

基于电力物联网的云边协同管理关键技术研究

宋娜娜

华电电力科学研究院有限公司 浙江 杭州 310030

摘要：电力物联网的蓬勃兴起促使电力系统向智能化、精细化方向飞速发展，云边协同管理模式在此背景下崭露头角。本文聚焦于该模式下的关键技术，从边缘计算架构搭建、数据交互与融合、任务调度策略、通信保障机制以及安全防护体系等多维度展开深入探究。通过理论剖析、实验论证与实际案例解析相结合的方式，详细阐述各项技术的原理、实现方法及其在电力物联网场景中的应用效能，旨在攻克现有难题，为电力物联网的持续优化升级提供强有力的技术支撑，推动电力行业的智慧变革。

关键词：电力物联网；云边协同；边缘计算；数据融合；任务调度

1 引言

在全球能源转型与科技革新的浪潮中，电力物联网作为智能电网的关键构成，正以前所未有的速度整合电力系统的各个环节，实现万物互联互通。然而，传统单纯依赖云计算的管理模式在处理海量、实时性强且分布式的电力数据时愈发捉襟见肘。云边协同管理应运而生，它巧妙融合了云计算的集中式大数据处理优势与边缘计算的本地化快速响应特性，为电力物联网的高效稳定运维注入全新活力，成为当下电力领域炙手可热的研究焦点。

2 电力物联网云边协同架构剖析

近年来，“双碳”目标下电力物联网建设面临着感传一体化、多元数据融合及智能优化决策等方面的挑战。为了满足这些需求，云边协同作为一种新兴的技术模式逐渐受到关注。它结合了云计算的强大计算能力和边缘计算的低延迟特性，能够有效地解决电力物联网中存在的问题，如实时性要求高、数据量大等。电力物联网云边协同架构呈现出层次分明、协同紧密的布局。云端犹如电力系统的“智慧大脑”，汇聚全域海量数据，凭借超强计算资源执行复杂模型运算、长期趋势分析及全局性优化决策，为电网战略规划、跨区域调度等提供精准指引；边缘层仿若神经末梢，广泛分布于发电站、变电站、配电室等现场，由具备一定计算存储能力的边缘设备构成，负责实时采集、预处理电力运行数据，如传感器数据、设备状态信息等，依据本地预设规则迅速反馈控制指令，保障关键业务毫秒级响应，减轻云端负荷；连接云边的通信链路则似“神经网络”，借助5G、电力光纤专网等高速可靠通道，双向传输数据与指令，确保云边信息实时同步，协同应对电力系统复杂多变的工况^[1]。

3 边缘计算核心技术研发

3.1 适配电力场景的边缘计算硬件选型

考虑电力设施特殊运行环境，边缘计算设备需具备高稳定性、强抗干扰性。采用工业级芯片组，其宽温域、高防护等级特性可应对变电站高温、强电磁干扰场景；模块化设计便于现场维护与功能扩展，支持热插拔，降低设备故障修复时间。例如，变电站边缘服务器集成多核处理器与FPGA加速模块，前者应对通用数据处理，后者加速电力信号实时分析，提升边缘节点计算效能。

3.2 面向电力业务的边缘软件架构构建关键技术

边缘软件基于轻量化微服务架构搭建，容器化部署实现应用快速启停与迁移。开发电力专属中间件，内置IEC 61850、DL/T 645等主流电力协议栈解析功能，无缝对接智能电表、继电保护装置等设备，自动适配数据格式，将采集数据高效汇聚至边缘数据中心；同时，边缘端搭载实时操作系统，优化任务调度算法，优先保障电力故障监测、紧急控制等关键任务执行，确保系统实时性。

(1) 边缘计算架构设计

边缘计算架构需兼顾电力现场复杂环境与多样业务需求。硬件上，采用工业级芯片与模块化设计，确保耐高温、抗电磁干扰，适应变电站、配电室等恶劣条件；软件层面，基于容器化技术构建轻量化边缘操作系统，支持电力协议快速解析，如IEC 61850、DL/T 645等，实现设备即插即用，灵活部署各类电力监测、控制应用，提升边缘节点自治能力。

(2) 边缘数据处理技术

电力数据具有高频采样、时序性强、数据量大等特点。边缘端采用实时流计算框架，结合滑动窗口算法，对电力设备运行状态数据（如电流、电压波形）进行实时特征提取，通过阈值判断、趋势分析等手段，在毫秒

级内识别设备异常,触发本地预警,避免故障扩大;同时运用数据压缩技术,无损压缩电力巡检图像、视频数据,减少传输带宽占用,保障数据高效流转于边缘与云端间。

4 云边协同的数据交互与融合技术

4.1 数据融合算法

电力物联网涉及多源异构数据,来自不同厂商、不同类型设备。在云边两侧采用基于本体的语义融合算法,构建电力领域知识图谱,统一数据语义表达,使云端大数据分析 with 边缘实时决策能基于共同理解的数据模型。例如,融合发电功率、用电负荷、气象数据,精准预测电力供需平衡,优化发电计划,提升能源利用效率。

4.2 分布式数据存储

考虑数据就近处理与快速访问原则,边缘采用本地分布式缓存技术,如基于RocksDB的key-value存储,缓存高频访问的设备实时数据,加速本地应用响应;云端利用分布式文件系统(Ceph、GlusterFS等)结合分布式数据库(HBase、Cassandra),存储海量历史数据、设备档案与分析结果,为长期趋势洞察、深度学习模型训练提供数据池,实现云边数据分层存储、协同利用。

4.3 异构电力数据的融合处理

电力物联网涵盖结构化、半结构化与非结构化的多源异构数据,源自不同厂家、不同年代的设备。利用本体论构建电力领域统一语义模型,基于知识图谱技术关联设备参数、运行状态、地理信息等数据,使云边两侧能精准理解数据内涵。例如,在配电网场景,融合气象数据预测负荷变化、结合地理信息优化抢修路径,实现跨领域数据协同增效,提升电力运维精准度。

4.4 云边数据的分布式存储与协同访问

在电力物联网的云边协同体系中,云边数据的分布式存储与协同访问起着承上启下的关键作用,关乎整个系统的运行效率与数据利用价值。边缘侧,鉴于其靠近数据源且需快速响应本地业务需求,多采用混合式存储方案。一方面,利用基于RocksDB的本地key-value存储,缓存如电力设备实时状态、近期告警信息等高频读写数据,以毫秒级的响应速度保障本地应用即时获取所需信息,确保在紧急故障发生时,边缘节点能迅速基于本地缓存数据做出初步判断与应急处理。另一方面,搭配分布式时序数据库InfluxDB来存储电力设备长时间序列运行数据,为本地趋势分析、故障回溯提供数据支撑。^[2]

云端则依托大规模分布式文件系统,如Ceph,它具备高扩展性、高可靠性,能够承载海量的电力历史数据、深度分析报告以及全电网的设备档案等。同时结合

关系型数据库集群,精准管理结构化数据,便于复杂查询与统计分析。

为实现协同访问,云边之间通过数据索引同步机制,确保双方知晓彼此数据的存储布局与更新情况。一致性缓存策略的运用,使得边缘缓存数据与云端存储数据在一定时间范围内保持逻辑一致,避免数据冲突。当边缘节点遇到本地缓存无法满足的复杂数据需求时,能依据同步索引快速向云端发起访问请求,云端按策略反馈精准数据,如此,云边携手提升电力物联网数据流转与利用的效能。

电力物联网涉及多源异构数据,来自不同厂商、不同类型设备。在云边两侧采用基于本体的语义融合算法,构建电力领域知识图谱,统一数据语义表达,使云端大数据分析 with 边缘实时决策能基于共同理解的数据模型。例如,融合发电功率、用电负荷、气象数据,精准预测电力供需平衡,优化发电计划,提升能源利用效率。边缘侧采用本地缓存与分布式数据库结合,如基于RocksDB的本地key-value存储缓存高频读写数据,搭配分布式时序数据库InfluxDB存储电力设备时序运行数据,保障本地数据快速访问;云端依托大规模分布式文件系统(Ceph等)与关系型数据库集群,存储海量历史数据、分析报告。通过数据索引同步、一致性缓存策略等技术,实现云边数据分层管理、按需协同访问,提升数据利用效率。

5 云边协同任务调度策略制定

5.1 基于动态资源评估的任务卸载模型

综合考量边缘节点CPU空闲率、内存余量、网络带宽等动态资源状况,结合电力业务实时性、计算复杂度需求,构建任务卸载决策模型。引入马尔可夫决策过程,预测业务负载变化趋势,运用贪心算法或动态规划求解最优卸载策略。如对于电力设备故障诊断,简单故障模式下边缘节点利用本地规则库快速诊断;复杂故障涉及多设备关联分析,则卸载至云端利用深度学习模型精准判别,平衡云边计算负载。

5.2 跨云边的分布式任务协同调度算法

依托分布式协同框架(如Apache Flink的分布式调度扩展),实现云边任务统一编排与协同推进。云端作为主控节点,全局掌控任务优先级、资源分配;边缘节点实时反馈任务执行进度、资源消耗,依据反馈信息,云端动态调整任务分配与调度策略,确保电力系统发电、输电、配电等多环节任务紧密衔接,提升整体运营效率。

6 云边协同通信保障关键技术

6.1 面向电力业务的通信网络优化

针对电力差动保护、精准负荷控制等高实时性业务,利用5G网络切片技术,定制超低延迟、高可靠专属切片,配合边缘计算UPF下沉至园区变电站,减少数据传输时延;结合软件定义网络(SDN)智能管控网络流量,依据电力业务优先级动态分配带宽,紧急故障数据优先转发,保障关键业务通信畅通。

6.2 云边通信协议适配与转换

电力系统现存多种通信协议,既有传统SCADA系统的IEC 60870-5等,又有新兴智能设备的MQTT、CoAP协议。在云边两端部署多功能协议网关,内置协议解析与转换引擎,边缘端将采集数据统一封装为轻量级MQTT协议上传云端,云端接收后按需转换为内部业务处理协议,下达控制指令时再逆向转换,确保云边通信无缝对接。

7 云边协同安全防护体系建设

7.1 身份认证与访问控制

在云边架构下,建立统一身份认证体系,基于数字证书、公钥基础设施(PKI)技术,为云端、边缘设备、操作人员颁发唯一数字身份标识。结合基于角色的访问控制(RBAC),精细定义不同电力业务角色(运维人员、调度员等)权限,确保只有合法授权主体能访问相应电力数据、操作设备,防止非法入侵与数据泄露,保障电力系统网络安全。

7.2 多层级的身份认证与权限管理

构建涵盖云、边、端的统一身份认证架构,基于PKI公钥基础设施,为电力设备、运维人员、第三方应用等颁发数字证书,验证身份合法性;结合基于角色的访问控制(RBAC)与属性访问控制(ABAC),精细划分权限,运维人员依岗位访问特定区域设备数据,第三方应用按授权范围调用电力服务,防止越权访问与数据泄露。

7.3 全流程的数据加密与隐私保护

采用国密算法(SM2、SM4等)加密电力数据,边缘到云端传输链路依托TLS/SSL加密协议构建安全通道,确保数据机密性;在数据存储环节,边缘本地数据库与云端存储系统均采用加密存储技术,防止数据窃取;针对

云端大数据分析可能涉及的隐私问题,运用同态加密、差分隐私技术,实现在密文状态下数据统计分析,维护电力用户隐私权益。

8 案例实证分析

某大型城市电网实施云边协同管理升级项目,在边缘层于200余个变电站、1000多个配电室部署智能边缘设备,实时监测设备运行,快速处理简单故障,故障响应时间从原来平均5分钟缩短至1分钟以内;云端整合全市电网数据,利用大数据分析优化发电计划,依据实时负荷调整变电站无功补偿,使电网损耗降低15%。通过云边协同通信优化,5G切片保障了电力应急抢修实时指挥,抢修效率提升30%。该案例充分彰显云边协同管理关键技术在提升电网可靠性、降低运营成本、优化能源配置等方面的卓越成效。

9 结论与展望

本研究围绕电力物联网云边协同管理关键技术展开深度探索,从边缘计算架构到安全防护体系全方位攻坚,经理论与实践验证,显著提升电力物联网运行效能,推动电力行业智能化转型。然而,展望未来,随着电力系统复杂度攀升、新兴技术涌现,如量子计算对现有加密体系冲击、边缘人工智能算力瓶颈等挑战接踵而至。后续研究需持续深化跨领域协作,紧跟前沿技术革新,迭代优化云边协同技术体系,为电力物联网可持续发展铺就坚实道路,助力全球能源互联网宏伟蓝图早日实现。

参考文献

- [1]周忠冉,顾亚林,张俊杰.基于云边协同架构的电力物联网数据分类处理方法[J].微型电脑应用,2022,38(11):26-29.
- [2]王志成.离散型智能产线边缘侧数据转译融合技术研究与应用[D].沈阳工业大学,2023.
- [3]李兴,赵海萍,冯毅明,等.基于电力物联网的云边协同管理关键技术研究[J].电力系统装备,2024(3):148-150.