April 2023

DOI: 10.7511/jslx20210929001

一种仅使用静态响应的梁结构损伤识别方法

汤彭恩布, 吴柏生*, 钟慧湘

(广东工业大学 机电工程学院,广州 510006)

摘 要:提出了一种仅使用静态响应的梁结构损伤识别方法。此方法引入了一种倒数变量。采用倒数变量后,位移的泰勒展开式中仅含有倒数增量的线性项。构建了基于倒数变量的损伤求解模型,然后应用非负最小二乘法求解损伤参数,可同时确定损伤位置和程度。与未引用倒数变量的方法对比,求解的损伤参数更加逼近真实的损伤情况,且讨论了噪声的影响。通过数值模拟对三跨连续梁结构进行仿真分析,结果表明,提出的方法能够对梁结构的损伤做出有效识别。

关键词:静态响应;损伤识别;倒数变量;非负最小二乘法中图分类号:TU311;U446;O346.5 **文献标志码:**A

文章编号:1007-4708(2023)02-0289-06

1 引 言

结构损伤识别在土木、机械和航空航天等多个 工程领域都受到了广泛的关注。到目前为止,已经 进行了广泛的研究并且提出了大量的结构损伤识 别技术。这些技术大致分为静力学方法和动力学 方法两类。静力学方法利用结构的静态响应,如位 移和应变,来定位和估计结构损坏的严重程度。动 力学方法利用频率和模态振型等动态特性来检测 结构中的损伤[1-6]。这两种方法通常都是基于有限 元分析和实验测试。其主要思想是,结构的质量、 阻尼和刚度特性在结构损伤发生后将产生变化,因 此结构的静动力响应都会发生变化,从而可以用于 判断结构损伤的位置和大小。静力学方法比动力 学方法更简单,因为静态响应的变化只涉及刚度特 性,而动力响应的变化是由质量、阻尼和刚度特性 的改变引起的。为了解决这个问题,大多数动力学 方法忽略阻尼和质量变化。

在静力学损伤识别方面,国内外学者做了深入的研究。Yang 等[7]利用柔度矩阵分解技术,以解耦的方式处理损伤的位置和程度。Nogal 等[8]提出了利用可观察性技术从桥梁结构静载试验响应中进行损伤检测的方法。欧阳煜等[9]基于梁弯曲挠度的三次样条插值,利用应变能损伤定位指标和有限元损伤状态方程,建立了梁损伤识别的两阶段

的横向位移的解,提出了一个损伤识别程序,并利用蒙特卡洛模拟研究了测量误差对损伤识别效果的影响。黄斌等[11]考虑梁式结构初始模型误差和测量误差的影响,建立了关于随机损伤指数的控制方程,再组合摄动法和 L1 正则化方法求解该方程来识别结构的损伤。Prakash等[12]利用虚功原理构建梁结构损伤前后挠度变化的解析表达式,提出了基于挠度变化的桥梁结构健康监测方法。

唐盛华等[13]提出了基于支座反力影响线曲率差分

的损伤定位方法,进一步建立了损伤程度计算方法。

方法。Caddemi 等[10]基于局部柔性的欧拉-伯努利

梁模型,利用一般边界条件下由静态载荷作用产生

本文提出了一种仅使用静态响应的梁结构损伤识别方法。这种方法引入了一种倒数变量,利用静态位移对于倒数变量的敏感性来建立损伤求解模型,再通过非负最小二乘法[14]来求解损伤参数。本文还研究了噪声的影响。通过数值模拟对三跨连续梁结构进行仿真分析,验证了该方法的可行性。

2 损伤参数识别原理

假设结构损伤只引起结构刚度的降低。进一步假设损伤后的自由度不变。根据有限元理论,结构整体刚度矩阵可以表示成各单元刚度矩阵之和,所以受损结构的整体刚度矩阵 K_a 可以写为

$$\mathbf{K}_{d} = \sum_{i=1}^{nl} (1 - \alpha_{i}) C_{i0} \widetilde{\mathbf{K}}_{ui}$$
 (1)

式中 \mathbf{K}_{d} 为 $n \times n$ 的矩阵,n 为结构的整体自由度,nl 为结构的单元数, C_{i0} \mathbf{K}_{ui} 为未损伤结构第 i 个单元在全局坐标下的单元刚度矩阵, C_{i0} 为依赖于单

收稿日期:2021-09-29;**修改稿收到日期**:2021-11-16. **基金项目**:国家自然科学基金(11672118)资助项目.

作者简介:吴柏生*(1963-),男,博士,教授

⁽E-mail: wubs@gdut. edu. cn).

元横截面性质的刚度参数, $\tilde{\mathbf{K}}_{ui}$ 与单元横截面性质 无关, α_i (0 $\leq \alpha_i <$ 1) 为第 i单元损伤程度。当 $\alpha_i \geq$ 0.05 时,认为该单元损伤。

注意到结构优化中设计变量的选择可以改变 泰勒展开的形式,从而影响到基于泰勒展开的线性 近似的精度^[15]。利用结构力学的虚功原理可知梁 的位移可表示成各单元刚度倒数的线性组合^[16]。 对本文考虑的梁损伤问题,引入倒数变量为

$$1/s_i = (1 - \alpha_i) C_{i0}$$
 (2)

方程(1)可写为

$$\mathbf{K}_{d}(\mathbf{s}) = \sum_{i=1}^{nl} (1/s_i) \widetilde{\mathbf{K}}_{ui}$$
 (3)

式中 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_{nl})^T$,并且结构未损伤时, $s_i = s_{i0} = 1/C_{i0}$ 。

方程(3)两端对 s_i 求导可得

$$\partial \mathbf{K}_d(\mathbf{s})/\partial s_i = -(1/s_i^2)\widetilde{\mathbf{K}}_{ui}$$
 (4)

令 \mathbf{F}_d 表示损伤结构的柔度矩阵,则有

$$\mathbf{F}_d(\mathbf{s}) \ \mathbf{K}_d(\mathbf{s}) = \mathbf{I} \tag{5}$$

式中 \mathbf{I} 为 $n \times n$ 的单位矩阵。方程(5) 两端对 s_i 求导得到

$$\frac{\partial \mathbf{F}_d(\mathbf{s})}{\partial s_i} \mathbf{K}_d(\mathbf{s}) + \mathbf{F}_d(\mathbf{s}) \frac{\partial \mathbf{K}_d(\mathbf{s})}{\partial s_i} = 0$$
 (6)

在试验载荷 $f_j(j=1,2,\cdots,l)$ 的作用下,损伤结构的静力平衡方程可以写为

$$\mathbf{K}_d(\mathbf{s}) \mathbf{u}_j^d(\mathbf{s}) = \mathbf{f}_j$$
 $(j=1,2,\cdots,l)$ (7) 式中 l 为试验载荷工况数。

通过方程(5,7)可以得到

$$\mathbf{u}_{i}^{d}(\mathbf{s}) = \mathbf{F}_{d}(\mathbf{s}) \mathbf{f}_{i} \qquad (j=1,2,\cdots,l) \quad (8)$$

将方程(8)在 s_{i0} ($i=1,2,\cdots,nl$) 处进行泰勒 展开,由于梁的位移可表示成各单元刚度倒数的线性组合,所以泰勒展开中的高阶项(二阶及其以上项)为零。利用方程(4,6)可以求得损伤结构在试验载荷下的位移,

$$\mathbf{u}_{j}^{d}(\mathbf{s}) = \left[\mathbf{F}_{u} + \sum_{i=1}^{nl} (s_{i} - s_{i0}) \frac{\partial \mathbf{F}_{d}(\mathbf{s})}{\partial s_{i}} \Big|_{s_{i} = s_{i0}} \right] \mathbf{f}_{j} = \mathbf{g}_{j} + \sum_{i=1}^{nl} (s_{i} - s_{i0}) \left[\left(\frac{1}{s_{i0}^{2}} \right) \mathbf{F}_{u} \widetilde{\mathbf{K}}_{ui} \mathbf{g}_{j} \right]$$
(9)

式中 \mathbf{g}_j 可通过求解 $\mathbf{K}_u \mathbf{g}_j = \mathbf{f}_j (j=1,2,\cdots,l)$ 得到。 结构发生损伤前后的位移变化

$$\Delta \mathbf{u}_{j} = \mathbf{u}_{j}^{d} - \mathbf{g}_{j} = \sum_{i=1}^{nl} \left(s_{i} - s_{i0} \right) \left[\left(\frac{1}{s_{i0}^{2}} \right) \mathbf{F}_{u} \widetilde{\mathbf{K}}_{ui} \mathbf{g}_{j} \right]$$
(10)

结构损伤前后的位移变化也可以表示成

$$\Delta \mathbf{u}_j = \mathbf{u}_j^m - \mathbf{g}_j \qquad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (11)$$

式中 \mathbf{u}_{i}^{m} 为结构损伤后测量的位移, \mathbf{g}_{i} 为结构损伤 前的位移,两者都是在相同的试验载荷 $\mathbf{f}_{i}(j=1,2,$

···, l) 作用下获得。将损伤参数表示为

$$\beta_i = s_i - s_{i0} \quad (i = 1, 2, \dots, nl) \quad (12)$$

注意结构损伤后,相应的 $s_i \ge s_{i0} (i = 1, 2, \dots, nl)$, 也就是 $\beta_i \ge 0 (i = 1, 2, \dots, nl)$ 。

组合方程(10,11),可将结构的损伤参数求解转换成求解函数(13)的非负最小二乘解问题,

$$J(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{j=1}^{l} \left\| \sum_{i=1}^{nl} \beta_i \boldsymbol{h}_{ij} - (\boldsymbol{u}_j^m - \boldsymbol{g}_j) \right\|^2 =$$

$$\left\| \sum_{i=1}^{nl} \beta_i \boldsymbol{H}_i - (\boldsymbol{U}^m - \boldsymbol{G}) \right\|^2$$
(13)

式中
$$\mathbf{H}_{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{i1} \\ \mathbf{h}_{i2} \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{il} \end{bmatrix}, \mathbf{U}^{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{1}^{m} \\ \mathbf{u}_{2}^{m} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{l}^{m} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{1} \\ \mathbf{g}_{2} \\ \vdots \\ \mathbf{g}_{l} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{s}_{2}^{2}} \end{bmatrix} \mathbf{F}_{u} \widetilde{\mathbf{K}}_{ui} \mathbf{g}_{j}$$

在实际应用中,由于用于测量静态响应的传感器的数量是有限的,因而难以测得所有节点的位移,故须对上述求解模型进行修正,以解决不能获知全部节点静态位移的情况。方程(13)修正如下,

$$\overline{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\beta}) = \left\| \sum_{i=1}^{nl} \beta_i \, \overline{\mathbf{H}}_i - (\overline{\mathbf{U}}^m - \overline{\mathbf{G}}) \right\|^2 \tag{14}$$

式中
$$\overline{\mathbf{H}}_i = \begin{bmatrix} \overline{m{h}}_{i_1} \\ \overline{m{h}}_{i_2} \\ \vdots \\ \overline{m{h}}_{i_l} \end{bmatrix}$$
, $\overline{\mathbf{U}}^m = \begin{bmatrix} \overline{m{u}}_1^m \\ \overline{m{u}}_2^m \\ \vdots \\ \overline{m{u}}_l^m \end{bmatrix}$, $\overline{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \overline{m{g}}_1 \\ \overline{m{g}}_2 \\ \vdots \\ \overline{m{g}}_l \end{bmatrix}$ 。其中,

 $\bar{\mathbf{h}}_{ij}$, $\bar{\mathbf{u}}_{i}^{m}$ 和 $\bar{\mathbf{g}}_{j}$ 分别为对应的第 $j(j=1,2,\cdots,l)$ 个试验载荷下获得的 \mathbf{h}_{ij} , \mathbf{u}_{i}^{m} 和 $\bar{\mathbf{g}}_{i}$ 的子集。

最后通过非负最小二乘法求解方程(14)获得结构的损伤信息。在获得 β_i 后,可通过方程(15)得到结构损伤参数 α_i ($i=1,\cdots,nl$)。

$$\alpha_{i} = 1 - \frac{1}{C_{i0} s_{i}} = \frac{C_{i0} \beta_{i}}{1 + C_{i0} \beta_{i}} \quad (i = 1, \dots, nl) \quad (15)$$

3 数值验证

采用三跨连续梁结构^[13]验证提出的仅使用静态响应的梁结构损伤识别方法的有效性。梁结构静态响应是通过对相应的结构进行有限元静力学分析所得。应用 MATLAB 建立结构模型并模拟了结构的损伤以及载荷的施加。同时还研究了测量噪声对本文方法性能的影响。

三跨连续梁的跨径布置为 50 cm + 75 cm + 50 cm,每 5 cm划分一个单元,共 35 个单元,如图 1所示。图 1中梁上方的数字为单元编号,下方的数字为节点编号,梁横截面积尺寸为 $b \times h = 6 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$,材料的弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$,密度为 7860 kg/m^3 。

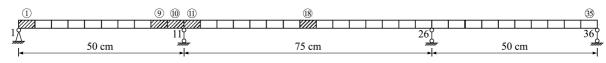


图 1 三跨连续梁模型

Fig. 1 Three span continuous beam model

通过降低梁单元刚度来模拟梁结构中的损伤,如裂纹的产生。设置移动载荷 P=500 N,方向垂直向下,依次经过每个节点位置,从而获得多组单个载荷作用下梁结构的静态响应。

设置 1 号、9 号、10 号、11 号和 18 号单元发生 损伤,具体的结构损伤工况列入表 1,损伤工况 1 模拟损伤单元均是孤立的情况,损伤工况 2 模拟多 个相邻单元同时损伤的情况。

传感器的数量设定为 2 个,分别测量节点 5 与 节点 18 处的位移。

表 1 三跨连续梁单元损伤工况

Tab. 1 Element damage condition of a three-span continuous beam

损伤工况	损伤位置	损伤程度/%
1	1,10,18	30,30,30
2	9,10,11	20,30,30

3.1 无噪声损伤识别结果

首先考虑无噪声情况。通过设置不同的损伤 工况来比较引入倒数变量前后对损伤识别结果的 影响。损伤识别结果如图 2 和图 3 所示。

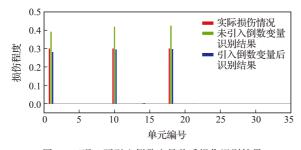


图 2 工况 1 下引入倒数变量前后损伤识别结果 Fig. 2 Damage detection results before and after the introduction of reciprocal variables under condition 1

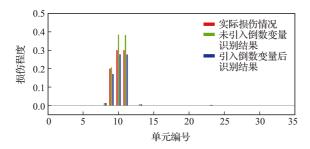


图 3 工况 2 下引入倒数变量前后损伤识别结果 Fig. 3 Damage detection results before and after the introduction of reciprocal variable under condition 2

可以看出,在无噪声情况下,未引入倒数变量的方法和引入倒数变量的方法均可以准确地识别出损伤位置。表2给出了引入倒数变量前后以及文献[13]的方法在无噪声情况下对三跨连续梁损伤单元的识别结果。由表2可知,对于实际发生损伤的单元,引入倒数变量后识别结果与实际损伤情况更加接近,说明引入倒数变量可以提高损伤识别精度。在损伤单元均是孤立的工况1下,引入倒数变量方法比文献[13]方法的损伤识别结果稍差,但前者可同时获知损伤位置和相应的损伤程度。在多个相邻单元同时发生损伤的工况2下,文献[13]方法不能准确定位损伤位置,而本文方法仍可以准确识别出损伤位置,损伤程度识别结果比工况1的识别结果稍差。

表 2 三种方法对三跨连续梁损伤单元的识别结果 Tab. 2 Detection results of damage elements for three span continuous beam by three methods

损伤 工况	损伤 单元	实际损 伤程度 /%	文献[13] 方法的损伤 识别结果/%	引入倒数 变量前损伤 识别结果/%	引入倒数 变量后损伤 识别结果/%
工况 1	1	30	30.1	39.2	28. 2
	10	30	29.8	41.9	29.5
	18	30	30.0	42.5	29.8
工况 2	9	20	_	20.6	17.1
	10	30	_	38.5	27.8
	11	30	_	38.3	27.7

3.2 噪声的影响

为考察噪声对引入倒数变量方法的影响,假定测量位移由损伤梁有限元模拟位移叠加测量噪声构成^[9],即若 $\{\bar{\boldsymbol{u}}_{j}^{e}\}=\{u_{j1}^{e},u_{j2}^{e},\cdots,u_{jN}^{e}\}^{T}$ 为第 $j(j=1,2,\cdots,l)$ 个试验载荷下损伤梁中传感器安装位置的有限元模拟位移(其中,N为传感器数量),则测量位移为 $\{\bar{\boldsymbol{u}}_{i}^{m}\}=\{u_{i1}^{m},u_{i2}^{m},\cdots,u_{iN}^{m}\}^{T}$,其中

$$u_{ji}^{m} = u_{ji}^{\epsilon} [1 + \epsilon(2 \times \text{rand}() - 1]]$$

 $(i = 1, 2, \dots, N)$ (16)

式中 ε为噪声水平, rand()产生一个在区间(0,1) 内均匀分布的随机数。考虑到噪声的随机性,取 500次结果的平均值代入方程(14)求解。

图 4 和图 5 给出了噪声水平为 3%和 5%时, 三跨连续梁在损伤工况 1 和工况 2 下的损伤识别结果。

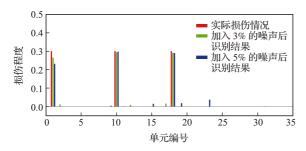


图 4 工況 1 下不同噪声水平的损伤识别结果 Fig. 4 Damage detection results for different levels of noise under condition 1

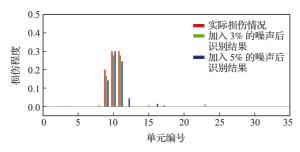


图 5 工况 2 下不同噪声水平的损伤识别结果 Fig. 5 Damage detection results for different levels of noise under condition 2

可以看出,在损伤工况1和工况2下,加入噪声水平为3%和5%时,均未出现漏判现象,即可准确识别实际损伤单元位置。加入噪声后,误识别成微弱损伤的单元数量增多。噪声对损伤程度识别结果同样产生影响。由表3可知,仅使用两个传感器时,随着噪声水平的增加,工况1下损伤单元1、工况2下损伤单元9和单元11的损伤程度识别结

果变差。

3.3 传感器数量的影响

研究放置更多传感器的情形。增加两个传感器,用于测量节点 15 和节点 30 的位移。图 6 和图 7 分别展示了在工况 1 和工况 2 下,加入 5 %噪声,使用不同数量传感器对损伤识别结果的影响。

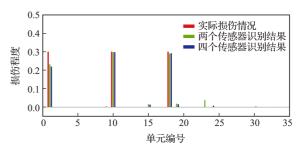


图 6 工况 1 下 5%噪声水平,不同数量传感器的损伤识别结果 Fig. 6 Damage detection results of different number of sensors under condition 1 with 5% noise level

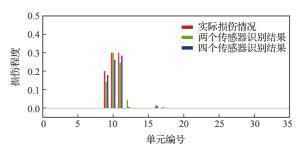


图 7 工况 2 下 5%噪声水平,不同数量传感器的损伤识别结果 Fig. 7 Damage detection results of different number of sensors under condition 2 with 5% noise level

表 3 不同噪声水平和不同数量传感器下三跨连续梁损伤单元的损伤程度识别结果 Tab. 3 Detection results of damage elements for three span continuous beam under different noise levels and different number of sensors

损伤 工况	损伤 单元	实际损伤 程度/%		加 3%的噪声,使用两个 传感器的损伤识别结果/%	加 5%的噪声,使用两个 传感器的损伤识别结果/%	加 5%的噪声,使用四个 传感器的损伤识别结果%
工况 1	1	30	28. 2	26.5	23. 2	21.9
	10	30	29.5	29.4	29.8	29.8
	18	30	29.8	29.1	29.0	29.2
工况 2	9	20	17.1	16.6	14.1	17.8
	10	30	27.8	27.8	30.0	26.1
	11	30	27.7	27.7	24.5	28.5

从图 6 和图 7 可看出,增加传感器数量后,虽然仍存在误识别成微弱损伤的单元,但整体上,实际未发生损伤单元的损伤程度识别结果得到明显改善。由表 3 可知,在工况 2 下,加入 5 % 噪声,使用四个传感器时,虽然损伤单元 10 的损伤识别结果相较于使用两个传感器时稍差,但实际损伤单元 9 和单元 11 的损伤识别程度更接近实际损伤,整

体的损伤识别结果得到改善。

4 结 论

本文提出了一种基于倒数变量的静力学损伤 识别方法。采用倒数变量后,位移的泰勒展开式中 仅含有倒数增量的线性项,这使得基于倒数变量的 损伤求解模型更准确。利用三跨连续梁结构的数 值仿真算例证明了本文方法的有效性。综上所述, 得到以下结论。

- (1)本文方法可同时识别出梁结构的损伤位置和损伤程度,相较于引入倒数变量前提高了损伤程度识别精度,且适用于损伤单元孤立存在和多个相邻单元同时损伤情况。
- (2) 当噪声水平不超过 5%时,仍可有效识别 出损伤位置和程度。通过增加传感器数量可改善 识别结果。
- (3) 本文提出的方法在理论上可以扩展到桁架和刚架等结构的损伤识别问题。

参考文献(References):

- [1] Daei M, Mirmohammadi S H. A flexibility method for structural damage identification using continuous ant colony optimization [J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2015, 11(2):186-201.
- [2] Masoumi M, Jamshidi E, Bamdad M. Application of generalized flexibility matrix in damage identification using Imperialist Competitive Algorithm [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19 (4): 994-1001.
- [3] Zare Hosseinzadeh A, Ghodrati Amiri G, Ali Seyed Razzaghi S. Model-based identification of damage from sparse sensor measurements using Neumann series expansion[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2017, 25(2):239-259.
- [4] 谢少鹏,吴柏生,钟慧湘.基于广义模态柔度矩阵的结构损伤识别[J]. 吉林大学学报(理学版),2020,58 (3): 518-526. (XIE Shao-peng, WU Bai-sheng, ZHONG Hui-xiang. Structural damage identification based on generalized modal flexibility matrix[J]. Journal of Jilin University (Science Edition),2020,58(3):518-526. (in Chinese))
- [5] Le N T, Nguyen A, Thambiratnam D P, et al. Locating and quantifying damage in beam-like structures using modal flexibility-based deflection changes [J].

 International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(10):2042008.
- [6] Jalali M H, Rideout D G. Substructural damage detection using frequency response function based inverse dynamic substructuring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163:108166.
- [7] Yang Q W, Sun B X, Structural damage localization and quantification using static test data[J], Structural Health Monitoring, 2011, 10(4):381-389.

- [8] Nogal M, Lozano-Galant J A, Turmo J, et al. Numerical damage identification of structures by observability techniques based on static loading tests [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12 (9):1216-1227.
- [9] 欧阳煜,徐 超,杨万锋.基于静力挠度的梁结构损伤识别两阶段方法[J]. 力学季刊,2017,38(3):458-467. (OUYANG Yu, XU Chao, YANG Wan-feng. A two-stage method for beam damage identification based on static deflection[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2017,38(3):458-467. (in Chinese))
- [10] Caddemi S, Caliò I, Cannizzaro F, et al. A procedure for the identification of multiple cracks on beams and frames by static measurements[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(8):e2194.
- [11] 黄 斌,鲁 溢.基于 L1 正则化的随机梁式结构静力损伤识别方法[J]. 计算力学学报,2020,37(1):69-74. (HUANG Bin, LU Yi. Static damage identification method of random beam structure based on L1 regularization[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2020,37(1):69-74. (in Chinese))
- [12] Prakash G. A deflection-based practicable method for health monitoring of in-service bridges[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(7):075108.
- [13] 唐盛华,张佳奇,刘宇翔,等. 基于支座反力影响线曲率差分的等截面连续梁损伤识别方法[J]. 计算力学学报,2022,39(4):427-434. (TANG Sheng-hua, ZHANG Jia-qi,LIU Yu-xiang, et al. Damage identification method of continuous beam with uniform cross section based on curvature difference of support reaction influence line[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(4):427-434. (in Chinese))
- [14] 江 潇. 非负最小二乘问题的算法研究[D]. 南京航空航天大学,2009. (JIANG Xiao. Algorithm Research for Nonnegative Least Squares Problems[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2009. (in Chinese))
- [15] 程耿东. 工程结构优化设计基础[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2012. (CHENG Geng-dong. Introduction to Optimum Design of Engineering Structures [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012. (in Chinese))
- [16] 王焕定,章梓茂,景 瑞. 结构力学(I)[M]. 北京:高 等教育出版社,2000. (WANG Huan-ding, ZHANG Zi-mao, JING Rui. Structural Mechanics (I)[M]. Higher Education Press,2000. (in Chinese))

A beam structure damage detection method using only static response

TANG Peng-enbu, WU Bai-sheng*, ZHONG Hui-xiang

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In this paper, a damage identification method for a beam structure using only its static response is proposed. This method introduces reciprocal variables. The Taylor expansion of the displacement after adopting the reciprocal variables only contains the linear term of the reciprocal increments. We construct a damage solution model based on reciprocal variables, and then apply the non-negative least-squares method to obtain the damage parameters, which can determine the location and extent of the damage at the same time. Compared with the method that does not involve the reciprocal variables, the damage parameters obtained by this method are closer to the real damage situation. This paper also discusses the effects of noise. A three-span continuous beam structure is modelled and analyzed by numerical simulation. The results show that the proposed method can effectively identify the damage of the beam structure.

Key words: static response; damage identification; reciprocal variable; non-negative least squares

引用本文/Cite this paper:

汤彭恩布,吴柏生,钟慧湘.一种仅使用静态响应的梁结构损伤识别方法[J]. 计算力学学报,2023,40(2):289-294.

TANG Peng-enbu, WU Bai-sheng, ZHONG Hui-xiang. A beam structure damage detection method using only static response [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(2):289-294.