

DOI: 10.7511/jslx20220905003

一种改进的残余力向量法在结构损伤识别中的应用

康哲民^{1,3}, 雷能忠^{*2,3}, 祖庆芝¹

(1. 漳州职业技术学院 建筑工程学院, 漳州 363000; 2. 武夷学院 土木工程与建筑学院, 武夷山 354300;
3. 丘陵山地智慧城镇建设技术福建省高校(武夷学院)重点实验室, 武夷山 354300)

摘要:残余力向量法是结构损伤识别中常用的方法,复杂结构中单元数量较多而损伤位置较少,容易造成无关变量增多,进而导致计算量过大的问题。鉴于此,本文提出一种改进的残余力向量法用于结构的损伤识别。该方法利用刚度联系向量与残余力向量之间线性相关的特性,以向量投影值作为损伤定位的影响系数,初步筛选出结构可能出现损伤的单元范围。在此基础上,构建出残余力向量对应的线性方程组,根据顺序主子式不为零的条件,对线性方程组进行行初等变换,再根据单元的数量保留前 n 维线性方程,通过求解该方程组的代数解可得到该结构单元的刚度损伤参数。以简支梁为例的数值模拟表明,本文方法可减少无关单元变量的计算,降低残余力向量的维度并且具有较好的抗噪能力。

关键词:残余力向量法;损伤识别;线性相关;刚度联系矩阵;抗噪分析

中图分类号: O346.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)02-0263-07

1 引言

工程结构的可靠性对社会和经济的发展有着重要的影响,从力学角度来看,结构可看作质量、刚度和阻尼组成的系统,当结构发生损伤时,势必造成系统参数的变化^[1]。随着计算机技术和检测设备的发展,一些满足不同使用功能的大跨度和复杂结构的桥梁随之出现^[2],判断结构的损伤单元及损伤位置也成为了国内外学者的研究热点,对于复杂结构能及时诊断并修复可能出现的损伤缺陷,可以减少事故发生带来的经济损失和负面的社会影响^[3]。

残余力向量法的损伤识别技术最早由 Zimmerman 等^[4]提出,该方法具有计算简洁、概念清晰和识别效率高等优势,在结构健康监测领域中具有一定的研究意义和应用价值^[5-7]。由于单元损伤容易导致结构参数出现变化,利用残余力向量对参数变化的敏感性,可以准确地计算出损伤位置及量化分析损伤程度的大小^[8]。Nobahari 等^[9]提出了一种基于桁架单元损伤指数的有效方法来快速预测结构系统中的损伤单元,有效降低损伤评估的计算量;杨秋伟等^[10]提出了一种静力残余力向量法,

无需模态分析等复杂操作,即可完成结构损伤评估;文献^[11,12]针对实测中模态振型数据的不完备性问题,提出了与残余力向量相匹配的振型展开法,解决实际工程中测点数据不足的难题。因而,通过改进残余力向量的识别过程,来不断降低整体计算量,并克服识别中测试信息不足的影响。

考虑噪声对残余力向量的影响,由于实测振型通常存在常见的误差,意味着与实际的振型不一致,很容易导致计算误差及虚假的损伤单元^[13,14]。鉴于此,Shi 等^[15]利用不完备的振型信息,提出一种解析模态振型变化的系统矩阵,并分析噪声影响下的误差大小;Lu 等^[16]提出一种将残余力向量与响应灵敏度分析相结合的两步识别方法,并测量了不同噪声水平下的识别效果。Lopez 等^[17]通过改进测点自由度与模型自由度一致,并应用残余力向量法进行损伤识别,研究表明当实测模态误差较大或不完整时,该方法识别效果较差。因此,需要对改进的残余力向量法进行抗噪分析,证明该方法的工程实用性和鲁棒性。

综上所述,当结构单元的数量较多时,利用残余力向量法进行损伤识别,相关向量的数量较多,计算量比较大,不利于损伤识别。本文引入一种改进的残余力向量法,考虑模态振型的不完备性,在进行计算时,用尽可能少的模态信息来求解单元的损伤大小,进一步减少了噪声信息的干扰,相比于文献^[18]的基于残余力向量的损伤识别方法,具有

收稿日期: 2022-09-05; **修改稿收到日期:** 2022-11-29.

基金项目: 福建省科技计划重点(引导性)项目(2020Y01010113);
福建省中青年教育科研项目(JAT201265);
漳州职业技术学院校级科研课题(ZZY2021B102)资助项目。

作者简介: 雷能忠^{*}(1969-),男,博士,教授
(E-mail: nzhlei@126.com).

更好的抗噪性。

2 基于残余力向量的损伤识别方法

2.1 残余力向量理论

当无外部激励作用时,自由度为 n 的自由振动方程为^[19]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中 \mathbf{M} 和 \mathbf{K} 为结构的 $n \times n$ 阶质量矩阵和刚度矩阵, $\ddot{\mathbf{u}}$ 和 \mathbf{u} 为 $n \times 1$ 加速度和位移向量。

解式(1)的微分方程,整理可得

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M})\phi_n = 0 \quad (2)$$

根据式(2)的微分方程解可知,结构损伤后的特征值问题方程可表示为

$$(\mathbf{K}_d - \lambda_{d_j} \mathbf{M})\phi_{d_j} = 0 \quad (3)$$

式中 \mathbf{K}_d , λ_{d_j} 和 ϕ_{d_j} 分别为含损伤结构的刚度矩阵、第 j 阶特征值和第 j 阶特征向量。

损伤前后刚度矩阵的变化可表示为

$$\Delta \mathbf{K} = \mathbf{K}_u - \mathbf{K}_d \quad (4)$$

其中 \mathbf{K}_d 为损伤后的结构刚度。

结合式(3,4)可得

$$(\mathbf{K}_u - \lambda_{d_j} \mathbf{M})\phi_{d_j} = \Delta \mathbf{K}\phi_{d_j} \quad (5)$$

记向量 $\mathbf{b}_j = (\mathbf{K}_u - \lambda_{d_j} \mathbf{M})\phi_{d_j}$, 式(5)可表示为

$$\Delta \mathbf{K}\phi_{d_j} = \mathbf{b}_j \quad (6)$$

式中 \mathbf{b}_j 即为残余力向量,若结构共测量 n 个振动模式,则式(6)可化为

$$\Delta \mathbf{K}\Phi = \mathbf{B} \quad (7)$$

式中 $\Phi = [\phi_{d_1} \ \phi_{d_2} \ \cdots \ \phi_{d_n}]$, $\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_n]$ 。

2.2 损伤矩阵的确定

假定结构整体的刚度可以由 n 个单元组成来建模,结构的整体刚度矩阵为^[20]

$$\mathbf{K}^G = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T \mathbf{k}_i^e \mathbf{T}_i \quad (8)$$

式中 \mathbf{K}^G 和 \mathbf{k}_i^e 分别为结构的整体刚度矩阵和单元刚度矩阵, \mathbf{T} 为结构自由度从单元坐标到整体坐标的变换矩阵。

将单元刚度矩阵分解为特征值和特征向量的形式,即

$$\mathbf{k}_i^e = [\mathbf{p}]_{m \times r} [\Lambda]_{r \times r} [\mathbf{p}]_{m \times r}^T \quad (9)$$

式中 \mathbf{p} 为第 i 个单元对应的特征向量组成的正交矩阵, m 为第 i 个单元自由度的数量, r 为单元刚度矩阵的秩, Λ 为第 i 个单元非零特征值的对角矩阵,可化为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 λ_r 为非零特征值。

将式(9)代入式(8)可得

$$\mathbf{K}^G = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T \mathbf{p}_i \Lambda \mathbf{p}_i^T \mathbf{T}_i \quad (11)$$

式(11)可最终转化为

$$\mathbf{K}^G = [\mathbf{A}]_{n \times (r \times n)} [\mathbf{P}]_{(r \times n) \times (r \times n)} [\mathbf{A}]_{n \times (r \times n)}^T \quad (12)$$

式中 $\mathbf{A} = [(\mathbf{T}_1^T \mathbf{p}_1) \ (\mathbf{T}_2^T \mathbf{p}_2) \ \cdots \ (\mathbf{T}_n^T \mathbf{p}_n)]$ 为刚度联通矩阵, \mathbf{P} 为单元非零特征值的对角矩阵。

考虑损伤前后结构刚度的变化,由式(12)可得 $\Delta \mathbf{K} = [\mathbf{A}]_{n \times (r \times n)} [\Delta \mathbf{P}]_{(r \times n) \times (r \times n)} [\mathbf{A}]_{n \times (r \times n)}^T$ (13)

式中 $\Delta \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & \\ & \alpha_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \alpha_{r \times n} \end{bmatrix}$ ($\alpha \in [0, 1]$), $\alpha_{r \times (i-1)+1} =$

$\alpha_{r \times i-1} = \alpha_{r \times i}$ 为结构第 i 个单元的损伤参数。

在平面杆系结构中,根据杆单元的不同类型,可对单元的刚度矩阵进行简化,简化之后的单元矩阵会出现不同的非零特征值。若结构单元为桁架杆单元,则矩阵 Λ 的秩 $r = 1$;若结构单元为梁单元,则矩阵 Λ 的秩 $r = 2$;若结构单元为钢架杆单元,则矩阵 Λ 的秩 $r = 3$ 。

由于结构损伤通常引起单元刚度的变化,而质量变化很小,一般可忽略不计。若单元未损伤,则相应单元 α_{r_i} 的值为 0;若该单元完全损伤,则相应值为 1。无论单元是否发生损伤,刚度联通矩阵 Λ 不会发生改变。因此,由 $\Delta \mathbf{P}$ 中非零元素个数即可确定损伤单元的数量。

2.3 基于向量相关性的损伤定位原理

当结构发生损伤时,结构的刚度联系矩阵是保持不变的,假设在已知结构中有 q 个单元发生损伤,该结构中对应的损伤定位向量为 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, 这些向量可组成 $n \times q$ 阶的矩阵 \mathbf{S}

$$\mathbf{S} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \cdots \ \tau_n] \quad (14)$$

结合式(10~12)可得

$$\tau_i = \mathbf{T}_i^T \mathbf{p}_i \sqrt{\lambda_i} \quad (15)$$

结合式(13,15),损伤前后的变化矩阵可化为

$$\Delta \mathbf{K} = \alpha_{r_1} \tau_1 \tau_1^T + \alpha_{r_2} \tau_2 \tau_2^T + \cdots + \alpha_{r_n} \tau_n \tau_n^T = \sum_{i=1}^n \alpha_{r_i} \tau_i \tau_i^T \quad (16)$$

将式(16)代入式(6)可得

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{r_i} \tau_i \tau_i^T \phi_{d_j} = \sum_{i=1}^n \alpha_{r_i} \xi_i = \mathbf{b}_j \quad (17)$$

式中 $\xi_i = \tau_i \tau_i^T \phi_{d_j}$ 为 $n \times 1$ 阶列向量。

由式(17)可知,残余力向量 \mathbf{b}_j 是由 n 个 ξ 向量

线性组合而成。若结构中有 q 个单元出现损伤,则仅这些单元的 α 值不为 0,而其他单元的值都为 0。因此,单元损伤参数 α 的解具有稀疏性,可通过去掉取值为零的列向量来简化整体的计算量。

3 改进的残余力向量法

由上述分析可知,若结构中含有 n 个有限元,利用残余力向量与已知向量 ξ 的线性相关性特征,可建立以结构损伤参数 α 为未知数的 n 个线性方程,可表示为

$$[C]_{n \times n} [\alpha]_{n \times 1} = [b_j]_{n \times 1} \quad (18)$$

式中 矩阵 C 是由 n 个向量 ξ 组成的系数矩阵

当系数矩阵 C 为可逆矩阵,可直接利用最小二乘法求解结构的损伤参数。然而,对于大型复杂的结构,单元数量 n 较为庞大,此时系数矩阵 C 不可逆,采用最小二乘法不仅计算量过大而且难以求解 α 值。针对此问题,本文定义了对应单元体的 ξ 向量在残余力向量方向上的投影长度的比例作为损伤定位的影响系数,即

$$W_{Si} = |\xi_i^T \cdot b_j| / \|b_j\|^2 \quad (19)$$

本文改进的残余力向量法的具体计算过程如下。

(1) 计算结构损伤后的残余力向量,由式(6)可得第 j 阶模态对应的残余力向量

(2) 判断结构单元体的类型,并计算其对应的静态非零特征值和特征向量,由式(12)可计算出整体结构的刚度联通矩阵。

(3) 将残余力向量按照式(17)展开,并建立式(18)的线性方程组,直接求解损伤参数 α 的大小。

若无法直接求解 α 值,可根据向量的相关性特征,筛选出可疑损伤单元的范围,并重新构建线性方程。

(4) 计算矩阵 S 中各定位向量的影响系数 W_{Si} ,若 $W_{Si} \leq \delta$ (δ 为较小的数),则该定位向量对残余力向量几乎没有影响,因此可判断其对应的单元体是无损伤的,可去除系数矩阵中对应的 ξ_i 向量。

(5) 按照影响系数 W_{Si} 从大到小的顺序对剩下的 s 个 ξ_i 向量进行排序,重新建立缩减后的系数矩阵 C' 。

(6) 经过缩减之后的方程组难以直接求解损伤参数 α ,因此本文引入一种基于顺序主子式不为零的行变换方式,详细过程为

假定在第 k 步先判断增广矩阵 $[C^{(k)}|b^{(k)}]$ 的顺序主子式 Δ_k 是否为零。若 $\Delta_k = 0$,则对 $[A^{(k)}|b^{(k)}]$

进行初等行变换,即 $(E_k) \leftrightarrow (E_{i_k})$,可进一步表示为

$$[C^{(k+1)}|b^{(k+1)}] = I_{i_k,k} [C^{(k)}|b^{(k)}] \quad (20)$$

式中 $i_k \in N(k+1, n)$, $I_{i_k,k}$ 为初等排列阵, $k \leq s$ 。

循环进行式(20)的变换,当顺序主子式 Δ_k 不为零时,应停止行变换,转至 $k+1$ 步计算。

若 $\Delta_k \neq 0$,则直接转至 $k+1$ 步计算。

(7) 取前 s 个方程进行计算,可得到新的方程组为

$$[C]_{s \times s} [\alpha]_{s \times 1} = [b]_{s \times 1} \quad (21)$$

对式(21)可直接求解,即

$$\alpha = (C^T C)^{-1} C^T b \quad (22)$$

改进的残余力向量法的计算流程如图 1 所示。

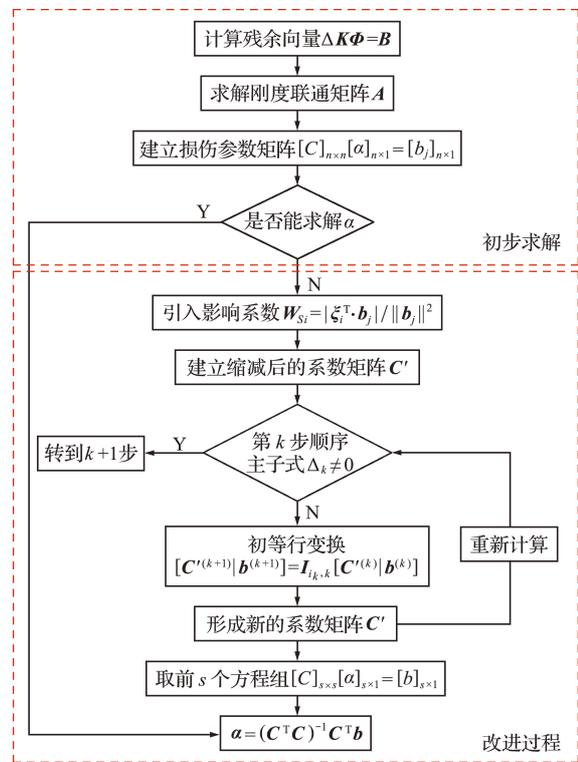


图 1 残余力向量法的改进流程

Fig. 1 Improved process of residual force vector method

4 数值算例

以文献[21]的简支梁结构为研究对象,利用本文方法进行损伤识别。简支梁模型如图 2 所示。梁全长 6 m,分为 15 个梁单元,依次从左向右进行编号,采用 Euler Bernoulli 梁单元计算梁的变形。梁的弹性模量为 32 GPa,质量密度为 2500 kg/m³。梁的截面面积与转动惯量分别为 0.05 m² 和 1.66 × 10⁻⁴ m⁴。结构的损伤以单元刚度折减来模拟,设定的损伤工况列入表 1。此外,单元与后续计算中自由度编号之间的对应关系列入表 2。

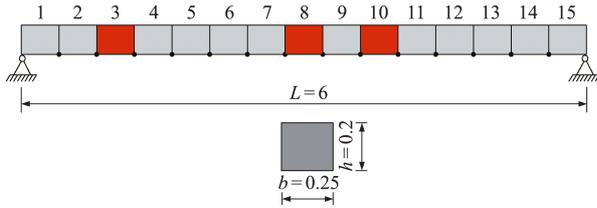


图2 简支梁有限元模型(单位:m)

Fig.2 Finite element model of simply supported beam(unit:m)

表1 损伤工况模拟

Tab.1 Simulated damage scenarios

损伤工况	单元损伤位置	预设损伤程度/%
D1	3	20
	8	30
D2	3	20
	8	30
D3	3	20
	10	10

表2 单元与自由度编号之间的对应关系

Tab.2 Relation between the element and the number of degrees of freedom

单元号	1	2	3	4	5	6	7	8
节点自由度	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10	11 12	13 14	15 16
单元号	9	10	11	12	13	14	15	
节点自由度	17 18	19 20	21 22	23 24	25 26	27 28	29 30	

为了研究本文方法的抗噪性,考虑不同噪声水平对结构损伤识别的影响,采用文献[18]的加噪方式,对工程添加不同噪声水平的干扰,将自振频率和模态数据分别按下列公式添加噪声,即

$$\omega_i = \omega'_i (1 + \epsilon_1 R), \phi_i = \phi'_i (1 + \epsilon_2 R) \quad (23, 24)$$

式中 ω'_i 和 ϕ'_i 分别为无噪声的频率数据和模态参数, ϵ_1 和 ϵ_2 为噪声水平, R 是在 $[-1, 1]$ 上的正态分布随机变量。以加噪后的模态数据代替实测数据,由于频率数据相对准确,若无特殊说明统一施加 $\epsilon_1 = 1\%$ 的噪声水平,模态数据分别添加 $\epsilon_2 = 1\%, 5\%$ 和 10% 的噪声水平。

该结构由梁单元组成,单元体的刚度矩阵 k^e 的秩 $r = 2$, 因此有两个非零特征值和特征向量。由于梁全长有 16 个节点,每个节点有 2 个自由度,考虑梁两端的约束限制,可通过式(13)求得 15×30 阶刚度联通矩阵 A ,截取部分展示为

$$A = \begin{bmatrix} -0.3651 & 0.6325 & 0 & \dots \\ 0 & 3.1623 & 0 & \dots \\ 0.3651 & 0.6325 & -0.3651 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix} \times 10^4$$

4.1 单一位置损伤的识别分析计算

为验证本文方法的计算精度及抗噪能力,首先采用文献[18]的方法,取前 4 阶振动模态数据,不考虑噪声的影响,求得损伤矩阵 D 的特征值 Λ 。

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 3.1305 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0196 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^4$$

由表 2 可知,每个残余力向量的每个单元对应两个自由度编号,可以发现 Λ 对角线上有两个非零元素,可知结构有 1 处损伤,进一步求解损伤定位矩阵 E 。

$$E = \begin{bmatrix} 132.5383 & \dots & 393.6565 & -39.516 \\ -26.53843 & \dots & 3.0916 & 30.798 \\ 0.5291 & \dots & 0 & 0 \\ 0.3474 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & 42.7337 & & \\ \dots & -57.0011 & & \\ \dots & 22.0649 & & \\ \dots & 21.4435 & & \end{bmatrix}_{4 \times 30}$$

从矩阵 E 可以看出,与矩阵 Λ 在第 3 行和第 4 行上对应元素为零的定位向量中,只有第 5 列和第 6 列的元素。由表 2 可知,第 3 个单元发生损伤,最终求解结构的损伤程度。

$$\Delta P_{D1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

若采用本文方法进行损伤识别,可先求解定位向量的影响系数 W_{Si} ,列入表 3。可以看出,单元 2、单元 3 和单元 4 处的影响系数较大,因此可初步判定损伤单元主要集中在此。当单元较多时,可选取合适的阈值系数 δ 来缩小损伤单元的计算范围。从图 3 可以看出,相同噪声影响下,不同的阈值系数 δ 虽然会产生一些虚假的损伤,但损伤处的识别

表3 工况 D1 中各单元的影响系数

Tab.3 Influence coefficient of each element at scenario D1

噪声水平	影响系数 W_{Si}														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\epsilon_1 = 0, \epsilon_2 = 0$	0	1.6961	5.0000	2.2653	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\epsilon_1 = 1\%, \epsilon_2 = 1\%$	0.0017	1.6986	5.0010	2.2675	0.0006	0.0003	0	0	0	0.0003	0.0006	0.0010	0.0013	0.0015	0.0017
$\epsilon_1 = 1\%, \epsilon_2 = 5\%$	0.0012	1.6942	4.9986	2.2635	0.0004	0.0002	0	0	0	0.0002	0.0004	0.0007	0.0009	0.0011	0.0012
$\epsilon_1 = 1\%, \epsilon_2 = 10\%$	0.0015	1.6936	4.9981	2.2630	0.0005	0.0003	0	0	0	0.0003	0.0005	0.0009	0.0012	0.0014	0.0015

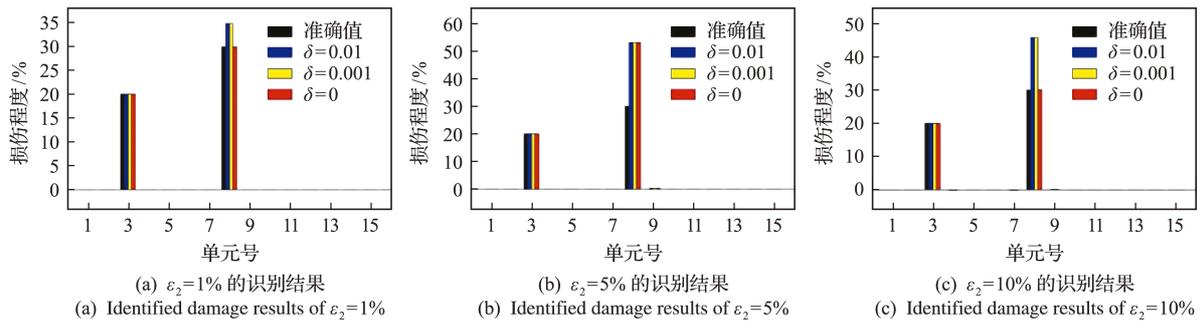


图4 工况 D2 在不同噪声水平下的识别效果

Fig. 4 Damage diagnosis results of scenario D2 at different noise levels

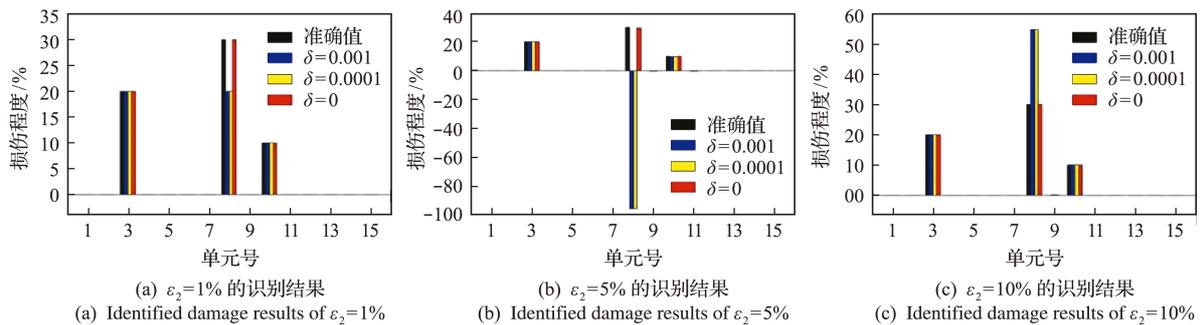


图5 工况 D3 在不同噪声水平下的识别效果

Fig. 5 Damage diagnosis results of scenario D3 at different noise levels

5 结论

本文以简支梁为研究对象,提出了一种改进的残余力向量法用于结构的损伤识别,分别利用该方法对单位置损伤和多位置损伤的情形进行识别判断,可得到如下结论。

(1) 不同噪声水平影响下,结构损伤处的残余力极易受到干扰而出现较大波动,此时可初步判定残余力波动较大的位置单元受损。

(2) 利用特征参数法虽然能准确计算结构的损伤位置,但是在噪声干扰下,特别是频率噪声的影响下,识别出来的损伤程度值不够准确。

(3) 根据本文的改进方法,只要选取合适的影响系数阈值,是能够在保证计算精度的前提下,最大程度地降低结构矩阵运算的计算量,同时影响系数对噪声并不敏感,因此该方法在不同噪声水平的影响下都具有较好的识别效果。

参考文献(References):

[1] Greco A, Pau A. Damage identification in Euler frames[J]. *Computers and Structures*, 2012, **92-93**: 328-336.
 [2] Xia Y, Chen B, Zhou X Q, et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, **20**(4): 560-575.
 [3] 杨辰. 结构健康监测的传感器优化布置研究进展与

展望[J]. *振动与冲击*, 2020, **39**(17): 82-93. (YANG Chen. Advances and prospects for optimal sensor placement of structural health monitoring[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(17): 82-93. (in Chinese))

- [4] Zimmerman D, Kaouk M. Structural damage detection using a subspace rotation algorithm[A]. *33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [C]*, 1992.
 [5] Eraky A, Saad A, Anwar A M, et al. Damage detection of plate-like structures based on residual force vector[J]. *HBRC Journal*, 2016, **12**(3): 255-262.
 [6] Wu J, Luo Y F, Wang L. Practical residual force decomposition method for damage identification of existing reticulated shells[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2019, **19**(6): 2024-2038.
 [7] Wang S, Li J, Hui L, et al. Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector[J]. *Engineering Structures*, 2019, **178**: 506-520.
 [8] Zou W, Zhang Y, Li C. Study on truss structure damage identification base on residual force vector[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **477-478**: 759-764.
 [9] Nobahari M, Ghasemi M R, Shabakhty N. A fast and robust method for damage detection of truss structures[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, **68**: 368-382.
 [10] 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*, 2021, **38**(5):

- 625-630. (YANG Qiu-wei, ZHOU Cong, LI Cui-hong, et al. Structural damage assessment based on static residual force vector[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(5): 625-630. (in Chinese)).
- [11] Zhao J H, Zhang L. A method for structural damage identification using residual force vector and mode shape expansion[A]. 2011 International Conference on Multimedia Technology[C]. 2011.
- [12] Eun H C, Park S Y. Damage detection and identification of parameter matrices using residual force vector[J]. *Journal of Measurements in Engineering*, 2014, **2**(1): 1-7.
- [13] Eun H C, Kim R J, Ahn Y J. Identification of parameter matrices using residual force vector[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **394**: 157-162.
- [14] Fan G, Li J, Hao H. Vibration signal denoising for structural health monitoring by residual convolutional neural networks[J]. *Measurement*, 2020, **157**: 107651.
- [15] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Structural damage detection from modal strain energy change[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, **126**(12): 1216-1223.
- [16] Lu Z R, Yao R Z, Liu J K, et al. A two-step approach for damage identification in axially functionally graded beams[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **842**: 012082.
- [17] Lopez F P, Zimmerman D C. Structural damage localization using element signature recognition[J]. *AIAA Journal*, 2007, **45**(1): 71-78.
- [18] Liu J K, Yang Q W. A new structural damage identification method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **297**(3-5): 694-703.
- [19] Görl E, Link M. Damage identification using changes of eigenfrequencies and mode shapes[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, **17**(1): 103-110.
- [20] Peterson L, Doebling S, Alvin K. Experimental determination of local structural stiffness by disassembly of measured flexibility matrices[A]. 36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference[C]. 1995.
- [21] Jaishi B, Ren W X. Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual[J]. *Journal of sound and vibration*, 2006, **290**(1-2): 369-387.

Application of an improved residual force vector method in structural damage identification

KANG Zhe-min^{1,3}, LEI Neng-zhong^{*2,3}, ZU Qing-zhi¹

(1. College of Architectural Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Wuyishan 354300, China;

3. Key Laboratory of Smart Town Construction of Hilly Mountains (Wuyi University),

Fujian Province University, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: Residual force vector method is a commonly used method in structural damage identification. Considering that a complex structure has many elements and few damage locations, it is easy to define too many unwanted variables, which leads to the problem of excessive computation. Therefore, this study presents an improved residual force vector method for structural damage identification. The method utilizes the linear correlation between the stiffness connection vector and the residual force vector. It uses the vector projection value as the influence coefficient of damage location. The suspect elements of possible structural damage are first located. In addition, a set of linear equations about residual force vector is constructed. According to the condition that the order principal form is not zero, this study conducts an elementary row transformation on the linear equations. According to the number of elements, the method can retain n-dimensional linear equations. From the algebraic solution of the equations, this study has obtained the stiffness and damage parameters of the structural elements are obtained. A simply-supported beam is simulated numerically. The results show that the proposed method can not only reduce the calculation of unrelated element variables, and the dimension of the residual force vector but also have better anti-noise ability.

Key words: residual force vector method; damage identification; linear correlation; stiffness connectivity; matrix; noise analysis

引用本文/Cite this paper:

康哲民,雷能忠,祖庆芝.一种改进的残余力向量法在结构损伤识别中的应用[J].计算力学学报,2024,**41**(2):263-269.

KANG Zhe-min, LEI Neng-zhong, ZU Qing-zhi. Application of an improved residual force vector method in structural damage identification[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, **41**(2): 263-269.