

数字孪生驱动下的露天矿山采剥计划动态优化模型

陈志勇

中国电建集团华中投资有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]数字孪生驱动露天矿山智能开采,能够精准破解传统静态采剥计划的固有短板。当前大型露天砂石矿山普遍采用静态固化的采剥生产方案,矿山开采过程中,存在地质条件动态变化、生产设备工况波动、户外气象环境干扰等诸多不确定因素,固定僵化的静态计划无法跟随现场工况实时调整,进而引发一系列生产难题。基于此,以大型露天砂石矿山为工程依托,基于数字孪生技术构建四层架构的矿山全流程闭环动态优化体系,以综合经济效益最大化为核心优化目标,兼顾开采安全规范、设备运行阈值、生产时序要求、资源开采标准等多重约束,搭建多目标采剥计划优化模型。工程实践结果表明,搭建的数字孪生动态优化体系提质增效效果突出。矿山剥采比波动幅度降低,设备有效作业效率提升,设备利用率提升,生产履约能力增强,产能达成率提升,综合生产成本下降。

[关键词]数字孪生;露天矿山;采剥计划;动态优化;多目标模型;NSGA-II算法

DOI: 10.33142/ect.v4i9.20483

中图分类号: TD854

文献标识码: A

Dynamic Optimization Model of Open-pit Mining Stripping Plan Driven by Digital Twin

CHEN Zhiyong

PowerChina Central China Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Digital twin drives intelligent mining in open-pit mines, which can accurately solve the inherent shortcomings of traditional static mining and stripping plans. At present, large-scale open-pit sand and gravel mines generally adopt a static solidification mining and stripping production plan. During the mining process, there are many uncertain factors such as dynamic changes in geological conditions, fluctuations in production equipment operating conditions, and outdoor meteorological environment interference. The fixed and rigid static plan cannot be adjusted in real time according to the on-site operating conditions, which leads to a series of production difficulties. Based on this, a four layer closed-loop dynamic optimization system for the entire mining process is constructed using digital twin technology, with a large-scale open-pit sand and gravel mine as the engineering support. The core optimization objective is to maximize comprehensive economic benefits, while taking into account multiple constraints such as mining safety regulations, equipment operation thresholds, production sequence requirements, and resource mining standards. A multi-objective mining and stripping plan optimization model is built. The engineering practice results show that the built digital twin dynamic optimization system has outstanding effects in improving quality and efficiency. The fluctuation amplitude of mining stripping ratio is reduced, the effective operating efficiency of equipment is improved, the utilization rate of equipment is increased, the production performance ability is enhanced, the production capacity achievement rate is increased, and the comprehensive production cost is reduced.

Keywords: digital twin; open-pit mines; mining and stripping plan; dynamic optimization; multi objective model; NSGA-II algorithm

引言

露天砂石矿山是基建工程原材料的核心供应源头,矿山采剥生产计划是否科学合理,直接影响着矿山的生产安全、经济效益和整体产能效率^[1]。但在矿山实际生产过程中,现场存在大量不确定的干扰因素。矿体的真实赋存情况会随着开采推进不断更新揭露,岩土材质性质分布不均,采掘设备会出现磨损和故障,极端天气突发影响施工,排

土场库存容量持续变化等,导致原本固定的静态生产计划和现场实际作业情况严重脱节,进而频繁出现剥采比例失衡、台阶开采顺序混乱、设备闲置停工或超负荷运转、边坡稳定性降低等各类问题,极大限制了矿山向智能化、高效化、安全化方向升级发展^[2]。当前,数字矿山、智能矿山建设工作持续推进,数字孪生技术凭借虚实精准映射、数据驱动运转、实时交互联动、动态迭代更新的突出优势,

依托数字孪生技术搭建和物理矿山完全同步的虚拟矿山模型,实时采集、融合分析矿山多源生产数据,通过仿真推演模拟现场生产状态,从而对生产计划进行动态调整 and 智能优化。基于以上行业现状和现存技术短板,以某大型露天砂石矿山实际工程为研究载体,构建数字孪生驱动的露天矿山采剥计划动态优化模型,搭建虚实闭环的生产优化体系。通过耦合矿山多重生产约束条件,结合智能算法求解最优生产方案,实现矿山采剥作业全流程的动态智能调度,能够有效提升矿山生产的经济效益和安全管控水平。

1 工程概况

依托某大型露天砂石矿山项目,该矿山开采范围大、开采台阶数量多,采剥作业区域较为分散,属于典型的大型露天边坡矿山。矿山主要为区域基础设施建设提供砂石原料,日常生产任务繁重,对整体产能的稳定性、连续性要求极高。矿区整体地质条件复杂,矿体与围岩的夹层分布杂乱无章,岩土体的强度在不同区域差异较大,且矿山开采推进过程中,现场地质条件会持续动态变化,不确定性较强。同时,矿区生产设备保有量大,现场作业工况随时会出现波动。以往依靠人工编制的静态采剥计划,无法适配地质条件、设备运行状态的实时动态变化,直接导致矿山生产出现诸多问题:剥采比波动幅度大、各类开采设备实际利用率偏低、整体开采生产成本长期偏高。除此之外,矿区地处亚热带季风气候区,雨季降雨集中、雨量大,

频繁造成现场采剥作业临时停工中断,进一步加剧了采剥计划与现场实际生产脱节的问题。矿山核心基础参数统计如下表 1 所示。

2 矿山数字孪生体系架构搭建

结合露天矿山采剥全流程作业特征,以及生产计划需要随时动态调整的实际需求,依托数字孪生虚实映射、数据互通、迭代优化的核心能力,搭建现场感知、虚拟孪生、数据交互、决策优化四层闭环管控架构,实现物理矿山全方位感知、虚拟模型精准还原、数据实时流转、采剥计划智能优化的全闭环管理。现场感知层是整套体系的数据基础,通过布置 GNSS 定位、边坡监测、设备工况采集、视频监控等智能设备,全方位采集矿山地形地质、设备运行状态、生产进度、环境及安全隐患等多维度实时数据。虚拟孪生层是虚实联动的核心,依托实测数据搭建 1:1 全真矿山虚拟模型,覆盖地形、矿体、开采台阶、作业设备、排土场等模块,同步接入现场数据实时更新开采状态^[3]。数据交互层负责处理各类杂乱的源头数据,完成清洗、规整与融合,搭建矿山专属数据库,依靠 5G 和工业以太网保障各层级数据高速稳定传输。决策优化层搭载智能算法和采剥动态优化模型,结合现场实时工况自动调整开采区域、作业顺序和设备配置,通过孪生仿真验证方案可行性后下发作业指令,最终形成“感知-建模-决策-执行-反馈”的全流程智能闭环,整体架构如图 1 所示。

表 1 矿山基础工程参数统计表

基础参数项目	具体参数数值	备注说明
年设计生产能力	1000 万 t/a	砂石骨料成品开采规模
开采台阶高度	12m	符合露天矿山安全开采规范
最终边坡角	42° ~45°	边坡稳定安全阈值范围内
设计合理剥采比	1.25 : 1	最优经济开采配比区间
排土场总库容	850 万 m ³	满足年度剥离岩土堆放需求
主要开采设备	挖掘机、自卸运输车、破碎机	成套机械化开采设备
矿区气候特征	亚热带季风气候,多雨潮湿	每年 4~9 月为集中雨季



图 1 露天矿山数字孪生四层闭环体系架构图

3 采剥计划动态优化模型构建

3.1 模型基本假设

为保证模型求解的合理性与精准性,结合矿山现场工况设置合理假设条件:(1)优化周期内矿山开采边界、整体开采范围保持固定,仅调整采剥分区与时序;(2)所有采掘、运输设备均为合规正常作业,故障数据由感知系统实时录入模型;(3)矿石与围岩剥离量、开采品位以实时探测数据为准,剔除勘探静态数据误差;(4)边坡安全阈值、排土场最大库容遵循矿山安全设计规范。

3.2 目标函数构建

该模型将实现矿山综合经济效益最大化作为主要优化方向,综合经济效益是矿石全部销售收入减去各类生产运营产生的开销。生产运营开销主要分为三部分:采剥作业直接开支、设备运转开销、安全管理和环境治理等相关开销。

目标函数中, F 代表矿山综合经济效益, R 代表矿石销售总收入; C_1 是采剥作业直接成本,包含钻孔、爆破、土石方开挖等各个工序产生的费用; C_2 为采掘、运输、破碎整套设备的运行总花费,涵盖燃油损耗、设备维修保养以及人员薪酬; C_3 代表安全管控和生态环境治理的全部综合开销。

和传统静态开采方案采用固定成本计算方式不一样,本模型里的收益、成本全部按照动态变量处理。矿石销售收入会随着实际产出量、当下市场售价发生变化;作业成本与设备成本,也会根据开采区域划分、设备负载大小、现场开采条件实时调整,更贴合矿山现场真实生产情况,保证经济效益计算结果贴合实际、准确可靠^[4]。

3.3 约束条件设置

结合矿山安全规范与生产要求,设置多重耦合约束条件,保障优化方案合规可行。

(1)开采时序约束:露天矿山台阶开采遵循“从上至下、分层开采”原则,下级台阶开采进度不得超前上级台阶,相邻台阶高差、作业步距符合露天矿山安全开采规范。

(2)产能约束:日、月、年采剥总量满足矿山设计产能要求,同时单作业面开采量不超过设备最大作业负荷,避免设备超负荷作业或资源闲置。

(3)边坡安全约束:开采过程中边坡坡度、台阶坡面角、边坡位移变形量均控制在安全阈值范围内,杜绝边坡失稳风险。

(4)排土库容约束:剥离岩土排土量不超过排土场实时剩余库容,根据排土场堆积高度、堆积范围动态更新

库容参数。

(5)剥采比约束:实时剥采比控制在矿山最优设计区间内,避免剥离量过大造成资源浪费与成本激增^[5]。

4 模型求解算法与优化流程

搭建的采剥优化模型,属于典型的多目标、非线性、多约束的复杂优化问题。如果采用传统的线性规划算法求解,不仅计算效率低、耗时长,还很容易在求解过程中陷入局部最优解,无法找到全局范围内的最优生产方案,难以满足矿山采剥优化的实际需求。结合上面整理的模型特点,选用NSGA-II非支配排序遗传算法来求解矿山采剥优化模型。结合矿山现场实际开采作业情况,以及采剥作业模型的专属特点,针对性调好了算法的核心运行参数,避免参数通用导致的优化结果脱离现场:一是初始种群数量设为120;二是最大迭代次数定为200次,同时避免无效运算浪费时间;三是交叉概率0.85,保证大部分优质方案能互相融合优点、迭代出新方案;四是变异概率0.1,小概率微调方案,避免算法陷入固定思路、错过最优方案;五是精英保留比例0.2,每一轮优化都留存20%的最优优质方案,防止优质方案被淘汰。除此之外,借助数字孪生技术虚拟模型和真实现场实时同步、双向联动的核心优势,搭建了一套可以实时更新、持续优化的闭环动态优化系统。

第一步,全面采集矿山现场的基础数据。主要包括开采设备的运行状态、现场实时生产工况、矿体剩余储量、开采边界条件等各类核心原始数据,同时剔除错误、无效数据,修正偏差数据,完成数据预处理,保证所有基础数据真实、准确、可用。

第二步,实时更新数字孪生虚拟矿山模型。把处理好的现场真实数据同步录入虚拟模型,让电脑里的虚拟矿山和现实中的矿山地形、设备、矿体情况完全匹配,杜绝模型和现场脱节的问题。

第三步,动态修正优化模型规则。根据实时更新的现场数据,随时调整采剥优化模型的各项参数和生产约束条件。

第四步,智能生成优化采剥方案。调用调试完毕的NSGA-II优化算法,依托贴合现场的精准模型,快速运算生成多套不同侧重点、可落地的采剥作业优化方案,供现场对比选择。

第五步,虚拟仿真校验评估。在数字孪生的虚拟仿真环境中,对每一套生成的方案进行模拟开采测试,重点核验方案的安全生产合规性、生产经济效益、采剥作业效率、资源利用率等核心指标,全方位排查方案隐患、评估方案

优劣。

第六步，落地最优作业方案。综合对比所有方案的各项指标，筛选出安全性最高、效益最好、效率最优的综合优质采剥计划，投入矿山现场实际开采作业。

第七步，闭环反馈持续优化。实时采集现场方案落地后的生产数据、作业反馈问题，回传至优化模型和数字孪生系统，让系统记住本次作业情况，完成一轮完整的闭环优化。整体优化流程如图2所示。

图2 数字孪生驱动采剥计划动态优化流程图

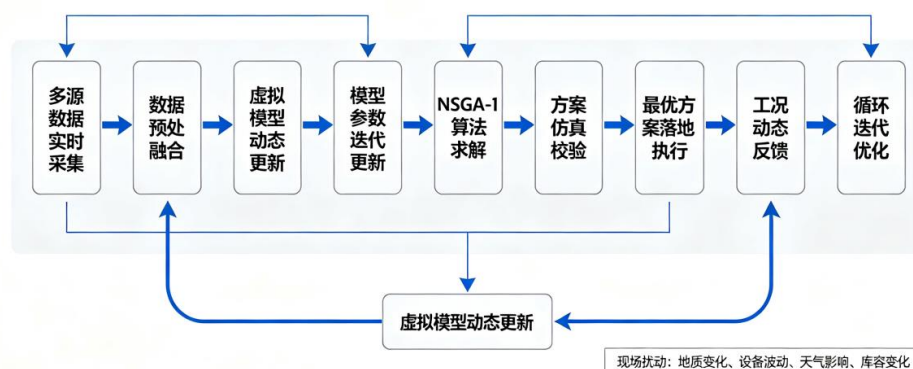


图2 数字孪生驱动采剥计划动态优化流程图

5 工程应用与结果分析

为验证本文模型的工程实用性，以某大型露天砂石矿山为应用场景，选取连续6个月生产数据进行对比分析，结果如表2所示。

表2 矿山核心生产指标对比分析表

评价指标	传统静态计划	本文动态优化模型	优化提升效果
剥采比波动幅度(%)	18.9	6.3	降低 12.6%
设备综合利用率(%)	72.7	87.0	提升 14.3%
产能达成率(%)	88.5	98.2	提升 9.7%
单位采剥成本(元/t)	12.18	11.18	降低 8.2%
边坡安全超标次数(次/月)	4.2	0.8	大幅降低安全风险

5.1 剥采比稳定性分析

剥采比是露天矿山一项核心经济指标，如果这项指标波动过大，容易出现成本不好把控、生产节奏混乱的问题。以往采用的静态开采方案依据前期拿到的地质数据制定的，没办法跟上矿山实际开挖后不断更新的矿体情况，经常出现半年之内剥采比波动幅度最高达到18.9%的情况。构建的模型依托数字孪生技术实时同步地质数据，灵活调整开采和剥离的配比，能把剥采比的波动幅度控制在6.3%以内，明显改善指标均衡性，避免出现剥离土方过多、矿石开采量不足这类生产难题。

5.2 设备利用效率分析

以往采用传统静态排产方式，设备配置固定不变，没

率只有72.7%。依托数字孪生模型可以实时采集、监控设备运行状态，再结合现场任务自动优化设备搭配和工作安排，避免资源分配不合理的情况，将设备综合利用率提高到87.0%，有效减少设备闲置，同时降低运维方面的消耗。

5.3 产能与成本效益分析

受天气、地质变动、设备出故障等突发情况影响，若是按照以往固定生产计划，实际产能只能达到预期的88.5%。采用动态调度模型后，系统可以随时处理各类突发问题、实时调整生产任务，产能达标率提高到98.2%；再配套多项综合优化措施，每吨/方采剥成本下降8.2%，整体效益提升明显。

5.4 安全性能分析

将边坡安全约束融入整体优化体系，依托现场实时监测数据动态调整开采时序，规避因开采顺序不当引发边坡局部应力集中、变形超限等风险。优化实施后，月度边坡安全指标超标频次由4.2次降至0.8次，滑坡风险得到有效管控，实现安全生产与生产效益统筹兼顾。

6 结论

以大型露天砂石矿山实际工程为研究载体，搭建四层闭环数字孪生系统架构，同时构建兼顾多重生产限制条件的采剥计划动态优化模型，并依托NSGA-II算法完成模型求解计算。研究表明，本次构建的优化模型，充分耦合了开采时序规则、边坡安全阈值、合理剥采比等多项核心约束条件，可灵活适配矿山动态变化的复杂生产工况，有效弥补了传统静态计划固化、适应性差的缺陷。通过实

际工程案例验证,相较于传统静态采剥计划的生产模式,优化方案可使矿山剥采比波动幅度降低 12.6%,矿山采掘运输设备利用率提升 14.3%,整体产能达成率提升 9.7%,同时矿山综合生产成本下降 8.2%。

[参考文献]

- [1]吴平.数字孪生技术在露天矿开采全流程可视化管控中的应用[J].能源与节能,2026(1):250-252.
- [2]胡思寒.智能化技术在大理石露天矿山开采安全管理中的应用分析[J].新发现,2026(7):31-33.
- [3]伍赛.基于数字孪生的智能化露天矿山开采系统优化与应用[J].中国金属通报,2026(2):151-153.
- [4]王国伟,郭茹涵,王勇澎.基于数字孪生的露天矿山装备智能化实施方案研究[J].露天采矿技术,2024,39(5):9-12.
- [5]周鹭,李立华,张众华,等.某露天矿山采场边坡岩体质量分析及稳定性研究[J].现代矿业,2024,40(9):132-136.

作者简介:陈志勇(1993—),男,工程师,工学学士,现就职于中国电建集团华中投资有限公司,分公司安全总监,长期从事水利水电、矿山工程安全管理工作。