

嵌入轨道系统振动传递研究*

杨刚^{1,2,3} 何远鹏¹ 韩健¹ 罗信伟^{3,4} 张智鑫² 何况¹

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都; 2. 成都市新筑交通科技有限公司, 611430, 成都; 3. 广州振宁交通科技有限公司, 611430, 成都; 4. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

摘要 [目的] 嵌入式轨道的阻尼较大, 有较好的减振降噪性能, 因此有必要对嵌入式轨道的减振降噪机理进行研究。[方法] 以广州地铁14号线为例, 对嵌入式轨道系统与普通扣件式轨道系统进行了静态与动态的振动测试; 基于现场测试的轨道结构频响函数及纵向衰减率, 分析嵌入式轨道系统的减振特性。[结果及结论] 嵌入式轨道系统在垂向减振中存在着明显的工作频段; 嵌入式轨道在绝大多数频段中的振动加速度幅值均小于普通扣件式轨道的振动加速度幅值; 当振动频率为550~1 200 Hz时, 嵌入式轨道的高分子阻尼材料与弹性垫板的减振体系在该频段具有良好的吸振能力; 嵌入式轨道与调频式钢轨阻尼器一样存在固定的调整频段, 其调整频段范围在振动频率为400 Hz附近; 相比于离散支承的轨道结构形式, 连续支承的轨道结构形式在振动频率大于750 Hz频段的钢轨振动衰减率更优。

关键词 地铁; 嵌入式轨道系统; 振动传递

中图分类号 U213.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.07.034

Research on Embedded Track System Vibration Transmission

YANG Gang^{1,2,3}, HE Yuanpeng¹, HAN Jian¹, LUO Xinwei^{3,4}, ZHANG Zhixin², HE Kuang¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Chengdu Xinzhu Transportation Technology Co., Ltd., 611430, Chengdu, China; 3. Guangzhou Zhenning Transportation Technology Co., Ltd., 611430, Chengdu, China; 4. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] Embedded tracks have relatively high damping, providing good vibration and noise reduction performance. Therefore, it is necessary to study the vibration reduction mechanism of embedded track system. [Method] Taking Guangzhou Metro Line 14 as example, static and dynamic vibration tests are conducted on both embedded and conventional fastener-based track systems. Based on the track

structure frequency response functions and longitudinal attenuation rates obtained from field tests, the vibration reduction characteristics of embedded track system are analyzed. [Result & Conclusion] Embedded track system exhibits a distinct operational frequency band in vertical vibration reduction. In most frequency bands, the vibration acceleration amplitude of embedded tracks is smaller than that of conventional fastener-based tracks. When the vibration frequency is between 550 and 1 200 Hz, the polymer damping materials and the elastic pad shock-absorbing systems of embedded tracks exhibit good vibration absorption capabilities in this frequency band. Embedded tracks, like frequency-adjustable rail dampers, have a fixed adjustment frequency band, typically around 400 Hz. Compared to the track structure form by discrete support, the track structure form by continuous support shows better rail vibration attenuation rates in frequency bands above 750 Hz.

Key words metro; embedded track system; vibration transmission

在轨道交通领域中, 尤其是城际铁路和地铁线路, 对线路的减振、降噪及异常磨损方面都有较高的要求和标准。由成都市新筑路桥机械股份有限公司牵头, 联合西南交通大学共同研发的嵌入式连续支承轨道系统(以下简称“嵌入式轨道系统”)在减振降噪、治理异常磨损、减少维护方面均有不错的表现^[1]。

目前, 嵌入式轨道系统的研究主要集中在改善轮轨关系、隔离振动、降低噪声等方面。文献[2]结合轮轨耦合动力学模型提出了适用于嵌入式轨道系统的支承刚度, 并通过线路实测数据发现, 嵌入式轨道的插入损失为10~12 dB(A), 可降低轮轨噪声约6 dB(A)。文献[3]采用波导有限元-边界元法发现嵌入式轨道的振动噪声在600 Hz以上有明显降低。文献[4]阐述了线路曲线段啸叫噪声的产生机理, 并发现嵌入式轨道能够抑制曲线啸叫噪

* 四川省科技厅项目(2016GZ0332); 云南省科技计划项目(202301AS070079)

声的产生。

综上所述,目前嵌入式轨道系统的振动传递研究主要集中于钢轨和弹性材料的振动研究,缺少对减振工作频段及各部件间的振动传递状态的研究。基于此,本文通过试验与仿真联合的方式,分析了嵌入式轨道频响函数、振动传递率及轨道结构纵向衰减率对嵌入式轨道系统的振动传递影响。

1 试验介绍

本文对广州地铁 14 号线敷设的嵌入式轨道系统与普通扣件式轨道系统进行了静态与动态的振动测试,具体测点信息如表 1 所示,主要传感器型号及量程如表 2 所示。根据所测数据,分析研究两种轨道结构振动传递的差异。嵌入式轨道结构示意图如图 1 所示。

表 1 具体测点信息

Tab. 1 Information of specific measuring points

测点编号	测试对象	测点里程
测点 1	普通扣件式轨道整体道床	K51+000
测点 2	嵌入式轨道道床	K52+470

表 2 主要传感器型号及量程

Tab. 2 Main sensor models and measurement ranges

名称	型号	量程
三向加速度传感器	ULT2010	50g(0.5~5 000.0 Hz)
	INV9832A	50g(0.5~5 000.0 Hz)
	ULT2061	5g(0.1~1 000.0 Hz)
力锤	MSC-3	0~50 kN

注:g 为重力加速度;三向加速度传感器括号中的量程数值代表加速度的适用频率量程。

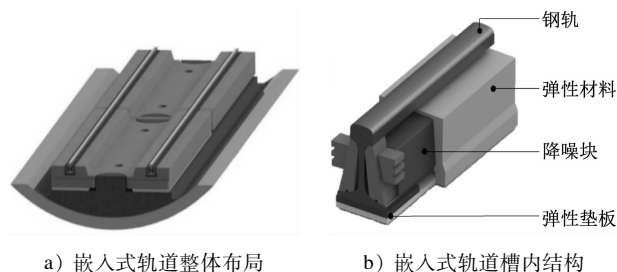


图 1 嵌入式轨道结构示意图

Fig. 1 Diagram of embedded track structure

1.1 频响测试

分别对普通扣件式轨道与嵌入式轨道进行现场频响测试,可以获得钢轨在两种轨道支承形式下的频率响应。

1.2 钢轨粗糙度测试

依据 ISO 3095:2013 *Acoustics Railway applications Measurement of noise emitted by rail bound vehicles* 进行钢轨粗糙度测试。在测试嵌入式轨道区段和相同里程的普通扣件式轨道的钢轨表面粗糙度时,使用钢轨波磨测量仪测试钢轨垂向短波不平顺。

1.3 轨道行车振动测试

轨道行车振动测试依据标准 GB/T 10071—1988《城市区域环境振动测量方法》、DB 11/T 838—2019《地铁噪声与振动控制规范》进行,荷载为在直线段运行、运行速度为 60 km/h 的空车(AW0)。两种轨道结构的断面传感器测点布置示意图如图 2 所示。

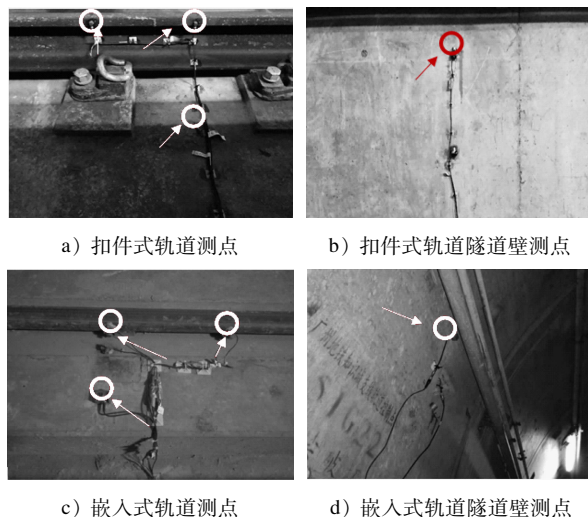


图 2 两种轨道结构的断面传感器测点布置示意图

Fig. 2 Diagram of cross-sectional sensor measuring point layout of two track structures

2 试验结果分析

2.1 振动传递率

分别提取普通扣件式轨道与嵌入式轨道的钢轨跨中、轨道板、1.9 m 处隧道壁的振动加速度值,分析两种轨道形势下,不同部件间的振动传递率,主要用于对轨道结构进行减振特性分析。振动传递率可以表示为:

$$T(\omega) = \frac{a_n(\omega)}{a_1(\omega)} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

ω ——加速度的圆频率;

$T(\omega)$ ——两测点间振动加速度传递率;

$a_1(\omega)$ ——传递路径起始处的振动加速度;

$a_n(\omega)$ ——传递路径终止处第 n 点的振动加速度。

当列车以运行速度为 60 km/h 通过普通扣件式轨道与嵌入式轨道时,分析振动加速度沿钢轨传递至轨道板、沿轨道板传递至隧道壁过程中的振动传递率。两种轨道结构下,不同部件间的振动传递率随振动频率的变化情况如图 3 所示。

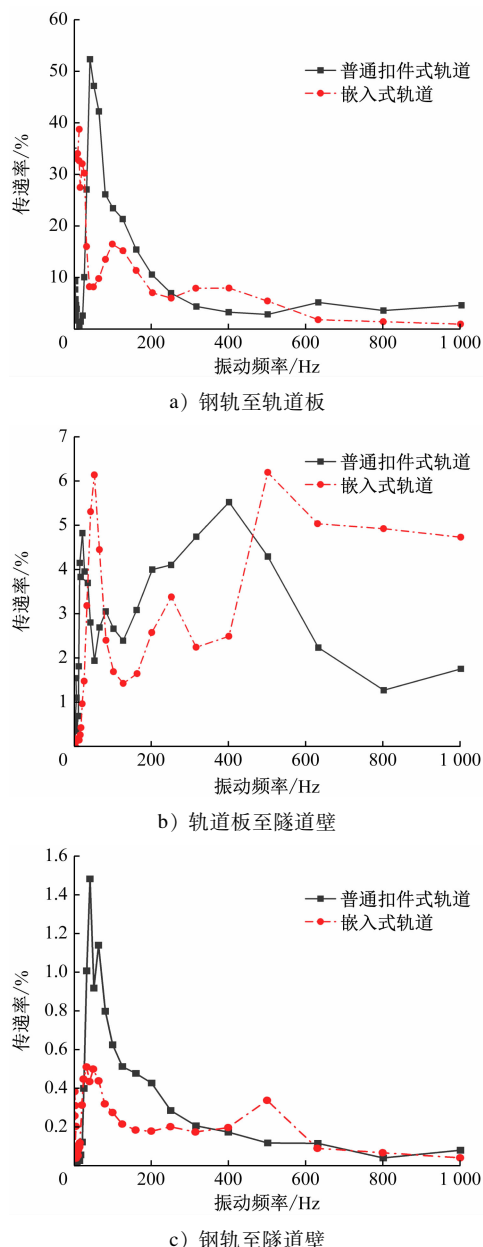


图3 两种轨道结构下不同部件间的振动传递率随振动频率的变化情况

Fig. 3 Vibration transmission rate between different components changing with vibration frequency under two track structures

由图3可知:①振动由钢轨传递至轨道板过程中,当振动频率小于250 Hz或大于550 Hz时,嵌入式轨道的振动衰减能力强于普通扣件式轨道;当振动频率为40 Hz时,两种轨道结构的传递率相差最大,普通扣件式轨道是嵌入式轨道的振动传递率的6.6倍。由此可知:在绝大多数频段内,嵌入式轨道系统能够有效抑制轨道板的振动,而在实际结构中,钢轨与轨道板间只有高分子阻尼材料与弹性垫板的存在,这说明嵌入式轨道系统的高分子阻尼材料与较软的弹性垫板组合能够较好地耗散所传递的能量。②振动由轨道板传递至隧道壁过程中,当振动频率小于450 Hz时,除部分频带外,嵌入式轨道的减振能力高于普通扣件式轨道;当振动频率大于450 Hz时,嵌入式轨道的振动衰减能力低于普通扣件式轨道。③振动由钢轨传递至隧道壁过程中,当振动频率小于400 Hz时,嵌入式轨道的振动衰减能力在大多数频带均大幅优于普通扣件式轨道;当振动频率为400~630 Hz时,嵌入式轨道的振动衰减能力略低于普通扣件式轨道;当振动频率为630~1 000 Hz时,两种轨道结构的振动衰减能力大体相当。④将图3 c)同图3 a)和图3 b)进行对比分析,当振动频率小于100 Hz时,嵌入式轨道系统的减振能力主要由钢轨至轨道板的传播路径提供;当振动频率为100~250 Hz时,嵌入式轨道系统的减振能力主要由钢轨至轨道板、轨道板至隧道壁的传播路径共同提供;当振动频率为250~400 Hz时,嵌入式轨道系统的减振能力主要由轨道板至隧道壁的传播路径提供。

综上所述,垂向振动在轨道结构中的传递路径拥有自身不同的减振频段。由文献[5]的研究结果可知,地铁的减振能力是通过频带为1~80 Hz范围内隧道壁振动加速度Z振级来评价的,故可对减振频段高的传递路径进行适当控制,使其减振频段向低频移动,以增加嵌入式轨道系统的减振能力。

2.2 结构动态振动

嵌入式轨道与普通扣件式轨道的钢轨粗糙度相差不大。当钢轨表面粗糙度波长为6~20 mm时,两种轨道结构的钢轨粗糙度幅值均较高,这主要是由于打磨钢轨留下的打磨痕迹导致了钢轨的粗糙度偏大。采集两种轨道结构下,轨道各部件的垂向振动加速度,并将测试所得时域下的垂向振动加速度数据转化为频域下的垂向振动加速度数据,其随振动频率的变化情况如图4所示。

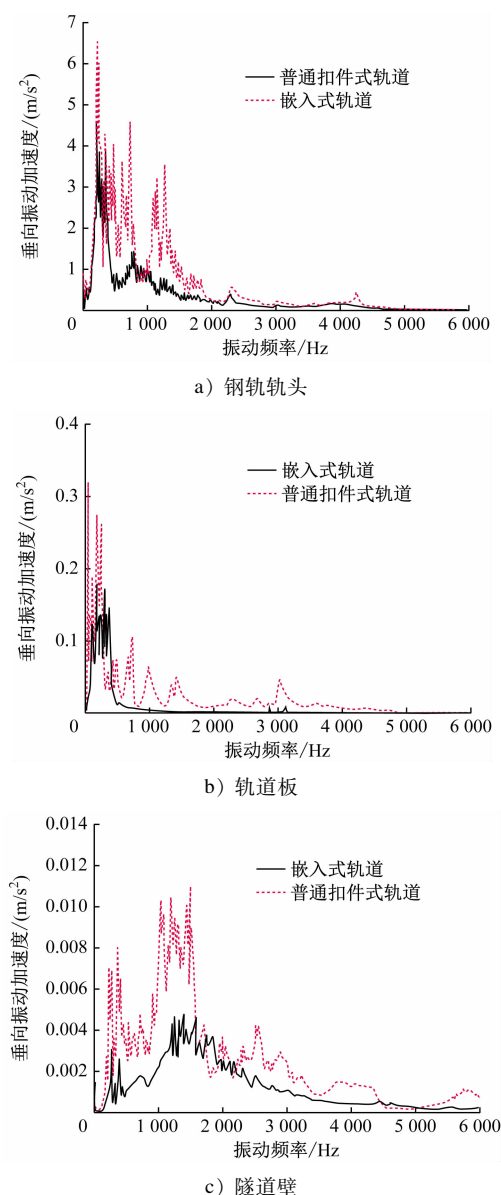


图4 两种轨道结构下轨道各部件的垂向振动加速度随振动频率的变化情况

Fig. 4 Vertical vibration acceleration of each track component changing with vibration frequency under two track structures

由图4可知:①在两种轨道结构的钢轨表面粗糙度基本相同的前提下,嵌入式轨道系统的钢轨、轨道板、隧道壁在绝大多数频段的垂向振动加速度均小于普通扣件式轨道的垂向振动加速度。②当振动频率为550~1 200 Hz时,嵌入式轨道系统与普通扣件式轨道系统在钢轨轨头处的垂向振动加速度均有两处明显的峰值。嵌入式轨道的垂向振动加速度峰值幅值较低,但当振动传递至轨道板处时,嵌入式轨道在此处的峰值消失了,而普通扣件

式轨道在轨道板处依然存在垂向振动加速度峰值,说明高分子阻尼材料与弹性垫板隔离或吸收了此处的峰值,证明高分子材料对中高频的垂向振动起到了明显的吸振作用。③由图4 a)可知,在绝大多数低频段,嵌入式轨道垂向振动加速度的振动幅值小于普通扣件式轨道垂向振动加速度的振动幅值;在中、高频段,嵌入式轨道的垂向振动加速度均小于普通扣件式轨道的垂向振动加速度,这说明嵌入式轨道能够有效降低钢轨振动加速度。

2.3 钢轨频响

本文对上述两种轨道结构进行钢轨轨头锤击试验。两种轨道结构下,钢轨轨头锤击试验曲线如图5所示。由图5可知:①两种轨道结构的钢轨频响所对应的相干函数均大于0.99(接近于1.00),说明频响函数可信;②普通扣件式轨道的一阶固有频率为158 Hz,而嵌入式轨道的一阶固有频率为144 Hz,说明普通扣件式轨道的单位垂向刚度大于嵌入式轨道的单位垂向刚度,且普通扣件式轨道的振动幅值也大于嵌入式轨道的振动幅值,这表明嵌入式轨道系统中的阻尼要高于普通扣件式轨道系

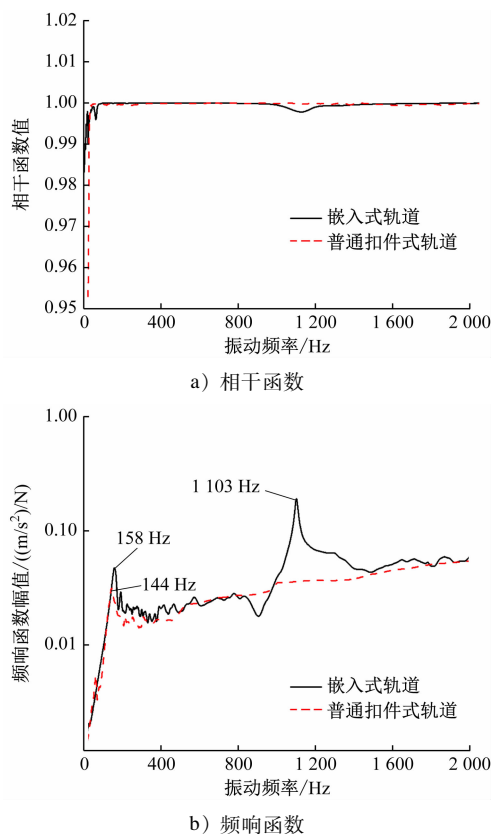


图5 两种轨道结构下的钢轨轨头锤击试验曲线

Fig. 5 Rail head hammering test curves under two track structures

统中的阻尼。

2.4 钢轨振动衰减率

根据文献[6]的研究结果,两种轨道结构的钢轨轨头频响曲线可用于确定其有限元模型的材料参数,实体模型与 Timosheko 梁模型在振动频率小于 3 000 Hz 范围内的垂向振动特性一致,因此本文的有限元模型采用由实体模型 + Timosheko 梁模型组合而成,在保证模型结构纵向长度足够支撑计算精度的同时,有效减少运算成本。两种轨道结构下,有限元计算获得的频响函数与线路实测频响函数对比,如图 6 所示。两种轨道结构下,钢轨振动衰减率随振动频率的变化情况如图 7 所示。

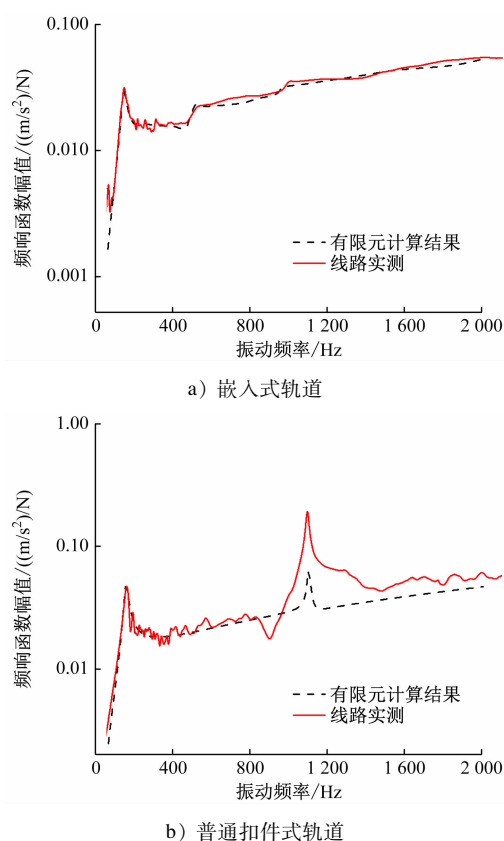


图 6 两种轨道结构下有限元计算获得的频响函数与线路实测频响函数对比

Fig. 6 Comparison of frequency response functions obtained by finite element calculation and line field measurement under two track structures

由图 7 可知:①在绝大多数中、高频带(约 250 Hz 以上频带)中,嵌入式轨道的钢轨振动衰减率均高于普通扣件式轨道的钢轨振动衰减率,说明嵌入式轨道的钢轨纵向振动衰减能力优于普通扣件式轨道。②嵌入式轨道在振动频率约为 400 Hz 处的

钢轨振动衰减率明显高于扣件式轨道的钢轨振动衰减率,峰值在 402 Hz(相比于普通扣件式轨道高 6.5 dB/m)处,谷值位于 262 Hz 与 663 Hz 处。③普通扣件式轨道在 Pinned-Pinned 模态频率处(振动频率为 1 103 Hz)的钢轨振动衰减率有明显的提升。

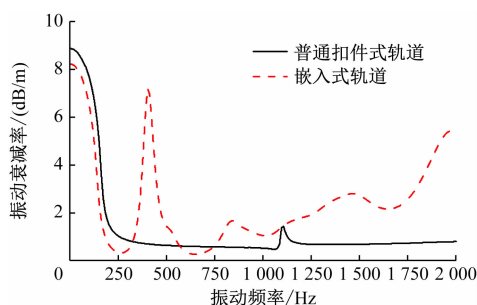


图 7 两种轨道结构下的钢轨振动衰减率随振动频率的变化情况

Fig. 7 Variation of rail vibration attenuation rate changing with vibration frequency under two track structures

嵌入式轨道可能存在与调频式钢轨阻尼器相似的工作机制,拥有特定的控制频带,使部分频带的钢轨振动衰减率明显优于普通扣件式轨道。为考察嵌入式轨道自身独有的连续支承设计是否对钢轨振动衰减率有影响,调整两种轨道结构的单位刚度、阻尼均为 49 (kN/mm)/m 和 11.67×10^3 N · s/m,计算得到的不同支承状态下(嵌入式轨道采用连续支承方式,普通扣件式轨道采用离散支承方式),钢轨振动衰减率随振动频率的变化情况如图 8 所示。由图 8 可知:在刚度、阻尼均相同的情况下,连续支承的嵌入式轨道除去固定的调整频带,在中高频段衰减率仍然大于离散支承的普通扣件式轨道,说明连续支承的结构能够提升钢轨振动衰减率。

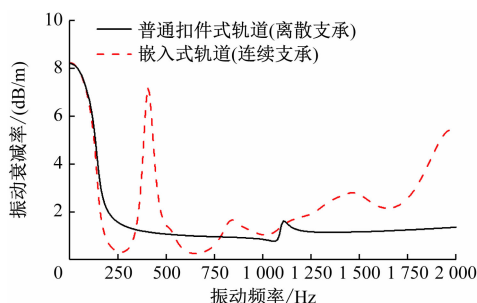


图 8 不同支承状态下的钢轨振动衰减率随振动频率的变化情况

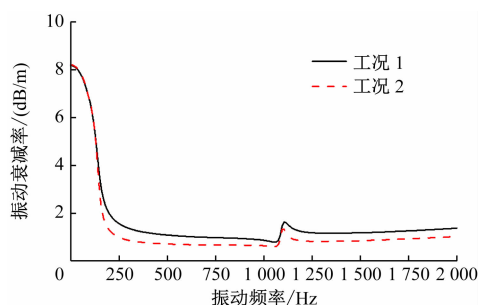
Fig. 8 Variation of rail vibration attenuation rate changing with vibration frequency under different supporting states

考虑两种轨道结构形式的刚度和阻尼对钢轨振动衰减率的影响,改变普通扣件式轨道模型的刚度与阻尼,设置工况参数,如表 3 所示。各工况下,通过控制变量法获得的钢轨振动衰减率对比如图 9 所示。由图 9 可知:①阻尼对中、高频段的钢轨振动衰减率造成明显的影响,阻尼越高,中、高频段的钢轨振动衰减率越高。改变结构的阻尼特性可以增加中、高频段的钢轨振动衰减率,故可通过采用高阻尼材料来提高振动能量的耗散。②刚度会对低频段的钢轨振动衰减率产生影响,刚度越高,低频段的钢轨振动衰减率越高。改变结构自身刚度可以增加低频段的钢轨振动衰减率,故可通过增加结构刚度的方式,控制低频段的钢轨振动衰减率。

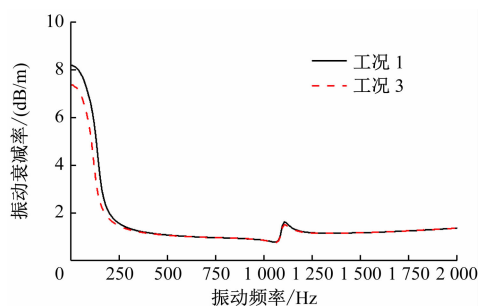
表 3 工况参数

Tab.3 Working condition parameters

工况	单位刚度/ $((\text{kN}/\text{mm})/\text{m})$	阻尼/ $((\text{kN}\cdot\text{s})/\text{m})$
工况 1	49	11.67
工况 2	49	4.16
工况 3	35	11.67



a) 变量为阻尼



b) 变量为刚度

图 9 各工况下通过控制变量法获得的钢轨振动衰减率对比

Fig. 9 Comparison of rail vibration attenuation rate obtained by control variable method under each working condition

3 结语

通过分析嵌入式轨道系统与普通扣件式轨道

系统中各部件间的振动传递率发现,嵌入式轨道系统在垂向减振中存在着明显的工作频段:①在振动由钢轨传递至轨道板时,工作频段为小于 250 Hz 与大于 550 Hz 频段,其中小于 250 Hz 频段的振动衰减能力尤为突出,其垂向振动传递率普通扣件式轨道是嵌入式轨道的 6.6 倍。②嵌入式轨道系统中,当振动频率小于 100 Hz 时,垂向振动主要由钢轨至轨道板的路径衰减;当振动频率为 100 ~ 250 Hz 时,垂向振动主要由钢轨至轨道板、轨道板至隧道壁的路径衰减;当振动频率为 250 ~ 400 Hz 时,垂向振动主要由轨道板至隧道壁的路径衰减。

通过测量嵌入式轨道系统与普通扣件式轨道系统中各部件的振动加速度值发现:①嵌入式轨道在绝大多数频段中的振动加速度幅值均小于普通扣件式轨道的振动加速度幅值;②两种轨道结构形式的钢轨在振动频率为 550 ~ 1 200 Hz 时,均存在两处明显峰值,嵌入式轨道的轨道板在该频段处的峰值已经被消除,而普通扣件式轨道的轨道板在该频段处的峰值仍然存在,说明嵌入式轨道的高分子阻尼材料与弹性垫板的减振体系在该频段具有良好的吸振能力。

通过对比线路实测频响数据与有限元模型仿真结果发现:①嵌入式轨道与调频式钢轨阻尼器一样存在固定的调整频段,其调整频带范围在振动频率为 400 Hz 附近;②相比于离散支承的轨道结构形式,连续支承的轨道结构形式在振动频率大于 750 Hz 频段的钢轨振动衰减率更优。

本文分别从改善振动传递路径、增加减振方式等方面研究了提升嵌入式轨道减振能力的措施,后续可在此基础上研究二级减振对嵌入式轨道减振能力的影响,将插入损失由 10 ~ 13 dB 提升至 15 dB 以上,以达到特殊减振的要求。

参考文献

- [1] 胡怡东,杨刚,马润涛,等.城市轨道交通嵌入式连续支承轨道系统性能分析[J].城市轨道交通研究,2020,23(7):102. HU Yidong, YANG Gang, MA Runtao, et al. Performance analysis of continuously supported embedded rail track system in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 102.
- [2] 韩健.地铁列车-嵌入式轨道系统动力学性能及振动噪声特性研究[D].成都:西南交通大学,2018. HAN Jian. Study on dynamic behaviour and vib-acoustic characteristic of metro train and embedded track system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

- [3] NILSSON C M, JONES C J C, THOMPSON D J, et al. A waveguide finite element and boundary element approach to calculating the sound radiated by railway and tram rails[J]. *Journal of Sound Vibration*, 2009, 321(3/4/5): 813.
- [4] 赵悦, 何远鹏, 韩健, 等. 有轨电车曲线啸叫噪声试验分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(10): 133.
- ZHAO Yue, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Measurements and analyses of curve squeal caused by tram[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(10): 133.
- [5] 刘卫丰, 张厚贵, 孟磊, 等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器抑制钢轨振动的试验研究[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(1): 105.
- LIU Weifeng, ZHANG Hougui, MENG Lei, et al. A test of suppressing rail vibration by tuned rail damper for Beijing Metro[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(1): 105.
- [6] 孙方遒, 谷爱军, 刘维宁. 钢轨长实体模型在不同频段的振动及传递特性分析[J]. *铁道学报*, 2013, 35(2): 81.
- SUN Fangqiu, GU Aijun, LIU Weining. Study on vibration and transmission characteristics of long solid rail models under different frequencies[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(2): 81.
- 收稿日期:2022-02-10 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-10 Revised:2022-03-15 Published:2024-07-10
· 第一作者:杨刚,博士研究生,940780623@qq.com
通信作者:何远鹏,博士研究生,he.yuanpeng@outlook.sg
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 190 页)

- [2] 虞凯. 中低速磁浮交通电磁辐射原理研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(2): 74.
- YU Kai. Research on the principle of electromagnetic radiation in low and medium speed maglev traffic[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(2): 74.
- [3] 钱根, 王沛沛, 湛博. 地铁杂散电流对隧道钢筋极化电位分布影响研究[J]. *铁道标准设计*, 2023, 67(11): 200.
- QIAN Gen, WANG Peipei, ZHAN Bo. Study on the influence of metro stray current on polarization potential distribution of tunnel reinforcement [J]. *Railway Standard Design*, 2023, 67(11): 200.
- [4] 吴树强. 中低速磁悬浮供电系统的技术特点研究[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(8): 87.
- WU Shuqiang. Research on the technical characteristics of power supply system for medium and low speed maglev vehicles [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(8): 87.
- [5] 王向灿, 邱冰, 戴旺, 等. 中低速磁浮交通系统工程造价优化[J]. *城市轨道交通研究*, 2023, 26(6): 161.
- WANG Xiangcan, QIU Bing, DAI Wang, et al. Project cost optimization of medium-low speed maglev transit system [J]. *Urban Mass Transit*, 2023, 26(6): 161.
- 收稿日期:2022-02-09 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-09 Revised:2022-03-22 Published:2024-07-10
· 通信作者:戴能云,高级工程师,155087082@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 196 页)

- [5] 张梦楠, 颜乐, 王平, 等. 长大坡道铺设无缝道岔可行性分析[J]. *铁道标准设计*, 2015, 59(2): 13.
- ZHANG Mengnan, YAN Le, WANG Ping, et al. Feasibility analysis of seamless turnout on long steep grade[J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(2): 13.
- [6] 曾志平, 徐榕, 阮莹, 等. 地铁大坡度道岔制动工况下钢轨表面接触应力变化规律研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(6): 243.
- ZENG Zhiping, XU Rong, RUAN Ying, et al. Research on the change law of rail surface contact stress under the braking condition of metro turnout [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(6): 243.
- [7] 刘伟, 刘春明. 12‰坡道上铺设 42 号道岔的理论研究与工程应用[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(10): 37.
- LIU Wei, LIU Chunming. Theoretical study and engineering application of laying No. 42 turnout on a 12‰ ramp [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(10): 37.
- [8] 张荣鹤. 高速铁路大坡道上 18 号和 42 号有砟道岔受力分析[J]. *山西建筑*, 2020, 46(23): 119.
- ZHANG Ronghe. Stress analysis of laying No. 18 and No. 42 ballasted turnout on large ramp of high-speed railway [J]. *Shanxi Architecture*, 2020, 46(23): 119.
- 收稿日期:2022-02-26 修回日期:2022-03-29 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-26 Revised:2022-03-29 Published:2024-07-10
· 第一作者:王天,高级工程师,693335166@qq.com
通信作者:徐井芒,教授,mang080887@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license