

11-20-2024

Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy

Xiaohan LIAO

State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; Key Laboratory of Civil Aviation Low-Altitude Geographic Information and Route, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100101, China, liaoxh@igsnrr.ac.cn

Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy

Abstract

Low-altitude airspace is a resource that needs to be fully explored, and the low-altitude economy is a new type of economic activity resulted from low-altitude airspace exploration and utilization. As the primary players of low-altitude flight activities, the commercialization and wide applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) are promoting the prosperity of the low-altitude economy. A low-altitude air route network is an effective means to ensure the safe and efficient operations of a large number of UAVs, and it is also a new key infrastructure hosting low-altitude traffic. The history shows that the investment on public transport infrastructure as a policy tool to help economic growth has been widely used; similarly, investment on and construction of the low-altitude air route network infrastructure will yield significant social and economic benefits and foster a landscape rise of the low-altitude economy. Addressing the current issues of vague definitions and development paths in the low-altitude economy, this study attempts to propose a technical solution from the perspectives of geography science by constructing low-altitude air route network infrastructure and an airspace revenue mechanism to unlock the potential of the low-altitude economy.

Keywords

low-altitude economy; low-altitude air route network; low-altitude infrastructure; airspace revenue

Authors

Xiaohan LIAO, Chenchen XU, and Huping YE

引用格式: 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. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966-1981, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240614002.

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. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(11): 1966-1981, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240614002. (in Chinese)

低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战

廖小罕 徐晨晨* 叶虎平

1 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101

2 中国民用航空局 低空地理信息与航路重点实验室 北京 100101

摘要 低空空域是一种亟待充分开发的资源, 低空经济是围绕低空空域开发、利用从而发展起来的新兴经济活动。无人机作为低空飞行活动的主体, 其商业化、规模化、场景化的应用正促进低空经济的繁荣。低空路网是保障规模化无人机安全、高效运行的有效手段, 也是低空交通的关键新型基础设施。历史表明, 对交通基础设施的公共投资是一种有力促进经济发展的政策工具。因此, 对低空路网基础设施的投资和建设也将促进低空经济的全面发展, 带来极大的经济社会效益。针对当前低空经济科学定义和发展路线模糊等问题, 文章尝试从地理学角度, 提供一种通过构建低空路网基础设施及空域收益机制来释放低空经济发展潜力的技术方案。

关键词 低空经济, 低空路网, 低空基础设施, 空域收益

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240614002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240614002

当前, 我国无人机产业发展位于全球前列^[1], 无人机在低空的飞行活动日益丰富, 包括以传统通航、载人载物无人机为主体的低空交通, 无人机摄影测量与遥感观测、无人机灯光秀、飞机和热气球观光、航

空体育等组成的低空文旅和体育, 应急救援、政务飞行等低空公共服务, 机场终端和低空航路等特殊场景, 低空气象、农林植保、低空电网、管网、光伏和风电巡护等生产作业服务等。得益于无人机应用在多

修改稿收到日期: 2024年10月14日; 预出版日期: 2024年10月28日

行业的迅猛发展,针对高密度、高流量、体系化的无人机应用业态——城市空中交通(UAM)^[2]和先进空中交通(AAM)^[3],成为国内外新的研究和发展的热点,这为带动和促进低空经济大发展带来巨大的可能^[4,5]。

低空经济进一步被明确作为新兴产业和未来产业,成为我国经济发展新的增长引擎。2021年2月,中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》,提出“发展交通运输平台经济、枢纽经济、通道经济、低空经济”^①,低空经济概念首次被写入国家规划。2023年12月,中央经济工作会议上,低空经济被提升至战略性新兴产业^②。2024年3月,低空经济在全国两会成为热议主题,首次被写入政府工作报告^③。2024年7月,党的二十届三中全会决定“发展通用航空和低空经济”^④。为与中央政策相配套,各省市陆续出台支持发展低空经济发展的政策和发展规划。据测算,2023年我国低空经济规模已经超过5000亿元,2030年有望达到2万亿元^⑤。

低空经济得到国内各级政府、行业以及众多资本的关注,成为近年来的发展热点。低空经济是一个新经济现象、新经济领域,各界还缺乏对低空经济含义、如何建设等基本认识。本文回顾了国内外低空经济相关研究发展历程和无人机应用视角下的国内低空经济产业发展现状,量化论证低空路网对于低空经济的发展和促进作用,综述当前低空路网研究现

状,结合最新技术和政策,分析低空路网及其基础设施建设落实难点,提供低空路网及其基础设施建设可行方案,并探索空域经济收益关键技术。本文目的不在于构建一种低空经济发展体系,而是尝试以低空路网及其基础设施作为面向无人机的低空经济发展支点,通过解决量大面广的低空无人机无“公路”可走的难题,并超前探讨空域收益技术,为低空路网及其基础设施建设吸引投资、制定政策等提供理论和可选的技术方案。

1 低空经济的科学研究与产业发展

1.1 低空经济科学研究进展

将低空经济作为一种新经济现象、新经济领域进行研究与发展是由中国开创的。当前国内外学者对于低空经济的科学研究还处在初级阶段,对于低空经济的科学定义尚未形成共识,各学者从不同学科角度对低空经济进行解读。

从空域自身属性出发,与低空经济密切相关的概念主要是空域经济,空域经济又分为空域资产经济和空域资源经济。^①从空域的资产属性出发,低空经济是低空空域价值开发过程中衍生的一种经济活动形式。鉴于空域所有权的不同,国内外在传统空域资源的经济价值研究方面有差别。在国外,Harold Demsetz^[6]从产权角度认为空域是一种带有财产特征的可货币化资产,这一观点在美国传统通用航空领域有

① 中共中央国务院印发国家综合立体交通网规划纲要.(2021-02-24)[2024-10-08]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.

② 中央财办有关负责同志详解中央经济工作会议精神.(2023-12-18)[2024-10-08]. https://www.gov.cn/zhengce/202312/content_6920788.htm.

③ 李强.政府工作报告——2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上.(2024-03-12)[2024-10-08]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm.

④ 中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定.(2024-07-21)[2024-10-11]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm?sid_for_share=80113_2.

⑤ 2023年我国低空经济规模超5000亿元.(2024-02-28)[2024-10-08]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934828.htm.

着较长的发展历史，空域资产表现为私人空域的销售或租赁、公共空域的租赁等形式^[7]，例如美国运输部从20世纪70年代开始广泛租赁位于道路上方的公共空域用于交通出行。在国内，空域资源作为国有公共资源目前没有从法律层面上进一步明确空域所有权具体归属，并且空域权和空间权的法律界限也比较模糊^[8]，空域目前还没有被作为资源来开发的经济价值，国内的空域经济主要是指其社会经济贡献，包括参与民航飞行活动各方创造的直接和间接价值、引致和催化价值等^[9]。②从空域的资源属性出发，空域资源是土地、海洋资源外最重要的资源之一，低空空域的使用频次与人类活动分布高度相关。在传统航空学科研究中，基于空域容量或流量管理的空域资源优化配置^[10,11]和空域资源可用性评估^[12]是研究的热点问题。近年来，随着各类低空飞行活动增多，尤其是无人机活动的迅速扩张，低空空域的资源稀缺性越发明显^[13]，低空空域资源的稀缺性又使得其竞争和排他属性愈加明显，低空空域的价值性逐步得以体现^[14]。例如，廖小罕等^[14]从价值性和独立性2方面论述低空空域资源的经济属性，主张其价值性主要体现在占有者的使用权上，时空价值计算遵循马克思“地租理论”；路紫等^[15]从空域资源的资源学和经济学等多理论角度建立起空域资源开发利用的理论体系。

按照低空服务对象来划分，当前与低空经济密切相关的概念主要包括通用航空经济和无人机经济。低空经济最开始是被解读为通用航空经济^[16]。从经济领域提出低空经济概念或进行科学研究最早也是为应对通用航空发展面临的问题，被定义为围绕低空这一宝贵资源而开展的经济活动的总称^[17]。近年来，随着无人机应用规模的迅速扩大，低空经济被赋予了新含义。范恒山提出低空经济是一种以各种有人驾驶和无

人驾驶航空器的各类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，强调有人驾驶和无人驾驶航空器在低空经济发展中的导向性^⑥。

低空经济不应局限于通用航空经济和无人机经济。更进一步，覃睿^[18]采用“种差+属”定义法将低空经济描述为以航空载运与作业装备技术为主要工具、以低空空域为主要活动场域、以低空飞行活动为最终产出形式的系列经济活动构成的经济领域。此外，也有学者提出，以无人机为主体的低空遥感网^[19]及低空遥感的智能化发展可助力构建低空快速响应体系，而无人机低空物联网^[20]的建设可以塑造低空飞行生态区，是低空产业化的基础设施和发展低空经济的重要配置要素。同时，面向无人机的低空经济发展相关问题也正成为科学研究热点。

1.2 低空经济产业发展与瓶颈问题

虽然学界对于低空经济的内涵和本质特征尚未形成共识，但在社会经济发展需求为导向的行业背景和公众对低空活动旺盛需求的推动下，以通用航空经济和无人机经济为典型代表的低空经济产业已在国内经历了数年培育和发展；尤其是在通用航空行业从机械化向智能化的转型过程中，随着无人机对有人机的替代作用不断增强，无人机逐渐成为低空经济发展的主导产业^⑥。根据天眼查相关数据，近5年内新增无人机企业注册资本4300亿元，这表明无人机和新型零售物流等企业正在加速布局低空商业版图。随着信息技术的不断发展和低空空域改革的深化实践，无人机对有人机的替代程度将进一步提高，对各行业的渗透程度也会日益深广，面向无人机的低空经济产业将成为社会讨论热点和行业发展趋势。

城市级无人机规模化应用崭露头角。截至

⑥ 范恒山：我国低空经济发展现状、重点和趋势。(2022-06-15)[2024-10-12]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202206/15/t20220615_37758125.shtml.

2023年,全国无人机能源电力巡检超过150万公里^⑦,超过200个城市开展城市级实景三维模型建设^⑧,农田森林植保面积超过30亿亩次^⑨。例如,无人机在智慧城市中对交通流量等进行动态监测,在数字城市中用于快速获取实景三维数据,在平安城市中用于紧急救援执法,在UAM中用于物流配送等。

在低空经济发展背景下,无人机产业呈规模化、业务化发展趋势,低空应用场景也日益多样化。为支撑无人机应用的快速扩张,中国民用航空局牵头开展了一系列民用无人驾驶航空试验基地(试验区)试点工作。2020—2022年,上海、深圳等20个城市成为中国民用航空局批准并授牌的民用无人驾驶航空试验基地(试验区)^[21],无人驾驶航空试验区及试验基地的规模和数量居全球第一,领跑探索规模化无人机城市应用发展管理新赛道。

国内无人机低空经济产业发展也存在诸多瓶颈问题,需要国内有较好的应用市场环境和相应的政策支持。虽然无人机在国内有着如城市物流、安防保卫、巡检巡查等多业务应用场景的巨大潜力,然而许多地方针对无人机的监管政策存在“一刀切”情况,忽视实际场景应用需求,相关标准规范也落后于技术发展速度、不能及时更新,这些因素都导致了无人机行业应用受阻。例如,大疆无人机的海外销售占比超过80%^⑩,远远超过其在国内销售的份额,这反映出制造大国的产能与其内部市场需求不足的矛盾。此外,在大时空尺度上监管“低慢小”无人机也导致了极低的

空域资源利用率,空中路网交通基础设施缺失是最为突出的问题之一,这也是规模化运行难以为继的主要原因^[22]。

低空“无路可走”严重制约了低空经济的发展,低空路网存在的必要性不言而喻。地面交通运输“动脉”是通过地面公路网完成循环的,类比地面交通运输网是国民经济的“动脉”,低空经济也是高度地依赖支撑无人机规模化、商业化运行的“低空天路”这个“血管”和“脉络”,从而带动低空制造和副业的发展。然而,低空没有现成的“公路”可走,也没有相应的公共空中交通服务可提供。无人机运营商需要自主完成空域申请、划设航路和评估航路风险全过程,这种运营商划设的私家航路安全风险完全由自己负责,提供商业化服务的无人机数量日益增加但公共路网基础设施缺失。

2 低空路网的经济效益分析及研究进展

“要致富,先修路”是被发展实践证明过的区域经济发展乃至国家经济发展的黄金准则。在社会生产实践中,公路已被证实是带动经济发展的核心要素,交通运输网也被比喻为国民经济的“动脉”,是拉动投资、增加就业、扩大内需的重要措施。2022年8月,交通运输部联合多部门印发《农村公路扩投资稳就业更好服务乡村振兴实施方案》,明确路网建设是拉动投资、增加就业和扩大内需的重要措施,“力争新增完成投资约1000亿元,带动约200万人次就地就近就

⑦ 大疆机场实现电网网格化巡检 中国智造带来无人智慧巡检新模式. (2023-04-27)[2024-10-08]. https://www.sohu.com/a/670806192_114822.

⑧ 应用场景广泛 我国60多个城市已初步完成实景三维建设. (2023-10-11)[2024-10-08]. <https://news.cctv.com/2023/10/11/AR-TIawc4uKa6o8FaEYgOnpBp231011.shtml>.

⑨ 大疆农业发布《农业无人机行业白皮书(2022)》,助力全球农业现代化变革. (2023-08-31)[2024-10-08]. <https://ag.dji.com/cn/newsroom/ag-news-insight-report-2022>;亿亩次是表示一亿亩面积的面积单位,在农业领域,亿亩次常用于衡量大规模农业作业的面积,例如植物保护无人机的作业量。

⑩ 68 drones statistics: 2020/2021 market shares, applications & forecasts. (2020-05-24)[2024-10-08]. <https://comparecamp.com/drones-statistics/>.

业增收。”^①2020年4月，中国证券监督管理委员会等部门联合发布《国家发展改革委关于推进基础设施领域不动产投资信托基金（REITs）试点相关工作的通知》，“聚焦重点行业。优先支持基础设施补短板行业，包括仓储物流、收费公路等交通设施”^②。就地上而言，公路对经济的贡献非常显著，区域经济发展和道路交通建设的紧密关系可以启发思考低空经济发展对低空路网建设的依赖程度。本文通过借鉴并研究分析地面交通发展，量化分析低空路网带动的低空经济相关投资和就业经济效益。

2.1 低空路网经济效益

低空路网是一种新型的空中交通基础设施，其经济效益分析应遵循基础设施领域投资效益计算范式。宏观经济模型常被应用于计算基础设施领域投资的经济效益^[23]。其中，投入产出法是一种分析部门间经济关系的重要方法，通过建立投入产出数学模型定量分析投入量和产出总量间数学模型和技术经济参数，常用于经济预测和研究就业分配等社会问题^[24,25]。本文

尝试基于现有相关统计数据，参考传统交通基础设施效益估算经验数据，通过投入产出方法初步分析“低空天路”投资可能带动的社会经济效益。

2.1.1 低空路网经济效益计算

低空路网带动的经济社会效益计算流程（图1）是通过关联产业分析、完全消耗系数计算、投入产出模型构建等关键步骤计算国内生产总值（GDP）乘数和就业乘数。

（1）**关联产业分析**。将低空路网基础设施建设关联产业分为基础产业、核心产业和应用产业3类。其中，核心产业包括低空路网规划、低空路网建设、低空路网管理和低空路网养护（图2），低空路网规划和低空路网建设是2个不同的核心阶段，类似地上公路的规划和动工建设不同阶段。^①**低空路网规划**，需要在多源精准地理信息支持下进行航路规划、风险评估等核心算法研发和软件平台开发，形成低空运行风险地图；^②**低空路网建设**，主要是指沿途支撑安全运行基础设施的修建，包括低空通信、导航、监视、气象

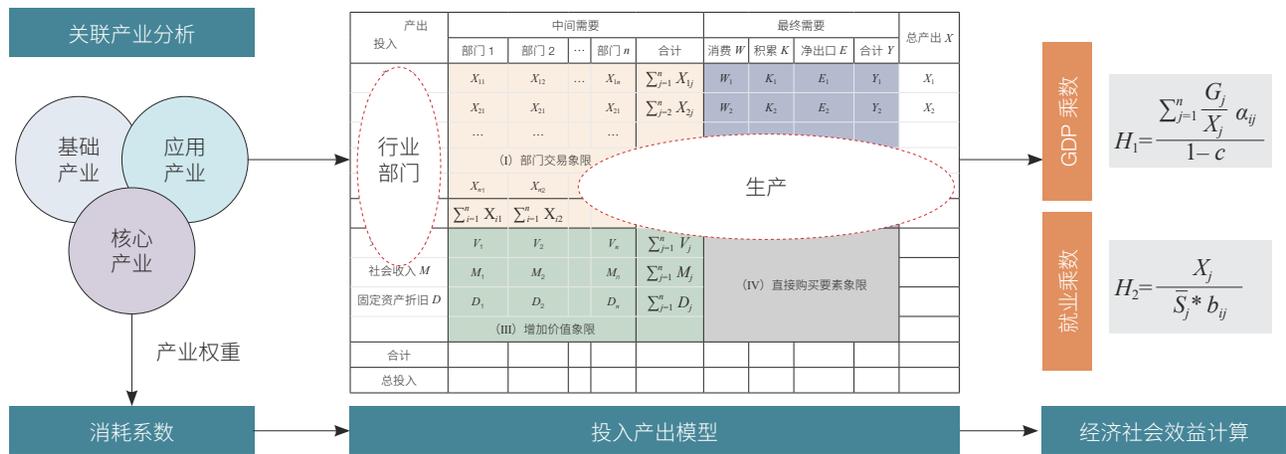


图1 低空路网经济社会效益计算流程

Figure 1 Roadmap of computing economic benefit of low-altitude air route network

① 交通运输部 国家发展改革委 财政部 农业农村部 中国人民银行 国家乡村振兴局关于印发《农村公路扩投资稳就业更好服务乡村振兴实施方案》的通知. (2022-08-09)[2024-10-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/20/content_5706227.htm.

② 中国证监会 国家发展改革委关于推进基础设施领域不动产投资信托基金（REITs）试点相关工作的通知. (2020-04-24)[2024-10-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/03/content_5508587.htm.

监测等设施，以及无人机常态化或临时起降枢纽和加油/充电相关设施的优化布局等；③ 低空路网管理，包括监管、运行调度/控制、融合交通与管理、场景管理、航路保险与认证、接口服务等；④ 低空路网养护，包括低空地图更新和基础设施检测等。

(2) 消耗系数计算和投入产出模型构建。基于国民经济产出表^[26]，计算得到低空路网及基础设施建设的投入产出消耗系数（图3）。根据计算，简单产出乘数为1.492 0，表明低空路网建设业增加1个单位的最终产品将对国民经济各部门产生近1.5个单位的生产需求。综合低空路网及基础设施修建关联产业的重要性评判结果，基于国民经济行业分类标准^[27]，通过建立低空路网修建关联产业与投入产出表部门对应关系得到各行业部门在低空路网及基础设施修建中所占权重，构建低空路网及基础设施建设的投入产出模型。

(3) 经济社会效益计算。通过投入产出模型估算表明，1亿元低空路网投资将带来超过2.8亿元GDP增长，带动约8 400个就业岗位，在地理遥感信息服务、

遥感测绘服务、通信、导航、监视等领域扩大内需，带动低空路网修建、定制、养护、管控、流量管理等行业需求。

2.1.2 低空路网经济效益分析

结合低空路网的产业分析，从地面道路过渡到“低空天路”是某种程度上由低端产业向高端产业发展，这意味着生产要素从生产率水平较低的行业流向生产率水平较高的行业，从而有了更高的边际生产率，会提高整个经济的生产效率，促进总量经济增长^[28]。因此，相对于地面路网，低空路网对GDP的拉动作用更大。

此外，低空路网拉动的产业除了看得见的传统交通产业（如机场、起降场、末端投递等），还有大量看不见的数字化、信息化产业（如海量低空地理信息和虚拟仿真产业）。行业生产率的进步能产生正向的溢出效应，间接创造出新商业范式、新就业形态和新就业岗位，尤其是发展信息技术等数字经济行业对就业的正向溢出效应将更加显著^[29,30]。因此，低空路网产业链能创造更多的就业岗位，超过公路投资带来的

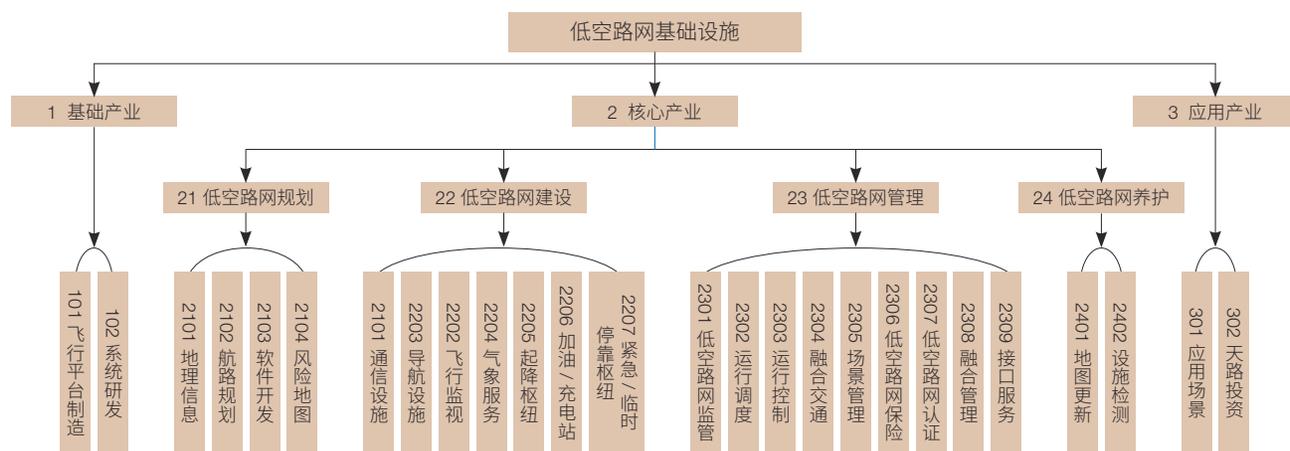


图2 低空路网基础设施建设关联产业分析

Figure 2 Analysis on connected industry for constructing infrastructures of low-altitude air route network

图中数字为各产业在本文中的编号代码

Figures are industry classification numbers for this study

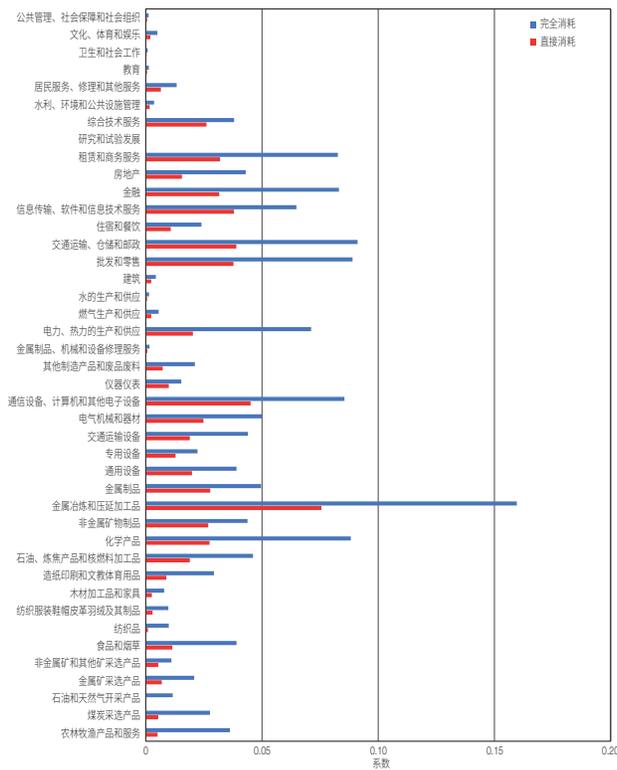


图3 低空路网及基础设施修建投入产出消耗系数结果

Figure 3 Result of input-output consumption coefficient of low-altitude air route network and infrastructure construction

横坐标数字表示生产低空路网及基础设施对于各部门完全消耗系数和直接消耗系数。

Horizontal figure represents the total consumption coefficient and direct consumption coefficient of production low-altitude air route network and infrastructure for each sector.

就业岗位数量^⑬。在完善的低空公共路网基础设施支持下，低空经济活动将从现在离散的科研验证、小范围商业试点应用发展到大范围、长距离、规模化、业务化的低空飞行活动，而低空经济范畴也将外延到运输服务，极大地释放低空经济潜力，例如外卖、快递等无接触配送服务以及由此带来的工业级无人机制造业、低空保障等业务类型。

2.2 低空路网科学研究现状

建设低空路网是释放低空经济潜力、催生低空经

济效益的可靠发展路径。然而，由于无人机监管和空域政策等顶层发展路线未定，国内外关于低空路网发展还存在争议，主要包括“隔离或融合”和“结构或自由”的路线分歧，以及“私家或公共”的属性分歧。

2.2.1 国外研究现状

以美国国家航空航天局（NASA）和美国联邦航空管理局（FAA）等为代表的美国研究或监管机构指出：① 无人机交通管理（UTM）系统应具有灵活性，建议无人机在400英尺（约122 m）以下空域隔离运行；② 面向城市地区建筑物高度以下的旋翼无人机飞行，提出空中通道（sky-lane）、空中管道（sky-tube）、空中走廊（sky-corridor）等多个空域结构^[31]；③ 面向中大型无人机，在AAM框架中提出走廊结构（corridor）和带航道的走廊（corridor with tracks）2种航路结构^[2]。

欧洲无人机监管机构对于低空路网保障空中交通安全这一观点是逐渐认可的。欧洲航空安全局（EASA）和欧洲单一天空空中交通管理研究（SESAR）联合执行体等机构提出相关低空路网保证观点。① 无人机隔离运行观点，航路被当作一种由自由飞行向隔离运行过渡的交通方式。将500英尺（约152 m）以下空域定义为无人机专属空域，并提出走廊结构作为更大高度层无人机载客/载货运行方式^[32]，通过结构化商业航线运行以区分无人机长距离飞行和自由飞行^[33]。② 低空路网作为一种缓解冲突风险的空域结构和技术手段。EASA还提出面向城市地区的载人垂起航空器按照预先定义的航线运行^[34]。然而，即使是在隔离运行阶段，仅依靠感知与避障（DAA）技术也不能保证高密度城市地区大规模无人机运行的安全性，故SESAR联合执行体研究通过包括固定三维航

⑬ 发展改革委:完善基础设施建设为经济发展攒后劲。(2008-12-02)[2024-10-10]. https://www.gov.cn/ztlz/kdxx/content_1165616.htm.

线网在内的空域结构来缓解碰撞风险^[35]。

新加坡的无人机监管工作由新加坡民用航空局 (CAAS) 牵头, 联合南洋理工大学研发了 uTM-UAS 系统, 并提出矩阵节点、建筑节点、道路沿线型 3 种城市空中航路网络^[36]。空中客车 (Airbus) 公司通过仿真模拟证明, 无序程度的上升将导致分离损失和碰撞概率增加、降低低空运行安全水平, 而航路策略能够保持空域秩序^[37]。Volansi 公司在制造厂和医疗中心间的人口密集区建立了专用空中走廊进行医疗运输, 其创始人认为地面公路网基础设施未来将被宜居的绿色空间和空中交通网所取代^⑭。

2.2.2 国内研究现状

国内各界对于低空路网的发展也持多样观点, 并探索具有学科特色的发展技术路线, 国内低空经济目前首要的需求行业是主要面向小、中型无人机的低空物流和低空货运。中国科学院地理科学与资源研究所

团队 (以下简称“团队”) 于 2017 年提出“低空公共航路”概念^[38], 即基于遥感和地理信息技术的低空公共航路规划与构建核心算法和关键技术^[39,40], 在北京、上海和杭州等多个试验区内分别就应急救援、海上运输和低空物流等多行业试点场景构建了低空路网 (图 4); 基于上述基础, 团队牵头制定了第一个低空运行国际标准 (IEEE 1939.1TM-2021)^[41]; 联合国内外无人机相关企业、科研院所以及地方政府部门联合发布了“天路宣言”^⑮, 为低空路网基础设施建设和低空经济建设拉开序幕。南京航空航天大学^[42]、北京航空航天大学^[43]、中国民航大学^[44]等院校的研究人员从航空航天学科角度进行低空航路航线的相关研究。

低空公共航路作为低空路网基础设施已有一定的探索性工作。科技零售公司美团和快递物流综合服务商顺丰速运都在试点城市运营自有的“私家”航路, 运营体制已经相对成熟, “私家”航路将可为未来低

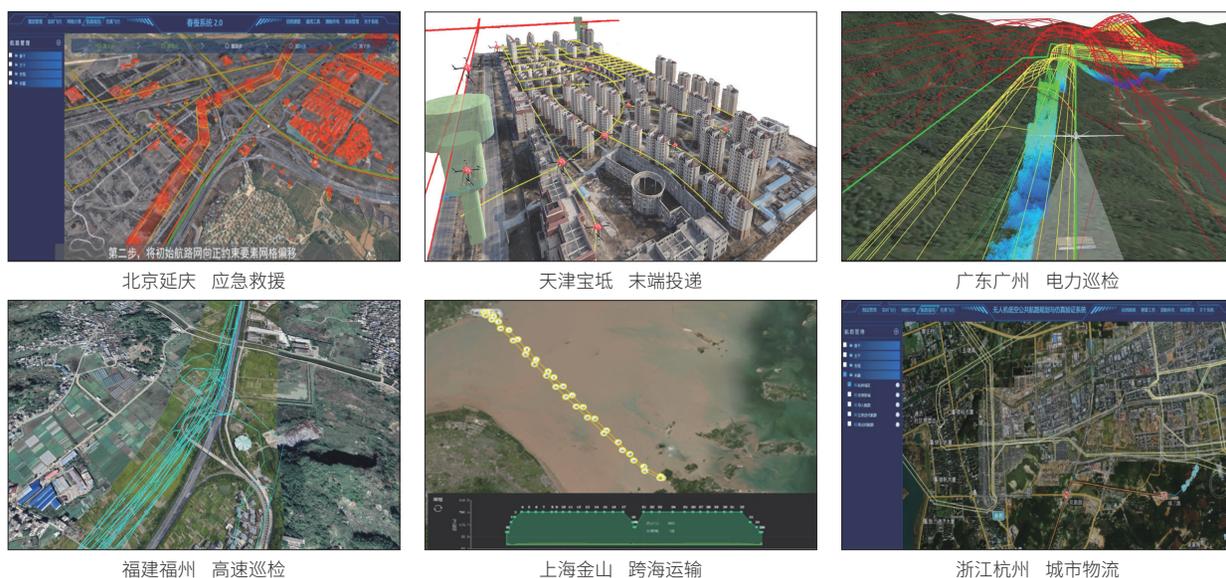


图 4 低空路网在民用无人驾驶航空试验基地 (试验区) 应用示范示意图^[45]

Figure 4 Demonstrated diagram of low-altitude route network application in civil unmanned aviation test base (test area)^[45]

⑭ Building the drone highways of the sky. (2022-12-22) [2024-10-12]. <https://www.smartcitiesdive.com/news/building-drone-highways-smart-city-sky/592581/>.

⑮ 2022 世界无人机大会在宝安举行,《天路宣言》公布. (2022-07-25)[2024-10-09]. http://www.laarlabs.cn/#/graphic/index/0/17/zonghe_news.

空公共路网建设提供有效补充，成为公共路网的一部分。然而，团队提出的低空公共航路是多用户和多任务共享的，不同于上述“私家”航路，该观点已在部分地区实践。例如，在杭州地区进行的常态化核酸标本无人机运输共享航路统筹了美团、杭州迅蚁网络科技有限公司和隶属于顺丰速运的丰翼科技（深圳）有限公司等多个用户，同时还联合国家电网有限公司与地方政府的协议共享航路实现了一次飞行同时巡检高压线路与水域的功能。

低空经济最迫切的是完成非管制空域低空路网的构建，让更多飞行器安全飞起来。本文研究团队提出的低空路网与其他研究提出的无人机隔离或融合运行并不冲突，低空路网既可以作为一种由自由飞行到隔离运行过渡阶段的交通方式，也可以作为隔离运行时期的特殊空域结构，不仅可以消减无人机与有人机、无人机与无人机之间的冲突，还可以保障低空飞行环境的安全性。同时，结合城市规划方案预先划设低空路网可以保障居民的隐私权利和噪音权利。无论是在自由飞行阶段、隔离运行阶段或融合运行阶段，低空路网均可作为保障无人机运行的基础设施，充分利用现有地面基础设施和优化布局低空新型基础设施，与地面交通协同发展。例如，珠海市政府已经前瞻性地认识到这一点，提出建设低空空域商业运营通道规划研究，拟划设“三横三纵”航路网^{①⑥}。

3 低空路网基础设施体系建设与空域收益探索

低空经济产业发展中后期在面向规模化无人机飞得起来与风险可控的双重需求下，不仅需要新建低空路网核心基础设施，还需要依托低空路网建设通导监

和气象等外部配套设施；应建立清晰的经济收益机制，制定相应政策吸引发展低空路网基础设施体系的投资。^①公司和私人投资者开始探索布局低空交通所需的基础设施资产。例如，美国亚马逊公司（Amazon）和美国优步公司（Uber）试图确定各种基础设施的成本和要求，设计了支持不同尺寸的电动垂直起降航空器（eVTOL）和运营量的垂直起降机场^{①⑦}。^②政府和公共机构对于空中交通基础设施的兴趣也在增长。例如，意大利拉齐奥大区、德国交通部、美国众议院分别宣布投资或加速建设无人机运输基础设施计划^⑧，FAA和EASA发布了世界首个垂直起降场设计规范^[46,47]，NASA也研发了垂直机场自动化系统以提升飞行安全性、效率和可扩展性^[48]，并提出建造空中高速公路的未来愿景^[49]。

本文研究团队在2022年首先提出低空路网新型基础设施体系^[22]，对通信、导航、监视和气象等面向低空和无人机的升级新型设施标明能力要求。本文将进一步结合国家立体交通发展需求，统筹空中与地面交通基础设施衔接、空中交通特有设施要求，结合团队在民用无人驾驶航空试验区的低空路网规划实践经验，探索低空路网基础设施建设的主要生命周期，并考虑低空经济发展需求特色，超前探索依托低空路网的空域收益等关键问题。

3.1 低空路网基础设施建设生命周期

低空路网基础设施建设的完整生命周期流程主要包括可行性研究、规划、构建及运行养护等环节，涉及空间遥感、摄影测量、地理信息、地图学和路径规划算法等技术。

3.1.1 可行性研究

遵循需求驱动原则，根据区域人口密度、低空应

^{①⑥} 珠海：2035年“天空之城”建设蓝图初现，全面建成规划方案已出炉。(2024-04-15)[2024-10-09]. http://www.szuavia.org/news_cen.php?cid=25&id=7470.

^{①⑦} Uber elevate “mega skyport” concept. [2024-10-11]. <https://www.bokapowell.com/projects/uber-elevate-mega-skyport-concept>.

^{①⑧} Unmanned Airspace. [2024-10-11]. <https://www.unmannedairspace.info/category/uncategorized/>.

用场景需求调研、产业发展基础及地面交通拥堵态势等多因子预测区域应用需求规模。调研区域禁飞区、限制区、告警区等低空空域环境，动态更新临时禁飞区信息，通过低空空域资源区划来分析无人机适飞空域的占比和空间分布，构建区域监管空域环境区划图。在此基础上，筛选并确定关于低空地理环境、电磁环境、大气环境等评价因子，进一步量化区域可飞行空域环境，结合区域的运输航路和通航机场及通信布局等低空交通基础设施布局现状，论证低空路网规划与构建的可行性（图5）。

3.1.2 低空路网规划

低空路网规划主要包括无人机起降枢纽空间布局、低空路网规划和建设及空地协同进近航路航线构建。

(1) 起降枢纽空间布局。基于区域低空环境特点、交通需求和流量预测分析，对地表建筑、通信、气象、人口等各类关键约束地理要素进行建模。在此基础上，进行低空空域资源的高效规划和精细管理，在地面交通可达、空域和通信条件良好等多目标约束条件下，以最大时效或最低成本为目标函数优化布局常态化、应急、临时的区域起降枢纽网络。为降低前期基础设施建设成本，可充分利用建筑物楼顶、通航机场等已有的城市地表设施，构建无人机地面起降枢纽

的最小设施集，包括起降场站及自动充电桩、通信、导航、小型气象服务站等，形成覆盖全区的多级多类别起降枢纽网络。

(2) 多层级低空路网。包括地表遥感、地理信息提取、低空网格化、网络构建和路径规划算法、获得最优航路（网）、仿真飞行验证、实际飞行验证等关键步骤^[41]。对应地面公路的分级体系，低空路网也需要根据机型、飞行任务类型和优先级，以及地表地理格局来设计城市分级空中路网，例如全国骨干航路、主干航路、支线航路和区域末端航路等。面向典型应用场景和特定机型，根据遥感影像识别出影响飞行的地表地理要素、政策规定的禁飞区、人口密集区、通信覆盖、大气等要素，通过自适应四维网格剖分与编码技术构建低空飞行环境，使用智能算法计算航路中心航线航点并迭代优化多级航路网，开展同一区域、同一时段下，多机、多用户运行多航道的时空资源配置，多机型、多行业共享宽兼容公共航路设计等关键技术，产出典型示范区的低空路网图。

(3) 空地协同的进近航路航线设计与运行调度。起降枢纽和空中路网之间的航路航线构建是实现空地高效协同的重要方式。为应对同一时刻多台无人机起降，需要对终端流量进行控制。可采用基于遗传进化算法的时间排序技术，以冲突风险最低为目标函数，

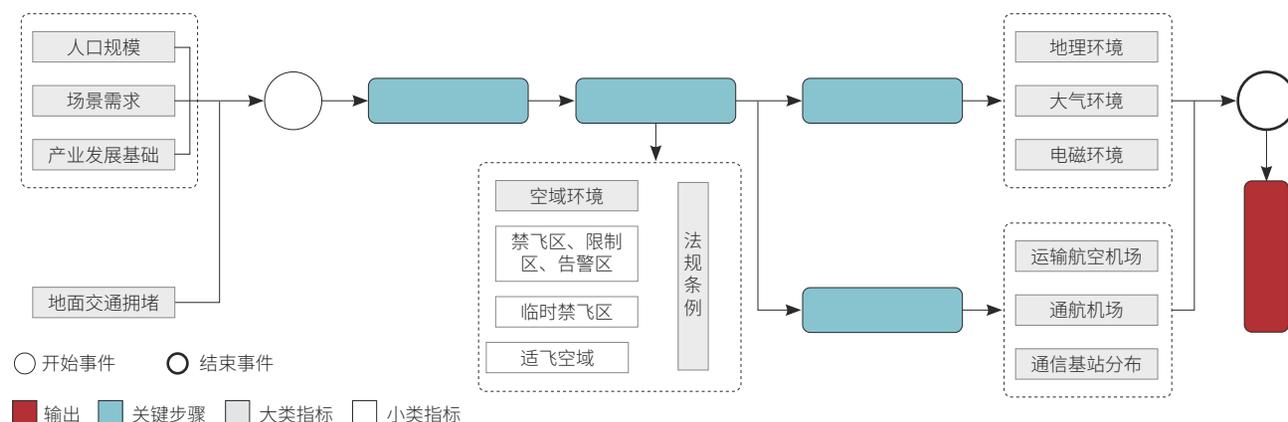


图5 低空路网建设的可行性分析基本流程

Figure 5 Process of feasibility study for constructing low-altitude air route network

通过重复交叉、变异过程，直到达到最大迭代次数或者获取目标函数的最优解。

3.1.3 低空路网构建

依靠地理空间信息技术手段，按照一定的低空路网施工建设标准，构建有边界的数字飞行廊道，包括基于主航线的航点，通过航空器性能和通导精度等因素研判设计的廊道边界。升级建设通导一体的外部基础设施体系，包括通信检测设备和小型通信基站设备、高精度导航定位设备（如基于实时动态载波相位差分技术的差分移动基站）、飞行安全监视设施（如地理围栏和无人机反制设备）、气象服务（如小型气象服务站）等外部支撑设施，并修建与地面交通设施接驳的无人机常态或临时起降枢纽站与加油站、充电站等设施。

3.1.4 低空路网运行养护

通过无人机云端管理系统与移动端增强现实（AR）管理系统对低空路网及基础设施进行三维可视化^[50]，实现路网运行态势的直观可视化监管，为基础设施现状的检测提供直观可视化手段。同时，高精度地图信息的全局和局部动态更新也是应对低空环境高动态变化的手段。

3.2 基于低空空域的空域收益探索

相比其他投资，交通基础设施投资回报率高，但同时也存在投资规模大、回报周期长、维护费用高等问题。为维持无人机低空运行的低水平风险，低空交通需要高带宽通信、高精度导航、精准气象监测等基础设施支撑，前期投入成本较高，一旦回报周期拉长便会阻滞低空路网经济发展。因此，需要超前探索基于低空空域的空域收益机制。

3.2.1 国外低空空域的空域收益探索经验

空域权利是空域收益的核心。

低空飞行活动迅速增长带来的空域权与空间权间的冲突（如噪声干扰和隐私侵犯等）是阻碍航空器商业活动良性运行的重要因素，也是低空经济可持续发展避不开的问题。美国为应对低空航空器活动给居民生活带来的噪声干扰和隐私侵犯及生命财产安全威胁等问题，各级政府主张土地所有者拥有空域排他权。例如，1946年，考斯比（Causby）经典空域产权案例中，美国国会裁定军队在私人土地上空活动侵犯了低空产权^[7]；Rule^[51]提倡基于微观经济学和财产理论，立法赋予土地所有者严格的权利，禁止航空器进入地块正上方明确高度的低空空域。然而，当前私人空域的高度界定仍不清晰。“足够低”到什么程度才会引发收购？飞行必须频繁到何种“足够频繁”程度才能要求支付合理的赔偿？这些问题都还需要进一步明确。

土地所有者的空域使用权利界定不清晰将严重阻碍公共通行权和空域收费系统的发展。商业无人机倡导者是私人空域权的反对者，他们认为取消或忽视土地所有者的空域权利是在全国范围内广泛开展商用无人机业务的唯一途径^[51]。为了调和私人空域和商业倡导者间的分歧，有学者和公司提出并实行在道路等公共空域上空构建公共通行权、针对私人空域构建空域收费体系的方案^[9]。例如，2014—2018年，美国伯灵顿北方圣太非铁路运输公司（BNSF）使用铁路用地范围内的空域进行了数百小时的远程无人机飞行^[52]。

3.2.2 国内低空空域的空域收益探索

国内尚未明确空域所有权主体及其与空间权的界限，也没有私人空域。在当前无人机运行的城市试点工作中，均是以牺牲部分公众空间权（如噪声和隐私权益）来修建由企业或公司主体运营的“私家”航路。然而，随着未来数以万计无人机在低空活动，空

^[9] Drones, airspace, and the sharing economy. (2022-06-11)[2024-10-11]. <https://www.mercatus.org/research/research-papers/drones-airspace-and-sharing-economy>.

域权和空间权的法律关系将在地面范围呈现出一种交织状态，这种以损失单方面利益的做法将会导致越来越多的企业日常运营与公共利益发生冲突，应提出从根本上解决空域权与空间权冲突问题的方法。

本文提出一种由政府顶层建设低空路网及依托低空路网的空域收益机制来缓解私人抵制和长距离商业航空活动间矛盾的技术方案。参考地面道路建设时建立隔音设施或采用经济补贴手段来保障沿路居民的噪声权益，相关部门可以行使空间征用权并给与赔偿或补贴以消减土地使用者的抵制，在某些最需要无人机进入的瓶颈位置创建开放的低空路网。同时，监管部门从空域租赁获得的收入可以用于低空路网的建设和管理。在低空经济国家战略背景下，空域权与空间权都有着为无人机低空路网建设让渡其自身权利的义务和能力^[8]。低空路网是一种无需清晰界定居民空域使用边界即可实现无人机大范围跨区飞行的有效手段，也将是一种由政府主导的缓解空域权和空间权矛盾、补偿因低空飞行活动而空间权受损公众利益的有效手段。2024年4月1日，由中国民用航空局主导发布的《民航空管收费行为规则》^[53]正式实施，其中的“航路费”可以看作是基于低空路网的空域收益体系的先导概念。

4 总结与展望

低空经济发展过程中，规模化无人机应用发展潜力很大，对产业链带动显著。以无人机为主的低空航空器规模化发展瓶颈——“低空路网”缺失，制约了以航空器低空运行为核心的经济活动，从而制约了多用户规模化航空器应用潜力的释放。解决低空经济发展的“路”瓶颈将解锁低空经济的大发展，投资规划和建设低空经济发展“动脉”基础设施，在GDP增长、就业拉动和扩大内需等方面效益显著。区域低空经济发展有望在先行发展低空经济“动脉”的低空路网基础设施支撑保障下得到迅猛的发展。2021年，

《国家综合立体交通网规划纲要》^①明确创新投融资政策、鼓励采用多元化市场融资方式拓宽融资渠道。本文初步量化分析了投资低空路网的社会经济效益，对于地方发展低空经济招商引资，尤其是通过贷款修路等方式拓宽社会资本融资渠道支持低空路网基础设施建设有参考价值，建议从以下3个方面探索低空路网的空域收益机制：**① 低空空域精细化管理**。对低空空域进行精细网格剖分，根据低空路网所穿行的低空空域单元，研发分布式收费系统。例如，根据空域单元对居民隐私和噪声的影响程度，划分空域赔偿补贴标准，以保障公众隐私安全和噪声权益。**② 空域资源经济效益最大化**。在城市核心商务区及交通枢纽节点，结合空域信息的高动态更新特点，构建占用和释放二元变量，设置流量占用收费模式，形成分布式空域计费，以提高资源配置的市场化潜力。**③ 超前布局与城市规划协同发展的路网政策**。城市高层建筑和摩天大楼对于城市低空空域的占用也增加了低空空域的价值，通过容积高度和倒退规则来限制建筑规模可以加强城市低空空域资源的经济价值。

低空路网及基础设施建设是一个巨大的系统工程，涉及学科众多，本文不能全面概括，下一步需要深入探讨的3个要点包括：**① 完善低空路网建设机制**。综合考虑融资、拥有成本、维护和监管等多因素，明确低空路网的规划、建设、拥有和管理通信、导航、监视和气象服务等地面基础设施的权责部门。可以按照“规划—构建—试点—推广”4阶段来分步实施。**② 构建低空路网建设的标准化体系**。研究低空路网规划的体系化试点，从低空路网的踏勘、规划、构建、验证、风险评估、验收，以及规划资质认证等方面构建一套完整的低空路网制度化、业务化规划建设标准流程。**③ 研究城市空中交通服务系统的试点建设**。结合“低空天路”网络体系化试点，开展集城市空中交通情报服务、飞行计划管理服务、交通流量监控服务、运行风险评估等于一体的综合性运行验证，

研究构建低空路网运行规则体系、标准体系、法规体系。

参考文献

- 廖小罕. 城市空中交通发展与路网基础设施建设. 中国空管, 2023, (5): 11-14.
Liao X H. Urban air mobility development and infrastructure construction of road network. China Aviation Management, 2023, (5): 11-14. (in Chinese)
- Bradford S. UAM ConOps v1.0. Washington, DC: FAA, 2020.
- Gipson L. Advanced Air Mobility Mission. Washington, DC: NASA, 2022.
- Choi J H, Park Y. Exploring economic feasibility for airport shuttle service of urban air mobility (UAM). Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2022, 162: 267-281.
- Garrow L A, German B J, Leonard C E. Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 1-31.
- Demsetz H. Some aspects of property rights. The Journal of Law and Economics, 1966, 9: 61-70.
- Skorup B. Drone technology, airspace design, and aerial law in states and cities. Akron Law Review, 2022, 55(1): 4.
- 江昊. 低空空域权与空间权的冲突调和路径. 郑州航空工业管理学院学报(社会科学版), 2020, 39(3): 23-31.
Jiang H. The conflict and harmony path between low altitude airspace right and space right. Journal of Zhengzhou University of Aeronautics (Social Science Edition), 2020, 39 (3): 23-31. (in Chinese)
- 李晓津, 王志强, 邓戡. 空域资源经济价值研究与应用. 价格理论与实践, 2013, (12): 89-90.
Li X J, Wang Z Q, Deng J. Research and application of economic value of airspace resources. Price: Theory & Practice, 2013, (12): 89-90. (in Chinese)
- 杜欣儒, 路紫, 郗方, 等. 灵活空域使用的设计方法与应用及其时间替代机制. 地球科学进展, 2016, 31(6): 643-649.
Du X R, Lu Z, Gao F, et al. Design method, application and time alternative mechanism of flexible use of airspace. Advances in Earth Science, 2016, 31(6): 643-649. (in Chinese)
- 董雅晴, 路紫, 张一诺, 等. 航空流网络解构与空域资源动态配置研究——以京-成空中廊道为例. 地理与地理信息科学, 2022, 38(1): 116-123.
Dong Y Q, Lu Z, Zhang Y N, et al. Deconstruction of air traffic flow network and dynamic allocation of airspace resources: A case study of Beijing-Chengdu corridor-in-the-sky. Geography and Geo-Information Science, 2022, 38(1): 116-123. (in Chinese)
- Gao Q, Hu M H, Yang L, et al. GIS-based spatial patterns analysis of airspace resource availability in China. Aerospace, 2022, 9(12): 763.
- Cho J W, Yoon Y J. How to assess the capacity of urban airspace: A topological approach using keep-in and keep-out geofence. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.
- 廖小罕, 黄耀欢, 徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨. 地理学报, 2021, 76(11): 2607-2620.
Liao X H, Huang Y H, Xu C C. Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607-2620. (in Chinese)
- 路紫, 李志勇, 张志雯, 等. 空域学概论. 北京: 高等教育出版社, 2016.
Lu Z, Li Z Y, Zhang Q L, et al. Introduction to Airspace Studies. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- 卜鹏楼. 低空经济、通航产业: 辽宁发展新动力. 辽宁经济, 2013, (8): 9-15.
Bu P L. Low-altitude economy and civil aviation industry: A new driving force for Liaoning development. Liaoning Economy, 2013, (8): 9-15. (in Chinese)
- 覃睿, 李卫民, 靳军号, 等. 基于资源观的低空及低空经济. 中国民航大学学报, 2011, 29(4): 56-60.
Qin R, Li W M, Jing J H, et al. Low altitude economy based on resource-based view. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(4): 56-60. (in Chinese)
- 覃睿. 再论低空经济: 概念定义与构成解析. 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. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2023, 41(6): 59-64. (in Chinese)
- 19 晏磊, 廖小军, 周成虎, 等. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 476-495.
Yan L, Liao X H, Zhou C H, et al. The impact of UAV remote sensing technology on the industrial development of China: A review. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(4): 476-495. (in Chinese)
- 20 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空互联网与无人机产业应用. *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. *Progress in Geography*, 2021, 40(9): 1441-1450. (in Chinese)
- 21 段昌森. 民用无人驾驶航空试验区发展概况. *无人机*, 2022, (6): 36-39.
Duan C M. Overview of the development of civil unmanned aerial vehicle test zones. *Drone*, 2022, (6): 36-39. (in Chinese)
- 22 廖小军, 徐晨晨, 叶虎平, 等. 无人机应用发展关键基础设施与低空公共航路网规划. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 977-988.
Liao X H, Xu C C, Ye H P, et al. Critical infrastructures for developing UAVs' applications and low-altitude public air-route network planning. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 977-988. (in Chinese)
- 23 Deng T. Impacts of transport infrastructure on productivity and economic growth: Recent advances and research challenges. *Transport Reviews*, 2013, 33(6): 686-699.
- 24 林晓言, 陈有孝. 基础设施投资效果定量评价. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2005.
Lin X Y, Chen Y X. Quantitative Evaluation of Infrastructure Investment Effectiveness. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2005. (in Chinese)
- 25 Yu H T. A review of input-output models on multi-sectoral modelling of transportation-economic linkages. *Transport Reviews*, 2018, 38(5): 654-677.
- 26 中华人民共和国国家统计局. 2020年全国投入产出表. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2021.
National Bureau of Statistics. 2020 National Input Output Table. Beijing: National Bureau of Statistics, 2021. (in Chinese)
- 27 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4754-2017 国民经济行业分类. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. GB/T 4754-2017 Industrial classification of national economic activities. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration, 2017. (in Chinese)
- 28 吴利学. 产业结构、生产率与经济增长. *产业经济评论*, 2021, (6): 14-30.
Wu L X. Industrial structure, productivity and economic growth. *Review of Industrial Economics*, 2021, (6): 14-30. (in Chinese)
- 29 魏熙晔, 郭东杰. 生产率提升对就业的影响——挤出效应还是溢出效应. *当代财经*, 2022, (4): 15-27.
Wei X Y, Guo D J. The impact of productivity growth on employment: crowding out effect or spillover effect. *Contemporary Finance & Economics*, 2022, (4): 15-27. (in Chinese)
- 30 Autor D, Salomons A. Robocalypse now—Does productivity growth threaten employment?// *Investment and Growth in Advanced Economie*. Sintra: European Central Bank Annual Conference, 2017.
- 31 Jang D S, Ippolito C, Sankararaman S, et al. Concepts of airspace structures and system analysis for UAS traffic flows for urban areas// *Information System*. Texas: AIAA SciTech Forum, 2017.
- 32 SESAR Joint Undertaking. U-space CONOPS 4th Edition. Brussels: SESAR Joint Undertaking, 2022.
- 33 EUROCONTROL, EASA. UAS ATM Integration: Operational Concept. Cologne: EUROCONTROL, EASA, 2018.
- 34 EASA. Introduction of a Regulatory Framework for the Operation of Drones. Cologne: EASA, 2022.
- 35 Polishchuk V, Sunil E, de Vries V, et al. Metropolis 2 D4.1: Concept Design Report. Brussels: SESAR Joint Undertaking, 2021.

- 36 Salleh M F B M, Chi W C, Wang Z K, et al. UAS for Urban Environments and Other Topics. Florida: AIAA Information Systems-AIAA Infotech, 2018.
- 37 Balakrishnan K, Polastre J, Mooberry J, et al. The Roadmap for the Safe Integration of Autonomous Aircraft. California: Airbus, 2018.
- 38 廖小罕, 徐晨晨, 岳焕印. 基于地理信息的无人机低空公共航路规划研究. 无人机, 2018, (2): 45-49.
- Liao X H, Xu C C, Yue H Y. Research on UAV low-altitude public air route planning based on geographic information. UAV, 201, 8(2): 45-49. (in Chinese)
- 39 Xu C C, Liao X H, Yang F. IEEE standard pioneered an IT-led interdisciplinary approach to structure low-altitude airspace for UAV operations. Science China Information Sciences, 2022, 65(10): 207201.
- 40 Xu C C, Liao X H, Ye H P, et al. Iterative construction of low-altitude UAV air route network in urban areas: Case planning and assessment. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9): 1534-1552.
- 41 IEEE Communication Society. IEEE 1939.1TM-2021 IEEE 1939.1 standard for a framework for structuring low altitude airspace for UAV operation. Beijing: IEEE Communication Society, 2021.
- 42 Li S, Zhang H H, Yi J, et al. A bi-level planning approach of logistics unmanned aerial vehicle route network. Aerospace Science and Technology, 2023, 141: 108572.
- 43 Quan Q, Li M X, Fu R. Sky highway design for dense traffic. IFAC-Papers OnLine, 2021, 54(2): 140-145.
- 44 赵巖飞, 郑雨欣. 城市物流无人机飞行任务剖面构建与优化. 飞行力学, 2021, 39(3): 54-59.
- Zhao Y F, Zheng Y X. Construction and optimization of flight mission profiles for urban logistics drones. Flight Dynamics, 2021, 39(3): 54-59. (in Chinese)
- 45 徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 等. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径. 地理学报, 2020, 75(5): 917-930.
- Xu C C, Ye H P, Yue H Y, et al. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: Theoretical system and technical roadmap. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 917-930. (in Chinese)
- 46 FAA. AC 150/5390-2C: Heliport Design. Washington, DC: FAA, 2012.
- 47 EASA. Vertiports: Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category. Cologne: EASA, 2022.
- 48 NASA. High Density Vertiplex Subproject. Washington DC: NASA, 2022.
- 49 Gipson L. Building the Infrastructure for Advanced Air Mobility. Washington, DC: NASA, 2022.
- 50 Tan J M, Ye H P, Xu C C, et al. SkyroadAR: An augmented reality system for UAVs' low-altitude public air route visualization. Drones, 2023, 7(9): 587.
- 51 Rule T A. Airspace in an age of drones. Boston University Law Review, 2014, 95: 155-208.
- 52 U. S. Government Publishing Office. Keeping pace with innovation—Update on the safe integration of unmanned aircraft system into the airspace. Washington DC: U. S. Government Publishing Office, 2018.
- 53 中国民航局发展计划司. 民航空管收费行为规则. 北京: 中国民航局发展计划司, 2024.
- Development Planning Department of Civil Aviation Administration of China. Rules on Air Traffic Management Charges in Civil Aviation. Beijing: Development Planning Department of Civil Aviation Administration of China, 2024. (in Chinese)

Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy

LIAO Xiaohan XU Chenchen* YE Huping

(1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Key Laboratory of Civil Aviation Low-Altitude Geographic Information and Route,

Civil Aviation Administration of China, Beijing 100101, China)

Abstract Low-altitude airspace is a resource that needs to be fully explored, and the low-altitude economy is a new type of economic activity resulted from low-altitude airspace exploration and utilization. As the primary players of low-altitude flight activities, the commercialization and wide applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) are promoting the prosperity of the low-altitude economy. A low-altitude air route network is an effective means to ensure the safe and efficient operations of a large number of UAVs, and it is also a new key infrastructure hosting low-altitude traffic. The history shows that the investment on public transport infrastructure as a policy tool to help economic growth has been widely used; similarly, investment on and construction of the low-altitude air route network infrastructure will yield significant social and economic benefits and foster a landscape rise of the low-altitude economy. Addressing the current issues of vague definitions and development paths in the low-altitude economy, this study attempts to propose a technical solution from the perspectives of geography science by constructing low-altitude air route network infrastructure and an airspace revenue mechanism to unlock the potential of the low-altitude economy.

Keywords low-altitude economy, low-altitude air route network, low-altitude infrastructure, airspace revenue

廖小罕 中国科学院地理科学与资源研究所研究员,中国民用航空局低空地理信息与航路重点实验室主任。主要研究领域:无人机低空航路规划构建,低空空域资源开发利用,无人机区域组网观测,无人机遥感应用,无人机遥感大数据等。

E-mail: liaoxh@igsnr.ac.cn

LIAO Xiaohan Professor at Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). Director General of Key Laboratory of Civil Aviation Low-Altitude Geographic Information and Route, Civil Aviation Administration of China (CAAC). His main research areas include UAV low-altitude air route planning and construction, low-altitude airspace resource development and utilization, UAV regional networked observation, UAV remote sensing applications, and UAV remote sensing big data. E-mail: liaoxh@igsnr.ac.cn

徐晨晨 中国科学院地理科学与资源研究所助理研究员,中国民用航空局低空地理信息与航路重点实验室副秘书长。主要研究领域:无人机低空航路规划,无人机遥感应用。E-mail: xucc.14s@igsnr.ac.cn

XU Chenchen Assistant Professor of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). Deputy Secretary General of Key Laboratory of Civil Aviation Low-Altitude Geographic Information and Route, Civil Aviation Administration of China (CAAC). Her research focus on UAV low-altitude air routes planning and UAV remote sensing applications.

E-mail: xucc.14s@igsnr.ac.cn

■责任编辑:文彦杰

*Corresponding author