

# 基于粒子群算法的虚拟质量优化布置研究

周润芳

(山西农业大学城乡建设学院, 山西 晋中 030600)

**摘要:** 在结构上附加虚拟质量的损伤识别方法可以避免附加真实质量的局限, 并增加测试模式数据量。损伤识别的精度与虚拟质量的布置方案有很大关系, 因此提出连续粒子群算法对虚拟质量的位置进行优化, 并通过简支梁结构的数值模拟验证该方法的有效性。结果表明, 应用粒子群算法进行虚拟质量的优化, 具有操作简单、搜索效率高的优点, 得到的优化方案能够准确识别结构的损伤。

**关键词:** 损伤识别; 粒子群算法; 灵敏度矩阵

中图分类号: TP391.98 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)02-0048-04

## Research on Virtual Mass Optimization layout Based on Particle Swarm Optimization

ZHOU Run-fang

( Shanxi Agricultural University, College of Urban and Rural Construction, Jinzhong 030600 China )

**Abstract:** The damage identification method of adding virtual mass to the structure can avoid the limitation of adding real mass and increase the amount of test modes. The accuracy of damage identification is closely related to the layout of virtual mass. Therefore, this paper proposes a continuous Particle Swarm Optimization algorithm to optimize the location of virtual mass, and verifies the effectiveness of this method through the numerical simulation of simply supported beam structure. The results show that the application of particle swarm optimization to optimize the virtual mass is easy to use and highly efficient, and the obtained optimization scheme can accurately identify the structural damage.

**Keywords:** damage identification; Particle Swarm Optimization algorithm; sensitivity matrix

### 0 引言

基于结构模态信息的方法目前广泛应用于土木工程结构损伤识别当中<sup>[1-3]</sup>。针对实际工程中存在模态对局部损伤不敏感和测试数据量不足的问题, Dems 和 Mroz 提出在原结构上添加支座、荷载和温度等参数进行损伤识别<sup>[4]</sup>。但在实际结构上附加真实的物理元件具有一定局限性。因此, Holnicki-Szulc 通过附加虚拟变形模拟未损伤结构的局部变形, 即虚拟变形法(VDM)<sup>[5]</sup>。基于该思想, 侯吉林等推导了附加虚拟构造公式, 避免附加真实质量的局限<sup>[6]</sup>。Hou 等提出附加虚拟质量的储罐损伤识别方法<sup>[7]</sup>。Li 等采用附加虚拟质量的方法识别管道的损伤<sup>[8]</sup>。虚拟质量的布置方案对于损伤识别结果影响很大, 因此本文研究虚拟质量的优化布置问题。传递误差最小准则是常用的传感器优化布置准则之一, 通过最大化 Fisher 信息矩阵的行列式, 使得系统参数识别误差最小。Kam-mer 基于 Fisher 信息阵准则的思想, 提出著名的有效独立

法, 通过使 Fisher 信息阵行列式最大化来保证目标模态之间的线性无关性<sup>[9]</sup>。Zhan 使用模态应变能方法来修正有效独立法, 并应用于桁架桥结构的传感器优化布置<sup>[10]</sup>。Zhang 为更好地解决水工结构的传感器优化布置问题, 提出有效独立-总位移法<sup>[11]</sup>。Silvers 提出通过最大化频率对于损伤的灵敏度对传感器进行优化布置<sup>[12]</sup>。Bruggi 提出了一种检测柔性板损坏的传感器优化布置方法, 结合灵敏度分析以响应对损伤的敏感性为目标函数, 采用类似拓扑优化的方法<sup>[13]</sup>。粒子群算法(PSO)是一种群智能优化算法, 收敛速度快, 参数数量少, 易于实现, 广泛应用于电力设计、智能控制、交通运输等各个领域的优化计算中。He 等采用改进的粒子群算法解决多维传感器布置信息冗余问题, 以黄河上游的拉西瓦拱坝为例验证了该方法的高效性<sup>[14]</sup>。Zhang 针对大跨度斜拉桥结构健康监测系统, 提出了基于粒子群算法的传感器布置优化算法, 以模态保证准则矩阵的非对角元素的均方根值建立适应度函数来解决最优问题<sup>[15]</sup>。侯吉林等提出逐步快速搜索方法对虚拟质量进行优化布置, 该方法操作简便, 搜索效率高<sup>[16]</sup>。本文基于 Fisher 信息阵准则, 提出基于灵敏度矩

\*基金项目: 山西农业大学青年科技创新基金(2020QC21)

收稿日期: 2023-08-08

阵体积最大化的优化准则,并利用粒子群算法对虚拟质量位置进行优化布置。

## 1 附加虚拟质量方法

利用原结构上的一组激励及加速度响应,可推导出附加虚拟质量后结构的频率响应特性,进一步求出结构的频率进行损伤识别。构造的公式为:

$$H_{pp}(\omega, m) = \frac{A(\omega)}{F(\omega) + mA(\omega)} \quad (1)$$

式中,  $H_{pp}(\omega, m)$ 表示结构附加虚拟质量  $m$  后在  $p$  自由度方向的加速度频率响应,  $F(\omega)$  和  $A(\omega)$  分别表示原结构在该自由度方向上的激励和加速度的频域响应,  $m$  是  $p$  自由度方向上附加的虚拟质量<sup>[16]</sup>。

## 2 虚拟质量优化布置方法

### 2.1 灵敏度信息矩阵

为消除频率大小引起的结构频率识别误差,本文采用相对灵敏度指标,可表示为式(2):

$$R_{ji,l}(\boldsymbol{\mu}, m) = \frac{\partial w_{ji}(\boldsymbol{\mu}, m)}{w_{ji}(\boldsymbol{\mu}, m) \partial \mu_l} = \frac{\Psi_{ji}^T(\boldsymbol{\mu}, m) K_l \Psi_{ji}(\boldsymbol{\mu}, m)}{2w_{ji}^2(\boldsymbol{\mu}, m)} \quad (2)$$

灵敏度信息矩阵的建立,首先将原结构划分为  $n$  个子结构,  $\mu_l$  为子结构  $l$  的损伤因子,  $\boldsymbol{\mu}$  为子结构损伤后与损伤前刚度之比,  $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_n\}$ , 结构刚度阵可表示为  $K(\boldsymbol{\mu})$ ;  $n_m$  为结构可布置虚拟质量的位置数, 设在第  $i$  个位置 ( $i=1, 2, \dots, n_m$ ) 布置质量后得到的结构的所有  $k$  阶频率为  $\omega_{i1}(\boldsymbol{\mu}, m), \omega_{i2}(\boldsymbol{\mu}, m), \dots, \omega_{ik}(\boldsymbol{\mu}, m)$ , 其中, 结构第  $j$  阶频率和质量归一化阵型分别为  $\omega_{ji}(\boldsymbol{\mu}, m)$  和  $\Psi_{ji}(\boldsymbol{\mu}, \omega)$ , 则  $R_{ji,l}$  表示  $\omega_{ji}(\boldsymbol{\mu}, m)$  关于子结构  $l$  损伤因子的相对灵敏度<sup>[16]</sup>。

将灵敏度矩阵构造为一个包含  $kn$  行  $n_m$  列的矩阵, 矩阵的每一列表示在一个测点上附加虚拟质量得到的所有  $k$  阶频率对所有  $n$  个子结构的相对灵敏度信息, 第  $i$  个测点列向量表示为  $\Lambda_i, \Lambda_i = \{R_{i1}^T, R_{i2}^T, \dots, R_{in}^T\}^T, R_{ji} = \frac{\partial w_{ji}(\boldsymbol{\mu}, m)}{w_{ji} \partial m} = \{R_{ji,1}, R_{ji,2}, \dots, R_{ji,n}\}^T$ , 则灵敏度矩阵可表示为公式(3), 构造图如图1所示。

$$R = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{n_m}\} \quad (3)$$

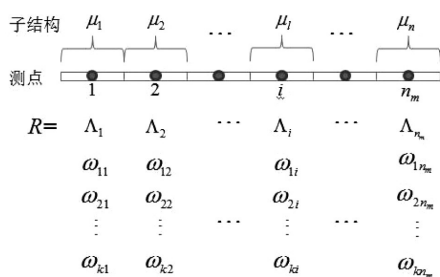


图1 灵敏度信息矩阵的构造图

### 2.2 基于灵敏度矩阵体积最大的优化准则

为保证获得尽可能多的测试模态信息,即最大化保证测点列向量之间的线性无关性。本文采用灵敏度矩阵体积最大化的优化布置准则,目标函数表示为:

$$f_1(\boldsymbol{\pi}, m) = V(R(\boldsymbol{\pi}, m)) \quad (4)$$

式中,  $R(\boldsymbol{\pi}, m)$  为结构灵敏度矩阵,  $V$  表示灵敏度矩阵中, 每一个测点布置虚拟质量得到的灵敏度信息列向量构成的有向空间的体积。经简单推导可以得到:

$$f_1(\boldsymbol{\pi}, m) = \sqrt{\det(R^T R)} \quad (5)$$

### 2.3 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是一种群智能优化算法。粒子在迭代过程中通过适应度函数评价不断调整速度及位置,从而找到最优解。该方法收敛很快,但存在精度较低的问题,因此, Y. Shi 和 R. E. Cberhart 提出通过动态调整惯性权重, 以较快速度在全局范围内搜索, 提高寻优的速度及精度<sup>[17]</sup>。

粒子群算法中: 在  $D$  维搜索空间中首先随机产生一群粒子, 粒子数目为  $q$ , 第  $i$  个粒子的位置和速度可以表示为:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}), i = 1, 2, \dots, q \quad (6)$$

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad (7)$$

粒子的速度和位置在迭代进化中按照下述不断更新, 直到找到满足终止条件的最优解。

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (8)$$

$$v_{id}^{t+1} = w v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t) \quad (9)$$

式中,  $c_1, c_2$  为加速度因子;  $r_1, r_2$  为随机函数, 取值范围为  $[0-1]$ ;  $p_{id}^t$  是第  $t$  次迭代过程中第  $i$  个粒子在第  $d$  维的个体最优解;  $p_{gd}$  是在第  $d$  维空间粒子群体当前搜索到的全局最优解。

灵敏度矩阵的建立是基于离散测点的, 而粒子群算法主要解决连续函数的优化, 因此需要对灵敏度矩阵进行差值拟合, 以求得在结构任何位置布置质量得到的频率的灵敏度值。此时的适应度函数选取为灵敏度矩阵体积的相反数, 该优化问题便转化为求解适应度函数极小值的问题。

## 3 数值模拟

如图2所示, 建立一个 1 m 跨度的简支梁结构, 其截面宽度和厚度分别为 0.05 m 和 0.005 m, 结构材料选用钢材, 弹性模量为 2.10 GPa, 密度为  $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 将结构划分为 10 个子结构, 20 个单元, 将节点 1 到节点 19 作为用于布置质量的节点, 编号如图2所示。假定结构损伤为: 子结构 2 刚度损伤 20%、子结构 7 刚度损伤 30%, 用损伤因子表示为  $\mu_2=0.8, \mu_7=0.7$ 。

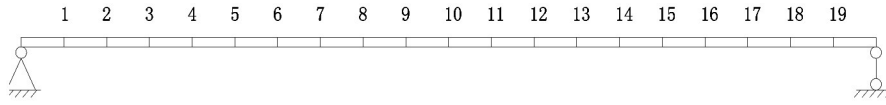


图2 简支梁有限元模型

本文假定虚拟质量大小为3 kg,应用粒子群算法优化虚拟质量位置时的参数设置见表1。

表1 参数设置

种群规模	粒子维数	迭代次数	惯性因子		学习因子		随机数		粒子速度	
			$\omega_{max}$	$\omega_{min}$	$c_1$	$c_2$	$r_1$	$r_2$	$V_{max}$	$V_{min}$
40	19	100	0.9	0.4	1.496	1.496	[0-1]	[0-1]	4	-4

应用粒子群算法对虚拟质量位置进行4次优化,结果见表2。

由表2可知,应用粒子群算法搜索虚拟质量最优测点的4次试验中,测点最优值及最佳适应度值完全相同,说

明算法找到了全局最优解。将4次试验的适应度值变化曲线绘制如图3。

表2 粒子群算法优化结果

随机测试试验编号	最优值				最佳适应度值	寻优时间/s
1	0.144	0.684	0.397	0.034	$-8.475e^{-14}$	206
	0.859	0.267	0.961	0.597		
2	0.597	0.034	0.267	0.859	$-8.475e^{-14}$	209
	0.961	0.397	0.144	0.684		
3	0.961	0.144	0.267	0.859	$-8.475e^{-14}$	210
	0.597	0.397	0.684	0.034		
4	0.267	0.397	0.859	0.144	$-8.475e^{-14}$	208
	0.597	0.034	0.961	0.684		

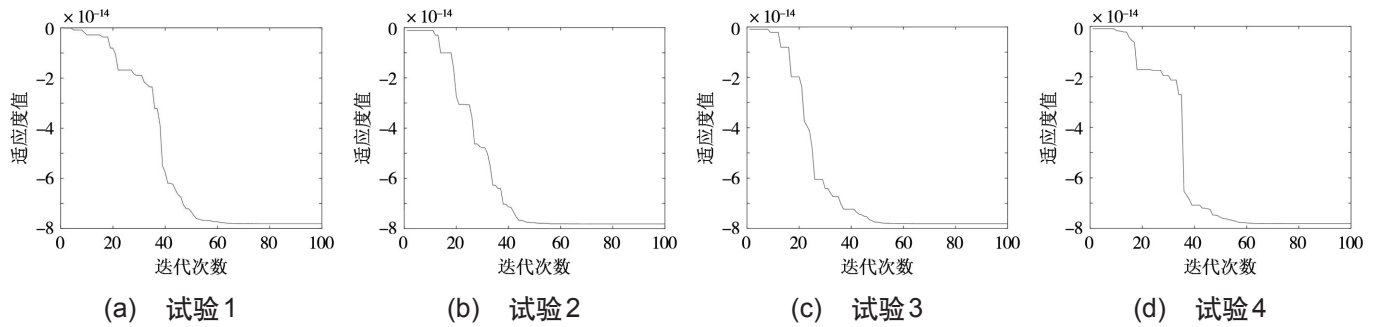


图3 适应度曲线

从图3可以看出,4次试验中随着迭代进行适应度值不断减小,迭代到50次左右时,适应度值降到最小值,并且达到稳定,说明算法已经收敛,找到最优解。

将得到的8个优化测点标注在简支梁上,如图4。

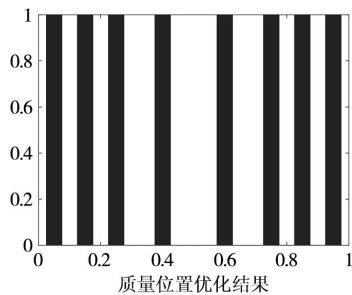


图4 质量位置分布图

由图4可见,优化测点在简支梁上分布均匀对称,再次说明应用粒子群算法进行虚拟质量优化布置是合理的。

利用灵敏度优化方法进行损伤识别,通过将虚拟质量附加到受损结构上来获取该结构的频率响应,再将质量附加到未损伤结构上来获取该结构的频率响应,并将两者进行比较,从而评估出结构的损伤程度。为验证方法的有效性,采用大小、数量相同的虚拟质量随机测点进行对比,随机节点为2,3,5,9,12,13,17,18。利用上

述两种虚拟质量布置方案进行损伤识别的结果如图5,其中横坐标为子结构,纵坐标为损伤系数。图中,理论值为假定的结构损伤因子,优化方案为用粒子群算法布置测点得到的结构损伤结果,随机方案为用随机测点布置方案识别的损伤因子。

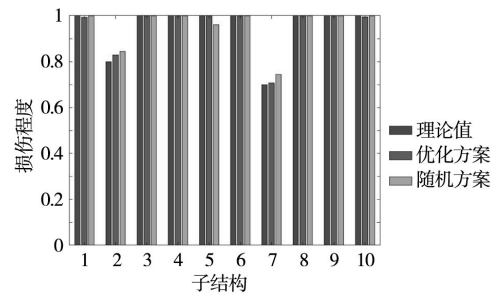


图5 识别的损伤因子

利用连续粒子群方法得到的优化方案布置虚拟质量,识别得到第2子结构与第7个子结构的损伤因子,误差分别为2.76%、0.3%。在施加5%的测量噪声下,识别结果也完全满足工程精度要求。而利用随机布置方案进行损伤识别,子结构2和子结构7的损伤识别误差较大,甚至对子结构5出现损伤误判。

## 4 结束语

基于灵敏度矩阵体积最大化的优化准则,能够获得足够的测试模态数据量,达到准确识别结构损伤的目的。连续粒子群方法在优化虚拟质量测点时,简单快速,容易得到全局最优解。应用连续粒子群算法优化的虚拟质量布置位置进行损伤识别,可以准确地识别损伤的位置及程度。

### 参考文献:

- [1] 王小娟,陈峰,等.基于混合模态数据融合的模式修正损伤识别方法[J].地震工程与工程振动,2022,42(5):83-95.
- [2] 邹云峰,卢玄东,阳劲松,等.基于应变模态响应重构的损伤识别方法[J].工程力学,2022,39(9):225-233.
- [3] 仇树茂,杨海峰,吴子燕,等.基于应变模态和稀疏贝叶斯学习的网架结构损伤识别[J].计算力学学报,2022,39(1):63-69.
- [4] Dems K. Damage identification using modal, static and thermographic analysis with additional control parameters[M]. Pergamon Press, Inc. 2010.
- [5] Holnicki-Szulc J. Smart Technologies for Safety Engineering[M]. 2008.
- [6] 侯吉林,王真真,欧进萍,等.基于附加虚拟质量的结构损伤识别方法[J].计算力学学报,2013(6):770-776.
- [7] 侯吉林,景天雨,王鹏飞,等.基于附加虚拟质量的储罐损伤识别方法[J].振动与冲击,2018,37(13):7-13.
- [8] Li D, Lu D, Hou J. Pipeline damage identification based on additional virtual masses[J]. Applied Sciences, 2017, 7(10):1040-1-16.
- [9] KAMMER D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1991, 14(2):251-259.

(上接第47页)

以上为两种方法识别统一区域的对比图,在两类图像中,所提方法在完成去噪后,识别的结果更为准确,易于识别故障节点。由此可知,基于多重分形谱的交流输电线路运行故障识别方法可准确地识别出故障节点。

## 3 结束语

将图像识别技术运用在交流输电线路运行故障识别中,可以极大地节省人力物力资源,并保证电力检修工作者的安全。将多重分形理论应用在图像识别领域是一个具有实际价值的思路,本文方法可以加强图像的去噪能力以及图像的特征提取能力。在接下来的研究中,可以尝试加大图像数据库的建立,为多重分形识别各式各样的图像奠定基础。

### 参考文献:

- [1] 孙黎霞,白景涛,周照宇,等.基于双向长短期记忆网络的电力系统暂态稳定评估[J].电力系统自动化,2020,44(13):64-72.

[10] Zhan J Z, Yu L. An Effective Independence-Improved Modal Strain Energy Method for Optimal Sensor Placement of Bridge Structures[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014 (670-671):1252-1255.

[11] Zhang J W, Liu X R, Yu Z, et al. Optimal sensor placement for hydraulic structures based on effective independence-total displacement method[J]. Journal of Vibration & Shock, 2016, 35(8):148-153.

[12] Silvers J E. Frequency response sensitivity analysis to determine sensor placement for vibration-based damage detection in structural elements[D]. Indiana, Purdue University, 2013.

[13] Bruggi M, Mariani S. Optimization of sensor placement to detect damage in flexible plates[J]. Engineering Optimization, 2013, 45(6):659-676.

[14] He L, Lian J, Ma B, et al. Optimal multi-axial sensor placement for modal identification of large structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(1):61-79.

[15] Zhang X, Wang P, Xing J C, et al. Optimal Sensor Placement of Long-Span Cable-Stayed Bridges Based on Particle Swarm Optimization Algorithm[M]// Practical Applications of Intelligent Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2014:207-217.

[16] 侯吉林,王海燕,等.基于灵敏度矩阵的虚拟质量快速优化布置方法[J].土木工程与管理学报,2019,36(5):62-67.

[17] Shi Y, Eberhart R. Modified particle swarm optimizer[C]. Proc. of IEEE ICEC conference, Anchorage, 1998:69-73.

作者简介:周润芳(1994-),女,硕士,讲师,研究方向:结构健康监测。

[2] 廖希仁,林志成,江灏,等.基于深度卷积神经网络的输电线路防鸟刺部件识别与故障检测[J].电网技术,2021,45(1):126-133.

[3] 杨杰,吴浩,董星星,等.基于电流故障分量特征和随机森林的输电线路故障类型识别[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):53-63.

[4] 饶超平,肖博文,严星,等.基于Seq2Seq技术的输电线路故障类型识别方法[J].智慧电力,2020,48(5):99-105,110.

[5] 宋亮亮,杨毅,范栋琛,等.基于改进学习矢量量化神经网络输电线路故障识别技术[J].科学技术与工程,2021,21(2):583-590.

[6] 唐艳慧,赵鹏,王承琨.基于多重分形谱的木材高光谱图像纹理分类算法[J].液晶与显示,2019,34(12):1182-1190.

[7] 王虎.基于小波包和模糊Petri网的输电线路故障类型识别方法[J].东北电力技术,2019,40(6):30-33.

[8] 陈艳茹,亓丹丹,张永学,等.拖拉机电气系统远程故障诊断模型研究[J].农机化研究,2025,47(3):242-246,253.

[9] 谢国民,黄睿灵,丁会巧.基于VMD样本熵和KELM的输电线路故障诊断[J].电子测量与仪器学报,2019,33(5):73-79.

作者简介:朱凌(1973-),男,本科,高级工程师,研究方向:数字电网。