

祁云,于开旺,汪伟,等. 基于改进樽海鞘算法的矿井火灾应急路径规划[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2264–2272.
QI Y, YU K W, WANG W, et al. Mine fire emergency path planning based on the improved salp swarm algorithm[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2264–2272.

基于改进樽海鞘算法的矿井火灾应急路径规划*

祁云^{1,2}, 于开旺², 汪伟^{1,2}, 崔欣超², 肖新帅²

(1 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古包头 014017; 2 山西大同大学煤炭工程学院, 山西大同 037000)

摘要: 为了应对矿井火灾后人员逃生问题, 提出了一种融合 Logistics 混沌映射、差分演化变异算子和非均匀高斯扰动策略的樽海鞘算法 (Salp Swarm Algorithm, SSA), 应用于机器人路径规划。对樽海鞘算法易陷入局部最优解、路径寻优能力有限和避障性能的固有不足等问题进行显著优化。为验证改进樽海鞘算法的优越性, 选取樽海鞘算法、粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法及遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 三类经典算法作为对照组, 在基于栅格地图构建的环境框架下, 开展多智能体路径寻优模拟仿真试验。结果表明: 在路径长度方面, 改进樽海鞘算法最优长度较 GA 缩短 8.6%, 较 PSO 缩短 22.7%, 较 SSA 缩短 13.3%; 在路径求解稳定性方面, 改进樽海鞘算法较 GA 性能提升 50%, 较 PSO 提升幅度达 93%, 比 SSA 算法提高了 77%。

关键词: 安全工程; 矿井火灾; 樽海鞘算法; Logistic 混沌初始化; 差分变异; 路径规划

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094(2026)06-2264-09

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0834

0 引言

煤矿井下火灾事故^[1]已成为制约高效开采的重要安全隐患, 其突发性和破坏性对矿井生产系统的稳定运行构成严重威胁。传统的路线规划方法多依赖于既往紧急逃生路线, 缺乏灵活性, 难以在火灾发生后根据实际情况进行实时再规划。目前, 生物启发式智能算法已用于火灾后的紧急路径规划, 将这种算法应用于采矿业^[2]也是备受关注的研究难题之一。矿井火灾严重危及工作人员的生命和财产安全。因此, 灾后可在巷道中快速寻找出最佳逃生路径, 对于减少人员伤亡和财产损失具有至关重要的作用。

传统图论路径规划方法 (如 Dijkstra^[3]、Floyd^[4] 算法) 在简单拓扑结构中表现良好, 但在高维复杂场景下, 其计算复杂度会随节点连接规模激增 (从多项式级跃迁至指数级), 导致实时性显著下降。近年来, 随着计算机、传感器及控制技术的发展和生物习性的智能优化算法 [如蚁群优化 (Ant Colony Optimization, ACO)^[5]、粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO)] 被引入路径规划领域。紧急疏散路径问题本质上是寻找最优路径。针对该问题, 曹祥红等^[6]通过重构路径吸引力评估函数, 在传统最短路径约束中引入火源排斥因子, 实现了安全距

离与路径长度双目标优化。刘建林等^[7]结合混沌映射、小孔成像学习策略和黄金正弦开发策略, 优化七阶 B 样条曲线的控制节点, 实现了机械臂准确且高效的运动轨迹规划。赵宏伟等^[8]针对机器人寻找最优路径问题, 提出了一种融合无标度网络、自适应权重和正弦算法变异的樽海鞘算法, 寻找的路径更优。2024 年, 姜龙腾等^[9]阐述了农田全覆盖路径规划的思想, 设计了基于神经元激励网络法的全覆盖路径规划算法和 Dijkstra 局部路径规划, 建立栅格图验证了全覆盖路径规划可大范围覆盖作业。贾进章等^[10]提出了一种混合基因-蚁群算法来规划消防人员的撤离路径, 并获得了一条更高效的应急路径。2023 年, 骆文冠等^[11]针对灾后应急场景开发了无人机三维航迹规划框架, 创新性地将 Q-learning 策略与布谷鸟搜索算法融合, 构建了具有环境感知能力的异构优化模型, 该模型通过动态奖励函数实现风险规避与能耗优化的多目标协同, 在复杂障碍环境中较传统方法路径规划效率提升 37.6%。林勇等^[12]提出了一种基于编码修改的改进型多目标粒子群优化算法, 用于地震灾害应急物资配送路线规划。2019 年, 何梦男等^[13]首先提出了一种基于元胞自动机理论的全局路径优化方法, 试验结果表明, 该方法能够实现路径长度平均缩短 12.39%, 此外, 该算法具备地形自适应能力, 能够依据环境特征智能切换

* 收稿日期: 2025-06-03

作者简介: 祁云, 副教授, 从事矿井灾害防治及应急管理技术等研究, qiyun_sx@163.com。

决策模式。曹祥红等^[14]提出了一种 Dijkstra - ACO 双混合路径动态算法以获取最优路径。尽管算法改进与组合在应急路径规划上取得进展,但仍存在问题:传统图搜索算法随环境复杂度增加计算量呈指数级增长;而新兴的通用智能优化算法对计算资源要求高、搜索过程冗长,且易陷入局部最优。

基于上述问题,本文提出一种改进樽海鞘算法 (Improved Salp Swarm Algorithm, ISSA),旨在克服传统算法易陷入局部最优困境及收敛效率低下的缺陷,以更快获取最优路径。首先,利用 Logistic 混沌映射对原始 SSA 进行初始化改进,使种群实现均匀随机分布;然后,引入差分演化变异以缓解早熟收敛、避免陷入局部最优;最后,采用非均匀高斯变异策略进一步增强种群多样性与全局搜索能力。该算法受樽海鞘群体智能启发,模拟其导航觅食行为并应用于矿井灾后路径规划。樽海鞘觅食机制包括种群初始化、适应度评估与位置迭代更新,最终收敛至全局最优解并输出路径。ISSA 兼具优异的全局探索能力与高效收敛性,其群体协作机制能有效平衡勘探与开发,在矿井火灾后的复杂障碍环境中可为人员逃生与应急路径规划提供新的解决思路。

1 樽海鞘算法

1.1 标准樽海鞘算法

2017 年, Mirjalili 等^[15]受樽海鞘群体协作行为特征的启发,首次提出并构建了樽海鞘算法,该算法旨在模拟生物群体智能的协同优化机制。该算法通过数学建模再现了这类无脊椎动物在深海环境中协同导航与资源搜寻的独特群体动力学特征。算法通过随机初始化种群,选用合适的适应度函数进行个体评价,根据位置更新策略进行迭代,最终得到最优解。

樽海鞘种群由领导者和追随者两种类型的樽海鞘组成。领导者位于樽海鞘种群的最前面,其他个体为追随者,随机初始化种群。

$$\mathbf{X}_{N \times d} = \mathbf{Z}(N, d) \times (\mathbf{u} - \mathbf{l}) + \mathbf{l} \quad (1)$$

式中 N 为樽海鞘的规模; d 为空间维数; $\mathbf{X}_{N \times d}$ 表示樽海鞘初始种群; $\mathbf{Z}(N, d)$ 表示樽海鞘群随机位置; $\mathbf{u}$ 为搜索区域的上限; $\mathbf{l}$ 为下限。

在樽海鞘中,食物源的位置是所有樽海鞘个体的目标位置,即探索过程中的全局最优解,影响着领导者位置更新。领导者的位置更新公式为

$$x_j^i = \begin{cases} F_j + c_1[(u_j - l_j)c_2 + l_j] & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1[(u_j - l_j)c_2 + l_j] & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_j^i 为第 i 只领导者在第 j 维空间的位置; F_j 为食物源在第 j 维空间的位置,即在搜索空间中整个樽海鞘的搜索目标为食物源; u_j 为在第 j 维空间的上限; l_j 为在第 j 维空间的下限; c_2 和 c_3 为 $[0, 1]$ 范围的随机数。

由式(2)可知,领导者位置更新主要受食物源位置影响。其中参数 c_1 定义为 $c_1 = 2e^{-(4t/T_{\max})^m}$, t 为当前迭代次数, $T_{\max}$ 为最大迭代次数,幂系数 $m = 2$ 。参数 c_1 在迭代过程中自适应降低,当值较大时,有助于提升搜索能力;当值较小时,有助于开发能力。系数 c_1 可以使樽海鞘的探索能力和开发能力处于较好的状态。

追随者的位置更新公式为

$$x_j^i = \frac{at^2}{2} + v_0\Delta t + x_j^{i-1} \quad (3)$$

式中 $i \geq 2$; x_j^i 为第 i 只追随者在第 j 维空间的位置; Δt 为追随者所用时间; v_0 为初速度; 加速度 $a = (v_i - v_0)/\Delta t$; t 表示加速所需的时间; $v_i = (x_j^{i-1} - x_j^i)/\Delta t$; x_j^{i-1} 为第 $i - 1$ 只樽海鞘在 j 维空间的位置。在离散迭代过程中,时间视为相邻两次迭代的次数差,即为迭代次数之差,通常取单位时间 $\Delta t = 1$, 并且初速度 $v_0 = 0$, 式(3)可表示为

$$x_j^i = \frac{1}{2}(X_j^i + X_j^{i-1}) \quad (4)$$

式中 X_j^i 表示 x_j^i 前面樽海鞘个体的位置; X_j^{i-1} 表示 x_j^i 后面樽海鞘个体的位置。由式(2)和(4)可以模拟樽海鞘的行为机制,式(4)由式(3)化简而来。

1.2 改进樽海鞘算法 (ISSA)

1.2.1 Logistics 混沌初始化

SSA 算法的性能表现与初始群体分布质量存在强相关性。在无先验信息约束条件下,与传统群智能算法类似,SSA 通常采用随机化生成策略确定初始位置。从理论分析层面来看,搜索空间中覆盖的均匀性可显著提升算法的全局探索性能,进而强化算法在全局范围内的搜索能力。为此,本文引入具有伪随机特性、遍历特征和内生确定性的混沌映射序列,其数学表达式可表示为

$$y_{j+1}^i = \mu y_j^i (1 - y_j^i) \quad y_j^i \leq 0.5 \quad (5)$$

式中 $\mu \in [0, 4]$ 是混沌参数, μ 越大,混沌性越好,本文取 $\mu = 4$; $i = 1, 2, \dots, N$ 表示种群规模; $j = 1, 2, \dots, d$ 表示混沌变量序号; y_j^i 表示混沌变量。

在实际应用中,Logistics 混沌映射对初始值选取具有高度敏感性,因此,针对式(5)选取 d 个存在微小差异的初始值,能够生成 d 个混沌变量 y_j^i 。随

后,将该组混沌变量 y_j^i ,通过逆映射操作转换至对应个体的搜索空间变量取值的 x_j^i 。

$$x_j^i = I_i + (U_i - I_i)y_j^i \quad (6)$$

式中 $[I_i, U_i]$ 为 x_j^i 的搜索范围, I_i 为下限, U_i 为上限。

1.2.2 差分演化变异

在算法运行机制中,樽海鞘领导者的位置变量 x_j^1 发挥着关键导向作用,引导种群向全局最优解方向探索。当参数 x_j^1 的取值导致算法陷入局部最优区域时,易引发群体搜索进程的停滞现象。针对这一问题,提出通过对领导者位置实施变异操作并拓展搜索空间维度的改进策略,可有效提升算法的跳出能力。具体而言,引入一种差分演化变异(Differential Evolutionary Mutation, DEM)策略,该策略基于差分演化原理对领导者位置变量 x_j^1 进行动态扰动,其数学更新表达式为

$$m_j = x_j^1 + F(x_j^{R_1} - x_j^{R_2}) + F(x_j^{R_3} - x_j^{R_4}) \quad (7)$$

式中 F 为缩放因子;参数 R_1, R_2, R_3, R_4 为区间 $[0, 1]$ 内互不相同的随机数值,是用于标识不同樽海鞘个体的特征编码; j 代表解空间的维度索引;参数 m_j 定义为经扰动处理后的食物源位置坐标。具体而言,通过执行式(8)所示的交叉操作机制来筛选新的食物源位置取值。

$$x_j^{1*} = \begin{cases} m_j & s \leq C_R, j_{\text{rand}} = j \\ x_j^1 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中 s 代表在 $[0, 1]$ 区间内服从均匀分布的随机数,且每个维度均需重新生成该数值; C_R 为交叉概率; j_{rand} 为区间 $[1, d]$ 内随机生成的整数,其作用是保证变量 x_j^{1*} 至少有 1 个维度与变量 x_j^1 存在差异; x_j^1 表示初始樽海鞘领导者的位置变量; x_j^{1*} 表示变异后领导者的位置变量。在本次试验设定中,缩放因子 F 取值为 1,交叉概率 C_R 取值为 0.1。

1.2.3 非均匀高斯变异

在樽海鞘群体^[16]结构中,尾部个体由于适应度处于较低水平,被归类为链尾者子群。这类个体可较好地保留自身信息,而非一味向领导者移动。其更新表达式如下。

$$x_j^{i*} = x_j^i + \Delta(t, G_t^i) \quad (9)$$

$$\Delta(t, y) = y[1 - r^{(1-t/T_{\max})^b}] \quad (10)$$

$$G_t^i = N[(F_j - x_j^i), \sigma] \quad (11)$$

式中 x_j^{i*} 为链尾者变异个体变量; x_j^i 为链尾者常规个体变量;参数 $\Delta(t, G_t^i)$ 表示非均匀变异步长,是一种通过高斯分布(G_t^i)自适应调节步长的变异算

子; r 为 $[0, 1]$ 区间内均匀生成的随机数; b 为系统参数,决定变异计算的非均匀程度,设 $b = 2$; y 代表经过高斯变异后链尾者新位置坐标。所设计的 σ (变异因子)非均匀高斯变异策略具备以下显著特性。

(1)靶向更新机制:仅针对种群中适应度表现最差的樽海鞘个体(即链尾者子群)实施位置更新操作,而非作用于整个种群个体。该机制通过缩小变异作用范围,有效降低了算法的变异计算复杂度。

(2)自适性调整策略:链尾者的位置更新公式以个体当前状态为基准,通过食物源位置与个体当前位置状态的高斯分布运算,实现变异步长的自适应调节。此方式在维持种群多样性水平的同时,进一步增强了算法的全局搜索效能。

2 算法实现流程

算法基本思想是:将改进的樽海鞘算法用于机器人路径搜索,通过迭代更新种群位置,并以食物源引导更新全局最优位置,最终确定最优路径并完成路径规划。图1为基于ISSA的路径规划实现步骤。

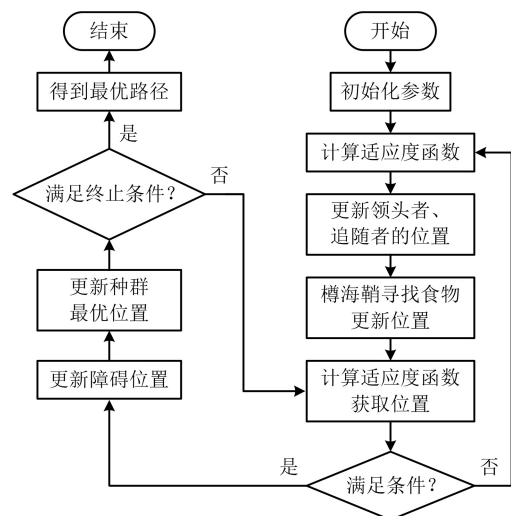


图1 基于ISSA的路径规划实现步骤

Fig.1 Implementation steps based on the ISSA path planning

算法运行步骤如下。

步骤1:系数初始化。系数初始化阶段需完成樽海鞘种群参数配置,设定种群规模和最大迭代次数。采用式(5)对个体位置进行初始化,并通过多维坐标映射实现个体位置的自适应分配。引入式(9)~(11)构建多样性增强机制,通过调节位置更新规则中的随机扰动系数,扩展搜索空间并提升种群结构多样性。

步骤 2:通过适应度函数对樽海鞘个体实施评估,识别领头者并提取全局最优适应度,同时记录对应个体位置与全局最优位置。

步骤 3:依据式(2)和(3)对领导者及追随者位置实施更新。

步骤 4:基于式(7)对处于最优位置的领导者施加扰动。

步骤 5:通过计算适应度函数值,存储樽海鞘种群的最优位置。

步骤 6:判定当前樽海鞘群位置是否为最优解或达到全局最优。当前位置为更优解时,启动下一阶段最优解求解流程;反之则返回至步骤 2。

步骤 7:基于式(4)对领导者的位置与速度实施动态更新。

步骤 8:刷新樽海鞘种群的最优位置。

步骤 9:判断迭代次数是否抵达预设上限;当条件满足时,输出全局最优位置(其关联位置参数作为改进算法的核心输入,用于驱动 ISSA 算法执行路径规划任务);反之则返回至步骤 6。

3 ISSA 算法性能测试

为评估 ISSA 算法的改进效能,构建包含四类测试函数的仿真试验体系:采用单峰基准函数 Sphere 验证算法的基础可行性,并引入多模态测试函数组(Rastrigin 函数、Griewank 函数、Schaffer 函数),从优化性能维度直观对比不同算法在寻优过程中的最优解收敛表现。测试函数的数学表达式及属性见表 1。

在 MATLAB2022b 平台上,将改进 SSA (ISSA) 与 SSA、粒子群优化 (PSO) 算法、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 开展对比试验。对上述四种算法分别独立运行 30 次,每次运行的迭代次数设为 1 000,种群规模设为 20。

从表 2 的仿真试验数据可见,ISSA、SSA、PSO、

GA 算法在四类测试函数上的均值与标准差指标,能够有效表征各算法对函数的优化求解效能。对比结果表明:ISSA 的平均表现优于其余算法,同时其标准差更小,体现出更强的鲁棒性与稳定性,整体寻优能力显著优于对照算法。从图 2 和 3 的动态曲线可见,随着迭代进程推进,各算法的适应度均呈现逐步收敛趋势。其中 ISSA 算法收敛速度、最终适应度最低。综合来看,ISSA 在寻优效率与稳定性方面均占优势。仿真试验结果充分验证了 ISSA 的有效性,也佐证了所引入改进策略的合理性和可靠性。

4 路径规划仿真测试

4.1 环境建模

在开展应急路径规划前,需针对樽海鞘群觅食环境进行建模与预处理操作。其中,栅格法是路径规划领域常用且经典的环境建模方法。火灾发生时,算法的核心任务是在全面掌握矿井内部环境信息的基础上,实现着火点规避、安全出口定位及最优疏散路线规划的多目标协同优化。为验证改进算法的实际应用可行性,需对环境条件进行如下假设。

假设 1:将矿井建筑物抽象建模为二维有限区域,空间内柱体、墙体、机器设备与堆积物等障碍物的位置已明确标注,且安全出口坐标作为已知条件纳入模型。

假设 2:将疏散人员简化为质点,不考虑个体特征差异,设定人员移动速度保持恒定,算法仅负责调控移动方向。

假设 3:将火灾发生后形成的障碍物及火焰不可通行区域等,统一简化为规则二维图形,以降低计算复杂度。

如图 4 所示:在可视化模型中,黑色栅格表示火灾后的障碍物与火焰区域(以 1 标记,表征樽海鞘群无法通行);白色栅格为空白区域及火灾未波及区域(用 0 表示,樽海鞘群可通过)。栅格单元边长设定

表 1 测试函数的数学表达式及属性

Table 1 Mathematical expression and properties of the test function

函数名称	计算式	范围
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100, 100]$
Rastrigin	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	$[-100, 100]$
Griewank	$f_3(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$[-100, 100]$
Schaffer	$f_4 = 0.5 - \frac{(\sin \sqrt{x_1^2 + x_2^2})^2 - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}$	$[-100, 100]$

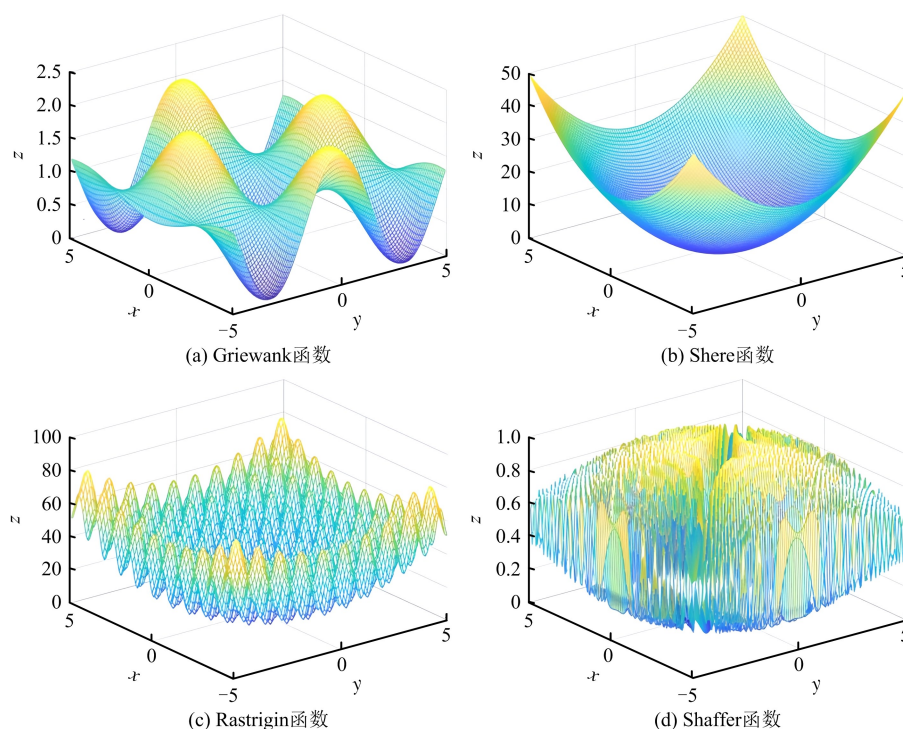


图2 ISSA 的函数测试结果

Fig.2 Function test results of ISSA

表2 测试函数运行结果

Table 2 Execution result of test function

算法	函数	最优值	平均值	标准差
ISSA	Shere	0	0	0
	Rastrigin	0	0	0
	Griewank	0	0	0
	Schaffer	6.05×10^{-12}	9.06×10^{-12}	1.70×10^{-12}
PSO	Shere	4.34×10^{-6}	2.60×10^1	3.76×10^{-2}
	Rastrigin	2.80×10^{-5}	3.25×10^1	5.80
	Griewank	3.76×10^{-2}	1.83×10^{-2}	1.38×10^{-2}
	Schaffer	2.30×10^{-7}	2.14×10^{-6}	1.09×10^{-6}
SSA	Shere	4.15×10^{-9}	5.70×10^{-9}	1.77×10^{-9}
	Rastrigin	2.95×10^1	4.76×10^1	9.96
	Griewank	4.93×10^{-7}	6.42×10^{-3}	6.30×10^{-3}
	Schaffer	1.10×10^{-2}	1.47×10^{-2}	6.02×10^{-3}
GA	Shere	3.68×10^{-88}	9.27×10^{-78}	1.83×10^{-77}
	Rastrigin	0	5.65×10^{-15}	1.04×10^{-14}
	Griewank	0	0	0
	Schaffer	4.47×10^{-2}	1.81×10^{-1}	1.04×10^{-1}

为1 m,按自下而上、从左至右的顺序编号,每个栅
2268

格均赋予唯一标识序号及对应位置坐标,其转换计算公式为

$$\begin{cases} x = a[(i-1) \bmod N_N + 0.5] \\ y = a[M_M + 0.5 - \text{ceil}(i/N_N)] \end{cases} \quad (12)$$

式中 x 和 y 分别表示第 i 个栅格单元的坐标值; a 为栅格单元的边长参数(默认取值为1); M_M 和 N_N 分别对应行方向与列方向的栅格数量; $\bmod$ 代表取余运算符(如 $7 \bmod 3 = 1$); ceil 表示向上取整函数。

4.2 试验验证与分析

为评估 ISSA 算法在路径规划任务中的优化性能,将 ISSA 与 SSA、PSO 及 GA 展开对比试验。地图规模为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。由表3可知:在路径长度最优值方面,ISSA 较 GA 路径缩短 8.6%,较 PSO 算法路径缩短 22.7%,较 SSA 缩短 13.3%;以标准差表征算法稳定性时,ISSA 的最优路径求解稳定性较 GA 提升 50%,较 PSO 提升 93%,较 SSA 提升 77%。在运算耗时方面,各算法的执行时长均随地图环境复杂度提升呈增长趋势。ISSA 算法的运行时间有所增加,这一点可解释为该算法引入多项优化策略以提升种群多样性与寻优精度,带来相应的计算开销。尽管如此,在相近的运行时间条件下,ISSA 能规划出更短且更平滑的路径。综上,该仿真试验结果证实了改进的樽海鞘算法(ISSA)在路径规划任务中

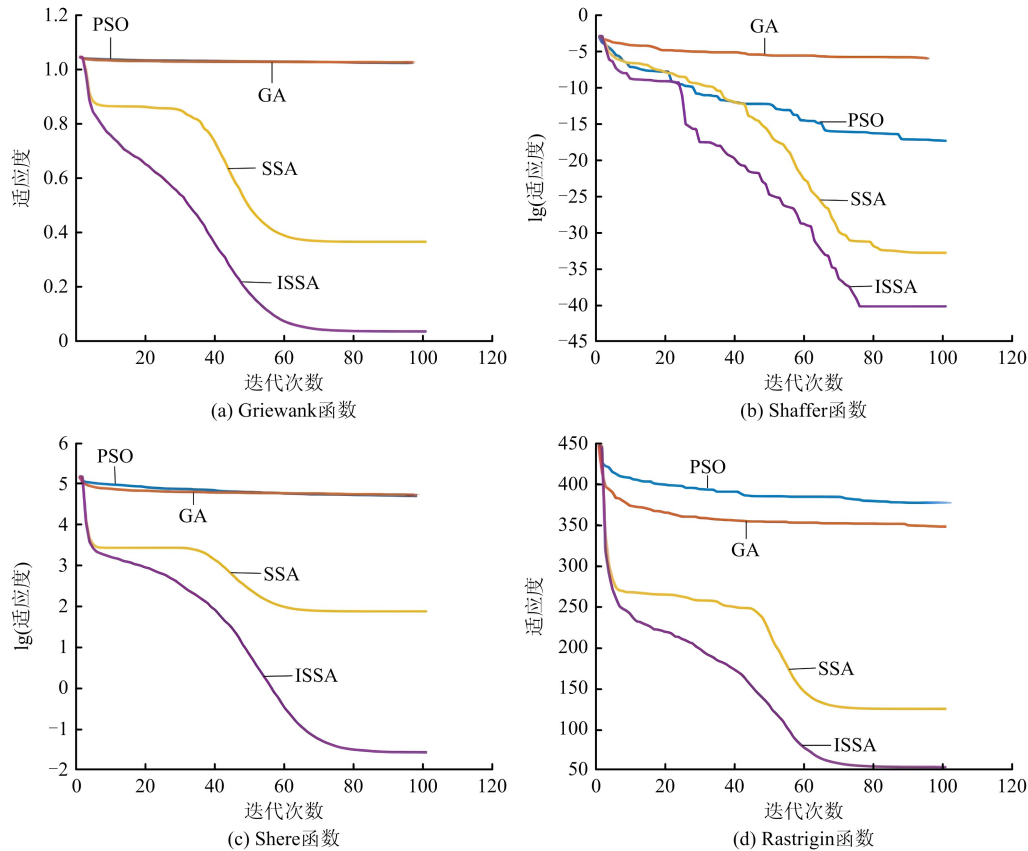


图3 算法收敛速度对比

Fig. 3 Comparison of algorithm convergence speed

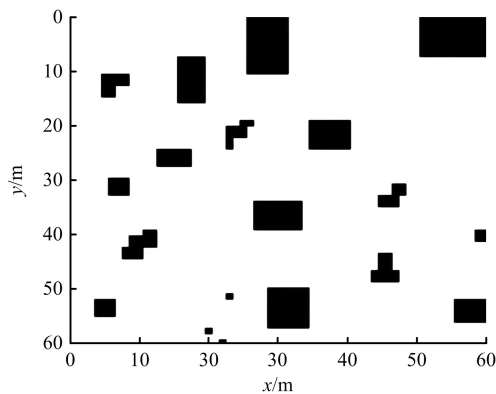


图4 地图环境模型图

Fig. 4 Model diagram of map environment

的有效性和应用可行性。

由仿真结果图5可知,SSA、PSO和GA算法的规划路径转折多、转角大,易陷入局部最优,导致路径平滑性不足且长度偏长,进而显著降低逃生效率。相比之下,ISSA能更快获得最优路径,且平滑性明显提升。图5进一步表明,SSA、PSO、GA的路径包含较多转折节点、平滑度较低;而ISSA的转折次数

表3 相同地图环境下各算法的对比结果

Table 3 Comparison results of various algorithms under the same map environment

算法	最优值/m	平均值/m	标准差	运行时间/s
ISSA	75.37	75.58	0.87	9.57
GA	82.43	77.32	1.74	9.85
SSA	86.97	87.94	3.76	7.43
PSO	97.50	97.50	12.34	9.08

大幅减少,路径质量更优。结合表3分析,ISSA的路径更短。从仿真轨迹形态看,ISSA生成的路径局部呈近直线段,整体更短且更平顺,更有利于爆炸后的快速撤离。综上,ISSA算法在路径规划效率与稳定性方面表现更优,其综合求解性能显著优于其他对比算法。

对比仿真结果表明,在含障碍物的地图环境中,ISSA算法能够以较高效率和稳定性求解应急路径规划问题,获得优质的路径求解结果,最终生成一条最短且平滑的直线型路径。该结果验证了ISSA算

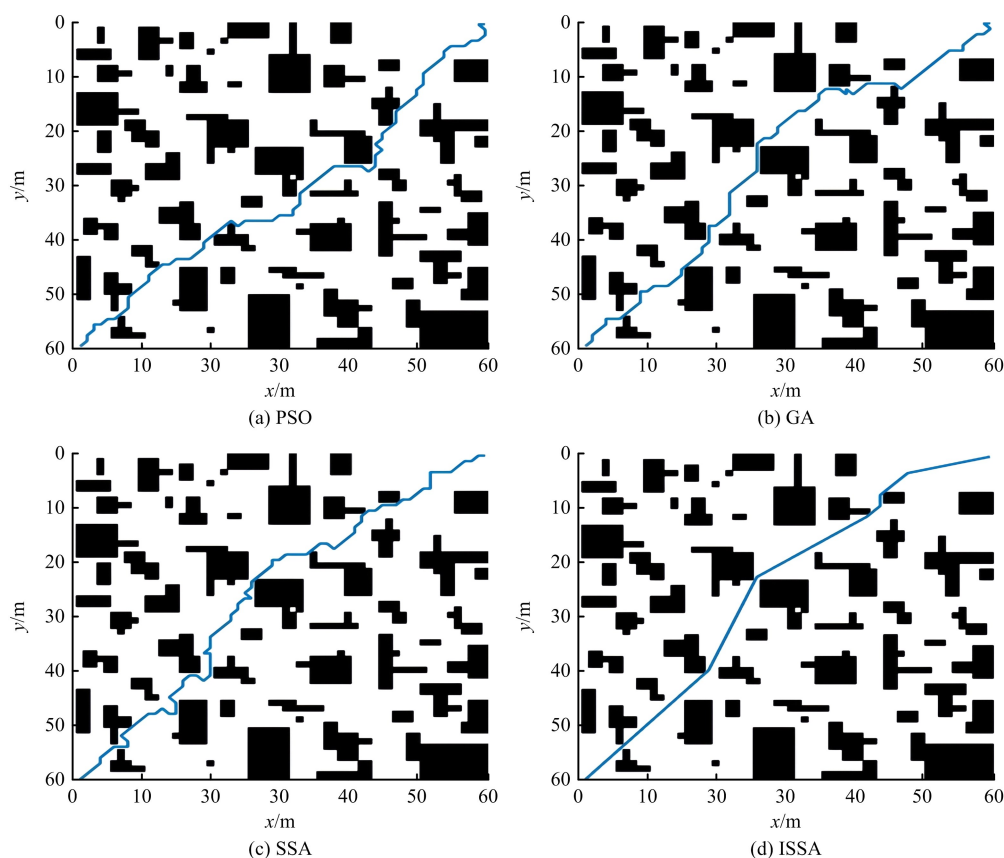


图5 各算法路径规划仿真结果

Fig. 5 Simulation results of path planning for each algorithm

法在复杂环境下处理应急逃生路径规划的有效性与可靠性。在矿井火灾等实际场景的逃生组织中,应用该算法能够取得更好的效果。

5 结论

(1) 针对应急路径规划领域普遍存在的算法适应性不足、易陷局部最优等问题,提出一种改进的樽海鞘算法(ISSA)。该算法采用混沌初始化以均匀种群分布;引入非均匀高斯变异以增强尾部个体自主性,提升种群多样性;结合差分变异策略以加速全局搜索,降低局部最优风险;配合精细化迭代机制,实现全局最优路径精准输出。函数测试对比结果进一步表明,ISSA在路径规划性能上优于对比算法。

(2) 试验结果表明,ISSA算法路径长度较GA算法缩短8.6%,较PSO算法路径缩短了22.7%,较SSA算法路径缩短13.3%。标准差可用于表征算法的稳定性。在求解最优路径的稳定性表现上,ISSA算法较GA算法的路径稳定性提升了50%,表明其在多次迭代中能更可靠地收敛于最优解,波动更小,

比PSO算法路径提高了93%,比SSA算法路径提高了77%。

(3) 经仿真试验验证,改进的樽海鞘算法能够在矿井火灾后有效完成路径规划。该方法通过提升种群多样性与寻优精度,能够生成最短且最平滑的最优路径,为实际应急疏散提供可行的最优路径方案。

参考文献(References):

- [1] 牛会永, 邓军, 周心权, 等. 矿井火灾事故调查综合分析技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4812-4818.
NIU H Y, DENG J, ZHOU X Q, et al. Comprehensive analysis techniques for mine fire accident investigation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(12): 4812-4818.
- [2] 祁云, 于开旺, 李绪萍, 等. 融合CPO-DWA的矿井应急无人机路径规划[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(10): 3953-3964.
QI Y, YU K W, LI X P, et al. Path planning for mine emergency UAVs using CPO-DWA[J]. Journal of Safety

- and Environment, 2025, 25(10): 3953–3964.
- [3] 李文倩, 周到洋, 郑媛媛. 基于 Dijkstra 算法的地震灾害应急避难路径分析[J]. 地震研究, 2022, 45(4): 653–661.
- LI W Q, ZHOU D Y, ZHENG Y Y. Analysis on emergency evacuation route of the earthquake disaster based on the Dijkstra algorithm [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(4): 653–661.
- [4] 刘益超, 郭进平, 李角群, 等. 基于 Floyd 算法的扇形中深孔爆破布孔优化设计[J]. 爆破, 2021, 38(1): 64–69, 152.
- LIU Y C, GUO J P, LI J Q, et al. Optimal design of hole arrangement for fan-shaped medium-length-hole blasting based on Floyd algorithm[J]. Blasting, 2021, 38(1): 64–69, 152.
- [5] 张彪, 李永强. 基于动态寻优蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 74–85.
- ZHANG B, LI Y Q. Path planning of mobile robot based on the dynamic optimization ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 74–85.
- [6] 曹祥红, 黄梦溪, 李栋, 等. 基于改进的 A* 和人工势场算法的火灾路径规划[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(2): 204–208.
- CAO X H, HUANG M X, LI D, et al. Fire path planning based on improved A* and artificial potential field algorithm[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(2): 204–208.
- [7] 刘建林, 黄海松, 范青松, 等. 基于改进樽海鞘群算法的机械臂多目标轨迹规划研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(9): 2047–2056.
- LIU J L, HUANG H S, FAN Q S, et al. Multi-object trajectory planning of robotic arms based on improved salp swarm algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9): 2047–2056.
- [8] 赵宏伟, 董昌林, 丁兵如, 等. 路径规划问题的多策略改进樽海鞘群算法研究[J]. 计算机科学, 2024, 51(增刊 1): 202–210.
- ZHAO H W, DONG C L, DING B R, et al. Study on multi-strategy improved salp swarm algorithm for path planning problem [J]. Computer Science, 2024, 51(S1): 202–210.
- [9] 姜龙腾, 迟瑞娟, 马悦琦, 等. 基于栅格法的农业机器人路径规划方法研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(6): 19–24.
- JIANG L T, CHI R J, MA Y Q, et al. Research on path planning method of agricultural robot based on grid method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(6): 19–24.
- [10] 贾进章, 李雪娇. 基于遗传-蚁群算法的单层建筑火灾疏散路径规划研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 122–126.
- JIA J Z, LI X J. Research on evacuation path planning in single-story building fire based on genetic-ant colony algorithm[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6): 122–126.
- [11] 骆文冠, 于小兵. 基于强化学习布谷鸟搜索算法的应急无人机路径规划[J]. 灾害学, 2023, 38(2): 206–212.
- LUO W G, YU X B. A reinforcement learning-based cuckoo search algorithm for emergency UAV path planning[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(2): 206–212.
- [12] 林勇, 肖骅, 张立, 等. 震灾应急物资分配-运输优化模型及算法研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 171–178.
- LIN Y, XIAO H, ZHANG L, et al. Optimization model algorithm of emergency supplies allocation-transportation in earthquake disaster [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 171–178.
- [13] 何梦男, 付瑜玲, 陈诚, 等. 基于元胞自动机的应急疏散最短路径优化算法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 51–57.
- HE M N, FU Y L, CHEN C, et al. Shortest path optimal algorithm for emergency evacuation based on cellular automata [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(4): 51–57.
- [14] 曹祥红, 李欣妍, 魏晓鸽, 等. 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的应急疏散路径动态规划[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(6): 1502–1509.
- CAO X H, LI X Y, WEI X G, et al. Dynamic programming of emergency evacuation path based on Dijkstra-ACO hybrid algorithm [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020, 42(6): 1502–1509.
- [15] MIRJALILI S, GANDOMI A, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm; a bio-inspired optimizer for engineering design problems [J]. Advances in Engineering Software, 2017, 114(12): 163–191.
- [16] 陈忠云, 张达敏, 辛梓芸. 多子群的共生非均匀高斯变异樽海鞘群算法[J]. 自动化学报, 2022, 48(5): 1307–1317.
- CHEN Z Y, ZHANG D M, XIN Z Y. Multi-subpopulation based symbiosis and non-uniform Gaussian mutation salp swarm algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(5): 1307–1317.

Mine fire emergency path planning based on the improved salp swarm algorithm

QI Yun^{1,2}, YU Kaiwang², WANG Wei^{1,2}, CUI Xinchao², XIAO Xinshuai²

(1 College of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014017, Inner Mongolia, China;

2 College of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037000, Shanxi, China)

Abstract: To effectively address the critical need for emergency personnel evacuation following a mine fire, this study proposes a novel robot path planning method based on an Improved Salp Swarm Algorithm (ISSA). The core of the methodology lies in enhancing the original Salp Swarm Algorithm (SSA) by integrating three key strategies. First, logistic chaotic mapping is introduced to initialize the population, thereby improving its diversity and providing a more robust starting point for the search process. Second, an integrated differential evolution mutation operator is incorporated to strengthen global exploration capabilities, effectively preventing the algorithm from prematurely converging on local optima. Finally, a non-uniform Gaussian perturbation strategy is applied to the leader's position, refining local exploitation and enhancing the ability to escape from local minima during the later stages of iteration. A comprehensive simulation experiment was designed to systematically validate the performance of the proposed ISSA. The algorithm was benchmarked against the original SSA, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, and the Genetic Algorithm (GA). Multiple groups of multi-agent path planning simulations were conducted within a grid-based simulation environment that replicated a complex mine layout. The experimental results demonstrate the superior performance of ISSA across key metrics. In terms of optimal path length, Compared with GA, PSO and the original SSA, ISSA has shortened by 8.6%, 22.7% and 13.7% respectively. In terms of the stability of path solving, the performance improvement of ISSA is more significant, with a 50% increase over GA, a 93% increase over PSO and a 77% increase over the original SSA. This indicates much greater consistency and reliability in finding high-quality solutions. In conclusion, the improved salp swarm algorithm exhibits significant advantages in path quality, convergence efficiency, and overall robustness. It proves capable of planning safer and more efficient evacuation paths for rescue robots in confined and hazardous environments such as mine fires, demonstrating considerable potential for practical engineering applications.

Key words: safety engineering; mine fire; salp swarm algorithm; Logistic chaotic initialization; differential mutation; path planning