

基于伪传递函数的高耸结构损伤识别*

李万润^{1,2,3}, 杜永峰^{1,2}, 倪一清³, 李 慧^{1,2}

(1. 兰州理工大学甘肃土木工程防灾减灾重点实验室 兰州, 730050)

(2. 兰州理工大学防震减灾研究所 兰州, 730050)

(3. 香港理工大学深圳研究院 深圳, 518057)

摘要 基于传递函数可以反映结构输入输出相互关系(结构特性)的思想,提出了一种基于具有额外输入的自回归模型(autoregressive model with exogenous input,简称 ARX 模型)建立伪传递函数的损伤定位方法。首先,根据各自由度之间的关联性对其进行分组,选取其中一个自由度的响应作为参考通道即系统输出,将与其相关联的其他自由度响应信号作为系统输入,利用 ARX 模型,建立各分组在结构完好工况下的伪传递函数,将其作为基准伪传递函数;然后,利用基准伪传递函数对待识别工况的响应进行预测,计算其拟合度;最后,通过定义待识别工况与完好工况之间拟合度的差异作为损伤指标,对结构损伤进行识别。通过广州塔缩减模型算例分析表明,该方法在有噪声的情况下,可以很好地发现损伤并对结构损伤位置和损伤程度进行识别。

关键词 伪传递函数;具有额外输入的自回归模型(ARX 模型);损伤识别;拟合度;高耸结构

中图分类号 TU12; TU311.3; TH113.1

引言

近年来,随着经济的快速发展以及施工技术的不断提升,超长、超高结构不断涌现,而且部分已建结构已进入了老化期,因此如何评价这些结构的现有状态以及在极端荷载(风、地震等)作用下的性能备受设计者、业主以及学者的关注。近年来,在国内外学者的共同努力下,使得结构健康监测技术得到了长足发展,并且已经开始尝试在一些大跨度桥梁、高耸结构上安装结构健康监测系统,这为结构健康监测技术从理论转向实际应用提供了机遇,也为结构健康监测理论研究提供了原形试验保障。损伤识别是结构健康监测的重要组成部分,得到了国内外学者的广泛关注。传统的损伤识别方法多是基于结构振动特性^[1]或者有限元模型修正技术^[2]。这些损伤识别算法需要首先识别结构的模态参数或者是具有很准确的有限元模型,但仍会出现误判的情况。部分学者提出了一种基于统计模式识别的损伤识别方法,该方法是从结构实测的振动和应变等响应信号中提出损伤指标,利用模式分类方法对损伤进行

识别。由于该方法不需要结构模型,只需结构在健康状态下的响应数据即可,因此得到了国内外学者的广泛关注。文献[3-4]以 AR-ARX 模型残差建立损伤的参考模式总体,采用假设检验的方法对损伤进行了诊断。Sohn 等^[5-6]利用主成分分析方法和自适应神经网络提出了以模型残差构造统计量,采用序列假设检验法和极值统计法对结构损伤进行诊断的方法。刘毅等^[7]利用主成分分析与假设检验对损伤进行了识别。Nair 等^[8]利用自回归系数作为损伤指标,采用统计方法对结构损伤进行诊断。王真等^[9]利用 AR 模型进行灵敏度分析对损伤进行了识别。Zhang^[10]针对桥梁结构提出了一种用于环境激励下桥梁的损伤识别方法。杜永峰等^[11]利用时间序列模型残差对损伤进行了识别。Fugate 等^[12]建立了结构振动响应 AR 模型,利用 AR 模型的残差作为损伤指标,采用均值控制图和标准差控制图对结构损伤状态进行监测,通过桥墩试验验证了该方法的可行性与有效性。Sohn 等^[13]对该方法进行了发展,在建立控制图前,采用主成分分析和投影方法对响应信号和 AR 系数进行数据压缩,使损伤指标对损伤更加灵敏。Kullaa^[14]采用统计过程控制

* 国家自然科学基金资助项目(50978130,51178211)

收稿日期:2013-01-02;修回日期:2013-03-05

(statistical process control, 简称 SPC) 方法对 Zurich 的 Z24 大桥进行了状态监测, 分别采用休哈特控制图、累积和控制图和指数加权移动平均控制图等 8 种控制图对结构损伤进行监控, 对各种控制图进行了对比, 结果表明休哈特控制图可靠性最高。文献[15]对基于统计模式识别的损伤识别方法的理论进行了介绍, 通过试验模型对该方法的可行性进行了验证。以上基于统计模式识别的损伤识别方法基本上都是对结构是否发生损伤进行诊断, 而对于损伤位置的研究则相对较少。

笔者基于传递函数可以反映结构输入输出相互关系(结构特性)的思想, 提出了一种基于 ARX 模型建立伪传递函数的损伤定位方法。首先, 根据各自由度之间的关联性对其进行分组, 选取其中一个自由度的响应作为参考通道即系统输出, 将与其相关联的其他自由度响应信号作为系统输入, 利用 ARX 模型建立各分组在结构完好工况下的伪传递函数, 将其作为基准伪传递函数; 然后, 利用基准伪传递函数对待识别工况的响应进行预测, 计算其拟合度; 最后, 通过定义待识别工况与完好工况之间拟合度的差异作为损伤指标, 对结构损伤进行识别。通过广州塔缩减模型算例分析表明, 该方法在有噪声的情况下, 可以很好地发现损伤并对结构损伤位置和损伤程度进行识别。

1 时间序列模型

时间序列分析主要是指采用参数模型对所观测到的有序随机数据进行分析与处理的一种数据处理方法, 参数模型在时间序列分析中扮演着重要角色。一般的分析中, 最常用的参数模型为自回归滑动平均模型^[16] (autoregressive moving average, 简称 ARMA)。对于一个平稳、零均值的时间序列模型 $x_t, t=1, 2, \dots, N$, 可以拟合成一个随机差分方程 $x_t + a_1 x_{t-1} + a_2 x_{t-2} + \dots + a_{n_a} x_{t-n_a} = b_1 u_t + b_2 u_{t-1} + \dots + b_{n_b} u_{t-n_b} + e_t + d_1 e_{t-1} + \dots + d_{n_d} e_{t-n_d}$ (1) 其中: x_t 为系统 t 时刻的输出; u_t 为系统 t 时刻的输入; e_t 为误差; a_i, b_i, d_i 为系统模型参数, 对应的阶次为 n_a, n_b, n_d 。

引入后移算子, 将式(1)写为

$$\mathbf{A}(q)x_t = \mathbf{B}(q)u_t + \mathbf{D}(q)e_t \quad (2)$$

其中: $\mathbf{A}(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}$; $\mathbf{B}(q) = b_1 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}$; $\mathbf{D}(q) = 1 +$

$$d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_{n_d} q^{-n_d}。$$

式(2)可以认为是一个具有额外输入的自回归滑动平均模型 (autoregressive moving average model with exogenous input, 简称 ARMAX 模型), 其中 e_t 为系统额外输入。通过对 ARMAX 模型取不同的阶次, 可以得到不同的 ARMAX 模型。例如, 取 $n_b = n_d = 0$, 该模型变换为 AR 模型。本研究采用 ARX 模型, 可以写为

$$\mathbf{A}(q)x_t = \mathbf{B}(q)u_t + e_t \quad (3)$$

2 伪传递函数

对于 N 个自由度的粘性阻尼系统, 振动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \quad (4)$$

展开成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

对其进行展开, 得到

$$\begin{aligned} m_{11}\ddot{x}_1 + m_{12}\ddot{x}_2 + \cdots + m_{1n}\ddot{x}_n + c_{11}\dot{x}_1 + c_{12}\dot{x}_2 + \cdots + \\ c_{1n}\dot{x}_n + k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \cdots + k_{1n}x_n = f_1 \\ \vdots \\ m_{n1}\ddot{x}_1 + m_{n2}\ddot{x}_2 + \cdots + m_{nn}\ddot{x}_n + c_{n1}\dot{x}_1 + c_{n2}\dot{x}_2 + \cdots + \\ c_{nn}\dot{x}_n + k_{n1}x_1 + k_{n2}x_2 + \cdots + k_{nn}x_n = f_n \end{aligned} \quad (6)$$

对于结构自由振动响应信号, 方程右边的激励项为零, 对上式进行变换。考虑质量、阻尼、刚度矩阵在形成时, 矩阵中的元素只有当两个自由度关联时, 对应的矩阵元素不为零; 而当两自由度不关联时, 矩阵元素为零。用其他自由度表示参考自由度, 建立伪传递函数为

$$\ddot{x}_1 = -[(m_{12}\ddot{x}_2 + \cdots + m_{1n}\ddot{x}_n + c_{11}\dot{x}_1 + c_{12}\dot{x}_2 + \cdots + c_{1n}\dot{x}_n + k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \cdots + k_{1n}x_n)]/m_{11} = \mathbf{H}(\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \dots, \ddot{x}_n) \quad (7)$$

其中: H 为伪传递函数。

通过式(7)可以看出,伪传递函数中包含了结构自身的物理参数。当结构物理参数发生变化时,伪传递函数也将发生变化;因此可以将伪传递函数作为指标,对结构状态进行评估,这里的结构状态主要指结构损伤(即刚度下降)。

3 伪传递函数的建立

基于伪传递函数的思想,利用 ARX 模型对其进行建模。根据各自由度的关联性对自由度进行分组,选取其中一个自由度的响应作为参考通道,即 ARX 模型的输出,将与其相关联的自由度的响应作为输入,利用 ARX 模型建立伪传递函数。由于在实际应用中不可能对所有自由度进行测量,因此只对进行测量自由度进行分组并建立伪传递函数,建模过程如图 1 所示。例如:对于第 1 组,选择第 1 监测截面的响应作为参考通道并作为 ARX 模型的输出,将与其相关联的第 2、第 3 监测截面的响应作为 ARX 模型的输入,建立第 1 组的伪传递函数;对于第 2 组,将第 2 监测截面的响应作为参考通道并作为 ARX 模型的输出,将与其相关联的第 1、第 2 和第 3 监测截面的响应作为 ARX 模型的输出,建立第 2 组的伪传递函数;对于第 3 组,将第 3 监测截面的响应作为参考通道并作为 ARX 模型的输出,将与其相关联的第 2、第 3 和第 4 监测截面的响应作为 ARX 模型的输入,建立第 3 组的伪传递函数。依此类推,可以建立以不同监测截面的响应为参考通道的伪传递函数。当结构某个截面发生损伤时,与其相关联的自由度之间的伪传递函数发生变化,通过伪传递函数的变化对结构损伤进行定位,具体识别流程如图 2 所示。

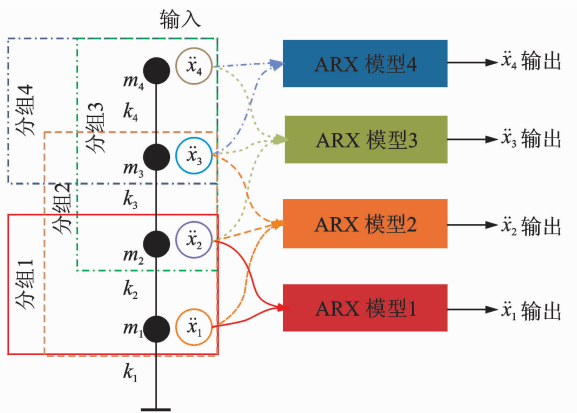


图 1 伪传递函数的建模过程

Fig. 1 Modeling process of pseudo-transfer function

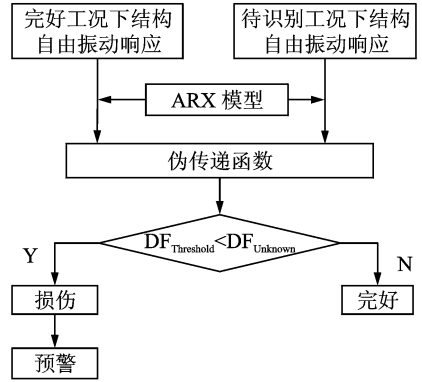


图 2 识别过程流程图

Fig. 2 Flow chart of identification

4 损伤指标的建立

利用结构在完好工况下的响应建立各分组的基准伪传递函数,对各工况下各分组的响应进行拟合,定义各组伪传递函数的拟合度为

$$F_R = (1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \bar{y}\|}) \times 100\% \quad (8)$$

其中: y 为测试的响应数据; \hat{y} 为利用基准伪传递函数预测的响应数据; \bar{y} 为测试响应数据的均值; $|\cdot|$ 为 (\cdot) 的范数。

通过定义待识别工况与完好工况的拟合度之相对损伤进行识别。

$$D_F = \frac{F_{Rhealthy} - F_{Rdamaged}}{F_{Rhealthy}} \times 100\% \quad (9)$$

其中: $F_{Rhealthy}$ 为完好工况下的拟合度; $F_{Rdamaged}$ 为待识别工况下的拟合度。

5 算 例

广州塔总高为 600 m,由一座高为 454 m 的主塔与一个高为 146 m 的天线桅杆组成,采用椭圆形钢结构外筒与椭圆形混凝土核心筒组成筒中筒结构。为了保证结构在施工过程中的安全以及对结构在运营过程中的状态进行评估,在结构上安装了 16 种、700 多个传感器组成结构健康监测系统,对结构施工阶段以及运营阶段的状态进行实时监测。这是国内外安装传感器最多的结构健康监测系统之一,也是一个考虑了施工期监测与运营期监测无缝连接的结构健康监测系统,这为高耸结构施工期施工方案的制定与调整、运营期结构健康状态的评估提供了依据。为了监测结构在极端荷载作用下结构的动态响应,在广州塔核心筒的 8 个监测截面安装了加

速度传感器,监测其在极端荷载作用下的动力响应,这也为基于振动特性的状态评估方法提供了数据依据。具体加速度传感器安装截面如图 3 所示。传感器测点布置位置与测试方向如图 4 所示。为了与国内外学者共同分享实测数据, Ni Yiqing 等^[17]建立了基于广州塔实测数据的 benchmark 模型(<http://www.cse.polyu.edu.hk/benchmark/index.htm>),为研究结构健康监测技术提供实测数据平台。

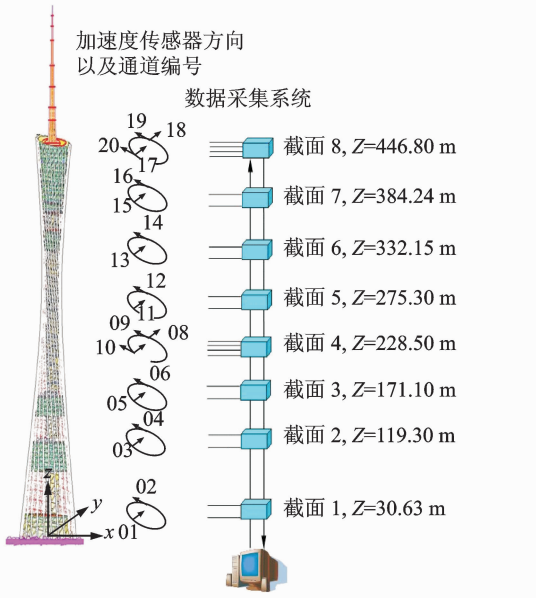


图 3 加速度传感器布置图

Fig. 3 Layout of the accelerometers

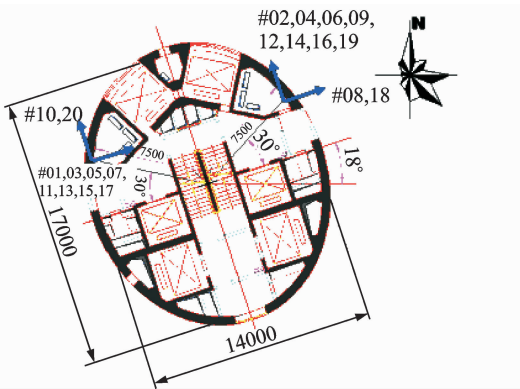


图 4 加速度测点以及测试方向

Fig. 4 Orientation and channel numbering of accelerometers

笔者采用 benchmark 中给出的广州塔缩减有限元模型,验证所提出方法的可行性。在 benchmark 模型中,给出了结构刚度矩阵与质量矩阵。在本研究中,阻尼采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比通过实测数据分析得到,取阻尼比为 0.8%。为了得到结构自由振动响应,在结构 443.6m 处(即节点 28 处)

施加 x 向初始单位位移,采用状态空间算法计算结构响应。利用 ARX 模型建立完好工况下的基准伪传递函数,建模过程如图 5 所示。ARX 模型的阶次采用最小最终预报误差准则(final prediction error, 简称 FPE 准则)与赤池信息量准则(akaike information criterion, 简称 AIC 准则)进行确定。分析结果如图 6, 7 所示,可以看出,由 AIC 准则确定的阶次高于 FPE 准则确定的阶次。综合考虑计算效

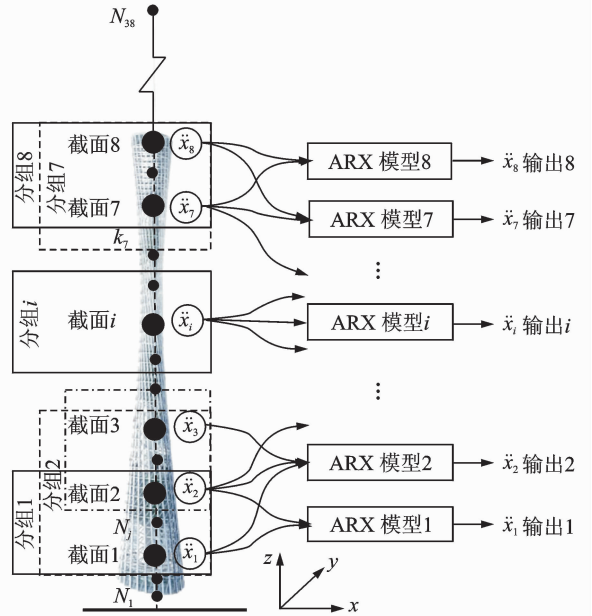


图 5 广州塔缩减模型以及伪传递函数的建模过程

Fig. 5 Reduced model and modeling process of pseudo-transfer function of Canton Tower

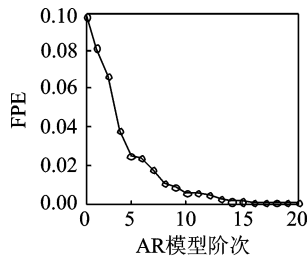


图 6 FPE 值

Fig. 6 Value of FPE

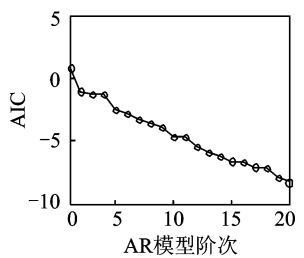


图 7 AIC 值

Fig. 7 Value of AIC

率与精度的要求,在此次分析中分别取 $n_a = n_b = 15$ 。为了与实际安装的加速度传感器相对应,提取 8 个监测截面的加速度响应数据进行分组,如表 1, 2 所示。其中: S_1 表示第 1 监测截面的加速度响应,其他依此类推。由于实测响应数据中受到噪声的影响,为了确定损伤指标的阈值,在结构完好工况下的响应中加入 5% 的高斯白噪声,通过多次计算给出在有噪声影响下的超越概率为 0.1% 的损伤阈

值^[18]。当损伤指标大于该值时则认为结构发生了损伤。在本研究中计算 1 000 次,得到超越 1 次的损伤阈值为 16.5。在进行结构响应分析时,通过降低单元刚度模拟结构发生损伤,定义损伤因子 α_i , 单元 i 损伤后刚度为

$$K_i^d = (1 - \alpha_i)K_i^u \quad (0 < \alpha_i < 1) \quad (10)$$

总体刚度矩阵为

$$K^d = \sum_{i=1}^N (1 - \alpha_i)K_i^u \quad (0 < \alpha_i < 1) \quad (11)$$

本研究主要分析工况如表 3 所示,其中当损伤为 10%,即取 $\alpha_i = 0.1$ 。

表 1 缩减模型节点标高对应表

Tab. 1 Corresponding level of the reduced model node

节点编号	Z/m	监测截面	节点编号	Z/m	监测截面
1	-10.00		20	355.05	
2	0.00		21	375.85	
3	12.00		22	381.20	x, S_7
4	22.25		23	396.65	
5	27.60	x, S_1	24	407.05	
6	58.65		25	417.45	
7	84.65		26	427.85	
8	95.05		27	438.25	
9	105.15		28	443.60	x, S_8
10	116.20	x, S_2	29	480.00	
11	147.05		30	497.60	
12	157.45		31	505.20	
13	168.00	x, S_3	32	520.70	
14	204.25		33	531.20	
15	225.20	x, S_4	34	545.20	
16	272.00	x, S_5	35	565.20	
17	308.25		36	580.70	
18	329.20	x, S_6	37	598.00	
19	344.65		38	618.00	

x 表示提取该节点 x 方向的加速度数据进行分析; S_x 表示监测截面

表 2 传感器分组对应表

Tab. 2 Group number of sensors

组号	输出(参考点)	输入
1	S_1	S_1, S_2
2	S_2	S_1, S_2, S_3
3	S_3	S_2, S_3, S_4
4	S_4	S_3, S_4, S_5
5	S_5	S_4, S_5, S_6
6	S_6	S_5, S_6, S_7
7	S_7	S_6, S_7, S_8
8	S_8	S_7, S_8

表 3 工况描述

Tab. 3 Description of the condition

工况	工况描述
1	单元 22 损伤 10%+5% 高斯白噪声
2	单元 22 损伤 20%+5% 高斯白噪声
3	单元 19 损伤 10%+5% 高斯白噪声
4	单元 19 损伤 20%+5% 高斯白噪声

通过在结构响应中添加 5% 的高斯白噪声,进行多次计算,对结构在考虑噪声影响下的损伤识别结果进行分析,本研究分析中计算次数为 20 次,分析结果如图 8~11 所示。从图 8, 9 可以看出,当单元 22 发生 10% 损伤时,在结构响应中添加 5% 的高斯白噪声情况下,第 7 参考点 S_7 的损伤指标 DF 明显大于其他参考点且高于先前设定的损伤阈值,说

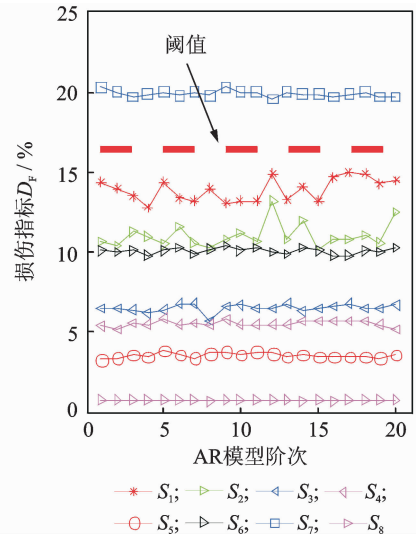


图 8 单元 22 损伤 10%+5% 噪声

Fig. 8 Element 22 damaged 10% + noise 5%

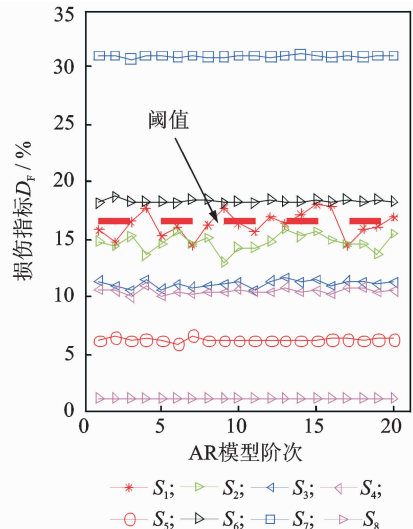


图 9 单元 22 损伤 20%+5% 噪声

Fig. 9 Element 22 damaged 20% + noise 5%

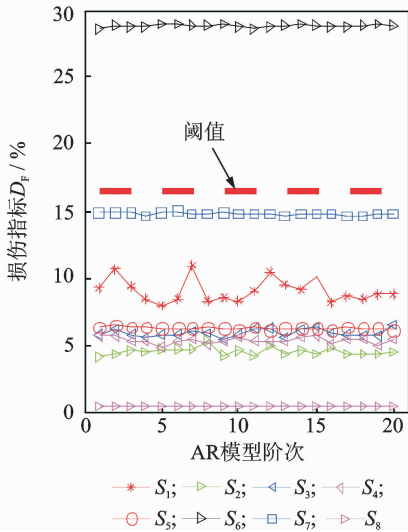


图 10 单元 19 损伤 10%+5% 噪声

Fig. 10 Element 19 damaged 10%+ noise 5%

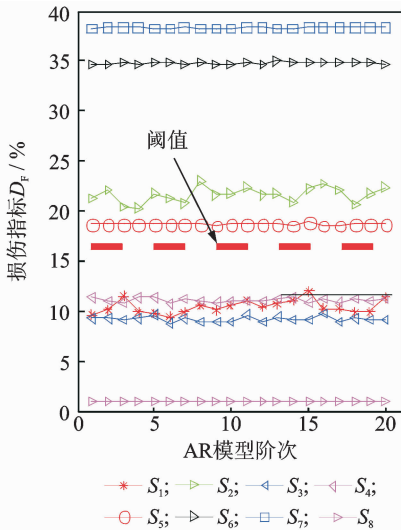


图 11 单元 19 损伤 20%+5% 噪声

Fig. 11 Element 19 damaged 20%+ noise 5%

明与第 7 参考点相关联的自由度之间结构发生了损伤；当单元 22 发生 20% 损伤时，在结构响应中添加 5% 白噪声的情况下，可以看出第 7 参考点 S_7 的损伤指标明显大于其他参考点，且高于损伤阈值，与其相邻的第 6 参考点 S_6 的损伤指标也高于损伤阈值，说明与 S_6, S_7 相关联的自由度发生了损伤。从图 9 可以看出，对于第 1 参考点 S_1 也有部分损伤指标高于损伤阈值。这主要是由于高耸结构底部截面在荷载作用下响应较小，受到噪声的干扰较大，而其他的噪声影响则较小，因此在实际损伤识别中应将底部截面不予考虑或者是降低损伤判断的权重因子，利用该方法也可以很好地确定其他监测截面的响应损伤位置。从图中也可以看出，随着损伤程度的增加，

损伤指标 DF 也随着增大，说明该方法还可以对结构损伤程度进行评价。从图 10, 11 可以看出，当单元 19 损伤时也可以得到相同的结论。

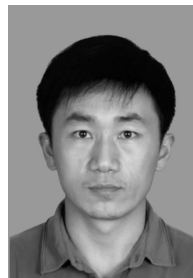
6 结束语

基于传递函数可以反映结构输入输出相互关系（结构特性）的思想，提出了一种基于 ARX 模型建立伪传递函数的损伤识别方法，并将其应用到高耸结构的损伤监测中。通过利用广州塔 benchmark 的有限元缩减模型，在噪声影响的情况下，不需要结构精确的有限元模型，只需要结构在完好工况下结构的响应即可识别结构损伤，这为新建结构的损伤识别以及状态评估提供了一种新思路。但在研究中发现，对于高耸结构，由于其结构体型较大，该方法受到传感器布置位置以及数量的影响。当传感器布置数量不足时可能会出现漏判现象，而且当传感器布置位置不当或者激励不足以激发出结构损伤的响应时，利用该方法也不能识别结构损伤，这也是现有损伤识别算法所面临的同样问题。因此，如何对传感器的位置及数量进行优化还需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, Report LA-13070-MS, 1996.
- [2] 杨小森, 闫维明, 陈彦江, 等. 基于模型修正的大跨斜拉桥损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 276-281.
Yang Xiaosen, Yan Weiming, Chen Yangjiang, et al. Long cable-stayed bridge damage identification method based on model updating[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 276-281. (in Chinese)
- [3] Sohn H, Farrar C R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(3): 446-451.
- [4] Lu Yong, Gao Feng. A novel time-domain autoregressive model for structural damage diagnosis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3-5): 1031-1049.

- [5] Sohn H, Worden K, Farrar C R. Statistical damage classification under changing environmental and operational conditions [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 13(9): 561-574.
- [6] Sohn H, Allen D W, Worden K, et al. Structural damage classification using extreme value statistics [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2005, 127(1): 125-132.
- [7] 刘毅,李爱群,费庆国,等. 基于时间序列分析的结构损伤特征提取与预警方法[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(2): 253-257.
Liu Yi, Li Aiqun, Fei Qingguo, et al. Time series analysis with structural damage feature extraction and alarming method[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanical*, 2008, 25(2): 253-257. (in Chinese)
- [8] Nair K K, Kiremidjian A S, Law K H. Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structures [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 291(1-2): 349-368.
- [9] 王真,程远胜. 基于时间序列模型自回归系数灵敏度分析的结构损伤识别方法[J]. *工程力学*, 2008, 25(10): 38-43.
Wang Zhen, Chen Yuansheng. Structural damage identification based on sensitivity analysis of autoregressive coefficients of time series models[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 38-43. (in Chinese)
- [10] Zhang Qiwei. Statistical damage identification for bridges using ambient vibration data [J]. *Computer and Structures*, 2007, 85(7-8): 476-485.
- [11] 杜永峰,李万润,李慧,等. 基于时间序列的结构损伤识别[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(12): 108-111.
Du Yongfeng, Li Wanrun, Li Hui, et al. Structural damage identification based on time series analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(12): 108-111. (in Chinese)
- [12] Fugate M L, Sohn H, Farrar C R. Vibration-based damage detection using statistical process control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, 15(4): 707-721.
- [13] Sohn H, Czarnecki J A, Farrar C R. Structural health monitoring using statistical process control [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(11): 1356-1363.
- [14] Kullaa J. Damage detection of the Z24 Bridge using control charts [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(1): 163-170.
- [15] Gul M, Catbas F N. Statistical pattern recognition for structural health monitoring using time series modeling: theory and experimental verification [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23: 2192-2204.
- [16] 杨叔子,吴雅,轩建平,等. 时间序列分析的工程应用 [M]. 2版. 武汉:华中理工大学出版社,2007: 175-276.
- [17] Ni Yiqing, Xia Yong, Liao Weiyang, et al. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(1): 73-98.
- [18] Worden K, Manson G, Fieller N R J. Damage detection using outlier analysis [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 229(3): 647-667.



第一作者简介:李万润,男,1985年12月生,博士、讲师。主要研究方向为结构健康监测。曾发表《基于测量不确定性的结构物理参数识别研究》《《振动、测试与诊断》2012年第32卷第4期》等论文。
E-mail: liwanrun2006@163.com

通信作者简介:杜永峰,男,1962年3月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构抗震、减震控制以及结构健康监测。

E-mail: dooyf@lut.cn