基于蚁群优化算法的动态规划改进及大型露天矿山高效采剥规划*

吕玉琪[1],王孝东[1],黄雪林[2],向弘[2],滕英超[2]

(1.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要:为提高大型露天矿山采剥规划的效率与精度,提出了一种融合蚁群优化(ACO)算法与动态规划(DP)的开采增量体动态排序方法(ACO-DP)。结合ACO的分布式搜索机制,重构状态转移路径选择策略,显著降低计算复杂度。通过广东某露天采石场的实际应用,验证ACO-DP方法在提升采剥规划效率、优化资源配置和提高经济效益方面的显著作用。结果表明,ACO-DP方法将采石场的规划时间从3 000 min缩短至6.45 min,效率提升了99.8%,采剥比从0.39优化至0.124,降幅为68.2%,净现值从24 499万元逐步增加到峰值25 393万元。ACO-DP方法可集成至矿山数字孪生系统,支持实时动态调整与多目标协同优化,为"双碳"目标下的矿山智能规划提供了新思路。

关键词:大型露天矿山;采剥规划优化;蚁群优化算法;动态规划;开采增量体动态排序

中图分类号:TD804 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0052-08

Improvement of Dynamic Programming Method Based on Ant Colony Optimization Algorithm and Efficient Mining and Stripping Plan for Large-Scale Open-Pit Mines

LYU Yuqi[1], *WANG Xiaodong*[1], *HUANG Xuelin*[2], *XIANG Hong*[2], *TENG Yingchao*[2]

(1.Faculty of land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;
2.PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: To improve the efficiency and accuracy of the mining and stripping plan for large-scale open-pit mines, a dynamic sorting of mining increment bodies (ACO-DP) integrating the ant colony optimization (ACO) algorithm and dynamic programming (DP) method was proposed. Combined with the distributed search mechanism of ACO, the state transition path selection strategy was reconstructed, which significantly reduced the computational complexity. Through its practical application in an open-pit quarry in Guangdong, the significant effects of the ACO-DP method in improving the efficiency of mining and stripping plan, optimizing resource allocation and enhancing economic benefits were verified. The results show that the ACO-DP method shortens the planning time of the quarry from 3 000 minutes to 6.45 minutes, with an efficiency improvement of 99.8%. The stripping ratio is optimized from 0.39 to 0.124, with a decrease of 68.2%, and the net present value gradually increases from 244.99 million yuan to a peak of 253.93 million yuan. The ACO-DP method can be integrated into a mine digital twin system, supporting real-time dynamic adjustment and multi-objective collaborative optimization, and providing a new idea for intelligent mine planning under the "double carbon" goal.

Key words: Large-scale open-pit mine, Optimization of mining and stripping plan, Ant colony optimization algorithm, Dynamic programming, Dynamic sorting of mining increment body

0 引言

大型露天矿山采剥规划优化是矿山高效运营的核心问题,其目标是通过科学调度矿石剥离顺序与时间,最大化净现值(Net Present Value, NPV),同时保障资源利用的可持续性[1-4]。传统方法中,动态规划(Dynamic Programming, DP)法因能够处理多阶段决策问题而被广泛应用,但其计算复杂度随矿

* **收稿日期**:2025-02-23
基金项目:昆明理工大学引进人才科研启动基金项目(KKSY201721032);中国电力建设股份有限公司资助项目(ZSGN-KW2404-011)
作者简介:吕玉琪(1999—),男,山东济宁人,硕士,主要从事矿山数字化方面的研究。E-mail:lvyuqi2022@163.com
通信作者:王孝东(1977—),男,云南玉溪人,博士,副教授,主要从事数字矿山、机器学习等方面的研究。E-mail:3038213974@qq.com

山规模的增大呈指数增长,导致在大规模场景下难以兼顾效率与精度。尤其在矿体赋存条件动态变化、开采空间位置频繁调整的实际生产环境中,传统方法易陷入局部最优解,且无法快速响应实时决策需求,严重制约矿山智能化发展[5-6]。

近年来,智能优化算法,如遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群优化(Patricle Swarm Optimization, PSO)算法为复杂规划问题提供了新思路[7-13],但其在露天矿山采剥规划中的应用仍面临挑战:一是矿山增量体动态排序的离散性与路径依赖性难以直接映射为连续优化问题;二是算法收敛速度与解的质量难以平衡。针对上述问题,本文提出一种蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)算法与动态规划(DP)融合的方法(ACO-DP),通过以下创新点突破传统局限:

(1) 增量体动态排序机制重构:将采剥规划问题转化为增量体序列的最优路径搜索问题,利用ACO的分布式协作特性优化状态转移路径选择,降低动态规划的状态空间维度;

(2) 双目标协同优化:在信息素更新规则中引入净现值权重,同步优化开采效率与经济收益指标;

(3) 约束驱动的路径筛选:结合矿山生产能力与采剥比约束,设计启发式概率函数,避免无效路径搜索。

通过广东某大型露天采石场的工程实例验证,改进方法将规划时间从传统动态规划的3 000 min缩短至6.45 min,采剥比从0.39优化至0.124。本研究为露天矿山智能规划提供了兼具效率与精度的新范式,对推动矿山数字化转型与"双碳"目标下的绿色智能规化与开采具有实践意义。

1 传统露天矿山采剥规划优化

1.1 构建开采增量体

构建增量体的具体步骤及原理如下。

第一步:以特定块体质心为锥顶构建锥体,如果是有效锥体[锥内块体质量≤计划周期采剥量的1/10(ΔP)],则将其列入锥体系列($\boldsymbol{C}$)。理论上,境界内的每一个块体都要不止一次作为锥内块体参与构建锥体,而构建的各增量体中,每个块体只能出现一次。

第二步:确定锥体系列($\boldsymbol{C}$)。$\boldsymbol{C}$表示采剥中可能的开采体。$\boldsymbol{C}$为一个二维矩阵,其每1列表示1个有效锥体,列数表示$\boldsymbol{C}$中的锥体数。$\boldsymbol{C}$中各行标记该锥体包含的块体编号。开采体矩阵结构如图1所示。

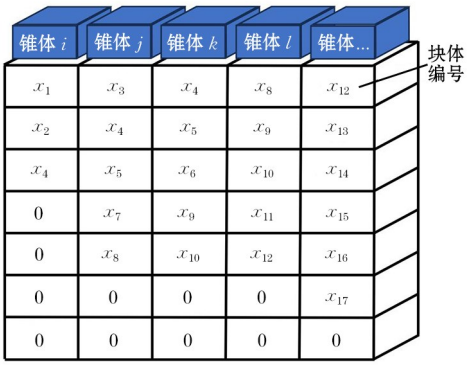


图1 开采体矩阵结构

Fig.1 Matrix structure of mining body

第三步:在$\boldsymbol{C}$中记录所有块体为锥顶的有效锥体后,对$\boldsymbol{C}$中第1行的砂石量按升序排列,使砂石量最少的锥体位于第1列。随后,以第1列为基准,将$\boldsymbol{C}$前c列中包含的重复块体编号合并到第1列的编号中,同时填充第1列的空白行直至其块体总质量约等于ΔP,其余块体则不再标记,可用于后续增量体的构建。通过这种方法,可以确保增量体的砂石含量最少(即平均品位最低),且块体质量之和约等于ΔP,符合锥体排除算法要求[14-16],即构建了一个增量体。

第四步:对增量体标号。在构建的第1个增量体中出现的所有块体,其"增量体编号"属性标记为1;第2个增量体中包含的块体,其"增重体编号"属性标记为2;依次类推,逐步计算各增量体的砂石矿量。

第五步:清空$\boldsymbol{C}$中已使用的数据,返回第一步开始新的构建循环。与前次循环不同的是,已包含在增量体中的块体将不再参与后续的构建循环。重复上述步骤直至所有块体均被纳入增量体,或当剩余块体的总质量小于ΔP时,构建过程终止。

第六步:对增量体编号进行倒序排序。由于初始构建的增量体品位最低(即砂石量最少),而实际开采顺序通常是从品位最高的增量体开始,因此需要将编号倒序排列。最终,将最后构建的增量体编号调整为1,而第1个构建的增量体编号调整为最大值,从而满足增量体动态排序计算中阶段划分的要求。

1.2 增量体动态排序

通过上述步骤生成开采增量体序列,进而将采剥计划的优化问题转化为寻找该序列中的最优子序列[15],即确定何时以何种顺序开采增量体,以使砂

石矿山总净现值达到最大。

为解决该问题,将开采增量体(P_1,P_2,…,P_n)映射在二维坐标轴中,纵坐标表示阶段(即开采时间),横坐标表示状态(如矿量、岩量等参数),如图 2 所示。图 2 中每条箭线代表状态转移,即某阶段状态向下一阶段状态的过渡。由于采矿需保持连续作业,每个阶段只能从前一阶段较小的状态转移至较大的状态,以避免停产情况的发生[17]。

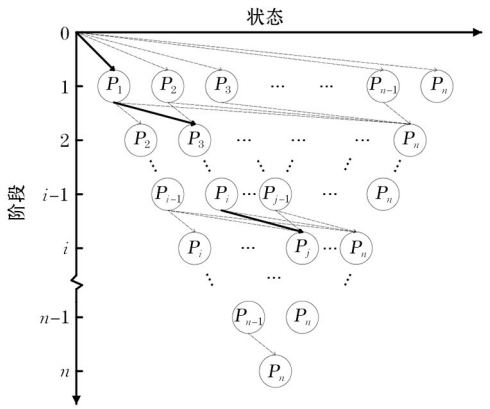


图 2 开采增量体动态排序

Fig.2 Dynamic sorting of mining increment body

开采增量体动态排序的具体步骤如下。

第一步:设置状态转移条件。动态规划模型要求满足无后效性,即某一阶段状态一旦确定,其后的决策将不受前面各阶段状态的影响。为了满足这个要求,通常假设矿石开采能力、采剥能力完全匹配,以简化状态转移方程。状态转移方程为:

$$t_{i,j(i-1,k)}=\frac{Q_{i,j(i-1,k)}r_{\mathrm{m}}(1+y)}{A} \tag{1}$$

式中:$t_{i,j(i-1,k)}$ 为 $i-1$ 阶段上状态 $k(i-1\leqslant k\leqslant j-1)$ 移动到 i 阶段上状态 j 所花费的时间;$Q_{i,j(i-1,k)}$ 为 $i-1$ 阶段上状态 k 移动到 i 阶段上状态 j 所含的砂石量;r_{m} 为矿石回采率;y 为废石混入率;A 为矿山年生产能力。

第二步:计算各阶段状态移动的净现值[18-21]。对于每个状态,根据砂石生产能力和各种技术经济参数(如矿石回采率、废石混入率、采矿成本等)计算出各阶段状态的盈利值,并折现到开采初期,得到每个状态的净现值。这一过程确保每个状态的选择都是基于利润最大化的目标。大型露天砂石矿山各阶段状态净现值计算公式如下:

$$P_{i,j(i-1,k)}=\frac{m_{i,j(i-1,k)}\,r_{\mathrm{m}}\,r_{\mathrm{p}}}{g_{\mathrm{p}}}P_i-q_{i,j(i-1,k)}\,r_{\mathrm{m}}(1+y)\,c_{\mathrm{m}}-\omega_{i,j(i-1,k)}\,c_{\mathrm{w}} \tag{2}$$

式中:r_{p} 为砂石成品率;g_{p} 为岩石风化程度;P_i 为阶段 i 的成品砂石单位售价(单位为元 /m^3);$m_{i,j(i-1,k)}$、$q_{i,j(i-1,k)}$、$\omega_{i,j(i-1,k)}$ 为 $i-1$ 阶段上状态 $k(i-1\leqslant k\leqslant j-1)$ 移动到 i 阶段上状态 j 上的微风化砂石量、中风化砂石量、全风化砂石量;c_{m} 为采石单位成本;c_{w} 为剥离单位成本。

第三步:计算累计净现值并确定最优路径。从第一阶段开始,逐阶段计算各状态的累计净现值。在每个阶段的各状态中,选择累计净现值最大的路径,最终在最后一个阶段得到最高累计净现值的方案。从该方案的最后状态反向推导,得到全开采过程中的最优路径,即采剥计划的最优决策。

累计净现值的计算公式如下:

$$NPV_{i,j(i-1,k)}=NPV_{i-1,k}+\frac{P_{i,j(i-1,k)}}{t_{i,j(i-1,k)}}\cdot\frac{(1+d)^{[t_{i,j(i-1,k)}]}-1}{d\,(1+d)^{[t_{i,j(i-1,k)}]}}\Big/(1+d)^{t_{i,j(i-1,k)}} \tag{3}$$

式中,d 为折现率。

增量体动态排序递归目标函数的计算公式如下:

$$NPV_{i,j(i-1,k)}=\max_{k\in[i-1,j-1]}\{NPV_{i,j(i-1,k)}\} \tag{4}$$

2 基于蚁群优化算法的动态规划法改进

DP 是一种广泛应用于优化问题的求解方法,其通过递归计算和状态转移方程求得全局最优解。然而,该方法的计算复杂度随着状态空间规模的增大呈指数增长,限制了其在大规模问题中的应用。针对这一问题,通过引入 ACO 群体协作的分布式搜索机制,优化动态规划模型中的状态转移路径,从而提高计算效率并降低计算复杂度。

第一步:蚁群算法初始化。

为每一对增量体间的转移路径分配初始信息素值 $\tau_{i,j(i-1,k)}=\tau_0$,定义启发式函数 $\eta_{i,j(i-1,k)}=P_{i,j(i-1,k)}$。$\tau_{i,j(i-1,k)}$ 为 $i-1$ 阶段上状态 $k(i-1\leqslant k\leqslant j-1)$ 移动到 i 阶段上状态 j 路径上残留的信息素浓度。

第二步:路径构建。

每只蚂蚁从起始节点(增量体)出发,按照转移概率选择下一节点,直到终止节点。转移概率计算公式为:

$$Pr_{i,j(i-1,k)}=\frac{\tau_{i,j(i-1,k)}{}^{\alpha}\cdot\eta_{i,j(i-1,k)}{}^{\beta}}{\sum_{l\in[j,n]}\left[\tau_{i,l(i-1,k)}{}^{\alpha}\cdot\eta_{i,l(i-1,k)}{}^{\beta}\right]} \tag{5}$$

式中:α 为控制信息素重要程度的参数,当 α 较大时,路径选择更依赖于信息素值;β 为控制启发式信息重要程度的参数;$Pr_{i,j(i-1,k)}$ 为 $i-1$ 阶段上状态 k 移动到 i 阶段上状态 j 的转移概率;$\sum_{l\in[j,n]}[\tau_{i,l(i-1,k)}{}^{\alpha}\cdot\eta_{i,l(i-1,k)}{}^{\beta}]$ 表示从 $i-1$ 阶段上状态 k 移动到 i 阶段上所有可能状态的吸引力总和,将路径选择概率归一化,确保蚂蚁在所有可能路径上选择的概率之和为 1。

确保路径选择应满足矿石生产能力量 Q_t 和采剥能力 T_t 的限制:

$$\begin{cases} Q_L \leqslant Q_t \leqslant Q_U \\ T_L \leqslant T_t \leqslant T_U \end{cases} \tag{6}$$

式中:Q_L、Q_U 为矿石生产能力的下限和上限;T_L、T_U 为采剥能力的下限和上限。

第三步:路径收益评价。

每只蚂蚁完成路径选择后,根据路径的状态转移计算累计净现值 $NPV_{i,j(i-1,k)}$,比较所有蚂蚁的路径净现值,保存当前迭代中累计净现值最大的路径和对应的净现值。

第四步:信息素更新。

每只蚂蚁完成路径选择后,根据其路径的累计净现值对信息素进行局部更新,具体计算公式如下:

$$\tau_{i,j(i-1,k)}=(1-\rho)\cdot\tau_{i,j(i-1,k)}+\frac{G}{NPV_{i,j(i-1,k)}} \tag{7}$$

式中:ρ 为信息素挥发系数,控制信息素的衰减速度;G 为信息素常量,控制信息素释放的总量。

重复步骤 2 至步骤 4,直到达到最大迭代次数或所有蚂蚁的路径累计净现值变化趋于稳定,输出净现值最大的路径,将当前最优路径作为 DP 的初始解,通过 DP 递归优化路径,确保累计净现值达到全局最优。将得到的最优路径下所包含的块体,以块体质心点文件格式输出,其中包括块体 X、Y、Z 坐标、块体长宽高、开采年度及砂石风化类型等属性值。

3 工程实例应用

ACO-DP 方法已成功运用于广东某大型露天采石场,该采石场采用台阶式分层开采方式,设计生产规模为 365 万 m^3/a,矿区面积为 0.94 km^2,主要开采建筑用花岗岩,露天采场的最高标高为 +307 m,最低标高为 +50 m,最大边坡高度为 256 m,最终边坡角度为 51°,矿山总服务年限为 17 a。

由于采石场可用于建模的有效钻孔数据较少,共有有效钻孔 24 个,岩石风化表数据 133 个(残积层、全风化、中风化、微风化四类风化类型),测斜数据 24 个。故结合钻孔数据库和勘探线剖面图,按照最低工业品位要求并参照地质规律与建模原则对矿体进行圈定,通过合理外推方式建立该采石场三维矿山模型,如图 3 所示。

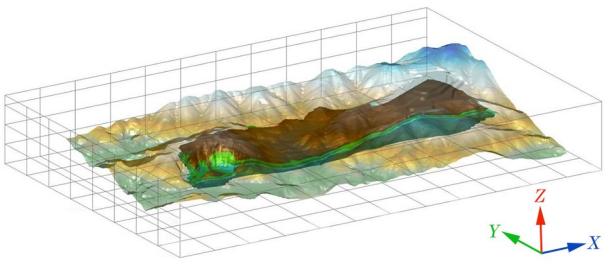


图 3 广东某露天采石场三维矿山模型

Fig.3 Three-dimensional mine model of an open-pit quarry in Guangdong Province

不同风化类型地质勘查砂石量与三维模型砂石量对比见表 1。由表 1 可知,三维模型的总量为 8 249.4万 m^3,比地质勘查总量砂石 8 358 万 m^3 低约 1.29%,整体差异较小,说明三维模型在总量上的建模精度较高。对于中风化和微风化区域,三维模型的报量结果与地质勘查数据较为一致,表明其在中深层风化矿体的建模方面具有较好的仿真效果,可为矿山开采和规划提供可靠依据。

表 1 不同风化类型地质勘查砂石量与三维模型砂石量对比

Table 1 Comparison of sand and gravel volume between geological survey and three-dimensional model under different weathering types

风化类型	地质勘查砂石量/万 m^3	三维模型砂石量/万 m^3	三维模型差率/%
残积层	163.6	159.85	−2.29
全风化	1 554.6	1 420.75	−8.61
中风化	970.1	959.20	−1.12
微风化	5 669.7	5 709.60	0.70
合计	8 358.0	8 249.40	−1.29

3.1 构建块体模型

以该采石场开采第 5 年年末地表现状和终了境界为实体约束条件,以单一赋值法或距离幂次反比法为主要赋值方法,对空白块体模型进行约束和赋值,最后再对所有的块体单元进行属性(风化类型)着色,以建立采石场待开采块体模型,如图 4 所示。

为保证计算精度,块体尺寸定为 5 m×5 m×2.5 m,共计 132 万块块体。

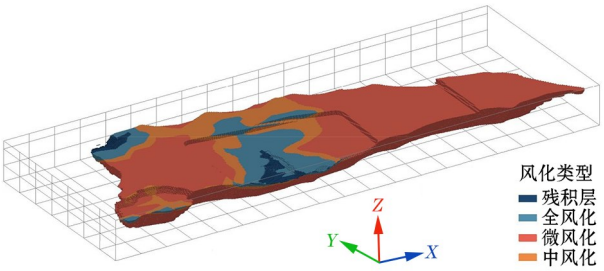


图 4 广东某露天采石场待开采块体模型

Fig.4 Block model of the to-be-mined area of an open-pit quarry in Guangdong Province

3.2 采剥规划优化

本实例以年开采规划优化为例,因此以最小年采矿量、最大年采矿量、最小年采剥量、最大年采剥量为约束条件进行开采规划优化,矿区技术经济参数见表 2。

通过 ACO 对 DP 进行改进,优化得到含“开采时间”属性的块体质心点文件,见表 3。将优化得到的“开采时间”作为块体的一个新属性赋值到待开采块体模型中,并按值的范围着色,不同颜色代表着不同时间的开采区域(颜色标识见电子版),即年采剥计划,见表 4。广东某露天采石场开采境界内横向剖面图如图 5 所示。

表 2 矿区技术经济参数

Table 2 Technical and economic parameters of mining area

开采体增量/万 m^3	台阶高度/m	工作帮坡角/(°)	最小年采剥量/万 m^3	最大年采剥量/万 m^3	最大年采矿量/万 m^3	最小年采矿量/万 m^3
100	15	14	1 100	1 150	1 200	960
砂石回采率/%	废石混入率/%	剥离单位成本/(元/m^3)	采石单位成本/(元/m^3)	成品砂石售价/(元/m^3)	折现率/%	最低售价/(元/m^3)
95	0	13.5	9.54	70	15	65

表 3 含“开采时间”属性的块体质心点文件

Table 3 Block centroid point files with “mining time” attribute

X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	块体密度/(m^3 · g^{-1})	风化类型	价格/(元/m^3)	开采时间
427 087.50	2 603 487.50	118.75	2.00	2	20.0	第 10 年
427 087.50	2 603 492.50	111.25	2.50	3	75.0	第 10 年
427 087.50	2 603 492.50	113.75	2.50	3	75.0	第 15 年
427 087.50	2 603 492.50	116.25	2.50	3	75.0	第 8 年
427 087.50	2 603 492.50	118.75	2.00	2	20.0	第 8 年
427 087.50	2 603 497.50	111.25	2.63	4	210.4	第 15 年
427 087.50	2 603 497.50	113.75	2.50	3	75.0	第 9 年
427 087.50	2 603 497.50	116.25	2.50	3	75.0	第 11 年
427 087.50	2 603 502.50	111.25	2.63	4	210.4	第 7 年
427 087.50	2 603 502.50	113.75	2.63	4	210.4	第 7 年
…	…	…	…	…	…	…
428 860.00	2 603 450.00	152.50	2.63	4	210.4	第 16 年

注:在风化类型中,1、2、3、4 分别表示残积层、全风化、中风化和微风化。

表 4 年采剥计划

Table 4 Annual mining and stripping plans

开采时间	采剥总量/t	当年净现值/元	累计净现值/元
第 6 年	9 941 400	244 997 729	244 997 729
第 7 年	999 400	246 294 013	491 291 742
第 8 年	9 992 960	246 268 383	737 560 125
第 9 年	10 435 560	252 830 900	990 391 025
第 10 年	10 303 160	240 622 419	1 231 013 444
第 11 年	11 223 840	247 363 121	1 478 376 566
第 12 年	10 761 320	244 143 517	1 722 520 082
第 13 年	10 459 320	253 927 622	1 976 447 705
第 14 年	10 832 080	248 852 163	2 225 299 868
第 15 年	10 459 200	252 646 724	2 477 946 592
第 16 年	9 464 440	232 987 849	2 710 934 440
第 17 年	400 000	9 864 800	2 720 799 240

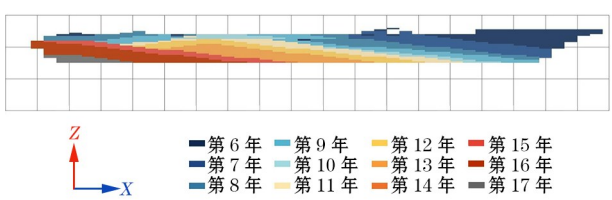


图 5 广东某露天采石场开采境界内横向剖面图

Fig.5 Transverse section within the mining boundary of an open-pit quarry in Guangdong Province

采剥量与采剥比变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知,优化后的采剥量与采剥比较为均衡。均衡的生产规划不仅能够最大限度地提高矿石和其他资源

的开采效率,减少资源浪费,还有助于企业现金流管理,降低市场波动对收益的影响,可以更好地应对市场需求变化,提高调整计划的灵活性,确保持续开采。

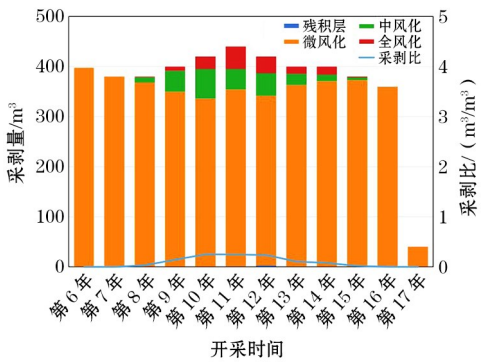


图 6 采剥量与采剥比变化趋势

Fig.6 Variation trends of stripping volume and stripping ratio

3.3 不同矿山类型优化效果对比

为验证 ACO-DP 方法的通用性,进一步将其应用于云南某露天锌锡矿(生产能力为 210 万 t/a,台阶高度为 15 m),矿区呈现北侧地势较高、南侧地势相对低缓的地貌特征。当前露天采场平均坡角为 20°,矿区开发呈现 3 大显著特征:采剥比高、土方剥离量大及地形高差显著。锌锡矿的优化后,采剥比由 0.52 降至 0.18,降幅为 65.4%,迭代计算时间由 3 480 min 降至 7.81 min,效率提升 99.8%,这表明本研究提出的 ACO-DP 方法在不同矿种和开采条件下均具有显著优势。

表 5 不同矿山类型优化效果对比

Table 5 Comparison of optimization effects under different mine types

矿山类型	采剥比		迭代计算时间/min	
	DP	ACO-DP	DP	ACO-DP
采石场	0.39	0.124	3 000	6.45
锌锡矿	0.52	0.180	3 480	7.84

3.4 同其他优化算法对比分析

为验证本文提出的 ACO-DP 方法的独特优势,在广东某花岗岩采石场案例中,使用 GA、PSO 及 DP 对每年的净现值进行优化求解,其收敛计算结果如图 7 所示。

从图 7 中可观察到,ACO-DP 的净现值曲线始终位于其他算法上方,且在时间维度上呈现稳健上升趋势,从 24 499 万元逐步增加至峰值 25 393 万元,而 DP、GA 和 PSO 则表现出明显的收益衰减或波动性风险。另外,ACO-DP 方法的规划时间为 6.45 min,传统 DP、GA、PSO 算法的规划时间分别为 3 000 min、8.52 min 、8.13 min。这说明将 ACO 的分布式搜索机制引入动态规划框架的策略,为大规模矿山采剥规划提供了高效率、高精度的解决方案。

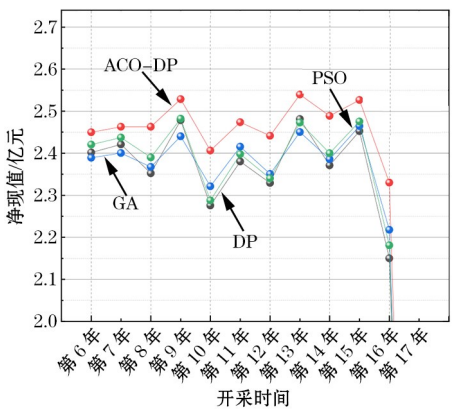


图 7 不同算法的采剥规划计算结果

Fig.7 Calculation results of the mining and stripping plan with different algorithms

4 结论

本研究提出了一种融合蚁群优化算法(ACO)与动态规划(DP)的开采增量体动态排序方法(ACO-DP),为大规模露天矿山采剥规划提供了兼具效率与精度的新范式,得出的主要结论如下。

(1) 理论创新。首次将 ACO 的分布式搜索机制引入动态规划框架,通过信息素驱动的路径筛选策略与净现值权重协同优化,重构了开采增量体状态转移路径的选择机制。与 DP 相比,ACO-DP 方法的计算复杂度显著降低,突破了大规模场景下状态空间爆炸的瓶颈。

(2) 采剥规划效率的显著提升。采石场的规划时间从 3 000 min 缩短至 6.45 min,效率提升了 99.8%;采剥比从 0.39 优化至 0.124,降幅为 68.2%;净现值从 24 499 万元逐步增加到峰值 25 393 万元,整体呈现先上升后平稳的趋势,波动范围较小,说明能够有效应对市场波动,具有较高的经济抗风险能力。

(3) 行业价值。ACO-DP 方法可集成至矿山数字孪生系统,支持实时动态调整与多目标协同优化,为“双碳”目标下的绿色开采提供了关键技术支撑。

(4) 局限性与未来方向。静态假设依赖:模型

基于固定矿床与生产能力设定,未来需探索动态地质条件(如矿体赋存变化)与实时产能波动的适应性优化方法;超大规模场景算法效率:针对块体数超过500万的超大型矿山,需结合GPU并行计算或增量式更新策略进一步提升算法效率。

参考文献(References):

[1] 彭芬,杨桦,张晓楠,等.砂石骨料矿山智能化建设现状与建议[J].中国矿业,2022,31(9):75-80.
PENG Fen, YANG Hua, ZHANG Xiaonan, et al. Current situation and suggestions of intelligent construction in sand-gravel aggregate mine[J]. China Mining Magazine,2022,31(9):75-80.

[2] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化:煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: the core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(2):349-357.

[3] 葛世荣,郝尚清,张世洪,等.我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. Coal Science and Technology, 2020,48(7):28-46.

[4] 李国清,王浩,侯杰,等.地下金属矿山智能化技术进展[J].金属矿山,2021(11):1-12.
LI Guoqing, WANG Hao, HOU Jie, et al. Progress of intelligent technology in underground metal mines[J]. Metal Mine,2021(11):1-12.

[5] 李立,刘健康,刘慧林,等.高分遥感影像在露天矿山越界开采动态监测中的研究[J].矿业研究与开发,2025,45(5):214-222.
LI Li, LIU Jiankang, LIU Huilin, et al. Study on dynamic monitoring of cross-border mining in open-pit mines based on high-resolution remote sensing images[J]. Mining Research and Development,2025,45(5):214-222.

[6] 孙效玉,涂鸿渐,诸子轩,等.露天矿设备调度图表绘制及设备时间利用率分析系统[J].金属矿山,2016(7):160-164.
SUN Xiaoyu, TU Hongjian, ZHU Zixuan, et al. Computer-based open-pit mine equipment dispatching diagram and time utilization ratio analysis[J]. Metal Mine,2016(7):160-164.

[7] 宋阳,陈鑫,李金玲,等.露天开采环状推进采剥计划自动编制方法[J].矿业研究与开发,2022,42(5):167-172.
SONG Yang, CHENG Xin, LI Jinling, et al. Automatic planning method for ring advancing mining and stripping in open-pit mining[J]. Mining Research and Development, 2022,42(5):167-172.

[8] 臧立岩,邢存恩.煤矿采掘计划计算机自动编制系统的研究[J].山西煤炭,2005(2):11-14.
ZANG Liyan, XING Cunen. The study of a computer aided mining schedule system[J]. Shanxi Coal,2005(2):11-14.

[9] 韩可琦,胡吉锋,刘华东,等.煤矿采掘计划计算机仿真系统实现[J].黄金科学技术,1999(增刊1):56-59.
HAN Keqi, HU Jifen, LIU Huadong, et al. Implementation of a computer simulation system for coal mine mining plans[J]. Gold Science and Technology,1999 (Suppl.1):56-59.

[10] 李仲学,廖荣淮.地下煤矿采掘计划计算机辅助管理系统[J].北京科技大学学报,1995(5):403-406.
LI Zhongxue, LIAO Ronghuai. Computer-aided management system for underground coal mine mining plans[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,1995(5):403-406.

[11] 戚克明,刘晓明,李冬洁.地下矿多步骤回采中长期计划编制探究[J].采矿技术,2021,21(3):186-189.
QI Keming, LIU Xiaoming, LI Dongjie. Research on medium and long-term planning of multi-step mining in underground mine[J]. Mining Technology, 2021, 21(3): 186-189.

[12] 蒋淑云,侯杰,李国清,等.面向关键链识别的矿山项目进度优化与仿真[J].中国矿业,2021,30(7):23-29.
JIANG Shuyun, HOU Jie, LI Guoqing, et al. Optimization and simulation of mine project schedule oriented to critical chain identification[J]. China Mining,2021,30(7):23-29.

[13] 顾清华,马龙,卢才武,等.露天矿山企业长期生产计划模型与优化算法[J].工业工程与管理,2020,25(1):38-52.
GU Qinghua, MA Long, LU Caiwu, et al. Long-term mining production scheduling model and optimization algorithm for open-pit mine enterprises[J]. Industrial Engineering and Management,2020,25(1):38-52.

[14] 毕春杰,戴晓江,宋小美.某露天铜矿全境界开采规划优化[J].金属矿山,2015(10):33-36.
BI Chunjie, DAI Xiaojiang, SONG Xiaomei. Optimization of the whole mining plan in a copper open pit[J]. Metal Mine, 2015(10):33-36.

[15] 狄长江,王孝东,戴晓江,等.基于3Dmine矿业软件的露天矿山采剥计划的数值模拟[J].黄金,2016,37(7):30-35.
DI Changjiang, WANG Xiaodong, DAI Xiaojiang, et al. Numerical simulation of open-pit stripping plan based on 3Dmine mining software[J]. Gold,2016,37(7):30-35.

[16] 宋小美.基于数字化矿床模型的露天开采规划优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
SONG Xiaomei. Research on optimization of open-pit mining planning based on digital orebody models[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2014.

[17] 孔文源,顾晓薇,王青,等.提高露天煤矿开采计划动态排序优化效率的算法[J].矿业研究与开发,2021,41(11):199-204.

KONG Wenyuan, GU Xiaowei, WANG Qing, et al. Algorithm to improve the efficiency of dynamic sequencing optimization of production schedule in open-pit coal mines [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(11): 199-204.

[18] 顾清华,李俊飞,卢才武.基于 AHCP 算法的大规模露天矿生产计划问题求解[J].重庆大学学报,2020,43(4):33-46.
GU Qinghua, LI Junfei, LU Caiwu. On the solution to large-scale open-pit mine production planning problem based on AHCP algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2020,43(4):33-46.

[19] 顾清华,吕艳红,卢才武,等.多金属露天矿多目标生产计划优化问题建模及求解算法[J].金属矿山,2020(4):147-153.
GU Qinghua, LYU Yanhong, LU Caiwu, et al. Modeling and algorithm of multi-objective production scheduling optimization for multi-metal open-pit mine[J]. Metal Mine, 2020(4):147-153.

[20] 马龙,卢才武,顾清华.金属矿山企业生产计划优化方法[J].运筹与管理,2020,29(9):34-42.
MA Long, LU Caiwu, GU Qinghua. Production scheduling optimization method for metal mine enterprises[J]. Operations Research and Management Science,2020,29(9):34-42.

[21] 王青,顾晓薇,胥孝川,等.露天矿生产规划要素整体优化方法及其应用[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(12):1796-1800.
WANG Qing, GU Xiaowei, XU Xiaochuan, et al. Holistic optimization of production planning elements and its application for open-pit mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2014,35(12):1796-1800.

[22] 钟小宇,辛凤阳,孙效玉,等.基于 WPF 的露天矿生产作业图表可视化系统开发与应用[J].金属矿山,2020(1):172-178.
ZHONG Xiaoyu, XIN Fengyang, SUN Xiaoyu, et al. Development and application of visualization system for open-pit production operation chart based on WPF[J]. Metal Mine,2020(1):172-178.