

文章编号:1671-6833(2008)01-0056-05

基于改进谐波合成法的杭州湾跨海大桥风场模拟研究

马 麟, 刘建新, 韩万水

(长安大学 风洞实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 基于风洞试验实测的风参数采用改进谐波合成法模拟了杭州湾跨海大桥全桥风场。风场模拟涉及的风参数主要包括脉动风谱和空间相关函数,对风洞中的风场参数进行了实测拟合并应用于风场模拟当中。谐波合成法模拟大跨桥梁的风场耗时过长、应用不便,用拉格朗日插值法改进谐波合成法可大大提高风场模拟效率,编制了基于改进谐波合成法的风场模拟流程图和相应程序 Improved-WAWS,为大跨桥梁的风场模拟提供了切实可行的方法。试验结果表明:衰减因子 λ 在不同间距 D 时,存在一定差异,且随风速 U 的增加,衰减因子不断增加;用改进谐波合成法模拟的风速样本时程的功率谱、互功率谱、相关函数及互相关函数与相应目标值吻合良好。

关键词: 风场模拟;谐波合成法;衰减因子;拉格朗日插值

中图分类号: U 441.3

文献标识码: A

0 引言

脉动风在时间上和空间上都是随机的,桥梁抗风分析中通常近似地将其视为多维多变量各态历经性的平稳高斯过程。二十世纪70年代至今,随机过程的数值模拟技术得到了很大发展,总的来说有两种方法:一种是基于线性滤波技术的回归方法,另一种是基于三角级数叠加的谱解法(WAWS法),后者的模拟精度较高。WAWS方法的发展经历以下几个阶段:Shinozuka^[1]将WAWS方法从最初仅能模拟一维单变量平稳高斯随机过程,发展至可模拟多变量、非平稳高斯过程;Yang^[2-3]把快速FFT变换技术融入模拟过程,大大地提高了模拟效率;Deodatis^[4]提出了频率双索引的概念,改善了模拟精度;曹映泓^[5]在一维等距风场网格内解析地推导了风谱密度矩阵的Cholesky显式分解;李永乐^[6]将斜拉桥面状三维相关的随机风场简化为主梁横桥向、竖向风场和桥塔沿横桥向、顺桥向一维风场;丁泉顺^[7]通过对现有谐波合成法进行改进,进一步提高了谐波合成法的计算效率。

笔者采用风洞试验实测的风谱参数和空间相关函数,用改进的谐波合成法模拟杭州湾大桥主塔和主梁共193个节点的横向风速时程,考虑了

主塔和主梁风场的相关性,为抖振分析提供更精确的风场。

1 改进的谐波合成法的程序实现

零均值的一维 n 分量高斯过程,其互谱密度矩阵为

$$S^0(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}^0(\omega) & S_{12}^0(\omega) & \cdots & S_{1n}^0(\omega) \\ S_{21}^0(\omega) & S_{22}^0(\omega) & \cdots & S_{2n}^0(\omega) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1}^0(\omega) & S_{n2}^0(\omega) & \cdots & S_{nn}^0(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

对 $S^0(\omega)$ 进行Cholesky分解:

$$S^0(\omega) = H(\omega) H^T(\omega) \quad (2)$$

其中, $H(\omega)$ 是下三角矩阵, $H^T(\omega)$ 是其复共轭转置矩阵。在风场模拟过程中对每个频率点 ω_{ml} 都要进行一次 $S^0(\omega)$ 的Cholesky分解,其计算量是相当大的,注意到 $H(\omega)$ 的各元素均随 ω 连续地变化,可用三次拉格朗日多项式插值来减少对 $S^0(\omega)$ 的分解次数^[8-9],插值方程为

$$\tilde{H}_k = \sum_{l=i-1}^{i+2} H_k(\omega_l) L_l(\omega) \quad (3)$$

其中, $L_l(\omega)$ 为拉格朗日插值函数。

运用 $H(\omega)$ 的插值近似之后,脉动风速样本的模拟公式可以表示为

收稿日期:2007-10-24;修订日期:2007-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578014)

作者简介:马 麟(1980-),男,安徽宣城人,长安大学博士研究生,主要从事桥梁风振和抗震方面的研究,E-mail:

malinmalin8005@126.com.

$$f_j(t) = \sqrt{2\Delta\omega} \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N \tilde{H}_{jm}(\omega_{ml}) \sqrt{\Delta\omega} \cdot$$

$$\cos[\omega_{ml} - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \phi_{ml}], \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} \theta_{jm}(\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega)]} \right\} \\ \omega_{ml} = (l-1)\Delta\omega + \frac{m}{N}\Delta\omega \end{cases} \quad (5)$$

为应用FFT技术,类似于Yang^[2-3]的推导,将式(4)改写为如下形式:

$$f_j(p\Delta t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=1}^j G_{jm}(q\Delta t) \exp \left[i \left(\frac{m\Delta\omega}{n} \right) p\Delta t \right] \right\},$$

$$p = 0, 1, \dots, M \times n - 1; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中 q 是 $p/(M)$ 的余数, $q = 0, 1, \dots, M-1$.

$G_{jm}(q\Delta t)$ 由下式给出:

$$G_{jm}(q\Delta t) = \sum_{l=0}^{M-1} B_{jm}(l\Delta\omega) \exp(ilq \frac{\pi}{M}) \quad (7)$$

其中:

$$B_{jm}(l\Delta\omega) = \begin{cases} \sqrt{2\Delta\omega} \tilde{H}_{jm}(l\Delta\omega + \frac{m\Delta\omega}{n}) \exp(i\phi_{ml}), & 0 \leq l \leq N \\ 0, & N \leq l \leq M \end{cases} \quad (8)$$

为了避免模拟结果的失真现象,时间增量必须满足以下关系式

$$\Delta t \leq \frac{2\pi}{2\omega_{up}} \quad (9)$$

值得注意的是,风工程中有物理意义的功率谱是单边谱,所以以上公式是针对单边风谱的.依照上述方法,作出脉动风速模拟的程序框图,如图1所示.基于程序流程,用MATLAB7.0编制了脉动风的模拟程序Improved-WAWS.

2 风参数的测定

为了对比抖振的计算与实验结果,风场模拟时应采用风洞实测的风参数,风场模拟涉及的风参数包括脉动风谱和空间相关函数.

采用Simiu谱形式拟合风洞实测风谱:

$$nS_u/u_*^2 = af/(1+bf)^{cm} \quad (10)$$

式中:下标 a 可以是 u, v 或 w ,分别代表紊流风的横桥向,顺桥向和竖向的脉动分量; a, b, m 是根据风洞实测功率谱密度采用非线性最小二乘拟合的参数; $c=5/3$; u_* 为摩擦速度; f 为莫宁坐标.

根据风洞实测的功率谱拟合得到的横向和竖向脉动风谱参数 a, b, m 分别374.9, 49.7, 0.99和8.798, 3.11, 0.91.图2和图3为风洞实测的横向和竖向功率谱和拟合的相应Simiu谱的对比.

空间相关函数通常用指数衰减函数表示^[8]:

$$\begin{aligned} \rho(x_1, x_2, n) &= \frac{S_{uu}^c(x_1, x_2, n)}{\sqrt{S_{uu}^c(x_1, n) S_{uu}^c(x_2, n)}} \\ &= \exp \left(-\lambda \frac{nD}{U} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $S_{uu}(x_1, n)$ 为横桥向脉动分量 u 在 x_1 处的功率谱; $S_{uu}^c(x_1, x_2, n)$ 为横桥向脉动分量 u 在 x_1 与 x_2 互谱的实部; λ 为衰减系数; n 为频率; D 为 x_1 与 x_2 之间的距离; U 为平均风速;衰减因子 λ 根据实测的功率谱和互谱采用最小二乘法拟合.

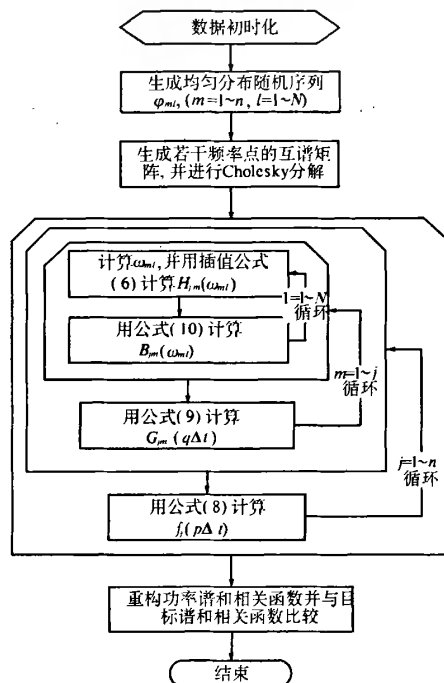


图1 风场模拟的程序流程

Fig. 1 Flow process of wind field simulation

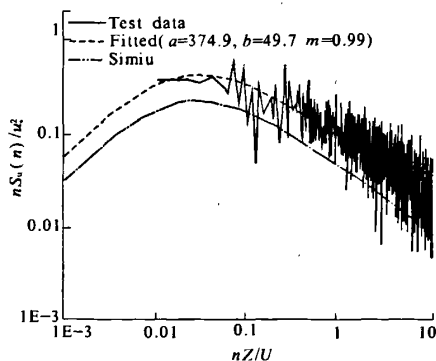


图2 风洞实测横向脉动风谱拟合

Fig. 2 Fitting of power spectrum density of transverse turbulent wind measured in wind tunnel

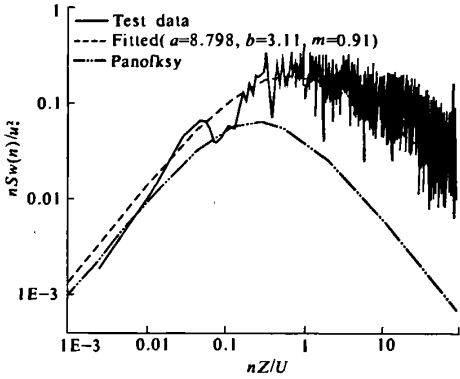


图3 风洞实测竖向脉动风谱拟合
Fig.3 Fitting of power spectrum density of vertical turbulent wind measured in wind tunnel

风洞试验过程中,采用热线风速仪进行相关性的测量,热线风速仪在全桥模型中的布置如图4所示.由式(11)可以看出,相关函数是频率 n 、空间距离 D 和风速 U 的函数.在测量过程中, D 分别取1.12,2.24,3.39及4.54 m,风速取4,6,8,10 m/s,测量两测点的相关函数,然后根据式(11)对 λ 进行最小二乘拟合,得到的衰减因子 λ 随距离 D 、风速 U 变化情况见图5.由图5可知:①风洞模拟紊流场的空间相关性在不同风速下以及不同间距 D 时存在一定的差异;②随着风速的增加,衰减因子总体上不断增大. λ 范围在10.8至15.7之间,平均值为12.9.数值模拟风场时取: $\lambda_{uv}=12.91, \lambda_{vw}=15.57$.

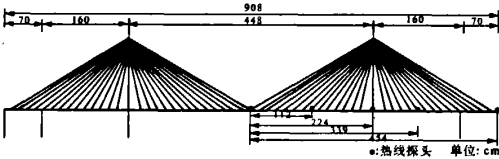


图4 风参数测定的热线风速仪空间布置
Fig.4 Hot-wire wind velocity indicator layout of measure of wind parameters

3 数值计算

改进谐波合成法的模拟效率高,不再需要像

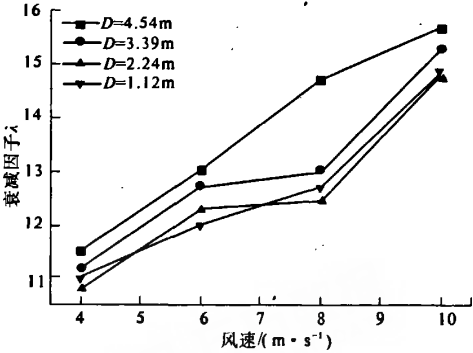


图5 风洞实测衰减因子 λ
Fig.5 Decay factors measured in the wind tunnel
文献[6]那样将主梁和桥塔的风场分开模拟.采用风洞实测的风谱和空间相关系数,用改进的谐波合成法模拟杭州湾大桥主塔和主梁共193个节点(图6)的横向风速时程,风场模拟参数如表1所示.

表1 风场模拟参数	
Tab.1 Parameters for wind field simulation	
A类地貌, z_0 取0.03	
地面粗糙类别	Von Karman 常数 $k=0.4$
平均风速	基准风速 $U(55.41) = 40 \text{ m/s}$, 其它位置处用对数规律计算
目标谱	采用风洞试验实测的风谱和相干因子
谱频范围	截止频率 $\omega_{up} = 4\pi \text{ (rad/s)}$
频率分割数	$N = 2\ 048$
FFT变换点数	$M = 4 * N = 8\ 192$
模拟空间点数	$n = 193$
时间步长	$dt = 0.1250 \text{ s}$
总模拟时长	$T_0 = 1\ 024 \text{ s}$

图7给出了点60(跨中)和点306(左侧塔顶)处水平风速时程;图8给出了点60、点306的模拟脉动风功率谱和目标谱的对比;图9是点59和点60(跨中相邻点)、点31和点272(主梁和桥塔相邻点)的模拟脉动风互功率谱相干因子与相应目标值的对比;图10和图11分别给出了点60的自相关函数及点59和点60的互相关函数与相应目标值的对比.

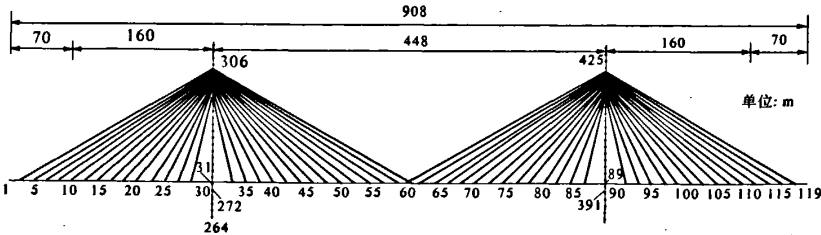


图6 杭州湾桥风场模拟节点布置图
Fig.6 Point layout of wind field simulation of Hangzhou Bay bridge

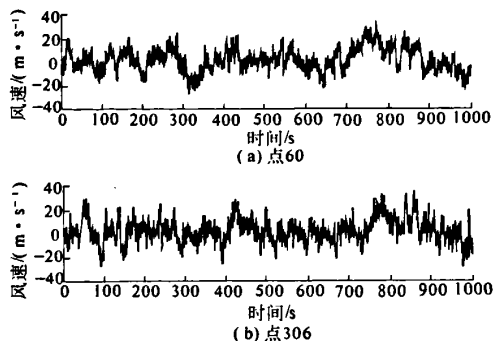


图7 模拟脉动风时程

Fig.7 Simulated turbulent wind velocity

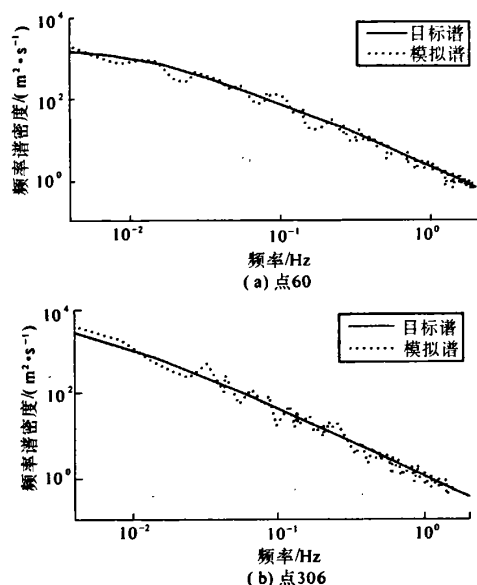


图8 脉动风功率谱

Fig.8 Verification of power spectral density of simulated wind velocity

从图8可以看出模拟的脉动风场在跨中和塔顶的功率谱与目标功率谱吻合很好. 图9显示跨中相邻点、桥塔和主梁相邻点的互功率谱相干因子与目标值在低频段吻合很好, 在高频段基本趋势吻合, 图9(b)也说明桥塔和主梁在临近区域在低频段具有较大相关性, 因此同时模拟桥塔和主梁风场更加符合实际工程情况. 图10说明模拟风场的跨中节点相关函数在0附近与目标值吻合很好, 当间隔时间较大时, 模拟风场的相关函数围绕目标值波动. 从图11可以看出, 模拟风场跨中相邻点的互相关函数在时间间隔0附近略低于目标值, 在时间间隔大时略高于目标值, 但基本趋势吻合.

基于改进谐波合成法的风场模拟在 Pentium4 CPU3.0、内存1G 的电脑上运行仅需22 min, 而采

用传统谐波合成法时, 同样的风场采用同样的参数设置在同台计算机上模拟需要300 min以上.

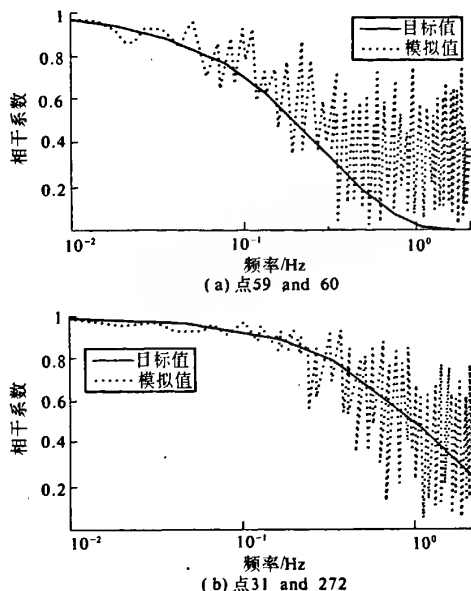


图9 脉动风互功率谱相干因子

Fig.9 Verification of cross power spectral density of wind velocity

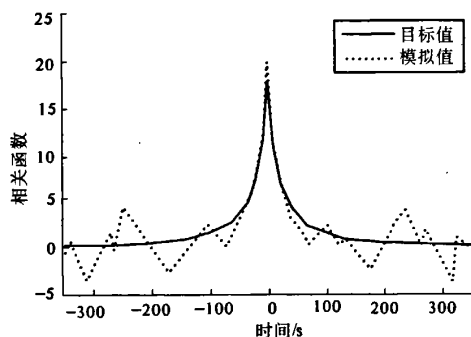


图10 脉动风的相关函数(点60)

Fig.10 Verification of correlation functions of simulated wind velocities of point 60

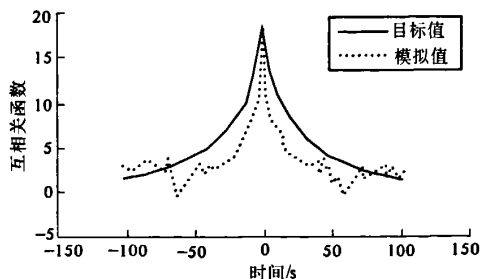


图11 脉动风的互相关函数(点60和59)

Fig.11 Verification of cross correlation functions of simulated wind velocities of point 59 and 60

4 结语

(1) 风洞实测的功率谱拟合得到的横向和竖向脉动风谱参数 a, b, m 分别为 374.9, 49.7, 0.99 和 8.798, 3.11, 0.91, 这与常用 Simiu 横桥向风速谱和 Lumley - Panofsky 竖向风速谱参数差异较大。

(2) 衰减因子 λ 在不同间距 D 时, 存在一定差异, 且随风速 U 的增加, 衰减因子不断增加, λ 范围在 10.8 至 15.7 之间, 平均值为 12.9。

(3) 用插值法改进的谐波合成法, 大大提高了模拟效率, 杭州湾大桥的主梁和主塔共 193 个节点的风场模拟在 Pentium4 CPU3.0、内存 1G 的电脑上运行仅需 22 min; 且由于频段划分细, 模拟精度高, 模拟功率谱和相关函数均与目标值吻合良好。用改进的方法编写的模拟程序 Improved - WAWS 为大跨桥梁的风场模拟提供了切实可行的手段。

参考文献:

- [1] SHINOZUKA M. Simulation of multivariate and multi-dimensional random processes[J]. J Acoust Soc Amer: part 2, 1971, 49(1): 357 - 367.
- [2] YANG J N. Simulation of random envelope processes[J]. J Sound and Vibration, 1972, 25(1): 73 - 85.
- [3] YANG J N. On the normality and accuracy of simulated random processes[J]. J Sound and Vibration, 1973, 26(3): 417 - 428.
- [4] DEODATIS G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes[J]. J Engrg Mech ASCE, 1996, 122(8): 778 - 787.
- [5] CAO Y H, XIANG H F, ZHOU Y. Simulation of stochastic wind velocity field on long - span bridges[J]. Engineering Mechanics, 2000, 126(1): 1 - 6.
- [6] 李永乐, 周述华, 强士中. 大跨度斜拉桥三维脉动风场模拟[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 10 - 16.
- [7] 丁泉顺, 陈艾荣, 项海帆. 大跨度空间脉动风场的计算机模拟[J]. 力学季刊, 2006, 27(2): 184 - 189.
- [8] TORIUMI R, KATSUCHI H, FURUYA N. A study on spatial correlation of natural wind[J]. J Wind Eng Ind Aerodgn, 2000, 87: 203 - 216.
- [9] 王全来, 张薇. 对波莱尔改进拉格朗日插值公式思想方法研究[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2007, 39(2): 7 - 10.

Wind Field Simulation of the Hangzhou Bay Bridge Based on the Improved WAWS

MA Lin, LIU Jian - xin, HAN Wan - shui

(Wind Tunnel Laboratory, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Turbulent wind field of the Hangzhou Bay Bridge is simulated by improved WAWS with wind field parameters measured in wind tunnel. Wind field parameters involved in wind field simulation include mainly turbulent wind power spectrum density and spatial - correlation function, which is measured and applied to wind simulation. Simulating wind field of long - span bridges must overcome the problem of accounting quantity, and Lagrange interpolation can improve WAWS and enhance simulation efficiency. The flow chart is put forward for the turbulent wind field simulation on the basis of improved spectral representation and corresponding programming is written, which provide the feasible method to wind field simulation of long - span bridges. Testing results show that decay factor varies with spatial distance D different and increase with mean wind velocity adding. And power spectrum density, cross power spectrum density, correlation function and cross correlation function of simulated wind velocity sample coincide with corresponding target ones.

Key words: wind field simulation; spectral representation; decay factor; Lagrange interpolation