

DOI: 10.7511/jslx20230508001

结合蜉蝣算法和响应面的结构静力损伤识别

宋彦朋¹, 陈辉^{1,2}, 黄斌^{*2,3}, 吴志峰⁴(1. 武汉工程大学邮电与信息工程学院, 武汉 430073; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070;
3. 武汉理工大学 海南研究院, 三亚 572025; 4. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要:提出了一种结合蜉蝣智能搜索算法和静位移响应面的结构损伤识别方法。首先构造了基于灵敏度的静力损伤识别方程残差和位移残差指标的正则化优化目标函数, 然后采用人工智能领域的蜉蝣算法来识别结构单元级别的损伤。在优化过程中, 为了解决静力加载点和位移测点不一致的问题, 利用模型凝聚和位移扩展方法重新构建了损伤识别方程。同时, 利用静位移响应面计算目标函数中的位移残差, 避免了耗时的有限元计算, 提高了优化效率。简支梁的数值算例结果表明, 本文方法在寻优速度和精度方面均优于传统的粒子群法和差分进化算法; 与单独基于静力损伤识别方程残差或位移残差指标的方法相比, 识别损伤更为准确。铝合金悬臂梁损伤识别的静载实验进一步验证了本文方法的高效率和有效性。

关键词:蜉蝣算法; 静力损伤识别; 响应面; 静力损伤方程; 静力残差

中图分类号: O346.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)04-0702-07

1 引言

改革开放几十年来, 我国基础设施建设经历了高速发展阶段, 特别是在交通领域, 各种桥梁的数量剧增。这些重大工程在服役过程中的健康状况显得尤为重要^[1]。由于外部荷载、环境变化和材料退化等复杂因素的影响, 许多桥梁会不可避免出现不同程度刚度退化或者损伤。为了充分了解服役期间桥梁结构的健康状况和实时状态, 避免工程事故的发生, 对这些服役桥梁进行损伤诊断, 是当前结构健康监测的主要内容之一^[2]。

对于工程结构, 较为常见的损伤主要有材料老化、局部开裂和产生塑性变形等。这在力学上往往表现为结构刚度的降低^[3]。因此, 大多数工程领域损伤识别的主要内容就是识别结构刚度降低的位置和程度^[4]。按照使用的测量数据来看, 结构损伤识别主要分为基于动力数据和静力数据的损伤识别方法。动力数据因其数据信息量丰富, 近十年来受到的关注较高^[2]。但同时也存在一些不足, 如结构振动频率和振型与结构质量和刚度均有关系, 受

边界条件影响也较大, 特别是目前振型测量效果还不是很好。而结构的静力数据因具有测试简单方便和精确、成本低且仅与结构刚度有关等诸多优点, 近年来受到较多关注。在使用静力数据进行结构损伤识别方面, 许多研究人员做了大量的工作。金靖等^[5]采用广义应变残差, 对一个实际桥梁结构的损伤进行识别。李继伟等^[6]建立了基于刚度灵敏度的静力损伤方程, 通过最小二乘法对其损伤方程进行求解, 并利用一个变截面梁的数值算例对方法的有效性进行了验证。黄斌等^[7]将稀疏正则化算法应用于求解其构造的结构概率损伤识别方程, 通过一个实际的混凝土梁的静力位移数据, 说明了该方法的良好效果。伍晓顺等^[8]通过位移灵敏度, 构造了静力损伤方程, 并提出用三阶段策略对损伤方程迭代求解, 从而获得结构损伤系数。从上述文献可以看出, 目前大多数基于静力数据的模型修正或者损伤识别方法中, 主要是以通过灵敏度构造损伤方程或通过位移残差指标构造目标函数进行优化^[9]。在采用损伤识别方程残差指标的方法中, 由于位移测点的限制, 需要进行静力凝聚或者位移扩展, 但还存在测量自由度和加载点不一致的问

收稿日期: 2023-05-08; 修改稿收到日期: 2023-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金(51578431; 51978545); 海南省自然科学基金(522CXTD517)资助项目.

作者简介: 黄斌* (1968-), 男, 博士, 教授(E-mail: songyanpeng2022@163.com).

引用本文: 宋彦朋, 陈辉, 黄斌, 等. 结合蜉蝣算法和响应面的结构静力损伤识别[J]. 计算力学学报, 2024, 41(4): 702-708.

SONG Yan-peng, CHEN Hui, HUANG Bin, et al. Structural damage identification using mayfly intelligent algorithm and static response surface model[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(4): 702-708.

题^[10]。同时,这类方法充分利用了正则化技术来解决方程求解过程中的不适定性问题^[7]。而在采用静力位移残差指标的损伤识别方法中,也存在优化结果不准确或不稳定的现象^[11]。上述方法在优化过程中还需要进行重复的有限元计算,对于大型结构来说,计算效率极低。

本文基于灵敏度的静力损伤识别方程和静力位移残差这两种不同的识别指标进行融合,提出了一种新的用于结构损伤识别的正则化优化目标函数。进一步,利用蜉蝣智能优化算法^[12]求解目标函数的极小值,较好地克服了传统优化算法容易陷入局优的问题。利用模型凝聚和位移扩展方法重新构建了损伤识别方程。同时,利用静力位移响应面计算目标函数中的位移残差,避免了耗时的有限元计算,提高了优化效率。最后,通过数值算例和一个铝合金悬臂梁的损伤识别静力实验验证了本文方法的有效性。

2 结构损伤识别新方法

2.1 多识别指标的优化目标函数

对于一个单元数量为 n 包含 N 个自由度的结构,假设损伤前完好结构的刚度矩阵为 $\mathbf{K}_0$,在已知外荷载 $\mathbf{F}$ 的作用下,结构的静力位移向量为 $\mathbf{U}_a$,则有

$$\mathbf{K}_0 \mathbf{U}_a = \mathbf{F} \quad (1)$$

当结构出现损伤后,刚度会降低,损伤后的结构刚度为:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \Delta \mathbf{K} \quad (2)$$

式中 $\Delta \mathbf{K}$ 为损伤前后结构刚度矩阵的改变量。损伤后的结构静力方程写为

$$\mathbf{K} \mathbf{U}_m = \mathbf{F} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{U}_m$ 为损伤结构的静力位移,由对结构位移进行测量得到。此时损伤前后结构的位移残差为

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{U}_m - \mathbf{U}_a \quad (4)$$

根据有限单元法,结构总体刚度的改变量为各个单元刚度矩阵改变量之和,即结构刚度的改变量 $\Delta \mathbf{K}$ 可以表达为

$$\Delta \mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{K}_i \quad (5)$$

式中 α_i 为结构第 i 个单元的刚度损伤因子。 $\mathbf{K}_i$ 为结构第 i 个单元的刚度矩阵组装到全局自由度后的矩阵,注意到其扩充的自由度元素均为零。结构损伤后的刚度矩阵可以表达为

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{K}_i \quad (6)$$

由式(1~6)可以得到结构静力损伤控制方程

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{K}_i \mathbf{U}_m = \mathbf{K}_0 \Delta \mathbf{U} \quad (7)$$

式(7)可以简写为

$$\mathbf{S} \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{R} \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_n]^T$, $\mathbf{R} = \mathbf{K}_0 \Delta \mathbf{U}$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{K}_1 \mathbf{U}_m \ \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_m \ \cdots \ \mathbf{K}_n \mathbf{U}_m]。$$

由于测量位移向量 $\mathbf{U}_m$ 存在不可避免的测量误差,式(8)不一定严格相等,因此可写为

$$\mathbf{S} \boldsymbol{\alpha} - \mathbf{R} = \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为式(8)的残差。显而易见,一个最优的损伤因子向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 会使式(9)的残差最小。因此可以通过一系列的优化算法结合 Tikhonov 正则化^[13]来寻找式(9)的最小值,此时对应的 $\boldsymbol{\alpha}$ 即为准确的损伤因子。Tikhonov 正则化中的正则化参数采用 L 曲线法计算获得。另外,当取最优损伤因子时,计算的结构位移与实测位移的残差也最小。因此,可以构造一个多指标优化目标函数

$$J(\boldsymbol{\alpha}) = \|\mathbf{S} \boldsymbol{\alpha} - \mathbf{R}\|^2 + \lambda \|\boldsymbol{\alpha}\|^2 + \|\mathbf{U}_m - \mathbf{U}_a\|^2 \quad (10)$$

式中 $\|\cdot\|^2$ 为求解向量 2 范数的算子, λ 为正则化参数,式(10)的前两项用 Tikhonov 正则化方法求解。特别注意到,式(10)最后一项的 $\mathbf{U}_a^i$ 与式(4)的 $\mathbf{U}_a$ 的物理意义是不同的,前者表示结构的第 i 次迭代过程中的计算位移,而 $\mathbf{U}_a$ 表示结构初始计算位移。式(10)是一个综合目标函数,损伤因子必须满足其中所有的项才能使目标函数最小,这极大提高了损伤识别的精度。

2.2 基于模型凝聚和位移扩展的损伤识别方程

当用本文方法进行损伤识别时,要求式(7)的 $\mathbf{U}_m$ 与 $\mathbf{K}_i$ 的自由度匹配,因此需要知道全部自由度的静力位移。对于仿真结构,其模拟的测量位移可假定是完备的。但对于真实结构,这是不可能的。此时,需要将式(7)的整体刚度矩阵 $\mathbf{K}_0$ 和各单元的刚度矩阵 $\mathbf{K}_i$ 进行凝聚,使之与加载点和测量点对应的自由度相匹配。本文采用 GUYAN 缩聚法来进行静力凝聚^[14]。假定结构加载点和测量点对应的位移向量为 $\mathbf{U}_p$,其他所有自由度对应的位移向量记为 $\mathbf{U}_q$,然后将结构初始刚度矩阵进行分块,分块后的静力平衡方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{pp} & \mathbf{K}_{pq} \\ \mathbf{K}_{qp} & \mathbf{K}_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{U}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_p \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{F}_p$ 为所有加载点和测量点自由度上的外荷载向量。且 $p + q = n$ 。由式(11)可得

$$\mathbf{U}_q = -\mathbf{K}_{qq}^{-1} \mathbf{K}_{qp} \mathbf{U}_p \quad (12)$$

定义 $\mathbf{R} = -\mathbf{K}_{qq}^{-1} \mathbf{K}_{qp}$ 以及单位矩阵 $\mathbf{I}_{p \times p}$,并令

$\mathbf{D}=[\mathbf{I};\mathbf{R}]$,然后将式(12)代入式(11)可得凝聚的静力平衡方程为

$$\mathbf{K}_p \mathbf{U}_p = \mathbf{F}_p \quad (13)$$

$$\text{式中} \quad \mathbf{K}_p = \mathbf{D}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{D} \quad (14)$$

同理,矩阵 $\mathbf{K}_i$ 凝聚后变为

$$\mathbf{K}_{ip} = \mathbf{D}^T \mathbf{K}_i \mathbf{D} \quad (15)$$

对于实际结构,测点一般不与加载点重合,因此 $\mathbf{U}_p$ 中加载点的位移是未知的。为解决这个问题,可采用位移扩展的方法,通过实测的位移得到加载点的未知位移。假定 $\mathbf{U}_p$ 中已知的位移向量为 $\mathbf{U}_s$,加载点位移向量为 $\mathbf{U}_t$,且 $s+t=p$ 。进一步,将 $\mathbf{K}_p$ 进行分块,式(13)可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{st} \\ \mathbf{K}_{ts} & \mathbf{K}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_s \\ \mathbf{U}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_t \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 $\mathbf{F}_s$ 为已知位移对应的荷载向量,通常为零向量, $\mathbf{F}_t$ 为全部加载点的荷载向量,所有元素均不为零。通过式(16),可得全部加载点的位移为

$$\mathbf{U}_t = -\mathbf{K}_{tt}^{-1}(\mathbf{F}_t - \mathbf{K}_{ts}\mathbf{U}_s) \quad (17)$$

至此,位移向量 $\mathbf{U}_p$ 成为已知量,凝聚后的损伤识别方程可以写为

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{K}_{ip} \mathbf{U}_p = \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{U}' \quad (18)$$

式中 $\Delta \mathbf{U}'$ 表示实测位移与相应自由度上的初始计算位移的位移差,即

$$\Delta \mathbf{U}' = \mathbf{U}_p - \mathbf{U}'_a \quad (19)$$

式中 $\mathbf{U}'_a$ 表示仅包含加载点自由度和测点自由度的初始计算位移向量。将式(17)代入式(10),当目标函数式(10)极小时,即可得到损伤因子 α 。

2.3 蜉蝣算法

本文采用群智能优化算法中最新的蜉蝣算法 MA(Mayfly algorithm)搜索目标函数式(10)的极小值。MA 算法的主要优势是其具有很强的探索和收敛能力,相较于其他传统的生物启发式优化算法,该算法能更快更准确地确定全局最优解。因此,其是解决复杂优化问题的一种很有前途的优化算法^[15,16]。本文用该算法进行结构损伤识别,主要步骤如下。

(1) 设定损伤参数及范围,初始化损伤因子向量 α (雌雄性蜉蝣位置)。

(2) 分别计算两性蜉蝣位置对应的目标函数 $J(\alpha)$ 的值,并且排序,获取局部最小值 pbest 和全局最小值 gbest。

(3) 依次更新雄性蜉蝣和雌性蜉蝣位置,即损伤因子的值,并且按照蜉蝣算法规则进行交配(产生新的损伤因子值)。

(4) 将后代(新的损伤因子值)随机分为雄性和雌性,计算 $J(\alpha)$,同时更新 pbest 和 gbest。

(5) 判断目标函数 $J(\alpha)$ 是否达到预设的极小阈值(建议设置为 10^{-4}),如果满足则退出,输出损伤因子值,否则重复执行步骤(3,5)。

2.4 静力位移的响应面代理模型

在利用正则化方法优化目标函数 $J(\alpha)$ 的过程中,关于式(10)第三式位移残差的计算,如果反复采用有限元计算,在实际工程应用中将过于耗时而不能接受。本文引入响应面法 RSM(Response surface model)来解决计算效率的问题。响应面法采用代数表达式在一定范围内建立结构输入和输出的近似关系^[17]。具体做法是选取适当的结构参数样本,用有限元方法计算这些样本的响应,然后拟合这些样本和对应的计算响应之间的关系,并建立响应面模型。响应面模型通常采用如下的二阶多项式形式,即

$$y = \xi_0 + \sum_{i=1}^n \xi_i \alpha_i + \sum_{i=1}^n \xi_{ii} \alpha_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \xi_{ij} \alpha_i \alpha_j + \epsilon_i \quad (20)$$

式中 ξ_0, ξ_i, ξ_{ii} 和 ξ_{ij} 为响应面模型的待定系数; α_i 和 α_j 为设计变量,即单元损伤因子向量 α 的元素; ϵ_i 为观测误差。首先采用拉丁超立方抽样选取结构参数样本(本文为 500 组样本),然后用有限元计算获取这些样本对应的结构静力位移,最后用 Matlab 软件统计工具箱中的 Regstats 函数,求得待定系数 ξ_0, ξ_i, ξ_{ii} 和 ξ_{ij} 。本文采用带有常数项、线性项和平方项的 Purequadratic 模型来获取这些待定系数,不考虑交叉项。

3 数值算例

考虑一个简支梁,梁的长度为 2 m,梁的横截面为矩形,横截面尺寸为 0.15 m×0.15 m。弹性模量为 28 GPa。在简支梁的上表面施加两个 5 kN 的集中荷载,如图 1 所示。为了模拟加载点和位移测点不一致的情况,采用实体单元建模。在梁的底部按照梁的长度方向均匀取 7 个位移测量点。按照梁的长度方向将其划分为 8 个子结构,每个子结构共享一个弹性模量。以设计模型作为梁的未损伤基准模型,损伤模型由表 1 设置的工况进行模拟。损伤因子定义为梁的真实刚度相对于初始刚度的减小量。表 1 的刚度计算的结构静力位移作为测量均值,本文仅使用 7 个测点的静力位移,各节点附加 1% 的高斯分布的相互独立的测量误差。8 个子结构的刚度折减量作为损伤因子进行识别。

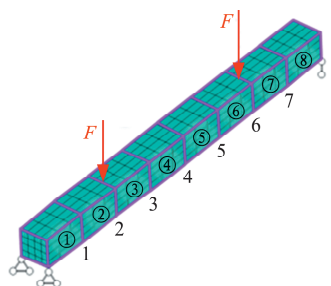


图1 简支梁有限元模型及测点

Fig. 1 FEM of simply supported beam and measurement points

表1 预设的损伤因子

Tab. 1 Preset damage factors

损伤因子	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
真值	-0.1	-0.15	-0.2	-0.3	-0.4	-0.1	-0.05	0

图2是用式(10)的目标函数结合蜉蝣算法(MA)优化得到的目标函数收敛图。结果同时列出了经典的粒子群优化算法(POS)^[18]和差分进化算法(DE)^[19]在同样的目标函数下得到的损伤因子。可以看出,三种寻优算法均收敛,但是MA算法搜索到了更小的值,且最先收敛。这说明MA算法能更快搜索到全局最优值。另外,设定三种智能算法均迭代500次,每次用有限元方法计算结构响应,结果显示MA方法耗时为17.2 s,POS算法耗时81.5 s,DE算法耗时183.6 s,这说明MA方法的寻优效率也很高。图3是迭代500次获得的损伤因子。可以看出,MA搜索的结果与预设值最为接近,这充分说明了MA优化算法的准确性。

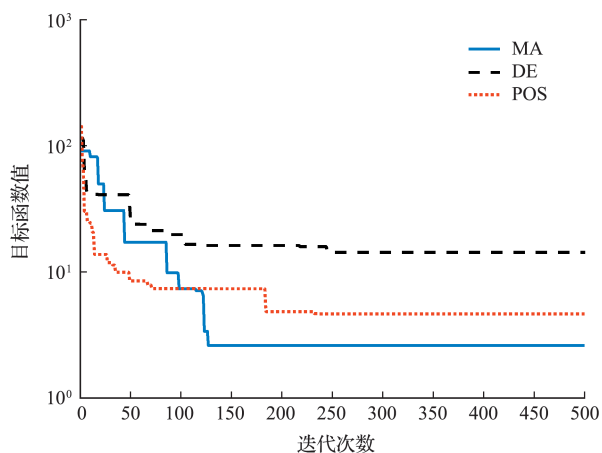


图2 迭代过程

Fig. 2 Iterative process

在已有的基于模型修正的损伤识别方法中,采用的目标函数涉及的损伤识别指标往往是单一的形式,典型的如采用位移灵敏度作为损伤识别指标建立目标函数 $J_1(\alpha) = \|S\alpha - R\|^2 + \lambda \|\alpha\|^2$ ^[7],或

仅采用位移残差构造目标函数 $J_2(\alpha) = \|U_m - U_a\|^2$ ^[14]进行损伤识别。在静力测量信息本身就比较有限的情况下,单一识别指标的目标函数常会造成识别结果不准确。为了比较,本文采用了上述两种识别指标对应的目标函数进行损伤识别,均利用MA算法进行寻优。图4列出了分别以 J , J_1 和 J_2 作为目标函数识别的结果。可以看出,本文方法得到的识别结果与预设损伤因子基本一致,而采用 J_1 作为目标函数得到的结果精度略有下降,以 J_2 作为目标函数的结果精度最差。这说明本文提出的多指标目标函数对于静力损伤识别是有效的。

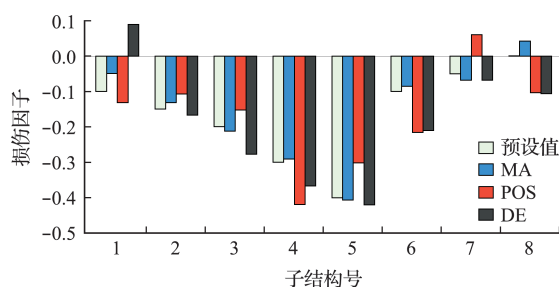


图3 三种优化算法的损伤因子

Fig. 3 Damage factors of three optimization algorithms

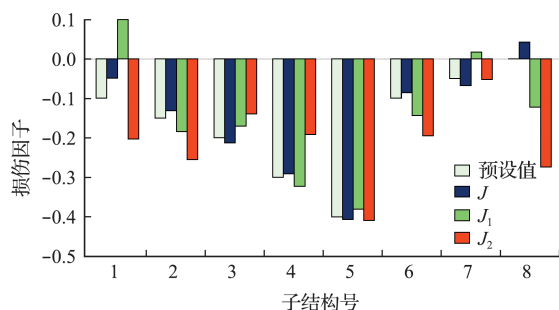


图4 不同目标函数下损伤因子

Fig. 4 Damage factors under different objective functions

进一步,讨论不同数量的静力位移测点对本文方法的影响。分别假定两种测点位移工况,第一种是假定仅在测量中获得了图1节点1、节点3、节点5和节点7的位移。第二种是使用图1中7个测点的位移进行损伤识别。这两种工况下,数值梁的有限元模型均缩减到 9×9 维,包含两个加载点自由度和7个测量点自由度。注意,在目标函数的矩阵 S 和向量 R 中,未测量的自由度的位移信息均用 U_a^i 对应节点的位移值代替,并在迭代过程中不断更新。图5显示了使用7个测点和4个测点得到的损伤因子。可以看出,4个位移测点和7个位移测点得到的损伤因子与预设的结果基本一致,这说明提出的方法对于测点较少的工况仍然具有良好的识别效果。

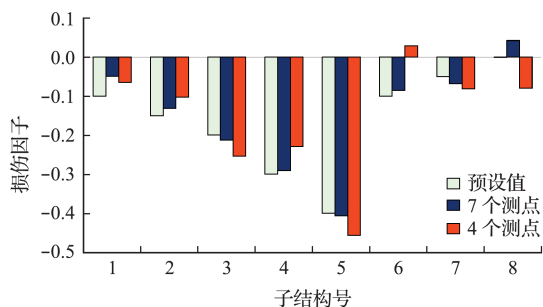


图5 不同测点数量的损伤因子

Fig. 5 Damage factors of different measuring points

在上述几个工况的损伤识别过程中,均是采用有限元方法来计算结构响应,这将会花费较长的时间。因此本文采用二次响应面代理模型,来代替大规模有限元模型运算中的耗时问题。图6分别列出了在7个位移测点和4个位移测点工况下,在迭代过程中采用有限元模型和响应面模型得到的损伤因子。可以看出,两种工况下,均能得到较为精确的损伤因子。但从计算效率来看,在采用MA优化算法情况下,有限元迭代500次耗时约180 s,而响应面仅需要3 s。这充分说明本文提出的方法具有很高的计算效率。

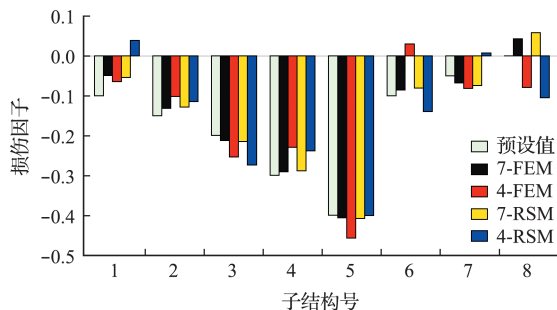
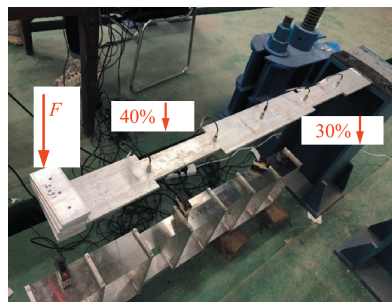


图6 损伤因子

Fig. 6 Damage factor

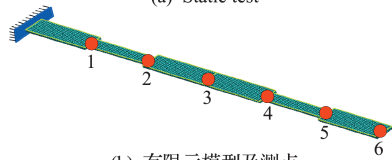
4 实验验证

开展了一个铝合金悬臂梁损伤识别的实验验证。梁的长度为1.2 m,横截面为矩形截面,尺寸为0.1 m×0.008 m。如图7所示。铝合金的弹性模量为 66×10^9 Pa。铝合金悬臂梁模型划分为3000个Solid 65单元,共16200个自由度。将梁沿着长度方向12等分,分为12个子结构,每个子结构共享一个损伤因子。将第3和第4个子结构切除30%,第9和第10个子结构切除40%,分别模拟30%和40%的损伤。铝合金梁的质量已知。试验梁的有限元模型如图7(b)所示。在梁端作用7.9 N的质量块作为荷载,三个激光位移传感器分两批对梁底部的六个测点的位移进行采集。测量的静力位移均值如图8所示。



(a) 静力试验

(a) Static test



(b) 有限元模型及测点

(b) FEM and measuring points

图7 铝合金悬臂梁有限元模型

Fig. 7 FEM of the aluminum alloy cantilever beam

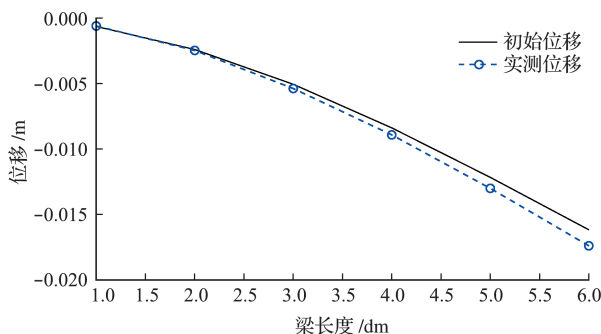


图8 铝合金悬臂梁位移

Fig. 8 Displacement of aluminum alloy cantilever beam

采用本文方法计算迭代过程中的结构位移响应,迭代次数设定为300次,损伤因子的搜索范围设定为 $[-0.5, 0.1]$ 。最终得到结构各单元的损伤因子如图9所示。可以看出,分别用响应面方法和有限元法计算结构位移残差,最终得到的损伤因子与实际值吻合度很好,这验证了二次响应面模型在代理结构静力位移方面的有效性。从计算效率看,采用有限元方法耗时约380 s,而本文方法耗时仅为10 s,说明本文方法计算效率高。损伤识别结果表明,本文方法识别出的损伤位置和程度与实际构造的损伤情况基本一致。

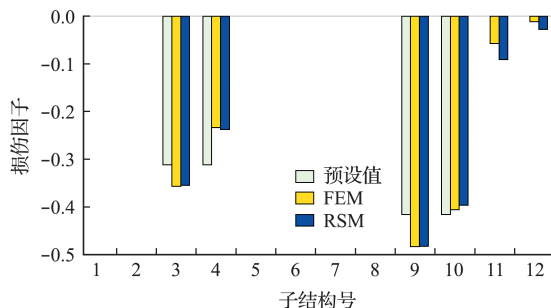


图9 铝合金悬臂梁损伤因子

Fig. 9 Damage factor of aluminum alloy cantilever beam

5 总 结

本文结合蜉蝣算法和响应面,提出了一种新的静力损伤识别方法。该方法首先建立了基于灵敏度方程残差和静位移残差指标的正则化优化目标函数,并利用蜉蝣算法进行损伤结构识别。数值算例结果表明,蜉蝣算法提高了对损伤因子的搜索能力,一定程度上克服了传统粒子群与差分进化算法容易陷入局优的问题。采用实体单元建模的数值算例结果证明采用位移扩展的方法解决了静力损伤识别中加载点和位移测点不一致的问题。铝合金悬臂梁损伤识别的实验结果表明,利用静位移响应面计算目标函数中的位移残差,避免了耗时的有限元计算,提高了优化效率,进一步验证了本文方法的优化效率和有效性,说明了本文方法在大型结构损伤识别中的潜力。

参考文献(References):

- [1] 朱宏平,余璟,张俊兵.结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J].工程力学,2011,**28**(2):1-11,17. (ZHU Hong-ping, YU Jing ZHANG Jun-bing. A summary review and advantages of vibration-based damage identification methods in structural health monitoring[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, **28**(2): 1-11, 17. (in Chinese))
- [2] Hou R R, Xia Y. Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures; 2010-2019 [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, **491**(9): 115741.
- [3] 张启伟,范立础.利用动静力测量数据的桥梁结构损伤识别[J].同济大学学报(自然科学版),1998,**26**(5):528-532. (ZHANG Qi-wei, FAN Li-chu. Damage detection for bridge structures based on dynamic and static measurements[J]. *Journal of Tongji University*, 1998, **26**(5): 528-532. (in Chinese))
- [4] 董 聪,丁 辉,高 嵩.结构损伤识别和定位的基本原理与方法[J].中国铁道科学,1999,**20**(3):89-94. (DONG Cong, DING Hui, GAO Song. The basic principle and method for recognition and location of structural damage[J]. *China Railway Science*, 1999, **20**(3): 89-94. (in Chinese))
- [5] 金 靖,傅林峰,陈 韵,等.基于静力虚拟变形法的桥梁结构损伤识别研究[J].浙江工业大学学报,2020,**48**(5):549-556. (JIN Jing, FU Lin-feng, CHEN Yun, et al. Research on damage identification of bridge structures based on static virtual deformation method[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, **48**(5): 549-556. (in Chinese))
- [6] 李继伟,汪 城,罗 帅.基于静力响应信号的变截面梁损伤识别[J].绍兴文理学院学报,2020,**40**(2):15-20. (LI Ji-wei, WANG Cheng, LUO Shuai. Damage identification of beams with variable cross sections based on static response signals[J]. *Journal of Shaoxing University*, 2020, **40**(2): 15-20. (in Chinese))
- [7] 黄 斌,鲁 溢.基于L1正则化的随机梁式结构静力损伤识别方法[J].计算力学学报,2020,**37**(1):69-74. (HUANG Bin, LU Yi. Static damage identification method of random beam structure based on L1 regularization[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, **37**(1): 69-74. (in Chinese))
- [8] 伍晓顺,马 俊,徐思东,等.基于位移灵敏度的结构损伤静力识别方法[J].空间结构,2019,**25**(3):45-50,66. (WU Xiao-shun, MA Jun, XU Si-dong, et al. Static method for identifying structural damages based on displacement sensitivity[J]. *Spatial Structures*, 2019, **25**(3): 45-50, 66. (in Chinese))
- [9] 贺文宇,武骥元,任伟新.基于车致桥梁响应和L1正则化的损伤识别研究[J].中国公路学报,2021,**34**(4):61-70. (HE Wen-yu, WU Ji-yuan, REN wei-xin. Bridge damage detection based on the moving vehicle induced response and L1 regularization [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, **34**(4): 61-70. (in Chinese))
- [10] 杨秋伟,周 聪,李翠红,等.基于静力残余力向量的结构损伤评估方法[J].计算力学学报,2021,**38**(5):625-630. (YANG Qiu-wei, ZHOU Cong, LI Cui-hong, et al. Structural damage assessment based on static residual force vector[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(5): 625-630. (in Chinese))
- [11] 向天宇,赵人达,蒲黔辉,等.基于静力测试数据的装配式混凝土简支梁有限元模型修正[J].公路交通科技,2006,**23**(10):79-82. (XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da, PU Qian-hui, et al. Updating of prefabricated simply supported beam FE model based on static measurement[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, **23**(10): 79-82. (in Chinese))
- [12] Zervoudakis K, Tsafarakis S. A mayfly optimization algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, **145**: 106559.
- [13] Zhang C D, Xu Y L. Comparative studies on damage identification with Tikhonov regularization and sparse regularization [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, **23**(3): 560-579.
- [14] 张德文.结构动力分析中的逐级近似缩聚法[J].固体力学学报,1994,**15**(4):360-364. (ZHANG De-wen.

- Succession-level approximate reduction technique (SART) in structural dynamic analysis [J]. *Anica Solida Sinica*, 1994, **15**(4):360-364. (in Chinese))
- [15] Abd Elaziz M, Senthilraja S, Zayed M E, et al. A new random vector functional link integrated with mayfly optimization algorithm for performance prediction of solar photovoltaic thermal collector combined with electrolytic hydrogen production system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **193**:117055.
- [16] Liu Z K, Jiang P, Wang J Z, et al. Ensemble forecasting system for short-term wind speed forecasting based on optimal sub-model selection and multi-objective version of mayfly optimization algorithm [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, **177**:114974.
- [17] Ren W X, Fang S G, Deng M Y. Response surface-based finite-element-model updating using structural static responses [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, **137**(4):248-257.
- [18] 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 Zhen, ZHU Jun-hua, YU Ling. An improved PSO algorithm for structure damage identification [J]. *Journal of Vibration And Shock*, 2012, **31**(5):17-20. (in Chinese))
- [19] 蒋伟, 刘纲. 基于多链差分进化的贝叶斯有限元模型修正方法 [J]. 工程力学, 2019, **36**(6):101-108. (JIANG Wei, LIU Gang. Bayesian finite element model updating method based on multi-chain differential evolution [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, **36**(6):101-108. (in Chinese))

Structural damage identification using mayfly intelligent algorithm and static response surface model

SONG Yan-peng¹, CHEN Hui^{1,2}, HUANG Bin^{*2,3}, WU Zhi-feng⁴

(1. College of Post and Telecommunication, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Hainan Institute of Wuhan University of Technology, Sanya 572025, China;

4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper presents a structural damage identification method combining the Mayfly Intelligent Search Algorithm and Static Response Surface Model (SRSF). First, a regularized optimization objective function is constructed based on the sensitivity-based static residual damage equation and displacement residual index, and then the Mayfly Intelligent Search Algorithm in the field of artificial intelligence is used to identify the damage at the structural element level. In the optimization process, in order to solve the problem of inconsistency between static load points and displacement measurement points, the static condensation and displacement extension methods are used to reconstruct the damage identification equation. At the same time, the displacement residual in the objective function is calculated by using the static displacement SRSF, which avoids the time-consuming finite element calculation and improves the optimization efficiency. The numerical example of a simply-supported simple beam shows that the proposed method is superior to the traditional Particle Swarm (PSO) or Differential Evolution (DE) algorithms in terms of optimization speed and accuracy; compared with the method based on the static residual damage equation or displacement residual index alone, the damage identification is more accurate. The static-load experiment of an aluminum alloy cantilever beam with damage further verifies the efficiency and effectiveness of the method in this paper.

Key words: mayfly algorithm; static damage identification; Response Surface Model; static damage equation; static residual