面向绿色生产的拌合站自动化系统优化设计研究

陈家易[1]
CHEN Jiayi

摘 要 为提升拌合站的绿色生产水平，文章提出了一种基于智能控制的自动化系统优化方案，旨在解决传统生产过程中的高能耗、配料误差及污染物排放等问题。通过引入 PLC 与边缘计算协同架构，优化了设备的动态调度与能耗管理；同时，采用模糊 PID 算法提升了配料精度，并建立了污染物排放实时监测与智能联动控制系统。仿真结果显示，优化后系统能耗降低 20.7%，配料误差减少 78.6%，粉尘排放浓度减少 60%，综合绿色效益指数提升至 0.72。实际应用中，优化系统在拌合站成功部署并运行，30 天内保持了数据完整率 99.7%，粉尘浓度超标时系统可在 3 s 内自动调整风机速度，并在 60 s 内启动自动修复策略。该方案可实现能耗、配料与排放的协同优化，具备工程应用条件。

关键词 绿色生产；自动化系统；优化方案；能耗管理；配料精度

doi：10.3969/j.issn.1672-9528.2026.08.007

0 引言

随着“双碳”目标推进，拌合站在骨料加热与多设备协同运行过程中呈现出能量流与物质流耦合特征。混凝土搅拌站兼具高耗能、粉尘外溢、骨料含水率波动和连续批量生产等特征，传统固定逻辑控制难以及时匹配负荷、配料和排放变化，绿色生产改造已成为降低能耗、稳定质量和满足环保约束的现实需求。然而，传统基于 PLC 的固定逻辑控制难以适应骨料含水率与生产负荷变化，易导致供能冗余、配料精度下降及排放调节滞后，系统整体效率受限[1]。从控制机制看，现有系统多采用分散调节方式，能耗、配料与排放之间缺乏统一约束，难以形成协同优化路径。针对上述问题，本文构建融合 PLC 与边缘计算的分层控制架构，首次将模糊 PID 与边缘计算结合应用于拌合站配料控制，将能耗、碳排放及污染物指标转化为控制目标，通过负荷预测与多源数据融合实现多变量耦合调节，从而提升拌合站绿色生产水平。

1 拌合站绿色生产现状与自动化系统瓶颈分析

当前案例拌合站在绿色生产实施中，主要问题集中于能耗利用效率低与排放控制滞后。以年产 30 万吨为基准，单位产量综合能耗约 5.8 kgce/t，对应碳排放水平偏高；粉尘浓度约 120 mg/m^3，接近排放限值，说明除尘调节主要依赖被动响应。同时，配料过程受骨料含水率波动影响明显，传统 PID 控制难以及时修正扰动，单批次误差约 21 kg，导致材料浪费及附加能耗增加。从系统结构看，现有 PLC 控制以固定逻辑为主，数据采集周期较长，难以支撑动态调节；设备运行缺乏基于负荷变化的协同控制，引风机与烘干系统存在高负载或空转现象，能耗利用率偏低[2]。此外，能耗、碳排放及污染物数据未形成统一关联，绿色生产指标停留在事后统计层面，未参与实时控制，限制了系统整体优化能力。

2 面向绿色生产的拌合站自动化系统优化方案设计

针对拌合站在能耗、配料及排放控制中存在的多源扰动与响应滞后问题，将系统运行抽象为由物性参数、负荷状态及环境条件驱动的动态过程。在此基础上，构建统一的数据输入与控制框架，将原有独立控制环节转化为多变量耦合调节关系，实现控制参数的协同联动。在该总体思路下，对各关键控制模块进行针对性优化设计。

2.1 能耗优化的智能控制模块架构设计

针对传统拌合站在能耗调节中存在响应滞后与供能冗余问题，构建基于 PLC 与边缘计算协同的智能控制模块。系统以设备运行数据为基础，将能耗监测、负荷预测与动态调节进行一体化设计，实现由固定逻辑向动态匹配转变。在数据层，通过红外热像仪及电流、压差等多源信号构建设备能耗数据集；在边缘节点中对短时负荷进行预测，并输出调节指令；PLC 侧完成执行与状态反馈，形成闭环控制。智能控制模块架构如图 1 所示。在控制模型构建中，以烘干过程热平衡为基础，将燃烧供热、骨料吸热及烟气散热进行耦合，并建立燃油流量与工况参数之间的关系。

$$F_{\mathrm{oil}} = k_1 \cdot \Delta T^2 + k_2 \cdot Q_{\mathrm{agg}} \tag{1}$$

1. 南宁兴典混凝土有限责任公司 广西南宁 530000

式中：F_{oil} 为实时燃油流量（单位：L/min），ΔT 为烟气目标温度与实际温度差值（单位：℃），Q_{agg} 为骨料处理量（单位：t/h），k_1 和 k_2 为工况修正系数。

该模型将控制量分解为负荷补偿与温差修正两部分，使供热过程随工况变化动态调整。在此基础上，引入单位能耗约束，将能耗偏差作为附加调节依据，对燃油输入进行修正，使控制过程同时满足温度稳定与能效优化要求[3]。系统以 500 ms 周期更新参数，PLC 以 50 ms 周期执行反馈，形成快速闭环。应用结果表明，烟气温度波动由 ±25 ℃ 收敛至 ±8 ℃，有效降低冗余供热。

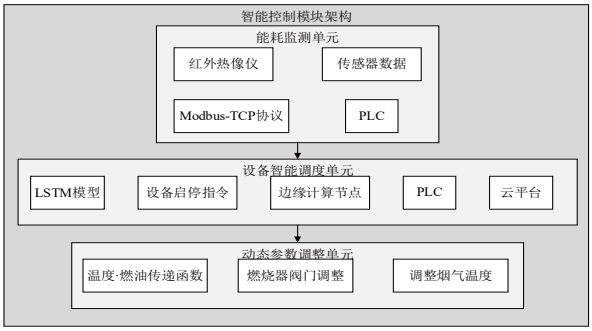


图 1 智能控制模块架构图

2.2 原材料利用率提升的配料算法优化

针对传统拌合站配料系统在原材料物性波动条件下控制精度不足的问题，构建融合多源感知与模糊推理的动态配料算法。系统在骨料仓出口布置微波湿度仪与激光粒度仪，实时获取含水率（4%~6%）及颗粒级配（0~10 mm 占比 85%±3%）等参数；称量单元采用悬臂梁式传感器，以 50 ms 周期采集瞬时下料量，并将其与目标值偏差作为主控输入。基于此，建立以含水率偏差 Δw、粒径变化 Δd 及称量误差 e_t 为输入的模糊控制器，输出闸门开度补偿量 U_c，并与 PID 控制量叠加形成复合控制策略。

$$U_t = K_p e_t + K_i \sum e_t + K_d \frac{de_t}{dt} + \gamma U_c \tag{2}$$

式中：U_t 为最终控制输出，表示闸门开度指令（单位：%）；e_t 为当前称量误差（单位：kg），即目标配料值与实际下料量之差；K_p、K_i、K_d 分别为比例、积分和微分系数；$\sum e_t$ 为误差累积项；de_t、dt 为误差变化率；U_c 为模糊推理输出的补偿量（单位：%），用于修正闸门开度；γ 为模糊补偿权重（取值 0.3~0.7），用于调节模糊控制在总控制量中的占比。

该方法在称量阶段前 500 ms 引入物性扰动前馈补偿，使控制由单一误差反馈转为“前馈 - 反馈”耦合模式[4]。为验证算法性能，引入传统 PID 作为对照（K_p=1.8，K_i=0.12，K_d=0.05）。在含水率由 4.2% 突变至 6.1% 的工况下，传统 PID 最大误差达 18.6 kg，稳定时间约 6.5 s；模糊 PID 将误差控制在 5.2 kg 以内，稳定时间缩短至 2.1 s。连续 10 批次仿真中，误差标准差由 6.3 kg 降至 1.7 kg，显示出更强的扰动抑制能力。通过 OPC UA 接口将算法写入 PLC，实现配料控制与生产调度的实时协同。

2.3 生产过程污染物排放实时监测系统集成

在完成配料算法优化基础上，污染物控制由被动监测转为过程调节。为保证控制模型在仿真分析与现场运行中的一致性，将排放监测系统纳入边缘—PLC 协同框架，使排放变量参与统一控制过程。系统在关键节点布设粉尘、烟气及噪声传感单元，其中滚筒出口设置激光散射式粉尘仪（0~1 000 mg/m^3，精度 ±3%），除尘器前后配置压差变送器（0~5 kPa），搅拌区布置气体检测装置，厂界设置声级计。多源数据通过 RS-485 总线接入边缘网关，并以 50 ms 周期刷新，与控制执行周期保持一致，为模型计算与实际响应提供统一时间尺度[5]。在控制逻辑上，采用分级阈值与动态修正机制：初级阈值用于预警，二级阈值触发风机频率及压差联动调节。为适应环境与连续生产条件变化，引入动态阈值模型：

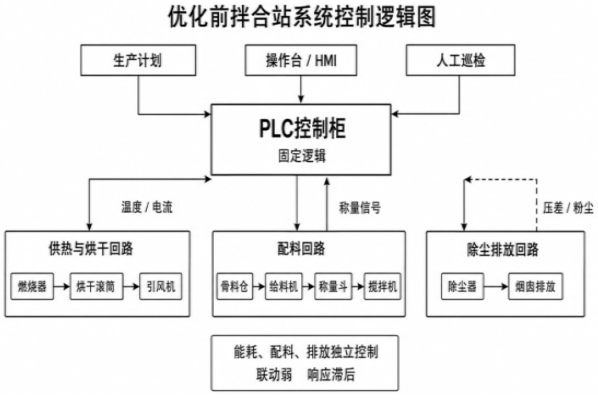
$$C_{限值} = C_{标准} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T \cdot e^{-\beta \cdot t}) \tag{3}$$

式中：$C_{标准}$ 为地方排放标准值，ΔT 为环境温度变化量，t 为连续生产时间，α 和 β 为温度修正系数与时间衰减系数。

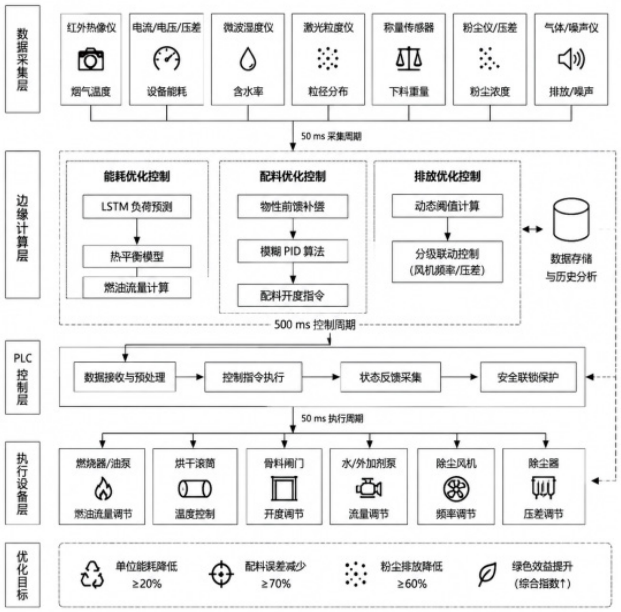
该模型将排放控制由固定限值约束转为随工况变化的动态响应过程。在此基础上，对阈值模型进行离散化处理并嵌入边缘节点执行单元，使其满足 PLC 扫描机制。处理后的参数作为仿真分析与现场控制的统一输入约束，实现控制策略由模型表达向实际执行的连续映射[6]。

3 优化系统的性能验证与案例应用

性能试验环节，考虑物性波动与负荷变化的耦合作用，设置多场景运行条件，对燃油流量、配料开度及排放阈值等关键变量进行统一调度分析。通过仿真结果获取系统响应特性及参数变化区间，为控制参数整定及现场运行提供约束依据。优化前后的拌合站系统控制逻辑图如图 2 所示。



（a）优化前



（b）优化后

图 2 优化前后的拌合站系统控制逻辑图

3.1 优化系统的仿真测试与性能指标对比

为验证优化系统在多扰动及跨区域工况下的控制性能，基于 MATLAB/Simulink 构建案例拌合站离散事件仿真模型，集成能耗、配料与排放子模块。案例拌合站试验以 30 万吨设计产能为约束，搭建多源感知与控制一体化测试平台，现场配置工业级 PLC 控制柜与边缘计算网关，形成分层采集与执行结构。红外热像、微波含水率与激光粒度等传感单元在使用前完成标定与零漂修正，并开展跨工况一致性校核以降低测量偏差。数据采集周期统一设定为 50 ms，能耗采用电表与燃油流量双通道交叉计量并进行误差比对。试验设置湿热与干燥两类典型环境工况，对温度与骨料含水率实施分级加载控制以扩大扰动覆盖范围。每组工况重复运行三次，采用批次均值与标准差对系统稳定性及测量离散性进行评价。为量化绿色生产水平，构建综合评价指标：

$$G = w_1 \cdot \Delta E' + w_2 \cdot \Delta C'_{CO_2} + w_3 \cdot \Delta C'_d \tag{4}$$

式中：G 为综合绿色效益指数，w_1、w_2、w_3 分别为单位能耗、碳排放及粉尘排放的权重系数，$\Delta E'$ 为单位产量综合能耗的相对改进率，$\Delta C'_{CO_2}$为单位产量碳排放的相对改进率，$\Delta C'_d$ 为粉尘排放浓度的相对改进率。

各指标的相对改进率统一定义为：

$$\Delta X' = \frac{X_0 - X}{X_0} \tag{5}$$

式中：$\Delta X'$ 为指标 X 的相对改进率，X_0 为优化前基准值，X 为优化后数值。

仿真结果表明，在配料控制方面，传统 PID 在含水率阶跃变化约 1.8% 条件下最大误差达 18.6 kg，稳定时间约 6.5 s，而优化系统误差控制在 5 kg 以内，稳定时间缩短至 2.1 s，误差标准差降低约 70%。在能耗控制方面，湿热工况下单位能耗稳定在 4.7~4.9 kgce/t，干燥工况下降至 4.2~4.5 kgce/t，表现出对环境扰动的自适应调节能力。排放控制中，粉尘浓度降至 50 mg/m^3 以下，超限响应时间控制在 3 s 以内。优化前后系统性能指标如表 1 所示，变化趋势如图 3 所示。结果表明，该方法在不同区域与物料条件下均具备稳定控制性能。

表 1 优化前后系统核心性能指标对比表

指标项	优化前	优化后	变化率
单位产量综合能耗 /（kgce·t^{-1}）	5.8	4.6	-20.70%
配料误差 /（kg· 批次 $^{-1}$）	21	4.5	-78.60%
粉尘排放浓度 /（mg·m^{-3}）	120	48	-60.00%
综合绿色效益指数	0	0.72	—

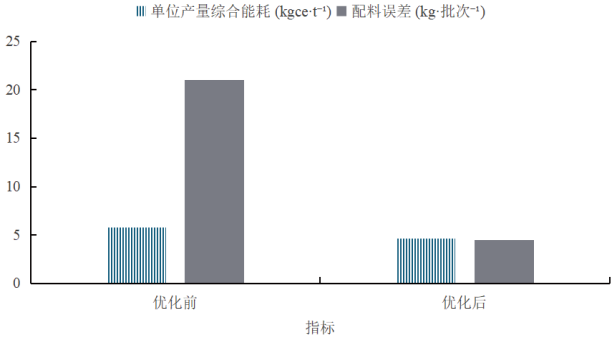


图 3 优化前后能耗与配料误差对比图

3.2 实际拌合站案例中的部署与运行效果

在保留原有 PLC 控制逻辑的基础上，扩展集成红外热像仪、微波湿度仪及激光粒度仪等多源传感接口，通过工业以太网构建边缘节点与 PLC 的低时延协同架构。数据采集层以 50 ms 周期实时采集骨料含水率粒径分布及设备能耗参数，经边缘节点清洗滤波后，采用滑动窗口机制校验数据完整性。系统连续运行 30 天期间，覆盖环境温度 12~34 ℃、骨料含水率 3.8%~6.4% 的波动工况，依托冗余传输协议与断点续传机制，最终实现数据完整率 99.7%，平均通信延时控制在 380 ms 以内。在日产 1 800~2 200 t 负荷区间内，系统通过模糊 PID 复合控制将配料误差稳定压制在 5 kg/ 批次以内，烟气温度波动由 ±25 ℃ 收敛至 ±8 ℃，粉尘超限响应时间缩短至 3 s 以内，全程运行平稳无振荡。

在跨工况应用中，进一步把河砂、机制砂、高含水率骨料以及负荷快速波动等场景纳入验证范围。河砂工况下配料误差约 3.8 kg，机制砂受级配波动影响，误差仍控制在 5.2 kg 以内；骨料含水率升至 6.4% 时，系统依靠前馈补偿维持称量稳定。负荷变化 ±15% 条件下，预测模块可在 30 s 内完成燃油供给修正，单位能耗波动保持在 ±5%。与传统固定逻辑控制系统相

比，夏季单位能耗由 5.8 kgce/t 降至 4.3~4.5 kgce/t，冬季控制在 4.8~5.1 kgce/t，配料误差及粉尘响应时间均处于较低水平，说明该系统在物料、季节及负荷变化下具备更充分的工程适应性。

3.3 系统优化后的经济与环境效益分析

在完成仿真对比与现场运行验证后，仍需从成本投入、能源节约、材料损耗、运维稳定性和污染减排等维度进一步评估优化系统的综合收益，以判断其在不同工况下的工程应用价值和推广可行性。通过负荷预测与热平衡模型协同调节，燃烧过程由固定供热转为按需匹配，引风机平均负载率由 95% 降至 78%，烘干燃油单耗降低 0.38~0.45 L/t。在不同区域工况下，湿热环境中单位能耗稳定在 4.6~4.9 kgce/t，干燥环境下降至 4.2~4.5 kgce/t，能耗波动控制在 ±5% 以内。按连续 30 天运行测算，燃料成本月均降低约 10 万元，叠加配料精度提升带来的材料损耗减少，综合运营成本下降约 13 万元，投资回收期约 12 个月。不同工况下系统能耗与控制指标对比如表 2 所示。

表 2 不同工况下系统能耗与控制指标对比

工况类型	单位能耗 /(kgce·t^{-1})	节能率 /%	配料误差 /(kg·批次$^{-1}$)	温度波动 /℃
夏季 + 河砂	4.3	23.8	3.8	±7
夏季 + 机制砂	4.5	21.5	5.2	±8
冬季 + 河砂	4.8	18.6	4.1	±9
冬季 + 机制砂	5.1	15.2	5.8	±10

在环境效益方面，多源监测与联动控制机制使污染物调节由事后响应转为过程抑制。粉尘排放浓度由 120 mg/m^3 降至 48 mg/m^3，在不同区域及季节条件下波动控制在 ±6 mg/m^3 以内；苯并 [a] 芘浓度下降约 0.15~0.20 μg/m^3。针对高含水率及机制砂工况，系统通过动态调节除尘压差与风机频率，使排放水平维持在稳定区间，噪声由 78 dB(A) 降至 71 dB(A)。综合分析表明，在不同气候条件、物料类型及负荷水平下，系统均可保持稳定的节能与减排效果，体现出良好的工程适应性与推广能力。

4 结语

针对拌合站在多扰动工况下存在的能耗利用效率低、配料精度不稳定及排放控制滞后问题，构建了融合 PLC 与边缘计算的分层控制架构，并将能耗、配料与排放指标统一纳入控制约束，实现多变量耦合调节。通过负荷预测与热平衡模型实现燃料输入动态匹配，结合模糊前馈与 PID 复合控制抑制物性扰动，并引入动态阈值联动机制约束污染物排放，使系统在不同工况下保持稳定响应。研究构建的融合 PLC 与边缘计算的分层控制架构，已实现能耗、配料与排放指标的统一约束与多变量耦合调节，有效解决传统拌合站高能耗、配料误差大、排放调控滞后的痛点；但传感层高湿粉尘环境下的测量偏差、热平衡模型工况适应性偏移、多源数据固定权重融合的局限性，仍是制约控制精度进一步提升的关键瓶颈。

系统的核心创新在于以 PLC—边缘计算协同架构贯通能耗预测、模糊 PID 配料补偿和排放动态阈值联动控制，使拌合站绿色生产由单环节调节转向多目标协同优化。后续研究可围绕高湿粉尘环境下传感数据动态校正、热平衡模型在线自整定以及多源信息自适应融合继续深化，并在不同产能规模、原材料类型和地区气候条件的拌合站开展长期验证，逐步形成可复制的系统配置、运行参数、维护规范及区域化应用经验，为绿色生产自动化改造在混凝土、沥青等拌合场景中的可靠持续性工程推广提供支撑。

参考文献：

[1] 翟世鸿，沈立龙，肖建庄，等 . 大体积混凝土结构绿色低碳建造技术研究：以平陆运河枢纽工程为例 [J]. 水利水运工程学报 ,2026(3):1-13.

[2] 丘道展，杨昊，高明明，等 . 装配式建筑碳排放优化设计及物化阶段评估 [J]. 低温建筑技术 ,2025,47(1):35-40.

[3] 曹建伟，王陈栋，伊文婷 . 高铁站站房全生命周期碳排放研究：以雄安站为例 [J]. 绿色建筑 ,2024,16(6):130-134.

[4] 周蕴卓，徐梓菁，毕林 . 基于深度学习级联卷积网络的露天矿道路扬尘识别 [J]. 煤炭科学技术 ,2024,52(S2):312-320.

[5] 熊星，许洪东 . 浅谈智慧混凝土施工技术在迈湾水利枢纽工程的应用 [J]. 葛洲坝集团科技 ,2024(2):10-12.

[6] 李子国 . 公路工程沥青混凝土施工技术应用 [J]. 中国科技信息 ,2025(4):40-42.

【作者简介】

陈家易（1995—），男，广西壮族自治区贺州人，本科，助理工程师，研究方向：建筑工程。

（收稿日期：2026-06-25 修回日期：2026-08-03）