

基于改进蚁群算法和共用航段的搜索救援通道规划

沈 堤¹, 张仁猛¹, 齐 铎¹, 余付平¹, 韩海龙²

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 73602 部队, 南京, 211100)

摘要 针对战斗搜救任务场景中, 空中搜索救援等待区至跳伞区之间的往返路径规划问题, 提出一种基于改进蚁群算法和共用航段的搜索救援通道规划方法。首先, 针对基本蚁群算法易出现局部极值及收敛速度慢等缺点, 对启发函数、状态转移策略、信息素更新策略进行了改进。然后, 针对单起点多目标点的路径规划问题, 提出了设置分航点以生成共用航段的搜索救援通道规划方法, 并以总路径长度表征任务准备负荷量与分别规划航路进行对比。实验结果表明, 在本文测试环境下, 改进蚁群算法规划的路径长度分别缩减 15.4% 和 14.2%, 搜索救援通道的任务准备负荷量减少 25.4%。所提出的搜索救援通道规划方法有一定的理论和应用价值。

关键词 蚁群算法; 战斗搜救; 搜索救援通道规划; 共用航段

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.008

中图分类号 TP18; E844 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0048-08

A Search and Rescue Channel Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm and Shared Flight Segment

SHEN Di¹, ZHANG Renmeng¹, QI Duo¹, YU Fuping¹, HAN Hailong²

(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Unit 73602, Nanjing 211100, China)

Abstract The round-trip path planning problems remaining between the air search and rescue waiting area and the parachute jump area in the combat search and rescue mission scenario, a search and rescue channel planning method is proposed based on the improved ant colony algorithm and shared flight segments. First, in view of the shortcomings of the basic ant colony algorithm, such as local extreme values and slow convergence speed, the heuristic function, state transition strategy, and pheromone update strategy are improved, and its path planning performance is verified. And then, for the path planning problem of single starting point and multiple target points, a search and rescue channel planning method is proposed to set branch points to generate shared flight segments. The total path length is used to represent the mission preparation load and compared with separately planned routes. The experimental results show that in the test environment of this article, the path length planned is reduced by 15.4% and 14.2% respectively by the improved ant colony algorithm, and the task preparation load of the search and rescue channel is reduced by 25.4%. The proposed search and rescue channel planning method has a certain theoretical and ap-

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(62303489)

作者简介: 沈 堤(1983-), 男, 湖南浏阳人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为空域规划与管理。E-mail: shendi1103@163.com

引用格式: 沈堤, 张仁猛, 齐铎, 等. 基于改进蚁群算法和共用航段的搜索救援通道规划[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 48-55. SHEN Di, ZHANG Renmeng, QI Duo, et al. A Search and Rescue Channel Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm and Shared Flight Segment[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 48-55.

plication value.

Key words ant colony algorithm; combat search and rescue; search and rescue channel planning; shared flight segments

在现代战争的战斗搜救行动中,执行直接救援任务的航空器仍以直升机为主^[1]。外军战斗搜救行动的大量案例表明,己方作战飞机坠毁后,抢在敌军组织兵力搜捕坠机幸存人员之前出动战斗搜救力量,可大幅提高营救成功率。根据美军战斗搜救条令,战斗搜救任务的实施有 3 个主要阶段:搜索、压制和执行^[2]。在执行阶段之前,搜救直升机一般位于敌方高威胁区外等待。因此,有必要在作战行动展开前,为搜救直升机规划空中搜索救援等待空域,提高战斗搜救行动的响应速度。美军执行作战任务前,通常会在战场区域内设置航路点、搜索救援点,幸存人员可通过救生设备等获取搜救点信息,战斗搜救部队可通过搜救点和幸存人员与搜救点的位置关系进行搜索定位。因此,以搜索救援点为中心,为作战飞机预先规划跳伞区,可使飞机受损时,飞行员能更有目的地跳伞求生,同时有利于战斗搜救部队定位坠机幸存人员。

为合理优化部署有限的战斗搜救力量,在规划搜索救援空域时,规定同一个搜索救援等待区负责保障相对集中或同一方向上的多个跳伞区。确定搜索救援等待区与跳伞区后,应规划由搜救等待区与其负责保障的跳伞区之间的往返路径,本文将该路径定义为搜索救援通道。搜索救援通道的规划本质是多目标点的航路规划问题,需要解决的关键问题是航路交叉、间距过小,以及由此引发的机组任务准备负荷大、存在潜在飞行冲突等问题。

当前关于多目标点的航路规划问题,可以分为两类:一类是多起点至多目标点的多航路规划,此类研究着重考虑多机协同规划的问题,多以消解航线冲突、提高任务效率为目的,如文献[3~6];另一类是单起点至多目标点的航路规划,此类研究注重从单起点出发遍历多目标点的研究,类似于旅行商问题,如文献[7~8]。路径规划的智能优化算法主要包括粒子群算法、蚁群算法、遗传算法等^[9]。搜索救援通道规划与一般航路规划之间有一个重要区别,一般航路规划问题是以航空器数量为基础考虑规划航路,搜索救援通道规划则是以空域数量为基础考虑规划航路,即规划搜索救援通道是为了连通多个空域,而不是单独为某架航空器规划航路。

为解决搜索救援通道规划的关键问题,提高搜索救援通道运行效率,减轻机组准备负担,降低飞行冲突产生概率,提出基于改进蚁群算法和共用航段的搜索救援通道规划方法。首先对基本蚁群算法进

行改进,测试改进算法路径规划性能。其次,设置航路分航点,生成共用航段。然后,运用改进蚁群算法规划分航点至多个目标点的航路。最后,基于 3 次 B 样条曲线方程对航路进行平滑处理,共用航段与平滑优化后的航路组合,即为搜索救援通道。通过仿真实验,以航线总长度表征机组准备工作量,对比搜索救援通道与分别规划航路的任务准备负荷,利用可视化航路比较飞行冲突,体现规划搜索救援通道的合理性及优势。

1 规划空间建模

1.1 影响因素分析

在战斗搜救行动中,搜救直升机多以低空、超低空接近坠机幸存人员,因此规划搜索救援通道参考低空突防的航路规划考虑因素,主要有以下几点:

一是对航空器机动性能要求,规划出的航路对航空器在转弯角度、坡度等方面的限制,限制越多航路可飞性越差。

二是通信导航监视覆盖率,我方通信导航监视等装备对规划出的航路覆盖率越高,越有利于飞行安全及指挥机构对搜救直升机进行指挥控制,在任务变更及出现紧急状况时能迅速做出反应。

三是地形障碍,低高度地面起伏影响规划航路的高度变化,高高度地形则视为障碍绕行,规划航路时重点处理高高度地形障碍。

四是恶劣气象条件影响,如低空风切变、雷暴区等,规划时应当避免通过此类区域。

五是航路长度,规划的航路越长飞行时长越久,对于时间敏感性较高的战斗搜救行动来说,路径越短用于救援的时间就相对越充裕,且在敌方防空火力范围内暴露或遭受打击的概率越小,规划时应以航路最短为主要目标。

综合以上影响搜索救援通道规划的因素,将地形障碍、恶劣气象条件、敌方防空火力等设为禁飞区,规划航路时规避此类区域,在规划搜索救援通道时采用以寻找最短路径为目标的蚁群算法,并运用 3 次 B 样条曲线方程平滑航路以减少规划出的航路对航空器机动性能的限制,提高航路可飞性。

1.2 规划空间模型

本文采用蚁群算法较为常用的栅格法进行搜救直升机执行任务的二维环境建模。栅格法是将二维平面地图转化为一组栅格构成的栅格地图。栅格

地图由取值为二进制的 0 和 1 矩阵构成,矩阵中 0 代表自由栅格,直升机可自由进出,用白色栅格表示,1 代表禁飞栅格,直升机需要绕行前进,用黑色栅格表示。在栅格地图中对横向纵向分别顺序编号,栅格序号与直角坐标 (x_i, y_i) 的对应关系如式 (1) 所示,以栅格中心点坐标表示该栅格直角坐标^[10]。

$$\begin{cases} x_i = r [\text{mod}(i, L) - 0.5] \\ y_i = r [L + 0.5 - \text{ceil}(i/L)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 表示单个栅格的尺寸; i 表示栅格序号; L 表示栅格矩阵的行数; mod 表示求余运算; ceil 表示向上取整运算。

为有效避免直升机进入禁飞区,对禁飞区进行膨化处理,出现不规则形状禁飞区时,将其涉及的栅格全部填充为完整栅格,直升机在栅格地图中以质点表示。栅格地图及数字编码如图 1 所示。

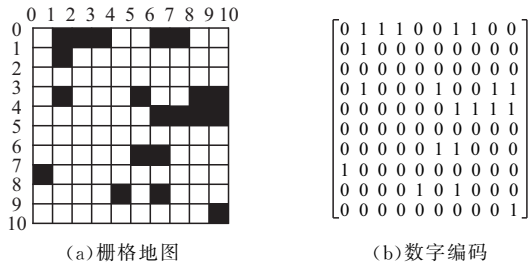


图 1 栅格地图及数字编码示例

直升机在栅格地图中移动规则如下:①直升机只能在白色栅格内移动,黑色栅格不能穿越,但可由白色栅格穿过黑色栅格顶角。②直升机不能重复通过同一个栅格。③单位时间内,直升机只能在相邻的栅格之间移动,即下一时刻直升机只能出现在包围当前栅格的 8 个栅格内,且只在栅格中心点间移动,如图 2 所示。采用欧式距离度量路径长度,若直升机在水平和垂直方向移动,则路径长度为 1 个单位,若以与水平或垂直方向夹角 45° 斜向移动,则路径长度为 1.41 个单位。

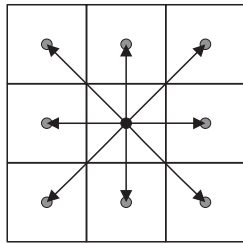


图 2 移动方向限制

2 基本蚁群算法及改进策略

2.1 基本蚁群算法

蚁群算法是一种受蚂蚁种群觅食行为启发的优化算法。在该算法中,每只蚂蚁都会在其移动路径

中释放信息素,以向整个种群传递信息。信息素的浓度与路径的长度成反比,即路径越短,信息素浓度越高。因此,蚂蚁选择路径的概率与信息素浓度成正比,从而形成了蚂蚁寻找最短路径的正反馈机制^[11]。

基本蚁群算法的状态转移概率,即在 t 时刻,蚂蚁 h 从栅格 i 移动到栅格 j 的概率可用下式表示:

$$P_{ij}^h(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in A_h} \tau_{is}^\alpha(t)} \eta_{is}^\beta, & s \in A_h \\ 0, & s \notin A_h \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 和 β 分别为信息素与距离启发函数的权重; A_h 表示下一时刻蚂蚁可选择的节点集合; τ_{ij} 表示移动路径上的信息素浓度; η_{ij} 表示距离启发因子,通常为节点 i 和 j 之间的距离倒数。

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

信息素更新公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{h=1}^m \Delta\tau_{ij}^h \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{ij}^h = \begin{cases} Q/L_h, & \text{当蚂蚁 } h \text{ 在本次周游经过}(ij) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 为蚂蚁数目; ρ 为信息素挥发系数; $\Delta\tau_{ij}$ 表示本次迭代边 (ij) 上信息素增量; $\Delta\tau_{ij}^h$ 表示蚂蚁 h 本次迭代留在边 (ij) 上信息素量; L_h 表示蚂蚁 h 本次周游路径长度; Q 为信息素增强系数。

2.2 蚁群算法的改进

由于蚁群算法易出现局部极值,以及收敛速度慢等固有缺陷。通过增加动态调节因子,促进算法初期距离启发函数的引导作用,加快算法收敛速度;对状态转移概率函数的改进,一方面是为了加快算法前期收敛,另一方面改善算法后期容易陷入局部最优的情况;对信息素更新的改进,则是为了在扩大蚁群搜索路径范围的同时,提高算法收敛速度^[12-13]。

2.2.1 改进启发函数

为了改善基本遗传算法初始阶段没有信息素留存造成蚂蚁选择路径没有目的性,基于文献[14]中改进的距离启发函数,增加动态调节因子 δ 。在迭代初期由于信息素较少时,该因子可促进距离启发函数发挥主导作用,随着迭代次数增加,各路径上逐步积累信息素,在信息素累积到一定量时,调节因子会减弱距离启发函数的引导作用,使得蚂蚁选择路

径时更倾向于依赖路径上积累的信息素。改进的距离启发函数如下:

$$\eta_{ij} = \frac{1}{(d_{ij} + d_{jE})^2} \delta \quad (8)$$

$$\delta = \begin{cases} \exp\left(-\frac{5I}{I_{\max}}\right) & I \neq I_{\max} \\ 1/I_{\max} & I = I_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_{jE} 是节点 j 与目标点的欧几里得距离; δ 是动态调节因子; I 为当前迭代次数; I_{\max} 为最大迭代次数。

2.2.2 改进状态转移策略

基本蚁群算法中,蚂蚁主要通过状态转移概率函数来选择下一个节点,但是在算法的初始阶段,路径信息素浓度之间的差距很小,无法有效地引导蚂蚁选择路径。在初始转移概率的基础上,通过引入伪随机规则的方法,可以确保算法在前期收敛速度上的表现。蚂蚁根据以下公式选择下一个节点 j [15]。

$$P_{ij}^h(t) = \begin{cases} \max\{(\tau_{is})^\alpha (\eta_{jE})^\beta\}, & q < q_0 \\ P_{ij}^h(t), & q \geq q_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: q 表示 $(0,1)$ 之间的随机数; q_0 为设计参数, q_0 的值较大,则路径转移更可能是确定性模式,收敛速度加快,但降低了全局搜索能力。如果 q_0 的值很小,路径转移更倾向于轮盘赌模式,从而增加了全局搜索的随机性。合理设置 q_0 可以改善算法初期收敛慢和后期容易陷入局部最优的情况,这里将 q_0 设计为一个会根据迭代次数变化的动态参数。具体如下所示:

$$q_0 = 0.25 \left[\exp\left(-\frac{1}{I}\right) \right]^{-1} \quad (11)$$

2.2.3 信息素更新改进

采用文献[16]提出的信息素挥发因子自适应更新策略:

$$\rho(t+1) = \frac{I_{\max}}{I_{\max} + I \exp[1 - \rho(t)]} \quad (12)$$

在算法初期,挥发因子 ρ 对蚂蚁搜索路径的干预较小,数值不应设置过小,随着迭代次数增加, ρ 的取值逐渐减小,此时路径上信息素累积量增大,对蚂蚁选择路径引导作用强,迭代次数到一定程度时,蚁群将汇聚在信息素含量较高的路径上。这种改进方法可以扩大蚁群搜索路径的范围,提高算法收敛速度。 ρ 的变化曲线如图 3 所示(初始 $\rho=0.80$)。

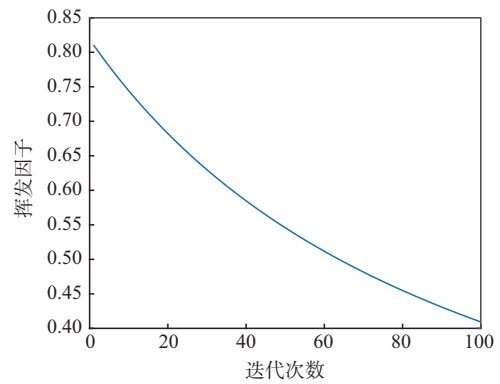


图 3 信息素挥发因子变化曲线

通过上述改进,得到用于直升机二维航路规划的改进蚁群算法,总体流程如图 4 所示。

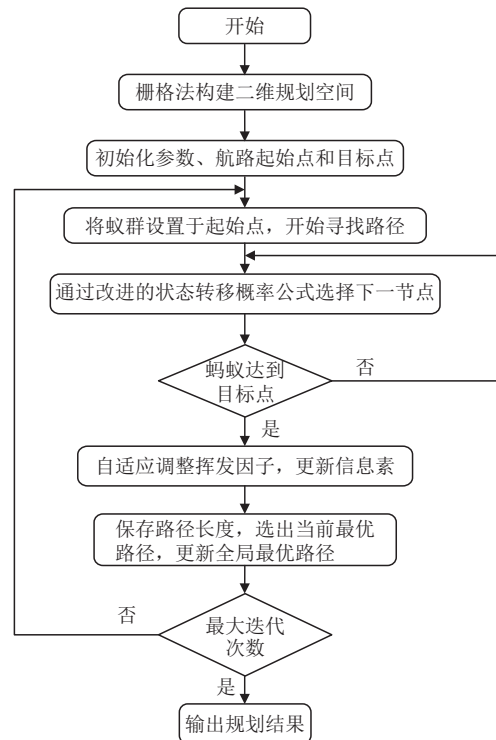


图 4 改进蚁群算法航路规划流程

2.3 航迹平滑方法

改进蚁群算法生成的直升机航路不够平滑,存在不利于实际飞行的拐点、折点。为优化航路使其更具可飞性,降低飞行员操作难度,引入 3 次 B 样条曲线平滑航迹。采用文献[17]给出的 3 次 B 样条曲线方程。具体数学表达式如下:

B 样条曲线总方程为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^k P_i F_{i,k}(t) \quad (13)$$

式中:

$$F_{i,k}(t) = \frac{1}{k!} \sum_{m=0}^{k-i} (-1)^m C_{k+1}^m (t+k-i-m)^k \quad (14)$$

当 $k=3$ 时,可得 3 次 B 样条曲线的基函数:

$$\begin{cases} F_{0.3}(t) = \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ F_{1.3}(t) = \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ F_{2.3}(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \\ F_{3.3}(t) = \frac{1}{6}t^3 \end{cases} \quad (15)$$

将 3 次 B 样条曲线的基函数代入 B 样条曲线总方程可换算出 3 次 B 样条曲线方程:

$$P(t) = P_0 F_{0.3}(t) + P_1 F_{1.3}(t) + P_2 F_{2.3}(t) + P_3 F_{3.3}(t) \quad (16)$$

基于上述的 3 次 B 样条曲线方程可对曲线进行平滑处理。图 5 为局部路径平滑结果仿真示意图,红色折线为待平滑路径,蓝色虚线为平滑结果。该策略的目标是在拐点附近,以曲线代替折线,使得到的路径更加平滑,更加符合直升机飞行实际。

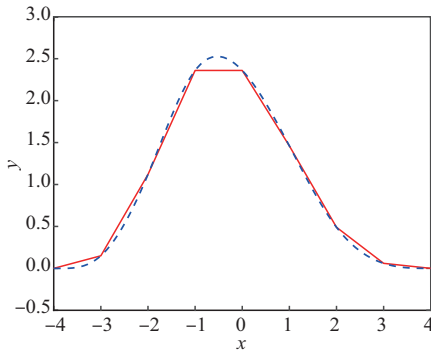


图 5 局部路径平滑结果仿真示意图

3 改进算法测试

采用 Matlab 进行仿真测试,基础参数设置如表 1 所示。

表 1 蚁群算法基础参数设置

参数名称	蚂蚁的数量 m	信息素浓度因子 α	期望启发因子 β	信息素浓度 Q
参数值	50	1	7	1

3.1 性能测试

为验证本文改进蚁群算法的寻优能力,首先利用典型的单模态测试函数 Sphere 和多模态测试函数 Alpine 进行寻优对比测试,2 个函数的维度值为 30, Sphere 取值范围 $[-100, 100]$, Alpine 的取值范围是 $[-10, 10]$,理论上可达到的最小值都是 0。2 种函数表达式分别如下所示:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (17)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n |x_i \sin(x_i) + 0.1x_i| \quad (18)$$

使用基本蚁群算法 (basic ant colony algorithm, BACA) 和本文改进的蚁群算法 (improved ant colony algorithm, IACA) 在各个测试函数上独立运行 20 次,算法共有参数保持一致。结果如表 2 所示。

表 2 测试函数结果对比

函数名称	算法	平均值	最差值	最优值
Sphere	BACA	2.43E-6	2.98E-5	7.92E-14
	IACA	7.64E-82	6.49E-69	0
Alpine	BACA	5.43E-2	1.21E-1	9.84E-3
	IACA	6.99E-79	2.14E-66	0

由表 2 的测试实验结果可知,本文提出的 IACA 算法具有较好的寻优效果,对 Sphere 函数和 Alpine 函数都可以搜索得到理论的全局最优值。

3.2 路径规划对比测试

为验证 IACA 算法在直升机航路规划中的有效性,将 BACA 作为对比算法,在 20×20 和 30×30 2 种不同环境地图中进行仿真对比实验。

3.2.1 20×20 仿真环境

在 20×20 的栅格地图中进行仿真实验,起点为地图左上角,目标点为地图右下角。分别利用 BACA 算法和 IACA 算法对直升机进行规划,最大迭代次数为 100。算法路径规划图与算法迭代收敛曲线如图 6、7 所示。实验结果如表 3 所示。

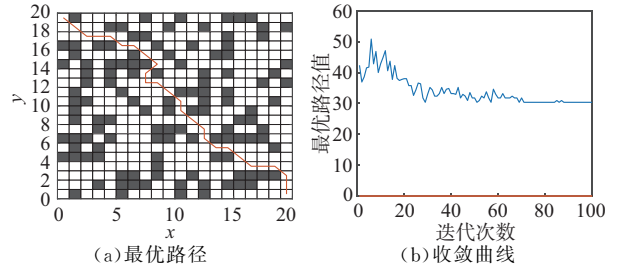


图 6 BACA 路径规划

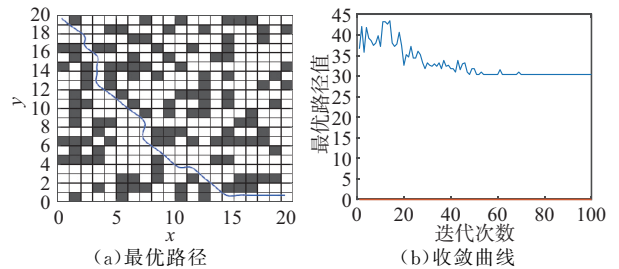


图 7 IACA 路径规划

表 3 20×20 仿真环境实验对比

算法名称	路径长度	运行时间/s	运行栅格数目	收敛迭代次数
BACA	36.04	4.62	32	62
IACA	30.47	3.97	26	46

由表 3 可知,应用本文提出的 IACA 算法得到的最短路径长度比应用 BACA 算法得到的最短路径长度分别缩短了 15.4%,运行时间减少了 14.1%。

3.2.2 30×30 仿真环境

当直升机运行环境较大且禁飞区分布较为密集时,应用 30×30 地图中 BACA 算法与 IACA 算法中 100 次的迭代次数进行直升机航路规划时均无法有效收敛至最短路径,将最大迭代次数增加至 300,规划出的最优路径与收敛曲线如图 8、9 所示。由表 4 可知,应用 IACA 算法得到的最短路径比 BACA 算法缩短了 14.2%,系统运行时间分别减少了 8.7%。

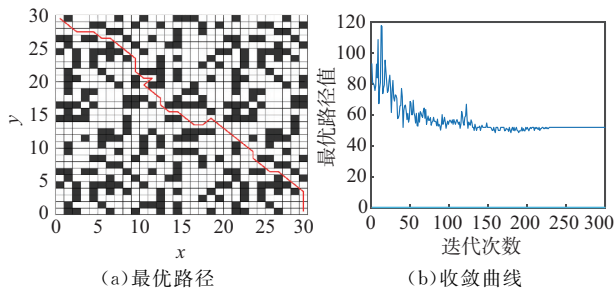


图 8 BACA 路径规划

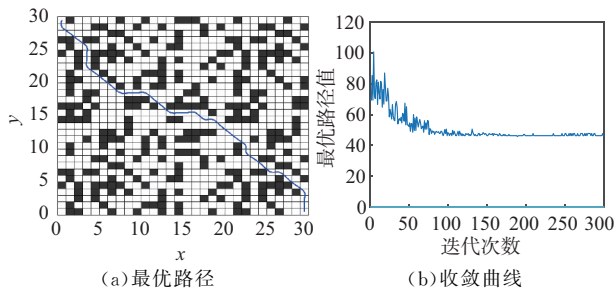


图 9 IACA 路径规划

表 4 30×30 仿真环境实验对比

算法名称	路径长度	运行时间/s	运行栅格数目	收敛迭代次数
BACA	53.19	64.15	43	211
IACA	45.62	58.59	38	150

4 搜索救援通道规划

前文对搜索救援通道的规划问题进行了分析,指出规划搜索救援通道的关键在于解决因搜索救援等待区与跳伞区的保障责任分配而造成的航路间距过小、交叉等问题。由于受损飞机运动距离有限,因此跳伞区的保障距离有限,进入敌方纵深越长,跳伞区总数量越多,前述问题越明显。因此,分别规划搜索救援等待区至其负责的跳伞区之间的航路不利于战斗搜救机组任务准备,当多个等待区出现救援需求时,还可能产生飞行冲突,不利于空域整体运行。

搜索救援通道的规划可分为 3 个步骤:一是根据起始点、目标点和禁飞区分布状况,设计共用航段;二是运用改进蚁群算法规划由分航点至各目标点的航路;三是采用 3 次 B 样条曲线方程对航路进行平滑优化,使规划结果更加符合飞行实际且更具

可操作性。通过比较分别规划航路与规划含共用航段的搜索救援通道,验证规划搜索救援通道的合理性及优势。图 10 为分别规划航路与规划搜索救援通道的对比示意图。

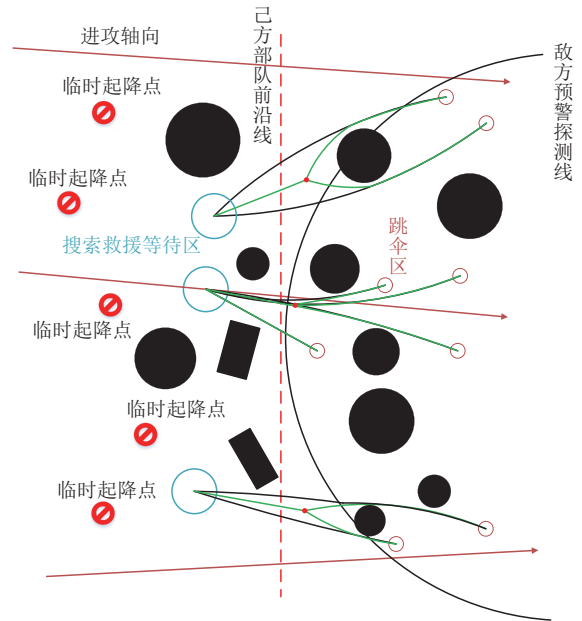


图 10 分别规划航路与规划搜索救援通道对比示意图

图中,蓝色圆圈为搜索救援等待区,红色圆圈为跳伞区,黑色实心区域表示对直升机有安全威胁的禁飞区,黑色连线表示由搜索救援等待区至跳伞区分别规划的航路,绿色连线表示搜索救援通道。

4.1 共用航段设计

本文共用航段的设计思路,参考民航机场终端区空域程序设计方面相关研究,这些研究中均以不同形式为航空器设置了共用航段。如文献[18~19]研究基于点融合系统的多目标进场排序与调度问题、进场程序设计问题,文献[20]研究低空物流无人机飞行计划调配问题,目的都是为了合理安排航空器在进离场次序,减少飞行冲突,提高空域整体运行效率。

为了提高搜索救援通道的整体运行效率,减轻搜救机组任务准备负荷,减少潜在飞行冲突。本文提出设置分航点作为一类报告点,连接起始点与分航点形成共用航段,以分航点为起始点规划至多目标点的航路,形成飞行冲突较小、脉络清晰的搜索救援通道。

分航点选取的规则设置如下:

- 1)以直线分别连接起始点(搜索救援等待区中心)至各目标点(跳伞区中心,数量为 n),形成 n 条直线段,若存在直线段夹角小于 30° ,则假设共用航段存在。
- 2)计算目标点扩展角 φ , φ 为起始点与第 1 个

目标点 T_1 连线与小于 30° 且角度最大的目标点 T_n 连线之间的夹角。以起始点为起点,作扩展角 φ 的角平分线,记为虚拟航路,共用航段位于虚拟航路上。

3)在虚拟航路上,按照一定间隔取虚拟航路点,选取虚拟航路点时应避免落入禁飞区,尽量在禁飞区之前选取,计算起始点与虚拟航路点之间的距离,记为 D_0 ,虚拟航路点至各目标点规划航路的长度分别记为 D_1, D_2, \dots, D_n ,记 $D = D_0 + D_1 + \dots + D_n$ 为规划航路总长度,比较选取不同虚拟航路点下的航路总长度值 D ,当 D 取最小值时,对应的虚拟航路点即为分航点,记为 P_i 。起始点至 P_i 连线即为本文所指的共用航段。将共用航段与分航点以后规划的航路组合即为搜索救援通道,若有夹角大于 30° 的目标点,则直接规划起始点至该目标点的航路,并纳入搜索救援通道。共用航段与分航点的选取方法如图 11 所示。

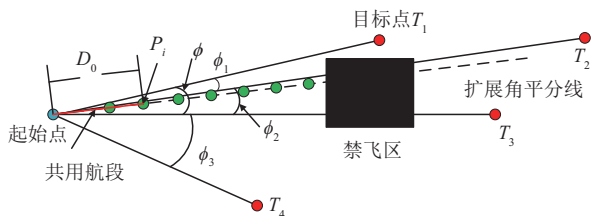


图 11 分航点选取与共用航段生成示意图

图中,起始点为某一个搜索救援等待区中心点,目标点 T_1, T_2, T_3, T_4 分别为该搜索救援等待区负责保障的跳伞区的中心点,虚线为虚拟航路,绿色点为按照一定间隔选取的虚拟航路点,假设 P_i 为使得航路总长度 D 值最小的虚拟航路点,则 P_i 为记分航点,起始点至分航点连线的红色线段即为共用航段。

4.2 仿真验证

仿真场景,假设当前规划了一个搜索救援等待区并且其负责保障 3 个跳伞区的救援需求,即有 1 个起始点,3 个目标点,现需规划搜索救援等待区至跳伞区的搜索救援通道。为了对比分析,首先运用改进的蚁群算法分别规划起始点至 3 个目标点的航路,规划结果如图 12 所示;然后运用 4.1 的方法计算分航点并生成共用航段,并运用改进蚁群算法规划分航点至 3 个目标点的航路,规划结果如图 13 所示。

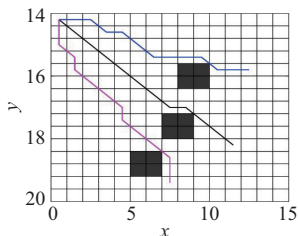


图 12 基于改进蚁群算法的直升机航路规划结果

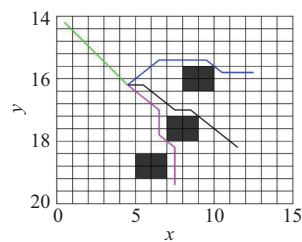


图 13 共用航段生成及分航点后航路重新规划结果

现以规划航路长度表征机组飞行准备工作量,航路越长,航路信息点越多,准备工作越复杂,各方面负荷越大,不利于搜救直升机快速响应战斗搜救任务。在战斗搜救任务发出前,不能确定是哪个机组执行任务,并且需要考虑各搜救机组均可能出现突发状况。因此,默认同一个搜索救援等待区内的机组需对完整的搜索救援通道进行准备。通过规划结果计算,可得分别规划搜索救援等待区至跳伞区的航路与包含共用航段的搜索救援通道的航路长度对比如表 5 所示。分别规划航路可视为分航点与起始点处于同一位置。

表 5 两种规划情况下航路长度对比

类别	D_0	D_1	D_2	D_3	D
分别规划航路	14.485 3	15.142 1	15.899 5	45.526 9	
搜索救援通道	6.403 1	9.242 6	9.071 1	9.242 6	33.959 4

从计算结果可知,如对各目标点进行分别规划航路,从起始点到目标点的最短距离分别是 14.485 3、15.142 1 和 15.899 5,准备负荷量为 45.526 9。设置共用航段和分航点之后,共用段的距离为 6.403 1,从分航点到目标点的最短距离分别是 9.242 6、9.071 1 和 9.242 6,准备负荷量为 33.959 4。即规划搜索救援通道与分别规划航路相比,总负荷量减少 25.4%,有一定的优势,有利于减小任务准备负荷,且能够减少潜在的飞行冲突。

最后,对含有共用航段的搜索救援通道进行航路平滑优化,使其更符合直升机飞行实际,得到最终的搜索救援通道规划如图 14 所示。

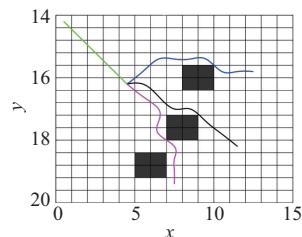


图 14 搜索救援通道规划结果

5 结语

通过对战斗搜救场景的分析,提出一种基于改

进蚁群算法和共用航段的搜索救援通道规划方法。首先通过对搜救直升机的特性及航路规划影响因素分析,确定采用蚁群算法规划搜索救援通道;然后对基本蚁群算法进行改进并测试,提高其路径规划性能;再通过场景分析,提出规划搜索救援通道的步骤,以及设置分航点与共用航段的方法,并通过对比实验分析,验证规划搜索救援通道的优势;最后利用3次B样条曲线方程对搜索救援通道进行平滑优化,使其更具可飞性。实验结果表明,本文所提搜索救援通道规划方法,具有一定的理论和应用价值。

参考文献

- [1] 葛志辉, 闫克学, 黄荣. 搜索营救直升机能力需求分析[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 60-64.
- [2] USA Joint Staff. Techniques and Procedures for Combat Search and Rescue: Joint Publication 3-09.3[M]. Washington D C : USA Joint Staff, 1998.
- [3] 夏正洪, 潘卫军. 多救援直升机多目标分配与航迹规划研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10226-10231.
- [4] SHAO Q, XU C, ZHU Y. Multi-Helicopter Search and Rescue Route Planning Based on Strategy Optimization Algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 33(1): 1950002.
- [5] 马梓元, 龚华军, 王新华. 基于改进人工鱼群算法的无人直升机编队航迹规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(2): 406-413.
- [6] 郑波, 高峰, 马昕, 等. 基于分段随机和角度随机算法的无人机三维航路规划[J]. 电光与控制, 2023, 30(7): 82-90.
- [7] 冯军红, 陈明强. 基于自适应蚁群算法的救援直升机航迹规划[J]. 计算机仿真, 2015, 32(5): 55-57, 99.
- [8] YANG K, DUAN P, YU H. An Improved Genetic Algorithm for Solving The Helicopter Routing Problem with Time Window in Post-Disaster Rescue[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(9): 15672-15707.
- [9] 王瑛, 周楚涵. 改航路径规划问题研究综述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 1-8, 84.
- [10] 齐款款. 复杂环境下的移动机器人路径规划算法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [11] 韩龙, 张娜, 汝洪芳. 人工智能算法原理、技巧及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [12] 吴剑, 江泽军, 朱效洲, 等. 基于改进蚁群算法的隐身无人机快速突防航路规划技术[J]. 电光与控制, 2023, 30(12): 18-23.
- [13] 李三平, 袁龙强, 吴立国, 等. 基于改进融合蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 机械设计, 2023, 40(10): 76-84.
- [14] 赵静, 汤云峰, 蒋国平, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 73-78.
- [15] 熊超文. 蚁群算法的改进及其在路径规划中的应用研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
- [16] 张天瑞, 吴宝库, 周福强. 面向机器人全局路径规划的改进蚁群算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(1): 282-291.
- [17] 黄辰, 费继友, 刘洋, 等. 基于动态反馈 A* 蚁群算法的平滑路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 34-40, 102.
- [18] 张军峰, 游录宝, 周铭, 等. 基于点融合系统的多目标进场排序与调度[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 66-73.
- [19] 汤荣亮, 王子明, 王艳军. 考虑航段复杂度的机场终端区进场程序设计及评估[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(4): 138-148.
- [20] 张洪海, 任真苹, 冯讴歌, 等. 城市低空物流无人机飞行计划预先调配[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(9): 2802-2811.

(编辑: 陈斐)