,预报误差既稳定又有缩小,可见是有一定的优越性,总体来说预报效果还是不错的。另外,虽然预报极值的能力不是很好,但预报风速与实际风速随时间变化的趋势还是比较一致,海岛站检验风速的极值比实际小一些,内陆站检验风速极值偏大一些。模式的预报误差,来自两方面。一是模式本身系统误差,二是数值产品对相关因子的预报误差。所以用 SVM 方法制作大风预报还是存在一定局限性,特别是在数值预报不稳定情况下可能产生较大误差。

5.2 关于预报结果的应用

模式的预报时间间隔是 6 h。由于模式采用的

预报因子跟预报量都是同一时次的,因而模式的总预报时效取决于数值预报产品资料的时效和北京台风报文中台风位置的预报时效。按目前的数值预报精度,48 h 的预报时效比较有实际意义,而且模式的本身计算时间很短,5 min 以内就可完成。

目前的数值预报精度,更多地反映了热带气旋风场的一个平均状况,还不能很好体现地面站点阵性风的特征,所以对一些站点的风速极值预报效果较差。模式中加入了地理因素,使得模式对站点的极值风速的预报能力获得一定程度的提高。

参考文献

- [1] Vapnik V, Lerner A. Pattern recognition using generalized portraits[J]. *Avtomatikai Telemekhanika*, 1963, 24: 774-780.
- [2] Bretherton C S, et al. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(6): 541-560.
- [3] 陈永义,俞小鼎,高学浩,等. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(I)——支持向量机方法简介[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(3): 345-354.
- [4] 冯汉中,陈永义. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(II)——支持向量机方法在天气预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(3): 355-365.
- [5] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 672-681.
- [6] 许映龙,张玲,高栓柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. *气象*, 2010, 36(7): 43-49.
- [7] 余晖,薛宗元. 若干统计方法预测影响华东地区热带气旋年频数的对比试验[J]. *大气科学研究与应用*, 2000, (19): 87-93.
- [8] 杨平章,郭英琼,李丹. 华南沿海台站热带气旋风力预报[J]. *中山大学学报论丛*, 1994, (5): 33-39.
- [9] 孙军波,钱燕珍,陈佩燕,等. 登陆台风站点大风预报的人工神经网络方法[J]. *气象*, 2010, 36(9): 81-86.
- [10] 乐群,董谢琼,马开玉. 西北太平洋台风活动和中国沿海登陆台风暴雨及大风的气候特征[J]. *南京大学学报*, 2000, 36(6): 741-749.
- [11] 郭其蕴,蔡静宇,邵雪梅,等. 1873—2000 年东亚夏季风变化的研究[J]. *大气科学*, 2004, 28(2): 206-215.
- [12] 高栓柱,孟智勇,杨贵名. 台风麦莎渤海转向的可预报性研究[J]. *气象*, 2009, 35(2): 8-14.
- [13] 李佳,余晖,应明,等. 2007 年西北太平洋热带气旋定位和预报精度评定[J]. *气象*, 2009, 35(2): 101-105.
- [14] 张容焱,张秀芝,蔡连娃,等. 热带气旋对中国沿海风电开发的影响[J]. *气象*, 2009, 35(12): 88-95.
- [15] 申松林,江静. 西北太平洋台风频数异常的气候背景分析[J]. *气象*, 2010, 36(5): 64-70.