第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0325-07
科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering
Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
© 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:吴本刚, 何炳泉, 吴玖荣, 等. 基于 Ritz-POD 法的格构式塔架结构风致振动分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 325—331
Wu Bengang, He Bingquan, Wu Jiurong, et al. Wind-induced vibration analysis of lattice tower structure based on Ritz-POD method[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 325—331

基于 Ritz-POD 法的格构式塔架结构风致振动分析

吴本刚[1,2] 何炳泉[1] 吴玖荣[3*] 丁昌银[1] 汤序霖[1,2]
(广州机施建设集团有限公司[1],广州 510115;华南理工大学土木与交通学院[2],广州 510641;
广州大学-淡江大学工程结构灾害与控制联合研究中心[3],广州 510006)

摘 要 根据自立式塔架结构脉动风荷载的空间分布形式,实现了本征特征分解(proper orthogonal decomposition, POD)和基于荷载-里兹模态分析相结合的 Ritz-POD 算法求解 Ritz 振型,并结合谐波激励法(harmonic excitation method, HEM)和荷载-响应相关法(load response correlation method, LRC)实现了塔架结构风振响应和等效静力风荷载(equivalent static wind load, ESWL)的高效分析。计算结果表明:采用 40 阶基于荷载-里兹振型和 100 阶传统自由振动振型计算的节点风振响应和等效静力风荷载结果及变化规律一致且二者吻合度高,说明较少阶 Ritz 振型的计算精度是能够保障的。并且较少阶 Ritz 振型减少了谐波激励法与荷载-响应相关法的运算工作量,提高了风致振动分析的效率。另外,本文利用大型通用有限元软件 SAP2000 基于 MATLAB 系统的应用程序接口(API)开发环境,实现了塔架结构风致动力响应和等效静力风荷载的高效分析平台,可为其他大型复杂工程的风致振动分析提供参考。

关键词 风振响应 等效静力风荷载 Ritz-POD 法 谐波激励法 荷载-响应相关法 塔架结构
中图法分类号 TU279.744 TB122 O324; **文献标志码** A

格构式塔架结构的几何外形复杂多变且镂空率高,国内外不少学者对塔架结构风荷载进行了研究,程志军等[1]获得了钢管塔的整体体型系数及风振系数;Carril 等[2]获得了平均及脉动阻力系数;邹良浩等[3]通过风洞试验得到了输电塔、通信塔及电视塔等三种典型格构式塔架结构的基底剪力和基底弯矩等风荷载数据。然而,上述试验研究都是基于整体塔架结构进行的,并不能给出塔架各杆件的风荷载体型系数,楼文娟等[4]对组成输电塔的角钢杆件体型系数进行了风洞试验研究,获得了结构不同位置处杆件的风压系数分布。

风振响应分析是求解运动微分方程的过程,如何精确、高效地计算结构风振响应一直是热点问题。在地震分析中,结构在单点激励作用下获得激励谱较为容易,而在格构式塔架风致振动分析中,由于结构承受多点随机风激励作用且它们之间具有相干性,因而激励谱的计算一般较难获得且需要占用大量内存和时间。在求解运动微分方程频域法中,传统 CQC(complete quadratic combination)方法是精确算法,由于大型复杂结构的自由度巨大,因此其激励谱运算量巨大从而导致时间成本较高。而 SRSS(square root of sum of squares)方法是以忽略振型耦合项来提高计算效率的近似算法,这种方法对结构自振频率分布较为稀疏且阻尼比小的高耸结构是适用的,而对大跨度复杂网架结构可能造成精度不满足要求。对激励谱进行三角分解的虚拟激励法(pseudo excitation method,PEM)[5]在理论上与 CQC 方法完全等价,该方法虽然大大提高了运算效率,但对基于试验条件的多点激励谱矩阵并非都满足正定要求。谢壮宁[6]基于周期图法估算功率谱密度的基本原理用来避开计算激励谱矩阵,提出了谐波激励法(harmonic excitation method,HEM),该方法保持了 CQC 方法的精度且大大提高了计算效率。陈波等[7]提出了一种高效的考虑风荷载分布特性的 Ritz-POD 法,该方法仅用少量的基于荷载的 Ritz 模态进行大跨屋盖风振响应分析便可达到较高的精度。

基于以上讨论,为保证格构式结构风致振动计算的精度与效率,本文首先将数值模拟的脉动风速作为塔架结构周围的风场环境,并试图结合谐波激

2017 年 5 月 10 日收到 国家自然科学基金面上项目(51778161,51578169)、广东省高等学校高层次人才项目和广州市建筑集团有限公司科技计划项目([2016]-KJ021)资助

第一作者简介:吴本刚(1984—),男,江西九江人,博士后。研究方向:结构风工程。E-mail:bengangwu@163.com。
* 通信作者简介:吴玖荣(1970—),男,江西南昌人,工学博士,教授。研究方向:结构风工程。E-mail:jrwuce@qq.com。

励法(HEM)、荷载响应相关法(load response correlation method,LRC)与 Ritz-POD 法提供的结构 Ritz 振型及传统自由振动特征向量法提供的模态振型等相关技术,采用 MATLAB 与 SAP2000 应用程序接口 API[8] (application programming interface)交互的方式来比较分析两种振型参与格构式塔线结构的风振响应及等效静力风荷载。

1 结构风致振动计算原理

1.1 风速与风荷载相互关系

顺风向风荷载与风速之间的关系可通过准定常假设来确定,则顺风向荷载在 t 时刻的表达式为

$$F_U(z,t) = \frac{1}{2}\rho_a C_d(z)A(z)U^2(z,t) \tag{1}$$

式(1)中,ρ_a 为空气密度(约 1.25 kg/m^3);$C_d(z)$ 为风压系数;$A(z)$ 为结构沿风速方向上的投影面积。在顺风向上,风速 $U(z,t)$ 由平均风速 $\bar{U}(z)$ 和脉动风速 $u(z,t)$ 组成,由于脉动风速远小于平均风速,所以可以将上式展开的脉动风速二次项予以忽略,则顺风向平均风荷载可表示为

$$\bar{F}_U(z) = \frac{1}{2}\rho_a C_d(z)A(z)\bar{U}^2(z) \tag{2}$$

而顺风向脉动风荷载可表示为:

$$\tilde{F}_u(z,t) = \rho_a C_d(z)A(z)\bar{U}(z)u(z,t) \tag{3}$$

结构在横风向上的风振机理比较复杂,需要有更详尽的风洞试验去研究与验证。如果只是考虑横风向湍流因素的影响,则横风向的脉动风荷载为

$$\tilde{F}_v(z,t) = \frac{1}{2}\rho_a C_d(z)A(z)\bar{U}(z)v(z,t) \tag{4}$$

需要注意的是,$C_d(z)$ 在顺、横两风向的值是不一致的。

1.2 本征正交分解(POD)

本征正交分解法的目的是采用新的坐标空间来描述原有节点荷载组的时空分布特征,具体做法为将已知脉动风荷载样本列向量 $\boldsymbol{p}(t)$ 表示成另一空间状态,此状态使得 $\boldsymbol{p}(t)$ 在坐标空间列向量 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 上的投影值 $a_i(t)$ 最大化,即

$$\boldsymbol{p}(t) = \sum_{i=1}^{n} a_i(t)\boldsymbol{\varphi}_i \tag{5}$$

经过数学推导,可采用求取脉动风荷载空间协方差矩阵 $\overline{\boldsymbol{p}(t)\cdot\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}(t)}$ 的特征值 λ_i 与特征向量 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 来获取,且有均方值 $\overline{a_i^2(t)} = \lambda_i$,即

$$\overline{\boldsymbol{p}(t)\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}(t)}\cdot\boldsymbol{\varphi}_i = \lambda_i\boldsymbol{\varphi}_i \tag{6}$$

由于均方值反映了与能量相关的信息,模态累积率可定义为

$$b_s = \frac{\sum_{i=1}^{s}\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i} \tag{7}$$

通过荷载向量状态空间的转换,可以用 $b_s \geqslant 0.75$ 对应的本征模态组 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 作为 Ritz 荷载向量进行荷载-里兹模态分析,得到基于 POD 分解后 Load dependent-Ritz 振型,而基于传统自由振动分析的模态振型可通过基于特征值-特征向量的分析方法来获取。

1.3 谐波激励法(HEM)

在风荷载作用下结构动力微分方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{r}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{r}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{r} = \boldsymbol{p}(t) \tag{8}$$

则风致结构响应的傅里叶变换为

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}(\bar{\omega}) = \int_{-\infty}^{+\infty}\boldsymbol{p}(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\bar{\omega}t}\mathrm{d}t \\ \boldsymbol{Y}(\bar{\omega}) = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{H}(\mathrm{i}\bar{\omega})\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(\bar{\omega})\end{cases} \tag{9}$$

式(9)中,$\boldsymbol{\Phi}$ 为参与计算的 k 阶振型矩阵;$H(\mathrm{i}\bar{\omega})$ 为频响函数的 k 阶对角矩阵。按照周期图方法估计功率谱密度的原理,则 $\boldsymbol{Y}(\bar{\omega})$ 的功率谱谱密度矩阵为

$$\boldsymbol{S}_{YY}(\bar{\omega}) = \lim_{t\to\infty}\left[\frac{1}{t}\boldsymbol{Y}^{*}(\bar{\omega})\cdot\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}(\bar{\omega})\right] \tag{10}$$

式(10)中,* 表示矩阵的共轭。当激励谱为双边谱时,结构位移响应的均方根为

$$\boldsymbol{\sigma} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty}\boldsymbol{S}_{YY}(\bar{\omega})\mathrm{d}\bar{\omega}} \tag{11}$$

则结构峰值响应列向量表示为

$$\boldsymbol{r} = \bar{\boldsymbol{r}} \pm g\cdot\boldsymbol{\sigma} \tag{12}$$

式(12)中,g 为峰值因子,取 $g = 2.5$;$\bar{\boldsymbol{r}}$ 为平均风荷载作用下结构位移响应列向量,可通过有限元软件设置静力分析工况求解得到。

1.4 荷载-响应相关法(LRC)

基于 LRC 法,可以得到以任意节点自由度 i 的响应 $\boldsymbol{r}_i$ 为等效目标的等效静力风荷载向量:

$$\boldsymbol{F} = \bar{\boldsymbol{F}} \pm g\cdot\frac{\boldsymbol{C}_{r_i,f}}{\sigma_{r_i}} \tag{13}$$

式(13)中,$\bar{\boldsymbol{F}}$ 为平均风荷载向量;σ_{r_i} 为响应 $\boldsymbol{r}_i$ 的均方根;$\boldsymbol{C}_{r_i,f}$ 为响应 $\boldsymbol{r}_i$ 与荷载 f 之间的协方差,其计算式为

$$\boldsymbol{C}_{r_i,f}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{R}_{r_i}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{\Phi}\cdot\boldsymbol{C}_{uu}\cdot(\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{\Phi}\cdot\boldsymbol{\Lambda})^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

式(14)中,$\boldsymbol{R}_{r_i}$ 为影响系数列向量,表示在自由度 i 上作用单位力后结构各自由度上的响应,即柔度矩阵的第 i 列;$\Lambda = \mathrm{diag}(\omega_1^2,\omega_2^2,\cdots,\omega_k^2)$;$\boldsymbol{C}_{uu}$ 为 k 阶模态响应的协方差矩阵,可用式(15)计算。

$$\boldsymbol{C}_{uu} = \int_0^{\bar{\omega}}\boldsymbol{H}(-\mathrm{i}\bar{\omega})\cdot\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{S}_{PP}(\bar{\omega})\cdot\boldsymbol{\Phi}\cdot\boldsymbol{H}(\mathrm{i}\bar{\omega})\mathrm{d}\bar{\omega} \tag{15}$$

综上所述，图 1 给出了 Ritz-POD 法提供的结构 Ritz 振型及传统自由振动特征向量法提供的模态振型参与格构式塔架结构风振响应及等效静力风荷载的计算流程图。此计算流程利用了 MATLAB 数值编程计算与 SAP2000 结构分析软件的功能，能够将结构 Modal 振型、Ritz 振型、刚度矩阵等结构分析信息的自动化读取，并结合风致动力响应和等效静力风荷载的相关算法，实现结构抗风性能评估的高效分析。

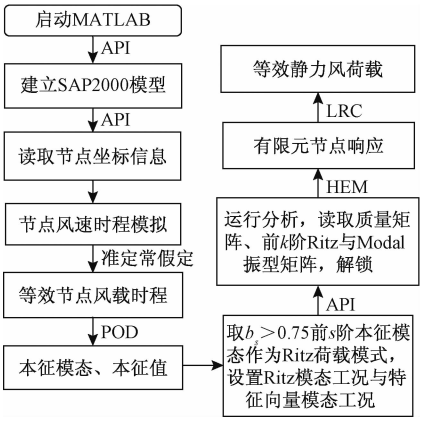

图 1　结构风振计算流程图

Fig. 1　Flow chart for wind-induced structural vibration analysis

2　通信塔线结构算例

通信塔线结构层高 3 m，层数 100 层，总高 300 m，底层边长 3 m，顶层边长 1 m。框架柱与斜撑横截面都采用等边角钢，边长分别为 160 mm 和 70 mm，厚度分别为 10 mm 和 6 mm。在地面上沿对角线方向距离原点 100 m 与 200 m 分别布置 2 个拉索锚结点，且拉索另一端分别在结构 24 和 48 层、72 和 96 层进行拉结，每根拉索的横截面积为 1 290 mm^2。

图 2 给出了通信塔线三维有限元模型及塔身段框架连接关系，其中塔身杆件采用框架单元，柱端固接，斜撑铰接；拉索采用索单元，拉索的预应力荷载通过温降进行模拟，设每根拉索温降都为 50 ℃。索单元采用弹性悬链线原理来模拟柔性索在自重、温度和应变荷载作用下的高度非线性行为[9]，未变形计算长度按照在地面端张拉力来确定。

结构风场环境可采用相关数值模拟技术来实现[10]，本次塔线结构采用谐波叠加法在层高处模拟了 100 个位置点基于 von Karman 谱[11]的脉动风速时程。受篇幅限制，图 3 只给出了某层处沿坐标轴顺（x）、横（y）两正交风向的脉动风速时程曲线样例，可以看出曲线基本围绕平衡位置处（0 m/s）上下波动且大部分控制在 ±10 m/s 的范围内。

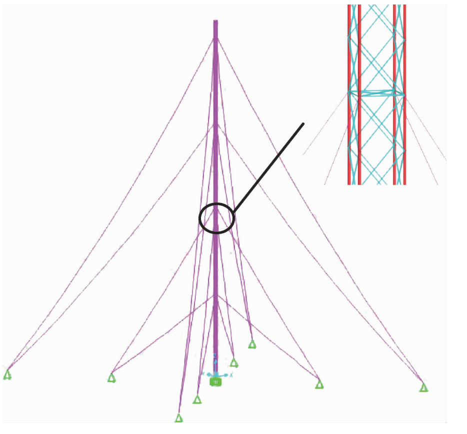

图 2　塔线结构有限元模型

Fig. 2　Guyed mast finite element model

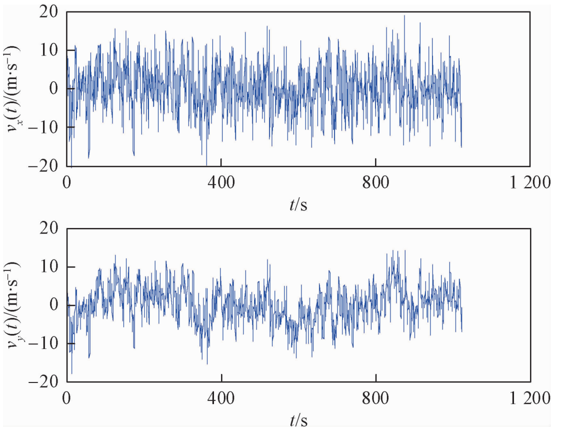

图 3　层高处沿坐标轴向的脉动风速时程

Fig. 3　The time history of fluctuating wind speed along the axis

格构式钢框架结构是由很多断面较小的角钢组成的，这种结构的整体镂空率一般大于 70%，于是在气流通过时，就会在各个杆件产生钝体绕流的现象，图 4 给出了角钢柱的兜风效应平面示意图。然而，要精确确定截面尺寸小的角钢的风荷载，就要知道在每一根杆件上的风压系数，而单根杆件上风荷

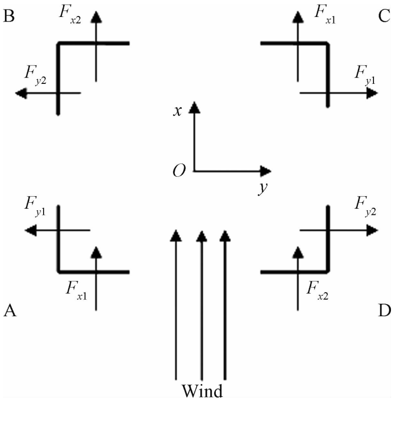

图 4　角钢柱的兜风效应示意图

Fig. 4　The schematic diagram of catching the wind for angle steel columns

载的分布与风向角度、相邻杆件的空间分布等诸多因素相关。

文献[4]对格构式塔身结构杆件上的风压系数进行了典型节段大比例刚性模型测压风洞实验研究，表 1 给出了该风洞实验沿整体坐标 x 轴风向下各杆件平均风压系数取值，其具体立面位置分布见图 5。为保证实验结果的可用性，此次通讯塔架结构所有构件断面形状、构件朝向、几何空间关系均与试验条件基本保持一致。将表 1 中风压系数换算成节段模型整体体型系数为 2.99，而模型体型系数按国内塔架荷载设计规程[12]可计算为 2.37，按美国规范[13]和欧洲规范[14]可取 2.92 和 2.75。通过对比可以看出风洞试验值是最大的，说明采用此风洞试验的体型风压系数相对于规范来说是偏安全的。

表 1 x 风向下桁架各杆件体型风压系数

Table 1 Wind pressure coefficient of each structural element in x direction

风向	杆件	迎风面		背风面		侧风面左	侧风面右
	编号	柱	斜撑	柱	斜撑	斜撑	斜撑
x	1	1.68	2.13	1.16	1.66	0.44	0.25
	2	1.78	2.06	1.08	1.44	0.09	0.39
y	1	−0.38	−1.4	1.45	0.30	0.69	0.18
	2	0.35	0.11	−1.33	−0.82	0.11	0.76

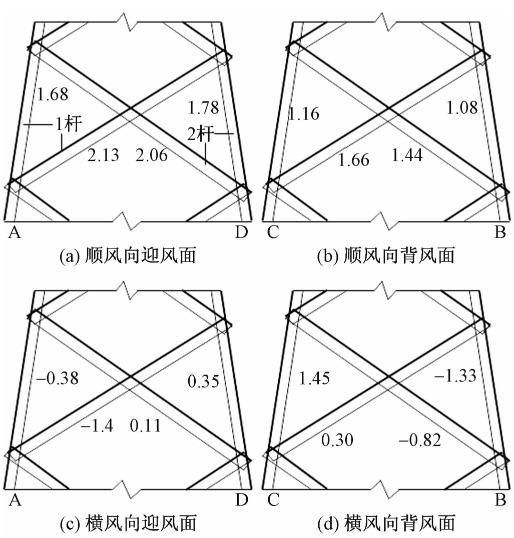

图 5 风压系数分布图

Fig. 5 Wind pressure coefficient distribution

图 6 给出了 Ritz 模态分析的前三阶平动振型，其对应的自振频率为 0.3 Hz、0.46 Hz 和 0.82 Hz，并且振型形态是与结构风荷载方向是一致的，说明 Ritz 振型是与外荷载相关的。

图 7、图 8 分别给出了采用 100 阶传统自由振动振型和 40 阶荷载-里兹振型代入谐波激励法

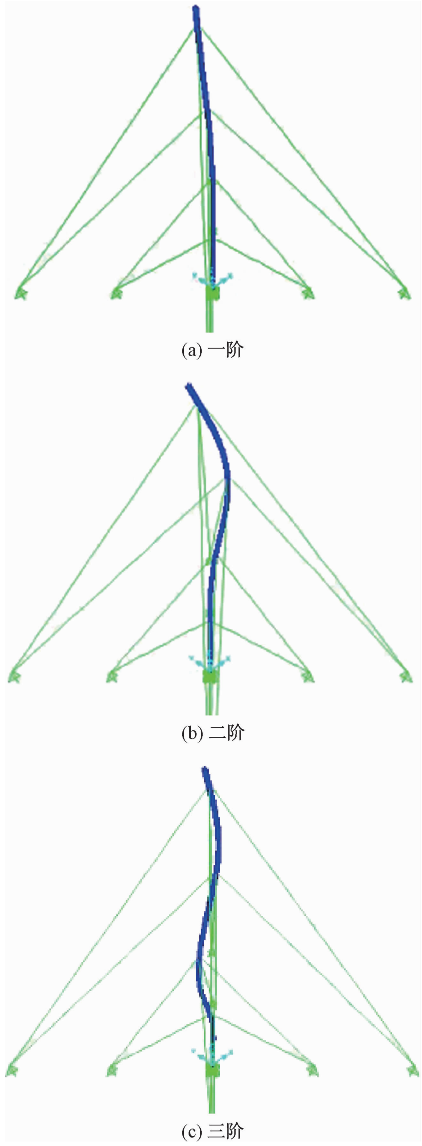

图 6 Ritz 振型

Fig. 6 The Ritz modal vibration mode

(HEM)所计算得到的结构节点 3 个自由度方向上的位移均方根响应与峰值响应曲线。图 7 和图 8 中纵坐标表示有限元模型节点的序号，因为程序建模是按照从地面沿着高度方向上递增编号命名的，因此纵坐标从某种程度上代表了结构的高度。从图中可以看出：采用两种不同振型计算的结构响应吻合度较高且顺风向风致位移的最大值均为 1.342 m。因此，以 40 阶荷载-里兹振型取代 100 阶 Modal 振型参与风振响应计算，减少了 HEM 的运算量、内存占有量。

图 9 给出了以顺风向最大节点峰值位移响应为等效目标，分别采用两种振型（100 阶 Modal 振型和 40 阶荷载-里兹振型）计算得到的节点 3 个平动自由度方向上的等效静力风荷载，可以看出：拉索连接处节点的等效静力风荷载有突变，这是由于拉索改

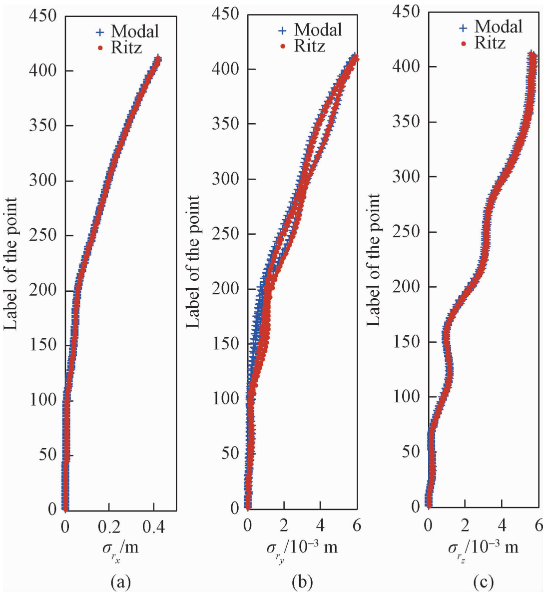

图 7　结构响应均方根

Fig. 7　Distribution of wind-induced RMS displacement in three directions

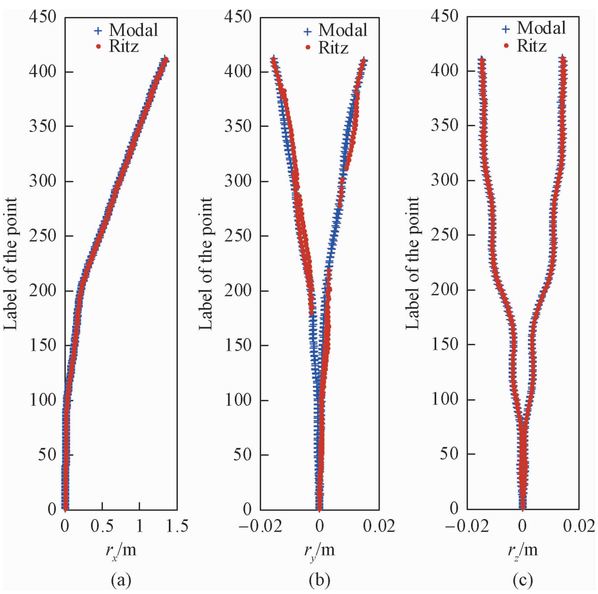

图 8　结构响应峰值曲线

Fig. 8　Distribution of wind-induced peak displacement in three directions

变了此处的刚度分布;3 个方向上的节点等效静力风荷载重合度较高;两种振型计算的节点最大等效静力风荷载值均为 3.05 kN。因此,以 40 阶荷载-里兹振型取代 100 阶 Modal 振型进行等效静风荷载的计算,一方面减少了振型选取的阶数,同时还减少了风致振动分析的计算工作量。

通过测定,采用 100 阶 Modal 振型和 40 阶荷载-里兹振型计算节点自由度上风振响应(HEM 法)和等效静力风荷载(LRC 法)所花费的时间分别为

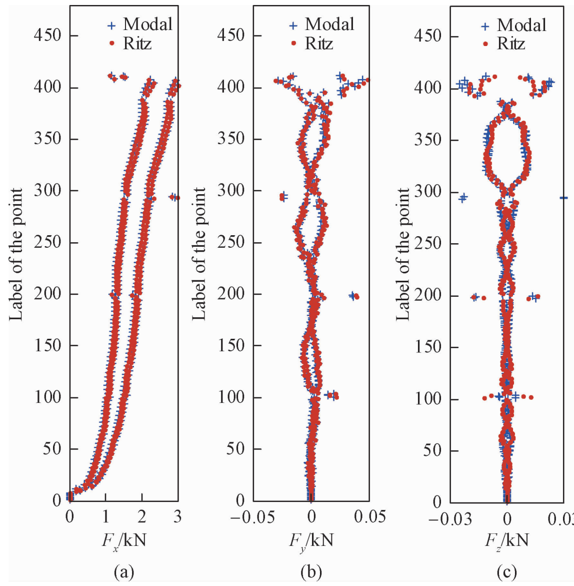

图 9　按结构最大位移等效的等效静力风荷载

Fig. 9　Distribution of equivalent static wind load

103.8 s 和 53.6 s。因此,应用荷载-里兹振型在保证计算精度的同时差不多节省了一半的时间,大大提高了计算效率。

需要说明的是,参与计算的振型阶数越多,结构风振计算结果的准确度越高;上述采用 100 阶 Modal 振型是作为相对准确的计算结果,用阶数较少的 40 阶荷载-里兹振型计算的结果用来作对比分析。而在实际工程的风振计算中,不同结构模态参与计算阶数需根据质量参与系数及静荷载参与系数来判断,本次格构式塔架结构采用 28 阶荷载-里兹振型经过计算得到的质量及静荷载参与系数分别达到 90%、98.5%。因此,在实际计算中选取前 28 阶荷载-里兹振型参与本次塔架结构风振计算,其结果的准确性能够得到保障。由于荷载-里兹振型是与外部风荷载相关的,能够避免特征向量法计算的许多振型对荷载是正交的而不参与动态响应计算,从而将有限的计算时间全部用于对精度有增进的振型计算中。因此采用针对风荷载的本征模态分解的荷载-里兹振型,以较少阶数的参与计算,不但保证了计算精度,而且能提高计算效率。

3　结论

本文分别采用基于荷载的里兹振型和传统自由振动振型,进行通信塔线结构的风振响应及等效静力风荷载的分析,由计算结果可得出如下结论。

(1)采用 40 阶基于荷载-里兹振型和 100 阶传统自由振动振型计算的节点风振响应和等效静力风荷载曲线吻合度较高,说明较少阶基于荷载-里兹振型的计算精度是能够保障的,并且较少阶 Ritz 振型

减少了谐波激励法与荷载-响应相关法的运算量、内存占有量,提高了计算效率。

(2)本文计算流程利用 MATLAB 编程软件,实现了与格构式塔架风致动力响应和等效静力风荷载求解的 POD、HEM 与 LRC 相关算法的一体化分析,可精确有效评估塔架结构的风致动力响应。

(3)本文利用大型通用有限元软件 SAP2000 基于 MATLAB 系统的应用程序接口(API)开发环境,实现了塔架结构 Modal 振型、Ritz 振型、刚度矩阵等结构分析信息的自动化读取,结合风致动力响应和等效静力风荷载的相关算法,实现了塔架结构抗风性能评估的高效分析平台,可为其他大型复杂工程的风致振动分析提供参考。

参 考 文 献

1 程志军, 付国宏, 楼文娟,等. 高耸格构式塔架风荷载试验研究. 实验力学, 2000; 15(1):51—55

Chen Zhijun, Fu Guohong, Lou Wenjuan, *et al*. Research for the wind force on high-rise latticed tower. Journal of Experimental Mechanics, 2000; 15(1):51—55

2 Carril C F, Isyumov N, Brasil R M L R F. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2003; 91(8):1007 - 1022

3 邹良浩, 梁枢果,邹 垚,等. 格构式塔架风载体型系数的风洞试验研究. 特种结构, 2008; 25(5):61—63,88

Zou Lianghao, Liang Shuguo, Zou Yao, *et al*. Wind tunnel tests for wind load shape coefficients of latticed tower. Special Structures, 2008; 25(5):61—63,88

4 楼文娟, 王 东,沈国辉,等. 角钢输电塔杆件风压及体型系数的风洞试验研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013; 41(4):114—118

Lou Wenjuan, Wang Dong, Shen Guohui, *et al*. Wind tunnel tests for wind load distribution and shape coefficient of angle-made-transmission towers. J. Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition), 2013; 41(4):114—118

5 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法. 北京:科学出版社, 2004

Lin Jiaohao, Zhang Yahui. Pseudo-excitation method of random vibration. Beijing: Science Press, 2004

6 谢壮宁. 风致复杂结构随机振动分析的一种快速算法——谐波激励法. 应用力学学报, 2007; 24(2):263—266

Xie Zhuangning. Wind induced random vibration analysis of complex structure, a fast algorithm of harmonic excitation method. Journal of Applied Mechanics, 2007; 24(2):263—266

7 陈 波. 大跨屋盖结构等效静风荷载精细化理论研究. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006

Chen Bo. Refined theory of the equivalent static wind loads on large span roofs. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006

8 SAP2000 application programming interface documentation. Copyright Computers and Structures, Inc, 2015

9 徐明骁, 葛耀君, 马婷婷,等. 大跨度斜拉索参数振动研究. 科学技术与工程, 2011; 11(19):4509—4515

Xu Mingxiao, Ge Yaojun, Ma Tingting, *et al*. Research on parametric oscillation of super long cables. Science Technology and Engineering, 2011; 11(19):4509—4515

10 梁 栋, 段文博, 朱亚洲,等. 双悬臂状态高墩连续刚构桥的风振及控制研究. 科学技术与工程, 2017; 17(6): 276—282

Liang Dong, Duan Wenbo, Zhu Yazhou, *et al*. Study on the wind-induced vibration and control of continuous rigid frame bridge with high-pier under double cantilever state. Science Technology and Engineering, 2017; 17(6): 276—282

11 吴本刚, 傅继阳, 吴玖荣. 实测风场风速风向耦合的三维非平稳特征研究. 建筑结构学报, 2016; 37(2):106—113

Wu Bengang, Fu Jiyang, Wu Jiurong. Three dimensional non-stationary analysis on field measured wind data with coupling wind speed and wind direction. Journal of Building Structures, 2016; 37(2):106—113

12 DL/T 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规定. 北京:中国电力出版社,2002

DL/T 5154—2002 Technical regulation of design for steel tubular tower structures of overhead transmission line. Beijing: China Electric Power Press, 2002

13 American National Standards Institute. Minimum design load for building and other structure (ASCE7-10). New York: American Society of Civil Engineers, 2010

14 European Committee for Standardization. Actions on structures general actions Part 1-4: wind actions (BS EN1991-1-4:2005 Eurocode). Brussels: Standards Policy and Strategy Committee, 2005

Wind-induced Vibration Analysis of Lattice Tower Structure Based on Ritz-POD Method

WU Ben-gang[1,2], HE Bing-quan[1], WU Jiu-rong[3*], DING Chang-yin[1], TANG Xu-lin[1,2]

(Guangzhou Jishi Construction Group Co., Ltd.[1], Guangzhou 510115, China; School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology[2], Guangzhou 510641, China; Guangzhou University-Tamkang University Joint Research Center for Engineering Structure Disaster Prevention and Control[3], Guangzhou 510006, China)

[**Abstract**] The wind-induced response and equivalent static wind load (ESWL) for a lattice tower was conducted by adopting the combined POD-Ritz method, harmonic excitation method (HEM) and load response correlation method (LRC). The load-dependent-Ritz vibration modes for the lattice tower were obtained by utilizing the proper orthogonal decomposition (POD) method on the simulated fluctuating wind loading in the proposed POD-Ritz method. By selecting 40 load-dependent-Ritz vibration modes and 100 traditional free vibration modes, the wind-induced responses and equivalent static wind loads for the lattice tower were conducted respectively. The comparison between these two sets of numerical analyzed results showed that the difference in wind-induced response obtained by using two different types of vibration modes is very small. The numerical analysis accuracy in evaluation of wind-induced vibration response for the lattice tower could be obtained with less load-dependent-Ritz vibration modes and high efficiency in reducing run time and less computation memory. Furthermore an integrated analysis system for the wind-induced response and equivalent static wind loading of the lattice tower was proposed by adopting the SAP2000 API for the MATLAB environment and the previous analysis procedure. This integrated analysis system could be used as a good reference for wind-induced response analysis for other large complex structures.

[**Key words**] wind-induced response equivalent static wind load Ritz-POD method harmonic excitation method load response correlation method lattice tower structure