

文章编号:1000-582X(2008)11-1285-06

台风极值风速的数值模拟及分布模型

陈朝晖, 汤海涛

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

摘要:为克服台风统计样本的不足,以厦门为例,采用 Batts 风场模型,利用 Monte-Carlo 数值模拟方法来拟合最大风速的极值渐进分布,拟合结果与实际较吻合。通过 3 种极值分布函数包括极值 I 型、II 型、反向威布尔分布以及广义 Parato 分布(GPD)拟合结果的对比分析,得到 100 年重现期内极值 III 型分布(即反向威布尔分布)对于厦门地区年最大风速拟合最好,而极值 II 型的偏差较大,并给出了厦门地区不同重现期内最佳的极值风速估算值。

关键词:极值分布;极值风速;风场模型;蒙特卡罗方法

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

Distribution models of extreme typhoon winds based on numerical simulation of wind data

CHEN Zhao-hui, TANG Hai-tao

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: To address the shortage of data regarding extreme winds in P. R. China, we examined Xiamen, located on the southwestern Chinese coast, as an example. We used the Batts wind field model and the Monte-Carlo method to simulate extreme wind speed distribution models and to predict maximum wind speeds in different recurring periods. The simulated results coincided with the experical distribution function. Comparing the numerical analysis results of different extreme distributions, such as the Gumbel distribution function, the Frechet distribution function, the reverse Weibull distribution function, and the Generalized Parato distribution function, shows that the reverse Weibull distribution function provides the most precise prediction of maximum wind speed for a one-hundred-year return period, while the Frechet distribution function significantly differs from the results of all the other distribution functions. The extreme wind speeds of different return periods are estimated.

Key words: extreme value distribution; extreme wind speed; wind field model; Monte-Carlo method

热带气旋灾害是引起损失最多的风灾,其中以台风最为严重。中国是世界上台风最集中的地区之一。中国沿海地区是国家的经济中心,风敏感的建筑和构筑物密集,对该地区城市进行台风危险性分析,不仅为结构设计提供风荷载依据,而且能为沿海城市防灾减灾提供基础信息。

适用于结构抗风设计的最大平均风速的统计分

布大致可分为 3 类:极值分布、正态分布、皮尔逊 III 型曲线及其变形^[1]。台风和常规风都是随机现象,故统计的最大风速属于极值随机变量,文献[2]证明无论随机变量的原始分布具有何种形式,如果其极大值渐进分布存在,都可用 3 种分布类型描述:极值 I 型(Gumbel)、极值 II 型(Frechet)和极值 III 型(reverse Weibull),其中前 2 种具有无限尾部长度,

收稿日期:2008-06-22

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(0711A3963);2008 教育部科学技术研究重点资助项目(108175)

作者简介:陈朝晖(1968-),女,重庆大学教授,主要从事结构工程和结构风工程方向的研究,(E-mail)zhaohuic@cqu.edu.cn。
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

第3种为有限尾部长度,它们的母体分布为指数型、柯西型和有界型分布。采用跨阈法(peak over threshold, POT)选取样本的广义跨阈分布 GPD 模型(generalized parato distribution)能较好地弥补样本不足给参数估计带来的困难,同时给出较好的风速估计^[3-4]。笔者的分析不指定母体分布,分别采用上述4种分布模型做 Monte-Carlo 数值模拟分析。

对台风历史数据进行概率统计分析是目前台风极值风速分析最常用的方法。由于中国海域辽阔,只能获得有限的观测资料,恶劣天气条件下观测资料更为稀少,资料的缺乏及实测资料在空间和时间上的不均匀及不连续性,使得直接依靠实测资料对台风参数作出估计存在一定的困难。从有限的实测资料出发,结合台风衰减模型和移动模型,运用统计分析方法确定适用的台风参数,并采用 Monte-Carlo 数值模拟推算极值风速分布对减灾防灾具有迫切的现实意义。

1 台风风场模型

台风风场模型是根据大气压力场与风速关系的基本理论得到的。现有的各种台风模型可分为3大体系^[5]:1)基于实测与经验拟合的 Gomes & Vickery 模型^[6];2)基于假定的梯度压力场和动量方程的 Chow^[7]、Shapiro^[8]、Georgiou^[9]和 Vickery^[10]等模型;3)基于扰动平衡方程的 Yan Meng 解析模型^[11]。

采用 Batts 提出的风场模型^[10,12]是目前比较成熟且计算简单的风场模型。该模型包括海面台风风场模型^[13](如图1)和考虑到台风登录后的衰减模型。

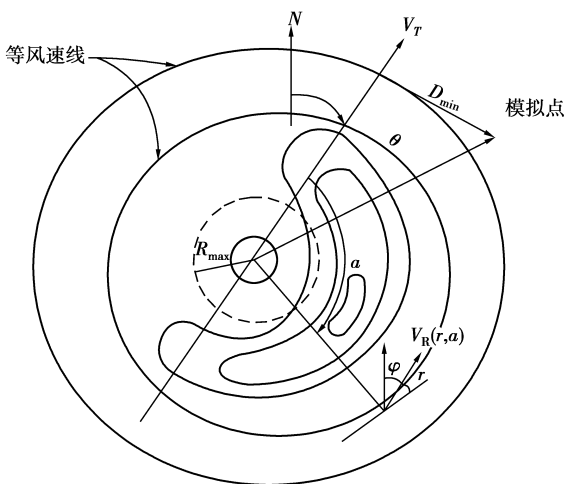


图1 梯度风场模型

在该模型中,最大梯度风速为

$$V_{gx} = K \sqrt{\Delta P} - (R_{\max}/2)f, \quad (1)$$

其中: K 为经验常数,取6.72; f 为科氏系数, $f = 2\Omega \sin\phi$; Ω 是地球转动速度(rad/s); ϕ 是空气微团所

处的纬度; R_{\max} 为最大风速半径(km); ΔP 为台风中心压差(hPa)。

距海面10 m高处10 min平均最大风速 $V_{10,R_{\max}}$ 为

$$V_{10,R_{\max}} = 0.865V_{gx} + 0.5V_T, \quad (2)$$

由于台风登陆后由摩擦造成了风速衰减,登陆后的风速 $V^t(10)$ (10 m高10 min平均)和海面上的风速 $V^w(10)$ (10 m高10 min平均)的比值为^[14]

$$\frac{V^t(10)}{V^w(10)} = \frac{1}{0.2p \ln \frac{10}{z_0}}, \quad (3)$$

其中: p 为障碍因子; z_0 为粗糙长度;对海岸开阔地带 p 取值为0.85; z_0 取值为0.005。

为了计算较粗糙地形的风速 $U(z_g, z_0)$,已知前一地面粗糙度风速 $U(z_{g1}, z_{01})$,有^[15]

$$U(z_g, z_0) = \left(\frac{z_g}{\delta(z_0)}\right)^{\alpha(z_0)} \left(\frac{\delta(z_{01})}{z_{g1}}\right)^{\alpha(z_{01})} U(z_{g1}, z_{01}), \quad (4)$$

其中: $\alpha(z_0)$, $\delta(z_0)$ 和 $\alpha(z_{01})$, $\delta(z_{01})$ 分别对应于粗糙长度为 z_0 和 z_{01} 的地面粗糙度指数和梯度风速高度; z_g 、 z_{g1} 为距离地面高度。

2 台风关键参数及其概率模型

台风关键参数包括台风的发生及台风风场的物理参数,即台风年发生率 λ 、台风移动方向 θ 、台风路径与模拟点间的最小距离 D_{\min} 、台风移动速度 V_T 、最大风速半径 R_{\max} 与台风中心压差 ΔP 。台风的关键参数可从台风历史记录数据中提取。笔者的台风数据来源于西太平洋台风网^[16](1951~2000年)登陆中国的热带气旋资料,数据包括了热带低压成长为台风到台风减弱至消亡的全过程,每6 h记录1次。

以参考点为圆心做出选择台风数据的模拟圆,选择台风路径通过模拟圆的数据作为统计台风参数的数据,以厦门为目标场地,选择模拟圆半径为150 km(因厦门陆地面积约1 500 km²,最大风速半径不超过100 km)。

为保证抽样时数据的合理性,需对参数进行修正,删除那些从历史资料看来不合理的值,使中心气压差 ΔP 范围为0~135 hPa,最大风速半径 R_{\max} 的范围为8~100 km,台风中心移动速度 V_T 范围为2~65 km/h^[15]。

利用 χ^2 检验法和K-S检验法,取置信度水平为0.95,对提取出的台风关键参数进行分布拟合优度检验,确定模拟抽样时所用的台风关键参数概率模型。表1给出了各关键参数拟合优度检验和拟合效

果最好的概率分布的参数估计。

表 1 台风关键参数概率分布及参数估计

关键参数	分布类型	分布的参数估计	拟和优度检验后所用分布
V_T	对数正态分布	$\mu=3.05, \sigma=0.68$	对数正态分布
	正态分布	$\mu=23.72, \sigma=11.7$	
λ	泊松分布	$\lambda=1.04$	泊松分布
R_{max}	对数正态分布	$\mu=3.67, \sigma=0.56$	对数正态分布
ΔP	对数正态分布	$\mu=3.25, \sigma=0.51$	对数正态分布
	韦布尔分布	$\mu=8.07, \sigma=23.52,$ $\gamma=1.53$	

3 数值模拟与极值风速预测分析

采用线性同余法产生(0,1)均匀分布的随机数,通过台风关键参数的概率分布(如表 1)产生台风关

键参数值:由式(1)得到最大梯度风速 V_{gx} ,再代入式(2)得到登陆点海面最大风速 $V_{10,R_{max}}$,由式(3)得到台风登陆后的 10 m 高 10 min 平均风速 $V'(10)$,再由(4)式计算不同地面粗糙度的台风风速。按上述步骤分别模拟产生 50、100、200、1 000 年的厦门 10 m 高 10 min 台风年极值风速序列。

GPD 模型的阈值由广义 Pareto 分布的性质利用观测值超出量($X-u|X>u$)之平均值(即称平均超出量)的散点分布图(即称平均剩余生命图)确定阈值^[17]。

为了对模拟得到的年极值风速序列进行分析,首先用经验分布(样本是总体的代表,把风速序列作为样本值来推断总体的分布)进行年极值风速分布拟合,以衡量其他分布模型优劣程度。模拟不同时间长度内台风不同分布类型的 CDF(累计概率分布函数)曲线如图 2 所示。

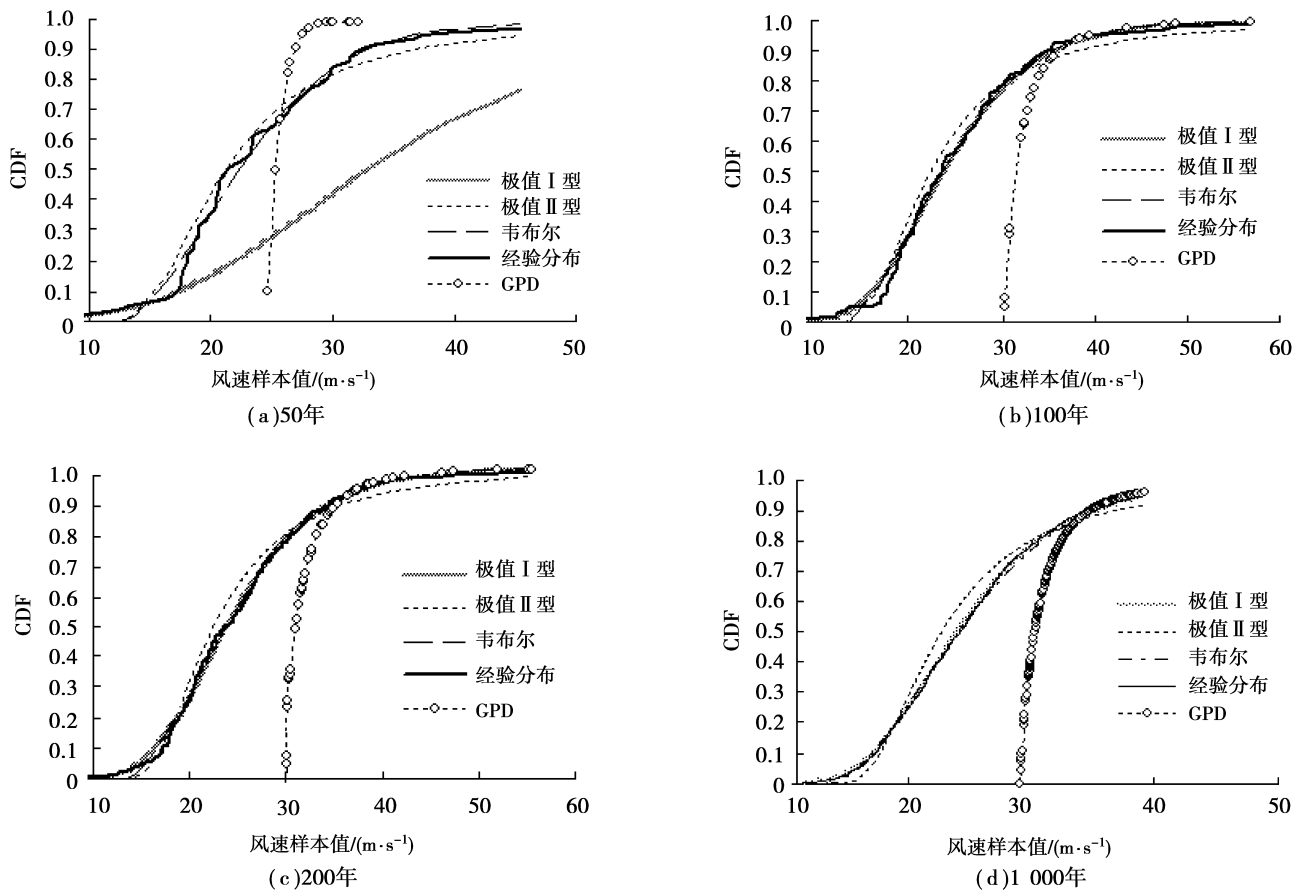


图 2 不同模拟时间段风速序列的台风年极值风速 CDF 曲线图

由图 2 可见:1)利用 Monte-Carlo 法来模拟台风能得到性质较好的台风年极值风速序列;2)除 50 年模拟数据外,其他各模拟年限不同模拟分布与实测分布非常吻合,其中极值 I 型分布和 Weibull 分布

与实测数据分布的 CDF 曲线基本重合;3)GPD 模型的尾部分布与实测数据分布吻合很好;

利用模拟得到的年极值风速序列,为便于与实测数据推算的风速做比较,可以计算出如表 2 所示

不同重现期(10、50、100 年)B 类地貌的年极值风速(10 m 处 10 min 平均风速),并做出不同重现期内 B 类地貌极值风速预测图,如图 3。

由图 3 可见:1)不同模拟时间长度内极值 II 型预测的极值风速总体均偏高,曲线上升都较快;2)从不同模型风速预测走势来看,除 50 年外,在 100、

200、1 000 年模拟风速序列基础上预测不同重现期的极值风速,在 100 年以内时,极值 I 型、Weibull 分布和 GPD 模型的预测曲线走势相近,且与实际风速记录吻合较好,而重现期 100 年以上时,Weibull 分布预测曲线上升比较平缓,极值 I 型和 GPD 模型相互吻合,显示出 Weibull 分布尾部有限的特点。

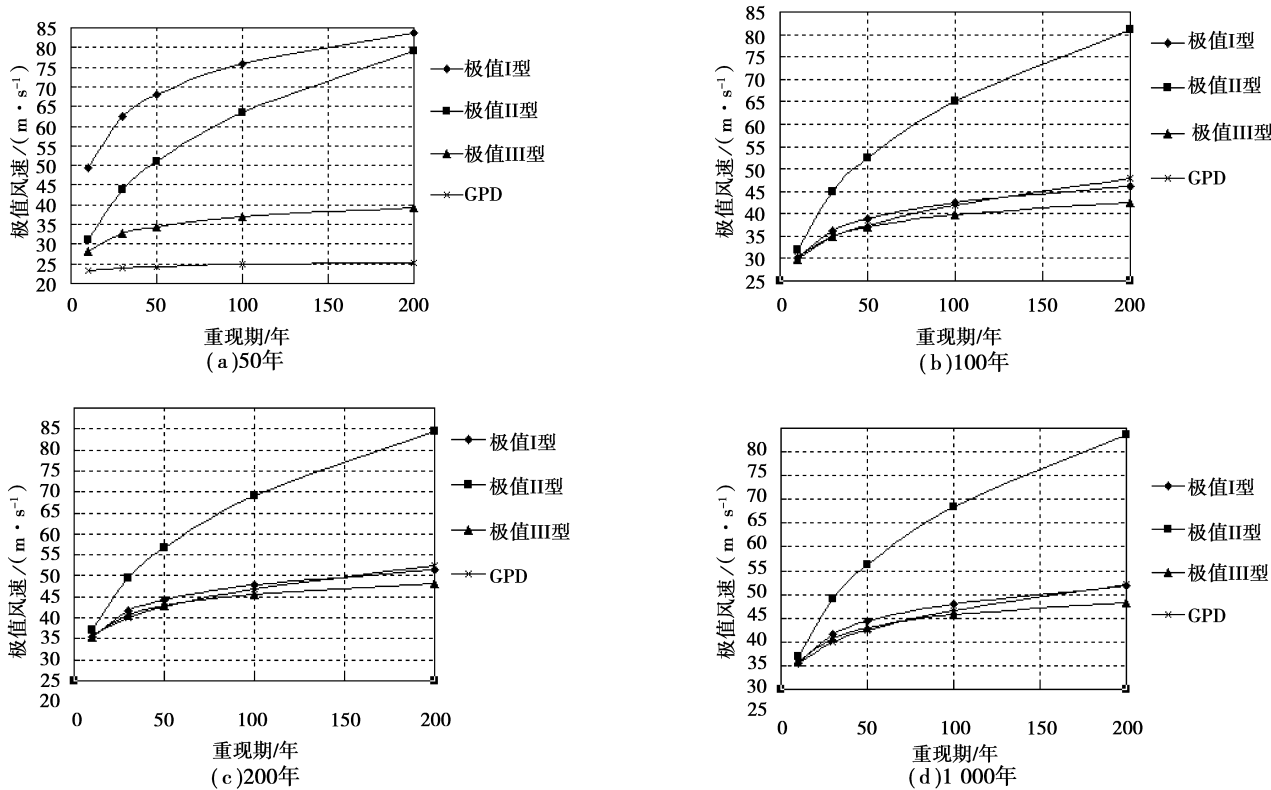


图 3 不同模拟时间段年风速序列预测的不同重现期极值风速

基于不同时间长度的风速序列模拟值而推测出的年最大风速见表 2。

表 2 B 类地貌模拟 50 年风速序列预测的不同重现期年最大风速

分布模型	不同重现期对应风速/($m \cdot s^{-1}$)					
	10 年		50 年		100 年	
	预测值	规范	预测值	规范	预测值	规范
极值 I 型	49.53		68.00		75.81	
极值 II 型	31.00		51.13		63.60	
Weibull	28.04	28.80	34.51	36.4	36.95	39.70
GPD	23.26		24.35		24.76	

与基于实测值推算的规范取值相比,可见:

1)极值 II 型对不同重现期的最大风速预测均大大超出实际值;

2)数值模拟的风速序列时间越长,得到的不同重现期的年最大风速的预测值与实际越吻合;反之,差距越大。如基于 Monte-Carlo 法模拟 50 年的台

风序列得到的年最大风速预测值,采用 4 种分布均与规范取值有较大差异;

3)较长时间段的模拟风速下(如 100 年及以上),极值 I 型、Weibull 分布和 GPD 模型均可推测出较好的重现期风速,其中极值 I 型比实际稍大,而 Weibull 分布得到的预测值与实际最接近。段忠东^[18]等推算的厦门地区台风不同重现期风速与规范相比明显偏低,见表 5。

表 3 B 类地貌模拟 100 年风速序列预测的不同重现期年最大风速

分布模型	不同重现期对应风速/($m \cdot s^{-1}$)					
	10 年		50 年		100 年	
	预测值	规范	预测值	规范	预测值	规范
极值 I 型	30.13		38.84		42.52	
极值 II 型	31.95		52.39		65.11	
Weibull	29.78	28.80	37.00	36.40	39.76	39.70
GPD	30.44		37.45		42.02	

表 4 B 类地貌模拟 200 年风速序列预测的不同重现期年最大风速

分布 模型	不同重现期对应风速/($m \cdot s^{-1}$)					
	10 年		50 年		100 年	
	预测值	规范	预测值	规范	预测值	规范
极值 I 型	30.45		39.19		42.89	
极值 II 型	31.93	28.8	51.74	36.4	64.01	39.7
Weibull	30.43		37.84		40.66	
GPD	30.75		37.65		41.96	

表 5 B 类地貌模拟 1 000 年风速序列预测的不同重现期年最大风速

分布 模型	不同重现期对应风速/($m \cdot s^{-1}$)					
	10 年		50 年		100 年	
	预测值	规范	预测值	规范	预测值	规范
极值 I 型	30.64		39.40		43.10	
极值 II 型	31.85		51.36		63.45	
Weibull	30.74	28.80	38.01	36.40	40.74	39.70
GPD	30.58		37.39		41.68	
文[18]模型			30.27		34.8	

4 结 论

运用 Monte-Carlo 数值模拟方法,结合台风实测资料,得出了厦门地区台风极值风速分布,并预测了不用重现期年极值风速,与实测结果比较,得出结论如下:

1)在对厦门地区的台风危险性分析中,在设计周期 100 年内的一般建筑,综合考虑经济与安全因素,可选择 Weibull 分布做为极值风速预测模型,对更重要的建筑物或构筑物,基于现有短期风速因素,建议采用 GPD 模型作预测分析;

2)风速历史记录较长,如达 100 年及以上时,可直接根据历史记录统计极值风速值;而对于风速记录缺乏的地区,分析表明,采用 Batts 台风风场模型,利用 Monte-Carlo 数值模拟风速序列是一条有效途径;

3)与模拟推算值比较可见现有规范中厦门地区设计基本风速基本满足抗台风设计要求。

4)对比国内现有类似分析方法^[18]的结果可见,风速历史样本的容量及准确性对台风风场关键参数的确定以及极值风速的估计影响较大。

参考文献:

- [1] 李桂清,曹宏,李秋胜,等. 结构动力可靠性理论及其应用[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [2] THOFT-CHRISTENSEN P, BAKER M J. Structural reliability theory and its applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1982.

- [3] SIMIU E, HECKERT N A. Extreme wind distribution tails: a "Peaks over Threshold" approach [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(5): 539-547.
- [4] HECKERT N A, SIMIU E, WHALEN T. Estimation of hurricane wind speeds by "Peaks over Threshold" method[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(4):445-449.
- [5] 葛耀君,赵林,项海帆. 基于极值风速预测的台风数值模型评述[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 31-40. GE YAO-JUN, ZHAO LIN, XIANG HAI-FAN. Review for numerical typhoon models based on extreme wind velocity prediction [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3):31-40.
- [6] GOMES L, VICKERY B J. On the prediction of tropical cyclone gust speeds along the northern coast [J]. Eng Aust C E Trans, 1976, CE 18 (2):40-49.
- [7] CHOW S. A study of the wind field in the planetary boundary layer of a moving tropical cyclone[D]. New York University: Department of Meteor Oceanogr, 1971.
- [8] SHAPIRO L J. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane [J]. Journal of Atmosphere Sciences, 1983, 40(8):1984-1998.
- [9] GEORGIU P N. Designing wind speeds in cyclone-prone regions [R]. University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, BLWT2, 1985.
- [10] VICKERY P J, TWISDALE L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions[J]. Journal of Engineering Structures, 1995, 121(11): 1700-1709.
- [11] YANG M, MATSUI M, HIBI K. An analytical model for simulation of the wind field in typhoon boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56:291-310.
- [12] BATTIS M E, RUSSELL L R, SIMIU E. Hurricane wind speeds in the United States [J]. Journal of Structural Division, 1980, 106(ST10):2003-2005.
- [13] GEORGIU P N, DAVENPORT A G, VICKERY P J. Design wind speed in regions dominated by typhoon cyclones [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, (13):139-152.
- [14] BIETRY J, SACR C, SIMIU E. Mean wind profiles and change of terrain roughness [J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104 (ST10): 1585-1595.
- [15] SIMIU E, SCANLAN R H. 风对结构的作用[M]. 刘尚培,项海帆,译. 上海:同济大学出版社,1992.
- [16] 西北太平洋台风网. 风历史记录数据[EB/OL]. (2007-10-15) [2008-03-16] http://agora.ex.nii.ac.jp/cgi-bin/dt/track_view.pl.
- [17] COLES S, TAWN J. Statistical methods for extreme values[R]. Strathde: 1998 RSS Conference, 1998.
- [18] 欧进萍,段忠东,常亮. 中国东南沿海重点城市台风危险性分析[J]. 自然灾害学报,2002,11(4):9-17. OU JING-PING, DUAN ZHONG-DONG, CHANG LIANG. Typhoon risk analysis for key coastal cities in southeast China. [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4):9-17.