

基于车辆无量纲响应的桥梁频率子空间识别方法

金楠^{1,2}, 李嘉琪³, 全一鑫^{3,4}, 施钟淇^{1,2}, 曾清^{3,4}

(1. 深圳市城市公共安全技术有限公司, 广东深圳 518023; 2. 深圳市城市灾害数字孪生重点实验室, 广东深圳 518023;
3. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东深圳 518055; 4. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东深圳 518055)

摘要:当前基于车桥耦合系统的桥梁频率间接识别方法普遍对行驶车辆参数和速度有较大约束,难以应用于正常行驶的普通车辆。为了解决这一问题,该文提出了一种考虑车辆无量纲响应的桥梁频率间接识别方法。首先,以无量纲化的车-桥耦合运动学方程为基础,构建基于改进子空间识别法的系统状态方程与输出信号方程,建立了考虑时间差的车辆双轴无量纲响应差值信号方程,从理论上有效地消除了状态方程与输出信号中的路面平整度信息,突破了传统子空间识别法对车辆参数的限制,使该方法适用于任何普通车辆,同时验证了基于单次行驶双轴车辆响应的桥梁频率间接识别方法对简支梁桥频率识别的可行性。然后,通过数值计算探讨了车辆行驶速度、路面平整度等级和随机车辆荷载对桥梁频率间接识别的影响。计算结果表明,充分的荷载激励对桥梁频率的稳定识别非常重要,并且能够激发桥梁高阶模态的振动,更有利于桥梁高阶频率的识别。最后,针对一座实际服役的高墩简支梁桥开展现场行车试验,基于车桥动态接触力作为信号输入,验证子空间识别法获得桥梁频率的可行性和准确性。试验结果表明,短时随机子空间识别方法可以提取测试桥梁前2阶频率,在高阶频率的识别中有着更优于 MOESP (multivariable output error state space, MOESP)子空间识别法的效果。

关键词:桥梁工程;频率间接识别;子空间识别法;车桥耦合;耦合系统解耦方法;无量纲参数分析

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Subspace identification method of bridge frequencies based on the dimensionless vehicle response

JIN Nan^{1,2}, LI Jiaqi³, QUAN Yixin^{3,4}, SHI Zhongqi^{1,2}, ZENG Qing^{3,4}

(1. Shenzhen Technology Institute of Urban Public Safety, Shenzhen 518023, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Urban Disasters Digital Twin, Shenzhen 518023, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The indirect identification of bridge frequencies through coupled vehicle-bridge dynamics is a critical area of research that underpins the health monitoring of bridges. Traditional methods in this domain, however, impose significant constraints on the parameters and operational velocities of the vehicles involved. These restrictions significantly hamper the real-world applicability of these indirect methods since they cannot be smoothly integrated into the analysis of standard vehicles in normal driving conditions. To bridge this gap in the literature and practice, the current study presents a pioneering approach that capitalizes on the dimensionless response of vehicles in transit to indirectly identify bridge frequencies. The research commences by formulating a set of dimensionless equations characterizing the motion of the vehicle-bridge system. From this theoretical groundwork, the study derives a system

收稿日期:2024-02-01; 修回日期:2024-06-18

基金项目:深圳市科技计划资助项目(KJZD20230923114310021);青年人才托举工程项目(2023QNRC001);广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金-青年基金项目(2022A1515110587);深圳市高层次人才项目孔雀团队项目(KQTD20210811090112003);深圳市高等院校稳定支持计划项目(GXWD20231130174255004);重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX1100);广东省2024年度教育科学规划课题(高等教育专项2024GXJK396)

作者简介:金楠(1990—),女,高级工程师,博士,主要从事智能监测研究。E-mail:jinnan@szsti.org

state equation and an output signal equation, both predicated upon an enhanced subspace identification technique. This study introduces an innovative equation that captures the dimensionless residual response signal from the dual axles of a single vehicle, incorporating temporal variances in the process. This methodological framework successfully negates the adverse impact of road surface irregularities, effectively sidestepping limitations linked to vehicle parameters within conventional subspace identification methods. The versatility of this approach allows for its application to any typical vehicle in motion across a bridge. Then, the study validates the practicality of the proposed indirect approach for the frequency identification of simply supported beam bridges using the dimensionless response of a dual-axle vehicle. Through rigorous numerical analyses, this study examines the influence of driving speeds, road surface conditions, and stochastic vehicle loads on the indirect identification of bridge frequencies. The results highlight the necessity of adequate load excitation to dependably identify bridge frequencies, especially for eliciting the higher-order modal vibrations of bridges, which are essential for accurately identifying modes at higher frequencies. Finally, empirical evidence is provided through field tests conducted on a high-pier simply supported beam bridge. By inputting the monitored dynamic contact force between the vehicle and bridge into the proposed enhanced subspace identification model, this study validates the feasibility and accuracy of this novel approach. The experimental results affirm that the short-time stochastic subspace identification (ST-SSI) technique effectively isolates the first two modal frequencies of the bridge, outperforming the multivariable output error state space (MOESP) method in identifying higher-frequency modes. This research substantially broadens the scope of bridge frequency identification to include standard vehicles within regular traffic flows, simultaneously improving the precision of frequency detection, especially for higher-order modes.

Key words: bridge engineering; indirect identification of frequencies; subspace identification; vehicle-bridge coupling; coupled system decoupling method; dimensionless parameter analysis

0 引言

我国在役桥梁数量巨大,其建设速度与规模均世界领先,然而整体上却存在运维养护不足的问题,桥梁实际使用寿命远小于设计年限。因此,有必要加强重视桥梁的运维安全,及时发现桥梁早期损伤并采取措施,避免重大事故发生^[1]。传统桥梁检测和监测方法需要在目标桥梁上安装传感器,通过分析监测数据,提取桥梁的关键特征参数。对桥梁运行状态实行全方位实时监测,是保障桥梁服役安全重要手段之一,但对传感器的需求大、维护成本高,出于运营成本考量,更适用于保障级别较高的大型桥梁工程^[2]。

YANG等^[3]首次提出了以车桥耦合动力学为基础的桥梁频率车辆扫描法,从车辆的频域响应中,间接提取桥梁的模态信息^[4]。类似的基于频谱峰值的选取方法还有功率谱法和基于奇异值图的频域分解法等^[5-7]。此后,在YANG等^[3]的研究基础上,大量研究扩展了以频域分析为主的车辆扫描方法的可行性^[8-11]。同时,结合希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)构造瞬时振幅,或采用局部模态振型估算并串联等方法,能够实现对桥梁振型的间接识别^[12-17]。由于桥梁频率、振型等动力特性是评价桥梁安全与监测预警的重要参数,一定程度上能够反映桥梁的损伤情况,可以作为桥梁安全状态的初筛依据^[18]。而这种基于车辆的识别方法,无需在桥梁上安装任何传感器,大幅度降低桥梁诊断的时间与经济成本,促使了以检测车为载体的“单系统-多桥梁”的桥梁移动诊断装备的研发。国内外大量研究及试验^[5,19]证明了以频率、振型识别为主的车辆扫描法的可行性,并对该方法面临的难题逐一攻克,包括路面平整度对桥梁特征识别的模糊效应^[20-25]、桥梁高阶模态识别难^[9,26]、车辆自身特性影响^[10,27-29]。然而,从现场试验的成果来看,该方法在实际应用中仍存在一定的局限性,如对车辆的参数要求较高、对车辆的行驶速度有较大的限制等^[10,30]。

YANG等^[31]首次将随机子空间识别法(stochastic subspace identification, SSI)应用于车-桥耦合系统,实现对简支梁桥频率的间接识别。由于SSI仅适用于线性非时变系统,该方法必须通过限制车速(低于2 m/s)抑制车-桥耦合系统的时变特性对桥梁频率识别的影响。LI等^[32]在桥梁上使用一辆行驶与一辆静止车辆,通过数值模拟和实验室试验进行了桥梁的频率和振型的识别。JIN等^[33]在2021年提出了一种短时随机子空间识别法(short-time stochastic subspace identification, ST-SSI),通过控制同一行驶车辆2次行驶过桥梁的

速度,从车辆自身参数和振动响应的组合信号中提取桥梁的多阶频率。该方法利用无量纲参数,首次从理论上阐述了子空间识别法应用于时变的车-桥耦合系统的可行性。JIN 等^[34]进一步将另一种基于 MOESP (multivariable output error state space, MOESP)的子空间识别方法引入车-桥耦合问题中并实现基于车辆信号的桥梁多阶频率间接识别,通过基于奇异值分解的伪逆矩阵算法,从理论上突破了子空间识别法应用对车辆行驶速度的限制。以车-桥耦合动力学模型为基础的子空间识别法(包括 ST-SSI 和 MOESP)能够通过车辆参数与响应组成的信号,从理论上消除了信号中的车辆自身信息,有效实现对桥梁多阶频率的间接识别。同时,该方法能够应用于正常车速行驶的车辆,通过选择合适的车辆参数且采用相同车辆的 2 次行驶,有效地消除了路面平整度对识别结果的影响。

然而,子空间识别法的应用也存在着一定的局限性^[33-34],该方法需要车辆以相同的路线和行驶速度通过桥梁 2 次,且通过对车辆参数的约束消除路面平整度对间接识别的不利影响,在实际应用中存在较大难度。为解决上述问题,本文提出了基于单次行驶的双轴车辆无量纲响应信号的桥梁多阶频率间接识别方法,从理论上有效去除未知的路面平整度对应用子空间识别法间接识别的不利影响。本文提出的基于车辆无量纲响应的桥梁多阶频率间接识别方法,以车-桥耦合系统理论模型为基础,从理论层面消除了桥梁频率间接识别的不利因素,且突破了子空间识别法对车辆参数的限制,使该方法适用于任何普通车辆。同时,考虑了实际应用中可能存在的不同行驶车速、不同路面平整度以及随机交通流对该方法的影响,另子空间识别法更适用于普通行驶车辆和行驶环境,为该方法的实际工程应用提供进一步的理论支撑。

1 桥梁多阶频率间接识别理论方法

本文提出的方法以车-桥耦合运动学方程为基础,建立适用于子空间识别法的系统状态方程和输出信号方程。在理论推导过程中,通过对车辆、桥梁、路面平整度的信息解耦,去除路面平整度和车辆自身参数在桥梁系统识别过程中的影响。同时,桥梁多阶频率识别所需要的输入和输出信号中,仅保留与车辆相关的参数与响应,而不需要依赖桥梁的监测信息,理论上证明基于双轴车辆响应的间接识别方法的可行性。

1.1 无量纲化车-桥耦合运动学方程

本文考虑双轴车辆以速度 v 行驶过桥梁,车辆包含 4 个自由度,模型见图 1。

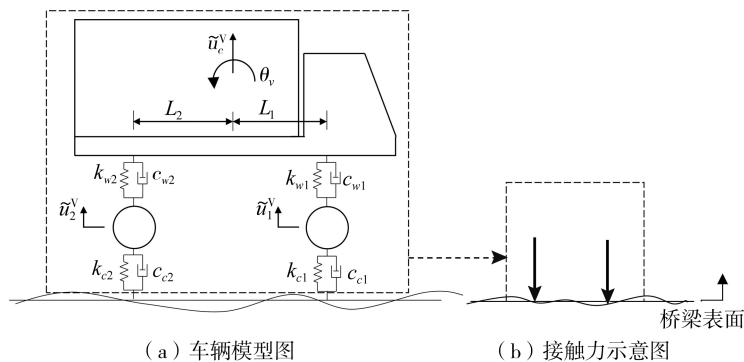


图 1 双轴多自由度车辆模型

Fig. 1 Dual-axle multi-degree-of-freedom vehicle model

由以下 2 个车-桥耦合关系的桥梁和车辆的运动学方程组成为

$$\mathbf{M}^B \ddot{\mathbf{u}}^B(t) + \mathbf{C}^B \dot{\mathbf{u}}^B(t) + \mathbf{K}^B \mathbf{u}^B(t) + \mathbf{W}_N^B(\tilde{x}) \tilde{\boldsymbol{\lambda}}(t) = \tilde{\mathbf{F}}_G \quad (1)$$

$$\mathbf{M}^V \ddot{\mathbf{u}}^V(t) + \mathbf{C}^V \dot{\mathbf{u}}^V(t) + \mathbf{K}^V \mathbf{u}^V(t) - \mathbf{W}_N^V(\tilde{x}) \tilde{\boldsymbol{\lambda}}(t) = 0 \quad (2)$$

式中:上标“B”和“V”分别为该参数为桥梁 (bridge) 和车辆 (vehicle) 的参数; \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{C} 分别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; $\mathbf{u}^B(t)$ 为桥梁的位移响应向量; $\mathbf{u}^V(t) = [\tilde{u}_c^V(t) \quad \tilde{\theta}_c^V(t) \quad \tilde{u}_1^V(t) \quad \tilde{u}_2^V(t)]^T$ 为车辆的位移响应,其中符号 T 表示向量的转置; $\tilde{\mathbf{F}}_G$ 包含了车辆的自身重量; $\mathbf{W}_N^V(\tilde{x})$ 和 $\mathbf{W}_N^B(\tilde{x})$ 为车-桥之间的接触力 $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}(t)$ 所在的自由度及其方向,其中, $\tilde{x} = vt$ 表示车轮 (即接触力) 距离桥梁一端的长度, $\mathbf{W}_N^B(\tilde{x})$ 由有限元形函数方程组成^[3], $\mathbf{W}_N^V(\tilde{x})$ 是由 0 和 1 组成的矩阵,如式 (3) 所示:

$$\mathbf{W}_N^V(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

车-桥之间的接触力 $\tilde{\lambda}(t) = [\tilde{\lambda}_1(t) \quad \tilde{\lambda}_2(t)]^T$ 考虑接触刚度 k_{c_j} 和接触阻尼 c_{c_j} , 其表达式为

$$\tilde{\lambda}_j(t) = k_{c_j} g_{N_j}(t) + c_{c_j} \dot{g}_{N_j}(t) \quad (4)$$

$$g_{N_j}(t) = -\tilde{u}_j^V(t) + \mathbf{W}_N^B(\tilde{x}_j)^T \mathbf{u}^B(t) + r_c(\tilde{x}_j) \quad (5)$$

式中: 下标 $j=1, 2$ 为车辆的前、后轮; $r_c(\tilde{x}_j)$ 为接触力所在位置的路面平整度的幅值。

将式(5)代入式(4), 并将式(4)乘以 $1/m_1^V(\omega_1^V)^2 L^B$ 得到无量纲化的接触力方程(6):

$$\begin{aligned} \lambda_j + K_j^V u_j^V + 2 \frac{C_j^V}{\omega_1^V} \dot{u}_j^V = & \left(K_j^V \mathbf{W}_N^B(x_j)^T + \frac{2vC_j^V}{\omega_1^V L^B} \mathbf{W}_N^B(x_j)' \right)^T \mathbf{u}^B + \\ & 2 \frac{C_j^V}{\omega_1^V} \mathbf{W}_N^B(x_j)^T \dot{\mathbf{u}}^B + K_j^V R(x_j) + \frac{2vC_j^V}{\omega_1^V L^B} R(x_j)' \end{aligned} \quad (6)$$

式中: L^B 为桥梁单跨的有效长度, 简支梁桥的有效长度为单跨长度, 连续梁的有效长度取跨度的 0.75; m_1^V 和 ω_1^V 分别为车辆的 1 阶模态质量和频率; $u_j^V = \tilde{u}_j^V(t)/L^B$ 为车辆第 j 个车轮的无量纲位移响应; $\mathbf{u}^B = \tilde{\mathbf{u}}^B(t)/L^B$ 为桥梁的无量纲位移响应向量; $\dot{\mathbf{u}}_j^V$ 和 $\dot{\mathbf{u}}^B$ 分别为车辆和桥梁无量纲速度响应(位移响应对时间 t 的导数); $K_j^V = k_{c_j}/m_1^V(\omega_1^V)^2$ 和 $C_j^V = c_{c_j}/2m_1^V\omega_1^V$ 定义为车辆第 j 个车轮的相对刚度比和相对阻尼比; $x_j = \tilde{x}_j/L^B$ 为第 j 个车轮的无量纲位置参数; $R(x_j) = r_c(x_j)/L^B$ 为第 j 个车轮所在位置的无量纲路面平整度参数; $(\)'$ 为变量对无量纲位置参数 x_j 的导数。

1.2 双轴无量纲残余响应运动学方程

由于车辆的前后车轮会先后通过路面平整度相同的位置, 2 个车轮通过的时间存在的时间差 $t_w = l_w/v$ 与两轮轴距 $l_w = l_1 + l_2$ 相关, 因此 $R(x_1) = R(x_2 + l_w/L^B)$ 。同样地, 2 个车轮的位置矩阵也存在类似的关系, 即 $\mathbf{W}_N^B(x_1) = \mathbf{W}_N^B(x_2 + l_w/L^B)$ 。一般认为车辆的 2 个车轮的刚度系数 k_{c_j} 和阻尼系数 c_{c_j} ($j=1, 2$) 接近, 则相应的无量纲参数 $K_1^V \approx K_2^V \approx K^V$ 以及 $C_1^V \approx C_2^V \approx C^V$ 。将 2 个车轮接触力的无量纲方程(6)与 K^V 相除并作差, 可以去除方程(6)中的路面平整度项 $R(x_j)$ 和 $R(x_j)'$, 并得到差值公式(7):

$$\frac{1}{K^V} \Delta \lambda + \Delta u^V + \frac{2C^V}{\omega_1^V K^V} \Delta \dot{u}^V = \left(\mathbf{W}_N^B(x_j)^T + \frac{2vC^V}{\omega_1^V K^V L^B} \mathbf{W}_N^B(x_j)' \right)^T \Delta \mathbf{u}^B + \frac{2C^V}{\omega_1^V K^V} \mathbf{W}_N^B(x_j)^T \Delta \dot{\mathbf{u}}^B \quad (7)$$

式中: $\Delta \lambda = \lambda_1(t) - \lambda_2(t + t_w)$ 为考虑时间差 $t_w = l_w/v$ 的前后 2 个车轮的无量纲接触力差值; $\Delta u^V = u_1^V(t) - u_2^V(t + t_w)$ 和 $\Delta \mathbf{u}^B = \mathbf{u}_1^B(t) - \mathbf{u}_2^B(t + t_w)$ 分别为考虑时间差的车辆和桥梁的无量纲残余响应。如方程(7)所示, 路面平整度的相关参数 $R(x_j)$ 和 $R(x_j)'$ 在差值后被完全消除。

相应地, 考虑桥梁的无量纲残余响应的运动方程由方程(1)变为

$$\mathbf{M}^B \Delta \ddot{\mathbf{u}}^B + \mathbf{C}^B \Delta \dot{\mathbf{u}}^B + \mathbf{K}^B \Delta \mathbf{u}^B = -\frac{1}{L^B} \mathbf{W}_N^B(x) \Delta \tilde{\lambda} \quad (8)$$

方程(7)和方程(8)为考虑了车辆双轴残余响应, 且不包含路面平整度影响的车辆与桥梁的无量纲化运动学方程。与现有研究相比^[33-39], 本文提出的方法不需要通过约束车辆参数来抑制路面平整度对应用子空间识别法间接识别桥梁频率的影响。

1.3 系统方程构建方法

子空间识别法是通过系统的输入和输出信号进行处理, 识别非时变线性系统模态参数的方法, 常用的方法有 MOESP、数值算法子空间状态空间系统辨识(numerical algorithms for subspace state space system identification, N4SID)等^[35-36]。对于一些特殊的系统, 仅有输出信号而没有输入信号的情况, 也可以使用 SSI 方法^[35-36]。本文探讨了以 SSI 为基础改进的 ST-SSI 方法^[33], 以及 MOESP 方法^[34]在基于车辆无量纲响应信号的桥梁多阶频率间接识别方法中的应用。

首先, 需要将方程(7)和方程(8)分别改写为适用于子空间识别法需要的输出信号方程和系统状态方程^[36-37]。将桥梁的运动学方程(8)改写为状态空间方程(9):

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}^B = \mathbf{N}_c^B \Delta \mathbf{X}^B + \frac{1}{L^B} \mathbf{N}_c^M \mathbf{W}_N^B(x) \Delta \tilde{\lambda} \quad (9)$$

式中: $\Delta \dot{\mathbf{X}}^B = [\Delta \mathbf{u}^B \quad \Delta \dot{\mathbf{u}}^B]^T$ 为桥梁系统的状态向量; \mathbf{N}_c^B 和 \mathbf{N}_c^M 为由桥梁质量、刚度、阻尼矩阵组成的桥梁系统矩阵,如式(10)所示:

$$\mathbf{N}_c^B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -(\mathbf{M}^B)^{-1}\mathbf{K}^B & -(\mathbf{M}^B)^{-1}\mathbf{C}^B \end{bmatrix}, \mathbf{N}_c^M = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -(\mathbf{M}^B)^{-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{0}$ 和 \mathbf{I} 为零矩阵和对角 1 矩阵。将方程(9)的等号两边同时乘以 $\exp(-\mathbf{N}_c^B t)$ 并积分^[31],可以得到时间离散化的桥梁系统状态方程(11):

$$\Delta \mathbf{X}_{k+1}^B = \mathbf{N}^B \Delta \mathbf{X}_k^B + \frac{1}{L^B} \mathbf{N}^M \mathbf{W}_{N,k}^B \Delta \tilde{\lambda}_k \quad (11)$$

式中:下标 k 为考虑了时间步长 dt 的离散时间; \mathbf{N}^B 和 \mathbf{N}^M 为仅包含桥梁信息的考虑离散时间的桥梁系统矩阵,其表达式为

$$\mathbf{N}^B = \exp(-\mathbf{N}_c^B \Delta t), \mathbf{N}^M = (\mathbf{N}_c^B)^{-1}(\mathbf{N}^B - \mathbf{I})\mathbf{N}_c^M \quad (12)$$

类似的,可以将方程(7)改写为状态空间方程(13):

$$\Delta P = \mathbf{N}^{Vf} \mathbf{N}^{WB} \Delta \mathbf{X}^B \quad (13)$$

式中, ΔP 为系统的输出信号,仅由车辆参数与响应组成,其表达式为

$$\Delta P = \frac{1}{K^V} \Delta \lambda + \Delta u^V + \frac{2C^V}{\omega_1^V K^V} \Delta \dot{u}^V \quad (14)$$

\mathbf{N}^{Vf} 和 $\mathbf{N}^{WB}(x)$ 是车辆的系统矩阵,定义为

$$\mathbf{N}^{Vf} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{2C^V}{\omega_1^V K^V} \end{bmatrix}, \mathbf{N}^{WB}(x) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_N^B(x)^T & \mathbf{0} \\ \frac{v}{L^B} \mathbf{W}_N^B(x)^T & \mathbf{W}_N^B(x)^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后,将输出信号方程(13)用离散化的时间表示为

$$\Delta P_k = \mathbf{N}^{Vf} \mathbf{N}_k^{WB} \Delta \mathbf{X}_k^B \quad (16)$$

式中, ΔP_k 是由车辆参数与响应组成的,离散时间状态下的系统输出信号,如式(17)所示:

$$\Delta P_k = \frac{1}{K^V} \Delta \lambda_k + \Delta u_k^V + \frac{2C^V}{\omega_1^V K^V} \Delta \dot{u}_k^V \quad (17)$$

综上,方程(11)和方程(16)即为以车-桥耦合运动学方程为基础,构建的适用于子空间识别法的系统状态方程(11)和输出信号方程(16)。通过对方程(11)和方程(16)应用子空间识别法(包括 ST-SSI 和 MOESP)求解系统矩阵 \mathbf{N}_c^B 的特征值,也就是系统的频率。

1.4 桥梁多阶频率间接识别信号参数

当行驶车辆的无量纲速度参数 $S_{v1} = \pi v / \omega_1^B L^B < 0.1$, 其中 $\omega_1^B = 2\pi f_1^B$ 是桥梁的 1 阶频率,可以对系统的输出信号 ΔP_k 应用 ST-SSI 方法^[33], 求解桥梁系统矩阵 \mathbf{N}_c^B 的特征值,也就是桥梁的多阶频率。其中,用于求解的输出信号 ΔP_k 仅由车辆参数与响应组成,包括车辆的 1 阶频率 ω_1^V 、无量纲刚度参数 K^V 、无量纲阻尼参数 C^V 、车辆双轴无量纲残余响应 Δu_k^V 和 $\Delta \dot{u}_k^V$ 、车辆双轴的无量纲接触力差值 $\Delta \lambda_k$ 。

当行驶车辆的无量纲速度参数 $S_{v1} \geq 0.1$, 则可以应用 MOESP 方法^[34] 并通过假设 $\mathbf{W}_{N,k}^B = \Phi_k$ 并改写式(16):

$$(\mathbf{N}^{Vf} \mathbf{N}_k^{WB})^\dagger \Delta P_k = \mathbf{E} \Delta \mathbf{X}_k^B \quad (18)$$

式中: $(\)^\dagger$ 为该矩阵的伪逆矩阵^[34,37]; \mathbf{E} 为一个近似随时间不变的系统矩阵,可以定义为 $\mathbf{E} = \text{diag}(1, 0, \dots, 0) \in R^{2N \times 2N}$, 其中 N 是桥梁的自由度; Φ_k 由桥梁的假定 1 阶振型形状函数组成,本文假设该振型由一次线性函数表示^[34]。应用 MOESP 方法需要方程(11)中的输入信号 $\mathbf{W}_{N,k}^B \Delta \tilde{\lambda}_k = \Phi_k \Delta \tilde{\lambda}_k$ 和方程(18)中的输出信号 $(\mathbf{N}^{Vf} \mathbf{N}_k^{WB})^\dagger \Delta P_k$ 来对桥梁频率进行识别。与 ST-SSI 方法类似,用于求解桥梁频率的输出信号 $(\mathbf{N}^{Vf} \mathbf{N}_k^{WB})^\dagger \Delta P_k$ 和输入信号 $\Phi_k \Delta \tilde{\lambda}_k$ 不需要测量任何桥梁的振动响应,除了需要与 ST-SSI 方法相同的车辆参数和响应之外,只需要与车辆行驶位置相关的位置矩阵 $\mathbf{W}_N^B(x)$ 和车辆的行驶速度 v 。

以车-桥耦合系统运动学方程为基础,即式(1)和式(2)构造适用于子空间识别法的系统状态方程(11)和输出信号方程(16)的过程中,已经成功分离了车辆与桥梁信息相关的信号,形成了仅有车辆信号组成的输出信号 ΔP_k (或 $(\mathbf{N}^{Vf} \mathbf{N}_k^{WB})^\dagger \Delta P_k$) 与桥梁状态 \mathbf{X}_k^B 的等效关系如式(16)所示。且系统状态方程(11)中的系统矩阵 \mathbf{N}_c^B 仅包含桥梁信息,输入信号 $\mathbf{W}_{N,k}^B \Delta \tilde{\lambda}_k$ 仅包含车辆相关信息。因此,应用改进的子空间识别法(包括 ST-SSI 方法

和 MOESP 方法)所需的输入和输出信号仅由车辆相关信息组成,而不需要桥梁的任何信息,而识别的系统矩阵 N_c^B 仅包含桥梁信息,其特征值即为桥梁的多阶频率,从而实现了基于车辆响应的桥梁频率的间接识别。

2 桥梁频率间接识别数值计算

本文采用双轴四自由度车辆(表1)验证考虑车辆无量纲响应的改进子空间识别法间接识别一座简支梁桥和一座三跨连续梁桥(表2)的频率。为了模拟测量车辆的响应,本文在对桥梁进行间接识别之前,通过求解车-桥耦合运动学方程(1)和方程(2)计算车辆响应,其中路面平整度(road roughness condition, RRC)考虑了4个等级:RRC = 1(很好),2(好),3(一般),4(差)。作为理论验证,计算模型中不同等级的路面平整度曲线仅在数量级上存在差异,而在频域范围内包含的成分相同^[38]。同时为了获得稳定的计算结果,考虑车辆在不平整路面上行驶10 m后进入桥梁。对于识别所需的输入和输出信号,通过去除平均值滤除了采集信号中的无穷大周期成分。

表1 双轴车辆参数

Table 1 Parameters of a dual-axle vehicle

| 车辆质量 m_1^V/kg | 接触刚度 $k_{c1} = k_{c2}/(\times 10^5 \text{ N/m})$ | 接触阻尼 $c_{c1} = c_{c2}/(\text{N} \cdot \text{s/m})$ | 车辆1阶频率 f_1^V/Hz |
|------------------------|--|--|--------------------------|
| 4990 | 7.02 | 1600 | 1.95 |

表2 待测桥梁参数

Table 2 Parameters of target bridges

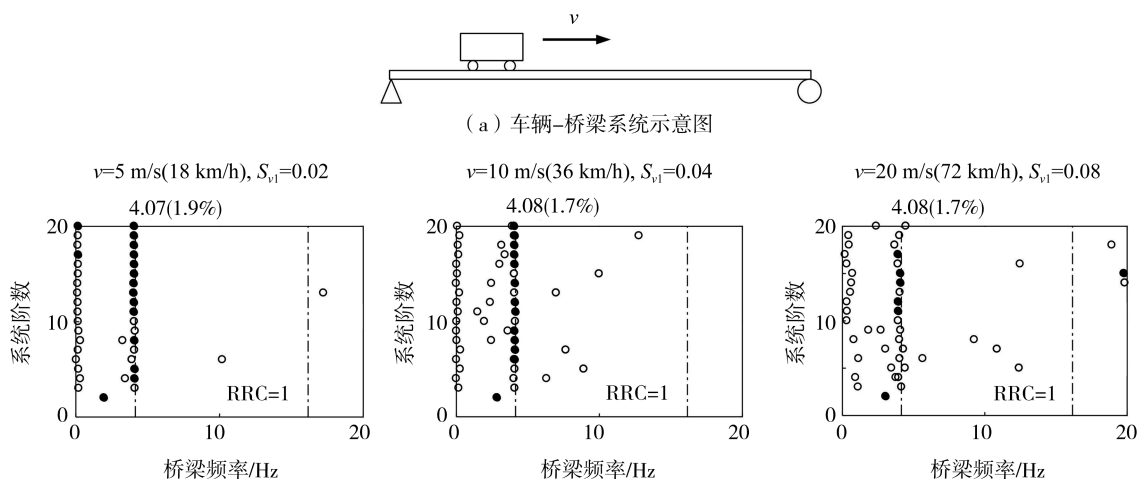
| 桥长 L^B/m | 抗弯刚度 $EI/(\times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$ | 单位质量 $\mu/(\times 10^4 \text{ kg/m})$ | 1阶频率 f_1^B/Hz | 2阶频率 f_2^B/Hz |
|-------------------|---|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 30 | 2.05 | 3.60 | 4.15 | 16.19 |
| 20+40+20 | | | 3.64 | 9.25 |

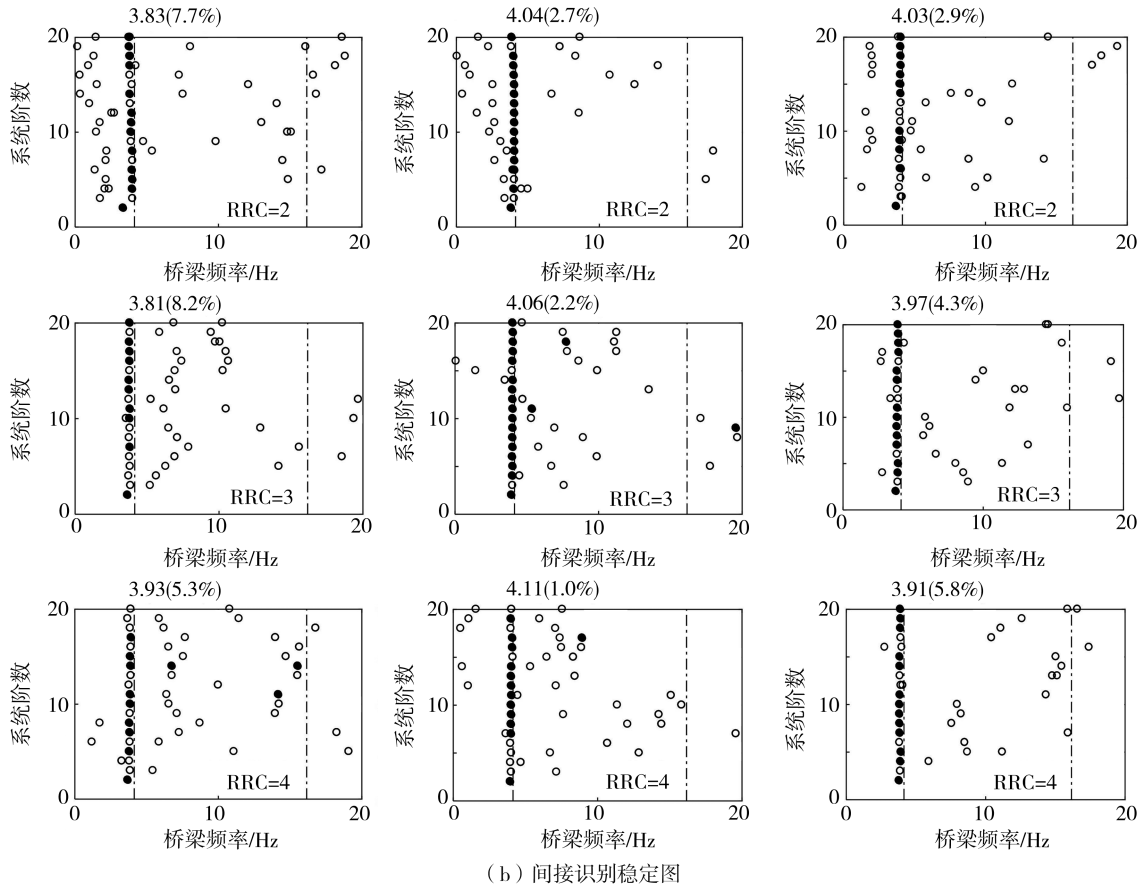
依据行驶车辆的无量纲车速 $S_{v1} = \pi v / \omega_1^B L^B$ 大小,本文应用 ST-SSI ($S_{v1} < 0.1$) 或 MOESP ($S_{v1} \geq 0.1$) 方法对桥梁频率进行识别。由于桥梁特征长度 L^B 和桥梁的基本频率 ω_1^B 为未知参数,可以通过预估值大致控制行车速度 v 的范围,并应用合适的改进子空间识别法。另外,也可以同时应用2种识别方法,并根据识别结果计算车辆的无量纲速度 S_{v1} 来选取更加可靠的结果。

2.1 简支梁桥频率间接识别方法验证

本文首先验证了对双轴车辆无量纲响应应用改进的子空间识别法间接识别一座简支梁桥多阶频率的可行性。假设5个工况中,车辆通过桥梁的行驶速度 v 分别为5 m/s (18 km/h)、10 m/s (36 km/h)、20 m/s (72 km/h)、30 m/s (108 km/h)、40 m/s (144 km/h),相应的无量纲速度参数 S_{v1} 分别为0.02、0.04、0.08、0.12、0.16。

本文采用稳定图^[33-35]来展示子空间法的识别结果,见图2。稳定识别频率 f_n^{id} 的判据为相邻阶次间的相对偏差小于1%,即 $\varepsilon_f = |f_{N_0} - f_{N_0-1}| / f_{N_0} < 1\%$ ^[33-34,36]。其中 N_0 可视为未知的桥梁自由度; f_{N_0} 表示预估系统阶数为 N_0 的识别频率。每幅稳定图上方的标注“ $f_n^{id}(\varepsilon_n)$ ”表示稳定识别频率 f_{N_0} 与理论频率 f_n^B 的误差 $\varepsilon_n = |f_{N_0} - f_n^B| / f_n^B$ 。



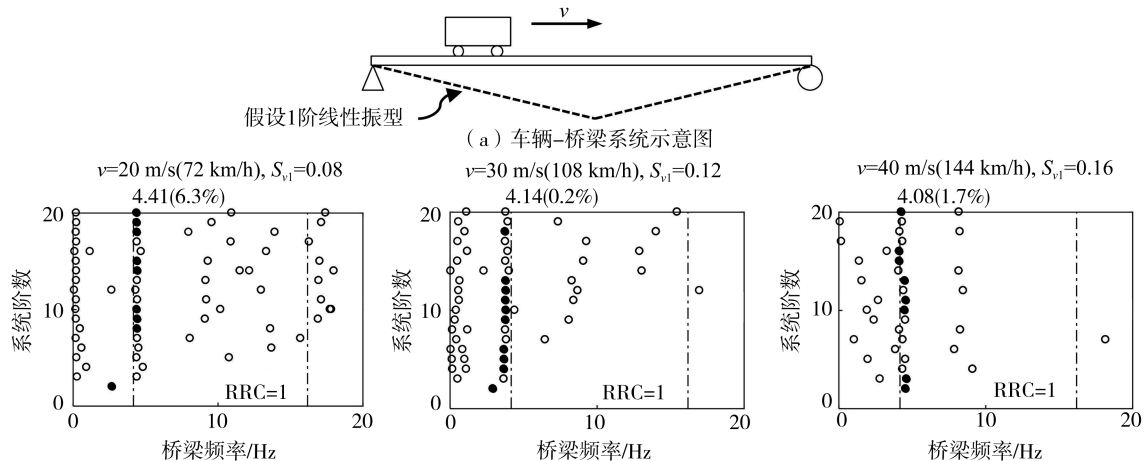


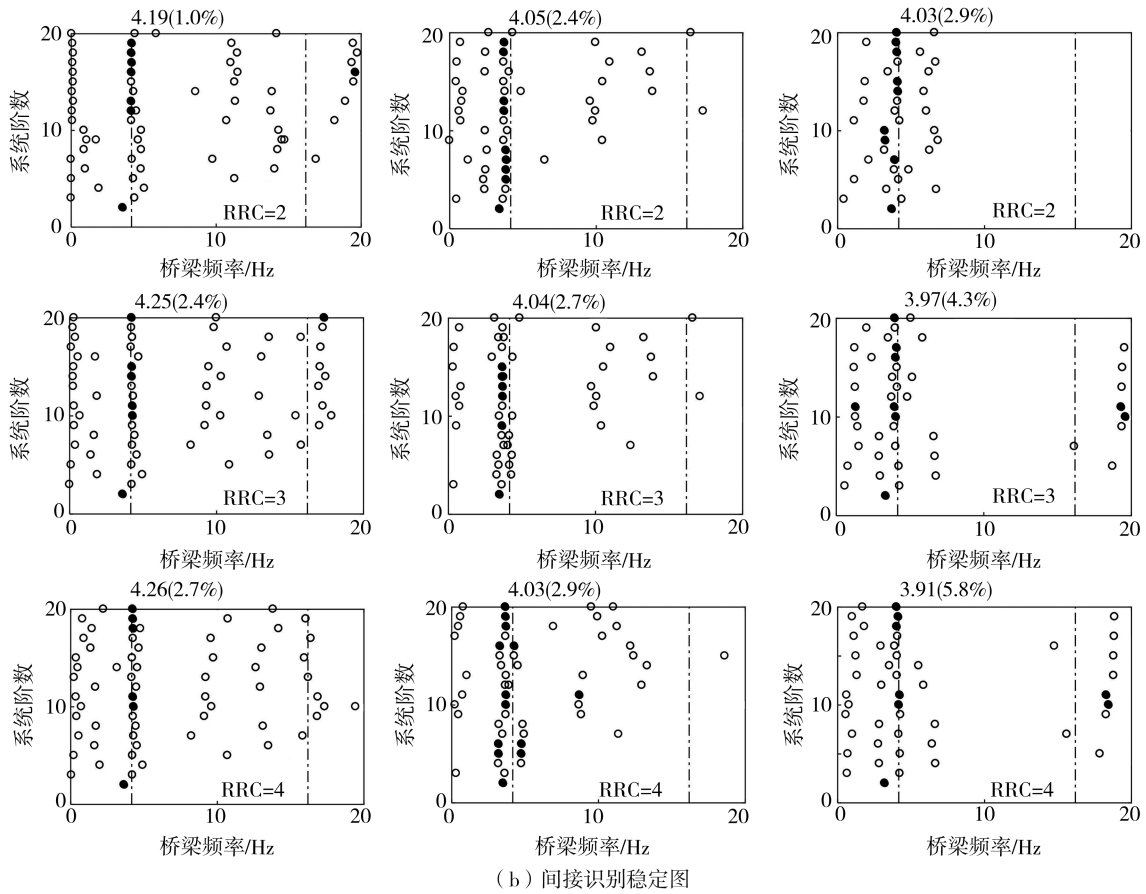
注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^d 。

图 2 基于双轴车辆无量纲响应的简支桥频率 ST-SSI 间接识别稳定图

Fig. 2 Stabilization diagrams for ST-SSI to identify bridge frequencies indirectly using the dual-axle vehicle response

行驶车速相对较低(v 为 5、10、20 m/s, S_{v1} 为 0.02、0.04、0.08)时采用 ST-SSI 方法对简支梁桥频率间接识别的结果,见图 2。行驶车速相对较高(v 为 20、30、40 m/s, S_{v1} 为 0.08、0.12、0.16)时采用 MOESP 方法的识别结果,见图 3。部分识别稳定图中(以及后文图中也有类似情况)在 0 Hz 附近出现了较小的识别频率,是车-桥耦合计算的数值误差造成的,随着车-桥耦合计算的时间步长减小,0 Hz 附近的识别频率会明显减少。另外,也可以根据稳定准则 $\varepsilon_f < 1\%$ 判定该频率不稳定,因此可以忽略。整体来看,在考虑不同等级路面平整度和不同行驶速度的情况下,ST-SSI(图 2)和 MOESP(图 3)均能成功识别桥梁的基本频率。当车辆行驶速度相对较低时(采用 ST-SSI 方法),识别结果更加稳定并且“噪声”更少。一方面,慢车行驶过桥梁需要更长的时间,能够从桥梁上收集更多的信息;另一方面,MOESP 方法具有更多的假设和不确定性,包括预估了 1 阶振型函数,以及引入了针对车桥耦合系统时变问题的伪逆矩阵算法。这一点也充分解释了当车速为 20 m/s (72 km/h) 时,采用 ST-SSI 方法(图 2)的识别结果比 MOESP 方法(图 3)得到的识别结果更加清晰,“噪声”更少。然而,由于单一车辆不足以激发桥梁的高阶模态振动,因此无论是采用 ST-SSI 还是 MOESP 方法,都难以识别桥梁高阶频率。





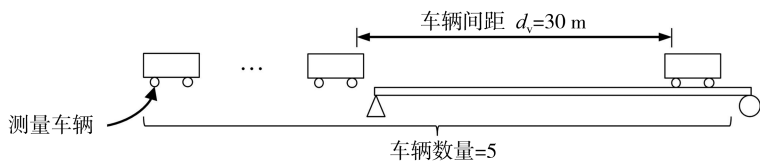
注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^d 。

图3 基于双轴车辆无量纲响应的简支桥频率 MOESP 间接识别稳定图

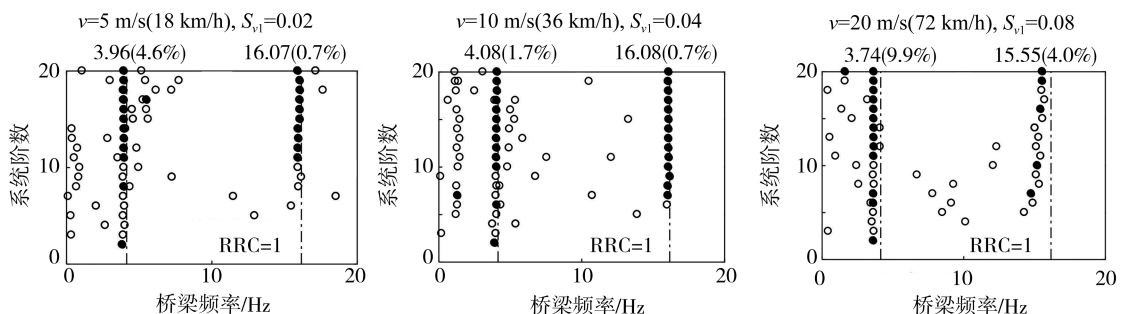
Fig.3 Stabilization diagrams for MOESP to identify bridge frequencies indirectly using the dual-axle vehicle response

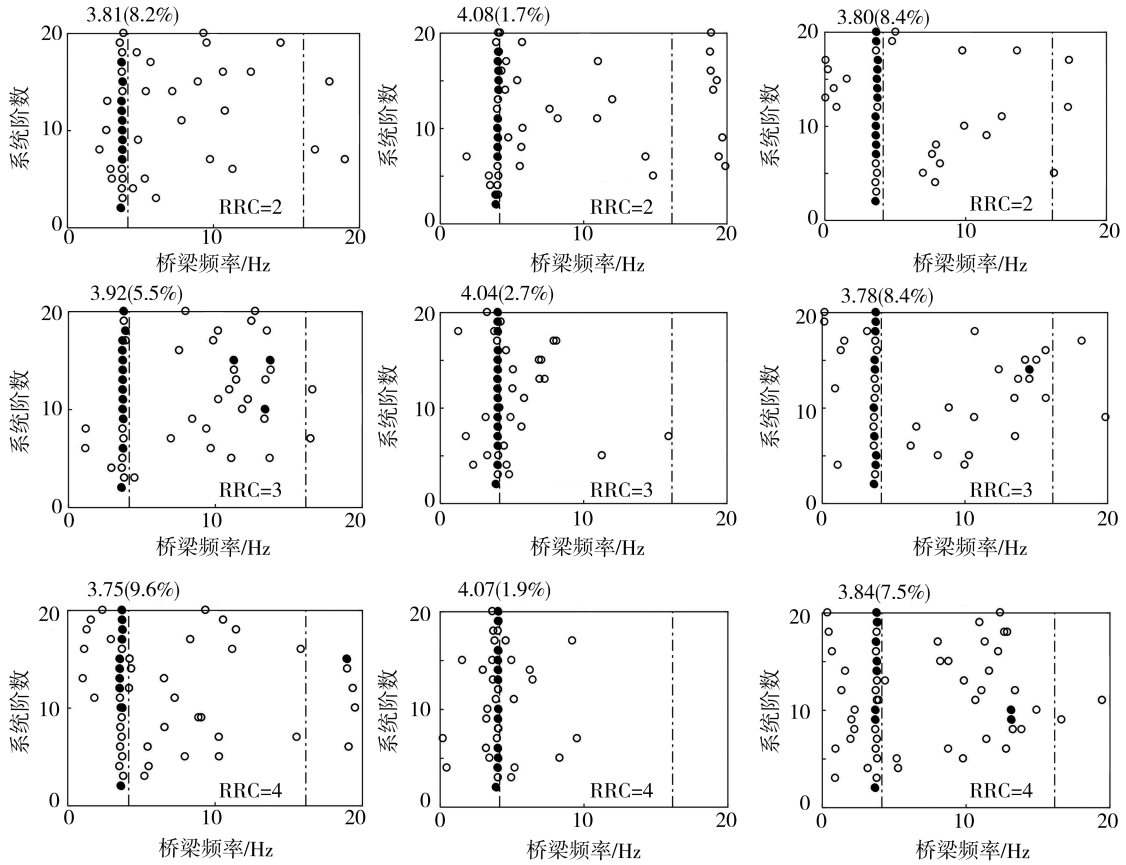
2.2 考虑连续行驶车辆的简支桥梁频率间接识别

为了更好地激发桥梁的高阶振动模态,本节考虑了5辆具有相同参数见表1。间距为 $d_v = 30$ m,行驶速度相同的连续车辆通过桥梁,并假设第5辆车为测量车辆,即对第5辆车参数与响应组成的输入与输出信号应用改进的子空间识别法。ST-SSI 和 MOESP 方法的识别结果见图4和图5。由图可知,对于所有情况 ST-SSI和 MOESP 方法均成功识别了桥梁的1阶频率。更为关键的是,当考虑较低路面平整度($RRC = 1$)和较小无量纲车速($S_{v1} < 0.1$)的情况下,ST-SSI 方法能够准确地识别出桥梁第2阶频率。随着无量纲速度变大以及路面状况变差,ST-SSI 方法对桥梁2阶频率的识别效果减弱。另外,虽然 MOESP 方法仍然只能识别桥梁的1阶频率,但连续行驶车辆放大了桥梁振动,减少了识别稳定图中的“噪声”,相比于单一车辆的识别结果(图3),图5的识别结果更加清晰和稳定。由此可得,考虑连续行驶车辆能够较好的放大桥梁的振动,且一定程度上激发桥梁的高阶频率振动,更有利于桥梁频率的间接识别。



(a) 车辆-桥梁系统示意图



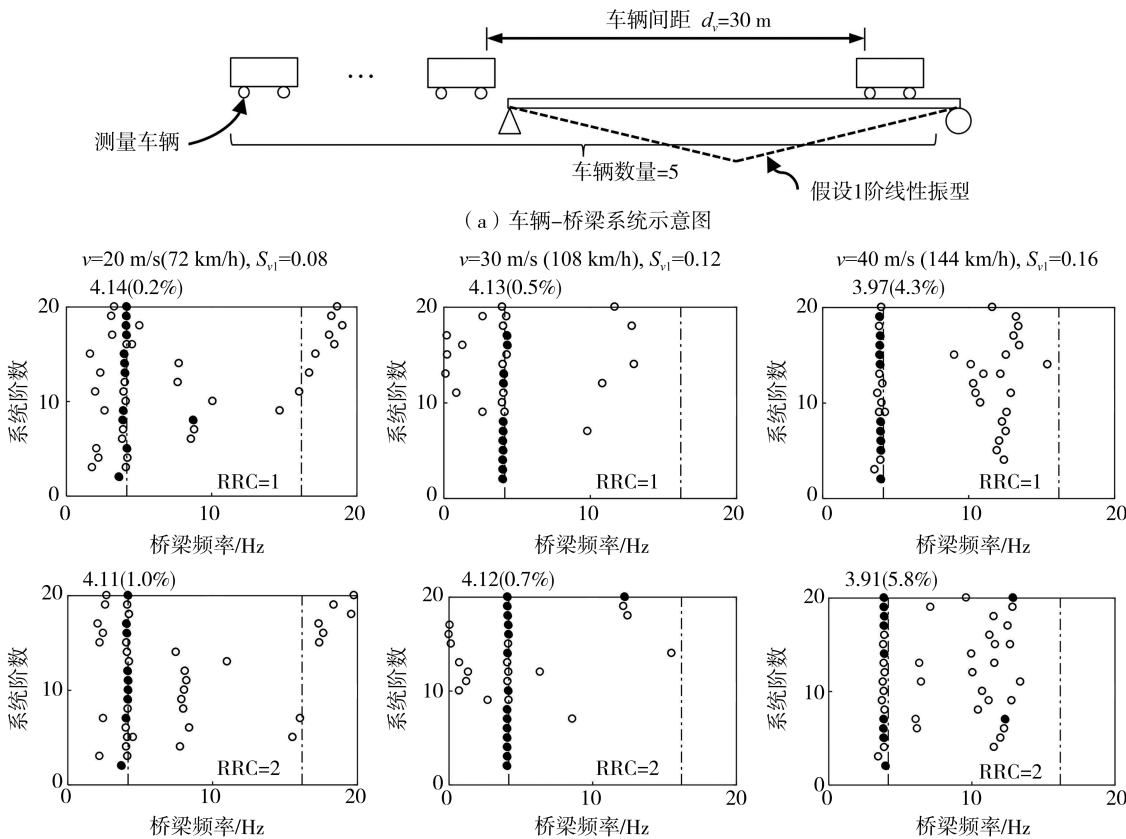


(b) 间接识别稳定图

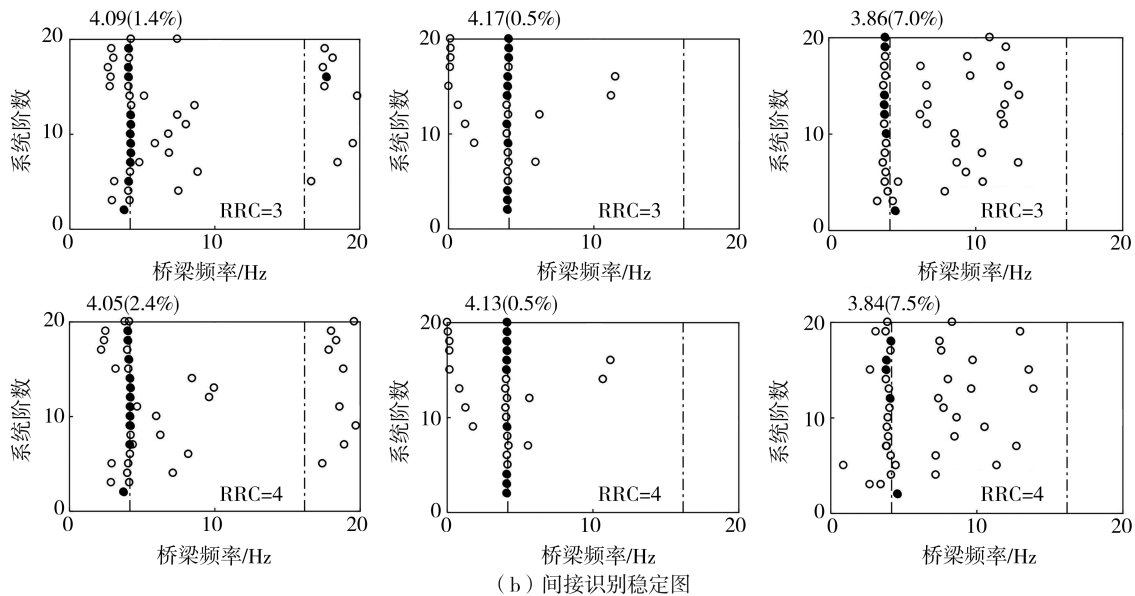
注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{id} 。

图 4 考虑连续行驶车辆情况下应用 ST-SSI 的识别稳定图

Fig. 4 Stabilization diagrams for ST-SSI considering regular on-going vehicles



(a) 车辆-桥梁系统示意图



注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{id} 。

图5 考虑连续行驶车辆情况下应用 MOESP 的识别稳定图

Fig.5 Stabilization diagrams for MOESP considering regular on-going vehicles

2.3 考虑随机行驶车辆的简支梁桥频率间接识别

为将本方法应用于更接近桥梁实际运行状态的场景,本节使用元胞自动机 (cellular automata, CA) 模型来模拟桥梁上的随机行驶车辆^[39-40],同时考虑桥梁服役状态下的常规车流量^[41]。为了更好的与 2.2 节进行对比,本节考虑 5 辆随机行驶车辆,同样对第 5 辆车参数与响应组成的输入与输出信号应用改进的子空间识别法。最后一辆(测量)车辆(图 6 中黑粗线)具有表 1 所示的属性,并以匀速 v 驶过桥梁。其他车辆以近似但非匀速地通过桥梁。测量车辆不同车速情况下随机行驶车辆的行驶路径见图 6。此外,本节对前 4 辆行驶车辆赋予随机参数,其车辆重量为 1 500~3 000 kg 中的随机数,1 阶频率为 1.5~3.5 Hz 中的随机数,阻尼比与最后一辆(测量)车辆相近。

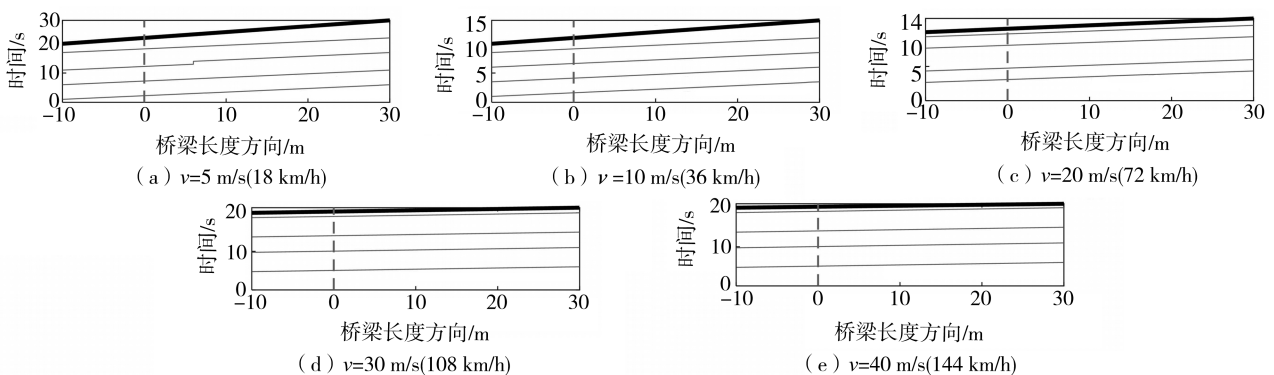
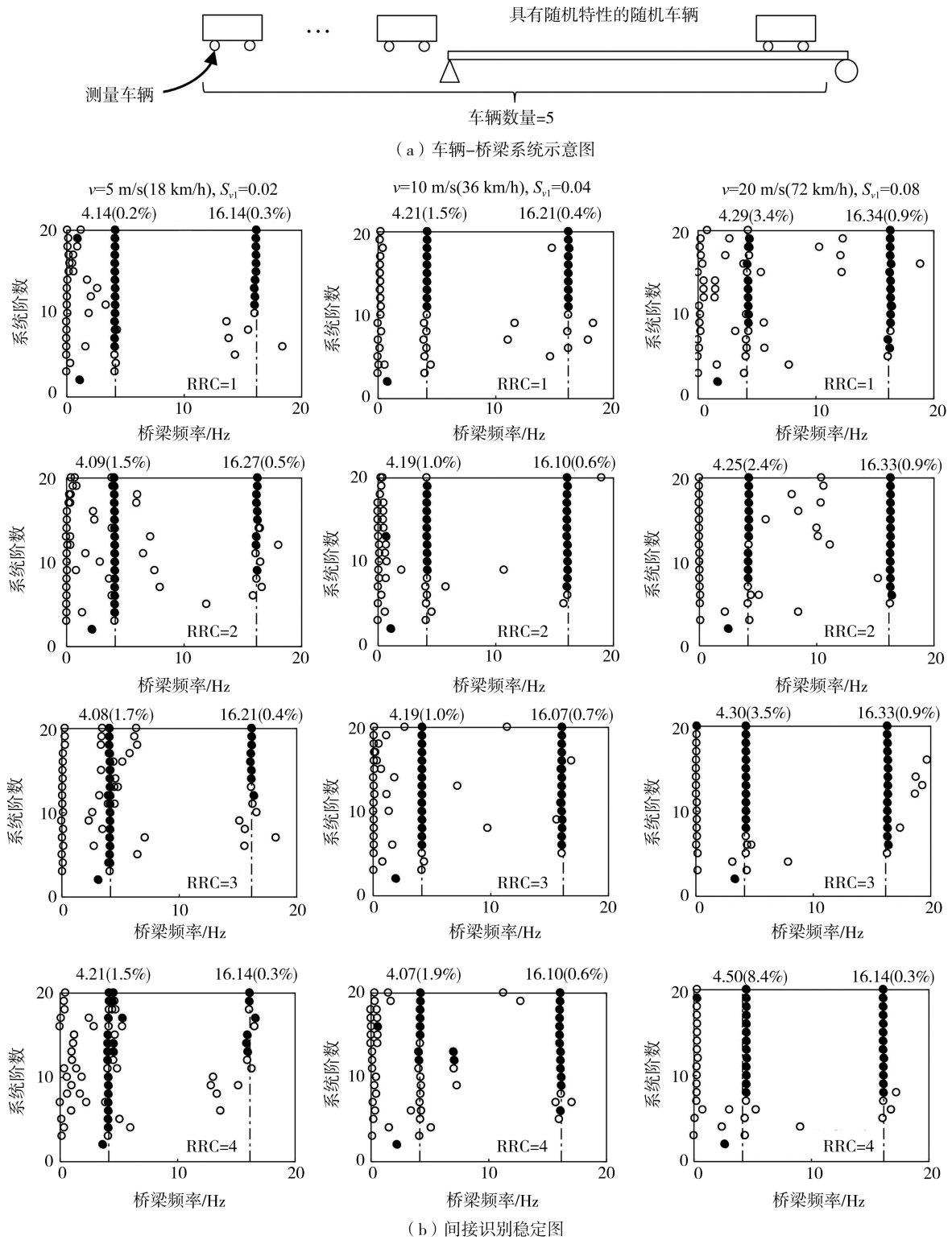


图6 简支梁桥($L^B = 30$ m)随机车辆行驶路径

Fig.6 Paths of random vehicles for the simply supported bridge ($L^B = 30$ m)

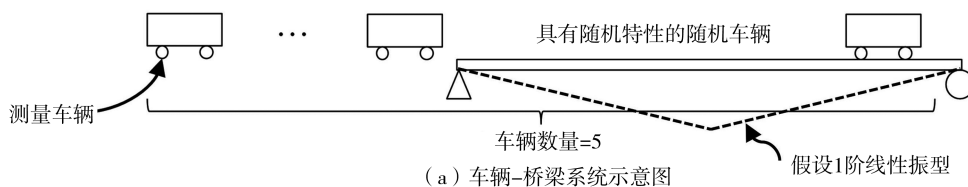
应用 ST-SSI 和 MOESP 方法的识别结果见图 7、图 8。当无量纲车速较小($S_{v1} < 0.1$)时,ST-SSI 方法成功识别了所有工况的前 2 阶桥梁频率。当车速 $v = 20$ m/s 时,MOESP 方法也能够识别桥梁的前 2 阶频率,但当车速较高($S_{v1} \geq 0.1$)时,MOESP 方法能够清晰稳定地识别桥梁的 1 阶频率,但无法识别桥梁的第 2 阶频率。总体而言,随机车辆荷载能够更好地激发桥梁的高阶振动,有利于桥梁高阶频率的识别,尤其是在无量纲车速较小的情况。然而,随着车速的提高,车辆通过桥梁的时间变短,桥梁的高阶模态可能难以被激励,因此测量车辆无法采集到足够的高阶频率信息。尽管如此,考虑车辆无量纲响应的改进子空间识别法对于简支梁桥的基本频率有较好的识别能力。

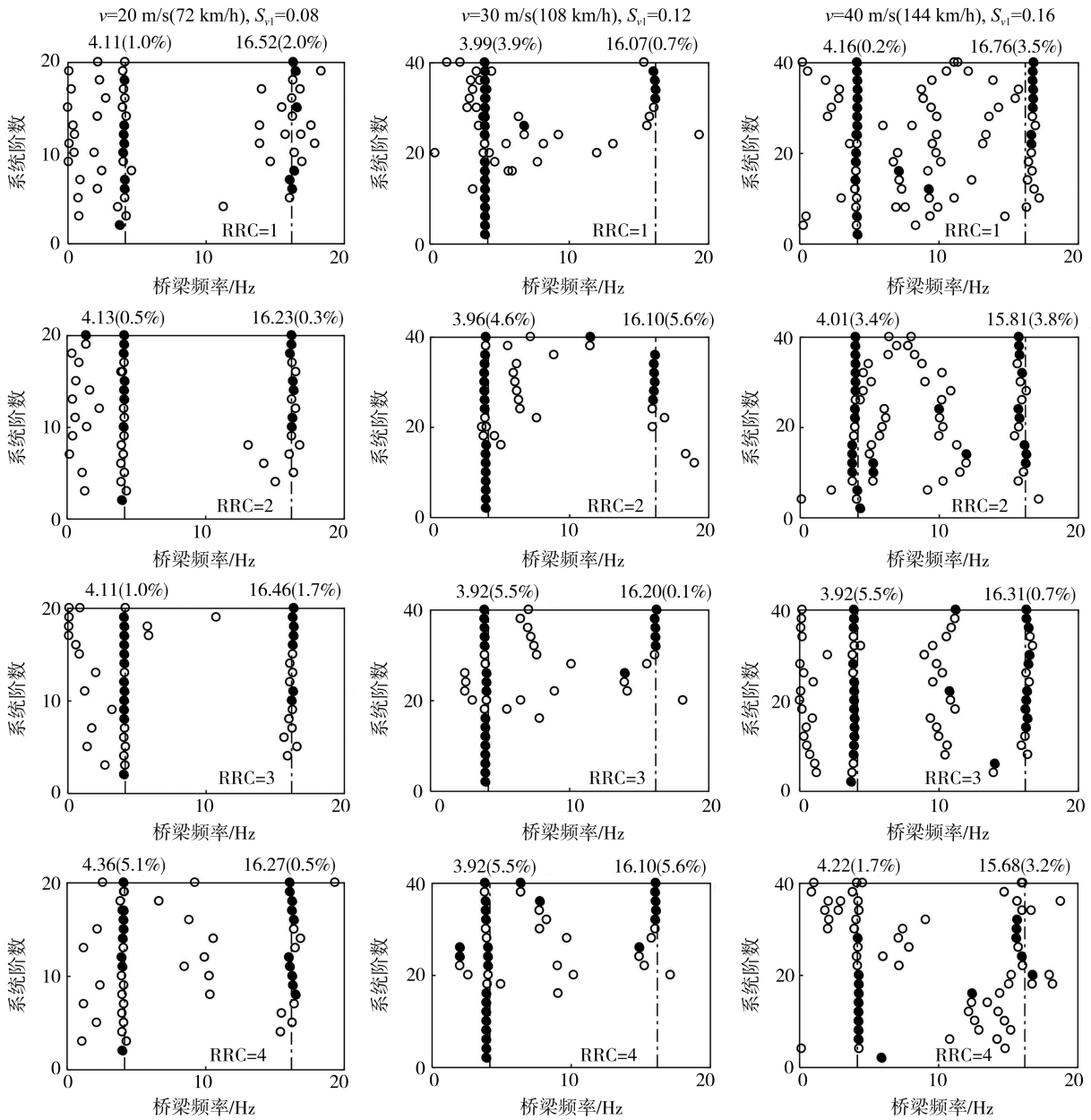


注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{id} 。

图 7 考虑随机行驶车辆情况下应用 ST-SSI 的识别稳定图

Fig. 7 Stabilization diagrams of ST-SSI identification considering random vehicles





(b) 间接识别稳定图

注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{id} 。

图8 考虑随机行驶车辆情况下应用 MOESP 的识别稳定图

Fig. 8 Stabilization diagrams of MOESP identification considering random vehicles

2.4 考虑随机行驶车辆的三跨连续梁桥频率间接识别

本节在前文的基础上,探讨了考虑车辆无量纲响应的改进子空间识别法对三跨连续梁桥频率间接识别的应用。首先通过车-桥耦合运动学方程计算求解车辆响应,考虑车辆速度 v 为 6、12、24 m/s 这 3 种情况,对应的无量纲速度参数分别为:边跨 $S_{v1,side}$ 为 0.055、0.110、0.220,中跨 $S_{v1,mid}$ 为 0.028、0.055、0.110。此算例中,测量车辆的参数见表 1,测量车辆进入桥梁前,进行了 1 min 的随机行驶车辆模拟。与 2.3 节类似,随机行驶车辆模拟了桥梁服役状态下的常规车流,且随机车辆参数同样被随机赋予,其车辆重量为 1500~3000 kg 中的随机数,1 阶频率为 1.5~3.5 Hz 中的随机数,阻尼比与最后一辆(测量)车辆相近。测量车辆不同车速情况下,随机车辆的行驶路径见图 9,其中黑粗线表示测量车辆。

ST-SSI 和 MOESP 方法的识别结果见图 10 和图 11。由图可知,ST-SSI 方法对于三跨连续梁桥的频率仍然有很好的识别效果,在所有工况下都能成功识别桥梁前 2 阶频率,包括考虑高路面平整度以及随机行驶车辆的情况。MOESP 方法可以识别到桥梁的基本频率,而在车速相对较低($v = 12$ m/s)且路面状况很好

(RRC=1)的情况下,其对于桥梁的 2 阶频率有很好的识别效果。且由于周围随机行驶车辆放大了桥梁振动,降低了识别稳定图中的“噪声”(图 11)。总之,应用考虑车辆无量纲响应的改进子空间识别法对三跨连续梁桥频率的成功识别,对该方法在实际场景中应用常规行驶速度的普通车辆对桥梁进行大规模快速筛查的应用具有重大意义。

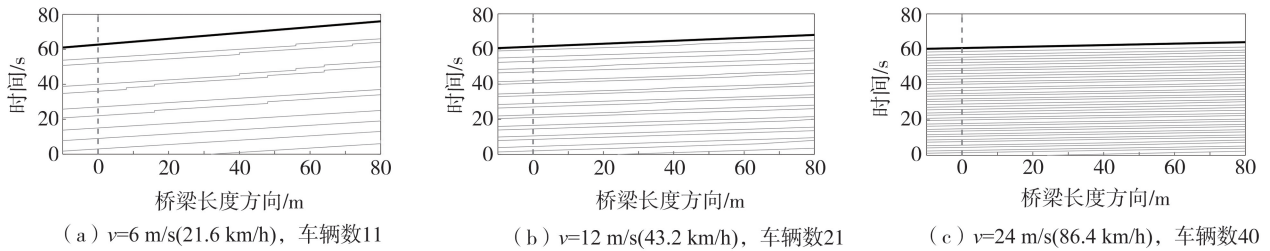
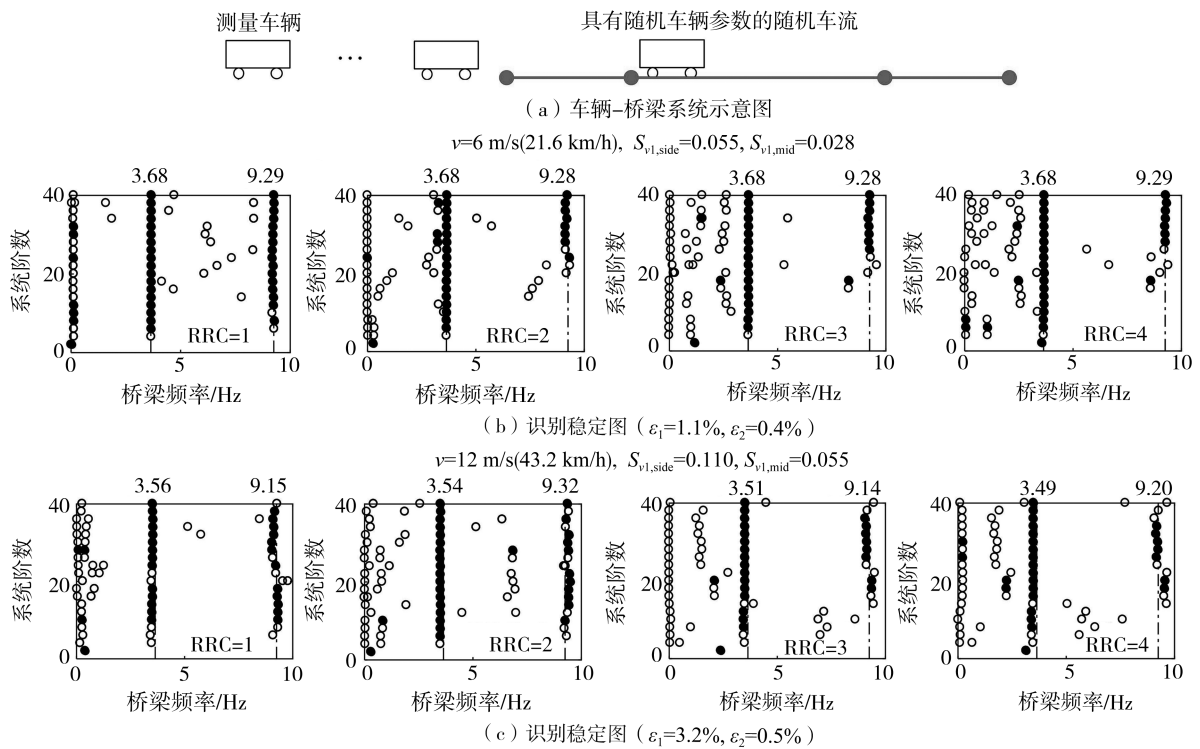


图 9 三跨连续梁桥 ($L^B = 80 \text{ m}$) 随机车辆行驶路径

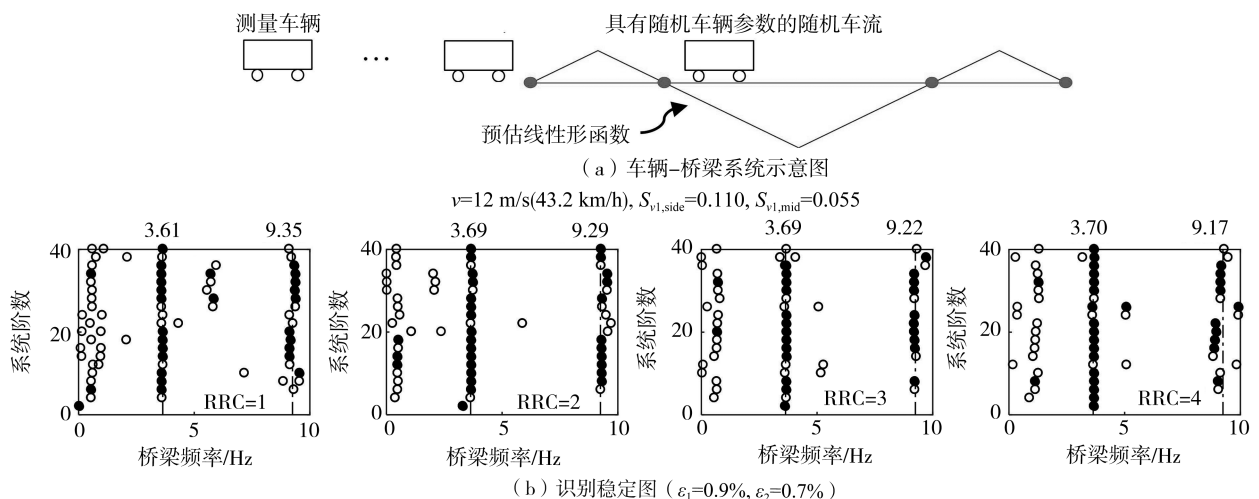
Fig. 9 Paths of random vehicles for the 3-span bridge ($L^B = 80 \text{ m}$)

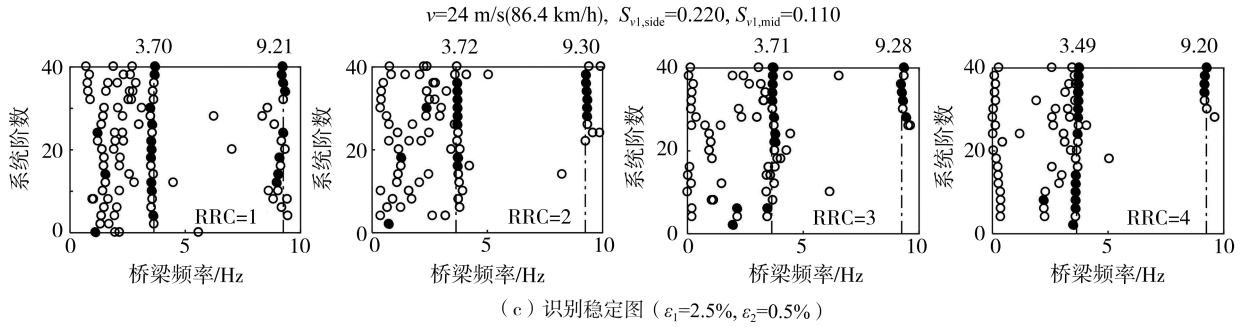


注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{st} 。

图 10 考虑随机行驶车辆情况下三跨连续梁桥 ST-SSI 识别稳定图

Fig. 10 Stabilization diagrams of ST-SSI identification for the 3-span bridge considering random vehicles





注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^d 。

图 11 考虑随机行驶车辆情况下三跨连续梁桥 MOESP 识别稳定图

Fig. 11 Stabilization diagrams of MOESP identification for the 3-span bridge considering random vehicles

3 服役简支梁桥驱车测试与验证

本节将本文提出的改进的子空间识别法(ST-SSI 和 MOESP 方法)用于重庆一座高墩简支梁桥的频率识别。在进入测试跨之前,将选定的测试车辆加速至目标速度,在车辆穿越测试跨的过程中,利用车内的数据采集系统收集车辆前后左右 4 个车轴处的竖直加速度。同时,为验证子空间方法的识别效果,利用安装在桥面上的加速度传感器测量桥梁在车辆通过后的响应,通过桥梁响应频域分析获取测试跨的前 2 阶振动频率,并与 ST-SSI 和 MOESP 的频率识别结果进行比较。

应当指出的是,车辆行驶过程中的车-桥接触力是耦合桥梁和车辆的关键,包含车辆和桥梁的信息,作为子空间识别法的重要输入信号。由安装在前后车轴处的加速度传感器可直接测量其竖直加速度,通过积分的依次获得轮轴相对于桥梁的速度和位移。如 2.2 节所述,本方法可以消除路面平整度对间接识别的影响,因此基于式(4),即可计算出前后轮接触力作为 ST-SSI 和 MOESP 的信号输入参数之一。依据车辆行驶速度的不同,在获得 2 种子空间识别方法所需的车辆信号后,可以选择合适的方法进行频率识别。

3.1 实测桥梁和车辆参数

试验桥为高墩简支梁桥,见图 12(a)、(b)。该多跨桥位于重庆,共有 5 跨,其中每一跨长均为 20 m、宽 6 m。图 12(b)为该桥水泥路面情况,桥面平坦光滑。本次试验选取中间跨进行现场试验。在测试跨的跨中以及 1/4 跨的边侧各安装一个加速度传感器,通过无线数据采集仪(wireless data acquisition, DAQ)实现与车内信号采集同步授时,以测量车辆通过后桥梁最外侧在跨中和 1/4 跨位置的加速度,见图 12(c)。由桥梁的加速度响应频域得到桥梁的前 2 阶频率分别为 6.836、13.310 Hz^[30]。



图 12 试验车桥

Fig. 12 Experimental bridges and vehicles

测试改装车为大众迈特威多功能车,见图 12(d),其车辆参数见表 3。车辆的前后左右车轴上设置 4 个加速度传感器,型号为 B&K 4507-B004,其测量量程为 $\pm 700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,灵敏度为 $0.01 \text{ V/m} \cdot \text{s}^{-2}$,用于测量车辆行驶过程中的前后车轴的竖直加速度,见图 12(e)、(f)。

表 3 测试车辆参数^[42]

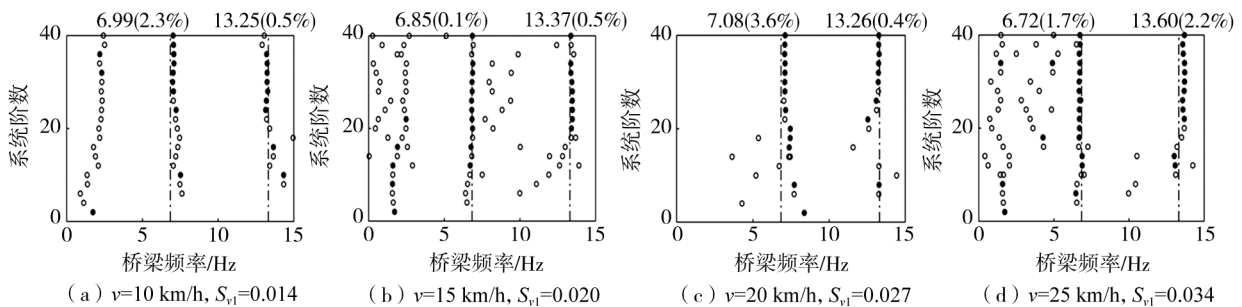
Table 3 Parameters of the measured vehicles^[42]

| 车辆参数 | 符号 | 值 | 单位 | 车辆参数 | 符号 | 值 | 单位 |
|---------|----------|--------|------------------------------|-----------------|----------|---------|-----|
| 车身质量 | m_c | 1 400 | kg | 前轮刚度 | K_{r1} | 92 727 | N/m |
| 车身转动惯量 | I_c | 3 526 | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | 后轮刚度 | K_{r2} | 107 592 | N/m |
| 前悬架簧下质量 | m_{w1} | 35 | kg | 前轴距 | L_1 | 1.65 | m |
| 后悬架簧下质量 | m_{w2} | 65 | kg | 后轴距 | L_2 | 1.75 | m |
| 前悬架刚度 | K_{v1} | 21 284 | N/m | 第 1 阶模态(车身竖向运动) | | 0.800 2 | Hz |
| 后悬架刚度 | K_{v2} | 28 835 | N/m | 第 2 阶模态(车身俯仰运动) | | 0.957 9 | Hz |
| 前悬架阻尼 | C_{v1} | 2 342 | $\text{N} \cdot \text{s/m}$ | 第 3 阶模态(前轮竖向运动) | | 7.287 9 | Hz |
| 后悬架阻尼 | C_{v2} | 3 795 | $\text{N} \cdot \text{s/m}$ | 第 4 阶模态(后轮竖向运动) | | 9.140 3 | Hz |

3.2 桥梁测试跨频率识别

本次试验设置了 $v=10、15、20、25 \text{ km/h}$ 共 4 种车速,来探究不同车速下改进子空间辨识法(ST-SSI 和 MOESP 方法)的识别效果。4 种车速所对应的无量纲速度 S_{v1} 为 0.014、0.020、0.027、0.034 均小于 0.1,满足 ST-SSI 方法近似非时变体系的应用假定。因此,ST-SSI 和 MOESP 方法可同时用于以上 4 种工况的桥频识别,此外也可清晰地比较 2 种方法的识别效果。

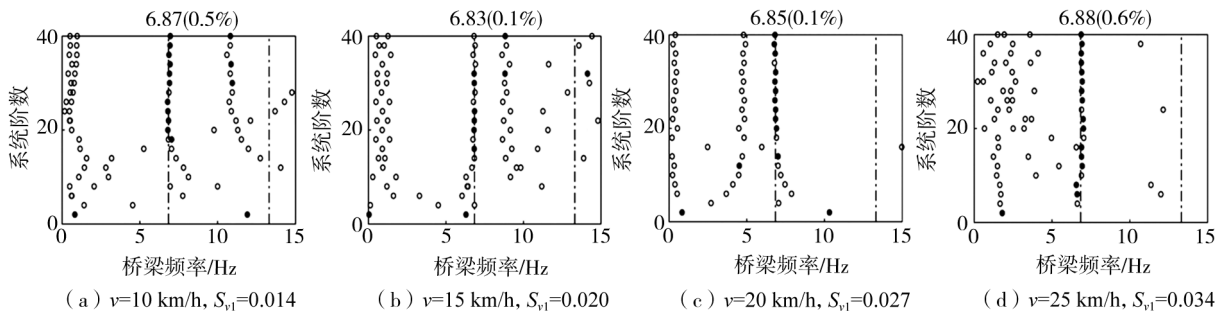
ST-SSI 和 MOESP 方法的识别结果见图 13、图 14。由图可知,ST-SSI 方法在所有情况下都成功地识别到桥梁的前 2 阶频率。同时,MOESP 方法也识别桥梁在所有车速下的基本频率,而对桥梁的高阶频率没有识别效果。因此,2 种改进的子空间识别法均可以成功辨识到桥梁的基本频率,且通过 2 种子空间识别法在不同车速下其自身的识别结果对比,可以发现,识别结果均在误差容许的范围之内,车速对于子空间识别法(ST-SSI 和 MOESP 方法)的识别准确度的影响较小。此外,当车速相对较低($S_{v1}<0.1$)时,由于 ST-SSI 方法相比于 MOESP 方法,假设条件较少,ST-SSI 方法的识别效果优于 MOESP 方法,特别是在桥梁的高阶频率识别方面,与前文的结论一致。最后,需要指出的是,由于路况条件对于行驶速度有限制,因而本次试验的车速相对较低,使得 MOESP 方法针对高速行驶车辆的优势并未充分体现。这一点有望在将来的试验中得以弥补。



注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{id} 。

图 13 测试桥 ST-SSI 识别稳定图

Fig. 13 Stabilization diagrams of ST-SSI identification for the test bridge



注:虚线为桥梁频率的理论值;空心圆为改进的子空间法得到的全部频率识别结果;实心圆为其中满足稳定性条件的频率点 f_n^{id} 。

图 14 测试桥 MOESP 识别稳定图

Fig. 14 Stabilization diagrams of MOESP identification for the test bridge

4 结论

本文通过对车-桥耦合系统中双轴车辆数据的处理和分析,为桥梁频率的识别提供了一种间接测量方法。本研究建立了以车-桥耦合运动学方程为基础,考虑车辆无量纲响应的改进子空间识别法(包括 ST-SSI 和 MOESP 方法)的理论模型。该方法仅依靠车辆的信息和响应,不需要任何桥梁信息,且通过对车辆双轴无量纲残余响应信号进行处理,从理论层面消除了路面平整度对桥梁频率间接识别的不利影响。更为重要的是,该方法在理论模型推导的过程完全去除了对桥梁频率间接识别不利因素,相比于现有方法,消除了对测量车辆参数与行驶速度的限制,使得该方法能够应用于任意以常规速度行驶的普通车辆。这一优势具体体现在 ST-SSI 方法可用于正常行驶速度($S_{v1} < 0.1$)的车辆,而 MOESP 方法完全突破了车速的限制,可用于高速公路桥梁($S_{v1} \geq 0.1$)的检测。本文对车辆无量纲响应应用了改进的子空间识别法(包括 ST-SSI 和 MOESP 方法),间接识别了简支梁桥和三跨连续梁的多阶频率,提供了充分的理论分析和数值计算证明。同时,验证了考虑不同形式车速、路面不平整度和随机行驶车流情况下改进的子空间识别法对桥梁频率间接识别的可行性。数值试验部分首先应用本文所提的子空间识别方法从一辆移动车辆单次过桥的响应中准确且有效地提取简支梁桥的基频,并通过逐步增强车辆荷载实现了桥梁高阶频率的识别。与此同时,对一座三跨连续梁桥考虑随机车流状况,验证了其对于获取稳定的桥梁多阶频率的作用。对于上述桥梁频率识别的数值计算表明,充分的荷载激励(如连续或随机的车辆荷载)对桥梁频率的稳定识别非常重要,尤其是对于高阶频率的识别。

最后,本文通过对一座高墩简支梁桥的实桥测试,验证了本文所提出的改进子空间识别法在实际桥梁的频率测试中的可行性以及识别结果的准确性。基于车桥动态接触力作为信号输入,2种子空间识别法均可以成功地识别到桥梁的基本频率,且识别结果具有较高的精度。此外,针对有车速限制的场景,ST-SSI 方法被证明优于 MOESP 方法,可以捕获更多的桥梁频率。

参考文献:

- [1] 李祖栋, 项长生, 元兴军, 等. 基于车辆响应的连续梁桥损伤识别数值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 202-211.
LI Zudong, XIANG Changsheng, QI Xingjun, et al. Numerical analysis of damage identification of continuous beam bridge based on vehicle response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 202-211. (in Chinese)
- [2] 郭迅, 王玉梅, 何福. 典型高墩大跨混凝土刚构桥模态参数测试[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 33-39.
GUO Xun, WANG Yumei, HE Fu. Modal parameters identification on a typical reinforced concrete rigid frame bridge with super high piers and long spans[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(6): 33-39. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 元兴军, 肖志全, 孙绪法, 等. 基于车辆响应的连续梁桥振型识别数值模拟及影响参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 28-37.
QI Xingjun, XIAO Zhiqian, SUN Xufa, et al. Numerical simulation and influence parameter analysis of mode shape identification of continuous beam bridge based on vehicle response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(4): 28-37. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 贺文宇, 何健, 任伟新. 基于间接法识别的桥梁振型的损伤定位方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 13-17.
HE Wenyu, HE Jian, REN Weixin. A damage localization method based on indirectly identified mode shapes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 13-17. (in Chinese)
- [7] YANG Y B, WANG Z L, SHI K, et al. State-of-the-art of vehicle-based methods for detecting various properties of highway bridges and railway tracks[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(13): 2041004.
- [8] URUSHADZE S, YAU J D. Experimental verification of indirect bridge frequency measurement using a passing vehicle[J]. Procedia Engineering, 2017, 190: 554-559.
- [9] YANG J P, CAO C Y. Wheel size embedded two-mass vehicle model for scanning bridge frequencies[J]. Acta Mechanica, 2020, 231(4): 1461-1475.
- [10] YANG Y B, XU H, ZHANG B, et al. Measuring bridge frequencies by a test vehicle in non-moving and moving states[J]. Engineering Structures, 2020, 203: 109859.
- [11] ABUODEH O, REDMOND L. An autonomous and heuristic approach for extracting bridge frequencies from passing vehicles[J]. Engineering Structures, 2023, 290: 116317.
- [12] 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.

- [13] MALEKJAFARIAN A, OBRIEN 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.
- [14] QI Z Q, AU F T K. Identifying mode shapes of girder bridges using dynamic responses extracted from a moving vehicle under impact excitation[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017, 17(8): 1750081.
- [15] HE W Y, REN W X, ZUO X H. Mass-normalized mode shape identification method for bridge structures using parking vehicle-induced frequency change[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(6): e2174.
- [16] ZHANG Y, ZHAO H S, LIE S T. Extracting mode shapes for beams through a passing auxiliary mass[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2019, 141(5): 054501.
- [17] ZHAN J W, YOU J J, KONG X, et al. An indirect bridge frequency identification method using dynamic responses of high-speed railway vehicles[J]. *Engineering Structures*, 2021, 243: 112694.
- [18] 刘宇飞, 齐玉, 李保罗, 等. 工程结构运维多场景的敏感服役指标智能识别[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(10): 1–15.
LIU Yufei, QI Yu, LI Baoluo, et al. Intelligent detection of sensitive service indicators in multiple scenarios of structural maintenance[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(10): 1–15. (in Chinese)
- [19] SINGH P, MITTAL S, SADHU A. Recent advancements and future trends in indirect bridge health monitoring[J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2023, 28(1): 03122008.
- [20] CHANG K C, WU F B, YANG Y B. Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle[J]. *Interaction and Multiscale Mechanics*, 2010, 3(4): 299–308.
- [21] KIM C W, INOUE S, SUGIURA K, et al. Extracting bridge frequencies from dynamic responses of two passing vehicles[C]//ZINGONI A, ed. *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. Boca Raton: CRC Press, 2016: 1858–1864.
- [22] ZHAN J W, WANG Z Q, KONG X, et al. A drive-by frequency identification method for simply supported railway bridges using dynamic responses of passing two-axle vehicles[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(11): 04021078.
- [23] 陈诚, 张静, 杜昌骏, 等. 基于双车接触点响应残差的桥梁模态参数识别方法研究[J]. *工程力学*, 2025, 42(1): 199–208.
CHEN Cheng, ZHANG Jing, DU Changjun, et al. Bridge modal parameters identification based on the contact point response residues of two vehicles[J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(1): 199–208. (in Chinese)
- [24] YIN X, YANG Y, HUANG Z. Bridge frequency extraction method based on contact point response of two-axle vehicle[C]//Structures. Elsevier, 2023, 57: 105176.
- [25] HE Y, YANG J P, CHEN J. Estimating bridge modal parameters from residual response of two-connected vehicles[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022: 1–15.
- [26] YANG J P, CHEN B H. Two-mass vehicle model for extracting bridge frequencies[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2018, 18(4): 1850056.
- [27] 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.
- [28] XU H, HUANG C C, WANG Z L, et al. Damped test vehicle for scanning bridge frequencies: Theory, simulation and experiment[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 506: 116155.
- [29] ZHANG T P, XIONG Z L, ZHU J, et al. Extracting bridge frequencies from the dynamic responses of moving and non-moving vehicles[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 564: 117865.
- [30] LIU C Y, ZHU Y P, YE H. Bridge frequency identification based on relative displacement of axle and contact point using tire pressure monitoring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 183: 109613.
- [31] YANG Y B, CHEN W F. Extraction of bridge frequencies from a moving test vehicle by stochastic subspace identification[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(3): 04015053.
- [32] LI J T, ZHU X Q, LAW S S, et al. Indirect bridge modal parameters identification with one stationary and one moving sensors and stochastic subspace identification[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 446: 1–21.
- [33] JIN N, YANG Y B, DIMITRAKOPOULOS E G, et al. Application of short-time stochastic subspace identification to estimate bridge frequencies from a traversing vehicle[J]. *Engineering Structures*, 2021, 230: 111688.
- [34] JIN N, DERTIMANIS V K, CHATZI E N, et al. Subspace identification of bridge dynamics via traversing vehicle measurements[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 523: 116690.
- [35] KATAYAMA T. *Subspace methods for system identification*[M]. Cham: Springer London, 2005.
- [36] VAN OVERSCHEE P, DE MOOR B L. *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*[M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1996: 111–115.
- [37] GOLUB G H, REINSCH C. Singular value decomposition and least squares solutions[C]//WILKINSON J H, REINSCH C, et al. *Handbook for Automatic Computation: Volume II: Linear Algebra*. Berlin: Springer, 1971: 134–151.
- [38] International Organization for Standardization. Road surface profiles—Reporting of measured data: ISO 8608[S]. Geneva: ISO, 2016.
- [39] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. *Journal de Physique I*, 1992, 2(12): 2221–2229.
- [40] CHEN S R, WU J. Modeling stochastic live load for long-span bridge based on microscopic traffic flow simulation[J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(9/10): 813–824.
- [41] Transportation Research Board. HCM2010: Highway capacity manual[M]. Washington, DC: National Research Council, 2010: 1–1207.
- [42] ZENG Q, HU X Y, SHI X D, et al. Estimation of road roughness based on tire pressure monitoring[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2022, 22(6): 2250073.