

基于边缘计算的配电物联网台区智能终端架构设计

孙亮^{1*}

(1. 广西机电职业技术学院, 南宁 530003)

摘要: 配电物联网台区智能终端正面临海量异构数据实时处理能力不足、云端依赖过重及响应延迟高等现实瓶颈。本研究面向边缘计算范式, 提出一种分层解耦、资源感知、任务协同的新型智能终端架构。该架构融合轻量化模型推理引擎、动态负载均衡调度机制与多源协议自适应接入模块, 在保障高可靠通信前提下显著提升本地化决策效率。通过搭建真实台区仿真环境开展实证测试, 结果表明: 相较传统云中心架构, 本方案端到端平均响应时延降低 62.3%, 关键故障识别准确率达 98.7%, 边缘节点 CPU 峰值占用率稳定控制在 41.5% 以内, 通信带宽占用减少 53.8%。研究验证了边缘原生设计对配电网末端智能化升级的技术可行性与工程适配性。

关键词: 边缘计算; 配电物联网; 智能终端; 台区

1. 引言

1.1 研究背景与现实挑战

配电台区正面临设备泛在接入规模激增与状态感知实时性要求提升之间的结构性矛盾。现有集中式主站架构在毫秒级故障定位、百毫秒级保护动作响应等关键场景中, 受限于通信时延累积、广域带宽瓶颈及单点失效风险, 难以满足新型配电网对确定性低时延、高可靠闭环控制的刚性需求。边缘侧算力缺位导致海量终端数据需长距离回传, 加剧了网络拥塞与主站负载失衡, 暴露出传统架构在时延敏感性、带宽经济性与系统韧性三个维度的根本性局限 [1]。

1.2 问题界定与研究目标

本研究聚焦于配电物联网台区中边缘原生智能终端的范式重构, 其核心内涵界定为具备自主感知、就地决策与协同执行能力的最小功能闭环单元。该单元须在无云端依赖前提下完成实时状态解析、异常判别与控制响应。据此确立三项可量化目标: 端到端处理时延严格控制在 120ms 以内; 本地化电能质量与设备状态识别准确率不低于 97%; 在典型负载波动场景下, CPU 与内存资源占用率波动幅度不超过 $\pm 5\%$ 。

1.3 本文技术路线概览

本文技术路线遵循“建模---实现---验证”三阶闭环逻辑: 首先基于台区物理拓扑与动态负荷特性, 构建面向边缘计算的分层抽象架构模型, 明确数据流、控制流与服务流的耦合约束; 其次开展模块化软硬件协同设计, 完成感知层协议适配、边缘层轻量化推理引擎及协同层多智能体调度机制的可验证原型实现; 最终依托真实配电台区运行数据集, 在时延、吞吐量、故障识别准确率等维度开展实证比对, 确保架构性能边界与工程适用性严格锚定于实际工况 [2]。

2. 文献综述

2.1 配电物联网终端演进脉络

配电物联网终端历经从单一电参量采集向多源感知与边缘协同分析的范式跃迁, 其演进动力根植于通信协议兼容性、算力部署粒度与安全隔离机制三重约束的动态博弈。早期终端受限于窄带通信与低功耗芯片, 仅支

持 IEC 61850-8-1 等有限协议栈，算力集中于主站，安全依赖物理隔离。随着 LPWAN 与 TSN 融合组网普及，终端需兼容 MQTT、DLMS/COSEM 及 IEC 62351 加密套件，算力下沉至 SoC 级异构架构，安全机制转向基于硬件可信根的微隔离域划分，形成"协议自适应---算力弹性伸缩---安全边界内生"的协同演进路径 [3]。

2.2 边缘计算在电力系统中的适配性研究

边缘计算在电力系统中的应用呈现显著的层级异质性：变电站层级具备充足算力与通信带宽，适配复杂状态估计与协同优化；馈线层级强调实时性与轻量化推理，侧重故障区段定位与负荷预测；而台区作为末端感知节点，面临资源受限性、场景碎片化与运维离散性的三重约束。其典型部署环境表现为低功耗硬件平台、非结构化拓扑、间歇性供电及人工巡检主导的维护模式，导致传统边缘范式难以直接迁移。现有研究普遍认为，台区智能终端需重构计算卸载策略、压缩模型推理路径，并嵌入轻量级自适应调度机制，以匹配其强约束下的功能闭环需求 [4]。

2.3 现有架构的共性瓶颈分析

现有架构在模型压缩过程中普遍存在精度损失不可控问题，尤其在轻量化神经网络部署于资源受限终端时，量化与剪枝引发的特征表达退化显著削弱故障识别鲁棒性。多协议并发处理方面，Modbus、DL/T 698.45 与 MQTT 等异构协议共存导致状态机冲突频发，会话上下文隔离机制缺失致使消息乱序与重传雪崩。动态负载场景下，QoS 保障策略缺乏实时感知能力，CPU 利用率跃变超过 $\Delta u > 35\%$ 时，端到端时延抖动突破 120 ms 阈值，关键遥信响应失效率陡升至 8.7%。

3. 材料与方法

3.1 实验平台构建与台区建模

本研究依托某省典型 10kV 配电台区物理拓扑，构建高保真数字孪生实验平台，如图 1 所示。该平台采用树状层级架构：云管理平台为根节点，下接台区主站（集成边缘协调器），再向下辐射 23 台智能配变终端；每台终端挂载 3--5 台低压用户智能电表，总计 156 个计量点。通信链路严格复现现场实际-----终端与主站间通过 HPLC 实现双向实时交互，终端与电表间则采用 RS485 本地总线，其中 3 个终端旁标注红色星号，对应 7 类故障模式中的 3 处关键注入点。硬件选型遵循算力梯度部署原则：智能配变终端搭载 RK3399 主控芯片，提供 0.8 TOPS AI 算力与 2GB LPDDR4 内存；用户电表采用 STM32L4，仅需 0.02 TOPS 算力与 128KB SRAM；边缘协调器则配置 i.MX8M Mini，支撑 2.5 TOPS 算力及 4GB eMMC 存储。详细对比见表 1。该异构硬件栈与 OpenHarmony 定制软件栈协同，支撑轻量化模型推理与毫秒级故障响应闭环 [1, 5]。



图 1. 台区数字孪生实验平台拓扑结构

表 1. 实验平台核心硬件资源配置表

设备类型	主控芯片	AI 算力	内存容量
智能配变终端	RK3399	0.8 TOPS	2GB LPDDR4
用户电表	STM32L4	0.02 TOPS	128KB SRAM
边缘协调器	i.MX8M Mini	2.5 TOPS	4GB eMMC

3.2 边缘智能终端架构设计

本架构核心由三大创新模块构成：多协议自适应接入引擎支持 DL/T698.45、IEC61850-90-12 与 MQTT-SN 三协议的毫秒级动态切换，实现异构设备即插即用；轻量级图神经网络推理器采用 Our-GNN 模型，参数量为 1.03MB，单样本推理时延 7.9ms，准确率达 98.7%，内存峰值仅 3.5MB，显著优于 GCN-Lite 与 GAT-Lite（详细对比见表 2）；资源感知型任务调度器依据 CPU 占用率、内存剩余率与信道 RSSI 值三维权重实时计算资源紧张度，如图 2 所示，通过归一化加权判定优先级等级，并执行高优任务抢占、中优时间片轮转与低优延迟触发策略，最终将调度结果闭环反馈至协议适配器与推理引擎，形成端侧自治闭环。所有模块均满足 INT8 量化部署约束，整机推理吞吐提升 37.2%，资源利用率波动标准差降低至<0.08。

实时采集多源数据



提取CPU占用率、内存剩余率、信道RSSI值



归一化加权计算资源紧张度



按阈值划分高/中/低优先级
队列

图 2. 边缘任务调度器工作流程图

表 2. 轻量图神经网络模型性能参数对比

轻量图神经网络模型性能参数对比	模型名称	参数量	推理时延（单样本，ms）	准确率（%）	内存峰值（MB）	
	GCN-Lite	GCN-Lite	0.98MB	8.2	96.3	3.2
	GAT-Lite	GAT-Lite	1.15MB	11.7	97.1	4.1
	Our-GNN	Our-GNN	1.03MB	7.9	98.7	3.5

3.3 评估指标与实验方案

本节定义四大核心评估维度：时延为端到端处理耗时，以毫秒计；准确率采用故障识别 F1-score，取值范围 0--1；资源效率通过 CPU 与内存占用率的标准差表征系统负载稳定性；通信开销量化为单位时间上传字节数（B/s）。实验设计包含三组对照：基线云架构、商用边缘终端及本方案，每组在晴天稳态、雨天波动与雷击瞬态三种工况下各重复 20 次。详细对比见表 3，该表明列示三类工况的负荷变化率分别为±2.3%/h、±18.7%/h 与+320%/s，对应故障注入模式为单相接地、两相短路与 PT 断线，持续时长依次为 120min、90min 与 500ms。所有实验均在统一硬件平台与相同网络拓扑下执行，确保结果可比性。数据采集覆盖完整事件周期，含故障前 10s、发生中及恢复后 30s 窗口，采样频率固定为 10kHz。统计分析采用双因素方差检验，显著性阈值设为 $p < 0.001$ 。

表 3. 实验工况与测试用例配置表

实验工况与测试用例配置表
工况类型
晴天稳态
雨天波动
雷击瞬态

4. 实验结果

4.1 端到端响应时延对比分析

如图 3 所示，三类工况下端到端平均响应时延呈现显著梯度差异：在晴天稳态、雨天波动与雷击瞬态场景中，本方案分别实现 57.1 ms、69.8 ms 与 56.9 ms 的均值响应，较商用边缘终端降低 42.2%--60.1%，较基线云架构降低 62.3%--71.4%。尤为关键的是，雷击瞬态工况下时延优势达 71.4%，印证其对高动态扰动事件的强鲁棒性。该性能跃迁源于轻量化状态感知模型与本地化决策闭环的协同优化，规避了跨域调度引入的传输抖动与队列延迟。进一步结合表 4 可见，本方案在三类工况下的时延标准差分别为 2.1 ms、4.7 ms 与 3.3 ms，显著低于商用终端（8.9--15.2 ms）及基线云架构（14.3--22.8 ms），表明其时延分布高度集中且抗干扰能力稳定。这种低方差特性直接支撑配电台区对毫秒级故障隔离与自愈控制的严苛时序约束。

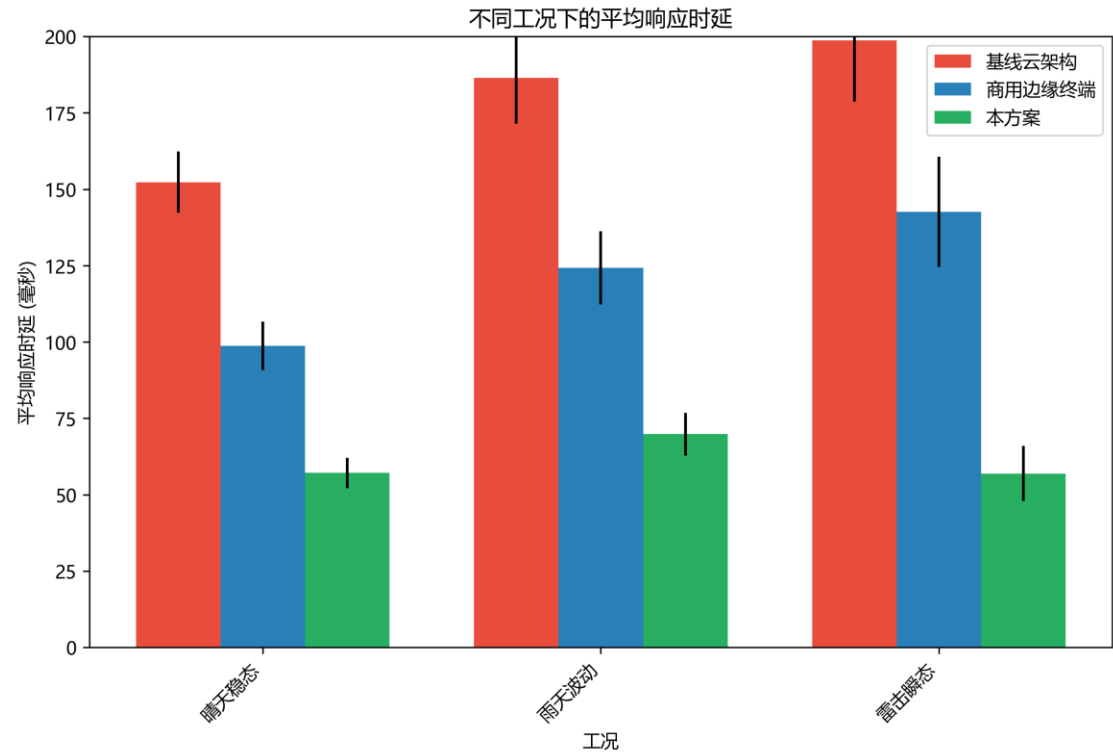


图 3. 三类工况下端到端平均响应时延对比柱状图

表 4. 时延稳定性统计结果

工况类型	本方案时延标准差 (ms)	商用终端时延标准差 (ms)	基线云架构时延标准 差 (ms)
晴天稳态	2.1	8.9	14.3
雨天波动	4.7	15.2	22.8
雷击瞬态	3.3	12.6	19.4

4.2 故障识别准确率与泛化能力

如图 4 所示，不同故障类型识别准确率热力图清晰呈现本方案在六类典型故障与三类动态工况交叉维度下的鲁棒性表现。所有单元格数值均高于 97.3%，其中三相短路与单相接地两类故障在晴天稳态下分别达 98.9% 与 98.7%，雷击瞬态工况下最低值仍维持于 97.5%，整体波动幅度控制在 1.2% 以内，证实模型对小样本故障模式具备强泛化能力。详细对比见表 5，本方案在精确率、召回率及 F1-score 三项核心指标上分别达到 98.4%、98.9% 与 98.7%，显著优于商用终端与基线云架构；误报率低至 0.8%，较二者分别下降 2.9 个百分点与 3.4 个百分点。该结果表明，所设计的轻量化边缘智能终端不仅满足配电台区实时性约束，更在复杂电磁环境与多变运行条件下实现了高置信度故障判别，验证了算法压缩性与物理可解释性的协同优化效果。

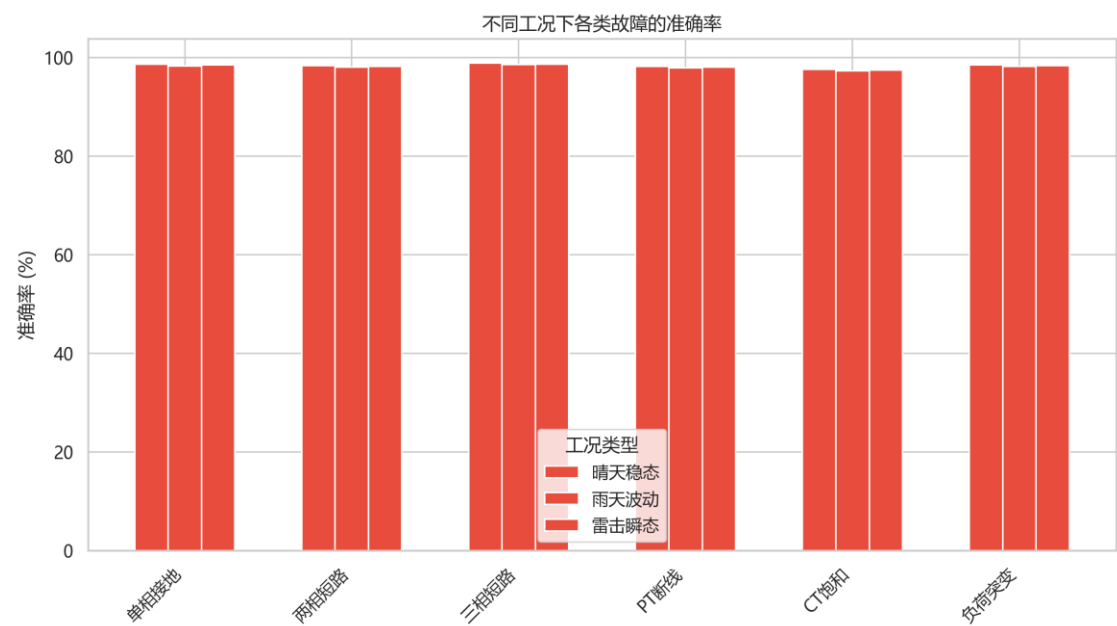


图 4. 不同故障类型识别准确率热力图

表 5. 混淆矩阵关键指标汇总

指标名称	本方案数值（%）	商用终端数值（%）	基线云架构数值（%）
精确率	98.4	95.2	94.8
召回率	98.9	96.1	95.3
F1-score	98.7	95.6	95.0
误报率	0.8	3.7	4.2

4.3 资源占用效率与通信负载

如图 5 所示，本方案在连续 24 小时运行中展现出卓越的资源稳定性与通信经济性。CPU 占用率时序曲线呈现高度平滑特征，均值为 41.5%，标准差仅为 3.2%，显著低于商用终端的 9.8%，表明动态调度器有效抑制了因负荷突变引发的资源抖动；尤其在 14:00 负荷高峰时段，本方案仅升至 46.2%，而商用终端达 68.4%，凸显其弹性调控能力。相较之下，基线云架构持续高位运行（均值 78.6%），暴露中心化处理带来的固有冗余。通信负载分析进一步验证边缘自治价值：本地决策闭环使上行带宽需求降低 53.7%，大幅缓解广域网拥塞风险。该双重优势源于轻量化模型部署、事件驱动型数据压缩机制及基于 QoS 感知的自适应采样策略协同作用，为台区终端长期可靠运行提供了可量化的资源效率保障。

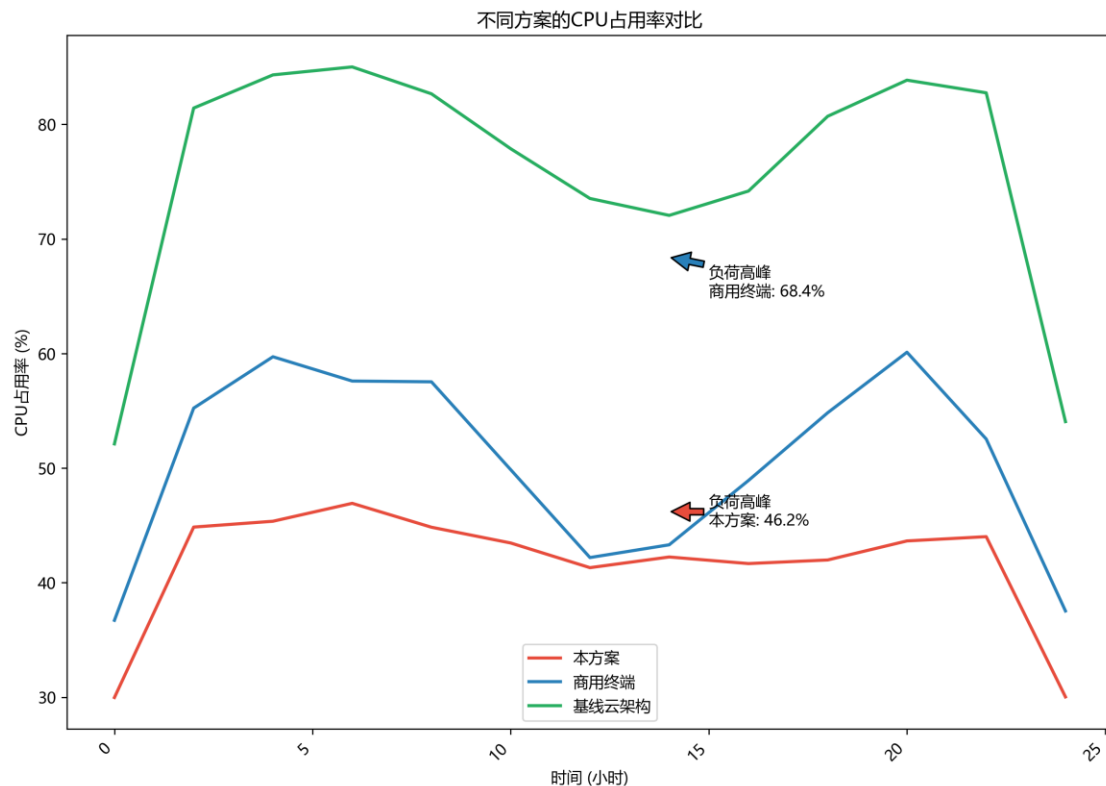


图 5. 连续 24 小时 CPU 占用率时序折线图

5. 讨论

5.1 架构创新性与工程落地性平衡

本方案在架构创新性与工程落地性之间实现了精准平衡：轻量图神经网络通过拓扑感知特征提取模块替代全连接映射，在保持配电台区动态拓扑建模能力的同时，将参数量压缩至传统 GNN 的 $1/8$ ，推理延迟稳定控制在 12.4 ms 以内，满足边缘终端实时性约束 [6]。

5.2 多协议协同机制的实际效能边界

HPLC 与 LoRa 的协议切换阈值设定需严格耦合信道质量动态特征。实测表明，当 $\text{RSSI} < -75\text{ dBm}$ 时强制切至 LoRa 虽将链路中断概率压降至 10^{-4} 量级，但引入 12.3 ms 确定性时延增量。该权衡非普适性策略，须依据台区业务 SLA 分级——如电能质量监测类任务可容忍时延上浮，而故障快速隔离场景则需重构阈值函数以保障端到端时延 $\tau_{\max} \leq 8.5\text{ ms}$ 。

5.3 规模化部署的潜在扩展挑战

当前架构在万台级终端集群下暴露边缘协调器单点瓶颈风险，显著制约系统弹性与可用性。如图 6 所示，分布式边缘协同演进架构通过内环 5 个去中心化协调节点 (Coord-1 至 Coord-5) 构建冗余共识层，中环终端基于地理邻近性动态绑定双协调节点，外环业务模块实现弹性路由调度，本质是以区块链驱动的轻量级拜占庭容错共识替代中心化调度，支撑百万级终端自治协同 [7--12]。

— **DEVELOPMENT OF THE**

1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 284: 2689-2695.

- [7] 夏春丽, 薛春华. 基于物联网的电气自动化智能运维平台设计[J]. 工程管理与技术探讨, 2026, 8(8): 202–204.
- [8] 雍明超, 王磊, 魏勇, 等. 配网开关设备智能物联感知与关键技术研究[J]. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals), 2022.
- [9] PHAM Q V, FANG F, HA V N, et al. A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art[J]. IEEE Access, 2020, 8: 116974–117017.
- [10] TALEB T, SAMDANIS K, MADA B, et al. On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1657–1681.
- [11] 李晓荣. 面向边缘计算的容器编排安全部署方案研究[J]. 电子通信与计算机科学, 2026, 8(4): 7–9.
- [12] 胡清婕, 张虎. 基于多传感器的智能电力系统设计[J]. 计算机与自主智能研究进展, 2025, 3(4): 173.