

地铁减振措施过渡段减振性能的测试与分析*

张斌¹, 俞泉瑜¹, 卢文成¹, 王小兵¹, 侯建鑫¹, 安小诗²

(1.北京市劳动保护科学研究所 北京,100054)

(2.北京市地铁运营有限公司设计研究所 北京,100082)

摘要 为了研究城市轨道交通环境振动领域中过渡段频率特性、实际减振效果和振动特性等问题,通过对北京多种减振措施过渡段进行测试,以DT-VI 2型扣件与钢弹簧浮置板道床过渡段测试分析为例,同时使用其他减振措施过渡段进行验证,发现过渡段会影响不同减振措施交界处两侧100m内的减振效果。测试结果表明:过渡段交界处两侧不同减振措施的振动能量会发生变化,频率分布也会发生变化;在过渡段交界处两侧100m内的减振效果呈线性变化趋势。经过大量测试分析结果统计,提出过渡段减振效果预测公式,并进行验证。

关键词 地铁; 轨道; 测试; 振级; 减振措施; 过渡段; DT-VI 2型扣件; 钢弹簧浮置板道床

中图分类号 U213.53; X593

引言

为了降低振动对地铁沿线建筑物的影响,在工程建设中采用不同的减振轨道结构。不同轨道结构的减振效果一直是地铁设计和研究工作者关注的问题,它直接关系到轨道工程设计安全性和环境保护^[1-2]。国、内外在各种减振措施实际效果上已有一些研究^[3-5],但目前仍缺乏对两种减振措施连接处的环境振动情况的相关研究。另外,对过渡段处扣件间距分布采取刚度平稳过渡手段进行处理,而实际减振效果并不理想。

笔者通过对北京地铁运营期间不同减振扣件过渡段的测试来研究过渡段的规律。列举了钢弹簧浮置板道床和DT-VI 2型扣件过渡段的轨道和隧道等结构振动的实测分析,归纳了北京地铁轨道减振结构过渡段的频谱规律和振级规律并给出了振级预测公式,为城市轨道交通的规划设计以及环境振动的研究提供了参考。

1 两种减振措施地下线过渡段测试方案

1.1 两种减振措施介绍

如图1所示,DT-VI 2型扣件为北京市城建设计研究院设计开发的弹性分开式扣件,主要用于地下

线短枕式整体道床,具有良好的弹性、较大的轨距和高度调整能力,以适应整体道床轨道弹性差、施工后难调整的特点。该扣件采用类似英国Pandml扣件的无螺栓弹条,使扣件扣压力均匀、零部件少,省去了传统扣件螺栓复拧和涂油等工序,大大减少了养路维修工作量。

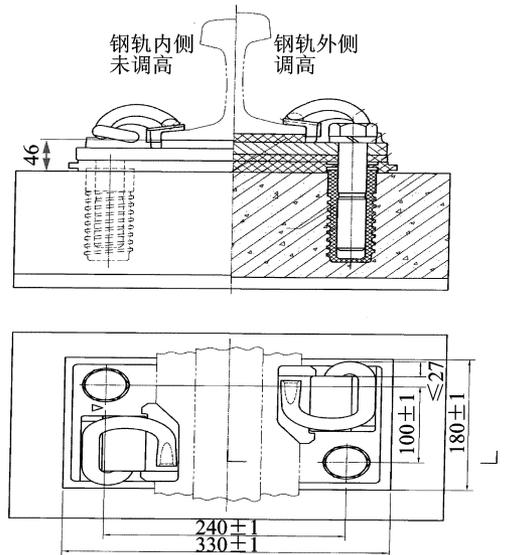


图1 DT-VI 2型扣件结构图(单位:mm)

钢弹簧浮置板道床结构如图2所示,浮置板轨道结构一般由钢筋混凝土浮置板、弹性支座、混凝土底座及配套扣件等组成。该结构是用扣件把钢轨固定在钢筋混凝土浮置板上,浮置板置于可调的弹性

* 北京市环境保护局资助项目(1041STC00240)

收稿日期:2011-03-04;修改稿收到日期:2011-07-16

支座上,浮置板两侧用弹性材料固定,形成一种质量-弹簧隔振系统^[6-7]。

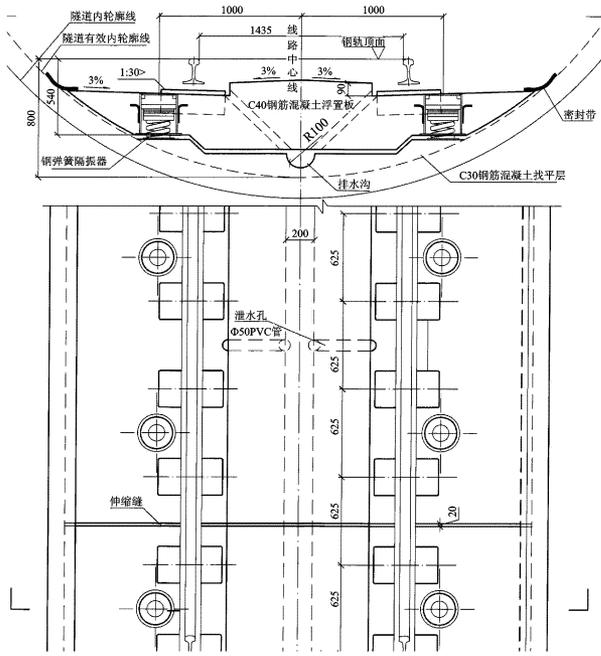


图 2 钢弹簧浮置板道床结构图

1.2 测试方案

测试采用 24 位精度、最高采样频率为 102.4 kHz 的 INV3018C 型智能信号采集处理分析仪,8 通道的 DASP(Data Acquisition & Signal Processing) 数据采集与分析系统。采用 INV9828 型压电加速度传感器,可用频率范围为 0.5 Hz~4 kHz。

测点布置在隧道内洞壁上垂直方向。测试仪器在使用前已经过国家计量检测中心的检验。选择测试断面考虑的主要因素是两种不同扣件的交界处,每种减振扣件铺设距离均大于 100 m。测试主要目的是研究两种扣件在交界处的减振效果和变化规律。



图 3 现场实测照片

笔者列举实测地点为北京某地铁线路地下 DT-VI 2 型扣件与浮置板交界处,从交界处向两侧轨道沿线洞壁上隔 20 m 布置一个测点,采集地铁正常运行 1 d 数据进行分析。该地段为直道,列车通过速度匀速约为 62 km/h,对测试结果分析基本没有影响。

测试过程中采样频率为 2.048 kHz,故采用时间间隔 $\Delta t = 0.0005$ s,测得隧道洞壁上各测点的加速度信号及时程曲线。实际测点布置如图 4 所示,具体位置如表 1 所示。

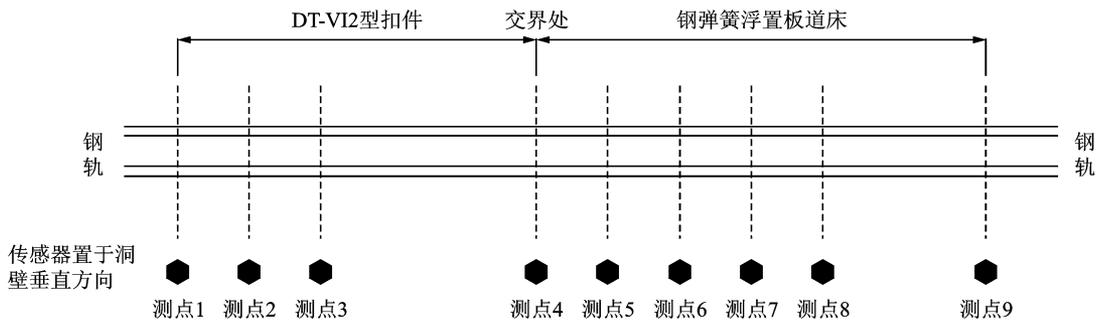


图 4 过渡段测点布置示意图

表 1 测点位置表

减振措施	DT-VI 2 型扣件			交界处	钢弹簧浮置板道床				
测点号	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9
距交界处/m	左 100	左 80	左 60	0	右 20	右 40	右 60	右 80	右 135

2 两种减振措施地下线过渡段测试结果

地铁经过过渡段是从一种减振措施驶向另一种

减振措施的特殊工况,为研究地铁通过过渡段的振动变化规律,从频域和时域两个角度进行分析^[8-11]:频域内分析不同减振区段洞壁加速度的频率分布;时域内分析加速度振级的变化,对不同位置的洞壁

振动加速度振级均值对比。

2.1 频谱规律

分析数据在频域上的变化,通过频谱曲线图观察过渡段不同位置振动能量的频率分布规律。取同一辆地铁经过不同位置的测点数据,对时域数据分别做自谱分析,分析点数为2 048,每个测点的幅值谱密度曲线如图5所示。横坐标为对数log形式的频率,纵坐标为统一尺度的加速度值。

图5(a)~(d)为测点1~测点4的频谱曲线,位置为DT-VI 2型扣件到交界处,图5(e)~(h)为测点5~测点8的频谱曲线,位置为交界处到钢弹簧浮置

板道床一侧。

笔者主要研究地铁经过1~200 Hz范围的频率变化。可明显看出,统一尺度下图5(a)~(d)的曲线幅值比图5(e)~(h)的曲线幅值相差很大,对多辆地铁数据分析后发现均有此规律。可见,DT-VI 2型扣件比钢弹簧浮置板道床产生的振动能量大。

经多组数据对比可看出过渡段两段的频率成分分布不同,DT-VI 2型扣件一侧的振动峰值主要分布在60 Hz附近,而钢弹簧浮置板的振动峰值主要分布在55 Hz附近,可见过渡段交界处两段的频率成分发生了改变。

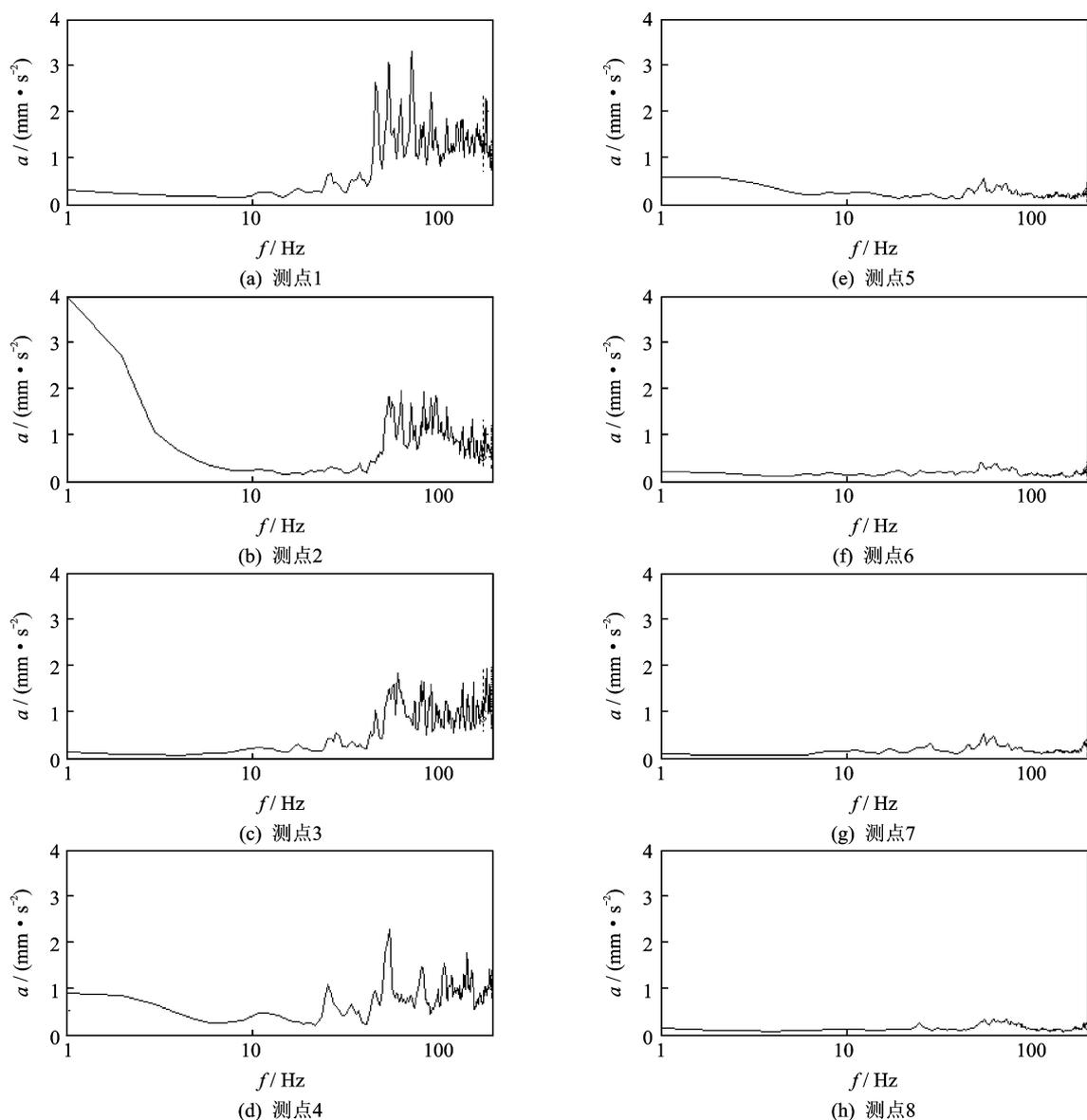


图5 同一辆地铁经过各测点的频谱曲线

2.2 频数分析

根据GB 10070--88《城市区域环境振动标准》中的计算方法,将各测点的振动加速度级进行对比。

振动加速度级 VAL 定义为

$$VAL = 20 \lg(a/a_0) \quad (1)$$

其中:VAL 为振动加速度级,单位为 dB; a 为振动加速度有效值,单位为 m/s^2 ; a_0 为基准加速度, a_0 取 $10^{-6} m/s^2$ 。

GB 10070—88 规定,对冲击振动取每次冲击过程中的最大示数为评价量,对重复出现的冲击振动以 10 次读数的算术平均值为评价量。

计算出全天采集到的各测点地铁经过加速度振级最大值;为保证数据有效性,先通过对每个测点计算出的多辆地铁振级数据进行频数分析处理。对 9 个测点的 9 组数据分别做频数分析画出直方图,计算均值和方差如表 2 所示。

从均值和方差可看出,每组数据的均值和整体

表 2 各测点均值与方差统计表

测点	车辆数	平均值/dB	方差/dB
1	221	74.5	0.48
2	221	70.8	1.69
3	221	69.2	0.76
4	221	72.5	2.54
5	221	66.0	4.09
6	221	60.4	0.72
7	221	62.3	0.76
8	221	57.91	2.156
9	221	62.5	0.65

表 3 各测点振级平均值

测点位置	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9
振级平均值/dB	74.48	70.71	69.04	72.69	66.38	60.35	62.08	57.58	62.5
减振措施	DT-VI 2 型扣件			交界处	钢弹簧浮置板道床				

围绕均值的波动范围和离散趋势,通过频数分析对原始数据中特别离散的点进行剔除,减小数据的波动范围,从而提高数据的可信度。

以测点 4 为例,对一整天测量的 221 辆地铁数据做频数分析,频数分布直方图如图 6 所示,其均值和方差如表 2 所示。从图 6 可看出,振级数值整体分布在 71~74 dB 之间,围绕 72.5 dB 波动,波动范围约为 2 dB,测点数据均值为 72.5 dB,方差为 2.54,其中 4% 的数值分布比较分散,剔除这些分散的数据,波动范围从 69~78 dB 变为 70~74 dB,剩下的数据占原始数据的 96%。

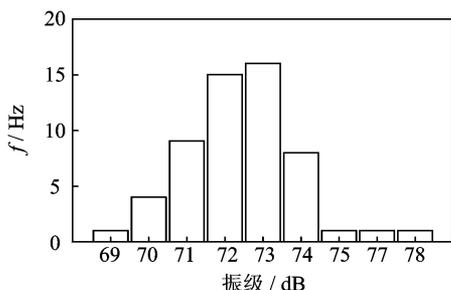


图 6 交界处测点频数分布直方图

2.3 振级规律

对去特殊值处理的各测点振级数据计算均值如表 3 所示,绘制散点图并做拟合曲线。各测点散点图如图 7 所示。各测点振级数值由 DT-VI 2 型扣件向钢弹簧浮置板道床方向逐渐减小。整体规律近似线性递减趋势,故选择直线来拟合变化趋势,并列出趋势线方程分析振级与测点位置的关系。

振措施的连接处以及距连接处长度在 100 m 范围内的测点处振动较大,并没有达到浮置板预期减振效果。随着与交界处距离的增加振动逐渐减弱,在 100 m 之外进行测试可发现基本趋于稳定并达到预期减振效果。拟合优度值接近 0.8,估计值与实际数据间接程度较高,趋势线可信度高,故可认为过渡段振级变化呈线性变化趋势。

在 100 m 之外测试 DT-VI 2 型扣件和钢弹簧浮置板道床两种减振措施的减振效果,钢弹簧浮置板道床的最大减振效果比 DT-VI 2 型扣件大 22 dB,为其预期的减振效果。因此,要达到钢弹簧浮置板道床的减振效果,需要在被保护敏感点两端各延长 100 m。

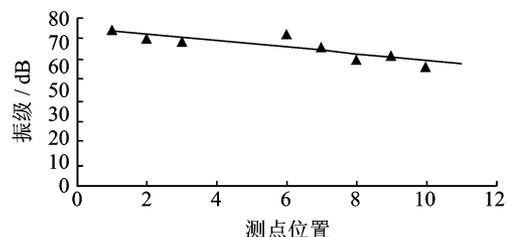


图 7 过渡段振级平均值曲线

趋势线公式和数值为

拟合曲线 $y = -1.5774x + 75.734 \quad (2)$

拟合优度 $R^2 = 0.752 \quad (3)$

在 DT-VI 2 型扣件和钢弹簧浮置板道床两种减

此外,又对北京地铁10号线内DT-VI2型扣件与Ⅲ型轨道减振器扣件过渡段,北京地铁5号线内Ⅲ型轨道减振器与钢弹簧浮置板道床、DT-VI2型扣件与先锋扣件等过渡段进行了全面测试和研究,所得振级均有相似线性变化规律。

基于其他减振措施过渡段的实测数据和类似线性变化规律,得到过渡段减振效果的规律公式

$$V_x = V_A + (V_B - B_A) \frac{L}{200} \quad (4)$$

其中: V_x 为过渡段某位置的振级; V_A 为过渡段一侧扣件A的振级; V_B 为过渡段一侧扣件B的振级; L 为所预测地点距连接处向A减振措施100 m处的距离; $V_B \geq V_A$ 。

此公式仅适用于过渡段交界处两侧100 m内,该结论为过渡段预测模型的推导提供了参考。

2.4 规律检验

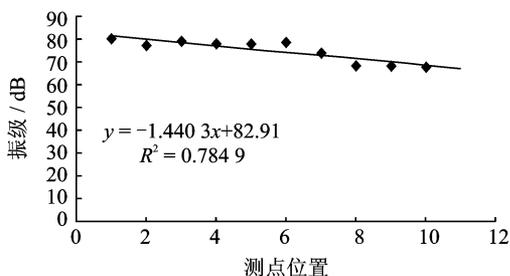
选择不同减振措施的过渡段自交界处向两侧100 m布置传感器进行实测,两测点间距为20 m。列举北京地铁10号线内DT-VI2型扣件与Ⅲ型轨道减振器扣件过渡段和北京地铁5号线内先锋扣件与钢弹簧浮置板道床的数据如表4和表5所示。对各测点平均振级绘制趋势线如图8所示,并计算拟合线公式和拟合优度。可以看出,趋势线可信度高且均符合线性规律。

表4 10号线某实测点振级平均值

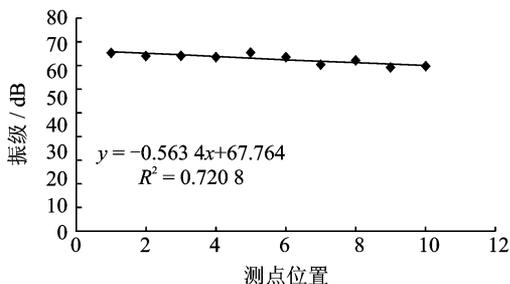
测点号	振级平均值/dB	减振措施
1	79.98	DT-VI2型扣件
2	77.37	
3	79.20	
4	78.13	
5	77.77	交界处
6	78.68	Ⅲ型轨道减振器
7	74.07	
8	68.57	
9	68.40	
10	67.71	

表5 5号线某实测点振级平均值

测点号	振级平均值/dB	减振措施
1	67.03	先锋扣件
2	65.66	
3	65.84	
4	65.45	交界处
5	67.07	
6	65.39	钢弹簧浮置板道床
7	62.55	
8	64.08	
9	61.57	
10	62.01	



(a) Ⅲ型轨道减振器与DT-VI2型扣件过渡段振级曲线



(b) 先锋扣件与钢弹簧浮置板道床过渡段振级曲线

图8 实测点振级曲线

3 结论

1) 通过频谱分析得出两种减振措施过渡段的交界处两侧振动能量变化大,频率分布发生了改变。

2) 通过振级分析,两种减振措施的减振效果在过渡段交界处互相影响,影响范围约为交界处前、后100 m,在这段范围内振级变化从一种减振措施逐渐增加或衰减到另一种减振措施,其变化规律呈线性。

3) 经过对北京地铁多种减振措施过渡段的实测和分析,基于其他减振措施过渡段的实测数据和类似线性变化规律,可以得到过渡段减振效果规律公式。

4) 通过实测,对过渡段减振效果规律及预测公式进行检验,结果符合研究结果,得到的预测公式可以对过渡段的实际减振措施进行预测,该公式模型使用简单且具有较高精度,为我国城市轨道交通的振动预测和评价提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Moroney B E. A study of railroad track transition points and problems [D]. Delaware: University of Delaware, 1991.
- [2] Kerr A D, Moroney B E. Track transition problems and remedies [J]. Bulletin American Railway Engineering Association, 1995, 74(2): 267-297.

- [3] 郝珺, 耿传智, 朱剑月. 不同轨道结构减振效果测试分析[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 4(1): 25-30.
Hao Jun, Geng Chuazhi, Zhu Jianyue. Field test and analysis of vibration in different track structures[J]. Urban Mass Transit, 2008, 4(1):25-30. (in Chinese)
- [4] Nelson J T. Recent developments in ground-borne noise and vibration control [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 367-376.
- [5] 雷晓燕, 张斌, 刘庆杰. 轨道过渡段动力特性的有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 15-21.
Lei Xiaoyan, Zhang Bin, Liu Qingjie. Finite element analysis on the dynamic characteristics of the track transition[J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 15-21. (in Chinese)
- [6] 孙晓静, 刘维宁, 张宝才. 浮置板轨道结构在城市轨道交通减振降噪上的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005, 8(8): 65-69.
Sun Xiaojing, Liu Weining, Zhang Baocai. Applications of floating slab track framework for vibration and noise control in urban rail traffic[J]. China Safety Science Journal, 2005, 8(8):65-69. (in Chinese)
- [7] 高世兵. 钢弹簧浮置板减振轨道在城市地铁中的应用[J]. 铁道工程学报, 2008(3):88-91.
Gao Shibing. Application of floating slab damping roadbed with steel spring in metro [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008 (3): 89-91. (in Chinese)
- [8] 高燕, 林建辉, 李翀. 磁悬浮轨道长波不平顺测试数据的预处理及时域分析[J]. 计算机应用, 2009, 6(29): 353-355.
Gao Yan, Lin Jianhui, Li Chong. Pretreatment and time-domain analysis of long-wave irregular data of maglev track [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 6(29): 353-355. (in Chinese)
- [9] 常乐, 闫维明, 任珉, 等. 高架路交通诱发的地面振动测试与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 175-178.
Chang Le, Yan Weiming, Ren Min, et al. Test and analysis of ground vibration induced by elevated road traffic[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 175-178. (in Chinese)
- [10] 李顶根, 何宝华. 某重型载重车辆振动分析和控制[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 172-174.
Li Dinggen, He Baohua. Vibration analysis and control of heavy truck [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 172-174. (in Chinese)
- [11] 王开云, 蔡成标, 徐志胜. 基于频域方法的轨道随机振动特性及试验验证分析[J]. 机械工程学报, 2005, 11(11):149-157.
Wang Kaiyun, Cai Chengbiao, Xu Zhisheng. Analysis of random vibration characteristics and verification of track spuctrue on frequency domain method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 11(11):149-157. (in Chinese)



第一作者简介:张斌,男,1963年8月生,研究员、硕士生导师。主要研究方向为振动与噪声控制。曾发表《Physical insight of the source data a two-port acoustic source model》(《Applied Mechanics and Materials》2010, Vol. 44-47)等论文。
E-mail: zhangbin815@hotmail.com