

基于时间序列模型的结构损伤识别方法

张玉建, 罗永峰, 郭小农, 刘俊, 朱钊辰

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对现有结构损伤识别方法中因模型参数物理意义不明确而导致的损伤信息遗漏等问题, 提出一种基于时间序列模型的损伤识别方法。首先, 推导了具有外部输入的自回归模型(ARX)的一般表达式, 并通过联立多自由度体系运动方程建立了考虑结构动力特性的 ARX 模型。随后, 运用该模型预测得到未损伤情况下的节点加速度时程序列, 根据其与实测数据的差异程度构造表征结构损伤的参数, 即损伤因子。最后, 根据损伤因子数值大小与分布情况评估结构损伤状态。数值算例结果表明, 该方法在较少的测量数据样本下, 能够较好地识别单位位置与多位置损伤, 并可较为准确地判断损伤程度, 同时识别结果受激励位置与测量噪声的影响较小。

关键词: 损伤识别; 时间序列模型; 运动方程; 损伤因子; 测量噪声

中图分类号: TU317; TU391

文献标志码: A

Structural Damage Identification Method Based on Time Series Model

ZHANG Yujian, LUO Yongfeng, GUO Xiaonong, LIU Jun, ZHU Zhaochen

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the problem of missing damage information caused by the unclear physical meaning of model parameters in the existing structural damage identification method, a damage identification method based on time series model is proposed. Firstly, the general expression of auto-regressive model with exogenous input (ARX) is derived. The ARX model considering structural dynamic characteristics is established by the simultaneous multi-degree-of-freedom system motion equation. Subsequently, the model is used to predict the nodal acceleration under undamaged conditions, and the parameters of the structural damage, i.e. the damage factor, are constructed according to the difference between the measured data and the predicted data. Finally, the

structural damage state is evaluated based on the magnitude and distribution of the damage factor. The numerical results show that the proposed method can perfectly identify single-position and multi-position damage under less measurement dates, and can make a more accurate judgment on the damage degree. At the same time, the influence of the excitation position and measurement noise is small.

Key words: damage identification; time series model; equation of motion; damage factor; measurement noise

既有结构的定期检测和维护, 是保障结构安全、正常服役的前提^[1-3], 而对结构损伤的准确识别则是进行检测和维护的基础。现有的损伤识别方法包括基于结构振动特性的识别方法和基于时频响应的识别方法^[4-5]。前者一般通过结构的模态参数进行损伤识别^[6-13], 然而, 由于实际结构的高阶振型难以获取、高阶振型频率难以测量, 此类方法的应用受到制约。后者是通过对结构的振动响应进行时域或频域处理, 然后提取损伤特征量, 进而评估结构的损伤状况。基于时频响应的识别方法因其具有数据样本易于获取、识别过程简单快速等特点, 成为结构损伤识别领域的研究热点。

基于时频响应的识别方法需要对结构动态响应数据进行时域或频域处理。作为时域数据处理的重要方式, 时间序列分析已被众多学者应用于结构损伤识别领域。刁延松等^[14]利用计量经济学中的协整理论对时间序列的自回归模型(auto-regressive model, AR)系数进行处理, 提取损伤指标并进行结构损伤识别。Noh 等^[15]采用 NCREE 标准模型建立 AR 模型, 根据 AR 模型前三阶系数定义损伤因子并进行结构的损伤定位。上述方法仅利用模型的有限阶系数构造损伤特征参数, 在数据处理过程中存在损伤信息遗漏问题, 导致对部分损伤工况产生误判。

收稿日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51678431; 51378379)

第一作者: 张玉建(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢结构检测鉴定。E-mail: yjz@tongji.edu.cn

通信作者: 罗永峰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构理论与施工技术。E-mail: yfluo93@tongji.edu.cn

Fugate 等^[16]基于 AR 模型残差的损伤识别方法,提出采用质量控制图形法监测结构状态. Sakellariou 等^[17]提出基于随机输出误差振动的地震激励下结构损伤检测与评估方法. 这类方法仅考虑了单位位置损伤识别,难以保证多位置损伤情况下的识别效果. Gul 等^[18-19]提出基于自回归滑动平均模型(auto-regressive moving average model, ARMA)的统计模式识别方法,以提高时间序列方法在损伤检测过程中的鲁棒性,并对不同结构的时间序列分析进行实测验证,但该方法仅验证了特定损伤程度下的损伤识别效果,难以保证不同损伤程度下的损伤识别效果.

分析现有研究文献可知,以时间序列分析作为时域数据处理方式的损伤识别方法,在应用过程中仍存在问题. 产生这些问题的根本原因在于方法所建立的时间序列模型仅为统计意义上的数据序列规律总结,与结构本身的物理特性很难建立直接联系,进而导致数据处理过程中存在损伤信息遗漏,易产生误判现象,对多位置、多程度的复杂损伤工况难以进行有效处理,也难以实现结构损伤的定量识别.

针对上述问题,本文提出一种基于具有外部输入的自回归模型(auto-regressive model with eXogenous input, ARX)的损伤识别方法,通过建立考虑结构动力特性的 ARX 时间序列模型,对实测数据进行拟合,根据数据拟合度构造表征结构损伤的参数,即损伤因子,进而评估结构的损伤状态. 以简支梁模型与桁架结构模型为例,通过一系列的损伤工况,分别对多位置和多程度的结构损伤进行识别,并分析激振位置和测量噪声对损伤识别结果的影响,证明了本文所提方法的有效性 with 适用性.

1 ARX 模型基本原理

1.1 ARX 模型一般表达式

时间序列是指按照时间顺序或其他物理量顺序排列的一组随机数据^[20],而时间序列模型则是揭示数据内部排列规律的系统函数. 时间序列分析需要承认随机数据之间的有序性和相关性,并通过数据内部的相互关系来辨识系统的变化规律. 常用的时间序列模型包括具有外部输入的自回归滑动平均模型(auto-regressive moving average model with eXogenous input, ARMAX)、ARX 模型、AR 模型等. ARMAX 模型的基本形式^[21]如式(1)所示:

$$y(t) + a_1 y(t - \Delta t) + \cdots + a_{n_a} y(t - n_a \Delta t) = b_1 u(t) + b_2 u(t - \Delta t) + \cdots + b_{n_b} u(t - n_b \Delta t) + e(t) + c_1 e(t - \Delta t) + \cdots + c_{n_c} e(t - n_c \Delta t) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 、 $u(t)$ 和 $e(t)$ 分别为模型的输出、输入和白噪声干扰项, a_1, \cdots, a_{n_a} 、 b_1, \cdots, b_{n_b} 、 c_1, \cdots, c_{n_c} 均为待定系数; Δt 表示时间序列数据点的时间间隔.

式(1)可采用更简洁的方式进行表达,即:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (2)$$

式中: $A(q)$ 、 $B(q)$ 和 $C(q)$ 均为包含模型系数的多项式:

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (3)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \cdots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (4)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \cdots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (5)$$

式(3)~(5)中: q 为后移算子,如时间 t 的变量 $x_{ij}(t)$ 乘以 k 阶后移算子后可得 $x_{ij}(t-k)$,即:

$$x_{ij}(t)q^k = x_{ij}(t-k) \quad (6)$$

根据各多项式阶数取值的不同,ARMAX 模型可退化为常见的一些时间序列模型. 例如,当 n_b 和 n_c 均为 0 时,式(1)将转化为 AR 模型;当 n_a 和 n_b 均为 0 时,式(1)转化为滑动平均模型(moving average model, MA);仅当 n_c 为 0 时,式(1)转化为 ARX 模型. ARX 模型的基本形式为

$$y(t) + a_1 y(t - \Delta t) + \cdots + a_{n_a} y(t - n_a \Delta t) = b_1 u(t) + \cdots + b_{n_b} u(t - n_b \Delta t) + e(t) \quad (7)$$

当输入 $u(t)$ 与其系数 b_i 为向量时,该模型即为多输入单输出模型. 以双输入单输出模型为例,此时 b_i 为两元素的行向量, $u(t)$ 为两元素的列向量,模型的基本形式如式(8)所示:

$$y(t) + a_1 y(t - \Delta t) + \cdots + a_{n_a} y(t - n_a \Delta t) = b_{11} u_1(t) + \cdots + b_{1n_{b1}} u_1(t - n_{b1} \Delta t) + b_{21} u_2(t) + \cdots + b_{2n_{b2}} u_2(t - n_{b2} \Delta t) + e(t) \quad (8)$$

式中: b_{ij} 为第 i 个输入变量的第 j 阶待定参数.

1.2 考虑结构动力特性的 ARX 模型

多自由度体系粘滞阻尼系统的振动微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (9)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; F 为荷载向量; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为位移向量、速度向量、加速度向量.

根据式(9),第 i 自由度的运动方程可表示为

$$\sum_{j=1}^N m_{ij} \ddot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^N c_{ij} \dot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^N k_{ij} x_j(t) = f_i(t) \quad (10)$$

式中: N 为体系自由度数, i 为自由度编号.

式(10)对 x 求二阶导数,可得:

$$\sum_{j=1}^N m_{ij} x_j^{(4)}(t) + \sum_{j=1}^N c_{ij} x_j^{(3)}(t) + \sum_{j=1}^N k_{ij} \ddot{x}_j(t) = \ddot{f}_i(t) \quad (11)$$

式中:括号内数值表示对变量求导的阶数,后同。

当结构运动形式为自由振动时,式(11)中右侧荷载项为 0,即:

$$\sum_{j=1}^N m_{ij} x_j^{(4)}(t) + \sum_{j=1}^N c_{ij} x_j^{(3)}(t) + \sum_{j=1}^N k_{ij} \ddot{x}_j(t) = 0 \quad (12)$$

采用差分法将 $x^{(3)}$ 与 $x^{(4)}$ 表示为 \ddot{x} 的函数,如式(13)、(14)所示:

$$x_i^{(3)} = (\ddot{x}_i(t + \Delta t) - \ddot{x}_i(t - \Delta t)) / 2\Delta t \quad (13)$$

$$x_i^{(4)} = (\ddot{x}_i(t + \Delta t) + \ddot{x}_i(t - \Delta t) - 2\ddot{x}_i(t)) / (\Delta t)^2 \quad (14)$$

式中: Δt 为数据的时间间隔。

将式(13)和(14)代入式(12),整理可得:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_{ij}}{(\Delta t)^2} + \frac{c_{ij}}{2\Delta t} \right) \ddot{x}_j(t + \Delta t) = \\ \sum_{j=1}^N \left(\frac{2m_{ij}}{(\Delta t)^2} - k_{ij} \right) \ddot{x}_j(t) + \\ \sum_{j=1}^N \left(\frac{c_{ij}}{2\Delta t} - \frac{m_{ij}}{(\Delta t)^2} \right) \ddot{x}_j(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (15)$$

考虑到质量矩阵与刚度矩阵的稀疏性,只有当两个自由度相互关联时,对应的矩阵元素才不为 0. 以 $N = 3$ 为例,此时与自由度 i 的相邻自由度数为 2,则式(15)可表示为

$$\begin{aligned} A_1 \ddot{x}_i(t) + A_2 \ddot{x}_i(t - \Delta t) + A_3 \ddot{x}_i(t - 2\Delta t) = \\ B_1 \ddot{x}_{i-1}(t) + B_2 \ddot{x}_{i-1}(t - \Delta t) + B_3 \ddot{x}_{i-1}(t - 2\Delta t) + \\ C_1 \ddot{x}_{i+1}(t) + C_2 \ddot{x}_{i+1}(t - \Delta t) + C_3 \ddot{x}_{i+1}(t - 2\Delta t) \end{aligned} \quad (16)$$

式中:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{m_{ii}}{(\Delta t)^2} + \frac{c_{ii}}{2\Delta t}, A_2 = k_{ii} - \frac{2m_{ii}}{(\Delta t)^2}, \\ A_3 = \frac{m_{ii}}{(\Delta t)^2} - \frac{c_{ii}}{2\Delta t} \\ B_1 = -\frac{m_{i,i-1}}{(\Delta t)^2} - \frac{c_{i,i-1}}{2\Delta t}, B_2 = \frac{2m_{i,i-1}}{(\Delta t)^2} - k_{i,i-1}, \\ B_3 = \frac{c_{i,i-1}}{2\Delta t} - \frac{m_{i,i-1}}{(\Delta t)^2} \\ C_1 = -\frac{m_{i,i+1}}{(\Delta t)^2} - \frac{c_{i,i+1}}{2\Delta t}, C_2 = \frac{2m_{i,i+1}}{(\Delta t)^2} - k_{i,i+1}, \\ C_3 = \frac{c_{i,i+1}}{2\Delta t} - \frac{m_{i,i+1}}{(\Delta t)^2} \end{cases} \quad (17)$$

可以看出,式(16)与式(8)表达形式基本一致. 当以 $\ddot{x}_{i-1}(t)$ 和 $\ddot{x}_{i+1}(t)$ 作为输入、 $\ddot{x}_i(t)$ 作为输出时,

所建立的 ARX 模型表达式即为式(16)所示,该模型即为考虑结构动力特性的 ARX 模型,且模型表达式中各系数($A_1 \sim C_3$)为质量系数 m_{ij} 、刚度影响系数 k_{ij} 以及阻尼影响系数 c_{ij} 的组合. 此时,模型中各待定系数的阶数分别为: $n_a = 2, n_{b1} = n_{b2} = 3$.

2 基于 ARX 模型的损伤识别方法

2.1 损伤识别机理

由 1.2 节分析可知,按式(16)建立的对应当于自由度 i 的 ARX 模型包含结构的质量、刚度和阻尼等参数. 在结构发生损伤后,伴随着结构动力特性的变化,由无损结构所建立的各节点 ARX 模型将无法反映损伤结构的节点加速度动态响应规律. 因此,在建立考虑结构动力特性的 ARX 模型后,可利用此模型进行结构的损伤状态评估.

为了更好地理解 ARX 模型在损伤识别领域的应用机理,本节采用一个包含三个自由度的弹簧质点子系统进行说明,如图 1 所示. 该系统各质点均沿水平方向自由振动,其中 k, c 分别表示质点间弹簧的刚度系数和阻尼系数, m_1, m_2, m_3 表示各质点的质量.

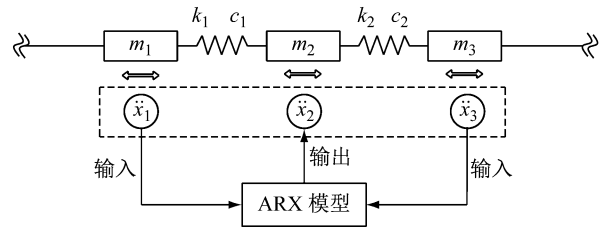


图 1 弹簧质点系统

Fig.1 Spring mass subsystem

各质点的加速度时程数据分别用 $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3$ 表示. 以 \ddot{x}_1, \ddot{x}_3 作为模型输入、 \ddot{x}_2 作为模型输出即可建立质点 2 的 ARX 模型,模型表达式如式(18)所示.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2(t) + a_1 \ddot{x}_2(t - \Delta t) + a_2 \ddot{x}_2(t - 2\Delta t) = \\ b_{11} \ddot{x}_1(t) + b_{12} \ddot{x}_1(t - \Delta t) + b_{13} \ddot{x}_1(t - 2\Delta t) + \\ b_{21} \ddot{x}_3(t) + b_{22} \ddot{x}_3(t - \Delta t) + b_{23} \ddot{x}_3(t - 2\Delta t) + e(t) \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中各系数包含了结构的物理力学参数($k_1, k_2, c_1, c_2, m_1, m_2$). 当该系统出现损伤时,质点 2 的加速度响应将不再满足式(18). 此时,以系统损伤后实测得到的 \ddot{x}_1, \ddot{x}_3 作为输入代入式(18)后,所得的输出 \ddot{x}_2 数据序列将与实测得到的 \ddot{x}_2 数据序列存在差异. 根据两者差异程度,可对系统损伤状态进行识别评估.

2.2 损伤特征因子

假设某节点实测加速度时程序列为 Y_i , 平均值 \bar{Y} ; 由 ARX 模型预测的加速度时程序列为 y_i . 根据两序列的差异性, 定义拟合度 ξ 为

$$\xi = \frac{1}{100 \times (Z^{1/p}) + 1} \quad (19)$$

式中: p 为计算阶次; Z 表达为式(20):

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (|y_i - Y_i|^p)}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{Y}|^p)} \quad (20)$$

式中: n 为样本数量.

根据定义, 可以得到拟合度 ξ 所在区间为 $(0, 1]$. 拟合度越大, 代表待识别结构与未损伤结构越接近. 无损伤情况下, y_i 将与 Y_i 完全相等; 而当结构出现损伤时, 式(16)中模型各系数也随之变化, 由无损伤情况下计算得到的 ARX 模型预测得到的加速度时程数据, 将与实测的加速度时程数据产生偏差. 因此, 可根据拟合程度定义损伤因子 (damage factor, DF) 数值大小为 $1 - \xi$.

2.3 损伤识别流程

由 2.1 节分析可知, 可将模型预测所得某一节点的加速度时程数据与实测加速度时程数据进行对比, 根据两者拟合度的大小, 评估该节点附近单元的损伤状态. 由此, 本文提出基于 ARX 时间序列模型的损伤识别方法, 具体分析步骤如下:

(1) 针对损伤识别对象的结构形式, 根据式(7)、(15), 确定所采用 ARX 模型的各项式阶数;

(2) 通过有限元数值模拟, 获取无损伤结构在某瞬时荷载作用后的自由振动加速度响应 $\{Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_i, \dots\}$;

(3) 根据 $\{Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_i, \dots\}$ 建立对应于各节点的 ARX 模型;

(4) 针对待测结构制定测量方案, 布置加速度传感器, 施加外界激励 (如锤击), 获取结构各节点实测加速度时程数据 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots\}$;

(5) 将 Y_{i-1} 与 Y_{i+1} 作为输入, 代入对应于节点 i 的 ARX 模型, 得到未损伤结构中节点 i 的加速度响应 y_i ;

(6) 代入 y_i 与 Y_i 至式(19)、(20), 计算节点 i 的损伤因子 DF;

(7) 改变 i , 按步骤(5)~步骤(6)重复计算, 最终得到各节点的损伤因子 DF;

(8) 根据 DF 数值对结构损伤状态进行评估.

3 数值算例

为验证所提方法的有效性与适用性, 本文分别采用一简支梁结构和桁架结构作为数值算例进行模拟验算.

3.1 算例一

3.1.1 数值模型

简支梁跨度 $L=10$ m, 采用箱型截面, 截面尺寸为 300 mm \times 200 mm \times 10 mm \times 10 mm, 弹性模量 $E=2.1 \times 10^5$ MPa, 泊松比 $\nu=0.3$, 材料密度 $\rho=7850$ kg \cdot m $^{-3}$, 结构模型见图 2. 采用 ANSYS v17.0 建立有限元模型, 单元类型为 Beam188 单元, 沿梁长度方向划分 24 个单元. 阻尼类型采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼比取 0.02. 以瞬时冲击荷载作为激励, 获取模型各节点竖向加速度响应作为仿真数据, 加速度信号的采样频率为 100 Hz. 本文共选取 2 个位置 (节点号 13、19) 作为激励点, 并分别定义为 ①号激励点与 ②号激励点, 冲击荷载大小为 100 N, 荷载作用时间 0.000 1 s. 图 2 所示模型上方数字为节点编号, 下方数字为单元编号.

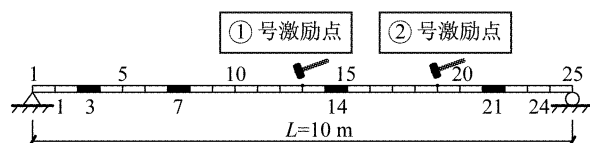


图 2 简支梁模型

Fig.2 Simple-supported beam model

由于既有结构构件的损伤类型较多, 本文仅讨论钢结构中常见的材料腐蚀、截面畸变、壁板变形等缺陷所引起的杆件刚度削减, 不考虑服役过程中构件的质量损失与阻尼变化. 文中构件的损伤程度即为构件刚度削减的相对值. 考虑到结构的对称性, 假定简支梁损伤出现在 4 处不同的位置, 损伤位置为图 2 所示阴影区域, 采用弹性模量折减的方式进行损伤模拟, 弹性模量折减程度即为损伤程度.

需要说明的是, 在利用相邻节点的加速度时程数据建立 ARX 模型预测某节点的加速度时, 由于支座节点固定, 不发生振动, 因此, 本文所提方法无法识别支座附近单元的损伤情况.

施加激励后, 获取任意两个节点的加速度时程反应, 并截取前 2 s 数据共 200 个数据点进行记录, 如图 3 所示. 其中, 示例 1 对应节点远离激振位置, 示例 2 对应节点靠近激振位置. 由图 3 可知, 本模型的自由振动在前 2 s 已基本衰减为 0. 此外, 考虑到

实际检测过程中可能出现人工操作引起的误差,需略去施加激励后一定时间段内的数据样本.因此,本文截取 1~2 s 时间区段的 100 个数据建立 ARX 模

型,并进行损伤识别.在按式(19)计算损伤因子时,设定计算阶次 $p=2$.

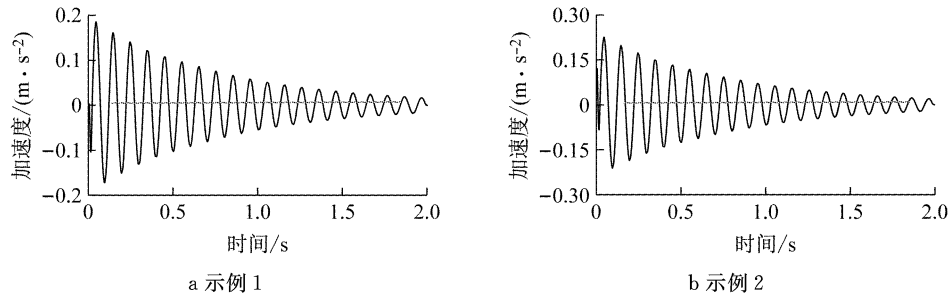


图 3 节点加速度时程数据

Fig.3 Acceleration time history data of nodes

3.1.2 损伤工况

定义损伤工况如表 1 所示,其中工况 1~工况 4 为单位置损伤,工况 5~工况 8 为多位置损伤.

表 1 数值模拟损伤工况(算例一)

Tab.1 Damage cases of numerical simulation(example 1)

工况	损伤单元编号	损伤程度/%
1	3	20
2	7	20
3	14	20
4	21	20
5	3,14	20
6	7,21	20
7	3,21	20(单元 3);10(单元 21)
8	3,7	10(单元 3);5(单元 7)

3.1.3 测量噪声

实际工程中,实测输出响应信号通常会包含一定水平的测量误差.已有研究表明,测量误差具有一定同济规律,因此可以利用概率学理论和数理统计

学方法对测量误差进行统计分析和数值模拟,从而弥补采用计算机数值模拟无法得到真实测量数据的不足.

本文采用文献[22]的方法,对测点的加速度响应施加正态分布的白噪声,作为测量噪声以引入测量误差,取噪声强度为 $n\%$,即测点加速度响应均方值 R 的 $n\%$,施加噪声后的响应为

$$a_t = a_{t,0} + r_{SN} \cdot R \cdot n/100 \quad (21)$$

式中: $a_{t,0}$ 和 a_t 分别为施加噪声前、后的加速度响应; r_{SN} 为符合标准正态分布的随机数.

本文数值算例中,噪声强度分别取 0(无噪声)、1%、2%、4%.

3.1.4 结果与分析

(1) 损伤位置识别

应用本文方法对工况 1~工况 8 进行损伤识别.图 4 为选择①号激振点进行激励,在不考虑测量噪声的情况下 4 种单位置损伤工况的损伤识别结果,

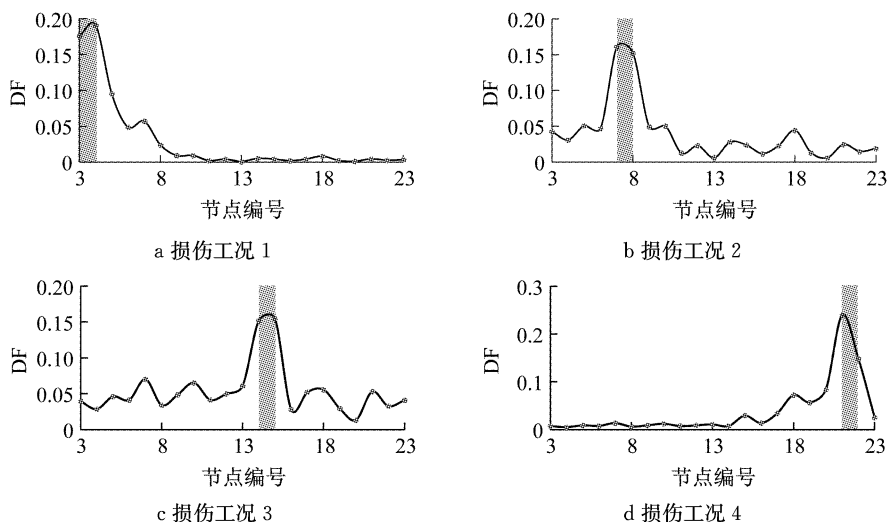


图 4 单位置损伤识别结果(工况 1~工况 4,①号激振点,无噪声)

Fig.4 Single-position damage identification results (condition 1~4, excitation point 1, without noise)

图中阴影部分表示损伤位置. 图 5 为选择①号激振点进行激励,在不考虑测量噪声的情况下 4 种多位置损伤工况的损伤识别结果. 以工况 6 为例,将识别

结果与各位置单独发生损伤时的识别结果进行对比,如图 6 所示.

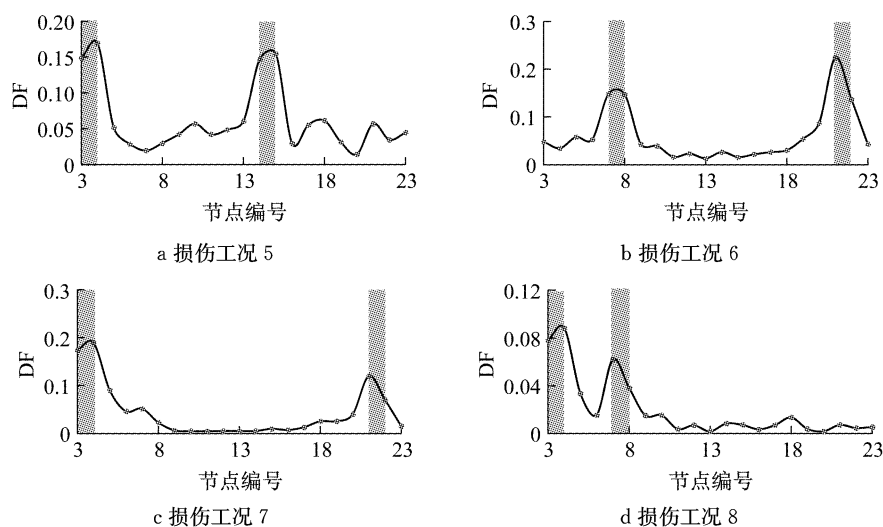


图 5 多位置损伤识别结果(工况 5~8,①号激振点,无噪声)

Fig. 5 Multi-position damage identification results (condition 5~8, excitation point 1, without noise)

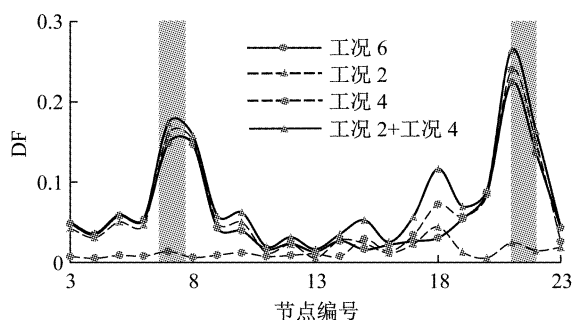


图 6 识别结果对比(工况 6,①号激振点,无噪声)

Fig. 6 Comparison of identification result (condition 6, excitation point 1, without noise)

图 4 表明,对于单位置损伤工况,损伤杆件附近区域的 DF 值较大,并在与损伤杆件相连的节点达

到峰值,由此可以对杆件损伤位置做出较为准确的判断. 图 5 表明,多位置损伤工况下各损伤位置处的 DF 显著高于其他位置,因此可以较为准确地判断损伤位置. 图 6 表明,多位置损伤识别结果近似为各单位置损伤识别结果的线性叠加,各位置损伤对识别结果的相互影响可忽略不计.

(2) 损伤程度识别

为考察不同杆件损伤程度的识别效果,本节以工况 2 和工况 6 为例,在原有 20% 损伤程度的基础上新增 5 组不同程度的损伤情况,损伤识别结果如图 7 所示,损伤位置处相邻节点的 DF 值随损伤程度变化曲线如图 8 所示.

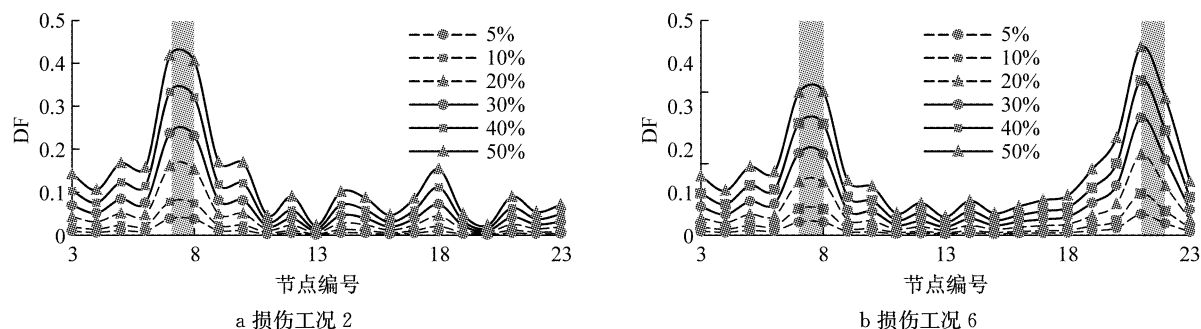


图 7 不同损伤程度下的损伤识别结果(工况 2、工况 6,①号激振点,无噪声)

Fig. 7 Identification results of single-position damage under different degree of damage (condition 2 & 6, excitation point 1, without noise)

图 7 表明,不同损伤程度下各节点 DF 分布形式基本相同,即使在较小损伤程度的情况下,仍然能够

较为准确地确定损伤位置. 图 8 表明,损伤位置相邻节点的 DF 值与损伤程度高度线性相关. 因此,在进

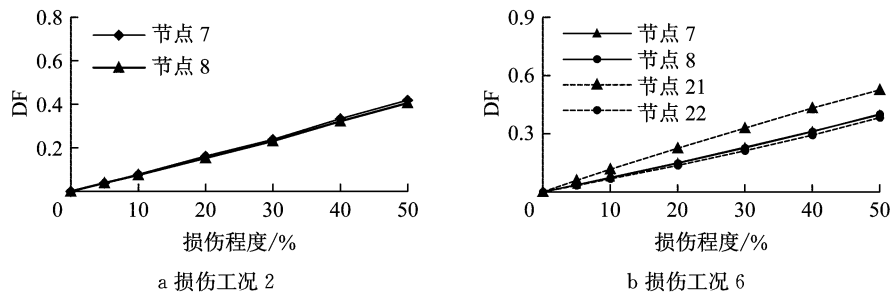


图 8 损伤单元相邻节点损伤因子-损伤程度曲线(工况 2、工况 6, ①号激励点, 无噪声)
Fig.8 Damage factor-damage degree curve of nodes adjacent to damage element
(condition 2 & 6, excitation point 1, without noise)

行结构损伤程度识别时,可将某一特定的损伤程度设定为基准损伤工况,并通过有限元数值模拟手段计算该损伤程度下节点的 DF 数值. 根据 DF 与损伤程度的线性关系,通过对比实测结构与基准损伤工况下的 DF 数值,即可对损伤程度进行较为准确的判断.

(3) 激励位置对损伤识别结果的影响

为考察激励位置对杆件损伤识别效果的影响,本节以工况 2 和工况 6 为例,分别以激励点①和激励点②作为激励位置,应用本文方法对该简支梁结构进行损伤识别,得到不同激励位置的结构损伤识别结果如图 9 所示.

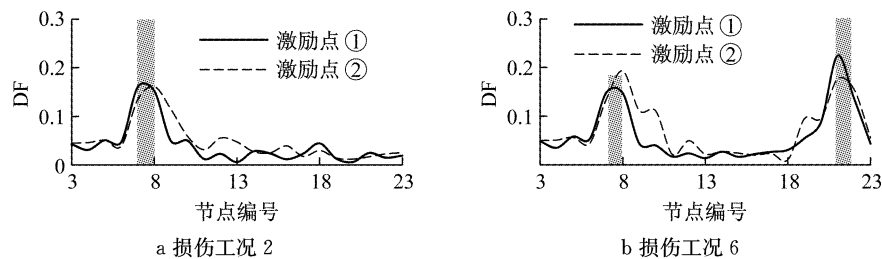


图 9 不同激励位置下损伤识别结果(工况 2、工况 6, 无噪声)

Fig.9 Single-position damage identification results under different excitation positions
(condition 2 & 6, without noise)

图 9 表明,不同激励位置的各节点 DF 值具有微小差异,但对损伤识别结果影响较小,可忽略不计. 实际工程应用中,可根据不同激励位置所求得的 DF 数值进行综合判断,从而获得较为准确的识别结果.

(4) 测量噪声对损伤识别结果的影响

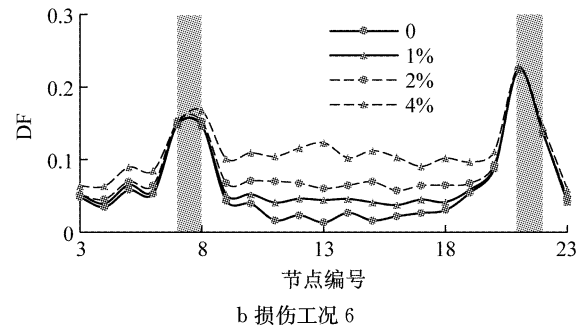
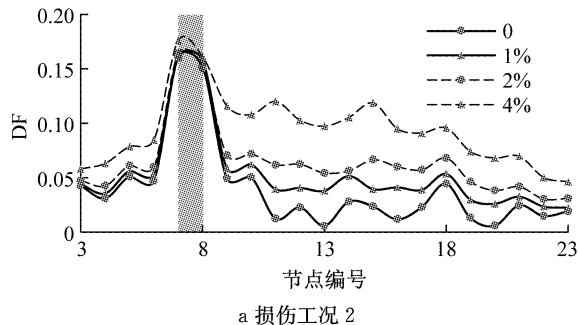


图 10 不同噪声水平下多位置损伤识别结果(工况 2、工况 6, ①号激励点)

Fig.10 Multi-position damage identification results under different noise levels(condition 2 & 6, excitation point 1)

图 10 表明,测量噪声对单位置及多位置损伤识别结果均具有一定程度的影响. 随着测量噪声强度等级的不断提高,未损伤区域的节点 DF 变化显著,

为考察测量噪声水平对杆件损伤识别效果的影响,本节以工况 2 和工况 6 为例,引入三组不同程度的测量噪声并将其识别结果与无噪声情况下的识别结果进行对比,对比结果如图 10 所示.

因此,可能存在高噪声环境下损伤位置的误判情况. 不同噪声等级下损伤位置节点 DF 基本保持不变,因此,在准确识别损伤位置的情况下,测量噪声对损

伤程度识别结果的影响较小,可忽略不计。

3.2 算例二

3.2.1 数值模型

由 1.1 及 1.2 节理论推导部分可以看出,本文所提方法基于双输入单输出 ARX 模型,适用于梁式结构受力体系的损伤识别。桁架结构依据其实际受力形式可等效为普通梁结构,如图 11 所示,因此可用本文所提方法对其进行损伤识别。

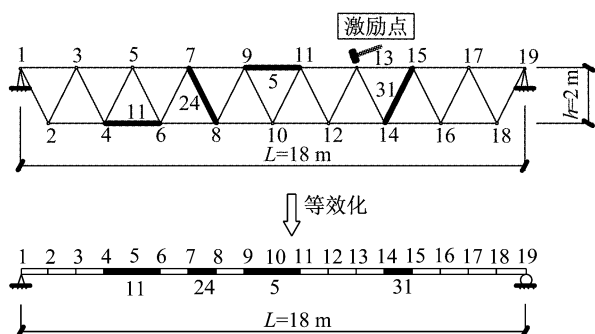


图 11 桁架结构模型

Fig.11 Truss structure model

桁架结构为上弦支撑的平面静定钢桁架结构^[12-13],跨度 $L=18$ m,高度 $h=2$ m。上下弦杆长度均为 2 m,斜腹杆长度为 2.24 m,采用圆钢管截面,截面积为 5×10^{-4} m²,弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$,材料密度 $\rho=7850$ kg · m⁻³,结构模型如图 11 所示。采用 ANSYS v17.0 建立有限元模型,单元类型为 Link1 单元。阻尼类型采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比取 0.02。以瞬时冲击荷载作为激励,获取模型各节点竖向加速度响应作为仿真数

据,加速度信号的采样频率为 100 Hz。本文选取节点 13 作为激励点,冲击荷载大小为 100 N,荷载作用时间 0.000 1 s。图 11 所示模型节点位置处数字为节点编号,单元旁数字为单元编号。

考虑到结构的对称性,假定桁架结构损伤出现在 4 处不同的位置,损伤位置为图 11 所示阴影区域(或称加粗区域),采用弹性模量折减的方式进行损伤模拟,弹性模量折减程度即为损伤程度。在识别过程中,上下弦杆的损伤可通过等效梁结构相应单元中部节点的 DF 值进行判断,如单元 11 可通过 5 号节点进行判断;斜腹杆的损伤可通过等效梁结构相应单元两侧节点的 DF 值进行判断,如单元 24 可通过 7、8 号节点进行判断。

3.2.2 损伤工况

定义损伤工况如表 2 所示,其中工况 1、2 为单位置损伤,工况 3、4 为多位置损伤。

表 2 数值模拟损伤工况(算例二)

Tab.2 Damage cases of numerical simulation(example 2)

工况	损伤单元编号	损伤程度/%
1	5	20
2	31	20
3	5、24	20
4	11、31	20(单元 11);40(单元 31)

3.2.3 结果与分析

应用本文方法对工况 1~工况 4 进行损伤识别,识别结果如图 12 所示。为考察不同杆件损伤程度的识别效果,本节以工况 2 为例,在原有 20%损伤程度

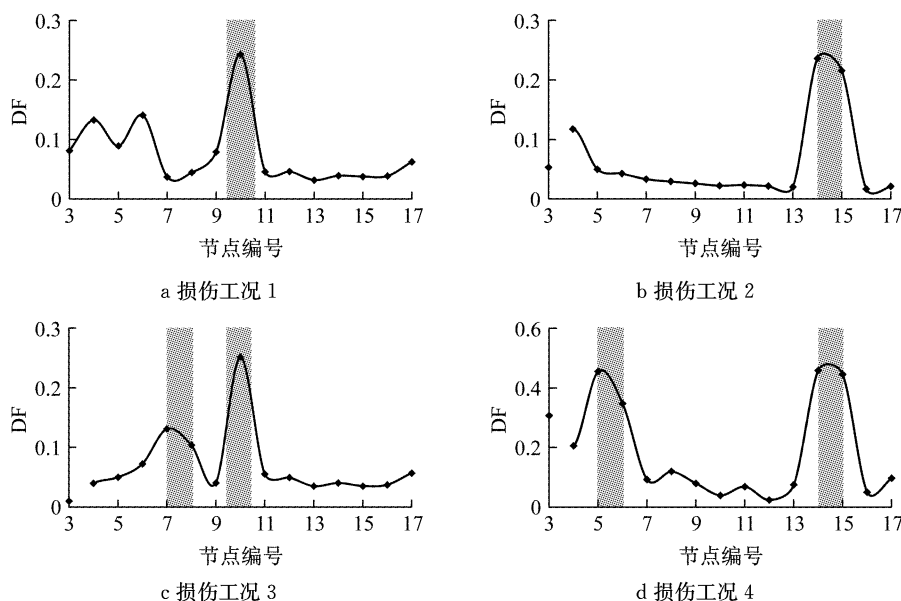


图 12 损伤位置识别结果

Fig.12 Damage location identification results

的基础上新增 4 组不同程度的损伤情况,损伤识别结果如图 13 所示,损伤位置处相邻节点的 DF 值随损伤程度变化曲线如图 14 所示。

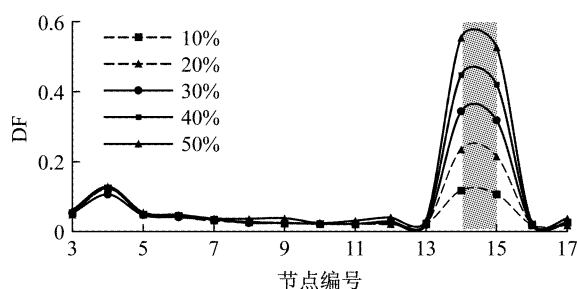


图 13 不同损伤程度下的单位置损伤识别结果

Fig. 13 Identification results of single-position damage under different degree of damage

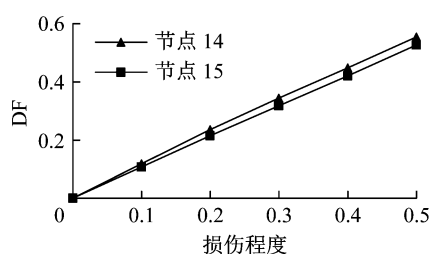


图 14 损伤因子-损伤程度曲线

Fig. 14 Damage factor-damage degree curve

图 12 表明,各损伤工况下均可较为准确地识别损伤位置。值得注意的是,当损伤杆件为上下弦杆时,损伤区域中部节点的 DF 数值较大。同时可以看出,对于上下弦杆,若以原结构的单元相邻节点的 DF 值进行判断,识别效果不尽理想,原因在于在等效梁结构中,原结构弦杆的损伤相当于两个相邻单元同时发生损伤,此时两单元公共节点的 DF 值会高于端部的两节点 DF 值。因此,以中部节点的 DF 数值作为弦杆的损伤特征指标会获得更好的识别

效果。

图 13 表明,不同损伤程度下各节点 DF 分布形式基本相同,即使在较小损伤程度的情况下,仍然能够大致确定损伤位置,但其准确性会有所降低。图 14 表明,与简支梁结构相同,桁架结构损伤区域内节点的 DF 值与损伤程度高度线性相关。因此,在进行结构损伤程度识别时,可将某一特定的损伤程度设定为基准损伤工况,并通过有限元数值模拟手段计算该损伤程度下节点的 DF 数值。根据 DF 与损伤程度的线性关系,通过对比实测结构与基准损伤工况下的 DF 数值,即可对损伤程度进行较为准确的判断。

在利用本文所提方法对桁架结构进行损伤识别时,激振位置与测量噪声对识别结果的影响程度仍需通过数值模拟进行评判。根据数值模拟结果,与算例一相同的是,激振位置和测量噪声两种因素对于桁架结构损伤识别结果准确性与精度的影响仍然较小,因此可以忽略。限于文献篇幅,本文不再赘述。

3.2.4 方法对比

现有的桁架结构损伤识别方法主要为基于结构振动特性的识别方法,如应变模态法^[9]、柔度阵法^[10]、单元模态应变差法^[12]、柔度曲率幅值突变系数法^[13]等。柔度曲率幅值突变系数法通过计算结构各阶模态柔度曲率幅值突变系数,对结构的损伤状况进行综合判断。本节以柔度曲率幅值突变系数法为例,分别应用本文所提方法与此方法对算例二的桁架结构进行损伤识别,并对识别结果进行整理对比。以工况 1 为例,两种方法的损伤识别结果对比如图 15 所示,其中图 15a 为仅利用一阶柔度曲率幅值突变系数进行对比;图 15b 为利用前三阶柔度曲率幅值突变系数的平均值进行对比。

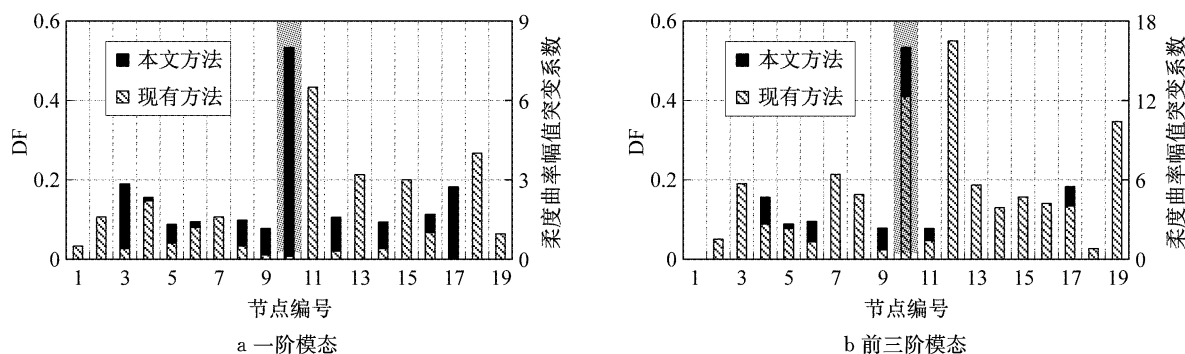


图 15 与现有损伤识别方法的对比

Fig. 15 Comparisons with existing damage identification methods

图 15 表明,应用现有损伤识别方法进行损伤位置识别时,未损伤区域处的节点柔度曲率幅值突变

系数较大(如节点 18、19),因此在实际工程应用中可能产生误判现象。此外,对于多位置损伤情况的识别

以及损伤程度的判定,现有方法均不能较好地解决.本文所提方法在一定程度上提高了识别的精度,并在多位置损伤工况下以及损伤程度判定方面具有一定优势.

4 结论

本文基于 ARX 时间序列模型,提出一种新的损伤识别方法.根据时间序列模型基本方程推导出双输入单输出 ARX 模型一般表达式,通过联立多自由度体系动力方程确定模型阶数,根据未损伤结构的加速度时程数据,建立考虑结构动力特性的各节点 ARX 时间序列模型,预测未损伤结构的节点加速度时程数据,通过对比理论预测数据和实测数据,根据拟合程度计算损伤因子 DF,进而进行结构损伤评估.数值算例分析结果表明,根据本文方法计算得到的各节点 DF 数值分布可用于损伤位置的识别定位,并可根据损伤位置相邻节点的 DF 数值大小识别损伤程度.该方法具有以下优点:

(1) 应用本文所提方法建立的 ARX 模型符合动态数据的实际变化规律,模型拟合程度较高,拟合模型所需的样本数量较少;

(2) 可仅针对疑似损伤区域或重点检测区域进行损伤识别,无需对整体结构进行模态参数识别,所需传感器数量较少;

(3) 实际工程应用中,可通过有限元数值模拟计算基准损伤工况的节点 DF 数值,并将实测结构所得 DF 与其进行对比,即可较为准确地判断损伤程度;

(4) 多位置损伤工况下仍具有较好的识别效果.

参考文献:

- [1] 罗永峰. 国家标准《高耸与复杂钢结构检测与鉴定技术标准》编制简介[J]. 钢结构, 2014, 29(4):44.
LUO Yongfeng. Brief introduction of composition of technical standard for inspection and appraisal of highrising and complex steel structures [J]. Steel Construction, 2014, 29(4):44.
- [2] 罗永峰, 张立华, 贺明玄. 上海市《钢结构检测与鉴定技术规程》编制简介[J]. 钢结构, 2009, 24(10):57.
LUO Yongfeng, ZHANG Lihua, HE Mingxuan. Brief introduction of composition of technical specification for inspection and appraisal of steel structures of shanghai [J]. Steel Construction, 2009, 24(10):57.
- [3] 罗永峰, 刘俊. 既有空间结构位形推算的随机偏差方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(6):791.
- LUO Yongfeng, LIU Jun. Stochastic deviation method of reckoning geometric shapes of existing spatial structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(6):791.
- [4] 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.
ZHU Hongping, YU Jing, ZHANG Junbin. A summary review and advantages of vibration-based damage identification methods in structural health monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2):1.
- [5] 韩大建, 王文东. 基于振动的结构损伤识别方法的近期研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(1):91.
HAN Dajian, WANG Wendong. Overview of vibration-based damage identification methods [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(1):91.
- [6] NDAMBI J M, VANTOMME J, HARRI K. Damage assessment in reinforced concrete beams using eigen frequencies and mode shape derivatives [J]. Engineering Structures, 2002, 24(4):501.
- [7] RATCLIFFE C P. Damage detection using a modified laplacion operator on mode shape data [J]. Journal of Sound & Vibration, 1997, 204(3):505.
- [8] KO J M, SUN Z G, NI Y Q. Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge [J]. Engineering Structures, 2002, 24(7):857.
- [9] 杜永峰, 邵云飞. 基于应变模态的桁架结构损伤指标研究[J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(3):127.
DU Yongfeng, SHAO Yunfei. Study on damage index of truss structure based on strain modal [J]. Journal of Gansu Sciences, 2007, 19(3):127.
- [10] 綦宝晖, 郭瑞锋, 蔡贤辉, 等. 一种桁架结构损伤识别的柔度阵法[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1):42.
QI Baohui, WU Ruifeng, CAI Xianhui, *et al.* A flexibility matrix method for damage identification of truss structure [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1):42.
- [11] 牛杰, 王龙花, 宗周红, 等. 考虑比例阻尼影响的梁式结构损伤识别方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3):120.
NIU Jie, WANG Longhua, ZONG Zhouhong, *et al.* Damage identification method of beam type structures considering proportional damping [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(3):120.
- [12] 李永梅, 郭磊, 孙国富, 等. 桁架结构损伤识别的单元模态应变差法[J]. 铁道学报, 2010, 32(6):78.
LI Yongmei, GUO Lei, SUN Guofu, *et al.* Identification of damages of truss structures using elemental modal strain method [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(6):78.
- [13] 张丽梅, 陈务军, 杜守军, 等. 钢桁架结构损伤检测的柔度曲率幅值突变系数法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(S1):133.
ZHANG Limei, CHEN Wujun, DU Shoujun, *et al.* Testing damage on the steel truss structure using the method of the sudden change coefficient of flexibility of curvature [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(S1):133.

- JIN Li. Research on the matching relationship between battery status and operation of electric buses [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [13] 王名扬, 张洪信, 张铁柱, 等. 电动公交车实际运行耗电量响应面模型研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2014(2):49. WANG Mingyang, ZHANG Hongxin, ZHANG Tiezhu, *et al.* Study on response surface model of actual power consumption of electric buses [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2014(2):49.
- [14] WANG J, LIU P, HICKES G J, *et al.* Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8):3942.
- [15] FRELING R, WAGELMANS A P M, PAIXÃO J M P. Models and algorithms for single-depot vehicle scheduling [J]. Transportation Science, 2001, 35(2):165.
- [16] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):256.
- ~~~~~
- (上接第 1700 页)
- [14] 刁延松, 曹亚东, 孙玉婷. 环境变化下基于 AR 模型系数和协整的海洋平台结构损伤识别[J]. 工程力学, 2017, 34(2):179. DIAO Yansong, CAO Yadong, SUN Yuting. Structural damage identification based on AR model coefficients and cointegration for offshore platform under environmental variations [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2):179.
- [15] NOH H Y, NAIR K K, KIRERNIDJIAN A S, *et al.* Application of time series based damage detection algorithms to the benchmark experiment at the national center for research on earthquake engineering (NCREE) in Taipei [J]. Smart Structures and Systems, 2009, 5(1):1.
- [16] FUGATE M L, SOHN H, FARRAR C R. Vibration-based damage detection using statistical process control [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2001, 15(4):707.
- [17] SAKELLARIOU J S, FASSOIS S D. Stochastic output error vibration-based damage detection and assessment in structures under earthquake excitation [J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 297(3):1048.
- [18] GUL M, CATBAS F N. Statistical pattern recognition for structural health monitoring using time series modeling: theory and experimental verifications [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009, 23(7):2192.
- [19] GUL M, CATBAS F N. Structural health monitoring and damage assessment using a novel time series analysis methodology with sensor clustering [J]. Journal of Sound & Vibration, 2011, 330(6):1196.
- [20] 王燕. 应用时间序列分析[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2015. WANG Yan. Applied time series analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.
- [21] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C. Time series analysis: forecasting and control [J]. Journal of Time, 2010, 31(4):303.
- [22] WANG D, HALDAR A. Element-level system identification with unknown input information [J]. Journal of Engineering and Mechanics, 1994, 120(1):159.