

基于应变响应二次协方差的梁结构损伤识别研究

晏世昌, 李 苗, 尹婷芳, 杨丽雯, 王祖亮, 杨桐兵

湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳

收稿日期: 2022年11月22日; 录用日期: 2022年12月12日; 发布日期: 2022年12月26日

摘 要

提出在时域内建立基于应变响应二次协方差矩阵来识别结构损伤。推导证明了应变响应二次协方差矩阵(QCoS)元素的解析公式,它是结构频率、振型和阻尼等模态参数的函数。基于结构应变响应二次协方差矩阵元素构造损伤特征向量,结合向量置信度准则和应变响应二次协方差矩阵元素差值,对结构的损伤进行检测和定位。通过数值模拟证明了该损伤识别方法的有效性。

关键词

损伤识别, 应变响应, 协方差, 模式识别

Research on Damage Identification of Beam Structures Based on Quadratic Covariance of Strain Responses

Shichang Yan, Miao Li, Tingfang Yin, Liwen Yang, Zuliang Wang, Tongbing Yang

School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: Nov. 22nd, 2022; accepted: Dec. 12th, 2022; published: Dec. 26th, 2022

Abstract

It is proposed to construct the quadratic covariance matrix based on strain responses in the time domain to identify the damage to the structure. An analytical formulation for the elements of the quadratic covariance matrix of strain responses (QCoS) is derived. QCoS is proved as a function of modal parameters such as structural frequency, mode shape and damping. The damage eigenvec-

tors are constructed based on QCoS. Through the vector confidence criterion and the difference of QCoS, the damage to a structure is detected and located. Numerical simulation results prove the effectiveness of the proposed damage identification method.

Keywords

Damage Detection, Strain Responses, Covariance, Pattern Recognition

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对结构进行损伤识别,通常先判断结构是否存在损伤,进而确定损伤位置以及损伤程度[1]。土木工程领域常通过结构的动力响应获取频率与振型进行损伤识别。基于模态参数的损伤识别方法在实际应用中,可能存在频谱泄露、截断误差以及丢失原始信号中的时域信息等问题。在时域提取振动响应信号中对结构损伤敏感的特征信息,省去了信号变换和模态识别的过程。阳洋[2]等基于统计矩理论,利用结构加速度响应在时域内构建八阶矩作为损伤指标,该方法可直接通过响应快速判断结构是否存在损伤以及损伤的位置。雷家艳[3]、Li [4] [5]等利用结构响应的自/互相关函数、协方差构造损伤识别因子进行结构损伤判定。

通过振动信号分析判断结构是否损伤,分析对象多是加速度响应。结构损伤的出现会引起损伤位置处应力重分布,应力的的大小是由应变反映的。相较加速度,应变更能敏感地反映结构局部刚度的变化。本文提出一种基于应变二次协方差矩阵元素(QCoS)的结构损伤识别方法,推导证明了结构在冲击荷载作用下,应变二次协方差矩阵元素是结构频率、应变模态振型、阻尼等结构模态参数的函数。利用结构应变二次协方差矩阵元素构建损伤特征向量,通过向量置信度准则以及特征向量改变量实现结构损伤的判定和损伤的定位。通过简支钢梁的数值算例,分析结构局部不同程度的损伤对 QCoS 的影响,验证了该损伤识别方法的有效性。

2. 基本理论

2.1. 应变二次协方差

下式为 N 个自由度系统的随机运动方程,

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

式中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别是 $N \times N$ 的质量、阻尼和刚度矩阵, $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}_g(t)$ 和 $\mathbf{x}_g(t)$ 分别是 $N \times 1$ 的加速度、速度和位移向量, \mathbf{L} 是 $N \times 1$ 的映射向量, $\mathbf{L}f(t)$ 是将激励 $f(t)$ 作用于系统的某自由度。

经作者推导自由度 l 的应变单位脉冲响应函数如公式(2), 推导过程见文献[6],

$$h_l^e = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi_i^e \psi_l}{\omega_{di}} e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t) \quad (2)$$

上式中, ω_i , ω_{di} 和 ξ_i 分别是第 i 阶无阻尼模态频率、有阻尼模态频率和阻尼比, Φ_i^e 是第 i 阶应变模态振型的第 l 个元素, $\psi_l = \Phi_i^{eT} \tilde{\mathbf{B}}^{-T} \mathbf{L}$

在 $f(t)$ 作用下, 自由度 l 的应变响应可表达为[7],

$$\varepsilon_l(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) h_l^\varepsilon(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

若激励 $f(t)$ 为冲击荷载作用, 可近似认为 $f(t) = \delta(t)$, $\delta(t)$ 是脉冲激励。自由度 l 的响应 $h_l^\varepsilon(t)$ 与自由度 p 的响应 $h_p^\varepsilon(t)$ 之间的互相关函数可通过下式计算得到,

$$R_{pl}(\tau) = \int_0^{\infty} h_p^\varepsilon(t) h_l^\varepsilon(t+\tau) dt \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)得到

$$R_{pl}(\tau) = \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_{lj}^\varepsilon \Psi_j}{\omega_{dj}} e^{-\xi_j \omega_j \tau} \times \{G_j \cos(\omega_{dj} \tau) + H_j \sin(\omega_{dj} \tau)\} \quad (5)$$

式中,

$$A_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{di} - \omega_{dj})^2} - \frac{\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{di} + \omega_{dj})^2} \right]$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\omega_{di} + \omega_{dj}}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{di} + \omega_{dj})^2} + \frac{\omega_{di} - \omega_{dj}}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{di} - \omega_{dj})^2} \right]$$

$$G_j = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi_{pi}^\varepsilon \Psi_i}{\omega_{di}} A_{ij}, \quad H_j = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi_{pi}^\varepsilon \Psi_i}{\omega_{di}} B_{ij}$$

响应的互相关函数也可表示为

$$R_{pl}(\tau) = \sum_{j=1}^N \Phi_{lj}^\varepsilon u_j^\varepsilon(p, \tau) = \Phi_l^\varepsilon \mathbf{u}^\varepsilon(p, \tau) \quad (6)$$

式中,

$$u_j^\varepsilon(p, \tau) = \frac{\Psi_j}{\omega_{dj}} e^{-\xi_j \omega_j \tau} \{G_j \cos(\omega_{dj} \tau) + H_j \sin(\omega_{dj} \tau)\}$$

$$\mathbf{u}^\varepsilon(p, \tau) = [u_1(p, \tau), u_2(p, \tau), \dots, u_N(p, \tau)]^T$$

$$\Phi_l^\varepsilon = [\Phi_{l1}^\varepsilon, \Phi_{l2}^\varepsilon, \dots, \Phi_{lN}^\varepsilon]$$

由下式计算得到应变响应的二次协方差(QCoS)矩阵,

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}_{pl} \cdot \mathbf{R}_{pl}^T = \Phi^\varepsilon \mathbf{u}^\varepsilon(p) \cdot (\Phi^\varepsilon \mathbf{u}^\varepsilon(p))^T = \Phi^\varepsilon (\mathbf{u}^\varepsilon(p) \cdot \mathbf{u}^\varepsilon(p)^T) \Phi^{\varepsilon T} \quad (7)$$

式中,

$$\mathbf{R}_{pl} = \begin{bmatrix} R_{pl_1}(t_1) & R_{pl_1}(t_2) & \dots & R_{pl_1}(t_n) \\ R_{pl_2}(t_1) & R_{pl_2}(t_2) & \dots & R_{pl_2}(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{pl_g}(t_1) & R_{pl_g}(t_2) & \dots & R_{pl_g}(t_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}^\varepsilon(p) = \begin{bmatrix} u_1^\varepsilon(p, t_1) & u_1^\varepsilon(p, t_2) & \dots & u_1^\varepsilon(p, t_n) \\ u_2^\varepsilon(p, t_1) & u_2^\varepsilon(p, t_2) & \dots & u_2^\varepsilon(p, t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_N^\varepsilon(p, t_1) & u_N^\varepsilon(p, t_2) & \dots & u_N^\varepsilon(p, t_n) \end{bmatrix}$$

自由度 p, l 在实际结构测试中对应应变响应测点 p, l_g , ($g = 0, 1, 2, \dots, n_{st}$), n_{st} 为应变测点数。两测点 p, l_g 数据构成的 R_{plg} 是以 p 为参考点的应变响应互相关函数。当 $p = l_g$ 时, R_{plg} 就是自相关函数。式中

$t_n = n\Delta t$, Δt 为测试采样时间间隔。

矩阵 $\mathbf{u}^e(p) \cdot \mathbf{u}^e(p)^T$ 的第 i 行第 j 列元素可由下式计算得到,

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{u}^e(p) \cdot \mathbf{u}^e(p)^T \right]_{i \times j} = & \frac{\psi_i \psi_j}{\omega_{d_i} \omega_{d_j} \Delta t} \times \left\{ \frac{G_i G_j}{2} \left[\frac{\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} + \omega_{d_j})^2} + \frac{\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} - \omega_{d_j})^2} \right] \right. \\ & + \frac{G_i H_j}{2} \left[\frac{\omega_{d_i} + \omega_{d_j}}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} + \omega_{d_j})^2} - \frac{\omega_{d_i} - \omega_{d_j}}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} - \omega_{d_j})^2} \right] \\ & + \frac{H_i G_j}{2} \left[\frac{\omega_{d_i} + \omega_{d_j}}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} + \omega_{d_j})^2} + \frac{\omega_{d_i} - \omega_{d_j}}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} - \omega_{d_j})^2} \right] \\ & \left. - \frac{H_i H_j}{2} \left[\frac{\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} + \omega_{d_j})^2} - \frac{\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j}{(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j)^2 + (\omega_{d_i} - \omega_{d_j})^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)所示, 结构应变响应二次协方差矩阵 \mathbf{Q} 的元素仅与结构的频率、振型、阻尼比等模态参数有关。结构的损伤会引起结构模态参数的改变, 导致 \mathbf{Q} 矩阵元素发生变化。因此, 矩阵元素可作为损伤特征参数。

在实际测试当中, 各测点响应是一系列离散的时间序列, 积分式(4)可由有限求和式替代。对于样本数是 n_s 的时间序列, τ 为时间延迟, 离散数据的互相关函数可表示成:

$$R_{p_l}(\tau) = \frac{1}{n_s} \sum_{k=0}^{n_s-1} h_p^e(k) h_l^e(k+\tau) \quad (9)$$

将由式(9)求得的 $R_{p_l g}$ 代入式(7)即可得到结构应变响应的二次协方差矩阵 \mathbf{Q} 。矩阵的行数 r 、列数 c 即对应测点 l_r 和测点 l_c , ($r, c = 1, 2, \dots, g$), 第 r 行、 c 列的矩阵元素 Q_{rc} , 即 \mathbf{Q}_{rc} 由下式可得,

$$\mathbf{Q}_{rc} = R_{p_{l_r}}(t) \cdot R_{p_{l_c}}(t)^T \quad (10)$$

2.2. 向量置信度准则

采用模式识别方法, 以结构在无损伤或健康状态下的 \mathbf{Q}^r 作为基准, 将结构在未知状态下的 \mathbf{Q} 与之进行对比, 根据矩阵元素的变化来判断结构是否损伤。将矩阵转换为损伤特征向量 \mathbf{V} 并欧拉范数归一化, 其目的是消除荷载大小的影响。然后匹配两组向量, 判断两者的一致性, 公式如(11)所示,

$$CVAC = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n_c} (V_s \times V_s^r) \right]^2}{\sum_{s=1}^{n_c} [V_s]^2 \times \sum_{s=1}^{n_c} [V_s^r]^2} \quad (11)$$

式中 $CVAC$ 是向量置信度准则, n_c 是向量 \mathbf{V} 元素的数量, V_s 为该向量的第 s 个元素。 $CVAC \in [0,1]$, 结构未知状态下 V_s 与无损伤状态下 V_s^r 比较, $CVAC$ 越接近 1, 说明两个向量的一致性越高。较低的 $CVAC$ 值说明未知结构状态下 \mathbf{V} 较基准向量 \mathbf{V}^r 存在较大的差异, 表明结构可能出现了损伤。

3. 数值模拟

试验梁是薄壁空心简支钢梁, 截面的宽和高都是 30 mm, 壁厚 1 mm, 两支座中心之间的距离为 3 m, 如图 1 所示。钢材弹性模量 206 GPa, 密度 7850 kg/m³。建立简支钢梁的有限元数值模拟, 将该梁均分为

10 个梁单元，单元长 30 cm，共 11 个节点，每个节点有竖向、转动 2 个自由度，梁共 22 个自由度。9 个应变测点“均布”于梁顶面纵向中轴线上，测点间距、测点与支座中心距离都为 30 cm (图 1)。

对梁单元节点 4 施加一个竖直向下的三角激励模拟简支梁受到的冲击荷载作用。无损简支梁受三次激励作用，峰值分别为 50N、100N 和 150N，激励时长都是 0.03 s，“测得”简支梁在给定三角激励下 9 个测点的应变响应，采样频率为 1000 Hz，共 5 s 的数据。在应变响应中添加白噪声模拟测试噪声，信噪比为 80 dB。测点 l_1 作为参考点，由 9 个测点的应变数据计算 R_{pl} ，再求得应变二次协方差矩阵 Q 。矩阵共 9×9 个元素，考虑该矩阵是对称矩阵，可利用其下(或上)三角元素或者对角元素构成损伤特征向量 V 识别结构的异常或损伤。下三角元素共 45 个。

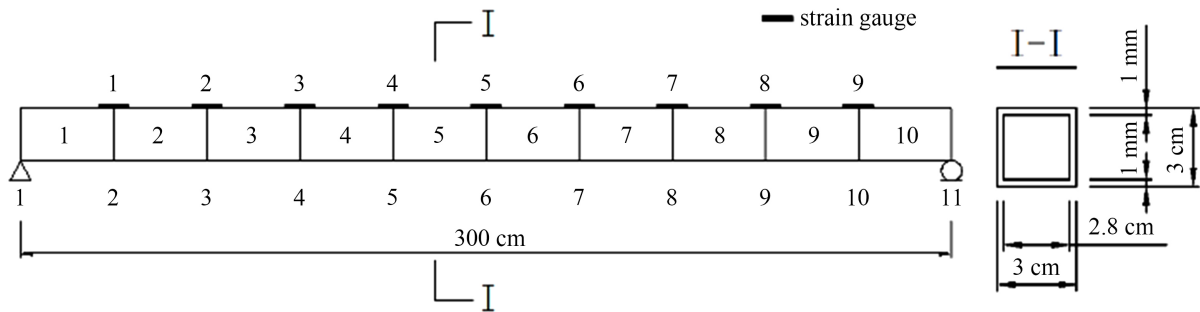


Figure 1. Simply supported beam model

图 1. 简支梁模型

3 次激励工况下 V 向量两两匹配的 CVAC 值都接近 1，结果表明在不同激励下 V 向量各元素间的比例一致，无损梁在不同锤击力作用下经归一化的 V 向量未发生改变，可以将该向量作为基准向量 V' ，判断未知状态下的结构是否异常或损伤。

数值模型中结构损伤的模拟通过折减结构单元的刚度来实现，单元损伤系数 $\alpha_m \in [0, 1]$ ，($m = 1, 2, \dots, n_e$)， n_e 是结构单元数，表明结构损伤的位置。当单元损伤系数 α_m 等于 1，表明结构没有损伤。设计以下损伤工况，单元 4 和单元 8 的刚度逐渐减小，

- 1) $\delta\alpha_4 = \delta\alpha_8 = -5\%$; 2) $\delta\alpha_4 = -10\%$, $\delta\alpha_8 = -5\%$; 3) $\delta\alpha_4 = -20\%$, $\delta\alpha_8 = -10\%$; 4) $\delta\alpha_4 = -30\%$, $\delta\alpha_8 = -20\%$ 。

3.1. 结构损伤程度对 QCoS 的影响

结构的频率和振型会随结构损伤的出现而改变，由综合式(2)、式(9)和式(10)可知，应变二次协方差矩阵元素 Q_{rc} 包含 $1 \sim N$ 阶的结构频率和振型等信息。理论上， Q_{rc} 应该也会因结构的损伤而变化。图 2 横坐标中括号外数值表示梁单元 4 刚度折减值，括号内数值表示梁单元 8 刚度折减值。图中点划线呈现上扬趋势，实线表现为下降趋势。上扬说明 QCoS 随单元刚度的减小而渐增。 Q_{33} 、 Q_{43} 、 Q_{44} 和 Q_{73} 、 Q_{74} 增幅最大， Q_{77} 、 Q_{87} 、 Q_{88} 、 Q_{83} 、 Q_{84} 增幅次之， Q_{53} 、 Q_{63} 、 Q_{31} 、 Q_{41} 增幅小。其中二次协方差矩阵对角元素 Q_{33} 、 Q_{44} 、 Q_{77} 、 Q_{88} 较结构在无损状态时都有增大。结果显示，当测点 l_r 和 l_c 都是损伤单元的测点(l_3 、 l_4 、 l_7 、 l_8)时， Q_{rc} 随单元刚度的减小而增大。若仅有一个测点(l_r 或 l_c)是损伤单元的测点，随单元刚度的减小 Q_{rc} 可能增大也可能减小，如 Q_{31} 稍有增大、而 Q_{93} 小幅减小。因此，当 l_r 、 l_c 中仅一点是损伤单元测点时，不能通过 Q 元素值的增大断定与测点相关单元的刚度会减小。若测点 l_r 和 l_c 都不是损伤单元的测点， Q_{rc} 随单元刚度的折减而减小。

以上分析结果证明了结构单元刚度的折减会导致 Q_{rc} 的改变。此外，当 Q_{rc} 是由损伤单元的测点响应

计算得到, Q_{rc} 较结构未损伤时有明显增大, 这一结果应该是与 Q_{rc} 包含的振型信息有关。所以, 可以考虑利用 Q_{rc} 在结构损伤前后的改变定位结构的损伤。

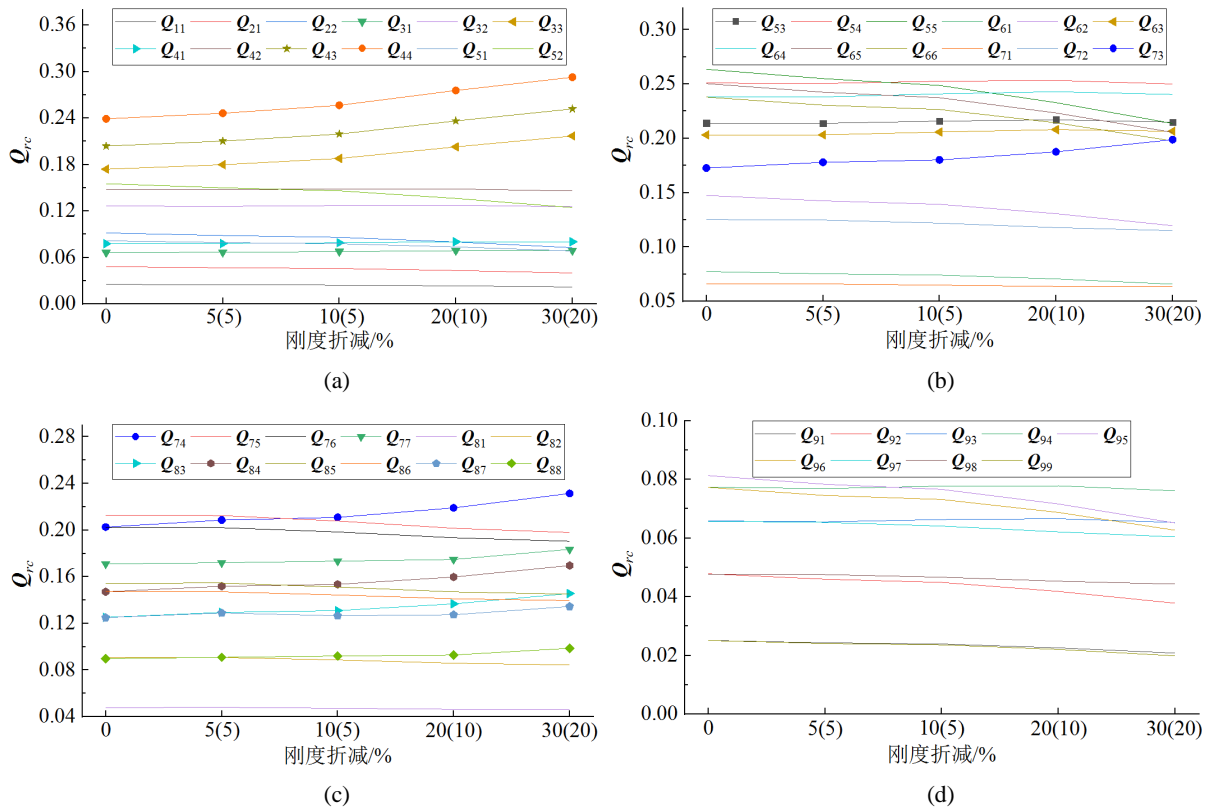


Figure 2. Curve of Q_{rc} versus the damage extent
图 2. Q_{rc} 与损伤程度的关系曲线

3.2. 损伤识别

基于单元刚度折减对 Q 矩阵元素的影响分析结果, 选择主对角元素构成对损伤敏感的特征向量 V 。损伤识别步骤为:

- 1) 用式(9)和式(7)计算结构无损状态下的 Q 矩阵, 取矩阵对角元素归一化构成基准向量 V^* 。
- 2) 重复步骤(1)计算得到结构未知状态下的 V 向量。

3) 用式(11)计算结构未知状态的 V 向量与 V^* 向量的向量置信度准则 $CVAC$ 。计算 V 与 V^* 的向量元素差值 δV_s 。综合 $CVAC$ 值与特征向量元素差值 δV_s 判断损伤和确定损伤位置。

验证基于应变二次协方差的梁损伤识别方法的准确性, 首先通过 $CVAC$ 值对结构的状态(无损或有损)进行初判。数值算例中各损伤工况下的 $CVAC$ 值列于表 1。当梁单元 4 和单元 8 引入 5% 的刚度折减, $CVAC$ 值减小 2.8%, 说明 $CVAC$ 能反映小损伤引起的特征向量 V 的改变, 梁结构的小损伤得到有效识别。当梁单元 4 刚度折减 30% 和单元 8 刚度折减 20% 时, $CVAC$ 值减小约 12%, 说明 $CVAC$ 值随单元刚度的减小而减小, 能反映结构损伤程度的变化。

对梁结构的状态进行初判后, 再通过损伤特征向量元素差值 δV_s 定位结构损伤。图 3 所示, δV_3 、 δV_4 和 δV_7 、 δV_8 为正值, 即 Q_{33} 、 Q_{44} 、 Q_{77} 、 Q_{88} 增大, 说明测点 3 与测点 4 之间的单元 4 和测点 7 与测点 8 之间的单元 8 存在刚度减小的情况, 且 δV_3 、 δV_4 和 δV_7 、 δV_8 随着单元 4 和单元 8 刚度的递减而递增。结

果表明, 通过损伤特征向量 V 的元素差值 δV_s 能准确定位简支钢梁有限元模型中损伤单元 4 和单元 8 对应的两处损伤梁段。

Table 1. CVAC for damage case

表 1. 损伤工况 CVAC

损伤工况	(1)	(2)	(3)	(4)
CVAC	0.9715	0.9625	0.9152	0.8767

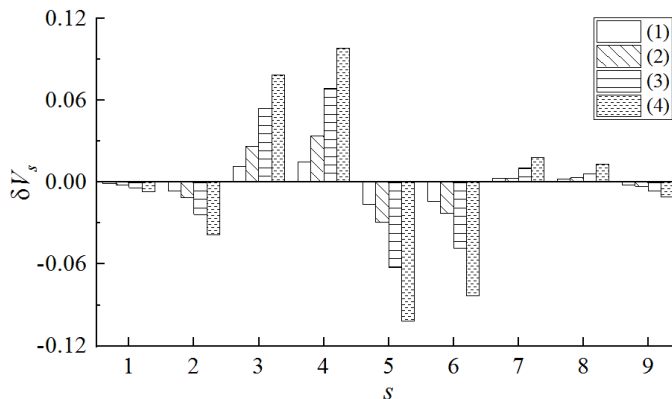


Figure 3. Difference between V_s values of the damaged and undamaged scenarios

图 3. 有损与无损工况的 V_s 差值

4. 结论

本文提出利用结构的应变数据, 在时域构造应变响应二次协方差矩阵对结构进行损伤识别。通过对矩阵元素与结构模态参数关系的推导, 证明矩阵元素包含了结构固有的模态信息(频率、振型和阻尼)。结构的损伤会导致矩阵元素的改变, 可以利用矩阵元素作为特征参数进行损伤识别。

通过对简支钢梁的数值模拟分析发现, 若构成矩阵元素的测点响应都是损伤单元的测点数据, 单元刚度的减小对该矩阵元素值的影响显著, 且随着损伤程度的增加而增大。基于这一结论, 可以选用应变二次协方差矩阵的对角元素构成损伤特征向量进行结构损伤识别。

通过梁结构损伤工况验证了该损伤识别方法的准确性。首先, 通过向量置信度准则 CVAC 反映损伤特征向量在结构损伤前后发生的变化, 当 CVAC 小于 1 时, 可初步判断结构异常或存在损伤。再通过损伤特征向量的差值可准确定位梁结构的损伤位置。

基金项目

湖南省教育厅科学研究项目(19B106); 湖南省自然科学基金(2021JJ50145); 湖南省大学生创新训练项目(S202111527030)。

参考文献

- [1] 杨坚, 董聪. 基于不完备模态信息的结构损伤识别方法[J]. 计算力学学报, 2019, 36(2): 290-296.
- [2] 阳洋, 李建雷, 梁晋秋, 王岩, 周财红. 基于统计矩理论的无模型结构损伤识别方法研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 196-204.
- [3] 雷家艳, 姚谦峰, 雷鹰, 刘朝. 基于随机振动响应互相关函数的结构损伤识别试验分析[J]. 振动与冲击, 2011,

30(8): 221-224+236.

- [4] Li, X.Y. and Law, S.S. (2010) Matrix of the Covariance of Covariance of Acceleration Responses for Damage Detection from Ambient Vibration Measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **24**, 945-956. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.10.007>
- [5] Li, X.Y., Wang, L.X., Law, S.S. and Nie, Z.H. (2017) Covariance of Dynamic Strain Responses for Structural Damage Detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **95**, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.020>
- [6] Li, M., Ren, W.X., Huang, T.L., and Wang, N.B. (2020) Experimental Investigations on the Cross-Correlation Function Amplitude Vector of the Dynamic Strain under Varying Environmental Temperature for Structural Damage Detection. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **39**, 631-649. <https://doi.org/10.1177/1461348418820237>
- [7] (美) Clough, R., Penzien, J. 结构动力学[M]. 第2版. 王光远, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006.