

高速低地板有轨电车座位区降噪方案

潘敏凯 陈云莎

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的] 随着低地板有轨电车的应用场景日益广泛, 为了适应市场对更高运行速度的需求, 新型高速低地板有轨电车应运而生。为了确保高速低地板有轨电车在提升运行速度的同时, 能够保持良好的噪声性能, 需对其开展整车噪声方案优化研究。[方法] 基于 FE(有限元)-SEA(统计能量分析)方法, 建立整车 SEA 模型, 通过声学软件进行车内噪声仿真预测。基于仿真预测结果, 结合车下空间的实际结构情况, 提出座位区降噪方案, 并进行隔声仿真计算与整车噪声方案优化研究。[结果及结论] 对于整车车内噪声, 列车在 100 km/h 匀速运行工况下, 车内噪声不满足设计目标要求, 最大噪声值位于中间车 1.2 m 高处, 主要声源为轮轨噪声, 声能量主要通过贯通道和转向架区的地板传递进入车内。通过优化筋板夹角和面板厚度, 可使型材 2、型材 3 的计权隔声量分别提升 3.3 dB 和 5.1 dB。若进一步增加面板厚度, 可使型材 4 和型材 5 的计权隔声量分别提升 4.3 dB 和 6.4 dB。结合型材参数及地板断面优化方案, 优化后的车内噪声能够满足车内噪声限值要求。

关键词 有轨电车; 高速低地板; 降噪方案

中图分类号 U270.16

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.045

Noise Reduction Scheme for High-speed Low-floor Tram Seating Areas

PAN Minkai, CHEN Yunsha

(CRRC Nanjing Puzhen CO., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] With the increasingly wide application scenarios of low-floor trams, new high-speed low-floor trams have emerged to meet the market demands for higher operating speed. To ensure that high-speed low-floor trams can maintain good noise performance while increasing the operating speed, it is necessary to carry out research on the optimization of the whole vehicle noise scheme. [Method] Based on the FE (Finite Element)-SEA (Statistical Energy Analysis) method, a SEA model of the whole vehicle is established, and the vehicle interior noise is simulated and predicted through acoustic software. Based on the simulation and prediction results, combined with the actual structure of the under-vehicle space, a noise reduction scheme for the seating area is proposed, a

sound insulation simulation calculation and an optimization research on the whole vehicle noise scheme are carried out. [Result & Conclusion] In terms of the whole vehicle interior noise, when the train is running at a constant speed of 100 km/h, the interior noise does not meet the requirements of the design target. The maximum noise value is located at a height of 1.2 m in the middle car, and the main sound source comes from the wheel-rail noise, and the sound energy is transmitted into the carriage mainly through the gangway floor and the bogie areas. By optimizing the angle of the stiffener plate and the thickness of the panel, the weighted sound insulation amounts of Profile 2 and Profile 3 can be increased by 3.3 dB and 5.1 dB respectively. If the panel thickness is further increased, the weighted sound insulation amounts of Profile 4 and Profile 5 can be increased by 4.3 dB and 6.4 dB respectively. Based on the optimization scheme of the profile parameters and the floor section, the optimized vehicle interior noise can meet the requirements of the interior noise limit.

Key words tram; high-speed low floor; noise reduction scheme

近年来, 高速低地板有轨电车以造价低廉、上下客方便等优点受到国内外专家和企业的广泛关注。由于低地板有轨列车不设专用线路, 与其他列车共用道路, 所以对其产生的环境噪声有较高的要求。因此, 改善高速低地板有轨电车的车内噪声环境, 特别是降低车内座位区的噪声, 对于提高高速低地板有轨电车的市场竞争力具有实际意义和社会效益^[1]。

我国的学者对高速低地板有轨电车进行了大量研究。文献[2]以 70% 低地板轻轨列车为例, 对比降噪前后的车内噪声, 提出一套可行的无内装 70% 低地板轻轨列车车体降噪方法。文献[3]对 70% 低地板列车进行了动力学和声学仿真分析, 同时对特定频率下的各部件声场贡献量进行了计算, 得出车顶声场贡献量较大的结论。文献[4]通过对 100% 低地板列车进行线路测试, 研究了显著声源的

传递路径,研究结果表明,可通过提高列车的结构密封性来降低车内噪声。文献[5]采用 FE(有限元)-SEA(统计能量分析)方法,建立低地板列车的噪声预测模型,分析了车内噪声的分布规律及各子系统的噪声贡献率,得出了一些有效的减振措施。

本文采用 VA One 软件对整车的车内噪声进行仿真预测,根据低地板有轨电车的座位区和车下空间实际结构情况,提出多种隔声优化组合方案,并分别对其进行仿真计算,以列车噪声限值指标对其进行综合评价,得出座位区的最优降噪方案,使列车声学设计满足车内噪声限值要求。

1 低地板有轨电车车内噪声分析

1.1 车内噪声来源

本文研究的高速低地板有轨电车噪声主要来自轮轨噪声、牵引噪声、气动噪声及辅助设备噪声。国内外大量的研究表明,当列车运行速度小于 35 km/h 时,列车牵引电动机及辅助设备噪声为噪声的主要成分;当列车运行速度为 35 ~ 250 km/h 时,轮轨噪声为噪声的主要成分;当列车运行速度大于 250 km/h 时,空气动力噪声为噪声的主要成分。本文的列车运行最高速度为 100 km/h,在该速度范围内,列车车内噪声的主要声源为轮轨噪声。

轮轨噪声是在车外产生的,主要通过空气传播和结构传播两种途径传递至车内。空气传播主要指噪声通过空气为介质传递至车内。空气传播噪声又分为透射声和直达声两种,透射声指透过车厢壁板和车窗等传递至车内的噪声,直达声指透过门缝等缝隙直接传递至车内的噪声。结构传播主要指轮轨系统的振动在通过一系悬挂和二系悬挂传递后仍存在较高的能量,该能量会引起车厢地板、门窗和侧板等车内结构件的振动,进而向车内辐射噪声。

1.2 车内噪声控制

目前,从控制声源的产生和控制传播途径两个方面对列车车内噪声进行控制。①控制声源:轮轨噪声是由车轮和钢轨相互作用所产生的,故控制轮轨噪声也是从车轮和钢轨两个方面着手进行的;开展车轮和钢轨的低噪声设计,对于降低轮轨噪声,进而降低车内噪声有显著作用,但轮轨系统的低噪声设计难度较大、成本较高。②控制传播途径:控制传播途径是目前常用的方法;针对透射声所采用的方法主要为增加车体结构的隔声性能,如优化铝

型材结构、在壁板中填充隔声材料等。

由以上分析可知,侧墙、地板、顶板对车体的隔声性能有较大的影响,需建立隔声仿真计算模型,并对其隔声量进行计算。其中,座位区的地板隔声指标较高,为达到要求需采取多种措施,如型材优化、铺设吸声材料和隔声毡等。

2 整车模型建立及车内噪声仿真

2.1 建立整车结构模型

高速低地板有轨电车为 3 节编组,动车为 2 节头车,拖车为中间车。头车分为站立区(低地板区)和座位区,座位区下是转向架。根据有轨电车 CAD(计算机辅助设计)图纸和三维模型,建立整车结构模型。通过 FE-SEA 方法,建立声学模型并进行初步仿真计算,简化不影响整车声学分析的结构部分,以提高仿真计算效率。

2.2 整车 SEA 模型建立

将结构模型导入声学仿真软件 VA One,基于低地板高速电车列车部件、车体结构和声源分布特点,建立高速低地板有轨电车头车和中间车的 SEA 模型,如图 1 所示。

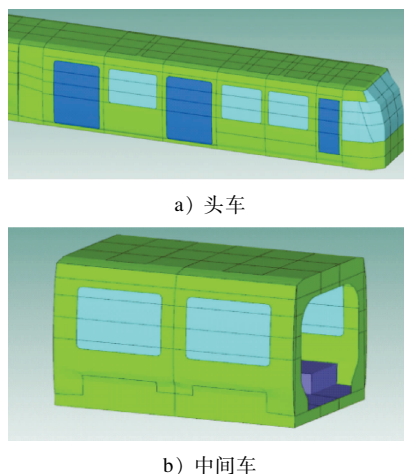


图 1 头车及中间车 SEA 模型

Fig. 1 SEA models of head car and middle car

根据统计能量分析方法的计算要求和 ISO 3381:2005 *Railway applications-Acoustics-Measurement of noise inside railbound vehicles* 标准规定的测点位置,划分整车车内声腔子系统,如图 2 所示。

2.3 列车噪声源

根据列车声源设备安装位置和车下结构,在对应位置设置声源(见图 3),包括超级电容、牵引变流器、辅助电源箱、空气压缩机、制动电阻、空调机组、

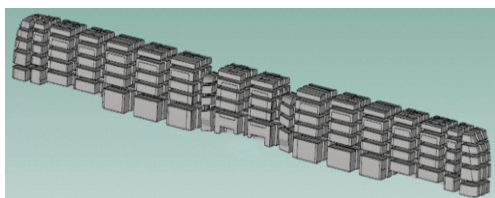


图2 整车车内声腔子系统划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the interior acoustic cavity subsystem division of the whole vehicle

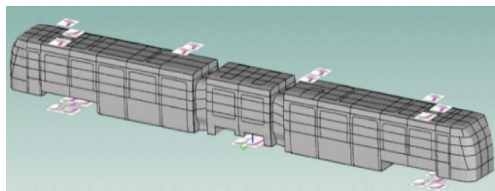


图3 声源布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sound source layout

司机室通风单元、客室通风单元、牵引电动机及轮轨噪声声源,列车噪声声源为实测噪声数据。

2.4 车内噪声仿真

将上述声源数据作为列车模型的仿真参数,在100 km/h 匀速运行工况下,车内噪声云图如图4所示。100 km/h 匀速运行工况下,距离地面高度为1.2 m 和1.6 m 处,车内各区域噪声如表1所示。

由表1可知:100 km/h 匀速运行工况下,车内噪声最大处在中间车位置,头车及中间车座位区的噪声值高于75 dB(A),初步仿真的隔声量设置不满足限值要求。因此,需进一步优化列车局部区域

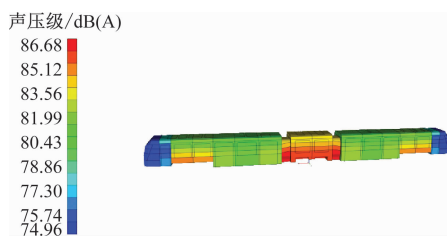


图4 100 km/h 匀速运行工况的车内噪声云图

Fig. 4 Cloud map of interior noise under the vehicle operation condition at a constant speed of 100 km/h

表1 距离地面不同高度处的车内各区域噪声

Tab. 1 Noise in various areas inside the vehicle at different heights from the ground

距地面高度/m	头车座位区噪声/ dB(A)	中间车座位区噪声/ dB(A)
1.6	82.3	84.8
1.2	83.5	85.7

的隔声性能,使头车及中间车座位区的声学设计满足车内噪声限值。

2.5 座位区噪声源分析

100 km/h 匀速运行工况下,车内噪声值远高于设计目标值,且噪声主要来源于车下的轮轨区域,其主要原因为:①该区域集中了轮轨噪声源、电动机噪声源及齿轮箱噪声源;②该区域形成了一个近似封闭的空间,轮轨噪声有所增强;③该区域中的贯通道距离较近,由于过小半径曲线的原因,贯通道的隔声性能较低,从该区域进入车内的噪声也较大。

3 座位区降噪方案

3.1 中间车座位区地板断面降噪方案

根据现有型材的隔声相关研究结果,在型材总厚度不变的情况下,其隔声量与多种因素有关,包括各面板厚度、筋板夹角和材料属性等。由于中间车座位区地板的隔声指标较高,一般降噪措施难以达到要求,因此针对该处地板铝型材进行优化设计,改变其面板厚度和筋板夹角,以提高组合结构的隔声量。

对座位区型材优化方案分别进行隔声仿真计算,型材优化参数及计权隔声量如表2所示,型材2—型材5的断面示意图如图5所示。

表2 座位区地板型材优化参数及计权隔声量

Tab. 2 Optimized parameters of the floor profiles and the weighted sound insulation amount in the seating area

名称	上面板厚度/mm	筋板厚度/mm	下面板厚度/mm	筋板夹角/(°)	总厚度/mm	计权隔声量/dB
原型材	2.7	2.5	3.5	42	50	36.4
型材2	4.2	1.8	2.0	55	50	39.7
型材3	4.2	1.8	2.0	60	50	41.5
型材4	3.3	2.0	4.3	55	50	40.7
型材5	3.2	2.0	4.3	60	50	42.8

注:总厚度指型材上表面至下表面的厚度。

对比原型材同型材2、型材3的隔声量仿真计算结果可知,在型材总质量几乎不变的条件下,改变筋板夹角和面板厚度可使计权隔声量分别提升3.3 dB和5.1 dB。对比型材4和型材5的隔声量仿真计算结果可知,增加面板厚度能进一步提升隔声性能,计权隔声量分别提升了4.3 dB和6.4 dB。结合铝型材的实际加工工艺要求,选择型材5作为最终优化方案。

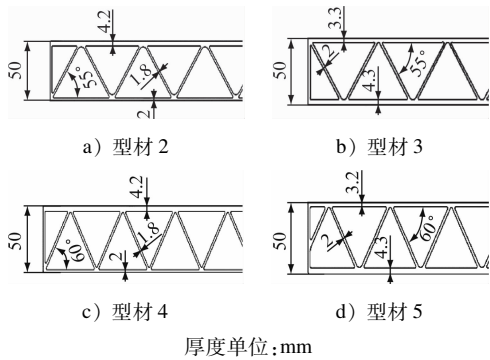


图5 型材2—型材5断面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cross-sections of Profile 2 to Profile 5

由于车体地板较低,转向架两侧有靠近地面的裙板,与地面围成较为封闭的区域,形成较强的混响区,使该区域的噪声较大。针对这一特点,在车下铺设吸声材料以获得较好的降噪效果。车下除枕梁等区域外,预留空间约为12 mm。中间车地板断面降噪方案参数如表3所示,地板断面计权隔声量为58.2 dB。中间车地板型材优化前后的隔声量频谱对比如图6所示。由图6可知:型材优化后,全频段的隔声量均有所提升,中低频带的隔声效果更为显著。

表3 中间车地板断面降噪方案参数
Tab.3 Parameters of noise reduction scheme for the middle car floor section

项目	材料	厚度/mm
车体地板	铝型材	50.0
阻尼贴片	—	1.2
吸声材料	预氧丝棉	7.0
隔声毡	—	3.0
防火板	不锈钢	0.8
裙板内侧	预氧丝棉	12.0

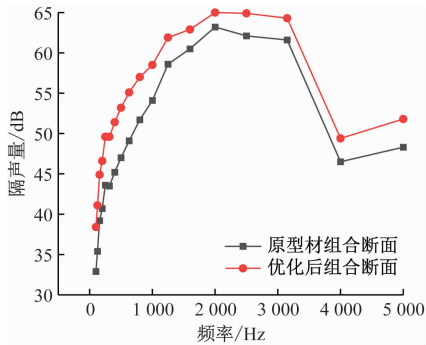


图6 中间车地板优化前后的隔声量频谱对比

Fig. 6 Comparison of sound insulation amount spectra before and after the middle car floor optimization

基于中间车座位区地板断面降噪方案,更新整车仿真参数,在100 km/h 匀速运行工况下,其优化前后的噪声仿真结果如表4所示。由表4可知:采用型材5的优化降噪方案后,车内噪声不大于75 dB(A),可满足限值要求。

表4 中间车座位区地板断面优化前后的噪声仿真结果
Tab.4 Noise simulation results in the floor section of the middle car seat area before and after optimization

降噪方案	距地面高度/m	中间车座位区噪声/dB(A)
型材5方案	1.6	74.2
	1.2	74.9
原型材方案	1.6	74.7
	1.2	75.5

3.2 头车座位区地板断面降噪方案

头车座位区地板断面降噪方案参数如表5所示。以型材5地板组合为例,地板断面计权隔声量为47.3 dB。

表5 头车座位区地板断面降噪方案参数
Tab.5 Parameters of noise reduction scheme for the floor section in the head car seating area

项目	材料	厚度/mm
车体地板	铝型材	50.0
阻尼贴片	—	1.2
隔声毡	—	3.0
防火板	不锈钢	0.8

将上述隔声仿真结果作为计算参数输入整车仿真模型,其他参数保持不变。在100 km/h 匀速运行工况下,头车座位区地板断面优化前后的噪声仿真结果如表6所示。由表6可知:头车座位区地板采用型材5的优化降噪方案后,车内噪声不大于75 dB(A),车内噪声可满足限值要求。

表6 头车座位区地板断面优化前后的噪声仿真结果
Tab.6 Noise simulation results before and after optimization of the floor section in the head car seating area

降噪方案	距离地面高度/m	头车座位区噪声/dB(A)
型材5方案	1.6	70.9
	1.2	71.6
原型材方案	1.6	75.4
	1.2	76.4

4 整车车内噪声仿真再评估

列车在静止、60 km/h 匀速、100 km/h 匀速 3 种不同工况下,对整车 SEA 模型进行车内噪声仿真计算。仿真计算中,采取的降噪措施包括:采用弹性车轮;头车、中间车座位区的地板组合方案采用表 3 和表 5 中的优化降噪参数;裙板内侧铺设吸声材料。静止工况下,列车所有辅助设备(连续工作不超过 1 min 的设备除外)均正常工作;当列车以 60 km/h 或 100 km/h 在自由声场中匀速运行时,列车所有设备均正常工作。100 km/h 匀速运行工况下,车内噪声预测结果云图如图 7 所示。不同工况下,头车、中间车座位区的噪声仿真结果如表 7 所示。

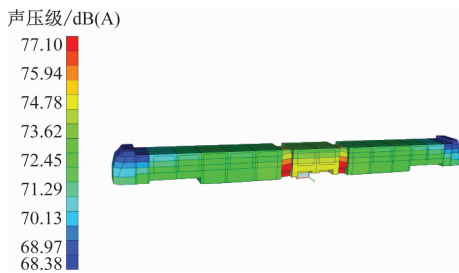


图 7 100 km/h 匀速工况下车内噪声预测结果云图

Fig. 7 Cloud map of interior noise prediction results under the vehicle operation condition at a constant speed of 100 km/h

表 7 不同工况下头车、中间车座位区的噪声仿真结果

Tab. 7 Simulation results of the noise in the seating areas of the front and middle cars under different operation conditions

工况	距离地面高度/m	头车座位区噪声/dB(A)	中间车座位区噪声/dB(A)
列车静止	1.6	60.9	56.2
	1.2	61.0	56.2
列车以 60 km/h 匀速运行	1.6	66.2	68.5
	1.2	66.8	69.1
列车以 100 km/h 匀速运行	1.6	70.9	74.2
	1.2	71.6	74.9

由表 7 可知:静止工况下,头车、中间车座位区的噪声均满足限值要求;60 km/h 匀速运行工况下,噪声值最大区域位于中间车距地面 1.2 m 高处,最大噪声值为 69.1 dB(A),主要声源为车下轮轨噪声,满足车内噪声限值要求;100 km/h 匀速运行工况下,噪声值最大区域位于中间车距地面 1.2 m 高处,最大噪声值为 74.9 dB(A),主要声源为车下轮轨噪声,满足车内噪声限值要求。

5 结论

1) 对于整车车内噪声,列车在 100 km/h 匀速工况下,车内噪声不满足设计目标要求,最大噪声值位于中间车 1.2 m 高处,主要声源为轮轨噪声,声能量主要通过贯通道和转向架区地板传入车内。

2) 通过优化筋板夹角和面板厚度,可使型材 2、型材 3 的计权隔声量分别提升 3.3 dB 和 5.1 dB。进一步增加面板厚度后,型材 4 和型材 5 的计权隔声量分别可提升 4.3 dB 和 6.4 dB。

3) 结合型材参数及地板断面优化方案,可以得到优化后的车内噪声仿真结果,以车辆噪声限值指标对其进行综合评价,能够满足车内噪声限值要求。

参考文献

- [1] 刘鸿宇,殷立阳,王秀丹,等. 多铰接 100% 低地板有轨电车隔声降噪方案分析及优化[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(3): 116.
LIU Hongyu, YIN Liyang, WANG Xiudan, et al. Analysis and optimization of noise reduction scheme for multi-hinged 100% low-floor tram[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(3): 116.
- [2] 锥磊,周劲松,李卓. 70% 低地板轻轨车车内噪声分析和降噪优化[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(4): 40.
LUO Lei, ZHOU Jinsong, LI Zhuo. 70% low-floor light rail vehicle interior noise analysis and noise reduction optimization[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(4): 40.
- [3] 邱晓磊,周劲松,马敏纳,等. 70% 低地板轻轨列车车内声学计算与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(10): 66.
QIU Xiaolei, ZHOU Jinsong, MA Minna, et al. Acoustic calculation and analysis of the inner carbody on 70% low-floor vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(10): 66.
- [4] 张捷,肖新标,张春岩,等. 100% 低地板列车车内声源识别试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4): 19.
ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, ZHANG Chunyan, et al. Experimental study on interior noise source identification for 100% low-floor railway trains[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 19.
- [5] 齐志鹏,陈江,盖磊,等. 基于 FE-SEA 混合法的低地板列车车内噪声预测[J]. 铁路技术创新, 2019(5): 100.
QI Zhipeng, CHEN Jiang, GAI Lei, et al. Prediction of noise in low floor train carriage based on FE-SEA hybrid method[J]. Railway Technical Innovation, 2019(5): 100.

· 收稿日期:2023-03-17 修回日期:2023-05-19 出版日期:2025-05-10
Received:2023-03-17 Revised:2023-05-19 Published:2025-05-10
· 通信作者:潘敏凯,工程师,panminkai@126.com
· ©《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