

# 一种带备选方案的露天矿生产作业计划优化方法

田谦益<sup>1,2</sup>, 李敬敬<sup>1</sup>, 陈建华<sup>1</sup>, 施心陵<sup>1</sup>

(1. 云南大学 信息学院, 云南 昆明 650091; 2. 闽南师范大学 计算机学院, 福建 漳州 363000)

**摘要:**针对露天矿生产临时出现变动,导致原最优生产作业计划失效的情况,提出一种能够提供备选方案的优化方法。采用一种新型的群智能优化算法——多元优化算法实现优化,算法的搜索元采用上三角数据结构体存储,利用该结构体实现有用信息的记忆和共享,充分利用寻优过程信息,实现搜索过程记忆,在找到最优解的同时,保留多个次优解。以某露天铁矿为例,通过与其他三种常用的群智能算法的优化结果进行比较,表明多元优化算法在露天矿生产作业计划优化中能够提供备选方案且最优解精度更高。

**关键词:**露天矿;生产作业计划;多元优化算法;搜索元;过程记忆

中图分类号: TP183; TD809

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)06-0102-05

## An Optimization Method of Open-pit-mining Production Planning with Various Alternatives

Tian Qianyi<sup>1,2</sup>, Li Jingjing<sup>1</sup>, Chen Jianhua<sup>1</sup>, Shi Xinling<sup>1</sup>

(1. School of Information, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China;

2. College of Computer Science, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

**Abstract:** In view of the optimum plan failures caused by varying environments in open-pit mines, an optimization method of open-pit-mine production planning with various alternatives was proposed. A novel swarm intelligence algorithm, multivariate optimization algorithm, was adopted to optimize the production planning. Stored in an upper triangular data structure which memorized and shared useful information, the search atoms of the algorithm achieved the memory of search process by making full use of optimization search process information so that multiple suboptimal alternatives were retained while finding the optimal solution. Taking an open-pit iron mine as an engineering background, this paper compared the optimization results of this algorithm with those of other three swarm intelligence algorithms. The results indicate that multivariate optimization algorithm can provide various alternatives and that the optimization solution is more accurate in the optimization of open-pit-mining production planning.

**Key words:** open-pit-mining; production planning; multivariate optimization algorithm; search atom; process memory

制定露天矿生产计划的目的是在给定的技术和经济条件下寻求经济效益最好的开采方案<sup>[1]</sup>。露天矿生产计划问题可以归结为一个复杂约束的规划模型,目标函数可以选取最小总成本或者最大开采量。这一类问题可以采用启发式算法来解决<sup>[2]</sup>。已有不少学者将遗传算法、粒子群算法等群智能优化算法用于露天矿生产计划优化问题,取得了较好的结果<sup>[3-5]</sup>。但这些方法一次只能给出一个最优方案,如果环境发生变化,就有可能导致原最优方案失效,限制了经典群智能算法在复杂工程优化问题中的应用。针对这一情况,本研究采用多元优化算法(multivariate optimization algorithm, MOA)<sup>[6]</sup>实现露天矿山生产计划的优化。

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61261007)

作者简介: 田谦益(1974—),女,讲师,主要从事人工智能与信号处理方面的研究工作. E-mail: qytian@126.com

施心陵(1956—),男,云南昆明人,教授,博士生导师,主要从事人工智能与自适应信号处理方面的研究工作,本文通信作者. E-mail: xlshi@ynu.edu.cn

## 1 问题描述

根据露天矿山生产的实际需要,考虑矿石指标、出矿点的最大采掘量及最小采掘量等因素,以采运成本最小作为露天矿山生产计划优化的最终目的,可建立露天矿山生产作业计划的数学模型<sup>[4]</sup>:

$$f(x) = \min \sum_{i=1}^n x_i C_i \quad (1.1)$$

$$\text{s. t. } G_1^{(\lambda)} \leq \frac{\sum_{i=1}^n x_i g_i^{(\lambda)}}{\sum_{i=1}^n x_i} \leq G_h^{(\lambda)} \quad (1.2)$$

$$\varphi_l \leq \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) \leq \varphi_h \quad (1.3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \eta_i = Q \quad (1.4)$$

$$q_{\min} \leq x_i \leq q_{\max} \quad (1.5)$$

式(1.1)为目标函数,  $f(x)$  是采掘和运输成本的最小值,其中:  $x_i$  为约束变量,代表各出矿点的出矿量,  $i$  为出矿点的个数 ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $C_i$  是第  $i$  个出矿点的单位采掘和运输成本。式(1.2)为入选矿石质量指标约束,其中,  $\lambda$  表示入选矿石包含组分的个数,  $g_i^{(\lambda)}$  为矿点  $i$  采出矿石的第  $\lambda$  种组分质量分数,  $G_h^{(\lambda)}$  和  $G_l^{(\lambda)}$  分别表示入选矿石的第  $\lambda$  种组分质量分数上限和下限。式(1.3)为综合回采率约束,其中,  $\eta_i$  表示第  $i$  个出矿点的回采率,  $\varphi_h$  和  $\varphi_l$  分别表示综合回采率的上、下限值。式(1.4)为计划期出矿总量约束,其中  $Q$  表示计划出矿总量。式(1.5)为  $x_i$  的上、下限约束,  $q_{\max}$ ,  $q_{\min}$  分别代表出矿量的上限和下限。

## 2 基于多元优化算法的露天矿生产作业计划优化

### 2.1 多元优化算法

多元优化算法是一种基于特殊数据结构体的群智能优化算法,通过该数据结构体充分利用计算机内存资源,实现对解空间进行交替的全局-局部迭代搜索,逐渐逼近全局最优解。算法中完成搜索功能的个体被称之为搜索元,搜索元按照不同的分工被分为两类:全局元(global atom, GA)和局部元(local atom, LA),全局元主要负责全局搜索,局部元则负责局部的开发。搜索元以图1所示的数据结构为载体,实现历史有用信息的记录和共享。整个结构体呈上三角型,顶部是一个队列,每个队列节点下挂一个堆栈,相对较优的全局元被作为潜在解保留在队列中,当环境改变时,有可能成为问题的优解。MOA的每次迭代包括两个阶段:①全局搜索。对整个解空间进行搜索,找到多个具有开发潜力的局部区域。②局部开发。对各个具有开发潜力的局部区域进行深入开发,从而找到该区域内的更优解。这样的结构有助于全局搜索和局部开发能力的平衡,而且在整个迭代过程中全局搜索和局部开发同时存在,使得算法不至于过早收敛,跳出局部最优解的能力更强,还能够将整个搜索过程保存下来,充分利用寻优过程信息,实现搜索过程记忆。

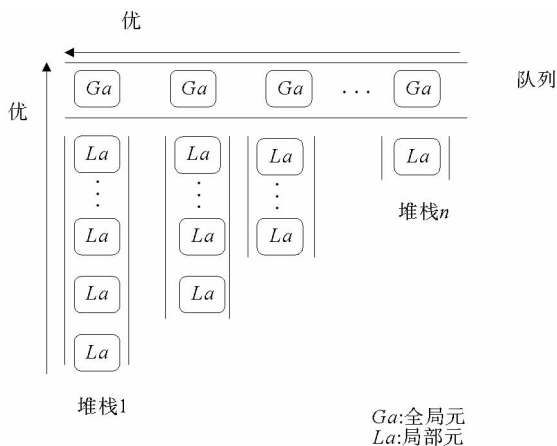


图1 MOA的数据结构

Fig.1 Data structure of MOA

全局搜索元根据式(2)生成:

$$\begin{cases} G_a = [h_1, h_2, \dots, h_d] \\ h_i = \text{unifrnd}(\min_i, \max_i) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $d$  是问题的维度;  $\max_i$  和  $\min_i$  分别为解空间第  $i$  维的上、下限;  $h_i$  为一个在  $\max_i$  和  $\min_i$  之间均匀分布的随机数。局部搜索元根据式(3)生成:

$$\begin{cases} L_a = G_a + r \times [l_1, l_2, \dots, l_d] \\ l_i = \text{unifrnd}(-1, 1) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $r$  为内局部邻域半径, 决定了局部邻域的范围;  $l_i$  为  $-1$  到  $1$  之间均匀分布的随机数,  $i = 1, 2, \dots, d$ 。

## 2.2 用多元优化算法优化露天矿生产作业计划

本研究讨论的露天矿生产作业计划问题的数学模型是一个带复杂约束的规划问题, 在约束处理问题中, 比较常用的方法有罚函数法、基于搜索可行解的方法等<sup>[1]</sup>。一个好的罚函数, 应该结构简单、参数少, 能在进化过程中正确权衡目标函数与约束条件之间的关系, 因此, 适应度函数可构造为

$$F(x) = f(x) + K \sum_i \varphi_i(x) \quad (4)$$

其中:  $f(x)$  为原数学模型的目标函数;  $\varphi_i(x)$  为第  $i$  个约束条件且  $\varphi_i(x) \leq 0$ ;  $K$  为罚函数,  $K = 10^{\rho(1-\mu)}$ ,  $\rho$  为  $0 \sim 10$  的整数,  $\mu = \frac{\text{可行解的个数}}{\text{所有解的个数}}$ 。

罚函数  $K$  是一个关于  $\mu$  的减函数, 迭代开始时, 由于可行解的个数较少, 所以罚函数较大, 也就是说惩罚力度较大; 随着迭代次数的增加, 可行解也逐渐增多, 罚函数逐渐减小, 惩罚力度也变小<sup>[8]</sup>。

露天矿山生产计划优化的 MOA 算法流程如图 2 所示。

## 3 实例验证

某露天铁矿一个计划期内矿石产量为 90 万 t, 共包含 5 种矿石类型, 所有矿石共由 8 个出矿点产出, 每个出矿点采出一种类型矿石。矿石生产及组成的相关信息如表 1 所示, 各出矿点的采运成本如表 2 所示。为了验证算法的有效性, 将 MOA 算法与精英保留策略的遗传算法 (genetic algorithm, GA)<sup>[9]</sup>、自适应惯性权重粒子群算法 (particle swarm algorithm-weighted, PSO-w)<sup>[10]</sup> 和动态多群和声粒子群算法 (dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with harmony search, DMS-PSO-HS)<sup>[11]</sup> 进行比较, 所有算法采用 MATLAB2011b 编程实现, 在 CUP 为英特尔 T1600, 2.5 GB 内存的个人计算机上执行。所有的种群大小为 65, 其中 MOA 算法数据结构为  $10 \times 10$  的上三角结构。最大迭代次数为 2 000 次, 算法随机运行 30 次, 所有实验结果均是取 30 次的平均值。

从图 3 可知, MOA 算法收敛速度较快而且精度较高。表 3 中的 MOA 和 MOA1 分别表示 MOA 算法得出的最优解和次优解。按照图 1 给出的 MOA 数据结构形式, MOA 算法最多可以有 9 个备选方案, 但由于越往后总成本会越来越大, 所以表中只给出了 1 个备选方案和其他算法的最优方案进行比较。表 3 给出了几种算法优化得出的参数, 经过计算, GA 超出了参数总和不得超过 90 的约束, 说明 GA 已陷入局部最优, 这一

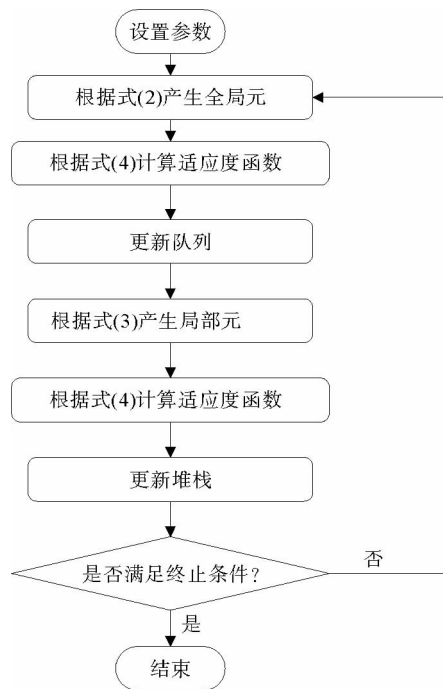


图 2 基于 MOA 的露天矿山生产计划优化的流程图

Fig. 2 Flow chart of the optimization of open-pit mine production planning based on MOA

表 1 各出矿点生产综合指标及矿石组分

Tab.1 Production composite indicators and ore components of each mining area

项目	出矿点	出矿量/(万 t)	回采率/%	矿石组分(质量分数)/%			
				Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
类型 I	②	$x_2$	94.50	66.50	1.02	1.00	2.50
类型 II	③	$x_3$	93.00	67.01	0.31	1.94	2.05
	⑥	$x_6$	95.00				
类型 III	①	$x_1$	93.50	64.05	2.56	2.80	3.00
	④	$x_4$	96.00				
类型 IV	⑤	$x_5$	94.00	61.26	2.30	3.95	5.50
	⑦	$x_7$	96.50				
类型 V	⑧	$x_8$	97.50	66.50	1.00	1.45	2.05
生产综合指标要求		$5 \leq x_i \leq 20$	95~96	65~66	$\leq 1.80$	$\leq 2.20$	$\leq 3.50$

表 2 各出矿点采运成本

Tab.2 Mining and transportation cost of each mining area

出矿点	采掘矿石类型	采运成本(元/t)
①	III	55.00
②	I	64.00
③	II	55.50
④	III	59.50
⑤	IV	52.25
⑥	II	65.50
⑦	IV	59.25
⑧	V	22.50

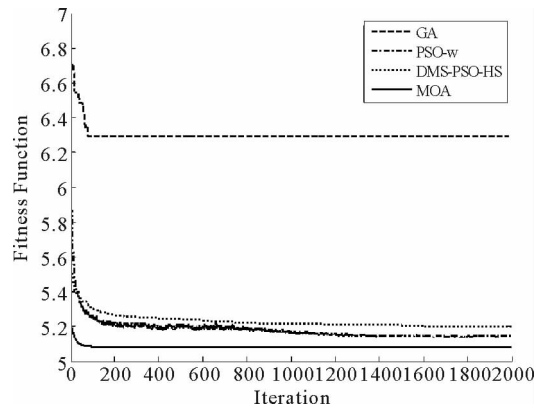


图 3 四种算法的迭代曲线

Fig.3 Iteration curves of the four algorithms

表 3 四种算法结果对比表

Tab.3 Optimization results comparison of the four algorithms

算法	GA	PSO-w	DMS-PSO-HS	MOA	MOA1	
①	13.10	10.89	11.20	20.0	11.40	
②	11.94	5.98	7.17	5.0	7.20	
③	7.90	12.47	10.13	9.5	10.90	
④	14.66	7.40	9.04	5.0	9.20	
⑤	15.50	16.62	15.07	20.0	14.76	
⑥	11.48	5.60	7.04	5.0	7.00	
⑦	12.54	10.63	10.18	5.0	9.52	
⑧	11.13	19.81	19.45	20.0	20.00	
参数总和	98.25	89.40	89.28	89.50	90.00	
采运成本(元/t)	59.45	49.16	49.60	48.49	49.66	
回采率%	0.950	0.951	0.952	0.950	0.952	
矿石组分/%	Fe	64.41	65.00	65.43	65.00	65.20
	SiO <sub>2</sub>	1.68	1.58	1.57	1.69	1.60
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.19	2.16	2.18	2.12	2.15
	LOI	3.36	3.33	3.30	3.28	3.31

点从图3也可以得到印证。从选矿标准来看,PSO-w、DMS-PSO-HS、MOA和MOA1都符合要求,但MOA的采运成本最小,也就是说,MOA算法在满足采矿要求约束和参数约束的条件下,实现了采运成本最小,这个值也优于文献[4]的结果。

## 4 结论

研究表明,采用MOA算法对露天矿山生产计划模型进行优化具有多重优势:

1)能够提供多种备选方案。由于MOA算法特殊的数据结构特点,不仅能够保留算法找到的最优解,还能保留次优解的信息,充分利用过程信息。在实际工程应用中,如果某些条件临时发生变化又在可容忍范围之内时,可以考虑次优解,以便能灵活、快速地制订生产计划,减少因临时变化给生产带来的损失。

2)收敛稳定。MOA算法特殊的数据结构有助于全局搜索和局部开发能力的平衡,而且整个迭代过程中全局搜索和局部开发同时存在,使得算法不至于过早收敛、跳出局部最优解的能力更强。

3)精度高。MOA算法最优解的精度高于所选的其他几种群智能优化算法。虽然MOA算法的收敛速度不及其他几种算法,但在实际工程应用中,许多优化问题属于离线优化,这就意味着速度是次要的,而精度是第一位的。

## 参考文献:

- [1]吴会江,李建祥.露天矿生产计划的现状、问题与对策[J].金属矿山,2005(4):4-6.  
Wu Huijiang, Li Jianxiang. Open-pit production planning: The current, problems & strategies[J]. Metal Mine, 2005(4):4-6.
- [2]Coelho V N, Souza M J F, Coelho I M, et al. Multi-objective approaches for the open-pit mining operational planning problem [J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2012, 39: 233-240.
- [3]Shishvan M S, Sattarvand J. Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 240: 825-836.
- [4]胡乃联,李勇,李国清,等.用粒子群优化算法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 particle swarm algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(4): 537-543.
- [5]李勇,胡乃联,李国清.基于改进粒子群算法的露天矿运输调度优化[J].中国矿业,2013,22(4):98-105.  
Li Yong, Hu Nailian, Li Guoqing. Open-pit hauling dispatching optimization based on improved PSO algorithm[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(4): 98-105.
- [6]Li B L, Shi X L, Gou C X, et al. Multivariate optimization algorithm for multimodal optimization[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 483: 453-457.
- [7]王军涛,尹国才,成岳鹏.智能算法在约束优化问题中的应用研究[J].北华航天工业学院学报,2013,23(1):24-27.  
Wang Juntao, Yin Guocai, Cheng Yuepeng. Research of intelligent algorithm applied in constrained optimization problems [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2013, 23(1): 24-27.
- [8]甘敏,彭辉.一种新的自适应惩罚函数算法求解约束优化问题[J].信息与控制,2009,38(1):24-28.  
Gan Min, Peng Hui. A new adaptive penalty function based algorithm for solving constrained optimization problems[J]. Information and Control, 2009, 38(1): 24-28.
- [9]Djurišić A B. Elite genetic algorithms with adaptive mutations for solving continuous optimization problems application to modeling of the optical constants of solids[J]. Optics Communications, 1998, 151(1): 147-159.
- [10]Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[C]//IEEE World Congress on Computational Intelligence. New York, IEEE, 1998: 69-73.
- [11]Zhao S Z, Suganthan P N, Pan Q K, et al. Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with harmony search[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3735-3742.

(责任编辑:吕文红)