

文章编号: 1000-4750(2013)03-0459-05

梯式轨枕轨道模态试验分析

金 浩¹, 刘维宁¹, 王文斌²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 梯式轨枕轨道已成为控制地铁列车振动的有效措施之一, 但枕下减振垫板的铺设形式如何影响梯式轨枕轨道的动力性能尚没有展开系统研究。该文通过多输入多输出模态测试方法, 分析了枕下减振垫板的三种铺设方式对梯式轨枕轨道动力特性的影响。分析得出: 现有的枕下减振垫板铺设方式, 具有最小的一阶自振频率 33Hz。单侧铺设 10 块枕下减振垫板的梯式轨枕轨道, 具有最大的一阶阻尼比 4.2%。三种枕下减振垫板铺设方式, 梯式轨枕轨道前 6 阶阻尼比都具有先减小后增大的规律, 一阶振型都沿轨道中心线对称。单侧铺设 5 块和 7 块枕下减振垫板的梯式轨枕轨道, 二阶振型都沿轨道中心线反对称, 和单侧铺设 10 块枕下减振垫板的梯式轨枕轨道正相反。分析结果为梯式轨枕轨道的工程应用提供了参考。

关键词: 梯式轨枕轨道; 模态试验; 自振频率; 阻尼比; 振型

中图分类号: U231.2 **文献标志码:** A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0628

ANALYSIS OF MODAL TEST OF THE LADDER TRACK

JIN Hao¹, LIU Wei-ning¹, WANG Wen-bin²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The ladder track was one of the best methods to control train-track vibrations. But the laying type of damping pads under sleepers had not been researched systematically. According to the MIMO (multiple input multiple output) method, three laying types of damping pads under a sleeper were analyzed how to affect the dynamic characteristics of the ladder track. Results show that the former laying type of damping pads has the smallest natural frequency (33 Hz). The ladder track with 10 damping pads (side) has the biggest damping ratio (4.2%). First six damping ratios of the ladder track of three laying types have a down-up manner and the first modal shape is symmetric along the centerline of the ladder track. The second modal shape of the ladder track with 5 and 7 damping pads (side) is antisymmetric along the centerline of the ladder track, contrary with the ladder track with 10 damping pads (side). The analysis provides an engineering reference for the ladder track application.

Key words: the ladder track; modal test; natural frequency; damping ratio; modal shape

地铁列车引起的环境振动问题日益受到关注^[1-4]。为此, 国内外提出了多种轨道减振措施, 其中包括具有新型轨道结构形式的梯式轨枕轨道。目前, 梯式轨枕轨道的动力特性研究方法主要为实验室试验、数值模拟和现场测试。王文斌等^[5]通过多输入单输出模态测试方法, 得出无砟轨道下梯式

轨枕轨道低阶模态分布比较密集, 基频为 48.6Hz, 前三阶模态阻尼比比较高, 一阶阻尼比(6.64%)最大的结论。马娜等^[6]通过数值模拟, 认为有砟轨道下梯式轨枕轨道具有整体性和传递性的特点。李克飞等^[7-10]通过现场测试, 认为梯式轨枕轨道具有较好的减振降噪能力。

收稿日期: 2011-09-23; 修改日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008017); 北京交通大学博士生创新基金项目(2011YJS261); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2012YJS072)

通讯作者: 金 浩(1986—), 男, 浙江诸暨人, 博士生, 从事地下铁道方向的轨道减振新措施研究(E-mail: jiaodajinhao@gmail.com).

作者简介: 刘维宁(1960—), 男, 江西人, 教授, 博士, 博导, 从事地下工程与铁道工程研究(E-mail: wnliu@bjtu.edu.cn);

王文斌(1982—), 男, 山东济南人, 博士, 从事地下铁道运营环境影响研究(E-mail: 13811667172@126.com).

无砟轨道下,已有的研究都只是测试、模拟和试验了现有减振垫板铺设方式下梯式轨枕轨道的动力特性,并没有对减振垫板的铺设形式进行详细的研究。本文在现有减振垫板铺设方式的基础上,提出了另外两种枕下减振垫板铺设方式。通过多输入多输出模态测试方法,以期得到各种铺设方式下,梯式轨枕轨道的自振频率、阻尼比和振型。

1 模态试验原理

在强迫激励下的多自由度系统的运动方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为 N 维激励向量; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为 N 维位移向量、速度向量和加速度响应向量; m 、 k 、 c 分别为结构的 N 阶质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。

对式(1)两边进行 Laplace 变换,得到传递函数矩阵:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 m + s c + k} \quad (2)$$

利用正则振型的正交性,在比例阻尼的情况下:

$$\phi^T m \phi = \text{diag}(M_r) \quad (3)$$

$$\phi^T k \phi = \text{diag}(K_r) \quad (4)$$

$$\phi^T c \phi = \text{diag}(C_r) \quad (5)$$

式中, M_r 、 K_r 、 C_r 分别是该系统的第 r 阶模态质量、模态刚度和模态阻尼。

将式(3)~式(5)代入式(2),得到:

$$H(s) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_r \phi_r^T}{M_r s^2 + C_r s + K_r} \quad (6)$$

展开式为:

$$\begin{bmatrix} H_{11}(s) & \cdots & H_{1f}(s) & \cdots & H_{1N}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{e1}(s) & \cdots & H_{ef}(s) & \cdots & H_{eN}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1}(s) & \cdots & H_{Nf}(s) & \cdots & H_{NN}(s) \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^N \frac{1}{M_r s^2 + C_r s + K_r} \times \begin{bmatrix} \phi_{1r} \phi_{1r} & \cdots & \phi_{1r} \phi_{fr} & \cdots & \phi_{1r} \phi_{Nr} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{er} \phi_{1r} & \cdots & \phi_{er} \phi_{fr} & \cdots & \phi_{er} \phi_{Nr} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{Nr} \phi_{1r} & \cdots & \phi_{Nr} \phi_{fr} & \cdots & \phi_{Nr} \phi_{Nr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

传递函数矩阵的任一列、任一行都包含 M_r 、 C_r 、 K_r 和一组 $\{\phi\}_r$, $r=1,2,\dots,N$, 所以差的只是一个常量因子。因此要求模态向量 ϕ_r , 只要测试传递函数的一列和一行元素就可以了。

2 梯式轨枕轨道模态试验

2.1 梯式轨枕轨道参数

梯式轨枕轨道采用 60kg/m 钢轨, DTVI2 型扣件。纵向轨枕(梯式轨枕轨道单侧)长×宽×高=6.15m×0.46m×0.185m, 弹性模量为 40GPa, 泊松比为 0.167, 密度为 2500kg/m³。两纵向轨枕之间通过 3 根钢横梁联接。枕下减振垫板静刚度为 20kN/mm, 摩擦系数为 0.7。

枕下减振垫板的尺寸分为两种: 第 1 种(记为 C₁ 型)尺寸, 长×宽×高=0.46m×0.25m×0.026m, 第 2 种(记为 C₂ 型)尺寸, 长×宽×高=0.46m×0.125m×0.026m。枕下减振垫板的铺设方式分三种: 第 1 种铺设方式(记为 P₁ 型)为单侧铺设 5 块 C₁ 型, 见图 1; 第 2 种铺设方式(记为 P₂ 型)为单侧铺设 10 块 C₂ 型, 见图 2; 第 3 种铺设方式(记为 P₃ 型)为单侧铺设 5 块 C₁ 型和 2 块 C₂ 型, 见图 3。

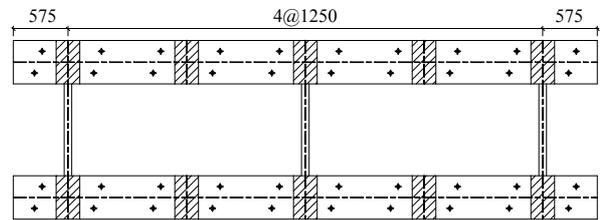


图 1 第 1 种铺设方式 /mm
Fig.1 Laying method 1

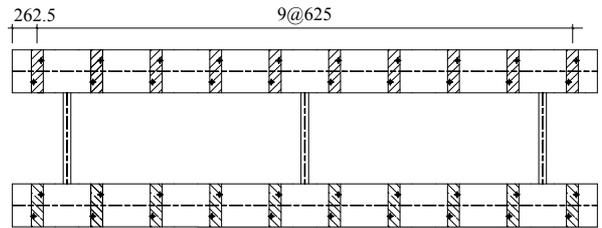


图 2 第 2 种铺设方式 /mm
Fig.2 Laying method 2

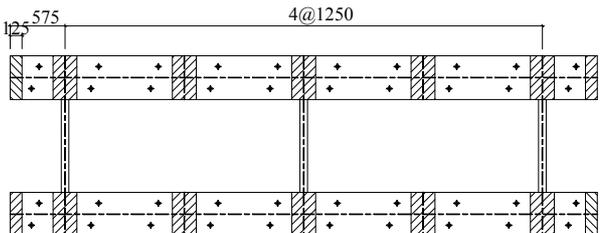


图 3 第 3 种铺设方式 /mm
Fig.3 Laying method 3

2.2 梯式轨枕轨道模态测试

梯式轨枕轨道模态测试在轨道试验台上进行,如图 4 所示。采用 24 位高精度数据采集仪(INV 3018C 型,具有 8 个通道并行处理的能力,单个通道最高采样频率达 51.2kHz);两个内装 IC 压电加速度的传感器(Lance AS0105 型,量程为 20g,频率范围为 0.35Hz~6000Hz,分辨率为 0.1mg);LC1303 型小力锤(安装具有 100kN 量程的石英力传感器)。本次模态试验,关心的频率范围为 1Hz~200Hz,因此选用尼龙锤头。



图 4 轨道试验台
Fig.4 Track test-bed

低频段频率响应函数的时域波形精度(采样频率越高,时域波形精度越高)和频率分辨率(即 $\Delta f = f_s / N$,对一定的采样点数 N ,采样频率 f_s 越低,分辨率越高)之间存在矛盾^[5]。本文通过应怀樵提出的变时基传递函数细化分析方法^[11]来解决这个问题。

该方法通过特殊的采样方法,将输入信号和输出信号使用不同的采样频率。例如,对力脉冲信号的采样时间间隔为 Δt_1 ,对响应信号的采样时间间隔 Δt_2 。 $\Delta t_2 = m \times \Delta t_1$,其中 m 为变时基倍数。当采样 N 点后,响应信号的时间长度 T_2 就是脉冲信号的时间长度 T_1 的 m 倍,即 $T_2 = m \times T_1$, $\Delta f_1 = m \times \Delta f_2$ 。 Δt_1 比较小,因此力信号可以被准确地采样。 Δf_2 比较小,因此相应信号的频率分辨率就较好^[11]。

本次测试将锤击信号采样频率设置为 5120Hz,设置变时基倍数为 8,因此响应信号采样频率为 1280Hz。采用多输入多输出模态测试方法,在纵向轨枕(单侧)端部和中部布置振动加速度传感器,力锤锤击轨枕预定的位置,如图 5 所示。

典型力信号功率谱如图 6 所示。从功率谱图可以看出,能量主要集中在 0Hz~1500Hz 频段。同时,在关心频段 0Hz~200Hz 频段,力幅值基本相同,很好的满足了本次模态试验的测试需要。

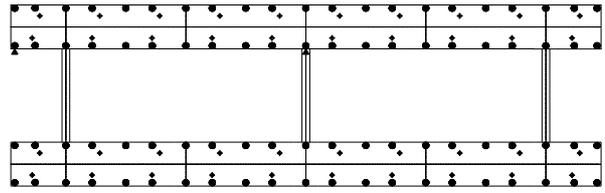


图 5 锤击点(●)和拾振点(▲)

Fig.5 Hammering position (●) and detecting point (▲)

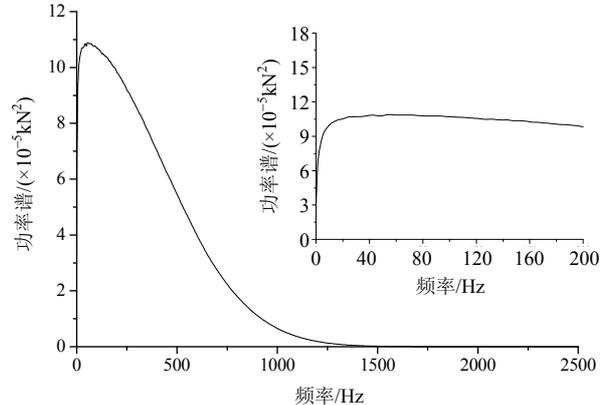


图 6 典型力信号功率谱

Fig.6 Power spectrum of typical force signal

2.3 梯式轨枕轨道模态试验分析

梯式轨枕轨道(P₁型、P₂型和 P₃型)前 6 阶自振频率和阻尼比如表 1 所示。从表 1 中可以得出:P₁型一阶自振频率最低(33Hz),P₂型一阶阻尼比最高(4.2%)。

表 1 梯式轨枕轨道(P₁型、P₂型和 P₃型)前 6 阶自振频率和阻尼比

Table 1 First six natural frequency and damping ratio of the ladder track (P₁、P₂ and P₃)

阶数	P ₁ 型		P ₂ 型		P ₃ 型	
	自振频率/Hz	阻尼比/(%)	自振频率/Hz	阻尼比/(%)	自振频率/Hz	阻尼比/(%)
1	33	3.3	36.4	4.2	36	3.9
2	37	2.2	38	3.2	39	3.6
3	44.6	1.7	54	2	46	1.5
4	69	1.7	71	2.2	70	1.5
5	78.5	0.8	77	2.6	78	1.9
6	103	3.9	105	2.9	106	2.7

梯式轨枕轨道前 6 阶自振频率和阻尼比,三种铺设方式进行横向对比,如图 7~图 8 所示。

从图 7 可以得出,三种铺设方式的前 3 阶自振频率比较接近(除 P₂型第 3 阶频率外),第 4 阶、第 5 阶自振频率比较接近。其中,有两个较大的跳跃,分别是第 4 阶自振频率相对于第 3 阶自振频率以及第 6 阶自振频率相对于第 5 阶自振频率。

从图 8 可以得出,三种铺设方式下,阻尼比存在相同的特性,即阻尼比随着阶数先降低后升高。

P₂型阻尼比回升最快(从第4阶开始), 其次为P₃型(从第5阶开始), 最后为P₁型(从第6阶开始)。

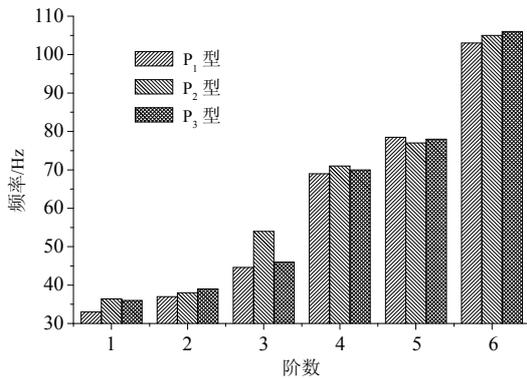


图7 梯式轨枕轨道P₁型、P₂型和P₃型前6阶自振频率
Fig.7 First six natural vibration frequency of the ladder track (P₁、P₂ and P₃)

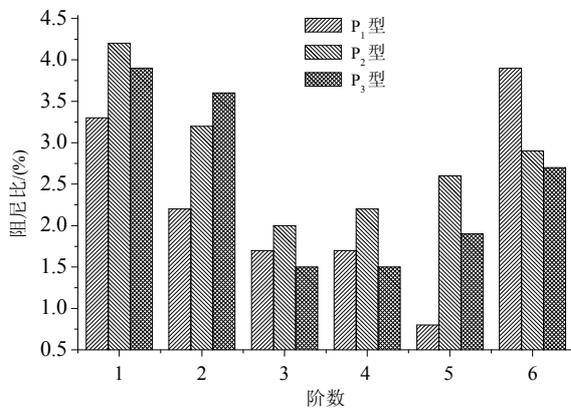


图8 梯式轨枕轨道P₁型、P₂型和P₃型前6阶阻尼比
Fig.8 First six damping ratio of ladder track(P₁、P₂ and P₃)

梯式轨枕轨道(P₁型、P₂型和P₃型)前2阶振型如图9~图14所示。

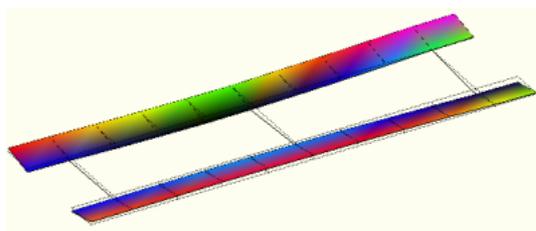


图9 梯式轨枕轨道(P₁型)一阶振型
Fig.9 First modal shape of the ladder track (P₁)

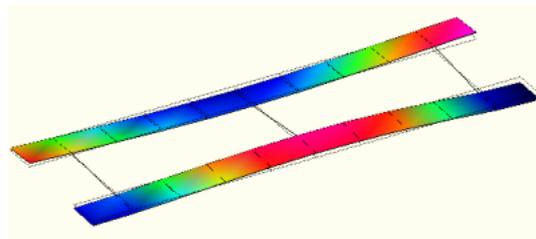


图10 梯式轨枕轨道(P₁型)二阶振型
Fig.10 second modal shape of the ladder track (P₁)

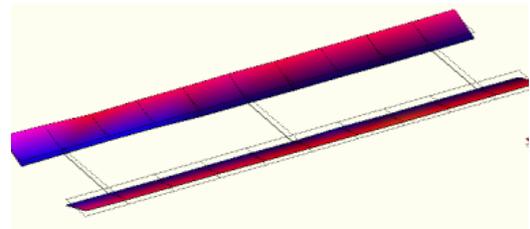


图11 梯式轨枕轨道(P₂型)一阶振型
Fig.11 First modal shape of the ladder track (P₂)

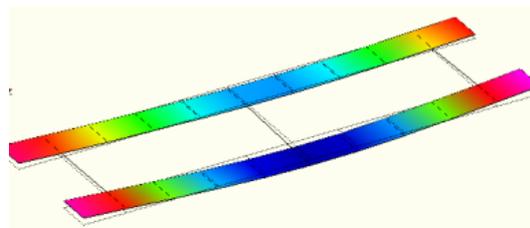


图12 梯式轨枕轨道(P₂型)二阶振型
Fig.12 Second modal shape of the ladder track (P₂)

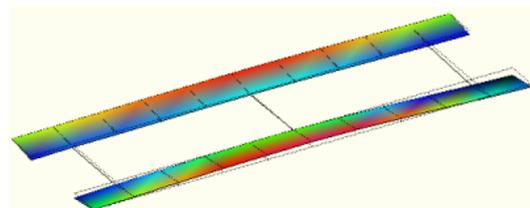


图13 梯式轨枕轨道(P₃型)一阶振型
Fig.13 First modal shape of the ladder track (P₃)

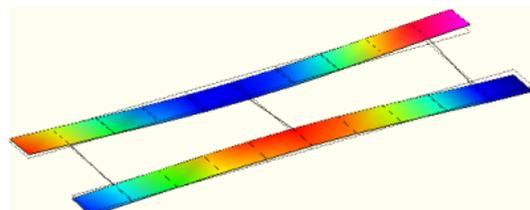


图14 梯式轨枕轨道(P₃型)二阶振型
Fig.14 Second modal shape of the ladder track (P₃)

从图9~图14可以得出: 对于枕下减振垫的三种铺设方式(P₁型、P₂型和P₃型), 梯式轨枕轨道一阶振型都沿轨道中心线对称; P₁型和P₃型梯式轨枕轨道二阶振型都沿轨道中心线反对称, P₂型梯式轨枕轨道二阶振型沿轨道中心线对称。

3 结论

通过多输入多输出模态测试方法, 比较了枕下减振垫板的三种铺设方式对梯式轨枕轨道动力特性的影响。分析得出: 现有的枕下减振垫板铺设方式, 具有最小的一阶自振频率(33Hz)。单侧铺设10块枕下减振垫板的梯式轨枕轨道, 具有最大的一阶阻尼比(4.2%)。

三种枕下减振垫板铺设方式, 梯式轨枕轨道前六阶阻尼比都具有先减小后增大的规律, 一阶振型都沿轨道中心线对称。单侧铺设 5 块和 7 块枕下减振垫板的梯式轨枕轨道, 二阶振型都沿轨道中心线反对称。单侧铺设 10 块枕下减振垫板的梯式轨枕轨道二阶振型沿轨道中心线对称。

梯式轨枕轨道的工程应用可以参考本文的动力分析, 根据实际振动控制需要, 进行合理的枕下垫板铺设方式选择。

参考文献:

- [1] 马蒙, 刘维宁, 丁德云, 等. 地铁列车振动对精密仪器影响的预测研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 185—190.
Ma Meng, Liu Weining, Ding Deyun, et al. Prediction of influence of metro trains induced vibrations on sensitive instruments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 185—190. (in Chinese)
- [2] 贾颖绚, 郭猛, 刘维宁, 等. 列车振动荷载对古建筑的动力影响[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 118—122.
Jia Yingxuan, Guo Meng, Liu Weining, et al. Dynamic effect of train-induced vibration on historic buildings [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 118—122. (in Chinese)
- [3] Luc S. Impact of sound and vibration of the north-south high-speed railway connection through the city of Antwerp Belgium [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267: 637—647.
- [4] Gupta S, Liu W F, Degrande G, et al. Prediction of vibration induced by underground railway traffic in Beijing [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008(310): 608—630.
- [5] 王文斌, 刘维宁, 马蒙, 等. 梯形轨道系统动力特性及减振效果试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 24—28.
Wang Wenbin, Liu Weining, Ma Meng, et al. Experimental study on the dynamic characteristics and the vibration mitigation effect of ladder track system [J]. China Railway Science, 2010, 31(2): 24—28. (in Chinese)
- [6] 马娜, 李成辉. 梯形轨枕竖向振动模态分析[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 247—249, 256.
Ma Na, Li Chenghui. The vertical vibration modal analysis of the ladder sleeper [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 247—249, 256. (in Chinese)
- [7] 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 等. 北京地铁 5 号线高架线减振措施现场测试与分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 25—29.
Li Kefei, Liu Weining, Sun Xiaojing, et al. In-situ test and analysis on the vibration mitigation measures of the elevated line in Beijing metro line 5 [J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 25—29. (in Chinese)
- [8] 战家旺, 夏禾, 善田康雄, 等. 城市轨道交通高架桥梯形轨枕轨道降噪性能试验分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 36—40.
Zhan Jiawang, Xia He, Zenda Yasuo, et al. Experimental study on the noise reduction performance of the ladder sleeper track on the elevated bridges of urban rail transit [J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 25—29. (in Chinese)
- [9] 邓玉姝, 夏禾, 善田康雄, 等. 城市轨道交通梯形轨枕轨道高架桥梁试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 49—54.
Deng Yushu, Xia He, Zenda Yasuo, et al. Experimental study of ladder track on a rail transit elevated bridge [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 49—54. (in Chinese)
- [10] 陈建国, 夏禾, 姚锦宝. 高架轨道交通列车对周围环境振动影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 159—163.
Chen Jianguo, Xia He, Yao Jinbao. Test for environment vibration induced by trains on viaduct [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 159—163. (in Chinese)
- [11] 沈松, 应怀樵, 雷速华, 等. 用锤击法和变时基技术进行黄河铁路桥的模态试验分析[J]. 振动工程学报, 2000, 13(3): 492—495.
Shen Song, Ying Huaiqiao, Lei Suhua, et al. Modal test for yellow river bridge exciting with hammer [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(3): 492—495. (in Chinese)