

基于边缘计算的物联网系统集成架构优化与实践

刘延灏

浙江爱客能源设备有限公司, 浙江省杭州市, 310000;

摘要: 随着物联网技术的广泛应用和数据量的迅猛增长, 传统的中心化云计算模式在面对高并发、低延迟和安全性要求的应用场景中日益暴露出瓶颈。边缘计算作为一种贴近数据源头的计算模式, 为物联网系统的集成架构带来了新的优化路径。本文以边缘计算为核心, 深入探讨其在物联网系统中的架构演进与集成优化实践。文章从边缘计算驱动下的架构升级出发, 梳理关键集成技术, 分析在工业、智慧城市、能源监测等典型应用中的部署实践, 总结优化路径与未来发展趋势, 旨在为边缘计算与物联网深度融合提供理论支撑与实用参考。

关键词: 边缘计算; 物联网; 系统集成; 架构优化; 实时处理; 智能感知

DOI: 10.64216/3080-1508.25.03.043

引言

物联网 (IoT) 已成为当前智能化社会构建的重要支柱之一, 涵盖智能制造、城市治理、环境监测、交通管理等多个领域。然而, 随着终端设备数量激增, 数据传输压力剧增, 传统“云中心+终端”的集中式架构在时效性、带宽负担、隐私保护等方面日益显现局限。边缘计算的提出, 为物联网系统注入了新活力。边缘计算通过将部分计算和存储能力下沉至网络边缘, 实现对本地数据的快速处理与智能响应, 有效缓解了云端压力。

基于此背景, 本文聚焦于边缘计算与物联网系统的集成架构优化, 从系统层级设计、边缘智能部署到典型场景应用三个维度展开深入分析与实践研究, 尝试构建一种兼具实时性、灵活性与可扩展性的融合架构, 以适应日趋复杂的物联网应用需求。

1 边缘计算驱动下的物联网系统架构重构

1.1 系统架构层级的动态演化机制

传统物联网系统采用“感知-网络-平台-应用”四层模型, 其核心计算任务集中于云端处理。这种模式在设备规模小、数据量少时具备一定效率, 但在百万级乃至千万级节点并发时, 延迟与带宽成为限制系统响应速度的关键瓶颈。边缘计算的引入打破了单向数据传输的固有模式, 将云、边、端三个计算层级进行动态分工: 终端侧侧重感知与上传, 边缘侧负责数据初处理、决策下发, 云端完成深度学习与长期建模。这种架构强调“就近计算、快速响应”, 构成物联网系统的新型分布式框架。

1.2 边缘节点部署策略与资源协同机制

边缘计算节点的位置选择及其资源配置关系着整个系统的稳定性与性能表现。部署策略应依据业务场景灵活调整: 如在工业控制中, 节点需靠近控制设备; 而

在智慧社区中, 则更适合集中部署于边缘数据中心。同时, 系统需建立资源协同机制, 实现云、边、端资源动态调度。以容器化和微服务为基础的架构能够提高边缘节点间的弹性互备能力, 而 Kubernetes 等边缘集群管理平台可提供统一的服务编排接口, 降低部署与维护成本。

1.3 网络拓扑与边缘接入协议的优化设计

在系统集成中, 网络拓扑设计与通信协议的优化不可或缺。边缘计算倾向采用“星型+环型”的混合拓扑结构, 以提升局部自治与全网冗余。接入协议方面, 传统 MQTT 和 CoAP 等轻量协议已广泛应用于边缘通信, 但在低延迟与高并发场景中, QUIC、DDS 等新型协议展现出更强性能。同时, 协议适配层的构建能够屏蔽底层协议差异, 实现异构设备统一接入与控制。

2 边缘智能技术在物联网集成中的核心支撑

2.1 边缘 AI 推理引擎的轻量化部署

边 2.1 边缘 AI 推理引擎的轻量化部署边缘智能最关键的是要让设备自己处理问题, 这就需要安装 AI 模型来运行。不过相比云计算的平台, 边缘节点的处理器算力不行、存储空间不够大还有电源供应不足这些问题很明显, 所以没法直接使用那些很长很复杂的深度学习模型。现在为了在边缘设备上实现人工智能推理的效果, 主要技术都在想办法把模型变小和优化, 比方说把模型剪裁 (Pruning)、对权重进行量化 (Quantization) 还有用知识蒸馏 (Distillation) 这些办法。

这些技术主要就是为了在尽量保持模型准确度的情况下, 把模型体积和计算需求都给压缩下去, 好让它们能跑到物联网的那些边缘设备里。同时现在有很多专门给边缘用的 AI 推理框架冒出来, 比如说 TensorFlow Lite、ONNXRuntimeEdge 还有 OpenVINO 这些东西, 开发

者就能在各种硬件架构比如 ARM、RISC-V 或者 x86 上面装 AI 模型，还能用 CPU、GPU 和 NPU 这些不同的计算单元来搞加速推理，这样处理速度更快还更省电。

另外，边缘缓存技术也成为了 AI 推理部署中的关键部分。通过在边缘节点上进行共享模型参数和中间的特征数据，让不同设备可以重复使用之前推理过的结果，这样减少不必要的计算量，资源利用率也提高了。这种模型共享加上推理协同的组合方式，特别适合城市监控、车路协同等使用频繁的场景，让整个边缘 AI 集群的运行效率都提高了。

2.2 数据预处理与流式计算框架的集成

在物联网的环境里，边缘设备收集到的数据往往呈现出非结构化的、比较零碎的情况，而且它们变化的速度也是非常快的。所以如果说把所有数据都直接传到云上，这样不光会导致通信资源被大量浪费，还会让整个系统的反应时间变得特别长。因此来说的话，在边缘节点那里部署数据预处理和初步分析的功能，这个做法其实是能够有效增强整个系统性能的最重要措施。

边缘节点需要的数据处理能力比如这些：给数据去除噪声、填补缺失的值、发现异常的数据点、抽取特征、聚合时间窗口内的数据、转换格式和适配协议等等。为了做到这些，应该把轻量的流处理引擎放到边缘平台里面，像是 Apache Edgent 或者 FlinkEdge 这样的框架，能支持收集实时数据、处理数据和转发数据的功能。在这些框架里用户可以自己设定滑动窗口的函数，设置复杂事件处理 CEP 的规则，还有优先级的调度策略这些，这样就能让连续的数据流被智能地处理操作。

以工业环境为例来说，当某设备的传感器数据突然剧烈波动时候，边缘处理框架就能及时识别出背后的‘设备异常’事件并发出预警，而不需要等待中心服务器的响应。再比如智慧安防的应用场景里，通过流处理来判断某段时间内的人群异常聚集的行为，就能够实现秒级的联动响应，这样就极大提高了边缘设备对于突发态势的自主判断和处理能力。

2.3 安全机制嵌入与边缘可信计算模型构建

随着边缘计算被应用到重要基础设施、智慧医疗和智慧交通这些比较敏感领域时候，它的安全性问题也更多人关注。因为边缘节点分布得比较散，资源都是开放的，又离终端很近，所以它们更容易被黑客当成攻击目标，像是数据被偷走、非法入侵或者恶意指令这些危险情况变得越来越多了。

为了保证边缘节点系统的稳定和通信安全，安全方面必须用系统嵌入的方式来设计。首先是边缘节点自己要有身份验证和可靠启动的功能，也就是用 TPM、TE

E 这些硬件保护的方法，让设备从通电开始就建立起整个信任链。然后是处理边缘数据流时候的加密和分开管理，需要用端到端加密技术或者按照属性来管控访问的策略，这样才能让信息在传送和保存时不被窃取或者泄漏

在系统架构方面，可以采用零信任边缘安全模式，也就是不再提前默认所有边缘节点或应用是安全的，必须在每次访问请求时重新检查身份和权限是否正确。另外结合区块链技术也成为可信边缘架构发展的重要方向，区块链技术可以把设备行为和数据流转全部链路记录下来，并且这些记录无法被修改或者能追溯到源头，所以这让整个分布式信任边缘协作体系有了技术基础。通过智能合约自动处理权限管理、访问验证和信誉评分这些规则，这可以提高它们的自我管理能力和整个系统的安全性。

3 边缘计算集成架构的典型实践路径探索

3.1 智慧工业场景下的边缘控制系统实践

在工业 4.0 和智能制造的大环境下，工厂的生产现场正在机械化的方式逐渐转变为数字化和智能化这样的升级过程。传统工业自动化系统主要依靠中心控制器和云平台来实现统一的数据处理和调度任务，但这样的中心化的结构在面对需要高频采集数据、低延迟控制和多源数据交换的情况时，常常由于带宽不足或者网络延迟的问题而无法满足要求。举例来说，比如在高速运转的冲压加工、注塑成型或流水线组装环节，即使只是几毫秒的延迟也可能导致产品质量问题或者安全事故出现。

边缘计算的应用很好改变了工业系统的结构。计算资源被放到靠近设备的地方，像边缘网关这些，就能实时感知设备状态并智能分析。比如有个汽车零件厂，每条生产线都有自己边缘节点，连了很多传感器，一直收集主轴振动、油压、电流、轴承温度这些参数，然后数据传给本地 AI 处理。

在这个系统里，边缘 AI 模型通过学习过去的的数据，建立起运行状态和故障征兆之间的联系。所以当设备出现一些小问题的时候，就能自己发出警报，让维护人员来处理。比如说模具振动次数太多超过安全线的时候，系统会觉得可能有模具松动的危险，就会停下生产线让人来检修。这种提前发现和本地处理的方法，让机器停转的时间减少了差不多 34%，还节省了电力和减少了材料浪费的情况。

更关键的是，边缘系统会和 MES（制造执行系统）还有 PLC（可编程逻辑控制器）直接连接起来，用 Modbus、CAN、OPCUA 这些协议让两边互相传递数据。边缘节点这边不仅能将设备情况传给 MES 做报表生成和统计，

还能接受来自上级的参数调整指令,自己就能调整流程和设备之间的配合。最后构成了从数据采集到智能分析再到工艺执行最后数据闭环的整个流程,这样就让生产的灵活程度和稳定程度都大大提高。

3.2 智慧城市中的分布式边缘集群应用

智慧城市主要目标是要把人、车、物品和环境都全面感知到,然后智能处理和高效管理,它需要很多传感器设备和不断增加的数据作为基础。现在城市里已经安装了很多智能设备,比如摄像头、红绿灯控制装置、垃圾桶传感器还有井盖监测器这些,数量非常多。以前那种以云计算为中心的处理方法在面对大量设备连接、数据频繁上传和需要快速反应决策这三个压力的时候,开始出现中心堵塞、处理速度慢和反应不平衡的情况。

所以城市级别的边缘计算集群模式现在被很多大中城市治理所采用。比如有个省会城市搞了‘智慧安防一张网’项目,政府在街道、商场小区这些地方装了超过150个边缘计算节点,每个节点都带有运算加速模块(比如寒武纪、海思这些芯片),可以在本地跑些简单的视频分析算法,像是认人脸、认车牌、看人动作和发现多人聚集这些事。比如晚上某个小区门口,边缘节点就能自动识别进来的人是不是住户,如果有陌生人长时间待着或者来回走,系统就会马上发出警报并把视频传回去。

在城市交通系统里边,边缘计算对交通控制的优化有很重要用处。边缘节点能实时监测车辆多少、行人密集程度还有路口通行的情况,然后根据本地算法来动态改变红绿灯的时间设置,从而有效缩短了堵车的时间。根据试点区域数据显示,这种调整办法让高峰时段拥堵程度下降了大约18.7%左右,道路通行变得顺畅多了。

还有就是城市路灯和垃圾处理这些方面,边缘计算集群的系统可以把光照数据和人流流动线图这种本地算出来的结果拿来动态调整控制。比如说在办灯光秀的时候,用边缘节点算出每个区域有多少人,自动增加相应的灯光亮度还有安保监控的次数,这样就能让公共设施根据人多人少来分配资源,从而达到提高利用率的目的。

3.3 新能源管理中的边缘感知与协同优化实践

在双碳战略要求下,可再生能源开始变成电力系统里的主要构成。像是风力、光伏这些绿色能源虽然环保且干净,但它们自己存在的波动性和不可操控特点给电网稳定带来很多问题。原来电网调度必须依靠中央系统做负荷预测和调控,但是这种方式跟不上新能源发电变化很快的特点。这时候边缘计算技术就给新能源系统的智能管理带来重要帮助。

以我国西部某个大型风光结合的发电场举例,场里面分布了上百个边缘节点,这些节点会收集风力速度、风的吹向、太阳光的强度、温度湿度情况、电池充电状态还有变流器的工作参数等很多方面的数据。每一个边缘节点里都装了预测模型算法比如LSTM、XGBoost之类的,能够根据现在和历史的环境参数数据,来预测未来5-15分钟功率输出会怎么变化的短期预测,然后结合电力负荷的模型,最后产生出调度用的建议方案。

当风速突然变化的时候,边缘系统能很快发现功率变化的危险,然后自己就让储能系统开始或者减少用电的命令,不用等调度中心回复,这样新能源发电就能稳定连上电网。另外各个场站的边缘节点用边缘协作的协议,把不同场站的信息互相分享还能一起安排储能。比方说A场站猜到风速要变小马上发电量不够,系统会安排B场站早点放电、让C场站晚点充电,这样能做到不同地方的用电高峰和低谷平衡,有效让整个电力系统更稳定也更省钱。

另外,边缘系统还能和市场电价预测的系统进行对接,根据电力价格浮动的变化动态地调整充放电的策略,在低谷电价时候主动去充电,到了高峰期就优先放电,这样就最大化了利润。边缘计算因为它响应速度快和智能协同性的特点,让新能源发电站点从原本孤岛式发电的模式转到协同参与的模式,很大程度上提高了在整个电力系统里面它们的调控能力和市场上价值。

4 结语

边缘计算作为支撑下一代物联网系统架构的关键力量,正逐步从理论构想到落地实践演化。本文从架构优化、核心技术到典型应用场景,全景式梳理了边缘计算在物联网集成中的关键路径与实践成效。可以预见,随着5G、人工智能和新一代嵌入式技术的发展,边缘计算将在更广泛领域中发挥决定性作用。未来,需持续深化云边协同机制,优化资源调度模型,强化安全与可持续性设计,从而构建起真正智能、灵活、高效的物联网系统生态。

参考文献

- [1]王红艳.边缘计算中信息年龄感知的实时任务调度方法研究[D].北京邮电大学,2024.
- [2]董理.移动边缘计算中计算卸载与资源分配问题研究[D].北京邮电大学,2024.
- [3]余奕桦.物联网场景下边缘计算的安全风险法律规制探究[D].北京邮电大学,2024.
- [4]杨淼.物联网中微服务部署与请求调度策略研究[D].北京邮电大学,2024.
- [5]孙司远.移动边缘网络缓存策略及计算任务管理技术研究[D].北京邮电大学,2024.