

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.056

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 斜交梁桥频率间接识别效果的影响参数

齐兴军<sup>a,b</sup>,肖志全<sup>a</sup>,张荣凤<sup>a</sup>

(山东建筑大学 a. 交通工程学院; b. 山东省高校土木结构防灾减灾协同创新中心, 济南 250101)

**摘要:**采用过桥车辆振动响应识别桥梁自振特性的间接测量法能够避免传统动载试验测量桥频方法存在的操作复杂和成本高等缺点。根据车桥耦合振动理论和桥梁间接测量法基本原理,对实际工程中的某一斜交梁桥建立车辆与桥梁耦合振动的有限元模型,采用双轴半车模型模拟测量车辆,提取车辆匀速驶过桥梁时的车辆加速度时程响应,并利用峰值拾取法进行频谱分析,剔除已知的车辆相关频率识别出桥梁的前三阶自振频率,分析了6种不同车速、6种不同车重、8种不同桥梁斜交角度对桥梁频率识别效果的影响特点。结果表明,间接测量法能够有效地识别桥梁比较密集的频率,车速低于20 km/h时,能够较好地识别出斜交梁桥的前3阶频率,车速较高时无法识别桥梁的频率信息;相对较小的车桥质量比对桥梁频率识别有利;斜交梁桥不同的斜交角度基本不影响桥梁频率识别的精度;桥面粗糙时采用差值法仍能较好地识别。数值模拟表明,间接测量法对于不规则斜交梁桥频率仍有较好的识别效果。

**关键词:**车桥耦合;斜交梁桥;间接测量法;粗糙桥面;自振频率

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2020)06-0119-08

## Influence parameters of frequency indirect identification effect for oblique beam bridge

Qi Xingjun<sup>a,b</sup>, Xiao Zhiquan<sup>a</sup>, Zhang Rongfeng<sup>a</sup>

(a. Institute of Traffic Engineering; b. Shandong Co-Innovation Center for Disaster Prevention and Mitigation of Civil Structures, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China)

**Abstract:** An indirect measurement method is adopted to identify the bridge's natural vibration characteristics by vibration response of vehicles crossing the bridge, it can avoid the disadvantages of the traditional method of measuring bridge frequency in dynamic load test, such as complicated operation and high cost. Based on the theory of vehicle-bridge coupling vibration and the basic principle of bridge indirect measurement method, the finite element model of vehicle-bridge coupling vibration is established for a skew beam bridge in practical engineering. A biaxial half-car model is used to measure the vehicle and extract the time-history response of the vehicle acceleration when the vehicle passes the bridge at a constant speed. Excluding known vehicle-related frequencies. The first three natural frequencies of the bridge are identified. The influence of six different vehicle speeds, six different vehicle weights and eight different bridge skew

收稿日期:2019-12-09

基金项目:山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目(XTM201904);山东省交通科技计划(2009Y10)

作者简介:齐兴军(1974-),男,教授,主要从事桥梁健康监测研究,E-mail:qxj123@163.com.

Received:2019-12-09

**Foundation items:** Financial Support of Shandong Co-Innovation Center for Disaster Prevention and Mitigation of Civil Structures (No. XTM201904); Transportation Science and Technology Plan of Shandong Province (No. 2009Y10)

**Author brief:** Qi Xingjun(1974-), professor, main research interest: bridge health detection, E-mail:qxj123@163.com.

angles on the bridge frequency identification is analyzed. The results show that the indirect measurement method can effectively identify the frequency of bridges with high density. When the speed is less than 20 km/h, the third-order frequency of skew beam bridge can be well recognized. When the speed is high, the frequency information of the bridge cannot be recognized. The relatively small ratio of vehicle and bridge mass to bridge frequency identification is advantageous. The accuracy of frequency identification is not affected by the different angle of oblique beam bridge. When the bridge deck is rough, the method of acceleration subtraction can still be used for frequency identification. Numerical simulation shows that the indirect measurement method still has a good recognition effect for the irregular skew beam bridge frequency. To promote the application of motion sensing indirect measurement method in bridge inspection engineering.

**Keywords:** vehicle-bridge coupling; skew girder bridge; indirect method of measurement; rough bridge surface; natural vibration frequency

桥梁频率不仅是反映桥梁整体结构完整性的重要指标,也是桥梁动力特性的重要参数,对桥梁承载力的评估具有重要参考价值<sup>[1-2]</sup>。现行测量频率方法应用最多的是桥梁动载试验,通过在桥梁上安装多组加速度传感器,利用有线或无线采集系统记录桥梁的动力响应,该方法需要中断交通且繁琐费力<sup>[3]</sup>。

根据车桥耦合理论和间接测量法原理进行频率识别是一种有效的识别手段,车辆驶过桥梁时,车辆与桥梁相互作用和影响的问题为车桥耦合问题。其研究自 1825 年人类有了第一条铁路就已开始<sup>[4-5]</sup>,在 20 世纪 60 年代以前,主要集中在简单移动荷载作用下铁路桥梁的车桥耦合动力分析研究上,20 世纪 60 年代以后,随着高等级公路桥梁的大量修建,公路桥梁的车桥耦合问题越来越吸引桥梁界科研人员的关注,并且随着计算机的出现和有限元软件的应用,使得建立复杂的车桥耦合振动模型成为可能。Yang 等<sup>[6]</sup>首次提出基于动力测试间接测量桥梁频率的方法,用单自由度车模型模拟检测车辆,检测车辆通过桥梁时,其垂向的惯性力和弹簧力经车轮以接触力形式传递到桥梁造成桥梁结构的振动,由于耦合作用,桥梁振动将再次影响到检测车的垂向振动,并为其主要振动源。因此,只要分析检测车垂直方向的响应,即可得出桥梁特征参数信息,从而规避了车桥耦合时变系统有载频率变化的限制<sup>[7]</sup>。其主要贡献是利用单轴四分之一车辆通过某一简支梁桥推导出了解析解,该公式结果与 Yang 等<sup>[8]</sup>提出的利用车辆与桥梁耦合单元计算出的数值解吻合,理论验证了车辆竖向加速度解析解中包含了桥梁频率的基本信息。Lin 等<sup>[9]</sup>通过现场试验验证了该方法的有效性,说明了间接测量法识别桥梁频率的可行性。在此基础上,陈上有等<sup>[10]</sup>用车轮加弹簧-阻尼器-簧上质量模拟移动小车,根据车辆的加速度响应

的频谱分析,成功地识别出简支梁桥的一阶频率;王希等<sup>[11]</sup>进行了在桥梁平整状态下由车辆振动信息识别简支梁桥固有频率的研究,可以准确识别桥梁的第一阶基频;Malekjafarian 等<sup>[12]</sup>利用列车不同车厢的振动信息识别出了简支梁桥的基频;Kong 等<sup>[13]</sup>利用单自由度小车识别出某简支梁桥的前三阶频率;Yang 等<sup>[14]</sup>在桥梁间接测量法的回顾文章中阐明了间接测量法应用的注意事项以及单自由度车辆模型的局限性。

前人的研究多集中于利用简支梁桥和单自由度车辆模型进行数值模拟分析,且主要是桥梁基频的识别。笔者选用更加贴近实际的双轴半车车辆平面模型,并选用实际工程中的三跨斜交梁桥建模,运用间接测量理论识别出了桥梁的前 3 阶频率。在 20 世纪 60 年代以前,车桥耦合多是现场试验研究,总结出经验公式或理论来指导桥梁设计;60 年代以后,车桥动力相互作用的研究方法多采用试验与理论相结合的方法,即用试验的方法校核理论的正确性,用校核过的、正确的理论方法进行车桥耦合振动的仿真分析,研究结构各参数对振动的影响。笔者主要运用后者方法,基于车桥耦合理论与间接测量法原理,通过有限元数值模拟方法得到理论解与试验数值,其基本流程:1)利用 Ansys 有限元软件建立桥梁模型,通过模态分析模块得到桥梁前 3 阶频率的理论解;2)建立车桥耦合模型,利用 Ansys 有限元软件的瞬态动力分析模块,模拟车辆驶过桥梁的过程,通过采用不同的参数得到车体的加速度时程后利用峰值拾取法等手段得到识别频率;3)将这两步得到的频率进行误差对比和验证分析。桥梁间接测量法不同于传统的桥梁频率测量方法,将加速度传感器放置于测试车辆上,不用在桥上架设各种仪器,且桥上任意移动车辆对频率识别无不利影响<sup>[15]</sup>,因此具有较大的应用前景。

### 1 理论依据

依据间接测量法理论<sup>[6]</sup>,单轴四分之一测量车辆模型匀速驶过等截面简支梁桥,量测车质量为  $m_v$ 、刚度为  $k_v$ 、车辆移动速度为  $v$ 。桥梁总长度为  $L$ ,单位长度质量为  $\bar{m}$ ,截面抗弯刚度为  $EI$ ,车桥振动简图如图 1 所示,桥梁因车辆作用导致振动产生坐标  $x$  处挠度为  $u(x)$ 。

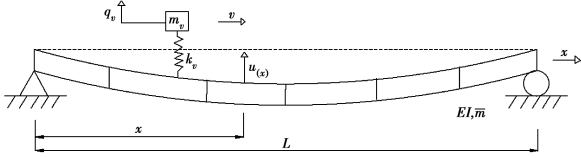


图 1 量测车驶过简支梁桥模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model of simply supported beam bridge passed by the measuring vehicle

采用有限元方法将桥梁离散化,桥梁振动方程可以表示为

$$\bar{m} \ddot{u}(x, t) + EI u''''(x, t) = f_c(t) \delta(x - vt) \quad (1)$$

车辆的运动方程为

$$m_v \ddot{q}_v(t) + k_v (q_v(t) - u(x, t)|_{x=vt}) = 0 \quad (2)$$

经推导得到车辆竖向加速度解析解为

$$\ddot{q}_v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta_{st,n}}{2(1-S_n^2)} \cdot \left[ \bar{A}_{1n} \cos(\omega_v t) + \bar{A}_{2n} \cos\left(\frac{2n\pi vt}{L}\right) + \bar{A}_{3n} \cos\left(\omega_{b,n} t - \frac{n\pi vt}{L}\right) + \bar{A}_{4n} \cos\left(\omega_{b,n} t + \frac{n\pi vt}{L}\right) \right] \quad (3)$$

式中:

$$\bar{A}_{1n} = \omega_v^2 \left[ \frac{-\omega_v^2}{\omega_v^2 - \left(\frac{2n\pi v}{L}\right)^2} + \frac{-\omega_v^2 S_n^2}{\omega_v^2 - \left(\omega_{b,n} - \frac{n\pi v}{L}\right)^2} + \frac{\omega_v^2 S_n^2}{\omega_v^2 - \left(\omega_{b,n} + \frac{n\pi v}{L}\right)^2} + 1 \right];$$

$$\bar{A}_{2n} = \frac{\omega_v^2 \left(\frac{2n\pi v}{L}\right)^2}{\omega_v^2 - \left(\frac{2n\pi v}{L}\right)^2}; \quad \bar{A}_{3n} = \frac{\omega_v^2 S_n^2 \left(\omega_{b,n} - \frac{n\pi v}{L}\right)^2}{\omega_v^2 - \left(\omega_{b,n} - \frac{n\pi v}{L}\right)^2};$$

$$\bar{A}_{4n} = \frac{-\omega_v^2 S_n^2 \left(\omega_{b,n} + \frac{n\pi v}{L}\right)^2}{\omega_v^2 - \left(\omega_{b,n} + \frac{n\pi v}{L}\right)^2}$$

式中:

$$\Delta_{st,n} = \frac{-2m_v g L^3}{n^4 \pi^4 EI}$$

$$S_n = \frac{n\pi v}{L\omega_{b,n}}$$

式中:  $\ddot{q}_v(t)$  为在时间  $t$  时刻车辆的竖向加速度;  $\Delta_{st,n}$  为在车辆作用下桥梁第  $n$  阶模态产生的静位移;  $S_n$  为无量纲速度参量;  $\omega_{b,n}$  为桥梁的第  $n$  阶自振频率;  $\omega_v$  为车辆的竖向振动频率。

车辆竖向加速度时程响应主要由 4 种类型的频率余弦波所叠加组成<sup>[10]</sup>,分别为车辆的固有频率  $\omega_v$ 、驱车频率  $2n\pi v/L$ 、桥梁的左移频率  $\omega_{b,n} - n\pi v/L$  和右移频率  $\omega_{b,n} + n\pi v/L$ 。然后通过快速傅里叶变换等频谱分析技术,桥梁的  $n$  阶频率信息可以从车辆的振动加速度响应中提取出来。

### 2 模型参数

运用 ANSYS 中的瞬态动力学分析方法进行车桥耦合振动数值模拟计算分析<sup>[16]</sup>,利用耦合命令约束车轮与相关桥面点的竖向位移,编制 APDL 车桥耦合振动命令流计算车辆和桥梁的动态响应,然后利用车辆响应识别出桥梁前 3 阶自振频率。

#### 2.1 桥梁建模

工程实例为跨径组合为 28 m+45 m+28 m 的混凝土连续梁桥,斜交角为 30°,桥面宽度为 8 m,上部结构为单箱单室主梁。全桥主梁采用 C50 预应力混凝土,弹性模量为  $E_c = 3.45 \times 10^4$  MPa,为模拟桥梁的倾斜支承边界条件,桥梁中横梁和端横梁均模拟为刚性横梁。桥梁横截面如图 2 所示。

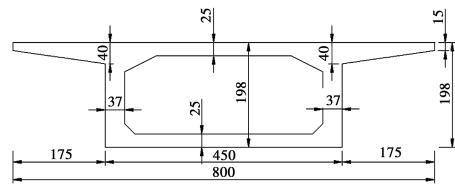


图 2 桥梁横截面图(单位:cm)

Fig. 2 Cross section of bridge (units: cm)

桥梁的相关结构参数如表 1 所示。

表 1 桥梁结构参数

Table 1 Structural parameters of bridge

跨径/m	单位长度质量/(kg·m <sup>-1</sup> )	截面惯性矩/m <sup>4</sup>	截面面积/m <sup>2</sup>	弹性模量/GPa
28+45+28	10 963	2.5	9.87	34.5

应用 beam4 单元建立桥梁的有限元计算模型,桥梁有限元模型如图 3 所示。

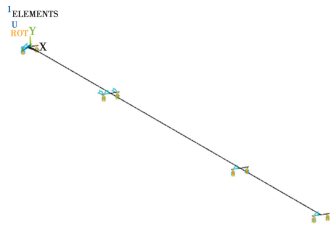


图 3 桥梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of bridge

应用有限元程序计算得到桥梁前 3 阶理论频率如表 2 所示。

表 2 桥梁自振频率与振型特性  
Table 2 Bridge natural vibration frequency and mode characteristics

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	2.431 5	0.411 3	全桥对称竖弯
2	4.684 8	0.213 5	全桥反对称竖弯
3	5.182 9	0.192 9	全桥对称竖弯

### 2.2 车辆建模

车辆模型采用双轴半车模型<sup>[17]</sup>, 车辆模型示意如图 4 所示。

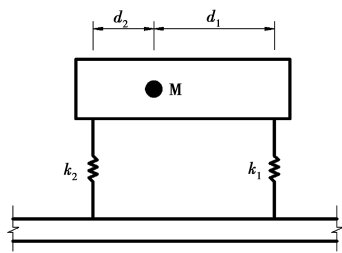


图 4 双轴半车模型

Fig. 4 Two-axle semi-car model

车辆模型具体参数如表 3 所示。

表 3 桥梁端横梁参数  
Table 3 Bridge end beam parameters

车辆模型	车体质 量/kg	车体点头 刚度/m <sup>4</sup>	车轴	车辆轴 距/m	一系垂向刚 度 ks/(N·m <sup>-1</sup> )
双轴半 车模型	4 000	1 000	前轴	1.33	5×10 <sup>4</sup>
			后轴	0.67	3.75×10 <sup>4</sup>

双轴半车模型相比于单轴 1/4 车辆模型, 增加了车体质量点的转动刚度, 因此, 多了一个转动频率, 利用 ANSYS 软件建立车辆模型进行频率分析得到车辆模型的频率为: 车辆竖向振动频率  $\omega_v$  为 0.75 Hz、转动频率  $\omega_\theta$  为 1.49 Hz。

车辆频率信息也可由式(4)、式(5)计算。

$$\omega_v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_i + k_j}{m_v}} \quad (4)$$

$$\omega_\theta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k_1 + k_2)(d_1 + d_2)^2}{4I_v}} \quad (5)$$

式中:  $I_v$  为车体点头刚度。  $k_i$  为车辆前轴垂向刚度,  $k_j$  为车辆后轴垂向刚度,  $m_v$  为车辆重量。

### 3 不同工况下桥梁频率识别效果

基于车桥耦合理论建立车桥耦合有限元模型进行数值模拟分析, 由于高阶桥梁频率对车辆动力响应贡献较小, 间接测量法的识别效果较差<sup>[18]</sup>, 现对桥梁只进行前 3 阶桥梁频率识别并进行相应的识别精度误差分析。

#### 3.1 不同车速对频率识别效果的影响

车辆匀速驶过该 3 跨连续斜交梁桥, 选取 6 个不同车速, 分别是 10、20、30、40、50、60 km/h。在车辆质量为 4 t 的条件下计算得到车辆加速度时程数据, 然后进行快速傅里叶变换得到频谱图, 识别结果的频谱如图 5 所示, 识别得到的桥梁频率数值如表 4 所示, 识别频率与理论计算频率的相对误差如表 5 所示。

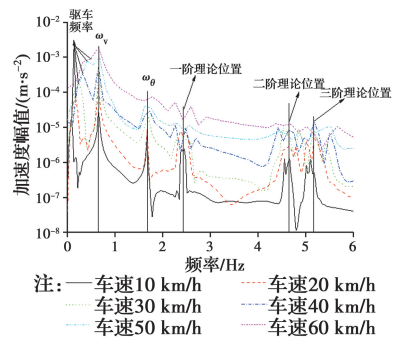


图 5 不同车速下识别频谱对比图

Fig. 5 Comparison of recognition frequency spectrum at different vehicle speeds

表 4 不同车速下识别频率值

Table 4 Identify frequency values at different vehicle speeds

车辆速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	1 阶频 率/Hz	2 阶频 率/Hz	3 阶频 率/Hz
10	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.18
20	2.37/2.48	4.53/4.80	5.01/5.18
30	2.26/2.59	4.53/4.85	5.18/5.42
40	2.26/2.70	4.42/4.74	5.18/5.50
50	2.29/2.56	4.45/4.74	
60	2.26/2.59		

注: 桥梁前 3 阶理论频率分别为 2.43、4.68、5.18。

表 5 不同车速下识别频率误差分析  
Table 5 Error analysis of recognition frequency under different speed

车辆速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	1 阶频率 误差/%	2 阶频率 误差/%	3 阶频率 误差/%
10		1.5	1.50
20		0.30	1.50
30		0.21	2.30
40	2.06	2.14	2.32
50		1.71	
60			

从图 5 可以看出,频谱图中共有 5 种频率信息,前 3 种频率是已知的车辆转动频率 1.49 Hz、驱车频率和车辆竖向振动频率 0.75 Hz,且随着车速的增大,驱车频率越来越大。后 3 种频率信息分别对应前 3 阶桥频,可以看到桥频都为双峰(桥梁左移频率  $\omega_{b,n} - n\pi v/L$ 、右移频率  $\omega_{b,n} + n\pi v/L$ ),并且随着车速的增大,双峰间距越来越远,峰值愈加不明显,可以认为双峰的均值为对应的桥梁频率。

通过表 5 误差分析可得,速度对桥梁基频识别结果基本无影响,对高阶识别较不利。速度在 20 km/h 及以下时,识别精度较高,高车速时无法有效识别桥梁的频率信息。

3.2 不同车桥质量比对频率识别效果的影响

为了分析不同的车桥质量比  $m_v/(\bar{m}L)$  对桥梁频率识别精度的影响,在 10 km/h 的车速下,选取不同的车桥质量比进行频率识别,结果如图 6 所示。

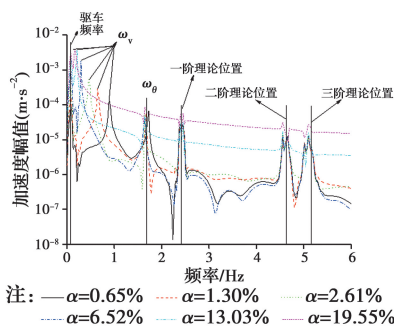


图 6 不同车桥质量比识别频谱对比图

Fig. 6 Spectrum comparison of different vehicle bridge mass ratio recognition

从图 6 中可以看出,每条车辆加速度频谱曲线都有 6 个峰值,它们分别是车辆转动频率 1.67 Hz, 10 km/h 时驱车频率  $2\pi v/L$  为 0.08 Hz,车辆竖向振动频率  $\omega_v$  因车辆质量不相等而数值不同,车辆竖向频率随着车重增加而逐渐减少,这 3 个频率信息

可以通过事先测试车辆而己知,并且数值相对于桥梁频率一般较小,所以可以较明显地区分出后面 3 个峰值为桥梁的前 3 阶频率信息。观察上述加速度时程数据频谱图,可以轻松地排除已知的驱车频率、车辆转动频率和车辆竖向频率,最后识别出桥梁前 3 阶频率信息。

从表 6 和表 7 可以看出,随着车桥质量比的增大,其识别出的频率值和识别频率误差基本无变化,仍能较好识别出桥梁的前 3 阶频率。通过图 6 看出,随着车桥质量比的增大,识别出的桥梁频率峰值逐渐不明显,变得难以辨识。因此,为了获得较好的识别效果,建议选用小的车桥质量比。

表 6 不同车桥质量比识别频率值  
Table 6 Identification frequency value of different axle mass ratio

车桥质量 比/%	1 阶频 率/Hz	2 阶频 率/Hz	3 阶频 率/Hz
0.65(2 t)	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.18
1.30(4 t)	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.18
2.61(8 t)	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.18
6.52(20 t)	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.18
13.03(40 t)	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.18
19.55(60 t)	2.40/2.45	4.56/4.66	5.01/5.10

注:桥梁前 3 阶理论频率分别为 2.43、4.68、5.18。

表 7 不同车桥质量比识别频率误差分析

Table 7 Frequency error analysis of different vehicle bridge mass ratio identification

车桥质量 比/%	1 阶频率 误差/%	2 阶频率 误差/%	3 阶频率 误差/%
0.65(2 t)	1.03	1.50	1.54
1.30(4 t)	1.03	1.50	1.54
2.61(8 t)	1.03	1.50	1.54
6.52(20 t)	1.03	1.50	1.54
13.03(40 t)	1.03	1.50	1.54
19.55(60 t)	1.03	1.50	2.32

3.3 不同斜交角度对频率识别效果的影响

改变桥梁的斜交角度,分析间接测量法提取桥梁频率的识别效果,选取 8 个不同的桥梁斜交角度,角度分别是 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°。在车重为 4 t、车速为 10 km/h 的条件下进行车桥耦合振动计算得到车辆加速度时程数据,然后进行快速傅里叶变换,得到车辆加速度频谱图,识别结果如图 7 所示。

从表 8 中可以看出,斜交桥不同的斜交角度会对桥梁的刚度产生影响,随着斜交角度的增大,基频增高。

从图 7 和表 9 中可以看出,间接测量法对所有不同斜交角度桥梁的识别效果均较好,与理论频率的最大误差不超过 4%,均满足工程精度要求。相对而言,斜交角度在 70°以下时识别精度较好,对于斜交角度在 50°时,2 阶桥频和 3 阶桥频由于太过接近而混为一簇大峰,使得 2 阶和 3 阶桥频峰值识别

困难,仔细辨别后仍能从频谱图中识别出桥梁频率相关峰值信息;斜交角度在 70°以上时,由于斜边支撑线与桥梁轴线接近平行,识别效果变差。但斜交角度在 70°以上的桥梁在实际工程中几乎不存在,因此,可以认为斜交角度对桥梁频率的间接识别精度几乎没有影响。

表 8 不同斜交角度理论频率

Table 8 Theoretical frequency of different skew angles

斜交角度/(°)	1 阶理论频率/Hz	1 阶识别频率/Hz	2 阶理论频率/Hz	2 阶识别频率/Hz	3 阶理论频率/Hz	3 阶识别频率/Hz
0	2.035 6	2.03	3.945 6	3.91	4.639 7	4.57
10	2.035 6	2.09	3.945 6	3.99	4.639 7	4.63
20	2.245 0	2.24	4.283 5	4.24	4.877 0	4.80
30	2.431 5	2.43	4.684 8	4.61	5.182 9	5.10
40	2.608 7	2.59	5.212 9	5.13	5.605 4	5.48
50	2.760 5	2.75	5.811 1	5.69	6.096 3	5.94
60	2.893 8	2.87	5.397 0	5.30	6.522 4	6.46
70	3.024 1	2.87	3.966 9	5.30	6.505 3	6.45

表 9 不同斜交角度识别频率误差分析

Table 9 Frequency error analysis of different skew angle identification

斜交角度/(°)	1 阶频率误差/%	2 阶频率误差/%	3 阶频率误差/%
0	0.28	0.90	1.50
10	2.67	1.13	0.21
20	0.22	1.02	1.58
30	0.06	1.60	1.60
40	0.72	1.59	2.24
50	0.38	2.08	2.56
60	0.82	1.80	0.96
70	5.10	33.61	0.85

### 4 桥面粗糙条件下频率识别

桥面不平整度是在实际应用中无法避免的一个重要影响因素。Chang 等<sup>[19]</sup>提出了使用两个单自由度车模型匀速通过粗糙桥面,然后对得到的两个加速度时程曲线分别进行快速傅里叶变换,将得到的两个频谱图相减,以达到消除桥面不平整度对间接测量法的影响。Elhattab 等<sup>[20]</sup>提出可以使用两个单自由度车模型匀速通过粗糙桥面,得到前后两车在过桥时段的加速度时程,然后选取它们在桥面同一位置时的加速度数值相减,使用加速度差值曲线进行桥梁模态参数识别,进而消除桥面不平整度对识别结果的影响,笔者采用后者方法进行频率识别。桥面不平整度参照《车辆振动输入与桥面平度表示方法》(GB/T 7031—1986)模拟,采用简谐波叠加法(三角级数法),生成 101 m 长桥面 C 级不平整

度,如图 8 所示。

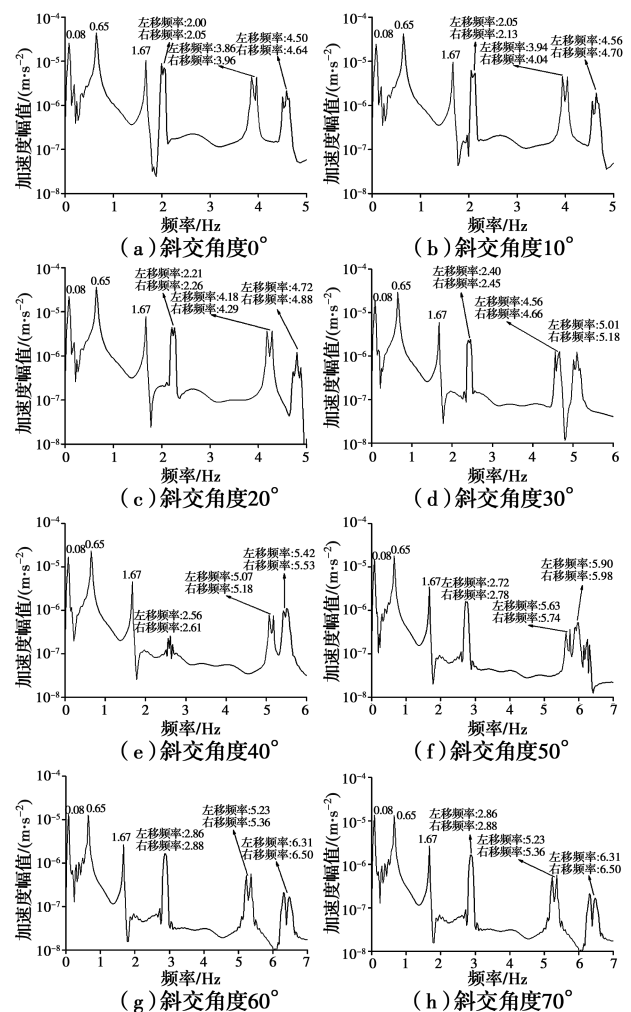


图 7 不同斜交角度频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of different skew angles

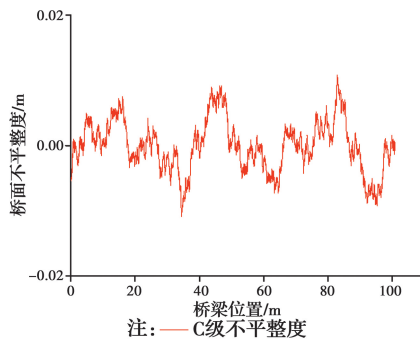


图8 C级不平整度模拟示意图

Fig. 8 Schematic diagram of class C bridge deck roughness simulation

选取桥面C级不平整度进行分析,用前后两辆相同1/4单轴车辆模型匀速以10 km/h驶过桥梁,两车间距1 m,车辆质量为4 t,刚度 $k_v=170$  kN/m,该单轴车辆的自振频率为1.038 Hz,在桥梁同一位置对前后车体加速度进行加速度差值,对差值数据进行处理,识别桥梁前3阶频率,与单车识别出的频谱图进行对比,结果如图9所示。

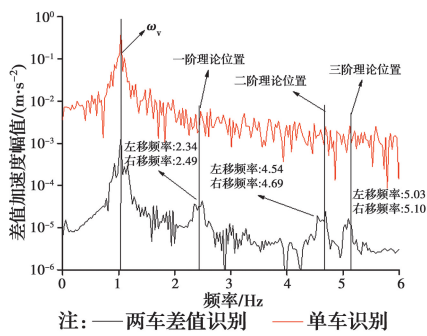


图9 桥面粗糙下识别频谱对比图

Fig. 9 Identification spectrum comparison diagram under rough bridge deck

从图9中可以看出,单辆车无法识别粗糙桥梁的频率,两车差值方法可以准确识别出粗糙桥梁的前3阶频率,1阶频率识别误差为0.41%;2阶频率识别误差为1.30%;3阶频率识别误差为2.12%。可以看出C级桥面粗糙条件下差值法能够较好地解决粗糙度对桥梁频率识别的干扰。

## 5 结论

车速低于20 km/h时能够较好地识别出斜交梁桥的前3阶频率,车速较高时无法识别桥梁的频率信息;相对较小的车桥质量比对桥梁频率识别有利;斜交梁桥不同的斜交角度基本不影响桥梁频率识别的精度,桥面粗糙条件下采用差值法仍能较好地识别桥频。数值模拟表明,间接测量法对于不规则斜

交梁桥频率仍有较好的识别效果,可进一步推进移动传感间接测量方法在桥梁检测工程中的应用。

本方法的优点是省时省力、不中断交通;缺点是用弹簧来模拟非线性的车辆减振系统可能仍不够精确;现场试验时的有色噪声也是重要的干扰因素,因此,在工程中的应用还需要进一步的实桥试验研究。

## 参考文献:

- [1] R. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
CLOUGH R, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
XIA H, ZHANG N. Dynamic interaction of vehicles and structures [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] BIGGS J. Introduction to structural dynamics [M]. New York: Mc Graw-Hill Book Co, Inc, 1964.
- [5] FR Y BA L. Vibration of solids and structures under moving loads [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1972.
- [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. (in Chinese)
- [8] YANG Y B, YAU J D. Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(11): 1512-1518.
- [9] LIN C W, YANG Y B. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification [J]. Engineering Structures, 2005, 27 (13): 1865-1878.
- [10] 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)
- [11] 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. Identification of natural frequencies of bridges by vehicle response [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] KONG X, CAI C S, DENG L, et al. Using dynamic responses of moving vehicles to extract bridge modal properties of a field bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(6): 04017018.
- [14] 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.
- [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] 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. Study on vehicle-bridge coupling vibration of double-deck highway steel truss bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] YANG Y B, LIN C W. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 284(1/2): 205-226.
- [19] 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.
- [20] ELHATTAB A. Drive-by bridge damage monitoring: concise review [J]. *Civil Engineering Research Journal*, 2017, 1(1): 25-29. DOI: 10.19080/cerj.2017.01.555555.

(编辑 胡玲)