

# 考虑风振响应特性的多目标等效静力风荷载实用分析方法

李玉学<sup>1,2</sup>, 冯励睿<sup>1,2</sup>, 李海云<sup>1,2</sup>, 田玉基<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省风工程与风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 北京交通大学结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 针对大跨屋盖结构风效应分析理论框架中不同环节相应分析方法众多且未能较好协调统一的问题, 以最后环节的等效静力风荷载求解为目标, 提出一种考虑风振响应特性的多目标等效静力风荷载实用分析方法。基于脉动风振背景响应、共振响应及其耦合项组合结果, 利用 LRC 法基本原理推导构造多目标等效方程的基本向量, 实现与脉动风振响应完全协调对应, 且能够再现风振响应特性, 采用最小二乘法求解等效方程, 得到多目标等效静力风荷载; 引入应变能概念, 考虑结构所有节点响应, 根据三分量各响应应变能对总响应应变能的贡献, 定义响应分量贡献系数, 据此系数进行大跨屋盖结构脉动风振响应特性类型判定, 在此基础上, 根据风振响应特性类型判定结果, 精准构造多目标等效方程并进行最小二乘数值求解, 实现多目标等效静力风荷载的高效实用计算。以北京奥林匹克公园网球中心赛场屋盖结构为例, 进行风振响应特性类型判定, 根据判定结果, 计算其多目标等效静力风荷载以及该等效静力风荷载作用下的结构静力响应, 并与频域分析所得目标响应进行对比, 结果表明: 所提方法能够精准高效计算结构多目标等效静力风荷载, 具有工程应用价值。

**关键词:** 等效静力风荷载; 大跨屋盖结构; 多目标; 响应类型; 三分量响应

**中图分类号:** TU312<sup>+</sup>.1; TU393.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0140-08

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.015

## 引言

风荷载确定、风振响应分析和风效应静力等效是结构风效应分析理论框架的三个主要环节, 针对重要且造型复杂、钝体形态明显的大跨屋盖结构, 表面风荷载需要依靠风洞试验确定<sup>[1]</sup>。围绕风振响应分析和风效应静力等效, 国内外学者提出了多种分析方法和处理手段。

对于大跨屋盖结构风振响应分析, 通常借助随机振动理论进行, 形成了直接求得总响应和分量组合求得总响应两种思路, 其中直接求得总响应以模态位移法和模态加速度法为代表, 比如, 顾明等<sup>[2]</sup>基于模态位移法编制了大跨屋盖结构风振响应计算程序; 方勇等<sup>[3]</sup>根据模态加速度法基本原理, 推导了大跨屋盖结构风振响应计算公式; 为了提高计算效率, 刘彪等<sup>[4]</sup>引入谐波激励原理, 采用基于风荷载 POD 分解的 Ritz 向量代替自由振动模态, 计算了深圳国际会展中心标准展厅屋盖风振响应。分量组合求得

总响应以 Davenport<sup>[5]</sup>提出的脉动风振背景响应和共振响应概念为基础发展而来, 由于其能够较好地反映风荷载作用机理, 从而得到了广泛应用并不断发展。比如, 田玉基等<sup>[6]</sup>采用背景响应和共振响应的分量组合法计算了国家体育场屋盖结构位移风振响应。李玉学等<sup>[7]</sup>基于时域内定义, 推导了考虑耦合效应的大跨屋盖结构风振响应背景分量和共振分量实用组合公式。Su 等<sup>[8]</sup>在基准响应基础上, 引入背景效应系数和共振效应系数, 分别考虑脉动风荷载相关性和动力效应影响, 得到了结构背景响应和共振响应。

风效应静力等效是在结构风振响应分析基础上, 根据响应等效原则, 给出方便设计人员直接使用的等效静力风荷载。主要有单目标等效和多目标等效两种处理手段, 其中单目标等效已经趋于成熟, 形成了阵风荷载因子法<sup>[9]</sup>、惯性力法<sup>[10-11]</sup>以及荷载响应相关法<sup>[12-13]</sup>等多种分析方法。研究表明, 对于风振响应计算需要考虑多阶模态参与的大跨屋盖结构, 单目标等效不能较好适用, 于是在单目标等效研究

**收稿日期:** 2020-07-19; **修订日期:** 2020-11-21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51278314, 51878040); 河北省自然科学基金资助项目(E2019210031); 中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G); 中央支持地方高校科研团队建设项目(XMPS-24)。

基础上,提出了多目标等效处理方法,比如,Tamura等<sup>[14]</sup>和段旻等<sup>[15]</sup>根据不同等效目标得到的多组等效静力风荷载,分别采用取平均值与取包络线的处理方法得到多目标等效静力风荷载。Patruno等<sup>[16]</sup>和罗楠等<sup>[17]</sup>分别采用本征表皮模态和本征正交模态作为基本向量构造多目标等效静力风荷载。Zhou等<sup>[18]</sup>在对结构响应分组基础上,采用数值方法得到了各组响应对应的多目标等效静力风荷载。

上述研究成果丰富和完善了大跨屋盖结构风效应分析理论,然而,由于不同环节相应分析方法之间未能较好协调统一,在具体方法选取和操作应用上还没有形成一脉相承,环环相扣的严密体系,设计人员面对众多分析处理方法常常感觉无从下手,给工程应用带来诸多不便,由于方法选取不当,或者造成计算资源浪费,或者使得计算精度不足。

因此,本文以大跨屋盖结构风效应分析理论框架中的最后环节,即等效静力风荷载求解为目标,基于脉动风振背景响应、共振响应及其耦合项组合(下文称为三分量完全组合)分析结果,根据LRC法基本原理分别推导构造多目标等效方程的背景分量、共振分量及其耦合项分量,实现与脉动风振响应各分量的完全协调对应,采用最小二乘法求解等效方程,得到兼顾多响应目标的等效静力风荷载,此等效静力风荷载作用下的结构静力响应在数值上最接近实际目标响应。以此为基础,引入应变能概念,根据三分量各响应应变能对总响应应变能的贡献,对结构脉动风振响应特性进行分类,针对不同响应特性类型结构,建立高效、实用的多目标等效静力风荷载分析体系。

## 1 三分量目标响应等效静力风荷载

### 1.1 脉动风振响应三分量

大跨屋盖结构在脉动风荷载作用下的运动方程为:

$$M\ddot{X}_d(t) + C\dot{X}_d(t) + KX_d(t) = LP(t) \quad (1)$$

式中  $M$ ,  $C$  和  $K$  分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{X}_d(t)$ ,  $\dot{X}_d(t)$  和  $X_d(t)$  分别为加速度、速度和位移响应;  $P(t)$  为测压点处脉动风荷载列向量;  $L$  表示测压点与节点间等效力转换矩阵。

根据模态叠加原理,选取  $m$  阶主要参振模态(选取方法参见文献[19]),则式(1)可以进一步表示为:

$$X_d(t) = K^{-1}LP(t) + [\Phi Q(t) - \Phi H_0 \Phi^T LP(t)] \quad (2)$$

式中  $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_m]$ , 其中元素  $\phi_m$  为第  $m$

阶模态向量;  $Q(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ \cdots \ q_m(t)]^T$ , 其中元素  $q_m(t)$  为第  $m$  阶模态广义模态坐标;  $H_0 = \text{diag}[1/\omega_1^2 \ 1/\omega_2^2 \ \cdots \ 1/\omega_m^2]$ , 其中元素  $\omega_m$  为第  $m$  阶模态圆频率,  $\text{diag}[\cdot]$  表示对角矩阵;  $T$  表示矩阵转置。

根据背景响应和共振响应的概念<sup>[5]</sup>,式(2)右边第一项表示脉动风荷载的准静力效应,定义为背景响应  $X_{d,b}(t)$ ,中括号项定义为共振响应  $X_{d,r}(t)$ 。

根据随机振动理论,由式(2)可以得到结构某一自由度  $i$  上的总响应方差:

$$\sigma_{x,i}^2 = \sigma_{x,b,i}^2 + \sigma_{x,r,i}^2 + 2\rho_{x,br,i}\sigma_{x,b,i}\sigma_{x,r,i} \quad (3)$$

式中  $\sigma_{x,b,i}^2$  和  $\sigma_{x,r,i}^2$  分别为由  $X_{d,b}(t)$  和  $X_{d,r}(t)$  得到的结构第  $i$  自由度上背景响应方差和共振响应方差;  $\rho_{x,br,i}$  为二者的相关系数,表征其耦合效应,计算公式为:

$$\rho_{x,br,i} = \frac{\sigma_{x,br,i}^2}{\sigma_{x,b,i}\sigma_{x,r,i}} = \frac{\text{diag}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} S_{x,br}(\omega)d\omega\right]}{\sqrt{\text{diag}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} S_{x,b}(\omega)d\omega\right] \cdot \text{diag}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} S_{x,r}(\omega)d\omega\right]}} \quad (4)$$

式中  $S_{x,b}(\omega)$ ,  $S_{x,r}(\omega)$  和  $S_{x,br}(\omega)$  分别为结构背景、共振及其耦合项响应谱矩阵;  $\text{diag}[\cdot]_i$  表示取矩阵对角线上第  $i$  个元素。

式(3)为脉动风振响应三分量完全组合结果,其中前两项分别为背景分量和共振分量,第三项为背景、共振耦合项分量。

### 1.2 等效静力风荷载三分量组合

由式(3)可见,结构某一自由度  $i$  上的总脉动风振响应包括背景响应、共振响应及其耦合项三部分,按照风效应静力等效的概念<sup>[5]</sup>,与上述脉动风振响应完全对应的等效静力风荷载也由三部分组成,即:

$$F_{eq,i} = F_{eq,b,i} + F_{eq,r,i} + F_{eq,br,i} \quad (5)$$

式中  $F_{eq,b,i}$ ,  $F_{eq,r,i}$  和  $F_{eq,br,i}$  分别为保证结构第  $i$  自由度上响应极值相等的等效静力风荷载背景分量、共振分量及其耦合项分量,需要根据风振响应分析结果进一步分别求得。

#### 1.2.1 背景响应等效静力风荷载

由式(2)可得背景响应瞬时等效静力风荷载  $F_{eq,b}(t)$  方差矩阵:

$$\begin{aligned} \sigma_{eq,b}^2 &= E[F_{eq,b}(t) \cdot F_{eq,b}^T(t)] = \\ &E[KX_{d,b}(t) \cdot X_{d,b}^T(t)K^T] = \\ &E[KK^{-1}LP(t) \cdot P^T(t)L^TK^{-1T}K^T] = \\ &L\sigma_{pp}^2L^T \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $\sigma_{pp}^2$  为脉动风荷载方差矩阵。

根据LRC法原理<sup>[12]</sup>,保证结构第  $i$  自由度上背

景响应极值相等的等效静力风荷载为:

$$F_{eq,b,i} = g_b \sigma_{eq,b}^2 D_i^T / \sigma_{x,b,i} \quad (7)$$

式中  $D_i$  为结构第  $i$  自由度上位移响应的影响系数向量;  $g_b$  为背景响应峰值因子, 可以根据极值穿越理论求得。

### 1.2.2 共振响应等效静力风荷载

由式(2)可得共振响应瞬时等效静力风荷载  $F_{eq,r}(t)$  方差矩阵:

$$\begin{aligned} \sigma_{eq,r}^2 &= E [ F_{eq,r}(t) \cdot F_{eq,r}^T(t) ] = \\ &E [ K X_{d,r}(t) \cdot X_{d,r}^T(t) K^T ] = \\ &E \{ K [ \Phi Q(t) - \Phi H_0 \Phi^T LP(t) ] \cdot \\ &[ \Phi Q(t) - \Phi H_0 \Phi^T LP(t) ]^T K^T \} = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} K \Phi H_r(\omega) \Phi^T L S_{pp}(\omega) L^T \cdot \\ &\Phi H_r^{*T}(\omega) \Phi^T K^T d\omega \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $H_r(\omega) = \text{diag} [ H_{1,r}(\omega) H_{2,r}(\omega) \cdots H_{m,r}(\omega) ]$ ,

其中元素  $H_{m,r}(\omega) = \frac{(\omega/\omega_m)^2 - 2i\zeta_m \omega/\omega_m}{\omega_m^2 [1 - (\omega/\omega_m)^2 + 2i\zeta_m \omega/\omega_m]}$

为结构第  $m$  阶模态共振响应频响函数,  $i$  为虚数单位,  $\zeta_m$  为结构第  $m$  阶模态阻尼比;  $S_{pp}(\omega)$  为脉动风荷载谱矩阵; “\*” 表示复数取共轭。

根据 LRC 法原理<sup>[12]</sup>, 保证结构第  $i$  自由度上共振响应极值相等的等效静力风荷载为:

$$F_{eq,r,i} = g_r \sigma_{eq,r}^2 D_i^T / \sigma_{x,r,i} \quad (9)$$

式中  $g_r$  为共振响应峰值因子, 可以根据极值穿越理论求得。

### 1.2.3 背景、共振响应耦合项等效静力风荷载

由式(2)可得背景、共振响应耦合项瞬时等效静力风荷载  $F_{eq,br}(t)$  方差矩阵:

$$\begin{aligned} \sigma_{eq,br}^2 &= E [ F_{eq,br}(t) \cdot F_{eq,br}^T(t) ] = \\ &E [ K X_{d,b}(t) \cdot X_{d,r}^T(t) K^T ] = \\ &E \{ K K^{-1} LP(t) \cdot [ \Phi Q(t) - \\ &\Phi H_0 \Phi^T LP(t) ]^T K^T \} = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} L S_{pp}(\omega) L^T \Phi H_r^{*T}(\omega) \Phi^T K^T d\omega \end{aligned} \quad (10)$$

根据 LRC 法原理<sup>[12]</sup>, 保证结构第  $i$  自由度上背景、共振响应耦合项极值相等的等效静力风荷载为:

$$F_{eq,br,i} = g_{br} \sigma_{eq,br}^2 D_i^T / \sigma_{x,br,i} \quad (11)$$

式中  $g_{br}$  为背景、共振响应耦合项峰值因子, 可以根据极值穿越理论求得。

## 2 基于最小二乘法的多目标等效静力风荷载

式(5)表示的三分量等效静力风荷载, 能够保证结构第  $i$  自由度上静力响应与脉动风振响应极值相

等, 如前所述, 对于大跨屋盖结构, 需要兼顾多个目标响应等效, 因此, 本节以脉动风振响应三分量等效静力风荷载为基本向量, 构造多目标等效静力风荷载方程, 并采用最小二乘法对其求解, 以得到多目标等效静力风荷载, 主要过程为:

(1) 以式(5)表示的三分量等效静力风荷载为基本向量, 构造多目标等效静力风荷载表达式:

$$F_{eq} = c_1 F_{eq,1} + c_2 F_{eq,2} + \cdots + c_j F_{eq,j} + \cdots + c_l F_{eq,l} \quad (12)$$

式中  $F_{eq,j}$  和  $c_j$  分别为选定的第  $j$  个三分量等效静力风荷载基本向量及其组合系数,  $l$  为基本向量数量。

(2) 根据多目标等效静力风荷载作用下结构静力响应与目标响应极值相等构造等效方程组, 并采用最小二乘原理数值求解等效方程组得到组合系数  $c_j$ 。

$$D_{q \times N} F_{eq} = \hat{X}_{q \times 1} \quad (13)$$

式中  $D_{q \times N}$  为结构目标响应影响系数矩阵,  $q$  和  $N$  分别为目标响应的数量和结构节点数量;  $\hat{X}_{q \times 1}$  为由  $q$  个目标响应组成的列向量, 其元素为:

$$\hat{x}_j = g_b \sigma_{x,b,j} + g_r \sigma_{x,r,j} + g_{br} \sigma_{x,br,j} \quad (14)$$

在实际计算过程中, 一般所选取的三分量等效静力风荷载基本向量数量  $l$  较少, 而结构设计所关心的目标响应数量  $q$  较多, 即  $q > l$ , 因此方程组(13)只有最小二乘解  $c_j^*$ , 将其代入式(12)便可得多目标等效静力风荷载:

$$F_{eq}^* = c_1^* F_{eq,1} + c_2^* F_{eq,2} + \cdots + c_j^* F_{eq,j} + \cdots + c_l^* F_{eq,l} \quad (15)$$

式(15)表示的多目标等效静力风荷载, 能够保证在该等效静力风荷载作用下, 结构静力响应与等效目标的实际动力响应极值误差最小。

## 3 多目标等效静力风荷载实用分析方法

由第2节基于最小二乘法的多目标等效静力风荷载求解过程可见, 该方法的优点在于有效兼顾了结构多个目标响应极值, 且构造多目标等效静力风荷载的基本向量  $F_{eq,j}$  与结构脉动风振响应三分量直接完全协调对应, 具有明确的物理意义。另外, 从线性代数向量线性表示原理来看, 若选取的基本向量  $F_{eq,j}$  合理, 则目标响应向量  $\hat{X}_{q \times 1}$  在这些基本向量  $F_{eq,j}$  上的投影值会很大, 这样只需少数几个基本向量  $F_{eq,j}$  就可以有效表示多目标等效静力风荷载  $F_{eq}$ 。对于复杂多样的大跨屋盖结构, 其脉动风振响应特

性差别较大,即脉动风荷载作用下,背景响应、共振响应及其耦合项三分量对结构总响应贡献程度不同,若能据此分别选取相应的基本向量  $F_{eq,j}$ ,将会提高多目标等效静力风荷载的计算效率。

### 3.1 结构脉动风振响应特性类型判定

基于脉动风振响应三分量应变能贡献程度,判定其脉动风振响应特性类型。

#### 3.1.1 背景分量应变能

根据式(2),脉动风荷载在背景响应分量上做功可以表示为:

$$W_b(t) = \frac{1}{2} \mathbf{X}_{d,b}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{X}_{d,b}(t) = \frac{1}{2} \sum \text{diag} [ \mathbf{L} \mathbf{P}(t) \mathbf{P}^T(t) \mathbf{L}^T (\mathbf{K}^{-1})^T ] \quad (16)$$

式中  $\sum \text{diag} [\cdot]$  表示矩阵的对角线元素求和。

对  $W_b(t)$  取数学期望,得到具有统计意义的背景响应应变能:

$$\bar{W}_b = \frac{1}{2} \sum \text{diag} [ \mathbf{L} \sigma_{pp}^2 \mathbf{L}^T (\mathbf{K}^{-1})^T ] \quad (17)$$

#### 3.1.2 共振分量应变能

根据式(2),脉动风荷载在结构共振响应分量上做功可以表示为:

$$W_r(t) = \frac{1}{2} \mathbf{X}_{d,r}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{X}_{d,r}(t) + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}_{d,r}^T(t) \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}}_{d,r}(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [ \omega_j^2 q_{j,r}^2(t) + \dot{q}_{j,r}^2(t) ] \quad (18)$$

式中  $q_{j,r}(t)$  为第  $j$  阶模态广义模态坐标共振分量;“ $\dot{\cdot}$ ”表示取一阶导数。

对  $W_r(t)$  取数学期望,得到具有统计意义的共振响应应变能:

$$\bar{W}_r = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [ \omega_j^2 \sigma_{q_{j,r}}^2 + \sigma_{\dot{q}_{j,r}}^2 ] \quad (19)$$

式中  $\sigma_{q_{j,r}}^2$  为第  $j$  阶模态广义模态坐标共振分量方差。

#### 3.1.3 背景、共振耦合项分量应变能

根据式(2),脉动风荷载在结构背景、共振响应耦合项上做功可以表示为:

$$W_{br}(t) = \frac{1}{2} \mathbf{X}_{d,br}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{X}_{d,br}(t) + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}_{d,br}^T(t) \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}}_{d,br}(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [ \omega_j^2 q_{j,br}^2(t) + \dot{q}_{j,br}^2(t) ] \quad (20)$$

式中  $\mathbf{X}_{d,br}(t)$  为结构瞬时位移响应背景、共振耦合

项分量组成的列向量; $q_{j,br}(t)$  为  $j$  阶模态广义模态坐标的背景、共振耦合项分量。

对  $W_{br}(t)$  取数学期望,得到具有统计意义的背景、共振响应耦合项应变能:

$$\bar{W}_{br} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [ \omega_j^2 \sigma_{q_{j,br}}^2 + \sigma_{\dot{q}_{j,br}}^2 ] \quad (21)$$

式中  $\sigma_{q_{j,br}}^2$  为第  $j$  阶模态广义模态坐标背景、共振耦合项分量方差。

#### 3.1.4 结构脉动风振响应特性类型判定结果

结构脉动风振总响应应变能由背景、共振及其耦合项响应应变能三部分组成,定义各响应分量的贡献系数  $\eta_k$ , 据此综合判定结构脉动风振响应特性类型。

$$\eta_k = \frac{\bar{W}_k}{\bar{W}_{\text{total}}} \quad (22)$$

式中  $\bar{W}_{\text{total}} = \bar{W}_b + \bar{W}_r + \bar{W}_{br}$ ;  $k$  分别取  $b, r$  和  $br$ 。

根据  $\eta_k$  的不同取值,表 1 列出了结构脉动风振响应特性类型判定标准。

表 1 大跨屋盖结构脉动风振响应特性类型判定标准

Tab.1 Criterion of fluctuating wind-induced response category

类型	贡献系数			类型描述
	$\eta_b$	$\eta_r$	$\eta_{br}$	
I	$\eta_b < \epsilon_b$	-	$\eta_{br} < \epsilon_{br}$	弱耦合柔性
II	$\eta_b < \epsilon_b$	-	$\eta_{br} > \epsilon_{br}$	强耦合柔性
III	-	$\eta_r < \epsilon_r$	$\eta_{br} < \epsilon_{br}$	弱耦合刚性
IV	-	$\eta_r < \epsilon_r$	$\eta_{br} > \epsilon_{br}$	强耦合刚性
V	$\eta_b > \epsilon_b$	$\eta_r > \epsilon_r$	$\eta_{br} < \epsilon_{br}$	弱耦合刚柔适中
VI	$\eta_b > \epsilon_b$	$\eta_r > \epsilon_r$	$\eta_{br} > \epsilon_{br}$	强耦合刚柔适中

注:表中  $\epsilon_b, \epsilon_r$  和  $\epsilon_{br}$  分别为  $\eta_b, \eta_r$  和  $\eta_{br}$  的误差限,根据工程精度要求确定。

### 3.2 不同类型结构多目标等效静力风荷载

3.1 节中将大跨屋盖结构脉动风振响应特性划分为 I ~ VI 类,结合 1.2 节的分析,分别给出其多目标等效静力风荷载实用分析方法。

对于 I 类弱耦合柔性结构,共振响应分量占主导地位,背景响应及其背景、共振耦合项可以忽略不计,据此,式(12)构造多目标等效静力风荷载的基本向量只需包括共振分量,即  $F_{eq,j} = F_{eq,r,j}$ ,同时,式(14)中目标极值响应也只需包括共振分量,即  $\hat{x}_j = g_r \sigma_{x,r,j}$ ,将其代入方程(13),求解组合系数的最小二乘解  $c_j^*$ ,由式(15)得到其多目标等效静力风荷载。

II ~ VI 类结构也只需对  $F_{eq,i}$  和  $\hat{x}_j$  进行相应的处理,具体如表 2 所示,其余过程同 I 类结构。

表 2 I~Ⅵ类结构多目标等效静力风荷载求解参数取值  
Tab. 2 Calculation parameters of multiple targets equivalent static wind load for I~Ⅵ structures

类型	基本向量 $F_{eq,j}$	目标响应 $\hat{x}_j$
I	$F_{eq,r,j}$	$g_r \sigma_{x,r,j}$
II	$F_{eq,r,j} + F_{eq,br,j}$	$g_r \sigma_{x,r,j} + g_{br} \sigma_{x,br,j}$
III	$F_{eq,b,j}$	$g_b \sigma_{x,b,j}$
IV	$F_{eq,b,j} + F_{eq,br,j}$	$g_b \sigma_{x,b,j} + g_{br} \sigma_{x,br,j}$
V	$F_{eq,b,j} + F_{eq,r,j}$	$g_b \sigma_{x,b,j} + g_r \sigma_{x,r,j}$
VI	$F_{eq,b,j} + F_{eq,r,j} + F_{eq,br,j}$	$g_b \sigma_{x,b,j} + g_r \sigma_{x,r,j} + g_{br} \sigma_{x,br,j}$

#### 4 本文所提方法主要分析步骤

本文所提考虑脉动风振响应特性的大跨屋盖结构多目标等效静力风荷载实用分析方法,主要步骤包括:

(1)首先对大跨屋盖结构进行动力特性分析及刚性模型测压试验,分别得到结构模态信息以及结构表面风荷载信息,包括各阶模态自振频率、模态分布、阻尼比以及风荷载方差、功率谱等。

(2)根据步骤(1)所得结构动力特性参数和风荷载参数,分别由式(17),(19)和(21)计算得到各响应分量应变能  $\bar{W}_b$ ,  $\bar{W}_r$  和  $\bar{W}_{br}$ ,并代入式(22)计算各响应分量的贡献系数  $\eta_b$ ,  $\eta_r$  和  $\eta_{br}$ ,同时确定其误差限  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_{br}$ ,由此误差限及表1综合判定结构脉动风振响应特性类型。

(3)根据步骤(2)大跨屋盖结构脉动风振响应特性类型判定结果,由表2选定多目标等效方程(13)中参数  $F_{eq,j}$  和  $\hat{x}_j$  的组成形式,据此分别由式(7),(9)和(11)计算需要的等效静力风荷载分量  $F_{eq,b,j}$ ,  $F_{eq,r,j}$  和  $F_{eq,br,j}$ ,同时由式(3)计算需要的目标响应  $\sigma_{x,b,j}$ ,  $\sigma_{x,r,j}$  和  $\sigma_{x,br,j}$ 。

(4)将步骤(3)组合得到的  $F_{eq,j}$  和  $\hat{x}_j$  分别代入方程(13),采用最小二乘法对其求解得到组合系数  $c_j^*$ ,然后代入式(15)得到相应的多目标等效静力风荷载  $F_{eq}^*$ 。

#### 5 算例分析

根据本文所提考虑脉动风振响应特性的大跨屋盖结构多目标等效静力风荷载实用分析方法,以北京奥林匹克公园网球中心赛场屋盖结构为例,对其脉动风振响应特性进行判定,根据判定结果计算其多目标等效静力风荷载,并对所得多目标等效静力风荷载作用下结构静力响应与目标响应进行对比,以检验所提方法的有效性。

#### 5.1 工程概况

北京奥林匹克公园网球中心赛场屋盖由12个“z”形单元组成,形成如“莲花”的环形结构,底部平台高6.0 m,直径79.7 m,结构新颖,造型独特,如图1所示。“z”形屋盖单元挑蓬最高点标高23.0 m,悬挑长度21.6 m,为方便排水,设置约3°的倾角。该屋盖体型特殊,钝体三维绕流特性显著,属于重要且复杂的风敏感结构,需借助风洞试验获取结构风效应分析所需的风荷载。

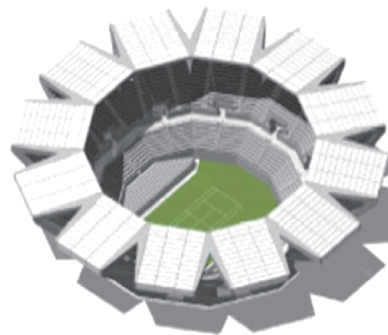


图1 北京奥林匹克公园网球中心赛场屋盖

Fig. 1 Roof of Beijing Olympic green tennis center stadium

#### 5.2 模型风洞试验及结构动力特性分析

屋盖模型风洞试验在北京大学力学与工程科学系低速风洞中进行,试验模型按照1:120进行缩尺设计,采用有机玻璃和ABS板制成,具有足够的强度和刚度,满足测压试验要求。根据结构对称性,在第3,4单元上、下表面共布置156个测点,每个测点采样点数为3900,采样频率为400 Hz,试验模拟地面粗糙度为B类,来流风速剖面 and 湍流度剖面如图2所示(图中Z和Z<sub>r</sub>分别表示高度和参考点高度;V和V<sub>g</sub>分别表示风速和参考点风速;I<sub>u</sub>表示湍流度)。测试风向角范围为0°~360°,每隔7.5°采集数据1次,定义正北方向为0°风向角,顺时针增大,其中屋盖风洞试验模型、单元编号、测压点布置及风向角定义如图3所示。

为了获取屋盖结构动力特性信息,建立了结构有限元模型,并进行动力特性分析,根据分析结果,提取屋盖结构前100阶模态信息,包括模态分布和自振频率,图4为屋盖结构前100阶自振频率,可见,该屋盖结构自振频率分布密集,风振响应分析需要考虑多阶模态参振。

#### 5.3 结构脉动风振响应特性类型判定及风振响应计算

如5.2节所述,该屋盖结构风振响应分析需要考虑多阶模态参振,据此,从结构动力特性分析提取的前100阶模态中选取第1,2,4,3,6阶等共17阶为主要参振模态,其中主要参振模态选取方法参见文

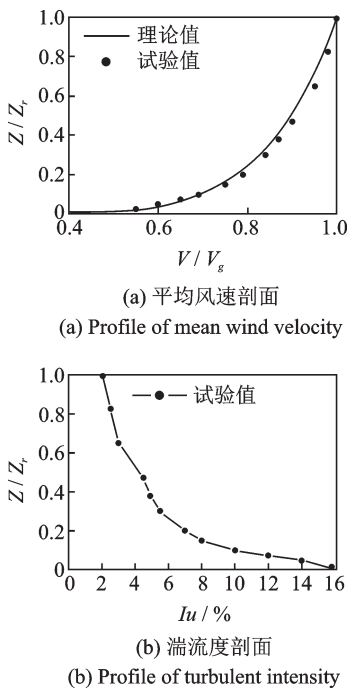


图 2 试验平均风速剖面 and 湍流度剖面  
Fig. 2 Profiles of mean wind velocity and turbulent intensity in test

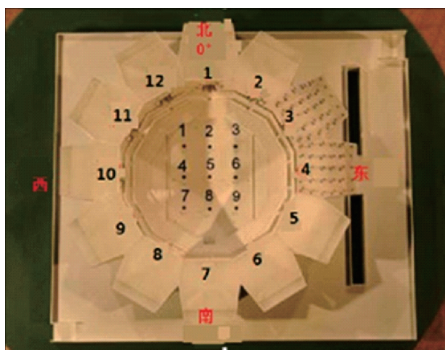


图 3 屋盖风洞试验模型、单元编号、测压点布置及风向角定义  
Fig. 3 Model for wind tunnel test, element number, pressure taps arrangement and definition of wind angle

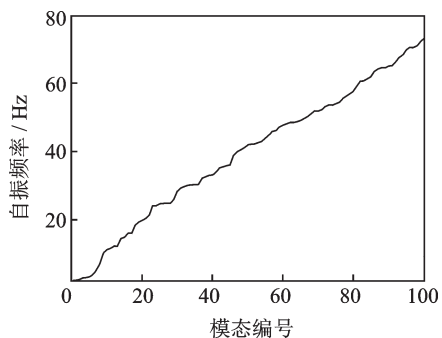


图 4 屋盖结构前 100 阶自振频率分布  
Fig. 4 Natural frequency distribution of the first 100 modes

献[19]。

按照本文所提方法,考虑所选取的 17 阶主要参振模态,利用 0° 风向角时屋盖模型风洞测压试验数据,由式(17),(19)和(21),计算得到背景、共振及其

耦合项响应分量应变能  $\bar{W}_b$ ,  $\bar{W}_r$  和  $\bar{W}_{br}$ , 并将其代入式(22)计算得到相应的响应分量贡献系数  $\eta_b$ ,  $\eta_r$  和  $\eta_{br}$  分别为 0.416, 0.543 和 0.041, 误差限  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_{br}$  均取 0.05, 由表 1 判定该屋盖结构脉动风振响应特性类型为 V 类, 即结构风效应分析只需考虑背景分量和共振分量。

根据该屋盖结构脉动风振响应特性类型判定结果,基于随机振动理论,在频域内由背景响应和共振响应组合得到了脉动风荷载作用下结构竖向位移响应极值,如图 5 所示。

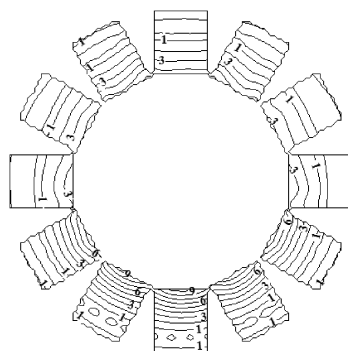


图 5 脉动风荷载作用下结构竖向位移响应极值(单位:mm)  
Fig. 5 Vertical peak displacement response of structure induced by fluctuating winds (Unit: mm)

由图 5 可见,所选定 0° 风向角下,该屋盖结构每个单元上的位移响应极值均由悬挑端(内环位置)向边缘区域(外环位置)逐渐减小,其中处于尾流区域的 6, 7 和 8 号单元挑棚悬挑端处位移响应极值较其他单元更大(来流方向及单元编号如图 3 所示),最大值达到 9 mm, 因此,选取结构内环位置处位移响应极值较大的节点为目标响应控制节点,进行该屋盖结构多目标等效静力风荷载计算。

### 5.4 结构多目标等效静力风荷载计算结果分析

根据图 5 屋盖结构脉动风振竖向位移响应极值分析结果,选取结构内环位置处 48 个典型节点为目标响应控制节点(典型控制节点位置及编号见图 6),采用本文所提多目标等效静力风荷载计算方法,得到与此目标响应极值等效的多目标等效静力风荷载,如图 7 所示。

根据图 7 所示多目标等效静力风荷载求解结果,采用静力方法计算了该多目标等效静力风荷载作用下结构静力响应,同时与基于随机振动理论的频域分析结果(目标响应)进行对比,选取屋盖结构内环位置处 48 个典型节点的对比结果如图 8 所示。

由图 8 可见,根据本文方法所得多目标等效静力风荷载计算的结构静力响应与频域分析所得目标响应总体吻合较好,也有个别响应绝对值较小的节点其误差稍大,比如 31 号节点,误差为 6.35%(以频

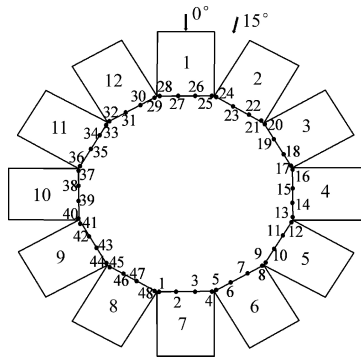


图6 典型控制节点位置及编号

Fig. 6 Key nodes location and number

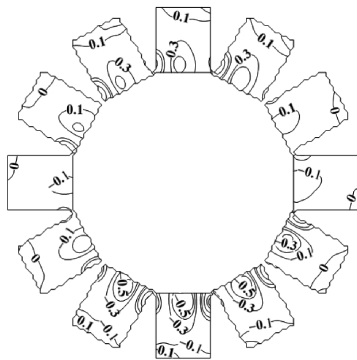
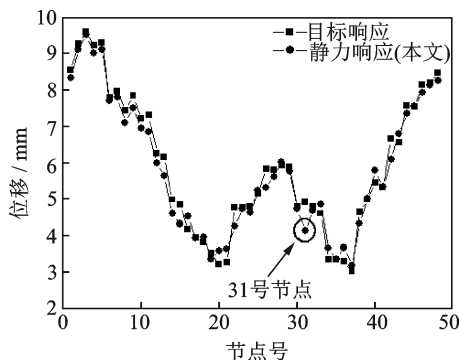
图7 本文方法计算所得结构多目标等效静力风荷载/  
( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )Fig. 7 Multi-target equivalent static wind loads calculated by  
proposed method/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$ 

图8 多目标等效静力风荷载下静力响应与目标响应对比

Fig. 8 Comparison between static response induced by multi-  
target equivalent static wind loads and target response

域所得目标响应为标准),考虑到这些节点响应绝对值相对较小,对结构抗风设计不起控制作用,因此,可以认为本文所得多目标等效静力风荷载能够满足工程应用要求。

## 6 结论

本文针对大跨屋盖结构风效应分析理论框架中不同环节相应分析方法众多且未能较好协调统一的问题,以最后环节的等效静力风荷载求解为目标,提出了考虑风振响应特性的多目标等效静力风荷载实

用分析方法,主要结论有:

(1)基于脉动风振背景响应、共振响应及其耦合项组合结果,利用LRC法基本原理推导所得构造多目标等效方程的基本向量,不仅能够实现与脉动风振响应完全协调对应,而且能够再现风振响应特性,物理意义明确,采用最小二乘法求解等效方程,能够得到兼顾多个目标响应的等效静力风荷载。

(2)引入应变能概念,考虑结构所有节点响应,根据三分量各响应应变能对总响应应变能的贡献,定义响应分量贡献系数,据此系数可以对大跨屋盖结构风振响应特性类型进行判定。在此基础上,考虑风振响应特性类型,可以实现对多目标等效静力风荷载的高效实用分析。

(3)采用本文所提方法,对北京奥林匹克公园网球中心赛场屋盖结构脉动风振响应特性类型进行判定,根据判定结果,计算其等效静力风荷载以及该等效静力风荷载作用下的结构静力响应,并与频域分析所得目标响应进行对比,结果表明二者总体吻合较好,能够满足工程应用要求。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. MOHURD of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [2] 顾明,周暄毅,黄鹏. 大跨屋盖结构风致抖振响应研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 37-42. Gu M, Zhou X Y, Huang P. A study on the wind-induced buffeting responses of large-span roof structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 37-42.
- [3] 方勇,倪振华,谢壮宁. 模态加速度法在屋盖结构风致响应分析中的应用[J]. 应用力学学报, 2004, 21(2): 122-125. Fang Y, Ni Z H, Xie Z N. Use of mode-acceleration solution in response analysis of roof structures[J]. China Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(2): 122-125.
- [4] 刘彪,谢壮宁,黄用军,等. 基于Ritz-POD的谐波激励法及其在大跨悬挑屋盖结构风致响应分析中的应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 7-14. Liu B, Xie Z N, Huang Y J, et al. Ritz-POD based harmonic excitation method and its application in wind-induced response of large-span cantilevered roof[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 7-14.
- [5] Davenport A G. Gust loading factors [J]. Journal of Structural Division, 1967, 93(3): 11-34.
- [6] 田玉基,杨庆山. 国家体育场屋盖结构的风振响应特点[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 1-7. Tian Y J, Yang Q S. Characteristics of wind-induced responses for Beijing National Stadium [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 1-7.
- [7] 李玉学,杨庆山,田玉基,等. 大跨屋盖风致背景响应和

- 共振响应实用组合方法[J].振动与冲击,2014,33(19):199-205.
- Li Y X, Yang Q S, Tian Y J, et al. Practical combination method for wind-induced background response and response of large-span roofs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19):199-205.
- [8] Su N, Peng S T, Hong N N. Analyzing the background and resonant effects of wind-induced responses on large-span roofs [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018,183(12):114-126.
- [9] Uematsu Y, Moteki T, Hongo T. Model of wind pressure field on circular flat roofs and its application to load estimation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008,96(6):1003-1014.
- [10] Zhang X T. The current Chinese code on wind loading and comparative study of wind loading codes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988,30(1):133-142.
- [11] Chen B, Wang K, Chao J Q, et al. Equivalent static wind loads on single-layer cylindrical steel shells [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144 (7) : 04018077.
- [12] Kasperski M, Niemann H J. The LRC (load-response correlation) method: a general method of estimating unfavorable wind load distributions for linear and nonlinear structural behavior[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992,43(3):1753-1763.
- [13] Cao S S, Ke S T, Zhang W M, et al. Load-response correlation-based equivalent static wind loads for large cooling towers[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(11):2464-2475.
- [14] Tamura Y, Kikuchi H, Hibi K. Actual extreme pressure distributions and LRC formula[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (12):1959-1971.
- [15] 段旻,倪振华,谢壮宁.大跨屋盖的包络等效静风荷载[J].振动与冲击,2008,27(9):6-10.
- Duan M, Ni Z H, Xie Z N. Envelope equivalent static wind load distribution on large roofs[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(9):6-10.
- [16] Patruno L, Ricci M, Miranda S, et al. Equivalent static wind loads: recent developments and analysis of a suspended roof [J]. Engineering Structures, 2017, 148 (10):1-10.
- [17] 罗楠,廖海黎,李明水.大跨屋盖时域多目标等效静力风荷载计算方法[J].工程力学,2013,30(4):316-321.
- Luo N, Liao H L, Li M S. Universal equivalent static wind loads for long-span roofs in time domain[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(4):316-321.
- [18] Zhou X Y, Gu M, Li G. Grouping response method for equivalent static wind loads based on a modified LRC method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,11(1):107-109.
- [19] 李玉学,杨庆山,田玉基.大跨屋盖结构风振响应主要参振模态确定方法研究[J].计算力学学报,2010,27(6):1049-1054.
- Li Y X, Yang Q S, Tian Y J. Research on the method for selecting dominant modes of wind-induced response for large-span roofs [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010,27(6):1049-1054.

## A practical method for analyzing multiple target equivalent static wind load considering the characteristics of wind-induced response

LI Yu-xue<sup>1,2</sup>, FENG Li-rui<sup>1,2</sup>, LI Hai-yun<sup>1,2</sup>, TIAN Yu-ji<sup>3</sup>

(1.School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2.Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China; 3.Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** With regard to the numerous analytical methods corresponding to different segments in the theoretical framework of the wind effect analysis of large-span roofs, which are also not well coordinated or unified, a practical method is proposed to analyze the multi-target equivalent static wind loads considering the characteristics of wind-vibration responses. Based on the combination of the pulsating wind-induced background response, resonant response and their coupling term, the load response correlation (LRC) theory is applied to derive the fundamental load vectors of the multi-target equivalent equations, in order to fully coordinate the pulsating wind-vibration response and reconstruct the wind-vibration responses. On this basis, the multi-target equivalent static wind load can be obtained by solving the multi-target equivalent equations using the least square method. Introducing the concept of strain energy, and considering all nodal responses and the contribution of the three components of the strain energy of each nodal response to the total response, the contribution coefficient of the response component is therefore defined to determine the characteristic category of the pulsating wind-induced response of the large-span roof. Based on this, the multi-target equivalent equations are constructed accurately and solved efficiently. Taking the roof of Beijing Olympic Park Tennis Center Stadium as an example, the type of the wind-vibration responses is identified. Hence, the multi-target equivalent static wind loads and the static responses are calculated and then compared with the target responses in the frequency domain. The results indicate that the presented method can accurately and efficiently compute the multi-target equivalent static wind loads of structures, with valuable engineering applications.

**Key words:** equivalent static wind load; large-span roof; multiple targets; response category; three component response

**作者简介:**李玉学(1978—),男,副教授。电话:(0311)87939550;E-mail:liyuxue2000@163.com。