

巡检机器人移动路径自适应规划研究

李江涛¹, 董长浩²

(1. 国能神东煤炭集团洗选中心, 陕西 榆林 719315; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710061)

摘要:为解决巡检机器人在复杂作业环境中路径规划效率低、精度不足等问题,提出了基于增强型雪雁算法(ESGA)。建立了巡检机器人路径规划模型;在雪雁算法的基础上,引入3种优化策略对算法进行改进,采用自适应切换策略实现探索与开发的动态平衡,引入主导群体引导策略加速收敛并提升搜索方向的稳定性,设计主导随机差分搜索策略增强局部开发能力以避免陷入局部最优;通过3个基准测试函数对比验证 ESGA 与 SGA 的性能差异;构建了巡检机器人测试实验,将 ESGA 与雪雁算法(SGA)、粒子群优化(PSO)、遗传算法(GA)及灰狼优化算法(GWO)等进行路径规划效果对比。实验结果表明,ESGA 算法在复杂环境下能够规划出更短的移动路径,同时具备更高的计算效率与稳定性。

关键词:巡检机器人;自适应雪雁算法;路径规划;余弦自适应策略

中图分类号:TP273

文章编号:1000-0682(2026)01-0057-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.01.011

Research on adaptive path planning for inspection robots

LI Jiangtao¹, DONG Changhao²

(1. Guoneng Shendong Coal Group Washing Center, Shaanxi Yulin 719315, China;

2. Xi'an University of Technology, Shaanxi Xi'an 710061, China)

Abstract:To address issues such as low path planning efficiency and insufficient accuracy of inspection robots in complex operating environments, an Enhanced Snow Geese Algorithm (ESGA) is proposed. A path planning model for inspection robots is established. Based on the Snow Geese Algorithm (SGA), three optimization strategies are introduced to improve the algorithm. An adaptive switching strategy is adopted to achieve dynamic balance between exploration and exploitation. A dominant group guidance strategy is introduced to accelerate convergence and enhance the stability of search direction. A dominant stochastic differential search strategy is designed to strengthen local exploitation capability and avoid falling into local optima. The performance differences between ESGA and SGA are verified by comparison using three benchmark test functions. A test experiment for inspection robots is constructed, and the path planning effects of ESGA are compared with those of SGA, Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), Grey Wolf Optimizer (GWO), and other algorithms. The experimental results show that the ESGA can plan shorter moving paths in complex environments, while possessing higher computational efficiency and stability.

Keywords:inspection robot; adaptive Snow Geese Algorithm; path planning; cosine adaptive strategy

0 引言

随着工业自动化与智能化的深度融合,巡检机器人已成为保障各领域设备安全、提升运维效率的核心装备,广泛应用于工业、农业、室内等多元场景。路径规划算法是实现自适应规划的基础,传统算法因存在搜索效率低、路径平滑性差、动态适应性不足

收稿日期:2025-09-22

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2020LM-022)

第一作者:李江涛(1980—),男,山西翼城人,大学本科,高级工程师,研究方向为复杂机电系统控制。

E-mail:lijiangtao_2025@126.com

等问题,推动学者开展多维度改进,形成了启发式算法优化、智能优化算法创新及混合算法融合三大技术路线。

以A算法为例,通过优化A算法代价函数提升路径精确性,引入距离因子视线法增加安全距离,并采用双向搜索策略加快搜索速度,最终结合曲线技术实现路径平滑^[1];在启发函数中融入多种因子,升级邻域搜索方式,同时通过算法剔除冗余节点,提升搜索性能^[2];基于跳点搜索法提出优化修剪规则,结合角度代价函数、局部路径替换等方法,改善路径规划效率与平滑性^[3]。除A算法外,D算法的改进也受到关注,提出自适应扩展步长的改进方案,替换代价函数并引入平滑度函数,实现静态与动态地图下的快速路径重规划^[4]。

在单一算法改进方面,针对电气巡检环境,在麻雀搜索算法中引入混沌映射优化初始种群,调整位置更新机制,结合曲线技术平滑路径^[5];向核环境巡检需求,提出自适应金豺狼优化算法,通过动态调整参数增强搜索精度^[6]。在跨算法融合方面,为解决蚁群算法缺陷,采用A*算法构建次优路径以初始化信息素浓度,设计方向性函数减少拐点,并融合遗传算法的相关操作与死锁避免策略^[7];将遗传算法的变异操作融入人工鱼群算法,优化视野、步长及拥挤度因子,提升算法性能^[8]。

全局路径规划与局部路径规划的融合,成为解决复杂动态环境自适应问题的主流方案,通过全局定优、局部避障的协同机制提升规划性能。提出融合改进A与DWA的混合算法,全局层通过引入多种因子优化A启发函数,采用算法实现路径简化与平滑;局部层将全局路径关键点作为目标点,重构评价函数^[9]。针对电力巡检需求,采用改进灰狼优化算法与A*算法实现全局路径规划,通过改进动态窗口法完成局部动态避障,在保证全局最优的同时应对环境故障^[10]。

不同场景的环境特征与巡检需求差异显著,推动路径规划技术向场景化、定制化方向发展。在化工与核工业领域,改进算法的应用解决了传统路径的安全隐患,同时提升路径效率^[6];在电力与煤矿领域,混合算法实现全局最优与动态避障协同,针对井下环境的改进算法适配矿用机器人作业需求^[10];在工业园区,有研究以多种因素为约束建立巡检模型,通过改进算法求解,优化巡检成本与时间^[11]。在农田巡检中,改进算法通过引入相关方法提升规

划效率,结合多种算法构建奖励函数,提升规划性能^[12];在牧场巡检中,融合算法通过优化行为与操作,实现更优路径规划与更强适应性^[8]。室内场景环境相对规整,但存在动态干扰,路径规划需平衡效率与平滑性,相关改进算法通过优化搜索过程,提升机器人作业效率^[3]。

雪雁算法(SGA)作为一种新型自然启发式智能算法,模拟雪雁迁徙过程中的“人”字形与直线形飞行模式实现寻优,在工程优化问题中展现出潜力,但将其直接应用于巡检机器人路径规划时,存在探索与开发阶段过渡生硬、局部最优规避能力不足的问题。基于此,该文引入3种优化策略改进SGA算法,构建适用于轨道环境的路径规划模型,为巡检机器人提供高效解决方案:采用自适应切换策略实现探索与开发的动态平衡,引入主导群体引导策略加速收敛并提升搜索方向的稳定性,设计主导随机差分搜索策略增强局部开发能力以避免陷入局部最优。

1 巡检机器人路径规划建模

该文采用栅格法,将机器人作业区域划分为大小一致的正方形栅格,构建起简化的轨道拓扑模型。在本研究中,依据轨道实际尺寸与机器人定位精度,设定栅格边长为1个单位长度。通过对每个栅格赋予特定属性,来表征可通行栅格和障碍栅格。结合栅格建模与移动约束,路径规划的核心目标明确为:在满足移动规则的前提下,寻求机器人从起始栅格至目标巡检栅格的最短路径。设机器人当前所在栅格中心坐标为 (x_i, y_i) ,目标栅格中心坐标为 (x_g, y_g) ,路径长度可通过欧氏距离公式量化,目标函数表示为:

$$f = \sqrt{(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2} \quad (1)$$

其中,坐标值可依据栅格索引进行换算,例如第 m 行第 n 列栅格的中心坐标为 $(n \times L, m \times L)$, L 为栅格边长。路径规划算法在寻优过程中,持续校验栅格状态与移动方向,确保目标函数的优化结果对应一条安全、合规且最短的实际巡检路径,满足机器人高效、可靠作业的要求。

2 改进的雪雁优化算法

原始的雪雁优化算法(SGA)在处理复杂优化问题时表现出性能下降,主要原因是其忽略了主导群体的引导作用,以及探索与开发阶段之间切换机制

的僵化。为解决这些问题,该文提出了一种增强型雪雁优化算法(ESGA),通过引入自适应切换策略、主导群体引导策略和主导随机差分搜索策略3种新策略来提升算法性能。

2.1 雪雁算法基本原理

SGA算法受雪雁迁徙过程中集体飞行行为启发,通过种群初始化、位置更新与飞行阶段切换实现寻优。

SGA通过飞行角度 θ 划分探索与开发阶段:探索阶段($\theta < \pi$),全局搜索环境信息, θ 的计算公式为:

$$\theta = \frac{2\pi t}{M} \quad (2)$$

式中: t 为当前迭代次数; M 为最大迭代次数。

结合能量衰减与空气阻力影响,速度 V 更新公式:

$$V^{t+1} = c \cdot V^t + a_i \quad (3)$$

式中: c 为速度权重系数; a_i 为加速度。

$$c = \frac{4t}{Me^{\frac{4t}{M}}} \quad (4)$$

$$a_i = P_b^t - P_i^t - \frac{1.29(V_i^t)^2 \sin\theta \cdot 10^{-2}}{2} \quad (5)$$

式中: P_i^t 为第 i 个雪雁个体的位置向量; P_b^t 为当前迭代最优位置。

位置更新根据适应度分层处理,前1/5高适应度个体为:

$$P_i^{t+1} = P_i^t + b(P_b^t - P_i^t) + V_i^{t+1} \quad (6)$$

后1/5低适应度个体为:

$$P_i^{t+1} = P_i^t + b(P_b^t - P_i^t) - d(P_c^t - P_i^t) + V_i^{t+1} \quad (7)$$

中间个体为:

$$P_i^{t+1} = P_i^t + b(P_b^t - P_i^t) + d(P_c^t - P_i^t) - e(P_n^t - P_i^t) + V_i^{t+1} \quad (8)$$

式中: $b = 4rand - 2$, $d = 3rand - 1.5$, $e = 2rand - 1$, P_c^t 为种群中心位置; P_n^t 为最差位置。 n 为候选路径数量。

$$P_c^t = \frac{\sum i = 1^n P_i^t f(P_i^t)}{n \sum i = 1^n f(P_i^t)} \quad (9)$$

开发阶段(直线形飞行, $\theta \leq \pi$),局部精修路径并规避局部最优,位置更新公式为:

$$P_i^{t+1} = \begin{cases} P_i^t + (P_i^t - P_b^t) \cdot r, r > 0.5 \\ P_b^t + (P_i^t - P_b^t) \cdot r \otimes B_r(d), r \leq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: r 为 $[0, 1]$ 随机数; \otimes 为逐元素乘法; $B_r(d)$ 为布朗运动随机扰动。

2.2 自适应切换策略

在原始SGA中,算法在迭代的前半段执行全局探索,后半段进行局部开发。这种固定的切换机制导致探索与开发之间缺乏平衡,可能引发过早收敛或收敛速度缓慢的问题。为此,该文提出一种自适应切换策略,使算法能够在迭代过程中动态调整探索与开发的比例。

$$\theta = \frac{2\pi t}{M} \cdot \cos\left(\frac{\pi t}{2M}\right), c = c_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi t}{2M}\right) \quad (11)$$

式中: $c_1 = 1.5$ 。

2.3 主导群体引导策略

在SGA的全局探索阶段,个体更新依赖于当前种群中的最优个体、最差个体和平均位置。然而,最差个体提供的信息可能误导搜索方向,降低收敛效率。该文引入主导群体引导策略。在每次迭代中,将适应度最优的前20%个体定义为主导群体,该群体代表当前搜索空间中最优的解集,能够为其他个体提供更稳定、更有效的引导。

在探索阶段,个体的位置更新不仅考虑全局最优和平均位置,还引入主导群体中的随机个体进行引导。更新公式改进为:

$$P_i^{t+1} = P_i^t + \alpha(P_{\text{best}}^t - P_{\text{worst}}^t) + \beta(P_{\text{avg}}^t - P_i^t) + \gamma(P_d^t - P_i^t) \quad (12)$$

式中: P_d^t 是从主导群体中随机选取的一个个体。该策略增强了优质解的信息传播,加快了种群向最优区域的收敛速度。

2.4 主导随机差分搜索策略

在局部开发阶段,SGA仅依赖当前最优个体进行微调,容易陷入局部最优。为此,该文提出主导随机差分搜索策略,利用主导群体内部的差异信息生成扰动,增强局部搜索的多样性。具体地,在开发阶段,个体更新引入2个来自主导群体的随机个体之差作为变异方向:

$$P_i^{t+1} = P_i^t + \delta(P_a^t - P_b^t) + \eta(P_{\text{best}}^t - P_i^t) \quad (13)$$

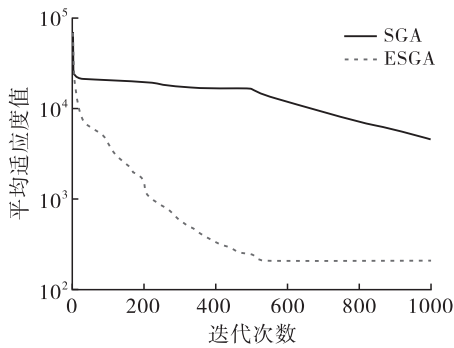
式中: P_a^t 和 P_b^t 是从主导群体中随机选取的两个不同个体; δ 为缩放因子; η 为随迭代递减的权重系数。

该策略借鉴了差分进化的思想,通过主导个体间的差异引导搜索,有效避免了开发阶段的早熟收敛,提升了局部搜索的鲁棒性。

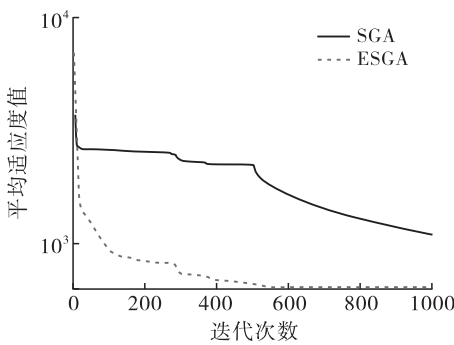
3 算法性能测试

为验证所提出的增强型雪雁优化算法在不同优化问题上的搜索性能与稳定性,选取经典雪雁优化算法作为基准对比方法,并采用 CEC2014 基准测试函数集进行仿真实验。实验重点考察算法在单峰与多峰函数上的收敛能力、全局探索性能以及稳定性。

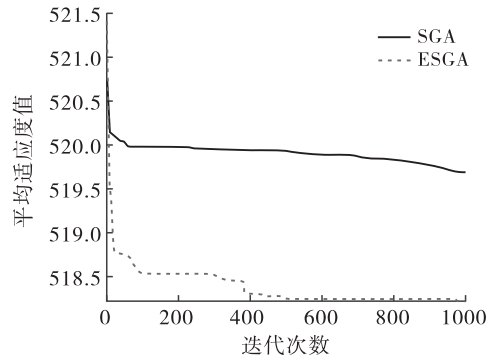
实验选取了 3 个典型的 CEC2014 测试函数: F_1 为 Sphere 函数,属于单峰函数,用于评估算法的局部开发能力; F_5 为 Rastrigin 函数,是一种具有大量局部极值点的多峰函数,用于检验算法的全局探索能力以及跳出局部最优的能力; F_6 为 Ackley 函数,多峰且局部最优区域较为平滑,用以评估算法在探索与开发之间的平衡能力。实验设置种群规模为 30,最大迭代次数为 1000,问题维度为 30,每组实验独立运行 30 次以确保统计结果的有效性。在 ESGA 算法中,主导群体比例设为 20%,即每一代中适应度排名前 20% 的个体构成引导群体,以增强对种群进化方向的引导作用。性能评价采用最优值 (Best)、平均值 (Mean) 和标准差 (Std) 这 3 个指标,分别反映算法的寻优精度、平均性能和稳定性。图 1 所示为 2 种不同算法在 3 个测试函数上的收敛曲线。



(a) 测试函数 F_1



(b) 测试函数 F_5



(c) 测试函数 F_6

图 1 2 种不同算法在 3 个测试函数上的收敛曲线

SGA 与 ESGA 在 3 类测试函数上的表现对比分析如表 1 所示。

表 1 ESGA 与 SGA 在基准测试函数上的性能对比

函数	算法	最优值	平均值	标准差
F_1	SGA	4.35E+00	4.58E+03	7.90E+03
	ESGA	5.41E+01	2.03E+02	1.17E+02
F_5	SGA	6.11E+02	1.13E+03	6.00E+02
	ESGA	5.77E+02	6.57E+02	6.78E+01
F_6	SGA	5.15E+02	5.20E+02	1.03E+00
	ESGA	5.00E+02	5.18E+02	5.47E+00

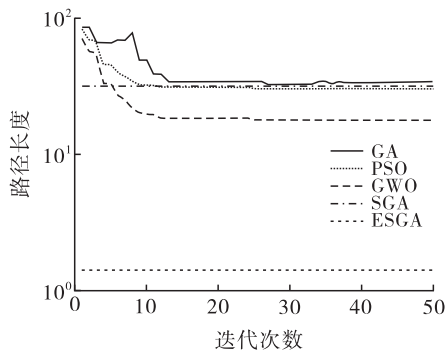
在 F_1 上,SGA 获得了更优的最优值,但其平均值和标准差显著高于 ESGA,表明 SGA 在部分运行中陷入早熟或收敛失败,整体稳定性较差。相比之下,ESGA 虽最优值略逊,但平均值和标准差远优于 SGA,体现出更强的收敛一致性和鲁棒性,说明 ESGA 所引入的主导群体机制有效提升了局部开发过程的稳定性。在 F_5 上,ESGA 在所有指标上均显著优于 SGA。其最优值优于 SGA,平均值降低,且标准差远低于 SGA,表明 ESGA 不仅具备更强的全局搜索能力,还能有效避免陷入局部最优,展现出优异的探索性能与稳定性。对于 F_6 ,2 种算法表现较为接近。SGA 在最优值和标准差上略占优势,而 ESGA 在最优值上进一步优化,平均值与 SGA 相近,但标准差略高。该结果表明,在具有平滑局部结构的多峰问题中,2 种算法在探索与开发的平衡能力上差异较小,ESGA 在寻优精度方面略有提升,但稳定性稍弱于 SGA。

综合 3 类函数的实验结果可知,ESGA 在多数测试场景下展现出优于 SGA 的整体性能。尤其在复杂多峰问题(如 Rastrigin 函数)中,ESGA 通过引入主导群体引导机制与自适应差分搜索策略,显著增强了种群多样性维持能力与全局探索效率,有效缓解了传统算法易陷入局部最优的问题。同时,在

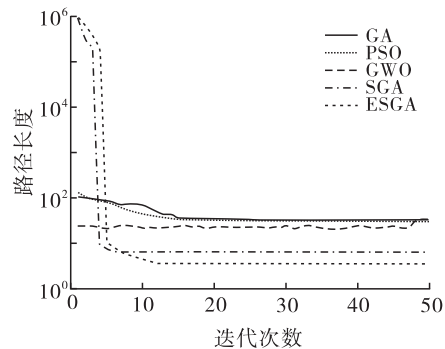
单峰函数上,ESGA 表现出更稳定的收敛行为,尽管牺牲了极个别运行中的最优解精度,但整体鲁棒性大幅提升。总体而言,ESGA 通过结构化引导与自适应变异机制的融合,实现了探索与开发能力的更好平衡,尤其适用于高维、多峰、复杂地形的优化问题。

4 实验验证

该实验旨在通过对比遗传算法 GA、粒子群优化算法 PSO、灰狼优化算法 GWO、雪雁优化算法 SGA 和增强型雪雁优化算法 ESGA 在栅格地图路径规划中的表现,评估各算法的路径长度、收敛性能及计算效率,验证 ESGA 在机器人路径规划任务中的适用性(如图 2 所示)。



(a) 各算法最优路径长度收敛曲线



(b) 各算法平均路径长度收敛曲线

图 2 5 种算法的收敛曲线

采用 20×20 的二维栅格地图,其中 0 表示自由栅格,1 表示障碍物,地图包含复杂障碍分布。从起点(编号 0)到终点(编号 399)规划 1 条无碰撞路径,优化目标为路径长度与路径平滑度的加权组合,长度权重系数 $a=1$,平滑度系数 $b=7$ 。种群数量为 200,最大迭代次数 50,交叉概率 0.8,变异概率 0.2,学习因子 $c1=1.5$ 、 $c2=1.5$,惯性权重 $w=0.8$ 。为保证统计可靠性,每种算法独立运行 30 次。

实验结果输出各算法的关键指标对比(平均路

径长度、标准差、最短路径、平均耗时),量化评估算法的优化精度与稳定性(见表 2)。绘制各算法的平均路径长度收敛曲线(如图 2(a)所示)和最优路径长度收敛曲线(如图 2(b)所示),对比不同算法的收敛速度与寻优能力。绘制各算法在 30 次实验中找到最优路径轨迹(图 3 所示),结合地图背景直观展示路径的避障能力与平滑性。

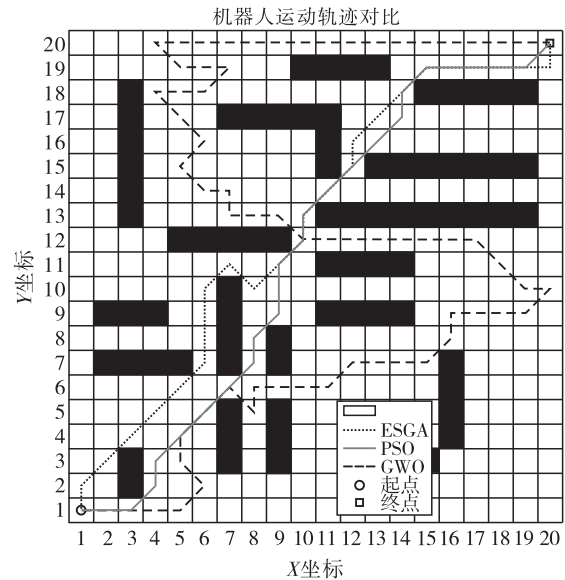


图 3 3 种算法的路径规划轨迹

表 2 各算法路径规划性能指标对比

Algorithm	Mean	Std	Min	Time
GA	33.22	1.90	30.97	0.04
PSO	30.38	0.00	30.38	1.93
GWO	65.53	4.79	57.04	1.42
SGA	7.35	18.76	1.41	0.06
ESGA	1.41	0.00	1.41	0.08

表 2 聚焦巡检机器人路径规划场景,通过 4 个核心指标横向对比遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、灰狼优化算法(GWO)、雪雁算法(SGA)和增强型雪雁算法(ESGA)的综合性能。表中 Mean 指多次实验中规划出的路径平均长度;Std 即标准差,体现算法多次运行结果的波动程度;Min 代表多次实验中能找到的最短路径长度;Time 指算法完成路径规划的平均计算耗时。

遗传算法(GA)整体处于中等水平,其突出优势是计算速度,在 5 种算法中,最快,但路径质量存在明显短板,规划出的路径整体偏长,且多次运行结果有一定波动,稳定性只能算一般;粒子群优化算法(PSO)稳定性表现极为突出,多次实验规划的路径完全一致,没有任何波动,但代价是计算效率极低,耗时在 5 种算法中最长,且路径整体长度仅略优于

GA,并未实现明显优化;灰狼优化算法(GWO)综合性能最差,不仅规划出的路径整体长度远超其他算法,路径质量效率低下,而且多次运行结果波动较大,稳定性欠佳,同时计算耗时也较长,在各维度均无优势;雪雁算法(SGA)呈现“两极分化”特征,其寻优上限很高,能找到与最优算法水平相当的最短路径,且计算速度较快,路径整体长度也远优于GA,PSO和GWO;但致命缺陷是稳定性极差,多次运行结果波动极大,部分实验的路径质量很差,可靠性不足;增强型雪雁算法(ESGA)综合表现最优,在各指标上实现了均衡且卓越的性能。与GA相比,ESGA的平均路径长度提升约95.76%,最短路径长度提升约95.45%,稳定性提升100%,仅计算耗时增加100%但仍处于极快水平;相较于PSO,ESGA的平均路径长度和最短路径长度均提升约95.36%,计算耗时提升约95.85%,同时保持了与PSO同等的完美稳定性;对比GWO,ESGA的平均路径长度提升约97.85%,最短路径长度提升约97.53%,稳定性提升100%,计算耗时提升约94.37%,优势极为明显;相较于原始的SGA,ESGA的平均路径长度提升约80.82%,稳定性提升100%,最短路径长度无差异,仅计算耗时增加约33.33%,保留了其较快的计算速度和高寻优上限,同时彻底解决了SGA稳定性极差的问题。

5 结论

该文提出基于增强型雪雁算法(ESGA)的巡检机器人路径规划方法,通过引入自适应切换策略、主导群体引导策略及主导随机差分搜索策略改进原始雪雁算法,有效解决了原算法探索与开发阶段过渡生硬、局部最优规避能力不足的问题。基准测试表明,ESGA在寻优精度、收敛速度与稳定性上均优于SGA;轨道环境实验显示,ESGA规划的路径更短、更平滑,计算效率满足实际需求,为巡检机器人自适应路径规划提供了可靠方案。

参考文献:

- [1] 孙宁,胡云雷,陈宇飞.基于改进A算法的轮式巡检机器人路径规划方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2025,52(08):103-110.
- [2] 张辉,苏国用,赵东洋,等.基于改进A算法的矿用巡检机器人路径规划[J].太原理工大学学报,2025,56(03):559-566.
- [3] 张伟民,徐森生,张月.基于改进A算法的室内巡检机器人路径规划研究[J].机械工程学报,2024,60(20):315-326.
- [4] 乔道迹,张艳兵.多障碍环境下巡检机器人路径规划优化研究[J].现代电子技术,2025,48(01):130-134.
- [5] 郭彬,牛毅,李根,等.基于改进麻雀搜索算法的电气巡检机器人路径规划方法[J].办公自动化,2025,30(16):110-112.
- [6] 徐雯清,顾大德,刘有志,等.基于自适应金豺狼优化算法的巡检机器人路径规划[J].核电子学与探测技术,2024,44(05):955-962.
- [7] 朱翠,罗宇豪,王占刚,等.新型蚁群算法规划核电厂巡检机器人路径[J].核电子学与探测技术,2025,45(01):107-115.
- [8] 高金喆,寇志伟,许寒琪,等.基于改进鱼群算法的牧场巡检机器人路径规划研究[J].中国农机化学报,2024,45(11):202-208.
- [9] 张伏,韩伟东,鲍若飞,等.融合改进A*与DWA算法的车间移动机器人路径规划[J].吉林大学学报(工学版),2025,55(09):3020-3031.
- [10] 完颜丹丹,孙士保,赵威.结合改进A*和改进DWA的电力巡检机器人路径规划方法[J].机械设计与制造,2025(09):303-308.
- [11] 邓军,李钊,王伟峰,等.基于改进ILS-RVND算法的工业园区智能巡检机器人路径规划方法[J/OL].现代电子技术,2021,44(18):167-171.
- [12] 许寒琪,寇志伟,李欣,等.基于EDDPG的农业巡检机器人路径规划研究[J/OL].中国农机化学报,1-8[2025-11-11].<https://link.cnki.net/urlid/32.1837.s.20250730.1543.003>.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00元/期 108.00元/年
地址:西安市高新区沣惠南路8号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址:<http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱:gyybbjb@126.com