

基于双轴车-桥接触力灵敏度的桥梁损伤识别

柳成荫, 曾 清, 龚 毅, 乔志浩

(哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳市土木工程智能结构系统重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 考虑车辆行驶过程中车身竖向和俯仰运动耦合的问题, 基于双轴四自由度车辆动力学模型, 从车身响应中获取车辆过桥时的接触力, 并利用接触力灵敏度和正则化方法识别桥梁结构损伤。数值模拟结果表明, 在考虑路面不平度的基础上, 与采用车身或车轴响应灵敏度的方法相比, 基于接触力灵敏度方法的简支梁桥损伤识别精度更佳。与基于单轴车接触力灵敏度的损伤识别方法相比, 本文所提出的方法在保证识别精度的同时能够明显减少迭代的次数。参数分析结果表明, 结构损伤识别结果受车速、噪声和建模误差影响; 该损伤识别方法也适用于连续梁桥。此外, 存在合适的车桥质量比和车桥一阶频率比使得基于接触力灵敏度的结构损伤识别效果达到最优。

关键词: 桥梁损伤识别; 车桥耦合作用; 车桥接触力; 响应灵敏度; 双轴四自由度车辆

中图分类号: U441⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)06-1346-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.06.006

引 言

传统的桥梁结构健康监测主要是通过通过在桥梁结构上直接布置传感器, 获取并分析其结构响应, 从而实现桥梁结构的模态和损伤识别。然而桥梁结构健康系统造价和后期维护成本较为昂贵, 在中国交通系统中广泛分布的中小型跨径桥梁上难以大量应用^[1]。

为提高桥梁监测的高效性、经济性和移动性, Yang 等^[2]最先提出基于过桥车辆响应的桥梁间接监测方法, 以移动车辆荷载作为激励, 通过对车桥耦合过程中车辆响应的分析, 间接提取桥梁的基本频率, 由此说明过桥车辆的动力响应中包含桥梁模态参数等相关信息。相比于传统的直接监测, 间接监测具备移动性强、无需专门的激励设备等优点。近年来, 国内外的学者针对此方法展开了大量研究, 成功识别到桥梁结构的固有频率^[3]、模态振型^[4]、阻尼^[5]等重要模态参数, 并由此评估桥梁结构的健康状况^[6]。

近年来, 基于过桥车辆响应的桥梁结构损伤识别研究受到了大量关注^[7]。由于振型对于损伤较为敏感, 因此大量研究利用其进行桥梁结构损伤识别。Zhang 等^[8]提出利用自带敲击装置的过桥小车加速度响应估计桥梁模态振型平方, 并通过数值模拟和

室内实验验证了使用模态平方识别桥梁损伤的可行性。O'Brien 等^[9]提出在过桥小车上安装激光测振仪和加速度传感器, 利用小车响应获取较为准确的桥梁振型, 再由模态振型平方识别到损伤的存在和位置。He 等^[10]通过移动小车的过桥响应获取桥梁的振型曲率, 并由此识别损伤的位置。除了振型之外, 车桥接触点位置的响应也可用于桥梁的损伤识别。Zhang 等^[11]利用车辆接触点响应的瞬时幅值平方进行桥梁损伤识别, 数值模拟结果表明该方法能够识别微小损伤的存在。

灵敏度分析的方法也常用于识别桥梁损伤。Bu 等^[12]提出利用过桥车辆响应灵敏度识别桥梁损伤, 通过正则化和最小二乘法由两自由度小车的车身和车轴加速度反求结构损伤参数, 利用数值模拟证明了该方法可以准确识别到桥梁结构损伤的位置和程度。Zhu 等^[13]提出利用车桥接触力灵敏度识别桥梁结构损伤, 建立了两自由度小车车身振动响应与车桥接触力之间的关系, 提出接触力对损伤的灵敏度方程, 通过同伦延拓方法由接触力反求桥梁损伤参数, 数值模拟结果证明与文献[12]相比, 该方法可以提高损伤识别的精度。

可以发现上述基于灵敏度的分析方法基本采用单轴车辆动力学模型, 无法反映实际车辆在桥梁上行驶过程中车身竖向和俯仰运动耦合关系。此外, 单车在实际应用时需要建立拖车系统, 适用性有

收稿日期: 2021-05-21; **修订日期:** 2021-08-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600302, 2019YFC1511101); 国家自然科学基金面上项目(51978215); 深圳市基础研究重点项目(JCYJ20200109112816582); 深圳市重点实验室筹建启动项目(ZDSYS20200810113601005)。

其中,符号 $\langle \rangle$ 表示行向量。

$$m_{y1} = m_s \frac{a_2}{a_1 + a_2}, m_{y2} = m_s \frac{a_1}{a_1 + a_2} \quad (19)$$

$$J_{\theta 1} = -\frac{J}{a_1 + a_2}, J_{\theta 2} = \frac{J}{a_1 + a_2} \quad (20)$$

$$m_1 = m_{t1} + m_s \frac{a_2}{a_1 + a_2} \quad (21)$$

$$m_2 = m_{t2} + m_s \frac{a_1}{a_1 + a_2} \quad (22)$$

用Newmark数值分析方法求解运动方程(14)可以得到车辆各部分的加速度响应。车桥接触力是联系车辆和桥梁系统的纽带,体现了车桥系统的耦合性^[13]。根据车辆动力学方程,车桥接触力表达式为:

$$F_{b1} = m_1 g + m_{t1} \ddot{y}_{t1} + m_{y1} \ddot{y}_s + J_{\theta 1} \ddot{\theta} \quad (23)$$

$$F_{b2} = m_2 g + m_{t2} \ddot{y}_{t2} + m_{y2} \ddot{y}_s + J_{\theta 2} \ddot{\theta} \quad (24)$$

式(23)和(24)表明可以通过车辆的车身竖向加速度、俯仰角及车轴的竖向加速度间接获得车桥接触力。

2 基于接触力灵敏度的损伤识别方法

2.1 接触力灵敏度计算

假定主梁在损伤后仍保持线性弹性和各向同性,本文采用单元抗弯刚度的降低来模拟桥梁结构的损伤。定义损伤参数为 α ,损伤单元的抗弯刚度可以表示为:

$$(EI)_i = (1 - \alpha_i)(EI)_i^0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

式中 $(EI)_i$ 为第 i 号梁单元损伤后的抗弯刚度; $(EI)_i^0$ 为未发生损伤原始状态的抗弯刚度; α_i 为第 i 号梁单元的抗弯刚度折减系数或损伤参数,其取值范围为 $0 \leq \alpha_i \leq 1$; n 为总的梁单元数。

利用车桥耦合方程(14)对损伤参数求偏导得到车身、车轴加速度对损伤参数的灵敏度方程:

$$M \frac{\partial \ddot{y}(t)}{\partial \alpha_i} + C \frac{\partial \dot{y}(t)}{\partial \alpha_i} + K \frac{\partial y(t)}{\partial \alpha_i} = -\frac{\partial K}{\partial \alpha_i} y(t) - \beta_b \frac{\partial K}{\partial \alpha_i} \dot{y}(t) \quad (26)$$

式(23)对损伤参数求一阶偏导得到接触力对损伤参数的灵敏度:

$$\frac{\partial F_{b1}(\alpha, t)}{\partial \alpha_i} = m_{t1} \frac{\partial \ddot{y}_{t1}}{\partial \alpha_i} + m_{y1} \frac{\partial \ddot{y}_s}{\partial \alpha_i} + J_{\theta 1} \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial \alpha_i} \quad (27)$$

2.2 桥梁损伤识别

基于响应灵敏度的桥梁损伤识别方法的主要原理为:以车桥耦合模型的计算响应与待测结构实际响应的差值作为输出量,以车桥耦合模型的刚度参数作为输入量,依据响应的差值,逆向调整车桥耦合

模型的刚度信息,寻找 $\langle \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \rangle$ 使得响应的差值接近零,此时车桥耦合模型的刚度信息体现的就是实际结构的损伤。计算响应与实际响应的残差 δR ^[15]:

$$\delta R = R_{\text{measure}} - QR_{\text{calculate}} \quad (28)$$

式中 Q 为使得计算响应与实测响应自由度匹配的选择矩阵; $R_{\text{calculate}}$ 为车桥耦合模型计算的响应; R_{measure} 为结构实测的响应。

利用式(28)可以获得两种响应的差值,响应具体可以是车身或车轴加速度,本文中更关注的是车辆驶过桥梁时车桥之间的接触力。采用响应灵敏度方法,不考虑二阶和高阶效应,有限元模型的计算接触力在时域上对损伤参数的一阶灵敏度矩阵形式为:

$$S_{EI} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{cal}(1)}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_{cal}(1)}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial P_{cal}(1)}{\partial \alpha_n} \\ \frac{\partial P_{cal}(2)}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_{cal}(2)}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial P_{cal}(2)}{\partial \alpha_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_{cal}(nt)}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_{cal}(nt)}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial P_{cal}(nt)}{\partial \alpha_n} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中 P_{cal} 为基于车桥耦合模型计算得到的桥梁刚度损伤参数一阶摄动量; nt 为时间步数,时间步数应大于所求未知量的数目,从而保证方程组是超定的。

损伤参数的一阶摄动量为:

$$\delta P_{EI} = \langle \delta \alpha_1, \delta \alpha_2, \dots, \delta \alpha_n \rangle^T \quad (30)$$

根据惩罚函数理论^[16],可以得到以下关系

$$\delta R = S_{EI} \delta P_{EI} \quad (31)$$

式(31)求逆问题经常存在方程病态或者不适定问题,在求解过程中无法得到唯一的真实解。正则化方法是求解不适定反问题的有力工具,利用Tikhonov正则化方法^[17]求得桥梁刚度损伤参数的一阶摄动量为:

$$\delta P_{EI} = (S_{EI}^T S_{EI} + \lambda I)^{-1} S_{EI}^T \delta R \quad (32)$$

式中 λ 为正则化参数, λ 值采用L曲线法确定^[18];采用SVD(singular-value decomposition)方法解决其中的伪逆计算^[19]。

进一步地可得到桥梁有限元模型迭代一次后,更新的桥梁刚度信息为:

$$P_{EI} = P_{EI0} + \delta P_{EI} \quad (33)$$

将更新后的桥梁刚度损伤参数回代至车桥耦合有限元模型中继续迭代处理,直至结果符合收敛标准,即有限元模型得到的接触力与待测结构实际的接触力残差接近于零,或者桥梁刚度参数不再变化,此时有限元模型的刚度信息体现的就是实际结构的损伤。

利用车桥接触力灵敏度识别桥梁损伤算法的流程如图2所示。在实际的应用中,车桥接触力也可

以通过车辆响应计算得到,具有实际应用的可能性。这里的 Tol 是很小的收敛临界值,取值量级可选 1.0×10^{-6} ,根据实际需要可设定合适的收敛标准。同理,后续研究车身、车轴响应灵敏度识别桥梁损伤效果时,只需将流程中的响应及灵敏度替换即可。

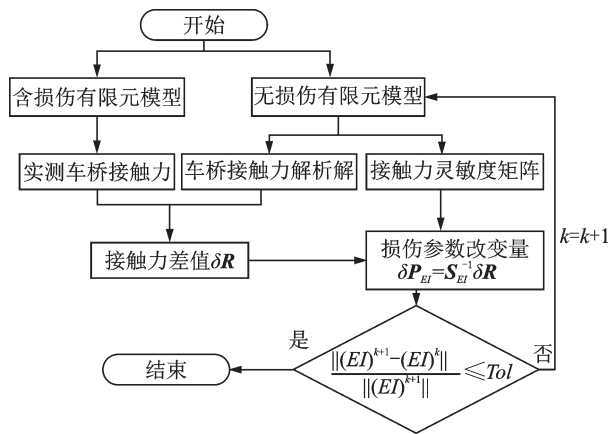


图2 基于车桥接触力灵敏度的损伤识别流程
Fig. 2 Flowchart of damage detection based on the sensitivity of vehicle-bridge contact force

3 模型验证和对比

3.1 车桥耦合模型与损伤工况

为验证基于车桥接触力灵敏度的桥梁损伤识别方法,针对四自由度小车,本文将数值模拟结果与Zhu等^[13]采用两自由度小车进行简支梁桥的损伤识别的结果进行对比。双轴四自由度车辆模型物理参数依据文献[20]进行取值,具体参数如表1所示。简支梁桥模型参数及损伤工况均与文献[13]一致。

表1 四自由度车辆物理参数($i=1,2$)
Tab. 1 Four degree-of-freedom vehicle physical parameters ($i=1,2$)

车辆模型参数	取值
簧上刚度系数 $k_{si}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.5×10^6
簧上阻尼系数 $c_{si}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	1.7×10^5
簧下刚度系数 $k_{ti}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2×10^6
前轴质量 m_{a1}/kg	524
后轴质量 m_{a2}/kg	297
车体质量 m_s/kg	6×10^3
车体转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	5×10^4
前轴距重心距离 a_1/m	1
后轴距重心距离 a_2/m	2

简支梁桥主要参数如下:计算跨径为 30 m,抗弯刚度为 $2.5 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$,单位长度质量为 $6 \times 10^3 \text{ kg/m}$ 。如图 3 所示,简支梁桥模型平均分为 10 个欧

拉梁单元,数据采样频率为 200 Hz。车辆过桥速度为 20 m/s。路面不平度采用 ISO 8608:1995 规范^[21]中的 C 级。

桥梁抗弯刚度损伤设置在第 1, 2, 4, 6 单元,损伤程度分别为 5%, 10%, 10%, 15%。无损伤状态下简支梁桥前 3 阶的理论频率分别为:3.6, 14.3 和 32.1 Hz。桥梁模型采用瑞利阻尼,阻尼系数 α 和 β 取值分别为 0.343 和 0.001。

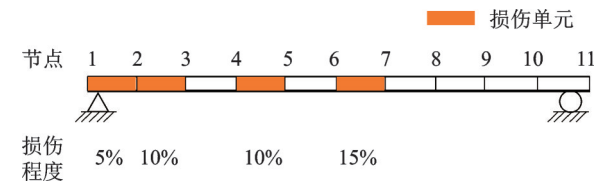


图3 简支梁桥模型节点编号
Fig. 3 Nodes of simply supported beam bridge model

3.2 简支梁桥损伤识别结果对比

利用上节所述车桥耦合数值模型,可通过采集车辆过桥时车身竖向加速度、俯仰角及车轴的竖向加速度响应,由公式(23)和(24)计算车桥接触力。

本节采用前轴车桥接触力进行损伤识别。识别精度用桥梁所有单元损伤参数的绝对误差 AE 表示:

$$AE = \sum_{i=1}^{n=10} \| \alpha_i^{\text{real}} - \alpha_i^{\text{calculate}} \| \tag{34}$$

式中 α_i^{real} 和 $\alpha_i^{\text{calculate}}$ 分别为第 i 个梁单元的真实损伤参数和识别损伤参数。本文收敛标准 Tol 均取 1.0×10^{-6} 。

由表2可知,在多损伤工况下,四自由度小车的三种响应灵敏度都可以有效识别桥梁刚度损伤的位置及程度。其中,基于接触力灵敏度的损伤识别结果绝对误差仅为 0.008%,在识别精度和迭代次数上均优于车身和车轴响应灵敏度,这与文献[13]的结论一致。因此,在考虑路面不平度的工况下,车桥接触力灵敏度能更有效地识别损伤位置及程度。与车辆响应相比,车桥接触力能够包含更多桥梁振动信息。

本文所提出的损伤识别方法对于带损伤的 1, 2 单元的损伤参数识别精确度优于文献[13],没有识别误差。然而由于支座附近无损伤的第 10 单元被误判为出现损伤,使得简支梁的整体损伤参数识别误差高于文献[13]的结果。此外,与文献[13]相比,利用正则化的方法从接触力灵敏度识别结构损伤的方法可以使得迭代次数明显减少(减少 78.18%),意味着单元的损伤参数可以较快收敛到真实值。需要指出,同伦延拓方法的迭代次数与同伦参数的取值有关,同伦参数的取值越小,则达到收敛标准的次数也越多,使得最终的迭代次数增加。与文献[12]相比,采用四自由度车辆的接触力灵敏度识别结构损

表 2 基于不同响应灵敏度的损伤识别结果(单位: %)

Tab. 2 Damage detection results based on different response sensitivity (Unit: %)

单元	真实损伤	本文方法:正则化			文献[13]:同伦延拓	文献[12]:正则化
		车身响应灵敏度	车轴响应灵敏度	接触力灵敏度	接触力灵敏度	车轴响应灵敏度
1	5	4.982	5.014	5.000	5.003	4.95
2	10	10.003	9.993	10.000	9.999	10.01
3	0	-0.002	0.001	0.000	0.000	0
4	10	10.052	9.999	10.000	10.000	10
5	0	0.000	0.001	0.000	0.000	0
6	15	15.002	15.001	15.000	15.000	15
7	0	0.001	-0.005	0.000	0.000	0.01
8	0	0.005	0.005	0.000	0.000	-0.01
9	0	0.005	0.039	0.000	0.001	0.02
10	0	-0.376	0.209	0.008	0.000	-0.04
AE	-	0.465	0.282	0.008	0.0033	0.0693
迭代次数	-	18	15	12	55	37

注:文献[12-13]均采用两自由度模型小车,收敛标准 Tol 分别为 1.0×10^{-6} 和 1.0×10^{-4} 。

伤可以提高结构损伤识别的精确度(提高 88.46%)。通过以上对比可以发现,本文针对四自由度车辆提出的基于车桥接触力灵敏度的结构损伤识别方法可以在保证识别精度的同时显著减少迭代的次数,从而提高损伤识别的效率。

4 参数分析

本节分析各项因素对于利用车桥接触力灵敏度识别桥梁损伤的影响,包括车速、车辆质量、频率、数据噪声、建模误差以及桥型。除非特定说明,数值模拟中参数的取值与前文保持一致。

4.1 车辆速度对识别结果的影响

在粗糙路面工况下,车速会影响车桥耦合振动、车桥接触力的大小以及数据的采样点数。车速过快会导致数据采样点过少,进而增大损伤识别误差。本小节主要讨论 C 级路面不平度工况下,不同车速对利用接触力灵敏度识别桥梁损伤效果的影响。六种车辆过桥时的常规行驶速度分别为 18, 36, 54, 72, 90, 108 km/h。六种车速工况下基于接触力灵敏度的损伤识别结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当车辆行驶速度接近 54 km/h 时,接触力灵敏度识别桥梁损伤的效果最好,损伤识别的绝对误差约为 0.005%。图 5 为不同车速工况下接触力对 4 号梁单元损伤的灵敏度,随着车速增加,接触力的损伤灵敏度不断增大,这有利于提高损伤识别效果。然而,车辆速度同时也会影响数据的采样点数,较高车速下车辆过桥时间偏短,采样点过少,从而导致损伤识别误差增大。综上,为获得较好

的桥梁损伤识别效果,车辆过桥速度宜控制在 54 km/h 附近。

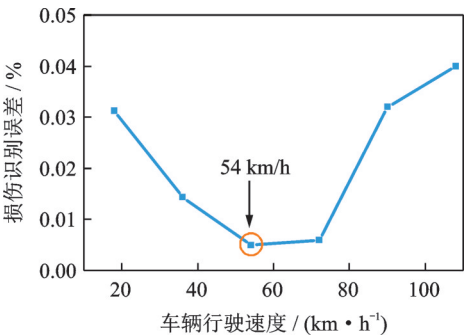


图 4 不同车速下损伤识别结果

Fig. 4 Damage detection results under various speeds

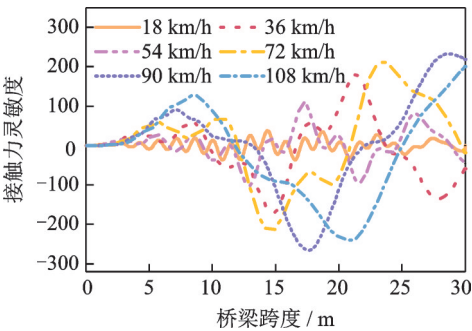


图 5 不同车速下接触力灵敏度

Fig. 5 Sensitivity of contact force under various speeds

4.2 车辆质量和频率对识别结果的影响

过桥车辆的质量和频率会影响接触力识别桥梁损伤的效果,合适的车辆质量能够较好地激发车桥耦合振动。因此,本节主要研究车桥质量比和车桥一阶频率比变化对损伤识别的影响。

在 C 级路面不平度工况下,选取车辆行驶速度

为 54 km/h,车辆质量和频率独立变化。改变汽车质量时,同比例改变车身和车轴的质量;改变汽车频率时,悬挂系统的刚度参数独立变化。车辆质量和频率变化时,桥梁损伤识别结果如图 6 和 7 所示。

图 6 表明,车桥质量比为 0.03 时,损伤识别的效果最佳,绝对误差为 0.003%,而车辆质量过小或过大都会降低损伤识别的效果。图 7 表明,利用车桥接触力灵敏度识别桥梁损伤存在最优的车桥频率比(约为 2.5),该频率比下桥梁损伤识别效果最好,所有单元损伤识别的绝对误差为 0.002%,而车辆悬挂系统过柔或过刚都会影响到车身的振动响应进而影响车桥接触力。因此,本文所提出的桥梁损伤识别方法在实际应用时,为获取较好的损伤识别效果,车辆的选择应考虑车桥质量比和一阶频率比的影响。

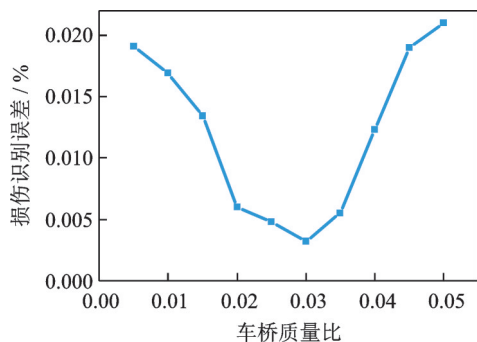


图 6 不同车桥质量比下损伤识别结果

Fig. 6 Damage detection results under different vehicle-bridge mass ratio

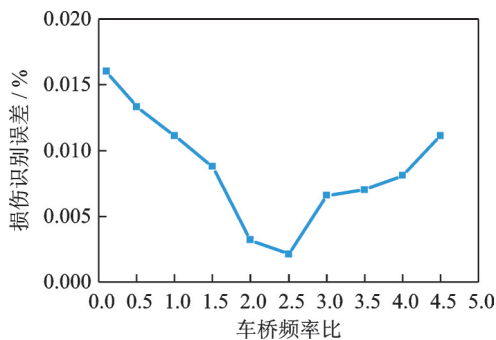


图 7 不同车桥频率比下损伤识别结果

Fig. 7 Damage detection results under different vehicle-bridge frequency ratios

4.3 数据噪声对识别结果的影响

本文所提出的损伤识别方法需要利用待测结构实际的接触力数据,进而根据有限元模型计算响应和实际响应间的残差来调整有限元模型的刚度信息。因此,数据采集的精度对于损伤识别效果非常重要。然而由于车辆振动的复杂性及传感器精度等原因,采集的车身响应数据往往伴有噪声,本小节通过在接触力中加入不同程度的白噪声模拟被“污染”

的测量数据,计算形式为:

$$P_m = P_c + E_p N_{oise} \sigma(P_c) \quad (35)$$

式中 P_m 为模拟实测响应; P_c 为计算响应; E_p 为用百分数表示的噪声水平; N_{oise} 为零均值、单位标准差符合标准正态分布的随机向量; $\sigma(P_c)$ 为计算响应的标准差。

考虑 C 级路面不平度工况下,实际接触力数据包含 2%, 5%, 10% 三种不同噪声水平干扰。

接触力数据中的噪声对损伤识别效果影响明显,由图 8 可见,当实测数据混入 2% 噪声干扰时,整体识别误差(即 AE)为 0.7%。随着噪声水平增加,桥梁各单元损伤识别的整体误差明显增加,当实测数据混入 10% 噪声干扰时,损伤识别整体误差达到 2.1%。此外,在不同程度的实测数据噪声影响下,损伤识别的误差主要集中在支座附近的 1 号和 10 号单元,其原因与车辆在进出桥时产生的桥头跳车现象有关。车辆在刚行驶进或驶出桥梁时的振动响应会明显增大,此时由车身振动响应间接获取的车桥接触力会出现明显波动且识别误差较大,如图 9 所示,这会降低损伤识别的效果。

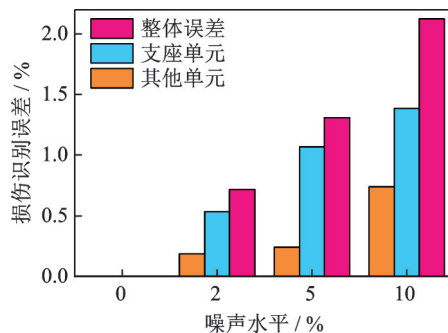


图 8 不同噪声水平下损伤识别误差分布

Fig. 8 Damage detection errors under various noise levels

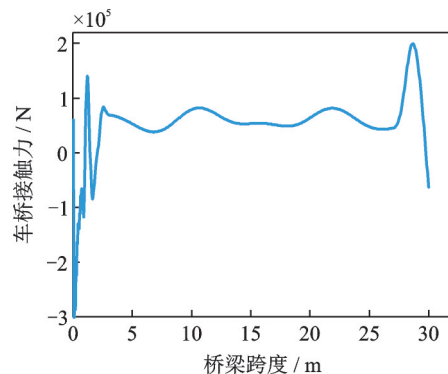


图 9 车桥接触力变化图

Fig. 9 Variation of vehicle-bridge contact force

4.4 桥梁刚度误差对损伤识别结果的影响

本文所提出的损伤识别方法需要依据结构原始资料建立一个有限元基准模型,由于材料特性、建模尺寸、参数选取等各种因素的影响,有限元基准模型

难免会产生误差,从而影响损伤识别效果。本节重点研究桥梁基准有限元模型刚度参数误差对于接触力响应识别损伤效果的影响。

根据待测结构的原始资料建立基准有限元模型时,桥梁模型刚度误差分别考虑 3%, 5%, 10%, 15%, 20% 整体刚度折减。用刚度折减后的有限元基准模型作为初始条件进行模型迭代修正和损伤识别,损伤识别结果如图 10 所示。

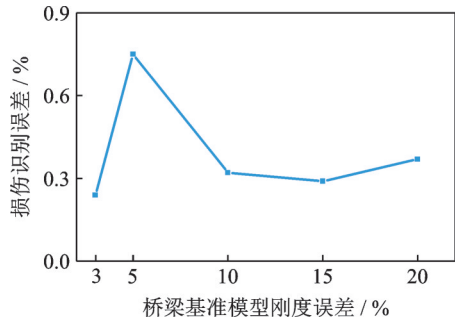


图 10 不同桥梁模型误差下损伤识别结果

Fig. 10 Damage detection results under different bridge model errors

数值模拟结果表明,当桥梁刚度误差分别为 3%, 10%, 15%, 20% 时,模型的整体损伤识别误差均维持在 0.3% 左右,仍可以通过迭代和调整有限元模型获得接近桥梁真实状态的刚度信息,说明本文提出的基于接触力灵敏度方法的损伤识别算法在模型误差方面具有较强鲁棒性。值得注意的是,当基准桥梁模型的刚度误差为 5% 时,整体识别误差为 0.75%,明显大于其他工况下的损伤识别误差。这是由于基于车桥接触力灵敏度的损伤识别过程是通过迭代调整有限元模型,获取实际响应与计算响应接近时的最优解的过程。当基准有限元模型的迭代初值设置不合理时,尤其是桥梁模型各部分真实损伤的平均值与有限元基准模型整体刚度折减程度接近时,有可能对损伤识别的结果造成一定程度的影响。

4.5 不同桥型对损伤识别结果的影响

本节研究本文提出的基于接触力灵敏度的损伤识别方法对于两跨和三跨连续梁的适用性。

两跨连续梁模型取自文献[13],主要参数如下:每跨长度为 15 m,弹性模量为 34 GPa,材料密度为 2800 kg/m³,横截面尺寸为 4 m×0.25 m,每跨梁均等分为 10 个欧拉梁单元。双跨连续梁桥损伤分别设置在第 1, 6, 11, 20 单元,损伤程度分别为 5%, 10%, 15%, 10%。

三跨连续梁模型如图 11 所示,每跨长度均为 20 m,弹性模量为 30 GPa,材料密度为 2400 kg/m³,横截面尺寸为 1.3 m×0.5 m,每跨梁均等分为 10 个

欧拉梁单元。三跨连续梁桥损伤分别设置在第 1, 11, 20, 30 单元,损伤程度分别为 10%, 5%, 5%, 10%。

根据前文参数分析的结果,四自由度小车车速设为 54 km/h,车桥质量比为 0.03,车桥频率比为 2.5。

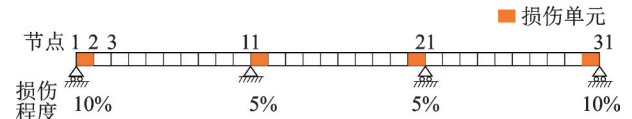
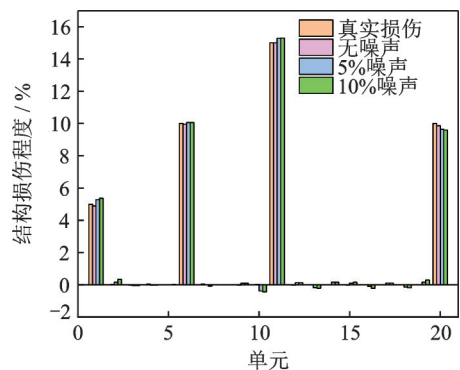


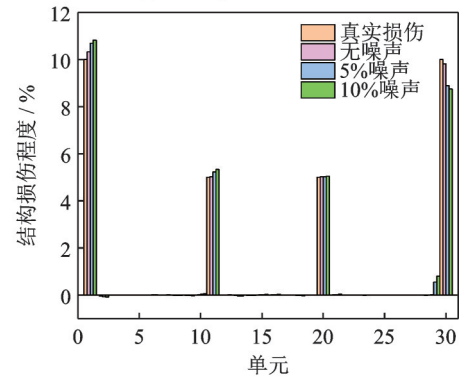
图 11 三跨连续梁桥模型节点编号

Fig. 11 Nodes of three span continuous beam bridge model

图 12(a)和(b)中分别给出了无噪声、含 5% 噪声、含 10% 噪声三种工况下,利用接触力灵敏度识别两跨和三跨连续梁结构损伤的结果,对于有损伤单元的损伤参数识别结果均精度较高。如表 3 所示,与简支梁桥的损伤识别结果类似,连续梁损伤识别的误差与迭代次数均随着噪声水平的上升而增加。



(a) 两跨连续梁
(a) Two-span continuous beam



(b) 三跨连续梁
(b) Three-span continuous beam

图 12 连续梁损伤识别结果

Fig. 12 Damage detection results of continuous beams

表 3 连续梁损伤识别绝对误差与迭代次数

Tab. 3 Damage detection absolute error and iteration number of continuous beams

连续梁	AE/%(迭代次数)		
	无噪声	5% 噪声	10% 噪声
两跨连续梁	0.59(12)	2.78(16)	3.68(17)
三跨连续梁	0.83(14)	2.98(17)	3.76(19)

5 结 论

本文考虑车辆行驶过程中车身竖向和俯仰运动耦合,建立双轴四自由度车辆模型,提出一种基于车桥接触力灵敏度的桥梁损伤识别方法,并探讨路面不平度、车速、车辆质量、噪声、建模误差以及桥型对识别方法的影响,数值模拟结果表明:

(1) 在桥梁多损伤工况下,考虑路面不平度影响,接触力灵敏度可以精确识别桥梁损伤的位置及程度,并且识别效果优于车身和车轴响应灵敏度。

(2) 利用正则化的方法,从四自由度车辆接触力获取桥梁结构损伤参数,可以在保证一定识别精度的同时明显降低迭代的次数,提高识别的效率。

(3) 在过桥车辆选择方面,对于本文的算例而言,存在合适的车桥质量比和一阶频率比使得效果达到最优。

(4) 本文提出的基于接触力灵敏度方法的损伤识别算法在桥梁模型刚度误差方面具有较强鲁棒性。

(5) 本文提出的损伤识别方法不仅适用于简支梁桥,也适用于两跨和三跨连续梁,均能够较为准确地识别损伤的位置和程度。

(6) 数据噪声对损伤识别结果影响较大。此外,由于桥头跳车现象的影响,桥梁支座附近单元的损伤识别存在较大误差,需进一步研究这一现象。

本文仅通过数值模拟对于所提出的损伤识别方法进行验证,未来还将通过室内实验验证该方法的可行性和准确性,包括研究实测车桥接触力的精度等问题。

参考文献:

- [1] 黄杰忠. 基于车桥耦合振动信号的桥梁结构损伤识别研究[D]. 南昌:南昌大学,2016.
HUANG Jiezhong. Research on damage identification of bridge structure based on vehicle-bridge coupling vibration signal [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [2] 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.
- [3] TAN C, UDDIN N. Hilbert transform based approach to improve extraction of "drive-by" bridge frequency [J]. Smart Structures and Systems, 2020, 25(3): 265-277.
- [4] MALEKJAFARIAN A, OBERIEN E J. On the use of a passing vehicle for the estimation of bridge mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 397: 77-91.
- [5] KEENAHAN J, OBERIEN E J, MCGETRICK P J, et al. The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(2): 143-157.
- [6] MIYAMOTO A, KIVILUOMA R, YABE A. Frontier of continuous structural health monitoring system for short & medium span bridges and condition assessment[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(3): 569-604.
- [7] YANG Y B, YANG J P. State-of-the-art review on modal identification and damage detection of bridges by moving test vehicles[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(2): 1850025.
- [8] ZHANG Y, WANG L Q, XIANG Z H. Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(2): 291-307.
- [9] O'BRIEN E J, KEENAHAN J. Drive-by damage detection in bridges using the apparent profile[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(5): 813-825.
- [10] HE W Y, HE J, REN W X. Damage localization of beam structures using mode shape extracted from moving vehicle response[J]. Measurement, 2018, 121: 276-285.
- [11] ZHANG B, QIAN Y, WU Y T, et al. An effective means for damage detection of bridges using the contact-point response of a moving test vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 158-172.
- [12] BU J Q, LAW S S, ZHU X Q. Innovative bridge condition assessment from dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(12): 1372-1379.
- [13] ZHU X Q, Law S S, Huang L, et al. Damage identification of supporting structures with a moving sensory system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 415: 111-127.
- [14] PARASKEVA T S, DIMITRAKOPOULOS E G, ZENG Q. Dynamic vehicle-bridge interaction under simultaneous vertical earthquake excitation [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 15(1): 71-95.
- [15] 张春丽, 吕中荣. 基于响应灵敏度分析的桥梁结构损伤和车辆参数的识别[J]. 振动与冲击, 2016, 35(9): 168-171.
ZHANG Chunli, LÜ Zhongrong. Identification of bridge structural damage and vehicle parameters based on response sensitivity analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9): 168-171.

- [16] FRISWELL M I, MOTTERSHEAD J E. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [17] Tikhonov A N. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization [J]. Soviet Math, 1963, 151(3): 501-504.
- [18] HANSEN P C, O'LEARY D P O. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problem [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1993, 14(6): 1487-1503.
- [19] Araújo dos Santos J V, Mota Soares C M, Mota Soares C A, et al. A damage identification numerical model based on the sensitivity of orthogonality conditions and least squares techniques [J]. Computers & Structures, 2000, 78(1-3): 283-291.
- [20] 陶胜利. 基于 Matlab 的车桥耦合时变系统动力响应分析[D]. 长沙:中南大学,2009.
- TAO Shengli. Dynamic response analysis of vehicle-bridge coupling time-varying system based on Matlab [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [21] International Standard Organization (ISO). Mechanical vibration-road surface profiles: reporting of measured data: ISO 8608:1995[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1995.

Bridge damage identification based on the sensitivity of two-axle vehicle-bridge contact force

LIU Cheng-yin, ZENG Qing, GONG Yi, QIAO Zhi-hao

(Department of Civil and Environmental Engineering, Shenzhen Key Laboratory of Smart Structural System in Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Considering the coupling effect of vehicle body vertical and pitch motions during driving, the contact force of the two-axle four-degree-of-freedom vehicle dynamics model during crossing the bridge are derived from the body response, and the response sensitivity method and regularization technique are employed to identify the bridge structural damage. The numerical study results reveal that, with the road roughness taken into consideration, compared with the methods using the sensitivity of vehicle body or wheel-axle responses, the method using sensitivity of contact force has a better damage detection accuracy. Compared with the damage identification using contact force sensitivity of a single axle vehicle, the proposed method could reduce the iteration number significantly. The parametric study results indicate that the damage identification accuracy is affected by vehicle speed, noise, and model error. The proposed method is also applicable to continuous beam. Besides, appropriate vehicle-bridge mass ratio and first-order vehicle-bridge frequency ratio could optimize damage identification performance.

Key words: bridge damage identification; vehicle-bridge interaction (VBI); vehicle-bridge contact force; response sensitivity; two-axle four-degree-of-freedom vehicle

作者简介: 柳成荫(1978—),男,副教授。电话:13927457216; E-mail: chengyin.liu@hit.edu.cn。

通讯作者: 曾 清(1990—),男,助理教授。电话:13163774176; E-mail: zengqing@hit.edu.cn。