

基于边缘计算的烤炉智能温控系统实时响应设计

饶 力 张西洋 牛军营
慈溪市悦达电子科技有限公司 浙江 宁波 315300

摘 要：烤炉温控系统对实时响应要求严苛，传统云端集中处理模式存在传输延迟大、带宽压力高、断网失控等不足。本文从边缘计算核心特性与烤炉热工原理出发，分析实时响应设计的时间、精度与可靠三维需求，构建包含硬件选型、温度采集、执行控制与接口设计的系统硬件方案，设计分层解耦软件架构、滑动窗口滤波预处理与自适应模糊PID温控策略，并从数据处理延迟、指令传输链路与任务负载均衡三个层面优化实时响应性能，形成边缘计算赋能烤炉智能温控的完整技术方案，有效解决炉温超调与产线停炉风险。

关键词：边缘计算；烤炉温控；实时响应

引言：烤炉作为典型大惯性热工设备，温度响应滞后显著且不同工作阶段动态特性差异极大，传统PLC加固定参数PID的控制方案难以适应全工况需求。云端集中式处理虽算力充足，但广域网传输引入的秒级延迟与断网失控风险直接威胁温控安全与产品质量。边缘计算将算力下沉至设备现场，凭借位置邻近性、本地自治能力与毫秒级响应速度，为烤炉温控提供了新的技术路径。

1 基于边缘计算的烤炉智能温控系统实时响应设计基础

1.1 边缘计算核心特性

边缘计算作为一种分布式计算范式，本质上是将计算资源从云端下沉至数据产生的物理场所附近，从而缩短数据传输路径并降低端到端延迟。边缘节点通常具备一定的算力储备，能够承载轻量级机器学习模型的推理任务，这与云端侧重大规模训练的定位形成互补。另一个关键特性是本地自治能力，即便与云端的通信链路中断，边缘节点依然可以独立完成数据采集、状态判断与控制指令下发，保证温控系统不会因网络波动而停摆^[1]。边缘计算还强调低延迟交互，传感器采集的温度信号在毫秒级时间内即可被边缘处理器消费并转化为控制决策，这种近乎实时的响应速度正是烤炉温控场景所迫切需要的。此外，边缘架构天然支持数据本地化处理，原始温度数据在边缘侧完成清洗与特征提取后，仅将摘要信息上传云端，既减轻了带宽压力，也在一定程度上保障了工业数据的隐私安全。

1.2 烤炉温控系统工作原理

烤炉温控系统的运行逻辑建立在闭环反馈控制基础之上。温度传感器持续采集炉腔内各测温点的热工数据，

这些信号经由采集模块转换为数字量后送入控制器。控制器将实测温度与预设工艺曲线进行比对，根据偏差大小和变化趋势生成调节指令，驱动加热元件的功率输出或燃料阀门的开度变化。传统方案多采用PID控制器在PLC上实现调节，但固定参数难以应对烤炉在不同工作阶段的非线性漂移。引入智能温控后，系统需要在边缘侧运行能够自适应热工特性变化的控制策略，将温度偏差控制在工艺允许的窄带范围内。

1.3 实时响应设计的核心需求

烤炉温控场景对实时响应的需求主要聚焦于三个维度。时间维度上，从温度异常发生到控制指令执行完毕的全链路延迟必须控制在工程可接受的阈值以内，任何环节的阻塞都可能导致炉温超调甚至安全事故。精度维度上，多测温点的数据采集与融合处理需要保持严格的时间对齐，否则基于不一致数据做出的控制决策将偏离真实炉况。可靠维度上，系统必须在网络抖动、节点故障等非理想条件下依然维持基本的温控能力，不能因为单点失效而导致整条产线停炉。这三个维度相互交织，共同构成了边缘计算架构下烤炉智能温控系统设计的出发点与约束边界。

2 基于边缘计算的烤炉智能温控系统硬件设计

2.1 边缘节点硬件选型

边缘节点作为整个温控系统的计算与通信枢纽，硬件选型需要兼顾算力储备、环境适应性与长期运行稳定性。处理器方面应优先选取具备多核架构且支持硬件加速的工业级芯片，满足轻量化AI推理模型的运行需求。存储层面需配置足够容量的固态硬盘以支撑操作系统、控制算法与历史数据的本地驻留，避免频繁读写对响应速度造成干扰。网络接口应至少保留两路冗余通信通道，一路连接现场总线采集温度信号，另一路接入工业以太网实

现与云端平台的数据交互。外壳防护等级需达到IP65以上,确保在高温高湿、粉尘密布的烤炉车间内长期稳定工作。供电方案宜采用宽压直流输入并内置不间断电源模块,防止短暂断电导致控制中断。整体功耗应控制在较低水平,以便于在狭窄的设备柜内实现自然散热,减少风扇等运动部件带来的故障隐患。

2.2 温度采集模块设计

温度采集模块承担着将炉腔内热工状态转化为数字信号的前端使命。传感器选型上,热电偶适合高温区的粗略监测,热电阻则在中低温段具有更优的线性度与重复性,两类传感器混合部署可覆盖烤炉全温域。多路模拟信号需经过高精度A/D转换器统一数字化,转换分辨率不低于16位以保证微小温差的可辨识度。采样频率应根据炉温变化速率动态调整,升温剧烈阶段自动提高采样率,保温平稳阶段适当降低以节约边缘节点计算资源。信号调理电路中加入硬件滤波环节,剔除高频电磁干扰对温度读数的污染。各通道之间采用独立的参考地线设计,避免共模干扰导致不同测温点数据串扰。

2.3 温控执行模块设计

温控执行模块负责将边缘节点输出的数字控制指令转化为物理动作。加热功率调节通过固态继电器或可控硅调功器实现,相较于机械触点方案,固态器件的开关速度更快且无电弧磨损,适合高频次的功率微调场景。燃料阀门的驱动则需选用防爆型电动执行器,开度信号以4至20毫安电流环路回传至边缘节点形成闭环。执行模块的硬件回路中应设置独立于软件之外的温度超限保护继电器,当炉温突破安全阈值时不经边缘计算直接切断加热回路,构成最后一道硬件屏障。各执行通道的驱动电路彼此隔离,防止单一通道短路波及回路。

2.4 边缘节点与硬件模块接口设计

边缘节点与采集、执行模块之间的接口设计决定了数据流动的通畅程度与系统集成的难易度。采集模块通过SPI或I2C总线与边缘处理器对接,总线速率需匹配最高采样率下的数据吞吐量,避免出现数据积压。执行模块采用GPIO隔离输出或RS485串行通信接收控制指令,指令帧格式应包含地址标识、操作码与校验位,防止误触发^[2]。所有外部接口均加入光电隔离器件,阻断工业现场地电位差对边缘节点内部电路的冲击。接口板卡采用模块化插拔结构,便于现场维护时快速更换故障通道而不影响整体系统运行。

3 基于边缘计算的烤炉智能温控系统软件设计

3.1 边缘计算节点软件架构设计

边缘节点的软件系统采用分层解耦的架构思路,自

底向上依次构建硬件抽象层、核心服务层与应用交互层三大功能分区。硬件抽象层屏蔽了底层芯片型号与外设接口的差异,向上提供统一的寄存器访问通道与中断响应机制,使得上层代码不随硬件平台变动而重写。核心服务层是整个软件的运算心脏,内部集成数据处理引擎、控制算法引擎与任务调度引擎三个独立模块,模块之间借助共享内存与轻量消息队列传递数据,避免进程间频繁拷贝造成的时间开销。任务调度引擎采用实时优先级队列管理各模块的执行顺序,控制回路的计算任务被赋予最高优先级,确保温度采样与指令输出不受日志记录、网络通信等低优先级任务的干扰。应用交互层面向现场操作员与云端平台分别提供本地触摸屏接口与远程服务接口,支持工艺参数设定、温度曲线展示以及告警信息推送。整体架构遵循微内核加插件的组织形式,各功能模块可独立编译与在线热更新,适应烤炉现场控制策略频繁调整的工程实际。

3.2 温度数据实时采集与预处理算法设计

温度数据的采集由边缘节点上的多通道轮询任务承担,各测温通道依照预设采样周期依次触发模数转换,转换结果立即写入环形缓冲区供后续环节读取。烤炉现场电磁环境复杂,原始信号中掺杂高频噪声与偶发脉冲干扰,预处理环节引入滑动窗口中值滤波算法,该方法在剔除尖峰噪声的前提下较好地保留了温度突变特征,优于均值滤波在非平稳信号处理中的表现。滤波后的数据还需经过异常值剔除步骤,依据相邻时刻的温度变化率设定动态阈值,凡变化率超出物理合理范围的数据点被标记为可疑并以线性插值方式修复。多测温点的数据在时间维度上存在微小偏移,预处理阶段通过时间戳对齐将全部通道的数据映射到统一时间基准上,确保控制算法所用温度场数据在时空上严格一致。

3.3 实时温控策略设计

温控策略的核心是在边缘节点上运行的自适应模糊PID复合控制算法。烤炉热工过程具有大滞后与强非线性特征,固定参数的PID难以在全工况范围内维持满意的跟踪精度,因此设计中将传统PID与模糊推理相结合。PID部分负责常规工况下的精确调节,模糊推理部分则根据温度偏差与偏差变化率在线调整比例、积分、微分三个参数,使控制器在升温段偏向快速响应,在保温段偏向平稳抑制超调。控制指令的生成周期被设定为与采样周期匹配的固定时步,每个时步内依次完成偏差计算、模糊推理、参数更新与指令输出四个动作,整个流程在边缘处理器上的执行时间被严格控制在毫秒量级。策略中还嵌入了冗余估计模块,当某一测温点数据连续丢失超

过设定阈值时,模块依据相邻测温点的空间相关性与历史温度梯度推算替代值,保证控制回路不因单点故障而中断。

3.4 边缘节点与系统终端数据交互设计

边缘节点与系统终端之间的数据交互通过发布—订阅模式的消息中间件实现。边缘节点作为数据发布方,将处理后的温度数据、控制状态与告警信息按预定义主题分类封装为JSON消息帧,经由MQTT协议通过工业以太网推送至消息代理。系统终端包括现场触摸屏、上位机监控软件与云端管理平台,各自订阅所需主题并在本地完成数据解析与可视化呈现。交互链路设计了优先级分级机制,控制指令与安全告警被赋予最高传输优先级,即便网络带宽紧张也能获得优先调度,常规监测数据则在带宽充裕时批量传输^[3]。边缘节点本地保留最近一定时段的完整运行日志,终端发起历史数据查询时从本地存储检索回传,避免每次查询都依赖云端中转带来的额外延迟。断网恢复后边缘节点自动将缓存数据补传至云端,确保数据链条的完整性不受网络波动影响。

4 基于边缘计算的实时响应优化设计

4.1 边缘节点数据处理延迟优化

边缘节点的数据处理延迟主要来源于信号转换、滤波运算与控制算法执行三个环节。信号转换环节通过选用高速A/D转换芯片并配置DMA直接存储器访问通道,将温度数据从外设搬入内存的过程中释放处理器干预,使CPU得以专注于滤波与控制运算。滤波算法层面,滑动窗口中值滤波的计算复杂度与窗口长度呈正相关,设计中采用自适应窗口策略,在温度平稳阶段缩小窗口以降低运算量,在温度剧烈波动阶段扩大窗口以保证滤波质量,这种动态调整使得平均处理耗时显著下降。控制算法的优化则着眼于指令流水线化,将偏差计算、模糊推理与参数更新三个步骤拆解为可重叠执行的微任务,利用边缘处理器的多核特性让各核心并行处理不同微任务,从而压缩单次控制周期的端到端耗时。

4.2 温控指令实时传输优化

温控指令从边缘节点下发至执行模块的传输链路存在协议封装与总线仲裁两类开销。协议封装方面,摒弃冗长的Modbus报文格式,改用精简帧结构,将指令内容

压缩至最小字节数,减少串口或以太网的传输耗时。总线仲裁方面,当采集任务与控制指令共享同一通信总线时,引入时间片轮转加优先级抢占机制,控制指令帧被赋予最高总线访问权,采集数据帧则在指令传输间隙插入,避免采集任务阻塞指令下发。对于无线传输场景,采用短帧聚合与前向纠错编码相结合的策略,在有限带宽下提升有效指令到达率,降低因丢包重传造成的指令延迟。

4.3 系统负载均衡设计

烤炉温控系统运行中,数据采集、算法推理、网络通信与日志存储四类任务对计算资源的争夺构成负载均衡的根源。设计中引入基于任务紧迫度的动态调度器,将控制回路计算标记为不可抢占的最高优先级任务,通信与日志任务标记为可降级的低优先级任务。当CPU占用率攀升至预警线时,调度器自动挂起日志写入并降低数据上报频率,将释放出的算力全部让渡给控制回路。多烤炉场景下,单一边缘节点需管理多路温控任务,调度器依据各路任务的实时计算量与截止时间动态分配核心资源,防止某一烤炉的繁重计算挤占其他烤炉的控制周期,确保各路温控指令的生成节奏不受彼此干扰。

结束语

基于边缘计算的烤炉智能温控系统通过硬件抽象层与核心服务层的分层架构,结合自适应模糊PID复合控制算法,实现了温度数据的毫秒级采集、预处理与控制指令生成。系统在数据处理、指令传输和负载均衡三个层面的优化设计,有效压缩了全链路响应延迟,多测温点时间对齐与冗余估计机制保障了控制决策的一致性与可靠性。工业级硬件选型与光电隔离接口设计确保了系统在高温高湿、电磁干扰等恶劣环境下的长期稳定运行。该方案为烤炉温控领域提供了一套兼顾实时性、精度与可靠性的工程化解决方案,具有较强的推广应用价值。

参考文献

- [1]李寒松.基于改进粒子群模糊PID的颗粒烤炉温度控制研究与应用[D].广西:广西师范大学,2024.
- [2]李艳红.基于边缘计算的工业炉实时数据采集系统研究[J].工业加热,2026,55(3):27-30.
- [3]徐永波.基于边缘计算的智能制造装备实时控制系统设计研究[J].现代制造技术与装备,2025,37(06):186-188.