

Construction of intelligent optimization control and digital twin system for whole process of mineral processing plant

Rui Weng

Sumeida International Technology Trading Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract

With the rapid advancement of intelligent manufacturing and industrial internet technologies, mineral processing plants are accelerating their transition toward digitalization and smart operations. Traditional plants face challenges such as complex workflows, delayed responses, heavy reliance on manual labor, and difficulties in resource optimization. The deep integration of full-process intelligent optimization control with digital twin systems provides a new pathway for achieving real-time production monitoring, predictive decision-making, and adaptive optimization in mineral processing plants. This paper reviews the theoretical foundations and key technologies of intelligent control in mineral processing plants, analyzes the application processes of digital twins in data acquisition, virtual-real mapping, and simulation optimization, and explores the synergistic effects of these two approaches on process stability, performance enhancement, early fault detection, and green/low-carbon development.

Keywords

mineral processing plants; full-process; intelligent optimization control; digital twin; industrial internet; production automation

选矿厂全流程智能优化控制与数字孪生系统构建

翁锐

苏美达国际技术贸易有限公司，中国·安徽 合肥 230000

摘要

随着智能制造和工业互联网技术的快速发展，选矿厂生产流程正加速迈向数字化、智能化。传统选矿厂面临流程复杂、响应滞后、人工依赖大和资源优化难等问题。全流程智能优化控制与数字孪生系统的深度融合，为选矿厂实现生产实时感知、预测决策和自适应优化提供了新路径。本文梳理了选矿厂智能控制的理论基础与关键技术，分析数字孪生在数据采集、虚实映射、仿真优化等环节的应用流程，探讨两者协同对工艺稳定、指标提升、故障预警、绿色低碳等方面的成效。

关键词

选矿厂；全流程；智能优化控制；数字孪生；工业互联网；生产自动化

1 引言

矿业作为国民经济的重要基础产业，选矿厂是矿产资源高效利用和绿色发展的核心环节。面对矿石品位波动、市场需求升级和能源资源环境约束，传统选矿厂的人工经验控制和静态分散管理模式已难以支撑高质量、高效率、低能耗的生产需求。近年来，随着人工智能、物联网、大数据、云计算等新一代信息技术的广泛应用，选矿厂流程智能化、控制优化和数字孪生系统构建成为矿业数字化转型的前沿方向。智能优化控制实现了生产流程的多变量动态感知、精准调度和自适应决策，显著提升了生产过程的稳定性、经济性和安全性。数字孪生系统则以虚实映射和全生命周期管理为核心，打通选矿厂物理实体与数字模型之间的信息通道，实

现全流程的可视化、可控化和可预测化。两者协同为矿山企业提供了实时、精准、高效的生产管理新范式。本文将围绕选矿厂全流程智能优化控制与数字孪生系统的集成路径、关键技术与应用成效展开论述，旨在为矿山企业智能化升级和高质量发展提供理论依据与技术支撑。

2 选矿厂全流程智能优化控制的理论基础与关键技术

2.1 全流程智能控制的系统逻辑与功能架构

选矿厂全流程智能控制以系统工程和控制科学为理论基础，围绕破碎、磨矿、分级、浮选、浓缩、过滤等主要工艺环节，构建感知—分析—决策—执行一体化的自动化管控体系。系统逻辑强调数据实时采集、关键参数自适应识别、生产指标多维优化和各单元动态协同。智能优化控制平台集成传感器网络、PLC/DCS 自动化系统、边缘计算与云服务，实现生产数据全流程感知与动态决策。通过工艺参数建模、

【作者简介】翁锐（1985-），男，中国安徽六安人，硕士，从事矿物加工工程研究。

过程控制优化、生产计划排布、能耗物耗协同优化等手段，平台能自动识别瓶颈环节，动态调整工艺参数，保证生产稳定与质量达标。基于模型预测、智能算法与专家系统的集成，推动选矿厂由静态管控向智能预测和自优化演进。

2.2 智能优化控制算法与生产过程自适应机制

智能优化控制的核心在于对复杂生产过程多目标、多约束、多变量的动态协调与决策。结合数据驱动与机制建模，采用模型预测控制（MPC）、模糊控制、神经网络、深度强化学习等智能算法，对原矿粒度、磨矿粒度、浮选剂添加量、流量分配等关键参数实现在线预测与优化。系统依据实时生产数据动态调整控制策略，自适应应对矿石品位波动、设备状态变化、负荷变化等干扰，提升流程稳定性和资源利用率。智能优化控制机制还支持生产异常与故障的快速诊断与自恢复，提高了生产安全性和运行效率。通过优化能耗分配和过程损失，智能控制为选矿厂实现绿色低碳运营提供技术基础。

2.3 数据采集与工业互联网平台建设

全流程智能优化控制离不开高质量数据采集与工业互联网平台支撑。选矿厂通过部署各类智能传感器，实现对矿浆流量、密度、品位、温度、压力、电耗、药剂浓度等生产数据的全方位、实时采集。数据采集系统与自动化控制平台无缝集成，形成矿厂多源异构数据的融合与共享。基于工业互联网平台，企业可实现生产数据的云端存储、远程运维和大数据分析，推动选矿厂跨地域、跨系统的协同管控。数据平台还支持设备健康管理、生产过程追溯、能耗分析与碳排放统计，为智能优化和数字孪生系统提供数据基础与决策支撑。

3 数字孪生系统在选矿厂的构建与应用

3.1 数字孪生的原理与系统架构

数字孪生（Digital Twin）作为新一代智能制造的核心技术，通过构建物理选矿厂的高精度数字模型，实现虚拟空间与现实生产全周期的信息同步与动态交互。选矿厂数字孪生系统以数据驱动为基础，整合原矿进厂、破碎、磨矿、浮选、浓缩、过滤、尾矿等工艺流程，覆盖设备运行、能耗管理和生产调度等环节。系统架构通常分为数据采集层、建模仿真层、业务集成层和应用展示层四大部分。数据采集层依托工业传感器、PLC、边缘计算等技术，实现生产环境的多源数据聚合与实时上报。建模仿真层通过工艺流、设备健康、能耗分析等多模型协同，精确还原物理工厂的运行规律。业务集成层对接ERP、MES等管理系统，打通计划、生产、运维等多业务链路，实现信息流与业务流的无缝集成。应用展示层则面向管理与操作人员，提供三维可视化运维、实时监控、预测分析和智能决策等应用，全面支撑选矿厂生产优化与全生命周期管理。

3.2 数据驱动的虚实映射与动态仿真

选矿厂数字孪生系统依托物理机理模型与数据驱动模

型的深度融合，实现虚实一体化的工艺流程建模与设备状态映射。系统通过高频采集的传感器数据与历史生产数据驱动仿真平台，对矿石粒度分布、浆体浓度、流量、设备转速、药剂配比等关键生产变量进行动态同步与精准模拟。虚拟模型不仅能够实时反映物理系统状态，还能对不同生产场景进行虚拟实验，预测参数变化对生产指标的影响。多场景、多工况的虚拟仿真支持生产流程的敏感性分析、瓶颈诊断和异常预测，有助于发现潜在工艺缺陷、提前预警设备异常，并为工艺参数的智能优化与调度调整提供理论依据。动态仿真平台还支持历史数据回溯与故障溯源，通过对典型工况和故障案例的复盘，实现生产知识的积累与智能推理，增强企业的生产应变与工艺创新能力。

3.3 数字孪生驱动的生产优化与全生命周期管理

数字孪生系统不仅是选矿厂数字化转型的基础平台，更是智能优化和全生命周期管理的“智慧大脑”。系统集成生产计划、工艺参数优化、设备健康管理、能耗分析等多模块，实现从生产指令下达到工艺执行、从设备维护到能效提升的智能闭环管控。平台可基于大数据和AI算法对原矿品位波动、设备健康状况、能源消耗、药剂使用等进行实时评估和动态预测，智能调整配矿方案、工艺参数和生产节奏，实现资源配置最优、生产成本最低和指标产出最优。数字孪生支持在线工艺仿真和设备远程诊断，实现“少人化”“无人化”运维，提升管理效率和应急处置能力。通过设备全生命周期数据追踪与故障诊断，平台还能智能安排维保计划，延长设备寿命、降低停机损失。数字孪生最终将选矿厂运营管理从静态响应向动态感知、预测预警、持续优化转变，为打造绿色矿山、智能工厂和高质量发展提供系统性技术保障。

4 智能优化与数字孪生协同驱动下的选矿厂应用成效

4.1 工艺稳定性与生产效率的提升

全流程智能优化与数字孪生系统在选矿厂的集成应用，显著提升了工艺流程的稳定性与生产效率。系统依托实时数据采集与虚拟映射，可持续动态监控磨矿、浮选、浓缩等关键工艺参数，及时识别生产波动并实现自适应调节。通过智能化控制，系统能够自动优化作业参数，减少人为操作的随机性与滞后性，保证工艺过程在最优区间稳定运行。设备利用率随之提升，生产线负荷分配更加合理，产出质量趋于均衡一致。同时，单位产品的能耗与原材料消耗指标大幅下降，为企业节能降耗、提质增效奠定了坚实基础，实现了智能化生产和精益化管理的有机结合。

4.2 故障预警与设备运维智能化

借助数字孪生平台和大数据分析，选矿厂设备运维管理从“事后维修”转向“预测性维护”。平台通过设备运行数据的实时采集与分析，结合机理建模与历史故障库，能精准识别设备健康状态，提前发现异常趋势并预警潜在故障。

系统还能自动分析故障原因,智能推荐维护方案与配件需求,极大提升了设备运维决策的科学性和反应速度。智能巡检机器人、远程诊断与工单自动派发功能,大幅降低了设备非计划停机率和维护人力成本,确保生产线连续稳定运行。设备管理模式由被动响应转为主动防控,助力选矿厂迈向智能、精益、高效的运维新时代。

4.3 绿色低碳与资源高效利用

全流程智能优化与数字孪生系统深度赋能选矿厂绿色低碳发展。平台可对能耗、药剂、原料等全流程进行动态监控与智能调节,精准优化生产配比、药剂投加和设备运行参数,最大程度提升资源利用效率,减少能源与物料浪费。能耗与碳排放数据实现实时采集、自动统计,为企业双碳管理与能效提升提供科学决策依据。通过精细化的生产调控和绿色工艺改进,选矿厂有效降低单位能耗、排放和废弃物产生,实现经济效益与生态效益的同步提升,积极响应国家“双碳”战略,推动矿业行业向绿色、可持续方向转型升级。

5 选矿厂智能优化与数字孪生系统构建的创新路径

5.1 多源异构数据融合与智能决策模型创新

选矿厂的全流程智能控制与数字孪生系统建设,首先要解决多源异构数据的融合问题。现代选矿生产涉及原矿性质、设备运行、工艺参数、能耗与环境监测等多类型数据,来源广泛、格式各异。通过大数据平台和工业物联网,实现各业务环节数据的统一采集与标准化管理,是智能决策的基础。依托人工智能与机器学习技术,构建面向选矿工艺的多模型耦合机制,推动生产数据与知识经验的深度融合。新一代决策模型可实时分析生产异常、动态预测指标波动、实现工艺参数自优化,为调度、能耗、设备管理等多目标提供科学决策支撑。随着深度强化学习等智能算法的落地应用,系统具备了自学习、自适应、进化的能力,推动选矿厂由传统“经验驱动”向“数据—知识—智能驱动”高阶跃迁,显著提升工艺稳定性和智能化水平。

5.2 数字孪生平台的开放互联与产业生态拓展

高效的数字孪生系统需与工业互联网、云计算平台紧密衔接,构建开放、互联、可扩展的数字底座。通过标准化接口、数据协议和API开发,实现与ERP、MES、设备监控、能耗管理等系统的深度集成,推动企业级信息流、业务流、控制流一体化。平台支持数据互通和资源共享,不仅服务于厂内多环节协同,还可向上游原料供应、下游产品配送

延展,打通产业链数据壁垒,形成智能供应链和生态协同网络。数字孪生平台还可通过边缘计算与云端服务,灵活支持多工厂、多场景应用,赋能业务快速迭代和创新。未来,选矿厂将以开放平台为枢纽,联合设备厂商、软件商和科研机构,打造产业级智能生态,推动选矿行业从“单点智能”向“产业智能、生态智能”系统升级。

5.3 智能工厂与绿色矿山协同发展新模式

在“双碳”目标与高质量发展背景下,选矿厂智能优化与数字孪生系统不仅要服务于生产智能化,更要与绿色矿山、生态矿业发展深度融合。通过智能装备自动化、柔性生产线布局 and 全流程环境监控,实现选矿工艺全过程的能耗优化、污染物减排和废弃物资源化利用。数字孪生驱动的全生命周期管理,推动从原矿开采、选矿生产、尾矿处理到设备运维的绿色管控与智慧运营。以数据和智能决策支撑生态治理和循环经济,实现“绿色选矿—清洁生产—智能运维”一体化新模式。加强产学研用协作和复合型人才培养,推进数字孪生和智能优化成果向行业应用和标准转化,为智能矿山建设和矿业可持续发展提供创新动力和坚实保障。

6 结语

选矿厂全流程智能优化控制与数字孪生系统的深度融合,是矿业数字化、智能化和绿色高效发展的必由之路。通过系统集成智能优化控制算法、工业互联网平台和数字孪生建模,选矿厂实现了生产过程的精准感知、动态优化与智能决策,有力支撑了矿产资源高效开发、能耗物耗持续降低和生产管理模式变革。未来,随着智能技术、数字经济和绿色发展理念的深入融合,选矿厂智能控制与数字孪生系统将不断拓展应用深度和广度,助力矿业实现从资源依赖向创新驱动、从粗放生产向高质量发展的历史性转型。

参考文献

- [1] 祝晋,刘威,高立强.智能选矿厂的建设探索与实践[J].有色金属(选矿部分),2023,(01):121-126.
- [2] 向凤红,张勇,张云生.选矿厂生产物流递阶智能控制系统功能分析与结构设计[J].有色冶金设计与研究,2003,(S1):125-128.
- [3] 来耀栋.酒钢选矿厂磨矿分级计算机智能控制系统[J].甘肃冶金,2000,(02):48-52.
- [4] 周淤成,张虎.选矿在线矿浆浓度检测技术分析[J].低碳世界,2025,15(09):76-78.
- [5] 刘玉森.特大型磁铁矿无人化选矿厂自动化系统建设与探索[J/OL].控制工程, 1-6[2025-09-23].