

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.012

风电主齿轮箱漏油故障分析及优化设计

石利勇, 黄永平, 张万军, 郑海洋, 詹浩, 宗多

(中船海装风电有限公司, 重庆 401120)

摘要:为分析风力发电机组主齿轮箱漏油故障,建立齿轮箱和发电机三维有限元模型。在流体域中分析发电机冷却风扇产生的强制冷空气对齿轮箱的影响,结合故障发生的现象,明确齿轮箱故障原因,在此基础上提出一种防风隔离罩装置并进行仿真分析。研究结果表明:在齿轮箱工作过程中,优化方案可以降低齿轮箱输出端内外的压强差,从而有效减少齿轮箱漏油问题。

关键词:风力发电机;齿轮箱;故障分析;仿真分析

中图分类号:TK83 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0067-05

Analysis and Optimization Design of Oil Leakage Fault in Wind Power Main Gearbox

SHI Liyong, HUANG Yongping, ZHANG Wanjun, ZHENG Haiyang, ZHAN Hao, ZONG Duo
(CSSC Haizhuang Windpower Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract:To analyze the oil leakage fault of the main gearbox of wind turbines, a three-dimensional finite element model of gearbox and generator is established. The influence of forced cold air generated by the generator cooling fan on the gearbox is analyzed in the fluid domain. Based on the fault occurrence phenomenon, the cause of the gearbox fault is identified. On this basis, a windproof isolation cover device is proposed and simulated for analysis. The research results indicate that the optimization scheme can reduce the pressure difference between the inside and outside of the gearbox output end of the gearbox during the working process of the gearbox, which effectively reduces gearbox oil leakage.

Keywords:wind turbines; gearbox; fault analysis; simulation analysis

0 引言

近年来,随着全国风电装机容量稳步增长。风电机组不断向长叶片、大功率、柔性化方向发展^[1-2],机型的迭代及升级速度显著加快,因此对风电机组运行的安全性和稳定性要求也越来越高^[3]。

齿轮箱是风力发电机组传动链系统上的重要组成部分,其结构复杂且运行环境恶劣,是风力发电机组故障率最高的部件之一。它的性能直接影响风力发电机组的稳定性和安全性^[4-5]。目前国内外风电主机厂家大多有过因齿轮箱故障导致严重经济损失的案例。其齿轮箱故障类型^[6-7]、原因各不相同。总体而言,故障现象主要集中于齿轮断齿^[8-9]、齿轮磨损^[10]、轴承磨损^[11]、齿轮箱漏油^[12]等方面。近年来,大数据和人工智能的快速发展使神经网络模型在风电机组故障分析领域使用越来越广泛^[13]。结合多种神经网络模型^[14-16]

学习和训练齿轮箱特征数据^[17],可以有效提取故障信息,识别故障类型,缩短故障分析周期^[18]。针对具体的齿轮箱故障分析,其原因及解决方案需要根据实际情况进行排查分析。

齿轮箱渗漏油是一种普遍存在的故障,表现形式多样,通常可以在机舱内完成维修,但严重情况下需要下塔返厂维修。本文针对中速永磁风电机组传动链的齿轮箱输入端渗漏油问题,通过仿真计算、故障分析,确定故障根本原因为发电机冷却空气进入齿轮箱内部引起,并据此制定优化设计方案,设计了一种隔离装置;采用有限元软件对原设计和加装隔离装置的优化设计方案对比分析,得出优化设计能够有效隔离发电机冷却气流对齿轮箱的影响,从而大幅度降低渗漏油的风险发生。

1 风电齿轮箱结构及故障描述

1.1 基本结构

某机组是中速永磁风力发电机组,其传动链

基金项目:内蒙古自治区科学技术厅揭榜挂帅科研项目(2022JBGS0041)

第一作者简介:石利勇(1996—),男,甘肃陇南人,工程师,硕士,研究方向为风电齿轮箱结构设计,sly187153@163.com。

结构如图 1 所示,主要特点为齿轮箱与发电机采用紧密集成结构。其中齿轮箱是中速永磁风力发电机组 3 大关键部件之一(叶片、齿轮箱、发电机),它的主要功能是将来自叶轮的低速旋转机械能提升到适合发电的高转速机械能输送给发电机,从而达到减少发电机的极对数,降低发电机体积和变流器功率的目的^[19-20]。

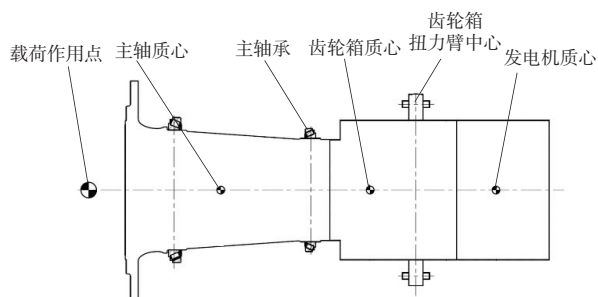


图 1 机组传动链布置图

齿轮箱采用三级行星增速结构,输入与输出同心传动,该齿轮箱传动结构如图 2 所示。齿轮箱与发电机是紧密集成结构,发电机转子采用刚性连接方式,悬挂在齿轮箱输出轴端;而定子则直接固定在齿轮箱后箱体法兰上。因此,齿轮箱输出轴及其端盖等部件位于发电机定子、齿轮箱后箱体、发电机转子构成的密闭空间中心部位。该特点导致输出部位相关零件维修困难,因此,输出轴端盖与输出回转轴的密封方案采用了无磨损、无须定期更换的多重迷宫式密封结构。

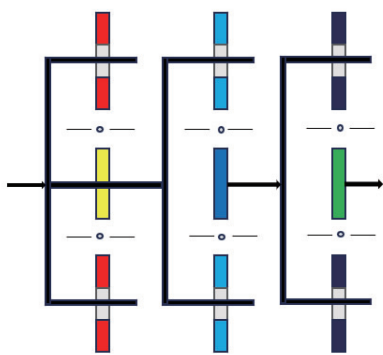


图 2 齿轮箱结构示意图

1.2 故障描述

某机组正常运行时系统主控 PLC 报错,发生通信故障,通信故障持续时长约 7 天。此 7 天内的机组数据无保存或备份。在通信故障期间,该机组为停机状态,无法正常运行及发电;齿轮箱的齿轮未转动运行,润滑系统为正常运行状态,不间

断地为内部提供润滑油;发电机冷却风扇为启动状态,持续提供强制冷空气在发电机内流通;机组其余零部件执行停机工况下的指令和策略。上机检查齿轮箱输入端渗漏油,关闭发电机冷却风扇后,齿轮箱输入端渗漏油停止。

2 原模型仿真分析

2.1 仿真分析

根据中速永磁机组传动链结构布置,建立三维仿真模型对发电机和齿轮箱的内部空腔气体压强进行仿真分析,对不必要的零部件模型进行简化,原模型流体计算域如图 3 所示。本文采用有限元软件仿真分析,在流体计算域对空腔的气体压强进行计算。

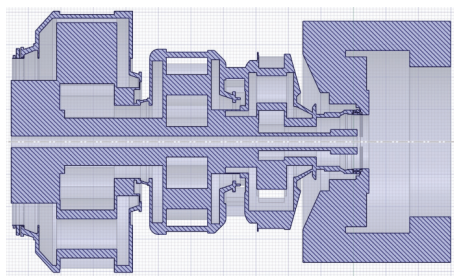


图 3 简化的三维模型

根据故障描述,在有限元软件的流体计算域中仿真发电机冷却风扇运行阶段发电机空腔内气压数值变化及对齿轮箱内部空气压强的影响。边界条件如下。

1) 发电机内部冷却风扇所提供的风量为 $15\,000\text{ m}^3/\text{h}$,由入口处进入发电机内部;出口 1 是为发电机冷却风扇提供风量的回风口;出口 3 是齿轮箱输入端,如图 4 所示。

2) 出口 2 是均匀分布的 $16\times\text{M}32$ 通孔,保证发电机内部与外界相通;观察孔是用于维修发电机碳刷,长期被盖板密封,如图 5 所示。各个出口均为静压出口。

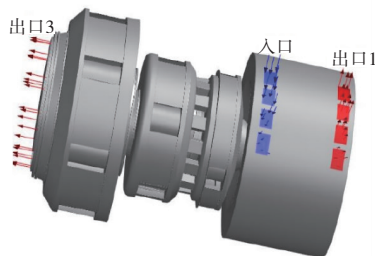


图 4 边界位置 1

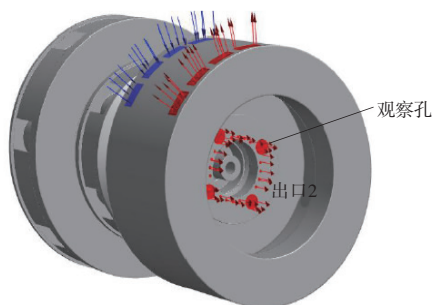


图5 边界位置 2

原模型仿真分析计算后,对仿真结果进行分析。发电机冷却风扇的风量经入口流入,大部分风量由出口 1 回流,少部分由出口 2 和出口 3 流出,观察孔因封闭未有风量流出,风量数值如表 1 所示。

表 1 原模型入口和出口风量 单位: m^3/h

风口位置	风量
入口	15 000
出口 1	14 322
出口 2	616
出口 3	62
观察孔	0

发电机及齿轮箱内部的空气压强云图如图 6 所示,齿轮箱输出端的压强云图如图 7 所示。齿轮箱输出端由发电机端到齿轮箱端的压强呈阶梯变化:640 Pa—340 Pa—155 Pa—105 Pa。

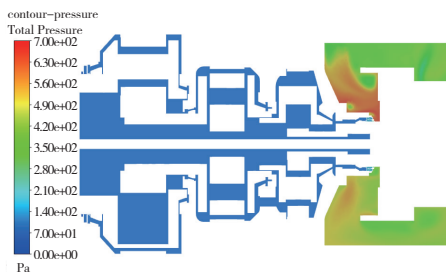


图6 原模型压强云图

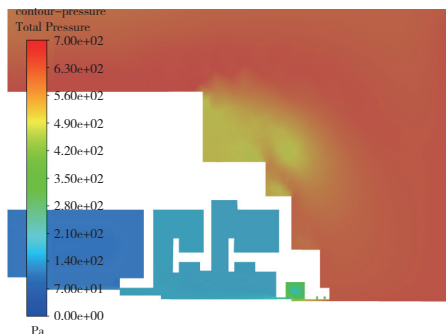


图7 原模型输出端压强云图

通过原模型有限元软件仿真计算,研究结果表明发电机冷却风扇产生的强制冷空气对齿轮箱输出端内部和外部产生压强差,出口 3 的压强大于环境压强,机组运行发电时有持续不断的风量从齿轮箱输入端流出。

2.2 故障分析

由于该机组采用中速永磁集成传动,齿轮箱与发电机集成为一体,在齿轮箱后箱体与发电机结合部位,发电机冷却风扇运行时形成的循环冷却空气流在齿轮箱输出轴周围空间形成正压区域。由于齿轮箱输出端密封结构采用的是非接触式迷宫密封,导致密封元件与输出轴之间存在很小间隙。虽然迷宫密封采用多重设计增加了气流经过间隙通道的难度,但发电机运行的正压冷却空气仍然具有足够压力,沿迷宫密封的间隙渗入到齿轮箱内部。进入齿轮内部的正压气流将裹挟内部由于润滑喷射产生的大量润滑油微粒及其油雾,从齿轮箱输入端缓慢吹出,造成齿轮箱输入端渗油。

结合故障描述和传动链结构的原模型仿真分析,该机组齿轮箱输入端渗漏油原因是发电机运行的正压冷却空气窜入齿轮箱内部引起漏油。

3 优化设计方案

为保证机组正常运行,降低齿轮箱故障率,根据故障分析和原模型仿真计算分析,在齿轮箱输出端安装一种防风隔离罩装置,并在保证发电机性能和安全前提下,拆除 4 个观察孔盖板,在设计源头杜绝因压强差而导致的齿轮箱漏油问题。

3.1 防风隔离罩

防风隔离罩采用钢板组焊,防腐要求与齿轮箱外表相同,图 8 为一种隔离罩与齿轮箱输出轴承座的连接方案。隔离罩的结构设计及其与输出轴承座的连接,需要具有足够刚性,可防止发电机的冷却正压气流引起变形过大或发生过大振动。隔离罩结构设计应兼顾输出轴碳刷支架及碳刷电缆、输出轴轴承温度传感器及其电缆的安装和布置,要保留维修空间。在拆除发电机 4 个观察孔盖板后,使用包含过滤棉的防尘装置代替观察孔盖板,以保持空气的流通和防止杂质进入发电机内部。

3.2 优化模型仿真分析

优化模型的边界条件与原模型一致。对优化的防风隔离罩方案进行有限元仿真计算,优化模

型的流体计算域如图 9 所示。

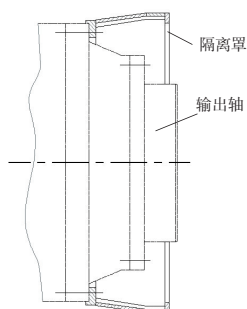


图 8 防风隔离装置

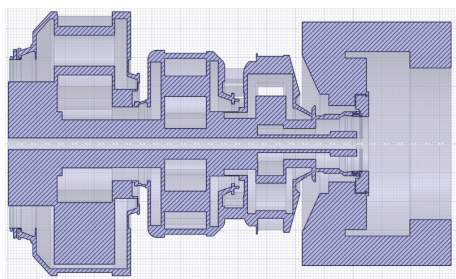


图 9 优化方案三维模型

优化模型经过仿真分析计算后,发电机冷却风扇的风量经入口流入,大部分风量由出口 1 流出,一部分风量由观察孔流出,少部分由出口 2 和出口 3 流出,具体风量数值如表 2 所示。

表 2 优化后入口和出口风量 单位: m^3/h

风口位置	风量
入口	15 000
出口 1	12 713
出口 2	329
出口 3	30
观察孔	1 928

优化设计方案的发电机和齿轮箱内部气体压强云图如图 10 所示,齿轮箱输出端气体压强如图 11 所示,齿轮箱输出端由发电机端到齿轮箱端的压强呈阶梯变化:200 Pa—100 Pa—45 Pa—33 Pa。

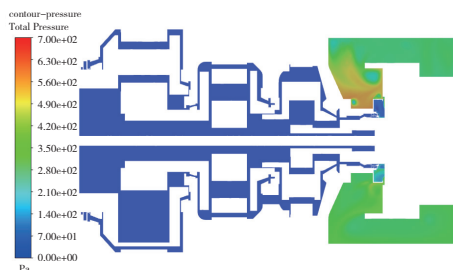


图 10 优化模型压强云图

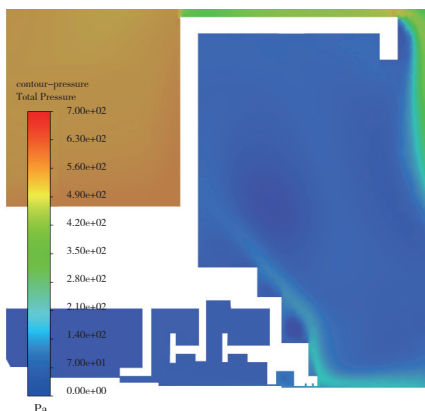


图 11 优化模型输出端压强云图

由表 2 和表 1 对比可知,在相同入口风量条件下,优化模型的出口 1 风量降低 11.2%,但能满足发电机内部冷却所需的风量;优化模型的出口 2 风量降低了 46.6%,观察孔的风量急剧增加,降低了发电机空腔内的压强;优化模型的出口 3 风量降低 51.6%,减少了进入齿轮箱内部的风量。

由齿轮箱输出端的压强对比可知,优化模型比原模型的压强降低了 68.6%,优化方案减少了进入齿轮箱内部的空气量,降低了齿轮箱输出端的压强,这说明防风隔离罩装置降低压强效果明显,可有效解决齿轮箱漏油故障问题。

3.3 实际应用

本文提出的防风隔离罩设计方案加工周期短,制造简单,已在渤海湾某风场批量安装且并网运行超 3 个月。与安装原模型齿轮箱的机组对比,优化模型齿轮箱的机组实际运行中无渗漏油故障发生,降低了故障率,验证了优化方案的可行性,防风隔离罩方案应用于工程可解决实际问题。图 12 方框中是防风隔离装置。

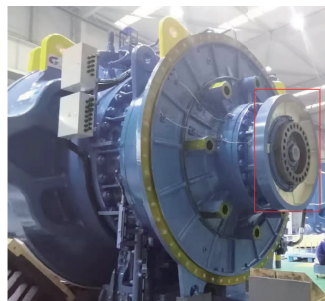


图 12 防风隔离装置实物图

4 结语

本文研究了风电主齿轮箱漏油故障的分析方

法,并针对中速永磁机组的齿轮箱和发电机建立了三维有限元模型,在发电机冷却风扇运行状态下,有限元仿真计算了齿轮箱和发电机连接处压强,对比了优化设计前后有限元模型压强的变化,结论如下。

1)对比了优化设计前后模型齿轮箱输出端压强变化,原模型齿轮箱输出端压强由 650 Pa 逐渐递减至 105 Pa;优化模型齿轮箱输出端压强由 200 Pa 逐渐降低至 33 Pa。仿真计算结果表明:优化设计方案的齿轮箱输出端压强降低了 68.6%。

2)根据齿轮箱输入端风量的变化,原模型齿轮箱输入端风量为 $62 \text{ m}^3/\text{h}$;优化模型齿轮箱输入端风量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$,风量降低了 51.6%。优化设计方案使齿轮箱输入端处的风量减少和齿轮箱输出端压强降低,且防风隔离装置符合工程实际需求,可操作性强,能够解决工程实际问题,降低了齿轮箱漏油故障率,提升了机组可靠性和发电量。

参考文献:

- [1] 金晓航,孙毅,单继宏,等. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述[J]. 仪器仪表学报,2017,38(5): 1041-1053.
- [2] 徐国平,沈佳涛,金程玮,等. 基于在线振动监测技术的风电机组齿轮箱故障分析与诊断[J]. 微特电机, 2024,52(6):23-25,29.
- [3] 周庆梅,刘冰冰,胡号朋,等. 基于重构特征和宽度学习的海上风电机组齿轮箱高速轴故障预警[J]. 船舶工程,2022,44(增刊2):32-36.
- [4] 徐启圣,白琨,徐厚昌,等. 风电齿轮箱状态监测和故障诊断的研究现状及发展趋势[J]. 润滑与密封, 2019,44(8):138-147.
- [5] 吴宣勇,黄忠全,李琪康,等. 无源数据约束下多源域自适应的风电齿轮箱故障诊断方法[J]. 太阳能学报,2024,45(4):238-246.
- [6] 邓自波. 风力发电机组齿轮箱故障诊断[J]. 设备管理与维修,2019(8):179-180.
- [7] 张书瑶,刘长良,王梓齐,等. 基于改进实例学习算法的风电机组齿轮箱状态监测[J]. 动力工程学报,

2024,44(10):1620-1631.

- [8] 宋维东,何卫东,张迎辉. 基于有限元的风电齿轮箱齿根裂纹前缘应力强度因子分析[J]. 机电工程技术,2025,54(10):60-64.
- [9] 史志刚,蔡晖,崔雄华,等. 风电机组齿轮箱高速轴断齿原因分析[J]. 热力发电,2021,50(10):173-178.
- [10] 孙建伟,杜琳娟,欧焕飞,等. 基于油液光谱监测的风电机组齿轮箱磨损状态的研究[J]. 太阳能, 2021(3):39-44.
- [11] 孙海波,沈峰. 风电齿轮箱轴承内部疲劳裂纹萌生与扩展方向研究[J]. 机械传动,2022,46(8):33-38.
- [12] 李金库,曾雨田. 2 MW 风电齿轮箱输入端漏油原因分析[J]. 机械工程师,2019(6):172-173,178.
- [13] 龙霞飞,何志成,曾进辉,等. 信息融合的 NRP-Alexnet-SENet 风电齿轮箱故障诊断[J]. 太阳能学报,2025,46(9):143-151.
- [14] 周伟,魏鑫,李西兴. 改进 MFO-LSTM 网络的风电机组齿轮箱故障预警研究[J]. 机床与液压,2024, 52(4):185-194.
- [15] 赵宇,王晓东,吕海华,等. 基于场景判别的风电齿轮箱温度预测及趋势异常预警方法[J]. 电力科学与工程,2024,40(2):61-70.
- [16] 李俊卿,韩小平,黄涛,等. 基于 ISDP 和膨胀胶囊网络的风电机组齿轮箱故障诊断[J]. 智慧电力, 2025,53(3):27-34.
- [17] 龙霞飞,何志成,周凌,等. 基于 KOA-CNN-BiLSTM-AM 的风电齿轮箱故障诊断研究[J]. 机床与液压, 2025,53(4):214-220.
- [18] 王进花,袁山钦,曹洁. 基于多核并行 RFECV-GNB 的风电机组齿轮箱故障诊断方法[J]. 太阳能学报, 2025,46(4):550-558.
- [19] 蒙康,滕伟,彭迪康,等. 运行机理与数据双驱动的风电齿轮箱系统故障预警[J]. 中国机械工程,2023, 34(12):1476-1485.
- [20] 陈雪峰,郭艳婕,许才彬,等. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述[J]. 中国机械工程,2020,31(2): 175-189.

收稿日期:2023-11-27