

城市轨道交通线路波磨与运行噪声关联性分析及防治策略研究

黄 涛

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 401120

摘 要：本文聚焦城市轨道交通线路波磨与运行噪声问题，通过理论分析、实验测试与数据统计，探究波磨形成机理、运行噪声特性及二者关联。研究发现波磨加剧会显著提升运行噪声声压级，不同波磨参数对噪声影响各异。基于此，从设计、运营等多维度提出波磨防治与噪声控制策略，并强调综合防治及效果评估的重要性，为提升城市轨道交通环境性能提供参考。

关键词：城市轨道交通；钢轨波磨；运行噪声；轮轨动力学；防治策略

1 城市轨道交通线路波磨现象分析

1.1 波磨的定义

波磨，全称为钢轨波浪形磨损，是指在城市轨道交通线路的钢轨表面上，呈现出周期性、规则性的波浪状磨损形态。这种磨损并非均匀分布，而是沿钢轨纵向以一定波长和波深交替出现，其波长范围通常在几十毫米到数米之间，波深一般在微米级别。波磨现象在国内外众多城市轨道交通线路中均有发现，尤其在地铁、轻轨等客流量大、运行频率高的线路上更为常见。波磨的出现不仅改变了钢轨的原始几何形状，还会引发一系列轨道结构及列车运行问题，严重影响城市轨道交通系统的安全性、稳定性和舒适性。

1.2 波磨的形成机理

波磨的形成是一个复杂的多因素耦合过程，涉及到轮轨相互作用、轨道结构特性、列车运行参数以及环境因素等多个方面。从轮轨相互作用角度来看，列车车轮与钢轨之间的高频振动和反复冲击是波磨形成的关键诱因。当列车运行时，车轮的偏心、不圆顺以及轨道的不平顺等因素，会导致轮轨接触力发生周期性变化，这种变化使得钢轨表面产生局部塑性变形，随着列车的持续运行，塑性变形不断累积，逐渐形成波浪形磨损^[1]。轨道结构特性对波磨的形成也有着重要影响。列车的运行速度、轴重、牵引制动方式等运行参数，以及环境温度、湿度、钢轨材质等因素，都与波磨的形成和发展密切相关。不同的线路条件和运行工况下，波磨的形成机理可能存在差异，需要进行具体分析。

1.3 波磨对轨道结构的影响

波磨的存在会对城市轨道交通的轨道结构产生诸多不利影响。首先，波磨会加剧钢轨的疲劳损伤，由于波磨改变了钢轨表面的应力分布，使得钢轨在列车荷载作用下产生更大的弯曲应力和接触应力，这些应力的反复

作用会加速钢轨内部裂纹的萌生和扩展，缩短钢轨的使用寿命。其次，波磨会引起轨道结构的振动加剧。波浪形的钢轨表面会导致轮轨之间的动力作用增强，产生高频振动，这种振动不仅会传递到轨道的其他部件，如扣件、道床等，还会引起周围土体的振动，进而影响轨道结构的稳定性和可靠性。另外，波磨还会增加轨道的维护成本。为了保证列车的安全运行，需要定期对出现波磨的钢轨进行打磨修复，频繁的打磨作业不仅消耗大量的人力、物力和财力，还会缩短钢轨的有效使用长度，增加钢轨更换的频率。同时波磨引发的轨道振动和噪声问题，还可能对周边建筑物和居民生活造成不良影响，引发一系列社会问题。

2 城市轨道交通运行噪声分析

2.1 运行噪声的产生与分类

城市轨道交通运行噪声是列车在轨道上运行过程中产生的各种噪声的总和。根据噪声产生的原因和部位，主要可分为轮轨噪声、气动噪声、牵引系统噪声和结构噪声等。轮轨噪声是最为常见的噪声类型，它主要由车轮与钢轨之间的滚动、滑动、冲击以及摩擦等相互作用产生，其噪声水平与轮轨表面状态、列车运行速度、轴重等因素密切相关。气动噪声则是列车在高速运行时，空气与列车表面、隧道壁以及轨道部件之间相互作用产生的噪声，随着列车运行速度的提高，气动噪声的影响愈发显著。牵引系统噪声来源于列车的牵引电机、齿轮箱等设备的运转，其噪声特性与设备的设计、制造工艺以及运行工况有关^[2]。结构噪声是列车运行时产生的振动通过轨道结构传递到周围建筑物而引起的二次噪声，它对周边居民的生活影响较大。不同类型的噪声在频率、强度和传播特性上存在差异，了解这些噪声的产生与分类，对于制定有效的噪声控制措施具有重要意义。

2.2 运行噪声的传播与控制

运行噪声的传播过程较为复杂,涉及到空气传播和固体传播两种方式。空气传播是噪声从声源向周围空间扩散的主要途径,噪声在空气中传播时会受到距离、地形、气象条件等因素的影响,随着传播距离的增加,噪声强度会逐渐衰减。固体传播则是噪声通过轨道结构、建筑物基础等固体介质进行传播,这种传播方式能够使噪声传播到较远的距离,且衰减较慢,对周边建筑物的影响更为严重。针对运行噪声的传播特性,可采取多种控制措施,在声源控制方面,可通过优化轮轨设计,如采用非圆车轮、打磨钢轨表面等方式,降低轮轨噪声的产生;改进列车牵引系统,提高设备的制造精度和运行稳定性,减少牵引系统噪声。在传播途径控制方面,可设置声屏障、安装吸声材料等,阻挡和吸收噪声的传播;对轨道结构进行减振处理,如采用弹性扣件、浮置板道床等,减少振动和噪声的传递。在敏感目标保护方面,可对受噪声影响较大的建筑物进行隔声设计,如安装双层玻璃、密封门窗等,降低噪声对室内环境的影响。

2.3 运行噪声对城市环境的影响

城市轨道交通运行噪声对城市环境产生了多方面的负面影响。从居民生活角度来看,长期暴露在高噪声环境中,会严重影响居民的睡眠质量和身心健康,导致听力下降、血压升高、精神紧张等健康问题,降低居民的生活质量和幸福感。在城市生态环境方面,噪声会干扰动物的正常生活和繁衍,破坏生态平衡;同时,过高的噪声还会影响城市的声景观质量,降低城市的宜居性。运行噪声还可能对城市的经济发展产生一定的阻碍作用。同时,为了应对噪声污染问题,城市需要投入大量的资金用于噪声治理和环境保护,增加了城市的运营成本。

3 波磨与运行噪声的关联性分析

3.1 波磨对运行噪声的影响机制

波磨与运行噪声之间存在着密切的关联,波磨对运行噪声的影响主要通过改变轮轨相互作用特性来实现。由于波磨的存在,钢轨表面不再平整,车轮与钢轨之间的接触状态发生变化,接触力的大小和分布变得更加复杂和不均匀。这种不均匀的接触力会导致车轮产生高频振动,进而激发强烈的轮轨噪声。波磨引起的轨道结构振动加剧,也会通过固体传播途径,将振动能量传递到列车和周围环境中,进一步增加运行噪声的强度。波磨还会影响列车的运行平稳性,使得列车在运行过程中产生更多的空气动力学噪声和结构噪声。因此,波磨的存在会从多个方面对城市轨道交通运行噪声产生影响,加剧噪声污染问题。

3.2 实验与数据分析方法

为了深入研究波磨与运行噪声的关联性,需要采用科学的实验与数据分析方法。在实验方面,通常采用现场测试和实验室模拟相结合的方式。现场测试是在实际运营的城市轨道交通线路上,选择不同波磨程度的轨道区段,利用噪声测量仪器、振动传感器等设备,对列车运行过程中的噪声和振动进行实时监测,获取真实的运行数据。实验室模拟则是通过建立轮轨相互作用模型,利用计算机仿真技术,模拟不同波磨参数(如波长、波深)下的轮轨接触力、振动和噪声特性,研究波磨对运行噪声的影响规律^[1]。在数据分析方面,主要运用信号处理和统计分析方法。通过对采集到的噪声和振动信号进行时域、频域分析,提取信号的特征参数,如声压级、振动加速度、频率成分等,分析波磨与运行噪声之间的相关性。同时采用统计分析方法,对大量的实验数据进行处理,建立波磨参数与运行噪声指标之间的数学模型,预测波磨发展对运行噪声的影响趋势,为制定防治策略提供科学依据。

3.3 关联性实证研究结果

众多国内外的实证研究结果表明,波磨与城市轨道交通运行噪声之间存在显著的正相关关系。随着钢轨波磨程度的加剧,运行噪声的声压级明显升高。例如,在某城市地铁线路的研究中发现,当钢轨波磨深度从0.1mm增加到0.3mm时,轮轨噪声的声压级平均升高了5-8dB(A),且高频噪声成分显著增加。同时,研究还发现不同波长的波磨对运行噪声的影响存在差异,较短波长的波磨更容易引发高频噪声,而较长波长的波磨则主要影响低频噪声。波磨对不同类型噪声的影响程度也有所不同。相比于气动噪声和牵引系统噪声,波磨对轮轨噪声和结构噪声的影响更为突出。通过对多条城市轨道交通线路的监测数据进行分析,进一步验证波磨与运行噪声之间的关联性,为深入理解波磨与运行噪声的关系以及制定针对性的防治策略提供有力的实证支持。

4 城市轨道交通线路波磨与运行噪声防治策略

4.1 波磨防治措施

为了有效防治城市轨道交通线路的波磨现象,可从多个方面采取措施。在设计阶段,应优化轨道结构设计,合理选择轨道部件的参数,如采用刚度均匀的轨道结构、合适弹性的扣件和道床等,减少轮轨之间的动力作用,降低波磨形成的可能性。同时对钢轨材质进行改进,提高钢轨的耐磨性和抗疲劳性能,增强钢轨抵抗波磨的能力。在运营阶段,加强轨道的检测和维护工作至关重要,定期对钢轨进行表面检测,及时发现波磨的早期迹象,采用先进的钢轨打磨技术,对出现波磨的钢轨进行

修复,恢复钢轨的表面形状和几何精度。合理调整列车的运行参数,如控制列车的运行速度、轴重,优化牵引制动方式等,减少轮轨之间的冲击和振动,减缓波磨的发展速度。

4.2 运行噪声控制策略

4.2.1 源头控制措施

从噪声产生的源头进行控制是降低城市轨道交通运行噪声的关键。在低噪声车辆设计方面,可采用多种技术手段。例如,优化车轮设计,采用特殊的车轮踏面形状和材料,减少车轮与钢轨之间的摩擦和冲击,降低轮轨噪声;对列车的牵引系统进行改进,采用低噪声的牵引电机和齿轮箱,提高设备的制造精度和运行稳定性,减少牵引系统噪声的产生。同时加强列车的空气动力学设计,优化列车车身外形,减少列车运行时的空气阻力和气动噪声。另外,在车辆内部采用吸声、隔声材料,对列车内部的噪声进行控制,降低噪声向外部环境的传播。通过这些源头控制措施,可以从根本上减少运行噪声的产生,降低噪声对城市环境的影响。

4.2.2 传播途径控制措施

在噪声传播途径上采取控制措施,能够有效阻挡和吸收噪声,降低噪声的传播强度。声屏障是一种常用的传播途径控制措施,通过在轨道沿线设置声屏障,可以阻挡噪声的直接传播,将噪声反射或吸收,从而降低声屏障另一侧的噪声水平。声屏障的设计应根据噪声源的特性、传播方向以及周边环境的要求进行合理选型和布局,选择合适的材料和结构形式,如采用吸声性能好的金属板、透明板等材料,提高声屏障的降噪效果。除了声屏障,还可以在轨道结构周围安装吸声材料,如吸声板、吸声棉等,吸收噪声能量,减少噪声的反射和传播。同时对轨道结构进行减振处理,如采用弹性扣件、浮置板道床等,降低轨道结构的振动传递,从而减少噪声通过固体传播对周边环境的影响。通过这些传播途径控制措施,可以有效降低运行噪声对周边环境的污染。

4.2.3 敏感目标保护措施

对于受城市轨道交通运行噪声影响较大的敏感目标,如学校、医院、居民区等,采取敏感目标保护措施是必不可少的。建筑物隔声设计是一种重要的敏感目标保护措施,通过对建筑物的门窗、墙体、屋顶等部位进

行隔声处理,提高建筑物的隔声性能,降低噪声对室内环境的影响。例如,安装双层玻璃、密封门窗缝隙,采用隔声性能好的墙体材料和屋顶结构等^[4]。还可以在建筑物周围设置绿化带,利用植物的吸声和隔声作用,降低噪声的传播强度。同时合理规划建筑物的布局,将对噪声敏感的房间(如卧室、教室)布置在远离轨道的一侧,减少噪声的影响。通过这些敏感目标保护措施,可以有效改善敏感区域的声环境质量,保障居民的正常生活和工作。

4.3 综合防治策略的实施与评估

城市轨道交通线路波磨与运行噪声的防治是一个系统工程,需要综合运用波磨防治措施、运行噪声控制策略等多种手段,制定全面的综合防治策略。在实施综合防治策略时,应根据不同线路的实际情况,结合波磨和运行噪声的特点,合理选择防治措施,确保各项措施的有效性和可行性。同时建立完善的监测和评估体系至关重要。通过对防治措施实施后的波磨发展情况和运行噪声水平进行持续监测,及时收集相关数据,运用科学的评估方法对防治效果进行评估。根据评估结果,分析各项防治措施的优缺点,总结经验教训,对防治策略进行调整和优化,不断提高波磨与运行噪声的防治水平,实现城市轨道交通系统的绿色、可持续发展。

结束语

本研究系统剖析城市轨道交通线路波磨与运行噪声的关联及防治策略,明确二者相互作用机制,提出的防治措施具有较强的实践指导意义。然而,随着城市轨道交通的持续发展,新的工况与环境因素不断涌现。未来需进一步深化研究,动态优化防治策略,以适应行业发展需求,推动城市轨道交通绿色、可持续发展。

参考文献

- [1]王蕊.城市轨道交通钢轨波磨诱发的轮轨噪声特性研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(10):24-29.
- [2]崔晓璐,尹越,包鹏羽,等.山地城市地铁制动/轨道结构参数对钢轨波磨的影响[J].表面技术,2023,52(1):103-111.
- [3]周维汉.城市轨道交通曲线钢轨病害及打磨对策研究[J].时代汽车,2024(13):10-12.
- [4]常亮.城市轨道交通地下线引起的环境振动影响因素研究[J].铁路节能环保与安全卫生,2021,11(01):13-17.