

运营列车车内噪声与平稳性检测及 整治评估标准研究

胡佳琦

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

摘要 [目的]运营列车车内噪声和运行平稳性直接影响乘客乘坐舒适度,目前国内外缺乏统一的运营列车车内噪声与平稳性评价标准。需研究相应的检测系统和评估标准。[方法]针对车内噪声大、舒适性较差及晃车等问题,上海轨道交通开发了运营列车车内噪声与平稳性检测系统。分析了该系统的应用需求和功能需求,介绍了该系统的系统方案和应用方案。基于该系统提出了运营列车车内噪声与平稳性整治方法和评估标准。[结果及结论]针对运营列车车内噪声与平稳性检测开展系统性研究是一次探索与实践。上海轨道交通编制发布与运营列车车内噪声与平稳性检测和整治评估的相关标准,不仅为行业提供了参考依据,更有助于推动制定城市轨道交通团体标准。将运营列车车内噪声与平稳性指标和线路维护作业紧密结合,不仅能及时发现潜在风险,更能显著提升乘客出行体验。

关键词 城市轨道交通;运营列车;车内噪声;平稳性;检测系统

中图分类号 U260.11⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.050

Evaluation Standard for Interior Noise and Stability Detection and Rectification of Operating Trains

HU Jiaqi

(Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The interior noise and running stability of operating trains have a direct impact on passenger riding comfort. At present, there is a lack of unified evaluation standards for interior noise and stability of operating trains at home and abroad. It is necessary to study the corresponding detection system and evaluation standards. [Method] Aiming at the problems such as high interior noise, poor comfort and car shaking, Shanghai Rail Transit develops an interior noise and stability detection system for operating trains. The application and functional requirements of the system are analyzed, and the system scheme and application scheme are introduced. On this basis, the rectification method and evaluation standard for the

interior noise and stability of operating trains are proposed.

[Result & Conclusion] It is an exploration and practice to carry out a systematic research on the interior noise and stability detection in operating trains. Shanghai Rail Transit has compiled and issued relevant standards for the detection and rectification evaluation of interior noise and stability in operating trains, which not only provide a reference basis for the industry, but also help promoting the formulation of urban rail transit group standards. Combining interior noise, stability indicators and line maintenance operations closely can not only detect potential risks in time, but also significantly improve passenger travel experience.

Key words urban rail transit; operating train; interior noise; stability; detection system

随着城市轨道交通列车运行频次加密、设施设备老化以及长期轮轨冲击,会导致列车和轨道出现各种次生病害,车内噪声与平稳性问题日益凸显,直接影响乘客乘坐舒适度与市民满意度。近年来,上海轨道交通陆续收到了车内噪声大、舒适性较差及晃车等投诉,主要涉及上海轨道交通5号线、8号线、10号线、11号线和13号线等多条线路。为此,上海轨道交通在部分区段采取了临时调整、常态化和分时段调控等降速运营措施,保障了乘客乘坐的舒适度,但却牺牲了运营效率,由此还可能引起乘客二次投诉,如列车行驶速度过慢、行程时间延长等。针对此类问题,通过常规添乘检测方式无法精准定位和监测噪声、预警列车运营状态以及对关联设备指标进行分析,因为不能获取到实际量化数据,所以难以准确判断问题原因。临时加装检测装置也不能全过程记录列车和线路运营状态,难以基于此评估线路整治效果。因此研究开发运营列车车内噪声与平稳性检测系统,通过该系统监测车内噪声和列车振动,并基于监测数据分析乘客需求,进一步研究形成车内评估指标和评价标准。

1 运营列车车内噪声与平稳性检测系统需求分析

目前,上海轨道交通全网络共有 18 条运营线路,车型近 50 种,线路运行环境也各有差异。运营列车车内噪声与平稳性检测系统需满足以下应用需求:

1) 定制化系统安装方案。每条线路选定一种车型,针对不同线路的选定车型特点制定检测设备安装方案,确保“一车一方案”。

2) 量化监测数据。系统能够实时监测列车运行状态,通过设置合适的采样率,精准获取车内噪声和振动数据,并能量化监测数据。

3) 准确定位。系统能够快速准确定位列车运行时间和对应的里程信息。

4) 可视化整治效果评估。系统能够通过对比优化前后作业数据,并以可视化方式直观反映整治评价结果。

运营列车车内噪声与平稳性检测系统需满足以下功能需求:

1) 可视化综合运维管理。通过可视化综合运维管理平台,系统能够实时获取列车运行速度、里程定位等数据,实时监测车内噪声、平稳性、舒适度和轴箱振动等指标,实时处理数据,并以可视化方式反映整治评价结果。

2) 监测数据管理。系统借助传感技术、通信技术、计算机技术及信息技术等算法模型,实现各项监测数据的存储、高效传输、精准处理和深入分析。

3) 监测指标变化趋势识别。系统基于监测数据、运维记录等,能识别监测指标变化趋势,并能结合历史数据预测潜在问题。

4) 预警报警。设定阈值,当监测指标数据超限时,系统能自动触发预警或报警机制。

5) 维护指导。系统基于效果评估提供具体维护建议或整改方案,为后续优化设计和维护整治提供指导。

2 运营列车车内噪声与平稳性检测系统设计方案

1) 总体架构。采用分布式架构,主要包括传感器网络、数据采集与处理模块、数据分析与评估模块和用户界面模块。传感器网络负责采集车内噪声和列车振动数据,数据采集与处理模块对原始数

据进行预处理和存储,数据分析与评估模块利用先进算法对数据进行深度分析,评估列车平稳性和车内噪声等效声级,最终通过用户界面模块展示结果。

2) 系统硬件。硬件设备包含车内平稳性振动传感器、噪声传感器、车下轴箱振动传感器、数据采集仪、工控机、数据传输模块和供电模块等。通过服务器与车载维护以太网交换机或列车乘客信息系统以太网交换机进行连接,经算法软件解析后获取数据。

3) 网络传输。借助 5G 网络及其他无线通信技术,将系统监测所捕获的指标数据实时、高效地传输至本地服务器。

4) 用户界面。设计直观易用的用户界面,便于运维人员监控数据、接收预警信息。

5) 监测指标。主要监测列车运行速度、列车加速度、声压级、振动幅值、振动频率、里程定位、时间等基础数据,结合调研问卷等方式,选定与乘客感受紧密关联的横向平稳性、车内噪声和横向舒适度等指标进行分析。

3 运营列车车内噪声与平稳性检测系统应用方案

1) 系统安装。在既有运营列车中,选择状态良好、能反映线路车内噪声和振动特征的列车安装系统。系统的硬件设备安装于拖车,包括 2 个噪声传声器、3 个车内振动加速度传感器、4 个轴箱振动加速度传感器、1 台数据采集器、1 台工控机、1 个数据传输模块和 1 个电源模块。

2) 测点布置。对于车内噪声测点,设置不少于 2 处,噪声传声器分别内置于列车侧顶板位置处。一处位于列车端部,另一处位于列车中部,相对布置,避开固定声源;对于运行平稳性测点,设置 2 处,每处含车体垂向和横向共 2 个方向传感器,对角布置在 1、2 位转向架中心偏车体一侧 1 m 处的车内地板上;对于舒适度测点,设置在车厢中部座椅下方地板面,包括垂向、横向和纵向振动 3 个方向的振动加速度传感器;对于轴箱加速度测点,设置 4 处加速度传感器,分别为 4 个垂向测点和 2 个横向测点,布设于 Tc(带司机室的拖车)车一位端 1 轴和 4 轴轮对轴箱处,安装在车轴中心线上方。

3) 系统校正。系统安装前,对噪声和平稳性采集设备进行出厂计量校准。现场安装时,对检测设备进行功能调试和量值标定。选择两列相同型号

列车进行对比测试,其中一列车按照 GB 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值 and 测量方法》和 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》规定安装检测设备。另一列车按照指定位置安装检测设备。在同一试车线、同一测试工况下测试两列列车的噪声和振动情况,并根据监测数据进行校验并修正。在标准规定的检测位置与系统实际安装位置进行数据检测,对检测结果进行差异性比较,使检测结果能准确反映车内噪声和平稳性等指标。

4) 检测分析。跟踪对比上海轨道交通 11 号线正线运营监测数据,分析影响指标变化的多重因素,其中以下因素影响较明显:①车速变化影响。在相同区间,车速越高,车内噪声越大,列车平稳性指标呈现上升趋势。②客流变化对车内噪声影响。相同速度下,早高峰时段,乘客数量上升,车内噪声较小;非高峰时段,乘客数量减少,车内噪声较大。两者平均相差 3 dB(A)。③车头车尾位置影响。车内噪声方面,车头比车尾的噪声小约 4 dB(A);横向平稳性方面,车头比车尾的大约 0.1 dB(A)。因此,要综合考虑上述因素并采用合理的分析方法对车内噪声和平稳性指标进行系统性评价。

4 运营列车车内噪声与平稳性整治效果评估

4.1 评估方法

由于受各种因素影响,车内噪声、平稳性和舒适性、轴箱加速度等检测数据呈现一定波动性。如采用平均数作为评价标准,可能会受到极端值(如异常高或异常低的噪声值、平稳性值或加速度值)干扰,导致评价结果偏离真实情况。综合考虑,采用 50 分位值(即中位数)统计方法作为评价标准,其能较准确反映实际情况。

依托车内噪声与平稳性检测系统实时获取指标数据,对照指标各级限值标准,由高到低依次统计超限区段数量(或区段所在区间数量)。在检测区段整治前后,对比分析相同列车在工作日平峰时段数据,用指标值前后差值评价结果并给出对比图,评估车内噪声和平稳性的专项整治效果。

4.2 评估标准

国家及行业标准规定了特定条件下(空旷区域、新车、碎石道床、混凝土轨枕、平直无缝钢轨等)的车内噪声限值,与实际运营列车和线路条件存在

较大差异,目前没有针对运营列车的车内噪声和平稳性标准。

4.2.1 车内噪声分级标准

在前期试点和现场检测数据积累基础上,上海轨道交通根据运营列车实际工况,制定发布了用于指导维修、改造的车内噪声分级、监测标准,如表 1 所示。

表 1 城市轨道交通运营线路列车车内噪声指标分级限值
Tab.1 Classification limits of interior noise indicators on urban rail transit operating lines

设计速度/ (km/h)	噪声等级 $L_{Aeq,10s}$ 限值/ dB(A)		
	I 级	II 级	III 级
≤ 80	[82,85]	(85,88]	>88
(80,120]	[83,87]	(87,91]	>91

注: $L_{Aeq,10s}$ 为列车正常运行连续 10 s 时段内测得的等效连续 A 声级。

车内噪声分级按照线路设计速度划分等级,根据数据统计、乘客感受和维护措施等方面综合确定限值。等效连续 A 声级是在规定的测量时间内用 A 计权网络测得的声压级能量平均值,用 L_{eq} 表示,单位为 dB(A),计算公式为:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A} dt \right) \quad (1)$$

式中:

L_A —— t 时刻的瞬时 A 声级;

T ——规定的测量时间段,本文建议采用 1 s。

4.2.2 列车平稳性分级标准

参照 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》划分列车平稳性等级(见表 2),指标限值参照上海地标规定。

表 2 城市轨道交通运营线路列车平稳性指标分级限值
Tab.2 Classification limits of train stability indicators on urban rail transit operating lines

指标	平稳性等级限值		
	I 级	II 级	III 级
垂向平稳性指标	(2.25,2.50]	(2.50,2.75]	>2.75
横向平稳性指标	(2.25,2.50]	(2.50,2.75]	>2.75

各区间自列车起动开始,按每 5 s 为一分析段进行垂向和横向平稳性指标分析。平稳性指标 W 计算公式为:

$$W = 3.57 \sqrt[10]{\frac{A^3}{f} F(f)} \quad (2)$$

式中:

A ——振动加速度,单位 m/s^2 ;

f ——振动频率,单位 Hz 。

4.2.3 舒适度分级标准

参照 GB/T 5599—2019,可将乘坐舒适度 N_{MV} 划分为 3 个等级, N_{MV} 由车体垂向、横向和纵向 3 个方向的乘坐舒适度加权综合计算。根据人体感受初步制定限值,其中 $1.50 < N_{\text{MV}} \leq 2.50$ 为 I 级, $2.50 < N_{\text{MV}} \leq 3.50$ 为 II 级, $N_{\text{MV}} > 3.50$ 为 III 级。

依据坐立或站立位置上舒适度的简化测量方法,采用车厢地板水平高度上 3 个方向的振动加速度变量 a 进行计算,计算公式为:

$$N_{\text{MV}} = 6 \sqrt{(a_{\text{xP95}}^{\text{Wd}})^2 + (a_{\text{yP95}}^{\text{Wd}})^2 + (a_{\text{zP95}}^{\text{Wd}})^2} \quad (3)$$

式中:

W_{d} ——权重,按 UIC 513 取值;

a_{xP95} 、 a_{yP95} 、 a_{zP95} ——地板水平高度上对应纵向 x 、横向 y 、垂向 z 三个方向分布概率分位点 95% 的加速度均方根值。

4.2.4 轴箱加速度分级标准

轴箱加速度分为垂向和横向轴箱加速度。采用数据统计分析方法确定限值标准,用每秒轴箱加速度均方根计算限值(RMS 值),如表 3 所示。

表 3 城市轨道交通运营线路列车轴箱加速度分级限值
Tab.3 Classification limits of train axle box acceleration for urban rail transit operating lines

指标	不同分级的轴箱加速度/(m/s^2)		
	I 级	II 级	III 级
垂向轴箱加速度 RMS 值	(60,80]	(80,100]	>100
横向轴箱加速度 RMS 值	(40,60]	(60,80]	>80

RMS 值计算公式为:

$$a_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (4)$$

式中:

a_{RMS} ——每秒轴箱加速度均方根计算限值;

$a(t)$ ——作为时间函数的不计权加速度。

4.3 应用效果

车内噪声与平稳性检测系统已在上海轨道交通 18 条线路实际应用。基于该系统的检测结果,对车内噪声和平稳性超过 III 级限值的区段立即进行整治,对车内噪声和平稳性处于 III 级限值内的区段

制定维修计划优先实施维修。

上海轨道交通 11 号线自 2024 年 1 月进行噪声集中整治以来,钢轨打磨作业区间噪声平均下降 3~4 dB(A),打磨重点区段噪声等效值降低 6.7 dB(A),噪声峰值降低 12 dB(A),打磨集中整治效果明显。上海轨道交通 12 号线开展全线钢轨铣磨专项整治后,作业区段车内噪声下降 6~8 dB(A),取得了良好效果。

5 结语

针对运营列车的车内噪声与平稳性检测开展系统性研究是一次探索与实践。鉴于目前国内外行业对此缺乏统一评价标准,上海轨道交通编制发布相关标准,不仅为行业提供参考依据,更有助于推动制定城市轨道交通团体标准。将运营列车车内噪声与平稳性指标和线路维护作业紧密结合,不仅能及时发现潜在风险,更能显著提升乘客出行体验。

后续将持续结合乘客实际感受,优化完善车内噪声与平稳性指标限值;开展平稳性专项研究,剖析关联因素并提出整改方案;围绕“轮-轨关系”开展轮轨廓形匹配研究,进一步改善轮轨关系;融合构建高性能、高扩展性、管理便捷的服务器平台,为实时监测和数据处理提供准确及时的技术支持,最大限度发挥车载检测系统平台作用,降低运营列车车内噪声,提高乘坐舒适性,提升服务品质,为乘客提供更加安全舒适、便捷高效的出行服务。

参考文献

- [1] 温学委,孙苗苗. 地铁车内噪声成因及影响因素研究概述[J]. 交通科技与管理, 2024(18): 17.
WEN Xuewei, SUN Miaomiao. A summary of the research on the causes and influencing factors of noise in subway cars[J]. Jiaotong Keji Yu Guanli, 2024(18): 17.
- [2] 李朋,张胜龙,罗鹏,等. 城市轨道交通车辆运行平稳性测试方法与评价[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 61.
LI Peng, ZHANG Shenglong, LUO Peng, et al. Testing methods and evaluation of urban rail transit vehicle operational stability[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(10): 61.

· 收稿日期:2024-11-12 修回日期:2024-12-20 出版日期:2025-04-10

Received:2024-11-12 Revised:2024-12-20 Published:2025-04-10

· 通信作者:胡佳琦,工程师,hujiaqi@metro.sh.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license