

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.02.005

基于鲸鱼算法的巷道掘进爆破参数优化与应用

蒋复量^{1,2}, 杨文超¹, 郭锦涛¹, 王小丽¹, 陈冠¹

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:合理的巷道掘进爆破参数组合是提高生产效率和改善掘进生产环境的重要因素。建立巷道爆破掘进经济数学模型, 对在综合成本最少的前提下优化巷道掘进爆破参数。以钻孔、爆破、铲装、运输等工程技术环节为基础, 建立巷道爆破掘进的综合成本为目的经济数学模型, 形成目标函数。鲸鱼算法较传统的智能优化算法有着收敛速度快、稳定性好和操作简单的优势。利用鲸鱼算法对目标函数进行优化, 最终得到最佳的爆破参数组合, 即周边孔抵抗线为 0.78 m, 周边孔间距为 0.64 m, 崩落孔抵抗线 0.95 m, 崩落孔孔间距为 0.90 m, 炸药单耗 1.21 kg/m³, 并得到了矿山的爆破掘进最佳综合成本在 29.9 元/m³ 左右, 可以为矿山爆破掘进的爆破成本控制提供参考。

关键词:巷道掘进; 鲸鱼算法; 爆破掘进成本; 爆破参数优化

中图分类号:TD263.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2019)02-0027-06

Optimization of Roadway Tunneling Blasting Parameters Based on Cetacean Algorithm and its Application

JIANG Fuliang^{1,2}, YANG Wenchao¹, GUO Jintao¹, WANG Xiaoli¹, CHEN Guan¹

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. The State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan, Anhui 243000, China)

Abstract: Reasonable combination of roadway blasting parameters is an important factor to improve production efficiency and environment. The economic mathematical model of roadway tunneling is established to optimize roadway tunneling blasting parameters with the least comprehensive cost. Based on the engineering technology such as drilling, blasting, shoveling and transportation, the comprehensive cost of roadway blasting and tunneling is

收稿日期: 2018-08-30

基金项目: 金属矿山安全与健康国家重点实验室开放基金项目(2016-JSKSSYS-03); 2018 年安全生产重特大事故防治关键技术科技项目(hunan-0003-2018AQ); 2018 年南华大学研究生科学基金项目(2018KYY135)

作者简介: 蒋复量(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事矿山安全与环境保护方面的研究。E-mail: jfljfd@163.com

established to form the objective function. Compared with the traditional intelligent optimization algorithm, the whale algorithm has advantages of fast convergence, good stability and simple operation. The whale algorithm is used to optimize the objective function, and the optimal combination of blasting parameters is obtained. The surrounding hole resistance line is 0.78 m. The surrounding hole spacing is 0.64 m. The caving hole resistance line is 0.95 m. The caving hole spacing is 0.90 m, and the single consumption of explosive is 1.21 kg/m³. The optimal comprehensive cost of blasting excavation in the mine is about 29.9 yuan/m³. It can provide reference for the control of blasting cost of mine blasting excavation.

key words: tunnel excavation; whale optimization algorithm; blasting and driving cost; optimization of blasting parameters

0 引言

近年来,我国经济进入转型期,高效率、高质量的发展成为主流。在工程领域,爆破参数的优化不仅仅对矿山生产中的成本、安全、效率等有着非常重要的作用,而且也是爆破技术作为破岩的主要手段在不断要求技术革新的工业化进程中,依然充满活力的原因。智能算法的发展,为爆破的工程设计和优化提供了一条途径,所以它也自然而然的成为爆破参数优化的主要手段。

崔铁军^[1]等在矿山爆破开采施工中利用神经网络优化的遗传算法的方法对爆破参数进行优化,提高了参数选取的效力。张建华^[2]等针对实际工程中的爆破生产效果不佳,成本偏高等情况利用层次分析和灰色关联分析法的爆破参数优化,达到了提高生产效率,降低成本的目的。单仁亮^[3]等将人工神经网络数学模型应用在装药量、炮孔数量等关键的爆破参数优化上,进而实现了对巷道掘进的影响进行了定量定性的分析。蒲传金^[4]等利用模糊层次分析法建立了巷道掘进爆破效果模型,并给出了该模型的计算方法。戴俊^[5]等为了改善巷道爆破开挖的效果,将模糊多元分析法应用在隧道爆破参数优化中,优化后的效果得到了工程实践的检验,取得了比较好的效果。

巷道掘进的爆破参数优化是一个复杂,多变的非线性问题,传统数学问题不能很好的适应参数优化的要求,而且有些智能优化算法在实际工程技术领域的应用中,有早熟收敛和容易陷入局部极值等缺陷;在针对有约束、非线性规划的问题时,其又不能很好的实现全局的最优解更有可能无法得出最优解。本文借助新的智能优化算法对此问题进行研究,为巷道爆破参数优化提供新的

思路,也可为实际工程提供参考。

1 鲸鱼优化算法

1.1 鲸鱼算法的基本原理

2016年,S. Mirjalili^[6]等提出了一种全新的智能优化算法——鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA),它是在受到座头鲸捕食行为的启发后,提出的一种基于自然界灵感的新型的启发式算法,其优点在于操作容易,需要调整的相关参数少并且有强的跳出局部最优的能力^[7]。在海洋活动中,座头鲸有着一种特殊的狩猎方法,这种觅食行为称为 Bubble-net 捕食策略^[8-9]。

1.1.1 鲸鱼环绕猎物

为了对这种鲸鱼环绕猎物行为进行描述, Mirjalili 提出了下面数学模型:

$$D = |CX^*(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - AD \quad (2)$$

式中: t 为迭代次数; A 和 C 为常数系数; $X^*(t)$ 为当前最好的座头鲸位置向量; $X(t)$ 为当前的座头鲸位置向量。而 A 和 C 则由下列公式得出:

$$A = 2ar_1 - a \quad (3)$$

$$C = 2r_2 \quad (4)$$

式中: r_1 和 r_2 是(0,1)之间的随机数; a 的值从2开始一直到0呈线性下降的趋势; t 为当前的迭代次数; $T_{\max}$ 则是最大迭代次数。其中:

$$a = 2 - 2t/T_{\max} \quad (5)$$

1.1.2 气泡网狩猎过程

根据座头鲸的狩猎行为,即螺旋运动接近猎物,所以其狩猎行为可以有如下数学模型:

$$X(t+1) = X^*(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l) \quad (6)$$

式中: $D_p = |X^*(t) - X(t)|$ 是用来表示鲸鱼与其目标猎物之间的距离; $X^*(t)$ 为当前最好的位置向

量; b 是一个常数,它是用来定义螺旋的形状, l 是 $(-1,1)$ 之间的随机数。

需要注意的是,座头鲸在的游动路线是按照螺旋形路径游动,同时又保持着对猎物活动范围的不断收缩。为了对这种同步行为进行准确的模拟,假设在鲸鱼的个体位置更新的过程中,有 p_i 的概率选择了收缩包围圈机制和 $1-p_i$ 的概率选择螺旋路径模型来更新鲸鱼的所在位置^[10],有了如下方程:

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - AD; (P < P_i) \\ X^*(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l); (p \geq p_i) \end{cases} \quad (7)$$

座头鲸在攻击猎物时,数学模型也被设置了相应的靠近猎物减小至 a ,这样随着 a 的下降, A 的波动范围也下降。在计算的过程中,当迭代时, a 的值从2下降0时, A 是在 $[-1,1]$ 内的数,下一个出现鲸鱼的位置可以是猎物到鲸鱼之间的任意位置,设置当 A 小于1时,座头鲸发起进攻。

1.1.3 猎物搜索过程

在猎物的搜寻过程中,其数学模型如下:

$$D = |CX_{\text{rand}} - X(t)| \quad (8)$$

$$X(t+1) = X_{\text{rand}} - AD \quad (9)$$

式中: X_{rand} 为被选择的随机的鲸鱼位置向量,鲸鱼算法设定当 $A \geq 1$ 时,随机选择一个搜索代理,根据随机选择的鲸鱼位置来更新其他鲸鱼的位置,迫使鲸鱼偏离猎物,借此找到一个更合适的猎物,这样可以加强算法的勘探能力使WOA算法能够进行全局搜索^[11]。

1.2 计算的基本步骤

WOA算法相较于其他优化算法而言,优势在

于其操作简单、调节的参数少,只包含两个主要调整参数(A 和 C),由于对 A 的设定,该算法能够很好地平衡其开发和勘探能力,增大了跳出局部最优的可能性^[12]。

用鲸鱼算法解决巷道爆破参数优化的基本思想是:根据巷道爆破的成本来确定待优化的参数,即决策变量,鲸鱼群众的每一个个体的位置均包含一组参数。利用鲸鱼寻觅方式不断更新位置,知道其找到最好的位置,即找到最佳参数组合。

计算步骤如下:

1) 初始化参数:确定决策变量,即巷道爆破参数,及其取值范围

2) 定义适应度函数:由于鲸鱼算法是求解极小值,则按照巷道爆破成本作为适应度函数,即目标函数。

3) 计算目标函数的每个鲸鱼位置的适应度,保存最佳位置个体。

4) 如果 $t \leq T_{\text{max}}$,更新 a, A, C, l, p 。

5) 当 p 小于0.5, A 小于1更新当前参数空间位置,如果 A 大于1,从群体中随机选取参数位置并更新参数。

6) 判断算法是否满足终止条件,满足转到步骤6);不满足,重复步骤3)到4)。

7) 输出最佳巷道爆破参数组合。

1.3 仿真实验

为了测试鲸鱼算法的优化效果是否良好,本文选取了Sphere, Rastrigin, Ackley 和 Griewank 作为测试函数进行测试,这些函数中有单峰和多峰函数,分别测试算法的收敛速度,精度和稳定性。测试函数如表1所示。

表1 测试函数
Table 1 Test function

函数	表达式	维度	范围	最小值
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	$[-100, 100]$	0
Rastrigin	$f_2(x) = (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10)$	30	$[-5.12, 5.12]$	0
Griewank	$f_3(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]$	0
Ackley	$f_4(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	$[-32, 32]$	0

鲸鱼算法迭代次数设为400次,并且进行30次的结果平均值。结果和布谷鸟算法(cuckoo search, CS), 粒子群算法(particle swarm optimiza-

tion, PSO)进行比对。鲸鱼算法的参数 p 设置为0.5,收敛因子最值分别设置成2和0,系数 k 设置为4。所有算法的规模的大小设置成30。结果如

表2所示。

表2 测试函数优化结果
Table 2 Optimization results of test functions

函数	CS		PSO		WOA	
	平均值	偏差	平均值	偏差	平均值	偏差
Sphere	79.6	13.3	0.305	0.4	0.3	0.1
Griewank	184	16.1	58	18	5.2×10^{-15}	1.3×10^{-14}
Rastrigin	1.9	0.02	0.04	0.05	1.01×10^{-17}	2.5×10^{-17}
Ackley	8.1	1.74	1.8	0.5	0.38	0.016

从上表可以看出,WOA的收敛速度明显快于其他两种算法,而且WOA的收敛的稳定性也优于其他的两个算法,这说明WOA算法在这些函数上的运用取得了比较好的效果。

2 巷道掘进爆破参数优化模型

2.1 加拿大钟汉荣博士爆破数学模型

钟汉荣博士爆破数学模型中认为在矿山生产中工序的划分可以有六道,即凿岩、爆破、装载、运输、储存和初碎,而且各工序的技术参数存在一定的函数关系。数学表达式如下:

$$C = C_{dr} + C_{bl} + C_i + C_h + C_d + C_{cr} \quad (10)$$

式中: C 为爆破综合总成本; C_{dr} 为凿岩费用; C_{bl} 为爆破费用; C_i 为装载费用; C_h 为运输费用; C_d 为储存费用; C_{cr} 为初碎成本。

式(10)中的凿岩成本 C_{dr} 由最小抵抗线 B 、炮孔深度 h 、孔间距 S 有关,即 $C_{dr}=f(h, B, S)$;爆破成本与炸药的质量 W 有关,即 $C_{bl}=f(W, p)$;其他四项费用与岩石块度 F 有关,即 $f(F)=C_i+C_h+C_d+C_{cr}$ 。故而,总的目标成本为:

$$C = f(h, B, S) + f(W, p) + f(F) \quad (11)$$

2.2 巷道掘进爆破参数的经济数学优化模型

本文结合某矿山的巷道爆破实际,以爆破成本为目标函数,建立爆破经济数学模型,最后找出最优的爆破参数组合。巷道的爆破成本控制,就是要求在最佳的块度分布情况下,使得钻孔、爆破、铲装、运输等成本达到最低^[13],结合式(10)和式(11)得到如下方程:

$$C = C_{dr} + C_{bl} + C_{sh} + C_{tr} = f_1(L, w, a) +$$

$$f_2(L, w, a, q, S, Y_D) + f_3(Y_D) + f_4(X) \quad (12)$$

式中: C 为爆破综合总成本; C_{dr} 为凿岩费用; C_{bl} 为爆破费用; C_{sh} 为铲装费用; C_{tr} 为运输费用; L 是循环进尺,m; w 是抵抗线,m; a 是孔间距,m; q 是炸药单耗, kg/m^3 ; Y_D 是大块率,%; X 是平均块

度,cm。

其中,凿岩费用的数学表达式为:

$$C_{dr} = f_1(L, w, a) = \frac{D_d V}{L \cdot w \cdot a} / V \quad (13)$$

式中: D_d 是每个炮孔的钻孔费用; V 是循环待爆的矿岩体积, m^3 ,其它符号含义同上。

爆破成本是指主要由炸药、导爆索费用,其成本与炸药单耗、炮孔的利用率有关。则每个循环爆破成本有下面的表达式:

$$C_{bl} = f_2(L, w, a, q, S, Y_D) = K_1 q + \frac{K_2 h}{LS} \left(\frac{V_1}{Lw_1 a_1} + \frac{V_2}{Lw_2 a_2} + \frac{V_3}{Lw_3 a_3} \right) + K_3 Y_D \quad (14)$$

式中: K_1 是炸药单价,元/kg; K_2 是爆破器材消耗费用,元/m; K_3 是大块岩石处理费用,元; S 是开挖断面面积, m^2 ; V_1, V_2, V_3 为分别为周边孔、崩落孔、掏槽孔待爆岩石体积(m^3); w_1, w_2, w_3 分别为周边孔、崩落孔、掏槽孔的抵抗线(m); a_1, a_2, a_3 分别为周边孔、崩落孔、掏槽孔的孔间距(m);其它符号含义同上。

铲装费用与大块率有关:

$$C_{sh} = a_{sh} Y_D + b_{sh} \quad (15)$$

式中: a_{sh}, b_{sh} 是常数系数,由矿山实际统计取值。

运输费用与平均块度有关:

$$C_{tr} = c_{tr} X + d_{tr} \quad (16)$$

式中: c_{tr}, d_{tr} 是常数系数,由矿山实际统计取值。

总的成本函数:

$$C = \frac{Kh}{LS} \left(\frac{V_1}{Lw_1 a_1} + \frac{V_2}{Lw_2 a_2} + \frac{V_3}{Lw_3 a_3} \right) + K_1 q + \frac{K_2 h}{LS} \left(\frac{V_1}{Lw_1 a_1} + \frac{V_2}{Lw_2 a_2} + \frac{V_3}{Lw_3 a_3} \right) + K_3 Y_D + a_{sh} Y_D + b_{sh} + c_{tr} X + d_{tr} \quad (17)$$

根据实际的工程要求,各个系数的取值会不同。

3 算例分析

在实际工程中,巷道爆破的掏槽体积占爆破体积的比例小,其影响可以忽略。浅孔爆破下,二次爆破采用率低,所以大块处理费用不计。为了提高巷道掘进的生产效率,采用两端同时掘进的方法,所以简化后的目标函数表达式为:

$$\min(C) = \frac{1}{2} \sum \frac{(K + K_2)h}{LS} \times \left(\frac{l}{a_1} + \frac{S - w_1 l}{w_2 a_2} \right) + K_1 q + 4.638 Y_{Di} - 0.0104 X_i + 13.949, \\ i = 1, 2$$

约束条件为:

$$\begin{cases} S_i = w_i \times a_i, i = 1, 2 \\ X_1 = 10 \times q^{-0.8} (LS_1 q)^{1/6} (1.15)^{2/3} = \\ \quad 10 \times q^{-0.8} (Lw_1 q)^{1/6} (1.15)^{2/3} \\ X_2 = 10 \times q^{-0.8} (LS_2 q)^{1/6} (1.15)^{2/3} = \\ \quad 10 \times q^{-0.8} (L(S - lw_1) q)^{1/6} (1.15)^{2/3} \\ \text{S. T. } \begin{cases} Y_{D1} = \exp \left[- \left(\frac{80}{X_1} \right)^n \right] \cdot \ln 2 \\ Y_{D2} = \exp \left[- \left(\frac{80}{X_2} \right)^n \right] \cdot \ln 2 \\ n_i = \left[2.2 - 14 \frac{w_2}{d} \right] \cdot \left[1 - \frac{0.5}{w_2} \right] \cdot \\ \quad \left[1 + \frac{m_i - 1}{2} \right] \cdot \frac{2.4}{2.6}, i = 1, 2 \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

其中变量约束条件: $0.45 \leq a_1 \leq 0.7, 0.4 \leq w_1 \leq 0.8, 0.9 \leq a_2 \leq 1.1, 0.8 \leq w_2 \leq 1.0, 1.1 \leq q \leq 1.3, 1 \leq m \leq 3, 0.8 \leq n \leq 2.2, 0.01 \leq Y_D \leq 0.05$ 。

实际工程参数:孔直径 $d = 45 \text{ mm}$,容重 $\gamma = 2.7 \text{ t/m}^3$,每米钻孔费 $K = 3.87 \text{ 元}$,炸药单价 $K_1 = 7.215 \text{ 元}$,爆破器材每米费用 $K_2 = 2.6 \text{ 元}$,轮廓线长 $l = 23 \text{ m}$ 。各项系数 $a_{sh} = 4.638, b_{sh} = 0.662, c_{tr} = -0.0104, d_{tr} = 13.287$ 。其中 K, K_1, K_2 的取值不但受到工程施工的影响,而且也收到市场价格变化的影响,本文所参考的数据来自2009年的统计结果。

根据爆破参数优化数学模型,选择鲸鱼算法进行优化求解,鲸鱼算法对目标函数的适应度均在迭代40次时开始稳定,如图1所示。

鲸鱼算法对目标函数计算,每次计算都能得到一组爆破参数组合,从结果中选取5组成本最低的参数组合,如表3所示。

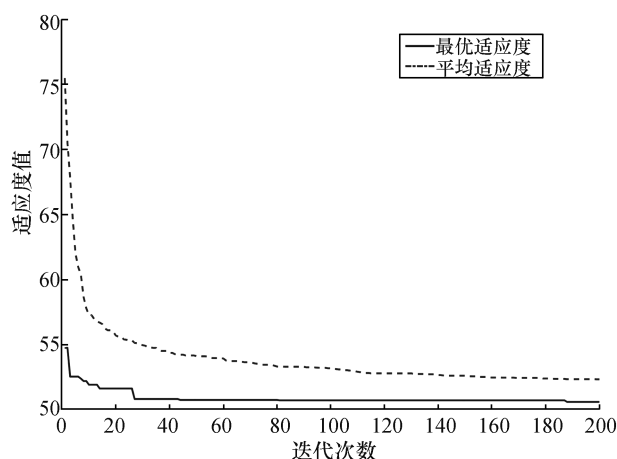


图1 总目标函数适应度曲线

Fig. 1 Fitness curve of total objective function

表3 巷道掘进爆破参数优化结果

Table 3 Optimization results of roadway tunneling blasting parameters

序号	周边孔抵抗线 /m	周边孔间距 /m	崩落孔抵抗线 /m	崩落孔间距 /m	炸药单耗 / (kg · m ⁻³)	单位综合成本 / (元 · m ⁻³)
1	0.79	0.69	0.98	0.91	1.17	29.5
2	0.75	0.50	0.93	0.91	1.18	30.1
3	0.76	0.61	0.99	0.87	1.24	29.6
4	0.79	0.69	0.95	1.03	1.21	30.2
5	0.80	0.70	0.92	0.80	1.26	29.9

表3中,5组参数的综合成本最低在得到的所有组合中最少,并且5组参数组合的单位成本平均值在29.86元左右。说明在以爆破掘进单位成本为目标的情况下,通过鲸鱼算法对爆破参数的优化,在目标成本最小的情况下,能够得到相应的最优爆破参数组合(取5组参数的平均值),其中周边孔抵抗线为0.78 m,周边孔间距为0.64 m,崩落孔抵抗线0.95 m,崩落孔孔间距为0.90 m,炸药单耗 1.21 kg/m^3 ,单位综合成本 29.9 元/m^3 。

4 结 论

利用鲸鱼算法对建立的巷道掘进的爆破经济数学模型智能寻优,得到以下结论:

1) 经过测试,虽然鲸鱼算法未能收敛到最小值,但是鲸鱼算法不论是对函数的收敛速度,还是稳定性都较传统的智能寻优算法有优势。利用鲸鱼算法对工程类方程寻优可以提高优化的效率。

2)利用鲸鱼算法对目标函数进行优化并结合实例,最终得到几组爆破参数组合,得到某矿山的爆破掘进最佳单位综合成本在29.9元左右,最佳参数组合为周边孔抵抗线为0.78 m,周边孔间距为0.64 m,崩落孔抵抗线0.95 m,崩落孔孔间距为0.90 m,炸药单耗 1.21 kg/m^3 ,单位综合成本 29.9 元/m^3 ,为矿山爆破掘进的爆破成本控制提供了参考。

3)使用鲸鱼算法对实际工程中的数学模型进行优化是可行的,但是由于实际工程情况复杂,为了更好地切合工程实际,还需对鲸鱼算法加以改进。

参考文献:

- [1] 崔铁军,马云东,白润才.基于神经网络优化遗传算法的爆破参数优化[J].地震工程与工程振动,2014,1(1):257-262.
 - [2] 张建华,王琪,黄其冲.基于AHP和灰色关联分析法的爆破参数优化[J].爆破,2014,31(4):72-75.
 - [3] 单仁亮,汪学清,高文蛟,等.人工神经网络在巷道爆破中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):3322-3328.
 - [4] 蒲传金,王俊青,姜锐,等.基于FAHP的巷道爆破效果评价模型与应用[J].化工矿物与加工,2015,44(2):36-41.
 - [5] 戴俊,李传净.模糊多元分析法在隧道爆破参数优化中的应用[J].爆破,2017,34(2):63-67.
 - [6] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in engineering software, 2016, 95:51-67.
 - [7] 牛培峰,吴志良,马云鹏,等.基于鲸鱼优化算法的汽轮机热耗率模型预测[J].化工学报,2017,68(3):1049-1057.
 - [8] WATKINS W A, SCHEVILL W E. Aerial observation of feeding behavior in four baleen whales: eubalaena glacialis, balaenoptera borealis, megaptera novaeangliae, and balaenoptera physalus[J]. Journal of mammalogy, 1979, 60(1):155-163.
 - [9] GOLDBOGEN J A, FRIEDLAENDER A S, CALAMBOKIDS J, et al. Integrative approaches to the study of baleen whale diving behavior, feeding performance, and foraging ecology[J]. Bioscience, 2013, 63(2):90-100.
 - [10] 崔东文.鲸鱼优化算法在水库优化调度中的应用[J].水利水电科技进展,2017,37(3):72-76.
 - [11] 许瑜飞,钱锋,杨明磊,等.改进鲸鱼优化算法及其在渣油加氢参数优化的应用[J].化工学报,2018,69(3):891-899.
 - [12] 覃溪,龙文.基于随机差分变异的改进鲸鱼优化算法[J].中国科技论文,2018,13(8):937-942.
 - [13] 高静静.岩石巷道爆破参数优化与爆破效果评价[D].绵阳:西南科技大学,2014.
- (责任编辑:周泉)
-
- (上接第26页)
- [9] LI Y H, ZONG L, HUANG Y, et al. Effect of different organic acids on lead uptake by rice[J]. Journal of Nanjing agricultural university, 2002, 25(3):45-48.
 - [10] VANDENHOVE H, VANHOUDT N, DUQ-UENE L, et al. Comparison of two sequential extraction procedures for uranium fractionation in contaminated soils[J]. Journal of environmental radioactivity, 2014, 137:1-9.
 - [11] LIN L J, LIU Q H, JU S, et al. Intercropping different varieties of radish can increase cadmium accumulation in radish[J]. Environmental toxicology and chemistry, 2014, 33(9):1950-1955.
 - [12] 张涪平,曹湊贵,李苹,等.藏中矿区重金属污染土壤的微生物活性变化[J].生态学报,2010,30(16):4452-4459.
 - [13] CUI T, FANG L, WANG M, et al. Intercropping of grassmineous pasture ryegrass (Lolium perenne L.) and leguminous forage alfalfa (Medicago sativa L.) increases the resistance of plants to heavy metals[J]. Journal of chemistry, 2018, 2018:1-11.
 - [14] BARMS S M, CAIN E C, SOMMERVILLE L, et al. Acidobacteria phylum sequences in uranium-contaminated subsurface sediments greatly expand the known diversity within the phylum[J]. Applied and environmental microbiology, 2007, 73(9):3113-3116.
 - [15] WANG Y D, LI G Y, DENG Q W, et al. Uranium leaching using mixed organic acids produced by aspergillus niger[J]. Journal of radioanalytical & nuclear chemistry, 2013, 298(2):769-773.
- (责任编辑:扶文静)