2021 年 第21 卷 第31 期
2021, 21(31): 13221-17

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:陈义友, 张建平, 邹 翔, 等. 民用无人机交通管理体系架构及关键技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13221-13237.
Chen Yiyou, Zhang Jianping, Zou Xiang, et al. System framework and key technologies of civil unmanned aircraft system traffic management [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13221-13237.

民用无人机交通管理体系架构及关键技术

陈义友, 张建平*, 邹 翔, 吴卿刚
(中国民用航空总局第二研究所, 成都 610041)

摘 要 民用无人机交通管理是无人机运行管理的核心。目前无人机交通管理的研究大都处于针对单一运行场景的策略制定和相关支撑技术方案的探讨和论证阶段,没有系统揭示无人机交通管理体系全貌和技术发展趋势。在分析国外民用无人机交通管理现状的基础上,设计了面向全谱系运行场景的民用无人机交通管理体系架构,涵盖典型运行场景、管理策略、运行生态。为支持无人机交通管理体系的实施,围绕无人机空域精细化管理、无人机运行安全与间隔管理、无人机交通引导与控制、无人机智能化设施规划与应用提出了11 项关键技术,并分析了技术发展现状,总结了技术发展方向。研究结果表明:民用无人机交通管理应采用面向场景基于风险的分级分类管理策略,适应无人机运行生态的可持续发展需要;交通管理关键技术研究需考虑多场景、多类型、多阶段、交互性、大规模、高自主等因素,以安全、高效融入国家空域系统。

关键词 无人机交通管理; 交通流; 体系架构; 关键技术
中图法分类号 V355; **文献标志码** A

System Framework and Key Technologies of Civil Unmanned Aircraft System Traffic Management

CHEN Yi-you, ZHANG Jian-ping*, ZOU Xiang, WU Qing-gang
(The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

[**Abstract**] Civil unmanned aircraft system (UAS) traffic management is the core of UAS operation management. At present, most of the researches on UAS traffic management(UTM) are in the stage of strategy making and discussing and demonstrating the key supporting technology scheme of a single operational scenario. There is no systematic disclosure of civil UTM framework and technology trends. Based on the analysis of the current situation of foreign civil UAS traffic management, the system framework of civil UTM adapted to all the UAS operational scenarios was designed. It specified UAS operation scenarios, management strategies, UTM ecosystem. In order to support the implementation of the civil UTM system framework, 11 civil UTM key technologies were proposed for delicacy management of airspace, operational safety and separation management, traffic guidance and control, intelligent facility planning and application. And the status quo of key technology development was analyzed and the development direction of key technology was summarized. The research shows that civil UAS traffic management should adapt the hierarchical classification management strategies which is the oriented to operational scenarios and risk-based, and serve the sustainable development needs of UTM ecosystem. In terms of UTM technologies, it may take multi-scenario, multi-type, multi-stage, interactive, large-scale, high-autonomy into consideration for safely and efficiently integrate the UAS into the national airspace system.

[**Keywords**] unmanned aircraft system traffic management (UTM); traffic flow; system framework; key technologies

近年来,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)、无人驾驶航空器规则制定联合体(Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems, JARUS)、美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)、欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)、波音(Boeing)、泰雷兹(Thales)、新加坡南洋理工大学等纷纷启动了民用无人驾驶航空器系统(unmanned aircraft system, UAS)即“无人机”,交通管理策略的探索、研究、试点论证,甚至局部推行工作。其中比较有代表性的项目或者系统包括 ICAO 基于仪表飞行规则(instrument flight rules, IFR)飞行的管控空

收稿日期: 2021-04-08; **修订日期**: 2021-06-22
基金项目: 国家自然科学基金(22074157,52072406);民航安全能力建设项目(民航局合同(2020)2 号,民航局合同(2021)27 号);成都市科技项目(2020-XT00-00001-GX)
第一作者: 陈义友(1989—),男,汉族,广东汕头人,博士,助理研究员。研究方向:无人机交通管理。E-mail:yiyouchen@foxmail.com。
*通信作者: 张建平(1976—),男,汉族,安徽南陵人,博士,研究员。研究方向:空中交通管理。E-mail:zhangjp@caacsri.com。

域远程遥控驾驶航空器系统(remotely piloted aircraft systems,RPAS)项目[1-2],美国低空轻小型民用无人驾驶航空器的解决方案(USA UAS traffic management,USA-UTM)[3-5]和城市空中交通解决方案(USA urban air mobility, USA-UAM)[6],欧洲超低空轻小型民用无人驾驶航空器的解决方案(U-space)[7-8],新加坡针对人群密集市区的民用无人驾驶航空器的解决方案(urban traffic management of unmanned aircraft systems,uTM-UAS)[9-10],这些计划和项目各具特色,主要围绕高空管制空域、超低空空域、城市空域在空中交通管理重点开展。

在中国,近几年国家空管委、中国民用航空局等单位陆续推出了一系列关于民用无人机管理的政策、法规、规章、标准及规范性文件,对无人机的交通管理、实名登记、驾驶员管理、经营许可、适航管理、运行管理、安全评估、飞行动态监控、无人机围栏、云系统接口等进行了规定,尤其在2019年11月发布了《轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定》,规定了轻小型民用无人机、植保无人机的飞行动态数据的管理要求、数据与传输要求、第三方平台系统技术与安全要求等,为中国无人机交通管理体系的构建奠定了数据管理基础。

总体而言,包括ICAO在内的全世界各民用无人机管理相关组织或机构针对无人机交通管理的研究和探索多处于针对单一运行场景[11-12]的策略制定和相关支撑技术方案的探讨和论证阶段,尚没有完整成熟针对所有无人机在所有空域飞行的交通管理解决方案,更没有大面积的实践应用。如ICAO目前尽管发布了无人机交通管理(UAS traffic management, UTM)通用框架,但欠缺细分运行场景基础,主要提供的是原则性规则[13],过于宏观粗略;美国USA-UTM项目中当前最具有实用性的LAANC(low altitude authorization and notification capability)[14]系统目前针对低空空域,且部署在民用机场及周边;欧洲U-space项目重点针对超低空空域,处于大规模验证阶段[15]。相比较而言,中国除发布了相关文件外,还结合国情开展了一系列相关试点验证工作,如民航局无人机实名登记系统、无人机云系统、在深圳及海南地区开展的针对低空空管体系和技术验证的无人驾驶航空器空中交通管理信息服务系统(unmanned aircraft traffic management information service system, UTMISS)试点项目及基于SORA(specific operations risk assessment)的无人机物流配送试运行试点。也有研究者针对无人机低空空域[16-17]、城市空域[18-19]、融入管制空域[20]提出相应的交通管理策略和技术,这些工作已让中国的无人机交通管理工作走在了世界前列。但由于无人机类型多样[21]且应用场景广泛、国家空域资源有限、空管保障能力不足等原因,总体上仍然存在无人机飞行需求难以满足,无人机交通管理顶层设计缺失、交通管理关键技术研究不足问题。

因此,在分析国外民用无人机交通管理现状基础上,提出了面向全谱系运行场景的无人机交通管理体系架构,阐述民用无人机交通管理关键技术研究现状与发展趋势,以期为未来民用无人机交通管理策略的顶层设计提供初步依据,为未来无人机空管关键技术研究提供新方向,助推无人机产业的高质量发展。

1 国外民用无人机交通管理现状

民用无人机交通管理直接面向无人机飞行作业,是无人机管理各个环节和成果的集中体现,在整个无人机运行管理中处于核心地位。为强化顶层设计,美国、欧洲等纷纷提出适合国家无人驾驶航空发展的无人机交通管理运行概念或无人机融合国家空域路线图。现将从无人机交通管理运行概念入手,对美国、欧洲、其他国家或地区的民用无人机交通管理现状进行分析,为无人机交通管理体系架构设计提供参考。

1.1 美国

2013年11月,美国FAA正式发布第一版《民用无人机系统融入国家空域系统路线图》[22],提出从低风险隔离运行到全空域融合运行的发展策略。随后在2018年7月发布的第二版路线图[23]按照运行复杂程度由低到高界定了人群上空运行、扩展运行(超视距运行)、小型无人机包裹配送、非隔离运行、日常或定期运行、大型运输公司的货运运行、旅客运输运行等七类运行,并提出相应运无人机运行管理的能力要求。2020年9月发布第三版路线图[24],阐述了美国无人机空域环境概念。

2014年4月,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)首次提出无人机交通管理概念[25],并在2016年的AIAA(American Institute of Aviation and Aeronautics)发布了学术报告,对UTM运行概念进行全面阐述[4],该论文是美国UTM发展的标准性成果。2015年,FAA和NASA建立了一个UTM研究转化小组(UTM research transition team, RTT)。于2017年1月31日,发布《UTM RTT计划》[26],制定了无人机技术能力水平(technical capability levels, TCL)发展的四个等级,以此来逐步实现从视距内运行(visual line of sight, VLOS)到超视距运行(beyond VLOS,

BVLOS)、从城郊人口稀疏区到城区人口稠密区、从人工手动控制到智能自动管理的转变。

2018 年 5 月,FAA 正式发布第一版 UTM 运行概念[5],提出 UTM 的使用空域是真高 400 ft(1ft = 30.48 cm)以下的超低空空域的非管制空域(G 类空域)。随后在 2020 年 3 月发布的第二版 UTM 运行概念[3]拓展到真高 400 ft 以下的管制空域,描述了更加复杂的 BVLOS 飞行场景。第二版 UTM 运行概念中的 UTM 参与方包括运营人、驾驶员、无人机系统服务提供商(UAS service supplier, USS),无人机系统补充数据服务提供商(supplemental data service provider, SDSP),FAA 和其他利益相关者。UTM 的主要服务包括远程身份识别、FAA 信息发送、发现、运营人注册、空域授权、限制管理、运营人信息发送、战略冲突管理、一致性监视、冲突通告与告警、动态路由、运行计划、飞行签派、天气、地图、通信、监视、导航、无人机系统监视等。

2020 年 5 月,FAA 正式发布第一版超高空交通管理(upper class E traffic management, ETM)运行概念[27],聚焦在运营人如何在超高空(upper class E)运行,跨越不同空域如何与空中交通管制(air traffic control, ATC)/空中交通管理(air traffic management, ATM)进行交互,界定了运营人和 ATC/ATM 的职责。

2020 年 6 月,FAA 正式发布第一版城市空中交通(urban air mobility, UAM)运行概念[6],提出“先易后难、逐步实施”的总体发展路线,定义 UAM 走廊空域、UAM 服务商(provider of services for UAM, PSU)等概念。

1.2　欧洲

2018 年 3 月,欧洲单一天空空管计划(single European sky ATM research, SESAR)发布《欧洲空管主计划:无人机安全融入所有空域的路线图》[28]。SESAR 的任务是构建满足有人和无人航空交通增长需求的航空环境,该目标愿景的演化将通过发展路线和创新路线来实现。其中发展路线:RPAS 融入传统有人航空使用空域,分为三个阶段,从 RPAS 从仪表飞行能力向仪表飞行/目视飞行双重能力发展,从 RPAS 在 A/B/C 空域融合运行向所有空域融合运行发展;创新路线:针对小型无人机交通管理系统 U-space 划分四个发展阶段(U1 ~ U4),从基础服务(U1)、初级服务(U2)、高级服务(U3)到全功能服务(U4),每个阶段具备的不同服务能力,最终支持基于高度自动化的 U-space 全面运行能力。

2018 年 11 月,欧洲航行安全组织(European Organization for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL)发布无人机系统空管融合运行概念[29]。根据无人机飞行规则,将无人机飞行空域划分为超低空飞行空域、IFR(instrument flight rules)或 VFR(visual flight rules)飞行空域、超高空飞行空域,其中超低空飞行空域在真高 500 ft(1 ft = 0.304 8 m)以下。提出需设计超低空飞行规则(low-level flight rules, LFR)、超高空飞行规则(high-level flight rules, VFR)。

2019 年 3 月,SESAR 联合执行体(SESAR joint undertaking, SJU)基于欧洲无人机交通管理系统运行概念(concept of operations for European UTM systems, CORUS)项目正式发布 U-space 运行概念[7, 30-31]。U-space 目前聚焦在超低空运行场景(very low level, VLL)。VLL 分为 X、Y、Z 空域,并明确 U-space 架构设计原则。UTM 参与方[30]包括 U-space服务提供商、无人机制造商、全国或区域或地区管理机构、无人机运营人、无人机拥有者、普通大众、其他空域用户、通信导航监视(communication navigation surveillance, CNS)设施服务提供商、补充数据服务提供商、空中航行服务提供商(air navigation service provider, ANSP)、民航管理机构、国防安全和公共安全管理机构、机场运营人、保险企业、培训机构。U-space 服务[30]包括识别与追踪、空域管理、任务管理、冲突管理、应急管理、监视、环境、与空中交通管制(ATC)交互等。

2020 年 4 月,瑞士发布 Swiss U-space 运行概念[32]。U-space 参与方包括无人机运营人或驾驶员、无人机系统、行业 U-space 服务提供商、SDSP、ANSP、共同信息功能服务商、授权用户、授权 U-space服务提供商等。U-space 服务包括通信、发现、认证和授权、注册、远程识别、空域授权、围栏感知、通知、规则感知、地理信息、追踪、运行计划、间隔、风险评估、天气、噪声缓解、责任保险、应急管理、事故和事件报告、数字日志等服务。

1.3　其他国家或地区

2017 年 9 月,新加坡南洋理工大学在 ICAO“放飞无人机”(Drone Enable)会议上提出服务城市环境的无人机交通管理(uTM-UAS)运行概念[9],使小型无人机融入城市空中交通系统。UTM 功能包括城市空域管理、飞行管理、风险管理、命令与控制链路(command and control, C2)管理四个模块。

2020 年 11 月,印度发布 UTM 运行概念讨论稿[33],明确了各利益相关方,包括机场管理当局、空中防卫部门、军队、民航局、标准制定机构、驾驶员、地方政府、普通大众、UTM 服务提供商(UTM service provider, UTMSP)、通信服务提供商、SDSP、运营人、

无人机反制服务商等,通过服务提供者、服务需求者、服务使能者进行区分各相关方的职责。UTM 服务包括无人机系统服务、SDSP 服务、UTMSP 服务、数字天空引擎服务四大类。

2020 年 12 月,澳大利亚面向低空空域正式发布城市空中交通管理(urban air traffic management,UATM)运行概念[34],主要的利益相关方包括 UAM 驾驶员、起降场运营人、航空器运营人、预定平台运营人、ANSP、USS、适航管理机构、其他监管方。主要的 UATM 服务包括空域和程序设计、信息交互、飞行计划和空域授权、流量管理、动态空域管理、一致性监视,并提出每种服务的性能要求和成熟度水平。

2 民用无人机交通管理体系架构

相比国外很早就提出民用无人机交通管理运行概念,中国虽然在无人机产业上具有较大优势,但民用无人机交通管理顶层设计概念文件依然缺失。从顶层概念上构建中国新的无人机交通管理体系架构是行业发展的迫切需求。

2.1 运行场景

民用无人机类型多样,分为微型、轻型、小型、中型、大型,且构型、能源、控制方式、续航时间、用途不一[21]。与传统有人航空、公路、高铁等交通方式相比,民用无人机在交通量、飞行速度、飞行密度等交通流主要参数对比如表 1 所示。

由表 1 可知,民用无人机将呈现交通量大、飞行速度多样、飞行密度高的交通流特性。民用无人机交通流最终将形成带有时间维度的四维属性,即无人机三维飞行空域不再固定,可随飞行时间或飞行需求动态变化、灵活调整,需要突破传统针对有人航空的空中交通管理规则,探索新的解决方案。建议从三维空间上参照有人航空器分层管理,而在同一高度层上借鉴公路车流设计不同车道,最终形成综合、立体、多层次、灵活的民用无人机综合立体网络,有序规范民用无人机的安全飞行。

借鉴中外无人机交通管理相关经验,根据民用无人机运行风险的高低和所需空域保持能力的不同,结合国家相关政策规定、空域分类、飞行规则、任务用途等因素,从民用无人机运行逐步融入国家空域系统的角度,提出四类民用无人机典型运行场景,如图 1 所示。

表 1 民用无人机交通流特性对比

Table 1 Comparison of traffic flow characteristics of civil UAS

交通流特性	有人航空飞机流	公路车流	高铁车流	民用无人机流
交通量	较少	最多	最少	较多
速度	最大	较小	较大	多变
密度	最小	较大	较小	最大

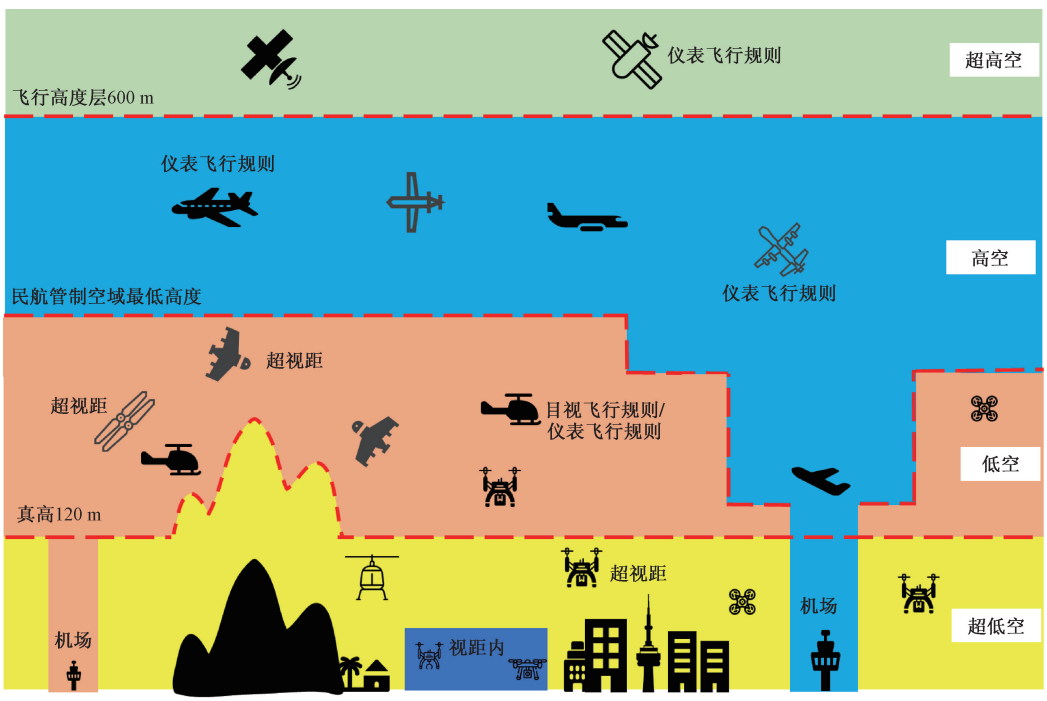

图 1 民用无人机典型运行场景

Fig. 1 Typical operational scenarios of civil UAS

2.1.1　超低空隔离运行场景

运行范围在真高(above ground level, AGL)120 m(含)以下且不包含民航空管管制范围。一般有民用微型、轻型、小型无人机在此范围内进行视距内(VLOS)或超视距(BVLOS)飞行。此场景内,民用无人机一般与有人机相互隔离运行,其主要应用包括个人娱乐、农林植保、国土测绘、电力巡线、应急救援,支线及末端物流等。

2.1.2　低空混合运行场景

运行范围在民航空管管制范围以外的低空区域,且不含超低空隔离运行场景的范围。所有类型民用无人机均可能在此场景下进行 BVLOS 飞行。在此场景内,民用无人机面临与有人通用航空器混合运行,其主要应用包括支线物流、应急救援、短途载人运输等。

2.1.3　高空融合运行场景

运行范围在民航空管管制范围以内。一般有民用中大型无人机基于 IFR 规则飞行。此场景内,民用无人机与民航运输航空飞机融合运行,其主要应用为公共航空运输,是典型的远程遥控驾驶航空器(RPAS)运行场景。高空融合运行场景的运行规则与空管体系基本沿用现有 ATM 体系。

2.1.4　超高空运行场景

运行范围在 FL600 飞行高度层(不含)以上。一般只有民用中大型无人机基于 IFR 规则飞行。此场景内,民用无人机应用包括行星探测等[35]。

2.2　管理策略

在设计民用无人机交通管理策略时,需考虑不同运行场景间的差异[36]。面向不同运行场景,基于不同运行风险等级,民用无人机管理策略分为开放、特许、审定三类。

2.2.1　低风险运行——开放管理策略

运行方不需要为其使用的民用无人机进行适航审定,不需要在运行前向监管方提出用以证明其具备相应运行安全水平的资质申请,也不需要在飞行前提交任何飞行申请。监管方不设置严格的交通规则,运行方对民用无人机飞行安全自主负责,负责避让、应急处置等。

2.2.2　中风险运行——特许管理策略

运行方不需要为其使用的民用无人机进行适航审定,但应当在运行前向监管方提出用以证明其具备相应特许运行安全水平的资质申请,在飞行前提交飞行申请。监管方需要设置相应交通规则并由相关无人机服务方为运行方提供无人机交通服务。

2.2.3　高风险运行——审定管理策略

运行方需要为其使用的民用无人机进行适航审定,在运行前向监管方提出用以证明其具备相应运行安全水平的资质申请,在飞行前提交飞行申请。民航空中交通服务机构参照运输航空 ATM 规则对高风险运行提供相应空中交通服务。

2.3　运行生态

民用无人机运行生态如图 2 所示。无人机运行生态主要参与方包括监管方、服务方、运行方、保障

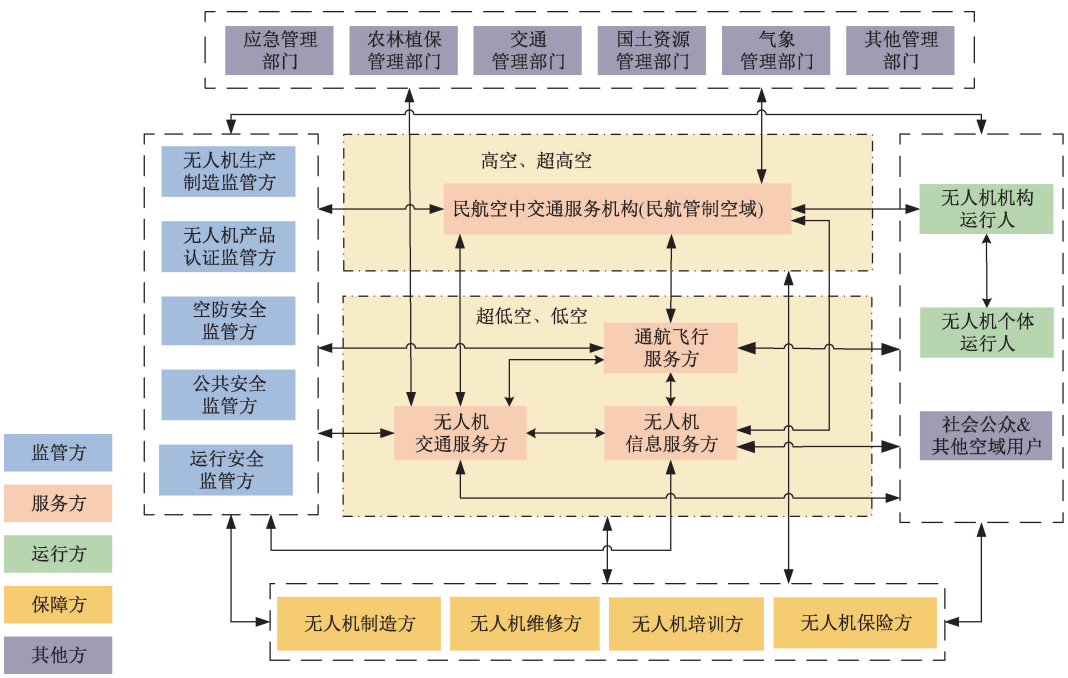

图 2　民用无人机运行生态

Fig. 2　Civil UAS operational ecosystem

方、其他方。其中,服务方主要包括无人机服务提供方(UAS service provider,USP)、通航飞行服务方、民航空中交通服务机构。USP 主要在超低空或低空范围内为民用无人机运行提供差异化的无人机服务。根据服务的差异,USP 又可分为无人机交通服务方和无人机信息服务方。

无人机所有的运行相关方都通过高度自动化的应用程序接口实现互联。服务方处于整个生态的中央位置,是面向监管方、运行方、保障方、其他方的统一对外门户。

在超低空或低空隔离运行场景下,民用无人机交通服务方、无人机信息服务方各自向运行方提供相应服务,三方之间可通过互联网协议传输信息。在低空混合运行场景下,存在民用无人机与有人通航飞行器混合运行的情况,在此空域内的各类 USP 应当能与相应的通航飞行服务方进行充分协同并逐步进行融合,以提供相应空域内民用无人机和有人通航飞行器的综合化低空空管服务。另一方面,为确保民用无人机不对有人运输航空飞行活动造成影响,并在低空运行场景和高空场景之间转换时实现平稳过渡,提供具体交通服务的 USP 需与相应民航航路航线及机场管制地带内的民航空管服务机构进行飞行计划、飞行态势、管制指令等信息的交互。但在一个特定空域中,仅能有一个服务方为无人机或有人机提供安全间隔等管制类服务。

在高空或超高空运行场景,涉及进入民航管制空域的民用无人机飞行,其服务方主要为民航空中交通服务机构。空中交通服务机构依托现行有人机的相关管理规定,遵循 ICAO 基于 IFR 的 RPAS 国际运行修订的标准、建议措施、指导材料要求,为进入管制空域运行的民用无人机提供相应的空中交通服务。服务的运行方为民用无人机机构运行人。

3 民用无人机交通管理关键技术

构建智能化的民用无人机交通管理系统,需要实现关键技术的突破。民用无人机交通管理关键技术分成运行技术和支撑技术。运行技术分为战略、预战术和战术三个层面,即无人机空域精细化管理、无人机运行安全与间隔管理以及无人机交通引导与控制。支撑技术主要包括无人机智能化设施规划与应用。下面分别介绍民用无人机交通管理关键技术的研究现状与发展趋势。

3.1 无人机空域精细化管理

3.1.1 空域分类

空域分类是一系列标准和系统运行软硬件框架的集合,包括对空域内运行的人员、设备、服务、管理的综合要求。无人机飞行类型多样,需突破现行针对有人航空的空域分类规定,现有研究主要聚焦在某一指定空域或典型运行场景上,未形成系统的无人机空域分类框架、方法、技术。

1)空域分类因素

根据空域的安全性,无人机飞行空域可简单分为隔离空域与融合空域。隔离空域尤其是超低空或者低空与有人机隔离运行的空域是目前各国关注的重点,如美国限定了 UTM 使用的空域为真高 400 ft 以下的空域[3];欧洲 U-space 重点解决超低空飞行的 X、Y、Z 空域[37];新加坡则聚焦于城市飞行的轻小型无人机,将其使用的空域规定为与有人机隔离的空域[38]。关于融合空域,则以 ICAO 为主,重点研究基于 IFR 的 RPAS 在有人机的管制空域运行。

未来,无人机空域分类除考虑空域的安全性,应基于无人机运行风险与所需性能的准则,考虑空域中空中交通的容量、复杂性,设计微型、轻型、小型、中型、大型无人机在不同飞行高度上的空域类型,提出无人机空域的间隔要求、所需交通管理服务及运行保障能力要求。

2)空域表征

无人机飞行空域表现形态为自由空域(full mix airspace)、分层空域(layers airspace)、轮辐空域(zones airspace)、管道空域(tubes airspace)、网格化空域。

针对自由空域、分层空域、轮辐空域、管道空域,Sunil[39]通过仿真分析城市环境下对这四类空域容量、复杂性、安全性的影响,认为分层空域在安全性表现最好,即通过在高度层的划分,明确不同飞行空域的间隔标准,降低无人机碰撞风险。针对分层空域,亚马逊公司[40]建议在真高 400 ~ 500 ft 的区域设为无人机与有人机的缓冲区,且真高 400 ft 以下空域根据无人机飞行性能分为高速区和低速区;McCarthy 等[12]假设在真高 150 m 的城市空域中,真高 50 m 以下用于无人机的垂直起降,真高 50 ~ 150 m 分为三层,每一层包括标准的运行层和冲突缓解层。

针对网格化空域,在中国深圳试点的 UTMISS 基于网格化的方法,划设了微型和轻型无人机的管控空域及适飞空域[41]。该试点的空域网格法,虽然有效地避开了敏感地区,确保多方安全,但本质上属于二维网格,只能对空域中同一高度的静态环境进行建模。

总之,无人机空域应采用至少三维甚至四维空域属性表征,划设无人机不同飞行空域的多重属性

及可重构动态边界。

3.1.2　空域规划

1)无人机地理围栏设计

无人机地理围栏是在相应的电子地理范围中划出特定区域,防止区域中的无人机飞入或飞出,围栏模型采用四维空间结构,包括平面地理区域(经度、纬度)、限制高度、有效时间[42]。根据目的,分为禁止飞入地理围栏和禁止飞出地理围栏[43]。根据地理围栏的时效性和控制手段,分为静态和动态地理围栏[44]。

目前研究主要聚焦在民用机场无人机地理围栏设计上。中国将机场周边包含机场障碍物限制面在内的距机场跑道中心线两侧各 10 km,跑道端外 20 km 的区域,划设为无人机管控区域。相比于中国直接沿用障碍物限制面的做法,英国民航局为全英国机场划设相同范围的轻型无人机管控区,由机场周边 2 ~ 2.5 n mile(海里,1 n mile = 1.852 km)半径周边圆形区域加上跑道两端长 5 km、宽 1 km 矩形区域组成。FAA 在全美机场周边绘制了无人机设施地图(UAS facility maps, UASFMs),以栅格的形式给出了机场周边轻型无人机能够飞行的区域和高度范围,以机场中心设置空域网格参数,每个网格为 1′纬度 × 1′纬度,大约 1 $mile^2$(1 $mile^2$ ≈ 2.6 km^2)面积[45]。Zhang 等[46]则创造性提出了基于飞行轨迹分布的民用机场无人机地理围栏设计流程及方法,并划设了重庆江北国际机场轻型无人机管控区域。

此外,付其喜等[47]提出一种针对水平方向的地理围栏预控制生成算法,同时设计了针自主飞行无人机越界航点重规划方法解决地理围栏的边界保持控制问题。D'Souza 等[48]提出了一种在 UTM 环境下基于无人机性能和风影响的代数几何地理围栏算法,将地理围栏垂直和水平方向上的最低尺寸由 30 m 降低到 5 m 以下。Wang 等[49]针对机场终端区域,设计了基于随机冲突地图的告警区域防止非合作无人机对机场有人机的冲突避撞。随后,采用 3D 蒙特卡洛模型构建了民用机场无人机 3D 告警区域[50]。但这些设计方法更多偏向无人机静态围栏设计。

无人机类型多样,飞行环境复杂,地理围栏的设计应更多地考虑时间属性,突破动态地理围栏技术,提高空域的使用效率。

2)无人机航路网络规划

无人机航路网络规划属于战略规划问题,类似于 ATM 体系中航路网络设计,最终需要明确无人机起降点和空中航路节点的位置与数量、空中航路上下限高度和宽度、节点与节点的连接。值得注意的是,目前研究解决无人机单次飞行航路(或航线、或航迹、或路径)预先或实时规划问题,属于任务规划问题,并非航路网络规划问题,该类问题将在 3.3.2 节中"动态路由"进行阐述。总体而言,目前无人机航路网络规划研究更多侧重在隔离空域低空运行场景,且对于无人机与通用航空有人机、与运输航空有人机融合飞行下航路网络规划研究较少。

针对隔离运行无人机航路网规划,徐晨晨等[51]提出隔离空域内无人机低空公共航路分为骨干航路、主干航路、支线航路和末端航路四级,同时基于多源地理空间数据和改进的蚁群算法,规划在既定起降点基础上的无人机低空公共航路网络。该分层规划方法在理论上提供了一种规划低空无人机航路网络的方法,但在实际应用过程中存在以下不足:仅规划同一高度平面的航路网络,没有考虑地面障碍物导致的飞行高度变化情况,未建立符合实际的不同高度三维航路网络;低空飞行空域的构建要素没有系统考虑 CNS 设施的服务能力[52],实际飞行中存在数据链路丢失的风险;无人机航路连接仅仅通过起降点,没有设置空中航路点,存在飞行隐患;空中航路上下限高度和宽度不明确,无法指导各种无人机的实际飞行。除了分层构建无人机低空航路网络外,McFadyen 等[53]提出了无人机交通网络设计新概念。首先,运用数据驱动的交通建模与分析方法构建了适合无人机低空飞行的交通网络区域;其次,考虑城市环境中典型无人机运行的地理覆盖范围,采用修正的 K 中心方法确定网络节点;最后,以不影响有人机的运行、实现无人机覆盖最大化为目标,采用 K-最近邻和图论的概念设计无人机交通网络。Mohamed 等[38]考虑起降点环境、城市建筑和地形限制,探讨了如何在城市空域构造小型无人机航路网络规划问题,提出基于离散网格空域、基于建筑上方、基于道路上方的三种航路网络,仿真结果揭示每种城市航路网络具有不同性能,航路网络应结合不同需求灵活规划。徐晨晨等[54]基于遥感和地理信息技术提出了一套城镇化区域低空无人机公共航路网络构建方法。

针对融合运行无人机航空网络规划,尽管 Pérez-Castán 等[55]建立了 RPAS 在融合空域内应遵循的安全飞行航路框架,基于空域的几何属性和空中交通的运行特性,设计了航路复杂性、交叉点复杂性等静态指标,航路占有率、交叉点占有率、航路可用性等动态指标,以及航路风险、交叉点风险的混合指标,并以西班牙 LECMZGZ 空域 FL250 到 300 为例进行分析验证,但基于融合运行的无人机航路

网络规划的研究还不成体系。虽然有研究建议无人机融合飞行遵从现有 ATM 体系[56-57],但由于无人机类型、性能不一,起降场设施有固定、临时之分,并非所有融合飞行的无人机均满足 ATM 体系要求。因此,需细分无人机运行场景,规划融合空域无人机航路网络。为避免飞行冲突,规划时可基于同高度航路不同时间使用、不同高度航路同一时间使用原则。如果无人机与有人机共用同一航路,无人机航路设计应严格遵循 ATM 相应的设计要求[55,58]。

相比有人机航路的常态化、固定化,无人机航路网络规划应注重时效性,充分考虑无人机运行场景的特有属性,在规划基础上动态调整,即构建带有时间维度的四维无人机航路网络[38],以切实释放空域需求,满足日益增长的无人机飞行需求。

3.1.3 空域性能测评

1)无人机空域安全评估

随着无人机飞行需求增加、技术与规则的完善,最后将实现无人机与有人机融合运行状态。Pérez-Castán 等[59]基于巡航飞行 RPAS 融合飞行,通过蒙特卡洛模拟,得到引入 RPAS 后空域总容量将降低,同样数量的 RPAS 飞行,将平均增加 90% 的飞行冲突及 300% 的冲突时间。如何在确保无人机融入现有有人机飞行空域下不降低现有目标安全水平(target level of safety, TLS)是无人机空域管理亟待解决的关键问题[60]。

欧洲在最新的 U-space 运行概念文件[30]构建了一种安全评估方法 MEDUSA(methodology for the U-space safety assessment),该方法主要用来识别和管理 U-space 体系中无人机交通的风险,综合考虑了不同的视角,包括无人机运营人视角(如 SORA)、无人机交通服务提供方的空域视角、无人机交通服务与 ATM 交互的视角。可接受的目标安全水平包括:基于 IFR 飞行的有人机与 VLOS 飞行的无人机的飞行小时碰撞概率不低于基于 IFR 飞行的有人机与基于 VFR 飞行的有人机,基于 IFR 飞行的有人机与 BVLOS 飞行的无人机的飞行小时碰撞概率不低于基于 IFR 飞行的有人机与基于 IFR 飞行的有人机。具体可参考文献[31,61]相关介绍。

2)无人机空域容量评估

针对小型无人机飞行的城市空域,Cho 等[43]提出了一种基于禁止飞入和禁止飞出的地理围栏的无人机飞行空域容量评估方法。Bulusu 等[62]基于安全准则,考虑合作和非合作无人机,提出了一种适应低空大城市无人机空域容量的理论方法。Mohamed 等[38]针对小型无人机与有人机隔离运行场景,提出与交通密度需求相适应的城市空域管理(adaptive urban airspace management, AdUrAM)方法,并以无人机航路网络为变量,分析对无人机空域容量和吞吐量的影响。

无人机空域容量设计与评估相比有人机更加复杂,主要表现在:运行需求多样,包括低空物流、航拍、载人、应急需求;飞行规则不一,现行针对有人航空设定的 IFR/VFR 已不能适应无人机操控的飞行机制;无人机类型多样,存在尺寸、重量、性能、操控方式、任务用途等多维度本质差异;空域环境复杂,包括超低空复杂地形环境、城市人口密集区及楼层建筑障碍、中高空飞行有人机的影响。在这些因素的共同作用下,无人机空域容量将并非是一个固定数值,而应是针对不同场景的一组动态数组。该动态数组将界定飞行空域内某种场景下无人机最大飞行架次,且随着时间处于变化中。

综上,无人机空域性能测评的研究目前主要在低空轻小型无人机的空域安全和容量评估上有所尝试,未来可围绕全面构建空域性能测评指标体系和综合评价方法开展研究。

3.2 无人机运行安全与间隔管理

3.2.1 运行风险评估

无人机运行风险评估是确保无人机飞行安全的前提,其评估对象是针对运行人的无人机单次飞行。相比传统有人机运行基于事故率可接受程度标定安全指标,无人机由于运行场景差异大、飞行规模大、自主智能化等特征,需设计无人机运行对应的等效安全指标。无人机运行安全指标可基于社会公众对无人机飞行事件造成空中和地面损失的可接受程度为原则[63]。值得注意的是,无人机运行风险评估不是无人机风险评估,前者侧重在飞行过程的风险,以满足空管的需求[64];后者侧重无人机系统本身的风险,以满足适航的需求[65-66]。

为提高无人机运行风险评估方法的适用性和准确性,应基于运行场景明确运行风险类型,选择科学的风险评估方法。

1)运行风险类型

目前,无人机运行风险研究主要聚焦于低空轻小型无人机隔离运行[64]、高空 RPAS 融合运行场景[60,67-68],也有研究者开始关注低空无人机与有人机混合运行场景[69]、无人机临近民用机场区域的飞行场景[49-50]。

无人机运行风险类型分为空中风险和地面风险。空中风险主要包括无人机与无人机碰撞风险、无人机与有人机碰撞风险、无人机与空中障碍物(如鸟群)碰撞风险,刻画空中风险的模型包括

Reich Marks 模型、交叉模型、几何冲突模型等[70];地面风险主要包括无人机与地面人群碰撞风险、无人机与地面财产(如高楼)碰撞风险,刻画地面风险的模型包括失效模型(failure model)、影响定位模型(impact location model)、恢复模型(recovery model)、压力模型(stress model)、暴露模型(exposure model)、事件压力模型(incident stress model)、伤害模型(harm model)等[71]。但这些风险模型大都针对特定的无人机飞行风险类型,如无人机失效坠落伤人,并不能完全适用所有的运行场景。

2)运行风险评估方法

在评估方法上,大量文献基于特许运行风险评估(SORA)方法[72],即通过定性评估相关输入参数,计算无人机在特定条件下飞行的地面风险等级、空中风险等级,然后得到特定保证等级和完整级别和对应的无人机运行安全目标。SORA 评估方法给出了空中风险、地面风险量化的分级,但风险的定级与计算大都基于定性分析,侧重飞行前、特定类无人机的风险评估,具有局限性。相比 SORA 评估飞行前风险评估,也有研究者开展了基于定量分析的飞行中实时风险评估。Ancel 等[64]基于贝叶斯网络,构建了美国 UTM 概念下的低空小型无人机实时运行风险评估框架(UTM risk assessment framework, URAF),并着重分析了低空飞行对地面人群造成的可能影响范围与影响程度。

综上,无人机运行风险评估应基于不同运行场景,以数据为驱动充分考虑周边人群密度、地面建筑物、电磁环境、气象条件、机体本身功能性能、飞行线路空域态势、驾驶员历史飞行记录等大量数据,以社会公众对无人机飞行事件造成空中和地面损失的可接受程度为原则,考虑不同运行场景、不同飞行过程,设计无人机飞行等效安全指标体系,集成量化预评估无人机飞行前风险,实时预测与评估飞行中风险,全面识别无人机全周期飞行过程中的各类可能性危害,实现智能测算无人机运行风险等级。

3.2.2　间隔标定

在传统 ATM 体系中,有人机在各种飞行阶段的水平及垂直间隔有清晰的定义。然而,到目前为止,由于民用无人机类型及飞行场景差异巨大,UTM 体系中还没有系统成熟的无人机飞行间隔标准。设计无人机间隔标准,需要明确哪种运行场景下无人机安全间隔类型,再设计相应的间隔策略。

1)安全间隔类型

美国的 UTM 运行概念[5]提出,超低空运行场景间隔标准应包括:VLOS 无人机与 VLOS 无人机、VLOS 无人机与 BVLOS 无人机、BVLOS 无人机与 BVLOS 无人机、VLOS 无人机与低空飞行有人机、BVLOS 无人机与低空飞行有人机。中国的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(征求意见稿)提出,间隔标准应包括:微型无人机与其他无人机、轻型无人机与其他无人机、小型无人机与其他无人机、中型无人机与其他无人机、大型无人机与其他无人机、无人机与有人机,同时也规定无人机要主动避让地面、水上交通工具,不得危害人员及财产安全。于清媛等[73]针对融合运行场景,首先将无人机进行风险高度层分类,基于无人机相比有人管制机管制操纵指令延迟的实际情况,推导计算了无人机与运输航空有人机的防撞管制间隔。

每种场景所需的无人机安全间隔不同,其中在超低空运行场景,重点关注无人机与地面障碍物的间隔[17],尤其是在城市人口密集区域飞行;在低空运行场景,重点关注按航线飞行的无人机间的间隔、无人机与通用航空有人机的间隔;在高空运行场景,重点关注无人机与通用航空有人机的间隔、无人机与运输航空有人机的间隔;在超高空运行场景,重点关注无人机与运输航空有人机的间隔。

2)安全间隔策略设计

无人机安全间隔策略包括基于距离、基于时间、基于距离和时间组合[74]。基于距离的间隔策略是以无人机为中心点,形成一个圆柱的保护区域,一旦受到入侵,则认为失去安全间隔标准,但该策略没有考虑入侵航空器的速度,无法适用于无人机融合运行场景;基于时间的间隔策略则是考虑无人机与入侵航空器的相对速度,如果反应时间低于冲突临近时间,则认为失去安全间隔标准,但该策略很难可视化;基于距离和时间的组合间隔策略充分发挥了前两者策略的优势,是标定无人机安全间隔的发展趋势。

3.2.3　应急管理

无人机交通管理应急管理指为应对各种空中交通管理突发事件影响无人机飞行活动而提供的一系列服务。因此,评定无人机空中交通管理突发事件类型及等级是应急管理首要解决的问题。现有文献关注了无人机突发事件的类型,如 C2 link 丢失、导航定位系统失效,将应急事件的风险水平根据事件发生的可能性和影响后果,分为低风险、中风险、高风险[75]。

针对 UTM 应急管理,Low[75]提出了飞行前和飞行中的城市 UTM 的应急管理框架,并分析了开放空域、城市空域、机场管控空域不同应急事件的风险水平。欧洲在最新的 U-space 运行概念文件[30-31]分

析了 U-space 偶发事件(contingency)和紧急事件(emergency)的差异,认为偶发事件是指服务是可控和可预防的,其应急计划是作为备份计划,以维持系统的运营水平;紧急事件是指服务完全失去控制的,其响应计划是针对事故或事件,以最小化失控事件的影响后果。Ali[11]认为开展 UTM 应急管理思路为:以现有 ATM 的应急管理体系为基准;识别无人机与有人机的区别,尤其是在空中交通管理的差异性;分析无人机运行场景的特点,从“人-机-环-管”分析。

一般上,UTM 应急管理流程包括如下:应急识别,确定是否有应急事件发生;应急评估;评估事件风险水平和类型;应急缓解,制定措施缓解应急风险;应急再评估,确定应急事件是否得到解决。

综上,目前对于无人机交通管理应急事件的等级分类或影响程度尚欠缺系统研究,关于 UTM 应急管理的研究处于概念设计阶段,大都属于定性地分析。未来应重点解决以下几个问题[75]:量化评估应急管理的有效性;定量衡量应急事件对飞行空域的影响;从飞行前制定缓解措施提高应急管理方案的有效性。

3.3 无人机交通引导与控制

3.3.1 起降管理

无人机类型多样、起降模式不一、运行场景广泛,不同起降场条件下所需的起降管理技术能力要求不同。

民用机场作为无人机起降场一种重要类型,是大型无人机运行的核心枢纽,也是飞行程序的第一环节。欧洲机场协会(ACI Europe)[76]首次提出民用机场无人机运行概念文件,包括三种模式:第一种为隔离运行模式,在一个隔离区域内运行,不需要与 ATC 进行交互;第二种为协调运行模式,开展风险评估,建立标准的无人机缓冲地带,与有人机保持间隔,与 ATC 进行交互;第三种为一体化运行模式,与 ATC 建立双向联系,无人机基于 IFR 飞行,遵循有人机管制间隔规定,需升级现有 ATM 相关设备。Lichoń[77]基于 ICAO 飞行程序设计指南,研究了 RPAS 在融合空域的标准仪表进场程序,为新航空器的引入到 ATM 系统融合运行提供了设计思路。

无人机垂直起降场是城市空中交通网络的重要节点,是智能交通基础设施。有研究者开始关注无人机垂直起降场流量管理问题。Zeng 等[78]基于效率优先准则研究了一种单入口单出口、航路交叉、多停机坪的无人机垂直起降场模型。崔恺等[79]在此基础上,考虑紧急降落的无人机调度情形,研究了同时段多架次垂直起降问题,并设计了基于图论安全优先的起降点区域流量控制方法,包括航路规划、延迟策略和航路图更新。

综上,关于无人机起降管理目前主要聚焦在无人机起降场概念模型和城市无人机垂直起降场流量管理上。未来应根据起降场类型,尤其是无人机与有人机共用、不同构型无人机共用情形,综合考虑安全和效率目标,研究无人机起降场三维数字化、民用机场无人机起降控制策略、不同类型无人机协同起降流量管理、无人机与有人机协同起降流量管理、无人机起降交通控制运行性能评估,实现自动计算无人机起降顺序、时间、地点及流量管理策略,保障无人机在起降阶段飞行安全和通行效率的提高。

3.3.2 动态路由

相比有人机,民用无人机需求多变、运行场景多、飞行环境复杂,在飞行前制定飞行航线计划、飞行中动态调整航线,能安全高效管理空域中飞行流量,实现容流均衡。民用无人机动态路由是基于任务需求,在满足无人机机动性能、空域环境、自然地形环境、起降点环境、气象环境等无人机飞行约束下,设计出一条从起点到终点代价最小的飞行航线[16,80],本质是任务规划。

1)无人机航线类型

不同场景应具有不同的飞行航线,无人机航线可根据不同维度划分:

根据是否调整航线方案,可分为静态航线和动态航线。其中静态航线重点解决考虑大规模飞行需求下全局航线安全、效率、环保等多目标最优规划问题,动态航线重点解决应对临时禁限飞空域、天气危害等各种突发情况下调整局部航线的实时规划问题[55-56]。

根据是否融合运行,可分为隔离运行航线和融合运行航线。其中隔离运行航线重点解决轻小型民用无人机在城市密集不规则障碍环境下的航线高效规划问题,融合运行航线重点解决中大型民用无人机与通用航空有人机或运输航空有人机融合飞下协同航线规划问题[46]。

根据无人机商业飞行目的,可分为物流航线、载人航线、电力巡线航线等。其中无人机物流航线规划是中外研究者关注的重点[81-82]。

以上列举了规划无人机航线的主要场景,实际上还需结合无人机的分类来设计相应的飞行航线。关于民用无人机分类可参考文献[21]。

2)无人机路由算法

无人机路由算法主要有:启发式搜索算法,如 A^* 算法[81]、深度优先搜索算法[83];图论算法,如概

率地图法[84];随机规划的方法,如快速扩展随机数算法[85];智能优化算法,如粒子群算法[86]、蚁群算法[53];基于势场的方法,如人工势场法[87]、流体扰动算法[88]。关于无人机路由算法的综述可参考文献[89]。尽管求解无人机航线规划已有诸多算法[89],但目前算法大都针对军用无人机、二维航线、隔离空域、静态航线开展相关的研究,结合民用无人机飞行的特有属性,规划带有时间维度的无人机四维航线的路由算法亟待突破。

综上,未来应针对城市密集不规则地区、大流量飞行实时响应需求、多类型无人机协同飞行、CNS设施能力覆盖不足、与有人机融合飞行等情形研究无人机动态路由方法,设计无人机四维飞行航线,确保无人机安全高效飞行。

3.3.3　冲突管理

无人机冲突管理与标定的安全间隔标准密切相关,冲突管理的目的是能察觉、感知或探测碰撞或其它风险,并采取适当应对措施确保安全的飞行间隔,具有达到类似有人机的感知避让系统能力[69,90]。流程上可分为态势感知、冲突探测和冲突解脱[90-92]。态势感知指如何建立无人机飞行态势情景意识,实现对周围环境的感知;冲突探测指通过精准预测航迹,判断是否与障碍物存在飞行冲突;冲突解脱指无人机探测到飞行冲突后,如何设计解脱策略保证安全飞行间隔。

1)飞行冲突类型

在飞行冲突类型上,无人机飞行冲突可分为无人机与无人机的飞行冲突、无人机与通用航空有人机的飞行冲突、无人机与运输航空有人机的飞行冲突、无人机其他障碍物的飞行冲突(如鸟群、危险天气、地面人群、地形或地面障碍物、管控区域边界)。总体而言,无人机飞行冲突障碍物具有静态和动态属性,其中静态属性主要面临地面固定障碍物的威胁;动态属性主要面临空中移动障碍物的威胁。

目前,由于无人机飞行间隔标准没有清晰的定义,各国也未达成统一共识,意味着无人机飞行管理处于粗放式管理阶段,如何在动态空域开展无人机实时冲突管理研究[87,93]是未来精细化管理阶段的重点。

2)冲突管理策略

在冲突管理策略上,包括战略交通流量管理、战术冲突解脱[74]。

无人机战略交通流量管理包括两种类型,一是在隔离空域内,不同构型无人机之间流量协同管理,包括载货无人机和载人无人机协同;二是在融合空域内,无人机与有人机之间流量协同管理,包括无人机与通用航空有人机协同、无人机与运输航空有人机协同[94]。除此,未来无人机交通流量管理技术应体现空域与流量一体化管理概念,使空域资源适应飞行需求,使飞行流量适应空域容量。

无人机战术冲突解脱包括加速、减速、左转向、右转向、爬升、下降六种基本类型和组合类型[74]。具体冲突解脱算法上,有智能优化算法、势场法、几何分析法、视觉避让法、随机模型方法等。甄然等[95]设计了量子遗传算法求解两架无人机在二维平面上进行航向调整的冲突解脱问题。Du等[87]基于动态人工势场法研究了动态空域下低空小型无人机实时冲突避让问题,定义了与障碍物的可变安全距离,给出了高效、安全、稳定、可调整的规划航线。Thanh等[96]采用几何学和运动力学研究了多旋翼无人机飞行在静态环境和动态环境的碰撞问题,定义了无人机障碍物的碰撞编辑,给出了冲突避让的飞行航迹角。Abdulla等[97]提出了一种基于小型无人机携带单目摄像机解决碰撞冲突的方法,并通过室内和室外飞行验证了方法的有效性。关于无人机视觉避让方法的综述可参考文献[98]。Ong等[99]采用多智能体马尔科夫决策过程来研究低空无人机与无人机间的冲突避让问题,提出了具有鲁棒性和高效率的短期冲突解脱算法,为每架无人机设计了避让策略。无人机冲突避让算法应结合不同运行场景选择设计。

综上,关于无人机冲突管理现有研究聚焦于战术冲突解脱,尤其是合作型入侵目标、二维静态环境、中短期冲突避让、局部小规模飞行冲突上。未来应围绕无人机面临静/动态碰撞威胁、面临合作/非合作碰撞威胁、单机/多机/混合多种任务模式、兼容现有ATM系统管理程序和工具等情形下,研究无人机全域态势感知、冲突预测、冲突避让方法,探索无人机与ATM系统飞行冲突协同管控技术,包括飞行计划协同、飞行态势共享、航迹协同管控,实现无人机飞行自主避障。

3.4　无人机智能化设施规划与应用

3.4.1　起降场规划

无人机起降场作为一种新型的基础设施,是打造立体交通的重要网络节点。相比有人机的民用机场类型单一,无人机起降场类型更多样,包括无人机与有人机共用的民用机场、无人机专用机场、无人机垂直起降场、无人机临时起降点等。合理规划无人机起降场的位置,明确其类型、规模、数量,是大容量无人机实现高效智能化运行的有效支撑。

开展无人机起降场规划研究,需首先明确规划目的,进而明确所需起降场的类型。鹿明等[100]针

对中国洪涝灾害无人机应急监测的需要,以中国科学院野外观测台站作为无人机起降场候选设施点进行布局。优步(uber)、空客(airbus)等企业针对城市空中交通,基于电动垂直起降航空器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)提出了 UAM 起降场概念。张洪海等[19]提出应建立垂直起降场、垂直起降站、垂直起降点三级节点体系满足城市空中交通发展的需要。

针对无人机起降场选址方法,Vascik 等[101]提出噪声是城市垂直起降场选址的最大影响因素。Vascik 等[102]提出四种无人机垂直起降场的设计概念,并采用整数规划方法研究了垂直起降场的运力和容量。Fadhil[103]针对停机位、航站楼、起降场面布局的不同,提出垂直起降站(vertistop)、垂直起降场(vertiport)、垂直起降中心(vertihub)三种起降场概念,考虑运行安全、充电站、噪声、天气、火灾威胁、通信设施、停车点等因素,采用 GIS(geographic information system)分析方法,研究了 UAM 垂直起降场布局问题。

综上,关于无人机起降场规划现有的研究聚焦于城市无人机垂直起降场上,考虑情形较为单一。未来应重点围绕多类型多层级无人机起降场、城市无人机公共起降场、与有人机混合运行的起降场,考虑噪音影响、公众接受度、无人机性能参数、与其他交通运输方式的衔接,兼顾无人机运行人的业务需求和监管方的安全管理需要,构建一张高效的无人机起降设施网络。

3.4.2 通信导航监视

通信、导航、监视(CNS)是支撑民用无人机交通管理的三项最基础的技术。2018 年,中国民用航空局发布信息公告《低空网联无人机安全飞行测试报告》[104],提出目前移动蜂窝网可以满足 120 m 以下绝大部分场景的无人机行业应用需求,以及 300 m 以下绝大部分区域的无人机安全飞行业务链路指标需求。2019 年,Ponchak 等[105]设计了针对管制与非管制空域运行环境下所有类型无人机系统的 CNS 体系架构指南,并提出了关于无人机系统 CNS 的九个技术成熟等级(TRL)。2020 年,Stouffer 等[106]发布了针对 UAM 运行所需的可靠、安全、可衡量的 CNS 技术调查报告,以支撑 UAM 成熟度等级 UML-4 的运行。

总体上,通信方面,现有研究聚焦低空轻小无人机,4G/5G、公网、专网、卫星、V2X 等技术已应用于通信研究;导航方面,拓展了基站定位、卫星导航、雷达导航、视觉导航、惯航等技术研究;利用 ADS-B、TCAS-II 开展了针对合作目标的探测研究,利用雷达、红外、声呐、光电、激光雷达开展了针对非合作目标的探测研究。

综上,无人机通信技术更加复杂、服务对象多,至少包括空对空通信、空对地通信、地对地通信、无人机与无人机、无人机与有人机之间的通信,无人机与无人机交通服务方的通信,无人机与 ATM 系统的通信等,上述技术亟待研究。导航技术上,目前大都基于单一导航技术,定位精度较低,欠缺基于北斗导航技术的研究,无法实现精准定位,无法满足长航时、高精度、高可靠、高稳定、自主性飞行的需要。监视技术上,无人机类型多样、数量众多、应用场景广阔,监视手段上需加强合作和非合作监视技术研究,多源融合动态监视是无人机监视技术亟待解决的问题,是实现无人机高效管控的前提。

4 结论

民用无人机交通管理是民用无人机运行管理的核心。由于无人机交通流的特殊性,决定了没有成熟的交通管理方式可适用于四维多变的无人机交通流属性特征,需要空管新体系。目前各国提出的 UTM 运行概念或验证技术大都针对单一运行场景,没有系统指明民用无人机交通管理的体系架构和未来关键技术的发展方向。

对此,在分析美国、欧洲、其他国家或地区的民用无人机交通管理现状的基础上,提出了面向全谱系运行场景的无人机交通管理体系架构。在运行场景上,提出了从民用无人机超低空隔离运行、低空混合运行、高空融合运行到超高空运行,逐步融入国家空域系统;运行分类包括开放类运行(低风险)、特许类运行(中风险)、审定类运行(高风险),相应的管理策略为开放、特许、审定,管理的力度随风险的增加而提升。最后定义了民用无人机运行生态,明确了民用无人机交通管理过程中涉及的监管方、服务方、运行方、保障方、其他方等空管相关方的职责。该体系架构旨在指导民用无人机安全高效运行,解决无人机交通管理顶层设计不充分、不完善问题。

民用无人机交通管理需攻克多个关键技术。无人机空域精细化管理方面,空域系统亟待重构,民用无人机融入国家空域系统带来了空域分类、规划、评估新问题;无人机运行安全与间隔管理方面,缺乏成熟的无人机飞行安全间隔标准和应急管理手段,导致安全预测难、评估难、防控难;无人机交通引导与控制方面,无人机飞行自然环境和交通态势感知能力不足,引导与控制空间和时间精度不足,及时应对能力不足,交通服务智能化程度低;在

无人机智能化设施规划与应用方面,无人机多元化起降场规划布局、新的通信导航监视技术应用无法满足复杂多变的无人机飞行需求。因此,在民用无人机交通管理关键技术的研究中,需重点考虑以下要素:①多场景,考虑无人机运行场景的差异性,分析场景的特有属性,包括空域规则、服务规则等;②多类型,考虑无人机类型的差异性,抽取飞行无人机的共同属性,预留飞行安全阈值;③多阶段,考虑无人机飞行阶段的差异性,飞行前防控风险,飞行中提高效率,飞行后总结规律;④交互性,考虑无人机飞行管理与 ATM 系统的交互性,抽取交互规则共性,使无人机具备融入国家空域系统的飞行能力;⑤大规模,考虑同时管理服务大规模异质性无人机飞行,具备实时在线、大容量飞行数据并行计算、动态优化能力;⑥高自主,考虑无人机自主化飞行特性,设计高度可靠的、信任的无人机空中交通管理机制。换言之,民用无人机交通管理关键技术研究,应基于运行风险和基于所需性能的原则,服务于特定运行场景的飞行需求。

参 考 文 献

[1] ICAO. Remotelypiloted aircraft systems(RPAS) concept of operations for international IFR operations: RPASP/6-WP/2[S]. Montreal: ICAO, 2016.

[2] ICAO. Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS): Doc 10019[S]. Montreal: ICAO, 2015.

[3] FAA. Unmanned aircraft systems (UAS) traffic management (UTM) concept of operations(edition:2.0)[R/OL]. (2020-03-02)[2021-06-22]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2020-03-faa-nextgen-utm_conops_v2-508_1.pdf.

[4] Kopardekar P, Rios J, Prevot T, et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations[C]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington: AIAA, 2016: 1-16.

[5] FAA. Unmanned aircraft systems (UAS) traffic management (UTM) concept of operations(edition:1.0)[R/OL]. (2018-05-18)[2021-06-22]. https://utm.arc.nasa.gov/docs/2018-UTM-ConOps-v1.0.pdf.

[6] FAA. Urban air mobility(UAM) concept of operations(edition: 1.0)[R/OL]. (2020-06-26)[2021-06-22]. https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf.

[7] SESAR Joint Undertaking. U-space concept of operations(edition: 01.01.03)-part 1 : U-space extended overview : No. 760550[R/OL]. (2019-09-09)[2021-06-22]. https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol1.pdf.

[8] SESAR Joint Undertaking. European drones outlook study: No. 760550[R/OL]. (2020-01-17)[2021-06-22]. http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf.

[9] Low K H. Framework for urban airspace management of unmanned aircraft systems (uTM-UAS)[R/OL]. (2017-09-22)[2021-06-22]. https://www.icao.int/Meetings/UAS2017/Documents/Kim%20Huat%20Lo_Singapore_UTM_%20Day%201.pdf.

[10] Mohamed F B M S, Tan D Y, Koh C H, et al. Preliminary concept of operations (ConOps) for traffic management of unmanned aircraft systems (TM-UAS) in urban environment[C]//2017 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace. Texas: AIAA, 2017: 1-13.

[11] Ali B S. Traffic management for drones flying in the city[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2019, 26:100310.

[12] McCarthy T, Pforte L, Burke R. Fundamental elements of an urban UTM[J]. Aerospace, 2020, 7(7): 85.

[13] ICAO. Unmanned aircraft systems traffic management (UTM): a common framework with core principles for global harmonization (edition:3.0)[R/OL]. (2020-12-7)[2021-06-22]. https://www.icao.int/safety/UA/Documents/UTM%20Framework%20Edition%203.pdf.

[14] FAA. UAS data exchange (LAANC)[EB/OL]. (2019-04-01)[2021-06-22]. https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/data_exchange/.

[15] Guillermet F. Safe and secure integration of drones (U-space)[R/OL]. (2019-11-13)[2021-06-22]. https://www.icao.int/Meetings/DRONEENABLE3/Presentations/2.01.1A%20 ~ %20Florian%20Guillermet.pdf.

[16] 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]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 6-34.

[17] Xu C, Liao X, Tan J, et al. Recentresearch progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude[J]. IEEE Access, 2020, 8: 74175-74194.

[18] 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 Chenglong, Qu Wenqiu, Li Yandong, 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.

[19] 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): 024638.
Zhang Honghai, Zou Yiyuan, Zhang Qiqian, et al. Review of research on future urban air mobility (UAM) management[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 024638.

[20] Liu Z, Cai K, Zhu Y. Civil unmanned aircraft system operation in national airspace:a survey from air navigation service provider perspective[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(3): 200-224.

[21] Hassanalian M, Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones:a review[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2017, 91: 99-131.

[22] FAA. Integration of civil unmanned aircraft systems(UAS) into the national airspace system (NAS) roadmap (1st ed)[R/OL]. (2013-11-07)[2021-06-22]. https://www.faa.gov/uas/re-

sources/policy_library/media/uas_roadmap_2013. pdf.

[23] FAA. Integration of civil unmanned aircraft systems(UAS) into the national airspace system(NAS) roadmap (2nd ed)[R/OL]. (2018-07-30)[2021-06-22]. https://www. faa. gov/uas/resources/policy_library/media/Second_Edition_Integration_of_Civil_UAS_NAS_Roadmap_July%202018. pdf.

[24] FAA. Integration of civil unmanned aircraft systems(UAS) into the national airspace system (NAS) roadmap (3rd ed)[R/OL]. (2020-09-30)[2021-06-22]. https://www. faa. gov/uas/resources/policy_library/media/2019_UAS_Civil_Integration_Roadmap_third_edition. pdf.

[25] Kopardekar P. Unmanned aerial system (UAS) traffic management (UTM): enabling low-altitude airspace and uas operations: NASA/TM-2014-218299[R]. California: NASA Ames Research Center, 2014.

[26] FAA, NASA. UAS traffic management———research transition team(RTT) plan(version:1.0)[R/OL]. (2017-01-31)[2021-06-22]. https://www. faa. gov/uas/research_development/traffic_management/media/FAA_NASA_UAS_Traffic_Management_Research_Plan. pdf.

[27] FAA. Upper class E traffic management(ETM) concept of operations(edition: 1.0)[R/OL]. (2020-05-26)[2021-06-22]. https://nari. arc. nasa. gov/sites/default/files/attachments/ETM_ConOps_V1. 0. pdf.

[28] SESAR Joint Undertaking. European ATM master plan: roadmap for the safe integration of drones into all classes of airspace[R/OL]. (2018-03-19)[2021-06-22]. http://www. sesarju. eu/sites/default/files/documents/reports/European% 20ATM% 20Master% 20Plan% 20Drone% 20roadmap. pdf.

[29] EUROCONTROL, EASA. UAS ATM Integration Operational Concept(edition: 1.0)[R/OL]. (2018-11-27)[2021-06-22]. https://www. eurocontrol. int/sites/default/files/publication/files/uas-atm-integration-operational-concept-v1. 0-release%2020181128. pdf.

[30] SESAR Joint Undertaking. U-space concept of operations(edition: 01.01.03)-part 2: U-space operational concept description: No. 760550[R/OL]. (2019-09-09)[2021-06-22]. https://www. sesarju. eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS% 20ConOps% 20vol2. pdf.

[31] SESAR Joint Undertaking. U-space concept of operations(edition: 01.01.03)-part 3: U-space ConOps annexes : No. 760550[R/OL]. (2019-07-10)[2021-06-22]. https://ext. eurocontrol. int/ftp/? t=714bd3ca21914c619387f1811a6b2f24.

[32] Federal Office of Civil Aviation. Swiss U-space ConOps[R/OL]. (2020-04-02)[2021-06-22]. https://www. bazl. admin. ch/dam/bazl/en/dokumente/Gut_zu_wissen/Drohnen_und_Flugmodelle/uspace_conops. pdf. download. pdf/Swiss% 20U-Space% 20ConOps. pdf.

[33] Government of India Ministry of Civil Aviation. National unmanned aircraft system(UAS) traffic management policy[R/OL]. (2020-11-30)[2021-06-22]. https://www. civilaviation. gov. in/sites/default/files/National-UTM-Policy-Dicussion-Draft-30-Nov-2020. pdf.

[34] Embraer X, Airservices Australia. Urban air traffic management concept of operations(version: 1.0)[R/OL]. (2020-12-02)[2021-06-22]. https://daflwcl3bnxyt. cloudfront. net/m/3dc1907d3388ff52/original/PPJ016561-UATM-Concept-of-Operations-Design_D11-FINAL. pdf.

[35] Hassanalian M, Rice D, Abdelkefi A. Evolution of space drones for planetary exploration: a review[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 61-105.

[36] JARUS. JARUS UAS operational categorization(edition: 1.0): JAR-DEL-WG7-UASOC-D. 04[R/OL]. (2019-06-21)[2021-06-22]. http://jarus-rpas. org/sites/jarus-rpas. org/files/jar_doc_09_uas_operational_categorization. pdf.

[37] Barrado C, Boyero M, Brucculeri L, et al. U-space concept of operations: a key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations[J]. Aerospace, 2020, 7(3): 24.

[38] Mohamed F B M S, Chi W, Wang Z, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations[C]//2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace. Florida: AIAA, 2018: 1-12.

[39] Sunil E, Hoekstra J, Ellerbroek J, et al. Metropolis: Relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities[C]// ATM Seminar 2015, 11th USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar. Lisboa, Portugal: HAL, 2015: 1-10.

[40] AMAZON. Revising the airspace model for the safe integration of small unmanned aircraft system[R/OL]. (2015-07-29)[2021-06-22]. http://assets. documentcloud. org/documents/2182311/amazon-revising-the-airspace-model-for-the-safe. pdf.

[41] Zhang J P. The elements of air traffic management of civil unmanned aircraft systems: APUAS/TF/3 IP05[R]. Bangkok, Thailand: ICAO, 2019.

[42] 中国民用航空局. 无人机围栏: MH/T 2018—2017[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
Civil Aviation Administration of China. Fence of unmanned aircraft system: MH/T 2018—2017[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2017.

[43] Cho J, Yoon Y. How to assess the capacity of urban airspace: a topological approach using keep-in and keep-out geofence[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.

[44] 李 腾, 汤新民. 基于柔性四维航迹预测的无人机动态围栏规划[J]. 航空计算技术, 2019, 49(5): 79-84.
Li Teng, Tang Xinmin. UAV dynamic geofence planning method based on flexible four-dimensional trajectory prediction[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(5): 79-84.

[45] FAA. FAA UASfacility map data [EB/OL]. (2020-08-13)[2021-06-22]. https://faa. maps. arcgis. com/apps/webappviewer/index. html? id=9c2e4406710048e19806ebf6a06754ad.

[46] Zhang J, Zou X, Wu Q, et al. Empirical study of airport geofencing for unmanned aircraft operation based on flight track distribution[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 121: 102881.

[47] 付其喜, 梁晓龙, 张佳强, 等. 自主飞行无人机地理围栏算法设计与实现[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(5): 167-175.
Fu Qixi, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Design and implementation of autonomous flight unmanned aircraft system geofence algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(5): 167-175.

[48] D'Souza S, Ishihara A, Nikaido B, et al. Feasibility of varying geo-fence around an unmanned aircraft operation based on vehicle

performance and wind[C]//2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Sacramento, CA: IEEE, 2016: 1-10.

[49] Wang C H J, Tan S K, Low K H. Collision risk management for non-cooperative UAS traffic in airport-restricted airspace with alert zones based on probabilistic conflict map[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 109: 19-39.

[50] Wang C H J, Tan S K, Low K H. Three-dimensional (3D) Monte-Carlo modeling for UAS collision risk management in restricted airport airspace[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105: 105964.

[51] 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.

[52] Apaza R, Marsden M. CNSsimulation tool development for increasingly complex airspace operation evaluation: GRC-E-DAA-TN65995[R/OL]. (2019-04-11)[2021-06-22]. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190025415/downloads/20190025415.pdf.

[53] McFadyen A, Bruggemann T. Unmanned air traffic network design concepts[C]//IEEE ITSC 2017 International Conference on Intelligent Transportation Systems. Yokohama: IEEE, 2017: 1-7.

[54] 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.

[55] Pérez-Castán J A, Comendador F G, Rodríguez-Sanz A, et al. Decision framework for the integration of RPAS in non-segregated airspace[J]. Safety Science, 2020, 130: 104860.

[56] 张建平, 任家龙, 陈　晓. 基于多属性分类的民用无人机空中交通管理模式[J]. 航空计算技术, 2017, 47(5): 6-9.
Zhang Jianping, Ren Jialong, Chen Xiao. Air traffic management mode of civil unmanned aircraft systems based on multi-attribute classification[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(5): 6-9.

[57] 张建平, 陈　晓, 任家龙. 民用无人机交通管理策略综述[J]. 航空计算技术, 2017, 47(6): 122-128.
Zhang Jianping, Chen Xiao, Ren Jialong. Review on civil unmanned aircraft traffic management strategies [J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(6): 122-128.

[58] ICAO. Aircraft operationsvolume II construction of visual and instrument flight procedures: Doc 8168 OPS/611[S]. Montreal: ICAO, 2014.

[59] Pérez-Castán J A, Comendador F G, Rodríguez-Sanz Á, et al. Safe RPAS integration in non-segregated airspace[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2020, 92(6): 801-806.

[60] 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.

[61] EUROCONTROL. Riga airspace assessment[R/OL]. (2019-11-29)[2021-06-22]. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-12/report-riga-airspace-assessment.pdf.

[62] Bulusu V, Sengupta R, Polishchuk V, et al. Cooperative and non-cooperative UAS traffic volumes[C]//2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Miami, FL: IEEE, 2017: 1673-1681.

[63] Shao P. Riskassessment for UAS logistic delivery under UAS traffic management environment[J]. Aerospace, 2020, 7(10): 140.

[64] Ancel E, Capristan F M, Foster J V, et al. Real-time risk assessment framework for unmanned aircraft system (UAS) traffic management (UTM)[C]//17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Denver: AIAA, 2017: 1-17.

[65] Washington A, Clothier R A, Williams B P. A Bayesian approach to system safety assessment and compliance assessment forunmanned aircraft systems[J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 62: 18-33.

[66] Gonçalves P, Sobral J, Ferreira L A. Unmanned aerial vehicle safety assessment modelling through petri Nets[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 167: 383-393.

[67] Pérez-Castán J A, Comendador F G, Rodríguez-Sanz A, et al. RPAS conflict-risk assessment in non-segregated airspace[J]. Safety Science, 2019, 111: 7-16.

[68] Pérez-Castán J A, Comendador F G, Rodriguez-Sanz Á, et al. RPAS integration in non-segregated airspace:safety metrics for tactical planning[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(16): 6063-6075.

[69] Cour-Harbo A L, Schiøler H. Probability of low - altitude midair collision between general aviation and unmanned aircraft[J]. Risk Analysis, 2019, 39(11): 2499-2513.

[70] Kim S H. Conflict risk assessment of structured and unstructured traffic of small unmanned aircraft systems[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, Georgia: AIAA, 2018: 1-15.

[71] Washington A, Clothier R A, Silva J. A review of unmanned aircraft system ground risk models[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2017, 95: 24-44.

[72] JARUS. JARUS guidelines on specific operations risk assessment (SORA)(edition:2.0): JAR-DEL-WG6-D.04[R/OL]. (2019-01-30)[2021-06-22]. http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v2.0.pdf.

[73] 于清媛, 潘卫军. 无人机共享空域管制间隔研究[J]. 科技和产业, 2018, 18(6): 102-107.
Yu Qingyuan, Pan Weijun. Research on unmanned aerial vehicle sharing space in controlling airspace[J]. Science Technology and Industry, 2018, 18(6): 102-107.

[74] Guan X, Lyu R, Shi H, et al. A survey of safety separation management and collision avoidance approaches of civil UAS operating in integration national airspace system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(11): 2851-2863.

[75] Low K H. Contingency management of urban UTM (UAStraffic management) based on airspace contexts[C]// ICAO Third Drone Enable Symposium. Montreal: ICAO, 2019: 1-15.

[76] ACI Europe. Drones in the airport environment: concept of operations & industry guidance[R/OL]. (2020-04-23)[2021-06-22]. https://www.aci-europe.org/downloads/resources/DRONES%

20IN% 20THE% 20AIRPORT% 20ENVIRONMENT% 20-% 20CONCEPT% 20OF% 20OPERATIONS% 20% 20INDUSTRY% 20GUIDANCE. pdf.

[77] Lichoń D. Modelling of the reference STARs procedures in the context of RPAS integration in non-segregated airspace[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2020, 92(9): 1385-1392.

[78] Zeng G, Cui K, Quan Q, et al. An airport airspace flow control method for drones[C]//2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Beijing: IEEE, 2019: 178-182.

[79] 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 Kai, Zeng Guoqi, Lin Wei, 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.

[80] Otto A, Agatz N, Campbell J, et al. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones:a survey[J]. Networks, 2018, 72(4): 411-458.

[81] 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 Qiqian, Xu Weiwei, Zhang Honghai, 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.

[82] Kellermann R, Biehle T, Fischer L. Drones for parcel and passenger transportation: a literature review[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2020(4): 100088.

[83] 吴玉文, 牛智越, 韩倩倩. 基于启发式搜索算法的无人机航迹快速规划[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8394-8399.
Wu Yuwen, Niu Zhiyue, Han Qianqian. Fast path planning of drone in heuristic search algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8394-8399.

[84] 曾国奇, 赵民强, 刘方圆, 等. 基于网格 PRM 的无人机多约束航路规划[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2310-2316.
Zeng Guoqi, Zhao Minqiang, Liu Fangyuan, et al. Multi-constraints UAV path planning based on grid PRM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(10): 2310-2316.

[85] 李文广, 孙世宇, 李建增, 等. 分段优化 RRT 的无人机动态航迹规划算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(8): 1786-1793.
Li Wenguang, Sun Shiyu, Li Jianzeng, et al. UAV dynamic path planning algorithm based on segmentated optimization RRT[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(8): 1786-1793.

[86] 杜 云, 彭 瑜, 邵士凯, 等. 基于改进粒子群优化的多无人机协同航迹规划[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(32): 13258-13264.
Du Yun, Peng Yu, Shao Shikai, et al. Cooperative path planning of multi-unmanned aerial vehicle based on improved particle swarm optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(32): 13258-13264.

[87] Du Y, Zhang X, Nie Z. A Real-time collision avoidance strategy in dynamic airspace based on dynamic artificial potential field algorithm[J]. IEEE Access, 2019(7): 169469-169479.

[88] 姚 鹏, 王宏伦. 基于改进流体扰动算法与灰狼优化的无人机三维航路规划[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 701-708.
Yao Peng, Wang Honglun. Three-dimensional path planning for UAV based on improved interfered fluid dynamical system and grey wolf optimizer[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 701-708.

[89] Aggarwal S, Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: a review, solutions, and challenges[J]. Computer Communications, 2020, 149: 270-299.

[90] Fasano G, Accado D, Moccia A, et al. Sense and avoid for unmanned aircraft systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(11): 82-110.

[91] Lim C, Li B, Ng E M, et al. Three-dimensional (3D) dynamic obstacle perception in a detect-and-avoid framework for unmanned aerial vehicles[C]//2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta: IEEE, 2019: 996-1004.

[92] 付其喜, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机低空交通管理系统综述[J]. 飞行力学, 2019, 37(2): 1-6.
Fu Qixi, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Overview of low altitude air traffic management system for UAS[J]. Flight Dynamics, 2019, 37(2): 1-6.

[93] Pierpaoli P, Rahmani A. UAV collision avoidance exploitation for noncooperative trajectory modification[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 73: 173-183.

[94] Balakrishnan H, Chandran B. A distributed framework for traffic flow management in the presence of unmanned aircraft[C]//12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar(ATM2017). Seattle, Washington: ATM Seminar, 2017: 1-10.

[95] 甄 然, 王 攀, 武晓晶, 等. 基于量子遗传算法的无人机冲突解脱方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6963-6969.
Zhen Ran, Wang Pan, Wu Xiaojing, et al. A method of unmanned aerial vehicles conflict resolution based on quantum genetic algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6963-6969.

[96] Thanh H L N N, Hong S K. Completion of collision avoidance control algorithm for multicopters based on geometrical constraints[J]. IEEE Access, 2018, 6: 27111-27126.

[97] Abdulla A K, Fernando G, David M, et al. Obstacle detection and avoidance system based on monocular camera and size expansion algorithm for UAVs[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1061.

[98] Mcfadyen A, Mejias L. A survey of autonomous vision-based see and avoid for unmanned aircraft systems[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2016, 80: 1-17.

[99] Ong H Y, Kochenderfer M J. Markov decision process-based distributed conflict resolution for drone air traffic management[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2017, 40(1): 69-80.

[100] 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.

[101] Vascik P D, Hansman R J. Evaluation of key operational constraints affecting on-demand mobility for aviation in the los angeles basin: ground infrastructure, air traffic control and noise [C]//17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Denver, Colorado: AIAA, 2017: 1-20.

[102] Vascik P D, Hansman R J. Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California: AIAA, 2019: 1-26.

[103] Fadhil D N. A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility[D]. MuNICH: Technical University of Munich, 2018.

[104] 中国民用航空局飞行标准司. 低空联网无人机安全飞行测试报告: IB-FS-2018-011[S]. 北京: 中国民用航空局, 2018.
Department of Flight Standards of CAAC. Testreport of safety flights at low-altitude airspace for networked UAVs: IB-FS-2018-011[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2018.

[105] Ponchak D S, Templin F L, Sheffield G, et al. Advancing the standards for unmanned air system communications, navigation and surveillance[C]//2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2019: 1-9.

[106] Stouffer V L, Cotton W B, DeAngelis R A, et al. Reliable, secure, and scalable communications, navigation, and surveillance (CNS) options for urban air mobility (UAM): GS00Q14OADU130[R/OL]. (2020-08-12)[2021-06-22]. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205006661/downloads/UAM%20CNS%20Final%20Report%2080GRC019D0017%20with%20App%20A%20B%20C%20v2.pdf.