

风电场站齿轮箱故障预警与维护策略研究

何佳明

中核汇能新疆能源开发有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]大型风电机组齿轮箱作为核心传动部件其运行可靠性对风电场整体效益构成直接影响。本研究深入剖析了齿轮箱典型故障模式及其演化规律系统构建了融合多源监测数据与机器学习算法的故障预警模型并在此基础上创新性地提出了一套基于风险评价的维护周期优化与决策支持框架。研究结果表明实施状态驱动的预测性维护策略能够显著降低非计划停机时间与总体维护成本提升风电场运营的经济性与安全性。

[关键词]风电机组齿轮箱; 故障预警; 风险评价

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17079

中图分类号: TM62

文献标识码: A

Research on Fault Warning and Maintenance Strategies for Gearboxes in Wind Farm Stations

HE Jiaming

CNNP Rich Xinjiang Energy Development Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: The operational reliability of the gearbox of large wind turbines, as the core transmission component, has a direct impact on the overall efficiency of wind farms. This study deeply analyzed the typical fault modes and evolution laws of gearboxes, and systematically constructed a fault warning model that integrates multi-source monitoring data and machine learning algorithms. Based on this, an innovative maintenance cycle optimization and decision support framework based on risk assessment was proposed. The research results indicate that implementing state driven predictive maintenance strategies can significantly reduce unplanned downtime and overall maintenance costs, improving the economic and safety of wind farm operations.

Keywords: wind turbine gearbox; fault warning; risk evaluation

近年来,随着环境污染和能源危机的日益加剧,风能等可再生清洁能源因具有储量丰富和无污染等特点而备受世界各国的青睐和重视。我国风电行业发展迅速,风力发电机作为一种旋转的机械设备,所具有的零件较多,结构也相对复杂;同时,风电机组工作于人烟稀少,自然条件恶劣的环境中,导致风机在运行过程中故障频繁发生,频繁的故障维修致使风电场的运营成本提高。齿轮箱是大型风电机组最重要的传动部件之一,它的健康状态直接决定着机组是否能够正常运行。风电机组一般工作在沙漠、野外、孤岛等恶劣环境下,齿轮箱是其故障率最高的部件,加强对风电齿轮箱故障诊断技术的研究,对于保证风电机组的正常运行,提高风电场的经济效益具有重要的意义。

1 风电机组齿轮箱故障特性分析

1.1 齿轮箱典型故障类型

风电齿轮箱在长期承受复杂交变载荷与极端环境因素共同作用的严酷条件下,其内部构件发生失效的模式呈现出显著的多样性特征。常见的典型故障类型主要集中于齿轮副与轴承部件上,具体包括齿轮齿面发生的渐进性点蚀损伤、导致轮齿局部或整体断裂的严重问题、齿面胶合粘连失效以及因塑性流动导致的齿形畸变。同样地,轴承也极易出现滚道或滚动体的疲劳剥落、保持架结构的意外破损以及润滑失效引发的烧伤等故障。这些不同类型的故障在发展过程中,往往伴随着振动信号能量分布的异常改变、运行

温度偏离正常范围的不合理升高、润滑油液中磨损颗粒物浓度与形态特征出现显著异常等可被观测到的物理现象。

1.2 故障特征参数与失效模式

准确识别并有效提取能够表征齿轮箱运行状态劣化趋势的特征参数,是成功实现故障早期预警最为核心的基础性工作。来源于振动传感器采集的时域统计指标、这些频域结构信息以及时频域分析结果,连同来自温度传感器的关键测点温升数据、润滑油液理化性能指标以及磨损磨粒的铁谱分析图谱特征,共同构成了反映齿轮箱健康状况的多维度多物理场参量体系。特定的失效模式,例如齿轮的齿根疲劳断裂,通常会在振动频谱上表现为转频及其倍频成分的异常增强,并伴随调制边带的显著增多现象。

1.3 故障演化规律与危害性评估

风电齿轮箱内部损伤的发生与发展普遍遵循着从微观缺陷萌生到局部损伤逐步积累扩大最终演变为宏观失效的渐进式规律。初期微小的点蚀或轻微剥落,若未能被及时检测发现并采取干预措施,在持续的动态载荷反复作用下,损伤区域会不可避免地加速扩展,最终可能引发灾难性的断齿或轴承卡死事故,导致整个传动链功能彻底丧失。对各类故障可能引发的后果进行科学严谨的危害性评估,需要综合考虑该故障导致设备完全停机修复所需时间的长度、更换故障部件产生的直接费用高低、因发电量损失造成的间接经济损失大小以及对相邻部件可能造成的

连带损伤风险程度等多个维度。

2 齿轮箱故障预警模型构建

2.1 多源监测数据采集与预处理

构建高精度的故障预警模型,其首要前提是获取高质量多维度的运行状态监测数据。现代风电场普遍部署了涵盖振动、温度、油液、转速、功率输出等多种类型的传感器网络,持续不断地采集着反映齿轮箱运行状态的海量原始信息。然而,原始监测数据中不可避免地混杂着由电磁干扰、传感器自身漂移、安装松动或恶劣环境噪声引入的大量异常值、缺失点以及无意义的波动干扰。因此,必须对原始数据进行一系列严格的预处理操作,包括采用滑动平均或小波阈值法进行降噪平滑处理、运用插值技术或基于生成对抗网络的数据生成方法填补缺失值、通过标准化或归一化手段消除不同物理量纲带来的影响,以及借助主成分分析或自动编码器等算法进行特征层面的降维融合,最终才能形成适用于后续模型训练的规范化高质量数据集。数据预处理环节的完备性与严谨性在很大程度上决定了最终预警模型性能的上限,这个环节的重要性怎么强调都不过分。

2.2 故障特征提取与选择方法

从经过预处理的看似杂乱无章的海量监测数据中,高效地去进行挖掘出能够敏感指示齿轮箱早期微弱故障的具有强区分能力的特征信息的工作,是预警成功与否的关键技术瓶颈。时域分析方法擅长捕捉信号幅值分布的统计特性变化,比如峰值因子、波形指标。频域分析则聚焦于能量在频率轴上的迁移规律,比如频谱重心偏移、边带能量比。时频域工具,比如短时傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换能够揭示非平稳信号中频率成分随时间演化的动态特性。而针对油液监测数据,则需关注磨粒浓度、尺寸分布、形态及化学成分谱的异常变动。面对提取出的高维特征集合,必须采用有效的特征选择技术,比如基于 ReliefF 或最大相关最小冗余 mRMR 的过滤式方法、嵌入模型训练过程的 L1 正则化 Lasso 回归或基于树模型的特征重要性排序,进行优化筛选,剔除冗余与噪声特征,保留最具代表性和判别力的核心特征子集,以此提升后续预警模型的泛化能力与计算效率。

2.3 基于机器学习的预警模型设计

利用经过精炼的强判别性特征,构建能够精准识别故障早期征兆并预测其发展趋势的智能预警模型,是当前研究的核心焦点。监督学习算法,例如支持向量机凭借其在小样本高维模式识别中的良好性能、随机森林依靠其强大的集成学习与特征重要性评估能力,以及梯度提升决策树在处理复杂非线性关系上的卓越表现,被广泛用于齿轮箱不同故障模式的分类识别任务。而对于更为重要的剩余使用寿命预测问题,时序建模能力强大的循环神经网络,尤其是其改进型长短期记忆网络和门控循环单元,以及能够并行处理序列且捕捉长期依赖关系的 Transformer 架构,展现出显著优势。这些模型通过学习历史监测数据中隐含

的故障演化模式规律,能够对未来时刻的健康状态进行概率性预测,输出故障发生概率或剩余有效运行时间等预警指标。模型的实际部署还需要解决在线增量学习、模型轻量化以适应边缘计算设备资源限制,以及处理类别不平衡样本等现实工程问题。

3 齿轮箱维护策略优化

3.1 预防性维护与状态维护对比

传统的预防性维护策略严格遵循固定的时间间隔或累计运行里程进行维护操作,其最大优势在于计划性强、管理简单,然而其固有缺陷也十分明显。它无法准确感知设备当前的实际健康状态,极易导致维护不足或维护过度。与之形成鲜明对比的是,状态维护策略的核心思想是“需要才修”,其决策完全依据对设备实时或近期健康状态监测与评估的结果来触发。状态维护策略通过预警模型输出的信息,能够精准把握最佳维护时机窗口,在故障发生前进行及时干预,从而有效避免非计划停机带来的巨大发电损失,并显著减少不必要的维护资源消耗。然而,实施状态维护需要投入相对高昂的监测系统建设成本与复杂的数据分析技术支持。对这两种维护模式进行综合对比分析,是制定最优维护策略的逻辑起点,分析它们的不同点很重要。

3.2 基于风险评价的维护周期优化

单纯依赖设备状态信息进行维护决策有时仍显不足,引入风险评价理念能实现更科学的维护周期动态调整。风险可量化为故障发生概率与该故障后果严重程度的乘积。故障发生概率可由前述预警模型输出的故障发生概率或剩余寿命预测结果进行估算。而后果严重程度,则需要从安全影响范围、潜在的经济损失大小,包括停机损失电量价值、备件更换费用、维修人工成本以及环境风险等多个维度进行综合量化评估。基于此风险量化模型,可以为不同部件、不同故障模式设定差异化的风险阈值。当评估得到的实时风险值逼近或超过预设的阈值时,系统即自动触发维护工单。这种动态调整维护周期的策略,本质是在设备运行风险与维护资源投入之间寻求最佳平衡点,确保资源投入到风险最高、最需要关注的环节。

3.3 维护决策支持系统框架

为了有效支撑基于状态和风险的维护决策流程在实际风电场复杂环境中的落地执行,构建一个集成化的维护决策支持系统还真是挺有必要的。该系统的核心框架通常包含以下几个关键层级:最底层是负责数据汇聚与管理的数据层,整合来自 SCADA 系统、CMS 振动监测系统、油液在线传感器等多源异构数据;其上是进行核心计算的模型层,部署训练好的故障诊断模型、剩余寿命预测模型及风险评估引擎;再往上是封装业务逻辑的服务层,提供状态评估、风险计算、维护建议生成等接口;最顶层则是面向运维人员的应用层,通过可视化界面展示设备健康状态全景视图、风险热力图、具体的维护建议工单以及维护历史记录。系统还应具备知识库管理功能,持续积累故障

案例与维护经验。维护决策支持系统将复杂的分析过程自动化、智能化,为现场工程师提供清晰可操作的决策依据。

3.4 成本-效益分析模型

评估所提出的新型维护策略是否真正具有推广价值,必须建立严谨的成本-效益分析模型进行量化验证。模型的构建需要全面考虑实施该策略所涉及的各种成本项,包括部署和运维状态监测系统所需的硬件投入与软件许可费用、进行高级数据分析消耗的计算资源成本,以及执行预测性维护活动本身产生的备件与人工费用。与之对比的效益,主要体现在通过减少非计划停机所挽回的发电量损失收益、通过精准维护避免重大故障从而节省的高额故障维修成本、因延长关键部件使用寿命而产生的备件更换周期延长收益,以及提升设备整体可靠性带来的潜在安全与环境风险降低。通过建立包含上述因素的净现值计算模型或投资回报率分析模型,可以在较长的时间跨度内,对状态维护策略与传统预防性维护策略进行经济性对比,为风电场投资决策提供坚实的量化支撑。

4 技术挑战与未来发展方向

4.1 数据质量与传感器可靠性问题

风电齿轮箱运行监测数据的质量与可靠性构成了预警模型准确性的根本制约。现场部署的传感器长期暴露于强振动、宽温变、高湿度甚至盐雾腐蚀等极端恶劣环境中,其自身发生漂移、失效或性能下降的风险不容忽视。监测信号在传输过程中极易受到复杂的电磁干扰,导致数据出现缺失、异常或噪声水平过高。此外,不同风电场、不同型号机组甚至同一机组不同位置安装的传感器类型与数据格式差异巨大,为构建通用性强的模型带来了数据标准化与对齐方面的巨大困难。未来研究亟需探索更鲁棒的传感器自诊断与数据质量在线评估算法,发展能够有效处理强噪声、高缺失率数据的自适应清洗与修复技术,并推动监测系统硬件在恶劣环境适应性方面的技术革新。数据是智能运维的基石,其质量难题亟待突破,解决好这个问题是基础。

4.2 多物理场耦合建模难点

齿轮箱的故障演化过程本质上是涉及机械动力学、摩擦学、热力学、材料疲劳乃至润滑流体力学的复杂多物理场强耦合问题。目前广泛应用的基于数据驱动的预警模型虽然在特定场景下表现出色,但其黑箱特性导致对故障深层物理机制的理解不足,模型泛化能力与在极端工况下的预测可靠性面临挑战。建立能够精确刻画齿轮啮合冲击、轴承滚滑接触、热弹性变形、润滑油膜破裂与再生等过程及其相互耦合效应的机理模型或物理信息神经网络,是深刻理解故障根源、提升模型可解释性和外推能力的必由之路。然而,此类模型往往计算复杂度极高,难以满足在线预警的实时性要求。如何有效融合物理机理与数据驱动,构建高效高精度的数字孪生体,是当前面临的核心科学挑战之一。耦

合建模是连接现象与本质的桥梁,这座桥的搭建难度很大。

4.3 人工智能算法的可解释性

尽管以深度学习为代表的人工智能算法在故障预警中展现出卓越性能,但其决策过程的不透明性严重阻碍了其在工业关键设备,尤其是像风电齿轮箱这样高价值高风险场景中的广泛信任与应用。运维工程师难以理解模型为何做出某个预警判断,也就难以验证其合理性或在模型出错时进行有效干预。提升人工智能模型的可解释性是当前紧迫的研究方向。这包括开发适用于时序预测模型,比如 LSTM, Transformer 的特征重要性可视化方法,比如 SHAP, LIME、设计本身具有可解释性的模型结构,比如决策树、规则集、注意力机制可视化,以及构建能够将复杂模型预测结果转化为运维人员可理解的故障诊断报告与维护建议的自然语言生成技术。缺乏可解释性,智能预警的价值将大打折扣。

5 结束语

风电场站齿轮箱作为保障机组持续可靠运行的关键枢纽,其故障的有效预警与维护策略的科学优化,对于提升风电场经济效益与运行安全性具有极其重大的现实意义。本研究系统性地探讨了齿轮箱的典型故障模式、特征提取方法、基于机器学习的预警模型构建技术以及融合风险评估的维护决策优化框架。研究清晰地指出,以状态监测为基础、以风险评价为导向、以智能预警模型为驱动核心的预测性维护策略,代表了未来风电场齿轮箱运维管理发展的主流方向与核心趋势。然而,数据质量瓶颈、多物理场建模的复杂性、人工智能模型固有的黑箱特性,以及实现全生命周期信息无缝集成的技术难题,仍是当前制约该领域取得更大突破的关键性挑战。展望未来,持续深化多学科交叉融合研究,着力提升模型的物理可解释性与在复杂多变工业场景下的泛化鲁棒性能,积极推动覆盖齿轮箱设计、制造、运行、维护全链条的数据贯通与知识共享平台建设,将是攻克这些挑战、最终实现风电场齿轮箱智能运维水平跨越式提升的必由之路。

[参考文献]

- [1]封永铭,吴文宝,张书启,等.融合振动数据和 SCADA 数据的风电机组齿轮箱故障预警方法[J].工业控制计算机,2023,36(5):1-3.
- [2]陈庭记,桂帆,郭政,等.基于不同运行状态的风电机组齿轮箱故障率预测模型[J].太阳能学报,2023,44(4):45-51.
- [3]王清照.风电机组故障预警方法研究与应用[D].四川:西南科技大学,2023.
- [4]王璞.基于物联网的风电机组齿轮箱故障诊断研究[D].河北:华北理工大学,2023.

作者简介:何佳明(1995—),男,汉族,新疆玛纳斯人,从事工作为中核汇能新疆能源开发有限公司,乌鲁木齐事业部(筹)安全质量环保部安全专责。