

基于动力特性的结构损伤识别研究现状与展望

孙腾飞, 杨卓懿*, 刘鹏, 周佳

山东交通学院 船舶与港口工程学院, 山东 威海 264200

DOI:10.61369/ETQM.2025070006

摘 要 : 结构损伤识别方法是结构健康检测系统的重要组成部分, 是确保工程结构安全的重要环节。本文旨在综述结构损伤识别的基本原理与方法, 详细介绍基于结构固有频率、振型、模态以及智能算法等不同技术路线的损伤识别方法, 并对这些方法的优缺点和应用范围进行分析。同时, 本文还对结构损伤识别方法的未来发展趋势进行展望, 探讨如何结合新技术、新方法, 推动结构损伤识别技术的不断创新和进步。为相关领域研究人员提供参考, 共同推动结构损伤识别技术的创新与应用。

关 键 词 : 损伤识别; 固有频率; 振型; 模态; 智能算法

Review of Structural Damage Identification Methods

Sun Tengfei, Yang Zhuoyi*, Liu Peng, Zhou Jia

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shandong Jiaotong University, Weihai, Shandong 264200

Abstract : Structural damage identification methodologies constitute a critical component of structural health monitoring (SHM) systems and represent an essential aspect in ensuring the safety of engineering structures. This paper aims to systematically review the fundamental principles and technical approaches in structural damage identification, providing a comprehensive examination of various methodologies including those based on natural frequencies, mode shapes, modal parameters, and intelligent algorithms. The work presents a systematic comparative analysis of these techniques, evaluating their respective advantages, limitations, and applicable domains. Furthermore, this study explores future development trajectories in damage identification technologies, with particular emphasis on the integration of emerging technologies and innovative methodologies to drive continuous advancement in this field. By examining potential synergies between conventional approaches and cutting-edge solutions such as AI-driven techniques and advanced sensor technologies, this review seeks to establish a framework for next-generation damage identification systems. The findings presented herein are intended to serve as a valuable reference for researchers in related disciplines and to foster collaborative innovation in the development and practical implementation of structural damage identification technologies.

Keywords : damage identification; natural frequency; vibration mode; modal parameter; intelligent algorithm

引言

近年来随着国家经济的飞速发展, 愈多工程结构逐渐大型化和复杂化。高层建筑物、桥梁、海洋平台、大坝等工程结构在长期服役过程中, 会因材料老化、环境腐蚀、过载疲劳等因素出现不可避免的损伤。这些损伤可能表现为细微的裂纹扩展、连接部件的松动或是材料性能的退化, 若未能得到及时的发现与修复, 不仅会缩短结构的使用年限, 更可能造成不可预估的后果。因此, 如何有效地对结构的健康状态进行监测并及时识别出潜在的损伤, 成为保障结构安全性和延长其服役寿命的关键技术之一。

结构损伤识别技术作为结构健康监测的重要组成部分, 其核心在于通过监测和分析结构的物理和力学特性变化, 实现对结构损伤的早期预警和精确定位。该技术不仅有助于及时发现并修复结构损伤, 防止事故发生, 还能为结构的维护管理提供科学依据, 从而延长结构的服役寿命, 降低维护成本。然而, 面对复杂多变的工程实际, 如何进一步提高损伤识别的准确性和可靠性, 仍是当前研究的热点和难点。

本文旨在综述结构损伤识别领域的研究进展, 分析不同损伤识别方法的原理、特点及应用范围, 探讨其在实际工程中的应用效果及存在的问题。同时, 结合当前研究趋势, 展望结构损伤识别技术的未来发展方向, 为相关领域的研究人员提供参考和借鉴。

作者简介: 孙腾飞 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为结构损伤识别, 结构健康监测, E-mail:23226022@stu.sdjtu.edu.cn。

通讯作者: 杨卓懿 (1983-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为结构力学分析, 结构健康监测, E-mail: zhuoyi0716@126.com。

一、结构损伤识别基本原理与过程

结构损伤识别是结构健康监测领域的关键技术，其基本原理主要建立在结构动力学和振动分析的基础之上。当结构发生损伤时，其内部的刚度、质量分布等物理特性会发生变化，这些变化进而影响到结构的动力学响应，如频率、振型、模态等。通过监测和分析这些动力学特性的变化，可以推断出结构中的损伤位置和程度。

一般情况下结构损伤识别可分为以下四个步骤：损伤响应、损伤定位、损伤量化以及损伤预测^[1]。首先，通过人为主观判断结构是否发生损伤，若直接判断发生损伤，则需要进一步确定损伤位置，若没有发现结构损伤，就需要布置传感器进行监测，对潜在的损伤进行检测及确定^[2]。之后，通过传感器对目标结构进行数据采集、信号预处理过滤噪声或无效数据，根据损伤量化的结果，计算出损伤的具体指标。对比计算结果与实际实验数据或仿真结果，验证损伤识别的精度，最后，生成损伤评估报告，记录损伤位置、程度及建议的维修措施。具体损伤检测流程图如图1所示。

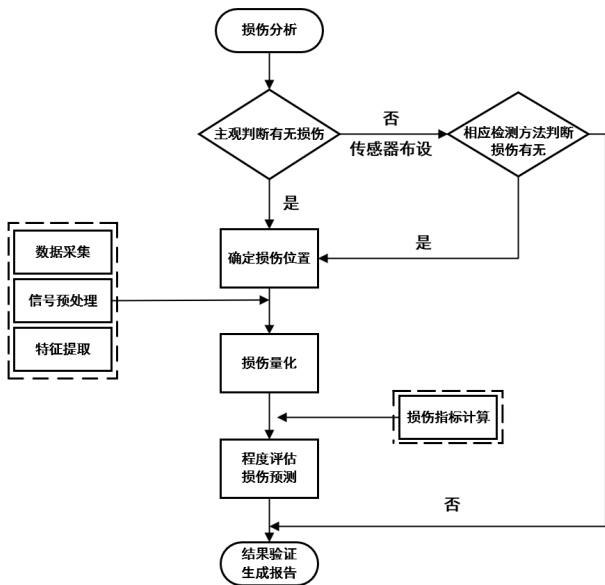


图1 损伤检测流程图

二、结构固有频率的损伤识别方法介绍

固有频率是结构在自由振动或受迫振动中表现出的基本动力学特性，它反映了结构整体的刚度和质量分布。当结构发生损伤时，无论是由于材料老化、疲劳累积还是外部冲击，其刚度通常会发生改变，进而导致固有频率的改变。

Cawley 和 Adams 等^[3]最早提出了利用固有频率变化定位结构的损伤位置。Salawu 等^[4]分析了结构损伤对固有频率的影响，提出固有频率的变化作为结构损伤的重要指标。Hearn 和 testa

等^[5]提出了固有频率平方变化比式，得出低阶模态的固有频率和模态振型变化是最容易检测到的指标，但结合高阶模态数据可以提高检测的准确性。在国内，王凤丹等^[6]针对小损伤识别，提出一种基于固有频率和应变模态加权 $lp(0 < p < 1)$ 正则化模型，通过悬臂梁试验得出在多种噪声水平下均展现出更强的抗噪能力。钟建军等^[7]通过有损结构前几阶固有频率和对应的模态位移数据，提出一种基于广义逆的损伤识别方法，并验证其有效性。

因此，通过监测结构固有频率的变化，可以作为一种有效的手段来识别和评估结构中的损伤。

三、结构振型的损伤识别方法介绍

振型是结构在特定振动模式下，各点位移随时间的分布规律。在结构动力学中，振型通常通过求解结构振动方程的特征向量来获得，每个特征向量对应一个特定的振动模式，即一个特定的振型^[8]。对于线性系统，振型是唯一的，且与系统的初始条件无关^[9]。与固有频率相比，振型对损伤位置更为敏感一些，它提供了更多关于结构损伤的空间信息，对于结构复杂，局部微小的损伤，通过对不同模态的振型分析得到不同频段下的结构动态响应，综合这些模态的信息能够提高损伤识别的准确性。

West^[10]等在1986年首次提出利用模态保证准则（MAC）识别和评估结构变化的方法。Kim 等^[11]通过使用基于频率与振型的方法联合识别了梁结构的损伤，并比较了它们的识别特点与互补性。Haoyue C 等^[12]基于模态振型的动态特征参数，通过使用 COMAC 和推导的曲率模态及模态柔度指数，对六种损伤条件下的船舶进行数值模拟和实验验证。在国内，陈淮等^[13-14]利用刚架桥损伤前后的曲率模态振型，通过数值仿真分析得出该指标可以有效地对损伤位置进行定位识别。之后又提出了根据频率和振型摄动进行结构损伤识别的方法，只需采用一阶模态，即可完全识别出结构损伤，有效地避免“伪损伤”的现象，识别结果更加可靠。王盟等^[15]提出了一种基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法，通过对悬臂梁和斜拉桥的数值算例验证，结果表明所提方法不仅准确高效地识别了损伤，还具备良好的抗噪声能力。

四、结构模态的损伤识别方法介绍

结构模态是结构动力学中的一个核心概念，它涵盖了模态频率、模态振型以及模态阻尼等多个重要参数。当结构受到损伤时，这些模态参数会发生显著变化，从而为损伤识别提供了有力依据。以下将详细介绍结构模态的损伤识别方法，特别是针对曲率模态、模态柔度、模态应变能以及应变模态等方面的内容。

（一）曲率模态

曲率模态是指在特定模态下，结构各点的曲率分布，是一种能够反映结构局部特性变化的模态参数，通过比较损伤前后模态

曲率的变化,可以定位损伤位置并评估损伤程度。由于曲率模态无法直接测量,通常需要通过位移模态间接获得。其计算方法是通过对中心差分法对位移模态进行处理,从而推导出曲率模态。Pandey等^[16]最早提出了一种基于曲率模态形状变化的结构损伤检测方法,通过分析振动结构的模态位移数据得到的曲率模态形状,可以有效识别结构中的损伤。Daniele等^[17]在论文中提出并比较了多种基于模态曲率分析的损伤识别方法,解决了结构损伤检测中灵敏度不足、噪声影响大及传感器布局不合理等问题。Gorgin等^[18]通过模态分析得到结构的模态形状,并通过差分法计算有损和无损模态形状的主曲率进行比较,有效识别出了损伤位置和损伤程度。徐飞鸿等^[19]采用曲率模态曲线分析技术,通过最小二乘拟合法计算损伤区域的有效面积,验证了该方法在含噪声干扰条件下的精准性和鲁棒性。任现才等^[20]以简支木梁为研究对象,提出了一种基于曲率模态和小波变换的木梁损伤识别方法,根据小波系数差指标的突变峰值判断木梁的损伤位置,通过拟合小波系数差指标与损伤程度的关系式估算木梁的损伤程度。

(二) 模态柔度

模态柔度是结构在特定模态下的柔性度量,指的是一个结构在外力作用下的变形能力,通常用柔度矩阵来表征,与刚度相对,刚度描述的是结构抵抗变形的能力,而柔度则反映了结构的易变性。当结构发生损伤时,其刚度矩阵会发生变化,进而导致模态柔度发生改变。柔度矩阵 $\mathbf{F}$ 定义为结构在单位力作用下的位移响应,可以用结构的模态参数表示:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i \phi_i^T}{\tilde{e}_i} \quad (3)$$

式中: ϕ_i 是第 i 阶模态振型; ϕ_i^T 是模态向量的转置,表示模态向量的列向量形式; n 表示系统的模态总数(通常与结构的自由度相关); $\tilde{e}_i$ 是第 i 阶模态的特征值,通常与结构的固有频率相关。特征值的倒数 $1/\lambda_i$ 与柔度成正比,因为刚度矩阵的特征值对应着系统的刚度,而柔度是其逆。

(三) 模态应变能

模态应变能是指在特定模态下,结构各点的应变能分布。当结构发生损伤时,损伤区域的应变能会发生变化,因为损伤会导致该区域的应力分布和应变状态发生改变。通过计算和分析模态应变能的变化,可以定位损伤位置并评估损伤程度。模态应变能损伤识别方法具有物理意义明确、能够直接反映结构损伤对能量分布的影响等优点。Shi等^[21]于1998年首次提出了单元模态应变能的概念,介绍了基于每个结构元件的 MSE 的损伤定位方法,并推导了 MSE 对损伤的灵敏度,通过对钢框架结构的实验研究,得到所提方法对噪声敏感,但只需要不完整的测量模态形状和解析系统矩阵就可以定位单个和多个损伤,之后在此基础上,改进了基于单元模态应变能的损伤量化。

结构单元模态应变能(式(4))由单元刚度和相应单元的振型

获得,当结构出现损伤时,对应损伤位置的单元刚度会降低,相应的振型会发生变化,从而引起单元的模态应变能发生变化(式(5),式(6),式(7))^[22]。

$$MSE_{ij} = \{\phi_i\}^T [\mathbf{K}_j] \{\phi_i\} \quad (4)$$

$$MSE_{ij}^d = \{\phi_i\}^{dT} [\mathbf{K}_j]^d \{\phi_i\}^d \quad (5)$$

式中,上标“d”表示结构的损伤情况; $[\mathbf{K}_j]$ 为无损结构第 j 单元的刚度矩阵; $[\mathbf{K}_j]^d$ 表示结构受损后按照整体坐标系扩展成新的刚度矩阵; $\{\phi_i\}$ 和 $\{\phi_i\}^d$ 分别表示无损与损伤状态下结构的第 i 阶模态振型,可通过应变能的变化情况来识别损伤。

$$MSEC_{ij} = MSE_{ij}^d - MSE_{ij} = \phi_i^T \mathbf{K}_j \Delta \phi_i \quad (6)$$

$$MSECR_{ij} = \frac{|MSE_{ij}^d - MSE_{ij}|}{MSE_{ij}} \quad (7)$$

式中: $MSEC_{ij}$ 为单元模态应变能变化值(均方误差变化量),即损伤或状态变化导致的误差增量。 $MSECR_{ij}$ 为单元模态应变能变化率(均方误差变化率),数值越大,表示系统在该位置的性能或状态发生了显著的变化。

(四) 应变模态

应变模态是结构在振动过程中,各点应变随时间的分布规律。与位移模态相比,应变模态提供了更多关于结构损伤的信息,因为应变对结构局部损伤更为敏感。以下将详细介绍应变模态的几个重要参数及其在损伤识别中的应用。

1. 应变模态变化差

应变模态变化差是指结构在损伤状态与无损状态(或参考状态)下的应变模态值之差。这个差值能够反映出结构在特定位置或区域上的应变变化,从而帮助识别损伤位置或评估损伤程度。其公式一般表示为:

$$[\Delta \psi_{ij}^k] = [\psi_{ij}^k] - [\psi_{ij}^k]^d \quad (i=1,2,\dots,r; j=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

2. 应变模态变化率

应变模态变化率是指损伤前后应变模态的差值与未损伤时应变模态的比值。通过计算应变模态变化率,可以量化损伤对结构应变分布的影响,从而更准确地评估损伤程度^[23]。

$$\sigma^k = \frac{[\Delta \psi_{ij}^k]}{[\psi_{ij}^k]^d} = \frac{[\psi_{ij}^k] - [\psi_{ij}^k]^d}{[\psi_{ij}^k]^d} \quad (i=1,2,\dots,r; j=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

式中: $[\Delta \psi_{ij}^k]$ 表示在 k 方向下,第 i 阶模态、第 j 单元的应变模态变化差。 $[\psi_{ij}^k]$ 和 $[\psi_{ij}^k]^d$ 分别表示无损和有损状态下, k 方向第 i 阶模态、第 j 单元的应变模态值。这里的 k 、 i 、 j 分别代表结构的不同方向、模态阶数和单元编号。

3. 应变模态差分曲线法

应变模态差分曲线法是一种通过绘制应变模态差分曲线来识别结构损伤的方法。该方法通过计算损伤前后各测点应变模态的差值，并绘制成曲线，然后通过分析曲线的形状和特征来判断损伤位置和程度。应变模态差分曲线法具有直观性强、易于实施等优点，特别适用于实际工程中的损伤识别。

综上所述，基于模态的损伤识别方法是一种有效且可靠的技术手段，它涵盖了曲率模态、模态柔度、模态应变能以及应变模态等多个方面。这些方法各具特色，能够全面反映结构损伤的特性，为结构的健康监测和损伤评估提供了有力支持。在实际应用中，可以根据具体需求和条件选择合适的方法或结合多种方法进行综合分析，以提高损伤识别的准确性和可靠性。

五、结构智能损伤识别方法

在结构工程中，智能损伤识别方法的应用日益广泛，这些方法利用先进的算法和技术来检测和评估结构的健康状况。以下是三种主要的智能损伤识别方法：遗传算法、神经网络和深度学习。

（一）遗传算法

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传学机制的搜索启发式算法。它基于生物进化理论，通过选择、交叉（杂交）和变异等操作，不断迭代进化，最终得到问题的近似最优解。

Holland等^[24]在1975年最早提出基于遗传算法的损伤识别方法，系统地阐述了遗传算法的理论和应用，通过模拟自然界中的遗传和进化过程，来解决复杂的优化问题。该方法的提出奠定了遗传算法及其在人工智能、机器学习和优化领域中的广泛应用的基础。Khaji等^[25]展示了遗传算法在梁结构中多裂纹检测上的显著优势，特别是在任意数量裂纹情况下，遗传算法能够有效识别裂纹的位置和深度。马成武^[26]在遗传算法基础上提出了一种基于自适应鲸鱼优化算法（AWOA）的桥梁传感器优化布置方法，并通过滨州黄河公路斜拉桥的有限元模型验证，同时使用三种损伤识别方法准确定位桥梁损伤，验证了AWOA的有效性。

虽然遗传算法具有自适应性、抗噪性、鲁棒性，全局优化能力强等优点，但其计算量大，耗时较长适合复杂结构损伤识别，但不适合实时监控。

（二）神经网络与深度学习

神经网络是一种受生物神经系统启发的计算模型，广泛用于机器学习、人工智能等领域，由大量的人工神经元（类似于生物神经元）组成，通常分为三种主要层次：输入层、隐藏层、输出层^[27]，通过层层连接进行信息处理和模式识别，其结构示意图如图2所示。神经网络根据其结构和应用领域的不同可分为前馈神经网络、卷积神经网络、递归神经网络、生成对抗网络等，其基本思想是模拟人类大脑如何学习和处理信息，从而解决复杂的非线性问题。

神经网络损伤识别法工作原理是将结构的传感器数据（如振动信号、位移或应变）输入网络，网络通过多个层次的非线性计算自动提取关键特征，并根据训练数据中的损伤标签进行学习。训练好的神经网络模型能够识别输入数据中的损伤模式，并准确预测结构是否存在损伤、损伤的具体位置和程度，通过学习结构的健康和损伤状态之间的特征差异来进行损伤识别。

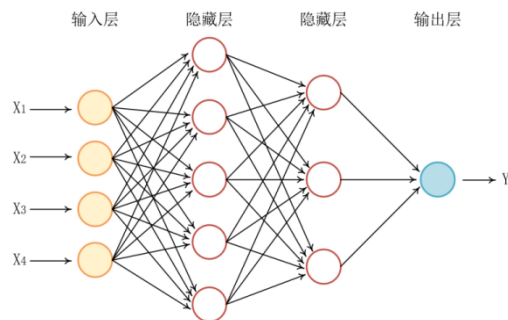


图2 神经网络模型示意图

深度学习是机器学习的一个分支，通过构建深层神经网络模型来学习数据的内在规律和表示层次，尤其特别擅长处理海量的非结构化数据，如图像、音频、视频和文本等。Lin等^[28]利用深度学习技术，特别是卷积神经网络（CNN），从传感器的原始数据中自动提取损伤敏感特征，从而实现结构损伤的自动检测。实验结果表明，深度学习算法在结构损伤检测中表现出色，其精度明显高于传统的小波分析方法。Teng等^[29]提出了一种结合应变能和动态响应的CNN方法，与仅使用单一类型数据的方法相比，该方法在定位精度、检测灵敏度和抗噪声能力方面均有显著提高，为多源数据融合在土木工程领域的应用提供了新的思路。骆勇鹏等^[30]通过简支梁、钢框架结构数值模型和IABMAS BHM Benchmark数值模型验证得出，所提的一维卷积神经网络的结构损伤识别方法能够准确识别结构的损伤位置和损伤程度，并具备一定的抗噪性能。

六、结构损伤识别方法展望

随着科技的进步和工程需求的不断增加，结构损伤识别方法也在不断发展和完善。未来，结构损伤识别方法将朝着更加智能化、精准化和高效化的方向发展。以下是对结构损伤识别方法的一些展望：

（1）智能化和自动化技术。通过传感器技术、大数据处理技术和人工智能技术，系统能够自动采集、处理和分析结构健康监测数据，实现损伤的实时监测和预警。

（2）精细化与多尺度分析技术。对结构进行多尺度建模和仿真，可以更准确地描述结构的损伤机理和演化过程。同时，结合高分辨率传感器和成像技术，可以实现对结构微小损伤的精准识别，提高识别的灵敏度和可靠性。

（3）实时监测与集成技术。通过集成先进的传感器网络和数

据处理平台,结合分布式光纤传感技术和纳米材料传感技术,可以实现对结构健康状态的持续监测和实时评估,结合振动理论、信号处理技术和人工智能算法,可以开发出更加高效和准确的损伤识别算法。

(4)非线性损伤识别技术。实际工程结构多为非线性系统,因此非线性损伤识别技术将成为未来的研究热点。通过发展更加精确的非线性动力学模型和非线性信号处理方法,可以更好地描

述结构在损伤状态下的动态响应特性,提高损伤识别的准确性和可靠性。

(5)数据驱动与知识融合技术。通过收集和分析大量的结构健康监测数据,可以挖掘出数据背后的规律和特征,建立更加准确的损伤识别模型。同时,利用机器学习中的迁移学习、强化学习等技术,实现对新结构或新损伤模式的快速适应和识别。

参考文献

- [1]SEN D, AGHAZADEH A, MOUSAVI A, et al. Sparsity-based approaches for damage detection in plates [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 333-346.
- [2]陈雅璠. 结构损伤识别技术的研究 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(17): 173-176.
- [3]Cawley P, Adams R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14(2): 49-57.
- [4]Salawu O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review [J]. Journal of Engineering Structures, 1997, 19(9): 718-723.
- [5]Hearn G, Testa R B. Modal Analysis for Damage Detection in Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(10): 3042-3063.
- [6]王凤丹, 宋学力, 李荣鹏, 等. 基于固有频率和应变模态加权 l_p 正则化模型的小损伤识别 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 124-134.
- [7]钟军军, 董聪, 夏开全. 基于频率及振型参数的结构损伤识别方法 [J]. 土木工程与管理学报, 2009, 26(4): 1-4.
- [8]李志强. 基于结构健康检测理论的构件损伤识别研究 [D]. 中国海洋大学 港口、海岸及近海工程, 2006.
- [9]姚忠伟, 全强, 刘立军. 结构损伤识别理论的研究现状与进展 [J]. 黑龙江交通科技, 2005, 28(9): 4.
- [10]West W M. Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an Orbiter test specimen [J]. 1986.
- [11]Kim J T, Ryu Y S, Cho H M, et al. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method- ScienceDirect [J]. Engineering Structures, 2003, 25(1): 57-67.
- [12]Haoyue C, Jun G, Yin Z, et al. Experimental research on damage identification of fully free beams based on modal shapes [J]. Applied Ocean Research, 2023, 139.
- [13]陈淮, 禹丹江. 基于曲率模态振型进行梁式桥损伤识别研究 [J]. 公路交通科技, 2004, (10): 55-57+65.
- [14]陈淮, 何伟, 王博, 等. 基于频率和振型振动的结构损伤识别方法研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(12): 244-249.
- [15]王盟, 翁顺, 余兴胜, 等. 基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 10-19.
- [16]Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [17]Daniele D, Gabriele G. Damage identification techniques via modal curvature analysis: Overview and comparison [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 52-53: 181-205.
- [18]Gorgin R, Wang Z P. Structural Damage Identification Based on Principal Curvatures of Mode Shape [J]. 2020, 25(4): 566-576.
- [19]徐飞鸿, 朱检, 张婷婷. 基于曲率模态曲线的结构损伤识别方法 [J]. 世界地震工程, 2015, 31(04): 36-42.
- [20]任现才, 孟昭博, 王鑫, 等. 基于曲率模态和小波变换的木梁损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(04): 79-88.
- [21]Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Improved damage quantification from elemental modal strain energy change [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5): 521-529.
- [22]侯永乐, 李传梁, 常品要. 基于动力特性的结构损伤识别研究方法的分析 [J]. 山西建筑, 2022, 48(15): 74-77.
- [23]刘银伟. 基于应变模态的压电智能层合板结构损伤识别方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2015.
- [24]Holland J H. Adaptation In Natural And Artificial Systems [J]. 1975.
- [25]Khaji N, Mehrjoo M. Crack detection in a beam with an arbitrary number of transverse cracks using genetic algorithms [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(3): 823-836.
- [26]马成武. 桥梁健康监测传感器优化布置及损伤识别方法研究 [D]. 兰州交通大学, 2023.
- [27]王术新, 姜哲. 基于结构振动损伤识别技术的研究现状及进展 [J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 4.
- [28]Lin Y Z, Nie Z H, Ma H W. Structural Damage Detection with Automatic Feature-Extraction through Deep Learning. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(12), 1025-1046.
- [29]Teng S, Chen G, Gong P, et al. Structural damage detection using convolutional neural networks combining strain energy and dynamic response [J]. Meccanica, 2020, 55(4): 945-959.
- [30]骆勇鹏, 王林瑩, 廖飞宇, 等. 基于一维卷积神经网络的结构损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 145-156.