

Study on Comprehensive Strategy of Vibration and Noise Reduction in Elevated Section of Metropolitan (Suburban) Railway

Peisheng Zhang

Sichuan Chengde Rail Transit Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610031, China

Abstract

Against the backdrop of China's ongoing urbanization, suburban railways have entered a phase of rapid development as vital transportation links connecting urban centers with surrounding towns and satellite cities. Elevated laying methods, characterized by minimal land occupation, cost-effectiveness, and flexible routing, have gained widespread adoption. However, vibration and noise pollution generated by train operations on elevated lines have become increasingly prominent, posing significant challenges to route planning, construction, and operation while adversely affecting residents' quality of life and social harmony. This study systematically analyzes the mechanisms, propagation characteristics, and environmental impacts of vibration and noise in suburban railway elevated lines. Adopting a comprehensive governance approach focusing on "source control, transmission path interruption, and protected point protection," it explores multi-level strategies for vibration and noise reduction. These include vehicle technology optimization, track structure innovation, bridge design improvements, application of sound barriers and soundproof windows, as well as planning and management measures. The research establishes a multi-tiered, end-to-end technical system for vibration and noise reduction, providing technologically advanced and economically viable solutions to support the green, low-carbon, and high-quality development of suburban railways.

Keywords

suburban railway; elevated section; vibration reduction; noise reduction; vibration transmission; environmental governance; comprehensive strategy

市域(郊)铁路高架区间减振降噪综合策略研究

张培胜

四川成德轨道交通有限公司, 中国·四川成都 610031

摘要

在我国城市化进程持续推进的背景下, 市域(郊)铁路作为连接城市中心与周边城镇和卫星城的重要交通纽带, 已进入快速发展阶段。其中, 高架敷设方式以其占地少、投资相对经济、线路灵活等优势得到广泛应用。然而, 列车在高架线路上运行所产生的振动与噪声污染问题日益凸显, 已成为制约线路规划、建设和运营, 并影响沿线居民生活质量与社会和谐的重要因素。本文系统分析了市域(郊)铁路高架线振动与噪声的产生机理、传播特性及其环境影响, 并从“源头控制、传播途径阻断、受保护点防护”的综合性治理思路出发, 探讨了车辆技术优化、轨道结构创新、桥梁结构设计、声屏障与隔声窗应用、规划与管理措施等多个层面的减振降噪策略。研究构建一套多层次、全链条的减振降噪技术体系, 为市域(郊)铁路的绿色、低碳、高质量发展提供技术先进性与经济可行的解决方案。

关键词

市域(郊)铁路; 高架区间; 减振; 降噪; 振动传播; 环境治理; 综合策略

1 引言

市域(郊)铁路作为服务于都市圈及城市群中长距离、大运力、快速通勤的骨干交通系统, 主要承担中心城区与外围城镇、组团之间的出行需求。与以城市核心区为服务对象的地铁不同, 市域铁路具有站间距大、设计速度高(通常为 100~160 km/h)等特点, 是推动区域一体化发展的关键基础

设施。

在当前城市建设用地趋紧、生态环境保护要求提升以及投资约束增强的背景下, 市域(郊)铁路广泛采用高架敷设方式, 平均占比超过 60%。然而, 高架线路也使得列车运行引发的环境振动与噪声问题更加凸显, 其影响范围广、传播直接, 对沿线居民区、学校、医院等敏感区域造成显著干扰。据生态环境部信访数据, 近年来轨道交通噪声振动投诉年均增长约 15%, 其中市域(郊)铁路高架段已成为投诉集中区域, 也成为项目规划、建设与运营中的突出制约因

【作者简介】张培胜(1976—), 男, 中国河北东光人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程、桥梁与隧道工程研究。

素。目前，学界已从车辆构造、轮轨关系、桥梁结构等方面对城市轨道交通减振降噪开展了系列研究^[1-4]。

因此，系统开展市域（郊）铁路高架段减振降噪策略研究，不仅是落实国家《声环境质量标准》《城市区域环境振动标准》等环保法规的必然要求，也是践行“交通强国”战略中绿色发展理念、建设和谐宜居城市、促进轨道交通可持续发展的现实需要。本研究对指导新建线路环保设计、推进既有线路改造提升，具有重要的工程应用价值与社会意义。

2 项目概况

市域（郊）铁路成都至眉山线工程起于成都天府新区红莲站，止于眉山东站，线路全长 59.139 公里。全线以高架敷设为主，高架区间长 46.180 公里，占比约 78%；地下区间长 10.076 公里，路基区间长 2.882 公里。共设车站 13 座，其中地下站 5 座、高架站 8 座，设煎茶车辆段 1 座和眉山北停车场 1 座；主变电所 2 座。

3 振动与噪声的来源及特性分析

轨道交通环境噪声主要可依据声源类型分为以下三类：

- 1) 牵引噪声：如机车发动机运转产生的轰鸣声，通常在列车速度低于 35 km/h 时起主导作用。
- 2) 轮轨噪声：由车轮与钢轨之间的相互作用引起，当列车速度低于 250 km/h 时，成为噪声的主要来源。
- 3) 气动噪声：由车体与空气摩擦而产生，当列车速度高于 250 km/h 时，是铁路噪声的主要来源。

在市域（郊）铁路中，轮轨噪声在总噪声中占比较高，因此降低噪声需首先控制轮轨噪声。轮轨噪声主要分为三种类型：滚动噪声、冲击噪声和尖啸声。

- 1) 滚动噪声：主要由轮轨表面粗糙度引起，车轮在转动时因表面不平顺导致轮轨系统振动而产生。
- 2) 冲击噪声：主要由车轮通过钢轨接头、道岔或车轮表面擦伤后在钢轨上滚动时产生。
- 3) 尖啸声：主要出现在列车通过小半径曲线时，由外侧车轮轮缘挤压外轨以及内侧车轮踏面在钢轨上滑动所引起。

除轮轨噪声外，轮轨间的垂向与横向作用力还会通过轨道结构传递至桥梁，引发桥梁结构振动，并向空气中辐射噪声，该部分噪声通常称为“结构噪声”或“二次噪声”。结构噪声频率较低（20~250 Hz），穿透力强，传播距离远，是导致沿线居民室内产生“轰鸣”感的主要原因。

4 减振降噪措施

4.1 源头控制

源头控制是减少振动与噪声最根本、经济的途径，主要从以下方面入手：

4.1.1 车辆技术优化

在车辆选型及招标阶段，重点围绕轮轨关系、车辆外

形结构及机电设备等方面进行降噪设计，以降低对沿线环境的影响。具体措施包括：

- (1) 采用车控式踏面修形装置，可同时控制同一车辆的 8 个车轮，结合走行部在线监测系统，当车轮失圆超过预警值时自动启动加速修形模式，改善车轮表面粗糙度。
- (2) 使用粉末冶金静音闸片，减少制动噪声。
- (3) 配置基于声学振动原理的智能监测系统，实现状态预警并指导车轮与轨道的定期打磨维护。

4.1.2 线路条件优化

根据前期测试研究，曲线半径小于 500m 时，轮轨相互作用及振动源强显著增大。本线高架区间最小曲线半径采用 650m，以降低轮轨动力效应。

4.1.3 桥梁护板缝封堵优化

为减少桥梁预制护板变形缝处的噪声泄漏，在变形缝位置设置遮缝钢板进行封堵。钢板厚 1.5mm、高 1.57m，宽度覆盖梁缝及两侧各 10cm。

4.1.4 桥梁结构优化

桥梁作为振动传递与噪声辐射的关键载体，其结构设计至关重要。提高桥梁刚度与质量、适当增加梁体截面尺寸、采用箱型等闭口截面形式，可有效提升梁体垂向与横向刚度，降低振动响应幅度，尤其有利于抑制低频振动，如图 1。

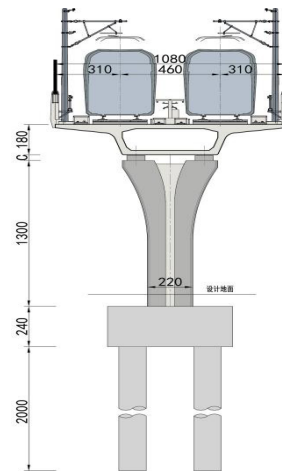


图 1 标准箱梁结构断面

4.1.5 轨道减振降噪措施

根据环评预测的振动与二次噪声超标情况，采用分级减振措施，具体如表 1 所示：

表 1 轨道的分级减振降噪措施

减振分级	振动超标	二次噪声超标	减振措施
中等减振	振动超标 ≤ 3dB	无二次噪声超标	减振扣件
高等减振	3dB < 振动超标 ≤ 7dB	0 < 二次噪声超标 ≤ 5dBA	减振垫浮置板
	7dB < 振动超标 ≤ 12dB	0 < 二次噪声超标 ≤ 5dBA	橡胶弹簧浮置板
特殊减振	振动超标 > 12dB	二次噪声超标 > 5dBA	液体阻尼钢弹簧浮置板

4.2 传播途径控制

噪声主要通过空气和固体构件传播,传播途径控制主要包括空气传声与结构传声的阻断。

在线路两侧设置声屏障是阻断空气传声的有效方式。声屏障分为直立式、半封闭式及全封闭式。

4.2.1 直立声屏障

为常用形式,降噪效果主要取决于屏障高度,高度越大,声影区范围越大。声屏障表面采用彩钢板、铝合金板或PC板等材料;内部填充吸声材料(如离心玻璃棉、岩棉)并设置穿孔护面板,可提高吸声性能;顶部增设弧形、T型或Y型吸声反射式折角,可提升降噪效果约2~5dB。

4.2.2 全封闭/半封闭声屏障

将轨道区间全部或部分封闭,形成“声隧道”,降噪效果显著(可达15~25dB以上);造价较高,并对桥梁景观、行车视线、通风救援等产生影响,设计中需考虑车辆活塞风效应与结构荷载;适用于噪声敏感核心区域。

此外,在高架区间轨旁护板内侧安装吸声板,可进一步吸收噪声,减少向周边扩散。

4.3 受声体控制

当传播途径控制仍无法满足室内声环境标准时,需对受影响的敏感建筑采取防护措施:

1) 建筑隔声改造:对既有建筑,可更换为中空或夹胶玻璃隔声窗并加强密封;通风要求高的建筑可加装隔声通风器;必要时对墙体与楼板进行隔声加固。

2) 室内吸声处理:在噪声反射显著的室内空间设置吸声吊顶或墙面处理,降低室内混响噪声。

4.4 规划与管理措施

采取“防患于未然”的主动策略,实现事半功倍的效果:

4.4.1 线路规划避让

在选线阶段运用噪声预测模拟技术,尽量使高架线路绕避已建成的集中居民区、文教区等声敏感区域;无法避让时,优先采用路堑、隧道等对环境影响较小的敷设方式。

4.4.2 用地控制与缓冲区设置

在线路两侧一定范围(如距外轨中心线30~100米)内,通过规划控制为绿化、仓储等非敏感用地;或要求该范围内新建建筑必须采取符合标准的隔声措施。

4.4.3 运营管理优化

速度管理:在穿越特别敏感区段设置合理限速,降低噪声振动强度;

维护制度:建立完善的轨道与车轮状态监测体系,定期进行钢轨打磨与车轮镟修,维持轮轨系统良好状态。

5 结语

市域(郊)铁路高架区间的振动噪声控制是一项涉及车辆、轨道、桥梁、环境与规划等多学科的复杂系统工程。基于系统分析,本文形成如下主要结论:

1) 必须实施综合治理。遵循“源头控制-传播阻断-受体防护”的系统路径,采用多层次、多技术融合的综合治理策略是有效控制振动噪声的必由之路。

2) 源头控制具有根本性作用。优化车辆选型与线路条件,并合理选用减振轨道结构,是从根本上削减振源强的关键措施,应作为工程设计中的首选与基础。

3) 桥梁结构是控制关键环节。桥梁承担着振动传递与噪声辐射的双重作用。通过提高结构刚度、附加阻尼以及采用隔振支座等手段改善其动力响应,对抑制结构噪声至关重要。

4) 声屏障是控制空气声的有效手段。针对空气传播噪声,经过合理选型与设计的声屏障具备良好的经济性与降噪效果。

5) 规划与管理具有前端保障意义。科学开展线路选线、落实用地规划控制、建立完善的运营维护体系,能够以较低的社会成本实现显著的环境效益,体现“防优于治”的主动策略。

参考文献

- [1] 杜运国,苟长飞,邱海慧.温州市域快速轨道交通高架线路减振降噪综合措施[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):220-222
- [2] 温玉君.城市轨道交通系统的减振降噪措施[J].城市轨道交通研究,2005,8(6):3.
- [3] 谢咏梅,辜小安,刘扬.地铁环境影响评价中轨道隔振措施应用效果研究[J].环境工程技术学报,2012,2(2):5.
- [4] 许代言,刘林芽.轨道交通双箱单室箱型梁结构改进后减振降噪效果分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(8):32-36.