

物联网技术在电学计量溯源中的应用研究

连明明¹ 陈光明¹ 孙斌²

1 临沂市计量检定所, 山东省临沂市, 276000;

2 临沂市人防工程建设服务中心, 山东省临沂市, 276000;

摘要: 电学计量溯源是保障电力系统精准运行、贸易公平结算及科研数据可靠的核心环节, 传统溯源模式存在周期长、成本高、实时性差及数据孤岛等问题。本文结合物联网 (IoT) 技术的感知、传输、边缘计算与云端协同特性, 深入分析其在电学计量溯源全流程中的应用路径。通过研究感知层智能传感器的高精度数据采集方案、网络层低功耗广域网 (LPWAN) 的可靠传输机制, 以及平台层区块链技术的溯源数据存证与共享模式, 揭示物联网技术对溯源效率、精度及安全性的提升作用。同时, 针对当前应用中存在的标准不统一、边缘节点算力不足及隐私保护难题, 提出对应的优化策略, 为物联网技术在电学计量溯源领域的规模化应用提供理论支撑与实践参考。

关键词: 物联网技术; 电学计量溯源; 智能传感器; 区块链; 低功耗广域网

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.008

引言

电学计量溯源作为量值传递的关键手段, 贯穿于电力生产、传输、消费及科研检测全链条, 其准确性直接影响电力系统稳定性、能源贸易公平性及电子设备研发可靠性。传统电学计量溯源依赖人工定期送检、离线校准, 不仅存在溯源周期长 (通常为 3-12 个月)、人力成本高的问题, 还难以实时捕捉计量设备的动态漂移, 导致量值偏差无法及时修正。随着智能电网、新能源发电及工业物联网的快速发展, 电学计量设备数量激增且分布分散, 传统模式已无法满足“实时化、智能化、网络化”的溯源需求。物联网技术通过融合感知、通信、计算与数据融合技术, 构建“物物相连”的智能网络, 为解决传统溯源痛点提供了新路径。目前, 物联网在电学计量领域的应用多集中于数据采集层面, 对溯源全流程的深度渗透 (如动态校准、量值传递可信化) 研究不足。本文基于物联网技术架构, 从感知、网络、平台三层深入分析其在电学计量溯源中的应用场景, 针对技术瓶颈提出解决方案, 旨在推动电学计量溯源向“实时化、可信化、智能化”转型。

1 物联网技术架构与电学计量溯源需求匹配性分析

1.1 物联网技术三层架构核心特性

物联网技术架构分为感知层、网络层与平台层, 各层功能与电学计量溯源的全流程需求高度契合。感知层以智能传感器、RFID 标签为核心, 具备高精度、低功耗的数据采集能力, 可实时获取计量设备的电流、电压、频率等关键参数, 解决传统溯源中“数据滞后”问题;

网络层依托 LPWAN (如 LoRa、NB-IoT)、5G 等通信技术, 实现广域分布计量设备的低成本、高可靠数据传输, 满足偏远地区 (如农村电网) 计量节点的溯源需求; 平台层通过边缘计算、云计算与区块链技术, 完成数据处理、存储与可信共享, 支撑溯源数据的实时分析、动态校准决策及量值传递的不可篡改, 解决传统溯源中“数据孤岛”与“可信度低”问题。

1.2 电学计量溯源的核心需求与物联网技术的适配性

电学计量溯源的核心需求包括实时性、准确性、可信性与经济性: 在实时性方面, 传统溯源依赖人工送检, 无法实时监测计量设备漂移, 而物联网感知层与网络层的协同可实现秒级数据采集与传输, 为动态校准提供数据支撑; 在准确性方面, 智能传感器的精度可达 0.01 级, 结合边缘计算的实时数据滤波算法, 可降低环境干扰 (如温度、湿度) 对计量数据的影响, 提升溯源精度; 在可信性方面, 区块链的去中心化存证模式可记录量值传递全流程数据, 避免数据篡改, 解决传统溯源中“人为干预”问题; 在经济性方面, 物联网远程溯源模式可减少人工送检成本 (据测算, 远程溯源可降低 60% 以上的运维成本), 同时延长计量设备校准周期, 提升资源利用率。

2 物联网技术在电学计量溯源中的关键应用场景

2.1 感知层, 智能传感器与动态数据采集系统的深度融合

感知层是电学计量溯源的“数据入口”，其核心在于通过智能传感器实现计量参数的高精度、实时采集。传统电学计量多采用机械式电表或普通电子式电表，数据采集精度低（通常为 0.5 级）且依赖人工抄录，无法满足溯源对“动态数据”的需求。物联网感知层通过以下技术路径优化数据采集环节。针对不同电学计量场景（如高压输电、低压配电、实验室校准），选择适配的智能传感器。例如，在高压输电线路溯源中，采用基于光纤传感技术的电流传感器，精度可达 0.02 级，且抗电磁干扰能力强；在实验室校准场景中，部署基于 MEMS 技术的电压传感器，体积小、响应速度快（ $\leq 1\text{ms}$ ），可实时捕捉电压波动。同时，传感器内置温度补偿模块，通过边缘计算实时修正环境温度对计量数据的影响，进一步提升采集精度。除传统的电流、电压参数外，智能传感器还可采集计量设备的工作温度、湿度、振动频率等环境参数，构建“计量参数—环境参数”的关联数据库。通过边缘节点的预处理算法（如卡尔曼滤波算法），剔除异常数据（如电磁干扰导致的脉冲信号），并对数据进行压缩处理，减少后续传输带宽占用。例如，在智能电表溯源中，边缘节点可将采集到的秒级数据压缩为分钟级有效数据，传输量降低 80% 以上，同时保证数据完整性。

2.2 网络层，低功耗广域网与 5G 的混合传输方案

网络层需解决“广域分布、低功耗、高可靠”的溯源数据传输问题。传统电学计量溯源多采用有线传输（如 RS485 总线），部署成本高且灵活性差，无法覆盖偏远地区计量节点；而普通无线网络（如 Wi-Fi）功耗高、覆盖范围小，不适用于长期在线的计量设备。物联网网络层通过“LPWAN+5G”混合传输方案，实现不同场景下的高效数据传输：针对农村电网、分布式光伏电站等偏远地区的计量设备，采用 LoRa 或 NB-IoT 技术实现数据传输。LoRa 技术的覆盖范围可达 10km，功耗仅为 $50\mu\text{A}$ ，适用于低频次（如每小时 1 次）的溯源数据传输；NB-IoT 技术依托运营商基站，覆盖范围广且稳定性高，可满足每日多次的溯源数据上报需求。例如，在分布式光伏电站的逆变器计量溯源中，通过 NB-IoT 将逆变器的输出电流、电压数据实时传输至云端，传输成功率可达 99.5% 以上，且单设备年耗电量仅为 1 度左右。针对智能电网中的实时动态校准场景（如变电站计量设备），采用 5G 技术实现毫秒级数据传输。5G 的低时延（ $\leq 1\text{ms}$ ）、大带宽特性，可支撑计量设备与校准平台的实时交互，实现远程动态校准。例如，在变电站的电压互感器溯源中，5G 网络可将互感器的实时误差数据传输至云端校准系统，系统根据误差数据生成校准

指令并反馈至互感器，完成动态校准，整个过程耗时不足 100ms，远低于传统人工校准的数小时周期。

2.3 平台层，区块链与云计算协同的溯源数据可信管理

平台层是电学计量溯源的“大脑”，负责数据处理、存证与共享，其核心在于解决溯源数据的“可信性”与“可用性”问题。传统溯源数据存储于中心化服务器，存在数据篡改风险，且不同机构间数据不互通，形成“数据孤岛”。物联网平台层通过区块链与云计算的协同，构建可信、共享的溯源数据管理体系：采用联盟链架构（如 Hyperledger Fabric），将计量设备的基本信息（型号、出厂编号）、校准记录（校准时间、校准机构、误差值）、量值传递路径等数据上链存储。每个节点（如计量机构、电力公司、监管部门）均拥有账本副本，数据修改需经多数节点共识，确保不可篡改。例如，在电能表溯源中，电能表出厂时生成唯一区块链标识（NFT），每次校准后，校准机构将校准数据上传至区块链，电力公司可通过标识查询完整溯源记录，避免“假校准”“假数据”问题。针对海量溯源数据（如百万级计量设备的实时数据），采用“边缘计算+云计算”分层处理模式。边缘节点（如区域计量网关）负责实时数据滤波、异常检测（如计量设备故障预警），减少向云端传输的数据量；云端平台则进行大数据分析，如计量设备漂移趋势预测、区域溯源精度统计，为溯源策略优化提供支撑。例如，云端通过分析 A 区域 1000 台智能电表的历史漂移数据，可预测电表的下次校准时间，将传统固定周期校准（12 个月）优化为动态周期（如 15 个月或 10 个月），提升溯源经济性。

3 物联网技术在电学计量溯源应用中的现存问题

3.1 技术标准不统一导致的互联互通难题

目前，物联网在电学计量溯源领域缺乏统一的技术标准，主要体现在三个方面：一是传感器接口标准不统一，不同厂商的智能传感器（如电流传感器、电压传感器）采用不同的数据接口（如 RS485、Modbus、MQTT），导致不同品牌计量设备的数据无法直接互通；二是数据格式标准缺失，溯源数据（如误差值、校准时间）的定义与存储格式各异，增加了跨平台数据整合的难度；三是区块链共识机制与智能合约标准不统一，不同机构搭建的区块链溯源平台无法实现跨链数据共享，形成新的“链上孤岛”。

3.2 边缘节点算力不足限制实时校准能力

边缘计算是实现动态校准的关键,但当前电学计量溯源中的边缘节点(如智能电表、区域网关)多为低成本设备,算力有限(如采用 ARM Cortex-M 系列芯片),无法支撑复杂的实时校准算法(如最小二乘法误差修正、非线性补偿算法)。例如,在低压配电网络的电能表动态校准中,边缘节点需实时计算电能表的误差值并生成校准指令,但受限于算力,误差计算耗时可达数百毫秒,无法满足毫秒级动态校准需求,影响溯源实时性。

3.3 数据隐私与安全风险

物联网溯源系统涉及大量敏感数据,如计量设备的位置信息、电力用户的用电数据,以及校准机构的核心技术参数,存在隐私泄露与安全风险。一方面,数据传输过程中,LPWAN 与 5G 网络虽具备加密功能,但仍面临中间人攻击、数据截取风险;另一方面,区块链的透明性虽提升了数据可信度,但也导致敏感数据(如校准机构的误差修正算法)被所有节点可见,侵犯数据隐私。此外,边缘节点与云端平台的通信接口若存在漏洞,可能被黑客利用,篡改溯源数据,影响量值传递准确性。

4 物联网技术在电学计量溯源中应用的优化策略

4.1 构建统一的技术标准体系

由国家计量技术机构牵头,联合电力企业、物联网设备厂商及科研机构,制定物联网电学计量溯源的技术标准体系:一是统一传感器接口与数据格式标准,规定智能传感器需支持标准化接口(如 IEEE 802.11ah)与数据格式(如 JSON-LD),确保不同设备数据互通;二是制定区块链溯源标准,明确共识机制(如实用拜占庭容错算法 PBFT)、智能合约模板及跨链交互协议,实现不同区块链平台的互联互通;三是建立溯源数据质量评估标准,定义数据精度、完整性、实时性的评估指标,为溯源数据的可用性提供依据。

4.2 提升边缘节点算力与算法优化

通过硬件升级与算法优化,解决边缘节点算力不足问题:一是采用“边缘网关+边缘服务器”的分层算力架构,在区域计量中心部署边缘服务器(如采用工业级 CPU),承担复杂的校准算法计算,边缘网关仅负责数据采集与初步预处理,提升整体算力;二是优化动态校准算法,采用轻量化算法(如基于支持向量机的简化误差修正算法),降低算法对算力的需求。例如,将传统最小二乘法的计算复杂度从 $O(n^3)$ 降低至 $O(n)$,使边缘节点可在 10ms 内完成误差计算,满足实时校准需求。

4.3 建立数据隐私保护与安全防护机制

从传输、存储、共享三环节构建安全防护体系:一是在数据传输环节,采用端到端加密技术(如 AES-256 加密算法),结合 LPWAN 的扩频通信特性,提升抗干扰与抗截取能力;二是在数据存储环节,采用“链上哈希+链下存储”模式,将敏感数据(如用电数据、校准算法)存储于加密云端,仅将数据哈希值上传至区块链,既保证数据不可篡改,又保护隐私;三是在数据共享环节,采用零知识证明技术,实现“数据可用不可见”,例如电力公司仅需验证校准机构的校准结果有效性,无需获取具体校准过程数据,避免隐私泄露。

5 结论

本文分析了物联网技术在电学计量溯源中的应用路径,研究认为:物联网技术通过感知层的高精度数据采集,网络层的可靠传输,平台层的可信数据管理,能有效解决传统溯源模式实时性差,成本高,可信度低等问题,推动电学计量溯源向“动态化,网络化,可信化”转型。但在当前应用中还存在着标准不统一,边缘算力不足以及隐私安全风险等瓶颈,需要通过构建统一标准体系,提升边缘算力和优化安全机制来逐步解决。未来,随着物联网技术与人工智能,量子计算的深度融合,电学计量溯源必将有新的发展方向:一方面,人工智能算法(如深度学习)可用于计量设备漂移趋势的精准预测,实现“预测性校准”,进一步延长校准周期;另一方面,量子传感技术的应用可将计量精度提升至量子级(如基于量子霍尔效应的电阻标准),结合物联网实现量子级量值的远程传递,推动电学计量溯源进入“量子化、智能化”新时代。

参考文献

- [1]张萍.基于物联网技术的供电企业用户用电计量数据实时采集方法[J].办公自动化,2025,30(12):89-91.
- [2]张丽.基于物联网技术的智能电力计量系统分析[J].电子技术,2024,53,(11):254-255.
- [3]孙黎敏.利用物联网技术实现计量自动化检定业务[J].云南电力技术,2024,52,(04):64-66.
- [4]李义.基于物联网与大数据的电学计量检测架构分析[J].数字通信世界,2021,(04):114-115.
- [5]明艳.基于物联网与大数据的电学计量检测架构研究[J].计量与测试技术,2020,47,(06):16-18.

作者简介:连明明(1990.04-),男,汉族,江苏宿迁,硕士研究生,中级,电学计量。