

# 基于 HGSA 的起重机振动监测传感器布置及应用\*

刘关四<sup>1,2,3</sup>, 靳慧<sup>1,2</sup>, 丁克勤<sup>3</sup>, 陈力<sup>3</sup>, 唐方雄<sup>3</sup>

(1. 东南大学江苏省工程力学分析重点实验室 南京, 211189)

(2. 东南大学土木工程学院 南京, 211189)

(3. 国家市场监督管理总局技术创新中心(结构健康监测)中国特种设备检测研究院 北京, 100029)

**摘要** 为解决起重机械监测传感器布置手段缺失、布置点位搜索效率低、测点不够准确的问题,提出了一种基于和声遗传搜索算法(harmony genetic search algorithm,简称HGSA)的振动传感器布置方法。首先,建立模型进行模态分析,得到各阶位移矩阵,通过参数对比建立最优参数组合;其次,采用随机搜索机制对位移矩阵进行快速搜索得到初步解;然后,通过对初步解进行反复遗传和变异迭代得到最优解;最后,以门式起重机试验装置为对象,采用模态数据分析系统分别对HGSA、和声搜索(harmony search,简称HS)和遗传算法(genetic algorithm,简称GA)得到的传感器布置方案进行对比。结果表明,HGSA得到的测点频率响应函数峰值更大,能够更加有效地反映结构的振动响应。该方法为起重机械振动监测传感器安装提供了一种新手段。

**关键词** 起重机械;健康监测;传感器布置;模态分析;智能算法

**中图分类号** TH21

## 引言

起重机械健康监测主要针对起重机械关键部件典型失效特征参数,采用先进传感技术感知结构动态响应,结合信号分析、诊断模型及预测算法,为起重机械的安全运行提供支撑的技术<sup>[1]</sup>。在结构关键部位布设传感器是起重机械健康监测成功的关键,过密的传感器会耗费大量的数据采集资源、数据传输资源与数据处理资源,且对结构动力响应的测试精度没有显著的提升,还会增加数据传输带宽、增大储存容量及影响分析效率而引起的监测失效<sup>[2]</sup>。然而对于起重机械结构健康监测指标的选择、决策方法和评价准则等研究较少<sup>[3]</sup>。Cao等<sup>[4]</sup>基于信息熵原理,构造优化目标函数提出了距离系数-多目标信息融合算法。牛国纯等<sup>[5]</sup>结合QR分解法与GA,实现了水工结构健康监测传感器的优化布置。华林等<sup>[6]</sup>实现了复合材料机翼盒段传感器优化布置。周硕等<sup>[7]</sup>提出了基于深度学习的传感器布置算法,并以简化桥梁为试验目标进行了测试验证。

笔者基于HS的全局搜索优势和GA的局部搜索优势,提出了智能融合的HGSA。该方法利用互补搜索机制提升了算法的全局和局部搜索能力,解

决了起重机大型复杂结构传感器布置手段缺失、传感器布置点位搜索效率低及测点不准确的问题,并以门式起重机为对象进行模态分析,验证了该算法的有效性和稳定性。

## 1 HGSA 原理

实际结构可以通过模态模型来描述其动态响应,将物理坐标转换到模态空间,对系统原来的振动微分方程进行分析,转换为模态坐标 $q$ 下的系统振动微分方程。由动力分析模态叠加原理可知,结构的响应可表示为

$$x = \phi q \quad (1)$$

其中: $x$ 为结构的响应向量; $\phi$ 为模态振型矩阵; $q$ 为模态坐标向量。

和声遗传算法取值概率、微调概率、变异率和杂交率等初始化参数的选择对搜索算法取得合理最优解及搜索效率至关重要,不同的初始参数会直接影响适应度最优解的大小和收敛速度。因此,在利用和声遗传算法前,应先对各初始化参数进行对比。

按照分析模型几何尺寸建立有限元模型,划分网格、定义结构边界条件。起重机械主梁结构前6

\* 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805100);中国特种设备检测研究院科研资助项目(2021青年17)

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-06-03

阶模态彼此独立,且各阶模态的传感器布点数不影响其他模态的观测。提取前6阶模态模型节点编号和各节点在各阶模态中 $x, y, z$ 方向位移 $U_x, U_y, U_z$ ,利用各阶模态位移构建模态位移矩阵<sup>[8]</sup>。

利用各阶模态位移构建模态位移矩阵 $\phi$ ,模态位移矩阵即为全集解空间(harmony memory,简称HM)为

$$HM = \begin{bmatrix} 1 & s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1m} \\ 2 & s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ n & s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $s_{nm}$ 为第 $n$ 个节点在 $m$ 阶模态下的位移。

传感器对应的和声库大小(harmony memory size,简称HMS)为

$$HMS = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1k} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{j1} & s_{j2} & \cdots & s_{jk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $k$ 为传感器个数; $s_{jk}$ 为第 $j$ 个节点第 $k$ 个传感器所对应的 $m$ 阶模态下的位移。

任意2阶模态振型具有质量矩阵的正交性和刚度矩阵的正交性,常用于传感器布置的评价指标模态置信准则(modal assurance criterion,简称MAC)反映的是2个模态振型向量之间的关联性<sup>[9]</sup>,即

$$MAC_{ij} = \frac{|\phi_i^T \phi_j|^2}{\phi_i^T \phi_i \phi_j^T \phi_j} \quad (4)$$

其中:振型向量 $\phi_i$ 和 $\phi_j$ 均为列向量; $i$ 和 $j$ 为模态的阶次。

若 $\phi_i$ 和 $\phi_j$ 对同一阶振型进行估计,即 $i=j$ ,则理论MAC的数值应近似为1,因为2个振型向量之间按照一定的比例因子可以相互转换。反之,对不同的振型估计时,MAC的数值会相对较低,表明2个振型向量之间没有显著的线性关系。因此,对于不同振型,当 $MAC_{ij}=0(i \neq j)$ 时,表明第 $i$ 阶振型和第 $j$ 阶振型正交,2个振型可以被识别出来<sup>[10]</sup>。工程上,由于结构非线性特点以及测量过程中受外噪声干扰、数据处理不精确等因素,都会对MAC的结果带来偏差。通常认为 $MAC \geq 0.9$ 时,两振型相关; $MAC < 0.05$ 时,两振型不相关<sup>[11]</sup>。对 $MAC_{ij}$ 进行修正,得到最终评价指标为

$$f(X) = \frac{|\phi_i^T \phi_j|^2}{\phi_i^T \phi_i \phi_j^T \phi_j} - E \quad (5)$$

其中: $E$ 为单位矩阵。

采用轮盘赌选择算法的思想,从初始精英种群中选取一个代替全局最优位置,作为父代通过交叉配对遗传给下一代。依次迭代,直至达到指定的次数 $T_{max}$ ,给出最优的方案及对应的 $f(X)$ 评价价值,最优方案对应的节点坐标即为传感器的安装位置。

## 2 门式起重机模态试验分析

频率响应函数曲线(frequency response function,简称FRF)表示输出响应和输入的激励力之间的比例关系。实际应用时,通常采用锤击法作为激振进行试验<sup>[12]</sup>。采用门式起重机试验装置和SO Analyzer分析软件进行试验。门式起重机模型如图1所示。模态分析仪器如图2所示。采用锤击法进行试验,基本过程为:几何建模、试验设置、锤击操作过程及数据采集分析<sup>[13]</sup>。



图1 门式起重机模型

Fig.1 Gantry crane model



图2 模态分析仪器

Fig.2 Modal analysis instrument

### 2.1 传感器布置点的确定

门式起重机为钢梁焊接结构,经适当简化,材料的弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,泊松比为0.28,密度为 $7850 \text{ kg/m}^3$ 。在 $x, y$ 和 $z$ 方向各布设6个传感器,提取门式起重机模型模态分析振型及各节点位移,建立模态矩阵。分别运用GA,HS和HGSA进行传感器布置分析。

GA,HS和HGSA 3种算法在 $x$ 方向的评价指标最优值分别为0.001,0.0013和 $9.3 \times 10^{-4}$ 。各算法在 $x$ 方向的传感器布置点如图3所示。 $x$ 方向各算法结果对比如表1所示。

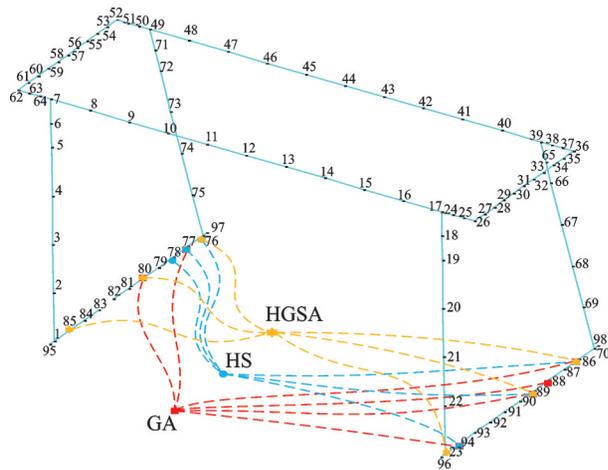


图 3  $x$  方向传感器布置点示意图

Fig.3 Schematic diagram of layout points in  $x$ -direction

表 1  $x$  方向各算法结果对比

Tab.1 Comparison results of algorithms in the  $x$ -direction

算法	传感器布置点						评价指标 最优值
	1	2	3	4	5	6	
GA	80	77	86	89	94	88	0.001 0
HS	76	86	89	94	77	78	0.001 3
HGSA	77	80	85	86	89	23	$9.3 \times 10^{-4}$

GA, HS 和 HGSA 3 种算法在  $y$  方向的评价指标最优值分别为  $5.94 \times 10^{-5}$ ,  $1.07 \times 10^{-4}$  和  $5.01 \times 10^{-5}$ 。各算法在  $y$  方向的传感器布置点如图 4 所示。 $y$  方向各算法结果对比如表 2 所示。

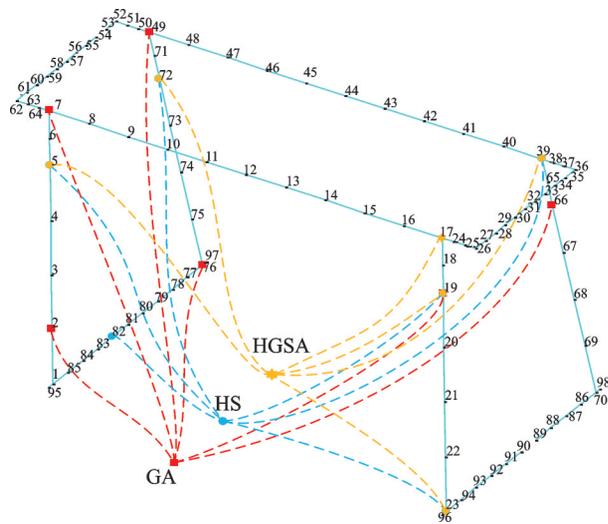


图 4  $y$  方向传感器布置点示意图

Fig.4 Schematic diagram of layout points in  $y$ -direction

GA, HS 和 HGSA 3 种算法在  $z$  方向的评价指标最优值分别为 0.009, 0.020 8 和  $8.51 \times 10^{-4}$ 。各算法在  $z$  方向的传感器布置点如图 5 所示。 $z$  方向各算法结果对比如表 3 所示。

表 2  $y$  方向各算法结果对比

Tab.2 Comparison results of algorithms in the  $y$ -direction

算法	传感器布置点						评价指标 最优值
	1	2	3	4	5	6	
GA	72	2	7	49	66	19	$5.94 \times 10^{-5}$
HS	82	72	5	39	23	19	$1.07 \times 10^{-4}$
HGSA	17	72	5	38	69	22	$5.01 \times 10^{-5}$

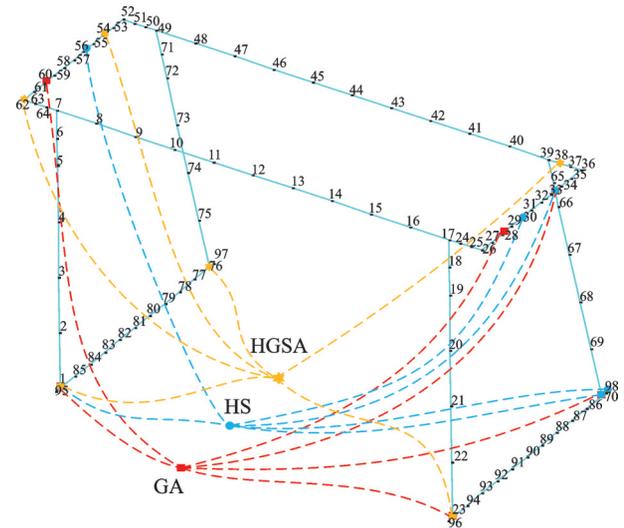


图 5  $z$  方向传感器布置点示意图

Fig.5 Schematic diagram of layout points in  $z$ -direction

表 3  $z$  方向各算法结果对比

Tab.3 Comparison results of algorithms in the  $z$ -direction

算法	传感器布置点						评价指标 最优值
	1	2	3	4	5	6	
GA	1	60	33	28	70	23	0.009 0
HS	1	56	30	70	33	98	0.020 8
HGSA	1	76	54	62	38	23	$8.51 \times 10^{-4}$

## 2.2 试验测试及结果分析

为了验证模型的有效性,分别对 GA, HGSA 和 HS 3 种算法得到的门式起重机测点进行对比测试。利用以上方法获得的传感器布置方案分别布置对应方向的加速度传感器。采用力锤敲击激励点,利用 SO Analyzer 分析软件采集各布置点的响应信号。在  $x, y$  和  $z$  方向的试验结果如图 6~8 所示。

$x$  方向传感器布置如图 6(a) 所示。用力锤对 30 号节点进行  $x$  方向激励,分别从 6 个布置点进行响应数据采集,通过 3 种算法得到的布置点频响函数曲线如图 6(b) 所示。门式起重机前 3 阶模态频率分别为 30, 112 和 193 Hz。3 种算法布置点获取的振型

频率基本一致,在第3阶频率上HGSA的峰值为0.031,较HS(0.021)和GA(0.023)的峰值更大,各测点的特征频率更加明显。

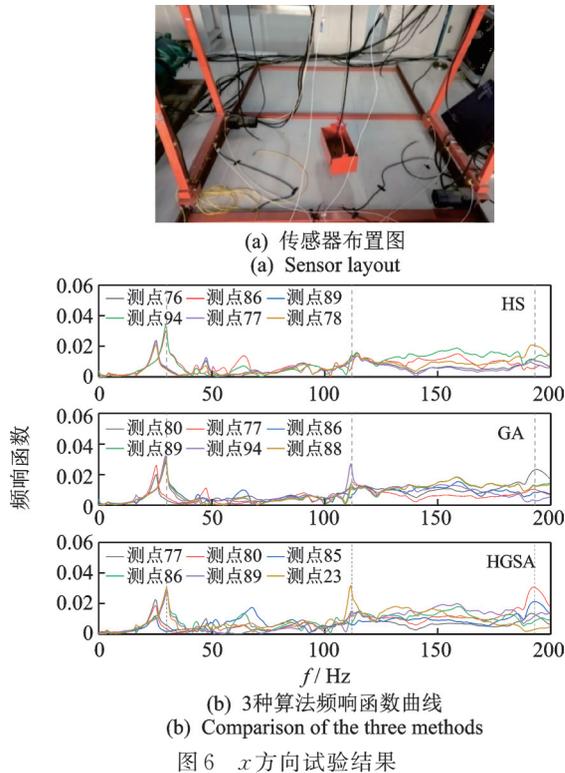


Fig.6 Comparison diagram of test results in  $x$ -direction

$y$ 方向传感器布置如图7(a)所示。用力锤对13号节点进行 $y$ 方向激励,分别从6个布置点进行响应数据采集,通过3种算法确定的布置点频响函数曲线如图7(b)所示。门式起重机前3阶模态频率分别为19,108和145 Hz。HGSA,HS各布置点获取的振型频率基本一致,较GA显著。在各阶振型对应的频响函数曲线峰值中,HGSA的峰值为0.144,较GA的峰值(0.125)和HS的峰值(0.130)显著,且在第3阶模态中各测点的频率较其他2个算法更集中于145 Hz。

$z$ 方向传感器布置如图8(a)所示。用力锤对13号节点进行 $z$ 方向激励,分别从6个布置点进行响应数据采集,通过3种算法确定的布置点频响函数曲线如图8(b)所示。门式起重机前3阶模态频率分别为41,110和146 Hz。3种算法各布置点获取的振型频率基本一致,HGSA和GA在各布置点对应的频响函数曲线峰值较HS更显著,HGSA的峰值为0.162,GA的峰值为0.154,HS的峰值为0.055。

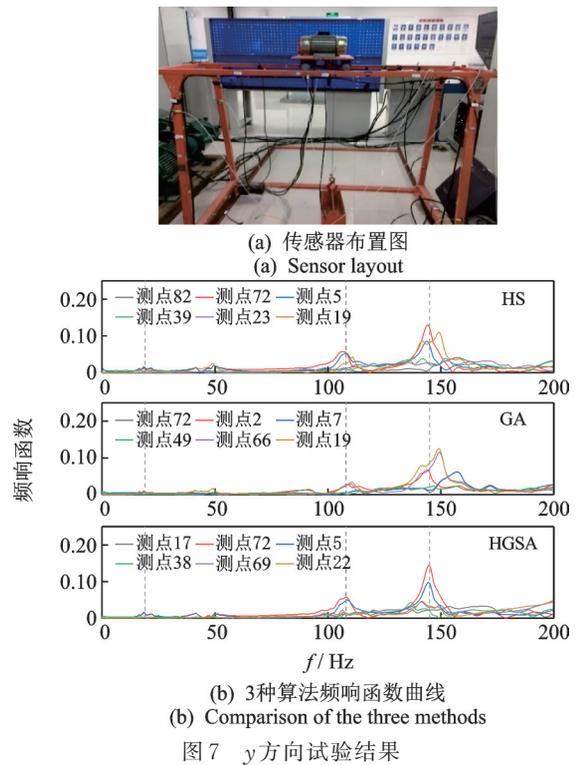


Fig.7 Comparison diagram of test results in  $y$ -direction

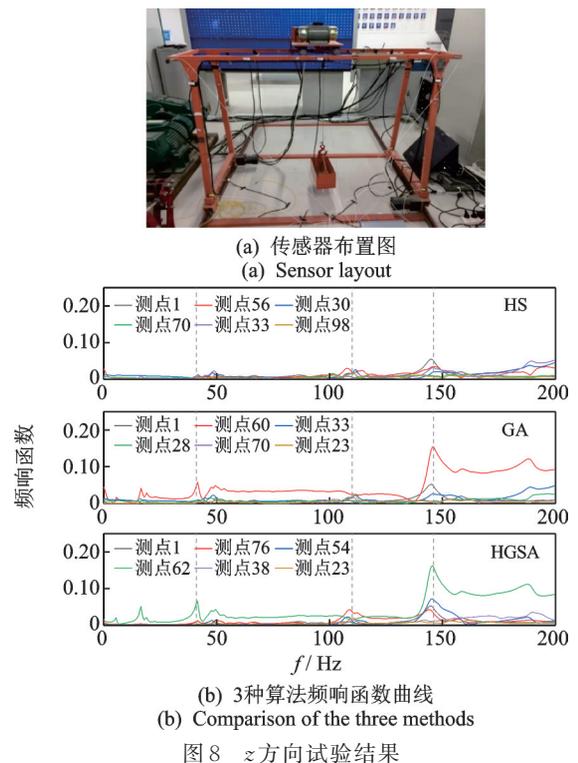


Fig.8 Comparison diagram of test results in  $z$ -direction

### 3 结论

1) 提出的HGSA充分利用了起重机模态正交的数学模型,在起重机模态振型的基础上在模态矩阵中进行快速搜索,通过遗传和变异操作得到优化

解,有效实现了振动传感器的布置点搜索。

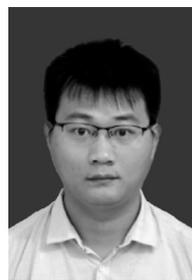
2) 以门式起重机为试验对象,利用振动传感器和模态分析软件对3种算法得到的传感器布置方案进行对比分析。可以看出,HGSA在 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向均能得到较好的模态信息,该方法比HS和GA具有更高的灵敏度和稳定性。

### 参 考 文 献

- [1] 王全伟. 起重机械健康监测系统理论与应用研究[D]. 太原:太原科技大学, 2018.
- [2] 刘福强,张令弥. 作动器/传感器优化配置的研究进展[J]. 力学进展, 2000(4):506-516.  
LIU Fuqiang, ZHANG Lingmi. Research progress on optimal configuration of actuators/sensors [J]. Advances in Mechanics, 2000(4):506-516. (in Chinese)
- [3] 刘关四,丁克勤,靳慧. 起重机械结构健康监测测点决策方法研究与展望[J]. 中国测试, 2021(47):5-11.  
LIU Guansi, DING Keqin, JIN Hui. Research and prospect of measuring point decision-making method for structural health monitoring of hoisting machinery [J]. China Test, 2021(47):5-11. (in Chinese)
- [4] CAO X Y, CHEN J Y, XU Q, et al. A distance coefficient-multi objective information fusion algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring [J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(4):718-732.
- [5] 牛国纯,练继建,马斌. 基于QR分解及遗传算法的水工结构传感器优化布置研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(6):36-38,43.  
NIU Guochun, LIAN Jijian, MA Bin. Research on optimal sensor layout of hydraulic structure based on QR decomposition and genetic algorithm [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2012, 43(6):36-38,43. (in Chinese)
- [6] 华林,康建雄,王富生,等. 基于混合算法的机翼多功能盒段传感器优化布置[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(6):257-262.  
HUA Lin, KANG Jianxiong, WANG Fusheng, et al. Optimal placement of multi-functional box section sensors of wing based on hybrid algorithm [J]. Science, Technology and Engineering, 2019, 19(6):257-262. (in Chinese)
- [7] 周硕,余龙,吴子燕,等. 基于深度学习的传感器优化布置方法[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4):719-724.

ZHOU Shuo, YU Long, WU Ziyan, et al. Optimal sensor placement method based on deep learning [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(4):719-724. (in Chinese)

- [8] 何浩祥,闫维明,张爱林. 面向结构健康监测的传感器数量及位置优化研究[J]. 振动与冲击, 2008(9):131-134,188.  
HE Haoxiang, YAN Weiming, ZHANG Ailin. Research on optimization of sensor number and location for structural health monitoring [J]. Vibration and Shock, 2008(9):131-134,188. (in Chinese)
- [9] BREITFELD T. A method for identification of a set of optimal measurement points for experimental modal analysis [J]. The International Society for Optical Engineering, 1995, 11(1/2):253-283.
- [10] CARNE T G, DOHRMANN C R. A modal test design strategy for model correlation[J]. The International Society for Optical Engineering, 1994, 2460:927-933.
- [11] 江世媛,姚熊亮,黄国权. 简化的舱段船壳模型试验模态分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003(5):483-486.  
JIANG Shiyuan, YAO Xiongliang, HUANG Guoquan. Modal analysis of simplified cabin hull model test [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003(5):483-486. (in Chinese)
- [12] 王伟雄,王新华. 起重机械结构服役安全评估技术[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2014:129-160.
- [13] 张建,吴刚. 长大跨桥梁健康监测与大数据分析:方法与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019:130-171.



**第一作者简介:**刘关四,男,1989年1月生,博士生。主要研究方向为特种设备健康监测、健康诊断与健康管理。曾发表《Sensor layout of hoisting machinery vibration monitoring based on harmony genetic search algorithm》(《Structural Durability & Health Monitoring》2022, Vol. 16, No.2)等论文。

E-mail: liu814293682@126.com

**通信作者简介:**靳慧,女,1974年4月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构疲劳与损伤、结构可靠性、工程机械设计及理论。

E-mail: jinhui@seu.edu.cn