

高层钢框架预应力索支撑结构脉动风模拟AR模型参数分析

王海忠¹, 冉克显¹, 刘学春¹, 杨茂钢², 王洪涛³, 赵玉龙¹, 宋林琳¹, 徐阿新¹

1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124
2. 北京中安质环技术评价中心有限公司, 北京 100026
3. 中国新兴建设开发总公司, 北京 100039

摘要 以高层钢框架预应力索支撑结构为例,研究了应用AR模型进行脉动风模拟时,模型的2个关键参数——时间步长、时域点数的取值对模拟结果的影响。在讨论基于AR模型的脉动风模拟方法的基础上,利用有限元软件Sap2000建立结构模型,利用Matlab编制AR算法程序,分别选用不同的时间步长、时域点数对结构进行脉动风速时程分析,将生成的脉动风速功率谱曲线与目标谱进行对比,根据曲线吻合情况确定参数的合理取值范围。结果表明,时间步长的取值对AR模型模拟结果有较大影响,其最优值域为0.10~0.18 s,超出这一范围均会导致功率谱曲线与目标谱偏离,降低模拟精度;时域点数对AR模型模拟精度的影响较小,可根据工程需要选择时域点数。

关键词 脉动风模拟;AR模型;高层钢框架预应力索支撑结构

中图分类号 TU311.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.06.010

Analysis of Parameters of the AR Model for Simulation of Fluctuating Wind on High-rise Steel Frame with Prestressed Cable Support

WANG Haizhong¹, RAN Kexian¹, LIU Xuechun¹, YANG Maogang², WANG Hongtao³, ZHAO Yulong¹, SONG Linlin¹, XU Axin¹

1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
2. Beijing Zhongan Zhihuan Evaluation Center Co., Ltd., Beijing 100026, China
3. Chinese Xinxing Construction Exploitation Corporation, Beijing 100039, China

Abstract Two critical parameters of the AR model are studied in the simulation of the fluctuating wind—time step and time points, focusing on the influence of the two parameters on the simulation of a high-rise steel frame with prestressed cable supports. The simulation of the fluctuating wind is based on the AR model, the finite element software Sap2000 is used to build the structural model, a mathematical software is used to program the AR model. Various values of the two parameters are selected, the modal analysis and the time history analysis of the structure are made. The ensemble power spectrum curve and the ensemble cross power spectrum curve are compared with the target power spectrum curve, and the reasonable value can be selected through the match of two curves. It is indicated that the value of the time step has a great effect on the accuracy of the simulation, and the suitable value should be around 0.10–0.18 s, if the value exceeds the range, the ensemble power spectrum can not match the target power spectrum

收稿日期:2013-03-08;修回日期:2014-01-12

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50678012,51248009)

作者简介:王海忠,副教授,研究方向为钢结构及预应力钢结构,电子信箱:wanghaizhong@bjut.edu.cn;冉克显(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为高层预应力钢结构风振舒适度,电子信箱:693985855@qq.com;刘学春(通信作者),博士,研究方向为钢结构及预应力钢结构,电子信箱:liuxuechun@bjut.edu.cn

引用格式:王海忠,冉克显,刘学春,等.高层钢框架预应力索支撑结构脉动风模拟AR模型参数分析[J].科技导报,2014,32(6):63-67.

and the accuracy of the simulation can not be ensured. The number of time points have little impact on the simulation.

Keywords fluctuating wind simulation; AR model; high-rise steel frame with the prestressed cable support

对建筑结构进行风振时程分析时,采用数值模拟方法对结构模型各个典型节点的风速时程曲线进行模拟分析,可以考虑场地、空间相关性、风速谱等因素,比强风观测更快捷方便。

目前,对于AR模型脉动风速曲线模拟方法的讨论较多。Iannuzzi等^[1]围绕从一维拓展到多维时域点,对WAWS法和AR法进行了讨论对比和实例分析。Owen等^[2]采用AR时间系列建模方法模拟平稳随机风载荷,用于斜拉桥的风振响应分析。舒新玲等^[3,4]对风载荷测试与模拟技术相关国内外成果进行了总结,提出VC与Matlab混合编程方法,研究结构节点脉动风速时程的时间与空间相关性,实现了模拟速度的改善。胡雪莲等^[5]考虑结构节点间的风速时程相关性,采用AR模型模拟节点随机脉动风速时程,利用AIC准则确定了模型阶数。袁波等^[6]给出了AR模型模拟风载荷的步骤及Matlab程序,并用于工程中,建议模拟时注意产生随机数的数量要足够大。张冬兵等^[7]采用改进的谐波叠加法和AR模型进行风速时程分析及验证,认为AR模型中模型阶次及时间步长对模拟结果影响较大。张希黔等^[8]对AR模型等风场模拟相关方法进行了总结。陈俊霖等^[9]通过AR模型对上海中心大厦进行脉动风速模拟并验证了其可行性。万春风等^[10]通过AR模型对脉动风速曲线进行模拟和验证,对一信号塔架进行了时程分析。唐柏鉴等^[11]通过AR模型对预应力巨型支撑——钢框架结构侧移模式进行了研究。本文以高层钢框架预应力索支撑结构为例,研究AR模型参数取值对模拟结果的影响。

1 基于AR模型的脉动风模拟方法

m 个点空间相关脉动风速时程 $V(X, Y, Z, t)$ 列向量的AR模型可表示为^[4]

$$V(X, Y, Z, t) = \sum_{k=1}^p \psi_k V(X, Y, Z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (1)$$

式中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$, $Z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$, t 为时间变量,表示速度变量随时间变化的关系,其中 x_i 、 y_i 、 z_i 为空间点 i 的坐标,共有 m 个空间点, $i = 1, 2, \dots, m$; Δt 为模拟风速时程的时间步长; ψ_k 为AR模型自回归系数矩阵, m 阶方阵, k 为参数变量, $k = 1, 2, \dots, p$; p 为AR模型的阶数,一般取4; $N(t)$ 为独立随机过程向量。其中 ψ_k 与 $N(t)$ 是求解的关键。

$$N(t) = L n(t) \quad (2)$$

式中, $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)]^T$,包含 m 个 $n_i(t)$ 数列, $i = 1, 2, \dots, m$; $n_i(t)$ 为均值为0且方差为1彼此相互独立的正态随机向量; L 为 m 阶三角矩阵。

通过 m 行 m 列协方差矩阵 R_N 进行克莱斯基分解可得

$$R_N = LL^T \quad (3)$$

将式(1)右边乘 $V^T(t - j\Delta t)$ 可得

$$V(t)V^T(t - j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p \psi_k V(t - k\Delta t)V^T(t - j\Delta t) + N(t)V^T(t - j\Delta t) \quad (4)$$

对式(4)取期望,并结合自相关函数的性质可得

$$R(j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p R[(j-k)\Delta t] \psi_k \quad (5)$$

$$R(0) = - \sum_{k=1}^p R(k\Delta t) \psi_k + R_N \quad (6)$$

写成AR模型的正则方程,即

$$R\psi = \begin{bmatrix} R_N \\ O_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $\psi = [I, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_p]^T$, ψ 为 $(p+1) \times m$ 行 m 列矩阵; I 为 m 阶单位矩阵; R_N 为 m 行 m 列协方差矩阵; O_p 为 $p \times m$ 行 m 列矩阵,元素均为0; R 为 $(p+1) \times m$ 行 $(p+1) \times m$ 列相关函数矩阵。

根据维纳-辛钦(Wiener-Khinchine)公式, R 中的元素为任意节点 i 、 j 的互相关函数,可表示为

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^\infty S_{ij}(f) \cos(2\pi f \cdot \tau) df \quad (8)$$

式中, f 为脉动风速频率; τ 表示整体 R 矩阵中任意两元素间的排列位置的一种时间关系,可表示为 $\tau = (l-k)\Delta t$,其中 l 、 k 分别表示矩阵 R 的第 l 行第 k 列, Δt 为编制程序时确定的时间步长; $S_{ij}(f)$ 为节点 i 、 j 的脉动风速功率谱,该函数反映任意2个节点之间的脉动相关关系。通过公式(8),可以求出 R 中每一元素 $R_{ij}[(l-k)\Delta t]$ 的数值,每个元素为 $m \times m$ 矩阵。

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \cdot r_{ij}(f) \quad (9)$$

式中, $S_{ii}(f)$ 、 $S_{jj}(f)$ 为脉动风自功率谱,一般选用Davenport谱; $r_{ij}(f)$ 为节点相关函数。

$$r_{ij}(f) = \exp \left[\frac{-2f \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{V}(z_i) + \bar{V}(z_j)} \right] \quad (10)$$

式中, C_x 、 C_y 、 C_z 分别为空间任意2点左右、上下、前后的衰减系数,通过试验或实测确定; $\bar{V}(z_i)$ 、 $\bar{V}(z_j)$ 分别为第 i 点和第 j 点的平均风速; x_i 、 y_i 、 z_i 和 x_j 、 y_j 、 z_j 分别为空间点 i 、 j 的坐标,一共有 m 个空间点, i 、 $j = 1, 2, \dots, m$ 。

总结求解过程,通过式(8)求出所有相关节点之间的互相关功率谱,组成矩阵 R 。再由式(7)、式(11)或者式(5)、式(6)求解出AR模型的自回归系数矩阵 ψ_k 和协方差矩阵 R_N ,对 R_N 进行克莱斯基分解求得三角矩阵 L ,生成随机序列 $n_i(t)$ 并代入式(2)求得 $N(t)$,将 $N(t)$ 代入式(1)求得所有节点的风速时程:

$$R\psi = \begin{bmatrix} R(0) & R(\Delta t) & \cdots & R(p\Delta t) \\ R(\Delta t) & R(0) & \cdots & R((p-1)\Delta t) \\ R(2\Delta t) & R(\Delta t) & \cdots & R((p-2)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R(p\Delta t) & R((p-1)\Delta t) & \cdots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_p \end{bmatrix} \quad (11)$$

需说明的是,在运行程序过程中,可能会出现 R_N 矩阵不能进行克莱斯基分解的问题。在式(5)、式(6)中,矩阵 R 与矩阵 ψ_k 相乘时须保证 R 在前、 ψ_k 在后,不可颠倒两者顺序,否则会造成后续程序无法运行。

基于 AR 模型的模拟方法具有较好的普适性,计算量小,稳定性好,但模型参数由于采用迭代、递推的方法求解,在模拟节点较多时容易产生累积误差,导致模型的精度降低。由功率谱转化为自相关函数 $R_y(\tau)$ 即式(8)时,由于采用的积分算法不同,精度控制也可能不同,因此选用一个好的积分算法是关键。文献[4]采用混合编程的方法,并且采用改进的 Roberg 定积分算法进行式(8)的求解,保证了后续计算的精度。此外,在生成均值为 0、方差为 1 且彼此相互独立的正态随机向量时,Matlab 中的内置方法产生伪随机数,当节点数目较多时,可能会使随机性不准确。

2 AR 模型参数的最优值域分析

以高层钢框架预应力索支撑结构为例^[11],应用 AR 模型,在不同时间步长、不同时域点数下进行脉动风速时程模拟。该结构总高度 109.6 m,33 层,底层高 4 m,其余层高 3.3 m,空间相关性主要考虑竖向的风压变化,每两层设置 1 个分析节点,根据结构的动力特性,结构振动频率范围取 0.01~1.00 Hz,分析生成的风速自功率谱、互相关功率谱在确定的频率值域内与目标谱的吻合情况。脉动风速时程模拟时,风速谱为 Davenport 谱,地面粗糙度为 C 类,基本风压为 0.45 kN/m²,

截断频率为 10 Hz。因为结构振动频率一般为 1 Hz,所以在进行频率积分时,取积分上限为 10 Hz,即截断频率为 10 Hz,这样便于进行计算。

2.1 时间步长

AR 模型的阶数取 4,参数时域点数取 2000,参数时间步长取 0.02~0.3 s,通过变换不同的时间步长值,模拟分析脉动风速的自功率谱曲线、互功率谱曲线与目标谱曲线的吻合性。自功率谱是 1 个风速点的频谱属性,而互功率谱是 2 个风速点的相关频率属性,都需要进行分析。

在 86.5 m 高度风速点,脉动风速样本的自功率谱曲线如图 1 所示。可以看出,随着时间步长的变化,样本的自功率谱曲线与目标谱存在最优吻合区域,时间步长取 0.02 s 时样本的自功率谱曲线向下偏离目标谱,取 0.30 s 时样本的自功率谱曲线向上偏离目标谱,取 0.10 s 和 0.18 s 时样本的自功率谱曲线与目标谱吻合较好。

在 53.5 m 高度和 86.5 m 高度 2 个风速点,样本的互功率谱曲线如图 2 所示。可以看出,随着时间步长的变化,样本的互功率谱曲线与目标谱也存在最优吻合区域,时间步长取 0.02 s 时样本的互功率谱曲线向下偏离目标谱,取 0.30 s 时样本的互功率谱曲线向上偏离目标谱,取 0.10 s 和 0.18 s 时样本的互功率谱曲线与目标谱吻合较好。

通过上述对比分析可知,时间步长对样本的功率谱曲线有较大影响,其最优取值范围为 0.10~0.18 s,超出这一范围均会导致功率谱曲线与目标谱偏离,从而影响模拟结果。

从图 1、图 2 还可以看出,在结构振动频率低于 0.05 Hz 时,样本的功率谱曲线与目标谱偏离,频率越低与目标谱偏离越大,这是因为结构振动频率不在此范围。结构振动周期一般低于 20 s,即振动频率大于 0.05 Hz,在 0.05~1.00 Hz 范围可满足结构分析要求。

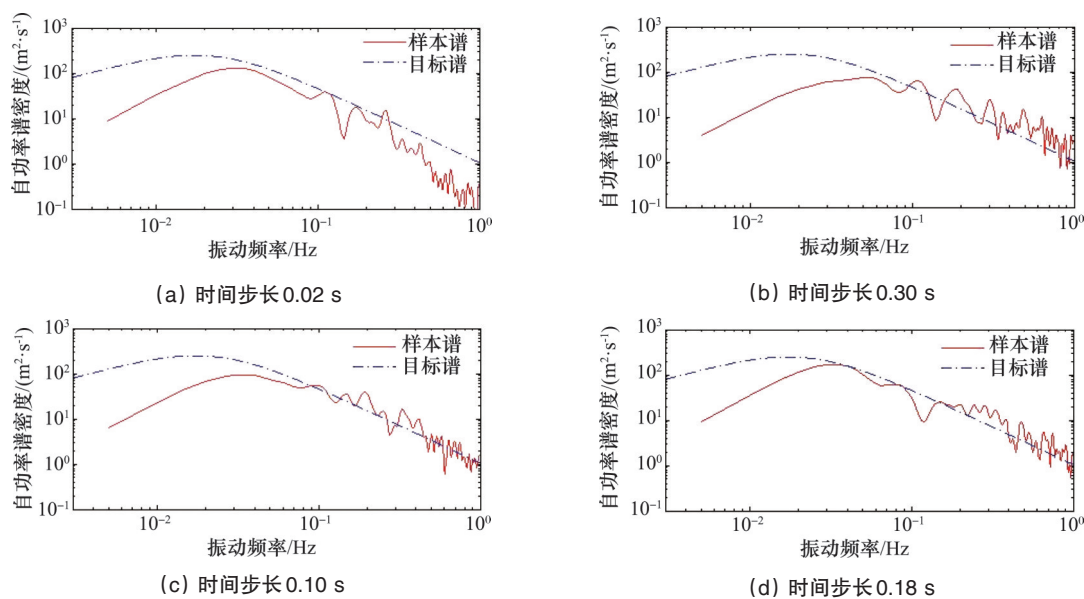


图 1 86.5 m 高度处时间步长对脉动风速样本自功率谱曲线的影响

Fig. 1 Influence of time step on ensemble power spectrum curve at the height of 86.5 m

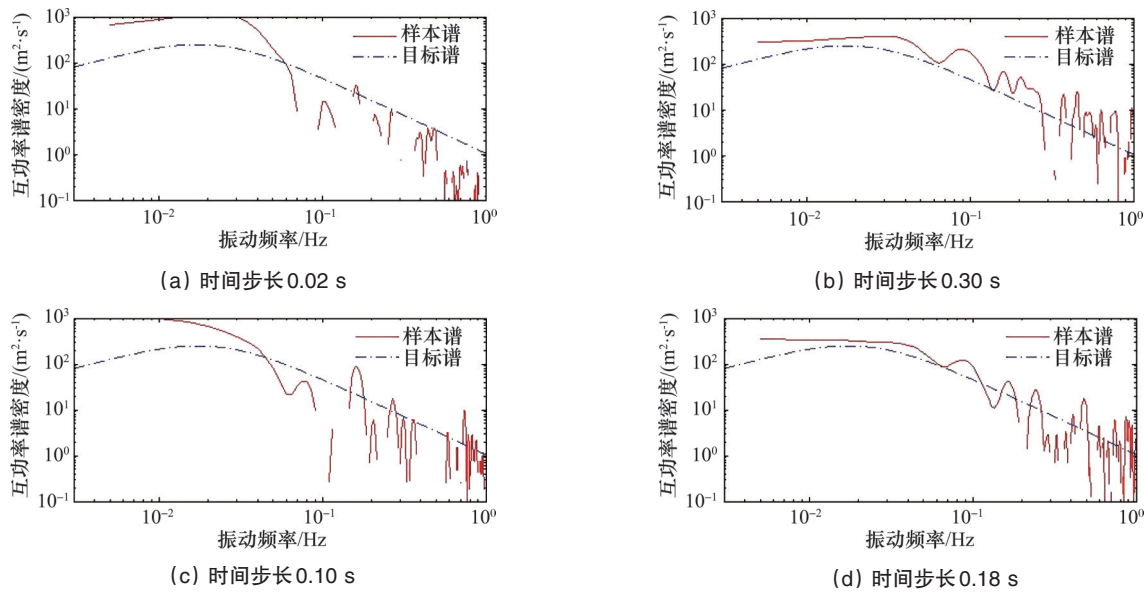


图2 53.5、86.5 m高度处时间步长对脉动风速样本互功率谱曲线的影响

Fig. 2 Influence of time step on ensemble cross power spectrum curve at the heights of 86.5 m and 53.5 m

2.2 时域点数

当AR模型的时间步长为0.12 s时,其时域点数为600、800、1000、1200、1600、2000、2500、3000。输入时域点数值进行模拟计算,获得脉动风速样本的功率谱曲线如图3、图4所示。

可以看出,时域点数变化时,样本的自功率谱曲线、互功率谱曲线与目标谱曲线均未出现大的分离。因此,可认为时域点数对于模拟结果的影响不大,选择工程所需的时域点数即可。

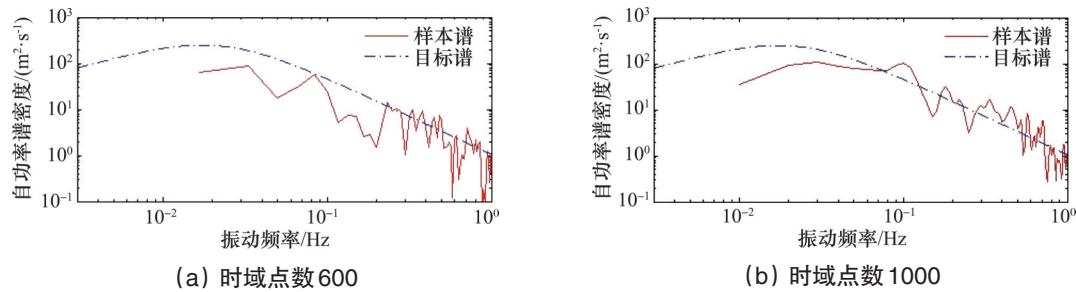


图3 86.5 m高度处时域点数对脉动风速样本自功率谱曲线的影响

Fig. 3 Influence of time points on ensemble power spectrum curve at the height of 86.5 m

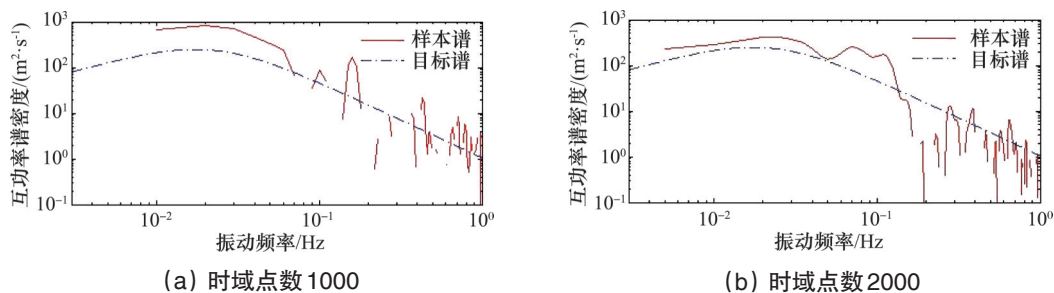


图4 53.5和86.5 m高度处时域点数对脉动风速样本互功率谱曲线的影响

Fig. 4 Influence of time points on ensemble cross power spectrum curve at the heights of 86.5 m and 53.5 m

3 工程应用

采用上述的结构模型和参数最优取值范围,时间步长取0.12 s,时域点数取2000,生成模型迎风面16个典型节点的脉动风速时程曲线和脉动风压曲线,使用Sap2000对结构进行脉动风作用下的动力时程分析,提取结构顶点的脉动风加速

度时程曲线,同时按照规范规定的顺风向顶点脉动风最大加速度公式求解,验证AR模型参数选取的合理性。

建筑模型的舒适度性能的衡量标准是结构顶层的脉动风最大加速度值,根据高层钢结构规范,公寓建筑顺风向顶点的脉动风最大加速度不可超过0.2 m/s²。

取基本风压为 0.45 kN/m^2 ,按照粗糙程度C类处理,使用Sap2000进行结构优化设计,求得结构的第一振型自振周期 $T_1=4.83 \text{ s}$;查规范,结构阻尼比按0.02计算,结构体形系数为1.3;结构总高度为109.6 m,结构迎风面宽度为48 m,结构总质量为21997.1 t。按照规范算法计算,得到结构顺风向顶点最大加速度为 0.187 m/s^2 。

通过编制程序生成16个风压时程曲线,分别导入Sap2000,将16个函数曲线作用到结构对应位置进行时程分析,得到结构顶点脉动风加速度时程曲线如图5所示,其中正反两方向的最大加速度值分别为 0.218 m/s^2 和 0.176 m/s^2 。与规范算法的计算结果对比,尽管加速度最大值相差较多,但除去最大值,其余加速度值均集中在 0.2 m/s^2 以内,与规范算法 0.187 m/s^2 对应较好。脉动风加速度最大值的差异在于算法的不同,规范算法以力除以质量求解,时程算法按照结构动力方法求解。

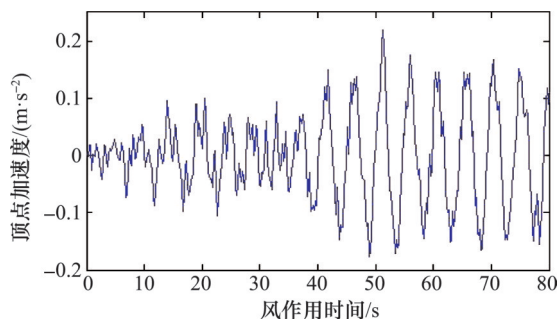


图5 结构顶层质点加速度时程曲线

Fig. 5 Acceleration time history curve of node at top floor

4 结论

1) AR模型的参数时间步长对其模拟结果有较大影响,研究表明,取0.10~0.18 s之间的数据时脉动风速样本功率谱曲线与目标谱吻合较好,因此该取值范围可以保证模拟精度。

2) AR模型的参数时域点数对其模拟结果的影响较小,选用需要的时域点数即可。

3) 经过对结构模型的风速时程分析,提取结构顶层质点的脉动风加速度时程曲线,并与规范算法对比,两者结果较为一致,说明在时间步长的合理取值范围内AR模型能够满足分析要求,可为进行后续高层预应力钢结构风振舒适度分析提供保证。

参考文献(References)

- [1] Iannuzzi A, Spinelli P. Artificial wind generation and structural response[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1987, 113(12): 2382-2398.
- [2] Owen J S. The application of auto regressive time series modeling for the time frequency analysis of civil engineering structures[J]. Engineering Structures, 2001, 23: 521-536.
- [3] 舒新玲, 周岱, 王泳芳. 风荷载测试与模拟技术的回顾及展望[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 6-10.

- Shu Xinling, Zhou Dai, Wang Yongfang. The retrospect and prospect of wind load test and simulation technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 6-10.
- [4] 舒新玲, 周岱. 风速时程AR模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003, 9(4): 27-32.
- Shu Xinling, Zhou Dai. AR model of wind speed time series and its rapid implementation[J]. Spatial Structures, 2003, 9(4): 27-32.
- [5] 胡雪莲, 李正良, 晏致涛. 大跨度桥梁结构风荷载模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(3): 63-67.
- Hu Xuelian, Li Zhengliang, Yan Zhitao. Simulation of wind loading for large-span bridge structures[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(3): 63-67.
- [6] 袁波, 应惠清, 徐佳炜. 基于线性滤波法的脉动风速模拟及其MATLAB程序的实现[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 55-61.
- Yuan Bo, Ying Huiqing, Xu Jiawei. Simulation of turbulent wind velocity based on linear filter method and matlab program realization[J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 55-61.
- [7] 张冬兵, 梁枢果, 韩银全, 等. 高层建筑风场的脉动风速时程模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(3): 127-130.
- Zhang Dongbing, Liang Shuguo, Han Yinqian, et al. Simulation of time history of turbulent wind speed in wind field around high-rises[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(3): 127-130.
- [8] 张希黔, 葛勇, 严春风, 等. 脉动风场模拟技术的研究与进展[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 206-212.
- Zhang Xiqian, Ge Yong, Yan Chunfeng, et al. Advances in research of simulation technology of fluctuation wind loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 206-212.
- [9] 陈俊儒, 吕西林. 上海中心大厦脉动风荷载模拟研究[J]. 力学季刊, 2010, 31(1): 92-100.
- Chen Junru, Lü Xilin. Simulation of fluctuating wind load of shanghai center tower[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(1): 92-100.
- [10] 万春风, 黄磊, 汪江, 等. 脉动风作用下塔架结构的风振响应分析[J]. 科技导报, 2010, 30(1): 39-43.
- Wan Chunfeng, Huang Lei, Wang Jiang, et al. Wind-induced response of a tower structure under fluctuating wind load[J]. Science & Technology Review, 2010, 30(1): 39-43.
- [11] 唐柏盛, 顾盛. 预应力巨型支撑-钢框架结构侧移模式研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 57-61.
- Tang Baijian, Gu Sheng. Study on lateral resistance performance of prestressed-mega-brace-steel frame structure[J]. Building Science, 2010, 26(9): 57-61.
- [12] Davenport A G. Wind effects on civil engineering structures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11(4): 1025-1026.
- [13] Kareem A, Kijewski T. 7th US national conference on wind engineering: A summary of papers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 62(1): 81-129.
- [14] Grigoriu M. On the spectral representation method in simulation[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1993(8): 75-90.
- [15] Naganuma T, Deodatis G, Shinozuka M. ARMA modal for two dimensional process[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1987, 113(2): 234-251.
- [16] Samaras E, Shinozuka M, Tsurui A. ARMA representation of random process[J]. American Society of Civil Engineers, 1985, 111(3): 449-461.
- [17] Shinozuka M. Simulation of multivariate and multidimensional random process[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49(3): 357-367.

(责任编辑 韩星明)