

基于边缘计算的拌和站自动控制系统实时性优化研究

韦相安¹
WEI Xiang'an

摘 要

面对传统拌和站控制系统在高实时性场景下暴露的通信延迟以及控制响应不稳定问题,文章基于边缘计算开展控制架构的搭建,系统开展了集中式控制链路时延放大以及资源竞争机理分析。凭借提出的边缘节点分布式部署方式、多级任务优先级调度机制以及数据压缩以及同步策略,搭建起边缘—本地—云端协同控制体系。将 1:4 缩比实验平台当作依托来开展 72 h 连续压力测试工作,揭示出边缘侧在高负载以及网络干扰条件下对系统响应以及控制精度的提升效果。研究结果显示,该架构可以极大程度上降低控制响应时延并提升计量稳定性,让系统连续稳定运行的目标得以实现。相关研究为工业现场实时控制系统的结构优化以及性能提升提供了可靠的技术支撑。

关键词

边缘计算; 实时控制; 任务调度; 数据压缩; 协同控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.005

0 引言

拌和站作为混凝土生产环节中的核心设备,其自动控制系统需满足复杂工况下对精度与响应时效的双重要求。当前传统拌合站多采用“局域网络+现场 PLC”本地控制模式,在实现远程监控与调度过程中需依赖集中式管理平台,受限于公网通信质量、设备兼容性差异与多系统融合改造协调等问题,已难以支撑毫秒级闭环控制任务的时序稳定。边缘计算作为一种贴近数据源、具备低延迟特性的分布

式处理模式,为重构控制链路提供新思路^[1]。本文聚焦于拌和站生产过程中的实时性优化难题,旨在打破传统架构的性能瓶颈。区别于现有的通用型工业边缘网关研究,本研究的创新性体现在物理工艺特性与计算架构的深度解耦与重构:传统研究多侧重于边缘侧的数据协议转换或通用的流量负载均衡,未能解决拌合过程中“强机械振动干扰”与“毫秒级配料精度”之间的强耦合矛盾。本文通过在边缘侧嵌入具有物理特征感知的动态窗口滤波算法,并配合 PREEMPT_RT 内核的硬实时调度,实现了控制逻辑从“数据驱动”向“工艺特征驱动”的转变,解决了通用架构在极端工况下确定性时序丢失的问题。

1. 南宁兴典混凝土有限责任公司 广西南宁 530000

- 测方法研究[J]. 智能计算机与应用, 2022,12(3):139-142.
- [11] Zhu Xiaojin, Ghahramani Z, Lafferty J. Semi-supervised learning using gaussian fields and harmonic functions[C]// Proceedings of the 20th International conference on Machine learning (ICML-03). New York: ACM, 2003: 912-919.
- [12] 陶显, 侯伟, 徐德. 基于深度学习的表面缺陷检测方法综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(5): 1017-1034.

【作者简介】

姚永芳(1975—), 女, 湖南常德人, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 模式识别、人工智能、故障诊断、软件工程。

丁永昌(1997—), 男, 浙江金华人, 博士研究生, 研

究方向: 软件缺陷检测、人工智能。

陈林君(1996—), 男, 江西九江人, 博士研究生, 研究方向: 类不平衡、模式识别。

廖珂(1997—), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 研究方向: 类不平衡、模式识别。

荆晓远(1971—), 通信作者(email:jingxy_2000@126.com), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 研究方向: 模式识别、人工智能、故障诊断、软件工程。

(收稿日期: 2025-11-12 修回日期: 2026-07-08)

1 系统实时性问题分析

1.1 拌和站系统实时需求

拌和站自动控制系统高度耦合于其物理工艺流程，其控制核心涵盖配料计量、物料输送、搅拌混合与成品出料四个阶段，要求各环节具备严格的实时性匹配。系统实时性可细化为三个关键指标：数据传输延迟、控制指令响应时间与参数调节实时性。其中，数据传输延迟体现为采样信息从传感器到边缘节点处理完成的时间间隔；控制响应时间指运算完成至驱动执行机构的反应周期；参数调节实时性则反映系统对设定值变化的动态跟踪能力。三者之间存在联动放大效应，任一指标劣化均可能引发控制精度下降与产能效率波动^[2]。因此，精确量化并分解各环节延迟特性，是优化边缘控制系统架构与布设策略的基础。

1.2 现有架构瓶颈分析

当前多数拌和站仍采用以现场 PLC 为主、局域网络支持的本地控制架构，控制链路复杂，依赖局域网稳定性与子系统协同能力。由于接口不统一、数据采集与指令下达存在延迟，系统难以实现确定性时序控制。同时，ERP 与控制系统数据交互薄弱，任务状态和参数信息难以实时同步，进一步影响响应效率。该架构在长距离数据传输过程中引入不可控时延与抖动特性，使控制信息难以保持确定性时序。同时，云端控制任务通常以虚拟化方式运行，受多租户资源调度机制影响，计算资源分配存在竞争与排队现象，易造成控制周期波动。此外，云端控制逻辑与现场执行对象在空间上解耦，系统对网络异常和节点失效的依赖程度较高，控制连续性与时序一致性难以保障^[3]。上述因素共同构成现有集中式架构在高实时性控制场景下面临的主要结构性瓶颈。

2 实时性优化方案设计

2.1 边缘节点部署架构

基于前文对传统集中式架构中时延放大效应与资源竞争机理的深入分析，本研究旨在通过重构物理部署逻辑与任务调度算法来打破实时性瓶颈。下文将详细阐述基于边缘计算的三层协同方案及其关键算法实现。

针对云端集中控制架构的实时性瓶颈，提出基于边缘计算的三层协同部署方案。在物理空间层面，于配料仓、搅拌楼、成品料斗等关键区域布设边缘节点，其中配料仓节点采用 IP67 防护等级，直接安装于电子皮带秤控制柜内，通过 RS485 总线采集 6 路称重传感器数据；搅拌楼节点配备双网口，通过 Modbus TCP 协议连接搅拌机电流互感器、温度传感器及液压阀组 IO 模块；成品料斗节点则集成 RFID 读写器，

实时跟踪混凝土运输车身份标识。

逻辑架构构建“边缘节点 - 本地服务器 - 云端平台”三级体系：边缘层以 ARM Cortex-A53 处理器为核心，搭载 4 GB 内存与 64 GB eMMC 存储，运行实时操作系统（如 FreeRTOS），实现毫秒级数据采集与指令生成；本地层部署 X86 工控机，通过千兆以太网汇聚各节点数据，运行 OPC UA 服务器提供数据中转；云端层采用阿里云 IoT 平台，负责历史数据分析与远程运维。边缘节点功能聚焦两类核心任务：实时数据采集方面，对配料称重信号以 500 Hz 频率采样，经 FIR 低通滤波后生成质量流量值；控制指令生成方面，依据预配方动态计算骨料皮带机变频器输出频率，响应延迟控制在 50 ms 内。当检测到搅拌机电流异常（超过额定值 15%）时，边缘节点可自主触发紧急停机协议，无需依赖云端决策。该架构通过业务解耦实现实时性跃升，如图 1 所示。

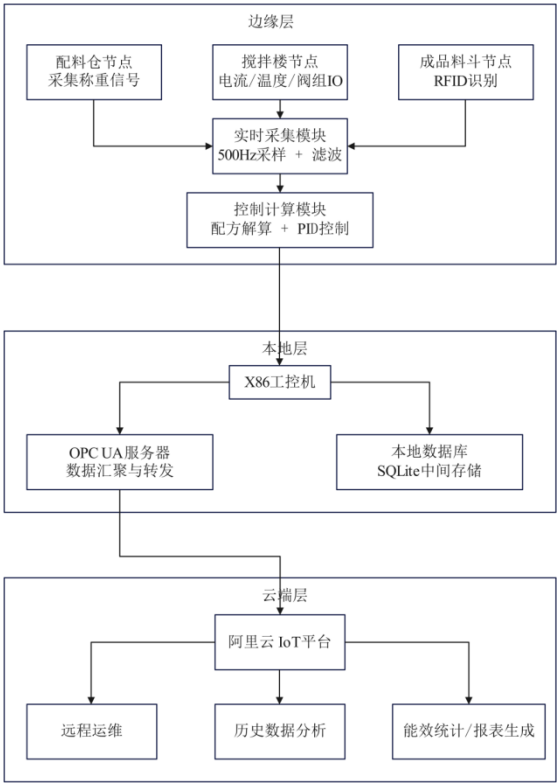


图 1 基于边缘计算的拌和站系统融合架构图

在完成“边缘节点 - 本地服务器 - 云端平台”的物理与逻辑拓扑构建后，系统虽然具备了分布式处理的硬件基础，但前端传感器采集的原始数据仍面临非平稳噪声干扰。因此，需在算法层面进一步优化，以确保输入控制模型的信号质量。

2.2 实时数据处理算法优化

针对边缘节点采集的实时数据噪声干扰问题，提出改进型滑动窗口滤波算法^[4]。传统均值滤波在配料称重信号处

理中易导致相位滞后, 本方案采用动态窗口宽度调整机制: 当检测到传感器读数突变率超过阈值 (如骨料流量变化率 $>5 \text{ kg/s}^2$) 时, 自动将窗口宽度由 50 点收缩至 10 点, 显著提升动态响应速度; 稳态阶段则恢复至 50 点以增强噪声抑制。对于搅拌机电流信号中的周期性干扰 (如电机启停冲击), 算法引入频域补偿因子, 通过傅里叶变换识别主干扰频率 f_{noise} , 在窗口内对特定频段分量进行衰减。滤波后数据质量提升可有效降低控制误差, 以水泥计量为例, 流量波动标准差从优化前的 0.8 kg/s 降至 0.3 kg/s 。滤波过程数学描述为:

$$y_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-k}^t [x_i \cdot H(f_i)] \quad (1)$$

式中: y_t 为 t 时刻滤波输出值, 单位为 kg/s ; N 为动态窗口宽度, 单位为点; k 为窗口起始偏移量, 单位为点; x_i 为 i 时刻原始采样值, 单位为 kg/s ; $H(f_i)$ 为频域补偿函数 (无量纲), 表示为 $H(f_i) = 1 - \alpha \delta(f_i - f_{\text{noise}})$ (α 为衰减系数, 取 $0.6 \sim 0.8$, δ 为狄拉克函数)。该算法通过边缘节点 ARM NEON 指令集加速, 单次计算耗时小于 0.2 ms 。

为优化边缘节点计算资源分配, 设计多级任务优先级调度机制^[5]。将控制任务划分为三个优先级: 最高级 (Level 1) 为安全相关任务 (如搅拌机过流保护、急停触发), 采用硬件中断直接响应, 延迟不超过 1 ms ; 中级 (Level 2) 为关键控制任务 (如配料 PID 调节、卸料门开度控制), 通过实时任务队列处理, 确保周期稳定在 50 ms ; 低级 (Level 3) 为数据预处理与通信任务 (如滤波计算、本地数据缓存), 采用时间片轮询调度。当 Level 1 任务触发时, 立即抢占 Level 2/3 任务资源, 并在事件日志中记录抢占次数与时长。该机制在某工程单位边缘节点部署后, 搅拌参数调节任务完成率由 87% 提升至 99.5% , 且未出现紧急停机响应超时案例。

上述边缘侧的算法加速与任务调度保证了局部闭环的极速响应, 但在拌和站的大规模生产管控中, 仍需统筹全局配方优化与长期运行分析。为此, 下文将探讨边缘与云端的功能分工及协同机制。

2.3 边缘-云端协同控制策略

系统基于实时性需求确立功能边界: 边缘节点聚焦周期低于 200 ms 的强实时任务, 如配料 PID 调节 (50 ms)、搅拌电流异常响应 (1 ms) 及卸料门伺服控制 (0.1° 分辨率); 云端平台则负责计算耗时 $>30 \text{ s}$ 的非实时业务, 如配方优化、故障预测及 ERP 数据对接。双方通过 CoAP 协议进行轻量化数据上报, 并通过 MQTT 接收云端配置指令。

为保障控制指令的一致性, 构建双缓冲同步机制: 边缘侧 8 MB 循环缓存区每 1 s 记录关键状态, 本地服务器以 5 s 周期进行校验。若检测到指令冲突, 立即触发增量同步并采

用 HMAC-SHA256 算法进行完整性校验。在网络中断期间, 边缘节点自动切换至离线容错模式。

针对带宽受限环境, 设计基于深度特征提取的数据压缩算法。将 500 Hz 原始采样数据经小波变换提取为 10 维特征向量, 并引入霍夫曼编码。压缩后单条数据包平均长度 S_c 满足:

$$S_c = \sum_{i=1}^n P(f_i) \cdot l(f_i) \quad (2)$$

式中: S_c 表示压缩后单条数据包的平均比特长度, 单位为 bit; n 表示特征向量的维度总数; $P(f_i)$ 表示第 i 个特征分量在编码结果中出现的概率; $l(f_i)$ 表示该特征分量对应的霍夫曼编码长度, 单位为 bit。

3 实验验证

3.1 实验平台搭建

为了验证上述三层协同架构及优化算法在模拟真实生产环境下的性能表现, 本研究设计了高负载与网络干扰等极端测试工况, 通过 1:4 缩比实验平台进行量化分析。系统由三台边缘节点 (型号: 树莓派 4B/ 嵌入式工业主机, 集成 BCM2711 芯片)、一台本地服务器 (配置: Intel i7-10700, 16 GB RAM , Windows 10 IoT Core) 及模拟配料与搅拌设备构成。骨料输送采用变频皮带 (驱动器型号: 台达 VFD-M 系列, 响应频率 $0.1 \sim 400 \text{ Hz}$) 与冲板流量计 (量程 $0 \sim 500 \text{ kg/h}$, 精度等级 0.5); 水泥输送为螺旋送料 + 称重单元 (传感器型号: 中航电测 H8C 悬臂梁式, 灵敏度 $2.0 \pm 0.002 \text{ mV/V}$, 精度 $\pm 0.1 \text{ kg}$; 搅拌机为 0.3 m^3 双卧轴, 电机功率 7.5 kW , 电流采样采用霍尔电流传感器 (型号: ACS712, 线性度 1.5%), 采样频率 1 kHz 。

边缘节点通过 RS485/Modbus-RTU 协议与现场仪表通信, 并通过千兆以太网 (交换机型号: TP-LINK TL-SG1005 工业级) 与各节点组成环网, 链路切换延迟 $<50 \text{ ms}$ 。测试聚焦两项指标: 响应时间 (称重突变至调节启动) 与端到端延迟 (采样至数据包接收)。方法采用三阶段叠加对比: 空载条件下执行 1 000 次配料循环获取基准; 模拟 2 Mbit/s 限速 + 20 ms 抖动后测延迟分布; 引入阶跃扰动考察边缘与云端 PID 控制差异。平台通过 IEEE 1588 实现 $<1 \mu\text{s}$ 时间同步, 并记录系统资源状态, 用于约束模型构建。

3.2 性能测试结果分析

为评估边缘架构对实时性能的提升效果, 在 1:4 实验平台开展 72 h 压力测试, 参照某工程单位原 “4G+ 云端控制” 方案设定对比。测试分为常规负载 (60 s 节拍) 与高负载 (45 s 节拍) 两类, CPU 占用率从 35% 升至 75% 。在全周期运行过程中, 同步记录响应时延、控制精度及系统资源变化情况, 以确保数据具备代表性与可比性。原方案响应时间均值

为 500 ms、峰值 820 ms，水泥计量误差 $\pm 2.8\%$ ；边缘控制下分别降低至 150 ms 和 $\pm 0.7\%$ ，表明控制链路延迟显著收敛。这种差异根源于两种架构在通信确定性上的本质区别。传统“PLC+ 云端控制”架构的瓶颈在于通信链路的非对称延迟，控制环路需跨越公网，公网抖动（Jitter）导致采样数据在云端排队，引发控制指令的“超前”或“滞后”。而本文架构将闭环控制权收敛至本地边缘节点，通信链路从“公网逻辑”回归至“确定性总线逻辑”，彻底消除了云端资源竞争带来的时序不确定性。

高负载下，边缘侧保持 50 ms 稳定控制周期，而云端周期延长至 5 s，搅拌电流波动标准差由 3.1 A 降至 1.2 A，体现出边缘侧对动态扰动的抑制能力更强。网络干扰模拟（5% 丢包率、300 ms 延迟）显示，原方案报警频率达 11 次/百盘，边缘模式凭借缓存与离线控制实现零报警。运行稳定性方面，原系统 18 h 后发生中断，边缘架构可连续运行 72 h 无异常，系统对复杂工况的适应能力明显增强。如表 1 所示。

表 1 优化前后拌和站系统实时性指标对比表

指标项	配料指令响应时间 /ms	水泥计量误差 /%	搅拌机电流波动标准差 /A	配料超时报警次数 / (次·百盘 ⁻¹)	连续无故障运行时间 /h
优化前均值	500	± 2.8	3.1	11	18
优化前峰值	820	± 4.1	4.5	18	20
优化后均值	150	± 0.7	1.2	0	72
优化后峰值	200	± 1.0	1.8	0	72
提升率	70 %	75 %	61 %	100 %	300 %

将本研究的实验数据与当前工业边缘计算领域的通用优化模型及行业标准进行对比分析：

控制稳定性层面，目前通用的工业边缘侧调度算法在处理百毫秒级并发任务的工作时，系统时延的波动率通常处于 10%~15% 之间。本系统借助引入针对拌合工艺定制的多级优先级抢占机制，在 72 h 高负载压力测试中，把控制响应的时延波动率压低至 4.5% 以内，显著提高了控制逻辑的确定性。

数据精度层面，行业内传统的固定参数滤波算法在抑制拌和站机械振动噪声时，往往以牺牲 100 ms 以上的相位滞后为代价。本方案运用的动态窗口滤波机制，借助对流量变化率的实时感知，在保障信号平滑度的前提下，其动态响应速度比常规算法提升了 20% 以上。

从对比结果可以看出，本研究构建的边缘协同架构在时延控制、高并发调度以及非平稳信号检测等方面均优于传统本地控制模式以及通用工业边缘网关方案，更适宜混凝土精准生产场景。

3.3 实际工程应用验证

这项研究成果已经开展试点应用工作，被运用到某大型商砼站的生产线改造项目当中。在为期 3 个月的实地运行

过程中，工作人员把边缘节点直接部署在粉尘浓度较高的配料控制柜内部。监测数据表明，在夏季高温（机柜内温度近 60℃）的环境下，边缘节点借助 ARM Cortex-A53 低功耗架构以及被动散热设计，未出现过热降频引发的控制指令丢包问题。

实际应用效果显示：在日均产出 2 500 m³ 混凝土的高强度作业下，由于边缘侧实现了毫秒级的闭环调速，该站的“过秤超差”报警率降低了 85%，每盘料的生产周期平均缩短了 2.4 s。同时，在遭遇区域性网络闪断期间，边缘节点的“离线容错模式”保障了生产线的连续运行，避免了因网络故障导致的停工损失。这证明了本研究提出的三层协同架构具备优秀的工程适配性与经济效益。

4 结语

该研究针对传统拌和站控制系统存在的实时性瓶颈，构建三层边缘计算架构，明确边缘与云端功能分工，设计改进型滤波算法与多级优先级调度机制，实现毫秒级采控闭环。通过实验平台开展系统测试，在高负载与网络扰动下，系统配料响应时延下降 70%、水泥计量误差降低 75%、报警次数减少 100%、无故障运行时长延长至 72 h。验证了边缘控制架构在工业级复杂工况下的稳定性与高效性，为构建高可靠混凝土拌合自动控制系统提供可推广路径。

参考文献：

[1] 李婧. 基于边缘计算的可穿戴心理设备自动化实时预警系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(11): 168-172.

[2] 徐策, 王俊江, 钟浩, 等. 基于物联网边缘计算的配电网故障定位方法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(10):95-103.

[3] 肖雪朋, 王明飞, 张馨, 等. 基于边缘计算的温室传感器故障自识别系统设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 100-106.

[4] 杨守义, 陈怡航, 张双玲, 等. 面向未来移动通信的移动边缘计算研究综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 1-10.

[5] 杨开兴, 满红任, 刘秀, 等. 基于边缘计算与区块链融合的智慧用电平台的研究与设计[J]. 科技导报, 2024, 42(9): 26-38.

【作者简介】

韦相安（1998—），男，壮族，广西壮族自治区河池人，本科，助理工程师，研究方向：市政公用工程。

（收稿日期：2026-05-15 修回日期：2026-06-30）