

# 基于约束力的轨道车辆空调结构振动响应预测

贾小河 张瑞刚 冯旭伟

(石家庄国祥运输设备有限公司, 050035, 石家庄)

**摘要** [目的] 空调机组作为车辆舒适性调节的重要装备,其在正常制冷运转时,压缩机和风机会产生振动,而过大的振动会引起车辆内部结构振动和噪声,进而影响人们乘坐的舒适性,因此需研究轨道车辆空调结构振动的响应问题。

[方法] 基于约束力理论建立相关模型;通过有限元仿真对车辆空调设计阶段可能引起的结构振动及噪声进行预测,并测试了降低车辆空调组装完成后的振动和噪声的各种工况。

[结果及结论] 通过仿真方法可以有效地预测空调机组在压缩机和风机激励下结构振动响应,减少空调机组装车后的车内振动问题。

**关键词** 轨道交通; 空调结构; 约束力; 振动响应

**中图分类号** U270.38

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.013

## Prediction for Vibration Response of Railway Vehicle Air-conditioning Structure Based on Constraint Force

JIA Xiaohe, ZHANG Ruigang, FENG Xuwei

(Shijiazhuang King Transportation Equipment CO., Ltd., 050035, Shijiazhuang, China)

**Abstract** [Objective] The air-conditioning unit, as an essential equipment for passenger comfort regulation in vehicles, generates vibration from the compressor and fan during normal cooling operation. Excessive vibration can lead to internal structural vibration and noise in the vehicle, thereby affecting passenger comfort. Therefore, it is necessary to study the vibration response of the air-conditioning structure in railway vehicles. [Method] A model based on the theory of constraint force is established. Finite element simulation is used to predict the structural vibration and noise that may occur during the design phase of vehicle air conditioning. Various operating conditions are tested to reduce vibration and noise after the assembly of the vehicle air conditioning unit. [Result & Conclusion] Through simulation methods, the vibration response of air-conditioning unit under the excitation of the compressor and fan can be effectively predicted, thereby reducing vibration issues inside the vehicle after the installation of the air-conditioning unit.

**Key words** rail transit; air-conditioning structure; constraint force; vibration response

随着社会的进步,各城市都在大力发展公共交通,轨道交通作为城市公共交通的重要组成部分,人们对于乘坐舒适性的需求也越来越高。客车空调系统作为轨道交通车辆的重要组成部分,也得到了长足的发展。

现有交通空调,除了需满足列车制冷、制热性能外,为了提高舒适性还需满足客室车辆内部振动与噪声的要求<sup>[1]</sup>。目前,中国中车集团有限公司、阿尔斯通公司等各主机厂在采购技术规范中对空调的振动和噪声有明确要求,而且越来越多的项目对空调机组安装座处的振动要求更加严格,这就需要空调生产厂家在设计开发阶段对于空调机组安装座处的振动进行预测评估。

## 1 约束力理论

经典的 TPA (传递路径分析) 理论本质上是激励源内部激励等效至连接界面被动端,通过连接界面接触力求解。而部件 TPA 试图将激励源内部激励等效至连接界面主动端,通过约束力  $F_{bl}$  来表征激励源的固有特性<sup>[2]</sup>。

结构噪音源的约束力  $F_{bl}$  可以通过现场测试并通过公式计算得到<sup>[3]</sup>。

$$F_{bl} = Y_c^{-1} V_c \quad (1)$$

$$Y_c = [Y_s^{-1} + Y_R^{-1}]^{-1} \quad (2)$$

式中:

$F_{bl}$ ——力矢量;

$V_c$ ——速度矢量;

$Y_c$ ——振动源和接收方接触面的导纳,是振动源和接收方组合的被动属性;

$Y_s$ ——振动源的导纳;

$Y_R$ ——接收方的导纳。

## 2 仿真建模

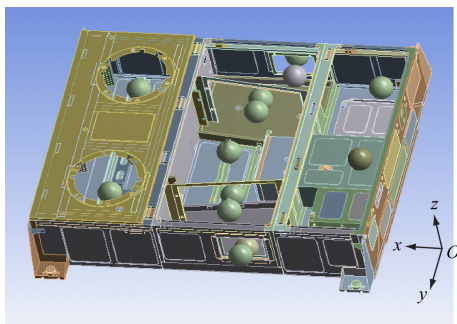
### 2.1 假设如下:

1) 线弹性假设;

- 2) 材料各向同性假设;
- 3) 钣金件以壳单元为主进行建模;
- 4) 冷凝器、压缩机等部件以体网格进行建模,并通过密度调整匹配组件质量,风机等部件以质量点的形式施加在部件质心处;
- 5) 铆钉以刚体单元进行连接,焊接处则通过节点间的合并来实现,部分区域采用刚性单元实现。

## 2.2 模型建立

模型采用标准长度为 10 mm 的四边形与三角形混合网格生成,共生成 597 746 个节点,625 914 个单元,整体有限元模型如图 1 所示。其中,针对压缩机、冷凝风机及送风机等关键部件进行详细的建模,以获取部件真实的振动响应,而后再计算通过框架结构的振动传递特性。图 2 为送风机有限元模型。



注:  $x$  轴为行车方向;  $y$  轴为宽度方向;  $z$  轴为垂直方向。

图 1 空调机组整体有限元模型

Fig. 1 Finite element model of air-conditioning unit entire structure

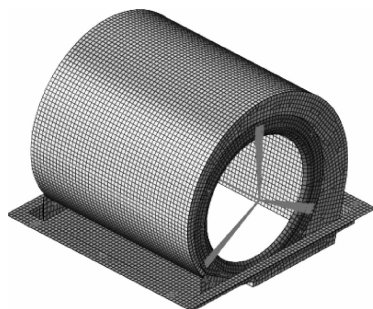


图 2 送风机有限元模型

Fig. 2 FEA model of ventilator

## 2.3 方向定义

有限元计算坐标系的定义见图 1。压缩机有限元模型(带 Bush(弹性单元))如图 3 所示。

## 2.4 边界条件

对模型安装座设置 Bush 单元模拟六自由度的减振器,并对减振器底部进行全约束固定,4 个固定点如图 4 所示。

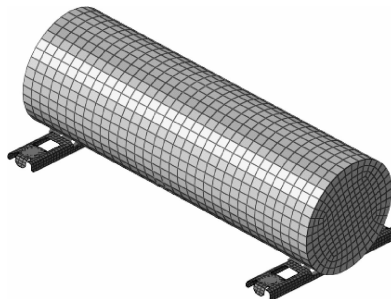
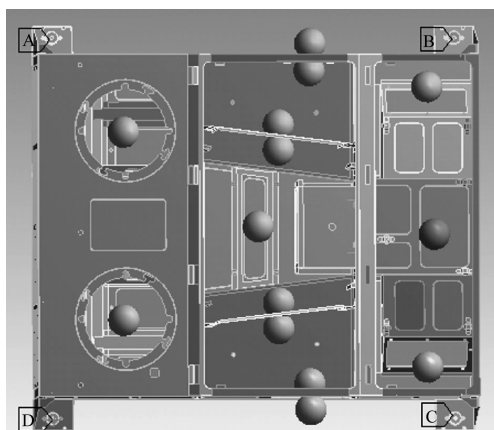


图 3 压缩机有限元模型(带 Bush(弹性单元))

Fig. 3 FEA model of compressor (with Bush (elastic unit))



注: A、B、C、D 为 4 个固定点。

图 4 边界条件

Fig. 4 Boundary conditions

## 3 仿真分析

### 3.1 参数设定

- 1) 频率范围为 3.8 ~ 116.0 Hz;
- 2) 频率间隔为 0.2 Hz;
- 3) 结构阻尼为 0.05。

### 3.2 激励幅值

激励载荷以冷凝风机、离心风机、压缩机等动不平衡量实施,幅值按额定转速时的离心力计算<sup>[4]</sup>:

$$F = e\omega^2 \quad (3)$$

式中:

$F$ ——激励力幅值;

$e$ ——转子不平衡量;

$\omega$ ——角速度。

各转动部件激励量见表 1。

### 3.3 工况分析

由于各个运动部件的安装方向不同,各自在其水平面上转动。考虑各个平衡量运行到主方向时的激励值最大,因此以主方向下的同时激励作为最

大载荷激励进行工况设置。针对该机组结构,特设定以下分析工况进行约束力计算。激励载荷工况如表2所示。

表1 转动部件激励量

Tab.1 Excitation loads of rotational components

激励源	额定转速/ (r/min)	转子不平衡量/ (g·mm)	激励载荷 值/N	激励方向
离心风机	1 420	17.9	0.39	$x$ 轴和 $z$ 轴
冷凝风机	1 410	41.7	0.91	$x$ 轴和 $y$ 轴
压缩机	2 900	128.3	2.80	$x$ 轴和 $z$ 轴

注:风机不平衡量为试验中多组试验数据的最大值;压缩机的取值均为经验值。

表2 激励载荷工况

Tab.2 Excitation load conditions

工况	激励方向
1	压缩机 $x$ 向激励,冷凝风机与离心风机 $x$ 向激励
2	冷凝风机 $y$ 向激励
3	压缩机 $z$ 向激励,离心风机 $z$ 向激励

### 3.4 分析结果

风机及压缩机运行时的共同对外激励作用下,机组的各个安装座分别在3个方向上的约束力最大值均小于目标值50 N,计算结果满足要求,具体数值见表3。

表3 安装座约束力值

Tab.3 Constraint force value of mounting base

工况	安装座约束力最大值/N			约束力的 目标值/N
	$x$ 向	$y$ 向	$z$ 向	
1	25.00	0.40	3.80	<50
2	1.30	4.80	2.80	<50
3	0.50	0.30	30.00	<50
合计	25.04	4.83	30.37	<50

由表3可知,冷凝风机与压缩机作为主要激励源,对外的激励量最大。从机组框架样式及振动形态看,结构以垂向振型为主,在外部激励下更容易激发垂向振型,引起垂向上的载荷放大。在 $x$ 向上,在压缩机载荷之外,还叠加了冷凝风机的纵向激励载荷,因此在 $x$ 向上的载荷传递也相对较大一些,但均不超过目标值。通过以上3个工况的计算可知,机组整体振动响应值相对较小,满足设计要求。

$z$ 向激励时,分析数据如图5所示。

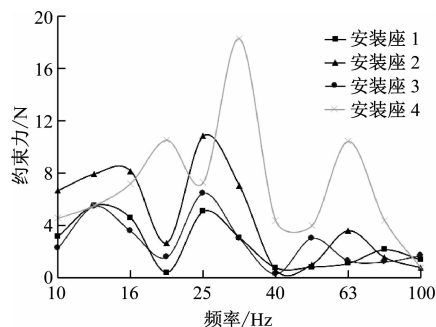


图5  $z$ 向约束力

Fig.5 Constraint force on  $z$  direction

## 4 测试试验

制作振动工装,将工装固定于地面,然后将空调机组固定到振动工装上,在机组安装座位置布置振动加速度传感器,依据 ISO 20270—2019《声学-结构声源和振动源的特性描述-约束力的间接测量》标准,首先测试振动工装的导纳,用于评估工装与列车车体的接近程度,合格后测试安装空调机组后耦合结构的导纳,耦合结构的导纳测试结果定义为 $Y_{S,R}$ ,即 $Y_c$ 。测试工装实景图如图6所示。



图6 测试工装实景图

Fig.6 Photo of test jig

对空调机组与测试工装形成的耦合结构进行动刚度测试(见图7):采用原点敲击原点测量的方式得到空调机组在10~100 Hz频段内的频响曲线和数值,测点为空调机组的安装位置;根据 ISO 9611—1996《声学-关于连接结构声辐射固体声的声源的特性-弹性安装的机械接触点处的振速测量》标准,测试时在每一个安装点均进行 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向的敲击,然后分别测试每个方向的导纳用于计算频响函数。

通过实测,通过空调机组安装座处测得约束力测试值见表4。





图7 空调机组和测试工装实景图

Fig.7 Photo of air condition and test jig

表4 安装座约束力测试值

Tab.4 Constraint force value of mounting base

工况	安装座约束力测试值/N		
	x 向	y 向	z 向
全冷	14.5	7.2	29.5

图8为仿真计算和试验结果对比。由图8可知:仿真计算结果和试验结果在个别峰值频率存在偏差,分析其原因可能是由于有限元模型不能完全反映空调机组的振动<sup>[4]</sup>;测试时无法单独施加单个方向的振动激励等原因造成的,但是通过仿真方法可有效地预测空调机组,在压缩机和风机激励下结构振动响应,为后续优化相关的结构设计提供理论依据,避免空调机组装车后的车内振动问题。

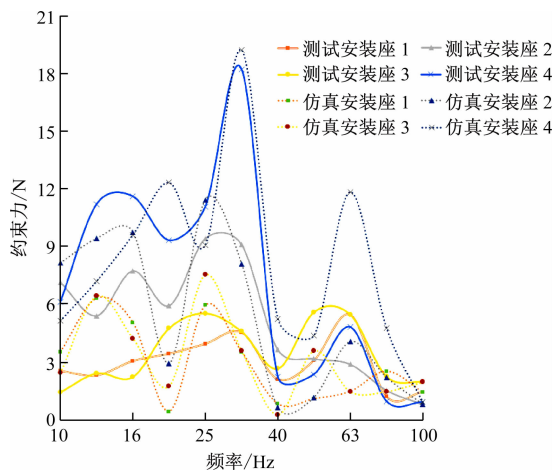


图8 仿真计算和试验结果对比

Fig.8 Comparison between FEA and test results

## 5 分析结论

通过对机组结构进行网格建模,分析并计算压

缩机及风机部件正常运转时的载荷激励通过机组结构传递到安装座的载荷,分析结果显示各工况下的载荷值均小于目标值,满足企业标准的要求。

## 6 结语

采用本文所述仿真及校验的评价方法,可在空调机组设计阶段即可对其振动水平进行评估,避免列车空调原设计流程中实际装车后由于振动导致的车厢内振动的问题,并提供了用于轨道交通列车空调的约束力仿真及测试方法和应用思路。在列车空调设计时校核空调的振动水平,可大幅降低后期装车后由于振动问题导致车体改进的成本,为相关应用研究提供了一种思路;在此基础上,增加空调机组实际约束力测试校验,为模拟空调机组的结构设计提供了理论支持和依据。

此种仿真及测试方法目前已经开始在复兴号高铁及部分海外项目上应用,后续国内诸多项目如市域车、地铁等均可应用。

## 参考文献

- [1] 谭祥军. 从这里学 NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
TAN Xiangjun. Learn NVH from here: introduction and advanced of noise, vibration and modal analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [2] ELLIOTT A, SANEI N, GLESSER M. Combining structural modification with in-situ transfer path analysis to solve noise and vibration problems [J]. International Congress on Acoustics, 2020: 754.
- [3] 刘念思, 翁建生, 郑子健. 基于 Blocked force 方法的结构振动响应预测 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 126.  
LIU Niansi, WENG Jiansheng, ZHENG Zijian. Structural vibration response prediction based on Blocked force method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 126.
- [4] 熊建强, 黄菊花, 廖群. 车辆噪声源识别理论与方法分析 [J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4): 97.  
XIONG Jianqiang, HUANG Juhua, LIAO Qun. Review of theories and methods of noise source identification of vehicle [J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(4): 97.

· 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-02 出版日期:2024-05-10

Received:2023-11-02 Revised:2023-12-02 Published:2024-05-10

· 通信作者: 贾小河, 高级工程师, xiaoh.jia@guoxiang.com.cn

· ©《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