

DOI: 10.7511/jslx20220822001

基于改进灰狼优化算法的结构损伤识别

谢少鹏^{*1}, 吴柏生², 赵秀婷¹, 邹敏清³, 林丹锐¹

(1. 广东工业大学 先进制造学院, 揭阳 522000; 2. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006;
3. 广东工业大学 实验教学部, 广州 510006)

摘要:结合模态柔度矩阵、广义模态柔度矩阵和振型三个识别精度较好的指标,构造新的目标函数求解损伤识别问题。通过 Nelson 方法求解得到的频率与振型的导数,得到对结构刚度发生变化时更具敏感性的位置,然后在这些位置布置传感器以提取结构信息。针对原有的灰狼算法虽然全局搜索能力强,但是存在局部搜索精度差的问题,本文从初始种群和收敛因子等方面着手,改善灰狼算法的局部搜索能力及收敛速度。最后利用提出的方法,通过识别梁模型及桁架模型中的损伤单元说明本文方法的有效性。

关键词:结构损伤识别;灰狼算法;灵敏度定位法;动力特性参数;Nelson 方法

中图分类号: TU311; O346.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)02-0256-07

1 引言

由于受荷载、环境和使用时长等因素的影响,在社会上应用越加广泛的桥梁桁架等建筑结构经常出现局部位置软化老损,继而出现裂纹等不利于正常使用的问题。因此在实际生活中需要对工程结构进行检测判断,从而评估结构的整体性能。

结构损伤识别的方法大致分为有损识别方法和无损识别方法^[1]。结构发生损伤时,其结构参数如质量和刚度等会发生变化,从而引起结构相应动力特性参数的改变。由于频率和振型测试简单便捷,故此方法应用最为普遍^[2,3]。其中柔度矩阵^[4]和广义柔度矩阵^[5,6]以低阶模态参数即可较为准确地反映结构的真实情况而广泛应用于损伤识别领域。传统的传感器布置策略的主要思想是将目标模态振型向量线性无关贡献度最小的自由度去掉,进而得到优化后的最大有效程度的参数信息(如有效独立法及其联合算法^[7]等)。对于部分多自由度结构而言,这些方法需要通过智能算法寻找最大线性无关向量组的过程耗费计算时间长、效果有时不明显^[8]且未对结构发生振动较为敏感的位置进行研究。Mirjalili 等^[9]提出了灰狼智能算法。传统灰狼算法具有全局搜索能力强的优点,但存在局部探索能力弱和效率低等问题。有学者采用初始化种群策略优化灰狼算法^[10];还有学者构造新

的位置方程或与其他算法融合改进灰狼算法^[11,12]。而现有大多数研究对灰狼算法缺乏统筹整体改进。

基于上述的问题,本文的传感器布置策略从结点自由度对损伤单元的敏感性出发,探究对损伤单元灵敏度更高的自由度序列进行布置传感器,以获取结构更多信息。此外利用新的目标函数结合传感器布置策略,用改进的灰狼算法求解梁结构模型,精确定位梁的损伤位置及损伤程度。

2 理论基础

2.1 目标函数的建立

动力特性参数主要包括频率与振型。由两者衍生得到的柔度矩阵和广义柔度矩阵为

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\lambda_i} \boldsymbol{\varphi}_i \boldsymbol{\varphi}_i^T, \quad \mathbf{G} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\lambda_i^2} \boldsymbol{\varphi}_i \boldsymbol{\varphi}_i^T \quad (1,2)$$

式中 k 为实验中使用的模态阶数, $\boldsymbol{\varphi}_i$ 和 λ_i 分别为第 i 阶归一化振型和频率平方。广义柔度矩阵在高阶频率与振型的影响下比柔度矩阵衰减得更为迅速。通常情况下,柔度矩阵的识别效果优于单一的模态振型^[13]。故本文将文献[14]由模态振型得到的模态应变能修改为柔度矩阵。为了减少测量噪声的扰动,目标函数加入模态振型。由此本文目标函数为

$$\text{Min } R(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{\|\mathbf{F}(\boldsymbol{\alpha}) - \mathbf{F}_d\|}{\|\mathbf{F}_d\|} + \frac{\|\mathbf{G}(\boldsymbol{\alpha}) - \mathbf{G}_d\|}{\|\mathbf{G}_d\|} + \frac{\|\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\alpha}) - \boldsymbol{\Phi}_d\|}{\|\boldsymbol{\Phi}_d\|}$$

$$\text{s. t. } \boldsymbol{\alpha} \in [0, 0.6) \quad (3)$$

收稿日期: 2022-08-22; 修改稿收到日期: 2022-10-02.

基金项目: 国家自然科学基金(11672118); 广工揭阳理工(筹)紧缺型人才科研启动基金资助项目.

作者简介: 谢少鹏^{*} (1994-), 男, 硕士, 助理实验师
(E-mail: 729975466@qq.com).

式中 $\mathbf{F}(\boldsymbol{\alpha})$ 和 \mathbf{F}_d 分别为迭代过程的柔度矩阵和损伤后的柔度矩阵, $\mathbf{G}(\boldsymbol{\alpha})$ 和 \mathbf{G}_d 分别为迭代过程的广义柔度矩阵和损伤后的广义柔度矩阵, $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\alpha})$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_d$ 分别为迭代过程的振型向量组和损伤后的振型向量组, $\|\cdot\|$ 为向量的 2-范数或矩阵的 F-范数。假设结构发生损伤时,仅有刚度发生变化, $\boldsymbol{\alpha}$ 为结构的所有单元的损伤参数向量,其取值范围为 $[0, 0.6)$ 。

2.2 传感器的布置策略

斜率的绝对值大小一定程度上反映因变量对自变量变化的敏感程度。将某一阶振型相对于各个损伤单元的灵敏度计算出来取绝对值。由文献[15]对广义模态柔度矩阵求得

$$\partial \boldsymbol{\varphi}_{di} / \partial \alpha_j |_{\alpha=0} = \mathbf{a}_{ij} - \boldsymbol{\varphi}_{ui}^T \mathbf{M} \mathbf{a}_{ij} \boldsymbol{\varphi}_{ui} \quad (4)$$

式中 α_j 为损伤参数向量的第 j 个分量, \mathbf{M} 为结构整体质量矩阵, $\boldsymbol{\varphi}_{ui}$ 为第 i 阶未损伤的模态振型, \mathbf{a}_{ij} 的求解过程见文献[15]。 $\partial \boldsymbol{\varphi}_{di} / \partial \alpha_j |_{\alpha=0}$ 为第 i 阶振型对第 j 个单元在 $\alpha_j=0$ 处的导数。假设其中的第 k 个分量为 $T_{ijk} = (\partial \boldsymbol{\varphi}_{di} / \partial \alpha_j |_{\alpha=0})_k$, 该分量代表结构中第 k 个自由度对第 j 个单元损伤的灵敏度。

$$Tz_{ij} = |T_{ij1}| + |T_{ij2}| + \dots + |T_{ijk}| + \dots + |T_{ijN}| \quad (5)$$

$$Tz_{ijk} = |T_{ijk}| / Tz_{ij} \quad (6)$$

式中 Tz_{ij} 为所有分量的绝对值之和, Tz_{ijk} 为第 k 个分量的绝对值与所有分量绝对值之和的商。于是得到各个分量的灵敏度占比。

综合第 i 阶振型相对于所有单元的偏导数。当求解出所有单元对第 i 阶振型的导数时有

$$TK_i = \begin{bmatrix} Tz_{i11} & Tz_{i21} & \dots & Tz_{iN_e1} \\ Tz_{i12} & Tz_{i22} & \dots & Tz_{iN_e2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Tz_{i1N} & Tz_{i2N} & \dots & Tz_{iN_eN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时 TK_i 为一个 $N \times N_e$ 的矩阵。其中, N 为自由度个数, N_e 为单元个数。

最后采用 Matlab 软件画出 3D 柱状图,并筛选出 TK_i 中每一列的前 t 个较大值,而将该列其他位置的数值设置为 0。最后按行统计出非零数值的个数,个数多的那一行即为需要进行测量的自由度位置。

2.3 求解算法

受大自然中灰狼的狩猎策略和角色等级的启发,灰狼算法参照灰狼种群分工角色分为 α 狼、 β 狼、 δ 狼和 ω 狼 4 个等级。其中 α 狼、 β 狼和 δ 狼搜索并引导剩余的 ω 狼,以模拟灰狼追踪、包围和攻击等行为模式,在解空间内实现对最优解的定位搜索。

2.3.1 产生初始种群

传统灰狼算法采用随机生成初始种群的方式

产生个体。此种方法一定程度上减缓了算法的收敛速度。在保留初始种群随机性的基础上,本文从损伤识别问题的解的特点出发,通常情况下,结构损伤只发生在少量单元且损伤程度较小。Tent 映射结构简单,容易实现和其他优化算法结合使用^[16]。本文采用 Tent 映射方程初始化种群,同时将 p 值设置为 0.99,意在将初始解向量的值随机生成在该初始解向量的第一个随机值的周围,可使初始向量接近损伤情况,以此提高初始种群接近实际情况的概率,加快算法收敛。其中 Tent 映射方程为

$$Z_{k+1} = \begin{cases} Z_k/p & (Z_k \in (0, p]) \\ (1-Z_k)/(1-p) & (Z_k \in (p, 1]) \end{cases} \quad (8)$$

2.3.2 收敛因子调整策略

在传统灰狼优化算法中,收敛因子 a 的取值随着迭代的次数呈现线性递减,这种方法使得算法在初期全局中不能保持较大范围的搜索。由此本文提出如下的收敛策略,

$$a = 2\cos(\pi t/2\text{Max_iteration}) \quad (9)$$

式中 t 为当前迭代次数, Max_iteration 为最大迭代次数。本文采用式(9)的调整策略在前期 a 值较大,有利于全局搜索,避免陷入局部最优解。在迭代后期, a 的值减小导致迭代步长减小,以精确搜索最优解。

2.3.3 位置更新策略

ω 狼的位置更新取决于 α 狼、 β 狼和 δ 狼的位置,而 α 狼是最接近最优解的粒子,故本文针对 ω 群体粒子的位置更新作如下改进,

$$X_{ij}(t+1) = \begin{cases} \frac{X_{\alpha j}(t) + X_{\beta j}(t) + X_{\delta j}(t)}{3} & (\text{rand} \leq 0.5) \\ X_{\alpha j}(t) & (\text{rand} > 0.5) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $X_{ij}(t+1)$ 为第 $t+1$ 代的第 i 个粒子的第 j 个分量, $X_{\alpha j}(t)$, $X_{\beta j}(t)$ 和 $X_{\delta j}(t)$ 分别是第 t 代的 α 狼、 β 狼和 δ 狼的第 j 个分量; rand 为均匀分布产生的随机数值,范围为 $(0, 1)$ 。此种改进方式采用轮盘赌的方式,一定概率上将 ω 狼的每个个体与最优个体(即 α 狼)交换个体中的分量,有利于 ω 群体向最优粒子靠近,加速算法收敛。

此外本文将第 i 次迭代生成的 α 狼、 β 狼和 δ 狼的目标值与第 $i+1$ 次得到的 α 狼、 β 狼和 δ 狼排序比较,替换第 $i+1$ 次中目标函数值较差的粒子,得到函数值更优的三个粒子,作为第 $i+1$ 次的 α 狼、 β 狼和 δ 狼。加快算法收敛及预防算法回退至更差的识别情况。

3 算例

3.1 梁模型

为了验证本文方法,采用一个固支梁模型作为算例。梁的结构参数如下,单个单元长 $L=0.5\text{ m}$,杨氏模量为 $E=210\text{ GPa}$,截面惯性矩为 $I=8.33\times 10^{-6}\text{ m}^4$,密度为 $\rho=7800\text{ kg/m}^3$,横截面面积为 $A=10^{-2}\text{ m}^2$,泊松比为 $\nu=0.3$ 。本文测量前两阶模态参数用于识别,其模型如图1所示。

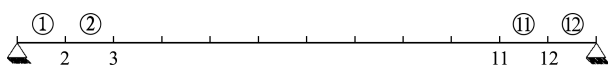


图1 梁模型
Fig.1 Model of beam

本文假设结构发生损伤时仅影响刚度数值,即弹性模量。设置如下三种损伤情况。

(1) 第5个单元折减15%的刚度。

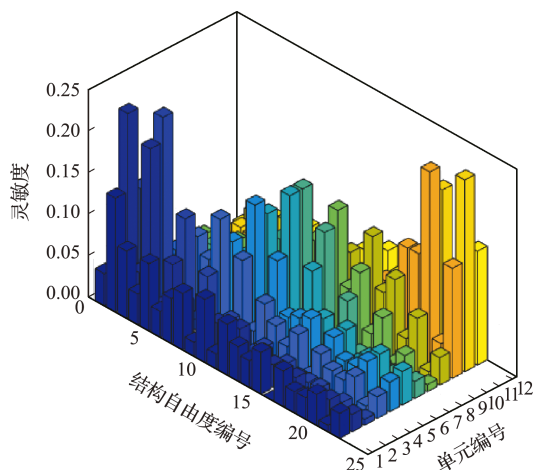


图2 第一阶模态下的单元损伤灵敏度
(未去掉低于平均值的分量)

Fig.2 Element damage sensitivity under the first mode
(components below average are not removed)

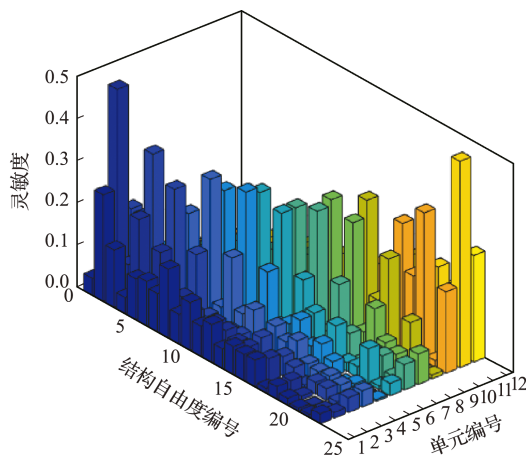


图4 第二阶模态下的单元损伤灵敏度
(未去掉低于平均值的分量)

Fig.4 Element damage sensitivity in the second mode
(components below average are not removed)

(2) 第1、第4和第11单元分别折减15%、20%和10%的刚度。

(3) 第2、第6、第10和第12单元分别折减15%、20%、10%和20%的刚度。

首先采用2.2节传感器布置策略确定传感器的位置。其第一阶与第二阶单元损伤灵敏度如图2所示。

图6为统计图3与图5的数据得到的两阶模态参数下各个自由度关于结构单元发生损伤时灵敏度较高的频数统计。其中绿色部分为结构梁单元的挠度自由度,而蓝色部分为转角自由度。虽然转角的敏感性比挠度高,但在实际测量工作中,获取挠度数据的方法比转角数据更为简单可行。故本文仅选取第3,4,5,9,10和11结点的挠度作为已知的测量数据,构建广义模态柔度矩阵和模态柔度矩阵的子矩阵及部分振型向量。

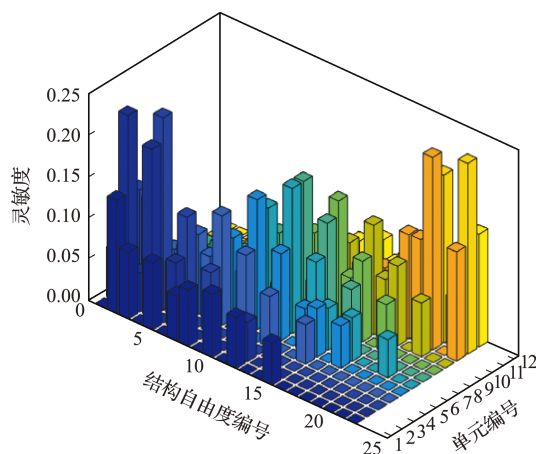


图3 第一阶模态下的单元损伤灵敏度
(去掉低于平均值的分量)

Fig.3 Element damage sensitivity under the first mode
(components below average are removed)

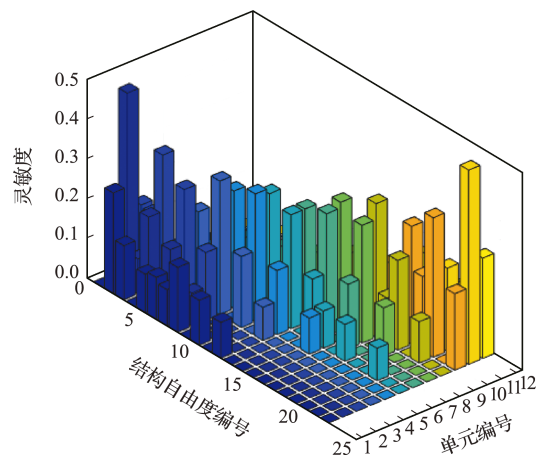


图5 第二阶模态下的单元损伤灵敏度
(去掉低于平均值的分量)

Fig.5 Element damage sensitivity in the second mode
(components below average are removed)

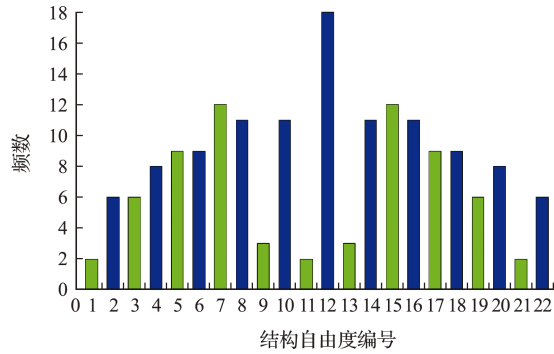


图6 结构各个自由度与敏感单元频数的关系(梁)

Fig. 6 Relationship between each degree of freedom of the structure and the frequency of sensitive elements (beam)

为了模拟实际测量中的测量误差,本文对测量的数据加入高斯白噪声,用于测试方法的可行性和准确性。其公式^[6]为

$$\varphi_{eij}^z = \varphi_{eij} (1 + \epsilon_1 R_{ij} (\max(|\varphi_{ui}|))) \quad (11)$$

$$\lambda_{ei}^z = \lambda_{ei} (1 + \epsilon_2 R_i) \quad (12)$$

式中 φ_{eij}^z 和 λ_{ei}^z 为损伤以后加入测量噪声的第 i 阶振型分量与频率平方,而 φ_{eij} 和 λ_{ei} 为损伤以后未加测量噪声的第 i 阶振型分量与频率平方, ϵ_1 和 ϵ_2 为所加的噪声水平, j 为振型分量, R_{ij} 和 R_i 均是均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声产生的随机数, $\max(|\varphi_{ui}|)$ 为损伤前的第 i 阶振型分量绝对值之最大值。

利用式(11,12)的噪声施加方法,分别为振型及频率施加 1%与 3%高斯白噪声,通过随机生成 500 组数据,并取平均值,代入本文的算法,计算得到如下结果。

当加入测量噪声时,从图 7、图 9 和图 11 可以看出,本文利用 Tent 映射生成初始种群的方法可有效改善初始种群的目标函数值,使其更快达到收敛。通过位置更新策略和调整因子改善算法的局部寻优能力。从图 8、图 10 和图 12 可以看出,无

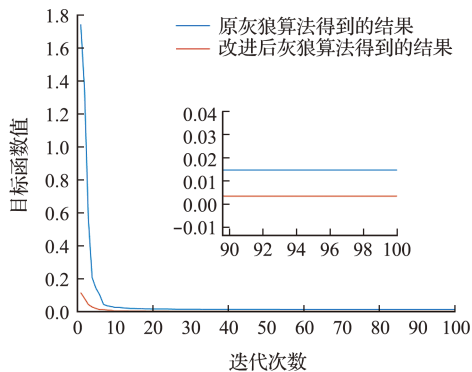


图7 两种算法在损伤情况(1)下的寻优曲线(梁)

Fig. 7 Optimization curves of two algorithms under condition (1) (beam)

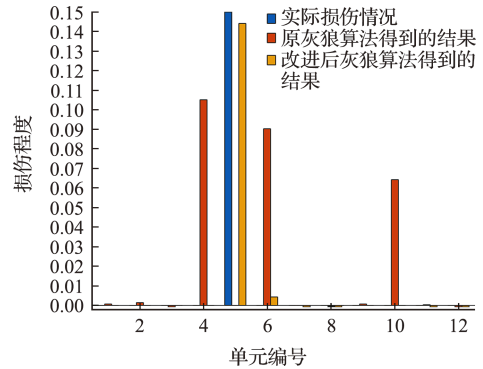


图8 两种算法在损伤情况(1)下的识别结果(梁)

Fig. 8 Comparison of results by two algorithms for scenario (1) (beam)

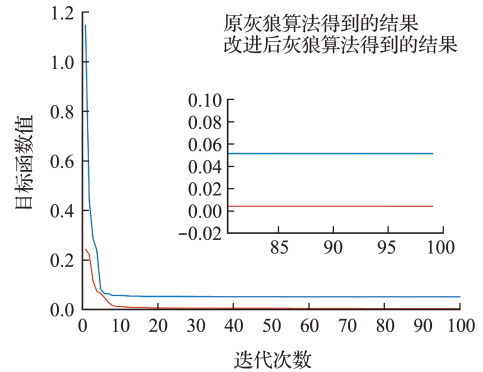


图9 两种算法在损伤情况(2)下的寻优曲线(梁)

Fig. 9 Optimization curves of two algorithms under condition (2) (beam)

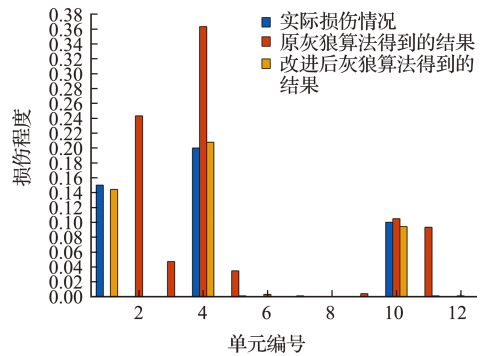


图10 两种算法在损伤情况(2)下的识别结果(梁)

Fig. 10 Comparison of results by two algorithms for scenario (2) (beam)

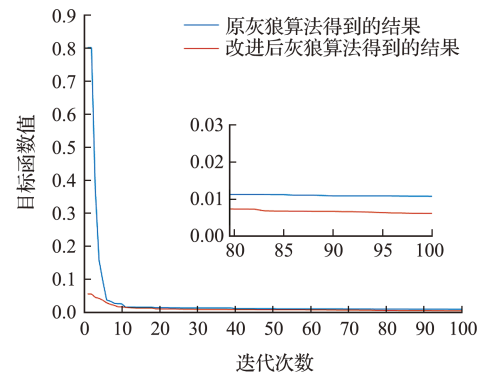


图11 两种算法在损伤情况(3)下的寻优曲线(梁)

Fig. 11 Optimization curves of two algorithms under condition (3) (beam)

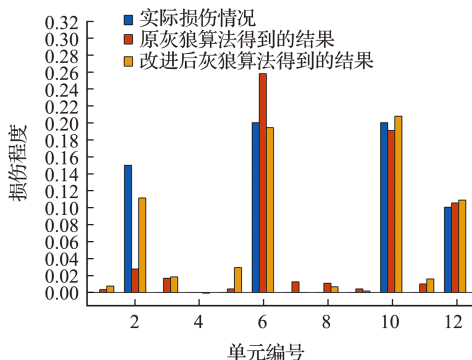


图 12 两种算法在损伤情况(3)下的识别结果(梁)
Fig. 12 Comparison of results by two algorithms for scenario (3) (beam)

论单个损伤单元情况还是多个损伤单元情况下,传统灰狼算法均出现无法准确识别损伤单元的情况且出现一些误判单元。

3.2 桁架模型

如图 13 所示为一个由 31 个杆单元组成的桁架结构,假设直杆和斜杆的长度分别为 $L_1 = 1\text{ m}$ 和 $L_2 = 1.414\text{ m}$,密度为 $\rho = 2770\text{ kg/m}^3$,横截面积 $A = 10^{-4}\text{ m}^2$,杨氏模量 $E = 70\text{ GPa}$ 。本文通过 2.2 节的方法,计算三阶模态参数下各个自由度关于结构单元发生损伤时的灵敏度,并统计其中灵敏度较高的频数,如图 14 所示。因杆单元节点仅有位移振型,不具有转角振型,所以从图 14 选取第 2 节、第 7 节、第 8 节和第 14 节点的垂直振型分量及其余节点的垂直振型分量。本算例测量前三阶固有频率及对应节点自由度的振型分量。

本算例依照 3.1 节梁模型的噪声水平、噪声施加方式及算法迭代次数,设置以下三种损伤情况再次验证本文方法的可行性。

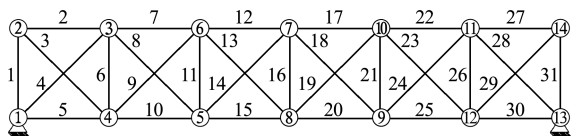


图 13 桁架模型
Fig. 13 Model of truss

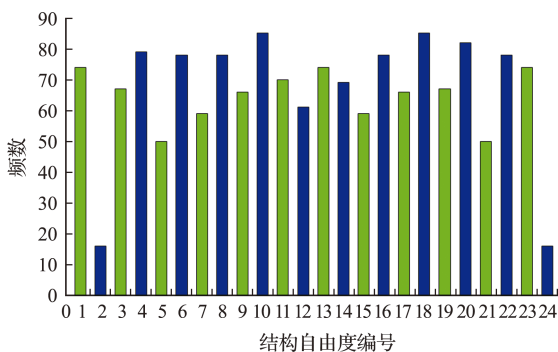


图 14 结构各个自由度与敏感单元频数的关系(桁架)
Fig. 14 Relationship between each degree of freedom of the structure and the frequency of sensitive elements (truss)

(1) 第 6 单元刚度折减 15%。

(2) 第 2、第 11 和第 18 单元刚度分别折减 15%、20% 和 10%。

(3) 第 3、第 14、第 21 和第 28 单元刚度折减 15%、20%、10% 和 20%。

如图 15、图 17 和图 19 可以看出,改进后的灰狼算法的收敛速度及目标函数值仍然优于传统灰狼算法;如图 16、图 18 和图 20 所示,在含噪声情况下,最终的识别结果依然能达到一个接近实际情况的效果,说明本文方法适用于识别桁架模型。

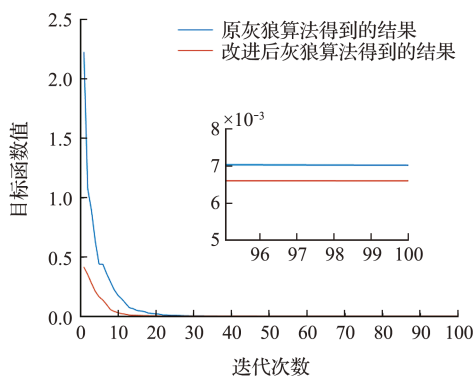


图 15 两种算法在损伤情况(1)下的寻优曲线(桁架)
Fig. 15 Optimization curves of two algorithms under condition (1) (truss)

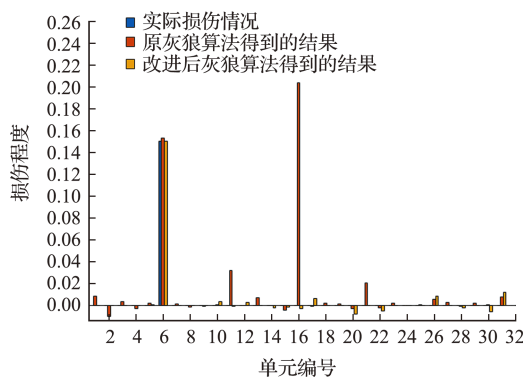


图 16 两种算法在损伤情况(1)下的识别结果(桁架)
Fig. 16 Comparison of results by two algorithms for scenario (1) (truss)

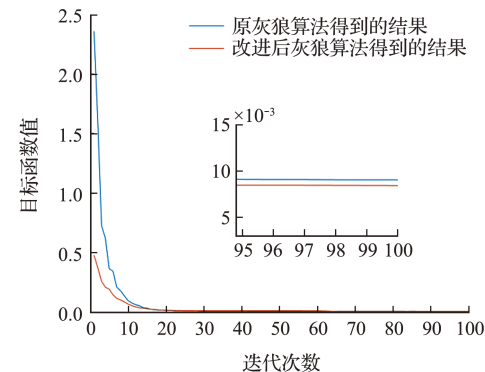


图 17 两种算法在损伤情况(2)下的寻优曲线(桁架)
Fig. 17 Optimization curves of two algorithms under condition (2) (truss)

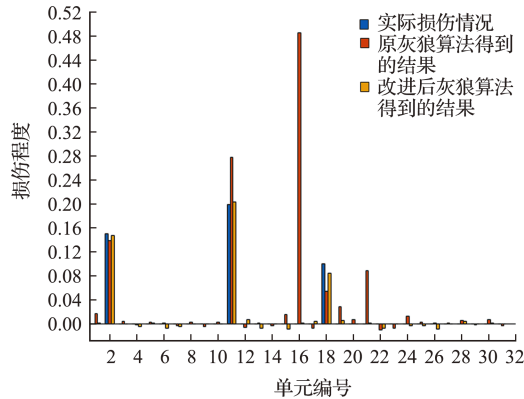


图 18 两种算法在损伤情况(2)下的识别结果(桁架)
Fig. 18 Comparison of results by two algorithms for scenario (2) (truss)

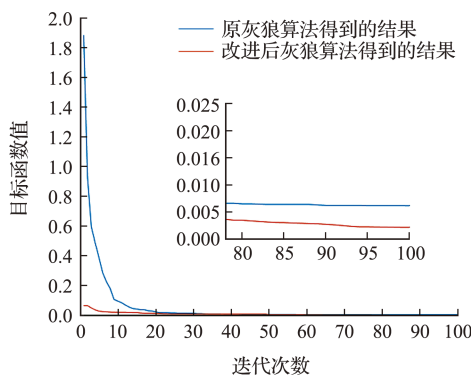


图 19 两种算法在损伤情况(3)下的寻优曲线(桁架)
Fig. 19 Optimization curves of two algorithms under condition (3) (truss)

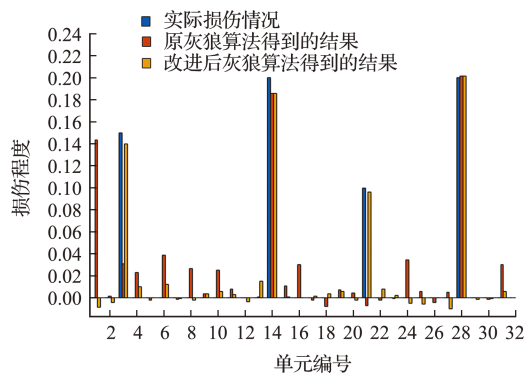


图 20 两种算法在损伤情况(3)下的识别结果(桁架)
Fig. 20 Comparison of results by two algorithms for scenario (3) (truss)

4 结 论

本文利用柔度矩阵、广义柔度矩阵及振型三个对损伤识别敏感的指标综合得到一个新的目标函数,采取本文提出的灵敏度定位法挑选出对结构发生损伤时敏感性更高的位置进行布置传感器,并运用改进的灰狼算法求解目标函数。综上所述,得到如下结论。

(1) 本文采用的改进后灰狼算法从种群初始化、收敛因子及位置更新等方面做出改进,利用本

文提出的目标函数,相比原灰狼算法的结果,更能准确识别出结构的损伤位置及损伤程度。

(2) 灵敏度定位法无需智能算法搜索寻优,亦能得到对结构刚度变化敏感的位置,并进行布置传感器。

(3) 通过梁模型及桁架模型两个算例证明了本文方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] 郭佳,管德清.基于梁连续抗弯刚度与小波变换的结构损伤识别方法研究[J].计算力学学报,2022,39(5):608-613. (GUO Jia, GUAN De-qing, Research on structural damage identification method based on continuous bending stiffness of the beam and wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(5): 608-613. (in Chinese))
- [2] Jalali M H, Rideout D G. Substructural damage detection using frequency response function based inverse dynamic substructuring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 163: 108166.
- [3] 孙健敏,李丹,颜王吉.基于模态参数灵敏度的损伤方程组求解正则化方法研究[J].计算力学学报,2022,39(1):70-79. (SUN Jian-min, LI Dan, YAN Wang-ji. Regularization methods for solving modal sensitivity-based damage equations: a comparative study [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(1): 70-79. (in Chinese))
- [4] 冯新,范颖芳,周晶.基于柔度的桁架结构损伤定位方法[J].计算力学学报,2006,23(5):563-568. (FENG Xin, FAN Ying-fang, ZHOU Jing. A flexibility-based method for damage localization of truss structures [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(5): 563-568. (in Chinese))
- [5] Li J, Wu B S, Zeng Q C, et al. A generalized flexibility matrix based approach for structural damage detection[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(22): 4583-4587.
- [6] Liu H F, Li Z G. An improved generalized flexibility matrix approach for structural damage detection[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2020, 28(6): 877-893.
- [7] 范恒承,余岭.一种传感器优化布置的多能量参数改进有效独立法[J].振动与冲击,2020,39(24):25-31. (FAN Heng-cheng, YU Ling. An improved effective independent method based on multi energy parameters for optimal sensor placement [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(24): 25-31. (in Chinese))
- [8] 杨辰.结构健康监测的传感器优化布置研究进展与

- 展望[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(17): 82-93. (YANG Chen. Advances and prospects for optimal sensor placement of structural health monitoring[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(17): 82-93. (in Chinese))
- [9] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, **69**: 46-61.
- [10] 伍铁斌, 桂卫华, 阳春华, 等. 用对数函数描述收敛因子的改进灰狼优化算法及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, **49**(4): 857-864. (WU Tie-bin, GUI Wei-hua, YANG Chun-hua, et al. Improved grey wolf optimization algorithm with logarithm function describing convergence factor and its application[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, **49**(4): 857-864. (in Chinese))
- [11] Arora S, Singh H, Sharma M, et al. A new hybrid algorithm based on grey wolf optimization and crow search algorithm for unconstrained function optimization and feature selection[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 26343-26361.
- [12] 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 一种改进的灰狼优化算法[J]. 电子学报, 2019, **47**(1): 169-175. (LONG Wen, CAI Shao-hong, JIAO Jian-jun, et al. An improved grey wolf optimization algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, **47**(1): 169-175. (in Chinese))
- [13] Zhao J, Dewolf J T. Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, **125**(4): 410-416.
- [14] Kaveh A, Hosseini S M, Akbari H. Efficiency of plasma generation optimization for structural damage identification of skeletal structures based on a hybrid cost function[J]. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 2021, **45**(4): 2069-2090.
- [15] 谢少鹏, 吴柏生, 钟慧湘. 基于广义模态柔度矩阵的结构损伤识别[J]. 吉林大学学报(理学版), 2020, **58**(3): 518-526. (XIE Shao-peng, WU Bai-sheng, ZHONG Hui-xiang. Structural damage identification based on the generalized modal flexibility matrix[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2020, **58**(3): 518-526. (in Chinese))
- [16] 王贺琦, 王然, 刘诗琳, 等. 基于 Tent 映射的改进型人工蜂群算法[J]. 软件工程, 2022, **25**(8): 15-19. (WANG He-qi, WANG Ran, LIU Shi-lin, et al. Modified artificial bee colony algorithm based on Tent mapping[J]. *Software Engineering*, 2022, **25**(8): 15-19. (in Chinese))

Structural damage identification based on improved gray wolf optimization algorithm

XIE Shao-peng^{*1}, WU Bai-sheng², ZHAO Xiu-ting¹, ZOU Min-qing³, LIN Dan-rui¹

(1. School of Advanced Manufacturing, Guangdong University of Technology, Jieyang 522000, China;

2. School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. Experimental Teaching Department, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In this paper, a new objective function is constructed to solve the damage identification problem by combining three indicators with good identification accuracy: modal flexibility matrix, generalized modal flexibility matrix and mode shape. The derivative of a frequency and a mode shape obtained by Nelson method is used to obtain the positions that are more sensitive to the change of structural stiffness, and then sensors are arranged at these positions to extract structural information. Although the original gray wolf algorithm has strong global search ability, it has the problem of poor local search accuracy. This paper improves the local search ability and convergence speed of gray wolf algorithm from the aspects of initial population, convergence factor, etc. Finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated by identifying the damage elements in a beam model and a truss model.

Key words: structural damage identification; gray wolf algorithm; sensitivity location method; dynamic characteristic parameters; Nelson method

引用本文/Cite this paper:

谢少鹏, 吴柏生, 赵秀婷, 等. 基于改进灰狼优化算法的结构损伤识别[J]. 计算力学学报, 2024, **41**(2): 256-262.

XIE Shao-peng, WU Bai-sheng, ZHAO Xiu-ting, et al. Structural damage identification based on improved gray wolf optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, **41**(2): 256-262.