

基于物联网技术的输变电线路作业风险 实时监测与预警系统研究

朱杰元，王友炜

(国网金昌供电公司，甘肃 金昌 737100)

摘要 本研究设计了一种基于物联网技术的输变电线路作业风险实时监测与预警系统。系统采用“感知层—网络层—应用层”三级架构，通过多源传感器网络实现环境、设备及人员状态的实时采集，构建 5G+LoRa 混合通信网络保障数据传输可靠性，并开发了基于边缘计算的智能预警引擎。关键技术包括：基于 IEEE 1588 协议的微秒级时间同步技术、改进的 SAX 流式分析算法以及动态阈值调整机制。实测结果表明，系统端到端传输延时 $\leq 800 \text{ ms}$ ，预警响应时间 $\leq 1 \text{ s}$ ，高风险事件检出率达 98.4%，数据丢失率 $< 0.5\%$ 。该系统显著提升了输变电线路作业的安全监测水平，为电力系统智能化运维提供了有效的解决方案。

关键词 物联网技术；输变电线路；作业风险

中图分类号：TP3；TM72

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.012

0 引言

输变电线路运行环境复杂，传统监测难以满足实时性与准确性需求。物联网技术具备感知、传输与智能处理能力，可实现对作业风险的实时监测与精准预警。本文对基于物联网的输变电线路风险监测预警系统进行研究，旨在为构建高效可靠的体系、提升作业安全水平提供参考。

1 基于物联网技术的输变电线路作业风险实时监测与预警系统总体架构设计

1.1 感知层，智能传感器网络部署方案

智能传感器网络在感知层的部署方案，需同时实现设备监测与人员防护的双重需求，在杆塔和可穿戴设备两类载体上采用差异化选型，杆塔监测中选用工业级传感器，以宽温域($-40 \sim 85^\circ\text{C}$)和高防护等级(IP68)为优先^[1]，在杆塔倾斜监测中使用双轴 MEMS 倾角传感器，内置温度补偿算法将误差控制在 $\pm 0.1^\circ$ ，采样频率设为 1 Hz 以平衡能耗与实时性；导线温度监测通过分布式光纤传感器结合拉曼散射原理，实现空间分辨率 1 m、测温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的连续测量，适合长距离线路热状态评估；覆冰监测采用集成称重传感器与气象传感器的复合模块，基于导线荷载变化和环境温湿度的动态采集，结合增长模型反演厚度。作业人员的可穿戴设备中，微型传感器节点借助低功耗蓝牙(BLE)进行传输，生理状态监测采用光电 plethysmography(PPG) 心率传感器，采样率设为 25 Hz，待机电流控

制在 $10 \mu\text{A}$ 及以下^[2]。定位模块使用北斗双模定位芯片，复杂地形下可达到亚米级的定位精度，离线轨迹存储功能同样支持，传感器的部署原则为“关键节点加密、普通区域稀疏”，高危区域如跨越段、风口段等布设密度为普通区段的 3~5 倍，物联网监测系统传感器配置参数表如表 1 所示。

1.2 网络层，5G+LoRa 混合组网实现实时传输

网络层混合组网架构融合 5G 与 LoRa 技术，动态资源调度使低延时和广覆盖实现协同优化，高带宽业务承载在 5G 网络，在约 500 m 半径的基站覆盖区，切片技术为监测数据分配专用通道，借助边缘计算节点(MEC)部署将核心网用户面时延降至 20 ms 内，偏远山区等 5G 信号弱的区域构建星形拓扑网络采用 LoRa 网关，通信扩频因子(SF)动态调整机制在终端和网关通信中使用，信道质量下降时 SF 自动从 7 提升到 12，以降低传输速率(从 5.5 kbps 到 0.3 kbps)换取通信距离延长，最大传输半径可到 3 km。异构网络切换延迟问题的解决，可借助接收信号强度指示(RSSI)设计预判切换算法，5G 模块检测信号强度低于 -105 dBm 时，提前 100 ms 启动 LoRa 链路建立流程，预同步机制将切换时间控制在 50 ms 以内，网络层集成边缘网关设备，采用 ARM Cortex-A53 四核处理器，支持本地数据缓存(容量 $\geq 128\text{GB}$)与协议转换功能，传感器的 Modbus、MQTT 等协议可统一转换为 IPv6 格式，为上层应用提供标准化数据接口。

表 1 物联网监测系统传感器配置参数表

传感器类型	部署位置	核心参数	通信接口	供电方式
MEMS 倾角传感器	杆塔底部	测量范围 $\pm 15^\circ$, 误差 $\pm 0.1^\circ$	RS485	太阳能 + 锂电池
分布式光纤传感器	导线本体	测温范围 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$, 空间分辨率 1 m	光纤接口	光缆自带铠装供电
复合覆冰传感器	杆塔横担	称重量程 $0 \sim 500 \text{ kg}$, 湿度测量 $0 \sim 100\% \text{ RH}$	LoRaWAN	太阳能 + 超级电容
PPG 心率传感器	作业人员腕部	测量范围 $30 \sim 240 \text{ bpm}$, 功耗 $\leq 5 \text{ mA}$	BLE5.0	可充电锂电池
北斗定位模块	作业人员背部	定位精度 1 m (开阔地), 冷启动时间 $\leq 30 \text{ s}$	UART	可充电锂电池

1.3 应用层, 风险预警引擎的实时处理框架(包含毫秒级响应机制)

应用层的风险预警引擎采取边缘—云端两层架构, 通过分布式的计算, 可以实现达到毫秒级的响应, 边缘端可以完成数据清洗及预警, 利用 FPGA 芯片作为加速模块, 进行传感器采集的实时滤波(高斯噪声使用卡尔曼滤波法进行过滤), 特征提取(导线温度梯度, 杆塔振动力等), 简单阈值判断等操作, 对于覆冰超限或者杆塔倾倒角突变等情况会直接产生本地声光警报, 响应时间小于等于 100 ms, 云端部署以微服务的形式, 分为数据存储, 模型训练, 综合预警三部分, 数据存储层的数据存储系统选择时序数据库 InfluxDB, 能够以每秒百万级的速度存储监测信息; 模型训练层以 Spark Streaming 框架来构建流式计算引擎, 采用滑动窗口的方法实时更新风险评估模型参数(窗口大小设为 5 分钟, 步进时间为 1 分钟); 综合预警层采用规则引擎与机器学习相结合的方式, 规则引擎主要用于明确阈值风险(比如风速大于或者等于十米每秒触发防风预警)的识别, 采用基于 XGBoost 算法建立的机器学习模型来进行多因素耦合作用评估(比如在覆冰与大风情况下评估复合风险), 两者产生的判断结果按照一定的加权方式融合在一起得到最终预警^[3]。为达到毫秒级响应, 预警引擎选用内存计算, 把关键模型参数及实时数据放到 Redis 缓存中, 从而免除磁盘 IO 延误, 单条数据的处理时间维持在 50 ms 以内, 符合大规模线路监测的并发要求。

2 关键技术实现

2.1 物联网实时数据采集技术

多模态传感器同步采集, 系统采用 IEEE 1588PTP 跨模态微秒同步, 同步误差范围控制在 $\pm 50 \mu\text{s}$ 内, 采用硬件时间戳和时钟补偿算法同步方式。针对异构传感器接口不一致问题设计统一的数据采集框架: 对

振动等模拟量传感器使用 24 位 $\Sigma-\Delta$ ADC, 以 10kSPS 采样率将模拟量信号转换成数字信号, 针对 UWB 定位模块等数字接口的传感器, 采用 FPGA 进行硬件层协议解析, 降低软件栈时序抖动。时间敏感的应用场景当中部署 TSN(时间敏感网络)交换机创建确定的传输通道以保证重要监测数据时间的一致性, 在做同步测试时显示该系统当有 200 节点的时候可以达到 1 ms 级别的时间同步水平, 这样的精确度完全可以满足像相量测量这样高级别的应用^[4]。

边缘计算节点进行实时预处理时, 边缘节点使用异构计算架构, 集成 ARM Cortex-A72 处理器与 Intel Cyclone10GXFPGA, 生成“CPU+FPGA”的混合计算范式。数据预处理流水线包含三级处理, 第一级在 FPGA 实现 128 阶 Hamming 窗函数的 FIR 滤波, 处理延时稳定保持在 $80 \mu\text{s}$; 第二级采用 NEON 指令集加速提取特征, 计算 32 维时频域特征, RMS 值、峭度指标、小波包能量熵等, 单样本处理耗时在 $200 \mu\text{s}$ 内; 第三级运行改进版轻量级异常检测模型(Mobile NetV3-Small), 模型推理延迟控制在 5ms 内。系统为确保实时性要求, 采用静态内存分配策略并使用了实时 Linux 内核(Xeno mai3 补丁), 最坏情况下响应时间控制在 10 ms 内, 实测结果说明边缘节点在压缩原始数据量 92% 时, 保留了 98% 的有效信息, 动态风险评估模型的特征与具体要求同样对实时性处理。

2.2 动态风险评估模型

系统通过流式计算的实时分析算法, 构建 Lambda 架构的流处理管道, 改进后的 SAX(符号化聚合近似)算法基于 Spark Structured Streaming 框架实现, 关键技术上存在突破, 设计滑动窗口增量计算机制, 窗口大小可以动态调整在 $1 \sim 60 \text{ s}$, 环形缓冲区的使用减少数据搬移开销现象; 开发 C++Native 的 UDTF 函数, DTW(动态时间规整)算法的计算效率提升了 40 倍; 模型实现热切换功能, 支持风险评估模型更新时数据流

不停止，与批处理模式进行对比测试，相同硬件条件下，流式处理将端到端延迟从分钟级降低至秒级（平均1.2秒），同时保证92.7%的检测准确率（只比批处理低1.3%）。预警阈值动态调整机制，提出环境耦合的风险阈值自适应算法，建立双层调节模型：基础层采用EWMA（指数加权移动平均）跟踪环境参数基线，计算式为：

$$\mu_t = \alpha xt + (1-\alpha) \mu_{t-1} \quad \mu_{t-1} = \alpha xt + (1-\alpha) \mu_{t-2}$$

式中，平滑因子 α 依据环境变化率进行动态调整，调整的值在0.1~0.3范围内，决策层对模糊推理系统进行构建，把风速梯度、降雨强度和设备负载率等因子作为输入变量，这些变量的值在0~15 m/s、0~50 mm/h和0~120%不等，风险系数修正值为输出，修正倍数在0.8~1.5倍的范围内^[5]。每过30秒系统就更新一次阈值规则库，通过FTRL-Proximal在线学习算法持续性地优化模糊规则权重，现场验证之后表明误报率降低63%，高风险事件的检出率提高至98.4%，同时展示风速突变场景下的动态响应特征。

3 基于物联网技术的输变电线路作业风险实时监测与预警系统测试与验证

3.1 实时性测试指标

系统在500 kV某输电线路开展实地测试，构建包含83个监测节点的试验网络。测试采用IEEE 802.1AS时间同步协议和示波器联合测量法，在三种典型场景下验证传输性能：（1）平原开阔地带（5G全覆盖），端到端延时中位值为423 ms，第99百分位延时为762 ms；（2）丘陵过渡区（5G+LoRa混合组网），延时中位值578 ms，第99百分位延时为891 ms；（3）高山屏蔽区（纯LoRa传输），延时中位值达1.2 s，通过边缘计算本地预警补偿传输延迟。预警响应时间测试采用故障注入法，模拟导线断股、杆塔倾斜等7类故障，结果显示：简单阈值类预警平均响应时间387 ms（SD=62 ms），复合模型分析类预警平均响应时间843 ms（SD=113 ms），全部满足≤1 s的设计要求。呈现明显的双峰特征，对应5G与LoRa两种传输模式的性能差异。

3.2 物联网可靠性验证

系统抗干扰能力的验证设计包含三项破坏性测试，网络中断测试中，人工切断基站通信后边缘网关切换至本地存储模式，数据缓存完整，网络恢复30 s内数据续传完成。电磁干扰测试时，距传感器1 m处施加10 V/m的30 MHz~1 GHz射频干扰，传感器通信误码率从0.01%升至0.18%，低于0.5%的阈值，极端环境测试为在-35 °C

低温下连续运行72小时，传感器供电系统输出电压波动≤5%，数据丢失率0.23%，具体见表2。

表2 可靠性关键指标实测结果

测试项目	测试条件	实测指标	达标情况
网络切换 可靠性	5G信号强度 <-105 dBm	切换成功率 99.7%	达标
数据完整性	持续断电8小时	数据丢失率 0.11%	达标
环境适应性	温度循环 (-40~85 °C)	功能异常次数 0	达标
抗干扰性能	30 dBm同频干扰	误码率 0.15%	达标

4 结束语

本研究成功构建了基于物联网技术的输变电线路作业风险实时监测与预警系统，通过三层架构创新与关键技术突破，实现了风险感知、传输与处理的智能化闭环管理。测试结果表明，系统在500 kV线路环境中展现出卓越性能：端到端传输延时控制在800 ms以内，预警响应时间不超过1 s，关键指标均优于传统监测手段。特别是在可靠性验证中，系统在极端环境下的数据丢失率低于0.5%，网络切换成功率高达99.7%，充分体现了物联网技术在复杂工况下的适应能力。本研究的创新价值主要体现在三个方面：一是提出了5G+LoRa混合组网的动态调度策略，有效解决了偏远地区传输瓶颈；二是开发了边缘—云端协同的毫秒级预警引擎，将风险评估准确率提升至92.7%；三是构建了环境自适应的阈值调节模型，使高风险事件检出率达到98.4%。这些成果为智能电网建设提供了重要的技术支撑，其方法论亦可推广至其他关键基础设施的安全监测领域。未来研究将聚焦量子加密传输和数字孪生可视化等方向，进一步提升系统的安全性和交互性。

参考文献：

- [1] 李峰,熊以旺,高慧挥,等.输变电线路感应电测量及预测模型研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2025,43(06):119-122,144.
- [2] 韩文通.基于大数据分析的输变电线路故障预测与诊断[J].自动化应用,2025,66(06):94-96.
- [3] 王亮.基于物联网技术的输变电线路智能化监控系统设计[J].家电维修,2025(01):74-76.
- [4] 姚琛彪.数字孪生与AI技术在输变电线路巡检中的集成应用探讨[J].张江科技评论,2024(09):46-48.
- [5] 李传明.数字孪生技术在输变电线路智能巡检中的应用研究[J].张江科技评论,2024(08):72-74.