

边缘计算赋能物联网自动化设备协同控制技术研究

周献水

杭州精鼎玻璃制品有限公司，浙江省杭州市，310000；

摘要：随着物联网和自动化技术的融合不断深化，设备间的实时协同控制需求日益增强。传统依赖云端处理的数据架构在时延、安全和网络依赖性等方面存在诸多瓶颈，限制了智能制造与工业物联网的发展。边缘计算作为新兴的分布式计算架构，通过在设备端或网络边缘进行数据处理与决策，具备低时延、高安全性、强自治能力等突出优势。本文基于边缘计算视角，系统探讨其在物联网自动化设备协同控制中的关键作用，从体系结构设计、协同控制机制到实际应用案例进行分析，旨在为工业 4.0 和智能工厂提供可行的技术支撑路径。

关键词：边缘计算；物联网；自动化设备；协同控制；智能制造；低时延

DOI: 10.69979/3029-2727.25.08.033

1 边缘计算支撑下的协同控制系统架构设计

1.1 边缘计算架构与物联网控制需求的契合性

随着工业物联网（IIoT）的快速发展，自动化设备之间的协同控制成为智能制造的关键支撑。传统以云计算为中心的数据处理架构虽然在算力层面具备优势，但在实际部署中暴露出显著的短板——尤其是在高实时性和强自治需求的控制场景中，存在数据传输延迟大、带宽占用高、服务中断风险高等问题，难以满足复杂现场对毫秒级反应时间的苛刻要求。而边缘计算的出现，正好与这一痛点高度契合，提供了分布式、低延迟、高可靠的解决方案。

边缘计算架构的核心在于将部分计算任务和决策功能前移至离数据源更近的“边缘”节点，如工业网关、边缘服务器、嵌入式控制器等。这些边缘节点具备本地处理能力，可以直接对所采集的数据进行预处理、分析甚至做出初步决策，避免了全部数据上云所带来的通信瓶颈。在制造车间、工业产线、物流配送中心等典型应用场景中，自动化设备如机械臂、AGV 小车、CNC 设备等，常常需要在毫秒级时间窗口内完成相互协作，例如在同一工序节点中实时避障、并行作业、同步调度等。若依赖远程云端进行计算与指令下发，系统将不可避免地产生通信和响应延迟，降低系统整体稳定性，甚至引发设备误动作。

边缘计算提供了“感知-分析-决策-执行”在本地闭环的能力，使得物联网终端具备更强的响应能力与操作自主权。同时，边缘节点可作为本地控制中枢，在断网或云服务异常的情况下仍保持系统局部正常运行，保障生产连续性与安全性。由此可见，边缘计算架构不仅仅是对云端架构的补充，更是在工业自动化控制中实现“前端智能化”的关键基础，与物联网自动化设备对时

效性、稳定性和协同性的需求天然匹配。

1.2 多层协同控制架构模型构建

现在自动化系统越来越复杂，单独一层控制很难同时管好整体效果、部分灵活度和系统靠谱性。所以需要建一个清楚的多层合作控制框架，这是边缘计算能让物联网设备协同控制的重要地方。一般设计时候，这种系统会被分成三层：感知层、边缘层和云层，每层都有自己该做的事，然后通过互相通信的办法把数据和控制逻辑动态分好工然后配合工作。

感知层在系统最下面位置，由各种传感器、摄像头、RFID 标签和执行器等组成，主要任务就是采集现场物理参数比如温度、湿度、电压、压力这些，并做出基础的动作反应。这一层强调数据的完整性还有即时收集，构成整个系统末端感知节点。处于中间层次的边缘层是体系核心部分，这里安排了边缘计算服务器，具备普通级别的运算能力和本地处理数据功能。在这里系统会先处理原始数据，做初步分析，判断是什么类型的事件，运用算法推导，同时协调优化局部任务，根据之前设定好的边缘 AI 策略判断是不是需要传到云上面。最上面的云层有非常强大的计算能力，存储容量也特别大，用来训练 AI 模型，优化整体策略，还能分析过去的数据记录，进行远程维护管理。

通过端边云这三个层次一起工作的结构，整个控制系统就有了本地处理、分级响应和整体优化这样的完整系统。比如说车间里的 AGV 小车要是碰到东西，传感器数据马上就传到边缘层，那边先判断会不会撞上然后改路线，如果边缘层搞不定或者有问题了才会叫云层帮忙。另外边缘节点之间也能互相帮忙，让附近的设备一起动起来，还能平衡工作压力。这种上下左右都配合的机制让系统特别灵活不容易坏，大大提高了资源使用效率，

也让控制更稳定，这就是让工业智能系统从集中管变成自己管的关键技术。

1.3 边缘智能节点的软硬件构成分析

作为协同控制系统的计算大脑和决策中心，边缘节点它的软硬件配置直接决定了系统实时性能和协作能力。硬件上来说，边缘设备要配备高性能的嵌入式处理器，像 ARM 的 Cortex-A 系列芯片、英伟达的 Jetson 或者英特尔的 Movidius 这些，这些处理器要有足够的算力和能耗效率。为了保证各个设备之间能顺利通信，节点应该装上多种通信协议的接口模块，比如说 ZigBee、WIFI、Modbus、LoRa 还有 5G 这些，这样才能和上面的云平台、同一层的其他边缘设备以及下面的传感器设备保持顺畅连接。另外像电源稳定、耐高温低温、防灰尘抗震这些工业级别的设计要求，也是布置边缘硬件时候必须重点关注的方面，特别是在制造业、电力行业、采矿或者交通这些比较复杂的应用场景里更加重要。

在软件部分，边缘节点需要安装容易扩展和小巧的操作系统平台，例如 EdgeX Foundry、KubeEdge、OpenNESS 还有 Ubuntu Core 这些，这些平台能处理多个任务，还有微服务安装和容器管理，让边缘节点运行变得更灵活更好维护。实时控制系统（RTOS）是用来让控制任务按时完成的，可以避免因为延迟问题导致控制出问题。另外边缘 AI 推理工具像是 TensorRT、ONNX Runtime、TFLite 这些东西，能让边缘节点自己就能运行和推理 AI 模型，做到比如识别图片内容、发现故障、提前维护这些功能。本地存数据的库、实时处理框架、自己检查问题的系统，还有远程升级模块这些都是软件系统中不能少的部分。

软硬件的整体设计结合，让边缘智能节点不但可以‘看得见’‘算得快’‘控制得准’，同时还能做到‘学得会’和‘修得好’。它们作为系统中最小的但是最强有力的自主单元，是物联网设备实现‘协同智能’的重要支持部分。以后随着芯片计算能力、边缘 AI 算法和软件系统的不断进步，这些节点会变得有更强自我组织、自我进化和自我保护能力，然后推动协同控制系统进入真正的泛在智能自治时代。

2 边缘计算促进下的协同控制机制创新

2.1 低延迟智能决策机制构建

在物联网的自动化系统里面，控制的精度和反应速度如何这对生产效率还有质量都有直接关系。尤其是在那些需要及时反应的工作情况里，比如工业机器人干点焊活、做数控机床加工或者快速分拣东西时候，系统对于指令的延迟时间差不多都要控制在几毫秒以内。以前

那种云计算方式的处理架构因为要把大量数据传到云端处理完再传回来，所以就算网络好的情况下都会有几十到几百毫秒的延迟，这种延迟要是碰到需要重复操作很多次或者特别精细的活计，很容易让加工出现误差或者机器抽风，最后导致整个系统性能变差甚至出安全问题。

边缘计算因为能就近处理的特性，让设备从感知到动作的过程变得更短。在边缘节点里装些轻量化的人工智能算法，比如 TinyML 或者 Edge AI 这些优化模型框架，不需要连云端就可以自己完成推理和实时判断。这些算法经过裁剪或精简处理后，运算需要资源大幅缩减，不过还能保持不错的识别准确率和操作速度。比如说在机器人抓东西的系统里，边缘 AI 可以快速认出被抓物体的位置姿势和移动快慢，整个过程从采集图像到调整动作只需要 10 毫秒就能完成，这样响应速度和准确度都有了很大提高。

另外的话边缘计算平台还有学习的能力，在长期使用过程中可以根据环境变化和设备的反馈来调整自己的决策策略，逐渐提高适应能力和稳定性。和原来那种比如说传统的云控制中心和终端模式相比，这种低延迟、本地化智能决策的方式，更能满足未来自动化系统对于快速反应、自主性以及稳定可靠这些重要要求。

2.2 基于边缘智能体的分布式协同策略

随着物联网设备数量的越来越多，单一的控制节点已经很难满足复杂系统统一管控需求。特别是在智能工厂、智慧物流和自动化仓储这些领域里，设备类型多、功能也不一样，怎么让不同设备之间有效协作成了系统设计的重点。边缘计算用了边缘智能体的思路，让每个节点都有了独立处理数据、分析信息和控制的能力，这样就能做到系统的分布式管控。

边缘智能体不只是自己能做决策，更关键的是它们可以通过通讯协议横向连起来，组成多个智能体合作的网络。比如说在智能仓库里，搬运机器人、分拣系统、传送轨道还有智能货架这些设备都装了边缘控制器，一边完成自己手头的任务，一边用 MQTT、DDS 这些延迟很低的通讯协议互相通消息，告诉大家各自的任务进展然后一起商量路线怎么走。整个系统可以在几毫秒里就根据其他设备在哪、正在干什么、任务谁更重要这些情况，随时调整自己的动作，这样就能做到一边躲开障碍、一边同时干活、一边分配资源，效率特别高。

这种分布式的方案极大提升了系统的扩展性和容错能力。哪怕某一个节点出问题，别的节点也能自己运行并重新分配路径，这样保持了整个系统的稳定性。还有通过协作学习的方式，各个边缘智能体还能分享经验

的数据,让算法的知识可以在不同节点之间迁移并自我进化。这种网络化的分布式控制方案为实现真正智能自治的系统提供了坚实基础。

2.3 数据融合驱动下的动态控制调整机制

在传统的自动控制系统里,控制方法通常是基于固定参数和静态模型设计的,这就很难处理环境变化和系统不稳定带来的问题。现在物联网的环境下面,设备的运行环境更加复杂多样,比如温度变化、湿度变化、电压不稳、机械磨损等等都会对系统的运行状态造成影响。要是继续用静态策略控制的话,经常会让系统反应变慢或者控制不够准确,从而影响生产质量和设备安全。

边缘计算在这种情况下体现出特别的好处,通过在边缘节点那里把各种不同来源的数据整合起来,搭建起实时动态的系统认知模型。边缘设备可以连接视觉图像、温湿度传感器、加速度传感器还有电流电压信号这些不同类型的数据来源,在本地完成数据清洗、特征提取和多模态数据的融合分析。靠着边缘 AI 平台的帮助,这些混合后的数据就能马上生成预测模型,对那些重要的指标比如工件偏差、运行负载、设备出毛病可能性这些都进行实时评估。

当系统发现运行数据和模型预测的数据不一样时候,边缘控制器就会自己改变控制的办法,比如说改执行器的动作曲线、拖延操作时间、优化输出功率这些。比如说在精密装配的时候,边缘设备发现温度变高让机械膨胀了,这个时候装配精度可能会出问题,系统就会马上调整装配路径和用力的参数,保证装配的东西能符合最开始的要求。

这个机制不仅提升自动化系统的适应环境能力,而且控制策略从预先设定好的到动态调整的改变,从而让系统拥有及时优化和错误自动纠正功能,这也是做到智能制造和边缘智能完整的闭环的必要步骤。

3 边缘协同控制技术的实际应用与发展趋势

3.1 智能制造中的边缘协同控制应用实践

在现在智能制造里,边缘计算已经成为重要的驱动力量。拿一个智能装配线举例子,他们安装了三十多个边缘节点,这些节点各自管装配检查、物料分配和监控设备状态,然后把本地控制系统连起来,组成了完整的自动控制网络。这套系统不仅让生产速度变快了,还让设备坏掉的次数和用电量都明显减少。根据真实数据,和过去中央控制系统比较,新系统反应快多了提高 42%,省电 18%,这充分说明边缘计算带来的协同控制效果确实厉害。

3.2 智能交通和能源系统中的使用

尝试在智能交通系统里,边缘计算技术的用途很多,比如红绿灯的控制、道路情况分析和自动驾驶配合系统。城市路口设置的边缘节点设备能及时获取车流数据,还能和附近信号灯系统配合起来完成绿灯波段调节。在智能电网方面,边缘节点可以检测分散式电源和用电负荷变化情况,这样就能一起调整送电方案,保证小电网稳定工作。这些系统最重要的特点是单独的局部能自己管理,但整体上又能协作配合,而边缘计算就是支撑这种特点的基础性关键技术。

3.3 未来发展趋势和挑战的展望

虽然现在边缘计算技术在协同控制中使用已经取得了挺多不错的成果,但还是存在不少的问题需要解决。一是边缘节点的计算能力其实是有限制的,如何在做的轻量化和保持智能化中间找到平衡的办法,这可能是将来设计模型时特别要注意的地方。二是不同系统之间的协作机制现在迫切需要制定统一的标准和协议,这样的话才能保证跨平台协作的时候不会出现不兼容的情况,同时安全性也能够得到保障。另外关于边缘 AI 的安全问题也要多下功夫,防止可能会发生的攻击行为或者数据泄漏的风险。可以预见的是,未来的边缘协同控制系统应该会朝着能自我学习、自我调整、自我修复这样的方向发展,逐渐变成物联网智能自治系统中最关键的核心部分。

4 结语

边缘计算正在以其分布式、低延迟、智能化的特性,重塑物联网自动化设备的控制模式。通过在边缘侧部署智能控制节点,不仅提升了系统的响应速度与自治能力,也拓展了协同控制的适用边界。随着 5G、人工智能与工业物联网的深度融合,边缘计算赋能的协同控制系统将在更多行业中落地应用,助力构建高效、安全、智能的自动化未来生态。

参考文献

- [1] 张红荣,张峰.物联网数据架构设计:理论框架与实践应用研究[J].物联网技术,2025,15(11):111-114+18.
- [2] 黎志生,覃健诚,王磊.基于边缘计算和云融合构建智慧农用集群系统[J].自动化与仪表,2025,40(05):1-6.
- [3] 明廷谦,吕占彪,王斌,等.基于物联网的变电站自动化设备智能诊断与维护系统研究[J].电气技术与经济,2024,(06):200-202.