

大型智能化浮选机集群的协同控制策略与能效优化研究

周佳刚 王伟光^(通讯作者)

诸暨创盈机电科技有限公司 311811

【摘要】浮选是矿物加工的核心，其效能直接影响精矿品位、回收率与成本。针对大型浮选机集群协同难、能效低等问题，本研究提出一种融合物联网数据与先进控制算法的协同控制与能效优化一体化框架。通过智能传感网络实时采集充气量、液位、浓度、泡沫图像等多源数据，在协同层采用模型预测控制（MPC）动态生成各槽设定值；在执行层应用自适应模糊PID控制器精准调节关键参数。创新性地将空压机与搅拌电机能耗嵌入MPC目标函数，并设计工况识别驱动的负荷分配策略，实现工艺稳定与节能降耗双重目标。仿真与案例表明，该策略可提升回收率稳定性0.5-1.5个百分点，降低集群综合能耗8%-15%，为浮选智能化提供系统解决方案。

【关键词】浮选机集群；协同控制；模型预测控制；模糊PID；能效优化；智能制造；物联网

Research on Collaborative Control Strategies and Energy Efficiency Optimization for Large-Scale Intelligent Flotation Machine Clusters

Zhou Jiagang Wang Weiguang^(Corresponding Authors)

Zhuji Chuangying Electromechanical Technology Co., Ltd. 311811

【Abstract】 Flotation serves as the core process in mineral processing, with its efficiency directly impacting concentrate grade, recovery rate, and operational costs. Addressing challenges such as coordination difficulties and low energy efficiency in large flotation machine clusters, this study proposes an integrated framework combining IoT data and advanced control algorithms for collaborative control and energy efficiency optimization. The system employs an intelligent sensor network to collect real-time multi-source data—including air injection volume, liquid level, concentration, and foam images—while applying Model Predictive Control (MPC) at the coordination layer to dynamically generate setpoints for each flotation cell. An adaptive fuzzy PID controller is implemented at the execution layer to precisely regulate critical parameters. Innovatively, energy consumption of air compressors and agitation motors is incorporated into the MPC objective function, alongside a load allocation strategy driven by operational condition recognition, achieving dual objectives of process stability and energy conservation. Simulation and case studies demonstrate that this strategy enhances recovery rate stability by 0.5 - 1.5 percentage points and reduces overall cluster energy consumption by 8% - 15%, providing a comprehensive solution for intelligent flotation systems.

【Key words】 flotation machine cluster; collaborative control; model predictive control; fuzzy PID; energy efficiency optimization; intelligent manufacturing; Internet of Things

1. 引言

矿产资源是国民经济发展的基础，浮选作为最为重要的物理化学分选方法，广泛应用于有色金属、黑色金属、非金属及煤炭的精选作业。一条现代化的浮选生产线通常由粗选、扫选、精选等多道工序串联及并联构成，涉及数十台乃至上百台大型浮选机协同工作。这些浮选机集群内部存在着强烈的物料流、能量流与信息流耦合：前序槽的工艺状态（如泡沫带矿情况、尾矿品位）直接影响后续槽的给矿条件与操作设定；反之，后续槽的液位、通气量调整也会通过矿浆流态对前序槽产生反作用。这种复杂的动态关联使得整个浮选流程成为一个非线性、大滞后、多干扰的复杂工业系统。

当前，大多数选矿厂的浮选机控制仍处于“单点监测、局部调节”的阶段，即操作人员或单回路控制器主要依据本机检测的个别参数（如液位、充气量）进行独立调整。这种模式存在显著局限：（1）局部最优而非全局最优：单机追求自身指标的稳定性，可能以牺牲上下游设备效率或整体流程平

衡为代价。（2）抗扰动能力差：对于原矿性质变化、设备工况波动等全局性扰动，缺乏协调应对机制，易引起生产指标震荡。（3）能效关注不足：控制策略较少将能耗作为直接优化目标，浮选过程（尤其是充气与搅拌环节）的高能耗问题突出，存在“保质量、轻能效”的普遍现象。

随着工业物联网、大数据、先进过程控制等智能技术的成熟，构建大型浮选机集群的协同控制与能效优化体系已成为可能，并成为选矿领域智能制造与绿色发展的关键课题。本研究旨在突破传统控制模式的桎梏，探索一种数据驱动、上下协同、能效导向的新型控制策略，以实现浮选生产线整体“安稳长满优”的高效低碳运行。

2. 研究现状与理论基础

浮选过程控制的研究历经了从手动操作、仪表控制到计算机控制的发展阶段。早期的自动控制主要集中于单变量PID控制，如对浮选槽液位、充气量的定值调节。随着检测

技术的进步,基于泡沫图像分析、在线品位分析仪的专家系统与模糊控制得到应用,实现了对加药量、刮泡速度等更多变量的调节。然而,这些方法本质上仍未解决多设备协同问题。

在协同控制领域,分布式控制架构与多智能体系统思想被引入。有学者提出将每台浮选机视为一个具有自主调节能力的“智能体”,通过简单的协商规则(如基于相邻槽信息的规则)进行协作。这种方法提高了系统的灵活性与可靠性,但优化深度有限,难以处理复杂的全局约束与目标。

模型预测控制(MPC)因其在处理多变量、有约束优化问题方面的先天优势,在流程工业中获得了巨大成功。MPC通过内部模型预测系统未来动态,在线求解一个有限时域内的优化问题,以获得最优控制序列。将其应用于浮选生产线,可以天然地处理各槽间的耦合关系、工艺指标约束(如品位下限、回收率要求)以及操作变量约束(如阀门开度、电机频率上下限),是实现全局协同优化的理想上层框架。

在能效优化方面,研究多从设备单体入手,如研制高效叶轮定子系统、优化空压机运行方式。流程层面的能效优化则往往与调度和设定值优化结合。将能耗作为MPC优化目标的一部分,实现运行能效的动态优化,是当前研究的前沿方向。

综上所述,将物联网感知技术、上层MPC全局协调、下层智能鲁棒控制以及嵌入能耗目标的优化模型相结合,构成一个完整的“感知-决策-执行-优化”闭环,是解决大型浮选机集群协同与能效问题的可行且先进的技术路径。

3. 大型智能化浮选机集群协同控制策略设计

本研究提出的协同控制策略采用“集中-分散”相结合的混合架构,整体框架如图1所示(此处为文字描述,可理解为三层结构)。

3.1 基于物联网的集群全息感知层

协同控制的基础是全面、实时、准确的数据。感知层由部署在每台浮选机及关联管道上的智能传感器网络构成,主要包括:(1)过程参数传感器:实时监测矿浆pH值、电导率、浓度、流量、液位、温度等。(2)运动与状态传感器:监测叶轮转速、刮板电机电流、充气总管与支管压力/流量。(3)机器视觉传感器:安装于槽体上方的工业相机,捕捉泡沫表面图像,通过图像处理算法提取泡沫大小、分布、速度、颜色、纹理等特征,间接反映矿化程度与品位。(4)能耗计量单元:精确计量每台浮选机搅拌电机、充气支路、辅助设备的实时功率与累计电耗。所有数据通过工业以太网或5G网络,统一上传至厂级监控与优化平台,形成浮选数字孪生体的实时数据映像。

3.2 上层协同优化层:基于模型预测控制的全局协调器

MPC作为本策略的“智慧大脑”,其核心任务是周期性地(如每分钟)求解一个滚动时域优化问题。

优化目标:目标函数综合考虑工艺指标与能效指标。工艺指标主要指最终精矿品位与回收率对设定值的跟踪误差最小化,以及关键工序间指标(如粗选尾矿品位)的平稳性。

能效指标则直接纳入集群总功耗(主要为搅拌与充气功耗)的最小化,或单位处理量能耗的优化。通过设置合理的权重系数,实现质量与能效的帕累托最优权衡。

内部模型:采用数据驱动与机理分析相结合的方式建立浮选流程的简化动态模型。例如,利用历史操作数据与运行数据,通过系统辨识方法建立各槽关键输出(如精矿品位、尾矿品位、液位)与关键输入(如前室液位、充气量、本机给药量)之间的传递关系模型,并考虑槽间物流耦合。

约束条件:明确设定操作变量(如各槽液位设定值、充气量设定值)的允许调整范围与变化速率限制,以及状态变量(如各槽浓度、泡沫层厚度)的安全工艺区间。

输出结果:MPC优化器在每个控制周期输出的是未来一段时间内,对各台浮选机关键设定值的优化轨迹。这些设定值(如下一级的液位设定值、充气量设定值区间)作为“指令”下发至下层控制器。

3.3 下层智能执行层:基于自适应模糊PID的单元控制器

下层控制器负责接收并执行上层MPC的设定值指令,并克服本地扰动。传统PID参数固定,难以适应浮选过程的非线性和时变性。本研究采用模糊PID控制器作为执行单元。

工作原理:控制器实时计算设定值与实际值的偏差及偏差变化率。模糊推理机依据预先设定的、基于专家经验的模糊规则(如“若偏差为正且偏差变化率为负小,则比例增益增大”),在线动态调整PID控制器的比例、积分、微分三个参数。

自适应优势:当矿浆性质变化或泡沫状态异常导致对象特性改变时,模糊PID能自动调整控制力度,保持调节过程的快速性与稳定性,有效抑制“跑槽”、“沉槽”等局部异常工况。

协同接口:下层控制器将MPC给出的设定值作为自身的“目标”,同时将本地执行情况(如阀门实际开度、当前扰动大小)及性能评估反馈给上层MPC,为下一周期的全局优化提供信息。

通过上层MPC的“全局视野、前瞻优化”与下层模糊PID的“精准执行、自适应抗扰”相结合,集群实现了从“各自为战”到“步调一致”的根本转变。

4. 面向能效优化的动态协同机制

协同控制不仅为稳定工艺服务,更是能效优化的核心使能手段。本研究在协同框架中深度融合了以下能效优化机制:

4.1 能耗指标内嵌的MPC优化

如前所述,在MPC的目标函数中显式地加入总能耗项,意味着控制器在寻找最优操作点时,会主动探索“在满足相同工艺要求下,哪种设定值组合更省电”。例如,它可能发现在特定原矿条件下,适当降低某些精选槽的充气量并微调液位,对最终品位影响甚微,却能显著节省空压机能耗。

4.2 基于工况识别的负荷动态分配策略

浮选生产线常设计有并联机组。传统上,并联机组多采用均匀分配负荷的方式。本研究提出智能化动态分配策略:平台实时分析原矿性质、目标产品要求等工况信息,通过查

询或计算最优负荷分配模型,动态调整进入各并联支路的矿浆流量比例及各支路内设备的运行强度。

例如,当处理易浮矿物时,系统可能识别为“高回收率工况”,自动强化粗选作业强度(适当提高充气量、降低液位以加强捕收),同时优化精选段能量使用。

对于老旧与新装机组的并联,系统可根据各机的效率特性曲线,分配与其效率最匹配的负荷,使高效机组在高效区多运行,整体能耗最低。

4.3 关键设备的联动节能控制

表1 某铅锌矿浮选生产线应用协同控制与能效优化策略前后对比(模拟数据)

评价指标	传统独立控制模式	协同控制与能效优化模式	改善效果	备注
工艺稳定性	最终锌精矿品位波动范围(%)	± 1.2	± 0.5	波动幅度降低58%
	锌回收率标准差(%)	1.8	1.0	稳定性提升44%
生产效率	平均单位时间处理量(t/h)	485	505	提升约4.1%
能耗指标	吨原矿浮选综合电耗(kWh/t)	8.5	7.3	降低约14.1%
	空压机单位气量电耗(kWh/m ³)	0.062	0.058	降低约6.5%
操作强度	关键操作参数(液位、充气)人工干预频次(次/班)	25-40	5-10	减少约75%

注:以上数据为基于典型工艺流程仿真与行业基准案例的综合模拟,实际效果因矿石性质、设备状态、基础自动化水平而异。

5. 实施挑战与未来展望

尽管本文提出的策略前景广阔,但其在实际部署中仍面临挑战:(1)数据质量与模型精度:高度依赖准确、可靠的传感数据。恶劣的工业环境对传感器维护、数据清洗提出了高要求。简化模型的预测精度直接影响MPC效果。(2)投资与维护成本:全面的传感器部署、计算平台升级与算法维护需要一次性投入与持续的IT/OT融合人才支持。(3)安全与可靠性:复杂算法的引入需经过充分测试,并设计完备的故障诊断与无扰切换机制,确保生产安全。

未来,随着边缘计算能力的提升,部分优化计算可下沉至车间,形成“云-边-端”协同,进一步降低延迟、提高可靠性。人工智能,特别是深度学习技术,将在泡沫图像特征与品位关联建模、复杂工况自适应识别、MPC内部模型自学习等方面发挥更大作用,使控制系统更具智能性与泛化能力。此外,将浮选集群的协同控制与上游碎磨、下游脱水乃至全厂能源管理系统集成,实现选矿全流程的智能化与绿色化,是必然的发展趋势。

参考文献

- [1]张士双,葛英勇,樊婷,等.物联网和工业云在选矿过程监控中的应用研究[J].自动化技术与应用,2024,43(3):1-4,26. DOI:10.20033/j.1003-7241.(2024)03-0001-05.
- [2]苏兆兴,李敬义.FXT浮选机智能控制系统设计[J].淮北职业技术学院学报,2025,24(3):109-112.
- [3]张洪菖,牟松,郭靖宇,等.浮选过程自动化加药控制系统的研究[J].有色矿冶,2024,40(1):41-42,55. DOI:10.3969/j.issn.1007-967X.2024.01.012.
- [4]朱坤.选煤厂浮选自动化控制装置系统设计研究[J].机械管理开发,2022,37(2):266-268. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.02.112.

协同控制实现了空压机(气源)与各浮选槽(气耗单元)的联动。MPC根据各槽需求的动态充气量设定值,汇总预测出总气量需求,并提前通知空压机群控系统,调整空压机运行台数与加载率,避免“大马拉小车”或频繁加卸载,实现气源侧的高效匹配。搅拌电机的频率也可根据矿浆浓度、液位进行优化调节,在保证悬浮效果的前提下节约电能。

为清晰展示协同控制与能效优化带来的综合效益,假设某铅锌矿浮选生产线应用本策略前后的关键指标对比如下表所示:

6. 结论

本研究针对大型浮选机集群的协同控制与能效优化问题,系统性地提出了一套融合物联网、模型预测控制与自适应执行技术的解决方案。该方案通过构建全息感知网络,实现了生产状态的透明化;利用MPC进行上层全局滚动优化,统筹质量与能效目标,生成协同设定指令;借助模糊PID控制器实现下层的精准、鲁棒执行,有效抑制局部干扰。核心创新在于将能效指标深度嵌入协同优化框架,并通过动态负荷分配、设备联动等机制,实现了从单体节能到系统级能效最优的跨越。

理论与模拟分析表明,该策略能够显著提升浮选生产线的运行稳定性与工艺指标,同时达成可观的节能降耗效果,有效助力选矿企业降本增效与绿色转型升级。本研究为复杂工业流程的智能化协同控制提供了可借鉴的范式,对推动自动化控制、智能制造及节能降耗技术在流程工业中的深度应用具有重要的理论价值与实践指导意义。后续工作将聚焦于工业现场的中试验证与算法工程化,以加速该技术的落地推广。