

Parameter Identification Method Based on Model Degradation

Xiaoxia Tian

Computer and Information Engineering College, Hanshan Normal University, Chaozhou, China

Email address:

txx@hstc.edu.cn

To cite this article:

Xiaoxia Tian. Parameter Identification Method Based on Model Degradation. *Science Discovery*. Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 489-494.

doi: 10.11648/j.sd.20180606.28

Received: November 1, 2018; **Accepted:** November 21, 2018; **Published:** December 12, 2018

Abstract: Vortex-induced resonance is a complex coupling phenomenon. Vortex-induced vertical force (VIVF) model describes the characteristics of the vortex-induced force in resonance. Improper parameters can distort the model, so accurately identifying the parameters of the model is a current research hotspot. In this paper, a parameter identification method based on model degradation is proposed. A constant term is used to replace the harmonic force term in the model. The degenerated model is a linear combination of the nonlinear basis functions. Therefore, the linear fitting method is used to identify the model parameters. Based on the fit of VIVF, the performance of identification algorithm is evaluated. The results of Wilcoxon's and Friedman's nonparametric tests show that the identification algorithm is the best.

Keywords: Long-Span Bridge, Vortex Induced Resonance, Parameter Identification, Nonparametric Test

基于模型退化的参数识别法

田小霞

韩山师范学院计算机与信息工程学院, 潮州, 中国

邮箱

txx@hstc.edu.cn

摘要: 涡激共振是一种复杂的耦合现象, 涡激力模型主要刻画共振中涡激力的特征。不合适的参数会使模型无法准确反映涡激力的特征, 故准确地识别模型的参数是当前的一个研究热点。本文提出一种基于模型退化的参数识别方法, 该方法用一个常数项代替涡激力模型中简谐力项, 退化后的涡激力模型是非线性基函数的线性组合, 故采用线性拟合的方法来识别模型参数。本文以竖向涡激力的拟合度为评价识别算法性能的依据, 利用Wilcoxon和Friedman非参数检验方法评价不同识别算法的性能, 检验结果表明基于模型退化的识别算法最优。

关键词: 大跨度桥梁, 涡激共振, 参数识别, 非参数检验

1. 引言

大跨度桥梁具有质量轻、阻尼小和柔性大的特点, 这些特点使得桥梁可能在一定风速下容易产生涡激共振[1]。如东京湾跨海大桥[2]和西堠门大桥[3]均有明显涡激共振

产生。由于漩涡脱落的复杂性, 目前很难构建一个纯理论的解析表达式。一种比较有效的方法是根据风洞试验结果建立半经验涡激力模型。从试验的涡振现象出发, 研究者们提出了很多定性或定量经验模型[4-11], 如Scanlan经验非线性模型[6]就可以定性描述涡激共振的自激自限特性。

对于一个特定的涡激力模型来说，模型参数能否正确识别对其描述结构承受的涡激力有直接关系。目前模型参数识别方法主要分为位移法和涡激力法[12]。由于受风洞试验技术限制，涡激力很难被测量，位移法是应用较多的识别法。位移法中比较著名的成长到共振或者衰减到共振法 (Grow To Resonance/Decay To Resonance, GTR/DTR) [6]。

Scanlan经验非线性模型的参数识别就是采用GTR法，该识别方法假定涡激共振系统是弱非线性，具体做法：首先，忽略Scanlan非线性模型中的简谐力项，将以Scanlan模型简化为非线性自治系统运动微分方程，对缓变函数 $A(s)$ 和 $\psi(s)$ 表达的系统响应 $\eta(s)$ 在求导过程中，去掉高阶项，得到方程组，求解此方程组而得到整个“准线性”自治系统的解析解。其次，对节段模型进行GTR试验，测定稳定状态下涡振响应时振幅 β ，以及在成长阶段测量振幅取对数，用线性拟合求出直线的斜率 α 。最后，将 α 和 β 代入方程组识别参数。但是该识别算法是基于测量结构振动响应， α 和 β 对误差比较敏感，即使很小的误差也会导致参数 $Y_1(K)$ 和 ε 的很大变化[13]。

Marra等[13]采用龙格库塔法来识别Scanlan经验非线性模型中的参数，该方法是一种在工程上应用广泛的高精度单步算法。具体识别过程：首先提供一组初始解，其次利用龙格库塔法来计算结构振动响应，然后计算测量振动响应与计算振动响应的误差，为了使误差达到预期最小值，算法迭代求出模型参数。该方法避免了由于近似求解Scanlan非线性涡激力运动微分方程带来的误差。此算法精度高，需要采取措施对误差进行抑制，所以其算法复杂度高。

Zhu等[9]在测得风洞试验涡激力的基础上提出新模型，并采用Levenberg-Marquart算法 (LMA) 来识别该模型参数。该识别方法是建立在非线性最小二乘法的基础上，通过输入一组初始解，通过反复迭代，使得测量涡激力与重构涡激力的误差达到预期的范围内，从而得到近似解。该模型是建立在测量涡激力的基础上，并且该参数识别也基于测量涡激力的方法，故该模型能描述闭合箱的竖向涡激力。但该识方法属于局部搜索方法，易陷入局部最小解。此外，还需要有先验知识来设置初始解，并且在迭代中需要计算海森矩阵的逆，算法复杂度高。

Weng 等[14]提出采用遗传算法 (GA) 来识别非线性模型的参数，GA可以大范围内进行粗略搜索并得到一个合适的解，但它接近该解附近的精细搜索能力差。Tian 等[15]提出一种基于GA和LMA的合成算法 (GALMA)，该算法具有很好全局和局部的搜索能力，它利用GA得到一个解，再利用LMA在该解附近精细搜索得到最优解。但是GA进行搜索时需要交叉和变异操作，这些操作使得GALMA的算法复杂度高。

本文提出一种基于模型退化的参数识别方法，该方法是建立线性拟合的基础上，通过简单的解方程来识别参数。该方法的优点是简单且有效，易于工程应用。

2. 相关知识

对于线性回归， x 代表特征变量构成的空间集合， z 代表目标值的空间集合[16]。令 θ 是参数向量，回归方程可以如下表示：

$$h(\theta) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \dots + \theta_d x_d \quad (1)$$

其中 x_0 设为1且 $\theta_0 = \theta_0 x_0$ ， $x^{(i)} = (x_0^{(i)}, x_1^{(i)}, \dots, x_d^{(i)})$ 和 $\theta = (\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_d)^T$ 。

$$X = \begin{pmatrix} x_0^{(1)} & x_1^{(1)} & \vdots & x_d^{(1)} \\ x_0^{(2)} & x_1^{(2)} & \vdots & x_d^{(2)} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ x_0^{(n)} & x_1^{(n)} & \vdots & x_d^{(n)} \end{pmatrix}, Z = \begin{pmatrix} z^{(1)} \\ z^{(2)} \\ \vdots \\ z^{(n)} \end{pmatrix}$$

方程(1)可以简化为：

$$z^{(i)} = x^{(i)}\theta + \zeta^{(i)} \quad (2)$$

其中 $\zeta^{(i)}$ 是误差向量，它满足均值为 μ 和方差为 σ^2 。它的正态分布概率密度函数为：

$$p(\zeta^{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\zeta^{(i)})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

根据公式(3)， $z^{(i)}$ 的概率为：

$$p(z^{(i)} | x^{(i)}, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(z^{(i)} - x^{(i)}\theta)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

对给定的向量 x ，似然估计为：

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n p(z^{(i)} | x^{(i)}, \theta) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(z^{(i)} - x^{(i)}\theta)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

对上式取对数得到：

$$\begin{aligned} l(\theta) &= \log L(\theta) \\ &= \ln \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(z^{(i)} - x^{(i)}\theta)^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (z^{(i)} - x^{(i)}\theta)^2 - d \ln \sqrt{2\pi\sigma^2} \end{aligned} \quad (6)$$

公式(6)的最大值就等价于 $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (z^{(i)} - x^{(i)}\theta)^2$ 的最小值。因此，代价函数可以表示为如下形式：

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x^{(i)}\theta - z^{(i)})^2 \quad (7)$$

回归算法的求解目标为：

$$\min_{\theta} J(\theta) \tag{8}$$

对于公式(8),可采用迭代法或者解正规方程来求解参数 θ 。

3. 基于模型退化的参数识别方法

涡激力的负阻尼模型以结构的振动响应为变量描述涡激力与结构运动有关的部分,具有气动负阻尼的结构涡振运动方程:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(\dot{y}, y, t) \tag{9}$$

Zhu等根据风洞试验测得竖向涡激力(Vortex-Induced Vertical Force, VIVF)数据分析并提出了VIVF模型(简称Zhu模型),该模型的表达式如下:

$$F(y, \dot{y}, t) = \frac{1}{2}\rho U^2 D [Y_1(1 - \varepsilon \frac{\dot{y}^2}{U^2}) \frac{\dot{y}}{U} + Y_2 \frac{y}{D} + Y_3 \frac{y \dot{y}}{DU} + C_L \sin(\omega_s t + \psi)] \tag{10}$$

其中 ρ 为空气密度, U 为风速, D 为特征尺寸。 $C_L \sin(\omega_s t + \psi)$ 项的变化范围为 $[-C_L, C_L]$, Ehsan通过试验发现 C_L 很小,并认为该项是可以忽略的。为了计算方便,用一个小常数代替 C_L 项,故Zhu模型的无量纲形式如下:

$$F_{VI} = \theta_0 + \theta_1 m_r \eta(s) + \theta_2 m_r \eta'(s) + \theta_3 \eta(s) \eta'(s) + \theta_4 m_r \eta'^3(s) \tag{11}$$

其中 $\eta = \frac{y}{D}$ 表示无量纲位移, $\eta' = \frac{\dot{y}}{U}$ 表示无量纲速度, $m_r = \frac{\rho D^2}{m}$ 表示质量比,而 $\{\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$ 是需要从风洞实验中识别的参数。其中 $\eta(s)$ 和 $\eta'(s)$ 可被认可为独立变量,令

$$\begin{cases} x_0 = 1 \\ x_1 = m_r \eta(s) \\ x_2 = m_r \eta'(s) \\ x_3 = m_r \eta(s) \eta'(s) \\ x_4 = m_r \eta'^3(s) \end{cases} \tag{12}$$

根据公式(12),公式(11)可以写成如下形式:

$$F_{VI} = \theta_0 x_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \theta_3 x_3 + \theta_4 x_4 \tag{13}$$

因此, F_{VI} 是关于 $\{m_r \eta, m_r \eta', m_r \eta \eta', m_r \eta'^3\}$ 的线性组合。令 $\theta = (\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$, 公式(13) 是参数 θ 的线性组合,

$$X = \begin{pmatrix} 1 & m_r \eta'_1 & m_r \eta_1 & m_r \eta_1 \eta'_1 & m_r \eta_1'^3 \\ 1 & m_r \eta'_2 & m_r \eta_2 & m_r \eta_2 \eta'_2 & m_r \eta_2'^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & m_r \eta'_n & m_r \eta_n & m_r \eta_n \eta'_n & m_r \eta_n'^3 \end{pmatrix}$$

公式(13)的矩阵形式为:

$$F_{VI} = X\theta \tag{14}$$

公式(14)是Zhu模型的简化形式,它的代价函数为:

$$J(\theta) = \|\tilde{F}_{VI} - X\theta\|_2 \tag{15}$$

其中 $\tilde{F}_{VI} = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T$, 其中 \tilde{F}_{VI} 表示测量VIVF。因此,Zhu模型的参数:

$$\theta = \arg \min_{\theta} J(\theta) \tag{16}$$

求解公式(16),可采用解正规方程或者随机梯度下降法。解正规方程的解:

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T \tilde{F}_{VI} \tag{17}$$

4. 仿真结果分析

仿真操作系统: window 10; 软件: Matlab 2016a; 硬件: 华硕笔记本电脑。数据来自风洞试验中节段模型在风速9.1m/s和阻尼比0.5%下的稳态响应,将该数据分为10个不同的测试数据集。

基于模型退化的识别方法在10个测试数据集上运行,识别模型的参数如表1所示, θ_0 是常数项,其在Zhu模型中的作用非常小,可以忽略的。

表1 不同数据集识别的Zhu模型参数。

数据集	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	8.2626E-05	-0.0017	0.0080	0.0631	-0.8205
2	8.8654E-05	-0.0018	0.0079	0.0699	-0.6550
3	1.0715E-04	-0.0016	0.0077	0.0667	-0.7534
4	9.1395E-05	-0.0015	0.0082	0.0668	-0.9322
5	8.3556E-05	-0.0016	0.0082	0.0672	-0.8172
6	9.9026E-05	-0.0016	0.0076	0.0666	-0.6092
7	1.2182E-04	-0.0015	0.0077	0.0661	-0.6494
8	1.1097E-04	-0.0015	0.0087	0.0650	-0.9273
9	9.7981E-05	-0.0017	0.0082	0.0665	-0.7818
10	9.6820E-05	-0.0016	0.0078	0.0686	-0.8145

根据这10组参数分别重构VIVF,并求出VIVF的拟合度(R^2)。图1显示这10组参数对应VIVF的拟合度,从图中可以看出这些 R^2 都在0.9附近,最高0.8983,最低为0.8930。图1从VIVF拟合的角度说明了Zhu模型能够很好地描述VIVF,也验证了识别参数的有效性。

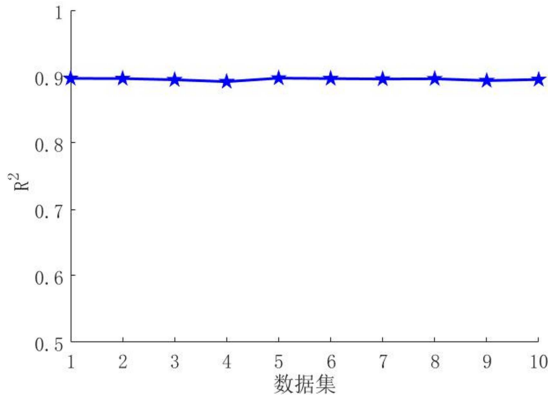


图1 十组参数对应VIVF的拟合度。

将表1中10组参数的平均值作为Zhu模型的参数，通过Zhu模型来重构VIVF。图2显示测量VIVF和重构VIVF的对比图，图2(a)是两种VIVF在时域里的对比，它们具有相似的曲线形态，一个周期里有两个幅值高度差不多的波峰。图2(b)显示两种VIVF在频域里的对比，测量VIVF包括三个频率点： f 、 $2f$ 和 $3f$ ，其中 f 是结构的自然频率之一，这三个频率点幅值不同， f 频率点幅值最高， $3f$ 频率点幅值最低；重构VIVF也包括三个相同频率点，除了 f 频率点幅值与测量VIVF相同，其它频率点都低于测量VIVF。

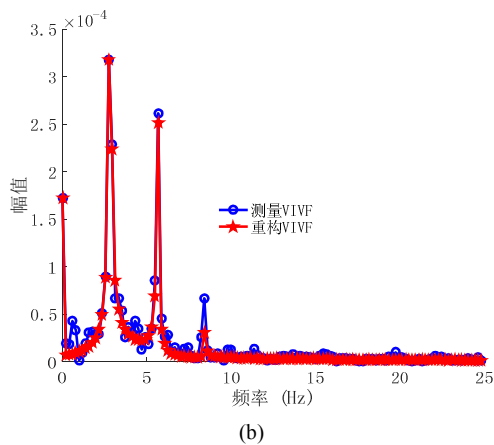
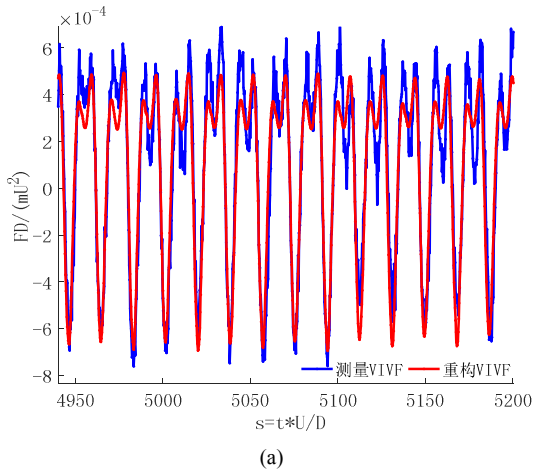


图2 测量VIVF和重构VIVF的对比图 (a) 时域 (b) 频域。

图3从力、位移和速度三者之间的关系分析参数的有效性。图3(a)显示测量VIVF与测量位移和速度的关系，图3(b)显示重构VIVF与位移和速度间的关系，从图中可以看出两条曲线形态一样，参数的有效性得到验证。

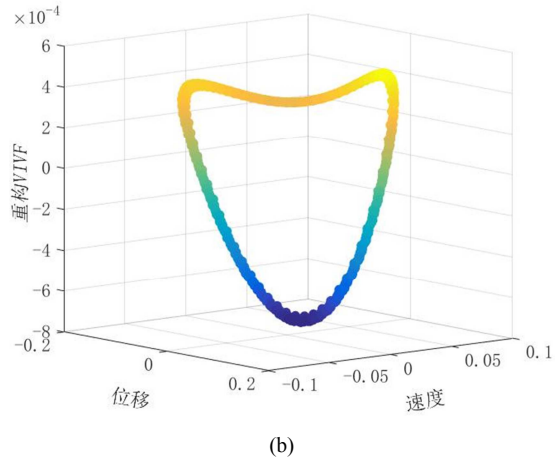
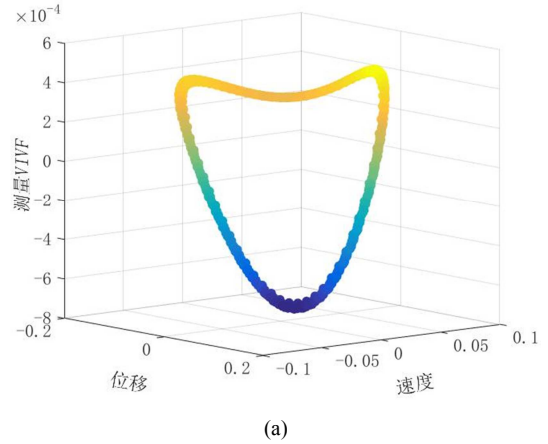
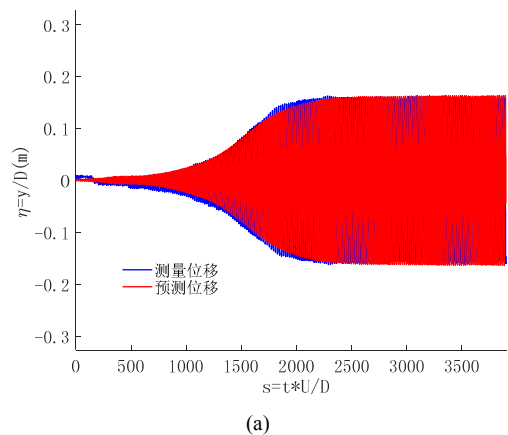


图3 VIVF、位移和速度的关系 (a) 测量VIVF (b) 重构VIVF。

根据重构VIVF，利用Newmark- β 来预测结构的振动响应。图4是测量位移与预测位移对比图，图4(a)是时域上两种位移对比图，从图中可以发现预测位移时程很好地覆盖测量位移时程；图4(b)是两种位移在频域中的对比图，它们都是单一频率信号，频率为2.8142Hz，它们的频率幅值高度相同。



(a)

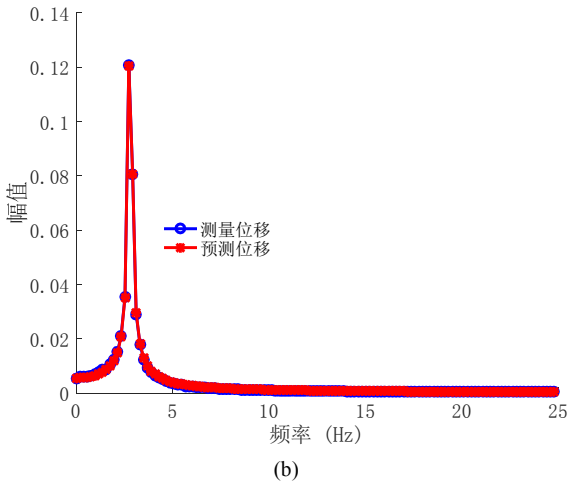


图4 测量位移和重构位移的对比图 (a) 时域 (b) 频域。

5. 不同识别方法间的非参数检验

非参数检验是在总体分布未知或者知道很少的情况下，利用样本数据对总体分布形态进行推断的一类方法[17]。非参数检验被用来评价不同算法的性能，如Wilcoxon符号秩检验和Friedman检验[18]。在本节中VIVF的拟合度作为评价算法性能的依据，GA和GALMA分别运行10次，其中GA的交叉概率为0.8，变异概率为0.08。LMA算法的最大迭代次数为100。GA和GALMA都不设置解空间的上界和下界。

Wilcoxon符号秩检验是通过分析两个配对样本来推断样本总体分布是否存在差异。其原假设H0是：两个配对样本来自两个总体分布无显著差异[17]。本小节以模型退化识别方法为主与其他算法进行配对检验，表2显示Wilcoxon检验结果，R+表示正秩，R-表示负秩，R表示拒绝原假设，显著水平 $\alpha = 0.05$ 。

表2 Wilcoxon检验结果。

算法	R+	R-	$\alpha=0.05$
GA	55	0	R
GALMA	55	0	R

根据表2，基于模型退化的识别方法在显著水平 $\alpha = 0.05$ 与GA和GALMA存在显著差异，拒绝原假设。

多配对样本的Friedman检验是利用秩实现对多个总体分布是否存在显著差异的非参数检验方法，其原假设为：多个配对样本来自多个总体分布无显著差异[17]。GA、GALMA和基于模型退化的识别方法间的Friedman检验结果如表3所示。Friedman统计量为20，渐进显著性为0.00，该值小于显著水平0.05，故拒绝原假设，这三个识别算法的性能存在显著差异。根据表3，基于模型退化识别法的平均秩最大，故该算法最优。

表3 Friedman检验结果。

算法	平均秩
GA	1
GALMA	2
基于模型退化的识别法	3

6. 结论

本文提出一种基于模型退化的参数识别算法，该算法简单易实现，且对VIVF的拟合度，识别参数精度高，使模型更能描述VIVF特征。此外，通过Wilcoxon和Friedman非参数检验，验证了该算法优于GA和GALMA算法。不足之处在于没有识别简谐力项的相位和频率。

致谢

感谢孟晓亮博士提供数据。

参考文献

- [1] 项海帆. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 人民交通出版社, 2005.
- [2] FUJINO Y, YOSHIDA Y. Wind-Induced Vibration and Control of Trans-Tokyo Bay Crossing Bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8): 1012-25.
- [3] LI H, LAIMA S, OU J, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements [J]. Engineering Structures, 2011, 33(6): 1894-907.
- [4] HARTLEN R T, CURRIE I G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1970, 96(5): 577-91.
- [5] SCANLAN R H, No. FHWA-RD-80- 50 [R]. Federal Highway Administration, Washington, DC, 1981.
- [6] EHSAN F, SCANLAN R H. Vortex-Induced Vibrations of Flexible Bridges [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(6): 1392-411.
- [7] LARSEN A. A generalized model for assessment of vortex-induced vibrations of flexible structures [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1995, 57(2): 281-94.
- [8] WU T, KAREEM A. Vortex-Induced Vibration of Bridge Decks: A Volterra Series Based Model [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(12): 1831-43.
- [9] ZHU L D, MENG X L, GUO Z S. Nonlinear mathematical model of vortex-induced vertical force on a flat closed-box bridge deck [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2013, 122(11): 69-82.
- [10] MASHNAD M, JONES N P. A model for vortex-induced vibration analysis of long-span bridges [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 134(96-108).
- [11] MARRA A M, MANNINI C, BARTOLI G. Measurements and improved model of vortex-induced vibration for an elongated rectangular cylinder [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015, 147(358-67).
- [12] 孟晓亮. 大跨度钢箱梁桥竖向涡激共振非线性特性和机理研究[D], 2013.

- [13] MARRA A M, MANNINI C, BARTOLI G. Van der Pol-type equation for modeling vortex-induced oscillations of bridge decks [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(6-7): 776-85.
- [14] WENGA X G Y, CHENA H. A new approach to identifying aeroelastic parameters in nonlinear vortex induced force model [M]. *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*. Shanghai, China. 2012.
- [15] TIAN X, YAN J, ZHOU Q. A novel method of parameter identification based on nonlinear empirical model for vortex-induced vibration [J]. *Journal of Engineering Research*, 2017, Vol. 5, No.(4)(44-58).
- [16] 梅长林,王宁.近代回归分析方法[M].科学出版社,2012。
- [17] 薛薇.SPSS统计分析方法及应用[M].电子工业出版社, 2013。
- [18] GARC A S, MOLINA D, LOZANO M, et al. A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 Special Session on Real Parameter Optimization [J]. *Journal of Heuristics*, 2009, 15(6): 617.