

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107502

# 基于广义模式搜索算法的框架结构损伤检测新方法研究\*

阳 洋<sup>1,2</sup>, 李昌林<sup>1,2</sup>, 凌 园<sup>1,2</sup>, 谭小琨<sup>1,2</sup>, 罗康辉<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室 重庆 400030; 2. 重庆大学 土木工程学院 重庆 400030;  
3. 中国电建集团重庆工程有限公司 重庆 400060)

**摘要:**基于单自由度体系推导的统计矩理论,针对无模型方法识别结构损伤距离实际应用差距较大等问题,结合融入广义模式搜索算法,提出一种以融合位移四阶矩和加速度八阶矩为指标的全新框架结构两步层递式快速损伤检测方法。所提广义搜索模式算法结合无模型快速损伤定位理论形成的全新损伤诊断方法,利用融合位移四阶矩和加速度八阶矩作为指标,对12层框架结构数值模型有无噪声工况进行数值模拟,与标准结果偏差均在3%以内,证明了该方法的精确性及抗噪性效果。并与相同指标下的统计矩二范数优化方法和类贝叶斯思想方法进行对比,验证了该新方法相较其他方法在损伤检测精度、稳定程度及快速检测计算时间上的优越性。通过12层标准框架振动台试验数据,选取3个典型工况分别进行损伤诊断,并与实测报告分析对比,其结果表明该方法相对于其他方法更能反映试验工况累积而表现出来的单元损伤程度变化,凸显了新方法在工程检测中的可靠性。

**关键词:**统计矩;广义模式搜索算法;两步层递式;快速损伤检测方法

**中图分类号:** TU375.4 TH-703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 560.3540

## Research on new damage detection method of frame structures based on generalized pattern search algorithm

Yang Yang<sup>1,2</sup>, Li Changlin<sup>1,2</sup>, Ling Yuan<sup>1,2</sup>, Tan Xiaokun<sup>1,2</sup>, Luo Kanghui<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
3. PowerChina Chongqing Engineering Corporation Limited, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** Based on the statistical moment theory derived from the single degree of freedom system, aiming at the large gap between identifying the structure damage with model-free method and the practical application, incorporates the generalized pattern search algorithm, proposes a new two-step hierarchical rapid damage detection method for frame structure, which takes fusing the fourth-order displacement moment and the eighth-order acceleration moment as the index. The generalized pattern search algorithm combines with the model-free rapid damage location theory to form a new damage detection method proposed. The numerical simulations of the 12-story frame structure numerical model with or without noise were carried out, and the deviations from the standard results are all within 3%, which proves the accuracy and the anti-noise effect of this method. This method was compared with the two-norm optimization method and the quasi-Bayesian thinking method of statistical moments under the same index, the results verify the superiority of the new method in accuracy, stability and fast detection calculation time of damage detection. With the test data of the 12-story standard frame vibration table, three typical working cases were selected for damage diagnosis, and the results were compared with the actual test report and analyzed, the results show that compared with other methods, this method can reflect the accumulated damage level change caused by the test working case accumulation better, which highlights the reliability of

收稿日期:2021-02-09 Received Date: 2021-02-09

\* 基金项目:国家重点研发计划(2020YFF0217802)、国家自然科学基金(51778090,51911530244)、重庆市研究生科研创新项目(CYS19004, CYS20022)、重庆市科技局技术创新与引用发展专项(cstc2019jcsx-msxmX0015, cstc2020jcsx-msxm0907)、中国电力建设股份有限公司科技项目(KJ-2020-117)资助

the new method in engineering detection.

**Keywords:** statistical moment; generalized pattern search algorithm; two-step hierarchical; rapid damage detection method

## 0 引言

传统的无损或半破损建筑结构检测工作量大、费用高,结构某些部位人或测试仪器无法到达则无法检测;且只能检测结构表面或附近的损伤,难以获得结构实时的全面信息,基于抽样结果的整体损伤检测往往依赖于人员经验和主观判断。相对于建筑结构传统检测方法,基于动力测试进行结构损伤检测的方法一直以来是学术研究的热点,有望解决上述问题<sup>[1]</sup>。

目前,对于结构动力检测的识别方法主要分为无模型损伤检测方法和有模型损伤检测方法。焦敬品等<sup>[2]</sup>利用最大类间方差方法分析处理宽带激励下的超声波场,从而建立超声局部谐振频率与板结构缺陷尺寸的关系模型,并通过回归分析模型及实验证明该方法的可行性。李林等<sup>[3]</sup>提出一种以框架梁梁柱节点的振型转角改变量作为参考量的损伤识别方法,并通过五层三跨的框架结构数值模拟验证该方法的有效性。Pooya等<sup>[4]</sup>提出一种不需完整结构数据仅利用未损与有损状态结构的模态振型曲率差值作为损伤指标的方法,通过不同边界条件的受损梁有限元模型及试验证明该方法的有效性。阳洋等<sup>[5]</sup>提出一种在时域内利用结构加速度八阶矩作为无模型损伤指标,直接利用输出信号快速判断结构有无损伤及损伤位置的识别方法。

上述无模型方法识别结构损伤简单快速但精度有限,距离实际应用差距较大;而残余力向量法<sup>[6-7]</sup>、模态应变能<sup>[8]</sup>、直接刚度法<sup>[9]</sup>、特征值灵敏度法<sup>[10]</sup>、小波分析法<sup>[11]</sup>等有模型方法需要对结构整体参数进行分析,运用在检测局部损伤位置虽可相对准确但耗时较长且不高效率。Zhang等<sup>[12-14]</sup>提出了以四阶位移统计矩作为损伤指标的三层平面框架结构有模型损伤检测方法;进一步,阳洋等<sup>[15-20]</sup>在此基础上对比了加速度统计矩与位移统计矩特性,提出了一种以融合位移四阶矩和加速度八阶矩作为损伤指标的常规二范数及类贝叶斯思想的有模型建筑结构损伤检测方法,并通过数值算例及试验研究进行了初步验证,但噪音水平下的精度及高效性仍有待解决。

广义模式搜索算法<sup>[21-23]</sup>(generalized pattern search algorithm, GPSA)能够在局部范围快速比较相邻点函数值的大小,相对其他对目标函数值求导或梯度信息算法,该算法具有迭代及评估次数更少即达到收敛的优势,并在工程应用中表现出较好的鲁棒性<sup>[24-25]</sup>。因此,本文在统计矩理论上,结合广义模式搜索算法,综合无模型及

有模型方法两者特点,即先通过融合位移四阶矩和加速度八阶矩损伤指标无模型方法快速检测结构损伤区域,再针对局部区域采用广义模式搜索算法基于有模型方法对结构损伤区域进行损伤构件位置和程度快速精准识别,形成简单快速高效的实用动力检测新方法。该方法能够有效识别损伤位置及损伤程度,且同其他方法在识别效率、精度、计算时间上具有相当优势。本文首先阐述了新方法的基本理论及计算流程,然后利用该方法针对12层标准框架模型不同损伤工况及振动台试验3个典型工况进行了3种指标及3类损伤检测方法下的研究对比,验证了新方法在工程检测中的可靠性。

## 1 理论

### 1.1 统计矩理论

对于多自由度建筑结构,结构的运动方程可表示为:

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

其中,  $M, C, K$  分别为结构的质量矩阵, 阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t)$  分别为结构在外部激励下的加速度、速度和位移时程响应;  $\mathbf{f}(t)$  为外部激励,  $\mathbf{f}(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_N(t)]^T$ 。求解得到结构加速度响应  $\ddot{\mathbf{x}}_j = [\ddot{x}_{1j}, \ddot{x}_{2j}, \dots, \ddot{x}_{N_s j}]$  和位移响应  $\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{N_s j}]$ , 其中  $\ddot{\mathbf{x}}_j$  为第  $j$  个测点加速度响应的采样数据集合,  $\mathbf{x}_j$  为第  $j$  个测点位移响应的采样数据集合,  $N_s$  为采样点, 统计矩表示为:

$$M_{n,j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (x_{ij} - \bar{x}_j)^n \quad (2)$$

位移四阶矩与加速度八阶统计矩变化量表达式为:

$$\eta_d = \left| \frac{M_{4,d,u} - M_{4,d,d}}{M_{4,d,u}} \right|, \eta_a = \left| \frac{M_{8,a,u} - M_{8,a,d}}{M_{8,a,u}} \right| \quad (3)$$

其中,  $M_{4,d,u}, M_{8,a,u}$  为无损工况下位移四阶矩和加速度八阶统计矩,  $M_{4,d,d}, M_{8,a,d}$  为损伤工况下加速度八阶统计矩。

文献[5]中提出以加速度八阶矩作为损伤指标, 通过对比加速度八阶统计矩变化量  $\eta_a$  各层统计矩变化量的基准值  $BS_a$  (即均值  $\mu_a$  与 1.645 倍标准差  $\sigma_a$  之和) 的大小来判断损伤区域, 当所测楼层统计矩变化量大于基准值时, 则认为该楼层区域存在损伤。但由于其只考虑结构加速度未考虑结构位移时程响应, 对于多处区域损伤工况的损伤检测不敏感。本文添加位移四阶矩的变化量  $\eta_d$  作为无模型损伤指标, 并在下文数值模拟中表明, 位移四阶矩对于多处区域损伤工况能有效识别。因此,

本文将各楼层区域的位移四阶矩与加速度八阶矩的变化量均作为损伤指标,当其中一个指标统计矩变化量大于相应基准值时,则判定结构该楼层区域存在损伤。

综上,融合位移四阶矩和加速度八阶矩作为损伤指标,结合两者单一指标的变化量与基准值的关系,则能更精准识别单、多处损伤工况损伤区域,且在时间上与单指标识别相比并无增加。

## 1.2 广义模式搜索算法

广义模式搜索算法 (generalized pattern search algorithm, GPSA) 属于直接搜索法,该算法不需求解任何导数,只需在搜索范围内比较目标函数值的大小,找出最快的下降方向以及最优解,相对其它算法计算效率更高且仍能收敛。GPSA 的两个重要参数为模式矩阵  $\mathbf{P}_k$  以及步长参数  $\Delta_k$ ,其中模式矩阵  $\mathbf{P}_k$  确定搜索步  $\mathbf{s}_k$  的方向,步长参数  $\Delta_k$  确定  $\mathbf{s}_k$  的步长。因此,对于任意迭代步  $k$ ,定义以  $x_k$  为中心的试探网格点可表示为  $x_k^i = x_k + s_k^i$ ,其中,  $s_k \in \Delta_k \mathbf{P}_k$ ,搜索步长  $\Delta_k$  为任意实数。则计算过程分为两种情况:

第1种:若在某个确定的试探网格点内存在某个点满足  $f(x_k + s_k) < f(x_k)$ ,则令  $x_{k+1} = x_k + s_k$ ,且  $\Delta_{k+1} = \lambda \cdot \Delta_k$ ,其中  $\lambda \in (1, +\infty)$ 。即找到比原目标函数值小点之后,以此点作为原点扩大搜索步长范围继续搜索符合条件的点。

第2种:若在某个确定的试探网格点内始终满足  $f(x_k + s_k) > f(x_k)$ ,则令  $x_k = x_k$ ,且  $\Delta_{k+1} = \Delta_k / \lambda$ 。即仍然以该点为原点缩小搜索步长范围搜索符合条件的点。

当算法收敛时,即步长参数  $\Delta_k$  足够小,则认为上述算法已经收敛,即此时所有方向上的梯度均为 0,没有可行的下降方向,算法终止。

在此理论基础上结合统计矩理论使目标函数残差二范数  $\|F(\mathbf{E})\|^2$  达到最小, $F(\mathbf{E})$  公式为:

$$F(\mathbf{E}) = \mathbf{M}(\mathbf{E}) - \hat{\mathbf{M}} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{M}(\mathbf{E})$  为模拟统计矩,  $\hat{\mathbf{M}}$  为实测统计矩。

最后得到目标函数最小情况下结构的刚度  $\mathbf{E}$  即为结构的真实估计值,由此便可检测出结构损伤程度。

在结合 GPSA 的统计矩数值模拟研究表明,该方法在以融合位移四阶矩与加速度八阶矩为指标的损伤检测过程中,对局部楼层区域进行 GPSA 算法识别具体楼层损伤构件位置和程度,具有良好的鲁棒性,且优于其他指标,并能针对性地准确识别损伤单元的损伤程度,误差小。避免了基于 GPSA 进行全局优化识别结构损伤位置及损伤程度时耗时长且容易受相邻区域受损影响造成误判的情况发生。因此本文提出一种无模型方法快速识别损伤区域,GPSA 方法快速准确识别损伤区域具体构件位置及损伤程度的新方法。

## 1.3 新方法计算流程

基于统计矩理论,融入广义模式搜索算法,新方法按照两步层递式检测结构损伤位置及损伤程度,主要计算流程如下:

第1步:利用无模型方法检测损伤区域

1) 将水平加速度传感器布置在结构不同水平区域同一竖向位置

2) 由结构各测点的位移和加速度时程响应,对一阶频率滤波后,计算出各测点的位移四阶矩  $M_{4,d}$  以及加速度八阶矩  $M_{8,a}$ ;

3) 根据无模型方法,利用式(3)分别计算出位移四阶矩与加速度八阶矩的变化量与基准值,当某楼层的统计矩变化量大于基准值,则判定该楼层区域存在损伤;

第2步:利用 GPSA 方法针对损伤区域检测损伤构件及程度:

4) 首先建立实际结构的有限元模型,给定初始无损刚度值  $\mathbf{E}_0$ ,初始步长  $\Delta_0 > 0$

5) 计算目标函数值即残差的二范数值  $\|F(\mathbf{E}_k)\|^2$ ,  $\|F(\mathbf{E}_k)\|^2 = \|\mathbf{M} - \mathbf{M}(\mathbf{E}_k)\|^2$ ,其中  $k = 1, 2, \dots, n$ ;

6) 由模式矩阵  $\mathbf{P}_k$  与步长参数  $\Delta_0$  确定方向矩阵搜索步  $\mathbf{s}_k$ ; 计算差值  $\rho_k = \|F(\mathbf{E}_k)\|^2 - \|F(\mathbf{E}_k + \mathbf{s}_k)\|^2$ ;

7) 判断差值  $\rho_k > 0$  成立,则令  $\mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{E}_k + \mathbf{s}_k$ ,否则,  $\mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{E}_k$ ;

8) 更新步长参数  $\Delta_k$ 。当算法终止时,得到的目标函数值  $\|F(\mathbf{E}_k)\|^2$  达到最小,此时结构刚度  $\mathbf{E}_k$  即为结构真实估计值,并由此判断结构楼层区域内具体损伤构件及损伤程度。

## 2 数值模拟

本文数值模拟分析模型为 12 层平面框架模型,各层层高均为 3 m,框架梁跨度为 6 m,框架梁、柱的弹性模量均为  $3 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,其线密度分别为  $\bar{m}_{梁} = 375$  kg/m,  $\bar{m}_{柱} = 625$  kg/m,阻尼比为  $\xi_i = 0.05$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ),平面框架如图 1 所示。本文采用高斯白噪声作为环境噪音激励,考虑无噪音、40 dB 及 30 dB 3 种信噪比影响,并设置 3 个是损伤模拟工况,弹性模量  $E$  折减情况如表 1 所示

表 1 工况折减设置情况

Table 1 Working condition reduction setting situation

工况	损伤折减设置情况
工况 1	结构未设置损伤
工况 2	第 1 层梁单元损伤 20%
工况 3	第 1、2 层梁单元同时损伤 20%

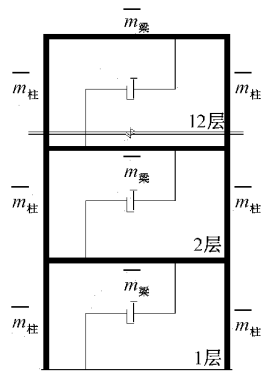
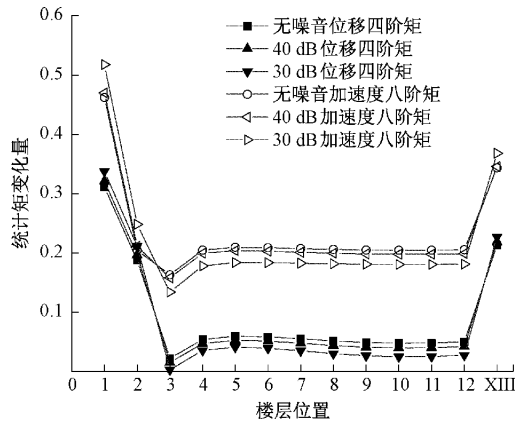


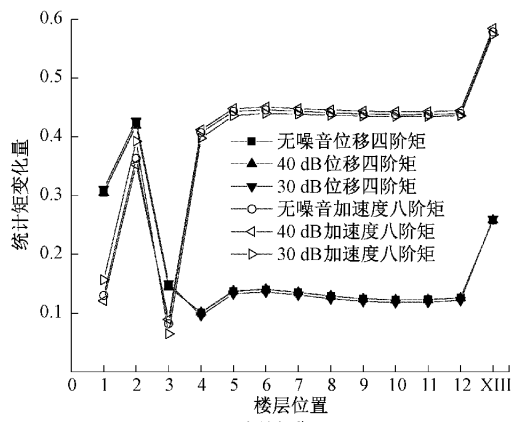
图1 十二层框架结构模型  
Fig. 1 12 story frame structure model

2.1 确定无模型方法损伤指标

本文在无模型方法<sup>[5]</sup>基础上,利用位移四阶矩加速度八阶矩共同作为指标对结构损伤位置判断。对单处损伤工况2及多处损伤工况3在无噪声、40 dB及30 dB信噪比下进行数值模拟分析,结果如图2所示,图中第1~12点为楼层,横坐标第XIII点为基准值。



(a) 单处损伤工况  
(a) Single damage working condition



(b) 多处损伤工况  
(b) Multiple damage working conditions

图2 无模型损伤工况分析

Fig. 2 Analysis of model-free damage working conditions

对于单处损伤工况,从图2(a)可以看出,加速度八阶矩第1层的统计矩变化量大于基准值,即识别出第1楼层区域存在损伤;而位移四阶矩第1层统计矩变化量明显大于基准值,第2层变化量略微小于基准值,易造成误判,但综合两个指标结果,则能够判断第1楼层区域为损伤位置,与原工况2假设相符。

对于多处损伤工况,从图2(b)可以看出,加速度八阶矩变化量均小于基准值,即无法识别出结构损伤区域。而位移四阶矩第1、2楼层的统计矩变化量大于基准值,即识别出结构第1、2楼层为损伤区域。与多处损伤工况3假设相符。

综上所述,加速度八阶矩作为指标识别单处损伤工况损伤区域时较为准确,而对多处损伤工况时损伤区域识别会存在不敏感现象;而位移四阶矩则对多处损伤工况较为敏感,单处损伤工况较加速度八阶矩敏感性差。因此,本文采用位移四阶矩与加速度八阶矩共同作为损伤指标判定结构损伤区域。

2.2 新方法损伤检测

新方法损伤检测采用两层递进式方法:第1步用无模型方法快速检测损伤区域,第2步用GPSA方法针对损伤区域识别具体构件位置及程度。

第1步:以四阶位移矩及加速度八阶矩为指标,用无模型方法识别单处损伤工况2,通过上节可知,判定结构第1层为损伤区域。

第2步:对损伤区域即结构第1层所包含的一层梁单元、左柱单元、右柱单元使用GPSA方法识别损伤程度,如图3所示。由图可知,第一层梁单元存在20%损伤,左柱、右柱不存在损伤,无噪声工况下误差在0.5%以内,40 dB工况下误差在1%以内,30 dB工况误差在3%以内,与原假设工况相符。

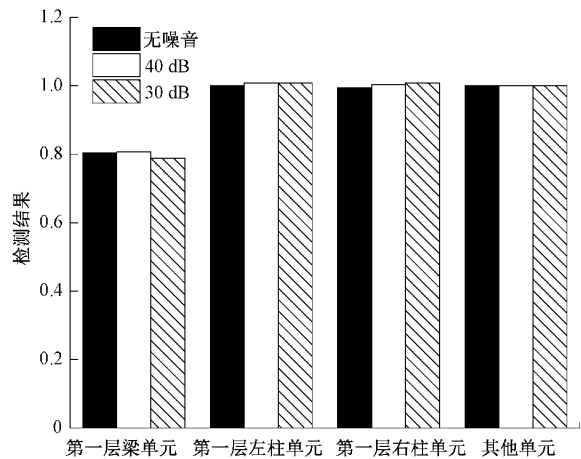
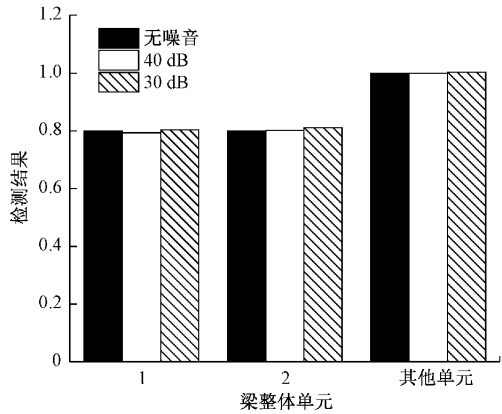


图3 工况2损伤检测结果

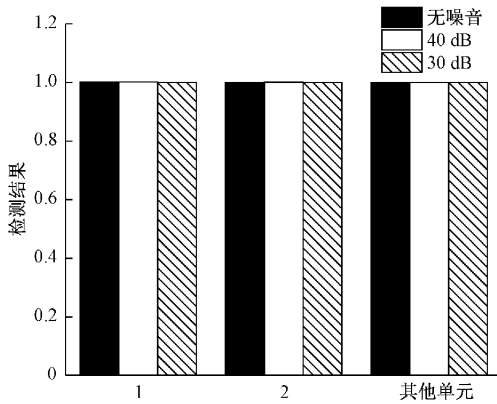
Fig. 3 Damage detection result of working condition 2



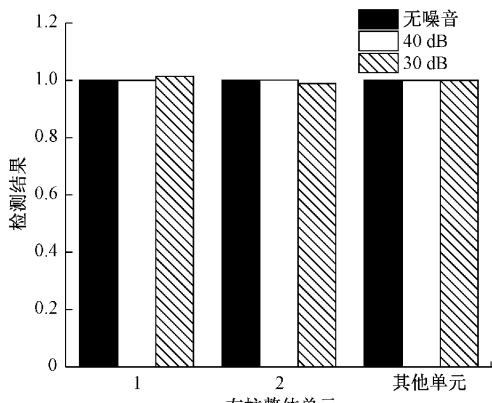
同理,对多处损伤工况 3 进行损伤检测。第 1 步:用无模型方法识别损伤区域,由上节知第 1、2 层为损伤区域。第 2 步:对损伤区域即结构第 1、2 层使用 GPSA 方法识别损伤构件及程度,如图 4 所示。由图 4 可知,第 1、2 层梁单元存在 20% 损伤,左柱、右柱不存在损伤,无噪音工况下误差在 0.5% 以内,40 dB 工况下误差在 1% 以内,30 dB 工况误差在 3% 以内,与原假设工况相符。



(a) 梁单元损伤程度  
(a) Damage degree of beam unit



(b) 左柱单元损伤程度  
(b) Damage degree of left column unit



(c) 右柱单元损伤程度  
(c) Damage degree of right column unit

图 4 工况 3 损伤检测结果

Fig. 4 Damage detection results of working condition 3

综上所述,证明该新方法即利用无模型方法检测出结构损伤区域,再利用 GPSA 方法识别结构损伤区域具体构件位置及程度有较好的精准性与抗噪性,在运用到实际工程中具有重要意义。

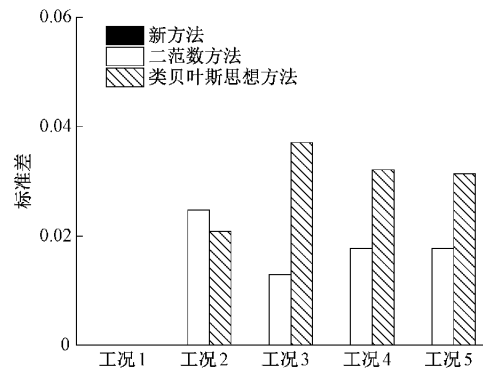
### 2.3 与同指标其他方法对比

本文提出的新方法相比其他统计矩方法无须对结构全局每个构件进行损伤检测分析,结合无模型检测损伤区域方法更快地针对有损伤构件进行损伤检测,减少对无损伤构件的重复识别,从而大大减少了损伤检测时间。本文通过比较新方法与传统二范数优化方法<sup>[18]</sup>以及运用类贝叶斯思想方法<sup>[19]</sup>在识别精度以及识别时间作对比分析,并考虑在无噪音、40 dB 噪音及 30 dB 噪音的情况下进行对比,结果如图 5 所示。定义标准差 SD 反应结构有损单元损伤检测误差情况:

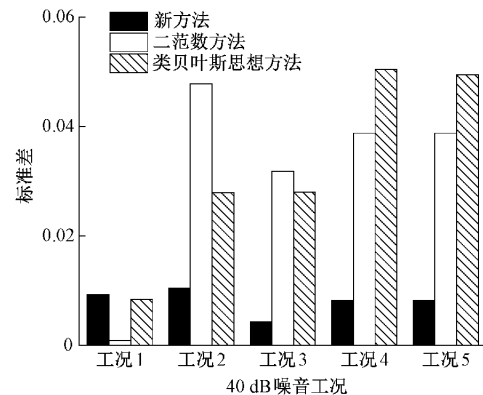
$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^i (x_i - \bar{x})^2}{i}} \quad (5)$$

其中,  $i$  为待测损伤单元数,  $x_i$  为数值模拟所得值,  $\bar{x}$  为结构单元损伤设定值,标准差  $SD$  越大,说明损伤检测结果误差越大。

同样选取工况 1~工况 5 作对比分析,并考虑不同噪音水平的影响,结果如图 5 所示。



(a) 无噪音工况对比  
(a) Comparison of noise-free working conditions



(b) 40 dB 噪音工况对比  
(b) Comparison of 40 dB-noise working conditions

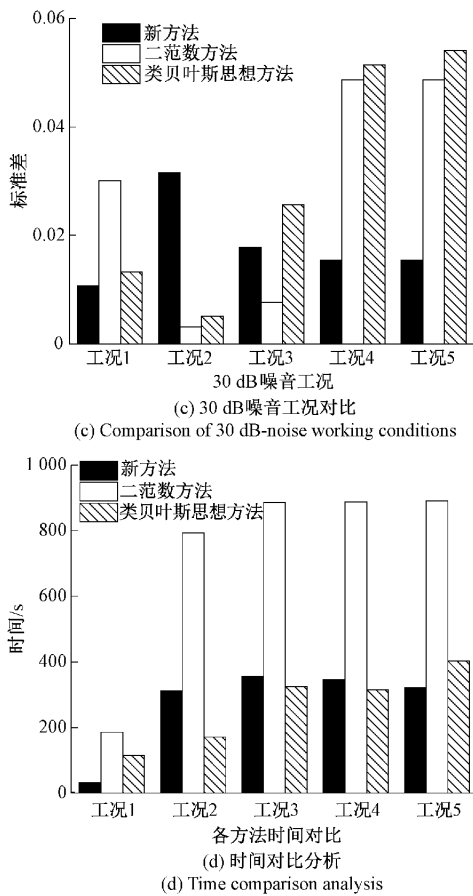


图5 各方法标准差 SD 及时间对比

Fig. 5 Comparison of standard deviation SD and time of various methods

由图5(a)~(c)所示,在考虑无噪音、40 dB 噪音以及30 dB 噪音水平的损伤检测过程中,新方法的识别损伤标准差 SD 值普遍小于二范数方法与类贝叶斯思想方法,在无噪音工况下,损伤检测标准差 SD 值误差接近于0;40 dB 噪音工况下,新方法 SD 值误差也控制在1%范围以内,远小于其他两种方法的识别误差标准差 SD 值;30 dB 噪音工况下,新方法 SD 值误差最大在3%附近,普遍小于其他两种方法 SD 值,且在双处损伤工况识别中优势格外明显。时间对比方面,如图5(d)所示,新方法耗费时间与类贝叶斯思想方法时间相差不大,但少于统计矩二范数方法。综合而言,本文方法与其他两种方法在采用相同统计矩指标的情况下,具有更好的精确性,且能运用到快速损伤检测中。

### 3 试验分析

#### 3.1 12层实验室框架模型

本文基于同济大学土木工程防灾国家重点实验室展开的12层标准框架振动台试验数据<sup>[26]</sup>进行分析,试验

模型为单跨12层钢筋混凝土(RC)框架结构,如图6所示。该结构为1/10缩尺模型,模型材料为微粒混凝土和镀锌铁丝。考虑实际结构装修及50%活载,在板上配质量块配重。标准层上每层布置19.4 kg配重,屋面层上布置19.7 kg配重。该试验分别在模型结构的基础、2层、4层、6层、8层、10层和12层的不同位置布置加速度计与应变传感器,测点位置如图6所示。试验过程中,采用上海人工波、EI Centro波、Kobe波和上海基岩波4种地震波和白噪声作为荷载激励,具体的加载方式以及检测装置设置文献<sup>[26]</sup>进行了详细说明,限于篇幅未展开。

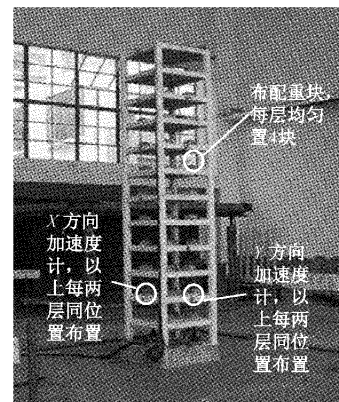


图6 振动台试验模型

Fig. 6 Vibration table test model

#### 3.2 计算结果对比

##### 1) 理论模型验证对比

按照文献<sup>[26]</sup>模型相关信息,本文按一致质量矩阵和一致刚度矩阵建立X方向平面模型,分析得到结构的前3阶频率与实测频率基本吻合,并通过模拟白噪声及地震波对理论模型的激励,对比结构的位移时程响应与位移时程响应,如图7所示,在白噪声激励作用下,两者结果曲线基本重合,表明简化的平面模型可用于优化分析。

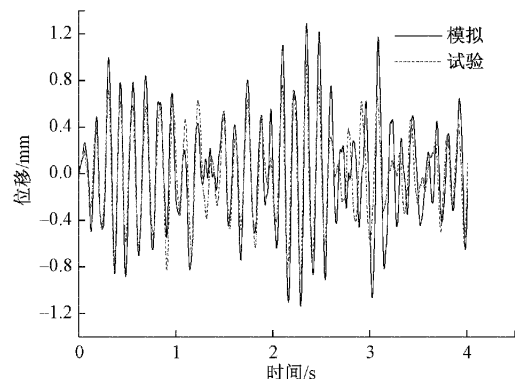


图7 白噪声作用下第十二层位移时程响应对比  
Fig. 7 Comparison of 12th storey displacement time history response under white noise

2) 试验工况横向分析

该试验共进行了 62 个工况,根据文献[26]试验现象描述,在前 8 个工况下,结构表面没有发现任何裂缝,其中工况 1 为第 1 次白噪声输入,视为无损工况;在第 9 工况上海人工波作用后,在平行于 X 振动方向的第四层框架梁的梁端首先出现细微的自上而下和自下而上发展的垂直裂缝,缝宽小于 0.05 mm;工况 16 为第 3 次白噪声输入后,在平行于 X 振动方向的 4~6 层框架梁的梁端均有垂直裂缝,缝宽约 0.08 mm,各柱中未观察到裂缝,平行于 Y 振动方向的框架梁柱中也未发现裂缝。因此,本文选取对应典型工况 1(无损工况)、工况 9(首次观察到裂缝的工况)及工况 16(观察到 3 处裂缝的工况)这三个具有代表性的工况进行分析,并同时对比本文新方法与传统二范数方法、类贝叶斯思想方法在识别上述工况的试验结果。

在工况 1 中,通过分析对应楼层传感器的位移时程响应,根据前述理论检测识别 12 层框架各层的梁、柱构件的弯曲刚度,限于篇幅,各层梁检测最终结果如图 8 所示。从图 8 可知,优化得到的结果与结构理论刚度值相差范围在 3% 以内,在工程精度 5% 内,检测结果与试验现象吻合。

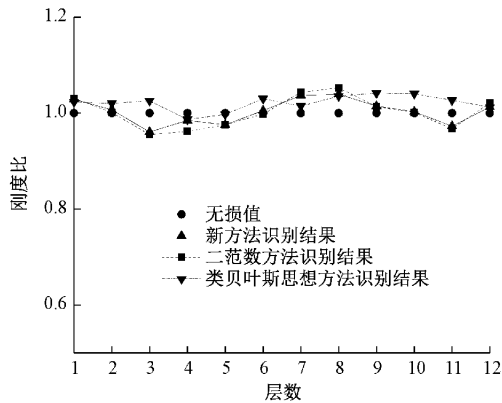


图 8 工况 1 作用下各层梁抗弯刚度比检测结果  
Fig. 8 Test result of the flexural stiffness ratios of various beams under working condition 1

工况 9 是第 1 次观察到裂缝的工况,通过分析上海人工波输入后的实测响应数据,对各层梁抗弯刚度进行检测,识别刚度与理论刚度比值如图 9 所示。从图 9 可知,第四层梁抗弯刚度折减最大,损伤程度接近 11%,其他位置损伤检测最大误差值接近 4%,均小于工程进度 5% 误差范围以内,与试验现象基本吻合。

工况 16 为第 3 次白噪声激励下观察到 X 振动方向第 4、5、6 层梁均出现裂缝的工况,同样利用实测响应数据分析,得到各层梁识别刚度与理论刚度比值如图 10 所示。识别结果表明,在第四层梁的损伤程度最为明显,损

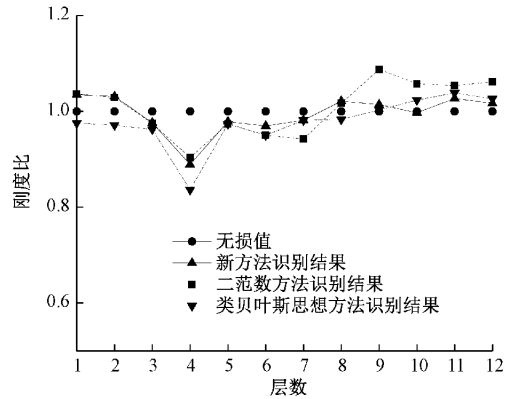


图 9 工况 9 作用下各层梁抗弯刚度比检测结果  
Fig. 9 Test result of the flexural stiffness ratios of various beams under working condition 9

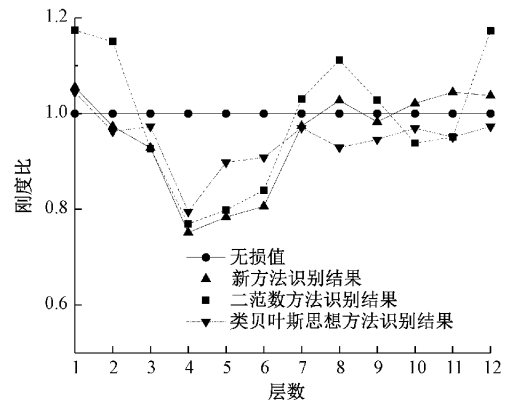


图 10 工况 16 作用下各层梁抗弯刚度比检测结果  
Fig. 10 Test result of the flexural stiffness ratios of various beams under working condition 16

伤程度接近 25%;第 5、6 层梁也有一定程度损伤,其中第五层梁损伤程度约为 21%,第六层梁损伤程度约为 19%,其他梁刚度比值误差最大为 5.5%,接近工程进度 5% 范围,与试验现象基本吻合。

通过图 8~10 的试验方法最终分析结果对比可知,本文新方法在稳定性上优于其他两种方法,表明该方法能更好运用于实际工程检测。

4 结 论

本文矩理论,利用融合位移四阶矩和加速度八阶矩为指标,结合无模型方法与 GPSA 方法形成新的损伤诊断方法,通过数值模拟验证该方法的可行性以及相对同指标其他方法的优越性,并模拟 12 层钢筋混凝土框架结构的振动台试验作损伤检测,得出以下结论:

1) 融合位移四阶矩及加速度八阶矩,适用于无模型方法与 GPSA 方法相结合的快速损伤检测指标,且具有

较好的精确性及抗噪性。

2) 对比本文新方法与二范数优化方法以及类贝叶斯思想方法在数值模拟及试验检测的结果, 本文方法在识别精度、时间及稳定性上更具优势。

3) 利用无模型快速检测损伤区域与 GPSA 方法快速精确检测损伤构件位置及程度相结合的优点, 有助于推动无模型与有模型方法相结合共同应用于实际工程。

### 参考文献

- [ 1 ] 杜江. 土木工程结构损伤诊断研究[J]. 工程技术研, 2020,5(2):54-55.  
DU J. Research on structural damage diagnosis in civil engineering [ J ]. Engineering and Technological Research, 2020,5(2):54-55.
- [ 2 ] 焦敬品, 李立, 马百义, 等. 基于超声局部谐振的板结构缺陷定量检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12):1-8.  
JIAO J P, LI L, MA B Y, et al. Quantitative detection method of plate structure defects based on ultrasonic local resonance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(12):1-8.
- [ 3 ] 李林, 袁艺宸. 基于振型转角改变的框架梁损伤检测研究[J]. 振动与冲击, 2019,38(1):180-186.  
LI L, YUAN Y CH. Damage detection for frame beams based on changes in mode rotary angles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019,38(1):180-186.
- [ 4 ] POOYA S, MASSUMI A. A novel and efficient method for damage detection in beam-like structures solely based on damaged structure data and using mode shape curvature estimation-ScienceDirect [ J ]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 91:670-694.
- [ 5 ] 阳洋, 李建雷, 梁晋秋, 等. 基于统计矩理论的无模型结构损伤检测方法研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9):196-204.  
YANG Y, LI J L, LIANG J Q, et al. Model-free structural damage detection method based on statistical moment theory[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9):196-204.
- [ 6 ] 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: 1-9 [2021-04-27].  
YANG Q W, ZHOU C, LI C H, et al. Structural damage assessment based on static residual force vector [ J ]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1-9 [2021-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.03.20201118.1050.006.html>.
- [ 7 ] WANG S N, LI J, LUO H, et al. Damage detection in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector [ J ]. Engineering Structures, 2019, 178(JAN. 1):506-520.
- [ 8 ] FAN Q. A two-step damage identification based on cross-model modal strain energy and simultaneous optimization[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 643(1), DOI:10.1088/1755-1315/643/1/012145.
- [ 9 ] YANG Y, YANG Y B. Seismic damage assessment of RC structures under shaking table tests using the modified direct stiffness calculation method [ J ]. Engineering Structures, 2017, 131(Jan. 15):574-586.
- [ 10 ] 邱飞力, 张立民, 张卫华. 改进的特征值灵敏度在结构损伤检测中的应用[J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(2):264-268+399.  
QIU F L, ZHANG L M, ZHANG W H. Structure damage detection based on improved eigen value sensitivity [ J ]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016,36(2):264-268+399.
- [ 11 ] MOJTABA H, OMID R. Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method [ J ]. Structures, 2021, 29:701-713.
- [ 12 ] ZHANG J, XU Y L, XIA Y, et al. A new statistical moment-based structural damage detection method [ J ]. Structural Engineering and Mechanics, 2008, 30(4):445-466.
- [ 13 ] XU Y L, ZHANG J, LI J C, et al. Experimental investigation on statistical moment-based structural damage detection method [ J ]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(6):555-571.
- [ 14 ] ZHANG J, XU Y L, LI J, et al. Statistical moment-based structural damage detection method in time domain[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(1):13-23.
- [ 15 ] YANG Y, ZHU Y H, WANG L L, et al. Structural damage identification of bridges from passing test vehicles[J]. Sensors, 2018, 18(11):4035.
- [ 16 ] YANG Y, CHENG Q, ZHU Y H, et al. Feasibility study of tractor-test vehicle technique for practical structural condition assessment of beam-like bridge deck [ J ]. Remote Sens. 2020, 12:114-1-34.
- [ 17 ] YANG Y, LI J L, ZHOU C H, et al. Damage detection of structures with parametric uncertainties based on fusion of statistical moments [ J ]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442(3):200-219.
- [ 18 ] 阳洋, 周财红, 王岩, 等. 基于统计矩理论的框架结构检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(1):183-191.  
YANG Y, ZHOU C H, WANG Y, et al. Structural



- damage detection of frame structures based on statistical moment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):183-191.
- [19] 阳洋,王岩,凌园,等. 基于贝叶斯思想的框架结构损伤检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 18-28.  
YANG Y, WANG Y, LING Y, et al. Research on frame structure damage detection method based on Bayesian thought[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3):18-28.
- [20] 阳洋,陈熠昕,凌园,等. 基于统计矩理论的模型修正损伤识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 217-226.  
YANG Y, CHEN Y X, LIN Y. Research on the damage identification method based on model updating of statistical moment theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12):217-226.
- [21] LI W M, JIANG Z H, WANG T L, et al. Optimization method based on generalized pattern search algorithm to identify bridge parameters indirectly by a passing vehicle [J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(2):364-380.
- [22] 石刚,井元伟,徐皓冬,等. 利用改进的遗传算法解决全局寻优问题 [J]. 仪器仪表学报, 2006 (S3): 2329-2332.  
SHI G, JING Y W, XU K D, et al. Using an improved genetical gorithm to solve gl obal optimization problem[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(S3):2329-2332.
- [23] 刘丽英. 广义模式搜索算法的一些研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.  
LIU L Y. Research on generalized pattern search algorithms [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [24] BEHROOZ S, KARAMOOZ R, SHAHRAM Y, et al. A heuristic algorithm based on line-up competition and generalized pattern search for solving integer and mixed integer non-linear optimization problems [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, 13(2): 224-242.
- [25] 李慧贇,王本德. 广义模式搜索算法在水文模型参数优选中的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2):6-9+80.  
LI H Y, WANG B D. Application of generalized pattern search algorithm in parameter optimization of hydrological models [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2):6-9+80.
- [26] 吕西林,李培振,陈跃庆. 12层钢筋混凝土标准框架振动台模型试验的完整数据 [R]. 上海:同济大学土木工程与防灾国家重点试验室, 2003:1-12.  
LYU X L, LI P ZH, CHEN Y Q. Benchmark test of a 12-storey reinforced concrete frame model on shaking table [R]. Shanghai: State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji Yniversity, 2003: 1-12.

### 作者简介



阳洋(通信作者), 2011年于同济大学获得博士学位, 现为重庆大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为工程结构检测、监测、鉴定与加固。

E-mail: yangyangcqu@cqu.edu.cn

**Yang Yang** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tongji University in 2011. Now, he is an associate professor and Ph. D. supervisor in Chongqing University. His main research interest includes engineering structural inspection, monitoring, appraisal and strengthening.