

广州地铁7号线列车客室噪声分析与整治措施

刘仁福 熊亮 魏晓婷 陈宇

(广州地铁集团有限公司运营事业总部, 510308, 广州//第一作者, 工程师)

摘要 针对广州地铁7号线列车正线行驶时客室噪声较大问题,通过噪声测试,分析车辆结构和轮轨状况等因素对列车噪声的影响,并从列车密封性、钢轨打磨、列车运行速度等方面开展列车运行噪声整治措施研究。研究表明,列车运行时客室噪声主要为轮轨噪声,通过钢轨打磨、列车限速、侧门密封性整改等措施可改善客室噪声问题。根据研究结果,提出了地铁车辆减噪设计建议。

关键词 地铁车辆; 客室噪声; 噪声测试; 声源识别; 噪声整治

中图分类号 U270.1*6; U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.04.005

Research and Treatment of Vehicle Interior Noise on Guangzhou Metro Line 7

LIU Renfu, XIONG Liang, WEI Xiaoting, CHEN Yu

Abstract In view of great noise during the train operation of Guangzhou Metro Line 7, through a systematic train noise test, the influence characteristics of vehicle design, wheel/rail state and other factors on train noise are analyzed, train running noise control measures are studied from the aspects of train tightness, rail grinding, train running speed and so on. The research shows that the main train noise comes from the wheel and rail, which can be improved by way of rail grinding, train speed limit, side door sealing rectification and so on. This paper provides design suggestions and reference for the study of subway train noise.

Key words metro vehicle; vehicle interior noise; noise test; sound source identification; noise treatment

Author's address Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510308, Guangzhou, China

广州地铁7号线于2016年12月28日正式开通运营。自开通以来,不断收到来自正线司机及乘客反馈的列车客室噪声过大问题。客室噪声对乘客舒适性造成了一定影响,而正线司机如长期处于噪声大的工作环境中可能会带来健康问题。本文针对广州地铁7号线列车运行噪声问题开展相关测试

分析,了解噪声频谱特性、噪声主要来源及噪声传递路径,为列车运行噪声控制和治理提供依据和建议。

1 客室噪声源识别

噪声源识别的方法有很多,阵列法是其中的一种。阵列法由多个相同的传声器按一定方式排列组成阵列,通过接收信号干涉所形成的强指向性来测定声源的位置和强度^[1]。为了识别正线列车客室噪声来源,本文利用BK声学阵列架测试系统分别对被测列车的Tc车(带司机室拖车)和Mp车(有受电弓动车)的客室与司机室关键位置进行声源识别测试。图1为客室声源识别结果。

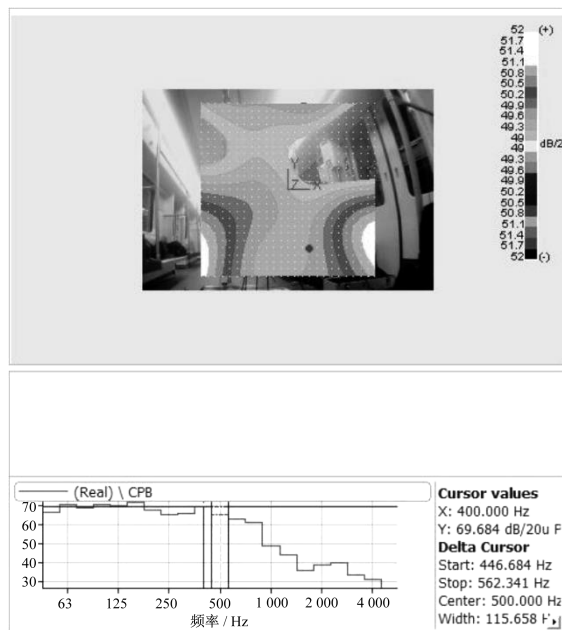


图1 客室噪声识别结果界面

测试结果表明:

1) 客室整体噪声主要来自车门、空调和地板。从两侧车门传入的是频率500~600 Hz的噪声;从上方空调处传入的是频率1 000 Hz左右的噪声;从下方地板传入的是频率700 Hz左右的噪声。

2) 从声源来看,车门处噪声主要为从两扇门中间缝隙漏入的轮轨噪声,空调处噪声主要来自空调出风口噪声;地板处噪声主要为轮轨噪声。

3) 司机室主要是门缝有漏声,频率为 400~600 Hz 的噪声主要通过司机室后部车门门缝传入,频率为 800 Hz 的噪声主要从前后两个门缝传入。

由此可知:列车静置时客室内噪声来源主要为空调系统噪声;列车运行时客室内噪声主要来源为轮轨噪声,此时空调系统噪声占比例很低。

2 客室噪声影响分析

2.1 空调系统对噪声的影响

为了解空调系统对客室噪声的影响,进行了空调系统噪声试验研究,试验包括列车静止试验和线路运行试验两种^[2]。

1) 在列车静止试验中,对比空调开启前后可以发现,开启空调后,客室整个频段噪声分贝值都有所增大,其中频率 1 kHz 附近的分贝值提升最大。空调空载运行与满载运行两种状况下,客室噪声差异约为 0.4 dB(A)。客室的噪声在出风口下方最大,随着与出风口距离的增加而逐渐减小。客室主要噪声为风机与风道送风噪声,频率集中在 235 Hz、350 Hz 和 956 Hz,其中频率为 956 Hz 的噪声主要由风机产生。

2) 在列车线路运行试验中,列车以 30 km/h 和 75 km/h 速度运行,分别采集客室测点和空调风道测点噪声数据进行分析。在列车以 30 km/h 低速运行时,客室噪声主要是空调噪声,频率主要集中在 900 Hz 附近;在列车以 75 km/h 速度运行时,频率为 600~800 Hz 的噪声能量最大,主要是轮轨噪声。通过对比 Tc 车空调开启与关闭的情况下可以发现,当车速达到 75 km/h 时,空调对客室内声压级影响不大(见图 2)。

综上所述,在列车静止或低速运行时,客室内的噪声主要为空调噪声,频率在 900~1 000 Hz;在列车达到一定速度运行时,客室噪声主要是轮轨噪声,此时空调噪声对客室声压级影响不大。

为降低空调系统噪声,将空调送风入口风道内部人字导流板的三聚氰胺吸音材料改为 3D 吸音棉材料,同时在空调机组送风机出口处加装多孔板对气流进行梳理。经过测试,此方法可以降低空调下方噪声约 1.4 dB(A),而空调送风量基本无影响。

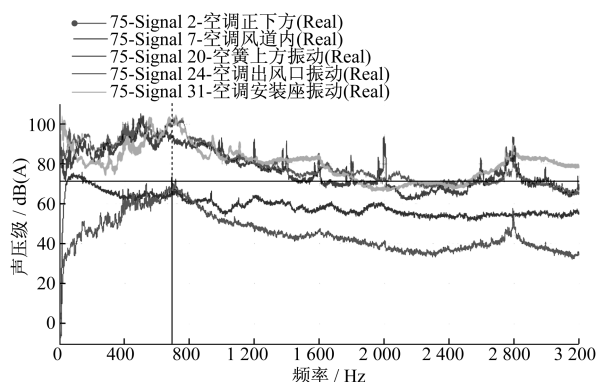


图2 客室内声振频谱(75 km/h 计权)

2.2 司机室侧门对噪声的影响

广州地铁 7 号线列车司机室侧门为内藏滑动门。前期测试发现司机室在列车运行工况下噪声过大,司机室声源识别测试显示噪声主要是通过司机室后部车门门缝传入的轮轨噪声。为研究司机室侧门密封情况对司机室噪声的影响,首先封堵司机室车门的 4 条门缝,然后测试不同密封状态下司机室噪声声压级。

测试结果显示:车门顶部门缝与后部门缝对司机室噪声影响比较大,尤其在列车过弯道时的噪声比较大;后部门缝的隔音效果差,对司机室噪声影响大。为此,针对司机室车门漏声采取如下措施:

1) 更换车门上部毛刷,增加车门顶部门缝与后部门缝的密封性能,减小车门与车体的间隙;

2) 更换车门后部密封橡胶条,采用隔声性能更好的密封橡胶条。

整改后测试发现,司机室噪声有所下降,在特定区段的测试满足相关标准要求。

2.3 车辆振动对客室噪声的影响

为了解车辆振动和结构传声特性,对广州地铁 7 号线开展了全程整体振动与噪声水平测试。根据标准 ISO 3381—2005 和 GB/T 3449—2011^[3]规定,按以下要求进行噪声数据处理:列车匀速运行时间尽可能保证大于 20 s;对于某些区段,若受实际条件限制,最短匀速运行时间不低于 5 s。

2.3.1 全线噪声测试情况

为了解全线列车客室噪声水平情况,列车按照自动运行(ATO)模式进行全程测试(见图 3)。测试结果发现,部分小曲线半径($R < 500$ m)处客室声压级大,客室噪声较大。通过 FFT vs Time 分析(快速傅里叶噪声时域-频谱分析)发现,当列车运行到弯道时,由于存在啸叫,使得高频噪声(400 Hz、600~800 Hz)明显增加,造成客室噪声整体上升。

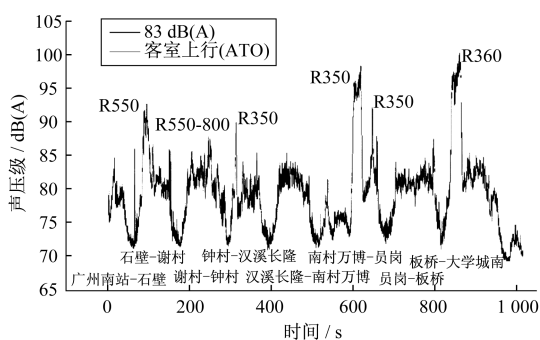
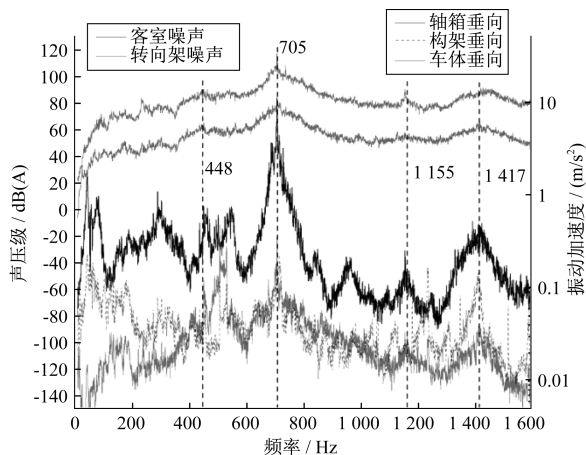


图3 客室声压级测试曲线

2.3.2 振动噪声测试

列车在运行时,由于轮轨表面存在不平顺,其产生的振动激励通过转向架结构和悬挂系统向车体传递,引起车体振动,激励客室内装结构振动并产生声辐射。在结构传声方面,通过测试分析轴箱、构架、车体的振动加速度,将它们和客室及车下噪声频谱进行对比,以此确定结构传声对客室噪声的影响。图4~7为试验车辆的垂向/横向振动与噪声相干关系图。

图4 车辆垂向振动与噪声相干关系图($R=350$ m)

车辆在弯道行驶时,频率为448、705、1417 Hz的振动激励经轴箱—构架—车体垂向和横向振动传递,1155 Hz振动激励经轴箱—构架—车体垂向振动传递,进而激励客室内装结构振动产生声辐射;车辆在直线段行驶时,频率为293、657 Hz的振动激励经轴箱—构架—车体垂向和横向振动传递。由此可见,客室噪声超标与结构传声具有较大的相关性,尤其与705 Hz附近的振动传递有强相关性。

3 轮轨状态对客室噪声的影响

由于钢轨表面和车轮踏面都存在粗糙度,当轮

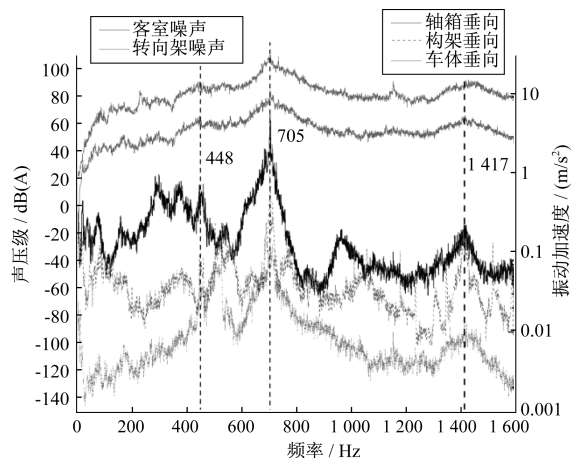
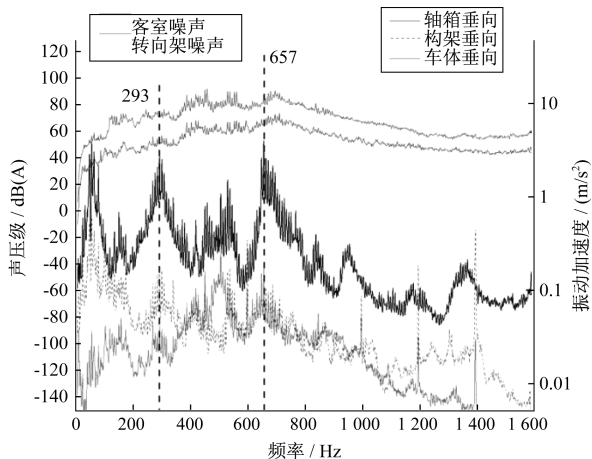
图5 车辆横向振动与噪声相干关系图($R=350$ m)

图6 车辆垂向振动与噪声相干关系图(直线)

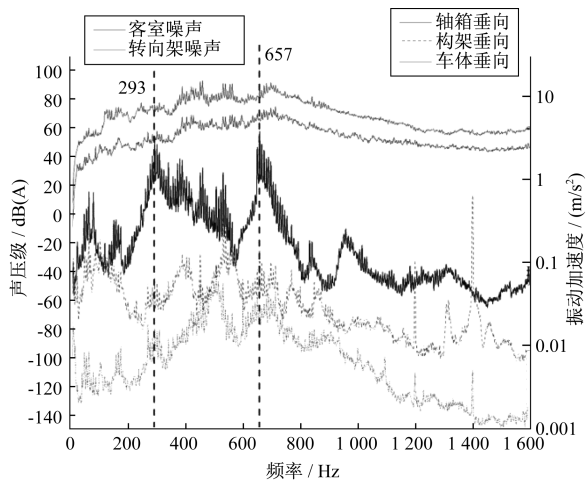


图7 车辆横向振动与噪声相干关系图(直线)

对在轨面上滚动时,会导致轮轨相对运动及本身的弹性振动,引起轨下基础部件如轨枕的振动,并向空气中辐射噪声。

为考察轮轨状态对客室噪声的影响,对钢轨打磨前后的状况进行噪声测试。测试时,列车分别以

65 km/h、55 km/h 速度通过曲线,采集列车通过曲线时的客室噪声数据。

1) 列车以 65 km/h 速度通过弯道时,钢轨打磨后情况下司机室内噪声在弯道处最大值为 88.9 dB(A),而钢轨打磨前情况下的最大值为 98.7 dB(A),钢轨打磨后情况下司机室内噪声降低了 9.8 dB(A),在 400~800 Hz 频段降低了 7.0~11.0 dB(A)。

2) 列车以 55 km/h 速度通过弯道时,钢轨打磨后情况下司机室内噪声在弯道处最大值为 85.8 dB(A),而打磨前情况下的最大值为 91.5 dB(A),钢轨打磨后情况下司机室内噪声降低了 5.7 dB(A),在 315~630 Hz 频段降低了 5~8 dB(A)。

钢轨打磨前的粗糙度测试情况如图 8 所示。由图 8 中钢轨打磨前 K13+269—K13+669 的 400 m 弯道($R=350$)粗糙度测试结果发现,左右轨道在波长 25 mm 和 40 mm 处粗糙度超标严重。

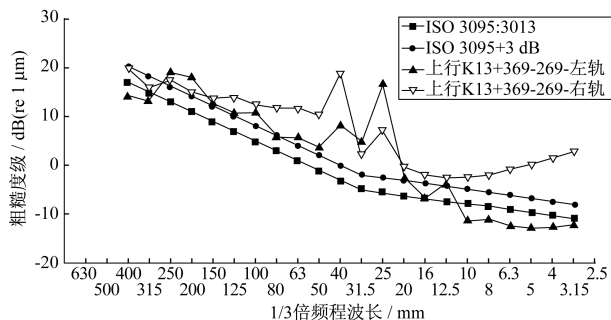


图8 钢轨打磨前粗糙度测试曲线

钢轨波磨引起的振动频率与波磨波长和列车通过速度相关,可用以下公式表示:

$$f = 1000 v / \lambda$$

式中:

v ——列车运行速度, m/s;

λ ——钢轨波磨波长, mm。

按照列车运行速度为 65 km/h 计算对应的频率,波长 25 mm、40 mm 对应的频率为 451 Hz、720 Hz;按照列车运行速度为 55 km/h 计算对应频率,波长 25 mm、40 mm 对应的频率为 381 Hz、611 Hz。计算结果与测试结果吻合,证实了弯道处噪声确实与轨道波磨有关。当轨道打磨后,弯道处噪声影响得到了明显改善。

针对广州地铁 7 号线小半径曲线区间噪声大的问题,开展对谢村站—钟村站、南村万博站—员岗站、板桥站—大学城南站等区段的小半径曲线打磨。打磨后区间噪声水平下降了 2.0~17.7 dB(A)。

4 弯道减速对客室噪声的影响

由全线噪声测试结果可知,噪声大的区间主要集中在半径 $R \leq 500$ m 的曲线段。为研究弯道减速对客室噪声的影响,选择在半径 $R=350$ m 的曲线段上进行车辆弯道减速减噪试验。

列车分别以 65 km/h、60 km/h、55 km/h、50 km/h 速度通过曲线,采集列车经过曲线时客室的噪声数据。司机室噪声 A 计权声压级随时间的变化情况如图 9 所示。

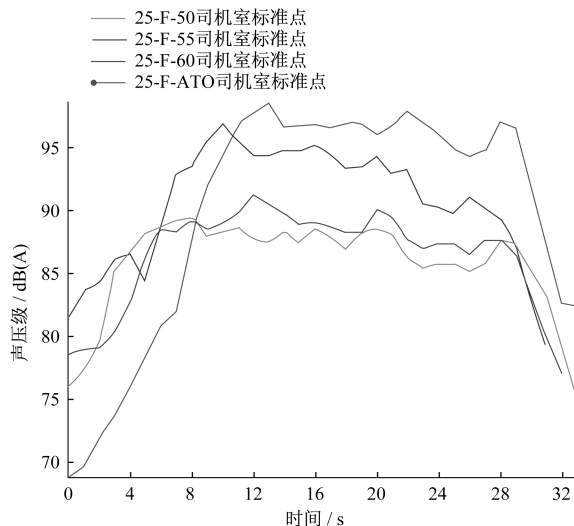


图9 司机室噪声时间历程曲线

通过分析列车不同速度下的客室噪声频谱可知,噪声峰值频率集中在 63~80 Hz、400~800 Hz、6 300~8 000 Hz 范围内。在频率 63~80 Hz 范围内,噪声主要为车辆结构噪声,噪声声压级随着车速的提高变化不大;在频率 400~800 Hz 范围内,噪声主要为轮轨噪声,噪声声压级随着车速的提高而提升,且峰值频率向后延迟;在频率 6 300~8 000 Hz 范围内,噪声主要为列车经过曲线段时轮缘内侧与钢轨内壁挤压引起的啸叫声^[4],噪声声压级也与车速正相关。可以看出,列车以速度大于 60 km/h 通过曲线段时,客室噪声显著增加,将列车曲线通过速度降低至 55 km/h 以下,可有效改善通过曲线时噪声过大的问题。

目前,广州地铁 7 号线的谢村站—钟村上行站、南村万博站—员岗上行站、板桥站—大学城南站上下行小半径曲线区间内,列车限速 55 km/h。列车限速后的区间噪声降低了 4.4~8.7 dB(A)。

5 结论与建议

针对广州地铁7号线列车运行时的客室噪声超标问题,开展了一系列噪声测试、分析及整治研究,分析了车辆空调系统、司机室侧门、车辆结构、轮轨粗糙度等因素对客室噪声的影响,提出了相关降噪措施。具体结论与建议如下:

1) 列车静止时客室内噪声来源主要为空调系统噪声;列车运行时客室内噪声主要来源为轮轨噪声,空调系统噪声对客室内噪声影响不大。

2) 针对司机室车门漏声问题,采取的整改措施是更换车门上部毛刷和车门后部橡胶条。整改后司机室噪声有所下降,在特定区段满足标准要求。列车司机室侧门滑动门的密封性较折页门差,后续新线司机室侧门选型时可根据密封性需求优先选择折页门。

3) 通过曲线段轨道打磨前后客室噪声测试和轨道特性分析,确认了列车通过曲线时的噪声与轨道波磨有关。建议后期通过周期性轨道打磨进行

噪声整治,同时建议后续新线可通过加装列车轮缘润滑装置及轨旁钢轨润滑装置等措施,减缓波磨发展,降低列车噪声。

4) 对不同车速下客室噪声A计权声压级时域特性进行了对比分析,得到了客室噪声声压级与车速关系的分布规律。通过控制列车通过曲线段的速度可以有效改善列车通过曲线时噪声过大的问题。

参考文献

- [1] 宋雷鸣. 基于相控麦克风阵列的逆向噪声源识别原理与技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [2] 许孝堂,金学松. 地铁内噪声超标分析[J]. 噪声与振动控制, 2017,37(5):75.
- [3] 全国声学标准化技术委员会. 声学 轨道车辆内部噪声测量: GB/T 3449—2011[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- [4] 张凯轩,周劲松,宫岛. 地铁车辆不同速度通过曲线段车内噪声研究[J]. 机械设计与制造工程,2018,74(3):126.

(收稿日期:2019-08-19)

(上接第4页)

表1 车体焊接变形问题解决方法汇总及评估

方法	解决方案	评估
1	焊丝直径由 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 改成 $\Phi 1.0\text{ mm}$	可用
2	采用多层多道焊接方式	可用
3	采用电阻点焊技术	可用
4	工艺条件允许时,孔采用后开方式	可用
5	在孔的位置点固定导热工艺板	不可用
6	增加支臂装置	可用
7	分次序焊接	可用
8	工装压头采用铜材料	可用

5 结论

1) 应用TRIZ理论解决生产难题的流程是:先进行分析问题,然后用TRIZ理论工具进行解决,再对创新方案进行现场实施验证评估,最终确定生产实际应用的方案。

2) 对不锈钢轨道车辆车体焊接变形控制的行业难题,首先进行现有专利检索分析,明确从焊接热量方向进行分析问题,然后对焊接过程建立功能分析图,分析有害功能和不足功能,之后再用因果链分析法找到产生焊接变形的根本原因。用技术矛盾、物理矛盾、物-场分析、效应理论等工具寻找解决不锈钢车体焊接变形的控制方法,并进行现场

验证。验证结果表明:所采用的方法能有效控制焊接变形,提升产品质量,特别是对于电阻点焊工艺在碳钢车体的应用方面,可将车体整体平度由原来的3 mm/m提升到2 mm/m,不仅满足铁路总公司对车辆提升质量要求的目标,也可为今后的全国铁路车辆换型发挥重要作用。

3) 应用TRIZ理论解决实际生产难题,可以找到技术系统中存在的矛盾,分析可以利用的资源,找到解决问题的方法。

参考文献

- [1] 孟保仓,张怀军,陈建新,等. TRIZ理论在钢铁行业技术创新的应用[J]. 包钢科技,2016,42(4):48.
- [2] 吉林省科学技术工作者服务中心. 创新方法(TRIZ理论)及应用[G]. 长春:吉林省科学技术工作者服务中心,2013.
- [3] 王庆军,冯耕,李晓青,等. 企业创新方法实务:一线创新工程师读本[M]. 北京:化学工业出版社,2018.
- [4] 于复生,王日君,冯耕,等. 一线工程师创新方法应用案例[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
- [5] 赵丽玲,葛少平,唐衡彬,等. 高速动车组端墙焊接变形控制[J]. 电焊机,2018,48(3):344.
- [6] 赵敏,张武城,王冠殊. TRIZ进阶及实战-大道至简的发明方法[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [7] 齐二石,仲伟俊,刘春晓,等. 创新方法教程(初级)[M]. 北京:高等教育出版社,2015.

(收稿日期:2019-07-03)