

高层建筑结构风振时程分析软件的技术研究

陈学伟^a, 韩小雷^{a,b}, 郑宜^a, 毛贵牛^a

(华南理工大学 a.高层建筑结构研究所; b.亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 高层建筑风振舒适度已受到普遍关注, 目前常采用规范的经验公式和风洞模型试验实测计算。但随着结构体系的复杂化及采用附加阻尼器减振技术的日益广泛化, 进行结构的风振时程分析是更为简单直接和准确的分析方法。本文采用自回归滤波法技术, 考虑三维空间相关性, 对具有随机性的脉动风荷载进行有效的模拟; 通过编制软件生成风压时程数据并自动输出至结构有限元软件进行风振时程分析, 为高层建筑的风振控制分析提供了可行的方法; 最后, 将该风动力荷载数值模拟技术与动力时程分析技术相结合进行算例分析验证, 经过对比研究表明该风振时程分析方法可应用于工程分析与设计。

关键词: 风振控制; 风荷载时程; 时程分析; 自回归滤波法

中图分类号: TU973+.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2008)03-0136-04

对于风敏感的复杂结构风振响应分析和风振系数求解, 主要有以下4种方法^[1]: 频域分析法、时域分析法、风洞试验法与数值风洞技术。其中, 时域分析法直接将风洞试验的风压时程或计算机模拟的风压时程作用于结构, 进行风振响应时程分析, 通过动力计算得到结构动力响应。采用时域分析法, 可以考虑自然风的空间相关性和结构非线性影响, 更准确地反映结构的耦合风振情况。

1 风速时程模拟方法

本文采用线性滤波法的自回归(AR)模型模拟风速时程。在满足工程计算精度要求的前提下, 可对风速时程作以下假定: (1) 任意一点处平均风速不随时间改变; (2) 脉动风速时程是零均值平稳随机过程; (3) 风速时程间具有空间相关性。

采用AR法^[2]推广到模拟多维风速时程的技术, 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:

$$V(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^p \psi_k V(x, y, z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (1)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为空间第 i 点坐标, $i=1, 2, \dots, M$; p 为AR模型阶数; Δt 是模拟风速时程的时间步长; ψ_k 为AR模型自回归系数矩阵, 为 $M \times M$ 阶

方阵, $k=1, \dots, p$; $N(t)$ 为独立随机过程向量:

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

式中, $n(t)=[n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$, $n_i(t)$ 是均值为0, 方差为1的正态分布随机过程, $i=1, \dots, M$ 。随机风过程的协方差 R 与回归系数 ψ 之间的关系可写成矩阵形式:

$$R \cdot \psi = \begin{bmatrix} R_N \\ O_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\psi = [I, \psi_1, \dots, \psi_p]^T \quad (4)$$

$$R_N = R_0 + \sum_{k=1}^p \psi_k R(k\Delta t) \quad (5)$$

式中, ψ 为 $(p+1)M \times M$ 矩阵, I 为 M 阶单位矩阵; O_p 为 $pM \times M$ 阶矩阵, 其余全部元素为0; R 为 $(p+1)M \times (p+1)M$ 阶自相关 Toeplitz 矩阵。

功率谱密度与相关函数之间符合维纳-辛钦(Wiener-Khintchine)公式, 即:

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^\infty S_{ij}(f) \cos(2\pi f \cdot \tau) df \quad i=1, \dots, M \quad (6)$$

式中, f 是脉动风速频率; $S_{ij}(f)$ 在 $i=j$ 时为脉动风速自谱密度函数, 在 $i \neq j$ 时为脉动风速互谱密度函数, 可由脉动风速自谱密度函数 $S_{ii}(f)$ 和相关函数 $r_{ij}(f)$ 确定。

收稿日期: 2008-03-05

作者简介: 陈学伟(1983-), 男, 广东汕尾人, 博士研究生, 研究方向为高层结构抗震抗风分析, dinochen1983@yahoo.com.cn。

基金项目: 广东省自然科学基金(06105416)。

可采用高斯约当法求解式(3)给出的线性方程组,可以得到回归系数矩阵 ψ 。对由式(5)确定的 R_N 进行Cholesky分解,则可求出 $N(t)^{[4]}$ 。由式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} v^1(j\Delta t) \\ \vdots \\ v^M(j\Delta t) \end{bmatrix} = -\sum_{k=1}^p \psi_k \cdot \begin{bmatrix} v^1[(j-k)\Delta t] \\ \vdots \\ v^M[(j-k)\Delta t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^1(j\Delta t) \\ \vdots \\ N^M(j\Delta t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

计算时,假定初始时刻之前的风速为0,即 $t \leq 0$ 时, $V(t) = 0$ 。最终的人工风速时程为

$$V(t) = \bar{v}(z) + v(t) \quad (8)$$

2 程序实现

在进行高层结构的风振时程分析之前,本文根据上述AR法模拟风速时程的方法得到具有符合《建筑结构荷载规范》GB 50009-2001^[5](以下简称《荷载规范》)规定的基本风压与地面粗糙度的风速时程曲线。

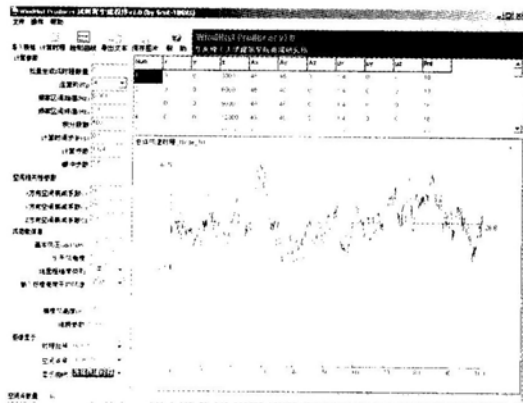


图1 风时程生成软件界面

通过面向对象的程序语言 Borland Delphi 7.0 编制具有前后处理及图形功能的风时程生成软件 WINDHIST PRODUCER v1.0。软件界面如图1所示。该软件可实现通过导入 SAP2000 和 ETABS 生成的 Excel 表格,输入结构空间点分布。本软件可修改 AR 模型的阶次,积分精度、频率区间、计算步长等计算模型的参数,可调节计算模型的速度与精度。本软件的特色在于风荷载特性的输入与我国《荷载规范》紧密结合。程序可通过输入基本风压与地面粗糙度类别,按规范自动计算出梯度风高度、平均风指数和粗糙度系数并生成风速时程数据,也可以手动输入风特性参数。本软件还可以实现多样本时程的自动生成,可实现批量保存,批量导入 SAP2000 与 ETABS 的模型中,从而实现多样本的时程分析。

3 参数选取

程序编制时水平风采用的风速功率谱为 Davenport 谱,假定湍流积分尺度 L 沿高度不变,取 1200 m,建立经验数学表达式如下式^[6]:

$$S_v(n) = 4k\bar{v}_{10}^2 \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}}, x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad (9)$$

我国规范及在风工程应用中多数采用 Davenport 脉动风速谱。该风速谱可能会高估结构的动力响应,结果偏于保守,从结构抗风设计的角度来看,提高了结构的安全度。在顺风向,对于高度和宽度方向均需考虑的高层建筑,一般考虑水平(x, y 方向)和竖向(z 方向)的相关,对此,Davenport 提出了指数形式的经验公式:

$$r_{ij} = Coh(r, n) = R_{xyz}(x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j, n) = e^{-c} \quad (10)$$

式中

$$c = \frac{-2n\sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{v}(z) + \bar{v}(z')} \quad (11)$$

其中 C_x, C_y, C_z 分别是 x, y, z 三个方向空间衰减系数,Davenport 建议取值为 $C_x=C_y=16, C_z=10$ 。根据我国可靠指标规定的数值,《荷载规范》保证系数(峰因子) μ 的取值在 2.2(保证率在 98.61%)左右,并常以带有保证系数 μ 和脉动风压的脉动系数来表达。根据 Davenport 谱可以求出脉动系数、紊流度和风速根方差之间的关系式:

$$\mu_f(z) = \mu\sqrt{24k}\mu_z^{-\frac{1}{2}}(z) = 2\mu I(z) \quad (12)$$

$$I(z) = \sqrt{6k} \frac{\bar{v}_{10}}{\bar{v}} = \sqrt{6k}\mu_z^{-\frac{1}{2}}(z) \quad (13)$$

参考《荷载规范》附录 G 的风荷载说明,脉动系数 μ_f 根据国内实测数据并参考国外规范选取^[7]。因此,按我国规范公式推导出地面粗糙系数 k 为:

$$k = 0.002152 \times 35^{3.6(\alpha-0.16)} \quad (14)$$

式中, α 为地面粗糙度系数,按《荷载规范》由 A, B, C, D 类地面可得 α 为 0.12, 0.16, 0.22, 0.30。按式(14)可得各种地面粗糙系数 k 。

4 算例分析

以下算例均为典型的高层结构形式,用上述程序模拟出水平风压时程并进行风振时程分析。风速时程模拟时的主要参数如下表 1。

表 1 风速时程模拟时的主要参数

参数	取值
平均风速模型	《荷载规范》指数模型
脉动风速谱类型	Davenport 谱
基本风压/(kN/m ²)	0.7
地面粗糙类别	A/B/C/D
AR 模型阶数	4
空间衰减系数 $C_x/C_y/C_z$	16/16/10
风速时程样本数	10
风速时程时间步长/s	0.1
风速时程时间步数	1 024

算例的结构形式、层数、高度、总重量及第一周期的数据如表 2 所示。算例中的结构水平风荷载按照《荷载规范》计算,其中体型系数取值 $\mu_s=1.4$ 。

表 2 算例的结构形式及其它属性

算例	结构形式	层数	第一周期/s	总重量/t	高度/m
1	混凝土框架	10	1.432	3 290	30
2	钢框架	15	2.491	4 003	45
3	砼框架-剪力墙	30	2.723	11 260	90
4	钢框架-砼剪力墙	30	3.135	9 043	90
5	支撑钢框架	30	3.456	8 707	90
6	砼筒中筒	60	4.871	76 830	210
7	钢筒中筒	60	5.175	52 890	210

运行模拟程序进行高层节点风速时程模拟,在算例 1 中抽出第一个样本的第一个节点风速时程如图 2 所示,通过 Matlab 进行 PSD 转化成功率谱曲线,进行模拟功率谱与目标功率谱的对比,如图 3 所示。从图 3 中可知模拟功率谱与目标功率谱(即式(9))相当吻合,说明 AR 模型风速时程模拟算法是有效的,所编制的风速时程程序是可行的。

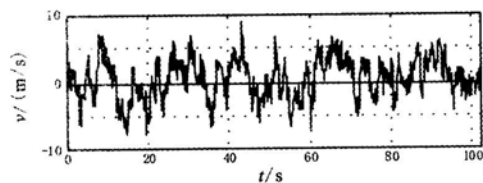


图 2 风速时程曲线

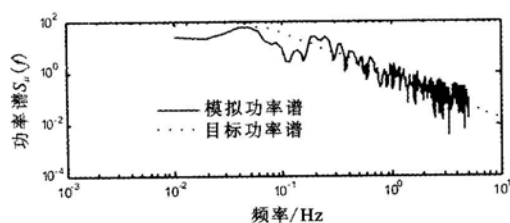
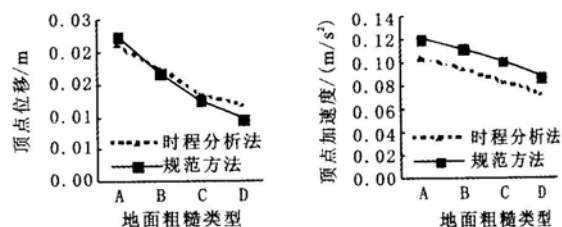


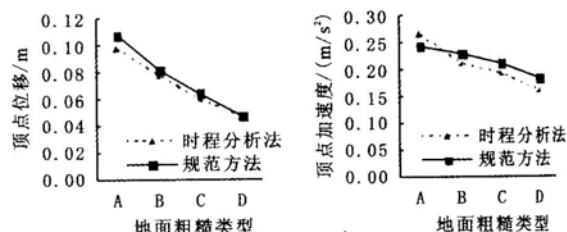
图 3 功率谱对比

计算软件采用 CSI 公司的 ETABSv9.1.2,动力时程分析的计算方法采用振型叠加法^[8]。对以上算例在不同地面粗糙度条件下进行风振时程分析,并将计算结果中 10 个样本的时程位移包络值的平均值与按《荷载规范》计算的位移进行对比。再将风振时程分析的加速度响应包络值的平均值与按《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》^[9]中的顶点最大加速度计算公式 $a_d = \zeta v \frac{\mu_s \mu_r \omega_0 A}{m_{tot}}$ 计

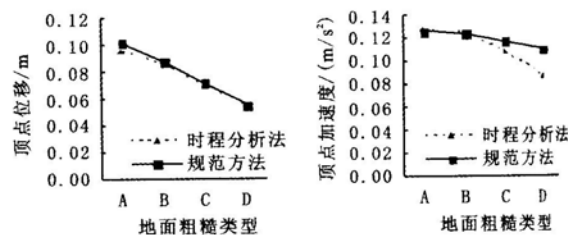
算结果进行对比(图 4)。从图 4 可知,对于不同层高,不同结构形式的高层结构,在不同的地面粗糙度的场地中,基于 AR 法风动力荷载模拟的风振时程分析的结果与按现行规范的公式计算结果基本吻合。



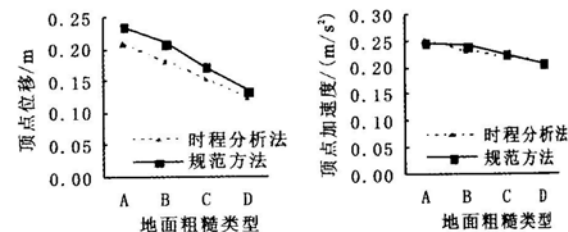
(a) 算例 1 计算结果



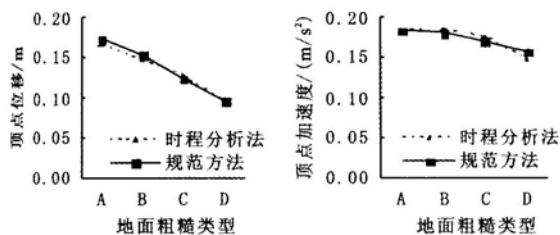
(b) 算例 2 计算结果



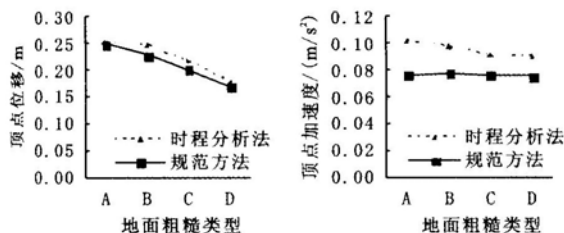
(c) 算例 3 计算结果



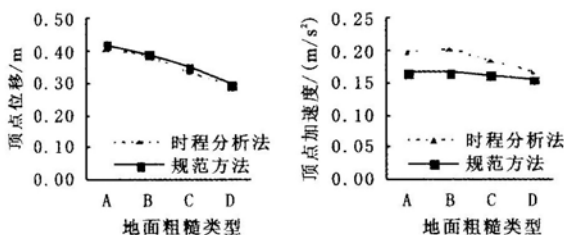
(d) 算例 4 计算结果



(c) 算例 5 计算结果



(f) 算例 6 计算结果



(g) 算例 7 计算结果

图 4 时程分析法与规范方法在计算风荷载作用下结构顶点位移与顶点加速度的计算结果对比

由图 4(a)至图 4(g)顶点加速度的吻合情况的变化可知,当结构刚度较大时,按时程分析法算出的顶点加速度比规范公式算出的结果要小,规范偏于安全。当结构刚度较小时,时程分析的结果比按规范公式算出的结果要大,规范的经验公式是否适用要由风洞试验结果进一步验证。

基于基本风压及地面粗糙度确定的风压时程对结构进行风振时程分析,可实现对复杂结构的风振响应分析,从而进行风振控制方案的制定,该方法特别适用于带有附加粘滞阻尼器的结构的加速度、速度、位移及内力风振响应的确定。

5 结语

本文采用时间序列分析中广泛采用的 AR 模型,考虑结构节点风速时程的三维相关性,通过

编制程序实现结构全部节点的风速时程模拟,通过文本的方法批量导出风速时程数据至结构有限元分析软件进行多样本的风振时程分析。通过典型的高层结构算例,对比发现,风振时程分析方法可以准确评估结构受风动力荷载作用下的响应,如位移、内力和顶点加速度。

随着建筑结构技术的发展,振控设备(阻尼器)越来越广泛的应用于高层结构。具有振控设备的结构在风荷载作用下的响应不能通过《荷载规范》的公式进行计算,而需要采用动力时程分析去评估结构的抗风效应,采用本文提出的方法可以有效解决上述问题。

参 考 文 献

- [1] 刘锡良,周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81-84.
- [2] Deodatis G, Shinozuka M. Auto-regressive Model for Nonstationary Stochastic Process[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1988, 114(11): 1995-2012.
- [3] Mario Di Paola. Digital Simulation of Wind Field Velocity[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76: 91-109.
- [4] 何光渝,雷群. Delphi 常用数值算法集[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范[S].
- [6] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.
- [7] 王修琼,崔剑锋. Davenport 谱中系数 K 的计算公式及其工程应用[J]. 同济大学学报, 2002, 30(7): 849-852.
- [8] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [9] DG/TJ08-015-2004, 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S].

参 考 文 献

- [1] Lo S-M. A Fire Safety Assessment System for Existing Buildings[J]. Fire Technology, 1999, 35(2): 131-152.
- [2] 杜红兵, 周心权, 张敬宗. 高层建筑火灾风险的模糊综合评价[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 242-245.
- [3] 胡宝清, 刘 敏, 卢兆明. 高层建筑火灾安全模糊评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(5): 67-72.
- [4] 刘爱华, 施式亮, 吴 超. 基于模糊模式识别的模糊综合评价在高层建筑火灾危险评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(11): 103-107.
- [5] 胡宝清, 卢兆明, 刘 敏. 高层建筑火灾安全评价的模糊最优归类模型[J]. 模糊系统与数学, 2004, 18(4): 77-85.
- [6] 刘章军, 叶燎原. 基于模糊理论的单层工业厂房震害预测[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(1): 121-125.
- [7] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学·原理及应用(第三版)[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.

Fuzzy Probability Comprehensive Evaluation Method for Fire Safety of High-rise Buildings

QU Jun-tong, MIAO Sheng, YE Liao-yuan, ZHOU Wei

(School of Urban Construction and Management, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: According to the index system of fire safety assessment to high-rise buildings, a mathematical model of fuzzy probability comprehensive evaluation for fire safety is established. The concept of fuzzy weight is proposed in the model, which could avoid the limitation of its weight value in the classical theory of fuzzy comprehensive evaluation. An application is studied for a high-rise building, and it is shown that the model is more reasonable and effective than other evaluation methods in practice.

Key words: high-rise buildings; fire safety; fuzzy probability; fuzzy weight; comprehensive evaluation

(上接第 139 页)

Computer Program for Wind Time-History Load Simulation of Tall Building Structure Under Wind-induced Vibration

CHEN Xue-wei^a, HAN Xiao-lei^{a,b}, Jack Cheang^a, MAO Gui-niu^a

(a. Tall Building Structure Research Institute; b. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Wind-induced comfort problems of tall building have raised more and more attention, empirical formulas from design codes and wind tunnel experiment method are widely used nowadays. However, as the complicate structure systems and especial structures with viscous dampers are widely applied, wind load time-history analysis method is more precise. In this paper, auto-regressive method is used to simulate the random wind dynamic loads which consider 3D spatial correlation. The computer program is developed to produce wind load time-history and export to FEM program to carry out the time-history analysis under wind-induced vibration. The program provides feasible method for analysis of wind-induced vibration of tall building structure. The proposed method was applied in numerical simulation of several typical examples. The results verify the effectiveness of this simulation method in practical structural analysis.

Key words: wind-induced vibration control; wind load time-history; time-history analysis; auto-regressive