

# 城市轨道交通振动噪声治理技术研究综述

王 谊<sup>1</sup> 何华凤<sup>2\*</sup> 徐 赞<sup>1</sup>

(1. 中铁开发投资集团有限公司, 650220, 昆明; 2. 昆明理工大学交通工程学院, 650106, 昆明//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 随着我国城镇化的快速发展及城市人口的快速增长,各大城市大力发展轨道交通。在城市轨道交通给市民带来交通便利的同时,列车在高速运行过程中产生的振动与噪声也严重影响了市民的日常生活,振动噪声治理技术亟待提高。从轨道交通振动噪声的成因、振动噪声治理方法等方面,全面总结近几年振动噪声治理技术的研究成果,重点阐述城市轨道交通振动噪声常用的治理方法,并对每种方法的减振降噪效果和优缺点进行对比分析。提出在对振动噪声进行治理时,要综合考虑多方面的因素,以求达到治理效果最好、成本最低。

**关键词** 城市轨道交通; 振动; 噪声; 减振降噪

**中图分类号** TB533+.2:U231

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.06.041

## Research Review on Urban Rail Transit Vibration Noise Treatment Technology

WANG Yi, HE Huafeng, XU Zan

**Abstract** With the rapid development of urbanization and the rapid growth of urban population in China, rail transit have been vigorously developed in major cities. While urban rail transit brings convenience to citizens, the vibration and noise generated by trains during high-speed operation also seriously affect daily life. The improvement of vibration noise control technology is urgent. From aspects such as causes and treatment measures of rail transit vibration and noise, the research results of vibration and noise control technology from recent years are summarized, the common control methods of urban rail transit vibration and noise are expounded, and the effects, advantages and disadvantages of each method are analyzed. It is proposed to consider many factors of various aspects comprehensively in vibration and noise control to achieve the best effect and the lowest cost.

**Key words** urban rail transit; vibration; noise; vibration and noise reduction

**First-author's address** China Railway Development Investment Group Co., Ltd., 650220, Kunming, China

随着城市规模的不断扩大,城市交通状况日益恶劣,居民对公共交通的需求越来越强烈。城市轨道交通虽然为人们出行提供了便利,但列车在高速运行过程中产生的振动噪声危害也不可忽视。如果城市轨道交通线路在居民区、建筑物的附近或从建筑物下方穿过,当列车运行时传来的振动频率和建筑物自身的振动频率相接近时,振动对建筑物的危害尤其明显,对建筑物中的精密仪器也会产生很大的危害。因此,很有必要对轨道交通的振动与噪声进行系统研究,提出切实可行的解决方法,降低轨道交通振动与噪声。

近几年,国内外许多学者对轨道交通的振动噪声进行了大量研究,但是缺乏总结性的文献综述,本文将从轨道交通振动噪声的成因、振动噪声评价准则、振动噪声治理方法等方面,全面总结近几年的研究成果,为未来轨道交通的振动噪声治理技术研究指明方向。

## 1 城市轨道交通振动噪声成因

列车运行过程中产生的振动与噪声密切相关,振动产生的主要原因是轮轨间的相互动力影响,而产生的振动通过钢轨、连接扣件以及道床等结构传向地面,导致了周围区域和建筑物的振动,形成“二次结构噪声”。轨道交通噪声主要包括轮轨噪声、设备噪声、空气发动机噪声、结构噪声等。各种噪声均受列车运行状态和轨道设备状态的影响。对振动噪声影响较大的因素是轮轨的接触状态,所以当车轮和钢轨出现病变或者钢轨焊接接头不平顺时,都会带来较严重的振动与噪声。除此之外,列车上各种设施设备的使用也会产生一定的振动和噪声,例如牵引电机、通风机、压缩机等。

除了以上传统的轨道交通振动噪声的来源以外,一些研究还发现<sup>[1]</sup>,用于降低轨道交通噪声的

\* 通信作者

声屏障也会引起振动噪声。在列车经过时,声屏障对高频噪声具有很好的降噪作用,但会使低频结构的噪声增大,原因是车致作用导致声屏障自身的横向振动,进而向外辐射噪声。

## 2 减振降噪治理技术

### 2.1 振动治理技术

城市轨道交通减振措施可以从钢轨、道床、扣件连接和轨枕间距四个方面进行振动治理。

#### 2.1.1 钢轨类减振措施

钢轨类减振措施一般包括钢轨打磨、重型钢轨和无缝线路以及弹性阻尼。钢轨打磨能够缓解钢轨表面的不平顺、车轮凹陷以及多边形磨耗等现象,从而降低列车运行时轨道结构的振幅和线路附近的振动加速度,若结合降速措施,则能够更好地降低振动噪声对建筑物内的影响。钢轨打磨措施不仅被运用在线路运营的中后期,也可在新线开通之前对钢轨进行预防性打磨,能够缓解钢轨的不平顺状态,延长钢轨的使用寿命,降低后期对钢轨进行维修而产生的成本。

重型钢轨有较大的质量和垂向刚度,能够提升钢轨的抗弯强度,在一定程度上减少列车冲击带来的影响,进而降低钢轨的振动频率、振动强度以及钢轨振动时辐射的噪声;而无缝线路没有钢轨接头,轨道平顺性较好,能够很好地降低轮轨冲击力,减少列车运行时的阻力,从而达到减振的效果。

阻尼材料的运用能够将列车运行过程中产生的振动能量转化为耗散在空气中的热能,是城市轨道交通减振降噪的有效材料。文献[2]从阻尼材料的厚度可控和性价比出发,研究发现阻尼材料应用在普通减振地段和中等减振地段更能体现其价值。

#### 2.1.2 道床类减振措施

道床类减振措施包括梯形轨枕道床和浮置板道床,浮置板道床又包括橡胶浮置板道床和钢弹簧浮置板道床。

梯形轨枕道床能够增大轨道的抗弯刚度,使轮轨力的分布范围扩大,还能改善轮轨动力性能,起到主动隔振的作用。文献[3]发现,梯形轨枕对高频段噪声的抑制效果更明显,能够达到 10 dB 的减振效果,属于高等级的减振措施。虽然梯形轨枕有很明显的减振效果,但其自身也会产生振动,针对这个问题,文献[4]提出了一种应用于梯形轨道的抑振调频装置,该装置能够抑制梯形轨枕的自身

振动,且能明显降低轨道基础的振动。

橡胶支承式浮置板道床的减振原理是在轨道与下部基础之间设置橡胶隔振垫,列车运行时产生的振动传递到减振垫时,减振垫利用其弹性吸收一部分振动,从而达到减振的目的。研究表明<sup>[5]</sup>,与普通道床相比,橡胶浮置板道床对中高频率段的振动具有很好的控制效果,且其在使用较长年限(20 年)以后还能保持良好的状态,具备正常服役的条件。

钢弹簧浮置板是将混凝土道床浮置于带有螺旋钢弹簧和粘滞阻尼的钢弹簧隔振器上,粘滞阻尼的存在使钢弹簧的弹性更高,在加强系统安全性的同时吸收一部分噪声。在浮置板和路基之间采用螺旋弹簧的支承结构,列车运行引起的振动经螺旋弹簧再传到路基上,以此来达到减振的目的。钢弹簧浮置板的固有频率约 5 ~ 7 Hz,比普通结构形式轨道的固有频率更低,因此能够更好地减小振动,减振效果约为 25 ~ 40 dB。

在众多的轨道减振措施中,钢弹簧浮置板的减振效果是最好的,可应用于减振要求较严格的线路区段,但这仅仅是对于中高频率段的振动来说,在低频振动范围内,钢弹簧浮置板的减振效果并不明显,不仅如此,浮置板振动作用还会引起 10 Hz 左右处的振动放大。针对低频振动的控制,大量学者展开了研究<sup>[6-9]</sup>,提出了能够抑制低频振动的措施,如使用新型隔振器:GQZS(通用型准零刚度隔振器),应用了 TVMD(调谐黏滞质量阻尼器)系统、TID(调谐惯容阻尼器)和新型 VAT(振动衰减轨道)的钢弹簧浮置板隔振器。新型隔振器的使用既能保持钢弹簧浮置板轨道原来的减振效果,又能更好地抑制低频振动。

#### 2.1.3 扣件类减振措施

扣件把钢轨和轨下基础牢固连结在一起,能够缓解列车经过时引起的振动。经过长时间的发展,扣件的减振效果也在不断提升。目前我国采用的扣件类型主要有:WJ 型系列扣件、DT 系列扣件、科隆蛋(剪切型轨道减振扣件)、双层非线性扣件(GJ-III 型扣件)、先锋扣件(Vanguard)。

WJ 型系列扣件是目前我国高速铁路无砟轨道的主要钢轨固定件,随着铁路运输技术的发展和列车运行速度的提高,现在应用较多的是 WJ-7 和 WJ-8 型扣件。WJ-7 型扣件系统适用于各类无挡肩结构无砟轨道,WJ-8 型扣件系统适用于有挡肩结构无砟轨道。

DT 型系列扣件,是为城市轨道交通地下线路专门设计的扣件,有 DT-I、DT-II、DT-III、DT-IV、DT-VI、DT-VII 等型号,使用较广泛的是 DT-III 型扣件,主要用于运输量大的地段,其减振作用主要是靠安装在钢轨和铁垫板下的绝缘橡胶垫来完成。

科隆蛋扣件的承轨板与底座之间用减振橡胶硫化粘结在一起,利用橡胶圈的剪切变形来获得更低的竖向刚度,进而消耗轮轨振动能量,并将轮轨冲击能量与轨枕或轨道板隔开,起到减振隔振的效果。若扣件采用较好的橡胶圈,其减振效果可到达 25 dB,在高频振动段的减振效果尤为显著,比 DT-III 减少了 10~20 dB,一般在减振要求较高的地段使用。但随着时间的延长,橡胶受到长时间的挤压而产生形变,并且受到与金属件之间的摩擦力,容易出现疲劳损坏。当橡胶出现疲劳损坏后,需要对其进行更换,由于其整体硫化的机构,整体更换的成本较高,所以近些年科隆蛋扣件逐渐被减振性能相当且综合成本更低的 GJ-III 型扣件取代。

GJ-III 型扣件设计了双层非线性弹性垫板,弹性垫板采用了优质橡胶制作,能够降低系统的刚度和提高阻尼,当列车通过时,弹性垫板会发生压缩变形,缓解了一部分振动,从而达到较好的减振效果。与传统的减振扣件相比,GJ-III 型扣件的减振效果可达 8~10 dB(A) 左右,能有效控制钢轨波磨的发展。

先锋扣件(Vanguard)系统有两种基本的型式——嵌入型和底板型,两种型式均具有很低的刚度,都能达到较高的减振效果。嵌入型先锋扣件适合新建线路使用,底板型先锋扣件适合既有地铁线路改造使用,与传统扣件紧扣钢轨轨脚不同,先锋扣件是紧扣钢轨轨腰,使钢轨处于悬空状态,这种悬空状态使扣件具有较小的动态刚度。文献[10]对先锋扣件的减振作用进行了研究,发现应用该扣件在列车通过时可允许轨道有较大的垂直变形,同时能够抑制钢轨轨头的外翻变形,从而达到较高的减振效果,其减振效果可高达 15 dB,适用于高等减振要求地段。

#### 2.1.4 轨枕类减振措施

弹性轨枕分为弹性短轨枕和弹性长轨枕,弹性短轨枕的减振原理是在短轨枕下设一层橡胶垫板,再利用橡胶套靴把短轨枕和橡胶垫板包裹起来,三层橡胶垫板使轨道结构具有较高的弹性,从而达到减振的目的。弹性短轨枕具有结构简单、施工相对

容易、成本较低、良好的绝缘性和耐磨性等优点,但在既有的弹性短轨枕轨道结构中,弹性短轨枕下部是埋入道床的,属于全包式,自重较大,排水困难,导致弹性垫板和橡胶垫加速老化。弹性长轨枕由钢轨、扣件系统、弹性长枕组成,利用置于轨枕之下、橡胶套靴之上的弹性垫层把长轨枕和道床分开,当列车通过时,弹性垫层能起到缓冲的作用,从而达到减振的效果。弹性长轨枕的长枕结构设计有利于提高轨枕抗扭转的能力,所采用的特殊预应力混凝土轨枕能够保持轨距不发生较大变化,橡胶套靴能够使箱内积累的雨水更好地排出,在一定程度上弥补了弹性短轨枕的缺点,目前我国北京和上海的轨道交通线路中都有使用弹性长轨枕。

### 2.2 噪声治理技术

根据噪声的产生和传播情况,城市轨道交通降噪治理可以通过从声源处控制噪声的产生、从噪声的传播途径控制噪声的扩散以及对受声点进行保护等三个方面进行。

#### 2.2.1 从声源处控制噪声

噪声的产生离不开振动,所以从声源处控制噪声自然离不开对振动的控制,减少振动的方法主要是降低轮轨系统产生的振动噪声。城市轨道交通噪声来源除了轮轨噪声以外,还有牵引电机和设施设备噪声,所以从声源处控制噪声还可以从减少牵引电机和设施设备噪声考虑。随着科学技术的发展,越来越多的低噪声设备被优化,比如改进电机的风扇设计,使叶片错落分布,防止不同叶片产生相同频率的噪声,另外,还可以控制风扇扇叶的大小,较小的风扇扇叶外径有利于控制噪声;罗茨鼓风机采用渐阔结构,降低了回流冲击的强度,削减了回流所产生的气动噪声,控制了鼓风机产生的噪声。

#### 2.2.2 从传播途径控制噪声

通过阻断噪声在空气中的传播也可以降低噪声。可采取设置屏障的办法,其原理就是阻挡声音的传播,并将大部分的声音反射,只有小部分的聲音被衍射,从而达到降噪的效果。主要措施包括在列车车轮两侧设置隔声罩,在列车运行轨道旁设置声屏障、建设绿化通道等。车轮两侧隔声罩采用隔音和吸音材料相结合,能够对噪声起到阻隔作用,减少一次噪声向外辐射的量,增加噪声在车底空间的发射次数和吸收次数,从而达到阻断或减少噪声向外传播。

在轨道旁设置声屏障是很多国家采用的一种

降噪措施,通常将其放在铁路旁边的住宅建筑物的侧面。声屏障能够阻挡直射声、隔离透射声、削弱衍射声和减少声绕射,所以声屏障的设置能够很大程度上阻止噪声的传播,从而达到降低噪声的目的。目前常见的声屏障主要有敞开式声屏障和全影型声屏障,在实际应用中,要根据沿线敏感建筑物的形式和地形等确定选用何种声屏障能够达到最大效益。

对轨道两侧进行绿化也可以降低城市轨道交通产生的噪声,包括树木绿化和地面绿化。绿色植物之所以能够起到降噪的作用,是因为其可以阻挡、散射声波,树干可以阻挡声波的传播,枝叶表面的气孔、绒毛能够吸收噪声;生长茂盛的草坪中,草的叶面积相当于它所占面积的19倍左右,茂密的叶片能够吸收和阻碍噪声的传播,减少噪声的危害。

### 2.2.3 对受声点进行保护

受噪声影响的物体可以通过改变自身来降低噪声的危害。比如受到高架桥线路影响的居民住宅,可以在建筑物表面涂抹吸音材料,从而减少噪声对居民的损害。吸音材料除了可以降低噪声以外,还有很多优点,比如耐高温、耐腐蚀、强度高、防水、防火等,对于保护建筑物能起到很大的作用;另外,其颜色多样,除了保护建筑物,还能够起到装饰的作用。安装隔声窗,阻断一部分噪声传播到室内也能减少噪声的危害。调整建筑物功能和布局,使噪声敏感点距离轨道线路更远,减小轨道交通噪声对敏感点的影响,达到降噪的效果。

## 3 结语

城市轨道交通给人们出行带来巨大方便的同时,也给城市带来了很严重的振动噪声污染。本文归纳总结了城市轨道交通振动噪声的来源,对我国城市轨道交通中减少振动和降低噪声的方法进行了分类介绍。在减少振动方面,主要从钢轨类、道床类、扣件连接类和轨枕间距类等四个方面对减振措施进行分类,介绍各类措施的减振原理和减振效果;在降低噪声方面,按照从声源处控制噪声的产生、从噪声的传播途径控制噪声的扩散以及对受声点进行保护等三个方面对降噪的方法进行了简要介绍。在现有的减振降噪措施中,多偏向于对高频率的振动噪声进行治理,而对于低频率的振动噪声的治理关注较少。随着城市居民对居住环境的要求不断提高,低频振动噪声的问题也亟待解决,因

此未来城市轨道交通振动噪声的治理技术需要全面发展,既要治理高频率的振动噪声,也不能忽视了低频率的振动噪声。

## 参考文献

- [1] 张小安,翟婉明,石广田,等.城市轨道交通直壁式声屏障车致振动噪声研究[J].兰州交通大学学报,2019,38(1):78.  
ZHANG Xiaohan, ZHAI Wanming, SHI Guangtian, et al. Structure noise of straight-wall noise barrier in urban rail transit[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019, 38(1): 78.
- [2] 袁月生,吕平,李向东,等.轨道交通减振降噪措施概述[J].高速铁路技术,2018,9(6):80.  
YUAN Yuesheng, LYU Ping, LI Xiangdong, et al. Overview of vibration and noise control measures for rail transit[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 80.
- [3] 江楠.梯形轨枕作为高等级轨道减振措施的应用性分析[J].绿色科技,2022,24(16):269.  
JIANG Nan. Application analysis of ladder track as vibration reduction measure for high grade track[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(16): 269.
- [4] 和振兴,王玉魁,白彦博,等.梯形减振轨道抑振调频装置及布置方式研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(12):3625.  
HE Zhenxing, WANG Yukui, BAI Yanbo, et al. Ladder track system suppression frequency modulation device and installation method research[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3625.
- [5] 李秋义,罗伟,朱彬,等.广州地铁1号线橡胶浮置板道床服役性能评估[J].铁道标准设计,2021,65(12):7.  
LI Qiuyi, LUO Wei, ZHU Bin, et al. Service performance evaluation of rubber floating slab track for Guangzhou Metro line 1[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(12): 7.
- [6] WANG L, ZHAO Y, SANG T, et al. Ultra-low frequency vibration control of urban rail transit: the general quasi-zero-stiffness vibration isolator[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(5): 1788.
- [7] 韦玮.基于调谐黏滞质量阻尼器的浮置板轨道低频振动控制研究[D].成都:西南交通大学,2021.  
WEI Wei. Research on low frequency vibration control of floating slab track based on tuned viscous mass damper[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [8] 盛曦,曾会柯,石灿,等.TID隔振器浮置板轨道低频减振特性研究[J].工程力学,2023,40(5):49.  
SHENG Xi, ZENG Huike, SHI Can, et al. Study on low-frequency vibration mitigation characteristics of TID-vibration-isolator floating slab track[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 49.

(下转第224页)

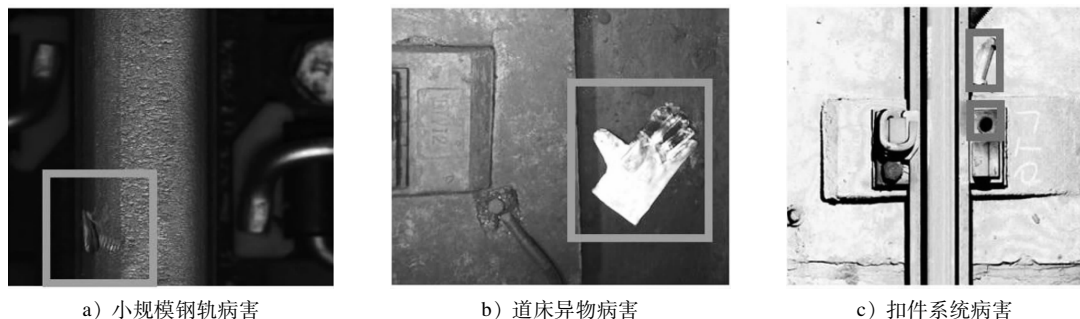


图5 综合巡检机器人病害检测结果

Fig. 5 Defect detection results of comprehensive inspection robot

的预测计算,使用体验优于传统纸质-电子化病害管理系统。因此,智能化检测装备的应用和工务智慧运维体系的建立可大幅提升城市轨道交通工务设施检修维护的质量和效率,达到降本增效的目的。

#### 4 结语

本文介绍了一种应用于城市轨道交通工务每日巡检的智能综合巡检机器人。使用编码器、百米标、机器视觉和激光指示实现了病害实时报警与数字化管理。随着巡检工作对病害数据的积累与分析,工务巡检所需人次预计将由全年 1 600 人次降低至 800 人次;依靠数字化病害管理系统实现城市轨道交通基础设施全寿命周期的智能化病害管理,将工务运维由传统“有病医病”的被动模式进化为“预测性”维修的主动模式,助力智慧工务运维体系和数字化城市的建设。在智能综合巡检机器人逐步投入使用的过程中,将通过积累历次巡检数据和增广人工样本两种途径实现样本多样性,确保病害识别的鲁棒性。此外,该机器人目前未集成衬砌层检测模块,后续可依靠模块化设计集成隧道衬砌机器视觉、断面激光扫描、空气耦合雷达等检测技术,进一步完善该机器人的智能综合巡检设计,实现工务巡检内容的全覆盖。

#### 参考文献

[1] 维科网. 2022 中国智能巡检机器人行业发展研究白皮书[EB/

OL]. (2022-06-15) [2022-08-20]. www.ofweek.com.

Ofweek. White paper on the development of China's intelligent inspection robot industry 2022 [EB/OL]. (2022-06-15) [2022-08-20]. www.ofweek.com.

[2] HUANG H, LI Q, ZHANG D. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77 (3): 166.

[3] WU Y, QIN Y, QIAN Y, et al. Hybrid deep learning architecture for rail surface segmentation and surface defect detection [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37 (2): 227.

[4] GIBERT X, PATEL V, CHELLAPPA R. Robust fastener detection for autonomous visual railway track inspection [J]. IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2015, 98 (2): 694.

[5] 田新宇,魏世斌,赵延峰,等. 城市轨道交通基础设施综合检测列车创新技术[J]. 现代城市轨道交通,2019(8):32.

TIAN Xinyu, WEI Shibin, ZHAO Yanfeng, et al. Innovative technology of comprehensive inspection train for urban rail transit infrastructure [J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(8):32.

[6] TAREEN S, SALEEM Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK [J]. International Conference on Computing, Mathematics, and Engineering Technologies, 2018, 3:1.

[7] ZHANG Z. Iterative point matching for registration for free-form curves and surface [J]. International Journal of Computer Vision, 1994,10(13):129.

(收稿日期:2022-09-30)

(上接第 219 页)

[9] ZHU S, WANG J, CAI C, et al. Development of a vibration attenuation track at low frequencies for urban rail transit [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32 (9): 713.

[10] 郭春华. 地铁运营线路既有弹性短轨枕扣件地段更换 Vanguard (先锋) 扣件施工工艺 [J]. 科技传播, 2013, 5

(4): 135.

GUO Chunhua. Construction technology of replacing vanguard fasteners in existing elastic short sleeper fasteners section of subway operation line [J]. Public Communication of Science & Technology, 2013, 5(4): 135.

(收稿日期:2022-12-12)