

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023100823121985

文章编号:1674-599X(2023)06-0024-09

引用格式:户东阳,刘鹏,熊亮,等.基于拟静力位移的桥梁损伤定位研究[J].交通科学与工程,2023,39(6):24-32.

Citation: HU Dongyang, LIU Peng, XIONG Liang, et al. Research on bridge damage localization based on pseudo-static displacement [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 24-32.

基于拟静力位移的桥梁损伤定位研究

户东阳¹, 刘鹏², 熊亮³, 李怡帆², 贺文宇²

(1. 中铁二院昆明勘察设计院有限责任公司, 云南 昆明 650200; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230000; 3. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:为克服传统桥梁损伤定位中存在的耗时长和易受操作环境影响大等问题,该研究提出一种高效、准确的桥梁损伤定位方法。通过有限脉冲响应滤波器将拟静力位移表示为总位移的线性组合,建立拟静力位移的精度函数对滤波器系数进行求解。将该方法应用于移动荷载作用下的桥梁位移响应中,提取其拟静力位移。基于拟静力位移,判定桥梁的损伤位置。再分别以某简支梁和连续梁为例,验证了该方法识别简支梁和连续梁损伤位置的准确性。该研究可为桥梁损伤定位检测提供借鉴。

关键词:拟静力位移;移动荷载;损伤定位;FIR滤波器

中图分类号:U448.222

文献标志码:A

Research on bridge damage localization based on pseudo-static displacement

HU Dongyang¹, LIU Peng², XIONG Liang³, LI Yifan², HE Wenyu²

(1. Kunming Survey Design and Research Institute Co., Ltd. of CREEC, Kunming 650200, China;

2. Department of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China;

3. AnhuiTransportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: To overcome the problems of long time consumption and susceptibility to operational environment in traditional bridge damage localization method, the efficient and accurate method for locating bridge damage was proposed in this study. The pseudo-static displacement was represented as a linear combination of total displacement through the finite impulse response filter. The accuracy function for quasi-static displacement was established to solve the filter coefficients. This method was used to extract quasi-static displacement from bridge displacement response under moving loads. The damage location of bridges was determined based on quasi-static displacement. Taking a certain simply supported beam and a continuous beam as examples, the accuracy of this method was verified in identifying the damage location of both beams. This study can provide reference for the detection of

收稿日期:2023-10-08

基金项目:安徽省杰出青年基金项目(2208085J20);安徽省交通控股集团有限公司科技资助项目(JKKJ-2021-01)

作者简介:户东阳(1985—),男,中铁二院昆明勘察设计院有限责任公司高级工程师。E-mail:1506696182@qq.com

bridge damage localization.

Key words: pseudo-static displacement; moving load; damage identification; FIR filter

桥梁损伤定位是桥梁监测与检测的重要内容,有利于桥梁安全运营和维护^[1]。在桥梁损伤识别研究中,通常采用桥梁刚度减小模拟损伤,而移动荷载作用下的桥梁位移响应是桥梁刚度的直接反映,对桥梁损伤识别具有重要意义^[2]。然而,移动荷载的动力效应及桥面不平整度等因素导致桥梁位移响应同时包含低频振动和高频振动两部分,如图1所示。所以通过损伤引起的位移响应很难直观地判定损伤位置^[3],通常需要借助复杂的信号处理工具。相较于动力响应,桥梁在静力荷载作用下的平衡方程仅与结构刚度有关,因此,静力响应与桥梁局部损伤的对应关系更为直接和明确。HE等^[4]基于简支梁损伤前后的位移影响线建立了损伤定位指标。张锦程等^[5]通过静力测试得到位移影响线,提出了基于位移影响线差值二阶导数的连续梁损伤识别方法。然而,在实际操作中,在桥梁不同位置施加静力荷载获取位移影响线十分耗时且容易受到操作环境的影响。因此,通过提取移动荷载作用下桥梁动位移与位移影响线接近的拟静力位移进行桥梁损伤定位备受关注。

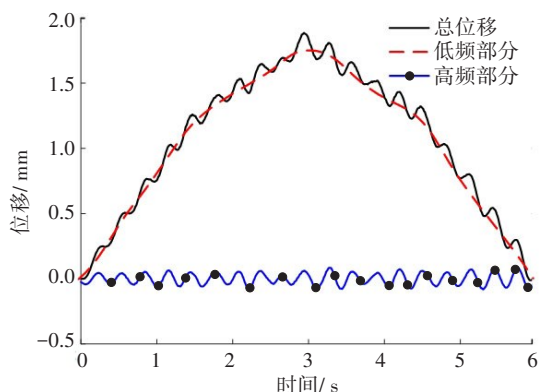


图1 移动荷载作用下的桥梁典型位移响应

Fig. 1 Displacement response of bridge under moving load

拟静力位移是桥梁在没有动力效应的情况下,由移动荷载引起的时变位移。拟静力位移通常具有非常低甚至接近于零的振动频率,因此,与桥梁静力位移十分接近。拟静力位移既可以通过速度

很低的移动荷载作用于桥梁直接产生,也可通过信号处理工具在快速移动荷载引起桥梁位移响应中间接获取^[6]。LI^[7]基于车致桥梁动力响应,提取振动频率很低的拟静力来对桥梁承载能力进行评估。OBRIEN等^[8]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法对移动车辆诱导的位移响应进行信号分解,提取出拟静力进行桥梁损伤识别。CHEN等^[9]利用基于自适应B-spline基字典和稀疏正则化技术的桥梁影响线识别的新方法,实现了从桥梁动力响应中提取位移影响线。林肯^[10]采用变分模态分解和经验模态分解消除桥梁位移响应的波动成份,进而提取位移影响线。尚稳齐等^[11]分别用dbN小波变换和经验模态分解剔除桥梁跨中位置的位移影响线的波动部分,从桥梁动力响应中识别位移影响线。ZHU等^[12]利用经验贝叶斯阈值估计器处理测量的桥梁位移响应,消除车辆引起的动态响应,并使用与L1范数和L2范数相融合的弹性网来估计影响线,进而识别桥梁损伤。

本研究拟利用加速度间接计算桥梁位移无法包含拟静力位移的特点,基于频域得到拟静力位移的转换函数,设计一种有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)滤波器,作用于移动荷载作用下的桥梁位移响应,提取拟静力位移,再利用提取的拟静力位移进行桥梁损伤定位。并分别用简支梁和连续梁进行实例验证。考虑不同损伤数量、不同荷载、移动速度及位移测试噪声,验证所提取的拟静力位移的损伤定位方法的有效性和适用性。以期桥梁损伤位置测量提供简捷方法。

1 拟静力位移提取方法

加速度是位移的二阶导数,然而通过加速度的二重积分计算桥梁位移时,由于积分常数的存在及边界条件未知,加速度信号中的低频噪声不可避免地放大,从而导致得到的位移在低频部分与实际值产生偏离。为了避免加速度计算位移

时发生低频偏移现象, HONG 等^[13]提出了一种传统的 FIR (conventional finite impulse response, CFIR) 滤波器, 利用测量的加速度响应, 结合正则化原理, 计算出在零附近波动的结构动态位移, 其不包含实际位移的拟静力部分。由加速度重构的位移的精度函数 (acceleration transform function, ATF) 见式(1)。

$$H_a(\bar{f}) = \frac{\bar{f}^4}{\bar{f}^4 + \lambda^4} \quad (1)$$

其中, \bar{f} 为归一化到一阶固有频率的频率, 简称标准频率, 即: $\bar{f} = f/f_1$, f 和 f_1 分别为频率和一阶固有频率, f_1 可通过对实测位移响应做快速傅里叶变换识别出; λ 为控制精度函数的算子。

由式(1)可知, $H_a(\bar{f})$ 随着 \bar{f} 的增大而增大, 收敛于 1。在一阶固有频率处, 即当 $\bar{f} = 1$ 时, 令:

$$H_a(\bar{f}) = \frac{1}{1 + \lambda^4} = \eta, \quad 0 < \eta < 1 \quad (2)$$

其中, η 为自由加速度重构的位移在一阶固有频率处的精度, 称为目标精度。并求解得:

$$\lambda = \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

由式(3)和(1)可知, 通过预先定义目标精度 η ($0 < \eta < 1$), 可得到具体的精度函数 $H_a(\bar{f})$ 。由于 $H_a(\bar{f})$ 在 $0 \leq \bar{f} \leq 1$ 从零逐渐增大, 但加速度重构的位移不包含振动频率很低的拟静力位移。为计算拟静力位移, 结合由加速度重构位移的精度函数 $H_a(\bar{f})$, 定义拟静力位移的精度函数 $H_p(\bar{f})$ (pseudo-static transform function, PTF):

$$H_p(\bar{f}) = 1 - H_a(\bar{f}) \quad (4)$$

将式(1)代入式(4), 可得:

$$H_p(\bar{f}) = \frac{\lambda^4}{\bar{f}^4 + \lambda^4} \quad (5)$$

当目标精度 η 取值不同时, 将加速度重构位移和拟静力位移的精度函数 (ATF 和 PTF) 进行对比, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 拟静力位移的精度函数在低频范围 ($0 \leq \bar{f} \leq 1$) 由 1 逐渐减小, 在高频范围 ($\bar{f} > 1$) 逐渐接近于零, 在一阶固有频率处 ($\bar{f} = 1$) 为 $1 - \eta$ 。因此, 为更准确地计算拟静力位移, 精度函数 $H_p(\bar{f})$ 应尽快地收敛于零, 即目标精度 η 应尽量取大。在本研究中, 目标精度均取 0.99。

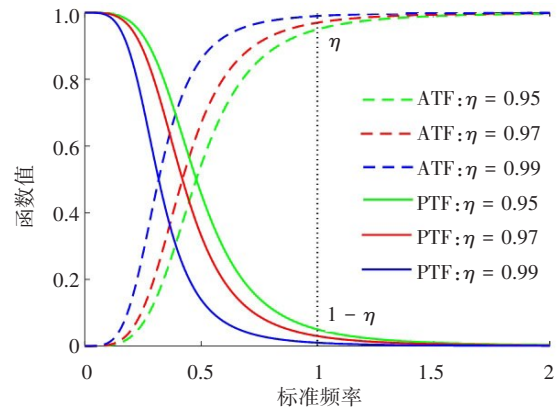


图 2 加速度重构位移精度函数与拟静力位移精度函数值

Fig. 2 The accuracy functions of acceleration-reconstructed displacement and pseudo-static displacement

设计的 FIR 滤波器, 如图 3 所示。FIR 滤波器将某一时刻的拟静力位移表示为以该时刻为中心的某一时间窗内的所有总位移的线性组合, 见式(6)。

$$\bar{u}_t = \sum_{p=-k}^k c_{(p+k+1)} u(t + p\Delta t) \quad (6)$$

式中: \bar{u}_t 为 t 时刻的拟静力位移, 对应的时间窗包含 $2k + 1$ 个时间点; Δt 为相邻时间点间隔; $c_{(p+k+1)}$ 为在第 p 个时间点 FIR 滤波器的系数; u 为总位移。

总位移由位移传感器测得, 假设位移传感器的采样频率为 f_s , 则 $\Delta t = 1/f_s$ 。

对式(6)进行傅里叶变换, 可得:

$$F(\bar{u}_t) = H_d(\bar{f}) F(u_t) \quad (7)$$

其中,

$$H_d(\bar{f}) = \sum_{p=-k}^k c_{(p+k+1)} e^{mi} \quad (8)$$

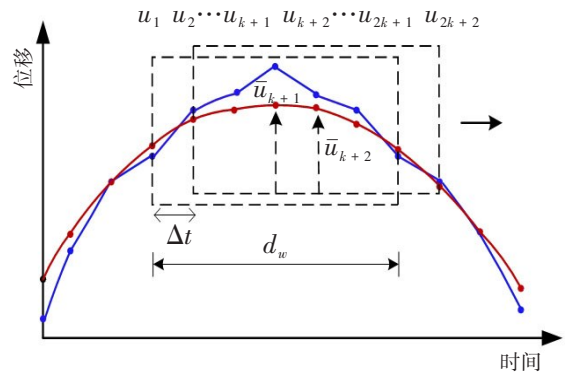


图 3 FIR 滤波器时间窗示意

Fig. 3 Time window of FIR filter

其中, F 为傅里叶变换, \bar{f}_s 为一阶固有频率与位

移采样频率的比值(the ratio of target frequency to the sampling rate, TSF_s), $\tilde{f}_s = f_i/f_s$, $H_d(\tilde{f})$ 为 FIR 滤波器的转换函数(finite impulse response transform function, FTF); i 为虚数; m 为 $H_d(\tilde{f})$ 的虚数系数, $m = 2\pi p \tilde{f}_s \tilde{f}$ 。

从总位移中提取出拟静力位移,利用 FIR 滤波器转换函数 $H_d(\tilde{f})$ 应近似等于拟静力位移的精度函数 $H_p(\tilde{f})$,即:

$$H_d(\tilde{f}) \approx H_p(\tilde{f}) = \frac{\lambda^4}{\tilde{f}^4 + \lambda^4} \quad (9)$$

由式(7)解得 FIR 滤波器的系数:

$$c_{(p+k+1)} = 2\lambda^4 \tilde{f}_s \int_0^{1/(2\tilde{f}_s)} \frac{1}{\tilde{f}^4 + \lambda^4} \cos(2\pi p \tilde{f}_s \tilde{f}) d\tilde{f} \quad (10)$$

由式(8)可知,该 FIR 滤波器的系数均为实数,且关于 $p=0$ 对称,每个系数与时间窗的长度无关。由式(5)可知,拟静力位移 \bar{u} 会随着时间窗的长度变化而变化。因此,为精确计算拟静力位移,时间窗的长度应选择适当。时间窗的长度可表示为:

$$d_w = 2k\Delta t = 2k \frac{1}{f_s} = 2k \frac{f_1}{f_s} \frac{1}{f_1} = 2k \tilde{f}_s \frac{1}{f_1} = 2\bar{k} \frac{1}{f_1} \quad (11)$$

式中: d_w 为时间窗长度; $1/f_1$ 为一阶固有振动周期; \bar{k} 为计算时间窗的系数, $\bar{k} = k\tilde{f}_s$ 。

在式(8)中,令 $\bar{c} = c\tilde{f}_s$, $\bar{p} = p\tilde{f}_s$, 当 $p=k$ 时, $\bar{p} = \bar{k}$, 则有:

$$\bar{c}_{(p+k+1)} = 2\lambda^4 \tilde{f}_s^2 \int_0^{1/(2\tilde{f}_s)} \frac{1}{\tilde{f}^4 + \lambda^4} \cos(2\pi \bar{p} \tilde{f}) d\tilde{f} \quad (12)$$

根据截断傅里叶级数的性质,式(6)中的转换函数 $H_d(f)$ 随着 k 的增大存在波动,发生吉布斯现象。为减小吉布斯现象,时间窗的长度应选择适当,使滤波器系数接近零。因此,令最后一项系数等于零,即 $c_{(2k+1)} = 0$, 等价于 $\bar{c}_{(2k+1)} = 0$ 。注意到当一阶固有频率与位移采样频率的比值 \tilde{f}_s (TSF_s) 较小 (≤ 0.1) 时,式(10)中的积分上限 $1/(2\tilde{f}_s)$ 较大;而当积分中的 \tilde{f} 靠近积分上限时, $1/(\tilde{f}^4 + \lambda^4)$ 近似为零。式(10)中,定积分的值近似与积分上限无关,即与 \tilde{f}_s 无关。当 $\bar{c} = 0$ 时, \bar{p} 的值与 \tilde{f}_s (≤ 0.1) 的大小无关,即式(9)中的 \bar{k} 与 \tilde{f}_s 无关。系数 \bar{c} 与 \bar{p} 的关系如图4所示。从图4可以看出, \bar{c} 的零点即 \bar{k} 的值与 \tilde{f}_s 无关;系数 \bar{c} 的零点以 1.69 为间隔,等间距出现,如: 1.26、2.95 和 4.64, 对应的时间窗分别为 2.52、5.90 和 9.28

倍的一阶固有振动周期。在第一个零点处的 \bar{c} 的图像不平滑且接近于零;在第三个零点处,系数计算量较大、所需测量数据较多,因此,本研究选取 FIR 滤波器时间窗的长度为 $5.9/f_1$ 。

目标精度 η 设为 0.99, TSF_s 取 1/100 时,拟静力位移精度函数与 FIR 滤波器转换函数(PTF 和 FTF)的图像如图5所示。从图5可以看出,两者曲线基本上重合,且其均随着标准频率的增大而减小。这表明: FIR 滤波器能够过滤掉测量位移中的高频部分,可获得较精确的拟静力位移。

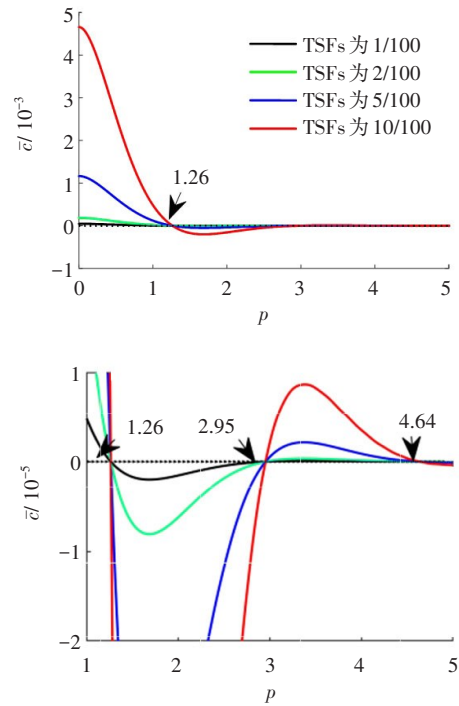


图4 FIR 滤波器系数零点分布

Fig. 4 The zero distribution of FIR filter coefficients

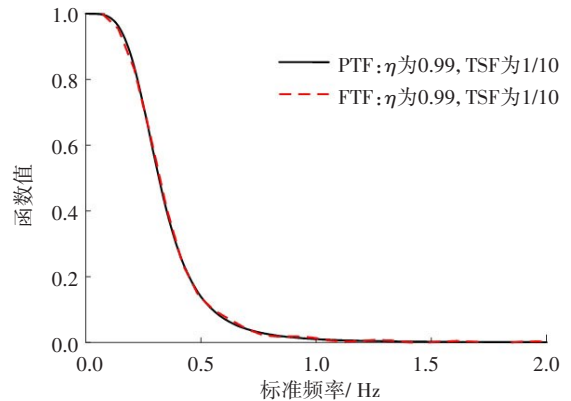


图5 拟静力位移精度函数与 FIR 滤波器转换函数图像对比

Fig. 5 Comparison between the pseudo-static displacement accuracy function and FIR filter conversion function

2 损伤定位方法

HE等^[3]基于简支梁的位移影响线构建了一种损伤定位指标,该指标能较好地适用于基于拟静力位移的损伤定位。

为确定损伤位置及数量信息,HE等^[3]定义的损伤指标(DLI_n)为:

$$DLI_n = \begin{cases} \text{abs} \left[\frac{2\Omega_n - \Omega_{n-1} - \Omega_{n+1}}{\max_{2 \leq n \leq N-1} (2\Omega_n - \Omega_{n-1} - \Omega_{n+1})} \right], & 2 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n = 1, N \end{cases} \quad (12)$$

式中: N 为桥梁单元总数; Ω_n 为位移改变量 $\Delta\omega$ 与第 n 个单元包围的图形面积。该指标通过判断相邻单元的 Ω_n 是否处于线性关系来识别损伤位置。如:若单元 n 及其相邻单元 $n-1$ 和 $n+1$ 均为无损单元,则三个单元对应的 Ω_n 、 Ω_{n-1} 、 Ω_{n+1} 处于线性关系,损伤指标DLI_n的值将接近于零;反之,若单元 n 为损伤单元,则单元 n 及其相邻单元对应的 Ω_n 、 Ω_{n-1} 、 Ω_{n+1}

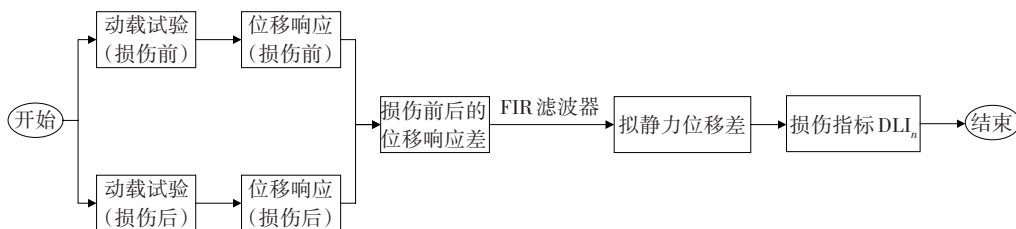


图7 基于拟静力位移的损伤定位流程图

Fig. 7 Process of damage localization method based on pseudo-static displacement

其具体步骤为:

步骤1:分别测试损伤前后的移动荷载作用下的桥梁位移,并计算损伤前后位移差;

步骤2:利用本研究提出的FIR波器,从损伤前后的位移差中提取出对应的拟静力位移差;

步骤3:基于拟静力位移差计算损伤指标DLI_n;

步骤4:采用损伤指标定位损伤。

3 数值验证

3.1 简支梁

1) 工况1:单损伤。

简支梁如图8所示,跨径 $L = 30$ m,弹性模量 $E = 3.75 \times 10^{10}$ N/m²,惯性矩 $I = 0.6624$ m⁴,密度 $\rho =$

处于非线性关系,DLI_n在损伤单元处的值远大于无损单元,故该指标可用于损伤定位。

图6为一跨径为 L 、截面抗弯刚度为 EI^u 的简支梁。在 x_d 位置处存在一块长度为 2δ 的损伤区域,损伤区域的抗弯刚度为:

$$EI^d = (1 - \alpha)EI^u \quad (0 < \alpha < 1) \quad (13)$$

式中: E 为材料弹性模量; I^u 和 I^d 分别为截面损伤前、后的惯性矩; α 为损伤程度。

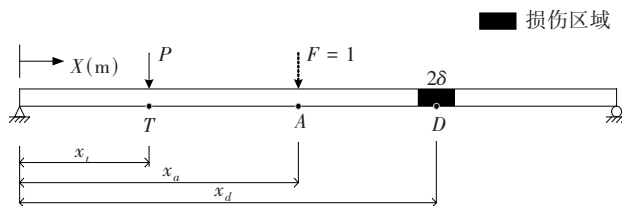


图6 局部损伤的简支梁静力加载示意

Fig. 6 Static loading of simply supported beam with local damage

由于桥梁位移中振动频率很低的拟静力位移与静力作用产生的位移效果类似,因此,本研究用提取的拟静力位移代替静力位移进行损伤定位。具体流程如图7所示。

2400 kg/m³,横截面面积 $A = 2.16$ m²。移动荷载由一个50 kN的集中力和一个5 kN的随机荷载组成。移动荷载速度分别取 $v_1 = 5$ m/s和 $v_2 = 10$ m/s,采样频率为1000 Hz。将桥梁划分为20个等长平面欧拉梁单元,假设单元8为损伤单元,损伤程度为15%。在有限元模型中,减小损伤单元的抗弯刚度模拟损伤,计算跨中位移响应。

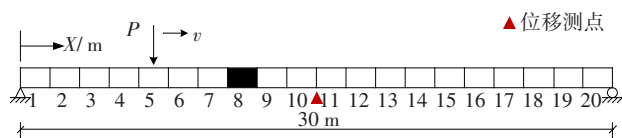


图8 单损伤简支梁有限元模型

Fig. 8 Finite element model of simply supported beam with single damage

以荷载移动速度为 $v_1 = 5 \text{ m/s}$ 时为例,分别测得简支梁损伤前后的位移,如图9所示。从图9可以看出,损伤前后的位移由于随机荷载的存在均出现了一定幅度的振动。损伤前、后的位移差值如图10所示,但从图10中难以直接获取损伤位置信息。所以利用本研究提出的FIR滤波器,从损伤前、后的位移差值中提取出拟静力位移改变量,结果如图11所示。从图11可以看出,FIR滤波器能有效剔除原位移差中的高频分量,得到的拟静力位移差值,在损伤区域出现峰值,可大致确定损伤位置。根据拟静力位移差,利用式(12)计算损伤指标 DLI_n ,结果如图12所示。从图12可以看出,荷载移动速度不同时,损伤指标均在单元8处取得明显峰值。因此,通过损伤指标能够较为清晰地定位损伤。同时,与损伤单元相邻的两个单元,由于受到损伤单元的影响,其损伤指标值高于其他单元的。

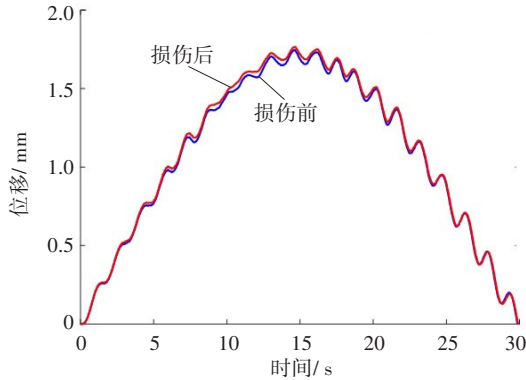


图9 单损伤简支梁损伤前后的位移响应

Fig. 9 Displacement response of simply supported beam before and after damage

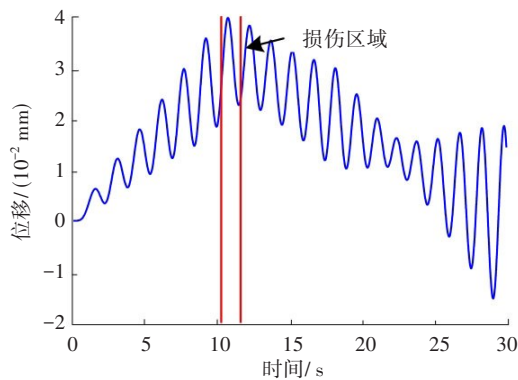
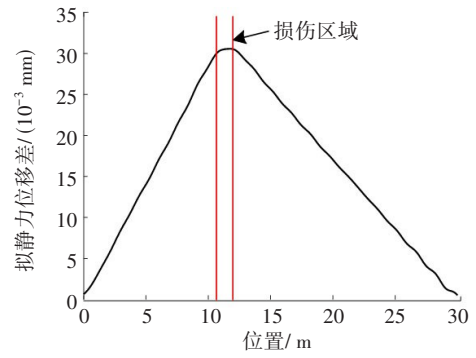
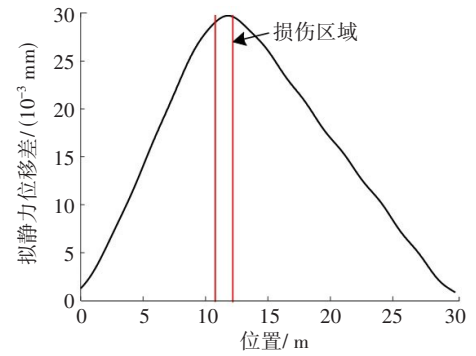


图10 单损伤简支梁损伤前后的位移响应差

Fig. 10 Displacement response change of simply supported beam before and after damage



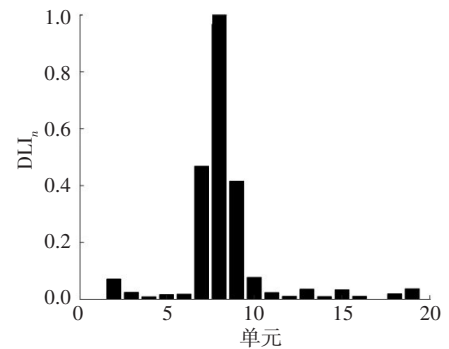
(a) $v_1 = 5 \text{ m/s}$



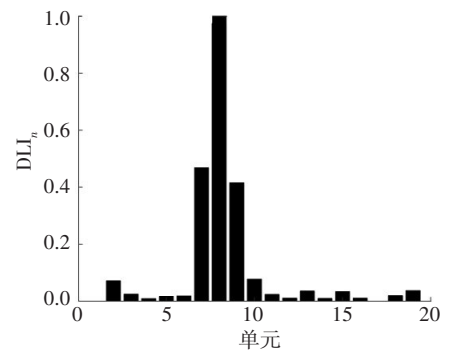
(b) $v_2 = 10 \text{ m/s}$

图11 不同荷载移动速度的拟静力位移改变量

Fig. 11 Pseudo-static displacement change for moving load with different velocity



(a) $v_1 = 5 \text{ m/s}$



(b) $v_2 = 10 \text{ m/s}$

图12 不同荷载移动速度的损伤定位指标

Fig. 12 Damage location index of moving load with different velocity

2) 工况2:双损伤。

在工况1中的简支梁中,引入第二处损伤,验证本方法在双损伤情况下的效果。假设单元8与单元13为损伤单元,相应的损伤程度分别为15%和20%,有限元模型如图13所示。荷载移动速度设为10 m/s,位移测点和采样频率同工况1,并在测试位移中加入5%水平的噪声。与工况1的计算过程相同,双损伤梁损伤前、后的拟静力位移改变量如图14所示,可据此大致确定损伤位置。

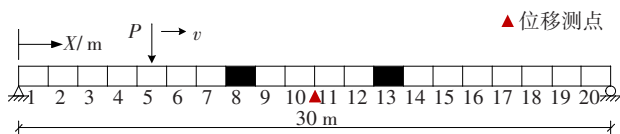


图13 双损伤简支梁有限元模型

Fig. 13 Finite element model of simply supported beam with double damages

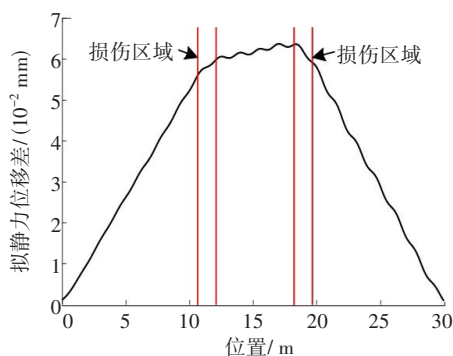


图14 双损伤简支梁损伤前后的拟静力位移改变量

Fig. 14 The pseudo-static displacement change of simply supported beam before and after double damages

基于拟静力位移在损伤前、后改变量,通过式(12)计算损伤指标 DLI_n ,如图15所示。损伤指标的峰值出现在单元8和单元13处,且由于单元13的损伤程度较大,相应的损伤指标峰值较大。因此,本研究基于拟静力位移的损伤定位法,能够在测试噪声和双损伤情况下定位损伤。

3.2 连续梁

两跨等截面连续梁如图16所示,跨径 $L = (20 + 20)$ m,横截面面积 2 m^2 ,惯性矩 $I = 0.167 \text{ m}^4$,材料密度 $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 3.75 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。移动荷载由一个50 kN的集中力和一个5 kN的随机荷载组成,荷载移动速度为10 m/s。将梁均匀划分

为40个平面欧拉梁单元,假设单元12为损伤单元,损伤程度为15%。

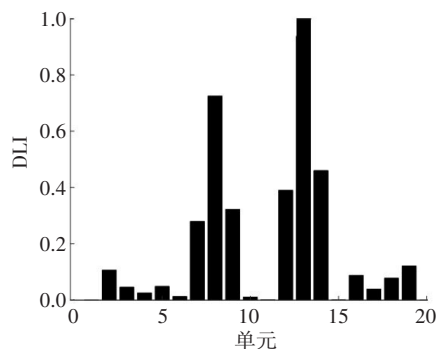


图15 双损伤简支梁的损伤定位指标

Fig. 15 Damage location index of simply supported beam with double damages

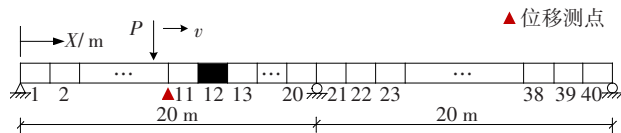


图16 连续梁有限元模型

Fig. 16 Finite element model of continuous beam

用有限元模型进行计算,获得连续梁左跨跨中损伤前、后的位移响应差,利用本研究提出的FIR滤波器提取出连续梁损伤前、后的拟静力位移差,如图17所示。拟静力位移差值曲线在损伤位置出现峰值,由此可大致定位损伤。根据拟静力位移差计算损伤指标 DLI_n ,如图18所示。从图18可以看出,损伤指标峰值出现在单元12处,且相邻单元受损伤影响,相应的损伤指标高于其他单元的,因此,基于本研究的拟静力位移方法能够有效定位连续梁损伤的位置。

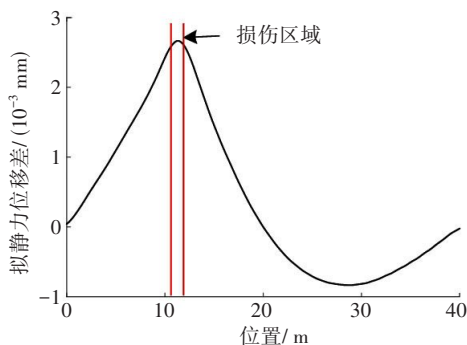


图17 连续梁损伤前后的拟静力位移差

Fig. 17 The pseudo-static displacement change of the continuous beam before and after damage

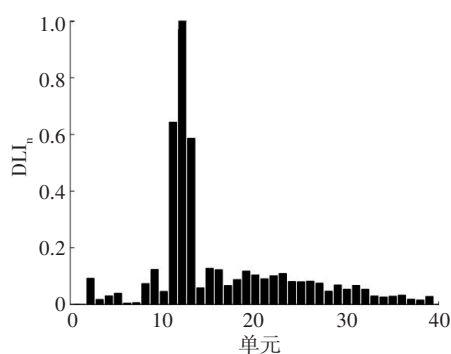


图18 连续梁的损伤定位指标

Fig. 18 Damage location index of the continuous beam

4 结论

本研究提出利用可从在移动荷载作用下的桥梁位移响应提取拟静力位移的FIR滤波器,对桥梁定位损伤。通过理论分析,建立拟静力位移的精度函数,将拟静力位移表示为总位移的线性组合,形成一个FIR滤波器函数,利用FIR滤波器系数近似拟静力位移精度函数,得到FIR滤波器的系数,确定了合适的FIR滤波器目标精度大小和时间窗长度,提高了拟静力位移提取精度。然后,基于提取的拟静力位移变化,定义了桥梁损伤定位指标,给出了损伤定位流程。最后,通过简支梁和连续梁的数值算例,考虑不同损伤数量、不同荷载移动速度及位移测试噪声,并分别以简支梁和连续梁为例,验证本方法的有效性和适用性。研究结果表明:本方法能够有效地提取移动荷载作用下桥梁位移响应中的拟静力位移;计算出的损伤指标能够准确地定位桥梁损伤,可为桥梁损伤定位提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.04.001.
- 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.04.001.
- [2] 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):1784-1791,1876. DOI: 10.11776/cjam.37.04.D040.

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, 1876. DOI: 10.11776/cjam.37.04.D040.

- [3] 肖勇刚,雷壹.索损伤对非对称独塔斜拉桥动力特性的影响[J].交通科学与工程,2022,38(2):40-44,101. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.013.
- XIAO Yonggang, LEI Yi. Influence of cable damage on dynamic characteristic of asymmetric single tower cable stayed bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2): 40-44, 101. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.013.
- [4] HE W Y, ZHU S Y. Moving load-induced response of damaged beam and its application in damage localization [J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(16): 3601-3617. DOI: 10.1177/1077546314564587.
- [5] 张锦程,董军,李国华,等.基于挠度差值影响线的桥梁结构模型损伤识别研究[J].建筑结构,2021,51(S2):1451-1455.
- ZHANG Jincheng, DONG Jun, LI Guohua, et al. Study on damage identification of continuous girder bridge structure model based on influence line [J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1451-1455.
- [6] ZHENG X, YANG D H, YI T H, et al. Development of bridge influence line identification methods based on direct measurement data: a comprehensive review and comparison [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109539. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109539.
- [7] LI W Z, HUANG X M, LI Y. Rapid assessment method of girder bridge carrying capacity based on traffic running test [J]. Key Engineering Materials, 2013, 574: 11-19. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.574.11.
- [8] OBRIEN E J, MALEKJAFARIAN A, GONZÁLEZ A. Application of empirical mode decomposition to drive-by bridge damage detection [J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2017, 61: 151-163. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2016.09.009.
- [9] CHEN Z W, YANG W B, LI J, et al. Bridge influence line identification based on adaptive B-spline basis

- dictionary and sparse regularization [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26 (6) : 2355. DOI: 10.1002/stc.2355.
- [10] 林肯. 基于动力响应的位移影响线识别及桥梁损伤识别研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021. DOI: 10.27206/d.cnki.gsgsu.2021.000805.
- LIN Ken. Displacement influence line identification and bridge damage identification based on dynamic response [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [11] 尚稳齐, 吴德义. 基于动力响应桥梁位移影响线识别方法分析[J]. 南阳理工学院学报, 2022, 14(4): 93-98. DOI: 10.16827/j.cnki.41-1404/z.2022.04.014.
- SHANG Wenqi, WU Deyi. Analysis of bridge displacement influence line identification method based on dynamic response [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2022, 14 (4) : 93-98. DOI: 10.16827/j.cnki.41-1404/z.2022.04.014.
- [12] ZHU J S, ZHANG C, LI X T. Structural damage detection of the bridge under moving loads with the quasi-static displacement influence line from one sensor [J]. Measurement, 2023, 211: 112599. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112599.
- [13] HONG Y H, KIM H K, LEE H S. Reconstruction of dynamic displacement and velocity from measured accelerations using the variational statement of an inverse problem [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329 (23): 4980-5003. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.05.016.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)

(上接第11页)

- 10.3390/s21134478.
- [57] CHI S, CALDAS C H. Image-based safety assessment: automated spatial safety risk identification of earthmoving and surface mining activities [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138 (3) : 341-351. DOI: 10.1061/(asce) co. 1943-7862.0000438.
- [58] PARK M W, KOCH C, BRILAKIS I. Three-dimensional tracking of construction resources using an on-site camera system [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012, 26 (4) : 541-549. DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000168.
- [59] HAN S, LEE S. A vision-based motion capture and recognition framework for behavior-based safety management [J]. Automation in Construction, 2013, 35: 131-141. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.05.001.
- [60] KHOSROWPOUR A, NIEBLES J C, GOLPARVAR-FARD M. Vision-based workplace assessment using depth images for activity analysis of interior construction operations [J]. Automation in Construction, 2014, 48: 74-87. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.003.
- [61] KURIEN M, KIM M K, KOPSIDA M, et al. Real-time simulation of construction workers using combined human body and hand tracking for robotic construction worker system [J]. Automation in Construction, 2018, 86: 125-137. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.11.005.
- [62] LEI L, ZHOU Y, LUO H B, et al. A CNN-based 3D patch registration approach for integrating sequential models in support of progress monitoring [J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 41: 100923. DOI: 10.1016/j.aei.2019.100923.
- [63] LI S L, GUO Y P, XU Y, et al. Real-time geometry identification of moving ships by computer vision techniques in bridge area [J]. Smart Structures and Systems, 2019, 23: 359.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:刘至真)