

面向缩聚模型的结构损伤识别研究

李蕊^{1,2}, 周丽^{1,2}

(1. 南京航空航天大学飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 210016, 南京;
2. 南京航空航天大学结构与强度研究所, 210016, 南京)

摘要: 为了减少结构健康监测系统中传感器的数量, 创新性地结合缩聚原理和自适应二次乘方和误差法提出了一种面向缩聚模型的结构损伤识别方法. 根据模型缩聚原理对结构有限元模型进行了缩聚, 依据缩聚后有限元模型、利用自适应二次乘方和误差法对结构参数进行了识别和追踪, 从而实现了结构损伤的识别. 对某一大型平面桁架结构进行了仿真, 期间考虑了白噪声和地震波的影响; 对某一悬臂梁结构进行了实验, 以研究白噪声、正弦、拟 El-Centro 3 种激励下的 6 种情况. 结果表明: 所提方法只需使用少量的传感器便可精确地识别出结构中损伤的发生时刻和损伤的程度及位置, 仿真结果的最大误差小于 3%, 实验结果的最大误差小于 5%.

关键词: 结构健康监测; 模型缩聚; 损伤识别

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0101-07

Structural Damage Identification Using Reduced Order Finite-Element Model

LI Rui^{1,2}, ZHOU Li^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Structure Mechanics and Control for Aircraft, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Institute of Structures & Strength, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to reduce the number of sensors in structure health monitoring systems, a structural damage identification method using the reduced order finite-element model was proposed by combining the adaptive quadratic sum-squares error approach. From the model reduction method, the structure finite element model is reduced. Moreover, using the reduced-order finite-element method and the adaptive quadratic sum-squares error approach, structural parameters can be identified and tracked, and then structural damages can be identified. A simulation test was performed on a large span plane truss considering white noise excitation and El-Centro earthquake excitation. The experimental tests were conducted on a scaled cantilever beam with the consideration of six cases under three excitations, including white noise, sinusoidal excitation, and El-Centro excitation. The simulation and experimental results show that the method proposed can effectively detect the structural damages including the damage location and severity with only a few sensors.

Keywords: structural health monitoring; model reduction; damage identification

结构健康监测系统的目标是, 保证结构的安全性和可靠性, 尽量减少使用期限内的经济费用. 为了保证结构的安全性, 需要及时发现结构损伤, 以进行

构件的修补或替换. 结构损伤的发生通常伴随着局部刚度折减, 因此通过追踪结构局部刚度的变化可监测结构的健康状况. 近年来, 基于振动响应数据的

损伤识别技术在学术界引起了高度关注^[1],目前已经用于结构损伤识别的时域分析技术主要有广义卡尔曼滤波^[2-6]、最小二乘估计^[7-10]等,相关研究中又提出了一种新的结构损伤识别方法——自适应二次乘方和误差法^[11-12],但其仿真结构大多比较简单,结构模型的自由度数比较少,工程中结构的有限元模型的自由度都比较大,使得现有方法在识别损伤时需要的传感器数量比较多,这与工程要求相悖。

为了满足工程需要,即尽量减少结构健康监测系统中传感器的数量,避免测量振动响应,本文将自适应二次乘方和误差法与有限元模型缩聚法相结合,以减少结构健康监测系统中传感器的数量,同时通过对一大跨度平面桁架结构和悬臂梁结构的仿真和实验,验证了本文方法的有效性。

1 基于缩聚模型的自适应二次乘方和误差法

1.1 基于缩聚模型的运动方程

根据有限元理论, s 维自由度线性结构的运动方程可表示为

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

式中: $\underline{x}(t)=[\underline{x}_1(t), \underline{x}_2(t), \dots, \underline{x}_s(t)]^T$ 为 s 维位移向量; $\underline{M}$ 为 $(s \times s)$ 维质量矩阵; $\underline{C}$ 为 $(s \times s)$ 维阻尼矩阵; $\underline{K}$ 为 $(s \times s)$ 维刚度矩阵; $\underline{\eta}$ 为 $(s \times (\bar{m}+r))$ 维激励影响矩阵; $\underline{f}(t)$ 为 $(\bar{m}+r)$ 维激励向量。

将位移向量 $\underline{x}(t)=[\underline{x}_1(t), \underline{x}_2(t), \dots, \underline{x}_s(t)]^T$ 分解为 $\underline{x}(t)$ 和 $\underline{x}^*(t)$,其中 $\underline{x}(t)$ 为对应于第1自由度的 m 维位移向量, $\underline{x}^*(t)$ 为将被缩聚掉的对应于第2自由度的 $(s-m)$ 维位移向量。根据模型缩聚理论^[13-14],式(1)可缩聚为如下 m 维自由度系统

$$\underline{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\underline{x}}(t) + \underline{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\underline{x}}(t) + \underline{K}(\boldsymbol{\theta})\underline{x}(t) = \underline{\eta}_1\underline{f}(t) \quad (2)$$

式中: $\underline{M}(\boldsymbol{\theta})$ 、 $\underline{C}(\boldsymbol{\theta})$ 、 $\underline{K}(\boldsymbol{\theta})$ 分别为经 $(m \times m)$ 维缩聚后的质量、阻尼、刚度矩阵; $\underline{\eta}_1$ 为 $(m \times (\bar{m}+r))$ 维激励影响矩阵; $\boldsymbol{\theta}=[\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_n]^T$ 为 n 维未知参数向量。

将 $(\bar{m}+r)$ 维激励向量 $\underline{f}(t)$ 分离为2个向量,分别记为 $\underline{f}^*(t)$ 和 $\underline{f}(t)$, $\underline{f}^*(t)$ 为 r 维未知(或未测量)激励向量, $\underline{f}(t)$ 为 $\bar{m}$ 维已知(或已测量)激励向量,则式(2)可改写为

$$\underline{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\underline{x}}(t) + \underline{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\underline{x}}(t) + \underline{K}(\boldsymbol{\theta})\underline{x}(t) = \underline{\eta}^* \underline{f}^*(t) + \underline{\eta} \underline{f}(t) \quad (3)$$

式中: $\underline{\eta}^*$ 为关于 $\underline{f}^*(t)$ 的 $(m \times r)$ 维激励影响矩阵; $\underline{\eta}$

为关于 $\underline{f}(t)$ 的 $(m \times \bar{m})$ 维激励影响矩阵。 $\bar{m}=0$ 和 $r=0$ 分别代表所有激励均未测量和所有激励均测量的2种特殊情况。

引入 $2m$ 维的状态向量 $\underline{X}(t)=[\underline{x}^T(t), \dot{\underline{x}}^T(t)]^T$,将运动方程(3)转换为状态方程得

$$\frac{d\underline{X}(t)}{dt} = g(\underline{X}, \boldsymbol{\theta}, \underline{f}^*, \underline{f}) + \underline{w}(t) \quad (4)$$

式中: $\underline{w}(t)$ 为模型噪声向量,其平均值为0、协方差矩阵为 $\underline{Q}(t)$ 。

1.2 自适应二次乘方和误差法

在自适应二次乘方和误差法中,状态向量 $\underline{X}(t)=[\underline{x}^T(t), \dot{\underline{x}}^T(t)]^T$ 被视为未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的隐式方程,即 $\underline{X}=\underline{X}(\boldsymbol{\theta})$ 。

根据控制理论,系统在 $t=i\Delta t$ 时刻的非线性离散方程为

$$\underline{y}_i = \underline{h}[\underline{X}_i(\boldsymbol{\theta}_i), \boldsymbol{\theta}_i, \underline{f}_i^*, \underline{f}_i] + \underline{v}_i \quad (5)$$

式中: $\underline{y}_i$ 、 $\underline{f}_i^*$ 、 $\underline{f}_i$ 分别为 $t=i\Delta t$ 时刻的 l 维测量向量、 r 维未测量激励向量、 $\bar{m}$ 维激励向量; $\underline{X}_i(\boldsymbol{\theta}_i)$ 为未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}_i$ 的隐函数; $\underline{v}_i$ 为测量噪声向量。

令 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1}$ 和 $\hat{\underline{f}}_{k+1|k+1}^*$ 分别为 $\boldsymbol{\theta}_{k+1}$ 和 $\underline{f}_{k+1}^*$ 在 $t=(k+1)\Delta t$ 时刻的估计值,根据自适应二次乘方和误差法, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1}$ 和 $\hat{\underline{f}}_{k+1|k+1}^*$ 的解析解如下

$$\hat{\underline{f}}_{k+1|k+1}^* = \underline{S}_{k+1} \underline{D}_{k+1}^T \underline{R}_{k+1}^{-1} (\underline{I} - \underline{H}_{k+1} \underline{K}_{\boldsymbol{\theta},k+1}) \cdot (\underline{y}_{k+1} - \hat{\underline{h}}_{k+1} + \underline{D}_{k+1} \hat{\underline{f}}_{k|k}^*) \quad (6)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_k + \underline{K}_{\boldsymbol{\theta},k+1} [\underline{y}_{k+1} - \hat{\underline{h}}_{k+1} - \underline{D}_{k+1} (\hat{\underline{f}}_{k+1|k+1}^* - \hat{\underline{f}}_{k|k}^*)] \quad (7)$$

式中

$$\hat{\underline{h}}_{k+1} = \underline{h}(\hat{\underline{X}}_{k+1|k}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_k, \hat{\underline{f}}_{k|k}^*, \underline{f}_{k+1}) \quad (8)$$

$$\underline{K}_{\boldsymbol{\theta},k+1} = (\underline{\Lambda}_{k+1} \underline{P}_{\boldsymbol{\theta},k} \underline{\Lambda}_{k+1}^T) \underline{H}_{k+1}^T (\underline{R}_{k+1} + \underline{H}_{k+1} (\underline{\Lambda}_{k+1} \underline{P}_{\boldsymbol{\theta},k} \underline{\Lambda}_{k+1}^T) \underline{H}_{k+1}^T)^{-1} \quad (9)$$

$$\underline{S}_{k+1} = [\underline{D}_{k+1}^T \underline{R}_{k+1}^{-1} (\underline{I} - \underline{H}_{k+1} \underline{K}_{\boldsymbol{\theta},k+1}) \underline{D}_{k+1}]^{-1} \quad (10)$$

$$\underline{P}_{\boldsymbol{\theta},k} = (\underline{I} + \underline{K}_{\boldsymbol{\theta},k} \underline{D}_k \underline{S}_k \underline{D}_k^T \underline{R}_k^{-1} \underline{H}_k) \cdot (\underline{I} - \underline{K}_{\boldsymbol{\theta},k} \underline{H}_k) (\underline{\Lambda}_{k+1} \underline{P}_{\boldsymbol{\theta},k-1} \underline{\Lambda}_{k+1}^T) \quad (11)$$

其中: $\underline{y}_{k+1}$ 和 $\underline{f}_{k+1}$ 分别为在 $t=(k+1)\Delta t$ 时刻测量的响应数据和激励载荷; $\underline{H}_{k+1}$ 和 $\underline{D}_{k+1}$ 分别为 $(l \times n)$ 维和 $(l \times r)$ 维矩阵,由下式给出

$$\underline{H}_{k+1} = [\partial \underline{h}_{k+1} / \partial \boldsymbol{\theta}_{k+1}]_{\boldsymbol{\theta}_{k+1}=\hat{\boldsymbol{\theta}}_k, \underline{f}_{k+1}=\hat{\underline{f}}_{k|k}^*} \quad (12)$$

$$\underline{D}_{k+1} = [\partial \underline{h}_{k+1} / \partial \underline{f}_{k+1}^*]_{\boldsymbol{\theta}_{k+1}=\hat{\boldsymbol{\theta}}_k, \underline{f}_{k+1}=\hat{\underline{f}}_{k|k}^*} \quad (13)$$

状态向量 $\mathbf{X}_{k+1|k}$ 在 $t=(k+1)\Delta t$ 时刻的估计值为

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k} + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} g(\hat{\mathbf{X}}_{t|k}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_k, \hat{\mathbf{f}}_{k|k}^*, \mathbf{f}) dt$$

(14)

1.3 基于子结构的自适应二次乘方和误差法

在工程中的部分情况下,只需关注结构中部分危险构件的健康状况,此时若直接对结构整体进行监测,则会过于费时、费力,为此本文考虑在子结构下采用自适应二次乘方和误差法。记 $\mathbf{x}_r(t)$ 为内部节点的位移向量, $\mathbf{x}_s(t)$ 为外部节点的位移向量,子结构的运动方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_r \\ \mathbf{C}_s & \mathbf{C}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s(t) \\ \ddot{\mathbf{x}}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{C}_r \\ \mathbf{K}_s & \mathbf{K}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{K}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_s(t) \\ \mathbf{x}_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_r(t) \end{bmatrix}$$

(15)

式中: $\mathbf{f}_r(t)$ 为外部节点上所承受的结构内力。

式(15)可改写为

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{x}}_r(t) + \mathbf{C}_r \dot{\mathbf{x}}_r(t) + \mathbf{K}_r \mathbf{x}_r(t) = \mathbf{f}_r(t) - \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s(t) - \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s(t) - \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t)$$

(16)

记 $\mathbf{f}_r(t) - \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s(t) - \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s(t) - \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t)$ 为 $\boldsymbol{\eta}_1 \mathbf{f}(t)$, 则式(16)可改写为式(2)的形式,这样便可使用前文所提的自适应二次乘方和误差法进行求解。

2 仿真研究

为了验证本文方法的有效性,对一大型平面桁架^[15-16]进行了仿真研究,其结构如图 1 所示。研究中考虑了白噪声激励、地震波激励及子结构共 3 种情况,采样频率为 500 Hz。

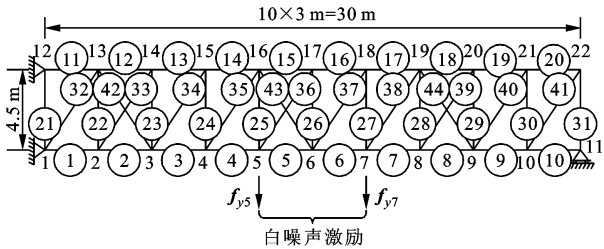
2.1 仿真结构

如图 1 所示,该桁架结构由 44 个杆件、22 个节点组成。假定结构阻尼为比例阻尼,即 $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$ 。整个桁架全部由钢($E=200$ GPa)制作而成,桁架中杆件横截面积 $A=64.5$ cm²,结构比例阻尼系数 $\alpha=0.106$ 4 s⁻¹, $\beta=3.4 \times 10^{-3}$ s。

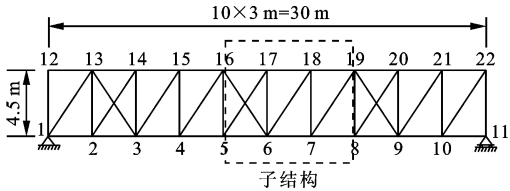
2.2 有限元模型

如图 1 所示桁架结构无约束时整个结构的有限元模型为 44 个自由度,包括 22 个水平自由度和 22 个竖向自由度。研究中还考虑了该结构的以下 3 个有限元模型。

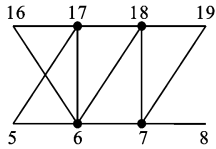
(1)有限元模型 1(约束①下有限元模型)。在约束①下,即支撑约束了节点 1、节点 12 的水平和竖向移动以及节点 11 的竖向移动,结构有限元模型的自由度数为 39,如图 1a 所示。记节点 2~节点 11 的横向位移分别为 $x_1, x_2, \dots, x_{10}$, 节点 13~节点 22



(a)白噪声激励



(b)地震波激励



10×3 m=30 m,桁架每个小格内宽度均为 3 m 时
整个桁架宽度为 10×3 m

(c)桁架子结构

图 1 平面桁架结构

的横向位移分别为 $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{20}$, 节点 2~节点 10 的竖向位移分别为 $x_{21}, x_{22}, \dots, x_{29}$, 节点 13~节点 22 的竖向位移分别为 $x_{30}, x_{31}, \dots, x_{39}$ 。考虑 $(x_{10}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{39})$ 为主自由度, $(x_1, x_2, \dots, x_9, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{20})$ 为从自由度,根据有限元缩聚理论,结构有限元模型可缩聚为 19 个自由度,缩聚后 $\mathbf{x} = [x_{10}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{39}]^T$ 。

(2)有限元模型 2(约束②下有限元模型)。在约束②下,即支撑约束了节点 1 的水平和竖向移动以及节点 11 的竖向移动,结构有限元模型的自由度数为 41,如图 1b 所示。记节点 2~节点 22 的横向位移分别为 $x_1, x_2, \dots, x_{21}$, 节点 2~节点 10 的竖向位移分别为 $x_{22}, x_{23}, \dots, x_{30}$, 节点 12~节点 22 的竖向位移分别为 $x_{31}, x_{32}, \dots, x_{41}$ 。考虑 $(x_1, x_2, \dots, x_{21})$ 为主自由度, $(x_{22}, x_{23}, \dots, x_{41})$ 为从自由度,根据有限元模型缩聚理论,结构有限元模型可缩聚为 23 个自由度,缩聚后 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{21}]^T$ 。

(3)有限元模型 3(子结构有限元模型)。桁架中如图 1b 和图 1c 所示子结构,其由 12 个单元、8 个节点组成,共有 16 个自由度。记节点 5~节点 8 的

横向位移分别为 $x_1, x_2, \dots, x_4$, 节点 16~节点 19 的横向位移分别为 $x_5, x_6, \dots, x_8$, 节点 5~节点 8 的竖向位移分别为 $x_9, x_{10}, \dots, x_{12}$, 节点 16~节点 19 的竖向位移分别为 $x_{13}, x_{14}, \dots, x_{16}$. 考虑 $(x_1, x_4, x_5, x_8, x_9, \dots, x_{16})$ 为主自由度, (x_2, x_3, x_6, x_7) 为从自由度, 根据有限元模型缩聚理论, 结构的有限元模型可缩聚为 12 个自由度, 缩聚后 $\mathbf{x} = [x_1, x_4, x_5, x_8, x_9, \dots, x_{16}]^T$.

2.3 仿真结果

仿真 1 如图 1a 所示, 在节点 5 和节点 7 处分别对桁架施加竖向激励 f_{y5} 和 f_{y7} , 并测量加速度响应 $(\ddot{x}_{10}, \ddot{x}_{21}, \ddot{x}_{22}, \dots, \ddot{x}_{39})$. 假定在 $t=10$ s 时, 单元 6、17、39 的刚度分别减少了 30%、20%、40%, 根据本文方法、使用测得加速度响应可以对结构各单元刚度等物理参数进行识别追踪, 结果如图 2 所示(因篇幅所限, 图 2 中仅列出了部分杆件的刚度识别结果, 所有桁架杆件刚度识别结果和基准值的最大误差不超过 3%). 从图 2 可以看出: 刚度识别值与基准值相当吻合; 当 $t=10$ s 时, 单元 6、17、39 对应刚度 k_6, k_{17}, k_{39} 的识别值均骤然减小, 说明单元 6、17、39 发生了损伤; k_6, k_{17}, k_{39} 在发生损伤时出现了跳动, 这是自适应因子矩阵 $\mathbf{A}_{k+1}$ 此时发生突变的缘故. 但是, 一旦 $\mathbf{A}_{k+1}$ 获得了最优解, 各单元刚度识别结果又重归稳定. 从图 2 中还可以看出, 本文方法在寻找 $\mathbf{A}_{k+1}$ 最优解时是高效的, 各单元刚度识别结果很快稳定下来. 识别时的初值为: $\beta_0 = 0$ s, $\mathbf{P}_0 = 10^{16} \mathbf{I}$, $k_{i,0} = 280$ MN/m ($i=1, 2, \dots, 31$), $k_{i,0} = 190$ MN/m ($i=32, 33, \dots, 44$).

仿真 2 如图 1b 所示, 改变桁架的左支持, 使桁架变为桁架桥. 对桁架桥施加加速度峰值(PGA)为 2 g 的 El Centro 地震波激励, 测量加速度响应 $(\ddot{x}_1, \ddot{x}_{21}, \ddot{x}_{22}, \dots, \ddot{x}_{25}, \ddot{x}_{27})$. 假定在 $t=10$ s 时, 单元 7、21、30 的刚度分别减少了 15%、30%、35%, 根据本文方法、使用测得的加速度响应对结构各单元刚度等物理参数进行了识别追踪, 结果如图 3 所示(因篇幅所限, 图 3 中仅列出了部分杆件的刚度识别结果, 所有桁架杆件刚度识别结果与基准值的最大误差不超过 3%). 仿真 2 识别时使用的初值同仿真 1.

仿真 3 如图 1c 所示, 子结构由 12 根杆件、8 个节点组成. 激励形式同仿真 2, 测量加速度响应 $(\ddot{x}_1, \ddot{x}_4, \ddot{x}_5, \ddot{x}_8, \ddot{x}_9, \dots, \ddot{x}_{16})$. 假定在 $t=10$ s 时, 单元 6、16、26 的刚度分别减少了 35%、20%、35%, 根据本文方法、使用测得的加速度响应对结构各单元刚度等物理参数进行了识别追踪, 结果如图 4 所示. 仿真

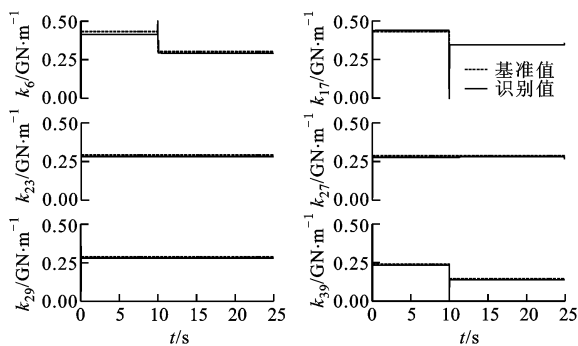


图2 仿真1下部分杆件刚度识别结果

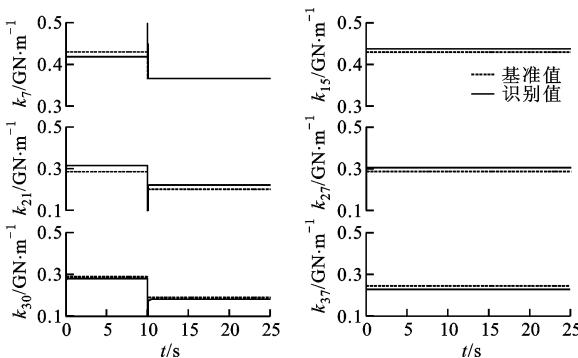


图3 仿真2下部分杆件刚度识别结果

3 识别时使用的初值同仿真 1.

3 实验研究

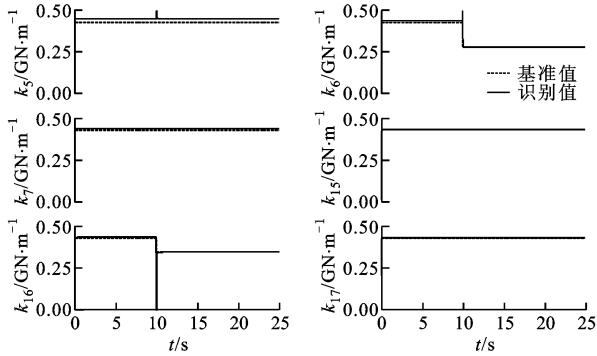
为了进一步验证基于缩聚模型的二次乘方和误差法的损伤监测能力, 本文针对某一悬臂梁结构进行了实验研究, 即将一个气缸作为刚度元件安装于悬臂梁之上(见图 5), 然后模拟实验过程中结构发生损伤的情况. 实验中考虑了白噪声、正弦和拟 El-Centro 3 种激励下的 6 种结构损伤情况.

3.1 实验装置

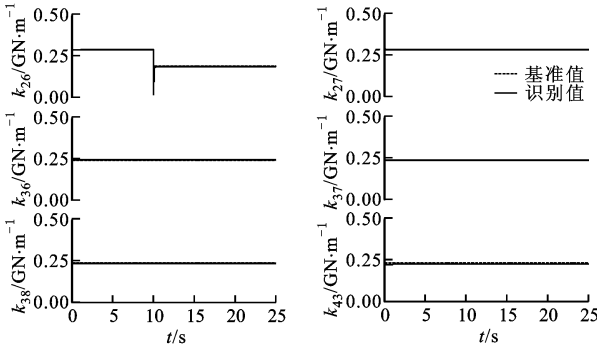
实验中的悬臂梁如图 5 所示. 为了在激励过程中改变悬臂梁的刚度, 实验时在悬臂梁上安装一个气缸, 以作为刚度元件. 悬臂梁的梁长为 1.5 m, 横截面为 0.048 m×0.003 m. 整根梁有 6 个独立的单元, 气缸安装在第 3 单元上, 见图 5. 实验中在 6 个节点上分别安装了 6 个加速度传感器(PCB3701-G3FA3G), 以测量每个节点的竖向加速度响应; 在激振器上安装了一个力传感器(PCB208C03), 以测量施加的外部载荷.

3.2 刚度单元装置

为了模拟结构的在线损伤, 本文提出了一种新的刚度单元装置(见图 5). 该装置的主体是一个双



(a)杆件 5、6、7、15、16、17 识别结果



(b)杆件 26、27、36、37、38、43 识别结果

图 4 仿真 3 下杆件刚度识别结果

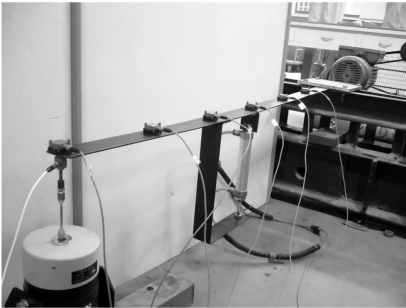


图 5 悬臂梁

阀门的液压气缸,刚度变化可通过改变液压气缸内部的气压来实现.实验前用气泵给气缸充填增压气体,充满后关闭阀门.随后在时刻 t_r (即损伤发生时)打开气缸阀门,使得内部气压骤降.

3.3 有限元模型

(1)12 自由度有限元模型.将悬臂梁分为 6 个单元、7 个节点.结构从自由度端到约束端按顺序依次为节点 1~节点 7、单元 1~单元 6,在节点 7 处施加固支约束,所以结构的有限元模型为 12 个自由度.记 $x_1, x_2, \dots, x_6$ 分别代表 6 个节点的竖向位移,

$x_7, x_8, \dots, x_{12}$ 分别代表 6 个节点的转动位移,并假定阻尼为比例阻尼,即 $\underline{C}=\alpha \underline{M}+\beta \underline{K}$.

(2)6 自由度有限元模型.在该模型中,将 6 个竖向位移视为主自由度,6 个转动位移视为从自由度.根据静态缩聚方法,这 12 自由度有限元模型可缩聚为 6 个自由度,缩聚后 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_6]^T$.

(3)3 自由度有限元模型.在该模型中,将 x_1, x_2 和 x_6 视为主自由度,其他 9 个位移为从自由度.根据静态缩聚方法,这 12 自由度有限元模型可缩聚为 3 个自由度,缩聚后 $\mathbf{x}=[x_1, x_3, x_6]^T$.

3.4 实验结果

实验前先用气泵给气缸充气,使之压力达 0.8 MPa.实验中用 Q8 板控制激振器对梁节点持续施加激振力,当激振持续时间 $t=10\text{ s}$ 时,打开刚度单元的 2 个阀门,使单元 3 的刚度突然减小,实验测试的采样频率均为 500 Hz.根据不同的缩聚有限元模型和激励载荷,考虑了下面 6 种情况的识别结果如下.

情况 1 外部激励为作用于节点 1 的正弦激励,有限元模型为 3 自由度有限元模型.根据 1.3 节方法对梁的未知参数进行了识别追踪,识别时初值分别为 $k_{i,0}=5.8\text{ kN/m}(i=1,2,4,5,6)$ 、 $k_{3,0}=20\text{ kN/m}$ 、 $\alpha_0=0\text{ s}^{-1}$ 、 $\beta_0=0\text{ s}$ 、 $\mathbf{P}_0=10^6 \mathbf{I}$,识别结果如图 6 所示.图中实线代表识别值,虚线代表通过静态实验测得的基准值, k_i 代表单元 i 的刚度识别结果.从图 6 可以看出,识别值和基准值相当吻合,当 $t=10\text{ s}$ 时, k_3 骤然减小,说明单元 3 在 $t=10\text{ s}$ 时发生损伤.损伤发生后,自适应因子矩阵 $\mathbf{\Lambda}_{k+1}$ 将发生突变,从而导致各单元刚度识别结果发生跳动,一旦获得了 $\mathbf{\Lambda}_{k+1}$ 的最优解,各单元刚度识别结果将重归稳定.从图 6 还可以看出,本方法在寻找 $\mathbf{\Lambda}_{k+1}$ 的最优解时效率很高,各单元刚度识别结果很快稳定下来.

情况 2 激励载荷为白噪声激励,其他情况同情况 1.识别结果如图 7 所示.

情况 3 外部激励为正弦激励,作用于节点 1,有限元模型为 6 自由度有限元模型.识别的结果如图 8 所示.

情况 4 激励载荷由正弦激励改变为白噪声激励,其他情况均与情况 3 相同.识别结果如图 9 所示.

情况 5 外部激励载荷为一作用于节点 2 的竖向拟 El-Centro 激励(根据 El-Centro 地震波激励转化得到的加速度响应),模型为 6 自由度有限元模型.识别结果如图 10 所示.

情况 6 外部激励载荷为一作用于节点 6 的竖向正

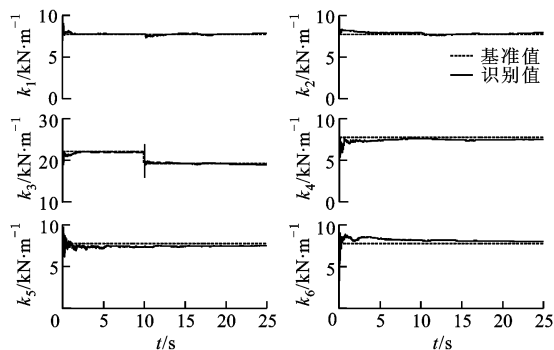


图6 情况1下悬臂梁各单元刚度识别结果

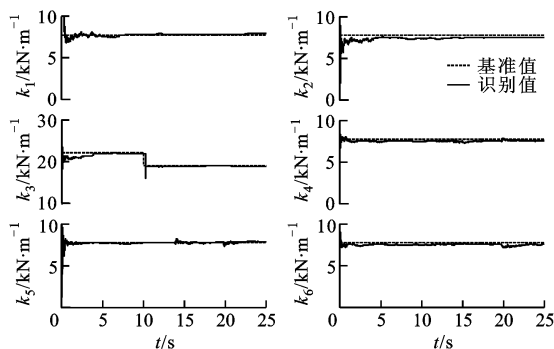


图7 情况2下悬臂梁各单元刚度识别结果

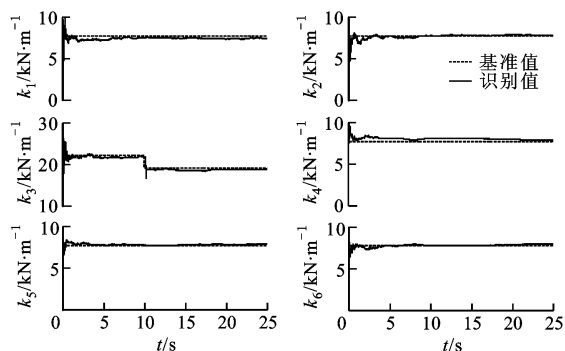


图8 情况3下悬臂梁各单元刚度识别结果

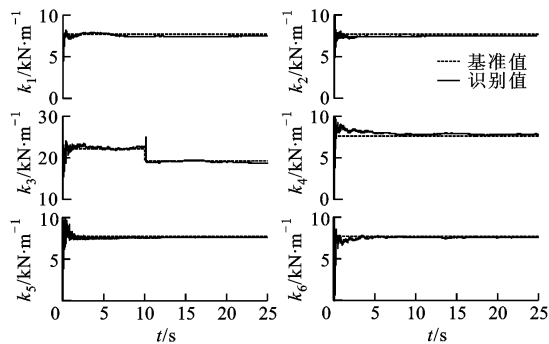


图9 情况4下悬臂梁各单元刚度识别结果

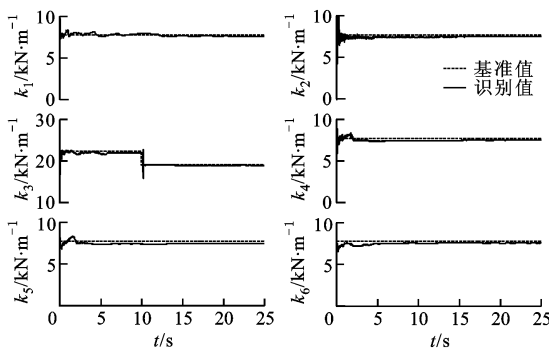


图10 情况5下悬臂梁各单元刚度识别结果

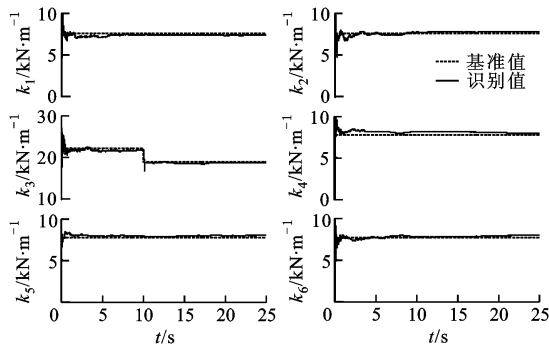


图11 情况6下悬臂梁各单元刚度识别结果

弦激励,模型为6自由度有限元模型,但仅测量 $\ddot{x}_1$ 、 $\ddot{x}_3$ 、 $\ddot{x}_6$,未测量也未被缩聚掉的 $\ddot{x}_2$ 、 $\ddot{x}_4$ 、 $\ddot{x}_5$ 在运动方程中通过移项进行处理.识别结果如图11所示.

4 结论

本文将自适应二次乘方和误差法与有限元模型缩聚法相结合来减少结构健康监测系统中传感器的数量.为了验证该方法的有效性,通过对一大型平面桁架结构和一悬臂梁结构分别进行了仿真和实验研究,得到了如下结果.

(1)将各单元刚度的识别结果与基准值对比发现:仿真下的识别结果与基准值的误差最大不超过3%;实验下的识别结果与基准值的误差最大不超过5%.

(2)观察各损伤单元的刚度识别结果可以发现:几乎在损伤发生的同时,损伤单元的刚度识别结果发生骤降,说明本文方法对损伤识别几乎不存在延时,即在结构中损伤发生的第一时间便获得了识别结果.

(3)将有限元模型缩聚法与自适应二次乘方和误差法相结合,可以大大减少结构健康监测系统中

传感器的数量。

综上所述,基于缩聚模型的自适应二次乘方和误差法是一种有效的结构损伤识别方法,能够在结构损伤发生时刻精确地获得损伤的结果、损伤的程度和位置。

参考文献:

- [1] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. Shock Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [2] HOSHIYA M, SAITO E. Structural identification by extended Kalman filter [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(12): 1757-1771.
- [3] YANG J N, LIN S, HUANG H, et al. An adaptive extended Kalman filter for structural damage identification [J]. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(4): 849-867.
- [4] 吴新亚, 周丽. 基于有限范围自适应卡尔曼滤波的结构损伤识别方法[J]. 振动工程学报, 2007, 20(4): 401-406.
WU Xinya, ZHOU Li. A finite-horizon adaptive Kalman filter for structural damage identification [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(4): 401-406.
- [5] 周丽, 吴新亚, 尹强, 等. 基于自适应卡尔曼滤波方法的结构损伤识别实验研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 197-202.
ZHOU Li, WU Xinya, YIN Qiang. Experimental study of an adaptive extended Kalman filter for structural damage identification [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 197-202.
- [6] ZHOU L, WU S Y, YANG J N. Experimental study of an adaptive extended Kalman filter for structural damage identification [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2008, 14(1): 42-51.
- [7] LIN J W, BETTI R, SMYTH A W, et al. On-line identification of nonlinear hysteretic structural systems using a variable trace approach [J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 2001, 30(9): 1279-1303.
- [8] YANG J N, HUANG H. Sequential non-linear least-square estimation for damage identification of structures [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2006, 41(1): 124-140.
- [9] YANG J N, HUANG H. Sequential non-linear least-square estimation for damage identification of struc-

tures with unknown inputs and unknown outputs [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2007, 42(5): 789-801.

- [10] HUANG H, YANG J N. Damage identification of substructure for local health monitoring [J]. Journal of Smart Structures and Systems, 2008, 4(6): 795-807.
- [11] YANG J N, HUANG H, PAN S. Adaptive quadratic sum-squares error for structural damage identification [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(2): 67-77.
- [12] HUANG H, YANG J N, ZHOU L. Adaptive quadratic sum-squares error with unknown inputs for damage identification of structures [J]. Control and Health Monitoring, 2010, 17(4): 404-426.
- [13] GUYAN R J. Reduction of stiffness and mass matrices [J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 380-380.
- [14] 张德文. 结构动力分析中的逐级近似缩聚法 [J]. 固体力学学报, 1994, 15(4): 360-364.
ZHANG Dewen. Succession-level approximate reduction technique (SART) in structural dynamic analysis [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1994, 15(4): 360-364.
- [15] BERNAL D. Load vectors for damage localization [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(1): 7-14.
- [16] BERNAL D, BECK J. Special section: phase I of the IASC-ASCE structural health monitoring benchmark [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 1-127.

[本刊相关文献链接]

考虑损伤程度的设备运行可靠性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 36-40.

钢-钢接触的扭动微动磨损氧化行为研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 86-90.

热应力对金属棒料内部损伤的机理研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 99-102.

液固高速撞击时材料表面损伤的数值模拟. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1435-1440.

考虑各向同性塑性损伤的钢结构塑性区分析方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 7885-890.

密肋复合墙体双参数地震损伤模型研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 852-856.

(编辑 苗凌)