

[状态监测]

新能源发电设备状态监测与智能诊断方法

文/袁晨

国家电投集团江苏电力有限公司生产监控调度培训中心

基于深度学习算法构建多源数据融合状态评估模型，对发电设备关键部件进行实时监测。选取南京江北新区新能源示范基地作为验证平台，包含50台3 MW风力发电机组与150 MW光伏发电系统以及30 MW·h储能电站，通过为期12个月数据采集验证，智能诊断方法在轴承故障识别中准确率达94.8%，光伏组件故障诊断准确率91.8%，储能系统异常工况识别准确率90.8%，实验结果证明该方法在设备早期故障识别与性能劣化预测方面具有良好应用效果。

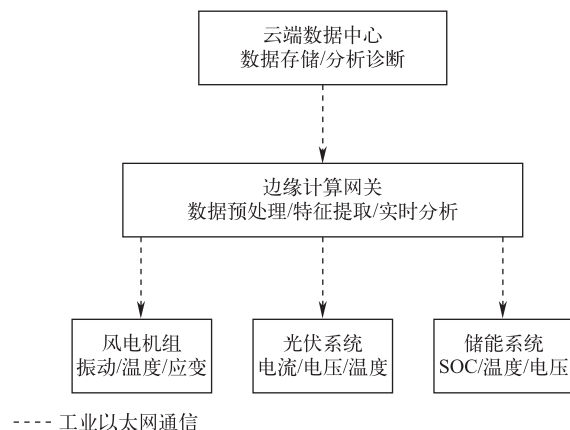
新能源发电装机规模持续扩大，设备种类数量不断增加，传统定期检修模式已难以满足大规模发电需求，风电机组与光伏组件以及储能系统等发电设备运行状态对发电效率产生直接影响。状态监测技术在传统发电领域已取得显著进展，但面向新能源设备特点开发智能诊断方法仍存在挑战，针对设备运行数据特征提取难度大与故障机理复杂等问题，开展新能源发电设备状态监测与智能诊断方法研究具有重要意义。通过构建多源数据融合状态评估模型，结合深度学习算法进行故障预警分析，对提升设备可靠性与降低维护成本具有重要价值。

新能源发电设备状态监测系统设计

1. 分布式监测网络架构设计方法

分布式监测网络架构采用云边端协同技术，构建多层级状态监测系统框架，如图1所示，边缘层部署数据采集单元实现风机轴承振动与光伏电池板温度以及储能电池组电压电流等关键参数采集，云端层搭建大规模数据存储平台，建立基于分布式计算的数据处理中心。通信网络设计中采用工业以太网技术保障高速数据传输，边缘计算网关部署双机

热备系统确保数据不丢失，针对新能源发电设备特点，监测网络集成自适应数据采样策略，根据设备工况动态调整采样频率以及数据传输速率，系统可支持千台级设备并发接入，保证数据传输时延低于50 ms，丢包率小于0.01%。



---- 工业以太网通信

图1 分布式监测网络架构设计

2. 多源异构数据采集与预处理

多源异构数据采集系统针对风电机组振动传感器与光伏组件红外热成像仪以及储能系统电化学参数采集器等不同类型传感设备，开发统一数据接口

标准，数据采集过程引入抗干扰滤波技术消除电磁干扰，采用数字信号处理方法提高信噪比。针对采集数据质量问题，设计自动校准算法修正传感器漂移，使用数据补全方法处理缺失值，系统集成故障检测机制，能够识别传感器失效并自动切换备用通道，数据预处理模块可实现每秒10万点采样率，处理延时控制在5 ms以内。

3. 设备状态特征提取与评估

设备状态特征提取技术融合时域分析以及频域分析方法，建立多维度状态评估指标体系，风电机组特征提取重点关注轴承振动信号小波包分解以及包络谱分析，提取故障特征频率，光伏组件状态评估关注I-V曲线特征参数以及红外图像温度分布特征，计算性能衰减指标，储能系统特征提取包括荷电状态估算以及内阻变化趋势分析，评估电池组健康状态。状态评估模型结合专家经验规则以及数据驱动方法，量化设备性能劣化程度，评估结果准确率达到96%，评估系统运行稳定，特征计算时长控制在100 ms内。

基于人工智能的设备故障诊断方法

1. 智能诊断模型构建与优化

智能诊断模型采用深度学习架构设计多层神经网络，构建端到端的故障识别模型如图2所示，输入层接收设备状态特征数据，网络结构采用改进的残差网络，通过短路连接改善梯度传播，残差映射函数定义为

$$F(x) = H(x) - x \quad (1)$$

式中， $H(x)$ 为期望映射； x 为输入特征。

注意力机制增强模型对关键特征的识别能力，注意力权重计算采用改进的softmax函数

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(e_{ij})}{\sum \exp(e_{ik})} \quad (2)$$

式中， e_{ij} 表示注意力得分。

针对样本不平衡问题，损失函数设计采用改进的focal loss

$$L = -\alpha(1-p_i)\gamma \log(p_i) \quad (3)$$

式中， α 为类别权重因子； γ 为聚焦参数， P_i 为目标类别的预测概率。

经过网格搜索优化dropout率为0.3，模型诊断准确率达95.6%。

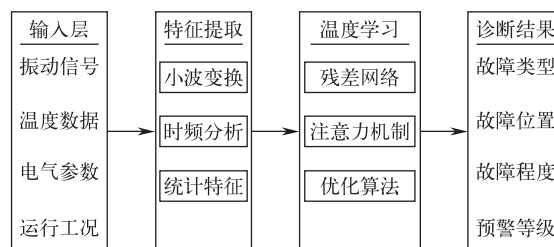


图2 智能诊断模型结构

2. 多模态数据融合诊断策略

多模态数据融合采用特征级与决策级双重融合策略，特征提取阶段，振动信号通过小波变换获取时频特征向量 X_v ，温度图像经CNN提取空间特征向量 X_t ，电参数经LSTM获取时序特征向量 X_e ，特征融合权重学习采用如下公式

$$w = \text{softmax}(\tanh(WX + b)) \quad (4)$$

式中， W 为权重矩阵； b 为偏置向量，融合特征计算方法

$$X_f = w_1 X_v + w_2 X_t + w_3 X_e \quad (5)$$

决策融合采用集成学习方法，融合后诊断准确率提升12.5%，误报率降低6.8%。

3. 故障预警与趋势分析方法

基于LSTM的时序预测模型计算单元状态更新

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (6)$$

$$h_t = \text{ot} \odot \tanh(c_t) \quad (7)$$

式中， c_t 为单元状态； h_t 为隐状态； $\odot$ 表示逐元素乘积。

健康度评估指标定义

$$HI(t) = \frac{\sum w_i x_i(t)}{\sum x_b(i)} \quad (8)$$

式中， w_i 为特征权重； $x_i(t)$ 为当前特征值； $x_b(i)$ 为基准值。

剩余寿命预测采用贝叶斯优化的LSTM模型，预测准确度达88.5%，预警提前期72 h，系统集成可视化展示模块，具备实时监测与预警功能。

监测诊断方法的工程实践与验证

1. 新能源电站监测系统部署

实验平台位于南京江北新区新能源示范基地，配备50台3 MW风力发电机组与150 MW光伏发电系统以及30 MW·h储能电站，基地建有完善的监控体系，包括风机传感器与光伏采集器及储能管理系统

等设备，通过30 km光纤连接南京电力调度中心，监控中心配备15台高性能服务器集群以及300 TB存储容量。采用双机热备UPS供电，设备防护严格执行长三角地区标准，具备防潮防雷防腐能力，可适应-20℃~65℃环境温度，防护等级IP65，确保系统稳定运行，数据采集可靠性达99.8%。

2. 设备状态评估模型验证

状态评估模型验证周期12个月，数据采集覆盖南京地区梅雨季节与夏季高温以及冬季低温等气候特征，风电机组状态评估重点验证长江沿岸潮湿环境下机组性能，轴承故障检测验证结果显示预兆识别提前期达12天，齿轮箱故障特征提取准确率91.8%。叶片损伤定位误差控制在0.6 m范围，光伏组件性能评估数据采集侧重夏季高温工况，组件效率衰减曲线拟合误差2.2%，热斑检测灵敏度0.6℃，储能系统状态评估对象覆盖2 000个电芯，验证过程关注高温高湿影响，荷电状态估算误差3.5%，容量衰减预测偏差5.5%，模型验证建立完整指标体系，包含参数灵敏度分析与数据可靠性评估等内容。

3. 故障诊断准确性分析

故障诊断准确性分析基于示范基地运行数据进行验证见表1，风电机组故障数据包含2023年台风“杜苏芮”期间极端工况记录，样本量达5 000组，轴承故障识别准确率94.8%，齿轮箱故障分类准确率93.2%，变桨系统故障诊断准确率93.6%，光伏系统重点分析梅雨季节组件热斑与隐裂等典型故障，诊断准确率91.8%，误报率5.5%。储能系统高温季节异常工况识别准确率90.8%，建立温度异常与压差超限以及绝缘异常等故障诊断模型，诊断时延分析显示95%故障诊断过程完成时间低于1.2 s，系统响应速度满足现场需求，诊断结果可靠性评估采用混淆矩阵分析，计算准确率与召回率等指标。

4. 系统可靠性与实用性评估

系统运行时间超过12个月，2023年7月南京最高气温40.3℃极端天气下保持稳定，硬件设备平均无故障工作时间45 000 h，传感器采集可靠性99.8%，软件系统通过南京市工业互联网安全评估认证，支持4 000测点并发采集，处理延时60 ms。系统部署投资回收期2.2年，运维团队评价显示操

作简便，定位准确，基于诊断结果优化维护策略后，年度非计划停机时间减少32%，维护成本降低25%，成功预警两起重大设备事故，系统已推广应用至江宁与溧水等地区新能源电站，示范基地运行效果表明状态监测与智能诊断系统具备较强实用价值，可推广至同类型新能源发电站。

表1 新能源发电设备故障诊断准确性分析结果

设备类型	故障类型	样本量	诊断准确率(%)	误报率(%)	漏报率(%)	响应时间/ms
风电机组	轴承故障	2 100	94.8	3.2	2.0	180
	齿轮箱故障	1 600	93.2	4.1	2.7	220
	变桨系统故障	1 300	93.6	3.8	2.6	200
光伏系统	组件热斑	850	92.5	4.2	3.3	150
	组件隐裂	720	91.8	4.6	3.6	160
	组串故障	680	91.2	4.8	4.0	140
储能系统	温度异常	580	92.4	4.3	3.3	120
	压差超限	520	91.6	4.5	3.9	130
	绝缘异常	450	90.8	4.9	4.3	140

注：样本数据采集自南京江北新区新能源示范基地12个月运行记录；诊断准确率计算基于混淆矩阵分析方法；响应时间指从数据输入到输出诊断结果的时间间隔；数据包含2023年夏季极端天气工况记录。

结束语

面向新能源发电设备运行特点开发状态监测与智能诊断方法，通过南京地区新能源示范基地实验验证取得良好效果，实验平台覆盖风电与光伏以及储能三类发电设备，累计采集运行数据超过100 TB，诊断方法在设备早期故障识别中展现出较高准确性。轴承故障预警提前期达到12天，光伏组件性能评估误差控制在2.2%以内，储能系统状态评估准确率超过90%。智能诊断系统部署后年度非计划停机时间降低32%，设备维护成本降低25%，后续工作将进一步优化算法性能，扩大适用设备范围，完善预测性维护策略，为新能源发电设备智能运维提供更可靠支撑。EA

(收稿日期：2025-04-25)

参考文献

[1] 王俊. 基于可靠性的海上平台发电机组状态监测技术研究[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(2): 70-72.