

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.018

考虑随机风压场非高斯特性的大跨度膜屋盖风振响应

罗俊杰^{1,2}, 宋雄彬³, 李璟⁴

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641; 3. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广州 510440; 4. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要:作用于大跨度膜屋盖结构上的随机风压场在统计意义上由高斯和非高斯区域构成。基于零记忆非线性转化法理论,提出了这种混合随机风压场的模拟方法,算例表明,生成的随机风压场样本能准确描述实验数据的各项统计特性。将生成的样本和利用传统方法生成的高斯随机风压样本作用于某膜屋盖结构,经风振时域分析后发现,高斯随机风压激励下结构部分构件的响应值比非高斯随机风压激励下的响应值低,这表明,随机风压荷载的非高斯特性不容忽视。文章还给出了结构不同构件的整体风振响应系数。

关键词:蒙地卡罗方法;时域分析;大跨度膜屋盖;随机风压场;整体风振响应系数

中图分类号:TU351; TU311. 3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0118-06

Wind-induced Response Analysis on a Large-span Membrane Roof by Considering Non-gaussian Stochastic Wind Pressure Field

Luo Junjie^{1,2}, Song Xiongbin³, Li Jing⁴

(1. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China;
3. Guangzhou Institute of Building Science CO., LTD., Guangzhou 510440, P. R. China;
4. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: The stochastic fluctuating wind pressure field acting on a large-span membrane roof consists of Gaussian and non-Gaussian regions in the sense of statistics. Simulation of this stochastic field is presented based on the zero memory nonlinearity (ZMNL) transformation method. A case study is then given to show that the stochastic wind pressure field samples generated by the proposed method can well represent the specified statistical characteristics of data from the wind tunnel experiment. After that, the wind-induced response analysis is conducted on a membrane roof structure using the Gaussian/non-Gaussian composed wind pressure field samples generated by the proposed method and the Gaussian samples by the traditional method, respectively. Results indicate that response values of some components of the structure induced by the Gaussian samples are lower than those by the Gaussian/non-Gaussian composed wind pressure samples, which means the non-Gaussian characteristics of the stochastic wind pressure should not be ignored. Meanwhile, the total gust response factors of the components caused by the wind excitation are given to meet with the requirement of the designers.

Key words: Monte Carlo methods; time domain analysis; a large-span membrane roof; stochastic wind pressure field; total gust response factor

收稿日期:2013-03-01

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAJ07B02);广东省自然科学基金(S2011040004060);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2014KB12)

作者简介:罗俊杰(1979-),男,副研究员,主要从事大跨度结构风振分析研究,(E-mail)axljj@163.com。

膜结构以其造型新颖优美、自身质量轻巧而广泛应用于各类空间屋盖结构中。风荷载是设计这类结构的控制荷载。由于这类结构刚度的几何非线性行为十分明显,使得适用于线性结构的频域分析方法无法满足此类结构的风振响应分析、随机分析和动力可靠度分析等的要求,所以,有必要在时域内对结构进行非线性风振分析。此时,对随机风荷载时程的准确模拟是影响时域分析准确性的关键。

传统的结构风振时域分析方法^[1-3]首先模拟服从高斯分布的随机风速时程样本,然后通过准定常理论的假设,转化为同样服从高斯分布的风压时程样本,再进行结构的时程分析。很明显,这样的处理没有考虑到结构与风之间的相互作用,比如来流风在经过结构迎风面后产生的分离现象,或者分离流的重附着现象等^[4]。根据 Kumar 和 Stathopoulos 等提出的标准^[5],可以利用脉动风压样本的偏斜度(Skewness,记为S)和峰态度(Kurtosis,记为K)这2个高阶统计量指标将随机风压场划分为高斯区域和非高斯区域。大量的风洞实验数据表明^[6-8],作用于大跨度屋盖结构相对平缓区域的随机风压场样本呈现高斯分布;在来流风的分离和重附着区域,随机风压场样本呈现非高斯分布。这就构成了一个空间相关的多点高斯/非高斯区域混合的随机风压场。

笔者首先采用零记忆非线性转化(ZMNL)理论^[9],提出了模拟这类随机风压场的数值方法,生成了服从对数正态分布和韦布尔分布的随机风压场样本,并检验了样本的准确性。然后将所生成的样本作用于一个大跨度膜结构屋盖上,得到结构不同构件的响应时程;经过处理,获得了可满足设计要求的各类构件的整体风振响应系数;还将所得结果与纯高斯随机风压场作用下的结构响应进行了比较。

1 高斯/非高斯混合随机风压场模拟方法

1.1 模拟方法

假设一个具有 m 个空间点的平稳高斯/非高斯混合随机风压场,记为 $\bar{Z}(t) = \{\bar{z}_1(t), \bar{z}_2(t), \dots, \bar{z}_m(t)\}^T$, (注:文中的“风压”是指无量纲的风压系数)。由于一些常用的非高斯分布模型,如对数正态分布^[6]或韦布尔分布^[10]等,模拟样本的偏斜度和峰态度均可符合 Kumar 和 Stathopoulos 等提出标准,因此,可以认为整个风压场的样本均服从同一类型的非高斯分布。此时,模拟样本要满足目标统计特性(即功率谱密度函数和概率密度函数)的要求,而且还要保持各样本间的空间相关性。

目前,由于模拟服从高斯分布的随机场样本已经有很多成熟的方法,其中谐波合成法的算法简单,

而且能准确描述目标样本的统计特性而受到广泛应用;所以,人们很自然想到如何将服从高斯分布的样本转化为服从非高斯分布的样本,同时又要满足目标样本的统计特性要求。零记忆非线性转化(ZMNL)法的基本思路就是要将高斯随机场样本 $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}^T$, 利用式(1)转化为非高斯随机场样本,

$$z_i(t) = g_i[x_i(t)], (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中 $g_i(\cdot)$ 为转化函数。很明显,由此所得到的非高斯随机过程只能满足概率密度函数的要求,不能满足目标功率谱密度函数的要求。此时,各点非高斯随机过程构成的功率谱密度函数矩阵 S^{NG} , 可通过维纳-辛钦定理转化为协方差函数矩阵 ξ , 它与高斯随机过程的协方差函数矩阵 ρ 存在转化关系。具体到矩阵中各元素间 ξ_{ij} 和 ρ_{ij} 的关系表达为

$$\xi_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [g_i(x_i) - \mu_i][g_j(x_j) - \mu_j] \Phi[x_i, x_j, \rho_{ij}] dx_i dx_j \quad (2)$$

为书写方便,以下均用 $z_i, x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 代替 $z_i(t), x_i(t)$; μ_i, μ_j 为非高斯样本的均值; $\Phi[x_i, x_j, \rho_{ij}]$ 为非高斯随机过程样本的边缘分布函数。式(2)说明,只要确定了 $\Phi[x_i, x_j, \rho_{ij}]$, 便可用协方差函数为桥梁,得到各点高斯随机过程和非高斯随机过程间功率谱密度函数的转化关系。至此,随机样本的模拟过程可归纳为:

1) 对从实测或风洞实验得到的目标样本数据进行统计,得到各点样本的均值 μ_i 、方差 σ_i^2 、偏斜度 S_i 和峰态度 K_i ; 然后归一化处理,使之成为均值为0、方差为1的随机向量过程,在求得相应的目标功率谱密度函数矩阵 S^{NG} 。

2) 根据维纳-辛钦定理,将 S^{NG} 转化为协方差函数矩阵 ξ ; 利用式(2)(此时 $\mu_i = \mu_j = 0$) 得到高斯随机过程的协方差函数矩阵 ρ 。

3) 再次根据维纳-辛钦定理,将 ρ 转化为功率谱密度函数矩阵 S^G 。

4) 利用谐波合成法,生成高斯随机场样本 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}^T$, 利用式(1), 得到非高斯随机风压场样本 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}^T$ 。

5) 利用式(3)根据 Z 中的过程样本 $z_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 得到所需要的随机场样本 $\bar{Z} = \{\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_m\}^T$ 。

$$\bar{z}_i = \mu_i - z_i \cdot \sigma_i \quad (3)$$

在这个转化过程中,对于不同的非高斯分布模型,转化式(2)有不同的形式。现给出2种在常用的非高斯分布模型:对数正态分布和韦布尔分布的转化公式。

1.2 服从对数正态分布样本的协方差函数转化关系

假设随机过程 \bar{x}_i 服从正态分布 $N(b_i, c_i^2)$, b_i 、

c_i^2 为其均值和方差。令 $\bar{x}_i = \ln(z_i - a_i)$, 则随机过程 z_i 服从具有三参数的对数正态分布, 其概率密度

$$f_{z_i} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}(z_i - a_i)c_i} \exp\left\{-\frac{[\ln(z_i - a_i) - b_i]^2}{2c_i^2}\right\} & , z_i \geq a_i \\ 0 & , z_i < a_i \end{cases} \quad (4)$$

式中 a_i 为位移参数。对 \bar{x}_i 进行标准化处理, 即 $\bar{x}_i = c_i x_i + b_i$, 使之转化为服从正态分布 $N(0, 1)$ 的随机过程 x_i 。此时 x_i 和 z_i 的关系为

$$z_i = a_i + \exp(c_i x_i + b_i) \quad (5)$$

经推导, 可得互协方差函数 ξ_{ij} 与 ρ_{ij} 的转化关系为

$$\xi_{ij} = \frac{\exp(\rho_{ij} c_i c_j) - 1}{\sqrt{\exp(c_i^2) - 1} \sqrt{\exp(c_j^2) - 1}} \quad (6)$$

当 $i = j$ 时, 得到自协方差函数转化公式

$$f_{z_i} = \begin{cases} \frac{p_i}{(q_i)^{p_i}} (z_i - a_i)^{p_i-1} \exp[-(\frac{z_i - a_i}{q_i})^{p_i}] & , z_i \geq a_i \\ 0 & , z_i < a_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: a_i 为位移参数; $p_i > 0$ 为形状参数; $(q_i)^{p_i} > 0$ 为尺度参数。则^[11]

$$z_i = (x_{i1}^2 + x_{i2}^2)^{\frac{1}{p_i}} + a_i \quad (9)$$

式中 x_{i1} 和 x_{i2} 为服从高斯分布 $N(0, (q_i)^{p_i}/2)$ 的 2

$$\xi_{ij} = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{p_i})\Gamma(1 + \frac{1}{p_j}) [{}_2F_1(-\frac{1}{p_i}, -\frac{1}{p_j}, 1; \tau_{ij}) - 1]}{\sqrt{\left\{\Gamma(1 + \frac{2}{p_i}) - \left[\Gamma(1 + \frac{1}{p_i})\right]^2\right\} \times \left\{\Gamma(1 + \frac{2}{p_j}) - \left[\Gamma(1 + \frac{1}{p_j})\right]^2\right\}}} \quad (10)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; ${}_2F_1(\cdot)$ 表示广义超几何分布函数^[12]。与此同时, τ_{ij} 与 x_i 和 x_j 的互协方差函数 ρ_{ij} 的转化关系为

$$\rho_{ij}^2 = \tau_{ij} \quad (11)$$

此外, 当 $i = j$ 时, 得到自协方差函数转化公式为

$$\xi_{ii} = \frac{\Gamma^2(1 + \frac{1}{p_i}) [{}_2F_1(-\frac{1}{p_i}, -\frac{1}{p_i}, 1; \tau_{ii}) - 1]}{\Gamma(1 + \frac{2}{p_i}) - \left[\Gamma(1 + \frac{1}{p_i})\right]^2} \quad (12)$$

以及

$$\rho_{ii}^2 = \tau_{ii} \quad (13)$$

可见, ξ 与 ρ 之间也为非线性转化关系, 此时, 参数 p 是最重要的影响因素。

需要注意的是, 由于 ξ_{ij} 的定义域范围在 $[-1, 1]$ 。所以 τ_{ij} 的范围也在 $[-1, 1]$, 但式(13)表明, τ_{ij} 的范围只在 $[0, 1]$ 内有意义。所以, 当遇到 $\tau_{ij} < 0$ 时, 首先计算 $|\tau_{ij}|$ 所对应的 $|\rho_{ij}|$, 然后令 ρ_{ij} 与 τ_{ij} 同号, 以保持两者符号的一致性。

1.4 分解谱密度函数的修正方法

当得到功率谱密度函数矩阵 \mathbf{S}^G 后, 利用谐波合成法可生成高斯随机场样本。然而, 由于从 ξ 到 ρ

函数为

$$\xi_{ii} = \frac{\exp(\rho_{ii} c_i^2) - 1}{\exp(c_i^2) - 1} \quad (7)$$

可见, ξ 与 ρ 为非线性转化关系, 而参数 c 是最重要的影响因素。

1.3 服从韦布尔分布样本的协方差函数转化关系

服从韦布尔分布随机过程 z_i 的三参数概率密度函数模型为

组独立随机过程。令 $y_i = x_{i1}^2 + x_{i2}^2, y_j = x_{j1}^2 + x_{j2}^2$, 则 w_i 和 w_j 互协方差函数 ξ_{ij} 与 y_i 和 y_j 互协方差函数 τ_{ij} 的转化关系为:

的转化受到参数的影响, 会使矩阵 ρ 中各元素间的相关性发生不同程度的改变, 进而破坏了 \mathbf{S}^G 的非负定性, 最终导致某些频点上的 \mathbf{S}^G 不能进行 Cholesky 分解。因此, 需要对 \mathbf{S}^G 在这些频率点处的值进行修正, 以确保 \mathbf{S}^G 在整个频率段范围内的非负定性。具体的修正过程可以参考文献[13]。

当得到服从高斯分布的随机过程后, 利用式(5)和式(9), 可以分别得到所需要模拟的服从对数正态分布和韦布尔分布的非高斯随机风压场样本。以下通过一个工程算例, 检验所生成样本的有效性, 并进行结构的风振响应分析。

2 工程算例

2.1 随机风压场样本的模拟及检验

以某大跨度空间膜屋盖结构为例, 经找形分析, 得到有限元模型(见图 1)。该结构所受到的随机风压分布情况参考有关风洞实验数据和文献^[14]。在后续分析中会发现, 当来流风为 0° 时(即: 来流风与整体坐标 y 向平行), 结构的响应最为不利。图 2 为该情况下, 风压系数的分布。鉴于此结构为对称结构, 图中

左半部分显示了结构不同区域所受到的平均风压系数;右半部分为根据 Kumar 和 Stathopoulos 等提出的划分标准^[5]对风压场所划分的高斯(G)和非高斯(NG)区域,以及某些模拟样本所在空间点的位置。

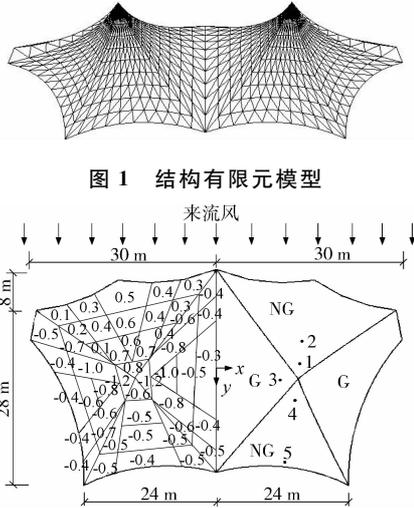


图 1 结构有限元模型

图 2 平均风压系数分布及高斯/非高斯风压区域划分图

经过对相关风洞实验样本的拟合分析,采用文献^[15]推荐的风压谱函数模型为

$$S_i^{NG}(\omega) = \frac{\sigma_i^2}{2\pi} m_i e^{-n_i \frac{\omega}{2\pi}} \quad (14)$$

式中: σ_i^2 为各点随机风压过程的方差; m_i 为位置参数; n_i 为形状参数。表 1 列出了图 2 中在某些代表性的空间点(点 2、点 3 和点 5)上,来流风风向角为 0° 时的风压功率谱参数值。

表 1 0° 风向角下节点风压谱系数

节点号	m_i	n_i	σ_i
2	1.187	1.865	0.042
3	0.832	0.902	0.152
5	0.962	1.176	0.027

由于节点间的空间相关性随节点间距离的变化而不同,所以随机风压样本间的互相关函数采用指数形式^[16]

$$\text{Coh}(z_i, z_j, \omega) = \exp\left[-\frac{\omega}{2\pi} \frac{\lambda_{ij}}{U(z)} |\Delta_{ij}| \right] \quad (15)$$

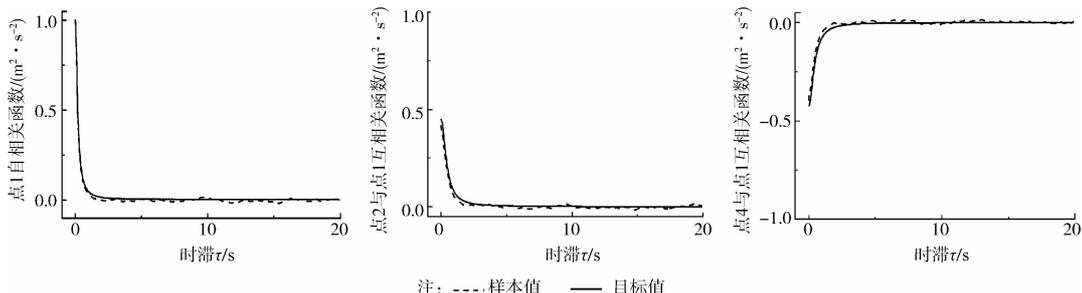


图 4 样本的自/互相关函数检验

式中: Δ_{ij} 为节点间的距离; $U(z)$ 为参考高度的风速; λ_{ij} 为指数衰减系数,根据节点的空间距离不同而取不同数值。表 2 列出了 0° 风向角下部分空间点之间的指数衰减系数值。

表 2 0° 风向角下部分空间点之间的指数衰减系数值

节点号	2	3	5
2	1.0	10.0	16.0
3	10.0	1.0	12.0
5	16.0	12.0	1.0

对该结构 88 个空间点所构成的随机风压场进行模拟。图 3 为在点 1~4 上服从韦布尔分布的非高斯随机过程样本。由图可见,点 1、点 2 以及点 4 的样本具有明显的非高斯特性,而点 3 的样本具有高斯特性。图 4 为点 1 样本自相关函数、点 2 与点 1 样本互相关函数、点 4 与点 1 样本互相关函数与相应目标值之间的校验情况。从图 4 可见,样本值与目标值比较接近,这说明所模拟的样本能满足目标相关函数(或功率谱密度函数)的要求。表 3 列出了 5 个点上随机样本的前四阶统计量(经 50 次模拟集平均的结果)。从表 3 可见,所模拟样本的前四阶统计量与目标值比较一致。

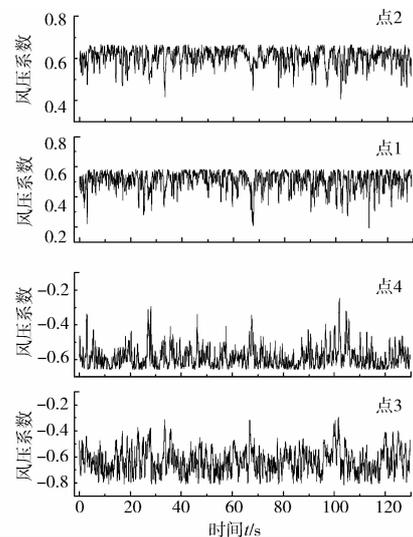


图 3 4 个空间点的随机风压时程样本

表 3 样本前四阶统计参数目标值及模拟值比较

节点编号	目标值				模拟值(对数正态分布模型)				模拟值(韦布尔分布模型)			
	μ_i	σ_i	$ S_i $	K_i	μ_i	σ_i	$ S_i $	K_i	μ_i	σ_i	$ S_i $	K_i
1	0.510 3	0.062 1	1.580 3	6.531 9	0.509 9	0.062 5	1.485 9	6.563 5	0.510 1	0.061 9	1.593 7	6.664 7
2	0.609 0	0.041 5	1.245 7	5.020 9	0.609 0	0.041 6	1.141 6	4.946 1	0.609 1	0.041 7	1.237 2	4.907 1
3	-1.240 3	0.152 1	0.754 2	3.500 2	-1.240 2	0.152 2	0.512 5	3.427 9	-1.239 8	0.151 4	0.745 2	3.482 6
4	-0.590 1	0.058 2	1.597 7	6.621 3	-0.589 8	0.058 6	1.511 1	6.681 0	-0.590 0	0.057 5	1.527 9	6.258 3
5	-0.362 1	0.027 1	1.023 5	4.232 7	-0.360 1	0.027 1	0.814 1	4.154 2	-0.361 1	0.270 0	1.009 6	4.121 1

上述 3 方面的验证说明所模拟的非高斯随机风压时程能满足各项统计特性的要求。

2.2 结构风振响应分析

将模拟的非高斯风压场样本作用于结构上,进行非线性时域分析,得到索、膜和支座 3 类构件的响应。图 5 为点 1、2、3 和点 5 处膜结构的内力响应时程图。由图 5(a)和(b)可见,虽然作用于点 1 和点 2 处的随机风压荷载呈现非高斯特征,但该处的响应仍呈现出高斯特征;然而,在点 5 处受到非高斯风压荷载后,该处的响应也呈现出非高斯特征,这是结构极值响应分析所不能忽视的情况。

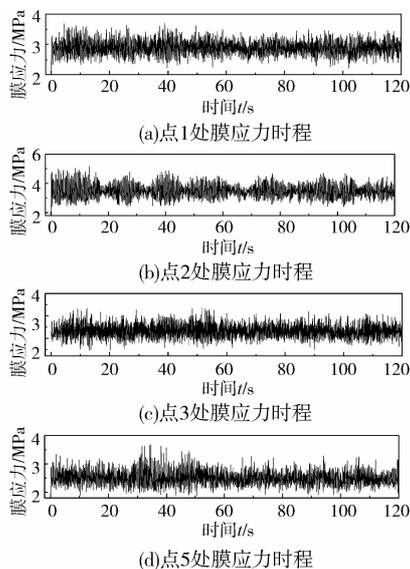


图 5 不同膜单元的应力时程

由于结构非线性的原因,结构响应和荷载并不成线性关系,所以需要引入构件整体风振响应系数的概念来指导实际结构的设计。考虑到结构响应的非高斯特征,参考文献[17]的建议,定义结构第 k 种整体风振响应系数为

$$\beta^k = \frac{\{ |R_i^k| \}_{\max}}{\{ |m_i^k| \}_{\max}} \quad (16)$$

式中: $\{ |R_i^k| \}_{\max}$ 、 $\{ |m_i^k| \}_{\max}$ 分别为同一类单元中,第 k 种响应最大值和均值; β^k 为第 k 种响应的整体风振系数,对该结构而言,这些响应包括:索、膜的节点位移,索、膜的内力,支座反力。

表 4 为风向角为 0° 、 45° 和 90° 情况下,施加服从高斯分布、韦布尔分布和对数正态分布随机风压时程后,结构各类构件的整体风振系数数值。从表 4 可以看出:

1) 在不同的风向角下,当该结构受到非高斯随机风压作用时,索的整体风振响应系数要比高斯激励下的系数大,这主要是因为索位于结构的边缘,受到非高斯随机风压的影响较大所致。膜的响应值在高斯和非高斯激励下基本接近,这说明非高斯激励对膜整体的风振响应影响并不明显。

2) 对于相同的风向角,在服从对数正态分布的随机风压作用下所得到索和膜的风振响应系数,比这些构件在服从韦布尔分布的随机风压作用时得到的系数略大。这说明不同类型的非高斯随机风压对该结构构件的响应有一定影响,但不明显。

3) 在 0° 风向角下,该结构的响应最不利。由于索的刚度远大于膜,所以在实际设计中,索以内力限

表 4 结构不同构件的整体风振响应系数

响应类型	0° 风向角			45° 风向角			90° 风向角		
	高斯分布	对数正态分布	韦布尔分布	高斯分布	对数正态分布	韦布尔分布	高斯分布	对数正态分布	韦布尔分布
索位移	3.57	3.90	3.81	3.46	3.72	3.53	3.50	3.83	3.67
膜位移	2.29	2.18	2.11	2.27	2.15	1.98	2.16	2.20	2.02
索内力	2.61	3.01	2.81	2.36	2.44	2.66	2.55	2.49	2.71
膜内力	2.17	2.21	2.10	2.01	2.07	2.05	2.19	2.11	2.03
支座反力	3.65	3.56	3.51	3.42	3.27	3.39	3.59	3.35	3.22

值控制,膜以位移限值控制^[15],而支座以反力限值控制。由此,对于该结构不同构件采用不同的整体风振响应系数:对索取值为3.0,对膜取值2.2,对支座取值3.6。

3 结论

基于非线性无记忆转换法理论,提出了模拟作用于屋盖结构的高斯/非高斯混合随机风压场样本的具体方法,并通过检验证明所生成的样本能准确描述目标样本的统计特性。将生成的随机风压样本作用于某大跨度膜屋盖结构进行风振时域分析后发现:

1)风压样本的非高斯特性对结构边缘的构件(如索等)有不容忽视的影响。

2)对于该结构而言,0°风向角作用下的结构响应最为不利,建议设计中对不同结构构件采用不同的整体风振响应系数,对索取值为3.0,对膜取值2.2,对支座取值3.6。

参考文献:

- [1] 田玉基,杨庆山. 国家体育场屋盖结构风振响应的时域分析[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 95-99.
Tian Y J, Yang Q S. Wind-induced responses of Beijing National Stadium using time history analysis method [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 95-99.
- [2] Luo J J, Han D J. 3D wind-induced response analysis of a cable-membrane structure [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2009, 10(3): 337-344.
- [3] 王剑文,孙文波,陈汉翔. 车辐式大跨度张拉索膜结构的风振响应分析[J]. 空间结构, 2010, 16(2): 67-71.
Wang J W, Sun W B, Chen H X. Wind-induced dynamic analysis of ring-shape tensile cable membrane structure [J]. Spatial Structures, 2010, 16(2), 67-71.
- [4] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 3版. 上海: 同济大学出版社, 2008.
- [5] Kumar K S, Stathopoulos T. Wind loads on low building roofs: a stochastic perspective [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 944-956.
- [6] Giufrè M, Gusella V, Grigoriu M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings I: stochastic field [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9): 981-989.
- [7] 孙瑛. 大跨屋盖结构风荷载特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [8] Dong X, Ye J H. The point and area-averaged wind pressure influenced by conical vortices on saddle roofs [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 101: 67-84.
- [9] Grigoriu M. Applied non-Gaussian processes: example, theory, simulation, linear vibration and MATLAB solutions [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [10] 黄鹏,顾明. 悬臂弧形挑篷脉动风压的概率特征[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 1153-1157.
Huang P, Gu M. Probabilistic characteristics of pressure fluctuations on cantilevered arc roofs [J]. Journal of Tongji University: Science, 2007, 35(9): 1153-1157.
- [11] Szajnowski W J. The generation of correlated Weibull clutter for signal detection problems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1977, 13(5): 536-540.
- [12] Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of mathematical functions [M]. New York: Dover, 1972.
- [13] Luo J J, Su C, Han D J. Simulation of multivariate stochastic wind pressure [C] // Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering, 2011, Amsterdam, the Netherlands.
- [14] 叶继红,候信真. 大跨屋盖脉动风压的非高斯特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 9-15.
Ye J H, Hou X Z. Non-Gaussian features of fluctuating wind pressures on long span roofs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 9-15.
- [15] Kumar K S, Stathopoulos T. Power spectra of wind pressures on low building roofs [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76: 665-674.
- [16] Solari G, Piccardo G. Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 16(1): 73-86.
- [17] Chen B, Wu Y, Shen S Z. Wind-induced response analysis of conical membrane structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2005, 12(5): 481-487.