基于改进鲸鱼优化算法的喷浆机械臂轨迹规划*

董志超[1]，王蒙[1]，苏发[1]，王帅[1]，焦显阳[2]，张迈[2]，王静[2]

（1.中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司， 陕西 榆林市 719315；
2.莱州亚通重型装备有限公司， 山东 烟台市 261400）

摘要：喷浆支护广泛运用于掘进巷道支所，具有成本低、安全性高等优点。其中机械臂是喷浆机器人的核心部分，为完善设计理论，以一款六自由度喷浆机械臂为对象进行运动学和轨迹规划分析，并针对机械臂时间最优轨迹规划，提出一种基于改进鲸鱼优化算法的轨迹规划方法，通过引入Circle混沌映射、柯西扰动策略和蚁群算法的信息素机制，增强了算法的全局搜索能力，有效避免了陷入局部最优解，并显著加快了收敛速度，同时提高了局部搜索过程的效率和精度。改进鲸鱼优化算法使得机械臂能够更快速地达到目标姿态，运行时间缩短了56.7%，进一步验证了该算法的可行性。

关键词：喷浆机械臂；轨迹规划；改进鲸鱼优化算法；时间最优

中图分类号：TD421 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)04-0196-08

Trajectory Planning of a Shotcrete Robot Arm Based on an Improved Whale Optimization Algorithm

DONG Zhichao[1], *WANG Meng*[1], *SU Fa*[1], *WANG Shuai*[1], *JIAO Xianyang*[2], *ZHANG Mai*[2], *WANG Jing*[2]

(1.Shendong Coal Branch of China Shenhua Energy Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719315, China;
2.Laizhou Yatong Heavy Equipment Co., Ltd., Yantai, Shandong 261400, China)

Abstract: Shotcrete support is widely used in roadway excavation support, with the advantages of low cost and high safety. The robot arm is the core part of the shotcrete robot. In order to improve the design theory, kinematics and trajectory planning analysis were carried out taking a six-degree-of-freedom robot arm as the research object. For the time-optimal trajectory planning of the robot arm, a trajectory planning method based on the improved whale optimization algorithm was proposed. By introducing the Circle chaos mapping, Cauchy perturbation strategy and the pheromone mechanism of the ant colony algorithm, the global search ability of the algorithm was enhanced, which effectively avoided being trapped in the local optimal solution, and significantly accelerated the convergence speed, while improving the efficiency and accuracy of the local search process. The improved whale optimization algorithm enables the robot arm to reach the target posture more quickly, successfully shortening the running time by 56.7%, thereby further verifying the feasibility of the algorithm.

Key words: Shotcrete robot arm, Trajectory planning, Improved whale optimization algorithm, Time-optimal

0 引言

喷浆作业是矿井巷道中不可或缺的重要工序，是保障巷道围岩稳定和作业安全的关键措施之一[1]。喷浆作业的质量在一定程度上影响了矿井巷道的安全性和使用寿命。将喷浆支护与锚杆支护相结合的喷锚支护方式，具有强度高、成本低、结构稳定等优点[2]。然而，目前许多小型矿井仍采用人工喷浆作业[3]，该操作存在风险高、涂层质量不稳定、工作效率低等问题[4]。因此，喷浆机器人的开发迫在眉睫，它对于推动矿井开采自动化、提高开采效率和安全性有重要意义。而轨迹规划是喷浆机器人机械臂运动的基础[5]，以时间最优为目标对机械臂进行轨迹优化，可提高机械臂运行效率。

近年来，众多科研人员针对机械臂轨迹规划进行了研究和优化，机械臂作为喷浆机器人的核心部分[6]，其稳定性和轨迹规划方法一直是研究的重点。许家伟等[7]引入增广拉格朗日乘子法，结合终端交叉与导向机制改进的粒子群优化算法进行求解，从而实现机械臂焊接轨迹的平滑规划与时间最小化。

* **收稿日期**：2025-04-02
作者简介：董志超(1982—)，男，内蒙古赤峰人，工程师，主要从事煤矿机电自动化工作。E-mail:dzc3177@126.com
通信作者：王静(1980—)，男，安徽淮北人，硕士，研究员，主要从事掘进、支护和运输装备研发工作。E-mail:wzr3678700@163.com

王怡等[8]结合 k-means 算法对清洗点进行分组,并通过蚁群优化算法规划出了双机械臂的最优移动路径。孟凡希等[9]通过引入 Circle 混沌映射与反向学习提升种群多样性,在种群进化中加入扰动机制与蝠鲼启发策略以增强全局搜索能力,有效减少运动时间与关节冲击。管翔宇等[10]针对 JAYA 算法引入 Tent 混沌映射、局部吸引点与历史种群机制增强算法全局与局部搜索能力,实现了较标准算法更高的寻优精度,并显著优化了运行时间。石灿等[11]提出基于自适应惯性权重与加速度系数的粒子群优化算法,结合直线与圆弧过渡、正弦加减速启停与匀速段轨迹设计,显著提升喷浆效率与轨迹均匀度。罗毅等[12]通过引入种群变异机制与惯性权重自适应调整,增强了算法的收敛性能。胡江涛等[13]通过引入非线性控制因子与 BAS 搜索机制提升算法的全局搜索能力与收敛精度,实现了装配机械臂运动时间的显著缩短与轨迹的平滑优化。王迈新等[14]通过动态调整惯性权重与认知因子,增强前期全局搜索与后期局部优化能力,实现对机械臂轨迹的高精度优化。

虽然上述研究在推动喷浆机器人机械臂的发展方面发挥了重要作用,但由于不同矿区的巷道存在较大差异[15],现有的解决方案仍然存在一定的局限性[16]。因此,本文设计了一种适用于大空间的多自由度喷浆机械臂构型,对其进行运动学分析、运动空间分析以及轨迹规划研究。同时针对机械臂进行时间最优轨迹规划,提出了一种基于改进鲸鱼优化算法的五次多项式插值法轨迹规划方法。研究结果可为喷浆机械臂的研发和优化提供理论参考。

1 喷浆机械臂的运动学及工作空间分析

1.1 喷浆机械臂结构

本文采用的矿用喷浆机器人主要由行走机构、机身控制系统、喷浆机械臂和感知系统等部分组成。其中,喷浆机械臂是该设备的核心部件,负责将喷浆头送至指定位置并确保其在移动过程中保持平稳,以保证喷浆涂层的均匀性。液压系统作为动力源,通过液压传动实现稳定的驱动力输出和精确的调节;电气系统作为控制中心,负责全局指令调度、信号处理和系统协调。通过激光雷达、摄像头等传感器的状态监测,喷浆机器人利用反馈机制进行精密控制。基于上述信息控制机械臂,使喷浆头到达指定位置完成作业。

本文中的喷浆机械臂由五部分组成,简化后包含 5 个转动副和 1 个移动副,喷浆机械臂结构如图 1 所示。其中回转装置由液压马达、回转减速器、编码器组成。通过回转装置的左右转动、升降臂的升降、伸缩臂的伸缩、摆动缸的摆动,使喷浆头达到指定位姿进行工作。

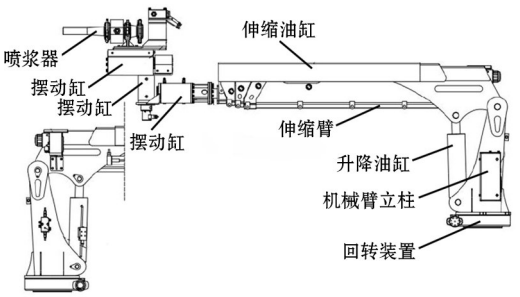


图 1 喷浆机械臂结构

Fig.1 Structure of the shotcrete robot arm

1.2 运动学模型

为了准确模拟机械臂的运行状况,建立机械臂的数学模型。D-H 法被广泛应用于机械臂关节与连杆的数学建模中,它通过表达各坐标系之间的位置与方向关系,从而构建机械臂的运动学模型。本文采用 D-H 法对喷浆机械臂进行分析并建立其数学模型。图 2 为采用经典的 D-H 法建立的喷浆机械臂 D-H 坐标系,表 1 为通过 D-H 法建立的参数,能够体现各连杆之间的关系。其中 d_i 为关节距离,θ_i 为关节扭角,a_i 为连杆长度,α_i 为连杆扭角。

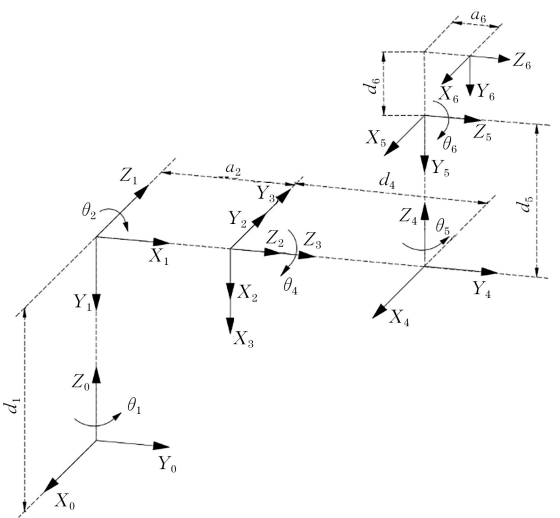


图 2 喷浆机械臂 D-H 坐标系

Fig.2 D-H coordinate system of the shotcrete robot arm

表 1 喷浆机械臂 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of the shotcrete robot arm

连杆	d_i/m	θ_i/(°)	a_i/mm	α_i/(°)
1	1.015	θ_1	0	−90
2	0	θ_2	2.834	90
3	0	0	0	0
4	0.12	θ_4	0	−90
5	0.26	θ_5	0	−90
6	0.265	θ_5	0.704	0

1.3 正逆运动学

机械臂的运动学方程是一种描述其运动规律的数学模型,用于将已知的关节角度转换为末端执行器的具体位置与姿态,从而实现对机械臂的位置控制与轨迹规划。根据图 2 的连杆坐标系,连杆 i 与连杆 $i-1$ 之间的齐次变换矩阵可表示为:

$$ {}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1} $$

通过 D-H 参数表可以得出每个运动关节相对于上一个关节的变换矩阵,每个变换矩阵依次相乘可以得到末端执行器坐标系相对于基坐标系的总变换矩阵,从而表征喷浆头相对于机身的位姿关系。对于喷浆机械臂,末端喷浆头的坐标系相对于基坐标系的关节变换矩阵为:

$$ {}_{5}^{0}\boldsymbol{T}={}_{1}^{0}\boldsymbol{T}\cdot{}_{2}^{1}\boldsymbol{T}\cdot{}_{3}^{2}\boldsymbol{T}\cdot{}_{4}^{3}\boldsymbol{T}\cdot{}_{5}^{4}\boldsymbol{T} \tag{2} $$

将各矩阵的逆解依次在等式左边相乘,即可得到喷浆机械臂的逆解。

1.4 机械臂工作空间求解

为检验喷浆机械臂的工作范围是否符合要求,对喷浆机械臂进行工作空间求解。工作空间是指机械臂末端执行器能够达到的空间范围。

各关节的旋转/位移取值范围见表 2。

表 2 喷浆机械臂各关节运动范围

Table 2 Motion range of each joint of the shotcrete robot arm

关节	关节类型	运动范围
1	旋转关节	−90°～90°
2	旋转关节	−90°～90°
3	移动关节	2.834～6.834 m
4	旋转关节	−180°～180°
5	旋转关节	−180°～180°
6	旋转关节	−150°～150°

基于蒙特卡洛法在 MATLAB 的机器人工具箱中对喷浆机械臂进行空间仿真分析,设置 20 000 个机械臂末端点来模拟机械臂的运动空间。为了方便观察,在求解空间中绘制出目标巷道的范围,即高 3.8 m、宽 5.6 m 的方框,如图 3 所示。

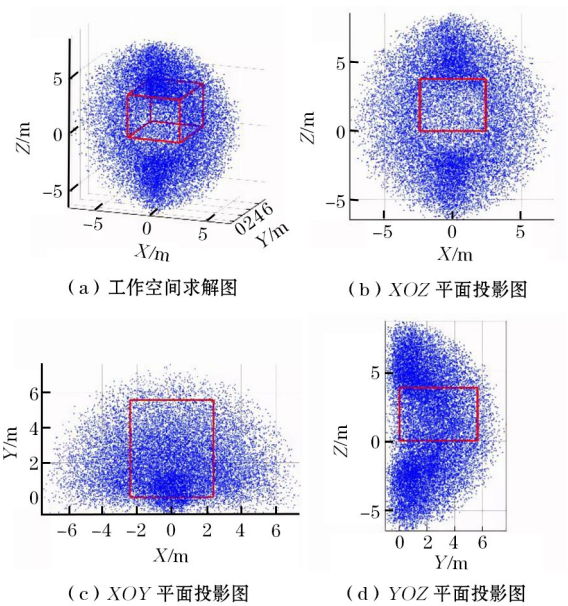


图 3 喷浆机械臂工作空间求解

Fig.3 Solution of the working space of the shotcrete robot arm

由图 3(a)可见,喷浆机械臂运动空间为一个半球体;图 3(c)中当 Y 轴距离超过 6 m 时,点云密度急剧下降,故当使用此喷浆机械臂时,要保证工作位置轴向距离机械臂底座小于 6 m。且在图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)中可以看出,巷道模型被完全包含在工作空间的投影视图中,故喷浆机械臂工作空间符合巷道工作要求。

2 机械臂轨迹规划

为了确保喷浆机械臂能够平稳、准确地到达工作位置并保证喷浆质量,需要对其进行轨迹规划。通过 6 个关节的调节,机械臂末端执行器可以到达指定位置并呈现所需的工作姿态。

为保证机械臂运动时不出现大的波动,并保证机械臂运动位移、速度、加速度曲线的平滑性,使用五次多项式插值法对机械臂进行轨迹运行分析,并在其基础上引入改进鲸鱼优化算法来提高轨迹规划的效果。

2.1 五次多项式插值法

五次多项式插值法不仅能确保位置和速度曲线的平滑性[17],还能保证加速度曲线连续平稳,避免

突变情况的发生。这样,可以进一步减少机械臂在运动过程中可能出现的振动和冲击,提高整体的运动稳定性和精度。

式(3)为五次多项式插值法中机械臂关于时间的位移函数:

$$\theta(t)=a_0+a_1(t-t_0)+a_2(t-t_0)^2+a_3(t-t_0)^3+a_4(t-t_0)^4+a_5(t-t_0)^5 \quad (3)$$

式中:$\theta(t)$表示位移函数;t 表示运动过程中的时间变量;t_0表示轨迹规划的初始时刻;a_1,a_2,a_3,a_4,a_5为五次多项式的系数,由轨迹规划的边界条件确定;a_0 为常数项。

对五次多项式的位移函数求一阶导和二阶导可以分别得到速度和加速度的表达函数,将其分别表示为:

$$\begin{cases}\theta'(t)=a_1+2a_2(t-t_0)+3a_3(t-t_0)^2+4a_4(t-t_0)^3+5a_5(t-t_0)^4\\ \theta''(t)=2a_2+6a_3(t-t_0)+12a_4(t-t_0)^2+20a_5(t-t_0)^3\end{cases} \quad (4)$$

式中:$\theta'(t)$表示速度函数;$\theta''(t)$表示加速度函数。

为了更好地模拟出喷浆机械臂工作时的各关节变化,设机械臂的初始速度、加速度均为 0,将其代入式(4)可得机械臂的位移、速度、加速度公式。

$$\begin{cases}\theta(t_0)=\theta_0=a_0\\ \theta(t_p)=\theta_p=a_0+a_1t_p+a_2t_p^2+a_3t_p^3+a_4t_p^4+a_5t_p^5\\ \theta'(t_0)=\theta'_0=a_1\\ \theta'(t_p)=\theta'_p=a_1+2a_2t_p+3a_3t_p^2+4a_4t_p^3+5a_5t_p^4\\ \theta''(t_0)=\theta''_0=2a_2\\ \theta''(t_p)=\theta''_p=2a_2+6a_3t_p+12a_4t_p^2+20a_5t_p^3\end{cases} \quad (5)$$

式中:θ_0表示机械臂关节在初始时刻 t_0的初始位移;t_p表示轨迹规划的终止时刻;θ'_0、θ''_0分别表示初始时刻的角速度和角加速度;θ'_p、θ''_p分别表示终止时刻的角速度和角加速度。

2.2 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法(WOA)于 2016 年提出,是一种模仿座头鲸猎食行为的智能优化算法[18]。WOA 结合了三种主要的行为机制:猎物包围、螺旋更新位置以及搜索猎物机制。在算法执行过程中,个体鲸鱼根据当前最优解动态调整位置,通过线性下降的控制参数在全局探索与局部开发之间实现平衡,从而提高搜索效率并避免陷入局部最优。WOA 具有结构简单、参数设置少、适应性强等优点,在轨迹规划等领域得到了广泛应用。

WOA 算法模拟的鲸鱼行为如下。

(1) 包围猎物阶段。

此阶段模拟座头鲸群体围捕猎物的行为。鲸鱼个体通过感知猎物位置并持续更新自身位置,逐步缩小包围圈,最终逼近最优解。由于搜索空间中最优解的位置并不先验已知,WOA 将当前找到的最优候选解视为目标猎物或其近似值。其余个体以此为参照,不断调整自身位置,从而引导整个群体收敛至最优区域。鲸鱼的位置更新公式如式(6)所示。

$$\vec{X}(t+1)=\vec{X}^*(t)-\vec{A}\cdot\vec{D} \quad (6)$$

$$\begin{cases}\vec{D}=|\vec{C}\cdot\vec{X}^*(t)-\vec{X}(t)|\\ \vec{A}=2a'\cdot\vec{r}_1-a'\\ \vec{C}=2\cdot\vec{r}_2\end{cases} \quad (7)$$

式中:t 表示当前迭代次数;$\boldsymbol{X}$ 表示当前鲸鱼个体的位置向量;$\boldsymbol{D}$ 表示鲸鱼与目标猎物之间的距离向量;$\boldsymbol{A}$ 为系数向量,控制鲸鱼靠近或远离猎物;$\boldsymbol{C}$ 为扰动系数,用于增加种群多样性;$\boldsymbol{r}$ 为[0,1]之间随机向量;a'为收缩因子。

(2) 气泡网攻击阶段。

此阶段主要模仿座头鲸在捕猎时的“螺旋上升气泡网”围捕行为。座头鲸在捕食猎物时,会绕着猎物游动,同时不断释放气泡形成气泡网,将猎物限制在较小的区域内,从而提高捕猎成功率。鲸鱼的位置更新公式如式(8)所示。

$$\vec{X}(t+1)=\vec{D}'\cdot e^{bl'}\cdot\cos(2\pi l)+\vec{X}^*(t) \quad (8)$$

$$\vec{D}'=|\vec{X}^*(t)-\vec{X}(t)| \quad (9)$$

式中:l'为[-1,1]范围内的随机数;b 为控制螺旋形收缩程度的常数;$\cos(2\pi l)$表示螺旋围绕猎物移动。

(3) 搜索猎物阶段。

此阶段模拟当鲸鱼在未发现猎物时,会以一定的随机方式在较大范围内游动以搜索猎物的位置。WOA 通过类似的方式,让鲸鱼个体以随机方式接近群体中其他个体的位置,从而模拟不确定性和探索性较强的搜索行为。鲸鱼的位置更新公式如式(10)所示。

$$\vec{X}(t+1)=\vec{X}_{rand}-\vec{A}\cdot|\vec{C}\cdot\vec{X}_{rand}-\vec{X}(t)| \quad (10)$$

式中,X_{rand}表示从当前种群中随机选择的个体。

2.3 改进鲸鱼优化算法

标准鲸鱼优化算法虽具有较强的搜索能力和结构简洁的优势,但在高维复杂问题中易出现早熟收敛和陷入局部最优的情况,个体更新机制单一缺乏多样的扰动机制,种群初始化采用均匀随机分布,多样性不足。为提升 WOA 在复杂问题中的全局搜索能力与收敛性能,本文从以下三个方面进行了改进

优化:首先,引入 Circle 混沌映射,增强初始解的分布均匀性与多样性,为后续搜索奠定更优的起点;其次,在个体更新阶段添加柯西扰动,提高局部搜索能力与跳出局部最优的可能性;最后,融合蚁群算法(ACO)中的信息素更新策略,引导个体朝优质解方向集中,提升全局搜索效率与解的质量。

2.3.1 基于 Circle 混沌映射的种群初始化

种群初始化作为智能优化算法的重要组成部分,对算法的全局搜索能力和收敛速度具有显著影响。标准鲸鱼优化算法通常采用随机初始化方式,虽然实现简便,但容易导致个体分布不均,从而降低算法在早期阶段的搜索多样性,并可能加剧陷入局部最优的问题。为提升初始种群的分布均匀性和搜索性能,引入混沌映射机制已成为一种有效的改进思路。常见的混沌映射包括 Tent 映射、singer 映射、Cubic 映射、Sine 映射等。

在本研究中,为进一步提高鲸鱼迁徙算法的搜索能力,引入了 Circle 混沌映射用于种群初始化,Circle 混沌映射的形式如式(11)所示。

$$x_{n+1}=\mathrm{mod}\left(x_n+a-\frac{b}{2\pi}\sin(2\pi x_n),\ 1\right) \tag{11}$$

式中:x_n表示第 n 代个体的混沌值;a、b 为映射控制参数;mod 为模运算的数学符号。

将 Circle 混沌映射引入到鲸鱼优化算法的种群初始化中,得到鲸鱼优化算法种群初始化公式如式(12)所示。

$$x_i=l+x_{\mathrm{circle}}\cdot(u-l),\quad i=1,2,\cdots,N \tag{12}$$

式中:x_{circle}为通过 Circle 混沌映射生成的第 i 个个体混沌值;l 和 u 分别为搜索空间的下限和上限;N 为种群规模。经仿真验证,当取 $a=0.5$、$b=2.2$ 时,可生成具有良好遍历性的混沌序列。

2.3.2 柯西扰动

在智能优化算法的迭代过程中,算法往往在搜索中后期逐渐收敛,此时个体趋于集中,导致全局搜索能力下降,甚至陷入局部最优。为进一步增强算法跳出局部极值点的能力,提高全局搜索效率,在引入 Circle 混沌映射,实现初始种群均匀分布的基础上,本文进一步引入柯西扰动策略,以增强鲸鱼优化算法的局部探索能力。

柯西扰动是一种基于柯西分布的随机变异机制,能在保留较大扰动幅度的同时,产生少量远离当前解的突变,从而提高搜索空间的覆盖能力。柯西分布的概率密度函数如式(13)所示。

$$f(x)=\frac{1}{\pi k\left[1+\left(\frac{x-x_0}{k}\right)^2\right]} \tag{13}$$

式中:x_0 为位置参数;k 为尺度参数。

本文采用以 0 为中心、单位尺度的标准柯西分布,并对鲸鱼个体进行扰动,鲸鱼位置更新公式如式(14)所示。

$$X_{i+1}=X_i+\gamma\cdot\tan[\pi\cdot(t'-0.5)] \tag{14}$$

式中:X_i为当前鲸鱼个体的位置;X_{i+1}为扰动后的新位置;t'为区间(0,1)中服从均匀分布的随机数;γ为扰动强度系数,控制扰动幅度。

为保证算法的收敛稳定性,本策略仅对一定比例的鲸鱼个体进行柯西扰动,并在扰动后执行边界检查,确保新位置落在定义域内。通过引入柯西扰动,鲸鱼个体可跳出局部区域,扩展搜索边界,有助于发现更优解。

2.3.3 引入蚁群算法的信息素机制

传统鲸鱼优化算法在更新过程中主要依赖个体与最优个体之间的位置关系进行位置调整,虽具备一定的全局搜索能力,但缺乏对搜索历史信息的有效利用,容易出现搜索路径重复或资源浪费的问题。为进一步提升鲸鱼优化算法的引导性与收敛效率,本文借鉴蚁群算法中的信息素机制,将信息素引导搜索思想引入鲸鱼更新策略中,构建出具有搜索记忆能力的改进鲸鱼优化算法。

蚁群算法中的信息素机制本质上是一种正反馈引导搜索的方法,通过保留历史优秀路径的“信息素”浓度,引导后续搜索趋向高质量解。在本文所提出的改进策略中,定义每个鲸鱼个体在搜索空间中与目标函数值成反比的信息素浓度 τ_i,其初始化方式见式(15)。在每一代的搜索过程中,信息素浓度根据式(16)的规则进行更新。

$$\tau_i^{(0)}=\frac{1}{f(X_i)+\varepsilon} \tag{15}$$

$$\tau_i^{(t+1)}=(1-\rho)\cdot\tau_i^{(t)}+\Delta\tau_i \tag{16}$$

$$\Delta\tau_i=\begin{cases}\dfrac{Q}{f(X_i)}, & X_i\text{为当前最优解}\\ 0, & X_i\text{ 不是当前最优解}\end{cases} \tag{17}$$

式中:$f(X_i)$表示第 i 个个体的适应度值;ε 表示为了避免零错误引入的微小常数;ρ 为信息素挥发系数,控制历史信息的遗忘程度;Q 为常系数。

在本文鲸鱼个体的搜索行为中,引入信息素引导的搜索方向,构造新的搜索位置更新公式如式

(18)所示。

$$X_i^{(t+1)}=X_i^{(t)}+\beta\cdot(\tau_i-\tau_a)\cdot\boldsymbol{rand}(1,\dim) \tag{18}$$

式中：τ_a表示当前种群信息素浓度的平均值；β为引导权重系数，用于平衡WOA更新规则与信息素引导之间的影响；$\boldsymbol{rand}(1,\dim)$表示服从均匀分布的随机扰动向量。

通过引入信息素机制，WOA具备了一定的记忆能力和路径选择偏向，有助于引导个体向历史优秀区域靠近，从而提升收敛速度并增强全局搜索能力。

综上所述，本文通过引入Circle混沌映射、柯西扰动策略和蚁群算法信息素机制三种改进手段，对算法的初始化方式、更新策略与搜索引导方向进行了系统优化，三者的有机结合在保持算法全局搜索能力的同时，显著增强了局部搜索效率和历史信息利用能力。

3　试验验证

3.1　轨迹规划

基于MATLAB的机器人工具箱，在建立喷浆机械臂模型的基础上，设置其初始位姿和工作位姿，通过机器人工具箱可以进行机械臂的轨迹规划。为了模拟喷浆机械臂在巷道侧面连续工作的场景，设定喷浆机械臂依次经过表3中三个路径点，机械臂通过上下摆动来实现对巷道侧面的喷浆工作，得到末端执行器轨迹仿真结果，如图4所示。

表3　喷浆插值点坐标

Table 3　Coordinates of shotcrete interpolation points

孔位	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	2 800	4 800	0
2	2 800	4 800	2 000
3	2 800	4 800	3 500

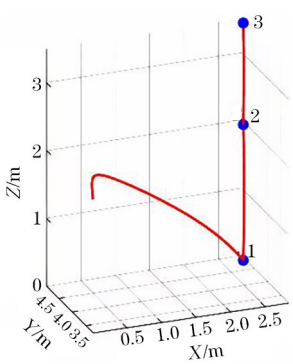


图4　末端执行器轨迹

Fig.4　End effector trajectory

3.2　改进WOA性能分析

为验证改进WOA在机械臂轨迹规划方面的性能提升效果，分别使用粒子群优化算法(PSO算法)、鹅群优化算法(GOOSE算法)、标准WOA与改进WOA对喷浆机械臂在图4中的轨迹进行时间最优轨迹规划效果对比。设定这些算法的种群个数为20，迭代次数为200。对于PSO算法，设置学习因子c_1和c_2的最大值为2，最小值为0.5，惯性权重w从初始的0.9线性递减至0.4。对于GOOSE算法，设置鹅群的引导因子为1.5，局部探索半径初始化为0.1，并在迭代过程中逐步缩小至0.01。对于标准WOA和改进WOA，设置螺旋系数b为1。

通过对喷浆机械臂第一关节的追踪，得到各算法进行时间最优轨迹规划的关节适应度收敛曲线，如图5所示。

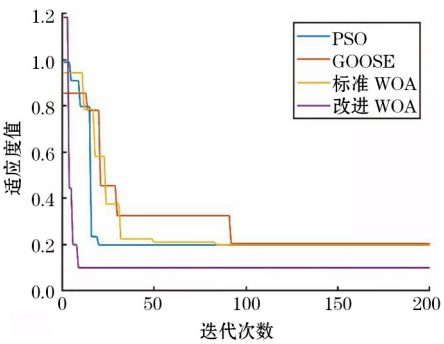


图5　不同算法迭代曲线

Fig.5　Iteration curves of different algorithms

由图5可以看出，改进WOA相较于其他算法在收敛速度和精度方面均表现出明显优势。在迭代初期，改进WOA能够迅速降低适应度值，仅在数十代内即可达到较优解；相比之下，PSO、GOOSE和标准WOA均存在一定程度的振荡或滞后。在迭代后期，改进WOA的适应度值趋于稳定，并保持在最低水平，说明其在搜索精度和全局最优保持能力方面也优于其他对比算法。因此，在相同参数设置下，改进WOA兼顾了全局搜索能力与局部开发能力的平衡，在优化收敛速度和提高收敛精度方面表现得更加出色，对机械臂进行时间最优轨迹规划是可行的。

3.3　时间最优轨迹规划

利用五次多项式插值法对喷浆机械臂进行轨迹规划，并使用改进WOA对其进行优化，绘制出优化前轨迹规划的位移曲线以及优化后时间最优轨迹规划的位移、速度和加速度曲线，并将二者进行对比，结果如图6至图9所示。

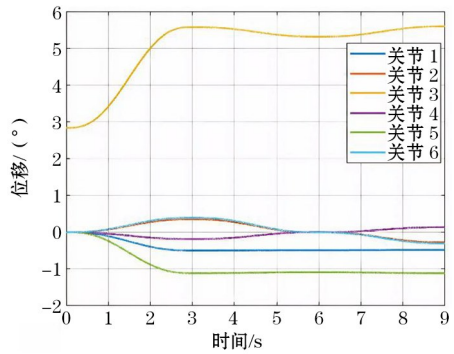


图 6 优化前的位移曲线

Fig.6 Displacement curves before optimization

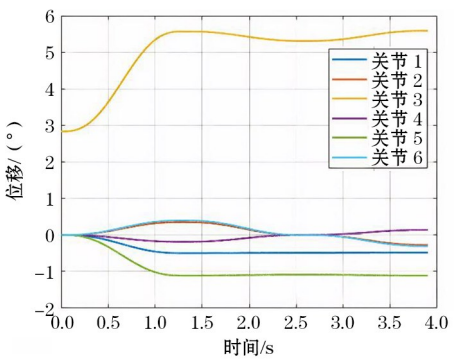


图 7 优化后的位移曲线

Fig.7 Displacement curves after optimization

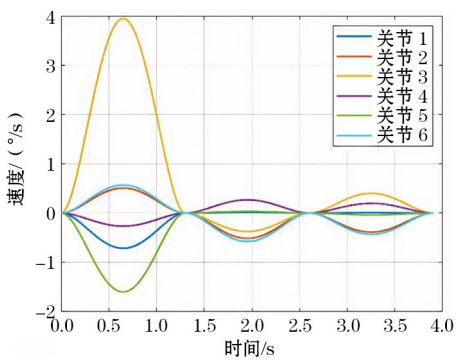


图 8 优化后的速度曲线

Fig.8 Speed curves after optimization

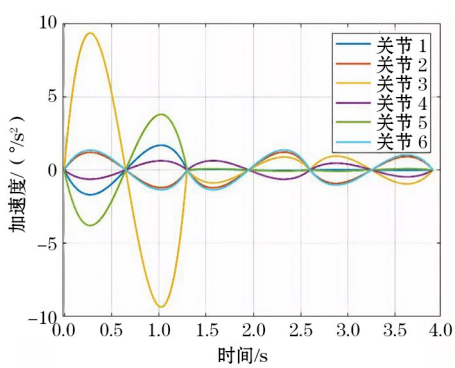


图 9 优化后的加速度曲线

Fig.9 Acceleration curves after optimization

通过对比图 6 和图 7 优化前后的位移曲线可以看出,通过应用改进 WOA 进行优化后,机械臂的轨迹运行时间从原来的 9 s 缩短至 3.9 s,减少了 56.7%,实现了机械臂时间最优轨迹规划的目标。优化后,机械臂各关节的位移、速度以及加速度的变化曲线均呈现出良好的平滑性与连续性,未出现突变情况,显著提升了整体运动的稳定性与协调性。在保持系统稳定运行的基础上,末端执行器的整体运行时间得到了明显压缩,表明所设计的轨迹规划方法兼顾了动态性能与时间效率。上述结果进一步证明了本研究提出的优化算法在机械臂时间最优轨迹规划任务中具有较高的鲁棒性与工程应用价值。

为进一步验证算法的可行性,将喷浆机械臂进行实体测试,图 10 为喷浆机械臂功能、性能试验现场照片,试验结果表明:研发的喷浆机械臂工作空间满足设计要求,机械臂运动平稳、灵活,可以满足工程需要。



图 10 喷浆机械臂试验

Fig.10 Shotcrete robot arm test

4 结论

本研究针对矿用喷浆机器人的开发需求,以一款六自由度灵活喷浆机械臂为对象,对其进行运动学分析、工作空间计算及轨迹规划研究,得出以下结论。

(1) 通过经典的 D-H 参数法建立喷浆机械臂的运动学模型,并通过运动空间分析验证了机械臂设计的合理性,能够满足工作场景中的安全性和效率要求。

(2) 针对时间优化的问题,提出了一种基于改进鲸鱼优化算法的五次多项式插值时间最优轨迹规划方法。引入 Circle 混沌映射、柯西扰动策略和蚁群算法信息素机制,三种策略在不同阶段协同作用,显著增强了算法的全局探索能力与局部开发效率,提升了改进算法在复杂优化问题中的适应性与稳定性。改进 WOA 使机械臂能够更快地运动到目标姿态,机械臂运行时间缩短了 56.7%,进一步验证了算法的可行性。

参考文献(References):

[1] 李亚斌,王瑞杰,李阳,等.韧性薄喷技术在煤矿巷道支护中的协同支护作用研究[J].煤炭技术,2024,43(3):81-85.

LI Yabin, WANG Ruijie, LI Yang, et al. Study on cooperative support effect of ductile thin spray-on technology in coal mine roadway support[J]. Coal Technology, 2024, 43(3): 81-85.

[2] 聂海男,邓立营.基于 ADAMS 的喷浆液压机械臂动力学仿真分析[J].机电工程技术,2024,53(8):211-214.
NIE Hainan, DENG Liying. Dynamics simulation analysis of shotcrete hydraulic manipulator based on ADAMS [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(8): 211-214.

[3] 张志献,荣学文,李云江.喷浆机械手的发展[J].煤矿机械,2002(10):1-3.
ZHANG Zhixian, RONG Xuewen, LI Yunjiang. The development of spraying manipulator [J]. Coal Mine Machinery, 2002(10): 1-3.

[4] 康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.

[5] 张涛,张建业,吴子朝.协作机器人时间最优轨迹规划研究[J].机床与液压,2025,53(3):12-19.
ZHANG Tao, ZHANG Jianye, WU Zichao. Research on time-optimal trajectory planning of collaborative robot[J]. Machine Tools & Hydraulics, 2025, 53(3): 12-19.

[6] 贾建龙,王志鹏,赵耀斌,等.智能化矿用喷浆机器人研究及应用[J].中国煤炭,2024,50(7):91-96.
JIA Jianlong, WANG Zhipeng, ZHAO Yaobin, et al. Research and application of intelligent mining spraying robot [J]. China Coal, 2024, 50(7): 91-96.

[7] 许家伟,李磊,汪建华,等.基于 TCSPSO 算法的机械臂运动时间最优轨迹规划[J].现代制造工程,2025(3):69-76+83.
XU Jiawei, LI Lei, WANG Jianhua, et al. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on TCSPSO algorithm [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2025(3): 69-76+83.

[8] 王怡,方珍龙.五自由度双清洗盘清洗机械臂的运动学分析与路径规划[J].船舶工程,2025,47(2):119-128.
WANG Yi, FANG Zhenlong. Kinematic analysis and path planning of a 5-DOF cleaning robot arm with dual cleaning discs[J]. Ship Engineering, 2025, 47(2): 119-128.

[9] 孟凡希,张乃文,李博元,等.改进狼群与蝠鲼混合算法的机械臂轨迹规划[J].机械设计与研究,2025,41(1):337-344.
MENG Fanxi, ZHANG Naiwen, LI Boyuan, et al. Improving the hybrid algorithm of wolf pack and manta ray for robotic arm trajectory planning[J]. Machine Design & Research, 2025, 41(1): 337-344.

[10] 管翔宇,周勇,胡楷雄.基于改进 JAYA 算法的机械臂时间最优轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2025(2):81-86.
GUAN Xiangyu, ZHOU Yong, HU Kaixiong. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on improved JAYA algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(2): 81-86.

[11] 石灿,檀子良,雷超,等.基于 AIWCPSO 算法的喷浆机械臂运动轨迹优化[J].工矿自动化,2024,50(12):155-165.
SHI Can, TAN Ziliang, LEI Chao, et al. Optimization of shotcrete manipulator motion trajectory based on AIWCPSO algorithm[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(12): 155-165.

[12] 罗毅,石艳,林椿松,等.基于变异策略粒子群算法的机械臂轨迹优化[J].制造技术与机床,2025(3):56-64+76.
LUO Yi, SHI Yan, LIN Chunsong, et al. Trajectory optimization of manipulator based on particle swarm optimization with mutation strategy [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025(3): 56-64+76.

[13] 胡江涛,党玉功,周志刚,等.基于改进灰狼算法的交叉滚子轴承自动装配机械臂轨迹规划[J].机械传动,2024,48(11):71-78.
HU Jiangtao, DANG Yugong, ZHOU Zhigang, et al. Trajectory planning of crossed roller bearing automatic assembly robotic arms based on the improved gray wolf optimizer[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(11): 71-78.

[14] 王迈新,闫莉,李雨菲.基于改进粒子群算法的 6R 机械臂时间最优轨迹规划[J].制造技术与机床,2025(2):36-42.
WANG Maixin, YAN Li, LI Yufei. Time optimal trajectory planning of the 6R manipulator based on improved particle swarm optimization [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025(2): 36-42.

[15] 王国法,庞义辉,任怀伟.煤矿智能化开采模式与技术路径[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(1):5-19.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent coal mining pattern and technological path[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 5-19.

[16] 张俊阳,王昆,赵同彬,等.矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展[J].煤炭科学技术,2024,52(增刊 2):435-444.
ZHANG Junyang, WANG Kun, ZHAO Tongbin, et al. Status and development of UAV remote sensing technology in mining surface subsidence and fracture measuring[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(Suppl.2): 435-444.

[17] 曹海燕,徐华珍,梅香香,等.基于 UR16e 机械臂的运动轨迹规划与仿真[J].电脑知识与技术,2025,21(2):81-84+87.
CAO Haiyan, XU Huazhen, MEI Xiangxiang, et al. Motion trajectory planning and simulation based on UR16e robotic arm [J]. Computer Knowledge and Technology, 2025, 21(2): 81-84+87.

[18] 吴仕虎,李颖,杨鑫杰,等.基于 SGMD-CMAE 和 WOA-ELM 的滚动轴承故障诊断方法[J].制造技术与机床,2023(12):9-18.
WU Shihu, LI Ying, YANG Xinjie, et al. Fault diagnosis method based on SGMD-CMAE and WOA-ELM for rolling bearing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(12): 9-18.