

基于跑车余振的混凝土梁桥阻尼比估算方法*

王宗林¹, 李伟钊¹, 盛可鉴^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨, 150090) (2. 黑龙江工程学院土木与建筑学院 哈尔滨, 150050)

摘要 分析了混凝土梁桥跑车余振信号的特点, 提出桥梁自由衰减振动分段幅值估算阻尼比的方法, 以提高阻尼比的识别精度。该方法通过对结构余振信号分段截取做FFT变换, 利用相邻两块数据的幅值求得其阻尼比。仿真分析比较了该方法与传统半功率点法估算结构阻尼比的精度, 结果表明该方法在有限衰减数据长度内精度优于传统半功率点法。利用该方法对某混凝土连续刚构桥的跑车余振信号进行阻尼比识别, 得到前两阶竖弯频率对应的阻尼比, 识别结果稳定, 可作为该桥的实际阻尼比。

关键词 梁桥; 阻尼比; 跑车试验; 自由衰减振动; 频谱分析

中图分类号 U441+.3; U446.3; O329

引言

阻尼是存在于结构中耗散结构振动能量的一种物理作用, 阻尼的大小决定了结构振动衰减的快慢程度。桥梁结构的阻尼是其固有的特性, 与结构的组成材料、结构形式以及外部环境等因素相关。桥梁结构本身构造发生的变化, 比如结构损伤、边界条件变异等都会导致其阻尼发生变化。与结构的其他动力特性一样, 原则上可以通过结构阻尼的变化来反映结构病害的发展情况^[1-2]; 但是, 桥梁结构阻尼作用机理复杂, 目前还无法通过理论计算的方法来确定。一般通过现场实测得到桥梁结构的阻尼比, 受现场条件、试验方法以及数据处理方法等因素的影响, 阻尼测试的结果具有较大的随机性, 甚至得到与实际相悖的结果; 因此, 有必要研究更加可靠的试验以及数据处理方法, 提高阻尼比识别的精度。国内外众多学者对实测阻尼的精确估算进行了深入研究^[3-14]。

混凝土梁式桥的阻尼比一般在0.01~0.1之间, 前几阶频率一般小于10 Hz, 属于低频、中小阻尼结构。目前, 混凝土梁式桥阻尼比的测定一般采用跳车或跑车试验。对于跳车试验, 由于车重对桥梁结构的影响, 对于中小桥会严重影响其识别精度, 且容易造成结构损伤。利用跑车余振的方法是测定桥梁振动特性的较为理想的方法。无论跳车还是跑车, 对混凝土桥梁的冲击作用是有限的, 桥梁的振动响应会在短时间内衰竭, 自由衰减振动数据长度有限, 信号

的频率分辨率低。混凝土梁式桥的低阶频率间隔较大, 目前桥梁评估中一般只采用低阶动力特性。针对混凝土梁式桥的以上特点, 笔者对跑车余振曲线分段截取进行频谱分析, 通过相邻段间幅值的变化来估算混凝土梁式桥的低阶阻尼比, 以提高阻尼比识别的精度。

1 分段幅值估算阻尼的原理

在结构响应的频谱分析中, 振动信号的幅值谱描述了振动响应随频率的分布情况。各频率成分所对应的谱线幅值为该频率在分析数据长度内的总振动响应。通过分段截取结构自由衰减响应的时域信号, 对各数据段进行频谱分析, 得到某阶频率在相邻时间段内谱线幅值的衰减规律, 就能识别出结构的阻尼比。笔者以单自由度有阻尼系统为例, 简述此方法的原理。

由动力学理论可知^[15], 单自由度有阻尼系统的振动微分方程为

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2y(t) = 0 \quad (1)$$

其中: ξ 为系统的阻尼比; ω_0 为固有圆频率。

通过拉普拉斯变换, 可求得该系统的自由衰减函数为

$$y(t) = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} t + \varphi) \quad (2)$$

其中: φ 为初始相位角。

* 国家自然科学基金资助项目(编号: 50678051)

收稿日期: 2011-05-18; 修改稿收到日期: 2011-07-03

以 $t=0$ 为时间起点,截取长度为 T 的 $y(t)$ 做傅里叶变换

$$Y_1(\omega) = \int_0^T \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} t + \varphi) e^{-j\omega_0 t} dt = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}} \int_0^T e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} t + \varphi) e^{-j\omega_0 t} dt \quad (3)$$

以 $t=\Delta T$ 为时间起点,截取长度为 T 的 $y(t)$ 做傅里叶变换

$$Y_2(\omega) = \int_0^T \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0(t+\Delta T)} \times \sin(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}(t+\Delta T) + \varphi) e^{-j\omega_0 t} dt = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0 \Delta T} \int_0^T e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} t + \omega_0 \sqrt{1-\xi^2} \Delta T + \varphi) e^{-j\omega_0 t} dt \quad (4)$$

式(3)、式(4)的积分项内只是三角函数项的初始相位不同,对两式取模后,在 $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1-\xi^2}$ 处有以下关系式

$$\frac{|Y_1(\omega_1)|}{|Y_2(\omega_1)|} = \frac{1}{e^{-\xi\omega_0 \Delta T}} = e^{\xi\omega_0 \Delta T} \quad (5)$$

由式(5)得

$$\xi = \ln \frac{|Y_1(\omega_1)|}{|Y_2(\omega_1)|} / (\omega_0 \Delta T) \quad (6)$$

其中: $|Y_1(\omega)|, |Y_2(\omega)|$ 为对应于结构振动响应的幅值谱。

对于小阻尼结构,可以认为 $\omega_1 = \omega_0$ 。由于对信号进行分段截取,做频谱分析时会导致原来集中在 ω_0 处的能量被分散到较宽的频带去,造成能量泄露。结构自由衰减振动幅频曲线在其固有频率 ω_1 处有峰值。峰值处所占能量大,信噪比较高,且前后两段数据长度和数学处理方法一致,可以认为前后两段数据峰值处幅值与未泄露幅值之间的关系一致。由式(6)可得到结构的阻尼比。

对于尚未衰竭的实测自由衰减信号,可取 $t = \Delta T, 2\Delta T, \dots, n\Delta T$ 为起点逐段截取数据,利用相邻的数据段做分析分别求出 ξ , 然后取其均值作为实测的 ξ 。

对于多自由度系统,可以看成是多个单自由度系统的线性叠加。其自由振动衰减函数为

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i \sqrt{1-\xi_i^2}} e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_i \sqrt{1-\xi_i^2} t + \varphi_i) \quad (7)$$

当各阶频率 ω_i 间隔较大时,相邻模态的耦合较小,可以按上述单自由度的方法估算各阶阻尼 ξ_i 。

2 仿真分析

由3种频率成分组成的单位为 mm 位移衰减信号,频率成分为 1.0, 2.0 和 3.0 Hz, 对应阻尼比为 0.01, 0.02 和 0.015, 如式(8)所示, 对应衰减曲线如图1所示。

$$Y(t) = \exp(-2\pi \times 1.0 \times 0.01t) \sin(2\pi \times 1.0t) + \exp(-2\pi \times 2.0 \times 0.02t) \sin(2\pi \times 2.0t + \pi/2) + \exp(-2\pi \times 3.0 \times 0.015t) \sin(2\pi \times 3.0t + \pi) \quad (8)$$

以采样频率为 100 Hz, 时间间隔 $\Delta T = 5$ s, 依次截取数据长度为 1k, 2k 和 4k 的数据段, 以本研究方法及传统的半功率带宽法进行阻尼比估算, 对应的频率分辨率 Δf_s 依次为 0.097 7, 0.048 8 和 0.024 4 Hz。对于传统半功率带宽法, 当半功率点不在谱线上时, 采用其左右谱线线性插值的方法来确定半功率点处的频率。由于做 FFT 变换时得到的 ω_n 可能有最大为 0.5 倍 Δf_s 的误差, 笔者取最接近理论频率 ω_n 的峰值进行计算。下边只列出分块长度为 4k 的数据截取图及 FFT 变换得到幅频曲线, 分别见图1、图2, 估算得到的阻尼比 ξ 及误差 δ 见表1。

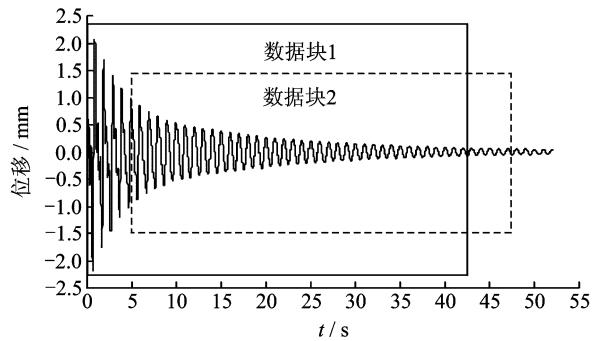


图1 振动衰减曲线及长度为4k的数据块截取

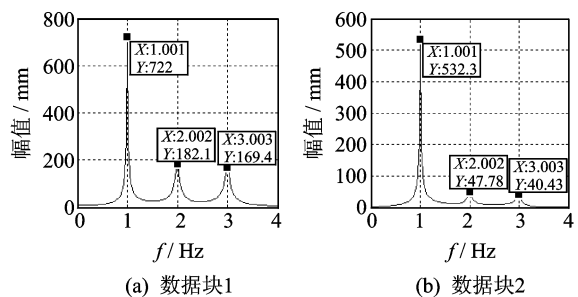


图2 分块长度为4k时各数据块的幅频曲线

表1 两种方法计算结果汇总

分块大小	理论值	本研究方法		半功率带宽法	
	ξ	ξ	$\delta/\%$	ξ	$\delta/\%$
1k	0.010	0.009 6	-3.8	0.047 2	372.5
	0.020	0.021 2	5.9	0.046 8	134.1
	0.015	0.015 3	2.0	0.022 6	50.7
2k	0.010	0.009 9	-1.0	0.045 6	356.3
	0.020	0.021 9	9.4	0.020 5	2.4
	0.015	0.014 8	-1.4	0.018 4	22.4
4k	0.010	0.009 7	-2.9	0.011 5	15.0
	0.020	0.021 3	6.4	0.020 6	2.9
	0.015	0.015 2	1.3	0.015 4	2.9

从表1结果可以看出,用本研究方法计算的阻尼比误差较小,前3阶最大分别为3.8%,9.4%,2.0%,且分块大小对计算结果影响较小。用传统半功率带宽法计算误差较大,在分块长度为1k时误差最大,达到372.5%。这是因为传统半功率带宽法计算阻尼比的精度与半功率带宽 Δf_w 和系统的自振频率 f_N 有关,而这两者的精度由频率分辨率 Δf_s 决定。对于一般的混凝土桥梁,其衰减信号长度往往有限,频率分辨率较大,导致半功率带宽法计算的阻尼比误差较大。

3 工程实例

某连续刚构桥桥跨布置为75 m+120 m+75 m,下部主墩为双薄壁墩,两主墩高分别为37.60 m和34.20 m,与主梁固结,梁端均采用单向活动的盆式橡胶支座,立面图见图3。主桥横断面为两幅分离的单箱单室断面,单幅箱梁全宽12.2 m,横向布置为0.75 m+净11 m+0.45 m。桥面横坡由箱梁顶板自倾形成。主梁横坡、纵坡均为2%。主墩墩顶箱梁高为6.00 m,跨中及边跨支点箱梁梁高2.80 m,其间按抛物线变化。该桥主梁混凝土采用C50,桥墩混凝土采用C40,设计荷载为汽车-超20级,挂车-120。

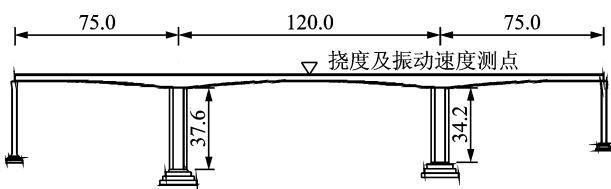


图3 某连续刚构桥立面图(单位:m)

跑车试验时在中跨跨中处布置挠度测点以及振动速度测点,同步测量跑车时桥梁中跨跨中的挠度以及速度响应。试验采用两台长春一汽生产的3轴翻斗车,车重30 t,沿着桥中轴线并排行驶。跨中挠

度采用芬兰产的PSM光电挠度仪测量;振动速度采用中国地震局工程力学研究所941B拾振器测试,用江苏东华DH5920信号采集系统进行采集,采样频率为200 Hz。

通过挠度时程曲线可知车辆上、下桥时的准确时间,进而对速度时程曲线进行截取,得到桥梁跑车余振的速度时程曲线,通过上面所提出的方法,计算桥梁的阻尼比。

车辆过桥时实测挠度及速度时程曲线见图4和图5。由图4可看出,车辆24.9 s上桥,在 $t=54.47$ s时下桥。由图5可看出,桥梁在 $t=100$ s时振动速度已基本衰竭到车上桥前水平,此时总衰减时间为45.53 s,衰减采样点数为9 106点。为了减小脉动的影响,同时考虑计算精度,分别以数据长度为2k,4k分段截取图4中的速度余振曲线做FFT变换,每段数据时间间隔 $\Delta t=5$ s,此时频率分辨率分别为0.097 6 Hz和0.048 8 Hz。各数据块的频谱曲线见图6,计算结果见表2。

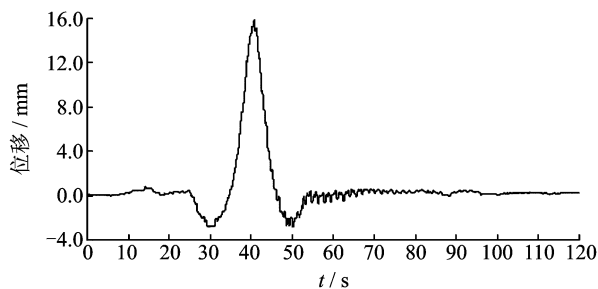
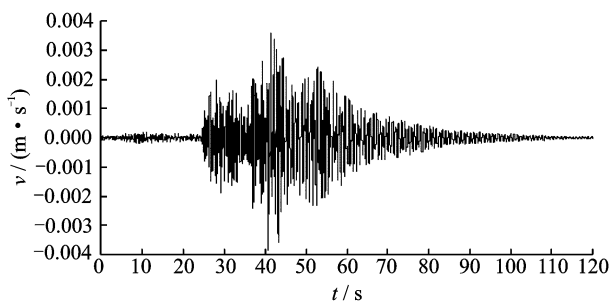
图4 汽车 $v=35$ km/h过桥时中跨跨中挠度曲线

图5 车辆过桥时中跨跨中速度曲线

从计算结果可以看出,受频率分辨率的影响,数据块长度不同时得到的频率并不一致,数据长度为2k时得到的1阶频率为1.270 Hz,与4k时的1.318 Hz相差0.048 Hz,小于其0.5倍的频率分辨率,且2k时能量泄露到1.367 Hz的谱线上,导致1.270 Hz处幅值较小,不到4k时1.318 Hz处能量的一半。无论数据长度为2k还是4k,计算得到的阻尼比基本一致,

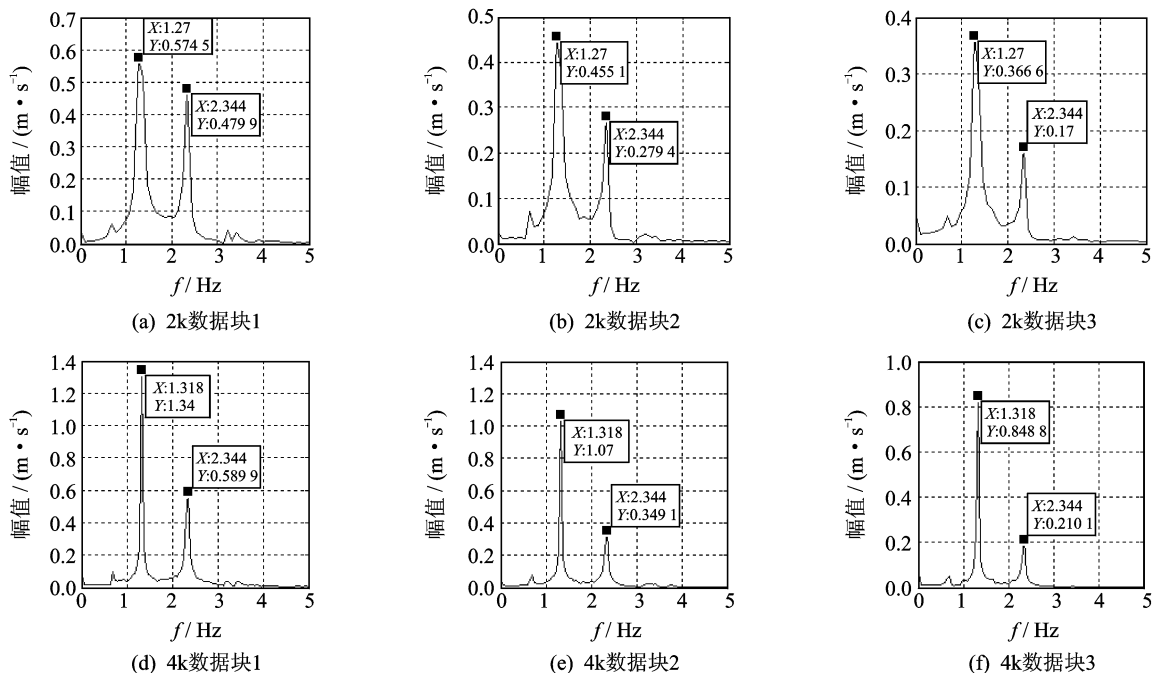


图6 各数据块速度响应衰减曲线的频谱曲线

表2 某连续刚构桥阻尼比估算结果

数据长度	f/Hz	幅值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			阻尼比		
		数据块1	数据块2	数据块3	ξ_1	ξ_2	均值
2k	1.270	0.574 5	0.455 1	0.366 6	0.005 8	0.005 4	0.005 6
	2.344	0.479 9	0.279 4	0.170 0	0.007 3	0.006 8	0.007 0
4k	1.318	1.340 0	1.070 0	0.848 8	0.005 4	0.005 6	0.005 5
	2.344	0.589 9	0.349 1	0.210 1	0.007 1	0.006 9	0.007 0

结果较为稳定,可以取各平均值作为实测阻尼比。综合分析,取该桥1阶频率为1.318 Hz,对应的阻尼比为0.005 5;2阶频率为2.344 Hz,对应的阻尼比为0.007 0。实测阻尼比较小,说明该桥无严重的损伤,但耗散能量的能力较差。

4 结 论

1) 混凝土梁式桥属于低频中小阻尼结构,一般跑车试验冲击能量有限,桥梁的振动响应会在短时间内衰竭,采集到的自由衰减振动数据长度有限。

2) 从理论推导上来讲,分段幅值估算阻尼的方法是通过自由衰减信号估算系统阻尼比的精确方法,当各阶相邻模态的耦合较小时,可估算多自由度系统各阶阻尼比。

3) 仿真结果表明,本研究方法估算的阻尼比误差小于10%,且FFT变换数据长度对计算结果影响较小,适用于自由衰减振动采样时间有限、频率分辨率较大的结构阻尼比的估算。

4) 应用本研究方法利用跑车余振对某连续刚构桥的阻尼比进行识别,得到其1阶频率为1.318 Hz,对应的阻尼比为0.005 5;2阶频率为2.344 Hz,对应的阻尼比为0.007 0。阻尼比较小,说明该桥无严重的损伤,但耗散能量的能力较差。

5) 在实测衰减信号较长时,宜提高频率分辨率,以得到最接近真实值的频率及阻尼比。

参 考 文 献

- [1] 孙晓燕,孙保沐,黄承逵. 钢筋混凝土简支梁超载后动力特性试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25(1): 61-65.
Sun Xiaoyan, Sun Baoshu, Huang Chengkui. Dynamic loading experimental investigation on reinforced concrete beams considering the influence of overload[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(1): 61-65. (in Chinese)
- [2] 王卓,阎维明,秦栋涛,等. 钢混简支梁加载损伤后

- 耗能特性试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1): 66-70.
- Wang Zhou, Yan Weiming, Qin Dongtao, et al. Dissipative characteristic investigation of simply-supported reinforced concrete beams with loading damages [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 66-70. (in Chinese)
- [3] 应怀樵, 沈松, 刘进明. “ZOOMBDF”法高精度求系统阻尼比的探讨[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(2): 42-46.
- Ying Huaqiao, Shen Song, Liu Jinming. Investigation on high precision calculation for damping ratio using “ZOOMBDF” method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1997, 17(2): 42-46. (in Chinese)
- [4] 应怀樵, 李惠彬, 沈松. 关于用INV的频率细化与大容量数据采集分析技术提高阻尼比计算精度的研究[J]. 噪声与振动控制, 1997(2): 17-20.
- Ying Huaqiao, Li Huibin, Shen Song. Research about the method to improve the calculation accuracy of damping ratio using INV refinement and large capacity data collection and analysis technology [J]. Noise and Vibration Control, 1997 (2): 17-20. (in Chinese)
- [5] 李中付, 华宏星, 石银明, 等. 遗传算法在结构模态参数识别中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2001, 21(4): 245-248.
- Li Zhongfu, Hua Hongxing, Shi Yingming, et al. Identification of modal parameters of linear structures using genetic algorithm [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2001, 21(4): 245-248. (in Chinese)
- [6] 陈奎孚, 张森文. 半功率点法估计阻尼的一种改进[J]. 振动工程学报, 2002, 15(22): 151-155.
- Chen Kuifu, Zhang Senwen. Improvement on the damping estimation by half power point method [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(22): 151-155. (in Chinese)
- [7] 苏向荣, 丁康, 谢明. 用传递函数估计小阻尼的新方法[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(5): 717-720.
- Su Xiangrong, Ding Kang, Xie Ming. A new method for exactly estimating small damping by transfer function [J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(5): 717-720. (in Chinese)
- [8] 应怀樵, 刘进明, 沈松. 半功率带宽法与INV阻尼比法求阻尼比研究[J]. 噪声与振动控制, 2006(2): 4-6.
- Ying Huaqiao, Liu Jinmin, Shen Song. Half-power bandwidth method and INV damping ratio solver study [J]. Noise and Vibration Control, 2006(2): 4-6. (in Chinese)
- [9] 汤宝平, 何启源, 蒋恒恒, 等. 利用小波去噪和HHT的模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 197-200.
- Tang Baoping, He Qiyuan, Jiang Hengheng, et al. Modal parameter identification based on Hilbert Huang transform and wavelet de-noising [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 197-200. (in Chinese)
- [10] 赵晓丹, 刘涛. 基于内积模极值的小阻尼计算新方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(10): 1308-1310.
- Zhao Xiaodan, Liu Tao. A method for small damping estimation by searching the maximum of inner product module [J]. Mechanical Science and Technology, 2009, 28(10): 1308-1310. (in Chinese)
- [11] 胡峰, 吴波, 胡友民, 等. 利用粒子群优化算法实现阻尼比和频率的精确识别[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 8-11.
- Hu Feng, Wu Bo, Hu Youmin, et al. Exact identification of damping and frequency based on a particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 8-11. (in Chinese)
- [12] Olmos B A, Roesset J M. Evaluation of the half-power bandwidth method to estimate damping in systems without real modes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(14): 1671-1686.
- [13] Filipe M, Álvaro C, Elsa C, et al. Damping estimation using free decays and ambient vibration tests [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(5): 1274-1290.
- [14] Papagiannopoulos G A, Hatzigeorgiou G D. On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 1075-1079.
- [15] Clough R, Penzien J. 结构动力学 [M]. 王光远, 等译. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.



第一作者简介: 王宗林, 男, 1969年6月生, 教授、博导。主要研究方向为大跨径桥梁设计理论、既有桥梁检测与加固和桥梁动力优化。曾发表《大跨径钢管混凝土拱桥的动力性能改造》(《公路交通科技》2006年第23卷第11期)等论文。

E-mail: wangzonglin@vip.163.com