

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.015

基于车-桥接触点响应与 HSD 的桥梁模态参数识别

徐耀耀¹, 王佐才^{1,2,3}, 辛宇^{1,2}, 孙晓彤¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省道路与桥梁检测工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽建筑大学 土木水利学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:为解决车辆扫描法在识别模态参数过程中对车辆频率及路面粗糙度敏感的问题,文章提出基于接触点响应和 Hilbert 平方解调(Hilbert square demodulation, HSD)技术的桥梁模态参数识别方法。基于车辆运动方程,利用四自由度双轴非对称车辆加速度响应计算车-桥接触点响应,并通过接触点响应频谱图中相邻峰值所对应频率平均值可识别桥梁各阶频率;利用解析模式分解(analytical mode decomposition, AMD)实现对接触点加速度响应的单分量提取,进一步利用 HSD 提取单分量动力响应的瞬时幅值用于桥梁振型识别。为减小路面粗糙度对模态参数识别的影响,在考虑相位差的基础上,以前、后车轴接触点时域响应的残差作为目标响应对路面不平顺下的桥梁模态参数进行识别。以单跨简支梁桥及三跨连续梁桥为数值算例来验证所提模态参数识别方法的可行性和有效性,并探究车速、车体阻尼及路面粗糙度对模态参数识别结果的影响。结果表明,该方法能够有效实现桥梁频率及振型的准确识别,且对车速及车体阻尼均具有较好的鲁棒性。

关键词:桥梁结构;四自由度双轴车;接触点响应;Hilbert 平方解调(HSD);模态参数识别

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)06-0821-09

Bridge modal parameter identification based on vehicle-bridge contact point response and Hilbert square demodulation

XU Yaoyao¹, WANG Zuocai^{1,2,3}, XIN Yu^{1,2}, SUN Xiaotong¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Road and Bridge Inspection Engineering Research Center, Hefei 230009, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to solve the problem of vehicle scanning method being sensitive to vehicle frequency and road roughness during the identification of modal parameters, a bridge modal parameter identification method based on contact point response and Hilbert square demodulation(HSD) is proposed in this paper. The vehicle-bridge contact point response is obtained by using the four-degree-of-freedom two-axle asymmetric vehicle acceleration response based on the vehicle motion equation, and the frequencies of each order of the bridge are identified by the average frequencies corresponding to adjacent peaks in the contact point response spectrum diagram. The single-component acceleration response of the contact point is extracted by analytical mode decomposition(AMD), and the instantaneous amplitude of the single-component dynamic response is extracted by HSD for the vibration mode identification of the bridge. In order to reduce the influence of road roughness on modal parameter identification, based on the consideration of phase difference, the residual response of the front and rear axle contact point in time domain is used as the target response to identify the modal parameters of the bridge under road irregularity. Numerical examples of a simply-supported beam bridge and a three-span continuous beam bridge are simulated to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method, and the effects of vehicle speed, vehicle body damping and road roughness on the modal pa-

收稿日期:2024-01-19;修回日期:2024-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278301);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52308310)

作者简介:徐耀耀(1999—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

王佐才(1982—),男,湖南双峰人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: wangzuocai@hfut.edu.cn.

parameter identification results are studied. The results show that the proposed method can effectively achieve the accurate identification of bridge frequency and vibration mode, and has good robustness to vehicle speed and vehicle body damping.

Key words: bridge structure; four-degree-of-freedom two-axle vehicle; contact point response; Hilbert square demodulation(HSD); modal parameter identification

0 引言

桥梁模态参数是反映桥梁结构动力特性的关键指标,对桥梁结构健康监测与安全评估具有重要意义^[1]。为克服传统模态参数识别方法效率与机动性较低的问题,文献[2]提出一种基于移动车辆的桥梁模态参数识别方法,通过理论推导及数值模拟验证该方法的可行性,并称为车辆扫描法。学者们针对该方法开展了大量研究,文献[3]采用集合经验模态分解处理车体信号以缓解模态混叠问题;文献[4]通过引入粒子滤波法提高桥梁频率识别效果;文献[5]基于车体响应结合希尔伯特变换实现了桥梁振型识别;文献[6]基于有限元模拟结合奇异值分解和短时频域分解分段构造桥梁振型;文献[7]利用停放在桥梁不同位置的测试车所形成的静置车-桥耦合系统,成功识别桥梁质量归一化振型;文献[8]通过双峰谱滤波方法从车体响应中识别桥梁振型。

采用车体响应识别模态参数时,桥梁响应不可避免地会受到车体频率的干扰,从而影响模态参数识别结果的准确性。文献[9]提出以单轴车与桥梁的接触点响应为对象识别桥梁的模态参数,相较于车辆响应,车-桥接触点响应能够剔除车体频率的干扰,能更加全面反映桥梁振动响应,提高模态参数识别结果的准确性;文献[10]通过采用变分模态分解改善识别效果,提高识别效率;文献[11]基于接触点响应,利用小波分析对桥梁振型进行构造。

以往研究忽略了车体阻尼及车辆俯仰效应的影响,且研究中大多采用单轴车辆与桥梁的接触点响应。虽然单轴车辆构造简单,但实际测量中需使用牵引车,两车间的连接是一个复杂构造。同时在利用单轴车识别模态参数时,难以消除路面粗糙度的影响。因此,本文采用与实际车辆更接近的四自由度车辆模型,提出基于双轴车车-桥接触点响应及 Hilbert 平方解调(Hilbert square demodulation, HSD)技术的桥梁模态参数识别方法。该方法采用四自由度自驱动的双轴车进行桥梁模态参数识别,克服了单轴车的缺陷并考虑了

车辆的悬架系统和俯仰效应。首先,基于车体响应计算出车-桥接触点加速度响应,通过接触点响应频谱图识别桥梁各阶频率;其次,利用解析模式分解与 HSD 技术提取单分量响应的瞬时幅值进而识别桥梁振型;同时,利用前、后接触点残余响应减小路面粗糙度对桥梁模态参数识别结果的影响;最后,通过单跨简支梁桥与三跨连续梁桥数值算例验证该方法的可行性和有效性。

1 理论框架

1.1 车-桥耦合振动理论

四自由度双轴非对称车与简支梁桥车-桥耦合系统的简化模型如图 1 所示。图 1 中: d 为模型中车身被简化为 1 个两轴间距; d_1 、 d_2 分别为前、后轴到重心距离; M_v 为车体质量; I_v 为刚性梁的质量惯性矩; k_{v1} 、 k_{v2} 为通过两侧刚度系数; c_{v1} 、 c_{v2} 为悬架系统与车轮相连的阻尼系数; m_{w1} 、 m_{w2} 分别为车轮质量; k_{w1} 、 k_{w2} 为两侧弹簧缓冲装置支撑刚度系数; c_{w1} 、 c_{w2} 为阻尼系数;桥梁简化为跨度为 L 、单位长度质量为 m 、抗弯刚度为 EI 的简支梁,车辆以速度 v 匀速通过桥梁。

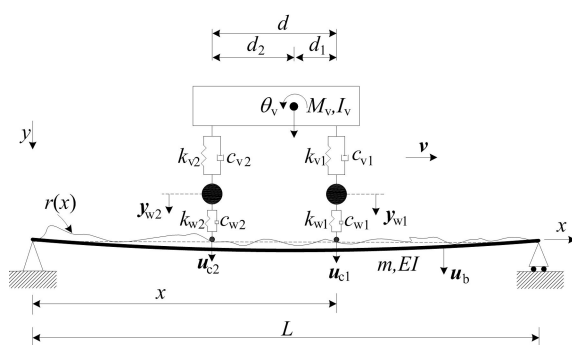


图 1 车桥耦合振动模型

桥梁的运动方程可表示:

$$m\ddot{u}_b(t) + EIu_b(x, t)'''' = F_c(t) \quad (1)$$

其中: u_b 为桥梁竖向位移; $F_c(t)$ 为车辆与桥梁之间的接触力。接触力^[8]可表示为:

$$F_c(t) = \sum_{j=1}^2 p_j \delta(x - v(t - t_j)) [U(t - t_j) - U(t - t_j - T)] \quad (2)$$

其中: $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; $U(\cdot)$ 为单位阶跃函数; t_j 为第 j 个车轮入桥时间, $t_j = (j-1)d/v$; T 为车辆通过桥梁时间, $T=L/v$; p_j 为第 j 个车轴荷载, $p_j = [(d-d_j)M_v/d + m_{wj}]g$, d_j 为第 j 个车轴到车体重心的距离, g 为重力加速度。

通过式(1)、式(2),结合模态叠加法可以得到桥梁的竖向位移 u_b 为:

$$u_b(x, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^2 \frac{\Delta_{stn,j}}{1-S_n^2} \left[\sin \frac{n\pi v(t-t_j)}{L} - S_n \sin \omega_{b,n}(t-t_j) \right] [U(t-t_j) - U(t-t_j-T)] \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (3)$$

其中: $\Delta_{stn,j}$ 为第 j 个车轴荷载引起的第 n 阶模态静力挠度, $\Delta_{stn,j} = \frac{2p_j L^3}{n^4 \pi^4 EI}$; $\omega_{b,n}$ 为简支梁第 n 阶频率, $\omega_{b,n} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$; S_n 为速度参数, $S_n = \frac{n\pi v}{L\omega_{b,n}}$ 。

接触点位置 $x_j = v(t-t_j)$,将 x_j 代入式(3)可得到双轴非对称车通过桥梁时车-桥接触点位移为:

$$u_{cj}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^2 \frac{\Delta_{stn,j}}{1-S_n^2} \left[\sin \frac{n\pi v(t-t_j)}{L} - S_n \sin \omega_{b,n}(t-t_j) \right] [U(t-t_j) - U(t-t_j-T)] \sin \frac{n\pi v(t-t_j)}{L} \quad (4)$$

通过式(4)可知,车-桥接触点响应中不含与车体垂直及转动频率相关的分量,因此,采用接触点响应代替车体响应识别桥梁模态参数可排除车体垂直及转动频率的影响。然而在实际测量中,由于车-桥接触点位置会随着车辆位置移动而改变,接触点响应难以直接获取。为此,采用一种基于双轴车车体的振动响应数据间接获取接触点响应的方法。

1.2 车轮响应及车-桥接触点响应

四自由度非对称车(图1)的垂直及旋转运动方程^[12]为:

$$M_v \ddot{y}_v + c_{v1}(\dot{y}_v - d_1 \dot{\theta}_v - \dot{y}_{w1}) + c_{v2}(\dot{y}_v + d_2 \dot{\theta}_v - \dot{y}_{w2}) + k_{v1}(y_v - d_1 \theta_v - y_{w1}) + k_{v2}(y_v + d_2 \theta_v - y_{w2}) = 0 \quad (5)$$

$$I_v \ddot{\theta}_v - c_{v1} d_1 (\dot{y}_v - d_1 \dot{\theta}_v - \dot{y}_{w1}) + c_{v2} d_2 (\dot{y}_v + d_2 \dot{\theta}_v - \dot{y}_{w2}) - k_{v1} d_1 (y_v - d_1 \theta_v - y_{w1}) + k_{v2} d_2 (y_v + d_2 \theta_v - y_{w2}) = 0 \quad (6)$$

其中: y_v 、 θ_v 分别为车体重心处的垂直位移、转动位移; y_{w1} 、 y_{w2} 分别为前、后车轮垂直位移。

通过对式(5)、式(6)取二阶导数并重新排列,

可得车轮处的加速度为:

$$c_{vj} \frac{d\dot{y}_{wj}}{dt} + k_{vj} \dot{y}_{wj} = G_j, \quad j = 1, 2 \quad (7)$$

$$G_1 = \left(\frac{d_2 M_v}{d} \right) \frac{d^2 \dot{y}_v}{dt^2} - \left(\frac{I_v}{d} \right) \frac{d^2 \dot{\theta}_v}{dt^2} + k_{v1}(\dot{y}_v - d_1 \dot{\theta}_v) + c_{v1} \left(\frac{d\dot{y}_v}{dt} - d_1 \frac{d\dot{\theta}_v}{dt} \right) \quad (8)$$

$$G_2 = \left(\frac{d_1 M_v}{d} \right) \frac{d^2 \dot{y}_v}{dt^2} + \left(\frac{I_v}{d} \right) \frac{d^2 \dot{\theta}_v}{dt^2} + k_{v2}(\dot{y}_v + d_2 \dot{\theta}_v) + c_{v2} \left(\frac{d\dot{y}_v}{dt} + d_2 \frac{d\dot{\theta}_v}{dt} \right) \quad (9)$$

根据式(7)同时考虑实测加速度数据的离散性可以求得车轮加速度为:

$$\dot{y}_{wj}(t) = \frac{1}{c_{vj}} \sum_{s=0}^{t/\Delta t} (G_j |_s) \exp \left\{ \frac{k_{vj}}{c_{vj}} (s\Delta t - t) \right\} \Delta t, \quad j = 1, 2 \quad (10)$$

其中: Δt 为采样间隔; s 为第 s 个采样点。

车辆前、后车轮的垂直运动方程为:

$$m_{wj} \ddot{y}_{wj} + c_{wj}(\dot{y}_{wj} - \dot{u}_{cj}) + k_{wj}(y_{wj} - u_{cj}) + c_{vj}(\dot{y}_{wj} - \dot{y}_{vj}) + k_{vj}(y_{wj} - y_{vj}) = 0, \quad j = 1, 2 \quad (11)$$

对式(11)求二次导数并重新排列可得到:

$$c_{wj} \frac{d\dot{u}_{cj}}{dt} + k_{wj} \dot{u}_{cj} = F_j, \quad j = 1, 2 \quad (12)$$

$$F_j = m_{wj} \frac{d^2 \dot{y}_{wj}}{dt^2} + c_{wj} \frac{d\dot{y}_{wj}}{dt} + k_{wj} \dot{y}_{wj} + c_{vj} \left(\frac{d\dot{y}_{wj}}{dt} - \frac{d\dot{y}_{vj}}{dt} \right) + k_{vj}(\dot{y}_{wj} - \dot{y}_{vj}), \quad j = 1, 2 \quad (13)$$

通过式(12)可得到接触点加速度为:

$$\dot{u}_{cj}(t) = \frac{1}{c_{wj}} \sum_{s=0}^{t/\Delta t} (F_j |_s) \exp \left\{ \frac{k_{wj}}{c_{wj}} (s\Delta t - t) \right\} \Delta t, \quad j = 1, 2 \quad (14)$$

由式(8)、式(9)及式(13)可知, G_j 、 F_j 仅与双轴测量车的车体响应、车轮响应以及车体本身特性相关,因此,通过式(10)及式(14)计算所得的接触点加速度响应不受桥梁类型的限制,这表明基于接触点响应的桥梁模态参数识别方法不依赖于特定桥梁结构或特性。

2 模态参数识别

2.1 解析模式分解及HSD技术

解析模式分解(analytical mode decomposition, AMD)是一种基于 Hilbert 变换的信号分解方法,该方法的本质是通过截止频率将某时间序列信号精确的分离为2个时间函数^[13]。该方法不仅能对具有密集模态与频率混叠的结构信号进

行有效分解,而且能够较好地保存信号幅度、频率和相位的信息。

对于接触点加速度响应 $x(t)$ 可表示为 n 个具有单一频率成分的单分量响应:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (15)$$

利用 AMD 算法分解接触点动力响应数据,从 $x(t)$ 中分解得到有限个具有单一频率成分的单分量响应数据。在得到结构响应的单分量后,便可利用 HSD 技术对响应进行解调。HSD 是一种针对具有单一频率成分数据的解调算法,其原理^[14]概述如下。

假设具有窄带宽的单分量可利用调幅-调频(amplitude modulation-frequency modulation, AM-FM)函数模型表示,即:

$$x_i(t) = l_i(t)h_i(t) \quad (16)$$

其中: $l_i(t)$ 为单分量数据中的低频成分(振幅包络函数); $h_i(t)$ 为单分量数据中的高频成分(频率调制函数)。

基于 Hilbert 变换可定义具有窄带宽的单分量动力响应 $x_i(t)$ 对应的解析函数 $Z_i(t)$:

$$Z_i(t) = x_i^2(t) + H^2[x_i(t)] \quad (17)$$

其中: $H[\cdot]$ 为 Hilbert 变换算子。

若 $l_i(t)$ 与 $h_i(t)$ 的傅里叶频谱不存在重叠的情况,则有:

$$H[l_i(t)h_i(t)] = l_i(t)H[h_i(t)] \quad (18)$$

解析函数 $Z_i(t)$ 可进一步改写为:

$$Z_i(t) = l^2(t)\{h^2(t) + H^2[h(t)]\} \quad (19)$$

则单分量动力响应中低频成分 $l_i(t)$ 为:

$$l_i(t) = \sqrt{Z_i(t)} \quad (20)$$

2.2 接触点响应和 HSD 的桥梁模态参数识别

利用车-桥接触点响应的特性与 HSD 技术可以实现桥梁模态参数的快速识别。

基于接触点响应和 HSD 技术的桥梁模态参数识别方法步骤为:① 让装有传感器的测量车以固定速度通过桥梁,采集车辆的垂直及转动加速度响应;② 根据采集的加速度响应利用本文所提算法计算出相应的车-桥接触点响应;③ 对接触点响应进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),通过频谱图识别出桥梁各阶频率;④ 利用 Hilbert 信号分解算法将接触点响应 $x(t)$ 分解为有限多个单分量响应 $x_i(t)$;⑤ 利用 HSD 技术对 $x_i(t)$ 进行解调,提取响应的瞬时幅值进而识别桥梁振型。具体识别流程如图 2 所示。

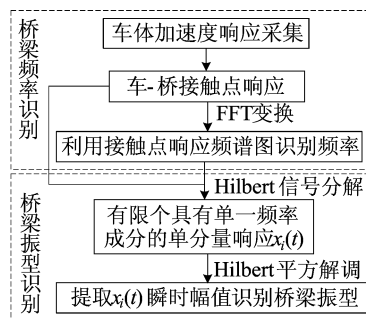


图 2 桥梁模态参数识别流程

3 数值算例

3.1 单跨简支梁桥模态参数识别

为验证本文所提桥梁模态参数识别方法的可行性和有效性,采用有限元方法通过数值模拟算例对所提方法进行验证。有限元方法中,简支梁桥被划分为 n 个长度相等的梁单元,与前轴直接接触单元为 f 单元,与后轴直接接触单元为 r 单元,每个梁单元的节点仅考虑竖向与转动自由度,双轴车被建模为四自由度系统,分别为车体的竖向、转动自由度以及前、后车轮竖向自由度,和车辆直接接触的车-桥耦合振动单元(vehicle-bridge interaction, VBI)的运动方程可表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (21)$$

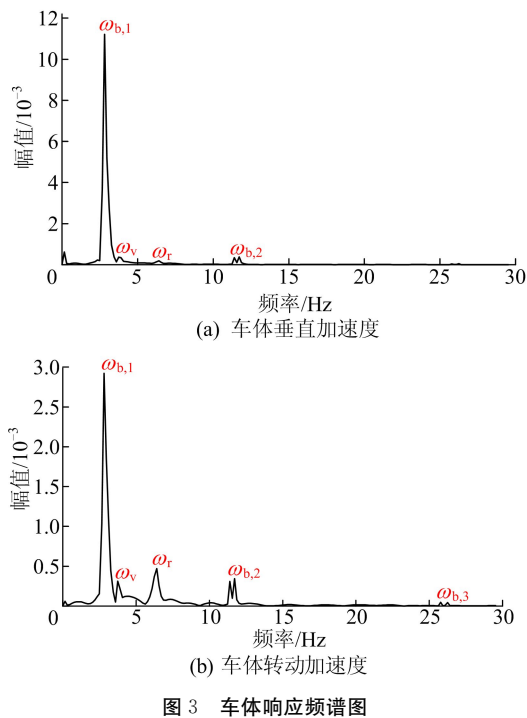
其中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为 VBI 单元的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{q}$ 为位移向量; $\mathbf{F}$ 为荷载向量。

将 VBI 单元与不直接受车体作用的梁单元组合,得到整个系统的运动方程,采用 Newmark- β 法($\beta=0.25$, $\gamma=0.5$)在整个时间范围内对方程进行求解即可得到车辆和桥梁的动态响应。

3.1.1 频率识别

数值模拟算例中,假设桥梁跨度 $L=30$ m,单位长度质量 $m=2\ 000$ kg,弹性模量 $E=27.5$ GPa,截面惯性矩 $I=0.20$ m⁴;假设车体质量 $M_v=1\ 000$ kg,转动惯量 $I_v=700$ kg·m²;车轮质量 $m_{w1}=m_{w2}=100$ kg;车轴间距 $d=2.0$ m,其中 $d_1=0.5$ m, $d_2=1.5$ m;弹簧的刚度系数 $k_{v1}=k_{v2}=700$ kN/m, $k_{w1}=k_{w2}=1\ 000$ kN/m;阻尼系数 $c_{v1}=c_{v2}=c_{w1}=c_{w2}=1.0$ kN·s/m;车速 $v=5$ m/s。假设桥面光滑,桥梁阻尼比为 0,模拟中桥梁被划分为 60 段,每个单元长度为 0.5 m,计算时间步长为 0.001 s。依据车辆系统参数可计算得到理论车体垂直频率及转动频率^[15] 分别为 $\omega_v=3.71$ Hz, $\omega_r=6.38$ Hz。车辆的垂直及转动加速度 FFT 频谱图如图 3 所示。

从图3可以看出,桥梁的一阶频率 $\omega_{b,1}$ 在车体垂直及转动加速度频谱图中均可以准确识别,但二阶频率 $\omega_{b,2}$ 幅值迅速减小,三阶频率 $\omega_{b,3}$ 在车体垂直加速响应频谱图中已无法识别,在转动加速度响应频谱图中仅可见。这主要是由于车体频率的存在使得桥梁频率对应的响应分量被掩盖,导致桥梁高阶频率幅值迅速下降。



为能够更准确地识别桥梁频率,采用前文所述的接触点响应避免车体频率的干扰,计算所得前、后接触点加速度响应及相应的FFT频谱图。另外,为保证计算的准确性,通过式(4)计算所得理论值和有限元模拟直接从桥梁表面提取前、后接触点加速度响应及相应的频谱图如图4、图5所示。

由图4、图5可知,基于车体响应与车轮响应计算得到的前、后接触点响应在时域、频域的理论值与有限元分析结果均较为吻合,验证了本文采用双轴车车体振动响应反算接触点响应算法的可行性。通过对比车体响应频谱(图3)与接触点响应频谱(图4b、图5b)可以发现,接触点响应中消除了车辆垂直频率和转动频率的干扰,车辆频率对桥梁响应的遮蔽效应消失,桥梁高阶频率在接触点响应频谱图中十分突出且易于识别。

通过接触点响应识别的桥梁前3阶频率及其理论值见表1所列。由表1可知,所识别桥梁前3阶频率与理论值相对误差较小,其中最大相对误差也仅为-2.76%。分析可知,相较于直接采

用车体响应进行桥梁频率识别,采用本文所提方法可以在保证较高识别精度前提下,扩大桥梁频率识别范围,识别更多桥梁高阶频率。

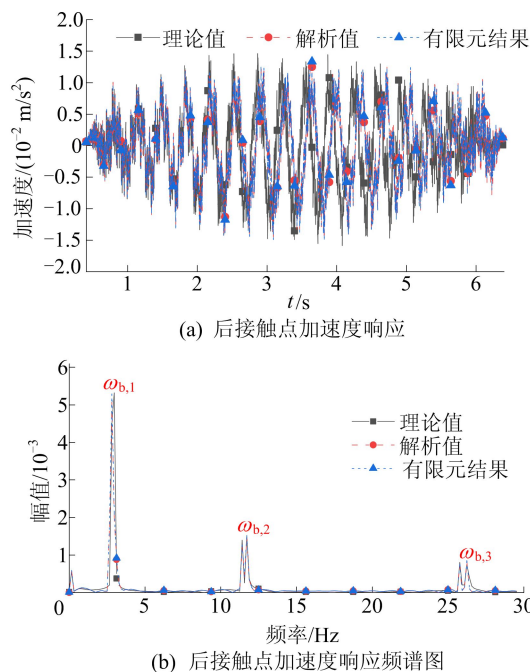
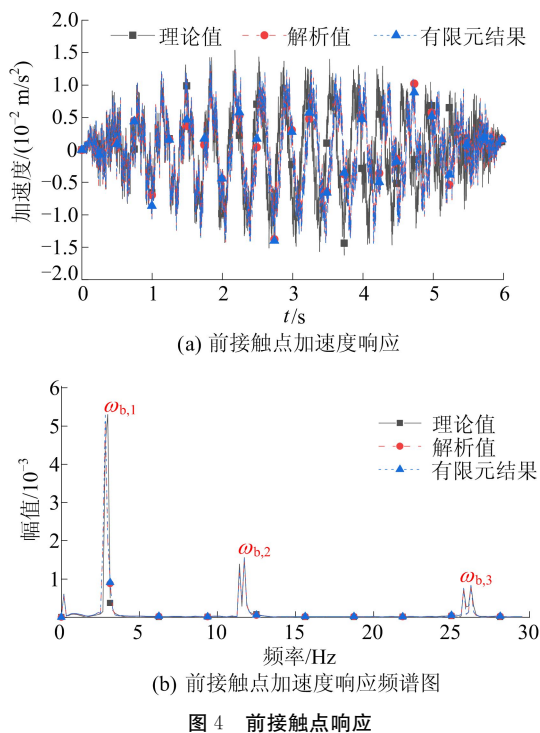


表1 桥梁频率识别结果

频率	前接触点响应 识别频率/Hz	后接触点响应 识别频率/Hz	理论频 率/Hz	相对误 差/%
$\omega_{b,1}$	2.81	2.81	2.89	-2.76
$\omega_{b,2}$	11.56	11.56	11.58	-0.17
$\omega_{b,3}$	26.01	26.01	26.05	-0.15

3.1.2 振型识别

由于前、后接触点响应具有相似特性,本节将采用前接触点响应识别桥梁振型,并与理论振型进行对比。

通过前接触点响应频谱图选取截止频率,利用解析模式分解和 HSD 得到桥梁的前 3 阶模态响应及 $l(t)$ 解调结果,如图 6 所示。

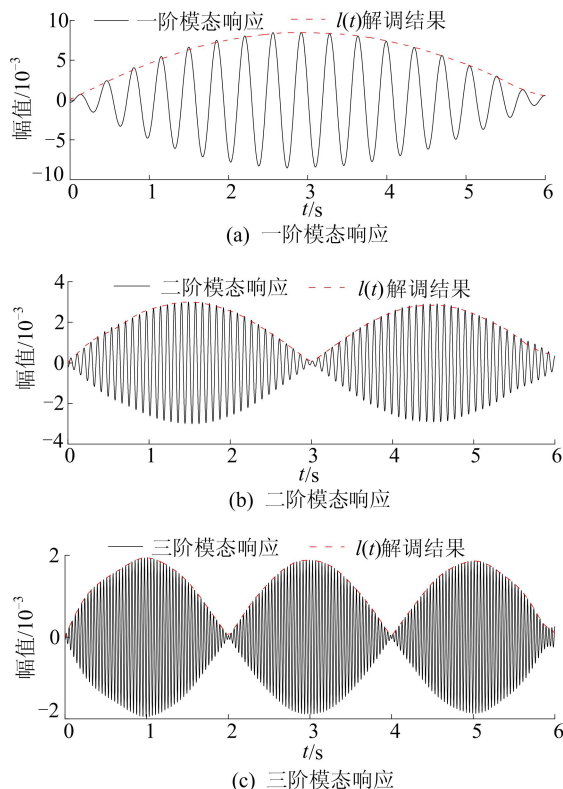


图 6 前接触点响应中桥梁各阶模态响应

通过 $l(t)$ 识别桥梁前 3 阶振型及其理论振型如图 7 所示。由图 7 可知,基于前接触点响应所识别桥梁前 3 阶振型与理论振型十分接近,识别振型与理论振型的吻合度较好,较大偏差仅发生在双轴车后轮入桥时。为验证识别振型的准确性,采用振型置信度(modal assurance criterion, MAC)^[16]评估振型的吻合度,计算得到前 3 阶振型 MAC 值分别为 0.999 3、0.998 5、0.997 9,这表明采用本文所述方法识别桥梁振型具有较高的精度。

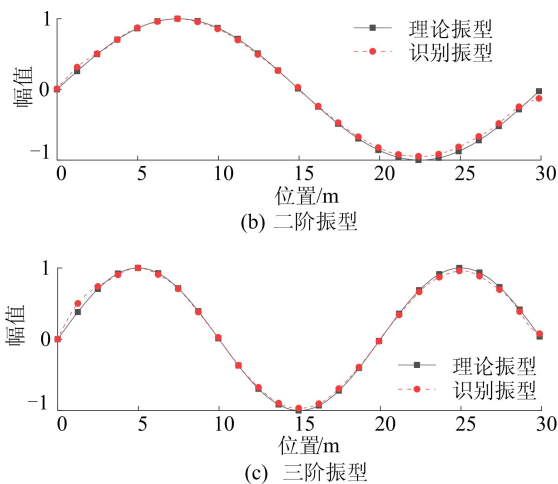
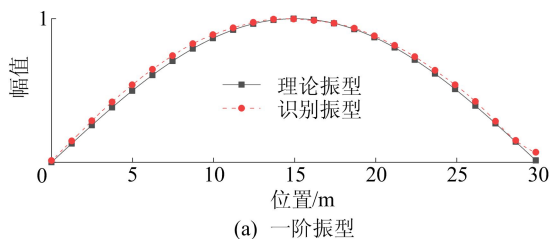


图 7 前接触点响应识别振型

3.2 三跨连续梁桥模态参数识别

为进一步验证所提模态参数识别方法的有效性,本文以某三跨变截面连续梁桥为研究对象进行模态参数识别。桥梁上部结构采用变截面预应力混凝土连续梁,跨径布置为(76+130+76) m,桥宽为 12.0 m,支点处梁高为 8.0 m,跨中梁高为 3.0 m,混凝土弹性模量为 3.55×10^4 MPa,密度为 $2\,600$ kg/m³。桥梁示意图如图 8 所示。

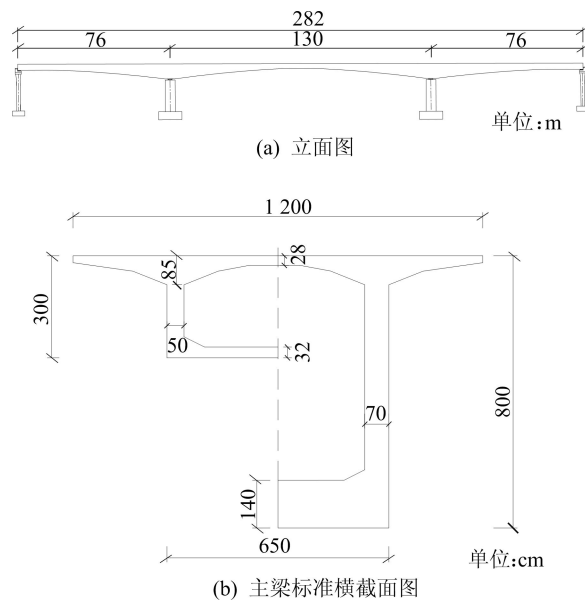


图 8 三跨连续梁桥示意图

依据设计图纸采用 Midas Civil 软件建立桥梁结构有限元模型,主梁采用空间梁单元进行模拟,支座采用双节点模拟,支座与主梁采用弹性连接中的刚性连接进行连接,采用子空间迭代法对三跨连续梁桥有限元模型进行特征值分析,计算得到桥梁前 3 阶频率及振型。

在数值模拟中,车辆特性参数保持不变,桥梁被划分为282段,每个单元长度为1 m,计算时间步长仍为0.001 s,计算所得前接触点加速度响应频谱图如图9所示,所识别前3阶振型及理论振型如图10所示。

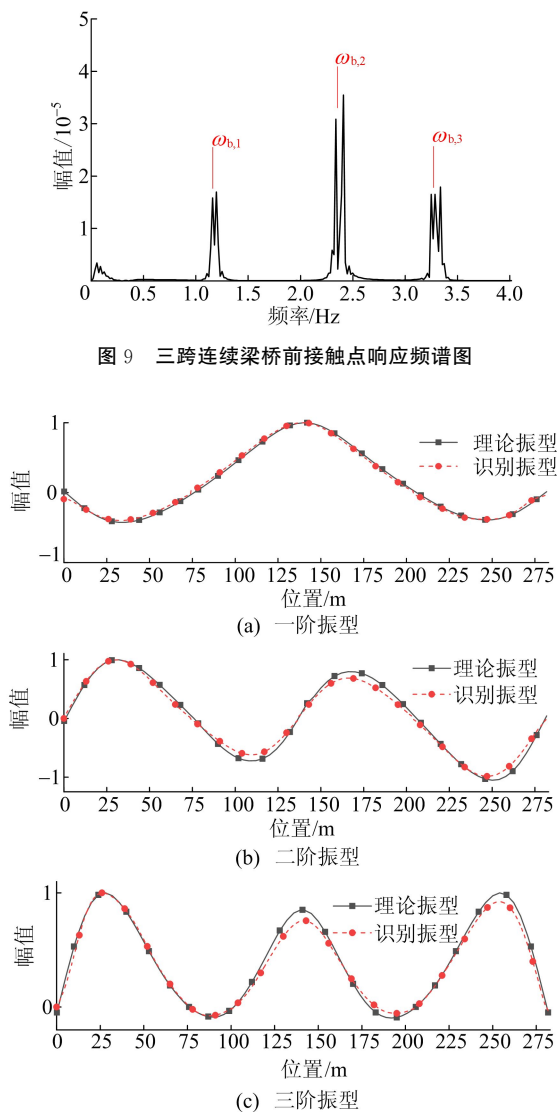


图9 三跨连续梁桥前接触点响应频谱图

图10 三跨连续梁桥振型识别结果

由图9可知,相较于简支梁桥,连续梁桥频率更加复杂,但采用本文所提方法仍能较为准确识别桥梁频率。通过有限元软件所得前3阶频率为1.14、2.30、3.28 Hz,所识别桥梁前3阶频率分别为1.18、2.35、3.32 Hz,最大相对误差为3.51%。

由图10可知,所识别连续梁桥前3阶振型与理论振型吻合度较高,通过MATLAB拟合工具箱对有限元软件模态分析所得离散振型数据进行拟合得到振型函数,计算相应位置幅值使得理论振型向量与识别振型向量维度一致,计算所得MAC值分别为0.995 8、0.991 0、0.994 2。通过

上述分析可知,本文所提模态参数方法对连续梁桥具有较好的适用性。

4 参数分析

4.1 不同车辆行驶速度下的桥梁模态参数识别

为研究双轴车不同行驶速度对桥梁模态参数识别的影响,在其他参数与3.1.1节中保持一致的条件下,对比2、5、10 m/s车辆行驶速度下单跨简支梁桥模态参数识别结果。3种不同车速下前接触点响应频谱图如图11所示,桥梁频率识别结果和识别振型的MAC值分别见表2和表3所列。

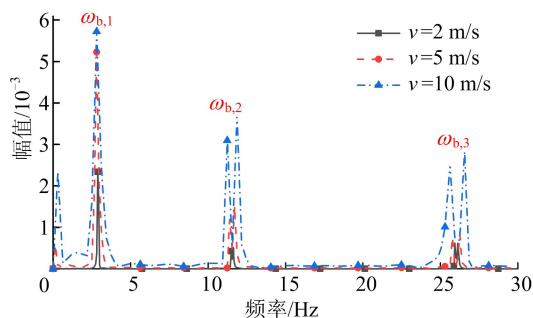


图11 不同车速下前接触点响应频谱图

表2 不同车辆行驶速度下桥梁频率识别结果

车速/ (m/s)	识别频率/Hz			误差/%		
	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
2	2.81	11.60	26.00	-2.76	0.17	-0.19
5	2.81	11.56	26.01	-2.76	-0.17	-0.15
10	2.81	11.55	26.10	-2.76	-0.25	0.19

表3 不同车辆行驶速度下识别桥梁振型MAC值

车速/(m/s)	一阶振型	二阶振型	三阶振型
2	0.999 4	0.997 5	0.997 8
5	0.999 3	0.998 5	0.997 9
10	0.997 8	0.998 0	0.999 4

由图11、表2可知,在不同车速条件下,随着车速提高,前接触点响应频谱图中桥梁频率对应的幅值也随之增大,主要是由于车速的增大会在桥梁上引起更大的激励所致,同时会导致频谱图变得粗糙,双峰现象更加明显,但仍可通过频谱图清楚识别桥梁各阶频率,桥梁频率识别结果误差随着车速提高未发生显著变化。

由表3可知,在3种不同车速条件下,通过前接触点响应识别桥梁振型的结果误差较小,识别的桥梁各阶振型MAC值均在0.99以上,满足实际测试精度要求。以上分析表明本文所提模态参

数识别方法对车辆行驶速度具有较好鲁棒性。

4.2 不同车体阻尼系数下的桥梁模态参数识别

车体阻尼系数会影响振动信号从桥梁传递到双轴测量车,为研究车体阻尼系数对桥梁模态参数识别的影响,本文考虑 c_v 、 c_w 均为 0.5、2.0、4.0 kN·s/m 这 3 种车体阻尼系数、车辆及桥梁的其余参数与 3.1.1 节保持一致条件下,前接触点响应频谱图如图 12 所示。

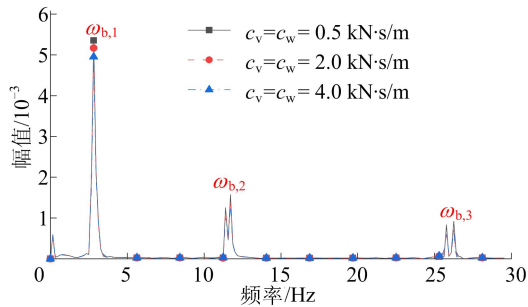


图 12 不同车体阻尼系数下前接触点响应频谱图

由图 12 可知,随着阻尼系数增加,前接触点响应频谱图中各阶桥梁频率的幅值逐渐下降,但降低幅度有限且 3 种不同车体阻尼系数下所识别桥梁频率与 3.1.1 节中一致,说明车体阻尼对桥梁频率识别结果的影响较小,实际测量中可忽略。

3 种不同车体阻尼系数下识别振型的 MAC 值见表 4 所列。由表 4 可知,随着车体阻尼系数的增加,所识别振型 MAC 值略有下降,但在车体阻尼系数为 4.0 kN·s/m 时,MAC 最小值仍为 0.981 2,所识别前 3 阶振型均具有较好准确性。

表 4 不同阻尼系数下识别振型 MAC 值

阻尼系数/ (kN·s/m)	一阶振型	二阶振型	三阶振型
0.5	0.999 3	0.999 4	0.998 4
2.0	0.999 1	0.992 8	0.995 0
4.0	0.998 2	0.981 2	0.983 6

4.3 考虑路面粗糙度影响的桥梁模态参数识别

路面粗糙度是影响桥梁模态参数识别结果的主要因素之一,本节将研究路面粗糙度对桥梁频率及振型识别的影响。路面粗糙度依据 ISO 8608^[17]标准中的功率谱密度函数生成,模拟得到 A 级路面粗糙度。考虑路面粗糙度影响车体加速度响应频谱图如图 13 所示。

由图 13 可知,路面粗糙度会导致车体频率在频谱图中变得十分突出,同时由于路面粗糙度的影响,车体响应中仅一阶桥梁频率易于识别,其他

桥梁频率已完全被车体频率及路面粗糙度频率所掩盖。

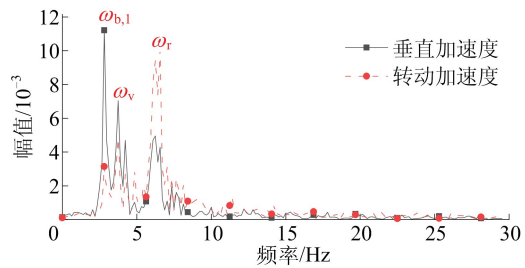


图 13 考虑路面粗糙度影响车体加速度响应频谱图

为更好克服路面粗糙度的影响,车辆在桥面上行驶时,后轮所通过路面轮廓与前轮相同,由路面粗糙度引起的前、后接触点响应相同且双轴测量车前、后车轮间距保持不变。因此,通过桥梁相同位置前、后接触点响应的差值获得残余响应,利用该残余响应识别模态参数可有效避免路面粗糙度的干扰,计算所得接触点残余响应频谱图如图 14 所示。

由图 14 可知,由于消除了路面粗糙度的干扰,残余响应频谱图重新变得光滑,能够准确识别出桥梁频率。

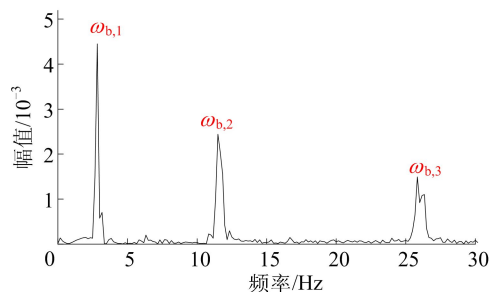
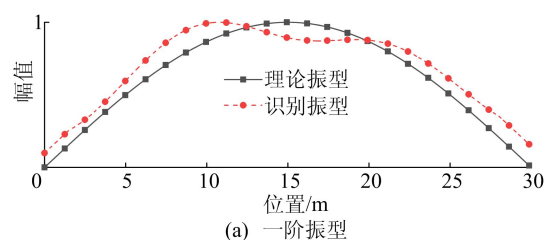


图 14 前、后接触点残余响应频谱图

考虑路面粗糙度影响从前、后接触点残余响应中识别的桥梁前 3 阶振型如图 15 所示。其中 MAC 值分别为 0.982 5、0.992 2、0.983 2。

由图 15 可知,利用前、后接触点残余响应能够有效降低路面粗糙度影响。综上,通过接触点残余响应能有效剔除路面粗糙度的干扰,准确识别出桥梁频率及振型。



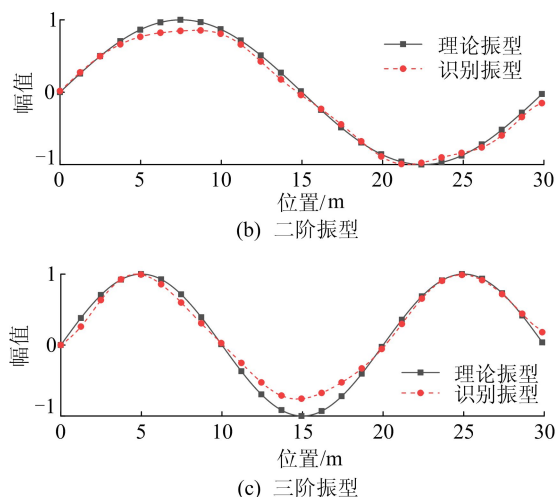


图15 考虑路面粗糙度影响残余响应振型识别结果

5 结 论

1) 基于双轴车车体响应能够计算得到前、后接触点响应,且相较于车体响应,接触点响应消除了车体竖向及转动频率的干扰,能够在保证较高识别精度的前提下,识别更多桥梁高阶频率。

2) 基于接触点响应结合解析模式分解与Hilbert平方解调技术能够较为准确地识别出桥梁振型,所识别桥梁前3阶振型MAC值均大于0.99,满足实际测试精度要求。

3) 所提模态参数识别方法对车速及车体阻尼均具有较好鲁棒性,在3种不同车速及车体阻尼下,桥梁频率识别结果误差未发生显著变化,并能准确识别出桥梁前3阶振型。

4) 考虑路面粗糙度的影响,从车体响应中仅能识别出桥梁一阶频率,通过使用前、后接触点残余响应能有效识别桥梁前3阶的频率与振型。

[参 考 文 献]

[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.
 [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):471-493.
 [3] ZHU L, MALEKJAFARIAN A. On the use of ensemble empirical mode decomposition for the identification of bridge frequency from the response measured in a passing vehicle[J]. Infrastructures,2019,4(2):32-45.
 [4] WANG H Q, NAGAYAM T, NAKASUKA J, et al. Extrac-

tion of bridge fundamental frequency from estimated vehicle excitation through a particle filter approach[J]. Journal of Sound and Vibration,2018,428:44-58.

[5] YANG Y B, LI Y C, CHANG K C. Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study[J]. Smart Structures and Systems,2014,13(5):797-819.
 [6] MALEKJAFARIAN A, OBRIEN E J. Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle[J]. Engineering Structures,2014,81:386-397.
 [7] 贺文宇,李伟琳,任伟新. 基于车辆静置的桥梁模态参数识别方法[J]. 土木工程学报,2023,56(6):52-62.
 [8] ZHOU J Y, LU Z L, ZHOU Z N, et al. Extraction of bridge mode shapes from the response of a two-axle passing vehicle using a two-peak spectrum idealized filter approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2023,190:110122.
 [9] YANG Y B, ZHANG B, QIAN Y, et al. Contact-point response for modal identification of bridges by a moving test vehicle[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics,2018,18(5):1-24.
 [10] YANG Y B, XU H, MO X Q, et al. An effective procedure for extracting first few bridge frequencies from a test vehicle[J]. Acta Mechanica,2021,232(3):1227-1251.
 [11] JIAN X, XIA Y, SUN L. An indirect method for bridge mode shapes identification based on wavelet analysis[J]. Structural Control and Health Monitoring,2020,27(12):e2630.
 [12] YIN X F, YANG Y C, HUANG Z. Bridge frequency extraction method based on contact point response of two-axle vehicle[J]. Structures,2023,57:105176.
 [13] CHEN G D, WANG Z C. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components[J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2012,28(2):258-279.
 [14] GE B, WANG Z C, DING Y J, et al. Hilbert square demodulation and error mitigation of the measured nonlinear structural dynamic response[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2021,160(6):107935.
 [15] 卢泽林. 基于车载传感器的桥梁模态识别及损伤检测研究[D]. 广州:广州大学,2023.
 [16] RAO M H, RAMAMURTI V, SWARNAMANI S. Modal analysis and model updating studies on a three-wheeler auto[J]. Journal of Vibration and Control,1999,5(5):253-276.
 [17] International Standardization Organization. Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data: ISO 8608[S]. Switzerland: International Standardization Organization,2016.

(责任编辑 吴 亮)