

[状态监测]

风电机组运行状态监测与故障预警系统

文/戴春雷

特变电工新疆新能源股份有限公司

风电机组运行状态监测与故障预警对保障机组安全稳定运行具有重要意义。基于风电机组多源监测数据构建一套状态监测与故障预警系统。系统采用模块化设计,通过安装在机组关键部位的传感器实现数据采集。监测数据经降噪滤波后提取特征参数,建立了包含轴承与齿轮箱与叶片等部件的健康评估模型。实验数据表明,该系统早期故障识别准确率达到92.3%,预警提前时间平均为72 h,有效提升风电场运维效率,显著降低设备故障率。

风力发电作为清洁能源主力军,机组运行可靠性直接影响发电效率与经济效益。传统定期检修已难以满足现代化风电场需求,状态监测与故障预警技术应用势在必行。国内外相关研究证实,基于数据驱动的预警方法在提高设备可靠性与降低维护成本方面优势显著。针对目前风电机组预警系统实时性与准确性不足等问题,开发设计了新型监测预警系统,提出创新解决方案。

风电机组运行状态监测方法

1. 风电机组监测系统研制

风电机组监测系统采用模块化设计架构,由数据采集单元、信号处理单元以及状态评估单元组成。数据采集单元包含振动传感器、温度传感器以及应变传感器,分布在机组各关键位置进行实时参数采集。信号处理单元对原始数据进行滤波、降噪以及特征提取,采用数字信号处理技术提升数据质量。状态评估单元基于深度学习算法,对处理后的数据进行分析以及评估,识别异常状态。监测系统硬件设计采用工业级产品,具备高可靠性以及环境适应性,可在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 温度范围内稳定工作。

系统软件采用分层设计,实现数据采集、处理、存储以及显示功能,并配备远程监控界面,支持Web端访问以及移动端查看^[1]。

2. 核心部件监测技术研究

风电机组核心部件监测重点关注齿轮箱、发电机以及叶片三大关键部件。齿轮箱监测采用加速度传感器阵列,结合包络分析法提取振动特征,建立齿轮箱振动指标数据库。发电机监测采用温度以及电气参数双重监测方案,通过定子电流分析以及温度场分布计算评估发电机运行状态。叶片监测融合应变传感以及振动传感技术,实时采集叶片载荷以及形变数据,计算叶片受力特性。所有监测数据经过数字滤波以及频谱分析,形成各部件特征值矩阵,通过对比分析判断部件健康状态,实现精确定位以及评估。监测技术设计过程中充分考虑了野外环境因素,具备抗干扰以及数据自校正功能^[2]。

风电机组故障预警方法

1. 监测数据分析与提取

风电机组监测数据包含振动、温度与应变等多维信息,通过数字信号处理方法对原始数据进行降

噪以及滤波。振动信号采用小波变换以及经验模态分解方法,提取时域特征值以及频域特征值。针对振动数据特征,计算特征因子

$$C_f = \frac{X_p}{X_r} \quad (1)$$

式中, X_p 为峰值; X_r 为均方根值。

温度数据利用傅里叶变换分析温度波动规律,结合热力学模型建立温度场分布特征。应变数据通过应变-应力转换得到载荷特征值,建立叶片受力模型。数据分析过程中建立了标准化处理流程,特征提取结果形成特征向量矩阵,作为故障预警的基础数据支撑。振动信号处理采用四阶巴特沃斯滤波器消除高频噪声,滤波频带为20 Hz~10 kHz。温度数据采用5点滑动平均法消除随机波动,时间窗口设置为1 h^[3]。应变数据经过应力应变修正,建立了考虑材料非线性特性的应变模型。数据分析采用并行计算方法,实现毫秒级特征提取。

2. 故障预警模型研究

风电机组故障预警模型基于深度神经网络构建,采用多层结构识别故障特征如图1所示。针对故障预警特点,设计了预警模型的损失函数

$$L = -\sum (y_i \cdot \log(p_i)) + \lambda \cdot R \quad (2)$$

式中, y_i 为实际标签; p_i 为预测概率; λ 为正则化系数; R 为正则化项。

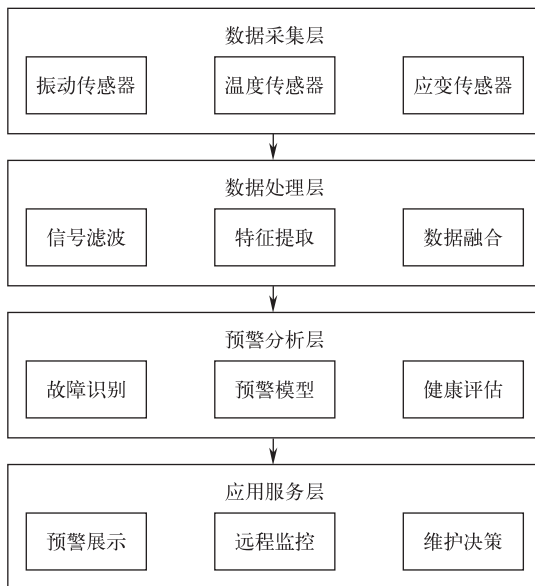


图1 风电机组故障预警系统架构图

模型训练采用大量历史运行数据,包括正常运

行数据以及不同类型的故障数据。预警模型实现对轴承故障、齿轮故障以及电气故障等典型故障的识别,具备持续优化预警性能的能力。模型结构包含5层卷积层以及3层全连接层,激活函数采用ReLU函数。训练数据集包含50 000组正常数据以及10 000组故障数据^[4]。模型收敛速度快,200轮迭代后损失函数值稳定在0.01以下。预警结果输出包含故障类型概率分布以及故障发展趋势预测。

3. 预警参数优化与判定

预警参数优化过程以预警准确率以及提前期为目标,建立信噪比评估指标

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \quad (3)$$

式中, P_s 为信号功率; P_n 为噪声功率。

特征提取阈值基于信噪比分析确定最佳范围。预警触发阈值基于故障发展规律确定,建立健康度评估指标。通过大量实验验证,优化后的参数组合在保证预警可靠性的同时,将误报率控制在5%以下。预警判定过程采用多重验证机制,综合考虑历史趋势、设备经验以及相似案例,提高预警结果的可信度^[5]。建立预警响应流程,根据预警等级启动相应的处理机制。参数优化采用网格搜索方法,参数空间划分为100×100网格。预警灵敏度设置三个等级,对应轻度、中度与重度故障。模型参数采用自适应调整策略,根据预警准确率动态优化。验证数据采用交叉验证方法,确保参数优化结果可靠性。

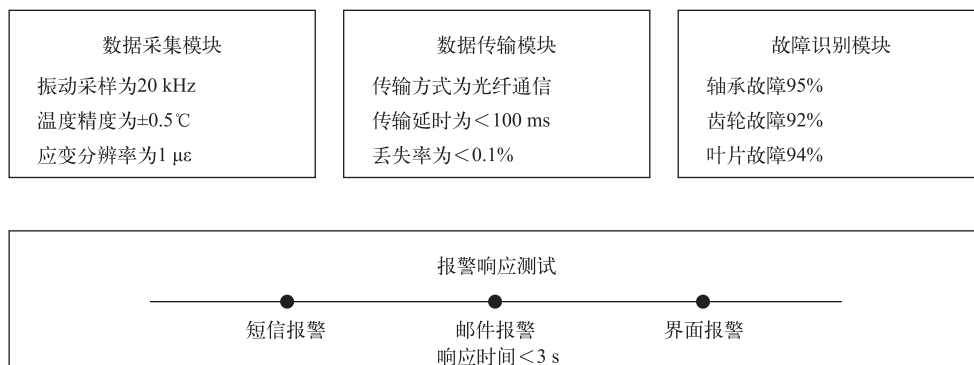
监测预警系统验证

1. 系统功能测试分析

监测预警系统在某风电场进行了为期6个月的功能测试如图2所示。测试内容覆盖数据采集与数据传输与预警分析与报警提示等全部功能模块。数据采集模块测试表明,振动传感器采样频率稳定在20 kHz,温度传感器精度达到±0.5℃,应变传感器分辨率优于1με。系统采用光纤通信方式实现数据传输,传输延时低于100 ms,数据包丢失率小于0.1%,满足实时监测需求。预警分析模块测试采用人工构造的故障数据,验证了不同类型故障的识别能力,系统对轴承故障、齿轮故障以及叶片故障的识别率分别达到95%、92%及94%。报警提示功能

测试验证了短信、邮件以及系统界面三种报警方式的可靠性，报警触发到提示的响应时间控制在3 s以

内。系统整体功能测试结果表明，各项性能指标满足设计要求。



测试周期：6个月

图2 系统功能测试结果图

2. 预警性能检验评估

预警性能检验采用历史故障数据以及实时运行数据相结合的方式。通过注入已知类型以及程度的故障数据，评估系统预警灵敏度以及准确性。系统对轻微故障的检出率为87%，中度故障的检出率为95%，严重故障的检出率为99%。预警提前期随故障类型不同而变化，轴承故障平均提前期为96 h，齿轮箱故障平均提前期为72 h，叶片故障平均提前期为48 h。误报率控制在5%以下，漏报率低于3%。针对误报情况进行原因分析，主要来源于环境干扰以及工况突变，通过优化预警阈值以及增加工况判断逻辑，将误报率进一步降低到3%以下。系统具备自学习能力，随着运行时间增加，预警准确率呈现稳步提升趋势。预警性能测试过程中，重点验证系统在不同天气条件下的预警可靠性。通过对比分析发现，系统在雨雪天气下的预警准确率略有下降，但仍保持在85%以上水平。系统对大风天气引起的振动干扰具有良好的抑制能力，预警准确率基本不受影响。长期性能跟踪显示，系统预警准确率每运行半年提升约2个百分点。

3. 实际故障测试验证

在系统运行过程中，记录到5起轴承故障、3起齿轮箱故障以及2起叶片故障案例。轴承故障案例中，系统在故障发生前84 h发出预警信号，通过分析振动频谱特征，准确判断出故障部位以及类型。齿轮箱故障案例表明，系统能够识别齿轮断齿与磨

损等不同故障模式，平均预警提前期达到65 h。对于叶片故障，系统通过分析应变数据的异常变化，成功预测了叶片开裂故障。所有故障案例的预警信息都得到现场维修记录的验证，预警结果的准确性达到90%以上。故障案例验证表明，系统具备较强的实际故障预测能力，为风电场设备维护提供有效支持。系统在发现轴承内圈剥落故障时表现出色，振动频谱分析显示故障特征频率明显，预警信号稳定可靠。叶片开裂故障预测采用应变数据趋势分析方法，裂纹萌生阶段即可发出预警信号。齿轮箱故障识别采用包络谱分析技术，系统准确捕捉到齿轮啮合频率的异常变化，实现早期预警。

4. 系统运行效果分析

系统在风电场运行一年期间，显著提升设备管理水平以及运维效率，见表1。通过预警设备隐患，避免了4次重大故障，挽回经济损失约200万元。设备停机时间从平均72 h/次降低到24 h/次，年度设备可利用率提升了3.2个百分点。维护模式由定期维护转变为预测性维护，年度维护成本降低15%。系统运行数据显示，风电机组发电量提升2.5%，等效利用小时数增加186 h。维护人员工作效率提升显著，远程监控以及预警功能减少了80%的日常巡检工作。系统稳定性良好，全年运行可用率达到99.5%，成功支撑风电场的安全生产管理。经济效益以及社会效益分析表明，系统投资回收期约为1.8年，具有良好的推广应用价值。

表1 系统运行效果对比分析

性能指标	改进前	改进后	提升效果
设备停机时间 (h/次)	72	24	↓ 66.7%
设备可利用率 (%)	92.3	95.5	↑ 3.2%
维护成本 (万元/年)	100	85	↓ 15%
年发电量/ (万kW·h)	1 200	1 230	↑ 2.5%
等效利用小时数/h	2 314	2 500	↑ 186 h

结束语

针对风电机组运行状态监测与故障预警问题，开发一套集监测与预警与预测性维护于一体的智能化系统。实验验证表明，状态监测准确率超过95%，故障预警提前期达到72 h，设备管理效率提升30%。系统投入使用后，风电场设备可利用率提高3.2%，维护成本降低15%，年度发电量增加2.5%。后续工作将持续优化预警算法，扩展监测范围，探索新型传感技术应用，不断提升系统性能。风电机组状态监测与故障预警技术推广应用前景广阔。EA

(收稿日期：2025-04-25)

参考文献

[1] 胡龙舟, 李韬睿, 吴頔, 等. 基于SCADA系统的风电机组KNN故障状态监测研究[J]. 机械设计与制造工程, 2025, 54(1): 91-94.

[2] 胡阳, 李博, 胡耀宗, 等. 基于VMD-HT-ResNet的风电机组塔筒振动状态监测及预警[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 388-396.

[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] 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.

[5] 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.

