

文章编号: 1000-4750(2014)01-0122-07

# 厦门地区台风风场特性的数值模拟

雷 鹰<sup>1,2</sup>, 李 涛<sup>1</sup>, 张建国<sup>1</sup>, 林树枝<sup>3</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建, 厦门 361005; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

3. 厦门市建设与管理局, 福建, 厦门 361002)

**摘 要:** 基于 1959 年~2008 年厦门地区的台风详细资料, 采用 Yan Meng 风场模型进行台风数值模拟, 得到了台风极值风速序列, 并推算出厦门地区不同重现期的极值风速, 与年极值风速实测资料统计结果及现行规范值进行比较, 为结构抗风设计提供了更为合理的荷载信息; 同时, 讨论了风向对极值风速分布的影响, 为正确选择建筑方位提供理论指导。最后, 基于 Yan Meng 风场不同半径位置处风剖面的变化规律, 提取厦门地区沿高度的极值风速, 研究了台风条件下的风剖面规律。

**关键词:** 台风; 数值模拟; 重现期; 极值风速; 风剖面; 风向

中图分类号: TU973.32 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.08.0614

## NUMERICAL SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF TYPHOON WIND-FIELD IN XIAMEN REGION

LEI Ying<sup>1,2</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, ZHANG Jian-guo<sup>1</sup>, LIN Shu-zhi<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Xiamen Construction and Management Bureau, Xiamen, Fujian 361002, China)

**Abstract:** Based on observed data of typhoons in Xiamen region during 1959- 2008, numerical simulation of typhoon is conducted using the Yan Meng wind-field model to obtain the extreme wind velocity series. Then, extreme wind velocity for different return periods is estimated and compared with the statistical results of the observed data of annual extreme wind velocity in Xiamen region, as well as the current structural code, to provide more accurate wind load information for the wind-resistant structural design. Furthermore, the effect of wind direction on extreme wind velocity is discussed in this paper to provide theoretical guidance of choosing appropriate building direction. Finally, gradient wind level as well as typhoon-governed wind profile in Xiamen region is proposed based on numerical simulation of the Yan Meng typhoon wind-field model.

**Key words:** typhoon; numerical simulation; return period; extreme wind velocity; wind profile; wind direction

厦门地处东南沿海, 是我国遭受台风灾害最为严重的地区之一。近年来, 随着经济发展和城市化建设加速, 高层建筑、大跨结构、高耸结构不断涌现, 而这类结构对风荷载非常敏感, 风荷载是结构

抗风设计的主要设计参量。现行规范给定的基本风速、风压是根据气象部门实测风资料统计分析的, 但在台风多发区, 台风条件下测量仪器易损、测量时间间隔过长都可能造成风载估计不准确。利用台

收稿日期: 2012-08-25; 修改日期: 2012-12-13

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金项目(SLDRCE10-MB-01); 厦门市建设科技项目(2011-2-1)

通讯作者: 雷 鹰(1966), 男, 福建宁化人, 特聘教授, 博士, 博导, 主要从事结构监测、随机动力学、台风特性等研究

(E-mail: yleixmu@xmu.edu.cn).

作者简介: 李 涛(1985), 女, 山西文水人, 硕士生, 从事结构工程研究与设计(E-mail: mmt0901@163.com);

张建国(1974), 男, 湖北长阳人, 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗风研究(E-mail: zjianguo@xmu.edu.cn);

林树枝(1965), 男, 福建厦门人, 教授级高工, 博士, 博导, 主要从事结构工程研究与管理(E-mail: shuzhilin@hotmail.com).

风数值模拟推算不同重现期的极值风速、风压，进行沿海地区台风危险性研究得到了越来越多的重视，是目前国内外应用较为广泛的研究方法，欧进萍、段忠东等<sup>[1]</sup>对我国东南沿海重点城市的台风危险性研究方法进行了阐述，赵林等<sup>[2-3]</sup>分别对上海周边沿海区域和广州地区的台风风场参数的合理取值进行了详细的研究，并预测了上述地区一定重现期内的极值风速，Maruyama 等<sup>[4]</sup>运用中尺度模型进行了强风的数值模拟。另外，Wang Hao<sup>[5]</sup>、李秋胜<sup>[6]</sup>等近年来在台风实测方面进行了大量的研究工作，其研究结果可为台风数值模拟提供可靠的数据基础。

## 1 台风数值模拟

### 1.1 台风关键参数

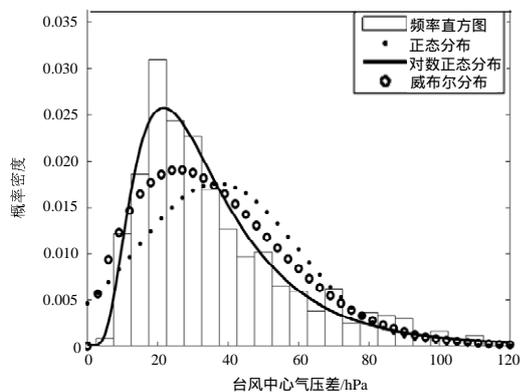
台风关键参数是进行台风数值模拟的必要条件。台风过程具有随机性，需研究厦门地区台风关键参数的概率分布。描述台风风场特性的关键参数一般包括：台风中心气压差  $\Delta P$ ，最大风速半径  $R_{max}$ ，台风移动速度  $c$ ；描述台风对模拟点影响的关键参数一般用台风移动方向  $\theta$ ，模拟点到台风移动路径的最小距离  $D_{min}$  表示<sup>[7-10]</sup>。

根据厦门地区 1959 年~2008 年厦门地区台风资料，采用半径为 250km 的模拟圆得到对厦门地区有影响的台风，提取出各台风关键参数，确定其概率分布模型如图 1(a)~图 1(e)。

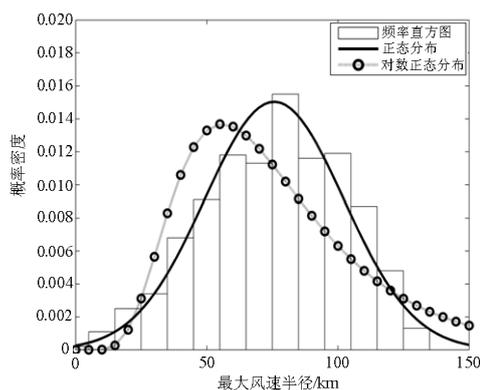
大量研究<sup>[11-14]</sup>表明最大风速半径  $R_{max}$  与中心气压差  $\Delta P$  之间存在很高的相关性，对厦门地区台风研究发现  $\ln(R_{max})$  和  $\Delta P$  之间存在线性关系，如图 2，拟合得到关系式：

$$\ln(R_{max}) = -0.0211\Delta P + 5.0009 \quad (1)$$

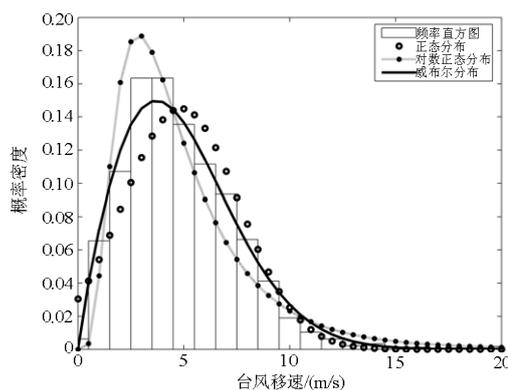
为便于阐述，将历年来影响厦门地区台风的 5 个关键参数的概率密度函数归纳，如表 1 所示。



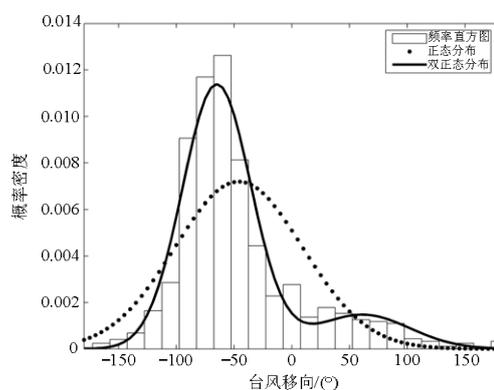
(a)  $\Delta P$



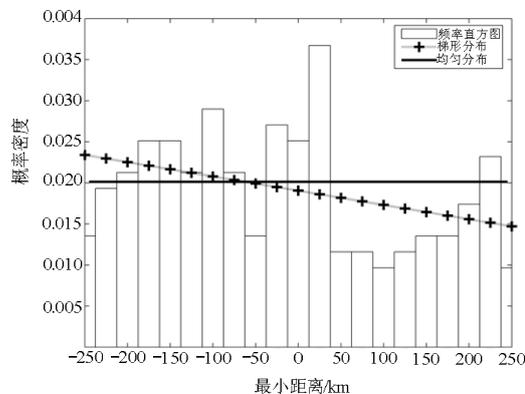
(b)  $R_{max}$



(c)  $c$



(d)  $\theta$



(e)  $D_{min}$

图 1 台风关键参数概率分布模型

Fig.1 Probability distribution of key typhoon parameters

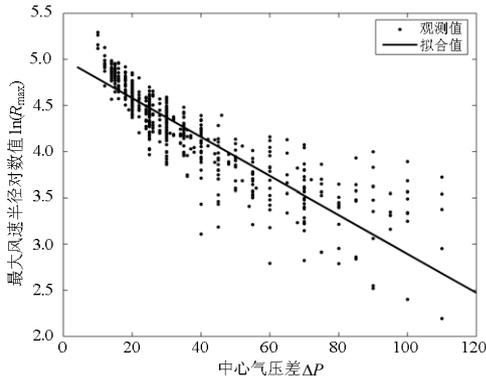


图2  $\ln(R_{\max})$ 和 $\Delta P$ 的相关性

Fig.2 Correlation between  $\ln(R_{\max})$  and  $\Delta P$

表1 台风关键参数的概率密度函数形式

Table 1 Probability distribution of key typhoon parameters

关键参数	概率密度函数形式
中心气压差 $\Delta P$	对数正态分布
最大风速半径 $R_{\max}$	正态分布
台风移动风速 $c$	威布尔分布
台风移动方向 $\theta$	双正态分布
最小距离 $D_{\min}$	均匀分布

1.2 台风风场模型

Yan Meng 风场模型是 Yan Meng 等<sup>[15 16]</sup>于 1995 年提出的考虑边界层摩擦力修正的压力梯度平衡方程，并引入“等效粗糙长度”考虑了模拟点地形地貌对台风风场的影响。该模型可以较好地表达台风风场中各种力的相互关系，能直观求解梯度风方程，演化出完整的解析解。

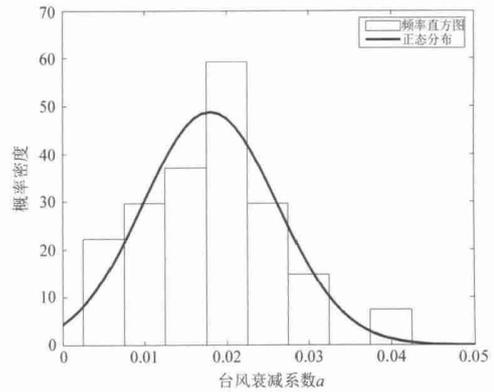
1.3 台风衰减模型

台风衰减模型基于 Vickery 台风衰减模型<sup>[17]</sup>，用指数函数如式(2)。根据厦门地区台风资料得到衰减系数  $a$ 、 $b$  的分布情况如图 3(a)、图 3(b)。

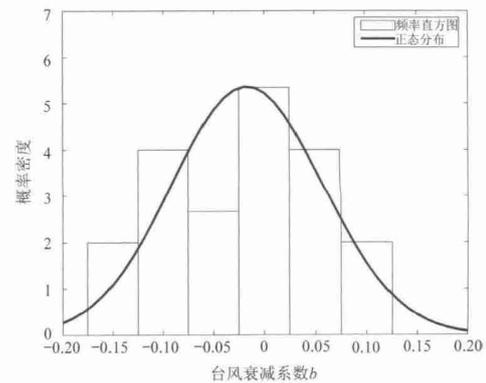
$$\Delta P(t) = \Delta P \exp(-at + b) \tag{2}$$

1.4 台风数值模拟

基于台风关键参数模型及 Yan Meng 模型，进行厦门地区台风风场模拟如图 4。首先 利用 Monte-Carlo 随机抽样法产生若干组台风关键参数 $\Delta P$ 、 $R_{\max}$ 、 $c$ 、 $\theta$ 、 $D_{\min}$ ，假定台风发展变化过程中台风移动方向和速度不变，某时刻中心气压差 $\Delta P(t)$ 由台风衰减模型式(2)算出，最大风速半径  $R_{\max}(t)$ 由任意时刻的中心气压差 $\Delta P(t)$ 据式(1)表示，根据台风中心到模拟点半径  $r(t)$ 及台风中心到模拟点的连线与台风移动路径的夹角  $\alpha(t)$ 计算相应时刻厦门地区的风速、风向，提取该台风过程的最大风速及对应风向。模拟过程中，所取的厦门地区地面“等效粗糙长度”为 0.10m，其取值在已发生的多个台风中得到验证。模拟若干台风，得到厦门地区极值风速序列。



(a) 衰减系数  $a$  的分布



(b) 衰减系数  $b$  的分布

图3 衰减系数分布

Fig.3 Distributions of attenuation coefficients

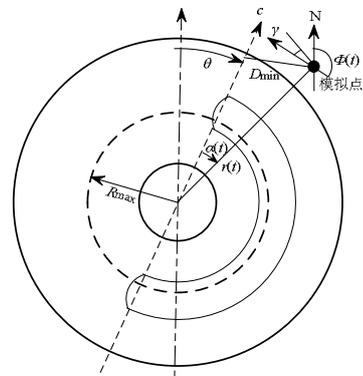


图4 台风风场模拟示意图

Fig.4 Sketch of the simulated typhoon wind field

台风移动过程中，模拟地区某时刻风向<sup>[18]</sup>可以表示为：

$$\Phi(t) = \theta + \alpha(t) + 90^\circ - \gamma \tag{3}$$

$$\alpha(t) = \arctan\left(\frac{D_{\min}}{D - c \cdot t}\right) \tag{4}$$

其中： $\Phi(t)$ 为某时刻模拟点的台风风向，以正北方向为  $0^\circ$ ，顺时针方向为正，逆时针为负，范围在  $[-180^\circ, 180^\circ]$ ； $\theta$ 为台风移动方向； $\alpha(t)$ 为某时刻模拟点与台风中心连线到台风移动方向的夹角； $\gamma$ 为台风流入角， $\gamma$ 的值一般取  $30^\circ$ ； $D$ 为模拟点到

模拟中所包括的台风路径的最大距离，取  $D = 250\text{km}$ ； $c$  为台风移动速度。

本文在用 Yan Meng 风场模型和 Vickery 台风衰减模型进行厦门地区的台风数值模拟前，已针对多个已发生台风进行了适用性验证，上述模型是否能适用于其他地区，也同样需要进行验证。

## 2 极值风速推断

### 2.1 不考虑风向情况

由台风数值模拟产生的厦门极值风速序列可看作一组随机变量  $X$ ， $X$  中元素不大于  $X_T$  的概率：

$$p(X \leq X_T) = F(X_T) \quad (5)$$

那么， $X_T$  的超越概率为：

$$p(X > X_T) = 1 - F(X_T) \quad (6)$$

$X_T$  对应的重现期可表示为超越概率的倒数，即：

$$T = \frac{1}{1 - F(X_T)} \quad (7)$$

由式(7)知，只要确定  $X$  的分布函数  $F(X)$ ，便能求得  $X_T$  对应重现期  $T$ ，反之，要求得的重现期极值风速  $X_T$  也可通过保证率或式(7)得到。据台风模拟的极值风速序列，作极值风速的累积概率分布曲线如图 5，并推断不同重现期极值风速如图 6。

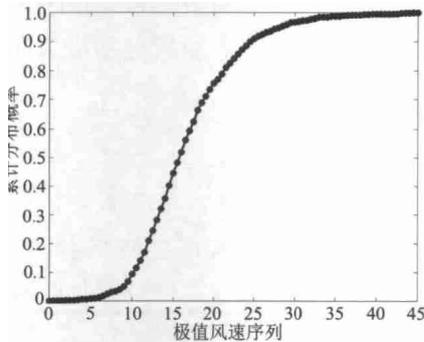


图 5 模拟极值风速累积概率分布图

Fig.5 Accumulated probability of simulated extrem wind velocity

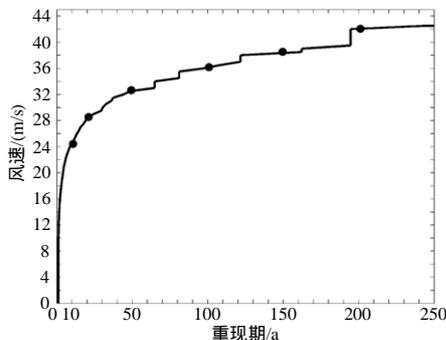


图 6 重现期对应风速

Fig.6 Wind velocity under different return periods

按上述方法，以厦门气象局提供的 1959 年 ~ 2008 年极值风速作样本，推算重现期极值风速与上述结果比较如表 2。由表 2 知，台风模拟风速与实测风速推算结果基本相符，说明台风模拟方法的有效性。但推算结果较现行规范值偏小，说明现行规范对基本风速、基本风压的标定偏保守。

表 2 不同重现期极值风速推算结果比较

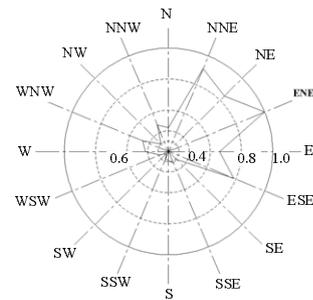
Table 2 Comparisons of estimated extreme wind velocity under different return periods

比较	重现期极值风速/(m/s)									
	10 年		20 年		50 年		100 年		200 年	
	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟
推算结果	22.8	24.5	28.7	28.1	34.2	33.4	36.5	37.3	38.0	39.8
现行规范	28.9		32.5		36.5		39.8		42.5	

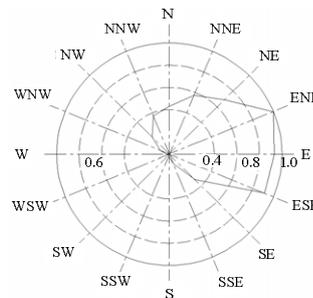
### 2.2 考虑风向情况

前述极值风速推算未考虑风向影响，但是不同地区的主导风向不同，各风向下的极值风速分布亦有不同。本文将利用台风模拟厦门地区的极值风速及对应风向，结合实测年极值风速及风向资料，研究考虑风向条件下的极值风速。

根据实测年极值风向与模拟所得极值风向，作风向玫瑰图如图 7(a)、图 7(b)。结果表明，模拟结果与实测风向虽不尽相同，主要由于台风模拟无法得到其他季风风向，但风向分布规律基本吻合。能够直观看到偏北、偏东方向是厦门地区的主导风向，证明台风模拟能够基本反映极值风的风向分布。



(a) 实测年极值风向玫瑰图



(b) 模拟极值风向玫瑰图

图 7 厦门地区极值风向分布

Fig.7 Distribution of extreme wind direction in Xiamen area

将台风模拟极值风速序列按 16 个风向进行排列, 分别推算出不同风向的重现期极值风速, 并与考虑风向条件下年极值风速实测资料推算结果进行比较如表 3。

表 3 中, 考虑风向与不考虑风向的结果有差异, 是由于不考虑风向时, 极值风速样本是所有风向中的最大值, 而考虑风向时, 极值风速样本只能取本风向的最大值, 因此, 考虑风向时, 各重现期内的各风向基本风速较不考虑风向时小。

表 3 表明, 偏东、偏北方向重现期极值风速较大, 这与风向发生频率分布一致, 厦门地区主导风向的风速相应较大, 台风是引发厦门地区大风的主要原因。所以在实际工程中应选取合理的建筑方位及朝向, 尽量避开主导风向; 并且在结构抗风设计过程中, 应根据建筑实际方位考虑风荷载影响, 在合理条件下调整设计风速及风压。

表 3 考虑风向条件的不同重现期极值风速推算结果比较  
Table 3 Comparisons of estimated extreme wind velocity under different return periods considering wind directions

风速/(m/s)	重现期								
	20 年		50 年		100 年		200 年		
考虑 风向	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	
	N	11.03	11.82	14.46	13.55	17.03	14.85	19.59	16.15
	NNE	12.07	17.79	15.68	20.54	18.70	22.62	21.53	24.68
	NE	13.77	21.29	17.78	25.05	20.79	27.87	23.80	30.69
	ENE	15.78	16.72	20.11	19.17	23.35	21.02	26.59	22.85
	E	18.62	14.45	23.34	16.23	26.88	17.57	30.40	18.92
	ESE	19.60	13.64	24.65	15.51	28.43	16.92	32.19	18.32
	SE	20.69	16.13	25.68	18.78	29.42	20.76	33.15	22.74
	SSE	20.68	15.90	25.64	18.72	29.36	20.95	33.07	22.95
	S	21.13	14.58	26.29	16.84	30.15	18.53	34.00	20.22
	SSW	11.82	14.80	14.21	17.36	16.00	19.28	17.79	21.19
	SW	10.39	9.70	12.33	11.15	13.77	12.24	15.21	13.32
	WSW	11.74	10.69	12.92	12.39	13.81	13.66	16.68	14.93
	W	14.09	13.09	17.95	15.38	18.60	17.09	20.24	18.80
	WNW	17.60	14.24	12.05	17.06	25.39	19.18	28.71	21.29
	NW	16.18	13.33	20.46	16.31	23.67	18.55	26.87	20.78
NNW	13.45	12.46	17.37	14.54	20.30	16.09	23.22	17.65	
不考虑 风向	推算值	28.1	28.7	33.4	34.2	37.3	36.5	39.8	38.0
	规范值	32.5		36.5		39.8		42.5	

### 3 风剖面研究

利用 Yan Meng 风场模型随机模拟台风, 研究在距离台风中心  $0.1R_{max}$ 、 $0.2R_{max}$ 、 $0.5R_{max}$ 、 $R_{max}$ 、 $1.5R_{max}$  和  $2R_{max}$  不同位置处平均风速沿垂直方向的变化规律。在每个位置处将  $[0, 500m]$  的高度范围分成 50 等分, 做出各位置处不同高度风速与梯度风速的比值  $U/U_g$  随高度的变化曲线如图 8。

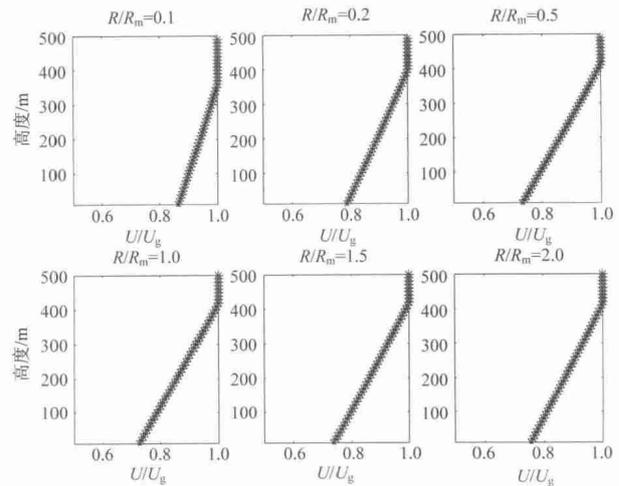


图 8 Yan Meng 风场下不同位置处风速剖面图

Fig.8 Wind profile in Yan Meng wind filed

由图 8 知, 在距离台风中心不同位置处风速剖面形状不同, 在  $0 < R < R_{max}$  范围内, 距台风中心越远的位置处台风风速受陆地地形地貌的影响, 地面摩擦增大, 梯度风高度随之增大, 风剖面变化趋于舒缓; 而在  $R > R_{max}$  区域, 台风风速受地面摩擦影响逐渐稳定, 梯度风速高度变化很小, 风剖面曲线形状趋于稳定。据图 8 风剖面的变化规律, 结合现行规范, 认为风剖面曲线能够用指数函数形式<sup>[19]</sup>描述。取各不同位置处自下往上风速不再增加的高度为梯度风高度  $Z_G$ , 并取此高度处的风速为梯度风风速  $U_G$ 。利用式(8)拟合得到各位置处梯度风高度  $Z_G$  和粗糙度指数  $\alpha$  取值如表 4。

$$\frac{U(Z)}{U(Z_G)} = \left( \frac{Z}{Z_G} \right)^\alpha \quad (8)$$

表 4 Yan Meng 风场下风剖面拟合

Table 4 Fitting of wind profile in Yan Meng wind field

与台风中心距离 $R$	梯度风高度/m	拟合指数 $\alpha$
$0.1R_{max}$	260	0.05
$0.2R_{max}$	380	0.12
$0.5R_{max}$	420	0.17
$1.0R_{max}$	420	0.18
$1.5R_{max}$	420	0.17
$2.0R_{max}$	420	0.17

以上结果表明, Yan Meng 风场模型下风剖面形状与到台风中心距离有关。根据厦门台风关键参数分布模型及风场模型, 随机模拟产生一系列厦门地区台风过程, 提取每次台风的极值风速计算其平均值如表 5。

根据表 5 数据, 做厦门地区平均风速沿高度变化曲线, 用式(8)进行拟合如图 9, 风速波动情况如

图 10. 估算厦门地区( $z_0=0.10m$ )的梯度风高度  $Z_G$  约为 380m, 粗糙度指数  $\alpha$  约为 0.13。

表 5 厦门地区沿高度方向平均风速值

Table 5 Average wind gradient velocity in Xiamen area

高度/m	平均风速/(m/s)	标准差/(m/s)	高度/m	平均风速/(m/s)	标准差/(m/s)
10	14.16	0.24	300	16.95	0.33
50	14.66	0.25	350	17.22	0.35
100	14.95	0.23	400	17.87	0.36
150	15.50	0.28	500	17.91	0.36
200	16.40	0.32	1000	17.90	0.35

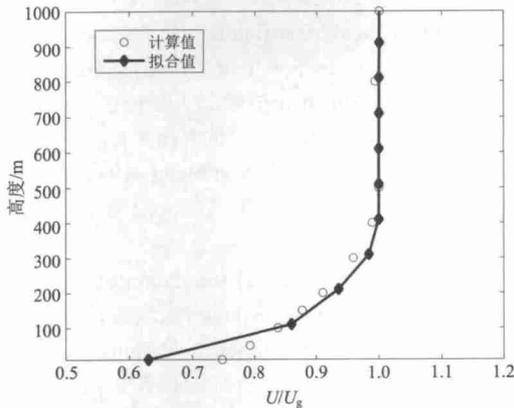


图 9 厦门地区风剖面图

Fig.9 Wind profile in Xiamen area

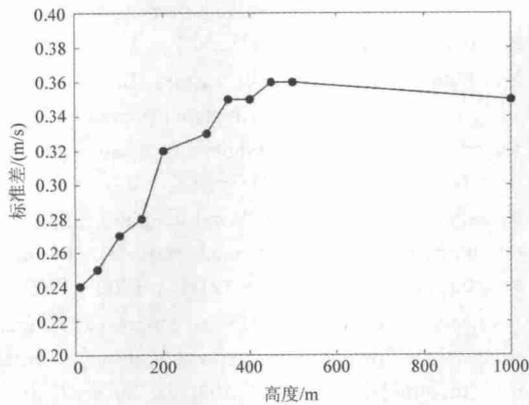


图 10 风速标准差分布

Fig.10 Distribution of standard deviation of wind velocity

将 Yan Meng 风场模拟得到厦门地区( $z_0=0.10m$ )的风剖面参数与现行规范给出 B 类地貌的对应参数比较可知, Yan Meng 风场模型计算该地貌的梯度风高度相对偏大, 主要是由于 Yan Meng 风场模型引入“地面等效粗糙长度  $z_0$ ”的概念, 地面粗糙度的影响权重变大, 但 Yan Meng 风场模型估算的风剖面指数  $\alpha$  比现行规范偏小, 即同高度处风速值比规范公式计算结果稍大, 反映了台风对当地风场的影响, 当然台风条件的风剖面规律尚待进一步研究。

## 4 结论

本文根据厦门地区 50 年台风资料建立台风关键参数概率模型, 利用 Yan Meng 风场模型及衰减模型进行台风模拟, 得到厦门地区极值风速。然后推算不同重现期对应的极值风速, 与实测极值风速推断结果吻合很好, 证明了台风数值模拟方法的可行和有效性。推算结果较规范值小, 说明现行规范对基本风速、风压的规定值偏于保守。在实际工程中, 可根据实际情况确定风荷载, 在合理范围内降低建筑成本。

本文还考虑风向的影响, 通过实测极值风向与模拟极值风向对比, 说明偏北、偏东方向是厦门地区的主导风向, 台风是引发厦门地区大风的主要原因。将极值风速按照 16 个风向分别进行统计分析, 得到各风向重现期风速。结果表明主导风向的极值风速值较大, 而考虑风向的极值风速值一般小于不考虑风向的情况。在实际工程规划中, 应正确选择建筑方位、朝向, 并按照实际建筑方位考虑风荷载。

本文结合 Yan Meng 风场模型不同位置的风剖面变化规律, 通过对厦门地区风剖面进行探索性研究, 初步认为指数函数能够描述台风条件下的风剖面, 但台风条件下的风剖面研究还待进一步研究。此外, 数值模拟与需与实际风场观测相结合, 更好地研究厦门地区台风特性。

### 参考文献:

[1] 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 Jinping, Duan Zhongdong, Chang Liang. Typhoon risk analysis for key coastal cities in southeast China [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 9-17. (in Chinese)

[2] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 台风随机模拟与极值风速预测应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(7): 37-41.  
Zhao Lin, Ge Yaojun, Xiang Haifan. Application of typhoon stochastic simulation and its extreme value wind prediction [J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2005, 33(7): 37-41. (in Chinese)

[3] 赵林, 葛耀君, 宋丽莉, 毛惠琴. 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): 58-62.  
Zhao Lin, Ge Yaojun, Song Lili, Mao Huiqin. Monte-Carlo simulation of typhoon extreme value wind characteristics in Guangzhou [J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2007, 35(8): 58-62. (in Chinese)

- [4] Maruyama T, Tomokiyo E, Maeda J. Simulation of strong wind field by non-hydrostatic mesoscale model and its applicability for wind hazard assessment of buildings and houses [J]. *Hydrological Research Letters*, 2010, 4: 40–44.
- [5] Wang Hao, Li Aiqun. Comparable study on typhoon and strong northern wind characteristics of the Runyang Suspension Bridge based on field tests [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2009(1): 11–15.
- [6] 李秋胜, 鄧伦海, 段永定, 高金盛, 等. 台北 101 大厦风致响应实测及分析[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(3): 24–31.  
Li Qiusheng, Zhi Lunhai, Duan Yongding, Gao Jinsheng, et al. Full-scale measurements and analysis of wind-induced response of Taipei 101 Tower [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(3): 24–31. (in Chinese)
- [7] 陶立英, 严济远, 徐家良. Monte-Carlo 模拟方法在风工程中的应用[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(3): 410–414.  
Tao Liying, Yan Jiyuan, Xu Jialiang. Application of Monte-Carlo simulation method in wind engineering [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2001, 24(3): 410–414. (in Chinese)
- [8] 肖玉凤, 段忠东, 肖仪清, 欧进萍. 基于数值模拟的台风危险性分析综述( )—台风风场模型[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(2): 83–89.  
Xiao Yufeng, Duan Zhongdong, Xiao Yiqing, Ou Jinping. Review of numerical simulation-based typhoon hazard analysis typhoon windfield model [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(2): 83–89. (in Chinese)
- [9] 肖玉凤, 肖仪清, 段忠东, 宋丽莉, 魏巍. CE 风场模型在中国华南沿海地区的适用性研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(10): 251–256.  
Xiao Yufeng, Xiao Yiqing, Duan Zhongdong, Song Lili, Wei Wei. The applicability of CE wind-field model in south China coastal region [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(10): 251–256. (in Chinese)
- [10] 常亮. 中国东南沿海台风危险性分析与 GIS 应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.  
Chang Liang. Typhoon risk analysis and the application of GIS in Southeast China [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003. (in Chinese)
- [11] 李茜, 段忠东. Shapiro 台风风场模型及其数值模拟[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(1): 45–52.  
Li Qian, Duan Zhongdong. Shapiro typhoon wind-field model and its numerical simulation [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(1): 45–52. (in Chinese)
- [12] 彭翔. 沿海台风工程数值模拟机极值风速预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.  
Peng Xiang. Coastal wind engineering numerical simulation and extreme wind velocity prediction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
- [13] 金铭. 华南沿海地区台风风场数值模拟与危险性分析[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2007.  
Jin Ming. On numerical simulation of typhoon wind field of coastal areas in South of China and its hazardous analysis [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 2007. (in Chinese)
- [14] 谢汝强. 基于 CE 风场和 Yan Meng 风场的台风数值模拟与危险性分析[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2008.  
Xie Ruqiang. On numerical simulation of typhoon wind and its hazardous analysis based on CE and Yan Meng wind-field [D]. ShenZhen: Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 2008. (in Chinese)
- [15] Yan Meng, Masahiro Matsui, Kazuki Hibi. An analytical model for simulation of wind field in a typhoon boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 56: 291–310.
- [16] Yan Meng, Masahiro Matsui, Kazuki Hibi. A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67: 437–448.
- [17] Vickery P J, Twisdale L A. Wind field and filling model for hurricane wind-speed prediction [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(11): 1700–1709.
- [18] Tryggvason B V, Surry D, Davenport G. Prediction wind-induced response in hurricane zones [J]. *Journal of the Structural Division*, 1976, 102(12): 2333–2350.
- [19] 刘军, 黄本才. 我国规范合理风剖面的建议[J]. *结构工程师*, 2000(2): 17–22.  
Liu Jun, Huang Bencai. Recommendations of rational wind profiles for code of China [J]. *Structural Engineers*, 2000(2): 17–22. (in Chinese)