智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用

吴俊熙

（广东粤电石碑山风能开发有限公司，广东 汕头 515000）

摘 要 风电机组长期处于复杂风况和交变载荷环境中，关键部件一旦出现异常，容易引发停机损失和安全风险。智能传感器融合技术能够整合多源数据，使机组状态监测由单点判断转向综合识别。本文围绕风电机组安全运行需求，分析智能传感器融合技术的应用价值，并从测点布设、数据治理、边缘计算、故障预警和检修闭环等方面提出应用策略，旨在提高状态识别准确性，增强故障预警及时性，为风电场精细化运维提供技术参考。

关键词 风电机组；安全运行；智能传感器融合技术；机组状态识别；故障预警

中图分类号：TP212；TM315 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.009

0 引言

随着风电机组单机容量不断提高，设备结构更加复杂，运行安全对风电场稳定发电具有直接影响。齿轮箱、主轴轴承、叶片、发电机和塔筒等部件长期承受风速波动、温度变化和机械载荷作用，传统巡检方式难以及时发现早期隐患。单一传感器虽然能够反映局部状态，但容易受到测点位置、环境干扰和数据失真的影响。智能传感器融合技术通过多源数据采集和关联分析，提高了设备状态识别的完整性，使风电机组安全监测逐渐从事后报警转向提前预警。基于此，研究该技术的应用路径，对降低非计划停机风险具有现实意义。

1 智能传感器融合技术分析

智能传感器融合技术是在传统传感监测基础上发展起来的综合感知技术，主要通过多源数据协同处理，提高设备状态识别的准确性[1]。该技术通常以振动、温度、压力、电流、转速、位移、应变等数据为基础，先由前端传感器完成实时采集，再经过信号滤波、时间同步、异常值剔除和特征提取，使不同来源的数据具备统一分析条件。在融合过程中，系统可结合卡尔曼滤波、神经网络、模式识别等方法，对复杂运行状态进行综合判断，从而弥补单一传感器容易受环境干扰、测点局限和信号失真的不足。与传统监测方式相比，智能传感器融合技术更强调数据之间的关联关系。例如：设备温度升高可能由负荷变化引起，也可能来自轴承磨损或润滑异常，只有结合振动频谱、转速波动和运行功率变化，才能提高判断结果的可靠性。当前，该技术已广泛应用于风电、轨道交通、智能制造和大型装备运维等领域，能够支持故障预警、状态评估、寿命预测和检修决策。随着边缘计算、工业互联网和人工智能算法不断成熟，智能传感器融合技术将进一步向实时化、轻量化和自学习方向发展[2]。

2 智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的作用

2.1 提升机组状态识别准确性

智能传感器融合技术能够改变传统单点监测容易失真的问题，使风电机组运行状态判断更加准确。风电机组运行过程中，齿轮箱、轴承、发电机、叶片和塔筒等部位会受到风速波动、载荷变化、温度变化等因素影响，单一传感器采集到的数据往往只能反映局部现象，难以判断故障来源。智能传感器融合技术可以将振动、温度、转速、功率、油液状态、应变变化等数据放在同一工况下分析，通过数据校准、特征提取和关联判断，识别不同信号之间的内在关系[3]。例如：齿轮箱温度升高并不一定说明设备故障，若同时出现振动频带能量增强、油液颗粒增多和转速波动异常，系统便可判断其存在磨损或润滑失效风险。通过多源信息相互印证，监测系统能够减少误报和漏报，使运行状态评估更接近设备真实情况。

2.2 增强故障预警及时性

智能传感器融合技术能够把风电机组安全监测从事后报警转向提前预警。传统监测方式多依靠固定阈

作者简介：吴俊熙（1985-），男，本科，工程师，研究方向：电力运行。

值，当温度、振动或电流达到设定上限后才触发报警，但许多故障在早期并不会立即越限，而是先表现为趋势性变化。智能传感器融合系统可以连续采集不同测点数据，并通过趋势分析发现早期异常。例如：轴承损伤初期只表现为振动冲击略有增强，随后才出现温升加快、运行噪声变化；叶片覆冰初期会先引起功率曲线偏移，再造成塔筒低频振动增强[4]。系统若能把这些变化联系起来，就能在故障扩大前发出风险提示。风电场运维人员可依据预警等级安排远程复核、现场巡检、限功率运行或停机检查，避免小缺陷发展成大范围损伤。对于高空设备和偏远风场而言，提前预警还能减少抢修次数，提高检修安排的主动性。

2.3 支撑运维决策精细化

智能传感器融合技术不仅用于发现异常，还能为风电机组运维决策提供数据支撑。风电场机组数量较多，运行环境差异明显，若仍然依赖定期巡检、人工经验安排检修，容易出现过度维护或维护滞后的问题。智能传感器融合系统可以根据机组健康状态、故障风险等级、部件劣化趋势和历史检修记录，为运维人员提供更具体的处置依据。对于轻微异常机组，系统可建议延长观察周期并加强数据跟踪；对于风险持续升高的部件，系统可生成检修工单并提示备件准备；对于短期内可能恶化的故障，系统可建议降低负荷或安排停机检查。通过该种方式，风电企业能够把检修工作从固定周期管理转向状态驱动管理，使人力、备件、吊装资源和检修窗口得到合理配置[5]。而且，监测数据还可反向修正故障模型，推动风电场形成持续优化的运维管理机制。

3 智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用策略

3.1 围绕故障机理布设传感测点

风电机组安全监测应先明确故障机理，再确定传感器布设方案，不能把测点数量作为系统能力的主要依据。企业可先根据历史故障记录划定重点部位，齿轮箱是传动链监测的核心位置，应在轴承座附近布设振动传感器，在润滑回路中设置油液颗粒监测单元，在箱体关键温升区域安装温度测点[6]。主轴轴承承受长期交变载荷，监测方案应关注低频振动变化和温升趋势，避免早期疲劳损伤被功率波动掩盖。发电机侧应重点采集绕组温度、电流波形、绝缘状态和冷却系统运行信息，判断过热、偏磁、绝缘劣化和局部放电风险。叶片监测可采用应变传感、倾角传感、声学监测或光纤光栅技术识别裂纹扩展、覆冰和气动失衡。塔筒监测应采集倾角、应变和低频振动数据，判断结构疲劳、基础沉降和法兰连接松动。测点安装还要符合信号传播规律。振动传感器应靠近振源，温度测点应避开非目标热源，油液传感器应布置在能够反映润滑循环状态的位置。SCADA系统常见的十分钟统计数据适合反映运行背景，却难以捕捉瞬态冲击，因此企业应将其作为工况校正信息，再同高频振动、温升速率和控制参数变化进行综合判断。

3.2 建立运行数据质量治理流程

多源传感数据进入融合模型前必须先完成质量治理，否则诊断结果容易受到噪声和失真数据影响。企业应建立统一的数据接入流程，对振动、温度、转速、功率、风速、桨距角、偏航角等数据进行时间基准处理。振动信号采样频率较高，适合捕捉轴承冲击和齿轮啮合异常。温度信号变化较慢，适合反映热积累和冷却异常。SCADA数据多用于判断机组负荷和控制状态，若平台不做时间对齐，系统就可能把不同时间片段的数据放在同一窗口内分析，导致融合结果偏离真实状态。因此，平台可通过时间戳校准、窗口重采样、缺失值补齐和量纲转换提高数据可比性。对于长期零值、瞬时尖峰、通信中断记录和超出物理边界的数据，系统应先标注来源，再决定是否进入诊断模型。振动数据可提取均方根值、峰值因子、峭度、频带能量和包络谱特征；温度数据可重点计算温升速率、同类部件温差和负荷修正温度；功率数据需要结合风速、空气密度、桨距角和偏航偏差判断曲线偏移。平台还应建立传感器健康度评价机制，根据零点漂移、噪声幅值、信号中断次数和相邻测点偏差生成可信度系数。当某个传感器长期偏离历史基线时，系统应降低其融合权重，并向运维端推送校准或更换提示。启停机、低温启动、限功率运行、检修试验和强阵风冲击应单独标注工况标签。

3.3 推进边缘计算现场化部署

风电机组部分故障具有快速演化特征，监测系统需要缩短数据采集到风险提示之间的时间[7]。企业可在机舱、塔基或场站侧部署边缘计算节点，使其靠近数据源完成现场处理。边缘节点应承担高速采集、初步滤波、特征提取、阈值判断、事件缓存和本地预警任务。轴承温度快速升高时，节点应立即计算温升速率并核对负荷状态。齿轮箱冲击振动增强时，节点应提取频带能量和冲击指标。叶片覆冰或偏航偏差扩大时，节点应结合风速、功率和控制参数判断风险等级。高频振动、声学波形和电流波形的数据体量较大，长

期全量上传会增加通信压力，也会占用平台存储资源。现场节点可先提取频域特征、冲击特征、转速波动和功率偏差，只在异常事件出现后上传原始片段。云端平台则用于跨机组对比、历史样本训练、寿命预测和检修策略优化。场站网络短时中断时，边缘节点应保留故障前后一段时间内的关键数据，通信恢复后再完成补传。对于高风险事件，边缘节点可向主控系统推送限功率、顺桨或停机建议，但控制动作需要经过权限分级、安全校验和人工确认规则。边缘设备还应预留远程升级、模型同步、网络安全防护和自检接口，防止算法更新影响现场连续监测。

3.4 构建多源状态故障预警模型

固定阈值报警只能发现明显越限问题，风电企业应把监测重点前移到故障早期趋势识别。平台应基于单台机组健康运行数据建立状态基线，再按照风速区间、负荷水平、环境温度、季节变化和运行年限进行修正。相同温度值在高负荷工况下可能属于正常状态，在低负荷工况下则可能提示摩擦异常或冷却效率下降。齿轮箱预警模型可综合高速轴振动、低速轴振动、油液颗粒、轴承温度、转速波动和发电功率变化，识别齿轮啮合异常、轴承剥落和润滑失效趋势。叶片预警模型可利用应变变化、塔筒低频振动、桨距角偏差、风速变化和功率波动判断裂纹扩展、覆冰和气动失衡。发电机预警模型可综合绕组温度、电流谐波、绝缘状态、冷却系统状态和机舱温度，识别过热、偏磁、绝缘劣化和局部放电风险。预警等级可设置为关注、复核、限载、停机四类。关注级用于提示趋势偏离，复核级用于安排远程诊断或现场检查，限载级用于降低运行负荷，停机级用于防止故障扩大。模型建设不宜完全依赖单一算法，机理模型可解释受力和失效规律，统计模型可捕捉长期趋势，机器学习模型可发现复杂变量之间的隐含关系。检修结果应持续回流到模型中，平台需要记录故障部位、异常特征、处置措施、更换部件、复测数据和恢复效果。

3.5 完善监测驱动检修执行机制

智能传感器融合技术只有进入检修流程，才能把监测结果转化为现场安全动作。企业应打通监测平台、工单系统、备件管理和运行调度环节。系统识别异常后，生成包含机组编号、异常部位、风险等级、关联参数、趋势曲线和建议措施的诊断信息。轻微趋势异常可进入观察流程，平台提示运维人员延长数据跟踪时间或缩短巡检周期。中等风险隐患可转化为现场复核工单，系统同步提示检测工具、备件类型和安全注意事项。高风险故障应触发限功率运行、停机检查或专项诊断建议。预测性检修需要结合风速预报、生产计划、备件库存和人员排班，尽量把检修窗口安排在低风速时段[8]。监测平台接入备件管理系统后，某类轴承、传感器、制动部件或变桨部件连续出现异常趋势时，系统可提前提示库存准备和采购周期。平台接入人员排班系统后，可根据故障等级、作业距离、天气条件、吊装资源和安全风险生成检修计划。检修完成后，运维人员应录入实际故障位置、损伤程度、处置方式、复测结果和运行恢复情况。平台据此修正预警阈值、模型权重和工况标签。对于反复出现的故障类型，企业应开展专项分析，检查测点布设、控制策略、润滑维护、安装质量和同批次部件状态。

4 结束语

智能传感器融合技术为风电机组安全运行监测提供了更加可靠的技术路径。风电企业应结合故障机理优化传感器测点布局，利用数据治理提高融合质量，并通过边缘计算提升现场响应速度。在此基础上，企业还需建立多源信息故障预警模型，将监测结果嵌入检修管理流程，使异常识别、风险分级、工单派发和处置反馈形成闭环。未来应用中，监测平台可继续结合人工智能算法和运维知识库，提升模型适应能力，使风电机组运行维护更加精准可控。

参考文献：

[1] 金晓航，刘家光，吴鹏洪，等．基于物理信息图神经网络的风电机组状态监测方法研究[J/OL].仪器仪表学报，1-13[2026-05-29].https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2614973.
[2] 王冰.智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用[J].中国科技纵横，2025(19):16-18.
[3] 戴春雷.风电机组运行状态监测与故障预警系统[J].电气时代，2025(06):59-62.
[4] 柳源．风电机组运行状态监测与评价方法研究及实现[D].内蒙古：内蒙古科技大学，2025.
[5] 周朝阳.风电机组大型滚动轴承在线监测技术与运行状态评价方法研究[D].上海：上海第二工业大学，2025.
[6] 金晓航，喻轩昂，关汉林．基于回声状态网络的风电机组运行状态监测[J].仪器仪表学报，2025,46(01):258-269.
[7] 陈臣，南明军，马宏怡，等.风电机组中主传动设备运行状态精准监测仿真[J].计算机仿真，2024,41(11):119-122,131.
[8] 陈闻鹤.基于深度学习的风电机组运行状态监测方法研究[D].南京：南京理工大学，2024.