

无人机产业高质量发展战略研究

樊邦奎^{1,2*}, 李云², 吴陈², 付祺琦²

(1. 中国工程院, 北京 100088; 2. 智能协同感知与分析认知国家级重点实验室, 北京 100094)

摘要: 我国已将发展低空经济上升为国家战略, 无人机产业是低空经济新质生产力的重要构成。推进无人机产业高质量发展, 是培育先进制造业、实现低空生产活动提质增效的重要途径, 将成为拉动低空经济增长的关键支撑。本文阐述了无人机产业发展对经济社会转型、国防安全建设等带来的深刻影响与变革, 剖析了无人机产业所涉及的技术突破转化、场景市场培育、低空空域治理、资源设施配置、安全监管服务、政策法规建设等发展要素以及面临的主要问题与挑战; 提出了统筹无人机全产业链体系布局、加速应用场景与关键技术创新、探索低空空域治理新模式、加强低空基础资源配置、构筑全产业链监管服务体系等对策措施, 前瞻了无人机产业的信息传输网络化、飞行空间数字化、运营控制智能化、行业应用服务化等新阶段的发展特点, 以期为管理部门、企业等推进无人机产业高质量发展提供理论指引和应用支撑。

关键词: 无人机产业; 低空经济; 全产业链; 低空互联网; 空域治理

中图分类号: TD67; TD82 **文献标识码:** A

High-Quality Development of the Unmanned Aerial Vehicle Industry

Fan Bangkui^{1,2*}, Li Yun², Wu Chen², Fu Qiqi²

(1. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 2. National Key Laboratory of Intelligent Collaborative Perception and Analytic Cognition, Beijing 100094, China)

Abstract: The development of the low-altitude economy has been elevated as a national strategy in China, and the unmanned aerial vehicle (UAV) industry is an important component of the new productive forces of the low-altitude economy. Promoting the high-quality development of the UAV industry is crucial for cultivating advanced intelligent manufacturing and for improving the quality and efficiency of low-altitude production activities; it will become a key support for driving the growth of the low-altitude economy. This study elucidates the profound impact and changes brought about by the development of the UAV industry on economic and social transformation as well as national defense security construction. It analyzes the development elements involved in the UAV industry, including technological breakthroughs, scenario market cultivation, low-altitude airspace governance, resource and facility allocation, safety supervision, and policy and regulatory construction, as well as major challenges it faces. Moreover, the study proposes the following countermeasures: (1) coordinating the overall layout of the entire UAV industry chain, (2) accelerating innovations in application scenarios and key technologies, (3) exploring new models for low-altitude airspace governance, (4) strengthening the allocation of basic low-altitude resources, and (5) constructing a comprehensive regulatory and service system for the entire industry chain. Furthermore, it explores future development trends in the UAV industry, such as networked information transmission, digital

收稿日期: 2025-07-31; 修回日期: 2025-10-30

通讯作者: *李云, 智能协同感知与分析认知国家级重点实验室正高级工程师, 研究方向为无人系统技术与产业发展战略等;

E-mail: 13391796163@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“无人机产业高质量发展战略研究”(2023-XZ-62)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

flight space, intelligent operation and control, and service-oriented industry applications, aiming to provide theoretical guidance and practical support for management departments and enterprises to promote the high-quality development of the UAV industry.

Keywords: unmanned aerial vehicle industry; low-altitude economy; entire industrial chain; low-altitude Internet of Intelligences; airspace governance

一、前言

在技术创新、需求牵引和政策支持等多重因素的共同作用下，低空经济快速崛起，已成为经济社会进步和生产力结构重塑的重要力量^[1]。2021年，“低空经济”首次写入《国家综合立体交通网规划纲要》；2023年，低空经济被列入战略性新兴产业，标志着低空经济正式上升为国家战略。低空经济是以各种有人或无人驾驶航空器低空飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态^[2]。它不仅涵盖传统的通用航空领域，还包括无人机产业等新兴领域，涉及航空制造、飞行管理与服务、基础设施建设等相关行业，是开发利用低空空域资源的重要生产与消费活动。无人机产业是低空经济新质生产力的重要代表，正迎来高质量发展的重大历史机遇，将成为拉动低空经济增长的关键引擎。

无人机是信息技术渗透到航空领域派生出的新型装备，被誉为“空中机器人”，凭借其在低空飞行高效、运用灵活、成本较低等优势，在经济社会与国防领域具有广泛的应用前景。无人机产业是以无人机平台为载体、低空空域为主要运营空间，集航空制造、能源动力、信息网络、大数据、人工智能等技术为一体，在相关领域深度融合应用的新兴产业。随着航空制造与信息技术在无人机产业中的深度融合发展，“无人机+”应用模式^[3]将引发经济社会生产服务与作战方式等的深刻变革。推进无人机产业高质量发展，是培育先进制造业、促进低空经济提质增效的重要途径，将在低空运输、农林植保、遥感探测、应急救援、城乡治理、娱乐消费以及军事应用等领域产生极为深远的影响，有望成为促进经济社会转型发展的重要赛道。

当前，世界无人机领域^[4]已进入技术快速突破与应用爆发的拓展期，无人机产业也进入了快速孕育发展的战略机遇期。美国致力于构建无人机融入国家空域系统的实施步骤和战略方案，处于领先地位；俄罗斯通过采取刺激市场需求、建设基础设施与安全体系、推动关键技术研究等措施，提升其无

人机产业的竞争力；英国、法国、德国、印度、土耳其等国家也取得了突破性进展，成为世界无人机产业发展的重要力量。我国无人机技术已跻身世界前列，无人机产业处于起步发展阶段，发展势头强劲，成为推动低空经济发展的重要支柱性产业^[5]。据不完全统计，2024年，我国无人机制造企业数量超1800家，生产民用无人机约 7×10^6 架，在企业数量规模和产能上处于优势地位。深入分析无人机产业发展带来的影响与变革，剖析无人机产业发展要素以及所面临的问题与挑战，探索无人机产业高质量发展的对策措施等，对加速推进我国无人机产业创新发展具有重要的现实意义。

二、无人机产业发展的影响与变革

无人机应用的快速增长，带动了无人机研发设计、原材料和元器件供应、零部件（组件）制造、整机系统集成、销售及应用服务等环节的发展，逐步形成了较为完整的无人机产业链。在无人机产业链中，各相关运营实体按照内在逻辑和时空关系，建立起企业链、供需链、价值链等多维度的对接机制，实现物质、信息、价值等要素的高效动态交换，形成既相互联系、又相互制约的无人机产业生态。随着无人机产业链和产业生态的不断发展与完善，无人机产业的服务化应用将与相关传统生产、作战方式深度融合，对经济社会发展和国防安全建设等带来深远影响与深刻变革。

（一）无人机制造业将成为先进制造的新领域

无人机制造业是航空制造与信息技术等深度融合应用的新兴领域，主要包括无人机零部件（组件）制造、整机、地面系统集成生产等环节，在无人机产业链中处于核心枢纽地位。随着新一轮科技与产业变革的迅猛发展，无人机产业迎来了航空制造、能源与动力、飞控与导航、信息感知与处理、网络化信息传输、人工智能等技术的群发性突破，颠覆性技术创新不断涌现，跨学科技术在无人机制

造领域深度融合且应用日趋成熟，与无人机制造业相关的技术链、供应链逐渐完善。

为支撑低空经济的快速发展，推进无人机制造业高质量发展已成为我国加快发展先进智能制造的有效举措，可加速推动云计算、物联网、大数据、人工智能、移动终端、绿色低碳材料等技术的深度融合，促进前沿技术转化为应用创新，实现无人机制造的智能化、绿色低碳化发展。通过智能制造创新，可以扩大优质无人机产品供给，提高国产自主品牌国际竞争力，为实现智能制造向中高端价值链迈进提供新动能。

（二）无人机应用将催生低空生产服务新模式

无人机产业是以低空空域为主要运营空间，可助力低空运输、农林植保、遥感探测、应急救援、城乡治理、娱乐消费等领域提质增效的新兴产业形态。它不仅是一种新的低空运输交通范式，如出现了飞行汽车、飞行快递员、空中巴士等运载工具；更重要的是可以催生“无人机+”生产模式、服务业态与生活方式，有效提升社会生产效率，推进社会治理现代化，丰富文体娱乐与旅游生活体验等。例如，无人机植保作业可为缓解农村劳动力短缺与提高喷药施肥效率提供有效解决方案。2024年，我国植保无人机保有量达 2.51×10^5 架，作业面积约为 $1.78 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，广泛应用于播种、施肥以及病虫害防治等领域^[1]，有效提升了植保作业的灵活性与效率。

随着人类经济社会活动由陆地逐步向海洋、航空、航天等领域持续拓展，低空空域将成为人类开发利用的重要空间资源。继陆地经济、海洋经济、空天探索时代之后，以无人机产业为主导的低空经济时代悄然来临。充分发挥低空空域紧邻陆地和海洋的空间优势，通过创新开发无人机应用场景，实现无人机低空运营与陆地、海洋相关产业的深度融合发展，如探索陆空立体融合交通模式^[6]、“火车-卡车-无人机”协同运输模式^[7]等应用场景，不断拓展和满足人类生产生活的多样化需求。

（三）无人机应用将对经济社会和国防安全带来严峻挑战

随着无人机在经济社会领域的大规模应用，无人机产业所面临的平台质量安全、飞行安全、空域

安全和公共安全等问题日渐显现，不仅影响社会生产运营安全与企业投资收益，而且可能危及民众生命财产、生活隐私等许多方面，成为制约无人机产业发展不可回避的现实矛盾。同时，无人机的大规模应用也将给低空环境带来重大影响。近年来，国际民用航空组织（ICAO）大力推动绿色航空发展，2016年建立了国际航空碳抵消与减排机制^[8]，并陆续制定了系列国际航空碳排放标准。这些机制与标准不仅是对民航产业的规范约束，同样也可成为无人机产业高质量发展要求，尽可能减少对低空环境的影响。

无人机在国防军事领域的广泛应用，正在深刻地改变军队作战力量编成与攻防作战方式，成为改变战争面貌的重要因素，对国防安全产生深远影响。近期局部战争的实践表明，无人机的大量运用已成为现代战场新质战斗力的重要因素，并成为影响作战进程的关键变量。

三、无人机产业发展的基本要素

在无人机产业发展中起关键作用的要素，主要包括技术、场景、空域、资源、安全和政策等。其中，技术是核心动力，场景是需求牵引，空域是运营空间，资源是基础条件，安全是必然要求，政策是法规依据。这些要素相互作用、相互影响，构成无人机产业运营的复杂生态。

（一）技术驱动是核心

从技术本质来看，无人机是航空制造和信息技术深度融合的产物，将发展成为网络环境下数据驱动、可服务多种行业应用的空中移动智能体^[3]，实现数字化、网络化、智能化、服务化融为一体的综合系统。无人机产业技术体系结构如图1所示。无人机产业技术体系主要涵盖5个方面：① 无人机飞行平台技术，包括无人机结构材料、能源与动力、飞行控制、定位导航等技术；② 低空网络技术，包括“星空地一体通导感”网络、网格化地理空间标识、低空物联网^[9]、信息网络安全等技术；③ 数据驱动技术，包括低空基础数据建模、低空数字空域管理^[10]、航路规划、多机协同^[11]、基于大模型的认知智能体^[12]、群体智能等技术；④ 应用载荷技术，包括无人机物流配送装置、农林植保精准施肥

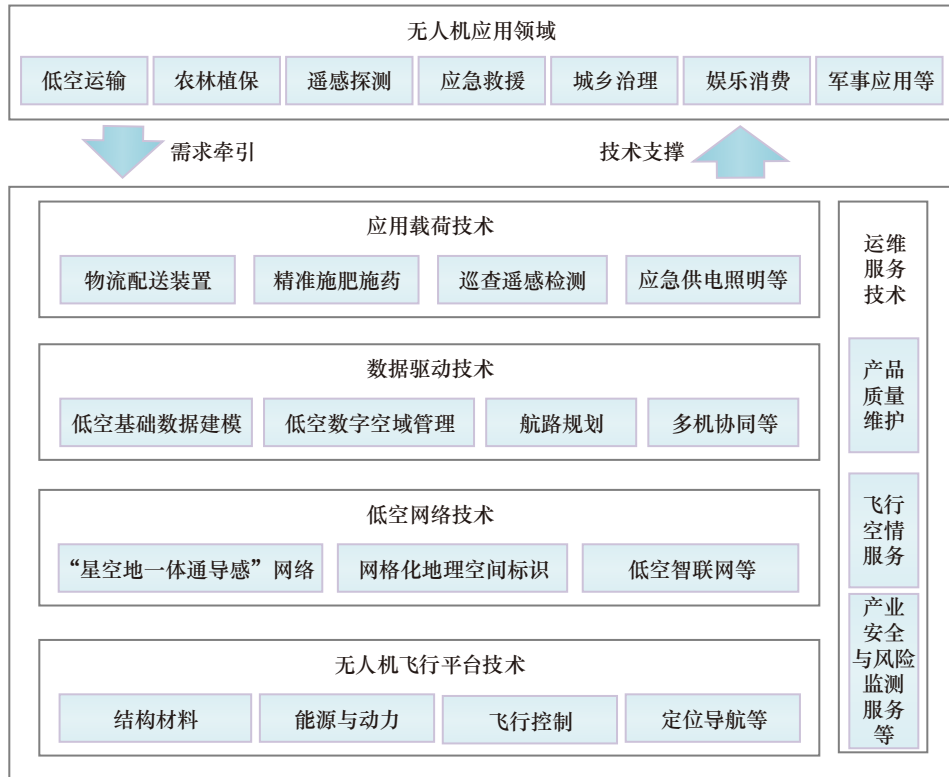


图1 无人机产业技术体系结构

施药、安全巡查遥感检测、应急供电照明等技术；
 ⑤ 运维服务技术，包括产品质量维护、飞行空情服务、产业安全与风险监测服务、行业应用服务等技术。

在上述无人机产业技术体系中，最重要的是无人机飞行平台技术，涉及“空海地”多栖平台结构、新型高效能源与动力、自主飞行与避障等关键技术的突破与成熟运用，关联领域多、突破难度大、转化应用复杂。客观上讲，无人机产业距离满足广大民众所期待的便于起降、全自主、长续航、低噪声、高安全、高性价比等多样化应用需求，实现各种新概念无人机像汽车、计算机等产品一样深受青睐，还任重道远。

（二）场景创新是关键

无人机是空中飞行的机器人，其自由度相较于地面行走机器人更加灵活，应用场景也更加丰富。无人机应用不仅可以实现低空运输模式的变革，还可以凭借起降方便、机动灵活、低成本、高效率等优势，提供各种复杂多样的低空生产服务与军事应用等场景（见图2）。① 在低空运输方面，无人机

可用于载客飞行、货物转运、物流配送等场景，有效满足提高交通与物流效率、增强旅游观光体验等需求。② 在农林植保方面，无人机用于植保巡查、施肥喷药、飞行播种等场景，可在提高施肥施药效率、降低劳动强度等方面发挥重要作用^[1]。③ 在应急救援方面，无人机用于查看灾情、搜救伤员、投送物资、恢复通信、空中照明与宣传等场景，可有效提高应急救援效率、减少救援风险。④ 在遥感探测方面，无人机用于油气管线巡查、输电线网巡查、铁路线网巡查、矿山油井巡查、矿产资源勘探以及考古探测等场景，可有效提高巡查巡检效率、降低巡查人员劳动强度与安全风险。⑤ 在城乡治理方面，无人机用于公安执法、安全监管、反恐维稳等场景，可提高对犯罪行为调查取证、交通监管、追捕嫌疑人等执法监管效率。⑥ 在娱乐消费方面，无人机用于低空影视拍摄、灯光秀表演、旅游陪伴和沉浸式游戏等场景，可丰富文化旅游娱乐需求。⑦ 在军事应用方面，无人机已广泛应用于侦察情报、火力打击、电子干扰、通信中继、勤务运输等方面，深刻地改变了战场面貌。

无人机应用场景极大地突破了传统航空器的交

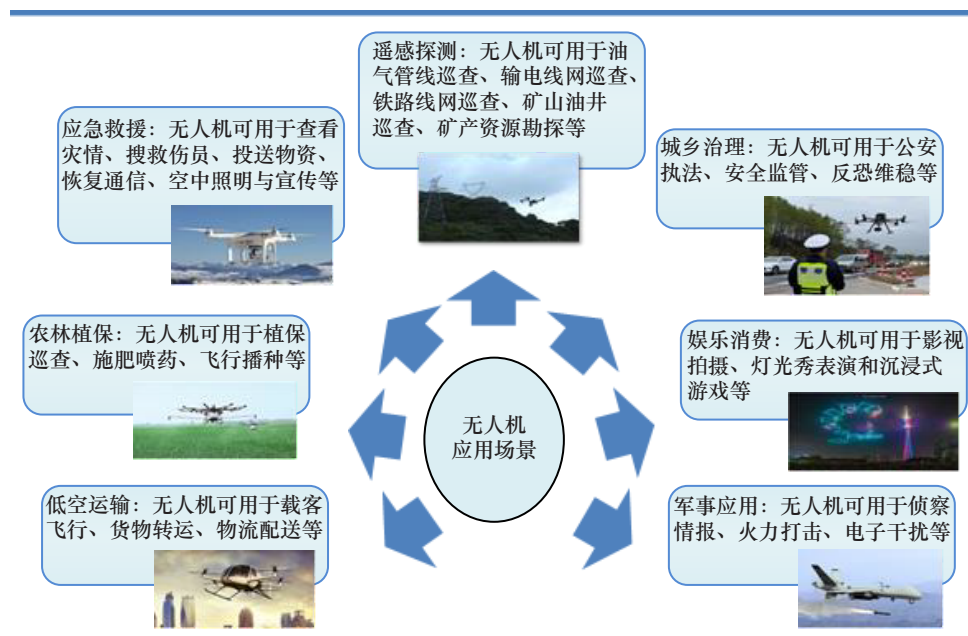


图2 无人机应用典型场景组成图

通运输范式，通过与传统行业领域的深度融合，可形成非常广阔的市场需求。为此，紧紧抓住场景创新求突破，深耕应用市场需求，创新行业应用模式，重点研究各类应用载荷与平台飞行、行业任务、信息处理等适配方式，着力解决无人机飞行控制与行业应用融合发展的难点及痛点问题，提升无人机行业应用服务质量与效益，将成为无人机产业走向规模化应用的关键抓手。

（三）空域治理是根本

无人机产业的运营空间主要在低空空域，而低空空域是地球表层系统的重要组成部分，是人类经济社会活动的重要空间和战略资源。低空空域不仅是低空经济发展的“增长带”，而且还是国家安全的“敏感带”和绿色发展的“环保带”。随着人类活动地理空间的不断拓展，航空运输、临近空间飞行、航天发射等频繁穿越低空空域，无人机低空运输、农林植保、应急救援、遥感探测、城乡治理、娱乐消费等应用场景将深度融合，有/无人航空器在低空空域高密度混合飞行成为常态。为此，多样化低空应用场景融合发展将引发空域管理、交通管制、流量控制等根本性变化，空中运行场景将从单一运输航行向多元异构飞行转变，在应用上向全方位、多尺度、多维度、多样化场景拓展。

面对低空经济繁荣发展的空域需求，亟需充分运用先进的网络化、数字化、智能化、服务化技术，在网格化空域管理技术的支撑下，基于地理网格划分低空空域资源^[4]，研发低空态势感知、立体交通规划、空域监管服务、安全保障等装备设施，成立无人机飞行管理机构，构建深度融合的低空空域监管服务体系，推动低空空域由传统的行业管理向体系治理深刻转变。

（四）资源配置是基础

低空资源配置是催生低空新质生产力、实现无人机产业高质量发展的必备基础条件。从场地设施方面看，低空资源配置主要包括无人机产业所需的起降、中转、货物装卸、乘客候乘、航空器充（换）电、电池存储、飞行测试、运行维修保障等；从网络信息设施方面看，低空资源配置主要涵盖通信、导航、监管、气象等专业领域，包括第五代移动通信/第六代移动通信（5G/6G）、无线电导航、“通导感”一体网络、气象雷达以及低空飞行数字化监管服务等。

当前，人类社会正进入“人机物”三元融合的万物智能互联时代。低空物联网是在低空空域实现“人机物”三元融合万物智能互联的重要基础设施，依托“星空地”一体化网络基础设施，以先进的信

息通信、人工智能、大数据等技术手段，构建起网联化、数字化、智能化的网络体系^[15]，具备智能感知、智能运控、智慧服务、智能安全等功能，可提供比软件定义网络更加灵活、自主的网络模型^[16]。为此，应依托低空智联技术，推进无人机产业的场地硬件“设施网”、“通导感”一体“空联网”、数字化空域“航路网”、数字化监管“服务网”等智能融合，构建支撑无人机产业高质量发展的“四网一体”低空基础资源。

（五）安全运营是底线

安全运营是无人机产业高质量发展的前提条件，也是政府部门决策与民众消费认可的必要条件。无人机产业安全包括质量安全、飞行安全、空域安全和公共安全等方面。其中，无人机质量安全主要包括产品设计、零部件供应、集成生产、检测鉴定、销售许可、维修服务、报废处理等；无人机飞行安全主要包括操作人员培养与资质管理、地勤与空情服务、无人机起降、飞行控制、飞行防撞、意外坠机等；无人机飞行空域安全主要包括禁飞区域管控、航路航线管理、协同飞行调控、空域监视告警与执法处置等，面对无人机高密度、高频次、多样化、智慧化飞行的需求和大量非合作目标的存在，空域安全不确定性风险高、治理难度大^[17]；无人机应用公共安全主要包括违规违法“黑飞”、飞越侵犯民众隐私、非法用于制造危害安全或恐袭事件等。无人机产业的安全发展，既是经济社会发展与国防安全的客观要求，也受产业自身技术发展的内在因素制约，必须从体系上统筹安全风险防范与治理举措，构建覆盖全产业链的安全监管服务体系，打牢产业安全发展根基。

（六）政策法规是保障

政策法规是无人机产业生态的上层建筑，可借鉴汽车、民航、移动通信等产业发展的经验做法，建立从无人机研发设计到应用服务、运维保障、安全监管等全产业链配套的政策法规体系。① 在技术驱动政策方面，积极发布鼓励无人机科技创新的相关政策，加速无人机产业技术创新突破与转化应用。② 在场景创新政策方面，结合无人机多样化应用场景，制定运营法规、市场准则、技术标准等法规规范，为应用市场孵化培育提供

政策法规依据。③ 在空域治理政策方面，统筹经济发展与国防应用、社会安全需求，科学合理制定空域治理法规制度与技术标准，既可确保空域安全，又能充分释放产业活力。④ 在资源配置政策方面，充分发挥政策法规对低空资源配置的杠杆效应，不断优化管理部门与企业的网络、算力、存储、数据等资源配置，提高资源调配与利用效率。⑤ 在安全发展政策方面，全面梳理无人机全产业链安全生产的政策法规问题，完善与无人机产业发展相关的政策法规等。通过逐步构建完善的无人机产业政策法规体系，奠定无人机产业高质量发展的政策法规基础。

四、我国无人机产业高质量发展面临的主要挑战

（一）技术突破转化亟待提速增效

无人机产业技术链条较长、涉及应用领域繁多，技术群突破难度较大，尽管无人机产业技术正在快速发展，但距离低空经济发展的应用需求还存在差距。无人机产业在无人机续航能力、通信带宽和延迟、自主感知和决策、应用载荷适用性、飞行控制可靠性等方面还存在明显不足^[18]，迫切需要加速实现核心关键技术突破与转化应用。主要体现在：① 在无人机飞行平台技术方面，需尽快突破无人机智能感知、智能飞控、新型能源与动力、复合材料、核心芯片与电子元器件等关键技术，提升无人机产品供给的安全性、可靠性，降低产业链的不稳定性和外部风险等。② 在低空网络技术方面，需尽快建立低空智联技术标准，智能融合通信网、导航网、遥感网、互联网等基础设施，构建“星空地”一体、实用、可靠、可拓展的信息网络，实现无人机起降场、通信、导航、监视、气象等设施组网，建成低空智联网络化运行环境。③ 在数据驱动服务技术方面，面向低空百亿级用户的网格化空域管理，需尽快构建新型时空数据管理引擎，形成基于网格化的高精度空域表征与计算方法，提升低空空域精细分配与动态管控能力，支撑低空无人机大规模、高密度、高复杂度的运行。④ 在应用载荷技术方面，面向复杂多样的应用需求，需尽快研发无人机对农作物生长态势感知、病虫害识别、农药化肥精准喷洒、水污染遥感探测等多样化

应用载荷技术,为应用转化降本增效提供可靠的技术支持。⑤在运维服务技术方面,需尽快突破复杂网络、海量数据、跨域应用、异构平台等运行维护与安全技术,增强无人机全产业链高效运营的风险监管防范能力。

(二) 场景市场培育亟待创新落地

近年来,我国部分地方政府、企业等积极采取场景创新驱动产业发展策略,因地制宜推进无人机应用场景开发,取得显著成效。但总体来看,无人机应用场景开发尚处于起步阶段,应用领域相对较窄,专业化、精细化、高性价比的应用服务供给明显不足,与实体经济增长的耦合度不紧、贡献率不高等问题仍较为突出,迫切需要加强应用场景创新、孵化培育应用市场。主要体现在:①在市场运营供给方面,存在无人机应用商业模式开发不足,企业投入成本较高、回报率较低且周期较长等问题,导致市场有效供给不足。由于低空经济具备网络效应和规模效应,如果应用场景的拓展广度和深度不足,实现投资的有效回报就会存在困难^[19]。据调研统计,顺丰控股股份有限公司在深圳市试验运营无人机物流同城即时配送推广价为12元/件(补贴后);而其传统的同城物流速运市场定价为10元/件,实际运营成本约为6.4元/件。相比较而言,无人机配送在时效性上具有较大优势,但运营成本相对较高、收益相对较低,其原因主要在于配送航线数量受限、网络化规模化运营效应尚未显现等。因此,迫切需要创新优化无人机应用商业模式,拓展市场培育广度、深度,实现商业运营降本增效。②在市场消费需求方面,市场营销与推广还存在不足,民众对无人机运营的认知度与接受度较低,消费活力低于预期。例如,在低空物流、低空旅游、低空航拍等消费领域,由于市场运行成本和消费价格相对偏高,受民众消费认可度、消费习惯等因素影响,无人机大规模进入民众消费领域还存在一定差距。③在跨域融合创新方面,随着无人机在智慧农业^[20]、智慧物流、智慧城市管理等应用领域融合创新的不断深化,将涌现大量应用场景和商业模式,迫切需要空域管理、城乡规划、市场监管等部门加强统筹协调,贯通行业领域壁垒,推动跨域融合创新发展。

(三) 低空空域治理亟待转型升级

我国持续推进低空监管与服务改革,发布施行了《中国低空空域使用管理规定(试行)》(2014年)等系列政策法规,在低空集约化管理与使用方面取得较大进展,但面对高密度、高频次、高风险的复杂低空飞行环境,叠加低空飞行器功能性能异构、运行数据类型和维度多样化等因素,进一步增加了低空空域管理的风险挑战^[21]。主要体现在:①在空域分类管理方面,尽管我国已发布《国家空域基础分类方法》,初步建立起高效便捷、安全有序的低空运行秩序,但低空空域分类划分标准还不够精细,针对不同地区、不同场景的差异,在飞行要求、流量特征等维度的细化分类不足,难以形成规模化、集约化发展优势。例如,在空中交通流量高度集中的珠江三角洲、长江三角洲等地区,空域需求远高于流量分散的内蒙古、新疆、西藏等地区,但在空域分类管理模式上尚未实现差异化区分。②在协同管理方面,尽管我国已建成了独具特色的空域协同管理模式,但协同管理机制还不够健全、空管资源设施共享程度不够、信息不畅问题依然存在,军航、民航、低空飞行等多方需求统筹仍不够高效,难以满足低空经济的发展需求。③在无人机飞行数据管理方面,现有飞行数据管理相对分散,虽然有些地区已实现所有数据集中到无人驾驶航空器一体化监管服务平台(UOM),但大部分地区运营数据仍然分散在企业监管服务平台商,尚未实现军警民管理部门一体化共享数据信息,难以实时掌握辖区内无人机飞行情况,无法有效实施监管服务与处置违规违法行为等。

(四) 资源设施配套建设相对较弱

近年来,我国卫星通信、基础网络、云计算、大数据等网络信息资源建设发展迅速,在网络、算力、存储、数据等资源要素统筹配置上不断加强。但低空经济发展还处于起步阶段,存在低空资源设施建设顶层规划还不够清晰,低空网络、算力、存储、数据资源仍相对分散,低空经济消费需求与资源设施还存在空间错位^[22]等问题,距构建基于低空互联网的“四网一体”资源设施生态仍有较大差距。主要体现在:①在场地设施方面,与无人机产业关联的起降场、货物装卸、电池充换与储存、飞行测试、维修保障等设施,尚未完全纳入智慧城

市、数字乡村融合建设的统筹范畴，且缺少统一规范的行业标准指导，难以支撑规模化的低空飞行活动。② 在网络信息设施方面，虽然我国5G技术处于国际领先水平，“北斗”导航与通信能力已得到广泛认可，但低空物联网等基础设施建设进展较慢，信息化、智能化融合水平还比较低，难以满足无人机产业场景融合的发展需求。

（五）安全监管服务还存在盲点堵点

尽管我国在无人机飞行安全监管服务试点方面取得了显著成效，但无人机全产业链安全责任边界仍不够清晰，高效运转的安全监管服务机制还没有建成，安全标准和法规不够完善，低空安全监管、告警、执法处置能力仍存在明显短板。主要体现在：① 从无人机制造侧来看，在国家层面，可以规范无人机制造质量和安全的要求及标准存在缺口，没有建立起国家无人机飞行试验与检测基地，没有权威机构组织开展系统性的质量监督和安全性能测试评估，对无人机产品供应链的安全风险底数还难以掌控，使无人机产品存在质量参差不齐、安全隐患突出等问题。② 从无人机应用侧来看，现行空域监管服务及其配套措施尚不具备无人机畅飞运营条件。民航部门虽然已建成无人驾驶航空器一体化监管服务平台，但尚未深度融合空域监管体系，流量监管、空情信息服务等功能还不够完善。部分省（市）建立的无人机飞行服务站系统与民航部门发布的监管服务平台互联还不够通畅，且运行效率不高。③ 从无人机运行环境来看，尚未构建起集主动与被动风险防控为一体的低空安全运行环境，还需加强网络、数据与算法等安全治理，提升对非合作目标的发现、识别、告警与反制能力等。

（六）政策法规建设还需持续优化完善

近年来，我国在低空经济发展战略统筹与顶层规划上不断深化，政策法规建设日趋完善。但由于无人机产业发展不仅涉及空域管理、飞行安全、隐私保护等诸多法律问题，而且涉及许多行业规范与技术标准等，目前仍在配套政策法规、标准规范等方面还存在许多空白或灰色地带，政策法规宣传力度薄弱^[9]等。主要体现在：① 在国家层面，与无人机产业发展相关的宏观政策与顶层规划处于起步阶段，长效监管服务机制不够健全，政策规划的完整

性与监管落实的协同性仍存在不足；无人机产业相关业态运行监管服务协调复杂，存在主责部门业务界面不够清晰、监管服务效率不高等问题；在产业配套的财政金融服务、保险服务等政策机制方面还不够完善。② 在地方政府与企业层面，无人机产业区域协同发展还存在差距，在产业规划、空域治理、基础设施建设方面的主动协同不足，在无人机平台制造、飞行监管服务系统建设等方面存在同质化竞争现象，在技术标准规范方面存在协同对接深度不够，难以实现跨区域数据交互与运营；由于不同地区的经济发展水平、产业基础、资源特色等存在差异，有些地方与企业在因地制宜发布差异化政策措施、打造区域特色品牌产业等方面还存在不足。

五、我国无人机产业高质量发展的对策措施

（一）统筹无人机全产业链布局，构建高质量发展生态体系

加强无人机产业顶层筹划，全面分析无人机产业发展需求，全链条梳理无人机产业发展要素配置责任清单，编制无人机产业发展规划，实现全产业链统筹布局与协同发展。进一步加强行业规范与标准体系建设，探索试行技术评价和质量认证制度，引导和规范全产业链的合理竞争、有序发展，实现更高效的资源配置和更广泛的市场覆盖，加快无人机产业人才培养与服务体系建设等。美国已出台包括运用电动垂直起降航空器（eVTOL）和电动短距起降航空器（eSTOL）等先进空中交通（AAM）实施方案^[23]，计划在2028年前完成AAM规模化运营所需的电力、网络、环境、社区参与等要素整合。

坚持以推动无人机产业高质量发展为主题，创新产业政策机制，优化政策杠杆效应，灵活运用宏观调控措施，设立无人机产业技术创新专项基金，支持物联网、大数据、人工智能、移动终端等技术融合创新应用，培育高素质科技人才与产业人才，推动创新链、资金链、人才链与产业链的深度融合。加大优质无人机产品供给，培育世界级无人机制造业基地。增强无人机行业应用服务供给，孵化培育市场规模，拓展无人机产业的实体经济贡献率。进一步细化和完善无人机产业政策法规，规范市场秩序^[24]，推动低空经济高质量发展。

(二) 加速场景与技术创新驱动, 推进无人机产业规模化发展

无人机在低空运输、农林植保、应急救援、遥感探测、城乡治理、娱乐消费等领域的大规模运用, 将带来经济社会生产模式、服务业态与生活方式的深刻变革。应充分发挥我国体制优势, 建立政府主导、企业主责的无人机行业应用培育生态, 加大应用场景开发培育力度, 促进“无人机+”行业应用深度融合, 深耕行业应用场景需求体系, 构建低碳高效无人机产业生态。在无人机产业基础设施较好的地域开展典型应用场景试点工作, 重点推动物流运输、城市快递、空中巴士、遥感探测、应急救援、政府服务等应用场景落地, 如深度开发无人机配送服务空间模式^[25]、无人机航测支持建筑施工设计^[26]等细分场景, 以具体的低空应用场景为导向, 挖掘市场规模优势, 创新商业运营模式, 促进企业规划和业务发展更加贴近市场需求, 支持研发、运维、保障等配套企业发展。面向多场景复杂作业环境, 基于人机协同互信机制, 研究鲁棒性强、可解释、抗干扰的任务适配与规划调度方法^[11], 构建安全可控、智能高效的无人机协同运营模式。

统筹无人机全产业链技术研发布局, 重点支持飞行平台自主可控核心关键技术和“无人机+”行业应用技术研究, 推进无人机跨域协同、信息安全、人工智能等技术融合发展, 建立全产业链企业实体间稳定的合作模式与机制, 建成应用场景需求与市场产品供给的技术链条, 打通行业应用技术难点堵点。例如, 低空经济农业领域的研究内容^[1]主要涵盖基于无人机/激光雷达平台的作物性状监测(叶面积指数、叶绿素含量、地上生物量等植被参数)、面向精准农业的田间管理应用(玉米增产、水稻精准栽培、病虫害智能诊断)、多源数据驱动算法优化(深度学习、植被指数、遥感、影像、反射率)等方面, 涉及技术领域多、细分门类杂、攻研难度大, 投资回报周期较长, 仅仅依靠企业投资推动很难实现快速突破与转化应用。因此, 建议在国家层面统筹布局, 加强企业、高校、科研院所之间的合作, 创建重点实验室、技术创新中心等, 形成从基础研究到技术攻关、再到成果产业化的创新链条^[19], 以场景创新打通应用市场“最后一公里”, 以科技创新推动无

人机应用服务提质增效。

(三) 以深化空域管理改革为抓手, 创建低空空域治理新模式

当前, 低空飞行器数量呈指数级增长态势, 必将引发空域管理、流量管理、交通服务思路与模式的深刻变革。为更好地服务低空经济发展, 建议进一步深化空域管理改革试点, 优化完善低空空域划分标准, 提升低空空域使用效率, 充分释放低空空域资源潜力; 建立国家主导、属地主责、市场运营低空空域治理体制, 创新治理模式和机制; 充分发挥属地政府和企业积极性, 强化属地政府发展低空经济与安全监管的主体责任, 组建运营管理机构, 完善规章制度, 优化运行流程。例如, 美国联邦航空管理局(FAA)和美国国家航空航天局(NASA)合作开发了无人机交通管理系统(UTM)^[23], 开展了多任务无人机在城市环境中高密度运行、多类型无人机在某个区域同时运行、中等流量密度无人机在机场附近运行等场景试验, 验证了无人机数据交互、感知与避让、监视与导航、空域划分、应急处理等技术应用问题, 通过合理的规划和调度保证无人机大规模运行的安全。

推进低空空域由行业管理向体系治理转变, 创建中国特色的低空空域治理体制机制和运作方式, 开展区域性城乡一体的通用航空与无人机监管服务设施建设^[10], 形成科学的低空空域治理理论体系、法规标准体系、运行管理体系和服务保障体系。综合运用地理信息技术手段实现立体空域的分层管理和资源优化调度^[14], 运用基于无碰撞轨迹的无人机路径规划方法^[27]、城市环境下无人机路径规划模型^[28]、面向无人机协同运行实时航迹优化模型^[29]等, 加快低空监管服务基础设施建设, 突破低空监管服务技术瓶颈, 建立高效的低空运行指挥和监管服务信息平台, 确保态势感知终端、智能载具、智算服务等无缝链接, 实现动态空域资源优化配置, 构建军警民共管共用共融、技术先进的低空治理体系, 为低空飞行器提供高可靠的通联、高精度的导航、精细化地理数据、全区域态势感知等技术服务, 实现无人机多点起飞、多点降落、即呼即应等调度模式, 满足无人机大规模、高密度、集约化飞行的空域监管服务需求。

（四）以低空智联网建设为牵引，统筹加强基础资源配置

低空智联网是支撑无人机产业网络化、数字化、智能化、服务化发展最重要的基础设施，涉及“星空地”一体化网络、低空空域数字化建设等重大领域。建议统筹国家经济建设与国防安全需求，加快推进低空智联网基础建设工程，重点突破基于5G/6G的“星空地”一体化网络架构^[30]、数字空间剖分定位与标识、无人机智能导航与自主避障以及专业化产业信息服务等核心关键技术，贯通多域异构的分布式云计算、云存储、大数据等信息基础资源，推动低轨卫星网络、5G/6G、云计算、大数据、人工智能、网络安全等先进技术融合应用，构建可满足多方需求的低空智联网络信息环境。

在低空智联网络信息环境支持下，统筹政府与企业的网络、算力、存储、数据等基础资源建设，融合贯通场地硬件“设施网”、通感一体“空联网”、数字化空域“航路网”、数字化监管“服务网”等基础设施，汇聚低空智联网与海量数据等资源优势。充分考虑不同地区地理环境、经济发展水平以及应用场景等差异化需求，合理布局机场、能源、数据中心等配套基础设施^[24]。推广群体智能软件架构，构造智能科技赋能的基础设施与运行环境，支持无人机产业智能化发展等。基于智能融合的“四网”一体基础资源生态，无人机将发展成为可执行多种任务的“空中机器人”，有效提高无人机飞行控制水平和作业效率。

（五）强化“管理+技术”理念，构筑全产业链监管服务体系

全面梳理无人机全产业链的安全风险与责任清单，厘清主管部门、属地政府与企业实体等安全监管服务责任，按照“管理+技术”深度融合的理念，统筹建立无人机全产业链安全监管服务机制，制定完善的安全监管服务法规与安全监管服务技术标准，强化无人机质量评定与全生命周期监管服务措施，完善无人机安全保险服务机制，严格查处违法违规运营行为，构建规范有序的全产业链安全监管服务体系，确保实现无人机全产业链的安全发展，压实无人机产业安全责任的刚性保证。

在产品安全监管服务方面，依据我国《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等法规，制定无

人机安全等级标准，对纳入飞行管控的无人机建立唯一性编码监管机制，实现无人机编码与法人身份绑定、责任绑定，完善无人机保险业务政策法规等。在飞行安全监管服务方面，依托低空运行指挥和监管服务信息平台，探索智慧城市无人机网络安全防护策略与部署方案^[31]等，建立类似“会飞的智能手机”监管服务模式，实现主管部门、属地政府与企业实体在同一网络信息平台上高效运转，提升无人机网络化运营的安全监管能力。在产业生态安全监管服务方面，统筹加强低空网络安全、数据安全、航线航路安全和隐私安全保护等，加强针对低空非合作目标的反制手段建设，确保在重点敏感区域和要地对低空非合作目标形成无缝的发现、识别和处置能力，严格查处违规违法飞行活动。例如，运用地理与通信信息融合建模、电子围栏自动生成、应急处置预案智能生成、便携式执法终端等策略^[19]，防范化解无人机带来的低空安全风险。

六、结语

面向低空经济发展战略需求，本研究深入分析了无人机产业发展所带来的深远影响与深刻变革，重点剖析了无人机产业发展的基本要素与问题挑战，提出了推进无人机产业高质量发展的对策措施。随着我国低空经济发展战略的持续推进，未来无人机产业所涉及的技术创新将不断突破、应用场景将不断拓展、空域治理将不断优化、资源配置将更加合理、安全运营将更加高效、政策法规将更加完善，产业发展面临的挑战将逐步得到化解，从而进入高质量发展的新阶段，呈现信息传输网络化、飞行空间数字化、运营控制智能化、行业应用服务化等显著特征。

一是信息传输网络化。依托泛在、韧性、可靠的低空智联网等基础设施，将无人机飞行状态和行业应用信息实时接入智联网云系统，实现无人机的网络化信息交互、遥控遥测、跟踪定位；利用网络用户透明机制实现无人机的网络化管控，同时根据无人机运行状态，优化协同空域管理，最终使无人机成为“会飞的智能手机”，实现“智联网+”“无人机+”的深度融合应用，为推进无人机产业的网络化组织架构、网络化数据处理、网络化协同作业

等奠定网络信息技术基础。

二是飞行空间数字化。运用时空网格编码数字化、网格属性可算化等地理空间信息剖分技术,数字化描述无人机与飞行环境的时空关系,实现无人机定位导航信息、感知探测信息与空间网格信息的实时融合;同时,对无人机飞行空域进行数字化分层航路规划,优化低空空域资源配置,构建“数据+算法”驱动无人机飞行的数字化低空,为无人机飞行管理、任务调度、协同作业、避障防撞以及空域监管服务等提供空间数字化技术支持。

三是运营控制智能化。以无人机信息传输网络化和飞行空间数字化为基础,按照开放式、一体化的无人机产业运营架构,充分利用网络环境下大数据、云计算、边缘计算等信息基础资源,融合运用无人机智能感知与认知、智能规划与控制、智能分析处理、机器学习以及低空空域智能监管服务等技术,实现在复杂运营条件下,无人机可根据任务需求和对环境的理解,自动优化飞行路径,自主执行作业任务,为构建“人机物”协同运行的低空经济生态提供运营控制条件。

四是行业应用服务化。综合运用网络化、数字化、智能化等技术手段,按照“架构开放化、功能模块化、应用服务化”的理念,搭建无人机产业服务化应用平台,创新行业应用场景,发展紧贴经济社会需求的行业服务手段,开发新型商业运营模式,推动技术变革与经济社会变革的深度融合,深度挖掘无人机产业服务潜能,提高低空经济生产与服务效率。行业应用服务化是无人机产业形成经济社会价值与效益的直接输出方式,是无人机产业高质量发展的内在必然要求,体现“无人机+”行业应用服务的本质特征。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 31, 2025; **Revised date:** October 30, 2025

Corresponding author: Li Yun is a professor-level senior engineer from National Key Laboratory of Intelligent Collaborative Perception and Analytic Cognition. His major research field is technology and industrial development strategy of unmanned systems. E-mail: 13391796163@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “High-Quality Development of the Unmanned Aerial Vehicle Industry” (2023-XZ-62)

参考文献

- [1] 何勇,王月影,何立文,等.低空经济政策和技术在农业农村的应用现状与前景[J].农业工程学报,2025,41(8):1-16.
He Y, Wang Y Y, He L W, et al. Current status and prospects of low-altitude economy policies and technologies in agriculture and rural areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8): 1-16.
- [2] 裘德馨.低空经济中无人机产业发展概述[J].商业全球化,2024(3):117-122.
Qiu D X. Overview of the development of the UAV industry in the low-altitude economy [J]. Business and Globalization, 2024 (3): 117-122.
- [3] Fan B K, Li Y, Zhang R Y, et al. Review on the technological development and application of UAV systems [J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(2): 199-207.
- [4] 张军,陈磊,高智杰,等.低空无人机技术研究现状与展望[J].中国工程科学,2025,27(2):73-85.
Zhang J, Chen L, Gao Z J, et al. Low-altitude unmanned aerial vehicle technology: Current status and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 73-85.
- [5] 廖勇,覃录智,刘思其.无人机在低空经济中的应用综述[J].贵州大学学报(自然科学版),2025,42(4):60-72.
Liao Y, Qin L Z, Liu S Q. A review of the application of unmanned aerial vehicle in low altitude [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2025, 42(4): 60-72.
- [6] 唐立.陆空立体交通:道路交通视域下的低空经济研究机遇[J].交通运输工程与信息学报,2025,23(3):27-36.
Tang L. Land-air integrated transportation: Research opportunities for the low-altitude economy from the perspective of road transportation [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2025, 23(3): 27-36.
- [7] 钟达峰,尹传忠,梁亚莉,等.应急物资“火车-卡车-无人机”协同运输优化[J].铁道运输与经济,2025,47(8):40-50,58.
Zhong D F, Yin C Z, Liang Y L, et al. Optimization of train-truck-drone cooperative transportation for emergency supplies [J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(8): 40-50, 58.
- [8] International Civil Aviation Organization. Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSA) [EB/OL]. [2023-03-28]. <https://www.icao.int/CORSA>.
- [9] 樊邦奎,李云,张瑞雨.浅析低空互联网与无人机产业应用[J].地理科学进展,2021,40(9):1441-1450.
Fan B K, Li Y, Zhang R Y. Initial analysis of low-altitude Internet of intelligences(IOI) and the applications of unmanned aerial vehicle industry [J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1441-1450.
- [10] 朱永文,陈志杰,蒲钊,等.空中交通智能化管理的科学与技术问题研究[J].中国工程科学,2023,25(5):174-184.
Zhu Y W, Chen Z J, Pu F, et al. Scientific and technological issues for the intelligent management of air traffic [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 174-184.
- [11] 薛建儒,房建武,吴俊,等.多机协同智能发展战略研究[J].中国工程科学,2024,26(1):101-116.
Xue J R, Fang J W, Wu J, et al. Collaborative multiple autonomous systems [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 101-116.
- [12] Park J S, O'Brien J, Cai C J, et al. Generative agents: Interactive

- simulacra of human behavior [R]. San Francisco: The 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2023.
- [13] 蒋玮. 中国植保无人机研究进展及影响因素分析 [J]. 中国农机装备, 2025 (6): 123–125.
Jiang W. Analysis of research progress and influencing factors of plant protection UAV in China [J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2025 (6): 123–125.
- [14] 谭均铭, 廖小罕. 地理信息技术应用下的无人机云端管理系统发展 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1451–1466.
Tan J M, Liao X H. Development of unmanned aerial vehicle cloud management system with the application of geographic information technology [J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1451–1466.
- [15] 中国移动通信集团有限公司. 低空智联技术体系白皮书 2024 [R]. 北京: 中国移动通信集团有限公司, 2024.
China Mobile Communications Group Co., Ltd. White paper on low altitude intelligent networking technology system [R]. Beijing: China Mobile Communications Group Co., Ltd., 2024.
- [16] 吴建鲁, 孟广雅, 刘煜. 智能化网络研究进展及舰艇应用分析 [J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(4): 7–13.
Wu J L, Meng G Y, Liu Y. Research progress of intelligent network and analysis of warship application [J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(4): 7–13.
- [17] 张勇, 黄沁. 面向网联无人机的低空安全防控策略研究 [J]. 无线电工程, 2025, 55(10): 2114–2122.
Zhang Y, Huang Q. Research on low-altitude security and defense strategies for net-linked UAVs [J]. Radio Engineering, 2025, 55(10): 2114–2122.
- [18] 李兢尧, 王宝军, 李轩, 等. 低空无人机系统关键技术与应用前景 [J/OL]. 航空工程进展, 2025: 1–10[2025-07-03]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250702.1659.002>.
Li J Y, Wang B J, Li X, et al. Key technology and application prospects of low altitude UAV system [J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025: 1–10[2025-07-03]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250702.1659.002>.
- [19] 茹雨暄, 王乐, 盖梦瑶. 低空经济的发展态势及促进策略研究 [J]. 科技和产业, 2025, 25(10): 32–37.
Ru Y X, Wang L, Gai M Y. Research on the development trend and promotion strategies of low altitude economy [J]. Science Technology and Industry, 2025, 25(10): 32–37.
- [20] 高凌宇. 无人机在智慧农业中的应用与前景 [J]. 农业工程技术, 2025, 45(11): 66–67.
Gao L Y. Application and prospect of UAV in smart agriculture [J]. Agricultural Engineering Technology, 2025, 45(11): 66–67.
- [21] 张祖耀, 田野, 张学军. 解构面向低空运行管控的低空智联网络体系 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 60–69.
Zhang Z Y, Tian Y, Zhang X J. Deconstructing the low-altitude intelligent networked system for low-altitude operation management [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2025, 44(5): 60–69.
- [22] 张新生, 郑琼洁. 发展低空消费新业态的现实困境与实践进阶 [J]. 南京邮电大学学报(社会科学版), 2024, 26(3): 1–10.
Zhang X S, Zheng Q J. The realistic dilemma and practical approach of developing new business forms of low-altitude consumption [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Social Science Edition), 2024, 26(3): 1–10.
- [23] 王茂霖, 吕人力, 管祥民. NASA 无人机交通管理系统飞行验证试验概述 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1488–1502.
Wang M L, Lyu R L, Guan X M. An overview of flight demonstration of NASA unmanned aircraft system traffic management system [J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1488–1502.
- [24] 刘广为, 毛荣, 卢建明. 无人机技术驱动下低空经济的发展研究 [J]. 价值工程, 2025, 44(22): 157–160.
Liu G W, Mao R, Lu J M. Research on the development of low altitude economy driven by drone technology [J]. Value Engineering, 2025, 44(22): 157–160.
- [25] 陈瑶瑶, 刘泉, 洪晓苇, 等. 面向TOD的小型无人机配送服务空间模式——以深圳美团试点为例 [J]. 城市发展研究, 2025, 32(4): 22–30.
Chen Y Y, Liu Q, Hong X W, et al. The spatial mode study of small drone delivery service for TOD: A case study of Shenzhen Meituan pilot [J]. Urban Development Studies, 2025, 32(4): 22–30.
- [26] 张志河, 王靠省, 刘立正, 等. 无人机航测技术在施工便道优化设计中的应用 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(4): 201–203.
Zhang Z H, Wang K S, Liu L Z, et al. The application of UAV aerial survey technology in optimization design of construction access road [J]. Engineering and Technological Research, 2025, 10(4): 201–203.
- [27] 谢俊, 张琦, 彭延云, 等. 基于无碰撞轨迹的无人机路径规划方法研究 [J/OL]. 系统仿真学报, 2025: 1–11[2025-07-30]. <https://link.cnki.net/doi/10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0028>.
Xie J, Zhang Q, Peng Y Y, et al. Research on UAV path planning method based on collision free trajectory [J/OL]. Journal of System Simulation, 2025: 1–11[2025-07-30]. <https://link.cnki.net/doi/10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0028>.
- [28] 吕伟, 吴嗣贤, 陈昭文, 等. 城市建筑群环境下的无人机配送应急物资路径规划研究 [J]. 灾害学, 2025, 40(4): 1–6.
Lyu W, Wu S X, Chen Z W, et al. Research on route planning of UAV delivery of emergency materials in urban building group environment [J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40(4): 1–6.
- [29] 陈丹, 汤程, 谢宇, 等. 面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划 [J]. 航空学报, 2025, 46(16): 229–247.
Chen D, Tang C, Xie Y, et al. Real time dual layer path planning of unmanned aerial vehicles for urban low altitude logistics distribution [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(16): 229–247.
- [30] Wang C, Zhang P Y, Kumar N, et al. GCWCN: 6G-based global coverage wireless communication network architecture [J]. IEEE Network, 2023, 37(3): 218–223.
- [31] 余润泽, 苏敏杰, 周焯挺, 等. 低空智慧城市无人机系统网络安全分析及防护策略研究 [J]. 电信工程技术与标准化, 2025, 38(3): 61–67.
Yu R Z, Su M J, Zhou Y T, et al. Analysis of network security and research on protection strategies for low altitude smart city unmanned aerial vehicle systems [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2025, 38(3): 61–67.