

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231025001

# 基于IPOA的巨型组合框架结构震损快速预测模型研究\*

黄志<sup>1,2</sup>, 周芙蓉<sup>1</sup>, 陈娟<sup>3</sup>, 蒋丽忠<sup>4</sup>, 周旺保<sup>4</sup>, 戚菁菁<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心, 湖南湘潭 411201;

3. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南湘潭 411201; 4. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:**为实现巨型组合框架结构的地震损伤程度快速评估,提出了一种基于改进鹈鹕优化算法(IPOA)的多参数震损预测方法。设计了5个不同参数的巨型组合框架结构模型,利用振动台试验和有限元软件进行非线性时程分析获取结构动态响应数据,并采用结构损伤指数量化评估结构的损伤程度。同时,引入K均值聚类优化策略和惯性权重自适应优化策略改进传统的鹈鹕优化算法。基于振动台试验和有限元分析结果数据,比较了不同输入参数组合预测结构损伤的准确性,构建了能反映结构参数与结构损伤之间非线性关系的智能算法快速预测模型。最后,将模型预测结果与一缩尺比为1/15的振动台试验模型结构损伤程度进行对比验证。结果表明:(1)改进鹈鹕优化算法模型的准确性和泛化能力均优于其他算法模型;(2)最大层间位移角与结构损伤相关性最高,增加影响结构损伤的输入参数可提高预测模型的准确度和泛化能力;(3)模型预测的结构损伤指数与试验结果相比误差均小于10%,预测结构损伤等级与试验结果一致,所提出的快速预测模型能高效准确地预测结构的损伤指标,为巨型组合框架结构震后损伤快速评估提供了一种新方法。

**关键词:**机器学习; 巨型结构; 快速评估; 鹈鹕优化算法; 结构损伤

**中图分类号:** TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0263-10

## Rapid Prediction Model for Seismic Damage in Mega Composite Frame Structures Based on IPOA Methods

HUANG Zhi<sup>1,2</sup>, ZHOU Furong<sup>1</sup>, CHEN Juan<sup>3</sup>, JIANG Lizhong<sup>4</sup>, ZHOU Wangbao<sup>4</sup>, QI Jingjing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricate Passive House, Xiangtan 411201, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

4. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** To rapidly assess the extent of seismic damage in mega composite frame structures, this study introduced a multi-parameter seismic damage prediction method utilizing Improved Pelican Optimization Algorithm (IPOA). Five models with different parameters were developed, and dynamic response data for the structures were obtained through shaking table tests and nonlinear time-history

\* 收稿日期:2023-10-25;修回日期:2024-01-01

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52204210, 51808213)、湖南省自然科学基金项目(2023JJ30242)、湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(21B0452, 20B214)、湖南省教育厅科学研究重点项目(20A184)资助

**作者简介:**黄志(1984—),男,副教授,博士。主要从事组合结构抗震性能研究。E-mail:huangzhi@hnust.edu.cn

analyses using finite element (FE) software. Structural damage indices were quantified to assess the extent of damage. Additionally, the traditional Pelican Optimization Algorithm (POA) was enhanced by incorporating K-means clustering optimization and inertia weight adaptive optimization strategy. Based on the data from shaking table tests and FE analyses, the accuracy of structural damage predictions using different input parameter combinations was compared. A rapid prediction model using an intelligent algorithm was constructed to reflect the nonlinear relationship between structural parameters and its damage. Finally, the model's predictions were compared and verified against the seismic damage extent from shaking table tests on a 1/15 scale model. The results indicated that: (1) The IPOA model exhibited superior accuracy and generalization capability compared to other algorithm models; (2) The maximum inter-story drift angle showed the highest correlation with structural damage. The introduction of additional input parameters that affected structural damage could enhance the model's prediction accuracy and its generalization capability; (3) The predicted structural damage indices exhibited an error of less than 10% compared to the experimental results, and the predicted levels of structural damage aligned with the experimental results. The proposed rapid prediction model can effectively and accurately predict structural damage indicators.

**Keywords:** machine learning; mega structure; rapid assessment; POA; structural damage

## 0 引言

巨型组合结构是一种始于20世纪60年代的新型结构,由大型构件组成的主框架与普通构件组成的次框架共同工作,具有整体性能优越、抗侧刚度大、能够适应建筑灵活设计等优点,巨型结构的出现,满足了现代高层建筑高度增加、特殊功能和形状设计的要求,解决了高层建筑的抗风抗震等难题。随着社会的发展,巨型结构在实际工程中被广泛的应用,我国比较著名的巨型组合建筑有上海中心大厦、香港汇丰银行、广州电视塔等。地震损伤一直是巨型组合结构的研究重点之一,近年来,国内外许多学者都对巨型结构的地震性能进行了研究<sup>[1-3]</sup>。赖正聪等<sup>[4]</sup>设计并制作了一缩尺比为1/25的某高烈度区大高宽比剪力墙结构模型,结合有限元软件计算,研究其隔震装置的减震性能;杨远威等<sup>[5]</sup>为研究超高层混凝土框架-核心筒结构的地震响应和性能,设计并制作了1/50的缩尺模型进行振动台试验,为该类建筑的抗震设计提供试验基础;张鸿森等<sup>[6]</sup>制作了一缩尺比为1/25的多层钢管混凝土柱-铰接钢梁-混凝土核心筒结构缩尺模型,研究分析该新型结构的震损特点和地震响应;薛红京等<sup>[7]</sup>对北京某超高层建筑进行了缩尺比为1/40的振动台试验,并结合有限元模型进行罕遇地震下弹

塑性时程分析,验证结构的抗震性能。学者们在进行巨型结构地震损伤研究时一般通过有限元软件进行分析或者依托振动台试验,并采用有限元数值分析软件建立模型进行分析,对建立的模型精度要求较高,且需要耗费大量的时间。而振动台试验作为结构地震响应和性能研究的一种常见方法,存在成本高昂,试验规模受场地限制,耗时间长等缺点。因此,需要找到一种更加简便的地震损伤预测方法。

智能算法具备处理大量数据、适应新条件、解决复杂问题、实时决策和提供实时反馈等优点,近年来,随着智能算法的兴起,越来越多的学者将其运用至土木领域<sup>[8-10]</sup>,高经纬等<sup>[11]</sup>针对高层建筑分散振动问题,提出了一种基于GA-LSTM的智能控制优化方法,为该类结构分散振动控制提供了新思路;张令心等<sup>[12]</sup>基于LM-BP神经网络提出了适用于预测钢筋混凝土框架结构震害的神经网络模型,能够准确高效地预测框架结构震害情况;马高等<sup>[13]</sup>对比多种机器学习算法采用SMOTE算法前后的预测效果,找到性能最优的预测模型,并基于SHAP算法对预测结果进行分析,结果表明基于机器学习模型预测钢管混凝土剪力墙弯剪破坏模式具有一定的可靠性;胡少伟等<sup>[14]</sup>基于PSO-BP算法提出了一种改进边坡稳定性预测模型,能够满足工程精度需要,为实际工程中评估分析边坡稳定性提供参

考;G. B. Zhang等<sup>[15-16]</sup>基于多目标甲虫天线搜索算法(MABOS-SVR)对CFRP筋加固水泥土进行优化设计并进行了敏感度分析,成功获得pareto前沿解,提供了可行的试验方案。但用于巨型组合结构震损预测的机器学习模型还有待研究。

为实现快速预测巨型组合框架结构震损情况,本文拟基于振动台试验和大量有限元计算数据,引入聚类优化策略和权重自适应优化策略改进鹈鹕优化算法<sup>[17]</sup>,建立能够反映巨型层层数、结构最大层间位移角、顶层加速度放大系数等参数与巨型组合框架结构地震损伤之间的非线性映射关系的改进鹈鹕优化算法的预测模型。并使用该预测模型对一缩尺比为1/15的振动台试验模型损伤情况进行预测,验证该方法的准确性和适用性。

## 1 优化算法

### 1.1 鹈鹕优化算法

鹈鹕优化算法具有良好的全局搜索能力、适应性和并行性,易于理解和实现,具有广泛的应用场景,在工程优化、模式识别、数据挖掘等领域都表现出相对良好的性能,对于非线性数据的震损预测问题可能存在多个局部最优解,而传统的梯度下降方法可能陷入局部最优。鹈鹕算法通过全局搜索和多样性的搜索策略,有助于避免陷入局部最优,提高对非线性数据的适应性。考虑具体问题的特点、数据规模及计算资源等因素,选择鹈鹕优化算法。

#### 1.1.1 逼近猎物(勘测阶段)

在第一阶段,鹈鹕确定猎物的位置并向该区域移动,这个过程即POA算法全面扫描搜索空间,在不同区域发挥不同的勘探能力。且搜索空间中猎物的位置是随机生成的,使POA算法在处理精确搜索问题上有更强的勘探能力。这一过程有助于POA算法更全面地勘探搜索空间,为后续优化过程提供了基础,其数学表达式为:

$$X_{i,j}^{P_1} = \begin{cases} X_{i,j} + rand(P_j - I \cdot X_{i,j}), & F_p < F_i \\ X_{i,j} + rand(X_{i,j} - P_j), & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $X_{i,j}^{P_1}$ 为基于第1阶段更新后第*i*个鹈鹕的第*j*维的位置; $rand$ 为0到1的随机数; $I$ 为1或2的随机整数; $P_j$ 为猎物的第*j*维的位置; $F_p$ 为猎物的目标函数值。

如果鹈鹕的新位置能够改善目标函数值,则接

受这一新位置,这类更新被称作“有效更新”,可以确保算法不会朝着非最佳区域移动。这个过程可以描述为:

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P_1}, & F_i^{P_1} < F_i \\ X_i, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X_i$ 为第*i*个鹈鹕的新位置; $F_i^{P_1}$ 为基于第1阶段更新后的第*i*个鹈鹕的新位置的目标函数值。

#### 1.1.2 水面飞行(开发阶段)

在第二阶段,当鹈鹕到达水面后在水面上展开翅膀,将鱼向上移动,把更多的猎物囤积在喉咙袋中。这一阶段使算法更好地收敛到狩猎区域内的最佳位置,同时提升算法的局部搜索和开发能力。且算法需要检查当前鹈鹕位置附近的潜在位置,以便算法可以收敛到最佳位置。这一过程用数学公式表示如下:

$$X_{i,j}^{P_2} = X_{i,j} + R \cdot (1 - \frac{t}{T}) \cdot (2 \cdot rand - 1) \cdot X_{i,j} \quad (3)$$

式中, $X_{i,j}^{P_2}$ 为第2阶段更新后第*i*个鹈鹕的第*j*维的位置; $R$ 为0或2的随机整数; $t$ 为当前迭代次数; $T$ 为最大迭代次数。

### 1.2 改进鹈鹕优化算法

鹈鹕优化算法适用性广,相比于遗传算法、差分进化算法、粒子群算法等有较强的搜索能力,但POA算法变异机制简单,存在收敛速度慢、可能陷入局部最优的问题。为平衡全局搜索和局部搜索能力,本文引入聚类竞争策略和惯性权重自适应策略得到改进后的IPOA算法。

#### 1.2.1 K均值聚类优化策略

K均值聚类(K-Means Clustering)是一种用于聚类数据的无监督学习算法,通过将数据划分为K个簇,帮助发现数据内在的聚类结构,可以使鹈鹕算法更好地理解 and 利用搜索空间中的局部结构,从而提高算法的局部搜索能力,并通过在聚类中心附近选择样本,增加搜索的多样性,避免算法陷入局部最优,有助于改进传统鹈鹕算法的收敛性和全局搜索性能。在处理非线性数据的问题时,问题的复杂性可能随着搜索过程的进行而变化。将其引进鹈鹕优化算法主要有以下几步:

(1)初始化鹈鹕种群,随机生成一群鹈鹕,每只鹈鹕代表一种解,即一组聚类中心。随机初始化K个聚类中心作为初始解。种群中任意个体到聚类中心的距离由欧式距离公式计算:

$$D = \sqrt{\sum_{q=1}^d (X_{m,q} - C_{j,q})^2} \quad (4)$$

式中,  $D$  为个体到聚类中心的距离;  $X_m$  为随机鹈鹕个体;  $C_j$  为该个体距离最近的聚类中心。

(2) 将鹈鹕个体分配到最近的聚类中心, 重新计算聚类中心的位置。

$$C'_j = \frac{1}{n} \sum_{X_j \in C_j} X_j \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

式中,  $C'_j$  为新的聚类中心;  $n$  为数据点数量;  $X$  为数据点。

(3) 从当前种群中随机选择  $k$  个样本, 这些样本将被组成一个集合。将计算得到的聚类中心与集合中的样本结合在一起, 形成一个新集合。

(4) 对新集合中的每个样本, 计算其适应度。将这些样本按照适应度从小到大进行排序, 并从排列好的样本中选择适应度较小的前  $k$  个样本, 将它们放回到种群中, 替代集合中的相应样本。且精英鹈鹕个体会被保留, 而不参与替换。通过引入新的样本并根据其性能对种群进行更新, 以促进多样性和帮助算法逃离局部最优解。

### 1.2.2 惯性权重自适应策略

引入惯性权重自适应优化策略有助于在不同搜索阶段动态调整搜索策略, 提高算法的适应性和鲁棒性, 更快地收敛到全局最优解, 加速算法的收敛速度。群智能搜索算法在解决优化问题时主要依赖于适应度值来判断是否最优解, 但随着算法迭代次数增加, 存在陷入局部最优的风险。因此通过根据适应度值的变化不断调整位置更新公式的权重参数, 以平衡局部开发与全局搜索之间的权衡关系, 避免陷入局部最优解, 同时提高全局最优解的求解速度。为增强算法全局探索和后期局部利用能力, 修改惯性权重自适应公式。这一公式在迭代过程中逐渐降低惯性权重, 从而使粒子在初始阶段更加倾向于广泛地探索搜索空间, 而在后续阶段更趋向于深入局部和全局信息以进行精细搜索。这一调整有助于平衡算法的广泛搜索和深入搜索能力, 更快地实现全局最优解的收敛。这一策略的引入使得算法能够更好地克服陷入局部最优解的问题, 提高了算法的搜索效率和质量。

$$w'_i = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \cdot t}{T} \quad (6)$$

式中,  $w_{\max}$  为预设权重最大值, 取 0.9;  $w_{\min}$  为预设权重最小值, 取 0.4;  $T$  为最大迭代次数。

$$X_{i,n} = X_i + x(i) \cdot (X_i - X_m) + w'_i \cdot x(i) \cdot (X_i - X_{i+1}) \quad (7)$$

式中,  $X_{i,n}$  为第  $i$  个鹈鹕的新位置;  $X_m$  为鹈鹕群体的平均位置;  $X_i$  为鹈鹕的当前位置;  $X_{i+1}$  为第  $i$  只鹈鹕下一阶段位置。

图 1 为引进聚类竞争策略和惯性权重自适应策略后的改进鹈鹕优化算法流程图。

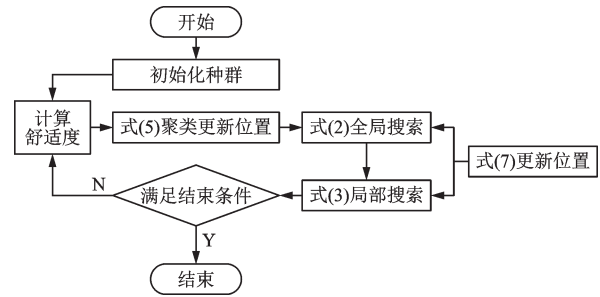


图 1 改进鹈鹕优化算法流程

Fig.1 Flowchart of IPOA

## 2 训练模型结果与分析

### 2.1 训练模型的建立

#### 2.1.1 输入参数与输出参数的选取

巨型组合框架结构震损评估模型的输入层主要为结构特征参数。通过合理选择这些参数, 可以有效提升震损评估模型的训练效果。为了尽可能全面地包含结构信息, 选取地震峰值加速度、结构巨型层层数、结构最大层间位移角和顶层加速度放大系数为输入参数。结构巨型层层数等参数与结构抗震性能直接相关且易于获得, 结构最大层间位移角、顶层加速度放大系数可根据观测数据得到, 且与结构的损伤程度相关性高。

模型的输出参数选取结构损伤指数, 为评估结构在地震作用下的损伤程度, 国内外许多学者提出了基于位移、损伤、能量平衡等多种损伤评估方法。采用施卫星等<sup>[18]</sup>提出的基于频率测量的高层建筑地震作用损伤模型量化结构损伤程度, 结构损伤指数由公式(8)得来, 并将结构破坏等级按照损伤指数分为四个等级, 见表 1。

$$D = 1 - \left( \frac{2}{m+1} \sum_{l=1}^m \gamma_l \frac{f_l^2}{f_0^2} \right)^{\alpha} \quad (8)$$

式中,  $m$  为结构振型数量;  $\gamma_l$  为结构振型参与系数;  $l$  为振型阶数;  $\gamma_l = [m - (l - 1)] / m$ ;  $\alpha$  为结构形式系

表1 结构破坏等级

Table 1 Levels of structural damage

破坏等级	破坏现象	结构损伤指数
1	结构基本处于弹性阶段,无损伤或有细小裂缝	$0.00 < D < 0.15$
2	结构有损伤但可修复	$0.15 < D < 0.30$
3	结构未倒塌但不可修复	$0.30 < D < 0.60$
4	结构严重破坏直至完全倒塌	$0.60 < D < 1.00$

数,取1.4; $\beta$ 为结构自振频率测试方式系数,取1.2; $f_{i0}$ 、 $f_i$ 分别为结构第*l*阶损伤前后的自振频率。

2.1.2 数据库的建立

为丰富神经网络数据库,使用有限元数值分析软件设计了5个巨型组合框架结构模型,结构几何参数见表2。其中,钢材本构模型选用双折线随动强化模型,该模型能较好地体现钢材在往复荷载或地震荷载作用下的拉压性能和结构响应。巨型组合框架结构涉及方钢管混凝土柱中的核心混凝土和钢筋混凝土楼板中的普通混凝土两种类型的混凝土结构体系。核心区混凝土受方钢管施加的约束作用,受压应力—应变关系选用内约束混凝土Mander模型。钢筋混凝土楼板中的普通混凝土采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[19]</sup>推荐的受压应力—应变关系模型。以M1模型为例,图2~4分别为模型M1的结构三维图、结构立面图

表2 结构设计参数

Table 2 Parameters for structural design

编号	巨型层数	构件	截面尺寸/m			
			<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t<sub>w</sub></i>	<i>t<sub>f</sub></i>
M1	3	巨型柱	1.800	1.800	0.040	—
		巨型主梁	2.000	1.000	0.060	0.060
		巨型次梁	1.800	1.000	0.060	0.060
M2	3	巨型柱	2.000	2.000	0.040	—
		巨型主梁	2.000	1.000	0.060	0.060
		巨型次梁	1.800	1.000	0.060	0.060
M3	3	巨型柱	1.800	1.800	0.040	—
		巨型主梁	1.800	1.000	0.060	0.060
		巨型次梁	1.800	1.000	0.060	0.060
M4	4	巨型柱	1.600	1.600	0.040	—
		巨型主梁	2.000	1.000	0.060	0.060
		巨型次梁	1.800	1.000	0.060	0.060
M5	5	巨型柱	1.800	1.800	0.040	—
		巨型主梁	2.000	1.000	0.060	0.060
		巨型次梁	1.800	1.000	0.060	0.060

注:*h*为梁高,*b*为梁宽,*t<sub>w</sub>*、*t<sub>f</sub>*分别为钢梁腹板、翼板厚度

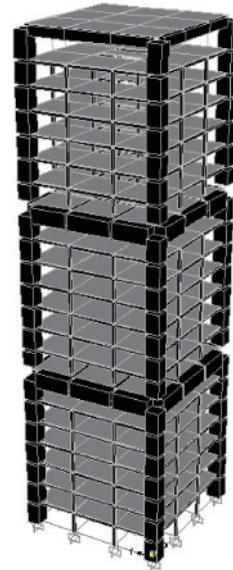


图2 结构三维示意

Fig.2 3D structural drawing

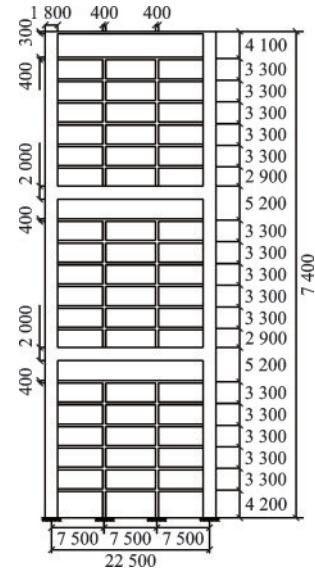


图3 结构立面

Fig.3 Elevation drawing

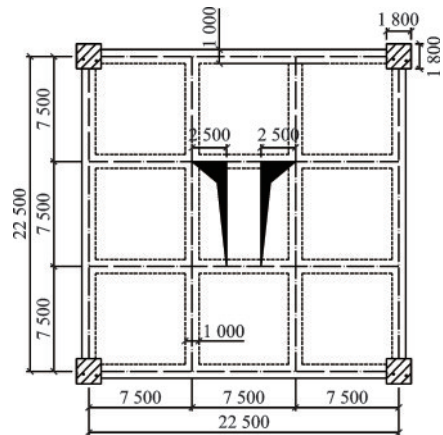


图4 巨型层平面

Fig.4 Mega floor plan

和巨型层平面图。从 PEER 地震动数据库选取 EL Centro、Taft、San-Fernando 等 23 条符合根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[20]</sup> 的地震波,同时,将地震波峰值加速度分别取 0.035g、0.07g、0.20g、0.24g、0.3g、0.40g、0.50g、0.60g,对 5 个结构模型进行非线性时程分析,得到包含结构最大层间位移、顶层加速度放大系数、结构损伤指数等信息的 920 组数据作为预测模型的数据库。

### 2.1.3 算法模型配置与训练

采用 MATLAB 软件搭建 IPOA 网络模型,将数据库的样本数据顺序打乱,随机选取 80% 数据作为训练集,20% 作为测试集。预测模型的输入层设置为 4 节点,分别为结构巨型层层数、层间最大位移角、顶层加速度放大系数和峰值加速度,输出层为单个神经元,对应输入数据的预测损伤指数。考虑不同隐藏层层数和隐藏神经元个数对预测模型的训练效率与精度的影响,设置 2 个隐藏层和 32 个隐藏神经元。模型训练设置迭代次数为 1 000,训练目标为 0.001,学习效率为 0.001。多次试算对比不同输入层和输出层激活函数模型的预测性能,发现选择 Logsig 作为隐藏层激活函数,Tansig 作为输出层激活函数时,模型的预测性能最佳。在进行模型训练之前,还需要对样本数据进行归一化处理,可以提升模型收敛速度,防止特征权重不平衡,提高训练模型的鲁棒性和泛化能力。

## 2.2 模型效果及对比

机器学习网络模型的准确性通常通过与验证数据或测试数据的对比来判断。模型在训练集上进行训练和优化,然后在测试集上进行评估。模型对测试集的预测结果与实际标签进行比较。常用的评估指标包括均方误差(Mean Squared Error)、平均绝对误差(Mean Absolute Error)、决定系数(Coefficient of Determination)等。这些指标可以量化模型的预测误差和拟合程度,进而评估模型的准确性。

MSE 对偏离较大的异常值分配更多的权重,用于评估模型的整体模拟效果。MAE 则对异常值不敏感,通常用于评估模型的平均预测误差。决定系数  $R^2$  用来衡量回归模型对因变量变异性的解释程度。计算公式分别为:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

式中, $N$  表示样本数量; $y_i$  表示第  $i$  个样本的实际观测值; $\hat{y}_i$  表示第  $i$  个样本的预测值;MSE 值越接近 0 表示模型的预测结果与真实值越接近。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (10)$$

式中, $N$  表示样本数量; $y_i$  表示第  $i$  个样本的真实值; $\hat{y}_i$  表示第  $i$  个样本的预测值;MAE 值越接近 0 表示模型的预测结果与真实值的绝对差异越小,即模型的预测能力越好。

$$R^2 = \frac{\left( N \sum_{i=1}^N \hat{y}_i y_i - \sum_{i=1}^N \hat{y}_i \sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{\left( N \sum_{i=1}^N \hat{y}_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N \hat{y}_i \right)^2 \right) \left( N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right)} \quad (11)$$

式中, $N$  表示样本数量; $y_i$  表示第  $i$  个样本的真实值; $\hat{y}_i$  表示第  $i$  个样本的预测值; $R^2$  值为 0 时,说明模型无法解释因变量的变异性,预测结果与真实值没有关联。 $R^2$  值越接近 1,说明模型对因变量的变异性解释程度越高,拟合效果越好。

基于有限元非线性时程分析数据,利用上述三个评估指标,对比本文提出的基于改进鹌鹑优化算法预测模型与基于鹌鹑优化算法、基于支持向量机(SVR)、基于随机森林算法(RF)的机器学习模型对巨型组合框架结构的地震损伤的预测性能。基于不同算法的机器学习预测模型的预测性能评估参数见表 3,四个模型都具有良好的预测性能,其中 IPOA 预测模型 MSE 值和 MAE 值都接近于 0,表明模型预测结果与真实值之间数据接近,差异较小。 $R^2$  值为 0.994,表明该模型对样本数据具有较高的拟合度。结合模型训练集残差图(图 5)可知,IPOA 模型的残差图呈现出更加均匀和随机的分布特征,残差的均值更接近零,这说明 IPOA 模型对于样本

表 3 模型预测性能

Table 3 Model prediction performance

模型	训练集			测试集		
	MSE	MAE	$R^2$	MSE	MAE	$R^2$
IPOA	0.003 3	0.012 3	0.994	0.005 0	0.012 4	0.991 5
POA	0.016 73	0.011 7	0.995	0.017 4	0.015 0	0.992 4
SVR	0.031 5	0.025 5	0.982	0.034 4	0.025 7	0.972 7
RF	0.015 4	0.010 2	0.996	0.023 9	0.015 5	0.989 1

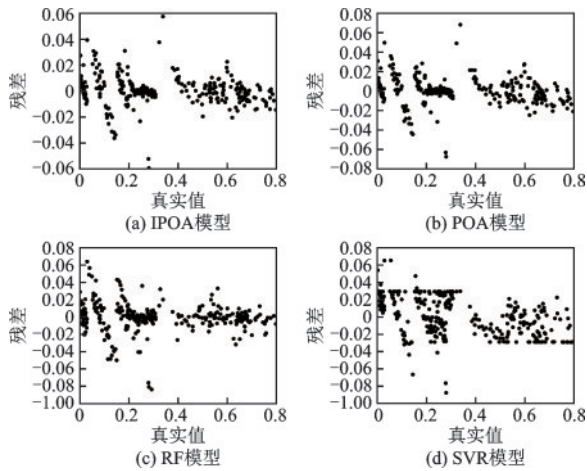


图5 训练集残差

Fig.5 Residual plot of the training set

数据的预测能力更好。相比之下,POA模型、SVR模型和RF模型的残差图呈现出更多的不规律性,残差值相对更大且分布更加离散。综合考虑多个评估指标,可知基于改进鹌鹑优化算法预测模型对于巨型组合框架结构的损伤预测具有更强的学习能力与适应能力,预测准确性较高,为该类结构震损预测研究提供可靠的模型基础。

### 2.3 不同组合输入参数对比

为提高算法预测准确度,确定最优输入参数组合,将输入参数进行组合,对比不同组合模型的预测性能,模型预测损伤等级情况见表4和图6。

从表4、图6可知,输入参数为Group3时,预测模型预测结构损伤等级准确度最高,且预测有误的情况主要为误判损伤等级为更高一级,能较为准确地进行结构等级预测评估。Group4预测损伤等级

表4 各模型预测损伤等级准确度

Table 4 Model accuracy in damage level prediction

	输入参数	准确度
Group1	巨型层层数、峰值加速度、顶层加速度放大系数	0.922
Group2	巨型层层数、峰值加速度、顶层加速度放大系数	0.897
Group3	巨型层层数、峰值加速度、最大层间位移角、顶层加速度放大系数	0.975
Group4	峰值加速度、最大层间位移角、顶层加速度放大系数	0.865
Group5	巨型层层数、最大层间位移角、顶层加速度放大系数	0.901

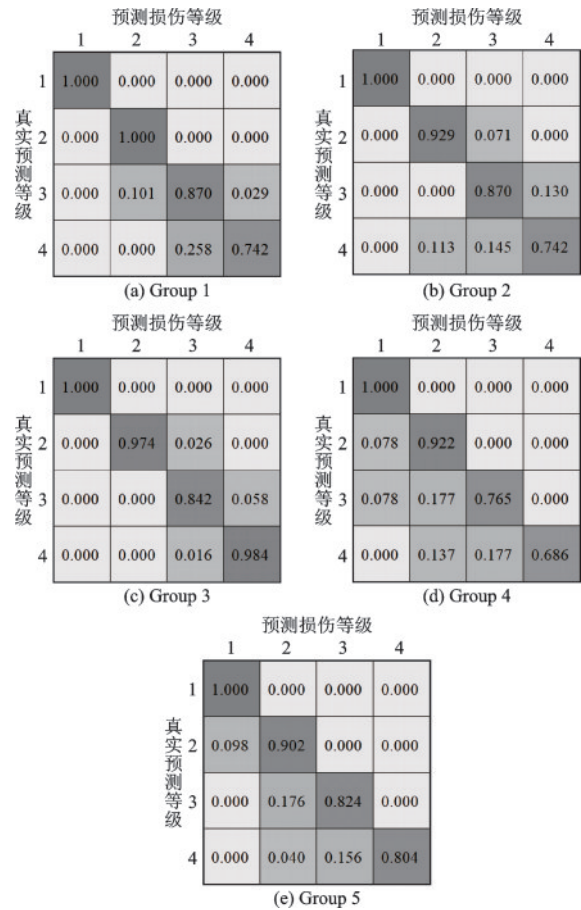


图6 预测损伤等级混淆矩阵

Fig.6 Confusion matrix for predicted damage level

准确性最低,且Group2、4、5都存在实际损伤等级为四级,误判为二级的情况,传递了错误信息。

取一有限元模型作为测试算例,该有限元结构参数见表5,分别使用上述三个预测模型对结构震损指数进行预测,观察不同组合输入参数预测效果的对比,预测结果对比如图7所示。

由图7可知,输入参数包含最大层间位移角时模型预测准确度更好,且Group3的预测准确性优于Group1,说明结构的最大层间位移角和顶层加速度放大系数都与结构损伤密切相关,且最大层间位移角的相关性更强。该预测模型能够很好地提取输

表5 有限元模型参数

Table 5 Parameters for finite element model

巨型层 层数	巨型 层高/m	构件	截面尺寸/m			
			$h$	$b$	$t_w$	$t_l$
		柱	1.700	1.700	0.040	/
3	4.2	主梁	2.000	1.000	0.060	0.060
		次梁	1.800	1.000	0.060	0.060

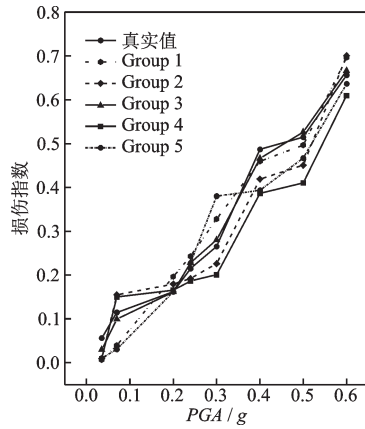


图7 不同模型预测损伤指数

Fig.7 Plot of damage indices prediction by different models

入参数与结构损伤之间的信息,构建最大层间位移角、顶层加速度位移等参数与结构损伤之间的非线性映射关系。

### 3 试验验证

#### 3.1 振动台模型

本节利用提出的IPOA预测模型对一振动台试验的结果进行预测,通过对比试验真实数据与预测结果的差异,评估该神经网络预测模型的准确性和泛化性。该振动台模型为三层巨型层组合框架结构,缩尺比为1/15,模型原型为实腹巨型框架结构,由巨型钢箱梁和巨型方钢管混凝土柱组成主框架,工字钢梁和方形钢管混凝土柱组成次框架,试验中根据相似关系选择紫铜替代原型结构中的钢构件部分,微粒混凝土模拟楼板和组合柱的柱内混凝土,镀锌铁丝模拟钢筋,焊接镀锌铁丝网模拟箍筋。结构具体参数见表6,结构模型如图8所示。

表6 构件截面尺寸

Table 6 Cross-sectional dimensions of components

位置	楼层	截面尺寸/mm			
		$h$	$b$	$t_w$	$t_f$
巨型柱	1~21	120.0	120.0	3.0	—
次框架柱	1~21	26.7	26.7	1.5	—
巨型主梁	7,14	133.5	66.7	4.0	4.0
	21	66.7	53.5	3.0	3.0
巨型次梁	7,14	120.0	66.7	4.0	4.0
	21	53.5	40	3.0	3.0
次框架梁	1~21	26.7	26.7	3.0	1.5

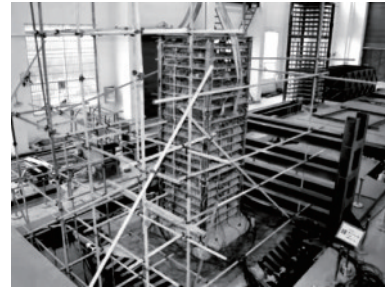


图8 试验模型

Fig.8 Test model

#### 3.2 试验工况

试验选取EL Centro波作为振动台台面激励,采用分级加载的方式,依次输入0.07g、0.20g、0.24g、0.30g以及0.40g对应的峰值加速度来模拟地震试验,并在每次输入地震波前后都对试验模型进行白噪音扫频。结构最大层间位移角、加速度响应等重要参数通过布置的位移计和加速度传感器采集,结构具体工况和损伤情况见表7。

表7 结构损伤情况

Table 7 Structural damage conditions

工况	PGA/g	试验现象	最大层间位移角	频率/Hz
1	0.07	模型结构无明显变形和可见细小裂缝,自振频率略有降低,说明有极少部分构件进入屈服阶段	1/1507	1.921
2	0.20	模型结构整体未见明显残余变形,楼板无明显裂缝,自振频率持续下降,位移时程曲线开始发生偏移,可以判断结构部分构件进入屈服阶段	1/369	1.877
3	0.24	模型结构第7层主梁与混凝土楼板连接处开始松动,结构整体可见参与变形	1/252	1.724
4	0.30	模型结构整体残余变形程度加大,结构第7层主梁与楼板连接处松动加剧,第8层、第15层有次框架梁的腹板与翼板连接处脱开,第21层主框架梁柱节点脱焊	1/207	1.804
5	0.40	模型结构第9层次框架梁端与混凝土楼板连接松动,顶层主框架梁柱节点与混凝土楼板脱离	1/137	1.632

### 3.3 模型预测结果对比

将振动台试验的工况数据放入上文提出的 IPOA 模型进行预测,预测结果与实际结果对比见表 8。实际损伤指数由振动台试验收集的结构频率通过公式(8)计算得来。

表 8 IPOA 模型预测结果  
Table 8 Prediction results of IPOA model

工况	预测损伤 指数	预测损伤 等级	实际损伤 指数	实际损伤 等级
1	0.156 9	1	0.143 7	1
2	0.183 6	1	0.173 1	1
3	0.246 1	2	0.238 9	2
4	0.280 9	2	0.276 8	2
5	0.469 1	3	0.431 3	3

五个工况预测损伤指数与试验实际损伤指数的误差均小于 10%,模型预测损伤等级均与试验实际损伤等级一致,有较高的准确度。且值得注意的是,用于预测振动台试验工况的模型为第二节中已训练完成的模型,并未针对振动台试验模型重新训练,表明该 IPOA 预测模型具有一定的泛化性,能够适用于不同的试验模型和实际工程情况。

## 4 结 论

基于有限元仿真数据和合适的网络结构,以巨型组合框架结构为研究对象,选取结构层数、最大层间位移角和加速度放大系数等参数,提出了一种快速预测震后结构损伤程度的改进鹌鹑优化算法的预测模型,并通过与振动台试验结果对比,验证该模型的准确性和实用性,得到以下结论:

(1)通过引入聚类优化策略和惯性权重自适应优化策略,提出了一种基于改进鹌鹑优化算法(IP-OA)的多参数震损预测方法,改进的鹌鹑算法搜索能力更强,能更快地发现并收敛到全局最优解,避免了陷入局部最优解的问题,达到平衡全局搜索和局部搜索的目的。

(2)通过与 RF 模型和 SVR 模型对比分析,IP-OA 模型对巨型组合框架结构的损伤预测具有更强的适应性和准确性,能够满足震后结构损伤评估高精度和耗时短的实际工程要求,具有实际应用价值。

(3)对比不同组合输入参数发现,最大层间位移角与结构损伤相关性最高,增加影响结构损伤的输入参数能够进一步提高预测模型的准确度和泛化能力,使该模型能更好地应用于实际震损预测工程。

(4)对比 IPOA 模型预测振动台试验缩尺模型损伤与实际损伤,预测结构损伤指数误差均小于 10%,预测等级与真实等级一致,表明采用已经训练好的神经网络快速预测模型,可以实现结构损伤程度快速预测评估。

### 参考文献:

- [1] Jiang L Z, Feng Y L, Zhou W B, et al. Vibration characteristic analysis of high-speed railway simply supported beam bridge-track structure system [J]. Steel and Composite Structures, 2019, 31(6): 591-600.
- [2] Huang Z, Jiang L Z, Chen Y F, et al. Experimental study on the seismic performance of concrete filled steel tubular laced columns [J]. Steel and Composite Structures, 2018, 26(6): 719-731.
- [3] 贺拥军,郭文豪.圆柱面巨型网格结构的粘滞阻尼器减震研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(2): 230-236. He Y J, Guo W H. Study on vibration reduction of cylindrical reticulated mega-structures with viscous dampers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(2): 230-236. (in Chinese)
- [4] 赖正聪,潘文,白羽,等.基础隔震在高烈度区大高宽比剪力墙结构中的应用与试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(9): 62-73. Lai Z C, Pan W, Bai Y, et al. Application and experimental investigation on base-isolated shear-wall structure with large height-width ratio in high seismic intensity regions [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 62-73. (in Chinese)
- [5] 杨远威,钱德玲,佟国锋.超高层混凝土框架-核心筒结构试验研究[J].振动与冲击,2016,35(16): 181-186. Yang Y W, Qian D L, Tong G F. Experimental study on a super high-rise building with a concrete frame-core tube [J]. Vibration and Shock, 2016, 35(16): 181-186. (in Chinese)
- [6] 张鸿森,黄炎生,周靖.多层钢管混凝土柱-铰接钢梁-混凝土核心筒结构振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(2): 227-238. Zhang H S, Huang Y S, Zhou J. Experimental study on multirise CFST column-pinned steel beam-RC core tube structure [J]. Earthquake Engineering and Engi-

- neering Dynamics, 2020, 40(2): 227-238. (in Chinese)
- [7] 薛红京,束伟农,陆新征,等.某高度522 m超高层结构振动台试验与理论分析研究[J].建筑结构学报,2023,44(4): 63-73.  
Xue H J, Shu W N, Lu X Z, et al. Shaking table test and theoretical analysis on a 522 m super high-rise structure [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4): 63-73. (in Chinese)
- [8] 马高,刘康.基于BP神经网络CFRP约束混凝土抗压强度预测[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(9):88-97.  
Ma G, Liu K. Prediction of compressive strength of CFRP-confined concrete columns based on bp neural network[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(9): 88-97. (in Chinese)
- [9] 韩小雷,蔡燕飞,杨明灿,等.钢筋混凝土框架结构震损预测模型参数敏感性[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(4):563-571.  
Han X L, Cai Y F, Yang M C, et al. Parameter sensitivity of earthquake damage prediction model for RC frame structure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(4): 563-571. (in Chinese)
- [10] 焦亮,柳金峰,游勇,等.基于SVM-RF的泥石流窗口坝闭塞度判别研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(3):439-446.  
Jiao L, Liu J F, You Y, et al. Research on the occlusion of debris flow window-frame dam based on SVM and RF methods[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(3): 439-446. (in Chinese)
- [11] 高经纬,涂建维,刘康生,等.基于GA-LSTM的高层建筑结构地震响应的分散控制研究[J].振动与冲击,2021,40(10): 114-122.  
Gao J W, Tu J W, Liu K S, et al. Study on decentralized control of seismic response of high-rise building structure based on GA-LSTM [J]. Vibration and Shock, 2021, 40(10): 114-122. (in Chinese)
- [12] 张令心,戴静涵,沈俊凯,等.基于LM-BP神经网络的钢筋混凝土框架结构震害快速预测模型[J].自然灾害学报,2019,28(2):1-9.  
Zhang L X, Dai J H, Shen J K, et al. Rapid prediction model of earthquake damage to frame structure based on LM-BP neural network [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 1-9. (in Chinese)
- [13] 马高,王瑶.基于机器学习的钢管混凝土剪力墙破坏模式预测与解释[J].地震工程与工程振动,2022,42(3): 143-152.  
Ma G, Wang Y. Failure mode prediction and explanation of concrete-filled steel tubular shear walls based on machine learning[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(3): 143-152. (in Chinese)
- [14] 胡少伟,李原昊,单常喜,等.基于改进的PSO-BP神经网络的边坡稳定性研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):854-861.  
Hu S W, Li Y H, Shan C X, et al. Research on slope stability based on improved PSO-BP neural network [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 854-861. (in Chinese)
- [15] Zhang G B, Chen C F, Li K F, et al. Multi-objective optimization design for GFRP tendon-reinforced cemented soil [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126297.
- [16] Zhang G B, Chen C F, Sun J B. Mixture optimization for cement-soil mixtures with embedded GFRP tendons [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18:611-628.
- [17] Trojovský P, Dehghani M. Pelican optimization algorithm: A novel nature-inspired algorithm for engineering applications[J]. Sensors, 2022, 22: 855.
- [18] 施卫星,汪洋,刘成清.基于频率测量的高层建筑地震作用损伤分析[J].西南交通大学学报,2007,42(4): 389-394.  
Shi W X, Wang Y, Liu C Q. Damage analysis of high-rise building under seismic load based on frequency measurement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4): 389-394. (in Chinese)
- [19] 混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [20] 建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(本文编辑:池营营)