

考虑温度影响的桥梁结构损伤识别*

张春丽¹, 吕中荣²

(1. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072;
2. 中山大学力学系, 广东 广州 510275)

摘要: 在利用测量数据进行结构损伤识别中往往会遇到环境温度改变的问题。温度的改变(即温度差)的影响在利用模型修正进行损伤识别时一般被忽略了而带来一定的损伤识别误差。该文试图基于响应灵敏度分析,同时识别结构损伤和温度差。推导了动态响应对损伤参数和温度差的时域灵敏度,得到模型修正时的灵敏度矩阵;利用加速度响应数据进行模型修正进行损伤和温度差的识别。通过对一平面桁架桥梁结构进行数值模拟计算验证了方法的有效性。

关键词: 损伤识别; 响应灵敏度; 模型修正; 温度差

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)03-0102-04

Structural damage identification including the temperature difference based on response sensitivity analysis

ZHANG Chunli¹, LÜ Zhongrong²

(1. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China;

2. Department of Applied Mechanics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Damage detection based on a reference set of measured data usually has the problem of different environmental temperature in the two sets of measurements, and the effect of temperature difference is usually ignored in the subsequent model updating. It attempts to identify the structural damage including the temperature difference both local damages, and the temperature difference are identified in a gradient-based model updating method based on dynamic response sensitivity. The measured dynamic responses of the structure from two different states are used directly to identify the structural local damages and the temperature difference. A planar truss structure are studied to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: structural damage identification; response sensitivity; model updating; temperature difference

桥梁结构损伤识别是近年来土木工程领域的研究热点。由于基于振动的结构损伤识别法具有非破坏性、方便、快速和廉价的优点,该方法具有广阔的工程应用前景。一般地讲,由于局部损伤的产生,在该区域的结构刚度和承载能力将会有所下

降,而结构的质量特性一般不会受到影响,结构的模态参数(模态频率、振型、阻尼等)也将随之而改变。通过研究结构的振动特性来识别结构是否发生损伤,并确定损伤的位置和程度。

目前,基于振动的结构损伤常用的频域方法主

* 收稿日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172333, 11272361); 广东省自然科学基金资助项目(2015A030313126); 广东省科技计划资助项目(2014A020218004); 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1404104)

作者简介: 张春丽(1980年生),女;研究方向:结构工程;通讯作者:吕中荣;E-mail:lvzhr@mail.sysu.edu.cn

要有：基于模态频率和振型方法^[1-2]，基于柔度的方法^[3]，基于曲率的方法^[4]，基于应变模态的方法^[5]，基于模态应变能的方法^[6]，基于结构有限元模型修正的方法。在时域内，Cattarius 和 Inman^[7]研究了一种利用时域上的振动响应数据来识别智能结构上存在的损伤的方法。Lu 和 Law^[8]提出了一种基于响应灵敏度的损伤识别方法。随着数学和计算机的发展，为结构损伤识别提供了一些新方法，如基于神经网络的识别方法^[9-10]，基于模糊逻辑和遗传算法的识别方法^[11]，以及基于小波变换的方法等^[12]。

在实际损伤识别中，不同阶段的测量往往会遇到温度差的问题。温度差往往也会导致结构的模态参数和振动响应发生变化。忽略温度差的影响可能导致损伤识别出现误差。本文旨在基于响应灵敏度分析，提出一种同时识别结构损伤和构件温度差的方法，利用基于时域响应灵敏度的模型修正方法实现两者的识别。通过研究一平面桁架结构验证所提出方法的正确性和有效性。

1 振动响应对刚度参数和温度差的时域响应灵敏度分析

1.1 系统的动态响应

对一具有 n 个单元的线性时不变系统，其有限元运动方程表示为

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{F\} \quad (1)$$

其中 $[M]$ ， $[C]$ 和 $[K]$ 分别为系统质量、阻尼和刚度矩阵。阻尼矩阵在工程中一般采用瑞利阻尼模型： $[C] = a_1[M] + a_2[K]$ ，其中 a_1 、 a_2 为两常数， $\{\ddot{d}\}$ 、 $\{\dot{d}\}$ 、 $\{d\}$ 分别为系统的加速度、速度和位移响应， $\{F\}$ 为节点力向量。系统的动态响应可利用 Newmark 直接积分法求得。

1.2 响应对刚度参数的灵敏度

式 (1) 两边对刚度参数求偏微分运算得：

$$[M]\left\{\frac{\partial \ddot{d}}{\partial \alpha_i}\right\} + [C]\left\{\frac{\partial \dot{d}}{\partial \alpha_i}\right\} + [K]\left\{\frac{\partial d}{\partial \alpha_i}\right\} = -a_2 \frac{\partial [K]}{\partial \alpha_i}\{\dot{d}\} - \frac{\partial [K]}{\partial \alpha_i}\{d\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

动态响应对刚度参数的灵敏度，即 $\left\{\frac{\partial d}{\partial \alpha_i}\right\}$ ， $\left\{\frac{\partial \dot{d}}{\partial \alpha_i}\right\}$ ， $\left\{\frac{\partial \ddot{d}}{\partial \alpha_i}\right\}$ 可类似地由 Newmark 直接积分法求得，其中下标 i 表示第 i 个刚度参数。

1.3 响应对温度差的灵敏度

式 (1) 两边对温度差求偏微分运算得：

$$[M]\left\{\frac{\partial \ddot{d}}{\partial \Delta T_i}\right\} + [C]\left\{\frac{\partial \dot{d}}{\partial \Delta T_i}\right\} + [K]\left\{\frac{\partial d}{\partial \Delta T_i}\right\} = -a_2 \frac{\partial [K]}{\partial \Delta T_i}\{\dot{d}\} - a_1 \frac{\partial [M]}{\partial \Delta T_i}\{\dot{d}\} - \frac{\partial [K]}{\partial \Delta T_i}\{d\} - \frac{\partial [M]}{\partial \Delta T_i}\{\ddot{d}\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

假定温度差 ΔT 只影响系统的刚度而不影响质量矩阵，等式 (3) 右手边的第二和第四项将不出现，等式 (3) 可写为

$$[M]\left\{\frac{\partial \ddot{d}}{\partial \Delta T_i}\right\} + [C]\left\{\frac{\partial \dot{d}}{\partial \Delta T_i}\right\} + [K]\left\{\frac{\partial d}{\partial \Delta T_i}\right\} = -a_2 \frac{\partial [K]}{\partial \Delta T_i}\{\dot{d}\} - \frac{\partial [K]}{\partial \Delta T_i}\{d\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

动态响应对温度差参数的灵敏度可由 Newmark 直接积分法从式 (4) 中求得。

2 损伤和温度差的同时识别

在反问题中，采用一种基于灵敏度的动态响应有限元模型修正法 [8] 来识别系统的损伤参数和温度差。模型修正的目标函数就是使测量和计算的结构动力响应的残差最小：

$$\min g(\alpha, \Delta T) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{nt} (\hat{R}_{ij} - R_{ij})^T W (\hat{R}_{ij} - R_{ij}) \quad (5)$$

其中， l 是测点的数量， nt 是时间采样点数。 α 是未知的损伤参数 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T$ 的向量形式， ΔT 为未知的温度差向量 $(\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n)^T$ 。 α 、 ΔT 为待识别的未知量。在本文中，单元杨氏模量 E_i 是选取的损伤参数， R 是计算的响应值， \hat{R} 是测量值， W 是权矩阵。

利用罚函数法，识别方程可写为：

$$S^j \Delta P^j = \Delta \ddot{d}^j \quad (6)$$

其中

$$\Delta \ddot{d}^j = \hat{\ddot{d}}^j - \ddot{d}_{cal}^j \quad (7)$$

$\Delta \ddot{d}^j$ 是第 j 次迭代时模拟测量响应和计算响应的差值。 S^j 为第 j 次迭代时灵敏度矩阵，向量 ΔP^j 包含第 j 次迭代时识别的刚度参数和温度差。

和许多反问题一样式 (6) 是病态的，为得到有界解，利用阻尼最小二乘法来求解式 (6)^[13]：

$$\Delta P^j = (S^{jT} S^j + \lambda I)^{-1} S^{jT} \Delta \ddot{d}^j \quad (8)$$

其中 λ 为非负的正则化系数。L-curve 法用来获得

最优的正则化系数 λ [14]。

3 数值算例

图 1 所示本论文研究的平面桁架桥结构, 其几何尺寸如图所示。材料常数为密度 $\rho = 7\ 860\ \text{kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 200\ \text{GPa}$ 。其有限元模型由 19 个平面桁架单元组成。假定一正弦外激励 $F = -10\ 000 \sin 20\pi t\ \text{N}$ 沿 y 轴负方向作用在第 8 个节点上。位于第 4 和第 10 个节点的两个加速度计分别记录两个位置的 y 方向和 x 方向的加速度响应用于反问题识别。采样频率为 1 000 Hz, 测量持续时间为 3 s。表 1 为研究的 2 种损伤识别工况。在识别时, 温度差的初始值设为 0。

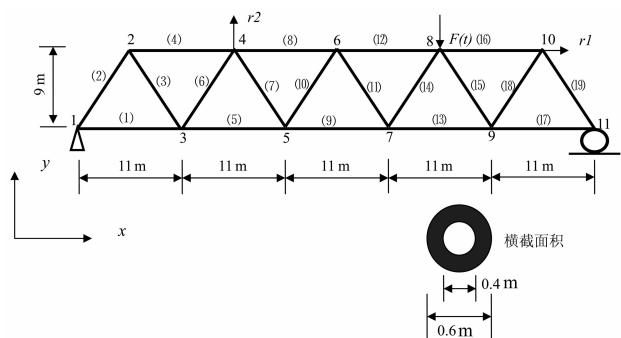


图 1 平面桁架结构

Fig. 1 The planar truss structure

表 1 损伤工况

Table 1 Damage scenarios on the planar truss

工况	损伤位置	EA 减损量	温度差 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	噪声水平
1	5 号单元	10%	+40	无
2	2 号, 5 号 和 19 号单元	均为 5%	+40	10%

工况 1 研究单一局部损伤和温度差的识别。假定所有桁架的杆件在两次测量时的温度差均为 $+40\ ^\circ\text{C}$ 。图 2 所示为识别的各桁架杆件的轴向刚度的相对减损量。可以看出第 5 根杆件减损 5% 被准确地识别出来了。而识别出来的每根杆的温度差都收敛为 $+40\ ^\circ\text{C}$ 。

工况 2 研究噪声影响下多损伤和温度差的识别。局部损伤发生在第 2, 5, 19 号单元, 刚度分别减损, 各杆的温度差同样设为 $+40\ ^\circ\text{C}$ 。考虑 10% 噪声水平的影响。图 3、图 4 分别为损伤识别和温度差识别的结果。损伤识别最大的误差为 5 号单元的 1.3%, 温度差识别的最大误差为 10 号单

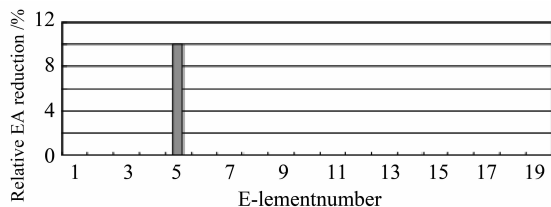


图 2 单损伤识别结果

Fig. 2 Identification of single local damage

元的 3.2%。由此可见即使在 10% 的噪声影响下, 识别的结果仍具有较好的精度。进一步表明本文方法的有效性。

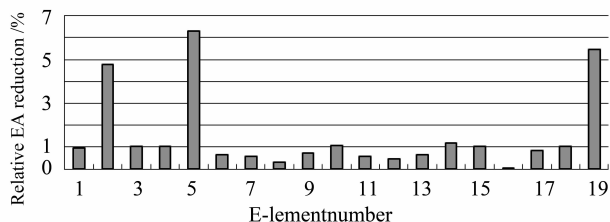


图 3 多损伤识别结果 (10% 噪声)

Fig. 3 Multiple damage detection with 10% noise level

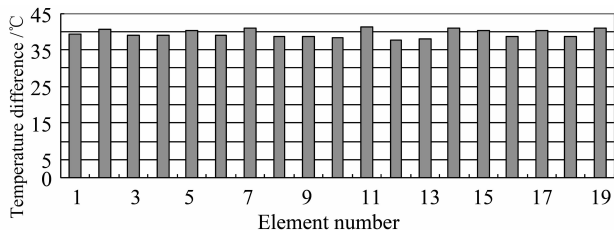


图 4 构件的温度差识别结果

Fig. 4 Identification of temperature difference in each member

4 结论

本文推导了结构振动响应对损伤参数和温度差的灵敏度, 在此基础上提出了一种基于时域响应灵敏度分析进行桥梁结构损伤和温度差同时识别的方法。数值模拟的结果表明本文方法仅利用少量数目的加速度响应测量就能成功识别结构局部损伤和构件的温度差, 并且具有对模拟测量噪声不敏感的特点。表明本文方法具有一定的实用潜力。

参考文献:

[1] CAWLEY P, ADAMS R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies[J]. Journal of Strain Analysis, 1979, 14(2): 49-57.

- [2] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Damage localization by directly using incomplete mode shapes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 656 – 660.
- [3] PANDY A K, BISWAS M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3 – 17.
- [4] WAHAB M M A, ROECK G D. Damage detection in bridges using modal curvatures; application to real damage scenario[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(2): 217 – 235.
- [5] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Structural Damage Localization from Modal Strain Energy Change[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 218(5): 825 – 844.
- [6] LIU X, LIEVEN N A J, ESCAMILLA-AMBROSIO P J. Frequency response function shape-based methods for structural damage localization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1243 – 1259.
- [7] CATTARIUS J, INMAN D J. Time domain analysis for damage detection in smart structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11(3): 409 – 423.
- [8] LU Z R, LAW S S. Features of dynamic response sensitivity and its application in damage detection[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1/2): 305 – 329.
- [9] MANNING R A. Structural damage detection using active members and neural networks[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1994, 33: 1331 – 1333.
- [10] 孙宗光, 高赞明, 倪一清. 基于神经网络的桥梁损伤位置识别 [J]. 工程力学, 2004, 21(1): 43 – 47.
- [11] 冯柯, 崔永固, 李静, 等. 基于模糊逻辑和遗传算法的工程机械故障诊断[J]. 解放军理工学院学报(自然科学版), 2005, 8(4): 385 – 389.
- [12] LAW S S, LI X Y, LU Z R. Structural damage detection from wavelet coefficient sensitivity with model errors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(10): 1077 – 1087.
- [13] TIKHONOV A M. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization [J]. Soviet Mathematics, 1963, 4: 1035 – 1038.
- [14] HANSEN P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve [J]. SIAM Review, 1992, 34(4): 561 – 580.

(上接第 101 页)

- [12] 张宏彬, 陈立群, 刘荣万, 等. 广义 Hojman 定理[J]. 物理学报, 2005, 54(6): 2489 – 2493.
- [13] 梅凤翔. 约束力学系统的对称性与守恒量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [14] JIA L Q, CUI J C, LUO S K, et al. Special Lie symmetry and Hojman conserved quantity of Appell equations for a holonomic system [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(3): 030303.
- [15] ZHANG M L, SUN X T, WANG X X, et al. Lie symmetry and the generalized Hojman conserved quantity of Nielsen equations for a variable mass holonomic system of relative motion [J]. Chinese Physics B, 2011, 20(11): 110202.
- [16] RIEWE F. Nonconservative Lagrangian and Hamiltonian mechanics [J]. Physical Review E, 1996, 53(2): 1890 – 1899.
- [17] EL – NABULSI A R. A fractional approach to nonconservative Lagrangian dynamical systems [J]. Fizika A, 2005, 14(4): 289 – 298.
- [18] 张毅. 相空间中类分数阶变分问题的 Noether 对称性与守恒量[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(4): 45 – 50.
- [19] SONG C J, ZHANG Y. Conserved quantities and adiabatic invariants for El – Nabulsi’s fractional Birkhoff system [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2015, 54(8): 1 – 13.
- [20] 丁金凤, 张毅. 基于按指数律拓展的分数阶积分的 El – Nabulsi – Pfaff 变分问题的 Noether 对称性[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(6): 150 – 154.