

基于改进萤火虫算法的无人机路径规划

刘晓波¹ 刘海芳¹

LIU Xiaobo LIU Haifang

摘要

无人机路径规划需要同时进行路径距离、飞行能耗与避障安全性的多目标优化方法研究。为提高求解效率与路径质量,文章通过引入自适应扰动控制、动态吸引度调节机制以及精英保留与多样性维护策略对萤火虫算法进行改进,增强算法的全局搜索能力与收敛稳定性。仿真实验在静态障碍、动态障碍和多目标任务三类典型场景下开展,提出的改进型萤火虫算法与遗传算法、粒子群优化算法和A*算法进行对比分析。结果表明,所提方法在路径长度、能耗控制和避障性能方面均优于对比算法,在不同环境中均表现出适应性与稳定性,能够满足无人机路径规划中对安全性、能效和全局最优解的综合需求。

关键词

萤火虫算法; 无人机路径规划; 优化算法; 元启发式算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.008

0 引言

随着无人机技术(unmanned aerial vehicle, UAV)的快速发展,其在农业监测^[1]、物流配送^[2]、公共安全^[3]、灾害评估^[4]等多个领域的应用愈发广泛。作为无人机执行任务的关键环节,路径规划技术直接影响其任务完成的效率、能耗、安全性及自主性^[5]。路径规划的本质是为无人机在已知或部分已知环境中,从起点导航至目标点,生成一条满足多种约束条件(如避障、安全、最短路径、最小能耗等)并优化目标函数的飞行路径。因此,路径规划问题不仅具有高度的实用价值,也在理论上属于典型的非确定性多项式难题(NP-hard),在解空间复杂、约束多样、环境动态变化的背景下尤为突出。

传统的启发式搜索算法(如A*、Dijkstra等)在规则环境和静态任务中具有一定的优势,但在面对维度高、非线性、动态不确定性强的问题时,常表现出局部最优陷阱、求解速度慢、全局搜索能力差等劣势。为应对上述挑战,近年来研究者逐渐将目光转向群体智能优化方法和元启发式算法^[6]。典型代表包括遗传算法(genetic algorithm, GA)^[7]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)^[8]、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)^[9]等。这些算法通过模拟自然界生物行为,实现对复杂优化问题的全局探索与近似求解,在路径规划领域获得广泛应用。

萤火虫算法(firefly algorithm, FA)是元启发式方法中的群体智能优化方法之一,其灵感源于自然界中萤火虫之

间通过发光吸引行为进行个体间交互的现象^[10]。FA通过设定个体亮度、吸引度与距离的关系,引导种群向全局最优解迭代收敛,具有算法结构简单、全局搜索能力强、参数设置少等优势。尽管已有研究初步将FA应用于路径规划问题,但在高维搜索空间、复杂障碍物环境以及多目标约束下,标准FA仍存在早熟收敛、搜索精度不足和路径平滑性差等局限。

针对上述问题,本文提出一种改进型萤火虫算法(improved firefly algorithm, IFA),结合动态吸引机制、自适应扰动调节策略与多目标加权评价模型,以增强其在复杂环境中的路径搜索能力。本文将该算法应用于二维无人机路径规划场景,综合考虑路径长度、能耗和障碍物避让等多个目标,通过多组仿真实验与典型算法对比验证了该方法的优越性与适应性。

本文主要贡献如下:

(1) 构建了面向无人机路径规划的多目标优化问题模型,其中考虑了路径长度、飞行能耗和避障安全性,确保飞行路径可行且安全。

(2) 提出了IFA算法,通过动态吸引度机制和自适应扰动策略,解决传统萤火虫算法后期种群多样性下降的问题,增强对路径全局搜索的能力。

(3) 设计了静态障碍物、动态障碍物和多目标任务三类实验,将IFA与A*算法、遗传算法和粒子群优化算法进行对比。实验结果表明,所提方法在路径长度、能耗和避障安全性方面表现较优。

1 无人机路径规划建模与目标函数设计

设无人机路径规划问题的任务区域为 Ω ,无人机起点

1. 山西工程科技职业大学 山西晋中 030619

[基金项目] 山西工程科技职业大学校级横向课题(2025HX08003)

为 P_s , 目标点为 P_g , 障碍物集合为 $\mathcal{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$, m 表示障碍物数量。规划路径 $\mathcal{P}$ 由 n 个连续航迹点构成, 记为 $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 。其中, $P_i = (x_i, y_i)$ 表示第 i 个航迹点的坐标, 且满足 $P_1 = P_s$, $P_n = P_g$ 。

模型的目标函数为:

$$\min J = \alpha_1 \cdot L + \alpha_2 \cdot E + \alpha_3 \cdot C \quad (1)$$

式中: L 表示路径总长度, E 表示 L 对应的能耗, C 表示 L 的避障成本, α_1 、 α_2 和 α_3 分别表示各项的权重系数, 满足公式:

$$\alpha_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1 \quad (2)$$

(1) 路径长度模型

路径长度是评价规划结果的基础指标之一, 直接影响飞行效率。路径长度 L 利用欧氏距离计算:

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} \|P_{i+1} - P_i\|_2 \quad (3)$$

(2) 综合能耗模型

无人机飞行能耗不仅与飞行距离有关, 还受到航迹转向和姿态调整等因素影响。因此综合能耗模型 E 除路径长度外加入了转向惩罚项:

$$E = \eta_1 \sum_{i=1}^{n-1} \|P_{i+1} - P_i\|_2 + \eta_2 \sum_{i=2}^{n-1} \theta_i \quad (4)$$

式中: η_1 表示单位飞行距离能耗系数, η_2 表示转向惩罚系数, θ_i 表示路径点 P_i 处的转向角。转向角由相邻路径段方向变化计算得到:

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{(P_i - P_{i-1}) \cdot (P_{i+1} - P_i)}{\|P_i - P_{i-1}\|_2 \|P_{i+1} - P_i\|_2} \right), i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (5)$$

式中: θ_i 采用弧度制表示。加入转向惩罚后, 路径会趋于转折少、变化缓的平滑路径, 从而降低频繁姿态调整带来的额外能耗。

(3) 避障成本模型

避障安全性确保优化结果是可行的无人机路径。为了避免航迹点过于接近障碍物, 评价函数中引入避障惩罚机制。

设航迹点 P_i 到障碍物集合 $\mathcal{O}$ 中最近障碍物 O_k 的距离为 d_i 。为避免 d_i 过小, 定义避障成本函数 C 为:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i + \varepsilon} \quad (6)$$

式中: ε 为极小正数, 避免分母为零。

(4) 约束条件

为了保证规划路径满足实际飞行要求, 路径优化必须满足多个约束条件:

(1) 边界约束

路径中的每个航迹点必须在 Ω 内, 其约束条件为:

$$X_{\min} \leq x_i \leq X_{\max} \text{ and } Y_{\min} \leq y_i \leq Y_{\max} \quad (7)$$

式中: (x_i, y_i) 表示航迹点 P_i 的坐标, $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 分别表示任务区域在横向和纵向上的边界范围。

(2) 障碍物约束

任意相邻航迹点 P_i 与 P_{i+1} 所构成的路径 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 均不得与障碍物区域发生相交, 该约束可表示为:

$$\overline{P_i P_{i+1}} \cap O_k = \emptyset, O_k \in \mathcal{O} \quad (8)$$

式中: $\emptyset$ 表示交集为空。

(3) 航程约束

路径长度不得超过无人机最大续航距离。

(4) 安全距离约束

航迹点与障碍物的距离 d_i 满足设定的安全距离 d_{safe} , 即:

$$d_i \geq d_{\text{safe}} \quad (9)$$

2 改进型萤火虫算法

2.1 算法流程

传统萤火虫算法具有参数少、实现简单等特点, 但在复杂路径规划问题中容易出现收敛速度下降以及局部寻优能力不足等现象。针对上述问题, 对算法搜索过程进行了改进。改进型萤火虫算法的基本流程如图 1 所示。

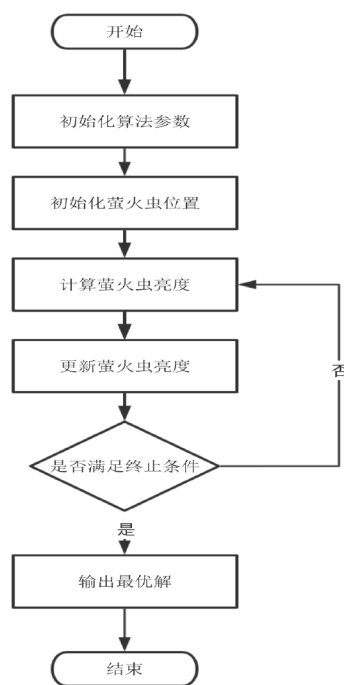


图 1 改进型萤火虫算法流程图

首先, 设定萤火虫算法的基本参数, 包括种群规模 N 、最大迭代次数 T 、初始吸引度 β_0 、光吸收系数 γ 以及随机扰动因子 α 等。然后, 在给定搜索空间内随机生成初始萤火虫种群, 每一个萤火虫个体对应一条候选飞行路径。

在种群初始化完成后, 根据目标函数计算各个个体的适应度值, 并进一步确定其亮度。对于路径规划中的最小化优化问题, 适应度值越小, 说明该路径在长度、能耗和避障安

全性等方面的综合表现越优。因此,个体亮度可定义为:

$$I(x) = \frac{1}{f(x) + \varepsilon} \quad (10)$$

式中: $f(x)$ 为适应度函数, ε 为防止分母为零的极小正数。由式(10)可知,适应度值越小,个体亮度越高,该个体对其他萤火虫的吸引作用也越强。

萤火虫之间的吸引度与个体距离有关。个体距离越大,光强衰减越明显,吸引作用也随之减弱。其吸引度计算公式为:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (11)$$

式中: β_0 表示初始吸引度, γ 表示光强吸收系数, r 表示两个萤火虫个体之间的距离。

在迭代过程中,低亮度的萤火虫会向高亮度的移动。其位置更新由当前位置项、吸引移动项和随机扰动项组成:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta(r_{ij})(x_j^t - x_i^t) + \alpha \varepsilon_t \quad (12)$$

式中: x_i^t 表示第 i 个萤火虫个体在第 t 次迭代时的位置, x_j^t 表示亮度较高个体 j 的位置, r_{ij} 表示个体 i 与个体 j 之间的距离。 α 表示随机扰动因子。随机扰动项可增加种群多样性,并防止算法过早收敛。

完成位置更新后,重新计算每个个体的适应度值和亮度后得到当前最优解。停止迭代并输出最优无人机飞行路径条件是达到最大迭代次数,或连续多次最优适应度变化小于设定阈值。

2.2 改进策略

无人机路径规划问题具有非线性和多约束特征。随着障碍物数量增加,环境复杂度提高。传统萤火虫算法在搜索过程中容易出现个体过早聚集、搜索范围收缩和陷入局部最优等问题。为增强算法在复杂环境中的路径搜索能力,IFA 从自适应扰动、动态吸引度、种群更新和适应度函数设计四个方面进行改进。

(1) 自适应扰动机制

传统萤火虫算法通常采用固定扰动因子。若扰动因子过大,算法后期容易在最优区域附近震荡。若扰动因子过小,算法前期搜索范围不足,而且全局寻优能力也会受到限制。

为解决上述问题,算法引入随迭代次数变化的自适应扰动因子。其表达式为:

$$\alpha_t = \alpha_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^\kappa \quad (13)$$

式中: α_0 为初始扰动系数, t 为当前迭代次数, T 为最大迭代次数, κ 为扰动衰减指数因子。

这一改进可以提高解的精度和算法收敛稳定性。在迭代初期保持较大的随机搜索范围,增强解空间探索能力。随着迭代推进,扰动幅度逐渐减小时,搜索范围缩小,个体可以在最优解附近稳定地局部搜索。

(2) 动态吸引度调整

无人机路径规划问题中,路径搜索受障碍物分布的影响。传统萤火虫算法中吸引度与个体间距离成正比。但在局部区域障碍物较密集时,为避障需调整搜索方向。因此动态吸引度模型 $\beta(r, \rho)$ 引入了障碍物密度:

$$\beta(r, \rho) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \cdot (1 + \lambda \rho) \quad (14)$$

式中: β_0 表示初始吸引度, γ 表示光吸收系数, r 表示萤火虫个体之间的距离, ρ 表示当前局部区域的障碍物密度, λ 表示环境调节系数。

(3) 种群更新策略

传统萤火虫算法随着迭代次数增加,萤火虫个体会逐渐集中到某一局部区域,导致搜索多样性会下降。此时,算法容易出现搜索停滞,甚至陷入局部最优。为保证搜索多样性,IFA 采用精英保留与种群重构相结合的更新策略。

在每轮迭代中,保留当前最优个体,以避免优质解在更新过程中被破坏。同时,当种群连续多代未获得明显改进时,对部分适应度较差的个体进行随机替换或局部重构。种群重构的触发条件为:

$$\sigma_X < \sigma_{\min} \text{ and } \Delta I < \varepsilon_I \quad (15)$$

式中: σ_X 表示种群位置方差,用于衡量个体分布的离散程度; $\sigma_{\min}$ 表示预设方差阈值,当 σ_X 小于该阈值时,说明种群个体过度聚集; ΔI 表示连续两次迭代之间最优亮度的变化量; ε_I 表示亮度变化阈值。

(4) 适应度函数设计

为综合评价规划路径的飞行效率、能耗水平和避障安全性,IFA 采用加权求和方式构建适应度函数。对于候选路径 x ,其适应度函数定义为:

$$f(x) = w_1 L(x) + w_2 E(x) + w_3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i(x) + \varepsilon} \quad (16)$$

式中: $L(x)$ 为路径长度, $E(x)$ 为路径对应的能耗代价, $d_i(x)$ 为路径中第 i 个航迹点与最近障碍物的距离, w_1 、 w_2 、 w_3 为各目标对应的权重系数。

该适应度函数考虑多目标优化,确保规划路径综合最优。

3 实验设计与结果

3.1 实验参数设置

为验证 IFA 在解决无人机优化问题的性能,其与 A* 算法、GA 和 PSO 进行了比较。为减少外部因素对结果的影响,保证算法比较的公平性,各算法均在相同硬件平台下运行。具体参数设置如表 1 所示。萤火虫算法的种群规模、初始吸引度、光吸收系数和随机扰动因子等参数的设定参考文献的常用。同时,结合多次预实验结果进行调整。为保证对比实验的公平性,减少种群数量差异对算法性能比较的影响,GA 和 PSO 采用与萤火虫算法相同的种群规模。

表 1 参数设置

参数	数值	说明
萤火虫个体数	50	群体中的萤火虫个体数量
最大迭代次数	200	算法停止条件之一
吸引度初始值 β_0	1	初始吸引力值
光强吸收系数 γ	1	控制吸引力随距离的衰减速度
随机移动系数 α	0.2	控制萤火虫的随机性
遗传算法种群大小	50	与萤火虫算法的个体数一致
PSO 粒子数	50	与萤火虫算法的个体数一致
A* 算法启发函数	曼哈顿距离	基于节点之间的直线距离

3.2 性能指标

为比较不同算法的路径规划效果，本文选取路径长度、计算时间、能耗水平和避障安全性作为评价指标。

- (1) 路径长度 L ：最优路径的总距离，单位：m。
- (2) 计算时间 T ：算法从开始到找到最优路径所需的时间，单位：s。
- (3) 能耗 E ：根据无人机的飞行距离和速度估算的能量消耗，单位：J。
- (4) 避障性能 $D_{\min}$ ：无人机在飞行过程中与最近障碍物之间的最小距离，确保安全。

3.3 实验结果

- (1) 静态障碍物环境
- 在静态障碍物场景中，障碍物位置保持不变，各算法测试结果如表 2 所示。

表 2 静态障碍物环境数据对比

算法	路径长度 L/m	计算时间 T/s	能耗 E/J	最小避障距离 $D_{\min}/\text{m}$
A*	145.2	0.3	3 200	0.8
GA	142.8	1.7	3 100	1.2
PSO	140.5	1.5	3 050	1.3
IFA	138.7	1.3	2 980	1.5

由表 2 可见，A* 算法的求解速度较快，计算时间为 0.3 s，但其生成路径相对较长。GA 和粒子群优化算法 PSO 在路径长度上有所改善，但计算开销明显增加。相比之下，IFA 获得了最短飞行路径和最低能耗。与 A* 算法相比，IFA 的路径长度由 145.2 m 降至 138.7 m，降幅约为 4.5%；能耗由 3 200 J 降至 2 980 J。同时，IFA 的最小避障距离为 1.5 m，高于其他算法。结果表明，在静态环境下，动态吸引机制有助于算法更好地协调路径长度与安全距离之间的关系。

- (2) 动态障碍物环境
- 为进一步考察算法对环境变化的适应能力，本文在场景中加入动态移动障碍物。实验结果如表 3 所示。

表 3 动态障碍物环境数据对比

算法	路径长度 L/m	计算时间 T/s	能耗 E/J	最小避障距离 $D_{\min}/\text{m}$
A*	158.3	0.5	3 400	0.5
GA	150.7	2.0	3 250	0.8
PSO	148.2	1.9	3 190	1.0
IFA	145.6	1.6	3 120	1.3

与静态环境相比，各算法的路径长度和能耗均有所增加。其中，A* 算法受环境影响明显，最小避障距离仅为 0.5 m。GA 和 PSO 虽然改善了路径质量，但计算时间均超过 1.9 s。

IFA 相比其他算法在复杂环境下表现稳定。其路径长度为 145.6 m，较 A* 算法缩短约 8%；能耗降低约 280 J；最小避障距离提高至 1.3 m。原因是 IFA 的动态吸引度可根据局部环境变化调整搜索方向。

- (3) 多目标路径规划
- 在多目标路径规划中，规划路径需要满足多个优化目标。实验结果如表 4 所示。

表 4 多目标路径规划数据对比

算法	路径长度 L/m	计算时间 T/s	能耗 E/J	最小避障距离 $D_{\min}/\text{m}$
A*	210.0	1.1	4 800	0.6
GA	205.7	4.3	4 700	1.0
PSO	202.3	3.8	4 620	1.2
IFA	198.5	3.1	4 500	1.4

随着任务复杂度增加，各算法的计算时间均有所增长。A* 算法能够较快获得可行解，但其整体路径优化能力有限。GA 和 PSO 可进一步缩短路径长度，但需要更多迭代过程，计算开销也相应增加。

IFA 的路径长度 198.5 m 和能耗值 4 500 J 相比各算法较优。其最小避障距离达到 1.4 m，表明算法在满足多目标访问要求的同时可以保障规划路径的安全性。

4 结论

本文围绕无人机路径规划中的路径长度、飞行能耗和避障安全性问题，建立了多目标路径优化模型，并在传统萤火虫算法基础上提出改进方法 IFA。IFA 主要从扰动机制、吸引机制和种群更新三个方面进行调整，以缓解标准萤火虫算法在后期搜索中容易收敛停滞和陷入局部最优的问题。评估实验分别设置了静态障碍物、动态障碍物和多目标任务三类场景。实验结果显示，与 A* 算法、遗传算法和粒子群优化算法相比，IFA 在路径长度、能耗控制和避障安全性方面均取得了更优或较稳定的结果。说明该方法能够在一定程度上兼顾路径效率、飞行能耗和安全避障需求，可为复杂环境下的无人机路径规划提供参考。

Unity 调用动态链接库方法研究

赵 鹏¹ 孔璐璐¹ 卢亚飞¹
ZHAO Peng KONG Lulu LU Yafei

摘 要

针对 Unity 工业应用场景中动态链接库调用的需求,文章在分析不同类型动态链接库差异的基础上,系统梳理了 Unity 调用托管与非托管动态链接库的技术路径与实践案例;通过实验量化分析了 64 位操作系统下调用 32 位动态链接库的延时等性能瓶颈,并提出了有效的性能改进方案,为 Unity 与第三方硬件/软件的高效集成提供了技术参考。

关键词

Unity 引擎;动态链接库;托管代码;非托管代码

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.009

0 引言

Unity 是一款优秀的三维引擎,在游戏、交互式三维仿真等领域得到了广泛的应用,其具备强大的渲染能力,丰富的生态资源^[1-2]。但其在工业应用领域等对需要读取或控制硬件信息的场合,往往要通过动态链接库的方式调用相关软件的实时数据或仿真计算结果以驱动场景中渲染对象的状态更新。这时,需要通过 Unity 调用第三方软件的动态链接库^[3]。

动态链接库(DLL)是 Windows 系统中实现代码复用与功能模块化的核心组件,广泛应用于硬件驱动、算法封装、

第三方工具集成等场景。Unity 作为当前主要三维仿真和游戏引擎,在许多场合需要通过动态链接库(DLL)调用外部程序数据以实现实时场景驱动、仿真计算等功能。而随着操作系统的不断变化,动态链接库的格式和调用方式也在不断变化,从一定程度上导致动态链接库调用失败,严重影响开发进度。本文从调用角度分析不同版本动态链接库的区别和调用方法,使其能够快速完成 Unity 与外部软件的交互过程,加快开发进度。

1 动态链接库分类

Windows 平台下,动态链接库分为 32 位和 64 位,还分

1. 陆军兵种大学郑州校区 河南郑州 450052

参考文献:

- [1] 符昌昊,高荧荧,许秀英.无人机在农作物检测领域应用现状及展望[J].现代化农业,2025(1):88-90.
- [2] 陈丹,徐天枢,马园园,等.复杂城市低空物流无人机任务协同动态分配[J/OL].航空学报,1-22[2026-06-22].<https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251017.1512.016>.
- [3] 伍刚.无人机在公共安全领域的创新应用[J].中国安防,2024(9):19-23.
- [4] 张延德.基于无人机倾斜摄影测量的露天煤矿灾害风险评估[J].中国矿山工程,2025,54(5):80-86.
- [5] 蒋文全,高豪云,郑佳秋,等.无人机在民用行业应用研究综述[J].机电工程技术,2025,54(9):119-124.
- [6] 张梦婷,张军,何承烽.元启发式算法研究综述[J/OL].计算机工程与应用,1-16[2026-06-22].<https://link.cnki.net/urlid/11.2127.TP.20250910.1253.002>.
- [7] 代进进,戢治洪,李季颖,等.基于改进遗传算法的多无人机协同搜索方法[J/OL].指挥控制与仿真,1-7[2026-06-22].

<https://link.cnki.net/urlid/32.1759.tj.20251113.1131.002>.

- [8] 卢秀丽,安娟华,冀松,等.基于粒子群优化的 WSN 多目标 3D 无人机运动规划[J].传感器与微系统,2025,44(11):153-158.
- [9] 胡佳伟,张佳伊,裴庆雨.一种基于改进蚁群算法的无人机路径规划方法[J].无线电工程,2025,55(10):2105-2113.
- [10] 郭志军,王远,王丁健,等.移动机器人反馈式步长萤火虫算法全覆盖路径规划研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2025,39(4):148-156.

【作者简介】

刘晓波(1995—),男,山西大同人,博士研究生,讲师,研究方向:人工智能、深度学习、强化学习、优化算法和计算机视觉等。

刘海芳(1989—),女,山西晋中人,博士研究生,副教授、讲师,研究方向:混沌电路、随机数产生、图像处理等。

(收稿日期:2025-12-01 修回日期:2026-07-13)