

大跨度桥梁结构风荷载模拟研究*

胡雪莲, 李正良, 晏致涛

(重庆大学 土木学院, 重庆 400045)

摘要:基于数值模拟方法的风速时程曲线在桥梁结构风振分析中被广泛采用。本文基于自然风特性,通过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准则确定模型阶数。对模拟所得的大跨度桥梁节点风速时程统计分析表明:AR模型可有效地模拟具有空间相关性、时间相关性的节点脉动风速时程,模拟精度、速度和计算稳定性均满足实际工程应用要求。

关键词:桥梁工程; 风荷载; 风速时程; AR模型; AIC准则; 空间相关

中图分类号:U441+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)03-0063-05

Simulation of Wind Loading for Large-span Bridge Structures

HU Xue-lian, LI Zheng-liang, YAN Zhi-tao

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Wind speed time series obtained with numerical simulation methods are adopted in structural analysis of wind-induced vibration. In this paper, based on the natural wind properties and the correlativity of nodal wind speed time series, AR model is employed to simulate wind speed time series, and the AIC rule is used to fix the rank of the AR model. Statistical analysis results of numerical wind speed time series show that AR model is efficient in simulating nodal wind speed time series which has time and space correlativity, and that the simulation precision, simulation efficiency and calculation stability answer the needs of practical engineering.

Keywords: bridge structures; wind load; wind speed time series; AR model; AIC rule; spatial correlativity

在时域内对大跨度桥梁进行风致振动分析,首先必须得到桥梁上脉动风速的时间历程。近年来,随着计算机技术的发展,人工模拟结构的随机输入得到了广泛的应用。人工模拟风速时程可以考虑场地、风谱特性、结构的特点等条件的任意性,使模拟得到的风速时程尽量接近结构的实际风力。目前,国内外对风速时程的模拟方法主要是利用三角函数叠加的谐波合成法和基于数字滤波技术的线性滤波法。谐波合成法计算量巨大,所产生的风速过程不能考虑时间相关性,与实际风速曲线存在一定的差异;线性滤波技术是广泛应用于随机振动和时间序列分析中的一种分析手段。近年来,线性滤波法中的自回归(Auto-Regressive, AR)模型因其计算量小、速度快,在脉动风场模拟中得到了广泛应用。

利用线性滤波器中的AR模型,采用最小AIC(A-Information Criterion)准则识别模型阶数,考虑大跨度桥梁风速谱随高度变化的特点,模拟具有随机性、时间、空间相关性的风速时程。算例表明该方法省时、高效,能够满足工程精度的要求。

1 风的基本特性

1.1 风的概况

风速观测记录表明瞬时风速包含两种成分:周期在10 min以上的平均风和周期在几秒的脉动风。

* 收稿日期:2005-01-18

作者简介:胡雪莲(1976-),女,重庆人,硕士生,主要从事工程力学研究。

作用于结构上任一点坐标 (x, y, z) 的风速 $V(x, y, z, t)$ 为平均 $\bar{V}(z)$ 风速和脉动风速 $v(x, y, z, t)$ 之和:

$$V(x, y, z, t) = \bar{V}(z) + v(x, y, z, t) \quad (1)$$

1.2 平均风速

平均风速沿高度变化的规律可用对数函数式来近似^[1]:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}_1} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad (2)$$

其中, $\bar{V}(z)$ 为高度 z 处平均风速, \bar{V}_1 为标准高度 z_1 处(一般为 10 m)的平均风速, z_0 为地面粗糙长度。

1.3 脉动风的功率谱

1) 自功率谱。采用 Simiu 于 1974 年提出的随高度变化的风速谱:

$$S_v(z, f) = 200 \frac{f_* v_*^2}{f(1 + 50f_*)^{5/2}} \quad (3)$$

其中 $f_* = \frac{fz}{\bar{v}(z)}$, $v_* = \frac{0.4\bar{v}_{10}}{\ln(10/z_0)}$, \bar{v}_{10} 为离地 10 m 高度处的平均风速, f 为频率。

2) 风的互功率谱。 i, j 两点间风速的互谱为:

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)}r_{ij}(f) \quad (4)$$

相干函数 $r_{ij}(f)$ 的三维表达式为:

$$r_{ij}(f) = \exp\left(\frac{-2f\sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{V}(z_i) + \bar{V}(z_j)}\right) \quad (5)$$

式中, C_x, C_y, C_z 分别表示空间任意两点左右、上下、前后的衰减系数, 通过实验确定。

2 风速时程模拟

2.1 脉动风速时程 AR 模型

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^[3]:

$$v(X, Y, Z, t) = - \sum_{k=1}^p \psi_k v(X, Y, Z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (6)$$

式中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$, $Z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$, (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, $k = 1, 2, \dots, p$; $N(t)$ 为独立随机过程向量:

$$N(t) = L \cdot n(t) \quad (7)$$

式中, $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)]^T$, $n_i(t)$ 是均值为 0、方差为 1 且彼此相互独立的正态随机过程, $i = 1, 2, \dots, M$; L 为 M 阶下三角矩阵, 通过 $M \times M$ 阶协方差矩阵 R_N 的乔里斯基(Cholesky)分解确定:

$$R_N = L \cdot L^T \quad (8)$$

2.2 求回归系数

为简便起见, 将 $v(X, Y, Z, t)$ 均简写为 $v(t)$ 。式(6)两边同时右乘 $v^T(t - j\Delta t)$, 得:

$$v(t)v^T(t - j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p \psi_k v(t - k\Delta t)v^T(t - j\Delta t) + N(t)v^T(t - j\Delta t) \quad (9)$$

式中, $j = 1, 2, \dots, p$ 。两边同时取数学期望, 考虑到 $N(t)$ 的均值为零, 且与随机风过程 $v(t)$ 独立, 并结合相关函数的如下性质^[2]:

$$R(-j\Delta t) = E[v(t)v^T(t - j\Delta t)] \quad (10)$$

$$R(-j\Delta t) = R(j\Delta t) \quad (11)$$

得到相关函数 $R(j\Delta t)$ 与回归系数 ψ_k 之间的关系:

$$R(j\Delta t) = - \sum_{k=1}^p \psi_k R[(j - k)\Delta t], j = 1, 2, \dots, p \quad (12)$$

写成矩阵形式,有:

$$[R] = [\bar{R}][\psi] \tag{13}$$

式中, $[R]_{pM \times pM} = [R(\Delta t), \dots, R(p\Delta t)]^T$; $[\psi]_{pM \times M} = [\psi_1, \dots, \psi_p]^T$:

$$[\bar{R}]_{pM \times pM} = \begin{bmatrix} R_{11}(0) & R_{12}(\Delta t) & \dots & R_{1(p-1)}[(p-2)\Delta t] & R_{1p}[(p-1)\Delta t] \\ R_{21}(\Delta t) & R_{22}(0) & \dots & R_{2(p-1)}[(p-3)\Delta t] & R_{2p}[(p-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots \\ R_{(p-1)1}[(p-2)\Delta t] & R_{(p-1)2}[(p-3)\Delta t] & \dots & R_{(p-1)(p-1)}(0) & R_{12}(\Delta t) \\ R_{p1}[(p-1)\Delta t] & R_{p2}[(p-2)\Delta t] & \dots & R_{p(p-1)}(\Delta t) & R_{pp}(0) \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中 $[R(j\Delta t)]_{M \times M} = \begin{bmatrix} R^{11}(j\Delta t) & \dots & R^{1M}(j\Delta t) \\ \dots & \ddots & \dots \\ R^{M1}(j\Delta t) & \dots & R^{MM}(j\Delta t) \end{bmatrix}, j = 1, 2, \dots, p$ (15)

根据随机振动理论,功率谱密度与相关函数(协方差)之间符合维纳-辛钦(Wiener-Khintchine)公式,即^[1]:

$$R^{\bar{y}}(j\Delta t) = \int_0^{\infty} S_{\bar{y}}(f) \cos(2\pi \cdot f \cdot j\Delta t) df \tag{16}$$

求解式(13)给出的方程,可以得到回归系数矩阵 $[\psi]$ 。

2.3 求给定方差的随机过程 $[N(t)]$

对式(6)两边同时右乘 $[v(t)] = [v^1(t), \dots, v^M(t)]$,有

$$R(0) = - \sum_{k=1}^p \psi_k R(k\Delta t) + R_N \tag{17}$$

求出 R_N 后,对 R_N 作乔里斯基(Cholesky)分解 $R_N = L \cdot L^T$,根据式(7)即可求得 $N(t)$ 。

2.4 AR模型阶数识别

文献[5]的研究表明,低阶的AR模型即可较好地模拟随机过程。因此,应从AR(1)模型开始,逐渐增加模型的阶数,根据AIC准则选取适宜的模型阶数。所谓AIC准则就是当欲从一组可供选择的模型中选择一个最佳模型时,选取AIC为最小的模型是适宜的。AR(p)模型的AIC准则函数为^[6]:

$$AIC(p) = N \lg \sigma_{\alpha}^2 + 2(p+1) \tag{18}$$

其中, $N = T, \sigma_{\alpha}^2 = 2R(0) - R_N$ 。

从AR(1)开始,AR(1)、AR(2)……AR(p)、AR(p+1),一共建立 $p+1$ 个模型,计算各个模型的AIC准则函数值,比较两个相邻模型间AIC值的大小,若AR(p)、AR(p+1)间的AIC值变化不显著时,即可确定模型的阶数为 p 。

2.5 求最终的个随机过程

按式(6)求解出 M 个空间相关的随机风过程。

将式(6)按时间间隔 Δt 离散化,假设当 $t < 0$ 时, $v(t) = 0$ 。则递推的矩阵表达式为^[4]:

$$\begin{bmatrix} v^1(j\Delta t) \\ \dots \\ v^M(j\Delta t) \end{bmatrix} = - \sum_{k=1}^p \psi_k \begin{bmatrix} v^1(j-k\Delta t) \\ \dots \\ v^M(j-k\Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^1(j\Delta t) \\ \dots \\ N^M(j\Delta t) \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} j\Delta t = 0, 1, \dots, T \\ k \leq j \end{matrix} \tag{19}$$

从而得出 M 个具有时间、空间相关、时间间隔 Δt 的离散脉动风速过程向量。

3 工程实例

重庆菜园坝长江大桥,主桥全长800 m。主体采用刚构与提篮式钢箱系杆拱、桁梁的组合结构,为刚构-桁架-系杆拱特大公轨两用无推力式钢箱系杆拱桥。以重庆菜园坝长江大桥作为算例,采用自回归模型,利用自编程序模拟沿主桥和拱肋分布的脉动风速时程曲线。计算参数见表1。各阶模型AIC

准则函数值见表 2。

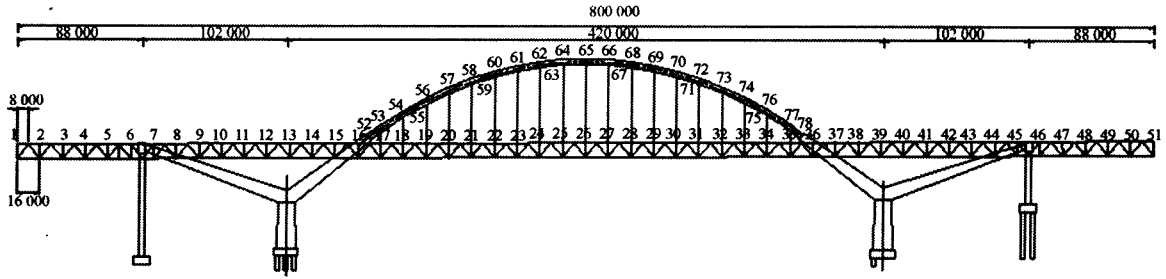


图 1 主桥模型节点编号

表 1 模拟脉动风速时程曲线的计算参数

地面粗糙长度/m	0.02	模拟点数	105
10 m 高度平均风速/ $m \cdot s^{-1}$	16	衰减系数 C_x	8
截断频率/Hz	2	衰减系数 C_y	16
频率等分数	1 024	衰减系数 C_z	10
模拟时间间隔/s	0.125		

表 2 AR 模型阶数识别

$P=1$	AIC(1) = 1 567.52
$P=2$	AIC(2) = 1 223.36
$P=3$	AIC(3) = 1 107.41
$P=4$	AIC(4) = 932.87
$P=5$	AIC(5) = 883.21
$P=6$	AIC(6) = 877.96

合适的模型阶数 $p=5$

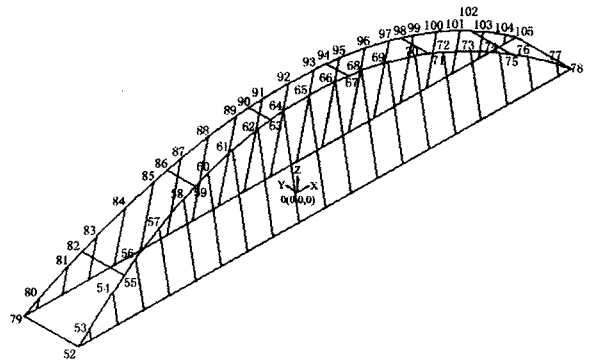


图 2 主拱模型节点编号

模拟的脉动风速时程再变换到频域中。其主梁端点处、跨中点、拱肋中点处水平脉动风速功率谱密度函数与目标谱的比较见图 3、4、5。可见脉动风速的均方值与目标值基本符合；模拟谱与目标谱基本重合，只是在较高频率处稍有偏差。图 6 分别为模拟得到的主桥跨中点与相邻点，右拱肋中点与相邻点脉动风速的相关函数与目标函数的对比，相邻两点相干性较强，相距较远，相干性较弱。

4 结论

基于数值模拟方法的风速时程曲线在结构风振分析中被广泛采用。本文采用时间序列分析中广泛应用的 AR 模型来模拟脉动风速时程，利用 AIC 准则确定模型阶数。数值算例表明，模拟精度、速度和计算稳定性均满足实际工程应用要求，可用于针对大量节点进行时间、空间的风速时程模拟，进而用于大跨度桥梁结构的风场模拟，尤其是必须考虑三维风场计算的拱桥。

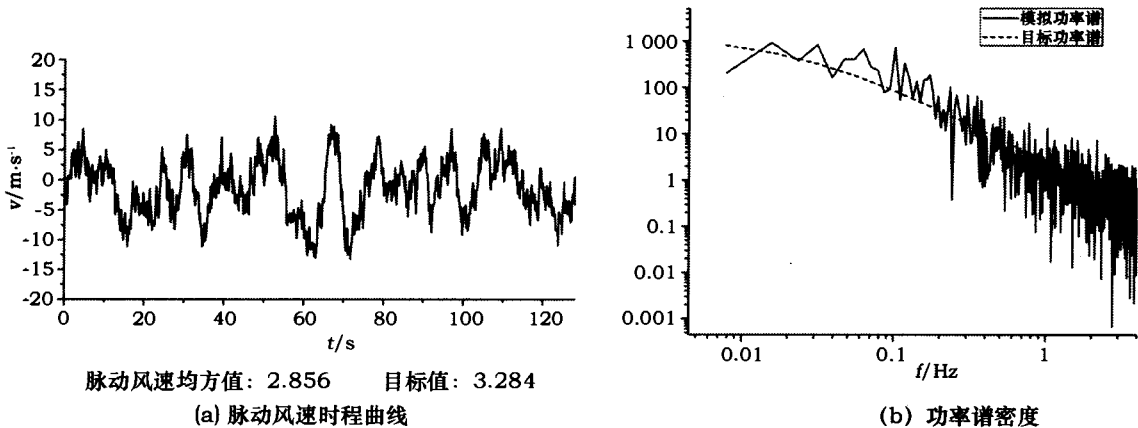


图 3 节点 1 模拟风速时程曲线及功率谱分析

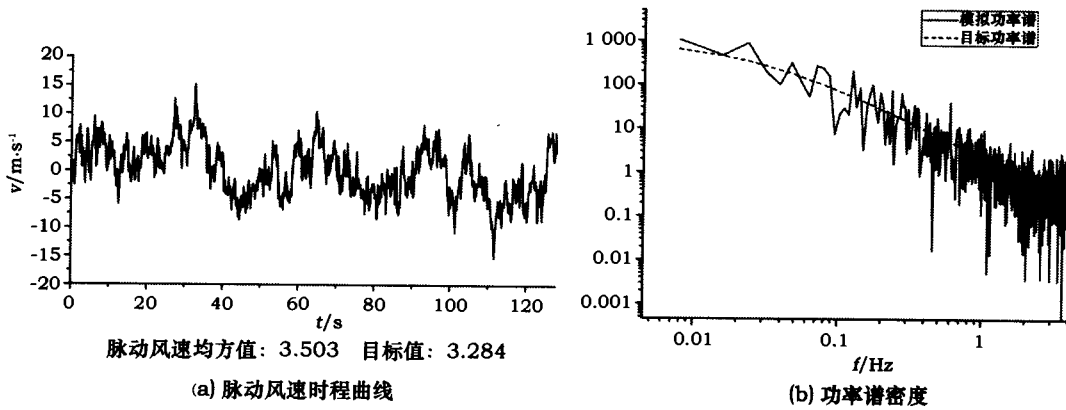


图4 节点26模拟风速时程曲线及功率谱分析

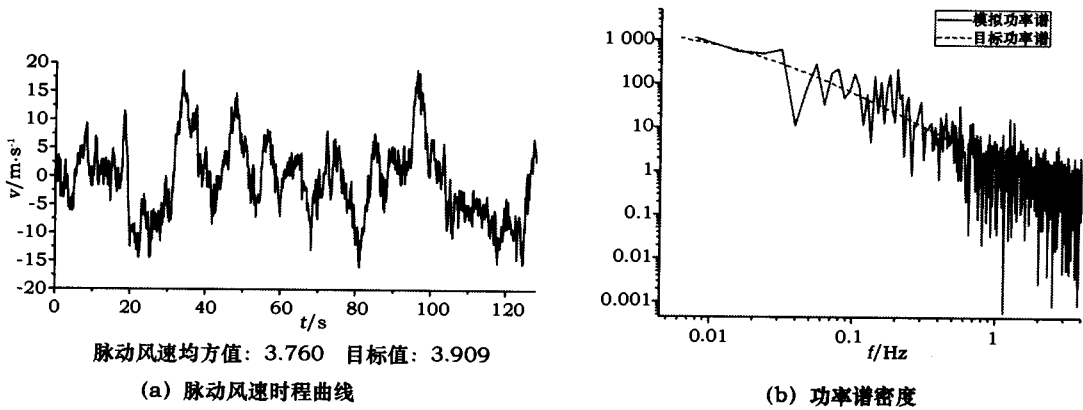
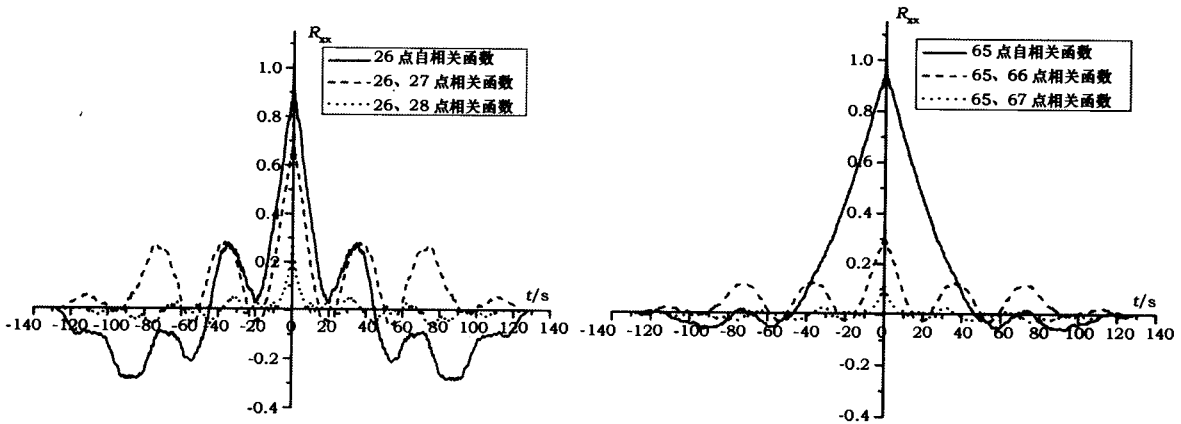


图5 节点65模拟风速时程曲线及功率谱分析



参考文献:

[1] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海:同济大学出版社,1985.

[2] 陈兆国. 时间序列及其谱分析[M]. 北京:科学出版社,1988.

[3] 舒新玲,周岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构,2003,12(9):27-32.

[4] 李元齐,董石麟. 大跨度空间结构风荷载模拟技术研究及程序编制[J]. 空间结构,2001,9(7):3-11.

[5] A. Iannuzzi. Artificial Wind Generation and Structural Response[J]. J. of Struct. Engng., ASCE,1987,113(12):43-57.

[6] 张树京,齐立心. 时间序列分析简明教材[M]. 北京:清华大学出版社,北方交通大学出版社,2003.