

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240320001

阈值法在沿海混合风气候极值风速预测中的对比与应用*

朱超¹, 赵林^{2,3}, 方根深^{2,3}, 代希华¹, 鲜荣¹

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东广州 510199; 2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学桥梁结构抗风技术交通行业重点实验室, 上海 200092)

摘要: 台风等极端强风条件下, 风速实测数据不足且分布不均匀, 传统用于估算重现期极值风速的基于极值分布概率函数的阶段极值法难以应用。系统回顾了在小样本极值风速预测中常用的两种阈值法-越界峰值法(POT)和独立风暴法(MIS), 结合 Monte-Carlo 随机模拟理论, 随机生成了服从六种常用风速概率分布的母体伪风速样本, 事先可以获得预期的特定重现期风速极值, 由此对比了 POT 和 MIS 法对阈值选取的敏感性以及在重现期极值风速预测中的差异。通过整理崇明岛气象站提供的 1971 年至 2007 年的日最大和台风条件逐时间间隔的 10 min 风速数据, 分别对混合气候(不区分良态风和台风数据类型)、良态气候和台风气候三种气候条件的风速分布概型进行比较, 并采用阶段极值法和两种阈值法预测了不同气候条件下的重现期极值风速, 在比较不同方法预测结果差异基础上, 阐明了不同方法的准确性和实用性, 为台风气候条件下基于实测数据的重现期极值风速预测提供参考。

关键词: 台风; 良态风; 越界峰值法; 独立风暴法; 重现期; 极值风速

中图分类号: U442.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0726-10

Comparison and Application of Threshold Methods for Extreme Wind Speed Estimation in Coastal Mixed Wind Climates

ZHU Chao¹, ZHAO Lin^{2,3}, FANG Genshen^{2,3}, DAI Xihua¹, XIAN Rong¹

(1. Guangdong Highway Construction Co., LTD., Guangzhou 510199, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Transport Industry of Bridge Wind Resistance Technologies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Under extreme wind conditions such as typhoons, the observed wind speed data are often insufficient and unevenly distributed, making it difficult to apply the traditional stage-wise extreme value method based on extreme value distribution probability functions to estimate extreme wind speed with a return period. This study systematically reviewed two commonly used threshold methods for estimating extreme wind speeds with small samples—peak over threshold (POT) and method of independent storm (MIS). Combining the Monte Carlo stochastic simulation theory, pseudo wind speed samples following six common wind speed probability distributions were randomly generated, enabling prior acquisition of theoretical extreme wind speeds with specific return periods. Based on this, the sensitivi-

* 收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108469, 52078383)资助

作者简介: 朱超(1982—), 男, 高级工程师, 总工, 硕士。主要从事桥梁工程研究。E-mail: 12504423@qq.com

通信作者: 方根深(1992—), 男, 助理教授, 博士。主要从事风工程研究。E-mail: 2222tjfgs@tongji.edu.cn

ty of the POT and MIS methods to threshold selection and their differences in estimating extreme wind speeds with return periods were compared. The wind speed probability distributions under three climates —mixed climate (without differentiation between normal wind and typhoon data), normal climate, and typhoon climate—were compared using the daily maximum wind speeds and hourly wind speeds with a 10-minute interval under typhoon conditions from 1971 to 2007 at the Chongming meteorological station, China. Additionally, extreme wind speeds with different return periods were estimated under different climates using the stage-wise extreme value method and two threshold methods. Based on the comparison of estimation differences among these methods, the accuracy and applicability of different methods were clarified. This study provides a reference for estimating extreme wind speeds with return periods based on observed data under typhoon climate.

Keywords: typhoon; normal wind; peak over threshold method; method of independent storm; return period; extreme wind speed

0 引言

结构工程中,风荷载往往控制着高耸建筑、长大桥梁等一系列柔性结构的设计施工,而对于风荷载的评估既要确保结构安全,又要求不能过于保守而浪费材料、增加成本,准确估计重现期风荷载是结构设计中的关键环节^[1-3]。目前主要有三种常用方法用于确定工程场地重现期风速,其中最直接的方法是参考荷载设计规范,如《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[4]、《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2018)^[5]等;另一种方法是选取离工程场地(一般要求小于20 km)最近的气象观测站超过30年的风速资料,进行极值分布分析以确定重现期风速;当工程场地建有风速观测塔时,由于其观测时间通常较短,需要同距离最近的气象站资料作相关性分析,而后计算重现期极值风速。

上述三种方法均需要基于极值风速概率分布和阶段极值抽样法进行参数估计,传统使用的三种极值分布类型可以统一为广义极值分布形式(累积概率分布)^[6]:

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \exp \left[- \left(1 + \gamma \cdot \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \right], \gamma \neq 0 \quad (1)$$

$$F(x; \mu, \sigma, 0) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right], \gamma = 0 \quad (2)$$

式中, x 为随机变量; γ 、 σ 和 μ 分别为形状、尺度和位置参数,且 $1 + \gamma(x - \mu)/\sigma > 0$,可以通过矩法、极大似然法或概率矩法^[7]进行估计,当 $\gamma = 0$ 、 $\gamma > 0$ 和 $\gamma < 0$ 时,广义极值分布退化为极值I型(Gumbel)、II型(Fréchet)和III型(Weibull)分布。对于重现期

为 T 的风速 x_T ,其累积概率为 $F(x_T) = 1 - 1/T$,相应地可以求得重现期 T 风速为^[8]:

$$x_T = \mu + \frac{\sigma}{\gamma} \left\{ 1 - \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^\gamma \right\}, \gamma \neq 0 \quad (3)$$

$$x_T = \mu - \sigma \cdot \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right], \gamma = 0 \quad (4)$$

目前,我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[4]、《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2018)^[5]分别对风压和风速采用了极值I型分布曲线,美国ASCE规范《Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures》(7-10)^[9]采用极值II型分布分析气象极值问题,加拿大规范《NBC 1995》^[10]则采用了极值III型分布。然而,上述基于极值分布的重现期风速估计方法只考虑了一段时间内的一个最大值,需要以大量连续的实测数据为基础,N. J. Cook^[11]指出最好有超过20年的有效数据才能保证上述方法的准确性,且建议数据低于10年时,不宜采用上述方法。对于一些风速样本较少的极端风气候,如台风气候,其通常控制着沿海地区的大型结构设计和安全风险评估,但观测数据量往往较少,且分布极不均匀,在极值分布拟合时,采用阶段极值采样法难于取得满足要求的风速样本。由此,众多学者^[12]提出了针对样本数量较少时的阈值法,该方法能够在降低最大风速权重的同时,尽可能多地保留一年中的最大风速。目前常用的阈值法主要包括越界峰值法(Peak Over Threshold, POT)和独立风暴法(The Method of Independent Storm, MIS)。

本文首先回顾了POT和MIS两种方法的基本理论,并结合Monte-Carlo随机模拟理论,随机生成了服从指数分布、正态分布、Rayleigh分布、Weibull

分布、对数正态分布和广义极值分布六种常用概率分布的母体伪风速样本,对比了POT和MIS法对阈值的敏感性以及预测重现期极值风速的差异;随后基于崇明岛气象站提供的1971年至2007年的日极值风速和台风每小时风速数据,系统对比了良态和台风混合气候、良态气候和台风气候条件下的风速样本概率分布类型,并分别采用阶段极值法和两种阈值法预测了不同气候条件下的重现期极值风速,比较了不同气候条件重现期风速的差异,为台风气候条件重现期极值风速预测提供参考。

1 阈值法

1.1 越界峰值法(POT)

为了能够更加合理地利用现有的数据资料,J. I. Pickands^[12]于1975年提出了一种基于广义Pareto分布模型的方法,简称越界峰值法(POT)。POT法基本思想是对风速母体样本选取一个阈值 u ,并认为超越阈值 u 的风速子样本服从泊松分布(相互独立),当母体样本数量 $n \rightarrow \infty$ 时,跨阈值风速渐近服从广义Pareto分布(Generalized Pareto Distribution, GPD):

$$F_{\text{POT}}(x; \mu, \sigma, \gamma) = 1 - \left(1 + \gamma \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (5)$$

式中, μ 为阈值; $\sigma > 0$ 为尺度参数(scale parameter); γ 为形状参数(shape parameter),需满足 $1 + \gamma(x - \mu)/\sigma > 0$ 。 $\gamma > 0, \gamma = 0$ 和 $\gamma < 0$ 分别对应极值II型、极值I型和极值III型吸引域。

POT方法的关键在于确定合适的阈值 u ,以满足在跨越阈值次数服从泊松分布的前提下,保留尽可能多的独立子样个体,该阈值要使GPD的参数估计具有足够的稳定性。若初始阈值 u_0 对应的超阈值量服从GPD,则对应于更大阈值 u 的超阈值也服从GPD,且具有相同的形状参数 γ 。 σ_u 为对应阈值 u 的GPD尺度参数,根据GPD的性质, σ_u 可以通过下式计算:

$$\sigma_u = \sigma_{u_0} + \gamma(u - u_0) \quad (6)$$

式中, σ_{u_0} 为初始阈值 u_0 对应的尺度参数。当 $\gamma \neq 0$ 时, σ_u 是阈值 u 的线性函数。现构造一个新的尺度参数 σ^* 如下:

$$\sigma^* = \sigma_u - \gamma \cdot u \quad (7)$$

显然,新参数 σ^* 不随阈值 u 变化,理论上如果 u_0

是一个合适的阈值,超过阈值 u_0 的阈值 u 所对应的 σ^* 和 γ 的估计值应该是常数。实际中由于抽样的可变性,这些量的估计值不会是确切的常数,但在抽样允许的误差范围内应该是稳定的。基于乘同余数法,产生1961年1月1日到2000年12月31日容量为14 600服从对数正态分布($\mu=1.9, \sigma=0.45$)的伪风速母样,采用POT法和矩估计参数方法,获得图1所示的新尺度参数估计值 $\hat{\sigma}^*$ 和形状参数估计值 $\hat{\gamma}$ 随阈值 u 的变化曲线,可以看出,阈值 u 取20 m/s到25 m/s之间的数值较合适。

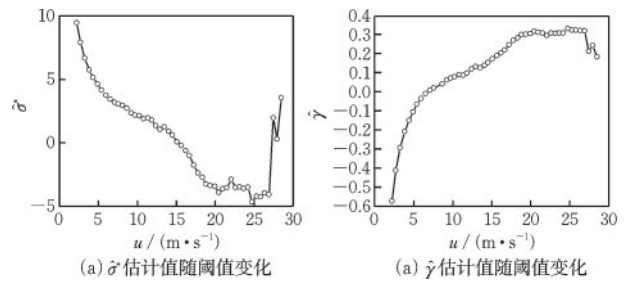


图1 伪风速样本 $\hat{\sigma}^*$ 和 $\hat{\gamma}$ 估计值随阈值 u 变化曲线

Fig.1 Variation curves of $\hat{\sigma}^*$ and $\hat{\gamma}$ with threshold value of u for pseudo wind speed samples

由此,在确定合适阈值基础上,可以通过矩估计或极大似然估计获得GPD的尺度参数 σ 和形状参数 γ ,计算重现期 T 年内的极值风速 x ,首先确定对应于GPD分布的分位点概率:

$$G(X < x) = 1 - \frac{1}{\lambda(u) \cdot T} \quad (8)$$

式中, $\lambda(u)$ 为风速每年平均跨越阈值率, $\lambda(u) = k/n$, n 为风速记录的年数, k 为超越阈值 u 的风速子样本的数量。

基于式(5)、(8),可确定重现期 T 的工程区域极值风速 x_T :

$$x_T = \mu - \sigma \cdot \frac{1 - [\lambda(u) \cdot T]^\gamma}{\gamma} \quad (9)$$

1.2 独立风暴法(MIS)

1982年,N. J. Cook^[11]提出独立风暴法(MIS)并运用于预测重新期内的极值风速。其基本思想是将连续的超出阈值 u 的风速段记为一个独立风暴,忽略每个独立风暴其它小的但高于阈值 u 的风速,选择每个独立风暴的最大值形成一个极值子样本,且形成的极值子样本服从Gumbel分布。如图2所示,根据日极值风速记录显示了MIS与POT方

法在样本的选取上的区别, MIS法的样本点少于 POT法。若平均每年风暴发生频率为 $r(u)$, $r(u) = m/n$, m 为超越阈值 u 的独立风暴总数量, n 为风速记录的年数, 则年风速极大值分布函数为:

$$F_{\text{MIS}}(x; \mu, \sigma, r(u)) = 1 - \left(1 + \gamma \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (10)$$

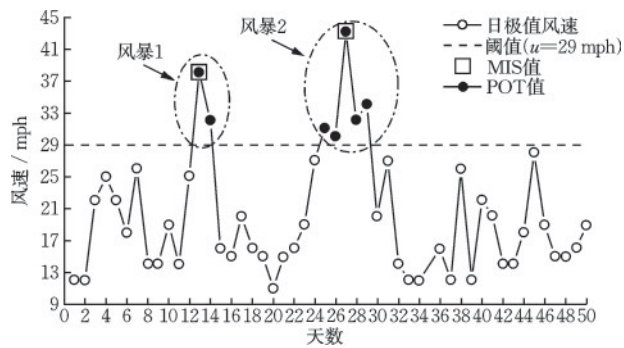


图2 独立风暴法(MIS)与跨域法(POT)对比

Fig.2 Comparison between MIS and POT methods

Davenport 基于风谱分析得出自然界风移动周期大约 4~5 天, 由此, N. J. Cook^[11] 认为当平均每年风暴发生频率为 $r(u) \approx 100$ 时对应的阈值 u 即可满足要求。独立风暴法(MIS)位置参数 μ 和尺度参数 σ 可以基于矩估计或极大似然法求得。根据相应极值风速分布的分位点概率, 可以计算重现期 T 年内

的极值风速 x_T :

$$x_T = \mu - \sigma \cdot \ln \left(-\frac{1}{r(u)} \cdot \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (11)$$

1.3 两类方法对比

尽管 MIS 法在选取样本方法上与 POT 相似, 但研究表明^[13-15], POT 法对阈值 u 非常敏感, 而 MIS 法对阈值 u 的稳定性要远高于 POT 法。Y. An 等^[16] 根据大量的实测风速记录, 数值模拟和数值分析都显示 MIS 法较 POT 法对阈值 u 的敏感性有所改进。

为了比较两种方法的差异, 本节采用 Monte-Carlo 模拟结合矩估计法, 分别对 POT 和 MIS 法预测不同重现期内的极值风速进行对比。基于极值理论和现有风速母样分布的研究^[7,17], 以日极值风速为样本, 随机生成自 1961 年 1 月 1 日到 2000 年 12 月 31 日容量为 14 600 的 6 组伪风速母样, 分别服从指数分布、正态分布、Rayleigh 分布、Weibull 分布(两参数)、对数正态分布和广义极值分布, 六组风速的基本参数见表 1^[7]。POT 的阈值按照上述参数估计稳定性方法确定, 为进行对比研究, MIS 法取相同阈值。由于伪风速母样是基于乘同余数法产生的, 满足样本相互独立性要求, 因此 MIS 的阈值可以满足 N. J. Cook^[11] 提出的平均每年风暴发生频率为 $r(u) \approx 100$ 的要求。

表 1 风速母样分布参数

Table 1 Parameters of parent distributions of wind speeds

分布类型	指数	正态		Weibull		Rayleigh	对数正态			广义极值	
参数	λ	μ	σ	σ	γ	σ	μ	σ	σ	μ	γ
	(0.23)	(16.26)	(3.47)	(0.02)	(1.97)	(7.07)	(1.90)	(0.45)	(5.40)	(34.00)	(-0.36)

基于 6 组伪风速母样, 两种方法的参数估计值见表 2 和表 3。基于各分布的参数估计值结合式(9)和式(11), 可以获得基于 POT 和 MIS 方法的重现

期极值风速(表 4), 可以看出, 与基于风速母样分布函数理论极值风速相比, 由 POT 和 MIS 法得到的不同重现期内的极值风速都存在较大偏差, 以百年

表 2 不同母体风速样本的 POT 参数估计值

Table 2 Estimated parameters of POT for different parent wind speed samples

母体分布	u	σ	γ	$\lambda(u)$
指数	20	3.510	0.225	149/37 = 3.725
正态	24	1.051	0.104	212/37 = 5.3
Rayleigh	23	1.906	0.175	73/37 = 1.825
Weibull	18	1.491	0.207	30/37 = 0.75
对数正态	20	2.665	0.308	114/37 = 2.85
广义极值	45	1.554	-0.430	391/37 = 9.775

表 3 不同母体风速样本的 MIS 参数估计值

Table 3 Estimated parameters of MIS for different parent wind speed samples

母体分布	u	σ	γ	$\lambda(u)$
指数	20	19.617	8.445	148/37 = 3.7
正态	24	24.118	1.819	210/37 = 5.25
Rayleigh	23	22.997	3.978	72/37 = 1.8
Weibull	18	17.919	3.443	29/37 = 0.725
对数正态	20	18.843	8.629	113/37 = 2.825
广义极值	45	45.469	1.097	379/37 = 9.475

重现期为例,当母体分布为对数正态分布时,POT和MIS方法的估计值存在最大偏差,分别为48%和64%;广义极值分布相对误差最小,分别为-0.6%

和8.8%;其他分布的误差分别为10%~40%和17%~54%。整体而言,POT方法相对MIS法偏差较小,准确度更优。

表4 不同样本和不同阈值法推算的极值风速

Table 4 Estimated extreme wind speeds with different samples and threshold methods

母体分布	指数分布				正态分布				Rayleigh分布			
	50年		100年		50年		100年		50年		100年	
极值和偏差	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%
母体分布	42.1	0	45.2	0	29.7	0	30.3	0	31.3	0	32.4	0
POT	55	31	63.5	40	31.9	7	33.3	10	36.1	15	39.2	21
MIS	63.6	51	69.5	54	34.2	15	35.5	17	40.9	31	43.6	35
母体分布	Weibull分布				对数正态分布				广义极值分布			
	50年		100年		50年		100年		50年		100年	
极值和偏差	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	极值/ (m·s ⁻¹)	偏差/%
母体分布	22.7	0	23.4	0	38.1	0	41.1	0	48.6	0	48.7	0
POT	26.0	15	28.4	21	51.2	34	60.7	48	48.3	-0.6	48.4	-0.6
MIS	30.2	33	32.7	40	61.5	61	67.5	64	52.2	7.4	53.0	8.8

基于上述相同的随机伪风速母体样本并结合矩估计法,分别采用POT和MIS法对50年和100年重现期极值风速的阈值敏感性进行分析,如图3所示。可以看出,无论风速母体样本服从何种分布,POT法获得的50年或100重现期内的极值风速

都随着阈值的增大而增大并逐渐趋于稳定,而MIS法重现期极值风速随着阈值的变化趋势与风速母体分布有关。尽管如此,MIS法获得的重现期极值风速随阈值变化波动性较小,即MIS较POT法对阈值 u 的敏感性有所改善,其对阈值 u 的稳定性要

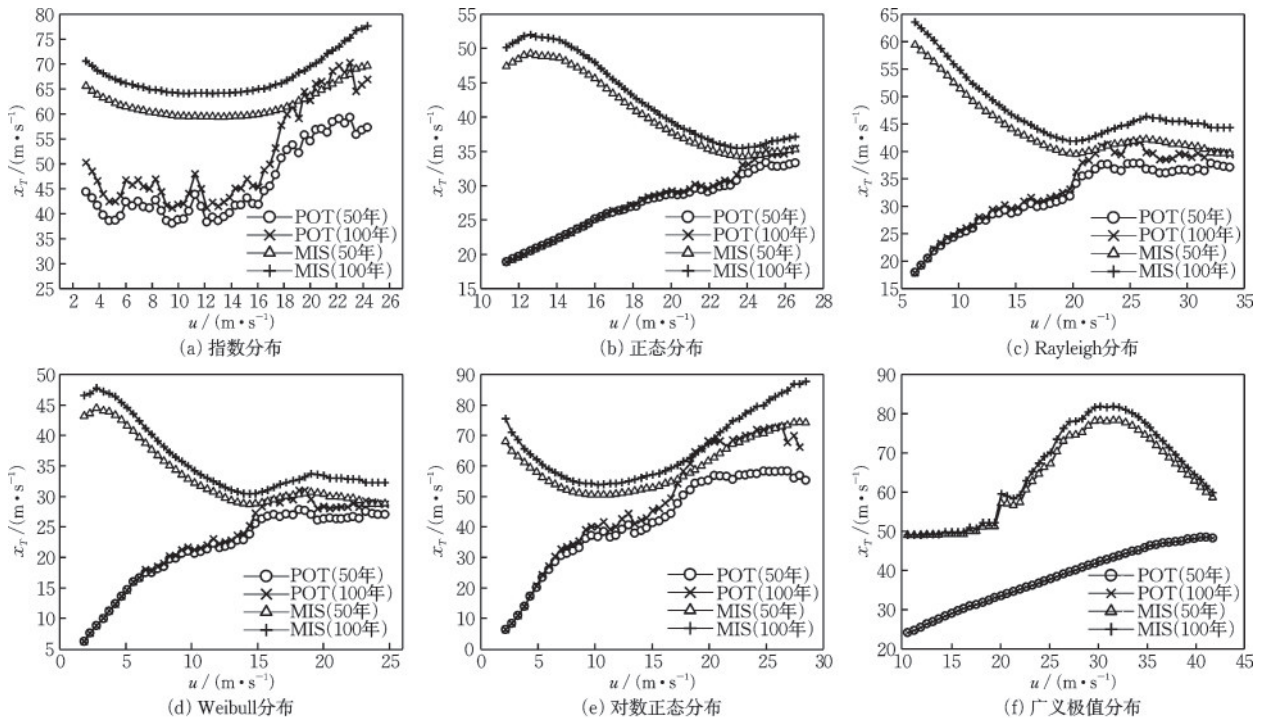


图3 不同母体分布POT法和MIS法对阈值敏感性比较

Fig.3 Comparison of threshold sensitivity between POT and MIS methods for different parent distributions

好于POT法。同时可以看出MIS法获得的50年或100年重现期内的极值风速明显大于POT法获得的极值风速,该结论和J. P. Palutikof等^[8]、Y. An等^[16]得到的结论一致。主要因为选取相对较大的阈值时,虽然样本之间可以保持较好的独立性,但对应的POT方法获得的样本较少,也就导致了样本的不确定性较大,而较小的阈值有时会使独立性减弱,同时极值风速也难以服从广义Pareto分布。

2 极值风速对比预测

为了进一步比较各方法对于实测数据分析的差异性和可靠性,整理了上海崇明岛气象站收集到的自1971年至2007年间日极值风速实测数据,同时还包含了1971年到2007年间影响崇明岛的47个台风每小时极值风速实测数据。基于该实测数据,分别采用阶段极值理论和阈值法,对良态与台风混合气候、良态气候和台风气候三种气候条件下的重现期极值风速进行对比预测。

2.1 良态与台风混合气候

由于崇明岛气象站1971年到2007年间的日极值风速实测数据中包含了台风影响下的台风极值风速,可以直接基于该样本容量为13 516的风速母样,分别采用极值I型、极值II型和极值III型三种经典极值理论和极大似然参数估计法,对良态与台风混合气候条件下重现期极值风速进行预测。

如表5和图4所示,分别采用指数分布、正态分布、Rayleigh分布、Weibull分布、对数正态分布和广义极值分布拟合1971年到2007年间的日极值风速母样,获得六种概率分布函数的参数估计值和对数似然值(表5)以及风速母样概率密度曲线(图4),其中对数似然值为似然函数极大值的对数值,似然函数极大值要求小于1,且数值越大表示选取的分布模型越能反应样本的真实分布情况,即对数似然值的绝对值越小越好。可以看出,在这六种概率分布函数中,1971年到2007年间的日极值风速母样与广义极值分布函数拟合度最好(形状参数 $\gamma < 0$,即为极值III型分布),对数正态分布次之,指数分布拟合度最差。

表5 风速母样分布函数参数估计

Table 5 Parameter estimation of distribution functions for parent wind speed samples

分布类型	指数	正态	Weibull	Rayleigh	对数正态	广义极值
对数似然值	-38 718	-29 578	-29 742	-31 551	-28 644	-28 578
参数	λ	μ	σ	σ	γ	σ
	1/6.45	6.45	2.19	7.21	3.04	4.82
						μ
						1.81
						σ
						0.33
						σ
						1.71
						μ
						5.47
						γ
						$-5.9e^{-4}$

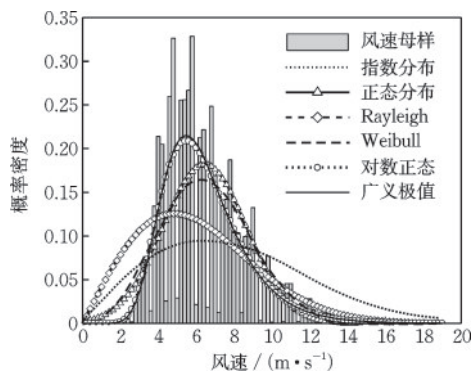


图4 混合气候母样概率密度分布拟合

Fig.4 Fitted distributions of probability density of parent wind speed samples under mixed climate

采用年最大值取样法和极大似然参数估计法,获得极值I型、极值II型和极值III型的参数估计值(表6),随后对不同重现期内的极值风速进行估计(表7)。根据我国《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T

表6 良态与台风混合气候年最大风速极值分布参数估计
Table 6 Parameter estimation of extreme value distributions of annual maximum wind speeds under normal and typhoon mixed climates

分布参数	μ	σ	γ
极值I型	14.5	1.8	—
极值II型	6.4	7.4	6.2
极值III型	22.2	7.5	3.7

表7 良态与台风混合气候不同重现期极值风速

Table 7 Extreme wind speeds with different return periods under normal and typhoon mixed climates

重现期	单位:m/s			
	10年	50年	100年	150年
极值I型	18.6	21.6	22.9	23.6
极值II型	17.1	20.3	22.0	23.1
极值III型	18.1	19.6	20.0	20.2

2.3 台风气候

1971年到2007年间影响崇明岛47个台风影响过程中,每小时的极值风速共计2345个子样本,由于台风每小时极值风速实测数据较少,因此采用适用于较小样本数量的POT和MIS法对台风气候条件下的重现期极值风速进行预测。

表12 风速母样分布函数参数估计

Table 12 Parameter estimation of distribution functions for parent wind speed samples

分布类型	指数	正态		Weibull		Rayleigh	对数正态		广义极值		
对数似然值	-7.088	-5.671		-5.657		-5.920	-5.789		-5.640		
参数	λ	μ	σ	σ	γ	σ	μ	σ	σ	μ	γ
	1/7.6	7.6	2.7	8.5	3.0	5.7	2.0	0.4	2.5	6.5	-0.2

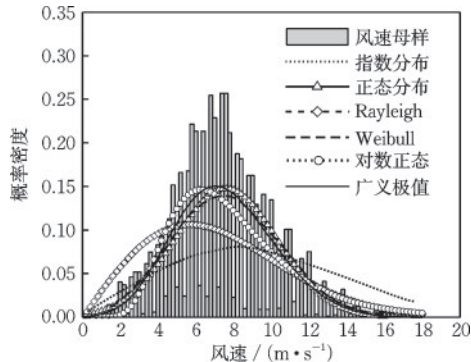


图6 台风母样概率密度分布拟合

Fig.6 Fitted distributions of probability density of parent wind speed samples under typhoon climate

基于台风每小时极值风速母样进行极值风速预测时,POT法的阈值估计过程如图7所示,根据参数估计的稳定性要求,当阈值 $u \geq 7.5$ m/s时,新的尺度参数 $\hat{\sigma}^*$ 稳定地在4上下波动,形状参数 $\hat{\gamma}$ 的估计值也比较稳定地在-0.25上下波动,因此确定阈值 $u=7.5$ m/s。为与POT法进行对比,对MIS法的阈值同样取 $u=7.5$ m/s。而后采用矩估计法分别获得POT和MIS的参数估计值见表13。

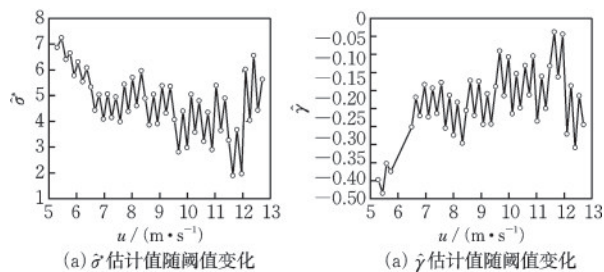


图7 台风风速样本 $\hat{\sigma}^*$ 和 $\hat{\gamma}$ 估计值随阈值 u 变化

Fig.7 Variation of $\hat{\sigma}^*$ and $\hat{\gamma}$ with the threshold value of u for typhoon wind speed samples

同样基于极大似然函数估计法,分别利用上述六类分布拟合台风每小时的极值风速母样,获得的参数估计值和对数似然值见表12,相应的概率密度曲线如图6所示。可以看出,广义极值分布函数拟合度最好(形状参数 $\gamma < 0$,即极值III型分布),Weibull分布次之,正态分布略次于Weibull分布,指数分布拟合度最差。

表13 台风气候POT和MIS参数估计值

Table 13 Parameter estimation of POT and MIS under typhoon climate

参数	μ	σ	γ or μ	$\lambda(u)$ or $r(u)$
POT	7.5	2.8	$\gamma = -0.2$	$\lambda(u) = 30.3$
MIS	7.5	3.1	$\mu = 7.9$	$r(u) = 5.2$

台风气候条件下不同重现期的极值风速见表14,POT和MIS方法获得的重现期极值风速相差较大,POT法获得的不同重现期内的极值风速偏小,且小于混合气候和良态气候两种气候条件下不同重现期内的极值风速。主要是因为台风气候条件下的风速母样为每小时极值风速,样本之间相关性较强,采用POT法很难获得相互独立的子样本,且崇明气象站提供的实测风速偏小。

表14 台风气候不同重现期极值风速

Table 14 Extreme wind speeds with different return periods under typhoon climate

重现期	10年	50年	100年	150年
POT	16.6	17.7	18.0	18.2
MIS	19.8	24.9	27.0	28.3

2.4 结果对比与讨论

由上述分析,分别获得了良态与台风混合气候条件、良态气候条件和台风气候条件下不同重现期内的极值风速,见表15。由上述可知,三种气候条件下的风速母样,都与广义极值分布(形状参数 $\gamma < 0$,极值III型分布)拟合度最好,由于对服从广义极值分布的风速母样,极值III型分布能给出最优的极值

风速估算,因此对良态与台风混合气候和良态气候条件下的极值风速,以极值Ⅲ型分布获得的不同重现期极值风速为参照值。对台风气候条件下的极值风速,由于POT法给出的不同重现期内的极值风速明显偏小,且小于前两类气候条件下的极值风速;对服从广义极值分布的风速母样,MIS法也能给出较好的极值风速估算,因此选取MIS法获得的极值风速作为台风气候条件下参照值,对比结果见表16。定义相差比:

$$err = (x - x_n) / x_n \times 100 \quad (12)$$

式中, x 为良态与台风混合气候或台风气候条件下不同重现期极值风速; x_n 为良态气候条件下的不同重现期极值风速。

由表16可知,良态与台风混合气候条件下不同重现期内的极值风速比良态气候条件下的极值风速大,但增幅不大;台风气候条件下不同重现期内的极值风速比前两类气候条件都大,且增幅随着重现期时间增大而逐渐增大;100年以上重现期内的极值风速,台风气候条件下极值风速接近良态气候条件下的1.5倍,是良态与台风混合气候条件下的1.4倍。由此可见,对于我国沿海台风多发区,《公路桥梁抗风设计规范》^[5]基于良态与台风混合气候条件

下的日极值风速样本获得不同重现期内的极值风速存在偏危险的可能。目前美国ASCE规范^[9]已经就台风和非台风气候分别建立了设计风速区划图,有必要在我国沿海台风高发地区,对台风气候设计风速开展独立研究,形成台风条件设计风速规定。

3 结 论

系统比较了预测重现期极值风速的两种阈值法(越界峰值法和独立风暴法),并结合崇明岛气象站37年的风速实测数据,采用不同方法分别预测了良态与台风混合气候、良态气候和台风气候的重现期极值风速,主要得出以下几点结论:

(1)与风速母样分布函数得到的不同重现期内的理论极值风速对比,由POT法和MIS法获得的不同重现期内的极值风速偏差都较大;相对于MIS法,当样本风速相互独立且取合适阈值时,POT法预测的极值风速偏差较小,准确度更佳;不管风速母样服从何种概率分布,MIS法获得不同重现期极值风速较POT法对阈值 u 的敏感性明显有所改善。

(2)在指数分布、正态分布、Rayleigh分布、Weibull分布、对数正态分布和广义极值分布六种概率分布函数中,良态与台风混合气候、良态气候和台风气候三种气候条件下的风速母样都与广义极值分布函数拟合度最好(形状参数 $\gamma < 0$,为极值Ⅲ型分布)。

(3)基于崇明气象站实测资料,获得良态与台风混合气候条件下的不同重现期内的极值风速比良态气候条件下稍大,而台风气候条件下比混合气候和良态气候条件下的极值风速都大很多;100年以上重现期内的极值风速,台风气候条件下将近是良态气候条件下的1.5倍,是混合气候条件下的1.4倍;建议沿海台风高发地区,开展台风条件的重现期风速研究,建立独立的台风气候重现期设计风速区划图。

参考文献:

[1] 张荣伦,黄仁谋,杨雯乔,等.基于YanMeng台风风场的输电线路极值风速推算方法[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):131-136.
Zhang R L, Huang R M, Yang W Q, et al. Extreme wind speed simulation of transmission line based on YanMeng typhoon model [J]. Journal of Disaster Pre-

表15 不同气候条件极值风速推算结果

气候类型	分析方法	10年	50年	100年	150年
混合气候	极值Ⅰ型	18.6	21.6	22.9	23.6
	极值Ⅱ型	17.1	20.3	22.0	23.1
	极值Ⅲ型	18.1	19.6	20.0	20.2
良态气候	极值Ⅰ型	17.3	20.0	21.1	21.7
	极值Ⅱ型	15.4	18.0	19.3	20.2
	极值Ⅲ型	17.1	18.6	19.1	19.3
台风气候	POT法	16.6	17.7	18.0	18.2
	MIS法	19.8	24.9	27.0	28.3

表16 不同气候条件极值风速结果对比

气候类型	良态/ (m·s ⁻¹)	混合/ (m·s ⁻¹)	偏差/%	台风/ (m·s ⁻¹)	偏差/%
10年	17.1	18.1	6.0	19.8	16.1
50年	18.6	19.6	5.3	24.9	33.9
100年	19.1	20.0	4.9	27.0	41.7
150年	19.3	20.2	4.7	28.3	46.3

- vention and Mitigation Engineering, 2018, 38 (1) : 131-136. (in Chinese)
- [2] 陈隽,赵旭东. 总体样本风速风向联合概率分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(1):63-70.
Chen J, Zhao X D. Analytical method of joint probability density function of wind speed and direction from parent population [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(1) : 63-70. (in Chinese)
- [3] 项海帆, 葛耀君. 现代桥梁抗风理论及其应用[J]. 力学与实践, 2007, 29(1):1-13.
Xiang H F, Ge Y J. Modern theory for wind resistant bridge and its application [J]. Mechanics in Engineering, 2007, 29(1): 1-13. (in Chinese)
- [4] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 公路桥梁抗风设计规范:JTG/T D60-01—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.
- [6] Jenkinson A F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1955, 81(348): 158-171.
- [7] 卢安平, 赵林, 郭增伟, 等. 基于 Monte Carlo 法的极值分布类型及其参数估计方法比较[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2):88-95.
Lu A P, Zhao L, Guo Z W, et al. A comparative study of extreme value distribution and parameter estimation based on the Monte Carlo method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2) : 88-95. (in Chinese)
- [8] Palutikof J P, Brabson B B, Lister D H, et al. A review of methods to calculate extreme wind speeds[J]. Meteorological Applications, 2010, 6(2): 119-132.
- [9] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE 7-10) [S]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [10] Canadian Commission on Building and Fire Codes. The national building code of Canada[S]. Ottawa ,ON: National Research Council of Canada (NRC-CNRC) , 1995.
- [11] Cook N J. Towards better estimation of extreme winds [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1982, 9(3):295-323.
- [12] Pickands J I. Statistical inference using extreme order statistics [J]. The Annals of Statistics, 1975, 3 (1) : 119-131.
- [13] Simiu E, Hecke N A. Extreme wind distribution tail: a peaks over threshold approach [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 122(5) : 539-547.
- [14] Heckert N A, Simiu E, Whalen T. Estimates of hurricane wind speeds by "Peaks Over Threshold" method [J]. Journal of the Structural Engineering, 1998, 124 (4): 445-449.
- [15] Davison A C, Smith R I. Models for exceedances over high thresholds [J]. Journal of Royal Statistical Society, Series B, 1990, 52(3): 393-442.
- [16] An Y, Pandey M D. A comparison of method of extreme wind speed estimation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93 (7) : 535-545.
- [17] 赵林, 葛耀君, 宋丽莉, 等. 广州地区台风极值风特性蒙特卡罗随机模拟 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(8):1034-1038.
Zhao L, Ge Y J, Song L L, et al. Monte-Carlo simulation analysis of typhoon extreme value wind characteristics in Guangzhou [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(8):1034-1038. (in Chinese)
- [18] 方根深, 赵林, 宋丽莉, 等. 基于多场参数相关台风工程模型的上海地区台风设计风环境研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 13-22.
Fang G S, Zhao L, Song L L, et al. Investigation of design wind environment in Shanghai using an engineering-based typhoon wind model considering correlation among field parameters [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7): 13-22. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)