

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.006

大尺度稳态强风地区考虑建筑风效应方向性的新方法*

刘敏¹, 蒋继伟², 杨庆山^{1,2}, 陈新中³, 黄帅¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044; 2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044;
3. 德州理工大学土木、水利与建设工程学院国家风工程研究中心, 美国德州拉博客 79409)

摘要: 首先,介绍了美国、新西兰和日本风荷载规范中关于方向性处理方法的优劣。其次,基于多元极值和条件概率理论,提出了一种按不同风向平均风速极值相互独立处理风荷载/效应方向性的新方法。再次,以哈尔滨、北京和济南为例,分析了我国大尺度稳态强风地区不同风向平均风速极值的相关性特征。最后,以一鞍型屋盖为例,分析了其在大尺度稳态强风地区(以哈尔滨、北京和济南为例)不同建筑朝向下风荷载/效应极值的方向性特征,阐明了美国、新西兰和日本规范中方向性处理方法的局限性,验证了新方法的有效性。研究表明:(1)我国大尺度稳态强风地区不同风向平均风速极值趋近于相互独立;(2)所提新方法可以方便、准确的考虑方向性,合理确定风荷载/效应极值;(3)建议该方法作为我国风荷载规范处理风荷载/效应极值方向性的一个方案。

关键词: 大尺度稳态强风; 风荷载/效应极值; 方向性; 风荷载规范; 新方法

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0884-08

A New Method for Considering the Directionality of Wind Effect on Structures in Synoptic-scale Strong Wind Region of China

LIU Min¹, JIANG Jiwei², YANG Qingshan^{1,2}, CHEN Xinzhong³, HUANG Shuai¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing 100044, China;
3. National Wind Institute, Department of Civil, Environmental and Construction Engineering, Texas Tech University, Lubbock TX 79409, USA)

Abstract: Firstly, the methods for dealing with directionality effect in ASCE 7-10, AS/NZS 1170.2: 2011 and AIJ-RLB-2004 were investigated and compared. Secondly, on the basis of multivariate extreme value theory and conditional probability, a new method for treating directionality effect is proposed based on the independent assumption of extreme wind speed in different directions. Thirdly, the correlation of directional extreme wind speed in different wind directions in the synoptic-scale strong wind region was discussed taking the climate of Harbin, Beijing and Jinan as examples. Finally, the directionality of wind loading or effect of a saddle-type roof in synoptic-scale wind region (e.g., Harbin, Beijing and Jinan) was studied for different structural orientations. Based on cases studies, some possible limitations in ASCE 7-10, AS/NZS 1170.2: 2011 and AIJ-RLB-2004 were clarified, and the ef-

* 收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808077; 51720105005)、“111”项目(B18062)资助

作者简介: 刘敏(1987-), 男, 讲师, 博士。主要从事结构风工程研究。Email: liu.min@cqu.edu.cn

fectiveness of the newly proposed method was validated. The research results show that : ① the directional extreme wind speed in different wind directions in synoptic-scale wind region of China tends to be mutually independent; ② the proposed method can deal with the directionality of wind loading or effect and determine their extremums for design correctly and efficiently; ③ this new method is suggested as a choice for Chinese wind loading code in dealing with directionality effectively.

Keywords: synoptic scale strong wind; extreme wind loading/effect; directionality; wind loading code; new method

引 言

结构风荷载/效应极值由平均风速极值和给定风环境条件下的风荷载/效应系数极值共同决定^[1-3]。平均风速极值和风荷载/效应系数极值均具有方向性,因此风效应极值亦具有方向性。考虑方向性建立风荷载/效应极值概率分布的理论方法主要包括随机过程穿越率法^[4-5]、基于年最大平均风速历史数据的方法^[6]、过境风暴法^[7]、分区法(sector-by-sector)^[8]和基于多元极值理论的估计方法^[9-10]。在以上这些理论方法的基础上,各国风荷载规范提出了不同的方向性处理方法。下面以较典型的美国、澳大利亚/新西兰、日本和我国风荷载规范的做法为例进行简要阐述。

美国规范 ASCE 7-10^[11]中规定对所有的建筑结构,其速压需乘以 0.85 的风向折减因子;单一风向折减因子使用方便,但可能无法全面考虑不同风环境特征、不同风效应特征和不同建筑朝向的影响^[10]。澳大利亚/新西兰规范 AS/NZS 1170.2^[12]中取所有方向中的最大风效应作为目标重现期时的风效应设计值;这种处理方法是在假定各方向风速极值全相关的前提下得到的,而实际各方向风速极值不一定全相关,所得风效应设计值将有可能偏于不保守^[8]。日本规范 AIJ RLB 2004^[13]中分别给定八个风向的设计风速,各个风向设置取值为 0.85~1 的风向折减因子对风速进行修正得到等效风速;但由于其设计风速是多个等效风速的平均值,最终得出的风荷载/效应设计值比实际值既可能偏大,也可能偏小。中国的《建筑结构荷载规范》^[14]中假定最大设计风速正好来自结构最大风效应发生的方向;然而实际情况并不一定如此,中国规范中的处理办法仅是所有可能发生情况中最不利的一种,这导致计算结果可能过于保守而使得设计不经济。现阶段各国荷载规范给出的做法具有一定的差异性,差

别的原因尚需进一步探讨。

本文首先介绍美国、新西兰和日本风荷载规范的方向性处理方法。其次基于多元极值和条件概率理论,提出了一种按不同风向向平均风速极值相互独立处理风荷载/效应方向性的新方法。再次,以北京、济南和哈尔滨为例,分析了我国大尺度稳态强风地区,即不受台风影响、主要由温带气旋和季风等主导的地区,不同风向平均风速极值的相关性特征。最后,以大跨度鞍型屋盖为例,研究了我国大尺度稳态强风地区(以北京、济南和哈尔滨为例)不同风环境下、不同建筑朝向下屋盖风荷载/效应极值的方向性特征;讨论了美国、新西兰和日本风荷载规范中关于方向性问题规定的差异,明确了产生差异的原因,验证了本文所提考虑风荷载/效应方向性新方法的有效性。

1 不同国家风荷载规范中方向性处理方法

美国、新西兰和日本荷载规范关于方向性处理的做法具有一定的代表性,现分别予以介绍。

(1)美国规范 ASCE 7-10^[11]:

对于所考虑的风效应,首先算出考虑各风向风速真实相关性情况下目标重现期对应的年最大风速,记为 V_{\max} ;然后取八个风向下平均风荷载/效应系数 C 的最大值 $C_{p\max}$,假设建筑朝向均匀分布,采用折减系数 0.85 考虑风向效应,即 $P = 0.85 \times 0.5\rho V_{\max}^2 C_{p\max}$ 得到目标设计风效应。

(2)澳大利亚/新西兰规范 AS/NZS 1170.2^[12]:

对各风向风速和对应的风荷载/效应系数计算各个风向下风荷载/效应,取所有风向中的最大风荷载/效应作为目标重现期时的设计风荷载/效应。

(3)日本规范 AIJ RLB 2004^[13]:

①计算目标重现期对应的考虑方向性时的真

实风效应。

②以此真实风效应为目标算出各方向风速的等效重现期。

③取各方向等效重现期最小值作为风速的最终等效重现期。

④以最终等效重现期为目标,算出各风向的风速即为等效风速。

⑤选择多个目标风效应重复步骤①~④,算得多组各个风向下的等效风速;在每个风向取多组等效风速的均值即为各风向的设计风速列入规范。

⑥设计时利用各风向设计风速算得各风向下的风荷载/效应,取其中的最大值作为设计风荷载/效应。

由上可得,美国规范关于风向的考虑最为简便(采用单一折减系数),新西兰规范考虑了不同的风环境特性(取各个风向下的最大值作为设计值),日本规范利用了风速对重现期不敏感的特性处理方法最为全面(考虑了不同风环境、不同风荷载/效应和不同建筑朝向的特点)。

2 考虑风荷载/效应极值方向性的新方法

接下来基于 X. Zhang 等^[10]给出的考虑风荷载/效应方向性的多元极值理论框架,提出一种处理方向性的新方法。

2.1 基于多元极值理论的方向性建模

2.1.1 单一风向极值风速的边缘分布

对于一个随机变量,不论其母体分布如何,其极值分布服从广义极值分布,表达式为:

$$\Psi(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \epsilon \left(\frac{x-m}{\delta} \right) \right]^{-1/\epsilon} \right\} \quad (1)$$

式中, m 为位置参数; δ 为尺度参数; ϵ 为形状参数。

此处 ϵ 的取值决定了 $\Psi(x)$ 的具体分布形式。当 $\epsilon > 0$ 时, $\Psi(x)$ 为极值 II 型分布(Frechet 分布);当 $\epsilon < 0$ 时, $\Psi(x)$ 为极值 III 型分布(Weibull 分布);当 $\epsilon = 0$ 时, $\Psi(x)$ 为极值 I 型分布(Gumbel 分布)。

目前广泛应用于极值风速估计的函数模型是极值 I 型分布模型,其分布函数公式为:

$$\Psi(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x-m}{\delta} \right) \right] \quad (2)$$

极值 I 型分布的均值和标准差分别为 $m + \gamma\delta$ 、 $\delta\pi/\sqrt{6}$, $\gamma = 0.5772$ 为欧拉常数。

2.1.2 不同风向下极值风速的联合概率分布

已知各个风向极值风速的边缘分布函数信息,利用 copula 函数将各边缘分布函数之间建立联系,可以得到所有风向下极值风速的联合概率分布函数。假定多元随机变量 V_1, V_2, \dots, V_n 的联合分布函数为 $H(v_1, v_2, \dots, v_n)$, 各变量的边缘分布函数分别为 $\Psi_{V_1}(v_1), \Psi_{V_2}(v_2), \dots, \Psi_{V_n}(v_n)$ 。根据分布函数的映射关系即 $u_i = \Psi_{V_i}(v_i)$, 可以将多元随机变量 V_1, V_2, \dots, V_n 转换为 $[0, 1]$ 上的均匀分布的随机变量 U_1, U_2, \dots, U_n 。当边缘分布函数连续时,总会存在唯一的 n 维 copula 函数 $C_{\text{copula}}(u_1, u_2, \dots, u_n)$, 可以将各标准边缘分布与其联合分布联系起来,表示为:^[15]

$$H(v_1, v_2, \dots, v_n) = C_{\text{copula}}(\Psi_{V_1}(v_1), \Psi_{V_2}(v_2), \dots, \Psi_{V_n}(v_n)) = C_{\text{copula}}(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (3)$$

因此,当已知各变量的边缘分布函数信息时,其联合分布函数就仅仅由 copula 函数确定。

本文采用 Gaussian copula, 其特点是利用具有对称正定协方差阵的多元联合分布建立联系。该函数被定义为:

$$C_{\text{copula}}(u_1, u_2, \dots, u_n) = G_n(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (4)$$

式中, $y_i = \Phi^{-1}(u_i) = \Phi^{-1}(\Psi_{V_i}(v_i)) = g_i(v_i)$ 。 y_i 为标准高斯变量; g_i 是变量 V_i 的转换函数; Φ 为标准高斯变量的分布函数; G_n 为 n 维高斯分布的分布函数, 其各变量均值为 0, 协方差矩阵 Σ 为 $\sum_{ii} = 1$, $\sum_{ij} = \sum_{ji} = \rho_{ij}$ 。 ρ_{ij} 为变量 Y_i 和 Y_j 的相关系数, 即 $\rho_{ij} = E(Y_i \cdot Y_j)$ 。 变量 V_i 和 V_j 间的相关系数为 $\zeta_{ij} = [E(V_i \cdot V_j) - \mu_{V_i} \cdot \mu_{V_j}] / (\sigma_{V_i} \cdot \sigma_{V_j})$ 。 ζ_{ij} 与 ρ_{ij} 的关系为:

$$\sigma_{V_i} \sigma_{V_j} \zeta_{ij} + \mu_{V_i} \mu_{V_j} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_i^{-1}(y_i) g_j^{-1}(y_j) \phi(y_i, y_j; \rho_{ij}) dy_i dy_j \quad (5)$$

式中, $\phi(y_i, y_j; \rho_{ij})$ 为相关系数为 ρ_{ij} 的双变量高斯分布联合概率密度函数; μ_{V_i} 和 σ_{V_i} 分别为变量 V_i 的均值和标准差。

当 $\Psi_{V_i}(v_i)$ 为极值 I 型分布时, 转换函数为 $v_i =$

$$g_i^{-1}(y_i) = \mu_{V_i} + \sigma_{V_i} \frac{\sqrt{6}}{\pi} (-\ln \{-\ln [\Phi(y_i)]\} - \gamma)$$

当各风向极值风速完全相关时, 其联合分布函数可表示为:

$$\Psi_{V,\text{ind}}(v) = H(v, v, \dots, v) = \Pr(V_1 \leq v, V_2 \leq v, \dots, V_n \leq v) = \min\{\Psi_{V_1}(v), \Psi_{V_2}(v), \dots, \Psi_{V_n}(v)\} \quad (6)$$

当各变量完全独立时,各变量为独立同分布,则其联合概率分布可表示为 $\Psi_{V,\text{ind}}(v) = \prod_{i=1}^n \Psi_{V_i}(v)$ 。

2.1.3 考虑方向性的风荷载/效应极值概率分布

当确定了多个风向向下极值风速的联合概率分布后,可以进一步得到风荷载/效应极值的概率分布。 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 风向下的风荷载/效应极值可表示为:

$$X_i = \frac{1}{2} \rho V_i^2 C_i \quad (7)$$

式中, V_i 为 i 风向的平均风速极值; C_i 为该风向对应的风荷载/效应系数极值; ρ 为空气密度。

当风荷载/效应系数极值 C_i 被视为确定值时(如果风工程中常用的 57% 或者 78% 分位数对应的极值),各风向风荷载/效应极值的联合分布函数可由极值风速的联合分布函数确定,即 $\Psi_X(x) = H(v_{X1}, v_{X2}, \dots, v_{Xn})$ 。这里, $v_{X_i}(i=1, 2, \dots, n)$ 为 i 风向的风速 $v_{X_i} = \sqrt{2x/\rho C_i}$ 。

2.2 一种风荷载/效应极值方向性处理的新方法

利用 Sector-by-Sector 法进行风荷载/效应方向性问题研究时,不难发现风荷载/效应真实值与考虑各风向完全独立和完全相关情况下的风荷载/效应存在如下关系:各风向全相关时的风荷载/效应 < 风荷载/效应真实值 < 各风向完全独立时的荷载/风效应^[8]。各方向风速相关性越弱,风荷载/效应真实值就越接近各风向相互独立情况下的风荷载/效应。经过对我国大尺度稳态强风地区的风环境分析,发现此时各方向风速相关性很弱,趋近于相互独立(当风速极值相关系数小于 0.8 时趋近于相互独立^[16])。具体的我国大尺度稳态强风风速极值相关性分析见第 3 节。因此,我们建议采用各风向风荷载/效应相互独立的情况来考虑方向性问题,具体做法如下:

(1) 确定当地各风向极值风速的均值和标准差,计算出各风向向下极值风速所服从的 Gumbel 分布的位置参数和尺度参数,进而确定极值风速的边缘分布函数。

(2) 在已知所研究结构各风向的风荷载/效应系数 C_p 的情况下,利用公式 $P = 0.5\rho V^2 C_p$, 确定各

风向风效应的分布函数。

(3) 确定考虑各风向相互独立情况下的风荷载/效应分布函数,最终得到任意重现期下的设计风荷载/效应。

3 大尺度稳态强风地区不同风向平均风速极值相关性分析

本文所采用的风速数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料日值数据集。本文分析了北京、哈尔滨和济南平均风速极值相关性,下面以北京为例给出分析结果,哈尔滨及济南分析结果见参考文献[17]。

中国地面气候资料日值数据集可以得到北京市从 1951 年 1 月 1 日以来的日最大风速及其对应风向。原始数据的风速测点离地 10 m 高度,日最大风速取一天内 10 min 平均风速的最大值,并将风向划分成了 16 个分区。原始风速数据需要进行预处理才能进行相关性分析。首先是原始风速数据缺测问题:在原始数据中,出于某种原因某日最大风速及其对应风向未被记录,此时,本文采用前一天的相应风速数据代替。其次,要解决风向分区问题;本文采用规范中常用的八风向分区,即对原始数据中采用的 16 风向自正北方向起逆时针两两合并,最终得到 8 个风向。原始数据中提供的信息仅是日最大风速及其所在风向,而忽略了当日其余方向的风速——即所谓的“遮蔽问题”。当得到 8 个风向的年最大风速信息后也可能存在“遮蔽问题”,使得某个风向的某年最大风速记录值为 0。这里我们采用如下处理方法:若 β 方向的年最大风速 v_β 为已知,需要求得 α 方向的年最大风速 v_α ,如果此时风向角满足 $|\alpha - \beta| < 90^\circ$,那么 $v_\alpha = v_\beta \cos(\alpha - \beta)$ ^[8]。

经过上述数据处理后可以得到 8 个风向向下 1951 年至 2017 年 67 年的年最大风速,并求得其对应的经验分布函数值。每个风向的年最大风速均服从 Gumbel 分布。根据 $F_V(v_i) = (i - 0.44)/(M + 0.12)$ 计算其相应值^[18],此处 i 表示将各风向年最大风速按升序排列后的所在序号, M 表示各风向年最大风速的总数。图 1 中给出了北京地区 N 和 NE 风向下年最大风速的边缘分布。利用各边缘分布函数可以分别得到各风向向下不同重现期时的年最大风速信息,如图 2(a) 所示。图 2(b) 给出了各风向向下年最大风速的变异系数。由图 2(a) 可得 N 向风速

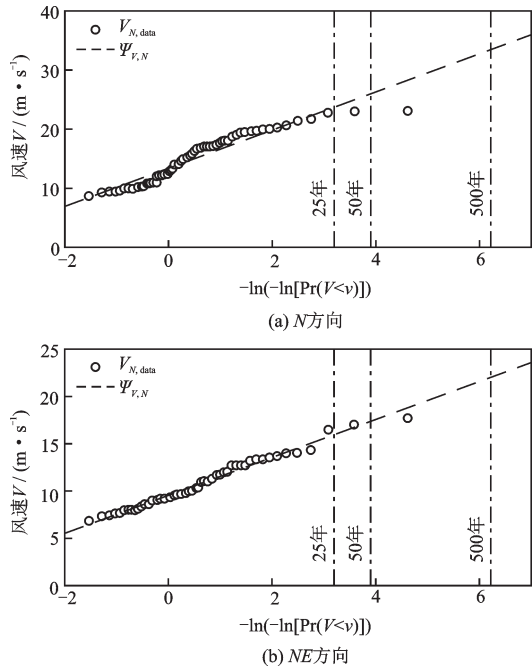


图1 N和NE风向极值风速的边缘分布

Fig.1 Marginal distribution of extreme wind speeds in the N and NE wind directions

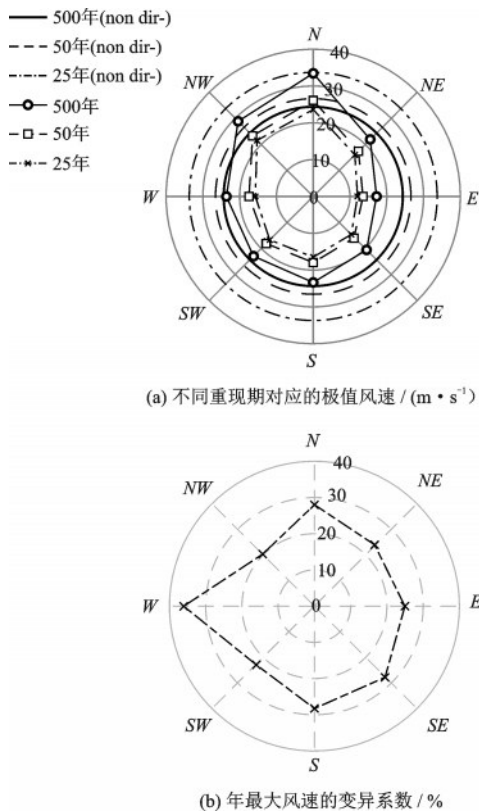


图2 各风向下不同重现期时的极值风速及变异系数

Fig.2 Directional extreme wind speeds with different MRIs and the COV in each direction

最大,25年、50年和100年重现期对应风速分别为23.64、25.91、33.39 m/s;图2(b)可知W向风速变异

性最大,可达36%。

利用年最大风速信息可以算得各风向年最大风速间的相关系数矩阵,结果见表1。根据 $\rho_{ij} = \zeta_{ij}(1.064 - 0.069\zeta_{ij} + 0.005\zeta_{ij}^2)^{[19]}$,可以得到极值风速对应的高斯变量间的相关系数矩阵;此时 ζ_{ij} 为*i,j*风向极值风速的协方差, ρ_{ij} 为极值风速对应的高斯变量的协方差。由表1可得,相邻风向间的年最大风速具有一定的相关性;有些风向间的相关性较强,比如正北和西北方向;而有些风向间的相关性很弱,比如正北和正东方向。图3分别给出了正北和西北风向、正北和正东风向年最大风速相关性。

表1 各风向极值风速的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of extreme wind speed in each direction

ζ_{ij}	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
N	1.00							
NE	0.50	1.00						
E	0.09	0.13	1.00					
SE	0.52	0.37	0.38	1.00				
S	0.63	0.25	0.01	0.23	1.00			
SW	0.57	0.27	0.08	0.41	0.52	1.00		
W	0.13	0.15	0.19	0.18	0.02	0.18	1.00	
NW	0.78	0.28	0.09	0.40	0.64	0.34	0.05	1.00

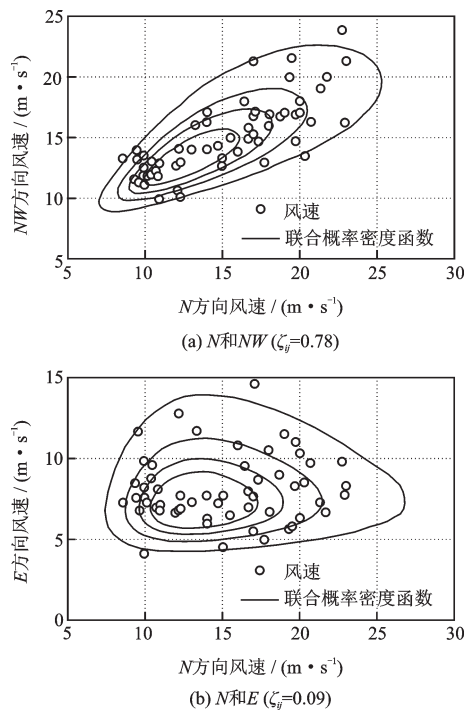


图3 不同风向间极值风速的相关性特征

Fig.3 The correlation characteristics of extreme wind speeds in different wind directions

在确定极值风速的边缘分布后,利用 Gaussian copula 可以得到极值风速的联合分布函数,如图 4 中的 Ψ_V 。通过 Ψ_V 可以确定重现期分别为 25 年、50 年和 500 年时的年最大风速,分别为 24.30、26.49、33.72 m/s,其结果如图 2(a)所示。图 4 中还给出了考虑各风向下极值风速在完全独立和全相关情况下的联合分布函数,分别记为 $\Psi_{V, ind}$ 、 $\Psi_{V, fullcorr}$ 。从图中可以发现,曲线 Ψ_V 在曲线 $\Psi_{V, ind}$ 与 $\Psi_{V, fullcorr}$ 之间,且当各风向极值风速相关性越强时,曲线 Ψ_V 越靠近 $\Psi_{V, fullcorr}$,反之则越靠近 $\Psi_{V, ind}$ 。另外,图 4 中还给出了直接采用全风向极值风速数据的经验分布函数,记为 $\Psi_{n, data}$,其拟合曲线记为 $\Psi_{V, non}$ 。此时 $\Psi_{V, non}$ 和 Ψ_V 在重现期较大时两者有一定的偏差,这主要是由于数据量较少造成的^[10]。

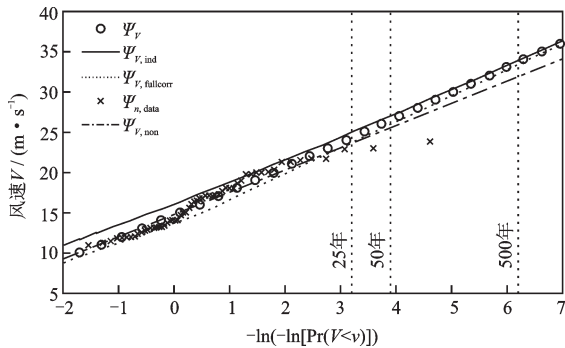
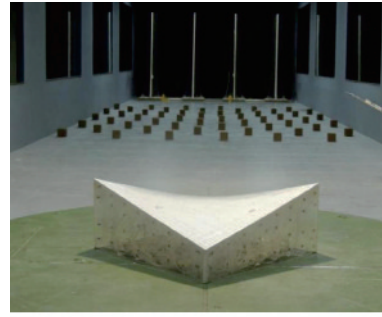


图 4 极值风速的联合概率分布

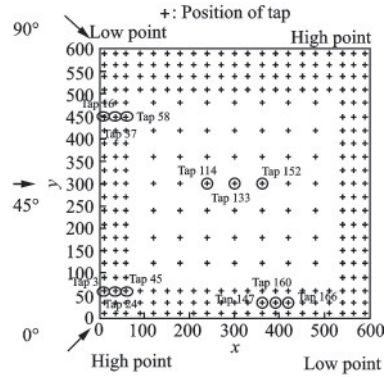
Fig.4 Joint probability distribution of extreme wind speeds in all directions

4 考虑风荷载/效应极值方向性的新方法的验证

本文以鞍型屋盖围护结构风荷载/效应为研究对象进行方向性研究。鞍型屋盖风洞测压试验在北京交通大学风洞实验室大气边界层风洞中进行,屋盖风洞测压模型及屋盖表面测点布置情况如图 5 所示。鞍型屋盖该模型几何尺寸为 60 cm×60 cm×10 cm(长×宽×最低点高),缩尺比例为 1:100。矢跨比为 1/12,屋盖低点高度为 10 cm,高点高度为 $10(1 + \sqrt{2})$ cm。试验中分别采集了 0°、45°及 90°风向角下屋盖模型的风压系数时程。风洞试验风速为 12 m/s,风速缩尺比为 1:2,时间缩尺比为 1:50。风洞中采样时长为 12 s 对应实际时间为 10 min。试验采样频率为 312.5 Hz。本次风洞试验的总采样时长为 270×12 s,模型每个测点共有



(a) 鞍形屋盖实验模型



(b) 测点平面布置

图 5 鞍型屋盖风洞试验模型

Fig.5 Wind tunnel test model of a saddle roof

312.5×12×270 个数据。

4.1 考虑风荷载极值方向性的新方法的验证

本文分别在屋盖边缘、角部以及中部选取具有代表性的十二个测点进行研究,测点位置及编号如图 5(b)所示。图 5(b)所示的 135°攻角与北风重合定义为 0°建筑朝向,建筑依次绕屋盖中心顺时针旋转 45°,共旋转 7 次,构成八个建筑朝向。

根据第 2.1 节的多元极值模型可求得各测点在八个建筑朝向情况下考虑方向性的真实极值风压概率分布函数。下面以各测点重现期为 50 年和 500 年时的极值风压为例,讨论美国、新西兰和日本抗风设计规范中关于方向性问题规定的差异性,具体结果如图 6 所示。图 6 中的误差百分比定义为(规范做法计算风荷载-真实风荷载)/真实风荷载。各测点真实风向折减因子可能比 0.85 大,也可能比 0.85 小,因此图 6(a)中美国规范得到的设计风荷载可能比真实风荷载偏大,也可能偏小。新西兰规范在考虑全相关的情况下得到的,因此所得设计风荷载大部分情况下比实际偏小(图 6(b))。日本规范中的设计风速取的是各测点等效风速的均值,因此所得设计风荷载与真实风荷载相比可能偏大,也可

能偏小(图6(c)),但整体上日本规范的做法比真实值偏差最小。

根据第2.2节内容,再次以鞍型屋盖围护结构风荷载为研究对象,采用我国具有大尺度稳态强风特征的不同城市风环境信息,来验证本文所提新方法有效性。限于篇幅,这里仅列举了风环境为北京时,屋盖在八个建筑朝向下(每隔45°为一个建筑朝向),重现期分别为50年和500年时风荷载极值误差结果,如图7所示。此时图7中比值定义为:真实风荷载/新方法计算风荷载。出于篇幅原因,本文仅列出了角部、边缘和中部部分测点结果。通过分析可以得出如下结论:

(1) 比值基本为0.90~1,说明考虑相互独立时的设计荷载比实际值是偏于保守的,且新方法计算的风压总体比较接近真实风压。

(2) 对于不同测点,在每个建筑朝向下比值基本满足500年时的值大于50年时的值。说明在

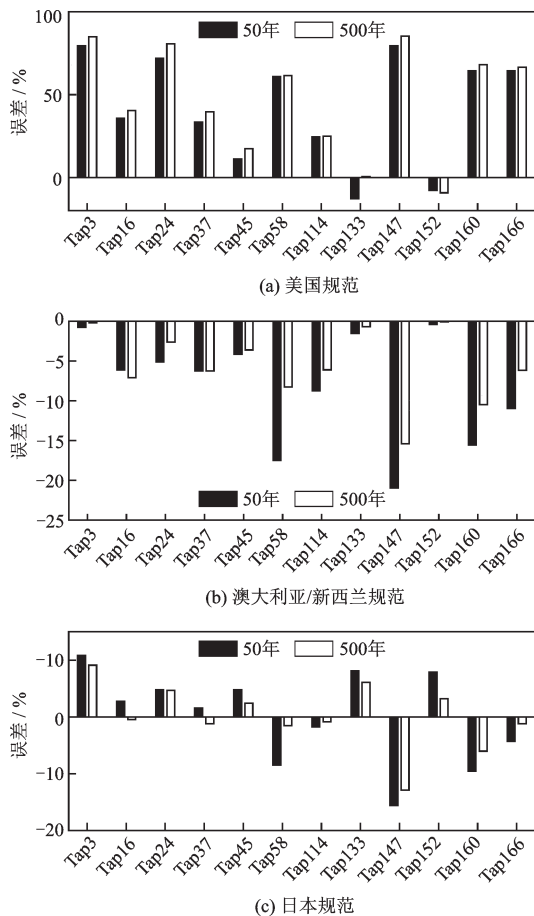


图6 各测点在0°建筑朝向下风效应方向性误差统计
Fig.6 Directional error statistics of wind effect for zero degree building orientation at each measuring point

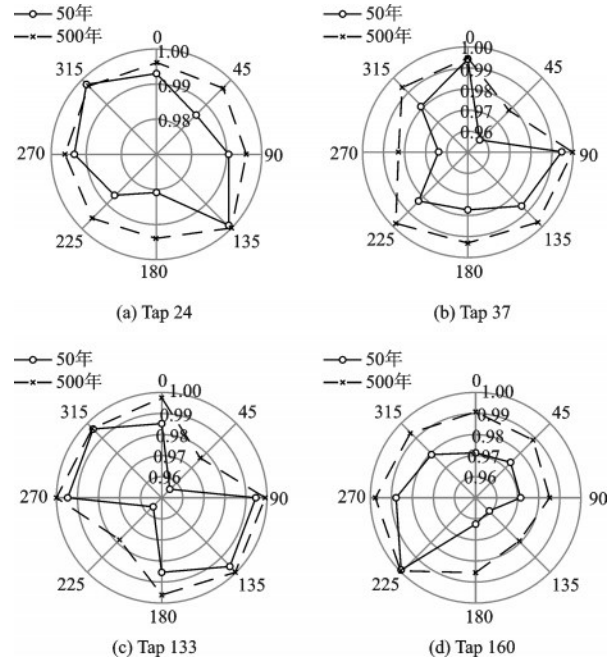


图7 考虑方向新方法应用于计算北京风环境下鞍型屋盖极值风压与真实值的比值

Fig.7 Ratio of extreme wind pressure on a saddle roof in Beijing climate obtained by the proposed method and the real values

随着重现期的增大,各风向风速极值趋近于相互独立,即所提新方法在高重现期精度更高。

4.2 考虑风效应极值方向性的新方法的验证

进一步以鞍型屋盖主体结构风效应——节点位移与单元应力为研究对象验证美国、新西兰和日本规范的差异性,验证本文所提新方法的有效性。结构模型选择正交斜放网格形式同时合理划分网格尺寸,确保杆件长度控制在2~4 m。本文中模型每边网格数取为15个,则杆件长度约为2.91 m。参照《空间网格结构技术规程》^[20]的相关要求,模型中节点形式为刚接,杆单元形式为梁单元。屋檐的约束形式为铰接支座约束。杆件的截面规格取为180 mm×12 mm的圆管,材料为Q235型。采用ANSYS软件建立有限元分析模型进行风荷载作用下的时程分析,模型其他信息详见参文[17]。图8给出了风荷载作用下竖向节点位移系数极值云图。本文研究了北京、济南和哈尔滨气候条件下的风效应风向处理结果,其规律与风荷载风向处理结果类似,出于篇幅考虑本文未给出具体内容,具体内容详见参文[17]。

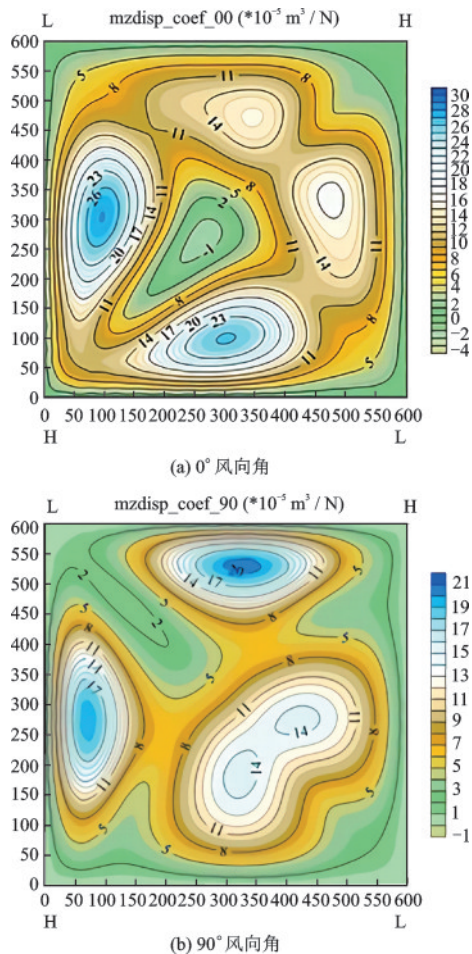


图8 风荷载作用下竖向节点位移系数极值云图

Fig.8 Contour of extreme vertical displacement coefficient of nodes induced by wind

5 结 语

通过对大尺度稳态强风地区风荷载作用下的鞍型屋盖极值风荷载/效应方向性问题研究,综合分析了美国规范 ASCE 7-10、澳大利亚/新西兰规范 AS/NZS 1170.2 和日本规范 AIJ RLB 2004 中关于方向性问题规定的差异;提出了考虑各风向风速极值相互独立来考虑荷载/效应方向性问题的改进方法。研究了我国大尺度稳态强风地区各风向风速极值的相关性特征,结果表明各风向极值风速趋近于相互独立。通过鞍型屋盖风荷载和风效应验证了新方法的有效性,且按新方法考虑得到的风荷载/效应值总是比风荷载/效应真实值偏大,从而保证了设计结果偏于安全。综上,建议将本文所提新方法作为我国大尺度稳态强风地区风荷载/效应方向性问题处理的一种选择方案。

参考文献:

- [1] Cook N J, Mayne J R. A novel working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design [J]. Journal of Industrial Aerodynamics, 1979, 4(2): 149-164.
- [2] Harris R I. An improved method for the prediction of extreme values of wind effects on simple buildings and structures[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1982, 9(3):343-379.
- [3] Chen X, Huang G. Estimation of probabilistic extreme wind load effects: combination of aerodynamic and wind climate data [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 136(6): 747-760.
- [4] Davenport A G. The prediction of risk under wind loading [C]//Proceedings of the second International Conference on Structural Safety and Reliability, Munich: Technische U, 1977:511-531.
- [5] Zhang X, Chen X. Refined process upcrossing rate approach for estimating probabilistic wind load effects with consideration of directionality [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 143(1): 04016148.
- [6] Simiu E, Filliben J J. Wind direction effects on cladding and structural loads [J]. Engineering Structures, 1981, 3(3): 181-186.
- [7] Isyumov N, Mikitiuk M, Case P C, et al. Predictions of wind loads and responses from simulated tropical storm passages [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Wind Engineering, Lubbock: Texas Tech University Press, 2003:254-260.
- [8] Simiu E, Filliben J J. Wind tunnel testing and the sector-by-sector approach to wind directionality effects [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(7): 1143-1145.
- [9] Warsido W P, Bitsuamlak G T. Synthesis of wind tunnel and climatological data for estimating design wind effects: a copula based approach [J]. Structural Safety, 2015, 57: 8-17.
- [10] Zhang X, Chen X. Assessing probabilistic wind load effects via a multivariate extreme wind speed model: a unified framework to consider directionality and uncertainty [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 30-42.
- [11] Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI7-10[S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2004.

(本文责编:池营营)

(下转第 935 页)