

基于宏应变自相关离散率向量的桥梁损伤识别

段君森¹, 孙振宇², 钟志鑫², 张浩^{3,4*}, 尚肖阳⁵

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院;

3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室;

4. 石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所; 5. 东南大学 土木工程学院)

摘要:既有宏观应变模态测试方法较难识别时变桥梁损伤,因此,该文通过建立车桥振动方程,推导了时变桥梁宏观应变表达式,基于提升小波变换在时频域拥有较好的时变表征特点,重构了单元宏应变数据,实现了噪声分离,有效优化了宏应变数值,突出其变异性,进而建立了基于单元宏应变自相关离散率向量作为损伤指标的时域损伤识别方法。仿真和试验结果表明:该损伤指标具有较好的抗噪性,可直观有效地实现对时变桥梁的损伤定位。识别方法操作较简单,不易受车桥耦合的影响。

关键词:损伤识别; 提升小波变换; 宏应变; 自相关离散率; 时变桥梁

截至2019年末,中国建设桥梁已达百万座。但随着时间推移,桥梁将不可避免存在各种损伤,危及公共生命财产安全。因此,及时识别桥梁损伤显得异常重要。既有研究表明:应变指标对局部损伤更敏感,位移指标对整体损伤识别更有效。在各类基于应变指标的损伤识别方法中,基于宏观应变模态指标的损伤识别方法在损伤定位及定量中取得了较好效果,并体现了“一专多能”的优势。吴智深等提出基于宏应变模态和频响函数能量的桥梁损伤识别方法,该方法理论清晰,易于实现,在长大跨柔性桥梁中应用效果较好。但基于宏应变模态的损伤识别方法在中小跨径桥梁的应用中,因模态测试精度不足导致损伤识别效果不理想,尤其是车辆荷载作为一种非平稳激励信号,不能保证激发桥梁所有模态,以及车桥耦合效应产生的复杂时变系统特征等导致的难以获得准确、稳定的结构应变模态的问题。因此寻找一种既能利用宏观应变测试数据,又能实现时变桥梁损伤识别的方法具有显著实用价值。

提升小波变换对信号的突变信息具有更加敏感的放大功能,更加适合分析车桥耦合振动下非平稳激励的桥梁损伤识别。刘习军等将位移响应相关系数曲率

和车激桥梁响应互相关函数作为损伤指标,采用提升小波变换的时频分析方法,对移动荷载作用下桥梁损伤进行识别。该方法不需要无损伤结构响应信息,可有效识别损伤位置;孙增寿等利用相对提升小波熵和提升小波时间熵两个指标准确检测出了简支梁中的损伤,取得了较好的定位效果。

该文基于提升小波变换在时频域具有较好的时变表征特点,通过对宏观应变测试数据的降噪,动静态应变分离,达到对时变宏观应变响应的重构,运用统计特性思想将车辆在桥梁结构上移动时各测点随时间变化的动力响应看成一个随机过程,进而构建基于单元宏应变自相关离散率向量(后文用离散率 $MSP_{\alpha}DR$ 代替)的时域损伤指标,实现对时变桥梁系统的损伤识别。该指标具有统计特性,可不受结构损伤前状态的束缚,具有良好的噪声鲁棒性。

1 时变桥梁宏应变响应解

如图1所示,设质量 M_1 的竖向位移为 $z(t)$,移动速度为 v ,梁的竖向位移为 $y(x, t)$,梁所受到的作用力 $P(x, t)$ 可表示为:

收稿日期:2020-09-23

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(编号:2016YFC0802202-3);河北省教育厅重点项目(编号:ZD2015060);省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室自主课题(编号:ZZ2020-19);石家庄铁道大学研究生创新计划项目(编号:YC2020026)

作者简介:段君森,女,硕士,讲师, E-mail:16955328@qq.com

* 通信作者:张浩,男,博士,副教授, E-mail: zhanghao@stdu.edu.cn

$$P(x, t) = M_1 g - M_1 \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \quad (1)$$

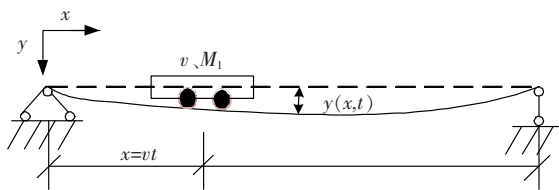


图1 时变车桥模型

根据不分离假定,在任意时刻 t 有:

$$z(t) = y(x, t) = y(vt, t) \quad (2)$$

则:

$$P(x, t) = M_1 g - M_1 \left[\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \right] \quad (3)$$

式(3)中括号中的第一项表示质量所在位置结构振动的竖向加速度,第二项表示质量移动使梁的竖向速度变化引起的竖向加速度,第三项表示梁振动过程中产生曲率,使质量在竖曲线上移动而产生的离心加速度。

梁的动力平衡方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \delta(x - vt) P(x, t) \quad (4)$$

式中: EI 为抗弯刚度; c 为阻尼系数; m 为单位线质量; $\delta(x - vt)$ 为 Dirac 函数,即 $x = vt$ 时 $\delta = 1$, $x \neq vt$ 时 $\delta = 0$ 。

利用振型正交性和 Newmark 法可得质量块移动时简支梁竖向位移的表达式为:

$$y(x, t) = y(vt, t) = \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi vt}{l}\right) \eta_n(t) \quad (5)$$

式中: $\sin\left(\frac{n\pi vt}{l}\right)$ 为振型; $\eta_n(t)$ 为模态坐标。

故其节点转角响应 $\varphi(x, t)$ 如下:

$$\varphi(x, t) = \dot{y}(x, t) = \sum_{n=1}^N \frac{n\pi v}{l} \cos\left(\frac{n\pi vt}{l}\right) \eta_n(t) + \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi vt}{l}\right) \dot{\eta}_n(t) \quad (6)$$

如图2所示,假设一标距为 L_m 的应变传感器安装在梁的底部,其连接的起点和终点的转角位移分别为 φ_1 和 φ_2 , h_m 为测点至截面中性轴的距离,则在移动质量移动到任意 t 时刻时,该长标距传感器测量的应变为:

$$\bar{\varepsilon}(x, t) = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{L_m} h_m \quad (7)$$

即该文所采用的宏观应变响应的理论计算公式在时域的表达式如下:

$$\bar{\varepsilon}(x, t) = \left\{ \left[\sum_{n=1}^N \frac{n\pi v}{l} \cos\left(\frac{n\pi vt}{l}\right) \eta_n(x_1, t) + \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi v}{l}\right) \dot{\eta}_n(x_1, t) - \sum_{n=1}^N \frac{n\pi v}{l} \cos\left(\frac{n\pi vt}{l}\right) \eta_n(x_2, t) - \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi vt}{l}\right) \dot{\eta}_n(x_2, t) \right] / L_m \right\} h_m \quad (8)$$

由于外界激励的非平稳性和噪声干扰,直接利用式(8)转化的宏应变信息会对损伤识别效果带来一定影响,该文引入提升小波的思想,借助其优良的降噪性能来提高信号的信噪比,强化损伤信息。

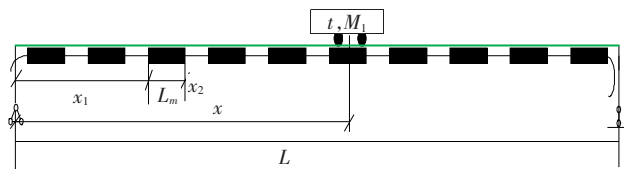


图2 长标距应变传感器监测原理图

2 提升小波变换理论思想

提升小波变换的基本思想是将原小波分解成基本模块,然后重构出一个具有更加良好性质的新小波,实现过程经过3个步骤:分解、预测、更新。其继承了传统小波变换多分辨率的特性,摆脱了对傅里叶变换的依赖,由于其计算过程不需要占用系统内存,大大提升了运算效率;且只需改变数据流方向和正负号便可实现小波逆变换。与传统小波相比,其对突变信号更具敏感性,在损伤识别中更能反映原始信号的细节特征。故借助提升小波变换进行数据重构后建立的损伤指标,既能继承原始信号的损伤特征,更能敏感地突显损伤效果。

3 损伤指标

将移动质量作用下桥梁结构 n 个测点的应变响应进行提升小波变换分解并重构得到信号向量:

$$M = \{m_1^k(t), m_2^k(t), \dots, m_{n-1}^k(t), m_n^k(t)\}, n \in Z, k \in Z \quad (9)$$

式中: $m_n^k(t)$ 为第 n 号测点的第 k 阶响应信息。

第 n 测点在 t_1 与 t_2 时刻的宏应变信息的自相关

关系：

$$P_{t_1,t_2,n}^k(T)=\lim_{T\rightarrow\infty}\frac{1}{T}\int_0^T m_n^k(t)m_n^k(t+\tau)dt,n\in Z,$$
$$k\in Z$$
$$(10)$$

T 为宏应变信息的时间长度,设 $P_{t_1,t_2,n}^k(T)$ 在 $T=T_0$ 处取得峰值,并记 $p_{t_1,t_2,n}^k=P_{t_1,t_2,n}^k(T_0)$,则某测点所有时刻自相关关系峰值 $p_{t_1,t_2,n}^k$ 所组成的向量为自相关峰值向量 P_n :

$$P_n=[p_{t_1,t_2,n}^k,p_{t_2,t_3,n}^k,\cdots,p_{t_{l-1},t,n}^k]$$
$$(11)$$

在相同条件下,某测点宏应变随时间变化存在固定相关关系,当桥梁中存在损伤时,这种相关关系会发生变异,为表征这种离散程度,建立宏应变自相关向量离散率(MSP_nDR)作为损伤指标:

$$MSP_nDR=\frac{\sqrt{\frac{1}{n_T}\sum(p_{t_i,t_j,n}^k-\overline{p_n^k})^2}}{\sum_1^n\sqrt{\frac{1}{n_T}\sum(p_{t_i,t_j,n}^k-\overline{p_n^k})^2}}$$
$$(12)$$

4 数值仿真

4.1 仿真概况

通过 Ansys 构建工字形截面简支梁移动质量相互作用模型,梁长 1.6 m,材料为铝合金,桥长方向划分为 10 个单元,如图 3 所示。在第 4 单元标段(发生两处损伤时分别在第 4、第 8 单元,损伤情况相同。)通过减小截面尺寸和增大损伤截面长度来实现 4 种损伤工况。如表 1 所示。

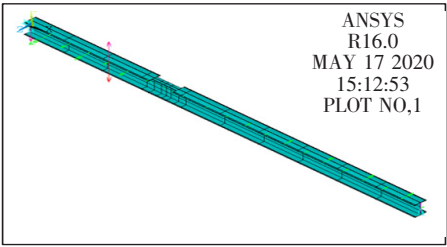


图 3 简支梁模型加载示意图

表 1 仿真分析损伤工况

| 损伤程度 | 损伤单元 | 单元损伤 长×宽/ (cm×cm) | 荷载大小/ N | | | 损伤大 小/% |
|------|------|-------------------------|------------|----|----|------------|
| 无损伤 | 4(8) | 0×0 | 43 | 58 | 81 | 0 |
| 小损伤 | 4(8) | 4.0×1.5 | 43 | 58 | 81 | 27.45 |
| 中等损伤 | 4(8) | 10.0×1.5 | 43 | 58 | 81 | 48.61 |
| 大损伤 | 4(8) | 16.0×1.5 | 43 | 58 | 81 | 60.22 |

4.2 提升小波变换数据重构

为初步运用提升小波变换思想,探究非平稳激励对数据的干扰和对所构建损伤指标的影响,经探究分析,该文对仿真数据进行 db4 提升小波 3 层分解实现动静态应变分离。以移动质量 4.3 kg 大损伤工况为例,如图 4 所示。

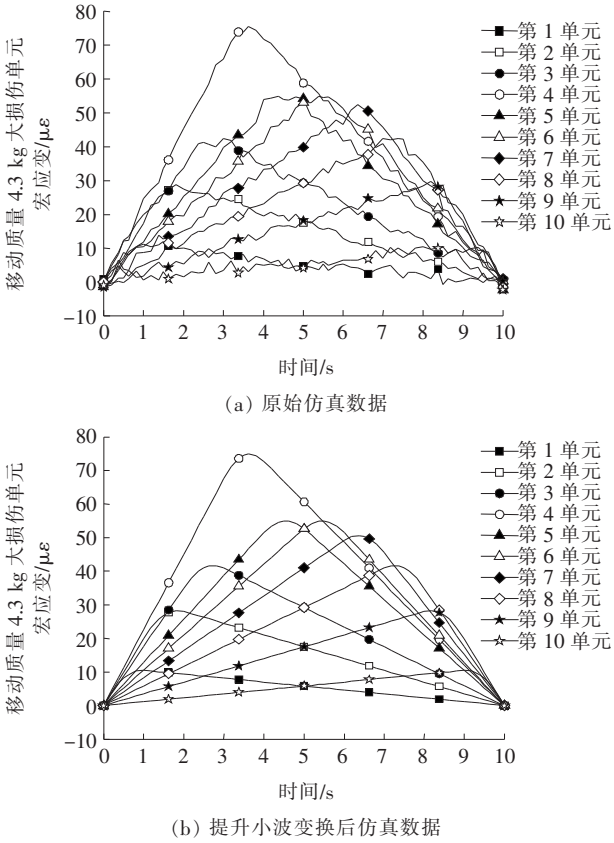


图 4 提升小波变换前后时程曲线对比

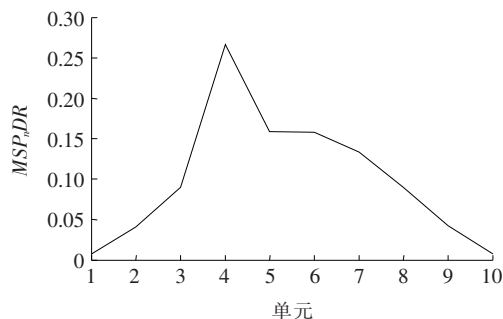
由图 4 可以看出:原始仿真数据存在大量局部峰值,这给该文基于时域特征进行相关性分析带来一定影响,导致时域段间的差异性普遍增大,减弱损伤信息的影响比例。而经过提升小波变换重构处理后的曲线明显消除了局部峰值,走势更加明显。现对图 4 提升小波变换前后的仿真数据构建损伤指标,结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出:当信号中存在噪声信息时,会使各单元宏应变的离散性整体增大,从而淹没了其中损伤信息的影响,减弱构建损伤指标的识别效果。从而为真实工况中分析噪声干扰提供参考,也证实引入提升小波变换进行降噪数据重构的必要性。为凸显识别效果,损伤分析采用提升小波变换数据重构的数据。

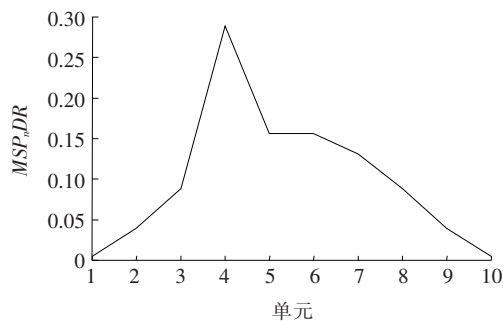
4.3 仿真损伤分析

通过改变不同移动质量大小,以 $v=0.16\text{ m/s}$ 的

速度步进,提取不同损伤工况下每个节点的转角位移,利用式(8)进行宏应变转化,通过提升小波变换重构动应变分离后,绘出对应静态宏应变时程曲线(图6)。



(a) 原始仿真数据



(b) 提升小波变换后仿真数据

图5 提升小波变换前后损伤指标对比

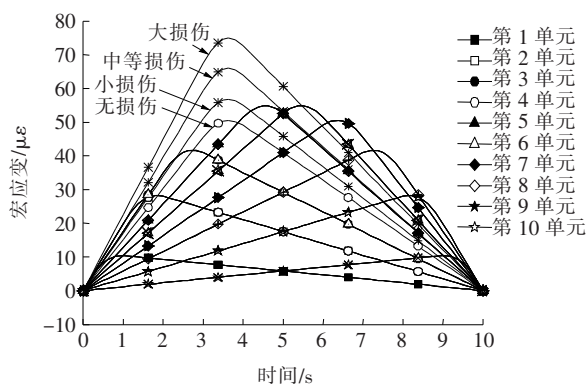
由图6得出:各单元在移动质量经过时应变达到峰值,梁两端受到支座约束峰值较小,跨中单元最大;未施加损伤时对称单元应变时程曲线也是对称的,且未施加损伤的单元在不同工况中的曲线重叠在一起;但当单元中存在损伤时这种对称性便受到扰动,即只在损伤单元出现差异性,由于损伤单元刚度减小,变形更为剧烈,时程曲线峰值便在损伤单元附近;随着移动质量的增大各单元应变幅值也增大,损伤单元和临近单元的差异性也更加显著。

利用上述特性结合构建的损伤指标对单元应变时程曲线进行损伤分析,结果如图7所示。

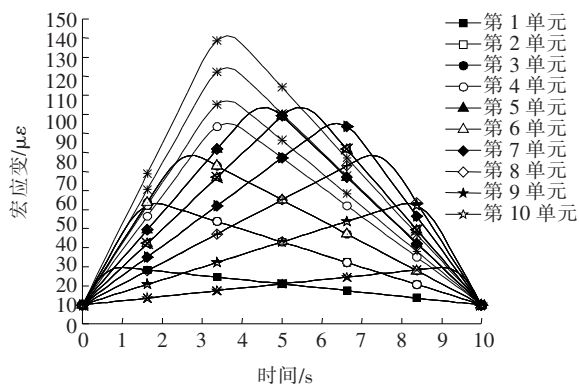
从图7可以看出:3种移动质量作用下的损伤指标在损伤单元处均发生明显突变,这是由于损伤单元的宏应变离散程度较其他单元(尤其与对称单元相比)更大,在归一化过程中突出了损伤信息的影响占比;而在靠近梁两端,由于支座约束和损伤辐射影响较小导致所占比例较低。经过宏应变数据标准化和指标构造归一化处理后3种移动质量下损伤指标量值较为接近,减轻了车桥耦合作用对损伤指标的影响。

为验证该损伤指标在多处损伤工况中的适用性,

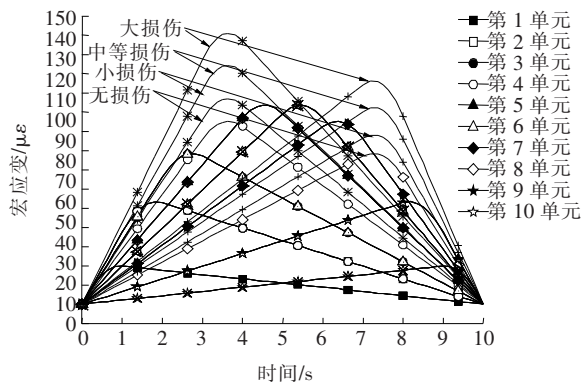
后加入两处损伤工况(单元4、单元8)。所得结果如图8所示。



(a) 4.3 kg 各损伤工况单元宏应变重构



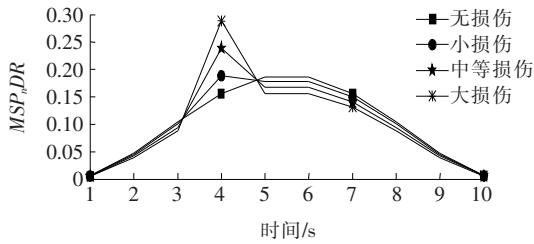
(b) 8.1 kg 各损伤工况单元宏应变重构



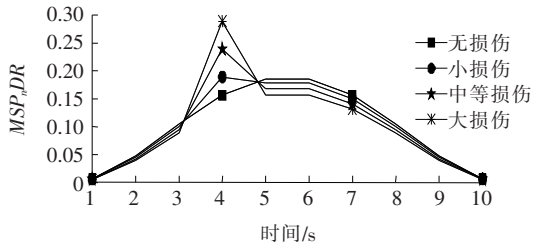
(c) 8.1 kg 各损伤工况两单元损伤宏应变重构

图6 简支梁单元应变时程曲线

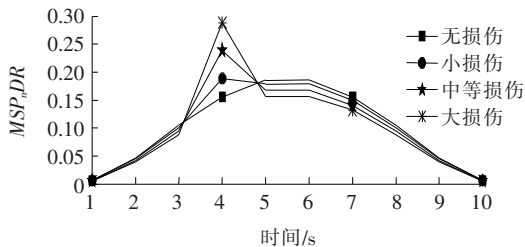
从图8可以看出:损伤指标在两处损伤均发生突变,也可在多损伤工况中作为判断损伤的依据。在构建损伤指标的过程中运用到归一化的思想,这使得指标数据更具代表性,也突出了损伤信息(位置、程度)在单元宏应变自相关离散率中的影响比例,使效果更加明显。但有多处损伤时会存在比例分散效应,使得小损伤程度的损伤指标突变程度降低,弱化识别效果,但依然能对小损伤实现准确定位识别。



(a) 移动质量 4.3 kg



(b) 移动质量 5.8 kg



(c) 移动质量 8.1 kg

图 7 单一单元不同损伤工况损伤指标

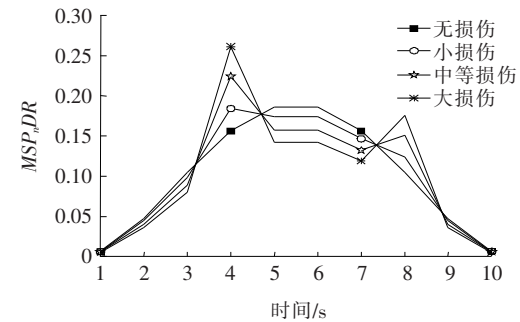


图 8 移动质量 8.1 kg 两处单元损伤工况下损伤指标

5 试验分析

5.1 试验概况

为进一步分析损伤指标效果,利用简支梁移动质量车载试验构造时变桥梁系统进行验证,工况同表 1。在梁翼缘粘贴长标距光纤光栅传感器,采集试验数据。如图 9 所示。

5.2 提升小波变换数据重构

在实际工程中所获的动力响应往往掺杂着更为复杂噪音干扰,包括机械振动、人员扰动等。为进一步探

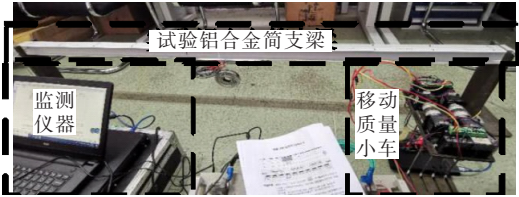


图 9 试验模型

究该损伤识别方法的抗噪能力,结合该文选择的 db4 小波分解层数 3 的手段对试验数据进行提升小波变换,进行降噪处理对比。以移动质量 4.3 kg 大损伤应变时程曲线去噪为例,结果如图 10 所示。

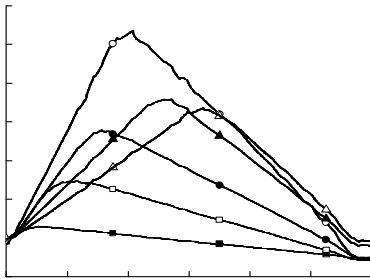
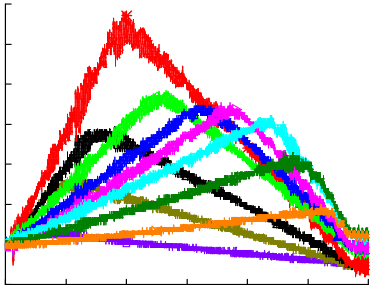
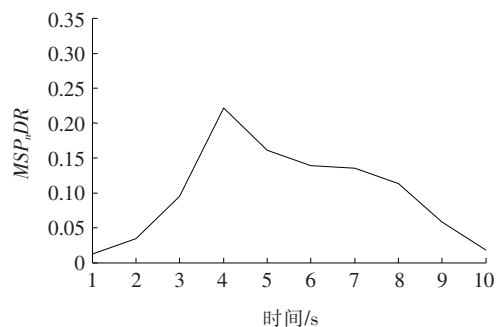


图 10 去噪前后应变时程曲线对比

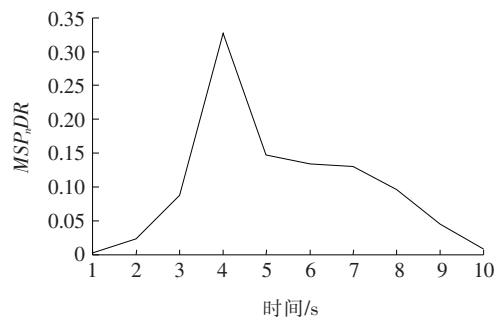
由图 10 可以看出:试验原始数据夹杂大量噪声干扰,应变时程曲线存在着更为密集的局部峰值,变化不连续,这势必会影响后期损伤识别效果。经 db4 提升小波变换分解重构后,曲线效果得到明显改善,走势更加清晰。

图 11 为利用 4.3 kg 移动质量试验重构分离前后数据构造的损伤指标。由图 11 可以直观看出来:去噪后损伤指标峰值明显比去噪前增大。与仿真分析一致,由于噪声干扰原始数据中各单元噪声信息影响占比较大,损伤信息的影响占比减小,降低了识别效果;而数据经提升小波变换后,剔除噪声影响,增强噪声鲁棒

性,使得损伤指标在损伤单元处的突变加剧,提升了识别效果。



(a) 去噪前损伤指标



(b) 去噪后损伤指标

图 11 移动质量 4.3 kg 大损伤去噪前后损伤指标对比

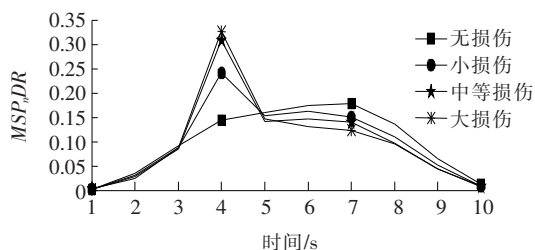
5.3 损伤定位分析

测试完毕后提取各测点的应变信号,对其进行宏观转化并利用 db4 小波进行提升小波变换,分解层数为 3。再对变换后的动力响应进行自相关处理,按照式(12)计算得到宏应变自相关离散率 MSP_nDR ,如图 12 所示。

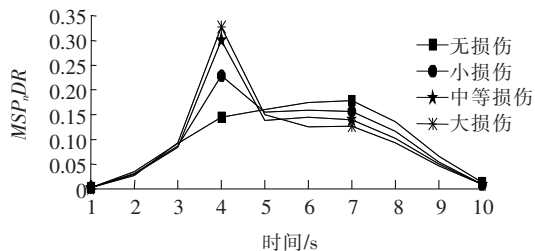
从图 12 可知:无损伤工况下各单元宏应变自相关离散率的连线是一个变化较为平缓的曲线,而在其他工况中 4 单元处出现突变峰值,说明此处存在损伤;另外随着损伤程度的增大,突变的相对变化越剧烈。该分析结果完全契合实际损伤工况且与仿真分析所得指标数据相接近,在该文的损伤信息下, MSP_nDR 的突变峰值在大损伤时均为 0.32 左右,中等损伤时均为 0.3 左右,小损伤均为 0.23 左右,即损伤单元的 MSP_nDR 峰值不随移动质量的变化而明显改变,进一步证实该损伤识别方法具有一定的特征性,可为在其他环境中进行损伤识别提供数据参考,所以根据自相关峰值离散率构造的损伤指标可以有效进行损伤位置识别。

5.4 试验误差分析

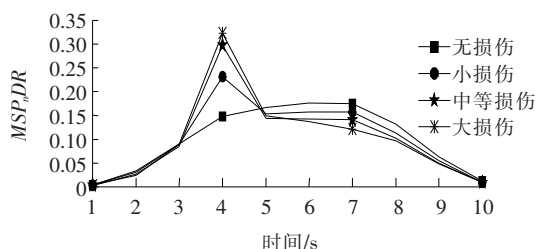
(1) 支座的加工:加工支座对梁产生的约束与理想简支梁约束有一定差距,数据存在误差。



(a) 移动质量 4.3 kg



(b) 移动质量 5.8 kg



(c) 移动质量 8.1 kg

图 12 试验数据损伤指标

(2) 铝合金梁:铝合金梁产生足够的微应变所需荷载较小,但容易产生塑性变形,故在无损伤工况中对称单元的应变数据不能完全一致,从而构造的损伤指标图形不完全对称。

(3) 截取时域段不同:由于每次接收的时间应变联动信息不一致,不同工况间进行自相关分析所截取的时域段不能绝对相同,会对构造的损伤指标带来影响。

6 结论

(1) 结构发生损伤后,宏应变自相关幅值向量离散程度会增大,导致单元间离散率增大,根据这一特性可利用该文所建损伤指标进行损伤定位识别。

(2) 利用提升小波变换 db4 小波 3 层处理后,可实现原始信号分解、重构,达到动静态应变分离的目的,使得损伤指标具有更强的抗噪能力,极大提升了损伤定位效果,并可为损伤定量研究提供参考。

(3) 该文构建的损伤指标受车桥耦合作用影响较小,适用性较强,可为进一步深入研究时变桥梁损伤识