http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0496

自由空域环境下多旋翼无人机进场三维航迹规划

王建忠*，梁飞达
(中国民航大学 空中交通管理学院，天津 300300)

摘 要：自由空域环境下，针对城市空间环境运行的多旋翼无人机(UAV)进场环节，提出一种考虑区域避拥堵的多旋翼无人机无冲突航迹规划方法，保证无人机安全高效进场运行，提高空域利用效率。对进场空间范围进行定义；采用栅格法对三维空间运行环境进行离散化处理，引入栅格占用时间概念，将无人机视为动态障碍物，构建以飞行时间最小为目标的无冲突航迹规划模型；设计基于三维拥堵权值地图的改进A*算法，求解避拥堵的多旋翼无人机飞行航迹；在不同障碍物环境下，面向10,15,20架无人机进场情景进行仿真分析。结果表明：在复杂障碍物环境下，与A*算法相比，改进算法在权重系数为0.4、0.6时增加0.96%的飞行时间即可减少52%的拥堵区域数量，优化效果明显，验证了所提模型和算法的可行性和有效性。

关 键 词：无人机；航迹规划；栅格占用时间；A*算法；拥堵权值地图
中图分类号：V279
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)11-3824-08

随着低空空域的逐步开放和政策利好，中国低空经济迎来了快速发展的春天，特别是民用无人机产业发展迅猛，使得无人机在各领域的应用频率不断上升，扮演着越来越重要的角色。在航迹规划方面，多旋翼无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)运行已经基于各种运行场景进行了研究，如城市物流配送[1]、河道巡检[2]、无人机巡逻[3]等。航迹规划是保障飞行效率和安全的关键，已经成为多旋翼无人机研究领域的热点，其核心思想是通过考虑无人机的飞行性能[4]、无人机与障碍物的最小安全距离[1]及飞行区域开放情况等因素，为无人机规划出最优或最满意的飞行航迹。

当前多旋翼无人机航迹规划研究主要集中在航路飞行阶段，航路阶段的航迹规划又可分为单机航迹规划和多机航迹规划两大类。单机航迹规划主要以最小化所需飞行时间、能量消耗[5]、航程距离[4]、运行风险[1,6]、噪声水平[1]等为目标，规划一条保证无人机可以更高效、安全、可接受的路径。而对于多机航迹规划则变得更加复杂，因为多架无人机必须协调它们的飞行以实现整体最优。在这些场景中，航迹规划不仅要考虑每架无人机的个体约束，还要考虑无人机之间的相互作用，包括协调、任务分配[7]、避免多机碰撞[8]等。而对于城市环境下多旋翼无人机进场阶段的研究主要集中于空域结构设计的进场控制，从空域结构设计来看，目前主要集中在环形空域结构设计[9]和路网结构的空域设计上[10]；从进场方式来看，主要包括3种，分别为水平进场垂直下降[11]、沿斜线进近[12-13]和基于环形结构运行[14-17]；从起降点设计来看，主要包括单起降点[14-15]、多起降点[10,16]；从运行速度来看，基于空域结构设计的模式，为更好地控制无人机进场运行，多旋翼无人机的飞行速度通常较为单一[9,14-15]。

综上可知，目前国内外对于无人机航迹规划主要存在以下不足：①无人机航迹规划主要集中在航

收稿日期：2024-07-01；录用日期：2024-09-20；网络出版时间：2024-10-11 16:43
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241010.2004.005
基金项目：天津市教委科研计划(2018KJ249)
*通信作者. E-mail：jz-wang@cauc.edu.cn

引用格式：王建忠，梁飞达. 自由空域环境下多旋翼无人机进场三维航迹规划[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(11)：3824-3831.
Wang J Z，Liang F D. Three-dimensional track planning for multi-UAV approach in free airspace environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(11)：3824-3831 (in Chinese).

路运行阶段, 对于无人机进场航迹规划也停留在空域结构设计下, 对自由空域环境下的进场运行却鲜有研究; ②大多数航迹规划研究针对航空器单一运行速度, 未充分考虑航空器选择不同飞行方向时的速度差异; ③现有航迹规划中对于航迹点周遭使用情况的考量仅停留在二维平面, 未能从三维空间角度入手。综上所述, 本文针对进场空间范围内多旋翼无人机航迹规划问题, 考虑多旋翼无人机在不同方向上的飞行速度, 明确记录各栅格占用时间, 构建以飞行时间最小为目标的无人机进场航迹规划模型, 设计基于三维拥堵权值地图的改进 A*算法进行求解, 得到一系列无冲突、避拥堵的进场航迹。

1　多旋翼无人机进场航迹规划问题建模

1.1　进场范围定义及问题描述

无人机飞行高度在 120 m 以下, 由于目前相关研究对无人机进场范围还没有统一的定义和描述, 文献 [9] 提出最大安全距离概念, 在给定环境下, 可利用在起降点周围控制障碍物距离减去缓冲余度来确定进场范围半径为 44.88 m。文献 [14] 通过考虑等待点之间的间隔和空域容量计算出在分支排队进场(branch-queuing approach, BQA)和基于顺序进场(sequence-based approach, SBA)2 种进场策略下的最优进场范围半径分别为 92.4 m 和 79.8 m。综上, 为方便进场空间栅格划分, 可将进场空间范围定为 120 m×120 m×120 m 的正方体区域。设某城市空间环境中建有无人机起降场, 无人机架次和进场位置已知, 机型为充电多旋翼式无人机, 无人机进场航迹规划问题即可表示为: 需要对某一时间段进场航空器进行无冲突航迹规划, 以确保多架次无人机安全、高效到达。

1.2　空间环境建模

1.2.1　城市空间环境表征

设 O 为原点建立空间直角坐标系, 无人机在长、宽、高分别为 X、Y、Z 的立方体进场空间环境运行, 将城市空域等分成 $n_x \times n_y \times n_z$ 个三维栅格。设栅格划分精度为 r, 则 $n_x = \mathrm{int}(X/r)$、$n_y = \mathrm{int}(Y/r)$、$n_z = \mathrm{int}(Z/r)$, int为取整函数。将 $B_{a,b,c}$ 表示为栅格中心点, 其中, a、b、c 分别表示其在 x 轴、y 轴和 z 轴方向上的序号, a=1,2,⋯,n_x, b=1,2,⋯,n_y, c=1,2,⋯,n_z。索引 $B_{a,b,c}$ 转换为坐标 $B(x,y,z)$, 其中, $x = ar$, $y = br$, $z = cr$。

针对城市空间环境中的静态障碍物, 采用二进制 0-1 来表示对应栅格空间是否被占用, 每个栅格状态信息表达式为

$$\mathrm{Occup}(B_{a,b,c}) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中: 0 表示未被占用, 1 表示被占用。

此外, 引入栅格占用时间概念, 以便更好地记录栅格的使用情况[8]。基于无人机的进场时刻和位置点, 在进行航迹规划的同时明确各栅格无人机使用时间, 将无人机作为动态障碍物, 对栅格使用状态进行动态更新。t 时刻的栅格 $B_{a,b,c}$ 状态信息则可以表示为

$$\mathrm{Occup}(B_{a,b,c}, t) \begin{cases} 0 & t \in [T_{\mathrm{enter}}, T_{\mathrm{exit}}] \\ 1 & t \in [T_{\mathrm{enter}}, T_{\mathrm{exit}}] \end{cases} \tag{2}$$

式中: 0 表示未被占用; 1 表示被占用; T_{enter} 为栅格进入时间; T_{exit} 为栅格离开时间。

1.2.2　航迹节点扩展及飞行时间表征

航迹节点扩展即无人机在进行航迹规划时从当前点寻找下一个可选航迹点的过程。无人机可以从栅格的中心点沿着栅格的边、面对角线或沿体对角线飞行至下一可选航迹点, 可选航迹点共计 26 个, 航迹节点扩展如图 1 所示。

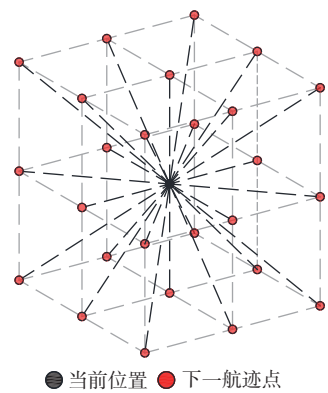

图 1　航迹节点扩展示意图

Fig. 1　Schematic diagram of track node expansion

以 x、y、z 轴的正方向为例, 存在 7 种不同飞行方向, 用向量可将移动方向分别标记为 $(x,0,0)$, $(0,y,0)$, $(0,0,z)$, $(x,y,0)$, $(0,y,z)$, $(x,0,z)$, (x,y,z)。考虑不同飞行方向移动速度的差异, 设置 5 种不同的飞行速度[18], 表示为

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} \tag{3}$$

式中: V_1 为沿 x 轴方向最大飞行速度; V_2 为沿 y 轴方向最大飞行速度; V_3 为沿 z 轴方向最大飞行速度; V_4 为沿面对角线方向最大飞行速度; V_5 为沿体对角线方向最大飞行速度。

结合多旋翼无人机选定的下一个航迹点则可以确定其飞行方向、飞行速度和飞行距离, 则当前无人机在对应栅格内的运行时间可以表示为

$$T^u=\begin{cases}\dfrac{\left|B^u(x,y,z),B^{u+1}(x,y,z)\right|}{2V^{u,u+1}} & u=1\\ \dfrac{\left|B^{u-1}(x,y,z),B^u(x,y,z)\right|}{2V^{u-1,u}}+\dfrac{\left|B^u(x,y,z),B^{u+1}(x,y,z)\right|}{2V^{u,u+1}} & 1<u<n\\ \dfrac{\left|B^{u-1}(x,y,z),B^u(x,y,z)\right|}{2V^{u-1,u}} & u=n\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\left|B^u(x,y,z),B^{u+1}(x,y,z)\right|$为2个航迹点之间的欧氏距离，$B^u(x,y,z)$为无人机所经过的第$u$个航迹点，当$u$=1和$u$=$n$时分别表示为进场点和着陆点。

无人机第u个航迹点的栅格进入和离开时间则可以表示为

$$T^u_{\text{enter}}=\begin{cases}T_{\text{approach}} & u=1\\ T_{\text{approach}}+\sum_{p=1}^{u-1}T^p & u>1\end{cases} \tag{5}$$

$$T^u_{\text{exit}}=T^u_{\text{enter}}+T^u \tag{6}$$

式中：T_{approach}为多旋翼无人机进场时间。

1.3 多旋翼无人机进场航迹规划模型

1.3.1 目标函数

本文将进场飞行时间最小作为目标，设无人机数量为N，其中，第i架无人机进场点坐标为$B_i^{(1)}(x,y,z)$，着陆点坐标为$B_i^{(n)}(x,y,z)$，则第i架无人机的目标函数为

$$F_i=\min\sum_{u=1}^{n}T_i^u \tag{7}$$

1.3.2 约束条件

1）进场飞行高度约束。无人机所处飞行高度会随着环境的变化而变化，但必须符合飞行高度标准，即

$$H_{\min}\leqslant H_i^u\leqslant H_{\max} \tag{8}$$

式中：H_i^u为第i架无人机在第u个航迹点的高度；$H_{\min}$和$H_{\max}$分别为飞行高度的下限和上限。

2）飞行范围约束。无人机飞行的航迹点集合都必须处于所指定的空间范围内，即

$$\begin{cases}x_i^u=ar & a=1,2,\cdots,n_x\\ y_i^u=br & b=1,2,\cdots,n_y\\ z_i^u=cr & c=1,2,\cdots,n_z\end{cases} \tag{9}$$

式中：(x_i^u,y_i^u,z_i^u)为第i架无人机的第u个航迹点实际坐标。

3）无人机与障碍物间隔约束。障碍物的大小决定了障碍物占据栅格的数量，由于在无人机进场航迹规划阶段，所经航迹点均不能穿越障碍物，且需与障碍物保持一定的安全间隔，则无人机需要与每个被占据栅格保持安全距离，即

$$\sqrt{\left(x_i^u-x_{\text{ob}}\right)^2+\left(y_i^u-y_{\text{ob}}\right)^2+\left(z_i^u-z_{\text{ob}}\right)^2}\geqslant D_{\min} \tag{10}$$

式中：$(x_{\text{ob}},y_{\text{ob}},z_{\text{ob}})$为障碍物所占据的栅格点实际坐标；$D_{\min}$为无人机与障碍物之间的最小安全距离。

4）无人机之间避撞约束。无人机进场空间环境中可能存在多架无人机，对任意2架航空器i、j，任意航迹点之间的距离均应保证大于安全距离：

$$\sqrt{\left(x_i^u-x_j^p\right)^2+\left(y_i^u-y_j^p\right)^2+\left(z_i^u-z_j^p\right)^2}\geqslant D_{\text{r}} \tag{11}$$

式中：(x_j^p,y_j^p,z_j^p)为第j架无人机的第p个航迹点坐标；D_{r}为无人机之间的最小安全距离。

2 多旋翼无人机进场航迹规划方法

对于多旋翼无人机进场航迹规划，需要在城市空间环境中搜索出每架无人机安全到达着陆点的航迹。A*算法通常用于无人机航迹规划中，通过计算起始点至扩展节点及扩展点至目标点的成本代价来规划合适的飞行航迹，其能够很好地解决在地图网格上寻找最优路径的问题。因此，本文在A*算法的基础上，面向三维空间环境，提出加入拥堵权值地图的改进A*算法（记为Weighted Map A*，简称WM-A*）。WM-A*算法主要通过获取前机的航迹规划结果进行拥堵权值地图更新，后续架次无人机在此基础上进行航迹规划，使得无人机在航迹规划时一定程度上避开拥堵区域，提高空域利用效率。航迹规划结果会随无人机航迹规划的顺序不同而变化，且所有可能规划的顺序数量是无人机进场规模的阶乘函数，具有高度复杂性，鉴于此，在算法里添加可变换顺序的时间间隔约束，即将进场时间间隔为Q（含）以内的无人机进行顺序调换，时间间隔的单位为s，适当减少考虑的进场顺序数量，降低算法计算的复杂性和运行时间，提高航迹规划结果的质量。本文算法流程如图2所示。

2.1 拥堵权值地图初始化和构建

二维的拥堵权值地图在无人机协同路径规划中有所使用，构建方法参考文献[19]。拥堵权值地图的基本原理是将栅格地图划分为m个拥堵检测区域。拥堵检测区域越小，航迹规划复杂度越高；反之，便会损失航迹规划质量。因此，拥堵检测区域需要权衡航迹规划的效率和质量，本文提出三维环境下的拥堵权值地图，拥堵检测区域划分方法如下：

1）确定拥堵检测区域体积。比例因子设定为λ，拥堵检测区域体积为LWH/λ^3，其中，L、W、H分别为进场范围的长、宽、高。

2）确定拥堵检测区域栅格数量。根据拥堵区域体积及栅格分辨率可以计算出每个拥堵检测区域包含栅格数量为$LWH/\left(\lambda^3r^3\right)$。

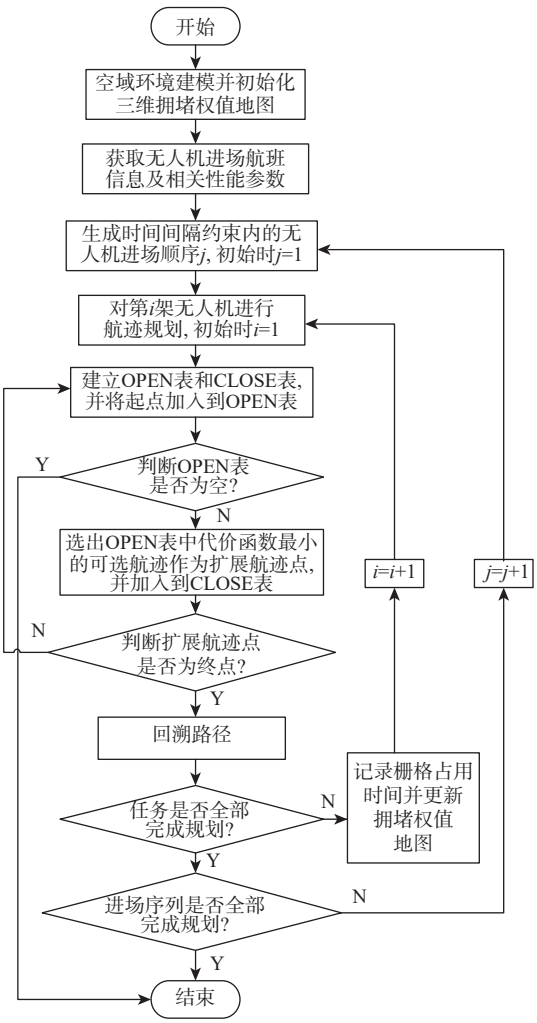

图 2　WM-A*算法流程

Fig. 2　Flow of WM-A* algorithm

3）拥堵检测区域编号规则。从栅格地图坐标轴开始，x、y、z 轴上分别按照从左到右、从前到后、从下到上的顺序为每个检测区域分配从 1 开始的连续整数作为区域编号。

拥堵权值地图构建完成后，将每个检测区域所对应的拥堵权值初始化为 0，之后每规划完成一架无人机的航迹便更新一次拥堵权值地图：记录规划完成的无人机航迹在每个检测区域的占有时间，并更新所对应拥堵权值。假设第 j 个拥堵检测区域（j=1,2,⋯,m）存在重复时间段，则将对应的拥堵权值进行叠加。拥堵权值的更新可表示为

$$M_j = M_j + 1 \tag{12}$$

2.2　航迹节点代价计算

在进行航迹节点扩展的过程中，计算无人机到达扩展航迹点的时间 t_d，查询该扩展航迹点所在拥堵检测区域的占有时间 $[t_h, t_f]$。若 t_d 在检测区域的占有时间 $[t_h, t_f]$ 内，则令 M 等于 $[t_h, t_f]$ 对应的拥堵权值。节点代价计算的评估函数表示为

$$f(u) = \omega_1 (g(u) + h(u)) + \omega_2 M \tag{13}$$

式中：$g(u)$ 为实际代价函数，表示进场航迹点 $B^{(1)}(x,y,z)$ 至扩展航迹点 $B^{(u)}(x,y,z)$ 的实际代价；$h(u)$ 为启发函数，表示扩展航迹点 $B^{(u)}(x,y,z)$ 至着陆点 $B^{(m)}(x,y,z)$ 的预估代价；ω_1 和 ω_2 分别为代价函数和拥堵权值的权重系数。

1）实际代价函数设计。为更精确地表示节点扩展中实际代价的计算，根据目标函数式（7）可知实际代价函数 $g(u)$ 为

$$g(u) = \sum_{p=1}^{u} T^p \tag{14}$$

式中：$g(u)$ 表示进场航迹点 $B^{(1)}(x,y,z)$ 至扩展航迹点 $B^{(u)}(x,y,z)$ 的实际飞行时间。

2）启发函数设计。启发函数 $h(u)$ 对路径点的求解速度和质量有重要影响，传统的启发函数采用单一距离代价计算方法，往往与实际飞行航程存在较大差距，导致所得到的路径通常不是最优解，此处采用欧氏距离与平均飞行速度的比值来表示：

$$h(u) = \sqrt{(x^u - x^n)^2 + (y^u - y^n)^2 + (z^u - z^n)^2} \Big/ \overline{V} \tag{15}$$

式中：$\overline{V}$ 为无人机 5 种不同飞行速度的平均值。

3　仿真验证及分析

3.1　仿真环境和参数设置

为验证本文算法在城市空间环境下对多旋翼无人机进场航迹规划的有效性，开展仿真实验。实验中选取 120 m×120 m×120 m 作为航迹规划环境空间，障碍物数量为 7 个，障碍物位置随机生成。城市空间模拟环境三维图像如图 3 所示。仿真所需设置参数如表 1 所示。

3.2　仿真结果分析

3.2.1　多旋翼无人机航迹规划方法有效性验证

选取数量分别为 10, 15, 20 架无人机进行航迹规划，无人机进场点 S 和起降点 G 信息已知，起降点数量设置为 3 个，同一起降点航空器落地间隔为 10 m。其中，10 架降落至起降点 G_1、G_2、G_3 的数量分别为 3、3、4；15 架降落至起降点 G_1、G_2、G_3 的数量分别为 6、5、4；20 架降落至起降点 G_1、G_2、G_3 的数量分别为 5、8、7。对本文算法开展有效性实验，采用本文算法及表 1 参数设置，其中，20 架无人机运行规模下进场航迹规划的结果如图 4 所示。

3.2.2　WM-A*算法效果分析

为评估 WM-A*算法在自由空域环境下多无人机进场航迹规划中的性能表现，本文基于不同架次的无人机进场规模，将改进后的 WM-A*算法与传统 A*算法进行实验并对比分析。考虑到无人机需要与障碍物及其他无人机之间保持安全距离，在拥

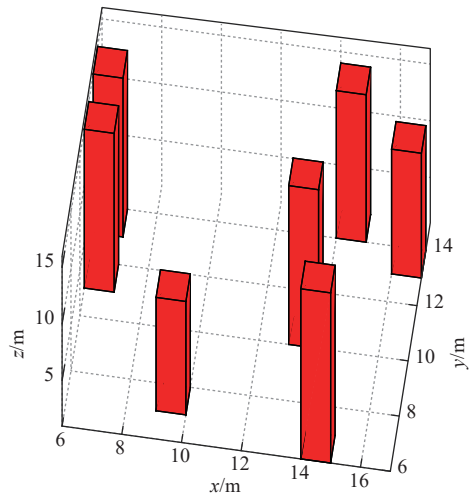

图3 三维空间环境地图

Fig. 3 Three dimensional space environment map

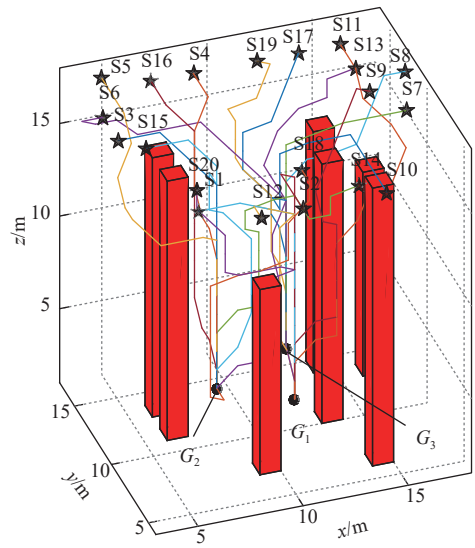

图4 20架无人机规模下航迹规划示意图

Fig. 4 Schematic diagram of track planning under scale of 20 unmanned aerial vehicles

表1 航迹规划模型及算法所需参数

Table 1 Required parameters of track planning model and algorithm

参数	数值
飞行高度最大值H_{max}/m	120
飞行高度最小值H_{min}/m	0
无人机与障碍物之间的最小安全间隔D_{min}/m	10
无人机之间的最小安全间隔D_r/m	10
栅格分辨率r/m	5
时间间隔约束Q/s	2
比例因子λ/m	8
沿x轴最大飞行速度V_1/(m·s^{-1})	6
沿y轴最大飞行速度V_2/(m·s^{-1})	6
沿z轴最大飞行速度V_3/(m·s^{-1})	3
沿面对角线最大飞行速度V_4/(m·s^{-1})	3
沿体对角线最大飞行速度V_5/(m·s^{-1})	3
代价函数权重系数ω_1	0.1
拥堵权值权重系数ω_2	0.9

堵权值地图中采用比例因子为8来划分拥堵检测区域，并且将具有重叠时间段、经过4架及以上无人机的区域认定为“拥堵区域”。

采用WM-A*算法、A*算法对无人机规模分别为10, 15, 20架的情况进行进场航迹规划，结果如表2所示。可知，本文WM-A*算法相较传统A*算法在规划多机进场时能够在保持牺牲较少飞行时间的提前下使区域避拥堵效果明显。在10, 15, 20架无人机进场运行过程中，总飞行时间分别牺牲了0.61%、1.91%、1.97%的情况下，对应的“拥堵区域”数量分别减少了48%、59.46%、61.11%，表明本文算法设计合理。

3.2.3 复杂障碍物环境下有效性验证及效果分析

为验证本文算法在其他环境下的有效性，增加障碍物数量至14个，障碍物大小、位置随机生成，保持其他参数不变，20架无人机进场运行的航迹规划结果如图5所示，本文WM-A*算法和传统A*算法航迹规划结果如表3所示。

由表3可知，在10, 15, 20架无人机进场运行过程中，总飞行时间分别牺牲了1.16%、2.15%、2.75%的情况下，对应的“拥堵区域”数量分别减少了45%、52.38%、44%。这表明在较复杂的障碍物空间环境下，WM-A*算法相比于A*算法依然可以规划出进场航迹并表现出良好的性能，得到的航迹规划结果可以保持牺牲较少飞行时间得到较好的避拥堵效果。

3.2.4 权重系数分析

面向复杂障碍物环境下无人机进场运行场景，针对10, 15, 20架无人机规模，分别通过设置9组不同的权重系数组合进行对照实验，分析权重系数ω_1、ω_2在不同取值情况下对实验结果产生的影响，

表2 不同进场规模下2种算法航迹规划结果对比

Table 2 Comparison of track planning results of two algorithms under different approach sizes

算法	飞行时间/s			拥堵区域个数		
	无人机为10架	无人机为15架	无人机为20架	无人机为10架	无人机为15架	无人机为20架
A*	272.06	429.22	571.86	25	37	54
WH-A*	273.71	437.40	583.10	13	15	21

其中, 20 架无人机规模实验数据如表 4 和图 6 所示。

表 4 给出了 20 架无人机规模在不同权重系数取值下的实验结果, 图 6 给出了该结果相较于传统 A*算法的变化情况。由表 3 可知, 传统 A*算法规划的飞行时间为 555.46 s, 拥堵区域数量为 50 个。通过表 4 和图 6 可知, 相较于传统 A*算法, 改进后的 WM-A*算法规划的飞行时间有所提高, 而区域拥堵数量有所下降。在ω_1取 0.8, ω_2取 0.2 时, 达到权重系数组合中飞行时间最小, 相较于传统 A*算法增加了 0.53%, 拥堵区域数量减少了 36%; 而当ω_1取 0.4, ω_2取 0.6 时, 飞行时间增加了 0.96%, 拥堵区域数量减少了 52%, 相较于前者在飞行时间多增加了 0.43% 的情况下拥堵区域数量多减少了 16%, 可取得较优结果。

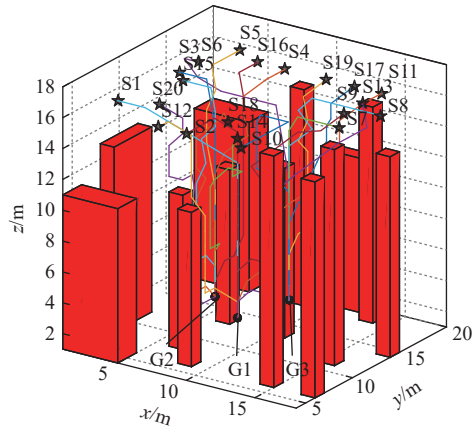

图 5　复杂障碍物环境下 20 架无人机规模下航迹规划示意图

Fig. 5　Schematic diagram of track planning under scale of 20 unmanned aerial vehicles under complex obstacle environment

表 3　复杂障碍物环境下 2 种算法航迹规划结果对比

Table 3　Comparison of track planning results between two algorithms under complex obstacle environment

算法	飞行时间/s			拥堵区域个数		
	无人机为10架	无人机为15架	无人机为20架	无人机为10架	无人机为15架	无人机为20架
A*	267.76	418.33	555.46	20	42	50
WH-A*	270.86	427.32	570.72	11	20	28

表 4　权重系数取值对航迹规划结果的影响

Table 4　Influence of weight value on result of track planning

ω_1	ω_2	飞行时间/s	拥堵区域个数
0.1	0.9	570.72	28
0.2	0.8	563.92	30
0.3	0.7	558.74	29
0.4	0.6	560.77	24
0.5	0.5	561.88	33
0.6	0.4	561.50	31
0.7	0.3	565.48	26
0.8	0.2	558.39	32
0.9	0.1	560.62	36

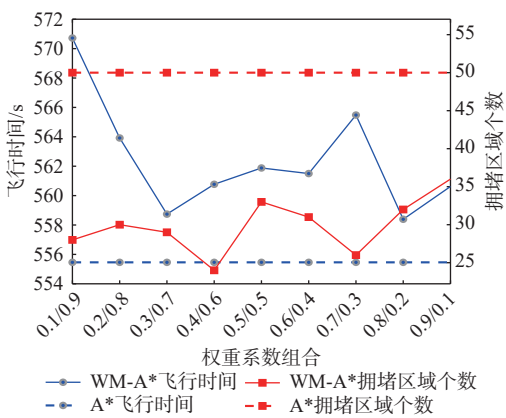

图 6　2 种算法下不同权重系数取值对航迹规划结果的影响

Fig. 6　Influence of different weight coefficient values on result of track planning under two algorithms

4　结　论

1) 结合现有研究基础定义进场空间范围, 面向自由空间环境构建以飞行时间最小为目标的无冲突航迹规划模型, 设计基于三维拥堵权值地图的改进 A*算法求解, 在多起降点的场景下实现多旋翼无人机避拥堵的无冲突进场。

2) 通过对比实验验证了在不同无人机规模、不同障碍物环境下 WM-A*相较于 A*算法在规划结果上有明显优势, 在最多牺牲 2.75% 的飞行时间时可使三维空间内拥堵区域分流效果明显, 提高空域利用效率。

3) 针对 10,15,20 架的无人机进场规模, 分别通过 9 组对照实验进行权重系数分析, 得出在多机进场航迹规划时, 较优权重系数ω_1为 0.4, ω_2为 0.6 时取得。在实际运行时可通过追求目标的侧重点来设置最有利的权重组合。

参考文献（References）

[1] 张洪海, 张连东, 刘嶂, 等. 城市低空物流无人机航迹规划模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 256-264.
Zhang H H, Zhang L D, Liu H, et al. Track planning model for logistics unmanned aerial vehicle in urban low-altitude airspace[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 256-264(in Chinese).

[2] 马德进, 陈洋, 朱振华. 面向河道巡检的多无人机协作路径规划[J]. 控制工程, 2025, 32(3): 545-552.

Ma D J, Chen Y, Zhu Z H. Multi UAVs cooperative path planning for river monitoring[J]. Control Engineering of China, 2025, 32(3): 545-552(in Chinese).

[3] 尹洪玉, 吴宇, 梁天骄. 固定翼无人机巡逻覆盖协同路径规划方法[J]. 航空学报, 2024, 45(6): 323-337.
Yin H Y, Wu Y, Liang T J. Cooperative path planning for patrol coverage of fixed wing UAV[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(6): 323-337(in Chinese).

[4] 张洪海, 李翰, 刘皞, 等. 城市区域物流无人机路径规划[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(6): 22-29.
Zhang H H, Li H, Liu H, et al. Path planning for logistics unmanned aerial vehicle in urban area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(6): 22-29(in Chinese).

[5] 张启钱, 许卫卫, 张洪海, 等. 复杂低空物流无人机路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(7): 1275-1286.
Zhang Q Q, Xu W W, Zhang H H, et al. Path planning for logistics UAV in complex low-altitude airspace[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(7): 1275-1286(in Chinese).

[6] 胡莘婷, 吴宇. 面向城市飞行安全的无人机离散型多路径规划方法[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 452-463.
Hu S T, Wu Y. Risk-based discrete multi-path planning method for UAVs in urban environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 452-463(in Chinese).

[7] 魏明, 孙雅茹, 孙博, 等. 带软时间窗的多调度中心 UAV 安全运输线路和航迹协同规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(10): 3233-3242.
Wei M, Sun Y R, Sun B, et al. Cooperative planning for safe transportation routes and flight paths of UAV with multiple dispatching centers and soft time windows[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(10): 3233-3242(in Chinese).

[8] Dai W, Pang B Z, Low K H. Conflict-free four-dimensional path planning for urban air mobility considering airspace occupancy[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107154.

[9] 赵嶷飞, 袁一凡. 小型多旋翼城市物流无人机进场航线设计方法研究[J]. 飞行力学, 2024, 42(4): 78-87.
Zhao Y F, Yuan Y F. Research on approach flight route design method of small multi-rotor urban logistics UAVs[J]. Flight Dynamics, 2024, 42(4): 78-87(in Chinese).

[10] 崔恺, 曾国奇, 林伟, 等. 一种基于图论的机场空域无人机流量控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(5): 978-987.
Cui K, Zeng G Q, Lin W, et al. Flow control method for UAV airport airspace based on graph theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(5): 978-987(in Chinese).

[11] Pradeep P, Wei P. Heuristic approach for arrival sequencing and scheduling for eVTOL aircraft in on-demand urban air mobility [C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.

[12] Kleinbekman I C, Mitici M, Wei P. Rolling-horizon electric vertical takeoff and landing arrival scheduling for on-demand urban air mobility[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2019, 17(3): 150-159.

[13] Kleinbekman I C, Mitici M A, Wei P. eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.

[14] Song K, Yeo H, Moon J H. Approach control concepts and optimal vertiport airspace design for urban air mobility (UAM) operation[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021, 22(4): 982-994.

[15] Song K, Yeo H. Development of optimal scheduling strategy and approach control model of multicopter VTOL aircraft for urban air mobility (UAM) operation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128: 103181.

[16] Shao Q, Shao M X, Lu Y. Terminal area control rules and eVTOL adaptive scheduling model for multi-vertiport system in urban air Mobility[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103385.

[17] Bertram J, Wei P. An efficient algorithm for self-organized terminal arrival in urban air mobility[C]//Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020.

[18] 程洁. 基于智能算法的多无人机协同 4D 路径规划研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2023: 19.
Cheng J. Multi-UAV collaborative 4D path planning algorithm based on intelligent algorithm[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2023: 19(in Chinese).

[19] 王祝, 张梦通, 张振鹏, 等. 基于多指标动态优先级的无人机协同路径规划[J]. 航空学报, 2024, 45(4): 256-269.
Wang Z, Zhang M T, Zhang Z P, et al. Multi-UAV cooperative path planning based on multi-index dynamic priority[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(4): 256-269(in Chinese).

Three-dimensional track planning for multi-UAV approach in free airspace environment

WANG Jianzhong*，LIANG Feida

(College of Air Traffic Management，Civil Aviation University of China，Tianjin 300300，China)

Abstract：In order to prevent congestion during regional approach phases, this study suggests a conflict-free multi-unmanned aerial vehicle (UAV) track planning strategy for metropolitan spatial environments under free airspace conditions. The method aims to ensure safe and efficient UAV approach operations while enhancing airspace utilization efficiency. Firstly, we defined the spatial scope of the approach phase. Secondly, we discretized the three-dimensional operational environment using the grid method and introduced the concept of grid occupancy time. UAV acted as dynamic obstacles, and we developed a conflict-free track planning model to minimize flight time. Subsequently, we enhanced the A* algorithm based on a three-dimensional congestion weight map to compute congestion-avoiding flight tracks for multiple UAV. Finally, we simulated approach scenarios with 10, 15, and 20 UAV under various obstacle environments. With cost weight coefficient values of 0.4, 0.6, the results demonstrate that in a complex obstacle environment, the improved algorithm decreases congested areas by 52% while sacrificing just 0.96% of flight time when compared to the A* algorithm. This significant optimization underscores the effectiveness of the model, confirming both its feasibility and the efficacy of the algorithm.

Keywords：unmanned aerial vehicle；track planning；grid occupancy time；A* algorithm；congestion weight map

Received：2024-07-01；**Accepted**：2024-09-20；**Published Online**：2024-10-11 16：43

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241010.2004.005

Foundation item：Tianjin Education Commission Scientific Research Project (2018KJ249)

* **Corresponding author**. E-mail：jz-wang@cauc.edu.cn