

文章编号:1671-6833(2010)04-0019-04

大跨径悬索桥施工期桥塔脉动风速场模拟

赵湘育¹, 李胜利¹, 王正君²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要: 针对大跨径悬索桥施工期桥塔的结构形式及振动形态特点, 考虑结合自然风的时间和空间相关性, 提出了一种比较精确的三维脉动风速场模拟方法. 基于谐波合成法, 采用 Cholesky 方法对谱密度矩阵进行分解, 并运用 FFT 技术, 以某大跨径悬索桥施工期桥塔为工程实例, 使用 MATLAB 编制了脉动风速场模拟程序, 并对模拟样本进行检验, 结果表明模拟值与目标值吻合良好.

关键词: 悬索桥; 桥塔; 脉动风模拟; 谐波合成法; MATLAB

中图分类号: U488.25 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 工程中将风处理成平均风和脉动风两部分. 平均风可以用随机变量来描述, 其在给定时间间隔内, 风力大小、方向等不随时间而变化, 其沿高度变化往往用指数或对数的平均风剖面来描述; 而脉动风是随机的可以用随机过程来描述, 结构抗风分析中通常近似地将其视为多维多变量各态历经的平稳高斯过程. 脉动风场的模拟方法主要有风洞试验、现场实测和数值模拟等, 风洞试验和现场实测需要的测试手段复杂, 耗时耗资巨大故仅仅针对特定的重要工程结构进行; 基于数值模拟方法的风速时程曲线可满足某些统计特性的任意性, 且比实际纪录更具代表性, 因而在实际工程中广泛被应用. 迄今, 脉动风速时程的模拟方法主要有谐波合成法(也称为频谱表达法)和线性滤波器法^[1]. 众多研究表明, 在大跨屋盖等结构中采用线性滤波器法比较合适, 而在大跨桥梁中往往采用谐波合成法^[2]. 谐波合成法采用以离散谱逼近目标随机过程的随机模型, 算法简单直观, 数学基础严密, 适用于任意指定谱特征的平稳高斯随机过程. 谐波合成法的基本概念出现在 1954 年, 近来, 研究者对该法进行了大量的改进, 并应用于斜拉桥、悬索桥抗风分析的风荷载模拟中^[3-11].

桥塔, 特别是悬索桥的混凝土桥塔, 成桥后桥塔刚度较大, 再加上主缆对其约束作用, 使得抗风性能较好. 但在施工期由于缺乏主缆的约束, 在任何风速下都可能会发生抖振, 抖振虽不会引起灾

难性的破坏, 但在施工期间过大的抖振可能引起结构物损伤, 危及施工机械和人员的安全^[2-3]. 笔者基于谐波合成法, 采用 Cholesky 方法对谱密度矩阵进行分解, 并运用 FFT 技术, 以某大跨径悬索桥施工期桥塔为工程实例, 使用 MATLAB 编制了脉动风速场模拟程序, 并对模拟样本进行检验.

1 脉动风速场模拟

考虑一个一维 n 变量零均值的高斯随机过程, 其功率谱密度函数矩阵为

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

式中: 矩阵 $S(\omega)$ 的各元素 $s_{pq}(\omega)$ ($p=1, 2, \cdots, n$; $q=1, 2, \cdots, n$) 是相关函数的傅立叶变换; $s_{pp}(\omega)$ 为自谱密度函数, 为实数形式; $s_{pq}(\omega)$ ($p \neq q$) 为互谱密度函数, 一般为复数形式; ω 为圆频率, 故该矩阵为复数形式.

将 $S(\omega)$ 进行 Cholesky 分解:

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

式中: $H(\omega)$ 为下三角矩阵; $H^T(\omega)$ 为 $H(\omega)$ 的复共轭转置矩阵.

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

收稿日期: 2010-03-14; 修订日期: 2010-06-15

作者简介: 赵湘育(1972-), 女, 河南孟县人, 郑州大学讲师, 博士生, 主要从事道路、桥梁结构方面的研究.

式中:对角线元素是 ω 的非负的实函数,非对角线元素一般是 ω 的复函数。

对于对角线元素:

$$H_{jj}(\omega) = H_{jj}(-\omega) \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

对于非对角线元素:

$$H_{jm}(\omega) = |H_{jm}^*(-\omega)| e^{i\theta_{jm}(\omega)} \quad (5)$$

$$\theta_{jm}(\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega)]} \right\} \quad (6)$$

式中: $j=1,2,\dots,n; m=1,2,\dots,j-1$ 。

按照 Shinoruka 的理论,具有式(1)形式的谱密度矩阵 $S(\omega)$ 的 n 个平稳随机过程样本,即模拟风速具有如下形式:

$$V_j(t) = \sqrt{2(\Delta\omega)} \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_{ml})| \cos[\omega_{ml}t + \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \psi_{ml}] \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

式中: n 为一充分大的数,风谱的有效频率范围 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 划分为 n 个相等的频率间隔; $|H_{jm}(\omega_{ml})|$ 为式(4)下三角矩阵的模;频率间隔 $\Delta\omega = \omega_u/n$, ω_u 为截止圆频率,即当 $\omega < \omega_u$ 时, $S(\omega) = 0$; θ_{jm} 如式编号所示为两个不同作用点之间的相位角; ψ_{ml} 为分布在 $[0, 2\pi]$ 区间的随机相位角。 ω_{ml} 为双索引频率,按如下取值:

$$\omega_{ml} = l\Delta\omega - \frac{N-m}{N}\Delta\omega = (l-1)\Delta\omega + \frac{m}{N}\Delta\omega, \quad (l=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

为应用 FFT 技术,风速时程模拟公式可被写成下式^[1]:

$$V_j(p_n\Delta t) = \sqrt{2(\Delta\omega)} \text{Re} \left[\sum_{l=1}^i G_u(p\Delta t) \exp(i \frac{l}{n} \frac{2p_n\pi}{M}) \right] \quad (i=1,2,\dots,n; p_n=0,1,2,\dots,(M \times n-1); p=0,1,2,\dots,(M-1)) \quad (9)$$

式中: $M = \frac{2\pi}{\Delta\omega\Delta t}$; $G_u(p\Delta t)$ 可通过下式采用 FFT 技术计算:

$$G_u(p\Delta t) = \sum_{q=0}^{M-1} B_u(q\Delta\omega) \exp(i \cdot pq \cdot \frac{2\pi}{M}) \quad (10)$$

其中,

$$B_u(q\Delta\omega) = \begin{cases} \bar{H}_u \left[\left(q + \frac{l}{m} \right) \Delta\omega \right] \exp(i\Phi_u), & 0 \leq q < N \\ 0, & N \leq q \leq M-1 \end{cases} \quad (11)$$

2 大跨径悬索桥施工风场的简化

在笛卡儿坐标系下,大跨桥梁的三维风场可以表示为

$$\begin{cases} U = \bar{U}(Z) + u(x,y,z,t) \\ V = V(x,y,z,t) \\ W = W(x,y,z,t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: x 轴为横桥向,即风的主流方向; y 轴为顺桥向,与风的主流方向垂直; z 轴为竖向,亦与风的主流方向垂直; $\bar{U}(Z)$ 为主流方向的平均风速; U, V, W 分别表示横桥向,顺桥向和竖向的脉动风速; t 表示时间。由于自然风在 x, y, z 3个方向上的脉动分量间的相关性较弱,且目前对3个脉动分量之间的相关关系缺乏卓有成效的研究,实际应用中通常不考虑风速在3个方向之间的相关性,而仅考虑风速在空间上的相关性,将三维相关的多变量随机过程简化为3个独立的一维多变量随机过程,结合有限元离散分析,通常将宽度为桥长、高度为塔高范围内的连续风场离散为该面状区域内有限点处的三维风场。

3 大跨径悬索桥施工裸桥塔风场模拟

某大跨径悬索桥桥塔是由塔柱、横梁组成的门式框架结构,塔柱为普通钢筋混凝土结构,横梁为预应力混凝土结构,柱身和横梁均为空心箱型截面。塔柱顶面标高为215.58 m,上横梁顶面标高为209.58 m,中横梁顶面标高为153.30 m,下横梁顶面标高为54.45 m,塔座底面标高为8.00 m。每个塔柱横桥向尺寸均为6 m,顺桥向尺寸由塔顶的9.5 m直线变化到塔柱底的12.4 m。桥塔有限元模型如图1所示。

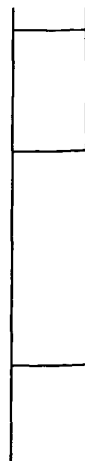


图1 桥塔有限元模型

Fig.1 Finite element model of pylon for the suspension bridge

3.1 风特性^[9-10]

由资料知,该桥场地风速剖面的幂指数为

$\alpha \approx 0.14$,在成桥状态下,桥面高度处的设计基准风速为 $U_d = 29.0 \text{ m/s}$,施工阶段取重现期为10 a,设计风速为 $U'_d = 24.4 \text{ m/s}$,平均风速沿高度的变化关系可用下式表示:

$$\frac{U_z}{U_d} = \left(\frac{Z}{Z_d} \right)^\alpha \quad (13)$$

式中: U_z 为高度 z 处的风速。

横桥向风速谱和顺桥向风速谱采用沿高度变化的 Simiu 谱,竖向风速谱采用 Lumley - Panofsky 谱。

Simiu 横桥向风速谱:

$$\frac{nS_u(f)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (14)$$

Simiu 顺桥向风速谱:

$$\frac{nS_v(f)}{u_*^2} = \frac{15f}{(1+9.5f)^{5/3}} \quad (15)$$

Lumley-Panofsky 竖向风速谱:

$$\frac{nS_w(f)}{u_*^2} = \frac{3.36f}{(1+10f)^{5/3}} \quad (16)$$

式中: $f = nz/U_z$ 称为相似坐标; n 为频率; $u_* = \frac{KU_z}{\ln \frac{z-z_d}{z_0}}$ 为气流剪切速度, K 为无量纲 Karman 常数,

可取 $K \approx 0.4$; $z_d = \bar{H} - z_0/K$, \bar{H} 为周围建筑物的平均高度,m,开阔地带 $z_d = 0$, z_0 为地面粗糙高度,m,可由相关资料查得。

空间相关性系数反映了不同点位上风谱的空间相关程度,对于侧向和竖向尺寸较大的结构,Davenport 建议的空间相关系数为:

$$Coh(x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j, n) = \exp \left\{ \frac{n [C_x^2 (x_i - x_j)^2 + C_y^2 (y_i - y_j)^2 + C_z^2 (z_i - z_j)^2]^{1/2}}{(U_{u_i} + U_{u_j})/2} \right\} \quad (17)$$

式中: n 为频率,Hz; U_{u_i} , U_{u_j} 为位置 i, j 处的平均风速, (x_i, y_i, z_i) , (x_j, y_j, z_j) 是点位的坐标; C_x , C_y , C_z 是指数衰减系数,可通过试验来确定。对于悬索桥这样侧向和竖向尺寸均较大的结构,可以忽略纵向前后的影响,即上式中令 $C_z = 0$,此时,Emil 建议: $C_y = 16$, $C_x = 10$ [9]。

桥塔和猫道不同高度处两点的互谱密度函数为:

$$S_{ij}(n) = \sqrt{S_{u_i}(n)S_{u_j}(n)} \cdot Coh(x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j, n) \quad (18)$$

式中: S_{u_i} , S_{u_j} 为不同高度两点 i, j 的自谱密度函数; $Coh(x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j, n)$ 为两点间的空间相关系

数。

3.2 桥塔风场

根据上述方法,使用编制了脉动风场的模拟程序。选定桥塔塔柱和横梁上结点作为风荷载的加载节点,表1列出了桥塔施工期工况4风速场模拟的主要参数 [13],其他工况略。桥塔上某点模拟的顺风向风速时程如图2所示。对模拟的脉动风速的谱检验如图3所示。从图3可以看出,模拟谱与目标谱吻合较好。

表1 风速场模拟参数

Tab. 1 Parameters for wind velocity field simulation

参数	横桥向
地面粗糙类别	B
平均风速	10 m 高风速 = 22.5 m/s, 其他高度处按照指数律换算
目标谱	Simiu 顺桥向风速谱
相干系数	Davenport 建议的空间相关系数
谱频率范围	$\omega_1 = 0, \omega_u = 4\pi$
频率分割数	$N = 1\ 024$
FFT 变换点数	$M = 2\ 048$
模拟空间点数	43
模拟空间点间距	塔柱 10 m
时间间隔	$\Delta t = 0.25 \text{ s}$
时间步数	$n_t = 6\ 000$
总模拟时长	$t = 1\ 500 \text{ s}$

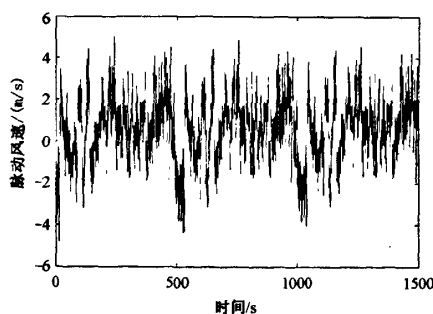


图2 桥塔上某点模拟的顺风向风速时程

Fig. 2 Simulated turbulent wind velocity at one point on pylon

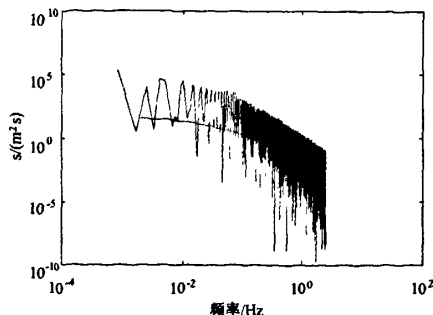


图3 对模拟的脉动风速的谱检验

Fig. 3 Verification of simulated wind velocity spectrum

4 结论

猫道是大跨径悬索桥施工的重要暂态结构之一,笔者应用随机振动理论,基于谐波合成法,采用FFT技术,用MATLAB编程模拟了一大跨径悬索桥的猫道风场,其中考虑了桥塔对猫道风场的影响以及猫道各模拟点的空间位置变化,最后用随机信号分析处理技术对模拟样本进行了校验.结果表明:该方法在模拟的速度、精度等方面均满足工程要求,为下一步对结构在时域内进行风振响应分析奠定了基础.

参考文献:

- [1] GEORGE D. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes [J]. J. of Engineering Mechanics, 1996, 122(08): 778 - 787.
- [2] 边建烽,魏德敏.大跨空间结构风速时程的数值模拟理论[J].暨南大学学报:自然科学版,2005,26(1):87 - 90.
- [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.
- [4] LI Y L, LIAO H L, QIANG S Z. Simplifying the simulation of stochastic wind velocity fields for long cable - stayed bridges [J]. Computers And Structures, 2004, 82: 1591 - 1598.
- [5] 胡亮,李黎,彭元诚,等.大跨桥梁抖振时域分析的程序化方法[J].中国公路学报,2006,19(6):59 - 64.
- [6] 韩大建,邹小江,苏成.大跨度桥梁考虑桥塔风效应的随机风场模拟[J].工程力学,2003,20(6):18 - 22.
- [7] 曹映泓.大跨度桥梁非线性颤振和抖振时程分析[D].同济大学土木工程学院,1999.
- [8] 黄海新,张哲,韩立中.金马大桥抖振响应的时域分析[J].重庆建筑大学学报,2006,28(1):63 - 66.
- [9] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures. Third edition [M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [10] 《公路桥梁抗风设计指南》编写组.公路桥梁抗风设计指南[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [11] 白泉,朱浮声,康玉梅.风速时程数值模拟研究[J].辽宁科技学院学报,2006,8(1):1 - 3.

Simulation of Turbulent Wind Velocity for Pylon of Long - span Suspension Bridge During Construction

ZHAO Xiang - yu, LI Sheng - li¹, WANG Zheng - jun²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Architecture Engineering, Heilongjiang University, Haerbin 150086, China)

Abstract: A precise simulation method of three dimensional turbulent wind velocity for pylon of long span suspension bridge during construction is put forward by considering correlation of time and space for natural wind. The simulation program of turbulent wind velocity for some pylon of long span suspension bridge during construction was composed by MATLAB and WAWS, adopting fast Fourier transform (FFT) and CHOLESKY - method. The simulate samples are tested, and results show that simulation value is in good agreement with the target value.

Key words: suspension bridge; pylon; turbulent wind velocity; WAWS; MATLAB