

局部传递率函数与模式匹配的结构损伤快速识别方法

沈清伟^{1,2}, 聂振华^{1,2}, 马宏伟^{1,3}

(1. 暨南大学力学与建筑工程学院, 广东 广州 510632; 2. “重大工程灾害与控制”教育部重点实验室, 广东 广州 510632; 3. 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523000)

摘要: 为了对结构进行灾后快速安全评估, 提出一种基于局部传递率函数与模式匹配的快速损伤识别方法。通过有限元建立结构不同损伤位置和程度的模型, 通过模态分析获取其固有频率与振型, 建立损伤模式数据库; 根据待测真实结构上少量测点所测振动信号计算局部传递率函数, 构建匹配因子矩阵; 调用损伤模式数据库中的模态参数构建损伤模式矩阵, 建立匹配因子矩阵与损伤模式矩阵间的映射关系; 以欧式距离相似度指标来衡量匹配程度, 相似度最高的损伤模式即视为待测结构的实际损伤情况。为了验证本方法的可行性和准确性, 对一四层层间剪切模型进行数值模拟和实验验证, 结果均表明, 本方法能够准确识别结构损伤位置和程度。所提方法不涉及复杂的算法, 只需少量测点数据, 计算速度快, 满足震后快速评估要求; 该方法只与结构固有属性有关, 但无需进行结构模态参数识别, 具有良好的实际工程应用前景。

关键词: 快速损伤识别; 模式匹配; 局部传递率函数; 欧式距离; 损伤模式库

中图分类号: O327; TU311.3 **文献标志码:** **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0010-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.002

引言

结构灾后安全性快速评估的一项重要工作是结构损伤快速识别, 可为灾后应急处置赢得时间。结构损伤识别可分为有模型和无模型方法两大类^[1]。无模型方法不需要结构有限元模型, 属于基于时间序列的数据驱动方法, 当前得到较快发展, 但其弱点是准确性难以满足工程需求, 且无法识别结构的损伤程度。相反, 有模型方法则须依赖于结构有限元模型, 但能够识别结构的损伤程度, 是未来结构健康监测和安全评估的发展方向。为了实现结构损伤位置与程度的快速识别, 基于损伤因子的模式匹配法为其提供了一种有效解决途径。其思想是通过有限元仿真模拟各种工况的损伤模式, 建立损伤模式数据库, 再通过实测响应提取出的结构损伤特征量作为匹配因子与已建立的损伤模式之间建立映射关系, 从而快速识别结构损伤位置及损伤程度。

传统的结构动力损伤检测方法需识别频率、振型等动态特性参数, 但实际工程荷载信息往往未知, 导致模态信息无法获取, 而基于传递率函数的损伤识别法只需结构响应, 大多能判断结构有无损伤以

及定位损伤位置^[2-3], 但无法实现损伤定量分析。已有学者将传递率函数与灵敏度分析或模型修正相结合实现定量分析^[4-6], 均存在误差。在基于模式匹配的损伤识别框架下, 损伤模式数据库的建立不应有外部激励的因素存在, 即数据库内的损伤特征量不应随激励变化而变化, 否则由于激励的随机性, 损伤模式数据库无法涵盖所有激励而得以建立。模态表征结构的固有属性, 结构损伤会引起其模态参数的变化, 且不激励的影响, 因此匹配因子的选取应只与模态参数有关。王乐等^[7]以固有频率向量作为匹配因子, 采用最大置信准则来判定对应的损伤模式, 不考虑测量误差, 对于损伤大于最低可检损伤的情况, 能够准确地检测出损伤的位置与程度。李雪艳等^[8]推导出位移应变协方差参数变化比(COD)仅与振型、频率、阻尼比等模态参数有关, 采用模态置信准则(MAC)找出最匹配的向量, 并对应其结构状态和损伤向量。模态参数的识别包括固有频率、振型、阻尼比等。频率虽然可以表征结构整体特性, 但对局部损伤不敏感。振型虽然可以表征结构的局部特性, 但实际工程中由于传感器数量的限制, 识别的振型为一稀疏振型, 将基于振型的损伤识别法直接应用于实际工程仍存在很大困难。而利用有限元这一

收稿日期: 2021-07-07; 修订日期: 2021-11-02

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1511004); 高等教育“创新强校工程”专项(2017KSYS009, 2016KZDXMO53)。

虚拟环境可以模拟各种可能存在的损伤模式,并存储于损伤模式数据库中。因此,须提出利用少量传感器信息提取与结构模态相关的参数进行模式匹配的方法。有学者研究得出,在环境激励信号未知的情况下,两个传感器信息的传递率函数可有效消除激励影响,Devriendt等^[9-10]验证了传递率函数与模态振型的关系,为本文利用少量传感器信息进行模式匹配的损伤快速识别提供了理论基础。

本文提出基于局部传递率函数与模式匹配的快速损伤识别法,结合了传递率函数与模式匹配的优点。根据局部传递率函数物理意义可知选取的匹配因子是模态参数的组合体,提取过程中不需要识别模态参数,只需对测点信号做自互谱分析,便可有效剔除激励影响;且模式匹配不涉及复杂的算法,只需对匹配因子与损伤模式进行相似性度量,也不需要结构所有测点的数据即可快速识别结构损伤位置和损伤程度。通过理论推导、数值模拟与模型实验验证了该法的可行性与准确性。

1 基本理论

1.1 模式匹配的损伤识别法基本思想

模式是信号的一种或者一组固有特征,这些特征以向量或者矩阵的形式存储于数据库^[11]。模态可以表征结构振动系统的固有特性,因此可以用与模态参数有关的指标作为匹配因子进行模式匹配。本文使用局部传递率函数对实测加速度响应信号进行特征提取,并建立相应的损伤模式数据库,用欧氏距离的倒数作为相似性度量指标,对待测工况的匹配因子向量与模式特征向量进行相似性度量,相似度最高的损伤模式工况视为检测工况的实际损伤情况,以此作为最终匹配结果,从而完成结构的损伤检测工作。该方法的实现流程简图如图1所示。

1.2 频响函数

对于一般的多自由度线性振动系统,考虑阻尼以及外部激励,其运动方程可以表示为:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (1)$$

式中 M, C, K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵; $X(t)$ 为位移列向量, $F(t)$ 为外激振力。

利用傅里叶变换得到式(1)的频域形式:

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)X(\omega) = F(\omega) \quad (2)$$

则

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{-\omega^2 M + i\omega C + K} \quad (3)$$

式中 ω 为结构的圆频率。

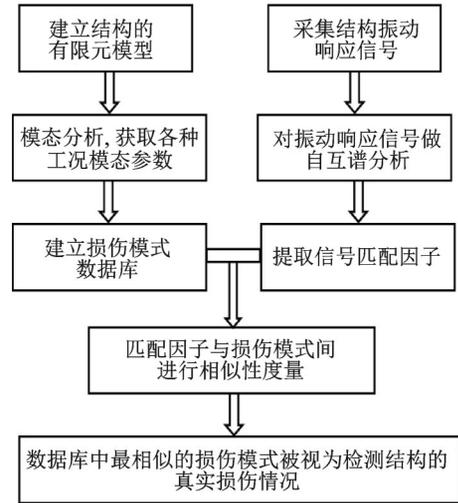


图1 模式匹配损伤识别流程

Fig. 1 Flowchart of pattern matching based on damage identification

由式(3)可知频响函数矩阵表征的是结构模态固有属性,其元素为:

$$h_{jk}(\omega) = \frac{X_j(\omega)}{F_k(\omega)} \quad (4)$$

式中 $X_j(\omega)$ 为作用在第 k 个自由度的外部激励 $F_k(\omega)$ 在第 j 个自由度上产生的位移响应的傅里叶变换。

结构的频响函数表征结构响应信号与激励信号在频域范围内的传递关系^[12],但其包含激励信息。对复杂大型土木结构,激励信息往往是未知的,而人为施加已知激励使其产生受迫振动非常困难。因此通常采用环境激励作为激励源,由于环境激励的随机性而无法测得,则无法得出系统的频响函数矩阵。

1.3 局部传递率函数

对于原始激励数据难以获取的问题, Maia等^[13]用多自由度系统传递率函数表征动力系统输出响应之间的传递关系。局部传递率函数具体定义如下:

在结构 i, j 两点处安装加速度传感器,采集相应的振动加速度响应 x_i 与 x_j , 分别对其做快速傅里叶变换,局部传递率函数 $T_{ij}(\omega)$ 为:

$$T_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{X_j(\omega)} \quad (5)$$

式中 $X_i(\omega), X_j(\omega)$ 分别为 x_i 与 x_j 的傅里叶变换。

假设在结构上的 p 点施加激励,将式(3)代入式(5),得局部传递率函数与频响函数之间的关系式如下:

$$T_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{X_j(\omega)} = \frac{H_{pi}(\omega)F_p(\omega)}{H_{pj}(\omega)F_p(\omega)} = \frac{H_{pi}(\omega)}{H_{pj}(\omega)} \quad (6)$$

由式(6)可知,局部传递率函数和频响函数之间存在联系,包含结构的模态信息,可将其应用于结构

损伤识别。

局部传递率函数除了从响应傅里叶变换中提取外,还可以通过自互谱进行平均提取^[14],其关系式如下:

$$T_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{X_j(\omega)} = \frac{X_j^*(\omega)X_i(\omega)}{X_j^*(\omega)X_j(\omega)} = \frac{G_{ij}(\omega)}{G_{ii}(\omega)} \quad (7)$$

式中 $X_j^*(\omega)$ 为 $X_j(\omega)$ 的复共轭; $G_{ij}(\omega)$ 为 i, j 两点信号的互功率谱; $G_{ii}(\omega)$ 为 i 点信号的自功率谱。因此,在实测时,为测得两点间的局部传递率函数,只需通过式(7)便可计算得到。由本节内容可知,局部传递率函数只与结构的模态有关,其符合匹配因子的选取条件。

1.4 局部传递率函数包含的模态信息

对于线性小阻尼系统运动方程可以用相应的振型矩阵 Φ 解耦成 n 个互不耦合的单自由度系统运动方程,结合正交性以及阻尼矩阵的近似考虑,式(1)可以表示为:

$$\ddot{x}_r(t) + 2\omega_r \xi_r \dot{x}_r(t) + \omega_r^2 x_r(t) = \frac{p_r(t)}{m_r}, \quad r = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

式中 ξ_r 为模态阻尼比; m_r 为质量。

$$p(t) = \Phi^T F(t) = [p_1(t) \ p_2(t) \ \dots \ p_n(t)]^T \quad (9)$$

式中 $p(t)$ 为广义力向量。

利用杜哈梅(Duhamel)积分和振型叠加法^[15]求解位移响应向量为:

$$X(t) = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_r}{\bar{\omega}_r m_r} \int_0^t \phi_r^T F(\tau) e^{-\xi_r \omega_r (t-\tau)} \sin[\bar{\omega}_r (t-\tau)] d\tau \quad (10)$$

式中 $\bar{\omega}_r = \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}$, ϕ_r 为第 r 阶振型。

在第 k 个自由度上施加白噪声激励,第 i 自由度上的位移响应为:

$$x_{ik}(t) = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_{ir} \phi_{kr}}{\bar{\omega}_r m_r} \int_0^t \alpha_{kr} \delta(\tau) e^{-\xi_r \omega_r (t-\tau)} \sin[\bar{\omega}_r (t-\tau)] d\tau \quad (11)$$

式中 $p_k(\tau) = \alpha_k \delta(\tau)$, α_{kr} 为常数项,仅与激励点位置以及模态的阶数有关; $\delta(\tau)$ 为狄利克雷函数,根据狄利克雷函数的筛分性质,式(11)进一步简化为:

$$x_{ik}(t) = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_{ir} \phi_{kr} \alpha_{kr}}{\bar{\omega}_r m_r} e^{-\xi_r \omega_r t} \sin(\bar{\omega}_r t) \quad (12)$$

同理,在第 k 个自由度上施加白噪声激励,第 j 自由度上的位移响应为:

$$x_{jk}(t) = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_{jr} \phi_{kr} \alpha_{kr}}{\bar{\omega}_r m_r} e^{-\xi_r \omega_r t} \sin(\bar{\omega}_r t) \quad (13)$$

x_{ik} 与 x_{jk} 间的互相关函数定义为:

$$R_{ijk}(\tau) = E[x_{ik}(t)x_{jk}(t+\tau)] \quad (14)$$

式中 E 为数学期望。

James 等^[16]详细推导了振动响应信号 x_{ik} 与 x_{jk} 间的互相关函数关系式如下:

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{r=1}^n [A_{ijk}^r e^{-\xi_r \omega_r \tau} \cos(\bar{\omega}_r \tau) + B_{ijk}^r e^{-\xi_r \omega_r \tau} \sin(\bar{\omega}_r \tau)] \quad (15)$$

式中 A_{ijk}^r, B_{ijk}^r 是独立于 τ 的函数,其仅与模态参数有关,具体表达式如下:

$$A_{ijk}^r = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_{kr} \phi_{ir} \phi_{kr} \phi_{js} \phi_{ks}}{m_r m_s \bar{\omega}_r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad (16)$$

$$B_{ijk}^r = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_{kr} \phi_{ir} \phi_{kr} \phi_{js} \phi_{ks}}{m_r m_s \bar{\omega}_r} \left[\frac{J_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad (17)$$

式中

$$I_{rs} = 2\bar{\omega}_r (\xi_r \omega_r + \xi_s \omega_s) \quad (18)$$

$$J_{rs} = (\bar{\omega}_s^2 - \bar{\omega}_r^2) + (\xi_r \omega_r + \xi_s \omega_s)^2 \quad (19)$$

由式(15)~(19),令 $\tau=0$,可得出:

$$R_{ijk}(0) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_{kr} \phi_{ir} \phi_{kr} \phi_{js} \phi_{ks}}{m_r m_s \bar{\omega}_r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad (20)$$

维纳-辛钦定理^[17]指出互功率谱密度函数与互相关函数为傅里叶变换对,表达式如下:

$$G_{ij}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ijk}(0) e^{-i\omega\lambda} d\lambda = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_{kr} \phi_{ir} \phi_{kr} \phi_{js} \phi_{ks}}{m_r m_s \bar{\omega}_r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\lambda} d\lambda \quad (21)$$

式中 i 为虚数。

同理,当 $\tau=0$ 时,信号 x_{ik} 的自相关函数以及自功率谱表达式为:

$$R_{iik}(0) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_{kr} \phi_{ir} \phi_{kr} \phi_{is} \phi_{ks}}{m_r m_s \bar{\omega}_r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad (22)$$

$$G_{ii}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{iik}(0) e^{-i\omega\lambda} d\lambda = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_{kr} \phi_{ir} \phi_{kr} \phi_{is} \phi_{ks}}{m_r m_s \bar{\omega}_r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\lambda} d\lambda \quad (23)$$

由式(21)与(23)可知,同一结构同一状态下各测点的同阶模态振型乘同一个因子时,并不改变模态振型的特征^[18]。假设各阶模态能够彼此有效分开,它们之间不存在着耦合或者耦合很小,即当固有频率 $\omega = \omega_r (r=1, 2, 3, \dots, n)$ 时,系统响应以第 r 阶振型为主,此时,其他阶的模态贡献可忽略不计。则:

$$\alpha_{ij}(\omega_r) = abs(T_{ij}(\omega_r)) = \frac{abs(G_{ii}(\omega_r))}{abs(G_{ij}(\omega_r))} = \frac{\phi_j(\omega_r)}{\phi_i(\omega_r)} \quad (24)$$

式中 $abs(\cdot)$ 为求幅值。

由上式关系,局部传递率函数的幅值只与模态频率和模态振型相关,可用于表征结构的固有属性。由前所述,模式匹配算法中的损伤模式数据库保存

的是结构在不同损伤工况下的模态参数,因此可利用模式数据库中两点的阵型数据计算得到局部传递率函数,作为损伤模式与实测响应计算得到的传递率函数进行模式匹配。加速度传感器是目前较常用的信号采集仪器,具有经济与便携等优点。虽然上述公式是基于位移振动信号进行推导,但同方向上的位移与加速度间仅存在二阶导数的关系,因此,上述推导过程同样适用于加速度响应信号的分析。

1.5 匹配因子矩阵与损伤模式矩阵

采集结构上 i, j 两点处的加速度响应,根据公式(24)进行信号自互谱分析得到局部传递率函数的幅值向量 α_{ij} ,其损伤模式 q 对应的匹配因子向量具体表达式如下:

$$\alpha_{ij}(\omega_{qr}) = [\alpha_{ij}(\omega_{q1}) \quad \alpha_{ij}(\omega_{q2}) \quad \cdots \quad \alpha_{ij}(\omega_{qn})] \quad (25)$$

式中 $q = 1, 2, 3, \dots, N; r = 1, 2, 3, \dots, n; \omega_{qr}$ 为损伤模式 q 对应的第 r 阶固有频率值。

当损伤模式数据库有 N 种损伤模式时,将每种损伤模式的固有频率代入式(25),构造 i, j 位置的匹配因子矩阵 \mathbf{A}_{ij} 如下:

$$\mathbf{A}_{ij} = [\alpha_{ij}(\omega_{1r}) \quad \alpha_{ij}(\omega_{2r}) \quad \cdots \quad \alpha_{ij}(\omega_{Nr})]^T = \begin{bmatrix} \alpha_{ij}(\omega_{11}) & \alpha_{ij}(\omega_{12}) & \cdots & \alpha_{ij}(\omega_{1n}) \\ \alpha_{ij}(\omega_{21}) & \alpha_{ij}(\omega_{22}) & \cdots & \alpha_{ij}(\omega_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{ij}(\omega_{N1}) & \alpha_{ij}(\omega_{N2}) & \cdots & \alpha_{ij}(\omega_{Nn}) \end{bmatrix}_{N \times n} \quad (26)$$

式中 ω_{Nr} 为第 N 种损伤模式对应的第 n 阶固有频率值。

为了提高匹配精度,降低误判概率,假设结构上总共装有 m 个传感器。使用 m 个测点两两构造出的匹配因子矩阵 \mathbf{P} 可表示为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{13} & \mathbf{A}_{14} & \mathbf{A}_{15} & \cdots & \mathbf{A}_{1(m-1)} & \mathbf{A}_{1m} \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{A}_{24} & \mathbf{A}_{25} & \cdots & \mathbf{A}_{2(m-1)} & \mathbf{A}_{2m} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_{34} & \mathbf{A}_{35} & \cdots & \mathbf{A}_{3(m-1)} & \mathbf{A}_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{A}_{(m-1)m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (27)$$

依据局部传递率函数与模态的关系,从损伤模式数据库调用各工况对应的模态信息,将其构造成损伤模式向量:

$$\Phi_{ij}(\omega_{qr}) = \begin{bmatrix} \phi_j(\omega_{q1}) & \phi_j(\omega_{q2}) & \cdots & \phi_j(\omega_{qn}) \\ \phi_i(\omega_{q1}) & \phi_i(\omega_{q2}) & \cdots & \phi_i(\omega_{qn}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

当损伤模式数据库有 N 种损伤模式时,将库中各模式的固有频率与振型代入式(28),构造 i, j 位置的损伤模式矩阵 Ψ_{ij} 如下:

$$\Psi_{ij} = [\Phi_{ij}(\omega_{1r}) \quad \Phi_{ij}(\omega_{2r}) \quad \cdots \quad \Phi_{ij}(\omega_{Nr})]^T = \begin{bmatrix} \phi_j(\omega_{11}) & \phi_j(\omega_{12}) & \cdots & \phi_j(\omega_{1n}) \\ \phi_i(\omega_{11}) & \phi_i(\omega_{12}) & \cdots & \phi_i(\omega_{1n}) \\ \phi_j(\omega_{21}) & \phi_j(\omega_{22}) & \cdots & \phi_j(\omega_{2n}) \\ \phi_i(\omega_{21}) & \phi_i(\omega_{22}) & \cdots & \phi_i(\omega_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_j(\omega_{N1}) & \phi_j(\omega_{N2}) & \cdots & \phi_j(\omega_{Nn}) \\ \phi_i(\omega_{N1}) & \phi_i(\omega_{N2}) & \cdots & \phi_i(\omega_{Nn}) \end{bmatrix}_{N \times n} \quad (29)$$

选取 m 个传感器测点位置处的振型值,构造损伤模式矩阵如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & \Psi_{12} & \Psi_{13} & \Psi_{14} & \Psi_{15} & \cdots & \Psi_{1(m-1)} & \Psi_{1m} \\ 0 & 0 & \Psi_{23} & \Psi_{24} & \Psi_{25} & \cdots & \Psi_{2(m-1)} & \Psi_{2m} \\ 0 & 0 & 0 & \Psi_{34} & \Psi_{35} & \cdots & \Psi_{3(m-1)} & \Psi_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \Psi_{(m-1)m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (30)$$

建立结构各损伤工况的有限元模型并分别进行模态分析,依据上述方法构造各工况的损伤模式矩阵,并将 N 种模式各自赋予“工况标签”用于后续损伤识别。本文以层间剪切模型为例,降低立柱刚度模拟损伤。如第一层刚度降低 20%,第四层刚度降低 40%,将这种工况的损伤模式命名为: f1_d20_f4_d40。

由于模态分析过程不需要施加任何外部激励,其计算效率仅与模型节点数量有关,与时间变量无关,大大提升建库效率与可行性。

1.6 相似性度量

匹配因子矩阵与损伤模式矩阵间的相似性度量一般有两种方法:距离测度法和相似函数法。

几种成熟的距离测度法有:明氏距离、欧式距离、马氏距离等。相似性函数是用函数的方法来表征两向量相似的程度。如夹角余弦法、相关系数法、广义 Dice 系数法以及广义 Jaccard 系数法等,其中夹角余弦和相关系数法运用较多。

本文采用欧式距离的倒数作为模式匹配相似性度量指标,在一定程度上放大元素误差在距离测量中的作用^[19]。如向量 x 与 y 欧式距离的计算表达式为:

$$d(x, y) = \left(\sum_{i=1}^N |x_i - y_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

式中 x_i, y_i 分别为向量 x 与 y 的元素。

模式匹配指标为:

$$PMI = \frac{1}{d(x, y)} \quad (32)$$

式中 PMI (Pattern Matching Index) 为匹配相似度指标, PMI 值越大, 说明向量 x 与 y 相似度越高。

$$d_{ij}(\mathbf{A}_{ij}(I, J), \mathbf{\Psi}_{ij}(I, J)) = \left(\sum_{J=1}^n \left| \mathbf{A}_{ij}(I, J) - \mathbf{\Psi}_{ij}(I, J) \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} =$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\left| \alpha_{ij}(\omega_{11}) - \frac{\phi_j(\omega_{11})}{\phi_i(\omega_{11})} \right|^2 + \left| \alpha_{ij}(\omega_{12}) - \frac{\phi_j(\omega_{12})}{\phi_i(\omega_{12})} \right|^2 + \dots + \left| \alpha_{ij}(\omega_{1n}) - \frac{\phi_j(\omega_{1n})}{\phi_i(\omega_{1n})} \right|^2} \\ \sqrt{\left| \alpha_{ij}(\omega_{21}) - \frac{\phi_j(\omega_{21})}{\phi_i(\omega_{21})} \right|^2 + \left| \alpha_{ij}(\omega_{22}) - \frac{\phi_j(\omega_{22})}{\phi_i(\omega_{22})} \right|^2 + \dots + \left| \alpha_{ij}(\omega_{2n}) - \frac{\phi_j(\omega_{2n})}{\phi_i(\omega_{2n})} \right|^2} \\ \vdots \\ \sqrt{\left| \alpha_{ij}(\omega_{N1}) - \frac{\phi_j(\omega_{N1})}{\phi_i(\omega_{N1})} \right|^2 + \left| \alpha_{ij}(\omega_{N2}) - \frac{\phi_j(\omega_{N2})}{\phi_i(\omega_{N2})} \right|^2 + \dots + \left| \alpha_{ij}(\omega_{Nn}) - \frac{\phi_j(\omega_{Nn})}{\phi_i(\omega_{Nn})} \right|^2} \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (33)$$

式中 I, J 为矩阵位置坐标, d_{ij} 为任取 i, j 两测点时 N 维距离向量。

对于有 m 个测点的情况时, 结合式 (27), (30) 及 (33), 欧式距离表达式如下:

$$d = \frac{2 \sum d_{ij}}{m(m-1)} \quad (34)$$

式中 $i = 1, 2, 3, \dots, m-1, j = i+1, i+2, \dots, m$; m 为响应测点个数。

因此模式匹配向量 PMI 为:

$$PMI = \frac{1}{d} \quad (35)$$

2 数值模拟

2.1 仿真模型

为了验证该方法的可行性, 本文建立 4 层高度的层间剪切模型进行方法论证。利用有限元分析软件 ANSYS 进行仿真模拟, 选用 beam3, mass21 单元分别模拟层间剪切模型的立柱与楼层质量, 健康工况的模型尺寸与物理参数如下: 各层立柱的宽高厚尺寸为: $0.1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$; 材料密度与弹性模量分别为: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3, E = 2.01 \times 10^{11} \text{ Pa}$; 质量单元 mass21 赋予的质量为 0.943 kg , 模型简图如图 2 所示。

设置 beam3 单元的截面宽度大小来模拟楼层立柱刚度折减, 各层损伤程度分别设为 20%, 40%, 60% 三个等级, 代表各层轻度、中度、重度的损伤情况, 共选取 72 种损伤模式建立数据库。其中包含无损工况 1 种、单损工况 12 种、双损工况 54 种、三损工况 5 种, 具体模式编号如表 1 所示。

分析式 (26) 与 (29) 可知, 矩阵中的每一行分别代表一种损伤工况, 对其进行相似性度量, 矩阵每行均能求得一个欧式距离 d , 将其组合成 d_{ij} 向量, 具体表达式为:

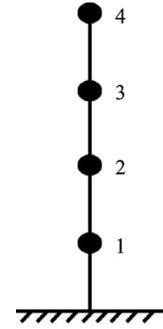


图 2 层间剪切模型

Fig. 2 Interlaminar shear model

2.2 结果分析

对模型施加水平方向的白噪声一致性激励, 进行瞬态动力学分析, 其采样频率设为 200 Hz, 采集 4 个集中质量点处的加速度响应信号。为验证本文方法对噪声的鲁棒性, 在测试用例生成的加速度响应信号上加入信噪比 (SNR) 为 25 dB 的噪声, 模拟信号被噪声污染的情况。随机选取测试用例如表 2 列出的 8 个工况, 它们的损伤程度与数据库内的既有工况存在微小差异, 验证本文方法在数据库不完备时也能准确地识别损伤。

图 3(a), (b) 分别为无损工况在测试点 3 位置处的原始加速度响应与其对应的傅里叶变换谱图。如图 3(b) 所示, 在一致性白噪声激励下, 结构以第一阶模态成分占主导, 可以初步判断, 此时结构主要以一阶振型在振动, 因此, 仅使用第一阶的模态数据用于模式匹配。

仿真模拟 8 种不同损伤位置与损伤程度的测试工况, 其中包含无损、单损、双损及三损的情况, 匹配结果如图 4~7 所示, 柱状的高度表征 PMI 值的大小, 图中深蓝色表示匹配上的损伤模式编号。

通过损伤模式数据库中编号与工况标签的对应

表 1 损伤模式数据库

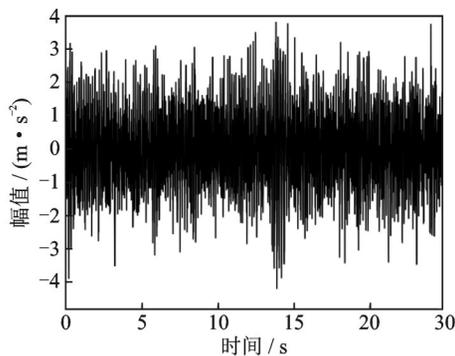
Tab. 1 Damage modes database

模式编号	损伤工况	模式编号	损伤工况	模式编号	损伤工况	模式编号	损伤工况
1	No_damage	19	f1_d20_f3_d60	37	f1_d40_f3_d60	55	f1_d60_f3_d60
2	f1_d20	20	f1_d20_f4_d20	38	f1_d40_f4_d20	56	f1_d60_f4_d20
3	f1_d40	21	f1_d20_f4_d40	39	f1_d40_f4_d40	57	f1_d60_f4_d40
4	f1_d60	22	f1_d20_f4_d60	40	f1_d40_f4_d60	58	f1_d60_f4_d60
5	f2_d20	23	f2_d20_f3_d20	41	f2_d40_f3_d20	59	f2_d60_f3_d20
6	f2_d40	24	f2_d20_f3_d40	42	f2_d40_f3_d40	60	f2_d60_f3_d40
7	f2_d60	25	f2_d20_f3_d60	43	f2_d40_f3_d60	61	f2_d60_f3_d60
8	f3_d20	26	f2_d20_f4_d20	44	f2_d40_f4_d20	62	f2_d60_f4_d20
9	f3_d40	27	f2_d20_f4_d40	45	f2_d40_f4_d40	63	f2_d60_f4_d40
10	f3_d60	28	f2_d20_f4_d60	46	f2_d40_f4_d60	64	f2_d60_f4_d60
11	f4_d20	29	f3_d20_f4_d20	47	f3_d40_f4_d20	65	f3_d60_f4_d20
12	f4_d40	30	f3_d20_f4_d40	48	f3_d40_f4_d40	66	f3_d60_f4_d40
13	f4_d60	31	f3_d20_f4_d60	49	f3_d40_f4_d60	67	f3_d60_f4_d60
14	f1_d20_f2_d20	32	f1_d40_f2_d20	50	f1_d60_f2_d20	68	f1_d20_f3_d20_f4_d20
15	f1_d20_f2_d40	33	f1_d40_f2_d40	51	f1_d60_f2_d40	69	f1_d40_f2_d40_f4_d40
16	f1_d20_f2_d60	34	f1_d40_f2_d60	52	f1_d60_f2_d60	70	f2_d60_f3_d60_f4_d60
17	f1_d20_f3_d20	35	f1_d40_f3_d20	53	f1_d60_f3_d20	71	f1_d20_f3_d40_f4_d60
18	f1_d20_f3_d40	36	f1_d40_f3_d40	54	f1_d60_f3_d40	72	f1_d20_f3_d40_f4_d40

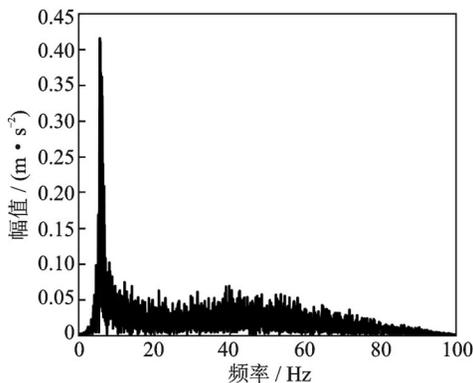
表 2 数值模拟模型损伤工况

Tab. 2 Damage scenarios of numerical simulation model

无损	单损	双损	三损
No_damage	f1_d38	f1_d38_f3_d18	f1_d18_f3_d38_f4_d38
f2_d2	f3_d18	f2_d58_f4_d18	f1_d18_f2_d38_f4_d58



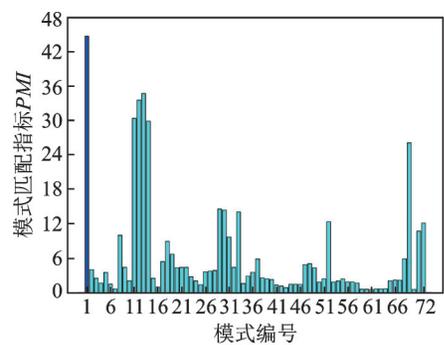
(a) 测点3位置的加速度响应
(a) Acceleration response of measuring point 3



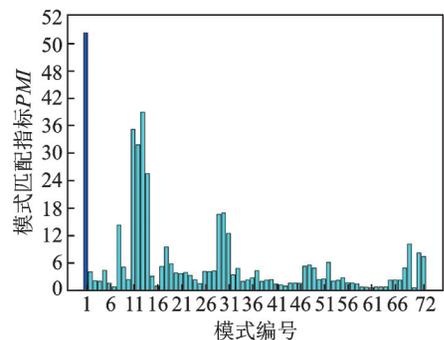
(b) 测点3位置响应的傅里叶变换
(b) Fourier transform of the response of measuring point 3

图 3 结构的加速度响应与傅里叶变换

Fig. 3 Acceleration response and Fourier transform of structure



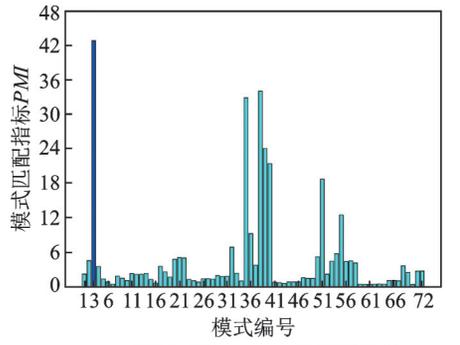
(a) 测试工况: No_damage 的匹配结果
(a) The matching result of test condition: No_damage



(b) 测试工况: f2_d2 的匹配结果
(b) The matching result of test condition: f2_d2

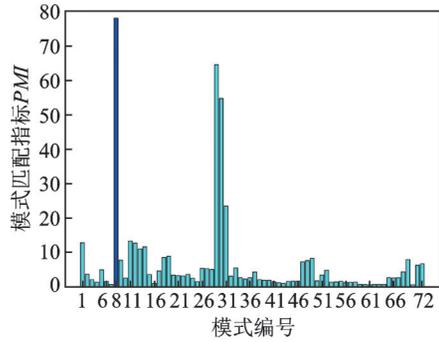
图 4 无损的匹配结果

Fig. 4 Matching results of undamage



(a) 测试工况: f1_d38的匹配结果

(a) The matching result of test condition f1_d38

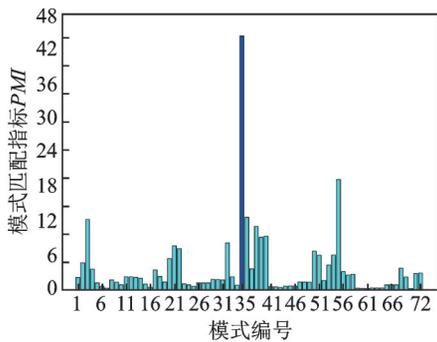


(b) 测试工况: f3_d18的匹配结果

(b) The matching result of test condition f3_d18

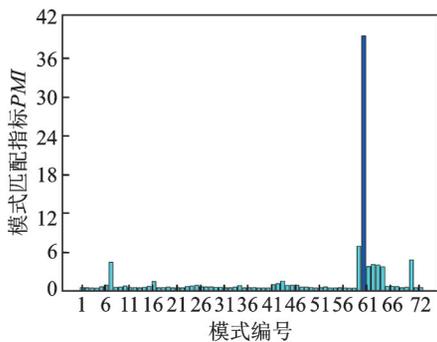
图5 单损的匹配结果

Fig. 5 Matching results of single damage



(a) 测试工况: f1_d38_f3_d18的匹配结果

(a) The matching result of test conditions f1_d38_f3_d18



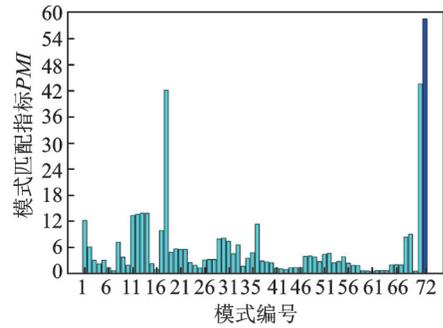
(b) 测试工况: f2_d58_f4_d18的匹配结果

(b) The matching result of test conditions f2_d58_f4_d18

图6 双损的匹配结果

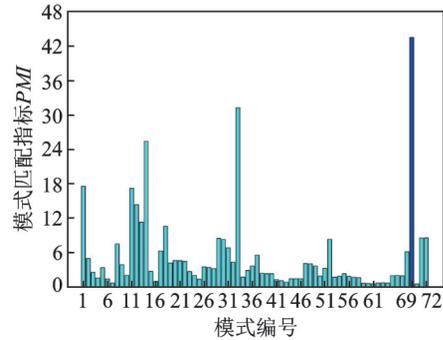
Fig. 6 Matching results of double damage

关系,可将匹配上的模式编号作为索引,在损伤模式数据库中寻找出其对应的工况标签,此时工况标签上附带的损伤位置及损伤程度信息即视为测试工况的真实损伤状况。



(a) 测试工况: f1_d18_f3_d38_f4_d38的匹配结果

(a) The matching result of test condition f1_d18_f3_d38_f4_d38



(b) 测试工况: f1_d18_f2_d38_f4_d58的匹配结果

(b) The matching result of test condition f1_d18_f2_d38_f4_d58

图7 三损的匹配结果

Fig. 7 Matching results of triple damage

如上匹配结果所示,随机选取的12个测试用例均能与相应的损伤模式准确匹配,从而达到损伤识别的预期目标,从数值模拟的角度验证了本文方法的可行性与准确性。

3 实验验证

3.1 实验简介

为进一步验证本文方法的可行性,搭建层间剪切实验模型。实验模型由钢板和质量块模拟实际楼层的立柱与层间质量,钢板尺寸及物理参数为:宽 \times 高 \times 厚为 $0.1\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.01\text{ m}$;材料密度与弹性模量分别为: $\rho = 7850\text{ kg/m}^3$, $E = 2.01 \times 10^{11}\text{ Pa}$ 。将8个重量为 0.943 kg 的质量块通过螺杆对称悬挂在钢板高度 $0.2, 0.4, 0.6, 0.79\text{ m}$ 处以此模拟楼板的集中质量,如图8所示。

由惯性矩的公式 $I = bh^3/12$ 可知,减小层间钢板宽度 b ,惯性矩 I 也随之减小,实验时通过减小钢板宽度来达到模拟损伤的效果。实验模拟三种待测工况如表3所示。

理论上使用2个传感器的测试数据即可满足本文所提方法要求,为了提高方法的容错性与鲁棒性,本文将4个传感器分别放置于图8结构的质量块处,传感器位置应保持同一垂直方向对齐。使用力锤对层间钢板中心进行敲击,采集加速度响应信号,采集

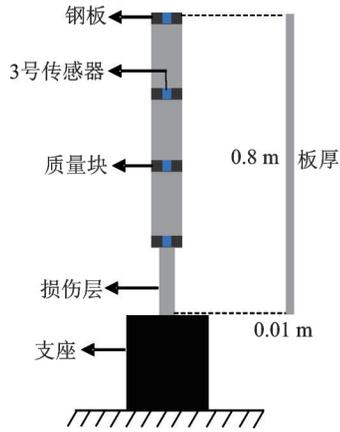


图 8 实验层间剪切模型

Fig. 8 Experimental interlaminar shear model

表 3 实验模型损伤工况

Tab. 3 Damage scenarios of experimental model

模拟工况	位置与程度
无损	No_damage
单损	f1_d40
双损	f1_d40_f3_d20

设备为 DH5922N 动态信号采集分析系统, 实验层间剪切模型以及采集系统实物图如图 9 所示。



图 9 实验模型

Fig. 9 Experimental model

根据无损工况的实验模型尺寸以及物理参数, 建立相对应的有限元模型, 两者的前二阶固有频率大小以及相对误差如表 4 所示。

由上述频率对比结果可知, 本文建立的有限元

表 4 频率对比

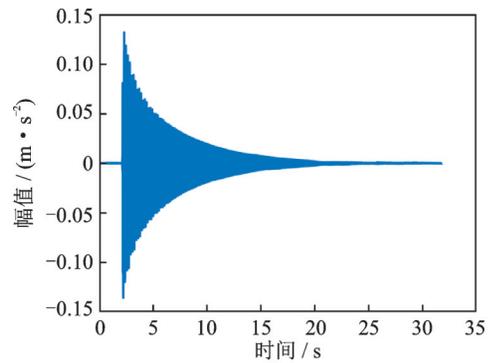
Tab. 4 Frequency comparison

	第一阶固有频率/Hz	第二阶固有频率/Hz	相对误差/%
实验	6.7505	6.7584	1.233
数值模拟	41.394	42.420	2.419

模型与实验模型的相对误差较小, 因此无需对有限元模型进行模型修正。但是结构较为复杂时, 由建模、边界条件等因素会带来较大的误差, 此时, 应当先对模型进行修正, 再使用本文方法识别结构的损伤。

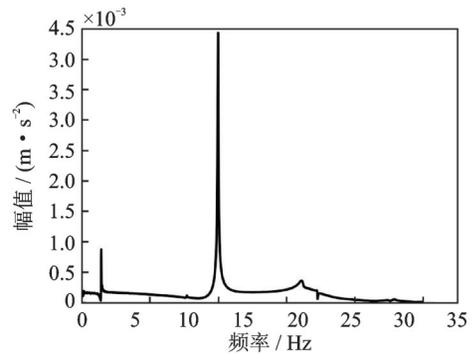
3.2 实验结果

图 10 为选用无损工况时 3 号传感器的加速度响应与其对应的傅里叶变换谱, 可知此时结构被激起二阶模态, 因此, 选取前二阶模态信息用于模式匹配损伤识别, 结果如图 11~13 所示。



(a) 3号传感器实验加速度响应

(a) Experimental acceleration response of sensor NO.3



(b) 3号传感器傅里叶变换谱

(b) Fourier spectrum of sensor NO.3

图 10 完好结构的加速度响应与傅里叶变换

Fig. 10 Acceleration response and Fourier transform of intact structure

仍然使用表 1 损伤模式数据库作为匹配基准, 实验选用无损、单损及双损的模型验证方法的可靠性, 其损伤位置与程度详细信息见表 3。在 4 层模型同侧的质量块上安装 4 个加速度传感器, 采集加速度响应数据, 根据上述方法构造匹配因子矩阵, 然后与损伤模式数据库中各工况的损伤模式进行匹配, 其匹配结果如图 11~13 所示。

实验测试及数据分析结果表明, 联合局部传递率函数与模式匹配损伤识别法能够准确识别结构有无损伤、损伤位置以及损伤程度, 从实验的角度验证了该方法的可靠性。

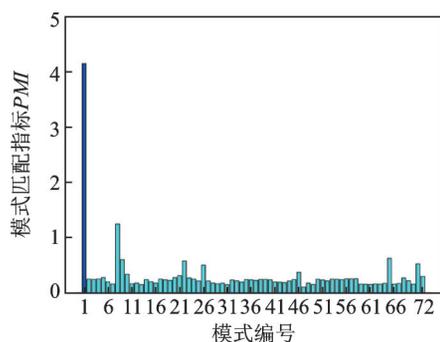


图11 实验测试工况:No_damage的匹配结果

Fig. 11 The matching result of experimental condition: No_damage

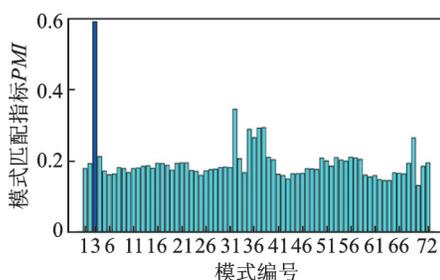


图12 实验测试工况:f1_d40的匹配结果

Fig. 12 The matching result of experimental condition: f1_d40

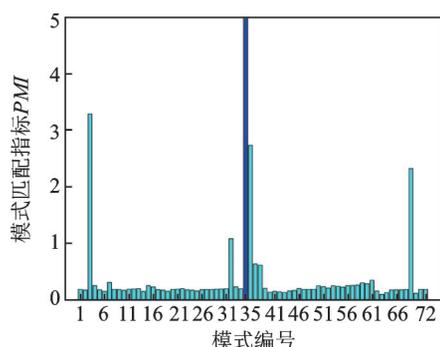


图13 实验测试工况:f1_d40_f3_d20的匹配结果

Fig. 13 The matching result of experimental condition: f1_d40_f3_d20

4 结论

本文提出一种基于局部传递率函数与模式匹配的快速损伤识别方法,首先通过有限元建立结构不同损伤位置与程度的模型,模态分析获取固有频率与振型,建立损伤模式数据库时,应根据具体情况设定适当的损伤程度区间及损伤位置,使其具备完备性;根据信号局部传递率函数构建匹配因子矩阵,调用模式库中的模态参数构建损伤模式矩阵,建立匹配因子矩阵与损伤模式矩阵间的映射关系;最后以相似度指标来衡量匹配程度,模式库中相似度最高的损伤模式即视为检测工况的实际损伤情况。通过

数值模拟与实验验证该法的可行性与准确性,并得出如下结论:

(1) 本文方法不涉及复杂的迭代算法与收敛性问题,能快速地识别结构的损伤位置与损伤程度。

(2) 本文方法依据局部传递率函数构造的匹配因子包含振型成分,对结构局部损伤敏感。

(3) 本文方法不受激励因素影响且无需识别结构的模态参数,从根本上避免了激励信号未知以及实测信号难以准确识别模态参数的问题。

(4) 本文方法传感器用量少,大大降低大型结构安全性评估的经济成本。

需要指出的是,用于验证本文方法的模型较为简单,意在论证方法的可行性,根据表4频率对比结果可知,有限元模型与实验模型的相对误差较小,因此未进行模型修正。事实上,当有限元模型与实际结构误差较大时,应当进行模型修正。

参考文献:

- [1] 马宏伟, 聂振华. 桥梁安全监测最新研究进展与思考[J]. 力学与实践, 2015, 37(2):161-170.
MA Hongwei, NIE Zhenhua. Recent advances and review of bridge safety monitoring[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(2):161-170.
- [2] Zhang H, Schulz M J, Naser A, et al. Structural health monitoring using transmittance functions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(5): 765-787.
- [3] Zhu D, Yi X, Wang Y. A local excitation and measurement approach for decentralized damage detection using transmissibility functions [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(3):487-502.
- [4] Zhu H P, Mao L, Weng S. A sensitivity-based structural damage identification method with unknown input excitation using transmissibility concept [J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(26):7135-7150.
- [5] Steenackers G, Devriendt C, Guillaume P. On the use of transmissibility measurements for finite element model updating [J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 303(3-5):707-722.
- [6] 刘焕林, 骆紫薇, 余岭. 一种运用少量传递率函数值与稀疏正则化的结构损伤识别方法[J]. 振动工程学报, 2020, 33(6): 1181-1188.
LIU Huan-lin, LUO Zi-wei, YU Ling. Structural damage detection using few transmissibility functions and sparse regularization[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1181-1188.
- [7] 王乐, 杨智春, 谭光辉, 等. 基于固有频率向量的结构损伤检测方法[J]. 应用力学学报, 2008, 25(4): 709-713.
Wang Le, Yang Zhichun, Tan Guanghui, et al. Struc-

- tural damage detection based on natural frequency vector [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(4):709-713.
- [8] 李雪艳,赵志强,王立新.基于位移响应协方差参数变化比和模式匹配的梁结构损伤识别方法研究[J].应用力学学报,2020,37(4):1784-1791.
Li Xueyan, Zhao Zhiqiang, Wang Lixin. Study of structural damage identification based on covariance of displacement response and pattern matching method [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4):1784-1791.
- [9] Devriendt C, Guillaume P. The use of transmissibility measurements in output-only modal analysis [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2007, 21(7):2689-2696.
- [10] Devriendt C, Guillaume P. Identification of modal parameters from transmissibility measurements [J]. Journal of Sound & Vibration, 2008, 314(1-2):343-356.
- [11] Long Qiao, Asad Esmacily, Hani G Melhem. Signal pattern recognition for damage diagnosis in structures [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2012, 27(9):699-710.
- [12] Lee U, Shin J. A frequency response function-based structural damage identification method [J]. Computers & Structures, 2002, 80(2):117-132.
- [13] Maia M M N, Silva J M M, Ribeiro A M R. The transmissibility concept in multi-degree-of-freedom systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(1):129-137.
- [14] Zhou Y L, Maia N M M, Sampaio R P C, et al. Structural damage detection using transmissibility together with hierarchical clustering analysis and similarity measure [J]. Structural Health Monitoring, 2017, 21(6):711-731.
- [15] 张雄,王天舒.计算动力学[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [16] James III G H, Carne T G, Lauffer J P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures [J]. NASA Sti/Recon Technical Report N, 1993, 93(4):260-277.
- [17] Lampard D G. Generalization of the Wiener-Khintchine Theorem to nonstationary processes [J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(6):802-803.
- [18] 王济. MATLAB在振动信号处理中的应用[M].北京:知识产权出版社,2006.
- [19] 张宇,刘雨东,计钊.向量相似度测度方法[J].声学技术,2009,28(4):532-536.
Zhang Yu, Liu Yudong, Ji Zhao. Vector similarity measurement method [J]. Technical Acoustics, 2009, 28(4):532-536.

Rapid damage identification of structure based on local transmissibility function and pattern matching

SHEN Qing-wei^{1,2}, NIE Zhen-hua^{1,2}, MA Hong-wei^{1,3}

(1.School of Mechanics and Construction Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.The Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Ministry of Education of China, Guangzhou 510632, China; 3.School of Ecological Environment and Construction Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, China)

Abstract: In order to quickly assess the safety of the structure after disaster, a rapid damage identification method based on local transmissibility function and pattern matching is proposed. The finite element models of the structure with different damage scenarios are established. The natural frequencies and mode shapes are obtained through modal analysis and the damage pattern database is established. For the real structure to be assessed, the local transmissibility function is calculated using the vibration signals measured by limited number of sensors installed on the structure to construct the matching factor matrix. Meanwhile, using the modal parameters stored in the damage pattern database, the damage pattern matrix is also calculated, establishing the mapping relationship between the matching factor matrix and the damage pattern matrix. The similarity index obtained by Euclidean distance is used to measure the level of the pattern matching. The damage pattern with the highest similarity is regarded as the damage scenario of the real structure, so that the damage is identified. In order to verify the feasibility and accuracy of this method, a four-layer interlayer shear model is simulated and tested in the lab. The results of both simulation and experiment show that the proposed method can accurately identify the damage location and severity of the structure. The proposed method has the advantages that it does not involve complex algorithms, only a small amount of sensors are used, and the calculation speed is fast, which meets the requirements of rapid post-earthquake evaluation of the structure. This method is only related to the inherent properties of the structure, but not requires the structural modal parameter identification. Hence, this method has a good prospect of practical application in engineering.

Key words: rapid damage identification; pattern matching; local transmissibility; Euclidean distance; damage mode library

作者简介: 沈清伟(1995—),男,硕士研究生。电话:15521258360;E-mail:qw15521258360@163.com。

通讯作者: 聂振华(1982—),男,教授。电话:13822254097;E-mail:niezh@jnu.edu.cn。