基于 Delaunay 网格和双向搜索的多无人机空中作战通道规划

李 强[1]，万路军[1,2]，吕茂隆[1]，肖博漪[1]
(1. 空军工程大学空管领航学院，西安，710051；2. 空中交通管理系统与技术国家重点实验室，南京，210007)

摘要 针对多无人机实际作战场景，为实现快速穿越控制区抵达作战区域的目的，提出了基于 Delaunay 三角网格剖分的空中作战通道规划方法。首先，通过对战场空域分布结构的离散化处理，利用 Delaunay 三角网格剖分构建搜索地图；然后，通过计算网格的纵横比，评估并检测生成网格的质量，进而对网格进行优化以提高其质量；最后，通过设计双向搜索策略对 A* 算法进行改进，在生成的地图中进行成本最小化的路径规划，实现了对已规划路径进行通道化处理的效果。实验结果表明，该研究提出的空中作战通道规划方法能够有效规避威胁，体现了该方法的有效性和优越性。

关键词 多无人机作战；Delaunay 三角剖分；空中作战通道规划；A* 算法；双向搜索
DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.05.010
中图分类号 V279 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)05-0089-09

An Air Combatant Corridor Planning for Multiple UAVs Based on Delaunay Mesh and Bidirectional Search

LI Qiang[1], WAN Lujun[1,2], LYU Maolong[1], XIAO Boyi[1]
(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract In the context of multi-UAV combat scenarios, there is a method, i.e. air combatant corridor planning, in its way of enabling rapid traversal through controlled areas and reaching the combat zone, and this method is based on Delaunay mesh triangulation. First, a search map is constructed by discretizating the distribution structure of battlefield airspace and by using Delaunay mesh triangulation. Then, the quality of the generated mesh is evaluated and detected by calculating the aspect ratio, and then the mesh is optimized to improve its quality. Finally, a bidirectional search strategy is designed to enhance the traditional A* algorithm, facilitating cost-minimized path planning on the generated map and achieving corridor of the planned path. The experimental results show that the air combat corridor planning method can effectively avoid threats, is valid and superior.

Key words multi-UAV combat; Delaunay triangulation; air combat corridor planning; A* algorithm; bidirectional search

收稿日期：2025-01-18
基金项目：国家自然科学基金(24050502)
作者简介：李 强(1995—)，男，陕西渭南人，硕士生，研究方向为智能空管与多无人机智能决策。E-mail:505252317@qq.com
通信作者：万路军(1986—)，男，江苏连云港人，副教授，博士生导师，研究方向为智能空管与多无人机智能决策。E-mail:pandawlj@126.com

引用格式：李强，万路军，吕茂隆，等. 基于 Delaunay 网格和双向搜索的多无人机空中作战通道规划[J]. 空军工程大学学报，2025，26(5)：89-97. LI Qiang, WAN Lujun, LYU Maolong, et al. An Air Combatant Corridor Planning for Multiple UAVs Based on Delaunay Mesh and Bidirectional Search[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(5): 89-97.

在信息化支撑的联合作战行动中，由于作战力量复杂多元、各项任务交织叠加导致战场用空需求激增，面对战场空域资源十分紧缺的局限性，合理分配空域资源，创新空域表征方法，提高战场空域资源使用效率是当前联合作战空战场管控领域亟需解决的问题之一[1-2]。随着智能化赋能武器装备的发展，无人机凭借智能自主、灵活高效、低成本等特点被广泛应用于军事领域。根据美军提出的《无人机路线图 2005—2030》和《2016—2036 年小型无人机系统路线图》[3]不难看出，无人机集群作战就是未来战争的主要作战样式之一。在无人机集群作战的任务规划过程中，为进一步提高作战效率，加快感知-判断-决策-行动(observation-orientation-decision-action，OODA)[4]作战循环速度，实现协同作战效能最大化，必须科学划设空中作战通道。

空中作战通道是在复杂空战场环境中，用于保障航空器安全快速穿越空战场的具有一定时空约束和宽度的航线，旨在实现不同作战平台间的有序协同和空域资源的高效利用[5-6]。通过分析可知，空中作战通道是在复杂战场空域划设环境下连接我方控制区与交战区的快速作战通道，可以将其看成是环境已知条件下的全局路径规划问题。在当前的研究中，求解全局路径规划问题的过程可以总结为 2 步：一是根据环境信息建立搜索地图，并建立数学模型；二是设计路径规划算法对问题进行求解。关于搜索地图的建立方法，目前主要的地图构建方式有栅格图[7]、随机采样方法[8]、同时定位和地图构建[9](simultaneous localization and mapping，SLAM)以及点云地图[10]等。栅格图中的环境分辨率主要取决于栅格划分粒度的大小，划分粒度大容易造成规划路径不精确，划分粒度小导致计算量骤增；随机采样方法在复杂环境中的全局路径搜索过程中，大多会因为采样点分布不均匀或采样不充分的情况陷入局部最优；针对 SLAM 和点云地图技术的地图构建方法能够有效依赖机载传感器处理高维度复杂环境，但对技术要求高且需要较强的计算能力。基于对 Delaunay 三角网格剖分的拓扑图法的研究，结合战场环境的不规则性和复杂性，该方法能够通过离散点建立空间面片的方式，提供在已知环境信息下的路径方案。

A* 算法作为解决全局路径规划的启发式算法，能够通过考虑路径代价和启发式函数，在已建立的地图环境中规划最优路径。为解决传统 A* 算法计算量大的不足，国内外大量学者对其进行针对性的优化，例如通过改进启发式函数、结合其他优化算法以及减少冗余节点等方式。文献[11]提出了一种基于权重因子与指数函数的评价函数对传统 A* 算法启发函数进行优化，提高了无人机在三维路径规划中的效率，降低了路径规划的代价。文献[12]针对无人水面船路径规划的问题设计了一种 A* 算法和动态窗口方法(dynamic window approach，DWA)的融合算法，展现了在复杂条件下良好的实施路径规划和避碰性能。文献[13]为解决传统 A* 算法在搜索效率、最优性和平滑性方面的局限性，通过引入冗余安全空间、预判规划以及冗余节点消除的 3 种策略对传统 A* 算法进行改进，进一步优化算法的性能。文献[14]提出了一种通过设置过滤函数的几何 A* 算法，消除了冗余的搜索节点，减少了转弯次数和角度，避免生成不规则路径。文献[15]通过引入收缩因子以及结合深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient，DDPG)的方法对 A* 算法进行改进，设计动作-状态和奖励函数优化了收缩因子，显著提升了算法的搜索效率。

综上所述，为有效解决空中作战通道划设，加快多无人机在交战区的快速部署，高效配置协同作战空域，提出 Delaunay 网格剖分处理空间地图和双向搜索策略改进 A* 算法的空中作战通道规划方法。首先，通过 Delaunay 网格剖分构建初始搜索地图，检测并优化网格地图质量；其次，依据网格节点的威胁程度选取可供路径规划的枢纽点；最后，利用双向搜索策略 A* 算法求解路径最优化问题，对已寻求的最优路径配置空间通道参数，即为空中作战通道。通过仿真实验证明了双向搜索 A* 算法在基于 Delaunay 网格剖分建立的搜索地图规划空中作战通道方法的有效性和优越性。

1 问题描述

本文研究的多无人机空中作战通道规划问题基于如下任务场景：多架无人机从多个临近机场或起降点起飞，经过出航阶段后汇聚于任务集结点，飞行时在穿越我方控制区过程中规避途中威胁障碍等复杂环境从而到达交战区，为保障多无人机安全快速抵达交战区并实现作战效能的最大化和空战场管控的有序高效，需要科学合理地构建空中作战通，如图 1 所示。

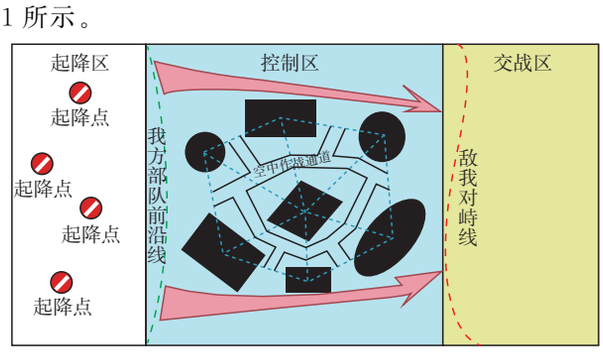


图 1 作战任务场景

Fig. 1 Operational mission scenarios

2　基于 Delaunay 网格构建搜索地图

对空中作战通道构建的任务场景进行分析，其中涉及到的预置空域和地形环境等确定性因素均可进行离散化处理，根据 Delaunay 网格剖分能够通过离散点解决空间面片问题，从而建立可供自主规划的空中作战通道网。

2.1　基本原理

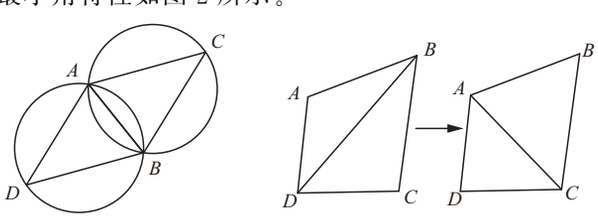
定义：假设 V 是二维空间内的有限点集，边 e 是由点集合中的点作为端点构成的封闭线段，E 是 e 的集合，则三角剖分 $T=(V, E)$ 构成了 1 个平面图，该平面图满足以下约束：

1）平面图 $T=(V, E)$ 中的点只包含点集合 V 中的端点。

2）各边之间两两互不相交。

3）平面图 $T=(V, E)$ 中涉及的所有面都是三角面，并且所有三角面的合集是有限点集合 V 的凸包。

Delaunay 三角剖分能够形成最接近于规则化的三角形，其主要取决于 2 个关键的特性：①空圆特性，即 Delaunay 三角剖分形成的三角形网中任一三角形的外接圆范围内不会有其他点存在；②最大化最小角特性，具体是指在 2 个相邻的三角形构成凸四边形的对角线经过顶点互换后，6 个内角的最小角不再增大。两大特性能够确保生成三角形的几何均匀性，避免生成狭长三角形。空圆特性和最大化最小角特性如图 2 所示。



(a)空圆特性　　(b)最大化最小角特性

图 2　Delaunay 三角剖分特性

Fig. 2　Delaunay triangulation properties

Bowyer-Watson 算法作为一种用于生成 Delaunay 三角剖分的增量式算法，其操作简单易于实现，且在局部更新时能够通过逐点插入方式更新三角形网结构，无需对整个网格进行全局重建，具体生成步骤参照文献[16]中的方法。

2.2　建立地图

2.2.1　战场空间的离散化处理

在联合空中作战行动中，为使各火力单元协同作战效能发挥至最大化，需要配置不同功能和种类的空域，例如警戒巡逻空域、空中加油空域、防空打击空域等。根据 Delaunay 网格性质能够高效处理空间中离散点形成三角网格，可以将控制区内的空域视为离散点，从而根据威胁大小在三角形剖分结构中选取合适的航路枢纽点，进而构建可供多无人机穿越的空中作战通道网。

针对不同规格形状的空域进行离散化处理，本文在基于所有空域内部威胁程度均匀分布的前提下，通过选取空域形状形心的方式确定各三角形的顶点，离散化处理表达式为：

$$S_A=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_i y_{i+1}-x_{i+1}y_i) \tag{1}$$

$$\bar{x}=\frac{1}{6S_A}\sum_{i=1}^{n}(x_i+x_{i+1})(x_i y_{i+1}-x_{i+1}y_i) \tag{2}$$

$$\bar{y}=\frac{1}{6S_A}\sum_{i=1}^{n}(y_i+y_{i+1})(x_i y_{i+1}-x_{i+1}y_i) \tag{3}$$

式中：n 为多边形顶点的个数；S_A 为多边形的面积；$\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别为形心的横纵坐标；(x_i, y_i)、(x_{i+1}, y_{i+1})为多边形相邻顶点以特定顺时针或者逆时针的次序在二维空间内的坐标。

2.2.2　网格质量优化

为了确保各空域离散点经 Delaunay 三角剖分后高效构建可通行的空中作战通道网，同时避免出现狭长三角形和配置距离过近空域的情况，在文献[17]的基础上，引入纵横比的方法对整个三角网格结构进行质量检测，其核心思想是逐个计算所形成三角形最短边与最长边距离的比值，若纵横比接近 1，则三角形形状合格且网格质量较高。反之，则质量较低。质量检测的表达式为：

$$q_m=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}q_i \tag{4}$$

$$q_i=\frac{l_{i\min}}{l_{i\max}} \tag{5}$$

式中：q_m 为网格平均质量；q_i 为第 i 个三角形的纵横比。

由于 Delaunay 网格具备区域性，无论是移动、新增还是删除其中某一点时，都只会影响与其相邻的三角形。因此，针对空域配置密集的情况，可以通过整合部分离散点，以空域聚类、合并的形式重新计算中心点进行局部更新；面对狭长三角形的情况，通过在其内部插入协调点的方式生成新的三角结构。具体优化过程如图 3 所示。

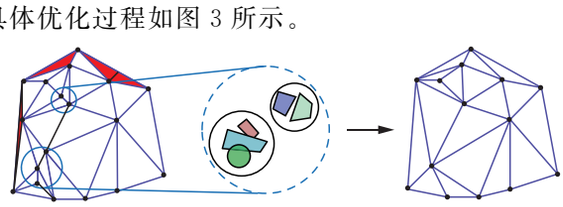


图 3　网格质量优化过程示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the grid quality optimisation process

通过表 1 可以看出，通过对空域配置位置较近空域进行聚合处理以及删除影响较小的空域离散点的方式，实现了剔除冗余节点的目的，达到了网格质量优化的效果，同时不影响搜索地图的构建。

表 1 网格优化前后质量对比结果

Tab. 1 Quality comparison of grid optimisation

阶段	网格个数	平均质量
优化前	28	0.502 8
优化后	18	0.577 8

2.2.3 规划枢纽点与航线段

在初步形成的 Delaunay 三角形网基础上，综合考虑其中每个顶点代表空域的威胁程度，合理选取规划航线段的枢纽点，如图 4 所示。假设每个空域的威胁都是均匀分布在各自范围内的，在规划枢纽点时仅需考虑 2 种情况：①2 点威胁相同，则枢纽点选取对应 Delaunay 边的中点位置；②2 点威胁不同，通过 2 个空域面积比值的形式确定枢纽点具体位置。

$$\begin{cases} \left|\dfrac{O_1A}{O_1B}\right| = k\dfrac{S_A}{S_B} \\ \left|\dfrac{O_2A}{O_2C}\right| = k\dfrac{S_A}{S_C} \\ \left|\dfrac{O_3B}{O_3C}\right| = k\dfrac{S_B}{S_C} \end{cases} \tag{6}$$

式中：S_A、S_B、S_C 分别为空域 A、B、C 的面积；k 为不同空域威胁评估系数；O_1、O_2、O_3 为规划出的枢纽点。

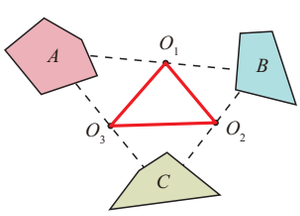


图 4 枢纽点的选取

Fig. 4 Selection of hub points

图中枢纽点 O_1、O_2、O_3 的选取是在空域 A、B、C 形心之间连线的基础上，根据空域威胁程度不同而确定的，红色线段为由枢纽点确立的最佳避撞方案的航线段。

根据上述枢纽点规划的方法，规划出所有可供航线段生成的枢纽点，在规划航线段过程中并不是将所有枢纽点依次连接即可，而是要在生成航线段后识别判断其是否存在穿越空域的情况。基于 Delaunay 三角剖分建立的搜索地图如图 5 所示，红色虚线段为可通行的区域，黑色节点为基于不同空域形状离散化处理后的形心位置，蓝色线段构成的三角形为由离散点构成的 Delaunay 三角形网。

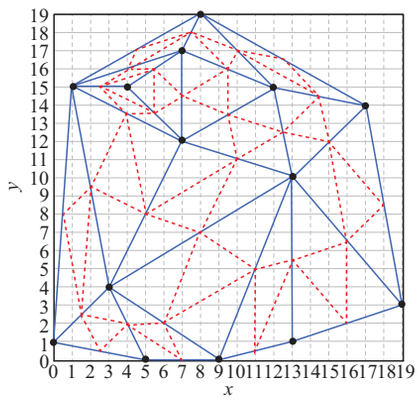


图 5 基于 Delaunay 三角剖分构建的搜索地图

Fig. 5 Search maps constructed based on Delaunay triangular profiles

3 改进 A* 算法通道规划

3.1 传统 A* 算法原理

A* 算法通常用于解决基于图搜索静态环境下的全局路径规划问题。传统 A* 算法的主要由开放列表、关闭列表和 1 个启发式函数组成，其中启发函数的表达式为：

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{7}$$

式中：$g(n)$为起始节点到当前节点 n 的实际路径代价；$h(n)$为当前节点 n 至目标节点待规划路径的估计代价；$f(n)$为从起始节点经历节点 n 至目标节点的估价函数。

在采用 A* 算法进行路径规划时常用的距离表述方式主要有曼哈顿距离、欧几里得距离和切比雪夫距离 3 种表现形式。通过表 2 中 3 种距离的表达式及实际意义对比结果，欧几里得距离更能代表在实际意义上的最短距离且适应在复杂环境下的自由移动场景。综上所述，本文采取欧几里得距离作为 $f(n)$估价函数的值。

表 2 3 种距离表达式对比结果

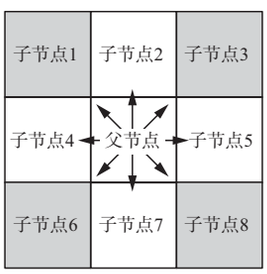
Tab. 2 Comparison results of three distance expressions

名称	表达式	实际意义
曼哈顿距离	$d_{man} = \lvert x_2 - x_1\rvert + \lvert y_2 - y_1\rvert$	2 点之间的直线最短距离
欧几里得距离	$d_{eucl} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$	2 点之间仅能通过水平或垂直方向移动的距离
切比雪夫距离	$d_{che} = \max(\lvert x_2 - x_1\rvert, \lvert y_2 - y_1\rvert)$	2 点之间沿水平、垂直或对角线方向的最大坐标差值

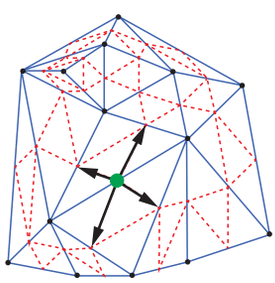
3.2　改进 A* 算法设计方案

3.2.1　优化搜索方式

传统 A* 算法在栅格化地图环境的搜索过程中，其节点搜索通常是传统 8 邻域的搜索方式，相较之下，由 Delaunay 方法构建的地图环境，采用 4 邻域节点搜索模式，具备自适应能力且灵活性强。A* 算法在不同地图环境下的节点搜索方式如图 6 所示。图 6(a)中，在不考虑周边存在障碍物的情况下，以父节点为中心向周边子节点进行水平、垂直以及对角线方向进行搜索，为下一步路径规划提供 8 个不同搜索节点的选择方案，即为传统 A* 算法的 8 邻域搜索方式。如图 6(b)所示，其中每个搜索节点的邻域方向并不固定，而是依赖于网格的连接结构，其通常是相邻的三角形或它们的共享边，由此构成 Delaunay 地图 4 邻域节点的搜索方式。



(a)传统 8 邻域节点



(b)Delaunay 4 邻域节点

图 6　节点搜索方式对比图

Fig. 6　Comparison of node search methods

3.2.2　双向搜索策略

为了提高路径规划的速度，本文在传统 A* 算法的基础上引入双向搜索策略[18-19]，该策略中的正向与反向搜索均采用同一启发函数 $f(n)$，从而实现由起始节点和目标节点 2 个方向同时进行搜索，直至 2 个不同搜索方向在过程中收敛到 1 个汇合点。最终，通过从汇合点回溯起始节点和目标节点规划方式生成完整的路径。基于双向搜索策略改进的 A* 算法，其核心本质为利用减少搜索节点数量提高搜索效率。具体路径规划流程如下：

步骤 1　初始化起始节点和目标节点，分别创建 2 个开放列表(open-start、open-goal)和关闭列表(closed-start、closed-goal)。

步骤 2　将起始节点和目标节点分别添加至各自的开放列表中，并计算启发式成本 $f(n)$。

步骤 3　采用双向搜索策略，对于 2 个不同搜索方向的当前搜索节点可作为父节点，分别遍历其各自的邻居节点，计算其实际路径代价 $g(n)$和估计路径代价 $h(n)$，并根据代价大小将其添加至开放列表中。

步骤 4　分别将 2 个搜索方向对应开放列表中的当前节点移除并添加到各自对应的关闭列表中。

步骤 5　如果从起始节点/目标节点搜索的当前节点出现在目标节点/起始节点的关闭列表中，则表示 2 个搜索已收敛至同一点；若没有，则继续重复步骤 3。

步骤 6　针对不同搜索方向出现交叉点，通过回溯方式分别追溯起点和目标的路径，将其合并生成最优路径。

3.3　通道化处理

空中作战通道的规划是对已规划最优路径进行空间化的处理，其目的在于确保多无人机能够安全高效且有序的在具备一定空间约束的环境内飞行。由于空中作战通道自身具备一定的空间特性，多无人机可以在避免机间碰撞的前提下在通道内部进行编队协同飞行，在抵达作战区域时具备快速作战的能力；同时在通道内飞行，安全间隔增大，使得规划路径具备一定的容错性，从而提高路径规划的速度和效率。为了快速实现空中作战通道的构建，综合考虑可飞性、灵活性以及安全性的通道特征，在上述双向搜索 A* 算法已规划的最优路径基础上，进一步利用膨胀法沿路径两侧进行扩展，同时预留足够的安全距离，最终规划由多个航线段扩展连接而成的多个长方形连续形成的空中作战通道。

如图 7 所示，在已规划路径的基础上结合无人机性能以及任务需求配置空中作战通道参数，其中，通道宽度为 $2d$，黑色虚线代表通道中心线位置，r_1、r_2、r_3 分别为根据飞行间隔规定以及通道周边空域不同威胁程度预留的安全裕度。空中作战通道流程如图 8 所示。

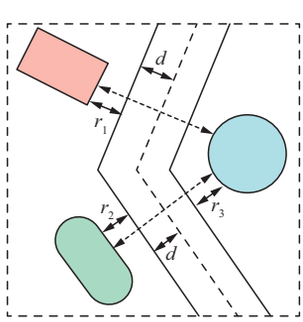


图 7　规划路径通道化示意图

Fig. 7　Schematic diagram of planned corridor

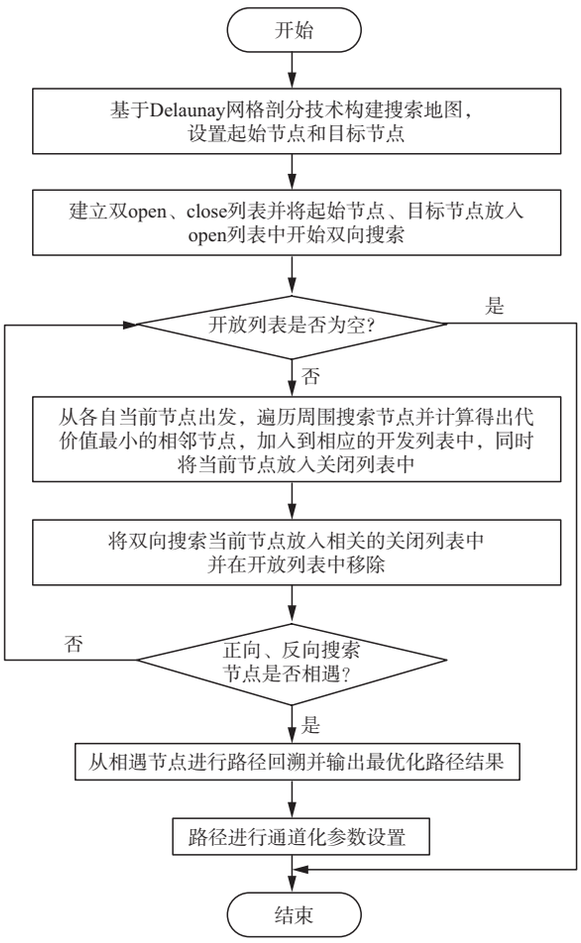


图 8 基于双向搜索 A* 算法构建空中作战通道流程

Fig. 8 Flowchart of building air combat corridor based on bi-directional search A* algorithm

4 仿真验证与分析

4.1 初始路径规划仿真结果

为验证本文提出由 Delaunay 网格构建搜索地图在处理该问题上的优越性以及双向搜索 A* 算法的可行性和有效性，通过设计传统 A* 算法和本文采用的双向搜索策略 A* 算法分别在 Delaunay 网格地图与栅格化地图进行仿真实验，并在每组实验数据的基础上进行多次实验证明实验方法的可靠性。

在构建栅格法地图时，参照文献[20]中对障碍物膨化扩张的方式进行处理。为突出 2 种地图环境之间的联系性，栅格化地图以 Delaunay 地图离散化形心为中心，障碍物覆盖范围为参考进行栅格化拟合还原。为尽可能使规划的路径穿越更多障碍，设置起始节点为(3，20)、目标节点为(20，6)。图 9 为 A* 算法在基于 Delaunay 网格剖分和栅格法构建的地图环境下的路径规划结果对比，图 10 是双向搜索 A* 算法在相应地图环境中的对比结果。

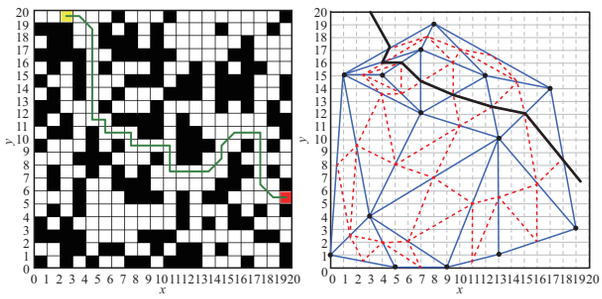


图 9 A* 算法在不同地图路径规划效果图

Fig. 9 A* algorithm in different map path planning effect diagram

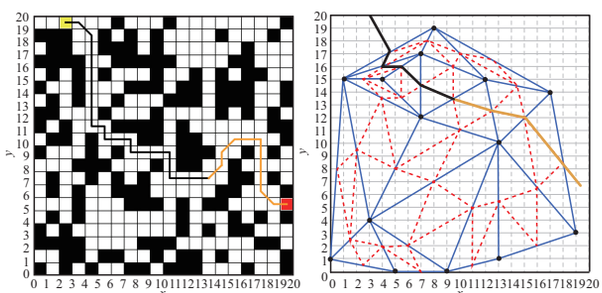


图 10 双向搜索 A* 算法在不同地图路径规划效果图

Fig. 10 Bidirectional search A* algorithm in different maps path planning effect diagram

在栅格化地图中，黄色方格为起始节点，红色方格为目标节点，黑色方格为障碍物，白色方格为可通行路径节点。在双向搜索 A* 算法针对不同地图环境的路径规划结果中，黑色线段为正向搜索所得的路径结果，橙色线段为反向搜索路径规划结果。

由路径规划结果可以看出：一是同一算法在不同地图环境中的路径规划结果对比表明，Delaunay 地图的路径转折节点明显减少，且生成路径更加平滑；二是通过对比不同算法在同一地图环境的路径结果可以得出，规划的路径结果完全一致，说明该路径规划结果为全局最优路径。

由表 3 可以看出，Delaunay 地图对比栅格化地图扩展节点数减少了 89.92%，提高了搜索效率，转折节点数减少了 56.25%，确保了规划路径的平滑性和可飞性，同时根据同一算法不同环境的规划时间可以看出，由 Delaunay 构建的地图在路径规划时间、搜索效率方面具备显著优势。

表 3 不同搜索地图下对应算法的仿真结果对比

Tab. 3 Comparison of simulation results of corresponding algorithms under different search maps

名称	地图类型	扩展节点个数	转折节点个数	路径长度/m	规划时间比
传统 A* 算法	栅格化搜索地图	258	16	34.65	1.42
	Delaunay 搜索地图	26	7	24.31	
双向搜索 A* 算法	栅格化搜索地图	258	16	34.65	1.58
	Delaunay 搜索地图	26	7	24.31	

4.2　算法性能验证实验

为充分验证双向搜索 A* 算法在性能上的优势，设计了其与传统 A* 算法和经典 Dijkstra 算法三者之间在复杂地图环境下的对比实验。为增加栅格化地图环境复杂性，一是采用 40×40 栅格化地图替代原先 20×20 的地图环境，并且障碍物以随机形式生成；二是设置 5 个起终点以及不同环境的路径规划地图。仿真结果如图 11 所示。

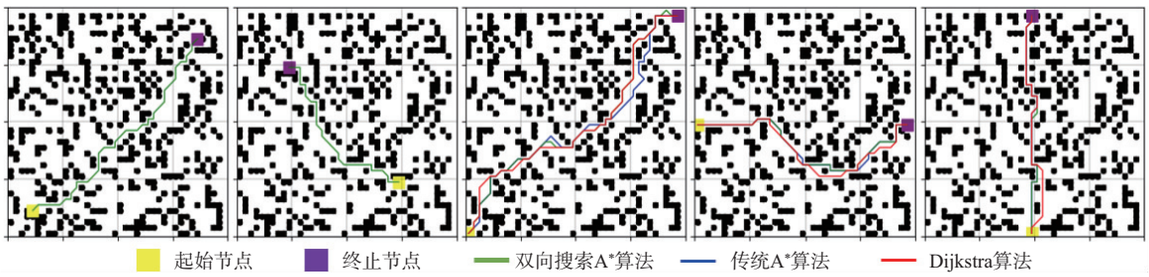


图 11　不同算法路径规划结果对比

Fig. 11　Comparison of path planning results of different algorithms

从图 11 中可以看出，针对起始、终止节点不同，复杂程度不同的栅格化地图环境，本文采取的双向搜索 A* 算法始终能够根据环境规划出相应的路径，相比之下，面对稍加复杂的环境，由图 11 前 2 个路径规划结果可得，传统 A* 算法和经典 Dijkstra 算法未能规划出路径。由此可见，本文采取的双向搜索 A* 算法能够处理复杂环境下的路径规划。如表 4 所示，不同算法性能指标的对比结果是在 5 次路径规划的基础上选取平均值，从规划时间、路径长度、平滑度、扩展节点数以及路径规划成功率 5 个层面全面反映不同算法的性能。因此，可以直观体现双向搜索 A* 算法相比其他 2 个算法，平均规划时间最短、平均路径长度最短、路径平滑度最高，且在搜索过程中平均扩展节点数最少，同时路径规划的成功率高达 100%。由此可得，本文提出的双向搜索 A* 算法具备在复杂环境中规划路径的能力，同时有一定的稳定性和可靠性。

通过上述实验表明，Delaunay 地图环境不同于栅格化环境，能够有效将复杂空间环境进行离散化处理，为路径规划释放足够空间，同时采用了 4 邻域搜索节点的方式，提高了路径规划的效率，从底层层面解决了路径质量问题，验证了 Delaunay 地图环境的优越性。在针对全局路径规划问题，通过将不同算法在不同环境中反复多次进行性能对比，结果表明，本文采取的双向搜索 A* 算法提高了搜索速度，缩短了规划时间，证明了本文所提算法的可靠性。

表 4　不同算法性能指标对比结果

Tab. 4　Comparison results of different algorithms' performance metrics

名称	平均规划时间/s	平均路径长度/m	平均平滑度	平均扩展节点个数	路径规划成功率/%
Dijkstra 算法	0.009 074	52.580 3	0.406 028	1 064.33	60
传统 A* 算法	0.004 059	53.246 7	0.419 681	474.33	60
双向搜索 A* 算法	**0.001 711**	**49.087 7**	**0.512 347**	**222.80**	**100**

4.3　空中作战通道规划仿真结果

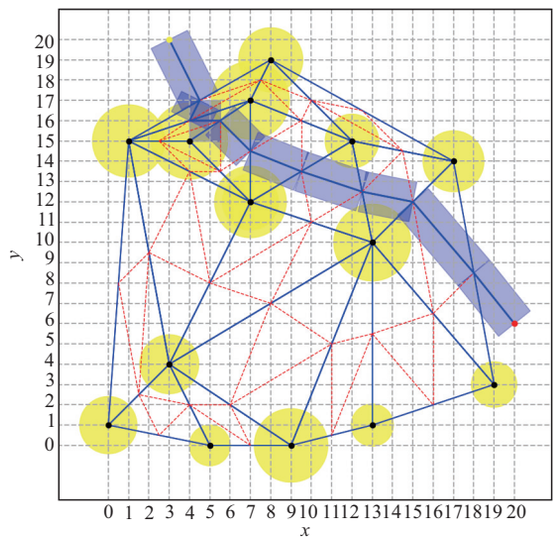
为了验证本文提出的空中作战通道规划方法的可行性，结合实际作战场景需求，对由双向搜索 A* 算法在 Delaunay 三角网络构建的搜图地图规划出的最优路径配置一定的宽度，从而形成可供多无人机由控制区安全快速进出交战区的空中作战通道。

在已规划最优路径仿真结果基础上，进行通道化参数的配置，同时，采用 3 次样条曲线的方法并引入迭代平滑机制对路径进行平滑处理，规划通道优化前后的结果对比如图 12 所示。图中，黄色圆形部分为控制区内相关的空域配置情况，图 12(a)中由多个蓝色矩形组成的部分为初始化的通道规划结果，图 12(b)中绿色区域为优化后的通道结果。通过对比空中作战通道规划优化前后的仿真结果可以看出，初始化通道规划结果不够连续，不符合实际空中作战通道需求。

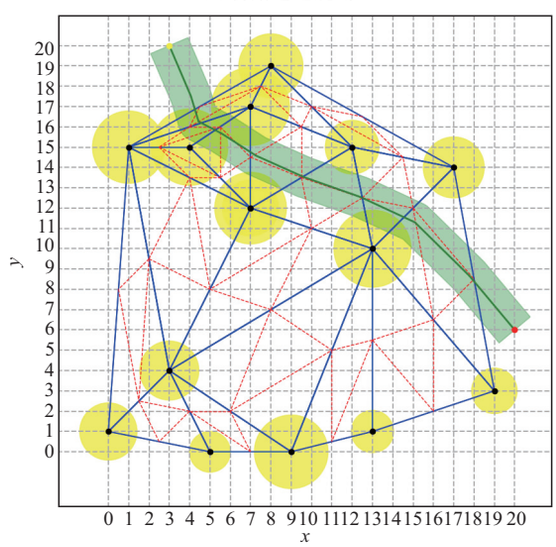
为进一步体现优化后通道的质量，通过计算所有路径段平均曲率的方式，量化整个路径的平滑度，并对通道优化前后的平均曲率进行对比，对比结果如表 5 所示。通过表 5 可以看出，优化后通道的平均曲率更小，表明通道结果更加平滑，且安全性能较初始规划结果更好。

针对空中作战通道的规划结果，为充分考虑通道的可行性以及安全性，还需对其与周边空域配置情况进行冲突识别检测与消解，对于使用同一高度层且不重合的通道与空域，则需在两者之间预留一定的安全裕度，而针对重合且有冲突的部分，在不影响作战效能的前提下，需在预先规划以及实时规划

中通过调整计划时间或高度的方式快速进行冲突消解。



(a)初始通道规划



(b)最终通道规划

图 12 空中作战通道规划优化结果示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the results of the optimization of air combat Corridor planning

表 5 通道优化前后平均曲率对比结果

Tab. 5 Mean curvature comparison results of corridor optimization

阶段	通道平均曲率
优化前	0.392 5
优化后	0.125 9

5 结语

为解决多无人机在复杂战场环境下穿越我方控制区以实现快速抵达交战区的目的，本文利用 Delaunay 三角剖分能够通过离散点解决空间面片问题的特性，将控制区内不可通行的区域进行离散化处理，并依据不同区域威胁程度选取可供路径规划的枢纽点，在传统 A* 算法的基础上，设计了双向搜索策略，提高了路径规划的效率，具备良好的避障能力。仿真实验结果表明：一是基于 Delaunay 三角剖分构建的搜索环境较栅格化地图具有显著的优势，相比传统 8 邻域的搜索方式，大大减少了冗余节点，提高了搜索效率；二是验证了本文采用双向搜索 A* 算法策略在解决路径规划问题中的可行性和有效性，与传统 A* 算法相比提高了在复杂环境下的搜索速度；三是对最优化路径进行了通道化处理，通过平滑处理初始通道规划确保了空中作战通道的安全性与稳定性。

总体而言，本文提出空中作战通道规划问题是针对静态环境且威胁已知条件下的全局路径规划问题研究，随着无人机协同作战技术的不断发展，未来无人机大规模集群协同作战实时规划将会是空战场领域关注的重点问题。

参考文献

[1] 杨任农，沈堤，戴江斌. 对联合作战空战场管控问题的思考[J]. 指挥信息系统与技术，2019，10(1)：1-6.
YANG R N，SHEN D，DAI J B. Consideration for Management and Control Problems of Joint Operation Air Battlefield[J]. Command Information System and Technology，2019，10(1)：1-6. (in Chinese)

[2] 徐鑫宇，万路军，陈平，等. 基于 GeoSOT 网格的空域栅格化表征方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)，2021，22(2)：15-22.
XU X Y，WAN L J，CHEN P，et al. An Airspace Raster Representation Method Based on GeoSOT Grid [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)，2021，22(2)：15-22. (in Chinese)

[3] 胡利平，黄晓阳，梁晓龙，等. 美军无人机蜂群作战研究动态及应对策略[J]. 国防科技，2021，42(4)：17-25.
HU L P，HUANG X Y，LIANG X L，et al. Developmental Trends in and Countermeasures Against UAV Swarm Operations by the US[J]. National Defense Technology，2021，42(4)：17-25. (in Chinese)

[4] 祝学军，赵长见，梁卓，等. OODA 智能赋能技术发展思考[J]. 航空学报，2021，42(4)：524332.
ZHU X J，ZHAO C J，LIANG Z，et al. Thoughts on Technology Development of OODA Empowered with AI[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2021，42(4)：524332. (in Chinese)

[5] 韩雪艳，沈堤，余付平，等. 空中进攻作战安全返航通道容量评估[J]. 空军工程大学学报，2023，24(5)：63-71.
HAN X Y，SHEN D，YU F P，et al. Evaluation of Safe

Return Channel Capacity in Air Offensive Operations [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 63-71. (in Chinese)

[6] 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 D, ZHANG R M, QI D, 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. (in Chinese)

[7] LAI R S, WU Z Y, LIU X G, et al. Fusion Algorithm of the Improved A* Algorithm and Segmented Bézier Curves for the Path Planning of Mobile Robots[J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2483.

[8] KANG T W, KANG J G, JUNG J W. A Bidirectional Interpolation Method for Post-Processing in Sampling-Based Robot Path Planning [J]. Sensors, 2021, 21(21): 7425.

[9] HU Y J, XIE F, YANG J Q, et al. Efficient Path Planning Algorithm Based on Laser SLAM and an Optimized Visibility Graph for Robots[J]. Remote Sensing, 2024, 16(16): 2938.

[10] ALI H, XIONG G, HAIDER M H, et al. Feature Selection-Based Decision Model for UAV Path Planning on Rough Terrains[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 232: 120713.

[11] 胡明哲，李旭光，任智颖，等. 基于改进启发函数的 A* 算法的无人机三维路径规划[J]. 兵工学报，2024，45(S1)：302-307.
HU M Z, LI X G, REN Z Y, et al. UAV 3D Path Planning Based on A* Algorithm with Improved Heuristic Function[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(S1): 302-307. (in Chinese)

[12] GUAN W, WANG K. Autonomous Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles Based on Improved A-Star and Dynamic Window Approach Algorithms[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(3): 36-50.

[13] LIN Z, WU K, SHEN R L, et al. An Efficient and Accurate A-Star Algorithm for Autonomous Vehicle Path Planning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 9003-9008.

[14] TANG G, TANG C Q, CLARAMUNT C, et al. Geometric A-Star Algorithm: an Improved A-Star Algorithm for AGV Path Planning in a Port Environment [J]. IEEE Access, 2021, 9: 59196-59210.

[15] 任智，张栋，唐硕. 基于强化学习的改进三维 A* 算法在线航迹规划[J]. 系统工程与电子技术，2023，45(1)：193-201.
REN Z, ZHANG D, TANG S. Improved Three-Dimensional A* Algorithm of Real-Time Path Planning Based on Reinforcement Learning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 193-201. (in Chinese)

[16] 青文星，陈伟. Delaunay 三角网生成的改进算法[J]. 计算机科学，2019，46(S1)：226-229.
QING W X, CHEN W. Delaunay Triangular Mesh Optimization Algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(S1): 226-229. (in Chinese)

[17] 张晶飞，李射，崔向阳. Delaunay 三角剖分的最优化网格节点生成算法研究[J]. 电子设计工程，2019，27(9)：10-16.
ZHANG J F, LI S, CUI X Y. Research on Optimal Grid Node Generation Algorithm for Delaunay Triangulation[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(9): 10-16. (in Chinese)

[18] WANG P K, MUTAHIRA H, KIM J, et al. ABA*-Adaptive Bidirectional A* Algorithm for Aerial Robot Path Planning [J]. IEEE Access, 2023, 11: 103521-103529.

[19] JIN W R, LI J X, LV X X, et al. An Optimized Path Planning Approach for Automatic Parking Using Hybrid A* Bidirectional Search[J]. Applied Intelligence, 2024, 55(3): 201.

[20] 孙岩霆，王荣杰，蒋德松. 融合 A* 与 DWA 算法的水面船艇动态路径规划[J]. 仪器仪表学报，2024，45(1)：301-310.
SUN Y T, WANG R J, JIANG D S. Dynamic Path Planning of Surface Ship by Combining A* and Dynamic Window Algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 301-310. (in Chinese)

（编辑：杜娟）