

低空经济时代城市空中交通公共航路发展思考

廖小罕^{1,2}, 屈文秋³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 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; 3. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际创新学院), 浙江 杭州 311115)

摘要: 随着低空经济被正式列为国家战略新兴产业和新质生产力的重要组成部分, 2024年已成为中国低空经济发展的“元年”, 标志着低空时代的全面开启。作为低空经济发展的核心领域, 城市空中交通(UAM)的发展路径成为当前研究重点。低空公共航路作为支撑低空经济的新型基础设施, 有望成为推动城市空中交通发展的基础性前提和关键突破口。首先系统梳理了低空经济、城市空中交通及低空公共航路的核心概念与发展现状; 其次创新性地提出, 发展低空公共航路需要深化城市管理体制变革, 明确政府作为航路网规划建设的主体责任, 通过航空部门与城市管理体系的协同创新, 为培育城市空中交通新质生产力提供制度保障; 最后深入分析了低空公共航路建设投资对促进低空经济全产业链发展的多重效应。

关键词: 低空经济; 城市空中交通; 低空公共航路; 体制机制改革

Development of Public Air-Routes for Urban Air Mobility in the Era of Low-Altitude Economy

LIAO Xiaohan^{1,2}, QU Wenqiu³

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Low Altitude Geographic Information and Air Route, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100101, China; 3. Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University, Hangzhou Zhejiang 311115, China)

Abstract: With the low-altitude economy officially enlisted as an important component of the national strategic emerging industry and new quality productivity, 2024 is called the ‘first year’ of low-altitude economy, signaling the approaching of the low-altitude era. As the core area of low-altitude economic development, the development path of Urban Air Mobility (UAM) has become a current research focus. Low-altitude public routes, as an important infrastructure for UAM, may serve as a fundamental driver to drive the development of UAM. Firstly, this paper systematically reviews the core concepts and development status of the low-altitude economy, UAM, and low-altitude public routes. Then, the paper innovatively proposes that low-altitude public routes development requires deepening urban management reform and establishing the government entity of corresponding planning, and providing institutional guarantees for cultivating new quality productivity in UAM through the collaborative innovation of the aviation department and the urban management system. Finally, the paper analyzes the multiple effects of low-altitude public routes construction investment on promoting the development of the entire industrial chain of the low-altitude economy.

Keywords: low-altitude economy; urban air mobility; low-altitude public air-routes; institutional mechanism reform

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 国家重点研发计划“复杂环境无人机全时全域组网观测技术与综合验证”(2023YFB3905705)、杭州市自然科学基金资助项目“城市低空空交通规则布局研究”(2024SZRYBG030001)

作者简介: 廖小罕(1963—), 男, 贵州贵阳人, 博士, 二级研究员, 博士生导师, 研究方向为空间遥感应用、无人机应用与管控、低空航路规划, 电子邮箱 liaoxh@igsrr.ac.cn。

0 引言

低空经济在中国发展迅速, 已成为战略

性新兴产业。2021年2月, 中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》中明确提出建设多层次一体化国家综合交通

枢纽系统，“低空经济”一词第一次出现在官方文件^[1]。2024年3月，政府工作报告明确提出“积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”^[2]，低空经济概念成为全国关注的焦点。2024年7月，二十届三中全会通过《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》(以下简称《决定》)，明确提出大力发展低空经济，自此支持发展低空经济纳入国家最高决策层级^[3]。国家部委层面和地方政府纷纷对低空经济的发展做出积极回应，截至2024年10月，全国已有超过25个省市将低空经济纳入地方政府工作报告^[4]。

规划未来城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)快速引起关注，其核心驱动力源于电动垂直起降航空器(electric Vertical Take-Off and Landing, eVTOL)的关键技术突破，以及该技术规模化应用后可能带来的惠及大众出行的UAM方式。UAM作为一种商业化服务的交通方式其实早已存在。长期以来，直升机一直被应用于城市运输，主要服务于商务人士和公务出行，这是早期UAM的表现形式。由于载具事故频发，加之运输价格较高，噪声和尾气排放严重，UAM的商业化进程相对缓慢。载人eVTOL的成功研发，有望大幅提高现有空中载具的安全性，同时降低运营成本，并减少因燃油排放带来的环境污染。eVTOL技术与汽车制造技术的融合发展正在引领城市交通载具的创新变革，极大地提升了公众对未来出行方式的期待。

然而，城市低空环境复杂，飞行约束要素众多且更新快，加之各类型航空器间的任务类型、应用领域^[5-6]、机型、安全间隔以及气动特性差距大，飞行性能及操控方式多样，严重影响航空器的安全运行^[7-8]。同时，商业化运行背景下航空器运行将呈现流量大、密度高、飞行性能及操控方式多样的交通流特性，这要求UAM系统具备大规模集群飞行的高效管控能力。因此，如何在复杂的低空空域环境中，构建多用户、多机型航空器的协同运行体系，确保其安全性与运行效率，是实现低空经济高质量发展的关键技术瓶颈，也是无人机管控系统亟待解决的核心问题。

常用的低空管控方法主要为地理围栏^[9]和无人机交通管理走廊^[10-11]，但这些管控措施并不适用于多机型、多应用场景的低空经

济时代，无法保障多类型航空器同时运行的安全性^[12]。低空商业化、规模化的运行场景对UAM系统的自动化程度提出了较高的要求。例如，在AirMatrix^[13-15]的网格化场景中，现有的通信、导航、监视技术很难满足实时更新的UAM空域网格与eVTOL状态的需求。

鉴于低空空域资源的公共属性^[16]，国家对其采取类似地面土地资源的交通用地规划模式——通过系统性路网规划建设提升空域利用效率，是实现公共资源集约化开发的有效路径之一。其核心在于构建低空公共航路体系：在低空空域内划设多航空器同时飞行的低空公共航路，这或许是UAM可行的管控方法。低空公共航路是一种面向多类型航空器、多用户、多行业共享使用的公共通道，是UAM的基础设施之一。通过合理规划低空公共航路网，可在顶层设计层面约束不同类型、不同任务需求航空器的飞行路径，使有限的低空空域在零冲突的前提下容纳更多不同机型、不同任务的载具，这是对航空器进行精细化管控的体现^[17-18]。

本文对低空经济时代UAM航路网基础设施发展进行讨论，分析低空公共航路网建设为何亟须城市管理体制改革以及加强航路网建设投资，以有效带动低空经济的发展。

1 基本概念

1.1 低空经济

低空经济是一种由中国开创的新经济现象，定义为以航空载运与作业装备为主要工具、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、由系列经济活动构成的经济领域^[19]。低空经济涉及的航空器主要包括eVTOL、飞行汽车以及直升机，最终产出的低空飞行活动包括UAM运输、低空娱乐飞行以及低空作业飞行等。

低空经济产业链与无人机相似，包括航空器制造、航空器研发与设计、飞行保障以及综合服务等多个方面。产业链上游主要为航空器的制造与研发，其中包括各类金属材料与复合材料的研发、载具的零部件制造、载具与工业软件的设计与研发。产业链中游主要为载具分系统的设计与集成，分系统包括动力系统、飞控系统、地面系统以及任务载荷等。产业链下游主要为低空应用服务与运行保障，包括电力巡检、农林植保、

UAM等行业应用, 载具维修与充电服务, 载具运行保障服务(通信、导航、监视)。

早在2010年,《国务院 中央军委关于深化我国低空空域管理改革的意见》(国发〔2010〕25号)就提出,支持大力发展通用航空,繁荣航空业^[20],意味着低空空域管理改革启动。2021年,《国家综合立体交通网规划纲要》提出建立安全可靠的现代化高质量国家综合立体交通网,开启了发展安全可靠低空空域交通新阶段^[1]。2023年5月,国务院、中央军委公布《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》^[21]。2023年12月,中央经济工作会议将低空经济纳入战略新兴产业^[2]。2024年2月,中央财经委员会第四次会议鼓励发展与低空经济、无人驾驶等结合的物流新模式^[22]。2024年3月,全国两会政府工作报告明确提出“积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”^[23]。2024年7月,《决定》明确提出发展通用航空与低空经济,低空经济元年自此拉开序幕^[3]。2024年年初以来,珠三角、长三角和全国多地出台政策和措施,支持和补贴具备条件的城市开通市内和城际低空客运、货运、观光等航线,建立城际间低空空域交通走廊。社会资本对空中交通领域的投资接连不断,eVTOL的大额订单消息此起彼伏,标志着UAM进入了快速发展轨道。

1.2 城市空中交通

2018年,以eVTOL为核心载具的UAM概念被美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)明确提出,并定义为服务城市及其周边旅客与货物空中运输的安全高效系统^[24]。自此UAM作为未来城市空中交通的专用名词,迅速获得学术界、工业界和投资界的认可并广泛使用。与早已存在几十年的传统UAM概念相比,未来UAM的核心特征在于其安全高效系统。

UAM最早在20世纪50年代就已经出现,主要运营商为洛杉矶航空与纽约航空,开展的业务为运输邮件与人员^[25-26]。70年来,尽管UAM在纽约市经历了多款机型的更替、多次事故,以及城市停机坪位置的多次变更,但它一直保持运行。此阶段是UAM发展的萌芽时期,可用于空中交通运输的航线数量少、服务费用高昂,多用于商务人士。

随着无人机载具技术实现关键突破,发

展未来UAM引发了全社会关注,学术界和产业界提出了许多设想。U-space提出建立在指定空域内对UAM进行管控的系统,集成多种服务,包括通信、导航、监视以及气象预报等^[27]。南洋理工大学提出利用动态的空中网格对低空空域的航空器进行管控^[28-30]。优步(Uber)提出了UAM运输白皮书,认为UAM十分具有市场潜力,能极大提高城市运输效率^[31]。NASA开发了无人机交通管理系统(UAS Traffic Management, UTM),并将其开发验证分为4个技术阶段(Technical Capability Level, TCL)^[32-34],内容包括UAM相关基础概念、管控系统与航空器的数据传输、航空器自主避撞以及UAM管控网络所需配置的基础设施等。此外,考虑航空器、空域使用以及社会接受度等方面的因素,NASA提出了UAM成熟度模型(UAM Maturity Levels, UML)^[35]。此模型将UAM的发展分为3个阶段6个层级,并对每一阶段及其对应的两个层级所需面对的挑战进行分析。

2021年,NASA进一步提出先进空中交通(Advanced Air Mobility, AAM)的概念。AAM相比于UAM概念的范围更广,包含城郊、乡村等场景。为加快推动AAM发展,美国参众两院通过了AAM协调与领导力法案,授权美国交通部开始落实产业生态的发展计划,特别是载客航空器产品^[36]。

UAM商业化试点工作已经在全球范围内迅速启动,例如刀锋(Blade)与优步^[37]开展了试点。在物流配送方面,UAM一般用作食品配送与紧急医疗物资配送。Flytrex与多家餐厅合作,使用无人驾驶航空器提供配送服务^[38]。城市足迹(Urban Footprint)与美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)合作,在城郊地区进行医疗物资的配送^[39]。此外,空中客车公司在巴西^[40]、墨西哥^[41]与当地第三方空中运输平台合作,乘客可通过第三方软件Voom平台下单直升机运输服务。中国杭州蚂蚁网络科技有限公司早在2020年就已经利用无人机开展医疗检验检疫用品的配送服务,至今已在合肥、南京、自贡以及德阳等多个城市建设医疗用品运输航线。亿航智能生产的EH216-S无人驾驶载人航空器是全球首个三证齐全的eVTOL,已获得型号合格证(Type Certificate, TC)、适航证(Standard Airworthiness Certificate, AC)和生产许可证(Production

Certificate, PC), 并在湖南吉首、深圳、烟台、广州以及佛山等多个城市进行了载人飞行演示。

UAM包含载人与载货场景，本质上是城市交通系统在向低空延伸发展，如图1所示。建设UAM涉及的内容包括空域划设、航路规划、运行规则、低空管制、流量控制、容量评估、风险评估、基础设施以及载具，UAM各部分内容之间的联系如图2所示。从城市交通角度来看，UAM是城市综合立体交通的一部分、是道路的低空拓展，与小汽车、公共汽车一样，是居民出行可选择的交通方式之一。将UAM融入城市综合交通体系时，需充分考虑不同交通方式间的多式联运，因此需对UAM的交通特性、基本概念、基本内容进行全面分析。从民航角度来看，UAM是通用航空的拓展，其运行具备民用航空的相关特性，针对UAM基础设施的研究应充分考虑其运输与运行双重特性。

传统UAM使用的载具主要为直升机，以燃油为动力原料，以涡轮轴发动机和活塞式发动机为动力系统，污染排放高且出行成本高昂。单桨系统安全冗余度少，事故高，致死率高。传统直升机飞行运行不依靠公共导航通信基础设施，没有UAM系统提供统一的服务。而对于未来UAM，载具更加多样化，包括直升机、eVTOL以及飞行汽车等。动力能源的发展趋势以绿色、环保的电驱动为主，以油电混合动力为辅，运行成本低、污染排放少。未来UAM的运行成本在普通城市居民的消费水平内，规模化运行于城市低空空域内，因而被期望能按需响应居民出行需求、缓解道路交通拥堵。此外，新型载具的动力推进系统主要为分布式结构，安全冗余度高，其运行基础设施主要依靠公共导航通信基础设施，接受城市集中管控系统的控制，可以规模化运行。未来UAM与传统UAM的区别如表1所示。

1.3 低空公共航路

低空公共航路是一种基于精准地理信息数据、动态地理围栏、近地面气候条件以及高速路网(由高速公路、城市快速路等构成)、移动公网等基础设施，为多航空器同时运行预先规划，面向公众开放的结构化航路网络，是低空空域航空器安全、高效运行的保障性新型基础设施。交通基础设施的公

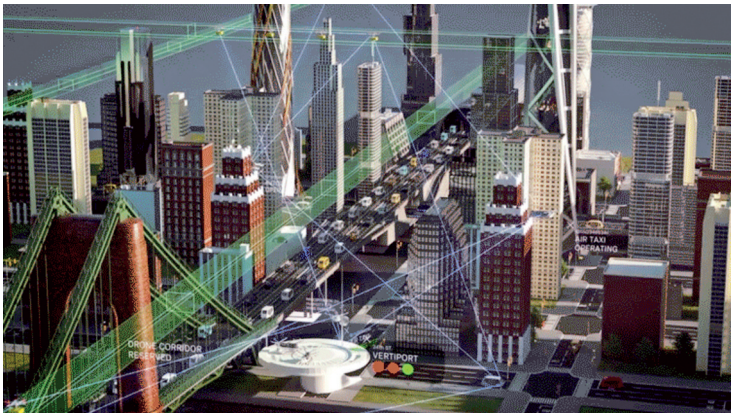


图1 UAM/AAM概念图
Fig.1 The concept of UAM/AAM
资料来源：文献[42]。

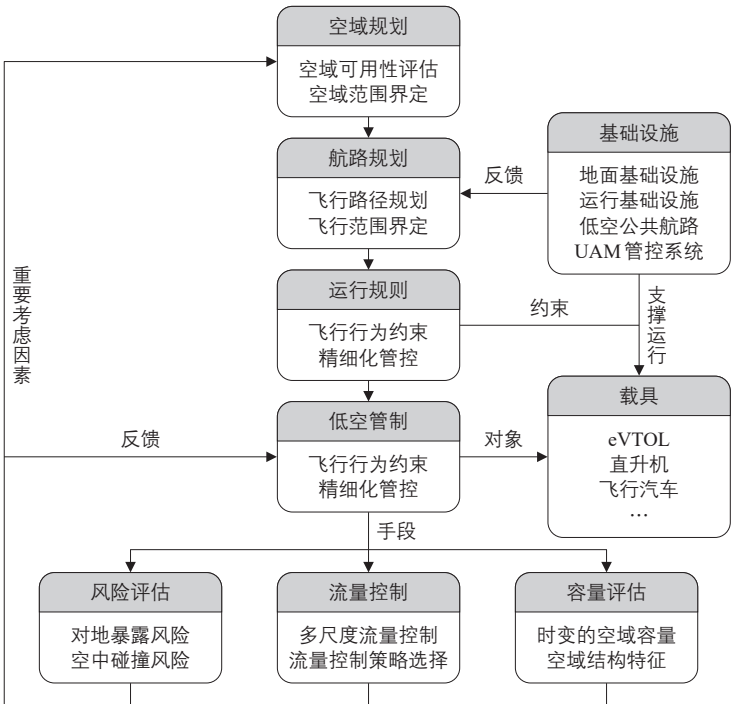


图2 UAM涉及的基本内容
Fig.2 Basic composition of UAM

表1 未来UAM与传统UAM的区别
Tab.1 The difference between future UAM and traditional UAM

项目	未来UAM	传统UAM
载具	航空器类型多样	直升机为主
动力来源	电驱动为主，绿色环保	燃油动力驱动，有污染排放
安全系统	先进高可靠安全系统	事故率高、致死率高
运行保障	依靠公共导航通信基础设施	不依靠公共导航通信基础设施
流量特性	规模化运行	个别运行
管控模式	需要城市集中管控系统	无须城市集中管控系统
应用场景	按需响应、灵活出行	军警、公务与高端出行
出行成本	成本低，普通居民可承担	成本高，普通居民难承担

共投资是推动经济发展的有效政策工具。因此,对低空航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,带来极大的社会效益^[43]。

相比运营商自己规划的航路,低空公共航路的特点在于其公共属性。公共航路具有包容性,是面向多航空器、多机型、多行业、多用户共享的航路,具备多航道,有严格的航路准入规则和航空器准入标准。建设标准需能满足各种类型通过低空适航认证的航空器的运行需求,例如固定翼航空器在航路中运行时要求具有更大的尾流安全间隔。

在城市低空空域内航空器数量较少时,空域资源较为充足,航空器可根据其飞行任务自主规划飞行路径,无须考虑其他航空器的飞行路径,能最大化每架航空器的运行效率。但规模化、常态化运行的UAM流量密度很大,空域内的航空器同时运行将产生海量的航线,加之航空器自主避撞能力有限、低空环境复杂,如何对这些航线进行规划、消解冲突、平衡有限的低空资源与日益增长的空域需求间的矛盾、保证安全运行是UAM管控必须考虑的问题。通过科学规划低空公共航路,可使有限的低空空域在零冲突的前提下容纳更多不同机型、不同任务的载具。当前,自动控制、自主避障及通信导航监视技术尚不足以实现UAM的自动化与智能化运行。在此背景下,低空公共航路可作为保障性基础设施,为UAM的安全高效运行提供支撑,成为其从零起步发展的可行路径。

低空公共航路是依托通信、导航、监视

等技术构建的虚拟电子通道(见图3),无需传统道路建设的砂石建材,仅需配置相应的运行设备。低空公共航路可充分利用现有的5G蜂窝数据通信网络、GPS与北斗导航系统、高精度的地面监视网络以及低空智联网^[44];根据航路网布局通信、导航、监视等运行设备,起步建设成本相对较低。此外,相比城市道路,航路的规划建设灵活性更高,可根据UAM实际运行状况进行布局规划调整,具有高效率和高可塑性的特点。

2 低空公共航路规划建设责任主体

在地面交通体系中,从土地资源到运营道路的规划建设已形成清晰成熟的流程,并设有明确的责任主体。相比之下,低空空域资源管理虽由军民航管理部门分工负责,但从空域资源到空中交通路网的转化过程中,主要依赖飞行任务执行主体自行规划,既缺乏类似地面交通的专业规划建设主体,也尚未形成系统化的公共空中交通路网体系。

当前低空航路主要由各运营商按照传统流程申请空域、划设航线并开展风险评估,这种模式下的航路具有明显的私人属性,无法实现多运营商共享使用。低空公共航路的公共属性决定了其必须获得相关管理部门的审批认证才能具备权威性和合法性,要实现产业化应用更需要政府部门主导建设、管理、监管和运营体系的建立。

然而目前国家层面尚未设立专门负责低空公共航路规划、建设和运行管控的主管部门,也缺乏通过建设公共航路来解决用户空域资源和航路规划问题的长效机制。要释放低空资源潜力、推动低空经济发展,当务之急是明确低空公共航路建设、管控和运营的管理主体,建立可实现常态化运营的航路体系。

建议通过深化城市管理体制改革,确立航路网规划的政府责任主体。在低空经济快速发展的背景下,地方政府应当主动承担这一职责。借鉴现有城市交通管理体系,《决定》提出了一种面向未来的低空行政管理架构设想:由市政交通部门负责低空公共航路的规划建设,民航部门负责eVTOL的适航审定和空域使用政策制定,同时引入具备资质的服务商提供商业化航路地图服务。

上海市已率先开展低空公共航路规划探索。2024年11月,上海市交通委员会印发



图3 低空公共航路概念图

Fig.3 Conceptual map of low-altitude public routes

了《上海市低空飞行服务管理能力建设实施方案》^[45]，明确提出在优化提升阶段将统筹划设一批低空飞行航线，研究制定低空公共航路划设标准和运行规则，探索划设上海市低空公共航路“一张网”，全面形成上海市低空公共航路网络架构，累计划设低空飞行航线不少于400条。

3 低空公共航路投资建设带动低空经济发展

低空经济概念提出后，各地方政府积极响应并出台支持政策。珠海市提出构建低空经济新兴产业集群、打造“天空之城”，并发布《珠海市支持低空经济高质量发展的若干措施(征求意见稿)》^[46]，率先开展全国首条海岛公共物流无人机配送航线试飞，推动低空经济应用进入新阶段^[50]；《山东省低空经济高质量发展三年行动方案(2024—2026年)》中提出，结合空中禁区、空中限制区、航路航线、临时空域等空域管理要求，精细划设支持多运营人融合飞行的公共航路航线^[47]；《江西省关于促进低空经济高质量发展的意见(征求意见稿)》中提出，聚焦城市低空载货载人运输需求，协调开展市内低空公共航路划设研究，推动多层次无人机航线运行试点，统筹开发低空空域资源^[48]；昆明市提出划设全市低空公共航路和飞行航线，统筹管理空域资源，并制定《昆明市民用无人机飞行管理办法》，提升空域使用效率^[49]；苏州市探索出台全国首部低空“交通规则”，对低空空域实施精细化管理^[51]。各地政策均强调低空公共航路的规划与建设，以促进低空经济高质量发展。

1) 促进城市空间及立体交通系统发展。

低空公共航路的划设需综合考虑低空空域的环境信息及UAM交通需求，其空间布局对智能交通系统的发展具有重要意义。一方面，低空公共航路的布局可以反映当前居民出行的空间分布特征，合理的布局有助于促进多式联运，实现城市交通与空中交通的耦合，构建一体化的城市立体交通。另一方面，低空公共航路可以约束规模化运行的航空器的飞行路径及方向，由此提高运行安全性。此外，低空公共航路的划设意味着提升城市可达性，进而促进城区规模进一步扩大，催生与UAM相关的产业，带动城区原有无人机制造产业和服务业的发展，甚至能

增强城区与郊区、周边城市的经济联动，拓展城市沿航路轴向发展，城市空间结构和功能布局也会因此发展改变。因此，低空公共航路不仅是UAM安全运行的必要手段，也是与城市内其他交通方式耦合的桥梁，更是带动低空经济发展的“动脉”。

2) 强化政府提供基础设施服务的角色定位。

当前部分地方政府已出台激励政策，对城市场景的载人载物运输按运营航次/人数给予补贴。本文建议可将补贴方式从直接补贴航空器运营成本，转向补贴低空路网“过路费”或征收类似车船税的空中运营税费。这种转变虽然补贴总额不变，但将传统运营补贴转化为基础设施使用费补贴，能够更好地体现政府作为基础设施服务提供者的角色定位。这种改革思路将自然推动相关政策体系的调整完善，并加速低空公共航路网基础设施的规划建设进程。这一转变本质上是通过调整生产关系来适应新质生产力发展的具体实践。

通过这样的创新探索，城市将逐步构建起高密度、高动态、安全高效的低空公共航路基础设施体系。未来，军民航管理部门只需对接城市低空交通管理机构，而无需处理规模化个体运营商的分散申请。运营商只需按照既定程序使用城市低空公共航路网即可开展运营。这种模式将显著提升审批和管控效率，为城市范围内大规模商业化低空飞行活动提供有力支撑，从而切实推动低空经济实现高质量发展。

3) 助力地方政府招商引资新机遇。

低空公共航路建设带动低空经济发展不仅体现在航路建设、运行和管理方面，还体现在配套通信、导航、监视以及气象等设备布局中；此外，还需要建设用于航空器起飞降落的地面基础设施以及管控系统等。这些都为地方政府进行相关设备企业招商引资提供条件。低空公共航路修建完成后，政府监管部门需持续开展运行管控，以防止发生违法违规事故，同时还需进行更换设备等养护工作。

4) 推动上下游产业链协调发展。

低空公共航路正式运行后，运营部门可向用户收取一定的飞行保障服务类费用，例如使用费、信息服务产品(如实时反映流量状况的“天路图”等)。低空公共航路的建设解决了航空器运行困难的问题，将提高

eVTOL 等航空器的销量, 进而促进低空经济上游产业链的发展。此外, 还会带动包括 eVTOL 等航空器充电、维修以及相关行业培训服务等下游产业链的发展。

4 结束语

本文介绍了低空经济、UAM 以及低空公共航路的概念, 分析了低空公共航路发展面临的问题并论述其对 UAM 发展的基础性作用, 同时提出发展低空公共航路基础设施需要深化城市管理体制改革, 确立航路网规划的政府责任主体。作为保障性基础设施, 低空公共航路可成为低空经济高质量发展的支点, 然而发展低空航路网基础设施仍面临很多挑战, 需不断研究探索。《决定》强调要健全因地制宜发展新质生产力的体制机制, 这为进一步深化军民航部门和城市管理体制改革、促进 UAM 新质生产力的发展提供了有力的政策支持。

参考文献:

References:

- [1] 新华社. 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)[2024-09-12]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
- [2] 人民日报海外版. 首次写入政府工作报告: “低空经济” 加速起飞[EB/OL]. (2023-04-02)[2024-09-12]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202404/content_6943071.htm.
- [3] 中国交通新闻网. 以改革创新为动力 推动低空经济高质量发展[EB/OL]. (2024-07-29)[2024-09-12]. https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202407/t20240729_4145477.html.
- [4] 邱世梁, 王华君, 陈晨. 低空经济: 低空翱翔, 拉开序幕: 低空经济系列深度报告[R]. 杭州: 浙商证券研究所, 2024.
- [5] SAFADI Y, FU R, QUAN Q, et al. Macroscopic fundamental diagrams for low-altitude air city transport[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2023, 152: 104141.
- [6] STRAUBINGER A, ROTHFELD R, SHAMI-YEH M, et al. An overview of current research and developments in urban air mobility: setting the scene for UAM introduction[J]. Journal of air transport management, 2020, 87: 101852.
- [7] WANG L, DENG X, GUI J, et al. A review of urban air mobility-enabled Intelligent Transportation Systems: mechanisms, applications and challenges[J]. Journal of systems architecture, 2023, 141: 102902.
- [8] CHEN S L, EVANS A D, BRITAIN M. et al. Integrated conflict management for UAM with strategic demand capacity balancing and learning-based tactical deconfliction[J]. IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(8): 10049-10061.
- [9] XU C, LIAO X, YE H, et al. Iterative construction of low-altitude UAV air route network in urban areas: case planning and assessment[J]. Journal of geographical sciences, 2020, 30(9): 1534-1552.
- [10] COHEN A P, SHAHEEN S A, FARRAR E M. Urban air mobility: history, ecosystem, market potential, and challenges[J]. IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 6074-6087.
- [11] QUAN Q, FU R, LI M, et al. Practical distributed control for VTOL UAVs to pass a virtual tube[J]. IEEE transactions on intelligent vehicles, 2022, 7(2): 342-353.
- [12] SHAO Q, SHAO M X, LU Y. Terminal area control rules and eVTOL adaptive scheduling model for multi-vertiport system in urban air mobility[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2021, 132: 103385.
- [13] SHAO Q, Li R, Dong M, et al. An adaptive airspace model for quadcopters in urban air mobility[J]. IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(2): 1702-1711.
- [14] DAI W, PANG B, LOW K H. Conflict-free four-dimensional path planning for urban air mobility considering airspace occupancy[J]. Aerospace science and technology, 2021, 119: 107154.
- [15] ZENG Y X, KY G, DUONG V N. Regulating arrival UAV flows between the AirMatrix and the droneport using a dynamic carousel circuit[C]//The SESAR Innovation Days. Proceedings of 11th SESAR Innovation Days (SID 2021), Singapore, 2021: 100.
- [16] 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[J]. 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 resource-

- es for UAV applications[J]. *Acta geographica sinica*, 2021,76(11): 2607-2620.
- [17] NETO E C P, BAUM D M, ALMEIDA J R, et al. A trajectory evaluation platform for urban air mobility (UAM) [J]. *IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 9136-9145.
- [18] BRUNELLI M, DITTA C C, POSTORINO M N. New infrastructures for urban air mobility systems: a systematic review on vertiport location and capacity[J]. *Journal of air transport management*, 2023, 112: 102460.
- [19] 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.
- [20] 内蒙古自治区人民政府. 国务院 中央军委 关于深化我国低空空域管理改革的意见 (国发〔2010〕25号)[A/OL]. (2010-08-19) [2024-09-12]. https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfgb/2010n_4950/201010/201008/t20100819_300396.html.
- [21] 中华人民共和国国务院, 中华人民共和国中央军委. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[A/OL]. (2023-05-31)[2024-09-12]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888800.htm.
- [22] 新华社. 习近平主持召开中央财经委员会第四次会议强调: 推动新一轮大规模设备更新和消费品以旧换新 有效降低全社会物流成本[EB/OL]. (2024-02-23)[2024-09-12]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202402/content_6933834.htm.
- [23] 史竞男, 刘芳洲, 胡喆. “‘低空经济’首次写入政府工作报告, 我非常振奋!” [EB/OL]. (2024-03-08) [2024-09-12]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6937778.htm.
- [24] NASA. UAM vision concept of operations (ConOps) UAM maturity level (UML) 4 version 1.0.[R/OL]. 2020[2024-09-12]. https://www.aam-gurs.com/bbs/board.php?bo_table=download_en&wr_id=49&page=4.
- [25] HARRISON S. From the archives: Los Angeles Airways helicopter overturns[N/OL]. *The Los Angeles Times*, (2017-03-10)[2024-09-12]. <http://www.latimes.com/visuals/photography/la-me-fw-archives-airways-helicopter-overturn-20170221story.Html>.
- [26] WITKEN R. New York Airways Acts to file for bankruptcy[N/OL]. *The New York Times*, (1979-05-16) [2024-09-12]. <https://www.nytimes.com/1979/05/16/archives/new-york-airways-acts-to-file-for-bankruptcy-suing-sikorsky.html>.
- [27] SESAR. U-space Blueprint[EB/OL]. (2017-07-09) [2024-09-12]. <https://sesarju.eu/u-space-blueprint>.
- [28] PATHIYIL L, LOW K, SOON B H, et al. Enabling safe operations of unmanned aircraft systems in an urban environment: a preliminary study[C]//German Institute of Navigation and German Aerospace Centre. *Proceedings of the International Symposium on Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications (ESAVS 2016)*, Computer Science. Berlin: Springer, 2016.
- [29] SALLEH M F B, CHI W C, WANG Z K, et al. Preliminary concept of adaptive urban air-space management for unmanned aircraft operations[C]//AIAA. 2018 AIAA Information Systems- AIAA Infotech @ Aerospace. Reston, Virginia, 2018: 2260.
- [30] SALLEH M F B, TAN D Y, KOH C H, et al. Concept of Operations (ConOps) for traffic management of unmanned aircraft systems (TM-UAS) in urban environment[C]//AIAA. *Proceedings of the AIAA Information Systems- AIAA Infotech at Aerospace*, Grapevine, Texas, 2017: 0223.
- [31] HOLDEN J, GOEL N. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation [R/OL]. San Francisco: Uber Elevate, 2016 [2024-09-12]. https://d1nyezh1ys8wfo.cloudfront.net/static/PDFs/Elevate%2BWhitepaper.pdf?uclid_id=4e6d76ac-7c01-42ea-948c-ef4839e8345d.
- [32] HOMOLA J, DAO Q, MARTIN L, et al. Technical capability level 2 unmanned aircraft system traffic management (UTM) flight demonstration: description and analysis [C]//IEEE, AIAA. *Proceedings of the 36th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, St. Petersburg, FL, 2017: 8101994.
- [33] JUNG J, RIOS J L, DREW C R, et al. Unmanned aircraft system traffic management technical capability level 4 implementation, data collection and analysis[R]. TM-2019-

220302. Washington DC: NASA, 2020.
- [34] RIOS J L, MARTIN L, MERCER J. Use of UAS reports (UREPs) during TCL3 field testing[R]. San Francisco: Ames Research Center, 2019.
- [35] NASA. NASA UAM for ENRI technical interchange meeting[R]. NASA- AFRC- E-DAATN68911. Washington DC: NASA, 2019.
- [36] NASA. One word change expands NASA's vision for future airspace mobility[EB/OL]. (2020-03-23)[2024-09-12]. <https://www.nasa.gov/aeronautics/one-word-change-expands-nasas-vision-for-future-airspace-mobility/>.
- [37] MATTHEWS L. I took Uber copter from Manhattan to JFK: here's what it's like[EB/OL]. (2019-10-03)[2024-09-12]. <https://www.afar.com/magazine/what-its-like-to-fly-uber-copter-from-manhattan-to-jfk-airport>.
- [38] GUSZKOWSKI J. Drone delivery service Flytrex raises \$40M[EB/OL]. (2021-11-19)[2024-09-12]. <https://www.restaurantbusinessonline.com/technology/drone-delivery-service-flytrex-raises-40m>.
- [39] URBANFOOTPRINT. Using UrbanFootprint to plan drone delivery of medicines and vaccines to rural areas[EB/OL]. (2021-03-17)[2024-09-12]. <https://urbanfootprint.com/planning-drone-delivery-of-vaccines/>.
- [40] AIRBUS. Voom: an on-demand helicopter booking service[EB/OL]. 2020[2024-09-12]. <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/voom.html>.
- [41] AIRBUS. Voom's helicopter commuting service launches in Mexico City[EB/OL]. (2018-03-09)[2024-09-12]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2018-03-vooms-helicopter-co-mmuning-service-launc-hes-in-mexico-city>.
- [42] Tiana May. NASA to conduct urban air mobility crash test[EB/OL]. 2022[2024-09-12]. <https://future-transport-news.com/nasa-to-conduct-urban-air-mobility-crash-test/>.
- [43] 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.
- [44] 董超, 经宇骞, 屈毓铨, 等. 面向低空智能网联频谱认知与决策的云边端融合体系架构[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 5-16.
- DONG C, JING Y Q, QU Y B, et al. Cloud-edge-device fusion architecture oriented to spectrum cognition and decision in low altitude intelligence network[J]. Journal of communications, 2023, 44(11): 5-16.
- [45] 上海市人民政府. 上海市交通委员会关于印发《上海市低空飞行服务管理能力建设实施方案》的通知[EB/OL]. (2024-11-21)[2024-12-07]. <https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/509e2dac7cc74d16ae4e87c5632b52c>.
- [46] 珠海市工业和信息化局. 关于公开征求《珠海市支持低空经济高质量发展的若干措施(征求意见稿)》意见的通知[EB/OL]. (2024-03-07)[2024-09-12]. <https://www.zhuhai.gov.cn/hdjlpt/yjzj/answer/mobile/34886#/index>.
- [47] 山东省交通运输厅. 关于公开征求《山东省低空经济高质量发展三年行动方案(2024—2026年)》意见的公告[EB/OL]. (2024-04-19)[2024-09-12]. https://jtt.shandong.gov.cn/art/2024/4/19/art_11690_10318890.html.
- [48] 江西省发展和改革委员会. 关于征求《江西省关于促进低空经济高质量发展的意见(征求意见稿)》意见的公告[EB/OL]. (2024-08-09)[2024-09-12]. https://drc.jiangxi.gov.cn/art/2024/8/9/art_14645_4977726.html.
- [49] 昆明市人民政府. 昆明力争3年使全市低空经济规模达300亿元[EB/OL]. (2024-07-01)[2024-09-12]. <https://www.km.gov.cn/c/2024-07-01/4874579.shtml>.
- [50] 观海融媒. 空中快递! 全国首条海岛公共物流无人机配送航线在珠海首飞成功[EB/OL]. (2024-07-30)[2024-09-12]. <https://pub-zhtb.hizh.cn/s/202407/30/AP66a8bb48e4b0da3590b24b5b.html>.
- [51] 苏州市人民政府. 苏州探索出台全国首部低空“交规”[EB/OL]. (2024-07-14)[2024-09-12]. <https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/dstx/202407/6f61c1792d9646f1ac12396fe2668a1c.shtml>.