

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250707002

基于非接触式视觉测量的结构损伤和冲击荷载识别方法*

刘泽刚¹, 潘梁¹, 张兆昌², 富春伟¹, 张广才³

(1. 丽水职业技术学院, 浙江 丽水 323000; 2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 3. 济南大学土木工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 工程结构在外荷载作用下可能出现损伤, 非接触式视觉测量方法已用于结构损伤识别或荷载识别, 但没有考虑结构损伤和未知输入荷载的耦合。为此, 提出一种基于非接触式视觉测量的结构损伤和冲击荷载迭代识别方法。首先利用亚像素模板匹配算法提取结构的多点位移响应, 根据输入荷载与输出响应的关系重构外荷载, 然后利用重构的外荷载和估计的结构参数计算位移响应, 将实际测量和计算位移响应之间的差值作为目标函数, 采用自适应混合群体智能算法优化该目标函数, 最终同时识别结构损伤和冲击荷载。通过冷弯型钢墙体结构室外振动台试验以及八层钢框架实验验证该方法的有效性, 结果表明, 所提出的方法能够同时准确识别结构损伤和冲击荷载, 在结构健康监测领域具有较好的工程应用前景。

关键词: 计算机视觉; 损伤识别; 荷载识别; 混合算法; 位移测量

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0467-10

Identification of Structural Damage and Impact Force Based on Non-contact Visual Measurement

LIU Zegang¹, PAN Liang¹, ZHANG Zhaochang², FU Chunwei¹, ZHANG Guangcai³

(1. Lishui Vocational and Technical College, Lishui 323000, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, China)

Abstract: Engineering structures may suffer damage under external loads, and non-contact visual measurement methods have been used for structural damage identification or load identification, but the coupling effect between structural damage and unknown input loads has not been considered. Therefore, this study proposed an iterative identification method for structural damage and impact force based on non-contact visual measurement. First, the multi-point displacement response of the target structure was extracted by a sub-pixel template matching algorithm, and the external load was reconstructed based on the relationship between input load and output response. Then, the displacement re-

* 收稿日期: 2025-07-07; 修回日期: 2025-09-25

基金项目: 浙江省高职教育“十四五”第一批教学改革项目(jg20230333)、浙江省丽水市2024年市本级公益性技术应用研究项目(2024GYX25)、博士后面上项目(2025M773297)、国家资助博士后研究计划项目(GZC20252163)、镇江市青年科技人才托举工程项目(镇科协[2025]21号)资助

作者简介: 刘泽刚(1977—), 男, 讲师/工程师, 在职研究生。主要从事结构损伤检测加固研究。E-mail: 873793578@qq.com

通信作者: 张兆昌(1990—), 男, 助理研究员, 博士。主要从事结构力学性能研究。E-mail: 1538719276@qq.com

sponse was calculated using the reconstructed external load and estimated structural parameters. The difference between the measured and calculated displacement responses was defined as the objective function, which was then optimized by an adaptive hybrid swarm intelligence algorithm. Finally, the structural damage and impact force were identified simultaneously. The effectiveness of the method was verified through an outdoor shaking table test on a cold-formed steel framed wall structure and an experiment on an eight-story steel frame. The results showed that the proposed method could accurately identify structural damage and impact force simultaneously, demonstrating favorable application prospects in the field of structural health monitoring.

Keywords: computer vision; damage identification; force identification; hybrid algorithm; displacement measurement

0 引言

在基础设施的长期服役过程中,荷载变化、自然灾害、环境因素等可能对结构造成损伤,进而威胁其安全性,大跨度桥梁、高层建筑、大跨空间结构等基础设施的突然倒塌会造成巨大的人员伤亡和财产损失。此外,随着城市化进程的推进,既有基础设施老化问题日益凸显,“城市更新”和“城市体检”等成为行业发展的新趋势。在此背景下,结构健康监测和状态评估技术不仅是确保基础设施运行安全的关键手段,也是推动城市更新和提升基础设施韧性的重要技术支撑。研究人员已开展了大量的结构健康监测和损伤识别研究以实现结构状况评估,确保结构的安全性和耐久性^[1-2]。

基于振动响应的结构损伤识别方法得到了越来越多的关注,可大致分为频域方法和时域方法。频域方法能够基于固有频率^[2]、模态振型^[3]、频响函数^[4]和模态应变能^[5]等模态参数的变化识别结构损伤,但以上模态参数对低阶模态和局部的小损伤不够敏感,且易受噪声的影响。时域方法直接利用时域响应数据进行结构损伤识别,更加简单方便,通常可将其转化为一个优化问题,目标函数定义为实测响应与估计响应之间的差值。损伤识别的反问题可使用启发式优化算法最小化目标函数来求解,遗传算法(genetic algorithm,简称GA)、差分进化算法(differential evolution,简称DE)、粒子群优化、人工蜂群算法、鲸鱼优化算法等智能算法已用于损伤识别并取得了良好的效果。黄民水等^[6]使用改进布谷鸟搜索算法识别了ASCE Benchmark结构的损伤;Z. Ding等^[7]利用改进Jaya算法和有限的测量信息并考虑较大不确定性准确识别出钢筋混凝土桥

的损伤。单一的群体智能算法在解决复杂的实际问题时可能难以平衡全局探索和局部搜索之间的关系,本文结合树种子算法(tree seed algorithm,简称TSA)和蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm,简称BOA),提出自适应混合优化算法(adaptive hybrid optimization algorithm,简称为AHOA),该算法利用变异池策略,能够从单一算法中动态选择最适合的搜索策略,比单一算法具有更强的优化能力。

应当注意,大多数时域方法通常需要已知输入激励来预测结构响应,但实际情况中,作用在结构的荷载,如风荷载、冲击荷载、波浪荷载,往往难以直接测量,因此,实际结构的损伤和未知输入荷载可能同时存在。近年来,部分研究人员尝试同时识别结构损伤和未知输入荷载,例如,B. Xu等^[8]提出一种加权自适应迭代最小二乘估计法,使用部分测量激励识别结构参数和动态输入荷载,并通过一个四层框架结构验证了该方法的有效性。H. Sun等^[9]提出基于高斯-牛顿法和贝叶斯推理正则化的方法,采用输出响应迭代识别结构参数和输入荷载。Y. Lei等^[10]提出未知输入的卡尔曼滤波器方法,使用部分测量的结构响应同时识别结构状态和未知激励,并通过三层钢结构振动台实验验证了该方法的有效性。

然而,以上研究均使用加速度计、应变计、LVDT等传统的接触式点式传感器,需要的传感器数量较多,且安装复杂,花费成本高,传统的接触式传感器在结构健康监测的应用仍然存在一定的阻碍。与传统的接触式测量技术相比,新兴的非接触式视觉测量不需要与结构直接接触,从而减少了设备安装与维护成本,提高了灵活性与实用性^[11]。与点式传感器相比,视觉测量是非接触式分布式传

感,可以从单个相机录制的视频图像中同时提取多点的位移,有效提高了监测效率。此外,使用高帧率相机和先进的位移提取算法,能够实现高精度的结构响应测量,可为结构健康监测提供可靠的数据支撑^[12]。

本文将非接触式视觉测量技术应用于结构健康监测,提出一种基于非接触式位移测量和自适应混合优化算法的方法,同时识别结构损伤和冲击荷载。该方法采用亚像素模板匹配算法测量结构的位移响应,根据输入荷载—输出响应的关系重构未知冲击荷载。然后,利用重构的外荷载和估计的结构参数计算位移响应,将实际测量和计算位移响应之间的差值作为目标函数。随后,采用提出的自适应混合优化算法迭代未知结构参数,最小化目标函数,重复以上过程,最终同时识别结构损伤和冲击荷载。最后,通过钢墙体结构室外振动台试验以及八层钢框架实验验证该方法的适用性和有效性。

1 亚像素模板匹配算法

亚像素模板匹配算法是一种用于高精度位移测量的图像处理方法,能够突破像素级精度,实现亚像素级的位移测量。亚像素模板匹配算法的核心在于对模板图像与目标图像进行匹配计算来确定其位移,为了减少计算时间,搜索区域将被限制在模板附近的一个感兴趣区域内。

对于一对相同尺寸 $A \times B$ 的图像 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$, $q(x, y)$ 与图像 $p(x, y)$ 有相对平移,则 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$ 之间的互相关可以定义为:

$$R_{PQ}(x_0, y_0) = \sum_{x, y} p(x, y) q^*(x - x_0, y - y_0) = \sum_{u, v} P(\rho, v) Q^*(\rho, v) \exp \left[i2\pi \left(\frac{\rho x_0}{A} + \frac{\rho y_0}{B} \right) \right] \quad (1)$$

式中, (x_0, y_0) 是坐标偏移的量; $P(\rho, v)$ 和 $Q^*(\rho, v)$ 表示离散傅里叶变换。

图1展示了基于亚像素模板匹配算法的位移提取方法,过程如下:

阶段1:像素级粗搜索,通过傅里叶变换,根据式(1)中的互相关 R_{PQ} 的峰值估计模板图像与目标图像的初始位移。

阶段2:亚像素精细搜索,通过 κ 的上采样因子计算关于初始估计的 1.5×1.5 像素邻域内的互相关,通过搜索 $(1.5\kappa, 1.5\kappa)$ 邻域的峰值,可以获得像

素 $1/\kappa$ 的亚像素分辨率。

然后,将图像坐标中的亚像素位移转换为物理坐标中的位移,如下式所示:

$$dis_{\text{physical}} = dis_{\text{image}} \times SF \quad (2)$$

式中, dis_{physical} 为真实物体长度, mm; dis_{image} 为图像中对应的物体长度, mm; SF 为缩放因子,可以通过将真实物体尺寸与图像中的像素尺寸进行比较来计算。

图像中目标物在第1帧和第 i 帧的运动关系为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{00} & \delta_{01} & \delta_{02} \\ \delta_{10} & \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{20} & \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, (x_1, y_1) 和 (x_i, y_i) 分别为在第一帧图像和第 i 帧图像中点的坐标; $[\delta_{00}, \delta_{01}, \dots, \delta_{22}]$ 是未确定的系数向量。

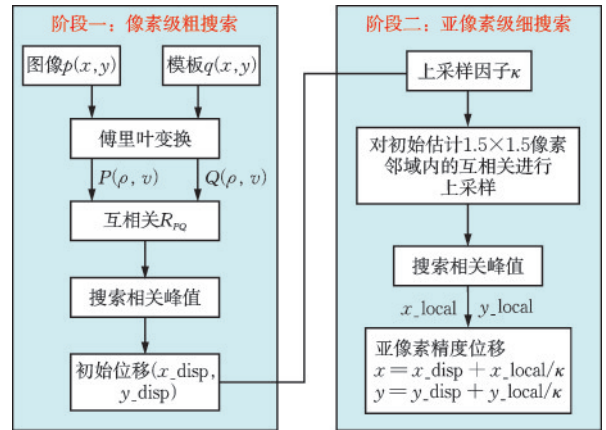


图1 亚像素模板匹配算法的流程

Fig.1 Flowchart of subpixel template matching algorithm

2 冲击荷载识别方法

外荷载作用下多自由度线性结构的运动方程可表示为:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = Lf(t) \quad (4)$$

式中, $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ 分别表示结构的加速度、速度和位移响应; M , C 和 K 表示结构的质量、阻尼和刚度矩阵; 质量可由几何形状和材料属性计算得到; 采用瑞利阻尼模型, $C = a_1 M + a_2 K$, 阻尼系数 a_1 和 a_2 由前两个模态阻尼比确定; L 是与输入荷载 $f(t)$ 相关的位置矩阵。

脉冲响应函数可以表示为特定初始条件的自由振动状态,假设系统处于初始静态平衡,可以通

过下式计算单位脉冲响应函数:

$$\begin{cases} M\ddot{h}(t) + C\dot{h}(t) + Kh(t) = 0 \\ h(0) = 0, \dot{h}(0) = M^{-1}L \end{cases} \quad (5)$$

式中, $h(t)$ 、 $\dot{h}(t)$ 、 $\ddot{h}(t)$ 分别为位移、速度和加速度单位脉冲响应函数。

利用 Duhamel 积分可以得到 t 时刻第 μ 个自由度的相对位移响应 $u_\mu(t)$:

$$u_\mu(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_\mu(t - \tau) f(\tau) d\tau \quad (6)$$

式(6)的不连续形式为:

$$u_\mu(t) = h_\mu(t) f(t) \quad (7)$$

上式可进一步表示为:

$$u = Hf \quad (8)$$

式中, u 为测量的位移响应; f 为未知的冲击荷载; H 为传递函数矩阵, 可通过下式计算:

$$H = \begin{bmatrix} h(0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h(1) & h(0) & 0 & 0 & 0 \\ h(2) & h(1) & h(0) & 0 & 0 \\ M & M & M & M & M \\ h(t) & h(t-1) & h(t-2) & \dots & h(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8)的荷载识别问题可转化为最小化 $\|u - Hf\|^2$, 使用最小二乘法识别冲击荷载, 但测量噪声使荷载识别成为一个不适定问题, 由于其病态性质, 通常无法直接解决。Tikhonov 正则化方法可以有效解决病态逆问题, 降低噪声对荷载识别结果的影响, 如下式所示:

$$f_{\text{Tikhonov}} = \operatorname{argmin} \left(\|u - Hf\|_2^2 + \lambda \|f\|_2^2 \right) \quad (10)$$

式中, λ 为非负的正则化参数, 控制残差项和正则化项的平衡, 该参数的取值对荷载识别结果至关重要, 选择参数值的一种常用方法是 L 曲线法。

可进一步推导外荷载的计算公式为:

$$f_{\text{Tikhonov}} = (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T u \quad (11)$$

式中, I 为单元矩阵。

3 结构损伤识别方法

3.1 结构损伤模型和目标函数

本文采用常用的结构损伤模型^[7], 即通过折减单元刚度考虑结构损伤, 忽略质量的变化^[13], 引入单元损伤系数向量 $\alpha_i = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{ne}]$, 损伤结构的总体刚度矩阵为:

$$K^d = \sum_{i=1}^{ne} (1 - \alpha_i) K_i^{ele}, 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad (12)$$

式中, K^d 为损伤结构的总体刚度矩阵; K_i^{ele} 表示无损伤状态下第 i 个单元刚度矩阵; ne 代表单元数量; 单元损伤系数 α_i 的取值范围是 $[0, 1]$, 结构刚度系数可计算为 $\theta = \{(1 - \alpha_1), (1 - \alpha_2), \dots, (1 - \alpha_{ne})\}$ 。

利用时域位移响应识别结构损伤可转化为一个优化问题, 目标函数定义为最小化实测位移响应和估计响应之间的差值, 如下式所示:

$$Obj = \frac{\|u_{\text{mea}} - u_{\text{est}}(\theta)\|_2}{\|u_{\text{mea}}\|_2} \quad (13)$$

式中, u_{mea} 是利用非接触视觉方法从实际结构上提取的位移响应; $u_{\text{est}}(\theta)$ 是未知结构参数为 θ 时由数值模型估计得到的位移响应。

3.2 损伤识别算法

3.2.1 单一优化算法

群体智能优化算法, 如遗传算法、粒子群优化算法、蚁群优化算法等, 自适应能力强, 适用于非线性、无约束或多约束问题, 具有较强的并行性与灵活性, 而且无需待求解问题的导数信息, 适用在难以计算导数的复杂问题中。基于以上优点, 群体智能优化算法已在工程优化设计、机器学习、结构健康监测等领域得到了广泛应用。

树种子算法 (tree seed algorithm, 简称 TSA) 是 M. S. Kiran^[14] 于 2015 年提出的一种新型的随机搜索算法, 其灵感来自于树木通过种子传播的机制。对于该基于种群的 TSA 算法, 优化问题解空间视为一片森林, 每棵树代表一个潜在解, 每棵树生成的种子在解空间中进行局部或全局搜索, 以产生新的候选解。树的适应度决定了其种子的分布和生长范围, 较优的解会产生更多的种子, 从而增加找到最优解的可能性。

种群随机初始化的方法如下:

$$X_{T_{i,j}} = LB_{i,j} + \operatorname{rand}(0, 1) \times (UB_{i,j} - LB_{i,j}) \quad (14)$$

式中, $X_{T_{i,j}}$ 表示第 i 个树的第 j 维变量; $\operatorname{rand}(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 内的随机数; $UB_{i,j}$ 和 $LB_{i,j}$ 代表参数搜索空间的上限和下限。

在 TSA 中, 种子通过公式(15)和(16)生成, 对应于全局搜索和局部搜索:

$$X_{S_{i,j}}^{G+1} = X_{T_{i,j}}^G + (X_{T_{i,j}}^G - X_{T_{r,j}}^G) \times \operatorname{rand} \quad (15)$$

$$X_{S_{i,j}}^{G+1} = X_{T_{i,j}}^G + (X_{I_{\text{best},j}}^G - X_{T_{i,j}}^G) \times \operatorname{rand} \quad (16)$$

式中, $X_{s_{i,j}}^{G+1}$ 表示第 i 个种子的第 j 维变量; rand 为 $[-1, 1]$ 内的随机数; $X_{T_{\text{best},j}}^G$ 代表最优树个体的第 j 维变量; $X_{T_{r,j}}^G$ 是从种群中随机选择的某一树个体的第 j 维变量。

蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm, 简称 BOA)是另一种近年新提出的群体智能优化算法^[15],其灵感来源于蝴蝶通过气味和视觉信号寻找食物或伴侣的行为。算法假设蝴蝶的气味强度与其适应度成正比,在每次迭代中调整蝴蝶个体的位置,逐步找到最优解。

BOA 算法公式(17)和(18)生成子代,对应于全局搜索和局部搜索:

$$X_i^{G+1} = X_i^G + (r^2 \times X_j^G - X_k^G) \times \varphi_i \quad (17)$$

$$X_i^{G+1} = X_i^G + (r^2 \times X_{\text{best}}^G - X_i^G) \times \varphi_i \quad (18)$$

式中, X_i^{G+1} 和 X_i^G 分别表示第 $G+1$ 和 G 次迭代时的第 i 只蝴蝶; X_j^G 和 X_k^G 分别表示第 G 次迭代时从种群中随机选择的蝴蝶个体; X_{best}^G 代表当前迭代的最优蝴蝶个体; φ_i 为第 i 只蝴蝶感知到的香味信息; r 是 $[0, 1]$ 内的随机数。

应当注意,树种子算法和蝴蝶优化算法等单一的群体智能算法虽然在函数优化问题表现出良好的性能,但在解决复杂的实际问题时可能难以平衡全局探索和局部搜索之间的关系,过于关注全局探索导致收敛速度慢,而过于关注局部搜索易陷入局部最优。优化算法在不同阶段需关注不同的任务,初期需要强大的探索能力以考虑任何潜在解,迭代后期需要强大的利用能力以提高解的质量。

3.2.2 自适应混合优化算法

针对单一优化算法存在的问题,本文结合 TSA 和 BOA,提出一个自适应混合优化算法(adaptive hybrid optimization algorithm, 简称为 AHOA),该算法利用变异池策略(strategy pool),动态选择最适合于当前问题的搜索策略,更加适用于求解高维、非线性、复杂约束优化问题。提出的策略池为:

$$\text{Strategy pool} = \begin{cases} \text{Group}_1, & \text{if } \text{rand}(0,1) > \frac{\text{Iter}}{\text{Max_Iter}} \\ \text{Group}_2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

式中, Group_1 为全局搜索组,其表达式为 $\text{Group}_1 = \begin{cases} \text{式(15)}, & \text{if } \text{rand}(0,1) < 0.5 \\ \text{式(17)}, & \text{otherwise} \end{cases}$; Group_2 为局部搜索组,其表达式为 $\text{Group}_2 = \begin{cases} \text{式(16)}, & \text{if } \text{rand}(0,1) < 0.5 \\ \text{式(18)}, & \text{otherwise} \end{cases}$ 。

其表达式为 $\text{Group}_2 = \begin{cases} \text{式(16)}, & \text{if } \text{rand}(0,1) < 0.5 \\ \text{式(18)}, & \text{otherwise} \end{cases}$ 。

由式(19)可知,提出的自适应混合优化算法能够从 TSA 和 BOA 的四种搜索机制中自适应选择搜索策略。此外, Group_1 中的变异策略在迭代初期被选择的概率较大,而 Group_2 中的变异策略在迭代后期被选择的概率较大,全局和局部搜索能力都能得到保证。

图 2 展示了自适应混合优化算法 AHOA。可以发现,该算法结构简单,思路清晰,没有引入新的算法参数,下面将此算法用于结构损伤识别研究。

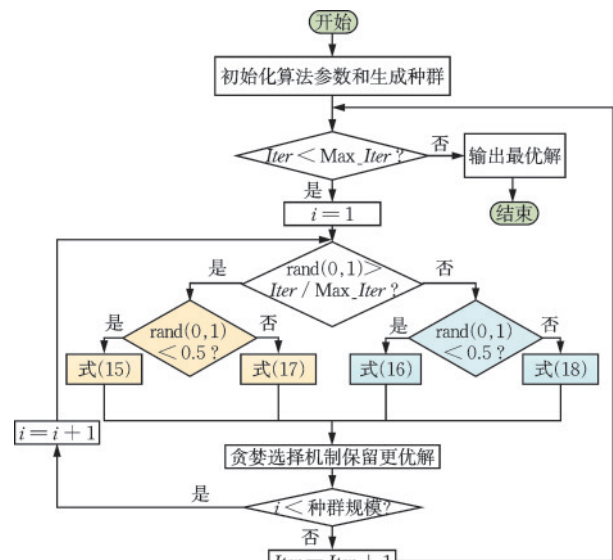


图 2 自适应混合优化算法

Fig.2 Adaptive hybrid optimization algorithm

4 同时识别结构损伤和冲击荷载的步骤

本文提出一种基于非接触式位移测量和自适应混合优化算法的方法,同时识别结构损伤和冲击荷载,其流程如图 3 所示。该方法的假设条件是已知冲击荷载位置和结构质量分布,具体实施步骤如下:

步骤 1: 使用相机记录结构在外荷载作用下的振动视频,利用亚像素模板匹配算法提取特征点的位移响应并保存到计算机中。

步骤 2: 初始化自适应混合优化算法的参数,生成初始种群,建立目标结构的有限元模型。

步骤 3: 计算位移单位脉冲响应函数 $h(t)$, 组装传递函数矩阵 H , 得到结构位移响应与输入荷载之间的方程式 $u = Hf$ 。

步骤4:利用改进的L曲线方法确定正则化参数 λ ,利用Tikhonov正则化方法和位移响应,根据式(11)识别未知冲击荷载。

步骤5:基于识别的外荷载计算结构的位移响应,将非接触式视觉方法测量的位移响应和数值模型计算的位移响应之间的差值作为目标函数 Obj 。

步骤6:采用提出的自适应混合优化算法AHOA更新未知结构参数以最小化目标函数。

步骤7:重复步骤3~6直至满足收敛条件,输出最优解,得到目标结构的单元损伤位置和程度。

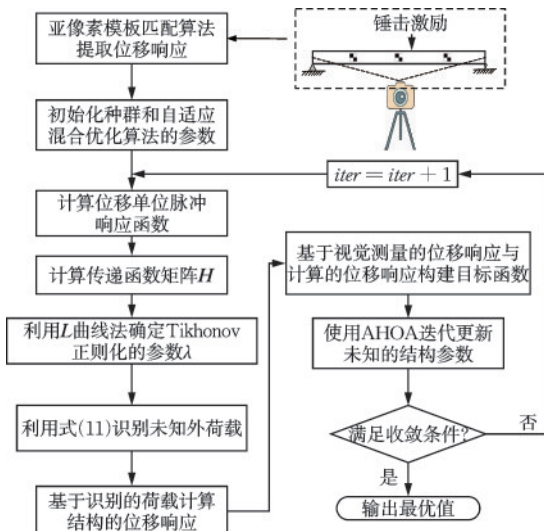


图3 同时识别结构损伤和冲击荷载的流程

Fig.3 Flowchart of simultaneous identification of structural damage and impact force

5 实验验证

首先采用一个冷弯型钢墙体结构室外振动台试验^[16]验证所提出的非接触视觉技术测量位移的准确性,然后利用室内八层钢框架实验验证基于计算机视觉测量的位移响应同时识别结构损伤和冲击荷载的有效性。

5.1 振动台实验

图4显示了冷弯型钢墙体结构室外振动台试验,该实验在加州大学圣地亚哥分校进行,相关的测试方案、报告、视频和数据已被公开,本研究采用第1试验组中的SGGS-1XS试件的动态测试视频和数据验证所提出的非接触视觉技术测量位移的准确性。试样的长度和高度分别为4.88 m和2.74 m,

采用Northridge地震波作为输入。在试件顶部的梁侧面安装了一个位移计以提供准确的位移响应作为对比,如图5所示。在测试过程中,使用相机记录墙体结构试件在地震波下的振动视频,该测试视频的像素分辨率为 654×368 ,采样率为24帧/s,帧数为1000。在测试中,一个棋盘状的人工目标被固定在墙体结构的顶部,此外,选取人工目标相邻的钻孔作为自然目标,同时提取人工目标和自然目标的位移响应,并与位移传感器的数据进行比较。

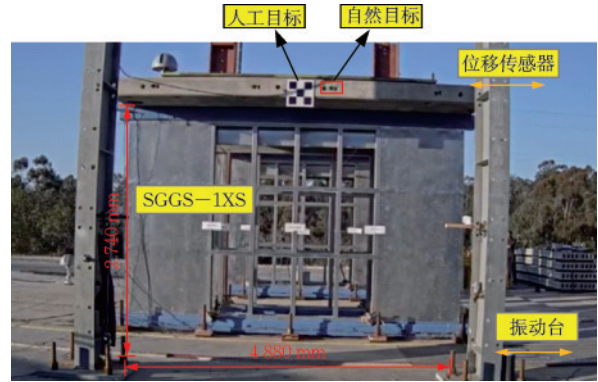


图4 冷弯型钢墙体结构室外振动台试验

Fig.4 Outdoor shaking table test of cold-formed steel wall structure

引入均方根误差(RMSE)和皮尔逊相关系数(PCC)评估基于非接触视觉方法测量位移的准确性和可靠性, RMSE可以计算两个信号序列之间的差值, RMSE的数值越小,表明两个信号越接近。PCC可以计算两个信号序列之间的相关性,与振幅无关,其范围在0到1之间,数值越大表明两个信号的相关性越强。计算公式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_{\text{vision},i} - u_{\text{true},i})^2} \quad (20)$$

$$PCC(u_{\text{true}}, u_{\text{vision}}) = \frac{\text{Cov}(u_{\text{true}}, u_{\text{vision}})}{\sigma_{u_{\text{true}}} \sigma_{u_{\text{vision}}}} \quad (21)$$

式中, N 表示位移数据点的数量; u_{true} 表示位移计实际测量的位移值; u_{vision} 表示测量的位移值; $\sigma_{u_{\text{true}}}$ 和 $\sigma_{u_{\text{vision}}}$ 分别表示位移计实测响应和视觉位移测量值的标准差; $\text{Cov}(u_{\text{true}}, u_{\text{vision}})$ 是两者的协方差。

图5对比了基于视觉测量的位移与位移计实测响应,可以发现,对于人工目标和自然目标,位移计实测响应和基于非接触式视觉方法测量的位移值都具有良好的一致性。人工目标的均方根误差和皮尔逊相关系数分别为 $RMSE = 2.31 \text{ mm}$ 和 $PCC = 0.992$,自然目标的均方根误差和皮尔逊相

关系数分别为 $RMSE = 2.35 \text{ mm}$ 和 $PCC = 0.991$, 以上结果充分表明了所提出的亚像素模板匹配算法在监测运动目标位移方面的有效性, 因此, 下面继续使用非接触式视觉位移测量方法识别结构损伤和冲击荷载。

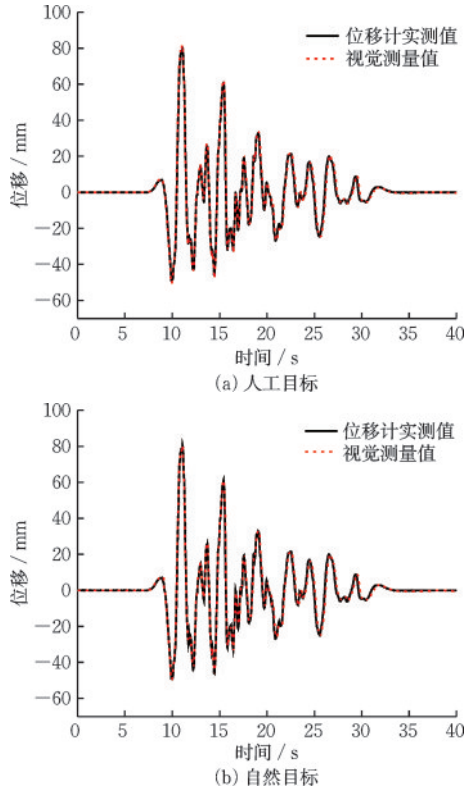


图5 基于视觉测量的位移与位移计实测值的结果对比
Fig.5 Comparison of displacement response measured by vision-based method and contact sensor

5.2 钢框架实验

5.2.1 模型介绍

在实验室内进行八层钢框架结构的振动测试实验。图6显示了该钢架结构的几何尺寸, 每层高250 mm, 框架总长2 000 mm, 两根竖向柱子的矩形截面为 $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 柱子焊接在底部的厚钢板上。横梁的长度为600 mm, 横梁的矩形截面为 $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。钢材的密度和弹性模量分别为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 使用带有橡胶头的力锤在钢框架的第六层施加冲击荷载。在每一层钢梁的表面上粘贴人工靶标, 在远离钢框架2 m的位置放置相机记录其振动视频, 视频的分辨率为 $3\,840 \times 2\,160$ 像素, 采样率为60 帧/s, 记录时间为30 s。此外, 实验时尽可能选取环境干扰(如光

照变化、遮挡)小的地方。在工程应用中可采用如下抗干扰方案: ①增加主动照明; ②多相机冗余与交叉视角; ③加入防遮挡冗余编码; ④使用防反光材料的靶标。

使用亚像素模板匹配算法估计钢框架各层的位移响应, 以第八层的位移响应为例, 如图7所示。

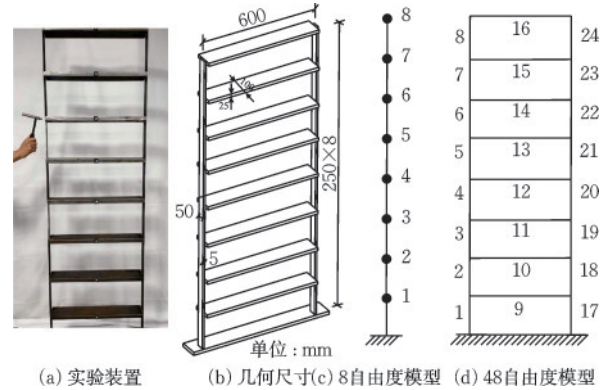


图6 八层框架结构
Fig.6 Eight-story frame structure

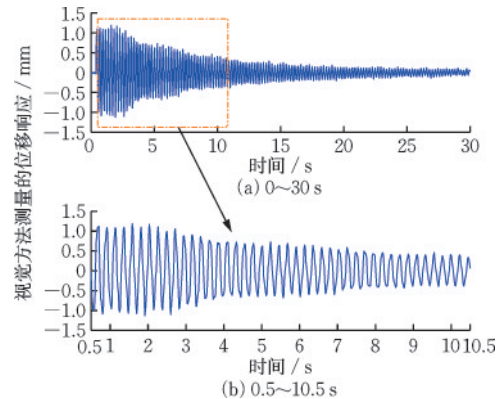


图7 基于视觉测量的第八层的位移响应
Fig.7 Displacement responses of 8th floor using vision-based measurement method

5.2.2 8 自由度模型

如图6(c)所示, 建立钢框架的8自由度集中质量模型, 为减少建模误差, 利用模型更新法减小实测频率与有限元模型计算得到的频率之间的差值。切割钢柱的截面在钢框架上引入四种损伤, 损伤工况1是将第二层的刚度降低10%, 损伤工况2是将第二层的刚度降低20%, 损伤工况3是将第二层和第四层的刚度分别降低20%和10%, 损伤工况4是将第二层和第四层的刚度分别降低20%, 如图8所示。

使用AHOA算法识别结构损伤, 种群规模和最大迭代次数为40和200。损伤工况1和工况2的损

伤识别结果如图9所示。工况1中单元2的刚度损伤程度为10%，识别结果为10.54%，工况2中单元2的刚度损伤程度为20%，识别结果为20.75%。此外，在单元1和单元5出现可能由测量噪声引起的较为明显的识别误差，但仍然在5%的可接受范围内，以上结果表明，采用基于非接触式位移测量和自适应混合进化算法可以成功识别损伤的位置和程度。对于多点损伤工况，即工况3和工况4，损伤单元的位置和程度被准确识别，最大识别误差分别为4.26%和4.12%。

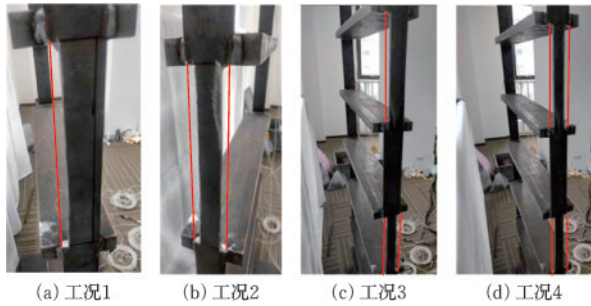


图8 切割柱截面引入损伤

Fig.8 Damage induced by cutting column cross-section

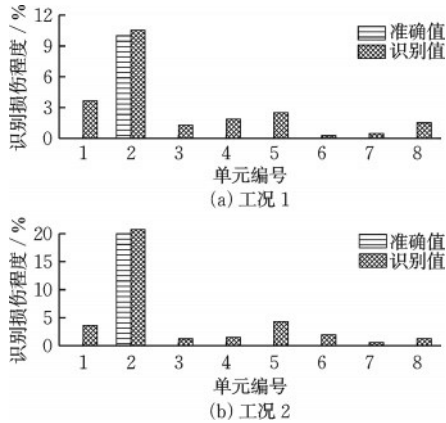


图9 8自由度模型损伤识别结果

Fig.9 Identified damage results of 8-degree-of-freedom model

此外，进一步考虑噪声对识别结果的影响，考虑0%、5%、10%、15%和20%的高斯噪声，以8自由度模型损伤工况1为例，损伤识别误差与噪声强度的关系曲线如图10所示。可以发现，损伤识别误差随着噪声等级的增大而增加，当噪声等级小于10%时，最大识别误差小于6%，在可接受的范围内，噪声容忍阈值为10%高斯噪声。

图11显示了力锤施加的冲击荷载的实测值和识别值，可以发现，力锤施加的冲击荷载峰值为8.3N，识别的锤击荷载峰值为8.4N，识别荷载的峰值与测

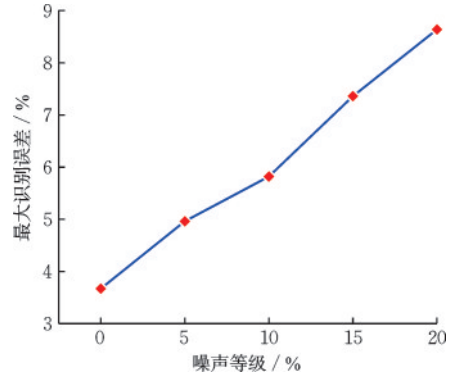


图10 最大识别误差与噪声强度的关系曲线

Fig.10 Relationship curve between maximum identification error and noise level

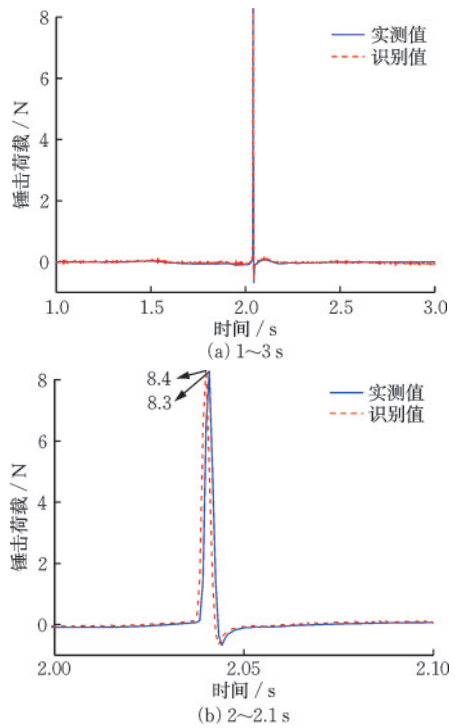


图11 冲击荷载识别结果

Fig.11 Identified impact force results

量值基本吻合，其他时间步长所识别的锤击荷载在零附近波动，以上结果表明，所提出的方法能够有效识别冲击荷载。

5.2.3 48自由度模型

如图6(d)所示，将钢框架建模为更加复杂的48自由度模型，该模型包含16个节点，24个单元，每个节点有3个自由度，两个平移自由度和一个转动自由度，仅在一个方向有输入和输出，在其他两个方向上无外部激励或结构损伤影响。对于该模型，损伤工况1和工况2为单元2的刚度降低20%和单元2的刚度降低了40%，其他单元的损伤系数为零。将AHOA与GA^[17]、聚类树种子算法(clustering based

tree seeds algorithm,简称C-TSA)^[18]、混合蝴蝶优化差分进化算法(hybrid butterfly optimization and differential evolution algorithm,简称HBODEA)^[19]等启发式智能优化算法对比,算法参数见表1。

表1 GA、C-TSA、HBODEA、AHOA 算法的参数
Table 1 Parameters of GA, C-TSA, HBODEA, and AHOA algorithms

参数	GA	C-TSA	HBODEA	AHOA
种群规模 np	100	100	100	100
最大迭代次数 Max_Iter	200	200	200	200
变异算子	0.05		0.5	
交叉算子	0.95		0.5	
搜索趋势		0.4		0.4
幂指数			0.1	0.1
转换概率			0.8	0.8

采用AHOA算法识别48自由度模型的损伤识别结果如图12所示,可以发现,工况1和工况2中单元2的损伤位置被准确识别,得到的损伤程度值分别为21.32%和36.16%,非常接近于准确值20%和40%。此外,在单元8和单元17出现较为明显的识别误差,工况1和工况2的最大识别误差分别为6.72%和7.46%。与8自由度模型相比,48自由度模型使用相同的测量响应来识别更多未知的结构参数,因此识别误差更大。

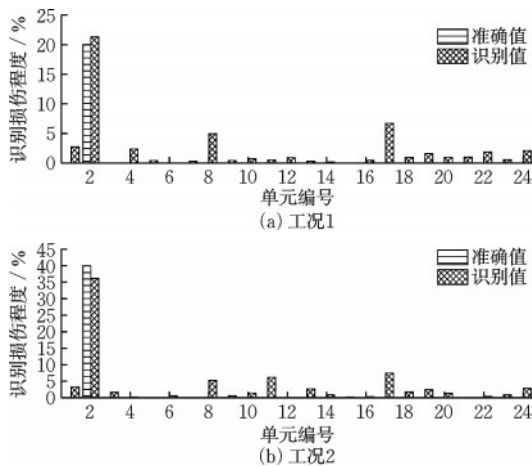


图12 采用AHOA算法识别48自由度模型的损伤识别结果
Fig.12 Identified damage results using AHOA for 48-degree-of-freedom model

表2列出了GA、C-TSA、HBODEA、AHOA的识别误差,可以发现,GA算法得到最差的识别结果,工况1和工况2的最大识别误差分别为16.67%和23.24%,显然超出了合理的误差范围;C-TSA和HBODEA算法获得相近的识别结果,最大误差都不

超过13%;与GA、C-TSA、HBODEA相比,提出的AHOA算法取得最优的识别结果,通过与其他启发式智能优化算法对比,进一步证明了该算法的优越性。

应当注意,迭代识别过程对初始参数存在敏感性,初始参数设置不合理将得到错误的识别结果,设置初始参数时应当参考前人文献或根据计算结果适当调整参数取值。

表2 GA、C-TSA、HBODEA、AHOA 的识别误差
Table 2 Identified errors using GA, C-TSA, HBODEA, and AHOA
单位:%

工况	误差	GA	C-TSA	HBODEA	AHOA
工况1	平均误差	3.23	2.17	1.89	1.31
	最大误差	16.67	12.46	9.14	6.72
工况2	平均误差	3.51	2.29	2.03	1.85
	最大误差	23.24	11.43	11.84	7.46

6 结论

本文提出一种基于非接触式位移测量和自适应混合优化算法的方法,通过模板匹配算法提取结构的位移响应,然后同时识别结构损伤和冲击荷载,并采用钢墙体结构室外振动台试验以及八层钢框架实验验证了该方法的有效性和可靠性,可以得到以下结论:

(1)冷弯型钢墙体结构室外振动台试验的测试结果表明,基于亚像素模板匹配算法的非接触式视觉方法测量的结构位移响应与位移计的测量结果高度一致,较小的均方根误差和接近于1的皮尔逊相关系数证明了非接触式视觉测量位移的准确性。

(2)与GA、C-TSA、HBODEA相比,提出的AHOA在策略池中自适应选择搜索策略,取得了更优的识别结果,能够准确识别冲击荷载下结构上单元的损伤位置和程度。

(3)实验研究表明,本文提出的基于非接触式位移测量和自适应混合优化算法的方法,为同时识别结构损伤和未知冲击荷载提供了一个准确、稳定、高效的方案。与传统方法相比,该方法在结构健康监测领域具有较好的工程应用前景。

今后的研究将进一步扩展本文提出的方法,结合不同的数据类型,如加速度、温度,发挥接触式与非接触式测量方法各自优点,利用多源的数据更全面理解结构的行为,提高实时监测能力,为结构损伤和失效提供及时反馈和预警。

参考文献:

- [1] 刘光耀,刘习军,张素侠. 基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 594-602.
Liu G Y, Liu X J, Zhang S X. Damage identification analysis of simply supported beam bridge based on lifting wavelet transform and statistical theory[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 594-602. (in Chinese)
- [2] 李治甫,康帅,王自法,等. 基于时频变换和卷积神经网络的结构损伤识别[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1275-1283.
Li Z F, Kang S, Wang Z F, et al. Structural damage identification based on time-frequency transform and convolutional neural network [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1275-1283. (in Chinese)
- [3] 李雨航,邓扬,李爱群. 基于频率变化的混凝土楼板损伤评价研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(5): 1028-1036.
Li Y H, Deng Y, Li A Q. Research on damage identification of concrete slab based on frequency change [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 1028-1036. (in Chinese)
- [4] 朱岩,蒋青桔. 曲率模态参数法在张弦结构定量损伤识别中的研究和应用[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 71-77.
Zhu Y, Jiang Q J. Research and application of the curvature modal parameter method in quantitative damage identification of string structures [J]. Industrial Construction, 2022, 52(10): 71-77. (in Chinese)
- [5] Hassani S, Shadan F. Using incomplete FRF measurements for damage detection of structures with closely-spaced eigenvalues [J]. Measurement, 2022, 188: 110388.
- [6] 黄民水,乾超越,程绍熙,等. 基于改进布谷鸟搜索的Benchmark框架损伤识别[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 158-163.
Huang M S, Qian C Y, Cheng S X, et al. Damage identification of the benchmark frame based on an improved cuckoo search [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(22): 158-163. (in Chinese)
- [7] Ding Z, Li J, Hao H. Structural damage identification using improved Jaya algorithm based on sparse regularization and Bayesian inference[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 211-231.
- [8] Xu B, He J, Rovekamp R, et al. Structural parameters and dynamic loading identification from incomplete measurements: approach and validation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 244-257.
- [9] Sun H, Betti R. Simultaneous identification of structural parameters and dynamic input with incomplete output-only measurements [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(6): 868-889.
- [10] Lei Y, Yang N. Simultaneous identification of structural time-varying physical parameters and unknown excitations using partial measurements[J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110672.
- [11] 叶肖伟,董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 21-39.
Ye X W, Dong C Z. Review of computer vision-based structural displacement monitoring[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 21-39. (in Chinese)
- [12] 逯鹏,赵天淞,王剑,等. 基于计算机视觉的钢结构表面损伤识别与健康监测综述[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 22-27.
Lu P, Zhao T S, Wang J, et al. Review on damage identification and health monitoring of steel structures based on computer vision[J]. Industrial Construction, 2022, 52(10): 22-27. (in Chinese)
- [13] Xu Y, Pei Y, Dong F. An adaptive Tikhonov regularization parameter choice method for electrical resistance tomography [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 50: 1-12.
- [14] Kiran M S. TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(19): 6686-6698.
- [15] Arora S, Singh S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization[J]. Soft Computing, 2019, 23: 715-734.
- [16] Singh A, Wang X, Zhang Z, et al. Steel sheet sheathed cold-formed steel framed in-line wall systems. I: Impact of structural detailing[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(12): 04022193.
- [17] Zhang Z, Koh C G, Duan W H. Uniformly sampled genetic algorithm with gradient search for structural identification-Part I: global search[J]. Computers & Structures, 2010, 88(15-16): 949-962.
- [18] Ding Z, Li J, Hao H, et al. Structural damage identification with uncertain modelling error and measurement noise by clustering based tree seeds algorithm[J]. Engineering Structures, 2019, 185: 301-314.
- [19] Zhou H, Zhang G, Wang X, et al. A hybrid identification method on butterfly optimization and differential evolution algorithm[J]. Smart Structures and Systems, 2020, 26(3): 345-360.

(本文编辑:池营营)