

脉动风作用下塔架结构的风振响应分析

万春风^{1,2}, 黄磊^{1,2}, 汪江³, 朱虹^{1,2}

1. 东南大学城市工程科学技术研究院, 南京 210096
2. 东南大学土木工程学院, 南京 210096
3. 安徽省电力科学研究所, 合肥 230601

摘要 简述了应用线性滤波法中的自回归模型 (AR) 模拟出给定风速功率谱的风速时程序列, 并验证其与目标谱 (Davenport 谱) 的一致性, 再通过规范公式推导脉动风载与风速之间的关系, 从而得到作用在各节点的脉动风荷载时程样本。以某 42m 高的通信塔架为原型进行了模拟计算分析, 用有限元分析软件 ANSYS 建立其有限元模型, 并用 Matlab 获取了塔架迎风面各节点上的风荷载时程信号作为动力输入。利用 ANSYS 对结构进行了模态分析, 结果显示结构的前几阶振动均是平面振动, 第 3 阶振动开始出现扭转模态和局部振动模态; 同时, 基于 ANSYS 时程分析方法计算了结构在脉动风载作用下的风振响应。结果表明, 在仅考虑脉动风作用的情况下, 本塔架结构顶部的水平位移低于规范规定的位移限值, 但塔架截面变化拐点处的弦杆在风载作用过程中会产生较大应力, 在塔架设计中予以注意。

关键词 脉动风; 自回归模型; 风振响应; 时程分析

中图分类号 TQ050.4*25

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.01.006

Wind-induced Response of a Tower Structure Under Fluctuating Wind Load

WAN Chunfeng^{1,2}, HUANG Lei^{1,2}, WANG Jiang³, ZHU Hong^{1,2}

1. International Institute for Urban Systems Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China
3. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China

Abstract In this paper, an autoregressive model (AR model) is used to simulate the wind speed time series. The spectrum of the simulated wind speed time series is found in agreement with the target spectrum, i.e., Davenport wind speed spectrum. The relationship between the wind load and the wind speed is derived according to the related Chinese codes. Samples of the fluctuating wind load on the nodes of a structure are obtained. Simulations with the Finite Element Method (FEM) are carried out for a 42m-high communication tower. The tower is made of Q235 steel. ANSYS software is used to build the FEM model. 188 elements of beams are applied for the main members of the tower structure, while link elements are applied for the web members. The wind load time history series are simulated by using Matlab software and are used as the input loads. The modal analysis shows that the first several modes of the structure are all plane vibration modes, and after the 3rd mode one may find torsional vibration modes and local vibration modes. Meanwhile, the time history analysis is used to determine the structural responses under wind loads. Results show that, under fluctuation wind loads, the horizontal displacement is much smaller than the value suggested by the code for the design of high-rising structures. However, it should be noted that the transmission tower experiences a large stressing in the chords where the section of the tower changes.

Keywords fluctuating wind; autoregressive model; wind response; time history analysis

收稿日期: 2011-11-10; 修回日期: 2011-12-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2011BAK02B03); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介: 万春风, 副教授, 研究方向为土木工程、结构健康监测等, 电子信箱: chunfengwan@gmail.com

0 引言

高耸塔架结构的高度与截面之比较大,且平面截面的结构对称性较强,其基本自振周期一般较长,因此结构的风效应会比地震作用更为显著,风荷载是引起结构侧向位移和振动的主要因素。结构上的风荷载主要包括顺风向的平均风和脉动风以及横风向的涡流干扰。平均风对于结构的作用相当于静力荷载,而脉动风由于周期接近于高耸塔架结构的自振周期,会在结构的顺风向引起较大振动,这种形式的振动需要在工程结构计算分析中予以考虑,即进行风振响应分析,为简化问题,本文暂不考虑横风向的涡流干扰。

对于脉动风的风速谱,目前比较流行的有 Davenport 谱、Kaimal 谱、Simiu 谱等,如秦力等^[1]用 Kaimal 谱进行了风速模拟。由于 Davenport 谱简单易用,本文利用自回归模型(Auto-Regressive, AR)法针对 Davenport 谱进行了风速模拟,并基于规范直接求出风压荷载,从而进行结构动力分析。

由于风效应对高耸结构的作用很大,国内外对高耸结构的风振响应作了大量研究,欧进萍等^[2]对高层结构进行了风振及阻尼控制分析,陈波等^[3]对合肥电视塔作了动力特性和风振响应的分析,邓洪洲等^[4]对大跨越输电塔线体系进行了风振研究,温德超等^[5]也对一 80m 的烟囱从其固有频率、风振频率和雷诺数 3 方面研究了该烟囱的振动问题,而徐刚等^[6]则对施工中大桥桥塔的风致振动极其减振控制进行了研究。在近 20 年来,随着无线通信,特别是手机通信网络的迅猛发展,建造了大量的通信塔架,但目前对于通信塔架的风振响应研究还很少,本文将对脉动风作用下的通信塔架结构进行风振响应分析,并将以某一通信塔架为例,分析顺风向的脉动风引起的结构振动,将依据相关的建筑结构规范,考虑节点脉动风的空间相关性,采用 AR 法模拟迎面各节点的脉动风载时程,并利用 ANSYS 有限元软件建立结构的有限元模型,分析塔架的动力特性,用时程分析方法计算通信塔架的风振响应。

1 脉动风速时程模拟

在时域内对结构进行风振响应分析,首先必须得到结构各节点上的脉动风速时程,目前对平稳或是非平稳、一维或多维、单变量或多变量、高斯性或非高斯性的随机过程的模拟,主要有谐波叠加法^[7]和线性滤波法两大类。

谐波叠加法是采用以离散谱逼近目标随机过程的随机模型,算法简单直观,数学基础严密,适用于任意指定频谱特征的平稳高斯随机过程,但局限于模拟一维平稳过程。线性滤波法基于线性滤波技术,也即白噪声滤波法(white noise filtration method),常用的有自回归 AR^[8]模型、滑动平均(Moving Average, MA)模型和自回归滑动平均(Auto Regressive Moving Average, ARMA)模型等。

AR 法通过线性自回归过滤器,将人工产生的均值为 0 的白噪声随机数,输出为具有给定频谱特性的随机数序列,可以一次模拟多个考虑相关性的随机过程,本文采用 AR 法

得到 M 个点的风速时程序列。生成空间 M 个的点的相关脉动风速时程 $\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t)$ 的 AR 模型可以表示为

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t-k\Delta t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_M)$, $\mathbf{y}=(y_1, y_2, \dots, y_M)$, $\mathbf{z}=(z_1, z_2, \dots, z_M)$, (x_i, y_i, z_i) 为空间第 i 点的坐标, $i=1, 2, \dots, M$; p 为 AR 模型阶数; Δt 为时间步长, $\boldsymbol{\Psi}_k$ 为 AR 模型自回归系数矩阵, 为 $M \times M$ 阶方阵, $k=1, 2, \dots, p$, $\mathbf{N}(t)$ 为 M 维独立正态分布的随机过程向量, 其均值均为 0, 协方差矩阵为 \mathbf{R}_N 。以下公式将 $\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t)$ 简写为 $\mathbf{V}(t)$ 。

式(1)两边同乘以 $\mathbf{V}^T(t)$, 得

$$\mathbf{V}(t+j\Delta t)\mathbf{V}^T(t) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{V}(t+j\Delta t-k\Delta t)\mathbf{V}^T(t) + \mathbf{N}(t)\mathbf{V}^T(t) \quad (j=1, 2, \dots, p) \quad (2)$$

对式(2)作数学期望运算, 根据相关函数的定义和性质可得

$$\mathbf{R}_V(j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{R}_V[(j-k)\Delta t] \quad (j=1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_V(0) = - \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \mathbf{R}_V(k\Delta t) + \mathbf{R}_N \quad (4)$$

式(3)、式(4)写成矩阵形式为

$$\mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_N \\ \mathbf{O}_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于功率谱密度函数和相关函数满足维纳-辛钦公式, \mathbf{R} 中的元素可通过下式求解:

$$\mathbf{R}_{ij}^V(m\Delta t) = \int_0^{\infty} S_{ij}(n) \cos(2\pi n \cdot m\Delta t) dn \quad (i, j=1, 2, \dots, M; m=1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

其中, $S_{ij}(n)$ 为功率谱密度函数, 采用常用的 Davenport 风速谱^[9]:

$$S_v(n) = \frac{4k\bar{v}_{10}^2}{n} \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (7)$$

$$x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}}$$

其中, n 为脉动频率; \bar{v} 为 10m 高处的水平平均风速; k 为与地面粗糙度有关的系数。由式(5)~(7)求出系数矩阵 $\boldsymbol{\Psi}_k$ 和 $\mathbf{N}(t)$ 的协方差矩阵 \mathbf{R}_N , 则

$$\mathbf{N}(t) = \mathbf{L} \cdot \mathbf{n}(t) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{n}(t) = (n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t))$, $n_i(t)$ 是均值为 0、方差为 1 且彼此独立的正态随机过程, $i=1, \dots, M$; \mathbf{L} 为下三角矩阵, 由对 \mathbf{R}_N 的 Cholesky 分解得到

$$\mathbf{R}_N = \mathbf{L}\mathbf{L}^T \quad (9)$$

假设初始时刻之前的风速为 0, 即 $t \leq 0$ 时, $\mathbf{V}(t)$ 为 0 向量, 由式(1)可得

$$\begin{bmatrix} V_1(j\Delta t) \\ \vdots \\ V_M(j\Delta t) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^p \boldsymbol{\Psi}_k \begin{bmatrix} V_1[(j-k)\Delta t] \\ \vdots \\ V_M[(j-k)\Delta t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1(j\Delta t) \\ \vdots \\ N_M(j\Delta t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

从而得到 M 个空间点的具有时间空间相关, 时间步长为 Δt 的离散脉动风速时程向量。采用 Matlab 编制的风速模拟程序实现上述过程, 得到 M 个点的具有空间相关性的脉动风速时程, 图 1 为某一点的风速时程样本曲线。

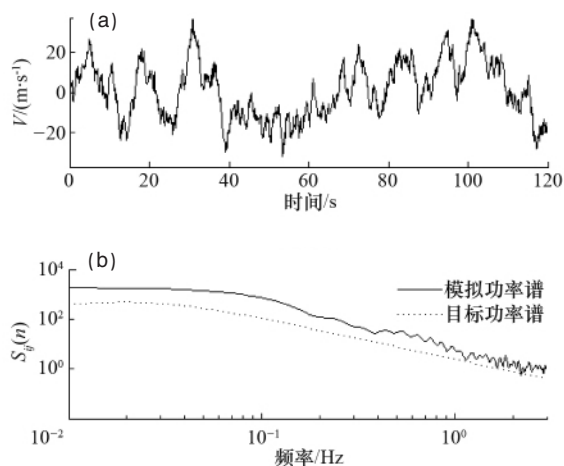


图 1 某点风速时程曲线(a)以及模拟谱与目标谱比较(b)
Fig. 1 Simulated wind history series (a) and its PSD (b)

图 1 模拟塔架顶部位置节点的风速时程序列, 通过时频转换为功率谱密度(PSD), 变换为频谱曲线并与同一频段内的目标谱(Davenport 谱)作比较, 两者趋势一致, 但仍有一定的偏差, 因为 AR 模型在计算过程中, 其精度取决于 AR 模型的阶数, 在阶数的选择上存在优化的过程。

2 风荷载的计算

第 i 节点处在 t 时刻的风压可表示为

$$w_i(t) = \frac{1}{2} \rho v_i(t)^2 \quad (11)$$

其中, ρ 为空气密度; 由于 $v_i(t)$ 由该节点的平均风速 \bar{v}_i 和脉动风速 $\tilde{v}_i(t)$ 两部分组成, 则式(11)可表示为

$$w_i(t) = \frac{1}{2} \rho [\bar{v}_i + \tilde{v}_i(t)]^2 \approx \frac{1}{2} \rho \bar{v}_i^2 + \rho \bar{v}_i \tilde{v}_i(t) \quad (12)$$

根据荷载规范^[4], 节点处集中荷载按下式计算:

$$F_i(t) = \mu_{s_i} \mu_{z_i} w_i(t) A_i \quad (13)$$

且

$$F_i(t) = \bar{F}_i + \tilde{F}_i(t) \quad (14)$$

由式(13)一式(14), 可得脉动风载 $\tilde{F}_i(t)$ 计算公式为

$$\tilde{F}_i(t) = 2 \bar{F}_i \frac{\tilde{v}_i(t)}{\bar{v}_i} \quad (15)$$

其中, 平均风载为

$$\bar{F}_i = \mu_{s_i} \mu_{z_i} A_i w_0 \quad (16)$$

其中, μ_{s_i} 为风压体型系数, μ_{z_i} 为风压高度系数, A_i 为节点受荷面积, w_0 为基本风压。

通过式(15)一式(16), 根据荷载规范及高耸结构设计规

范^[10-11]查找响应的系数及由第 1 节模拟出的风速时程样本, 可以得到作用在节点上的风荷载时程样本。

3 塔架动力响应分析

本文以江苏移动某通信塔架为原型进行模拟计算分析, 该通信塔架高度为 42m, 横截面形状为正方形, 底部边长约 4.3m, 顶部边长约 1.2m。塔架共有 7 个节间, 底部 5 个节间高 6m, 上部 2 个节间高 5m, 顶部有个 2m 的小节间用来安置天线。塔架主要部件材料选用 Q235 钢材, 在塔架 4 个角上的弦杆在底部尺寸为 $\angle 160 \times 160 \times 12$, 向上逐步减小, 到顶部尺寸为 $\angle 80 \times 80 \times 6$, 塔架的腹杆尺寸主要在 $\angle 90 \times 90 \times 8$ 到 $\angle 50 \times 50 \times 6$ 不等。考虑到弦杆和腹杆在结构受力中的特点, 在此塔架结构的有限元建模中, 对主要的杆件选取梁单元, 而对于次要的腹杆则采用杆单元建模, 塔架结构的混凝土地基近似为塔架的固定支承, 即不考虑地基的变形。

风荷载作用下塔架结构的运动微分方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + ku = F(t) \quad (17)$$

本文应用有限元软件 ANSYS 对塔架进行建模和时程分析, 图 2 为该通信塔架的空间三维模型。考虑对结构模型的简化, 将顶部的维修平台以等效荷载的形式施加在结构上, 建立如图 3 所示的有限元模型, 同时按前述 AR 法模拟了塔架迎风面上各节点的风速时程。



图 2 塔架 CAD 图形
Fig. 2 CAD model of the structure



图 3 塔架 ANSYS 模型
Fig. 3 ANSYS model of the tower structure

3.1 模态分析

首先, 计算塔架的固有模态, 利用 ANSYS 模态分析获得结构的自振频率和振型, 表 1 列出了前 4 阶模态。

由于结构的对称性较强, 一阶平面振动形式在 x 方向和 y 方向均有, 两个方向振动相同, 所以在这两个方向上的一阶频率接近, 同理二阶振动的情况也是如此。到 3 阶以上结构出现扭转振动(扭转与平动耦合)和局部振动, 说明塔架结构的质量、刚度在整体上分布比较均匀。

表 1 结构模态频率及振动形式

Table 1 First 4 order natural frequencies and its vibration types

振型	振动形式	频率/Hz
1 阶	平动 (y)	2.6576
	平动 (x)	2.6582
2 阶	平动 (x)	7.5206
	平动 (y)	7.5523
3 阶	扭转+平动	12.085
4 阶	局部振动	12.405

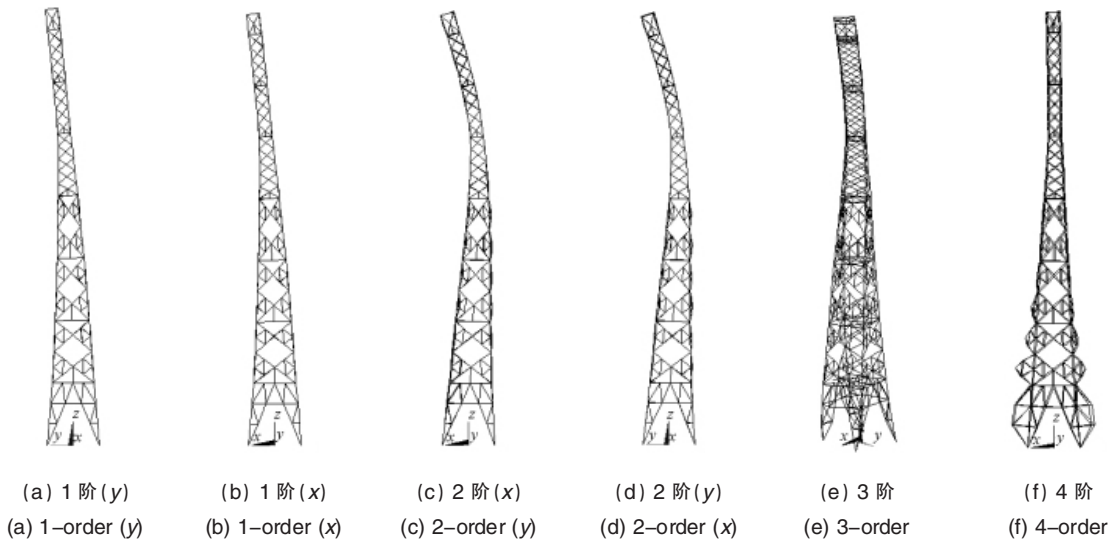


图 4 前 4 阶模态振型

Fig. 4 First 4 modes of the structure

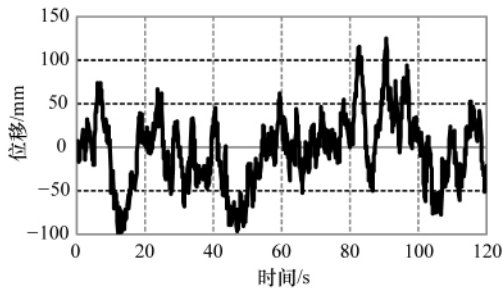


图 5 顶点位移时程

Fig. 5 Displacement at the top point

时刻出现最大应力的杆件分布情况,表 2 所示为结构最大应力出现最多的 3 根杆。

表 2 单元最大应力

Table 2 Maximum stress of the elements

单元编号	最大应力/MPa
490	48.05
23	47.93
24	47.91

前 4 阶模态振型如图 4 所示。

3.2 脉动风作用下时程分析

在塔架某一面施加节点脉动风荷载,用 ANSYS 进行分析,图 5 分别为计算分析得到的塔架顶点处的位移时程曲线,可以得出塔顶部的峰值位移为 0.13m。根据高耸结构设计规范^[1],以风为主的荷载标准组合下,其水平位移限值为按线性分析小于总高的 1/75,按非线性分析为小于总高的 1/50,本自立塔架结构按线性分析计算,其水平位移限值为 0.56m,因此从脉动风动力模拟看,其水平位移满足规范要求。

通过提取各个时刻的结构应力数据,获得了结构在各个

上述统计的应力幅值包括负值最大值,但若考虑平均风效应,会抵消部分的负值。这些杆件在 120s,1200 个时间步长中,出现有 250 多次结构最大应力,但时间并不连续,说明这几根杆件在风载环境中极容易处于高应力状态。其中 490 号杆件位于结构的底部,图 6 所圈位置为 23、24 号杆件,具体位

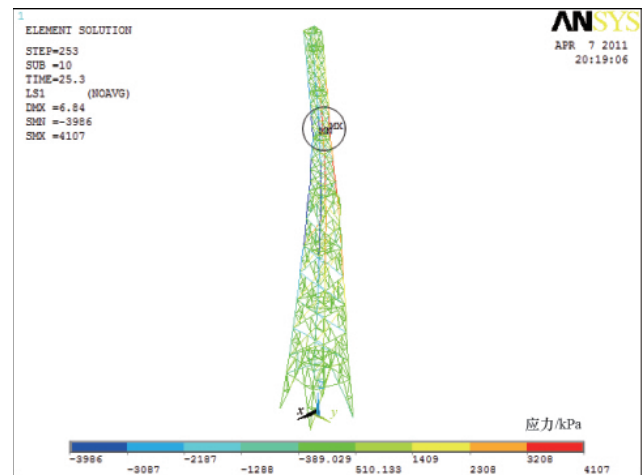


图 6 25.3s 时刻结构应力云图

Fig. 6 Structural stress at the instant of 25.3s

置如图7所示。图6为25.3s时刻结构应力云图,该时刻结构的最大应力出现在23、24号杆件,这两根杆分别出现了应力正负幅值。图7可以看出,杆件位于塔架截面拐点处,这主要是由于较高阵型对该部分杆件影响较大,如图2所示的2阶模态下在这些部位有比较大的变形,说明动力荷载激发高耸结构高阶振型对结构应力分布有一定影响。

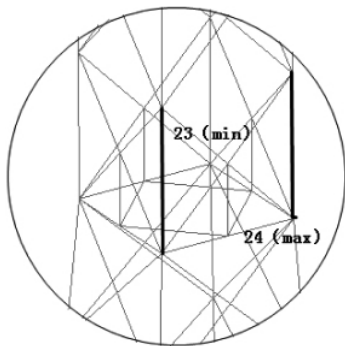


图7 23、24号杆件位置

Fig. 7 Location of the 23th and 24th rods

图8、图9显示了23、24号杆件的应力时程曲线,其中最大应力23号杆件47.93MPa,24号杆件47.91MPa,要得到其最终应力状况还需要确定平均风作用下的应力状况。

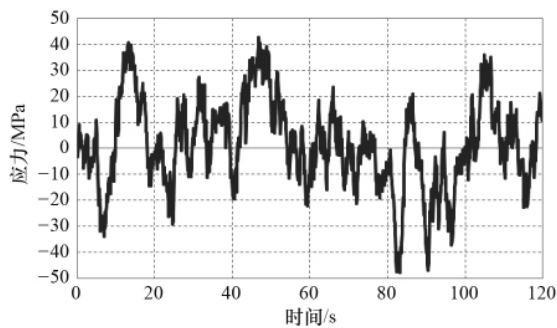


图8 23号杆件的应力时程曲线

Fig. 8 Stress time series of the 23th rods

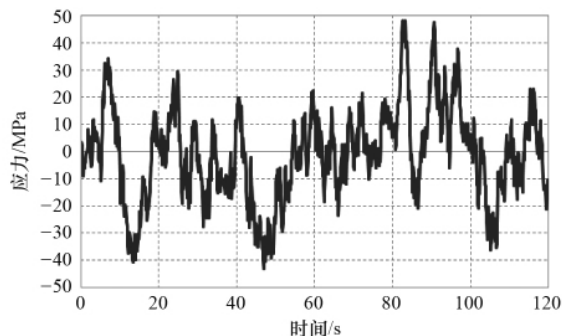


图9 24号杆件的应力时程曲线

Fig. 9 Stress time series of the 24th rods

4 结论

由于脉动风的频谱范围包含了高耸塔架结构的前几阶

模态频率甚至高阶频率,可以激起结构高阶振动,对结构性影响比较大,因此对高耸塔架结构的风振分析十分必要。

本文根据Davenport风速功率谱,用AR模型模拟了某通信塔架节点风载时程样本,利用ANSYS软件对塔架进行了模态分析和时程分析,结果表明该塔架结构整体上比较均匀,塔顶位移低于规范规定的位移值,同时也发现脉动风载作用下在截面突变处和底部的弦杆会产生较大应力,在塔架设计时应予注意。

参考文献 (References)

- [1] 秦力, 袁俊健, 李兴元. 基于AR法的输电塔线体系风速时程模拟[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 169-171.
Qin Li, Yuan Junjian, Li Xingyuan. *Water Resources and Power*, 2011, 29(2): 169-171.
- [2] 欧进萍, 张微敬. 高层建筑结构的风振阻尼控制分析与设计方法[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 32-37.
Ou Jinpin, Zhang Weijing. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(6): 32-37.
- [3] 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): 23-36.
Chen Bo, Qu Weilian. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2004, 26(2): 23-36.
- [4] 邓洪洲, 朱松晔, 陈亦, 等. 大跨越输电塔线体系风振控制研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 60-75.
Deng Hongzhou, Zhu Songye, Chen Yi, et al. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(4): 60-75.
- [5] 温德超, 刘季林, 王清刚. 80m 高钢烟囱的风振分析 [J]. 工程抗震, 2004(1): 26-29.
Wen Dechao, Liu Jilin, Wang Qingang. *Earthquake Resistant Engineering*, 2004(1): 26-29.
- [6] 徐刚, 王靖夫, 任文敏, 等. 施工中大桥桥塔的TMD减振研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 106-110.
Xu Gang, Wang Jinfu, Ren Wenmin, et al. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(6): 106-110.
- [7] Shinozuka M. Simulation of multivariate and multidimensional random process [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, 49(1): 357-367.
- [8] Iwatani Y. Simulation of multidimensional wind fluctuations having any arbitrary power spectra and cross spectra[J]. *Wind Engrg*, 1982(11): 5-18.
- [9] 黄本才, 汪丛军. 结构抗风原理及应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.
Huang Bencai, Wang Congjun. *Wind structure of theory and application* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.
- [10] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
The People's Republic of China Ministry of Construction. GB 50009—2001, load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [11] 同济大学. GBJ 135—90, 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
Tongji University. GBJ 135—90, code for design of high-rising structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991.

(责任编辑 郑伟, 刘志远)