

阻尼谐振器对地铁线路道床板低频振动的影响

张力文¹ 刘强¹ 王温栋¹ 孙剑伟¹ 王博华¹ 李元康²

(1. 西安航空职业技术学院, 710089, 西安;

2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 471023, 洛阳//第一作者, 讲师)

摘要 介绍了一种在地铁线路道床板上安装阻尼谐振器以降低低频振动的方法。建立了道床系统有限元模型, 分析道床板上安装阻尼谐振器的减振特性。在相同轨道条件下, 对普通道床和安装阻尼谐振器的道床进行了锤击和在线振动测试, 对比分析其频率响应函数。结果表明, 在正常的地铁轨道条件下, 与无阻尼谐振器道床相比, 安装阻尼谐振器的道床板的低频振动可降低 10 dB 以上。

关键词 地铁; 道床系统; 低频振动; 阻尼谐振器

中图分类号 U213.7⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.05.012

Impact of Tuned Slab Damper on Metro Line Low Frequency Ground Vibration Level

ZHANG Liwen, LIU Qiang, WANG Wendong, SUN Jianwei, WANG Bohua, LI Yuankang

Abstract A method to reduce slab low frequency vibration by tuned slab dampers installed on metro track is introduced. By setting up a finite element model of track bed system, the performance of tuned slab damper on metro track is analyzed. Under the same orbital conditions, the ordinary track bed and the track bed with damping resonator are tested by using hammering and online vibration methods, the frequency response functions are compared and analyzed. Results demonstrate that compared with ordinary track bed without damping resonator, the metro track installed tuned slab damper can reduce low frequency slab vibration level by more than 10 dB under normal metro traffic conditions.

Key words metro; track bed system; low frequency vibration; tuned slab damper

First-author's address Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, 710089, Xi'an, China

1 组合道床附加阻尼谐振器工作原理

在主系统上设置阻尼谐振器, 当主系统固有频率和谐振器的固有频率相同时, 可显著减少主系统

在该频率下的振动。在设计道床结构时, 采用上述原理, 在原道床结构上附加与原道床系统固有频率相同的阻尼谐振器系统, 利用阻尼谐振器系统吸收道床板的振动能量, 降低原固有频率附近道床板的振动^[1-6]。

组合式道床系统是一种高性能减振道床系统, 其通过将道床板质量、道床板下的隔振垫刚度及道床板上扣件刚度进行参数匹配设计, 获得高等减振能力。

在组合式道床系统上增加多组配重盖板(质量单元)和对应弹性垫层(弹簧和阻尼单元)后, 可利用配重盖板和弹性垫层形成质量-弹簧-阻尼吸振系统。配重盖板-弹性垫层阻尼吸振系统的固有频率与原道床主系统固有频率一致。可利用该阻尼谐振器系统吸收道床板的振动能量, 降低道床板的振动。其原理图如图 1~3 所示。

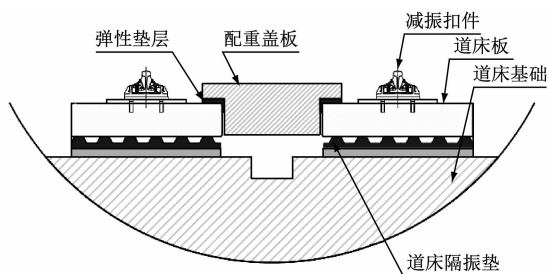


图 1 组合式道床系统截面示意图

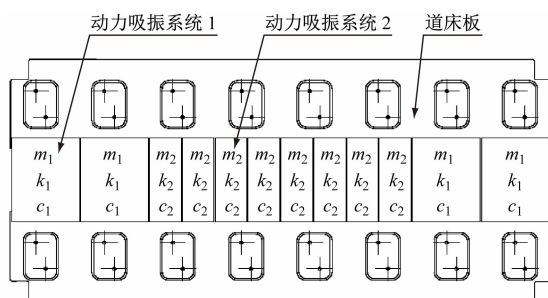


图 2 组合式道床系统平面示意图

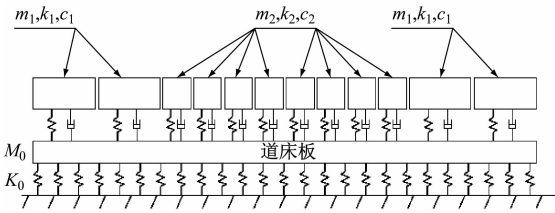


图3 组合式道床系统阻尼谐振器原理示意图

2 理论计算

2.1 理论模型

道床系统:钢轨采用 60 kg/m 轨。道床板长 5 m,宽 2.4 m,立面厚度 200 mm。道床垫厚 30 mm,面刚度为 0.018 N/mm³。普通道床采用普通单层扣件,垂向刚度为 60 kN/mm;组合道床采用谐振式浮轨扣件,垂向刚度为 8 kN/mm。

数值模型中,为减少计算机的计算量和占用的存储空间,计算单元可由多个压载板组成。钢轨采用弹性梁单元离散;轨道地基采用空间六面体离散;扣件用弹簧单元来模拟,扣件间距 0.625 m,同时连接板的节点对轨道床进行约束处理。模型计算所需的材料参数如表 1。

表 1 材料参数

项目	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢轨	7 850	210 000	0.30
道床板	2 500	32 500	0.20
道床垫	1 200	3	0.49
地基	1 500	2 000	0.25

根据上述简化建模,道床系统 ABAQUS 有限元模型如图 4 所示。

2.2 参数设置

计算轨道系统引起的地面振动时,地基应考虑为半无限域。但在有限元计算中,考虑到计算效率,只能建立有限大小的土体,对其进行离散后,在数值分析中会出现“低通效应”和“频散效应”。此时,应对地基计算域边界进行合理设置,在保证计算效率和计算误差合理的基础上对实际工况进行模拟^[7-9]。

本文使用等效的连续分布并联弹簧-阻尼系统,切向的弹簧刚度和边界上法向阻尼系数计算如下:

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_p \tag{1}$$

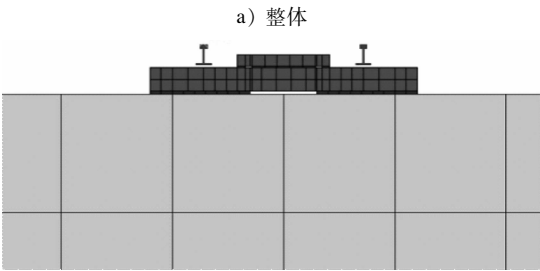
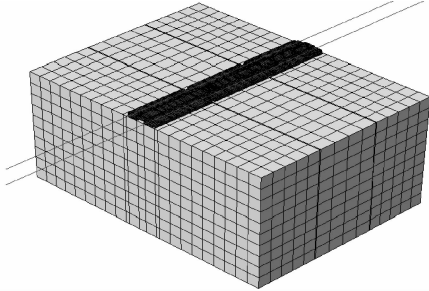


图4 道床系统有限元模型

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_s \tag{2}$$

式中:

- K_{BN}, K_{BT} ——分别为法向和切向弹簧刚度;
- C_{BN}, C_{BT} ——分别为法向和切向阻尼系数;
- C_p, C_s ——分别为介质的 P 波和 S 波波速;
- G ——介质 i 剪切模量;
- ρ ——介质质量密度;
- α_N, α_T ——分别为法向和切向黏弹性人工边界修正系数。

为与实际测试工况保持一致,在数值模型中施加相应载荷。道床与地基的响应位置参考在线测试,道床响应点选在道床板中央,地基响应点选在距离道床边缘 30 cm 处。

2.3 理论计算结果

2.3.1 道床板振动加速度

基于上述有限元模型,分析道床板上安装阻尼谐振器的减振特性。图 5 为安装了质量比 $\mu = 0.3$ 的阻尼谐振器的道床板与普通道床板的振动加速度对比图。从图 5 可以看出:普通道床板结构在 25 ~ 35 Hz 有明显峰值;安装阻尼谐振器之后,道床板在该频率范围内的振动加速度显著降低。因此,道床板因共振产生的放大现象可以通过使用阻尼器消除。

2.3.2 质量比对减振效果的影响

从道床板谐振设计可知,道床板的振动幅值与附加阻尼谐振器的质量比 μ 成反比。即 μ 越大,道床板的振动幅值越小^[10]。为研究 μ 对道床板振动

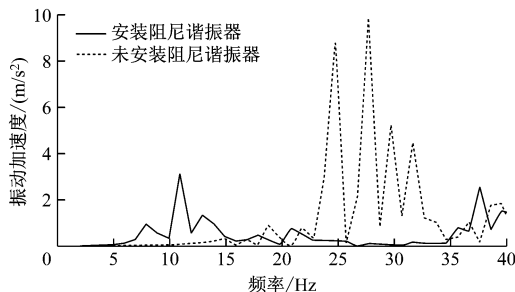
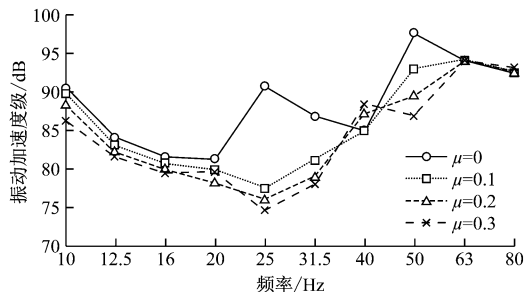
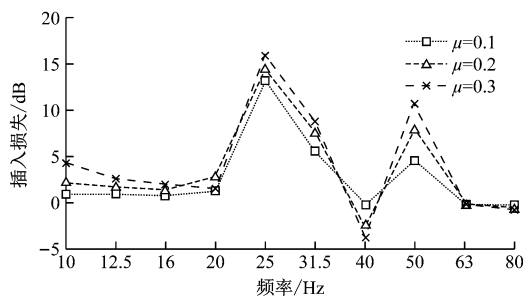


图5 道床板振动加速度对比

抑制效果的影响,计算了 μ 为0、0.1、0.2和0.3等4种不同质量比工况下振动加速度级对比及其插入损失,见图6。其中, $\mu=0$ 表示未安装阻尼谐振器的常规道床板。从图6 a)可知,安装阻尼谐振器后,在20~40 Hz频率范围内,道床板的振动加速度级随着质量比增大明显降低,但影响较弱。从图6 b)可知,插入损失随着质量比的增大而增大。



a) 1/3 倍频程图



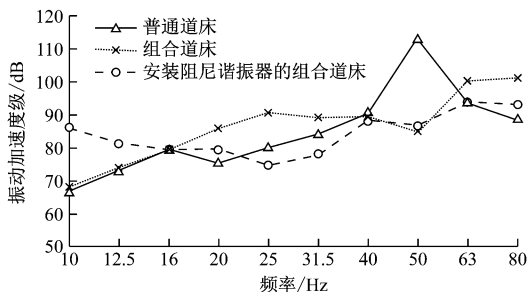
b) 插入损失

图6 道床板振动加速度级对比及其插入损失

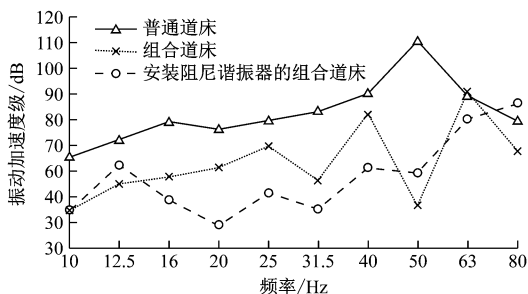
2.3.3 道床系统振动特性分析

为分析组合道床及阻尼谐振器对道床板和地基振动的影响,对普通道床、组合道床和安装阻尼谐振器($\mu=0.3$)的组合道床等3种轨道结构分别进行频响分析。3种轨道结构道床板及地基的振动加速度级见图7。从图7可知:组合道床相对普通道床在基础振动方面具有较好的减振效果,但较低的隔振频率使得道床板的振动增大;组合道床安装阻尼谐振器后不仅使道床板的振动显著降低,也降

低了基础的振动,起到更好的减振效果。



a) 道床板振动加速度级



b) 地基振动加速度级

图7 轨道结构1/3倍频程图

3 实验室锤击测试

3.1 测试方法

为更精确地了解不同结构的轨道振动传递规律与振动特性,对U型轨道的激励和响应进行了研究。在可以测量可控激励幅值和方向的条件下,可得到空载系统下的动态特性参数,如轨道隔振特性、轨道板振动特性等^[11-12]。

为验证轨道板上阻尼谐振器对轨道低频域的减振效果,在实验室1:1组合道床试验段对安装阻尼谐振器前、后两种工况进行锤击试验。轨道传递函数测试包含:

- (1) 组合道床系统谐振系统固有频率测试;
- (2) 钢轨至道床板传递函数测试;
- (3) 钢轨至道床基础传递函数测试。

组合道床轨道传递响应函数测试如图8所示。

3.2 锤击测试结果

给出了两种工况下轨道传递函数、道床板以及道床基础的振动响应对比,以比较分析其减振效果。同时,给出了盖板配重-橡胶垫阻尼谐振器的共振频率测试,以确定是否满足设计要求。

3.2.1 道床谐振系统固有频率分析

通过在实验室1:1轨道系统的锤击测试,得到谐振系统固有频率测试结果,如图9所示。可见,垂

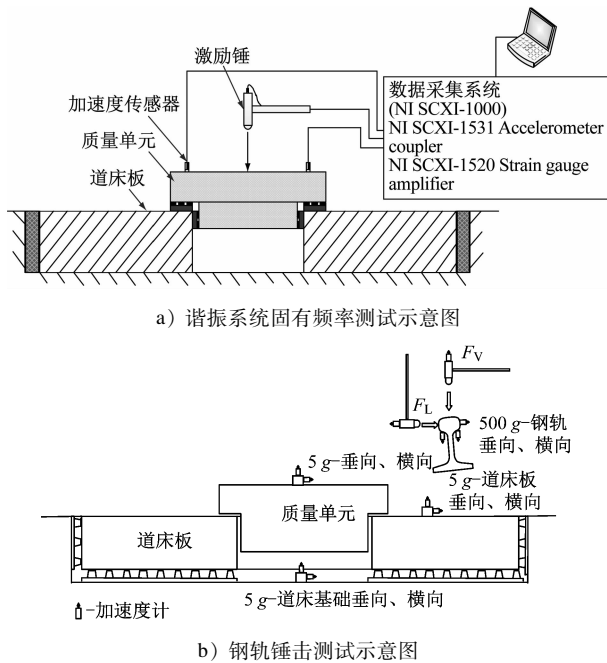


图8 组合道床轨道传递响应函数测试

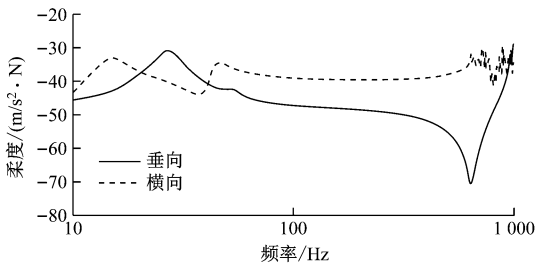


图9 道床板谐振系统固有频率

向固有频率在 27 Hz 附近,横向固有频率在 15 Hz 附近。考虑到测试对象的单一性,结果基本满足设计要求。

3.2.2 道床板传递函数分析

图 10 给出了组合道床和安装轨道板阻尼谐振器组合道床的道床板振动加速度级及其插入损失。由图 10 可知:在 20 ~ 40 Hz 频率范围内,相对于普通组合道床的道床板,安装轨道板阻尼谐振器组合道床的道床板在垂向和横向上振动均明显降低;特别是在 25 Hz 处,垂向振幅降低约 15 dB,横向振幅降低了 13 dB 左右,表明谐振系统起到了谐振作用,显著降低了道床板低频范围的振动。

3.2.3 道床基础传递函数分析

图 11 给出了组合道床和安装轨道板阻尼谐振器组合道床的基础振动加速度级及其插入损失。由图 11 可知,在 125 Hz 以下的低频振动区域,谐振式组合道床的基础振动小于普通组合道床,在共振峰处甚至达到 13 dB。可见,谐振式组合道床系统

可有效减小振动能量向轨道外的传递,起到减振降噪效果。

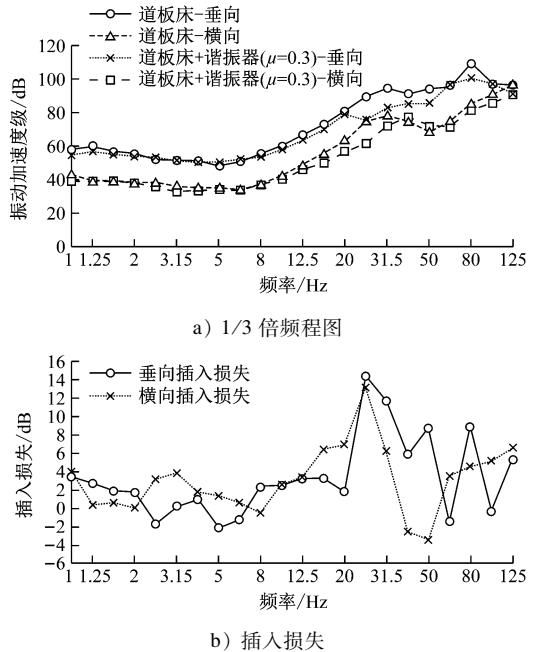


图10 道床板振动加速度级对比及其插入损失

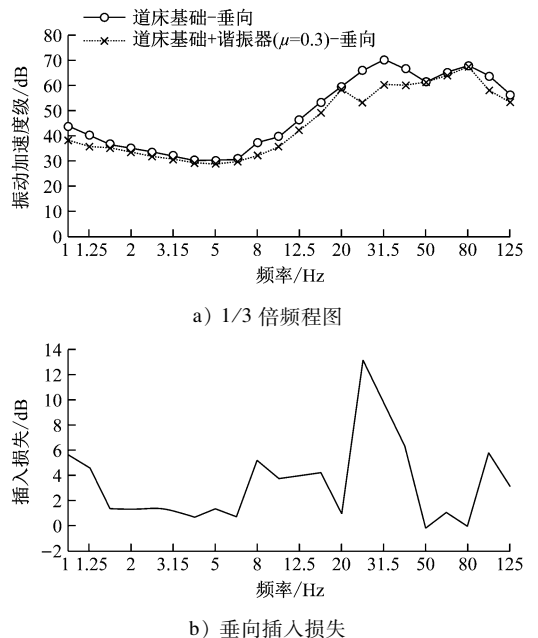


图11 道床基础振动加速度级对比及其插入损失

4 结论

(1) 从道床板谐振设计可知,道床板的振幅大小与附加阻尼谐振器的质量比成反比。道床板的振动加速度级在安装阻尼谐振器后有大幅度降低,且随着质量比增大,减振效果不断增强,插入损失随着质量比的增大而增大。

(下转第 71 页)

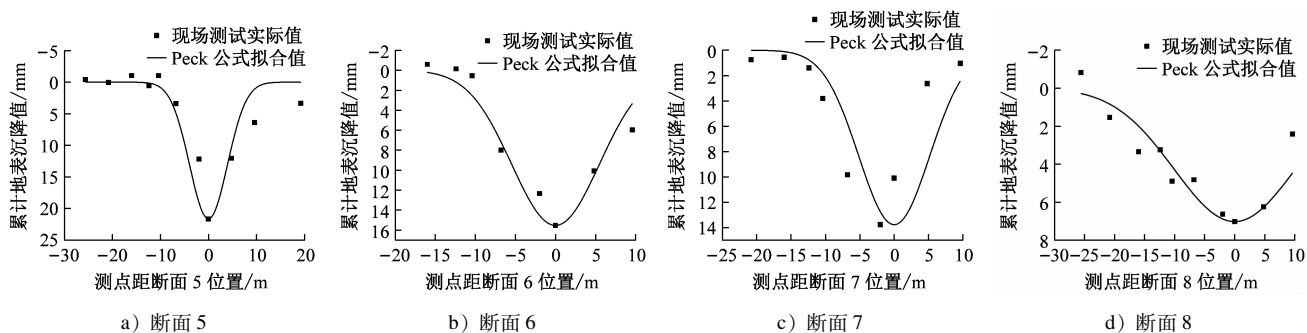


图12 粉细砂地层各监测断面沉降槽对比

片脱出盾尾和后期的固结沉降阶段;在粉细砂地层中,地表沉降主要发生在盾构掘进和管片脱出盾尾阶段。

(5) 当线间距大于2倍盾构主要影响范围,最终的沉降槽成W型;当线间距小于2倍盾构主要影响范围,最终的沉降槽成V型。

参考文献

- [1] 李新志,李术才,李树忱. 浅埋大跨度隧道施工过程地表沉降变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 3348.

- [2] 王振飞,张成平,王剑晨. 富水砂卵石地层泥水盾构施工地层变形规律[J]. 铁道工程学报, 2013(9): 78.
- [3] 任建喜,王金华,张引合,等. 黄土层地铁盾构施工地表变形规律预测研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(11): 93.
- [4] 滕丽,张桓. 盾构穿越砂卵石地层地表沉降特征细观分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1141.
- [5] 任松,姜德义,杨春和. 基于遗传算法的浅埋隧道开挖地表沉降神经网络预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006(3): 46.
- [6] 阳军生,刘宝琛. 挤压式盾构施工引起的地表移动及变形[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 10.

(收稿日期:2018-11-11)

(上接第58页)

(2) 普通道床板结构在25~35 Hz有明显峰值;安装阻尼谐振器之后,道床板在该频率范围内的振动加速度显著降低。因此,道床板因共振产生的放大现象可以通过使用阻尼器消除。

(3) 在20~40 Hz频率范围内,相对于普通组合道床的道床板,安装轨道板阻尼谐振器组合道床的道床板在垂向和横向上振动均明显降低。特别是在25 Hz处,垂向振幅降低了15 dB左右,横向振幅降低了13 dB左右,表明谐振系统起到了谐振作用,显著降低了道床板低频范围的振动。

参考文献

- [1] LIU Y Z, YU D L, ZHAO H G, et al. Review of passive dynamic vibration absorber [J]. Chinese Journal of Mechanic Engineering, 2007, 43(3): 14.
- [2] BROCK J E. A note on the damped vibration absorber [J]. Journal of Applied Mechanics, 1946, 13(4): A-284.
- [3] DEN HARTOG J P. Mechanical vibration [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1947: 112-132.
- [4] WEI C F. Time-domain conversion and the application research of track irregularity power spectrum [D]. Chengdu: Southwest

Jiaotong University, 2011: 26-28.

- [5] ZHAI W M. Vehicle-track coupling dynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997: 175-178.
- [6] CHEN G. The analysis on random vibration of vehicle-track coupling system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000: 153.
- [7] 刘晶波,王振宇,杜修力,等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46.
- [8] LIU W F, LIU W N, YUAN Y. Study on isolation efficiency of floating slab track using a numerical prediction model of metro traffic induced vibrations [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 34(9): 81.
- [9] WANG A B, QU L H, FAN Y X, et al. The key technology research of high performance damping slab mat [R]. 2013: 1-25.
- [10] WANG A B, WANG Z Q, XU N. Dynamic testing analysis report of the high performance damping slab from Guangbo station to Xinlong road of Zhengzhou metro line two [R]. 2015.
- [11] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [12] 国家环境保护局. 城市区域环境振动测量方法: GB 10070—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.

(收稿日期:2017-06-20)