

# 基于时域分析的风载激励下桥梁结构动力特性识别

姜 浩<sup>1,2</sup>, 郭学东<sup>2</sup>, 张艳辉<sup>2</sup>

(1. 吉林建筑工程学院 土木工程学院, 长春 130017; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022)

**摘要:**为研究环境激励下针对混凝土桥梁结构动力特性的识别问题,将现有的时域分析方法进行改进。利用自然激励技术与特征系统实现算法相结合,模拟风载激励对一预应力混凝土连续梁桥进行动力特性识别的有限元仿真模拟分析。利用随机减量技术和 Ibrahim 时域联合算法和有限元模态分析进行结果对比验证。仿真模拟结果表明,基于最常见的环境激励——风载激励识别混凝土梁桥的动力特性参数是行之有效的。运用自然激励技术与特征系统实现算法相结合的时域分析方法识别结果较为准确,为此类结构的健康监测和结构设计提供了有效支持。

**关键词:**桥梁工程; 动力特性; 时域分析; 有限元仿真模拟; 风载激励

**中图分类号:**U446    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2011)05-1279-05

## Dynamic behavior identification of concrete bridge structure under wind load excitation based on time-domain analysis

JIANG Hao<sup>1,2</sup>, GUO Xue-dong<sup>2</sup>, ZHANG Yan-hui<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Jilin Institute of Architecture and Civil Engineering, Changchun 130017, China;  
2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The traditional time-domain analysis method was improved to study the dynamic behavior identification of the concrete bridge structure under environmental excitation. Applying the combination of the natural excitation technique and the eigensystem realization algorithm, a finite element numerical simulation was performed for the dynamic behavior identification of a pre-stressed concrete continuous beam bridge under simulating wind load excitation. The results were validated comparatively using the combined algorithm of random decrement technique and Ibrahim time domain technique as well as the finite element modal analysis. The simulation results show that the wind load as the most common environmental excitation can be used effectively to identify the modal parameters of the concrete bridge. The results identified by the combination of the natural excitation technique and the eigensystem realization algorithm are precise enough for the concrete bridge, providing an effective support for the structure health monitoring and structure design.

**Key words:** bridge engineering; dynamic behavior; time-domain analysis; finite element numerical simulation; wind load excitation

---

收稿日期:2010-08-26.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070183058);建设部国际科技合作项目(2009H11);吉林省教育厅“十一五”科技研究项目(2010106).

作者简介:姜浩(1974-),男,博士,副教授。研究方向:结构健康监测。E-mail:jianghao0709@126.com

通信作者:郭学东(1955-),男,教授。研究方向:结构健康监测。E-mail:guoxd@jlu.edu.cn

传统动力特性参数识别方法需要同时测得结构上的激励和响应信号,而实际工程结构中同时测得激励和响应信号不切实际,主要因为大型工程结构无法施加激励或施加激励十分困难<sup>[1]</sup>。目前基于环境激励的结构动力特性参数识别技术在航天、机械、土木工程领域都是研究热点<sup>[2-5]</sup>。所谓环境激励是指风载、车辆载荷、地震等随机引起的扰动。与传统方法相比,基于环境激励的动力特性参数识别方法进行结构动力特性参数识别,不影响结构正常使用、对结构无损伤,大大降低了测试成本,是一种简便、易行、经济、快速的方法。风载是土木建筑,特别是大跨度桥梁的主要设计荷载<sup>[6]</sup>。研究表明,将风载激励近似当作白噪声处理是可行的,随机减量技术和自然激励技术对白噪声的处理都是非常有效的<sup>[7]</sup>。

自然激励技术(Natural excitation technique, NExT)<sup>[8]</sup>是一种有效的利用自然环境激励响应提取结构振动脉冲响应的技术。特征系统实现算法(Eigensystem realization algorithm, ERA)<sup>[9]</sup>是目前较完善、先进的动力特性参数识别方法之一。本文将 NExT 与 ERA 方法相结合形成新的时域分析方法,并利用此联合算法对比随机减量技术/ITD 时域联合算法对一混凝土梁桥基于风载激励下进行动力特性参数识别的有限元仿真模拟分析,并将计算结果与有限元模态分析结果进行对比分析,为桥梁的健康监测和抗风设计提供有效帮助。

## 1 基本理论

### 1.1 NExT/ERA 时域分析方法

NExT 法的主要思想是受白噪声环境激励下结构两点之间响应的互相关函数与脉冲响应函数表达式相似,求出两点之间响应的互相关函数后,利用时域中模态识别方法进行动力特性参数识别。

线性阻尼结构的动力学方程表示如下:

$$\dot{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为  $n$  阶质量、阻尼和刚度方阵;  $\mathbf{x}(t)$  为在连续时间  $t$  时刻的位移向量;  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  为位移向量对时间的一阶导数,即速度向量;  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  为加速度向量;  $\mathbf{f}(t)$  为外部激励向量。

当结构的  $k$  点受到外界白噪声激励时,  $l, p$  两个响应点信号之间的互相关函数能够表示如下<sup>[8]</sup>:

$$R^{lp}(t) = \sum_{i=1}^n B_i^{lp} \frac{\phi_i^l \phi_i^p}{m_i \lambda_i} \exp(-\xi_i \omega_i T) \sin(\lambda_i T + \Omega_i) \quad (2)$$

式中:  $\omega_i$ 、 $\xi_i$ 、 $m_i$  分别为第  $i$  阶模态频率、阻尼比和模态质量;  $\lambda_i = \sqrt{\omega_i(1 - \xi_i^2)}$  为阻尼固有频率;  $\phi_i^l$ 、 $\phi_i^p$  分别为第  $l, p$  测点的第  $i$  阶模态振型分量;  $B_i^{lp}$  为与测点及模态阶次  $i$  有关的常数项;  $\Omega_i$  为与模态阶次  $i$  有关的相位角。

脉冲响应函数表示为<sup>[8]</sup>

$$h^{lk}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i^l \phi_i^k}{m_i \lambda_i} \exp(-\xi_i \omega_i t) \sin(\lambda_i t) \quad (3)$$

比较式(2)和式(3)可以看出,线性系统在白噪声激励下两点响应的互相关函数和脉冲激励下的脉冲响应的数学表达式在形式上完全一致。因此,可以将两点间响应的互相关函数用来替代脉冲响应函数。

ERA 法的基本思想是根据系统的脉冲响应数据,构造 Hankel 矩阵,然后对该 Hankel 矩阵进行奇异值分解,通过奇异值分解的结果得到系统的最小实现,最后对最小实现的状态矩阵进行特征值分解,可得到系统动力学参数。

根据前述脉冲响应数据构造 Hankel 矩阵

$$\mathbf{H}_i(k-1) = \begin{bmatrix} h(k) & h(k+1) & \cdots & h(k+s) \\ h(k+1) & h(k+2) & \cdots & h(k+s+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h(k+r) & h(k+r+1) & \cdots & h(k+r+s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

奇异值分解后,得到

$$\mathbf{H}_i(0) = \mathbf{U}^T \mathbf{\Sigma} \mathbf{V} \quad (5)$$

结构的模态参数可以通过求解特征值问题计算得到。

### 1.2 随机减量技术/ITD 时域联合算法

如果把环境激励看作随机激励,那么从随机响应信号中提取自由响应信号的方法称为随机减量法。该方法的基本思想为:依据被检测结构上同时记录的多个随机响应信号,利用样本平均的办法,通过去除响应信号的随机部分以提取自由响应信号,并由提取的自由响应信号识别模态参数。

ITD 法<sup>[10]</sup>(The Ibrahim time domain technique)是 20 世纪 70 年代由 Ibrahim 提出的动力特性参数识别的时域算法,是较早的一种行之有效的动力特性参数识别方法,其基本思想是使用同时测得的各测点的自由响应(位移、速度、加速度三者中的任一个),通过 3 次不同延时的采样,构造自由响应采样数据的增广矩阵,根据自由响应的数学模型建立特征方程,求解特征对后再估算结构各阶模态参数。

## 2 数值仿真

### 2.1 模型的建立

利用长春市某预应力混凝土连续梁桥进行数值仿真模拟, 其上部结构为 65 m + 100 m + 65 m 连续箱梁, 下部结构为双柱式桥墩, 如图 1 所示。

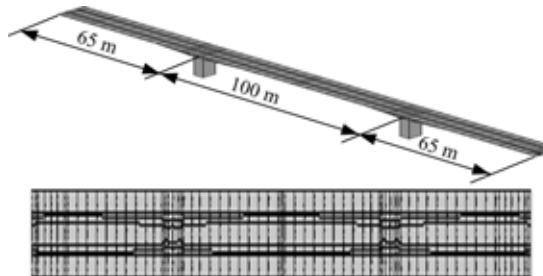


图 1 连续梁桥有限元模型

Fig. 1 Continuous bridge FE model

风载即引起结构风振的荷载。桥梁结构所受风载主要有静力风载、抖振力、自激力。本文选择抖振力作为风载激励。

采用线性滤波的自回归模型(AR)模拟脉动风速时程, 由多维 Yule-Walker 方程的 Whittle 递推公式进行求解。借助 BIC 法则确定模型阶数, 计算脉动风的自功率谱、互功率谱, 然后利用自回归模型进行计算, 得到脉动风速过程向量。以上过程通过 Matlab 程序实现, 模拟得到脉动风速时程曲线。主梁跨中和 1/4 跨的脉动风速时程曲线如图 2 和图 3 所示。

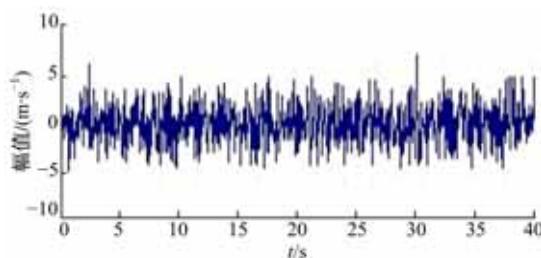


图 2 主梁跨中模拟风速时程

Fig. 2 Wind speed time series of mid-span of main girder

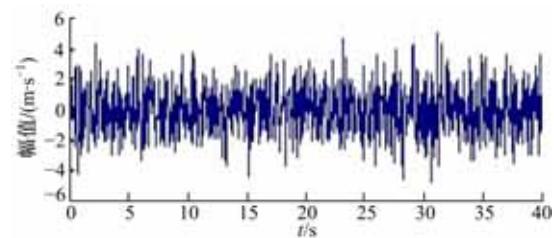


图 3 主梁 1/4 跨模拟风速时程

Fig. 3 Wind speed time series of quarter-span of main girder

抖振力的计算按 Scanlan 提出的准定常理论计算, 利用 Matlab 计算风载时程曲线, 如图 4 和图 5 所示。

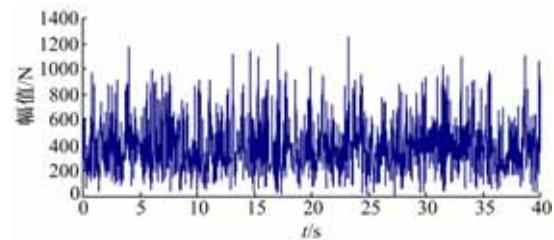


图 4 主梁跨中竖向风荷载

Fig. 4 Vertical wind load of mid-span of main girder

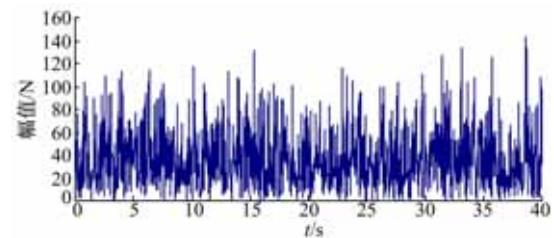


图 5 主梁跨中水平风荷载

Fig. 5 Horizontal wind load of mid-span of main girder

### 2.2 时程分析

将模拟的风载作为环境激励进行时程分析。测点布置选取记录时程响应数据的节点, 如图 6 所示。图中测点(节点)的位置用  $\otimes$  表示, 并有数字注释表示测点编号。

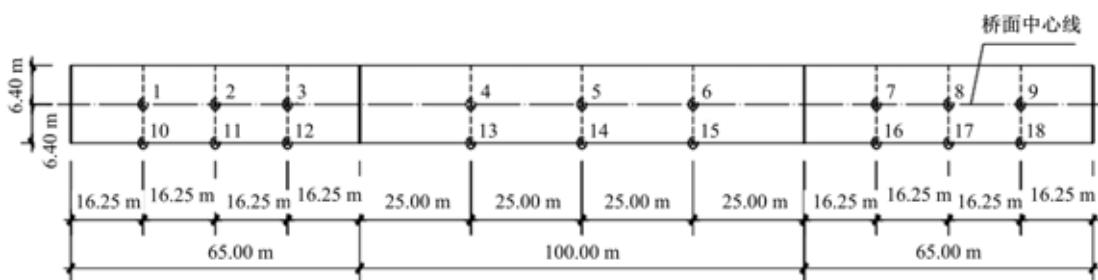


图 6 测点布置

Fig. 6 Arrangement of the measuring points

时程分析的目的是得到结构在以风载为环境激励下的响应信号,以此作为参数识别算法的输入。选择测点加速度响应仿真信号,数据采样周期  $\Delta t=0.04$  s,模拟时长 40 s 的结构响应。其中选择 1~9 号测点记录横向的响应信号,选择 10~18 号测点记录竖向的响应信号。得到仿真响应信号后,将一倍响应方差的白噪声加入响应信号。

### 3 动力特性参数识别

#### 3.1 随机减量技术/ITD 法动力特性分析

按照方法的基本理论过程,分别对横向和竖向的仿真响应数据进行处理,计算自由响应函数。图 7 为通过随机减量技术得到的测点自由响应函数。

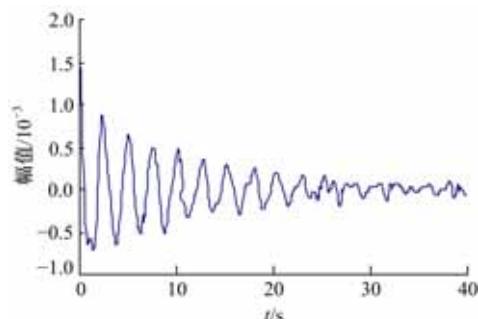


图 7 用随机减量技术计算的自由振动响应

Fig. 7 Free vibration response by random decrement technique

通过对测点 1~18 进行延时采样得到 18 个虚拟测点,构建行数为 18 的响应矩阵,然后利用响应矩阵计算结构的频率和阻尼比,最后计算模

态振型。

#### 3.2 NExT/ERA 法动力特性分析

首先选择合适的参考点,本文选取测点 1、测点 10 分别作为横向和竖向的参考点;分别计算测点 2~9 与测点 1 的互相关函数,计算测点 11~18 与测点 10 的互相关函数。典型互相关函数见图 8。

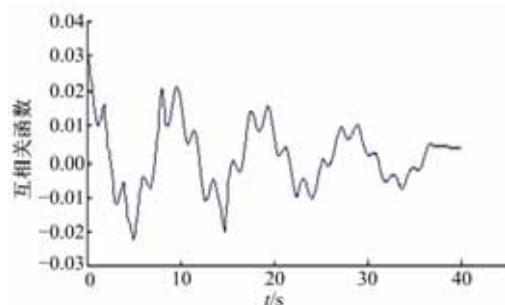


图 8 典型互相关函数

Fig. 8 Typical cross correlative function

通过最小实现调试确定 Hankel 矩阵的分块数为 160,取 3 个方向的互相关函数代替脉冲响应函数,利用互相关函数的前 230 个离散点组成 Hankel 矩阵的  $H(0)$ 。识别得到 4 阶模态参数。

#### 3.3 计算结果比较

对模型进行有限元模态分析,求解结构的固有模态参数,并以此与识别结果进行比较分析。频率和阻尼比识别结果见表 1,利用模态振型吻合度 MAC 值对识别振型与有限元模态分析得到的振型吻合度进行的估计及振型识别结果对比见表 2。

表 1 频率与阻尼比识别结果对比

Table 1 Result of frequency and damping ratio

模态阶数	有限元模态分析值			随机减量技术/ITD 法			NExT/ERA 法			
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	误差/%	阻尼比/%	误差/%	频率/Hz	误差/%	阻尼比/%	误差/%
1	1.631	10	1.719	5.39	5.76	11.76	1.702	4.35	11.03	10.3
2	2.357	10	2.434	3.26	4.33	7.14	2.268	3.79	8.41	15.9
3	3.319	10	3.454	4.57	6.11	12.59	3.415	2.89	11.36	13.6
4	3.875	10	3.633	6.25	4.79	16.89	4.036	4.16	6.45	35.5

表 2 振型分量识别结果吻合度(Mac 值)对比

Table 2 Comparisons of results of modal shapes

有限元分析 模态阶数	随机减量技术/ITD 法				NExT/ERA 法			
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
1 阶	0.9978				0.9992			
2 阶		0.9834				0.9880		
3 阶			0.9917				0.9961	
4 阶				0.9949				0.9964

## 4 结束语

本文的研究表明,在以风载为环境激励的条件下,选择适当的参数识别算法识别预应力混凝土梁桥的模态参数是可行的;将自然激励技术(NExT)与特征系统实现算法(ERA)相结合形成时域分析方法对混凝土桥梁结构进行动力特性参数识别是行之有效的,无需中断桥梁的正常工作,且对结构本身不造成损伤,无需特殊的激励设备,可降低实际现场测试的成本,具有重要的理论意义和工程实用价值。

### 参考文献:

- [1] 程永春,谭国金,刘寒冰,等. 车辆作用下的公路简支梁桥测试频率[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(6):1492-1496.  
Cheng Yong-chun, Tan Guo-jin, Liu Han-bin, et al. Test frequencies freely supported beam of Highway Bridge under effect of vehicles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(6):1492-1496.
- [2] Siringoringo D M, Fujino Y. System identification of suspension bridge from ambient vibration response[J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 462-477.
- [3] 侯立群,欧进萍. 基于时频分析的运营桥梁模态参数识别方法[J]. 振动工程学报, 2009, 22(1):19-25.  
Hou Li-qun, Ou Jin-ping. Modal parameters identification of bridge in serve based on time-frequency analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(1):19-25.
- [4] 廖庆斌,李舜酩,朱丽娟. 基于随机激励的某机匣模态实验与分析[J]. 航空动力学报,2005,20(6):932-936.  
Liao Qing-bin, Li Shun-ming, Zhu Li-juan. Modal experiment and analysis of an engine casing based on stochastic excitation[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6):932-936.
- [5] 淡丹辉,孙利民. 在线监测环境下土木结构的模态识别研究[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(3):82-88.  
Dan Dan-hui, Sun Li-min. Research on structure modal identification under online monitoring conditions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(3):82-88.
- [6] 钟万勰,林家浩,吴志刚,等. 大跨度桥梁分析方法的一些进展[J]. 大连理工大学学报,2000, 40(2): 127-135.  
Zhong Wan-xie, Lin Jia-hao, Wu Zhi-gang, et al. Development of analytical method for long-span bridges[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(2):127-135.
- [7] 姜浩,郭学东,杨焕龙. 环境激励下桥梁结构模态参数识别方法的研究[J]. 振动与冲击,2008,27(11): 126-128.  
Jiang Hao, Guo Xue-dong, Yang Huan-long. Research on modal identification of bridge structure under ambient excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(11):126-128.
- [8] James G H, Carne T G, Lauffer J P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures[J]. International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1995, 10(4): 260-277.
- [9] Lian Ji-jian, Li Huo-kun, Zhang Jian-wei. ERA modal identification method for hydraulic structures based on order determination and noise reduction of singular entropy[J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2009, 52(2):400-412.
- [10] Ibrahim S R. Efficient random decrement computation for identification of ambient responses[C]// Proceeding of 19 IMAC, Florida, USA, 2001.