

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.021

基于时频相干函数的多跨梁损伤识别方法

张哲, 缪炳荣, 胡天棋, 陈辉, 张盈, 赵浪涛

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为解决连续小波变换损伤识别方法受边界和约束干扰的问题,提出一种基于时频相干函数的结构损伤识别方法。该方法通过时频相干函数构造损伤识别指标对多跨梁进行损伤识别,能够有效降低边界和约束对损伤识别的干扰,提高损伤的定位精度。通过对梁模型的数值仿真分析与实验验证,结果表明:通过时频相干函数构造的损伤指标,有效地消除了连续小波变换所带来的边界效应和约束的影响,能够实现对多跨梁损伤的准确定位,且在噪声干扰下依然具有良好的损伤定位能力。

关键词:损伤识别;时频相干函数;连续小波变换

中图分类号:U441+.4;U448.21+7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0101-05

Multi-span Beam Damage Detection Method Based on Time Frequency Coherence Function

ZHANG Zhe, MIAO Bingrong, HU Tianqi, CHEN Hui, ZHANG Ying, ZHAO Langtao

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A damage detection method based on the time frequency coherence function is proposed to address the continuous wavelet-based damage detection methods distorted by border and constrain distortion. With the proposed method, the damage detection on multi-span beam is realized based on time frequency coherence function, which can significantly reduce the distortion of damage detection caused by border and constrain and upgrade damage positioning accuracy. The results of numerical investigation and experimental verification on beam show that the proposed method can effectively eliminate the effect of border and constrain due to continuous wavelet transform, accurately position multi-span damage even under noise interference.

Keywords: damage detection; time frequency coherence function; continuous wavelet transform

0 引言

机械结构和土木结构在实际使用工况中不可避免的会产生损伤,损伤的产生和发展可能会对结构的性能、安全性、可靠性和使用寿命产生不利影响。为了防止结构失效并保证结构的安全性,及时地发现损伤并对结构进行维修是十分重要的。结构健康监测(structural health monitoring, SHM)是一种测量结构当前状态的有效方法,其中结构损伤识别是健康监测的核心部分。

可以通过对比结构在损伤前后模态参数的变化,如固有频率、模态振型和阻尼比的变化对结构的损伤进行识别^[1],但由于结构的固有频率及模态振型在损伤前后的变化较小,使用固有频率、模态振型等进行损伤识别的方法在损伤定位中存在

精度不高的共性和局限性,人们开始关注与能量概念相关的其他模态方法^[2]。连续小波变换方法被广泛使用在结构损伤识别中,该方法通过将信号变换到尺度域中,能够放大信号中的奇异值与不连续点^[3]。在损伤位置处小波变换系数会出现明显的极值,根据该极值的位置可以很好地识别信号的奇异点并确定损伤位置。

KATUNIN A^[4]分析了测量环境、噪声、小波选择、损伤位置和边界效应对损伤识别效果的影响。单纯的连续小波变换方法存在无法量化损伤和边界效应等不足,常将连续小波变换和其他技术结合,提高损伤识别的效果。SHA G G等^[5]在小波变换的基础上结合 Teager 能量算子(teager energy operator, TEO)对振型进行处理,通过融合 TEO-WT 振型对尺度的积分构建了损伤指标,并

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51775456);中央高校基本科研业务费-专题研究项目(2682022ZTPY007);四川省重点研发项目(2023YFG0197);牵引动力国家重点实验室自主课题项目(2019TPL_T03);牵引动力国家重点实验室自主研发项目(2023TPL_T08)

第一作者简介:张哲(1998—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为结构损伤识别研究,qq549008875@163.com。

通过数值仿真和试验验证了该指标对多损伤复合梁的识别效果,管德清等^[6]将连续小波变换与神经网络结合,使用应变模态小波模极大值定位损伤并以此作为神经网络的输入,实现了对损伤的定位和量化。还可以考虑将连续小波变换与相干性结合,在连续小波变换基础之上,计算有损和无损结构振型小波变换系数的相干性进行损伤识别。ZUMPANO G^[7]通过计算超声波信号的时频相干函数,实现了对轨道损伤的识别,且有效地避免了边界反射对识别效果的影响。ZHENG H^[8]使用谱相干处理加速度信号和声发射信号,根据接收信号与已知的特定信号的相干程度能够判断轨道、车轮和轴承的损伤。

通过连续小波变换识别损伤时,结构边界和约束处的振型突变会导致小波系数产生局部极值影响损伤识别的效果。为解决此问题,本文拟将连续小波变换与时频相干函数结合构造损伤指标,旨在降低边界和约束对损伤识别的影响,提高多跨梁损伤定位的精度。

1 理论背景

1.1 连续小波变换

对于任意函数 $f(x) \in L^2(R)$, 其连续小波变换定义为

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dx = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(t) dx \quad (1)$$

式中: ψ^* 为小波母函数的复共轭; b 为平移因子; a 为尺度因子。从定义可以看出连续小波变换是时间参数 b 和尺度参数 a 的函数, 通过小波变换, 可以同时时间和频率域上观察信号。

不同小波函数对损伤有不同的识别效果。参考小波函数的选择原则^[9-10], 考虑支撑长度、消失矩和正交性等因素, 本文选择“gaus4”小波对多跨梁的振型进行小波分析。

1.2 时频相干函数

信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 的时频相干函数为:

$$C_{\text{oh}}(t, f) = \sqrt{\frac{|R_{12}(t, f)|^2}{R_{11}(t, f) R_{22}(t, f)}} \quad (2)$$

其中:

$$R_{ij}(t, f) = \int_{\tau} W_i^*(\tau, f) W_j(\tau, f) d\tau \quad (3)$$

式中: $W_i(\tau, f)$ 和 $W_j(\tau, f)$ 分别为第 i 个和第 j 个信

号的连续小波变换; 时间积分窗 $T = [t - \Delta t, t + \Delta t]$ 。时频相干函数可以表示两个信号在时频域上的相关程度, 损伤位置处的有损结构和无损结构响应相关程度会降低。

1.3 基于时频域相干的损伤指标

假设 $\phi_u(x)$ 和 $\phi_d(x)$ 分别为有损结构和无损结构的振型向量, 根据式(3)可知 $\phi_u(x)$ 和 $\phi_d(x)$ 的时频相干函数为:

$$R_{ij}(x, s) = \int_0^L W_i^*(u, s) W_j(u, s) du \quad (4)$$

$$C_{\text{oh}}(x, s) = \sqrt{\frac{|R_{\text{ud}}(x, s)|^2}{R_{\text{uu}}(x, s) R_{\text{dd}}(x, s)}} \quad (5)$$

式中: W 为连续小波变换; L 为结构的长度; 下标 u 和 d 分别代表无损结构和有损结构。

对式(5)取倒数:

$$\tilde{C}_{\text{oh}}(x, s) = 1/C_{\text{oh}}(x, s) \quad (6)$$

考虑结构的 m 阶振型, 认为固有频率变化更大的模态, 对应的振型变化也更明显。为了提高指标的灵敏度, 根据各阶固有频率的差异对振型的时频相干函数进行融合^[11], 得到

$$\overline{C}_{\text{oh}}(x, s) = \sum_{i=1}^m \tilde{C}_{\text{oh}_i}(x, s) \times \left(1 - \frac{\omega_u^i}{\omega_d^i} \right)^2 \quad (7)$$

式中: \tilde{C}_{oh_i} 表示通过第 i 阶振型计算得到的时频相干函数; ω_u^i 和 ω_d^i 分别表示连续梁的第 i 阶无损和有损固有频率。

构建损伤指标时, 为了减小尺度选择对损伤识别效果的影响, 在尺度方向对时频相干函数进行积分:

$$p(u) = \int_{s_0}^{s_1} \overline{C}_{\text{oh}}(x, s) ds \quad (8)$$

式中 s_1 和 s_0 为尺度参数的上下限, 本文中选取的尺度积分范围为 $[0.1, 10]$ 。

使用 Z-score 对 $p(u)$ 标准化, 并设定阈值对较小的峰值进行滤除:

$$Z_{\text{-score}} = \frac{p - m_{\text{ean}}(p)}{S_D(p)} \quad (9)$$

式中 $m_{\text{ean}}(p)$ 和 $S_D(p)$ 分别为 p 的均值和方差。最终将损伤指标 D_1 定义为:

$$D_1 = \begin{cases} Z_{\text{-score}}, & Z_{\text{-score}} \geq 0 \\ 0, & Z_{\text{-score}} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

1.4 损伤识别流程

本文以多跨梁结构作为研究对象, 基于模态参数, 利用时频相干函数构造损伤指标对结构进

行损伤识别。具体步骤如下。

步骤 1:建立多跨梁结构的有损与无损有限元模型。考虑边界约束条件,通过模态分析得到结构的固有频率和振型。

步骤 2:对振型进行 3 次样条插值。对有损和无损结构的振型分别进行连续小波变换,并基于小波系数计算时频相干函数,然后对时频相干函数进行归一化并将各阶模态下的时频相干函数进行融合,对尺度进行积分构造相干损伤指标,图 1 为损伤识别流程示意图。

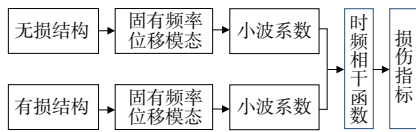


图 1 损伤识别流程示意图

步骤 3:根据设定的阈值,判定出损伤单元的位置。

2 数值算例

以连续梁结构作为研究对象进行损伤识别算法的研究。建立连续梁有限元模型尺寸: $L \times B \times H$ 为 $1\ 200 \times 60 \times 4$, mm;弹性模量 $E = 2.1$ GPa;泊松比 $\nu = 0.3$;密度 $\rho = 7.8 \times 10^3$ kg/m³。沿长度方向划分为 24 个单元,单元尺寸为 50 mm,损伤及边界条件如图 2 所示。

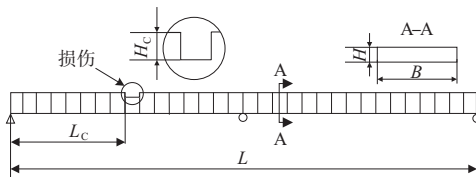


图 2 损伤及边界条件

图 2 中 H_c 为损伤的深度,采用损伤深度与截面厚度的比值 H_c/H 来表征单元处的损伤程度,通过改变梁单元的截面尺寸在有限元模型中添加不同程度的损伤。

为了探究该方法在不同工况下对不同大小和位置处的损伤识别效果,在有限元模型中设置了 3 种工况类型的损伤,损伤工况设置参数如表 1 所示。

表 1 损伤工况设置参数

工况	损伤类型	损伤单元	损伤程度/%
1	单损伤	5	5
2	单损伤	9	10
3	多损伤	5,9	5,10

本文选择多跨梁的前 4 阶模态参数进行损伤识别的研究。通过有限元建模与模态分析,获得结构的前 4 阶模态振型和频率并对振型进行 3 次样条插值。不同工况下,多跨梁前 4 阶固有频率如表 2 所示。

表 2 多跨梁前 4 阶固有频率 单位:Hz

阶数	无损	工况 1	工况 2	工况 3
1	26.14	26.12	26.10	26.08
2	40.83	40.80	40.83	40.80
3	104.49	104.42	104.31	104.24
4	132.21	132.15	131.99	131.94

2.1 单损伤识别

为了验证本文提出的基于时频相干函数方法对损伤识别的有效性,分别在多跨梁第 5 号和第 9 号单元处设置了单损伤。在工况 1 和工况 2 下,损伤指标的识别效果如图 3 和图 4 所示。

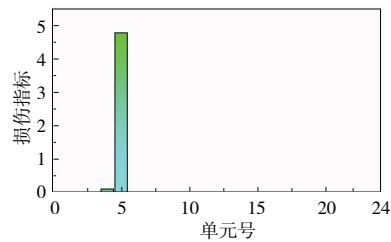


图 3 工况 1 损伤识别效果

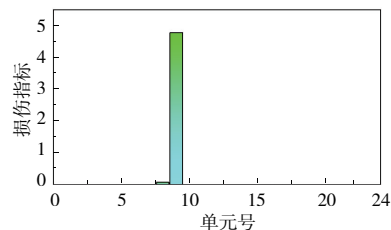


图 4 工况 2 损伤识别效果

从图 3 和图 4 中可以看出,在单损伤工况下,由时频相干函数构建的损伤指标可以准确地对损伤进行定位。同时,在边界处,该损伤指标并未因受到边界效应的干扰而出现误判,具有较高的损伤识别准确度。

2.2 多损伤识别

为了研究该方法对多损伤的识别能力,在多跨梁同一跨内的 5 号和 9 号单元设置了 2 个损伤程度分别为 5% 和 10% 的损伤。工况 3 下,损伤指标的识别效果如图 5 所示。

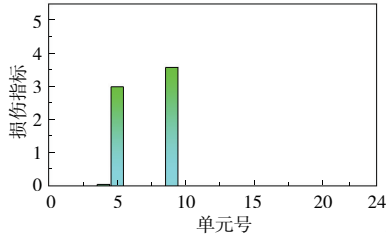


图5 工况3 损伤识别效果

从图5中可以看到,该损伤指标同样可以对两处损伤准确定位,同时在边界处未发生误判的情况。虽然在损伤位置附近损伤指标出现了不为0的情况,但其值远小于损伤位置处损伤指标的值,所以对损伤识别的准确性不会造成影响。同时可以发现,该损伤指标在结构存在多个损伤时,其值的大小可以反映出损伤的相对大小。

2.3 抗噪性分析

在实际的结构模态试验中,不可避免地受到环境、测量和系统噪声的影响。为了研究损伤指标在噪声环境下的可靠性,在各阶模态振型中添加一定的噪声水平,噪声水平通过信噪比 S_{NR} (dB)表示:

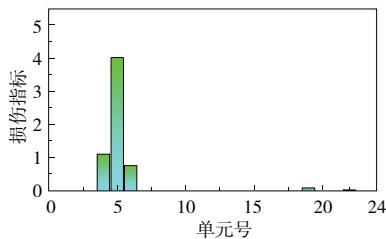
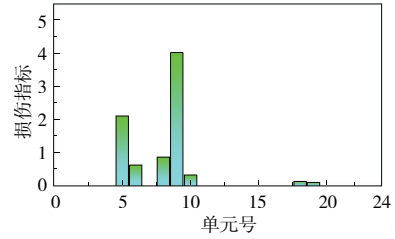
$$S_{NR} = 10 \lg \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (11)$$

式中: S_{NR} 为信噪比水平; P_s 和 P_n 分别为信号和噪声的功率,通过下式对振型添加噪声:

$$\phi_n = \phi + r_{\text{andn}} \times \sqrt{\frac{P_\phi}{10^{S_{NR}/10}}} \quad (12)$$

式中: ϕ 和 ϕ_n 分别为原始振型信号和添加噪声后的振型信号; P_ϕ 为振型信号的功率; S_{NR} 为添加的噪声水平,dB; r_{andn} 是均值为0,标准差为1的标准正态分布随机向量。

为了探究构建的损伤指标在噪声环境下的损伤识别效果,在单损伤工况1和多损伤工况3位移模态中加入信噪比水平为70 dB的高斯白噪声,对应的识别效果如图6和图7所示。

图6 工况1 损伤识别效果 $S_{NR} = 70$ dB图7 工况3 损伤识别效果 $S_{NR} = 70$ dB

从图6和图7中可以看到信噪比水平在70 dB时,在无损伤位置处损伤指标受到了一定的干扰,但可以看到损伤单元处的损伤指标明显较大,依然可以准确地定位损伤。由于相邻的单元间存在公共的节点,损伤单元的相邻单元更容易出现干扰。

3 试验验证

为了验证该方法的可靠性,使用与仿真一致的梁结构验证损伤识别的效果,梁的尺寸 $L \times B \times H$ 为1200×60×4,mm。通过缺口的形式在梁的8号单元和19号单元处加工出两处损伤。

模态试验采用DH5923N信号采集仪、1个加速度传感器和力锤进行各测点振动响应数据的采集,试验现场如图8所示。

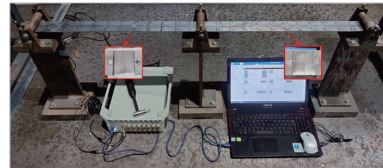


图8 结构模态试验布置

将梁分为49个测点,即采样间隔为25 mm。在采集系统中计算并输出结构的前4阶模态振型。对试验模态振型进行3次样条插值,然后进行连续小波变换,计算时频相干损伤指标,识别效果如图9所示。

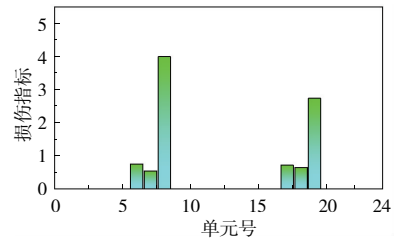


图9 试验数据损伤识别效果

从图9可以看到,对于实测数据,在16号单

元处存在一定的干扰,但依然可以判断出 8 号单元和 19 号单元为损伤单元,且 8 号单元和 19 号单元处的损伤指标值大于其他单元,说明该损伤指标能对损伤进行定位。

4 结语

针对连续小波损伤识别方法受到边界与约束影响的问题,本文在连续小波变换的基础上,研究时频相干函数对多跨梁结构损伤的识别效果及其抗噪性,得到以下结论:

1) 该损伤指标可以对多跨梁的单损伤和多损伤进行定位,且在 $S_{NR} = 70$ dB 的噪声水平下依然具有定位损伤的能力;

2) 通过时频相干函数构造的损伤指标,有效地消除了连续小波变换所带来的边界效应影响;

3) 该方法需要精确地估计结构的模态,对于复杂结构的识别效果,还需要进一步试验研究。

参考文献:

- [1] AVCI O, ABDELJABER O, KIRANYAZ S, et al. A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to machine learning and deep learning applications [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 147: 107077.
- [2] 缪炳荣,刘俊利,张盈,等. 轨道车辆结构振动损伤识别技术综述 [J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(1): 338-357.
- [3] SAADATMORAD M, JAFARI-TALOOKOLAEI R A, PASHAEI M H, et al. Damage detection on rectangular laminated composite plates using wavelet based convolutional neural network technique [J]. *Composite Structures*, 2021, 278: 114656.
- [4] KATUNIN A. Nondestructive damage assessment of composite structures based on wavelet analysis of modal curvatures: state-of-the-art review and description of wavelet-based damage assessment benchmark [J]. *Shock and Vibration*, 2015, 2015: 1-19.
- [5] SHA G G, RADZIENSKI M, SOMAN R, et al. Multiple damage detection in laminated composite beams by data fusion of Teager energy operator-wavelet transform mode shapes [J]. *Composite Structures*, 2020, 235: 111798.
- [6] 管德清,廖俊文. 连续梁结构损伤识别的小波神经网络方法研究 [J]. *中外公路*, 2016, 36(1): 136-139.
- [7] ZUMPANO G, MEO M. A new damage detection technique based on wave propagation for rails [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(5): 1023-1046.
- [8] ZHENG H. Integrated railway remote condition monitoring [D]. Birmingham, West Midlands, UK: University of Birmingham, 2017.
- [9] DOUKA E, LOUTRIDIS S, TROCHIDIS A. Crack identification in beams using wavelet analysis [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(13/14): 3557-3569.
- [10] GENTILE A, MESSINA A. On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(2): 295-315.
- [11] SERRA R, LOPEZ L. Damage detection methodology on beam-like structures based on combined modal wavelet transform strategy [J]. *Mechanics & Industry*, 2017, 18(8): 807.

收稿日期: 2022-10-24