

文章编号:1671-251X(2018)04-0104-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017100044

# 用于求解露天矿运输问题的改进差分进化算法

彭程, 隋晓梅, 王辉俊

(华北科技学院 信息与控制技术研究所, 河北 三河 065201)

**摘要:**针对露天矿运输问题,以露天矿开采能力和运输能力为约束条件,以运输费用最小为目标函数,建立了露天矿运输问题的数学模型。针对智能优化算法用于求解露天矿运输问题时容易陷入局部最优解的问题,提出了一种改进差分进化算法。该算法通过在差分进化算法中引入归一化操作,使得运输问题中的等式约束能自动成立,有利于跳出局部最优解。应用结果表明,该算法具有较好的可重复性,利用该算法对露天矿运输问题进行优化后,运输成本明显降低。

**关键词:**露天矿运输;人工智能;差分进化算法;等式约束;归一化

中图分类号:TD57 文献标志码:A 网络出版时间:2018-03-20 15:09

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180320.1335.002.html>

Improved differential evolution algorithm for solving open-pit mine transportation problem

PENG Cheng, SUI Xiaomei, WANG Huijun

(Institute of Information and Control Technology, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** Aiming at open-pit mine transportation problem, a mathematical model of the open-pit mine transportation problem was established which took production and transportation capacity of open-pit mine as constraint conditions and the minimum transportation cost as objective function. In view of problem that intelligent optimization algorithm for solving the open-pit mine transportation problem was easily getting trapped in local optimal solution, an improved differential evolution algorithm was proposed. Normalization is introduced into differential evolution algorithm which makes equality constraint in the transportation problem can be satisfied automatically and is advantageous to jump out of local optimal solution. The application results show that the algorithm has good repeatability, and transportation cost is significantly reduced by use of the algorithm to optimize the open-pit mine transportation problem.

**Key words:** open-pit mine transportation; artificial intelligence; differential evolution algorithm; equality constraint; normalization

## 0 引言

运输优化对降低露天矿企业生产成本、提升竞争力具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。随着人工智能技术的发展,

智能优化算法被用于求解露天矿运输问题<sup>[3]</sup>。智能优化算法通常是针对无约束或边界约束优化问题提出的,而在露天矿运输问题中,除了边界约束之外还存在等式约束和不等式约束<sup>[4]</sup>,其中等式约束为智

收稿日期:2017-10-20;修回日期:2018-03-13;责任编辑:盛男。

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(3142015013);河北省科技计划项目(15211830)。

作者简介:彭程(1978-),男,山东日照人,高级工程师,博士,主要研究方向为系统建模、优化与控制,E-mail:pengc@ncist.edu.cn。通信作者:隋晓梅(1978-),女,辽宁辽阳人,副教授,硕士,主要研究方向为复杂系统建模与优化,E-mail:sunny7801@ncist.edu.cn。

引用格式:彭程,隋晓梅,王辉俊.用于求解露天矿运输问题的改进差分进化算法[J].工矿自动化,2018,44(4):104-108.

PENG Cheng, SUI Xiaomei, WANG Huijun. Improved differential evolution algorithm for solving open-pit mine transportation problem[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(4): 104-108.

能优化算法的实施带来困难。因此,必须将智能优化算法与约束处理方法<sup>[5-8]</sup>相结合才能求解露天矿运输问题。文献[9]利用运输问题的目标函数和约束条件构造霍普菲尔德神经网络,使用遗传算法优化神经网络权值。文献[10]使用多目标优化的思路处理约束条件,利用带双引子的粒子群优化算法求解与运输问题对应的多目标优化问题。上述文献采用不同的智能优化算法和约束处理方法,取得了相应的成果,但存在容易陷入局部最优解的问题。

差分进化算法<sup>[11]</sup>具有操作简单、求解精度高的优点,是进化计算领域最重要的优化算法之一,已被用于解决换热网络优化<sup>[12]</sup>、并联机构位置正解<sup>[13]</sup>、电动汽车排放优化<sup>[14]</sup>、瓦斯涌出量预测<sup>[15]</sup>等问题。本文在差分进化算法中引入归一化操作,去掉了运输问题中的等式约束,提出了一种改进差分进化算法,并将其应用于露天矿运输问题的优化计算。

## 1 露天矿运输问题的数学模型

假设露天矿中存在  $I$  个装载点  $A_i (i=1, 2, \dots, I)$  和  $J$  个卸载点  $B_j (j=1, 2, \dots, J)$ ; 装载点  $A_i$  所在采区的开采能力为  $P_i, \text{m}^3$ , 卸载点  $B_j$  的受矿能力为  $Q_j, \text{m}^3$ ; 从装载点  $A_i$  到卸载点  $B_j$  的单位运费和运输量分别为  $C_{ij}, \text{元}/\text{m}^3$  和  $x_{ij}, \text{m}^3$ 。从降低运输成本的角度考虑,露天矿运输问题的目标函数可表示为

$$\min H(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式中  $H(x)$  为总运费,  $x = [x_{11} \ x_{12} \ \dots \ x_{1J} \ x_{21} \ x_{22} \ \dots \ x_{2J} \ \dots \ x_{I1} \ x_{I2} \ \dots \ x_{IJ}]$ 。

考虑到开采能力、受矿能力和运输行为的特点,露天矿运输问题还需满足式(2)~式(4)定义的约束条件,即装载点的矿石需要全部运出,运送到卸载点的矿石量不能大于其受矿能力,从装载点到卸载点的运输量不能为负。

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = P_i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} \leq Q_j \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

## 2 差分进化算法

有边界约束的函数优化问题定义为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{Z}) \\ \mathbf{Z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_D] \in \mathbf{R}^D \\ L_d \leq z_d \leq U_d \quad d = 1, 2, \dots, D \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $f(\mathbf{Z})$  为目标函数;  $\mathbf{Z}$  为决策向量;  $D$  为决策向量的维数;  $z_d$  为决策向量的第  $d$  维分量;  $L_d$  和  $U_d$  分别为  $z_d$  的下界和上界。

设种群大小为  $N$ , 差分进化算法首先按照随机方式生成初始种群:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 \\ \mathbf{Z}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1D} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2D} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_{N1} & z_{N2} & \dots & z_{ND} \end{bmatrix} \quad (6)$$

种群的每个个体  $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_N$  均为优化问题(式(5))的一个可能解。在算法运行过程中的每一代,差分进化算法需要执行变异、交叉、选择三类操作,以更新种群中每个个体的位置。

(1) 变异操作。对种群中第  $n (n=1, 2, \dots, N)$  个个体  $\mathbf{Z}_n$ , 由变异操作生成与  $\mathbf{Z}_n$  对应的变异向量:

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{Z}_{r1} + F(\mathbf{Z}_{r2} - \mathbf{Z}_{r3}) \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{Z}_{r1}, \mathbf{Z}_{r2}, \mathbf{Z}_{r3}$  为当前种群中彼此不同的 3 个个体, 并且均不是  $\mathbf{Z}_n$ ;  $F$  为缩放因子。

变异操作产生的变异向量  $\mathbf{V}_n$  的某些分量有可能违反边界约束, 对于这些分量可取其边界值, 即  $\mathbf{V}_n$  的第  $d$  维分量  $V_{nd}$  可进一步按式(8)进行处理。

$$V_{nd} = \begin{cases} L_d & V_{nd} < L_d \\ V_{nd} & L_d \leq V_{nd} \leq U_d \\ U_d & V_{nd} > U_d \end{cases} \quad (8)$$

(2) 交叉操作。对个体  $\mathbf{Z}_n$  和变异向量  $\mathbf{V}_n$  进行交叉操作得到试验向量  $\mathbf{U}_n$ ,  $\mathbf{U}_n$  的第  $d$  维分量为

$$U_{nd} = \begin{cases} V_{nd} & r_4 \leq R \text{ 或 } r_5 = d \\ z_{nd} & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $R$  为交叉概率;  $r_4$  为  $[0, 1]$  内符合均匀分布的随机数;  $r_5$  为随机整数,  $r_5 \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

$R, r_4, r_5$  配合用以控制试验向量  $\mathbf{U}_n$  各分量的来源。

(3) 选择操作。若试验向量  $\mathbf{U}_n$  优于个体  $\mathbf{Z}_n$ , 则在下一代种群中用  $\mathbf{U}_n$  代替  $\mathbf{Z}_n$ , 否则保持  $\mathbf{Z}_n$  不变, 即按式(10)进行选择操作。

$$\mathbf{Z}_n = \begin{cases} \mathbf{U}_n & f(\mathbf{U}_n) < f(\mathbf{Z}_n) \\ \mathbf{Z}_n & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

## 3 改进差分进化算法

### 3.1 等式约束处理

首先定义

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{P_i} \quad (11)$$

式中  $y_{ij}$  为装载点  $A_i$  到卸载点  $B_j$  的运输量  $x_{ij}$  占装载点  $A_i$  所在采区开采能力  $P_i$  的比例。

对  $y_{ij}$  进行归一化操作, 可得

$$\bar{y}_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^J y_{ij}} \quad (12)$$

则

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = \sum_{j=1}^J P_i \bar{y}_{ij} = P_i \quad (13)$$

即理论上式(2)定义的等式约束可自动成立。

然而, 实际计算发现, 对某个装载点, 会有很小的概率出现  $y_{ij} = 0$  的情况, 此时应跳过归一化操作。

### 3.2 非线性优化问题

利用惩罚函数法<sup>[5]</sup>处理式(3)定义的不等式约束, 将式(1)一式(4)定义的露天矿运输问题转化为式(14)定义的仅存在边界约束的非线性优化问题。

$$\begin{cases} \min H(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} P_i y_{ij} + \\ \mu C \sum_{j=1}^J \max\left(\sum_{i=1}^I P_i y_{ij} - Q_j, 0\right) \\ y_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{y} = [y_{11} \ y_{12} \ \dots \ y_{1J} \ y_{21} \ y_{22} \ \dots \ y_{2J} \ \dots \ y_{I1} \ y_{I2} \ \dots \ y_{IJ}]$ ;  $\mu$  为惩罚因子;  $C$  为常数, 本文取  $1 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

### 3.3 算法流程

求解露天矿运输问题的改进差分进化算法流程:

(1) 设置算法参数, 包括惩罚因子  $\mu$ 、种群大小

$N$ 、最大进化代数  $G$ 、交叉概率  $R$  及缩放因子  $F$ 。

(2) 按随机方式生成初始种群。根据式(12)对种群中每个个体进行归一化操作, 利用式(14)计算种群中每个个体对应的目标函数值, 找到当前种群中最优个体。令  $n=1$ 。

(3) 进行变异操作。根据式(7)和式(8)生成变异向量。

(4) 进行交叉操作。根据式(9)得到试验向量。

(5) 进行归一化操作。若试验向量中与某个装载点对应的各分量均为 0, 转到步骤(7); 否则对试验向量按式(12)进行归一化操作, 得到归一化后的个体, 利用式(14)计算其目标函数值。

(6) 进行选择操作。若归一化后的个体优于当前种群中的第  $n$  个个体, 则更新种群中的第  $n$  个个体; 若归一化后的个体优于最优个体, 则更新最优个体。

(7) 令  $n=n+1$ 。若  $n \leq N$ , 返回步骤(3)。

(8) 若达到最大进化代数, 结束优化, 输出最优个体; 否则令  $n=1$ , 返回步骤(3)进行下一代优化。

## 4 算法在露天矿运输问题中的应用

抚顺西露天矿共有 9 个装载点  $A_1 \sim A_9$ , 5 个卸载点  $B_1 \sim B_5$ , 装载点所在采区的开采能力、卸载点的受矿能力及从装载点到卸载点的单位运费见表 1。经试验, 改进差分进化算法各参数取值: 惩罚因子  $\mu=1\ 000$ 、种群大小  $N=100$ 、最大进化代数  $G=5\ 000$ 、交叉概率  $R=0.9$ 、缩放因子  $F=0.5$ 。

表 1 露天矿运输相关数据

Table 1 Data related to open-pit mine transportation

卸载点	单位运费/(元·m <sup>-3</sup> )									受矿能力/ (万 m <sup>3</sup> )
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	
B <sub>1</sub>	8.2	3.4	6.2	7.5	9.1	4.3	5.7	3.1	6.8	2 850
B <sub>2</sub>	5.6	8.0	7.5	8.7	7.1	6.2	8.4	9.1	9.5	3 420
B <sub>3</sub>	3.2	4.5	3.6	2.9	3.7	5.6	6.2	5.1	3.7	680
B <sub>4</sub>	4.6	5.8	6.3	5.4	5.3	6.2	4.2	3.1	6.2	750
B <sub>5</sub>	6.4	3.6	5.5	6.4	4.5	3.4	3.6	4.5	4.6	650
开采能力/ (万 m <sup>3</sup> )	540	460	430	350	2 100	1 850	670	980	820	—

考虑到改进差分进化算法是一种随机优化算法, 重复进行 100 次优化计算, 100 组优化结果中最优总运费最大值为 41 224.93 万元, 最小值为

41 224.01 万元, 均值为 41 224.21 万元, 标准差为 0.19 万元, 表明改进差分进化算法具有较好的可重复性。

利用文献[9-10]算法和本文算法得到的最优运输量(四舍五入后保留整数部分)见表2。经检验,表2中3组最优运输量均满足式(2)一式(4)定义的约束条件,但文献[9-10]算法得到的最优总运费分

别为41 717万元和44 090万元,均大于本文算法得到的最优总运费,表明通过改进差分进化算法得到了更好的运输方案。

表2 不同算法得到的最优运输量

Table 2 Optimal transportation volume of different algorithms

算法	装载点到卸载点的运输量/(万 m <sup>3</sup> )													其他
	$x_{12}$	$x_{21}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{43}$	$x_{52}$	$x_{61}$	$x_{62}$	$x_{74}$	$x_{81}$	$x_{84}$	$x_{93}$	$x_{95}$	
文献[9]算法	540	460	420	10	350	2 100	1 490	360	670	900	80	272	548	0
文献[10]算法	210	330	460	430	350	2 100	200	1 000	650	670	230	750	820	0
本文算法	540	460	270	160	350	2 100	1 490	360	670	900	80	170	650	0

### 5 结语

改进差分进化算法针对露天矿运输问题中等式约束的特点,引入归一化操作去除了等式约束,有利于跳出局部最优解。应用结果表明,该算法具有较好的可重复性,有利于降低运输成本。

#### 参考文献(References):

[1] 李桂荣,尹江艳,郝全明. 浅谈运筹学在矿业中的应用[J]. 黄金,2008,29(4):25-27.  
LI Guirong, YIN Jiangyan, HAO Quanming. Application study of operational research in mining [J]. Gold,2008,29(4):25-27.

[2] 方颜空,张修玉,邬艳礼. 九架炉露天矿采掘带单元排土运输方案优化研究[J]. 矿业研究与开发,2017(11):99-101.  
FANG Yankong, ZHANG Xiuyu, WU Yanli. Optimization research on the dumping transportation of cutting zone unit in Jiujialu open-pit mine [J]. Mining Research and Development, 2017(11):99-101.

[3] 苏楷,门飞. 露天矿运输调度问题求解的自适应果蝇优化算法[J]. 金属矿山,2017,46(11):172-176.  
SU Kai, MEN Fei. Adaptive fruit fly optimization algorithm for solving open-pit hauling dispatching optimization problem[J]. Metal Mine,2017,46(11):172-176.

[4] 仇旺令,叶义成. 露天矿运输问题优化及其算法[J]. 化工矿物与加工,2005,34(7):25-27.  
QIU Wangling, YE Yicheng. Optimization and arithmetic of the open-pit transportation problem[J]. Industrial Minerals and Processing, 2005, 34(7):

25-27.

[5] 李宜萱,金治群,程军蕊,等. 一种基于 AEA 算法的改进的惩罚函数法[J]. 计算机与应用化学,2014,31(12):1479-1484.  
LI Yixuan, JIN Zhiqun, CHENG Junrui, et al. Study on an improved penalty function method for constraint problem based on AEA (IAEA) algorithm [J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(12):1479-1484.

[6] 刘衍民,牛奔,赵庆祯. 求解约束优化问题的多目标粒子群算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(3):851-853.  
LIU Yanmin, NIU Ben, ZHAO Qingzhen. Multi-objective particle swarm optimizer for solving constraint optimization problems [J]. Application Research of Computers,2011,28(3):851-853.

[7] 刘大莲,张春花,杜金玲. 基于种群分类排序的约束优化遗传算法[J]. 数学的实践与认识,2012,42(8):190-196.  
LIU Dalian, ZHANG Chunhua, DU Jinling. An evolutionary algorithm based on classification and sorting for solving constrained optimization problem [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(8):190-196.

[8] 郭中华,金灵,郑彩英. 神经网络求解 TSP 问题的改进算法研究[J]. 计算机仿真,2014,31(4):355-358.  
GUO Zhonghua, JIN Ling, ZHENG Caiying. Study on improved method of neural network to solve TSP[J]. Computer Simulation,2014,31(4):355-358.

[9] 鞠兴军,李林,刘光伟. 基于遗传算法的神经网络在露天矿卡车调度系统中的应用研究[J]. 露天采矿技术,2009,24(6):31-33.

- JU Xingjun, LI Lin, LIU Guangwei. Application research on truck dispatching system based on neural network of genetic algorithm in surface mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2009, 24(6): 31-33.
- [10] 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): 98-101.  
LI Yong, HU Nailian, LI Guoqing. Open-pit hauling dispatching optimization based on improved PSO algorithm[J]. *China Mining Magazine*, 2013, 22(4): 98-101.
- [11] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- [12] 陈家星, 崔国民, 彭富裕, 等. 基于种群多样性的改进差分进化算法应用于换热网络优化[J]. *热能动力工程*, 2017, 32(4): 29-37.  
CHEN Jiaying, CUI Guomin, PENG Fuyu, et al. An improved differential evolution algorithm based on population diversity and its application in heat exchanger network synthesis [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2017, 32(4): 29-37.
- [13] 彭程. 平面并联机构正解的拥挤差分进化算法求解[J]. *华北科技学院学报*, 2016, 13(2): 94-97.  
PENG Cheng. Forward kinematics solutions of the planar parallel mechanism using crowding differential evolution algorithm [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2016, 13(2): 94-97.
- [14] 卜凡靖, 王耀南. 电动汽车排放的改进差分进化算法[J]. *智能系统学报*, 2017, 12(1): 110-116.  
BU Fanjing, WANG Yaonan. Study of electric vehicle emissions by applying modified differential evolution algorithm [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2017, 12(1): 110-116.
- [15] 王江荣, 罗资琴, 赵睿. 投影寻踪在瓦斯涌出量预测中的应用[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(4): 87-89.  
WANG Jiangrong, LUO Ziqin, ZHAO Rui. Application of projection pursuit in gas emission prediction[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(4): 87-89.