

中低速磁浮列车车外噪声特性及声源贡献测试分析

赵新利 贾尚帅 彭 垒 潘德阔
(中车唐山机车车辆有限公司,064099,唐山//第一作者,高级工程师)

摘 要 通过现场测试,对磁浮列车的车外噪声进行了测量。对比分析了磁浮列车外部噪声与地铁列车车外噪声的特性差异。基于声线追踪法,建立了磁浮列车的车外噪声仿真模型,并与试验结果进行了对比验证。基于该仿真模型分析了磁浮列车的车外噪声贡献。研究结果表明,当列车运行速度为 60 km/h 时,磁浮列车的车外噪声比地铁列车低 5 dB(A)左右,其车外噪声贡献主要来自于受电靴/供电轨系统,显著贡献分布在 200~5 000 Hz 频带。

关键词 中低速磁浮列车;车外噪声;声源贡献

中图分类号 TB533.2:U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.017

Characteristics and Source Contribution Test Analysis of Low-medium Speed Maglev Train Exterior Noise

ZHAO Xinli, JIA Shangshuai, PENG Lei, PAN Dekuo

Abstract Through field tests, exterior noise of maglev train is measured. The exterior noise characteristic difference between a maglev train and a metro train is compared and analyzed. Based on sound ray tracing method, a simulation model of maglev train exterior noise is established and comparatively verified with the experimental results. Based on mentioned simulation model, the contribution of maglev train exterior noise is analyzed. Research results show that the exterior noise of maglev train is about 5 dB(A) lower than that of metro train when train running speed is at 60 km/h, and its contribution mainly comes from the collector shoe and power rail system, and the noise significant contributions are distributed in 200 to 5 000 Hz frequency band.

Key words low-medium speed maglev train; exterior noise; source contribution

Author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 064099, Tangshan, China

城市轨道交通的车外噪声对沿线居民和生态具有重要影响,是关系轨道交通绿色环保、可持续发展的关键问题。城市轨道交通的车外噪声关注点有两

个:①声源识别;②声源辐射特性及其对标准点的噪声贡献。文献[1-2]建立了高速列车车外噪声预测模型,以声源识别结果作为输入,研究了车外噪声源贡献,结果表明,转向架区域和车下区域对车外噪声贡献最大,且声学灵敏度高于其他区域的声源。

不难看出,有关城市轨道交通车外噪声的研究大多集中于高速列车,对于中低速磁浮列车的研究较少,而与之相似的地铁列车噪声研究又以车内噪声研究居多。因此,研究中低速磁浮列车的车外噪声有着较大的实用意义。本文通过线路试验测试了中低速磁浮列车的运行车外噪声,并利用声线追踪法进行了车外噪声仿真计算,采用仿真与试验相结合的手段,对磁浮列车的车外噪声贡献进行了分析。本研究可为中低速磁浮列车的噪声控制提供指导和数据支撑。

1 车外噪声特性试验

1.1 测点布置

根据相关标准规定,轨道交通车辆的车外噪声评价测点设置要求为:距离轨道中心线 7.5 m、钢轨顶面 1.2 m 和 3.5 m 的测点;距离轨道中心线 25.0 m、钢轨顶面 3.5 m 的测点。高速列车的动态试验一般主要评价距离轨道中心线 25.0 m 处的测点,地铁列车则主要评价距离轨道中心线 7.5 m 处的测点,磁浮列车根据速度等级参考地铁列车。地铁列车车外噪声测点布置示意图如图 1 所示。

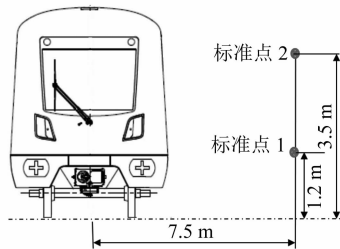


图 1 地铁列车车外噪声测点布置示意图
Fig. 1 Layout diagram of metro train exterior noise measurement points

1.2 噪声特性

根据标准点 1 和标准点 2 的位置(见图 1),分别固定一只自由场麦克风,用于监测磁浮列车的通过噪声。数据采集频率为 65 536 Hz。列车通过时的噪声计算公式为:

$$L_{Aeq,T_p} = 10 \lg \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (1)$$

$$T_p = t_2 - t_1 \quad (2)$$

式中:

L_{Aeq,T_p} ——列车通过时段内的等效连续 A 声级, dB(A);

t_1 ——车头进入测点时间, s;

t_2 ——车尾离开测点时间, s;

T_p ——列车通过的时间段, s;

$p_A(t)$ ——噪声瞬时 A 计权声压, Pa;

p_0 ——基准声压, 取为 20 μ Pa。

磁浮列车与地铁列车的车外噪声频谱差异对比如图 2 所示。其中:列车运行速度均为 60 km/h;测点距离轨道中心线均为 7.5 m;地铁列车的两个测点分别位于距离钢轨顶面 1.2 m 和 3.5 m 处;由于研究性试验的特殊要求,磁浮列车的测点位于距离钢轨顶面 1.5 m 处。

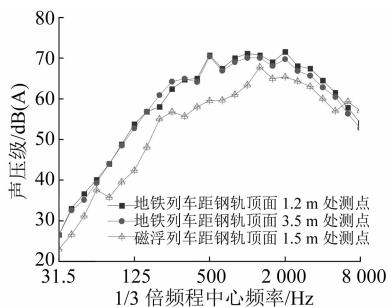


图 2 磁浮列车与地铁列车的车外噪声频谱

Fig. 2 Exterior noise spectrum of maglev train and metro train

当列车运行速度为 60 km/h 时,地铁的车外通过噪声约为 80 dB(A),磁浮的车外通过噪声约为 75 dB(A)。磁浮列车的车外噪声比地铁列车低 5 dB(A)左右。由图 2 可知:磁浮列车的车外噪声主要在中心频率为 80~1 000 Hz 的 1/3 倍频带,且该频带磁浮列车的声压级明显低于地铁列车;地铁列车的车外噪声峰值主要在中心频率为 500 Hz 和 2 000 Hz 的 1/3 倍频带,磁浮列车的车外噪声峰值主要在中心频率为 1 250 Hz 的 1/3 倍频带。

文献[3-4]的研究结果表明,轨道交通车辆在中低速运行时的噪声源主要为轮轨噪声,其显著频

带为中心频率为 500~2 000 Hz 的 1/3 倍频带。但磁浮列车的车外主要噪声源贡献尚不明确,故有必要通过试验与仿真的方法进行深入研究。

2 车外噪声仿真建模

2.1 理论方法

轨道交通车辆的车外噪声仿真建模方法很多,包括有限元-边界元方法、统计能量分析和声线追踪法等。其中,声线追踪法无论在预测精度还是在计算效率方面都具有独特的优势。因此,本文采用声线追踪法对磁浮列车的车外噪声进行建模分析。声线追踪法是用声线来表示点声源以球面波发射声波的形式,其原理如图 3 所示。

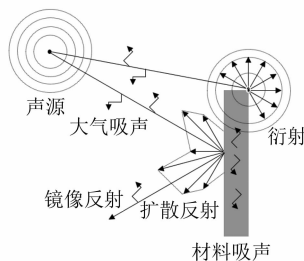


图 3 声线追踪法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sound ray tracing method

声线沿直线按声速朝一定方向传播。当遇到阻抗与空气不同的界面时,声线会发生镜像反射或扩散反射,在拐角或边界面顶点处可能伴有衍射现象。当声线发生反射时,部分声能被吸收,剩下的声能由反射声线携带。对于光滑界面,即界面上的起伏比波长尺度小得多,反射服从镜像反射规律。发生镜像反射的声线幅值取决于界面的法向声阻抗率和声线的入射角。基于声线追踪法建立磁浮列车的车外噪声模型可以考虑不同区域的声源特性,以及声源在传播过程中与界面发生的相互作用关系。

2.2 模型验证

根据一列三节编组的中低速磁浮列车实际几何尺寸,考虑轨道结构,建立磁浮列车的车外噪声预测模型,如图 4 所示。磁浮列车和轨道以实际结构作为几何边界,以材料属性体现结构特征。地面设置为混凝土介质,考虑其吸声及反射。模型输入主要声源激励包括:受电靴/供电轨系统、空调机组、空压机、辅助逆变器、牵引逆变器、充电机和悬浮电源。其中:受电靴/供电轨系统为磁浮列车运行时的关键噪声源,通过试验台测试获得 60 km/h

速度级下,受电靴/供电轨系统的声压级;其他声源为设备噪声,采用包络法测试设备以额定功率运转时的离散点声压获得其声功率。

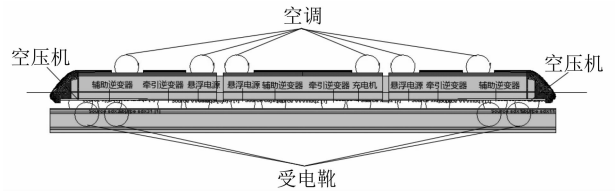


图 4 磁浮列车车外噪声预测模型

Fig. 4 Prediction model of maglev train exterior noise

受电靴/供电轨系统声源和其他各设备声源的 1/3 倍频程频谱如图 5 所示。以点声源的形式将上述声源激励加载到磁浮列车车外噪声预测模型中。在距离轨道中心线 7.5 m、钢轨顶面 1.5 m 处,沿车身纵向布置一系列的声学场点,计算车外辐射噪声。当磁浮列车运行速度为 60 km/h 时,车外噪声的预测结果与试验结果对比如图 6 所示。由图 6 可知,磁浮列车车外噪声预测结果与试验结果在频谱分布规律上基本一致,且吻合度较高,噪声总值差异在 2 dB(A) 以内。仿真模型预测结果与试验结果具有很好的一致性,验证了预测结果是可信的。

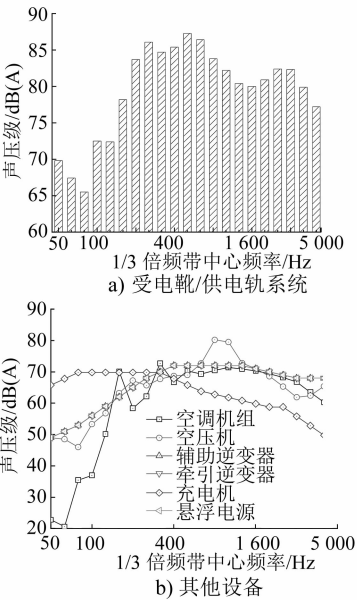


图 5 声源的 1/3 倍频程频谱

Fig. 5 1/3 octave spectrum of sound sources

3 车外噪声贡献分析

基于第 2 节经过验证后的磁浮列车车外噪声预测模型,对磁浮列车车外噪声贡献进行分析。

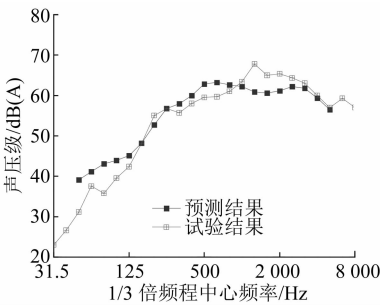


图 6 磁浮列车车外噪声预测结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between prediction results and test results of maglev train exterior noise

3.1 声场云图

在距离轨道中心线 7.5 m 处,沿车身纵向方向建立垂直于地面的面网格,用于观察距离轨道中心线 7.5 m 处的辐射声场。磁浮列车车外辐射声场云图如图 7 所示。由图 7 可知,当磁浮列车运行速度为 60 km/h 时,车外噪声主要表现为车下区域较高,特别是受电靴/供电轨系统所在位置对应的车下区域。由此可知,受电靴/供电轨系统噪声是磁浮列车车外噪声的主要噪声源。

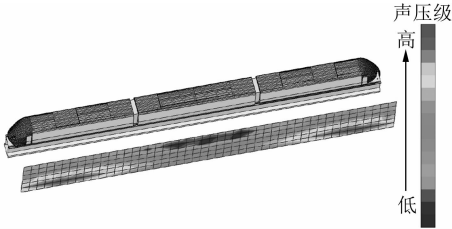


图 7 磁浮列车车外辐射声场云图

Fig. 7 Nephogram of maglev train exterior radiated sound field

3.2 频谱贡献

为了进一步明确受电靴/供电轨系统噪声以及其他设备噪声对磁浮列车车外噪声的贡献,依次只考虑一个声源的激励加载,计算对比车外噪声特性。车外噪声频谱贡献如图 8 所示。由图 8 可知:受电靴/供电轨系统接触噪声在中心频率为 200 Hz 以上的 1/3 倍频带,且均对车外噪声呈主要贡献状态,这和受电靴/供电轨系统噪声本身呈现明显的高频特性有关;相对于受电靴/供电轨系统,其他设备噪声对车外噪声贡献较低。在中心频率为 200 Hz 以上的 1/3 倍频带,按照声源贡献大小排序,依次为空调机组、辅助逆变器、牵引逆变器、悬浮电源及空压机。充电机主要在低频部分对车外噪声有一定贡献。

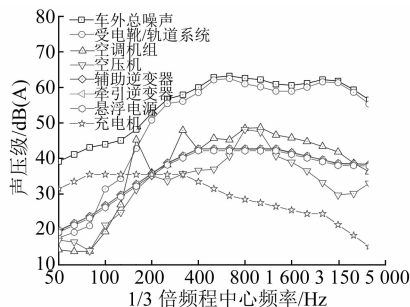


图8 车外噪声频谱贡献

Fig. 8 Contribution of exterior noise frequency spectrum

4 结语

本文通过线路试验测试了磁浮列车的车外噪声,并对比分析了磁浮列车与地铁列车的车外噪声特性差异。基于仿真模型,研究了磁浮列车的车外噪声贡献。主要获得以下结论:

- 1) 当列车运行速度为 60 km/h 时,磁浮列车的车外噪声比地铁列车低 5 dB(A) 左右;
- 2) 磁浮列车的车外噪声主要表现为车下区域较高,受电靴/供电轨系统噪声是主要噪声源;
- 3) 测试数据的 1/3 倍频程分析表明,受电靴/供电轨系统接触噪声在 200~5 000 Hz 频带对车外噪声呈主要贡献;

(上接第 85 页)

国内车辆验收中涉及较少的情况,本文首先基于 EN 14363:2016(E) 详细阐述了实验室内有无扭曲试验台情况下的两种扭曲试验方法,建立了扭曲试验台仿真模型,并分析了在空气弹簧有气和无气状态下的车辆轮重减载情况。计算结果表明,两种状态下的车辆轮重减载率均满足标准要求,且二者在数值上存在明显差异,说明空气弹簧刚度对车辆的抗扭曲安全性有明显的影响。

参考文献

- [1] ZENG J, GUAN Q H. Study on flange climb derailment criteria of a railway wheelset[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(3): 239.
- [2] ISHIDA H, MIYAMOTO T, MAEBASHI E, et al. Safety assessment for flange climb derailment of trains running at low speeds on sharp curves[J]. Quarterly Report of RTRI, 2006, 47(2): 65.
- [3] WILSON N, FRIES R, WITTE M, et al. Assessment of safety against derailment using simulations and vehicle acceptance

4) 相对于受电靴/供电轨系统,其他设备噪声对车外噪声贡献较低;

5) 控制磁浮列车的车外噪声应该重点关注受电靴/供电轨系统的减振降噪设计。

参考文献

- [1] ZHANG J, XIAO X, WANG D, et al. Source contribution analysis for exterior noise of a high-speed train: experiments and simulations[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1.
- [2] 王德威,李帅,张捷,等. 高速列车车外噪声预测建模与声源贡献量分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 3113.
- WANG Dewei, LI Shuai, ZHANG Jie, et al. Prediction of external noise of high-speed train and analysis of noise source contribution[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(12): 3113.
- [3] 杨新文,王金,练松良. 轨道交通轮轨噪声研究进展[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 100.
- YANG Xinwen, WANG Jin, LIAN Songliang. Review on wheel/rail noise in rail transit[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 100.
- [4] 刘林芽,雷晓燕. 轮轨噪声的预测[J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 101.
- LIU Linya, LEI Xiaoyan. Prediction of wheel/rail noises[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(1): 101.

(收稿日期:2020-10-13)

tests: a worldwide comparison of state-of-the-art assessment methods[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(7): 1113.

- [4] 李浩,戴焕云,汪群生,等. 等效锥度对 120 km/h 地铁车辆横向稳定性影响研究[J]. 机车电传动, 2020(3): 68.
- LI Hao, DAI Huanyun, WANG Qunsheng, et al. Research on influence of equivalent conicity on lateral stability of 120 km/h metro vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 68.
- [5] 罗湘潭,肖春昱,田师峤. 城市轨道交通车辆转向架双 T 型铰接式柔性构架动力学特性仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(10): 44.
- LUO Xiangping, XIAO Chunyu, TIAN Shiqiao. Research on the dynamic characteristics of double T-type articulated flexible frame on urban rail transit vehicle bogie[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(10): 44.
- [6] 汪群生,曾京,董浩. 基于 SIMPACK 铰接式列车的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(1): 32.
- WANG Qunsheng, ZENG Jing, DONG Hao. Analysis of articulated train dynamics performance based on SIMPACK software [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(1): 32.

(收稿日期:2020-09-16)