·航空科学与工程·航电与空管·

基于起降场漏斗形空域分层结构的无人机进离场程序设计

杨心月[1], 张冰玉[1], 王宝红[2], 韩　鹏[1*]
(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 中国民用航空局空中交通管理局航行情报服务中心综合业务室, 北京 100021)

摘　要：无人机在城市物流、智慧城市建设等多场景取得成功应用, 城市区域的高密度运行已成趋势。考虑空域结构、无人机性能、起降场特征、外围衔接航路等因素, 针对城市场景无人机起降场, 提出一种满足可悬停、进离场混合运行的漏斗形起降场空域及相应的进离场程序设计方法。首先, 根据国内外研究现状, 参考有人机成熟经验, 结合无人机特征提出漏斗形空域结构设计的方法及进离场程序设计中的关键因素; 接着以某市无人机物流配送应用场景为仿真工况, 设计其典型起降场空域进离场程序, 评价结果显示该程序具有较低的延误水平和安全风险。研究结果表明, 基于空域分层结构设计的无人机进离场程序可以适应起降场的高密度运行, 并具有较高的效率和安全系数。

关键词：空域结构; 进离场程序; 多旋翼无人机; 起降场
中图分类号：V279；V249　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673–159X(2024)04 − 0001 − 09
doi:10.12198/j.issn.1673 − 159X.5188

Design of UAV Funnel-shaped Approach/Departure Procedure Based on Airspace Hierarchy of Take-off and Landing Fields

YANG Xinyue[1], ZHANG Bingyu[1], WANG Baohong[2], HAN Peng[1*]
(1. *School of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin* 300300 *China*;
2. *Comprehensive Operations Office, Aeronautical Information Service Center of Air Traffic Management Bureau, CAAC, Beijing* 100021 *China*)

Abstract: UAVs are successfully used in many scenarios such as urban logistics and smart city construction, and along with the gradual opening of low-altitude airspace, high-density operations in urban areas have become a trend. Considering the airspace structure, UAV performance, landing and takeoff field characteristics, peripheral connecting flight paths, and other factors, the design of funnel-shaped airspace near the landing and takeoff fields of UAVs in urban scenes and the approach and departure procedure

收稿日期:2023 − 08 − 30
基金项目:国家自然科学基金青年基金资助(52102409)。
* **通信作者**:韩鹏(1991—), 副教授, 博士, 主要研究方向为无人机运行安全风险评估; 无人机空中交通管理; 空中交通管制规则。
ORCID: 0000 − 0003 − 0996 − 6103　　E-mail: p_han@cauc.edu.cn

引用格式:杨心月, 张冰玉, 王宝红, 等. 基于起降场漏斗形空域分层结构的无人机进离场程序设计[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 1 − 9.
YANG Xinyue, ZHANG Bingyu, WANG Baohong, et al. Design of UAV Funnel-shaped Approach/Departure Procedure Based on Airspace Hierarchy of Take-off and Landing Fields[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(4): 1 − 9.

design method are proposed. Firstly, based on the current situation of domestic and international research, the key elements and design methods of the approach and departure procedure design are proposed with reference to the mature experience of manned aircraft and the characteristics of UAVs; secondly, the airspace departure and arrival procedure of a typical take-off and landing field in city is designed with the UAV application scenario as a simulation condition to evaluate the operational efficiency and safety. The research results show that the airspace can adapt to the high-density operation of the landing field, and has a high efficiency and safety factor.

Keywords: airspace structure; departure and arrival procedure; multi-rotor drones; take-off and landing field

近年来,随着无人机在城市物流配送、日常巡逻、应急救援和数字化管理等智慧城市建设场景的广泛使用,无人机保有量快速增长,飞行时长和起降架次迅猛提升。无人机已经成为发展低空经济的重要支撑[1-2]。伴随航空器高密度运行趋势逐步形成,起降场附近空域使用效率将成为限制其整体容量的关键[3]。作为衔接航路与起降场的重要环节,无人机起降场附近空域结构及进离场程序设计成为研究热点。

目前,国内外学者已取得大量研究成果,通过2种方法提高无人机进离场效率和安全性:一是在战略阶段优化起降场附近空域结构及飞行程序[4];二是在战术阶段优化进离场运行策略。在空域结构优化研究中,基于NASA、城市空中交通运行概念的流程及场景[5-7]:Bertram等[8]采用同心圆环的漏斗形空域结构,通过固定翼无人机持续飞行等待完成排序过程,基于马尔可夫决策过程(MDP)为无人机提供引导和避免碰撞;Song等[9]拓展了空域结构的划分类型并针对可悬停的多旋翼无人机,提出基于漏斗形空域的自由路径单队列法(SBA)和约束路径分支队列法(BQA)2种空域结构模型,并分别为其开发了最优空域半径计算方法,在其后续研究中,进一步将2种模型结合,提出了增加可自由移动圆环的单队列法(SBAM)模型[10];Shao等[11]将地面交通的环岛结构引入漏斗形空域,通过在环岛上设置多个功能不同的交叉口结构,辅助航空器加入或脱离同心环,完成自由路径的多个爬升和下降航段,这种高度结构化的空域开拓了缓解进离场混合运行冲突的新方向;张洪海等[12]沿用传统运输航空的进离场程序设计方法,将垂直起降程序划分为6个程序模块。在运行规则优化方面:Kleinbekman等[13]沿用运输航空进离场方式,允许无人机在进入机场附近空域时以一定梯度下降或爬升(即浅层下降方式),在其后续研究中,考虑了起降场中起降平台数量对运行的影响[14];Pradeep等[15]提出了固定翼和多旋翼异构机队的混合运行规则。

上述研究在空域结构和运行规则的优化中成果丰硕。本文在此基础上,归纳无人机起降场空域结构和进离场程序设计方法及其关键要素,考虑进离场航空器类型、安全间隔、衔接航路网络、起降平台等关系,提出起降场空域效能评价指标;以某城市实际运行工况为例,设计起降场空域结构和进离场程序;通过仿真分析其运行效率和安全等关键效能指标以验证进离场程序的合理性。

1 起降场空域结构及考虑因素

1.1 起降场空域结构

根据传统运输航空的运行经验及低空空域的现有研究结果,在复杂条件下对空域结构化能够提高空域容量、空域利用率、安全等级和运行效率等性能指标。考虑到低空空域资源受限及运行技术需求,无人机起降场上空通常划设成“上大下小”的漏斗形空域。为提高无人机起降场空域的运行效率,国内外研究及主要试验基地实践中针对起降场空域设计了大量模型,通过空域结构化实现对漏斗形空域各结构的有效划分,进而从物理结构上提高空域效率,同时提高起降场的吞吐量,这也是起降场空域设计的发展趋势。空域结构化方式可归纳为分层、分区和综合3类,如图1所示,其中综合结构为分层与分区划分方式的结合。

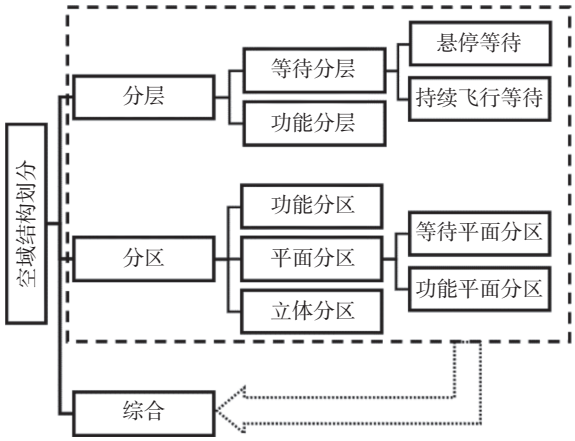

图 1　空域结构划分方式

Fig. 1　Structured approaches of airspace

分层即通过将空域按高度层垂直划分,分隔出高度不同的空域以适应无人机的不同进近阶段。SONG 等[10] 提出的 SBA 和 BQA 模型通过不同进场高度层悬停点之间的匹配,实现无人机分阶段式进近,如图 2(a)悬停等待分层,而 SBAM 模型则设置了持续飞行的等待层[10],3 种模型的进场航线与离场航线皆通过高度分离,如图 2(c)功能分层;BERTRAM 等[8] 设计的同心圆环空域利用了分层的方法为无人机提供了持续飞行完成排序过程的区域;PRADEEP 等[15] 通过无人机的速度控制实现了持续飞行等待,如图 2(b)持续飞行等待分层。

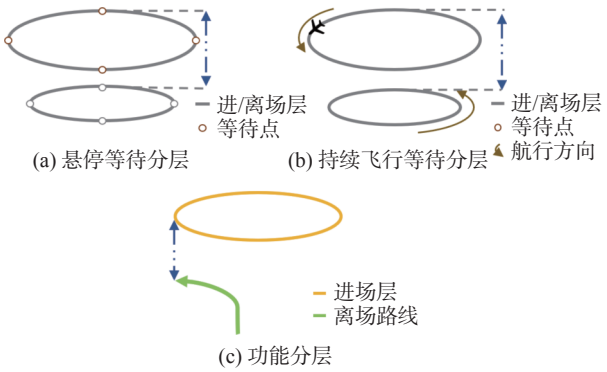

图 2　分层结构方式

Fig. 2　Layered structure approach

分区即通过直接对终端区进行功能分配来达到隔离进离场无人机流的目的。Song 等[10] 提出的 SBAM 模型采用对同一高度层划分同心圆环的方式为无人机提供外环等待区,如图 3(a)所示;Shao 等[11] 通过设置转换点将同一高度层分区,使该层同时具有进场与离场区域,如图 3(b)所示;Kleinbekman 等[13] 将空域按角度立体化划分为进场区与离场区,提高了起降场空域的安全系数,如图 3(c)所示。

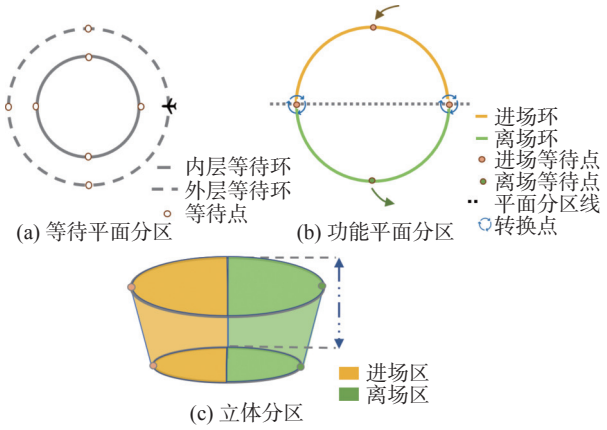

图 3　分区结构方式

Fig. 3　Partition structure approach

除了空域结构化分层、分区基本方式之外,还有管道等复杂度更高的结构。以提高空域整体性能为基本原则,起降场空域的结构化目的是赋予空域不同的功能及用途,为等待程序提供执行空域或实现进场与离场功能分离。起降场多种空域结构化方式的实现方法如表 1 所示。

表 1　多种空域结构化方式的实现方法

Tab. 1　Methods for implementing multiple airspace structuring approaches

空域结构	方法概述	细分结构
分层	将空域按高度层垂直划分,分隔出高度不同的飞行高度层以适应无人机的进离场程序的不同航段	等待分层 功能分层
分区	通过直接对起降场空域的不同扇区进行功能分配来达到隔离进离场无人机流和划设等待空域的目的	平面分区 立体分区
管道	通过划设固定的管道供无人机运行	单向管道 双向管道

空域分层可基本划分为等待层、进场层及离场层;空域分区主要为实现进离场无人机分离,包括靠高度分区、靠航向角度分区及组合的综合分区方式。

1.2　进离场程序设计考虑因素分析

在进离场程序设计过程中,应充分考虑所服务的无人驾驶航空器、空域条件、地面起降场保障条件等因素。

1)进离场程序应充分考虑无人驾驶航空器构型、性能、重量等因素,根据其垂直起降、滑跑起降要求、外形尺寸及重量、性能参数等差异分类设计。

2)起降场空域与空中航线网络在角度和高度的衔接。

3)起降场空域与地面保障的衔接,包括起降场与地面保障设施。综合考虑起降场设计标准、数量、布局、运行模式及尺寸。

4)起降场空域与运行的衔接,包括飞行计划、服务的航空器类型、航空器数量及流量及排序策略。

5)空域结构设计应考虑航空器性能包括飞行速度、最大升降速度及位置保持能力。

6)根据机型、性能、机载通信导航精度及地面监视精度考虑机间安全间隔。

2 进离场程序效能评价

进离场程序的评价指标考虑从运行安全性、运行效率 2 方面评估。参考空管领域对运输航空器效能评价指标的构建方法,设计反映进离场程序安全性和运行效率的指标,包括碰撞告警次数、违反间隔规定次数、违反间隔规定的持续时间等安全性指标,以及总延误时长、单架最长延误时间等效率指标。

2.1 安全性指标

在安全性评价指标中,按照无人机之间的最小距离划分为 3 类,按照严重程度依次为相对危险接近、违反安全间隔和碰撞警告。具体间隔标准如表 2 所示。

表 2 安全评价指标间隔标准

Tab. 2 Criteria for intervals of safety evaluation indicators

项目名称	间隔标准
碰撞警告	≤1CD
违反安全间隔	1CD ~1.5CD
相对危险接近	1.5CD ~ 2CD

CD 是 2 个无人机最外侧相对点之间的最长距离,包括所有可调部件延伸到最大外偏转程度的情况。无人机对的直线距离(DIS)计算公式为

$$\mathrm{DIS}_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(z_i-z_j)^2} \tag{1}$$

式中:i, j为某个特定无人机对;(x_i,y_i,z_i), (x_j,y_j,z_j)分别为无人机i, j的三维坐标位置。

将违反间隔规定的持续时间作为安全性评价指标,与违反间隔规定的次数具有等价性。即当无人机对间的直线距离低于安全间隔的间隔标准时,对该无人机对持续间隔丢失时长进行计时,直至该无人机对不再违反安全评价间隔标准。

2.2 效率指标

采用起降场空域内无人机的总延误时间与平均延误时间反映进离场效率,采用最小延误与最大延误的差值反映无人机的延误区间。

总延误时间的计算公式为

$$\text{总延误时间}=\sum_{i\in G}|\mathrm{ATA}_i-\mathrm{ETA}_i| \tag{2}$$

式中:i是某个特定无人机;G 是飞行计划中所有多旋翼无人机的集合;ATA_i表示第i架无人机到达数据输出点的时间;ETA_i为该航班的预计到达时间。

平均延误时间的计算公式为

$$\frac{1}{N_1}\times\sum_{i\in G}|\mathrm{ATA}_i-\mathrm{ETA}_i| \tag{3}$$

式中N_1是 G 集合内无人机的数量。

队列中最后一架无人机的延误计算公式为

$$\begin{aligned}&|\mathrm{ATA}_s-\mathrm{ETA}_s|, s\in N_1\\&\mathrm{ATA}_s=\max\{\mathrm{ATA}_1,\cdots,\mathrm{ATA}_{N_1}\}\end{aligned} \tag{4}$$

式中:ATA_s表示最晚到达数据输出点无人机的到达时间;ETA_s即为该航班的预计到达时间。

最小延误与最大延误差值计算公式为

$$\begin{aligned}&\max|\mathrm{ATA}_i-\mathrm{ETA}_i|-\min|\mathrm{ATA}_j-\mathrm{ETA}_j|,\\&i,j\in G, i\neq j\end{aligned} \tag{5}$$

3 算例分析

算例主要包括仿真工况、起降场空域结构以及进离场程序效能评价 3 部分内容,总体流程如图 4 所示。

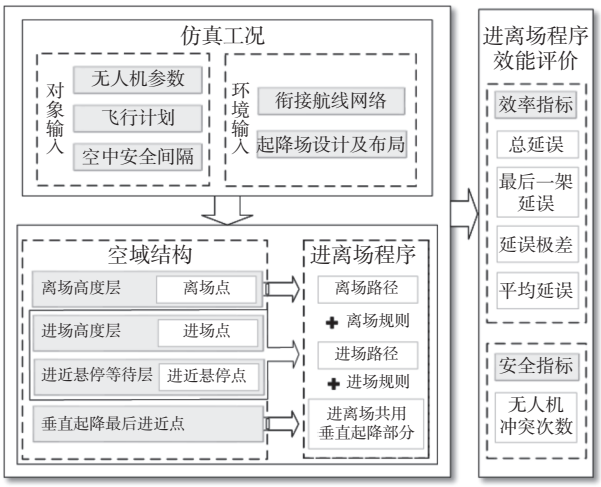

图 4 总体流程图

Fig. 4 General flowchart of the procedure

3.1　工况

以某城市在疫情期间开通 13 条无人机航线进行常态化无人机核酸样本物流配送服务为例,在区内 15 个常态化核酸检测样本中转站和 4 个检测机构间往返运送,单日运输量达 50 000 管核酸样本。针对其中一个与衔接网络交汇最多的核酸检测机构(如图 5 所示),抽象其运行工况,以其与相关送检方之间的航线为仿真模拟环境,生成仿真飞行计划获取输入输出。

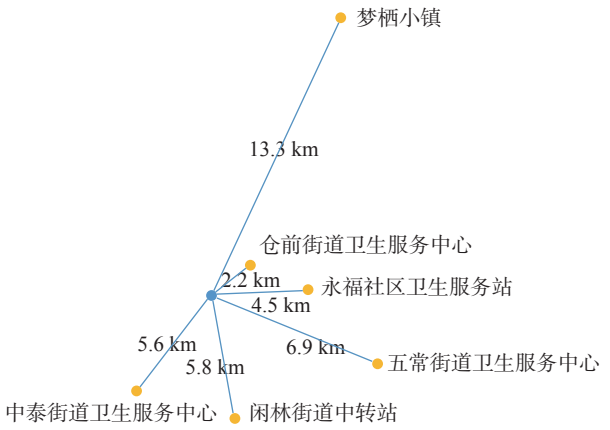

图 5　起降场本场与外围起降点相对位置

Fig. 5　Position of the landing site in relation to the perimeter landing site

3.1.1　对象输入

1)无人机及其参数。选用某公司常见的城市末端配送的多旋翼无人机:巡航速度为 10 m/s,起降场空域结构内升降速度为 3 m/s(垂直速度),垂直上升速度为 8 m/s(采用最大升降速度),飞行状态改变用时为每 10 m/s 用时 2 s,航空器尺寸为 1 240×1 240×417 mm^3。

2)飞行计划。将外围起降场向本场进场无人机的起飞间隔设置为 2 min(工况 2 为 3 min),本场向外围起降场离场无人机的起飞间隔设置为 1 min/架,目的地起降场从梦溪小镇沿顺时针次序顺序循环起飞。

3)空中安全间隔。参考《民用航空空中交通管理规则》[16] 中对直升机安全间隔的规定,选取旋翼转动时最大宽度的 4 倍作为安全间隔。

3.1.2　环境输入

1)衔接航线网络。与该核酸检测机构相连的起降点分别为梦栖小镇、仓前街道卫生服务中心、永福社区卫生服务站、五常街道卫生服务中心,闲林街道中转站、中秦街道卫生服务中心等 6 处。

2)起降场设计及布局。为评价空域与程序设计模型方法,对仿真环境进行简化,仅设计一个机坪起降场,且不考虑起降场内部的滑行。

3.2　起降场空域及进离场程序设计

3.2.1　空域结构

为衔接外围起降点,考虑进离场点与航线快速便捷衔接,将图 6 中 6 个点选做无人机进入和离开起降场空域的起始位置,如图 6 所示。

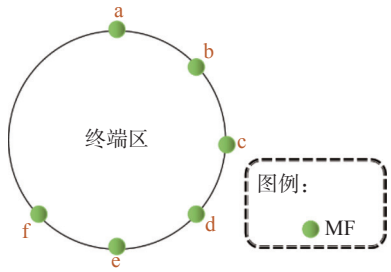

图 6　与衔接的航路网络相连的进离场点

Fig. 6　Approach and departure points connected to the articulated route network

为提高空域容量、空域便捷性、空域运行效率和安全性,采用分层和分区综合的空域结构方法。同时,考虑到进场程序中排序过程对等待程序的需求,本文将进场层分成 2 层。为衔接起降场与外围航路,将离场层高度设置为与巡航阶段同一高度。

依据空域结构划分方式的分层结构,将起降场空域设计为 3 层式空域模型,并设计配套的进离场程序,如图 7、8 所示。仅分层的空域结构模型主要采用功能分层和等待分层的结构化方式,将无人机起降场空域分为离场层、进场层及等待层,其中离场层高于进场层,等待层为无人机进近悬停等待层,垂直起降最后进近点以下为进离场共同使用路径。依据仿真背景在外接航线方向各设置 6 个离场门(departure gate)和进场门(approach gate),在对应高度层 0 至 225 度方向均匀分布,与外围起降场空域边界的进离场点一一相接。

进场层与进近等待层等待点之间通过对应分支的固定进场路径衔接,无人机在等待点与最后进近点间也应按照固定路径飞行。进场多旋翼无人机巡航高度为 90 m,离场多旋翼无人机巡航高度为 105 m。相关参数设置如表 3 所示。

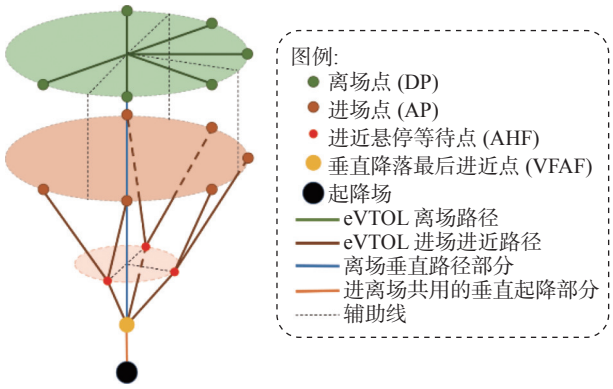

图 7 空域结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the airspace structure

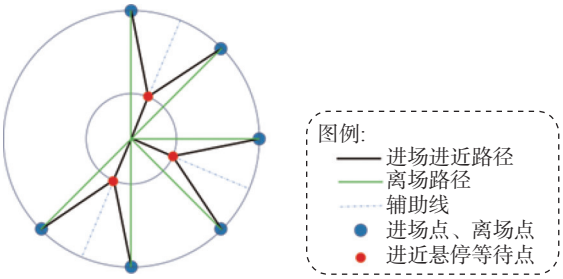

图 8 空域结构俯瞰图

Fig. 8 Overhead view of airspace structure

3.2.2 进离场程序及规则

1)进场程序。为保证运行安全,进离场点、进近悬停等待点、垂直降落最后进近点及点与点之间的衔接路径都应具有独占性,在前一架无人机离开时点被释放转变为解除占用状态,起降场与垂直起降部分同理。无人机进场流程图如图 9 所示。

无人机到达终端区边界后,通过进场门继续进近程序时,就近从未被占用的空闲进场点进入进场高度层。当 2 架处于同时等待继续进近许可状态的无人机位于进场高度层的相邻等待点,且对应分支为同一下层进近悬停等待点时,首先判定其路径分支对应的进近悬停等待点是否可用,并按照飞行计划优先的排序规则,给预计着陆时间较早的无人机发送进近许可,进场无人机沿着进场进近路径移动至进近悬停等待层;同时为另一架无人机发布继续等待指令,直至对应进近悬停等待点解除占用状态,该无人机可继续进近。进近悬停等待点至垂直降落最后进近点航段同理。到达垂直起降最后进近点的无人机应判定起降场的可用性。垂直降落最后进近点与起降场间一对一的垂直降落路径无排序过程,在起降场为非占用状态、进离场共用垂直起将部分未被离场无人机占用,且最近的离场无人机是否已经上升至进近悬停等待层高度及以

表 3 空域结构相关参数

Tab. 3 Parameters of airspace structure

结构	指标项	参数
离场高度层	高度	105 m
	半径	45 m
进场高度层	高度	90 m
	半径	45 m
进近悬停等待层	高度	30 m
	半径	15 m
垂直起降最后进近点	高度	15 m

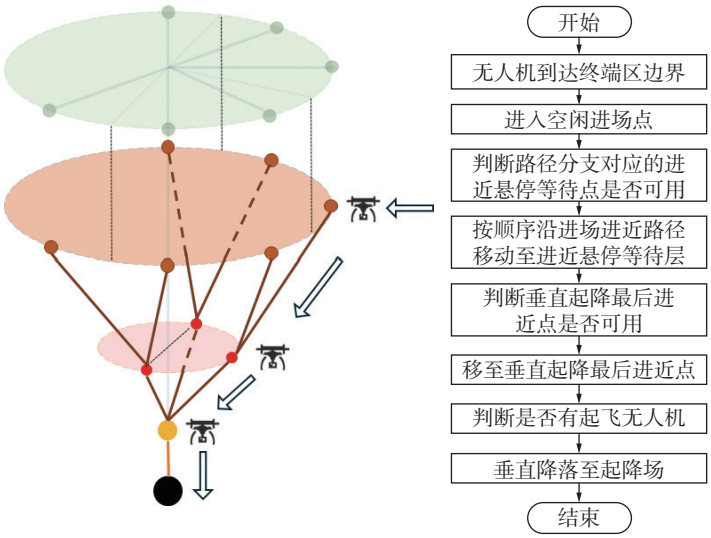

图 9 无人机进场流程图

Fig. 9 UAV approach process flowchart

上、当前时间之后 7.5~17.5 s 内无起飞无人机的情况下,进场无人机可直接降落。

2)离场程序。标准离场程序为无人机直接从起降场垂直上升至离场高度层,并根据目的地选择离场门,按照既定离场路径离场,通过起降场空域边界离场点与航路相接。为提高运行效率,对于连续离场的无人机,当前一架无人机通过垂直降落最后进近点时即可为准备离场的无人机发送放行许可。无人机离场流程图如图 10 所示。

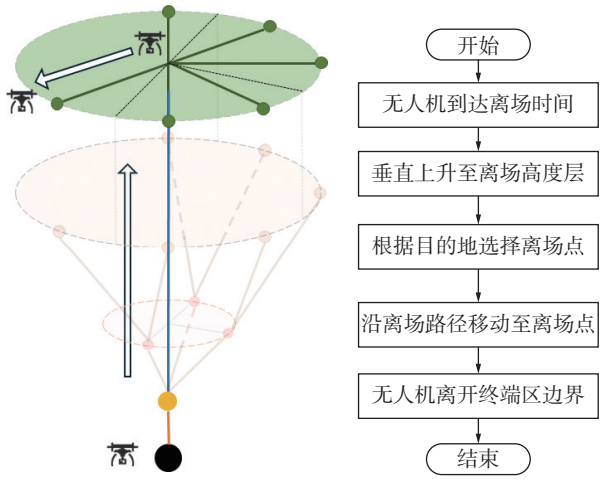

图 10　无人机离场流程图

Fig. 10　UAV departure process flowchart

为避免进离场无人机相撞,进离场共用垂直起将部分应同时具有独占性和单向性,不允许进离场无人机出现对头相遇情况。因此程序为离场无人机赋予更高的移动优先级,以应对起降场地面资源受限的约束。向离场无人机发送放行许可时,垂直降落最后进近点将更新为正被占用状态,直至无人机通过进近悬停等待层,垂直降落最后进近点即被释放。

3.3　仿真实验

3.3.1　仿真逻辑

仿真通过 MATLAB 模拟运行,根据设计的空域结构和飞行程序,在遵循运行原则的前提下模拟无人机的进离场运行过程。仿真采用时域比较法来模拟判断冲突与延误,并对可能发生冲突的时段进行坐标测距评估安全性。为简化仿真实验,将起降场置于三维坐标系原点,各等待节点及无人机的实时位置采用三维坐标表示,仿真中不考虑无人机状态转变过程中的反应时间和加速度,认为无人机在起降场空域内各阶段匀速飞行。在程序运行过程中,以 1 s 为迭代单位时间,实时记录起降场空域内所有无人机的坐标位置。通过判断各等待节点的占用状态变量及无人机的航行数据,作为发布移动指令的决策依据。仿真逻辑包括进场程序和离场程序 2 部分。

进场程序的每个点都是程序单个迭代周期内的决策点。首先判断是否有无人机已经到达该点,若位于此决策点的无人机数量大于 1 架,需根据无人机航行数据信息,按照到达决策点的早晚次序进行排序,到达决策点时间最早的无人机具有最高移动优先级,随着到达时间增大无人机移动优先级依次递减,根据移动优先级顺序逐个对无人机进行调度。对单架次无人机进行调度时,首先判断无人机所在决策点的下层(对应分支)点的状态变量,若为可用状态,从此刻开始该无人机向目标点移动直至到达并进入下一决策点;否则,无人机获得继续等待指令直至下一次迭代。离场程序与进场程序类似但由于离场路径节点数量限制,单个迭代周期内至多只有一架无人机执行离场程序。

3.3.2　仿真结果分析

经过仿真计算,分别得到 2 组飞行计划下,每架进离场无人机的实际离场时间、实际进场时间以及飞行轨迹。按照进离场程序效能评价方法,进行效率和安全性的评价,其结果如表 4 和表 5 所示。可以看出,该起降场空域和进离场程序设计具有较高的安全性,当航班量较低时,队列的最后一架航班不存在延误情况,说明系统对延误的吸收能力较强,当航班密度增大时,延误情况加重,但仍处于较低水平。仿真表明,该空域设计和进离场程序设计是安全高效的。

表 4　评价指标结果(2 min)

Tab. 4　Evaluation of indicator results(2 min)

一级指标	二级指标	数值
效率指标	总延误时长/s	970
	最后一架航班延误/s	5
	延误时间极差/s	10
	平均延误时间/s	4.04
安全性指标	航空器冲突数/次	0

表 5 评价指标结果(3 min)

Tab. 5 Evaluation of indicator results (3 min)

一级指标	二级指标	数值
效率指标	总延误时长/s	190
	最后一架航班延误/s	0
	延误时间极差/s	—
	平均延误时间/s	0.79
安全性指标	航空器冲突数/次	0

4 结论

本文针对无人机起降场附近空域管理发展现状,对起降场空域设计及进离场程序设计开展了分析研究。通过归纳整理起降场空域的结构化方式,确定了目前已有的主要结构化设计方法,提出了起降场进离场程序设计需要考虑的重要因素,如无人机性能、空域条件等。本文依据仿真背景设计了一种基于起降场漏斗形空域分层结构下的进离场程序,并采用提出的进离场程序效能评价指标对其效率和安全性进行评估,其结果表明,该进离场程序设计有助于适应未来起降场高密度运行需求,能够有效保障起降场附近空域无人机进离场的运行效率和安全系数,可为今后无人机起降场的进离场程序设计提供有效参考。

参 考 文 献

[1] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 023238.

QUAN Q, LI G, BAI Y Q, et al. Low altitude UAV traffic management: an introductory overview and proposal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 023238.

[2] 张洪海, 邹依原, 张启钱, 等. 未来城市空中交通管理研究综述[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 75 − 99.

ZHANG H H, ZOU Y Y, ZHANG Q Q, et al. Future urban air mobility management: review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 75 − 99.

[3] SCHWEIGER K, KNABE F, KORN B. An exemplary definition of a vertidrome's airside concept of operations[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 125: 107144.

[4] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35 − 54.

LI C L, QU W Q, LI Y D, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35 − 54.

[5] GIPSON L. 2017. NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study[EB/OL]//NASA. (2017-11-07)[2023-02-25]. http://www.nasa.gov/aero/nasa-embraces-urban-air-mobility.

[6] Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation[EB/OL]. [2023-02-25]. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:21731018.

[7] CityAirbus NextGen-Urban Air Mobility-Airbus [EB/OL].[2023-02-25].https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus-nextgen.

[8] BERTRAM J R, WEI P. An Efficient Algorithm for Self-Organized Terminal Arrival in Urban Air Mobility[J]. 10.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 张洪海, 李靖宇, 费毓晗, 等. 城区物流无人机垂直起降程序设计方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(5): 1 − 10.

ZHANG H H, LI J Y, FEI Y H, et al. Design method for vertical take off and landing procedures for logistics UAVs in urban areas[J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(5): 1 − 10.

[13] KLEINBEKMAN I C, MITICI M A, WEI P. eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility[C]//2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). London, UK: IEEE, 2018: 1−7.

[14] 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, 2020, 17(3): 150 − 159.

[15] PRADEEP P, WEI P. Heuristic approach for arrival management of aircraft in on-demand urban air mobility[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2020: 1−12.

[16] 民用航空空中交通管理规则[EB/OL][2023-06-20].https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/03/content_5717885.htm.

Civil aviation air traffic management rules[EB/OL][2023-06-20].https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/03/content_5717885.htm.

(责任编辑:饶莉)