

基于传感器技术的风电机组在线故障诊断研究

梁振国¹, 李洪凯¹, 刘雄¹, 张东东¹, 郭翔²

1. 中广核（甘肃）新能源有限公司, 甘肃 兰州 730070

2. 甘肃轩岳生态科技有限公司, 甘肃 兰州 730070

DOI:10.61369/EPTSM.2026040018

摘 要： 针对风电机组复杂运行环境下故障诊断准确性与实时性不足的问题，围绕传感器技术与多源数据融合方法展开研究。构建了涵盖振动、温度与应变的多源传感器数据采集系统，提出基于信号预处理与特征提取的融合分析策略。通过建立机器学习故障识别模型，结合动态阈值更新机制，优化了在线诊断的实时性与准确性。设计了完整的硬件架构与软件平台，实现诊断系统的闭环验证。研究表明，该方法可有效提升故障特征辨识度，增强系统鲁棒性，为风电机组智能运维提供理论支撑。

关 键 词： 风电机组；传感器技术；多源数据融合；在线故障诊断；机器学习

Research on Online Fault Diagnosis of Wind Turbine Based on Sensor Technology

Liang Zhengguo¹, Li Hongkai¹, Liu Xiong¹, Zhang Dongdong¹, Guo Xiang²

1. CGN Gansu New Energy Co., Ltd. Lanzhou, Gansu 730070

2. Gansu Xuan Yue Ecological Technology Co., Ltd. Lanzhou, Gansu 730070

Abstract： To address the challenges of insufficient fault diagnosis accuracy and real-time performance in complex operating environments for wind turbines, this study focuses on sensor technology and multi-source data fusion methods. A comprehensive multi-source sensor data acquisition system covering vibration, temperature, and strain measurements was established, complemented by a fusion analysis strategy based on signal preprocessing and feature extraction. By developing a machine learning-based fault identification model integrated with dynamic threshold update mechanisms, the real-time performance and diagnostic accuracy of online monitoring systems were optimized. A complete hardware architecture and software platform were designed to enable closed-loop validation of the diagnostic system. Research findings demonstrate that this approach significantly enhances fault feature recognition capabilities and improves system robustness, providing theoretical foundations for intelligent operation and maintenance of wind turbines.

Keywords： wind turbine; sensor technology; multi-source data fusion; online fault diagnosis; machine learning

引言

风电机组长时间处于变载荷、强干扰的不良环境当中，关键部件频繁出现故障，这给电网安全以及运维成本带来了严峻考验。传统的定时检修模式很难解决突然失效的情况，非常必要开发出在线且精准的故障判断技术。传感器技术是实现状态感知的关键方法，所选用的传感器以及数据融合的质量会直接左右判断的效果。当前研究大多侧重于单个信号的分析，对于多物理量共同判断以及动态阈值适应方面关注较少。本文依据传感器选择的原理，全面论述了从数据收集到信号处理，再到特征融合、判断建模直至系统框架的整套技术路线，力求形成起一套具备较高可靠性和即时性的在线故障判断方法体系。

一、风电机组故障诊断与传感器技术概述

（一）风电机组常见故障类型与机理

风电机组故障大多集中在叶片、齿轮箱、发电机以及变桨系统这些关键部件上，其失效机理表现出多物理场耦合的特性。叶

片故障主要体现为裂纹、覆冰和气动不平衡，这源于交变载荷和材料疲劳。齿轮箱故障主要是齿面磨损、断齿以及轴承受损，其振动响应具备非线性调制的特点。发电机故障涉及绕组短路、转子偏心和轴承电蚀，电磁故障与机械故障相互交织。变桨系统故障常常由液压泄漏或者电机失控引起，造成桨角调节迟缓^[1]。各

种故障在时域、频域以及统计特征方面都有特有的表现形式，要依据全面的传感信息来做到精确识别。

（二）传感器技术原理与选型依据

传感器属于机组状态感知的基本元件，其选型要综合考量测量参量、环境适应性、安装方式以及信号特性。振动传感器大多以压电式加速度计为关键部件，其频响范围较广，灵敏度较高，适合用于检测齿轮箱和轴承故障。温度传感器常采用热电偶或者铂电阻，用以监测发电机绕组和齿轮箱的油温，以此来体现热载荷是否出现异常。应变片通过测量结构形变来判断叶片和塔筒是否存在疲劳损伤，具备局部应力敏感的特点。在选型的时候，重点在于关注灵敏度、动态范围、抗干扰能力以及与检测系统的接口适配情况，保证数据采集既准确又连续。

二、传感器数据采集与信号处理方法

（一）多源传感器数据采集系统设计

多源传感器数据采集系统要达成多种物理量信号的同步采样，并持有统一的时间基准，防止由于时延不同而造成特征被误读。系统前端设有模块化的采集单元，此单元分别接上振动、温度、应变等传感器的信号，通过高精度的模数转换以及抗混叠滤波来优化信噪比。采集控制层依靠工业以太网协议做到分布式节点的同步触发，确保数据对齐的精准度。数据汇聚层利用边缘计算节点执行初步校验和打包操作，以此减轻上位机的输送压力。在系统设计的时候重视通道的多余性、抗冲击性能以及防护等级，才能适应机舱内部高电磁干扰、温差大的工作环境。

（二）信号预处理与特征提取方法

原始传感信号存在环境噪声、安装谐振以及工频干扰，要借助预处理加强特征纯度。利用带通滤波去掉低频趋向项和高频电磁干扰，依据小波阈值去噪保存故障冲击部分。关于振动信号，在时域获取峰值、峭度、脉冲因子等统计特征，在频域通过傅里叶变换找出转频和啮合频率边带。温度与应变信号经过滑动平均滤波之后，把变化率和累积偏差当作特征量^[2]。对于非平稳工况，则采用短时傅里叶变换和经验模态分解，得到时频域局部化的特征，给后续融合诊断提供高分度度的输入。

三、基于多传感器融合的故障特征分析

（一）振动信号特征分析与故障关联

振动信号对齿轮啮合异常、轴承损伤以及转子不平衡十分敏感。在平稳工况下，通过包络谱分析能够获取到轴承故障特征频率及其倍频，以此来判断内圈、外圈以及滚动体是否受损。在变速工况下，利用阶次追踪技术把时域信号变换到角度域，去除转速波动带来的影响。振动特征和故障类型之间有着确切的对应关系，如齿轮断齿会使得啮合频率的边带能量变强，而轴不对中则会引起二倍频分量大幅增多。建立起振动特征图谱库之后，给故障模式识别赋予定量标准，进而支持后续融合诊断模型的形成。

（二）温度与应变信号的融合诊断

温度和应变信号可体现机组热载荷及结构应力分布情况，二者与振动特征存在互补关系。发电机绕组温度不断上升，伴有振动加重现象，这表明可能存在匝间短路或者冷却系统故障。齿轮箱油温出现异常波动，且振动高频分量一同显现，这种情况有利于判断润滑不良或者齿面磨损状况。应变信号能直观表现出叶片和塔筒弯矩的改变情形，如果应变幅值超出限定范围，并且与某特定风向下的振动相位相互作用，就可以判定是叶片不平衡或者塔筒发生共振。把温度和应变特性当作振动分析的辅助证据链条，可以有效地减小单一振动信号产生的误报概率，优化诊断结论的可信度。

（三）多源数据特征层融合策略

多源数据特征层融合期望把振动、温度、应变等不同物理量的特征结合起来表示，建立一个统一的故障特征空间。先对各个特征执行归一化操作，去掉量纲上的差别。用主成分分析法对高维特征实施降维处理，选取贡献度大的主要成分，减少多余的信息。凭借互信息法来分析各个特征同故障状态之间的关联程度，挑选出灵敏的特征子集^[3]。在融合的时候利用加权投票制度，按照各个传感器在不同工作情况下的可信度自动分配权重。特征层融合能够很好地保存住各个物理量原本的资料，提升故障特征的完整性及其彼此间的区别能力，给分类模型提供优质的输入数据。

（四）多物理量时空关联特征提取

在机组运行时，振动、温度和应变信号存在本质的物理耦合关系，单独分别加以分析很难表现出故障的全部情况。时空关联特征获取就是要找出不同物理量在时间上共同变化的规律以及其空间分布特点。通过计算振动能量和温度梯度之间的动态时间规整距离，可以量化热-力耦合效应的时序一致性。此外，根据应变信号的空间分布差别，并结合振动传递途径来分析，就能够找到结构损伤的区域特征。采用图神经网络创建模型以体现传感器节点之间的拓扑联系，把物理衔接和信号相关性结合起来，获取表现故障流传递途径的高阶特征，给后续的判断模型提供更具物理可解释性的输入。

四、在线故障诊断模型与算法构建

（一）基于机器学习的故障识别模型

选择支持向量机和随机森林作基本分类器，形成多层融合故障识别模型。用从历史故障样本获取的融合特征集来执行训练，通过网格搜索改良核函数参数和树深。支持向量机在小样本情况下，对于边界敏感的故障有着不错的分类效果。随机森林依靠整合学习加强泛化能力，还能给出特征的重要程度排序。按照不同的故障种类规划很多个二分类子模型，再依据投票机制得出最终的判断结论。在模型训练的时候运用交叉验证来防止过拟合，采用增量学习法，借助新收集的数据不断改善模型参数，顺应机组之间的差别以及运行环境的改变。

（二）故障阈值设定与动态更新机制

固定阈值无法适配风电机组工况的波动及部件性能的衰减情况，因此要构建动态阈值更新机制。按照正常运行时各特征量的长期趋势，利用高斯混合模型来拟合特征分布，并把置信区间当作初始阈值。运用自适应滑动窗口，随时计算窗口内部特征均值的漂移量，再结合统计过程控制理论来识别异常变化。如果特征一直偏离并超出警戒线，就会自动启动阈值更新流程，防止由于老化或者季节性波动造成误报现象发生^[4]。动态阈值机制既保障了诊断灵敏度的稳定性，又能够在机组整个使用寿命期间维持报警阈值的恰当性和自适应能力。

（三）诊断系统实时性与准确性优化

在线判断对即时性要求很高，要兼顾算法复杂度和识别精度。在边缘侧设置轻量化特征获取及预判断模型，只传送异常片段的数据，减轻传送和云端计算的压力。利用模型剪枝和量化技术缩小分类器规模，把单次判断延迟维持在毫秒级。从精准性优化来看，运用置信度考量模块，如果多个模型输出不一致就启动二次判别，并结合历史故障案例库执行相似度比对。形成判断结果的反馈循环，把现场确认结果当作监督信号，定时修正模型参数和阈值，做到系统精准性不断改善。

五、诊断系统架构设计与验证

（一）在线监测系统硬件架构设计

硬件架构采取分层分布式设计，其中，底层是传感器与采集终端层，中间层为边缘计算和协议转换层，最上层则是数据服务器和监测平台。传感器终端通过航空插头同采集模块相接，采集模块具备信号调理以及模数转换的功能，其可应对 IEP E、热电偶、应变桥等各类输入信号。边缘计算节点依托工业级的嵌入式平台，并运行即时操作系统，达成数据汇集、特征识别及初步判断的目的。数据服务器设置在风场集控中心，依靠光纤环网来与各个机组实施通讯，做到对全场域状态的集中监测。硬件设计时充分考虑到多余供电、电磁屏蔽以及防雷接地等因素，以确保系统长时间稳定运行。

（二）故障诊断软件平台与数据流设计

软件平台采取模块化架构，被划分成数据接入层、数据处理层、判断服务层以及应用显示层。数据接入层依靠 OPCUA 协议来对接硬件采集系统，达成多机组数据的标准化接入。数据处理层把信号预处理、特征获取以及融合算法加以封装，并提供统一的算法调用接口。判断服务层安排机器学习模型和动态阈值引擎，给出故障类型与置信度。应用显示层凭借 Web 组态技术做到状态仪表盘、历史趋势查询以及报警推送。数据流执行发布-订阅模式，确保判断结果及时发送到运维终端，利于远程分析与决策。

（三）系统性能评估与鲁棒性分析

系统性能评定包含三个主要方面，即诊断准确率、即时性以及鲁棒性。其中，准确率需借助对比现场实际故障记录和系统输出结果来执行统计，并全面考量漏报率与误报率。即时性要通过考察从信号采集直至报警输出的整个过程所耗时延并加以量化，保证符合在线检测的需求^[5]。而鲁棒性分析着重关注在传感器失灵、通信中断以及电源波动等非正常工作状态下系统的反应情况，利用模拟传感器通道断开和网络丢包的情形，考察系统能否执行降级运行并自动复原。评定结果显示，此系统即便存在诸多故障并发且受到强大干扰的情况下，其诊断性能仍然较为稳定，具有一定的工程应用意义。

六、结语

围绕风电机组在线故障判断的需求，创建起包含传感器选型、数据采集、信号处理、融合判断以及系统达成的技术体系。多源传感器协同采集保障了状态信息的完备性，特征层融合策略优化了故障识别能力，机器学习和动态阈值机制做到了判断的精准化和自适应化。硬件与软件一体化设计保证了系统在复杂工况下具备即时性和稳定性。之后还要进一步探究多机组数据协同建模以及数字孪生融合判断，推动风电机组智能运维朝着预测性、积极性的方向发展。

参考文献

- [1] 李俊卿, 马亚鹏, 胡晓东, 等. 基于 CBAM-InceptionV2-双流 CNN 的风电机组轴承故障诊断 [J]. 智慧电力, 2023, 51(06): 28-33.
- [2] 桂斌斌, 李泽兰, 刘泳志, 等. 基于小波包和 PSO-BP 的风机滚动轴承故障诊断 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (11): 5-9.
- [3] 丁傲. 基于自适应啁啾模态分解的风电机组轴承故障诊断研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [4] 史宗辉, 陈长征, 田森, 等. 基于 S-CBiGRU 的风电机组滚动轴承故障诊断方法 [J]. 机电工程, 2023, 40(02): 232-238.
- [5] 毛成, 沈春和, 崔悦, 等. 自适应频移变尺度振动共振轴承故障诊断 [J]. 南通大学学报 (自然科学版), 2020, 19(02): 70-75.