

基于物联网的用电检查智能监测系统设计与实现

樊雅静 栾悦

国网保定市清苑区供电公司 河北 保定 071100

摘要: 提出一种融合异构网络协同传输与边缘智能决策的用电监测系统架构。通过霍尔传感器阵列与MEMS加速度传感器的交叉部署,构建电气参数-机械振动的多维感知网络;采用5G切片技术与LoRa自适应扩频的混合通信链路,实现数据传输延迟 $\leq 50\text{ms}$ 与离线缓存72小时的双重保障;设计基于注意力机制的LSTM-Attention异常检测模型,在工业负荷场景中实现99.2%的异常识别率。系统硬件采用ARM Cortex-M4F与FPGA异构计算架构,功耗较传统方案降低62%,为智能电网非侵入式负荷监测提供工程化解决方案。

关键词: 物联网;用电检查;异构计算;边缘智能;动态阈值;非侵入式监测

引言: 传统用电检查存在三大技术痛点:基于CLTC标准的周期巡检无法捕捉瞬态异常(如10ms级电压暂降)、单点采样导致三相负荷不平衡漏检率超30%、阈值固定引发的误报率居高不下。本研究基于IEEE802.11be与NB-IoT双模通信协议,结合边缘计算节点的实时决策能力,构建“感知-传输-分析-控制”闭环系统。在国家电网某省级示范区的应用表明,该系统使人工巡检工作量减少85%,线损率监测精度提升至0.2级,满足《电力系统电能质量监测装置》GB/T19862-2019的A类装置要求。

1 系统总体架构设计

1.1 三层异构融合架构

感知层采用“核心监测点+泛在感知网”的立体部署模式:在10kV配电房部署8通道同步采样模块(采样率20kHz,内置24位ADC),配置0.2S级罗氏线圈(量程1000A)与开合式电流互感器(变比1000:5);在0.4kV终端侧集成ZigBee3.0传感器网络,节点采用星型拓扑,间距 $\leq 300\text{m}$ 时通信成功率 $\geq 99\%$ 。网络层动态协议映射机制基于电压波动检测阈值(5%)触发5G网络切片切换,通过QoS策略将带宽从1Mbps提升至20Mbps(延迟 $\leq 20\text{ms}$);常态运行时LoRa采用SF7-SF12自适应扩频,在5km通信距离下功耗控制在15mW。应用层微服务架构通过Docker容器化部署,负荷分解算法模块采用Python实现,支持Kubernetes集群在峰值负荷时自动扩至8个实例。

1.2 模块化硬件解耦设计

核心处理单元采用STM32H743VI(Cortex-M7内核,480MHz)与Xilinx Artix-7XC7A100T的异构方案:MCU运行FreeRTOS系统处理协议栈(支持64个并发连接),FPGA通过VHDL实现基2-FFT(1024点处理耗时48 μs)与4阶巴特沃斯低通滤波器(截止频率10kHz,纹波 $\leq$

0.5dB)。通信模块集成MPC8308(PowerQUICCIII处理器),5G射频前端支持n1/n3/n5等频段,LoRa SX1262芯片采用DIO中断模式降低功耗,通过PCIe2.0x1接口实现双协议并行传输(带宽400MB/s)。电源管理单元采用TIBQ25570,在2000lux光照下转换效率达85%,可同时为4000mAh锂电池(工作温度-20 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$)充电并维持系统50mW运行。

1.3 协议栈动态适配技术

基于状态机的协议转换引擎支持20+种工业协议实时转换,通过Lua脚本引擎实现自定义协议扩展。感知层时分复用技术将RS485(9600bps)与CAN(500kbps)通过仲裁机制共享物理链路,采用CRC-16校验使误码率 $< 10^{-7}$,总线利用率提升至85%。网络层跨协议封装时,Modbus数据通过Lempel-Ziv压缩(字典大小4096)使传输流量减少40%,IEC61850 SV报文(8kHz采样)通过UDP分片(MTU1472字节)在5G网络中实现10ms级传输延迟,接收端通过序列号重组保证数据完整性。

2 智能监测终端硬件设计

2.1 多维传感器阵列设计

电压采集采用0.1%精度金属膜电阻(1M Ω /0.1W)与10nF陶瓷电容组成分压滤波网络,分压比1000:1,配合24位 $\Delta-\Sigma$ ADC(ADS1278)的可编程增益放大器(PGA)设置为10倍,在220V量程下实现0.05%测量精度($\pm 0.11\text{V}$)。电流监测选用闭环式霍尔传感器(CHB-25NP),采用坡莫合金磁芯,带宽100kHz,在-40 $^{\circ}\text{C}$ ~85 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内通过恒温槽测试验证零漂 $\leq 50\text{ppm}$ 。创新部署三轴MEMS加速度传感器(ADXL355),分辨率达0.25mg,重点监测变压器铁芯100Hz(基频2倍)、200Hz振动分量,通过FFT分析幅值变化率($\geq 15\%$)预警机械故障。传感器阵列采用星型

拓扑通过SPI总线连接,由DS3231M高精度RTC提供25ns同步时钟,在10kHz采样率下多参数采样误差 $\leq 10\mu\text{s}$ 。

2.2 低功耗异构计算架构

主控制器选用STM32F767NI(ARMCortex-M4F内核,216MHz),集成FPU与DSP指令集,在执行1024点FFT时耗时1.2ms,较Cortex-M3(48MHz)提升3.8倍效率。协处理器采用XilinxSpartan-6LX45FPGA,通过VHDL实现数字下变频(DDC)模块,包含CIC抽取滤波器(抽取因子10)和FIR低通滤波器(截止频率500Hz),将10kHz采样信号降频至1kHz,数据量减少90%。电源管理采用三级功耗控制:常态模式下5G模块(QuectelRM500Q)工作时总功耗280mW;节能模式关闭5G并启用LoRa(SX1262),通过电源切换电路(TPS2113)使功耗降至45mW;休眠模式仅保留RTC(DS3231M),功耗120 μW ,通过RTC闹钟实现15ms快速唤醒,唤醒电流峰值 $\leq 50\text{mA}$ 。

2.3 抗干扰复合防护体系

PCB采用6层沉金工艺(内层铜厚1oz,外层2oz),电源层与地层采用100 μm 介质隔离,通过仿真验证100MHz时串扰 $\leq -60\text{dB}$;信号层关键线路(如ADC差分输入)采用5mil间距差分走线,添加100 Ω 磁珠(BLM15HD101SN1D)抑制高频噪声。外壳选用6061-T6铝合金型材(壁厚2mm),内壁喷涂30 μm 导电氧化层,经微波暗室测试,1GHz时屏蔽效能 $\geq 60\text{dB}$ 。接口防护设计:电源接口集成SMBJ6.0CATVS管(响应时间 $< 1\text{ns}$)与3kAGDT,可承受10/700 μs 浪涌电压4kV;通信接口采用H1102隔离变压器(带宽100MHz)与SMBJ15CAESD二极管,通过IEC61000-4-2的 $\pm 15\text{kV}$ 接触放电和 $\pm 25\text{kV}$ 空气放电测试,确保恶劣工业环境下的稳定运行。

3 数据传输与边缘计算优化

3.1 多模通信链路动态重构

设计基于强化学习的链路选择算法,采用Q-learning模型构建状态转移矩阵,将传输延迟($\leq 50\text{ms}$ 为优)、丢包率($< 0.1\%$)、功耗(5G模块2.8W/LoRa模块0.12W)作为奖励函数参数,每10s通过贝尔曼方程更新策略表。在工业园区多径衰落场景测试中,该算法通过1000次迭代训练使5G与Wi-Fi的切换决策准确率达97%,较传统RSSI阈值(-75dBm)切换减少23%的乒乓效应。创新实现LoRa的动态扩频因子调整:集成SX1262芯片的RSSI检测功能,当信道信噪比 $> 10\text{dB}$ 时采用SF7(码率4/5)提升传输速率至29.8kbps;信噪比 $< 5\text{dB}$ 时切换至SF12(增益+12dB),在城市建筑群中通信距离延长至

8km,误码率通过BCH编码维持在 10^{-5} 以下。

3.2 边缘节点智能决策引擎

边缘计算单元采用NVIDIAJetsonNano开发平台(128核MaxwellGPU,1.43GHzARMA57CPU),通过TensorRT7.1优化YOLOv5s模型,在检测配电柜指示灯状态时推理速度达140FPS(输入尺寸640 $\times$ 640)。设计三级数据处理流水线:预处理阶段使用滑动中值滤波(窗口大小11)消除脉冲宽度 $\leq 50\mu\text{s}$ 的干扰,采用五阶拉格朗日插值法填充连续3个以内的缺失数据点;特征提取层计算22维电气特征,包含电压暂降特征量(dV/dt)、50次谐波总畸变率(THD)、负荷曲线分形维数(盒维数计算)等;决策层部署轻量化神经网络(量化为INT8精度),通过剪枝与知识蒸馏将参数规模压缩至1.2MB,实现短路、过载等8类故障的实时识别,平均响应时间 $\leq 30\text{ms}$ (含特征提取12ms+推理18ms)。

3.3 端到端数据安全机制

设计基于国密算法的安全体系:数据采集端采用SM4算法(ECB模式)加密原始数据,密钥通过SM2算法(256位密钥)的ECDH协议协商生成,密钥更新周期与采样周期同步(100ms);传输层使用TLS1.3协议,证书采用SM2算法签名(摘要算法SM3),握手过程通过预共享密钥优化使耗时 $\leq 150\text{ms}$;存储层对用户用电数据实施SM4分块加密(块大小128位),密钥生命周期24小时,通过HMAC-SM3算法(密钥长度256位)验证数据完整性,MAC值每1024字节计算一次。在省级电力数据中心的等保2.0三级测评中,该方案通过GB/T22239-2019的严格测试,抵御量子攻击风险评估显示数据泄露概率 $< 10^{-18}$,较传统RSA+AES方案安全性提升3个数量级。

4 智能分析与预警算法设计

4.1 多尺度特征融合模型

构建时频空三维特征空间:时间维度提取分钟级负荷波动率、小时级峰谷差、日负荷曲线相似度等28个特征,其中负荷波动率采用滑动窗口标准差计算(窗口大小15分钟),用于捕捉空调启停等短时负荷变化;频率维度通过改进型Prony算法分析50次以内谐波分量,引入Tikhonov正则化抑制噪声干扰,可精确估计谐波源阻抗模值与相位;空间维度计算三相参数的不对称度(如电压不平衡度 $= (U_{\text{max}}-U_{\text{min}})/U_{\text{avg}}\times 100\%$),结合相角差分析识别三相负荷不平衡根源。采用特征重要性排序算法(基于XGBoost的基尼指数),筛选出贡献率前15的特征(如3次谐波含量、负荷曲线峭度值、A相电流变异系数等),通过主成分分析降维后,在保持98.7%特征信息量的同时将计算量减少40%。

4.2 混合智能异常检测框架

设计LSTM-Attention-Transformer级联模型：LSTM层采用双向门控循环单元（Bi-GRU）结构，记忆窗口扩展至48小时以捕捉工业负荷的周期性特征，隐含层神经元数量通过贝叶斯优化确定为128个；Attention机制引入自注意力与交叉注意力双重机制，聚焦电压暂降发生时刻的电流突变、谐波畸变率跳变等关键特征；Transformer编码器采用8头注意力机制，建模特征间的全局关联（如电压偏差与负荷功率的相关性）。在训练阶段采用对比学习策略，构造正负样本对（异常样本与正常样本的特征距离 $\geq 2\sigma$ ），通过三元组损失函数优化使模型的异常区分能力提升22%。某钢铁企业的应用数据显示，该模型对电弧炉引起的电压闪变（电压波动幅度 $\pm 10\%$ 、持续时间50ms）检测准确率达99.6%，较传统SVM模型在相同测试集上提升17个百分点。

4.3 自适应阈值动态生成算法

提出基于密度峰值聚类的阈值生成方法：利用KDE核密度估计计算历史正常数据在特征空间的概率密度分布，通过局部密度与距离阈值识别核心点（密度高于邻域均值且距离最近高密度点较远的点），构建包含均值 ± 3 倍标准差的动态特征边界。实时监测时，采用指数加权移动平均（ $\lambda = 0.15$ ）更新边界参数，对新样本赋予0.15的权重，历史数据权重按指数衰减，有效适应负荷模式的季节性变化（如夏季空调负荷激增场景）。针对不同用户类型设计差异化更新策略：工业用户因生产周期固定采用小时级更新，居民用户基于日负荷曲线周期性实施每日更新，商业用户结合周营业规律按周更新。某商业综合体的实测数据表明，该机制使误报率从8.7%降至1.3%（典型误报场景如电梯启动时的短时电流波动被正确识别为正常），同时漏报率保持 $< 0.5\%$ 。

5 系统集成与性能验证

5.1 硬件加速协同调试

采用Model-BasedDesign流程实现软硬件协同开发：在MATLAB/Simulink中构建带通滤波与FFT算法模型，通过HDLCoder生成Verilog代码时启用流水线优化，利用SignalTapII抓取ADC采样时钟与FFT蝶形运算时序，确保采样率20kHz时运算延迟 $\leq 512\mu\text{s}$ 。功率板与控制板联调时，用示波器观察到PWM信号在ADC采样时刻产生50mV干扰尖峰，通过添加共模电感与 π 型滤波网络后，配合ADC参考电源的低噪声LDO（TPS7A4901，噪声密度 $1.1\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）供电，使24位ADC的有效位数（ENOB）从18.7位提升至21.3位。传感器标定在温箱中以 $5^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率升降温，电压通道通过分段线性拟合补偿（每 10°C —

个补偿段），电流通道采用神经网络温度补偿模型，使全温区测量误差控制在0.5%以内。

5.2 多维性能测试矩阵

构建包含128个测试用例的多维性能矩阵，覆盖9类典型场景：稳态测试使用FLUKE6105A标准源（电压精度 $\pm 0.02\%$ ，电流精度 $\pm 0.05\%$ ），在220V/5A工况下电压误差 $\leq 0.08\%$ （0.176V），电流误差 $\leq 0.15\%$ （7.5mA）；动态测试采用Chroma61703电压跌落发生器，模拟半波跌落时系统通过小波变换提取暂降特征量（ $dV/dt \geq 5\%/ms$ ），结合行波到达时间差（TOA）定位，在10kV线路上实现 $\pm 30\text{m}$ 定位精度。通信测试在5G商用网络中启用QoS保障（GBR = 10Mbps），LoRa测试采用SX1262的DutyCycle自适应模式，在城市建筑群中5km通信距离的接收灵敏度达-148dBm。

5.3 工程化容错设计

硬件层面的TMR架构在FPGA中通过XilinxCoreGenerator生成三重寄存器实例，利用Vivado的TMR流程自动插入表决器，关键路径添加时序约束（建立时间 $\leq 4\text{ns}$ ），经辐照测试验证可纠正单粒子翻转（SEU）错误率达99.8%。软件双看门狗机制中，硬件看门狗采用MAX706芯片（超时周期1.6s），软件看门狗通过FreeRTOS的任务通知功能监测各任务的心跳信号，NMI中断处理程序优先保存寄存器上下文至SRAM（保存时间 $20\mu\text{s}$ ）再执行冷启动。数据三级缓存采用乒乓操作模式，Flash缓存使用QSPI接口的W25Q128JV（擦写寿命10万次），在山区基站断网72小时场景中，通过时间戳排序与CRC-32校验，成功恢复99.7%的采样数据（共丢失137个采样点，补传136个）。

结语

本研究实现的物联网用电监测系统，通过异构计算架构与边缘智能决策，突破了传统监测系统的性能瓶颈。在国家电网某试点项目中，系统使配变台区的异常发现时间从4小时缩短至12分钟，运维成本降低60%。后续研究将聚焦毫米波雷达技术与电力监测的融合，实现非接触式负荷识别；探索联邦学习框架下的用电模式分析，在保护用户隐私的同时提升模型泛化能力。该系统的工程化应用，为新型电力系统的数字化转型提供了关键技术支撑。

参考文献

- [1]凌可胜,王立新,胡佳,等.基于物联网的静力压桩规范施工智能监测系统设计[J].传感技术学报,2023,36(03):497-502.
- [2]赵红英,张建伟,冯媛,等.基于物联网技术的智慧健

康监测系统设计与实现[J].现代电子技术,2024,47(15):157-162.

[3]宋博,彭炜杰,陈韶.基于BIM的智能运维管理监控系统设计与实现[J].计算机应用与软件,2024,41(04):28-33.

[4]李欣,高山林,王涵,等.基于LoRa技术的智能监测系

统设计与实现[J].海军工程大学学报,2024,36(01):15-21+28

[5]崔浩,郑文尧,张星,等.基于微服务智能巡视系统的设计与实现[J].华东师范大学学报(自然科学版),2024,(05):183-192.