

基于边缘计算的风电机组关键部件实时状态监测系统设计与工程应用

孙程

江苏国电南自海吉科技有限公司 江苏省南京市 210000

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21183

[摘 要] 针对传统风电机组状态监测系统存在的云端数据传输延迟高、现场异常响应滞后以及带宽与算力资源分配不合理等问题。本文提出一套适配风场复杂运行环境的边缘计算架构状态监测方案，该方案充分发挥边缘端本地化算力优势来实现关键部件运行数据就地实时分析与异常快速响应。同时借助云边协同机制兼顾全局运维统筹与模型迭代优化，有效平衡监测实时性与分析深度的需求。本文依次梳理风电机组监测场景的核心需求，阐述系统整体架构与核心模块的设计思路，最后通过实际工程落地验证方案的可行性与应用价值，为风电智能化运维体系的构建提供技术参考。

[关键词] 边缘计算；风电机组；状态监测；故障预警；云边协同；智能运维

在双碳战略持续推进的情况下，我国风电装机规模始终保持高速增长态势，与此同时风电机组运行维护的难度和成本随之攀升。传统依靠人工巡检以及云端集中分析的运维模式难以适配大规模风场精细化管理需求。

1 风电机组关键部件状态监测需求分析

1.1 风电机组核心故障风险分布特征

风电机组长时间处于野外复杂工况环境中，持续受到极端温度、强风载荷以及交变应力等因素影响，不同部件的故障演化规律和风险等级有着显著差异。传动链系统作为机组能量转换的核心单元，如齿轮箱、主轴、发电机等部件故障发生率较高，并且维修成本高昂、停机损失巨大，是状态监测必须覆盖的核心对象，叶片作为风能捕获的关键部件，长期遭受腐蚀、雷击、疲劳载荷作用，裂纹、前缘侵蚀等隐患容易逐步发展成结构性损坏，其早期异常识别难度大、监测需求十分迫切。

1.2 实时状态监测的性能指标要求

风电机组关键部件实时状态监测对系统性能有多个维度指标要求，其核心目标是尽早发现并处置故障避免小隐患发展为严重事故，在故障识别方面要对不同类型典型故障有足够识别精度，能有效区分正常工况波动和异常特征以降低误报漏报概率。同时要具备早期隐患感知能力为运维预留充足响应时间，在响应效率方面从数据采集分析到异常告警全流程时延要控制在可接受范围，满足关键故障发生时快速处置需求避免故障进一步扩大。在环境适应性方面监测系统要适配风场高低温、强电磁干扰、高湿度等恶劣运行环境保障长时间稳定运行，还要具备足够兼容性适配不同机型不同服役年限机组监测需求。

1.3 传统架构下监测系统的能力瓶颈

传统风电机组状态监测大多采用集中式架构，在当前大规模风场运维场景中逐渐暴露出多方面能力瓶颈。云端集中处理模式下所有机组高采样率运行数据需通过公网回传，这不仅会占用大量带宽资源且提升运维成本，同时网络传输过程的不确定性易导致数据丢失和时延波动，无法满足关键故障的实时响应需求。

2 基于边缘计算的监测系统总体架构设计

2.1 系统设计原则

基于边缘计算设计风电机组状态监测系统要充分结合风电场景实际运行特点并遵循几大核心原则。第一是低时延本地化处理原则，将常规状态分析、异常告警等高频功能下沉到边缘端，最大程度减少数据远距离传输产生的时延以保障故障响应实时性。第二是云边端三级协同原则，明确终端、边缘端、云端的功能边界和协作逻辑来实现三类节点能力互补，既发挥边缘端实时响应优势也依托云端强大算力进行全局数据挖掘与模型迭代优化。第三是多源异构数据兼容原则，系统要支持振动、温度、应力、电气量等不同类型传感器的数据接入，同时适配不同厂商、不同型号机组的通信协议以降低场景适配成本。第四是可扩展与易部署原则，系统功能模块采用松耦合设计支持后续新增监测对象、新增分析算法快速接入，同时边缘节点要满足小型化、易安装特点以适配存量机组改造需求。

2.2 三层系统架构组成

2.2.1 终端感知层

终端感知层作为整个监测系统的数据来源，负责采集风电机组关键部件全维度运行状态数据。依据不同部件的故障特征与监测需求，在对应位置部署差异化的感知设备，例如在齿轮箱、主轴、发电机等传动链部件的轴承座、壳体等位

置部署振动传感器，以此捕捉设备运行过程的振动特征，在关键发热部位部署温度传感器，从而监测设备的温升异常情况^[1]。在叶片、塔筒等部位部署应变传感器，用于监测结构应力的变化状况，同时接入机组原有的电气量、运行工况等数据，为状态分析提供多维度的数据支撑。所有感知设备都具备高采样率、高可靠性、低功耗的特点，能够适应风电场的极端运行环境，采集的数据通过本地总线实时传输至边缘计算层，为后续分析提供基础条件。

2.2.2 边缘计算层

边缘计算层部署于风电机组舱内或者风场侧，该层是系统实现实时监测的核心单元，承担着本地化数据处理、分析决策与现场响应的核心功能，边缘节点配备适配工业场景的算力硬件，具备足够计算能力与存储能力，能够同时处理多台机组的高采样率监测数据，运行轻量化的故障诊断与状态评估算法，该层向上和云端平台进行通信。向下对接终端感知设备，主要负责实时接收感知层上传的各类数据，在本地

完成数据预处理、特征提取、故障诊断与异常告警，常规状态数据无需回传至云端，仅在识别到异常或满足特定上报条件时，才将相关数据按需传输到云端，有效降低带宽消耗。

2.2.3 云端管理层

云端管理层作为整个监测系统的全局调度与资源中心，依靠云端充足的算力和存储资源，承担全风场数据聚合、模型训练、运维管理等非实时性功能，云端接收边缘节点上报的异常数据、状态统计数据与全量特征数据，对跨机组和跨风场的运行数据进行深度挖掘，分析不同机组不同工况下的故障演化规律，训练并优化故障诊断模型，还将更新后的模型定期下发到边缘节点以持续提升边缘端分析精度^[2]。同时云端管理层构建全局运维管理界面，集中展示所有机组的运行状态、异常告警信息、故障处置进度等内容，辅助运维人员制定运维决策、生成运维工单，实现全风场运维资源的统筹调度，并且支持历史数据的长期存储与追溯，为机组全生命周期健康管理提供数据支撑（见图1）。

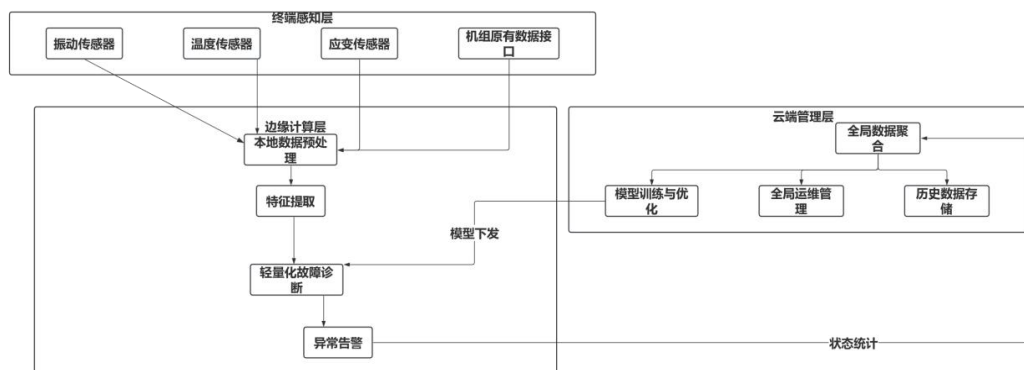


图1 基于边缘计算的监测系统总体架构图

2.3 云边协同工作机制

云边协同机制是保障系统实时性和分析精度平衡的核心，通过明确云端和边缘端分工及交互逻辑，实现两类节点的能力互补。在模型迭代方面，边缘端采集异常样本和运行数据上传至云端，云端基于全量数据训练高精度故障诊断模型，经轻量化处理后下发至边缘端，实现边缘侧分析能力持续迭代，形成“边缘采集数据-云端训练模型-边缘落地应用”闭环^[3]。在数据交互方面，采用分级上报机制，边缘端仅将异常事件数据和定期统计的状态特征数据上报云端，常规运行数据就地处理与存储，大幅降低数据传输量，同时支持运维人员按需主动调取特定机组全量运行数据，兼顾传输效率和数据可用性。在运维协同方面，边缘端负责实时告警和本地初步应急响应，云端负责故障二次复核、运维方案制定和全风场资源调度，实现现场快速响应和全局科学决策有机结合。

3 边缘端核心功能模块设计

3.1 多源数据预处理模块

多源数据预处理模块作为边缘端数据分析的基础，承担着对终端感知层上传的各类异构数据进行标准化处理的任务，为后续故障诊断提供高质量数据输入，该模块将先对收到的原始数据进行有效性校验。过滤因传感器故障、传输干扰产生的异常值和无效数据，并评估数据质量，防止无效数据干扰后续分析结果^[4]。针对不同类型的监测数据，模块采用差异化预处理逻辑，对高采样率的振动信号进行降噪处理，消除环境噪声与工况波动带来的干扰，提取时域、频域、时频域等多维度特征参数，对温度、应力、电气量等缓变量进行平滑处理与趋势分析。同时对所有数据进行时间戳对齐与归一化处理，实现多源数据的时间维度统一与量纲统一。经过预处理后的数据一部分直接输入实时诊断模块进行分析，一部分按规则存储在边缘端本地以满足后续查询与回溯需求^[5]。

3.2 实时故障诊断与预警模块

实时故障诊断与预警模块作为边缘端核心功能模块，负

责依据预处理后的数据快速识别机组关键部件异常状态以实现故障早期预警，该模块采用“规则判定+轻量模型推理”两级诊断逻辑^[6]。先基于已有故障机理知识和运维经验设置关键特征参数阈值规则快速识别超出正常运行范围的明显异常，再调用经过轻量化优化的故障诊断模型对特征参数进行深度分析以识别早期微弱故障特征并判断故障类型、位置与严重等级，模块支持针对不同部件故障特征配置差异化诊断策略，将根据故障严重程度自动划分预警等级并触发对应级别本地告警信息^[7]。同时将预警相关上下文数据同步上报至云端，为后续故障复核与运维决策提供支撑，整个诊断流程在边缘端本地完成以确保从数据输入到告警输出低时延，从而满足实时响应需求。

3.3 边缘端本地运维响应模块

边缘端本地运维响应模块在识别到异常情况时，负责实现现场侧的快速处置以及运维支撑，以此最大限度降低故障所带来的损失，模块在接收到故障预警信息后，依据预设的处置规则^[8]。向机组控制系统发送适配的调整指令，在安全试点从功能、性能、效益三个维度开展量化验证，核心指标对比结果如下表所示：

指标类型	传统架构	边缘计算架构	优化幅度
故障预警准确率	62%	94%	+51.6%
平均告警时延	28s	3.2s	-88.6%
数据回传量	1.2TB/台/月	96GB/台/月	-92%
年运维成本	1200 万元	780 万元	-35%
年非计划停机时长	82 小时/台	21 小时/台	-74.4%

试运行期间系统成功识别 11 起早期故障，其中齿轮箱轴承磨损 3 起、叶片裂纹 2 起、发电机绝缘异常 1 起，全部经现场排查确认，避免直接经济损失超过 320 万元，验证了边缘计算架构在风电监测场景的显著优势。

5结论

本文围绕风电机组关键部件实时状态监测核心需求，设计了一套基于边缘计算的监测系统方案，通过将把数据处理能力下沉到现场端，有效突破传统集中式架构的时延与带宽瓶颈，实现异常状态的快速识别和本地响应，系统采用云边端三层架构，明确各层级功能边界与协同机制。同时优化边缘端核心功能模块设计，兼顾监测实时性与分析精度，工程试点应用结果显示，该系统能有效识别关键部件早期故障隐患，提升运维响应效率并降低运维成本，具备良好可行性与应用推广价值。

[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 [2026-05-13].

[2]孔鹿鸣,肖峰,秦世耀,等. 风电机组地面试验平台及

范围内对机组的运行参数进行调整,例如降低载荷、限制功率,从而避免故障进一步恶化。同时模块可自动生成现场运维提示信息,明确故障相关的具体部位、可能存在的原因以及初步处置建议,并将这些信息推送到现场运维人员的移动终端,辅助运维人员快速定位问题,进而提升现场处置的效率。

4 工程应用与效果验证

本次试点选取国内装机容量为 50MW 的山地风电场,该风电场共安装 20 台 2.5MW 的机组且投运年限达 6 年,位于海拔 1800-2200m 的山区,此地极端温差可达 60℃,运维人员平均到场时间超过 2 小时。部署之前采用传统云端监测系统,机组年平均非计划停机次数为 12 次/台,故障预警误报率达到 38%,年运维成本超过 1200 万元。本次在每台机组舱内部署边缘计算节点,同时新增 128 个振动、温度、应变传感器,并且完成与原有 SCADA 系统、云端运维平台的对接,试运行周期设为 6 个月。

其仿真系统综述[J]. 太阳能学报, 2026, 47 (03):175-186.

[3]黄守道,屈尹鹏,高剑,等. 大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术综述[J]. 高电压技术, 2026, 52 (03):1013-1034.

[4]窦照军,马建新,王刚,等. 基于数字孪生的风电机组关键部件故障监测研究[J]. 中国设备工程, 2026, (05):160-162.

[5]崔明军,高亚楠,应宇翔,等. 面向风电机组的分布式声发射监测网络装置设计与测试[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61 (12):18-20.

[6]董治言,王晓东,李世璇,等. 偏航下风电机组关键部件疲劳载荷耦合特性研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46 (11):3635-3642.

[7]朱孝晗,张凯,常慧英. 风电机组关键部件故障智能预测技术分析[J]. 自动化应用, 2025, 66 (21):122-124+128.

[8]徐勇. 风电机组关键部件的热控与故障诊断方法研究[J]. 家电维修, 2025, (11):110-112.

作者简介:孙程,1989 年 8 月,男,回族,安徽马鞍山,本科,工程师,研究方向:发电/变电系统主设备在线监测。