



商业航天与低空经济：国家战略新兴产业的跨界融合与创新

王治中^{1,3*}, 刘辉^{2,3}

1. 北京零重空间技术有限公司, 北京 102600;
2. 清华大学 公共管理学院跨界研究中心, 北京 100084;
3. 中关村认同应用技术跨界创新联盟, 北京 100084

摘要: 作为新质生产力的典型代表, 商业航天和低空经济已经成为世界各国科技创新和经济发展的新高地。二者都具备带动产业链繁荣、推动科技创新、赋能行业应用等特点, 对人类社会的发展具有重要的时代意义。当前, 商业航天与低空经济在技术、资源、市场和产业生态等方面已呈现相互促进和互为赋能的态势, 深度融合和协同创新的趋势越发明显。通过在技术、资源与市场等方面的深度共享, 二者在农业、物流、智慧城市和应急救援等应用场景下正催生一系列新的应用模式, 并推动构建跨领域、跨行业、跨区域、跨学科的产业生态。本文在剖析商业航天与低空经济各自产业发展趋势的基础上, 秉承社会科学维度的跨界创新理论和自然科学维度的系统工程论, 从关键技术、应用场景、产业生态三个角度探究二者的跨界融合与创新路径, 进而提出面临的挑战和发展建议。这不仅能为两大产业的发展注入新活力, 更有助于加快我国战略性新兴产业发展和科技创新进程, 推动我国经济的高质量发展, 提升我国在全球科技创新和产业发展中的竞争力。

关键词: 商业航天; 低空经济; 跨界创新; 战略新兴产业; 新质生产力

中图分类号: V19;[T-9]

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-20

引言

在全球新一轮科技革命与产业变革的时代浪潮

中, 商业航天和低空经济作为新质生产力的典型代表, 已经成为世界各国科技竞争的战略新高地。二者不仅将重塑全球产业发展格局, 对国家综合实力的提

收稿日期: 2025-04-29; **修回日期:** 2025-05-28

作者简介: *王治中 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为低轨卫星互联网, 卫星总体设计, 低空经济。E-mail: wangzz04@126.com (通讯作者)

刘辉 (1971—), 男, 博士, 跨界研究中心主任, 研究方向为跨界创新。

引用格式: 王治中, 刘辉. 商业航天与低空经济: 国家战略新兴产业的跨界融合与创新[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250064.. CSTR: 32282.14.JES.20250064

WANG Zhizhong, LIU Hui. Commercial Aerospace and Low-altitude Economy: Cross-over Combination and Innovation of National Strategic Emerging Industry[J]. Journal of Engineering Studies, DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250064.. CSTR: 32282.14.JES.20250064

升与可持续发展也将产生深远的战略影响，更是对人类社会发​​展彰显出重要的时代意义。

商业航天打破了传统航天高度依赖政府投资与计划的模式，通过引入市场机制，加速航天技术的产业化和商业化应用，大幅降低太空探索和利用成本，开启人类航天的“大航海”时代。自20世纪80年代起，以中美两国为代表的商业航天经历了40多年的探索和成长之后，已逐步进入快速发展的成熟期，覆盖发射场、运载火箭、测控、航天器、应用等航天各个领域^[1]。目前，发射场有完全自建发射场、在已有国家发射场里面自建发射工位、国家投资建设发射场但是按照市场化方式运营等三种商业化方式^[2-5]。运载火箭方面，美国SpaceX凭借可回收技术占据绝对领先地位，蓝色起源、蓝箭航天等中美两国其他商业火箭公司正加速追赶^[6-8]。测控方面，瑞典SSC和挪威KSAT凭借高纬度地理优势长期主导全球商业测控市场，SpaceX等卫星运营商自建测控站但不对外提供商业服务，我国的航天驭星已经初步具备了全球范围的商业测控能力^[9-11]。航天器涵盖通信、导航、遥感、载人等领域，低轨星座是当前航天器的热点，同时商业载人、在轨维护、深空探测等新业态也逐步兴起^[12-13]。卫星应用直接面向终端用户提供通信、导航和遥感服务，是商业航天中商业化起步最早、竞争最为激烈的赛道^[14-16]。

随着低空空域管制的逐步放开，低空经济在传统通用航空产业的基础上，依托无人机、5G通信、卫星导航、智能控制、新能源等技术的发展，广泛赋能交通、物流、农业等传统产业转型升级，将重构人类近地空间交通方式，催生出全新的经济形态和社会组织模式。从产业结构维度看，低空经济可以归纳为：作为核心关键资源要素的低空空域，以及低空飞行器研发制造、低空飞行产品运营服务、低空交通基础设施等三大支柱领域^[17-19]。具体而言，低空空域作为低空经济活动的核心资源载体，作为支撑全产业链运行的关键基础性要素，其开放程度和管理水平直接决定低空经济的发展水平^[20-21]。低空飞行器研发制造领域涵盖航空器及配套作业装备的研发设计、生产制造全流程，为低空经济活动提供飞行和作业工具，构成产业发展的硬件基础^[22-23]。低空飞行产品运营服务聚焦

低空经济活动应用场景的构建，通过货运物流、载人出行、观光旅游、生产作业、应急救援等多元场景开发，将产业价值直接转化为经济价值^[19,24]。低空交通基础设施通过飞行器起降场、导航与通信、监视管理、能源保障等方面的配套建设，为低空经济活动的安全平稳运行提供基础保障^[23,25]。

商业航天与低空经济在农业、环保、海洋、自然资源、应急等诸多行业拥有重叠的用户群体，通过在多行业应用场景中实现技术协同赋能，构建起天空一体化的解决方案体系，催生出一系列新业态与新模式^[26-29]。此外，在复合材料、能源、控制等关键技术领域，二者共同面临着轻量化、高强度、散热强、高能量密度、智能化控制等许多核心技术瓶颈，蕴含着巨大的跨界融合与创新潜力^[30-32]。同时，商业航天与低空经济都具有产业链长、科技含量高、创新要素集中、研发周期长且迭代速度快、应用场景广泛多元等特点，能够在繁荣产业链、推动科技创新、赋能行业应用等方面发挥重要作用。世界各国纷纷强化对这两大产业的战略布局和政策扶持，一方面可以加速产业规模化发展，另一方面可以从产业生态维度实现技术、资源、人才与市场的深度共享，助力打造跨领域、跨行业、跨区域、跨学科的产业生态体系^[33-36]。

本文聚焦商业航天与低空经济的产业发展趋势，以社会科学维度的跨界创新理论和自然科学维度的系统工程论为理论基础，从关键技术、应用场景、产业生态三个角度深入探究二者的跨界融合与创新路径，并针对二者跨界融合与创新所面临的挑战提出建议，旨在为我国战略新兴产业发展和科技创新进步提供理论支撑。

1 商业航天产业发展趋势

1.1 商业航天的概念

商业航天是以市场需求为导向，通过市场手段、市场化机制及市场规律开展的航天活动^[37]，涵盖航天器研发制造、发射、运营与应用等航天全产业链环节。相较于以政府投资和计划任务为主导的传统航

天, 商业航天不仅需要聚焦市场需求, 更要重视投入产出比, 通过将航天技术转化为可工业化生产的产品和规模化应用的服务, 实现成本的最小化和经济效益的最大化, 是推动航天事业繁荣发展的新动能^[38]。

1.2 发展历程

从全球航天事业的发展历程来看, 商业航天是航天事业发展到特定阶段的必然产物^[37-38]。20 世纪中期, 1957 年人类第一颗人造卫星“斯普特尼克 1 号”成功发射, 标志着人类正式迈入航天时代。20 世纪 70 年代, 美国“阿波罗 11 号”登月成功和苏联“礼炮 1 号”空间站发射成功, 将政府主导的传统航天推向巅峰。如图 1 所示, 在政府主导的航天发展阶段之后, 商业航天的发展大致经历了起步、探索、崛起三个阶段。



图 1 商业航天事业发展历程

Figure 1 Milestones of commercial aerospace development

20 世纪 80 年代至 21 世纪初, 是商业航天的起步阶段。为缓解政府在航天领域的高额财政压力, 美国于 20 世纪 80 年代颁布《商业航天发射法》, 首次确立私营企业参与航天活动的法律框架, 允许私人企业通过联邦航空管理局 (FAA) 许可后开展商业发射^[39], 这标志着航天活动从“国家专属”向“商业市场”转型, 航天商业化进程由此开启。1992 年, 美国《陆地遥感政策法案》的颁布开放了商业卫星遥感市场^[40], 催生了 Space Imaging、Digital Global 等一批商业卫星运营公司, 它们凭借优质卫星图像垄断了全球 90% 的高分辨率卫星影像市场, 但是卫星研制和发射成本高达上亿美元。1991 年, 摩托罗拉主导的“铱星计划”耗资 57 亿 USD 发射 66 颗卫星, 为全球用户提供语音通话服务。然而因终端售价高达 3000

USD, 资费达 7 USD/min, 全球用户数量仅为 1 万左右, 最终于 2000 年宣告破产^[41]。2006 年, 美国波音和洛克希德·马丁两大航天巨头联合组建 ULA 公司, 整合德尔塔、宇宙神两大系列火箭, 采用“政府订单+商业发射”双轨模式运营, 但其单次发射成本依然高达上亿美元。随着 SpaceX 可重复使用火箭技术的突破, ULA 的经营逐渐陷入困境。20 世纪 90 年代, 我国航天产业开始通过长城公司向全球提供商业化的火箭发射和卫星研制服务。由于航天技术的复杂性, 起步阶段的商业航天企业更多聚焦市场需求开展运营和服务, 航天产品依旧是由传统航天企业按照原有流程和方式进行研制和生产。这种模式下航天产品制造成本居高不下, 商业航天企业难以通过市场化运营和服务实现盈利, 导致技术供给与市场需求错配, 大批商业航天公司因此破产或重组。

21 世纪初至 2020 年, 商业航天进入探索阶段, 其显著特征是在商业化运营基础上, 深度介入航天产品的研发和制造环节, 力求大幅度降低航天产品的制造成本。主要特征表现为以下四个方面^[6,42]: ①未简单照搬传统封闭的航天产业链, 而是将现代工业产品引入到供应链体系中; ②借鉴互联网开发模式, 在航天产品研制过程中采用了多次试错和快速迭代的方式; ③推动大批量工业化生产模式; ④各国政府以政策指引、技术转让、国家订单、资本投入等方式给予全方位支持。此阶段, SpaceX、Blue Origin(蓝色起源)等一批极具创新活力的美国商业航天企业相继涌现^[43]。在美国 NASA 的大力支持下, SpaceX 研发的可重复使用火箭技术和批量化生产方法取得重大突破, 大幅降低了航天研制成本, 彻底重塑了全球商业航天的竞争格局。截至 2024 年, SpaceX 的猎鹰 9 号火箭累计发射超过 400 次, 复用次数超 300 次, 发射成本降低了 50% 以上, 载荷发射价格降至 2000(USD/kg) 以内^[44-45]。其星链项目在短短 3 年内便完成技术验证、成功组网并正式提供服务^[46]。同时, 2010 年后美国政府陆续出台《国家航天政策》^[47]、《美国商业航天发射竞争力法案》^[48]等政策, 进一步推动美国商业航天持续发展。2015 年, 我国发展改革委等部门联合发布了《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)》^[49], 明确鼓励民营企业发展商

业航天，标志着中国商业航天正式起步，社会资本开始涌入航天领域^[43,50]。星河动力、蓝箭航天、银河航天等一批我国民营商业航天企业迅速崛起，在火箭研发、卫星制造等领域取得了丰硕成果。

从2020年起，找到正确发展模式的商业航天迎来快速发展期，在卫星互联网、载人飞行等领域取得重大突破，开始深度参与国家航天战略任务，进入崛起阶段。以SpaceX为例，2020年执行全球首次民营载人航天任务；2021年星链正式提供商业服务，并于2024年实现盈利，目前在轨卫星超7000颗，全球用户超300万^[45]；2023年多次开展人类有史以来最大运力火箭“星舰”的飞行试验，并于2025年8月26日在第十次试飞任务中取得圆满成功，该火箭有望将发射价格降至100 USD/kg以内，远期目标为10 USD/kg^[51]。随着商业航天在民用市场取得显著成就，美国通过《国防部太空政策》^[52]《国防部商业航天整合战略》^[53]、《2024年商业太空一体化战略》^[54]等一系列政策，将商业航天正式纳入国家太空安全体系。我国在2021年先后成立中国卫星网络集团有限公司（简称“星网”）、上海垣信卫星科技有限公司（简称“垣信”）等卫星互联网企业，且在2024年和2025年政府工作报告中均明确提及商业航天，表明我国将坚持以市场化方式提供航天运营和应用服务，向商业航天企业开放航天产品生产环节，鼓励其参与国家航天任务。此外，欧洲、俄罗斯等国家和地区也在积极推动商业航天的发展，通过政府扶持和国际合作，提升自身在该领域的竞争力。

1.3 产业现状与前景

当前，全球商业航天市场规模持续扩张。除通信、导航、遥感等传统业务之外，卫星互联网、太空旅游等新兴业务不断涌现^[55-56]。在卫星互联网领域，SpaceX、OneWeb、星网、垣信等全球众多企业纷纷布局低轨卫星星座，激烈争夺轨道和频谱资源。太空旅游也从概念逐步走向实践，SpaceX、Virgin Galactic、Blue Origin等公司已开展多次太空旅游飞行。如图2所示，根据航天产业链环节，本节从发射场、火箭、测控网、航天器和应用等5个方面，对商业航天产业的现状和前景展开分析。

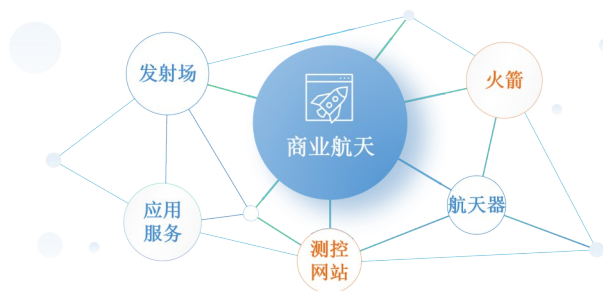


图2 商业航天产业构成

Figure 2 Composition of the commercial aerospace industry

在发射场商业化方面，除了在传统国家发射基地内建设商业发射工位之外，还专门打造面向商业发射服务的发射基地，以进一步降低发射成本、提高发射效率。2014年8月，SpaceX正式宣布将得克萨斯州的博卡奇卡（Boca Chica）作为商业发射场的最终选址，该发射场于2020年12月9日完成首飞，并被确定为重型运载火箭“星舰”的发射基地^[2]。蓝色起源也在得克萨斯州西部建造了名为“一号发射场”的发射设施，用于其新谢泼德火箭的发射^[7]。2024年11月底，中国海南商业航天发射场建成并成功完成首次发射，填补了我国没有商业航天发射场的空白。该发射场采用水平组装、水平测试、水平转运的“三平模式”，可兼容10余个型号火箭的发射需求，极大提升了发射的灵活性与商业适配性^[5]。



图3 海南商业航天发射场^[16]

Figure 3 Hainan Commercial Aerospace Launch Center^[16]

火箭作为进入太空的唯一运载工具，是影响商业航天成本的核心因素。SpaceX凭借可重复使用火箭技术，成为全球发射市场的领军者。此外，其研发的

“星舰”是目前全球体积最大、推力最强的重型运载火箭,可以支持美国的重返月球和火星探测任务^[51,57]。我国的商业火箭企业同样成果显著,在多个关键领域实现历史性突破,推动了国内商业航天发射服务市场的发展^[55]。2019年7月25日,星际荣耀的双曲线一号遥一运载火箭在酒泉卫星发射中心发射成功,实现了中国民营运载火箭轨道级发射零的突破^[58]。2023年,天兵科技的天龙二号遥一运载火箭成功入轨,蓝箭航天的朱雀二号遥二液氧甲烷运载火箭完成全球首枚液氧甲烷火箭入轨壮举,星河动力航天则圆满完成谷神星一号海射型(遥一)运载火箭发射任务^[8]。同时,欧洲航天局的阿丽亚娜6型火箭、日本三菱重工的H3火箭、美国蓝色起源的“新格伦”重型运载火箭等新一代火箭也在推进研制和发射计划。

航天器可以分为卫星和飞船2大类。商业卫星的制造正朝着小型化、低成本、高性能的方向发展,以满足多样化的市场需求。由数百颗低轨遥感卫星组成的高频次观测星座,在环境监测、国土资源调查、农业估产、城市规划、灾害防治等多个领域展现出巨大的应用价值。通信卫星则推动了卫星互联网的发展,SpaceX、OneWeb、星网等国内外众多企业竞相部署低轨通信卫星星座,旨在为全球提供高速互联网接入服务。我国的长光卫星技术股份有限公司(简称“长光卫星”)、银河航天(北京)科技有限公司(简称“银河航天”)等商业卫星公司也已经深度参与国内星网的卫星研制任务。低轨导航增强星座可以对现有卫星导航系统进行增强和补充,具备地面终端快速收敛定位、信号抗干扰、定位精度提升等优势。在飞船方面,美国已经率先实现了商业化,SpaceX已经开展载人飞行和空间站货运服务,Virgin Galactic已完成多次亚轨道太空旅游飞行。相比较,紫微科技等国内企业才刚刚起步。

测控站网方面,挪威和瑞典凭借靠近极地的地理优势,分别诞生了KSAT和SSC商业测控公司,为卫星运营商提供全球测控、数据传输等服务,支持通信、地球观测、科学研究等多个领域和不同轨道类型的卫星。亚马逊和微软依托自身强大的云服务能力,结合全球地面站网,为全球用户提供卫星测控、数据

接收和处理等服务。随着商业航天的发展,我国测控服务逐渐走向市场化:一方面,传统的国家测控站网在保障国家航天任务的同时,开始为商业航天项目提供测控服务;另一方面,航天驭星等国内企业着手建设自有商业测控站网,为全球范围内的商业火箭和卫星提供实时、可靠、稳定的测控服务。

应用服务领域始终是商业航天的主战场。随着商业航天产业链上游的逐渐成熟,航天应用场景不断拓展。卫星遥感数据在农业领域,可通过监测农作物生长状况指导精准施肥和喷药;在保险行业,能用于评估自然灾害风险。卫星通信为偏远地区提供通信服务,助力当地经济发展。除了中国卫通、中国四维、21世纪等具有国家背景的卫星运营商外,近年来中科星图、航天宏图、长光卫星等新势力纷纷涌现,浪潮、泰达等其他行业的企业也开始进入商业航天赛道,推出星座计划。除传统的通信、导航、遥感应应用外,天基云服务、太空旅游、太空采矿、深空探测等新兴应用场景也逐渐兴起^[56]。

当前,商业航天产业已形成完整的产业链,尤其在火箭、卫星等核心领域取得了重大技术突破。据相关机构预测,未来10年,全球商业航天市场规模有望突破万亿美元,占全球GDP的比重将超过1%^[59]。商业航天将持续推动新材料、电子信息、高端制造、大数据、AI等行业的技术发展以及多学科跨界融合,构建全球无缝互联网络以弥合数字鸿沟,赋能农业、能源、交通等多个行业。此外,随着太空探索成本的持续降低,人类将深度开发太空资源,催生出太空旅游、航天器4S服务、人造太阳(太阳能)、太空采矿等新业态,这不仅将深刻改变人类探索和利用太空的方式,拓展人类的认知边界和活动范围,重塑人类文明,更将推动人类迈入大航天时代^[37]。

2 低空经济产业发展趋势

2.1 低空经济的概念

低空经济是以1000 m以下低空空域为核心活动范围,以航空载运与作业装备技术为主要工具,通过开展各类低空飞行活动,带动相关产业协同发展的综

合性经济活动^[17,24],是我国为推动低空空域管理改革以及产业发展而提出的全球首创概念。低空经济与通用航空联系紧密,但前者是一个更宽泛的综合性经济概念,不仅覆盖通用航空相关的产业和活动,更加突出经济活动属性和效益产出,注重与物流、交通、农业等多领域融合后的创新应用,以推动不同领域的协同创新和产业升级,最终孕育新的商业模式和经济增长点。

2.2 发展历程

低空经济是在通用航空产业基础上发展而来,二者在空域资源、航空器、飞行活动、基础设施等多个方面存在概念重叠和资源共享。低空经济在通用航空的基础上,加入了以无人机、热气球、飞艇为核心的各类飞行活动,其飞行空域限制以1000 m以下为主,与允许更高飞行高度的通用航空有部分空域重叠。旅游观光、航空摄影、航空物探、航空跳伞等众多通用航空飞行活动,以及通用航空器制造、维修、运营等相关产业,也都属于低空经济的范畴。此外,通用航空机场、起降点、空管、通信、导航、气象飞行服务站等地面保障设施,也是低空经济发展的重要基础支撑,适用于整个低空领域的飞行活动。

如图4所示,2010年之前以通用航空为主,是指不包含军事、警务、海关缉私飞行以及公共航空运输飞行的民用航空活动,涵盖工业、农业、林业、渔业以及气象探测、海洋监测、科学试验等层面的飞行活动^[18,60-61]。因技术积累、政策环境、市场需求等方面的差异,欧美等国的通用航空产业起步较早,产业链和相关基础设施完备,各种管理措施成熟,适航体系完善。其中,美国构建了全球最为完善的通用航空体系,截至2021年,拥有近2万个通用航空机场和超过20万架飞机^[62],广泛应用在交通运输、旅游观光、农业作业、应急救援等多个领域。在产业链上,美国拥有发动机(GE)、航电系统(Honeywell)、整机制造(Celanese、Cirrus)等完整的通用航空产业链,且均处于全球领先地位。在监管体系上,美国联邦航空管理局(FAA)已经建立成熟的适航认证、飞行员培训和空域管理体系。受限于严格的空域管理政策,我国通用航空发展较为缓慢,截至2022年,通用机



图4 低空经济发展历程

Figure 4 Milestones of low-altitude economy

场仅有399个,飞机保有量约3186架^[62],大多集中在农业植保、测绘航拍、应急救援等领域,而且产业链不完整,发动机等核心部件依赖进口。

进入2010年,随着电动垂直起降、智能控制管理、5G通信、高精度导航定位等技术的不断成熟,无人机进入到快速发展期,开始在各个领域广泛使用,涌现出了无人机物流配送、eVTOL、无人机农业植保等多种新业态^[23,63]。中、美、欧等全球各国已经开始推动UAM(城市空中交通)落地^[64],亚马逊、顺丰、京东、美团、UPS等国内外物流巨头纷纷涉足无人机物流配送业务^[23,65],大疆推出MG-1农业无人机^[66],亿航智能EH216成为全球首款获得证书的载人级自动驾驶飞行器^[67],美国Joby于2018年完成S4原型机首飞,德国Lilium于2019年完成设计300 km/h的eVTOL飞行器Jet首飞^[68]。同时,世界各国通过政策释放低空空域资源,加速技术商业化,进一步推动无人机产业快速发展。2010年,我国发布《深化低空空域管理改革意见》^[69],开放1000 m以下空域试点。2014年,美国FAA发布小型无人机管理规则,允许商用小型无人机飞行。2016年,我国国务院印发《关于促进通用航空业发展的指导意见》^[70]。

2021年,我国在《国家综合立体交通网规划纲要》^[71]中正式提出低空经济概念,标志着低空经济进入爆发期。美国UPS、中国顺丰、美团、京东的无人机物流配送分别获得美、中两国政府的许可,开始实现常态化配送,显著提高了物流配送效率^[23,65]。美国Zipline在非洲完成超100万次医疗物资配送,单机日效率达150次^[72]。在eVTOL方面,德国Volocopter在巴黎奥运会期间开展载人试飞^[67],日本计划在2025年大阪世博会上展示多款eVTOL飞行器,我国

预计2027年可以在部分特大中心城市和省会城市实现eVTOL商业化。截至2023年, 大疆农业无人机全球销量突破30万台, 累计作业面积达60亿亩次, 单机日作业效率是传统人工的100倍^[73]。随着低空空域管理改革的持续推进和低空基础设施的不断完善, 应用市场需求将迎来井喷式的释放, 带动相关技术快速创新升级, 低空经济将步入黄金发展期。

2.3 产业现状与前景

目前, 低空经济呈现出蓬勃发展的态势, 已经构建起覆盖“研发制造—运营服务—基础设施”的全产业链生态。除传统的通用航空业务外, 无人机物流配送、eVTOL、电力巡检等诸多新兴业务不断涌现。如图5所示, 本节将从低空空域、低空飞行器研发制造、低空飞行产品运营服务、低空交通基础设施等4个方面对低空经济的产业现状和前景进行分析。

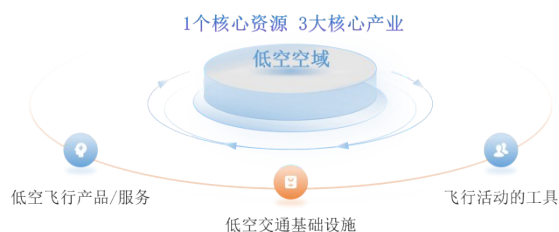


图5 低空经济产业组成

Figure 5 Composition of Low-altitude economy

低空空域是低空经济的核心资源。中、美等国已经启动对低空空域管理的深度改革^[20-21,74]。2024年我国正式施行《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》^[75], 明确300 m以下空域实行“白名单”备案制, 在长三角、粤港澳大湾区推行“分级分类、动态开放”试点。同年11月, 中国首个阶梯式低空空域正式投入使用, 不同高度层对应不同类型的低空飞行活动, 提升了空域使用效率。深圳等地率先建成低空经济示范区, 在低空交通管理、无人机物流等领域开展大量的实践探索, 积极推进低空空域的精细化管理, 为低空经济发展释放更多空域资源^[76-77]。预计2027年, 我国1000 m以下的低空空域管理权限将逐步下放到地级市, 实现自行申请, 即审即飞。美国方

面, NASA于2018年正式提出UAM概念, 得到了FAA积极响应和推动; 2023年, FAA发布《城市空中交通运行概念》^[78], 详细阐述了UAM的运行实施方式, 旨在将UAM安全纳入日常城市交通体系, 并明确所需的技术进度和监管需求^[79-80]。

飞行活动工具包括低空飞行器和作业装备2类。低空飞行器又分为有人驾驶航空器、无人驾驶航空器、热气球、飞艇等。以无人驾驶航空器为例, 我国已成为全球最大的电动无人驾驶航空器生产和出口国, 在电动无人机的技术研发、生产制造和应用服务等领域处于世界领先地位。其中, 消费级无人机占据了全球70%的市场份额^[81], 农业植保专用无人机年作业面积超18亿亩/次(1亩=666.67 m²)^[73], 在电网领域可以用于电力巡检、应急处置、物资运输等多种场景^[82]。美国无人机公司在长航时、大载荷技术方面占据优势, 以通用原子的“捕食者”、诺斯罗普·格鲁曼公司的“全球鹰”为代表, 普遍采用传统油动技术, 主要应用于军事侦察与气象监测等高端特种领域。作业装备是连接低空飞行器与行业需求的核心载体, 可以分为机载喷洒/撒系统、航空遥感系统、机载吊挂系统, 通过与无人机、有人驾驶航空器的有机结合, 为农业植保、电力巡检、警务安防等行业提供服务。机载喷洒/撒系统通过模块化喷头、流量控制系统与智能规划软件, 实现农业生产中农药、肥料、种子、土壤改良剂的精准投放; 航空遥感系统集成可见光、红外、多光谱、激光雷达(LiDAR)等传感器, 可获取厘米级分辨率的地物信息, 广泛应用于电力巡检、资源勘探、城市规划等领域; 机载吊挂系统通过电动绞车、快拆挂钩等装置实现货物吊运, 解决山区、水域等复杂地形的运输难题。

目前, 低空飞行产品的运营服务日益丰富。根据应用场景的不同, 其可以分为3大方向: 以无人机物流配送和空中载人交通eVTOL为代表的低空运输, 以航空摄影与测绘、农业植保、电力巡检为代表的低空作业, 以旅游观光为代表的休闲娱乐^[19]。在无人机物流配送领域, 京东物流推出全新一代JDX20“京鹊”多旋翼智慧物流无人机, 具备15 kg载荷、10~15 km半径配送能力^[83], 满足城市低空物流“安全、即时、智能”的需求。顺丰和京东正在构建覆盖偏远

地区和城乡接合部的低空物流网络,以提高快递配送时效^[23]。在低空作业领域,极飞科技无人机可以完成飞播、病虫害防治、追肥等工作,提高播种及田间管理效率,减少用药用肥量,便于及时了解作物生长状况,减少人工巡田^[84]。大疆农业无人机已在全球30多个国家和地区实现了规模化应用,覆盖玉米、大豆、水稻、小麦等大田作物以及咖啡、茶叶、柑橘、棉花、甘蔗等经济作物^[64]。国家电网采用无人机巡检输电线路,通过可见光可以检测电线断裂、绝缘子破损、悬挂异物等异常情况,绝缘子缺陷检测平均精度达93.84%;通过红外热成像可有效识别接触不良、过载、短路等异常发热故障;通过紫外检测可发现绝缘子和线路表面因破损或毛刺导致的异常放电;通过激光Lidar扫描架空线路,获取高精度三维数据,识别杆塔倾斜问题^[85]。在旅游观光方面,美国大峡谷、法国巴黎、迪拜棕榈岛,以及中国三亚、张家界等地均推出低空观光项目,游客可以俯瞰山川峡谷、海岛风光,吸引了大量体验者^[23]。

低空交通基础设施是支撑低空经济运行的基础底座,涵盖机场起降设施、导航与通信设施、监视管理设施、能源保障设施等4大核心模块,其建设水平直接决定低空空域的资源利用效率、低空飞行的安全性以及规模化应用服务的潜力。机场起降设施包括传统跑道型的通用机场,以及适配低空飞行器特性的垂直起降场、临时起降点等新型起降设施。未来,传统跑道型民航通用机场可以作为“空陆一体交通枢纽”,集成通用机场、eVTOL停机坪、无人机配送中心等功能,实现“干线航空-短途运输-末端配送”无缝衔接^[86]。垂直起降场一般建在城市核心区,适合无人机起降,通过配套智能调度系统,实现“1 km半径覆盖”。临时起降点适合直升机快速起降,配备便携式气象站与地面引导设备,可保障应急救援飞行,缩短响应时间。导航设施采用GPS/北斗导航卫星+地基/星基增强技术,为低空飞行提供静态精度 ± 2 cm、动态精度 ± 5 cm的厘米级高精度导航定位服务。通信设施采用地面5G+卫星的天地融合融信技术,可以实现飞行数据全区域、全天候实时回传,支持无人机高清图传与远程操控。监视管理设施通过低空监视雷达、飞行服务站、空域管理系统构建全方位智能空管

体系,实现空间分辨率1 km、时间分辨率15 min的高精度短期临时气象预报,支持飞行计划随用、随报、随批的快速审批方式,有效监管无人机流量,实时模拟飞行轨迹,自动规避冲突,动态分配飞行空域,大幅提升空域利用率,减少违规飞行事件。能源保障设施包括低空飞行器的加油、充电、维修等服务,可有效保障低空飞行器的续航能力,提高连续飞行服务水平。

低空经济的崛起和快速发展,本质是无人机研发、新能源、飞行控制等航空技术革命,与人工智能、卫星导航、5G通信等新一代信息技术深度融合、协同创新的结果。其核心驱动力不仅在于空域资源的释放,更源于底层技术群的颠覆性创新与跨域协同。随着低空经济与农业、物流、测绘、旅游等多行业的深度融合,应用场景也将不断拓展。此外,高能量密度的固态电池、氢燃料电池等技术突破之后,低空飞行器续航能力有望突破500 km,可以覆盖90%的城市通勤场景。基于AI的空管系统也将实现“万架级”飞行器同时管控,进一步提升空域容量。届时,低空物流、空中出行等新兴业态也将逐步成熟,极大缓解地面交通压力,提供更快捷的出行方式,为人类带来全新的生活、生产、旅游和休闲体验。据权威机构预测,2030年,我国低空经济规模有望突破万亿元,占全球GDP的比重也将超过1.5%,成为推动经济增长和科技创新的新引擎^[76]。总之,低空经济给人类带来的变革堪比汽车替代马车,将重塑交通、物流、服务和城市管理形态,低空也将成为继陆地、海洋、天空、太空后的“第五空间”,催生出全新的经济范式和社会组织方式。

3 二者的跨界融合与创新

3.1 理论基础

创新涵盖从创意到科研、从科研到成果、从成果到产品的完整价值创造全过程,其本质是探索求知,目标是创造价值,是社会进步、经济增长与科技发展的核心动力。作为新质生产力的典型代表,商业航天与低空经济无疑是全球范围内新的创新高地。此外,

二者都具有产业链长、技术复杂度高、研发周期长且迭代速度快、应用场景多元且繁杂等特点, 传统的集成、开放、协同创新理论已难以满足其发展要求, 因



图6 跨界创新的理论支撑
Figure 6 Theoretical Foundation of Cross-over Innovation

此对创新的原理、方式、方法提出了更高的要求。

从社会科学维度来看, 跨界创新理论^[87]源于创新且高于创新, 以创新、认同、共同体三者为理论支撑, 如图6所示。该理论以创新理论为本质内涵, 以认同理论为合作基石, 以共同体理论为组织形式, 通过调动多方资源, 获取更多信息, 获得持续前进动力, 克服创新过程中的风险和困难, 突破技术、资金、人力、物资等关键难点, 最终实现更好的创新预期。

从自然科学维度来看, 系统工程论^[88]将研究对象视为一个由多个部分有机组成的整体, 运用系统的观点、方法和技术, 综合考虑管理机制、经济条件和技术水平等制约因素, 融合多学科和技术, 对开放、高难、复杂的巨系统进行分析、设计、实施和管理, 以实现系统最优的终极目标。系统工程论已经在航天等许多行业取得巨大成功。例如, 美国阿波罗登月工程有2万家企业、200多所大学和80多个科研机构参

与, 总人数超过30万人。

如表1所示, 商业航天与低空经济在专业技术、服务行业用户和产业发展规律等方面存在相似之处。商业航天包括发射场、火箭、航天器、测控站网、应用等5大领域, 技术上需要机械、力学、热学、材料、控制、电气、计算机、电子、土木、可靠性、通信、导航、遥感等几十种专业支撑。低空经济涵盖空域管理、飞行器研发制造、飞行产品运营服务、交通基础设施等领域, 所需要的专业技术也都涉及机械、力学、材料、控制等方面。二者由于涉及的技术领域广泛, 产业环节多元, 集成难度大, 均属于典型的复杂、高难、多元的巨系统, 需要持续不断的技术迭代演进和优化。在服务的行业用户方面, 二者高度一致, 都可以服务农业、林业、能源、国土、海洋、国防等行业。同时, 二者的产业发展都需要政府层面的政策推动, 以及企业和科研机构间的紧密合作。

从技术研发、市场应用、产业发展等方面来看, 商业航天与低空经济有一些差异点, 比如: 商业航天主要聚焦于100 km以上的太空领域, 技术难度高, 投资规模大, 产业周期长, 服务的用户目前主要以政府和国防为主, 随着卫星互联网技术的发展, 逐渐开始向普通消费者提供手机直连的卫星通信服务; 低空经济主要活动于以1000 m以下为主的低空空域, 技术相对成熟, 应用场景除了农业、林业、应急等行业用户之外, 还将以面向普通消费者日常生活的空中交通和物流配送为主, 产业发展注重基础设施普及和运营服务优化。但是, 二者在专业技术领域和应用场景上有较高的重叠度, 对材料、能源和控制等诸多技术有相同的研发需求, 在农业、林业、国防等领域存在大量互补性应用场景, 可以共同打造出更具创新性的解决方案。因此, 作为关联性较强的产业, 商业航天

表1 商业航天与低空经济比较
Table 1 Comparison of commercial aerospace and low-altitude economy

比较维度	商业航天	低空经济
活动区域	100 km 以上高度的太空	以 1000 m 以下为主的低空
核心技术	材料、通信、机械、力学、轨道、能源、控制、计算机等	材料、通信、导航、能源、控制、力学、计算机等
应用场景	农业、林业、国土、海洋、能源、国防、应急、交通等行业用户为主, 未来会有手机直连、太空旅游等面向普通消费者的应用场景	农业、林业、国土、海洋、能源、国防、应急、物流、交通等行业用户与普通消费者用户并举
投资特点	周期长, 规模大, 技术难度大, 产业链不足	周期短, 技术相对成熟, 产业链完善, 应用广泛

与低空经济并非孤立发展的个体，而是呈现出深度协同、相互赋能的产业生态关系，既是跨界创新理论的生动实践，也需要系统工程论的深入指导。通过关键技术联合攻关、应用场景拓展、产业生态构建等方面的跨界融合与创新，二者的结合能够实现技术与市场资源的高效整合，推动产业结构优化升级，显著拓展应用场景边界，提升技术应用的深度与广度，为两大产业实现跨越式发展注入强劲动力，创造巨大的经济价值与社会价值。

3.2 关键技术的跨界融合与创新

商业航天与低空经济在材料与制造、能源、控制等关键技术领域存在极高的重合度，二者的跨界融合与创新不仅能够相互赋能，实现技术能力的共享，更能极大地加速技术创新的进程。

在材料与制造领域，航天器与低空飞行器对结构材料都有轻量化、高强度、高导热、低成本制备的需求，同时要求可以实现大批量工业化生产，大幅降低制造成本。碳纤维复合材料凭借其卓越的比强度（强度/密度）和设计灵活性，已成为现代工业轻质高强度复合材料的核心。石墨烯因其超高导热性和独特的二维结构，成为新一代散热材料的核心。二者结合形成的复合材料，本质上是“宏观纤维”与“纳米片层”的跨尺度协同，既弥补了碳纤维横向性能不足的缺陷，又解决了石墨烯难以独立成材的难题。增材技术，是一种通过逐层堆积材料直接构建三维实体的技术，为碳纤维复合材料提供了“设计即制造”的颠覆性能力，具有设计自由度高、材料利用率高、快速成型等优势，突破了传统工艺在复杂结构、定制化生产中的瓶颈，适合小批量、多品种的定制化生产，可缩短研制周期，实现按需生产。

能源方面，高能量密度固态电池技术和智能充放电的能源高效管理技术，有助于大幅度提升航天器和低空飞行器的工作效能。对于航天器而言，二者能够有效延长其在轨非太阳光照区域的工作时长，执行更为复杂和长期的太空任务；而对于低空飞行器，则可大幅提升其续航能力，覆盖更广阔的作业范围。高能量密度固态电池通过固态电解质替代液态电解液，其理论能量密度可以突破 500 Wh/kg，无泄漏和燃爆风

险，还支持快充，从根本上解决了传统锂离子电池能量密度瓶颈、安全性隐患、循环寿命限制、充电慢等问题，是下一代储能技术的核心方向。智能充放电的能源高效管理技术依托先进的传感器与精密算法，实时、精准地监测电池的电量、电压、内阻以及温度等关键参数，根据多样化的能源需求场景动态感知能源系统的负载，依据电池当前状态，优化充放电策略，动态调整充放电电流与电压，确保充放电过程高效安全，有效规避过充、过放现象对电池寿命与性能的损害，以实现能源的精确控制、按需分配和优化利用。

航天器与低空飞行器都需要高精度的自主导航与智能控制能力。其中，惯性导航技术是二者的核心技术手段，但存在随着工作时间推移累积误差的特性。因此，GPS、星敏感器、摄像头、激光雷达等其他高精度测量手段分别应用在航天器和低空飞行器中，对惯性导航的累积误差进行校正。此外，大规模集群智能控制技术既可以让不同功能的低空飞行器高效协同，自主精准编队，完成各类复杂任务；也可以精确控制低轨卫星的轨道和姿态参数，实现自主精准轨道维持和姿态控制、碰撞预警和规避，保障海量低轨卫星的智能化在轨运维。

3.3 应用场景的跨界融合与创新

商业航天与低空经济在应用场景的跨界融合与创新，可以为农业、物流、智慧城市、应急救援等行业的用户提供空天一体化服务。其中，商业航天的卫星遥感技术可以提供丰富的、低成本的、全方位的地理信息数据，助力低空飞行器提前了解不同区域的地理特征，从而制定有针对性的飞行作业任务。卫星通信技术凭借不受地理条件限制的优势，可解决山区、海洋等区域通信基站覆盖不足的问题，确保低空飞行器与地面控制中心实现全球任意区域的稳定、高效远程实时通信。卫星导航系统则能够为低空飞行器提供厘米级的高精度导航定位服务，避免碰撞等安全事故的发生，大幅提升低空飞行的安全性和准确性。

在农业领域，卫星遥感技术能够快速获取大范围农田土地信息，通过分析不同光谱波段数据，准确区分耕地、林地、草地等土地类型，了解土壤的质地、湿度、肥力分布，识别不同种植区域作物的生长态

势、病虫害早期迹象,以及监测大范围的云层分布、温度、湿度、风向等气象要素,为低空无人机作业的时间、范围、类型等选择提供更详尽的指导。无人机依据卫星遥感数据提供的农田信息,针对不同区域的作物需求,精确规划施肥和喷药路径,实施肥料与农药的定向投放,提高农业生产效率,降低生产成本。此外,无人机还可以对重点局部区域的农田土壤、作物进行近距离、高精度光谱测量,更准确地获取土壤养分分布、作物生长细节数据,精准识别病虫害早期迹象或作物的生理胁迫状况,进而修正和细化基于卫星遥感数据生成的病虫害或者产量预测模型,提高大范围农田作物快速预测的准确性。

在物流领域,利用卫星遥感技术可以获取大范围的地理地形、人口分布以及交通流量等宏观信息,通过数据分析优化低空物流配送路线,避开地形复杂或交通不便的区域,设计出最为高效的飞行路径。卫星遥感还能实时监测配送区域的天气变化,对暴雨、强风等影响飞行安全的气象因素提前预警。此外,卫星通信和导航技术相结合,可以实时定位和跟踪低空飞行器,全程掌握交通状况,辅助物流无人机避开拥堵路段和恶劣天气区域,灵活调整路线,确保货物快速、安全送达,提升物流配送的时效性与可靠性。

在智慧城市领域,商业航天与低空经济可以在城市规划与建设、城市管理与服务等诸多方面提供立体化解决方案。卫星遥感能提供大范围、高精度的城市地形地貌、土地利用等数据,为城市宏观规划布局奠定基础。低空飞行器携带测绘设备,在宏观规划框架下开展精细的地形测绘和建筑物三维建模,获取厘米级甚至更高精度的数据,辅助城市详细规划和建筑设计。在环境监测方面,卫星遥感可大范围监测城市的空气质量、水质变化、热岛效应等环境指标,提供初步的污染源信息。低空无人机能深入城市街区和工业园区,对烟囱排放、河流污染点等特定污染源进行近距离检测,实现对城市环境的立体监测和精准溯源。在基础设施维护中,卫星遥感可对桥梁、隧道、电力塔架、通信基站等城市基础设施进行宏观的定期检查,锁定潜在隐患区域。低空无人机搭载激光雷达、红外热成像仪等检测设备,对重点隐患区域开展精细化巡检,及时发现结构损伤、设备故障等问题,提高

维护效率和安全性。

在应急救援领域,商业航天的卫星通信和遥感技术与低空应急救援形成空天一体化救援能力,最大限度地降低灾害造成的损失。当地震、洪水等自然灾害来袭,导致地面通信网络和交通设施陷入瘫痪时,卫星遥感技术能够对受灾区域进行全面扫描,快速评估灾害损失,为救援力量的调配和救援物资的投放提供科学依据。卫星通信技术则成为连接灾区与外界的“生命线”,确保低空应急救援飞行器迅速接收到救援指令,凭借其灵活的低空飞行能力深入灾区,开展人员搜救、物资运输等紧急救援任务。

3.4 产业生态的跨界融合与创新

随着商业航天和低空经济在关键技术与应用场景的深度渗透,二者可以在产业链上下游、创新平台、基础设施与环境等方面开展紧密合作和开放共享,构建协同发展、合作共赢、市场闭环、良性循环的产业生态。

在产业链上游,商业航天和低空经济在高强度轻量化新材料、低成本批量化制造、高能量密度固态电池、集群智能控制等方面有相同的技术需求,通过相互借鉴成熟的技术成果和优质供应商资源,建立技术合作机制,共享资金、技术、人才、数据、设备等要素,联合攻关技术难题,推动产品接口标准化,可有效降低各自的供应链成本,提高供应链效能。在产业链下游,商业航天和低空经济分别发挥广域普查、重点详查的技术优势,构建“天上有卫星,空中有飞机”的空天一体化监测服务体系,在自然资源调查、农业植保、智慧城市、物流配送、应急救援等行业形成立体服务能力,进而催生新的商业模式和业态,实现互利共赢。

围绕商业航天和低空经济领域的核心、共性研发方向,联合国内知名企业、一流高校和科研机构,以跨界创新理论为指导,共同建设空天信息实验室,搭建“产学研用”深度融合的创新研发平台,开展技术研究、标准制定、成果转化等工作。该平台可以打破行业技术壁垒,促进创新要素在不同主体、不同领域间自由流动和高效配置,最终构建从需求提炼汇聚、关键技术联合攻关、样机试制测试、场景验证到成果

转化应用的全链条基础支撑体系，实现创新资源的最大化利用，形成相互赋能、相互协作、开放共享、产业协同的双向创新机制，推动两大产业的创新发展。

在政策制度、共性试验设施、标准规范等方面，提供完善的软硬件基础设施和环境，形成“政策引导+制度保障+设施赋能+标准规范”的组合策略，可突破协同瓶颈，提升协同效能，进一步推进商业航天与低空经济在产业生态上的跨界融合与创新。首先，在顶层设计上，明确商业航天与低空经济产业协同的重点领域和路线图；其次，在配套细则上，出台政策扶持、创新激励、市场培育等条款；再次，在设施建设上，打造共性试验设施与全链条技术共享平台，降低研发成本；最后，在标准规范上，制定数据传输与交换、环境试验、检测认证、应用场景作业等方面的统一标准。

3.5 挑战与发展建议

商业航天与低空经济的跨界融合与创新发展，面临着技术、市场、法规、人才等多方面的挑战。在技术标准与兼容性方面，商业航天和低空经济各自有独立的技术标准和行业规范。这导致二者在跨界融合与创新时可能出现接口不统一、通信协议冲突、数据格式不兼容等问题。这增加了专业技术成果直接应用和跨界系统集成的难度。在市场与模式方面，商业航天与低空经济的跨界融合与创新是一个相对较新的概念，市场对其认知和接受度还比较低。虽然已经有一些如利用卫星遥感和低空无人机联合进行农业监测的初步探索，但在盈利模式、成本控制、价值创造等方面还存在许多问题。同时，潜在用户对这种跨界融合与创新模式的应用场景、优势和价值了解不足，可能导致市场需求释放缓慢。如何构建高性价比的解决方案、应用产品和可持续的商业模式，实现二者在多个应用场景中业务的稳定盈利和长期发展，是面临的一大挑战。在政策和法规方面，二者都属政策敏感型领域。这使得相关企业和科研机构在开展业务时可能面临法律风险，抑制产业创新积极性。在行业人才方面，两大产业的技术迭代快，要求从业人员持续更新知识储备，而商业航天与低空经济的跨界融合和创新发展需要既具备商业航天知识，又掌握低空经济相

关技术和管理经验的复合型人才。但由于这两个领域的知识体系较为复杂，存在行业壁垒，跨领域学习难度大，且高校和科研机构的人才培养模式多侧重于单一领域，导致人才供给与产业需求严重错配，复合型人才成为稀缺资源。

因此，实现商业航天与低空经济的跨界融合和创新发展，可以从搭建技术共享平台、构建产业生态、政策支持与保障等三个方面开展工作。首先，搭建跨领域技术交流平台，通过定期举办技术研讨会、产业论坛等活动，促进双方技术人员的沟通与合作，增进双方对彼此行业的技术了解；针对关键技术难题，组织双方的科研力量联合攻关，推动技术共享与转移；制定统一的技术标准和规范，从底层实现两大领域的技术兼容性和互联互通。其次，通过产业联盟的方式，将产业链的上下游相关单位组织在一起，构建产业生态，共同探索融合应用新场景；鼓励企业围绕农业、林业、能源、国土、海洋、国防等双方共同的潜在用户开展业务合作，形成产业交叉融合的发展态势，培育一批具有核心竞争力的龙头企业和创新型中小企业。再次，鼓励企业通过人才交叉引进、培训等方式，提升员工的综合素质和专业能力。最后，政府应出台包括财政补贴、税收优惠、科研项目支持等在内的一系列鼓励跨界融合与创新发展的政策措施，建立适应二者创新融合与发展的管理体制，优化资源配置，简化审批流程，提高办事效率，为企业发展创造良好的政策环境，帮助企业提升技术水平和市场竞争力，推动产业生态的繁荣发展。政府还需要在高校和科研机构中设置相关专业课程，培养适应跨界融合与创新发展需求的专业人才，制定相关人才政策，加快培养既懂商业航天又懂低空经济的复合型人才。

4 结论

商业航天和低空经济作为新质生产力的典型代表已经成为国家战略新兴产业的重要组成部分，在推动经济发展、引领科技创新和促进社会进步方面发挥着重要作用。通过对二者产业发展趋势的深入分析，可以清晰地看到：虽然在概念定义、发展历程、产业现状与前景等方面有所不同，但是商业航天和低空经济都具

备产业链长、科技含量高、创新要素集中、研发周期长且迭代速度快、应用场景多元且繁杂等共性特征,而且二者在材料和制造、能源、智能控制等关键技术领域高度重合,在应用场景中服务相同的行业用户,在产业生态方面存在多维度的协同需求。

因此,以社会科学维度的跨界创新理论和自然科学维度的系统工程论为指导,商业航天和低空经济在

关键技术、应用场景和产业生态等方面存在深度融合与协同创新的巨大空间。通过跨界融合与创新,二者不仅能够实现技术和资源共享,拓展新兴应用场景,还能构建更加完善的协同产业生态,为各自发展注入新的活力。这将有助于加快落实我国战略新兴产业规划落地,提升我国在全球科技创新和产业发展中的地位,助力我国经济的高质量发展。

参考文献

- [1] 于淼,戴阳利,张召才. 国外商业航天发展模式研究[J]. 卫星应用, 2017(1): 23-31.
Yu M, Dai Y L, Zhang Z C. Research on foreign commercial aerospace development model[J]. Satellite Application, 2017(1): 23-31.
- [2] 刘欢,薛辉,王晓光,等. 太空探索技术公司“星舰”基地对我国下一代发射场建设启示[J]. 中国航天, 2024(9): 56-63.
Liu H, Xue H, Wang X G, et al. Inspiration of SpaceX starship base to the construction of China's next generation launch site[J]. Aerospace China, 2024(9): 56-63.
- [3] 梁唐,李亚楠. 美、俄、欧航天发射场运营模式分析[J]. 国际太空, 2020(9): 18-22.
Liang T, Li Y N. Analysis on the operation mode of American, Russian and European space launch sites[J]. Space International, 2020(9): 18-22.
- [4] 雨菲. 商业火箭,能否在酒泉基地放飞——酒泉基地接纳商业火箭发射可行性分析[J]. 卫星与网络, 2017(4): 12-15.
Yu F. Can commercial rockets be released at Jiuquan base: Feasibility analysis of Jiuquan base accepting commercial rocket launch[J]. Satellite & Network, 2017(4): 12-15.
- [5] 刘晓敏. 我国首个商业航天发射场首发告捷海南商发实现“开门红”[J]. 国际太空, 2025(1): 44-46.
Liu X M. China's first commercial space launch site made its first success, and Hainan Commercial Development achieved a "good start"[J]. Space International, 2025(1): 44-46.
- [6] 盛英华,吴佳林,王玮. SpaceX发展之路: 互联网模式下的商业航天[J]. 张江科技评论, 2022(3): 32-35.
Sheng Y H, Wu J L, Wang W. The road of SpaceX development: Commercial space under Internet mode[J]. Zhangjiang Technology Review, 2022(3): 32-35.
- [7] 松堂. 蓝色起源的商业航天架构[J]. 太空探索, 2025(2): 36-41.
Song T. Commercial space architecture of blue origin[J]. Space Exploration, 2025(2): 36-41.
- [8] 刘洁,褚洪杰,李一凡. 2023年世界航天发射活动总结[J]. 中国航天, 2024(2): 46-52.
Liu J, Chu H J, Li Y F. World space launch activities in 2023[J]. Aerospace China, 2024(2): 46-52.
- [9] 郭夏锐. 商业卫星测控发展现状及趋势[J]. 国际太空, 2019(10): 44-48.
Guo X R. Development status and trend of commercial satellite TT&C[J]. Space International, 2019(10): 44-48.
- [10] 尹胜刚,张新民,朱健源. SpaceX公司航天测控系统建设应用及启示[J]. 军民两用技术与产品, 2024(5): 6-10, 20.
Yin S G, Zhang X M, Zhu J Y. Development, application and inspiration of SpaceX TT & C system[J]. Dual Use Technologies & Products, 2024(5): 6-10, 20.
- [11] 榆木. 航天驭星: 成为全球化商业航天基建运营商[J]. 卫星应用, 2021, 29(5): 20.
Yu M. Space satellite control: Becoming a global commercial space infrastructure operator[J]. Satellite Application, 2021, 29(5): 20.
- [12] 王晓北,郭文彧,刘士成. 我国商业航天发展现状分析[J]. 国际太空, 2021(6): 34-36.
Wang X B, Guo W Y, Liu S C. Analysis on the current situation of China's commercial aerospace development[J]. Space International, 2021(6): 34-36.
- [13] 张振华,白明生,石泳,等. 国外商业航天的发展及启示[J]. 中国航天, 2015(11): 31-39.
Zhang Z H, Bai M S, Shi Y, et al. Development of foreign commercial aerospace and its enlightenment[J]. Aerospace China, 2015(11): 31-39.

- [14] 李志忠, 卫征, 付垒, 等. 我国遥感卫星技术与应用重要进展[J]. 卫星应用, 2025(4): 16-19.
Li Z Z, Wei Z, Fu L, et al. Important progress of remote sensing satellite technology and application in China[J]. Satellite Application, 2025 (4): 16-19.
- [15] 李海龙, 孟亚洁. 织就“天地一体”信息网络: 我国卫星通信产业发展趋势研判[J]. 中国电信业, 2022(2): 37-41.
Li H L, Meng Y J. Weaving the "integration of heaven and earth" information network: research on the development trend of China's satellite communication industry[J]. China Telecommunications Trade, 2022(2): 37-41.
- [16] 李冬航. 数字经济时代的“北斗”应用发展与产业生态演进[J]. 中国航天, 2024(5): 50-56.
Li D H. The development of BeiDou application and the evolution of industrial ecology in the digital economy era[J]. Aerospace China, 2024(5): 50-56.
- [17] 覃睿. 再论低空经济: 概念定义与构成解析[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(6): 59-64.
Qin R. Further discussion on low altitude economy: concept definition and composition analysis[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2023, 41(6): 59-64.
- [18] 沈映春. 低空经济的内涵、特征和运行模式[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 108-117.
Shen Y C. Low-altitude economy: Definition, characteristics and operation modes[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 46(1): 108-117.
- [19] 樊一江, 李卫波. 我国低空经济阶段特征及应用场景研究[J]. 中国物价, 2024(4): 98-103.
Fan Y J, Li W B. The development stage and application scenarios of China's low-altitude economy[J]. China Price Journal, 2024(4): 98-103.
- [20] 王俊潼, 包丹文, 周佳怡, 等. 低空空域规划研究现状与展望[J/OL]. 航空学报, 2024: 1-26. (2024-10-30). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HKXB20241029003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
Wang J T, Bao D W, Zhou J Y, et al. Low-altitude airspace planning studies: A review and prospect[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024: 1-26. (2024-10-30). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HKXB20241029003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [21] 张旭. 低空空域开发现状与低空经济发展策略[J]. 中国航务周刊, 2024(13): 57-59.
Zhang X. Current situation of low-altitude airspace development and low-altitude economic development strategy[J]. China Shipping Gazette, 2024(13): 57-59.
- [22] 卢方周, 闫坤, 李文宇, 等. 低空经济总体架构与提升路径[J]. 信息通信技术与政策, 2024(11): 2-10.
Lu F Z, Yan K, Li W Y, et al. Overall architecture and enhancement pathways of low-altitude economy[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2024(11): 2-10.
- [23] 陈柳钦. 低空经济发展的现状、核心驱动力及潜力预测[J/OL]. 企业科技与发展, 2025: 1-10. (2025-03-28). <https://link.cnki.net/doi/10.20137/j.cnki.45-1359/t.20250328.001>.
Chen L Q. The present situation, core driving force and potential prediction of low-altitude economic development[J/OL]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2025: 1-10. (2025-03-28). <https://link.cnki.net/doi/10.20137/j.cnki.45-1359/t.20250328.001>.
- [24] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. 经济纵横, 2024(8): 53-62.
Zhang X L, Huang W R. Development of low-altitude economy: Global trend, China's Current situation, and promotion measures[J]. Economic Review Journal, 2024(8): 53-62.
- [25] 刘亚亚, 杨德林, 戴永. 低空经济的概念内涵、发展特征与推进策略[J]. 技术经济, 2025, 44(3): 29-37.
Liu Y Y, Yang D L, Dai Y. The conceptual connotation, development characteristics and promotion strategies of the low-altitude economy [J]. Journal of Technology Economics, 2025, 44(3): 29-37.
- [26] 沈运华, 张秀荣, 刘晓煌, 等. 天空地一体化自然资源要素监测体系及其应用[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1696-1706.
Shen Y H, Zhang X R, Liu X H, et al. An integrated space-aerial-ground monitoring system and applications for natural resources elements [J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1696-1706.
- [27] 李德仁, 眭海刚, 倪梓轩, 等. 论天空地一体化灾损监测评估[J]. 中国减灾, 2022(5): 28-31.
Li D R, Sui H G, Ni Z X, et al. On disaster monitoring and evaluation of sky-ground integration[J]. Disaster Reduction in China, 2022(5): 28-31.
- [28] 李妍, 范筱, 黄晓明, 等. 面向未来的陆海天融合通信网络架构[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 104-115, 125.

- Li Y, Fan X, Huang X M, et al. Emerging network architectures for integrated communications among land, sea, air and sky[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(6): 104-115, 125.
- [29] 明朝辉, 明晓洋, 王骋翰, 等. 空天地一体化融合通信赋能智慧应急救援建设[J]. *中国应急救援*, 2024(4): 25-29.
- Ming Z H, Ming X Y, Wang C H, et al. Space-air-ground integrated communication empowering intelligent emergency rescue development [J]. *China Emergency Rescue*, 2024(4): 25-29.
- [30] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景[J]. *航天器环境工程*, 2013, 30(2): 115-121.
- Tang J M. A review of aerospace materials[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(2): 115-121.
- [31] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(3): 77-94.
- Liu S F, Song X, Xue T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(3): 77-94.
- [32] 王彬, 李海岩, 王玉林. 未来空天领域中的人工智能技术展望[J]. *指挥与控制学报*, 2020, 6(4): 349-355.
- Wang B, Li H Y, Wang Y L. Prospect of artificial intelligence technology in the future aerospace field[J]. *Journal of Command and Control*, 2020, 6(4): 349-355.
- [33] 张敏, 王立校, 王伟. 河北省空天信息产业发展现状及优化策略[J]. *产业创新研究*, 2025(1): 16-18.
- Zhang M, Wang L X, Wang W. Development status and optimization strategies of aerospace information industry in Hebei Province[J]. *Industrial Innovation*, 2025(1): 16-18.
- [34] 赵璐, 孙草塬. 长三角地区战略性新兴产业的空间共聚与演化[J/OL]. *世界地理研究*, 1-13[2025-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20250523.1544.002.html>.
- Zhao L, Sun C Y. The spatial co-agglomeration and evolution of strategic emerging industries in the Yangtze River Delta Region[J/OL]. *World Regional Studies*, 1-13[2025-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20250523.1544.002.html>.
- [35] 徐宁. 今天是第十个“中国航天日”, 我市不断优化产业生态、提升创新能力振翅高飞, 打造南京航空航天产业高地[N]. *南京日报*, 2025-04-24(01).
- Xu N. Today is the 10th "China Aerospace Day", and our city continues to optimize the industrial ecology, enhance the innovation ability, and build the highland of Nanjing's aerospace industry[N]. *Nanjing Daily*, 2025-04-24(01).
- [36] 唐琴, 李凌儿. 正处于起步成势的关键期——重庆空天信息产业如何竞逐千亿级[N]. *重庆日报*记者, 2025-04-03(01).
- Tang Q, Li L E. It is in the critical period of starting to become a trend: How to compete for 100 billion yuan in Chongqing's aerospace information industry[N]. *Chongqing Daily*, 2025-04-03(01).
- [37] 宋歌, 孙艺, 李晶. 浅析大航天时代下的商业航天产业发展[C]. 第八届中国(国际)商业航天高峰论坛论文集, 2022: 121-125.
- Song G, Sun Y, Li J. Analysis of the development of the commercial aerospace industry in the era of large aerospace[C]. *Proceedings of the 8th China (International) Commercial Aerospace Summit*, 2022: 121-125.
- [38] 黄志澄. 太空经济新动力与我国商业航天[J]. *张江科技评论*, 2022(3): 20-23.
- Huang Z C. New impetus of space economy and China's commercial space flight[J]. *Zhangjiang Technology Review*, 2022(3): 20-23.
- [39] 牟宇. 美国商业航天发射市场政府管理与启示[J]. *国际太空*, 2018(7): 45-51.
- Mou Y. U.S commercial space launch market governance and its enlightments[J]. *Space International*, 2018(7): 45-51.
- [40] 姚磊, 谢平, 薛雅心, 等. 国际遥感卫星商业化发展政策分析[J]. *军民两用技术与产品*, 2013(9): 10-12.
- Yao L, Xie P, Xue Y X, et al. Policy analysis of commercialization development of international remote sensing satellites[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2013(9): 10-12.
- [41] 史锦梅. 高科技就一定带来效益吗——铱星破产案的启示[J]. *企业研究*, 2003(2): 25-28.
- Shi J M. Will high technology definitely bring benefits: Enlightenment from Iridium bankruptcy case[J]. *Business Research*, 2003(2): 25-28.
- [42] 谢涛, 余东峰, 李云鹏, 等. 星链与星舰启示和我国商业航天探索[J]. *卫星应用*, 2023(5): 45-50.
- Xie T, Yu D F, Li Y P, et al. Enlightenment of star chain and starship and China's commercial space exploration[J]. *Satellite Application*, 2023(5): 45-50.
- [43] 韩槌夏, 张丽艳, 陈状, 等. 美国商业航天发展带来的启示[J]. *科学*, 2023, 75(1): 23-28, 4.
- Han Y X, Zhang L Y, Chen Z, et al. Lessons learnt from the development of U. S. commercial spaceflight industry and suggestions for China's commercial spaceflight industry[J]. *Science*, 2023, 75(1): 23-28, 4.
- [44] 张娅, 吴健. 2024年国外运载器发展回顾[J]. *中国航天*, 2025(1): 39-46.

- Zhang Y, Wu J. Review on the development of foreign launch vehicles in 2024[J]. Aerospace China, 2025(1): 39-46.
- [45] 曲忠芳. 商业航天探路者: 马斯克和SpaceX[N]. 中国经营报, 2024-10-14(D04).
- Qu Z F. Commercial space pathfinders: Musk and SpaceX[N]. China Business Journal, 2024-10-14(D04).
- [46] 张涵抒. "星链" 在战场: 第一次商业太空战争[J]. 文化纵横, 2024(1): 8-11.
- Zhang H S. Starlink on the battlefield: The first war with commercial space capabilities[J]. Beijing Cultural Review, 2024(1): 8-11.
- [47] The White House. National Space Policy of the United States of America[EB/OL]. (2020-12-09). Washington, D.C.: The White House. [2023-10-27]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2020/12/National-Space-Policy.pdf>.
- [48] U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act, Title IV of the FAA Reauthorization Act of 2015, Pub. L. No. 114-90, 129 Stat. 704-728 (2015). [2023-10-27]. <https://www.congress.gov/114/plaws/publ90/PLAW-114publ90.pdf>.
- [49] 国家发展改革委, 财政部, 国防科工局. 国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025年)[EB/OL]. (2015-10-26) [2023-10-27]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796165/part/6776244.pdf>.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. National medium and long-term development plan for civil space infrastructure (2015-2025) [EB/OL]. (2015-10-26) [2023-10-27]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796165/part/6776244.pdf>.
- [50] 高国柱. 我国商业航天政策分析与未来展望[J]. 卫星应用, 2023(10): 54-60.
- Gao G Z. Analysis and future prospect of China's commercial space policy[J]. Satellite Application, 2023(10): 54-60.
- [51] 龙雪丹, 杨开, 王林, 等. 一代"超重-星舰" 综合飞行试验情况总结分析[J]. 中国航天, 2025(1): 68-72.
- Long X D, Yang K, Wang L, et al. Summary and analysis of the integrated flight tests of SpaceX's first-generation super heavy-starship[J]. Aerospace China, 2025(1): 68-72.
- [52] U. S. Department of Defense. DoD Space Policy[EB/OL]. (2012). [2023-10-27]. <https://acqnotes.com/wp-content/uploads/2014/09/DoD-Directive-3100.10-Space-Policy-October-10-2012.pdf>
- [53] U.S. Department of Defense. Commercial Space Integration Strategy[EB/OL]. (2023-04). [2023-10-27]. <https://media.defense.gov/2023/Apr/17/2003201414/-1/-1/0/COMMERCIAL-SPACE-INTEGRATION-STRATEGY.PDF>.
- [54] U.S. Department of Defense. 2024 Commercial Space Integration Strategy [EB/OL]. (2024-04-02) [2024-05-15]. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3733447/dod-releases-2024-commercial-space-integration-strategy/>.
- [55] 马万卓, 钟兴, 董科研, 等. 我国商业航天信息产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 156-165.
- Ma W Z, Zhong X, Dong K Y, et al. Development of commercial aerospace information industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(5): 156-165.
- [56] 林仁红, 王凤宇, 王伟, 等. 全球太空经济发展态势分析与启示[J]. 国际太空, 2022(11): 30-34.
- Lin R H, Wang F Y, Wang W, et al. Analysis and enlightenment of global space economy development trend[J]. Space International, 2022 (11): 30-34.
- [57] 李利群, 马翀, 王二亮. 国内外航天发射技术现状与未来发展综述[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(2): 1-6, 170.
- Li L Q, Ma C, Wang E L. Overview on the current situation and future development of space launch technology at home and abroad[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(2): 1-6, 170.
- [58] 李琦. 双曲线一号运载火箭首飞成功[J]. 今日科苑, 2019(7): 1.
- Li Q. Hyperbolic No.1 carrier rocket successfully made its first flight[J]. Modern Science, 2019(7): 1.
- [59] 付志恒. 商业航天市场与发展机遇[J]. 中国航天, 2024(6): 20-26.
- Fu Z H. Commercial space development market and opportunities[J]. Aerospace China, 2024(6): 20-26.
- [60] 杨正泽, 包丽萍. 我国通用航空的发展现状及展望[J]. 商业经济, 2024(6): 140-142.
- Yang Z Z, Bao L P. Development status and prospect of general aviation in China[J]. Business & Economy, 2024(6): 140-142.
- [61] 郭辰阳, 敖万忠, 吕宜宏. 低空经济与通用航空、无人机、UAM的关系分析[J]. 财经界, 2023(28): 30-32.
- Guo C Y, Ao W Z, Lyu Y H. Analysis on the relationship between low-altitude economy and general aviation, UAV and UAM[J]. Money China, 2023(28): 30-32.
- [62] 范爱华, 朱俊洪, 王铮. 我国通用航空产业发展现状及策略探讨: 基于2015—2022年通用航空数据[J]. 综合运输, 2024, 46(11): 17-21.
- Fan A H, Zhu J H, Wang Z. Development status and strategies discussions about China general aviation industry: Based on general aviation data from 2015-2022[J]. China Transportation Review, 2024, 46(11): 17-21.

- [63] 傅惠, 崔煜, 赵佳虹, 等. 低空无人机物流配送研究与应用综述[J]. 工业工程, 2025, 28(1): 9-21.
Fu H, Cui Y, Zhao J H, et al. A review of research and applications in low-altitude logistics and delivery using unmanned aerial vehicles[J]. Industrial Engineering Journal, 2025, 28(1): 9-21.
- [64] 廖小罕, 屈文秋, 徐晨晨, 等. 城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J]. 航空学报, 2023, 44(24): 028521.
Liao X H, Qu W Q, Xu C C, et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 028521.
- [65] 张永康. 低空经济视角下物流产业高质量发展策略研究[J]. 物流科技, 2025, 48(5): 35-36, 39.
Zhang Y K. Research on the high-quality development strategy of logistics industry from the perspective of low-altitude economy[J]. Logistics Sci-Tech, 2025, 48(5): 35-36, 39.
- [66] 段运红. 大疆植保机产品进化路线剖析[J]. 农业机械, 2019(3): 42-44.
Duan Y H. Analysis of the evolutionary route of dajiang plant protection machine products[J]. Farm Machinery, 2019(3): 42-44.
- [67] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 529937.
Deng J H. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 529937.
- [68] 杜伟, 孙娜. 电动垂直起降飞行器的发展现状研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(11): 1-7.
Du W, Sun N. Research on development status of eVTOL[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(11): 1-7.
- [69] 国务院 中央军委关于深化 我国低空空域管理改革的意见[EB/OL]. (2010-08-19)[2024-05-15]. https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfgb/2010n_4950/201010/201008/t20100819_300396.html.
State Council, Central Military Commission, opinions on deepening the reform of low altitude airspace management in China[EB/OL]. (2010-08-19)[2024-05-15]. https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfgb/2010n_4950/201010/201008/t20100819_300396.html.
- [70] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见[EB/OL]. (2016-05-13)[2024-05-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm.
General Office of the State Council. Guiding opinions of the General Office of the State Council on promoting the development of general aviation industry[EB/OL]. (2016-05-13)[2024-05-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm.
- [71] 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24)[2024-05-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued the "Outline of the National Comprehensive Three-dimensional Transportation Network Planning"[EB/OL]. (2021-02-24)[2024-05-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
- [72] 郑宇航. 从在非洲送药到在美国送“万物” 全球最大无人机货运公司的新蓝图[N]. 中国航空报, 2023-06-09(7).
Zheng Y H. From delivering medicine in Africa to delivering "everything" in the U.S. A new blueprint for the world's largest drone cargo company[N]. China Aviation News, 2023-06-09(7).
- [73] 闻坤. 大疆农业无人机累计作业 60 亿亩次[N]. 深圳特区报, 2023-12-22(A01).
Wen K. DJI's agricultural drones have operated a total of 6 billion acres[N]. Shenzhen Special Zone Daily, 2023-12-22(A01).
- [74] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966-1981.
Liao X H, Xu C C, Ye H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(11): 1966-1981.
- [75] 中华人民共和国国务院, 中央军委. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-05-31)[2024-05-15]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.
State Council of the People's Republic of China, Central Military Commission. Interim regulations on the flight management of unmanned aerial vehicles[EB/OL]. (2023-05-31)[2024-05-15]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.
- [76] 2025 年我国低空经济发展形势展望[N]. 通信产业报, 2025-1-13(12).
Prospects for China's low-altitude economic development in 2025[N]. Communications Weekly, 2025-1-13(12).
- [77] 张雄化. 低空经济兴起及高质量发展的理论与实践: 深圳的视角[J]. 特区经济, 2023(8): 15-19.
Zhang X H. The theory and practice of the rise of low-altitude economy and high-quality development: A perspective from Shenzhen[J]. Special Zone Economy, 2023(8): 15-19.

-
- [78] Federal Aviation Administration (FAA). Concept of Operations for Urban Air Mobility (Version 2.0)[EB/OL]. (2023-06)[2024-05-15].<https://www.faa.gov/nextgen/programs/urban-air-mobility/conops>.
- [79] 贾圣真, 姚怡行. 面向未来的城市空中交通法律规制框架[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2025, 38(1): 63-70.
Jia S Z, Yao Y X. Future-oriented legal regulatory framework for urban air mobility[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2025, 38(1): 63-70.
- [80] 丁磊. 浅析城市空中交通管理内涵要素与发展趋势[J]. 民航管理, 2024(12): 46-50.
Ding L. A brief analysis of UAM connotation elements and development trends[J]. Civil Aviation Management, 2024(12): 46-50.
- [81] 陈梦月. 中国无人机产业竞争力分析及启示[J]. 合作经济与科技, 2019(11): 4-7.
Chen M Y. Analysis on the competitiveness of China's UAV industry and its enlightenment[J]. Co-Operative Economy & Science, 2019 (11): 4-7.
- [82] 程海涛, 孔令宇, 王泽昭, 等. 电力行业无人机典型应用的服务模式和创新研究[J]. 应用科技, 2024, 51(5): 197-205.
Cheng H T, Kong L Y, Wang Z Z, et al. Research on service mode and innovation of a typical application of UAVs in power industry[J]. Applied Science and Technology, 2024, 51(5): 197-205.
- [83] 孙溥茜. 京东物流: 智能物流体系中的配送机器人与无人机技术[J]. 机器人产业, 2022(5): 56-58.
Sun P Q. Jingdong logistics: Distribution robot and UAV technology in intelligent logistics system[J]. Robot Industry, 2022(5): 56-58.
- [84] 潘慧. 极飞科技: 精准应用农业无人机 助力低空经济"腾飞"[J]. 广东科技, 2024, 33(3): 43-45.
Pan H. Extreme flying technology: Accurate application of agricultural UAV to help low-altitude economy "take off"[J]. Guangdong Science & Technology, 2024, 33(3): 43-45.
- [85] 何成, 王峰, 朱丽婷, 等. 基于无人机平台的电力巡线相关技术研究进展[J]. 中国测试, 2025, 51(3): 1-15.
He C, Wang F, Zhu L T, et al. Research progress of electric power patrol related technologies based on UAV platforms[J]. China Measurement & Test, 2025, 51(3): 1-15.
- [86] 孙卫国, 吕人力, 李凌威, 等. 低空经济面临的机遇、挑战与城市空中交通规划展望[J]. 城市交通, 2025, 23(2): 13-19, 127.
Sun W G, Lyu R L, Li L W, et al. Opportunities and challenges for low-altitude economy and future prospects of urban air mobility planning[J]. Urban Transport of China, 2025, 23(2): 13-19, 127.
- [87] 刘辉. 跨界创新理论研究与现实分析: 基于中国创新路径的探讨[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Liu H. Theoretical research and practical analysis of cross-border innovation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [88] 钱学森. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
Qian X S. On System Engineering[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1982.

Commercial Aerospace and Low-altitude Economy: Cross-over Combination and Innovation of National Strategic Emerging Industry

WANG Zhizhong^{1,3*}, LIU Hui^{2,3}

1. Beijing ZeroGlab Space Technology Co. Ltd, Beijing 102600, China;

2. Cross-bouandary Research Center; School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Z-park Cross-over Innovation Alliance, Beijing 100084, China

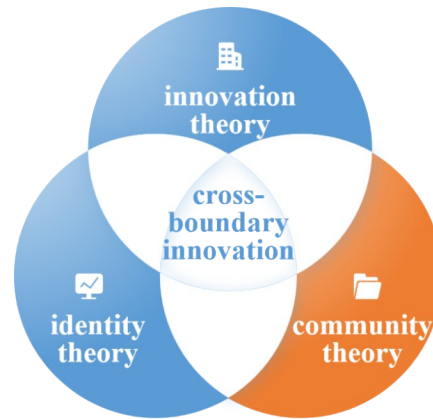
Highlights

Commercial aerospace and the low-altitude economy, as typical representatives of new-quality productive forces, hare user groups, face core technological challenge, and possess common industrial characteristics.

Commercial aerospace drives the industrialization and application of space technology, lowering the costs of space exploration and utilization. Low-altitude economy enables upgrades across traditional industries, reshaping near-earth transportation.

The cross-border combination and innovation paths of them includes: core technologies, application scenarios, and industrial ecosystems.

Graphical Abstract



Abstract: As typical representatives of new quality productive forces, commercial aerospace and the low-altitude economy have become new frontiers for scientific and technological innovation and economic development in the world. Both commercial aerospace and the low-altitude economy have characteristics such as driving the prosperity of the industrial chain, advancing scientific and technological innovation, and empowering industry applications. Finally, they can bear epoch-making significance for the development of human society. Currently, these two fields exhibit increasingly profound integration and collaborative innovation, with mutual reinforcement across technological development, resource allocation, market expansion, and industrial ecosystem construction. It will enable the profound sharing of technologies, resources, and markets, catalyze novel application scenarios under innovative paradigms, and construct a cross-domain, cross-industry, cross-regional, and interdisciplinary industrial ecosystem.

This paper systematically analyzes the industrial development trends of commercial aerospace and the low-altitude economy respectively. Commercial aerospace is an inevitable outcome of the aerospace industry's development reaching a specific stage. Following the government-led phase of aerospace development, the evolution of commercial aerospace has generally gone through three stages: initiation, exploration, and rise. It refers to aerospace activities guided by market demand, conducted *via* market-based means, market-oriented mechanisms, and market laws, covering all links of the aerospace industry chain, including the R&D, manufacturing, launch, operation, and application of spacecraft. Currently, the commercial aerospace industry has formed a complete industrial chain, with major technological breakthroughs achieved particularly in core fields such as rockets and satellites. It will also continue to drive technological advancement across multiple industries and interdisciplinary integration across different fields, profoundly transforming the way humans explore and utilize outer space, expanding humanity's cognitive boundaries and scope of activities, reshaping human civilization, and further propelling humanity into the era of grand aerospace.

The low-altitude economy has evolved on the basis of the general aviation industry. It is a comprehensive economic activity that takes low-altitude airspace below 1,000 meters as its core operational scope, relies on aviation transportation and operational

equipment technology as its primary tools, and drives the coordinated development of related industries through various low-altitude flight activities. At present, the low-altitude economy has established an entire industrial chain ecosystem covering "R&D and Manufacturing-Operation Services-Infrastructure", encompassing four aspects: low-altitude airspace, R&D and manufacturing of low-altitude aircraft, operation services of low-altitude flight products, and low-altitude transportation infrastructure. The low-altitude economy will reshape the patterns of transportation, logistics, services, and urban management; low altitude will also become the "fifth space" following land, ocean, sky, and outer space, spawning entirely new economic paradigms and social organization models.

Adhering to the cross-border innovation theory from the perspective of social sciences and the systems engineering theory from the perspective of natural sciences, it studies the cross-border combination and innovation paths of them from three aspects: core technologies, application scenarios, and industrial ecosystems. They share an extremely high degree of overlap in key technology fields such as materials and manufacturing, energy, and control. The cross-over combination and innovation not only enable them to empower each other and achieve the sharing of technological capabilities, but also greatly accelerate the process of technological innovation. In terms of application scenarios, the cross-over combination and innovation can provide air-space integrated services for users in industries such as agriculture, logistics, smart cities, and emergency rescue. With the in-depth penetration in key technologies and application scenarios, they can carry out close cooperation and open sharing in aspects including the upper and lower reaches of the industrial chain, innovation platforms, infrastructure and environment. This will help build an industrial ecosystem featuring coordinated development, win-win cooperation, market closed-loop, and positive circulation.

This paper identifies challenges of the cross-over combination and innovative development of commercial aerospace and the low-altitude economy in areas such as technology, market, regulations, and talent. In terms of technical standards and compatibility, commercial aerospace and the low-altitude economy each have their own independent technical standards and industry norms. This may lead to issues such as inconsistent interfaces, communication protocol conflicts, and incompatible data formats when the two sectors carry out cross-sector integration and innovation. These problems increase the difficulty of the direct application of professional technological achievements and cross-over system integration. Therefore, this paper finally proposes developmental recommendations to realize the cross-over combination and innovative development of commercial aerospace and the low-altitude economy in three aspects: establishing technology sharing platforms, building industrial ecosystems, and providing policy support and guarantees.

Through their cross-over combination and innovation, the two sectors can achieve technology and resource sharing to inject new vitality into both industries. These insights will also accelerate the growth of China's strategic emerging industries, advance scientific and technological progress, drive high-quality economic development, and enhance China's global competitiveness in technological innovation and industrial leadership.

Keywords: commercial aerospace; low-altitude economy; cross-over innovation; strategic emerging industry; new quality productive forces