

基于改进遗传算法的开采计划优化研究*

顾晓薇,王开拓,胥孝川,赵昀奇,王宏宇

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:为了克服露天矿生产计划方案精确求解的困难,提出了一种基于改进遗传算法的开采计划优化方法。首先,利用采选成本、精矿售价、矿石回采率、废石混入率、精矿品位和混入废石品位等技术经济参数构建目标函数,并以年采矿量和年采剥量为约束条件构建模型;其次,通过引入突变算子对传统遗传算法进行改进,避免算法陷入早熟;最后,通过算法运算结果对比验证所提出的算法的性能。结果表明,所提出的方法能够在约束条件下有效处理露天矿开采计划问题,在较短时间内可找到较优的露天矿开采计划方案。与其他的方法相比,所提出的方法在参数设置、模型构建、运算时间方面都具有较大的优势。

关键词:遗传算法;露天矿;开采计划;总净现值

中图分类号:TD854

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)02-0028-05

0 引言

生产计划对于露天矿山企业至关重要,好的生产计划可以为矿山企业带来巨大的经济效益,但是找到总净现值最大的生产计划是一项复杂的工作。

对于露天矿山而言,在完成境界优化后,下一步就是在已知境界中进行开采计划优化。开采计划优化研究,就是在最终境界内寻求每年末应推进到的最佳开采体,以使总净现值最大。开采计划包括生产能力、开采顺序和开采寿命。这些要素之间相互影响,在优化过程中要同时考虑这些要素,单独优化一两个要素无法得到全局最优解。1975年,John Holland首先提出了遗传算法,并通过编制计算机程序解决复杂的优化问题^[1]。开采计划作为一个带约束的组合优化问题,除了可以采用确定性算法外(如:枚举法、动态规划法),还可以采用元启发式算法,而遗传算法作为元启发式算法的代表,具有适应性强、全局优化、概率搜索等优点^[2-4]。突变是指生

物进化过程中,由于重大的灾难性事件导致大量物种或个体灭绝。在这种情况下,只有适应能力强的物种或个体能够幸存并繁衍后代。在优化露天矿开采计划的遗传算法中,突变操作表现为保留总净现值较大的开采计划方案,同时对表现不佳且陷入停滞的开采计划方案进行重新生成,以确保整个开采计划种群的多样性得以维持^[5]。本文提出了一种基于改进遗传算法的开采计划优化方法。

1 开采计划优化模型的构建

基于经济效益的露天矿开采计划优化本质上是一个组合优化问题,不同的开采组合会导致矿山经济效益出现较大的差异。开采计划优化决策可以归结为如何在第 t 年末将采场推进到使总净现值最大的最佳位置和形态^[6]。

在开采计划优化问题中,开采体 i 或者被开采,或者不被开采,设决策变量 x_i 表示开采体 i 是否被开采的情况, $x_i = 0$ 时,表示开采体 i 没有被开采; $x_i = 1$ 时,表示开采体 i 被开采。令 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_e, \dots, y_N\}$ 为开采顺序变量序列, N 为开采体的总数,也是矿山的开采寿命; y_e 为第 e 个被开采的开采体,也是采场推进到 y_e 的位置和形态。若 $Y = \{0, 1, 1, 0, 0, 1\}$,则对应的开采顺序为:第2个开采体→第3个开采体→第6个开采体。

相较于利润,净现值考虑了资金的时间价值,有利于计算投资回报率^[7]。因此,采用净现值作为衡量矿山生产计划的经济效益指标。基于经济效益的矿山生产计划模型的目标函数为:

$$\max \theta = \sum_{t=1}^N \frac{\frac{m_t r_p D_t}{g_p} - q_t (c_m + c_p) - w_t c_w}{(1+d)^t} \quad (1)$$

* 收稿日期:2023-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52074061)。

作者简介:顾晓薇(1971—),女,辽宁凤城人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事矿山资源与生态经济及露天矿床开采优化领域的研究,E-mail:guxiaowei@mail.neu.edu.cn。

通信作者:王开拓(1994—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事露天矿优化方面的研究工作,E-mail:1083764790@qq.com。

式中, θ 为总净现值, 万元; t 为年份, $a; N$ 为矿山生产计划的开采寿命, $a; D_t$ 为第 t 年的精矿价格(可取常数), 元 / $t; c_m$ 为矿山的单位开采成本, 元 / $t; c_p$ 为选厂的单位选矿成本, 元 / $t; c_w$ 为废石的单位剥离和排弃成本, 元 / $t; r_p$ 为选厂的金属回收率, %; g_p 为精矿品位, %; q_t 为第 t 年开采的矿石量, 万 $t; m_t$ 为 q_t 含有的金属量, 万 $t; w_t$ 为第 t 年剥离的废石量, 万 $t; d$ 为可比价格折现率(年贴现率), %。

根据矿山生产过程, 构建的优化模型需要满足以下两个设计约束条件。

(1) 采矿量要处于年矿石生产能力的下限和上限之间, 即:

$$Q_L \leq q_t \leq Q_U \quad (2)$$

式中, Q_L 为年矿石生产能力的下限, 万 $t; Q_U$ 为年矿石生产能力的上限, 万 $t; q_t$ 为第 t 年开采的矿石量, 万 t 。

(2) 采剥量不能超过年采剥能力的上限, 即:

$$q_t + w_t \leq T_U \quad (3)$$

式中, T_U 为年采剥能力的上限, 万 $t; w_t$ 为第 t 年剥离的废石量, 万 t 。

综合上述目标函数、约束条件和决策变量, 基于经济效益的露天矿开采计划优化模型为:

$$\begin{cases} \max \theta = \sum_{t=1}^N \frac{m_t r_p D_t - q_t (c_m + c_p) - w_t c_w}{(1+d)^t} \cdot x_i \\ \text{s.t.} \quad Q_L \leq q_t \leq Q_U & i = 1, 2, \dots, N \\ q_t + w_t \leq T_U & i = 1, 2, \dots, N \\ x_i \in \{0, 1\} & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

2 改进的遗传算法

启发式算法通常是针对特定问题而设计的, 利用问题的特点来寻找解决方案。一个好的启发式算法应该具有适应特定问题的特性, 避免陷入局部最优解, 同时能够充分利用问题的基本结构来提高搜索效率^[8]。然而, 这样的算法很难具有通用性, 因为不同问题的特点和结构可能有很大差异, 所以要求一个算法在所有问题上都表现出色是不现实的。选择遗传算法优化基于经济效益的露天矿开采计划, 在算法设计过程中也是充分利用了矿山开采问题的特性。特别是在开采计划制定初期, 合适的初始方案对整个优化过程具有重要影响。合理的初始方案的选择有助于提高算法的收敛速度和解的质量, 从

而找到露天矿开采计划的全局最优方案。

2.1 个体编码

编码是智能进化方法求解优化问题的基础和前提条件, 本质是采用一定长度的字符串表示优化问题的解。常用的编码方式主要包括浮点数编码、二进制编码、整数编码和排列编码等^[9]。在基于经济效益的露天矿开采计划优化问题中, 开采计划参数为整数型变量, 因此采用二进制编码来求解基于经济效益的露天矿开采计划整体优化问题。二进制编码遗传算法是一种概率搜索算法, 通过模拟自然界中的遗传操作, 将一组开采计划优化方案(这里为固定长度为 N 的开采体序列)迭代调整生成一组新的优化方案。在这个优化模型中, 建立了一个固定长度为 N 的开采体序列集合, 其中每个开采体序列对应于搜索空间中的一个点(即开采计划可能方案空间里的一个方案), 对每个开采体序列应用开采计划适应度函数来评估其实际效果。

二进制编码的开采体序列 X_i 的表达如下:

$$X_i = [x_1, x_2, \dots, x_e, \dots, x_N] \quad (5)$$

式中, x_e 为第 e 个开采体; N 为开采体的总个数。

采用上述二进制编码的开采体序列中, 每个基因代表一个开采体, 每个基因的计算值代表当年的净现值, 对应关系非常明确, 在运算过程中无需解码。露天矿开采计划编码示例如图 1 所示。



图 1 露天矿开采计划编码

2.2 种群初始化

传统的遗传算法通过对染色体的所有基因随机赋值来完成种群的初始化。然而, 随机初始化的方法存在一定问题。具体来说, 初始化完成后需要对这些随机生成的开采计划序列进行评估, 以确定开采计划方案的优劣。如果含有大量无效的基因, 就会增大算法的计算负担, 甚至可能影响到最优开采计划方案的寻找。因此, 针对遗传算法的种群初始化, 需要寻求更有效的优化策略^[10]。

为了改善传统遗传算法中种群随机初始化的问题, 对种群初始化的方法进行了优化, 以一定概率生成每个开采体序列的 0 和 1 的组合。矿山开采过程中需要满足年矿石生产能力的约束条件, 即相邻的被开采的开采体之间会间隔很多个开采体, 所以利用露天矿开采计划优化的这个特点, 设定一定的阈

值,使开采体序列初始化的时候能够产生具有一定间隔的 0 和 1 的组合,从而提高全局最优解的搜索效率。

2.3 适应值评价

适应度函数是表示种群当中个体适应度的一种函数,通常采用适应度函数计算个体的适应值,且该函数可以决定遗传算法的搜索方向。由于开采计划方案的最终目标是实现经济效益的最大化,那么直接用目标函数的总净现值作为适应度函数。总净现值越大,表示开采计划方案的经济效益越高,相应的个体适应度也就越高。这样的设定使得我们能够更高效地找到那些具有高经济效益的矿山开采方案,从而实现露天矿开采计划的优化。

2.4 遗传算子

2.4.1 选择

采用锦标赛选择算子。锦标赛选择算子通过随机选择两个开采计划方案并比较它们的总净现值的大小来确定选中的开采计划方案。这种方法简单且易于实现,同时保证了优秀的开采计划方案有较高的选中概率,也给予了相对次优的开采计划方案有一定的机会被选中,有利于保持整个种群的多样性^[11]。

2.4.2 交叉

常见的交叉算子有单点交叉、两点交叉、多点交叉、部分匹配交叉、均匀交叉、顺序交叉、基于位置的交叉等^[12]。露天矿开采计划的优化选择单点交叉作为遗传算法的交叉算子。为叙述方便,以 8 维开采顺序为例,染色体的单点交叉步骤如下:

步骤 1,随机选择两条染色体(即开采体序列),并随机选取一个位置(两个开采体序列的位置一样),如图 2(a)所示;

步骤 2,交换两个位置之间的开采体,即将两个位置的开采体是否开采的决策情况做一个交换,如图 2(b)所示。经过两个开采体序列的交换后,后续的开采顺序都发生了相应的变化。

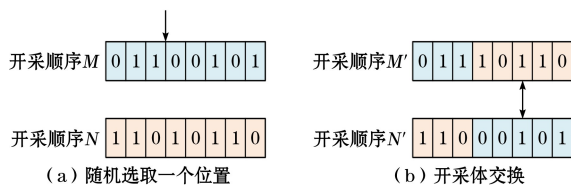


图 2 开采顺序的单点交叉过程

2.4.3 变异

在遗传算法优化开采计划中,变异操作是在种

群中改变开采体序列中某个开采体开采与否的操作,利用这种技术来维持从一个种群到另一个种群的多样性^[13]。此外,采用这种变异算子也是为了防止优化算法陷入局部最优或者收敛于开采计划次优方案。变异算子在遗传算法优化开采计划中起辅助作用,用于优化前述选择算子和交叉算子处理后产生的开采计划。

交换突变是在开采体序列中随机选择两个不同的位置,再将两个位置的开采体交换(交换的是开采体是否开采的决策情况)插入到原开采体序列。以 8 维染色体为例,开采顺序的交换突变过程如图 3 所示。

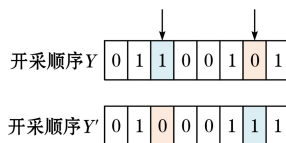


图 3 开采顺序的交换突变过程

2.4.4 灾变

灾变算子由灾变条件和灾变方式构成。

灾变条件:设置一个灾变计数器 counter,检查当前迭代次数是否大于 1,以及当前最佳开采计划方案与新一轮优化的最佳开采计划方案之差的绝对值是否小于设定的阈值。如果满足灾变算子检查条件,则灾变计数器 counter 就进行加 1 操作,如果不满足上述条件,则将灾变计数器 counter 重置为 0。当灾变计数器 counter 的值达到或超过预设的灾变触发阈值时,便对种群执行灾变操作。

灾变方式:灾变算子在露天矿开采计划优化中的主要作用是帮助算法跳出局部搜索,重新提高开采计划方案的多样性,使其能够找到最佳的开采计划方案。用于开采计划优化的常见灾变算子有改变变异算子、调整原有突变方式、重新随机生成开采计划方案等。

在露天矿开采计划优化的遗传算法中,首先要确定当前种群中应该被保留下来的方案所占的比例。所占比例越大则灾变强度越小,能够被保留下来的原有开采计划方案就越多。在确定保留方案数量后,算法会随机选择种群中的方案,对选中的开采计划方案进行强制性变异操作,从而实现灾变的效果。然后,计算选中方案的总净现值,接着算法会回到正常的迭代过程,继续在开采计划优化中进行选择操作、交叉操作和变异操作。灾变遗传算法的流

程如图 4 所示。

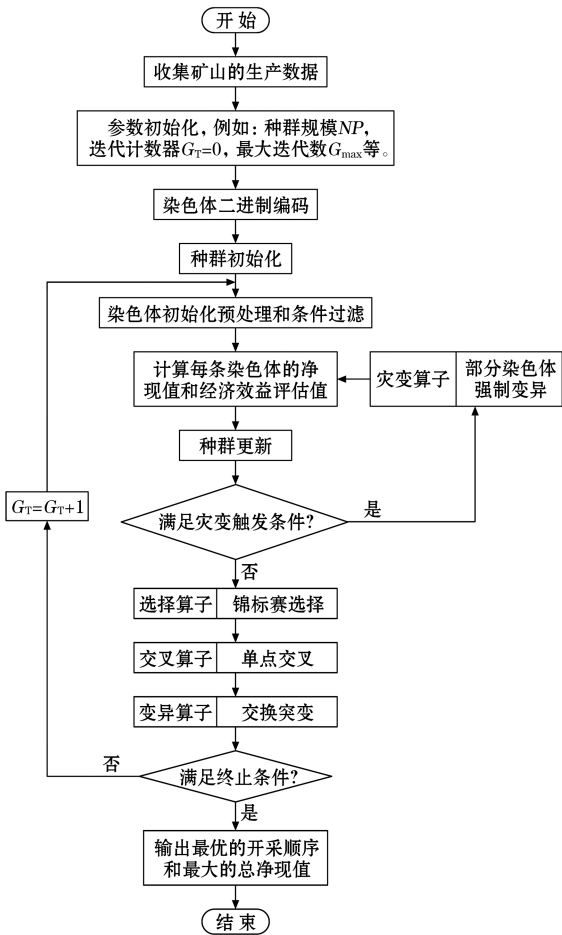


图 4 露天矿开采计划优化模型的灾变遗传算法流程

3 结果与分析

技术经济参数与矿山的实际情况、运营成本以及开采效率等因素有关。根据矿山的相关资料,这里将矿山的基建期设为 1 a,矿石开采成本设为 72 元/t,岩石剥离成本设为 15 元/t,选矿成本设为 70 元/t,选矿回收率为 0.8,废石混入率为 0.06,矿石回采率为 0.933,废石品位为 0.1,精矿品位为 0.65,成本上升率为 2%,价格上升率为 3%,折现率为 7%,精矿价格为 800 元/t,年采矿量下限为 1800 万 t,年采矿量上限为 2200 万 t。

开采方案的精确程度以及算法运行的时间除了与算法结构的设计有关外,还受到遗传算法参数设定的影响。这里将种群的大小设为 2000,最大迭代次数设为 2000,交叉比例设为 0.4,变异概率设为 0.1,灾变影响比例设为 0.4,灾变触发条件设为 20 次。

为了评估改进的遗传算法的性能,在

MATLAB 中将遗传算法独立运行 30 次,并记录每次运算的总净现值,见表 1。

表 1 遗传算法运算记录

次数	总净现值/万元	运行时间/min
1	2 399 579.53	16.45
2	2 400 948.10	16.65
3	2 399 622.18	17.35
4	2 396 095.20	16.61
5	2 395 890.91	15.61
6	2 403 149.06	16.35
7	2 401 150.43	17.96
8	2 397 870.52	17.47
9	2 396 176.15	17.88
10	2 398 178.53	17.43
11	2 401 341.54	15.37
12	2 397 956.07	14.83
13	2 397 173.39	14.09
14	2 402 854.51	14.01
15	2 397 820.07	15.73
16	2 401 414.73	15.71
17	2 396 685.51	15.92
18	2 400 616.81	16.01
19	2 399 010.46	16.47
20	2 396 735.52	15.34
21	2 400 463.07	14.55
22	2 399 319.20	14.30
23	2 397 732.86	14.53
24	2 400 481.74	15.54
25	2 400 109.05	15.46
26	2 399 487.44	15.45
27	2 403 497.97	16.03
28	2 399 478.04	16.40
29	2 398 951.40	16.17
30	2 400 801.84	17.11
平均	2 399 353.06	15.96

由表 1 可知,算法平均运行时间为 15.96 min,最大的总净现值为 2 403 497.97 万元,最小的总净现值为 2 395 890.91 万元,总净现值的平均值为 2 399 353.06 万元。由动态规划算法运算出来的总净现值的平均值精确结果是 2 419 618.00 万元,这一精确结果与遗传算法求出来的总净现值的平均值的相对误差为 0.84%。30 次运算中,总净现值的动态规划运算结果和遗传算法运算结果的相对误差为 0.67%~0.98%。

虽然遗传算法没有找到全局最优方案,但是找到的开采方案非常接近最佳方案,0.84%的相对误差在露天矿开采计划优化问题中也是可以接受的。对于这种具有大量参数和高维度的复杂问题,精确解往往是非常难以找到的。如果采用枚举法,其计算复杂度较高,耗时会较多,但是当问题的解空间较小、计算资源充足的情况下特别有效^[14]。如果选用动态规划法,虽然可以大幅度提高运行效率,但是是具有“无后效应”,对于露天矿开采计划问题的实际

应用有一定的限制^[15-16]。因此,遗传算法提供的近似解是非常实用和可行的。遗传算法可以在相对较短的时间内找到一个接近最优的解,而不需要消耗大量的计算资源去寻找有可能根本找不到的精确的全局最优解。此外,遗传算法的一个重要优点是它具有较强的鲁棒性^[17]。这意味着,即使在参数或约束有所变化的情况下,遗传算法仍然能够找到一个比较好的解。这使得遗传算法非常适合于处理露天矿开采计划这种充满不确定性和动态变化的实际问题。

4 结论

为解决露天矿生产计划方案精确求解困难的问题,提出了一种基于改进遗传算法的露天矿开采计划优化方法,并通过程序运算结果分析得出以下结论。

(1) 所提方法通过以总净现值为目标函数,引导遗传算法搜索方向,可以得到与精确算法结果的相对误差在 0.84% 左右的近似最优开采计划方案。

(2) 与动态规划法相比,本文所提出的方法不用满足“无后效应”,投资可以不是常数,且运营成本都可以以单位运营成本计算,鲁棒性更好,适用范围更广。

(3) 本文所提出的算法是元启发式算法,对于露天矿开采计划这种高维度的问题,一般只能得到近似解,虽然增加种群数和迭代次数可以减小和最优解之间的误差,但是会增加运算时间。下一步研究将致力于将所提出的方法与其他算法结合,寻找一个既高效又适用性广的混合算法。

参考文献(References):

- [1] 朱宇,王慧玲,郑锦波,等.基于遗传算法的贝叶斯网络结构学习综述[J].激光杂志,2023,44(4):32-39.
- [2] 李少波,宋启松,李志昂,等.遗传算法在机器人路径规划中的研究综述[J].科学技术与工程,2020,20(2):423-431.

- [3] 尚正阳,顾寄南,唐仕喜,等.针对几种元启发式算法的应用性能对比研究[J].机械设计与制造,2021(4):34-38.
- [4] 杜永浩,邢立宁,姚锋,等.航天器任务调度模型、算法与通用求解技术综述[J].自动化学报,2021,47(12):2715-2741.
- [5] 轩华,刘淑燕,王薛苑,等.带不相关机的可重入柔性流水车间问题的改进灾变遗传算法[J].工业工程与管理,2021,26(5):161-171.
- [6] 顾晓薇,胥孝川,王青,等.金属露天矿生产计划优化算法的改进[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(10):1492-1496.
- [7] 朱敏,胡煜昭.基于调整净现值法的我国采矿权估值应用研究:以黔西南晴隆梯矿采矿权为例[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(5):160-168.
- [8] FESTA P. A brief introduction to exact, approximation, and heuristic algorithms for solving hard combinatorial optimization problems [C]//International Conference on Transparent Optical Networks.IEEE,2014:1-20.
- [9] 刘延华,李永飞,李林,等.配电网重构遗传算法的个体编码综述[J].计算机应用与软件,2018,35(10):33-37+107.
- [10] 常见,任雁.基于改进遗传算法的机器人路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2023(2):23-27.
- [11] 张琛,詹志辉.遗传算法选择策略比较[J].计算机工程与设计,2009,30(23):5471-5474+5478.
- [12] LIM S M, SULTAN A B M, SULAIMAN M N, et al. Crossover and Mutation Operators of Genetic Algorithms [J]. International Journal of Machine Learning and Computing,2017,7(1):9-12.
- [13] 王春阳,赵玉庆,谢金兴,等.遗传算法变异算子的改进[J].山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(5):898-901.
- [14] 王丽媛,郭树生,安吉祥.基于枚举法的海上风电智能运维调度模型[J].船舶工程,2022,44(2):28-34.
- [15] 牛鹏飞,王晓峰,芦磊,等.强化学习在车辆路径问题中的研究综述[J].计算机工程与应用,2022,58(1):41-55.
- [16] 张莹.动态规划算法综述[J].科技视界,2014(28):126+158.
- [17] 左悦.基于视觉内容分析和遗传算法优化的鲁棒图像水印算法[J].包装工程,2019,40(1):209-217.

Research on Mining Plan Optimization Based on Improved Genetic Algorithm

GU Xiaowei, WANG Kaituo, XU Xiaochuan, ZHAO Yunqi, WANG Hongyu

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: In order to overcome the difficulty of accurately solving the production plan of open-pit mines, an optimization method of mining plan based on improved genetic algorithm was proposed. Firstly, the objective function was constructed by using the technical and economic parameters such as mining cost, concentrate price, ore recovery rate, waste rock mixing rate, concentrate grade and mixed waste rock grade, and the model was constructed with annual mining amount and annual stripping amount as constraints. Secondly, the traditional genetic algorithm was improved by introducing the catastrophe operator to avoid the algorithm falling into prematurity. Finally, the performance of the proposed algorithm was verified by comparing the results of the algorithm. The results show that the proposed method can effectively deal with the problem of open-pit mining plan under constraint conditions, and a better open-pit mining plan can be found in a short time. Compared with other methods, the proposed method has great advantages in parameter setting, model construction and operation time.

Key words: Genetic algorithm, Open-pit mine, Mining plan, Total present value