基于物联网的电气工程自动化监控系统研究

苏宇飞　杨德宇　吴志宏

国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司　新疆　乌鲁木齐　831400

摘　要：工业 4.0 与智能电网发展，使传统电气工程监控系统在实时性、智能化和可扩展性上，难以满足现代复杂电力网络与工业自动化需求。物联网（IoT）技术具有泛在感知、海量连接和智能分析能力，为电气工程自动化监控带来变革机遇。本文致力于构建基于物联网的电气工程自动化监控系统，先系统阐述其整体架构，涵盖感知层、网络层、平台层和应用层的核心功能与技术选型；接着重点探讨多源异构数据融合、边缘计算协同、基于深度学习的故障预测及云边端一体化安全机制等关键技术；最后分析系统实际应用挑战并展望未来趋势。研究表明，该系统可显著提升电气系统运行效率、安全性与智能化水平，为构建下一代智能、可靠、高效的能源与工业基础设施提供有力技术支撑。

关键词：物联网；电气工程；自动化监控；智能电网；边缘计算；故障预测

引言

电气工程是现代工业与社会运转的基石，确保电力系统安全、稳定、经济运行是其核心任务。传统电气监控系统依赖 SCADA 和 DCS，通过有线连接传感器等实现集中监测与控制。但在数字化浪潮下，传统系统局限性凸显：感知能力有限，监测点稀疏，难以全方位感知设备状态；不同子系统数据标准、协议不同，形成信息孤岛，阻碍全局决策；中央集中式处理有通信延迟，对毫秒级响应的故障处理力不从心；且以“事后报警”为主，缺乏数据深度挖掘，无法实现故障早期预警和预测性维护，智能化程度低。物联网兴起为解决这些问题提供新思路，其“万物互联”特性，使构建新型电气工程自动化监控系统成为可能。本研究旨在探索物联网等前沿技术与电气工程深度融合路径，丰富智能监控系统理论体系，助力其数字化转型，提升能源利用效率和生产安全性。

1 基于物联网的电气工程自动化监控系统总体架构

本文提出一个四层架构的监控系统，分别为感知层、网络层、平台层和应用层。该架构遵循“端-边-云”协同的理念，各层之间通过标准化接口进行交互，确保了系统的开放性和可扩展性。

1.1 感知层（端）

感知层负责对电气设备及环境进行全面、实时的数据采集。其核心组件包括各类智能传感器、执行器和边缘网关。智能传感器家族涵盖了电气量传感器（如高精度电流/电压互感器、智能电表）、状态量传感器（如温度、湿度、局部放电、振动传感器）以及视觉传感器（如高清摄像头、热成像仪），它们共同构成了对设备运行状态和环境的立体化感知网络。智能执行器，如远程控制的断路器和无功补偿装置，则负责接收上层指令并执行具体操作。边缘智能终端或网关在此扮演着至关重要的角色，它不仅是数据汇聚和协议转换的枢纽，将 Modbus、DL/T645 等工业协议统一转换为 MQTT 等物联网协议，还具备本地计算能力，能够执行初步的数据清洗、过滤和简单逻辑判断，从而有效减轻云端的处理负担，为后续的高效分析奠定基础。

1.2 网络层

网络层核心任务是保障数据的可靠、高效传输。考虑到电气工程应用场景的极端多样性，从室内密集的变电站到广袤的户外输电线路，单一的通信技术难以满足所有需求。因此，网络层必须采用一种异构融合的通信策略。在设备密集的局部区域，如单个配电柜内部，Zigbee、LoRa、Bluetooth LE 等低功耗、低成本的无线技术被用于连接各类微型传感器[1]。对于厂区内或城市范围内的数据回传，则主要依赖于蜂窝网络（4G/5G）和工业以太网，其中 5G 网络凭借其超大带宽、超低时延和海量连接的卓越特性，尤其适合承载关键控制指令和高清视频流等高要求业务。而在骨干电网等对安全性和隔离性要求极高的场景，则可充分利用电力线载波（PLC）或光纤专网（如 EPON）等专用电力通信资源，确保核心业务的万无一失。

1.3 平台层（云 + 边）

平台层由边缘计算平台和云计算平台两部分构成，二者通过紧密协同工作，共同完成从实时响应到深度

洞察的全谱系任务。边缘计算平台通常部署在靠近数据源的本地服务器或高性能网关上，其首要职责是对感知层上传的原始数据进行实时流处理，计算出如功率因数、负载率等衍生指标，并能在毫秒级内完成本地闭环控制，例如触发过流速断保护，无需等待云端指令。此外，它还负责对非关键数据进行聚合、降噪和压缩，再择机上传至云端，以节省宝贵的网络带宽。相比之下，位于数据中心或公有云的云计算平台则提供了近乎无限的计算、存储和管理能力。它利用分布式数据库和对象存储来容纳海量的时序与非结构化数据，并依托 Spark、Flink 等大数据分析引擎，支持对历史数据的离线批处理和复杂事件处理。更为重要的是，云平台集成了强大的 AI 模型训练与管理功能，能够持续优化故障预测、能效分析等核心算法，并通过设备管理和规则引擎，为上层应用提供灵活、强大的业务逻辑支撑。

1.4 应用层

应用层使命是将平台层处理后的数据和深刻洞察转化为直观、易用的服务，打通从数据到价值的最后一公里。全景可视化监控是其基础功能，通过 Web 或移动 App，以 GIS 地图、拓扑图乃至三维模型等形式，实时、生动地展示全网设备的运行状态、电气参数和告警信息。在此基础上，智能告警与诊断服务超越了简单的阈值越限，而是结合上下文信息和 AI 分析结果，主动向运维人员推送包含故障原因、影响范围和处置建议的综合性报告。预测性维护（PdM）则是系统智能化的集中体现，它基于设备的历史运行数据和健康评估模型，精准预测潜在故障的发生时间和剩余寿命，并自动生成维护工单，将被动抢修转变为主动预防[2]。能效分析与优化模块则专注于经济效益，通过深入分析各区域、各产线的能耗数据，识别能效瓶颈，并提供削峰填谷、无功补偿等切实可行的优化策略。最后，移动巡检与 AR 辅助等创新应用，更是将数字世界与物理世界无缝融合，极大地提升了现场作业的效率和准确性。

2 系统关键技术研究

2.1 多源异构数据融合技术

电气监控系统产生的数据类型繁杂，涵盖了结构化的时序数据、半结构化的日志数据以及非结构化的图像/视频数据。如何将这些多源异构数据进行有效关联与融合，是提取深层价值、构建完整设备画像的前提。本文采用基于“特征-实体-事件”三层模型的数据融合方法来应对这一挑战。在特征层，系统对来自不同传感器的同一物理量（如变压器油温）进行卡尔曼滤波或加权平均，以提高测量精度和鲁棒性，消除单一传感器的偶然误差。在实体层，系统以具体的电气设备（如一台断路器）为核心实体，将其相关的所有数据——包括电气量、机械状态、环境温湿度乃至操作记录——进行精确的时空对齐和关联存储，从而构建出一个动态、完整的设备数字孪生体。在事件层，系统利用复杂事件处理（CEP）引擎，定义跨数据源的事件模式，例如，当系统同时检测到“局放信号强度突增”、“红外温度异常升高”且“负荷电流正常”时，便可将其识别为一个高置信度的“绝缘劣化”复合事件，其预警价值远非任何单一信号的告警所能比拟。

2.2 边缘-云协同计算架构

为了在实时性与计算复杂度之间取得最佳平衡，系统采用了动态任务卸载策略，实现了边缘与云的智能协同。边缘节点会维护一个本地任务队列，并根据任务的紧急程度、所需计算资源以及当前网络状况，动态决策任务的执行地点。对于高优先级、低延迟要求的任务，如继电保护或紧急停机指令，系统会毫不犹豫地在边缘侧本地执行，以确保在最短时间内完成关键操作。而对于计算密集型、非实时的任务，如对数年历史数据进行大规模分析或训练复杂的深度神经网络模型，则会被卸载到拥有强大算力的云端执行[3]。对于介于两者之间的复杂 AI 推理任务，例如基于视频流的设备缺陷识别，系统则采用协同执行模式：先将一个轻量化的模型（如 MobileNet）部署在边缘进行初步筛选，仅将那些被判定为疑似异常的图像片段上传至云端，再由更庞大、更精确的模型（如 ResNet）进行最终确认，从而在保证准确率的同时，极大地节约了网络带宽和云端资源。

2.3 基于深度学习的故障预测模型

准确的故障预测是实现预测性维护的核心驱动力。本文提出一种融合卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）的混合深度学习模型，专门用于处理电气设备产生的多维时序数据。该模型的工作流程是：首先，CNN 模块负责从输入的多通道时序数据（如三相电流、电压、温度等）中自动提取局部的空间特征和模式，捕捉不同信号间的瞬时关联；随后，LSTM 模块接收这些由 CNN 提炼出的特征序列，并利用其独特的门控机制，有效捕捉数据中蕴含的长期时间依赖关系，识别出缓慢演变的故障征兆。模型的训练过程充分利用了历史故障数据集，该数据集包含了每次故障发生前 N 小时的完整运行数据，通过对这些数据进行监督学习，模型最终能够输出未来一段时间内发生特定故障的概率。实践证明，该模型能够有效识别出传统阈值法无法察觉的、由多种因素缓慢累积导致的隐性故障，从而将预警

窗口大大提前，为运维决策赢得了宝贵的时间。

2.4 云-边-端一体化安全机制

本文构建了一个覆盖云、边、端全链路的纵深防御安全体系。在端侧，为每一个物联网设备烧录唯一的数字证书，实现设备与平台之间的双向身份认证，杜绝非法设备的接入；同时，采用 AES-128 等轻量级加密算法对敏感数据进行本地加密，确保即使设备被物理窃取，其内部数据也无法被轻易读取。在边侧，部署防火墙和入侵检测系统（IDS），对所有进出边缘节点的网络流量进行深度包检测，及时发现并阻断恶意攻击；并通过建立安全隔离区（DMZ），严格控制边缘节点与云端核心系统的访问权限，形成有效的安全缓冲带[4]。在云侧，则实施严格的基于角色的访问控制（RBAC），确保所有 API 调用都经过严密的鉴权；对静态存储的所有数据进行加密，防止数据泄露；并定期进行安全审计和漏洞扫描，持续加固系统防线。在整个通信链路上，系统强制采用 TLS/DTLS 协议进行端到端加密，确保数据在传输过程中的机密性和完整性，构筑起一道坚不可摧的安全屏障。

3 挑战与展望

3.1 挑战

首先是标准化问题，物联网设备厂商众多，各自采用的通信协议和数据模型缺乏统一标准，导致系统集成成本高昂且过程繁琐。其次是数据隐私与所有权问题，海量运行数据的所有权归属、使用边界以及相关的隐私保护法规尚不清晰，这在一定程度上制约了数据的开放共享和价值挖掘。最后是投资回报周期问题，初期在硬件和软件上的投入较大，对于预算有限的中小企业而言，如何清晰地测算和证明其投资回报率（ROI）是决定其是否采纳该技术的关键因素。

3.2 展望

第一，与数字孪生技术的深度融合将成为主流，通过构建高保真的电气系统数字孪生体，实现物理世界与虚拟世界的实时映射和交互仿真，这不仅可用于日常监控，更能服务于人员培训、应急预案演练和系统优化控制。第二，AI 原生架构将逐渐普及，AI 能力将不再是附加的功能模块，而是内生于系统架构的每一个环节，从数据采集、传输到分析、决策，全流程都将由 AI 驱动和持续优化。第三，区块链技术有望为该领域赋能，利用其不可篡改、可追溯的特性，确保关键操作日志和计量数据的真实可信，为电力市场化交易、碳足迹追踪等新兴业务模式提供坚实的信任基础。

4 结语

本文系统性地研究了基于物联网的电气工程自动化监控系统。通过构建“感知-网络-平台-应用”四层架构，并深入探讨了多源数据融合、云边协同、智能预测和一体化安全等关键技术。研究表明，该系统不仅能实现对电气设备更全面、更精细的状态感知，更能通过智能化分析，将监控模式从被动响应转变为主动预防，极大地提升了系统的安全性、可靠性和经济性。随着相关技术的不断成熟和标准的逐步统一，基于物联网的自动化监控系统必将成为未来电气工程领域的主流范式，为构建智慧能源和智能制造生态奠定坚实基础。

参考文献

[1] 丁边阅. 物联网在电气工程中的应用探究 [J]. 应用能源技术,2025,(04):7-9.

[2] 闫帅. 基于物联网技术的电气自动化系统远程监控系统设计与实现 [J]. 电气技术与经济,2024,(12):90-92.

[3] 孙桂磊, 张博, 刘光辉. 基于物联网技术的电气工程设备远程监控研究 [J]. 数字通信世界,2025,(04):34-36.

[4] 赵阳. 基于物联网技术的电气工程设备远程监测与控制研究 [C]//中国智慧工程研究会.2024 新技术与新方法学术研讨会论文集. 库柏 (宁波) 电气有限公司;,2024:145-147.