

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107750

悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法研究^{*}

王苏彧, 马登成, 任 泽, 吴 淼
(中国矿业大学(北京) 北京 100083)

摘 要:断面成型是掘进过程的重要工序,传统的断面轨迹仅以轨迹最短为目标,且一旦确定不再改变,制约掘进机器人的发展。为此,本文针对常见及复杂构造断面,提出了悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法。首先,以效能和安全为目标,建立了截割轨迹多目标优化模型,考虑实际截割工况,确定了模型中决策变量、目标函数以及约束条件;其次,为进一步提高优化解的收敛性及分布性,提出了基于知识库精简的多目标粒子群算法(FDMOPSO算法);最后,基于FDMOPSO算法对截割轨迹多目标优化模型进行求解。经仿真验证,算法的收敛性提高了约90%、分布性提高了约40%,且对于不同形状、大小的复杂构造巷道断面都可以规划得到截割轨迹解集,并以效率、安全和截割平滑性为依据,最终决策得出最优轨迹。优化之后的截割轨迹,既能提高截割效率,同时可以做到避免夹矸,增加了截割的安全性。

关键词:悬臂式掘进机;断面成型;多目标优化;多目标粒子群算法

中图分类号: TH69 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

A multi-objective optimization method for cantilever roadheader section forming trajectory

Wang Suyu, Ma Dengcheng, Ren Ze, Wu Miao
(China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Section forming is an important process in the tunneling process. Traditional section trajectory only aims at the shortest trajectory and it will not change once determined, which restricts the development of tunneling robots. For this reason, this paper proposes a multi-objective optimization method for the cutting trajectory of the cantilever roadheader for common and complex structural sections. Firstly, taking efficiency and safety as the goal, a multi-objective optimization model of the cutting trajectory is established. Considering the actual cutting conditions, the decision variables, objective functions and constraints in the model are determined. Secondly, in order to further improve the convergence and distribution of the optimized solution, a multi-objective particle swarm optimization based on fitness distance to simplify knowledge base (FDMOPSO) is proposed. Finally, the multi-objective optimization model of the cutting trajectory is solved based on the FDMOPSO algorithm. Simulation results show that the convergence and distribution of the algorithm are improved by about 90% and 40%, respectively. It also verified that the cutting trajectory solution set can be planned for complex structure roadway sections of different shapes and sizes. Based on efficiency, safety and cutting smoothness, the optimal trajectory can be finally determined. The optimized cutting trajectory not only improves the cutting efficiency, but also avoids dirt band trapping and increases the safety of cutting.

Keywords: cantilever roadheader; section forming; cutting trajectory; multi-objective particle swarm optimization

0 引 言

随着机器人技术的不断发展,我国煤炭行业也进入

了特种机器人的研发阶段^[1-2],以期望逐步利用机器人替代矿工劳动,提升煤炭开采效率和智能化水平,达到“无人则安”的终极目标。

悬臂式掘进机(以下简称“掘进机”)是掘进作业最

收稿日期:2021-04-13 Received Date: 2021-04-13

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62003350,51874308)、中央高校基本科研业务费专项(2021YQJD07)资助

主要的设备,近年来,掘进机的自动化、智能化发展迅速,部分技术已达到国际领先水平^[3-4],但是距离实现机器人化还需要开展大量研究。掘进工作面的地质复杂多变、作业空间狭窄、载荷未知突变,制约掘进机器人发展的核心难题是掘进作业过程中断面环境非结构化,存在非常因素(如夹矸、顶底板与断面边界煤岩性状的变化)扰动,煤岩性状、装备姿态、作业工况难以获取,从而无法自主感知断面环境信息,只能借助人工感觉和操控掘进机完成断面截割,不能自主调节轨迹,缺少优化与决策机制,难以适应无人化掘进的需求。国外同类技术也未见很好的解决办法。为此,非结构化环境下掘进断面轨迹的实时生成与优化,是保障断面成型及掘进作业质量首要解决的关键及共性难题^[1]。

传统的断面掘进首先截割一个大致断面轮廓,然后对断面边界局部人工修正。断面成型轨迹通常由工作人员依靠经验或卷尺等工具设计完成,随机性强,且效率低下。

国外掘进机技术发展早,机电一体化程度较高,除完成常规的控制功能外,还具有程控、遥控、掘进断面的自动控制和定向掘进等功能,使得掘进机按设定方案自动作业,自动化水平和工作效率较高。近年来研究主要集中在掘进机工作可靠性、综掘(掘锚一体化)作业线配套设备、探索新的截割技术等^[5-7],由于国外掘进地质条件比较理想,因此未涉及掘进作业过程的智能优化与决策相关内容。

在国家自然科学基金等重点项目支持下,长期致力于掘进机研究的团队在自动截割、姿态检测、定向掘进以及自适应控制等方面的基础理论与实际应用也达到了较高水平。在截割轨迹规划方面,井乐^[8]针对常见断面形状,通过数值模拟分析了不同掘进轨迹的性能。苏杭^[9]提出了以截割精度为目标函数,用“近似迭代法”来寻找梯形断面和圆弧拱顶断面自动成型工艺路径中的拐点方法。其他研究人员,仅针对常见的巷道断面形状,对断面成型的截割轨迹进行简单的类S型轨迹规划^[10-12]。已有方法设计的轨迹一旦确定不再改变;也没有考虑掘进断面成型过程的效能,使得掘进轨迹有可能存在多余或者停滞;安全性也未加考量。掘进工况恶劣、环境特殊、作业空间封闭狭窄,不易找到智能优化与控制理论和工程实际相结合的切入点,整体智能化水平仍不高。

综上所述,本文对掘进断面成型轨迹的多目标优化展开研究,提出基于改进多目标粒子群算法的悬臂式掘进机截割轨迹多目标优化方法。首先,建立兼顾掘进效能和安全指标的截割轨迹多目标优化模型;其次,为进一步提高解的收敛性及分布性,提出知识库精简机制及变异扰动机制,得到基于知识库精简的多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization based on fitness distance, FDMOPSO);最后,基于FDMOPSO算法,对截割

轨迹多目标优化模型进行求解。所提的方法可进一步提高掘进机的截割效率以及成型质量,确保截割的安全。

1 断面成型轨迹多目标优化模型

断面成型的性能指标主要体现在:1)效能,即断面成型的时间以及生成大功率截割动作所需的功耗;2)安全,即是否会产生超挖、欠挖,从而造成顶板垮落等事故,是保障掘进质量的核心问题。

断面成型轨迹优化属于多目标优化问题,其与单目标优化问题的本质区别在于,它的解并非唯一,而是存在一组由众多Pareto最优解组成的最优解集合,集合中的各个元素称为Pareto最优解或非劣最优解。

高效能、强安全是掘进断面成型的质量要求,更是整个掘进作业过程的关键性能指标^[13],如何参数化表述到轨迹规划模型,加之非结构化环境的动态影响,对此,多目标优化是较为合理的选择。该问题实质上归结到两个关键:一是如何准确建立断面成型轨迹多目标优化模型,二是如何快速找到有效的Pareto最优解集。

基于断面环境及关键点构建决策空间,表征反应性能指标的各目标函数,结合特殊工况分析非结构化环境对目标函数中包含参数的影响,执行机构空转位置和速度满足的约束,建立断面成型轨迹多目标最小化模型,最大程度地反映真实的断面成型过程。

断面成型轨迹多目标优化模型由决策变量、目标函数及约束条件组成,确立过程如下:

1) 决策变量

根据掘进截割工序,选择相应区域内一定数量的拓扑网络节点作为关键点,形成若干连通线段,并通过不断优化所有关键点和连通线段,形成一条平滑的成型轨迹,将这些有序关键点的集合作为决策变量,表示为 $x_r(r=1, \dots, m)$ 。

2) 目标函数

(1) 效能

记掘进机的截割臂摆速为 v ,截割功率为 N ,截割深度为 L ,截割头平均直径为 D ,比能耗 H_w 定义为: $H_w = N / (60 \times v \times L \times D)$ (根据德国艾克霍夫公司试验资料,对 $f=1 \sim 2.2$ 的煤,取,对 $f=4 \sim 6$ 的沙岩或沙质页岩,取)^[14]。

能耗的公式为:

$$W = N \times (t_1 + t_2) \quad (1)$$

其中, t_1 为空转时间; t_2 为截割断面耗时。

根据比能耗计算得: $N = H_w \times (60 \times v \times L \times D)$ 。

根据断面成型轨迹长度与截割速度,则可计算出 t_2 。断面成型轨迹长度 Y 可定义为:

$$Y = \int_0^{t_2} v dt \quad (2)$$

由于目前掘进机是截割臂摆速只分为低中高速三档,因此本文记作 $Y = v \times t_2$ 。

故提现效能的目标函数一为:

$$f_1(x) = W = 60 \times H_w \times v \times L \times D \times (t_1 + \sum_{r=2}^m (x_r - x_{r-1})/v) \quad (3)$$

(2)安全且不偏离

安全的目标主要是为了体现轨迹的安全,当轨迹点距离障碍物越近,式子的值越大,那么路径越危险。体现安全指标的目标函数二为:

$$f_2(x) = \min_{(k=1, \dots, n)} \left(\frac{(\min_{(r=1, \dots, m)} \|x_r^k - x_k\| - d)^2}{\min_{(r=1, \dots, m)} \|x_r^k - x_k\|^2} \right) \quad (4)$$

其中,可能存在的夹矸用 n 个点表示, x_k 表示夹矸中第 k 个点的位置, x_r^k 表示在计算轨迹与第 k 个障碍物点的距离时轨迹上的第 r 个点的位置, d 为安全距离。

安全距离 d 由两个临界值组成,其中 d_1 为临界距离, d_2 为绝对安全且合理的距离。令 $s = \min_{(r=1, \dots, m)} \|x_r^k - x_k\|$, 当 $s < d_1$ 时,表示轨迹越过夹矸或者与夹矸过近,此时判定轨迹不通;当 $d_1 < s < d_2$ 时, $f_2(x)$ 表示轨迹与障碍物之间的安全系数,式子的值越大,那么轨迹越危险;当 $s > d_2$ 时, $f_2(x)$ 表示轨迹与障碍物之间的偏离距离,式子的值越大,代表轨迹越偏离。

上述两个目标都是取最小值时目标最优,因此断面成型轨迹多目标优化问题可以描述为:

$$\min F(x) = \min(f_1(x), f_2(x)) \quad (5)$$

s. t. , $x \in \mathcal{X}^2$

3)约束条件

在进行断面成型轨迹多目标优化时,除满足上述多目标外,整体截割轨迹可分为两部分分别进行规划与约束:(1)无夹矸区域,该部分增加的约束条件为断面全覆盖;(2)含夹矸区域,该部分增加的约束条件为安全躲避夹矸截割。

此外,决策变量 X_x (截割断面宽度), X_y (截割断面高度)的约束条件以及截割深度 L 的约束条件如式(6)所列,一般纵轴式掘进机截割头平均直径 D 的大小通常在 600~900 mm,大型掘进机可达 1 000 mm;以中煤岩为例,可选 $v = 1 \sim 2$ m/min, $L \leq 2 \sim 3$ cm, $H_w = 3 \sim 5$,断面宽和高最大约为 50×40 dm。其他类似约束条件不再一一列出。

$$\begin{cases} h_1(X) = X_x - 4 > 0 \\ h_2(X) = 46 - X_x > 0 \\ h_3(X) = X_y - 4 > 0 \\ h_4(X) = 36 - X_y > 0 \\ h_5(X) = L - 2 > 0 \\ h_6(X) = 3 - L > 0 \end{cases} \quad (6)$$

2 改进的多目标粒子群算法

解决多目标优化问题(multi-objective optimization problems, MOPs)的典型算法主要有:蚁群算法(ant colony optimization, ACO)、蜂群算法(bee colony optimization, BCO)、萤火虫群算法(glowworm optimization, GO)、布谷鸟算法(cuckoo optimization, CO)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)^[15-17]、果蝇算法(fruit fly optimization, FO)等等。由于多目标粒子群优化算法收敛速度快、易于实现且仅有少量参数需要调整,为此,本文采用改进的多目标粒子群算法求解断面成型轨迹多目标优化模型,从而得到满足目标的 Pareto 最优解集。

多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)需要创建一个初始群体,群体中每个个体都有初始位置和速度,两者都是随机产生的。粒子的飞行主要受两个参数的影响,一个是个体最优值($pbest$)^[18],即每个粒子在飞行过程中依据自己的经验所找到的最好的位置,另一个是全局最优值($gbest$),即整个群体目前所找到的最好的位置,粒子通过这两个参数不断的调整自己的飞行,同时用惯性权重(w),平衡全局搜索和局部搜索。

假设群体中共有 m 个粒子,算法共迭代 K 次,粒子 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 第 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 次迭代时的位置记为 X_i^k ,速度记为 V_i^k ,在维度为 D 的搜寻空间中 $X_i^k = (x_{i1}^k, x_{i2}^k, \dots, x_{iD}^k)$, $V_i^k = (v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{iD}^k)$,算法中粒子依据式(7)和(8)两个公式更新位置和速度:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(P_{best}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(G_{best}^k - x_{id}^k) \quad (7)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (8)$$

其中, w 是惯性权重; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 是 0 和 1 之间的随机数^[19]。

MOPSO 不可或缺的结构之一是维持和更新知识库。现有的该结构相对简单,为进一步解的收敛性及分布性,本文在基本多目标粒子群算法基础上,增加了知识库精简机制以及粒子位置变异扰动机制,以快速找到全局最优解集^[20]。

1)知识库精简机制

适应度距离公式如式(9)所列,是平均单一适应度函数上所计算的距离,可以是更好地用于判断非支配解在单个相对适应度函数层次上的分布性和收敛性,从而用来更好的精简知识库。

$$S(i)_{fd}^m = \frac{(S(i+1)_m - S(i-1)_m)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (9)$$

其中, $S(i)_{fd}^m$ 表示个体 i 的相对于目标 m 的适应度距离, $S(i)_m$ 表示集合 S 中个体 i 的相对于目标 m 的适应度函数值。

非支配解相对于适应度函数进行了精简,有几个适应度函数知识库就会被精简几次。当计算完非支配解的适应度距离之后再跟一个设定的阈值 α 作比较,以决定该非支配解是否保留。完成所有的精简步骤之后的知识库即为精英知识库。精英知识库同样有一定的大小,所以精英知识库同样可以基于拥挤距离进行限制大小。

2) 粒子位置变异扰动机制

为了防止陷入局部收敛,设计了粒子位置变异扰动机制。首先计算变异发生概率如式(10),判断是否进行变异扰动,判断的依据是产生一个处于0和1之间的随机值,如果随机值小于变异发生概率,则进行变异扰动。变异扰动由两个因素组成,因素1(E_1)是一个随机值,因素2(E_2)跟当前的迭代次数有关,属于一个动态变异值,最终的变异扰动将由两者以不同的权重结合在一起如式(11)所示。

$$P(r) = 1 - \sqrt{r/\max gen} \quad (10)$$

其中, r 表示当前的迭代数; $\max gen$ 表示最大的迭代数。

$$x(i) = x(i) \times E_1/2 + E_2/2 \quad (11)$$

其中, E_1 计算式如(12):

$$E_1 = randn + 0.5 \quad (12)$$

E_2 计算式如(13):

$$E_2 = (1 - r/\max gen)^{\wedge}(\sqrt{\max gen}) \quad (13)$$

改进后得到的算法称之为 FDMOPSO 算法,其整体流程如下。

步骤1:初始化

随机生成初始位置,初始速度为0。

步骤2:更新(产生)非支配解集

计算适应度值,当迭代次数 $r=1$ 时,代表产生非支配解集,否则为更新非支配解集。

步骤3:更新(产生)知识库

根据非支配关系,将非支配解集存储于知识库,当迭代次数 $r=1$ 时,代表产生知识库,否则为更新知识库。

步骤4:基于适应度距离精简知识库

计算知识库中每个非支配解的 K 个适应度距离,并根据适应度距离删除无效或效果不佳的非支配解。

步骤5:基于拥挤距离限制知识库

如果知识库超出规模,计算拥挤距离,根据拥挤距离降序排列,删除超出规模的非支配解。

步骤6:选取 $pbest$ 和 $gbest$

选取粒子的局部最优和全局最优。

步骤7:更新速度和位置

根据基本多目标粒子群算法公式更新粒子的位置和速度。

步骤8:变异扰动

计算变异发生概率,判断是否需要粒子位置进行变异扰动,如果需要则对粒子位置进行变异扰动。

步骤9:判断是否达到终止条件。

3 仿真实验验证

以 EBZ200 掘进机为例,截割头直径为 800 mm。以中煤岩为例,取截割臂摆速为 $v=1.5$ m/min,截割深度 $L=2.5$ cm,比能耗 $H_w=4$,空转时间 $t_1=10$ min。代入到断面成型轨迹多目标优化模型中,开展大量仿真实验验证所提算法的有效性以及多目标优化模型的正确性。

3.1 算法性能测试

利用评价指标对算法本身的性能进行测试,最常用的有两个,分别是反世代距离(inverted generational distance, IGD)和分布性(spacing, SP)指标。

反世代距离指标的定义:记目标空间中沿着 PF 分布的理想点集为 P^* ,通过计算得到的帕累托最优前沿为 P ,则从 P^* 到 P 的 IGD 计算如式(14)所示。

$$D(P^*, P) = \frac{\sum_{v \in P^*} d(v, P)}{|P^*|} \quad (14)$$

其中, $d(v, P)$ 是 v 和在 P 中的点之间最小的欧几里得距离; $D(P^*, P)$ 的结果可以同时表征解 P 的分布性和收敛性。如果要得到更好的 $D(P^*, P)$ 值(即值越小表面收敛性和分布性越好),则 P 必须非常接近真实的帕累托最优前沿。

分布性指标的定义:分布性指标可以反映解是否分布均匀的特性,如果帕累托前沿覆盖非常均匀,则说明解的分布性非常好。分布性指标的值越小,说明算法的分布性越好。SP 的计算如式(15)所示。

$$Spacing = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2} \quad (15)$$

其中 $d_i = \min_j (|f_1^i(\vec{x}) - f_1^j(\vec{x})| + |f_2^i(\vec{x}) - f_2^j(\vec{x})|)$, $i, j = 1, \dots, n$; n 是非支配解的数量; $\bar{d}$ 是所有 d_i 的平均值。

将改进后得到的 FDMOPSO 与 MOPSO 在经典测试函数上进行评价指标的对比,得到如图1、2所示的曲线,从曲线中可以看出, FDMOPSO 的 IGD 和 SP 指标值都更小,其收敛性及分布性有显著性提高。

3.2 最佳轨迹的确定

掘进机对截割轨迹的规划及其优化之前首先要获取截割断面地图信息,包括截割断面的类型、宽度、高度、硬质点区和非硬质点区、硬质点区夹矸等硬质体体量的大小多少等,分析如下:

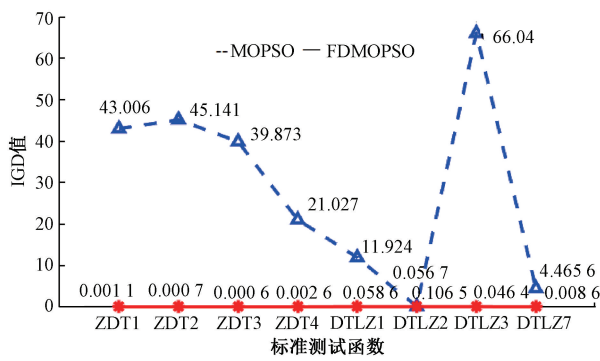


图 1 IGD 指标对比图

Fig. 1 Comparison of IGD indicators

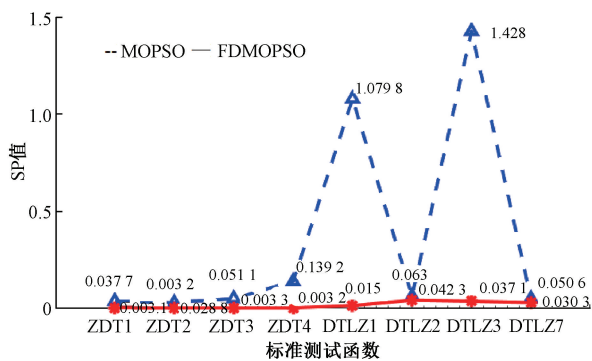


图 2 SP 指标对比图

Fig. 2 Comparison of SP indicators

1) 断面类型:常见的断面类型主要有拱形断面、矩形断面等,本文在确定最佳轨迹时只选择一种最常见的断面类型,即拱形断面,在确定了最佳轨迹后对其他断面进行轨迹优化测试。

2) 断面宽度及高度:参考实际截割工况及相关断面截割资料,以大尺寸为例,拱形断面设定宽 5 m、高 5.5 m,矩形断面设定宽 5 m、高 4.5 m。

3) 硬质点区和非硬质点区:如果将断面从下到上分为 3 段,硬质点区主要选中间一段进行模拟测试,由于本文的研究重点在于合理的躲避硬质点规划出最优轨迹,故对于硬质点所在外围的形状及范围不做详细分析。

4) 硬质点区夹矸等硬质体体量:通常掘进的截割断面具有非结构化的特点,即煤层中的夹矸种类繁多,夹矸的数量和大小等具有分布不均匀不规则的特点,但是本文在的截割轨迹优化时只需要硬质点区、夹矸等硬质体的基于整个断面大小建立的横纵坐标的位置信息,故整个硬质点区和硬质体等不论规则与否都可以找到其具体的坐标位置,都可以进行轨迹优化。

按照上述分析,确定截割断面地图后,轨迹规划及决策过程如下:

1) Pareto 最优解集集的数据分析

断面成型多目标优化模型经多目标优化算法求解得到众多非劣最优解,存储于外部档案集,每一个非支配解对应一条截割轨迹。对外部档案集按照目标一(目标一决定轨迹的长度)进行排序后,取十次实验的前 4 条轨迹目标数据值列到表 1 中,对比数值分析。

表 1 Pareto 最优解集的目标值数据对比

Table 1 Comparison of target value data of Pareto optimal solution set

实验	目标	均值	标准差	中位数	轨迹 1	轨迹 2	轨迹 3	轨迹 4
一	1	345.4	41.5	337.4	300.8	308.6	311.6	318.4
	2	5.9×10^{-6}	1.5×10^{-5}	2.5×10^{-7}	3.72×10^{-7}	3.21×10^{-8}	1.25×10^{-7}	1.14×10^{-8}
二	1	314.4	6.7	314.8	299.1	310.7	311.4	313.3
	2	6.7×10^{-6}	5.6×10^{-6}	6.7×10^{-6}	1.40×10^{-5}	1.34×10^{-5}	8.67×10^{-7}	5.51×10^{-7}
三	1	305.9	7.3	304.6	297.7	298.0	298.5	301.6
	2	4.2×10^{-6}	6.2×10^{-6}	1.4×10^{-6}	1.84×10^{-5}	3.23×10^{-6}	9.47×10^{-7}	7.40×10^{-7}
四	1	309.0	5.5	310.9	298.6	302.8	305.3	306.2
	2	3.7×10^{-5}	6.6×10^{-5}	9.3×10^{-6}	2.10×10^{-4}	8.81×10^{-5}	1.81×10^{-5}	4.01×10^{-9}
五	1	312.2	8.7	311.7	301.6	303.5	305.8	308.4
	2	1.5×10^{-6}	2.3×10^{-6}	6.3×10^{-7}	2.9×10^{-6}	6.4×10^{-7}	7.3×10^{-8}	7.5×10^{-6}
六	1	313.7	7.6	314.7	299.9	305.6	307.2	311.8
	2	3.8×10^{-6}	6.0×10^{-6}	3.9×10^{-7}	4.8×10^{-7}	1.2×10^{-5}	1.6×10^{-7}	1.5×10^{-5}
七	1	309.1	7.1	308.8	297.7	298.7	306.9	307.7
	2	6.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-6}	3.3×10^{-5}	1.2×10^{-6}	9.4×10^{-7}	1.4×10^{-5}
八	1	313.5	8.6	315.1	298.3	304.2	307.6	308.0
	2	3.2×10^{-6}	3.3×10^{-6}	1.9×10^{-6}	7.9×10^{-6}	7.7×10^{-7}	1.3×10^{-6}	2.6×10^{-7}
九	1	304.6	4.2	304.5	297.6	301.3	302.4	302.8
	2	3.1×10^{-5}	2.8×10^{-5}	2.5×10^{-5}	4.9×10^{-5}	8.5×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.2×10^{-6}
十	1	308.3	5.4	309.2	299.0	301.5	304.6	307.2
	2	1.7×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.2×10^{-5}	4.2×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.3×10^{-5}

其中,均值、标准差、中位数是由外部档案集中按目标一排序后的前 10 位非支配解的数据统计值得到的。从表 1 中可知,在十次实验中对于目标 1,轨迹 1 的值都是最小的;对于目标 2,前四条轨迹的值都是小于或者接近均值。

2) 数据与图形对比

再进行 4 次实验,对前 4 条轨迹的目标值与图形进行对比。

假定断面环境为均匀介质,只利用改进的多目标粒子群算法求解断面成型轨迹多目标优化模型的仿真结果图形如图 3 所示,对于不含夹砭区域,考虑断面的全覆盖要求及轨迹平滑性,直接示意类 S 型轨迹;对于含夹砭区域,从起点到终点的 4 条轨迹为与表格 2 对应的图形化显示,其中,实线轨迹与表 2 中加粗的非支配解对应,虚线轨迹与表 2 中第二至第四非支配解的分别对应。

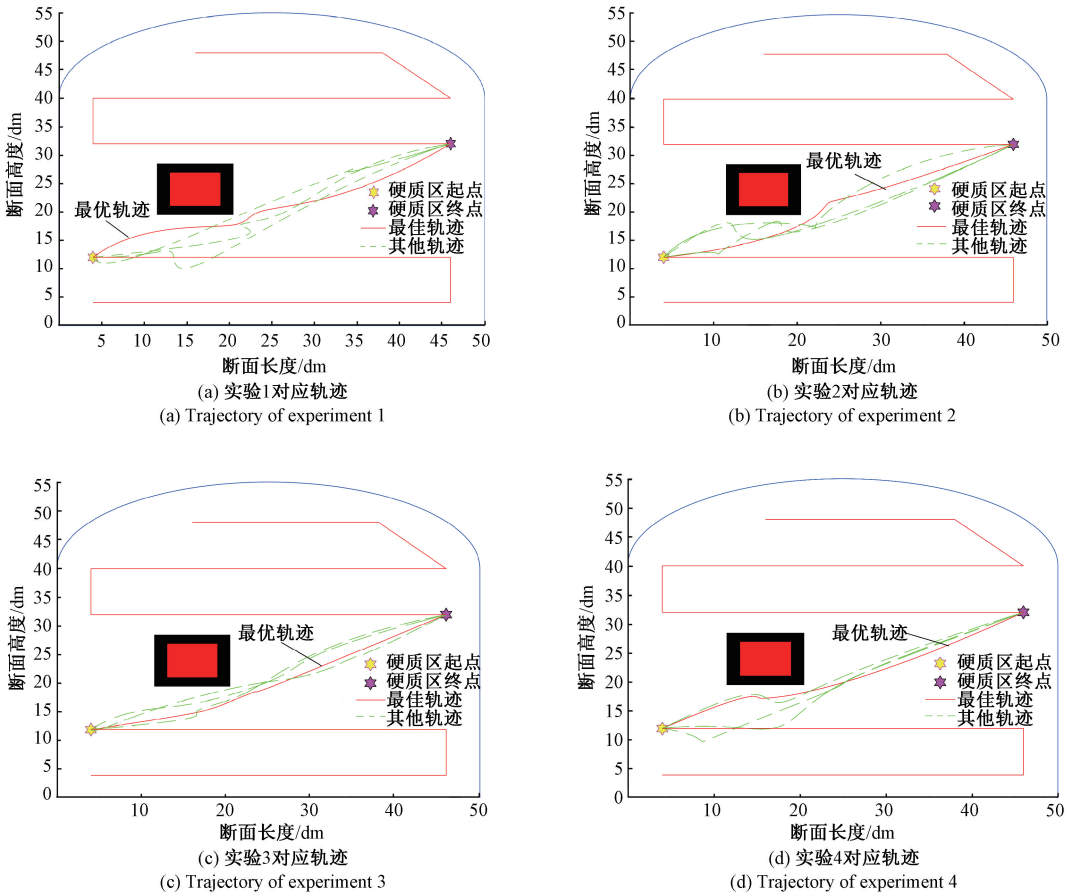


图 3 截割轨迹多目标优化解集对应的图形显示

Fig. 3 Graphic display corresponding to the multi-objective optimization solution set of the cutting trajectory

表 2 4 次实验对应非劣最优解集数据

Table 2 Non-inferior optimal solution set data of four experiments

实验	目标	非劣最优解集(外部档案集中前 10 位,按目标一排序)									
一	1	300.8	308.6	311.6	318.4	324.5	350.2	354.5	374.6	375.5	434.9
	2	3.72×10^{-7}	3.21×10^{-8}	1.25×10^{-7}	1.14×10^{-8}	2.52×10^{-6}	5.03×10^{-8}	4.92×10^{-5}	3.62×10^{-8}	4.07×10^{-6}	2.34×10^{-6}
二	1	299.1	310.7	311.4	313.3	314.0	315.5	317.3	319.5	320.9	322.2
	2	1.40×10^{-5}	1.34×10^{-5}	8.67×10^{-7}	5.51×10^{-7}	1.86×10^{-6}	8.02×10^{-6}	5.35×10^{-6}	8.77×10^{-6}	6.69×10^{-7}	1.32×10^{-5}
三	1	297.7	298.0	298.5	301.6	302.2	307.1	310.1	312.1	315.7	316.5
	2	1.84×10^{-5}	3.23×10^{-6}	9.47×10^{-7}	7.40×10^{-7}	1.96×10^{-6}	8.74×10^{-7}	1.77×10^{-6}	1.24×10^{-8}	1.04×10^{-6}	1.27×10^{-5}
四	1	298.6	302.8	305.3	306.2	310.8	311.1	311.4	313.5	314.5	315.5
	2	2.10×10^{-4}	8.81×10^{-5}	1.81×10^{-5}	4.01×10^{-9}	1.20×10^{-5}	5.38×10^{-6}	6.60×10^{-6}	2.37×10^{-6}	2.19×10^{-5}	2.10×10^{-6}

综合考虑目标数据值、图形以及掘进机执行机构性能(轨迹越平滑,越利于掘进机的截割)等,可以确定红色轨迹(即外部档案中按目标一排序后的第一位非支配解对应的轨迹)为最佳轨迹。

3.3 其他断面形状仿真试验

考虑常见断面形状为矩形、半圆拱形断面,以及断面构造复杂,可能存在一处或两处较大夹矸的极端情况,分别对上述情况进行了截割轨迹多目标优化仿真实验,以验证方法的适用性。

1) 矩形断面

以 $5\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ 矩形为例,开展了多组实验,如图4(a)、(b)为其中一次实验的仿真图,为了显示清晰,图中仍画出解集中的前四组解,综合考虑效率和安全,以及截割平滑性,决策得到图4(a)、(b)中的最优轨迹,可按照此轨迹控制掘进机自动截割,形成规整断面。

2) 半圆拱形断面

半圆拱形截割轨迹仿真实验图如图4(c)、(d)所示,由图形可以看出,可以多目标优化得到适宜截割的最优轨迹。综合以上实验结果,对于不同形状、大小的复杂构造巷道断面都可以规划得到最优轨迹。

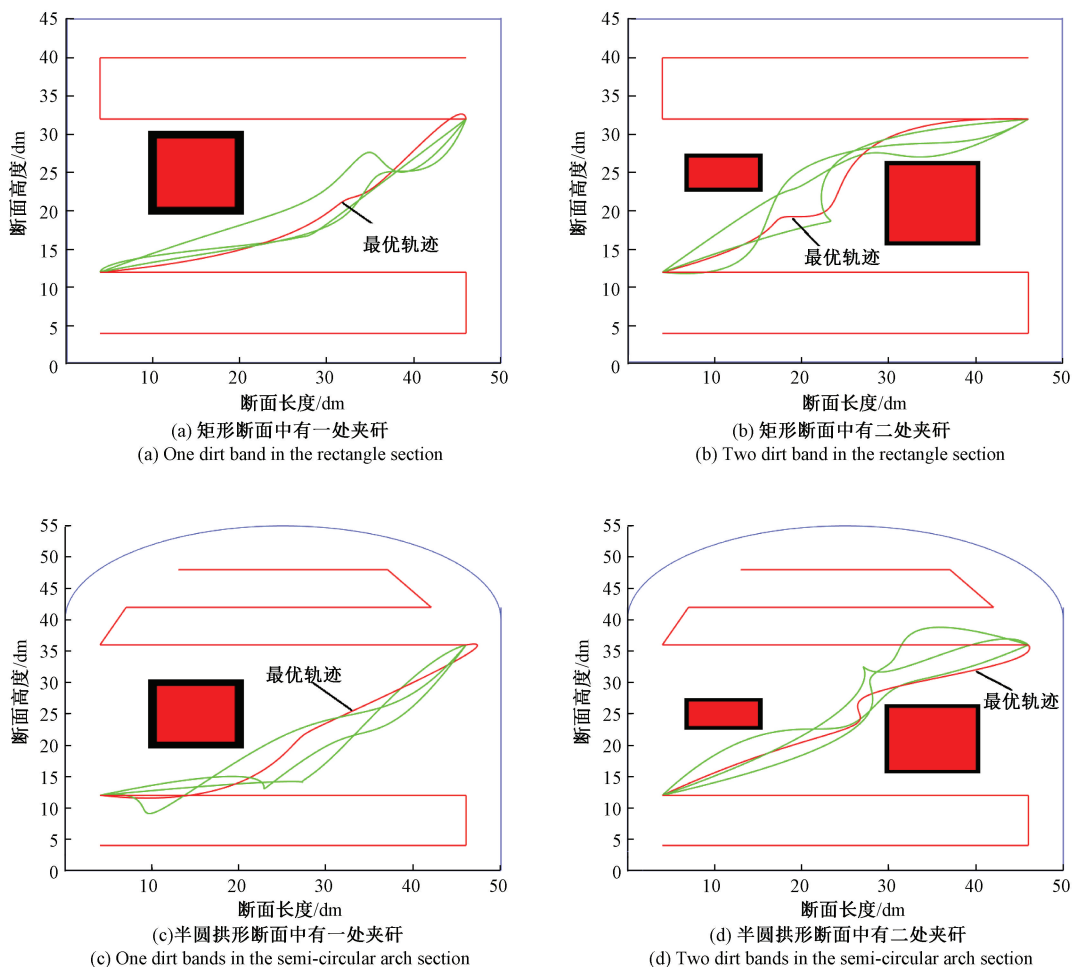


图4 不同断面形状截割轨迹多目标优化仿真图

Fig. 4 Multi-objective optimization simulation diagram of cutting trajectory for different shapes of sections

4 地面试验

基于以往研究成果,课题组搭建了掘进机远程智能控制系统,包括本机上所用的多台传感器、多台机载工业计算机、本地通讯模块、本地近距离的遥控操作装置、无线信

号传输模块、井下集控中心、地面操作平台等一系列设备,这些设备和装置可为验证各项控制功能服务,从而满足掘进各项智能功能要求。图5为该现场试验照片。

掘进机本地以机载工控机为控制核心,由上位机+下位机双控制器模式实现信息采集、智能控制及通信功能。在上位机控制器上加载了断面成型轨迹多目标优化模



图5 掘进机远程智能控制系统

Fig. 5 Remote intelligent control system of roadheader

块,所优化的轨迹再经过自动截割模块的自动控制,实现断面成型。

掘进机断面成型轨迹多目标优化方法的试验指标为:1)能耗,由于地面试验环境无法加入负载,因此设定截割臂摆速为恒定,所以该指标考量的依据为截割一个断面所需要的时间;2)安全且不偏离,地面试验环境暂未考虑夹矸的设定,因此该指标考量的依据为断面成型精度;3)断面全覆盖,该指标考量的依据为本地或远程显示界面中截割一个断面的轨迹覆盖率。

以3 m×3 m矩形断面为例,在EBZ135型掘进机上开展了试验,上述3个指标的具体试验数据如表3所示,设定截割臂摆速恒定为阀口开度的PWM值为90%,则截割一个3 m×3 m矩形断面的时间为2 min 14 s左右;断面边界成型精度控制在5 cm内;由于截割头形状导致断面边界会出现少量残留区域未截割到,因此轨迹覆盖率在95%左右。经过多组试验,实验数据较稳定,且符合掘进施工规程及要求。

表3 地面试验数据

Table 3 Data of ground tests

试验次数	指标一 截割时间	指标二 成型精度/cm	指标三 轨迹覆盖率/%
1	2 min 12 s	<5	94
2	2 min 14 s	<5	95
3	2 min 13 s	<5	95
4	2 min 14 s	<5	95

目前,经地面试验,初步验证了悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法的可行性。由于大型装备试验条件的特殊性,后续仍有待开展任意断面形状、特殊工况条件的地面及井下工业性试验。

5 结 论

为实现掘进机器人,本文对其关键基础问题展开了研究,提出了悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法。兼顾效能和安全两大指标,并考虑特殊工况对截割轨迹的影响,确定了约束条件,建立了掘进机截割轨迹多目标优化模型;提出了FDMOPSO算法,在基本多目标粒子群算法基础上增加了知识库精简机制和变异扰动机制,以提高算法解的收敛性及分布性;最后利用FDMOPSO算法对掘进机截割轨迹多目标优化模型进行求解,得到Pareto最优解集。

经仿真验证,对于不同形状、大小的复杂构造巷道断面都可以规划得到截割轨迹解集,并以效率、安全和截割平滑性为依据,最终决策得出最优轨迹。所规划的轨迹可消耗较小能耗的同时确保截割的安全,并减小截割的超挖(或欠挖)面积,提高截割效率,保证整个断面的成型质量。优化后的轨迹可以直接用于自动截割控制,提高掘进截割的智能化水平。

本文所提方法考虑掘进截割断面成型的重要指标,开展大量仿真验证了方法的正确性和适用性,并经过了地面试验系统初步验证。但是掘进断面构造复杂,环境突变非结构化,因此还需考虑轨迹随环境变化的动态优化性能,这也是笔者今后研究的方向。

参考文献

- [1] 葛世荣,胡而已,裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):455-463.
GE SH R, HU ER Y, PEI W L. Coal mine robot system and key technology [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):455-463.
- [2] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8):1-36.
WANG G F, LIU F, MENG X J, et al. Research and practice on intelligent (Primary Stage) of coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8):1-36.
- [3] 杨健健,张强,王超,等. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8):2995-3005.
YANG J J, ZHANG Q, WANG CH, et al. Research status and development of robotization of coal mine roadheading machine [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8):2995-3005.

- [4] 张建广. 悬臂式掘进机智能截割控制技术发展现状及关键技术探讨[J]. 煤炭工程, 2015, 47(2):89-91.
ZHANG J G. Development status and key technologies of intelligent cutting control technology for cantilever roadheader [J]. Coal Engineering, 2015, 47 (2): 89-91.
- [5] 王宏. 国外巷道掘进施工技术与发展趋势[J]. 中国煤炭, 2000, 26(4):57-58.
WANG H. Construction technology and development trend of foreign roadway excavation [J]. China Coal, 2000, 26(4):57-58.
- [6] 王金华. 我国煤巷机械化掘进机现状及锚杆支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(1):6-10.
WANG J H. The current situation of mechanized coal roadheader and bolt support technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(1):6-10.
- [7] HARGRAVE C O, JAMES C A, RALSTON J C. Infrastructure-based localisation of automated coal mining equipment [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2017,4(3):252-261.
- [8] 井乐. 掘进机自动成型控制系统研究[D]. 西安:西安科技大学, 2014.
JING L. Research on automatic forming control system of roadheader [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- [9] 苏杭. 悬臂式掘进机巷道断面自动精确成形系统研发[D]. 济南:山东大学, 2015.
SU H. Research and development of automatic precise forming system for roadway section of cantilever roadheader [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [10] 张付凯, 王福忠, 高庆华. 掘进机截割臂运动轨迹的迭代学习控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12):1355-1362.
ZHANG F K, WANG F ZH, GAO Q H. Iterative learning control of roadheader cutting arm motion trajectory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12):1355-1362.
- [11] 毛君, 李建刚, 陈洪月. 掘进机器人仿形截割建模与轨迹仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 175-178.
MAO J, LI J G, CHEN H Y. Research on modeling and trajectory simulation of cutting profile of roadheader robot [J]. Computer Simulation, 2010, 27 (3): 175-178.
- [12] 田劫, 王苏戔, 穆晶等. 悬臂式掘进机空间位姿的运动学模型与仿真[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 83-86.
TIAN J, WANG S Y, MU J, et al. Kinematics model and simulation of space position and pose of cantilever roadheader [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11):83-86.
- [13] 王苏戔, 田劫, 吴森. 纵轴式掘进机截割轨迹规划及边界控制方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4):89-94.
WANG S Y, TIAN J, WU M. Research on cutting trajectory planning and boundary control method of vertical axis roadheader [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4):89-94.
- [14] 高峰, 王苏戔, 高娟, 等. 掘进机截割臂摆速自动控制方法研究[J]. 工矿自动化, 2011(8): 38-41.
GAO F, WANG S Y, GAO J, et al. Research on automatic control method of swing speed of roadheader cutting arm [J]. Industry and Mining Automation, 2011(8): 38-41.
- [15] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[J]. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 2002, 39-43.
- [16] 吴阳, 刘凯, 陈柏, 等. 自适应粒子群优化算法优化径向基函数神经网络用于电阻抗成像图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 240-249.
WU Y, LIU K, CHEN B, et al. Image reconstruction for electrical impedance tomography using radial basis function neural network optimized with adaptive particle swarm optimization algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 240-249.
- [17] 谭建豪, 马小萍, 李希. 无人机3D航迹规划及动态避障算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 224-233.
TAN J H, MA X P, LI X. Research on UAV 3D flight track planning and dynamic obstacle avoidance algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(12):224-233.
- [18] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Sixth International Symposium

on Micro Machine and Human Science, 2002, 39-43.

- [19] 胡旺, YEN G G, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014, 25(5):1025-1050.
HU W, YEN G G, ZHANG X. Multi-objective particle swarms optimization algorithm based on pareto entropy [J]. Journal of Software, 2014, 25 (5): 1025-1050.
- [20] 于慧, 王宇嘉, 陈强, 等. 基于多种群动态协同的多目标粒子群算法[J]. 电子科技, 2019, 32(10):28-33.
YU H, WANG Y J, CHEN Q, et al. Multi-objective particle swarms optimization algorithm based on multi-population dynamic cooperation [J]. Electronic Science and Technology, 2019, 32(10):28-33.

作者简介



王苏戔(通信作者),2009 年于中国矿业大学(北京)获得学士学位,2014 年于中国矿业大学(北京)获得博士学位,现为中国矿业大学(北京)副教授,主要研究方向为煤矿大型掘进装备智能控制、智能优化与决策。

E-mail: wsy@cumtb.edu.cn

Wang Suyu (Corresponding author) received her B.Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology-Beijing in 2009 and 2014, respectively. She is currently an associate professor at China University of Mining and Technology-Beijing. Her main research interests include intelligent control of large-scale tunneling equipment in coal mine, and intelligent optimization and decision-making.