

桥梁节段模型颤振导数识别的 MITD 时域优化

杨转运^{1,2}, 张亮亮¹, 刘 会², 张金梅²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘要:基于 R. H. Scanlan 提出的自由振动法求解桥梁颤振导数实验量很大,且在提取交叉导数的过程中,一方面要求模型的竖向运动和扭转运动在所有的风速下都具有相同的频率比和阻尼比是很难达到的,另一方面非耦合导数的识别误差将带到耦合导数中。基于 Modified Ibrahim Time-domain Method(MITD)时域的改进方法,应用变尺度优化算法进行提取桥梁断面的全部颤振导数。研究表明,应用此方法具有解决非线性参数辨识问题的可行性。

关键词:MITD 时域分析,颤振导数识别,优化

中图分类号:U 448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)02-0078-04

Optimization of Extracting Fremitus Derivative Based on Modified Ibrahim Time-Domain Method

YANG Zhuan-yun^{1,2}, ZHANG Liang-liang¹, LIU Hui², ZHANG Jin-mei²

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

2. Sichuan College of Architecture Technology, Deyang 618000, Sichuan, P. R. China)

Abstract: The experimental task was very large for solving fremitus derivative of bridge by free vibration method proposed by R. H. Scanlan. And in the process of extracting cross derivative, it was difficult that the frequency ratio and damping ratio under vertical motion and torsional motion were kept the same in all wind speed. Besides, the discriminating error of uncoupled derivative would be coupled in derivative. Considering these, an improved method based on Modified Ibrahim Time-domain Method was proposed. With the application, it was found that this method was better than least square method.

Key words: MITD method, fremitus derivative, optimization

颤振导数对于大跨度桥梁的颤振预测以及气动稳定性分析等都具有重要意义。目前,利用节段模型的自由振动法来获取桥梁颤振导数是工程界普遍使用的方法,自由振动法于 20 世纪 60 年代末由 R. H. Scanlan 为代表的学者提出并建立起来的,即先测出模型纯竖向和纯扭转状态下的直接导数,后通过耦合振动试验测定交叉导数。R. H. Scanlan 在 2000-2001 年又提出二维低速风下桥梁节段模型考虑模态自激力和气动力函数分析方法^[1-2],在随着对系统辨识的理论和方法研究的深入,其他学者开始

运用系统识别的方法识别颤振导数,如 Borri C. 提出基于有限元法时程模拟分析桥梁气动力^[3], Limited Information Maximum Likelihood Method, Modified Ibrahim Time-domain Method 等。总体说来 Modified Ibrahim Time-domain Method 是在 Ibrahim Time-domain Method 基础上改良的,可以通过模型振动试验一次性识别多个颤振导数,这种方法减少了试验的数量,提高了抗噪的能力,但是识别结果识别精度有待进一步提高。Tubino F. 和 Gu M. 研究了大跨度桥梁颤振导数、气动导纳和相

收稿日期:2009-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助(50778185);重庆市大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-09105)

作者简介:杨转运(1979-),男,博士生,主要从事桥梁结构抗风研究,(E-mail)zhuanyun@gmail.com。

张亮亮(联系人),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁结构抖振研究,(E-mail)zll500510@126.com。

关性函数等问题,就如何识别颤振导数采用时程分析方法开展了研究^[4-6].自由振动法的试验装置同时还可以进行颤振、抖振以及涡激振动等方面的试验研究^[7-9].该文给出的是基于 Modified Ibrahim Time-domain Method 的时域改进方法,通过对响应应用优化方法进行时域拟合,从而解析构造出系统特征矩阵,一次全部提取出桥梁断面的颤振导数。

1 数学模型

二维流场中的桥梁节段模型,其升力和力矩可表示为:

$$L = \frac{1}{2}\rho U^2 2B \left(KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right)$$

$$M = \frac{1}{2}\rho U^2 2B^2 \left(KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right) \quad (1)$$

式中 L 、 M 分别为升力和力矩; H_i^* 和 A_i^* ($i = 1, 2, 3, 4$) 为颤振导数; h 为竖向位移; α 为扭转角位移; U 为平均风速; B 为模型宽; ρ 是空气密度; $K = \omega B/U$ 为折算频率; ω 为振动角频率。

而具有弯扭二自由度系统在自激力作用下的运动微分方程可写为:

$$m(\ddot{h} + 2\zeta_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h) = L$$

$$I(\ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha) = M \quad (2)$$

式中, m 为单位长质量; I 为单位长转动惯量; ω_j 、 ζ_j ($j = h, \alpha$) 分别为系统的固有频率和阻尼比。

把方程(2)代入方程(1),整理后可得:

$$\ddot{h} + 2\zeta_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h = H_1 \dot{h} + H_2 \dot{\alpha} + H_3 \alpha + H_4 h$$

$$\ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha = A_1 \dot{h} + A_2 \dot{\alpha} + A_3 \alpha + A_4 h \quad (3)$$

式中, H_i 和 A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为非定常气动力系数,无量纲即为气动导数,如下^[10-12]:

$$H_1^*(K) = \frac{2m}{\rho B^2 \omega} H_1, A_1^*(K) = \frac{2I}{\rho B^3 \omega} A_1,$$

$$H_2^*(K) = \frac{2m}{\rho B^3 \omega} H_2, A_2^*(K) = \frac{2I}{\rho B^4 \omega} A_2,$$

$$H_3^*(K) = \frac{2m}{\rho B^3 \omega^2} H_3, A_3^*(K) = \frac{2I}{\rho B^4 \omega^2} A_3,$$

$$H_4^*(K) = \frac{2m}{\rho B^2 \omega^2} H_4, A_4^*(K) = \frac{2I}{\rho B^3 \omega^2} A_4 \quad (4)$$

将(3)式写成矩阵形式:

$$\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (5)$$

式中, $x(t) = [h(t), \alpha(t)]^T$;

$$C = \begin{bmatrix} 2\zeta_h & -H_1 & & -H_2 \\ & -A_1 & & 2\zeta_\alpha \omega_\alpha - A_2 \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} \omega_h^2 - H_4 & & -H_3 \\ & -A_4 & & \omega_\alpha^2 - A_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

令状态向量 $Y = [x, \dot{x}]^T$, 则系统状态方程为:

$$\dot{Y} = AY \quad (7)$$

式中,系数矩阵 $A = \begin{bmatrix} 0 & E \\ -K & -C \end{bmatrix}$ 为特征矩阵,其中 E 为单位阵。显然,特征矩阵 A 包含了系统全部信息,如果能获得矩阵 A ,即可从(6)式中确定出全部颤振导数。由方程(7)得:

$$A = \dot{Y} \cdot Y^{-1} \quad (8)$$

上式表明,若能获得在若干时间点上的自由振动位移、速度和加速度大小,即可解出特征矩阵 A 。 A 是一个 4 阶矩阵,一般计算时取一时间段,然后求出矩阵 A 的最小二乘解。如果 Y 包含了系统全部的模态信息,那么 Y 的秩必为 4,即最小二乘解是存在的^[9,13]。

2 参数识辨

根据复模态理论,对于二自由度系统,其自由振动相应位移时间历程函数 $h(t)$ 、 $\alpha(t)$ 具有如下形式^[10]:

$$h(t) = \sum_{r=1}^2 e^{\lambda_{rh} t} [A_{rh} \cos(\omega_{rh} t) + B_{rh} \sin(\omega_{rh} t)] \quad (9)$$

$$\alpha(t) = \sum_{r=1}^2 e^{\lambda_{ra} t} [A_{ra} \cos(\omega_{ra} t) + B_{ra} \sin(\omega_{ra} t)] \quad (10)$$

其中, λ_{rp} 、 ω_{rp} 、 A_{rp} 、 B_{rp} ($p = h, \alpha$) 为待定参数。

用节段模型的自由衰减振动来识别颤振导数,要先给模型一个激励,让其作弯扭二自由度的衰减振动,并记录其衰减振动时间历程,然后通过记录的振动历程数据来拟合方程(9)和(10),实际就是辨识系统模态参数 λ_{rp} 、 ω_{rp} 、 A_{rp} 、 B_{rp} 。方程(9)和(10)既包含了线性参数也包含了非线性参数,在拟合过程中要把线性参数和非线性参数分离即分别计算^[14-15]。

记 $\Phi_{rp} = e^{\lambda_{rp} t} \cos(\omega_{rp} t)$ 、 $\Psi_{rp} = e^{\lambda_{rp} t} \sin(\omega_{rp} t)$ ($r = 1, 2; p = h, \alpha$)。令 $G_p = [\Phi_{1p}, \Psi_{1p}, \Phi_{2p}, \Psi_{2p}]$; $\Lambda_p = [A_{1p}, B_{1p}, A_{2p}, B_{2p}]^T$, 其中 T 表示转置, $p = h, \alpha$ 。把方程(9)、(10)合并写成如下形式:

$$x(t) = [h, \alpha]^T = \begin{bmatrix} G_h & 0 \\ 0 & G_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Lambda_h \\ \Lambda_\alpha \end{bmatrix} = G \cdot \Lambda \quad (11)$$

当给定初值 $\lambda_{rp}^{(0)}$ 、 $\omega_{rp}^{(0)}$ 可计算出 $G^{(0)}$, 假设试验记录的数据为 y , 于是按最小二乘准则可得 Λ 的估算值 $\hat{\Lambda}^{(0)}$, 即

$$\hat{\Lambda}^{(0)} = G^{+(0)} \cdot y \quad (12)$$

其中, $G^{(0)}$ 表示 $G^{(0)}$ 的广义逆。

定义总体残差目标函数:

$$J = \epsilon^T \cdot \epsilon \quad (13)$$

其中, $\epsilon = G^{(0)} \cdot \hat{\Lambda}^{(0)} - y$ 表示估算的误差。

如果不考虑干扰误差等因素,那么非线性参数 $\lambda_{rp}, \omega_{rp}$ 的解必然满足方程(13)使 $J = 0$,但是因为误差的存在,实际上不可能找到一组解使 $J = 0$ ^[16]。但是对于最接近真实解的 $\lambda_{rp}^*, \omega_{rp}^*$ 应使方程(13)取得最小值,即:

$$J(\lambda_{rp}^*, \omega_{rp}^*) = \min(J) \quad (14)$$

这就是对残差目标函数求无约束最优化的问题。无约束最优化问题求解的方法目前有多种,该文使用变尺度法(拟牛顿法)和直接搜索的单纯形法^[11],结果表明都非常有效。变尺度法的计算速度要比直接搜索法快得多,而且对初值的依赖性更小,即实现更大范围的收敛。但变尺度法每一步要计算目标函数的梯度即下降方向 ∇J ,令:

$$g = -\nabla J = -2 \cdot \nabla \epsilon \cdot \epsilon \quad (15)$$

不妨设第 $(k+1)$ 步的迭代公式是:

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} + \mu^{(k)} g^{(k)} H^{(k)} \quad (16)$$

其中, $g^{(k)} = g(\lambda_{rp}^{(k)}, \omega_{rp}^{(k)})$; 如令: $S^{(k)} = W^{(k+1)} - W^{(k)}$; $Q^{(k)} = g^{(k+1)} - g^{(k)}$,则按 DFP 格式进行迭带有:

$$H^{(k+1)} = H^{(k)} + \frac{S^{(k)} (S^{(k)})^T}{(S^{(k)})^T Q^{(k)}} - \frac{H^{(k)} S^{(k)} (S^{(k)})^T (H^{(k)})^T}{(Q^{(k)})^T H^{(k)} Q^{(k)}}; H^{(0)} = E \quad (17)$$

$\mu^{(k)}$ 是通过一维搜索得到, $\mu^{(k)} (\geq 0)$ 的取值应使第 k 步下降的步长为最大。

通过以上步骤计算得到第 $(k+1)$ 步的非线性参数最优解以后,再代到方程(12)得到线性参数的近似解以及残差目标函数,重复以上过程直到达到所求的精度。

3 实例

图 1 为某大跨度桥梁主梁节段模型的自由振动法测量颤振导数风洞试验照片,试验主梁模型参数见表 1。试验在中国空气动力中心低速所 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ 风洞中进行了自由振动法提取气动导数风洞进行,气动导数识别采用该文的 MITD 时域的改进方法。由于自由振动法在风速较高时模型振动衰减很快,因此本次试验风速取为 $U = 3 \sim 10 \text{ m/s}$, $\Delta U = 1 \text{ m/s}$,共 8 个风速。试验的动态悬挂装置置于风洞之外,从而避免了装置对流场的干扰,也较好的实现了模型的二维流场。

表 1 颤振试验模型设计参数

参数	相似比	实桥值	模型要求值	模型实现值
长度/m	1:70	98	1.2	1.2
宽度/m	1:70	38	0.543	0.543
高度/m	1:70	4.5	0.064	0.064
单位长度质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	1:70 ²	12 546	2.56	2.56
单位长度质量惯矩/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	1:70 ⁴	5.7×10^6	0.237	0.237
扭弯频率比	1	2.67	2.67	2.67



图 1 某主梁节段试验照片

图 2 为 $U = 5 \text{ m/s}$ 时迎风 $\alpha = -3^\circ$ 工况下测得的试验数据拟合情况,可以看出拟合结果基本上再现了自由衰减振动的的时间历程,因此它应包含了系统模态的全部信息。

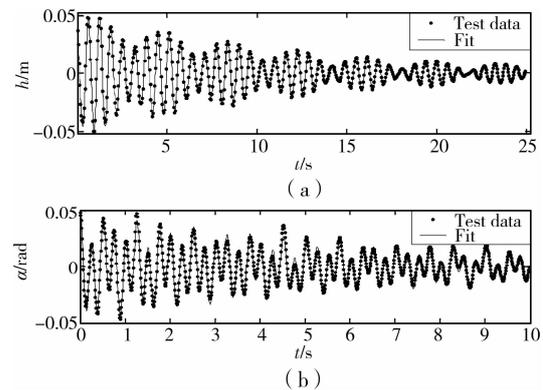


图 2 $U = 5 \text{ m/s}$ 时迎风 $\alpha = -3^\circ$ 工况的拟合效果

图 3 为 $U = 5 \text{ m/s}$ 时迎风 $\alpha = -3^\circ$ 工况下测得的颤振导数,在试验中得到了各风速下自由衰减振动信号,直接进行气动导数识别,图 3 给出了识别结果。由图可见,随着折算风速增加,识别的各气动导数与数值分析结果具有明显的一致性规律,除耦合颤振导数 A_1^* 外误差均不大,而识别的 A_1^* 在数值模拟结果上下波动,因此拟合后应较为接近真实,绝大多数结果离散性小,因此识别结果较为可信。可见 MITD 时域的改进方法取得了较好识别效果。

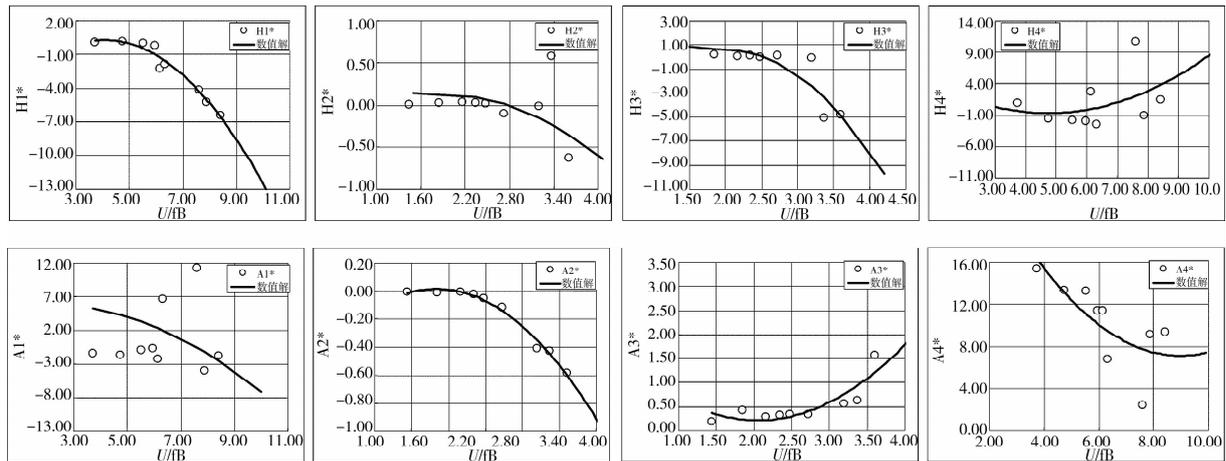


图3 模型颤振导数

4 结语

该文给出的是基于 Modified Ibrahim Time-domain Method 的时域改进方法提取桥梁断面的颤振导数,通过对响应应用优化方法进行时域拟合,从而解析构造出系统特征矩阵。该方法可一次全部提取出桥梁断面的颤振导数,在自由响应参数识别过程中,应用了变尺度优化算法,具有识别速度快,有较高的识别精度,且实现更大范围的收敛,可进行在线分析等优点。

参考文献:

- [1] SCANLAN R H. Reexamination of sectional aerodynamic force functions for bridges[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2001,89: 1257-1266.
- [2] SCANLAN R H. Motion related body-force functions in two-dimensional low-speed flow[J]. J. Fluids Struct. , 2000,14:49-63.
- [3] BORRI C, Salvatori L, Zahlten W. Finite-element time-domain simulations of bridge aeroelasticity: implementation and profiling[M]. Computat. Fluid Solid Mech. 2005. 1, 103-107.
- [4] TUBINO F. Relationships among aerodynamic admittance functions, flutter derivatives and static coefficients for long-span bridges[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. , 2005,93:929-950.
- [5] CARLOTTA C, CLAUDIO B, OLIVIER F. Time-domain buffeting simulations for wind-bridge interaction [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. , 2007,95:991-1006.
- [6] GU M, ZHANG R, XIANG H. 2000. Identification of flutter derivatives of bridge[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. , 2000,88:151-162.
- [7] PETER A Irwin. Buff body aerodynamic in wind engineering [J]. J. Wind Eng. Aerodyn. 2007,95: 1-12.
- [8] JIN CHENG, C S CAI, RU-CHENG XIAO, etc. Flutter reliability analysis of suspension bridges [J]. J. Wind Eng. Aerodyn. , 2005, 93: 757-775.
- [9] 李永乐,廖海黎,强士中. 桥梁断面颤振导数识别的加权整体最小二乘法[J]. 土木工程学报,2004,37(3): 80-84.
- [10] 陈政清,胡建华. 桥梁颤振导数识别的时域法与频域法对比研究[J]. 工程力学,2005,22(6):127-133.
- [11] CHENG Z Q, HU J H. A comparative study between time-domain method and frequency-domain method for identification of bridge flutter derivatives[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(6):127-133.
- [12] CHOWDHURY A G, SARKAR P P. Identification of eighteen flutterderivatives [J]. Wind and Structures, 2004,7(3):187-202.
- [13] SARKAR P P, CHOWDHURY A G, Gradner T B. A novel elastic suspension system for wind tunnel section model studies[J]. J. Wind Eng. Aerodyn. , 2004,92: 23-40.
- [14] MATSUMOTO M. On the flutter characteristics of separated two box girders [J]. Wind and Structures, 2004,7(4):281-291.
- [15] 秦灿荣,顾明. 紊流风场中桥梁气动导数识别的随机方法[J]. 土木工程学报,2005,38(4):73-77.
- [16] QIN X R, GU M. Stochastic system method for identification of aerodynamic derivatives of bridge decks in turbulent flow [J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(4):73-77.
- [17] 祝志文,顾明. 基于自由振动响应识别颤振导数的特征系统实现算法[J]. 振动与冲击,2006,25(5):28-31.
- [18] ZHU Z W, GU M. Identification of flutter derivatives by using eigensystem realization algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(5):28-31.
- [19] 陈政清,于向东. 大跨桥梁颤振自激力的强迫振动法研究[J]. 土木工程学报,2002,35(5):34-41.
- [20] CHEN Z Q, YU X D. A new method for measuring flutter self-excited forces of long-span bridges[J]. China Civil Engineering Journal,2002,35(5):34-41.

(编辑 胡玲)