

文章编号: 1005-0523(2024)05-0029-10



基于谱元法和北方苍鹰算法的振动损伤检测

周运来¹, 姚峰¹, 白春玉², 李凯翔², 朱胜阳³

- 西安交通大学航天航空学院复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 陕西 西安 710049;
- 中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065;
- 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 611756)

摘要:【目的】为了解决结构损伤检测中有限元法建模不精确和计算成本高的问题, 提出了一种结合谱元法与北方苍鹰优化算法(NGO)的结构健康监测(SHM)技术。【方法】首先, 采用谱元法建立结构的频响函数, 并应用于结构的损伤定位与损伤检测目标函数的构造, 将损伤检测划分为两阶段问题, 以降低算法优化维度和检测复杂性。其次, 引入北方苍鹰优化算法(NGO), 对目标函数进行优化求解。最后, 以平面桁架结构和 ASCE Benchmark 结构为研究对象, 利用 NGO、粒子群优化(PSO)和蚁狮优化(ALO)算法对其各种损伤工况进行损伤检测性能对比。【结果】结果表明, 在低维度和简单结构中, NGO, PSO 和 ALO 算法均表现出良好的求解能力; 但在高维度和大型复杂结构中, NGO 相较于 PSO 和 ALO 算法具有更高的损伤检测能力和鲁棒性。【结论】改进后的方法提高了损伤检测数值建模的精度。

关键词: 谱元法; 损伤检测; NGO; ASCE Benchmark Structure

中图分类号: TP273

文献标志码: A

本文引用格式: 周运来, 姚峰, 白春玉, 等. 基于谱元法和北方苍鹰算法的振动损伤检测[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 29-38.

Vibration Damage Detection Based on the Spectral Element Method and Northern Goshawk Optimizer Algorithm

Zhou Yunlai¹, Yao Feng¹, Bai Chunyu², Li Kaixiang², Zhu Shengyang³

- State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
- National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China;
- State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: 【Objective】 To address the issues of imprecise modeling and high computational cost in structural damage detection using the finite element method (FEM), this study proposes a structural health monitoring (SHM) technique that combines the spectral element method (SEM) with the Northern Goshawk Optimization (NGO) algorithm. 【Method】 Firstly, the spectral element method was used to establish the frequency response function of the structure, which was then applied to construct the objective function for damage localization and detection. This approach divided the damage detection problem into two stages, reducing the optimization dimension and complexity. Secondly, NGO algorithm was introduced to optimize and solve the objective function. Finally, planar truss structure and ASCE Benchmark Structure were used as case studies to compare the damage detection performance of

收稿日期: 2024-06-14

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划-面上项目(2023-JC-YB-007)

NGO, Particle Swarm Optimization (PSO), and Ant Lion Optimization (ALO) algorithms under various damage cases. **【Result】**The results show that for low-dimensional and simple structures, NGO, PSO, and ALO algorithms all exhibit good solving capabilities. However, for high-dimensional and large complex structures, NGO demonstrates superior damage detection capability and robustness compared to PSO and ALO. **【Conclusion】** The improved method enhances the accuracy of numerical modeling in damage detection.

Key words: spectral element method; damage detection; NGO; ASCE Benchmark Structure

Citation format: ZHOU Y L, YAO F, BAI C Y, et al. Vibration damage detection based on the spectral element method and Northern Goshawk Optimizer algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 29–38.

【研究意义】在结构的使用寿命期间,其性能会因各种损伤逐步衰退,主要源于材料退化、结构疲劳、超载及环境因素。这些损伤可能改变结构材料的性质或几何特性。为确保结构的稳定性、维护性和可靠性,早期准确定位和诊断损伤尤为重要。简而言之,准确识别和定位结构损伤对于保持结构完整性和安全性至关重要,有助于防止渐进式故障并提高安全性能^[1-2]。

【研究进展】过去数十年中,基于多种元启发式算法对振动分析数据进行处理以评估结构损伤的方法,已经受到了学术界和工业界的广泛关注^[3-4]。Majumdar等^[5]采用有限元法计算的固有频率与实际测量结果之间的均方根值作为目标函数,使用蚁群优化算法进行结构损伤检测,并验证了平面和空间桁架结构。Mohan等^[6]对悬臂梁和平面框架结构进行损伤检测,采用基于结构频域响应的差异和基于固有频率的差异两种目标函数,并用粒子群优化算法最小化目标函数,结果显示基于频域响应的方法精度更高。Nabavi等^[7]提出结合巨型狢狢优化算法(GOA)与结构时域响应的损伤检测方法,通过结构损伤加速度和解析模型的加速度定义优化目标函数,用GOA算法解决损伤识别问题,确定结构损伤位置和程度。李成等^[8]分别针对两层钢架以及三层框架结构,以实测模态参数和计算模态参数之间的误差作为目标函数,采用人工鱼群算法进行优化求解,从而实现结构的损伤检测。Seyedpoor等^[9]采用两阶段方法识别桁架结构损伤:第1阶段使用柔度矩阵损伤指数识别疑似损坏单元,第2阶段用差分进化算法预测损伤程度。Khatir等^[10]提出改进频响函数(FRF)指标用于复杂结构损伤识别,第一阶段检测和定位单个及多个损伤,之后用人工大猩猩部队优化算法(GTO)、野狗优化算法(DOA)、非洲

秃鹫优化算法(AVOA)和基于梯度的优化算法(GBO)等求解损伤程度。

【关键问题】结构建模在损伤检测中至关重要。之前的研究中,均采用有限元法进行损伤检测数值建模。而有限元法需要细化网格以获得准确结果,这增加了结构自由度和计算成本^[11]。谱元法结合了有限元法、动力学刚度法和谱分析法,具有高精度、少自由度、低计算成本等优点,能够有效求解频域问题^[12-13]。北方苍鹰优化(northern goshawk optimization, NGO)算法是一种启发式优化算法,于2022年由Dehghani等提出^[14]。该算法通过模拟苍鹰的狩猎行为,包括猎物识别与攻击、追逐逃生两个阶段,来寻找优化问题的解,具有结构简单、性能优良等特点,已在多个领域得到了应用^[15-16]。

【创新特色】本文结合谱元法与NGO进行损伤检测。首先,利用谱元法构造结构的频响函数,弥补了有限元法在高频段精度不高的缺点,并利用频响函数建立损伤定位模型以及损伤检测目标函数。其次,引入NGO,对目标函数进行优化,并与PSO以及ALO算法进行比较。最后,分别以平面桁架结构以及ASCE Benchmark结构为研究对象,对其各种损伤工况进行检测。为了验证NGO算法的鲁棒性并模拟真实测量数据,在数值计算的频响曲线中加入5%的高斯白噪声。

1 损伤检测原理

1.1 谱元法求解频响函数

1.1.1 杆的轴向振动

杆单元的运动方程为

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $u(x,t)$ 为杆的纵向位移; ρ , A 和 E 分别为杆的

密度,截面面积和弹性模量。

杆单元的动力学刚度矩阵为

$$\mathbf{S}_R(\omega) = \frac{EA}{L} \frac{k_L L}{\sin k_L L} \begin{bmatrix} \cos k_L L & -1 \\ -1 & \cos k_L L \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: L 为长度;

$$k_L = \omega \sqrt{\rho/E} \quad (3)$$

则杆单元频域上节点力与节点位移的关系为

$$\mathbf{S}_R(\omega) \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: U_1, U_2 均为节点位移; F_1, F_2 均为节点轴向力。

1.1.2 Euler梁的横向振动

Euler梁的振动方程为

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

Euler梁单元的动力学刚度矩阵 $\mathbf{S}_B(\omega)$ 为

$$\mathbf{S}_B(\omega) = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} \alpha & \lambda L & -\zeta & \gamma L \\ \lambda L & \beta L^2 & -\gamma L & \mu L^2 \\ -\zeta & -\gamma L & \alpha & -\lambda L \\ \gamma L & \mu L^2 & -\lambda L & \beta L^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: L 为长度; I 为截面惯性矩,

$$\begin{aligned} \alpha &= (CSh + SCh)(kL)^3/\Delta, \quad \zeta = (S + Sh)(kL)^3/\Delta \\ \beta &= (-CSh + SCh)(kL)/\Delta, \quad \mu = (-S + Sh)(kL)/\Delta \\ \gamma &= (-C + Ch)(kL)^2/\Delta, \quad \lambda = (SSh)(kL)^2/\Delta \\ C &= \cos kL, \quad S = \sin kL, \quad Ch = \cosh kL, \quad Sh = \sinh kL \\ \Delta &= 1 - CCh, \quad k = \sqrt{\omega \left(\frac{\rho A}{EI} \right)^{1/4}} \end{aligned}$$

则Euler梁频域上节点力与节点位移的关系为

$$\mathbf{S}_B(\omega) \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: v_1, θ_1 分别为左节点上的位移和转角; v_2, θ_2 分别为右节点上的位移和转角; V_1, M_1 分别为左节点上的剪力和弯矩; V_2, M_2 分别为右节点上的剪力和弯矩。

1.1.3 轴的扭转振动

轴的扭转振动方程为

$$\frac{\partial^2 \varphi(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \varphi(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

式中: $\varphi(x,t)$ 为杆的纵向位移; ρ 和 G 分别为杆的密度和剪切模量。

轴扭转的动力学刚度矩阵为

$$\mathbf{S}_T(\omega) = \frac{k_T GJ}{\sin k_T L} \begin{bmatrix} \cos k_T L & -1 \\ -1 & \cos k_T L \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: L 为长度; J 为截面极惯性矩;

$$k_T = \omega \sqrt{\rho/G} \quad (10)$$

则频域上节点扭矩与节点扭角的关系为

$$\mathbf{S}_T(\omega) \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: Φ_1, Φ_2 均为节点扭角; T_1, T_2 均为节点扭矩。

1.1.4 频响函数

以空间梁单元为例,将式(4),式(7),式(11)整合,得到空间梁单元的节点力与节点位移之间的关系。将其利用有限元刚度阵组合法,得到空间结构的谱形式方程为

$$\mathbf{S}(\omega) \mathbf{U}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (12)$$

$$\mathbf{U}(\omega) = [\mathbf{S}(\omega)]^{-1} \mathbf{F}(\omega) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{S}(\omega)$ 为空间结构动力学刚度矩阵; $\mathbf{U}(\omega)$ 为节点的频域响应向量; $\mathbf{F}(\omega)$ 为频域的节点力向量。

由式(13)可得出,空间结构的频响函数为

$$\mathbf{H}(\omega) = [\mathbf{S}(\omega)]^{-1} \quad (14)$$

1.2 损伤定义

赋予结构中每个单元一个损伤系数 a ,则损伤的动力学刚度矩阵可以表示为

$$\mathbf{S}(\omega)_{\text{de}} = (1-a)\mathbf{S}(\omega) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{S}(\omega)$ 为未损伤的动力学刚度矩阵; $\mathbf{S}(\omega)_{\text{de}}$ 为损伤的动力学刚度矩阵; a 为损伤系数,在 $0 \sim 1$ 取值, a 为0时表示该单元没有损伤, a 为1时表示该单元完全损伤。

1.3 损伤定位原理

通过谱元模型模拟了未损伤结构的频响函数为

$$[\mathbf{H}(\omega)]_A = [\mathbf{S}(\omega)]_A^{-1} \quad (16)$$

损伤结构的频响函数为

$$[\mathbf{H}(\omega)]_r = [\mathbf{S}(\omega)]_r^{-1} \quad (17)$$

因损伤引起的刚度变化 $\Delta \mathbf{S}(\omega)$ 为

$$[\Delta \mathbf{S}(\omega)] = [\mathbf{H}(\omega)]_A^{-1} - [\mathbf{H}(\omega)]_r^{-1} \quad (18)$$

式(18)两边乘以 $[\mathbf{H}(\omega)]_r$ 得到

$$[\mathbf{H}(\omega)]_r [\Delta \mathbf{S}(\omega)] = [\mathbf{H}(\omega)]_r [\mathbf{H}(\omega)]_A^{-1} - [\mathbf{H}(\omega)]_r [\mathbf{H}(\omega)]_r^{-1} \quad (19)$$

β 值是根据自由度、元素位置以及全局FRF矩阵

的第 j 行计算得到的,用于表示损伤位置,其定义为

$$\beta(j,i) = \left([\mathbf{H}(\omega)]_{1n}^{-1} [\mathbf{H}(\omega)]_{(c,i)}^{-1} - [I]_{(j,i)} \right) \quad (20)$$

1.4 损伤检测目标函数

将结构的损伤检测问题转化为一个优化问题,使损伤结构计算的频响函数与实际的频响函数之间的误差最小,从而得到损伤参数。基于频响函数的误差函数如下

$$E_q(a) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |H_{\text{compute}}(\omega_i, a) - H_{\text{actual}}(\omega_i)| \quad (21)$$

式中: m 为考虑响应的节点总数; n 为计算时采用的频率总数; $H_{\text{compute}}(\omega_i, a)$ 为计算的频响函数; $H_{\text{actual}}(\omega_i)$ 为实际的频响函数。

2 北方苍鹰算法(NGO)

北方苍鹰的狩猎策略可以分为两个阶段:猎物识别阶段,追击与逃逸阶段。

2.1 第1阶段(猎物识别阶段)

在捕猎的第1阶段,北方苍鹰随机挑选一个猎物,随后快速向其发起攻击。由于在搜索空间中对猎物的选择是随机的,因此这一阶段增加了NGO算法的勘探能力。这个阶段对搜索空间进行全局搜索,目的是确定最优区域。在这一阶段,北方苍鹰进行猎物选择和攻击的行为,用式(22)~式(24)描述为

$$P_i = X_k, i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N \quad (22)$$

$$x_{ij}^{\text{new}, P_i} = \begin{cases} x_{ij} + r(p_{ij} - sx_{ij}), & F_{P_i} < F_i \\ x_{ij} + r(x_{ij} - p_{ij}), & F_{P_i} \geq F_i \end{cases} \quad (23)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{\text{new}, P_i}, & F_i^{\text{new}, P_i} < F_i \\ X_i, & F_i^{\text{new}, P_i} \geq F_i \end{cases} \quad (24)$$

式中: P_i 为第 i 只北方苍鹰所选猎物的位置; F_{P_i} 为对应的目标函数值; k 为 $[1, N]$ 范围内且不等于 i 的随机整数; x_{ij}^{new, P_i} 为第 i 只北方苍鹰的新解在第 j 维的值; F_i^{new, P_i} 为其对应的目标函数值; r 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; s 的值为1或2。

2.2 第2阶段(追击及逃逸)

在北方苍鹰攻击猎物后,猎物会试图逃跑。因此,在追逐猎物的收尾过程中,北方苍鹰需要继续追逐猎物。由于北方苍鹰的追击速度很高,几乎可以在任何情况下追逐猎物,并最终捕获猎物。对这种行为的模拟提高了算法对搜索空间的局部搜索

能力。假设这种狩猎活动接近于一个半径为 R 的攻击位置。在第2阶段中,用式(25)~式(27)描述为

$$x_{ij}^{\text{new}, P_2} = x_{ij} + R(2r-1)x_{ij} \quad (25)$$

$$R = 0.02 \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (26)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{\text{new}, P_2}, & F_i^{\text{new}, P_2} < F_i \\ X_i, & F_i^{\text{new}, P_2} \geq F_i \end{cases} \quad (27)$$

式中: t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; R 为攻击半径,随迭代次数增加而缩小; x_{ij}^{new, P_2} 是第 i 只北方苍鹰在新位置的第 j 维解的值; F_i^{new, P_2} 为其对应的目标函数值。

3 数值算例

本节将讨论基于谱元法和NGO算法的损伤检测性能评估。本研究以平面桁架结构和ASCE Benchmark结构为研究对象,并与ALO以及PSO算法进行损伤检测性能比较,为防止偶然性,每种算法进行10次求解,并取平均值。另外,在实际测量结构频响的实验中,往往会产生误差,从而导致频响曲线产生噪声。为了模拟实际测量结果,在数值计算的频响曲线中加入5%的高斯白噪声。

3.1 平面桁架结构损伤检测

图1为平面桁架结构,将平面桁架损伤分为3种类型,如表1所示。

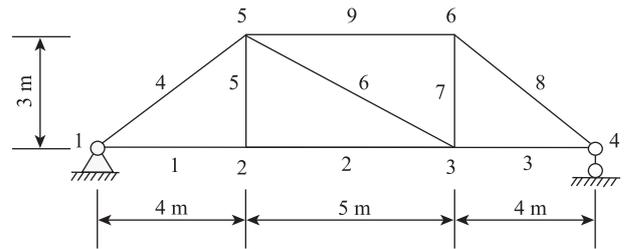


图1 平面桁架结构

Fig. 1 Planar truss structure

表1 平面桁架结构损伤工况

Tab.1 Damage cases of the planar truss structure

Damage case	Element number	Damage degree/%
Case 1	6	70
Case 2	2	30
	7	20
Case 3	2	30
	5	40
	6	25

在节点6处施加竖直方向单位力,利用谱元法分别计算节点2,节点3,节点5垂直自由度的频响,将其作为实际测量数据。图2为平面桁架在节点3垂直自由度处未损伤与3种损伤工况的频响曲线。

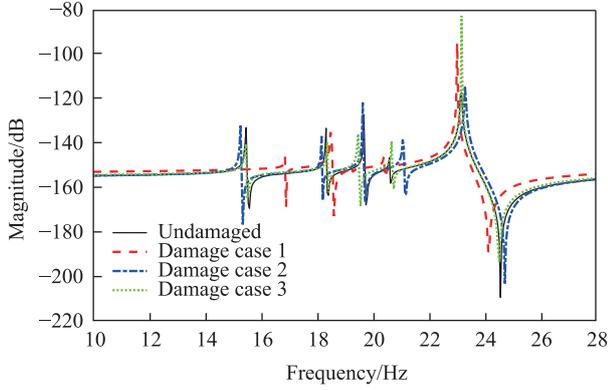


图2 平面桁架在节点3垂直自由度处未损伤与3种损伤工况的频响曲线对比图

Fig. 2 Comparison of frequency response curves for the planar truss at the vertical degree of freedom at node 3 under undamaged and three damaged cases

3.1.1 平面桁架结构损伤工况1

假设频响是在450 rad/s的测试频率下测量的。利用全局频响矩阵的第4行,式(20)中向量 $\beta(4,i)$ 为

$$\beta(4,i) = [0, 0, 0, 0, 0, 0, -0.5491, 0.3781, -0.2351, 0, 0, 0, 2.2057, -1.7284, -0.1654, 0, 0, 0]$$

在 $\beta(4,i)$ 中,除了第7~9,13~15自由度外,其

余全为0。则可以判断出节点3和节点5所对应的单元有损伤,即疑似损伤单元为单元6。

在完成损伤定位之后,分别利用NGO, PSO, ALO算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取30,求解结果如图3所示。结果表明,3种算法在损伤工况1中均表现良好。

3.1.2 平面桁架结构损伤工况2

损伤工况2考虑两个单元损伤,利用全局频响矩阵的第4行,此时式(20)中向量 $\beta(4,i)$ 为

$$\beta(4,i) = [0, 0, 0, 2.7128, 1.4863, 0.9864, -2.0520, -0.8743, 0.7149, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.0122, -1.0591, -0.0515]$$

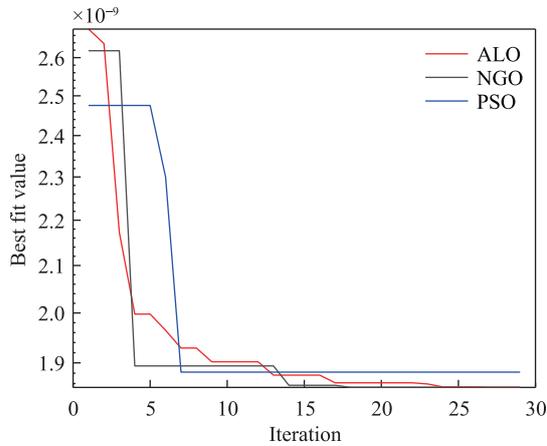
在 $\beta(4,i)$ 中,除了第4~9,16~18自由度外,其余全为0。则可以判断出节点2,节点3以及节点6所对应的单元有损伤,即疑似损伤单元为单元2和单元7。

损伤定位完成之后,分别利用NGO, PSO, ALO算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取50,求解结果如图4所示。结果表明,3种算法在损伤工况2中均有较强的求解能力。

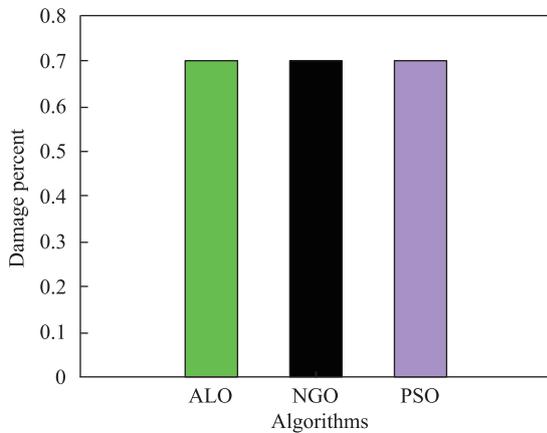
3.1.3 平面桁架结构损伤工况3

损伤工况3考虑两个单元损伤,利用全局频响矩阵的第4行,此时式(20)中向量 $\beta(4,i)$ 为

$$\beta(4,i) = [0, 0, 0, -1.9769, 0.6195, 0.0238, 1.2100, 0.4465, -0.2335, 0, 0, 0, -1.4021, -0.5233, -0.3545, 0, 0, 0]$$



(a) Iteration curves of various algorithms for damage case 1 of the planar truss structure



(b) Damage detection results for damage case 1 of the planar truss structure

图3 平面桁架结构损伤工况1

Fig. 3 Damage case 1 of the planar truss structure

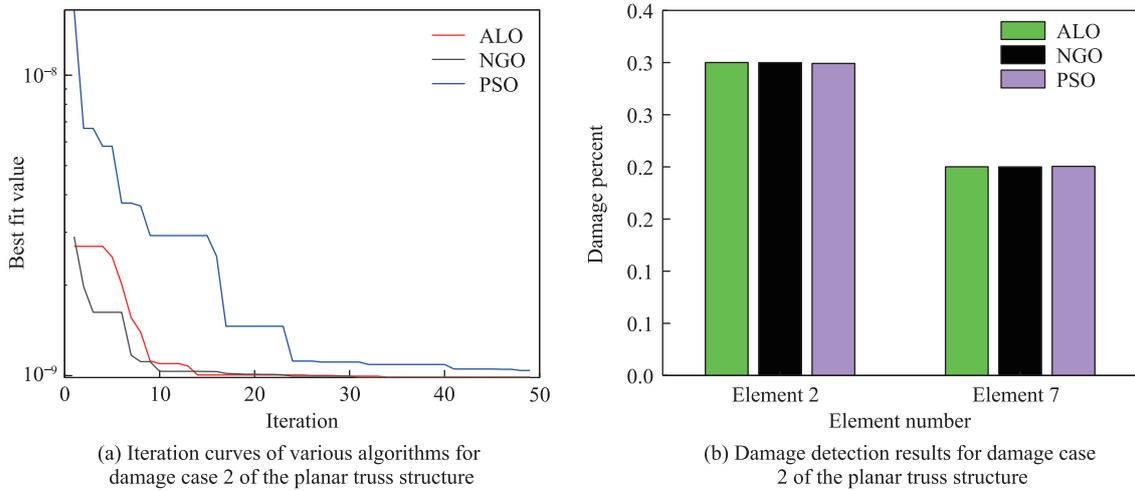


图4 平面桁架结构损伤工况2
Fig. 4 Damage case 2 of the planar truss structure

在 $\beta(4,i)$ 中,除了第4~9,13~15自由度外,其余全为0。则可以判断出节点2,节点3以及节点5所对应的单元有损伤,即疑似损伤单元为单元2,单元5以及单元6。

损伤定位完成之后,分别利用NGO,PSO,ALO算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取50,求解结果如图5所示。结果表明,NGO和PSO在损伤工况3中表现良好,ALO算法求解能力略差。

3.2 ASCE Benchmark Structure 损伤检测

1998年,Black和Ventura提出了Benchmark结构,并建造于加拿大哥伦比亚大学地震工程研究实验室内。图6为Benchmark Structure的三维示意

图,表2为其结构参数。由45个节点和116个单元组成。为了研究结构的损伤识别,UBC实验室针对Benchmark Structure定义了不同损伤工况,主要通过改变刚度对损伤进行模拟。参考其设置方法,本文设置了4种损伤工况,分别模拟了框架中各构件的不同程度损伤,如表3所示。

在节点17的y方向施加单位力,利用谱元法分别计算节点21,节点35,节点33y方向的频响。将其作为实际测量数据。图7为Benchmark结构在节点33y方向未损伤与4种损伤工况的频响曲线。

3.2.1 Benchmark结构损伤工况1

损伤工况1仅考虑一个单元损伤。利用基于频

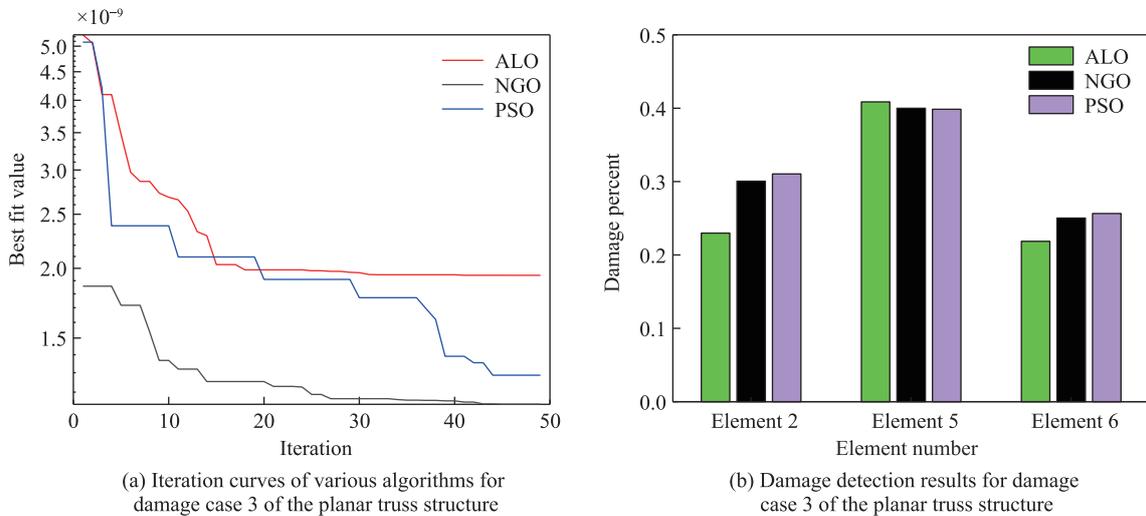


图5 平面桁架结构损伤工况3
Fig. 5 Damage case 3 of the planar truss structure

表2 ASCE Benchmark Structure 参数
Tab.2 ASCE Benchmark Structure parameters

Parameters	Brace	Beam	Column
Cross-sectional area A/m^2	0.141×10^{-3}	1.430×10^{-3}	1.133×10^{-3}
Young's modulus E/Pa	2×10^{11}	2×10^{11}	2×10^{11}
Moment of inertia about the X-axis I_x/m^4	0	1.22×10^{-6}	1.97×10^{-6}
Moment of inertia about the Y-axis I_y/m^4	0	0.249×10^{-6}	0.664×10^{-6}
Torsional constant J/m^4	0	38.20×10^{-9}	8.01×10^{-9}
Shear modulus G/Pa	0.77×10^{11}	0.77×10^{11}	0.77×10^{11}
Density $\rho/(kg/m^3)$	7 800	7 800	7 800

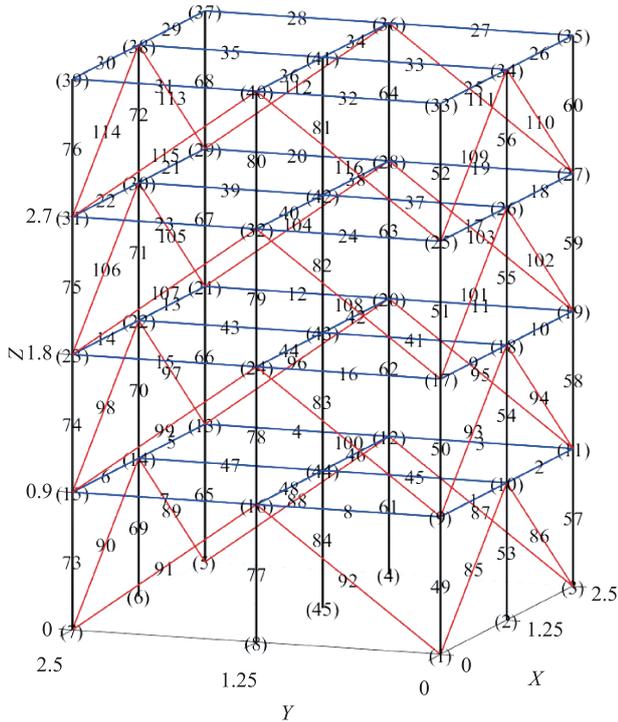


图6 ASCE Benchmark Structure 模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ASCE Benchmark Structure

表3 ASCE Benchmark Structure 损伤工况

Tab.3 Damage cases of the ASCE Benchmark Structure

Damage case	Element number	Damage degree/%
Case 1	103	80
Case 2	93~100	100
Case 3	9	50
	58	70
Case 4	3	50
	12	70
	24	60

响函数的损伤定位方法,可以定位出,节点19和节点28所对应的单元疑似损伤,即单元103疑似损伤。
损伤定位完成之后,分别利用NGO,PSO,ALO

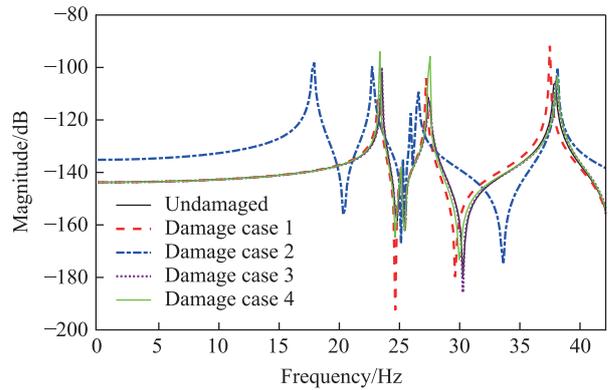


图7 Benchmark 结构在节点33y方向未损伤与4种损伤工况的频响曲线对比

Fig. 7 Comparison of frequency response curves for the Benchmark Structure at node 33y direction under undamaged and four damaged cases

算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取50,求解结果如图8所示。结果表明,NGO和ALO算法在损伤工况1中求解结果优于PSO算法。

3.2.2 Benchmark 结构损伤工况2

损伤工况2为第2层斜支撑全部移除。利用基于频响函数的损伤定位方法,可以定位出单元93~单元100疑似损伤。

单元损伤定位完成之后,分别利用NGO,PSO,ALO算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取200,求解结果如图9所示。结果表明,NGO算法和ALO算法在损伤工况2中,求解能力远强于PSO。

3.2.3 Benchmark 结构损伤工况3

损伤工况3考虑两个单元受损。利用基于频响函数的损伤定位方法,可以定位出单元9以及单元58疑似损伤。

损伤定位完成之后,分别利用NGO,PSO,ALO算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取200,求解结果如图10所示。结果表明,NGO和PSO算法在损伤工况4中,求解能力优于ALO算

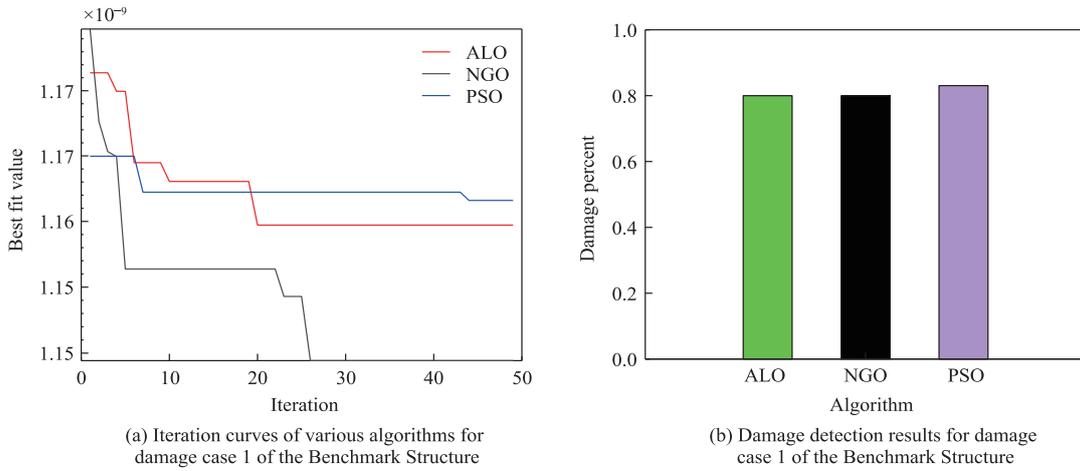


图8 Benchmark Structure 损伤工况 1
Fig. 8 Damage case 1 of the Benchmark Structure

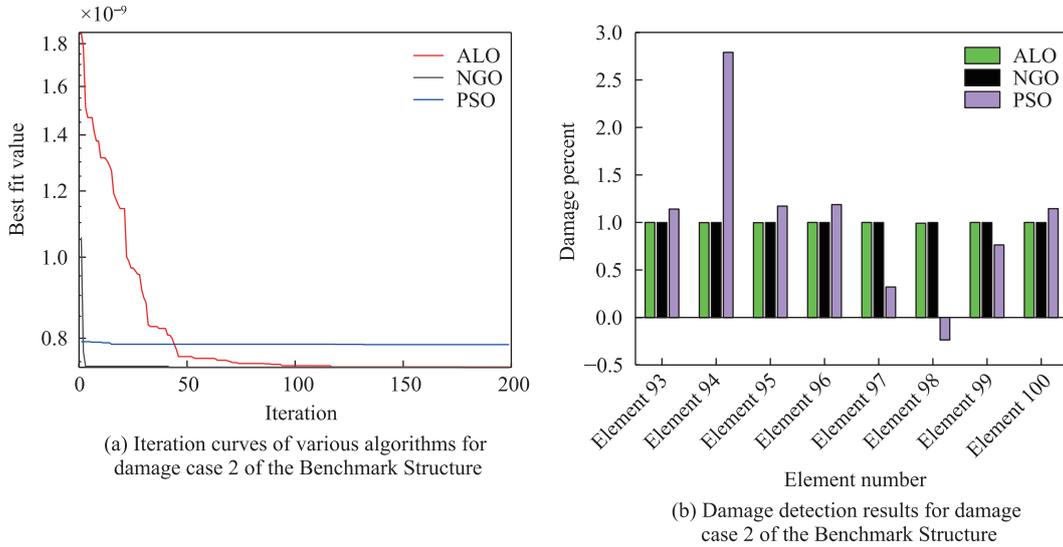


图9 Benchmark Structure 损伤工况 2
Fig. 9 Damage case 2 of the Benchmark Structure

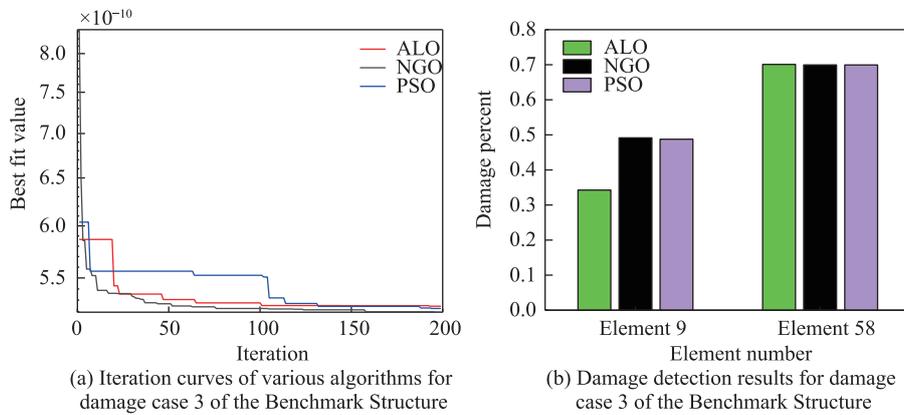


图10 Benchmark Structure 损伤工况 3
Fig. 10 Damage case 3 of the Benchmark Structure

法。但从求解迭代曲线中可以看出,NGO算法收敛速度比PSO算法快。

3.2.4 Benchmark结构损伤工况4

损伤工况4考虑3个单元受损。利用基于频响函数的损伤定位方法,可以定位出单元3,单元12

以及单元24疑似损伤。

损伤定位完成之后,分别利用NGO,PSO,ALO算法对式(21)进行优化求解。最大迭代次数取300,求解结果如图11所示。结果表明,NGO算法在损伤工况4中,求解能力优于PSO以及ALO算法。

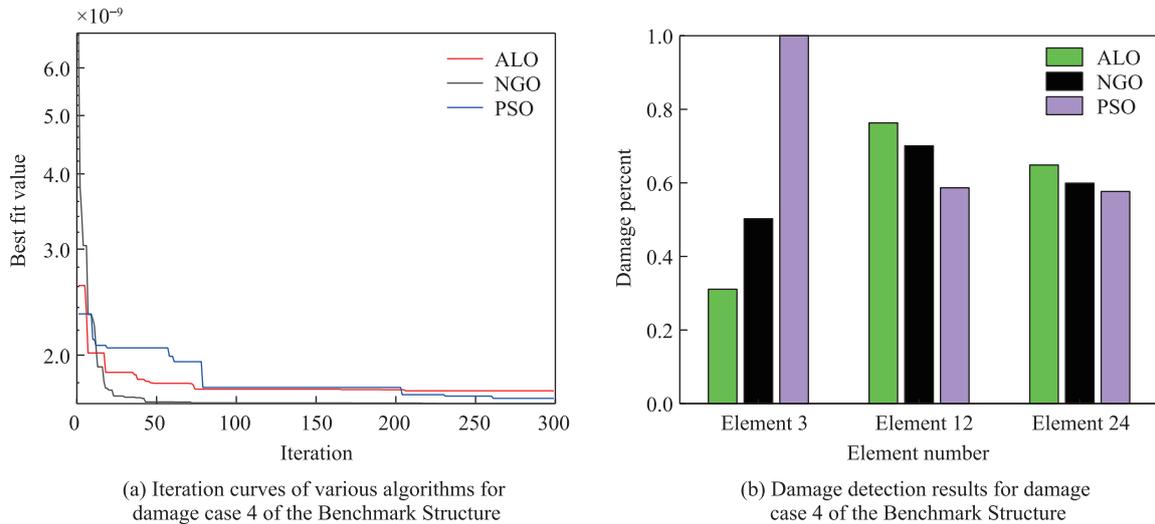


图11 Benchmark Structure 损伤工况4
Fig. 11 Damage case 4 of the Benchmark Structure

4 结论

提出了一种基于谱元法和NGO的方法,利用谱元法求解结构的频响曲线,并以频响函数为指标,采用了两阶段损伤检测方法,减少了求解的维度,更适合用于较复杂结构的损伤检测。以平面桁架和ASCE Benchmark Structure为例,在MATLAB中,将NGO算法与ALO以及PSO算法进行损伤检测性能对比。可以得到如下结论。

1) 谱元法可以作为一种更高效准确的损伤检测建模方法来代替有限元法。

2) 在低维度以及较简单结构中,NGO,PSO以及ALO算法具有良好的求解能力。

3) 对于较高维度以及复杂结构来说,NGO相较于PSO与ALO具有更高的损伤检测能力以及鲁棒性。

参考文献:

[1] 巫文君,董利强,任晖,等.基于改进MPSO算法的框架结构损伤检测研究[J].地震工程与工程振动,2017,37(2):108-116.
WU W J, DONG L Q, REN H, et al. Damage detection of

frame structures based on improved multi-particle swarm coevolution optimization algorithm[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2): 108-116.
[2] MAHDAVI S H, XU C. Time-domain structural damage identification using ensemble bagged trees and evolutionary optimization algorithms[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2023: 6321012.
[3] MORADI S, RAZI P, FATAHI L. On the application of bees algorithm to the problem of crack detection of beam-type structures[J]. Computers & Structures, 2011, 89(23/24): 2169-2175.
[4] 陈震,朱军华,余岭.一种基于改进PSO算法的结构损伤识别方法[J].振动与冲击,2012,31(5):17-20.
CHEN Z, ZHU J H, YU L. An improved PSO algorithm for structure damage identification[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5): 17-20.
[5] MAJUMDAR A, MAITI D K, MAITY D. Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2012, 218(19): 9759-9772.
[6] MOHAN S C, MAITI D K, MAITY D. Structural damage assessment using FRF employing particle swarm optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(20):

- 10387-10400.
- [7] NABAVI S, GHOLAMPOUR S, HAJI M S. Damage detection in frame elements using Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) and time-domain responses of the structure[J]. *Evolving Systems*, 2022, 13(2): 307-318.
- [8] 李成, 余岭. 基于人工鱼群算法的结构模型修正与损伤检测[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(2): 112-116.
LI C, YU L. Structural model updating and damage detection based on artificial fish swarm algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(2): 112-116.
- [9] SEYEDPOOR S M, MONTAZER M A. Damage identification method for truss structures using a flexibility-based damage probability index and differential evolution algorithm[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2016, 24(8): 1303-1322.
- [10] KHATIR S, TIACHACHT S, THANH C L, et al. A robust FRF damage indicator combined with optimization techniques for damage assessment in complex truss structures[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01197.
- [11] LEE U. Spectral element method in structural dynamics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [12] 鄂林仲阳, 杜强, 李上明. 基于谱元法的空间刚架动力学特性分析[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(5): 802-806.
E L Z Y, DU Q, LI S M. Dynamics characteristic analysis of space frame structure based on spectral element method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5): 802-806.
- [13] KIM T, LEE U. Vibration analysis of thin plate structures subjected to a moving force using frequency-domain spectral element method[J]. *Shock and Vibration*, 2018: 1908508.
- [14] DEGHANI M, HUBÁLOVSKÝ Š, TROJOVSKÝ P. Northern Goshawk Optimization: a new swarm-based algorithm for solving optimization problems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 162059-162080.
- [15] EL-DABAH M A, EL-SEHIEMY R A, HASANIEN H M, et al. Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization Algorithm[J]. *Energy*, 2023, 262: 125522.
- [16] NING M, CHEN X, LIN Y, et al. Revealing the hot deformation behavior of AZ42 Mg alloy by using 3D hot processing map based on a novel NGO-ANN model[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 2292-2310.



通信作者:周运来(1986—),男,博士,研究员,博士生导师。研究方向为结构优化、无损监测。E-mail: yunlai.zhou@xjtu.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕)