

文章编号: 1000-4750(2009)08-0088-07

从过桥车辆响应中识别桥梁结构 基本自振频率的方法

*陈上有^{1,2}, 夏 禾¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中交公路规划设计院有限公司桥梁技术中心, 北京 100088)

摘 要: 用车轮加弹簧-阻尼器-簧上质量模拟移动小车, 建立了车辆荷载作用下欧拉梁的动力分析模型, 得到车桥系统运动控制方程。根据车辆的加速度响应的频谱分析, 识别桥梁结构的基础频率。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以及路面不平顺等参数对识别效果的影响, 得出以下结论: 桥梁阻尼比大小不影响识别精度; 为提高识别的精度, 车辆移动速度应较低, 车桥质量比应较小; 路面不平顺水平对识别的精度有非常显著的影响; 车辆在桥上做加速度较小的变速移动时不会显著影响识别的精度。

关键词: 基本自振频率; 加速度; 变速; 路面不平顺; 识别

中图分类号: U441^{+.3} 文献标识码: A

AN IDENTIFICATION METHOD FOR FUNDAMENTAL FREQUENCY OF BRIDGE FROM DYNAMIC RESPONSES DUE TO PASSING VEHICLE

*CHEN Shang-you^{1,2}, XIA He¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Bridge Technology Development Center, CCCC Highway Consultants Company Limited, Beijing 100088, China)

Abstract: The dynamic analysis model of a simply-supported beam under a vehicle modeled as a wheel-spring-damper-sprung mass is established, and the motion equations are derived. Using the vertical accelerations of the vehicle and its spectra, the fundamental frequency of the bridge is identified. The influences of parameters, such as bridge damping, vehicle, spring stiffness, damping ratio of vehicle mass to bridge mass, vehicle moving speed and acceleration, and bridge surface roughness, are studied. The main conclusions are drawn from an example: bridge damping does not affect the accuracy of frequency identification; better accuracy is achieved for smaller vehicle speed and smaller ratio of vehicle mass to bridge mass; the influence of bridge surface roughness is significant; the varying speed of the vehicle does not obviously affect the identification accuracy.

Key words: fundamental frequency; acceleration; speed-varying; bridge surface roughness; identification

考虑到长期时时健康监测的需要, 人们渴望运用运营荷载进行模态参数识别和损伤识别, 其中以车载激励作为激励源识别桥梁结构的模态参数和识别结构损伤的研究开始受到重视。Piombo B A D 等^[1]利用桥梁结构在移动车辆荷载下的桥梁的瞬态数据(位移、速度及加速度时程)识别了桥梁结构模

态参数。Majumder L 等^[2]提出了一种同时利用车辆响应和桥梁结构响应识别桥梁结构损伤的方法。Zhu X Q 等^[3]利用移动汽车荷载作用下桥梁结构响应识别桥梁结构损伤, 识别时不需知道激励信息。Chen S Y 等^[4]利用列车激励下的桥梁动力响应识别桥梁结构损伤。上述方法都测量桥梁的动力响应且

收稿日期: 2007-09-16; 修改日期: 2009-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(90715008); 比利时-中国政府间合作项目(BIL07/07); 中国交通建设股份有限公司科技研发项目: 铁路、轻轨、公铁(轨)桥梁车-桥耦合振动仿真分析研究

作者简介: *陈上有(1982—), 男, 江西萍乡人, 硕士生, 从事桥梁与结构动力学研究(E-mail: shangyou0507@163.com);

夏 禾(1951—), 男, 北京人, 教授, 硕士, 博导, 从事桥梁与结构动力学研究(E-mail: hxia@bjtu.edu.cn).

需要经过复杂的计算, 而 Yang Y B^[5-6]另辟蹊径, 提出了直接从车辆动力响应中提取桥梁结构基本自振频率的方法, 简单易行。该方法把过桥车辆简化为一移动弹簧和簧上质量, 桥梁结构在移动车辆荷载作用下发生振动, 而车辆随着桥梁结构振动自身也将发生振动。在一定程度上, 桥梁结构振动是车辆动力响应的激励源, 所以可以从车辆动力响应中提取桥梁结构有关信息。

本文建立了简支梁在单个移动车轮(质量)+弹簧(阻尼器)+簧上质量荷载作用下的振动分析模型, 考虑路面不平顺因素以及车辆作变速运动的影响, 通过簧上质量的加速度响应识别桥梁基本自振频率, 并分析了影响识别结果精度的车桥系统参数。

1 简化的车辆加速度响应理论解^[5-6]

均质各向同性材料的简支梁, 跨度为 L , 单位长度质量为 \bar{m} , 抗弯刚度为 EI 。以车轮加弹簧-阻尼器-簧上质量体系模拟车辆, 简支梁受到体系以速度 $v(t)$ 移动的车辆荷载作用, 如图 1 所示。

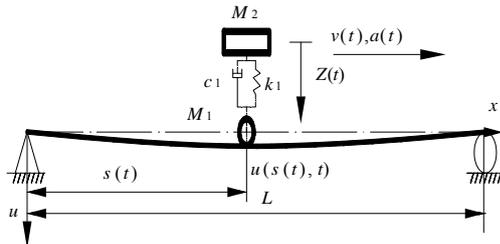


图 1 移动车轮加簧上质量作用下简支梁振动

Fig.1 Simple beam under a moving wheel-spring-damper-sprung mass

假设车辆匀速运动, 不计桥梁阻尼及车辆与桥梁间的相互作用, 以及车轮和簧上质量的惯性力, 不考虑路面不平顺, 欧拉梁的运动控制方程为:

$$EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m}(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \delta(x-vt)(M_1 + M_2)g \quad (1)$$

不计车辆阻尼和惯性力, 车辆运动方程为:

$$M_2 \ddot{Z}(t) + k_1[Z(t) - u(x,t)|_{x=vt}] = 0 \quad (2)$$

梁位移用广义坐标表示:

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (3)$$

式中: $q_i(t)$ 为广义坐标; $\phi_i(x)$ 为梁的振型函数, 对于简支梁可取 $\phi_i(x) = \sin(i\pi x/L)$, 利用正交条件, 且根据一般情况, $1/\bar{m}L$ 较小, $M_1/\bar{m}L \approx 0$, 把式(3)代入式(1)和式(2), 得:

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{2}{\bar{m}L} (M_1 + M_2)g \sin \frac{i\pi vt}{L} \quad (4)$$

$$\ddot{Z}(t) + \omega_v^2 Z(t) = \omega_v^2 \sum_{i=1}^n q_i(t) \sin \frac{i\pi vt}{L} \quad (5)$$

式中: $\omega_v = \sqrt{k_1/M_2}$ 为车辆自振频率; ω_i 为桥梁第 i 阶自振频率。

式(4)的满足零初始条件的解为:

$$q_i = \frac{2(M_1 + M_2)g}{\omega_i^2 \bar{m}L} \frac{1}{1 - \mu_i^2} \times [\sin \omega_{ci} t - \mu_i \sin \omega_i t] \quad (6)$$

式中: $\omega_{ci} = i\pi v/L$ 为车辆加载频率; $\mu_i = \omega_{ci}/\omega_i$ 。

式(6)代入式(5)可得:

$$\ddot{Z}(t) + \omega_v^2 Z(t) = \sum_{i=1}^n \frac{2(M_1 + M_2)g \omega_v^2}{\omega_i^2 \bar{m}L (1 - \mu_i^2)} [\sin(\omega_{ci} t) - \mu_i \sin(\omega_i t)] \sin(\omega_{ci} t) \quad (7)$$

求解(7)可得:

$$\ddot{Z}(t) = \sum_{i=1}^n \{P_i \cos(\omega_v t) + Q_i \cos(2\omega_{ci} t) + X_i \cos[(\omega_{ci} - \omega_i)t] + Y_i \cos[(\omega_{ci} + \omega_i)t]\} \quad (8)$$

式中 P_i 、 Q_i 、 X_i 和 Y_i 为与时间无关的系数。

从上面的推导可以看出, 式(6)中方括号中的第二项相当于桥梁结构自由振动项(瞬态反应), 振动的频率等于体系的自振频率 ω_i 。该部分振动信息又通过车辆响应中表现出来, 也即式(8)中大括号中的第三项和第四项, 因此, 可以从车辆响应中提取出结构的自振频率 ω_i 。根据式(8), 对车辆响应进行快速傅里叶变换, 可以求得四种频率, 即 $\omega^1 = \omega_v$ 、 $\omega^2 = 2\omega_{ci}$ 、 $\omega^3 = |\omega_{ci} - \omega_i|$ 和 $\omega^4 = \omega_{ci} + \omega_i$; 继而可以求得桥梁结构频率 ω_i 。考察四种频率对应的四个系数 P_i 、 Q_i 、 X_i 和 Y_i 的大小, 第三种频率和第四种频率对应的系数要大的多, 所以其傅里叶系数相对也要大。根据这个性质, 可以清楚地从频谱图判断出后两种频率。由于通常情况下 $\omega_{ci} < \omega_i$, 所以求得后两种频率的平均值即为桥梁的频率。

2 车辆响应的数值解

为了能够得到解析上的车体加速度表达式, 在理论解的推导过程中作了许多假定, 如式(1)中, 没有考虑车轮和簧上质量的惯性力; 对于实际存在路面不平顺也没有考虑。为验证所做的假定是否合理以及识别方法的实用性, 有必要建立更完善的车桥系统相互作用^[7]数值分析模型。本文采用作者在文献[8]中的建立的车轮加弹簧-阻尼器-簧上质量与桥梁的相互作用模型, 并在其基础上加入路面不平

顺, 该模型既能考虑车体做匀速运动, 也能考虑车体做变速运动。为节省篇幅, 此处不说明推导过程, 只列出最终结果。

车桥系统运动控制方程为:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\} \quad (9)$$

式中: $\{q\} = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t), Z]^T$ 为广义坐标向量; $\{F\} = [\rho_F \alpha_1, \rho_F \alpha_2, \dots, \rho_F \alpha_N, \rho_r]^T$ 为广义荷载向量; N 为考虑振型阶数。

$[M]$ 为质量矩阵:

$$[M] = \begin{pmatrix} M & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_2 \end{pmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} ;$$

$$M = [m_{ij}]_{N \times N} ; m_{ij} = \begin{cases} \rho_M \Phi_{ij} & i \neq j \\ 1 + \rho_M \Phi_{ij} & i = j \end{cases}$$

$[C]$ 为阻尼矩阵:

$$[C] = \begin{pmatrix} C & -\rho_C \mathbf{a}^T \\ -c_1 \mathbf{a} & c_1 \end{pmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} ;$$

$$\mathbf{a} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_i \ \dots \ \alpha_N] ;$$

$$C = [c_{ij}]_{N \times N} ; c_{ij} = \begin{cases} \varphi_{ij} + \rho_C \Phi_{ij} & i \neq j \\ 2\xi_i \omega_i + \varphi_{ij} + \rho_C \Phi_{ij} & i = j \end{cases}$$

$[K]$ 为刚度矩阵:

$$[K] = \begin{pmatrix} K & -\rho_K \mathbf{a}^T \\ -c_1 v \boldsymbol{\beta} - k_1 \mathbf{a} & k_1 \end{pmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} ;$$

$$\boldsymbol{\beta} = [\rho_{L1} \beta_1 \ \rho_{L2} \beta_2 \ \dots \ \rho_{Li} \beta_i \ \dots \ \rho_{LN} \beta_N]_{N \times 1} ;$$

$$K = [k_{ij}]_{N \times N} ; k_{ij} = \begin{cases} \psi_{ij} + \rho_K \Phi_{ij} & i \neq j \\ \omega_i^2 + \psi_{ij} + \rho_K \Phi_{ij} & i = j \end{cases}$$

式中: $\rho_M = \frac{2M_1}{\bar{m}L}$; $\rho_C = \frac{2c_1}{\bar{m}L}$; $\rho_K = \frac{2k_1}{\bar{m}L}$;

$\rho_r = k_1 r(s(t))$; $\rho_F = \frac{2(M_1 + M_2)}{\bar{m}L} g - \rho_K r(s(t))$;

$\alpha_i = \sin \frac{i\pi s(t)}{L}$; $\beta_i = \cos \frac{i\pi s(t)}{L}$; $\rho_{Li} = \frac{i\pi}{L}$; $\varphi_{ij} = 2v(t)\rho_{Lj}\alpha_i\beta_j\rho_M$; $\Phi_{ij} = \alpha_i\alpha_j$; $\psi_{ij} = [\rho_{Lj}a(t)\alpha_i\beta_j - \rho_{Lj}^2 v^2(t)\alpha_i\alpha_j]\rho_M + \rho_{Lj}v(t)\alpha_i\beta_j\rho_C$

路面不平顺函数由三角级数叠加法生成^[9]:

$$r(x) = \sum_{k=1}^{N_r} R_k \cos(2\pi f_k x + \theta_k) \quad (10)$$

式中: R_k/m 为余弦波的幅值; $f_k/(\text{cycle/m})$ 为位于功率谱密度 $S_r(f)$ 定义域范围 $[f_l, f_u]$ 内的空间频率, f_l 和 f_u 为截断频率的上下限; θ_k 按 $0-2\pi$ 均匀分布取值的一系列不相关的随机相位角; N_r 为组成不平顺值采用的余弦函数的阶数, R_k 和 f_k 可以

采用下式计算:

$$R_k = \sqrt{4S_r(f_i)\Delta f} \quad (11)$$

$$f_i = f_l + (i-1/2)\Delta f \quad ; \quad i=1, 2, \dots, N_r \quad (12)$$

其中:

$$\Delta f = (f_u - f_l) / N_r$$

$$S_r(f_k) = \begin{cases} \bar{\alpha} f_k^{-\eta}, & f_l \leq f_k \leq f_u \\ 0, & f_k < f_l \text{ 或者 } f_k > f_u \end{cases}$$

式中: S_r 的单位为 m^3/cycle , 指数 $\eta=1.94$, $\bar{\alpha}/(\text{m}^2/(\text{m}/\text{cycle}))$ 为不平顺系数, 不同路面条件对应的不平顺系数见表 1^[9]。

表 1 路面不平顺等级

Table 1 Grade of road surface roughness

路面不平顺等级	$\bar{\alpha}/(\text{m}^2/(\text{m}/\text{cycle}))$
A(很好)	$\bar{\alpha} \leq 0.24 \times 10^{-6}$
B(好)	$0.24 \times 10^{-6} < \bar{\alpha} \leq 1.0 \times 10^{-6}$
C(一般)	$1.0 \times 10^{-6} < \bar{\alpha} \leq 4.0 \times 10^{-6}$
D(差)	$4.0 \times 10^{-6} < \bar{\alpha} \leq 16.0 \times 10^{-6}$
E(很差)	$\bar{\alpha} > 16.0 \times 10^{-6}$

本文针对每一种路况通过 10 次随机模拟不平顺样本序列后取平均作为本路况的不平顺样本序列。每次模拟的三角级数的个数是 300 个。然后将得到的不平顺序列进行动力计算。

3 简支梁基本自振频率识别

利用本文数值分析模型模拟车辆荷载过桥的全过程, 得到簧上质量的振动加速度, 进行桥梁基本自振频率的识别。假设梁的跨度为 $L=25\text{m}$, 梁体的弹性模量 $E=2.75 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, 抗弯刚度 $I=0.12\text{m}^4$, 单位长度质量 $\bar{m}=4800\text{kg/m}$; 簧上质量分别为 $M_2=1200\text{kg}$ 、 $M_2=3000\text{kg}$ 和 $M_2=5000\text{kg}$, 簧下质量 $M_1=200\text{kg}$, 所以车桥的质量比 $\lambda=(M_1+M_2)/\bar{m}L=1.17\%$ 、 2.67% 和 4.33% ; 弹簧阻尼 $c_1=160\text{N}\cdot\text{s/m}$, 弹簧刚度 $k_1=5 \times 10^5\text{N/m}$, 桥梁阻尼比分别为 $\xi=0$ 、 $\xi=0.02$ 和 $\xi=0.05$; 车辆的匀速行驶速度分别按 $v=5\text{m/s}$ 、 $v=7\text{m/s}$ 和 $v=10\text{m/s}$ 、 $v=15\text{m/s}$ 计算。

3.1 桥梁阻尼比、车桥质量比对桥梁基本自振频率识别精度的影响

表 2—表 3 为不同桥梁阻尼比和车桥质量比的桥梁基本自振频率的识别结果与理论解的比较, 图 2—图 3 为对应的加速度响应频谱。

从表 2 和图 2 可以看出, 不同阻尼比下的桥梁基本自振频率的识别结果相同, 识别精度较好, 这与实际情况相符合。第二种频率的识别误差比较

大, 但第二种频率可以测量车辆的速度得到, 且不影响桥梁的第一阶频率的识别。第一种频率也可以通过其他方法事先知道。桥梁的高阶频率在频谱图中反应不出来。

从表 3 可知, 不同的车桥质量比下识别精度相

同, 但从图 3 可以看出, 车桥的质量比越大, 从频谱图中识别桥梁基本自振频率变得越来越困难, 这是由于质量比越大, 质量惯性力作用明显, 而在理论推导中这项作用是不计的。因此为获得较好的识别精度, 车桥的质量比应该较小。

表 2 不同桥梁阻尼比下的识别结果($v=10\text{m/s}$, $M_2=1200\text{kg}$)

Table 2 Identification results for different bridge damping ($v=10\text{m/s}$, $M_2=1200\text{kg}$)

频率	理论解/Hz	识别值/Hz			相对误差/(%)		
		$\xi=0$	$\xi=0.02$	$\xi=0.05$	$\xi=0$	$\xi=0.02$	$\xi=0.05$
ω_v	3.2487	3.4180	3.418	3.4180	5.21	5.21	5.21
$2\omega_{e1}$	0.4000	0.4882	0.4882	0.4882	22.1	22.1	22.1
$\omega_1-\omega_{e1}$	1.8839	1.9531	1.9531	1.9531	/	/	/
$\omega_{e1}+\omega_1$	2.2839	2.4414	2.4414	2.4414	/	/	/
ω_1	2.0839	2.1972	2.1972	2.1972	5.44	5.44	5.44

表 3 不同车桥质量比下的识别结果($\xi=0.02$, $v=5\text{m/s}$)

Table 3 Identification results for different ratio of vehicle mass to bridge mass ($\xi=0.02$, $v=5\text{m/s}$)

频率	理论解/Hz	识别值/Hz			相对误差/(%)		
		$\lambda=1.17\%$	$\lambda=2.67\%$	$\lambda=4.33\%$	$\lambda=1.17\%$	$\lambda=2.67\%$	$\lambda=4.33\%$
$\omega_1-\omega_{e1}$	1.9839	1.9531	1.9531	1.9531	/	/	/
$\omega_{e1}+\omega_1$	2.1839	2.1973	2.1973	2.1973	/	/	/
ω_1	2.0839	2.0752	2.0752	2.0752	0.42	0.42	0.42

注: 不同车桥质量比下的车辆自振频率分别为 $\omega_v=3.2487\text{Hz}$ 、 $\omega_1=2.0547\text{Hz}$ 和 $\omega_{e1}=1.5915\text{Hz}$ 。

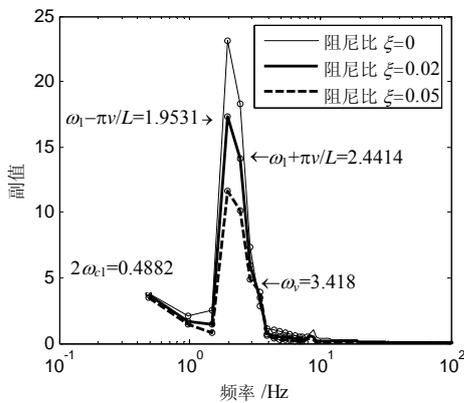


图 2 不同桥梁阻尼比下的簧上质量加速度频谱
Fig.2 Acceleration spectra of sprung mass for different bridge damping

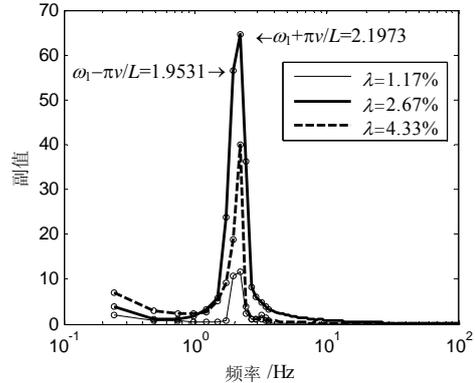


图 3 不同车桥质量比下的簧上质量加速度频谱
Fig.3 Acceleration spectra of sprung mass for different ratio of vehicle mass to bridge mass

表 4 不同车辆行驶速度下的识别结果($\xi=0.02$, $M_2=1200\text{kg}$)

Table 4 Identification results for different vehicle moving speeds ($\xi=0.02$, $M_2=1200\text{kg}$)

频率	理论解/Hz	识别值/Hz			相对误差		
		$v=5\text{m/s}$	$v=7\text{m/s}$	$v=15\text{m/s}$	$v=5\text{m/s}$	$v=7\text{m/s}$	$v=15\text{m/s}$
$\omega_1-\omega_{e1}$	1.9839/1.8039/1.7839	1.9531	1.9531	1.9531	/	/	/
$\omega_{e1}+\omega_1$	2.1839/2.3639/2.6839	2.1973	2.4414	2.9297	/	/	/
ω_1	2.0839	2.0752	2.1972	2.4414	0.42	5.44	17.15

注: 车辆自振频率为 $\omega_v=3.2487\text{Hz}$ 。

表 5 车辆匀变速行驶下的识别结果

Table 5 Identification results when vehicle moves on bridge with speed uniformly varied

频率	理论解/Hz	识别值/Hz			相对误差		
		$a=1\text{m/s}^2$	$a=2\text{m/s}^2$	$a=5\text{m/s}^2$	$a=1\text{m/s}^2$	$a=2\text{m/s}^2$	$a=5\text{m/s}^2$
$\omega_1-\omega_{c1}$	≈ 4.5597	4.3945	4.4395	4.4395	/	/	/
$\omega_{c1}+\omega_1$	≈ 4.7597	4.8828	4.8828	4.8828	/	/	/
ω_1	4.6597	4.6611	4.6611	4.6611	0.03	0.03	0.03

注： $\omega_1=3.2487\text{Hz}$, $\omega_{c1}=0.1\text{Hz}$ (匀速时)。

3.2 车辆行驶速度对桥梁基本自振频率识别精度的影响

3.2.1 车辆匀速过桥的影响

表 4 为车辆匀速过桥时不同车辆行驶速度下的桥梁自振频率的识别结果与理论解的比较, 图 4 为 $v=7\text{m/s}$ 对应的簧上质量加速度响应频谱。

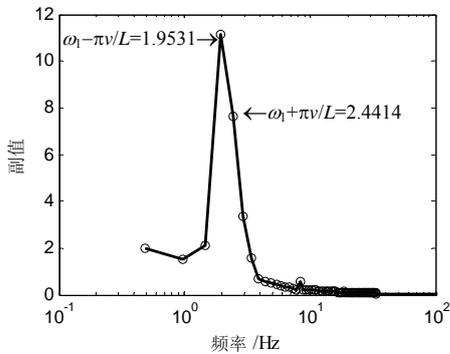


图 4 簧上质量加速度响应频谱($v=7\text{m/s}$)

Fig.4 Acceleration spectrum of sprung mass ($v=7\text{m/s}$)

从表 4 可以看出, 在车辆行驶速度较高时, 识别的精度较低。研究也表明, 车辆行驶速度较低时, 即使是在共振^[10]速度下, 桥梁基本自振频率也能够识别出来。

3.2.2 车辆变速过桥的影响

考虑到实际运行车辆在桥上可能不是匀速运动, 故模拟车辆在桥上作匀加速运动。桥梁抗弯刚度增大五倍, 即 $I=0.60\text{m}^4$, 取簧上质量 $M_2=1200\text{kg}$, 桥梁阻尼 $\xi=2\%$, 车辆上桥初速度 $v_0=5\text{m/s}$, 加速度 $a=1\text{m/s}^2$ 、 $a=2\text{m/s}^2$ 和 $a=5\text{m/s}^2$, 其它参数不变。表 5 为各加速度值下的识别结果与理论解的比较, 图 5 为 $a=5\text{m/s}^2$ 簧上质量加速度响应频谱。

从表 5 可知, 车体在桥上匀变速运动时, 当行驶加速度较小的情况下, 车体移动加速度对识别结果基本上没有多大的影响, 因此, 实际工作中车辆不需要严格意义上的匀速行驶。另外, 对比表 5 与表 2—表 4 可知, 对于刚度相对较大的桥梁, 识别的精度要高一些。

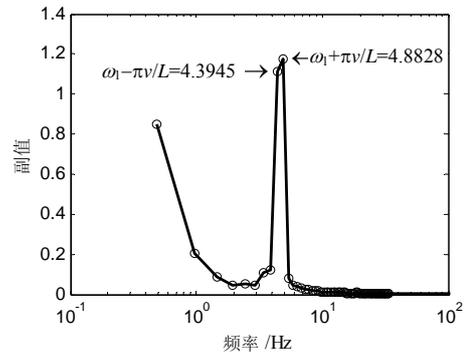


图 5 簧上质量加速度响应频谱($a=5\text{m/s}^2$)

Fig.5 Acceleration spectrum of sprung mass ($a=5\text{m/s}^2$)

3.3 路面不平顺对桥梁基本自振频率识别精度的影响

实际桥梁存在路面不平顺, 且不平顺激励对于车辆动力响应来说是一个重要的激励源, 不同的路面不平顺条件下的车辆动力响应具有较大的差异。当路面不平顺对车体的激励与桥梁的振动对车体的激励相比大的多时, 车体加速度响应中所含有的梁体模态信息将会被淹没, 从加速度响应的频谱中将找不出桥梁的基本自振频率。由于不平顺激励相对而言是一种高频激励, 为了尽可能的减少这种激励在车体加速度响应中的反应, 应该尽可能的选择较小的车体的自振频率, 或者较小的车体弹簧刚度, 较大的弹簧阻尼。

考虑 B、C 和 D 三个路面不平顺等级, 参照表 1, 在计算中, 对应的不平顺系数分别取为: $\bar{\alpha}_B=0.62 \times 10^{-6} \text{m}^2 / (\text{m} / \text{cycle})$, $\bar{\alpha}_C=2.5 \times 10^{-6} \text{m}^2 / (\text{m} / \text{cycle})$ 和 $\bar{\alpha}_D=10.0 \times 10^{-6} \text{m}^2 / (\text{m} / \text{cycle})$ 。空间截断频率取: $f_l=0.06 \text{cycle/m}$, $f_u=3 \text{cycle/m}$ 。模拟车辆在桥上作匀加速运动, 取簧上质量 $M_2=1200$, 弹簧刚度 $k_1=1 \times 10^4 \text{N/m}$, 弹簧阻尼 $c_1=3 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{s/m}$, 桥梁阻尼比 $\xi=0.02$, 车辆上桥初速度 $v=5\text{m/s}$, 加速度 $a=0.5\text{m/s}^2$, 其他参数不变。表 6 为不同路面不平顺水平下的识别结果及与理论解的比较, 图 6 和图 7 为簧上质量加速度响应及其频谱。

从图 6 和图 7 看出,路面不平顺度越大,识别变的越困难。当路面不平顺等级为 D 级时,识别失效。因此这种方法用于实际的桥梁结构基础频率的识别时对路面的平顺水平有较高的要求。

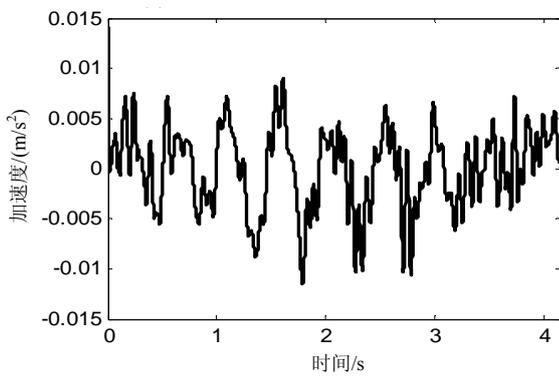
减小车辆自振频率的途径可以是直接采用刚

度较小的弹簧,也可以是在车体和轮对之间设置多层弹簧,后者更加接近普通车辆构造。因此,从实际运营的普通车辆的加速度响应中识别出桥梁基础频率将是可能的,但这有待于理论上的进一步研究。

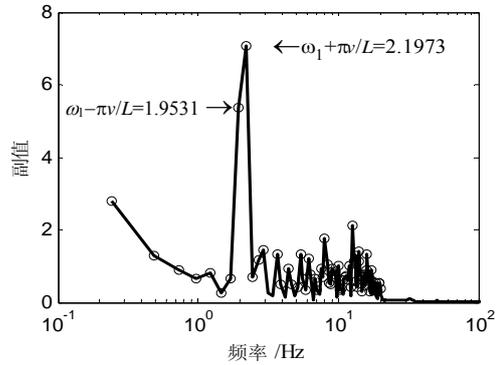
表 6 不同路面不平顺等级下的识别结果

Table 6 Identification results for different grades of bridge surface roughness

频率	理论解/Hz	识别值/Hz			相对误差		
		B	C	D	B	C	D
$\omega_1 - \omega_{c1}$	≈ 2.06	1.9531	1.9531	/			
$\omega_{c1} + \omega_1$	≈ 2.10	2.1973	2.1973	/	0.42	0.42	失效
ω_1	2.0839	2.0752	2.0752	/			



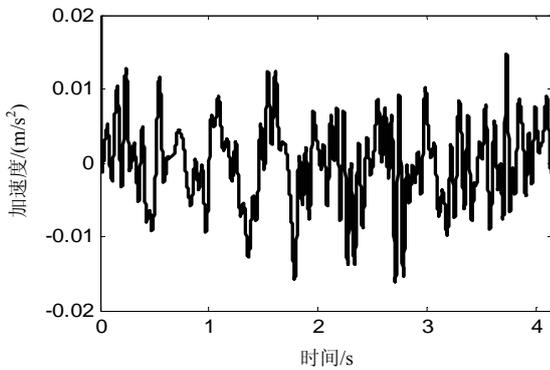
(a) 簧上质量加速度(B级不平顺) (m/s^2)



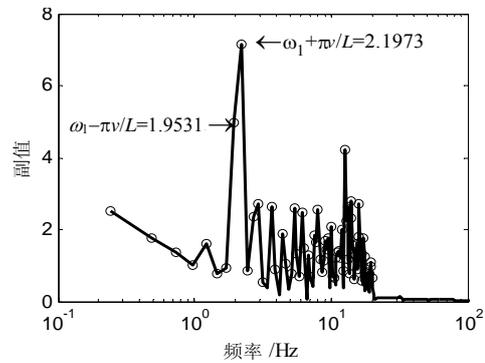
(b) 频谱

图 6 不平顺等级为 B 级时的簧上质量加速度响应及其频谱

Fig.6 Acceleration response and its spectrum of sprung mass for grade B



(a) 簧上质量加速度(C级不平顺) (m/s^2)



(b) 频谱

图 7 不平顺等级为 C 级时的簧上质量加速度响应及其频谱

Fig.7 Acceleration response and its spectra of sprung mass for grade C

4 结论

大多数情况下,通过车体加速度响应的离散傅里叶变换得到的幅值谱,其中幅值最大点和幅值第二大点对应的频率之和的平均值为桥梁的一阶频率。桥梁阻尼比大小不影响识别精度。实际识别桥梁基础频率时,为提高识别的精度,应该选择较低

的车辆行驶速度,车桥质量比。车辆以较小的加速度在桥上作变速运动不会影响识别结果。路面不平顺水平对识别的精度有非常大的影响,实际识别时应该尽量选择自振频率小,阻尼大的车辆。该方法优点是简单易行,缺点是仅仅能够识别出桥梁的基本自振频率,车辆模型简单。实际车辆构造更加复

杂, 弹簧也可能是非线性的, 桥上多车辆同时运行较普遍。对于正常行驶车辆, 特别是高速铁路车辆, 行车速度也将更高。因此, 复杂条件下由桥上行车动力响应识别桥梁基本自振频率还有待于在理论上进一步研究。

参考文献:

- [1] Piombo B A D, Fasana A, Marchesiello S, Ruzzene M. Modelling and identification of the dynamic response of a supported bridge [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, 14(1): 75—89.
- [2] Majumder L, Manohar C S. A time-domain approach for damage detection in beam structures using vibration data with a moving oscillator as an excitation source [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268(4): 699—716.
- [3] Zhu X Q, Law S S. Damage in simply supported concrete bridge structure under moving vehicle loads [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, ASME, 2007, 129: 58—65.
- [4] Chen S Y, Xia H, Zhan J W, Gu X H. A transient data-based sensitivity method for bridge damage detection [C]. *International Symposium on Innovation and Sustainability of Structures in Civil Engineering*. Nanjing China: Southeast University Press, 2007: 1402—1410.
- [5] Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting the bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 272: 471—493.
- [6] Yang Y B, Lin C W. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 284: 205—226.
- [7] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2005.
Xia He, Zhang Nan. *Dynamic interaction of vehicles and structures* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 陈上有, 夏禾, 战家旺, 顾戌华. 变速移动荷载作用下简支梁的动力响应分析[J]. *中国铁道科学*, 2007, 28(6): 41—46.
Chen Shangyou, Xia He, Zhan Jiawang, Gu Xuhua. *Dynamic analysis of simply-supported beam under speed-varying loads* [J]. *China Railway Science*, 2007, 28(6): 41—46. (in Chinese)
- [9] 余志生. 汽车动力学 B 卷[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
Yu Zhisheng. *Volume B of vehicle dynamic* [M]. Beijing: China Communication Press, 1994. (in Chinese)
- [10] Xia He. Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 297: 810—822.