

文章编号: 1000-8152(2009)06-0613-06

## 随机风速场的数值模拟及高层建筑风振控制

汪 权, 王建国, 张鸣祥

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 根据Davenport脉动风速谱, 采用AR模型(auto-regressive)法, 考虑竖向相关性、平稳的多变量随机过程以及它的互谱密度矩阵, 模拟生成具有随机性的脉动风速时程曲线和风速谱的功率谱密度. AR法模拟风速的功率谱密度函数与Davenport目标谱的比较表明AR法具有很高的精度和效率. 采用了建筑结构振动控制第2代标准规定的76层306 m高钢筋混凝土结构的风振控制模型, 研究了风荷载作用下高层建筑动力响应的控制方法, 给出了模拟脉动风荷载作用下, 被动调谐质量阻尼器(TMD, tuned mass damper)控制和主动线性二次型Gauss(LQG, linear quadratic Gaussian)控制的控制结果.

**关键词:** 脉动风; 随机模拟; AR模型; 高层建筑; 时程曲线; 风振控制

**中图分类号:** TU311.3, TP202+.4 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of stochastic wind field and wind vibration control for high buildings

WANG Quan, WANG Jian-guo, ZHANG Ming-xiang

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

**Abstract:** By employing the auto-regressive(AR) method, we use the Davenport wind speed power spectrums to simulate the stochastic fluctuating wind field and the cross-spectral density function for a spatial-correlated, stationary multivariate stochastic process. The superiorities in accuracy and efficiency of this technique are shown by comparing the simulation results with those obtained with the Davenport target spectrums. The model of a 76-story 306 m-high reinforced concrete structure recommended by the second generation benchmark vibration control for building is studied. Numerical results of the structural dynamic-response to the tuned-mass-damper(TMD) control and the linear quadratic Gaussian(LQG) control are obtained respectively.

**Key words:** fluctuating wind; stochastic simulation; AR model; high building; time-history curve; wind-induced vibration control

### 1 引言(Introduction)

现代高层建筑和高耸结构向着更高、更柔的方向发展, 使得建筑物的固有频率更加接近强风的频率, 加剧了风激振动的响应. 风荷载已成为建筑设计主要的水平荷载和结构破坏的主要控制荷载. 为了更精确地研究风对建筑结构的作用, 得到更直接的风振反应, 许多科研人员开始在时域内研究风荷载. 随着计算机技术的飞速发展, 随机风荷载的数值模拟分析技术得到不断的改进. 随机风荷载的数值模拟方法有AR法<sup>[1~4]</sup>、ARMA法<sup>[5,6]</sup>、谐波叠加法和Monte Carlo法等. AR法具有计算效率高和计算量少的优点.

本文采用随机风速场数值模拟分析的AR法, 根据Davenport脉动风速谱<sup>[7]</sup>的经验公式, 考虑了高层建筑风速谱随高度变化的特点, 采用线性滤波法的自回归模型模拟高层建筑顺风向脉动风时程曲线, 在此基础上形成具有随机性、时间相关性、空间相关性的风速时程曲线和结构风振控制的外扰力. 将得到的风荷载时程作用在76层的Benchmark模型上进行了风振控制响应仿真分析. 研究了风荷载作用下高层建筑动力响应的控制方法, 给出了结构在模拟脉动风荷载作用下的被动TMD(tuned mass damper)控制<sup>[6,7]</sup>和主动LQG(linear quadratic Gaussian)控制<sup>[7,8]</sup>的控制结果.

收稿日期: 2007-10-26; 收修改稿日期: 2009-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572046); 高等学校博士点专项科研基金资助项目(20030359005); 安徽省自然科学基金资助项目(050440504).

## 2 脉动风荷载时程曲线的模拟(Simulation of fluctuating wind load)

AR法是多重相关时间序列的一种自回归线性滤波法<sup>[1~3]</sup>,  $M$ 个时间序列过程的瞬时值可表示为每一个时间序列过程的线性组合加上一个随机的时间序列过程. 这种方法因计算量小, 速度快, 广泛应用于随机振动和时间序列分析中.

采用AR模型法, 生成 $M$ 个点空间相关顺风向脉动风速时程 $V(X, Y, Z, t)$ 随机列向量的AR模型可表示为

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

式中:  $X, Y, Z$ 均为坐标向量矩阵,  $(x_i, y_i, z_i)$ 为空间第 $i$ 点坐标,  $i = 1, \dots, M$ ;  $p$ 为AR模型阶数, 一般取4或5;  $\Delta t$ 是模拟的风速时程的时间步长;  $\Psi_k$ 为AR模型自回归系数矩阵, 为 $M \times M$ 阶方阵,  $k = 1, \dots, p$ ;  $\mathbf{N}(t)$ 为独立随机过程向量.

1) 求解自回归系数矩阵 $\Psi_k$ .

为简便起见, 下面用 $\mathbf{V}(t)$ 来表示 $\mathbf{V}(X, Y, Z, t)$ . 方程(1)两边同时右乘以 $\mathbf{V}^T(t - j\Delta t)$ , 得

$$\mathbf{V}(t)\mathbf{V}^T(t - j\Delta t) =$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11}(0) & R_{12}(\Delta t) & R_{13}(2\Delta t) & \cdots & R_{1(p+1)}(p\Delta t) \\ R_{21}(\Delta t) & R_{22}(0) & R_{23}(\Delta t) & \cdots & R_{2(p+1)}((p-1)\Delta t) \\ R_{31}(2\Delta t) & R_{32}(\Delta t) & R_{33}(0) & \cdots & R_{3(p+1)}((p-2)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{(p+1)1}(p\Delta t) & R_{(p+1)2}((p-1)\Delta t) & R_{(p+1)3}((p-2)\Delta t) & \cdots & R_{(p+1)(p+1)}(0) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中:  $R_{ij}(k\Delta t)$ 是 $M \times M$ 阶方阵,  $i = 1, 2, \dots, p+1$ ;  $j = 1, 2, \dots, p+1$ .  $R_{ij}(k\Delta t)$ 是时滞为 $k\Delta t$ 的相关矩阵, 是偶函数. 根据维纳-辛钦(Wiener-Khinchine)公式求得

$$R_{ij}(k\Delta t) = \int_0^\infty S_{ij}(f) \cos(2\pi f k \Delta t) df. \quad (7)$$

式中:  $f$ 为脉动风速频率,  $S_{ii}(f)$ 为 $i = j$ 时脉动风速的自功率谱密度函数;  $S_{ij}(f)$ 为 $i \neq j$ 时脉动风速的互功率谱密度函数, 可由脉动风速的自功率谱密度函数 $S_{ii}(f)$ 和相干函数 $r_{ij}(f)$ 确定,  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $j = 1, 2, \dots, M$ ,

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f) S_{jj}(f)} r_{ij}(f). \quad (8)$$

本文模拟风谱采用加拿大Davenport脉动风速谱<sup>[7]</sup>:

$$S_{ii}(f) = 4K \bar{v}_{10}^2 \frac{x^2}{f(1+x^2)^{4/3}}. \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^p \Psi_k \mathbf{V}(t - k\Delta t) \mathbf{V}^T(t - j\Delta t) + \mathbf{N}(t) \mathbf{V}^T(t - j\Delta t), \quad j = 0, 1, \dots, p. \quad (2)$$

上式两边同时取数学期望值, 考虑到 $\mathbf{N}(t)$ 的均值为零, 并结合相关函数的性质, 得

$$\begin{cases} R(-j\Delta t) = E[\mathbf{V}(t) \mathbf{V}^T(t - j\Delta t)], \\ R(-j\Delta t) = R(j\Delta t). \end{cases} \quad (3)$$

利用方程(2)(3), 得到以下方程组:

$$\begin{cases} R(j\Delta t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k R[(j-k)\Delta t], \quad j = 1, 2, \dots, p, \\ R(0) = \sum_{k=1}^p \Psi_k R(k\Delta t) + R_N, \quad j = 0. \end{cases} \quad (4)$$

将方程(4)写成矩阵形式得

$$\mathbf{R}\Psi = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_N \\ \mathbf{O}_p \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

式中:  $\Psi = [I \ \Psi_1 \ \Psi_2 \ \cdots \ \Psi_p]^T$ 为 $(p+1)M \times M$ 阶矩阵,  $I$ 为 $M$ 阶单位矩阵,  $\mathbf{R}_N$ 为 $M \times M$ 阶协方差矩阵,  $\mathbf{O}_p$ 为 $pM \times M$ 阶零矩阵,  $\mathbf{R}$ 为 $(p+1)M \times (p+1)M$ 阶自相关矩阵, 其分块形式为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11}(0) & R_{12}(\Delta t) & R_{13}(2\Delta t) & \cdots & R_{1(p+1)}(p\Delta t) \\ R_{21}(\Delta t) & R_{22}(0) & R_{23}(\Delta t) & \cdots & R_{2(p+1)}((p-1)\Delta t) \\ R_{31}(2\Delta t) & R_{32}(\Delta t) & R_{33}(0) & \cdots & R_{3(p+1)}((p-2)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{(p+1)1}(p\Delta t) & R_{(p+1)2}((p-1)\Delta t) & R_{(p+1)3}((p-2)\Delta t) & \cdots & R_{(p+1)(p+1)}(0) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中:  $x = \frac{1200f}{\bar{v}_{10}}$ 为湍流积分尺度系数,  $S_{ii}(f)$ 为脉动风速功率谱( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $K$ 为地面粗糙度系数;  $\bar{v}_{10}$ 为距地面10 m高度处的平均风速.

空间相干系数采用与频率有关的Davenport指数形式的经验公式<sup>[7]</sup>:

$$r_{ij}(f) = \exp\left[-\frac{f \sqrt{[c_x^2(x - \hat{x})^2 + c_z^2(z - \hat{z})^2]}}{\bar{v}_{10}}\right]. \quad (10)$$

式中:  $(x, z)$ ,  $(\hat{x}, \hat{z})$ 分别为迎风面上的两点坐标,  $c_x$ 和 $c_z$ 是两个决定空间相关性衰减速度的参数, 建议取 $c_x = 16$ ,  $c_z = 10$ .

2) 求解独立随机过程向量 $\mathbf{N}(t)$ .

利用方程(4)求出 $\mathbf{R}_N$ 后, 对其进行Cholesky分解, 得到一个下三角矩阵 $L$ :

$$\mathbf{R}_N = LL^T. \quad (11)$$

独立随机过程向量 $\mathbf{N}(t)$ 为

$$\mathbf{N}(t) = L \cdot \mathbf{n}(t). \quad (12)$$

式中:  $n(t) = [n_1(t) \cdots n_M(t)]^T$ ,  $n_i(t)$  是均值为0、方差为1的正态分布随机过程,  $i = 1, \dots, M$ .

### 3 风振控制模型(Model of wind-induced vibration control)

#### 3.1 LQG最优控制算法<sup>[8]</sup>(LQG optimal control)

假设只能观测结构少数几层的绝对加速度和位移响应, 另外考虑输入噪声  $\varepsilon_1(t)$  和量测噪声  $\varepsilon_2(t)$ , 它们均为零均值Gauss白噪声过程. 对于一个  $n$  层的高层建筑, 风荷载作用下结构的运动方程如下:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} + [E]\{u\}. \quad (13)$$

式中:  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  分别为结构的  $n \times n$  维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\{X\}$ ,  $\{\dot{X}\}$  和  $\{\ddot{X}\}$  分别为结构相对于地面的位移、速度和加速度向量;  $\{F(t)\}$  为脉动风荷载向量;  $\{u\}$  为控制力向量;  $[E]$  为控制力位置矩阵. 本文利用MATLAB软件求解, 首先将运动方程式(13)用状态空间法转换为以下状态方程和观测输出方程:

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + B\{u\} + D\{F(t)\} + \varepsilon_1(t), \\ Z(0) = 0, \\ Y = C_0AZ + C_0B\{u\} + \varepsilon_2(t). \end{cases} \quad (14)$$

式中: 状态向量  $Z = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \cdots \ \dot{x}_n]^T$  分别代表每层的绝对位移和速度;  $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}[E] \end{bmatrix}$ , 其中0和I分别是  $n \times n$  维的零矩阵和单位矩阵. 可以看出A, B都是常数矩阵, 所以该模型可以看作定常系数控制系统的最优控制问题.  $C_0$  为输出矩阵, 根据具体问题要求确定;  $D$  为脉动风荷载作用位置矩阵.

LQG算法首先采用全状态反馈的LQR算法设计全状态反馈最优控制力  $u(t) = -GZ(t)$ , 其中G为连续状态方程的控制力状态反馈增益矩阵, 可在MATLAB中用lqr命令求解, 然后根据结构的观测输出, 采用Kalman滤波器估计结构的全部状态, 选取如下目标函数:

$$J_e = E\{\{Z(t) - \hat{Z}(t)\}^T \{Z(t) - \hat{Z}(t)\}\}. \quad (15)$$

式中  $\hat{Z}(t)$  是状态  $Z(t)$  的估计, 由目标函数极小构造出Kalman滤波器和滤波器的增益矩阵  $K_e$ :

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}} = A\hat{Z} + Bu + K_e(Y - \hat{Y}), \\ \hat{Z}(t_0) = \hat{Z}_0, \hat{Y} = C_0\hat{Z}. \end{cases} \quad (16)$$

由上述得到的控制力反馈增益矩阵  $G$  和Kalman滤波器的增益矩阵  $K_e$ , 可以得到下述受控系统的状态方程和输出方程:

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}} = (A - BG - K_eC_0A + K_eC_0BG) + K_eY + D\{F(t)\}, \\ Y = C_0(\hat{Z} - DF), Z(0) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

#### 3.2 TMD控制算法<sup>[8,10]</sup>(TMD control)

设  $n$  层的高层建筑, TMD设置于第  $k$  层, 结构受脉动风荷载作用, 则结构和TMD系统的运动微分方程分别为

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = F_{TMD} + \{F(t)\}, \quad (18)$$

$$m_d\ddot{x}_d + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_k) + k_d(x_d - x_k) = 0. \quad (19)$$

式中:  $m_d, k_d, c_d$  分别为TMD的质量、刚度和阻尼,  $x_d$  为TMD相对于地面的位移, 控制力

$$F_{TMD} = [0 \ \cdots \ 0 \ k_d(x_d - x_k) + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_k) \ 0 \ \cdots \ 0]^T,$$

其中  $k_d(x_d - x_k) + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_k)$  在第  $k$  列. 调整TMD系统的固有频率与结构的第一频率相同, 以达到控制结构振动的目的.

### 4 算例分析(Example analysis)

数值模拟得到的脉动风速时程是一个随机过程, 可以利用概率论和随机振动理论来分析. 只要掌握几个统计数字特征, 如均值、根方差等便可以描述整个随机过程, 而这些统计数字恰好可以用相关函数或功率谱密度来表示. 验证一个模拟风谱是否正确, 只需观察它的相关函数或功率谱密度与目标风谱是否相符.

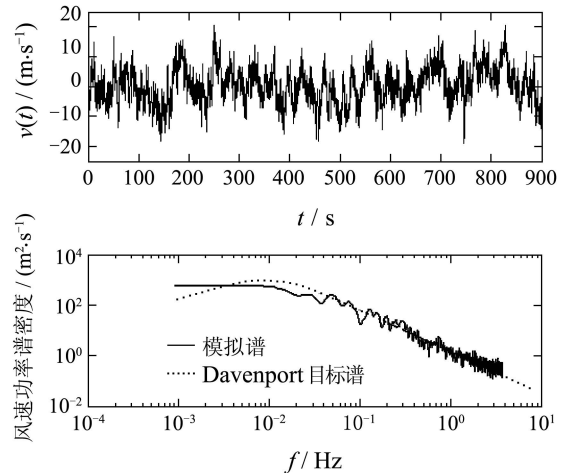


图 1(a) 第1层脉动风速模拟及其功率谱密度  
Fig. 1(a) The 1st floor fluctuating wind speed & power spectrums density

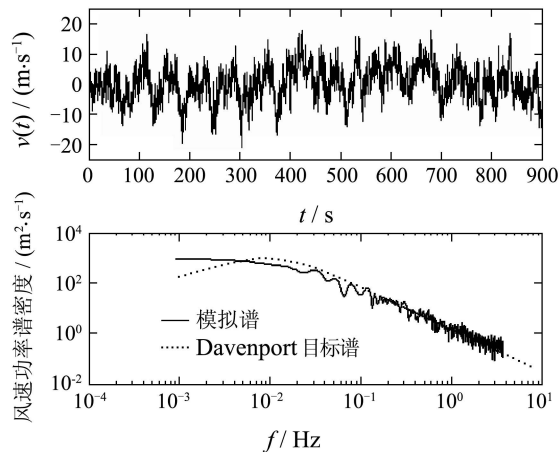


图 1(b) 第50层脉动风速模拟及其功率谱密度

Fig. 1(b) The 50th floor fluctuating wind speed &amp; power spectrums density

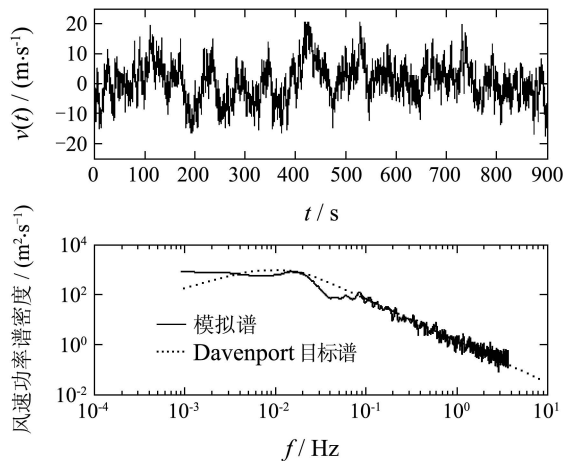


图 1(c) 第60层脉动风速模拟及其功率谱密度

Fig. 1(c) The 60th floor fluctuating wind speed &amp; power spectrums density

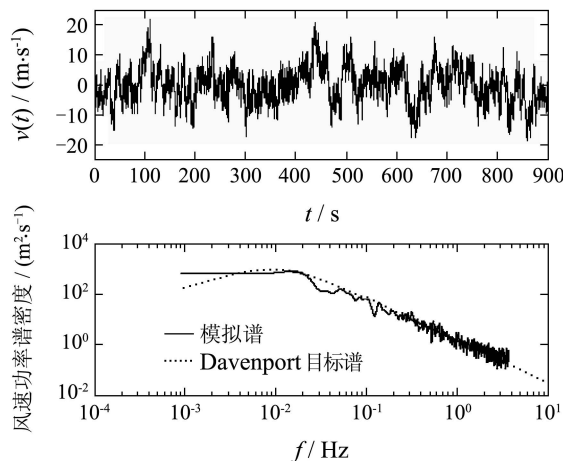
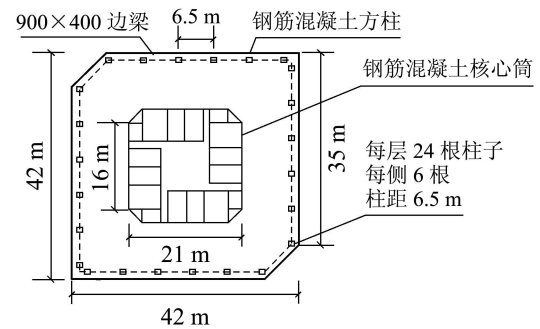


图 1(d) 第76层脉动风速模拟及其功率谱密度

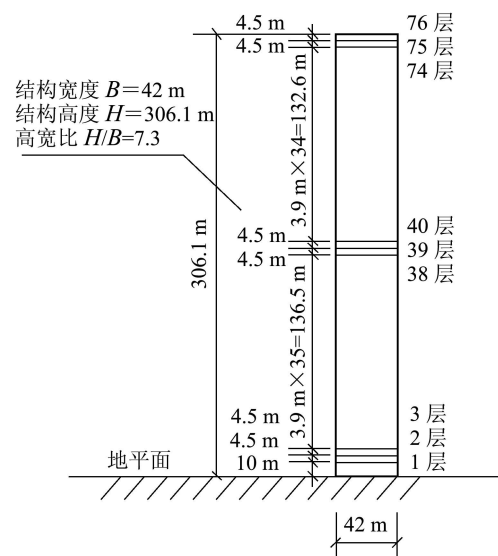
Fig. 1(d) The 76th floor fluctuating wind speed &amp; power spectrums density

利用本文 AR 模型算法模拟算例中的 76 层

Benchmark模型结构, 仅考虑该模型76个空间点的竖向相关性, AR模型的阶数 $p = 4$ , 时间步长 $\Delta t = 0.1333 \text{ s}$ ,  $\bar{v}_{10} = 15 \text{ m/s}$ ,  $K = 0.03$ ,  $\rho = 1/800$ ,  $c_z = 10$ , 模拟时程900 s, 体型系数 $\mu_s = 0.8$ . 图1给出了该结构第1, 50, 60和76层的脉动风速时程曲线以及模拟风速的功率谱密度与Davenport目标谱的比较, 可以看出在走势上和目标谱比较一致, 所以利用AR法得到的风速是可行的.



(a) 76层模型平面图



(b) 76层模型立面图

图 2 Benchmark模型平、立面图

Fig. 2 Plan view&amp;elevation view of the Benchmark model

本文选取的Benchmark模型取自拟在澳大利亚墨尔本建造的76层、306 m高的钢筋混凝土塔式结构<sup>[8]</sup>, 见图2所示. 该结构是由核心混凝土筒和外框架组成的框筒结构. 结构平面呈方形, 在两个对角处有倒角, 结构及其使用活荷载总重153000 t, 总体积510000 m<sup>3</sup>, 质量密度约为300 kg/m<sup>3</sup>. 结构高宽比为 $306.1/42 = 7.3$ , 属于风敏感性结构. 内

核心筒尺寸为21 m × 21 m, 外框架柱距6.5 m. 每层有24根柱子, 均匀分布于筒周边, 且在各层楼板处与高0.9 m、宽0.4 m的箱形截面梁固定连接. 混凝土抗压强度为60 MPa, 弹性模量40 GPa, 柱尺寸、核心筒厚度及各楼层质量随高度变化. 采用有限元方法进行分析, 将结构看做竖向的悬臂梁模型, 各层楼板质量之间采用经典的梁单元模型, 结构共有76个平动自由度和76个转动自由度, 进一步采用静力凝聚方法, 则结构模型只保留76个平动自由度. 计算得到76层结构的前五阶频率为0.160 Hz, 0.765 Hz, 1.992 Hz, 3.790 Hz, 6.395 Hz, 钢结构的阻尼比设定为1%, 缩聚的模型较好地保留了原结构的动力特性.

图3给出了76层Benchmark模型结构无控制、TMD和LQG控制下第50, 60, 70和76层的位移响应时程曲线. 表1,2给出了该模型在模拟脉动风荷载作用下的位移和加速度峰值响应, 以及模型结构在TMD被动控制和LQG主动控制下的峰值响应, 其中TMD控制将一个765 t的质量块安装在顶层, 将TMD系统的固有频率调整到与结构的第一阶频率相同, 即0.160 Hz, 阻尼比取0.2; 最优LQG控制中权矩阵Q, R系数分别取 $\alpha = 1, \beta = 3 \times 10^{-2}$ , 假设在第1, 30, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 76层位置安装传感器量测结构的速度和加速度响应,  $U_{max}$ 为最优控制所需的最大控制力.

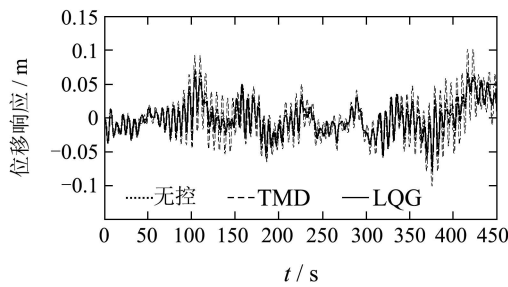


图 3(a) 第50层的位移响应时程

Fig. 3(a) The 50th floor displacement response time history

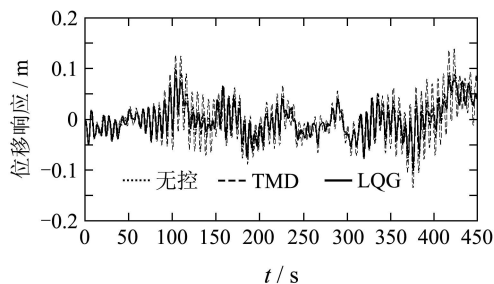


图 3(b) 第60层的位移响应时程

Fig. 3(b) The 60th floor displacement response time history

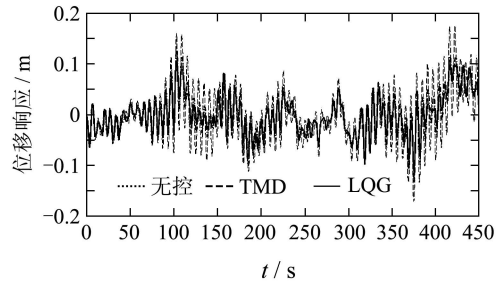


图 3(c) 第70层的位移响应时程

Fig. 3(c) The 70th floor displacement response time history

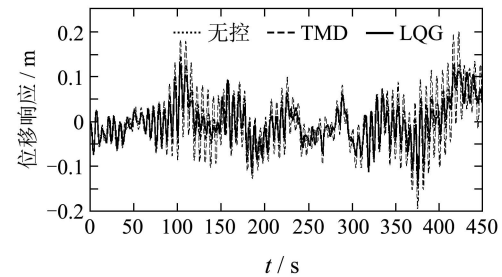


图 3(d) 第76层的位移响应时程

Fig. 3(d) The 76th floor displacement response time history

表 1 Benchmark模型风振控制位移峰值响应

Table 1 Peak displacement response quantities of the Benchmark model

工况	层位移/cm					
	1	50	60	70	75	76
无控	0.032	10.162	13.767	17.568	19.553	19.997
TMD	0.026	7.955	10.641	13.449	14.913	15.242
LQG	0.022	6.860	9.187	11.626	12.901	13.187

表 2 Benchmark模型风振控制加速度峰值响应

Table 2 Peak acceleration response quantities of the Benchmark model

工况	层加速度/(cm · s <sup>-2</sup> )					
	1	50	60	70	75	76
无控	0.646	7.696	10.061	13.464	17.214	18.762
TMD	0.651	6.119	7.582	9.842	13.049	14.831
LQG	0.642	4.738	6.222	7.590	8.934	12.241

## 5 结论(Conclusion)

应用AR模型法模拟实现了考虑竖向相关性的超高层建筑的脉动风荷载时程, 算法简洁, 计算快速, 精度可以保证. AR法模拟风速的功率谱密度函数与Davenport目标谱的比较表明AR法具有很高的精度和效率. 本文第2部分只考虑了顺风向脉动风对结构顺风向振动的影响, 而没有计入建筑物的质心、刚心与几何形心的偏心、平扭耦合

振动及建筑物体形等对风振动力响应影响,因此实际结构的风振动力响应值可能偏大.由本文算例仿真结果可以看出,风振模型LQG主动控制控制效果明显,位移控制效果可达30%~34%,加速度控制效果可高达40%~47%,而被动TMD控制位移控制效果可达24%~33%,加速度控制效果可达19%~27%.

### 参考文献(References):

- [1] IWATANI Y. Simulation of multidimensional wind fluctuations having any arbitrary power spectra and cross-spectra[J]. *Journal of Wind Engineering*, 1982, 11(1): 5 – 18.
- [2] LAZZARI M, SAETTA A V, VITALIANI R V. Non-linear dynamic analysis of cable-suspended structures subjected to wind actions [J]. *Computers and Structures*, 2001, 79(9): 953 – 969.
- [3] IANNUZZI A. Artificial wind Generation and structural response[J]. *ASCE: Journal of Structural Engineering*, 1987, 113(12): 43 – 57.
- [4] 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.  
(LIU Xiliang, ZHOU Ying. Numerical simulation of wind load[J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(5): 81 – 84.)
- [5] LI Y, KAREEN. ARMA representation of wind field[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36(Part 1): 415 – 427.
- [6] LI Y S, KAREEM A. ARMA systems in wind engineering[J]. *Probabilistic Mechanics Publications*, 1990, 5(2): 50 – 59.
- [7] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.  
(HUANG Bencai. *Principle and Application of the Structural Wind Resistance Analysis*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.)
- [8] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
(OU Jinping. *Structural Vibration Control—Active, Semi-active and Intelligent Control*[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [9] LU L T, CHIANG W L, TANG J P, et al. Active control for a benchmark building under wind excitation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(4): 469 – 493.
- [10] RICCIARDELLI F, OCCHIUZZI A, CLEMENTE P. Semi-active tuned mass damper control strategy for wind-excited structures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 88(1): 57 – 74.
- [11] ZHANG J, ROSCHKE P N. Active control of tall structure excited by wind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83(1/3): 209 – 223.

### 作者简介:

汪 权 (1981—), 男, 结构工程专业博士研究生, 主要研究方向为工程结构振动控制, E-mail: wquan2005@sina.com.cn;

王建国 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能材料、工程结构振动控制, E-mail: jianguow@hfut.edu.cn;

张鸣祥 (1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为大跨度桥梁风致振动分析, E-mail: zmx.zhang@163.com.