

基于概率分析的高层建筑风荷载组合方法

姚 博, 全 涌, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于高频天平试验和 Copula Frank 函数构建了高层建筑风荷载两正交方向分量效应的联合概率分布函数, 并基于应力准则和考虑变量之间的相关性, 求解具有一定保证率的风荷载组合系数。最后, 将采用本文组合方法、Solari 组合方法和 Asami 组合方法得到的总效应与真实的总效应进行对比。结果表明, 本文方法给出的组合系数可使风荷载的总效应与真实值趋于一致, 传统组合方法计算得到的风荷载总效应过于保守。

关键词: 高层建筑; 概率分析; 风荷载; 组合方法; 应力效应

中图分类号: TU312

文献标志码: A

Combination Method of Wind Load About High-rise Buildings Based on Probability Analysis

YAO Bo, QUAN Yong, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A joint probability density function of along wind direction and across-wind direction on wind load effect was built based on the high-frequency force balance test and Copula Frank function. Then, the rule of stress was taken as a design basis and the combination coefficient with a certain assurance of wind load components was solved. Finally, the stress effects obtained from the proposed combination method were compared with the true stress effect and the stress effect obtained from other combination methods. The results show that the combination coefficients provided by the proposed method can make the combination stress effect close to the real stress effect while the traditional combination method tends to be conservative.

Key words: high-rise building; probability analysis; wind load; combination method; stress effect

强风作用下高层建筑受到风荷载 3 个方向分量 (2 个水平方向和 1 个扭转向) 的同时作用。对于相对较矮的建筑, 平行于建筑主轴的顺风向荷载常常起主导作用, 因此在风荷载组合设计时, 荷载规范往往只考虑顺风向风荷载的影响, 而忽略同步存在的横风向或扭转向风荷载。随着现代高层建筑朝更高更柔的方向发展, 横风向和扭转向风荷载的影响越来越明显, 在结构总荷载中的比重也越来越大, 甚至会超越顺风向风荷载起到控制作用^[1], 此时必须同时考虑各个荷载分量共同作用下的影响。如果仍将各荷载分量的极值同时作用在结构上会严重高估风荷载效应, 虽然保证了结构的安全性, 但是增加工程成本, 经济性欠佳。因此, 研究各风荷载分量的合理组合, 给出具有一定保证率的组合参数具有十分重要的理论意义和实用价值。

截至目前, 人们对风荷载组合方法的研究并不充分, 相关理论也有待于进一步完善。Melbourne^[2]认为顺风向和横风向响应符合无相关性的二维正态分布。Solari 等^[3]提出了基于应力响应的组合方法, 但该方法也没有考虑风荷载各分量之间的相关性, 只适用于相关性可以忽略的情况。Tamura 等^[4]在研究荷载组合时考虑了相关性的影响, 并指出了相关性与风向之间的关系。Asami^[5-6]在 Solari 方法的基础上通过考虑脉动响应之间的相关性提出了适用于二维风荷载分量的组合方法。Tamura 等^[7]对风荷载分量之间相关性的形成机理进行解释, 并指出风荷载分量之间相关性较弱时, 采用风荷载绝对值进行相关性分析可以更好地用于荷载组合。Tamura 等^[8]考虑了风向对风荷载各方向分量组合的影响, 并研究了不同风向荷载效应系数之间的对应关系。Davenport^[9]考虑多个风向角下高层建筑等效静力风荷载三分量组合问题, 并给出整体风荷载组合系

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51278367); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金(SLDRCE10-B-03)

第一作者: 姚 博(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为土木工程抗风。E-mail: lixue05-116@163.com

通讯作者: 全 涌(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风。E-mail: quanyong@tongji.edu.cn

数的计算方法. 严志威^[10]在上述研究的基础上进一步发展并提出了计算脉动风荷载三分量组合系数的分析方法. 此外, 多国规范也分别给出了相应的风荷载分量组合法, 影响较大的有日本 AIJ 规范方法^[11]和 ISO 规范方法^[12]. 上述各组合法得到的设计结果往往偏于保守, 无法准确判断组合的保证率. Bartoli 等^[13]采用 Copula 函数构建任意两方向风荷载分量的联合概率密度函数来求解组合系数.

本文基于高频天平试验和 Copula Frank 函数构造 2 个方向荷载分量效应的联合概率密度函数, 同时基于应力准则并考虑变量之间的相关性, 得到具有一定保证率的风荷载总效应. 最后, 在任意影响系数作用下, 对采用本文组合法得到的总效应与真实值, 以及采用 Solari 组合法^[3]和 Asami 组合法^[5-6]计算得到的结果进行对比, 并讨论各方法的特征.

1 Copula 组合法理论

传统的风荷载方向分量组合分析方法存在诸多问题, 且各方向分量之间的相关性问题也未予以很好考虑, 因而往往给出过于保守的设计结果. Copula 函数理论正是可以很好地描述这种相关性结构的有效途径. Copula 函数理论^[14]可以有效地用于分析各种统计问题, 并在金融、水文等领域得到广泛应用^[15-16]. 本文将采用 Copula 函数理论研究风荷载组合问题, 给出适用于工程实际的风荷载组合系数.

1.1 风荷载效应的计算

一般来说, 在各方向等效风荷载分量作用下, 任意响应与基底弯矩响应和扭矩响应之间存在线性关系^[3,7]. 因此, 响应与等效静力风荷载分量的关系可以由响应与弯矩之间的关系来表达. 为了表述上的方便, 本文采用应力响应与弯矩分量的关系来替代应力响应与等效静力风荷载分量之间的关系.

风致应力效应 z 与风荷载的 2 个正交方向分量 (用风致基底弯矩分量替代) x_i 之间的线性组合关系可以表示为

$$z = \gamma_1 x_1 + \gamma_2 x_2 \quad (1)$$

式中: γ_i 为风致效应影响系数; x_i 为风荷载的正交方向分量 (用风致基底弯矩分量替代).

风致应力效应 z 的极值记为 Z_{\max} , 为了使 Z_{\max} 具有与各向风荷载分量效应极值 $x_{i,\max}$ 相同的保证率, 引入一组标量 c_i , 并使得上式满足

$$Z_{\max} = \gamma_1 c_1 x_{1,\max} + \gamma_2 c_2 x_{2,\max} \quad (2)$$

其中, c_i 表示组合系数. 风荷载各正交方向弯矩分量的应力效应可表示为 $Y_i = \gamma_i x_i$. 对于不同的结构或构件, 影响系数 γ_i 各不相同. 为了计算需要, 可基于风荷载 2 个正交方向分量对总响应的贡献相当的原则来确定代表性影响系数的值^[10], 即

$$[\gamma_1, \gamma_2] = \left[K \frac{\text{sign-}\gamma_1}{x_{1,\max}}, K \frac{\text{sign-}\gamma_2}{x_{2,\max}} \right] \quad (3)$$

式中: K 为大于零的常数, 与极值响应具有相同的量纲; $\text{sign-}\gamma_i$ 为影响系数的正负方向.

对于仅考虑风荷载 2 个正交方向分量的组合情况, 总的风致效应 $z = Y_1 + Y_2$ 的概率密度函数可以表示为^[17]

$$f_{z=Y_1+Y_2}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d}{dz} (\text{prob}[Y_1 < z - y | Y_2 = y]) f_{Y_2}(y) dy = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Y_1, Y_2}(z - y, y) dy \quad (4)$$

式中: f_{Y_1, Y_2} 为联合概率密度函数. 总效应的发生概率^[13]

$$P = f_{z=Y_1+Y_2} = \text{prob}(\max(Y_1 + Y_2) \leq Z_{\max} | Y_1 = y_{1,\max} \cup Y_2 = y_{2,\max}) = \int_{-\infty}^{Z_{\max}+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Y_1, Y_2}(z - y, y) dy dz \quad (5)$$

对于风荷载 2 个正交方向分量的组合问题, 要求解保证率 P 对应的组合效应值 Z_{\max} , 就必须准确确定变量 Y_1 和 Y_2 的联合概率密度函数 f_{Y_1, Y_2} . 根据 Sklar 定理^[14], 若 $F(y_1, \dots, y_n)$ 为 n 维分布函数, 其连续边缘分布函数为 $F_1(y_1), \dots, F_n(y_n)$, 则存在唯一的连接函数 $C(\cdot)$, 使得变量的联合分布函数满足

$$F_{y_1, \dots, y_n}(y_1, \dots, y_n) = C(F_1(y_1), F_2(y_2), \dots, F_n(y_n)) \quad (6)$$

$F_{y_1, \dots, y_n}(y_1, \dots, y_n)$ 的联合概率密度函数

$$f_{y_1, \dots, y_n}(y_1, \dots, y_n) = c(F_1(y_1), F_2(y_2), \dots, F_n(y_n)) \prod_{i=1}^n f_i(y_i) \quad (7)$$

其中, 对连接函数 C 求导得到 $c(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \frac{\partial^n C(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)}{\partial \xi_1 \partial \xi_2 \dots \partial \xi_n}$, 其中 ξ_i 为连接函数变量; $f_i(y_i)$ 为边缘概率密度函数, $i=1 \sim n$. 当 $n=2$ 时, 可采用该方法构造本文风荷载 2 个正交方向分量效应的联合分布函数.

求不同变量共同作用下一定保证率的联合效应 Z_{\max} , 关键在于选择合适的关联函数和边缘分布函

数,以构造多维变量的联合概率分布函数.常用的 Copula 连接函数有椭圆 Copula 函数、Archimedean Copula 函数和二次型 Copula 函数.由于 Frank 函数作为 Archimedean 函数的一种,它对变量相关性的

分析包括了结构变化的各种情形,且能够较为全面地描述变量间的复杂相关性关系,因此选用 Archimedean Frank Copula 函数为连接函数来研究风荷载方向分量的组合效应,其表达式如下所示:

$$C(u, v) = -\frac{1}{\rho} \ln \left(1 + \frac{(\exp(-\rho u) - 1)(\exp(-\rho v) - 1)}{\exp(-\rho) - 1} \right) \quad (8)$$

式中: u, v 为 Frank 函数的变量; ρ 为对应相关系数.其概率密度函数可由式(8)对 u, v 依次求偏导得到,

如下所示:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial u \partial v} = \frac{(\exp(-\rho) - 1) \exp(-\rho(u+v))(-\rho)}{(\exp(-\rho) - 1 + (\exp(-\rho u) - 1)(\exp(-\rho v) - 1))^2} \quad (9)$$

同时,可采用极值 I 型分布函数作为边缘函数,来表示各正交方向分量效应 Y_i 的分布,其概率分布表达式可以表示为:

$$\begin{cases} u_{Y_1}(y_1) = \exp(-\exp(-a_1(y_1 - b_1))) \\ v_{Y_2}(y_2) = \exp(-\exp(-a_2(y_2 - b_2))) \end{cases} \quad (10)$$

式中: a_i, b_i 为各自的分布参数.进一步将式(10)所示的应力效应分布函数作为边缘分布函数代入式(8)即可得到变量 Y_1 和 Y_2 的联合概率分布函数,再基于式(7)和(9)得到联合概率密度函数

$$f_{Y_1, Y_2} = \frac{\partial^2 C}{\partial u_{Y_1} \partial v_{Y_2}} \frac{\partial u_{Y_1}}{\partial y_1} \frac{\partial v_{Y_2}}{\partial y_2} = \frac{(\exp(-\rho) - 1) \exp(-\rho(u_{Y_1} + v_{Y_2}))(-\rho)}{(\exp(-\rho) - 1 + (\exp(-\rho u_{Y_1}) - 1)(\exp(-\rho v_{Y_2}) - 1))^2} \cdot a_1 u_{Y_1} \exp(-a_1(y_1 - b_1)) a_2 v_{Y_2} \exp(-a_2(y_2 - b_2)) \quad (11)$$

最后,将式(11)代入式(4)并联立式(5)即可得到风荷载 2 个正交方向分量作用下联合荷载效应的概率表达式,可用于得到一定保证率对应的联合应力极值 Z_{\max} ,如下所示:

$$F(z) = \int_{-\infty}^z f_{\varepsilon=Y_1+Y_2}(z) dz = \int_{-\infty}^{Z_{\max}+\infty} \int_{-\infty}^{Z_{\max}+\infty} f_{Y_1, Y_2}(z - y_2, y_2) dy_2 dz \quad (12)$$

1.2 组合系数的确定

传统的风荷载组合方法中, Solari 方法是不考虑风荷载的相关性的, Asami 方法和 ISO 方法则从不同角度考虑了风荷载各方向分量之间的相关性.另外,在求解风荷载组合系数时,一种普遍的方法就是,假设其中一个变量取极值并取其组合系数为 1,进而求解另一组合系数.这种方法的基本思想是由 Melbourne 的顺风向和横风向风荷载的独立二维正态分布理论发展而来,由于风荷载分布可表示为一个主轴平行于坐标轴的椭圆,取其中一变量为极值时椭圆一端点距离坐标原点距离最远,此时可表示联合应力效应最大,因此该方法的实质是建立在各变量完全独立假设之上的;而实际情况下顺风向和横风向荷载之间是存在相关性的,因此基于二维正态分布的椭圆其主轴并非平行于坐标轴,而是有一定的角度,此时椭圆端点位置并非在坐标轴上,所以联合效应的极值不一定发生在单一荷载取最大值的时候,因此组合系数应该是一个与相关系数有关

的值.

上述理论详细给出了求解一定保证率组合系数的理论依据,其计算步骤可简述为:

(1) 基于高频天平试验数据,计算各向风荷载响应极值,并基于式(3)确定影响系数向量 (γ_1, γ_2) ,进一步计算得到式(10)所示的极值 I 型边缘分布函数.

(2) 选择式(8)所示的 Frank Copula 函数作为连接函数并计算相关系数 ρ ,然后将边缘分布函数(10)代入式(8)得到应力效应的联合概率分布函数 F .

(3) 在步骤(2)的基础上求偏导得应力效应的联合概率密度函数 f_{Y_1, Y_2} .

(4) 将该联合概率密度函数(11)代入式(12),求解保证率 P 对应的 2 个正交风荷载共同作用下的应力效应 Z_{\max} .

(5) 由于任意影响系数的正负方向是未知的,因此式(3)中影响系数对应于 4 种正负方向组合 $([\text{sign}_x, \text{sign}_y] = [\pm 1, \pm 1])$.以影响系数方向 $[\text{sign}_x, \text{sign}_y] = [+1, +1]$ 为例,基于 2 个正交方向风荷载应满足的应力准则^[9],可得求得组合系数为 $-1 + \sqrt{2(1 + \rho_{xy})}$,同理可求得不同影响系数方向 $[\text{sign}_x, \text{sign}_y] = [1, -1], [-1, 1], [-1, -1]$ 对应的组合系数分别为 $1 - \sqrt{2(1 - \rho_{xy})}, -1 + \sqrt{2(1 - \rho_{xy})}, 1 - \sqrt{2(1 + \rho_{xy})}$,进而分别得到各影响系数正负方向对应的组合系数,并联立步骤(4)得到

的应力效应 Z_{\max} 代入式(2),求解组合系数 c_2 ;同时各向风荷载对响应的重要性影响可依次设定为主导风荷载方向和次要风荷载方向,结合这 2 种重要性影响次序,共得到 8 组组合系数。

2 试验系统和数据分析

为了更清楚地阐述问题,本研究借助于一栋实际超高层建筑设计方案的风荷载分析来说明上述过程。首先采用高频天平试验获取试验数据,并进一步对数据进行分析,以研究荷载效应分布情况。

2.1 高频天平风洞试验

高频天平试验中,模型对应的实际超高层建筑高度超过 600 m,横截面自下而上为逐渐收缩的正方形,位于我国华东某城市市区。为了研究其整体结构风荷载,在同济大学 TJ-3 大气边界层风洞中对其 1/600 的缩尺刚性模型进行了高频天平风洞试验,试验概况如下:

(1) 试验系统

该项目试验风洞为同济大学 TJ-3 大气边界层风洞,其试验段横截面高 2 m,宽 15 m,试验风速最高可达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,连续可调。试验所用高频天平系统可同时采集 3 个正交方向的力和力矩,力和力矩的量程分别为 330 N 和 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。模型-天平系统的自由振动频率为 30 Hz,是结构自由振动频率对应模型空间频率的 3.5 倍。

(2) 试验工况条件

如图 1 和 2 所示,风洞试验在所有规划建筑都建成后的状态下进行。图 1 中还给出了风向角定义

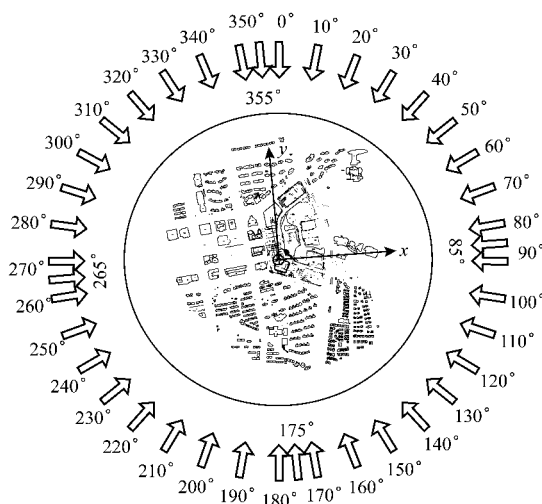


图 1 周边建筑和风向角定义

Fig.1 Surrounding buildings and wind direction

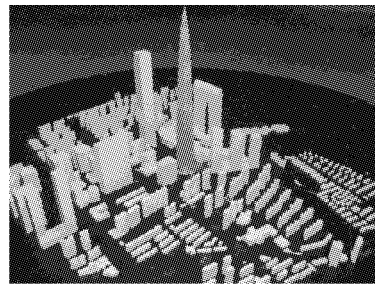


图 2 试验模型

Fig.2 Testing model

和试验工况。风向角以从北向南的风向为 0° 风向角,以从东往西的风向为 90° 风向角。风洞试验中试验了 $0 \sim 360^\circ$ 的 36 个整十度风向工况以及 85° 、 175° 、 265° 和 355° 共 4 个与建筑体轴方向一致的风向工况,共计 40 个风向工况。由于该建设场地的东边为一湖区,西边为城市市区,风洞试验中将 40° 到 140° 风向角范围的风场设定为 B 类风场,其余风向的来流风场设定为 C 类风场。

(3) 数据采集

风洞试验中参考高度(1 m)处的来流风速保持在 $7.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。针对不同重现期的设计风速,各物理量的缩尺比相应变化。建筑模型基底气动力的采样频率为 1 000 Hz,采样时间为 60 s,对应的实际时间为 90~115 min。

2.2 数据分析

任意风向的风速作用下均会引起高层建筑风荷载效应,通过动力响应分析可以得到任意方向荷载分量下的响应时程数据,以风致基底弯矩响应 M 为例,其荷载效应系数时程表示为

$$C_M(t) = \frac{M(t)}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 H D B} \quad (13)$$

式中: C_M 为荷载效应系数; U 为来流平均风速; ρ_{air} 为空气密度; H 、 D 和 B 分别为建筑高度、建筑长度和迎风面宽度。

将上述风荷载 2 个风向分量对应的弯矩效应系数时程划分为多组短时距时程,并取各段短时程的极值得到一组极值样本。基于 Harris 极值理论^[18-19]对各极值数据进行拟合得到各荷载效应系数如式(10)所示的极值 I 型分布函数。

风荷载 2 个正交方向分量之间具有一定的相关性,且相关系数的准确确定对 Copula 函数的影响非常大。顺风向脉动荷载由来流湍流产生,而横风向荷载、扭矩荷载则是由漩涡脱落产生,因此横风向荷载和扭转荷载之间具有很强的相关性,顺风向与横风向、顺风向与扭转方向荷载的相关性比较弱。相关性大

小不仅与风荷载变量类型有关而且与风向有关, 相关性问题十分复杂. Tamura 等^[7]的研究表明, 当采用荷载系数绝对值研究荷载相关性的时候, 各荷载分量均具有比较明显的相关性. 本文在上述研究基础上采用分布估计方法(IFM)求解参数, 即先利用极大似然估计方法计算边缘分布函数参数, 然后再将计算结果代入联合分布函数计算 Copula Frank 函数参数.

通过上述分析很容易得到各荷载效应系数的概率分布函数(边缘分布函数)和 Copula Frank 函数对应的相关系数, 将其代入式(8)即得到风荷载 2 个分量作用下风荷载效应的联合概率分布函数, 图 3 为采用 Frank Copula 函数建立的联合概率分布函数图. 图中 $C_{M,1}$ 和 $C_{M,2}$ 为 2 个正交方向的荷载效应系数. 最终, 基于第 1.2 节方法求解组合系数.

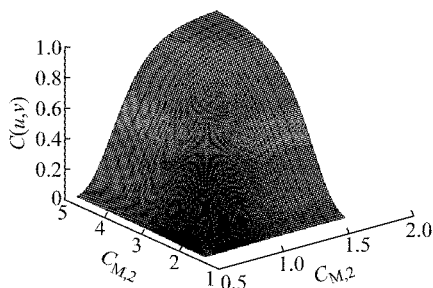


图 3 横风向和顺风向荷载效应的联合概率分布图

Fig. 3 Joint probability distribution of loading effect between along and across directions

3 组合方法的验证

风荷载组合方法的优劣可以从安全性和经济性 2 个方面进行评价. 首先, 为了保证结构的安全所有风荷载组合工况下得到的荷载响应不应低于真实风荷载的最不利响应; 其次, 风荷载响应的估计值不应超过真实风荷载作用下响应值太多, 否则就是不经济. 这里首先采用任意影响系数(γ_x, γ_y)对一定风速作用下结构风荷载的真实组合应力响应进行计算, 然后再采用 Solari 组合方法、Asami 组合方法计算对应的风荷载应力效应. 最后, 将上述计算结果与本文基于 Copula Frank 函数和应力设计准则得到的计算结果进行对比.

3.1 风荷载作用下的响应分析

在一定风速作用下, 高层建筑结构会受到各个方向的风荷载作用, 此时任意风速条件下风荷载的真实的应力响应 \hat{S} 与弯矩响应 M_x, M_y 满足线性关

系, 且应力响应 \hat{S} 可表示为^[3,6]

$$\begin{cases} \hat{S}(\theta) = \bar{S}(\theta) + \tilde{S}_{\max}(\theta) \\ \bar{S}(\theta) = \gamma_x \bar{M}_x(\theta) + \gamma_y \bar{M}_y(\theta) \\ \tilde{S}_{\max}(\theta) = \sqrt{\begin{bmatrix} \gamma_x \\ \gamma_y \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} g_x^2 \sigma_{M_x}^2 & \psi_{xy} g_x g_y \sigma_{M_x} \sigma_{M_y} \\ \psi_{xy} g_x g_y \sigma_{M_x} \sigma_{M_y} & g_y^2 \sigma_{M_y}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_x \\ \gamma_y \end{bmatrix}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: \bar{S} 为真实应力响应均值; \tilde{S}_{\max} 为真实应力响应脉动值; \bar{M} 为基底弯矩均值; σ_M 为基底弯矩均方根值; g 为峰值因子; ψ 为任意 2 个方向风荷载之间的互相关系数; γ 为应力响应与基底弯矩或扭矩的影响系数; θ 为风向角. 基于上述天平试验数据可计算各方向风荷载应力效应真实结果.

已有文献对 2 个方向风荷载组合的研究也较多, 其中较为有影响的方法有 Solari 方法和 Asami 方法. Solari 方法基于荷载效应的椭圆分布规律, 采用外接 12 边形代替椭圆, 并以 12 个顶点作为组合系数的计算依据, 所以采用该方法进行计算时, 每个风向可给出 12 组组合系数. 单个风向角的风荷载应力组合效应的计算式可以表示为

$$\begin{cases} \hat{R}(\theta) = \bar{R}(\theta) + \tilde{R}(\theta) \\ \bar{R}(\theta) = \gamma_x \bar{M}_x(\theta) + \gamma_y \bar{M}_y(\theta) \\ \tilde{R}(\theta) = \gamma_x \tilde{c}_x(\theta) g_x \sigma_{M_x}(\theta) + \gamma_y \tilde{c}_y(\theta) g_y \sigma_{M_y}(\theta) \end{cases} \quad (15)$$

式中: R 为本文方法得到的应力响应; γ 为影响系数; \tilde{c} 为组合系数. 因此, 可基于式(15)并采用 Solari 方法提供的组合系数得到对应的风荷载联合应力效应 $R(\theta)$, 并将 $R(\theta)$ 代入式(12)可进一步得到 Solari 方法提供的组合效应对应的保证率 P , 便于与本文方法的组合效果比较.

Asami 方法在 Solari 方法的基础上, 考虑了脉动风荷载之间的相关性, 并将 Solari 方法中外接 12 边形改为外接 8 边形, 提出了改进的适用于单个风向角下 2 个方向分割荷载组合的方法. 由于每个风荷载组合工况中总有一个方向风荷载取得极值, 即风荷载组合系数为 ± 1 , 因而该方法更便于实际工程的应用. 与 Solari 方法类似, 也采用式(15)对该 Asami 方法进行评价.

3.2 结果分析

为了验证本文方法的准确性, 对任意影响系数(γ_x, γ_y)作用下各组合方法对应的结构响应真实值和估计值进行计算. 采用本文计算方法得到上述高层建筑 1 000 组任意影响的 100 年重现期风荷载组

合系数.图4为采用本文方法得到的组合应力效应与采用式(14)得到的真实结果的对比和误差分析.由图可知,任意组合系数影响下采用本文方法得到应力组合效应与真实风荷载作用下的应力效应吻合度非常高,其误差在3%以内.这表明本文采用Frank函数构建荷载效应联合概率密度函数的方法可以准确提供100年设计年限的风荷载组合系数.

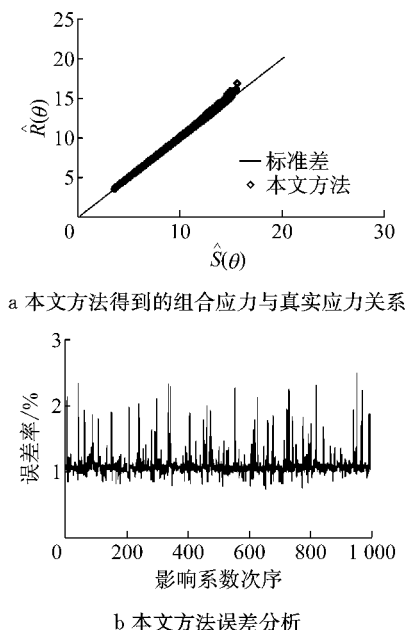


图4 任意影响系数作用下应力效应对比

Fig.4 Comparison of stress effect at any influent coefficients

图5为任意影响系数作用下,Asami方法得到的应力效应与真实应力效应误差对比结果.由图可知,传统的Asami组合方法得到的组合应力效应高估幅值在7%左右.图6表明Solari组合方法到的组合应力效应与真实应力值相比也明显偏大,高估幅值在6%以内.

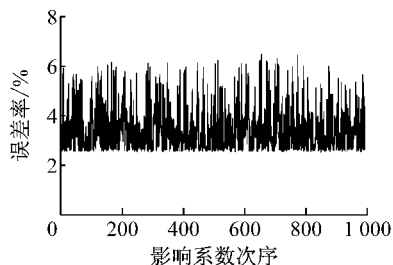


图5 Asami方法的误差分析

Fig.5 Error analysis of Asami method

因此,本文方法提供的100年设计年限的风荷载组合系数比传统方法更加经济,进一步证明了本文方法具有良好的精确性和经济性.

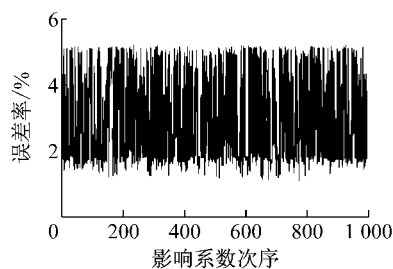


图6 Solari的误差分析

Fig.6 Error analysis of Solari method

4 结论

(1) 本文基于高频天平试验和Copula Frank函数构造任意2个方向荷载效应的联合概率密度函数,并进一步得到各向风荷载联合作用下应力效应的概率分布函数.通过考虑荷载分量之间的相关性,得到具有一定保证率的风荷载组合系数. Frank函数在构造三维变量的联合概率密度函数时存在一定局限性,后续工作将在此基础上引入新的理论研究三维组合问题.

(2) 本文方法得到的设计结果精度非常高,与真实风荷载应力效应相比,采用本文方法得到的应力效应其误差很低.与传统的Solari方法、Asami方法相比,传统的设计方法给出偏于保守的设计结果,而本文方法与真实结果更接近,因而精确性更高,经济性更佳.

参考文献:

- [1] 全涌.超高层建筑横风向风荷载及响应研究[D].上海:同济大学,2002.
QUAN Yong. Across-wind loads and responses on super high-rise buildings [D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [2] Melbourne W H. Probability distributions of response of BHP house to wind action and model comparisons [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1975, 1(2): 167.
- [3] Solari G, Pagnini L C. Gust buffeting and aeroelastic behaviour of poles and monotubular towers [J]. Journal of Fluids and Structures, 1999, 13(7): 877.
- [4] Tamura Y, Kikuchi H, Hibi K. Quasi-static wind load combinations for low-and middle-rise buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(12): 1613.
- [5] Asami Y. Combination method for wind loads on high-rise buildings[C]//Proceedings of the 16th National Symposium on Wind Engineering, Tokyo, Japan. Tokyo: Springer Japan, 2000: 531-534.