

变桨系统故障预警策略与处理技术研究

韩迎春

国华（沽源）风电有限公司 河北张家口

【摘要】风力发电作为清洁能源的核心支柱，其安全稳定运行对电网可靠性和经济效益至关重要。变桨系统是风电机组的核心执行机构，负责精准调节叶片桨距角以捕获最佳风能并确保机组安全，其运行状态直接影响发电效率与设备寿命。变桨系统结构复杂，工作环境恶劣，故障率高，一旦失效可能导致发电量损失甚至灾难性事故。因此，开发高效、精准的故障预警与处理技术成为风电运维领域的迫切需求。本研究聚焦于变桨系统关键部件的故障机理与特征信号，深入探讨基于多源信息融合的状态监测方法，构建智能预警模型，并提出针对性的故障诊断与快速处理策略。研究旨在突破传统事后维修的局限，实现从被动响应向主动预防的转变，提升风电机组的可利用率和运行可靠性。

【关键词】变桨系统；故障预警；状态监测；故障诊断；处理策略

【收稿日期】2025 年 11 月 15 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.ispm.20250015

Research on fault early warning strategies and handling technologies for pitch systems

Yingchun Han

Guohua (Guyuan) Wind Power Co., Ltd. Zhangjiakou, Hebei

【Abstract】 As a core pillar of clean energy, wind power generation plays a crucial role in ensuring the reliability and economic efficiency of the power grid. The pitch system, serving as a key executive mechanism of wind turbines, is responsible for precisely adjusting the blade pitch angle to capture optimal wind energy and ensure operational safety. Its performance directly affects power generation efficiency and equipment lifespan. However, due to its complex structure and harsh operating environment, the pitch system has a relatively high failure rate; once a malfunction occurs, it can lead to power losses or even catastrophic accidents. Therefore, developing efficient and accurate fault early warning and handling technologies has become an urgent demand in the field of wind power operation and maintenance. This study focuses on the fault mechanisms and characteristic signals of key components within the pitch system. It explores state monitoring methods based on multi-source information fusion, constructs intelligent early warning models, and proposes targeted fault diagnosis and rapid handling strategies. The research aims to overcome the limitations of traditional post-failure maintenance by enabling a shift from passive response to proactive prevention, thereby enhancing the availability and operational reliability of wind turbines.

【Keywords】 Pitch system; Fault early warning; Condition monitoring; Fault diagnosis; Handling strategy

引言

随着全球能源转型加速，风力发电装机容量持续攀升，风电场的安全高效运行日益受到重视。变桨系统作为风电机组实现功率调节与超速保护的核心子系统，其性能直接关乎整机的发电效率、结构安全和运行寿命。该系统通常由桨叶、变桨轴承、变桨电机或液压缸、齿轮箱、编码器、控制器及后备电

源等组成，长期承受交变载荷、极端温度、盐雾腐蚀等恶劣环境影响，导致其机械与电气部件易于发生磨损、疲劳、腐蚀、老化等故障。传统的计划检修或事后维修模式不仅运维成本高昂，且难以避免突发故障带来的停机和潜在风险。为此，发展先进的故障预警与处理技术，实现对变桨系统潜在故障的早期识别、精确定位和快速处置，是提升风电场运行

可靠性与经济性的关键路径。

1 变桨系统概述与预警需求

1.1 变桨系统功能结构

变桨系统是大型风力发电机组中不可或缺的核心控制系统，其主要功能在于通过精确调节三个桨叶的桨距角，实现对机组输出功率的主动控制。当风速低于额定值时，系统控制桨叶保持接近零度的攻角以最大化捕获风能^[1]。当风速超过额定值或机组出现故障时，系统则迅速将桨叶顺桨至约 90 度位置，大幅降低风能捕获，从而保护机组免于超速甚至飞车等危险工况。典型的电动变桨系统主要由变桨电机、变桨减速齿轮箱、变桨轴承、旋转编码器、后备电源、变桨控制器以及相关的连接件和传感器组成。

1.2 故障预警在变桨系统运维中的价值与目标

在变桨系统运维中实施故障预警具有显著的经济价值和意义。有效的预警能够显著减少计划外停机时间，避免因突发故障导致的发电量损失。通过早期发现潜在故障，可以降低维修难度和成本，避免小故障演变成大事故，从而延长关键部件的使用寿命。更重要的是，预警能极大提升风电场运行的安全性，防止因变桨失效引发的超速、倒塔等恶性事故^[2]。变桨系统故障预警的核心目标在于实现对系统运行状态的实时、连续、精准感知，基于采集的多维数据信号，利用先进的信号处理与智能算法，识别出偏离正常状态的早期微弱征兆，评估故障发生的可能性及其严重程度，并提前发出报警信息。

2 变桨系统故障预警面临的难点

2.1 复杂工况下的信号采集与特征提取难点

实现变桨系统的精准预警首先依赖于高质量的状态信号采集与有效的特征提取，然而这在实际应用中面临诸多困难。变桨系统工作在高动态、多干扰的环境中，其产生的振动、噪声、电流、温度等物理信号往往淹没在背景噪声和机组其他部件的耦合信号中，信噪比低。传感器安装位置受限，且需经受长期振动冲击，其可靠性与测量精度易受影响^[3]。变桨过程涉及多个部件的协同动作，产生的信号具有强非线性和时变性，使得表征特定部件健康状态的特征量难以稳定提取。

2.2 多故障模式耦合与早期微弱征兆辨识挑战

变桨系统包含机械传动、电气驱动、电子控制等多个子系统，其故障模式多样且复杂，包括但不

限于轴承磨损、齿轮断齿、电机绕组短路、编码器信号异常、电源失效、通讯中断、控制器逻辑错误、液压系统泄漏等。这些故障可能单独发生，也可能相互关联或耦合发展^[4]。例如，轴承磨损可能导致齿轮负载不均进而引发断齿，编码器故障会导致控制失准进而增加电机负担。更棘手的是，在故障发生的早期阶段，其征兆往往非常微弱，且表现形式可能与非故障工况下的正常波动相似，难以准确区分。传统的基于单一信号或简单规则的阈值报警方法，在面对这种多故障模式耦合和早期微弱征兆辨识时，极易出现漏报或误报。

2.3 预警模型泛化能力与实时性要求冲突

基于数据驱动的预警模型需要利用历史数据（包括正常运行数据和已知故障数据）进行训练，以学习系统的健康状态模式。然而，风电场中机组型号多样，运行环境各异，即使是同一型号的机组，其个体差异、安装位置、运行历史的不同也会导致其“健康基线”存在差异。使用单一模型或基于有限机组数据训练的模型，在应用于其他机组时，其泛化能力往往不足，可能导致预警失效^[5]。另一方面，变桨系统对控制实时性要求极高，预警模型需要能够在线快速处理数据流，及时做出判断。复杂的深度学习模型虽然可能具有更高的精度，但其计算开销大，可能难以满足在线实时处理的需求。而过于简单的模型则可能无法捕捉复杂故障模式。

3 变桨系统故障预警与处理策略

3.1 基于多源信息融合的状态监测与数据采集策略

为克服信号采集难点，需构建基于多源信息融合的立体化状态监测体系。具体策略包括在变桨系统关键节点部署高可靠传感器网络，核心监测点涵盖变桨电机三相电流与电压、电机绕组温度、减速箱壳体振动、轴承座振动、润滑油温度与颗粒度、编码器反馈信号、变桨角度指令与实际值偏差、后备电源电压等。采用高精度、宽频响的传感器，如压电式加速度计用于捕捉轴承齿轮的冲击振动，电流互感器用于监测电机驱动状态。数据采集系统需具备高采样率与抗干扰能力，同步记录所有通道数据，确保时域相关性^[6]。在数据处理层面，实施多源信息融合技术，例如将振动信号的时频域特征如有效值、峰值因子、峭度、包络谱特征与电流信号的谐波分析、瞬时功率特征，以及温度趋势、油液分析结果等

进行特征级或决策级融合。通过融合互补信息,可显著提升对微弱故障特征的感知能力与鲁棒性,降低单一信号受干扰的影响,为后续预警模型提供更全面、更可靠的数据基础。

3.2 智能预警模型构建与故障阈值动态设定策略

针对特征提取与早期征兆辨识挑战,需采用先进的智能预警模型。策略上,首先利用历史健康数据,通过分析历史数据,找出风机正常运行状态下的典型特征分布,为每台机组建立个性化的“健康基线”模型,表征其正常运行状态下的特征分布。随后,引入机器学习或深度学习算法构建故障检测模型。具体可采用无监督学习方法如一类支持向量机、隔离森林、自编码器,用于检测与健康基线的偏离;对于有标签故障数据的情况,可采用监督学习方法如支持向量机、随机森林、梯度提升树或长短期记忆网络,进行具体故障类型的分类。关键策略在于实现故障阈值的动态设定:结合机组实时运行工况如风速、桨距角、功率输出等,利用回归模型或工况聚类技术,预测当前工况下特征的正常值范围,并将实际特征值与此动态阈值进行比较,而非固定阈值^[7]。

3.3 分层递进式故障诊断与根因分析策略

为应对多故障耦合难题,需建立分层递进式诊断流程。第一层为实时运行监测层,基于前述预警模型输出初步异常报警信号。第二层为在线快速诊断层,当报警触发后,系统自动调取关联时段的多维原始数据与融合特征,运行轻量级诊断算法库。算法库包含针对特定部件的诊断规则,如基于振动包络谱识别轴承故障频率,基于电流频谱分析辨识电机电气不对称,基于角度偏差与响应时间评估伺服性能。利用贝叶斯网络或故障树分析模型,计算不同故障模式发生的概率,给出最可能的初步诊断结论^[8]。第三层为深度根因分析层,适用于复杂或耦合故障。此阶段可结合更长时间窗口的数据趋势分析,如油液金属颗粒增长趋势、温度缓慢上升曲线。

3.4 预警驱动的主动维护与快速处置策略

预警信息的价值最终体现在有效的处理行动上。策略上需建立预警驱动的主动维护体系。根据预警等级与诊断结果,将响应分为不同级别。对于低风险预警,如轻微参数漂移或早期磨损迹象,触发状态监控加强指令,缩短数据采集间隔,密切跟踪趋势变化,并纳入下次计划维护的检查项。对于中风险

预警,如明确可辨识的单一部件早期故障,生成预防性维护工单,在计划停机窗口内安排部件更换或修复,避免故障扩大^[9]。对于高风险预警,如涉及安全的关键功能异常或多点故障耦合,立即触发降功率运行或安全停机指令,同时向运维中心发出紧急报警,生成带有详细诊断报告和维修建议的紧急工单,调度人员和备件进行快速现场处置。建立标准化的故障处置流程库和备件快速响应机制,确保处置行动高效、规范。所有预警事件、处置过程和效果均记录在案,用于模型优化和经验积累。

3.5 预警系统闭环验证与持续优化策略

为确保预警系统的可靠性和有效性,必须建立闭环验证与持续优化机制。策略包括设计严格的验证流程,利用历史故障数据回放验证预警模型的准确性和及时性。在系统部署后,记录所有预警事件及其后续处置结果,特别是误报和漏报案例。建立关键性能指标评价体系,如故障检出率、误报率、平均提前预警时间、故障处置成功率等^[10]。定期进行系统性能评估,分析误报和漏报的根本原因,可能是传感器失效、特征选取不当、模型参数过时或工况覆盖不足。基于分析结果,执行优化措施,如调整特征提取算法、重新训练或更新模型参数、修订动态阈值规则、补充新的故障样本数据。利用风场实际运行中积累的新数据,持续迭代更新健康基线模型和故障诊断模型^[11]。鼓励运维人员反馈系统使用体验和问题,形成“数据采集-预警诊断-处置反馈-模型优化”的闭环,使预警系统具备自适应进化能力,不断提升性能。

4 结束语

变桨系统作为风电机组安全高效运行的核心保障,其故障预警与处理技术的提升对风电产业意义重大。本文系统性地研究了变桨系统故障预警策略与处理技术,从系统概述与预警需求出发,深入分析了当前面临的主要技术难点与挑战,包括复杂工况下的信号处理、多故障耦合辨识、模型泛化与实时性平衡等问题。在此基础上,重点提出并阐述了五项核心策略。本研究为风电场实现变桨系统的预测性维护提供了理论依据和实践路径,有助于显著降低运维成本,提高机组可用率和运行安全性,推动风电运维向智能化、精细化方向发展。未来研究可进一步探索边缘计算在实时处理中的应用,以及基于数字孪生的深度仿真与预测技术。

参考文献

- [1] 张明红,张琛.结合专家知识与数据分析的风力发电机组参数异常检测方法研究[J].湖北电力, 2024, 48(5):51-58.
- [2] 赵森,文登宇.变桨系统故障下风机极限载荷控制算法仿真设计与分析[J].机械设计与制造工程, 2024, 53(4):16-20.
- [3] 何晓丽,刘立群.风电机组变桨系统状态监测方法研究[J].太原科技大学学报, 2024, 45(6):562-567.
- [4] 杨家兴,齐春祥,王志勇.风力发电机组变桨滑环常见故障机理与研究[J].电力设备管理, 2023(1):262-264.
- [5] 宋瑞鹤.风电机组变桨系统故障诊断方法研究[J].设备管理与维修, 2024(4):25-28.
- [6] 吴松,贾帅,何晓峰,等.2.0MW 机组变桨系统的技术改造方案分析[J].电子技术, 2023(4):139-141.
- [7] 索新良,刘俊廷.变桨系统故障致风电机组倒塔事故分析[J].电力安全技术, 2024, 26(10):68-71.
- [8] 井露茜,文传博指导.基于 LMD-SECNN 的风机变桨系统故障检测[J].上海电机学院学报, 2024, 27(1):13-19.
- [9] 尹子康,林忠伟,吕广华,等.基于数据驱动的风电机组变桨系统故障诊断与健康状态预测研究[J].东北电力大学学报, 2023, 43(5):1-11.
- [10] 侯泽营,华锐 SL1500 风电机组变桨系统故障分析与维修[J].黑龙江电力, 2024, 46(5):450-454.
- [11] 冯猛,尹海天,黄燃.基于故障树的风电机组变桨系统故障诊断研究[J].数字化用户, 2023(4).

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS