

某纯电动客车的车内低频噪声压耳现象及解决措施

陈小评^{1,2}

(1. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023;

2. 福建省客车安全与节能技术企业重点实验室, 福建 厦门 361023)

摘要:针对某型纯电动城市客车在行驶中存在的车内低频噪声压耳现象进行研究。首先,通过试验测试及数据分析,确定压耳现象形成机理;然后,基于 CAE 仿真制定车身结构的优化方案;最后,通过实车验证,表明优化方案可行,压耳现象得到解决。

关键词:纯电动客车; 低频噪声; 压耳现象; 声固耦合

中图分类号:U461.4

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)06-0015-04

Ear Pressure Phenomenon and Its Solution to Low-frequency Noise Inside a Pure Electric Bus

CHEN Xiaoping^{1,2}

(1. Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China;

2. Key Laboratory of Bus Safety and Power-saving Technology Enterprises of Fujian Province, Xiamen 361023, China)

Abstract: This paper studies the ear pressure phenomenon of low-frequency noise in a pure electric city bus during its operation. Firstly, it determines the mechanism of ear pressure phenomenon through experimental testing and data analysis. Subsequently, it formulates an optimization scheme for the vehicle body structure based on CAE simulation. Finally, it shows that the optimization scheme is feasible and the ear pressure phenomenon is solved through the real vehicle verification.

Key words: pure electric bus; low-frequency noise; ear pressure phenomenon; acoustic-structure coupling

电动客车作为国内近年来公众出行最主要的方式,除安全性、经济性、动力性、购车及维保成本外,其乘坐舒适性也越发受到行业关注^[1],已成为客车生产厂家在新产品开发时的关键设计及验收指标之一。目前,针对传统燃油客车行驶轰鸣问题,行业内已有较成熟的解决方案^[2-5],但针对纯电动客车行驶轰鸣问题的解决方案较少。某纯电动客车在新产品开发性能验收时,发现车内前驾驶区及后排乘客位置存在压耳问题,本文对此问题进行研究,并通过 CAE 仿真分析优化顶盖骨架结构,有效地解决了纯电动客车行驶轰鸣问题。

1 车内噪声测试及仿真

该纯电动客车为电机直驱,无级变速。驱动电机

具备辅助制动和能量回收功能。悬架系统采用前、后板簧非独立悬架。在进行行驶工况的 NVH 主观评价时,发现驾驶区及后排乘客区的压耳现象较为严重,且路况越差,问题越严重;相反,路况越好,压耳现象就越不明显。而当其在良好的沥青路面上行驶,压耳现象基本消失。因此,初步判断压耳问题与路面有关,而与动力及传动系统无关。较大概率是路面激励通过悬架激起车身板件振动,压缩了车身腔体空气体积,产生声固耦合效果,从而导致了较为严重的压耳问题。下面进行具体研究分析^[6]。

1.1 噪声及振动试验

以一般水泥路面 60 km/h 匀速行驶为测试工况,进行车内噪声及振动试验^[7-8]。在驾驶区和前排、中排、后排乘客区各布置一个声传感器,同时在空调回

收稿日期:2024-05-22。

第一作者:陈小评(1984—),男,工程师;主要从事客车底盘总布置工作。E-mail:chenxp@mail.king-long.com.cn。

风口的顶盖骨架处布置一个加速度传感器。

图1为车内噪声测试结果,从图中可看出,驾驶区的噪声峰值高达108.4 dB(C),所处频率为21.3 Hz;前排乘客区的噪声峰值高达105.5 dB(C),所处频率为21.5 Hz;中排乘客区的噪声峰值为101.3 dB(C),所处频率为21.4 Hz;后排乘客区的噪声峰值达到109.1 dB(C),所处频率为21.2 Hz。驾驶区及前排、后排乘客区位置的噪声分别比目标值高出5.4 dB(C)及2.5 dB(C)、6.1 dB(C)。其主要噪声能量集中在低频段。

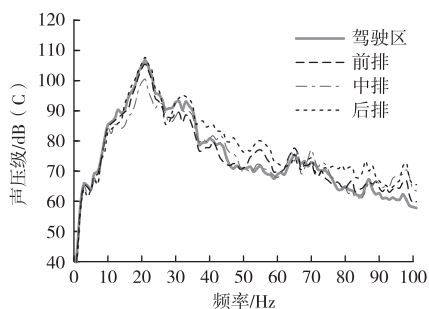


图1 车内噪声测试结果

图2为空调回风口顶盖骨架处的Z向振动测试结果。由于只有整车Z向振动会显著引起车内空间压缩,故本文只测Z向振动情况。Z向加速度峰值为 1.42 m/s^2 ,频率为21.4 Hz,该频率与车内噪声峰值所在频率相吻合,故可以初步判定顶盖Z向振动与车内声腔存在耦合作用。

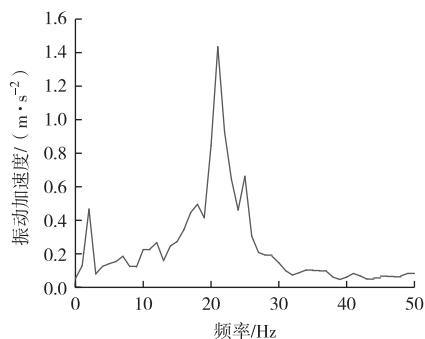


图2 顶盖骨架处的Z向振动测试结果

1.2 顶盖传递函数试验

为明确车身顶盖振动的传递路径,有必要对车身顶盖的传递函数进行测试^[9]。将Z向加速度传感器布置在空调回风口的顶盖骨架处,力锤的激励位置位于传感器附近。

图3为空调回风口顶盖骨架处的Z向传递函数测试结果。从图中可以看出,顶盖Z向传递函数的峰值频率为21.6 Hz。根据传递函数测试结果及车身顶盖的振动特性,可得出由于外部激励与车身顶盖模态耦合发生共振,从而导致顶盖振幅偏大的结论。

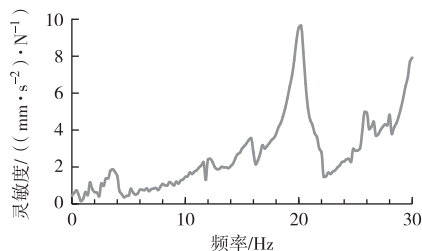


图3 顶盖骨架处的Z向传递函数测试结果

1.3 压耳现象形成机理

压耳现象是指车内产生的一种低频轰鸣声,听起来仿佛耳朵进水受压一样,因此被称为“压耳”。客车车身主体结构是由矩形管材、铁蒙皮焊接而成,具有频率较低的声腔模态。当顶盖大幅度振动时,会通过声固耦合作用,使车内气体产生较大的声压脉动,进而使乘员出现明显压耳感^[10]。

纯电动客车低频压耳问题主要是路面激励通过悬架系统传递至车身,导致车身板件振动,引起车内压差变化并与声腔模态耦合,导致车内噪声被放大。因此,有必要对簧下质量振动的偏频进行测试。由图4可知,前悬架簧下质量的振动在17.2 Hz,与响应峰值频率21.4 Hz相差较大;后悬架簧下质量的振动在20.4 Hz处存在明显的峰值,该振动频率很接近车身顶盖模态频率,因此引起了顶盖共振,进而使车内乘员有较明显的压耳感,此现象与NVH主观评价结论相吻合。

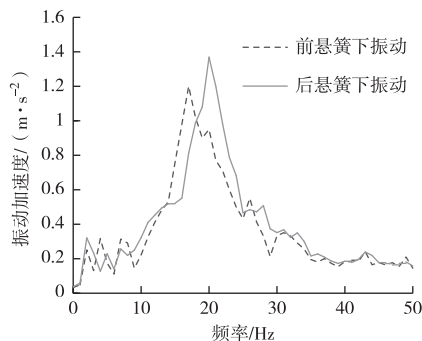


图4 前后悬架下位置振动偏频测试结果

1.4 CAE 仿真

由前面分析可知,车内压耳现象是后悬架簧下质量与车身顶盖骨架模态耦合所导致的。故建立 TB 级 NVH 分析模型,并进行模态分析,对车身骨架进行结构优化^[9,11]。

应用 CAE 仿真软件,在纯骨架有限元模型基础上增加蒙皮、封板、玻璃及内外饰件,搭建 TB 模型,如图 5 所示。

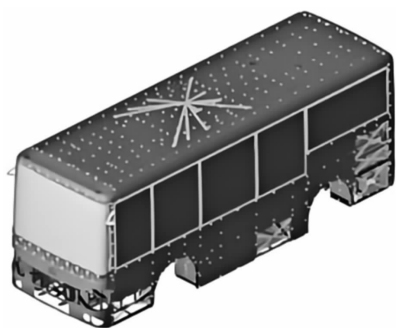


图5 TB 有限元模型

在 TB 有限元模型的基础上进行自由模态分析,重点观察 20~25 Hz 顶盖回风口处的模态。为便于更清晰地分析车身骨架结构,显示结果时,有必要去掉车身蒙皮与玻璃等干扰信息,只保留车身骨架,如图 6 所示。

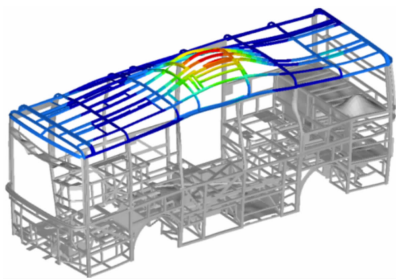


图6 改进前顶盖局部模态

通过 CAE 仿真可知:

1) 回风口处原点传递函数试验测试峰值频率在 21.6 Hz,仿真分析其呼吸模态频率在 22.3 Hz,两者基本吻合,可确定有限元模型有效可信。

2) 如图 1 所示,测试结果显示车内噪声 C 计加权峰值在 21.2 Hz,与 CAE 仿真值 21.4 Hz 非常接近。后悬架簧下质量振动偏频在 20.4 Hz,顶盖频率在 22.3 Hz,说明顶盖存在共振,顶盖的振动与车内声腔产生

声固耦合,从而产生压耳问题。说明回风口处的局部模态对其有重要影响,需进行优化改进。

2 车内压耳改进方案验证

2.1 车身顶盖骨架优化方案及仿真分析

车身顶盖骨架优化改进有两种方案,分别是 CASE1 方案和 CASE2 方案。

2.1.1 CASE1 方案及仿真

在原结构基础上于回风口前端增加一根顶弧杆(如图 7 所示),规格为 30 mm×30 mm×2.0 mm,与其他顶弧杆保持一致。相应的仿真分析结果如图 8 所示。车身呼吸模态频率由原来的 22.3 Hz 增加到 23.4 Hz(图 8),但是模态位移也由原来的 1.60 mm 增加到 1.75 mm,故该方案仍存在一定的风险。

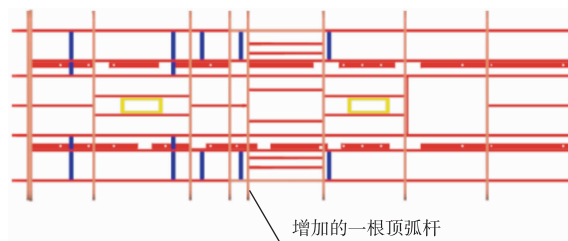


图7 CASE1 方案顶盖状态

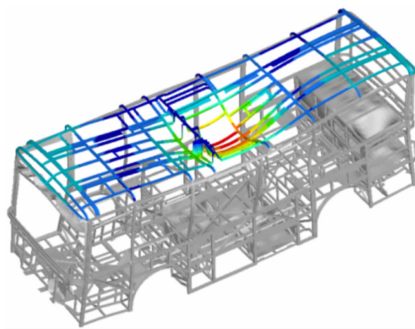


图8 CASE1 方案顶盖局部模态

2.1.2 CASE2 方案及仿真

在原结构基础上于回风口前后端各增加一根顶弧杆(如图 9 所示),规格为 30 mm×30 mm×2.0 mm,与其他顶弧杆保持一致。相应的仿真分析结果如图 10 所示。车身呼吸模态频率由原来的 22.3 Hz 增加到 25.2 Hz(图 10),与后悬架簧下质量的振动偏频相差了 4.8 Hz,满足避频要求。同时,模态位移也由原来的 1.60 mm 减小到 0.92 mm。从理论上讲,压耳现象

将会得到显著改善。该改进方案的成本不高且满足避频和降低模态位移的要求,因此选择该方案实施和试验验证。

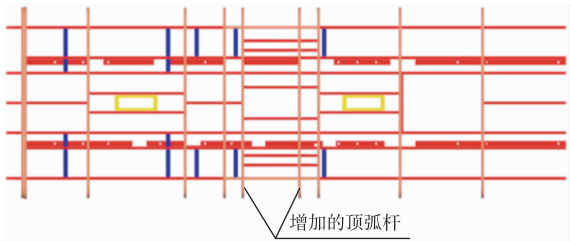


图 9 CASE2 方案顶盖状态

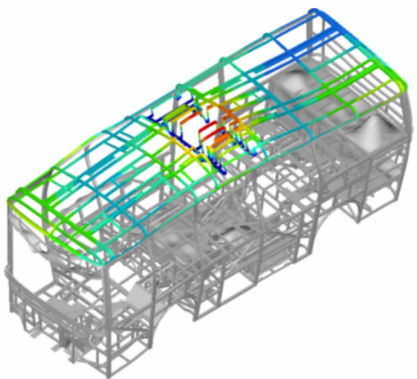


图 10 CASE2 方案顶盖局部模态

2.2 车身顶盖骨架优化方案试验验证

采用 CASE2 化方案进行顶盖物理结构改进后,车辆在一般水泥路面上以 60 km/h 匀速行驶车身顶盖骨架的车内噪声测试结果如图 11 及表 1 所示,所有位置的声压级均满足要求(≤ 103 dB(C))。再次组织车辆主观评价小组对改进后的车辆进行 NVH 主观评价,全体主观评价工程师一致认为压耳现象消失。

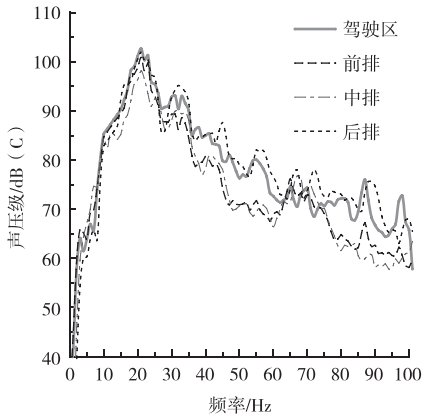


图 11 改进后车内噪声测试结果

表 1 改进前后的车内噪声均方根值测试结果

测试位置	声压级/dB(C)	
	改进前	改进后
驾驶区	108.4	102.7
前排	105.5	100.9
中排	101.3	98.2
后排	109.1	102.0

3 结束语

本文针对客车车内低频噪声压耳现象提出一种基于 CAE 仿真分析的结构优化方法,根据主观评价及试验测试数据初步捕捉噪声源,然后基于声固耦合有限元模型对车内噪声进行仿真分析,最后针对车身顶盖骨架结构进行优化,从而解决压耳现象。在今后设计开发过程中,建议顶盖骨架 1 阶模态频率与悬架簧下质量的振动偏频相隔 2.5 Hz 以上,这样可有效减轻行驶过程中车内低频噪声的压耳感。

参考文献:

[1] 杨晓光,朱际宸,王一喆,等. 汽车变革发展中的城市交通系统重构与研究综述[J]. 交通运输研究,2022(3):2-20.

[2] 陈海建. 客车车内轰鸣声优化改进[J]. 客车技术与研究, 2021,43(3):51-53.

[3] 林银聚. 某后置发动机客车车内轰鸣声原因及改进[J]. 客车技术与研究,2021,43(2):26-28.

[4] 林小燕. 某客车行驶轰鸣声研究[J]. 客车技术与研究, 2022,44(4):39-42.

[5] 胡德卿. 车内轰鸣音的声固耦合频率响应分析及优化[J]. 机械研究与应用,2023,36(6):128-132.

[6] 邹杰,牛腾飞,王朝建,等. 某电动汽车 NVH 性能主观评价方法研究[J]. 机械工程师,2023(2):52-54.

[7] 杨晓芳. 汽车车内噪声的分析及控制[J]. 装备制造技术, 2011(10):152-154.

[8] 鲁显睿. 汽车 NVH 设计中振动与噪声控制技术研究[J]. 汽车测试报告,2023(20):25-27.

[9] 颜伏伍,郑灏,卢焱华,等. 微型客车轰鸣噪声源的识别与控制[J]. 汽车工程,2015,37(4):446-450.

[10] 庞剑,湛刚,何华. 汽车噪声与振动:理论与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:77-84.

[11] 杨仕祥,史文库,陈志勇,等. 某商用车轰鸣问题的分析与控制[J]. 汽车工程,2018,40(2):214-220.