

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.06.001

城市低空航路规划研究综述

张洪海, 李 珊, 夷 珈, 钟 罡

(南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

摘要: 随着低空空域开放进程的不断加速, 低空航路规划的重要性逐渐显现。航路作为航空器运行的主要媒介, 可以保证航空器安全高效的运行。当前, 为解决尚未统一的低空航路划设规范与日益增长的低空航空器运行需求之间的矛盾, 必须针对复杂低空空域环境特点, 构建完备、合理的低空航路规划体系。首先, 从城市低空航路规划的相关概念和发展历程出发, 重点梳理航路相关概念; 其次, 基于中国空域管理特点与未来低空发展趋势, 融合空域规划、基础设施建设、航路构建、运行评估等多方面的理论研究, 提出城市低空航路规划框架体系; 最后, 剖析城市低空航路规划所面临的挑战与机遇, 为未来城市低空航路构建提供参考和支持。

关键词: 低空运输; 航路规划; 交通管理; 运行概念

中图分类号: V355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)06-0827-12

Review on Urban Low-Altitude Air Route Planning

ZHANG Honghai, LI Shan, YI Jia, ZHONG Gang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the acceleration of the low altitude airspace opening process, the importance of low-altitude air route planning gradually appears. Air routes could ensure the safe and efficiency for aircrafts operation. However, there is no unified specification of low-altitude air routes planning at present, which lags behind the increasing demand in the future. Therefore, a complete and reasonable low-altitude air route planning system must be constructed. Based on the concepts and the development of low-altitude route planning, this paper focuses on the studies world-wide on urban air routes concept, air routes network design and construction, airspace structure and capacity. Then, according to the characteristics of airspace management in China and the future trend, the framework system of urban low-altitude air routes planning is proposed based on the theoretical research of airspace planning, infrastructure construction, air routes construction and operation evaluation. Finally, the challenges of urban low-altitude air routes planning development are analyzed.

Key words: low-altitude transportation; air route planning; traffic management; concept of operation

1 城市低空航路规划概况

1.1 基本概念

2019年5月14日, 民航局在《促进民用无人驾驶航空发展的指导意见(征求意见稿)》中明确提出

加强对于“低空航路航线规划与构建技术”的研究, 促进中国低空空域资源的合理开发与高效利用^[1]。

低空空域是“低慢小”航空器实现空中交通的可航空间, 是国家空域体系的重要组成部分。中国现行

基金项目: 国家自然科学基金(71971114)资助项目。

收稿日期: 2021-11-15; **修订日期:** 2021-11-30

作者简介: 张洪海, 男, 教授, 博士生导师, 民航科技创新拔尖人才, 江苏省高校“青蓝工程”青年学术带头人。研究方向: 通航运行与无人机管控、城市空中交通。主持多项国家自然科学基金、国家重点研发计划项目等科研项目, 荣获省部级科技进步奖9项。

通信作者: 张洪海, E-mail: honghaizhang@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张洪海, 李珊, 夷珈, 等. 城市低空航路规划研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 827-838. ZHANG Honghai, LI Shan, YI Jia, et al. Review on urban low-altitude air route planning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 827-838.

的低空空域管理体制是在国家空管委领导下,由空军负责统一组织实施。《低空空域使用管理规定(试行)(征求意见稿)》明确提出中国低空空域原则上是指全国范围内真高1 000 m(含)以下区域^[2]。随着未来发展需要,《关于促进通用航空业发展的指导意见》提出可将低空空域范围扩展至3 000 m^[3],这将大幅度提升低空飞行器的活动空间。航路由国家统一划定的具有一定宽度和高度的空中通道,属于特殊的走廊式保护空域。目前,航路按“东单西双”原则划分航路高度层,即向东飞的航空器使用单数高度层,向西飞的航空器使用双数高度层。航路配备全向信标台(VHF omni-directional range, VOR)、测距仪(Distance measure equipment, DME)等一系列助航设施,为沿途航空器提供通信、导航和监视等空中交通服务,以保障航空器的安全有效运行。

低空时空环境复杂多变,传统的航路规划方法已无法匹配目前低空发展的实际情况,亟需研究适用于低空的航路规划方法。近年来,加拿大滑铁卢大学、美国航空航天局、新加坡南洋理工大学、荷兰代尔夫特理工大学、中国南京航空航天大学等国内外相关组织与机构逐步深入开展对于城市低空航路规划的研究。城市低空航路规划作为空中交通管理的基础,是实现复杂低空有人机与无人机混合密集飞行的关键手段,也是大力发展通用航空与无人机产业的重要前提。城市低空航路规划涉及空域规划、航路构建、基础设施建设和运行评估等多领域,其中航路网络设计是低空航路规划的核心内容,也是近年来国内外相关机构的重点研究内容之一。滑铁卢大学^[4]面向无人机交通管理,设计出一种包含航路、节点、自由飞行区域、连接路径、交叉口等新概念的分层无人机网络控制架构(The Internet of drones, IoD)。美国航空航天局^[5]以沃斯堡机场都市区为研究对象,设计出一种以达拉斯垂直起降机场为中心,与周边19个其他城市垂直起降机场为关键枢纽的放射形城际空中交通航路网络结构。该航路网络共包含190条不同的航路,可以实现区域内各城市之间的高效通勤。南洋理工大学^[6]依托城市布局提出了3种低空航路结构。代尔夫特理工大学^[7]提出了固定路线结构的管道航路,该航路由节点与边所组成的结构,除节点外,在同一水平面内的管道永不相交,且它们彼此之上的管层节点密度逐渐减小。南京航空航天大学以上海某区域为设计场景,提出了城市空中交通发展初级阶段概念图^[8],重点围绕物流无人机的末端配送进行了航路网络设计^[9]。北京航空航天大学提出了“空中高速公路(Sky highway)”,设计了

航路网结构参数和提出基本控制方案,侧重将分布式自主控制和集中式调度相结合,以提高未来无人机流量^[10]。低空空域内运行的载运工具主要包括垂直起降(Vertical take off and landing, VTOL)、航空器和短距起降(Short take off and landing, STOL)航空器等。部分学者认为此类航空器飞行灵活、自由度高,仅需较小的起降场地便可轻松响应用户点对点的运输需求,会成为未来城市空中交通的主要载运工具,面向垂直起降航空器运行的低空航路网络设计研究也逐渐成为热点。

城市低空的航路规划方法研究逐渐走向成熟,各国研究机构依据本国低空空域的管理情况与相关产业发展的实际需求,围绕不同的运行场景开展研究。然而,多数研究并未应用至实际运行场景中,仍以仿真验证为主。城市低空的航路规划不仅需要理论的支撑,更要考虑到空域管理、通导监技术、基础设施建设等多方面因素。尤其中国空域管理更为严格,低空空域尚未完全开放,国外的研究成果无法完全适应中国低空空域的运行需要。因此需结合中国未来空中交通的发展需求,构建适用于中国的城市低空航路规划方案,以实现城市复杂低空多类型航空器混合有序的运行。在航路规划建设过程中,主要包括空域分类划设、基础设施建设、航路网络构建和运行安全评估4个层面。低空空域划设是构建航路的基石,航路的高效运行离不开起降场、通信导航设备等基础设施的科学布局,运行安全评估又为规划合理可靠的航路提供重要参考。

1.2 发展需求

近年来城市车辆数量急剧增长,交通拥堵日益严重,有限的陆用空间与不断增长的交通需求之间矛盾显著,亟需探索低空空域发展潜力,发掘新兴交通模式,逐步建立城市低空航路规划体系,以满足低空航空器的运行需求;另外,随着通用航空与无人机产业迎来发展热潮,随之而来的低空飞行器“黑飞”乱象日渐凸显,对地区的治安管理、公众隐私等方面构成威胁。

在空中交通建设方面,韩国在城市空中交通规划方案中提出“4阶段”发展计划,在建设初期(2025—2029年)计划完成初期航路与相关基础设施的建设,在发展期(2030—2035年)计划扩大航线规模,增加商业元素,预计在2035年以后实现低空航空器在可扩展的空域环境中自主飞行。在通用航空发展方面,中国航空运输协会在《2020—2021中国通用航空发展报告》中指出,截至2020年底,全国通用航空企业共计523家,通用航空器在册总数4 165架,全行业无人机运营企业为11 084

家,注册无人机达51.7万^[11]。在物流运输方面,亚马逊公司针对用户的包裹重量进行分析,统计结果显示大约83%的包裹在2.5 kg以下^[12],86%的包裹能够满足无人机运输承载能力要求^[13]。美国国家航空航天局在城市空中交通市场报告中提出,预计在2030年无人机物流将承担5亿单的包裹配送服务^[14]。

低空交通市场规模不断扩大、用户需求日益增长,但城市低空航路的规划体系在空域分类划设、基础设施建设、航路网络构建和运行安全评估等方面还需要进一步完善,以促进低空产业链的稳健发展。

2 城市低空航路规划发展历程

2.1 发展进程

低空航路的设计与构建可以追溯至20世纪40年代,自1946年美国贝尔47直升机首次获得航空适航证以来,人们便开始了对低空空域资源的探索^[15]。近年来,伴随着低空航空器性能逐步提高,低空交通需求日益旺盛,国内外诸多学者纷纷开展了对低空航路规划的研究。纵观国内外低空航路规划发展进程和现状,在科研驱动、政策利好的良好环境下,中国逐渐形成优势。目前,国内外低空航路的发展大致可为科学研究和试点验证两部分。

(1) 科学研究

国外南洋理工团队为主要代表,该团队从2014年起就将城市上空的低空航路规划作为重点研究内容之一,并在2017年已形成了较为完整的低空航路构建体系,整个框架体系涉及起降程序设计、运行风险评估、动态航路规划等多项关键技术^[16-17]。国内,柳煌等^[18]提出低空航路划设的基本步骤。其中具体流程包括:①确定航路规划的任务区域,明确地形障碍物威胁,无人机性能参数等限制条件;②采用合适的航路规划算法,参考任务要求,在限制条件约束下生成无人机的参考航路;③对航路进行优化,满足越障高度,最小转弯半径等限制,并划设相应的保护区。随后,白龙等^[19]归纳总结了城市区域(超)低空空域无人机活动高度-密度规则、覆盖区规则和隔离区规则以及优化方式。

(2) 试点验证

国外,美国于2017年首次提出无人机交通管理走廊,建造了一条80 km长的无人机空中航路,并利用雷达和地面感应器对无人机进行追踪,确保其安全间隔^[20]。2017年2月,新加坡民航局启动了“Skyways项目”,测试无人机在预定空中航路中运

输物品的实际效果^[21]。国内,也逐步开展低空航路建设与运行试点工作,湖南在3 000 m以下低空空域实现了航空器通信导航全覆盖、低空空域可监管、航空器运行能管理,为全国低空开放提供了模版,为通航航路的发展提供契机。

总体而言,中国多将航空器的运行安全作为低空航路规划的重要参考因素,国外多考虑商业运行的实际需求。未来随着低空交通生态体系在空域管理、适航条例、基础设施建设以及社会认知接受度等方面进一步的完善^[22],低空航路的研究范畴也将进一步扩展。未来城市低空航路的建设将与地理信息系统、遥感技术相结合,利用地理信息系统和地理网格测绘技术构建高精度、高分辨率的地理信息,并且通过遥感技术,动态地更新数据,以支持城市低空航路的建设。另外,完善人工和自然障碍物地理围栏,明确地理围栏保护区范围,建立地理围栏边界定量更新系统,也是城市低空航路发展的重要支撑^[23]。

2.2 研究现状

航路概念方面,未来无人机将会成为低空空域内运行的主要航空器类型之一,中国科学院在2017年提出了针对无人机运行的低空公共航路,并构建了较为完整的理论体系^[24]。无人机低空航路的概念最初由中国科学院率先提出并得到业界和中国民用航空局认可。2018年,中国航空运输协会通用航空分会提出“小微航路”概念,建立有别于运输航空的低空航路审批和运行保障机制,可以管理绝大部分通用航空飞行作业,保障通用航空作业合理合法地运行^[25]。同年,南洋理工大学^[6]提出了适应性城市空域的概念(Adaptive urban airspace, AdUrA),涉及不同类型的航路网络以满足不同的城市空中交通运输需求。2019年,鹿明等^[26]定义了无人机低空多级公共航路的概念,研究了无人机低空多级航路规划的关键技术,将其应用到全国和京津冀航路网规划设计中,介绍了基于地理信息技术手段生成的区域低空无人机航路网的构建过程,展示了全国无人机低空骨干航路和区域多级航路示意图。2020年,徐晨晨等^[27]提出一种基于遥感和地理信息技术的城镇化区域低空公共航路网的高效迭代构建方法,基于地面路网生成具有多高度层的Ⅰ级航路网,利用航路正约束地理要素生成Ⅱ级航路网,规避负约束地理要素构建Ⅲ级航路网,通过仿真飞行和实际飞行测试分别生成Ⅳ、Ⅴ级航路网,通过实际测量对比分析来检验无航空器飞行的环境地图,保证飞行的安全性。随着低空航路概念的进一步普及和深化研究,杭州迅蚁网络科技有限公司在杭州城区开展无人机快递运

送试点工作,并在杭州重点示范区内,进行了无人机低空物流航路规划。

航路网络设计与构建方面,张启瑞等^[28]在2015年提出面向密集建筑物空间的局部回溯航路设计方法,建立了局部视界范围内的最优回溯模型,通过添加相应约束条件来描述密集建筑物空间航路设计问题,提出基于局部回溯和广度优先思想相结合的综合路径规划方法,实现了对不规则障碍空间中“航路死区”的突破。2016年,加拿大滑铁卢大学^[4]针对航路网络结构进行了初步的定义与设计。2017年,澳大利亚昆士兰科技大学^[29]做出了世界上首次对航路网络结构建模的尝试,首先选择适合嵌入无人机系统(Unmanned aerial system, UAS)航路网络的城市低空可行区域,然后利用改进KNN(K-nearest neighbour)分类算法确定无人驾驶交通网络的航路结构,其思想在于对每个网络节点 n ,找到与其最接近的 K 个节点,并假设该节点与其最接近的 K 个节点之间存在网络连接。对于第 i 个节点,第 k 个最小的欧式距离 d_i^k 到由 N^k 定义的节点集合的欧氏距离为

$$\begin{cases} d_i^k = \min_{j \in N^k} \{d(n_i, n_j)\} & k \in \{1, \dots, K\} \\ d(n_i, n_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x(\cdot)$ 、 $y(\cdot)$ 分别为对应节点的经度和纬度。

空域结构与容量方面,Vidosavljevic等^[30]在2015年针对无人机在城市空域运行的概念提出了非结构化空域和3种结构化空域(Layers, zones, tubes)的设想,为未来50年内的城市环境研究全新的空域设计概念,确定城市空域设计概念中涉及的结构以及其影响交通状况的复杂性。同年,Clothier等^[31]设计了Barrier-bow-tie模型,说明如何将空中碰撞事故的风险管理控制在可接受水平范围内,通过实时优化空中航路实现碰撞事故的动态规避。2016年,Sunil等^[32]将自由航路、分层航路、扇形航路和管道航路这4个空域概念置于多个交通需求场景中,从交通需求变化对安全、效率和稳定性指标的影响推断出结构-容量关系。安全表示航空器之间保持安全间隔的能力,表示为

$$\text{Int}_{\text{severity}} = \max_{t_{\text{0int}} \sim t_{\text{1int}}} [\min(\hat{I}_H(t), \hat{I}_V(t))] \quad (2)$$

式中: $\hat{I}_H(t)$ 、 $\hat{I}_V(t)$ 分别表示水平和垂直入侵量; t_{0int} 、 t_{1int} 分别表示入侵开始和结束的时间;效率用航空器飞行时所做的功度量,充分考虑了航空器飞行轨迹的优越性,计算公式为

$$W = \int_{\text{path}} T ds \quad (3)$$

式中: T 和 s 分别表示推理和位移的矢量;以往研究

中,多使用多米诺效应参数(Domino effect parameter, DEP)。DEP通常与空域稳定性成反比,因此可表示为

$$\text{DEP} = \frac{R_3 - R_1}{S_1} = \frac{S_2}{S_1} - 1 \quad (4)$$

式中: S_1 为无法解决冲突的集合; S_2 为可解决的冲突集合; $R_1 = S_1 \setminus S_2$; $R_2 = S_1 \cap S_2$; $R_3 = S_2 \setminus S_1$ 。基于此,讨论了不同空域航路结构与极限交通流密度的关系,分析得出了影响空域容量的重要因素。2017年,Sunil等^[7]还从多种交通需求密度对空域指标的影响入手,模拟比较了4个分散的航路空域概念,结果表明,在不同的飞行高度,利用空域的垂直分割来分离不同飞行方向的交通时,空域容量是最大的。2019年,Zhu等^[33]提出了一种面向城市空中出行的无冲突航线预规划方法,面对结构化空域,将飞行轨迹离散为时间段并建立整数规划模型,确定每个时间段动态地理围栏的位置,避免与已提交的飞行计划发生冲突,同时提出了一个速度剖面模型使飞行轨迹更加平滑。

3 城市低空航路规划体系框架

3.1 框架体系

目前,中国对于城市低空航路的建设仍处于初期发展阶段,尚未形成完备的低空航路规划体系。因此,在现有研究基础上,结合中国空中交通管理现状,本文提出了城市低空航路规划体系框架,该体系框架主要由空域范围规划、基础设施建设、航路网络构建和运行安全评估4部分组成,框架结构如图1所示^[4,34-39]。其中:空域规划作为航路规划的基础环境,由空域划分和空域结构组成;通信、导航、监视、起降点等基础设施设备建设,为航路的正常运行提供保障;航路构建作为航路规划体系的核心内容,要充分考虑“人-机-环-管”对航路建设的综合影响,按照“航路构型-航路布局-网络设计-运行规则”的4步走策略,构建合理有效的运行航路,并通过地对地风险、碰撞概率等运行评估方法以及冲突解脱策略,实现对航路构建的反馈与调整。

3.2 空域规划

低空空域是国家空域体系的重要组成部分,但目前尚未明确低空空域的概念,未形成统一的低空空域划设标准。按照国际民航组织的空域分类标准,将空域分为A至G共7类,其中低空空域包括除了A类(绝对管制空域)、B类、C类(进近管制空域)、D类(机场管制地带)等公共运输航空主要使用的空域,以及特殊用途空域(如军航训练空域、空中禁区、限制区和危险区)之外的所有空域,通常又可以按照限制等级和服务类型细分为E、F、G类空域。美国低空空域范围为3 000 m以下的空间,美国联

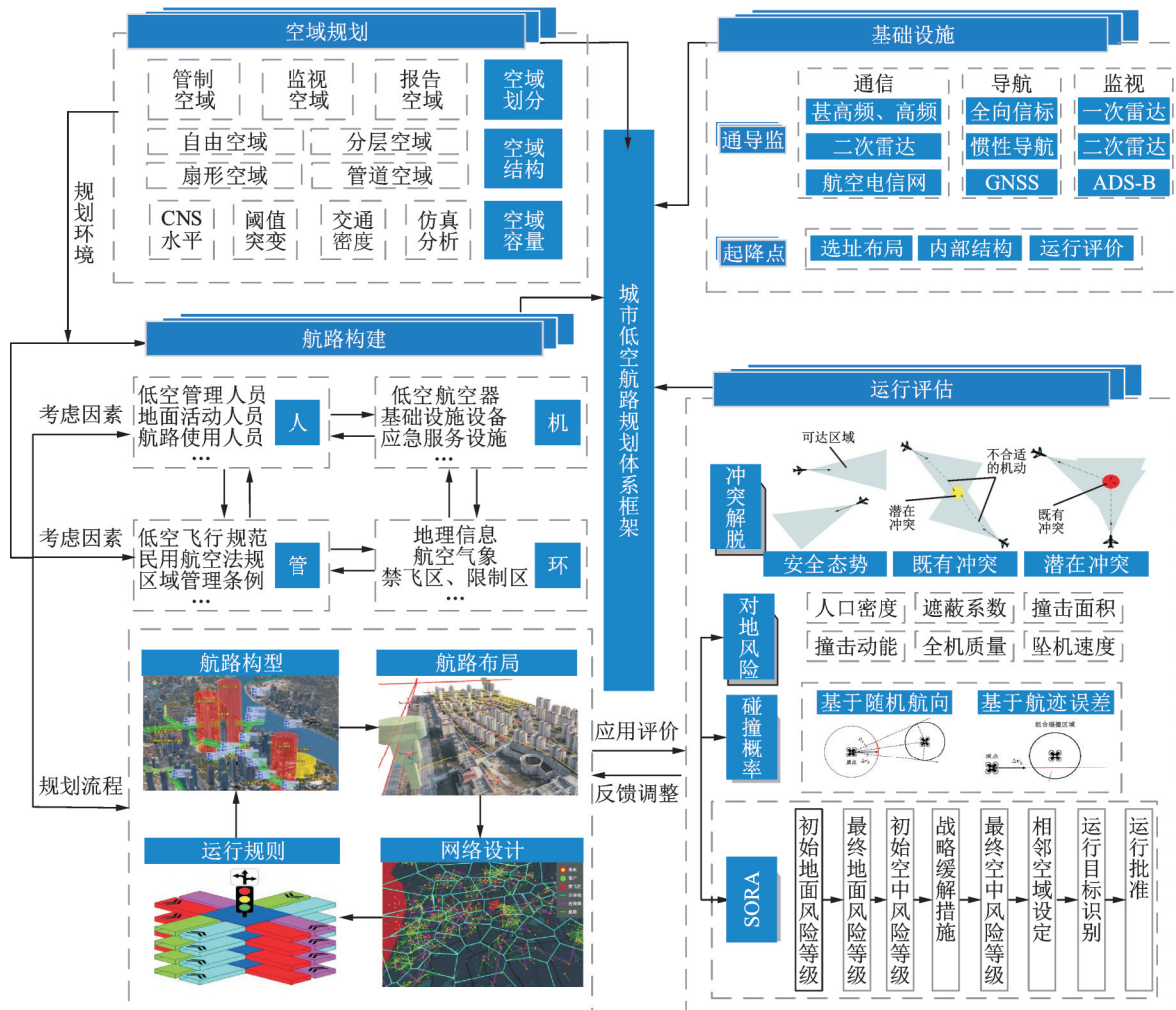


图1 城市低空航路规划体系框架^[4,34-39]

Fig.1 Framework system of low altitude route planning^[4,34-39]

邦航空管理局部分采纳国际民航组织建议的空域分类标准,将空域划分为A、B、C、D、E和G类空域^[37]。其中:A类为绝对管制空域,B、C、D、E类为管制空域,G类为非管制空域。E类空域范围最大,高度区间为地表或其他空域边界至平均海平面高度5 400 m;G类空域为非管制空域,高度区间为地表至真高370 m。除此之外,低空空域还包含一些特殊使用空域,如禁区、限制区、告警区等,主要划设在政府敏感区、军事活动区等区域上空。欧洲为实现单一天空计划,将空域分为N和U两类。

中国现行的低空空域管理体制是在国家空管委领导下,由空军负责统一组织实施。《关于深化中国低空空域管理改革的意见》指出按照服务类型,低空空域可分为管制空域、监视空域和报告空域,不同模式实行分类管理。自2010年起,中国在“两区一岛”和“两大区、七小区”组织了较大范围的低空空域管理改革试点,涉及全国14个省(区、市),试点地区占全国空域的33%。据空军统计,在试点地区共划设空域254个。其中,管制空域122个、监视空域63个、报告空域69个^[37]。

3.3 基础设施

3.3.1 通信导航监视

通信,导航与监视在低空运行与管理过程当中至关重要,为航空器的平稳、安全、有效运行提供可靠保障。与高空环境相比,低空环境复杂多变,而有人机与无人机混合运行也是未来低空交通发展的必然趋势,通信导航监视技术是约束航空器在规划航路内运行的重要保证,直接关系到低空交通管理的水平,如图2所示为无人机通信导航监视网络示意图^[40]。

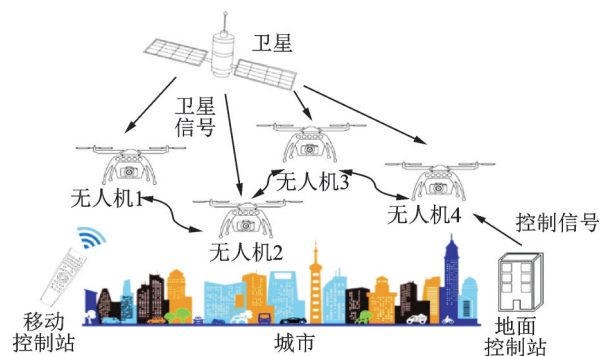


图2 无人机网络系统^[40]

Fig.2 UAV network system^[40]

(1) 通信

通信的主要目的是实现目标间的信息传输,主要模式有空对地、地对空、空对空、无人机与无(有)人机,无人机运营商之间的通信^[41],常用的通信手段有公网、专网、V2X (Vehicle to everything, V2X)、4G/5G、卫星,对于1 000 m以下的低空空域,结合基础设施、建设成本、通信速率等综合因素,主要采用基于地面移动电话蜂窝网络的4G/5G通信手段。然而移动电话的5G通信基站需求不能覆盖所有空域范围,无法满足无人机的正常飞行需要,因此合理科学的基站选址与天线覆盖范围的设定就显得尤为重要。杨秀玉^[42]分析了ACARS (Aircraft communications addressing and reporting system)甚高频数据链与卫星通讯的优缺点,基于5G技术与无人机的通信需求分析了5G系统应用于无人机通信的可能性。Ullah等^[43]分析了V2V (Vehicle to vehicle, V2V)、V2P (Vehicle to pedestrian, V2P)、V2I (Vehicle to infrastructure, V2I)等通信技术及其应用领域,解决了目前通信技术的挑战与机遇,提出了基于5G技术的解决方案,进一步研究了关键任务基础设施的无人机通信,并对4G和5G在控制延迟方面进行了比较分析。

(2) 导航

在飞行的过程中向航空器发送精确的方位信息,使航空器明确自己的位置与其他航空器之间的距离。传统民航采用GNSS (Global navigation satellite system)为航空器进行导航,随着中国自主研发的北斗卫星导航系统的不断突破与创新,现今可将北斗导航系统与低空航空器相结合,为其提供精准的导航服务。Bijjahalli等^[44],提出了一种考虑城市结构对GNSS性能影响的制导策略,并对城市环境中无人机的运行进行了仿真研究。

(3) 监视

在低空飞行的过程,需要主动或被动的将自身的位置信息与状态信息等信息发送给地面管制中心以便中心更好的执行对航空器进行管理以及冲突预测等操作。传统的民航主要依靠广播式自动相关监视 (Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)进行信息的接收与发送。但对于低空无人机,由于其数量多,通过ADS-B对其监视势必会增加民航系统的负荷。覃睿等^[45]根据中国民航局空管局公布的ADS-B最低性能标准,构建了ADS-B信号覆盖模型,明确了ADS-B布局原理,提出了ADS-B空间规划布局算法。王尔申等^[46]针对通用航空航空器低空雷达监视存在盲区和广播自动相关监视 (ADS-B)设备成本高等问题,提出

以“北斗”卫星导航系统和移动公共网络通信相结合的低空空域通用航空飞机导航监视系统。

3.3.2 起降点选址布局

起降点作为航路网络中的关键节点,其地理位置和内部结构直接影响着起降点的承载能力和整个航路网络的服务水平。随着低空航空器数量的攀升,飞行需求日益增加,国内外学者纷纷展开起降点选址与布局的研究。佐治亚理工学院针对未来电动垂直起降飞行器 (Electric vertical takeoff and landing, eVTOL)垂直起降飞行器^[47],考虑了飞行器的俯仰布局和起降点数量估计问题,以满足eVTOL航空器每日通勤需求,通过求解整数程序放置垂直起降点,最大限度地节省了潜在累积时间,此技术可应用于旧金山和洛杉矶的城市空中交通 (Urban air mobility, UAM)通勤网络。Darshan等考虑无人机能量消耗和射程限制^[48],以需求覆盖最大化为目标,建立物流无人机设施点定位选址模型,提出整数线性规划公式,其目标是最大化覆盖率,同时考虑了无人机的能量消耗和航程限制。美国宇航局兰利研究中心Guerreiro等采用先到先服务的城市空中交通起降点调度算法^[49],对各种起降点配置的容量和吞吐量进行评估比较,根据垂直机场和停车位的数量对每个垂直机场进行建模,定义了可用于估算起降点配置容量的理论模型。German等结合无人机性能特点与包裹吞吐量限制等选择起降点^[50],构建了无人机货运地点选址优化模型,模型如下所示

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i \in C} d_i y_i & (5) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} y_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j & \forall i \in C \\ y_i = 0 & \forall i \in R \\ \sum_{i \in C} x_i \leq v \\ x_i, y_i \in \{0, 1\} & \forall i \in C \end{cases} \end{aligned}$$

式中: d_i 表示所选区域*i*的需求; y_i 表示需求 d_i 是否被满足; x_i 表示所选地区*i*是否有垂直起降场; v 表示可以建造的垂直起降场最大数量。在此基础上进行了路线规划,主要研究了配送过程中“最后一公里”的问题,

在起降点内部规划方面,徐博等人为减少飞行总距离和多余覆盖面积^[51],节省无人机的能耗和药液消耗,研究了一种基于作业方向的不规则区域作业航线规划算法。该算法根据指定的作业方向,可快速规划出较优的作业航线,也可在未指定作业方向的情况下,给出推荐的作业方向与航线,使整个作业过程满足能耗和药耗最优。Hong等提出物流无人机充电定位优化模型^[52],综合最小生成树、

贪婪减法等多种算法进行求解,定位物流无人机起降点,规划内部飞行路线,以对亚利桑那州菲尼克斯市为研究对象,验证了该方法的有效性和效率性。麻省理工学院的Vascik等运用了一种整数规划方法来解析垂直运输能力包络线^[53],以离港和到港总效益最大为目标,构建如下模型

$$\max \left(\sum_{\{k, t, i = \text{desk}(k)\}} c^d x_{i,j}^k(t) + \sum_{\{k, t, i = \text{arr}(k)\}} c^a x_{i,j}^k(t) \right) \quad (6)$$

式中: $c^d(k)$ 表示单位时间 k 型飞机离港效益; $c^a(k)$ 表示单位时间 k 型飞机进港效益; $x_{i,j}^k(t)$ 为决策变量。该方法可用于确定起降点容量对着陆、起飞坪、滑行道、大门、停车坪数量以及布局的敏感性。该研究还评估了垂直运输能力对运行参数的敏感性,包括滑行时间、周转时间、预分段飞机、进近/离港程序独立性等。结果表明,合理平衡着陆和起飞坪的数量,可以实现每个起降点的最大飞机吞吐量。此外,同时成对到达或出发可显著提高吞吐量,无须完全独立的进近和出发程序。

3.4 航路构建

航路作为航空器运行的主要媒介,合理的航路构型与网络布局对保障航空器平稳、高效运行至关重要。城市低空航路主要由空中航段和网络节点组成,其中节点一般是指起降机场,已在3.3基础设施部分讨论。本小节重点讨论航路网络的空中航路结构,对现有成果进行梳理和总结。

目前关于城市低空航路构型的研究尚不多见,南洋理工大学^[6]论述了城市低空航路网络的3种类型,并用容量和吞吐量两个指标衡量所构建网络的能力,分别表示为



图3 城市低空航路网络的3种类型^[6]

Fig.3 Three types of urban low altitude air route networks^[6]

由于目前尚未形成规模的低空航路网络,部分学者在考虑自由空域环境的前提下,以航程最短或运行成本最低为目标,通过路径搜索实现对单条低空航路的构建,区域内的多条航路形成了航路网络。单条航路的布局规划可参考自由空域下的航迹规划方法,并根据航空器导航性能等因素加以延伸,从而成为具有一定宽度和高度的空中通道。徐晨晨等^[54]基于改进蚁群算法对天津无人机空港之

$$p_c = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^r n_i(t) \quad (7)$$

式中: p_c 表示容量值; r 表示生成的航线总数; $n_i(t)$ 表示 t 时刻航线 i 上的航空器数量。

$$p_t = \Delta T \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^r k_i(t)}{t} \quad (8)$$

式中: p_t 表示 ΔT 时间内的吞吐量; $k_i(t)$ 表示当前或已经在航线 i 上处于着陆阶段的航空器数量。如图3所示。第1种是矩阵节点型航路(Air matrix),该类型在考虑了空域容量与交通流量的大量需求,将空域栅格化,如图3(a)所示航路;第2种是建筑节点型航路(Over-buildings),将建筑物上方10 m作为网络节点,并将所有节点相连。由于建筑物高度的差异,该结构的航路高度并不在同一水平面上,以此提高网络的连通性,建立更多的可选航路,如图3(b)所示;第3种是道路沿线型航路(Over-roads),以城市道路为基础,在地面道路上方45 m与60 m处划设航路,并根据建筑物的位置调整航路节点。上述航路结构能够减少空中飞行冲突次数以及与地面人员发生危险的概率,如图3(c)所示。Gharibi等^[4]提出空域的结构类似于道路网络,提出航路(Airways)、航路交叉口(Intersections)、航路节点(Nodes)、空域区域(Zones)、区域进出口(Inbound and outbound gates)等概念。规定航空器在以下3种情况通过:与道路起相同作用的航路;至少由两条直线航路所组成的交叉口;通过交替航路和交叉口可到达目的点的通道,在运行中和交叉口都要受到管制。

间的航路进行规划,得到低空支线航路网。Fu等^[55]提出一种将差分进化与量子粒子群算法结合的混合算法,进一步提高求解性能,对海上无人机进行航迹规划。Cekmez等^[56]基于统一计算设备架构(Compute unified device architecture, CUDA)平台构建并行结构,采用蚁群算法解决无人机航迹规划的问题。岳碧波^[57]针对无人机低空避障问题,在传统人工势场算法中,通过改进引力作用方式和

限制斥力范围的方式,构建改进的人工势场法避障原理,实现低空域二维航迹动态规划。Roberge等^[58]考虑了无人机的动态约束,以最小化油耗和平均飞行高度为目标,在图形处理器上利用遗传算法并行实现。唐立等^[59]针对山区环境条件,考虑航迹安全度,对传统蚁群算法进行改进,提出了一种改进蚁群算法搜索最短航迹,并进行平滑处理,使得算法收敛速度更快,且生成航迹更短,平滑后的无人机路径参考值为

$$L_{\text{route}} = \frac{R_{\min}}{\tan \frac{\theta_i}{2}} + \frac{R_{\min}}{\tan \frac{\theta_j}{2}} \quad (9)$$

式中: θ_i 、 θ_j 分别为顶点*i*、*j*处的转弯角度; R_{\min} 为无人机的最小转弯半径。若 $L_{\text{route}} > d_{ij}$,此时转弯半径为

$$R = \frac{d_{ij} \left(\tan \frac{\theta_i}{2} \cdot \tan \frac{\theta_j}{2} \right)}{\tan \frac{\theta_i}{2} \cdot \tan \frac{\theta_j}{2}} \quad (10)$$

式中 d_{ij} 为*i*、*j*两点间的距离。张洪海等^[60]综合考虑城市低空复杂环境与无人机性能约束,提出了一种基于改进A*算法的物流无人机路径规划方法。Xi等^[61]基于无人机动力学特性,实现避撞的离散控制网络,根据控制网络中的最短路径生成可行航迹,并采用三维Dubins曲线算法进行平滑处理,使其能在短时间内识别出合理的航迹。

3.5 运行评估

容量评估是实施空中流量管理的重要基础,在城市低空航路规划研究中,容量也可被认为是评价网络规划设计是否合理的指标之一。目前,对于低空空域容量并没有统一的定义,根据现有研究主要有以下几种描述。第1种定义是从广义上来理解,低空空域容量是指给定的空域内所能安全容纳的最大航空器数量^[62]。第2种定义是从阈值的角度考虑,将低空空域容量定义为特定性能指标NTSC(Normalized time spent in conflict)的最小相变阈值^[63]。NTSC表示为

$$\text{NTSC} = \frac{\text{无人机发生冲突的飞行时间}}{\text{无人机的总飞行时间}} \quad (11)$$

然后通过定义反映低空空域运行安全和效率的特定性能指标,通过仿真实验,观察这些指标随着交通量或是交通密度的变化关系,找到指标突变的阈值,把此时空域中所能容纳的航空器数量作为该低空空域的容量。第3种定义是从低空航路网的角度,将低空空域容量定义为任意时刻,指定空域内航路网络所能承载的最大无人机数量^[6]。由第3种定义,引申出第4种定义,即低空无人机航路网运行容量是指在航路入口点所允许的最大无人机放行率。在对空域容量的定义基础上,还引申出

了吞吐量的定义,吞吐量被定义为在特定时间范围内降落到任一起降点的无人机的数量^[6]。例如在5 min的时间窗内,某一起降点接纳的无人机的数量。起降点的吞吐量一定程度上也能够反映空域的承载能力。起降点的吞吐量类似高空中的机场容量,也可能成为限制整个低空空域容量的关键一环。空域容量是用来量化空域及空中交通服务的效能,被认为是表示空管可扩展性约束的适当指标。由于无人机采用自动化运行,因此和高空容量评估相比,可以将管制员的人为因素除去。另外,并非所有无人机的坠毁都会带来灾难性的后果,大多数情况下仅会导致财产损失,而不是人员伤亡。因此,低空空域容量评估考虑的因素与高空存在着显著不同。在低空空域背景下,容量的影响因素主要包括冲突解脱算法的复杂度、低空障碍物、飞行规则、无人机运行的动态性和随机性等。

安全评估包括航空器对地风险、空中风险、碰撞概率等多层次内涵,通过对航空器的有效安全评估可实现对规划航路的反馈调节。意大利都灵理工大学通过分析不同无人机失控坠地事件下的无人机坠地区域,使用概率的方法评估无人机在城市环境下运行对城市地面的风险^[64],计算公式为

$$P_{\text{impact}}(x, y) = \rho(x, y) \cdot A_{\text{exp}} \quad (12)$$

$$A_{\text{exp}}(\theta) = 2(r_p + r_{\text{uav}}) \frac{h_p}{\tan \theta} + \pi(r + r_p)^2 \quad (13)$$

式中: ρ 为人口密度; A_{exp} 为撞击暴露面积; r_p 、 h_p 分别为人的平均半径和高度; r_{uav} 为无人机的半径; θ 为地面撞击角度。随着无人机应用范围的扩大,美国联邦航空管理局针对无人机碰撞风险情况成立研究小组,于2017年发布了无人机空中碰撞严重性评估最终报告^[65-68],该报告选取典型民用无人机模拟撞击运输类飞机的不同位置,得到相关损伤等级用于评估无人机所造成的撞击后果。南洋理工大学空中交通管理研究所(Air Traffic Management Research Institute, ATMRI)通过分析无人机运行数据,认为无人机在机场周边环境运行风险较大,因此开展了机场环境下的无人机碰撞概率研究和碰撞严重性研究。ATMRI利用计算机模拟无人机吸入商用飞机发动机造成发动机推力损失的情景,基于发动机结构和发动机不同工作状态下的特点,建立了推力损失模型^[69],并开发了无人机入侵机场风险分析软件^[70]。2019年,中国民用航空局发布咨询通告《特定类无人机试运行管理规程(暂行)》,要求使用特定运行风险评估方法(Specific operations risk assessment, SORA),对安全风险较高的无人机运行进行安全管理。基于上述规章,各高校开展了城市物流无人机运行风险评估^[71-72],分析无人机运行风险因素,利用SORA评估城市

物流无人机航路运行阶段的风险,并提出相应的风险缓解措施。Zhang等^[73]提出了一种基于自适应遗传算法和模糊C均值聚类算法的低空空域安全状况评估方法,研究了航空器相互作用过程中低空空域的安全状态和趋势,结合低空运行环境特点与飞行模拟数据,建立了低空空域安全状况评估指标体系。

4 结 论

近年来以5G、物联网、人工智能等新兴技术为主要媒介的第4次工业革命席卷各个领域,蓬勃发展的通用航空和无人机产业与之同向而行。随着中国军民融合战略的不断推进,低空空域管理改革成为军民融合的重点内容,以亿航智能、小鹏汇天、大疆创新为代表的新兴科技企业把握机遇、勇于创新,已经成为低空产业发展的先行者和探索者。然而低空不断增长的飞行需求和运行安全之间的矛盾日益凸显,规划科学有效的城市低空航路是保障航空器在低空空域平稳有序运行的重要前提。城市低空航路的构建与应用,不仅能够满足日益增长的低空航空器飞行需求,亦可作为各国发展低空产业的重要途径。本文从城市低空航路规划的实际需求出发,提出城市低空航路规划框架体系,从空域范围划设、基础设施建设、航路网络构建、安全运行评估4个方面入手梳理相关研究进展,为进一步城市低空航路规划研究提供支撑。综上所述,结合中国现阶段低空空域的发展现状及未来趋势,提出以下3点建议。

(1)推动低空航路规划试点验证。低空环境复杂多变,仅仅依靠理论研究无法满足实际运行需要,只有通过试点验证才能深入剖析城市低空航路划设的关键要素,从而进一步验证在低空环境下以航路为主要载体的空域结构是否具备实际应用价值。

(2)规范低空航空器的生产标准。现阶段低空航空器百花齐放,其性能水平参差不齐,对低空航空器的有效监管是促进其融入国家空域系统的重要途径。因此,必须严格规范低空航空器生产制造标准,实现核心器件规格化。

(3)全面促进低空空域管理立法。近年来国家为促进低空产业发展陆续出台多项法规制度,但实际执行水平有限,现阶段低空相关产业发展已逐渐从萌芽期走向迅速成长期,亟需健全相关法律法规,依法对产业发展进行约束与管理。

低空空域资源广阔,发展潜力巨大,与地面协同运行也是未来交通发展的主流趋势之一,伴随着航空器的智能化与新技术的更新迭代以及法律法规的日益完善,城市低空航路常态化运行终将会成为现实。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局.关于促进民用无人驾驶航空发展的指导意见(征求意见稿)[EB/OL].(2019-05-14)[2021-10-22].<http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201905/P020190514539096257584.pdf>.
- [2] 民航资源网.低空空域使用管理规定(试行)(征求意见稿)[EB/OL].(2014-07-23)[2021-10-22].<http://news.carnoc.com/list/288/288814.html>.
- [3] 国务院办公厅.关于促进通用航空业发展的指导意见[EB/OL].(2016-05-17)[2021-10-22].http://www.gov.cn/xinwen/2016-05/17/content_5074151.htm.
- [4] GHARIBI M, BOUTABA R, WASLANDER S L. Internet of drones[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1148-1162.
- [5] BOSSON C, LAUDERDALE T A. Simulation evaluations of an autonomous urban air mobility network management and separation service[C]//Proceedings of Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, USA: AIAA, 2018.
- [6] SALLEH M M F B, CHI W, WANG Z, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations[C]//Proceedings of AIAA Information Systems—AIAA Infotech at Aerospace. Kissimmee, USA: AIAA, 2018.
- [7] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J, et al. An analysis of decentralized airspace structure and capacity using fast-time simulations[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(1): 38-51.
- [8] 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): 82-106. ZHANG Honghai, ZOU Yiyuan, ZHANG Qiqian, et al. Future urban air mobility management: Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 82-106.
- [9] LI Shan, ZHANG Honghai, LI Zhuolun, et al. An air route network planning model of logistics UAV terminal distribution in urban low altitude airspace[J]. Sustainability, 2021, 13(23): 13079.
- [10] QUAN Quan, LI Mengxin, FU Rao. Sky highway design for dense traffic[J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54(2): 140-145.
- [11] 航空数据.2020—2021中国通用航空发展报告[EB/OL].(2021-10-07)[2021-10-22].<http://www.199it.com/archives/1321431.html>.
- [12] GROSS D. Amazon's drone delivery: How would it work?[EB/OL].(2013-12-03)[2021-10-22].<https://edition.cnn.com/2013/12/02/tech/innovation/amazon-drones-questions/index.html>.
- [13] SUNIL E, HOEKSTRA J, ELLERBROEK J, et al. Metropolis: Relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities[C]//Proceedings of USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Semi-

- nar. Lisboa, Portugal:[s.n.], 2015.
- [14] NASA. Urban air mobility market study [EB/OL]. (2018-11-01)[2021-10-22]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002046/downloads/20190002046.pdf>.
- [15] STUDY A D P. Concepts studies for future intracity air transportation systems[EB/OL]. (1970-12-01) [2021-10-22]. http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/68000/FTL_R_1970_02.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [16] KOH C H, LOW K H, LEI L, et al. Weight threshold estimation of falling UAVs (Unmanned aerial vehicles) based on impact energy[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2018, 93: 228-255.
- [17] WANG C H J, TAN S K, TING L K J, et al. Impact of sensors on collision risk prediction for non-cooperative traffic in terminal airspace[C]//*Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Dallas, USA: IEEE, 2018: 177-185.
- [18] 柳煌, 夏学知. 无人机航路规划[J]. *舰船电子工程*, 2008, 28(5): 53-57.
LIU Huang, XIA Xuezhi. UAVs route planning[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(5): 53-57.
- [19] 白龙, 路紫, 杜欣儒, 等. 城市区域(超)低空空域无人机活动通道划设规则与方法[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(11): 1197-1204.
BAI Long, LU Zi, Du Xinru, et al. Rules and methods of UAV activities' aerial lanes design for (ultra) low airspace in regional areas[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(11): 1197-1204.
- [20] CRAIG H H. New York State creates nation's first air corridor for unmanned aerial vehicles[EB/OL]. (2018-02-01) [2021-10-22]. <https://suffolklaw.com/new-york-state-creates-nations-first-air-corridor-for-unmanned-aerial-vehicles/>.
- [21] Airbus. The roadmap for the safe integration of autonomous aircraft[EB/OL].[2021-10-22].https://storage.googleapis.com/blueprint/Airbus_UTM_Blueprint.pdf.
- [22] 王翔宇. 城市空中交通市场前景分析[J]. *航空动力*, 2019, 9(4): 22-25.
WANG Xiangyu. The future of urban air mobility market[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 9(4): 22-25.
- [23] XU Chenchen, LIAO Xiaohan, TAN Junming, et al. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 74175-74194.
- [24] 徐晨晨. 基于遥感数据和地理信息技术的无人机低空公共航路网规划与构建[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
XU Chenchen. Planning and construction of the low-altitude public air route network of UAVs by remote sensing data and geographical information technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [25] 吕宜宏. 通用航空空域使用新模式新建议[J]. *中国经贸导刊*, 2018, 3: 75-77.
LYU Yihong. The proposals for a new model of general aviation airspace use[J]. *China Economic and Trade Herald*, 2018, 3: 75-77.
- [26] 鹿明, 廖小罕, 岳焕印, 等. 面向中国洪涝灾害应急监测的无人机空港布局[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(6): 854-864.
LU Ming, LIAO Xiaohan, YUE Huanyin, et al. Determining the distribution of unmanned aerial vehicles airports for the emergency monitoring of floods in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(6): 854-864.
- [27] 徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 等. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 917-930.
XU Chenchen, YE Huping, YUE Huanyin, et al. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: Theoretical system and technical roadmap[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 917-930.
- [28] 张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10): 133-139.
ZHANG Qirui, WEI Ruixuan, HE Renke, et al. Path planning for unmanned aerial vehicle in urban space crowded with irregular obstacles[J]. *Control Theory and Application*, 2015, 32(10): 133-139.
- [29] MCFADYEN A, BRUGGEMANN T. Unmanned air traffic network design concepts[C]//*Proceedings of 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Yokohama, Japan: IEEE, 2017.
- [30] VIDOSAVLJEVIC A, DELAHAYE D, SUNIL E, et al. Complexity analysis of the concepts of urban airspace design for metropolis project[C]//*Proceedings of ENRI International Workshop on ATM/CNS*. Tokyo, Japan:[s.n.], 2015.
- [31] CLOTHIER R A, WILLIAMS B P, FULTON N L. Structuring the safety case for unmanned aircraft system operations in non-segregated airspace[J]. *Safety Science*, 2015, 79: 213-228.
- [32] SUNIL E, HOEKSTRA J, ELLERBROEK J, et al. The influence of traffic structure on airspace capacity [C]//*Proceedings of International Conference on Research in Air Transportation*. Philadelphia, USA: [s.n.], 2016.
- [33] ZHU Guodong, WEI Peng. Pre-departure planning for urban air mobility flights with dynamic airspace reservation[C]//*Proceedings of AIAA Aviation 2019 Forum*. Dallas, USA: AIAA, 2019.

- [34] ZOU Yiyuan, ZHANG Honghai, FENG Dikun, et al. Fast collision detection for small unmanned aircraft systems in urban airspace[J]. *IEEE Access*, 2021(9): 16630-16641.
- [35] 付其喜, 梁晓龙, 张佳强, 等. 双层优化的多无人机合作式冲突探测与解脱[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(4): 74-83.
FU Qixi, LIANG Xiaolong, ZHANG Jiaqiang, et al. Cooperative conflict detection and resolution for multiple UAVs using two-layer optimization[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(4): 74-83.
- [36] ROTHFELD R, BALAC M, PLOETNER K O, et al. Agent-based simulation of urban air mobility[C]// *Proceedings of Modeling and Simulation Technologies Conference*. Kissimmee, USA: AIAA, 2018.
- [37] MUELLER E R. Enabling airspace integration for high density urban air mobility[C]// *Proceedings of 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Denver, USA: AIAA, 2017.
- [38] HOEKSTRA J M, ELLERBROEK J, SUNIL E, et al. Geovectoring: Reducing traffic complexity to increase the capacity of UAV airspace[C]// *Proceedings of International Conference for Research in Air Transportation*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2018.
- [39] JANG D S, IPPOLITO C A, SANKARARAMAN S, et al. Concepts of airspace structures and system analysis for UAS traffic flows for urban areas[C]// *Proceedings of AIAA Information Systems-AIAA Infotech at Aerospace*. Grapevine, USA: AIAA, 2017.
- [40] 李秀滢, 王宇辰, 孙宜悦, 等. 无人机导航系统攻击技术概述[J]. *人工智能*, 2021, 4: 40-47.
LI Xiuying, WANG Yuchen, SUN Yiyue, et al. Overview of UAV navigation system attack technology [J]. *Artificial Intelligence*, 2021, 4: 40-47.
- [41] 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): 6-34.
QUAN Quan, LI Gang, BAI Yiqin, et al. Low altitude UAV traffic management: An introductory overview and proposal[J], 2020, 41(1): 6-34.
- [42] 杨秀玉. 基于5G移动通信的无人机与民用飞机防相撞技术研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2019.
YANG Xiuyu. Research on anti-collision technology based on 5G between UAV and civil aircraft[D]. Deyang: Civil Aviation Flight University of China, 2019.
- [43] ULLAH H, NAIR N G, MOORE A, et al. 5G Communication: An overview of vehicle-to-everything, Drones, and Healthcare Use-cases[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 37251-37268.
- [44] BIJJAHALLI S, SABATINI R, GARDI A. GNSS performance modelling and augmentation for urban air mobility[J]. *Sensors*, 2019, 19: 4209.
- [45] 覃睿, 史娅琪, 王明科. 面向低空飞行安全监视的ADS-B地面站空间布局规划方法[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(7): 100-105.
QIN Rui, SHI Yaqi, WANG Mingke. Spatial distribution programming method of ADS-B ground station oriented to low altitude flight safety[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2018, 37(7): 100-105.
- [46] 王尔申, 佟刚, 庞涛. 低空空域通用航空飞机机载导航监视终端设计[J]. *电讯技术*, 2015, 5: 60-64.
WANG Ershen, TONG Gang, PANG Tao. Design of an airborne navigation surveillance terminal for general aviation aircraft in low altitude airspace[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 5: 60-64.
- [47] DASKILEWICZ M, GERMAN B, WARREN M, et al. Progress in vertiport placement and estimating aircraft range requirements for eVTOL daily commuting[C]// *Proceedings of Aviation Technology Integration and Operations Conference*. Denver, USA: AIAA, 2018.
- [48] DARSHAN C, AVINASH U, MIGUEL F. Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones[J]. *Transportation Research*, 2019, 99: 1-18.
- [49] GUERREIRO N M, HAGEN G E, MADDALON J M, et al. Capacity and throughput of urban air mobility vertiports with a first-come first-served vertiport scheduling algorithm[C]// *Proceedings of AIAA Aviation 2020 Forum*. Atlanta, USA: AIAA, 2020.
- [50] GERMAN B, DASKILEWICZ M, HAMILTON T K, et al. Cargo delivery in by passenger eVTOL aircraft: a case study in the San Francisco bay area[C]// *Proceedings of AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Kissimmee, USA: AIAA, 2018.
- [51] 徐博, 陈立平, 谭彧, 等. 基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 173-178.
XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Route planning algorithm and verification based on UAV operation path angle in irregular area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 173-178.
- [52] HONG I, KUBY M, MURRAY A T. A range-restricted recharging station coverage model for drone delivery service planning[J]. *Transportation Research*, 2018, 90: 198-212.
- [53] VASCIK P D, HANSMAN R J. Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors[C]// *Proceedings of AIAA Scitech 2019 Forum*. San Diego, USA: AIAA, 2019.
- [54] 徐晨晨, 廖小罕, 岳焕印, 等. 基于改进蚁群算法的无人机低空公共航路构建方法[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 570-579.
XU Chenchen, LIAO Xiaohan, YUE Huanyin, et al. Construction of a UAV low-altitude public air route

- based on an improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(4): 570-579.
- [55] FU Yangguang, DING Mingyue, ZHOU Chengping, et al. Route planning for unmanned aerial vehicle (UAV) on the sea using hybrid differential evolution and quantum-behaved particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Systems Man*, 2013, 43(6): 1451-1465.
- [56] CEKMEZ U, OZSIGINAN M, SAHINGOZ O K. A UAV path planning with parallel ACO algorithm on CUDA platform[C]//*Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Orlando, USA: IEEE, 2014.
- [57] 岳碧波. 无人机复杂低空自主防撞方法[J]. *中国科技信息*, 2018, 580(8): 86-87.
YUE Bibo. UAVs complex low altitude autonomous collision avoidance method[J]. *China Science and Technology Information*, 2018, 580(8): 86-87.
- [58] ROBERGE V, TARBOUCHI M, LABONTE G, et al. Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(5): 2105-2117.
- [59] 唐立, 郝鹏, 张学军. 基于改进蚁群算法的山区无人机路径规划方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(1): 162-168.
TANG Li, HAO Peng, ZHANG Xuejun. An UAV path planning method in mountainous area based on an improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(1): 162-168.
- [60] 张洪海, 李翰, 刘崴, 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 Honghai, LI Han, LIU Hao, 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.
- [61] XI Lin, WANG Chengzhang, WANG Kaiping, et al. Trajectory planning for unmanned aerial vehicles in complicated urban environments: A control network approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 128: 103120.
- [62] BULUSU V, SENGUPTA R, POLISHCHUK V, et al. Cooperative and non-cooperative UAS traffic volumes[C]//*Proceedings of 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Miami, USA: IEEE, 2017.
- [63] BULUSU V, POLISHCHUK V. A threshold based airspace capacity estimation method for UAS traffic management[C]//*Proceedings of International Systems Conference*. Montreal, Canada: IEEE, 2017.
- [64] PRIMATESTA S, RIZZO A, COUR-HARBO A L, et al. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments[J]. *Journal of Intelligent*, 2020, 97(3): 489-509.
- [65] OLIVARES G, LACY T, GOMEZ L, et al. Unmanned aircraft systems airborne collision severity evaluation[EB/OL]. (2017-07-01) [2021-10-22]. <https://trid.trb.org/view/1490821>.
- [66] OLIVARES G, GOMEZ L, MONTEROS J E D L, et al. Volume II-UAS airborne collision severity evaluation-quadcopter [EB/OL]. (2017-07-01) [2021-10-22]. <https://trid.trb.org/view/1490822>.
- [67] OLIVARES G, LACY T, GOMEZ L, et al. Volume III-UAS airborne collision severity evaluation-fixed-wing[EB/OL]. (2017-07-01) [2021-10-22]. <https://trid.trb.org/view/1490823017>.
- [68] D'SOUZA K, LYONS T, LACY T, et al. Volume IV-UAS airborne collision severity evaluation-engine ingestion[EB/OL]. (2017-07-01) [2021-10-22]. <https://trid.trb.org/View/1490824>.
- [69] LIU HU, MAN M H C, NG B F, et al. Airborne collision severity study on engine ingestion caused by harmless-categorized drones[C]//*Proceedings of AIAA Scitech 2021 Forum*. [S.l.]: AIAA, 2021.
- [70] ZHANG Na, LIU Hu, NG B F, et al. Collision probability between intruding drone and commercial aircraft in airport restricted area based on collision-course trajectory planning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 120: 102736.
- [71] 耿增显, 杜星奇, 赵焜飞, 等. 基于SORA方法城市物流无人机航路运行风险评估[C]//*第九届中国指挥控制大会*. 北京, 中国: [s.n.], 2021: 468-473.
GENG Zengxian, DU Xingqi, ZHAO Yifei, et al. Route operation safety assessment for urban logistics unmanned aircraft based SORA[C]//*Proceedings of the 9th China Command and Control Conference*. Beijing, China: [s.n.], 2021: 468-473.
- [72] 胡莘婷, 戴福青. 基于城区行人安全的无人机运行风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(8): 137-142.
HU Xinting, DAI Fuqing. Risk assessment model for UAV operation considering safety of ground pedestrians in urban areas[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(8): 137-142.
- [73] ZHANG Honghai, ZOU Yiyuan, WANG Zhongye, et al. Assessment model of safety situation in low-altitude airspace based on AGA-FCM[C]//*Proceedings of International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation*. Guilin, China: IEEE, 2019: 10-17.