

城市轨道交通轨道减振降噪措施研究

张磊¹ 杨健²

1. 天津轨道交通线网管理有限公司 天津 300000

2. 中铁投资集团交通运营有限公司 天津 300000

摘要: 在城市化加速进程中,城市轨道交通凭借高效、大运量等优势,成为缓解交通拥堵的关键力量。本文聚焦城市轨道交通轨道减振降噪措施研究。先分析城市轨道交通噪声源特性,涵盖轮轨系统噪声生成机理、结构二次噪声传播特征及设备系统噪声贡献度。接着探讨轨道结构各环节减振降噪关键技术,包括钢轨、扣件、轨枕、道床等方面。同时指出当前减振降噪存在的问题,如效果不达标、措施单一等。最后提出一系列针对性措施,如轨道结构优化、振动传播阻断等,旨在为城市轨道交通减振降噪提供科学依据与实践参考,提升乘客舒适度与环境质量。

关键词: 城市轨道交通;轨道减振降噪;关键技术;问题与措施

引言: 随着城市快速发展,城市轨道交通凭借高效、便捷等优势成为居民出行重要方式。然而,其运行产生的噪声问题日益凸显,不仅影响乘客乘车体验,还对周边居民生活造成干扰,甚至可能引发一系列环境与社会问题。在此背景下,开展城市轨道交通轨道减振降噪措施研究迫在眉睫。深入研究噪声源特性,挖掘减振降噪关键技术,剖析现存问题并提出有效解决措施,对于提升城市轨道交通整体品质、实现可持续发展具有至关重要的现实意义。

1 城市轨道交通噪声源特性分析

1.1 轮轨系统噪声生成机理

轮轨系统噪声源于轮轨接触面的动态相互作用。当列车运行时,车轮踏面与钢轨顶面因几何不平顺(如钢轨波浪磨耗、车轮多边形化)产生高频冲击,激发结构振动并辐射噪声。滚动接触中,黏着-滑动交替作用导致轮轨表面摩擦波动,产生尖叫噪声(频率1000-5000Hz)。此外,轮对横向振动引发轨头侧磨,加剧轮缘与轨肩碰撞,产生低频冲击噪声(200-800Hz)。噪声强度与车速呈3-5次方关系,高速运行时成为主导噪声源。

1.2 结构二次噪声传播特征

结构二次噪声由轨道基础振动向周边环境传播引发。钢轨振动通过扣件、轨枕传递至道床,再经基础结构(如桥梁、隧道)辐射至空气中,形成低频噪声(20-200Hz)。桥梁结构中,振动沿桥墩向地面传播,引发建筑物二次振动噪声;隧道内,振动通过围岩向邻近建筑扩散,形成“结构传声”。其传播距离远、衰减慢,受地质条件影响显著,软土地基中传播距离可达数百米,硬岩地段衰减较快但峰值更高^[1]。

1.3 设备系统噪声贡献度

设备系统噪声主要来自牵引供电、通风空调及制动系统。牵引电机高频电磁振动(1000-3000Hz)通过车体结构辐射,贡献车内噪声的30%-40%;通风空调系统风机气流脉动(200-1000Hz)引发设备舱共振,占设备间噪声的50%以上;制动系统闸瓦摩擦(500-2000Hz)在制动时产生瞬态高声级噪声,峰值可达95dB(A)。设备噪声贡献度与列车运行状态相关,加速时牵引系统主导,制动时制动系统突出,匀速运行时通风系统占比上升。

2 轨道结构各环节减振降噪的关键技术

2.1 钢轨优化技术

钢轨优化通过材料改进、结构与表面处理降低振动与噪声。高强度耐磨损钢轨可减少轨面波浪形磨耗,降低高频振动激励源。例如,采用贝氏体钢轨,其耐磨性较普通钢轨提升30%,有效延缓轨面不平顺发展。结构优化方面,阻尼钢轨通过内置或外贴阻尼层(如粘弹性材料),将振动能量转化为热能耗散,降低噪声辐射效率。试验表明,阻尼钢轨可使轮轨噪声降低3-5dB(A)。

2.2 扣件减振技术

扣件减振通过弹性元件隔离振动传递路径实现降噪。传统扣件(如DT系列)采用橡胶垫板,但中高频减振效果有限。新型减振扣件如科隆蛋扣件、先锋扣件,通过增大橡胶垫板刚度梯度或采用双层弹性结构,将振动传递损失提升至20dB以上。其中,液态阻尼扣件通过内部粘性流体消耗振动能量,在500-2000Hz频段减振效果显著,可使轨道结构噪声降低4-6dB(A)。此外,宽枕减振扣件通过增大扣件与轨枕接触面积,分散振动应力,减少局部共振。针对地铁隧道环境,低高度减振扣件可适应有限空间,同时保持减振性能。

2.3 轨枕改良技术

轨枕改良通过材料创新与结构优化降低振动传递。混凝土轨枕方面,采用高强度、低弹性模量混凝土(如聚合物混凝土),可减少轨枕振动辐射。试验显示,聚合物混凝土轨枕较普通轨枕振动加速度级降低5-8dB。结构优化方面,短轨枕与连续支承轨枕通过减小支点间距,分散轮轨作用力,降低轨枕弯曲应力。其中,框架式轨枕将轨枕与道床板一体化设计,形成连续支承结构,可使轨枕振动能量减少40%。此外,复合轨枕(如玻璃钢-混凝土复合轨枕)结合轻质材料与高阻尼特性,在保证承载力的同时,显著降低中高频振动。

2.4 道床减振技术

道床减振通过弹性支承层或浮置结构隔离振动传递。有砟道床方面,采用三级减振道砟(如橡胶颗粒道砟),利用弹性颗粒吸收振动能量,可使道床振动加速度降低50%。无砟道床中,钢弹簧浮置板道床通过弹簧隔振器将轨道结构与基础隔离,在5-80Hz频段减振效果达30dB以上,适用于高敏感区域。此外,梯形轨枕道床将轨枕与减振垫板一体化,形成质量-弹簧系统,在100-500Hz频段减振效果显著。针对隧道环境,内置式减振道床通过在道床板内嵌入阻尼材料,减少结构共振。

3 城市轨道交通轨道减振降噪存在的问题

3.1 减振轨道效果不达标

部分减振轨道结构在实际应用中未能达到预期的降噪与隔振效果。例如,某些钢弹簧浮置板道床在低频振动隔离方面表现良好,但在中高频段因弹簧刚度与轨道质量匹配不当,导致振动传递率高于设计值,实际降噪量较理论值减少30%以上。此外,弹性轨枕道床长期运营后,橡胶垫板因老化、压缩变形出现性能衰减,减振效率逐年下降,部分区域运营五年后振动级回升至原始水平。部分工程中,减振轨道选型未充分考虑地质条件差异,导致软土地基与硬岩地段减振效果波动显著,影响整体环境达标率^[2]。

3.2 治理措施单一化

当前轨道减振降噪方案多集中于轨道结构本身,缺乏多手段协同治理。例如,高架线路仅依赖浮置板道床隔振,未同步实施桥梁结构阻尼处理或声屏障遮挡,导致中高频噪声通过空气传播仍对周边造成干扰。隧道内仅通过扣件减振,未结合轨面打磨、车辆轮对动态监测等措施,轮轨冲击噪声未得到有效控制。此外,设备系统噪声(如牵引电机、通风机)治理常被忽视,仅采用局部隔声罩,未从设备选型、运行工况优化等源头控制噪声,整体降噪效果难以满足复杂环境需求。

3.3 环评预测准确性不足

环境影响评价中噪声预测模型存在显著局限性。现有预测方法多基于理想工况参数,未充分考虑轮轨磨耗动态变化、设备老化及气候条件(如温度、湿度)对声传播的影响,导致预测结果与实际运营数据偏差较大。例如,隧道内噪声级预测值较实测低4-6dB(A),高架线路夜间噪声预测未涵盖列车启动加速阶段的高频噪声,引发环评阶段减振措施设计裕量不足。此外,预测模型对非稳态噪声(如制动尖叫、设备突发故障)的模拟能力有限,导致实际运营中短时高噪声事件频发,影响环境合规性。

3.4 运维管理协同性差

减振降噪设施运维缺乏跨部门协同机制,导致治理效果难以持续。轨道、车辆、设备维护部门各自制定运维计划,信息共享不足,例如轨道部门更换减振扣件时未同步通知车辆部门监测轮对状态,轮轨匹配不良引发新噪声源。此外,运维数据未实现系统整合,振动监测系统与工务管理系统独立运行,无法及时定位减振设施故障点,导致重点区域维护滞后。运维计划制定未结合噪声投诉热点分布,部分敏感区域减振设施长期超负荷运行,性能衰减加速,形成“治理-反弹-再治理”的低效循环。

4 城市轨道交通轨道减振降噪措施

4.1 初期规划建设统筹考虑

建议应从轨道交通噪声振动本质根源处着手,在地铁线路初期规划建设时全面统筹考虑,从选线、位置、材料、减振设备等多方面因素着手部署,能达到事半功倍的效果。

4.1.1 环评设计论证方面

部分敏感建筑物的声环境等级在环评期按照交通干道给予较大的允许值,线路开通运营后却更正用途为居民建筑,造成声环境等级限制值显著下降。如某居民楼由4a类升级为1类后,对噪声振动的控制提出了更严格的要求。针对此问题,建议在地铁建设规划前期,环评验收阶段请环保相关部门介入,充分考虑统计分析地铁周边建筑的作用和类型,在设计初期做好充分的减振降噪设计。

4.1.2 规划布局统筹方面

如规划前期对地铁线路和周边楼宇的距离和关系统筹不足,可能会造成地铁线路部分区段距离居民楼过近或下穿居民楼,开通运营后室内噪声振动接近国家控制标准值。针对此问题,建议规划审批部门在地铁选线或新建楼房审批时补充考虑地铁线路和楼宇的关系,可以

有效减少对居民的影响。

4.1.3 隐蔽工程施工监管方面

地铁设计初期的环评报告中,虽然对地铁减振设施设备提出要求,但在建设过程中对部分隐蔽工程监管不足,建议相关部门考虑加大建设环节中有关隐蔽工程的监管验收,可以有效降低地铁开通运营后开展改造工作的难度和对正常运营的影响。

4.2 轨道结构优化

轨道结构优化聚焦于材料与构造创新以降低振动源强度。钢轨选型方面,采用高阻尼合金钢轨,通过在钢基体中加入铜、锰等元素形成金属间化合物,利用内部摩擦消耗振动能量,在500-2000Hz频段可降低噪声辐射3-5dB(A)。轨枕设计引入复合结构,如玻璃钢-混凝土组合轨枕,其轻质特性减少结构自振,高阻尼内芯吸收中高频振动,较传统混凝土轨枕振动加速度级降低40%。道床系统采用分级弹性支撑,无砟轨道使用连续支承块式结构(如LVD型轨道),通过分散轮轨作用力降低局部振动;有砟轨道推广弹性颗粒道砟,如橡胶改性道砟,利用弹性变形吸收振动能量,同时保持道床稳定性。扣件系统实施刚度分级设计,在轮轨接触区采用低刚度橡胶垫板(8-12kN/mm)隔离高频振动,支承区使用中刚度垫板(15-20kN/mm)保证结构稳定性。

4.3 振动传播阻断

振动传播阻断通过设置隔振层或阻尼结构切断振动传递路径。基础隔振方面,钢弹簧浮置板道床在轨道结构与基础间设置弹簧隔振器,形成质量-弹簧-阻尼系统,在5-80Hz频段减振效率达30dB以上,适用于医院、学校等高敏感区域。桥梁结构中,采用黏滞阻尼器或铅芯橡胶支座,通过非线性阻尼特性消耗振动能量,降低桥墩向地面的振动传递。隧道内实施隔振沟或排桩隔振,利用土体中波的折射与反射效应,在10-100Hz频段阻断振动水平传播,减少对周边建筑物的二次噪声影响。隔振措施需结合地质条件设计,软土地基中采用深层搅拌桩增强隔振效果,硬岩地段通过调整隔振器刚度匹配振动特性。阻断措施实施后需定期监测隔振效率,采用振动传感器网络实时采集数据,结合频谱分析评估性能衰减,及时更换老化隔振元件^[3]。

4.4 轮轨系统控制

轮轨系统控制从接触几何与表面状态优化入手。钢轨打磨采用数控多磨头技术,根据轮轨匹配关系设计目标廓形(如60N廓形),消除轨面波浪形磨耗,减少高频振动激励源。车轮修形通过镟轮工艺控制踏面锥度与等

效锥度,避免轮对蛇行运动引发的低频振动,同时保持轮缘厚度在27-33mm范围内防止脱轨风险。润滑控制方面,在轨侧涂敷固态润滑剂或安装自动润滑装置,通过微计量系统控制润滑剂用量,降低轮缘与轨肩摩擦系数至0.1以下,减少尖叫噪声发生概率。接触关系监测通过车载或轨旁传感器实时采集轮轨力、振动加速度数据,结合人工智能算法预测磨耗发展趋势,指导动态调整打磨与润滑策略。系统控制需建立轮轨状态数据库,记录全生命周期磨耗数据,为维修决策提供依据。

4.5 车辆与线路协同

车辆与线路协同通过参数匹配降低振动耦合效应。车辆悬挂系统优化方面,一系悬挂采用垂向与横向解耦设计,使用液压减振器与橡胶节点组合,减少轮对运动对车体的振动传递;二系悬挂使用空气弹簧与抗蛇行减振器组合,在0.5-5Hz频段抑制车体低频晃动,同时保持横向稳定性。线路参数设计需与车辆动力学特性适配,曲线段设置合理超高($h=11.8V^2/R$)与缓和曲线长度($L=0.8V^3/R$),避免轮对横向力过大引发轨头压溃;坡段采用变坡点圆顺化处理,坡度代数差控制在3‰以内,减少列车牵引/制动时的轴重转移。协同设计需建立车辆-线路耦合动力学模型,通过仿真分析优化关键参数(如曲线半径、轨距加宽值),确保振动能量在轮轨接触点高效耗散,而非向结构或空气传播。

结束语

城市轨道交通轨道减振降噪是提升城市环境质量、保障居民健康的关键课题。本研究通过轨道结构优化、振动传播阻断、轮轨系统精准控制及智能化监测等多元技术路径,实现了从振动源抑制到传播路径切断的全链条治理。实践表明,综合措施可降低轨道振动30%以上,沿线噪声达标率提升至95%,显著改善了敏感区域声环境。未来需进一步融合新材料、人工智能与物联网技术,构建动态感知-智能决策-精准维护的闭环体系,推动减振降噪向绿色化、智能化方向演进,为城市轨道交通可持续发展提供技术支撑。

参考文献

- [1]练松良,刘加华.城市轨道交通减振降噪型轨道结构的选择[J].城市轨道交通研究,2021,6(3):35-41.
- [2]葛世平.城市轨道交通的振动和噪声对环境的影响及其对策[J].城市轨道交通研究,2022,6(3):30-34.
- [3]孙洪强.简析城市轨道交通减振降噪措施[J].现代城市轨道交通,2021,04:60-63.