

<http://bhxb.buaa.edu.cn> [jbuaa@buaa.edu.cn](mailto:jbuaa@buaa.edu.cn)

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0060

# 低空智能网联体系

张学军<sup>1,2,\*</sup>, 刘法旺<sup>3</sup>, 张祖耀<sup>1,4</sup>, 田野<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 空地一体新航行系统技术全国重点实验室, 北京 100191;  
3. 工业和信息化部装备工业发展中心, 北京 100846; 4. 网络化协同空管技术北京市重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 近日, 低空产业联盟对外发布《低空智能网联体系参考架构(2024版)》报告, 该报告作为框架性的文件, 旨在用最精确简短的内容体现低空智能网联体系的关键构成, 但缺乏对体系背后隐含的科学方法、理论基础、实现途径等内容的详细描述。基于此, 围绕该报告的内容, 对低空智能网联体系发展现状、架构设计思路、关键技术等进行了全面的阐述, 旨在对报告涉及的内容做进一步的分析和解读, 为后续围绕低空智能网联体系的开发和建设工作提供科学的理论参考。

**关键词:** 低空智能网联体系运行概念; 低空智能网联体系架构设计; 低空智能网联应用服务系统; 低空智能网联数据与服务支撑网络; 低空智能网联机载终端与基础设施; 低空智能网联体系关键技术

中图分类号: V2; V24; V247.1

文献标志码: A 文章编号: 1001-5965(2025)06-1793-23

低空经济方兴未艾, 低空领域正成为中国经济建设和产业发展的重要方向。随着低空装备制造的发展升级及各试点地区空域的进一步开放, 未来的低空空域发展将呈现出高密度、高频次、大规模、复杂异构等特点, 载人出行、低空物流、公共服务、文体旅培等应用场景层出不穷, 不同的应用需求将推动系统建设、应用服务、装备制造等低空业态的平稳落地。

近日, 在 2024 低空装备产业创新发展大会上, 低空产业联盟对外发布《低空智能网联体系参考架构(2024版)》报告<sup>[1]</sup>。该报告提出, 低空智能网联体系作为低空产业结构转型的核心, 旨在整合多种技术手段和服务能力, 满足不同运行场景对应用服务、资源调度、信息共享及设施设备的需求。要实现这一目标, 不仅需要解决技术层面的难题, 还需从体系架构和协同机制的角度进行深入研究。

结合未来发展需求和技术趋势, 本文针对低空智能网联体系的关键问题, 作进一步分析和探讨, 旨在阐述该体系的构建依据, 剖析体系层次结构的

内在逻辑, 为后续发展完善提供理论支持。通过对低空智能网联体系的系统性研究, 本文力求为相关领域科研人员和产业从业者提供有价值的参考, 助力低空运行体系化建设, 推动低空经济全面发展。

## 1 低空智能网联体系概述

低空智能网联体系是由数字化、网联化、智能化的新型飞行器及机载设备、信息物理基础设施、数据信息网络及应用服务系统构成的综合性体系, 可实现对低空空域的泛在感知、广域互联和智能管服应用, 支撑低空典型应用场景的安全高效运行。该体系是低空经济发展的重要基础, 是低空产业结构转型的关键支点, 是低空空域中交通管理(air traffic manage, ATM)的核心引擎。

### 1.1 低空智能网联体系发展现状

欧美国家和地区传统航空领域特别是通用航空尤为发达, 在运行概念、平台构建、商业模式开发等方面有具有深厚的积累, 其低空无人机产业经过十余年理论沉淀、技术开发和探索实践, 出台了

收稿日期: 2025-01-23; 录用日期: 2025-03-18; 网络出版时间: 2025-04-11 10:47

网络出版地址: [link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250411.0921.002](http://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250411.0921.002)

\*通信作者. E-mail: [zhxj@buaa.edu.cn](mailto:zhxj@buaa.edu.cn)

引用格式: 张学军, 刘法旺, 张祖耀, 等. 低空智能网联体系[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(6): 1793-1815.

ZHANG X J, LIU F W, ZHANG Z Y, et al. Overview of low-altitude intelligent networked system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 1793-1815 (in Chinese).

一系列政策法规、标准文件及技术方案。而中国对低空的开发起步较晚,近年来结合自身需求进行了一系列探索和实践,形成了相关的政策标准、技术报告等,以支撑低空产业的持续发展。

### 1.1.1 国外发展现状

#### 1) 美国

围绕无人机发展,美国低空交通运行管控主要分为以下3个阶段:特殊用途无人机融入美国国家空域系统(national airspace system, NAS)建设、无人机交通管理系统(unmanned aircraft system traffic management, UTM)建设、先进空中交通(advanced air mobility, AAM)体系构建,如图1所示。

① 阶段1:特殊用途无人机融入美国NAS建设。20世纪末,由于民用无人机技术发展和市场化条件均未成熟,无人机应用局限于军用或其他特殊用途无人机,用空需求单一,无人机的运行没有对美国NAS构成安全威胁。因此,此阶段美国对无人机的空中交通管理的重点,主要在如何使无人机具备与有人机同等的水平方面,使得这类执行特殊任务的中大型无人机能够基于传统民航的通信、导航、监视及信息(communication, navigation, surveillance and information, CNSI)基础设施体系,安全融入国家空域。

2012年开始,美国国会和美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)等相继出台了一系列法案和文件<sup>[2-3]</sup>,对无人机的技术研究、研发制造和运行管理标准等进行了设计,以保证在不降低现有航空系统效率和安全性的前提下,实现无人机系统(unmanned aircraft systems, UAS)安全融入NAS。

② 阶段2:UTM建设。随着无人机技术的快速发展,无人机的应用场景得到很大扩展,FAA预见到无人机的运行规模、飞行密度、用空需求将急

剧增加,但现行的ATM系统的CNSI基础设施体系和管理方式无法为无人机安全、高效、经济的运行提供交通管理和服务。因此,FAA开始着手构建一种为无人机的安全运行提供管理和服务的系统。

2015年,FAA与美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)联合成立了UTM研究转化小组,旨在为FAA提供量化和可落地的UTM研究成果和技术方案<sup>[4]</sup>。美国各单位陆续发布了相关的法案标准<sup>[5-6]</sup>,启动了一系列项目(如UTM Pilot Program、UAS Integration Pilot Program等),为UAS技术方案和应用场景的测试和评估提供了保障。经过对多年的试点和论证进行梳理,FAA的NextGen办公室发布了《UTM运行概念1.0版》<sup>[7]</sup>,明确了面向真高120m以下的UAS的运行概念,并在2020年发布了《UTM运行概念2.0版》<sup>[8]</sup>,对UTM运行概念进一步完善。

③ 阶段3:AAM体系构建。美国的无人机运行管理系统经过多年技术验证和运行概念的梳理,再结合其在低空产业上商业运营的经验,基于需求最明确的载人和载货运输场景,着力在城市区域和城郊及以外区域构建AAM体系,实现对现有城市交通运输体系的扩展。该体系需要新型的智能化飞行器及CNSI基础设施的支撑,并可通过信息网络实现数据的广域互联,为低空的安全运行提供智能化的服务和保障,持续推动现有ATM系统的变革性发展。

早在20世纪中期,城市空中交通(urban air mobility, UAM)已经作为一种城市出行概念开始出现,但由于成本、安全性等因素,并未成为大规模商业化的出行方式。随着无人机、电动垂直起降(electric vertical take-off and landing, eVTOL)飞行器等新型智能飞行载具问世,UAM作为日常运输方式成为了可能<sup>[9-10]</sup>。

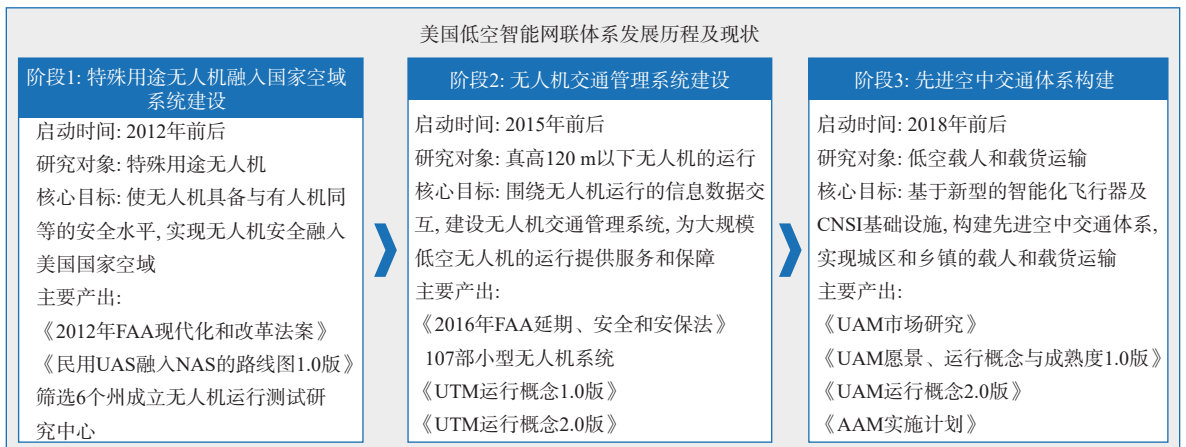


图1 美国低空发展历程及现状

Fig. 1 The development process and current situation of low-altitude development in the United States

2018年开始,NASA发布了一系列报告、文件,分析了未来UAM相关技术和市场的可行性<sup>[11]</sup>,定义了UAM的发展阶段、运行环境、空域设计、CNSI基础设施需求等概念<sup>[12-19]</sup>,明确了低空交通管理与传统ATM在运行概念、所需能力上的差异性,对低空交通管理的技术手段、信息物理基础设施等提出了更高的要求,同时将面向城市载人和载货运输的UAM定义为AAM的一个子集,并且近年一直在对UAM和AAM的运行概念进行完善<sup>[20-21]</sup>。

然而,美国作为传统航空强国,通用航空产业非常发达,其拥有世界领先的飞行器研制水平、完整的基础设施和服务保障产业、成熟的商业模式、深度的行业认可及完善的政策法规支撑。因此,对于无人机、eVTOL等新型低空飞行器的低空交通管理上,传统行业运营商希望尽可能地利用现有基础设施实现短期盈利,这在一定程度上限制了新技术、新平台的研发和建设进程。

## 2) 欧洲

与美国FAA同时负责美国航空安全监管和空中交通管理不同,欧洲各国由于面积较小,空域碎片化问题突出,需要跨国性质的机构或组织对其空域、航空安全及空中交通管理等进行统一监管。

① 阶段1: 无人机基础安全管控。20世纪初,欧洲各国主要通过无人机执行相对特殊且专业的任务,无人机数量有限且飞行环境较为简单,监管的关注点更多放在如何确保这些无人机不干扰公共安全、不影响民众日常生活方面,进而建立起基础的法律框架和安全准则。

从2009年开始,欧洲单一天空空中交通管理研究(Single European Sky ATM Research, SESAR)、欧盟等机构和组织就已经开始考虑无人机与现有空中交通管制(air traffic control, ATC)交互的需求<sup>[22]</sup>,并陆续发布了一系列文件,对欧洲民用无人机,特别是对遥控无人机(remotely piloted aircraft systems, RPAS)的应用前景、市场、现行标准、关键技术、监管框架等进行了阐述和探讨<sup>[23]</sup>,同时由欧盟航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)为无人机的安全引入和运营制定法律框架、详细的运行规则、行业标准等<sup>[24]</sup>。

此阶段的核心工作是为初步进入民用领域的无人机建立安全运营的制度基础,也使监管部门和公众逐渐形成“必须对无人机进行立法管控”的共识。

② 阶段2: 多类型、多场景无人机交通管理。随着无人机技术的突破和市场需求<sup>[25]</sup>的飙升,无人

机不再只是小型多旋翼或用于特定场景的RPAS,各种固定翼、大型无人机及可执行载人运输、物流配送、公共服务等复杂任务的机型不断出现,给传统ATM体系带来了前所未有的挑战。

为应对复杂多变的低空运行需求,欧洲在立法和技术层面“双管齐下”,一方面通过大量的修订和新颁布条例(如2018/1139号、2019/947号、2019/945号等<sup>[26-28]</sup>),针对无人机设计、生产、运营、人员资质、风险评估等环节做了系统化的规定;另一方面,着手构建并完善无人机交通管理系统U-space,该系统面向未来欧洲无人机的大规模运行,能够为无人机提供远程识别、动态空域管理、冲突探测与回避等核心服务<sup>[29]</sup>,并持续发布了多个版本的《U-space运行概念》<sup>[30]</sup>,对运行环境、空域管理、运行服务、飞行规则、系统架构等内容进行了全面的分析,同时基于现有基础设施和技术水平,对U-space后续实施阶段进行了阐述。

在这一过程中,欧洲逐步确立了针对无人机运行的风险分级管理,并明确了数据交互标准等关键技术要求,为后续大规模无人机空中交通管理及示范应用提供了可落地的监管和技术框架。

③ 阶段3: 欧洲“单一天空”的全面融合。随着无人机技术和eVTOL等新型飞行器的发展,欧洲在低空交通管理问题上的关注重点进一步转向“大规模无人机与新型飞行器的协同运行”,并在单一天空的整体愿景下,将U-space系统和传统ATM体系更为紧密地结合,强调通过统一的法规、标准和基于风险的安全监管体系,确保欧盟范围内大规模无人机的安全运行,并通过U-space实现数字化空域管理,进而支撑eVTOL等新型飞行器的高密度、自动化、可持续安全运行,为欧洲有人机和无人机的融合运行奠定基础<sup>[31-32]</sup>。

该阶段的核心工作是将U-space下的无人机及其他低空飞行器交通管理体系真正融入到欧洲单一天空的主干架构中,实现无人机与有人机在统一规则和空域资源下的高效协同。根据《欧洲ATM总体规划4.0版》<sup>[33]</sup>的规划,欧洲将继续完善对eVTOL、无人机等新型飞行器在低空出行场景的顶层设计,使低空交通管理真正成为未来航空生态不可或缺的一部分。

欧洲在构建低空交通管理体系的过程中(见图2),围绕U-space框架的开发和实施,在动态空域管理、无人机识别及轨迹管理等技术领域进行了深入探索和实践,为政策调整和技术优化提供了宝贵的数据支持,但仍然面临各成员国监管标准不一、传统ATM体系与新型低空飞行器交通管理衔

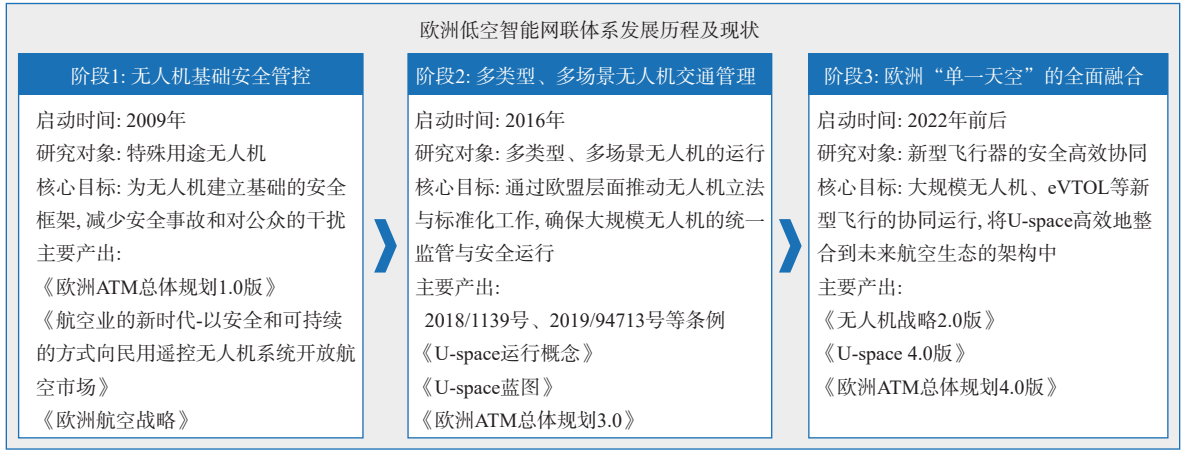


图2 欧洲低空发展历程及现状

Fig. 2 The development process and current situation of low-altitude development in Europe

接困难、数据信息协同能力低、社会接受度不足等诸多问题。

### 1.1.2 国内发展现状

2010年, 国务院、中央军委印发《关于深化我国低空空域管理改革的意见》<sup>[34]</sup>。随后, 多个省份陆续开展了低空空域管理改革相关试点, 进行了多种低空运行管理模式与技术体系的探索与尝试, 相关职能部门围绕低空运行管理和技术实现发布了一系列法律法规、国家标准、规划建议和实施方案等文件, 为中国低空领域的发展积累了许多经验。

2023年12月的中央经济工作会议明确提出, 打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业。2024年全国两会期间, 低空经济首次被写入政府工作报告, 报告提及要加快发展新质生产力, 打造低空经济等新增长引擎<sup>[35-36]</sup>。随后, 全国各地响应积极, 纷纷出台各类举措支持低空经济的发展和智慧低空基础设施的建设。当前, 已有多家单位、组织和机构, 结合自身业务需求和技术理解, 围绕低空运行管理, 发表了报告、白皮书, 对低空运行概念、低空智能网联技术及未来低空发展思路等做了详细阐述。

#### 1) 中国电子科技集团

中国电子科技集团基于自身在航空领域系统和装备的特有优势, 总结发布了白皮书《低空航行系统: 拥抱低空经济, 安全智慧出行》<sup>[37]</sup>, 主要围绕低空经济时代背景、低空航行面临的挑战等方面展开, 旨在为低空经济发展提供系统解决方案, 推动低空航行安全智慧发展。首先, 从运行概念出发, 对各类型飞行器及用空需求、起降场及CNSI基础设施、飞行监管服务系统等的概念进行了阐述。其次, 围绕空域管理、飞行服务、CNS技术、自主飞行、安全监管、信息服务六大关键能力进行了详细分析, 并在此基础上对低空航行系统的总体发展阶

段进行了规划, 如图3所示。

图4为中国电子科技集团低空航行系统的5层体系架构。该架构对整个低空航行系统的系统组成、发展演进做了详细的规划和分析, 从应用场景对应到具体业务能力, 再深入到各业务能力和服务供给, 这些服务通过中间层的业务网、通信网对基础的资源进行调度和管理, 最终实现对整个体系的支撑。

该白皮书以低空航行系统的运行概念的角度, 描述清楚了低空运行、监管及服务的范围和对象, 明确了从运行概念到业务能力需求和服务, 再映射到具体技术实现的能力需求这样一个科学的从理论到实践的方法路径, 可以为低空智能网联体系的构建方法提供指导。虽然该白皮书逻辑清晰、见解独到、内容全面, 但是低空航行系统是一个庞大的概念, 报告中的描述大多较为宏观, 仍有较多问题和内容未能详尽, 对现有低空运行体系的发展和建设提供的帮助有限。

#### 2) 通信网络运营商

作为未来低空运行的参与方, 三大运营商出于自身的业务发展需求, 发布了若干相关报告或白皮书。

① 中国移动。中国移动发布《低空智联技术体系白皮书(2024)》<sup>[38]</sup>, 分析了低空经济产业链的分布和需求情况, 尤其是对低空信息基础设施的CNS需求进行了详细的分析, 明确了CNS能力在低空发展中的重要意义。该报告基于5G-A低空智联端到端的技术架构, 围绕空地协同、通感融合及安全可信的理念, 梳理出了包含网络、平台、应用3个层次的低空智联技术体系, 如图5所示。

该体系明确了CNS在低空信息基础设施上的核心地位, 对涉及的技术从所需能力到技术指标进行了梳理, 并利用现有设施对网络进行了测试分析。但该白皮书中提到的技术手段较为单薄, 对低



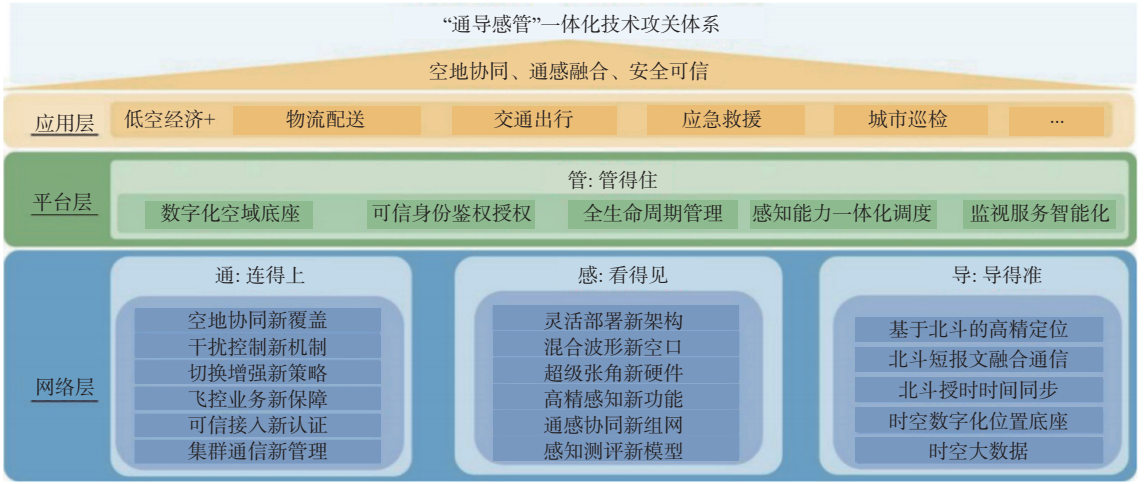


图5 中国移动 5G-A 低空智能网技术体系

Fig. 5 Technical framework of 5G-A low-altitude intelligent network by CMCC

空运行相关业务的梳理不够深入和全面,因此,仅凭该架构提及的内容不能很好支撑未来低空运行的开展。

② 中国联通。中国联通与广东通信学会、中国信息通信研究院等机构合作发布了《低空智能网发展研究报告(2024年)》<sup>[39]</sup>,对各国低空产业的战略规划和发展现状进行了分析,提出了以通信网、感知网、导航网、气象网、算力网为核心的低空智能网整体架构(见图6),对“五张网”涉及到的发展趋势、现有问题、技术方向等内容进行了详细阐述,并且在全国范围内进行了技术验证和部署试点,获取了宝贵的实验数据。此外,该报告还对低空智能网下典型应用场景的业务特点、发展阶段、技术需求等做了详细分析,为低空智能网联的体系化发展和落地应用提供了良好的基础和支撑。

③ 中国电信。中国电信牵头发布了《通感一体低空网络白皮书》<sup>[40]</sup>,提出面向低空物流、地理测绘、应急救援等典型场景,依托通信、感知、算力等基础设施,构建通信、感知、智能计算一体化的低空智能互联数字化服务体系。该白皮书针对低空网络和监视服务业务,分别构建了低空网络功能架构和低空无人机监管服务平台架构,如图7所示。其中,低空网络功能架构主要包含应用层和功能层,应用层主要包含各典型低空应用场景,功能层基于通信感知网络、算力存储资源,为各应用场景提供通信、感知及智能计算能力。

而低空无人机监视、服务平台架构则为了访问层、业务应用层、应用支撑层、数据资源层及基础设施层5个层次,如图8所示,围绕气象、空域、情报、飞行计划、监视信息、综合计算6类核心服



图6 中国联通低空智能网整体架构视图

Fig. 6 Architecture of the low-altitude intelligent network by CUCC

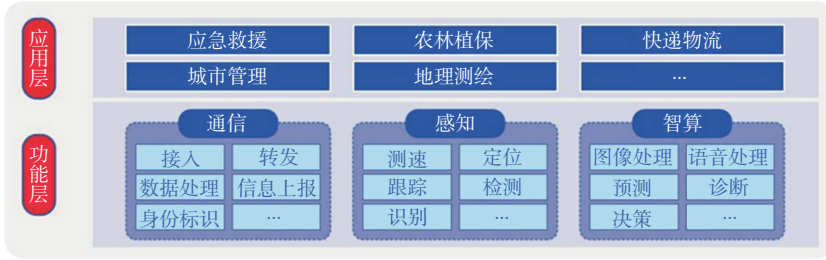


图 7 中国电信低空网络功能架构

Fig. 7 Functional architecture of the low-altitude network by CTC

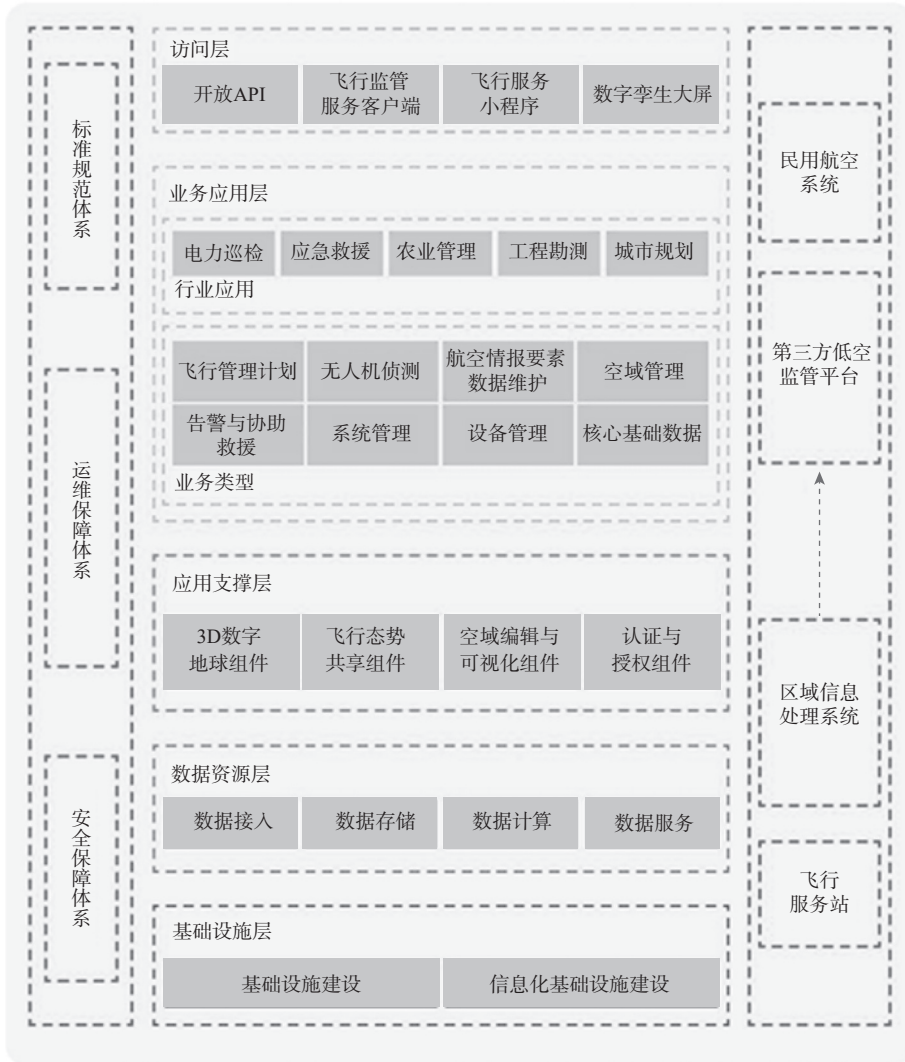


图 8 中国电信低空无人机监管、服务平台架构

Fig. 8 Architecture of the low-altitude UAV supervision and service platform by CTC

务,以保障低空无人机运行的可视化、可调度和可监控。

在上述 2 个架构中,低空网络功能的架构要素过少,很难满足低空运行对网络能力的需求;低空无人机监管、服务平台的整体框架虽比较完整、思路清晰,但是层级间的功能划分有待商榷,某些涉及低空交通管理业务的内容有所欠缺,需要对相关内容进一步整合优化。

通信网络运营商发布的一系列报告或白皮书,

内容丰富、技术扎实,对低空智能网联体系涉及到的核心技术,特别是通信网络相关的技术内容进行了详细的理论阐述和测试验证,为低空智能网联体系的技术能力分析和评估提供了宝贵的数据支撑。

### 3) 粤港澳大湾区数字经济研究院

粤港澳大湾区数字经济研究院(International Digital Economy Academy, IDEA)沈向洋教授团队针对深圳市发展现实需求,在 2022 年和 2023 年发布了两版《低空经济发展白皮书》<sup>[41-42]</sup>,提供了未来

“异构、高密度、高频次、高复杂度”条件下提升飞行安全和效率的部分解决思路。该白皮书聚焦低空经济的发展,阐述了其发展现状,提出要构建全数字化低空智能融合系统 (smart integrated lower airspace system, SILAS), 如图 9 所示。

针对低空智能融合基础设施的建设, IDEA 提出要从物理设施、低空感知通信、空域共享、数字化管服 4 个角度, 构建低空智能融合基础设施“四张网”, 以解决资源共享、安全、效率、成本及协同运行等问题, 如图 10 所示。

IDEA 提出的 SILAS 架构, 强调利用智能化技术来实现整个低空运行的管控和服务, 但与当前低

空智能网联体系发展阶段的实际需求不太匹配。当前技术成熟度决定了低空智能网联体系的智能化水平发展是一个由低到高的过程, 不是一蹴而就, 整个体系的构建需要不断发展演变, 持续优化。此外, 提出的“四张网”也存在值得商榷的问题。首先, 低空智能网联体系下的服务包括了通信、导航、监视、气象、起降场等各个维度的服务, 是由整个低空运行的能力需求所决定, 而 SILAS 中的“服务网”概念类似于低空飞行服务中心, 其主要围绕低空 ATM 开展业务, 显然不能满足低空运行的服务需求。其次, “空联网”中对 CNS 等设施设备的描述也较模糊, 并未体现机载终端与信息物

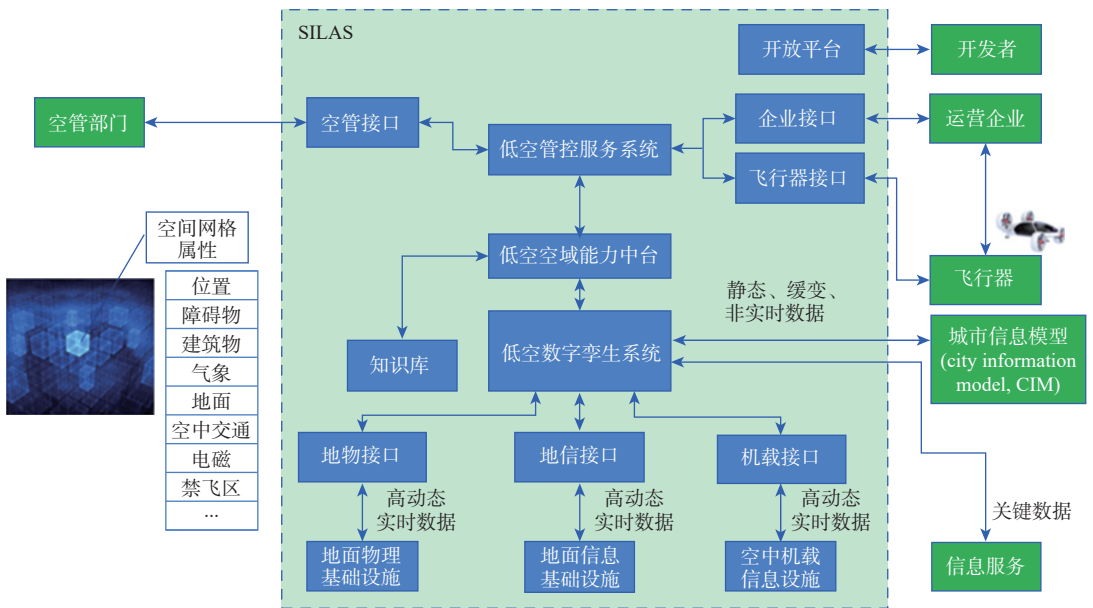


图 9 粤港澳大湾区数字经济研究院 SILAS 框架体系

Fig. 9 Framework of SILAS by IDEA

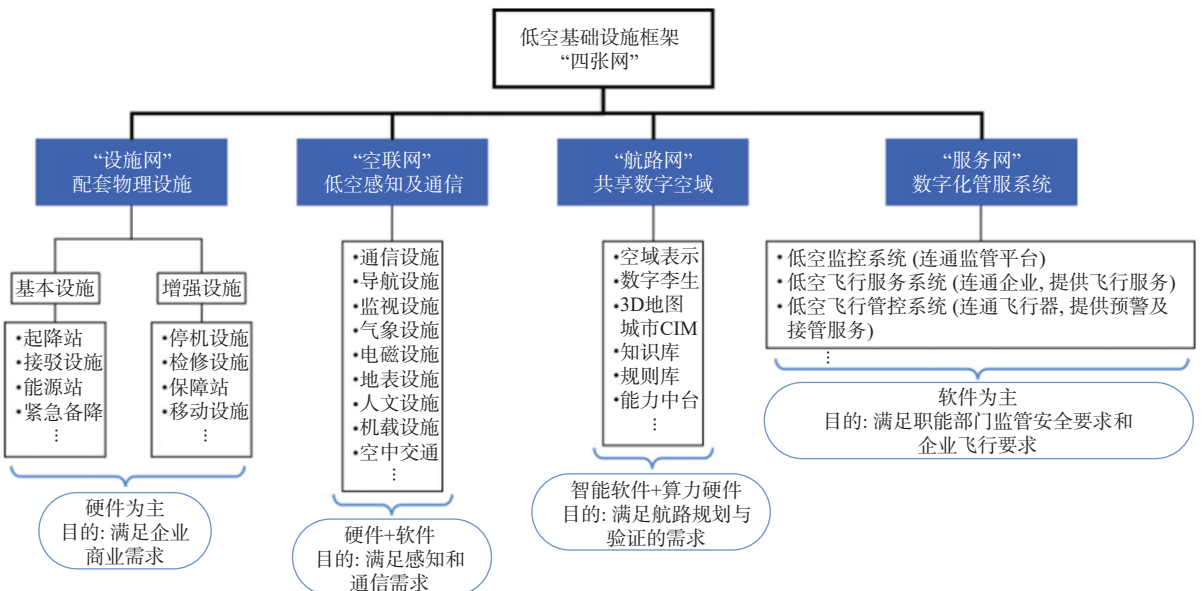


图 10 粤港澳大湾区数字经济研究院低空智能融合基础设施“四张网”

Fig. 10 “Four Networks” of SILAS infrastructure by IDEA

理基础设施的区别, 并且杂糅了一些外围的设施设备, 不适用于现阶段整个体系的装备制造和基础设施建设, 将会影响低空智能网联体系的发展。

上述各方提出的报告或白皮书, 均从各自领域对低空交通管理的“是什么”、“管什么”及“怎么管”等问题做出深入分析和阐述, 但对低空智能网联体系缺乏一个贯穿应用场景、运行概念、业务需求、业务服务、所需能力、技术实现等方面的整体科学方法的梳理, 并且现有方案对低空智能网联体系如何融入现有 ATM 系统考虑较少, 极大降低了对现有资源的利用率。同时, 由于各地方政府认知、区域资源、支撑机构能力等方面存有参差, 给其政策制定、总体规划、技术体系选择、基础设施建设等带来了较大挑战。因此, 亟需一个顶层的低空智能网联体系框架来对各地方的具体实施边界进行约束, 解释低空发展的方向性问题, 保障未来低空运行活动的顺利开展。

### 1.1.3 发展现状总结

纵观欧美低空领域战略发展规划, 初始阶段由于需求的限制, 其研究的重点均为如何为特殊用途无人机提供基础的管控服务, 让无人机安全融入现有系统; 但随着无人机技术的不断发展, 其职能机构发现现有 ATM 体系远远无法满足未来无人机的运行需求, 因此, 开始基于各类低空飞行器特点, 梳理运行概念的差异, 挖掘运行模式和能力需求。同时, 分析如何利用现有的技术手段和基础设施, 满足越来越多的无人机、eVTOL 等新型低空飞行器的安全运行。

而中国对低空发展的迫切需求与新型低空飞行器技术的突破几乎处于同一节奏, 与欧美国家在基本国情、顶层战略、管理体制、发展规划、应用场景、市场需求、技术储备及基础设施条件等方面均存在较大差异, 因此, 不能对欧美的发展经验生搬硬套, 而是要构建结合中国低空行业的实际情况, 构建一套适合自身发展和产业特点的低空智能网联体系, 在新的赛道, “换道超车”。

### 1.2 低空智能网联体系设计思路

任何运行体系的构建都是一项系统工程, 既需要多方合力协同, 又需要在实践中逐步推进。运行体系的建设需要遵循科学的实践方法。运行概念的明确是整个体系构建的起点, 需要对目标任务、运行场景、角色分工及关联因素进行全面分析, 从中梳理核心理念和基本运行规则。而对能力需求的分析是连接运行概念与技术实现的关键环节, 通过对运行规则进行提炼, 形成运行模式, 以挖掘不同运行模式下需要满足的功能、性能指标和适用条件, 能够有效指导技术方案的选择和资源的合理配置。最终, 在技术实现的过程中完成运行体系的落地发展, 并在持续的应用实践中对运行概念、能力需求及技术手段进行迭代和优化, 将概念和需求转化为实际可用的系统能力, 如图 11 所示。。

构建低空智能网联体系是一个系统性工程, 需要多方协同、逐步推进。作为一项复杂系统, 低空智能网联体系的建设须遵循从运行概念到能力需求, 再到技术实现的科学实践路径, 以确保发展方向的正确性和可行性, 并在面对复杂环境和技术挑

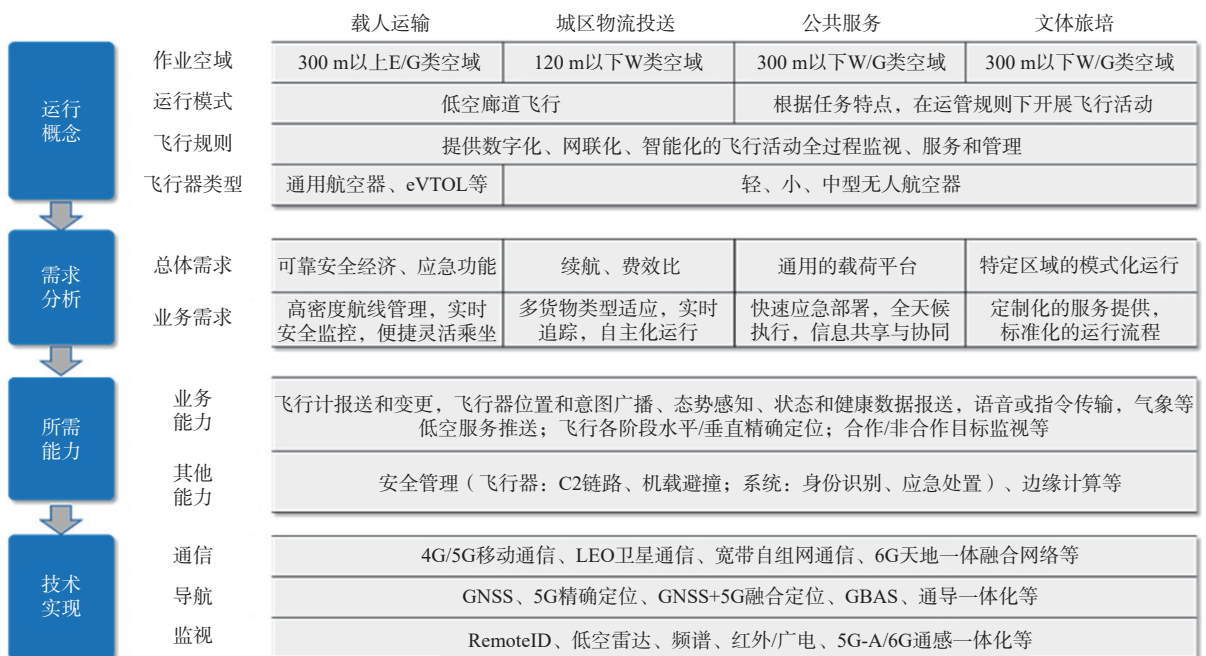


图 11 低空发展的方法论

Fig. 11 Methodology for low-altitude development

战时可具有更高的适应性和创新性。

低空智能网联体系的发展演进过程如图 12 所示。运行概念是对低空运行场景、运行目标、角色分工和基本规则的整体描述,其为各方提供了共同的工作框架和发展方向。低空运行涉及多个参与

方,包括低空飞行器制造方、低空交通管理和服务提供方、低空行业监管方、低空运营参与方、低空基础设施保障和服务提供方等,为实现低空的高效和安全运行,各参与方需在明确的运行概念指引下协同工作。

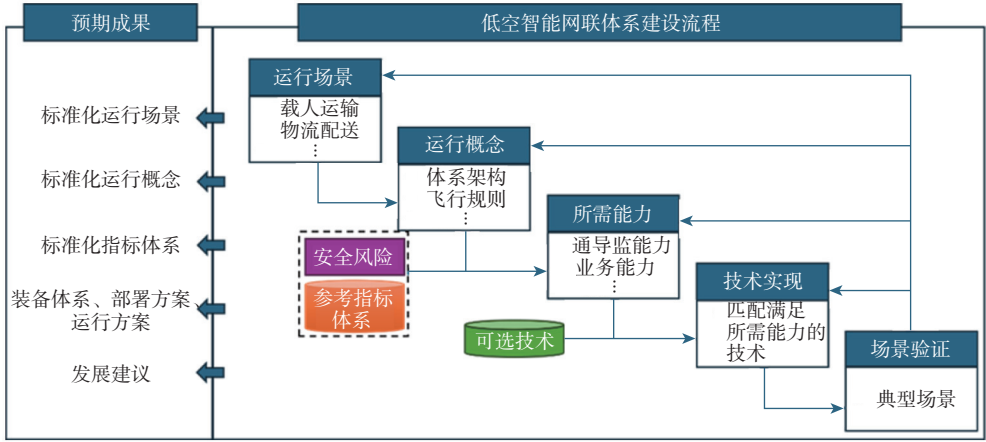


图 12 低空智能网联体系的发展演进过程

Fig. 12 Development and evolution of the low-altitude intelligent networked system

运行概念及体系框架的构建是一个持续发展、迭代优化的过程。当前,城市低空运行概念仍在孕育之中。虽然整体运行思路与体系框架已初步构建,但顶层飞行规则、安全保障框架等关键要素尚未完全明确,仍需在后续试点过程中进一步细化与验证。随着试点的推进,各类运行场景、角色分工、运行模式及飞行规则将不断在实际运行中校准与提升。在此过程中,通过问题发现与经验积累的闭环迭代,将为性能指标的合理设定和能力框架的持续优化提供科学支撑,进而推动低空智能网联体系由初步构想向成熟运行稳步迈进。

随着低空运行场景的不断丰富,应用系统和服务应更加多元化,以满足低空运行的多样化需求,实现经济价值的转化。同时,数据与服务支撑网络应当具备更多应用系统和多源异构数据接入能力,这是保证整个体系兼容性与可扩展性的核心载体和基本保障,为体系的持续发展奠定基础。

## 2 低空智能网联体系架构设计

低空智能网联体系的发展应当从运行概念出发,紧密围绕低空运行和装备制造的实际需求展开,明确技术体系的核心组成要素、功能需求及发展路径。首先,需要明确低空运行所需的核心组成部分,包括应用系统、数据与服务支撑、装备制造与基础设施保障。在此基础上,考虑载人出行、低空物流、公共服务等应用场景,可将系统分为 3 个层次:机载终端与基础设施层、数据与服务支撑

层、应用服务层。机载终端与基础设施层为最底层,主要涉及机载设备与基础设施,包括机载通信设备、导航设备和信息物理基础设施等;数据与服务支撑层为中层,由接入网、交换网和服务网组成,负责数据交换、分发服务;应用服务层为最高层,包含各类航空管理与监管系统,为智能网联体系提供完善的服务和能力支撑。

为保障整个框架体系在发展过程中的规范性和安全性,参考架构还应当确立低空智能网联标准和安全 2 个体系。标准体系通过统一技术规范、接口协议等,以保障各设施设备、数据信息和系统应用的互联互通与兼容性;安全体系则聚焦于装备体系、网络数据、电磁频谱等关键安全问题,共同为低空运行提供可靠保障。

### 2.1 机载终端与基础设施层

机载终端与基础设施层主要参与方为低空飞行器制造方与低空基础设施保障和服务提供方。作为低空智能网联体系架构的最底层,本层主要功能是使飞行器与相关基础设施具备一定智能,具有参与数据交换活动的的能力,并可接受上层指挥进行智慧运行。

#### 2.1.1 低空飞行器制造方

低空飞行器制造方主要负责制造具有智能的低空载具,以及服务低空智能载具的机载设备系统。低空智能载具依托智能航电系统和部件,实现飞行器的智能化,其核心能力包括可被感知、可被管理、具有智能航行能力 3 点。

服务低空智能载具的机载设备系统主要包括机载通信设备、多元导航设备、机载感知与识别设备、智能航行设备等。机载通信设备实现远程控制和数据传输,应具备高可靠性、低延迟、抗干扰、多模兼容、高速率、数据安全等特点;多元导航设备是指集成了多种导航传感器和技术的航空器系统,能采取不同的技术并利用不同的数据来源获取定位信息,以实现低空飞行器在空中飞行期间持续的导航准确、可靠和完整;机载感知与识别设备用于实现对地面的感知设备发送飞行器信息,并实现对周边空中交通态势的感知;智能航行设备是集成在低空飞行器上的系统,旨在实现自动化的飞行控制和管理功能。

### 2.1.2 低空基础设施保障和服务提供方

低空基础设施保障和服务提供方为体系运行提供基础设施保障和服务支持,具体内容包括地空通信基础设施、低空导航基础设施、低空监视基础设施、算力存储基础设施、反制设备、起降基础设施等。利用多种技术手段,依托地基和星基的现有资源,保持低空飞行器随时与智能网络链接,为低空飞行器提供导航、通信、感知、决策等能力。

## 2.2 数据与服务支撑层

作为整个架构体系的中间层,数据与服务支撑层将机载终端与基础设施层生成的数据供给至应用服务层。数据与服务支撑层由数据接入网、数据交换网、信息服务网构成,其主要构成体现在以下3个方面:

1) 数据接入网。数据接入网负责中层与下层的基本信息链接,通过通信接入、导航接入、监视介入等手段,将通信、导航、监视等终端设备接入到通信网络。通过标准化的数据格式和信息交换模型,加之标准化接口和服务框架,确保不同设备间数据无缝对接与统一管理,提升了系统内部的兼容性,并且为不同厂商设备和异构系统的接入提供了便利条件。

2) 数据交换网。数据交换网负责从下层反馈至中层的信息的处理,其包含通信资源管理、导航资源优化、监视数据融合、系统互操作、系统集成化管理等内容。宗旨:对系统中的通信、导航、监视等各类资源进行统一调度和优化分配,保证低空飞行环境中的资源得到充分利用,支撑系统在高负载和多任务情况下依然能够稳定运行,确保系统的鲁棒性、高并发性。

3) 信息服务网。信息服务网负责资源分配和对用户信息服务的支撑。这一部分通过发布-订阅模式和智能分析功能,为用户提供高效的数据分发

和决策支持。信息服务网提供智能化资源调度与保障系统,分配通信、导航、监视等资源,并提供智能分析与服务能力。

## 2.3 应用服务层

作为体系架构的最上层,应用服务层根据中层的数据信息负责智能的计算、规划、管理,并将相关管理、调度命令反馈给数据与服务支撑层,应用于机载终端与基础设施层。应用服务层的参与方有低空运营参与方、低空交通管理与服务提供方、低空行业监管方。

### 2.3.1 低空运营参与方

低空运营参与方是低空智能网联体系中的直接应用者,基于低空运营管理系统开展业务。该参与方的核心业务包括飞行计划的制定和申报、飞行过程和运行状态的实时跟踪监控、飞行作业过程的统计与控制、任务和资源的动态调度与协同及信息的发布等,为低空智能飞行器的飞行提供基本的飞行任务规划、指导与申报。这些业务能力需要高可靠、低延迟的通信网络以保障飞行器与地面系统之间业务、指控数据的持续交互;高精度的导航技术支持复杂环境下的路径规划与动态调整;可靠的监视技术提供运行状态的实时反馈;要求飞行器具备自主飞行能力以应对突发状况。

### 2.3.2 低空交通管理与服务提供方

低空交通管理与服务提供方由进行低空交通管理和提供基础服务的企业、机构等组成,主要基于低空交通管理和服务系统开展业务。该方核心业务包括空域资源的分配与优化、飞行安全风险的评估与管控、空域容流量测算与管理、低空交通管制、低空气象和数据信息等服务的提供等。通过收集分析实时空域信息,为低空飞行器提供飞行过程的管理、调度。这些能力依赖于实时精准的飞行器位置和状态信息获取、广泛的空域态势感知、精细化的空域管控、高效的飞行冲突检测与消解、低延迟的数据传输等,为安全高效的低空空域运行提供保障。

### 2.3.3 低空行业监管方

低空行业监管方由低空监管相关政府职能部门组成,基于低空监管系统开展业务。该方利用低空基础设施提供方和数据与服务支撑层实现安全可靠的低空运行监管。其主要功能包括飞行器身份的识别认证、对运行异常或风险情况的应急处置、运行过程的违规监控与处置及运行事故的分析与追溯。可帮助维持空域安全有效运行、及时处理突发事件并有效打击违法事件。这些业务需要构建全面的数据获取与存储能力,通过对运行数据的

实时采集和安全管理为监管提供数据支撑;同时,还要求系统具备智能自主的分析和管理能力。

### 3 低空智能网联体系关键技术

#### 3.1 应用服务系统

低空运行监管和服务的各参与方,基于运营管理系统、低空交通管理和服务系统及低空监管系统等多个应用服务云系统,基于数据驱动的低空智能航行、低空数字化空域管理技术、低空空域容流自适应匹配、风险评估等关键技术,围绕不同的低空运行场景、低空飞行器特性和任务特点,开展各类低空业务。表1为各应用服务系统所需关键技术及相应的业务能力<sup>[43-48]</sup>。

表1 低空智能网联体系应用服务关键技术

Table 1 Key technologies of the application service for the low-altitude intelligent networked system

应用服务系统	关键技术	业务能力 <sup>[43-48]</sup>
运营管理系统	数据驱动的低空智能航行管理技术	通过请求和处理飞行计划、气象信息和容流信息等,实现无人机智能飞行计划生成、航迹动态优化和多无人机协同管理
低空交通管理和 服务系统	低空数字化空域管理技术	基于低空空域数字化模型,支持航行方案的仿真验证、空域资源和运行态势的可视化,为实时决策提供数据支撑
	空域容流自适应匹配技术	根据实时飞行需求和空域负载动态调整容量,优化流量分配,避免区域性的空域拥堵和冲突风险
低空监管系统	实时安全风险评估	构建低空运行风险动态指标体系,实时评估当前空域安全风险;在突发事件中快速生成风险报告,辅助应急决策
	身份识别与认证	系统支持无人机提供身份识别和权限认证、飞行活动记录溯源、防止非法设备入侵等业务,保障空域内低空飞行器的合法运行

#### 3.2 数据与服务支撑网络

数据与服务支撑网络是整个低空智能网联体系的中枢,通过统一的标准化数据接口接入机载终端及基础设施的数据信息,并对异构数据进行信息模型构建,实现各类数据信息的高效交换与数据服务能力生成。

在传统民航空管领域,空管、航司、机场等各方的数据信息数量庞大、结构各异,信息交互需求日益增加,信息“孤岛”问题愈加显著,严重影响了民航业务的正常开展。为高效地开展信息共享和协同决策,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)提出了广域信息管理系统(system wide information management, SWIM)的概念,旨在建立统一的标准化数据接口和共享平台,

使空中交通运输的各参与方能够在松耦合框架下进行信息交换与协同<sup>[49-52]</sup>。表2为对SWIM关键技术进行梳理的结果。

表2 SWIM 关键技术

Table 2 Key technologies in SWIM

关键技术	功能描述	指标参考
数据标准化	统一航班信息、飞行情报、气象信息等异构数据接口	≥7种异构数据
信息交换模型构建	标准化数据交换模型(如AIXM、FIXM、WXXM等)	数据吞吐量 ≥ 10 Gbit/s
面向服务架构设计	提供态势感知、运行控制、飞行计划更新等服务支持	服务数据延迟 ≤ 100 ms

注:假设一个典型的全国性SWIM系统服务约5000个终端(机场、航空公司、空管站等),每个终端每秒传输数据200KB,吞吐量可达 $5000 \times 200 \text{ KB/s} \approx 8 \text{ Gbit/s}$ 。

面向服务的架构(service-oriented architecture, SOA)通过标准化接口进行信息交互,各服务提供者将各自的功能组件进行封装为服务接口,以供其他参与者按需通过网络进行请求/调用。中国民航系统基于现有基础设施,结合国外SWIM的建设经验,将面向服务架构分为空管业务信息系统、SOA核心服务,数据交互服务及技术基础设施4个层次,如图13所示<sup>[51]</sup>。

为满足低空ATM系统的网联化、智能化需求,特别是针对无人机数据信息的交互和智能决策,NASA发起了建设新型信息基础设施的数据和推理网络(data and reasoning fabric, DRF)项目<sup>[53]</sup>。DRF关键技术梳理如表3所示,DRF架构如图14所示。DRF凭借一个去中心化的信息网络,高度互联、相互交织,能够实现未来低空飞行环境中大规模数据与智能推理决策的高度集成与无缝接入,以确保未来低空场景的可靠运行。

根据上述民航SWIM的设计思路和国外相关低空数据服务网络开发经验,可以将低空智能网联体系下的数据与服务支撑网络的核心架构梳理为3层结构,即数据接入、数据交换及服务能力生成3个层级,如图15所示。

同时,定义低空智能网联体系下,表4为数据与服务支撑网络的所需关键技术,主要为数据标准化、信息融合与建模、数据交换及服务能力生成等技术。

#### 3.3 机载终端与基础设施

##### 3.3.1 空地协同新航电技术

为满足未来低空无人化和大规模运行的需求,新一代低空飞行器的航电系统需具备智能化的稳定通信、自主导航、全域感知、协同作业、智能决策等关键功能,以确保飞行器能够高效、安全地应对动态变化的空域和复杂的任务要求,实现复杂环

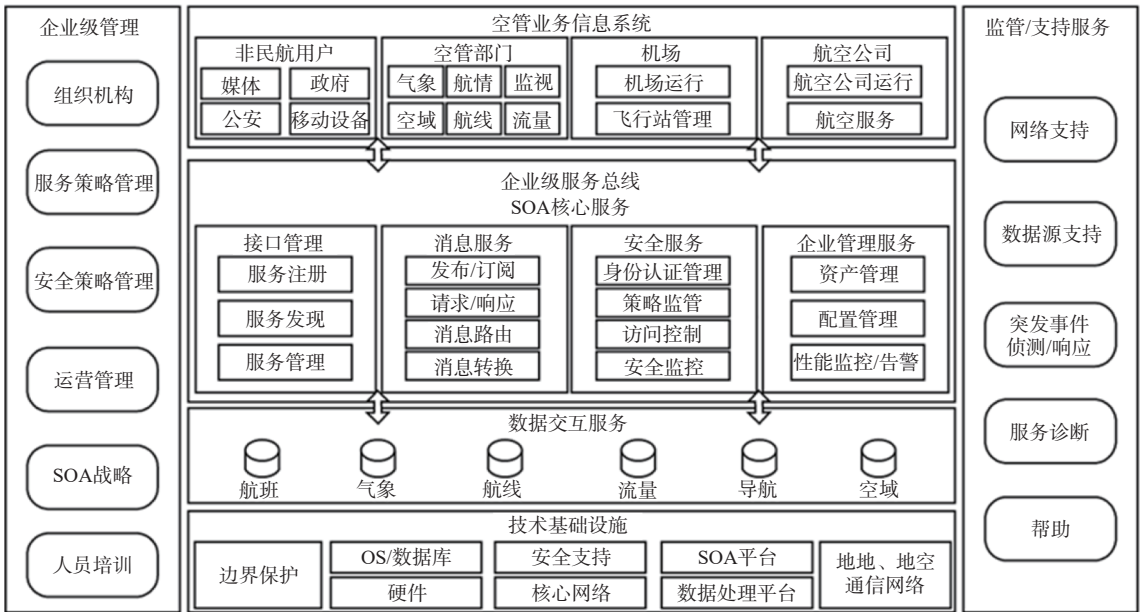


图 13 面向服务架构的空管数据共享平台<sup>[51]</sup>

Fig. 13 Service-oriented architecture for air traffic management data sharing platform<sup>[51]</sup>

表 3 DRF 关键技术梳理

Table 3 Analysis of key technologies in DRF

关键技术	功能描述	指标参考
数据融合	动态数据融合与推理生成	终端数量 $\geq 10\,000$ ; 数据吞吐量 $\geq 10\text{ Gbit/s}$
智能算法	支持实时态势感知与任务规划服务	算法响应时间 $\leq 200\text{ ms}$
分布式服务架构	动态生成分发任务相关的决策支持服务	动态服务生成时间 $\leq 1\text{ s}$

注: 假设 10 000 架无人机, 每秒上报 100 KB 数据, 同时接受推理结果, 吞吐量可达  $10\,000 \times 100\text{ KB/s} \approx 8\text{ Gbit/s}$ 。

境下的自主运行。

1) 一体化 CNSI 集成技术。CNSI 集成技术通过一体化系统架构, 将通信、导航、监视和情报服务模块紧密集成, 提供全面的机载航电解决方案。该技术实现了各个功能模块的协同工作, 形成一个统一的平台, 以简化飞行器的系统设计和操作流程。通信模块支持多种网络形式的融合(如卫星通

信、5G 和 VHF/UHF 通信), 确保飞行器与地面控制和其他飞行器之间的实时数据交换。导航模块通过集成全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、惯性导航和地面辅助定位等技术, 提供高精度的定位与路径规划。监视模块融合 ADS-B 和雷达技术, 实时监控空域状况, 提供精准的碰撞预警和空域管理。情报服务模块利用大数据分析和云计算技术, 提供飞行决策支持和风险预警。通过这一高度集成的架构, CNSI 技术有效提升了低空飞行器在复杂环境中的协同能力和操作效率, 确保了飞行安全和任务的顺利执行。

2) 机载感知与避撞技术。机载感知与避撞(detect and avoid system, DAA)系统是防止空中相撞的最后一道防线, 通过集成多种传感器和智能算法, 实时感知飞行器周围环境, 确保飞行器在低空复杂空域中的安全运行。该技术涉及多源航迹管理、自主安全间隔丢失预警与恢复引导、冲突解脱



图 14 DRF 架构

Fig. 14 The DRF architecture

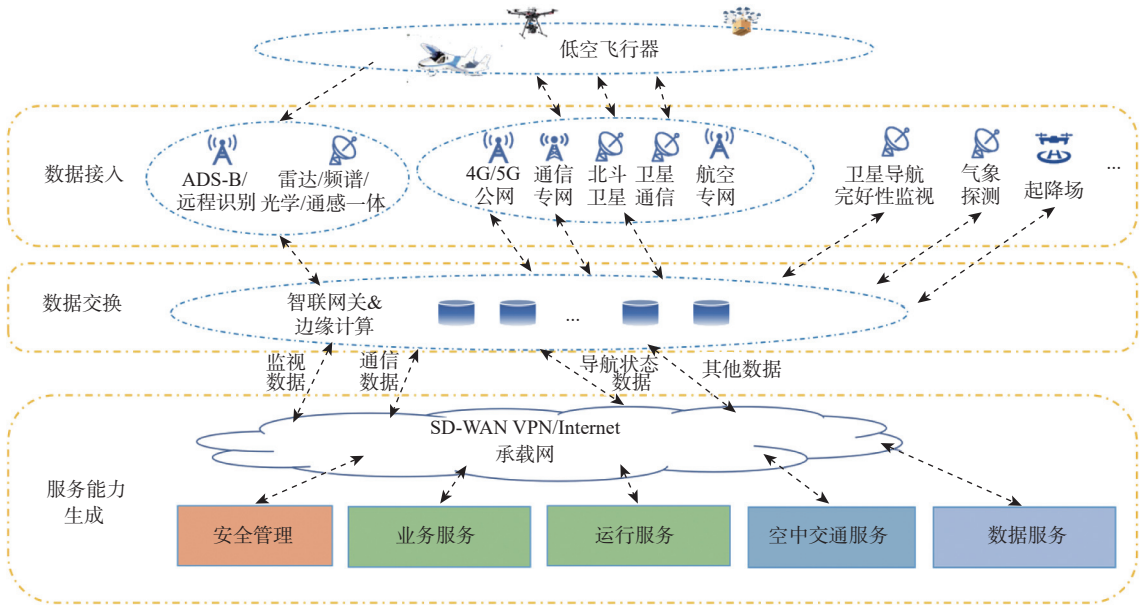


图 15 数据与服务支撑网络架构示意图

Fig. 15 Architecture of data and service support network

表 4 数据与服务支撑网络所需关键技术

Table 4 Key technologies required for the data and service support network

关键技术	功能描述	指标参考
数据标准化	接入机载终端与地面基础设施数据, 统一标准化数据接口	≥15种异构数据
信息融合与建模	基于接入的融合数据扩展建模, 实现多源数据的智能决策模型构建	单次建模时间 ≤ 10 s; 融合误差 ≤ 1%
数据交换	实现城市级规模的低空数据可靠传输与动态交换	数据传输速率 ≥ 10 Gbit/s; 延迟 ≤ 50 ms
服务能力生成	生成和分发飞行态势感知、冲突检测、路径优化等业务服务所需的底层数据和决策信息。	支持终端 ≥ 10 000; 动态服务生成时间 ≤ 1 s

同时应对突发情况或环境变化, 确保飞行的稳定性和安全性。

### 3.3.2 低空智能网联体系通信技术

#### 1) 能力需求

在复杂的城市环境和动态空域条件下, 低空飞行器需要稳定、实时的通信链路来确保飞行安全、任务精准执行和多机协同合作。传统的通信网络难以满足低空飞行器对高带宽、低延迟和高可靠性等要求。表 5 为低空智能网联体系 5 方面通信能力需求的含义。在降低通信时延、提升数据传输速率、扩展通信网络覆盖范围的同时, 保障连续性与完好性, 成为低空智能网联体系通信能力的核心需求。

表 5 低空智能网联体系通信能力需求

Table 5 Communication capability requirements of the low-altitude intelligent networked system

能力需求	具体含义
传输时延	从发送端发送数据到接收端接收到数据所需的时间间隔
传输速率	在单位时间内可以传输的数据量, 通常以bit/s为单位
覆盖率	通信网络能够有效提供服务的区域占总区域的比例
连续性	通信服务在一段时间内不间断的能力
完好性	在未检验出错误情况下, 通信处理能够在通信处理时间内完成的概率

#### 2) 可选技术方案

为满足低空智能网联体系下通信能力的需求, 需整合现有通信技术, 为低空智能网联体系的发展, 提出切实可行的技术方案。表 6 为现有通信技术手段及特点、需解决的问题、关键指标参考值等内容。

等关键研究, 为机载系统提供多阶段的冲突告警与缓解措施, 使无人机具有与有人机同等的“看见与避撞”能力。机载 DAA 技术还能够与空域管理系统、地面控制中心进行数据交换, 提供更加全面的空域动态信息, 从而实现飞行器之间的协同避碰, 减少飞行安全风险。

3) 自主飞行与智能决策技术。自主飞行与智能决策技术使无人机能够在无需人工干预的情况下, 根据实时感知数据和任务需求自主执行飞行任务。通过集成的传感器系统、自动飞行控制和机载稳定性增强算法, 无人机能够感知和分析周围环境, 识别障碍物, 实现无人机姿态控制与飞行路径动态管理, 提高机身稳定性。智能决策系统是该技术的核心, 其结合实时环境信息与任务目标, 基于复杂的算法模型进行决策, 自动优化飞行器的航向、速度和高度, 确保飞行路径的灵活性与精确性,

表 6 通信可选技术方案

Table 6 Optional communication technology solutions

技术手段	需要解决问题/缺点	指标参考
5G蜂窝通信	需要解决航空优先级、天线指向、高密度服务拥堵相关问题	带宽 $\geq 10$ Gbit/s 空口时延 $\leq 1$ ms
LEO卫星通信	可能具有双重功能(通信和导航增强)	通信延迟 $\leq 100$ ms 上行速率 $\geq 10$ Mbit/s 数据链: 传输距离 $\geq 40$ km 传输速率 $\geq 300$ Kbit/s 专网, 覆盖高度 $\geq 1$ km 传输速率 100~1.024 $\times 10^5$ Kbit/s (不同技术路径有差异)
低空通信专网和数据链	需要部署多基站或中继设备	单条报文1 000Byte (北斗三)
北斗短报文通信	引入数据压缩技术, 减少单次通信的数据量	通信速率31.5 Kbit/s
VDL模式2	成本、容量和延迟方面存在问题	通信速率31.5 Kbit/s
VDL模式3	适当的带宽	通信速率31.5 Kbit/s
自组网电台	需解决跳转增加的网络传输延迟	峰值速率 $\geq 10$ Mbit/s 单台距离 $\geq 30$ km 组网能力 $\geq 64$ 节点 跳数 $\geq 10$ (不同产品差异较大)
激光通信	成熟度不足	
WiFi/蓝牙	短距离通信需要太多的地面站点以确保可行性; 易受发射器干扰; 适用低速合作目标	最大传输速率: 9.6 Gbit/s 24 Mbit/s(蓝牙) 传输距离: 100 m(WiFi)、 10 m(蓝牙)

① 5G 蜂窝通信。5G 通信技术在不同阶段的演进为低空飞行器的应用提供了逐步增强的技术支撑。从 Release 15 起, 5G 引入的增强型移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB) 技术显著提升了低空飞行器的数据传输能力。随着 Release 16 的发布, 低时延高可靠通信 (ultra-reliable low latency, URLLC) 和大规模机器型通信 (massive machine type communication, mMTC) 得到优化, 重点解决了实时应用对低时延和高可靠性的需求, 支撑低功耗、广覆盖的无线网络实时交换数据, 为低空飞行器在复杂城市环境中的自动驾驶及大规模协同作业提供了必要的技术保障。Release 17 为上行控制和数据信道引入多个增强特性, 初步拓展空天地覆盖能力。Release 18 及后续版本, 5G 技术进入了更为先进的阶段 5G-A, 聚焦于增强网络的智能化和自适应能力, 特别是通过边缘计算、AI 驱动的网络优化和跨域协同等技术, 使低空飞行器能够在更加复杂和动态的环境中实现更加精确的实时导航、路径规划和空域管理。随着 5G-A 的发展, 低空飞行器将能借助更高带宽、更低时延及更强的网络覆盖, 实现更加智能化的 UAM 系统。

在低空运营场景中, 5G 蜂窝通信因其高带宽

和低时延优势, 成为主要通信技术之一。其理论带宽可高于 10 Gbit/s, 传输延迟可降低至 1 ms, 能够支持高清视频传输、航迹管理和实时避撞等高频更新需求。现有 5G 基础设施日臻成熟, 可靠性较高, 适合在城市区域进行高密度部署。5G 基站的有效覆盖半径一般在 100~300 m 之间, 在空旷地区可能有所扩大, 而在城市中心区域则可能有所减小。为了弥补高频段信号在城市区域穿透力弱的不足, 可能需要更密集的 5G 基站部署, 而这同时也需要更高的成本。

② 基于低轨卫星通信网络和 6G 的天地一体化融合网络技术。国内低轨 (low Earth orbit, LEO) 卫星互联网星座主要包括了 GW 星座 (星网)、G60 星座 (垣信卫星等) 及近期公布的鸿鹄-3 星座 (上海蓝箭鸿擎科技有限公司), 规划合计超 3.6 万颗星, 3 个星座是未来国内 LEO 卫星互联网组网核心载体。

LEO 卫星覆盖范围可实现全球连接, 在地面基础设施不足的区域也能提供可靠的通信服务。小于 100 ms 的双向通信延迟可以满足低空运营的动态数据需求, 上行速率约 10 Mbit/s, 适合航迹管理和飞行计划更新等任务。然而, LEO 通信设备成本较高, 且信号在城市高楼环境中容易被遮挡, 在低空高密度应用场景 (如无人机集群、城市空中交通), 大量用户同时接入 LEO 卫星网络会导致负载过高, 影响通信质量。

随着 6G 技术的发展, 将实现卫星与地面通信的深度整合。基于 6G 的天地一体融合网络利用 LEO 卫星网络, 面向偏远地区、海洋、航空等全域立体空间实现“泛在连接”和低时延服务, 为地面网络无法部署或建网维护成本高昂的区域填补覆盖空洞; 同时, 发展动态灵活的网络资源管理技术以适应高速移动的网络拓扑。此外, 6G 还将统一空中接口标准和频率, 确保不同网络环境下的兼容性和高效接入, 并通过星地智能动态协作网元优化覆盖和资源调度, 实现星地资源的高效协同。

③ 低空通信专网和数据链。低空通信专网适用于区域性低空运营, 专网能够根据低空无人机的需求进行优化设计, 具有更高的抗干扰能力和数据安全, 其适用于飞行控制、监控和特定任务场景 (如无人机物流配送) 的通信。然而, 专网的覆盖范围有限 (典型覆盖半径为几十公里), 需要通过部署多基站或中继设备扩展覆盖范围, 主要适用于区域性应用或关键任务需求。

低空数据链单台传输距离可达 40 km (组成专网后可达百公里), 传输速率在 300 Kbit/s 以上, 常用频点为 800~900 MHz。低空通信专网视技术路

径不同,通信速率在  $100\sim 1.024\times 10^5$  Kbit/s 不等,覆盖高度可达千米级。

④ 北斗短报文通信。在偏远地区或紧急情况下,北斗短报文通信提供了低功耗和广覆盖的通信能力,其具有极高的抗干扰性和可靠性,适合在飞行器失联或地面信号中断时作为备份。但北斗三号 14 Kbit 的报文长度限制和秒级的通信时延使其不适合高清视频传输或实时控制需求。北斗短报文更适合关键状态信息回传和应急通信。

⑤ VDL 模式 2/模式 3。最高频(very high frequency, VHF)通信作为航空领域的成熟技术,因其稳定性和多信道支持能力被广泛采用。使用的无线电频率须在 117.975~137 MHz 之间选择。最低的可分配频率须为 118.000 MHz,最高的可分配频率须为 136.975 MHz。各信道之间的间隔须为 25 kHz。模式 2 仅支持数据通信,模式 3 支持数据通信和话音通信,其覆盖范围为 50~200 km,适合城市低空空域的任务。VDL 模式更适合作为飞行状态和计划数据传输的基础链路,并在必要时提供应急通信保障。

⑥ 低空自组网电台。低空自组网能够在无需固定基站的情况下,通过节点间的无线连接自动建立和维护网络,适应动态变化的环境(如无人机集群)。自组网支持中高速数据传输( $10\sim 100$  Mbit/s),无障碍干扰下通信距离超过 30 km,具备较强的抗干扰能力和端到端加密通信的安全性,其分布式路由机制可在节点失效时自动重组网络,确保通信的连续性和可靠性。然而,由于多跳传输可能导致延迟累积,且能耗较高,自组网电台更适合用于无人机协同作业、灾害应急通信及城市物流等需要灵活性和覆盖广泛的任务场景。

⑦ 蓝牙/WiFi。蓝牙和 WiFi 作为主要的短距离无线通信技术,其具备独特的物理层和协议层特性,通常能支持 100 m 范围的数据通信。当前,蓝牙技术拥有毫秒级的唤醒延迟和极低功耗,数据传输率可达 2 Mbit/s,适合小型设备的周期性广播和设备发现。WiFi 通常能提供数 Gbit/s 的数据传输速率,支持高带宽、低延迟但功耗较高的场景。但由于技术特点和广播模式的发射功率受限,该类技术有效覆盖距离仅在百米范围,难以支持超视距(beyond visual line of sight, BVLOS)的无人机通信和监视需求;同时,广播消息易受多径和同频干扰,流量密集时碰撞概率上升;且广播链路本身不含加密或身份认证,单包最大承载数据量有限,存在被嗅探和伪造的安全隐患。

中国民用航空局发布的《民用无人驾驶航空器

系统运行识别规范(征求意见稿)》<sup>[54]</sup>中将蓝牙和 WiFi 作为无人驾驶航空器广播式运行识别链路的支撑技术,定期向周边接收设备广播无人机身份、位置、状态等信息,实现对无人机全过程的连续、实态势感知。为保证短距内的实时高可靠通信,对广播周期、信息安全、接收端天线灵敏度、解码概率、系统数据处理能力,完成时延等内容做了明确要求,以确保蓝牙/WiFi 广播在低空密集场景下的短距离、低时延、高可靠性运行识别能力。

### 3.3.3 低空智能网联体系导航技术

#### 1) 能力需求

由于低空空域存在建筑密集、地形复杂、气象多变、信号干扰严重等影响,对导航系统的稳定性和可靠性提出了更高要求,必须采取多元化的技术手段来确保飞行器在复杂环境下的精确定位和安全飞行。表 7 为低空智能网联体系 5 方面导航能力需求的含义。在提升定位精度、维持稳定的更新频率的同时,保障可用性、连续性和完好性水平,成为低空智能网联体系导航能力的核心需求。

表 7 低空智能网联体系导航能力需求

Table 7 Navigation capability requirements of the low-altitude intelligent networked system

能力需求	具体含义
定位精度	系统测量或计算目标位置的准确度
更新频率	系统在覆盖区域内,2次位置信息更新的时间间隔
可用性	在指定的覆盖区域内,多技术手段融合导航系统能够提供有效服务时间的百分比
连续性	导航系统在覆盖区域一定时间范围内持续提供位置信息的能力
完好性	系统出现故障并超出误差限制时,在规定的阈值内向用户发出告警的能力

#### 2) 可选技术方案

为满足低空智能网联体系下导航能力的需求,需要整合现有的导航技术,为低空智能网联体系的发展,提出切实可行的技术方案。表 8 为现有导航技术手段及特点、需要解决的问题、关键指标参考值等内容。

① 惯性导航。惯性导航系统(inertial navigation system, INS)主要以 MEMS 惯性传感器和光纤陀螺仪广泛用于旋翼无人机、直升机等领域,提供轻量化、高动态下的自主导航能力。在低空物流等场景中,INS 具备短时独立导航、抗遮挡和高动态适应能力,但受制于漂移误差和环境振动影响,需与 GNSS 或视觉导航融合。根据不同场景,其需满足高位置与姿态精度(误差小于 10 m 或  $0.2^\circ$ )、宽动态范围(加速度  $5g\sim 10g$ )、长连续导航时间(30 min 至数小时)和强抗干扰性能,以确保复杂环境中的

表 8 导航可选技术方案

Table 8 Optional navigation technology solutions

技术手段	需要解决问题/缺点	指标参考
惯性导航	漂移误差累积; 高精度成本高	角速度精度 $\leq 0.01$ ( $^{\circ}$ )/s; 加速度精度 $\leq 0.01$ m/s <sup>2</sup> ; 累计位置误差 $\leq 0.1\% \times$ 距离
视觉导航	需要与环境地图进行匹配(如SLAM)	导航精度 $\leq 0.2$ m; 特征点匹配成功率 $\geq 95\%$ ; 算法延迟 $\leq 50$ ms
卫星导航及增强	需与RTK、增强系统、完好性监测共同适用; 多径效应; 抗干扰	定位精度: $\leq 1$ m(普通), $\leq 0.1$ m(RTK增强) 信号丢失恢复时间 $\leq 5$ s
高度计	城市环境中的气压高度计可能会有高达 152.4 m 的高度误差	高度测量精度 $\leq 0.1$ m 响应时间 $\leq 10$ ms
LiDAR	高分辨率LiDAR设备成本较高	探测距离 $\leq 200$ m 探测精度 $\leq 0.01$ m 点云刷新率 $\geq 10$ Hz

注: 不同制造商设备数据存在差异。

可靠运行。

② 视觉导航。视觉导航通过机载设备(如高分辨率 RGB 摄像头、深度摄像头、双目立体摄像头等)采集环境图像, 并结合地面设施(如视觉信标等)实现精准定位和路径规划。由于视觉导航不依赖外部信号(如卫星、地面基站等), 具有较强的自主性, 广泛应用于 GPS 信号弱或无法接收的环境下工作, 如城市峡谷、室内等。其优势在于结合信标后可显著提升定位精度(可达 0.1 m 以内), 降低对自然环境特征的依赖, 且信标成本低、易于部署; 缺点是需要提前开展背景数据提取, 适应性受限。受环境和设备精度影响, 其定位精度在 0.1~1 m, 复杂环境中需要  $< 0.5$  m; 信标检测范围 1~10 m, 响应时间小于 50 ms; 支持高分辨率图像处理, 帧率要求  $\geq 30$  帧/s。

③ 卫星导航及增强。GNSS 作为适应性最广的导航技术, 在低空运行环境下受到多种因素制约, 其导航精度和稳定性受到严峻的考验, 因此, 需要配合多种技术, 以满足 GNSS 技术在低空各类场景下的高精度、高鲁棒性需求及对完好性的监测。

GNSS 通过机载设备(如 GNSS 接收机、RTK 机载模块等)和地面设备(如 RTK 基站、星基增强系统(satellite based augmentation system, SBAS)/地基增强设备(ground based augmentation system, GBAS)、完好性监测设备等)协同工作, 实现高精度位置信息的实时获取, 广泛应用于无人机低空运行中的自主起降、路径规划、精准任务执行和航迹跟踪等场景。SBAS/GBAS 是 GNSS 的有效补充, 其中, 单频 GBAS 服务可以提供水平/垂直方向 95% 以上的米级导航精度和  $2 \times 10^{-7}$  的完好性能力水平, 而完好性监视设备提高了 RTK 系统的定位可靠性和完好

性, 弥补了 RTK 系统本身无法提供完好性检测的不足, 其导航精度能达到厘米级, 数据更新率为 1~20 Hz, 具备抗干扰能力和多模多频接收能力, 以充分保障低空飞行高精度导航的稳定性和可靠性。

在 GNSS 的应用中, RTK 组网和增强网络是确保低空运行导航精度和可靠性的关键技术。RTK 网络通过多个基站的分布式部署形成网络化结构, 每个基站能够接收来自 GNSS 卫星的信号, 并将校正信息发送至无人机的 RTK 接收机。典型的 RTK 基站组网覆盖范围可达几十公里, 基站间距通常为 10~20 km, 以确保校正信号的连续性和精度。同时, 为了增强系统的覆盖范围和冗余性, 地面 RTK 网络可结合区域性的 GBAS 实现更大范围的导航增强支持。此外, 完好性监测系统同样需要通过组网形式进行部署, 通常在关键节点(如机场、交通枢纽)设置完好性监测设备, 实时监控 GNSS 信号的质量和完好性数据, 发现异常时及时发出告警信号。

④ 高度计。高度计通过机载设备(如气压高度计、激光高度计、超声波高度计)实时测量飞行器的高度信息, 适用于无人机垂直起降、低空悬停和近地飞行等场景。其优势在于垂直精度高、实时性强, 可有效保障低空飞行安全; 但气压高度计易受环境气压变化影响, 激光和超声波高度计则易受障碍物和天气条件限制。关键性能指标包括测量范围 0.1~10 000 m, 测量精度气压高度计为  $\pm 1$  m, 激光和超声波为  $\pm 0.01$  m, 响应时间小于 20 ms, 激光高度计需具备在雨雾天气下的适应能力。

⑤ 激光雷达。激光雷达 LiDAR 一般通过机载设备(如旋转式 LiDAR、固态 LiDAR、MEMS 扫描 LiDAR)实现三维环境感知、路径规划和精准避障, 特别适用于复杂未知地形和动态环境的低空飞行任务。其优势在于定位精度高(可达  $\pm 1$  cm), 视场范围大(水平  $90^{\circ} \sim 360^{\circ}$ , 垂直  $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ), 测量范围为 0.1~300 m, 数据更新率为 100~300 Hz, 可生成高密度三维点云, 适合复杂地形和动态场景, 同时具备较强的抗干扰能力以确保低空飞行的稳定性和可靠性; 但设备成本较高, 雨雾天气下性能下降, 且机载设备的质量和功耗往往限制了其使用范围。

### 3.3.4 低空智能网联体系监视技术

#### 1) 能力需求

低空飞行目标根据能否接入低空网络化监管系统、接受通信和管控指令, 分为合作和非合作 2 种类别。针对合作目标的监视技术需重点解决低空各类航空器的协同感知、入网监测及身份识别等问题。非合作目标不主动向低空智能网联监视系

统报送信息,并且低空飞行器具有飞行高度低、反射截面小、飞行速度慢、周围环境复杂等特点,因此,单一的雷达或光电监视技术对非合作目标的探测较为困难。同时,由于无法接受监管系统的管控指令,非合作目标对空域内其他飞行器、地面的人身财产和关键基础设施等具有巨大的安全威胁。表9为低空智能网联体系7方面监视能力需求的含义。监视目标识别率、监视信息更新频率、监视告警时延、误警率、虚警率、漏警率、完整率等,共同构成了低空智能网联体系监视能力的核心需求。

表9 低空智能网联体系监视能力需求

Table 9 Surveillance capability requirements of the low-altitude intelligent networked system

能力需求	具体含义
监视识别率	系统发现并准确识别监视目标的概率
监视信息更新频率	系统在时间范围内更新监视信息的次数
监视告警时延	从事件发生到监视系统发出告警的时间间隔
误警率	系统发出错误告警的概率
虚警率	系统错误的报告监视目标的概率
漏警率	系统未能发出应有告警的概率
完整率	系统在未检验出错误情况下,能够在一个监视周期内完成监视任务的概率

2) 可选技术方案

为满足低空智能网联体系下监视能力的需求,需要整合现有的监视技术,为低空智能网联体系的发展提出现实可行的技术方案。表10为现有监视技术手段及特点、需要解决的问题、关键指标参考值等内容。

① 合作目标监视。

a. 远程识别。远程识别是指通过无线通信技术(如WiFi、LTE、5G等),将飞行器的身份信息(如飞行器的唯一标识符、位置信息、速度、航向等)远程广播给地面接收设备或其他飞行器,从而实现对其飞行器的远程识别与监视。其单个接收机最远监视范围5 km,最大支持同时监控100架无人机目标,实时性强,适合无人机运行密集的空域管理。然而,远程识别技术需要标准化协议支持,同时可能受到信号覆盖范围和多目标监测能力的限制,适合作为城市无人机监管的辅助技术。《民用无人驾驶航空器系统安全要求》<sup>[55]</sup>中规定轻型、小型无人机应通过远程识别报送信息。针对所有类型无人机的远程识别报送强制性标准正在制定中。

b. 广播式自动相关监视。通过飞行器广播其位置信息,无需主动请求,地面站和其他飞行器即可接收数据。ADS-B具有实时性强、部署成本低的特点,适合高密度低空空域的航迹管理和动态避

表10 监视可选技术方案

Table 10 Optional surveillance technology solutions

目标类型	技术手段	需要解决问题/缺点	指标参考
合作目标	远程识别	强制要求轻小微无人机通过远程识别报送信息,最低性能要求(试行)已发布	探测距离 1~2 km 频率 2.4 GHz/ 5.8 GHz 探测距离≥200 km (有人机)
	广播式自动相关监视	ADS-B设备可用于中大型无人机,解决1 090 MHz频段拥堵问题	监视识别无人机≥100架 处理速度≥500报文/s
非合作目标	低空监视雷达	减少虚假目标和误警;提高对低反射目标(如微型无人机)的探测能力	探测范围达到20 km 探测高度1 000 m 跟踪目标数量≥500架 识别时间≤10 s 面向低空场景单站覆盖距离≥1 200 m 感知高度≥300 m 跟踪距离≥2 km 跟踪误差≤0.02° 识别距离≥1 km
	5G-A通感一体	目前测试验证不充分;昂贵	探测距离≥10 km; 易受到干扰,信号分离覆盖频段0.02~8 GHz;测向精度≤3°; 探测能力有限
	光电/红外探测	作用距离短,识别精度受限	
	频谱探测	高密度电磁环境中,对静默无人机探测能力有限	

撞,接收机空地最大作用距离大于100 km(无遮挡),空空最大作用距离大于200 km,分辨率能达到10 m量级。然而,其信号覆盖受限,可能受到建筑物遮挡和电磁干扰的影响。中国民用航空局发布的《民用微轻小型无人驾驶航空器系统运行识别概念(暂行)》<sup>[56]</sup>中规定所有民用轻小微无人机禁止在任何空域使用ADS-B信号发射机广播运行识别数据,但允许在无人驾驶航空器上加装ADS-B接收机来实现无人驾驶航空器对有人驾驶航空器的感知和识别。

② 非合作目标监视。

a. 低空监视雷达。低空监视雷达采用微波技术探测低空飞行器的位置和速度,其特点是探测精度高、全天候运行能力强,适合城市低空空域的动态监视,监视范围通常在3~5 km(消费级无人机)、30~50 km(通航飞机)。低空监视雷达存在一些局限性,包括对复杂背景的分辨能力较弱,容易受到地面杂波、植被反射等因素影响,产生虚假目标或误警。同时,在高密度飞行器运行环境中,可能存在目标分离困难的问题。此外,设备成本较高,部署需要预留较大的安装空间和电力资源。为了增强监视效果,低空监视雷达通常需要结合ADS-B等其他技术使用,以提高目标识别的可靠性和准确性。针对复杂应用环境,可通过分布式组网探测提升目标发现概率和定位精度。

b. 5G-A 通感一体。将 5G 通信和感知功能相结合,利用 5G 网络实现飞行器的实时位置监测和数据传输。5G-A 通感一体技术在低空运营中展现了优越的感知性能,其感知距离可达 1~20 km,位置精度为 10~30 m,速度分辨率为 5 m/s,刷新率为 1 s,检测率达 95%,虚警率低至 5%。同时,技术支持对 0.01~40 m<sup>2</sup> 雷达散射截面积(radar cross section, RCS)目标的探测,能够在 0~300 m 的低空范围内实现目标识别和航迹跟踪。但目前技术测试验证不充分;加之 5G 基站部署昂贵,只适合在城市重点区域部署对非合作目标进行监测。

c. 光电/红外探测。光电和红外均属于光学探测技术,光学探测设备的成本较高,处理大规模图像数据也需要较强的计算能力。光学探测非常适合城市核心区域的低空监视任务,尤其是在需要精确目标识别的场景中。

光电探测利用高分辨率光学摄像头捕捉飞行器图像,进行目标识别和定位,其特点是分辨率高,能够提供详细的目标特征信息,适用于无人机行为分析和精细化监控任务。光学探测在光线条件良好的情况下探测效果最佳,典型探测距离可达数百米至数公里,具体取决于设备参数,但其性能受天气条件(如雨雾)和环境光照的限制,可能在低能见度环境中表现不佳。

而红外探测通过红外传感器捕捉飞行器发出的热辐射信号,定位并监测目标,能够在低光照或无光环境下进行有效探测,适合夜间或恶劣天气条件下的飞行器监控。典型红外探测距离为数百米至数公里,具体视传感器性能而定。红外探测对目标的热辐射特征较为敏感,能够在复杂背景中分辨飞行器,但在极端高温或热源干扰严重的环境中,可能会出现误报。红外传感器的精度和分辨率通常低于光学摄像头,无法提供精细的目标特征信息。红外探测非常适合用于夜间监控、低光照区域及应急响应中的飞行器监视任务。

d. 频谱探测。频谱探测基于到达时间差(time difference of arrival, TDOA)和到达角度(angle of arrival, AOA)等技术实现对低空飞行器的定位,探测的频谱能覆盖 0.07~6 GHz 的范围,包括了目前常见无人机 C2 链路的 2.4 GHz 和 5.8 GHz 频段,测向精度能达到 3°以内,是非合作目标监视的有效手段之一,其特点是隐蔽性强、无源被动探测、绿色环保。但在复杂的电磁环境下,如城市建筑物反射和各类电磁干扰,会影响探测准确性,需要进一步开展研究提高技术能力。

## 4 低空智能网联体系未来展望

### 4.1 运行概念与体系框架有待完善

低空智能网联体系的发展是一个逐步推进、持续完善的过程。当前阶段,低空运行场景和运行概念还未明确,空域密度和运行风险相对较低。因此,现阶段飞行器的设计制造主要用于满足单机独立运行的目标,具备自主导航和简单的任务执行能力,智能化水平较低,机载设备以满足基础通信导航监视能力为主,制造重点在于提高单机可靠性和经济性;空域仍以隔离运行为主,通过廊道式的运行模式确保业务的正常开展;服务能力和监管自动化水平较低,仅提供飞行任务的简单支持,运行数据的实时性和全面性较低,尚未实现动态信息共享和实时协同管理,仍需要通过人在回路中的方式进行飞行计划的制定审批、空域态势的监管及风险的安管理等。

随着相关技术的成熟和应用场景、应用边界的逐渐明确,低空运行将逐步向中等密度、可控风险的方向发展。飞行器制造开始向网联化和业务驱动智能化方向发展,网联化单体智能飞行器逐渐普及,机载设备将集成更多高精度、智能化设备,以支持多机协同和复杂任务执行,同时基础设施建设也同步升级,为飞行器提供动态感知能力,确保安全高效的运行;空域管理由静态隔离运行模式向动态网格化运行模式转变,逐渐具备多运营人共用航路及动态调整飞行计划的能力。依托智能航电系统和实时数据传输实现飞行器之间的协同感知和动态避障;基于低空智能网联体系的服务支撑平台和应用系统逐步投入使用,服务和监管的自动化水平得到较大提升,逐步实现人在回路上的空域容流管理、飞行计划调整、冲突风险告警解脱等能力。

随着低空智能网联体系的进一步扩展和完善,低空运行将全面进入高密度、大规模、复杂异构的运行阶段。在这一阶段,飞行器以高速可靠的网络协同为核心,智能化由单机智能向体系智能转变,形成高度模块化、低成本制造体系;空域管理从动态网格化运行进一步演进至灵活低空自由运行,飞行器能够在无固定航线约束的情况下自主完成复杂任务;低空监管和服务向高度智能化和无人化的方向发展,基于 AI 的监管服务平台能够实时监控飞行器运行状态并进行智能化安管理和调度,实现人在回路外的低空运行精准管理与高效调控。

### 4.2 关键技术尚未成熟,需要持续突破

低空智能网联体系的建设与完善有赖于相关

技术的支持。目前,许多关键技术(如通感一体、卫星互联网、复杂环境精准导航、低空全面可信监视等)尚未成熟,仍需要持续的创新和突破。以5G-A通感一体技术和机载空空监视雷达为例,现有的5G-A技术相比传统5G在通信速率,时延、感知能力精度及对低空的适应性改造上具有一定的优势,但由于其技术特点,发射信号强度一般远大于接收信号,从而会对接收链路造成严重的同频干扰,并且天线间的自干扰信号等与探测目标的回波信号相互混合,会产生海量背景噪声,降低信噪比,增加对目标探测和感知的难度。此外,低空场景下对定位精度的需求至少要达到米级或者亚米级,这要求通感一体化基站之间的同步误差控制在纳秒级别,但当前5G通信系统基站之间同步误差还处在毫秒级,尚无法满足广泛的低空场景应用需求。表11为5G与5G-A技术发展指标典型值对比。

表11 5G-A技术指标发展

Table 11 Development of 5G-A technical indicators

性能参数	5G-A级别	5G级别
下行速率	10 Gbit/s	1 Gbit/s
上行速率	1 Gbit/s	200 Mbit/s
时延	5~10 ms	20 ms
位置精度	厘米级	米级
感知能力	距离、速度	
现存问题	存在同频干扰,时间同步误差不能满足精度要求,网络容量增长限制	无法针对低空场景提供网络支持

受限于当前机载平台的质量和功耗限制,全球仅有少数几家公司(如美国通用原子公司、霍尼韦尔公司)的ATAR设备能满足RTCA DO-366B<sup>[57]</sup>标准,中国目前还未开发出满足相应标准的产品。其中霍尼韦尔公司的IntuVue RDR-84K雷达,其体积226 mm×125 mm×43 mm,质量仅为0.7 kg,视场达到100°(水平)/30°(垂直),探测距离能达到3 km,但目前对中国禁运,并且功耗高达60 W,不适用于有功耗限制的低空飞行器。而目前车规级毫米波雷达,虽然功耗能满足部分应用需求,但探测距离一般在百米级别,无法满足低空飞行器的安全监视需求<sup>[58]</sup>。

因此,CNSI技术需要进一步向高精度、低成本方向发展,以适应复杂场景的需求;人工智能技术将在飞行优化、运行调度、安全监测等领域为系统智能决策深度赋能;信息安全技术的升级将提升网络数据安全性及信任管理水平;能源技术的突破将有助于提升飞行器运营效率和经济效益。技术水平的不断升级和成熟,将使低空智能网联体系具备

更强的适应性,为未来低空运行、监管和服务保障提供牢固基础和有力支撑,为低空智能网联体系的稳健发展和多元化应用奠定坚实的基础。

### 4.3 技术方案应当与运行需求相匹配

随着低空飞行量的不断增加,多样化的应用场景与运行需求将不断涌现,这既是推动技术创新的动力,也是对体系适应性提出的新考验。未来,低空运行需要在通信、导航、监视及管控服务等多个环节协同进化,以满足快速增长的运行需求。通过反复试点与应用反馈,将逐步明确最优的技术组合方案、基础设施布局及资源调度方式。此外,数据与服务支撑网络的兼容性和扩展性将持续提升,从而为多源数据融合、异构信息处理及多样化服务能力的迭代发展提供有力支持。通过这一系列的动态调整与优化,低空智能网联体系将逐步具备从小规模试点走向大规模常态化运行的能力,并在未来城市的空中出行与产业生态构建中发挥关键作用。

## 5 结束语

本文系统分析了低空智能网联体系的国内外发展现状,重点探讨了国外低空建设的发展思路及中国在该领域的相关框架和技术方案。通过对“运行概念-能力需求-技术实现”这一科学方法的深入解读,本文提出了低空智能网联体系的实践路径和发展方向。本文进一步剖析了《低空智能网联体系参考架构(2024版)》中体系架构的内在逻辑,详细阐述了“五方三层”体系的核心内涵、业务需求与关键能力,结合现阶段技术瓶颈,进行了关键技术的全面论证与分析,为低空智能网联体系的理论发展与技术创新提供了参考依据。本文总结了低空智能网联体系发展过程中面临的主要问题,并结合现有研究成果提出了未来发展过程中应遵循的基本原则及优化建议,以期低空智能网联体系的持续发展提供理论支持与实践指导。

### 参考文献 (References)

- [1] 低空产业联盟. 低空智能网联体系参考架构(2024版)[R/OL]. (2024-11-11)[2025-01-23]. [https://www.miit-eidc.org.cn/art/2024/11/11/art\\_1644\\_11070.html](https://www.miit-eidc.org.cn/art/2024/11/11/art_1644_11070.html).  
Low-Altitude Industry Alliance. The framework of low-altitude intelligent network system(version 2024)[R/OL]. (2024-11-11)[2025-01-23]. [https://www.miit-eidc.org.cn/art/2024/11/11/art\\_1644\\_11070.html](https://www.miit-eidc.org.cn/art/2024/11/11/art_1644_11070.html)(in Chinese).
- [2] U. S. Congress. Faa Modernization and reform act of 2012[Z/OL]//112TH Congress 2d Session. House of Representatives, Report112-381. (2012-05-10) [2025-01-23]. <https://www.congress.gov/bill/112th-congress/house-bill/658/text>.
- [3] Federal Aviation Administration. Integration of civil unmanned air-

- craft systems (UAS) in the national airspace system (NAS) roadmap (First Edition-2013)[R/OL]. (2013-11-07)[2025-01-23]. [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/resources/policy\\_library/uas\\_roadmap\\_2013.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/resources/policy_library/uas_roadmap_2013.pdf).
- [4] Federal Aviation Administration, National Aeronautics and Space Administration. UAS traffic management research plan (Version 1.0) [Z/OL]. (2017-01-31)[2025-01-23]. [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/FAA\\_NASA\\_UAS\\_Traffic\\_Management\\_Research\\_Plan.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/FAA_NASA_UAS_Traffic_Management_Research_Plan.pdf).
- [5] U. S. Congress. Public law 114—190—FAA extension, safety, and security act of 2016[Z/OL]. (2016-06-15) [2025-01-23]. <https://www.congress.gov/114/plaws/publ190/PLAW-114publ190.pdf>.
- [6] Federal Aviation Administration. 14 CFR Part 107: Small unmanned aircraft systems [Z/OL]. [2025-01-23]. <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107>.
- [7] Federal Aviation Administration. Concept of operations v1.0: unmanned aircraft system (UAS) traffic management (UTM) [R/OL]. (2018-05-18)[2025-01-23]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/04/2018-utm-conops-v1-0-508.pdf?emrc=94dccb>.
- [8] Federal Aviation Administration. Concept of operations v2.0: unmanned aircraft system (UAS) traffic management (UTM) [R/OL]. (2020-03-02)[2025-01-23]. [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/UTM\\_ConOps\\_v2.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/UTM_ConOps_v2.pdf).
- [9] GERMAN B J, DASKILEWICZ M J, TRANI A, et al. Aviation global demand forecast: model development and ISAAC studies-Task 3.7: concept of operations for ODM VTOL aircraft package delivery[J/OL]. [2025-01-23]. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005895/downloads/GeorgiaTech\\_eVTOL\\_Cargo\\_Final\\_Report\\_July2018.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005895/downloads/GeorgiaTech_eVTOL_Cargo_Final_Report_July2018.pdf).
- [10] RIMJHA M, ADE M, TARAFDAR S, et al. Aviation global demand forecast model development and ISAAC studies: UAS-VTOL Cargo study[J/OL]. [2025-01-23]. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005891/downloads/VirginiaTech\\_eVTOL\\_Cargo\\_Final\\_Report\\_July\\_2018.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005891/downloads/VirginiaTech_eVTOL_Cargo_Final_Report_July_2018.pdf).
- [11] GOYAL R, REICHE C, FERNANDO C, et al. Urban air mobility market study[R/OL]. [2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190001472/downloads/20190001472.pdf>.
- [12] PATTERSON M D, ANTCLIFF K R, KOHLMAN L W. A proposed approach to studying urban air mobility missions including an initial exploration of mission requirements[C/OL]//Proceedings of the Annual Forum and Technology Display. [2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190000991/downloads/20190000991.pdf>.
- [13] KOHLMAN L W, PATTERSON M D, RAABE B E. Urban air mobility network and vehicle type-modeling and assessment[R/OL]. [2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190001282/downloads/20190001282.pdf>.
- [14] PATTERSON M D, ISAACSON D R, Mendonca N L, et al. An initial concept for intermediate-state, passenger-carrying urban air mobility operations[C/OL]//Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum. [2025-01-23]. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/2020501-0104/downloads/UAM\\_ConOps\\_SciTech2021\\_STRIVESsubmit.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/2020501-0104/downloads/UAM_ConOps_SciTech2021_STRIVESsubmit.pdf).
- [15] Hill B P, DeCarme D, Metcalfe M, et al. UAM vision concept of operations (ConOps) UAM Maturity Level (UML) 4 [R/OL]. (2020-12-2)[2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205011091>.
- [16] Hill B, DeCarme D. Urban Air Mobility (UAM) vision concept of operations (ConOps) UAM maturity level (UML)-4 overview [R/OL]. (2020-12-15)[2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210010443>.
- [17] RICE G, HELTON D, JENKINS K, et al. Urban air mobility operational concept (opscon) passenger-carrying operations[R/OL]. (2020-05-01)[2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205001587>.
- [18] 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)[R/OL]. (2020-08-21)[2025-01-23]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205006661>.
- [19] LEVITT I, PHOJANAMONGKOLKIJ N, HORN A, et al. UAM airspace research roadmap-Rev. 2.0[R/OL]. [2025-01-23]. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002647/downloads/NASA-TM-20230002647\\_Final.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002647/downloads/NASA-TM-20230002647_Final.pdf).
- [20] Federal Aviation Administration. Advanced air mobility (AAM) implementation plan[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AAM-I28-Implementation-Plan.pdf>.
- [21] Federal Aviation Administration. Concept of operations v2.0: urban air mobility(UAM)[R/OL]. (2023-08-31)[2025-01-23]. [https://www.faa.gov/air-taxis/uam\\_blueprint](https://www.faa.gov/air-taxis/uam_blueprint).
- [22] SESAR Joint Undertaking. European ATM master plan: Edition 1 [R/OL]. (2009-03-30)[2025-01-23]. [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/European\\_ATM\\_Master\\_Plan.pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/European_ATM_Master_Plan.pdf).
- [23] European Commission. A new era for aviation-opening the aviation market to the civil use of remotely piloted aircraft systems in a safe and sustainable manner[R/OL]. [2025-01-23]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014AE3189>.
- [24] European Commission. An aviation strategy for Europe[R/OL]. [2025-01-23]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52015DC0598>.
- [25] SESAR Joint Undertaking. European drones outlook study: unlocking the value for Europe[R/OL]. [2025-01-23]. [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European\\_Drones\\_Outlook\\_Study\\_2016.pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf).
- [26] European Parliament and Council. Regulation (EU) 2018/1139 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2018 on common rules in the field of civil aviation and establishing a European Union Aviation Safety Agency[R/OL]. [2025-01-23]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1139/oj/eng>.
- [27] European Commission. Commission implementing regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft[R/OL]. [2025-01-23]. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2019/947/oj/eng](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj/eng).
- [28] European Commission. Commission delegated regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems[R/OL]. [2025-01-23]. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2019/945/oj/eng](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj/eng).
- [29] SESAR Joint Undertaking. U-space: blueprint[R/OL]. (2017-06-09) [2025-01-23]. <https://www.sesarju.eu/u-space-blueprint>.
- [30] 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.
- [31] SCOTT B I, ANDRITSOS K I. A drone strategy 2.0 for a smart and sustainable unmanned aircraft eco-system in Europe[J]. *Air and*

- Space Law, 2023, 48(3): 273-296.
- [32] SESAR Joint Undertaking. Fourth edition of the U-space concept of operations (ConOps)[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.sesarju.eu/node/4544>.
- [33] SESAR Joint Undertaking. 2025 edition of the European ATM master plan[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.sesarju.eu/MasterPlan-2025>.
- [34] 国务院, 中央军委. 关于深化我国低空空域管理改革的意见[N]. 光明日报, 2010-11-15(2).  
State Council of the People's Republic of China, Central Military Commission of the Communist Party of China. Opinions on deepening the reform of low-altitude airspace management in China[N]. Guangming Daily, 2010-11-15(2)(in Chinese).
- [35] 中央经济工作会议. 2023年12月中央经济工作会议纪要[C/OL]. [2025-01-23]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content\\_6919834.htm?fromModule=lemma\\_middle-info](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content_6919834.htm?fromModule=lemma_middle-info).  
Central Economic Work Conference. 2023 December Central Economic Work Conference Summary [C/OL]. [2025-01-23] [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content\\_6919834.htm?fromModule=lemma\\_middle-info](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content_6919834.htm?fromModule=lemma_middle-info)(in Chinese).
- [36] 全国人民代表大会和中国人民政治协商会. 2024年政府工作报告[R/OL]. [2025-01-23]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/2024-03/content\\_6939153.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/2024-03/content_6939153.htm).  
The National People's Congress and Chinese People's Political Consultative Conference. Government work report[R/OL]. [2025-01-23]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content\\_6939153.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm)(in Chinese).
- [37] 中国电子科技集团有限公司. 低空航行系统: 拥抱低空经济, 安全智慧出行[R/OL]. [2025-01-23]. <https://cetcam.cetc.com.cn/zgdk/1593022/1592495/1816065/2024090608464631229.pdf>.  
China Electronics Technology Group Corporation. Low-altitude navigation system: embracing low-altitude economy, safe and smart travel [R/OL]. [2025-01-23]. <https://cetcam.cetc.com.cn/zgdk/1593022/1592495/1816065/2024090608464631229.pdf>(in Chinese).
- [38] 中国移动通信集团有限公司. 低空智能网技术体系白皮书[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.dtinsight.com.cn/nd.jsp?id=2826>.  
China Mobile Communications Group Co., Ltd. Low-altitude intelligent networked technology system white paper[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.dtinsight.com.cn/nd.jsp?id=2826> (in Chinese).
- [39] 广东省通信学会, 中国信息通信研究院, 中国联合网络通信有限公司广东省分公司, 等. 低空智能网发展研究报告(2024年)[R/OL]. [2025-01-23]. <https://hanglian.feishu.cn/file/BWBgby-PLxo39sqxmBktcGzX8nXe>.  
Guangdong Institute of Communications, China Academy of Information and Communications Technology, China United Network Communications Limited Guangdong Branch, et al. Research report on the development of low-altitude intelligent networked [R/OL]. [2025-01-23]. <https://hanglian.feishu.cn/file/BWBgby-PLxo39sqxmBktcGzX8nXe>(in Chinese).
- [40] 中国电信集团有限公司, 爱立信, 诺基亚, 等. 通感一体低空网络白皮书[R/OL]. [2025-01-23]. <http://claei.com.cn/files/file/20241119/1731987437969932.pdf>  
China Telecom Corp Ltd., Ericsson, Nokia, et al. Integrated sensing and communication low-altitude network white paper [R/OL]. [2025-01-23]. <http://claei.com.cn/files/file/20241119/1731987437969932.pdf>(in Chinese).
- [41] 粤港澳大湾区数字经济研究院. 低空经济发展白皮书: 深圳方案[R/OL]. [2025-01-23]. <http://www.cuaer.com/plus/view.php?aid=11756>  
International Digital Economy Academy. Low-altitude economy development white paper: Shenzhen solutions[R/OL]. [2025-01-23]. <http://www.cuaer.com/plus/view.php?aid=11756>(in Chinese).
- [42] 粤港澳大湾区数字经济研究院. 低空经济发展白皮书: 全数字化方案[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.hulianhutongshequ.cn/upload/tank/report/2024/202404/1/b47f07c17faa4b7ab3fe915f22b11a18.pdf>.  
International Digital Economy Academy. Low-altitude economy development white paper: all digital solutions[R/OL]. [2025-01-23]. <https://www.hulianhutongshequ.cn/upload/tank/report/2024/202404/1/b47f07c17faa4b7ab3fe915f22b11a18.pdf> (in Chinese).
- [43] PUENTE-CASTRO A, RIVERO D, PAZOS A, et al. A review of artificial intelligence applied to path planning in UAV swarms[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(1): 153-170.
- [44] SHRESTHA R, OH I, KIM S. A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management[J]. Frontiers in Future Transportation, 2021, 2: 626935.
- [45] Yan C, Xiang X, Wang C. Towards real-time path planning through deep reinforcement learning for a UAV in dynamic environments[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 98: 297-309.
- [46] 陈志杰, 朱永文, 刘杨. 基于数字化空域系统的城市无人机管理对策研究[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(3): 8-12.  
CHEN Z J, ZHU Y W, LIU Y. Research on urban drone management strategies based on digital airspace system[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2023, 41(3): 8-12(in Chinese).
- [47] 陈志杰, 汤锦辉, 王冲, 等. 人工智能赋能空域系统, 提升空域分层治理能力[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 525018.  
CHEN Z J, TANG J H, WANG C, et al. Artificial intelligence empowering airspace systems to enhance layered airspace governance capabilities[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 525018(in Chinese).
- [48] 刘泉, 陈瑶瑶, 洪晓苇, 等. 面向无人机的城市低空空域规划的国际经验[J]. 城市规划学刊, 2024(5): 64-70.  
LIU Q, CHEN Y Y, HONG X W, et al. International experience in urban low-altitude airspace planning for drones[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 64-70(in Chinese).
- [49] International Civil Aviation Organization. Manual on the system-wide information management (SWIM) concept[R]. Montreal: ICAO, 2024.
- [50] International Civil Aviation Organization. Procedures for air navigation services-information management[R]. Montreal: ICAO, 2024.
- [51] 张军. 现代空中交通管理[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2024.  
ZHANG J. Modern air traffic management[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2024(in Chinese).
- [52] 任冰洁. SWIM数据模型的设计与实现[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.  
REN B J. Design and implementation of the SWIM data model[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022(in Chinese).
- [53] FREEMAN K, SHETYE S, WONG C, et al. NASA data and reas-

- oning fabric (DRF)[R/OL]. [2025-01-23]. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220010954/downloads/DRF\\_External\\_Outreach\\_presentation\\_19.07.22%20-%20-%20%20Repairedr.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220010954/downloads/DRF_External_Outreach_presentation_19.07.22%20-%20-%20%20Repairedr.pdf).
- [54] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 民用无人驾驶航空器系统运行识别规范(征求意见稿)[S/OL]. (2025-01-09)[2025-01-23]. [https://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202502/t20250212\\_226676.html](https://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202502/t20250212_226676.html).  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Specification for civil unmanned aircraft system operational identification[S/OL]. (2025-01-09)[2025-01-23]. <https://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202502/P020250212316294948285.pdf> (in Chinese).
- [55] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 民用微轻小型无人驾驶航空器系统运行识别概念(暂行)[S/OL]. (2022-03-11)[2025-01-23]. [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202203/t2022031\\_212290.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202203/t2022031_212290.html).  
Civil Aviation Administration of China. Concept of operation identification for civil micro, light, and small unmanned aircraft systems (Interim)[S/OL]. (2022-03-11)[2025-01-23]. [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202203/t2022031\\_212290.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202203/t2022031_212290.html) (in Chinese).
- [56] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 民用无人驾驶航空器系统安全要求[S]. (2023-05-23). <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=FC83293D549DB452E05397BE0A0A9309>.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Safety requirements for civil unmanned aircraft system[S]. (2023-05-23). <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=FC83293D549DB452E05397BE0A0A9309> (in Chinese).
- [57] Radio Technical Commission for Aeronautics Special Committee-228. Minimum operational performance standards (MOPS) for air-to-air radar for traffic surveillance[S/OL]. (2020-09-10)[2025-01-23]. <https://products.rtca.org/21djqiu/>.
- [58] 汤新民, 顾俊伟, 刘冰, 等. 低空监视技术及其发展趋势综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 973-993.  
TANG X M, GU J W, LIU B, et al. Overview of low-altitude surveillance technology and its development trends[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 56(6): 973-993(in Chinese).

## Overview of low-altitude intelligent networked system

ZHANG Xuejun<sup>1,2,\*</sup>, LIU Fawang<sup>3</sup>, ZHANG Zuyao<sup>1,4</sup>, TIAN Ye<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. State Key Laboratory of CNS/ATM, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Ministry of Industry and Information Technology Equipment Industry Development Center, Beijing 100846, China;

4. Beijing Key Laboratory for Network-Based Cooperative Air Traffic Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Recently, the Low-Altitude Industry Alliance released the *Reference Architecture of the Low-Altitude Intelligent Networked System (2024 Edition)* report, which outlines the basic content of the developmental evolution stages, components, and system framework of the low-altitude intelligent networked system. This document provides a reliable reference and foundation for the development of the low-altitude intelligent networked system. However, as a framework-based report, the report focuses on presenting the key components of the low-altitude intelligent networked system in the most concise and precise manner, lacking detailed descriptions of the underlying scientific methods, theoretical foundations, and implementation approaches. This paper comprehensively elaborates on the current state of development, design concepts, system logic, and key technologies of the low-altitude intelligent networked system based on the report. It aims to further analyze and interpret the content of the report, providing a scientific theoretical reference for the subsequent development and construction of the low-altitude intelligent networked system.

**Keywords:** concept of operation for low-altitude intelligent interconnected system; design of low-altitude intelligent interconnected system architecture; low-altitude intelligent interconnected application service system; low-altitude intelligent interconnected data and service support network; low-altitude intelligent interconnected airborne terminals and infrastructure; key technologies for low-altitude intelligent interconnected system