

基于模态修正策略和稀疏正则化的损伤识别*

谭颖轩, 陈衍茂, 汪利, 吕中荣

中山大学航空航天学院, 广东 广州 510006

摘要: 结构损伤识别问题中, 剪切层结构简化带来的模型误差会对识别结果带来不可预料的影响。为了尽可能地减少模型误差的影响, 提出了模态改变修正策略。并结合损伤位置的稀疏性, 引入稀疏正则化以解决损伤识别反问题的不稳定性。此外, 为了使稀疏正则化引起的额外计算成本尽可能小, 提出了一种解耦的损伤识别目标函数, 并用交替优化方法进行求解。文章通过识别结构健康监测标准模型成功验证了所提方法的正确性, 并且展示出模态改变修正策略的显著优点: 仅需要得知剪切层结构的层数即可利用测量的模态数据进行损伤识别, 适用于难以获取实际质量与刚度的真实剪切层建筑的损伤识别。

关键词: 损伤识别; 剪切层结构; 模态改变量; 稀疏正则化; 交替优化法

中图分类号: TU312+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)03-0116-07

Damage identification using modal changes correction strategy and sparse regularization

TAN Yingxuan, CHEN Yanmao, WANG Li, LU Zhongrong

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: For structural damage identification, model errors brought by the simplification of shear structure will often have bad effects on the result. To alleviate the errors, the modal measurement changes correction strategy is proposed. And because of the sparsity of damage itself, sparse regularization is invoked to solve the ill-posedness of damage identification that is an inverse problem. Moreover, in order to reduce the extra computational cost caused by sparse regularization, a new objective function is established accordingly, and the alternate optimization method is used to get the solution. The accuracy of the identification method present here are verified by identifying the SHM Benchmark problem. Additionally, a significant advantage of the modal measurement changes correction strategy has been shown. That is, only the number of floors is required to detect damage, which extremely suitable for the damage identification of real multi-story buildings whose actual mass and stiffness are hard to obtain.

Key words: damage identification; shear structure; modal measurement changes; sparse regularization; alternate optimization method

结构老化、环境侵蚀会引起结构损伤, 降低结构安全性和可靠性, 因此需要对重要工程结构进行定期检查以便及时识别损伤。结构损伤识别

可以为结构维护和修理提供指导, 从而最大限度地降低维护成本并保证结构安全^[1-2]。

基于模型的损伤识别方法, 第一步需要建立

* 收稿日期: 2020-11-27

录用日期: 2020-12-29

网络首发日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (11702336, 11972380)

作者简介: 谭颖轩 (1996年生), 女; 研究方向: 结构损伤识别; E-mail: tanyx9@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 吕中荣 (1975年生), 男; 研究方向: 结构损伤识别、群智能计算; E-mail: lvzhr@mail.sysu.edu.cn

结构的有限元离散模型。本文主要针对剪切层结构进行损伤识别。对于多层建筑, 通常将其计算模型简化为一个集中质量剪切层模型。已有文献^[3-4]证明采用这种简化的剪切层模型进行框架结构、高层建筑等损伤识别是切实可行的。值得注意的是, 将实际结构简化为剪切层模型的过程中会不可避免地会带来模型误差, 从而可能导致结构损伤识别出现不可预料的偏差。为了减少模型误差带来的不利影响, 本文提出了一种新的模态改变修正策略。该策略利用损伤前后实际结构的模态信息(包括特征频率与振型)的改变量, 对简化模型的模态信息进行修正, 使得不需要得知实际结构的刚度与质量等信息即可进行损伤识别。

在结构健康监测的领域, 基于系统输出量改变的损伤识别方法的研究已有许多^[5-8], 利用模态数据改变的也有不少。Morita等^[5]以及Zhou等^[6]通过频率数据的改变分别对五层框架结构和钢构悬臂梁进行了损伤识别。Hao等^[7]不仅单独使用频率、模态的改变率还结合二者对门式钢架进行识别, 成功验证了利用模态数据的改变进行损伤识别的可行性。

基于模型的损伤识别方法的第二步则是通过测得的数据识别结构的损伤参数。本文选取易获得且与阻尼、外荷载无关^[9]的模态数据进行损伤识别。但由于工程成本的限制, 模态数据量往往不足; 而且损伤识别作为反问题, 存在不适定性。这些都导致小小的噪声扰动就会对结果造成非常大的影响, 而正则化是应对这个问题的重要方法^[10-11]。本文结合结构损伤位置的稀疏性, 引入稀疏正则化^[11], 以降低识别结果对于误差的敏感性, 得到更准确的解。Zhou等^[6]提出了仅利用少数前几阶频率的稀疏损伤识别方法。Wang等^[12]、Zhou等^[13]也利用稀疏正则化分别建立了基于时域与频域的损伤识别新方案, 证明了稀疏正则化在损伤识别中应用的有效性。

利用模态数据, 损伤识别这一反问题可看成一个优化问题。本文结合剪切层结构的特点以及模态改变修正策略构造了一个新的目标函数, 该函数与稀疏正则化结合几乎不会产生额外的计算成本。正则化参数的选取也采用计算成本较低的阈值法, 而目标函数求解则基于交替最小化方法^[14]。最后, 对结构健康监测标准模型和真实酒店建筑进行损伤识别。结果表明, 模态改变修正策略能在结构的真实质量与刚度信息未知的情况

下快速准确地识别结构损伤位置和程度, 具有重要的实用价值。

1 基本理论

1.1 模态数据

考虑 n 层剪切层结构, 其中各层质量为 $m_1, m_2, \dots, m_n > 0$, 各层刚度为 $k_1, k_2, \dots, k_n > 0$ 。因此, 对应于测量的模态数据, 结合其质量矩阵 \mathbf{M} 和刚度矩阵 \mathbf{K} , 有特征方程

$$\mathbf{K}\phi_i = \lambda_i \mathbf{M}\phi_i, \quad (1)$$

其中 $\lambda_i = \omega_i^2$ 是第 i 个特征值, ω_i 为第 i 个自振频率, ϕ_i 是对应的模态振型。

利用实际结构的测量模态数据, 将测量的 n_e 个特征值表示为 $\hat{\lambda}_{a_1}, \hat{\lambda}_{a_2}, \dots, \hat{\lambda}_{a_{n_e}}$, 相应的 n_e 个模态振型为 $\hat{\phi}_{a_1}^S, \hat{\phi}_{a_2}^S, \dots, \hat{\phi}_{a_{n_e}}^S$ 。其中, 上标 S 为测量的自由度的集合。例如, 测量的是第一和第三个自由度, 则 $S = [1, 3]$ 。剩余的未测量的自由度的集合由 U 表示, 实际结构的整个模态振型 ϕ_a 由 S 和 U 两个部分组成, 为 $\phi_a = [\phi_a^S; \phi_a^U]$ 。

那么, 可以将损伤识别问题描述为: 根据测量的模态数据 $\hat{E}_a = \left[\left\{ \hat{\lambda}_{a_i}, \hat{\phi}_{a_i}^S \right\}, i = 1, 2, \dots, n_e \right]$, 反向识别结构的刚度(或称为损伤参数) $p = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ 。

1.2 模态改变修正策略

模态改变修正策略^[15]是一种直接修正测量数据以减小模型误差影响的策略。该策略简单有效, 不会引入额外计算量, 且允许损伤识别可在未知真实结构质量和刚度信息的情况下进行。

对于本文的剪切层结构, 平均质量和刚度参数是比例模型参数, 在损伤识别过程中可直接设为 1。然后, 引入质量和刚度均匀分布假设, 假设未损伤结构的有限元模型参数为 $m_1 = \dots = m_n = 1$, $k_1 = \dots = k_n = 1$ 。通过特征方程(1)可求得该假设模型的特征值 $\hat{\lambda}_{0i}$ 与模态振型 $\hat{\phi}_{0i}$ 。根据文献^[15], 进行如下数据修正、损伤识别。令

$$\hat{\lambda}_i = \hat{\lambda}_{0i} + \frac{\hat{\lambda}_{0i}}{\hat{\lambda}_{a_0i}} (\hat{\lambda}_{a_i} - \hat{\lambda}_{a_0i}), \quad \hat{\phi}_i^S = \hat{\phi}_{0i}^S + (\hat{\phi}_{a_i}^S - \hat{\phi}_{a_0i}^S), \quad (2)$$

其中 $\hat{\lambda}_{a_0i}, \hat{\phi}_{a_0i}^S$ 为实际结构未发生损伤时测量的模态数据, $\hat{\lambda}_{a_i}, \hat{\phi}_{a_i}^S$ 为实际结构损伤后的测量模态数据 ($i = 1, 2, \dots, n_e$, S 为测量自由度的集合)。

测量改变策略的优点在于: 除了测量的模态数据以外, 仅需要得知实际结构的层数, 而不需要其他的结构信息(包括其各层质量与刚度等),

即可依据有限元模型识别实际结构的损伤。

1.3 损伤识别目标函数

方程 (1) 所得模态数据 $E = \{ \lambda_i, \phi_i^s \}, i = 1, 2, \dots, n_e$ 是损伤参数 p 的隐函数。根据求解反问题的一般思路, 获得非线性最小二乘目标函数

$$g_{LS}(p) = \| \hat{E} - E(p) \|^2, \quad (3)$$

其中 $\| \cdot \|^2$ 为向量的 2-范数。为了使目标函数更方便地与稀疏正则化相结合, 且不产生额外的计算代价, 在这里将定义一个新的目标函数 $g(p)$ 。

首先, 将刚度矩阵 K 分解为

$$K = LDR, \quad (4)$$

其中 D 是 p 对角化获得的正定矩阵; 对于剪切层结构, L, R 是如下的可逆常数矩阵, 即

$$D = \text{diag}(p) = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & k_n \end{bmatrix},$$

$$R = L^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

然后, 由式 (1) 与 (4) 得到 p 解耦的方程

$$LDR\phi_i = \lambda_i M\phi_i, \quad DR\phi_i = \lambda_i L^{-1} M\phi_i. \quad (5)$$

最后, 考虑修正模态数据 \hat{E} , 将等式 (5) 的差值最小化, 获得最终的目标函数

$$g\left(\left\{\phi_i\right\}_{i=1}^{n_e}, p\right) = \sum_{i=1}^{n_e} (D(p)R\phi_i - \hat{\lambda}_i L^{-1} M\phi_i)^T D(p)^{-1} (D(p)R\phi_i - \hat{\lambda}_i L^{-1} M\phi_i),$$

$$\phi_i^s = \hat{\phi}_i^s, \quad i = 1, 2, \dots, n_e. \quad (6)$$

1.4 稀疏正则化

使用模态数据进行损伤识别, 会由于模态数据量的不足, 导致识别结果对测量噪声非常敏感。为了克服这个缺点, 引入稀疏正则化。通过最小化下面的 l^1 -范数项^[11], 实现稀疏约束。令

$$\| p - p_0 \|_1 = \sum_{j=1}^n |k_j - k_{0j}|, \quad (7)$$

其中 k_{0j}, k_j 分别是结构未发生损伤和发生损伤后的第 j 层刚度。在本文中, 将稀疏正则化项 (7) 合并到目标函数 $g\left(\left\{\phi_i\right\}_{i=1}^{n_e}, p\right)$ 中, 得到结合了稀疏正则化的目标函数

$$g_{\mu}\left(\left\{\phi_i\right\}_{i=1}^{n_e}, p\right) =$$

$$\sum_{i=1}^{n_e} (D(p)R\phi_i - \hat{\lambda}_i L^{-1} M\phi_i)^T D(p)^{-1} (D(p)R\phi_i - \hat{\lambda}_i L^{-1} M\phi_i) + \mu \| p - p_0 \|_1, \quad \phi_i^s = \hat{\phi}_i^s, \quad i = 1, 2, \dots, n_e, \quad (8)$$

其中 $\mu \geq 0$ 是正则化参数, 后面将对其进行合理选择。

1.5 交替最小化方法求解目标函数

交替最小化法是一个用来解决多组自变量优化问题的迭代方法^[14]。利用交替最小化方法求解损伤识别目标函数 (8) 的过程包括参数初始化 (将初始损伤参数设置为未发生损失时的结构参数 (令 $p^{(0)} = p_0$)) 和迭代求解 $p^{(k)}, k = 1, 2, \dots$ 。迭代求解分为两步:

1) 模态恢复。从不完整的模态振型中恢复完整的振型

$$\left\{\phi_i^{(k)}\right\}_{i=1}^{n_e} = \arg \min_{\phi_i^s = \hat{\phi}_i^s, i=1, 2, \dots, n_e} g_{\mu}\left(\left\{\phi_i\right\}_{i=1}^{n_e}, p^{(k-1)}\right). \quad (9)$$

2) 参数识别。最终的损伤参数可以从完整的模态数据中识别出来。

$$p^{(k)} = \arg \min_p g_{\mu}\left(\left\{\phi_i^{(k)}\right\}_{i=1}^{n_e}, p\right). \quad (10)$$

交替最小化方法求解流程以及稀疏正则化参数的选取见表 1。

2 案例验证

2.1 健康监测标准模型

为了验证模态改变修正策略的可行性, 以美国土木工程学会 (IASC)-ASCE 提出的结构健康监测标准模型 Phase I^[16-17] (图 1) 作为研究对象来进行损伤识别。该模型是一个 4 层 2×2 跨的钢框架结构。用于生成标准模型响应数据的有限元模型有 12 个自由度和 120 个自由度两种。共有 6 种损伤工况: 除去第一层所有斜撑、除去第一和第三层所有斜撑、除去第一层一根斜撑、除去第一和第三层各一根斜撑、除去第一和第三层各一根斜撑且第一层一个梁柱连接处松动、第一层一根斜撑损失 1/3 的刚度。

在损伤识别中, 该模型可简化为一个 $n = 4$ 层高的剪切层模型 (无论是 x 方向或是 y 方向)。根据模态改变修正策略, 其质量矩阵将设为主对角线全为 1 的单位矩阵 (即 $m_1 = m_2 = \dots = m_n = 1$), 且未发生损失的结构初始刚度也设为 $k_{01} = k_{02} = \dots = k_{0n} = 1$ 。值得注意的是, 模态改变修正策略采取了类似于“无量纲化”的思路, 无需获知结构的真实质量、刚度信息, 只需大致的质量与刚度分布

表1 损伤识别方法

Table 1 Algorithm of damage identification

```

% 初始参数设置
- 建立  $n$  层剪切层有限元模型, 设定模型质量与刚度矩阵  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}$ ,
- 设定未损伤结构损伤参数  $p_0 = [1, \dots, 1]$ ,
- 定义容许误差  $\text{tol} = 1e - 6$  和最大迭代次数  $N_{\max}$  ( $=1\ 000$ ), 确定两个阈值系数  $l_{\max}$ ,  $\alpha$ ,
- 引入测量的模态数据  $\{\hat{\lambda}_{ai}, \hat{\phi}_{ai}^S\}, i = 1, 2, \dots, n_e$ ,
- 计算修正数据  $\hat{\lambda}_i = \hat{\lambda}_{0i} + \hat{\lambda}_{0i}/\hat{\lambda}_{a0i}(\hat{\lambda}_{ai} - \hat{\lambda}_{a0i}), \hat{\phi}_i^S = \hat{\phi}_{0i}^S + (\hat{\phi}_{ai}^S - \hat{\phi}_{a0i}^S)$ ,
% 交替最小化方法 (9)-(10)
- 循环执行  $k = 1: N_{\max}$ 
% 模态恢复
- 循环执行  $i = 1: n_e$ 
-  $\mathbf{A}_i = (\mathbf{D}(p^{(k-1)})\mathbf{R} - \hat{\lambda}_i\mathbf{L}^{-1}\mathbf{M})^T \mathbf{D}(p^{(k-1)})^{-1}(\mathbf{D}(p^{(k-1)})\mathbf{R} - \hat{\lambda}_i\mathbf{L}^{-1}\mathbf{M})$ ,
-  $\Phi_i^{(k)} = [\hat{\phi}_i^S; -\mathbf{A}_{iUU}^{-1}\mathbf{A}_{iUS}\hat{\phi}_i^S]$ ,
- 结束  $i$  取值循环
% 正则化参数选择
- 循环执行  $j = 1: n$   $a_j = \sum_{i=1}^{n_e} (\mathbf{R}\phi_i^{(k)})_j^2, b_j = \sum_{i=1}^{n_e} (\hat{\lambda}_i\mathbf{L}^{-1}\mathbf{M}\phi_i^{(k)})_j^2$  结束  $j$  取值循环
- 计算阈值集  $\{\mu_{jcr} = |b_j/k_0^2 - a_j|, j = 1, \dots, n\}$ , 并按降序排列  $\{\hat{\mu}_{1cr} \geq \dots \geq \hat{\mu}_{ncr}\}$ ,
-  $l = 2$ , 判断是否满足  $l < l_{\max}, \hat{\mu}_{(l-1)cr} < \alpha\hat{\mu}_{lcr}$  若不满足则  $l = l + 1$ , 直至满足
-  $\mu = \hat{\mu}_{lcr}$ ,
% 参数更新
- 循环执行  $j = 1: n$ 
- 若  $\mu < b_j/k_0^2 - a_j$  则  $k_j^{(k)} = \sqrt{b_j/(a_j + \mu)}$ ,
- 若  $\mu < a_j - b_j/k_0^2$  则  $k_j^{(k)} = \sqrt{b_j/(a_j - \mu)}$ ,
- 否则  $k_j^{(k)} = k_{0j}$ 
- 结束  $j$  取值循环
% 收敛性判定
- 若满足  $\|p^{(k)} - p^{(k-1)}\| / \|p^{(0)}\| \leq \text{tol}$ , 则终止循环
- 结束  $k$  取值循环

```

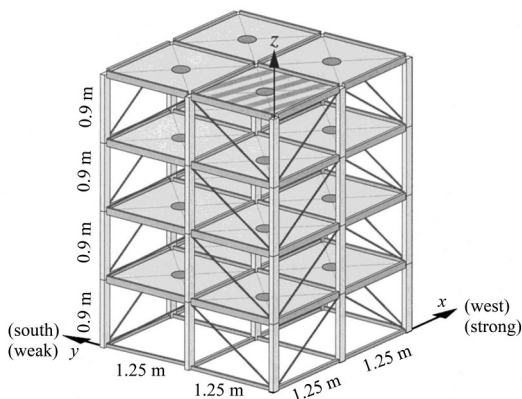


图1 标准模型 Phase I

Fig. 1 Benchmark model of Phase I

(通常取为均匀分布)即可进行损伤识别,这正是模态改变修正策略的优势所在。

为了更好地讨论结构简化带来的误差对识别结果的影响,对标准模型的 case 2、case 6 进行损伤识别。这 2 个案例的数据由更为复杂的 120 个自由度有限元模型生成。两个案例在不同工况的频率数据^[18]见表 2。

图 2-3 是不同工况的识别结果。从 case 2 的识别结果(图 2(b))中可以看出,与参考文献结果(图 3(a))在少数楼层识别出了小损伤相比,本文方法仅在有损伤的楼层识别出了损伤。

图 2(c)中,在识别 case 6 工况 1 (仅第一层有

表 2 第 2 和第 6 个模拟仿真案例在不同工况的频率数据
Table 2 Natural frequencies for case 2 and case 6

案例	损伤工况	各阶频率数据/Hz			
		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
case 2 (y 方向)	无损伤	8.21	22.6	35.5	46.1
	工况 1	4.91	18.3	34.0	45.8
	工况 2	4.36	10.3	33.8	37.4
case 6 (x 方向)	无损伤	8.41	23.9	39.4	54.9
	工况 1	6.55	20.8	37.7	54.5
	工况 2	5.72	15.1	37.4	47.7
	工况 3	8.41	23.9	39.4	54.9
	工况 4	8.12	23.0	39.1	53.1
	工况 5	8.12	23.0	39.1	53.1
工况 6	8.41	23.9	39.4	54.9	

损伤) 时, 本文方法没有出现参考文献(图 3(b)) 中第三层的虚假损伤, 体现出本文方法在这个算例损伤位置识别上的优越性; 与参考文献结果的相比, 其余工况的识别结果也识别得很好。

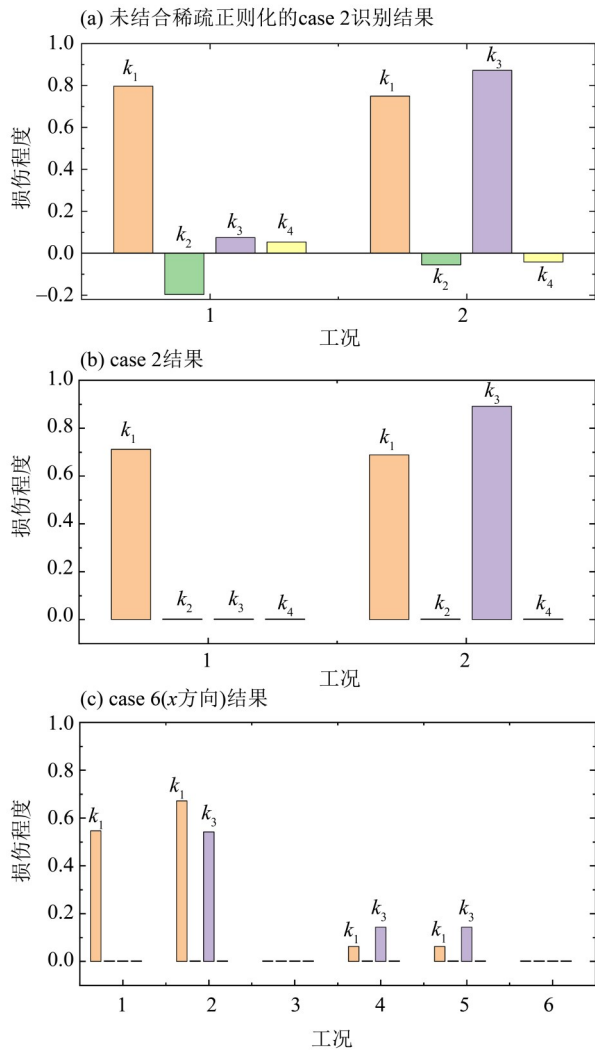


图 2 标准模型两个案例的本文方法识别结果
Fig. 2 Identification results of two cases in Benchmark model by the proposed method

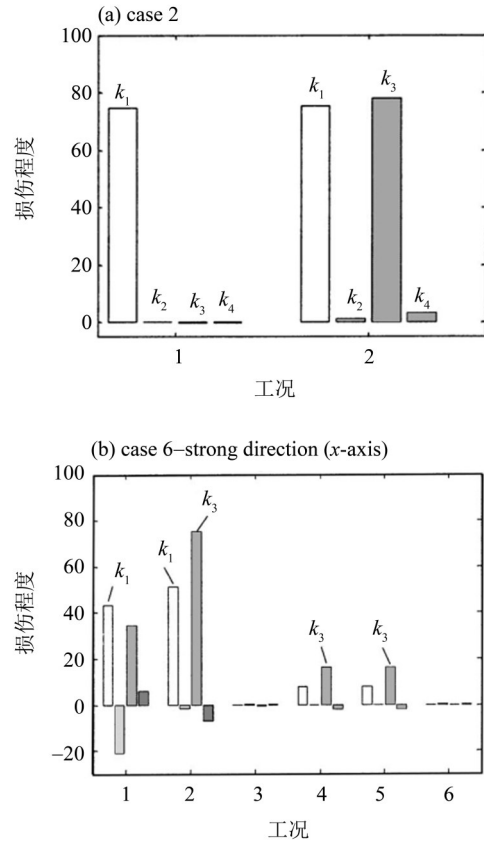


图 3 标准模型两个案例在参考文献^[18]的识别结果
Fig. 3 Identification results of two cases in Benchmark model from Ref^[18]

对比图 2(a)与图 2(b), 可看出未结合稀疏正则化的识别结果在未损位置均出现了虚假损伤。而结合稀疏正则化之后可以很好地提高鲁棒性, 有效减少噪声对结果的影响, 准确识别出损伤位置及其程度。

不仅如此, 从这个算例可以明显看出模式改变修正策略的优势, 即: 仅需要得知剪切层算例模型的层数, 不需要真实质量、刚度等信息, 就可以通过损伤前后测量的模态数据对结构进行损伤识别。

2.2 算例

本例是一个位于美国加州的七层假日酒店^[19]的震后损伤评估问题。图 4 是该建筑的剪切层模型, 布设的 16 个加速度计位置均已表示在图中。它在 1994 年经历了洛杉矶北岭大地震及一些余震

后, 发生了严重的损坏。具体裂纹情况见图5。

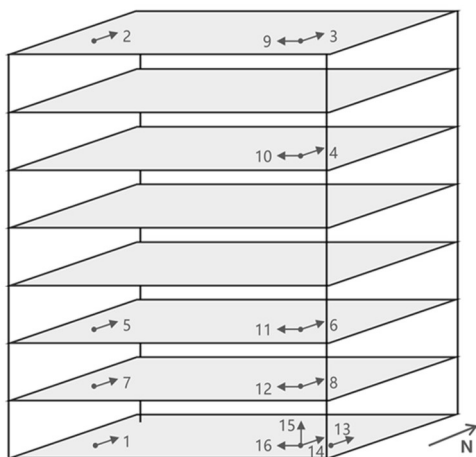


图4 某七层酒店建筑的剪切层模型

Fig. 4 Shear model of a 7-story building

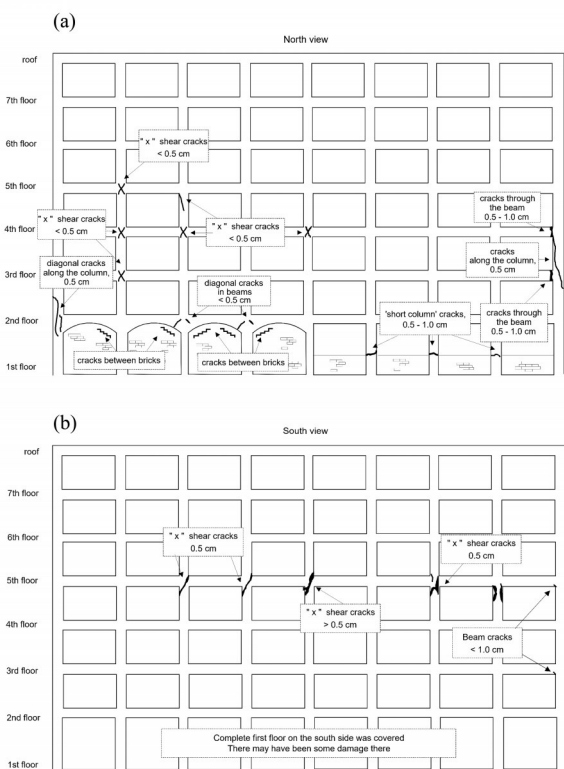


图5 七层酒店建筑的南北外部框架损伤示意图

Fig. 5 Schematic representation of damage in the exterior north and south frames of the 7-story building

这里要识别北岭大地震后该酒店建筑出现的损伤情况。用于损伤识别的纵向模态数据通过识别第9、10、11、12号加速度计的响应得出^[20], 如表3所示。利用本文方法, 结合第一阶频率与振型数据对该建筑进行损伤识别, 结果见图6。

在图5的南北外框架损伤示意图中可以看出,

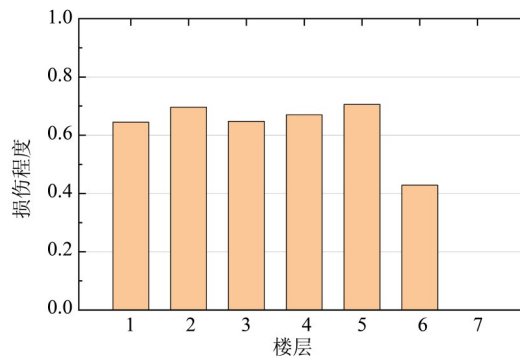


图6 七层酒店建筑的损伤识别结果

Fig. 6 Identification result of the 7-story building by the proposed method

表3 七层酒店建筑于北岭地震前后的第一阶模态数据

Table 3 Modal data of the 7-story building before and after the Northridge earthquake

楼层	地震前	地震后
2	0.165	0.163
3	0.354	0.384
6	0.884	0.947
7	1.000	1.000

在北面的外部框架上, 第一层至第五层均存在不少可视损伤(裂纹); 而在南面, 第三与第五层存在可视损伤。对比识别结果(图6), 在出现了可视损伤的楼层(第一至第五层)均识别出了较大损伤; 而且由于第六至第七层没有可视损伤, 因此尽管在第六层识别出损伤, 其程度也比出现可视损伤的楼层明显较小。在文献[20]通过SDI (Story Damage Index) 法对该建筑进行损伤识别的结果中, 一层损伤值是0.64, 二层是0.70, 三至五层的平均损伤是0.67, 六至七层的平均损伤是0.25, 可以看出前五层的数据与本文的识别结果基本一致, 而六、七层的平均损伤也与本文的识别结果非常接近, 这体现出了本文方法对于该真实结构损伤识别的准确性。

不同于实验室的框架结构, 对于真实建筑而言, 想要获取每一层的刚度信息是非常困难的。而本文方法不需要得知建筑的刚度信息就能较为准确地识别出它的损伤, 这对于真实建筑的损伤识别有非常重要的意义。

3 结论

本文介绍了一种新的剪切层结构损伤识别方法, 它使用模态改变修正策略处理模型误差, 引

入稀疏正则化克服损伤识别的非适定性。通过健康监测标准案例和一个真实建筑案例,验证了方法的可行性与准确性。值得注意的是,本文的方法仅需要得知结构的层数,不需要结构其他的信息,包括真实刚度与质量等,就可以通过损伤前

后测量的模态信息识别结构损伤。对于实际工程结构,获得质量、刚度信息的过程代价高昂且十分复杂,而本文的方法避开了这个复杂的过程,可直接应用于真实结构的损伤快速评估,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] FAN W, QIAO P. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study [J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(1): 83-111.
- [2] 朱宏平,余璟,张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. *工程力学*, 2011, 28(2): 1-11.
- [3] 李洪泉,欧进萍. 剪切型钢筋混凝土结构的地震损伤识别方法[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1996, 29(2): 8-12.
- [4] 姜增国,瞿伟廉,闵志华. 基于小波包分析的结构损伤定位方法[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(11): 94-97.
- [5] MORITA K, TESHIGAWARA M, HAMAMOTO T. Detection and estimation of damage to steel frames through shaking table tests [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2005, 12(3/4): 357-380.
- [6] ZHOU X Q, XIA Y, WENG S. L1 regularization approach to structural damage detection using frequency data [J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(6): 571-582.
- [7] HAO H, XIA Y. Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, 16(3): 222-229.
- [8] WANG X, HU N, FUKUNAGA H, et al. Structural damage identification using static test data and changes in frequencies [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(6): 610-621.
- [9] WANG L, LU Z R. Sensitivity-free damage identification based on incomplete modal data, sparse regularization and alternating minimization approach [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 43-68.
- [10] WEBER B, PAULTRE P, PROULX J. Structural damage detection using nonlinear parameter identification with Tikhonov regularization [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2007, 14(3): 406-427.
- [11] ZHANG C D, XU Y L. Comparative studies on damage identification with Tikhonov regularization and sparse regularization [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(3): 560-579.
- [12] WANG Y, HAO H. Damage identification scheme based on compressive sensing [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 29(2): 04014037.
- [13] ZHOU S, BAO Y, LI H, et al. Structural damage identification based on substructure sensitivity and l_1 sparse regularization [C]// *Proceedings of SPIE*, 2013.
- [14] BECK A. On the convergence of alternating minimization for convex programming with applications to iteratively reweighted least squares and decomposition schemes [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2015, 25(1): 185-209.
- [15] LU Z R, YIN Z, ZHOU J, et al. A simple and effective measurement changes correction strategy for damage identification with aleatoric and epistemic model errors [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 20(3): 1-25.
- [16] CANDÈS E J, WAKIN M B, BOYD S P. Enhancing sparsity by reweighted L1 minimization [J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2008, 14(5/6): 877-905.
- [17] JOHNSON E A, LAM H F, KATAFYGIOTIS L S, et al. Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1): 3-15.
- [18] CAICEDO J M, DYKE S J, JOHNSON E A. Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: Simulated data [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1): 49-60.
- [19] TRIFUNAC M D, IVANOVIC S S, TODOROVSKA M I. Instrumented 7-storey reinforced concrete building in Van Nuys, California: Description of the damage from the 1994 Northridge Earthquake and strong motion data [R]. Report CE 99, 1999: 2.
- [20] WANG J F, LIN C C, YEN S M. A story damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29: 2143-2157.