• 专题一：双清论坛“低空经济信息系统与安全管理理论及关键技术” •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025.08.05.0003

基于低空智能网联体系的低空安全管控科学问题与展望*

张学军[1,2**] 张志远[1] 李诚龙[1,3] 郑 远[4] 刘懿中[5]

1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191
2. 北京航空航天大学 空地一体新航行系统技术全国重点实验室，北京 100191
3. 中国民用航空飞行学院 飞行技术学院，成都 641419
4. 中国民用航空飞行学院 计算机与人工智能学院，广汉 618307
5. 北京航空航天大学 网络空间安全学院，北京 100191

[**摘 要**] 低空运行是一项安全关键型复杂系统工程，涉及多方参与，涵盖智能载具、信息物理基础设施、网络互联与管服平台等多个部分，其安全管理面临空域复杂性高、航空器种类繁多、空域运行密度高、网络安全与数据隐私风险突出、系统集成与互操作性复杂，以及法规标准差异显著等难题，亟需开展系统性研究以构建全面可靠的安全管理体系。本文遵循“运行概念—所需能力—技术实现”的系统工程路径，阐述了低空运行与低空安全概念，从系统科学视域将低空安全分为系统安全与衍生安全，探讨了低空智能网联体系在保障系统安全中发挥的关键作用，重点分析了所需能力与现有技术，凝练出低空安全管理领域的关键科学问题并给出了发展建议。

[**关键词**] 低空安全；低空智能网联体系；无人机；风险评估；网络安全

低空经济是以各类有人驾驶和无人驾驶航空器在低空空域(一般为真高1 000米以下)的飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态。自2023年被列为国家战略性新兴产业以来，其战略地位显著提升，2024年、2025年的《政府工作报告》和党的二十届三中全会均明确提出发展低空经济。在政策推动下，该领域迎来重大发展机遇，市场规模预计超万亿元[1]。随着空域开放，载人出行、物流配送等应用场景不断涌现，未来高密度、高频次、异构运行将成为一部分低空空域的常态。然而，安全与发展是对立统一的，这种复杂运行模式在促进经济发展的同时，也必然催生出复杂的低空安全问题。安全是发展的基础，构建系统化的低空安全保障体系，已成为支撑低空经济产业高质量发展的关键课题。

面对低空安全保障问题带来的诸多挑战，构建低空智能网联体系已成为当前的重要解决方案。该体系是由数字化、网联化、智能化的新型航空器及机载设备、信息物理基础设施、数据通信网络以及应用服务系统构成的综合性系统[2]，能够实现对低空空域的泛在感知、广域互联和智能管服等应用。该体系不仅是低空经济发展的重要基础，也是中国低空产业结构转型的关键支撑，更是低空安全的核心保障。

本文遵循“运行概念—所需能力—技术实现”的系统工程路径，探究基于低空智能网联体系保障低空安全的路径。第1节系统阐述低空安全管理的概念与挑战。第2节重点探讨低空智能网联体系在低空安全管理中的关键支撑作用，分析其所需能力与技术路径。第3节提出未来低空安全管理需要突破的关键科学问题，并给出

收稿日期：2025-08-04；修回日期：2025-12-23
* 本文根据国家自然科学基金委员会第407期“双清论坛”讨论的内容整理。
** 通信作者，Email：zhxj@buaa.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目(U2333214)的资助。

引用格式： 张学军，张志远，李诚龙，等. 基于低空智能网联体系的低空安全管控科学问题与展望. 中国科学基金，2026，40(1)：95-106.
Zhang XJ，Zhang ZY，Li CL，et al. Scientific issues and future perspectives on low-altitude safety management based on low-altitude intelligent networked system. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2026，40(1)：95-106.(in Chinese)

相应发展建议。

1 低空安全管理的概念内涵与发展挑战

1.1 低空安全是什么

2015年,美国率先启动了主要针对轻小型无人机的无人驾驶航空器交通管理(Unmanned aircraft systems Traffic Management,UTM)项目,推动了低空运行概念的发展。随后,美国相继提出了UTM[3]、城市空中交通(Urban Air Mobility,UAM)[4]和先进空中交通(Advanced Air Mobility,AAM)[5,6]等低空运行概念。欧洲构建了U-space运行体系[7],引入了精细化的低空空域分类理念,以适应精细化管理的需求。中国则提出了“低空经济”概念,通过应用场景的探索推动低空运行体系的发展。

目前,低空运行通常指依托低空载具,在低空空域内开展飞行活动,涵盖载人出行、低空物流、公共服务及文体旅培等应用场景。现有研究表明,未来低空运行将呈现高密度、大规模及复杂异构的特征,这些特征为低空安全管理带来了严峻挑战[8]。如图1所示,在低空运行场景中,载人电动垂直起降航空器(electric Vertical Take-Off and Landing,eVTOL)、直升机与无人机等多种异构航空器共存,高密度环境下的碰撞风险显著增加,提升了风险管控的难度。此外,复杂的地形障碍不仅会直接威胁运行安全,还可能加剧低空风切变等不利气象条件,并引发电磁信号遮挡或多径干扰等问题。

安全是民航业的生命线。传统安全观主张“无危则安,无损则全”,强调通过消除危险和填补漏洞来实现安全保障。然而,绝对安全不仅成本高昂且难以实现,尤其在低空交通等复杂系统中更为显著。因此,航空运输等安全关键型(Safety-Critical)行业普遍采纳“可接受的安全”这一理念。在民航领域,可接受的安全水平(Acceptable Level of Safety,ALoS)指通过系统化安全管理将风险控制在社会可承受范围内,从而保障民用航空的安全运行。基于此,低空安全可定义为:低空风险(与低空运行相关的风险)被降低并控制在可接受安全水平的状态。

低空安全继承了传统民航安全的基本理念,但其内涵已显著变化,突出体现在风险来源、潜在事故类型与管理重点等方面。传统民航运输航空因机上载有大量乘客,主要聚焦于航空器本体的飞行安全,重点防范由机载设备失效、机体结构损伤或人为因素等危险源引发的空中碰撞或失控坠地事故,以避免机上人员伤亡。而低空运行高度贴近城市环境,其安全范畴不仅涵盖航空器本体的飞行安全,也包括坠地事故对地面公众生命财产及生态环境构成威胁的公共安全与其他衍生安全,受障碍阻挡、电磁干扰、微气象突变及非合作目标入侵等威胁的环境安全,由网联特性带来的数据窃取、篡改或

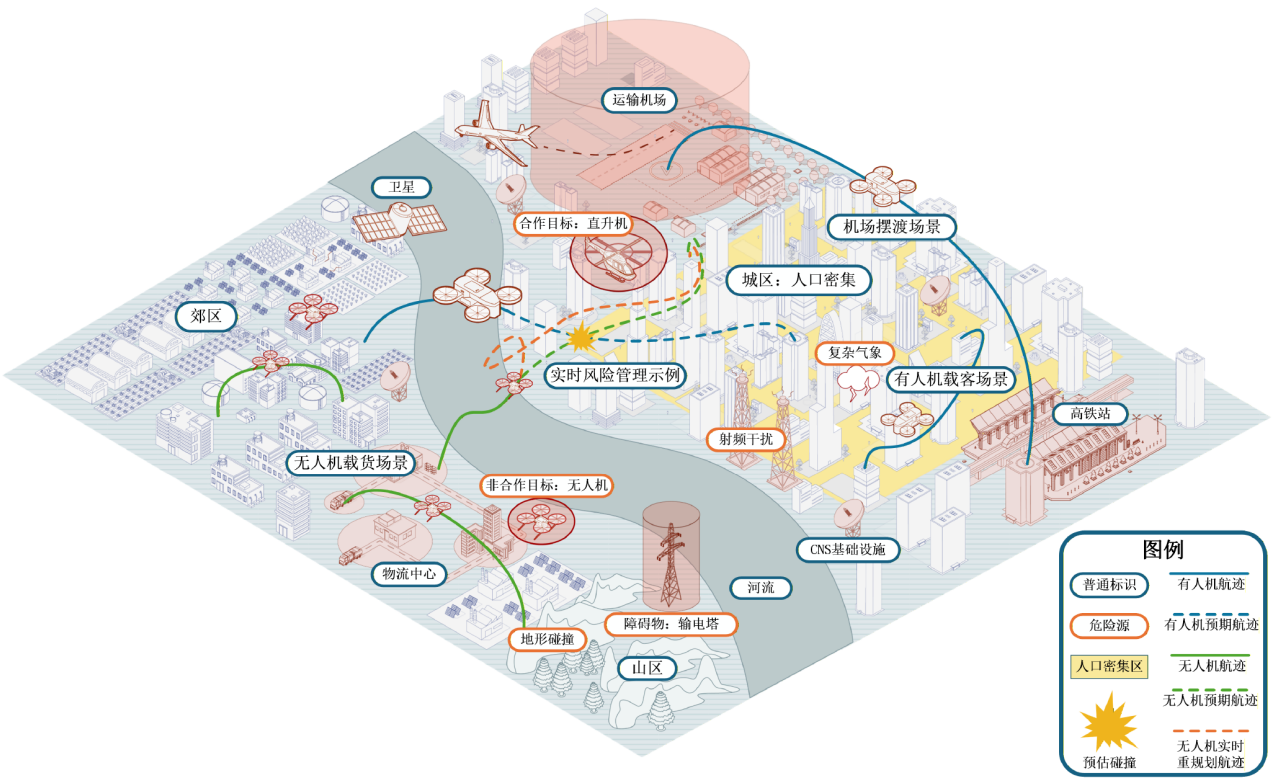


图1 低空运行场景及各类危险源示意[8]

Fig.1 Low-altitude Operation Scenarios and Various Risk Source Diagrams[8]

劫持风险引发的信息安全,以及在高密度异构运行下碰撞概率上升所凸显的运行安全。上述多安全维度相互交织、动态耦合,共同构成了低空安全新内涵。

低空安全以低空风险为度量,以可接受安全水平为评判标准。低空风险源于运行中的危险源,表现为危险源导致事故的概率与其严重程度的组合(一般为乘积关系)。可接受安全水平通过安全目标与安全绩效指标共同确定。例如,每飞行小时致死率作为风险量化指标,同时兼具安全绩效指标属性,其数值由每飞行小时事故率(概率)与事故致死率(严重性)相乘得出。当该指标值不超过既定安全目标时,即判定风险处于可接受水平。此类通过安全绩效指标量化的安全目标,亦称安全绩效目标。总体安全绩效目标可逐级分解为若干子目标:现行民航体系常将每飞行小时事故率作为核心指标,进而将其分解为机载设备故障率、基础设施失效率、航空器危险接近率等子指标,并为各子项设定对应的安全绩效目标,从而实现安全责任的细化管理和资源的高效配置。

1.2　系统科学视域下的低空安全

航空安全通常涉及运行安全(与航空器碰撞事故风险相关)和公共安全(如航空器坠毁导致的地面人员伤亡及财产损失等)。在低空新型运行场景下,低空安全的构成要素更加多元化。网联智能载具的广泛应用使得网络空间安全与电磁频谱安全问题日益突出,而消费级无人机的普及则导致“黑飞”现象成为亟需解决的安全隐患。为有效保障低空安全,需系统全面地把握其构成要素,进而针对所有要素制定无疏漏的安全管理策略。因此,本节将从系统科学视角出发,深入分析低空安全的构成要素及其相互关系。

低空交通系统是低空运行的载体,是典型的安全关键型复杂巨系统。系统科学理论表明,系统是由若干相互作用、相互依赖的组成部分(元素)构成的具有特定功能的有机整体[9]。基于此,低空交通系统可视为由运行空域、基础设施、智能载具、管理系统以及互联网络等元素组成的有机整体,其核心功能在于保障低空运行的安全与高效。其中,基础设施、智能载具、管理系统通过互联网络相互连接与协同,共同构成了低空智能网联体系。如图2所示,以低空交通系统为研究对象,低空安全可划分为两类:一是保障系统正常运行的系统安全;二是防止系统对外部系统造成侵害的衍生安全。系统安全由各组成要素对应的安全共同构成,即环境安全、飞行安全、运行安全与信息安全。各要素既需保障自身内部功能的完整性,又需在与外部系统进行人、物及信息交互时,防范外部入侵风险,并避免对外的衍生风险。

(1)环境安全:指通过维护良好运行环境,确保航空器免受环境威胁。其涵盖空域内的地理空间、空域结构、飞行物体、气象条件及支撑飞行的通信、导航与监视(Communication Navigation Surveillance,CNS)等基础设

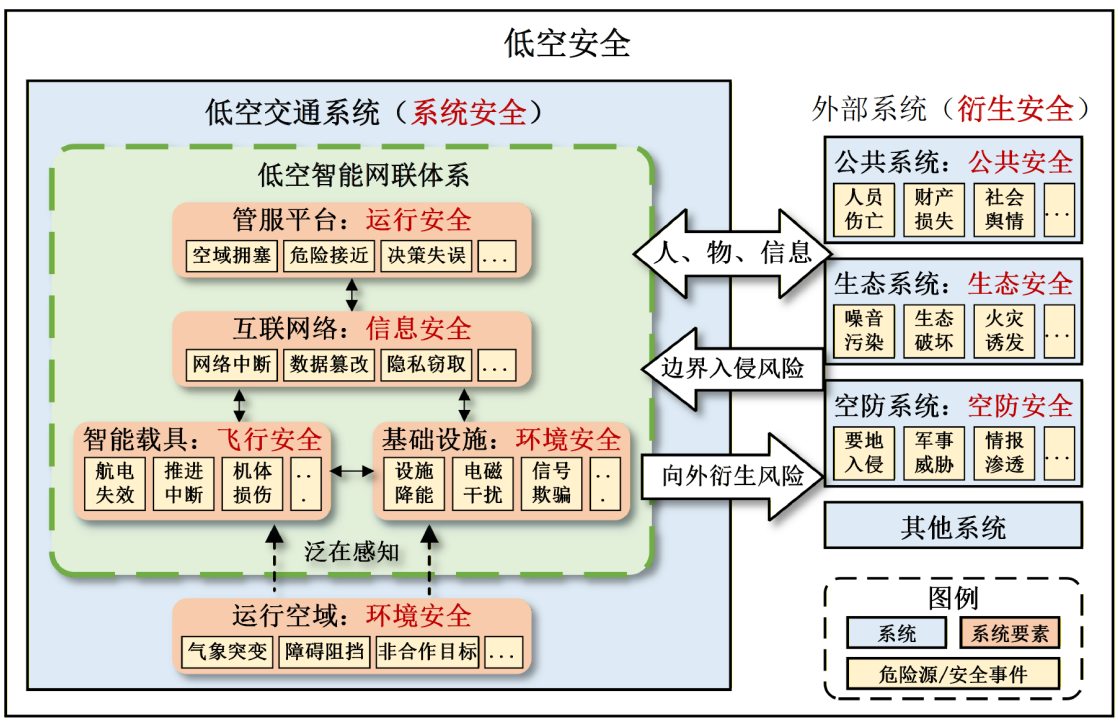


图2　系统科学视域下的低空安全构成

Fig.2　Low-altitude Safety Composition from the Systems Science Perspective

施与电磁环境。需应对设施降级、电磁干扰、信号欺骗等危险源。由于空域自然环境无法直接控制,需依靠基础设施实现泛在感知,监测空域中的气象突变、障碍阻挡、非合作目标等安全威胁,并对非合作目标进行有效反制。

(2)飞行安全:指通过确保航空器自身系统的可靠性与稳定性,保障其安全执行飞行任务,预防因系统故障或功能失效引发的事故。飞行安全既涉及航空器关键子系统(如飞控、推进、通信等)的正常运行,又包括机体结构的完整性以及机载航电系统的有效性。

(3)运行安全:指在低空运行过程中,控制因交通冲突或管理失效引发的安全风险。其涵盖空域结构优化、容流动态调整、异构航空器间协同冲突解脱等。需应对空域拥塞、航空器危险接近及决策失误等可能导致空中碰撞的危险源,并需综合考虑所规划航路航线对覆盖区域产生的衍生风险。

(4)信息安全:指保障数据与通信系统的机密性、完整性和可用性,防范网络攻击或恶意干扰。其涵盖航空器内部数据链路防护及与地面站、卫星等的外部通信安全,需应对网络中断、数据篡改、隐私窃取等威胁。针对智能网联航空器的网络化特性,需建立加密通信、身份认证等多层级防御体系,并具备抗干扰与快速恢复能力,确保核心功能稳定运行。

(5)衍生安全:指预防和缓解低空运行引发的次生安全影响,保障公众利益和社会稳定。其涵盖公共安全、生态安全和空防安全等维度,既包括人员伤亡与财产损失防护,又涉及舆情调控与生态保护。针对低空经济发展新挑战,需通过完善法规标准、强化公众沟通及建立生态补偿等构建综合管理体系,并具备跨领域影响评估功能,实现衍生风险前瞻预测与系统管控。

低空交通系统各要素相互关联,各安全部分紧密耦合。例如,无人机通信失效会直接损害飞行安全,使其成为非合作目标则影响环境安全,若与其他航空器碰撞将损害运行安全,坠毁在公共区域则危及公共安全,携带危险物质的航空器坠毁还可能危害生态安全。因此,必须建立系统化防护体系,实现各安全部分的协同保障。

综上所述,环境安全与飞行安全关注的是“能否飞”的问题,是低空安全的基础;运行安全关注的是“如何飞”的问题,是低空安全的核心;信息安全关注的是各系统间数据的安全传输与可信交互,是低空安全的数据纽带;衍生安全关注的是引入低空飞行活动对外部系统的影响,是低空安全的延伸。因此,低空安全管理应以低空智能网联体系为基础,优先解决系统安全问题,统筹兼顾衍生安全问题,并在实践过程中持续优化完善。

1.3 低空安全管理发展现状与挑战

2006年国际民航组织发布*Safety Management Manual*(DOC 9859),确立了安全管理体系(Safety Management System,SMS)[10]。该体系采用结构化方法,基于安全政策、风险管理、安全保证与安全促进四大支柱,实现系统性风险防控[11]。目前SMS已在航空全产业链广泛应用,但随着低空经济发展,该体系正面临深刻变革,呈现两大新趋势:

一是管控对象从单一走向多元化。传统SMS主要面向6 000米以上运输航空和1 000~3 000米通用航空。而低空经济主要在1 000米以下(尤其是120米超低空)运行,管理对象扩展至无人机、eVTOL等新型航空器,应用场景涵盖城市交通、物流等领域。空域条件因障碍物多、气流复杂而更具挑战,管理方式也从飞行员直接控制转向远程/自主飞行,飞行规则由目视/仪表向数字化转变。

二是管理模式从事后分析向实时管理发展。传统SMS主要依赖事后分析,存在响应滞后问题。针对低空运行实时性需求,全球航空安全理念正向主动预防转型。如美国提出的AAM实时安全管理系统(In-time Aviation Safety Management System, IASMS)[12],期望实现从被动应对到主动预测的根本转变,满足快速响应和实时管控要求。

未来低空安全面临技术、数据、法规等多维挑战。

(1)技术维度:在高动态、强异构的低空环境中,难以同步保障环境安全、飞行安全、信息安全与运行安全。具体表现为:环境安全方面,地形与建筑遮蔽导致通导监性能下降,微气象突变难预测,非合作目标(如“黑飞”无人机、鸟类)探测与反制能力薄弱;飞行安全方面,高密度运行缩减了间隔,低性能航空器在湍流与阵风扰动下航迹保持困难,机载感知与避撞系统对合作/非合作目标的实时响应能力不足;信息安全方面,终端异构性强、信任机制缺失,多源异构数据在传输中易遭窃取、篡改,缺乏高效协同验证与安全传输保障;运行安全方面,缺乏支撑高密度有人无人混合运行的动态容流管理、大规模冲突解脱能力,难以实现宏观空域调配与微观飞行控制的协同优化。这四类技术挑战相互耦合,共同制约低空智能网联体系的安全可靠运行。

(2)数据维度:低空智能网联体系汇聚雷达探测、合作监视、卫星导航、气象监测、视频监控、飞行计划等多模态数据,具有来源广、类型杂、更新快、敏感度高的特点。一方面,数据在时空基准、精度等级、置信度评估等方面缺乏统一标准,难以实现高效融合与可信共享;另一方面,在多方协同、开放接入的运行模式下,敏感数据(如飞行轨迹、用户身份、重点区域影像)面临泄露、滥用

与未授权访问风险。当前系统普遍缺乏面向低空场景的数据分级分类机制、动态脱敏策略与全生命周期安全管控能力,既难以支撑高精度态势感知与智能决策,也无法满足日益严格的隐私保护与合规要求,成为制约低空数据价值释放与安全应用的关键瓶颈。

(3)法规维度:低空运行在管理对象、飞行高度、任务属性和运行模式上与传统民航存在显著差异,而现行法规与标准体系主要基于运输航空和通用航空构建,对低空智能网联场景的适配性有待提升。一方面,关键技术与运行环节的标准尚处于探索阶段,在空域使用、航电设备、风险评估、数据共享、安全认证等方面缺乏统一规范,影响系统互操作性与规模化部署;另一方面,低空管理涉及多部门协调,职责边界尚待清晰,跨部门协调机制仍需在实践中逐步理顺。构建覆盖技术、运行、监管的全链条、兼具安全性与创新性的低空法规与标准体系,以有效适应中国低空空域管理的实际需求与发展阶段,仍是当前面临的关键挑战。

2 低空智能网联体系支撑低空安全管理

低空智能网联体系是低空交通系统的核心,是保障系统安全、防范衍生风险的支柱。其建设思路遵循从运行概念到能力需求,再到技术实现的系统工程路径,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战时具备更高的适应性和创新性。

2.1 低空智能网联体系的构成与演进

低空智能网联体系涵盖五大核心参与方,包括低空航空器制造方、运营参与方、交通管理与服务提供方、行业监管方以及基础设施保障方[13]。如图3所示,这些主体协同构建了三层架构。(1)机载终端与基础设施层,包含航空器及航电系统(通信/导航/感知设备),以及地面通信导航监视等信息物理基础设施,形成体系运行的物理支撑。(2)数据与服务支撑层,通过三级网络实现信息流转:接入网整合基础数据,交换网建立数据模型并管理分发,服务网提供应用接口。(3)应用系统层涵盖运营管理、交通管服和监管等核心系统,采用开放式架构设计以适应未来新兴应用场景的发展需求。通过在发展与实践中迭代优化,最终形成低空智联安全体系与低空智联标准体系。

低空智能网联体系的发展是一个涉及运行场景、空域条件、航空器性能、管理服务能力和信息物理基础设施等多方面要素的阶段性演进过程。

2.2 端:环境安全与飞行安全

环境安全与飞行安全是低空安全的基础,如何以可靠且经济的方式维护空域运行环境并赋能航空器实现自主安全飞行,是当前亟需解决的难题。一方面,地形与建筑物引起的信号遮蔽和多径效应,对现有基于无线电的通信、CNS服务构成严峻挑战,尤其对成本和性能受限的小型无人机影响显著;另一方面,低空微气象环境复杂

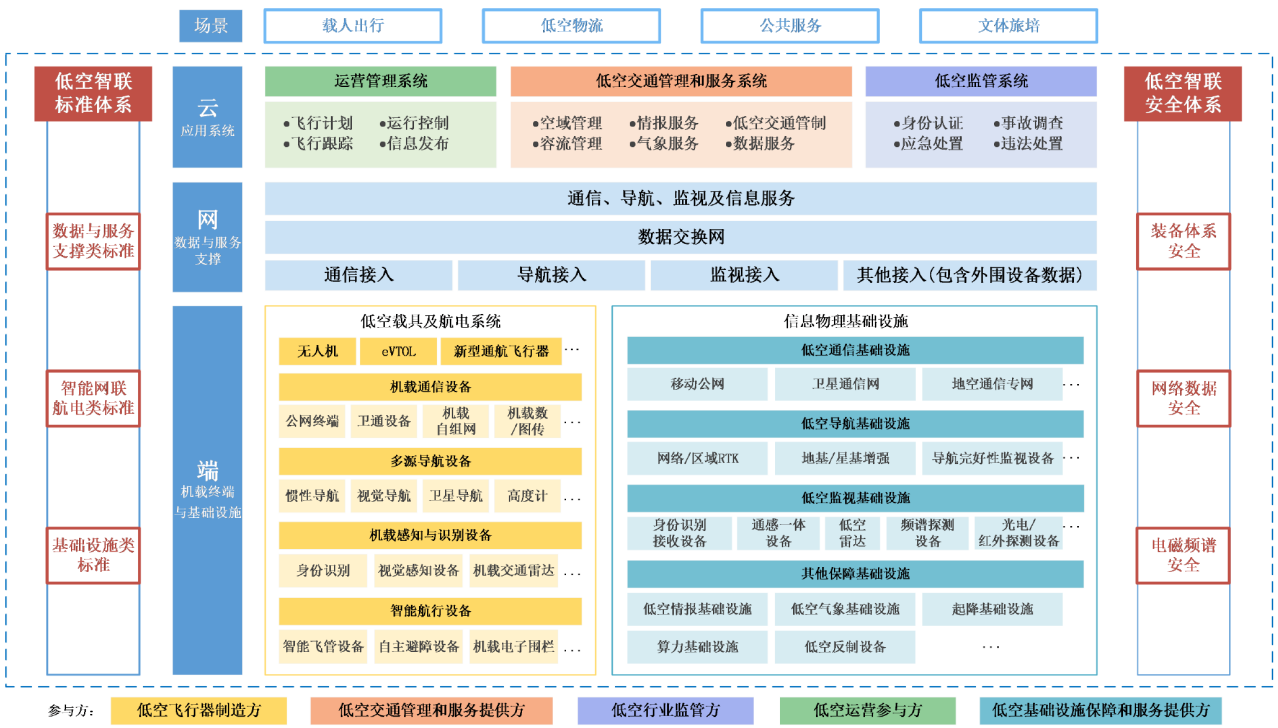


图3 低空智能网联体系参考架构[13]

Fig.3 Reference Architecture of Low-altitude Intelligent Networked System[13]

多变且难以准确预测,空域中还存在鸟类、“黑飞”无人机等非合作目标,其探测识别困难、反制手段不足等问题亦亟待解决。为保障环境安全与飞行安全,需通过信息物理基础设施与机载终端协同,构建以下核心保障能力:

(1)可靠、经济、高容量的CNS服务能力。可靠性是根基,保障了在复杂低空环境下的稳定运行;经济性是关键,构成了低空服务的大规模普及和可持续运营的前提;高容量是趋势,支撑了低空运行由低密度向高密度的演进。2016年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,U. S.,NASA)与波音公司合作了Reliable and secure Surveillance,Communications And Navigation(RSCAN)项目,开发集成多源通信(卫星、蜂窝)、导航(全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)、视觉融合)及监视(广播、雷达、光电信号)的架构[14],并于2019年通过实地飞行测试验证了其可靠性[15],但发现Long Term Evolution(LTE)通信时延、GNSS城市信号遮挡等问题仍需优化。2020年,NASA针对UAM建议采用5G、低轨卫星、多传感器融合和高精度GNSS增强等核心技术[16]。欧洲SESAR于2017年开展了DroC2om项目[17,18],在丹麦的城市和郊区进行了多场景飞行测试,试验表明双网络连接显著提升了可靠性,但飞行高度增加导致的信号干扰问题仍然存在。同年,SESAR开展了The Clear Air Situation for uaS(CLASS)项目[19,20],通过实际环境验证了基于卫星定位的合作监视、基于地面雷达和机器学习分类的非合作监视技术的可行性。2020年,SESAR开展了Integrated Common Altitude Reference system for U-Space(ICARUS)项目[21,22],融合气象与地理信息为无人机提供高度参考服务,通过模拟和实地飞行测试,成功验证了其在120米以下低空空域中的适用性,但其误差、实时性与计算能力方面仍存在不足。NASA和SESAR的研究项目初步验证了低空CNS相关技术的可行性,但通信带宽、城市信号衰减、高密度场景扩展性以及多技术融合的标准化等问题仍需进一步研究和解决。2021年起,中国开展了低空智联网项目,融合地面网络、空中平台与低轨卫星,构建“人—机—物”三元智能互联体系,并在长江南京段开展低空运行示范,集成“通导监气”功能,但面临频谱资源紧张问题[23,24]。湖南省于2023年基于北斗建成全国首个覆盖全省的低空监视网[25,26],填补500米以下监视通信的覆盖空白,为规模化应用提供参考。

(2)高精度、高分辨率的气象监测与预警能力。气流对航迹的干扰导致实际航迹的不确定性在高密度、低间隔运行时凸显,城市复杂地貌引发的风切变等微气象现象加剧了这一影响。2023年,NASA联合麻省理工学院等研究机构系统分析了UAM气象需求,提出41项技术指标,涵盖预测、建模及决策支持,并制定了发展路线[27]。研究指出需降低监测不确定性以应对复杂天气影响。Chao等[28]开发了基于交通与气象数据的评估模块,用于量化天气对UAM的影响;Pensado等[29]提出了计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)三维建模新方法,但计算效率与城市适应性仍是挑战。随着人工智能大模型的发展,基于神经网络的气象预测技术已超越传统方法[30],可能成为未来城市微气象高精度预测的主流方案。

(3)全面精准的非合作目标探测反制能力。非合作目标主要包括“黑飞”无人机、鸟类、风筝等,因其缺乏明确的识别特征且具有随机飞行意图,对低空安全构成严重威胁。目前,主要探测技术包括雷达探测、光电探测、雷达光电复合探测及无源侦测[31-34]等。反制手段涵盖无线电干扰、激光拦截、微波毁伤与物理捕获[35-38]等方式。现有非合作目标探测与反制技术仍存在智能化程度不足、效费比低、探测与反制成功率有限等问题[39,40]。未来亟需发展智能协同探测系统,结合边缘计算实现实时目标追踪与威胁评估,构建“探测—识别—处置”一体化防御体系。

(4)机载自主安全飞行与智能决策能力。基于稳定可靠的航电与飞控系统,结合先进传感器技术、人工智能及优化算法,可显著提升航空器在复杂环境下的自主性、安全性与适应性。当前研究主要集中于多源数据(如雷达、视觉等)融合的高精度环境建模、视觉/惯性/激光等多模态融合导航以增强定位精度与鲁棒性,以及基于优化算法与机器学习的飞行路径规划与容错控制[41,42]。目前,机载自主安全飞行技术已通过了初步的模拟仿真与实际场景验证,但机载自主能力仍受限于载荷与计算资源,且现有研究多基于静态环境假设,在复杂动态环境下的适应性仍需进一步检验。

综上所述,低空CNS、非合作目标探测反制及机载自主安全飞行技术已完成原型测试,具备初步可行性,但仍存在验证场景单一、复杂动态环境适应性与可靠性不足、效费比偏低等问题。相比之下,低空气象监测仍处于概念验证阶段,多数新方法尚未经过实地测试,技术成熟度较低,亟需进一步研发与验证。总体而言,当前技术虽取得阶段性进展,但在实际应用中仍需解决适应性及可靠性等关键工程问题。

2.3 网:信息安全

信息安全是低空安全的枢纽,实现安全、稳定、实时的数据传输是当前亟需解决的难题。一方面,低空智能网联体系中的航空器、传感器等终端节点类型多样,在

计算能力、通信方式和信任等级等方面存在显著差异,难以构建统一的信任与保密机制,导致数据在传输过程中易遭窃取、篡改或劫持,面临较高的泄露风险;另一方面,低空数据源自雷达、摄像头、气象站等多源异构传感器,其数据模态与采集技术各不相同,海量、高并发、多模态数据的协同验证、可信融合及低时延安全传输尚缺乏有效的技术支撑。为保障信息安全,需通过互联网络中的密码学基础设施、数据链路与安全监测系统协同,构建以下核心保障能力:

(1)多方可信身份认证能力。在开放的低空网络环境中,保证加入网络的通信实体(如无人机、地面站、空管系统、第三方服务商)身份真实可信,是防止非法接入、指令伪造和"中间人"攻击的基础。目前,基于公钥基础设施(Public Key Infrastructure,PKI)的数字证书体系是实现强身份认证的主流技术框架。例如,美国ASTM F3411-22[43]标准中定义的无人机远程识别(Remote ID)就包含了基于可信证书的广播身份认证机制。国际民航组织也在探索建立全球统一的无人机与运行方注册及信任框架。然而,将传统PKI体系应用于大规模、高动态的低空智能网联场景时,仍然需要解决证书生命周期管理复杂、计算资源受限使得终端难以承载等难题。未来可结合区块链和轻量化密码技术,研究基于分层次、分片区块链的分布式数字身份(Decentralized Identifier)管理技术,形成适应低空特点的轻量级身份认证协议与分布式信任管理机制,以实现高效、可扩展的身份认证。

(2)全链路数据加密与访问控制能力。低空智能网联系统在运行中会产生海量异构数据,包括航空器的遥测遥控数据、导航增强信息、监视数据和任务载荷数据等,其机密性和完整性直接关系到飞行安全与运行秩序。机密性保护主要依赖加密算法防止数据被非法窃取,而完整性保护则通过数字签名或消息认证码防止数据在传输过程中被篡改。当前,TLS/DTLS等成熟的传输层安全协议已广泛应用于保障数据链路安全。针对导航信号的欺骗攻击,欧洲伽利略系统OSNMA(Open Service Navigation Message Authentication)服务提供了民用GNSS信号的认证能力,有效提升了定位数据的可信度[44]。然而,传统的数据加密与访问控制体系会引入额外的计算和分发时延,并且面临着密钥分发和管理复杂、访问策略单一、实时决策性能瓶颈等挑战。如何在保障高强度安全的同时,满足低空飞行的低时延、高可靠通信需求,特别是在资源受限的机载终端上实现高效的密码学算法部署与优化,是当前研究的重点。未来可结合身份基和属性基加密技术,将数据保密性与使用者状态强关联,发展适应低空环境的轻量化属性基数据和动态加密访问控制机制,实现对海量异构数据快速、高效、可扩展的加解密。

(3)网络韧性与协同入侵检测防御能力。低空通信网络面临着非法劫持、信号干扰、拒绝服务攻击等多种网络层威胁,攻击者通过破坏低空航空器的通信链路,使航空器"失联",对整个低空网络构成严重安全隐患。对此,提升网络韧性是首要防御手段,通过构建异构"空—天—地"一体化融合通信网络(如5G+卫星+自组网),实现链路的冗余备份与智能切换,确保在部分网络失效时仍能维持基本通信。此外,还需部署专门针对低空网络特征的入侵检测系统(Intrusion Detection System,IDS),通过分析网络流量与通信行为模式,实时发现异常与攻击行为。传统IDS多为单点部署,难以应对分布式、协同式的攻击。未来的发展方向是构建基于人工智能模型和云边端协同的分布式入侵检测体系,利用部署在边缘侧的轻量级AI模型进行实时威胁过滤与告警;并将威胁情报上传至云端侧,通过更强大的AI算法对全局数据进行关联分析与态势研判,形成"感知—决策—响应"一体化的协同防御能力,从而有效应对大规模网络攻击,保障整个低空智能网联体系的稳定运行。

综上所述,低空网络信息安全的基础技术框架已初步建立,主要借鉴了传统互联网和物联网的安全理念。然而,现有技术在应用于低空场景时,面临着大规模终端的信任管理、安全与性能(特别是时延)的平衡以及针对性网络攻击的协同防御等一系列新挑战。目前多数安全方案仍停留在理论研究或小规模验证阶段,缺乏大规模、高动态、强对抗环境下的实际测试与验证,技术成熟度与标准化程度亟待提升。

2.4　云:运行安全

运行安全是低空安全的核心,如何实现高密度异构航空器的协同有序运行是当前亟需解决的难题。一方面,运行安全不仅需要应对来自飞行安全与环境安全层面的危险源及安全事件,还需在复杂空域结构下解决高密度、高频次运行所引发的容流管理与大规模冲突解脱问题;另一方面,航线规划必须规避人口密集区、关键基础设施等敏感区域,以防范衍生风险对公共安全造成影响。上述因素对低空运行系统的整体协同性、实时性与可靠性提出了更高要求。为保障运行安全,需通过运营系统、交通管理与服务系统以及监管系统协同,构建以下核心保障能力:

(1)运行风险实时量化评估与预警能力。在复杂空域快速变化的过程中,风险也随之动态变化,需具备实时性以应对高自由度动态响应,以及预测性以预判冲突连锁反应,从而及时实施缓解措施。当前低空风险评估研究分

为两个部分:系统性框架研究和关键技术专项研究。在系统性框架方面,NASA开发的UTM风险评估框架(UTM Risk Assessment Framework,URAF)运用贝叶斯网络、动力学建模和毁伤估计模型构建了实时风险评估体系[45],其衍生的地面风险评估服务提供方(Ground Risk Assessment Service Provider,GRASP)软件已结合现实环境实现风险可视化模拟[46];而SESAR的U-AGREE(U-space Air and Ground Risk modEls Enhancement)项目正致力于将无人驾驶系统规则制定联合机构(Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems,JARUS)提出的特定运行风险评估框架(Specific Operations Risk Assessment,SORA)[47]定性方法向定量模型转型。在关键技术层面,研究者们聚焦于融合数据驱动、动力学模型与地面人口分布等进行碰撞概率计算与事故严重性评估[48-50],以及基于贝叶斯网络的风险传递机理分析[51,52]等核心问题。上述研究为低空风险评估提供了重要参考,但其中绝大部分停留在实验室环境测试或模拟仿真阶段,技术成熟度与可行性较低,且目前的研究大部分仅针对无人机,对于eVTOL等有人机的风险评估较少。

(2)多主体协同运行风险缓解能力。通过空域管理、容流管理、间隔保持和冲突解脱等措施可将低空运行风险降至可接受水平。其中,基于意图共享和智能决策的实时战术冲突解脱是其应对动态环境高密度异构协同运行的关键能力。在空域管理与容流管理方面,NASA于2017年提出无人机空域“廊道”概念,指出高结构化空域依赖中心化管控,可能增加延迟,低结构化空域则需更强机载自主能力[53];2022年,NASA通过National Campaign项目在美国达拉斯验证了“廊道”作为UAM初期运行环境的可行性,并测试动态密度与需求—容量平衡方法[54];2020年,SESAR的Demand And Capacity optimisation for U-space (DACUS)项目采用动态间隔准则和场论算法优化空域。在间隔保持和冲突解脱方面,已有研究采用了最优化[55,56]、强化学习[57,58]、博弈论[59,60]、复杂网络[61]等方法实现协同冲突解脱与实时避撞技术。目前,运行风险缓解研究仍局限于简单场景的仿真验证,尚未针对多主体协同运行场景开展深入研究。

(3)低空协同多尺度应急处置能力。应急处置作为事故发生后或风险超出可控范围时的最终保障手段,旨在通过快速响应、疏散救援等措施控制损失,避免事态升级。应建立系统化的多尺度应急预案以应对各类突发情况。例如,针对机载设备故障威胁飞行安全的情况,需制定单机级应急处置方案(如就近备降)[62];对于运行空域气象突变影响环境安全的情形,则应实施空域级应急处置(如快速疏散航空器并临时关闭空域)。应急管理需在实际运行中持续优化,当前低空运行试点尚处初期阶段,相关应急管理研究亟待深入。

综上所述,当前低空风险评估与缓解研究虽已取得初步进展,但仍处于探索阶段,主要集中于单一简化场景的仿真验证。现有方法尚难以实现复杂动态环境下多主体协同运行时的实时风险评估,且风险缓解策略未能系统考虑多重风险约束的耦合效应。亟待针对实际应用场景突破相关科学问题,构建所需的风险评估与缓解能力。对于应急处置,则围绕实际运行流程与规则,不断细化应急预案以构建完备的应急处置能力。

3 基于低空智能网联体系的安全管理展望

3.1 关键科学问题

由第2节可知,目前低空安全管理领域在全球各地开展了诸多研究与试点项目,但技术成熟度较低,仍处于初期探索阶段,需重点突破以下关键科学问题:

(1)端:低空高动态复杂环境空地协同泛在感知问题

在高楼遮蔽、电磁干扰与微气象突变等高动态复杂环境中,低空环境安全与飞行安全高度依赖对障碍物、气象扰动、非合作目标等外部要素的实时、全域、可信感知。然而,地面基础设施与网联航空器所获取的多源异构观测数据(如CNS、气象、非合作目标等)普遍存在时空基准不一致、置信度动态变化、覆盖盲区交织等问题,难以形成统一、连续、可解释的空域环境表征,无法为环境安全与飞行安全提供可靠、实时、可追溯的泛在感知基础。因此,如何基于低空信息物理基础设施与网联航空器,构建空地协同的泛在感知机制,实现多源异构观测在动态不确定条件下的高精度融合、置信量化与时空一致性建模,是支撑环境安全与飞行安全的基础科学问题。

(2)网:低空异构网络内生安全体系构建与防护问题

在高动态、资源受限且时延敏感的低空运行环境下,面对无人机、监管方、基础设施保障和服务提供方等多元主体构成的复杂信息网络,存在认证、接入、传输、感知等多环节安全机制相互割裂、难以协同的难题。如何基于低空智能网联体系,构建覆盖全链路、支持跨域协同防御的信息内生安全体系,实现从多方可信身份认证、数据高可靠传输到全域威胁智能感知的一体化防护,是保障低空信息链路机密性、完整性与可用性的关键科学问题。

(3)云:低空运行风险动态演化机理与缓解方法

问题

在高密度、异构航空器混合运行的复杂低空场景中，低空交通管理与服务提供方、运营方/驾驶员、基础设施保障和服务提供方等多元主体的交互复杂，且人、机、环、管四个维度风险来源相互动态耦合，导致风险跨域传导路径模糊、级联失效机制复杂、高动态演化趋势难以量化。因此，如何揭示低空运行风险的动态生成、传播与演化机理，构建融合多源感知信息的风险实时量化与预测框架，并发展宏观容流调控、中观冲突解脱到微观避撞决策的多层级协同风险缓解理论与方法，是保障低空安全的核心科学问题。

3.2 低空智能网联体系发展建议

针对当前低空安全管理面临的关键挑战与科学问题，建议围绕低空智能网联体系制定专项研究计划，充分发挥其在低空安全保障中的核心支撑作用，重点聚焦以下发展目标。

（1）多学科融合，突破关键技术瓶颈。针对低空复杂环境下空地协同泛在感知困难、网络内生安全体系尚未构建、运行风险动态演化机理不清等科学问题，需融合航空工程、通信工程、网络安全、交通运输与人工智能等学科，强化基础研究与交叉创新，重点攻关低空多源异构数据融合与安全态势表征建模、网络全域威胁智能感知与一体化防护、运行风险多层级协同缓解等低空智能网联体系核心技术。

（2）跨行业协同，推动系统集成与应用落地。推动智能网联航电设备制造、低空基础设施建设、空中交通管理、信息网络服务等行业的跨界协同，共建联合平台，加速将低空空域态势一体化监测、高密度运行空域管理、网络一体化感知防护等关键能力集成到低空智能网联体系中，并在典型低空场景中开展规模化验证与应用推广。

（3）强化政策统筹，加快构建法规与标准体系。针对低空智能网联体系缺乏适用标准与规范、跨领域协同机制尚不健全等问题，建议加强顶层设计与政策引导，优先制定覆盖基础设施建设、航空器性能、风险管理、网络及电磁安全防护等领域的技术标准与管理规范。同步推进国家级低空智能网联体系验证与认证平台建设，支持多部门协同开展技术验证、互操作测试与合规性评估，推动形成贯通研发、测试、认证、应用的全链条制度支撑，为低空智能网联体系的发展提供兼具安全性、创新性与包容性的制度保障。

4 结 语

低空经济蓬勃发展，安全管理亟待体系化升级。本文基于“运行概念—所需能力—技术实现”的系统工程路径，系统分析了低空智能网联体系在环境、飞行、信息与运行安全中的技术支撑作用，凝练关键科学问题并提出多维发展建议。展望未来，低空安全管理需基于低空智能网联体系，逐步构建全域态势感知、实时风险评估、智能协同决策、信息安全防护的新一代管理能力。长远来看，应加快低空智能网联体系建设，推动形成兼具安全性、高效性与包容性的低空运行生态，为全球低空安全管理提供可复制、可推广的中国方案。

参 考 文 献

[1] 张晓兰. 低空经济发展前景可期. 经济日报，2024-11-19.

[2] 张学军，刘法旺，张祖耀，等. 低空智能网联体系. 北京航空航天大学学报，2025，51(6)：1793—1815.
Zhang XJ，Liu FW，Zhang ZY，et al. Overview of low-altitude intelligent networked system. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(6)：1793—1815.(in Chinese)

[3] FAA. Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM) Concept of Operations 2.0.FAA. 2020.

[4] FAA. Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations 2.0.FAA. 2023.

[5] National Academies of Sciences，Engineering，and Medicine. Advanced Aerial Mobility：A National Blueprint. Washington，D.C.：National Academies Press，2020.

[6] FAA. Advanced Air Mobility (AAM)Implementation Plan.FAA. 2023.

[7] SESAR. U-space concept of operations (conops) fourth edition. SESAR，2023.

[8] 张学军，李诚龙，张志远，等. 低空航行系统实时风险管理能力构建：概念、挑战与技术. 航空学报，2025，46(11)：8—34.
Zhang XJ，Li CL，Zhang ZY，et al. Constructing in-time risk management capabilities for low-altitude aviation systems：Concepts，technologies，and challenges. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2025，46(11)：8—34. (in Chinese)

[9] 谭跃进. 系统工程原理. 第2版. 北京：科学出版社，2017.
Tan YJ. Principles of Systems Engineering. 2nd edition. Beijing：Science Press，2017. (in Chinese)

[10] Blišťanová M，Kešeľová M，Brůnová Ľ. A systematic review of Safety Management System (SMS) in aviation with a focus on the safety level. Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport，2021，113：29—43.

[11] ICAO. Safety management manual (DOC 9859) fourth edition：Doc 9859. ICAO，2018.

[12] Ellis KK，Krois P，Koelling J，et al. A Concept of Operations (ConOps) of an In-time Aviation Safety Management System (IASMS) for Advanced Air Mobility (AAM)// AIAA Scitech 2021 Forum. VIRTUAL EVENT：American Institute of Aeronautics and Astronautics，2021. https：//arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-1978.

[13] 低空产业联盟. 低空智能网联体系参考架构(2024版). (2024-11-11)/[2025-07-29]. https：//www.miit-eidc.org.cn/art/2024/11/11/art_1644_11070.html.

[14] Ponchak DS，Tenplin FL，Sheffield G，et al. Reliable and secure

surveillance，communications and navigation（RSCAN）for Unmanned Air Systems（UAS）in controlled airspace// 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky，MT：IEEE，2018：1—14. https://ieeexplore.ieee.org/document/8396511.

[15] Martin L，Wolter C，Jobe K，et al. TCL3 UTM（UAS Traffic Management）flight tests，Airspace Operations Laboratory（AOL）report. NASA，2019.

[16] Stouffer VL，Cotton WB，Deangelis RA，et al. Reliable，secure，and scalable Communications，Navigation，and Surveillance（CNS）options for Urban Air Mobility（UAM）. NASA，2020.

[17] Wigard J，Kovács IZ，Clergeaud M. D3.3-Insights from simulation experiments on combined cellular satellite UAS communication. SESAR，2019.

[18] Sørensen TB，Amorim R，Lopez M. SESAR 2020-763601-D5.2 Report of first drone flight campaign. SESAR，2020.

[19] Piot A，Jahangir M，Cisek K. SESAR 2020-763719-Conclusion and recommendations. SESAR，2019.

[20] Jahangir M，Baker CJ. CLASS U-space drone test flight results for non-cooperative surveillance using an L-band 3-D staring radar. 2019 20th International Radar Symposium（IRS）. Ulm，Germany：IEEE，2019：1—11.

[21] Mennella A，Luisi G，Gagliarde G. ICARUS D5.2-Cockpit simulator architecture. SESAR，2021.

[22] Terpessi C，Onate M，Orsini C，et al. ICARUS final project results report. SESAR，2022. https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5f19e7366&appId=PPGMS.

[23] 樊邦奎，李云，张瑞雨. 浅析低空智联网与无人机产业应用. 地理科学进展，2021，40(9)：1441—1450.
Fan BK，Li Y，Zhang RY. Initial analysis of low-altitude Internet of Intelligences（IOI）and the applications of unmanned aerial vehicle industry. Progress in Geography，2021，40(9)：1441—1450.（in Chinese）

[24] 吴启晖，董超，贾子晔，等. 低空智联网组网与控制理论方法. 航空学报，2024，45(3)：028809.
Wu QH，Dong C，Jia ZY，et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2024，45(3)：028809.（in Chinese）

[25] 吴媚，宛俊余. 湖南建成全国首个覆盖全省低空空域监视网. 湖南日报，2023-05-19.

[26] 湖南省通用航空发展有限公司. 北斗低空 闪耀三湘. 湖南机场报，2023-12-06.

[27] Bonin T，Jones J，Enea G，et al. Development of a weather capability for the urban air mobility airspace research roadmap// 2023 Integrated Communication，Navigation and Surveillance Conference. ICNS，2023：1—11. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10124295.

[28] Chao H，Maheshwari A，Delaurentis D，et al. Weather impact assessment for urban aerial trips in metropolitan areas// AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual Event：American Institute of Aeronautics and Astronautics，2021. https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-3176.

[29] Aldao Pensado E，Veiga Piñeiro G，Domínguez Estévez P，et al. Towards enhancing the safety of Advanced Air Mobility：Automatic 3D inter-urban modelling for improved weather monitoring. ISPRS Annals of the Photogrammetry，Remote Sensing and Spatial Information Sciences，2024，10：1—7.

[30] Bi KF，Xie LX，Zhang HH，et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. Nature，2023，619(7970)：533—538.

[31] 齐嘉豪，张宇，万鹏程，等. 红外遥感图像目标识别对抗算法研究. 航空兵器，2022，29(3)：47—53.
Qi JH，Zhang Y，Wan PC，et al. Object detection adversarial attack for infrared imagery in remote sensing. Aero Weaponry，2022，29(3)：47—53.（in Chinese）

[32] 李康，丁国如，李京华，等. 无源定位技术发展动态及其应用分析. 航空兵器，2021，28(2)：104—112.
Li K，Ding GR，Li JH，et al. Development and application analysis of passive localization. Aero Weaponry，2021，28(2)：104—112.（in Chinese）

[33] Caris M，Johannes W，Sieger S，et al. Detection of small UAS with W-band radar. 2017 18th International Radar Symposium（IRS）. Prague，Czech Republic：IEEE，2017：1—6.

[34] de Quevedo ÁD，Urzaiz FI，Menoyo JG，et al. Drone detection with X-band ubiquitous radar. 2018 19th International Radar Symposium（IRS）. Bonn，Germany：IEEE，2018：1—10.

[35] 马宇辰. 无人机链路压制与导航欺骗平台硬件设计及实现. 成都：电子科技大学，2022.

[36] 吴玲，卢俊霖，许俊飞. 激光武器反无人机集群建模与效能评估. 激光与红外，2022，52(6)：887—892.
Wu L，Lu JL，Xu JF. Modeling and effectiveness evaluation on UAV cluster interception using laser weapon systems. Laser & Infrared，2022，52(6)：887—892.（in Chinese）

[37] 姚庆阳，辜霄，王辉，等. 高功率微波无人机反制系统研究. 真空电子技术，2024(1)：51—55.
Yao QY，Gu X，Wang H，et al. Research on high-power microwave anti-UAV system. Vacuum Electronics，2024(1)：51—55.（in Chinese）

[38] 邹攀攀，刘加凯，王娅. 基于激光近感探测的远距离捕捉网弹设计. 兵器装备工程学报，2023，44(2)：47—51.
Zou PP，Liu JK，Wang Y. Design of long-distance capture net projectiles based on laser proximity detection. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2023，44(2)：47—51.（in Chinese）

[39] 邱小剑，骆博雅，付珍，等. 国内外反无人机技术发展综述. 战术导弹技术，2024(5)：63—73，98.
Qiu XJ，Luo BY，Fu Z，et al. An overview on development of domestic and foreign anti-UAV technology. Tactical Missile Technology，2024(5)：63—73，98.（in Chinese）

[40] 王建，韦卓，辛红强，等. 典型场景下的无人机探测反制技术及应用. 兵器装备工程学报，2025，46(2)：72—79.
Wang J，Wei Z，Xin HQ，et al. Unmanned aerial vehicle detection and countermeasures technology and its application in typical scenarios. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2025，46(2)：72—79.（in Chinese）

[41] Ji MH，Jin Y，Fu SS. Fault-tolerant control for unmanned aerial vehicles *via* an adaptive neural network observer. 2024 IEEE International Conference on Unmanned Systems（ICUS）. Nanjing，China：IEEE，2025：151—156.

[42] 聂虹宇，张广玉，李德才，等. 多旋翼无人机的环境感知与运动规划方法综述. 信息与控制，2025，54(3)：353—371.
Nie HY，Zhang GY，Li DC，et al. Environment perception and motion planning for multi-rotors：A review. Information and Control，2025，54

(3):353—371. (in Chinese)

[43] ASTM. Specification for Remote ID and Tracking. ASTM International. (2022-06-13)/[2024-12-05]. http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?F3411-22A.

[44] Yuan MZ,Tang XM,Ou G. Authenticating GNSS civilian signals:A survey. Satellite Navigation,2023,4(1):6.

[45] Ancel E,Capristan FM,Foster JV,et al. Real-time risk assessment framework for Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM)// 17th AIAA Aviation Technology,Integration,and Operations Conference. Denver,Colorado:American Institute of Aeronautics and Astronautics,2017. https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2017-3273.

[46] Ancel E,Helsel T,Heinich CM. Ground Risk Assessment Service Provider (GRASP) development effort as a Supplemental Data Service Provider (SDSP) for Urban Unmanned Aircraft System (UAS) operations// 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Diego,CA,USA:IEEE,2019:1—8. https://ieeexplore.ieee.org/document/9081659/.

[47] JARUS. JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA) V2.5 JARUS. (2024-05-13)/[2025-08-04]. http://jarus-rpas.org/wp-content/uploads/2024/06/SORA-v2.5-Main-Body-Release-JAR_doc_25.pdf.

[48] Oh S,Yoon Y. Data-driven risk analysis of unmanned aircraft system operations considering spatiotemporal characteristics of population distribution. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,2022,16:100732.

[49] Jiao QY,Liu YS,Zheng ZG,et al. Ground risk assessment for unmanned aircraft systems based on dynamic model. Drones,2022,6(11):324.

[50] Zhou SY,Liu Y,Zhang XJ,et al. Risk assessment and distribution estimation for UAV operations with accurate ground feature extraction based on a multi-layer method in urban areas. Drones,2024,8(8):399.

[51] Sun XT,Hu Y,Qin YC,et al. Risk assessment of unmanned aerial vehicle accidents based on data-driven Bayesian networks. Reliability Engineering & System Safety,2024,248:110185.

[52] 耿增显,陈俊宇. 基于模糊贝叶斯网络的低空无人机运行风险评估. 中国安全科学学报,2024,34(8):53—60.
Geng ZX,Chen JY. Risk assessment of low-altitude unmanned aerial vehicle operation based on fuzzy Bayesian network. China Safety Science Journal,2024,34(8):53—60. (in Chinese)

[53] Jang DS,Ippolito CA,Sankararaman S,et al. Concepts of airspace structures and system analysis for UAS traffic flows for urban areas// AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace. Grapevine,Texas:American Institute of Aeronautics and Astronautics,2017. https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2017-0449.

[54] Cheng AW,Witzberger KE,Isaacson DR,et al. National Campaign (NC)-1 strategic conflict management simulation (X4) final report. 2022. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220018159/downloads/X4-Final-Report-V8.pdf.

[55] Bereziat D,Cafieri S,Vidosavljević A. Metropolis II:Centralised and strategical separation management of UAS in urban environment// 12th SESAR Innovation Days,Dec 2022,Budapest,Hungary. 2023.

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

[57] Isufaj R,Omeri M,Piera MA. Multi-UAV conflict resolution with graph convolutional reinforcement learning. Applied Sciences,2022,12(2):610.

[58] Huang C,Petrunin I,Tsourdos A. Strategic conflict management using recurrent multi-agent reinforcement learning for urban air mobility operations considering uncertainties. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2023,107(2):20.

[59] Van Nguyen L,Phung MD,Ha QP. Game theory-based optimal cooperative path planning for multiple UAVs. IEEE Access,2022,10:108034—108045.

[60] Deniz M,Zhao L,Wan Y,et al. Game-theoretic decision-making and payoff design for UAV collision avoidance in a three-dimensional airspace. Unmanned Systems,2024,12(3):499—509.

[61] Huang Y,Tang J,Lao SY. Cooperative multi-UAV collision avoidance based on a complex network. Applied Sciences,2019,9(19):3943.

[62] Sharma P,Kraske B,Kim J,et al. Risk-aware Markov decision process contingency management autonomy for uncrewed aircraft systems. Journal of Aerospace Information Systems,2024,21(3):234—248.

Scientific Issues and Future Perspectives on Low-altitude Safety Management Based on Low-altitude Intelligent Networked System

Xuejun Zhang[1, 2*] Zhiyuan Zhang[1] Chenglong Li[1, 3] Yuan Zheng[4] Yizhong Liu[5]

1. *School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*
2. *State Key Laboratory of CNS/ATM, Beihang University, Beijing 100191, China*
3. *Flight Technology College, Civil Aviation Flight University of China, Chengdu 641419, China*
4. *School of Computer Science and Artificial Intelligence, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China*
5. *School of Cyber Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China*

Abstract Low-altitude operations constitute a safety-critical and complex systems engineering endeavor, involving multiple stakeholders and encompassing intelligent aerial vehicles, cyber-physical infrastructure, networked interconnections, and management-service platforms. Its safety management faces multifaceted challenges, including high airspace complexity, diverse aircraft types, dense airspace utilization, prominent cybersecurity and data privacy risks, complex system integration and interoperability issues, as well as significant regulatory and standard disparities. Systematic research is urgently needed to establish a comprehensive and reliable safety management framework. Following the systems engineering approach of "operational concept - required capabilities - technological implementation", this paper elaborates on the concepts of low-altitude operations and safety. From a systems science perspective, it categorizes low-altitude safety into systemic safety and derived safety, highlighting the pivotal role of intelligent low-altitude networked systems in ensuring systemic safety. Key required capabilities and existing technologies are analyzed, culminating in the identification of critical scientific challenges in low-altitude safety management, along with actionable recommendations for future development.

Keywords low-altitude safety; intelligent low-altitude networked system; unmanned aerial vehicle; risk assessment; cybersecurity

张学军 北京航空航天大学教授，校学术委员会委员，博士生导师。长期从事航空电子和智能空管研究。主持国家自然科学基金重点项目、863计划项目、国家重点研发计划项目等项目20余项，发表SCI/EI学术论文130余篇，授权国家发明专利80余项，获国家级科技奖励4项（其中以第一完成人获国家科技进步奖二等奖1项）、省部级科技奖励5项和国家教学成果奖1项。

（责任编辑 王 磊 张 强）

* Corresponding Author, Email: zhxj@buaa.edu.cn