

某拖拉机风扇系统共振分析及改进

周伟伟^{1,2}, 赵婧婧^{1,2}, 郭彬^{1,2*}, 范增^{1,2}

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决某拖拉机开发过程中出现的风扇扇叶根部断裂故障,针对某6缸柴油机常用转速区间工况,采用模态分析与频谱分析相结合的方法分析故障原因,据此提出改进方案并进行仿真和耐久试验验证。结果表明:风扇1阶模态频率与发动机3阶激励频率在常用转速区形成共振,导致扇叶根部双向弯曲疲劳失效;采取保持风扇直径不变,扇毂厚度增加2 mm的改进措施后,风扇1阶模态频率由108 Hz提高到150 Hz;改进后的风扇经500 h耐久试验未断裂,改进措施有效。旋转机械系统设计应重点控制关键部件模态频率与激励频率的耦合关系,通过优化结构参数调整模态分布,可在保证性能的前提下规避共振风险。

关键词:风扇;模态分析;频谱分析;共振特性

中图分类号:U472

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)05-0063-05

引用格式:周伟伟, 赵婧婧, 郭彬, 等. 某拖拉机风扇系统共振分析及改进[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5): 63-67.

ZHOU Weiwei, ZHAO Jingjing, GUO Bin, et al. Analysis of resonance in a tractor fan system and its improvement[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5): 63-67.

0 引言

共振现象常见于旋转机械运转中,是系统中一个或多个稳态振源的固有频率与另一振源的频率相等或接近时引起的振幅显著增大的振动现象^[1]。在整车系统中,发动机曲轴、风扇、齿轮等旋转部件若设计不当,当其固有频率与特定转速下的激励频率重合或接近时,极易诱发共振,导致部件疲劳加剧、产生异响,甚至引发系统失效,该特定转速亦称为临界转速^[2]。风扇叶片振动按产生原因可分为强迫振动、颤振和非同步振动^[3]。共振会导致风扇叶片工作应力骤增,可能迫近其材料耐久极限的80%,严重威胁运行安全^[4]。因此,在车辆风扇设计过程中须规避共振风险,确保其固有频率不与某阶激励频率相同或接近^[5]。

振动模态分析是研究结构动力特性的方法,为工程中振动故障的机理分析、源头定位与解决方案的制定提供了重要技术支撑^[6]。频谱分析是通过傅里叶变换将时域信号转换为频域分布的方法,应用广泛,振动和噪声分析是其经典应用场景。本文中,针对某拖拉机开发过程中出现的风扇共振断裂故障,利用LMS Test Lab软件,采用模态分析法^[7]、频谱分析法^[8]分析产生共振的原因,提出改进措施并进行仿真和试验验证。

1 模态分析

模态是结构系统中固有的振动特性,模态参数主要包括频率和振型。通过计算或试验分析获得模态

收稿日期:2025-03-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000302)

第一作者简介:周伟伟(1985—),男,山东东营人,高级工程师,主要研究方向为内燃机设计,E-mail:zhouww@weichai.com。

*通信作者简介:郭彬(1985—),男,山东潍坊人,工学硕士,工程师,主要研究方向为内燃机及整车NVH性能,E-mail:guobin@weichai.com。

参数的过程即为模态分析^[9]。试验模态分析是根据系统的输入和输出,即采集的激励和响应数据,识别模态参数的过程^[10]。

在风扇系统设计过程中应综合分析其模态频率与所有潜在激励的关系,避免共振。激励主要有发动机运行产生的主激励、风扇自身旋转激励、叶片在不同工况下的气动激励。拖拉机风扇设计中应主要考虑风扇自身旋转激励。根据工程经验,一般要求风扇模态频率至少为上述频率的 1.2 倍。

定义发动机曲轴旋转频率为 1 阶,以 Hz 为单位的发动机主激励频率 f_e 的数值

$$\{f_e\} = \{n\}k/60, \quad (1)$$

式中: $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的发动机转速 n 的数值; k 为发动机激励阶次,对于 6 缸发动机, $k=3$,对于 4 缸发动机, $k=2$ 。

以 Hz 为单位的风扇自身旋转激励频率 f_f 的数值

$$\{f_f\} = \{n\}i/(60j), \quad (2)$$

式中: i 为风扇速比; j 为风扇激励阶次, $j=1,2,3,4$ 。

2 故障现象及故障源识别

2.1 故障现象与原因初筛

某拖拉机用 6 缸柴油发动机在开发过程中出现严重的风扇扇叶断裂故障,发动机常用工作转速为 2 100 r/min,常用负荷率为 50%。风扇叶片为高强度复合塑料材质,扇毂为铁制材料,扇毂及夹板厚度为 3 mm,故障位置出现在扇毂根部,如图 1 所示。

排查发现风扇与护风圈之间无干涉,风扇连接无问题。对风扇故障部位进行电镜分析,结果如图 2 所示。由图 2 可知:断口呈双向弯曲疲劳断裂特征,推测风扇断裂原因为振动过大。



图 1 风扇故障图片

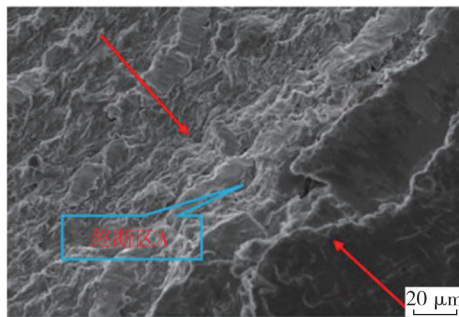


图 2 故障部位电镜分析结果

因风扇无装配干涉问题,因此可排除碰撞、松装等因素,初步怀疑故障原因为风扇系统自身约束模态与发动机主激励、风扇旋转激励耦合,产生共振导致。设定发动机曲轴旋转激励为 1 阶,分析整车主要旋转系统相对于曲轴的激励阶数和频率范围,发现与潜在共振频率相近的激励包括发动机 3 阶激励、风扇旋转引起的 1~4 阶激励,以及风扇自身约束(1 阶)模态。发动机 3 阶激励频率、风扇旋转引起的 1~4 阶激励频率分别按式(1)(2)计算,风扇自身约束模态频率为试验测试结果。

2.2 故障源识别

频谱分析法可以确定故障发生时的振动频率、幅值、谐次性等信息,结合模态识别法,可以确定具体故障源。

试验设备包括 LMS Test Lab 振动噪声测试模块、加速度传感器、力锤、风扇等。将测试风扇按实际运行状态安装到发动机上,以空气弹簧支撑风扇,在扇叶及扇毂处安装振动传感器,构筑风扇几何外形,采用锤击法,以力锤为激励源对风扇系统进行约束模态试验,识别风扇模态频率分布。

试验结果表明:风扇前 3 阶模态频率分别为 108、134、168 Hz,其中 1 阶模态振动节点与故障位置重合,因此,风扇 1 阶模态振动导致风扇断裂的可能性较大。

基于发动机的常用转速,考虑±10%的转速波动,分析发动机激励、风扇旋转激励及风扇模态之间是否存在共振风险。风扇系统频谱共振分析结果如图 3 所示。由图 3 可知:当发动机处于常用转速区时,风扇 1 阶模态曲线与发动机 3 阶激励曲线相交,与 4 条风扇自激励曲线不相交,因此判断故障原因为风扇 1 阶模态频率(108 Hz)与发动机 3 阶激励频率(105 Hz)接近,引发共振,导致 1 阶模态节点处产生振动疲劳,风扇断裂。

3 改进措施及验证

为避免共振,根据试验结果,应调整风扇模态分布,确保风扇 1 阶模态频率、发动机激励频率及风扇旋转激励频率 3 者间均不接近。由于实际操作中调整发动机转速及风扇转速比较困难,因此,本文中通过优化风扇设计,提高其结构刚度,改变其模态特性,从而避开共振区域。改变扇叶的扇形设计影响其气动性能,尤其会显著影响流量特性,故优先考虑通过调整扇叶直径及扇毂优化其模态分布。采取 3 种措施改进风扇,并对改进方案进行约束模态试验验证。不同风扇方案及模态数据如表 1 所示,其中,改进措施以相对原方案的变化表示,“-”表示减小或下降。由表 1 可知:改进方案 1、2、3 的模态频率都显著提高,但方案 2 的风量损失较大。

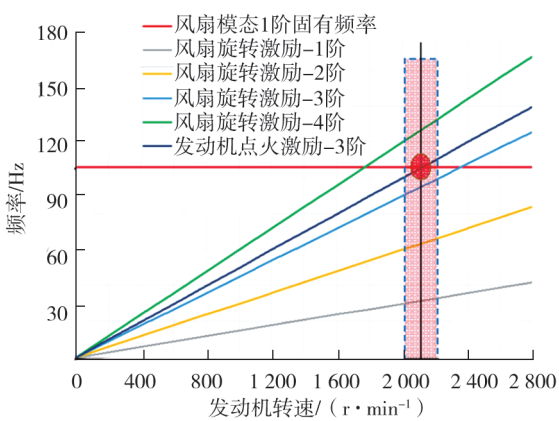


图 3 风扇系统频谱共振分析

表 1 不同风扇方案及模态数据对比

风扇方案	风扇直径变化/mm	扇毂厚度变化/mm	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	风量相对变化/%
原方案	0	0	108	134	0
改进方案 1	0	2	150	163	0
改进方案 2	-20	2	162	178	-11
改进方案 3	-12	2	152	158	-4

改进方案 1~3 的频谱分析如图 4~6 所示。由图 4 可知:改进方案 1 的 1 阶模态频率与风扇 4 阶旋转激励比较接近,但因激励非常小,不存在共振风险;在发动机常用转速区,风扇 1 阶模态频率曲线与发动机 3 阶激励、风扇旋转激励频率曲线不相交,可有效避免共振。

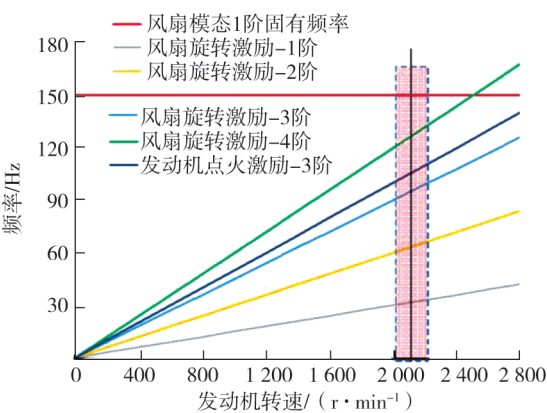


图 4 改进方案 1 频谱共振分析

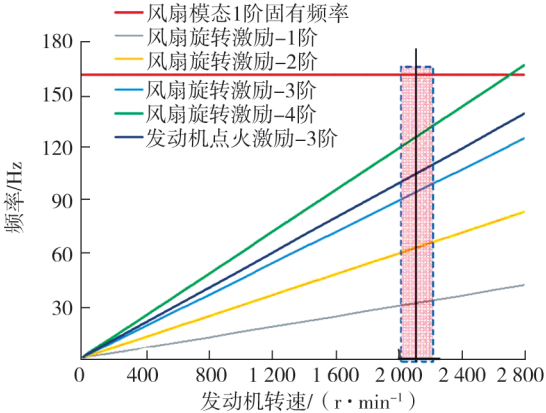


图 5 改进方案 2 频谱共振分析

由图 5 可知:改进方案 2 的 1 阶模态频率、发动机 3 阶激励频率及风扇旋转激励频率在发动机常用

转速区不相交,可避免风扇共振现象的发生;但由于改进方案2的风扇直径减小,需同时更改护风圈直径,且其风量相比原方案下降约11%,降幅显著。

由图6可知:改进方案3也可有效避免共振,风量较原方案略微下降,同样需更改护风圈直径。

综合共振频率、风量、整车相关部件更改难度、风扇通用性等因素,确定改进方案1为最优方案。对改进方案1进行500 h实车耐久考核,风扇未发生断裂故障,改进方案有效。

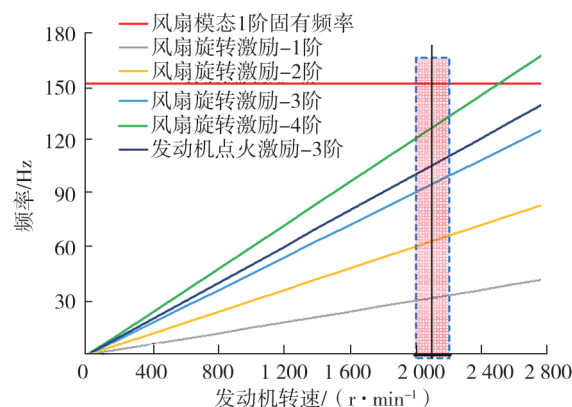


图6 改进方案3频谱共振分析

4 结论

1) 风扇断裂故障的根本原因为风扇1阶模态频率与发动机3阶激励频率耦合,从而在其1阶模态节点处引发振动疲劳,最终导致断裂。

2) 采取保持风扇直径不变,扇毂厚度增加2 mm的改进措施后,风扇1阶模态频率提高至150 Hz,有效避开发动机3阶激励频率和风扇旋转激励频率,风量维持不变,无需调整护风圈结构,并且通过了实车耐久考核验证,改进方案有效。

3) 通过提高关键部位的结构刚度优化模态分布,可在保持系统性能不变的前提下解决旋转件的共振问题。

参考文献:

- [1] 屈梁生,何正嘉.机械故障诊断学[M].上海:上海科学技术出版社,1986.
- [2] 张强波,张帅,郑豪.基于有限元的风扇转子临界转速与振动特性研究[J].现代机械,2025,1(1):21-26.
- [3] 吕彪,孟卫华,陈剑,等.风扇叶片非同步振动研究[J/OL].航空动力学报.(2025-01-08)[2025-02-02]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240601>.
- [4] 石冉.燃气发电机冷却风扇叶片故障分析研究[J].机械管理开发,2021,36(9):79-81.
- [5] 陈铁锋,金赛英.一种单向无迭代航空发动机风扇叶片调频方法[J].装备制造技术,2017(5):16-18.
- [6] 姜丽霞.离心式压缩机的防喘振控制设计探讨[J].山东化工,2022,51(2):161-162.
- [7] 曹树谦,张文德,萧龙翔.振动结构模态分析:理论与应用[M].天津:天津大学出版社,2001.
- [8] 瞿红春,黄远强,王涛,等.民用发动机风扇叶片模态及共振分析[J].中国民航大学学报.2015,33(6):13-16.
- [9] 刘杰,苏玉淋,张亚坤,等.某车型引擎盖模态分析及优化[J].装备制造技术,2023(3):141-144.
- [10] 王书敏,何可禹.离心式压缩机技术问答[M].2版.北京:中国石化出版社,2005.

Analysis of resonance in a tractor fan system and its improvement

ZHOU Weiwei^{1,2}, ZHAO Jingjing^{1,2}, GUO Bin^{1,2*}, FAN Zeng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To address the issue of fan blade root fracture during the development of a certain tractor, the combined approach of modal analysis and spectral analysis are employed to identify the root cause under the common operating speed range of a 6-cylinder diesel engine. Based on the findings, an improvement solution is proposed and validated through simulation and endurance testing. The results indicate that the first-order modal frequency of the fan resonated with the third-order excitation frequency of the engine within the common speed

range, leading to bidirectional bending fatigue failure at the blade root. By maintaining the fan diameter unchanged and increasing the hub thickness by 2 mm, the first-order modal frequency of the fan is raised from 108 Hz to 150 Hz. The improved fan doesn't break after a 500 h durability test, which indicates that the improvement measures are effective. In the design of rotating machinery systems, it is crucial to control the coupling relationship between the modal frequencies of key components and excitation frequencies. Optimizing structural parameters to adjust modal distribution can mitigate resonance risks while ensuring performance.

Keywords: fan; modal analysis; spectral analysis; resonance characteristic

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 54 页)

Simulation analysis of hydrogen fuel cell heat exchanger structure on cold start performance

LIU Yangyang¹, CUI Wanxin², BAO Zunjun¹, ZHANG Shuhan¹,
KONG Xiang'an¹, LÜ Chengju³, CHEN Zhongyan⁴, LI Xinhai^{1*}

1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. China National Heavy Duty Truck Group, Co., Ltd., Jinan 250101, China;

3. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250031, China;

4. Shandong Fuel Cell Power in Technology Co., Ltd., Jinan 250109, China

Abstract: To solve the problem of difficult start of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) in ultra-low temperature environment, a solution to the difficult cold startup of hydrogen cells is proposed. By generating high-temperature gas with a hydrogen burner, the coolant is heated by a heat exchanger, and the stack temperature is improved by a small cycle coolant to reduce the cold startup time and improve the cold startup performance of fuel cells. The computational fluid dynamics (CFD) method is used to establish a three-dimensional model of the shell-and-tube heat exchanger based on AVL_FIRE software, and the heat exchange performance of the heat exchanger is numerically analyzed. In view of the low heat exchange efficiency and uneven temperature distribution of the initial model, four optimization schemes are proposed, including shortening the length of the heat exchanger inlet and adjusting the distribution of copper tubes, setting baffles to change the airflow path, increasing the diameter of the fluid inlet pipe, and reducing the length of the heat exchanger to eliminate the low-efficiency heat exchange area at the tail. The simulation results show that the fourth optimization scheme increases the temperature of outlet cooling water by 36 K compared with the inlet temperature, which meets the requirements of the cold start system for the temperature rise of the cooling water and is the best option.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); low-temperature cold start; heat exchanger; numerical simulation

(责任编辑:胡晓燕)