

# 移动荷载作用下时变简支钢桥损伤识别<sup>\*</sup>

刘景良<sup>1</sup>, 高源<sup>1</sup>, 廖飞宇<sup>1</sup>, 骆勇鹏<sup>1</sup>, 郑文婷<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院 福州, 350002)

(2. 福建工程学院土木工程学院 福州, 350118)

**摘要** 针对移动荷载作用下桥梁结构振动响应信号呈现非平稳性的特点, 构建新的一阶本征函数自功率谱最大值变化比和一阶本征函数小波能量变化率两个指标来识别时变结构的损伤。首先, 采用小波阈值去噪法对时变结构响应信号进行去噪处理; 其次, 运用解析模态分解定理提取响应信号的一阶本征函数并构建一阶本征函数自功率谱最大值变化比指标来识别结构的损伤位置, 在识别结构损伤位置的基础上, 将损伤位置处的加速度响应信号的一阶和二阶本征函数进行线性混叠后, 采用快速独立成分分析进行分离, 得到更有效的一阶本征函数; 最后, 基于连续小波变换和时间窗思想, 提出一阶本征函数小波能量变化率指标来预测结构的时变损伤。通过移动荷载作用下的时变简支钢桥试验验证所提出的损伤指标, 研究结果表明, 提出的两个指标能够有效识别结构的损伤位置和时变损伤。

**关键词** 解析模态分解; 本征函数; 自功率谱; 快速独立成分分析; 时变损伤; 损伤识别

**中图分类号** TN911.6; TU311.3

## 1 问题的引出

结构损伤识别是对结构性能各项指标进行分析, 以确定结构是否发生损伤, 进而判断结构的损伤位置和损伤程度乃至评估结构当前的健康状况。成功识别损伤的关键是提出可靠的损伤指标<sup>[1-2]</sup>。目前, 基于振动信号的损伤识别方法成为研究热点并获得了广泛关注<sup>[3-7]</sup>。然而振动信号的采集容易受到环境噪声的干扰, 因此如何消除实测响应信号中的噪声是一个需要解决的问题。邵忍平等<sup>[8]</sup>采用基于经验模态分解的小波阈值去噪方法对测试信号进行预处理并验证了该方法的有效性。赫彬等<sup>[9]</sup>提出一种基于独立分量分析-互补集合经验模态分解小波阈值的组合去噪算法, 并通过仿真和实测试验证明了该组合去噪算法的有效性。信号降噪后, 如何对信号进行处理并提出相应的损伤指标十分重要。其中, 功率谱指标反映了信号功率在各个频带上的分布情况, 可以用于结构损伤识别。李曰兵等<sup>[10]</sup>对废止的铁路线钢桥预设损伤工况, 然后采用正弦扫频波激励钢桥并通过计算损伤前后加速度反应功率

谱密度变化来定位损伤位置, 但该方法需要未损伤结构的信息。Mikami等<sup>[11]</sup>通过小波包分解对动态信号进行分解, 估计出各个分量的功率谱密度并根据其幅值的差异提出了新的适用于识别梁类结构损伤位置的方法。杨佑发等<sup>[12]</sup>根据 Benchmark 模型测点处的加速度响应计算出自功率谱, 而自功率谱曲线表现为一个或多个明显的峰值。当结构发生损伤时, 自功率谱曲线主要表现为峰值的减小, 且在损伤测点处的自功率谱曲线的峰值变化最为明显。在上述损伤位置指标中, 加速度反应功率谱密度变化指标可以用于检测结构内部损伤, 而功率谱密度幅值指标是在结构本身对称的情况下才能有效识别位置<sup>[11]</sup>。加速度自功率谱曲线峰值变化指标主要用于识别预设的连接点损伤或者桁架斜撑损伤<sup>[12]</sup>。笔者主要研究移动荷载作用下桥梁结构发生刚度突变损伤的情况, 可根据各测点时程响应自功率谱曲线峰值在不同频率处的变化来识别结构的损伤位置。由于实际结构响应信号的高频部分更容易受到噪声干扰, 因此提取低阶特征分量来构建自功率谱函数损伤指标是可行的。

实际上, 自然环境激励下的桥梁结构在服役期

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51608122); 福建省自然科学基金青年科技人才创新资助项目(2016J05111); 福建农林大学杰出青年基金资助项目(XJQ201728)

收稿日期: 2018-02-25; 修回日期: 2018-04-14

限内会受到各种复杂荷载作用,其损伤不可避免且不断累积,本质上属于时变和非线性结构系统。时变结构的损伤过程是由轻微损伤到严重损伤的渐变过程。在渐变过程中,结构的动力特性随时间不断变化,其响应信号呈现非平稳性<sup>[13]</sup>。渐变的损伤过程需要瞬时特征参数作为表征支撑,因此提出一个时变的损伤指数来追踪结构损伤演化过程具有重要的理论意义和工程实用价值。目前,关于时变结构损伤识别方法的研究工作并不多见。Soyoz 等<sup>[14]</sup>采用扩展卡尔曼滤波方法识别地震作用下结构的瞬时单元刚度,并以此作为损伤评价指数。熊飞等<sup>[15]</sup>基于希尔伯特-黄变换识别出时变结构的瞬时频率并以此作为结构的损伤判定指标。Liu 等<sup>[16]</sup>在采用同步挤压小波变换识别响应信号瞬时频率的基础上,提出模态振型参与系数指标来追踪简支梁结构的时变损伤。任宜春等<sup>[17]</sup>采用集合经验模态分解方法处理响应信号,利用损伤前后结构响应固有模态函数特征能量比和瞬时频率的变化来分别判断强震作用下结构的损伤位置和损伤时间。在上述时变损伤指标中,瞬时频率为全局损伤指标且对噪声十分敏感,瞬时单元刚度识别难度过大,而能量指标包含丰

富的损伤信息,可以用来构建新的时变损伤指标并识别结构的时变损伤。

基于此,笔者针对移动荷载作用下的时变结构,提出一种新的判别结构损伤位置和时变损伤的方法,其具体流程如图 1 所示。首先,该方法对原始响应信号进行小波阈值去噪并通过解析模态分解(analytic mode decomposition,简称 AMD)方法提取各阶本征函数(intrinsic mode function,简称 IMF);然后,计算一阶分量信号  $IMF_1$  的自功率谱最大值变化比(maximum change ratio of auto power spectrum,简称 MCRAPS)并由此确定损伤位置。由于快速独立分量分析(fast independent component analysis,简称 FastICA)能够消除各个输入量之间的互信息和冗余信息,并分离出信息之间隐藏的相互独立的成分<sup>[18]</sup>,因此将损伤位置处的响应信号的  $IMF_1$  和  $IMF_2$  线性混叠后采用 FastICA 算法进行分离,从而得到包含干扰信息更少的一阶本征函数。在此基础上,构建时变指标一阶本征函数小波能量变化率(wavelet-energy change rate,简称 WCR)来识别结构的时变损伤,并通过时变简支钢桥试验验证了本方法的可行性及有效性。

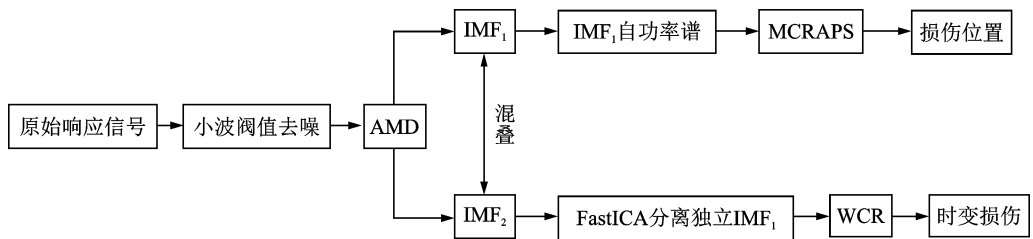


图 1 时变钢桥试验损伤识别流程图

Fig. 1 The flowchart of damage detection of a time-varying steel bridge

## 2 基本理论

### 2.1 解析模态分解定理

为降低噪声对信号的干扰,在对实测响应信号进行 AMD 分解之前,采用小波阈值去噪法对响应信号进行去噪,具体方法见文献<sup>[19-20]</sup>。由于 Daubechies 小波和加速度信号的波形最为相近,且对加速度信号的峰值敏感,有利于后期的加速度信号分析处理<sup>[20]</sup>,因此笔者选择 Db10 作为小波母函数。

图 2 为基于 AMD 分解的时频低通滤波器框图。AMD 作为一种与经验模态分解类似的信号分解方法是解析而不是经验性的,其具体算法及证明过程详见文献<sup>[21]</sup>。任意响应信号的 AMD 分解本

质上是一个如图 2 所示的自适应低通滤波器。通过选择合适的截止频率,AMD 利用希尔伯特变换把每一具有特定频率成分的分量信号从  $n$  个信号分量组成的原始响应信号中解析分解出来。

### 2.2 快速独立成分分析

独立成分分析(independent component analysis,简称 ICA)<sup>[22]</sup>的基本思想是将多个观测信号通过优化算法分解为若干个独立成分,从而实现信号的增强和提纯。ICA 算法流程如下。

对  $n$  个未知信号源  $S$  经混合矩阵  $A$  线性混合为信号  $X$ ,通过式(1)估算出信号源  $S$  为

$$S \approx Y = WX \quad (1)$$

其中: $Y$  为信号源  $S$  的估计;待求矩阵可通过 ICA 求得。

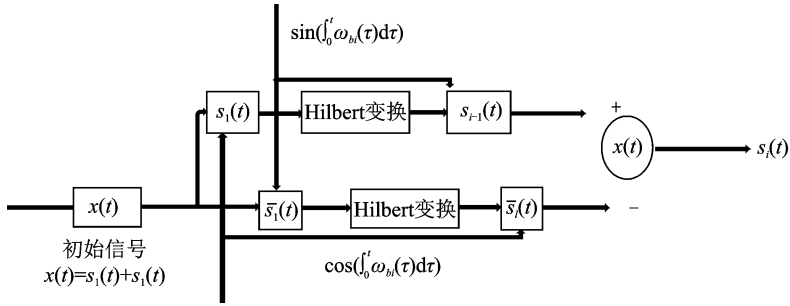


图2 基于 AMD 分解的时频低通滤波器框图

Fig. 2 The flowchart of low-pass time-frequency filter based on AMD

作为 ICA 中一种性能相对较好的算法, FastICA<sup>[23]</sup> 是一种计算简单、收敛速度快的局域负熵极大化算法。FastICA 算法采用牛顿迭代算法对观测变量的大量采样点进行批处理, 以最大化负熵作为目标函数, 每次从观测信号中分离出一个独立分量, 经多次迭代直到分离出所有的独立分量。负熵的定义式为

$$J(\mathbf{y}) = \{E[G(\mathbf{y}) - E\{G(\mathbf{y}_{\text{Gauss}})\}]\}^2 \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{y} = \mathbf{W}^T \mathbf{Z}$ ;  $\mathbf{Z}$  为对  $\mathbf{X}$  进行中心化和白化处理后的矩阵;  $G$  为一个非二次非线性的函数。

在  $\mathbf{W}$  正交的约束条件下, 求取式(2)的极大值可得到如式(3)所示的迭代式。然后重复上述过程直到所有独立分量完全分离。

$$\mathbf{W}(k+1) = E\{g(\mathbf{W}(k)^T \mathbf{Z}) - E\{g'(\mathbf{W}(k)^T \mathbf{Z})\} \mathbf{W}(k)\} \quad (3)$$

其中:  $k$  为迭代次数;  $E$  表示数学期望;  $g$  为  $G$  函数的导数;  $g'$  为  $g$  函数的导数。

需要注意的是, 在经过 AMD 分解后, 源信号的各阶 IMF 组成  $m$  维独立矩阵  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 。以  $\mathbf{X}$  作为输入矩阵, 通过 FastICA 可估计出源信号矩阵  $\mathbf{S}(t)$ , 而  $\mathbf{S}(t)$  中包含了更为有效的各阶独立 IMF, 为后续的时变损伤识别过程提供了方便。

## 3 损伤指标构建

### 3.1 损伤位置指标自功率谱最大值变化比

自功率谱定义为单个随机振动信号在单位频带内的信号功率, 代表了信号功率在频域内的分布情况。当结构发生损伤时, 各测点的加速度响应自功率谱会发生相应变化, 因此可根据不同时段自功率谱的变化情况来判断结构损伤<sup>[11]</sup>。设定某时域响应信号  $x(t)$ , 则基于韦尔奇方法<sup>[24]</sup>的自功率谱的定义为

$$\mathbf{S}(f) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \mathbf{X}_i(f) \overline{\mathbf{X}_i(f)} \quad (4)$$

其中:  $M$  为平均次数;  $N$  为响应信号长度;  $\mathbf{X}_i(f)$  为响应信号的第  $i$  个数据段的傅里叶变换;  $\mathbf{X}_i(f)$  与  $\overline{\mathbf{X}_i(f)}$  互为共轭复数。

假定结构上某一测点  $k$  处的加速度响应 IMF<sub>1</sub> 的自功率谱最大值为  $\mathbf{S}_{k1, \max}^d$ , 则该点处的加速度响应 IMF<sub>1</sub> 的自功率谱最大值变化比的定义为

$$\text{MCRAPS} = \left| \frac{\mathbf{S}_{k1, \max}^d - \mathbf{S}_{k1, \max}^u}{\mathbf{S}_{k1, \max}^u} \right| \quad (5)$$

其中: 上标  $u$  和  $d$  分别表示未损和损伤状态。

### 3.2 时变损伤指标小波能量变化率

实际工程结构是一个损伤逐渐积累的渐变过程, 渐变的损伤过程需要时变损伤指数作为支撑来追踪结构的损伤演化过程。为提取更有效的独立一阶本征函数, 将损伤位置处加速度响应的 IMF<sub>1</sub> 和 IMF<sub>2</sub> 线性混叠后采用 FastICA 进行再分离, 然后对分离得到的新的独立一阶本征函数 IMF<sub>1</sub> 即  $s_1(t)$  进行连续小波变换, 得到小波系数矩阵为

$$\mathbf{W}_{s_1}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (6)$$

其中:  $a$  和  $b$  分别为尺度因子和平移因子;  $\psi(t)$  为平方可积函数且满足容许性条件的小波母函数;  $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$  为  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  共轭复数。

若  $\mathbf{W}_{s_1}(a, b)$  为  $m \times n$  矩阵, 记为  $\mathbf{W}_{s_1}(a_i, b_j)_{m \times n}$ , 其中:  $m$  为尺度  $a_i$  个数;  $n$  为采样时间点  $b_j$  个数。由于小波尺度与频率存在一一对应关系, 根据  $a = (F_c \cdot f_s) / f_a$  可进行频率与尺度之间的转换。其中:  $F_c$  为小波中心频率;  $f_s$  为采样频率;  $f_a$  为尺度  $a$  对应的频率。对所有尺度所对应的小波系数进行求和可得

$$\mathbf{W}_s(b_j) = \sum_{i=1}^m \mathbf{W}_{s_1}(a_i, b_j)_{m \times n} \quad (7)$$

沿求和后的小波系数  $W_s(b_j)$  曲线设置一个滑动时间窗, 窗口长度为  $2\Delta t$ , 以窗内的小波能量平均值代表滑动窗中心点的小波能量。令窗口沿时间轴不断滑动, 可求得  $IMF_1$  的小波能量在每个窗口中心点的值, 即

$$E_1(t) = \sum_{b_j \in [t-\Delta t, t+\Delta t]} \frac{W_s(b_j)^2}{2\Delta t} \quad (8)$$

设结构未损工况和损伤工况下的加速度响应  $IMF_1$  的小波能量分别为  $E_1^u(t)$  和  $E_1^d(t)$ , 则加速度响应  $IMF_1$  分量的小波能量变化率为

$$WCR(t) = \frac{E_1^d(t) - E_1^u(t)}{E_1^u(t)} \quad (9)$$

### 4 简支钢桥损伤试验验证

为验证损伤定位指标 MCRAPS 和时变指标 WCR 的有效性, 以时变简支钢桥试验为例, 模拟实际车辆通过公路桥梁的情况。图 3 为桥面板尺寸图。图 4 为时变简支钢桥模型图。桥梁结构的工字梁

高为 450mm, 桥面板尺寸为  $10\,000\text{mm} \times 450\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 桥面板与下部两根工字梁之间采用型号为 M24 的高强螺栓进行连接, 具体如图 4(a) 所示。桥面板、工字型梁及引桥面板所用材料均为钢材 Q235, 密度  $\rho = 7\,800\text{kg/m}^3$ , 弹性模量  $E = 21\text{GPa}$ 。加速度传感器型号为江苏东华测试技术股份有限公司生产的 IEPE 压电式加速度传感器 (灵敏度在  $52 \sim 53\text{mV/g}$ ), 从左到右 1m 等间距布置, 分别记为测点 1~9。为模拟时变结构的损伤, 在桥面板上有切割尺寸为  $450\text{mm} \times 100\text{mm}$  的 3 块矩形钢块  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$ , 具体位置如图 3 所示。采用两块通电矩形磁铁从桥面板下部对每一损伤块进行固定, 损伤块及固定方式具体如图 4(e) 所示。图 4(e) 中的损伤块对应实际桥梁面板中某处出现刚度损伤的情况。在主桥的端部分别有 3m 和 2m 的引桥, 分别为重量为 42.8kg 的小车加速和减速提供空间, 以保证小车在主桥上可以匀速运动。引桥和小车分别模拟实际情况桥梁两端的引桥和桥面上行驶中的车辆, 模型如图 4(b) 和 4(c) 所示。

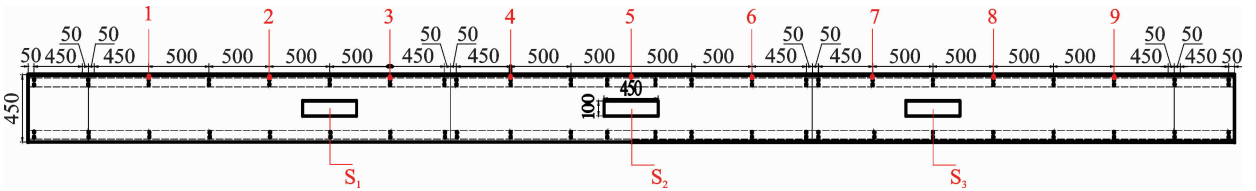


图 3 桥面板尺寸图 (单位: mm)

Fig. 3 The dimensions of bridge deck (unit: mm)

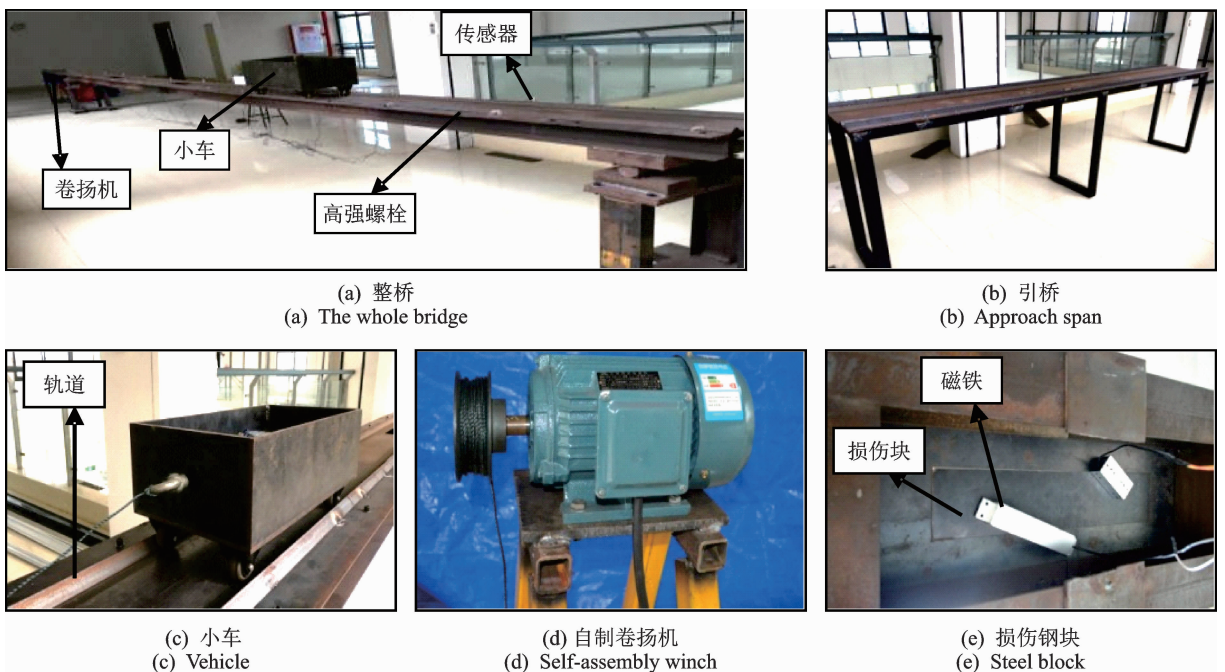


图 4 时变简支钢桥模型图

Fig. 4 The diagram of time-varying steel bridge model

为了使小车沿预先设定的轨道前行,在桥面板上用  $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 3\text{mm}$  的角钢连接成间距为  $0.29\text{m}$  的固定轨道以便容纳小车通行。在试验过程中,使用自组装可调速卷扬机提供牵引力拉动小车前行,卷扬机如图 4(d) 所示。小车在引桥段加速,进入主桥轨道之后为匀速行驶阶段。匀速前行的小车为整个桥梁系统提供了移动荷载激励。当小车行驶至损伤块位置时,突然断电释放矩形钢块,以此模拟桥梁的刚度变化,即时变损伤。在通过主桥后,小车在另一端引桥上减速滑行并最终停止行驶。在整个小车驶过主桥的过程中,采用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH5922 动态信号测试分析系统进行试验数据采集。损伤工况如表 1 所示,共考虑 3 个工况,  $\text{DS}_1$ ,  $\text{DS}_2$  和  $\text{DS}_3$  分别为未损伤工况、单点损伤工况和多点损伤工况。

表 1 损伤工况

Tab. 1 The damage scenarios

损伤工况	损伤情况	损伤位置
$\text{DS}_1$	无	无
$\text{DS}_2$	$S_1$ 在 $7.5\text{s}$ 突然掉落	$S_1$ (测点 2 和 3 之间)
$\text{DS}_3$	$S_1$ 和 $S_3$ 分别在 $2.4\text{s}$ 和 $7.5\text{s}$ 突然掉落	$S_1$ 和 $S_3$ (测点 7 和 8 之间)

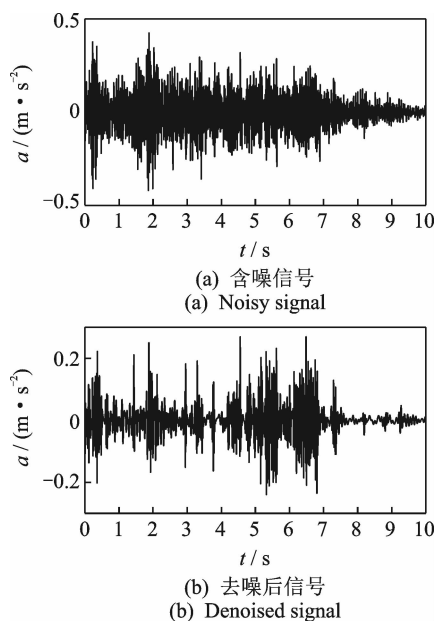
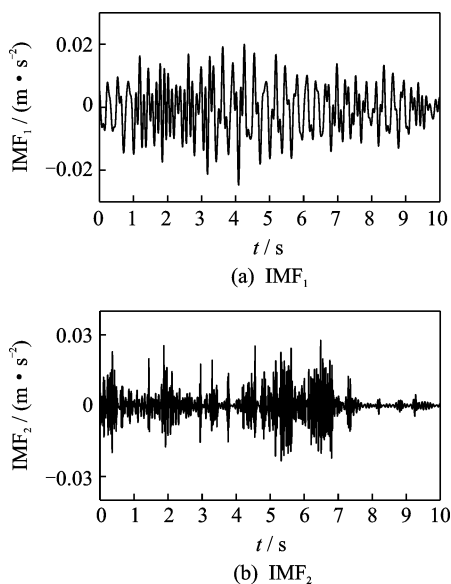
#### 4.1 单点损伤工况

图 5 为  $\text{DS}_1$  工况下加速度响应。  $\text{DS}_1$  工况下, 1 号测点记录的加速度响应如图 5(a) 所示。以 Daubechies 小波为母函数, 对该响应信号进行小波阈值去噪, 去噪后的信号如图 5(b) 所示。

图 6 为  $\text{DS}_1$  工况下加速度响应分量信号。选定截止频率为  $10\text{Hz}$ , 通过 AMD 提取去噪信号的  $\text{IMF}_1$  和  $\text{IMF}_2$ 。同理,  $\text{DS}_2$  工况下采用 AMD 定理提取 1 号测点记录的加速度响应的  $\text{IMF}_1$  和  $\text{IMF}_2$ , 如图 7 所示。

根据式(4)求取  $\text{DS}_1$  和  $\text{DS}_2$  工况下测点 1 记录的加速度响应  $\text{IMF}_1$  自功率谱曲线, 如图 8 所示。提取图 8 中自功率谱曲线的最大值, 并将  $\text{DS}_1$  和  $\text{DS}_2$  工况下测点 1 的加速度自功率谱曲线最大值代入式(5), 求得测点 1 的 MCRAPS 值。同理, 可求出其余测点位置上的 MCRAPS 值, 如图 9 所示。由图 9 可知, 测点 2 和 3 的 MCRAPS 最大, 而测点 2 和 3 位于  $S_1$  损伤块两侧, 因此可以大致判断  $S_1$  损伤块处发生损伤, 这与预先设定的  $\text{DS}_2$  工况下  $S_1$  处发生损伤的试验情况是吻合的, 同时也验证了 MCRAPS 指标识别时变结构损伤位置的准确性。

图 8 为  $\text{DS}_1$  和  $\text{DS}_2$  工况下加速度响应  $\text{IMF}_1$  自功率谱曲线。图 9 为单点损伤 MCRAPS 直方图。

图 5  $\text{DS}_1$  工况下加速度响应Fig. 5 Acceleration responses with  $\text{DS}_1$ 图 6  $\text{DS}_1$  工况下加速度响应分量信号Fig. 6 Component signals of acceleration responses with  $\text{DS}_1$ 

在成功识别损伤位置为  $S_1$  (2 号和 3 号测点) 附近的基础上, 从  $\text{DS}_1$  工况下测点 2 或者测点 3 中任意一个测点 (笔者以测点 2 为例) 记录的加速度响应信号出发, 将 AMD 定理提取的  $\text{IMF}_1$  和  $\text{IMF}_2$  线性混叠后, 通过 FastICA 再分离出独立  $\text{IMF}_1$ , 结果如图 10(a) 所示。同理, 求得  $\text{DS}_2$  工况下去除相关成分的独立  $\text{IMF}_1$ , 如图 10(b) 所示。图 10 为 FastICA 分离得到的独立  $\text{IMF}_1$ 。

采用复 Morlet 小波对 FastICA 提取的独立  $\text{IMF}_1$  进行连续小波变换, 并根据式(7)对得到的小

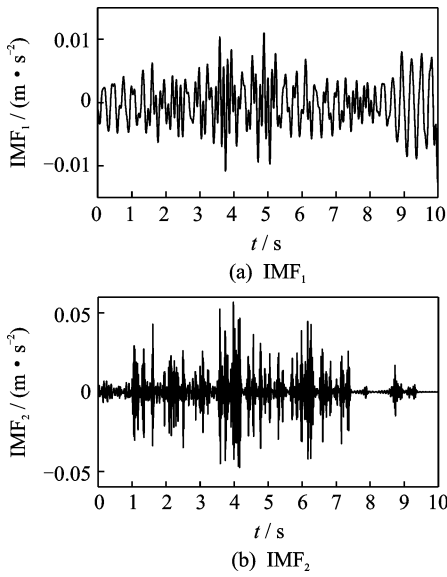


图 7 DS<sub>2</sub> 工况下加速度响应分量信号

Fig. 7 Component signals of acceleration responses with DS<sub>2</sub>

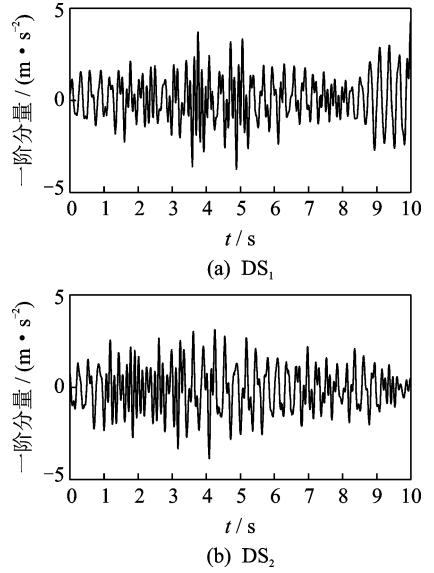


图 10 FastICA 分离得到的独立 IMF<sub>1</sub>

Fig. 10 The independent IMF<sub>1</sub> extracted by FastICA

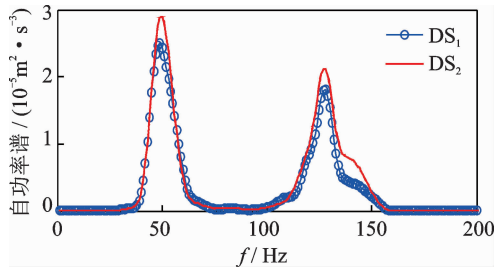


图 8 DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>2</sub> 工况下加速度响应 IMF<sub>1</sub> 自功率谱曲线

Fig. 8 Auto power spectrum curves of IMF<sub>1</sub> of acceleration responses with DS<sub>1</sub> and DS<sub>2</sub>

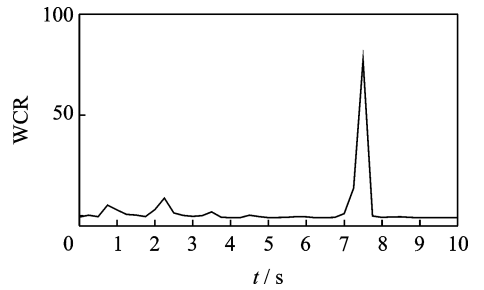


图 11 单点损伤的 WCR 图

Fig. 11 The WCR with single damage locations

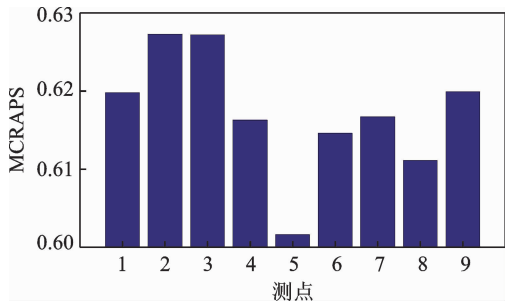


图 9 单点损伤 MCRAPS 直方图

Fig. 9 The histogram of MCRAPS with single damage location

波系数矩阵求和。在求和后的小波系数曲线上设置一个滑动时间窗,选取时间窗长为 50(0.25s),根据式(8)求得一阶本征函数小波能量在每个中心点的值  $E_1^u(t)$ 。同理,可求得 DS<sub>2</sub> 损伤工况下一阶本征函数小波能量在每个中心点的值  $E_1^d(t)$ 。最后根据式(9)求解最终的 WCR,如图 11 所示。由图 11 可

知,WCR 在 7.5s 附近出现突变,这是由于 S<sub>1</sub> 损伤块在此刻突然掉落而引起的刚度突变造成的,且与事先定义的损伤工况 DS<sub>2</sub> 相吻合。因此,WCR 指标能够有效识别简支梁结构的损伤发生时间并追踪结构的时变损伤。

### 4.2 多点损伤工况

DS<sub>3</sub> 为多点损伤工况,其识别过程与 4.1 节类似。首先,以 Db10 小波为母函数,对 DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>3</sub> 工况下的响应信号进行小波阈值去噪;然后,通过 AMD 定理分别提取 DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>3</sub> 工况下的特征分量 IMF<sub>1</sub> 和 IMF<sub>2</sub>。采用式(4)和式(5)对 DS<sub>1</sub> 和 DS<sub>3</sub> 工况的 IMF<sub>1</sub> 进行计算处理,得到的 MCRAPS 指标如图 12 所示。从图 12 可知,测点 2,3,7 和 8 的 MCRAPS 值偏大。其中,测点 2 和 3 位于 S<sub>1</sub> 损伤块两侧,而测点 7 和 8 位于 S<sub>3</sub> 损伤块两侧,因此大致可以判断 S<sub>1</sub> 和 S<sub>3</sub> 两处位置发生损伤,这与事先设定的 DS<sub>3</sub> 工况下 S<sub>1</sub> 和 S<sub>3</sub> 处发生损伤的试验情况

是吻合的,同时验证了 MCRAPS 指标不仅可以识别单点损伤工况下简支梁结构的损伤位置,且可以识别多点损伤工况下简支梁结构的损伤位置。

在成功识别损伤位置为  $S_1$  (2 和 3 测点) 和  $S_3$  (7 和 8 测点) 附近的基础上,从  $DS_1$  工况中的测点 2,3,7 和 8 中任意一个测点(笔者以测点 2 为例)记录的加速度信号出发,将 AMD 定理提取的  $IMF_1$  和  $IMF_2$  线性混叠后通过 FastICA 再分离出独立  $IMF_1$ 。

采用复 Morlet 小波对的 FastICA 提取的独立  $IMF_1$  进行连续小波变换,并根据式(7)对得到的小波系数矩阵求和,在求和后的小波系数曲线上设置一个滑动时间窗,选取时间窗长为 50(0.25s),根据式(8)可求得  $DS_3$  损伤工况下一阶本征函数小波能量在每个中心点的值  $E_1^d(t)$ 。根据式(9)求解最终的 WCR 如图 13 所示。由图 13 可知,WCR 在 2.3s 和 7.5s 附近出现突变,这是由于  $S_1$  和  $S_3$  损伤块在 2.4s 和 7.5s 时刻附近分别突然掉落而引起的刚度突变造成的,且与事先定义的损伤工况  $DS_3$  基本吻合。因此,WCR 指标不但能够识别单点损伤工况下简支梁结构的损伤发生时间,而且能够有效识别多点损伤工况下简支梁结构的损伤时间。

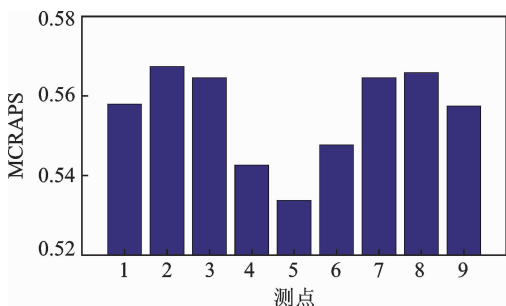


图 12 多点损伤 MCRAPS 直方图

Fig. 12 The histogram of MCRAPS with multiple damage locations

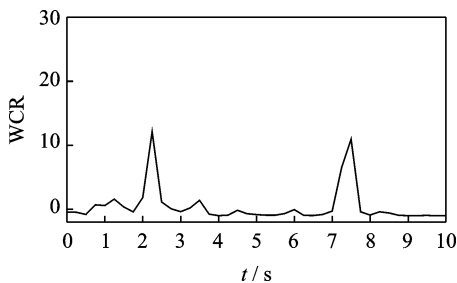


图 13 多点损伤工况下的 WCR

Fig. 13 The WCR with multiple damage locations

## 5 结论

1) 位置损伤指标 MCRAPS 指标可以识别移动

荷载作用下简支钢梁桥单点和多点损伤工况下的损伤位置。

2) FastICA 可以去除线性混叠信号的相关成份,从而得到包含更多损伤信息的独立 IMF,为后期更精准地识别结构时变损伤奠定基础。

3) 在移动荷载作用下,时变损伤指标 WCR 指标可以识别单点和多点损伤工况下实际简支钢梁桥的时变损伤。

## 参 考 文 献

- [1] 吴向男,徐岳,梁鹏,等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(6):49-57.  
WU Xiangnan, XU Yue, LIANG Peng, et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification[J]. Journal of Chang'an University (Nature Science Edition), 2013, 33(6): 49-57. (in Chinese)
- [2] 孙增寿,韩建刚,任伟新. 基于小波分析的结构损伤检测研究进展[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(2):93-99.  
SUN Zengshou, HAN Jiangan, REN Weixin. State of the art research and development of wavelet analysis based structural damage detection [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(2): 93-99. (in Chinese)
- [3] 杨秋伟. 基于振动的结构损伤识别方法研究进展[J]. 振动与冲击,2007,26(10):86-91.  
YANG Qiuwei. A review of vibration-based structural damage identification method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10): 86-91. (in Chinese)
- [4] KOPSAFTOPOULOS F P, FASSOIS S D. A functional model based statistical time series method for vibration based damage detection, localization, and magnitude estimation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 39(1/2): 143-161.
- [5] HUMAR J. Performance of vibration-based techniques for the identification of structural damage[J]. Structural Health Monitoring, 2006, 5(3): 215-241.
- [6] 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):91-96.  
HAN Dajian, WANG Wendong. Overview of vibration-based damage identification methods[J]. Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition), 2003, 31(1): 91-96. (in Chinese)
- [7] 孙晓丹,欧进萍. 基于动力检测的损伤指标评价方法[J]. 振动与冲击,2009,28(1):9-13.  
SUN Xiaodan, OU Jinping. Assessment of vibration-based damage indexes in structural health monitoring [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 9-

13. (in Chinese)
- [8] 邵忍平,曹精明,李永龙. 基于EMD小波阈值去噪和时频分析的齿轮故障模式识别与诊断[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 96-101.  
SHAO Renping, CAO Jingming, LI Yonglong. Gear fault pattern identification and diagnosis using time-frequency analysis and wavelet threshold de-noising based on EMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 96-101. (in Chinese)
- [9] 赫彬,张雅婷,白艳萍. 基于ICA-CEEMD小波阈值的传感器信号去噪[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 226-231.  
HE Bin, ZHANG Yating, BAI Yanping. A method for sensor signal de-noising based on ICA-CEEMD wavelet threshold[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 226-231. (in Chinese)
- [10] 李曰兵,邢爽,大岛俊之. 加速度功率谱密度在钢桥损伤检测中的应用[J]. 实验力学, 2009, 24(6): 598-604.  
LI Yuebing, XING Shuang, OSHIMA T. Damage detection of steel bridge based on acceleration power spectral density[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(6): 598-604. (in Chinese)
- [11] MIKAMI S, BESKHYROUN S, OSHIMA T. Wavelet packet based damage detection in beam-like structures without baseline modal parameters[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(3): 211-227.
- [12] 杨佑发,王飞宇,徐德健. 基于健康监测 Benchmark 结构的损伤识别方法[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 80-86.  
YANG Youfa, WANG Feiyu, XU Dejian. Damage identification method for Benchmark structure based on healthy monitoring[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 80-86. (in Chinese)
- [13] 刘景良,任伟新,黄文金,等. 基于同步挤压小波变换的时变结构损伤识别方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(21): 8-15.  
LIU Jingliang, REN Weixin, HUANG Wenjin, et al. Damage detection for time-varying structure based on the synchrosqueezing wavelet transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(21): 8-15. (in Chinese)
- [14] SOYOZ S, FENG M Q. Instantaneous damage detection of bridge structures and experimental verification [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15(7): 958-973.
- [15] 熊飞,程远胜,刘均. 基于HHT方法的时变多自由度系统的损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 122-125.  
XIONG Fei, CHENG Yuansheng, LIU Jun. Damage identification of time varying multi-degrees of freedom systems based on Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 122-125. (in Chinese)
- [16] LIU J L, WANG Z C, REN W X, et al. Structural time-varying damage detection using synchrosqueezing wavelet transform[J]. Smart Structures and Systems, 2015, 15(1): 119-133.
- [17] 任宜春,翁璞. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的结构损伤识别方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(18): 195-199.  
REN Yichun, WENG Pu. Structural damage detection based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(18): 195-199. (in Chinese)
- [18] YANG Y, NAGARAJAIAH S. Blind identification of damage in time-varying systems using independent component analysis with wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 47(1/2): 3-20.
- [19] HYVÄRINEN A, HURRI J, HOYER P O. Independent component analysis: a tutorial [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 15(2): 529.
- [20] 邹亚,汪丰. 加速度信号小波降噪的改进算法[J]. 北京联合大学学报, 2014, 28(2): 64-68.  
ZOU Ya, WANG Feng. Wavelet de-noising algorithm of acceleration signal[J]. Journal of Beijing Union University, 2014, 28(2): 64-68. (in Chinese)
- [21] CHEN G, WANG Z. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrow-band time series with closely spaced frequency components[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28(2): 258-279.
- [22] 姜绍飞,陈志刚,沈清华,等. 基于EEMD与FastICA的损伤异常识别与定位[J]. 振动与冲击, 2016, 35(1): 203-209.  
JIANG Shaofei, CHEN Zhigang, SHEN Qinghua, et al. Damage detection and locating based on EEMD-FastICA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(1): 203-209. (in Chinese)
- [23] HYVÄRINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.
- [24] 涂拥军,李静,王国恩,等. 基于韦尔奇功率谱的雷达辐射源信号识别[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(3): 32-34.  
TU Yongjun, LI Jing, WANG Guoen, et al. Radar emitter signal recognition based on Welch power spectrum [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2009, 25(3): 32-34. (in Chinese)



**第一作者简介:**刘景良,男,1983年11月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为结构健康监测、桥梁振动与稳定。曾发表《基于改进同步挤压小波变换识别信号瞬时频率》(《振动、测试与诊断》2017年第37卷第4期)等论文。

E-mail: liujingliang@fafu.edu.cn