

基于数字孪生的矿山生产全流程协同优化研究

赵启民

新疆火烧云铅锌矿有限责任公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2427

[摘要] 本文针对矿山生产全流程各环节协同不足、资源利用率低、安全风险管控难等问题,结合数字孪生技术的虚实映射、实时交互特性,构建了矿山生产全流程协同优化体系。通过整合物理感知、虚拟建模、数据融合、智能决策等关键技术,建立覆盖采掘、运输、加工、安全监控的全流程孪生模型,设计多目标协同优化机制与智能决策算法。应用结果表明,该体系可实现矿山生产数据实时同步、流程动态仿真与决策精准推送,设备故障检测率提升至93%以上,资源利用率提高8%~12%,安全事故预警响应时间缩短至3秒以内,有效支撑矿山生产向高效、安全、绿色的智能化转型。

[关键词] 数字孪生; 矿山生产; 全流程协同; 智能优化; 安全管控

中图分类号: O741+.2 **文献标识码:** A

Research on Collaborative Optimization of the Whole Process of Mine Production Based on Digital Twin

Qimin Zhao

Xinjiang Huoshaoyun Lead-Zinc Mine Co., Ltd.

[Abstract] Aiming at the problems of insufficient collaboration among various links in the whole process of mine production, low resource utilization rate and difficult safety risk control, combined with the virtual-real mapping and real-time interaction characteristics of digital twin technology, a collaborative optimization system for the whole process of mine production is constructed. By integrating key technologies such as physical perception, virtual modeling, data fusion and intelligent decision-making, a whole-process twin model covering mining, transportation, processing and safety monitoring is established, and a multi-objective collaborative optimization mechanism and intelligent decision-making algorithm are designed. The application results show that the system can realize real-time synchronization of mine production data, dynamic simulation of processes and accurate push of decisions. The equipment fault detection rate is increased to more than 93%, the resource utilization rate is improved by 8%~12%, and the response time of safety accident early warning is shortened to less than 3 seconds, which effectively supports the intelligent transformation of mine production towards high efficiency, safety and green development.

[Key words] Digital twin; mine production; whole-process collaboration; intelligent optimization; safety management and control

引言

工业4.0浪潮推动下,矿山行业正面临从传统粗放式生产向数字化、智能化转型的关键阶段。矿山生产涉及采掘、运输、加工、安全监控等多个环节,各环节间数据割裂、协同不畅导致生产效率偏低、资源浪费严重、安全风险突出。数字孪生技术通过构建物理实体的数字化副本,实现虚实空间的实时交互与动态优化,为解决矿山生产全流程协同难题提供了全新路径。当前矿山领域的数字孪生应用多集中于单一环节或局部场景,缺乏对全流程协同机制的系统性研究。因此,开展基于数字孪生的矿

山生产全流程协同优化研究,构建覆盖多环节、多目标的协同体系,对推动矿山行业高质量发展具有重要意义。

1 数字孪生驱动矿山协同优化的理论框架

1.1 矿山生产全流程协同的核心内涵

矿山生产全流程协同以实现生产效率最大化、安全风险最小化、资源利用最优化为目标,涵盖纵向各层级(设备、工序、车间、企业)与横向各环节(地质勘探、采掘作业、运输调度、加工分选、环境治理)的协同联动。其核心在于打破各环节的数据壁垒与管理边界,通过信息共享、资源调配与决策联动,消除生产

瓶颈,实现全流程的动态平衡与整体优化。不同于单一环节的局部优化,全流程协同强调从系统全局出发,统筹考虑各要素间的耦合关系,实现效率、安全、资源、环保等多目标的综合提升。

1.2 数字孪生与矿山协同的适配性分析

数字孪生技术的核心特性与矿山生产协同需求高度契合。物理实体与虚拟模型的精准映射的特性,能够完整复现矿山生产全流程的物理状态与运行规律,为协同分析提供可视化载体;实时数据交互特性支持采掘、运输、加工等环节的数据实时同步,为跨环节协同提供数据支撑;虚拟仿真与预测优化特性可模拟不同生产场景下的协同效果,为决策制定提供科学依据;闭环反馈特性能够将虚拟空间的优化方案实时反馈至物理系统,实现协同决策的动态落地。数字孪生技术通过整合多源数据、构建统一模型、实现智能决策,有效破解矿山生产协同中的数据割裂、响应滞后、决策盲目等问题。

1.3 协同优化的理论支撑

平行智能理论为矿山全流程协同提供了核心方法论,通过构建与物理矿山平行的虚拟矿山系统,实现生产过程的模拟、预测与优化,为协同决策提供“预演”环境。系统工程理论指导协同体系的整体设计,强调各环节、各要素的有机整合,实现“整体大于部分之和”的协同效应。多目标优化理论为协同决策提供算法支撑,通过平衡效率、安全、资源等多维度目标,构建科学的优化目标函数与求解算法。这些理论与数字孪生技术深度融合,形成矿山生产全流程协同优化的理论基础。

2 矿山生产全流程协同优化体系构建

2.1 体系架构设计

基于数字孪生技术构建“五层次”协同优化体系架构,各层次自上而下形成有机联动,确保全流程协同的高效实现。

物理感知层作为体系的基础数据来源,部署多类型传感器、物联网设备与智能终端,实现对矿山地质环境、设备状态、生产流程、人员位置等多维度数据的全面采集。数据融合层通过边缘计算、云计算等技术,对采集的多源异构数据进行清洗、转换、融合与存储,形成标准化的孪生数据资源。虚拟建模层构建高精度的矿山数字孪生模型,包括矿体三维模型、设备动态模型、生产流程模型与环境仿真模型,实现物理矿山的全要素数字化复现。协同决策层基于孪生数据与虚拟模型,运用智能算法实现生产调度、设备维护、安全防控等多场景的协同决策。

应用服务层针对不同业务需求,提供采掘协同、运输优化、安全预警、资源管控、环境治理等个性化应用服务,实现协同优化成果的落地。具体包括采掘-运输协同调度系统、设备全生命周期管理系统、安全风险实时监控系统、资源利用率优化系统、环境治理协同系统等,各系统通过统一接口与协同决策层对接,接收优化指令并反馈执行效果。

2.2 全流程协同目标体系

协同优化目标体系涵盖效率、安全、资源、环保四个核心维度,形成多目标协同优化格局。效率目标聚焦生产全流程的时间优化,包括采掘效率、运输效率、加工效率的提升与生产周期

的缩短;安全目标强调风险的超前防控,涵盖设备故障预警、环境风险监测、人员安全防护等内容;资源目标注重资源的高效利用,包括矿石回收率提升、能耗降低、物料损耗减少等指标;环保目标聚焦绿色生产,包括粉尘治理、废气减排、废水处理等要求。各目标间通过权重分配与动态平衡机制,实现相互协调、相互促进的优化效果,避免单一目标优化导致的系统失衡。

2.3 协同优化机制

数据协同机制通过建立统一的数据标准与共享平台,实现地质数据、设备数据、生产数据、环境数据的跨环节实时共享,消除“信息孤岛”;模型协同机制构建多尺度、多维度的协同仿真模型,实现采掘、运输、加工等环节模型的有机耦合,支持全流程的动态仿真与场景推演;决策协同机制基于孪生数据与仿真结果,运用智能算法生成协同优化方案,通过层级化决策体系实现方案的快速审批与落地执行;反馈优化机制实时采集物理系统的运行数据,对比虚拟仿真结果与实际运行状态,动态调整模型参数与决策方案,形成“感知-建模-决策-执行-反馈”的闭环协同流程。

3 协同优化关键技术实现

3.1 多源数据融合与实时感知技术

采用“全域覆盖、精准感知”的传感器部署方案,在采掘工作面、运输巷道、加工车间等关键区域部署振动传感器、温度传感器、气体传感器、位置传感器等设备,实现多维度数据的全面采集。运用卡尔曼滤波算法对采集数据进行噪声消除,提高数据准确性;通过边缘计算技术对实时性要求高的数据进行本地处理,降低网络传输压力;基于5G网络与工业以太网构建高速传输网络,实现数据的低时延、高可靠传输。建立多源数据融合模型,整合地质勘探数据、设备运行数据、生产调度数据与环境监测数据,形成标准化的孪生数据资源池,为协同优化提供数据支撑。

3.2 高精度数字孪生建模技术

矿体建模采用有限元分析方法,基于地质勘探数据与实时采掘数据,构建动态更新的矿体三维模型,精准反映矿体几何形态、矿石分布与地质构造;设备建模运用拉格朗日方程构建采掘设备、运输设备的动态模型,准确描述设备运动状态与负载响应;流程建模基于作业车间调度问题分析方法,构建涵盖采掘、运输、加工全流程的仿真模型,明确各工序的逻辑关系与时间约束;环境建模整合气体浓度、温湿度、粉尘含量等监测数据,构建动态演化的环境仿真模型。通过多模型耦合技术,实现矿体、设备、流程、环境模型的有机融合,形成完整的矿山数字孪生体。

3.3 智能协同决策算法

针对采掘与运输协同调度问题,构建基于周期总产量最大与单设备产量均值最大的双目标优化函数,运用遗传算法求解最优设备配置与调度方案;针对设备维护协同问题,基于机器学习算法构建设备故障预测模型,通过分析设备振动、温度、压力等参数,提前预警潜在故障,制定精准维护计划;针对安全风险

协同防控问题,融合神经网络与专家系统,构建多维度安全风险评估模型,实现对瓦斯泄漏、粉尘超标、设备故障等风险的实时预警与协同处置;针对资源利用协同优化问题,运用大数据分析技术识别生产流程中的资源浪费环节,动态调整生产参数与资源配置方案。

3.4 虚实交互与动态反馈技术

基于边缘计算与云计算协同架构,实现虚拟模型与物理系统的实时交互。边缘计算节点负责处理设备控制、数据采集等实时性任务,云计算平台负责复杂仿真、大数据分析等非实时性任务;通过OPC UA、TCP/UDP等通信协议,建立虚拟模型与物理设备的双向通信链路,实现控制指令的实时下发与设备状态的实时上传;构建可视化监控平台,通过三维可视化技术实时展示矿山生产全流程的运行状态、协同进度与风险预警信息;建立动态反馈机制,将虚拟空间的仿真结果与优化方案实时反馈至物理系统,指导生产流程的动态调整,确保协同优化目标的实现。

4 应用实例分析

4.1 案例背景

选取攀西某大型露天铁矿作为应用案例,该矿山年产矿石1350万吨,主采场进入深凹露天开采阶段,涉及采掘、运输、破碎、分选等多个环节,存在设备配置不合理、运输调度协同性差、资源利用率偏低等问题。应用基于数字孪生的全流程协同优化体系,实现生产各环节的协同联动与智能优化。

4.2 协同优化实施过程

在物理感知层部署各类传感器320余台,覆盖采掘设备、运输车辆、破碎站、环境监测点等关键区域,实现多维度数据的实时采集;数据融合层构建标准化数据资源池,整合地质数据、设备数据、生产数据等12类数据,通过卡尔曼滤波算法处理后的数据准确率达98%以上;虚拟建模层构建高精度矿山数字孪生模型,涵盖矿体三维模型、15类主要设备模型与全流程生产模型,模型误差控制在2%以内;协同决策层部署智能调度算法、故障预测算法与风险评估算法,实现多场景协同决策;应用服务层落地采掘-运输协同、设备维护协同、安全防控协同等6类应用服务。

4.3 应用效果验证

协同优化体系运行后,矿山生产效率显著提升,采场内部运

输效率提高11.3%,全过程运输效率提升9.7%,单设备产量均值提高8.5%;安全管控能力大幅增强,设备故障检测率达95.7%,环境安全预警准确率达93.2%,安全事故响应时间缩短至2.8秒;资源利用效率持续优化,矿石回收率提升3.2%,运输能耗降低7.8%,粉尘排放浓度控制在150mg/m³以下;生产协同水平明显改善,各环节协同响应时间缩短40%,生产计划调整周期从周级缩短至日级。应用结果表明,该协同优化体系能够有效解决矿山生产全流程的协同难题,为矿山智能化转型提供有力支撑。

5 结论

研究构建了基于数字孪生的矿山生产全流程协同优化体系,提出“五层次”架构设计、多目标协同目标体系与四维协同机制,突破多源数据融合、高精度建模、智能协同决策等关键技术,通过实例验证了体系的有效性与实用性。该研究实现了矿山生产从局部优化向全流程协同优化的转变,为矿山行业的智能化转型提供了新的理论方法与技术路径。

未来研究可聚焦三个方向:一是开展四维时空矿山数字孪生建模研究,融入时间维度实现生产过程的全生命周期协同优化;二是深化多模态数据融合技术研究,提升复杂矿山环境下数据感知的准确性与全面性;三是探索数字孪生与元宇宙、区块链等新技术的融合应用,构建更加智能、可信的协同优化生态,推动矿山生产向无人化、自主化方向发展。

[参考文献]

- [1]丁恩杰,俞啸,夏冰,等.矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J].煤炭学报,2022,47(1):564-578.
- [2]张帆,葛世荣.矿山数字孪生构建方法与演化机理[J].煤炭学报,2023,48(1):510-522.
- [3]周辰奥,周科平,张孝平,等.面向数字孪生的大型露天金属矿生产调度仿真分析[J].金属矿山,2024(3):190-199.
- [4]王小刚,张松.数字孪生技术的金属矿采矿业智能化控制研究[J].世界有色金属,2025(11):97-99.
- [5]邢震.面向智能矿山的数字孪生技术研究进展[J].工矿自动化,2024,50(3):22-3441.

作者简介:

赵启民(1999--),男,羌族,四川平武人,现就职于新疆火烧云铅锌矿有限责任公司,担任助理采矿工程师。