

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-733-06

市域列车空调通风机结构优化与振动特性研究

于晓良 陈洋洋

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111)

【摘要】 针对某市域列车空调通风机异响问题,通过仿真计算和试验验证,对通风机结构强度进行了分析和优化,同时研究了不同工况下市域列车空调通风机的振动特性以及结构优化前后通风机的振动特性。结果表明:通风机电机固定架振动幅值与列车运行速度及通风机的稳定工作工况关系较小,与通风机启动影响较大;结构优化后的通风机电机固定架振动明显减小。研究结果可为轨道车辆空调通风机强度设计提供参考。

【关键词】 市域列车;空调机组;通风机;强度

中图分类号 U270.38+3 文献标识码 A

Structural Optimization and Vibration Characteristics Study on the Air Conditioning Ventilator of Suburban Train

Yu Xiaoliang Chen Yangyang

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao, 266111)

【Abstract】 Aiming at the abnormal sound problem of the air conditioning ventilator of an suburban train, the structural strength of the ventilator is analyzed and optimized through simulation calculation and experimental verification. At the same time, the vibration characteristics of the air-conditioning ventilator on the suburban train under different working conditions and the vibration characteristics of the ventilator before and after the structure optimization are studied. The results show that the vibration amplitude of the motor fixing frame of the ventilator has little relation with the running speed of the train and the stable working condition of the ventilator, and has great influence on the start-up of the ventilator, and the vibration of the motor fixing frame of the ventilator decreases obviously after the structure optimization. The research results of this paper can provide reference for the strength design of air conditioning ventilator for rail vehicles.

【Keywords】 suburban train; air conditioning unit; ventilator; strength

0 引言

轨道交通车辆空调通风系统主要用于将车厢内的温度、相对湿度、空气流动速度等车内环境控制在规定的范围内,以满足乘客乘坐舒适度要求^[1]。通风机作为空调机组中非常重要的部件,用于将空调处理过的空气送入客室并提供新鲜的空气。冯阳^[2]和罗铁军^[3]分别以单轨列车和地铁空调系统为例,归纳总结了列车空调系统常见故障及解决方案,详细说明了空调不出风、风量小等通风机相关

故障处置及风机的日常维护保养。冀春俊^[4]对离心风机叶轮结构进行了优化研究,并采用有限元仿真软件 ANSYS 进行仿真计算。靳谊勇^[5]对铁路客车空调机组整机振动性能和运行条件下车体振动可能对空调机组产生的影响进行了分析研究,避免产生共振。武孟^[6]介绍了铁路客车空调通风机常见故障及诊断方法,用频谱分析法进行了实例说明。刘晓晨等^[7]对离心式风机机架进行了有限元模态分析和模态试验,并对机架进行了谐响分析和加速度

响应试验。

本文结合某市域列车空调通风机异音问题,对市域列车空调通风机结构强度进行了优化及仿真分析,通过对列车静止及运行状态下通风机电机固定架振动测试,获取车辆各工况下空调通风机电机固定架振动特性,并对优化后通风机强度验证,对后续轨道列车空调通风机结构设计提供参考。

1 通风机结构及异音分析

市域列车每辆车客室设置两台顶置单元式空调,布置在车辆约 1/4、3/4 位置,每台空调机组内设置两台通风机、两台压缩机及两台冷凝风机,分别布置在蒸发腔、压缩机腔和冷凝腔内,其中通风机通过出风口处法兰上四个安装螺栓固定在空调机组箱体上,空调机组内主要部件布置如图 1 所示。

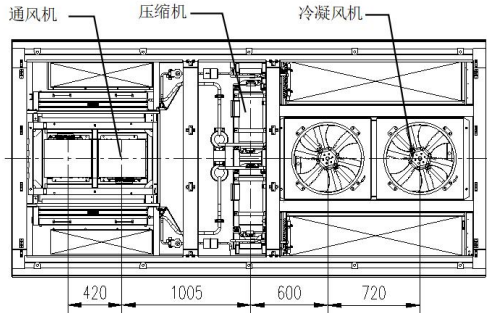


图 1 空调机组内部主要部件布置

Fig.1 Layout of main parts in air-conditioning unit

在市域列车运行过程中出现通风机异音问题,现车检查发现通风机电机固定架位置铆钉脱落、蜗壳裂纹,叶轮偏心,导致叶片与蜗壳摩擦产生异音。经分析,主要是由于风机电机固定架与蜗壳连接位置固定强度较弱导致。电机采用三点固定方式,在每个固定架对应蜗壳固定位置铆接自带螺栓的固定块,通过螺栓将电机固定架与蜗壳固定,具体结构如图 2 所示。

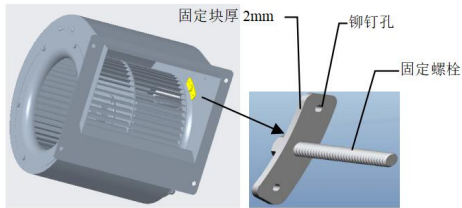


图 2 电机与蜗壳固定结构

Fig.2 Motor and spiral case fixed structure

2 通风机结构优化

针对通风机产生裂纹的位置及结构特点,优化了通风机电机固定架固定方式和蜗壳的强度,具体方案如下:

(1) 在固定电机侧蜗壳内部焊接一圈自带固定电机支架用螺栓的导流圈,优化电机与蜗壳固定方式,分散应力,同时提升蜗壳强度;

(2) 电机固定侧蜗壳厚度由 1mm 加厚至 1.5mm,提升蜗壳强度。

通风机优化后结构如图 3 所示。

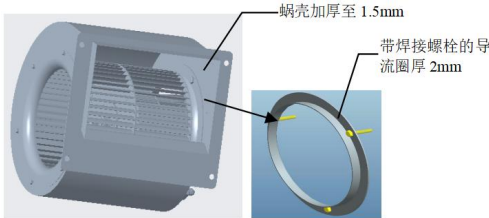


图 3 优化后结构

Fig.3 Optimized structure

3 仿真分析

通风机壳体采用 SUS304 不锈钢材质,材料性能如表 1 所示。

表 1 风机壳体材料性能参数

Table 1 Material performance parameter of ventilator

shell				
弹性模量	泊松比	密度	屈服强度	抗拉强度
/GPa		/kg·m ⁻³	/MPa	/MPa
1.93×10 ⁵	0.3	7850	205	515

建立通风机三维模型,利用 ANSYS Workbench 进行网格划分,其中风机蜗壳采用壳单元,单元形状为四边形,网格大小设置为 10mm,优化前通风机模型壳单元数量约 2.14 万个,优化后通风机模型壳单元数量约 1.85 万个;电机结构采用体单元,网格大小设置为 10mm,通风机模型体单元数量约 6500 个,扇叶部件采用集中质量点方式作用在模型上。优化后通风机网格划分如图 4 所示。

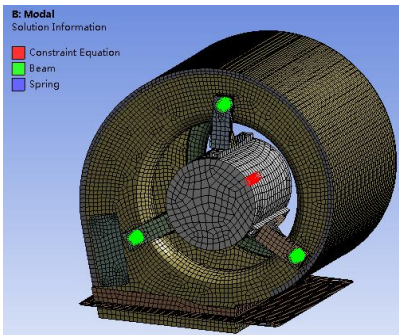


图 4 优化后通风机网格划分

Fig.4 Mesh generation of the optimized ventilator

根据能量守恒定律,采用虚位移原理,建立通风机整体结构平衡方程:

$$\{F\} = [K]\{u\}$$

其中, $\{F\}$ 为静力载荷, $[K]$ 为总刚度系数矩阵; $\{u\}$ 为节点位移量。

利用 ANSYS 有限元仿真计算,模拟通风机实际安装结构,建立约束条件时,将通风机在空调箱体上安装点的节点固定,以 X 方向为列车运行方向,即纵向, Y 方向为横向, Z 方向为垂向,在这三个方向分别施加相应加速度进行风机结构强度分析^[4],采用直接求解器求解,分别计算应力和位移。施加载荷方向如图 5 所示,在 X 方向施加 5g 载荷后的应力云图如图 6 所示,仿真计算结果如表 2 所示。

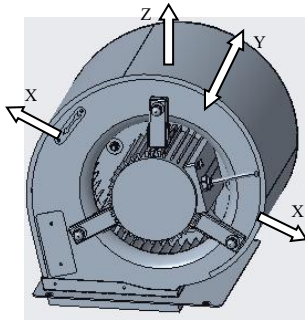
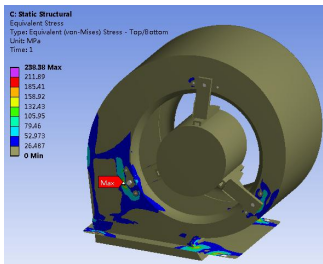
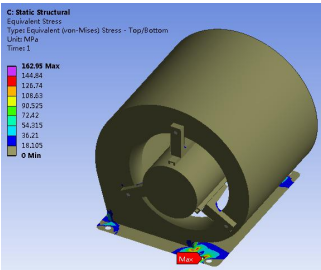


图 5 施加载荷方向

Fig.5 Direction of loading



(a) 优化前通风机应力云图



(b) 优化后通风机应力云图

图 6 X 方向施加 5g 载荷通风机应力云图

Fig.6 Stress nephogram of the ventilator with 5g load in

X direction

表 2 仿真计算结果

Table 2 Simulation results

加载方向及大小	测试项点	优化前	优化后
X 方向 施加 5g 载荷	最大应力 (MPa)	238.4	163
	最大位移 (mm)	1.42	0.77
Y 方向 施加 3g 载荷	最大应力 (MPa)	182.6	56.4
	最大位移 (mm)	0.56	0.14
Z 方向 施加 3g 载荷	最大应力 (MPa)	131.3	95.8
	最大位移 (mm)	0.8	0.43
模态	1 阶固有频率 (Hz)	29.4	41.3

由仿真计算可知,通风机整机固有频率不是风机运转频率24Hz整倍数,运转时共振可能性较小;优化前通风机所受应力最大位置在电机固定架蜗壳侧板处;优化后通风机最大应力为163MPa,小于不锈钢屈服强度205MPa,安全系数为1.26,满足使用要求;优化后通风机所受的最大应力和位移优于优化前通风机。

4 试验验证

4.1 地面试验验证

按照IEC61373-2010振动冲击试验标准^[8],对优化后通风机分别在横向、纵向和垂向顺序进行模拟长寿命试验、冲击试验、功能性随机振动试验,参照1类B级车体安装设备施加载荷,具体见表3。试验结果表明,冲击和振动试验后,外观无异常,通电后风机运转正常。

表 3 试验加载条件

Table 3 Test loading conditions

模拟长寿命试验条件					
1 类 B 级 车体安装	垂向	横向	纵向	频率范围 (Hz)	
ASD 量级 (m/s ²) ² /Hz	0.964	0.192	0.461	f_1	f_2
RMS	5.72	2.55	3.96	5	150
试验时间 (h)	5				
冲击试验条件					
类别	方向	峰值加速 度 A(m/s ²)	标称持续时 间 D (ms)	冲击次数	
1 类 B 级 车体安装	垂向	30	30	±各 3 次	
	横向	30	30	±各 3 次	
	纵向	30	30	±各 3 次	
功能性随机振动试验条件					
1 类 B 级 车体安装	垂向	横向	纵向	频率范围 (Hz)	
ASD 量级 (m/s ²) ² /Hz	0.0301	0.0060	0.0144	f_1	f_2
RMS	1.01	0.450	0.700	5	150
试验时间 (min)	15				

4.2 现车试验验证

JB/T 8689-2014 及 JB/T 7221-2017 标准对通风机产品出厂前轴承部位振动速度方均根值测试进行了要求,以测试其运转时振动特性^[9,10]。为研究空调装车后列车在静止及运行状态下通风机电机固定架与蜗壳固定处振动特性,通过在通风机电机固定架处设置振动传感器进行现车测试^[6]。

4.2.1 测点布置

选取其中一辆车的两台空调,在通风机电机固定架处设置振动传感器,以检测此位置振动特性,每台空调测点布置如图 7 所示。

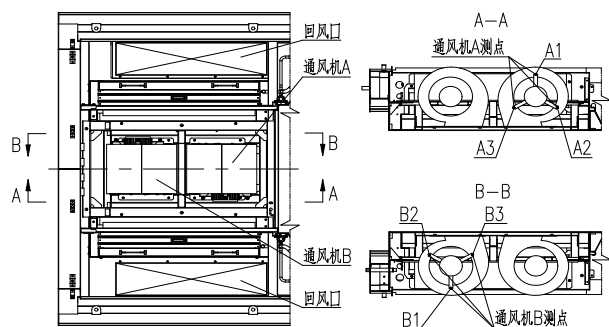


图 7 测点布置

Fig.7 Lay out of measuring point

通风机 A 和 B 的电机固定架处分别布置 3 个加速度测点,测点编号分别为 A1、A2、A3, B1、B2、B3,其中 A1 测点为三向加速度传感器,优化后测试中 B1 测点更换为三向加速度传感器。

4.2.2 现车测试

(1) 空调通风机稳定工作状态振动测试

列车在静止及线路运行条件下,根据测试情况选取四种工况进行对比分析,具体工况如下:

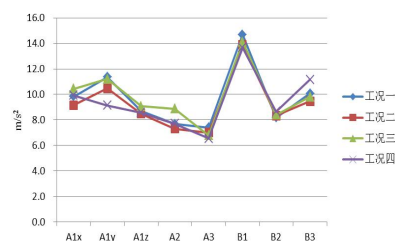
工况一:列车静止,压缩机停止,通风机稳定工作;

工况二:列车速度 150km/h,压缩机停止,通风机稳定工作;

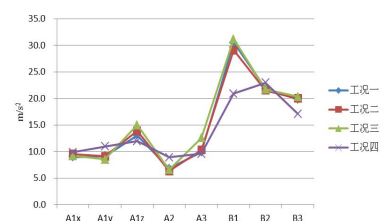
工况三:列车速度 200km/h,压缩机停止,通风机稳定工作;

工况四:列车速度 150km/h,压缩机工作,通风机稳定工作。

空调 1 和空调 2 的通风机 A 和 B 电机固定架处各测点最大振动测试值如图 8 所示。



(a) 空调 1 各测点最大振动测试曲线



(b) 空调 2 各测点最大振动测试曲线

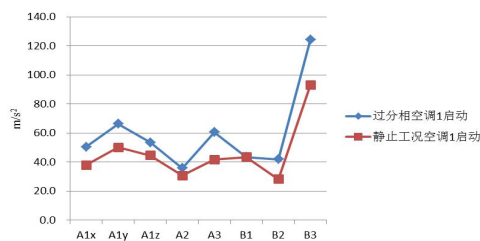
图 8 通风机稳定工作各工况下最大振动测试曲线

Fig.8 Maximum vibration test curve of ventilator under stable working conditions

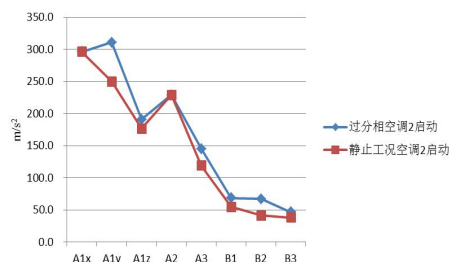
由图 8 可看出,列车不同速度等级对空调通风机稳定工作工况下电机固定架振动影响较小;压缩机工作状态对空调通风机电机固定架振动影响较小;通风机电机固定架最大振动测试值位于蜗壳顶部固定架位置,约 3.1g;稳定工作时,空调 1、2 通风机四种工况下对应各测点振动幅值差别较小。

(2) 空调通风机启动状态振动测试

列车运行线路中有分相区,当列车进入分相区时,通风机停止工作,通过分相区后,通风机启动开始工作,对列车通过分相区后及列车静止状态下通风机启动时空调通风机电机固定架进行了测试,各测点最大振动测试值具体如图9所示。图10为任一测点A1y的典型振动时频图。



(a) 空调1通风机启动时各测点最大振动测试曲线



(b) 空调2通风机启动时各测点最大振动测试曲线

图9 过分相及静止工况通风机启动时最大测试曲线

Fig.9 Maximum test curve of ventilator in over-phase and static condition at startup time

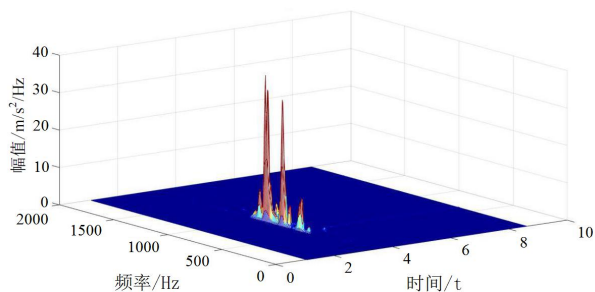


图10 空调2通风机电机固定架A1y测点的振动时频图

Fig.10 Vibration time-frequency diagram of motor fixing frame A1y measuring point of air conditioning unit 2 ventilator

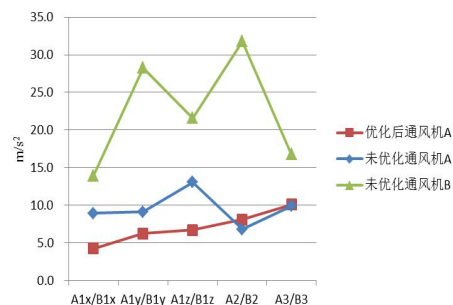
从图9和图10可看出,列车运行通过分相区后及列车静止状态下通风机启动瞬间对电机固定架处会产生较大的振动冲击,最大测试值可达30g以上;当列车通过分相区后通风机启动时对电机固定架产生较大的振动冲击,长期反复启停易造成通风机电机固定架附近蜗壳的疲劳,产生裂纹等故障,

此为通风机电机固定架处蜗壳产生裂纹进而导致异音的主要原因。

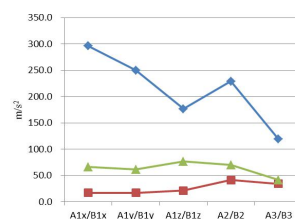
(3) 优化后空调通风机状态振动测试

将空调2通风机A更换为电机固定架固定结构优化后的风机,然后分别进行空调通风机稳态和启动工况测试。

图11为优化后通风机A与优化前通风机A和B在通风机稳态工作和启动工况下的最大振动测试值。



(a) 优化前后通风机稳态工作最大振动测试曲线



(b) 优化前后通风机启动时最大振动测试曲线

图11 优化前后通风机在稳态和启动时最大振动测试曲线

Fig.11 Test curve of maximum vibration of ventilator at steady state and start-up time before and after optimization

由图11可看出,稳定工况下优化后与未优化的通风机A电机固定架最大振动测试值约为1.0g,最大振动幅值差别不大;列车静止状态,未优化的通风机B启动工况下最大振动加速度测试值最大约7.8g,优化后通风机A启动工况下最大振动加速度约4.2g;未优化的通风机B电机固定架各测点启动冲击均大于优化后通风机A各测点启动冲击值;通风机稳定工作及启动时,优化后通风机整体振动优于未优化通风机。

5 结论

本文针对某市域列车通风机电机固定架固定强度较弱问题,从列车静止、运行状态下空调通风

机稳态工作工况、启动工况、优化前后振动对比及通风机结构强度仿真等方面进行了验证及研究,基于本次试验研究主要得到如下结论:

(1) 列车不同速度等级对空调通风机电机固定架振动影响较小;通风机稳定工作时,空调1、2通风机在四种工况下对应各测点最大振动加速度差别较小。

(2) 压缩机工作状态对通风机电机固定架测点振动影响较小。

(3) 列车运行通过分相区后及列车静止工况下,通风机启动瞬间通风机电机固定架产生较大振动冲击;稳定工作后,峰值消失。列车运行通过分相区后,通风机启动时,通风机电机固定架会产生较大的振动冲击,长期反复启停易造成通风机电机固定架附近蜗壳的疲劳,产生裂纹等故障,此为通风机电机固定架处蜗壳产生裂纹进而导致异音的主要原因。

(4) 列车静止工况,空调通风机稳定工作及启动时,优化后通风机整体振动优于未优化通风机,通风机结构优化措施有效。

参考文献:

- [1] 胡永胜,刘骏亚,曹晨,等.JB/T 7221-2017《暖通空调用离心通风机》要点解析[J].制冷与空调,2018,18(6):1-4.
- [2] 冯阳.单轨列车空调系统日常维护及常见故障分析处理[J].甘肃科技纵横,2019,5(48):31-33.
- [3] 罗铁军.地铁列车空调系统常见故障分析与对策[J].现代物业(上旬刊),2014,13(4):39-41.
- [4] 冀春俊,高亚威,孙琦,等.基于 ANSYS 的离心风机叶轮结构优化研究[J].风机技术,2016,(6):349-52.
- [5] 靳谊勇,郁永章,金新灿,等.铁路客车空调机组的振动性能试验研究[J].制冷学报,2002,(2):53-55.
- [6] 武孟,张小辉.铁路客车空调通风机常见振动故障诊断[J].制冷空调与电力机械,2008,29(123):71-73.
- [7] 刘晓晨,李振,贺磊盈,等.离心式风机机架振动分析及减振试验[J].风机技术,2018,(5):59-64.
- [8] IEC 61373-2010,Railway applications – Rolling stock equipment-Shock and vibration tests[S]. IEC, 2010.
- [9] JB/T 8689-2014,通风机振动检测及其限值[S].北京:机械工业出版社,2014.
- [10] JB/T 7221-2017,暖通空调用离心通风机[S].北京:机械工业出版社,2017.