第 39 卷　第 2 期
2022 年 3 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 39　No. 2
Mar. 2022

引用本文:李寿英,曹镜韬,李寿科. 考虑风速风向联合分布的双坡屋面风致疲劳研究[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(2):1-10.
LI Shou-ying,CAO Jing-tao,LI Shou-ke. Study on Wind-induced Fatigue of Double-slope Roof Panels Considering Joint Distribution of Wind Speed and Direction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(2):1-10.

DOI:10.19815/j.jace.2021.02027

考虑风速风向联合分布的双坡屋面风致疲劳研究

李寿英[1],曹镜韬[1],李寿科[2]

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室,湖南 长沙　410082;
2. 湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭　411201)

摘要:为研究风荷载作用下大跨度低矮建筑金属屋面板的疲劳损伤分布规律,以坡度为 1/60 的双坡屋面建筑为研究对象,基于 1975～2019 年间的风速风向数据,研究了双坡屋面板 50 年重现期的疲劳损伤累积值。采用 Gumbel 分布描述日极值风速分布,混合 Von Mises 分布描述风向分布,并用单参数 Archimedean Copula 函数描述二者的相关性,得到了风速风向的联合分布;基于双坡屋面的测压风洞试验结果,考虑连续变化风速和离散风向角对疲劳寿命的影响,研究了金属屋面板的疲劳损伤累积值。结果表明:双坡屋面板疲劳损伤与主导风向、屋面位置等因素密切相关,位于主导风向处的迎风屋檐、边角等气流分离位置的疲劳损伤累积值远大于其他区域;良态风环境下,该双坡屋面金属屋面板 50 年风致疲劳损伤累积值最大可达 0.746,风荷载可引起迎风屋檐、边角位置金属屋面板的疲劳破坏;对于金属屋面板而言,风致疲劳破坏是引发风揭事故的巨大隐患,应高度重视。

关键词:风致疲劳;风速风向联合分布;概率统计;金属屋面板;极值分布;角变量

中图分类号:TU312　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-2049(2022)02-0001-10

Study on Wind-induced Fatigue of Double-slope Roof Panels Considering Joint Distribution of Wind Speed and Direction

LI Shou-ying[1], CAO Jing-tao[1], LI Shou-ke[2]

(1. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: In order to study the fatigue damage distribution law of metal roofs used in long span and low buildings under wind loads, taking the double-slope roof building with a slope of 1/60 as the research object, based on the wind speed and direction data from 1975 to 2019, the fatigue damage cumulative value of the double-slope roof panel with a return period of 50 years was studied. The Gumbel distribution and the mixed Von Mises distribution were used to describe the daily extreme wind speed distribution and the wind direction distribution separately. The single-parameter Archimedean Copula function was used to describe the correlation between wind speed and wind direction, and the joint distribution of wind speed and direction was obtained. Based on

收稿日期:2021-02-11
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703600,2017YFC0703604)
作者简介:李寿英(1977-),男,江西萍乡人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:shyli@hnu.edu.cn。

the wind tunnel test results of the double-slope roof, the cumulative value of fatigue damage of the metal roof panel was studied considering the influence of continuously changing wind speed and discrete wind direction angle on the fatigue life. The results show that the fatigue damage of double-slope roof panels is closely related to factors such as the dominant wind direction and roof position. The cumulative fatigue damage in windward eaves, corners and other airflow separation locations at the dominant wind direction is much larger than that of other areas. The maximum cumulative value of 50 years wind-induced fatigue damage for the double-slope roof is 0.746 under, and wind load can cause fatigue failure of metal roof panels in windward eaves and corners. For metal roof panels, wind-induced fatigue damage is a huge hidden danger causing wind exposure accidents, which should be paid great attention to.

Key words: wind-induced fatigue; joint distribution of wind speed and direction; probability statistics; metal roof panel; extreme value distribution; angular variable

0 引 言

金属屋面板造型美观、制作方便,广泛应用于各种工业、商业、民用建筑。近年来,中国沿海地区频频出现大跨度屋面风毁案例[1],屋面系统作为围护结构,对风荷载尤其敏感,且表现出极大的不确定性。

疲劳效应往往在风致破坏中起主导作用,金属屋面疲劳损伤的累积会降低其本身的抗风承载力,加速破坏进程[1]。国际现行的金属屋面抗风揭性能检测标准较多,金属屋面静力性能的研究方法相对成熟,但针对屋面板的动态检测标准能否反映真实风荷载的作用仍存在质疑[2-4],存在多数通过了动态性能检测的屋面板仍发生破坏的现象。Xu[5]从构件层面出发,利用跨中加载法完成了自攻螺钉固定的双跨金属屋面板的静力性能和疲劳性能研究,得到了金属屋面板的静力承载力和疲劳寿命曲线。在此基础上,Kumar 等[6-7]提出了考虑长期风环境影响的金属屋面风致疲劳的基本计算流程,以位于平板屋面屋角位置的屋面板为例,在不考虑风向变化时,结合风速统计信息计算了作用在该区域的荷载循环矩阵,利用试验得到的屋面板疲劳寿命曲线估计疲劳损伤。Jancauskas 等[8]以台风 Winifred 的基本参数为计算依据,结合平板屋面的风洞测压试验,计算了一次强台风过境期间屋面板屋角区域的风致疲劳损伤累积值,总结了金属屋面风致疲劳损伤在台风过境期间的累积规律。Xu[9-10]结合 TTU 模型角部分离区测点的测压结果比较了良态风、台风主控地区建筑结构在设计使用期内的疲劳损伤,基于计算结果评估了澳大利亚 TR440 低-高-低测试加载序列。已有研究在计算风致疲劳时均忽略了风向的变化,仅考虑最不利风向对屋面进行单点评估,存在一定的局限性。中国学者多数致力于屋面板的静力抗风承载力研究,用于指导实际工程建设,针对屋面板疲劳性能的研究较少[11-14]。

中国多数动态抗风揭检测方法直接参考国外相关标准,如《采光顶与金属屋面技术规程》参考美国 UL 580 标准。中国气候条件和金属屋面板样式和国外有较大差异,直接借鉴国外标准有很大的不确定性。合理评估屋面系统的疲劳损伤对制定屋面系统动态性能检测标准具有重要意义。为研究长期风荷载作用下大跨度低矮建筑金属屋面板的疲劳损伤分布规律,本文以位于厦门地区的双坡屋面为例,考虑风向变化,基于风洞试验测压结果和风速风向的实测信息,通过简化循环荷载矩阵计算,提出考虑连续变化风速和离散风向角的风致疲劳计算公式,进行良态风环境下双坡屋面 50 年内的风致疲劳损伤整体评估。

1 疲劳分析方法

1.1 计算方法

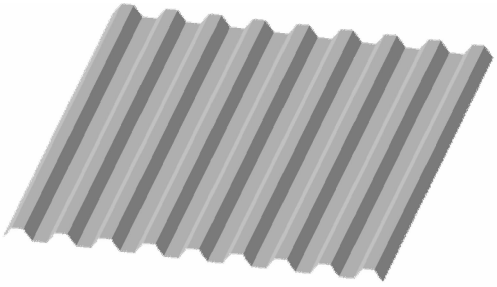
目前,计算随机荷载疲劳损伤的方法分为时域和频域 2 类计算方法。频域方法简单快捷,但是计算精度低于时域方法。时域计算主要包括循环计数和疲劳损伤线性累积计算 2 个部分。循环计数法中,雨流计数法可较真实地反映随机加载的全过程,因计算精度高被广泛应用。MATLAB 平台提供的 RainFlow 函数参考美国 ASTM E1049-85 标准提供的雨流计数流程编写。雨流计数法得到的统计结果可通过式(1)计算随机荷载引起的疲劳损伤 D_F,并可利用 Goodman 方程考虑荷载均值的影响[5]。

$$D_{\mathrm{F}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

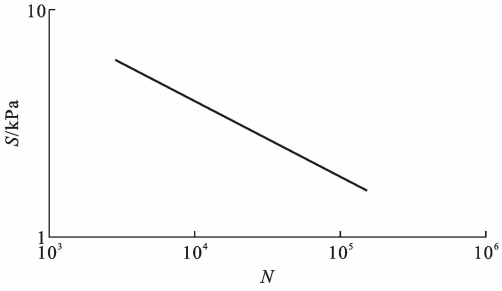
式中：N 为荷载循环总次数；n_i 为荷载幅值为 S_i 时的荷载循环次数；N_i 为荷载幅值为 S_i 时材料或结构的疲劳寿命。

1.2　金属屋面板的选取

金属屋面板疲劳破坏形式与屋面板样式、加固措施、施工质量等因素有关。目前中国对于金属屋面板疲劳性能研究相对较少，相关检测规范多数参考国外已有检测标准。考虑到图 1(a)所示的澳大利亚常用的金属屋面板在外形、尺寸、固定方式上与中国常用的自攻螺钉固定金属屋面板相似，本文基于文献[5]的试验结果进行屋面板疲劳分析。Xu[5]以双跨屋面板为研究对象进行疲劳试验，得到了屋面板的疲劳寿命曲线，且根据自攻螺钉固定金属屋面板的受力特点，Xu[5]和 Kumar 等[6-7]提出可直接应用屋面板的疲劳寿命曲线进行风致疲劳分析。屋面板单板宽 760 mm，厚 0.43 mm，波峰高度 29 mm，跨长 1.0 m。该金属屋面板的静力承载极限强度 S 为 7.6 kPa，疲劳性能曲线如图 1(b)所示。该金属屋面板的疲劳破坏形式主要表现为自攻螺钉固定位置屋面板的撕裂破坏或螺钉的拔出破坏[5]。



(a)　金属屋面板基本轮廓



(b)　疲劳性能曲线

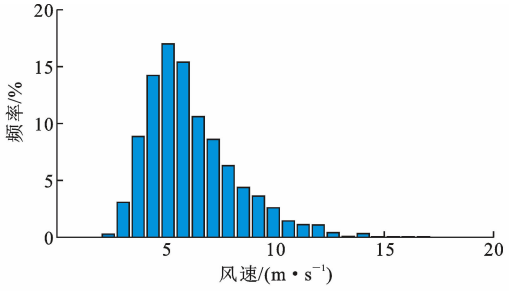
图 1　澳大利亚梯形截面金属屋面板

Fig. 1　Australia Trapezoidal Section Metal Roof Panel

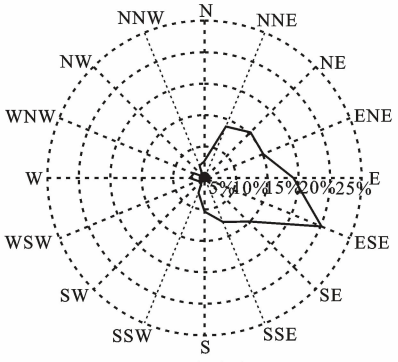
2　极值风速风向联合分布

2.1　数据来源和分析

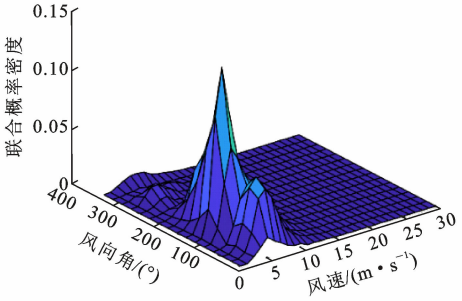
本文选取厦门市 1975 年 1 月 1 日～2019 年 12 月 30 日期间记录的日最大风速和相应风向作为样本数据，数据来源于中国气象数据网，总计 16 437 组，样本数据统计到的最大日极值风速(每日最大 10 min 平均风速)为 36.4 m·s^{-1}。由于数据基数较大，高风速比例较小，风速统计结果仅反映良态风出现的概率。图 2(a)和图 2(b)分别为由实测数据得到的风速频率分布直方图和风向玫瑰图，图 2(c)为实测风速风向联合概率密度，可以看出：日最大平均风速主要集中在 3～15 m·s^{-1}，风向以东南风为主，统计结果与实际情况相符。



(a)　风速频率分布直方图



(b)　风向玫瑰图



(c)　实测风速风向联合概率密度

图 2　厦门市实测风速风向信息

Fig. 2　Measured Wind Speed and Direction Information in Xiamen

2.2　极值风速分布

极值风速分布的估计主要包括选取风速样本、建立分布模型、参数估计 3 个方面，其中常用的极值分布模型有 Gumbel 分布、Frechet 分布、Weibull 分布、对数正态分布等，通常采用最小二乘算法、极大

似然估计进行参数估计。计算建筑结构风致疲劳损伤的理想统计数据是 10 min 平均风速和对应风向，但对于风振疲劳寿命期为几十年的建筑结构，王钦华等[15]提出采用月极值风速作为统计样本计算风致疲劳损伤是合理的。考虑到数据来源，采用月极值风速会高估强风天气的出现概率，因此选择日极值风速作为样本数据。

采用 Gumbel、Lognormal、Weibull 三种分布模型拟合厦门地区日极值风速，采用最小二乘算法估计分布参数，拟合结果如图 3 所示，其中 R^2 为判定系数。由图 3 可知：对全风向日极值风速而言，Gumbel 和 Lognormal 分布拟合精度较高，Gumbel 分布略优于 Lognormal 分布，Weibull 分布的尾部长度属于有限有界型，这与风速有限无界特性的特点不符[16]。因此，选取 Gumbel 分布作为厦门市日极值风速的概率模型。

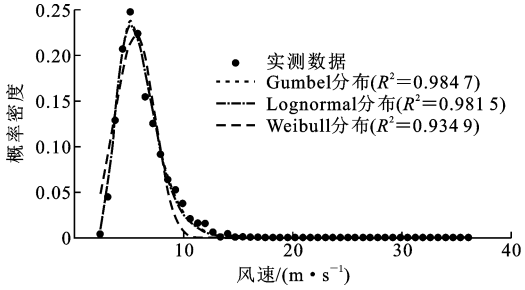


图 3 风速概率密度函数拟合结果

Fig. 3 Wind Speed Probability Density Function Fitting Result

2.3 风向分布

中国气象站风向记录采用 16 方位，风洞测压试验往往间隔 5°或 10°。为方便利用测压结果和风向统计信息进行风致疲劳计算，采用 Johnson 等[17]建议的基于离散角变量的连续概率密度结构模型，避免风向角统计的不连续性问题。用于风向拟合的常用角变量分布包括谐波函数、Von Mises 分布。

采用谐波函数拟合风向概率密度函数 $f(\theta)$[式(2)]形式较为复杂，函数阶次对拟合精度影响较大。采用三角函数族逼近离散数据点的问题存在惟一解，解的形式如式(3)所示。采用 4～7 阶谐波函数拟合风向概率密度函数的拟合结果如表 1 所示。

$$f(\theta) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i\cos(i\theta - \gamma_i) \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned}
\alpha_0 &= \frac{1}{N'}\sum_{k=1}^{N'} f(\theta_k)\\
\beta_i &= \sqrt{\left[\frac{2}{N'}\sum_{k=1}^{N'} f(\theta_k)\cos(i\theta_k)\right]^2 + \left[\frac{2}{N'}\sum_{k=1}^{N'} f(\theta_k)\sin(i\theta_k)\right]^2}\\
\gamma_i &= \arctan\left[\sum_{k=1}^{N'} f(\theta_k)\sin(i\theta_k) \Big/ \sum_{k=1}^{N'} f(\theta_k)\cos(i\theta_k)\right]
\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：α_0、β_i、γ_i 均为谐波函数的待定参数；n 为谐波函数阶次；$\theta_{k'}$、$f(\theta_{k'})$分别为已知风向角及其出现的概率；N' 为风向区间个数，$N'=16$；θ 为离散风向角。

由表 1 可以看出：采用 4 阶谐波函数的拟合精度较低，5 阶谐波函数拟合精度达 0.951，继续增加谐波函数阶次到第 6 阶，拟合精度的提高效果并不明显。由于数据点个数有限，谐波函数拟合最高阶次理论上只能达到 7 阶，7 阶谐波函数拟合精度为 0.990。

Von Mises 分布又被称为圆周正态分布，常用于描述方向数据，其概率密度函数 $f(\theta)$为

$$f(\theta) = \frac{\exp[k'\cos(\theta-\mu)]}{2\pi I_0(k')} \tag{4}$$

式中：$I_0(\cdot)$为 0 阶修正贝塞尔函数；k' 为尺度参数，$k'\geqslant 0$；μ 为位置参数，$0\leqslant\mu\leqslant 2\pi$。

多数统计结果表明，风向角变量一般具有多峰值，单一的 Von Mises 分布不能完整描述风向圆周分布特性，通常采用混合 Von Mises 分布表示风向角变量的分布，即

表 1 谐波函数参数拟合值

Table 1 Fitted Values of Harmonic Function Parameters

i	α_0	$n=4$			$n=5$			$n=6$			$n=7$		
		β_i	γ_i	R^2	β_i	γ_i	R^2	β_i	γ_i	R^2	β_i	γ_i	R^2
1		−0.175	−1.528		−0.175	−1.528		−0.175	−1.528		−0.175	−1.528	
2		−0.049	0.389		−0.049	0.389		−0.049	0.389		−0.049	0.389	
3		0.029	0.242		0.029	0.242		0.029	0.242		0.029	0.242	
4	0.163 5	0.044	1.109	0.903	0.044	1.109	0.951	0.044	1.109	0.958	0.044	1.109	0.990
5					−0.030	0.127		−0.030	0.127		−0.030	0.127	
6								0.024	−1.181		0.024	−1.181	
7											−0.027	0.000	

$$f(\theta)=\sum\omega_i f_i(\theta)=\sum\omega_i\frac{\exp[k_i'\cos(\theta-\mu_i)]}{2\pi I_0(k_i')} \tag{5}$$

式中：ω_i 为组合系数，满足 $\sum\omega_i=1$。

采用最小二乘法进行参数估计，未知参数的初值取值会直接影响参数求解结果和求解效率。采用文献[18]中提到的方法进行参数估计，结果见表 2。由表 2 拟合结果可知：4 阶 Von Mises 分布的拟合精度为 0.994，混合 Von Mises 分布的拟合精度总体高于谐波函数拟合精度。因此，采用 4 阶混合 Von Mises 分布描述风向变量。

表 2　混合 Von Mises 分布参数拟合值

Table 2　Fitted Values of Von Mises Mixture Model Parameters

i	$n=3$				$n=4$			
	ω_i	k_i'	μ_i	R^2	ω_i	k_i'	μ_i	R^2
1	0.140	1.000	4.016	0.912	0.404	3.233	0.829	0.994
2	0.650	3.113	2.535		0.308	12.733	1.887	
3	0.210	6.283	0.585		0.234	4.104	2.775	
4					0.054	8.333	4.804	

2.4　风速风向联合分布

风速风向联合分布属于角度-线性分布，风速、风向并不总是相互独立的，二者之间的相关性通常不能直接忽略[16,19-21]。Copula 函数最初广泛应用于统计、金融、风险管理等领域，近几年被引入水文流量分析等工程领域，是处理随机变量相关性的有效方法[22]。因此，本文结合拟合结果，选择合适的 Copula 函数建立风速风向联合分布模型。

Copula 函数可以分别考虑变量的边缘分布和变量间的相关性，Copula 函数形式多样，对正负相关性均适用，且求解方便。若计 $F(x)$ 和 $G(y)$ 分别为 x、y 的边缘分布函数，$f(x)$ 和 $g(y)$ 为对应的概率密度函数，则 x、y 的联合分布函数 $L(x,y)$ 和联合概率密度函数 $l(x,y)$ 可表示为

$$L(x,y)=C[F(x),G(y)] \tag{6}$$

$$l(x,y)=\frac{\partial C[F(x),G(y)]}{\partial F\partial G}f(x)g(y) \tag{7}$$

本文采用形式较为简单的 4 种单参数 Archimedean Copula 函数构造风速风向联合分布，Copula 函数表达式如表 3 所示。可采用 Kendall 秩相关系数直接计算单参数 Archimedean Copula 函数的参数，即

$$\tau=2\sum_{i<j}\mathrm{sign}[(x_{1i}-x_{1j})(x_{i2}-x_{2j})]/[M(M-1)] \tag{8}$$

式中：sign(·)为符号函数；M 为数据个数；x_{1i}、x_{2j} 分别表示序列 x_1、x_2 中的第 i 个、第 j 个数据，τ 为相关系数。

表 3　Archimedean Copula 函数

Table 3　Archimedean Copula Function

Copula 类型	$C_\alpha(u,v)$	$c_\alpha(u,v)$	α 取值范围	Kendall 秩相关系数	α 实际计算值
GH	$\exp(-D)$	$\frac{\exp(-D)[\ln(u)\ln(v)]^{\alpha-1}(D+\alpha-1)}{uvD^{2\alpha-1}}$	$[1,+\infty)$	$1-\frac{1}{\alpha}$	0.881
Clayton	$(u^{-\alpha}+v^{-\alpha}-1)^{-\frac{1}{\alpha}}$	$(1+\alpha)(uv)^{-(1+\alpha)}(\frac{1}{u\alpha}+\frac{1}{v\alpha}-1)^{-(\frac{1}{\alpha}+2)}$	$[0,+\infty)$	$\alpha/(\alpha+2)$	−0.238
AMH	$uv/[1-\alpha(1-u)(1-v)]$	$-\frac{[\alpha(u+v-1)+1](1-\alpha)+\alpha uv(1+\alpha)}{[\alpha(u-1)(v-1)-1]^3}$	$[-1,1)$	$1-\frac{2}{3\alpha}-\frac{2}{3}(1-\alpha^{-1})^2\ln(1-\alpha)$	−0.705
Frank	$-\frac{1}{\alpha}\ln[1+\frac{(e^{-\alpha u}-1)(e^{-\alpha v}-1)}{e^{-\alpha}-1}]$	$\frac{\alpha e^{\alpha(u+v+1)}(e^{\alpha}-1)}{[e^{\alpha(u+v+1)}+e^{\alpha}-e^{\alpha(u+1)}-e^{\alpha(v+1)}]^2}$	$\mathbf{R}\backslash\{0\}$	$1+\frac{4}{\alpha}[\frac{1}{\alpha}\int_0^{\alpha}\frac{t}{\exp(t)-1}dt-1]$	−0.003

注：$D=[(-\ln(u))^{\alpha}+(-\ln(v))^{\alpha}]^{\frac{1}{\alpha}}$；$c_\alpha(u,v)=\frac{\partial C_\alpha(u,v)}{\partial u\partial v}$；$\mathbf{R}$ 为实数；u、v 均为随机变量的分布函数；α 为未知待定参数。

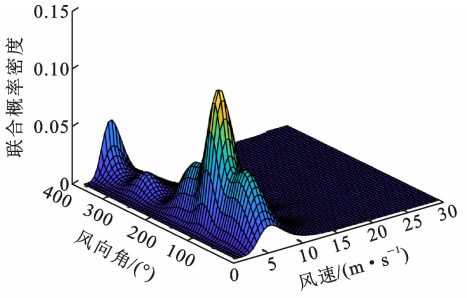
由厦门地区实测数据计算得到相关系数 $\tau=-0.135$，表示风速风向呈现弱负相关性。

根据式(9)计算矩形区域 $u\in[0,30]$ 和 $\theta\in[0°,2\pi]$ 内共 480 个离散点的风速风向联合分布概率密度拟合值，和实测值进行比较，通过 R^2 检验 4 种方法的拟合优度。

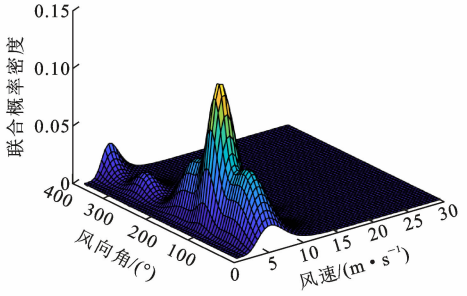
$$f(u,\theta)=c[F(u),F(\theta)]f(u)f(\theta) \tag{9}$$

式中：$c(\cdot)$ 为 Copula 函数的密度函数；$F(u)$、$f(u)$ 分别为采用 Gumbel 分布描述的风速分布函数和概率密度函数；$F(\theta)$、$f(\theta)$ 分别为采用 Von Mises 分布描述的风向分布函数和概率密度函数。

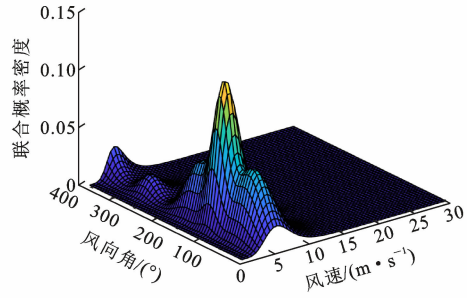
图 4 为采用 3 种 Copula 函数拟合的风速风向联合概率密度函数的图像，可以看出三者均可反映厦门市的主要风向，每个风向角下对应的日极值风速具有相同的变化规律。由拟合结果可知，GH、AMH、Frank 三种 Copula 函数拟合结果均较好。虽然通过 Kendall 秩相关系数计算得到的 GH Copula 函数的参数 α 超出了表 3 中所示的参数范围，但



(a) GH Copula



(b) AMH Copula



(c) Frank Copula

图 4 风速风向联合概率密度函数拟合结果

Fig. 4 Joint Probability Density Function of Wind Speed and Direction Fitting Result

是并未影响拟合精度。Clayton Copula 函数的参数 $\alpha=-0.2376<0$，拟合结果较差，仅为 50%。由此，本文采用 Frank Copula 函数描述厦门市的风速风向联合分布，根据建筑实际高度进行修正，即

$$f_{\mathrm{H}}(u,\theta)=1.147\,3f\left(\frac{u}{0.871\,6}\right)f(\theta)\cdot\{-0.003\mathrm{e}^{\alpha[F(u/0.871\,6)+F(\theta)+1]}(\mathrm{e}^{-0.003}-1)\}/\{\mathrm{e}^{-0.003(F[u/0.871\,6)+F(\theta)+1]}+\mathrm{e}^{-0.003}-\mathrm{e}^{0.003[F(u/0.871\,6)+1]}-\mathrm{e}^{-0.003[F(\theta)+1]}\}^2 \tag{10}$$

由于无法获得 Von Mises 分布的积分形式，本文采用数值积分计算 $F(\theta)$的值。

3 双坡屋面风致疲劳损伤估计

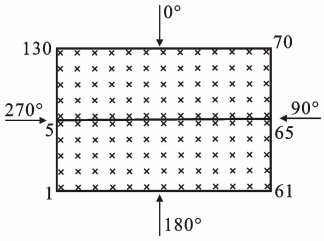
3.1 风洞试验概况

本文选取尺寸为 13.7 m×9.1 m×4.0 m、坡度为 1/60 的双坡屋面作为算例。测压试验在湖南大学 HD-2 风洞的高速试验段进行，试验模拟地貌为 B 类。模型几何缩尺比为 1∶50，风速比为 1∶3，相应的时间比为 3∶50。屋盖表面共布置 130 个测点，每个测点的控制面积约为 1.0 m^2，详细测点布置和风向角定义见图 5，测试风向角间隔 5°，共计 72 个风向角。采样时长约 30 s，采样数据点 10 000 个。通过式(11)计算得到相应的风压系数 $C_{p_i}(t)$。

$$C_{p_i}(t)=\frac{P_i(t)-P_0}{0.5\rho u_{\mathrm{h}}^2} \tag{11}$$

式中：$P_i(t)$为风压时程；P_0 为静压；ρ 为空气密度，取值为 1.225 $\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$；u_{h} 为屋盖最高点处的平均风速。

(a) 试验模型



(b) 测点布置

图 5 风洞试验模型

Fig. 5 Wind Tunnel Test Model

3.2 试验风速下屋面板疲劳损伤估计

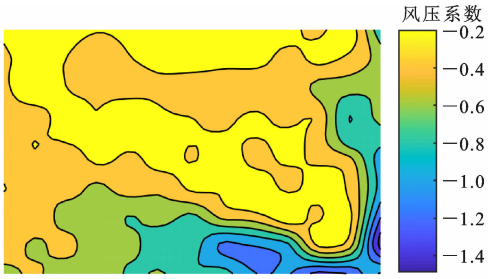
风洞测试风速为 11 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，代表实际风速 33 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。图 6(a)、(b)分别为 135°风向角下屋面平均风压系数等值线图和脉动风压系数等值线图。在 135°风向角下，平均风压系数等值线与来流屋面对角线大致呈对称锥形分布，在屋面等值线锥形的中心处其风压系数最大可达−1.5；最大脉动风压系数为 0.5，出现在 2 个锥形涡中心位置。

以 135°风向角下位于气流分离位置的 62 号测点测压结果为例，计算屋面板上各点在 33 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的风速下约 8 min 内的疲劳损伤。通过雨流计数法可得到式(12)所示的循环荷载矩阵 $\boldsymbol{N}_0$。

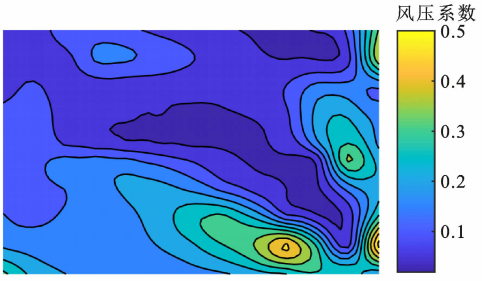
$$\boldsymbol{N}_0=N_0\boldsymbol{H}=N_0\begin{bmatrix}h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n}\\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{mm}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：N_0 为荷载循环总数；h 为循环荷载所占比例；循环荷载均值为 $0.5\rho u^2 C_{\mathrm{Pmean},i}$，幅值为 $0.5\rho u^2 C_{\mathrm{Prange},j}$，$C_{\mathrm{Pmean},i}$、$C_{\mathrm{Prange},j}$ 分别为采用雨流计数法得到的风压系数均值、风压系数幅值。

62 号测点代表区域 8 min 内荷载循环总数 $N_0=2\,968$，图 7 为雨流计数法得到的循环荷载计数结果，可以看出，循环荷载主要集中在幅值较小的区域。基于循环荷载矩阵 $\boldsymbol{N}_0$，可直接利用式(1)按照



(a)　平均风压系数等值线



(b)　脉动风压系数等值线

图 6　135°风向角下风压系数等值线

Fig. 6　Contour Map of Wind Pressure Coefficient at 135° Wind Direction

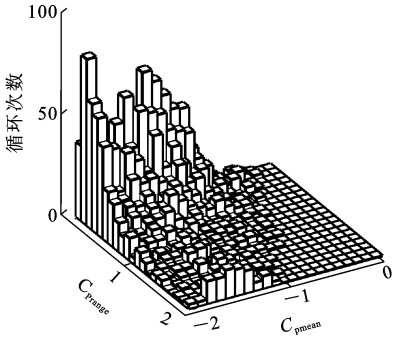


图 7　62 号测点区域循环荷载

Fig. 7　Load Cycle in Area of No. 62 Measuring Point

疲劳损伤线性累积理论计算疲劳损伤。

图 8 为疲劳损伤分布等值线。图 8(e)为 135°风向角下金属屋面的疲劳损伤分布等值线，图 8(e)与图 6(b)所示的脉动风压系数具有类似的分布规律，位于气流分离屋檐位置处的金属屋面板疲劳损伤最大，屋面板疲劳损伤等值线与来流屋面对角线大致呈锥形分布，2 个锥形涡分布并非完全对称。由图 7 可知，循环荷载的均值水平集中在 $-0.25\rho u^2 \sim 0$，脉动风压对疲劳计算结果起决定性作用。可以发现除来流方向的角部气流分离区域外，大部分屋面区域的疲劳损伤很小，疲劳损伤最大值为 0.003 5。

由图 8 可知：135°风向角下金属屋面的疲劳损伤最大区域为来流屋檐位置(62 号测点)，来流屋角位置的疲劳损伤相对较小；当风向角从 115°变化到 135°时，屋面板易损区域由来流屋角位置逐渐转移到来流屋檐位置，疲劳损伤最大累积值同时由 0.006 减小到 0.003 5；当风向角从 135°变化到 155°时，屋面板易损区域再次发生变化。因此，风向对屋面板疲劳损伤分布规律的影响不可忽视；屋面板易损区域对风向角较敏感，在考虑长期风环境计算屋面板疲劳损伤时，风向角设置不宜过于离散。

3.3　考虑风速风向的屋面板疲劳损伤估计

第 3.2 节得到了金属屋面板在 72 个风向角下，平均风速为 33 m·s^{-1}，持时约 8.4 min 的疲劳损伤值。文献[7]中给出了屋面板疲劳损伤的计算流程，计算流程如下：

(1)对于给定的平均风速 V_i，在设计期 T 内屋面某测点代表区域荷载循环总次数 $N_{\mathrm{v}i}$ 为

$$N_{\mathrm{v}i}=\bar{n}V_iP(V_i)\Delta VT \tag{13}$$

式中：$\bar{n}$ 为单位时间内单位平均风速作用下金属屋面板上风荷载循环次数；ΔV 为离散风速的增量；$P(V_i)$为风速 V_i 对应的概率密度。

(2)给定平均风速 V_i 对应的循环荷载矩阵 $\boldsymbol{N}_{\mathrm{v}i}$ 为

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{v}i}=N_{\mathrm{v}i}\boldsymbol{H} \tag{14}$$

(3)设计期 T 内的总循环荷载矩阵 $\boldsymbol{N}_{\mathrm{total}}$ 为

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{total}}=\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{N}_{\mathrm{v}i} \tag{15}$$

上述过程需计算测点在每个离散风向角和离散风速下的荷载矩阵，最后组成总荷载矩阵，计算过程复杂。对上述过程进行简化，提出考虑连续变化风速和离散风向角的疲劳计算公式。循环荷载总数和平均风速成正比[16]，定义风速比 $k_{\mathrm{s}}=u/u_0$，若计风速 u_0 下某测点代表区域荷载循环总数为 N_0，则风速 u 下的荷载循环总数 $N=k_{\mathrm{s}}N_0$，循环荷载矩阵 $\boldsymbol{N}=N\boldsymbol{H}$，风速 u 下对应循环荷载均值为 $0.5\rho u^2C_{\mathrm{Pmean},i}$，幅值为 $0.5\rho u^2C_{\mathrm{Prange},j}$ 的荷载循环次数 $n_{ij}=h_{ij}k_{\mathrm{s}}N_0$。

若考虑风速风向联合分布，将疲劳损伤计算扩展到整个计算时间年限，则需考虑风速变化时屋面板某一区域在同一风向角、相同时间内屋面板疲劳损伤累积变化规律。第 3.2 节中计算屋面板疲劳损伤时均考虑了循环荷载均值的影响，采用 Goodman 方程对循环荷载幅值进行修正。考虑到良态风环境下平均风速通常小于 33 m·s^{-1}，若不考虑风速变化时对循环荷载幅值修正的影响，则可推导出某测点代表区域在同样时长，特定风向角下，风速 $u=k_{\mathrm{s}}u_0$ 时的疲劳损伤值 $D_{\mathrm{F}}(k_{\mathrm{s}})$ 和风速 u_0 时的疲劳损伤值 D_{u_0} 之间的关系，如式(16)所示，疲劳估计结果偏于保守。

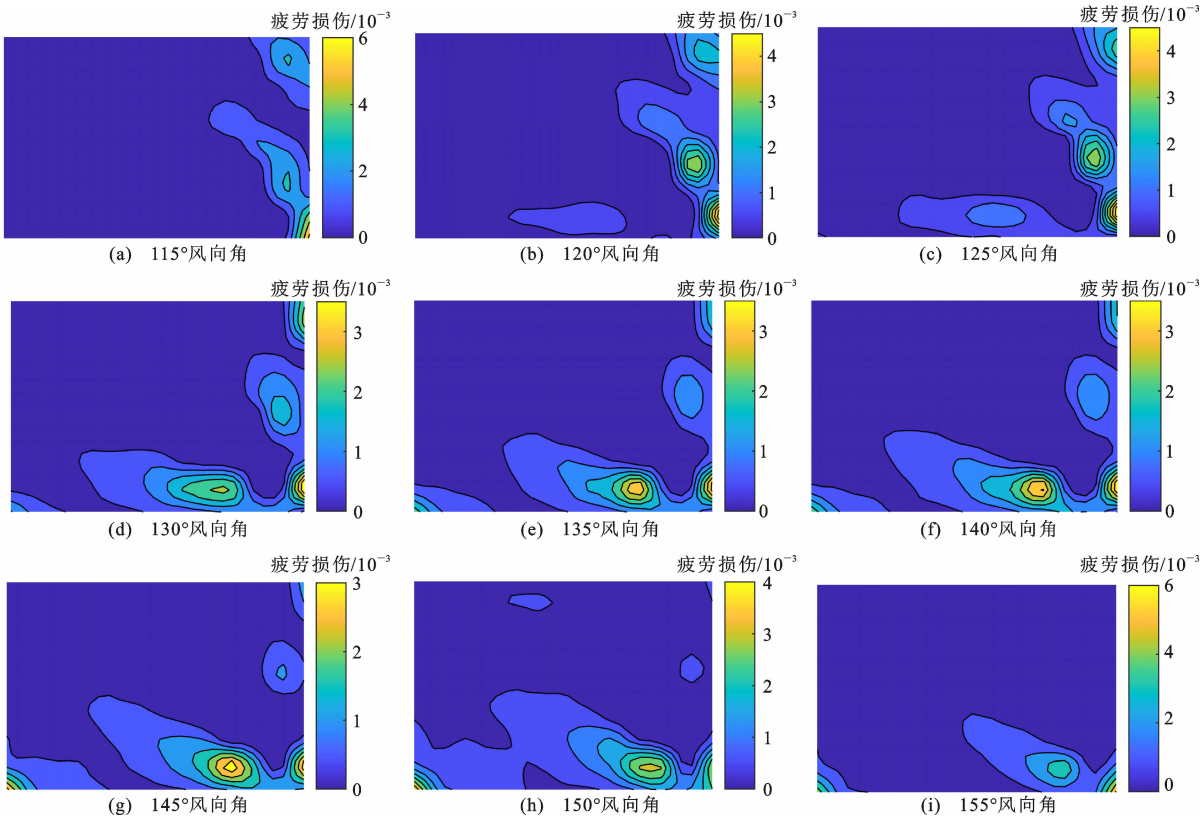


图 8 疲劳损伤分布等值线

Fig. 8 Contour Map of Fatigue Damage Distribution

$$D_{\mathrm{F}}(k_{\mathrm{s}}) = \sum_{i=1}^{n'}\sum_{j=1}^{m'}\frac{n_{ij}}{N_{ij}} = \sum_{i=1}^{n'}\sum_{j=1}^{m'}D_{ij}k_{\mathrm{s}}^{2b+1} = D_{u_0}k_{\mathrm{s}}^{2b+1} \tag{16}$$

式中：D_{ij} 为循环荷载引起的疲劳损伤，对应循环荷载均值为 $0.5\rho u^2 C_{\mathrm{Pmean},i}$，幅值为 $0.5\rho u^2 C_{\mathrm{Prange},j}$，循环次数为 n_{ij}；b 为表示屋面板疲劳性能的参数；n'、m' 分别为循环荷载矩阵中均值、幅值的划分组数。

由式(16)可知，金属屋面板的风致疲劳损伤随风速增加按照指数型增长，增长速度与屋面板的疲劳性能直接相关。

在时间 T 内某测点的疲劳损伤值 D_{total} 可用式(17)计算。

$$D_{\mathrm{total}} = \sum_{i=1}^{72}\frac{T}{8.4}\int_0^{+\infty}\int_{\theta_i}D_{\theta_i}k_{\mathrm{s}}^{2b+1}f_{\mathrm{H}}(u,\theta)\mathrm{d}u\mathrm{d}\theta \tag{17}$$

式中：D_{θ_i} 为该测点在 θ_i 风向角下对应的疲劳损伤；$f_{\mathrm{H}}(u,\theta)$ 为根据建筑实际高度修正得到的概率密度函数。

图 9 为 50 年内双坡屋面建筑金属屋面板的疲劳损伤分布。可以看出：除边角等气流分离区域外，屋面板大部分区域疲劳损伤累积值小于 0.1。1 号、61 号、68 号测点代表区域均有较大可能发生疲劳破坏。由于厦门地区风向主要集中在东北和东南方向，68 号、61 号测点代表区域疲劳损伤均大于 1 号测点区域(西南边角)。68 号测点疲劳损伤累积值最大，为 0.746，金属屋面板仅在风荷载作用下即有可能发生疲劳破坏[8]。

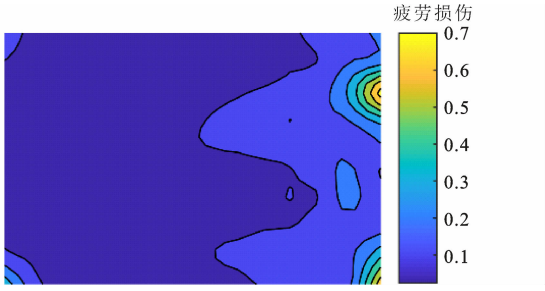


图 9 双坡屋面 50 年风致疲劳损伤分布等值线

Fig. 9 50-year Wind-induced Fatigue Damage Distribution Contour Map of Double-slope Roof

为方便描述屋面各区域的易损性，并考虑到材料可能在疲劳损伤为 0.3～3 的区间内破坏[23]，取 0.1、0.3 作为界限值，将双坡屋面初步划分为 3 个区域。假设某区域的疲劳损伤小于 0.1，则不需要采取加固措施，为安全区域；疲劳损伤在 0.1～0.3 之间为危险区域，可有选择地采取加固措施；疲劳损

伤大于 0.3 的区域为重点加固区域，必须进行加固。关于各区域临界值的界定需要进一步深入研究。

图 10 为双坡屋面易损区域的界定。双坡屋面板易损区域的界定应综合考虑主导风向和屋面位置等因素。厦门地区主导风向为东北风和东南风，其中东北风集中在 45°风向角，东南风集中在112.5°风向角。45°风向角下屋面板易损区域为来流屋檐位置(68 号测点)，而 112.5°风向角下屋面易损区域为来流屋角位置(61 号测点)，图 9 中的疲劳损伤等值线同样符合以上分析结果。

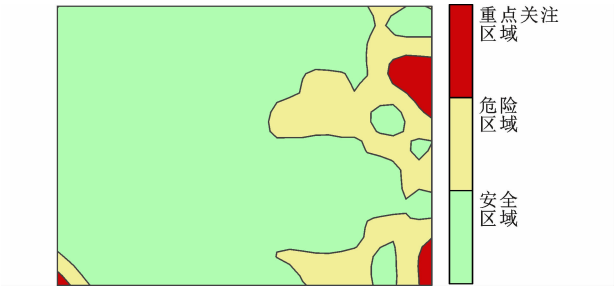


图 10　双坡屋面易损区域界定

Fig. 10　Vulnerable Area Definition of Double-slope Roof

4　结　语

(1)厦门市日极值风速和风向表现为弱负相关性，可用 Gumbel 描述日极值风速分布，混合 Von Mises 分布描述风向角分布，日极值风速、风向的相关性可用 GH、AMH、Frank 三种单参数 Archimedean Copula 函数准确描述。

(2)对于双坡屋面，建筑所处地区的主导风向、屋面位置等因素会直接影响金属屋面板疲劳损伤的分布，位于主导风向处的迎风屋檐、边角等气流分离位置疲劳损伤累积值远大于屋面板的其他区域。

(3)良态风环境下，13.7 m×9.1 m×4.0 m 的双坡屋面板 50 年内的疲劳损伤最大值为 0.746，风荷载有可能引起金属屋面板发生疲劳破坏，引发风揭事故。考虑到实际情况下屋面板承受多种荷载，会加快疲劳破坏进程，因此应更加关注金属屋面板的疲劳破坏问题。

参考文献：

References：

[1] 宣　颖，谢壮宁. 大跨度金属屋面风荷载特性和抗风承载力研究进展[J]. 建筑结构学报，2019，40(3)：41-49.
XUAN Ying，XIE Zhuang-ning. Research Progress on Wind Loads and Wind Resistance Bearing Capacity of Large Span Metal Roof Structures[J]. Journal of Building Structures，2019，40(3)：41-49.

[2] MAHENDRAN M. Behaviour and Design of Crest-fixed Profiled Steel Roof Claddings Under Wind Uplift[J]. Engineering Structures，1994，16(5)：368-376.

[3] MAHAARACHCHI D，MAHENDRAN M. A Strain Criterion for Pull-through Failures in Crest-fixed Steel Claddings[J]. Engineering Structures，2009，31(2)：498-506.

[4] MAHAARACHCHI D，MAHENDRAN M. Wind Uplift Strength of Trapezoidal Steel Cladding with Closely Spaced Ribs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2009，97(3/4)：140-150.

[5] XU Y L. Fatigue Performance of Screw-fastened Light-gauge-steel Roofing Sheets[J]. Journal of Structural Engineering，1995，121(3)：389-398.

[6] KUMAR K S，STATHOPOULOS T. Computer Simulation of Fluctuating Wind Pressures on Low Building Roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，1997，69/70/71：485-495.

[7] KUMAR K S，STATHOPOULOS T. Fatigue Analysis of Roof Cladding Under Simulated Wind Loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，1998，77/78：171-183.

[8] JANCAUSKAS E D，MAHENDRAN M，WALKER G R. Computer Simulation of the Fatigue Behaviour of Roof Cladding During the Passage of a Tropical Cyclone[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，1994，51(2)：215-227.

[9] XU Y L. Determination of Wind-induced Fatigue Loading on Roof Cladding[J]. Journal of Engineering Mechanics，1995，121(9)：956-963.

[10] XU Y L. Fatigue Damage Estimation of Metal Roof Cladding Subject to Wind Loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，1997，72：379-388.

[11] OU T，WANG D Y，XIN Z Y，et al. Full-scale Tests on the Mechanical Behaviour of a Continuously Welded Stainless Steel Roof Under Wind Excitation[J]. Thin-walled Structures，2020，150：106680.

[12] 秦国鹏，张晓旭，孙　超. 铝合金屋面系统抗风揭性能试验研究及数值分析[J]. 工业建筑，2016，46(10)：169-173.
QIN Guo-peng，ZHANG Xiao-xu，SUN Chao. Experimental Research and Numerical Analysis of an Aluminum-alloy Roof System Under Wind Uplift Load[J]. Industrial Construction，2016，46(10)：169-173.

[13] 陈 玉. 直立锁边屋面系统抗风承载能力研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
CHEN Yu. Loading Bearing Capacity of the Standing Seam Roof System Under the Wind Load[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2015.

[14] 孙 瑛,武 涛,武 岳. 带抗风夹的直立锁边屋面系统抗风性能的参数研究[J]. 工程力学,2020,37(2):183-191.
SUN Ying, WU Tao, WU Yue. Parameter Study on Wind Resistant Performance of Standing Seam Roof System with Anti-wind Clip[J]. Engineering Mechanics,2020,37(2):183-191.

[15] 王钦华,顾 明. 风速风向联合分布对结构风致疲劳寿命可靠性的影响[J]. 振动与冲击,2009,28(12):167-171,210.
WANG Qin-hua, GU Ming. Influence of Joint Distribution of Wind Speed and Wind Direction on Wind-induced Fatigue Life Reliability[J]. Journal of Vibration and Shock,2009,28(12):167-171,210.

[16] LI H N, ZHENG X W, LI C. Copula-based Joint Distribution Analysis of Wind Speed and Direction[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2019, 145(5): 04019024.

[17] JOHNSON R A, EVANS J W, GREEN D W. Some Bivariate Distributions for Modeling the Strength Properties of Lumber[J]. Mechanical Systems & Signal Processing,1999,6(3):251-260.

[18] CARTA J A, BUENO C, RAMIREZ P. Statistical Modelling of Directional Wind Speeds Using Mixtures of Von Mises Distributions: Case Study[J]. Energy Conversion and Management,2008,49(5):897-907.

[19] 张春涛,李正良,范文亮,等. 考虑风向风速联合分布的输电塔线体系风振疲劳研究[J]. 工程力学,2013,30(3):315-322.
ZHANG Chun-tao, LI Zheng-liang, FAN Wen-liang, et al. Study on Wind-induced Fatigue of Transmission Tower-line Coupled System Considering the Joint Distribution of Wind Speed and Wind Direction[J]. Engineering Mechanics,2013,30(3):315-322.

[20] 楼文娟,段志勇,庄庆华. 极值风速风向的联合概率密度函数[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(6):1057-1063.
LOU Wen-juan, DUAN Zhi-yong, ZHUANG Qing-hua. Joint Probability Density Function of Extreme Wind Speed and Direction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2017,51(6):1057-1063.

[21] 林涛涛,陈 隽,李 想,等. 基于连续型风速风向联合概率分布的风致结构疲劳分析方法研究[J]. 振动与冲击,2014,33(12):48-52,105.
LIN Tao-tao, CHEN Jun, LI Xiang, et al. Analysis Method for Wind-induced Structural Fatigue Based on Continuous JPDF[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(12):48-52,105.

[22] 李天元. 基于 Copula 函数的设计洪水计算方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2014.
LI Tian-yuan. Design Flood Estimation Based on Copulas[D]. Wuhan: Wuhan University,2014.

[23] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
YAO Wei-xing. Fatigue Life Prediction of Structures [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2003.