

城市轨道交通轮轨噪声分析与降噪实践

一、背景与挑战

随着我国城市化进程不断加快，地铁作为城市公共交通的骨干网络，其运营里程和客运量持续攀升。然而，在提供便捷出行服务的同时，地铁运行产生的噪声污染问题日益突出，成为影响乘客舒适度和沿线居民生活质量的重要因素。

轨道车辆的振动噪声机理主要涉及轮轨振动通过转向架传递至车体，进而引发车体振动和噪声。车辆的主要声振源包括轮轨噪声、牵引系统噪声、辅助设备噪声以及气动噪声等。在动态工况下，车辆噪声主要来自轮轨噪声、牵引系统噪声和车体表面气动噪声；而在静态工况下，噪声则主要由辅助设备（如空调机组、空压机等）产生。

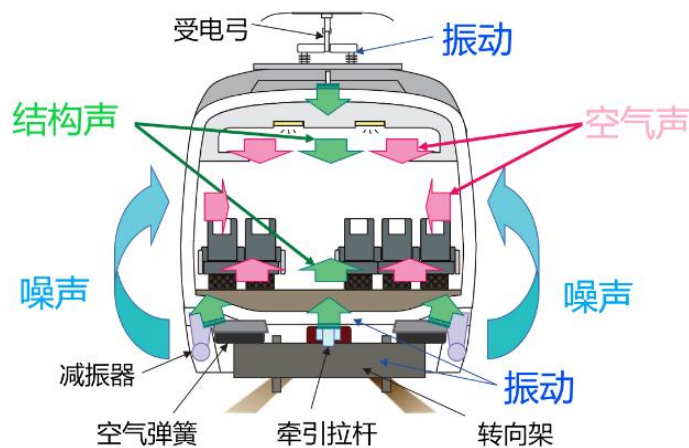


图 1 车辆振动噪声机理

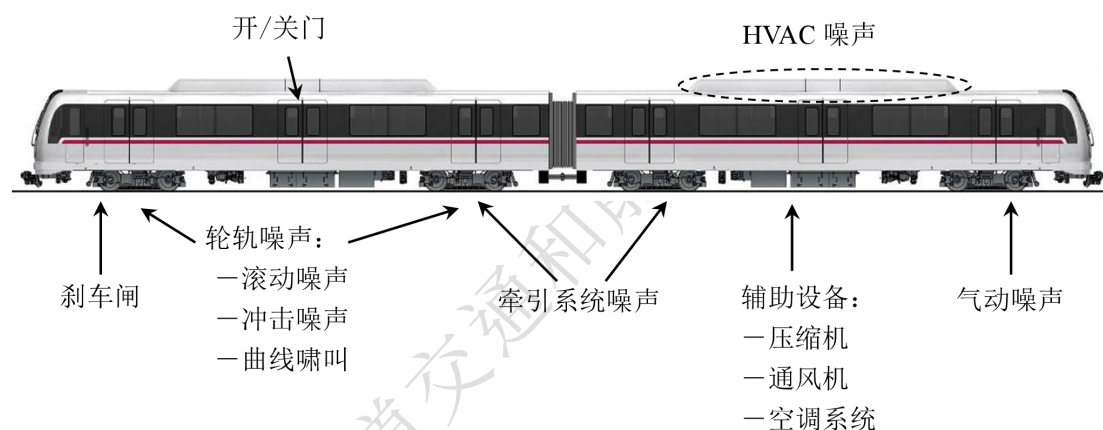


图 2 轨道车辆主要声源

针对这一问题，目前轨道建设相关行业轮轨噪声是由车轮与轨道接触时产生的振动和摩擦引起的，这种噪声在地铁车辆启动、制动及通过曲线区段时尤为明显。已开发了多种降噪技术，如使用弹性轨道垫片、优化轮轨材料匹配和进行轨道打磨等。这些方法虽然在一定程度上降低了噪声水平，但仍面临着成本、维护和长期效果的挑战。

另外，地铁车辆在隧道内高速运行时，会产生复杂的空气动力学噪声，这种噪声通常由车体与空气的相互作用引起。为了减少这种噪声，地铁车辆设计了更为流线型的车体结构，并在隧道内部安装吸音材料。然而，这些措施往往需要较大的空间和较高的成本投入，而且在实际应用中可能会受到隧道尺寸和结构的限制。

针对已经建成的地铁线路，曲线半径、轨道形式、隧道尺寸结构、车辆性能已无法改变，在保障运维成本的前提下，实现有效的噪声治理是目前面临的技术难题。

通过对杭州地铁全网噪声状况的调研分析，我们发现地

铁 3 号线因其特殊的线路条件成为噪声问题的典型代表。该线路具有以下显著特征：

（1）小半径曲线密集：全线最小曲线半径仅为 300 米的区间多达 8 处，占全线总长的 15%；

（2）隧道结构复杂：穿越主城区的隧道占比超过 60%，声学环境封闭；

（3）客流量大：日均客运量超 50 万人次，运营时间长达 18 小时。

在这些特殊条件下，3 号线面临三大核心挑战：一是噪声超标严重。实测数据显示，列车通过小半径曲线时产生的啸叫噪声峰值达 125dBA。在黄龙体育中心-黄龙洞等区间，客室内噪声持续超过 90dBA。二是传统措施效果有限。既有降噪手段如轨道打磨平均每 3 个月就需要重复施工，单次成本高达 80 万元；车轮镟修周期短于设计值 30%，显著增加维护成本。三是系统性解决方案缺失。缺乏精准的噪声源定位技术和长效治理机制，导致降噪工作陷入"治理-反弹-再治理"的循环。

二、解决方案与创新点

（一）关键技术方案

经前期调研，选取杭州地铁各条线路中噪音问题较显著、小曲线半径最多的杭州地铁 3 号线进行全线振动噪声测试，研究车辆内外部振动噪声的特点与区间分布规律，寻找异常噪声的存在区间，如图 3 图 4。调研车辆运行全程的振

动噪声水平。根据不同速度级、轮缘润滑装置工作策略、轮轨情况下的振动噪声测试结果，拟定噪声治理改造方案，并推广至杭州地铁全线网。

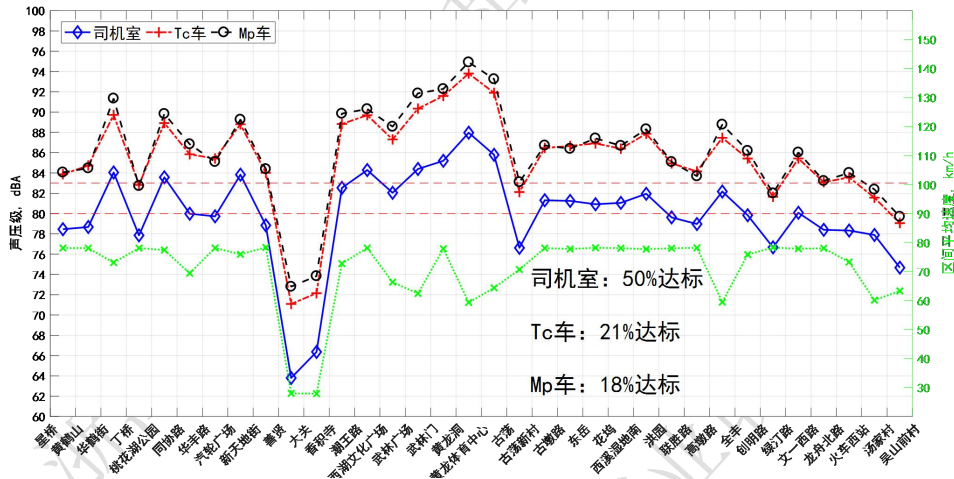


图3 分段噪声总值（星桥-吴山前村方向）

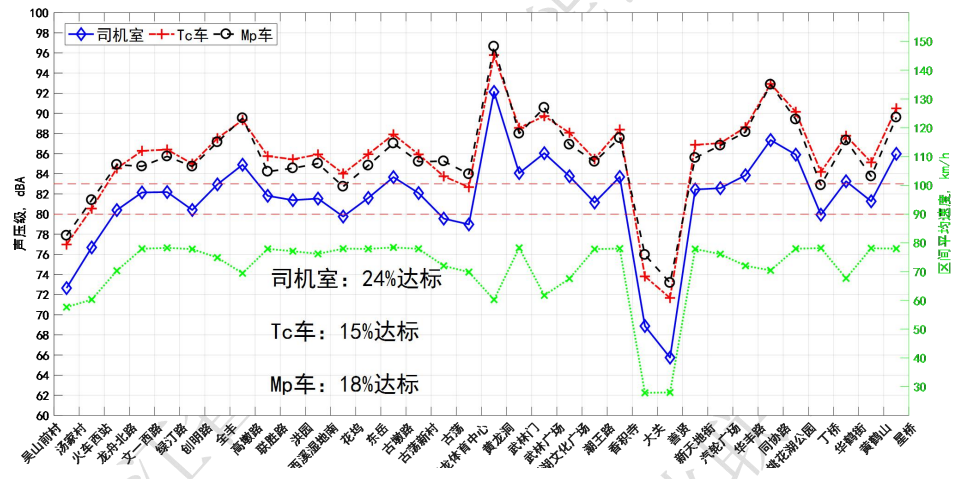


图4 分段噪声总值（吴山前村-星桥方向）

为进行一个地铁故障区域异响定位以及故障类型识别的相关研究，将采用以下关键技术：

- a) 确定麦克风阵列的形式，编写 music 算法对异响位置进行定位，确定故障位置。
- b) 编写小波包程序，对阵列输出信号进行降噪，去除信号中的干扰噪声。

- c) 编写 KJADE 算法，提取信号的频谱特征。
- d) 通过搭建实验平台建立转向架声音特征频谱标准数据库。
- e) 编写 SVM 程序进行频谱库匹配识别，确定故障类型。

(二) 限速区间精细化分析

综合考虑线路结构、曲线半径、车辆运行速度及润滑状况等因素，对限速区间进行细分，并优化限速值，特别针对那些产生最大噪声的曲线半径进行特别优化，如图 5 图 6。这种方法能够更精确地控制列车运行，减少因高速过弯而产生的噪声，同时保证行车安全和效率。

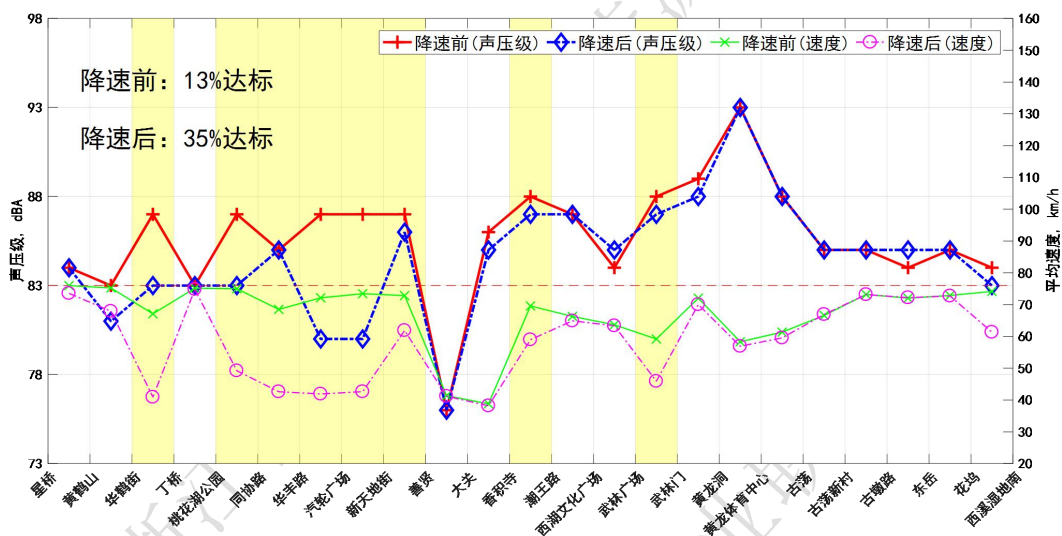


图 5 Tc 车噪声总值降速前后评定结果对比（星桥-西溪湿地南方向）

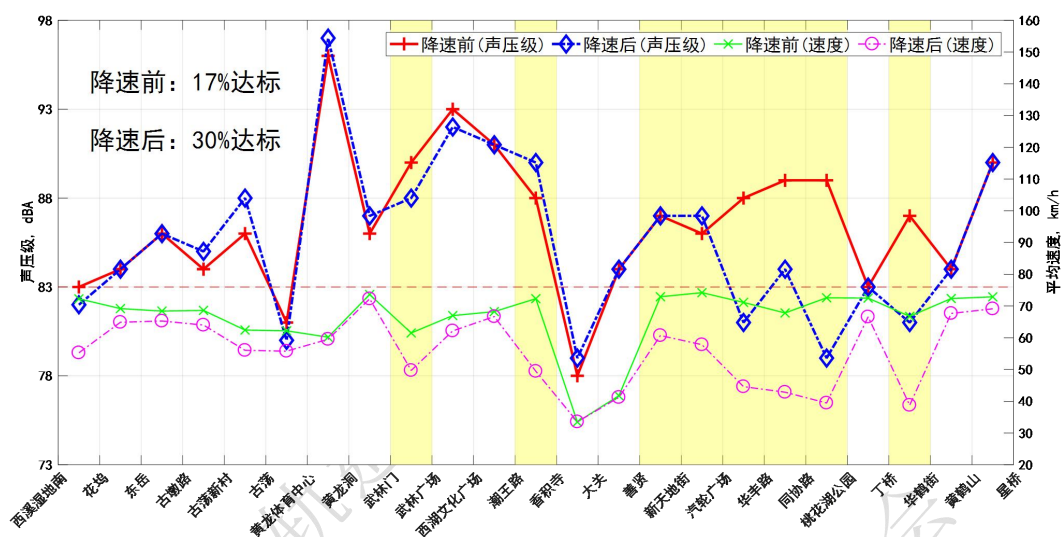


图 6 Tc 车噪声总值降速前后评定结果对比（西溪湿地南-星桥方向）

（三）噪声主频的精准定位与来源识别

分析轮对和轨道的粗糙度，准确找出产生噪声的主要频率，并据此判断噪声的来源。基于数据驱动的方法有助于深入理解车辆噪声振动的特点及其在不同区间的分布规律，通过精准定位噪声源，以针对性地采取措施。



图 7 钢轨几何参数测量

（四）多工况下的噪声对比与最优降噪方案探索

通过对比不同工况下（如轮轨打磨前后、轮轨润滑前后、不同限速运行）的噪声水平，系统地评估各种降噪措施的效

果。不仅能够验证单个措施的有效性，还能探索组合措施的协同效应，从而找出最行之有效的降噪方法。这种基于实证研究的优化策略，确保了降噪方案的可行性和高效性。

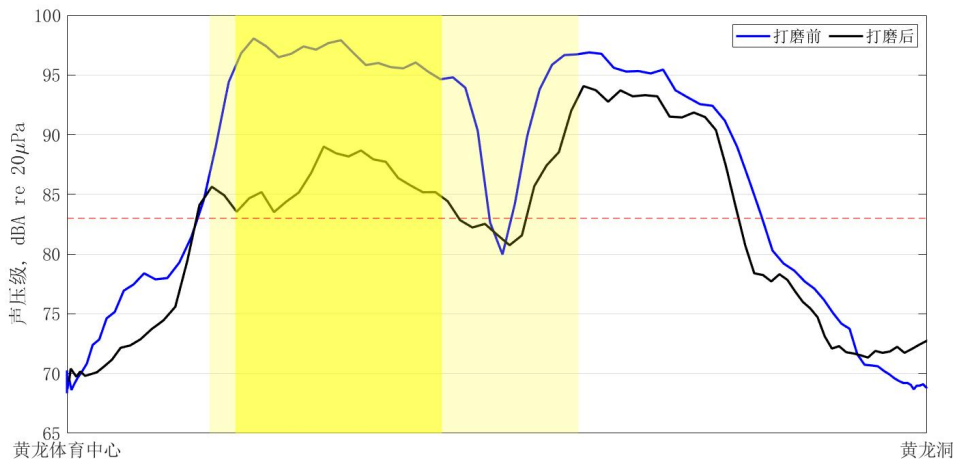


图 8 打磨前后 AT0 工况 TC 客室声压级随路程变化曲线

三、成果与效益

项目实际成果如下：

- (1) 研制 1 套通用的轨道交通噪声分析及降噪方法，完成杭州地铁 3 号线噪声分析及整治；
- (2) 发表论文 1 篇，已被核心期刊《城市轨道交通研究》录用论文《地铁车辆曲线运行车内噪声影响因素的试验分析》。

通过区间的细化和精准噪声治理，较单一的限速降噪可提高运营效率，研究对象 3 号线一期在优化后，上行运行时间缩短 1 分 01 秒，效率提升 24%，下行运行时间缩短 1 分 06 秒，效率提升 25%。预计节省上线车数量 3.8%。

在社会效益方面，预计司机室内噪声平均至少降低

10dBA，客室内平均至少降低 8dBA。提升乘客舒适度，预计降低噪声投诉率约 20%。

四、可复制性与展望

本项目研制 1 套通用的轨道交通噪声分析及降噪方法，已在杭州地铁 3 号线使用。该噪声分析及降噪方法具有普适性，可使用此方法进行城市轨道交通噪声整治，也可用于城市地铁噪声治理及新线建设项目验收时列车平稳性及降噪性能的量化评判。

本项目研究表明，使用轨顶涂覆机涂覆材料对降低车内外噪声具有一定效果，降低噪声分贝值 2~3dB，轨道打磨后，司机室噪声平均降低 12.2dBA，客室内平均降低 9.8dBA。后续为科学有效开展噪声整治工作，杭州地铁将增设车载实时噪声监测系统，快速高效的开展噪声测量，在重点区间配置轨顶涂覆装置，降低轮轨噪声，并定期开展钢轨打磨、轮对镟修，按照本项目研发方法，有效开展噪声治理工作。

五、研发团队

负责人	姓 名	邢海福	专 业	电子信息工程
	出生年月	1983. 11	联系电话	13735400760
	职务职称	运营公司副总经理/高级工程师	学历学位	本科学士
	工作单位	杭州地铁运营有限公司	Email	xinghaifu@hzm metro. com
	项目分工	课题负责人		
成员 2	姓 名	郭正海	专 业	机械电子工程
	出生年月	1986. 01	联系电话	15868865836
	职务职称	客运二公司副总经理/高级工程师	学历学位	本科学士

	工作单位	杭州地铁运营有限公司		Email	guozhenghai@hzmetro.com	
成员 3	姓 名	吴亮		专 业	车辆工程	
	出生年月	1990. 1		联系电话	13738146564	
	职务职称	客运二公司工程师/中级工程师		学历学位	硕士	
	工作单位	杭州地铁运营有限公司		项目分工	项目方案策划	
其他成员	姓 名	出生年月	职务职称	专 业	工作单位	项目分工
	江天晓	1993. 10	中级工程师	机械工程	杭州地铁运营有限公司	项目执行
	姚远	1990. 4	中级工程师	电气工程及其自动化	杭州地铁运营有限公司	项目执行
	徐炬	1988. 12	中级工程师	机械工程及其自动化	杭州地铁运营有限公司	项目执行
	王良胜	1994. 8	中级工程师	机械工程	杭州地铁运营有限公司	项目执行
	张晓雨	1992. 7	中级工程师	机械工程	杭州地铁运营有限公司	项目执行
	章凯	1996. 4	中级工程师	机械设计制造及其自动化	杭州地铁运营有限公司	项目执行

联系人: 杭州地铁运营有限公司 钱家辉 15158133013