

基于动力扩展有限元和人工蜂群算法检测 钢筋混凝土结构内部缺陷

杜成斌^{1*}, 王 翔¹, 储冬冬², 江守燕¹, 王珍兰²

(1. 河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要: 结合动力扩展有限元和人工蜂群算法, 提出了一种新的缺陷识别模型用以检测钢筋混凝土结构内部缺陷。用扩展有限元结合水平集法描述结构内部缺陷以避免迭代计算中的网格重划分, 采用钢筋混凝土组合单元模拟结构中钢筋的作用, 采用广义反向策略、多维邻域搜索策略和动态全局引导策略以加快人工蜂群算法的反演效率。数值算例表明所建立的反演模型能够准确的识别结构内部缺陷的位置和大小。

关键词: 动力扩展有限元; 人工蜂群算法; 反分析; 无损检测

中图分类号: TV332 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2018) 05-0022-05

Internal defects detection of reinforced concrete structure based on dynamic expansion finite element and artificial bee colony algorithm

DU Chengbin^{1*}, WANG Xiang¹, CHU Dongdong², JIANG Shouyan¹, WANG Zhenlan²

(1. Department of engineering mechanics, Hohai University, Nanjing 210098;

2. Jiangsu Water Conservancy Science Research Institute, Nanjing 210017, Jiangsu)

Abstract: A new defect recognition model was proposed to detect the internal defects of reinforced concrete structures by combining the dynamic expansion finite element method and the artificial bee colony algorithm. Using extended finite element method combined with horizontal set method to describe the internal defects of the structure, which could avoid the iterative calculation in grid partition. Reinforced concrete composite unit was used to simulate the effect of reinforcement in structure, and generalized reverse strategy, multi-dimensional neighborhood search strategy and dynamic global guidance strategy was used to accelerate the inversion efficiency of artificial swarm algorithm. The numerical example showed that the proposed inversion model could accurately identify the position and size of the internal defects in the structure.

Key words: dynamic expansion finite element; artificial bee colony algorithm; back analysis ; nondestructive testing

0 引言

在过去几十年中已经发展了许多钢筋混凝土

无损检测技术, 例如超声波技术、红外热成像技术、探地雷达技术、压电阻抗技术、声发射技术、CT技术等。常规的钢筋混凝土结构无损检测方法虽

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51579084, 11372098)、江苏省水利科技项目 (2016017, 2015030)

作者简介: 杜成斌 (1965-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构中力学问题研究。

然很多,但大多用于小型结构,且上述的无损检测方法基本上都需要预先知道结构损伤的大体位置,测区有限,经常会漏掉存在缺陷的区域,留下工程隐患。因此,常规的无损检测技术在处理水工结构等大体积钢筋混凝土结构损伤检测方面往往力不从心,开发研究新型的无损检测技术对提高钢筋混凝土结构使用寿命和耐久性具有重要意义。

计算机与数值计算技术的发展为无损检测提供了一条新的路径,基于先进的数值分析方法建立有效的反演分析模型,识别出结构内部缺陷的位置、尺寸等参数是一种行之有效的途径。Rabinovich 等^[1]基于扩展有限元(Extended Finite Element Method, XFEM)和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)提出了一种裂纹反演识别的数值方法。Nanthakuma 等^[2]基于多级坐标搜索法和 XFEM 检测压电陶瓷板的缺陷。江守燕等^[3]基于 XFEM 与人工蜂群算法,建立了结构内部缺陷(夹杂)的反演分析模型。王珍兰等^[4]基于结构自振频率和人工蜂群算法反演结构内部的圆形孔洞缺陷。目前的结构损伤反演算法大多基于静力有限元且大多针对单一均质材料,反演目标函数的参数为结构的应变,这类算法虽然在理论上取得了较好的效果,但是对于工程中的大体积复杂钢筋混凝土结构,尤其是水工建筑物,则很难通过加载装置施加荷载使结构产生大的变形,实际上可行性不大。

结构的动力响应与结构内在的物理性质(如质量、刚度、阻尼等)紧密相关,当结构产生损伤时,这些内在的物理参数将不同程度上发生变化,也必将引起结构动力响应的改变。基于结构的动力响应,对结构内部的缺陷进行识别,相比局部检测方法更加合理,且操作简单,不影响结构正常使用,具有较强的可行性。

本文基于改进的人工蜂群算法和动力扩展有限单元法,采用钢筋混凝土组合单元模拟结构中钢筋的作用,提出了一种新的适用于钢筋混凝土结构的缺陷识别模型。数值算例表明这种缺陷识别模型可以有效识别出钢筋混凝土结构内部的缺陷。

1 检测结构内部缺陷的反分析法

在弹性力学正分析问题中,一般是已知结构

的平衡方程、几何方程、物理方程(本构关系)以及边界条件等,求解结构的响应量(位移、速度、加速度等)。而在反分析中,往往是已知结构某些关键点的响应量(如:位移、加速度、速度等)通过反演算法求解结构一些未知的物理特性。反分析法目前已被用于材料参数的反演^[4]。结构关键点的响应量通常是通过安装在结构上的一系列传感器得到。本文的反演算法首先使用一系列的参数来描述结构内部的缺陷,使用一个合理的目标函数描述正分析所求得的预设关键点的响应量和实际测得的关键点的响应量之间的差距,通过不断进行正分析迭代更新这些参数,逐步缩小目标函数值,直到算法收敛,即所求得的预设关键点的响应量和实际测得的响应量差别最小。

本文针对的钢筋混凝土内部缺陷反演问题,其反分析问题可描述为通过反演算法得到一组最佳的参数:

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n) \quad (1)$$

使得目标函数式(2)最小化。

$$\rho(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{NS} \|a_{ij}^c(\theta) - a_{ij}^m\|}{\sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{NS} \|a_{ij}^m\|} \quad (2)$$

式中, n 为模型中待反演的参数总个数; $a_{ij}^c(\theta)$ 、 a_{ij}^m 分别为传感器布置点的数值结果和真实值(本文中为测点的加速度); NS 为模型中传感器的总数; NT 为动力扩展有限元中所取的时程点个数。

反分析法检测结构内部缺陷的核心是建立合理的结构模型和使用适当的反演算法。本文使用动力扩展有限元结合水平集法描述结构内部的缺陷,从而避免迭代分析中的网格重划分,采用人工蜂群算法反演结构内部缺陷,并采用广义反向策略、多维邻域搜索策略和动态全局引导策略加快人工蜂群算法的反演效率。

2 水平集法描述结构内部缺陷

扩展有限元法通过引入非连续位移模式,使得不连续位移场的描述独立于网格划分,可以在不重新划分网格的前提下,通过改变水平集函数反映缺陷的位置及大小,极大的提高了反演计算效率。

例如对于圆形缺陷,水平集函数为

$$\varphi(x) = \|x - x_c\| - r_c \quad (3)$$

式中, x_c 、 r_c 分别为圆形缺陷的圆心坐标向量和圆形缺陷的半径。

3 钢筋混凝土组合单元

建立能够反映钢筋的实际力学性能的模型对钢筋混凝土结构内部缺陷反演计算结果和计算效率有至关重要的影响。目前, 钢筋混凝土的有限元模型有整体式、分离式和组合式 3 种^[6]。

整体式模型将钢筋均匀弥散于整个单元中, 通过配筋率来计算钢筋对混凝土的增强效果, 只能大致求解结构的宏观应力应变状态。分离式模型将钢筋和混凝土作为不同的单元来处理, 钢筋使用杆单元模拟, 这种模型概念简单, 易于实现; 但钢筋单元必须位于混凝土单元边界上, 单元划分受到很大限制。组合式模型将钢筋植入混凝土单元的内部, 两种单元的组合基于位移协调条件: 钢筋单元的节点位移服从混凝土单元的位移场。组合式模型中钢筋可以从单元的任意位置穿过, 钢筋的位置不影响整体网格的划分。钢筋混凝土组合单元的理论推导见文献^[7]。

计算上述钢筋混凝土组合单元的刚度和质量矩阵时, 首先要确定各混凝土单元内钢筋段与单元边交界处的坐标, 在模型很大的情况下, 这项工作是无法人工完成的。本文基于 Fortran 语言编制了相应程序, 在已经形成的混凝土单元背景网格的基础上, 给定直线钢筋段的起点与终点坐标, 即可求得埋置在混凝土单元内各钢筋段的坐标信息。

4 基于动力扩展有限元和人工蜂群算法的缺陷识别模型

4.1 人工蜂群算法

受自然界蜂群采蜜行为的启发, 土耳其学者 Karaboga 提出了人工蜂群算法 (Artificial Bee Colony, ABC)。蜂群在采蜜时由采蜜蜂、观察蜂和侦察蜂 3 种不同类型的蜜蜂互相合作, 分为 3 个阶段进行采蜜。采蜜蜂阶段: 采蜜蜂离开蜂巢, 随机分布在蜂巢周围初步确定蜜源位置, 同时在该蜜源的附近进行邻域搜索以寻找更好的蜜源。采蜜蜂在完成初步搜索后回到蜂巢, 通过摇摆舞, 将当前蜜源的信息分享给在蜂巢中等待的观察蜂。观察蜂阶段: 获取蜜源信息后, 观察蜂按照轮盘赌

策略, 在花蜜量较高的蜜源附近展开搜索以寻找更好的蜜源。侦察蜂阶段: 如果某个蜜源附近进行多次邻域搜索后仍无法找到更优的蜜源, 则放弃该蜜源, 对应的采蜜蜂或观察蜂转变为侦察蜂随机飞到一个新的蜜源位置并继续搜索。在 ABC 算法中, 蜂群的整个搜索范围代表问题的完整解空间, 蜜蜂所开采的蜜源对应问题的某个解, 蜜源的花蜜量则代表相应解的适应度函数值。ABC 算法的具体求解流程见文献^[3]。

ABC 算法仅以适应度函数作为反演的依据, 在搜索过程中不利用外部信息。与传统优化算法相比, ABC 算法操作简单、控制参数少、搜索精度较高并且鲁棒性较强。已有研究表明与遗传算法 (GA)、差分进化算法 (Differential Evolution Algorithm, DE) 和粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 相比较, ABC 算法的求解质量相对较高^[8]。然而标准人工蜂群算法尚存在初始解生成的不确定性, 局部搜索能力弱, 后期搜索速度较慢等不足, 本文引入广义反向策略、多维邻域搜索策略和动态全局引导策略等方法用以弥补上述不足。

人工蜂群算法的搜索效率直接取决于初始解的优劣, 通用的初始化方法是在整个搜索空间中随机生成一组初始解, 这显然具有很大的不确定性。如果得到一组随机的初始解后, 再通过一定的策略得到整个搜索空间中与其对应的解集, 在这中间选取较好的解作为初始解, 那么理论上这种与初始解对应的解集有一半的解要优于当前初始解。此外将求解对应解的策略应用于搜索过程中的种群更新机制中, 可以有效地提高算法的搜索效率^[9]。本文引入广义反向策略用于人工蜂群算法初始解的生成与搜索过程中的种群更新, 下面给出广义反向策略:

对每一个解 X , 根据式 (4) 求解其广义反向解 X^* ; 分别计算其适应度函数, 根据贪婪准则, 在广义反向解 X^* 与原解 X 之间选择适应度函数值更好的解保留在种群中; 每完成一次迭代后, 对当前的边界值进行动态更新。

$$x^* = k(a+b) - x \quad (4)$$

式中, $x \in [a, b]$, a 、 b 分别为参数 x 的上下界; k 为 0 到 1 的实数。不同于基本反向策略的是, 基本反向策略的搜索中心为 $(a+b)/2$, 而广义反向策略的搜索中心位置为 $(2k-1)(a+b)/2$, 这种策略

有利于保持解的多样性。

标准人工蜂群算法的每次邻域搜索均为一维邻域搜索,效率不高,本文将一维的邻域搜索策略改进为多维邻域搜索,引入多维搜索控制参数 δ ,对每一维变量 x_i , $i=1, 2, 3\cdots, n$, 若该变量随机产生的搜索概率小于 δ , 则对该维变量进行邻域搜索。

本文引入动态全局引导策略以改善标准人工蜂群算法存在的局部搜索能力较弱, 后期搜索速度较慢等缺陷, 即将邻域搜索公式改进为下式:

$$v_i^j = w * x_i^j + \lambda_i^j (x_i^j - x_k^j) + (1-w)(y^j - x_i^j) \quad (5)$$

$$w = \begin{cases} 0.99 - 0.49 * iter / maxcycle & iter \leq limititer \\ 0.5 & limititer < iter \leq maxiter \end{cases}$$

式中, V_i 为在当前解 X_i 的邻域中产生新的候选解, $i, k=1, 2, \cdots, NP$; X_k 为在种群中随机选取的不同于 X_i 的蜜源; $j=1, 2, \cdots, n$ 为在 n 维变量中随机选择的下标数值; Y 为本次优化中的全局最优解; λ_i^j 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数, 使用自适应系数 w 动态控制邻域搜索, 使新生成的邻域解不断趋向于全局最优解。 w 在算法最初迭代时为 0.99, 在迭代达到一定次数 ($limititer$) 后, w 逐渐减小至 0.5, 这样可以既保持种群的多样性, 又可以提高算法的搜索效率。

4.2 基于动力扩展有限元和人工蜂群算法的缺陷识别模型

基于人工蜂群算法与动力扩展有限元建立反演模型以识别结构内部缺陷。首先在可行解空间内生成一组随机可能解作为初始种群, 通过蜂群的智能搜索行为不断改进可能解, 最终寻找最优解。在最优解的搜索过程中, 利用动力扩展有限元计算测点的加速度响应求得适应度函数值来评价解的质量。本文基于 Fortran 语言编制了相应的程序用于识别结构内部存在的缺陷 (孔洞、裂纹)。反演分析过程 (程序框图) 如图 1 所示。

5 数值算例

5.1 算例 1: 圆形孔洞的反演

图 2 为一含圆形孔洞的钢筋混凝土板, 模型简化自某河口闸站的导流墙。板下端固定约束, 左侧受到一冲击荷载 P 激励。板的长度为 5 m, 宽度为 4 m。数值计算时, 假定板处于平面应力状态, 板被离散成 25×20 的均匀网格, 网格剖分情况

见图 3。板内钢筋的分布情况见图 4。基体的弹性模量 $E=30$ GPa, 泊松比 $\nu=0.167$, 钢筋的弹性模量 $E=30$ GPa, 横向钢筋的直径为 16 mm, 竖向钢筋的直径为 18 mm。在板的上部、左右边缘处分别布置 4 个传感器。通过动力 XFEM 数值解获取结构的加速度响应。圆形孔洞缺陷位置和传感器布置情况见图 2, 图 2 中绿色的小框即为传感器。

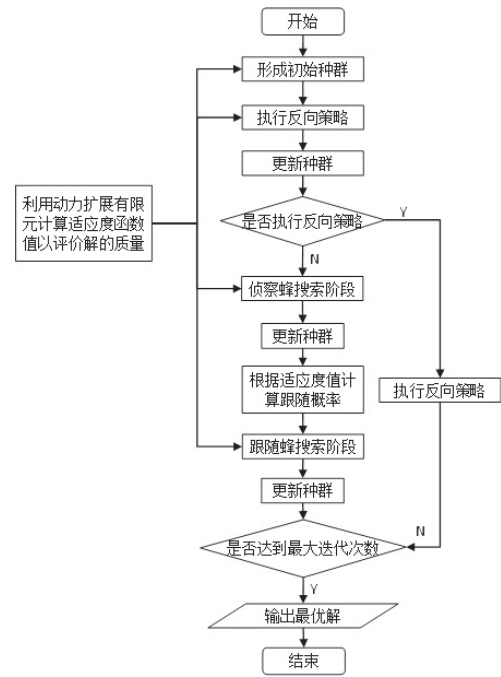


图 1 结构内部的缺陷识别模型流程图

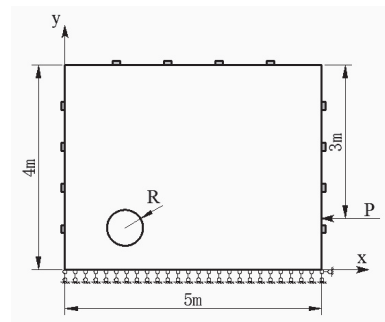


图 2 板上圆形孔洞几何尺寸和位置

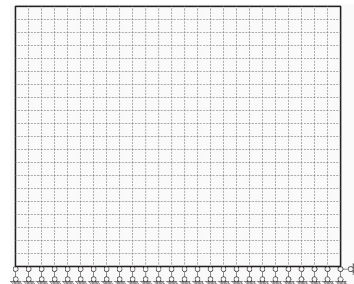


图 3 钢筋混凝土板的网格划分

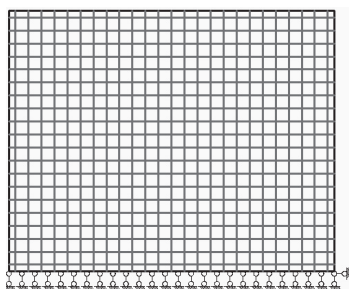


图4 钢筋混凝土板配筋图

本算例中, 圆形孔洞有3个待反演参数分别为圆心坐标 (x_c, y_c) 、圆的半径 r_c , 待反演参数的限值为 $x_c \in [0, 5]$, $y_c \in [0, 4]$, $r_c \in [0, 1]$ 。反演分析时, 蜂群的数量 $NFood=15$, 邻域搜索上限 $Limit=50$, 反演最大迭代次数取 $Maxiter=50$ 。

单个圆形孔洞的反演过程见图5。图中红色缺陷为真实缺陷位置, 黑色缺陷为反演结果。

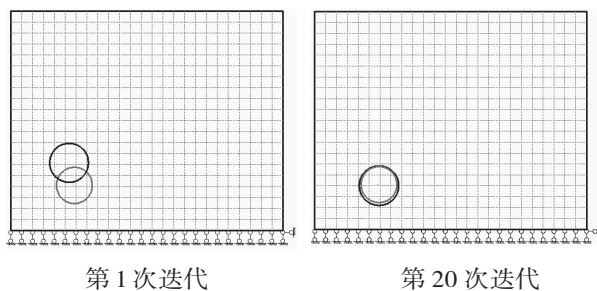


图5 圆形孔洞的反演过程

5.2 算例2: 斜裂缝的反演

图6为含一斜裂缝的钢筋混凝土板, 板的几何尺寸、材料属性、边界条件、荷载激励、网格划分、钢筋分布、传感器布置等和算例1相同。

本算例中, 斜裂缝有4个待反演参数分别为裂缝中心坐标 (x_c, y_c) 、裂缝的长度 r_c 、裂缝的角度 θ , 待反演参数的限值为 $x_c \in [0, 50]$, $y_c \in [0, 40]$, $r_c \in [0, 40]$, $\theta \in [0, \pi]$, 反演分析时, 蜂群的数量 $NFood=15$, 邻域搜索上限 $Limit=50$, 反演

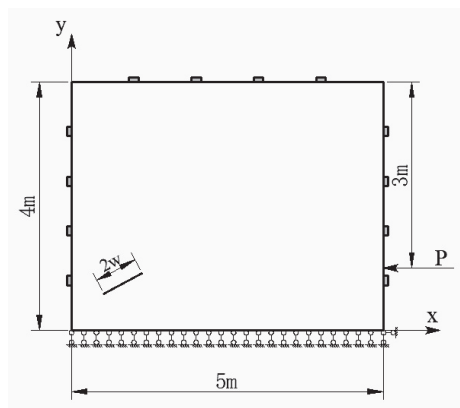


图6 钢筋混凝土板裂缝几何尺寸和位置
最大迭代次数取 $Maxiter=200$ 。

斜裂缝的反演过程见图7。图中红色缺陷为真实缺陷位置, 黑色缺陷为反演结果。

6 结论

结合动力扩展有限单元法和人工蜂群算法, 建立了一种新的缺陷识别模型用以反演钢筋混凝土结构内部缺陷。用水平集法描述结构内部缺陷; 采用钢筋混凝土组合单元模拟结构中钢筋的作用; 采用广义反向策略、多维邻域搜索策略和动态全局引导策略改进人工蜂群算法以加快反演效率。文中采用结构的加速度时程作为真实响应, 能够考虑结构惯性力的影响, 比静力响应只考虑刚度的变化更全面, 且在实际工程中更易实现。数值算

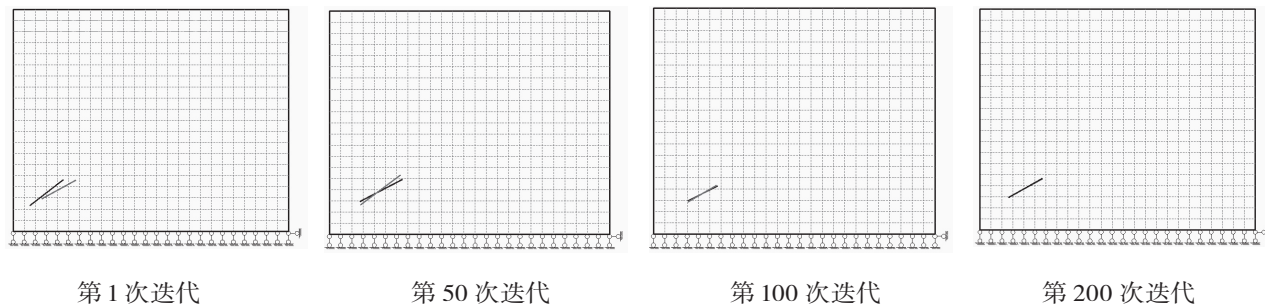


图7 单个斜裂缝的反演过程

(下转第30页)

例结果表明:所建立的新的缺陷识别模型能够准确地识别出钢筋混凝土结构内部缺陷的位置和大小。

- [1] Rabinovich D, Givoli D, Vighergauz S. Crack identification by 'arrival time' using XFEM and a genetic algorithm[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 77 (3):337-359.
- [2] Nanthakumar S S, Lahmer T, Rabczuk T. Detection of multiple flaws in piezoelectric structures using XFEM and level sets[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2016 (No.12):960.
- [3] 江守燕, 杜成斌. 基于扩展有限元的结构内部缺陷(夹杂)的反演分析模型[J]. 力学学报, 2015 (06):1037-1045.

- [4] 王珍兰, 江守燕, 杜成斌, 等. 基于频域内动力 XFEM 和人工蜂群算法反演结构内部缺陷[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017(03):15-19.
- [5] 曾辉, 廖露梅, 曾予剑. 遗传算法——支持向量机在面板堆石坝堆石料的参数反演分析的应用[J]. 江苏水利, 2017(08):34-37.
- [6] 王家林, 陈山林. 钢筋混凝土平面问题的含梁组合单元模型[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005(02):72-75.
- [7] 陈国荣. 有限单元法原理及应用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2016, 429.
- [8] Karaboga D, Akay B. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm[J]. Applied Mathematics & Computation, 2009, 214(1):108-132.
- [9] Gao W, Liu S. A modified artificial bee colony algorithm[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(3):687-697.