

# 格构塔架的实用高阶广义荷载谱模型 与共振分量表达式改进

柳国环 李宏男

(大连理工大学, 辽宁大连 116024)

摘要: 基于风洞试验得到的格构式塔架的一阶广义荷载谱 (fundamental mode generalized force spectrum, FMGFS), 采用沿高度不变的风速谱, 再选取 Shiotami 空间相干函数, 由此推导出一种更为简单实用的格构塔架高阶广义荷载谱 (higher mode generalized force spectrum, HMGFS) 模型。明确给出不同于以往文献的求解共振分量的计算表达式, 该表达式更加合理。以沈阳一输电塔工程为例, 验证了本文导出模型的准确性, 为进一步推导格构塔架的位移反应的实用计算表达式和建立等效静力风荷载计算公式奠定了基础。

关键词: 风洞试验; 高阶广义荷载谱; 共振分量; 输电塔; 等效静力风荷载

中图分类号: P315.9 U442 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2009) 02-0053-05

## A practical higher mode generalized force spectrum model for lattice towers and improvement of expression for the resonant component

Liu Guohuan Li Hongnan

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A practical higher mode generalized force spectrum (HMGFS) model for lattice towers is proposed by adopting height-independent fluctuating wind spectrum density and selecting Shiotami-Type spatial coherence. The fundamental mode generalized force spectrum (FMGFS) obtained through a wind tunnel test is used. A more rational expression for the resonant component computed through the generalized force spectrum (GFS) is derived. A transmission tower structure in Shenyang is taken as an example to show the accuracy of the HMGFS model.

**Keywords:** wind tunnel test; higher generalized force spectrum; resonant component; transmission tower; equivalent static wind load

**E-mail:** carecivil@yahoo.com.cn

### 引 言

建筑物的风荷载测量常采用多点同步测压 (Multi-Point Synchronous Pressure, MPSP) 方法和高频测力天平 (High Frequency Force Balance, HFFB) 技术。采用多点同步测压方法可以较详细地测量作用于建筑表面的风荷载数据, 而通过高频测力天平技术只可近似得到一阶振型广义力。不同于一般建筑结构, 格构式塔架 (例如输电塔) 是一种镂空率较高的结构<sup>[1-3]</sup>, 较难甚至无法通过同步测压方法对作用在

其表面的风荷载进行准确测量。因此, 一般常采用高频测力天平技术测得的数据得到一阶线性广义力和一阶线性广义荷载谱, 进而根据随机振动理论计算出结构一阶振型反应方差。计算格构式塔架结构的高阶振型反应需要高阶广义荷载谱, 而关于格构塔架的高阶广义荷载谱的研究不多见。为此, 邹良浩<sup>[4]</sup>在同济大学风洞实验室利用高频测力天平对三个不同类型的格构塔架半刚性模型进行了风洞试验, 试验考虑了模型惯性力的影响, 利用最小二乘法首次拟合出了格构式塔架基本振型广义荷载谱, 并进一步对高阶广义荷载谱进行了探讨。但该文献中的高阶广义荷载谱为二重积分的解析模型, 不便直接应用于工程实际。

规范常采用等效静力风荷载 (ESWLs) 对结构响应进行计算, 由 Davenport<sup>[5]</sup>提出的风振响应系数 (GRF) 方法得到广泛应用, 其中 ESWLs 由平均风荷

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50638010)、教育部创新团队 (IRT0518) 和高等学校博士点基金 (20060141027)

作者简介: 柳国环, 博士研究生

收稿日期: 2007-10-11

载乘以 GRF 得到。文献 [6-10] 对不同工程结构的风振响应的等效计算方法作了相关的研究。文献 [11] 基于 Davenport 提出的将顺风响应处理为平均、背景和共振分量的思想, 并根据 Chopra<sup>[12]</sup>提出的振型贡献静力修正方法进行了研究, 而文中给出的求解共振分量的表达式尚值得商榷。

本文推导出了格构塔架的一种表达形式简单、便于工程应用的高阶广义荷载谱模型, 给出了理论上更为合理的利用广义荷载谱求解共振分量的计算表达式。通过工程算例, 验证了本文导出模型的准确性, 为建立格构塔架的实用 ESWLs 计算公式奠定了基础。

### 1 理论分析

#### 1.1 格构塔架的高阶广义荷载谱的推导

一离散单元的结构体系, 与地面刚性连接, 该体系在风荷载作用下的动力平衡方程可表达为

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=F(z,t) \quad (1)$$

式中:  $M$ 、 $C$  和  $K$  分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$  和  $\ddot{x}(t)$  分别为节点位移向量速度向量和加速度向量;  $F(z,t)$  为节点力向量。对式 (1) 数学解耦, 可得

$$M_n[\ddot{q}_n(t)+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t)+\omega_n^2q_n(t)]=F_n^G(z,t) \quad (2)$$

式中:  $M_n=\varphi_n^T M \varphi_n$  为第  $n$  阶振型的广义质量;  $\varphi_n$ 、 $q_n(t)$ 、 $\xi_n$  和  $\omega_n$  分别为结构第  $n$  阶振型的振型向量、广义位移、阻尼比和圆频率;  $F_n^G(z,t)=\varphi_n^T F(z,t)$  为第  $n$  阶振型的广义力, 根据拟定常理论, 可表达为

$$F_n^G(z,t)=\frac{1}{2}\rho C_D \varphi_n^T \{B(z)d(z)R(z)V(z,t)^2\} \quad (3)$$

式中:  $\rho$ 、 $C_D$ 、 $B(z)$  和  $d(z)$  分别表示空气密度、阻力系数、 $z$  高度位置的结构截面宽度和  $z$  高度处计算高度;  $R(z)$  为  $z$  高度处单位高度实际面积与轮廓面积的比值;  $V(z,t)$  表示  $z$  高度  $t$  时刻风速。其中

$$V(z,t)^2=\bar{V}(z)^2+2\bar{V}(z)\tilde{V}(z,t)+\tilde{V}(z,t)^2 \quad (4)$$

式中:  $\bar{V}(z)$  和  $\tilde{V}(z,t)$  分别表示  $z$  高度处平均风速和脉动风速时程。由于平均风对结构作用相当于静力, 这里不作考虑。由风洞试验测到的紊流度剖面<sup>[4]</sup>可知,  $\tilde{V}^2(z,t)$  很小, 可以忽略(令  $\tilde{V}(z,t)=0$ )。此时联合 (3) 和 (4) 两式, 脉动风荷载作用下结构的第  $n$  阶振型广义力可表达为

$$F_n^G(z,t)=\rho C_D \varphi_n^T \{ \Gamma(z) \tilde{V}(z,t) \} \quad (5)$$

式中

$$\Gamma(z)=B(z)d(z)R(z)\bar{V}(z) \quad (6)$$

文献 [13] 指出, 尽管采用沿高度变化的脉动风速谱更加合理, 但经过与 Davenport 沿高度不变的风速谱  $S(f)$  对结构响应计算的比较, 相差不大。为此, 根据随机振动与矩阵论知识, 可由式 (5) 得到第  $n$  阶广义荷载谱  $S_n^G(f)$  的表达式

$$S_n^G(f)=\rho^2 C_D^2 \varphi_n^T \Lambda \varphi_n \quad (7)$$

式中:  $\Lambda$  表示如下

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Delta(z_1, z_1, f) \cdots \Delta(z_1, z_i, f) \cdots \Delta(z_1, z_H, f) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ \Delta(z_i, z_1, f) \cdots \Delta(z_i, z_i, f) \cdots \Delta(z_i, z_H, f) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ \Delta(z_H, z_1, f) \cdots \Delta(z_H, z_i, f) \cdots \Delta(z_H, z_H, f) \end{bmatrix} S(f) \quad (8)$$

其中:

$$\Delta(z_i, z_j, f)=\rho(z_i, z_j, f)\Gamma(z_i)\Gamma(z_j); \rho(z_i, z_j, f)$$

为竖向相干函数;  $S(f)$  为  $\tilde{V}(z,t)$  的功率谱密度函数, 与高度无关。理论上, 相干函数不仅与空间位置有关, 而且与频率有关。而本文选择 Shiotami 建议的简单函数<sup>[13]</sup>式 (9), 而未选取相干函数式 (10)。之所以这样处理, 原因有: ①学者们对相干函数式 (10) 有不同评价, Emil 和 Choi Cheong Chuen 两位学者明确指出了式 (9) 的不足之处<sup>[13]</sup>; ②不同于式 (10), 式 (9) 不仅是建立在试验基础之上、适用于高耸结构<sup>[12]</sup>, 它还与频率无关, 给计算带来较大方便。此时, 式 (7) 可表达为式 (11)。

$$\rho(z_i, z_j)=\exp\left(-\frac{|z_i-z_j|}{L_z}\right), L_z=60 \quad (9)$$

$$\rho_{ij}(z_i, z_j, f)=\exp\left(-C_z \frac{f|z_i-z_j|}{\bar{V}(z)}\right), C_z=7 \quad (10)$$

$$S_n^G(f)=\rho^2 C_D^2 \varphi_n^T L_R \varphi_n S(f) \quad (11)$$

式中,  $L_R$  定义为位置矩阵, 其中的矩阵元素表示为

$$L_R(i, j)=\rho(z_i, z_j)\Gamma(z_i)\Gamma(z_j) \quad (12)$$

由  $S(f)$  随高度不变的前提条件和式 (11), 可得到高阶广义荷载谱与一阶广义荷载谱的关系, 即

$$S_n^G(f)=\frac{\varphi_n^T L_R \varphi_n}{\varphi_1^T L_R \varphi_1} S_1^G(f) \quad (n \geq 1, n \in z) \quad (13)$$

式中:  $S_n^G(f)$  ( $n \in z, n \geq 2$ ) 表示高阶广义荷载谱,  $S_1^G(f)$  表示一阶广义荷载谱。式 (13) 即为本文导出的格构塔架的实用模型高阶广义荷载谱 (以下简称为“本文模型”) 表达形式。容易看出,  $S_n^G(f)$  与  $S_1^G(f)$  的本质联系是结构的振型, 这符合物理意义。与文献 [4] 给出的式 (14) (以下简称为“积分模型”) 相比, 式 (13) 形式简单、更便于应用。

$$S_n^G(f)=\frac{\int_0^H \int_0^H \Omega_1 \Omega_2 \rho(z_1, z_2) \phi_n(z_1) \phi_n(z_2) dz_1 dz_2}{\int_0^H \int_0^H \Omega_1 \Omega_2 \rho(z_1, z_2) \frac{z_1}{H} \frac{z_2}{H} dz_1 dz_2} S_1^G(f) \quad (14)$$

其中,

$$\Omega_1 = \frac{1}{2} \rho C_D S(z_1) \bar{V}(z_1)^2; \Omega_2 = \frac{1}{2} \rho C_D S(z_2) V(z_2)^2; S(z) \text{ 表}$$

示  $z$  高度单位高度的实心面积。 $S_1^G(f)$  可对文献 [4] 在试验基础上统计得到的顺风向的一阶广义荷载谱 (该谱为单边功率谱) 作简单数学变化得到, 即

$$S_1^G(f) = \frac{a(fB/V_H)^{1.05}}{f[1+b(fB/V_H)^2]^{1.5}} \sigma^2 \quad (15)$$

式中,  $\sigma = (1/2) C_M \rho V_H^2 A R$ , 为塔架基本振型广义荷载均方根;  $C_M$  为基本振型广义荷载均方根系数,  $a$  和  $b$  为拟合参数, 对于输电塔, 依次分别取 0.088、14.6 和 113.5 [4];  $\rho$  为空气密度;  $A$  和  $B$  分别为风来流方向格构塔架的轮廓面积和底部宽度;  $V_H$  为输电塔顶部平均风速;  $R$  为塔架实心面积与轮廓面积的比值。

对于一实际塔架, 计算其高阶广义荷载谱可按照如下 3 个步骤:

(1) 确定风来流方向的  $A$ 、 $B$  和  $R$ , 根据平均风速的变化指数规律函数式 (16) (对数律与指数率计算结果相差不大 [13]) 计算  $V_H$ , 再由式 (11) 可得到一阶广义荷载谱  $S_1^G(f)$ 。

$$\bar{V}_z = \bar{V}_s (Z/Z_s)^\alpha \quad (16)$$

式中:  $\bar{V}_z$  和  $Z$  为任意点的平均风速和高度;  $\bar{V}_s$  和  $Z_s$  为标准高度位置的平均风速和高度, 标准高度一般取为 10 m;  $\alpha$  是地面粗糙度指数, 根据地貌确定。

(2) 兼顾计算精度与计算效率, 将输电塔沿高度离散化, 求出振型向量  $\varphi_n$ 。根据结构的实际形状、离散化后节点高度位置以及式 (14) 确定  $B(z)$ 、 $d(z)$ 、 $R(z)$  和  $\bar{V}(z)$ , 进而联合式 (6)、式 (9) 和式 (10) 三式计算位置相关矩阵  $L(R)$ 。

(3) 将前两步得到的  $S_1^G(f)$ 、 $\varphi_n$  和  $L(R)$  代入式 (11), 可得到  $S_n^G(f)$ 。

## 1.2 利用广义荷载谱求解共振分量的表达式

不考虑平均风引起的静力响应。脉动风引起的动力响应可对式 (2) 分析, 研究结构前  $N$  阶振型贡献, 根据模态叠加法可得

$$\mathbf{R}(z, t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{R}_n(z, t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n q_n(t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{M_n} \varphi_n q_n(t) \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{R}(z, t)$  和  $\mathbf{R}_n(z, t)$  分别为结构总反应向量和各振型反应向量;  $\mathbf{H}_n = \varphi_n / M_n$ 。

风属于宽频荷载, 低频占主要成分且卓越周期高达几十秒, 长周期可达 10 min 以上。为此, 对于输电塔等高耸结构, 由于其自振周期比较长,  $\mathbf{R}(z, t)$  可分为两部分考虑: 前  $N_r$  阶模态, 其周期较长, 风荷载作用下的动力响应比较显著; 第  $N_r+1$  到  $N$  阶模态, 其周期较短, 风荷载作用可视为拟静力。因此, 根据

Chopra [12] 思想, 式 (17) 可表达为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(z, t) &= \sum_{n=1}^{N_r} \mathbf{H}_n q_n(t) + \sum_{n=N_r+1}^N \mathbf{H}_n q_{nb}(t) \\ &= \sum_{n=1}^{N_r} \mathbf{H}_n q_{nr}(t) + \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n q_{nb}(t) \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $q_{nb}(t) = F_n^G(t)/K_n$ , 是第  $n$  阶振型背广义位移;  $K_n = M_n \omega_n^2$ , 是第  $n$  阶振型广义刚度;  $q_{nr}(t) = q_n(t) - q_{nb}(t)$ , 是第  $n$  阶振型共振广义位移 (由此可知, 求解  $q_n(t)$  与  $q_{nr}(t)$  的传递函数不同, 对此下文有述)。基于上述思想, 下面对共振响应的计算公式进行讨论:

$$\sigma_{Rr}^2 = \sum_{m=1}^{N_r} \sum_{n=1}^{N_r} H_m H_n \sigma_{qmr} \sigma_{qnr} \gamma_{mn} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{qnr} &= \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_n(\omega)|^2 R_n(\omega) d\omega} \\ &= \frac{1-2\xi_n}{K_n} \sqrt{\frac{\pi \omega_n}{4\xi_n} R_n(\omega_n)} \end{aligned} \quad (20)$$

式 (19) 中:  $\sigma_{Rr}^2$  为共振反应的方差;  $\sigma_{qnr}$  为第  $n$  阶振型的共振广义位移均方值; 式 (20) 中  $R_n(\omega)$  是双边广义荷载谱 (在此,  $R_n(\omega)$  只起到中间变量作用, 下文将  $R_n(\omega)$  替换为单边广义荷载谱  $S_n^G(f)$ )。由于  $q_{nr}(t)$  的物理意义是在广义位移  $q_n(t)$  基础之上减去了背景分量  $q_{nb}(t)$ , 所以式 (18) 中的传递函数为式 (21), 而不是式 (22), 进而  $\sigma_{qnr}$  的表达式不是较为熟悉的式 (23)。

$$H_n(\omega) = \frac{1}{K_n} \left[ \left( 1 + i2\xi(\omega/\omega_n) - (\omega/\omega_n)^2 \right)^{-1} - 1 \right] \quad (21)$$

$$H'_n(\omega) = \frac{1}{K_n} \left( 1 + i2\xi(\omega/\omega_n) - (\omega/\omega_n)^2 \right)^{-1} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{qnr} &= \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |H'_n(\omega)|^2 R_n(\omega) d\omega} \\ &= \frac{1}{K_n} \sqrt{\frac{\pi \omega_n}{4\xi_n} R_n(\omega_n)} \end{aligned} \quad (23)$$

由文献 [14] 可知, 反应方差相等时, 即  $\int_{-\infty}^{+\infty} R_0(\omega) d\omega = \int_0^{+\infty} S_0(f) df$ , 单边输出功率谱  $S_0(f)$  与双边输出功率谱  $R_0(\omega)$  存在如下关系

$$R_0(f) = 4\pi S_0(\omega) \quad (24)$$

由于传递函数只与结构有关, 即,  $H_n(f) = H_n(2\pi f) = H_n(\omega)$ , 所以根据上式以及输入功率谱与输出功率谱的关系, 可得

$$|H_n(\omega)|^2 S_n^G(f) = 4\pi |H_n(\omega)|^2 R_n(\omega) \quad (25)$$

因此

$$R_n(\omega) = \frac{1}{4\pi} S_n^G(f) \quad (26)$$

将上式与  $\omega_n = 2\pi f_n$  代入式 (20), 可得

$$\sigma_{qnr} = \frac{1-2\xi_n}{K_n} \sqrt{\frac{\pi f_n}{8\xi_n} S_n^G(f_n)} \quad (27)$$



上式为利用广义荷载谱求解振型共振分量的表达式，即文献 [11] 给出的式 (20.1)。文献 [11] 之所以给出式(28)，可能是由于两个原因所致：①传递函数选择式(22)；②将式(23)中的  $\omega_n$  直接替换为  $f_n$ 。

$$\sigma_{qm} = \frac{1}{K_n} \sqrt{\frac{\pi f_n}{4\xi_n} S_n^G(f_n)} \quad (28)$$

式(19)中  $\gamma_{mn}$  为第  $m$  和  $n$  阶共振反应相关系数<sup>[11]</sup>，即

$$\gamma_{mn} = \alpha\beta \quad (29)$$

式中，

$$\alpha = \frac{8\sqrt{\xi_m \xi_n} (\lambda_{mn} \xi_m + \xi_n) \lambda_{mn}^{3/2}}{(1-\lambda_{mn}^2)^2 + 4\xi_n \xi_m \lambda_{mn} (1+\lambda_{mn}^2) + 4(\xi_m^2 + \xi_n^2) \lambda_{mn}^2}$$

$$0 < \lambda_{mn} = f_m / f_n \leq 1; \beta = \frac{\text{Re}(S_{mn}^G(f))}{\sqrt{S_m^G(f) S_n^G(f)}}$$

$S_m^G(f)$  为第  $m$  和  $n$  阶广义荷载谱的协方差，Re 表示实部。

## 2 工程算例分析

### 2.1 输电塔模型介绍与计算参数说明

为了验证导出实用计算模型的准确性，以沈阳一输电塔（图 1）为例，分别由“本文模型”与“积分模型”得到高阶广义荷载谱，并对结果进行比较。为方便下文叙述，规定垂直与平行于横担的方向分别为  $x$  和  $y$  方向，风来流为  $x$  方向。 $x$  方向的前三阶振型均为质量归一化（即  $M_n=1, n=1, 2, 3$ ）对应的振型（图 2）。



图 1 输电塔模型 (43m)  
Fig. 1 Transmission tower model (43m)

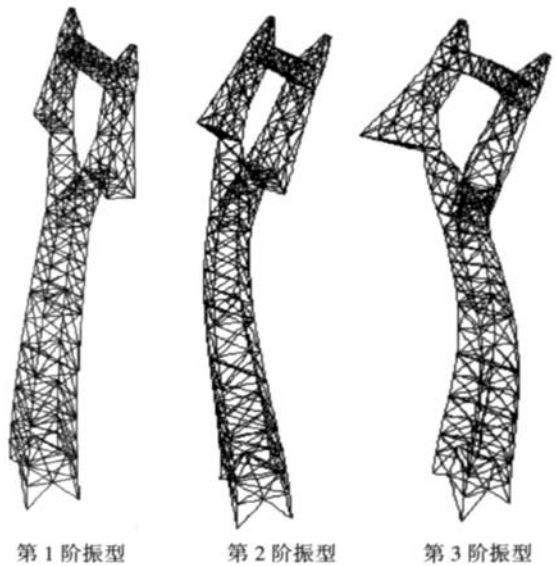


图 2 输电塔  $x$  方向振型  
Fig. 2 Mode shape of transmission tower in  $x$  direction

计算高阶广义荷载谱所需的计算参数：①地貌类型 B 类， $\alpha=0.16$ ；②标准高度风速  $V_H=25$  m/s；塔顶风速  $V_H=31.57$  m/s；③轮廓面积  $A=168.1$  m<sup>2</sup>；④风来流方向输电塔的底部宽度  $B=6.5$  m；⑤实心面积与轮廓面积比值  $R=5\%$ ；⑥标准状态下空气密度  $\rho=1.29$  kg/m<sup>3</sup>；⑦  $\phi_n$  ( $n=1, 2, 3$ ) 具有 24 个向量分量；⑧振型阻尼比取为相等， $\xi_n=0.02$ 。

### 2.2 本文高阶广义荷载谱模型的验证

利用“本文模型”与“积分模型”计算得到的第二、三阶广义荷载谱曲线比较见图 3 所示。从图中可以看出，两者计算结果吻合程度较好，“本文模型”表达形式简单，更便于工程人员采用。

## 3 结 语

本文首先推导出了格构塔架的一种实用高阶广义荷载谱模型，其优点是表达形式简单，更便于工程应

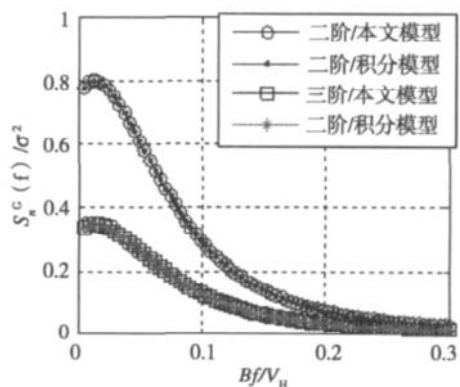


图 3 输电塔  $x$  方向的 HMGFS 比较  
Fig. 3 HMGFS of transmission tower in  $x$  direction

用；同时，提供了可作为参考的求解广义荷载谱的步骤；其次，明确给出了理论上更加合理的利用广义荷载谱求解共振分量的表达式，为更准确地确定峰值因子范围提供了理论根据；最后，以沈阳一输电塔为例，通过数值计算，验证了本文导出的高阶广义荷载谱模型的准确性，可为进一步建立格构塔架的反应方差和等效静力风荷载实用简化公式奠定基础。

#### 参 考 文 献

- [1] Li Hongnan, Bai Haifeng. High-voltage transmission tower-line system subjected to disaster loads [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16 (9): 899-911
- [2] 李宏男, 白海峰. 高压输电塔-线体系抗灾研究的现状与发展趋势 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (2): 39-46(Li Hongnan, Bai Haifeng. State-of-the-art review on studies of disaster resistance of high-voltage transmission tower-line systems [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 39-46(in Chinese))
- [3] 楼文娟, 孙炳楠. 高耸塔架横风向动力风效应 [J]. 土木工程学报, 1999, 32 (6): 67-71 (Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Across-wind dynamic response of tall latticed towers [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(6): 67-71(in Chinese))
- [4] 邹良浩. 格构式高耸结构动力风荷载模型与风振响应研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006 (Zou Lianghao. Investigation on model of dynamic wind loads and wind-induced vibration of lattice highrise structures [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006(in Chinese))
- [5] Davenport A G. Gust Loading factors [J]. Journal of Structure Division ASCE, 1967, 93(1):11-34
- [6] Zhou Yin, Gu Ming, Xiang Haifan. Along-wind static equivalent wind loads and responses of tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 79(1):135-150
- [7] 陈波, 瞿伟廉. 高耸电视塔的动力特性及风振反应分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(2):23-26(Chen Bo, Qu Weilian. Dynamic characteristics and wind-induced response analysis of high-rise TV tower [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(2):23-26(in Chinese))
- [8] 全涌, 顾明. 高层建筑横风向风致响应及等效静力风荷载的分析方法 [J]. 工程力学, 2006, 23 (9):84-88(Quan Yong, Gu Ming. Analytical method of across-wind response and equivalent static wind loads of high-rise buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (9):84-88(in Chinese))
- [9] 陈波, 武岳, 沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静力风荷载中共振分量的确定方法研究 [J]. 工程力学, 2007, 24 (1): 51-55 (Chen Bo, Wu Yue, Shen Shizhao. Study of the resonant component of equivalent static wind loads on large span roofs [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (1):51-55(in Chinese))
- [10] 田玉基, 杨庆山, 范重, 等. 国家体育场大跨度屋盖结构风振系数研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (2):26-31 (Tian Yuji, Yang Qingshan, Fan Zhong et al. Gust factor for large-span roof of the national stadium [J]. Journal of Building Structure, 2007, 28 (2): 26-31(in Chinese))
- [11] Huang Guoqing, Chen Xinzhong. Wind load effects and equivalent static wind loads of tall buildings based on synchronous pressure measurements [J]. Engineering Structures, 2007, 29(1):287-292
- [12] Chopra A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering [M]. Prentice-Hall, 2000
- [13] 张相庭. 结构风工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [14] D.E 纽兰. 随机振动与谱分析概论 [M]. 方同, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982

柳国环 (1980-), 男, 博士研究生。主要从事工程结构抗风 (雨)、抗震研究。

李宏男 (1957-), 男, 博士, 教授。主要从事工程结构抗震、抗风、健康监测与诊断研究。