基于DPRS-NSGA-Ⅲ的露天矿出矿策略优化*

张雨[1],陈忠强[2],王琦[2],申雨梦[2],彭平安[3]

(1.中铁十九局集团矿业投资有限公司, 北京 100161;
2.内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;
3.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:露天矿山生产受地质波动影响,传统方法难以有效协调多目标出矿策略。针对出矿过程中矿石品位和单位采掘成本不确定的问题,构建了以最小化单位成本、最大化出矿总量和最小化品位波动标准差为目标的多目标不确定性优化模型,并采用蒙特卡洛方法模拟地质参数的随机变化。为提升解集的稳定性和多样性,设计了动态参考点扰动跳跃机制和目标尺度自适应缩放策略,并将其嵌入NSGA-Ⅲ中,生成DPRS-NSGA-Ⅲ算法。以某大型钼矿为研究对象开展算例分析,结果表明:DPRS-NSGA-Ⅲ算法使总出矿量提高2.03%,单位采掘成本降低2.17%,品位偏差控制在0.005个百分点以内。所得帕累托解集在三维目标空间中分布均匀,未出现异常聚集或塌陷现象。研究结果在应对露天矿山出矿策略中的不确定性因素方面具有良好的适应性和实际应用价值。

关键词:露天矿;出矿策略;多目标优化;不确定性建模;DPRS-NSGA-Ⅲ

中图分类号:TD854 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0052-08

Optimization of Ore Extraction Strategy for Open-Pit Mines Based on DPRS-NSGA-Ⅲ

ZHANG Yu[1], *CHEN Zhongqiang*[2], *WANG Qi*[2], *SHEN Yumeng*[2], *PENG Ping'an*[3]

(1.China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China;
2.School of Resources and Environmental Engineering,
Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;
3.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The production of open-pit mines is affected by geological fluctuations, and traditional methods are difficult to effectively coordinate multi-objective ore extraction strategies. Aiming at the uncertainty of ore grade and unit mining cost during the extraction process, a multi-objective uncertainty optimization model was constructed with the objectives of minimizing unit cost, maximizing total extraction amount, and minimizing the standard deviation of grade fluctuation. The Monte Carlo method was used to simulate the random variations of geological parameters. To improve the stability and diversity of the solution set, a dynamic reference point perturbation jumping mechanism and an adaptive scaling strategy for the objective space were designed and embedded into NSGA-Ⅲ, resulting in the DPRS-NSGA-Ⅲ algorithm. A case study was conducted on a large-scale molybdenum mine. The results show that the DPRS-NSGA-Ⅲ algorithm increases the total ore extraction amount by 2.03%, reduces the unit mining cost by 2.17%, and controls the grade deviation within 0.005 percentage points. The obtained Pareto solution set is uniformly distributed in the three-dimensional objective space, without abnormal clustering or collapse. The research results demonstrate good adaptability and practical application value in addressing uncertain factors in the ore extraction strategy of open-pit mines.

Key words: Open-pit mine, Ore extraction strategy, Multi-objective optimization, Uncertainty modeling, DPRS-NSGA-Ⅲ

---

* **收稿日期**:2025-05-11

基金项目:内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220259);内蒙古工业大学科学研究项目(ZD201621);国家重点研发计划项目(2022YFC2904105)

作者简介:张雨(1996—),男,内蒙古松山人,工程师,主要从事露天开采技术研究工作。E-mail:1255841878@qq.com

通信作者:陈忠强(1984—),男,山西文水人,博士,副教授,主要从事智慧化矿山研究工作。E-mail:czq413513@imut.edu.cn

0 引言

矿山开采作为矿产资源开发的重要形式,其生产技术直接关系到资源利用效率和出矿生产水平[1]。矿山企业在编制出矿策略时,通常采用人工编制,该方法存在工作策略难以完全考虑不确定因素等问题,已明显落后[2-3]。

近年来,矿山出矿策略与调度优化的研究逐步向多方法融合、智能化及动态化方向发展。针对地下矿山产能接续问题,侯杰等[4]提出多矿区协同优化模型,结合 Python 与 Gurobi 进行高效解算,实现了产能均衡与经济效益的协同提升。罗周全等[5]基于模糊综合评价与泰勒公式构建了生产规模优化框架,为资源约束下的产能决策提供了依据。在露天矿山调度领域,杨仕教[6]融合 ANFIS 与群集拟生态算法,构建了动态非线性调度模型。霍晓宇等[7]引入 Multi-agent 技术,通过改进粒子群算法(PSO)与遗传算法(GA)实现多环节协同优化,增强了系统动态响应能力。胡乃联等[8]将粒子群算法(PSO)应用于露天矿生产作业计划优化中,以采掘与运输成本最小化为目标,设计带核粒子及双吸引子搜索策略。顾清华等[9-10]提出了多金属露天矿多目标模型,结合改进狼群算法提升了矿产资源利用率与求解效率。周森奇[11]改进了粒子群算法,通过交叉策略与莱维飞行增强全局寻优能力,优化了矿山生产计划编制。此外,仿真与可视化技术在矿山出矿与调度优化方面的应用逐步深化,胡柳青等[12]开发 3D 可视化矿山生产计划编制系统,支持多目标自动优化。周耀东等[13]构建了矿山生产仿真平台,通过多目标模型实现了生产资源的最优配置。姚旭龙等[14]集成异构数据融合技术,建立了多目标优化模型。叶海旺等[15]构建了以品位与经济成本最小化为目标的优化模型,采用遗传粒子群混合算法,通过石灰石矿案例验证了该模型在平衡出矿品位、产量与利润方面的有效性。顾晓薇等[16]通过引入灾变算子避免早熟收敛,构建了以采选成本、精矿品位等多参数为目标的优化模型,在运算效率与方案质量上展现出显著优势。随着人工智能技术的突破,李召朋[17]提出数据驱动的深度学习调度模型,实现了对矿山现场数据的实时监测与动态优化;ESMAEIL 等[18]设计整体优化算法,在矿山生产计划、采出矿石去向与最终坑限间建立了动态关联。

综上所述,已有研究论证了矿石品位、市场价格和生产成本等因素对露天矿出矿策略编制的重要影响,但针对多目标下的不确定性综合分析较为欠缺。基于此,本研究以某大型露天钼矿为背景,结合蒙特卡洛模拟,引入参考点扰动跳跃机制与目标尺度自适应缩放策略,建立一个考虑不确定因素的多目标优化模型。为矿山在应对动态环境、实现生产成本优化方面提供借鉴。

1 出矿策略优化模型构建

露天矿生产计划中的出矿策略是一个受多重不确定性因素影响的动态优化问题。采场的地质条件、生产能力及矿石品位等不确定因素对生产目标的制定和实现有着显著影响。因此,需通过对矿山实际的生产数据进行数学建模和求解,并给出生产优化建议。

1.1 目标函数

(1) 最小化单位矿石采掘成本。各个出矿点到卸载点之间存在多条运输路线,使得单位矿石采掘成本不同。同时,不同出矿点的矿体赋存亦不相同,使得各采掘作业面的生产成本存在差异。每个出矿点的物料成本在不同条件下是随机变量,因此,需要在规划过程中对物料成本的不确定性进行有效处理,使矿石采掘平均成本最小。最小化单位矿石采掘成本 $\min F_1$ 计算公式见式(1)。

$$\min F_1 = E\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i x_i + W_i x_i)}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \tag{1}$$

式中:E 是期望算子;x_i 表示各个平台的季度计划出矿量,t;C_i 表示矿石平均采掘成本,元/t;W_i 表示每个出矿点的物料消耗成本,元/t。

(2) 最大化矿石生产量。为了提升矿山的经济产值,在达到生产要求的同时尽可能提高每个出矿点的产量。式(2)为最大化矿石生产量 $\max F_2$ 的计算公式。

$$\max F_2 = E\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2}$$

(3) 最小化矿石品位偏差。在满足矿山生产目标的同时,应综合考虑金属矿市场的价格波动、供需关系变化等经济因素,构建动态调整机制,实现矿山生产计划与市场波动的调节,使矿石品位偏差最小化。式(3)为最小化矿石品位偏差 $\min F_3$ 的计算公式。

$$\min F_3 = E\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{z,i}-P_x)x_i}{\sum_{i=1}^{n}x_i} \tag{3}$$

式中:$P_{z,i}$ 表示装载点 i 的矿石品位,%;P_x 表示卸载点的矿石品位,%。

1.2 约束条件

(1) 采出矿石品位指标约束。不同出矿点的矿石品位存在显著差异,为确保选矿工艺流程的稳定运行并实现资源的可持续利用,需对各出矿点的矿石品位进行约束,使其波动控制在一定区间范围内,既能保障选矿系统的稳定运行,又可避免因品位剧烈波动导致的资源浪费,从而实现矿山生产的经济效益与资源利用效率的协同优化。

$$P_{\min} \leqslant \frac{\sum_{i=1}^{n}P_i x_i}{\sum_{i=1}^{n}x_i} \leqslant P_{\max} \tag{4}$$

式中:$P_{\min}$ 表示单位矿石品位下限,%;$P_{\max}$ 表示单位矿石品位上限,%;P_i 表示单位矿石品位,%。

(2) 计划完成率约束。通过动态调控生产任务完成程度,将计划完成率控制在较优区间内。既避免了因硬性指标导致的资源错配,又防止了过度调整引起生产波动。

$$L_{\min} \leqslant \frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\beta_i}{\sum_{i=1}^{n}x_i} \leqslant L_{\max} \tag{5}$$

式中:β_i 表示各个平台矿石采出计划的完成率,%;$L_{\min}$ 表示计划完成率的下限,%;$L_{\max}$ 表示计划完成率的上限,%。

(3) 出矿总量指标约束。计划周期内生产的矿石产量必须符合长期出矿策略的要求,因此矿石总产量需遵循预先制定的战略性出矿目标。

$$D_{\min} \leqslant \sum_{i=1}^{n}x_i \leqslant D_{\max} \tag{6}$$

式中:$D_{\min}$ 表示所有平台最小出矿总量,t;$D_{\max}$ 表示所有平台最大出矿总量,t。

(4) 破碎站处理能力约束。破碎站作为矿石加工破碎的关键生产环节,其处理能力直接影响整个生产系统的运行效率。合理的处理能力可以确保出矿的连续性与稳定性。

$$S_{\min} \leqslant \sum_{i=1}^{n}x_i \leqslant S_{\max} \tag{7}$$

式中:$S_{\min}$ 表示破碎站处理能力下限,t;$S_{\max}$ 表示破碎站处理能力上限,t。

(5) 出矿点地质储量约束。各出矿点的出矿量不得超出其地质可采储量,这是确保资源可持续开发的关键约束条件。

$$\sum_{i=1}^{n}x_i \leqslant Z_{\max} \tag{8}$$

式中,$Z_{\max}$ 表示出矿点地质储量上限,t。

(6) 采掘、运输设备指标约束。采掘设备的生产能力是影响开采效率的核心因素之一。确保设备在较优工况下运行可延长其使用寿命。

$$Q_s G_s \alpha \leqslant \sum_{i=1}^{n}x_i \leqslant Q_s G_s \tag{9}$$

$$Q_r G_r \beta \leqslant \sum_{i=1}^{n}x_i \leqslant Q_r G_r \tag{10}$$

式中:Q_s 表示采掘设备的数量,台;G_s 表示采掘设备在计划周期内的额定采掘能力,t/ 台;Q_r 表示运输设备的数量,台;G_r 表示运输设备在计划周期内的额定运输能力,t/ 台;α、β 表示设备实际工作系数。

(7) 物料消耗约束。单位矿石物料消耗(如炸药、支护材料、电能等)会直接影响企业生产的经济效益。为优化资源配置并控制运营成本,需对物料消耗进行动态约束。

$$W_{\min} \leqslant \frac{\sum_{i=1}^{n}W x_i}{\sum_{i=1}^{n}x_i} \leqslant W_{\max} \tag{11}$$

式中:$W_{\min}$ 表示消耗物料成本下限,元 /t;$W_{\max}$ 表示消耗物料成本上限,元 /t。

1.3 求解算法

针对多目标优化问题,提出一种基于参考点动态扰动与目标空间自适应重缩放的双机制改进(Dual Perturbation and Re-scaling Strategy based NSGA-Ⅲ,DPRS-NSGA-Ⅲ)算法,该算法流程如图 1 所示。

参考点构造用于支持目标空间的均衡覆盖,在传统 NSGA-Ⅲ框架中用于引导个体分布。每个参考点所关联的解数量设为 δ_k。为识别种群在目标空间中的局部聚集区域,统计参考点拥挤度的平均值及标准差,当某参考点满足拥挤度条件时,触发参考点扰动跳跃机制。该机制通过引导参考点远离拥挤区域,减少局部解集集中,辅助实现解空间的结构性扩展。

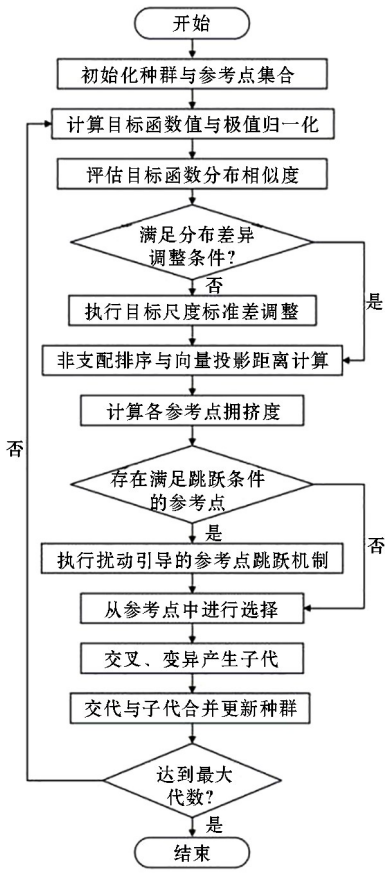


图 1 DPRS-NSGA-Ⅲ算法流程

Fig.1 Flowchart of the DPRS-NSGA-Ⅲ algorithm

跳跃方向由稀疏区域参考点集合的质心与当前拥挤点间的方向向量构建,设扰动幅度为 η,则更新后的参考点向量表达式见公式(12)。

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{new},j}^{k}=\frac{\boldsymbol{Z}_{j}^{k}+\eta\boldsymbol{\mu}_{j}}{\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{Z}_{i}^{k}+\eta\boldsymbol{\mu}_{j}} \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{new},j}^{k}$ 表示第 k 次迭代后,第 j 个参考点经扰动更新后的新位置向量;$\boldsymbol{Z}_{j}^{k}$ 表示第 k 次迭代中,第 j 个参考点的原始位置向量;$\boldsymbol{\mu}_{j}$ 表示第 j 个参考点的跳跃方向向量;m 表示稀疏区域参考点集合中的参考点总数;$\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{Z}_{i}^{k}$ 表示第 k 次迭代中,稀疏区域所有 m 个参考点原始位置向量的总和。

该公式确保扰动后的参考点仍归一于单位单纯形空间。跳跃后的参考点可引导种群跳出局部密集区域,使当前种群向空白或稀疏区域扩展,从而改善其在目标空间的覆盖均衡性。

设多目标优化问题具有 m' 个目标函数,初始均匀生成的参考点集合表示为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}=\{\boldsymbol{Z}^{1},\boldsymbol{Z}^{2},\cdots,\boldsymbol{Z}^{N}\},\boldsymbol{Z}^{k}=(\boldsymbol{Z}_{1}^{k},\boldsymbol{Z}_{2}^{k},\cdots,\boldsymbol{Z}_{m'}^{k}),\\ \boldsymbol{Z}^{k}\in\boldsymbol{Z},k=1,2,\cdots,N\end{cases} \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{Z}^{k}$ 表示第 k 个参考点的向量;N 表示参考点总数目。每代迭代中,统计参考点 $\boldsymbol{Z}^{k}$ 所关联的解数量。

通过式(14)和式(15)计算所有参考点的平均拥挤度和标准差:

$$\bar{\delta}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\delta_{k} \tag{14}$$

$$\sigma_{\delta}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(\delta_{k}-\bar{\delta})^{2}} \tag{15}$$

式中:δ_{k} 表示参考点 k 所关联的个体数量;$\bar{\delta}$ 为所有参考点所关联个体数量的平均拥挤度;σ_{δ} 为所有参考点所关联个体数量的标准差;λ 表示跳跃灵敏系数,用于控制算法对解集局部拥挤程度的敏感性。当某个参考点满足 $\delta_{k}>\bar{\delta}+\lambda\sigma_{\delta}$ 时,依据公式(15)触发参考点扰动跳跃机制,引导种群跳出局部解集聚区域。

构造跳跃方向向量 $\boldsymbol{u}^{k}$,由当前参考点 $\boldsymbol{Z}^{k}$ 指向参考点集合中关联个体最少的参考点质心,表示为:

$$\boldsymbol{u}^{k}=\frac{g-\boldsymbol{Z}^{k}}{||\,g-\boldsymbol{Z}^{k}\,||} \tag{16}$$

$$g=\frac{1}{|\,s\,|}\sum_{z^{s}\in S}z^{s} \tag{17}$$

$$S=\{z^{s}\in Z\mid\delta_{s}=\min\delta\} \tag{18}$$

式中:g 表示稀疏区域质心;$\boldsymbol{u}^{k}$ 表示跳跃单位方向向量;S 为稀疏区域参考点子集;δ_{s} 为参考点 z^{s} 所关联的个体数量;$\min\delta$ 为所有参考点关联个体数量中的最小值。参考点跳跃更新方法见式(19)。

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_{j}^{k}=\boldsymbol{Z}_{j}^{k}+\eta\cdot\boldsymbol{\mu}_{j}^{k},\ \forall j=1,2,\cdots,m \tag{19}$$

在出矿成本与矿石品位等目标函数分布特征差异较大的情况下,引入 Jensen-Shannon 散度可识别其非一致性,从而通过重缩放统一尺度,避免部分目标主导优化方向。计算平均 Jensen-Shannon 散度,若其超过阈值,则目标函数间分布形态不一致,需引入尺度调整策略。具体方法为:对目标函数进行标准差倒数加权处理,目标函数 f_{j} 的调整表达见式(20)。

$$f_{j}^{\mathrm{adj}}=\frac{f_{j}}{\sigma_{j}} \tag{20}$$

式中,σ_{j} 表示目标 f_{j} 在当前种群中的标准差。

为保证扰动后的参考点仍在单位单纯形空间中,需进行归一化处理,见式(21)。

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{new},j}^{k}=\frac{\hat{\boldsymbol{Z}}_{j}^{k}}{\sum_{i=1}^{m}\hat{\boldsymbol{Z}}_{j}^{k}} \tag{21}$$

为提升解与参考点的匹配质量,需对目标函数

值进行归一化处理。设种群个体集合为 $P=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$,则第 j 个目标函数在该种群中的归一化表示为:

$$\hat{f}_j(x_i)=\frac{f_j(x_i)-f_j^{\min}}{f_j^{\max}-f_j^{\min}},\forall x_i\in P \quad (22)$$

式中:$\hat{f}_j(x_i)$ 表示归一化处理后的目标函数;$f_j(x_i)$ 表示个体 x_i 的第 j 个目标函数值;$f_j^{\max}$,$f_j^{\min}$ 表示目标 j 的最大值与最小值。

针对任意两个目标函数 f_j、f_k,利用 Jensen-Shannon 散度衡量其分布差异:

$$JS(f_j,f_k)=\frac{1}{2}KL(f_j\parallel M)+\frac{1}{2}KL(f_k\parallel M) \quad (23)$$

$$M=\frac{f_j+f_k}{2} \quad (24)$$

式中:$KL(p\parallel q)$ 表示 Kullback-Leibler 散度,度量分布 p 与 q 的距离;M 表示两个目标的平均分布。

全体目标平均散度如式(25)所示,当平均散度超过设定阈值 θ(取值 0.05 ~ 0.15)时,认为各目标间分布存在明显不一致,需调整目标表达结构。若某一目标远大于其他目标,则通过缩放机制弱化单一目标对搜索方向的干扰,使算法更容易保持对多个目标的均衡考虑。

$$\overline{JS}=\frac{2}{m'(m'-1)}\sum_{j<k}JS(f_j,f_k) \quad (25)$$

式中,$\overline{JS}$ 为全体目标的平均散度。

目标尺度标准化调整:

$$f_j^{\mathrm{adj}}(x_i)=\frac{f_j(x_i)}{\sigma_j},\forall j=1,2,\cdots,m' \quad (26)$$

2 仿真应用实例

2.1 矿山概况

以某大型露天钼矿为研究对象。该矿区位于阴山山脉东段南麓,海拔为 1 223~2 121 m,切割深度相对高差为 350 m,属低中山区,所在部位为大苏计复式背斜,背斜走向 NEE,延伸约 15 km,轴面向南陡倾,核部地层为中太古代黄土窑岩组,褶皱两翼地层为花山岩组大理岩。矿石以氧化钼和硫化钼为主,开采方式为露天开采。矿体的赋存岩性以正长花岗岩为主,矿化连续性良好,矿床成因类型为典型的岩浆热液斑岩型钼矿,资源质量较高。矿石储量为 3.18 亿 t,氧化钼与硫化钼品位较为相近,为 0.107%~0.158%,平均品位为 0.122%,年生产能力为 540 万 t,配备 20 辆运矿卡车。该矿在制定出矿策略时,采用数字软件进行计划编制,未充分考虑矿石品位及相关成本的不确定性,为了解决该问题,通过采用不确定规划并运用 DPRS-NSGA-Ⅲ算法进行求解。该矿区地表模型如图 2 所示。

矿区采用单斗-卡车间断式生产工艺。根据场内岩性分布比例及所确定的开采参数,土方直接采用机械法开挖,岩石则经爆破松动后再开挖,月平均产能约为 45 万 t。以目前开采的三个平台为研究对象,每个平台设置一个出矿点,各出矿点基本参数见表 1,以月计划为优化周期,其中矿石品位及相关成本为随机变量,用蒙特卡洛方法模拟其随机变化。求解算法参数设置见表 2。



图 2 矿区地表模型

Fig.2 Surface model of the mining area

表 1 各出矿点基本参数

Table 1 Basic parameters of each ore extraction point

出矿点	开采周期/d	氧化钼品位/%	硫化钼品位/%	矿石地质储量/t	采掘成本/(元/t)	其他物料单耗/(元/t)
1 235~1 255 m	30	0.111~0.127	0.117~0.125	641 880	47~64	12.5~15.6
1 340~1 355 m	30	0.131~0.150	0.131~0.152	1 022 040	44.5~60	12~17.4
1 355~1 370 m	30	0.144~0.156	0.139~0.158	396 080	44~58	13~17.2

表 2 DPRS-NSGA-Ⅲ算法参数

Table 2 Parameters of the DPRS-NSGA-Ⅲ algorithm

种群规模	最大迭代次数	触发缩放的变异系数阈值 θ	变异系数 CV	拥挤判断跳跃阈值因子 λ	跳跃扰动幅度 η	拥挤度标准差、平均值
400	300	0.3	每代更新判断是否触发	2.0	0.1×单位向量	每代计算

目标尺度的自适应机制触发过程见表 3。初始阶段变异系数 CV 较大,目标函数之间尺度差异显著,易导致个别目标主导进化方向,使种群分布偏离。为避免该偏差,设置缩放阈值 $\theta=0.3$,当 $CV>\theta$ 时,对执行目标值进行归一化处理。参考点跳跃机制见表 4,分别统计每代参考点的拥挤度均值 $\bar{\delta}$ 与标准差 σ_δ,当某参考点的拥挤度超过 $\bar{\delta}+\lambda\sigma_\delta$ 时,即触发跳跃。

表 3 目标函数波动与尺度自适应机制触发判断

Table 3 Trigger decision of objective function fluctuation and scale adaptive mechanism

迭代代数	月出矿量/万 t	单位矿石成本/(元/t)	矿石品位偏差/%	变异系数 CV	是否触发缩放
1	15.31	3.14	0.004 8	0.38	是
2	9.07	2.04	0.003 1	0.27	否
3	13.28	2.55	0.004 2	0.34	是
4	13.95	2.63	0.004 4	0.36	是
5	11.12	2.11	0.003 6	0.30	是
6	10.24	2.13	0.003 4	0.31	是
		……			

表 4 参考点跳跃机制触发判断

Table 4 Trigger decision of reference point jumping mechanism

迭代代数	拥挤度均值 $\bar{\delta}$	拥挤度标准差 σ_δ	跳跃参考点数	是否跳跃参考点
1	2.41	1.23	6	是
2	2.13	1.08	4	是
3	2.28	1.19	3	是
4	1.92	0.98	1	否
5	1.58	0.76	0	否
6	1.72	0.89	2	是
		……		

2.2 优化结果

原始方案、传统 NSGA-Ⅲ算法(方案一)及 DPRS-NSGA-Ⅲ算法(方案二)在多目标优化下的结果对比见表 5。其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示矿山中三个主要出矿点对应的月度出矿量。对比原始方案和传统 NSGA-Ⅲ算法,DPRS-NSGA-Ⅲ在各目标上均表现更优,其出矿量分别为 129 416 t、210 580 t 和 78 352 t,与原始方案相比,DPRS-NSGA-Ⅲ的月出矿量提升 2.03%,在满足矿山资源开发的前提下实现了更优的任务分配。单位矿石成本下降至 70.44 元/t,低于 NSGA-Ⅲ算法和原始方案。DPRS-NSGA-Ⅲ算法的平均品位提高至 0.132%,品位偏差控制在 0.005 个百分点以内,波动控制明显优于 NSGA-Ⅲ算法。DPRS-NSGA-Ⅲ算法的帕累托解集分布情况如图 3 所示。由图 3 可知,DPRS-NSGA-Ⅲ算法在单位矿石成本和品位偏差两个维度上均形成了较为连续、均衡的分布带,有效避免了解集塌陷、空洞或集中聚集等现象,显示出较好的解空间探索能力,其解集区间均满足矿山对成本控制与品位稳定性的综合要求。综上可知,DPRS-NSGA-Ⅲ算法通过动态调整各平台出矿量,优先释放高品位出矿点的产能以降低品位偏差,同时优化低品位出矿点的物料消耗约束,在保障资源可持续利用的前提下,总出矿量提升了 2.03%,单位矿石成本下降了 2.17%。

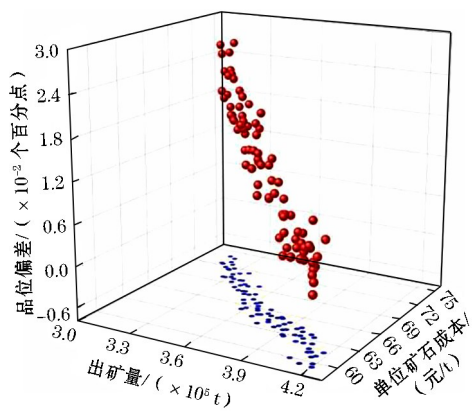


图 3 DPRS-NSGA-Ⅲ帕累托解集

Fig.3 Pareto solution set of the DPRS-NSGA-Ⅲ algorithm

表 5 优化结果对比分析

Table 5 Comparative analysis of optimization results

方案	各出矿点的出矿量/t			月出矿量/t	单位矿石成本/(元/t)	矿石品位偏差/(个百分点)	矿石品位/%	生产目标达成率/%
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ					
原始方案	120 000	220 000	70 000	410 000	72.00	—	≥0.120	≥95.00
方案一	115 830	227 819	71 143	414 792	71.53	0.007	0.125	94.84
方案二	129 416	210 580	78 352	418 348	70.44	0.005	0.132	97.35
方案一原点误差/%	3.47	3.55	1.63	1.17	0.65	—	4.41	0.17
方案二原点误差/%	7.80	4.20	12.00	2.03	2.10	—	9.60	2.47

3 结论

(1) 针对露天矿出矿品位与采掘成本波动问题,构建了融合蒙特卡洛模拟的多目标不确定性规划模型,通过量化地质参数随机性,实现出矿成本、月度产量与品位偏差的动态协同优化。

(2) 提出基于参考点动态扰动与目标空间自适应重缩放的 DPRS-NSGA-Ⅲ算法。通过扰动跳跃机制突破局部前沿聚集,结合尺度标准化策略均衡目标分布,与传统 NSGA-Ⅲ算法相比,DPRS-NSGA-Ⅲ算法在解集多样性控制与收敛性方面表现更优。

(3) 应用实例表明,DPRS-NSGA-Ⅲ算法使总出矿量提升 2.03%,单位矿石成本降低 2.17%,品位偏差控制在 0.005 个百分点以内,生产目标达成率提高至 97.35%。解集分布整体均衡,未出现异常聚集或塌陷现象,显示出良好的优化适应性。

参考文献(References):

[1] 车建明.露天开采矿山采矿技术及安全策略研究[J].世界有色金属,2021(2):71-72.
CHE Jianming. Research on mining technology and safety strategy of open pit mining[J]. World Nonferrous Metals, 2021(2):71-72.

[2] 郭阳阳,赵程荣.综合管理智能化露天采矿策略分析[J].露天采矿技术,2022,37(3):52-55.
GUO Yangyang, ZHAO Chengrong. Analysis of comprehensive management intelligent open-pit mining strategy[J]. Opencast Mining Technology, 2022, 37(3): 52-55.

[3] 付翔,王开,王然风.智能采矿数智赋能技术内涵与应用范式[J].工矿自动化,2025,51(3):1-8.
FU Xiang, WANG Kai, WANG Ranfeng. Connotation and application paradigm of intelligent mining data intelligence enabling technology[J].Journal of Mine Automation, 2025, 51(3):1-8.

[4] 侯杰,李国清,修国林,等.金属地下矿山深部转产过程中的产能接续优化[J].工程科学学报,2023,45(5):693-700.
HOU Jie, LI Guoqing, XIU Guolin, et al. Optimization of capacity continuity during the deep-area transition for an underground metal mine [J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(5):693-700.

[5] 罗周全,管佳林,王益伟,等.地下金属矿山生产规模优化确定方法[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(7):2875-2880.
LUO Zhouquan, GUAN Jialin, WANG Yiwei, et al. Production scale optimization determination method of underground metal mine [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 2875-2880.

[6] 杨仕教.露天矿山生产调度系统群集拟生态优化方法及应用研究[D].长沙:中南大学,2007.
YANG Shijiao. Studies of swarm simulation biology optimization for production scheduling system of open pit mine and its application [D]. Changsha: Central South University,2007.

[7] 霍晓宇,杨仕教.基于 Multi-agent 技术的露天矿山生产调度系统的优化实现[J].计算技术与自动化,2013,32(2):21-26.
HUO Xiaoyu, YANG Shijiao. Optimized implementation of open-pit mine production scheduling system based on multi-agent technology [J]. Computing Technology and Automation,2013,32(2):21-26.

[8] 胡乃联,李勇,李国清,等.用粒子群算法优化编制露天矿生产作业计划[J].北京科技大学学报,2013,35(4):537-543.
HU Nailian, LI Yong, LI Guoqing, et al. Optimization of open-pit-mining operational planning by using a particle swarm algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2013,35(4):537-543.

[9] 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.

[10] 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 andalgorithm of multi-objective production scheduling optimization for multi-metal open-pit mine[J]. Metal Mine,2020(4):147-153.

[11] 周森奇.用于矿山生产计划的粒子群改进算法研究[D].天津:天津大学,2021.
ZHOU Senqi. Research on improved particle swarm optimization for mine production planning [D]. Tianjin: Tianjin University,2021.

[12] 胡柳青,王李管,毕林.地下矿山生产计划 3D 可视化编制技术[J].煤炭学报,2007(9):930-933.
HU Liuqing, WANG Liguan, BI Lin. 3D visualization system based production plan scheduling of underground mine[J]. Journal of China Coal Society,2007(9):930-933.

[13] 周耀东,赵怡晴,李仲学,等.基于仿真的矿山生产计划优化研究与工程应用[J].矿业研究与开发,2011,31(6):79-82.
ZHOU Yaodong, ZHAO Yiqing, LI Zhongxue, et al. Optimization research and engineering application of mine production planning based on simulation [J]. Mining Research and Development,2011,31(6):79-82.

[14] 姚旭龙,胡乃联,刘大斌,等.基于异构数据融合技术的地下矿生产计划优化[J].金属矿山,2012(11):116-120.
YAO Xulong, HU Nailian, LIU Dabin, et al. Optimization of underground metal mine production plan based on heterogeneous data integration technology[J]. Metal Mine, 2012(11):116-120.

[15] 叶海旺,欧阳枧,李宁,等.矿山短期生产计划优化的多目标遗传粒子群算法[J].金属矿山,2018,(11):25-30.
YE Haiwang, OUYANG Jian, LI Ning, et al. Multi-objective genetic particle swarm optimization algorithm for the short-term production planning in a mine[J]. Metal Mine,2018(11):25-30.

[16] 顾晓薇,王开拓,胥孝川,等.基于改进遗传算法的开采计划优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(2):28-32.

GU Xiaowei, WANG Kaituo, XU Xiaochuan, et al. Research on mining plan optimization based on improved genetic algorithm[J]. Mining Research and Development, 2024,44(2):28-32.

[17] 李召朋.利用人工智能技术矿山开采生产调度优化策略[J].新疆钢铁,2024(2):76-78.
LI Zhaopeng. Optimization strategy for mining production scheduling using artificial intelligence technology [J]. Xinjiang Iron and Steel,2024(2):76-78.

[18] ESMAEIL Rahimi, EHSAN Moosavi, REZA Shirinabadi, et al. 矿山生产计划优化算法、开采材料目的地及最终坑限(英文)[J].Journal of Central South University,2018,25(6):1475-1488.
ESMAEIL Rahimi, EHSAN Moosavi, REZA Shirinabadi, et al. Optimized algorithm in mine production planning, mined materialdestination, and ultimate pit limit[J]. Journal of Central South University ,2018,25(6):1475-1488.