

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904047

# 基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别分析\*

刘光耀, 刘习军, 张素侠

(天津大学机械工程学院, 天津 300354)

**摘要:** 为了解决损伤识别中对健康结构响应数据的依赖问题和小损伤难以识别情况, 提出基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别分析方法, 通过测得损伤状态下的动态应变响应即可对损伤位置直接判断。首先基于应变响应对结构局部损伤的敏感性, 利用提升小波变换分解重构出比原始应变响应更加光滑的低频应变响应; 然后根据统计理论, 构建出应变方差局部概率(Strain Variance Local Probability, SVLP<sub>3</sub>)损伤指标进行损伤定位分析。以简支梁桥为研究对象, 在数值模拟中讨论了单处、多处损伤、不同车速与荷载、抗噪性以及测点稀疏布置等方面对损伤识别效果的影响; 最后通过简支梁桥模型进行了实验验证, 结果表明所提方法在简支梁桥损伤识别中简单有效, 对微小损伤也能准确识别。

**关键词:** 简支梁桥; 提升小波变换; 应变响应; 方差局部概率; 损伤识别

**中图分类号:** U446; TU317   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0594-09

## Damage Identification Analysis of Simply Supported Beam Bridge based on Lifting Wavelet Transform and Statistical Theory

LIU Guangyao, LIU Xijun, ZHANG Suxia

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of dependence on health structural response data in damage identification and the difficulty of identifying small damage, a new damage identification method for simply supported beam bridges based on lifting wavelet transform and statistical theory is proposed, which can directly identify the damage location by measuring the dynamic strain response in the damage state. Firstly, based on the sensitivity of the strain response to the local damage of the structure, the lifting wavelet transform is used to reconstruct the low-frequency strain response which is smoother than the original strain response; And then according to the statistical theory, the damage index of strain variance local probability (SVLP<sub>3</sub>) is constructed for damage location analysis. Taking a simply supported beam bridge as the research object, it discusses the effects of single damage, multiple damage, different speed and load, the noise resistance and the sparse measuring points in the numerical simulation. Finally, the experimental verification is carried out by the model of simply supported beam

\* 收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-05-29

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC18700)、天津市交通运输科技发展计划项目(2018B-33)资助

作者简介: 刘光耀(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事桥梁结构的损伤检测研究。E-mail: liugy@tju.edu.cn

通讯作者: 张素侠(1978—), 女, 副教授, 博导, 博士。主要从事结构的损伤检测与健康监控研究。E-mail: zhangsux@tju.edu.cn

bridge, and the experimental results show that the proposed method is simple and effective in the damage identification for simply supported beam bridge and can also accurately identify minor damage.

**Keywords:** simply supported beam bridge; lifting wavelet transform; strain response; variance local probability; damage identification

## 引言

随着时间的推移,越来越多的在役桥梁在自然环境以及荷载等作用下日益老化产生损伤,桥梁损伤识别方面的研究逐渐成为工程界的难点和热点,国内外学者对此进行了大量深入的研究,发现应变作为对结构局部损伤十分敏感的物理量,可以反映出结构刚度的局部变化。李德葆等<sup>[1-3]</sup>对结构局部损伤的灵敏度进行了详细分析,指出应变型指标总体上优于位移型指标。S.Fariba等<sup>[4]</sup>提出了一种伪线性灵敏度方程,利用应变频响函数和基于灵敏度的模型更新方法来识别结构损伤,并且通过二维桁架和框架算例对该方法的有效性进行了数值验证。商开然<sup>[5]</sup>在改进应变响应的基础上构造出相对小波能量差指标,对识别简支梁桥区域损伤进行了准确定位。M.P.Singh等<sup>[6]</sup>基于应变响应提取系统的模态振型和频率,利用两步伪反演方法识别单元刚度特征,可以定位出框架中多个损伤位置。许如锋等<sup>[7]</sup>利用损伤前后应变响应来构建伪比能变化率指标,建立连续梁桥的PSO-BP神经网络预测模型,实现了对桥梁损伤位置以及损伤程度的大致判断。因此基于应变响应的敏感性来进行损伤研究,能够较准确地识别出桥梁结构的局部损伤状况。

而小波分析作为信号处理的一种手段,将其应用于桥梁结构损伤识别中有着显著的优势。R.Janeliukstis等<sup>[8]</sup>尝试基于振型和小波变换方法进行损伤识别,将小波变换系数作为判断损伤的指标,在梁结构的局部损伤识别中具有较好的定位能力。J.G.Han等<sup>[9]</sup>提出了一种用于梁结构损伤检测的小波包能量率指标,将测得的动态信号分解为小波包分量,计算出小波能量率指标来表征结构损伤。范哲等<sup>[10-11]</sup>利用小波变换的时频多分辨率特性,提出一种基于小波传递性函数的损伤识别方法,通过一个斜拉桥模型进行了数值计算。J.Zhou等<sup>[12]</sup>利用二维连续小波变换建立了复合材料层合板的损伤指标,并根据高阶模态振型对板损伤的位置进行了判断,该损伤识别方法具有较强的抗噪性。此外一些

学者还基于统计理论进行了结构健康监测的不确定性方法研究,极大程度上降低了损伤识别过程中的不确定因素。杨晓明等<sup>[13]</sup>推导出位移、速度、加速度响应的均值和方差与结构损伤位置、损伤程度之间的关系,探究了将统计特征作为损伤指标的可行性。Q.Fan等<sup>[14]</sup>以简支梁桥为研究对象,利用加速度信号的标准差、峰度等统计特征作为损伤识别指标,验证了将统计理论运用在齿轮损伤诊断中的有效性。但是以上方法均没有摆脱对健康结构响应数据的依赖,这就限制了当前损伤识别方法的实用性。

基于上述研究,为了进一步提高简支梁桥结构在损伤识别过程中的准确性和实用性,本文将提升小波变换和统计理论相结合,提出基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别分析新方法,通过简支梁桥数值模拟和模型试验,研究了所提方法在简支梁桥损伤识别中的应用。

## 1 基本理论

### 1.1 提升小波变换原理

提升小波变换属于第二代小波变换方法,是一种更快更有效的小波变换实现途径,且对信号突变信息具有十分敏感的放大功能,同时在很大程度上降低了测量噪声的干扰<sup>[15-17]</sup>。整个提升小波变换过程划为分解和重构两大阶段,其中提升小波变换分解的过程如下:

(1) 分裂:将原始序列  $S_i$  依照奇偶性分为 2 个互不相交子序列  $e_{i-1}$  和  $o_{i-1}$ , 即:

$$\begin{cases} S_i = e_{i-1} \cup o_{i-1} \\ e_{i-1} \cap o_{i-1} = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

(2) 预测:利用奇序列的实际值  $o_{i-1}$  与预测算子  $P$  对偶序列  $e_{i-1}$  内插后得到细节系数  $d_{i-1}$ , 即:

$$d_{i-1} = o_{i-1} - P(e_{i-1}) \quad (2)$$

(3) 更新:将预测后得到的子序列  $d_{i-1}$  更新分裂得到偶序列  $e_{i-1}$ , 使偶序列  $e_{i-1}$  具有原始序列的某些全局特性, 即:

$$S_{i-1} = e_{i-1} + U(d_{i-1}) \quad (3)$$

式中,  $S_{i-1}$  为  $S_i$  的低频部分;  $U$  为更新算子。

提升小波变换的重构过程即为分解的逆变换, 整个提升小波变换的过程如图1所示。

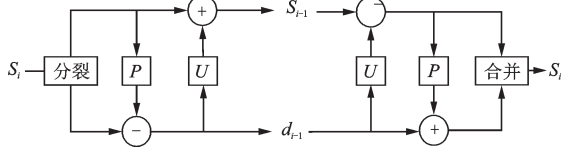


图1 提升小波变换示意

Fig.1 Diagram of lifting wavelet transform

## 1.2 应变响应的统计特征

根据应变  $\epsilon$  与位移  $u$  的关系, 多自由度结构的应变可由位移模态写成:

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \sum_{r=1}^n q_r \frac{\partial \varphi_r(x)}{\partial x} = \sum_{r=1}^n q_r \varphi_r^\epsilon(x) \quad (4)$$

式中,  $\varphi_r(x)$  为第  $r$  阶位移模态;  $\varphi_r^\epsilon(x)$  为第  $r$  阶应变模态;  $q_r$  为第  $r$  阶广义模态坐标。

在单位脉冲荷载激励下, 模态解耦后的时域分析可得杜哈梅尔卷积积分为:

$$q_r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_r(\tau) h_r(t - \tau) d\tau \quad (5)$$

式中,  $P_r(\tau)$  为模态广义力;  $h_r(t - \tau) = \frac{1}{M_r \omega_D} e^{-\zeta_r \omega(t - \tau)} \sin \bar{\omega}_D(t - \tau)$  为模态坐标的脉冲响应函数,  $\bar{\omega}_D = \bar{\omega}_r(1 - \zeta_r^2)^{1/2}$ ,  $\bar{\omega}_r$ ,  $M_r$  和  $\zeta_r$  分别为结构第  $r$  阶的固有频率、质量和阻尼比。

由响应自相关函数并代入式(4)可以得:

$$R_\epsilon(t) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \varphi_r^\epsilon \varphi_s^{\epsilon T} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{P_{rs}}(t + \tau_1 - \tau_2) \times h(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 \quad (6)$$

式中,  $R_{P_{rs}}(t)$  为广义力的自、互相关函数;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  为时间变量。

对测点间响应的相关函数进行傅里叶变换(详见文献[18-19]), 可以得到离散化的响应自谱密度函数为:

$$S_{\epsilon_j}(\omega) = \sum_{r=1}^n \varphi_{rj}^{\epsilon 2} |H_r(\omega)|^2 \varphi_r^T S_p(\omega) \varphi_r + \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \varphi_{rj}^\epsilon \varphi_{sj}^\epsilon H_r^*(\omega) H_s(\omega) \varphi_r^T S_p(\omega) \varphi_s \quad (7)$$

式中,  $H_r(\omega)$ ,  $H_s(\omega)$  分别为第  $r$ ,  $s$  阶传递函数; \* 为共轭复数;  $S_p(\omega)$  为荷载谱。

将式(7)代入上述功率谱密度与自相关函数傅里叶逆变换, 可以得到应变响应的统计特征即方差

为:

$$\sigma_{\epsilon_j}^2 = R_{\epsilon_j}(0) = \sum_{r=1}^n \varphi_{rj}^{\epsilon 2} \int_{-\infty}^{+\infty} H_r^*(\omega) H_r(\omega) \varphi_r^T S_p(\omega) \varphi_r d\omega + \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \varphi_{rj}^\epsilon \varphi_{sj}^\epsilon \int_{-\infty}^{+\infty} H_r^*(\omega) H_s(\omega) \varphi_r^T S_p(\omega) \varphi_s d\omega \quad (8)$$

对于低阻尼体系, 由于模态坐标系统振型相互独立, 各阶模态的响应统计无关, 因此耦合影响可以忽略不计<sup>[19]</sup>。令  $\varphi_r^T S_p(\omega) \varphi_r = \sum_{k=1}^n \varphi_{rk}^2 S_{pk}(\omega)$ ,  $k$  为节点号, 式(8)可化为:

$$\sigma_{\epsilon_j}^2 = \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^n \varphi_{rj}^{\epsilon 2} \varphi_{rk}^2 \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_{pk}(\omega)}{K_r^2 + M_r^2 \omega^4 + K_r M_r (4\zeta_r^2 - 2) \omega^2} d\omega \quad (9)$$

结果可以发现, 结构应变响应的方差特征值中包含了结构模态、结构质量和结构刚度的状态信息, 使其对结构损伤十分敏感, 因此在结构损伤识别中可以依据应变响应的方差构建恰当的损伤指标, 来判断结构的损伤状况。

## 1.3 损伤指标的构建过程

### (1) 获取各个测点低频响应信息

为了不封闭正常交通, 本文利用移动荷载来对简支梁桥进行外部激励测得各个测点的应变响应  $\epsilon_i(t)$  (测点号  $i=1, 2, \dots, k$ ), 并将获取的应变响应进行提升小波变换, 分解与重构并提取出各个测点的低频应变响应成分。

由于低频响应为损伤信号中含有的主要损伤信息, 其对损伤变化更加敏感且易于获得, 因此选取低频的应变响应作为数据源来进行损伤识别的效果十分明显。

### (2) 构建应变方差局部概率 SVLP<sub>3</sub> 指标

结构一旦发生损伤, 必然会引起结构模态、质量和刚度等状态信息的改变。基于振动响应的时域数据, 将其统计参数直接作为损伤指标, 不在频域中进行损伤判断, 很大程度上降低了损伤识别过程中的不确定性; 根据统计理论的相关知识, 计算结构各个测点应变方差值  $\sigma_\epsilon^2(i)$  为:

$$\sigma_\epsilon^2(i) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left( \epsilon_{i,t} - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \epsilon_{i,t} \right)^2 \quad (10)$$

式中,  $\epsilon_{i,t}$  为第  $i$  个测点在  $t$  时刻的应变响应;  $n$  为采样点数;  $k$  为测点数。

通过低频应变响应计算得到各个测点的应变方差  $\sigma_\varepsilon^2(i)$  后,在此基础上构造应变方差局部概率指标  $SVLP_3(i)$  进行损伤判断,即定义损伤指标公式为:

$$SVLP_3(i) = \frac{\sigma_\varepsilon^2(i)}{\sum_{j=i-1}^{i+1} \sigma_\varepsilon^2(j)} \quad (11)$$

值得注意的是,本文数值模拟中应变响应是利用结构的位移经二阶中心差分原理近似求出,当测点间距相同时可用下式近似求出各个测点的应变响应为:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{x_{i-1}(t) - 2x_i(t) + x_{i+1}(t)}{l_0^2} \times \frac{h}{2} \quad (12)$$

式中,  $x_i(t)$  为第  $i$  个测点  $t$  时刻位移;  $h$  为简支梁截面高度;  $l_0$  为测点间距。

## 2 数值模拟

本文以简支梁桥为例,通过数值模拟来验证所提方法在损伤识别中的正确性。使用 ANSYS 建立简支梁桥的有限元模型如图 2 所示,其简支梁桥的几何参数为:桥长  $L=20.8$  m,共划分 26 个单元,27 个节点,截面形式为矩形,截面积  $A=3.5$  m<sup>2</sup>;其简支梁桥的物理参数为:惯性矩  $I=0.204$  m<sup>4</sup>,泊松比为 0.3,弹性模量  $E=2.75 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,密度  $\rho=2500$  kg/m<sup>3</sup>。在简支梁桥底部均匀布置 25 个传感器测点,用于采集简支梁桥的动态应变响应,以移动速度  $v=10$  m/s,重  $P=20$  kN 的弹簧质量块来模拟移动车辆,对简支梁桥施加移动激励,其中弹簧刚度系数为  $10^7$  N/mm。整个模拟过程共设置五种损伤工况,编号为 D1~D5 代表单处损伤、两处损伤及不同程度的损伤状态,考虑到工程实际中对测量存在很多影响因素,且在工程中测量允许误差为 5% 左右,故一般将损伤程度为 5% 作为界定“微小损伤”的依据,具体工况见表 1。

本文在数值模拟中将损伤位置由单元的刚度折减来确定,损伤程度由单元的刚度折减百分比来表示<sup>[20]</sup>:

$$\alpha_i = \left[ \frac{(EI)_D}{(EI)_U} \right] \times 100\% \quad (13)$$

式中,  $\alpha_i$  为第  $i$  单元的损伤程度;  $(EI)_D$  为损伤单元的抗弯刚度;  $(EI)_U$  为未损伤单元的抗弯刚度;  $i$  为简支梁桥的划分单元号。

在数值模拟中利用 ANSYS 进行结构动力时程

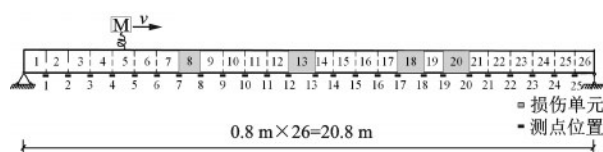


图 2 简支梁模型示意

Fig.2 Schematic diagram of the simply supported bridge model

表 1 损伤工况模拟

Table 1 Damage condition simulation

损伤工况	$\alpha_8$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{18}$	$\alpha_{20}$
D1	—	—	5	—
D2	—	—	10	—
D3	—	—	15	—
D4	—	10	—	10
D5	15	—	10	—

分析,采样频率为 312.5 Hz,采样时间为 2.08 s,每个测点只提取强迫振动信号成分。将简支梁桥得到的位移响应利用公式(12)来获取各个测点的动应变数据,然后通过 1.3 节中所述步骤构建出应变方差局部概率  $SVLP_3$  损伤指标进行损伤识别。

### 2.1 单损伤识别分析

以工况 1~3 为例,分析本文所提方法在简支梁桥单处损伤状态下对损伤程度的敏感性,损伤的识别效果如图 3 所示。根据损伤指标  $SVLP_3$  沿梁结构分布曲线的变化趋势可以看出,测点 17 和测点 18 位置附近损伤指标  $SVLP_3$  曲线的光滑性发生改变,在损伤位置出现突变峰值。由于某单元损伤,其应变突然增大,导致该单元对应的  $SVLP_3$  突然增大,邻近单元则因受到损伤单元应变的影响,其  $SVLP_3$  相应减小,故曲线突变呈现为中间凸起,两侧下凹形式,并且  $SVLP_3$  曲线的突变程度与单元的损伤程度呈现一致性变化,即认为测点 17 和测点 18 之间的 18 单元发生损伤,识别结果与模拟中预设的损伤位置完全一致。

从工况 1 曲线中也可以发现,本文方法对 5% 程度的微小损伤也非常敏感,通过观察工况 1 状态下损伤指标  $SVLP_3$  曲线产生的突变位置也能判定出 18 单元存在损伤,在验证了方法有效性的同时,也体现了所提方法在针对小损伤识别时的优越性。

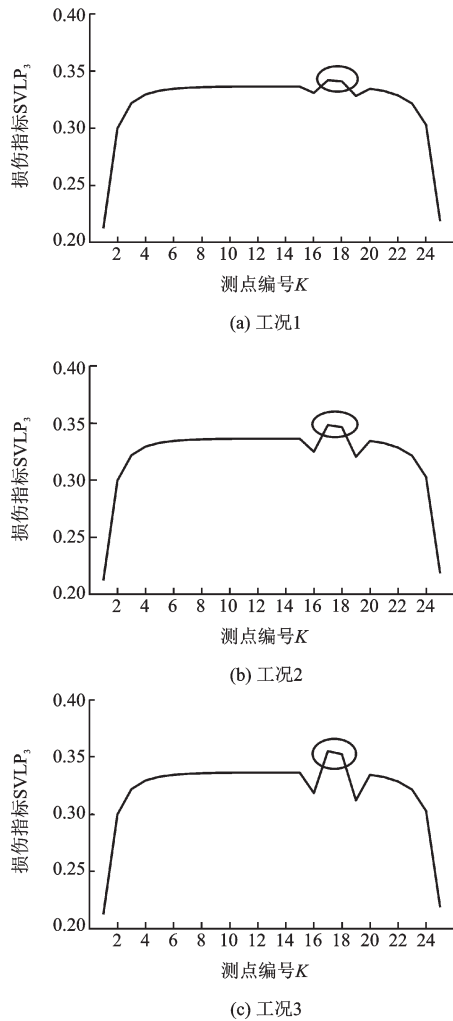


图3 单损伤识别效果

Fig.3 Single damage identification effect

## 2.2 多损伤识别分析

以工况4和工况5为例,观察简支梁桥在多位置损伤状态下本文所提方法的损伤识别效果,如图4所示。从工况4曲线中可以看出,损伤指标 $SVLP_3$ 曲线在测点12、13和测点19、20之间的位置,存在两处明显的突变峰值,由于损伤程度相同,两处突变峰值大小相差不多,依据曲线突变的位置,可认为13单元和20单元确实发生损伤,识别效果十分显著。

另外从工况5曲线中也可以看出,当简支梁桥损伤程度不相同且为非对称损伤时,测点7、8和测点17、18之间的突变峰值也能明显看出,且损伤状态为15%的突变程度明显大于损伤状态为10%的突变程度,可对简支梁桥8单元和18单元位置的损伤准确定位,因此可以说明本文所提方法对于多损伤的复杂工况依然保持着很好的损伤识别能力。

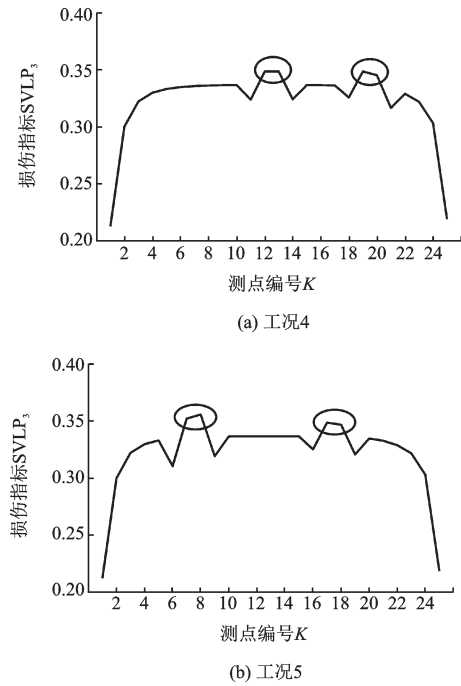


图4 多损伤识别效果

Fig.4 Multiple damage identification effect

## 2.3 车速敏感性分析

大多数的损伤识别方法中,对于移动荷载的行驶速度要求很高,但桥梁检测过程中很难做到对速度的准确掌控,在工程应用上存在一定的局限性,因此有必要考虑移动荷载的行驶速度对所提方法产生的影响。以工况1和工况5为例,分别考察5 m/s、10 m/s和15 m/s三种车速下损伤指标 $SVLP_3$ 曲线的损伤识别效果,如图5所示。在发生一处、两处以及不同程度的损伤状态下三种车速的损伤指标 $SVLP_3$ 曲线相互吻合良好,不影响对损伤位置的识别。表明本文方法在简支梁桥损伤识别中对车速不敏感,几乎不受移动荷载行驶速度大小的影响,克服了大多数损伤识别方法受移动荷载行驶速度限制的难题。

## 2.4 荷载敏感性分析

在损伤检测的过程中,如果荷载不同测量的数据不同,所计算出的损伤指标往往也不相同,甚至还可能影响损伤识别的结果,本文分别施加了20 kN、40 kN和100 kN三种不同大小的外部荷载,考察所提方法对荷载大小的敏感性,识别结果如图6所示。同样以工况1和工况5为例,发现在荷载大小不同的情况下,所构建出来的三种损伤指标 $SVLP_3$ 曲线也几乎没有变化,损伤识别结果差别很小。

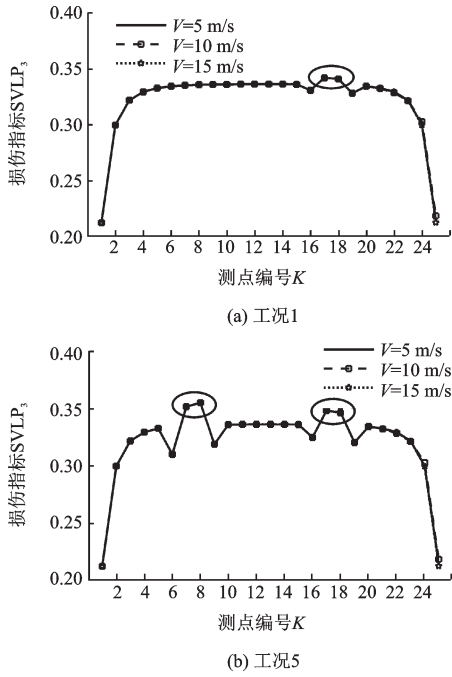


图5 不同车速大小的损伤识别效果

Fig.5 Damage identification effect under the different speed

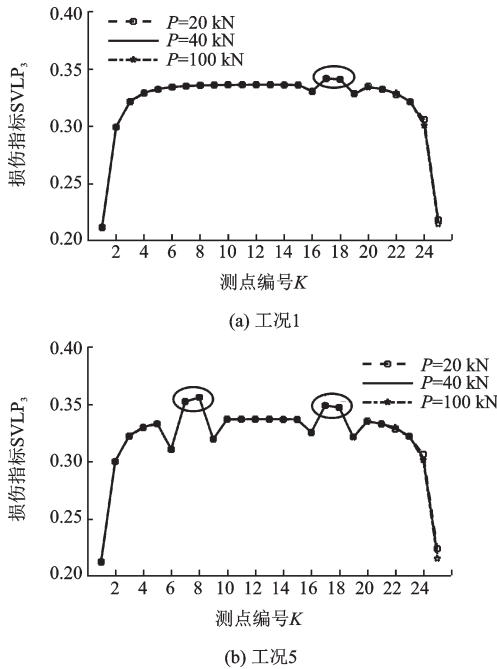


图6 不同荷载大小的损伤识别效果

Fig.6 Damage identification effect under different load sizes

结果表明本文所提方法基本不受外部荷载大小的影响,在无须测量移动荷载情况下仍可以进行损伤识别,使本文方法在实际应用中具有较大的工程意义。

### 2.5 抗噪性分析

在工程环境测试中,由于外界噪声的干扰,获

取的测量数据往往含有不确定性因素。为了研究测量噪声对所提方法产生的影响,在移动车速为 10 m/s、荷载为 20 kN 条件下,将无噪声的应变响应数据  $\epsilon_m$  中添加 20% 的高斯白噪声<sup>[21-22]</sup>,其计算公式为:

$$\epsilon_{\text{noise}} = \epsilon_m + E_p N_{\text{noise}} \text{std}(\epsilon_m) \quad (14)$$

式中,  $\epsilon_{\text{noise}}$  为添加噪声后的动态应变响应;  $E_p$  为噪声强度;  $N_{\text{noise}}$  为均值为 0, 标准差为 1 的随机数序列;  $\text{std}(\epsilon_m)$  为计算应变响应的标准差。

基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别方法在添加 20% 高斯白噪声后的损伤识别效果,如图 7 所示。从上述分析中,对比无噪声和添加 20% 噪声的损伤指标分布曲线及其值的大小基本保持一致,仅在少数位置有较小的改变,认为强度为 20% 的噪声对本文所提方法进行损伤识别的结果影响很小,损伤位置与模拟中预设的损伤位置相符。由图 7 工况 1 损伤指标分布曲线中可发现,如果测量过程中噪声强度达到 20% 以上,且微小损

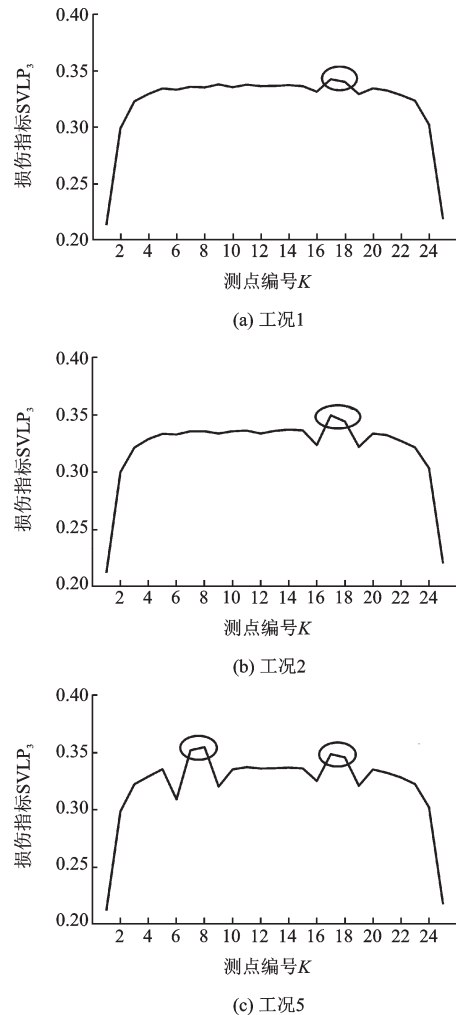


图7 添加 20% 噪声后的损伤识别效果

Fig.7 Damage identification effect with 20% noise

伤在5%程度以下时损伤信息有可能被噪声淹没,将很容易出现误判,但实际工程环境中噪声强度一般不会高于15%,故可认为本文方法在工程环境中依然有效,具有很强的鲁棒性。

### 2.6 测点稀疏性分析

为了尽可能地减少测点数量来提高方法在工程上的应用性,在上述模拟条件不变情况下,对测点稀疏性进行分析。

在数值模拟中将布设测点数减少二分之一,仅选取奇数测点作为测量位置,编号1~13,计算损伤指标SVLP<sub>3</sub>沿梁结构的分布曲线对简支梁桥进行损伤识别,如图8所示。从图中可以看出,损伤指标在测点数减小一半测量间距增大一倍时,由于测点间存在两个单元,损伤单元距离相邻测点不等距,

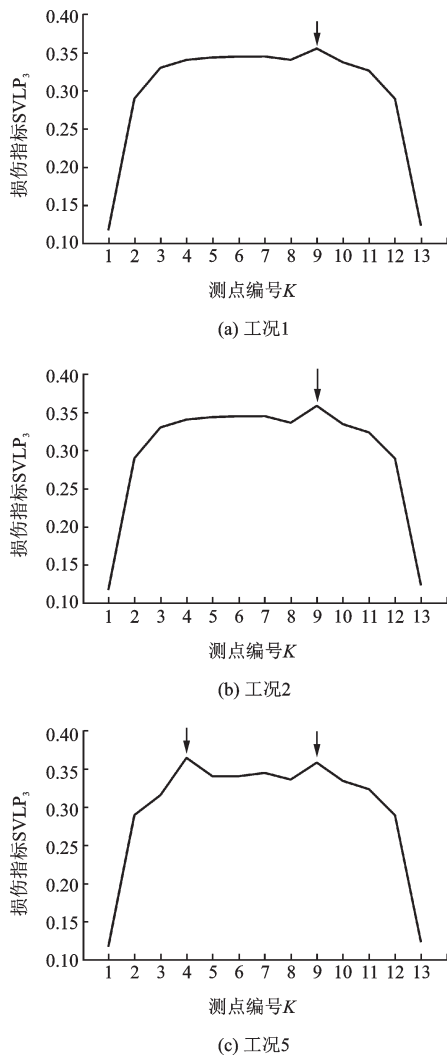


图8 测点数目为13时的损伤识别效果

Fig.8 Damage identification effect with the 13 numbers of detection points

使靠近损伤单元一侧的测点受到影响更大,该测点位置处的突变峰值呈现为尖峰状态。通过尖峰位置可以判断出简支梁桥中损伤单元的大致位置,识别效果较好。

由测点稀疏性分析发现,测点数的多少对损伤识别的结果影响较大,而测点数受到测量间距的限制,在本算例中当测点间距不大于简支梁桥长度的8%时得到的结果还是比较准确的,仍然可以达到损伤定位的目的。

### 3 实验验证

为进一步验证本文所提方法在工程上的可行性,对移动荷载作用下简支梁桥模型的损伤进行实验检测。实验中简支梁的材料为有机玻璃,尺寸为1 650 mm×170 mm×14.5 mm(长×宽×高),其中简支梁的物理参数:材料密度为1 201.0 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为3.75×10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>,惯性矩为4.32×10<sup>-8</sup> m<sup>4</sup>。全桥共划分为15个单元,在简支梁桥底部均匀布置14个应变测点,测点编号为1~14,应变片间距设为110 mm,用于采集简支梁桥的动态应变响应,其中简支梁桥有限元模型及其应变片分布如图9所示。采用重为4.9 N,行驶速度为1.7 m/s的小车模型对简支梁桥进行移动激励。利用东华数据采集仪进行数据采集,采样频率为1 kHz,采样时间为1 s。

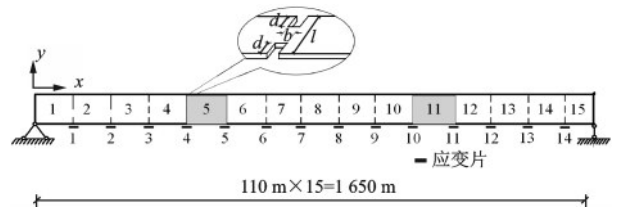


图9 简支梁桥实验模型及应变片示意

Fig.9 Experimental model of simply supported beam bridge and schematic diagram of strain gauge sensor

实验中沿着简支梁的桥面宽度方向做对称缺口来模拟损伤,将缺口深度 $2d$ 与桥面宽度 $l$ 之比定义为损伤程度<sup>[23]</sup>。本实验对简支梁桥桥面设置了缺口宽度 $b=110$  mm、缺口深度为 $d$ 的对称缺口来模拟三种损伤工况,整个实验设置如图10所示,具体工况见表2。

将实验中采集到的应变响应数据通过1.3节中所述步骤构建SVLP<sub>3</sub>损伤指标曲线进行损伤识别,结果如图11所示。从工况1曲线中可以看出,简支

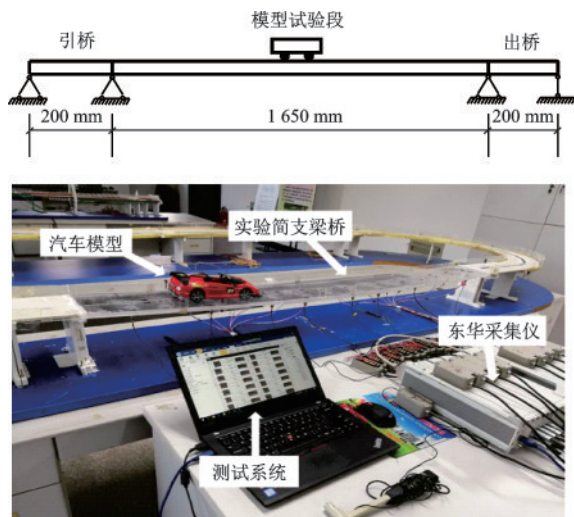


图10 实验设置示意

Fig.10 Schematic experimental set-up

表2 损伤工况模拟

Table 2 Damage condition simulation

损伤工况	损伤单元	缺口深度 $d/\text{mm}$	损伤程度 $\alpha/\%$
D1	5	4.25	5
D2	5	8.5	10
D3	5, 11	8.5, 8.5	10, 10

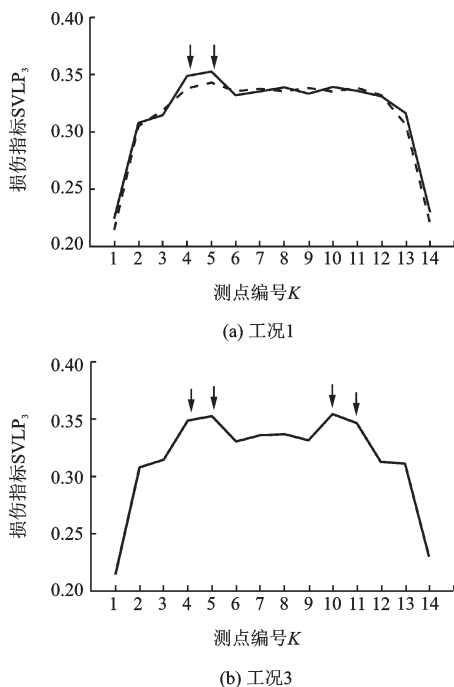


图11 基于实验工况的损伤识别结果

Fig.11 Damage identification results based on experimental conditions

梁桥一处发生5%的微小损伤,在测点4和测点5之间的损伤位置有微弱的凸起,由于实际测试实验中

存在仪器设备、环境噪声或者人员操作等各种各样的误差,导致识别效果所受干扰较大,可初步认为第5单元存在着小损伤;从工况2曲线中可以看出,简支梁桥一处发生10%的损伤,在测点4和测点5之间的损伤位置凸起十分明显,对第5单元的损伤识别出的效果更好;从工况3曲线中可以看出,简支梁桥发生两处10%的损伤,在测点4、5和测点10、11之间的位置曲线都出现明显的凸起,根据损伤指标  $SVLP_3$  曲线奇异性的位置,可判定凸起位置对应的4单元和11单元发生损伤,检测结果与实验中预设的损伤位置吻合良好。

此外,为保证所提方法在损伤识别结果中的准确性和可靠性,在工程实际测量中可进行多组数据的测量计算,避免误判。值得注意的是,本文方法在简支梁桥损伤识别过程中不必通过损伤前健康结构的响应数据进行损伤判断,说明本文方法成功摆脱了对健康结构响应数据的依赖,并且不用建立结构有限元模型,通过测得损伤状态下的动态应变响应即可对损伤位置直接判断,适合在线处理,为工程应用打下良好基础。

特别说明,该方法仅以简支梁桥作为研究对象,进行了数值模拟和实验验证,对于其它更加复杂的桥梁结构有待进一步研究。

## 4 结论

提出基于提升小波变换和统计理论的简支梁桥损伤识别分析的新方法,为了验证该方法对简支梁桥损伤识别的可靠性和有效性,以简支梁桥为研究对象进行了多方面的损伤数值分析和模型实验,研究结果表明:

(1) 本文方法对简支梁桥结构的微小损伤十分敏感;此外,该方法成功摆脱了对健康结构响应数据的依赖。

(2) 可以准确对简支梁桥的单处、多处损伤进行有效定位,基本不受移动速度和荷载大小影响。

(3) 在添加了20%的高斯白噪声后仍然可以准确进行损伤识别,具有很强的鲁棒性;且测点布置数目一定时,也可以达到损伤定位目的。

(4) 该方法不必封闭交通、无需建立有限元模型,适合在线处理,极大地满足工程实际需求,为简支梁桥损伤识别的研究提供了一定的理论思想。

## 参考文献:

- [1] 李德葆. 实验应变/应力模态分析若干问题的进展评述[J]. 振动与冲击, 1996, 15(1): 13-17.  
Li D B. A general review on several fundamental points of experimental strain/stress modal analysis[J]. Journal of vibration and shock, 1996, 15(1): 13-17. (in Chinese)
- [2] 李德葆, 陆秋海. 应变模态分析和曲率模态分析[C]//第十五届全国振动与噪声控制高技术及应用会议. 北京: 中国振动工程协会, 2001: 149-167.  
Li D B, Lu Q H. Strain modal analysis and curvature modal analysis [C]//The 15th National Conference on High Technology and Application of Vibration and Noise Control. Beijing: China Association of Vibration Engineering, 2001: 149-167. (in Chinese)
- [3] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [4] Fariba S, Faramarz K, Akbar E. Structural damage identification based on strain frequency response functions [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(12): 1850159-1-25.
- [5] 商开然. 基于离散小波变换的桥梁损伤识别方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 33-42. (in Chinese)  
Shang K R. Damage detection of bridge structures based on the discrete wavelet transform [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 33-42. (in Chinese)
- [6] Singh M P, Elbadawy M Z, Bisht S S. Dynamic strain response measurement-based damage identification in structural frames [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(7): 1-21.
- [7] 许如锋, 陈建国, 赵作周, 等. 基于应变和 PSO-BP 神经网络的连续梁桥损伤识别方法[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2093-2098.  
Xu R F, Chen J G, Zhao Z Zh, et al. Damage identification and discrimination method for the continuous bridges based on the strain and PSO-BP neural network [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2093-2098. (in Chinese)
- [8] Janeliukstis R, Rucevskis S, Wesolowski M, et al. Multiple damage identification in beam structure based on wavelet transform [J]. Procedia Engineering, 2017, 172: 426-432.
- [9] Han J G, Ren W X, Sun Z S. Wavelet packet based damage identification of beam structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(26): 6610-6627.
- [10] 范哲, 冯新, 周晶. 基于小波传递性函数的结构损伤识别研究[J]. 地震工程与工程振, 2014, 35(4): 28-34.  
Fan Zh, Feng X, Zhou J. Structural damage detection by using wavelet based transmissibility function [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(5): 28-34. (in Chinese)
- [11] 范哲, 冯新, 周晶. 基于分布式应变监测的大跨度斜拉桥结构损伤探测[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 46-51.  
Fan Zh, Feng X, Zhou J. Damage detection of long-span cable-stayed bridge based on the distributed strain monitoring[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 46-51. (in Chinese)
- [12] Zhou J, Li Z, Chen J L. Damage identification method based on continuous wavelet transform and mode shapes for composite laminates with cutouts [J]. Composite Structures, 2018, 191: 12-23.
- [13] 杨晓明, 刘海卿. 基于结构动态响应统计特征的损伤指标研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 166-172.  
Yang X M, Liu H Q. Damage index based on statistical properties of structural dynamic responses [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2009, 29(2): 106-172. (in Chinese)
- [14] Fan Q, Ikejo K, Nagamura K, et al. Application of statistical parameters and discrete wavelet transform to gear damage diagnosis [J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2014, 8(2): 1-12.
- [15] 孙增寿, 张耀, 王希东. 基于运营环境和提升小波变换的桥梁损伤检测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 718-724.  
Sun Z Sh, Zhang Y, Wang X D. Research on bridge damage detection based on operational environment and lifting wavelet transform [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 718-724. (in Chinese)
- [16] 刘习军, 王正飞, 张素侠. 基于振动响应统计特征的简支梁桥损伤检测[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2842-2850.  
Liu X J, Wang Zh F, Zhang S X. Damage detection of simply-supported beam bridge based on statistics characteristic of vibration responses [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2842-2850. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)

(下转第 649 页)