

300 km/h 动车组机械师室异常噪声分析与控制*

石晓玲¹ 樊康²

(1. 吕梁学院矿业工程系, 煤矿机械装备维护与检测试验吕梁市重点实验室, 033001, 吕梁;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130011, 长春//第一作者, 讲师)

摘要 针对 300 km/h 动车组机械师室异常噪声问题, 采用有限元分析与试验研究相结合的方法, 对其噪声与振动信号的频谱特性进行了分析。结合车体端墙的模态仿真计算结果, 分析了机械师室异常噪声产生的机理, 同时提出减振降噪技术措施, 有效控制了机械师室的异常噪声, 也验证了机械师室异常噪声产生机理分析的正确性。研究结果表明: 机械师室异常噪声主要是由动车组高速运行中车体端墙共振产生的, 所得研究结果为动车组异常噪声的研究与控制提供了可行的参考依据。

关键词 高速动车组; 异常噪声; 车体端墙共振

中图分类号 U270.1⁺6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.021

Analysis and Control of Abnormal Noise of 300 km/h EMU Mechanical Room

SHI Xiaoling, FAN Kang

Abstract Targeting at the abnormal noise in the mechanical room of EMU (electric multiple units) running at the speed of 300 km/h, the frequency spectrum characteristics of noise and vibration signals in mechanical room are analyzed by combining finite element analysis with experimental research. Based on the modal simulation results of the vehicle body side wall, the mechanism of abnormal noise in the mechanical room is analyzed, corresponding technical measures to reduce vibration and noise are put forward. Thus, the abnormal noise of the mechanical room is controlled effectively, and the analysis correctness of abnormal noise generation mechanism in the mechanical room is verified. The research results show that the abnormal noise of the mechanical room is mainly caused by the resonance of the EMU vehicle body side wall during high speed operation, and provide a feasible reference for further studying and controlling abnormal noise in EMU.

Key words high-speed EMU; abnormal noise; vehicle body side wall resonance

First-author's address Municipal Key Laboratory of Ma-

intenance and Inspection of Coal Mining Mechanical Equipment, Department of Mining Engineering, Lyuliang University, 033001, Lyuliang, China

随着高铁运营速度的不断提高, 铁路噪声问题日益突出, 人们对乘坐列车的舒适性有了越来越高的要求。相对于普通列车, 高铁具有高速、高架和电气化特征, 其噪声通常是由不同类型的噪声组成的。根据噪声产生部位的不同, 可将动车组噪声分为轮轨噪声、牵引系统噪声、集电系统噪声、辅助设备噪声和气动噪声等^[1]。为提高高速动车组乘坐的舒适性, 有效降低车内噪声, 许多国家科研人员一直在寻找方法来有效降低车内的噪声与振动。声源辐射的噪声按传递路径分为固体传播声和空气传播声两大类^[2]。文献[3]运用声品质方法, 分析了不同速度下的车内噪声特性。文献[4]对高速列车车厢减振降噪材料进行了研究, 同时还对车内噪声特性做了分析与评价。对于其他结构的异常噪声, 许多学者也做了研究, 文献[5]针对出口欧洲的国产某型号拖拉机驾驶室内存在的异常噪声问题, 提出利用频谱分析对异常噪声特性进行辨识; 文献[6]通过频谱分析中的 CPB (三分之一倍频程分析) 和 FFT (快速傅里叶变换) 分析方法, 确定空调室内机异常噪声的来源和频谱特性与压缩机相关。

本文针对时速 300 km/h 动车组机械师室异常噪声问题, 对高速运行下的机械师室进行了振动噪声测试。采用有限元分析与试验研究相结合的方法, 首先对机械师室噪声与振动信号的频谱特性进行了分析, 结合车体端墙的模态仿真计算结果, 分析了机械师室异常噪声产生的机理; 同时提出减振降噪技术措施, 有效控制了机械师室的异常噪声,

* 山西省高等学校科技创新项目(2019L0938); 吕梁学院 2020 年校级教学改革创新项目(JXGG202039)

也验证了机械师室异常噪声产生机理分析的正确性。研究表明,机械师室异常噪声是动车组高速运行中车体端墙共振产生的,通过整改有效抑制了车体端墙的共振,明显改善了机械师室的异常噪声,为动车组异常噪声的研究提供了可靠的理论指导。

1 机械师室振动与噪声测试

机械师室振动噪声测试为线上运行测试,车速最高为 300 km/h,依据 GB 12816 和 ISO 3381 标准进行测试并评价,测量仪器包括 1 个 12 通道实时频谱分析仪、2 个传声器、3 个单向加速度计。

1.1 噪声测点布置

试验测试中传声器为丹麦某公司生产的电容传声器,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 传声器主要技术参数	
参数	数值
传感器型号	4189-A-021
声场类型	自由场
灵敏度/(mV/Pa)	40
频率响应/Hz	1~20 000
输出阻抗/ Ω	<50
测量范围/dB(A)	16~134

为分析该高速动车组列车机械师室异常噪声的来源,在运行线路条件下,对该动车组机械师室进行噪声测试,在机械师室中部、距离地板面 1.2 m 高度处布置麦克风(对应于人坐姿耳朵的位置),其噪声测点位置如图 1 所示。测试过程分为匀速与加速工况,匀速工况列车保持 300 km/h 的速度运行。

1.2 振动测点布置

本文所研究的动车组为高速动车组,车体结构布局图 2 a) 所示,机械师室在列车纵向行进方向紧挨着车体端墙,在垂向方向机械师室位于转向架的斜上方。试验测试中对机械师室与车体端墙进行振动测试,分别在机械师室地板、后端墙、车体端墙上布置单向加速度传感器,地板上的单向加速度计垂向安装,后端墙与车体端墙的单向加速度计纵向安装,均距离地板面 1.2 m,共计 3 个振动测点。选取采样频率为 20 kHz,每次采样时间不少于 20 s;每个数据至少采集 3 次,对于平均值偏差较大的数据应予以删除;当出现猝发声或读数起伏超过 3 dB(A) 时,应停止测量,待稳定后再进行测量^[7]。

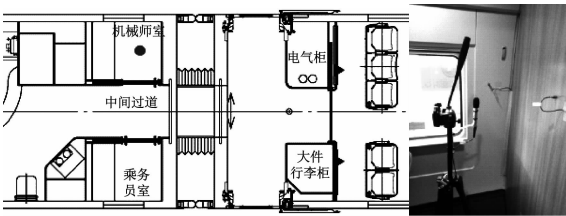


图 1 机械师室噪声测点布置示意图

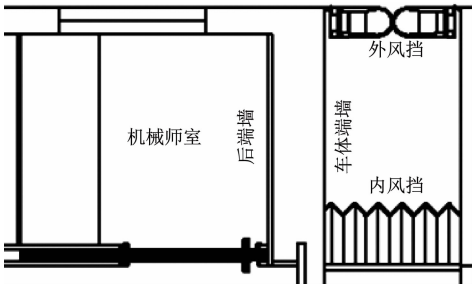


图 2 机械师室布局示意图(俯视图)

2 机械师室噪声与振动特性分析

2.1 机械师室噪声特性分析

为有效控制机械师室异常噪声,必须明确异常噪声的来源,分析异常噪声产生的机理。对采集的机械师室噪声信号进行 A 计权处理,并进行 1/3 倍频程分析及傅里叶分析,分别得出列车匀速工况下、机械师室噪声测点 1/3 倍频程图(见图 3)和窄带频谱测试结果(见图 4)。图中可见:动车组以 300 km/h 匀速运行时,机械师室内噪声测点在中心频率 40 Hz 的 1/3 倍频带出现显著峰值,40 Hz 处对应的峰值为 69 dB(A),比其他频带处峰值至少高出 8 dB(A);机械师室噪声测点窄带频谱图只在频率为 40 Hz 处出现了明显峰值,与噪声测点 1/3 倍频程图规律保持一致。

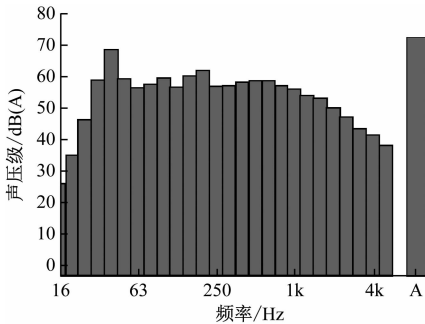


图 3 机械师室噪声测点 1/3 倍频程图

为进一步分析机械师室异常噪声是否受列车运行速度的影响,图 5 给出了列车从 0~300 km/h 加速运行过程中的机械师室噪声能量图。图中,横

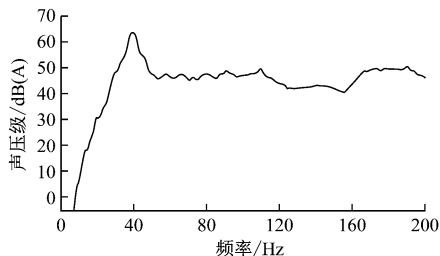


图4 机械师室噪声测点窄带频谱图

坐标为频率,纵坐标分别为相对时间与A计权声压级。由图5可见:该动车组在加速过程中,机械师室噪声在40 Hz频带存在明显亮带,对应频谱图中40 Hz显著频率;随着列车速度的增加,40 Hz车峰值声压级逐渐增大;而随列车速度的增加,40 Hz频率能量带却一直存在,不会随动车组运行速度变化发生频率改变。

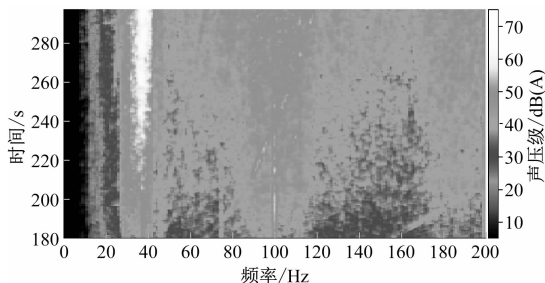


图5 机械师室噪声测点能量图

2.2 机械师室振动特性分析

本文所研究的动车组为高速动车组,从车体结构布局图可以看出,机械师室在列车纵向行进方向紧挨着车体端墙,且在垂向方向上机械师室位于靠近转向架的上方。根据机械师室噪声特性分析结果,暂不能确定造成异常噪声40 Hz附近峰值的激励源。因此,为更准确掌握机械师室异常噪声产生的根源,需进一步分析机械师室地板、车体端墙振动特性,明确频谱图40 Hz频率附近峰值的产生机理。

在分别对机械师室后端墙、地板与车体端墙振动测试后,需对振动信号进行FFT,得出动车组以300 km/h匀速运行时,机械师室各振动测点的窄带频谱如图6所示。分析可知:动车组保持300 km/h匀速运行时,机械师室后端墙、车体端墙振动测点频谱图在40 Hz处均出现明显峰值,而地板在40 Hz处无峰值,机械师室后端墙、车体端墙振动测点频谱图与噪声测点频谱图规律相一致;地板区域在40 Hz处没有峰值出现,说明40 Hz频率激励与车下悬

挂系统,尤其是转向架区域振动无关,异常噪声并非来源于动车组转向架区域振动。

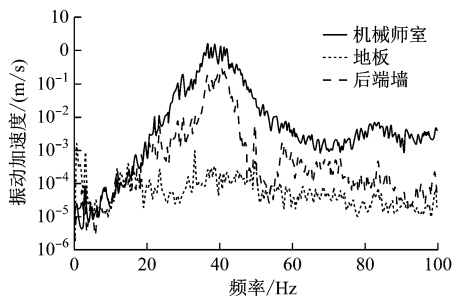


图6 机械师室各振动测点频谱图

3 异常噪声产生机理分析

3.1 机械师室车体端墙模态分析

车体端墙作为高速列车铝合金车体的重要零部件之一,主要由骨架、弯梁和外板焊接组成,其结构复杂,零部件较多。为进一步分析车体端墙的固有频率,找出异常噪声40 Hz峰值的来源,需建立符合实际情况的车体端墙有限元模型。本文利用Pro/E绘制车体端墙三维实体模型,通过Hypermesh抽取车体端墙的中面,采用shell181壳单元完成网格划分^[8]。图7为车体端墙的有限元模型。

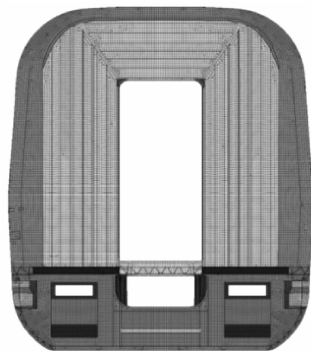


图7 车体端墙有限元模型

采用ANSYS中的Lanczos方法完成车体端墙的模态分析^[9],仿真求解车体端墙的前两阶固有频率与振型。图8和图9为仿真得出的车体端墙前两阶弯曲固有频率与振型图。该车体端墙前两阶的弯曲固有频率分别为41.7 Hz、52.2 Hz,可以看出车体端墙上的弯曲振型比较明显,一阶弯曲振型为端墙上两个铝合金型板向同一方向弯曲,二阶弯曲固有频率为端墙上的两个铝合金型板向相反的方向弯曲。

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB=1

FREQ=41.716 6

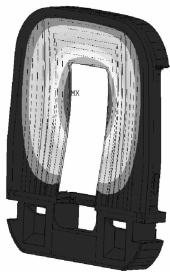
UX (AVG)

RSYS=0

DMX=5.039 87

SMN=-0.041 171

SMX=5.039 54



-0.041 171 1.087 88 2.216 92 3.345 97 4.475 01
0.523 352 1.65 24 2.781 44 3.910 49 5.039 54

图8 车体端墙一阶弯曲固有频率与振型

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB=2

FREQ=52.280 1

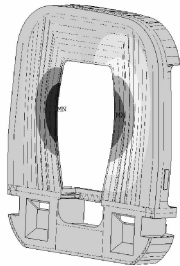
UX (AVG)

RSYS=0

DMX=5.458 61

SMN=-5.453 65

SMX=5.458 16



-5.453 65 -3.028 8 -0.603 957 1.820 89 4.245 74
-4.241 23 -1.816 38 0.608 467 3.033 31 5.458 16

图9 车体端墙二阶弯曲固有频率与振型

3.2 机械师室异常噪声产生机理分析

分析机械师室试验结果噪声频谱特性得出,机械师室噪声频谱在频率 40 Hz 附近存在明显峰值,结合机械师室后端墙与车体端墙的振动试验特性,可知机械师室后端墙、车体端墙的振动频谱与噪声的频谱特性保持着较好的一致性,均在 40 Hz 处存在较大峰值。

根据车体端墙结构有限元仿真模态计算结果,车体端墙的前两阶弯曲固有频率为 41.7 Hz 和 52.2 Hz,一阶弯曲固有频率与机械师室噪声、振动测试结果相吻合,综合试验与仿真分析结果,机械师室 40 Hz 噪声、振动峰值主要由车体端墙和机械师室后端墙共振引起的。列车在高速运行过程中,高速气流激励在车体端墙上,引起了车体端墙的共振,车体端墙结构模态的共振使机械师室产生了异常噪声。

4 减振降噪技术措施与验证

考虑到动车组运行过程中速度较高,作用在车体端墙上的气动力较大,因此从减小作用在车体端墙上的气动力方面考虑,可采取的措施较少,实施难度也比较大。本文结合现有车辆车体的结构,初

步采取改变车体端墙的固有频率的方法,抑制端墙的共振,具体减振降噪技术措施如图 10 所示:在动车组车体端墙上固定方形铝型材,包括一根横向与两根垂向铝型材,铝型材与车体端墙之间通过螺栓刚性固定。

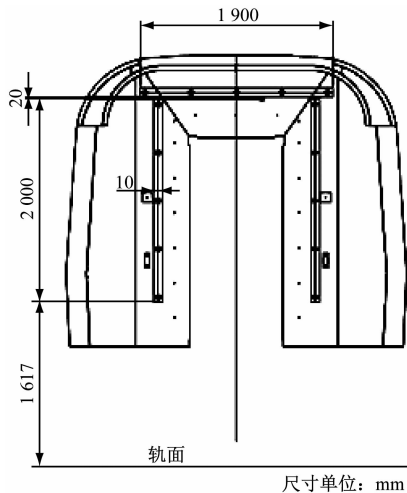


图10 车体端墙整改方案示意图

图 11 为车体端墙整改后的仿真模态计算结果,其一阶弯曲固有频率为 48.7 Hz。对比整改前车体端墙的模态结果,分析可得出:铝型材的添加增大了车体端墙的刚度,从而改变了车体端墙的一阶弯曲固有频率,由整改前 41.7 Hz 增大至 48.7 Hz,增大了 7 Hz。

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB=1

FREQ=48.686 6

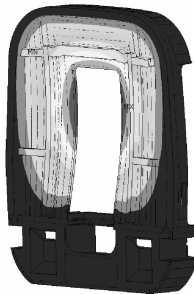
UX (AVG)

RSYS=0

DMX=4.345 71

SMN=-0.046 483

SMX=4.345 32



-0.046 483 0.929 473 1.905 43 2.881 38 3.857 34
0.441 495 1.417 45 2.393 41 3.369 36 4.345 32

图11 整改后车体端墙一阶弯曲固有频率与振型

图 12 为车体端墙整改前后机械师室噪声频谱图的对比试验结果。由图 10 可见:从机械师室噪声频谱图中可以看出峰值对应的频率右移,峰值频率从 40 Hz 增大为 45 Hz,说明车体端墙通过添加固定铝型材后,端墙的固有频率变大,动车组高速运行中车体端墙共振得到有效抑制,从而有效改善了机械师室异常噪声;车体端墙经过整改后,机械

师室噪声频谱图频率 40 Hz 处对应的峰值明显降低,峰值由整改前 62 dB(A)降低至 52 dB(A),降低了约 10 dB(A);经过车体端墙小幅度改动,有效控制了机械师室的异常噪声,验证了机械师室异常噪声产生机理分析的正确性。

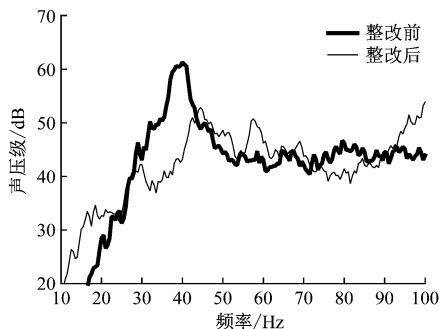


图 12 整改前后机械师室噪声频谱图对比结果

5 结论

1) 机械师室噪声频谱在 40 Hz 处存在明显峰值,且 40 Hz 频率处的噪声不随动车组运行速度的变化而改变。

2) 机械师室后端墙、车体端墙的振动频谱在 40 Hz 附近均存在明显峰值,与机械师室噪声频谱特性规律保持一致,且与车体端墙的一阶固有频率仿真结果相吻合。

3) 综合试验与仿真分析结果,机械师室 40 Hz 噪声和振动峰值主要由车体端墙和机械师后端墙共振引起的,列车在高速运行过程中,高速气流激

励在车体端墙上,引起了车体端墙的共振,车体端墙结构模态的共振使机械师室产生了异常噪声。

4) 车体端墙经过整改后,机械师室噪声频谱图频率 40 Hz 处峰值明显降低,端墙的固有频率变大,峰值由整改前 62 dB(A)降低至 52 dB(A),降低了约 10 dB(A),机械师室的异常噪声得到有效控制。

参考文献

- [1] 韩光旭,张捷,肖新标,等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22):113.
- [2] POISSON F, GAUTIER P E, LETOURNEAUX F. Noise sources for high speed trains: a review of results in the TGV case [C]// Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Munich: Springer, 2007:71.
- [3] 张伟,陈光雄,肖新标,等. 高速列车车内噪声声品质客观评价分析[J]. 铁道学报,2011(2):13.
- [4] 范蓉平. 高速列车车厢减振降噪材料和结构的一体化设计技术与性能评估方法[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [5] 张敬涛,周以齐. 拖拉机驾驶室内异常噪声分析与控制[J]. 噪声与振动控制,2017,37(2):75.
- [6] 张筱璐,黄其柏,许智生,等. 空调机异常噪声源的实验分析与诊断研究[J]. 噪声与振动控制,2009,29(3):136.
- [7] 张立军,余卓平,靳晓雄,等. 减振器异常噪声的试验研究与分析[J]. 振动与冲击,2002(1):35.
- [8] 樊康,华春蓉,闫兵,等. 某航空发动机机扭振减振器失效机理分析[J]. 机械科学与技术,2018,37(2):318.
- [9] 樊康. 直裂纹转子系统呼吸效应与振动特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

(收稿日期:2018-11-17)

(上接第 92 页)

能的影响进行了仿真,对双缆同槽及三线同槽电缆的空间磁场分布进行了描述。研究表明,优化电缆的布局方式及走线,选用合适的屏蔽材料和屏蔽体厚度,可以有效地降低动车组中电缆向空间辐射的低频磁场值,减少电磁污染,提高列车运行的安全性能。

参考文献

- [1] 章国平,康洪军. 高速动车组布线线槽电磁兼容设计[J]. 铁道机车车辆,2018(8):4.
- [2] ROBINSON M P, TURNER J D. Shielding effectiveness of a rec-

tangular enclosure with a rectangular aperture [J]. Electronics Letters, 1996, 32(17):1559.

- [3] 何金良. 电磁兼容概论[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [4] 袁岩兴. 低频磁屏蔽材料的制备与研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.
- [5] CEN. 铁路应用 机车车辆布线规则:EN 50343:2003[S]. Brussels:CEN, 2003.
- [6] 杨君,苑丰彪. 高速动车组电磁兼容性设计研究[J]. 机车电传动,2009(2):13.
- [7] 王艳琴,郝明远,汪星华,等. CRH3G 型动车组电磁兼容性的仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2014(6):146.

(收稿日期:2018-10-21)