

# 某动车组变流器风扇随机振动疲劳分析

彭其云<sup>1</sup>,孙璐<sup>2,3</sup>,马明阳<sup>2,3</sup>,徐阳<sup>1</sup>

- (1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031;
- 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司,北京 100081;
- 3. 北京纵横机电科技有限公司,北京 100094)

**摘要:**以某动车组变流器风扇为研究对象,通过扫频试验确定风扇结构的固有模态,同时进行无极调速试验验证风扇结构满载运行情况下是否会发生共振。建立风扇结构的有限元模型,将模型的固有模态与扫频试验对比,确保模型的准确性。利用 Dirlik 法和 Miner 线性损伤累积准则对风扇结构进行随机振动疲劳分析,根据实验和仿真分析结果对结构进行仿真优化。分析结果表明:优化方案避免了共振现象的发生,疲劳寿命得到显著提高。

**关键词:**动车组;风扇;振动疲劳;固有频率;共振

**中图分类号:**TB534+.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0038-04

## Random Vibration Fatigue Analysis of an EMU Converter Fan

PENG Qiyun<sup>1</sup>, SUN Lu<sup>2,3</sup>, MA Mingyang<sup>2,3</sup>, XU Yang<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
- 2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
- 3. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Development Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** Taking the auxiliary converter fan of an EMU as the research object, the natural mode of the fan structure is determined by frequency sweep test, and meanwhile the step-by-step power-on test is applied to verify whether the fan structure will resonate at full rotation. A finite element model of the fan structure is established, and its inherent mode is calculated and compared with the frequency sweep experiment to ensure the accuracy of the model. The Dirlik method and the Miner linear damage accumulation criterion are used to evaluate the fatigue damage of the fan structure, and the structure is simulated and optimized based on the results of the experiment and simulation analysis. The analysis results show that the optimized scheme avoids the occurrence of resonance phenomenon, intensifying the fan's fatigue life significantly.

**Keywords:** EMU; fan; vibration fatigue; natural frequency; resonance

## 0 引言

随着我国轨道交通行业的迅猛发展,动车在运行中的速度也在不断增加,由于路况、空气阻力等因素导致的设备随机振动强度不断增加,危及到设备的强度与疲劳性能。变流器作为动车组上重要的电气设备,如果其散热受阻,则可能导致变流器出现故障,严重时可能危及动车组的行驶安全。因此,需要对变流器风扇进行随机振动疲劳分析。

本文以某动车组变流器风扇作为主要研究对象,通过扫频试验以及无极调速试验得到风扇的固有频率和振动剧烈程度。建立风扇结构的有限元模型,并将模型的固有模态与扫频试验对比,确保模型的准确性。基于频域法对风扇进行疲劳寿命分析,并根据仿真计算结果和试验数据对风扇结构进行优化。

## 1 随机振动疲劳基本理论

设系统满足线弹性假设, $H(f)$ 是系统应力响应与激

励载荷之间的传递函数, $S(f)$ 是激励载荷的功率谱密度,可利用式(1)计算出系统的响应功率谱密度 $G(f)$ <sup>[1-2]</sup>。

$$G(f) = |H(f)|^2 \times S(f) \tag{1}$$

Dirlik 的经验表达式为

$$p(\sigma) = \frac{\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{\sigma}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{\sigma}{R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{\sigma}{Z}}}{2(m_0)^{1/2}} \tag{2}$$

$$\text{式中: } D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}; R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 - D_1^2}; D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 - D_1^2}{1 - R};$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2; Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}; Z = \frac{\sigma}{2(m_0)^{1/2}};$$

$$\gamma = \frac{m_2}{(m_0 m_4)^{1/2}}; x_m = \frac{m_1}{m_0} \left( \frac{m_2}{m_4} \right)^{1/2}, \text{其中 } m_i \text{ 是应力功率谱密度 } G(f) \text{ 的 } i \text{ 阶矩。}$$

通过式(3)计算出:

$$m_i = \int_0^{+\infty} f^i G(f) df \tag{3}$$

线性疲劳损伤累积准则基于 Miner 假设:

第一作者简介:彭其云(1995—),男,湖北潜江人,硕士研究生,研究方向为车辆结构强度分析。

$$D = \int_0^{+\infty} \frac{Np(\sigma_i)\Delta\sigma}{N_{\sigma_i}} d\sigma = \frac{N_0 T^{+5}}{C} \int_0^{+\infty} \sigma^m p(\sigma) d\sigma \quad (4)$$

式中 $N_0 = (m_2/m_0)^{1/2}$ 。结合式(2)、式(3)和式(5),当 $D = 1$ 时,可计算出疲劳寿命 $T^{[3-5]}$ 。

$$T = \frac{C}{N_0 \int_0^{+\infty} \sigma^m p(\sigma) d\sigma} \quad (5)$$

## 2 风机结构疲劳寿命仿真优化分析

### 2.1 有限元模型

风扇上下安装板及支架均采用热轧钢材,集流器和叶轮采用铝材。为了满足有限元模型计算精度的要求,根据风扇的几何形状和受力特性等因素建立风扇结构的有限元模型。风扇结构上下安装板、集流器、叶轮和支架采用板壳单元模拟,电机结构采用体单元模拟,螺栓连接通过 beam 梁进行模拟。风扇有限元模型如图 1 所示。其中  $x$  方向为铁路行车方向的纵向, $y$  方向是横向, $z$  方向为垂向。

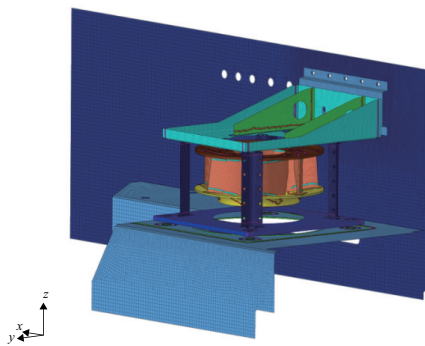


图 1 风扇有限元模型

### 2.2 模态分析

为了解风扇结构实际的动态特性,按照《GB/T 2423.10—2019 环境试验第 2 部分》:对风扇在 2~75 Hz 进行扫频,扫频时间为 30 min。同时建立风扇结构的有限元模型,并将模型的固有模态与扫频试验对比,确保模型的准确性。风扇结构的固有频率为 30.2 Hz、34.0 Hz、46.9 Hz 和 52.3 Hz,前两阶振幅较大的位置均发生在侧板上。第三阶发生在风扇上,其第三阶模态如图 2 所示。风扇作为有源部件,当其工作频率与风扇安装到箱体內的固有频率接近时,便会发生共振。为验证风扇在运行过程中是否会发生共振,对风扇进行无极调速。同时为了使振动效果明显,在风扇上施加了 4.8 g 的不平衡块,不平衡块的施加位置如图 3 所示。

选取风扇振动最剧烈的测点 5 为研究对象,测点如图 4 所示。无极调速试验结果表明风扇结构运行转速从低到高增加,当主频率为 47.15 Hz 时,横向加速度振幅达到 8g,如图 5 所示,出现突增,发生共振。分析其原因为,风扇的第三阶固有频率 46.9 Hz 与满载时 48.3 Hz 的工作频率接近引发风扇的共振,极大地缩短了风扇结构的疲劳寿命。

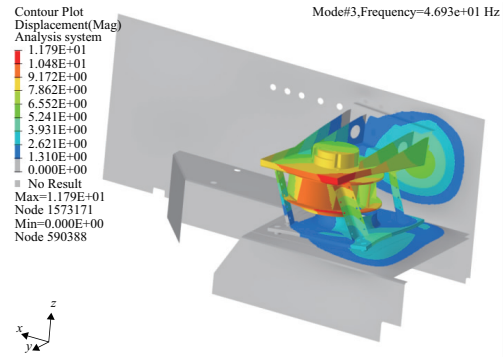


图 2 风扇第三阶模态振型图

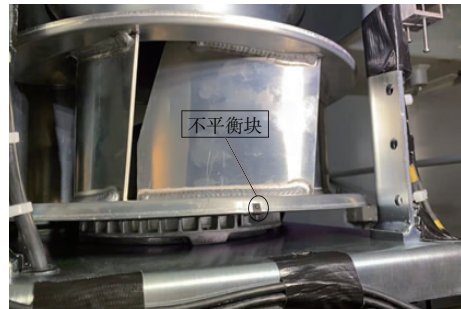


图 3 风扇动不平衡块施加位置

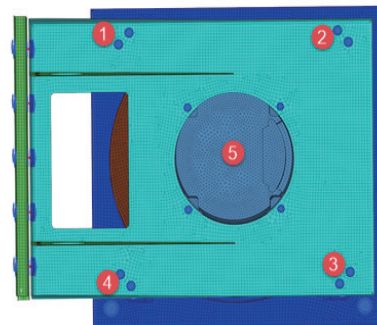


图 4 风扇头部测点图

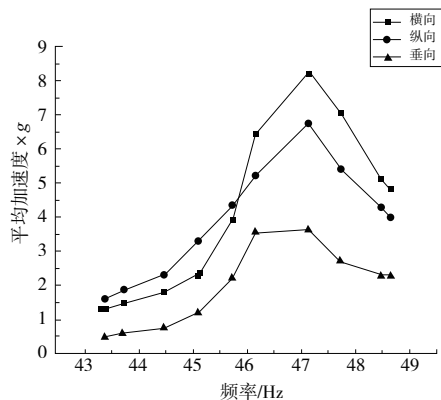


图 5 测点 5 三向平均加速度折线图

### 2.3 疲劳寿命仿真分析结果

根据 IEC61373:2010 标准,风扇实验等级为 I 类 B 级。I 类 B 级车身安装设备机柜中的设备加速度谱密度量级如图 6 所示。约束风扇侧板及风道,将图 6 中的激励施加在约束点处。验收标准为 3 个方向的疲劳损伤累计  $5 h < 1^{[6]}$ 。

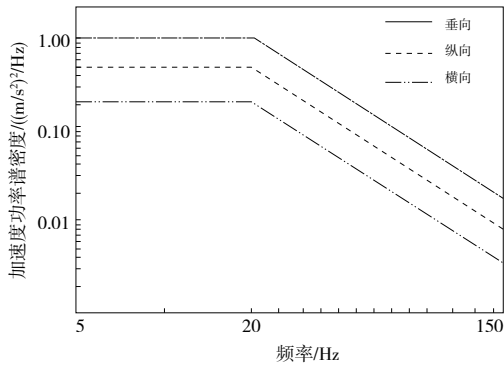


图 6 I 类 B 级车身安装设备 ASD 量级示意图

利用疲劳分析软件进行频域疲劳分析,得到风扇在加速度激励下的疲劳寿命<sup>[7]</sup>。风扇结构薄弱位置损伤值如表 1 和图 7 所示。

表 1 损伤较大单元号及损伤值

| 单元号   | 3971165 | 3972320 | 3972319 | 3972317 | 3972058 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 累积损伤值 | 0.862   | 0.810   | 0.795   | 0.780   | 0.773   |

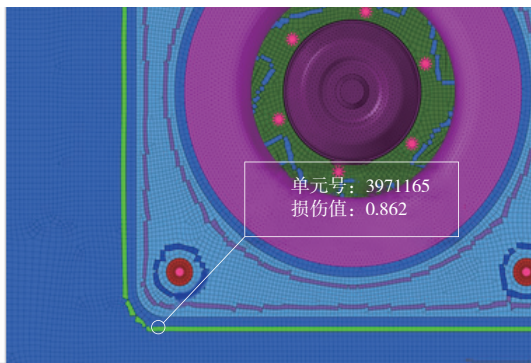


图 7 损伤最大值单元

### 2.4 风扇结构疲劳寿命仿真优化分析

风扇作为有源部件,当其运行时自激频率与风扇安装到箱体内部的固有频率接近时,便会发生共振。由风扇的无极调速试验可知,风扇的第三阶固有频率 46.9 Hz 与满载时 48.3 Hz 的工作频率接近引发风扇的共振。按照 IEC61373 标准对风扇进行疲劳强度考核,虽然该风扇结构疲劳损伤小于 1,满足强度要求。根据文献<sup>[8]</sup>可知,风扇的实际运营环境会造成扇叶立面的积灰,积灰导致风扇转子的动平衡被破坏,振动量级加大,缩短风扇的疲劳寿命,风扇积灰图片见图 8。因此,需对风扇结构进行优化,改变其固有频率,避免共振的发生,提高风扇的疲劳寿命,

增大安全余量。



图 8 风扇扇叶积灰

辅助变流器内部的风扇主要是通过螺栓固定在机箱侧板及风道上,根据风扇的连接方式可以将其近似等效为悬臂梁结构。悬臂梁结构的固有频率与其固定方式、自身的质量及结构的刚度等有关<sup>[9]</sup>。考虑到风扇自身结构,其高度和质量都不易改变。因此,改变其连接方式,将风扇与侧板的固定方式由单排螺栓改为双排螺栓以增加模型的安装刚度,如图 9 所示。

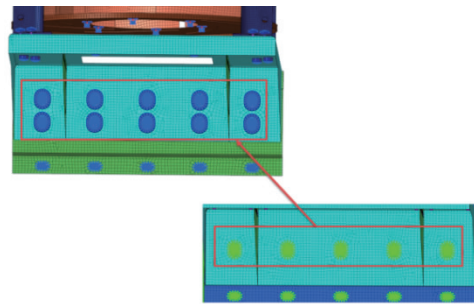


图 9 安装螺栓修改图

风扇新结构的扫频试验和模态分析结果一致,前四阶固有频率为 35.7 Hz、44.3 Hz、53.4 Hz 和 56.7 Hz,前两阶振幅较大的位置均发生在侧板上。第三阶发生在风扇上,其第三阶模态如图 10 所示。风扇新结构的无极调速试验结果如图 11 所示。由图可知,新风扇结构头部测点 5 三向加速度数值随转速增加稳步递增,没有突变,在满载运行时不存在共振。新结构风扇薄弱位置如图 12 所示,损伤值如表 2 所示。

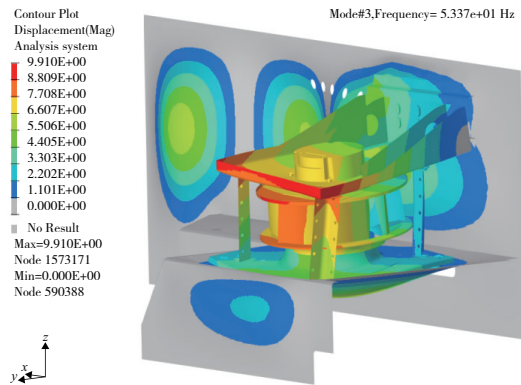


图 10 风扇第三阶模态振型图



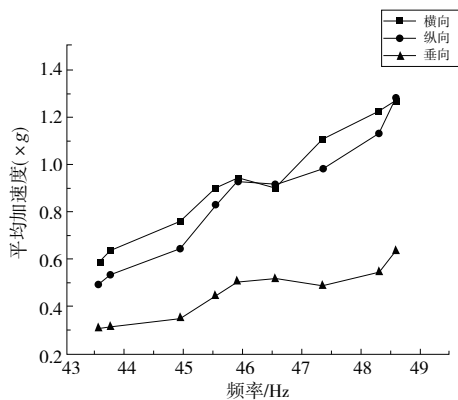


图 11 测点 5 三向平均加速度折线图

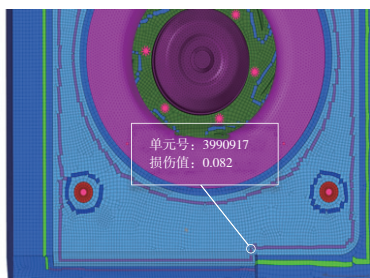


图 12 风扇新结构损伤最大单元

表 2 新结构损伤较大单元号及损伤值

| 单元号   | 3990917 | 3992303 | 3971165 | 3971191 | 3971462 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 累计损伤值 | 0.082   | 0.075   | 0.073   | 0.070   | 0.070   |

通过增加安装座螺栓数量提升风扇整体的安装刚度,将风扇的固有频率从 46.9 Hz 提升到 53.4 Hz,避开风扇满载运行时的频率,避免共振的发生。风扇的振动剧烈程度减小,应力减小,结构焊缝单元的损伤也相应减小。

### 3 结语

本文以某动车组变流器风扇为研究对象,通过无极调速试验验证风扇结构满载运行情况下是否会发生共振。

建立风扇结构的有限元模型,并将模型的固有模态与扫频试验对比,确保模型的准确性。基于频域法采用 IEC61373:2010 标准 1 类 B 中规定的加速度密度谱进行振动疲劳寿命分析。

1) 无极调速试验的结果表明,风扇原始结构在满载运行时会发生共振。根据风扇的安装特点,将其等效为悬臂梁结构,得出风扇的固有频率与安装刚度有关。增加风扇结构的刚度可以提高风扇的各阶模态,使其远离风扇满载时的工作频率,避免共振的发生。

2) 风扇的实际运营环境会造成风扇叶立面的积灰,导致风扇动平衡被破坏。提高风扇的固有频率,可以使其远离 5~20 Hz 水平激励线,降低振动输出响应,从而提高风扇结构的疲劳寿命,增大安全余量。

变流器风扇结构所使用的振动疲劳分析思路与方法对于其他列车悬挂有源设备的振动疲劳分析有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 花新华,肖守纳,阳光武,等. 机车车辆车下悬挂箱体设备安装座疲劳寿命仿真优化分析[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(6):24-27,48.
- [2] 王超,许平,何华. 机车辅助变流器柜基于有限元的疲劳分析[J]. 内燃机车,2007(9):14-18,51.
- [3] 卢剑,钟自锋. 发电机支架振动疲劳分析及其优化设计[J]. 机械强度,2019,41(5):1244-1248.
- [4] 程贤福,李晶,程安辉. 某轻型货车燃油箱振动疲劳分析[J]. 噪声与振动控制,2020,40(1):93-98,115.
- [5] 游永忠. 某轻型载货车储气罐支架振动断裂分析与优化[J]. 机械设计与研究,2020,36(1):190-195.
- [6] 张永明. 带有压型板的车下悬挂件随机振动疲劳寿命分析[J]. 机械研究与应用,2019,32(4):6-11.
- [7] 祁喜全,王岩松,郭辉,等. 振动载荷下薄板疲劳寿命预测[J]. 机械强度,2019,41(6):1499-1503.
- [8] 于欣杰. 牵引变流器冷却风机积灰导致异常振动的分析及预防[J]. 电力机车与城轨车辆,2020,43(4):72-74.
- [9] 戴江梁,熊飞,刘静,等. 基于某车型动力电池包的随机振动疲劳分析与结构设计改进[J]. 机械强度,2020,42(5):1266-1270.

收稿日期:2021-10-15

(上接第 22 页)

- [4] RAGHURAMAN N, JAIN D S, GLINSKY C. Prediction of dynamic factors for helical gears in a high-speed multibody gearbox system[J]. Gear Technology, 2018, 35(3):44-54.
- [5] 李楠,王三民,杜佳佳. 功率四分支齿轮传动系统的固有特性与动载系数[J]. 航空动力学报,2013,28(2):445-451.
- [6] 孙红,史妍妍,张茂强. 基于动力学的齿轮传动系统动载系数计算方法[J]. 航空科学技术,2015,26(8):23-27.
- [7] 付杰. 重载高线速度渐开线直齿轮动载系数研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.

- [8] 常乐浩. 平行轴齿轮传动系统动力学通用建模方法与动态激励影响规律研究[D]. 西安:西北工业大学,2014.
- [9] 蒋进科,方宗德,刘红梅. 考虑多体承载啮合斜齿行星齿轮动载特性分析[J]. 工程科学与技术,2020,52(1):161-167.
- [10] 林何,王三民. 参数对分扭-并车齿轮传动系统动载和均载特性的影响[J]. 机械传动,2019,43(5):18-22,63.
- [11] 颜夕秋,穆键. 一种附加弹性块面齿轮传动的动载系数分析[J]. 机械制造与自动化,2017,46(1):32-36.

收稿日期:2021-11-12