

基于运行模态的复合材料梁脱层损伤识别

杜宇^{1,2} 杨涛^{1,2} 何梅洪²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

文 摘 为了实现复合材料结构损伤的定位与定量识别,利用传递率函数的运行模态分析方法探讨了复合材料梁无损检测方法,通过对加速度传递函数的最小二乘拟合,得到结构的模态频率和阻尼,对传递率函数矩阵奇异值分解,得到结构的振型。运用曲率模态(CMS)和曲率模态变化率(CMSI)作为损伤指标,对具有单损伤、多损伤和不同损伤程度的复合材料梁结构进行模态分析,并对两种损伤指标的识别敏感性进行对比。实验结果表明:CMS和CMSI在损伤位置发生突变,通过突变可以识别出损伤的位置和大小,并且能够对结构中的多损伤进行识别;CMS和CMSI的突变极差值随着损伤程度的增加而增大,说明CMS和CMSI具有定量识别损伤程度的能力;与CMS相比,CMSI对复合材料梁结构损伤识别更为敏感。

关键词 复合材料梁,运行模态,曲率模态,曲率模态变化率,损伤识别

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.02.014

Delaminate Damage Identification of Composite Beam Based on Operational Modal

DU Yu^{1,2} YANG Tao^{1,2} HE Meihong²

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

Abstract In order to locate and quantitatively identify the composite material structural damages, the non-destructive testing method of composite beams was investigated using the operation mode analysis method of the transmissibility functions. Through the least-squares fitting of the acceleration transfer function, the frequency and damping were obtained. By decomposing the singular value of the transfer rate function matrix, the mode shape of the structure can be obtained. Taking the curvature mode shape (CMS) and the curvature mode shape change rate (CMSI) as damage indexes, modal analysis of composite beam structures with single damage, multiple damages, and different damage degrees were performed. The identification sensitivity of two damage indexes was compared. The experimental results show that CMS and CMSI were mutated at damaged locations, the location and size of damages can be identified through the CMS and CMSI mutations, and multiple damages in the structure can also be identified. Moreover, the mutation range of CMS and CMSI increases with the increase of the damage degrees, indicating that CMS and CMSI can quantitatively identify the damage degrees. Compared with CMS, CMSI is more sensitive to damage identification of the composite beam structures.

Key words Composite beams, Operational modal, Curvature mode shape, Curvature mode shape change rate, Damage identification

0 引言

复合材料梁结构在很多工程领域中有着广泛应用。不同工况下,复合材料梁结构承受载荷时,容易

产生损伤。损伤会造成刚度降低,带来安全隐患。因此对其进行损伤识别具有重要意义。

在复合材料损伤识别方面,无损检测技术发展

收稿日期:2020-08-05

基金项目:天津市自然科学基金(20JCQNJC00050)

第一作者简介:杜宇,1988年出生,硕士,研究方向为复合材料缺陷检测。E-mail:duyu2219@163.com

通信作者:杨涛,1970年出生,教授。E-mail:yangtao@tjpu.edu.cn

尤为突出。如分布式光纤传感检测、X射线检测、声发射检测、涡流检测和超声检测等都被用于复合材料的无损检测^[1-5]。此外,损伤结构会导致其刚度的变化,进而引起模态参数(固有频率、振型和阻尼比)的改变,由于模态频率和振型对损伤结构的识别敏感性并不高,更敏感的损伤指标被研究者们提出。A. K. PANDEY^[6]还提出基于曲率模态的梁结构损伤识别方法,进而发展成为曲率模态法和曲率模态差法。M. CAO^[7]等利用曲率模态法对梁结构中的多损伤进行了识别。D. DESSI^[8]等对曲率模态法识别结构损伤进行了详细的阐述,并将其与其他的模态参数损伤识别指标进行了比较。M. H. HE和T. YANG等^[9-10]分别利用曲率模态差和模态柔度曲率矩阵对复合材料进行了无损检测,通过实验和有限元模态分析方法对具有单损伤、多损伤和不同损伤程度的构件进行识别,验证了该方法的正确性。陈立^[11]和李永梅^[12]等利用基于模态柔度矩阵的柔度曲率作为损伤参数的方法对桥梁损伤进行了准确的检测。田淑侠^[13]等应用曲率模态方法对复合材料层合板分层损伤进行损伤检测。

与传统的锤击法实验模态分析方法相比,运行模态分析不需要测量输入信号,只用响应信号提取模态参数。因此,它不需要测量激励信号,避开了实验模态分析方法所遇到的问题^[14]。将传递率函数的运行模态分析方法应用在复合材料结构损伤识别中的研究工作还很少。基于此,本文基于传递率函数的运行模态分析方法,结合运行模态实验分析,对具有单损伤、多损伤和不同损伤程度的复合材料梁结构进行研究。探讨运行模态分析法在复合材料梁结构损伤识别中的适用性,为实现复合材料脱层损伤的定位与定量识别,提供一种有效的无损方法。

1 复合材料梁损伤识别理论

1.1 传递率函数

将复合材料悬臂梁视为N自由度振动系统,其运动微分方程为^[15]:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (1)$$

式中, $u(t)$, $\dot{u}(t)$ 和 $\ddot{u}(t)$ 分别为广义位移、速度和加速度。 $f(t)$ 为广义力的n维向量。 M , C 和 K 分别为 $[n \times n]$ 阶的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

对(1)式作傅式变换,可得

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (2)$$

其中

$$H(\omega) = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} \quad (3)$$

称为振动系统的频响函数矩阵, $[n \times n]$ 阶。

加速度列阵为:

$$A(\omega) = -\omega^2 H(\omega)F(\omega) \quad (4)$$

系统所受到的激励力向量为:

$$F(\omega) = \{0, 0, \dots, F_k(\omega), \dots, 0, 0\}^T \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,得

$$A(\omega) = -\omega^2 F_k(\omega)H_k(\omega) \quad (6)$$

式中, $H_k(\omega)$ 是 $H(\omega)$ 的第k列。

设外部激励产生的加速度响应由i处向j处传递,定义加速度传递率函数为两处响应的比值:

$$T_{ij}(\omega) = \frac{A_i(\omega)}{A_j(\omega)} = \frac{H_{ik}(\omega)}{H_{jk}(\omega)} \quad (7)$$

通过对加速度传递函数的最小二乘拟合,可以得到结构的模态频率和阻尼。

系统的模态振型可以通过对所构造传递率函数矩阵在系统模态频率处的奇异值分解得到^[16]。

$$T_{ij}(\omega) = \begin{bmatrix} T_{11}(\omega) & T_{12}(\omega) & \dots & T_{1N}(\omega) \\ T_{21}(\omega) & T_{22}(\omega) & \dots & T_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ T_{M1}(\omega) & T_{M2}(\omega) & \dots & T_{MN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)的奇异值进行分解取奇异值向量的第一列,即可得到复合材料梁结构的振型。

1.2 损伤指标

根据弹性梁的弯曲变形理论和材料力学,任意截面弯曲梁振动曲率的变化函数可以表示为:

$$k(x,t) = \frac{1}{\rho(x,t)} = \frac{M(x,t)}{EI(x)} = \sum_{j=1}^{\infty} C_j(x)q_j(t) \quad (9)$$

式中, $k(x,t)$ 为曲率; $\rho(x,t)$ 为曲率半径; $EI(x)$ 是梁截面抗弯刚度; $M(x,t)$ 是单位长度质量; $C_j(x)$ 是j阶曲率模态; $q_j(t)$ 是模态坐标。

由于现在缺乏可以能够直接测量结构曲率响应的传感器,因此利用中心差分法计算结构的曲率模态(CMS)^[9]:

$$C_j(i) = \frac{\phi_{j(i+1)} - 2\phi_{j(i)} + \phi_{j(i-1)}}{l^2} \quad (10)$$

式中,j为模态阶数,i表示第i个测试点,l为相邻测试点之间的距离。 $C_j(i)$ 为复合材料梁第j阶、i个节点的曲率模态。通过CMS的一阶微分,可以得到曲率模态变化率(CMSI):

$$C'_j(i) = \frac{C_{j(i+1)} - C_{j(i)}}{l} \quad (11)$$

式中, $C'_j(i)$ 为曲率模态变化率(CMSI); $C_{j(i)}$ 和 $C_{j(i+1)}$ 分别为复合材料梁第j阶、i和i+1个节点的曲率模态。

由(10)和式(11)式可知,当复合材料梁中存在宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第2期

损伤时,损伤位置对应的弯曲刚度就会降低,与此同时,CMS和CMSI就会在该点发生明显突变。因此,CMS和CMSI可以作为损伤定位的指标。

2 损伤识别实验

采用SK化工(青岛)有限公司的TR50碳纤维预浸料制备复合材料试件。碳纤维密度为:1.7 g/cm³,树脂的密度为1.2 g/cm³,每层厚度为0.17 mm,铺层方向均为[0/90]_{6s},共24层,试件尺寸为300 mm × 30 mm × 4.08 mm。采用聚四氟乙烯薄膜人工制作损伤。将悬臂梁分为30个单元,共31个节点,每个单元长度为10 mm,离散后其模型如图1所示(图中上排数字为节点号,下排数字为单元号)。

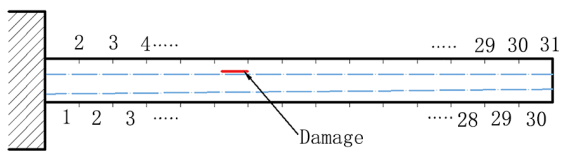


图1 复合材料梁模型

Fig. 1 Calculation model of composite beam

针对复合材料悬臂梁单损伤、多损伤和损伤程度的情况进行研究分析,总共分为5种工况,每种工况的损伤由不同节点的位置、区域大小和数量来确定。5种预设工况如表1所示。

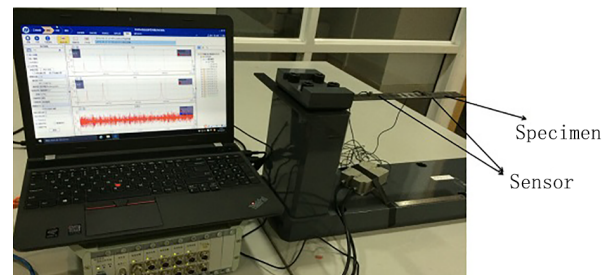
表1 损伤工况

Tab. 1 Preset work conditions

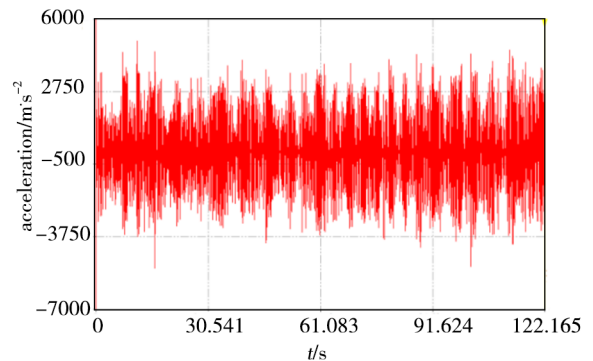
工况	脱层单元	节点	厚度方向
case1	14	14-15	4-5
case2	14、15	14-16	4-5
case3	14、19	14-15、19-20	4-5
case4	14	14-15	4-5、8-9
case5	14	14-15	4-5、8-9、12-13

采用基于传递函数的运行模态分析方法对复合材料梁进行模态试验。图2(a)为模态实验示意图。本研究使用东华测试科技有限公司生产的DH 5922N动态信号测试系统。采用2个1g的加速度传感器(型号:DH132)测量试件的振动响应。一个加速度以双面胶条为参照点粘贴在试件9节点上,另一个加速度传感器依次粘贴在试件各节点上。通过在试样的不同位置人工连续敲击橡胶棒来激活试样,且激励是随机的。记录加速度响应、各加速度响应的平均频谱,如图2所示。采样频率为5 kHz,采样时间为120 s。根据各节点的传递率函数,得到各节点

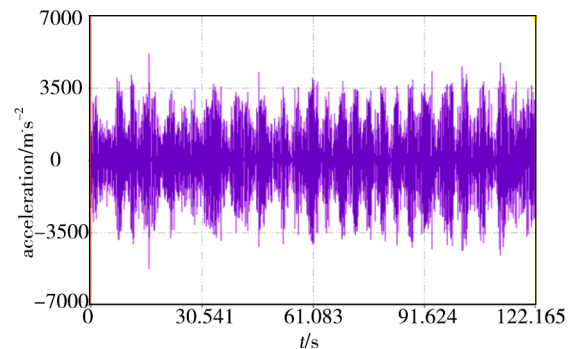
的固有频率和振型。



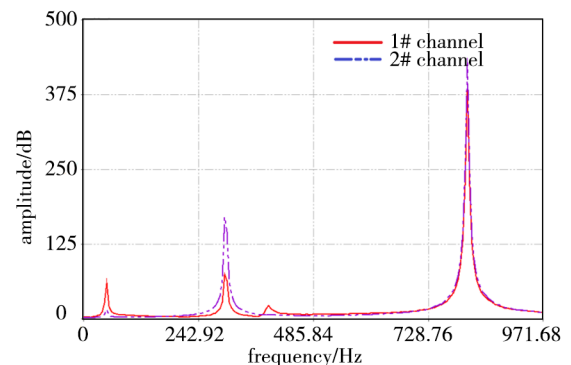
(a) 实验搭建



(b) 1号加速度



(c) 2号加速度



(d) 平均频谱

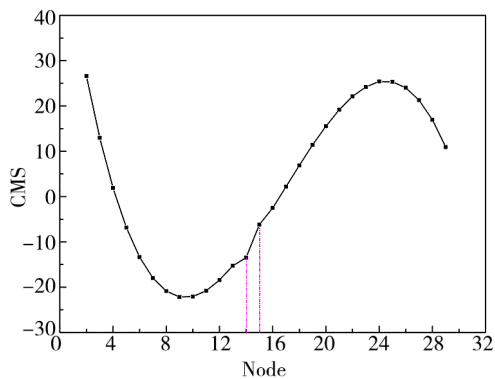
图2 实验测试系统

Fig. 2 Experimental test diagram

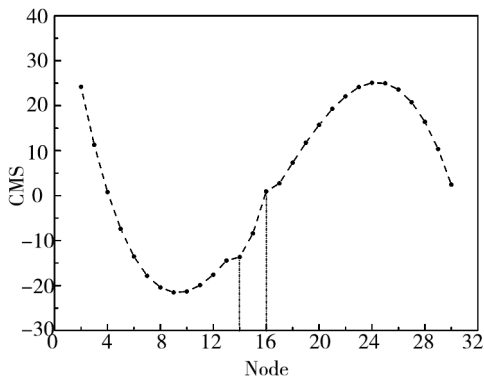
3 结果与讨论

3.1 CMS 损伤识别

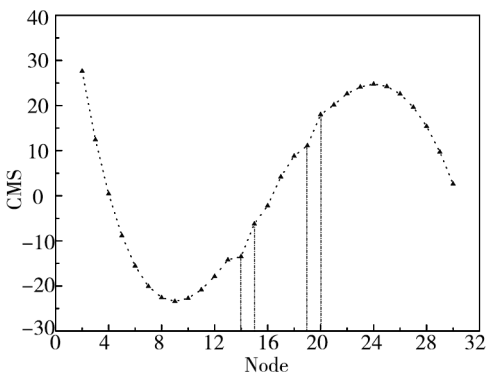
图3为不同工况下复合材料梁的CMS结果。可以看出,CMS在预制的损伤位置有明显的突变,但在未损伤区域,CMS是光滑的。显然,复合材料梁的损伤可以用CMS指标来识别。



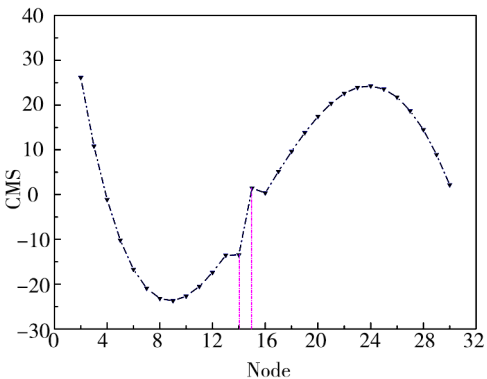
(a) 1#试件



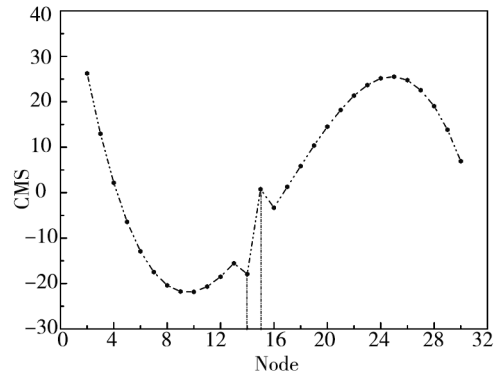
(b) 2#试件



(c) 3#试件



(d) 4#试件



(e) 5#试件

图3 CMS损伤识别

Fig. 3 Experimental identification of damage in composite specimens using the CMS

图3(a)(b)中的CMS分别有14单元和14~15单元的突变。此外,图3(c)中的突变单位分别为14和19。这些突变的位置与实际预制的损伤位置一致。可以得出结论,复合材料梁损伤的位置和大小可以通过CMS指标来确定。图3(a)(d)(e)为损伤位置相同但程度不同的试件CMS,随着分层损伤数量的增加,损伤位置的CMS发生了显著变化。试件1、试件4、试件5损伤单元的CMS的突变极差值CMSD分别为7.28、14.90、18.68。这说明CMSD随着损伤程度的增加而增加。从而验证了CMS可以定量识别相同损伤位置下梁的损伤程度。

3.2 CMSI损伤识别

图4为不同工况下复合材料梁的CMSI结果。CMSI表现出较大的突变,值得注意的是在同等损伤程度下,CMSI的突变比CMS更明显。

图4(a)为CMSI的单损伤和多损伤情况下的损伤识别图。通过突变位置可以很容易地找到损伤的位置和大小,并且识别结果与预先预制的损伤一致。结果表明,CMSI能较好地识别复合材料梁损伤的位置和大小。

对于试件3,通过对受损19单元的CMS与CMSI突变差值的对比分析可知,图4(a)中CMSID约为9.40,而图3(c)中CMSD约为6.78。也就是说,在相同的损伤条件下,CMSI的突变比CMS的突变更为显著。因此,可以得出结论,CMSI比CMS更能有效地识别复合材料梁损伤。

图4(b)为CMSI的不同损伤程度下的损伤识别图。对于受损单元14,试件1的CMSID约为10.96,试件4的CMSID约为31.998,试件5的CMSID约为45.52,说明损伤越严重,CMSI突变越明显。结果证

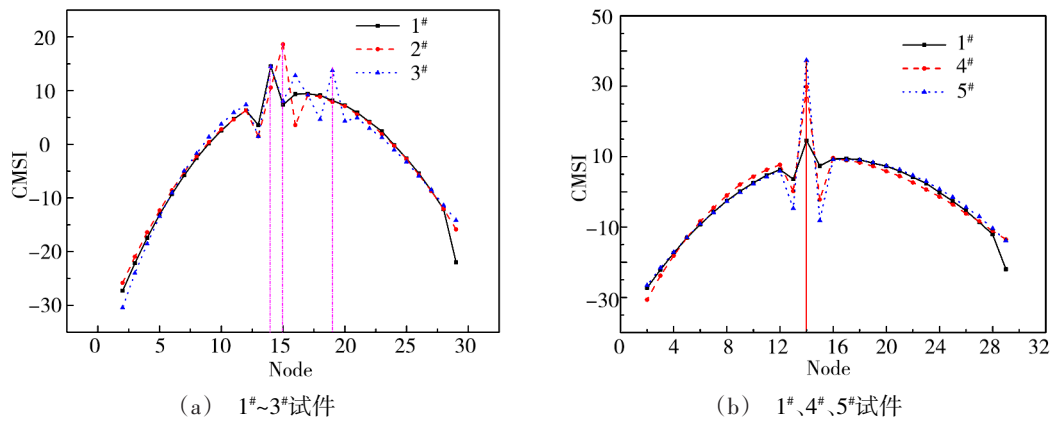


图4 CMSI损伤识别

Fig. 4 Experimental identification of damage in composite specimens using the CMSI

明,利用CMSI可以识别复合材料梁在相同位置的损伤程度。

3.3 CMS和CMSI对比

CMS和CMSI,在损伤程度(脱层数量)上突变极差值的比较如图5所示。可以看出,随着损伤程度的增加,CMS的突变极差值CMSD和CMSI的突变极差值CMSID明显增大,且CMSID的值大于CMSD。这不仅表明CMSD和CMSID能够定量识别复合材料梁在同一位置的损伤程度,而且验证了CMSI对复合材料损伤识别的敏感性优于CMS。与实验模态分析方法相比^[9-10,13,17],运行模态分析不需要测量输入信号,在未知输入的情况下,获得辨识结构的模态参数,即可对复合材料梁结构进行位置、大小和损伤程度的识别,更加方便快捷。

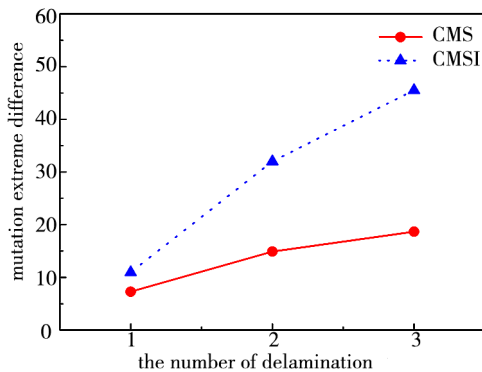


图5 CMS和CMSI的突变极差值

Fig. 5 Comparison of mutation extreme difference of the experimental CMS and CMSI for damage degree of composite beams

4 结论

(1)利用传递率函数的运行模态分析方法对复合材料梁脱层损伤检测,通过对加速度传递函数的最小二乘拟合,得到复合材料梁结构的模态频率和阻尼,传递率函数矩阵在系统模态频率处奇异值分

解,得到复合材料梁结构的模态振型。

(2)采用曲率模态CMS和曲率模态变化率CMSI作为损伤指标,可以对单损伤、多损伤和不同损伤程度的复合材料梁结构进行损伤识别。

(3)通过不同损伤程度的复合材料梁的曲率模态CMS和曲率模态变化率CMSI的突变极差值对比可知,曲率模态变化率CMSI对复合材料梁结构损伤识别更为敏感。

参考文献

- [1] 巴德欣,董永康. 分布式光纤传感技术及其在航空航天领域的应用展望[J]. 宇航学报,2020,41(6):730-738.
BA De Xin, DONG Yong Kang. Distributed optical fiber sensor and its potential application in health monitoring of aerospace structures[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 730-738.
- [2] DILONARDO E, NACUCCHI M, PAASCALIS F D, et al. High resolution X-ray computed tomography: A versatile non-destructive tool to characterize CFRP based aircraft composite elements[J]. Composites Science And Technology, 2020,192:108093.
- [3] 宋远佳,张炜,田干,等. 基于超声红外热成像技术的复合材料损伤检测[J]. 固体火箭技术,2012,35(4):559-563.
SONG Yuan Jia, ZHANG Wei, TIAN Gan, et al. Damage detection of composites based on ultrasonic infrared thermography technique[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(4): 559-563.
- [4] RAMADAS C, BALASUBRAMANIAM K, JOSHI M, et al. Interaction of the primary anti-symmetric Lamb mode (A0) with symmetric delaminations: numerical and experimental studies[J]. Smart Materials Structures, 2009, 18(8): 46-50.
- [5] 李菊峰,杨涛,杜宇. 基于柔度曲率矩阵的复合材料脱层损伤识别研究[J]. 宇航材料工艺,2015,45(5):75-79.
LI Ju Feng, YANG Tao, DU Yu. Delamination damage identification of composite based on flexibility curvature matrix[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(5): 75-79.

- [6] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. *Journal of sound and vibration*, 1991, 145(2): 321-332.
- [7] CAO M, RADZIENSKI M, XU W, et al. Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shapes[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 46(2): 468-480.
- [8] DESSI D, CAMERLENGO G. Damage identification techniques via modal curvature analysis: overview and comparison [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 52: 181-205.
- [9] HE M H, YANG T, DU Y. Nondestructive identification of composite beams damage based on the curvature mode difference[J]. *Composite Structures*, 2017, 176:178-186.
- [10] YANG T, LI J F, DU Y. Delamination detection in composite structures based on modal flexibility curvature [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(10): 853-863.
- [11] 陈立. 基于柔度曲率矩阵的结构损伤识别研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- CHEN Li. Structural damage identification based on flexibility curvature matrix[D]. Dalian University of Technology, 2009.
- [12] 李永梅,周锡元,高向宇. 基于柔度差曲率矩阵的结构损伤识别方法[J]. *工程力学*, 2009, 26(2):188-195.
- LI Yong Mei, ZHOU Xiyuan, GAO Xiangyu. Detection indicator of structural nondestructive damage based on curvature flexibility difference matrix [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(2):188-195.
- [13] 田淑侠,王双双,樊江磊,等. 基于曲率模态的复合材料层合板分层损伤检测方法研究[J]. *机械设计与制造*, 2018(11):135-138.
- TIAN Shuxia, WANG Shuangshuang, FAN Jianglei, et al. Study on detection method of delamination damage for composite laminates based on mode curvature [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(11):135-138.
- [14] 李星占,岳晓斌,黄文,等. 振动响应传递率及其工作模态分析方法综述[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(18):24-32.
- LI Xingzhan, YUE Xiaobin, HUANG Wen, et al. Vibration response transmissibility and operational modal analysis methods: a review and comparative study[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(18):24-32.
- [15] 陈家宝. 基于加速度传递率函数的结构损伤识别研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2013.
- CHEN Jia Bao. Study on the structural damage identification based on acceleration transmissibility function [D]. Qing Dao: Qingdao University of Technology, 2013.
- [16] 张永年,王彤,夏遵平. 基于传递率函数的运行模态分析方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(5):945-949.
- ZHANG Yongnian, WANG Tong, XIA Zunping. Transmissibility based operational modal analysis [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(5):945-949.
- [17] NICK H, AZIMINEJAD A, HOSSEINI M H, et al. Damage identification in steel girder bridges using modal strain energy-based damage index method and artificial neural network [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 119:105010.