

车致振动响应递归量化分析在桥梁结构 损伤识别中的应用

杜昌骏¹, 张静¹, 杨栋^{2,3}, 陈诚¹, 贺文字¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510006;
3. 广州大学工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 基于移动车辆引起的桥梁结构动力响应, 采用递归量化分析的方法对结构进行损伤识别。用固定宽度的滑动窗将桥梁结构上任意两个位置的响应信号分成若干小段, 并对每一小段信号进行递归量化分析, 进而提取特征构造损伤指标。损伤向量随着滑动窗的移动得到每一个相对位置的损伤指标, 最终实现结构的损伤识别。通过数值模拟验证上述方法, 并讨论了单损伤工况和多损伤工况, 分析了损伤位置、损伤程度、车辆速度、噪声水平等因素的影响。最后制作实验室模型对递归量化分析的结构损伤识别方法进行了试验验证。数值模拟和试验结果表明, 基于递归量化分析的损伤识别方法可以有效识别移动车辆作用下的桥梁结构损伤。

关键词: 桥梁结构; 损伤识别; 递归量化分析; 车-桥-耦合; 滑动窗

中图分类号: U441⁺.3; U446.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)07-1098-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.07.002

引言

随着服役年限的增长, 在役桥梁由于长期处于复杂环境下以及受到各种荷载的反复作用, 其结构难免会因性能逐渐退化而出现局部损伤等问题, 这给桥梁结构安全及正常运营带来巨大隐患。结构损伤识别方法众多, 其中基于车致振动响应的损伤识别方法受到很多学者的青睐^[1]。当结构出现损伤时, 结构的物理特性改变, 动力响应也随之发生变化并影响动力特性, 因此可采用结构的车致振动响应来识别结构损伤^[2]。Zhu等^[3]在桥梁结构上均匀布置传感器, 根据提取的车致振动位移响应, 通过迭代的方法同时识别移动荷载和结构损伤。Law等^[4]利用移动车辆激励下的桥梁响应进行结构模型修正, 通过可靠度分析识别结构损伤, 并考虑了建模误差和测量噪声的不确定性。Li等^[5]提出了一种改进的移动荷载作用下的桥梁结构损伤识别方法, 该方法无需识别移动力以及移动车辆的特性, 可直接重构结构的动态响应。Cheng等^[6]采用分形理论和模型修正提出了一种两阶段桥梁损伤识别方法, 并采用一座大型钢拱桥的监测数据对该方法进行了验证。以上研究均为基于车致振动响应和结构数值模型的损伤识别方法, 但建立结构的精确模型难度较大, 且

需要用到相对较多的响应信号来保证结构信息的完整性。

近年来, 随着信号处理技术的快速发展, 仅基于结构响应信号的损伤识别方法得到了进一步应用。Zhang等^[7]提出了一种无模型的桥梁结构损伤识别方法, 该方法通过移动荷载激励下桥梁结构响应在相空间中轨迹的变化来识别结构损伤, 采用位移、速度及加速度三种动力响应构造响应的相空间轨迹, 并定义相轨迹的距离为损伤指数, 以识别桥梁的损伤位置。Nie等^[8]定义移动荷载激励下桥梁上任意两个传感器信号的互相关系数为结构的损伤指标, 对结构进行损伤定位。聂振华等^[9]提出了一种移动荷载激励下数据驱动的桥梁损伤识别方法, 该方法利用移动主成分分析对结构响应信号进行分析, 并用传递熵方法处理局部特征值以实现结构损伤定位。上述研究皆通过结构响应中的异常或奇异性来揭示结构的损伤, 进而通过损伤特征指标的振荡来突显结构损伤位置。但这些研究都将车辆简化为移动荷载, 未考虑车的特性(弹性模量及阻尼等), 因此忽略了车和桥之间的耦合效应。Yang等^[10]首次提出了“车辆扫描法”, 即利用车辆响应识别桥梁动力参数和损伤状态的间接测量法, 并深入讨论了各种因素对识别效果的影响^[11]。车辆扫描法具有高机动性、快速、经济、可连续测试等显著优点, 但测试过程

收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278303); 安徽省自然科学基金杰出青年基金项目(2208085J20)。

因测试车辆本身的局限以及周围环境因素的影响,有时难以获得稳定的识别效果^[12]。

在上述研究成果的基础上,本文拟采用递归量化分析方法对桥梁结构的损伤进行识别和定位。递归量化分析是处理非平稳、非线性振动信号的一种方便且有效的手段,以此方法对车致振动响应进行分析和处理,进而可对桥梁损伤进行定位。此方法首先用固定宽度的滑动窗将结构响应分成若干段局部信号,然后利用递归量化分析在分析非平稳、非线性信号方面的优势,从局部信号中提取结构的损伤特征,最后将损伤特征信息汇总,构造结构的损伤指标,从而识别结构的损伤位置。

1 理论基础

1.1 车-桥系统模型

移动车辆-桥梁耦合系统可以简化为图1所示模型,车辆和桥梁分别考虑为被弹簧和阻尼连接的可移动质量和简支梁。图1中, m_v 表示移动车辆的质量, k_v 表示车辆刚度系数, c_v 表示车辆阻尼, v 表示车辆移动速度。

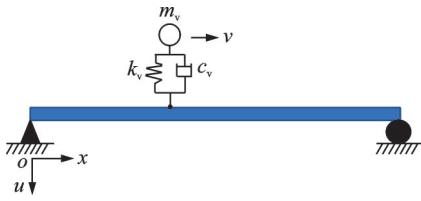


图1 移动车辆-简支梁模型

Fig. 1 Moving vehicle-simply supported beam model

桥梁的振动控制方程为:

$$m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = N^T f \quad (1)$$

式中 m_b 为桥梁结构质量矩阵; k_b 为桥梁结构刚度矩阵;采用 Rayleigh 阻尼模型, $c_b = \alpha m_b + \beta k_b$ (α 和 β 为常数) 为桥梁结构阻尼矩阵; N 为形函数向量, N^T 为其转置;集中力 $f = m_v(g - \ddot{u}_v)$, 其中, g 为重力加速度, \ddot{u}_v 为车辆竖向加速度; \ddot{u}_b , \dot{u}_b 和 u_b 分别为桥梁的节点加速度、速度和位移向量。

车辆的振动控制方程为:

$$m_v \ddot{u}_v + c_v \dot{u}_v + k_v u_v = 0 \quad (2)$$

式中 \ddot{u}_v 为车辆单元质量的加速度; \dot{u}_k 和 u_k 分别为车辆质量与接触点处的速度和位移之差。

根据车-桥位移及作用力之间的相互作用关系,可建立车-桥耦合振动控制方程:

$$M_s \ddot{u} + C_s \dot{u} + K_s u = F \quad (3)$$

其中, M_s , C_s , K_s , F , \ddot{u} , \dot{u} 和 u 分别为:

$$M_s = \begin{bmatrix} m_b & m_v \times N^T \\ 0 & m_v \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ c_v \times (-N) & c_v \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ -k_v \times N - c_v \times v \times N_x & k_v \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} m_v \times g \times N^T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\ddot{u} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_v \end{bmatrix}, \dot{u} = \begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_v \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_b \\ u_v \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 N_x 表示形函数对 x 求导; \dot{u}_v 和 u_v 分别为车辆质量的竖向速度和位移。

采用 Newmark 法求解得到上述控制方程桥梁节点的位移、速度和加速度响应。

1.2 递归量化分析

递归图方法源于动力系统中普遍存在的特性即递归特性,这种特性是指动力系统某些时刻的状态会在相空间中互相接近。Eckmann 等^[13]提出递归图方法,将动力系统在高维相空间中展现的递归特性变换到二维图形——递归图上,通过递归图揭示动力系统的非平稳特征。

递归图在数学上表现为一个由两根时间轴组成的 0-1 方阵。通常来说,对于一个时间序列 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,构造其递归图的步骤如下:

(1) 由于单一的时间序列无法构造一个完整的相空间,故首先根据该时间序列重构其等价相空间,具体过程如下式所示:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N | X_i = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau})\}, N = n - (m-1)\tau \quad (9)$$

式中 n 为时间序列的元素个数; N 为重构相空间 X 的轨迹长度; m 和 τ 分别为嵌入维度和时间延迟。

(2) 在相空间 X 中,时间序列 x 的递归图便可根据下式得到:

$$R_{i,j} = H(\epsilon - \|X_i - X_j\|); i, j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中 $R_{i,j}$ 表示递归图中位置 (i, j) 处的值; ϵ 为人为选取阈值; $\|\cdot\|$ 表示范数,通常采用 2-范数,即表示相点间的欧式距离; $H(\cdot)$ 为 Heaviside 函数,如下式所示:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (11)$$

如果 X_i 与 X_j 间的距离小于阈值 ϵ , 则 $R_{i,j} = 1$, 在递归图上表示为黑点,说明该重构相空间中的相点 i 与相点 j 之间是递归的;反之, $R_{i,j} = 0$, 在递归图上表示为白点,两点之间无递归现象。这些黑点和白点的组合会在递归图中表现出各种图形特征,如

斜线、竖直线和水平直线等,进而反映出时间序列 x 的递归特性。

递归图中不同图形特征能够反映信号或系统的各种振动特性,然而仅通过对图像的观察进行信号或者系统的定性分析在实际应用中是不够的。Zbilut 等^[14]提出了基于递归图图形特征的递归量化分析,该方法通过统计或测定递归图中各类图形特征的数量及分布等,对递归图所反映出的特征进行量化。递归量化分析现阶段主要包含以下几类测度:递归率、确定度、平均对角线段长度、层状度、平均垂直线段长度、熵以及趋势。杨栋等^[15]提出了一个基于无阈值递归图的损伤指标——递归矩阵奇异熵,分析表明,当结构发生损伤后,递归矩阵奇异熵指标对结构微小局部损伤较为敏感。随后提出一种评价信号非平稳程度的指标^[16],并通过该指标对拱桥吊索振动信号的平稳性进行了分析。徐进^[17]提出采用最大相似度对非线性直杆的纵向振动响应作递归分析,有效识别了结构损伤,为结构微小损伤的敏感识别提供了一种有效途径。

在递归图的应用研究中,常规递归图的局限逐渐显现,如常规递归图阈值选取缺少依据、仅能对单个信号进行分析等。因此,针对这些问题,学者们对常规递归图构造方式进行了拓展。

(1) 交叉递归图(Cross Recurrence Plot, CRP)

CRP^[18]是一种双变量递归图,能够显示两个时间序列相空间轨迹之间的接近程度。对于两个时间序列,其相空间轨迹分别为 X_i 与 Y_i ,则由其构造的 CRP 表示为下式:

$$CR_{i,j} = H(\epsilon - \|X_i - Y_j\|); i, j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中 $CR_{i,j}$ 为 CRP 递归图中位置 (i, j) 处的值; N 为 X_i 与 Y_i 在共同的重构相空间中的轨迹长度。故在交叉递归图中,一些递归量化指标的含义会产生相应的改变。

(2) 无阈值递归图

无阈值递归图由 Iwanski 等^[19]提出,该类递归图将原本递归图构造公式中的阈值项去除,使得此类递归图能够表示相点之间的距离。无阈值递归图的构造方式如下式所示:

$$D_{i,j} = \|X_i - X_j\|; i, j = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

文中将结合这两类递归图进行损伤指数的构造。

2 损伤指标的构造

递归图将信号转换成二维图形,为了从中提取动力响应的局部特征,采用一个固定宽度的滑动窗

口,其宽度为 l ,移动步长为 Δs ,依次将动力响应截取为小段信号进行递归量化分析,进而获得其递归特征,如图 2 所示。

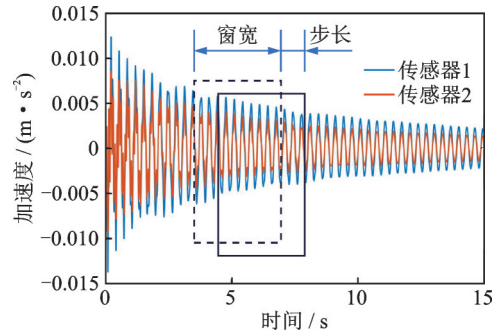


图 2 滑动提取加速度局部信号示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local acceleration signal extracted by sliding

当 $l = 2 \frac{f_s}{f_1}$ (f_s 为采样频率, f_1 为结构振动响应的

基频)^[8], $\Delta s = 1$ 时,提取的每一小段信号为 x_k^{1u} :

$$x_k^{1u} = \{a^{1u}(k), a^{1u}(k+1), a^{1u}(k+2), \dots,$$

$$a^{1u}(k+l-1)\}; k = 1, 2, \dots, N_a - l + 1 \quad (14)$$

式中 a^{1u} 为未损伤桥梁结构传感器 1 提取的加速度响应; N_a 为 a^{1u} 的响应个数; x_k^{1u} 为滑动窗在 a^{1u} 截取的第 k 段响应,滑动窗共可以截取 $N_a - l + 1$ 段响应。同理,根据未损伤传感器 2 和损伤结构双传感器所提取的加速度响应 a^{2u}, a^{1d}, a^{2d} , 得到 $x_k^{2u}, x_k^{1d}, x_k^{2d}$ 。

构造 x_k^{1u} 的相空间轨迹:

$$X_k^{1u} = \{X_k^{1u}(1), X_k^{1u}(2), X_k^{1u}(3), \dots, X_k^{1u}(t), \dots,$$

$$X_k^{1u}(N)\}, N = N_x - (m-1)\tau \quad (15)$$

$$X_k^{1u}(t) =$$

$$(x_k^{1u}(t), x_k^{1u}(t+\tau), \dots, x_k^{1u}(t+(m-1)\tau))^T \quad (16)$$

式中 X_k^{1u} 为 x_k^{1u} 的相空间轨迹; N_x 为 x_k^{1u} 的响应个数。同理可得到 $x_k^{2u}, x_k^{1d}, x_k^{2d}$ 的相空间轨迹 $X_k^{2u}, X_k^{1d}, X_k^{2d}$ 。

计算第 k 段响应的无阈值递归矩阵:

$$D_{i,j}^u = \|X_k^{1u}(i) - X_k^{1u}(j)\|; i, j = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

$$D_{i,j}^d = \|X_k^{1d}(i) - X_k^{1d}(j)\|; i, j = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

计算第 k 段响应的无阈值递归矩阵的特征值(该特征值公式由有阈值递归矩阵的递归率公式变形而来):

$$RS_k^u = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N D_{i,j}^u \quad (19)$$

$$RS_k^d = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N D_{i,j}^d \quad (20)$$

定义第 k 步的损伤指数:

$$RK_k = \frac{RS_k^u - RS_k^d}{RS^u} \quad (21)$$

最后可得到损伤指数向量,其构造流程图如图 3 所示。

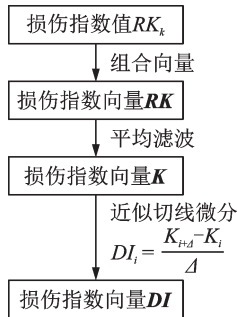


图 3 损伤指数向量构造流程图

Fig. 3 Construction flow chart of damage index vector

3 数值验证

3.1 数值模型

以图 4 所示的简支梁为例,对所提出方法的有效性和准确性进行验证。梁的参数定义如下:梁长 $L=30\text{ m}$,杨氏模量、质量密度和惯性矩分别为 $E=2.75 \times 10^{10}\text{ N/m}^2$, $\rho=1500\text{ kg/m}$ 和 $I=0.175\text{ m}^4$,结构前两阶阻尼比为 2%;车辆质量、刚度和阻尼分别为 $m_v=2000\text{ kg}$, $k_v=2.02 \times 10^7\text{ N/m}$ 和 $c_v=390\text{ N}\cdot\text{s/m}$;时间间隔 $d_t=0.001\text{ s}$,采样频率 $f_s=1000\text{ Hz}$ 。沿梁长将其等分为 100 个单元,通过降低选取的梁单元刚度模拟损伤。

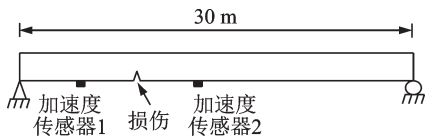


图 4 简支梁示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simply supported beam

通过 Newmark 法获取桥梁各个节点的位移、速度和加速度响应,图 5 为结构响应示例。图 5(a) 为车辆通过桥梁时相对位置 $0.2L$ 处的加速度响应;通过对信号进行谱分析可得桥梁的前三阶频率分别为 3.067, 12.2 和 28.27 Hz,如图 5(b) 所示。

3.2 单损伤工况

3.2.1 不同损伤位置

此工况车的质量选为 2000 kg,车速选为 2 m/s,损伤程度选为降低单元刚度 30%,传感器位置选为相对位置 $0.2L$ 和 $0.4L$ 处,递归参数选为 $m=2$,

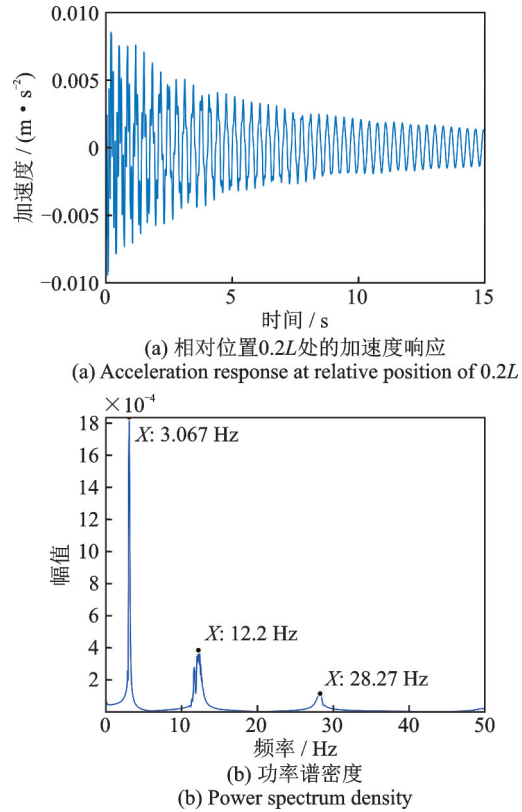


图 5 相对位置 $0.2L$ 处的加速度响应和功率谱密度

Fig. 5 Acceleration response and power spectrum density at relative position of $0.2L$

$\tau=1$ 。由于损伤位置识别的分辨率会受到滑动窗宽度和移动步长的影响,若窗宽度过窄,包含信号的信息太少,不足以识别损伤位置;若窗宽度过宽,包含信息过多,识别分辨率会随之下降;增加移动步长也会对识别分辨率产生一定的影响,为实现较好的识别效果,移动窗宽和移动步长分别选为 $l=653$ ($l=2 \times 1000/3.067$), $\Delta s=1$,然后在梁的第 30 个单元(相对位置 $0.29L \sim 0.3L$)处设置损伤。其模拟结果如图 6~8 所示。

从图 6 中可以看出,损伤指数向量 RK 波动大且具有周期性,为了消除波动的影响,将 RK 曲线做平均滤波处理得到 K ,如图 7 所示。

从图 7 中红线所示的 K 向量可以看出,在相对位置 $0.3L$ 处有明显的下滑趋势。为使损伤曲线更

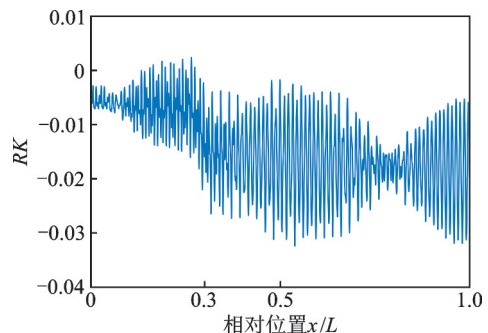
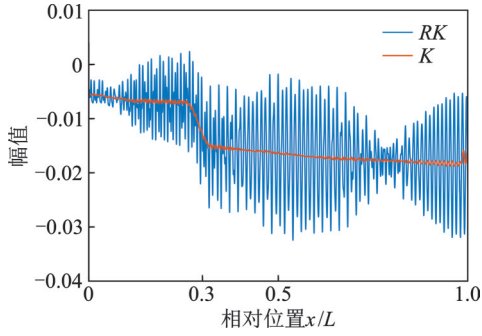
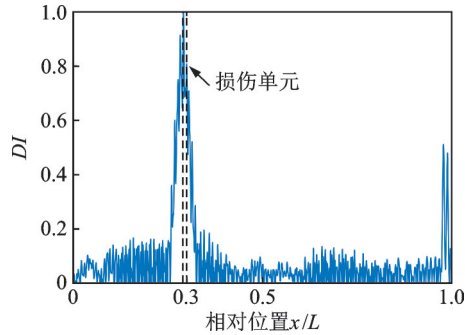


图 6 损伤位置为 $0.29L \sim 0.3L$ 时的 RK 值

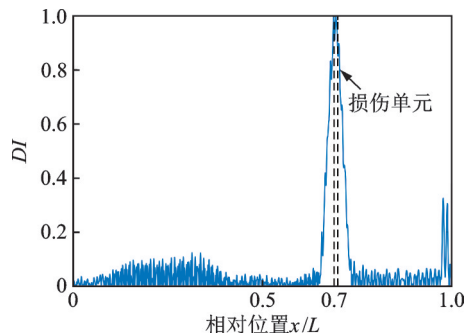
Fig. 6 RK values when damage location is $0.29L \sim 0.3L$

图7 损伤位置为 $0.29L\sim 0.3L$ 时的 RK 值和 K 值Fig. 7 RK values and K values when damage location is $0.29L\sim 0.3L$ 图8 损伤位置为 $0.29L\sim 0.3L$ 时的 DI 值Fig. 8 DI values when damage location is $0.29L\sim 0.3L$

直观,将 K 向量做近似切线微分处理得到 DI 曲线,并取绝对值和进行归一化处理,如图8所示。

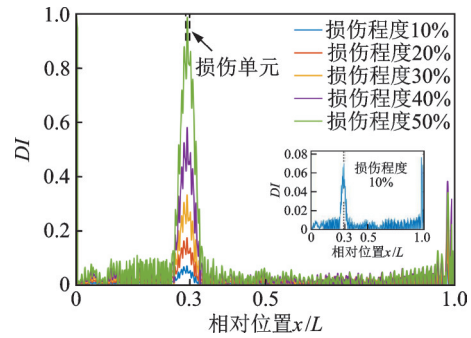
通过 DI 曲线可以明显发现,在预设损伤位置处有较大的峰值,峰值位置位于 $0.29L\sim 0.3L$ 之间,其损伤识别分辨率在相对位置的1%之内,识别效果良好。另外,针对滑动窗法、平均滤波以及近似切线微分处理所造成的损伤指数向量变短而导致其相对位置的偏移,图6~8中的信号在分析过程中都进行了镜像延拓处理,后续工况同理。

接下来在梁的第70个单元(相对位置 $0.69L\sim 0.7L$)处设置损伤,其余参数与上一工况相同,如图9所示。可以看出,在其他参数一定的情况下,设置的损伤位置对应处有着明显的峰值,说明此方法能有效识别损伤位置。

图9 损伤位置为 $0.69L\sim 0.7L$ 时的 DI 值Fig. 9 DI values when damage location is $0.69L\sim 0.7L$

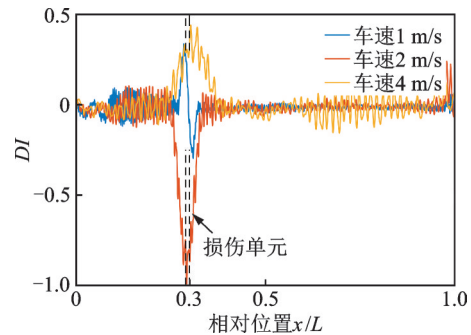
3.2.2 不同损伤程度

本工况损伤位置选择在梁的第30个单元(相对位置 $0.29L\sim 0.3L$)处,损伤程度分别设置为刚度降低10%~50%,其余参数与第一个工况设置相同,其模拟结果如图10所示。由于图形比例的缘故,损伤程度为10%时的曲线峰值不太明显,图中右边为单独绘制的损伤程度为10%时的效果图。可以看出,随着损伤程度的增加,损伤指标的幅值随之增加,识别效果更为明显。即便在损伤程度为10%的情况下,该方法也能准确识别损伤。

图10 损伤程度为10%~50%时的 DI 值Fig. 10 DI values when damage degree is 10%~50%

3.2.3 不同车速

此工况下分别设置车速为1,2和4 m/s,其余参数与第一个工况设置相同,其模拟结果如图11所示。可以看出,在4 m/s车速模拟下, DI 的尖峰值位置有些右偏,但位置也在 $0.3L$ 处附近,说明车速对识别效果有一定的影响,车速越快,识别误差越大。在1 m/s车速模拟下, DI 在损伤处出现了两个尖峰,这是由于该车速下的 K 向量在损伤位置处已有明显的尖峰效果,如图12所示,此时若对 K 向量做近似切线微分处理,就会出现两个尖峰的现象。

图11 车速为1,2和4 m/s时的 DI 值Fig. 11 DI values at vehicle speeds of 1, 2 and 4 m/s

3.2.4 噪声影响

实桥测试中噪声的影响是无法避免的,为了研究该方法在噪声污染环境中的鲁棒性,在原始响应中加入不同水平的高斯噪声进行模拟。噪声响应表

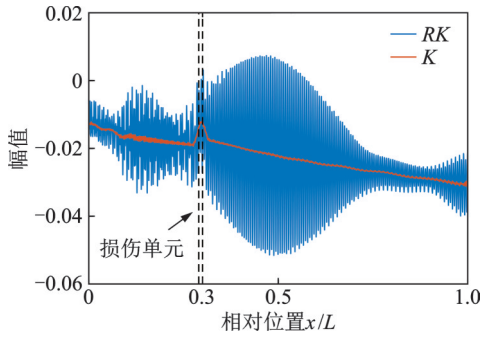


图 12 车速为 1 m/s 时的 RK 值与 K 值

Fig. 12 RK values and K values at vehicle speed of 1 m/s

示为:

$$sig_{noise} = sig + N_{lev} RMS(sig) \eta \quad (22)$$

式中 sig_{noise} 表示包含噪声的响应; sig 表示原始响应; N_{lev} 为噪声水平; $RMS(sig)$ 为原始响应信号的均方根; η 为均值和单位标准差为零的正态分布向量。

下面考虑 5%, 10% 和 20% 三种噪声水平, 此工况其余参数与第一个工况设置相同, 模拟结果如图 13 和 14 所示。在相对位置 0.29L~0.3L、噪声水平 5%, 10% 和 20% 的情况下, 损伤指标在该位置均出现明显峰值, 但随着噪声水平的增大, 曲线后半部分出现波动。在噪声水平为 10% 的情况下, 指标在末端出现较大峰值, 但依旧能识别损伤位置; 在噪声水平为 20% 的情况下, 波动程度更大, 并且出现 0.8L 位置处的错误尖峰, 影响损伤识别。总之, 随着噪声

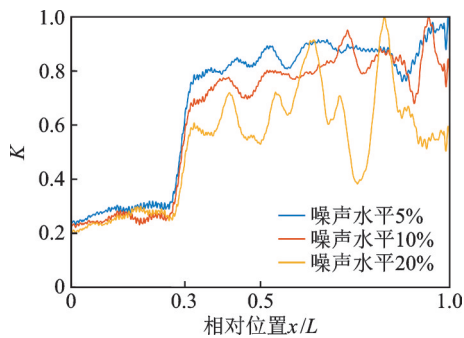


图 13 噪声水平为 5%, 10% 和 20% 时的 K 值

Fig. 13 K values of noise levels at 5%, 10% and 20%

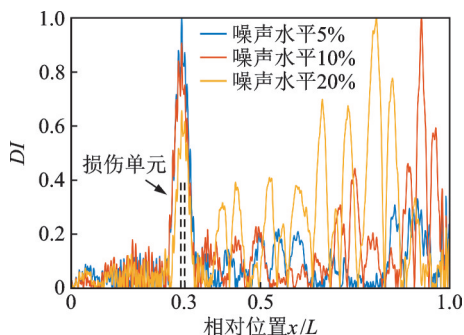


图 14 噪声水平为 5%, 10% 和 20% 时的 DI 值

Fig. 14 DI values of noise levels at 5%, 10% and 20%

水平的增大, 损伤向量曲线出现波动, 甚至出现误导的尖峰, 但当噪声水平小于 10% 时, 损伤识别结果仍具有较高的精度。

3.3 多损伤工况

在上述单处损伤场景中, 利用该方法识别损伤位置都有着良好的准确性, 下面探究在多个位置同时发生损伤的情况下采用该方法识别每个损伤位置的准确性。

多损伤场景设置两个工况, 工况一的两个损伤相对位置分别为 0.29L~0.3L 和 0.69L~0.7L, 工况二的两个损伤相对位置分别为 0.39L~0.4L 和 0.69L~0.7L, 设置损伤程度为 10%~50%, 其识别结果如图 15 和 16 所示。可以看出, 在设置两个损伤的情况下, 该方法能够准确识别两处损伤对应的位置。虽然两处损伤位置的损伤程度相同, 但其损伤指数幅值大小却不一致, 这可能是损伤位置与传感器的位置关系所导致的; 由于第二处损伤在两个传感器的右边, 其识别效果不如位于两个传感器之间的第一处损伤。值得说明的是, 该工况与 3.2.2 节情况一致, 由于图形比例问题, 损伤程度为 10% 的情况下, 损伤峰值依然明显。

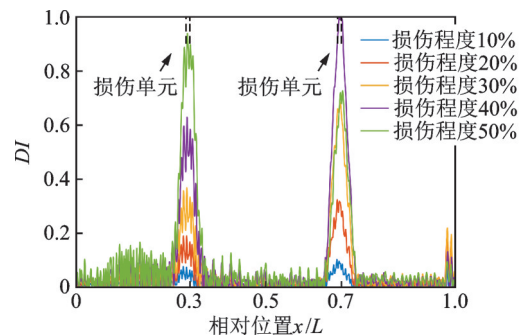


图 15 损伤位置为 0.29L~0.3L, 0.69L~0.7L 时不同损伤程度的 DI 值

Fig. 15 DI values of different damage degrees when damage location is 0.29L~0.3L and 0.69L~0.7L

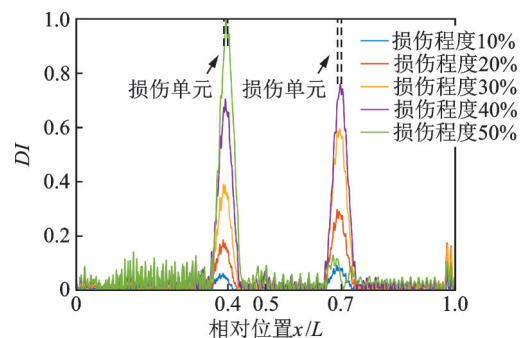


图 16 损伤位置为 0.39L~0.4L, 0.69L~0.7L 时不同损伤程度的 DI 值

Fig. 16 DI values of different damage degrees when damage location is 0.39L~0.4L and 0.69L~0.7L

3.4 连续梁工况

如图17所示,此工况采用双等跨连续梁,其桥梁特性参数与简支梁模型参数相同,所用车辆模型参数、采样频率和梁单元划分也与3.1节设置一致。此工况损伤位置预设于相对位置 $0.29L\sim 0.3L$ 处,损伤程度分别设置为刚度降低 $10\%\sim 50\%$,识别效果如图18所示。可以看出,本文方法亦能有效地识别出连续梁桥不同程度的损伤,对于不同桥型有良好的适应性和识别准确性。

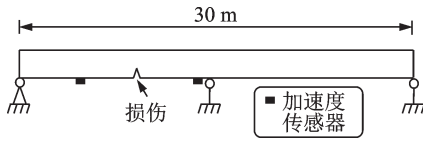


图17 连续梁示意图

Fig. 17 Schematic diagram of continuous beam

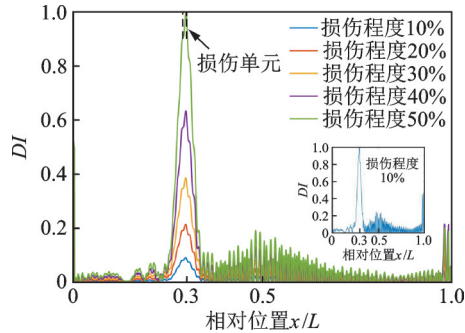


图18 连续梁损伤位置为 $0.29L\sim 0.3L$,损伤程度为 $10\%\sim 50\%$ 时的DI值

Fig. 18 DI values when damage degree is $10\%\sim 50\%$ and damage position of continuous beam is $0.29L\sim 0.3L$

4 试验

4.1 试验模型

为了验证本文所提出损伤识别方法的适用性和有效性,在实验室制作了简支梁和车辆模型进行移动荷载试验。简支梁模型采用铝合金材料制成,两端设有引导段,试验段跨长3 m,截面尺寸为 $124\text{ mm}\times 24\text{ mm}$,车辆模型轴距160 mm,车重 $m_v=2.47\text{ kg}$ 。在简支梁上挖去一个长方形区域以模拟损伤,大小为 $15\text{ cm}\times 3\text{ cm}$,损伤位置预设于相对位置 $0.6L\sim 0.65L$ 。在梁上均匀安装9个加速度传感器以获取桥梁响应,采样频率取为1000 Hz。试验模型示意图如图19所示,试验装置如图20所示。

4.2 试验结果分析

4.2.1 模型响应

图21显示了简支梁模型受到车速为 0.29 m/s

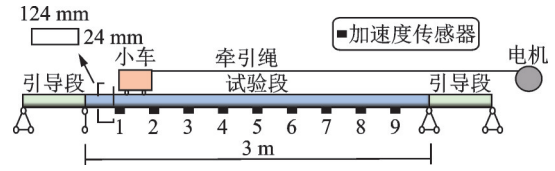
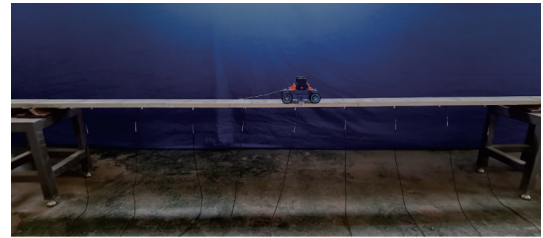
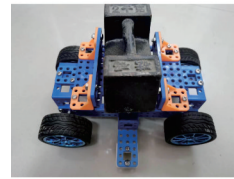


图19 试验模型示意图

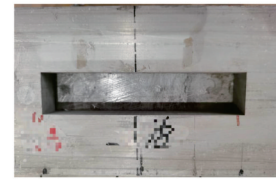
Fig. 19 Schematic diagram of test model



(a) 试验梁
(a) Test beam



(b) 车辆模型
(b) Vehicle model

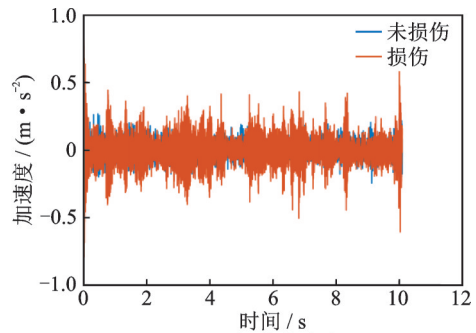


(c) 损伤模拟
(c) Damage simulation

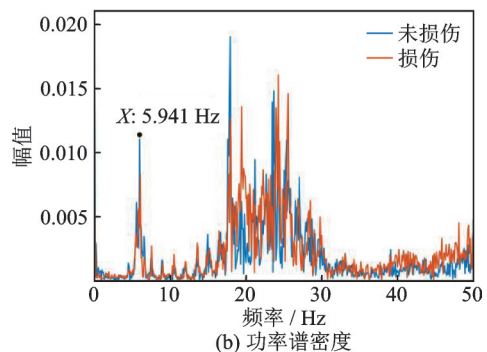
图20 试验装置

Fig. 20 Test setup

的移动车辆作用时,未损伤和损伤条件下桥梁的加速度响应和频谱图。响应的基频为 5.941 Hz ,滑动窗口的长度为336(也就是 $2\times 1000/5.941$)。



(a) 加速度响应
(a) Acceleration response



(b) 功率谱密度
(b) Power spectrum density

图21 未损伤、损伤桥梁的加速度响应和功率谱密度

Fig. 21 Acceleration response and power spectrum density of undamaged and damaged bridge

4.2.2 不同车速

由于试验梁长度较短,以及电机设备限制,本试验设置0.29和0.57 m/s两个车速工况,每个车速下采用两种传感器选取方案,方案一采用1号和3号传感器,方案二采用1号和7号传感器。将所提取的加速度响应进行低通滤波处理,随后计算损伤指数,该损伤指数向量同样采用镜像延拓处理。由于车速、损伤区域大小等影响,曲线已出现明显的峰值效应,该损伤曲线便不做平均滤波和近似切线微分处理,其识别效果如图22所示。从图22中可以看出,在不同车速和不同传感器选取方案下,该方法皆可准确识别损伤,其中在同一车速下,方案二的损伤指数幅值明显高于方案一,说明损伤位置位于两个传感器之间能较好地识别出损伤位置及程度。

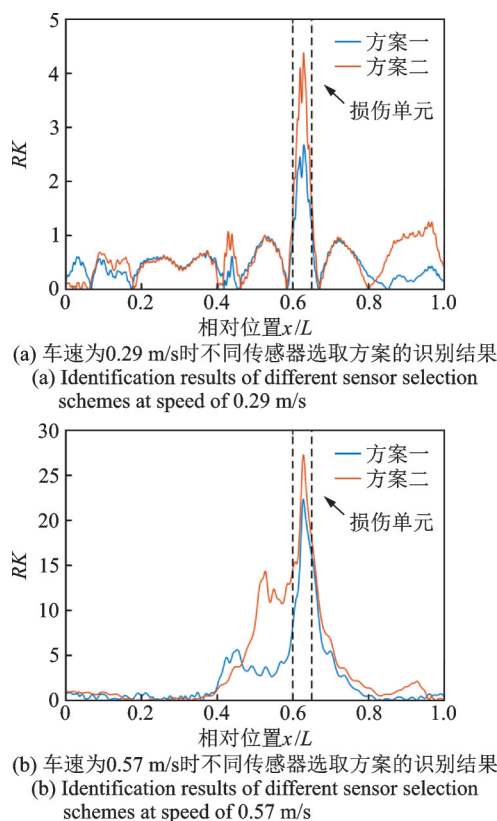


图22 车速为0.29和0.57 m/s时不同传感器选取方案的识别结果

Fig. 22 Identification results of different sensor selection schemes at speeds of 0.29 and 0.57 m/s

5 结论

本文提出了一种基于车致振动动力响应递归量化分析的桥梁损伤识别方法,该方法以车辆荷载激励下桥梁结构的加速度响应为分析对象,以递归量化分析为提取结构损伤特征的工具,基于多变量无阈值递归图的特征构造结构损伤指标,利用滑动窗

得到损伤指标向量用于损伤定位。为了验证所提方法的有效性和鲁棒性,采用数值算例和试验对其进行验证和参数分析。结果表明,该方法能准确定位简支梁和连续梁的损伤,也能够通过损伤指标幅度的差异体现出不同的损伤程度,并且该指标在结构损伤较小的时候也较为灵敏。接着对该方法的抗噪性进行了讨论,在10%的噪声水平范围内,指标均能较准确地识别损伤。文中进一步讨论了车速对损伤识别结果的影响,再次验证了该方法的可靠性。最后验证了该方法在试验环境下的可行性。数值算例和试验模型皆验证了所提方法的有效性,后续将通过实桥试验和在复杂桥型条件下对该方法的有效性进行进一步验证。

参考文献:

- [1] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [2] Malekjafarian A, McGetrick P J, O'Brien E J. A review of indirect bridge monitoring using passing vehicles [J]. Shock and Vibration, 2015, 2015(1): 286139.
- [3] Zhu X Q, Law S S. Damage detection in simply supported concrete bridge structure under moving vehicular loads [J]. Journal of Vibration and Acoustics: Transactions of the ASME, 2007, 129(1): 58-65.
- [4] Law S S, Li J. Updating the reliability of a concrete bridge structure based on condition assessment with uncertainties [J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 286-296.
- [5] Li J, Law S S, Hao H. Improved damage identification in bridge structures subject to moving loads: numerical and experimental studies [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 74: 99-111.
- [6] Cheng X X, Wu G, Zhang L, et al. A new damage detection method for special-shaped steel arch bridges based on fractal theory and the model updating technique [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(3): 2150030.
- [7] Zhang W W, Li J, Hao H, et al. Damage detection in bridge structures under moving loads with phase trajectory change of multi-type vibration measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 410-425.
- [8] Nie Z H, Lin J, Li J, et al. Bridge condition monitoring under moving loads using two sensor measurements [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(3): 917-937.
- [9] 聂振华, 杨卫星, 程良彦, 等. 联合移动主成分分析与传递熵的桥梁损伤识别方法 [J]. 振动工程学报,

- 2020, 33(5): 1062-1072.
- NIE Zhenhua, YANG Weixing, CHENG Liangyan, et al. Bridge damage detection based on moving principal component analysis combining with transfer entropy[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 1062-1072.
- [10] Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3-5): 471-493.
- [11] Lin C W, Yang Y B. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification[J]. Engineering Structures, 2005, 27(13): 1865-1878.
- [12] 杨永斌, 王志鲁, 史康, 等. 基于车辆响应的桥梁间接测量与监测研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 1-12.
- YANG Yongbin, WANG Zhilu, SHI Kang, et al. Research progress on bridge indirect measurement and monitoring from moving vehicle response[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 1-12.
- [13] Eckmann J P, Kamphorst S O, Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems[J]. Europhysics Letters, 1987, 4(9): 973-977.
- [14] Zbilut J P, Webber C L, Jr. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots[J]. Physics Letters A, 1992, 171(3-4): 199-203.
- [15] 杨栋, 任伟新. 基于递归矩阵奇异熵的损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 60-63.
- YANG Dong, REN Weixin. Structure damage detecting using singular entropy of recurrence matrix[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 60-63.
- [16] 杨栋, 任伟新, 李丹, 等. 基于局部递归率分析的振动信号非平稳评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 3024-3032.
- YANG Dong, REN Weixin, LI Dan, et al. Local recurrence rate analysis based non-stationarity measurement for operational vibration signal[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 3024-3032.
- [17] 徐进. 基于递归相似性的非线性振动损伤敏感识别[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 636-641.
- XU Jin. Damage detection for non-linear vibration using recurrence similarity[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 636-641.
- [18] Zbilut J P, Giuliani A, Webber C L, Jr. Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification[J]. Physics Letters A, 1998, 246(1-2): 122-128.
- [19] Iwanski J S, Bradley E. Recurrence plots of experimental data: to embed or not to embed?[J]. Chaos, 1998, 8(4): 861-871.

Bridge damage identification using recurrence quantification analysis of vehicle-induced vibration response

DU Chang-jun¹, ZHANG Jing¹, YANG Dong^{2,3}, CHEN Cheng¹, HE Wen-yu¹

(1.College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2.Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3.Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the dynamic response caused by moving vehicles, a recurrence quantification analysis-based structural damage detection method is proposed. The acceleration response is split into several segments using a moving window. The recurrence plots are constructed to analyze and present the characteristics of each segmented response signal. The recurrence quantification analysis is used to quantify the damages and construct the damage feature. The damage features of each relative position are assembled as a vector for the location of the structural damage. The proposed method is validated by numerical simulation with the single-damage and multi-damages. The influence of damage location, vehicle speed, noise and other factors are discussed to illustrate the robustness of the proposed method. Results show that the method is a potential way for structural damage detection under operational condition.

Key words: bridge structure; damage identification; recurrence quantization analysis; vehicle-bridge coupling; sliding window

作者简介: 杜昌骏(1999—),男,硕士研究生。电话:(020)39366266;E-mail:ducj@mail.hfut.edu.cn。

通讯作者: 杨栋(1982—),男,博士,副教授。电话:(020)39366266;E-mail:izaac@foxmail.com。