

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.005

# 基于平稳小波变换的悬臂梁 微小缺陷检测方法研究\*

欧芬兰<sup>1</sup>, 郭金泉<sup>1</sup>, 钟剑锋<sup>1</sup>, 钟舜聪<sup>1,2\*</sup>

- (1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;
2. 福建省医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350000)

**摘要:**针对悬臂梁微小缺陷难以直接从模态振型进行有效识别的问题,提出了基于平稳小波变换的悬臂梁微小缺陷检测方法。通过利用有限元方法对悬臂梁进行建模和模态分析,得到了悬臂梁的模态参数。在此基础上,通过利用平稳小波变换对悬臂梁模态振型进行正交分解以得到平稳小波变换的近似系数(含模态振型的低频信号成份)和细节系数(含模态振型的高频信号成份)。最后,从平稳小波变换细节系数中提取了悬臂梁的微弱缺陷信息,实现了悬臂梁微小缺陷的有效定位和检测。从有限元模拟和平稳小波变换的结果可知,悬臂梁不同位置缺陷的前四阶细节系数都可以有效用于微小缺陷的定位。该方法具有较好的检测精度和可靠性,在结构缺陷萌生之初就可以有效识别缺陷的存在,避免结构灾难事故的发生,可推荐用于实际工程结构的检测。

**关键词:**振型;平稳小波变换;有限元分析;缺陷识别

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0762-06

## Small crack identification in cantilever beams by stationary wavelet transform

OU Fen-lan<sup>1</sup>, GUO Jin-quan<sup>1</sup>, ZHONG Jian-feng<sup>1</sup>, ZHONG Shun-cong<sup>1,2</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty in effective determinations of the existence of the cracks /defects in cantilever beams with small cracks due to weak crack effects, a methodology was proposed for small crack identification in cantilever beams by using stationary wavelet transform (SWT). Modal analysis of cantilever beams were modelled and analyzed by using finite element (FE) method. The obtained modal shapes of cantilever beams were orthogonally decomposed by using SWT into approximation coefficients (which include the low-frequency components of modal shapes) and detail coefficients (which include the high-frequency components of modal shapes). Finally, the SWT detail coefficients were used to extract small defect features, therefore, small crack localization and identification in cantilever beams were realized. The FE and SWT results indicate that the detail coefficients for the first four modal shapes of damaged cantilever beams could be effectively used for the localization of small cracks. The SWT-based method has excellent detection precision and robustness. Small cracks in engineering structures could be identified avoiding the catastrophic failures, especially when the crack is initiated. Therefore, it could be recommended in real engineering applications.

**Key words:** vibration modal shape; stationary wavelet transform; finite element analysis; crack detection

收稿日期:2015-01-26

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51005077);教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(博导类,20133514110008);国家卫生和计划生育委员会科研基金资助项目(WKJ-FJ-27);福建省杰出青年基金滚动资助项目(2014J07007);福建省质量技术监督局科技项目资助项目(FJQI2013095,FJQI2012024);福建省高等学校学科带头人培养计划资助项目(闽教人[2013]71号);国家质检总局科技计划资助项目(2011QK216)

**作者简介:**欧芬兰(1989-),女,福建南平人,主要从事无损检测及结构健康监测方面的研究. E-mail:514690110@qq.com

**通信联系人:**钟舜聪,男,研究员,博士生导师. E-mail:zhongshuncong@hotmail.com

## 0 引言

结构在各种载荷的共同作用下,都会出现不少的局部裂纹、断裂、脱落、内部损伤等现象,最初这些损伤都较为微小,一般不会影响结构的使用,所以不易被检测出来。随着结构在外力的不断作用,缺陷随之发生扩展,使得结构存在安全隐患。当这些裂纹扩展到足够大时,结构的承载能力迅速下降,结构会受到严重破坏甚至坍塌。为了避免类似灾难性的后果,很多学者致力于研究结构缺陷的检测方法。一般的方法都是基于振动模态的方法。理论上,结构如果出现损伤,结构的模态参数(频率、振型等)也随之发生变化,通过对比损伤发生前后结构模态参数的变化,可以对有缺陷的结构的损伤状况进行评估。

有关学者根据损伤前、后结构的频率变化,对梁结构裂纹进行检测,Kaushar<sup>[1]</sup>通过结构损伤前后前两阶固有频率的变化可以用于检测裂纹的位置和大小,通过与实际结果相对比发现具有较好的一致性。Jasim<sup>[2]</sup>认为对于较小的缺陷,固有频率不能很好地对缺陷进行检测,有限元分析后结果显示曲率模态振型检测损伤程度的灵敏度好,对确定圆形悬臂梁的缺陷能进行准确定位。高芳清<sup>[3]</sup>从理论上证明了频率变化比值是基于结构损伤位置和程度的函数,并应用于钢桁架结构上进行微小损伤识别。郭国会<sup>[4]</sup>依据曲率模态振型对结构进行识别结构损伤,结果表明曲率模态振型对损伤的识别效果要优于基于固有频率或者振型的识别方法。李功宇<sup>[5]</sup>把曲率模态振型识别损伤方法运用到悬臂梁上,结果显示曲率模态振型可以准确识别损伤的位置。Pandey等<sup>[6]</sup>也利用曲率模态振型对具有单个或者多个损伤的结构进行识别,并发现如果损伤的深度越深,损伤处曲率模态振型的突变就越明显,得出了良好的识别效果。袁向荣<sup>[7]</sup>对比基于固有频率、振型和曲率模态振型等方法检测损伤位置的精确性,发现曲率模态振型对损伤具有更强的敏感性。王玲娟<sup>[8]</sup>通过有限元方法建立具有矩形凹槽裂纹的悬臂梁,分别对不同深度和位置的模型计算得出了固有频率和模态,研究的结论为裂纹检测提供了理论依据。以上的研究都是基于固有频率和模态振型的变化来作为损伤发生的识别依据。但是,微小缺陷所引起的结构固有频率和模态振型变化是很微弱的,较难实现对微小缺陷的识别。

近年来,很多学者研究利用小波分析来进行结构的损伤识别<sup>[9-10]</sup>。小波分析本质是对信号进行多分辨

率的分析,在时域和频域都具有相同的表达信号的能力,使得其在低频时能具备较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,而在高频时能具备较低的频率分辨率和较高的时间分辨率,所以小波分析适合用于探测在完整信号中出现的瞬态非正常的突变信号,它对微小损伤检测具有较好的效果<sup>[11]</sup>。袁云龙<sup>[12]</sup>通过对滚动轴承故障信号进行小波分解与重构以检测出轴承的故障类型。Ovanesova<sup>[13]</sup>提出运用离散小波变换对平面框架进行损伤检测。Huang<sup>[14]</sup>使用连续小波变换对三层不对称钢框架进行动力参数识别。Liew等<sup>[15]</sup>使用离散小波变换对简支梁进行损伤识别。Zhong等<sup>[16]</sup>对简支梁振型进行重构后利用连续小波变换得到较好的缺陷识别效果。

本研究针对悬臂梁微小缺陷难以直接从模态振型进行有效识别的问题,提出基于平稳小波变换的悬臂梁微小缺陷检测方法。

## 1 平稳小波变换

平稳小波变换是在离散小波变换的基础上改进的方法,它最主要特征是冗余性和平移不变性。小波变换将一般的信号表示为小波基的线性叠加,从而将对原来函数的分析转换为对这个叠加权系数,即小波变换的分析。连续小波变换定义为:

$$WTf(ab) = (f, \psi_{a,b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\lambda) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left( \frac{\lambda - b}{a} \right) d\lambda \quad (1)$$

式中: $\psi_{a,b}$ —小波基, $\psi_{a,b} = [(\lambda - b)/a] \cdot \psi/\sqrt{a}$ ,它由某一小波函数 $\psi(\lambda)$ 通过平移( $\lambda \rightarrow \lambda - b$ )和伸缩( $\lambda \rightarrow \lambda/a$ )获得。通常取 $a = 2, b = 1$ ,即常见的正交小波变换。

信号( $S$ )被分解为近似系数( $A$ )和细节系数( $D$ ),三层小波变换分解图如图1所示。一般地,低频信息集中在近似系数中,高频信息集中在细节系

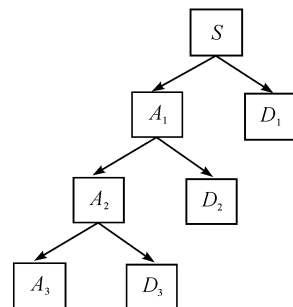


图1 三层平稳小波变换分解图

$A_1, A_2, A_3$ —三层分解的近似系数; $D_1, D_2, D_3$ —三层分解的细节系数

数中。在图像处理领域,是滤掉高频成份以实现降噪的目的。平稳小波变换后的近似系数和细节系数与原信号长度相等,具有时移不变性,避免了时移信息的丢失。

平稳小波变换具有很好的去噪功能和信号边缘检测,广泛运用在图像处理和机械故障检测领域。徐元柳<sup>[17]</sup>提出基于平稳小波变换的图像减噪处理方法,在减噪的同时可以很大程度上保留了图像的边缘细节特征,得到很好的减噪效果。隋文涛<sup>[18]</sup>利用平稳小波变换对信号进行分解,根据不同尺度的故障信息来决定阈值的大小进行减噪,实验结果表明此方法可以保留振动信号的细节特征,具有良好的降噪性能。Zhong<sup>[19]</sup>提出基于平稳小波变换对简支梁的缺陷进行识别,并发现平稳小波变换的缺陷识别效果比离散小波变换更准确。Zhong 等人<sup>[20]</sup>还进一步利用平稳小波变换分析研究简支梁采样位置间隔的灵敏度分析。

## 2 悬臂梁缺陷模型

悬臂梁缺陷模型如图 2 所示。右边为固定端。本研究选用 ABAQUS 有限元分析软件来进行模态分析。

悬臂梁模型的总体尺寸为  $L = 600 \text{ mm}$ 、 $B = 20 \text{ mm}$ 、 $H = 8 \text{ mm}$ 。悬臂梁的材料选择为铝,其材料特性为:密度、弹性模量、泊松比。

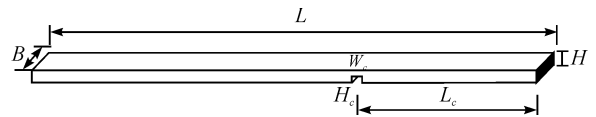


图 2 悬臂梁缺陷模型

$L, H, B$ —悬臂梁的长度、高度和宽度; $L_c, H_c, W_c$ —缺陷的位置、深度和宽度

## 3 平稳小波变换的结构损伤识别及结果分析

本研究首先对  $L_c = 400 \text{ mm}$ 、 $H_c = 2 \text{ mm}$ 、 $W_c = 0.4 \text{ mm}$  缺陷进行模拟。笔者在 ABAQUS 中对该悬臂梁进行模态分析可以得到前四阶的振型模态曲线,悬臂梁前四阶振型如图 3 所示。由于缺陷的尺寸较小,产生的缺陷效应比较微弱,振型模态曲线相对比较平滑,曲线中没有出现明显的突变,该结构是否存在缺陷无法得到直接判断。

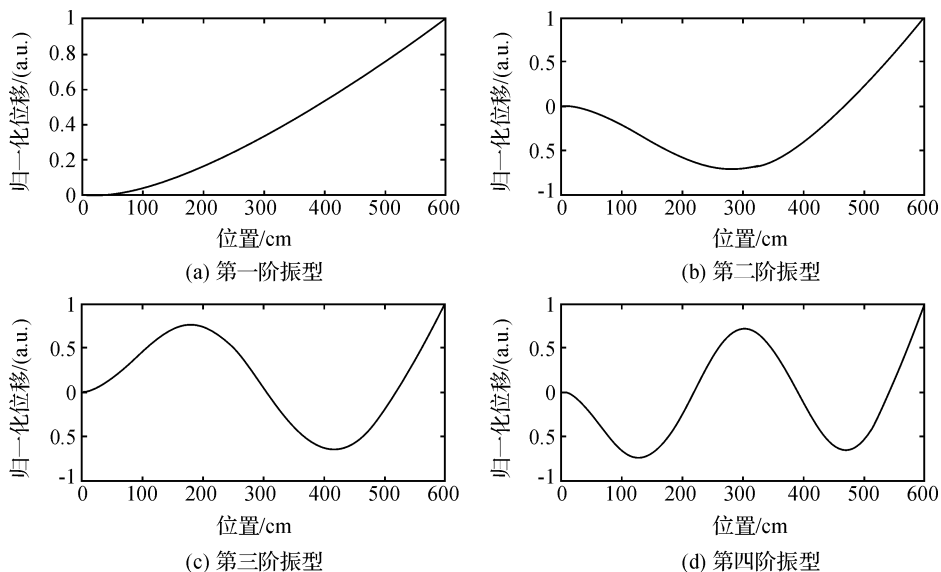


图 3 悬臂梁( $L_c = 400 \text{ mm}$ )前四阶振型

通过利用平稳小波变换对悬臂梁( $L_c = 400 \text{ mm}$ )前四阶振型进行一层分解可以得到各个振型的近似系数  $A_1$  和细节系数  $D_1$ 。前四阶细节系数都包含了悬臂梁的缺陷信息,悬臂梁前四阶振型的平稳小波分解细节系数如图 4 所示。在  $L_c = 400 \text{ mm}$  的位置都出现突变,可以清晰准确地定位缺陷的位置。这个例子较好地说明了平稳小波变换对悬臂梁结构微弱缺陷识别的有效性。

为了讨论缺陷的位置对缺陷识别的影响,本研究

选取以下不同缺陷位置  $L_c = 100 \text{ mm}$ 、 $L_c = 200 \text{ mm}$ 、 $L_c = 300 \text{ mm}$  进行比较研究。损伤的深度、宽度分别设为  $H_c = 2 \text{ mm}$  和  $W_c = 0.4 \text{ mm}$ 。

损伤位置在  $L_c = 100 \text{ mm}$ 、 $L_c = 200 \text{ mm}$ 、 $L_c = 300 \text{ mm}$  处的前四阶振型的平稳小波分解细节系数如图(5~7)所示。这 3 个仿真模型中采样距离都是  $10 \text{ mm}$ ,所以在总长为  $600 \text{ mm}$  的悬臂梁上就可以得到 61 点数据。图(5~7)中峰值的位置就是缺陷的存在

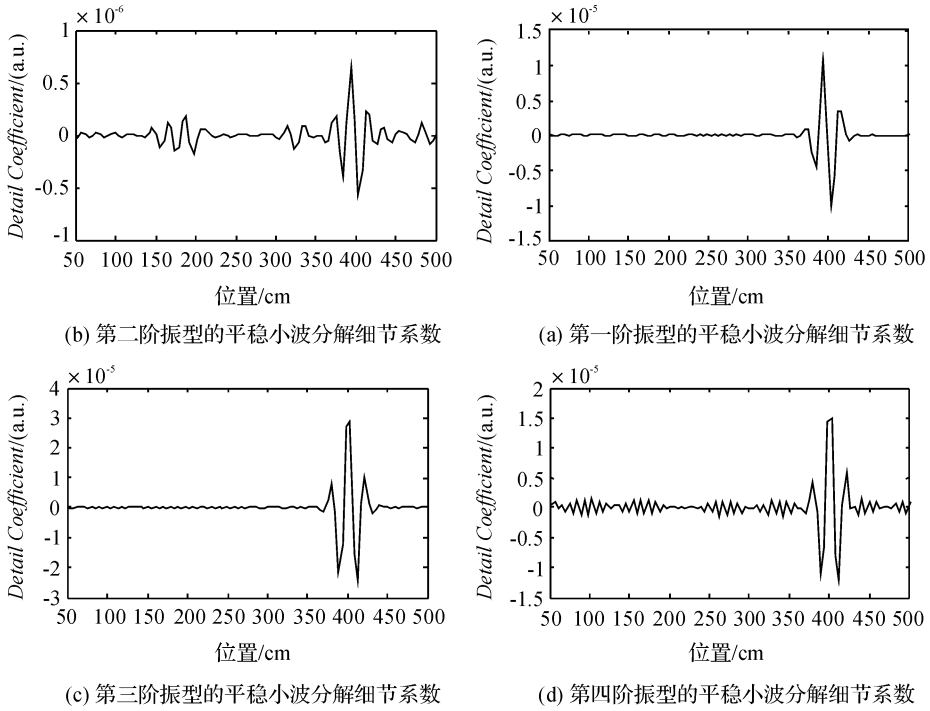


图 4 悬臂梁( $L_c = 400$  mm)前四阶振型的平稳小波分解细节系数

位置。由于靠近模态节点位置的位移接近为零,靠近节点的缺陷效应会比较微弱<sup>[16]</sup>。图 5(a)、6(d)、7(c)的细节系数都出现不同程度的噪声,说明这些位置的缺陷效应比较小。实际上,从图 3 可知:缺陷位置

$L_c = 100$  mm、 $L_c = 200$  mm 和  $L_c = 300$  mm 分别接近第一、第四和第三模态的节点,这就很好说明了图 5(a)、6(d)、7(c)中的平稳小波分解细节系数的信噪比偏低。

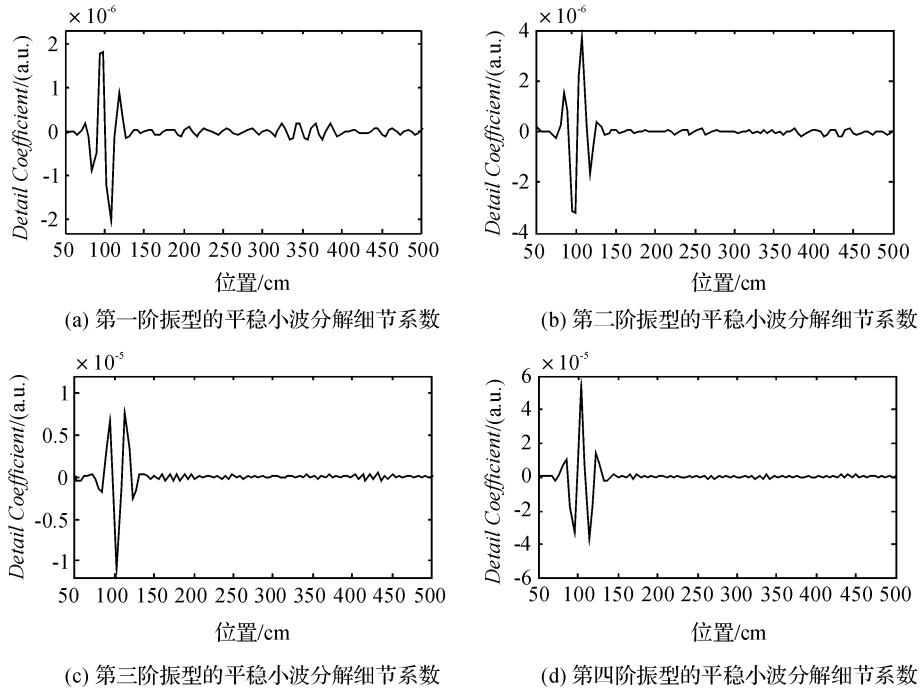


图 5 悬臂梁( $L_c = 100$  mm)前四阶振型的平稳小波分解细节系数

### 4 结束语

本研究利用平稳小波变换分析悬臂梁振动模态以实现其微弱缺陷的检测,该方法的创新之处在于可以

从细节系数中提取微弱缺陷信息,它实际上是一种“变废为宝”的方法(图像小波降噪是将细节系数滤掉)。针对 4 种不同缺陷的位置,笔者通过采用平稳小波变换都可以有效地对微小缺陷进行定位,说明了

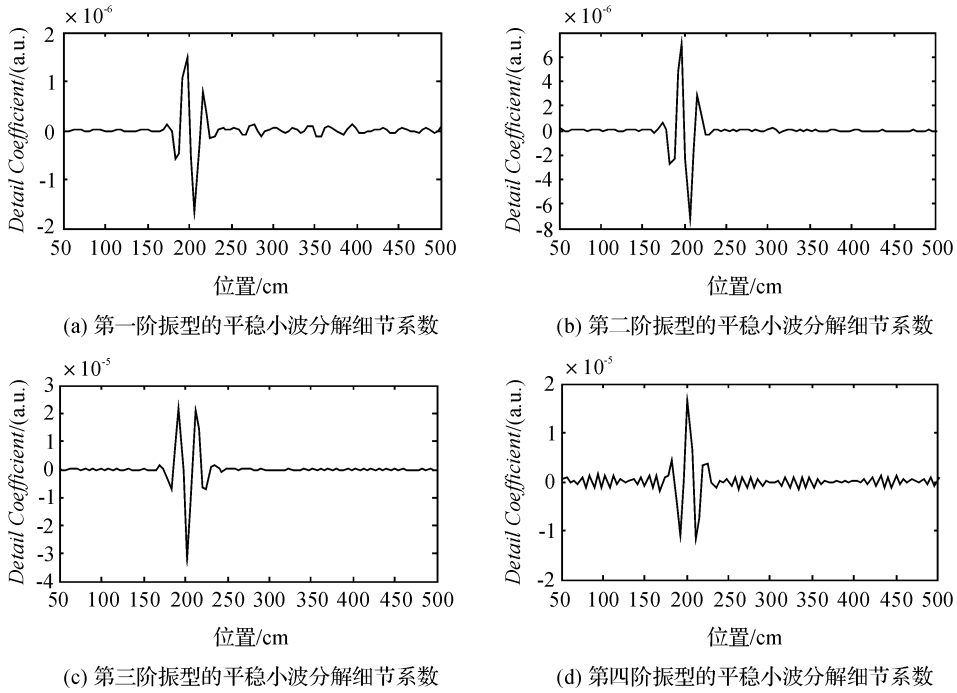


图 6 悬臂梁 ( $L_c = 200 \text{ mm}$ ) 前四阶振型的平稳小波分解细节系数

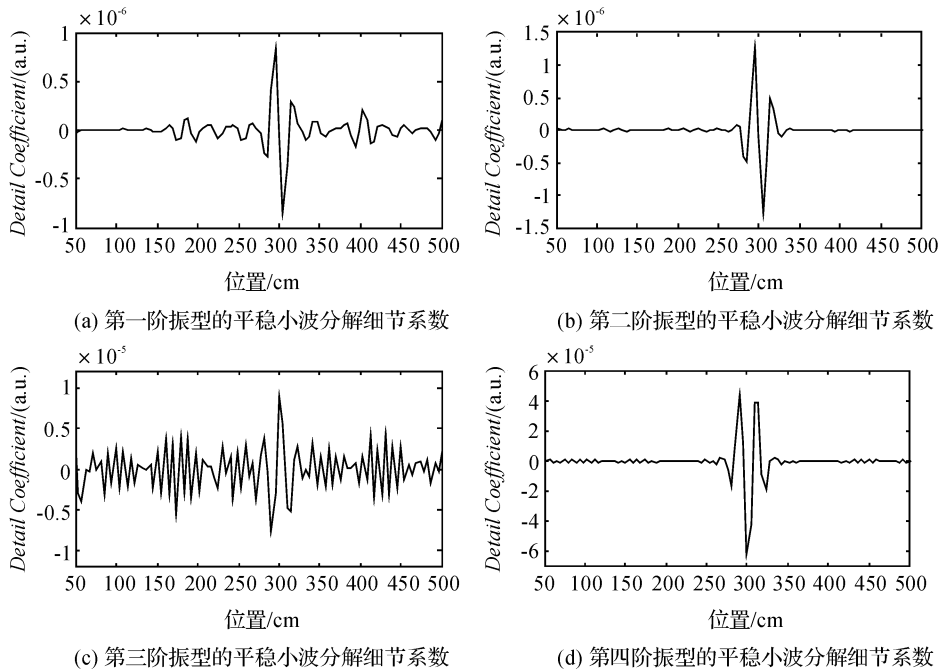


图 7 悬臂梁 ( $L_c = 300 \text{ mm}$ ) 前四阶振型的平稳小波分解细节系数

该方法有较好的检测精度。缺陷如果出现某阶模态结点位置会出现细节系数信噪比较差的情况,这是因为靠近节点的缺陷效应会比较微弱。

仿真结果表明,综合前四阶振型的平稳小波分解细节系数可以可靠地对悬臂梁的微弱缺陷进行定位。

参考文献 (References) :

[1] BARAD K H, SHARMA D S, VYAS V. Crack detection in cantilever beam by frequency based method[J]. **Procedia**

**Engineering**, 2013(5) :770-775.  
 [2] JASSIM Z A, ALI N N, MUSTAPHA F. A review on the vibration analysis for a damage occurrence of a cantilever beam [J]. **Engineering Failure Analysis**, 2013(31) :442-461.  
 [3] 高芳清,金建明,高淑英. 基于模态分析的结构损伤检测方法研究[J]. **西南交通大学学报**, 1998, 33(1) :108-113.  
 [4] 郭国会. 桥梁结构动力损伤诊断方法研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2001.  
 [5] 李功宇,郑华文. 损伤结构的曲率模态分析[J]. **振动、测试与诊断**, 2002, 22(2) :136-141.

- [6] PANDEY A, BISWAS M, SAMMAN M. Damage Detection from changes in Curvature Mode shape [J]. **Journal of Sound Vibration**, 1991(145):321-332.
- [7] 袁向荣. 梁的破损对频率振型及振型曲率的影响[J]. 振动、测试与诊断, 1994, 14(2):40-44.
- [8] 王玲娟. 基于有限元法的局部缺陷悬臂梁的裂纹监测[J]. 机床与液压, 2013, 41(5):191-193.
- [9] 朱可恒, 宋希庚, 薛冬新. 希尔伯特振动分解在滚动轴承故障诊断中应用[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14):160-164.
- [10] 张梅军, 王闯, 陈灏. IMF 能量和 RBF 神经网络相结合在滚动轴承故障诊断中的应用研究[J]. 机械, 2012(6):69-72, 76.
- [11] 任宜春, 易伟建. 基于小波分析的梁裂缝识别研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(4):399-404.
- [12] 袁云龙, 迟军. 基于小波分析的滚动轴承故障诊断[J]. 机电工程, 2008, 25(6):31-34.
- [13] OVANESOVA A, SUAREZ L. Application of wavelet transforms to damage detection in frame structures[J]. **Engineering Structures**, 2003(26):39-49.
- [14] HUANG C S, SU W C. Identification of Modal Parameters of a Time Invariant Linear System by Continuous Wavelet Transformation [J]. **Mechanical Systems And Signal Processing**, 2007, 21(4):1642-1664.
- [15] LIEW K, WANG Q. Application of wavelet theory for crack identification in structure[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1998, 124(2):152-157.
- [16] ZHONG S, OYADIJI S. Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data [J]. **Computers & structures**, 2011, 89(1):127-148, 201.
- [17] 徐元柳, 张晓帆, 樊永峰. 一种基于平稳小波域的图像去噪新方法[J]. 中国科技信息, 2005(11):17-18.
- [18] 隋文涛, 张丹. 平稳小波变换在轴承振动信号去噪中的应用[J]. 轴承, 2012, 7(12):38-40.
- [19] ZHONG S, OYADIJI S. Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data [J]. **Mechanical Systems And Signal Processing**, 2007, (21)1853-1884.
- [20] ZHONG S, OYADIJI S. Sampling interval sensitivity analysis for crack detection by stationary wavelet transform[J]. **Structural Control and Health Monitoring**, 2013, 20(1):45-69.

[编辑:李辉]

## 本文引用格式:

欧芬兰, 郭金泉, 钟剑锋, 等. 基于平稳小波变换的悬臂梁微小缺陷检测方法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6):762-767.

OU Fen-lan, GUO Jin-quan, ZHONG Jian-feng, et al. Small crack identification in cantilever beams by stationary wavelet transform[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(6):762-767.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 761 页)

## 参考文献 (References):

- [1] XV Jin, LUO Jian-bin, LU Xin-chun, et al. progress in material removal mechanisms of surface polishing with ultra precision [J]. **Chinese Sci. Bulletin**, 2004, 49(16):1687-1693.
- [2] 康杰. 单颗粒脆性材料冲击破碎三维数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳理工大学装备工程学院, 2010.
- [3] 廉晓庆, 蒋明学, 白顶有. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的磨料冲击行为分析[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2):409-412.
- [4] 赵永春. 摩擦过程表面形貌动态变化模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学机械工程学院, 2009.
- [5] 姜胜强, 谭援强, 聂时君, 等. 碳化硅陶瓷预应力加工的离散元模拟与实验研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(12):1286-1289.
- [6] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展, 2003, 33(4):483-490.
- [7] 胡励. 机械产品设计中的颗粒离散元仿真技术及实现[D]. 武汉: 武汉大学动力与机械学院, 2013.
- [8] 范亮平. 集料均匀性对沥青混合料力学性能影响的离散元模拟[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2014.
- [9] 刘小君, 魏庆森, 张彦, 等. 基于离散元法的粗糙表面摩擦过程数值模拟[J]. 合肥工业大学学报, 2011, 34(1):23-27.
- [10] 邹猛, 李建桥, 贾阳, 等. 月壤静力学特性的离散元模拟[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(2):383-387.
- [11] TAN Y Q, YANG D M, SHENG Y. Discrete element method (DEM) modeling of fracture and damage in the machining process of polycrystalline SiC[C]//The European Ceramic Society 2008. Portugal: [s. n.], 2008:236-240.

[编辑:李辉]