

自动旅客运输系统车辆结构噪声仿真研究*

朱冬进¹ 徐海大¹ 周劲松²

(1. 中车浦镇阿尔斯通运输系统有限公司, 241007, 芜湖;

2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 为研究自动旅客运输系统的车内结构声特性,通过建立有限元仿真模型,基于现场测试和多体系统动力学模型,分别得到车下电机和空气弹簧的振动激励。将激励施加到车体进行结构噪声仿真测试,计算分析车内结构噪声声压级和噪声频谱特性。研究结果表明:在电机和空气弹簧的结构振动激励下,车内结构噪声响应存在多个峰值,特别是在 315 Hz 处,各个观测点的 A 计权声压级较大;车体中部结构声较大,与其他 4 个观测点相比,其 A 计权总声压级高 3 dB(A)左右。

关键词 自动旅客运输系统; 车辆; 结构噪声

中图分类号 U270.1⁺1:U239.9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.046

Simulation Research on APM System Vehicle Structure Noise

ZHU Dongjin, XU Haida, ZHOU Jinsong

Abstract To study the interior structural sound characteristics of APM (automated people mover) system, by establishing finite element simulation model, based on field tests and multi-system dynamics model, vibration excitations of off-vehicle motor and air spring are obtained. By applying excitations to car body and carrying out structure noise simulation tests, the interior structure noise sound pressure level and noise spectral characteristics are calculated and analyzed. Research results show that under the structural vibration excitation of motor and air spring, there are multiple peaks in the interior structure noise response, especially at 315 Hz, the A-weighted sound pressure level of each observation point is relatively larger. The carbody middle section generates larger structure sound, and compared with the other four observation points, the A-weighted total sound pressure level is about 3 dB (A) higher.

Key words APM system; vehicle; structure noise

First-author's address CRRC Puzhen Alstom Transportation System Co., Ltd., 241007, Wuhu, China

自动旅客运输 (APM) 系统是一种独具特色的城市轨道交通形式^[1]。随着国民生活水平的不断提升,交通运输工具本身的振动和噪声已经成为衡量装备性能的重要指标^[2-4]。

本文针对 APM 车辆建立了车内噪声有限元仿真预测模型,分别对其结构模态和声学模态进行分析得到其振型特性。通过现场测试,得到电机对车体结构的振动激励,并且建立了 UM(多体系统)动力学仿真模型,用以得到空气弹簧施加于车体结构上的振动激励。基于建立的有限元模型和结构振动激励计算得到车内的结构声响应,并分析其频域特性,为改善 APM 车内噪声环境提供参考。

1 APM 车体有限元模型

1.1 车体结构有限元模型

APM 车辆由车顶、侧墙、端墙、地板等部分组成。将既有车体三维模型导入到 Hypermesh 软件中,对局部复杂部分进行必要的简化处理并对其进行抽中面和网格划分处理,进而得到简化后的车体有限元模型,见图 1。其网格大小为 50 mm × 50 mm。

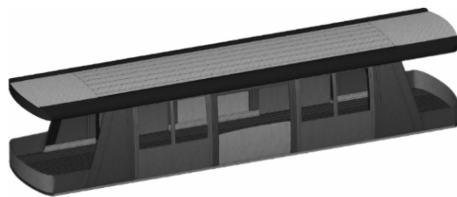


图 1 简化车体有限元模型

Fig. 1 Finite element model of simplified car body

1.2 车体声腔有限元模型

在简化车体有限元模型的基础上,补全车窗等必要单元网格,使其形成密闭空间,进而建立车内声

* 安徽省重大科技专项(202103a05020033)

腔有限元模型,见图 2。模型单元尺寸为 50 mm × 50 mm。

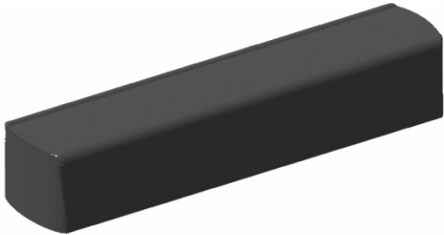


图 2 声腔有限元模型

Fig. 2 Finite element model of acoustic cavity

2 模态分析

2.1 结构模态分析

通过结构模态分析可确定设计机构或者零部件的振动特性,并且得到由结构本身特性和材料决定的固有频率和固有振型。本文采用 HyperWork 软件的 OptiStruct 求解器,对整个车体进行模态求解,得到车体前 30 阶的固有频率和固有振型。图 3 为几个具有代表性的模态振型。

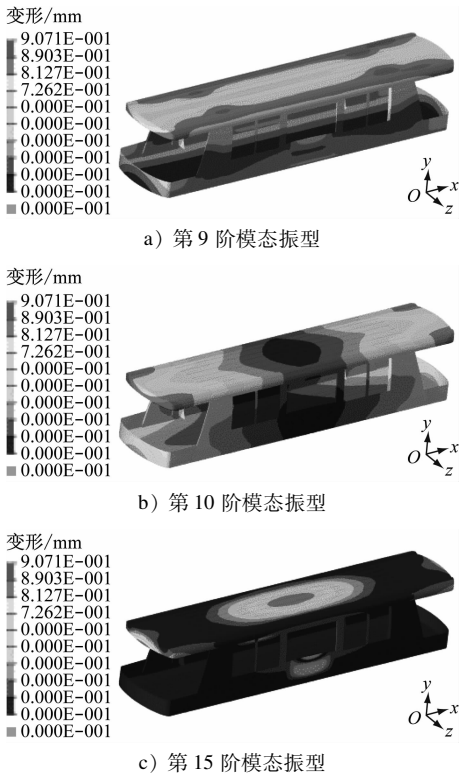


图 3 部分结构模态振型

Fig. 3 Partial structural modal shapes

从图 3 中可以看出:第 9 阶模态振型为菱形振型,车体变形主要集中在车顶两侧;第 10 阶模态振

型为扭转振型,车体变形主要集中在车顶的 4 个边角处;第 15 阶模态振型为呼吸振型,车体变形主要集中在车顶中心和侧墙中部。

2.2 声学模态分析

当车门及车窗封闭时,车厢内为封闭空腔。在一定的声学模态频率下,车厢内不同位置会产生不同的声压分布,从而形成声学模态振型。当结构系统产生的振动频率与声腔产生的模态频率相近时,声腔容易产生共鸣导致噪声放大。对图 2 中的声腔有限元模型进行声学模态分析,设置空腔内介质密度和声速等参数,其中空气密度取 1.225 kg/m³,声速为 340 m/s,计算得到车内声学模态前 20 阶频率,见表 1。从表 1 中可以看出:第 1 阶声学模态频率远小于 1 Hz,为整车客室内空腔的声学共振。第 1 阶声学模态频率远小于人类听力的范围,故对整车的舒适性影响较小。

表 1 声学模态频率表

Tab. 1 Acoustic modal frequencies

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	7.9×10^{-7}	11	75.38
2	14.36	12	78.90
3	28.72	13	79.41
4	43.04	14	85.69
5	57.34	15	85.86
6	64.81	16	87.74
7	67.11	17	93.76
8	71.60	18	97.87
9	71.87	19	99.98
10	74.09	20	100.09

图 4 为部分具有代表性的模态振型。从图 4 中可以看出:第 2 阶声学模态为纵向声学模态,声压最小出现在车体中部,从车体中部沿纵向向两端增大;第 6 阶声学模态为横向声学模态,声压最小值出现在车体横向一截面处,并向两侧递增;第 10 阶声学模态为垂向声学模态,声压最小值出现在车体垂向一截面处,并沿垂向递增;第 12 阶声学模态为综合叠加模态,声压最大值出现在车底,为 95.5 dB,并向车顶处递减。

3 获取载荷

3.1 获取电机激励

电机悬挂于车体下方,电机振动将直接作用于

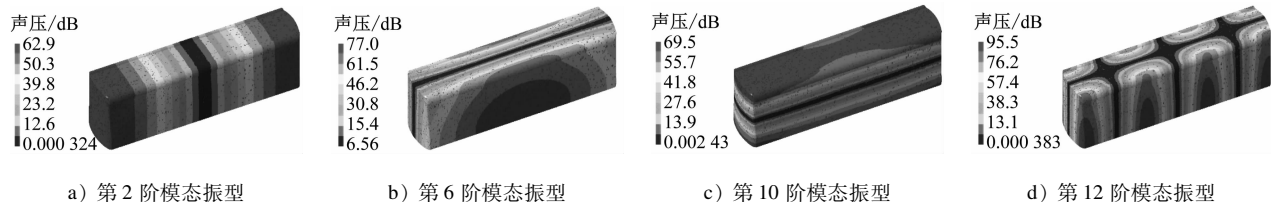


图4 部分声学模态振型

Fig. 4 Partial acoustic modal shapes

车体结构。因此,可对 APM 车辆车下电机处振动进行测试,并将测试得到的结果与电机质量相乘,即得到电机处的激励。

3.2 空气弹簧激励获取

来自路面的激励通过车轮及空气弹簧的衰减形成二系悬挂力作用于车辆底部,从而造成结构噪声。本文通过 UM 动力学软件来获取空气弹簧处的二系悬挂力。如图 5 所示,车体模型包括 1 个车体、2 个轴桥、4 个走行轮和 8 个导向轮。将车体和道路部分相互连接、耦合后,即可提取其中的垂向二系悬挂力。

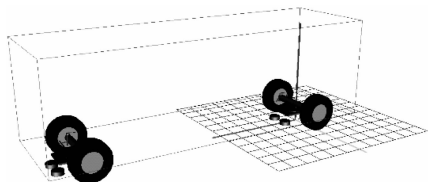


图5 UM 动力学模型

Fig. 5 UM dynamics model

4 车内声学响应分析

根据 GB/T 3499—2011《声学轨道车辆内部噪声测量》和 GB/T 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值和测量方法》,在模型中分别选取车体一位端、一位端车门、车体中部、二位端车门、车体二位端共 5 个观测点,如图 6 所示。5 个观测点位于地板上方 1.6 m 处。

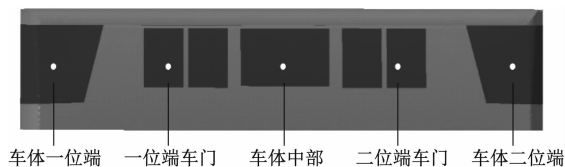


图6 客室内声压级观测点位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sound pressure level observation points in compartment

各观测点的频率响应 A 计权声压级频谱如图 7 所示。

由图 7 可以看出:随着振动频率的提升,车内各观测点的声压级逐渐升高;各观测点在振动频率范围内存在多个明显的噪声峰值,其中所有观测点都在 315 Hz 产生了较大的结构声响应,并且达到了最大的声压级,且最大声压级分别为 71.43 dB(A)、72.41 dB(A)、75.19 dB(A)、71.38 dB(A) 和 71.72 dB(A);此外,车体一位端、二位端车门和车体二位端均在 630 Hz 处产生了噪声峰值,而且噪声峰值分别为 67.85 dB(A)、63.78 dB(A)、65.34 dB(A);一位端车门和车体中部在 500 Hz 处产生了噪声峰值,且噪声峰值分别为 68.12 dB(A)、62.58 dB(A);车内 5 个观测点的 A 计权总声压级分别为 73.45 dB(A)、72.91 dB(A)、76.12 dB(A)、72.38 dB(A) 和 73.23 dB(A),由此可见:在 315 Hz 处出现的不同程度的结构声响应,是导致车内结构噪声的主要原因;车体中部噪声较大,其余 4 个观测点的噪声值差别不大。

5 结语

本文基于某 APM 车辆结构,采用现场测试和建立 UM 动力学模型相结合的方式,分别得到了电机和空气弹簧对车体的振动激励,结合建立的有限元模型进一步得到电机激励和空气弹簧激励下的车内结构噪声响应。分析其噪声特性,得出以下结论:

1) 在电机和空气弹簧的结构振动激励下,车内结构噪声响应存在多个峰值,特别是在 315 Hz 处,各个观测点的 A 计权声压级较大。

2) 车体中部的结构声最大,与其他 4 个观测点相比,其 A 计权总声压级高 3 dB(A) 左右。

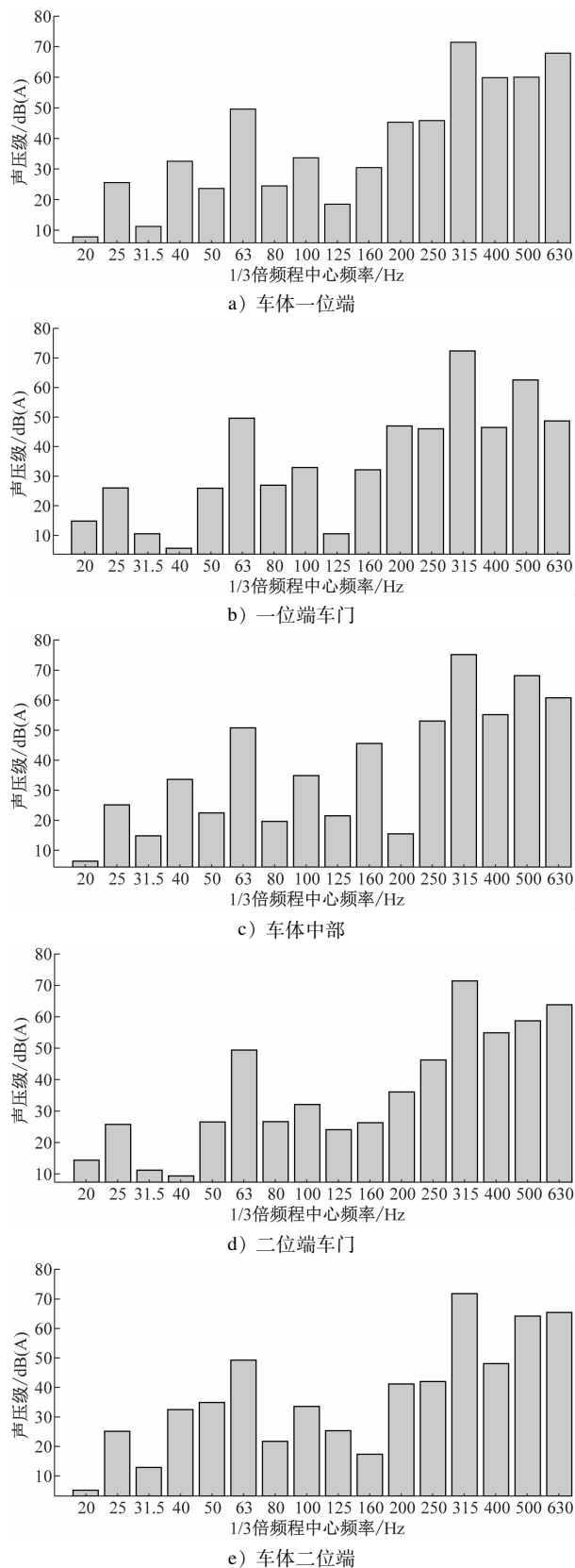


图7 各观测点频率响应A计权声压级频谱

参考文献

- [1] 牛悦丞,李芾,刘方伟,等. APM 系统在城市轨道交通中的运用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022(2): 1.
NIU Yuecheng, LI Fu, LIU Fangwei, et al. Application research of APM system in urban rail transit[J]. Electric Locomotive and Mass Transit Vehicles, 2022(2): 1.
- [2] 乔宇锋. 板结构辐射声的声品质基础理论研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
QIAO Yufeng. Research on basic theories of the radiation sound quality from plate structures[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [3] 肖勇. 局域共振型结构的带隙调控与减振降噪特性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
XIAO Yong. Research on bandgap control and vibration and noise reduction characteristics of local resonant structures [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [4] 王磊,常书刚. 潜艇噪声与综合降噪技术的应用[J]. 航海技术, 2007(2): 44.
WANG Lei, CHANG Shugang. Application of submarine noise and comprehensive noise reduction technology[J]. Marine Technology, 2007(2): 44.
- [5] 刘哲,高云凯,徐翔,等. 关门时车内声场的仿真与试验研究[J]. 汽车工程, 2021(6): 909.
LIU Zhe, GAO Yunkai, XU Xiang, et al. Simulation and experimental study on vehicle interior sound field during door closing [J]. Automotive Engineering, 2021(6): 909.
- [6] 张强,何东伟. 机械激励下高速列车车内低频噪声分析[J]. 机电一体化, 2021(3): 13.
ZHANG Qiang, HE Dongwei. Analysis on low-frequency noise of high-speed train by mechanical excitation [J]. Mechatronics, 2021(3): 13.
- [7] 贺昊原. 400 km/h 高速列车车头车内噪声仿真预测[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
HE Haoyuan. Simulation and prediction of the interior noise of the head car of a 400 km/h high-speed train [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [8] 田云坤. 地铁车辆车内噪声原因分析及解决措施[J]. 内燃机与配件, 2021(3): 119.
TIAN Yunkun. Cause analysis and solution of noise in metro vehicles[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(3): 119.
- [9] 陈智伟. 基于传递路径的某车型低频噪声分析与优化[D]. 长春:吉林大学, 2020.
CHEN Zhiwei. Analysis and optimization of low-frequency noise of a vehicle based on transfer path [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

(收稿日期:2022-06-08)

Fig.7 A-weighted sound pressure level spectrum of frequency response of each observation point