

地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析

刘鹏辉, 杨宜谦, 尹京

(中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 通过对地铁隧道内普通整体道床、Ⅲ型轨道减振器、弹性短轨枕、梯形轨枕、钢弹簧浮置板道床的现场振动测试, 进行时、频域对比, 了解各种减振措施在不同频率范围内的减振效果差异。结果表明, 轨道减振器、梯形轨枕、弹性短轨枕及钢弹簧浮置板可降低隧道壁 $V_{L_{Z_{max}}}$ 分别为 4 dB, 7.6 dB, 7.8 dB, 19.0 dB; 无论何种轨道减振措施, 高频减振效果高于低频减振效果, Z 计权的振动加速度级明显小于不计权的振动加速度级减振效果; 梯形轨枕、弹性短轨枕、轨道减振器对 50 Hz 以上振动减振效果明显, 钢弹簧浮置板道床对 12.5 Hz 以上振动减振效果明显, 对控制列车运行产生的二次噪声更有效。

关键词: 地铁; 减振效果; Z 振级

中图分类号: TB53 **文献标识码:** A

Test and analysis on vibration of different track structures in tunnel

LIU Peng-hui, YANG Yi-qian, YIN Jing

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to meet the environment vibration requirements of buildings which are sensitive to vibration, four different kinds of measures for track vibration mitigation were adopted. The difference between various vibration mitigation measures in different frequency bands was investigated by comparing on-site vibration test results in time domain and frequency domain. The measures adopted include Ⅲ style rail vibration absorber, flexible short sleeper, ladder sleeper and steel spring floating slab track in underground circular shield tunnel. The results show that the four measures can respectively reduce the degree of Z direction vibration in 4 dB, 7.6 dB, 7.8 dB, 19.0 dB on tunnel wall; the mitigating vibration effect at high frequency is higher than at low frequency, and the weighted vibration acceleration level is significantly lower than the non-weighted; the spring floating slab track is of obvious mitigating vibration effect above 12.5 Hz and the flexible short sleeper, ladder sleeper, and rail vibration absorber are of obvious mitigating vibration effect above 50 Hz.

Key words: metro; mitigating vibration effect; degree of Z direction vibration

为缓解城市化建设步伐加快带来的巨大交通压力, 轨道交通作为城市交通系统的发展重点近年来得到迅猛发展。而由列车运行产生的振动对环境的影响亦引起高度重视^[1-3]。我国曾对 4 城市的铁路环境振动做过现场实测^[4], 初步了解铁路沿线居民区受列车运行引起的环境振动影响状况, 并制定了《城市区域环境振动标准》。

进入 21 世纪, 我国城市轨道交通建设发展快速, 对北京、上海、广州、深圳等城市地铁、轻轨引起的环境振动问题的研究已取得研究成果^[5]。深圳地铁一期工程道床减振降噪科研项目在国内首次从理论分析、仿真计算、足尺模型试验、运营检测等方面研究、设计适合地铁的钢弹簧浮置板、橡胶浮置板及弹性支承块 3

种轨道结构^[6]。为评价、防治轨道交通引起的振动可能对环境及周边建筑物内居民生活、工作影响, 北京市地铁公司、北京市环境保护局、北京交通大学等对北京地铁 1、5 号线许多区段进行现场测试, 并获得大量有价值的测试数据; 通过理论分析、数值模拟、现场试验, 获得有关列车作用的地面、隧道及高架桥梁振动及对周围环境、建筑物影响的研究成果^[7-10]。

通过对北京某号线地铁隧道内普通整体道床、Ⅲ型轨道减振器、弹性短轨枕(弹性支承块)、梯形轨枕、钢弹簧浮置板道床的现场振动测试, 对不同减振轨道结构的实际减振效果进行评价, 为今后的轨道减振设计提供借鉴。

1 测试仪器及测点布置

所测 5 种轨道型式均铺设于单洞单线的圆形隧道

内,不同轨道结构测试地点所处曲线半径、地质条件、隧道结构、行车速度及隧道轨面埋深等对比见表1。测点布置示意图见图1。测试内容包括钢轨铅垂向加速

度,道床、梯形轨枕、短轨枕铅垂向加速度,隧道壁铅垂向、横向加速度及列车通过速度。

表1 不同轨道类型简况对比
Tab.1 Guidelines of different track structures

项目	梯形轨枕道床	轨道减振器轨道	普通整体道床	钢弹簧浮置板	弹性短轨枕
直、曲线	直	直	直	直	$R=600\text{ m}$ 曲线缓和曲线
线路坡度/%	3	3	3	17.4	15
隧道断面形式	圆形盾构	圆形盾构	圆形盾构	圆形盾构	圆形盾构
轨面埋深/m	20	20	20	18	21.6
地质特征	粉土及卵石圆砾上下堆叠	粉土及卵石圆砾上下堆叠	粉质粘土、卵石圆砾及杂粘土上下堆叠	粉质粘土	粉质粘土、卵石圆砾及中粗砂上下堆叠
行车速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	60	60	60	60	60

测试采用16位精度的INV306智能信号采集处理分析仪,所用内装IC压电加速度传感器具有低阻抗输出、抗干扰、噪声小等特点,主要技术指标见表2。自动触发采样,采样频率2560 Hz,时间间隔0.39 ms。

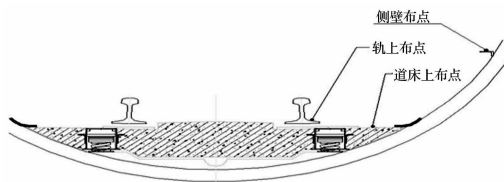


图1 测点布置示意图

Fig.1 Arrangement of measuring points

表2 加速度传感器技术指标

Tab.2 Technical indicators of accelerometer

测试位置	钢轨、浮置板、短轨枕、梯形轨枕	隧道壁
传感器型号	LC0104	LC0130
灵敏度系数/ ($\text{mv} \cdot \text{g}^{-1}$)	800	40
分辨率	2×10^{-4}	5×10^{-7}
分析频率范围/Hz	1~1000	1~1000

测试列车为实际运营的B型4轴车空车,固定轴距2.3 m,车辆定距12.6 m,6辆编组。

2 评价标准及数据处理方法

分析轨道交通轨道减振措施减振效果时尚无对应的标准规范,评价城市区域环境振动(人体承受建筑物内振动)时,应据GB10071-1988与JGJ/T 170-2009进行测量、评价,采用1~80 Hz频率范围内的Z振级插入损失值作为减振措施的评价量。插入损失即为有无隔振装置时的加速度级差。

插入损失定义为:

$$L_1 = 20 \lg \frac{a_{2R}}{a_2} \quad (1)$$

式中: a_{2R} 为无隔振装置时响应; a_2 为有隔振装置时响应。当 $L_1 \geq 0$ 时,隔振系统起作用;当 $L_1 \leq 0$ 时,隔振系统无衰减作用。

对式(1)进行变换,引入基准加速度 $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$,得:

$$L_1 = 20 \lg \frac{a_{2R}}{a_2} = 20 \lg \left(\frac{a_{2R}}{a_0} \frac{a_0}{a_2} \right) = 20 \lg \frac{a_{2R}}{a_0} - 20 \lg \frac{a_2}{a_0} \quad (2)$$

$$L_1 = VL_{2R} - VL_2 \quad (3)$$

本文统一用振动加速度分别计算弹簧浮置板、梯形轨枕、轨道减振器、弹性短轨枕相对于普通整体道床的对比损失。加速度有效值计算时常为列车通过时段,Z振级采用时间计权常数为1 s。每个测点振动加速度以6~10次测量数据的算术平均值作为该点测量结果。

3 测试结果与分析

3.1 时域分析

表3 不同轨道结构振动加速度级(dB)

Tab.3 Vibration acceleration of various track structures (dB)

位置	频率范围/Hz	普通整体道床	钢弹簧浮置板	梯形轨枕	轨道减振器	弹性短轨枕
钢轨铅垂向	1~1000	148.4	144.6	145.7	153.7	143.1
道床铅垂向	1~1000	110.9	121.3	93.8	100.2	96.7
	1~80	85.8	63.0	76.6	77.9	76.0
隧道壁铅垂向	1~200	87.6	63.9	78.2	78.7	77.4
	1~1000	98.3	70.3	82.9	88.4	84.7

注意:加速度有效值的计算时常为列车通过时段8 s。

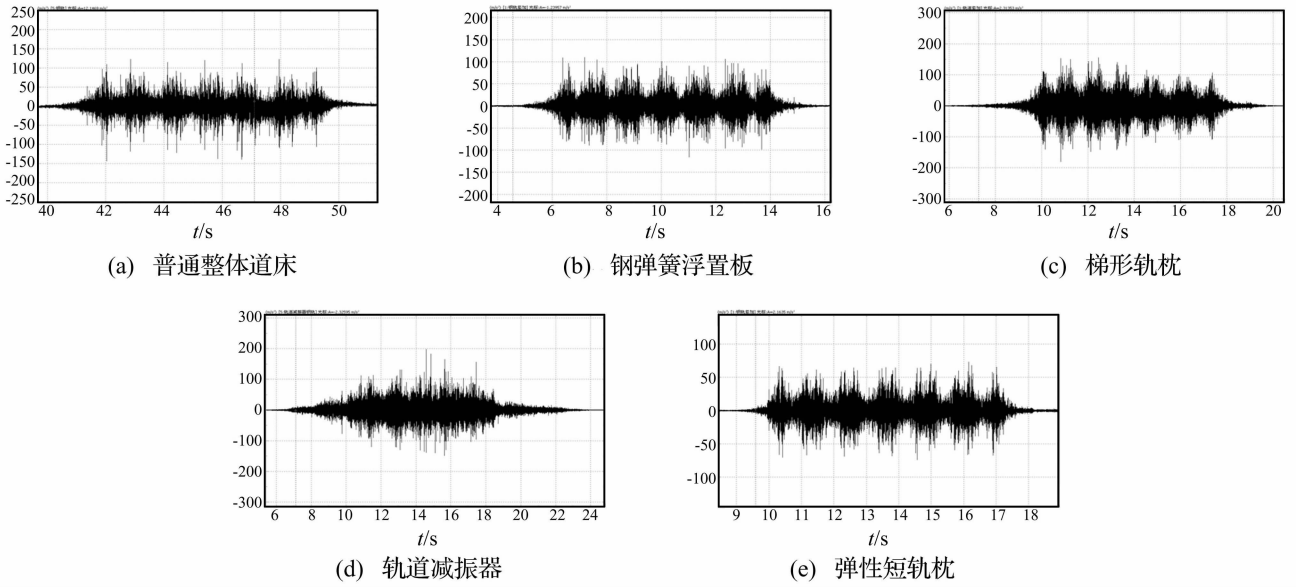


图 2 钢轨振动加速度典型时域波形图

Fig. 2 Time domain waveform of vibration acceleration of rail

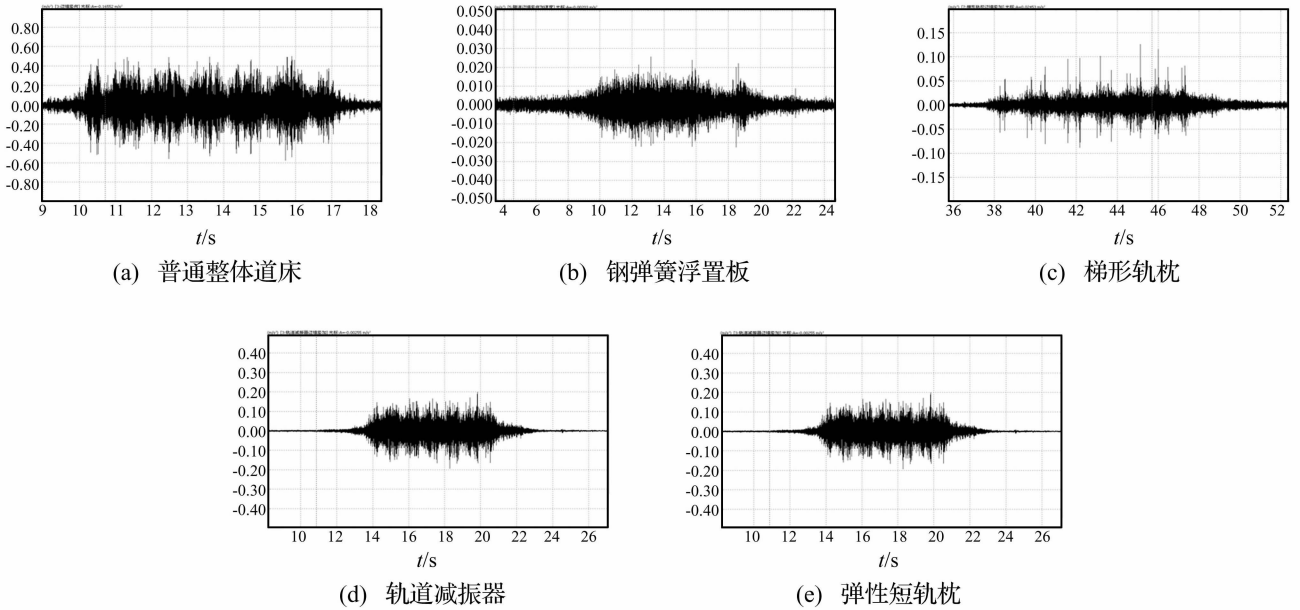


图 3 隧道壁振动加速度典型时域波形图

Fig. 3 Time domain waveform of vibration acceleration of tunnel wall

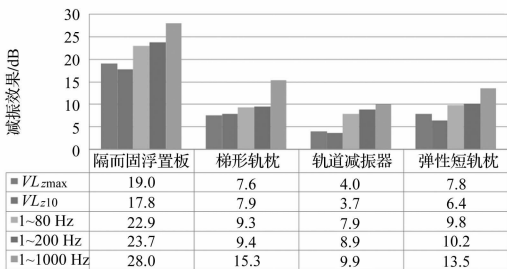


图 4 不同轨道结构隧道壁对比损失

Fig. 4 vibration mitigation effect of various track structures at tunnel wall

隧道壁时域波形。由表 3、图 2 ~ 图 4 看出：

(1) 轨道减振器、梯形轨枕、弹性短轨枕及钢弹簧浮置板可降低隧道壁 VLzmax 为 4 dB, 7.6 dB, 7.8 dB, 19.0 dB; VLz10 为 3.7 dB, 7.8 dB, 6.4 dB, 17.8 dB。

(2) 与普通整体道床隧道壁不计权振动加速度级相比,轨道减振器对应于 1 ~ 80 Hz 对比损失 7.9 dB, 1 ~ 200 Hz 为 8.9 dB, 1 ~ 1 000 Hz 为 9.9 dB; 梯形轨枕对应于 1 ~ 80 Hz 对比损失为 9.3 dB, 1 ~ 200 Hz 为 9.4 dB, 1 ~ 1000 Hz 为 15.3 dB; 弹性短轨枕对应于 1 ~ 80 Hz 对比损失为 9.8 dB, 1 ~ 200 Hz 为 10.2 dB, 1 ~ 1 000 Hz 为 13.5 dB; 钢弹簧浮置板对应于 1 ~ 80 Hz 为 22.9 dB, 1 ~ 200 Hz 为 23.7 dB, 1 ~ 1 000 Hz 为 28.0 dB。

图 2、图 3 为不同轨道结构在列车通过时的钢轨及

(3) 无论何种轨道减振措施,均表现为高频减振效果高于低频减振效果。各种轨道减振措施对应于不同上限截止频率,振动加速度级不同,对应减振效果亦不同。截止频率越高,振动加速度级越高,减振效果亦越好。隧道壁处对应于1~1 000 Hz与1~80 Hz的振动加速度级相差10 dB,对比损失差别6~10 dB。

(4) 人体全身垂向振动感觉敏感的振动频率为1~80 Hz,其中4~10 Hz最敏感。由于梯形轨枕、轨道减振器、弹性短轨枕对40 Hz频率范围内的降振效果不明显, VL_{Zmax} , VL_{z10} 减振效果均明显小于不计权振动加速度级的减振效果。

(5) 不同减振轨道在减小隧道壁与地面振动的同时,放大了轨道结构部件振动。如轨道减振器增大钢轨振动加速度5.2 dB;钢弹簧浮置板道床增大道床振动加速度级10.4 dB。减振性轨道放大了部分轨道结构部件的振动加速度,影响轨道结构的稳定性,亦会增加轨道养护维修成本。

(6) 轨道减振效果与诸多因素有关,各厂家或测量单位给出的各种减振措施减振效果应注明测量方法、评价量、频率范围、计权网络、测点位置等与减振效果直接相关的边界条件及报告减振型轨道的自振特性。

3.2 频域分析

城市轨道交通地下线振动频率因受不同轨道结构形式、不同列车类型、运行速度、隧道结构、地质条件等诸多因素影响,有不同的振动频率特性。弹簧浮置板、梯形轨枕、轨道减振器、弹性短轨枕轨道及普通整体道

床钢轨、道床、隧道壁振动加速度1/3倍频程频谱图见图5。未计权与4~200 Hz计权的隧道壁振动加速度1/3倍频程频谱图见图6。

表4 各种减振措施隧道壁处不同频段减振效果

Tab.4 Vibration mitigation effect of various track structures at tunnel wall in different frequency bands

轨道类型	减振效果	频率/Hz
弹簧浮置板	7~13	12.5~40
梯形轨枕	18~33	50以上
轨道减振器	9~18	50以上
弹性短轨枕	7~14	50以上
弹性短轨枕	6~20	50以上

表5 各种减振措施隧道壁处分频振级(4~200 Hz)

Tab.5 Fractional-frequency vibration level of various track structures at tunnel wall

轨道类型	VL_{max}/dB
普通整体道床	66.6
弹簧浮置板	47.3
梯形轨枕	62.5
轨道减振器	65.4
弹性短轨枕	58.3

由表4、表5、图5~图7看出:

(1) 地铁振动源频谱特性呈宽频带特性,以 $f=80\sim 1\ 000$ Hz频率为主;不同轨道结构、隧道结构及地质条件,其振动加速度不同;各种轨道结构钢轨振动加速度频谱均以630~1 000 Hz为主,道床、隧道壁在31.5~60 Hz处峰值明显,主要由轮轨相互耦合作用所致。

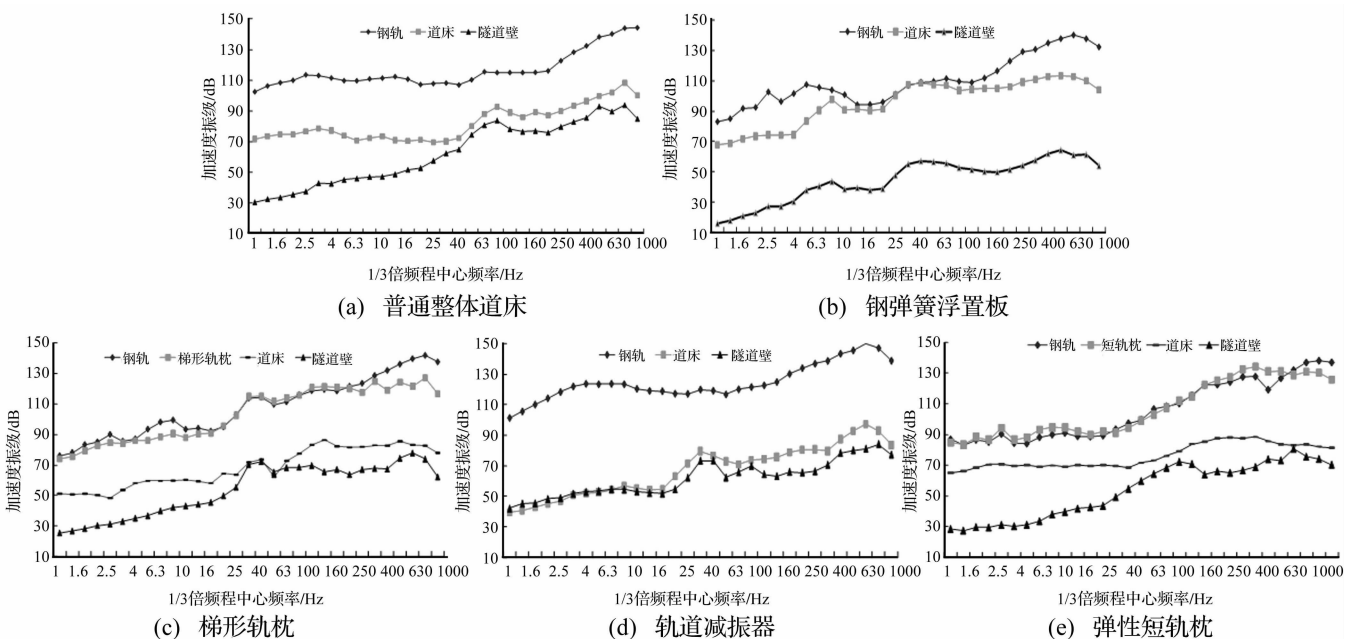
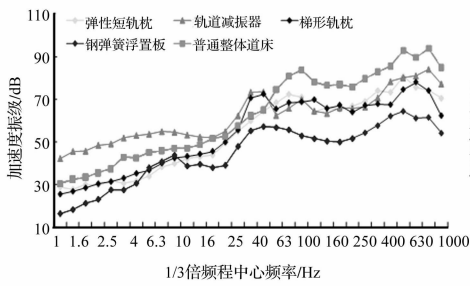
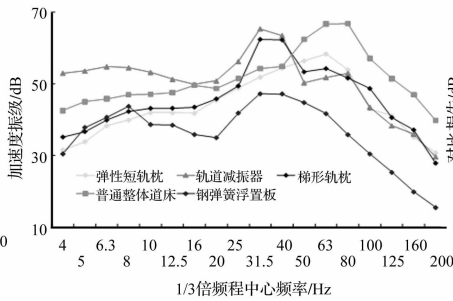


图5 轨道结构振动加速度1/3倍频程频谱图

Fig.5 1/3 Octave band of vibration acceleration of rail



(a) 未加权



(b) 4~200 Hz加权

图 6 隧道壁振动加速度 1/3 倍频程频谱图

Fig. 6 1/3 Octave band of vibration acceleration of tunnel wall

(2) 轨道结构系统自振特性不同,钢轨、道床、隧道壁等振动加速度在不同频率处峰值明显。如钢弹簧浮置板自振频率 7.5 ~ 8 Hz,其钢轨、道床、隧道壁的振动加速度在中心频率 8 Hz 处峰值明显;梯形轨枕自振频率 25 ~ 35 Hz,钢轨、梯形轨枕、道床、隧道壁在 25 ~ 40 Hz 处峰值明显。

(3) 据 JGJ/T 170 - 2009 规定,隧道壁 4 ~ 200 Hz 频率范围垂向振动加速度级按 ISO2631/1 - 1997 规定的 Z 加权因子修正后所得各中心频率振动加速度级见图 6(b),分频最大振级见表 5。普通整体道床 VL_{max} 为 66.6 dB;钢弹簧浮置板 VL_{max} 为 47.3 dB;梯形轨枕 VL_{max} 为 62.5 dB;轨道减振器 VL_{max} 为 65.4 dB;弹性短轨枕 VL_{max} 为 58.3 dB。

(4) 与普通整体道床相比,梯形轨枕、弹性短轨枕、轨道减振器高于 40 Hz 时减振效果明显;浮置板高于 12.5 Hz 时减振效果明显,对控制列车运行产生的二次辐射噪声影响更有效。

(5) 为获得较好减振效果,轨道结构固有频率须设计较低,但难保证列车运行安全性及旅客乘坐舒适性,一般认为轨道隔振无法解决 10 ~ 15 Hz 以下振动,减小低于 10 ~ 15 Hz 振动只能通过改善车辆转向架性能(低刚度悬挂系统、弹性车轮)解决。

3.3 振动源强

HJ453 - 2008 中对列车运行振动对环境保护目

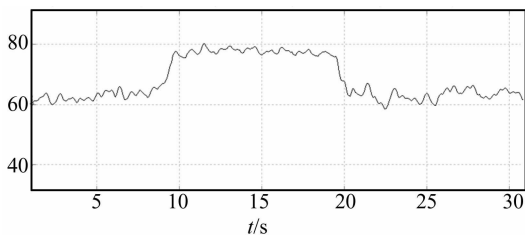


图 8 普通整体道床 Z 振级典型时域波形

Fig. 8 Time domain waveform of Z direction vibration degree of general monolithic track bed

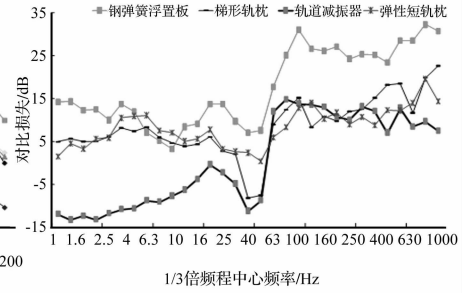


图 7 隧道壁振动加速度对比损失 1/3 倍频程频谱图

Fig. 7 1/3 Octave band of vibration acceleration insertion loss of tunnel wall

标影响进行预测。环境预测时,振动源强确定与预测参数选取极为重要。据该规定定义的振动源强,将测试中速度约 60 km/h 的 VL_{zmax} , VL_{z10} 算术平均。普通整体道床 Z 振级典型波形见图 8。获得 B 型车空车时北京地铁振动源强 VL_{zmax} , VL_{z10} 分别为 82.5 dB, 79.3 dB。

4 结 论

(1) 目前地铁采用的轨道减振措施对隧道壁振动减振效果为:梯形轨枕、弹性短轨枕、钢弹簧浮置板各自降低隧道壁 VL_{zmax} 分别为 4 dB, 7.6 dB, 7.8 dB, 19.0 dB。

(2) 轨道减振措施表明,减振效果高频高于低频; VL_{zmax} , VL_{z10} 减振效果小于不计权的振动加速度级。

(3) 受不同轨道结构形式、不同列车类型、运行速度、隧道结构、地质条件等诸多因素影响,振动频率特性亦不同。地铁振动源频谱特性呈宽频带特性,钢轨振动加速度频谱以 630 ~ 1 000 Hz 为主,道床、隧道壁在 31.5 ~ 60 Hz 范围内的峰值均由轮轨相互耦合作用产生。

(4) 北京地铁空车时振动源强 VL_{zmax} , VL_{z10} 分别为 82.5 dB, 79.3 dB。

(5) 减振轨道在减小隧道壁与地面振动的同时,会放大部分轨道结构部件振动,应予以重视、研究;用新型减振型轨道或轨道设计参数有重大变化时,应对列车行车安全指标(脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力)进行检测试验。

致谢:感谢北京城建设计研究总院、北京京港地铁有限公司的协助!

参 考 文 献

[1] 张艳平,杨宜谦,柯在田,等. 城市轨道交通振动和噪声的控制[J]. 中国铁路,2000 (3):43 - 45.
ZHANG Yan-ping, YANG Yi-qian, KE Zai-tian, et al. Urban rail transit vibration and noise control [J]. Chinese Railways, 2000 (3):43 - 45.
[2] 夏 禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道学报与工程学报,2004(1):1 - 8.

- XIA He, CAO Yan-mei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004(1):1-8.
- [3] 杨宜谦,王 澜,孙 宁. 城市轨道交通中浮置板式轨道结构的设计[J]. 工程建设与设计,2005(4):13-15.
YANG Yi-qian, WANG Lan, SUN Ning. The design of floating slab structure in the urban rail transit systems [J]. Construction and Design for Project, 2005(4):13-15.
- [4] 马 筠. 我国铁路环境振动现状及传播规律[J]. 中国环境科学,1987,17(6):70-74.
MA Jun. Current situation of train induced vibrations of environments and its propagation [J]. China Environmental Science, 1987,17(6):70-74.
- [5] 辜小安,任京芳,刘 扬,等. 我国地铁环境振动现状及控制措施[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,2003,30(5):206-210.
GU Xiao-an, REN Jing-fang, LIU Yang, et al. The status quo of environment vibration level and control measures of subway in China [J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 2003, 30(5):206-210.
- [6] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 深圳地铁一期工程道床减振降噪科研项目总报告[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2003.
- [7] 夏 禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [8] 李克飞,刘维宁,孙晓静,等. 北京地铁5号线地下线减振措施现场测试与分析[J]. 铁道学报,2011,33(4):112-119.
LI Ke-fei, LIU Wei-ning, SUN Xiao-jing, et al. In-situ test of vibration attenuation of underground line of beijing metro line 5 [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4):112-119.
- [9] 栗润德,张鸿儒,刘维宁. 北京地铁1号线地面响应测试与分析[J]. 北京交通大学学报,2007,31(4):31-35.
SU Run-de, ZHANG Hong-ru, LIU Wei-ning. Testing and analysis of metro-induced ground vibrations response near beijing metro line 1 [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007,31(4):31-35.
- [10] 张宝才,徐祯祥. 螺旋弹簧浮置板隔振技术在城市轨道交通减振降噪上的应用[J]. 中国铁道科学,2002,23(3):68-71.
ZHANG Bao-cai, XU Zhen-xiang. Vibration isolation technology of spiral steel spring in the application of urban rail transit antivibration noise reduction [J]. China Railway Science, 2002, 23(3):68-71.
- [11] 曾树谷. 铁路轨道动力测试技术[M]. 北京:铁道出版社,1985.
- [12] 郝 珺,耿传智,朱剑月. 不同轨道结构减振效果测试与分析[J]. 城市轨道交通研究,2008(4):68-71.
HAO Jun, GENG Chuan-zhi, ZHU Jian-yue. Field test and analysis of vibration in different track structures [J]. Urban Mass Transit,2008(4):68-71.

(上接第30页)

参 考 文 献

- [1] Ehrich F F. High order sub-harmonic response of high speed rotors in bearing clearance [J]. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1988, 110: 9-16.
- [2] Jiang J, Ulbrich H. Stability analysis of sliding whirl in a nonlinear jeffcott rotor with cross-coupling stiffness coefficients [J]. Nonlinear Dynamics, 2001, 24 (3): 269-283.
- [3] Zhang H B, Chen Y S, Li J. Bifurcation on synchronous full annular rub of rigid-rotor elastic-support system [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 33(7): 865-880.
- [4] Zhang H B, Chen Y S. Bifurcation analysis on full annular rub of a nonlinear rotor system [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 1977-1985.
- [5] Shang Z Y, Jiang J, Hong L. The global responses characteristics of a rotor/stator rubbing system with dry friction effects [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(10): 2150-2160.
- [6] 李朝峰,戴继双,闻邦椿. 油膜支撑双盘转子-轴承系统周期运动稳定性与分岔[J]. 力学学报,2011,43(1):208-216.
LI Chao-feng, DAI Ji-shuang, WEN Bang-chun. Stability and bifurcation of the rotor-bearing system with double disks supported by cylindrical bearings [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43 (1): 208-216.
- [7] Kim Y B, Noah S T. Quasi-periodic response and stability analysis for a nonlinear jeffcott rotor [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(2): 239-253.
- [8] Goldman P, Muszynska A. Chaotic behavior of rotor/stator system with rubs [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116: 693-701.
- [9] Evgueni V K, Wiercigroch M, Cartmell M P. Regular and chaotic dynamics of a discontinuously nonlinear rotor system [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002, 13 (6): 1231-1242.
- [10] 褚福磊,张正松,冯冠平. 碰摩转子系统的混沌特[J]. 清华大学学报(自然科学版),1996,36(7):52-57.
CHU Fu-lei, ZHANG Zheng-song, FENG Guan-ping. Chaotic behavior of a rub rotor model [J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 1996,36(7):52-57.
- [11] 刘 林,江 俊. 转子/定子碰摩响应的全局动力学特性研究[J]. 应用力学学报,2006,23(3):351-356.
LIU Lin, JIANG Jun. Global dynamical characteristics of rotor/stator rubbing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(3):351-356.
- [12] Zhang W M, Meng G. Nonlinear dynamics of a rub-impact micro-rotor system with scale-dependent friction model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 309(3-5): 756-777.
- [13] 张义民,刘巧伶,闻邦椿. 旋转机械系统碰摩故障的失效灵敏度研究[J]. 振动工程学报,2007,20(2):189-193.
ZHANG Yi-min, LIU Qiao-ling, WEN Bang-chun. Failure sensitivity investigation in impact-rub malfunction for rotating machinery [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(2):189-193.