

工业互联网中边缘计算与云计算协同调度策略研究

徐 浩

中国联合网络通信有限公司青岛市分公司 山东青岛 266071

摘 要：工业互联网规模化发展推动计算架构向分布式协同转型，边缘计算低时延与云计算全局优化能力形成互补，破解了工业数据实时处理与全局资源配置的核心矛盾。本文聚焦工业场景需求，突破资源异构整合、智能任务卸载等四大技术瓶颈，形成标准化整合等技术体系，结合三大典型场景构建“技术—场景—效能”路径，实现任务精准分配、资源高效利用与系统安全稳定，为协同调度系统落地赋能制造业数字化转型。

关键词：工业互联网；边缘计算；云计算；协同调度

引言

在新一代信息技术与制造业深度融合的背景下，工业互联网已成为产业升级的核心载体。海量工业设备接入与高频数据爆发式增长，对计算架构的实时响应能力与全局优化水平提出双重要求。传统单一计算架构难以适配，云计算集中式处理无法满足毫秒级实时控制需求，边缘计算资源受限制约全局协同效能。边云协同调度虽为工业互联网高质量发展的关键支撑，但当前仍面临资源异构适配困难等四大突出问题，严重影响技术落地。基于此，本文系统研究边云协同调度关键技术突破路径，结合典型工业场景构建实践体系，为破解行业痛点、推动工业数字化转型提供切实的理论与实践参考。

一、工业互联网协同调度关键技术突破

1. 资源异构整合与动态分配

资源异构整合通过标准化技术打破跨层级、跨设备协同壁垒。边缘层基于容器化技术构建轻量级计算节点集群，采用Spring Cloud框架（Spring Cloud Framework, Spring Cloud）微服务架构，以“高内聚、低耦合”为设计圭臬，将系统功能解构为数据采集、实时处理、边缘智能分析与资源调度四大核心模块，各模块间通过消息总线实现松散耦合的交互机制，远程字典服务（Remote Dictionary Server, Redis）分布式缓存构建多级缓存架构，降低通信开销。数据采集模块整合多协议解析引擎，支持开放平台通信统一架构（Open Platform Communications

Unified Architecture, OPC UA）、Modbus协议（Modbus Protocol, Modbus）、过程现场网络（Process Field Net, PROFINET）、以太网控制自动化技术（Ethernet for Control Automation Technology, EtherCAT）等主流工业协议的动态加载。实时处理模块采用多线程并行采集与零拷贝技术，使单节点数据吞吐量突破50000点/秒；边缘智能分析模块内置轻量级AI推理引擎，实现1ms级端到端时延；资源调度模块基于Kubernetes构建动态分配体系，通过自定义调度器实现容器实例的智能伸缩与故障迁移。

这种分层解耦的设计模式，既保障了各模块的专业化演进，又通过标准化的交互接口实现了系统整体的高效协同，为工业互联网场景下的边云协同调度提供了可扩展的技术框架。

云端层搭建统一工业平台即服务（Platform as a Service, PaaS）平台，该平台基于领域驱动设计（DDD）方法论，对复杂业务逻辑进行系统化拆分，形成多个可独立部署且具备弹性扩展能力的微服务模块。在基础设施支撑方面，通过集成Eureka服务注册中心实现微服务实例的自动化发现与管理，配合Spring Cloud Config配置中心完成配置参数的动态更新与版本控制，确保系统配置的实时性和一致性。数据存储体系采用混合架构设计，其中Apache Cassandra分布式数据库针对工业时序数据特点进行优化，实现PB级数据存储能力的同时，将写入性能提升至百万级/秒，查询响应时间控制在毫秒级，MongoDB文档数据库（MongoDB Document Database, MongoDB）结合分布式文件系统构建对象存储服务，Redis集群提升热点数据访问性能。计算框架层以

个人简介：徐浩，男，1977年9月，汉族，山东烟台，本科，工程师，计算机网络专业方向。

容器编排系统 (Kubernetes Container Orchestration System, Kubernetes) 为核心, 自定义调度器扩展原生调度能力, 支持容器实例自动伸缩与故障迁移, 细粒度资源配额管理使集群整体资源利用率提升至85%以上^[1]。

动态资源分配依托智能算法实现供需精准匹配。在边缘计算层面, 基于Kubernetes构建的监控体系可实时采集CPU利用率、内存占用、网络吞吐量及存储容量等关键指标, 采样周期最短可设为100ms。通过定制化调度器, 系统能够依据资源使用效率与任务优先级进行动态调节, 其中内置的负载预测模块可分析历史数据趋势, 提前预判资源需求变化, 配合容器实例的弹性伸缩机制, 实现计算资源与业务负载的实时匹配。云端协同调度采用资源感知型智能决策引擎, 该引擎整合业务负载特征与网络传输质量, 自动优化计算任务在边缘与云端之间的分配策略, 深度强化学习算法构建多目标优化模型, 可综合评估任务紧急程度、资源利用率、网络带宽占用及能耗成本等多维因素, 任务分配延迟优化至5ms以内^[2], 抢占式调度机制保障突发性关键任务及时响应。

2. 智能任务卸载策略

任务特征评估体系为卸载决策提供量化支撑。建立多维度任务评估模型, 从延迟敏感度、计算复杂度、数据体量三个核心维度对工业任务进行量化, 传统任务评估常缺统一量化依据, 延迟敏感程度量化区间设定为0-1 (其中数值1对应毫秒级实时响应诉求), 计算密集度以每秒千兆次浮点运算 (GFLOPS) 为计量单位, 数据体量以GB衡量, 赋予三者权重系数分别为0.5、0.3、0.2, 通过加权计算得出任务分配优先级, 数值大于0.6的任务分配至云端, 否则由边缘节点处理。

差异化卸载模式适配多元场景。实时控制类任务如设备故障预警 (振动分析、温度监测)、人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 视觉质检、自动导引车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 路径规划等, 由边缘节点本地处理, 依托边缘层1ms端到端时延、1Gbps上行带宽保障实时响应。深度分析类任务如生产计划优化、供应链协同、设备寿命预测等, 由云端承担, 利用大规模计算资源开展全局数据分析与模型训练。中等复杂度任务采用边云协同卸载, 边缘节点完成数据清洗、聚合、过滤等预处理, 云端进行深度分析与模型优化, 传统全量传输图像易致带宽冗余, 工业相机缺陷图经边缘AI, 仅传不合格品至云端, 合格图像在边缘节点本地留存7日后自动清除, 降低传输开销^[3]。

任务分片与动态调整提升卸载灵活性。整合Apache Storm流式计算框架, 以分片并行策略均衡分配数据处理负载。建立任务卸载动态调整机制, 边缘节点实时评估负载状态, 当CPU占用率、内存使用率或任务队列长度超过阈值, 系统自动转移非紧急任务至云端, 防止节点过载延迟。资源池按业务波动动态调整, 高峰增容、低谷减负, 实现资源按需分配。

3. 自适应负载均衡算法

传统微服务易遇路由僵化、负载突变适配不足问题, 微服务层面搭建智能路由与弹性伸缩机制。本研究基于轻量化的Istio服务网格架构搭建智能路由体系, 运用智能请求分发策略实现跨节点负载的动态均衡, 将单节点服务响应时长优化至5毫秒。同时, 结合容器化弹性伸缩技术与深度学习预测算法, 系统可精准预判业务负载变化趋势, 并提前触发容器实例的自动化扩缩容调整, 避免负载突变导致的服务不稳定。

传统资源调度常陷单目标优化、负载失衡困境, 资源调度层面实现多目标负载均衡的优化升级。本研究构建多目标优化算法, 融合关键指标评估任务优先级, 预判负载变化动态调资。云端层通过Ribbon客户端负载均衡组件 (Ribbon Client-side Load Balancing Component, Ribbon) 与Feign声明式REST客户端 (Feign Declarative REST Client, Feign) 实现客户端负载均衡, 结合Hystrix服务熔断与降级组件 (Hystrix Service Circuit Breaker and Degradation Component, Hystrix) 提供服务熔断与降级机制, 避免单个服务故障引发连锁反应, 提升系统整体稳定性。Kubernetes支持万级节点规模管理, 自定义调度器基于应用特征和资源约束实现智能调度, 容器实例故障迁移机制保障服务持续运行。

边云协同负载均衡达成全局优化。边缘层针对资源有限特性, 采用任务分片技术将复杂任务分解为小型计算单元, 并行调度提升处理效率。云端层通过资源预留和超卖策略, 提升集群资源利用率, 结合分布式消息队列Apache Kafka分布式消息队列 (Apache Kafka Distributed Message Queue, Apache Kafka) 实现消息异步传输, 缓解峰值压力。建立边云负载状态同步机制, 边缘节点实时向云端反馈负载状况, 云端根据全局负载分布调整任务分配策略在突发负载情况下将边缘节点非核心任务迁移至云端, 实现边云整体负载均衡。

4. 数据安全与隐私保护

多层次防护体系覆盖全链路。物理层面, 关键边缘

节点部署可信平台模块（Trusted Platform Module, TPM）与安全启动（Secure Boot）技术，保障从硬件到系统初始化全流程的可信属性，重要部署环境采取物理隔离、视频监控、访问授权等防护措施，降低物理破坏、篡改风险。在系统架构中，边缘节点部署轻量级安全组件，按最小权限策略严格约束应用与用户操作。核心节点启用动态完整性校验与行为异常分析机制，实时追踪关键系统区域的非法篡改活动。云端平台打造多层级安全防护体系，集成统一认证与权限管理模块，采用OAuth 2.0及JWT技术实现单点登录，支持多因素身份验证机制。通过RBAC权限模型与资源标签体系结合，实现精细化权限分配，同时安全审计系统完整记录关键操作轨迹，为安全事件追踪提供可靠依据^[4]。

网络通信上，基于零信任架构搭建访问管控体系，节点、设备、用户接入前必经严格验证授权。边缘节点间采用精细微分段，管控横向流量防攻击扩散。数据传输用端到端加密，基于QUIC协议自适应传输，多路复用与零RTT握手使连接时延低于5ms，分布式探针实时监测并优化拥塞，提升吞吐。工业时序数据用增量压缩，减少65%传输量，解压延迟微秒级。

智能防御强化隐私保护。敏感数据采用加密存储与脱敏处理，边缘节点本地存储原始数据，仅向云端传输处理后的标准化数据，减少核心数据暴露风险。部署IDS/IPS，实时监测边缘网络流量并识别异常，即时阻断异常通信。运用边缘智能防御，以AI和机器学习预测威胁、主动响应，在边缘节点部署轻量模型，分析数据定位攻击。借联邦学习等隐私技术联合训练模型，提升适应力。发现异常，边缘节点可隔离恢复或联动处置，构建完整防御体系。

二、工业场景下的协同调度实践路径

1. 智能制造车间场景

智能制造车间构建“终端—边缘—网络—云端”四层协同架构，终端层接入工业机器人、工业相机、制造执行系统（Manufacturing Execution System, MES）扫码器、温湿度传感器等设备，通过OPC UA、Modbus、消息队列遥测传输协议（Message Queuing Telemetry Transport, MQTT）等工业协议高效采集数据，边缘层12台服务器与45网关，支持百万点位接入，读写时延低，集成实时数据处理引擎与边缘智能分析单元，基于5G专网切片技术实现上行带宽1Gbps，端到端时延1ms，满足实时控制需求。网络层采用5G专网，系统部署4个5G宏基站、3

个5G微基站、9套室内分布系统及2台多接入边缘计算（Multi-access Edge Computing, MEC）设备，通过网络切片技术为不同业务分配专属通信资源：AGV调度系统分配10ms级超低时延切片，视频监控业务配置高带宽切片，实现各业务独立运行且互不干扰。云端层与工业互联网平台深度集成，具备工业大数据分析、AI算法训练及跨厂区协同调度能力^[5]。

传统调度流程易出现响应滞后、协同效率不足的问题，本场景通过边云协同实现全流程优化升级。边缘层对设备运行数据进行实时处理，利用振动监测与温度分析技术实现设备故障提前预警，AI视觉检测模块可精准识别产品表面缺陷，AGV智能路径规划系统确保实时调度高效运行，资源调度模块基于Kubernetes实现任务动态调度与资源管理，容器实例自动伸缩机制根据生产负载调整计算资源。云端以历史数据训练模型并定期推送更新，统筹跨产线排产与设备全周期管理。边缘实时处理AGV调度决策，云端优化全局路径。设备故障预警由边缘节点实时采集振动、温度数据，本地分析后触发预警，云端汇总历史故障数据深度分析，优化预警模型参数。实践成效显著，设备响应时延降低，运维效率提升，产品质量与生产效率改善，达成直发率升、库存降、成本减、检出率增目标。

2. 智慧园区能源管理场景

智慧园区能源管理构建边云协同调度体系，边缘层部署于配电房、光伏电站、储能设备等关键节点，接入电压、电流、功率、光照强度、储能容量等传感器数据，单节点数据吞吐量可达50000点/s，实时处理能源供需数据，通过本地计算快速响应负载变化，实现分布式能源就地消纳与负荷均衡。网络层采用5G与MEC结合技术，数据无须回传核心网即可就近处理，保障传输低时延与高可靠。云端层构建能源管理平台，整合园区所有能源数据，进行全局能耗分析、趋势预测与优化调度。

协同调度提升能源利用效率。边缘节点实时采集光伏出力、电网负荷、储能状态等数据，本地计算后控制储能充放电与分布式电源出力，保障局部能源供需平衡。云端平台基于海量历史能源数据训练深度学习模型，预测园区能源消耗趋势与光伏出力情况，制定全局能源优化调度方案，动态调整储能设备充放电策略、分布式电源运行参数及电网购电计划。用电高峰调度储能放电与光伏出力缓解电网压力，低谷时段控制储能充电提升新能源消纳率。极端天气情况下，云端提前预测能源供需

缺口，制定应急预案，边缘节点实时执行调度指令，保障能源供应稳定。

安全防护方面，边缘节点部署轻量级防火墙与异常检测模块，防止恶意入侵与数据篡改，能源数据传输采用端到端加密技术，云端平台构建安全审计系统，记录能源调度所有操作，支持安全事件追溯，保障能源数据安全与调度可信。

3. 跨域协同供应链优化

跨域协同供应链构建分布式协同调度体系，边缘层部署于生产企业车间、仓储中心、物流枢纽等节点，接入生产进度、库存水平、物流位置、温湿度等数据，多协议解析引擎实现异构设备统一接入，数据采集连续性通过心跳检测与超时重连保障。云端层构建跨域供应链协同平台，整合供应链各环节数据，实现可视化管理与优化调度。

协同调度打通全链条数据壁垒。边缘节点实时采集生产设备运行状态、仓储库存数据、物流车辆位置信息，本地处理后生成标准化数据，紧急数据（如订单异常、物流延误）通过5G增强型移动宽带（Enhanced Mobile Broadband, eMBB）以高优先级数据即时传云，质检等关键数据准实时送，普通类数据（如设备运行日志）按预设周期批量上传，归档类数据（例如历史监控视频）按需调取^[6]。云端平台基于大数据分析实现供应商选择、库存布局、物流路径全局优化，结合AI模型预测市场需求变化，动态调整生产计划与物流方案，跨企业协同排在云端统筹计算，实现供应链资源优化配置。

典型应用中，仓储边缘节点实时监测库存，低于阈值自动触发补货请求，云端调度就近仓库并优化物流路径。生产企业边缘节点实时反馈生产进度，云端平台根据订单需求与生产进度，调整跨企业生产任务分配，保

障订单按时交付。物流环节边缘节点实时跟踪车辆位置与货物状态，云端平台动态优化物流路线，规避拥堵路段，提高物流效率。

结论

边云协同调度有效解决了单一计算架构难以兼顾实时响应与全局优化的行业难题。本文通过构建资源异构整合、任务分级卸载等技术体系，突破四大核心瓶颈，经三大典型场景验证，显著提升生产效率、能源利用率与供应链协同能力，形成完整解决方案。未来需持续优化异构资源适配精度与负载均衡算法，完善安全防护策略，拓展应用领域，为工业数字化转型提供更强劲的技术支撑。

参考文献

- [1] 曹鹏, 王家华. 工业互联网中的边云协同架构与边缘计算平台功能优化研究[J]. 中国宽带, 2025, 21(11): 4-6.
- [2] 牛文博. 云边协同架构下基于深度强化学习的云制造调度方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2024.
- [3] 代丹. 面向工业互联网的边缘计算安全风险评估与防御机制研究[J]. 科技视界, 2025, 15(09): 16-19.
- [4] 席艳. 云边协同架构下的物联网实时计算优化研究[J]. 互联网周刊, 2025, (22): 79-81.
- [5] ECC发布《边缘计算与云计算协同白皮书2.0》、《5G时代工业互联网边缘计算网络白皮书》、《工业互联网边缘计算节点白皮书1.0》三大白皮书[J]. 自动化博览, 2021, 38(02): 3.
- [6] 高鹏佩, 宋纯贺, 曾鹏. 面向应用领域的工业互联网边缘计算模型[J]. 自动化博览, 2023, 40(02): 36-39.