

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.196



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于车桥振动的桥梁振型识别及主梁挠度计算方法

亓兴军¹, 亓圣¹, 王珊珊², 丁晓岩²

(1. 山东建筑大学交通工程学院, 济南 250101; 2. 山东高速集团有限公司, 济南 250098)

摘要:根据桥梁间接测量法的基本原理,对一座三跨连续梁桥建立车桥振动有限元模型,提取匀速通过桥梁时车辆竖向加速度时程响应,利用中心差分法计算接触点加速度时程响应,采用快速傅里叶变换得到加速度频谱图,应用峰值拾取法识别出桥梁的前三阶频率;利用带通滤波技术从接触点竖向加速度响应中提取与桥梁频率相关的分量响应,通过希尔伯特变换得到测试桥梁的前三阶振型,并与有限元理论振型进行比较。结果表明:车体质量的改变对于振型识别没有明显影响;车速较低时对于振型的识别不利,但选择合适的驱车速度仍能够保证振型的识别精度。基于桥梁有限元模型,将识别的振型进行质量归一化,计算主梁的测试位移柔度矩阵,设计桥梁标准荷载试验方案,利用柔度矩阵计算主梁在试验荷载下的预测挠度,并与理论挠度进行比较。结果表明,在合适的车速下,预测挠度与理论挠度误差基本满足工程精度要求。

关键词:车桥耦合振动;间接测量法;振型识别;柔度矩阵;预测挠度

中图分类号:U441.3 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2023)05-0191-11

Vibration mode identification of bridge girder and deflection calculation of main girder based on vehicle-bridge vibration

QI Xingjun¹, QI Sheng¹, WANG Shanshan², DING Xiaoyan²

(1. School of Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China;

2. Shandong Hi-speed Co., Ltd, Jinan 250098, P. R. China)

Abstract: According to the basic principle of bridge indirect measurement, the finite element model of vehicle-bridge coupled vibration is established for a three-span continuous girder bridge. The time-history response of the vertical acceleration is extracted when the vehicle passes the bridge at a constant speed. The acceleration spectrum is obtained by using fast Fourier transform. The acceleration spectrum is obtained by using fast Fourier transform. The central difference method is used to calculate the time-history response of the contact point acceleration. The first three frequencies of the bridge are identified by the peak picking method. The bandpass filtering technology is used to extract the component response related to the bridge frequency from the vertical acceleration response of the contact points, the first three modes of the bridge are obtained by Hilbert transform. The identified mode shapes are compared with the finite element theoretical mode shapes. The results show that

收稿日期:2021-06-08

基金项目:山东省交通运输厅科技计划(2020B69);山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目(XTM201904)

作者简介:亓兴军(1974-),男,博士,教授,主要从事桥梁快速评估与健康监测研究,E-mail:qxj123@163.com。

Received: 2021-06-08

Foundation items: Science and Technology Plan Project of Shandong Provincial Department of Transportation (No. 2020B69); Project of Collaborative Innovation Center for Disaster Prevention and Mitigation of Civil Structure in Institutions of Higher Learning of Shandong Province (No. XTM201904)

Author brief: QI Xingjun (1974-), PhD, professor, main research interests: rapid evaluation and health monitoring of bridges, E-mail: qxj123@163.com.

the change of vehicle mass has no obvious effect on modal identification. Although the low speed is unfavorable to the mode identification, the accuracy of mode identification can be ensured by selecting the appropriate speed. Based on the finite element model of the bridge, the mass of the identified modes is normalized, the test displacement flexibility matrix of the main girder is calculated, and the standard load test scheme of the bridge is designed. The flexibility matrix was used to predict the deflection of the main girder under the test load, and compared with the theoretical deflection. The results show that the errors of predicted deflection and theoretical deflection meet the requirements of engineering accuracy.

Keywords: vehicle-bridge coupling vibration; indirect measurement; vibration mode identification; flexibility matrix; predicted deflection

作为交通设施互联互通的关键点和枢纽工程,桥梁是国民经济发展和社会繁荣的重要保障^[1-3]。模态参数(桥梁的频率、振型等)是反映桥梁特性的重要动力指标,常被用来进行桥梁的损伤识别和状态评估^[4-5]。

根据车桥耦合理论和间接测量法原理进行模态参数的识别是一种高效快速的识别方法, Yang 等^[6]首先提出了模态参数的间接测量法——利用过桥车辆识别桥梁结构的模态参数,推导出了理论解析解并通过数值模拟方法验证了理论的正确性。通过分析检测车辆垂直方向的响应,即可得出桥梁的频率信息,从而规避了车桥耦合时变系统有载频率变化的限制^[7];陈上有等^[8]通过模拟移动小车,分析了桥梁阻尼比、车体弹簧刚度和阻尼、车桥质量比、车辆移动速度和加速度及路面不平顺等参数对桥梁基频识别效果的影响;谢天宇^[9]利用间接测量法识别出了简支梁桥的前 3 阶振型,并从理论上研究了考虑车辆阻尼、测量车辆非匀速行驶对桥梁间接测量效果的影响。前人对间接测量法的研究多集中于简支梁桥基频的识别,对桥梁结构振型的研究相对较少。随着振动测试技术的不断发展,如何快速地识别模态参数,进行既有桥梁工作状态评估是研究的热点。目前,主要通过动载试验获取桥梁结构的自振频率、阻尼和冲击系数,并与理论值进行比较,从而对桥梁整体刚度进行定性评价^[10],但动载试验需要大量价格昂贵的加速度传感器来获取桥梁的模态信息,且试验过程较为繁琐^[11]。

笔者提出一种基于车桥振动的桥梁振型识别及主梁挠度计算方法,无需安装大量传感器,利用过桥车辆快速地识别桥梁的模态参数,结合已知静荷载计算结构的模态挠度,从而代替实测静挠度,应用于桥梁的承载能力状态评估中。选用实际工程中的三跨连续梁桥为研究对象,提取车辆过桥时车体的竖向加速度,利用中心差分法得到接触点加速度时程响应,运用快速傅里叶变换、峰值拾取法、

希尔伯特转换等手段,识别桥梁前三阶模态参数,计算主梁的测试位移柔度矩阵,从而求得试验荷载作用下主梁控制截面的预测挠度。

1 车桥耦合模型

通过 ANSYS 软件建立车桥耦合振动模型,利用瞬态动力分析模块模拟车辆行驶过桥。建立车辆和桥梁模型后,基于分离法原理与车辆动力学理论,利用 ANSYS 中约束方程实现任意时刻车轮与桥面接触点的位移协调关系。

车辆在桥上满足与桥面紧密接触,无跳起现象且为点接触,所以任意时刻车轮点的竖向位移 y_{il} 、车轮点对应位置的桥面竖向位移 y_{qil} 与桥面不平顺度 r_{li} 之间的位移协调关系为

$$y_{il} - y_{qil} - r_{li} = 0, \quad i=1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

1.1 车辆建模

在 ANSYS 中建立单轴车辆模型,主要利用 COMBIN14 单元^[12]和 MASS21 单元^[12]。

由于车桥耦合振动的复杂性,建模之前先对车辆模型作出如下假设^[13-15]:

- 1) 车体为刚性,左右对称;
- 2) 测试车辆匀速通过桥梁;
- 3) 仅考虑测试车辆所受竖向力,不考虑横向力;
- 4) 车辆与桥面之间紧密接触,没有起跳现象。

基于以上假设,采用单轴 1/4 车辆模型,如图 1 所示。

单轴 1/4 车辆模型不考虑各个方向的转动,只考虑车辆的竖向振动和桥梁的弯曲振动。根据拉

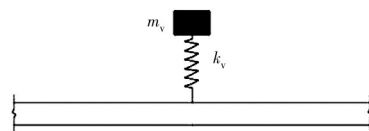


图 1 单轴 1/4 车辆模型

Fig. 1 One-axle quarter car model

格朗日方程,车辆的振动约束方程^[16]为

$$m_v \ddot{q}_v + c_v \dot{q}_v + k_v q_v = -F_v^{\text{int}} \quad (2)$$

式中: m_v 为簧上质量; q_v 为簧上质量的竖向位移; c_v 为车辆悬挂系统的阻尼,一般忽略不计; k_v 为车辆悬挂的刚度; $-F_v^{\text{int}}$ 为车辆上的接触力。

1.2 桥梁建模

采用 BEAM4 建立跨径为 20 m+25 m+20 m 的三跨连续梁桥有限元模型,全桥采用 C50 混凝土,弹性模量 $E = 3.45 \times 10^4$ MPa,桥梁的横断面如图 2 所示。

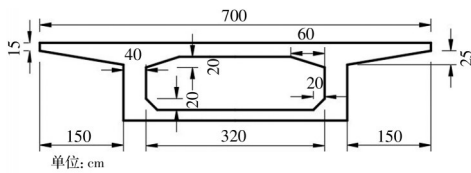


图 2 桥梁横断面图

Fig. 2 Cross section of the bridge

桥梁相关参数如表 1 所示。

表 1 桥梁结构参数

Table 1 Structural parameters of bridge

桥梁跨径/ m	单位长度质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	截面惯性 矩/ m^4	截面面 积/ m^2	弹性模量/ GPa
20+25+20	9 571.5	0.880 5	3.545	3.45

单轴 1/4 车辆匀速通过桥梁,其模型如图 3 所示。



图 3 车辆过桥模型

Fig. 3 Model of vehicles crossing the bridge

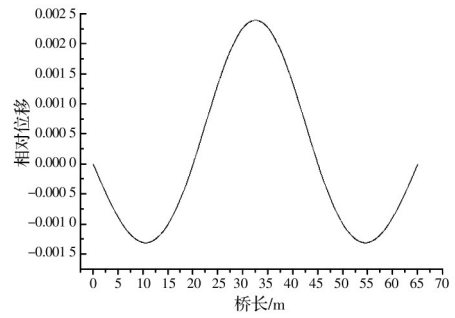
使用以上桥梁参数,在 ANSYS 中建立桥梁模型,得到的桥梁自振频率与振型特性见表 2。

表 2 桥梁自振频率与振型特性

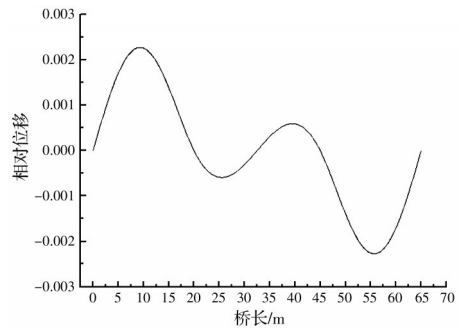
Table 2 Natural vibration frequency and vibration mode characteristics of the bridge

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特性
1	5.653 3	0.176 8	全桥对称竖弯
2	8.618 4	0.116 0	全桥反对称竖弯
3	10.612 0	0.094 2	全桥对称竖弯

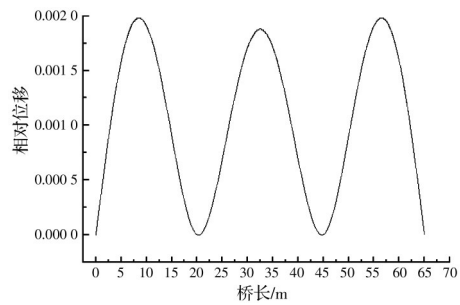
桥梁前三阶理论振型如图 4 所示。



(a) 一阶理论振型



(b) 二阶理论振型



(c) 三阶理论振型

图 4 前 3 阶理论振型

Fig. 4 First three order theoretical formation

2 主梁振型识别及柔度矩阵计算

2.1 车桥接触点加速度获取

根据间接测量法理论^[17],将车辆简化为一个集中质量 m_v ,由一个刚度为 k_v 的弹簧支承,以恒定速度 v 移动,车辆为单轴车辆模型,图 5 为车桥相互作用模型。

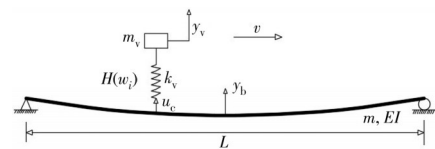


图 5 车桥相互作用 (VBI) 模型

Fig. 5 Vehicle-bridge interaction (VBI) model

在忽略阻尼影响下,车辆的运动方程为

$$m_v \ddot{y}_v + k_v (y_v - u_c) = 0 \quad (3)$$

式中: y_v 为车辆本身的垂直位移; u_c 为移动车辆和梁

之间接触点的位移;·表示对时间 t 求导。注意,车辆位移从静态平衡位置测量。

忽略阻尼影响下梁的位移方程式为

$$m\ddot{u} + EIu'''' = [k_v(y_v - u_c) - m_v g]\sigma(x - vt) \quad (4)$$

式中: m 为质量; E 为弹性模量; I 为转动惯量; g 为重力加速度; σ 为狄克拉函数;一个“'”表示对位置坐标 x 求导一次。

梁的位移 u 能够代表模态响应之和^[18]。

$$u = \sum_n \left[q_{bn}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \right] \quad (5)$$

式中: q_{bn} 为梁的模态位移,且接触点位移包括 $u_c = u|_{x=vt}$; L 为梁的长度。

将车辆频率 ω_v 和桥梁的第 n 阶频率 ω_{bn} 表示为

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} \quad (6)$$

$$\omega_{bn} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (7)$$

经推导化简得接触点加速度

$$\ddot{u}_c = \sum_n \frac{\Delta_{sn}}{(1 - S_n^2)} \left\{ \left(\frac{2n\pi v}{L} \right)^2 \cos \frac{2n\pi vt}{L} + S_n \left[\left(\omega_{bn} - \frac{n\pi v}{L} \right)^2 \cos \left(\omega_{bn} - \frac{n\pi v}{L} \right) t - \left(\omega_{bn} + \frac{n\pi v}{L} \right)^2 \cos \left(\omega_{bn} + \frac{n\pi v}{L} \right) t \right] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知,接触点加速度不包含车辆频率,因此,在识别桥梁基本信息时,车辆频率被排除在外。由于接触点加速度不能直接测量,所以可先采集车辆竖向加速度时程响应数据,通过对车辆加速度进行中心差分,得到接触点加速度。

根据式(3),对时间 t 进行二次求导,考虑到车辆加速度是离散数据,再结合中心差分法,接触点加速度为

$$\ddot{u}_c = \ddot{y}_v + \frac{d^2 \ddot{y}_v}{\omega_v^2 dt^2} \quad (9)$$

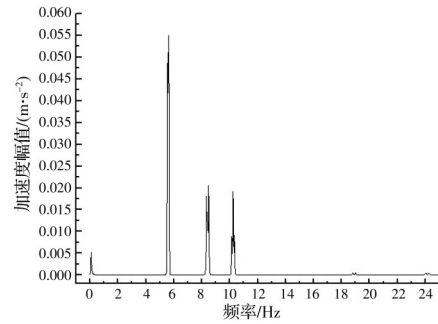
$$\frac{d^2 \ddot{y}_v}{dt^2} = \frac{\ddot{y}_v|_{i+1} - 2\ddot{y}_v|_i + \ddot{y}_v|_{i-1}}{\Delta_t^2} \quad (10)$$

2.2 主梁振型识别

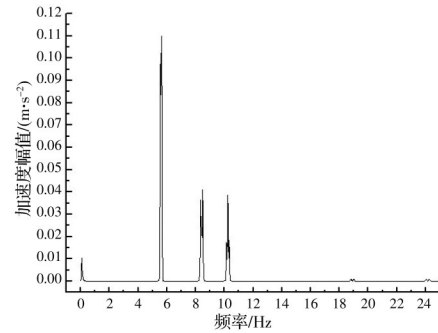
2.2.1 车重对振型识别的影响

为探究不同车重对振型识别的影响,在车速为 2 m/s 条件下,利用 ANSYS 分别提取测试车质量为 1 000、2 000、5 000 kg 时车体的竖向加速度,进行中心差分,计算接触点的竖向加速度,采用快速傅里叶变换处理得到的加速度时程信号,进行频谱分析。图 6 为车体质量 m 为 1 000、2 000、5 000 kg 时对应的接触点加速度频谱图。

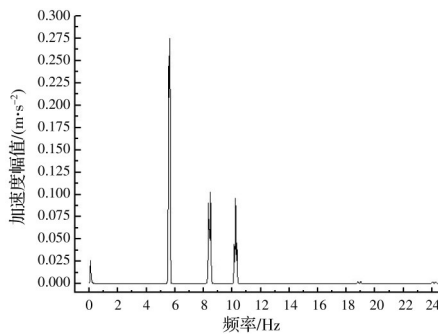
由 3 种车重下的加速度频谱图可以看出,随着车



(a) $m=1\ 000\ \text{kg}$



(b) $m=2\ 000\ \text{kg}$



(c) $m=5\ 000\ \text{kg}$

图 6 3 种车重下的频谱图

Fig. 6 Spectrum diagram for three types of vehicle weight

体质量的增加,频谱图中的加速度峰值会增大,但仍然只能识别前三阶频率。分别对 3 种车重下的识别频率与理论频率进行误差分析,误差对比结果见表 3。

表 3 前三阶频率识别误差

Table 3 First three order frequency identification error				
车重/kg	模态阶次	理论频率/Hz	识别频率/Hz	误差/%
1 000	1	5.65	5.60	0.9
	2	8.62	8.42	2.4
	3	10.61	10.24	3.5
2 000	1	5.65	5.60	0.9
	2	8.62	8.42	2.4
	3	10.61	10.24	3.5
5 000	1	5.65	5.60	0.9
	2	8.62	8.42	2.4
	3	10.61	10.24	3.5

结果表明,3种不同车重下识别的前3阶频率值和误差值没有变化,均能较好地识别前3阶频率。

利用汉宁窗函数和带通滤波技术相结合的方法截取桥频分量响应,利用截取的桥频分量及其希尔伯特变换构造出与桥梁固有频率相对应的振型,图7~图9分别为车体质量 m 为 1 000、2 000、5 000 kg 时识别的桥梁前3阶振型。

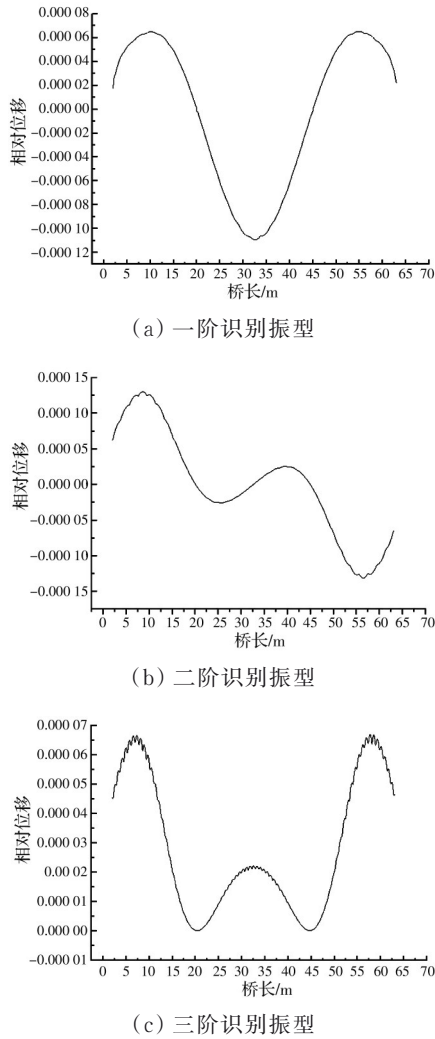


图 7 m 为 1 000 kg 时前三阶识别振型
Fig. 7 The first three identification formation of $m=1\ 000\ \text{kg}$

为了判断识别振型的准确性,需要计算 MAC 值,通过 MAC 值大小就可以准确直观地看出识别振型和理论振型的接近程度,MAC 值越接近 1,识别振型的精确度越高。表 4 为 3 种车重下前三阶识别振型对应的 MAC 值。

由表 4 可知,3 种车重下识别振型的 MAC 值几乎相同,车体质量的改变对于振型识别的影响并不明显,且车速为 2 m/s 时,3 种车重下识别的第三阶振型精度较差。

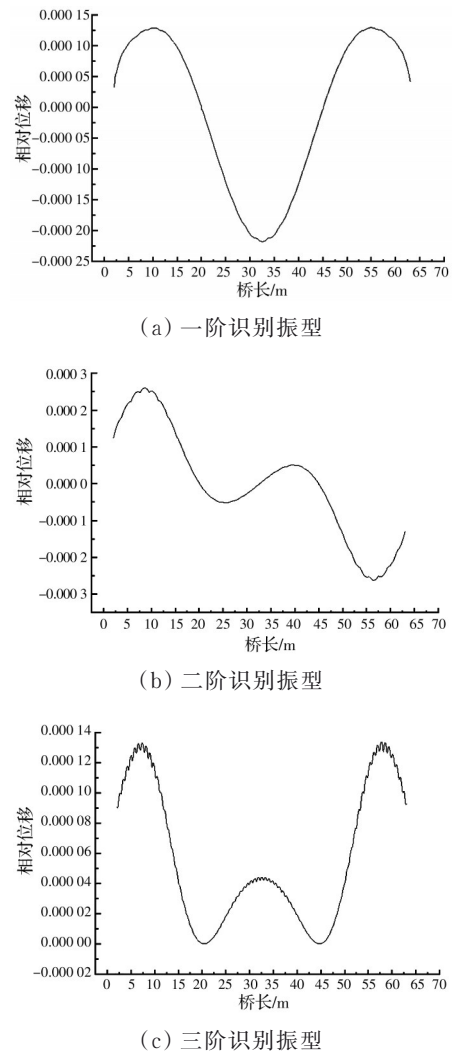


图 8 m 为 2 000 kg 时前三阶识别振型
Fig. 8 The first three identification formation of $m=2\ 000\ \text{kg}$

表 4 3 种车重下对应的振型 MAC 值
Table 4 Formation MAC values under the three vehicle weights

振型阶数	1 000 kg	2 000 kg	5 000 kg
一阶识别	0.994 1	0.993 9	0.993 9
二阶识别	0.987 5	0.987 5	0.987 5
三阶识别	0.848 3	0.848 1	0.848 0

2.2.2 车速对振型识别的影响

在测试车重为 1 000 kg 条件下,分别提取车速 v 为 2、4、8 m/s 时对应的平整桥面状态下车体的竖向加速度时程响应,结合接触点加速度的相关理论,计算接触点的加速度,图 10 为不同车速下接触点加速度时程响应。

得到接触点加速度时程响应后,采用快速傅里叶变换处理所记录的加速度时程信号,分析其频域分布。图 11 为车辆速度 v 为 2、4、8 m/s 时对应的接

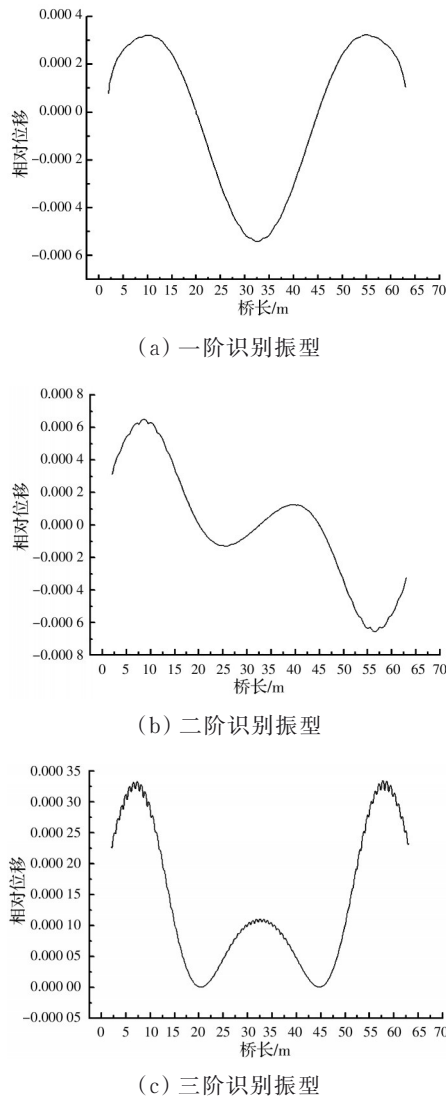


图 9 m 为 5 000 kg 时前三阶识别振型
Fig. 9 The first three identification formation of $m=5\ 000$ kg

触点加速度频谱图。

观察 3 种车速下的加速度频谱图,可以看出,车速为 2 m/s 时只能识别到前三阶频率,车速为 4、8 m/s 时可以识别到更高阶频率。分别对 3 种车速下识别到的频率与理论频率进行误差分析,误差分析结果见表 5。

结果表明,路面平整状态下,车速为 4、8 m/s 时均能精确地识别到桥梁的前三阶频率,而车速为 2 m/s 时无法达到较高的识别精度,原因是低车速下频谱图中的桥梁频率信号较弱,增大了识别误差。

识别到桥梁频率后,利用汉宁窗函数和带通滤波技术相结合的方法截取桥频分量响应,利用截取的桥频分量及其希尔伯特变换构造出与桥梁固有频率相对应的振型。图 12~图 14 分别为车速 $v=2$ 、4、8 m/s 时识别到的桥梁前三阶振型。

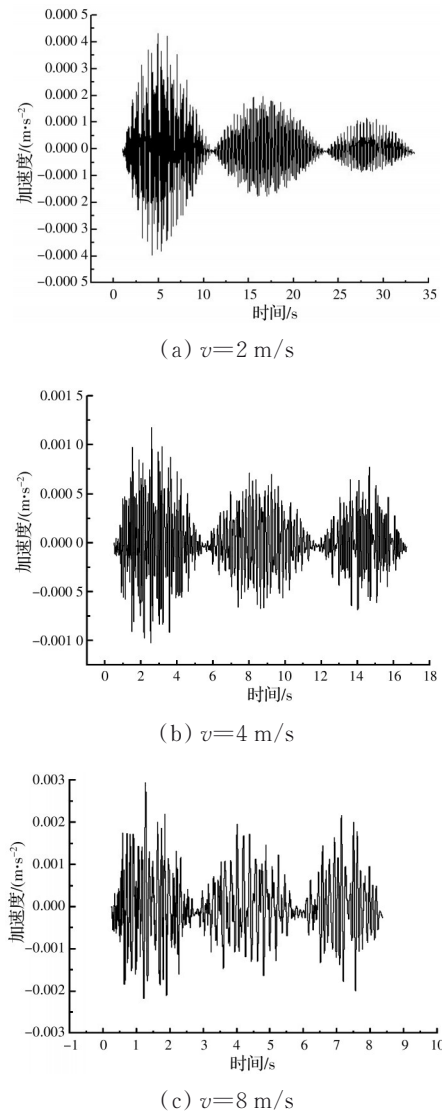


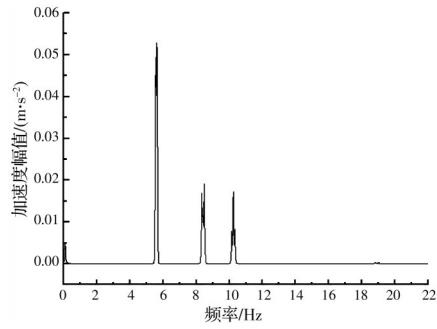
图 10 3 种车速下接触点加速度时程响应
Fig. 10 Time-history response of contact point acceleration at three speeds

表 5 前 3 阶频率识别误差

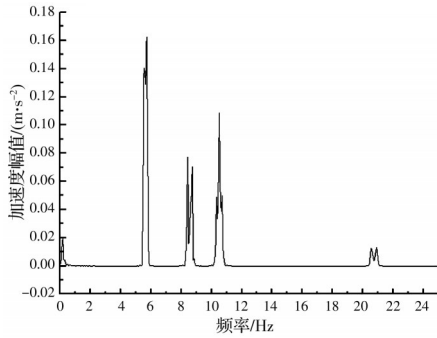
Table 5 First three order frequency identification error

车速/(m·s ⁻¹)	模态阶次	理论频率/Hz	识别频率/Hz	误差/%
2	1	5.65	5.60	0.9
	2	8.62	8.42	2.4
	3	10.61	10.24	3.5
4	1	5.65	5.63	0.4
	2	8.62	8.59	0.4
	3	10.61	10.52	0.8
8	1	5.65	5.66	0.2
	2	8.62	8.62	0.0
	3	10.61	10.58	0.3

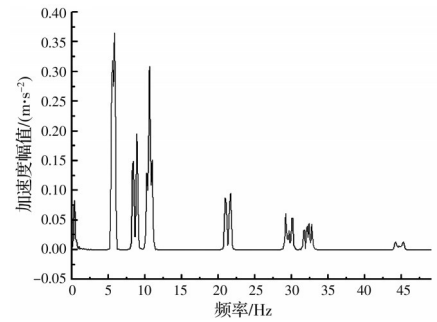
为了判断识别振型的准确性,需要计算 MAC 值,通过 MAC 值大小就可以准确直观地看出识别



(a) $v=2$ m/s



(b) $v=4$ m/s



(c) $v=8$ m/s

图 11 3种车速下的频谱图

Fig. 11 Spectrum diagram for three speeds

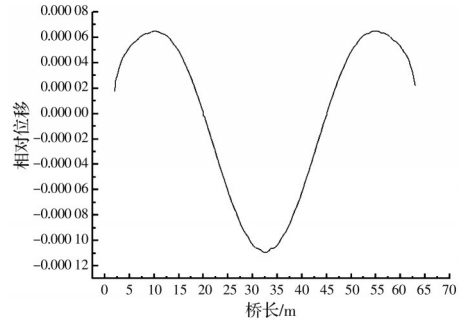
振型和理论振型的接近程度,MAC 值越接近 1,识别振型精确度越高。表 6 为 3 种车速下前三阶识别振型对应的 MAC 值。

由表 6 可知,车速为 2 m/s 时,桥梁振型识别精确度比车速为 4、8 m/s 时差,结合图 11 中 3 种车速下的频谱图可以得出:频谱图中可识别的频率阶数越高,识别振型与理论振型拟合度越高,计算得到的 MAC 值也越高,但是车速较高会导致振型图畸变,因此振型识别要合理控制车速。

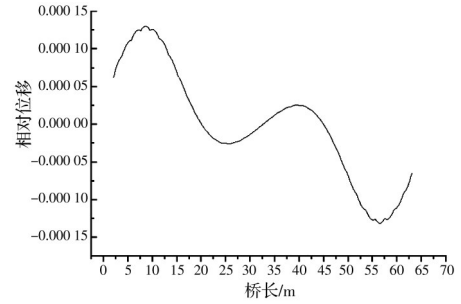
2.3 主梁柔度矩阵计算

根据振型的正交性

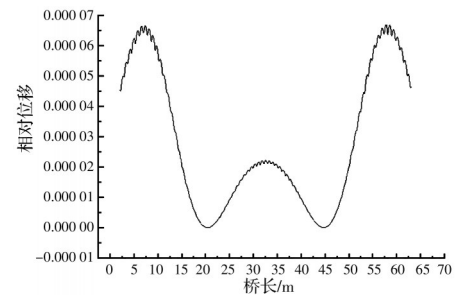
$$\begin{cases} \text{diag}(M_i) = \phi^T M \phi \\ \text{diag}(C_i) = \phi^T C \phi \\ \text{diag}(K_i) = \phi^T K \phi \end{cases} \quad (16)$$



(a) 一阶识别振型



(b) 二阶识别振型



(c) 三阶识别振型

图 12 车速为 2 m/s 时前三阶识别振型

Fig. 12 The first three identification formation of $v=2$ m/s

式中: ϕ 为位移振型矩阵, $\phi = \phi_1 \phi_2 \phi_3 \cdots \phi_i$, ϕ_i 为对应的第 i 阶振型向量。

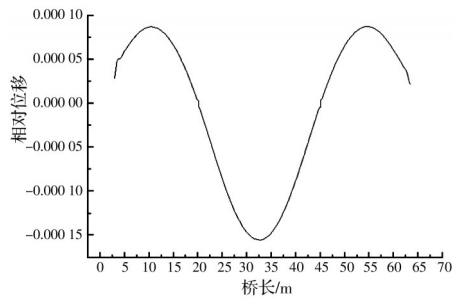
由式(16)可知,识别的结构任意位移振型 ϕ_i 满足正交性条件,可按式(17)或式(18)对结构的质量矩阵和刚度矩阵进行对角化。

$$\begin{cases} \phi^T M \phi = \text{diag}(m_i) \\ \phi^T K \phi = \text{diag}(k_i) \end{cases} \quad (17)$$

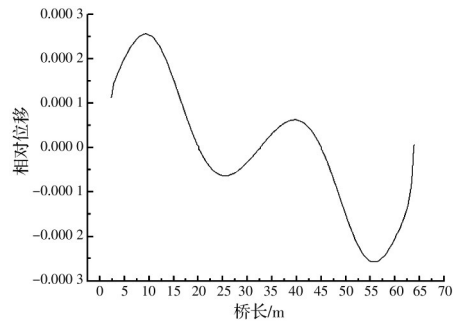
$$\begin{cases} \phi_i^T M \phi_i = m_i \\ \phi_i^T K \phi_i = k_i \end{cases} \quad (i=1, 2, 3, 4 \cdots n) \quad (18)$$

对第 i 阶模态,当存在位移振型 $\bar{\phi}_i$, 满足 $\bar{\phi}_i^T M \bar{\phi}_i = m_i = 1$ 时,称 $\bar{\phi}_i$ 为质量归一化位移振型,相应的振型矩阵 $\bar{\phi}$ 为质量归一化位移振型矩阵。

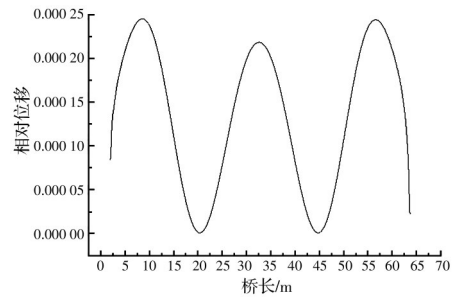
结构的质量矩阵是确定的,其对应的某阶质量归一化位移振型也是确定的。通过模态特征值分析计算或进行模态分析识别的位移振型 ϕ_i 不一定刚好



(a) 一阶识别振型



(b) 二阶识别振型



(c) 三阶识别振型

图 13 车速为 4 m/s 时前三阶识别振型

Fig. 13 The first three identification formation of $v=4$ m/s

就是质量归一化的位移振型,其与对应的质量归一化位移振型 $\bar{\phi}_i$ 之间存在比例系数 a_i ,如式(19)所示。

$$\bar{\phi}_i = \frac{\phi_i}{a_i} \quad (19)$$

将式(19)代入 $\bar{\phi}_i^T M \bar{\phi}_i = 1$ 可以求得比例系数 a_i 为

$$a_i = \sqrt{\phi_i^T M \phi_i} \quad (20)$$

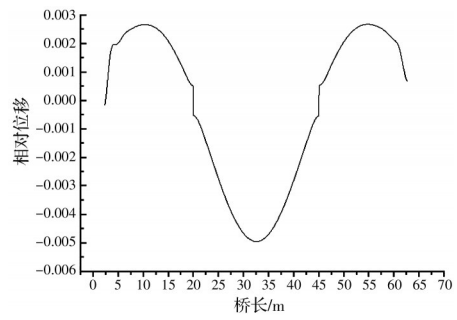
将质量归一化的位移振型矩阵代入式(17)得

$$\begin{cases} \bar{\phi}^T M \bar{\phi} = \text{diag}(\bar{m}_i) = I \\ \bar{\phi}^T K \bar{\phi} = \text{diag}(\bar{k}_i) \end{cases} \quad (21)$$

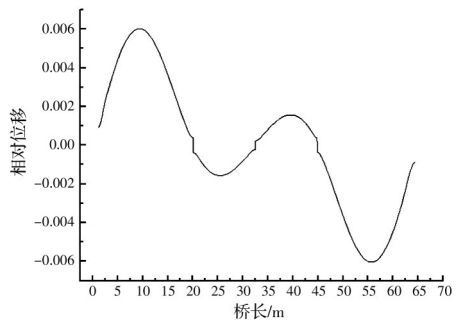
在 $\bar{\phi}$ 为方阵且满秩的情况下,可同时对式(21)

第 2 式左边乘以 $(\bar{\phi}^T)^{-1}$ 、右边乘以 $(\bar{\phi})^{-1}$,得到结构的刚度矩阵为

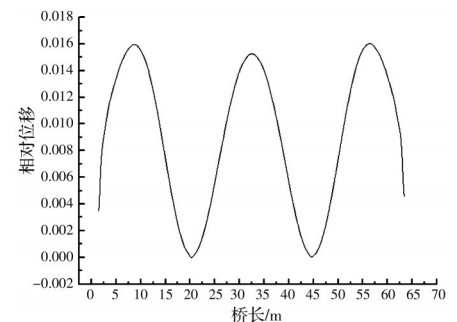
$$K = (\bar{\phi}^T)^{-1} \text{diag}(\bar{k}_i) (\bar{\phi})^{-1} \quad (22)$$



(a) 一阶识别振型



(b) 二阶识别振型



(c) 三阶识别振型

图 14 车速为 8 m/s 时前三阶识别振型

Fig. 14 The first three identification formation of $v=8$ m/s

表 6 3 种车速下对应的振型 MAC 值

Table 6 Formation MAC values at three speeds

振型阶数	$v=2$ m/s	$v=4$ m/s	$v=8$ m/s
一阶识别	0.994 1	0.999 5	0.996 3
二阶识别	0.987 5	0.997 2	0.999 2
三阶识别	0.848 3	0.996 4	0.998 1

结构的位移柔度矩阵 F^d 是刚度矩阵的逆矩阵,如式(23)所示。

$$F^d = K^{-1} = \bar{\phi} \text{diag}\left(\frac{1}{\bar{k}_i}\right) \bar{\phi}^T = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\phi}_i \bar{\phi}_i^T}{\bar{k}_i} \quad (23)$$

式中: d 为该参数属于位移。

模态质量 \bar{m}_i 、模态刚度 \bar{k}_i 和固有频率 ω_i 之间关系为

$$\omega_i = \sqrt{\frac{\bar{k}_i}{\bar{m}_i}} \quad (24)$$

与质量归一化位移振型 $\bar{\phi}_i$ 对应的 $\bar{m}_i = 1$, 所以 $\bar{k}_i = \omega_i^2$, 将其代入式(23), 得到最终的位移柔度矩阵计算式为

$$F^d = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\phi}_i \bar{\phi}_i^T}{\omega_i^2} \quad (25)$$

式中: $\bar{\phi}_i$ 为第 i 阶质量归一化位移振型; ω_i 为第 i 阶固有频率; n 为总的识别模态阶数。

基于有限元法提取主梁质量矩阵, 完成识别振型的质量归一化。利用式(25)计算主梁的测试位移柔度矩阵。由于传感器是沿三跨连续梁顺桥向布置, 所以位移柔度矩阵的三维曲面图有3个明显的峰值, 最大峰值点对应桥梁各跨的跨中, 与该连续梁桥的变形物理意义一致, 图15为3种车速下的柔度矩阵三维图。

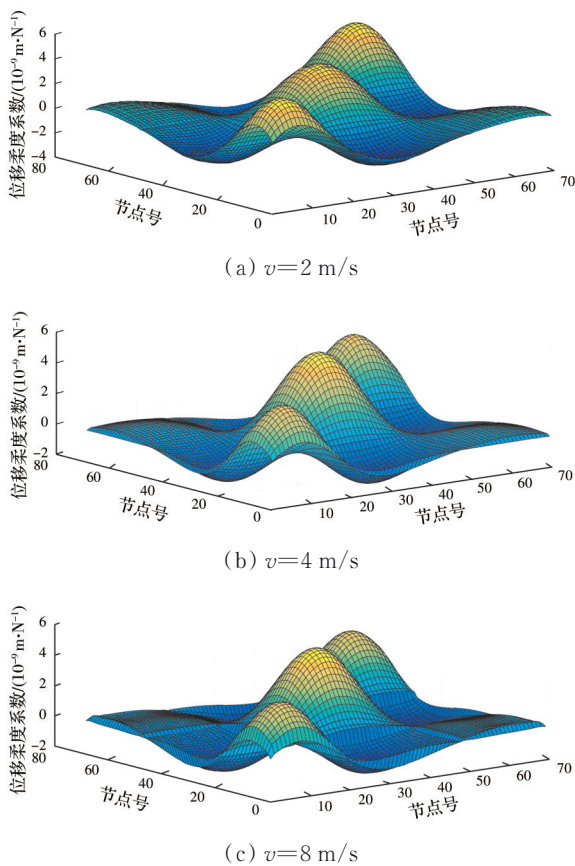


图15 3种车速下的柔度矩阵三维图

Fig. 15 Three-dimensional diagram of flexibility matrix at three speeds

3 计算预测挠度

依据《公路桥梁荷载试验规程》设计桥梁标准荷载试验方案, 采用3辆30 t的三轴车对连续梁桥

第2跨进行中载工况的加载, 计算静载试验的荷载效率, 以确定试验车辆布置方式。荷载效率 η_q 按式(26)计算, 宜介于0.95~1.05之间。

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)} \quad (26)$$

式中: S_s 为某一加载试验项目对应的加载控制截面内力或位移的最大计算效应值; S 为控制荷载产生的同一加载控制截面内力或位移的最不利效应计算值; μ 为冲击系数值, $\mu = 0.17671 \ln f - 0.0157$, 其中, f 为结构基频。

加载车辆布置方式如图16所示。

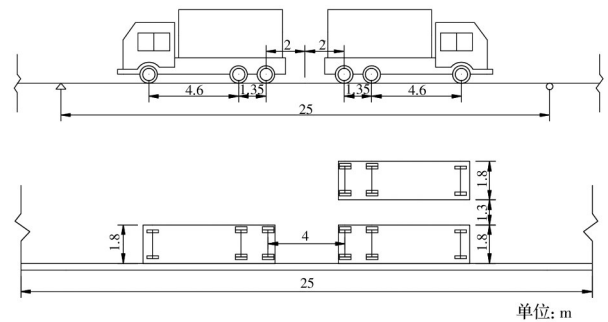


图16 加载车布置方式

Fig. 16 Layout of loading vehicle

利用主梁的测试位移柔度矩阵计算试验荷载作用下主梁的预测挠度。计算时需要对车辆荷载进行节点等效荷载分配, 按照等效荷载原则将车轮力分配到柔度矩阵的计算节点上^[19-20]。利用有限元软件提取试验荷载下的理论挠度, 预测挠度和理论挠度对比如图17所示, 各跨控制截面挠度值对比见表7~表9。

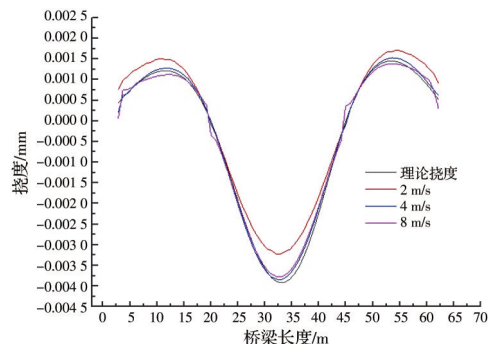


图17 不同车速下各测点预测挠度

Fig. 17 Predicted deflection of each measuring point at different speeds

比较3种工况下预测挠度与理论挠度, 车速为2 m/s时误差较大, 平均误差达到21.6%, 车速为

表7 $v=2$ m/s时对应的误差Table 7 The corresponding error of $v=2$ m/s

控制截面	理论挠度/ mm	预测挠度/ mm	相对误 差/%	平均误 差/%
第1跨	1.18	1.48	26.0	21.6
第2跨	-3.92	-3.22	17.8	21.6
第3跨	1.40	1.69	20.9	21.6

表8 $v=4$ m/s时对应的误差Table 8 The corresponding error of $v=4$ m/s

控制截面	理论挠度/ mm	预测挠度/ mm	相对误 差/%	平均误 差/%
第1跨	1.18	1.22	4.2	4.2
第2跨	-3.92	-3.85	1.8	4.2
第3跨	1.40	1.49	6.6	4.2

表9 $v=8$ m/s时对应的误差Table 9 The corresponding error of $v=8$ m/s

控制截面	理论挠度/ mm	预测挠度/ mm	相对误 差/%	平均误 差/%
第1跨	1.18	1.07	8.7	5.1
第2跨	-3.92	-3.78	3.6	5.1
第3跨	1.40	1.36	3.1	5.1

4、8 m/s时平均误差在5%左右,结果较为准确。这是由于车速过低时频谱图中的高阶桥梁频率信号较弱,导致识别振型与理论振型产生偏差,柔度矩阵计算误差增大,预测的挠度不够精确。如果选择合适的车速,便可以较好地识别到桥梁的高阶振型并且保证识别精度,最终预测挠度与理论挠度拟合较好。

4 结论

1)基于车桥耦合振动间接测量法,利用前三阶模态参数计算在静载试验荷载作用下的预测挠度,与静载理论挠度相比,在车速适宜的条件下,预测挠度与理论挠度的平均误差基本满足工程精度要求。说明基于间接测量法的预测挠度能够有效代替静载试验挠度,可以应用于对桥梁承载能力状态的评估。

2)基于间接测量法进行主梁挠度预测要选择合适的车速。车速过低时频谱图中的高阶桥梁频率信号较弱,振型的识别精度大大降低,导致预测挠度与理论挠度误差增大。车速过高时识别的振型也会发生畸变,对预测挠度的精度同样不利。

3)通过试验车方便快捷地测得桥梁的振动信息,识别桥梁结构的前三阶模态参数,计算静载试验荷载作用下主梁控制截面的模态挠度,与静载试

验的有限元理论挠度对比,证明了基于车桥耦合振动的静载试验法的有效性。

参考文献

- [1] 范立础. 桥梁工程[M]. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2017.
FAN L C. Bridge engineering [M]. 3rd edition. Beijing: People's Communications Press, 2017.
- [2] U. S. Department of Transportation. National transportation statistic 2015-Bureau of Transportation Statistics [R]. Washington, DC: U. S. Department of Transportation, 2015.
- [3] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. White paper on land, infrastructure, transport and tourism in Japan [R]. Tokyo, Japan: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2013.
- [4] CARDEN E P, FANNING P. Vibration based condition monitoring: A review [J]. Structural Health Monitoring, 2004, 3(4): 355-377.
- [5] REN W X, DE ROECK G. Structural damage identification using modal data. I: Simulation verification [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 87-95.
- [6] 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 (3/4/5): 471-493.
- [7] 杨永斌. 非传统思维的桥梁监测法[J]. 桥梁, 2015, 66 (4): 34-36.
YANG Y B. Bridge non-traditional monitoring method [J]. Bridge, 2015, 66(4): 34-36.
- [8] 陈上有, 夏禾. 从过桥车辆响应中识别桥梁结构基本自振频率的方法[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 88-94.
CHEN S Y, XIA H. An identification method for fundamental frequency of bridge from dynamic responses due to passing vehicle [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 88-94. (in Chinese)
- [9] 谢天宇. 桥梁动态讯息间接测量法的多种工况分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
XIE T Y. A study on the working conditions analysis for the bridge indirect measurement method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [10] 姜鸿, 彭浪. 基于频率的桥梁承载能力快速评价方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(2): 236-239.
JIANG H, PENG L. Research on rapid evaluation method of bridge bearing capacity based on frequency [J]. Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition), 2020, 16(2): 236-239. (in Chinese)
- [11] 李焕兰. 简支梁桥损伤状态下车桥耦合动态响应分析

- [D]. 辽宁大连:大连海事大学, 2015.
- LI H L. Dynamic response analysis of vehicle-bridge coupling under damaged state of simply supported girder bridge [D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)
- [12] Guide to ANSYS user programmable features [M]. SAS IP, Inc, 1998.
- [13] 刘世忠. 双层公路钢桁梁桥车桥耦合振动研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- LIU S Z. Research on vehicle-bridge coupling vibration of double layer highway steel truss beam [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [14] 王希. 由车辆响应识别桥梁固有频率的方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
- WANG X. Research on natural frequency identification method of bridge based on vehicle response [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [15] 杨晓天. 桥面不平整下连续梁桥频率的间接识别[D]. 济南:山东建筑大学, 2019.
- YANG X T. Frequency identification of continuous bridge based on indirect method considering the uneven deck [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019. (in Chinese)
- [16] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 2003.
- LI G H. Structure stability and vibration of bridges [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [17] 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): 1850073.
- [18] BIGGS J M. Introduction to structural dynamics [M]. New York, USA: McGraw-Hill College, 1964.
- [19] 陈钊. 车轮冲击力测量与桥梁性能快速评估[D]. 南京:东南大学, 2017.
- CHEN Z. Tire force measurement and rapid bridge test [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [20] 亓兴军, 肖志全, 张荣凤. 斜交梁桥频率间接识别效果的影响参数[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 119-126.
- QI X J, XIAO Z Q, ZHANG R F. Influence parameters of frequency indirect identification effect for oblique beam bridge [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 119-126. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)