互相关函数子结构损伤识别

张宁宁

北京工业大学建筑工程学院,北京

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月17日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

建筑结构在长期服役过程中不可避免地会产生结构损伤,因此需要对结构进行健康监测。传统的整体结构损伤识别在面对大型结构时,往往会面临计算效率低下,计算精度不足的困境,而子结构方法能够有效地降低这两方面的难度。此外,大部分建筑结构所受激励情况未知进一步提高了损伤识别的难度。互相关函数方法能够在不测量环境激励的情况下完成损伤识别,为解决此类问题提供了新的思路。鉴于此,本文提出了基于互相关函数的子结构损伤识别方法,并通过桁架子结构进行数值模拟,验证了所提方法的有效性。

关键词

互相关函数,子结构,损伤识别

Damage Identification of Substructure Using Cross-Correlation Function

Ningning Zhang

School of Architecture and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: May 25th, 2025; accepted: Jun. 17th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

Structural damage is inevitable during long-term service of building structures, therefore health monitoring of the structure is necessary. Traditional overall structural damage identification often faces the dilemma of low computational efficiency and insufficient computational accuracy when facing large structures, while substructure methods can effectively reduce the difficulty of these two aspects. In addition, the unknown excitation conditions of most building structures further increase the difficulty of damage identification. The cross-correlation function method can complete damage identification without measuring environmental stimuli, providing a new approach to solving such

problems. In view of this, this article proposes a substructure damage identification method based on cross-correlation functions and verifies the effectiveness of the proposed method through numerical simulations of truss structures.

Keywords

Cross-Correlation Function, Substructure, Damage Identification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

建筑结构受到风荷载、雪荷载、车辆荷载等荷载作用,在长期服役期间不可避免地会产生结构损伤。 例如钢筋锈蚀,混凝土的碳化。这些结构损伤无疑会造成结构承载能力下降,降低其安全性和耐久性, 影响结构的使用年限。因此,需要定期的对这些建筑结构进行损伤检测,为后续的结构评估和维护提供 依据。传感技术的发展为结构健康监测(SHM)领域提供了新的损伤识别方法,按照信息来源可分为基于 振动响应的损伤识别方法、基于模态信息的损伤识别方法等,按照识别对象可分为整体结构识别、子结 构识别等。本文将互相关函数应用于子结构中提出了基于互相关函数的子结构损伤识别方法。

2. 结构损伤识别方法

2.1. 整体结构损伤识别方法

在结构健康监测领域,整体结构损伤识别方法具有举足轻重的地位。早期提出的基于结构振动响应的损伤识别方法,通过测量结构全局的位移、应变、加速度等响应,采用模型简化的方式,进行整体结构损伤识别。Lu等人[1]综合了经验模态分解法(EMD)和自回归积分移动平均(ARIMA)模型进行桥梁结构损伤识别。将测量获取到结构振动响应分解为本征模态函数(IMF),并利用 ARIMA 模型提取损伤敏感特征(DSF)。通过对节点损伤敏感特征值的分析,确定桥梁结构中的损伤位置和损伤程度。

此外,通过全局布设传感器可实现结构整体的振动响应采集,实时监测结构损伤。夏烨等人[2]推导 了一般多梁结构的特征方程,并且深入研究了桥梁模态与铰接缝刚度之间的关系,在此基础上提出了基 于特征方程解的铰接缝刚度识别方法,利用实时监测数据实现了装配式板梁桥的损伤识别。陆军等人[3] 为解决地震荷载作用下结构损伤识别问题,结合高通滤波技术和经验模态分解方法对实时加速度响应信 号进行处理,而后利用高频能量比作为损伤指标进行结构损伤定位。

另外,随着技术的发展,超声波、X 射线等技术陆续被应用于整体结构损伤识别过程中。吕瑞宏等 人[4]将超声技术引入结构损伤识别,通过集成经验模态分解和小波阈值去噪技术对超声信号进行处理, 结合牛顿-拉夫逊算法完成了天然气管道防腐层的损伤识别。王玉玺[5]提出了一种针对井架结构的基于 超声波技术与深度学习算法相结合的损伤识别方法。闫瑛隆[6]将超声导波覆盖范围大,检测效率高的优 势与全波形反演相结合提出了基于超声导波和全波形反演的损伤识别方法,利用超声导波的频散理论激 励特定模态和频率的导波实现了钢板和钢-水泥砂浆板的损伤识别。

整体结构识别方法的全局性、实时性、适用广泛性使得其在实际工程中备受青睐,为结构安全性和 可靠性评估提供了坚实的理论依据。

2.2. 子结构损伤识别

与整体结构识别相比,子结构识别可极大减少待识别参数数量,因此具有更好的收敛精度和速度。 采用"分而治之"的理念,可将大型结构划分为多个子结构,逐一识别各子结构,继而实现大型结构的 损伤识别。虽然子结构损伤识别方法能够减少待识别参数数量和传感器数量,提高损伤识别效率,但复 杂的边界条件会增加子结构识别过程中的不确定性,限制了诸多子结构损伤识别方法的推广应用。

通过测量边界响应获得边界激励,为解决子结构复杂边界条件问题提供了途径。Zhang 等人[7]仅测量边界加速度响应,采用数值积分计算相应的位移和速度响应,继而获得边界激励; Koh [8]提出"准静态位移"概念,仅利用边界加速度响应即可获取边界激励。尽管上述方法可获得较为准确的边界激励, 但仍需完备的边界加速度响应数据。然而,在实际工程中完备的边界加速度响应通常难以获取,特别是 需要测量边界转动加速度时。

鉴于此,诸多学者将边界激励视为未知,侯吉林等人[9]在子结构边界处引入虚拟支座,实现了子结构的独立分离,并利用模态信息进行了子结构损伤识别。邹云峰等人[10]结合模态理论与改进的模态叠加法,提出了"超单元"模型,通过重新整合子结构消除了未知边界激励对识别结果的影响,并通过输电塔模型验证了其方法的准确性。雷鹰,朱佳佳等人[11]采用卡尔曼滤波或扩展卡尔曼滤波方法同时识别子结构损伤及边界激励。Li 等人[12]采用切比雪夫多项式描述边界激励,继而进行子结构边界激励和损伤识别。上述研究在边界激励未知情况下均能有效识别子结构损伤,但将边界激励视为未知,极大增加了待识别参数数量,导致子结构损伤识别难度大幅提升。

子结构损伤识别方法自 2003 年被提出以来,得到了充分的发展,在局部损伤识别领域大放光彩,同时在大型复杂结构的精确识别领域也颇有建树为结构安全性判断提供了新的思路和方法。

2.3. 基于互相关函数的损伤识别方法

在时域损伤识别领域中,基于互相关函数的损伤识别方法具有一席之地。互相关函数是一种数据处 理手段,可用于衡量两个信号之间的相似性。在结构损伤识别领域中,互相关函数通常用于分析结构在 随机激励作用下的动态响应信号。通过计算不同测点之间的互相关函数,可以提取出互相关函数幅值向 量等结构损伤的特征指标。当结构发生损伤时,其刚度、质量等都会产生相应的变换,继而噪声结构振 动响应的改变,最终引起互相关函数产生变化。

此外,与传统的基于结构振动响应损伤识别方法不同,基于互相关函数的损伤识别方法可无需测量 结构所受激励。在实际工程中,许多结构受到多种荷载作用且无法精确测量,这无疑给结构损伤识别提 出了巨大挑战。因此基于互相关函数的损伤识别方法在实际工程中具有巨大的应用前景。

3. 基于互相关函数的子结构损伤识别

在现实工程中,建筑结构往往受到风荷载、车辆荷载等环境激励作用,例如长江大桥等各类桥梁, 阿拉伯的迪拜塔等等。而环境激励种类复杂且变化多样,目前难以精准测量,因此如何在激励未知的情 况下进行损伤识别,这一问题受到了广泛关注。James III [13]在未知激励可由白噪声激励表示的基础上, 提出了自然激励技术。该理论指出白噪声激励作用下的互相关函数包含结构的模态信息。这为结构响应 相关函数用于损伤识别奠定了理论基础。

线性子结构受到多个外激励作用时,其运动方程可由下式表示:

$$\boldsymbol{M}_{sub}\ddot{\boldsymbol{u}}_{sub}\left(t\right) + \boldsymbol{C}_{sub}\dot{\boldsymbol{u}}_{sub}\left(t\right) + \boldsymbol{K}_{sub}\boldsymbol{u}_{sub}\left(t\right) = \boldsymbol{B}_{sub}\boldsymbol{F}_{sub}\left(t\right)$$
(1)

其中 M_{sub} 、 C_{sub} 、 K_{sub} 分别表示子结构整体的质量、阻尼、刚度矩阵,下标 sub 表示子结构; $\ddot{u}_{sub}(t)$ 、

 $\dot{u}_{sub}(t)$ 、 $u_{sub}(t)$ 分别表示子结构的加速度、速度和位移响应; $F_{sub}(t)$ 表示作用在子结构上的未知环境激励。 B_{sub} 表示未知环境激励的作用位置。对式(1)等式两侧乘子结构加速度,而后进行期望计算。子结构 m-th 自由度的加速度 \ddot{u}_m 和 n-th 自由度的加速度 \ddot{u}_n 的互相关函数可由下式求得:

$$\boldsymbol{M}_{sub}\boldsymbol{R}_{\ddot{\boldsymbol{u}}_{m}\ddot{\boldsymbol{u}}_{n}} + \boldsymbol{C}_{sub}\boldsymbol{R}_{\ddot{\boldsymbol{u}}_{m}\dot{\boldsymbol{u}}_{n}} + \boldsymbol{K}_{sub}\boldsymbol{R}_{\ddot{\boldsymbol{u}}_{m}\boldsymbol{u}_{n}} = \boldsymbol{B}_{sub}\boldsymbol{R}_{\ddot{\boldsymbol{u}}_{m}\boldsymbol{F}_{sub}}$$
(2)

其中 **R**_{*ü_mū_n*、 **R**_{*ü_mu_n*、 **R**_{*ü_mu_n*、 **R**_{*ü_mF_{sub}*分别为子结构 *m*-th 的加速度与子结构 *n*-th 加速度,速度,位移和环境 激励之间的互相关函数。由于环境激励服从高斯分布,因此环境激励自相关函数可由狄拉克函数表示,因此子结构互相关函数可表示为:}}}}

$$\boldsymbol{R}_{sub(\boldsymbol{\ddot{u}}_{m}\boldsymbol{\ddot{u}}_{n})}(\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{S}_{sub}) = \boldsymbol{H}_{sub(\boldsymbol{\ddot{u}}_{m}\boldsymbol{\ddot{u}}_{n})}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{S}_{sub}$$
(3)

其中 H 为由子结构计算出的脉冲响应矩阵, S 为与外激励有关的激励常数矩阵。利用图 1 所示桁架子结构进行数值模拟,该结构受到多个未知环境激励,长度为 20 m、高度为 2 m 的二维十跨简支钢桁架结构。此结构由 37 根杆件组成,杆件为空心圆柱,杆件外径为 20 mm,壁厚为 2 mm。杆件材料的杨氏模量为 210 GPa,密度为 7850 kg/m³。结构中的垂直和水平杆件的长度均为 2 m,所有斜杆的倾斜角度为 45°,长度均为 2.828 m。每根杆件考虑为一个杆单元,每个节点具有水平和竖直两个方向的自由度。为验证本文提出的子结构损伤识别方法,选取图 1 所示的子结构,该子结构包括 17 根杆件,整个子结构有 8 个边界自由度和 12 个内部自由度。考虑子结构内部存在结构损伤,子结构的 7 号和 15 号杆件的刚度分别降低了 20%和 30%。



Figure 1. 2D ten-span truss model and substructure model 图 1. 二维十跨简支梁钢桁架和子结构

图 2 展示了整体结构和子结构损伤识别结果,表 1 统计了两者的最大误差和平均误差。误差结果表明,采用加速度 - 加速度响应互相关函数能较好地识别子结构损伤情况。



Figure 2. Damage identification results of the whole structure and substructure SS1 图 2. 整体结构和子结构 SS1 的损伤识别结果

Table 1. Damage identification errors of different structure	e
表 1. 不同结构损伤识别结果误差	

工况	无噪声		10%噪声		20%噪声	
	平均误差(%)	最大误差(%)	平均误差(%)	最大误差(%)	平均误差(%)	最大误差(%)
整体结构	0.87	4.21	1.32	6.54	1.53	10.53
子结构	0.80	2.85	1.14	4.74	1.21	5.78

误差结果表明,我们所提出的子结构损伤识别方法与整体结构相比具有较好的损伤识别效果,并且 具有较好的噪声鲁棒性。

4. 结论

- 1) 本文提出的子结构损伤识别方法能够有效地识别子结构损伤。
- 2) 本文提出的子结构损伤识别方法与整体结构相比具有更好的识别精度。
- 3) 本文提出的子结构损伤识别方法具有较好的噪声鲁棒性。

参考文献

[1] Lu, W., Dong, J., Pan, Y., Li, G. and Guo, J. (2022) Damage Identification of Bridge Structure Model Based on Empirical

Mode Decomposition Algorithm and Autoregressive Integrated Moving Average Procedure. *Archives of Civil Engineering*, **68**, 653-667. <u>https://doi.org/10.24425/ace.2022.143060</u>

- [2] 夏烨,潘诚,龚丰宗,等.基于监测数据的装配式梁桥横向连接性能评估[J].中国公路学报,2025,38(3):317-330.
- [3] 陆军,朱旺,谢强. 基于动力响应的特高压变压器套管地震实时损伤识别[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6): 1325-1331.
- [4] 吕瑞宏, 解海龙, 王晨丽, 等. 基于空耦超声管道防腐层裂纹识别算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 234-245.
- [5] 王玉玺. 基于超声波与深度学习算法的井架结构损伤诊断[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [6] 闫瑛隆. 基于超声导波和全波形反演的损伤识别方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023.
- [7] Zhang, J., Koh, C.G., Trinh, T.N., Wang, X. and Zhang, Z. (2012) Identification of Jack-Up Spudcan Fixity by an Output-Only Substructural Strategy. *Marine Structures*, **29**, 71-88. <u>https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2012.10.001</u>
- [8] Koh, C. and Thanh, T. (2010) Output-Only Substructural Identification for Local Damage Detection. In: Taylor and Francis, Ed., Bridge Maintenance, Safety and Management, CRC Press, 128-128.
- [9] 侯吉林, 欧进萍, Jankowski U. 基于附加虚拟支座的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 118-123+129.
- [10] 邹云峰, 卢玄东, 阳劲松, 等. 基于模态综合法和模态叠加法的密集模态结构响应重构[J]. 工程力学, 2023, 40(3): 54-64.
- [11] 朱佳佳. 广义的未知激励下扩展卡尔曼滤波方法及其在子结构识别与振动控制的结合[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [12] Li, J. and Hao, H. (2016) Substructural Interface Force Identification with Limited Vibration Measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 395-410. <u>https://doi.org/10.1007/s13349-016-0157-8</u>
- [13] James, G.H. (1993) Extraction of Modal Parameters from an Operating HAWT Using the Natural Excitation Technique (Next). <u>https://ui.adsabs.harvard.edu/</u>