

DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20250406001

低空基础设施规划研究进展与展望*

Progress and prospect of low-altitude infrastructure planning research

党安荣 张朝阳 王飞飞 翁 阳 李翔宇 仇 实

DANG Anrong, ZHANG Chaoyang, WANG Feifei, WENG Yang, LI Xiangyu, QIU Shi

摘 要：低空经济是我国高质量发展背景下的重要发展方向，低空基础设施作为低空经济发展的关键支撑，其规划布局具有重要的研究意义。论文旨在对低空基础设施规划进行系统性研究梳理，为后续研究与实践提供支撑。基于文献研读归纳了低空基础设施的分类框架与研究重点，明确低空基础设施的概念内涵；梳理了国内外的规划研究进展，总结了五类不同国家与地区的低空基础设施层级划分方法，归纳了目标驱动型与需求驱动型两类低空基础设施网络布局规划思路，以及利用机场、火车站、屋顶等空间进行低空基础设施规划的相关案例。现有规划研究虽然在指标体系、技术方法等方面取得一定进展，但是仍存在概念认知不一、空间区域失衡、应用场景局限、建模过于理想与缺少实证研究五个方面的问题。为此，论文最后探讨了低空基础设施规划纳入规划体系的两条路径选择，并提出了低空基础设施规划的未来展望。

关键词：低空基础设施；低空经济；城市空中交通；通用航空；垂直起降场；空间布局

中图分类号 TU984.1

文献标识码 A

Abstract: The low-altitude economy is rapidly emerging as a focal point in China's pursuit of high-quality development. As the foundational support system, low-altitude infrastructure plays a critical role in enabling low-altitude flight activities, underscoring the importance of its spatial planning. Despite increasing attention from policymakers and researchers, there remains a lack of consensus on the conceptual scope, classification frameworks, and optimal planning methodologies for low-altitude infrastructure. A comprehensive review of relevant domestic and international research on low-altitude infrastructure planning is conducted, aiming to identify key trends and reveal existing gaps. To build a robust analytical basis, the study conducted targeted literature searches using China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WOS), covering publications from January 2010 to December 2024. Keywords used in both Chinese and English included "low-altitude economy" "UAM" "AAM" "infrastructure" "vertiport" and "general aviation," yielding a final selection of 158 Chinese-language and 66 English-language peer-reviewed papers. This core literature set was further enriched by 8 authoritative research reports and 18 regulatory documents from agencies including the Civil Aviation Administration of China (CAAC), the Federal Aviation Administration (FAA) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA). The literature analysis reveals the ambiguity regarding the definition of low-altitude infrastructure. Drawing insights from transport geography, aviation engineering, and urban studies, this study comprehensively defines low-altitude infrastructure as an integrated system of physical assets and information networks that collectively enable secure, reliable, and efficient low-altitude flight operations. Within this broad conceptualization, the most frequently referenced facility categories include landing and take-off infrastructure, air-traffic management systems, communication, navigation and surveillance (CNS) equipment, and energy supply stations. Notably, overlapping terminologies across studies—such as multiple designations for charging and refueling stations—underscore the need for standardization. Further analysis identifies five prominent classification approaches in existing scholarship, including distinctions between new and legacy infrastructure, hard versus soft infrastructure, spatial positioning, facility functionality, and hierarchical network scales. Although individually insightful, these classification systems have seldom been synthesized or systematically reconciled, which may impede cumulative knowledge development and effective comparative research. Policy-oriented practices reveal clearer hierarchical categorization patterns, which are particularly instructive for practical planning applications. Comparative analysis of regulatory frameworks adopted by CAAC, FAA, NASA, the European Union Aviation Safety Agency (EASA), and the Japan Civil Aviation Bureau (JCAB) illustrates varied yet structured multi-tier approaches. For example, NASA's three-tier structure (vertihubs, vertiports, vertistops) provides differentiated guidance tailored to urban cores, suburban zones, and rural peripheries, which is

*国家重点研发计划项目（2022YFC3800601）

作者简介

党安荣（通讯作者）：清华大学建筑学院，教授，danrong@mail.tsinghua.edu.cn

张朝阳：清华大学建筑学院，硕士研究生

王飞飞：北京清华同衡规划设计研究院有限公司，高级工程师

翁 阳：清华大学建筑学院，博士研究生

李翔宇：清华大学建筑学院，助理研究员

仇 实：清华大学建筑学院，博士研究生



particularly instructive for application in the spatial context of Chinese cities. The literature also identifies two distinct but complementary methodological paradigms in infrastructure planning: goal-driven and demand-driven approaches. Goal-driven planning employs normative policy targets—such as accessibility, regional economic equity, or emergency responsiveness—as a basis for initial expert-guided site identification, subsequently refined through quantitative modeling and simulation techniques. Conversely, demand-driven planning methods prioritize spatial data on population density, commuting patterns, logistical flows, and socioeconomic variables, employing clustering algorithms or network optimization techniques to determine infrastructure placement. Despite methodological divergences, combining these approaches may achieve a more balanced integration of strategic objectives with empirical market conditions, a synthesis seldom explored comprehensively in existing studies.

Keywords: low-altitude infrastructure; low-altitude economy; urban air mobility; general aviation; vertiport; spatial layout

0 引言

低空经济 (low-altitude economy) 作为新质生产力的重要组成部分^[1-2], 具有推动产业融合、带动区域经济发展重要作用^[3], 有望为我国高质量发展注入新的活力。低空经济是“以低空空域为主要活动场域, 以航空载运与作业装备技术为主要工具, 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”^[4]。其中, 低空空域一般指真高 1 000 m 以下的空域, 根据需要可进行拓展。低空经济强调将低空空域视作公共资源, 关注低空资源的整体开发与统筹管理, 通过全产业链协同来推动经济发展。低空经济是由我国率先提出的概念, 在国际上尚无完全对应的概念, 较为接近的是城市空中交通 (Urban Air Mobility, UAM), UAM 是指在城市低空空域内通过飞行器实现载人载物空中运输的活动^[5]。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 在 2017 年提出 UAM 概念, 并在 2020 年进一步提出先进空中交通 (Advanced Air Mobility, AAM), 将空间范围从城市区域拓展到全部区域。目前国际上 UAM 或 AAM 的相关研究较多, 涉及飞行器制造、基础设施建设、市场运营、政策监管等众多领域^[6], 美国、欧洲、日本、新加坡等国家和地区都发布了一系列政策法规推动相关产业的发展建设^[7]。UAM 或 AAM 聚焦于低空经济中的城市或区域交通运输的应用场景, 可以看作是低空经济的子集。

低空基础设施 (low-altitude infrastructure) 可从狭义和广义两种视角进行理解。从狭义上看, “低空”指低空飞行活动; “低空基础设施”特指直接或间接服务于低空飞行活动的设施, 例如起降场地、充电站、空域管理系统等。这种视角与当前多数相关文献的观点一致^[8-10]。从广义上看, “低空”可以拓展至低空经济整体; “低空基础设施”涵盖低空经济全产业链条中的一切支撑性设施。这不仅包括服务于低空飞行活动的设施, 还延伸至低空技术研发、低空飞行器制造和低空场景应用等领域, 如低空产业园、低空数据交易平台以及低空场景体验基地等。这一视角更注重对低空经济系统性发展的支持, 目前仅有少数文献提及^[11], 是低空基础设施研究的重要拓展方向。考虑到低空经济处于初步发展阶段, 本研究采用狭义视角, 即低空基础设施是支撑低空飞行活动正常运行的物理设备与信息系统的总称, 提供运行支持、安全保障和运营服务等各类支撑功能。

低空基础设施被认为是支撑低空经济活动的关键载体^[7,12-13], 是低空经济发展的基础性、先导性、战略性设施^[11]。低空基础设施

建设可以拉动内需、增加就业, 创造新的经济增长点^[14], 是我国新型基础设施建设的重要组成部分, 也是前瞻布局未来科技发展新赛道的战略举措。低空基础设施建设具有重要意义, 深圳、上海、北京等全国多个城市已出台相关行动计划^[9], 计划中均提出要加快推进低空基础设施建设, 然而目前还没有城市给出实施性的规划方案, 相关规划工作仍在前期探索阶段。

低空基础设施规划与传统的道路、铁路等基础设施规划相比, 两者在规划主体、规划目标、规划流程等方面存在一定相似性, 但是低空基础设施规划面临着更大的不确定性, 因为低空经济作为新兴领域面临着用户需求、安全监管、市场拓展等诸多不确定因素^[15-16], 无人机等新技术的用户采纳也存在随机性与空间异质性^[17], 这给低空基础设施规划带来了挑战。而且低空基础设施规划必须基于三维空间开展, 因为低空基础设施支撑的是低空飞行活动, 需要根据飞行器特点、飞行高度、航线轨迹等因素调整设施的布局与规模, 包括根据飞行器的起飞滑行距离不同, 在起降场选址时应设置不同范围的空中缓冲区^[18], 这对规划工具、规划方法和规划思维都提出了新的要求。此外, 低空基础设施规划的综合性更高, 不仅要考虑设施自身布局, 还需要考虑空域限制、航路规划、交通接驳、存量利用、影响评估等要素^[19], 需要进一步推进跨学科与跨部门合作。因此, 现有的基础设施规划体系与方法难以直接应用于低空基础设施规划, 亟需相关研究的探索与指导。目前, 低空基础设施规划的相关研究有一定的基础, 但是还存在两个方面的问题: 一是低空基础设施的内涵界定标准不一, 比如有的将其分为硬件基础设施与软件基础设施^[20], 有的则按照通航机场设施与低空新型基础设施来分类^[21], 具体的设施组成也各不相同, 有待梳理与归纳; 二是低空基础设施规划的研究方法与领域较为分散, 尚未形成系统化的规划体系, 需要对于现有研究进行系统的梳理与总结。

基于上述背景, 本文首先选取中国知网 (CNKI) 和 Web of Science (WOS) 进行相关文献检索, 中文语境下以“低空经济 AND (基础设施 OR 垂直起降场 OR 通用机场)”为关键词, 英文语境下以“(low-altitude economy OR UAM OR AAM) AND (infrastructure OR vertiport OR general aviation airport)”为关键词, 时间范围均为 2010 年 1 月至 2024 年 12 月, 在初步检索文献的基础上进一步剔除、优选与补充, 最终得到相关中文文献 158 篇, 英文文献 66 篇。同时, 本文也加入了主流研究机构发布的 8 篇研究报告以及中国民航局、美国 FAA 等主要政府机构发布的 18 篇政策文件 (图 1)。然后系统分析上述文献, 旨在梳理低空基础设施规划相关的研究进

展,明确低空基础设施的分类与组成,并总结低空基础设施规划的研究范式与规划经验,最后探讨低空基础设施规划的研究重点与研究方向,为后续相关研究与规划实践提供参考。

1 低空基础设施内涵梳理

1.1 低空基础设施分类框架

已有研究中对于低空基础设施的内涵尚未形成统一的认知,不同研究从不同角度提出了各自的分类方法,并且存在分类的交叉与混用现象。已有文献对于低空基础设施的概念分类可以总结为五大类:新旧领域导向型、软硬范畴导向型、空间位置导向型、设施功能导向型与网络层次导向型(表1)。

分类特征如下:第一,新旧领域导向型按照新旧领域进行划分,分为传统基础设施与新型基础设施,强调低空基础设施中新技术的创新与应用。传统基础设施主要指通用航空领域已广泛应用的设施,例如机场跑道、起降场和飞行器维护站等。这些设施构成了传统通用航空产业的重要支撑;新型基础设施伴随技术的快速发展而产生,强调前沿技术的应用,例如空天地一体化网络、5G-A 通感一体基站等。第二,软硬范畴导向型按照软硬范畴进行划分,分为硬件基础设施与软件基础设施,也称物理基础设施与信息基础设施,该框架在现有研究中使用最为广泛。硬件基础设施包括跑道、导航设备、通信基站等物理实体设备;软件基础设施包括空域管理平台、飞行调度系统和数据处理系统等虚拟信息化工具。第三,空

间位置导向型主要按空间位置划分,分为地面基础设施与空中基础设施,主要关注低空基础设施的服务范围。地面基础设施主要服务于地面停放或起降的飞行器,提供起降、充电、维护等功能;空中基础设施服务于空中运行中的飞行器,提供通信、导航、监视以及空中交通管理等功能。第四,设施功能导向型按照设施功能进行划分,使用该分类视角的相关研究较少,一般可分为飞行起降设施、管理保障设施与运行支撑设施三大类。飞行起降设施是直接支撑飞行活动的物理设施;管理保障设施包括飞行管控设施与地面保障设施,确保飞行活动的安全性与规范性;而运行支撑设施指的是通信、算力、市政、能源等支撑低空经济活动的关联设施。第五,网络层次导向型按照网络层次进行划分,分为设施网、空联网、航路网与服务网,也被称作“四张网”,强调低空基础设施间的层次性与协同性。设施网是底层的物理基础设施;空联网通过通信、导航、感知等技术实现飞行器之间及与管理平台之间的互联互通;航路网在空联网的基础上构建数字空域并划定数字航路;服务网则面向管理与用户需求,提供管理、服务、运营等功能。

1.2 低空基础设施重点设施

本文研究提取了文献中提及的各类具体设施,并对相似功能的设施进行了合并归类,比如充电站、充电桩、换电站、加氢站、加油站等表述都与能源相关,则统一表述为“能源设施”。在此基础上,研究汇总了确保低空活动正常运行的必备的各类低空基础设施,基于常见的低空飞行活动流程对设施进行整理归纳(图2),并对其提及次数进行统计分析,得到现有研究中低空基础设施的提及频次分布(图3)。从中可以看出,起降设施、空管系统、通信设

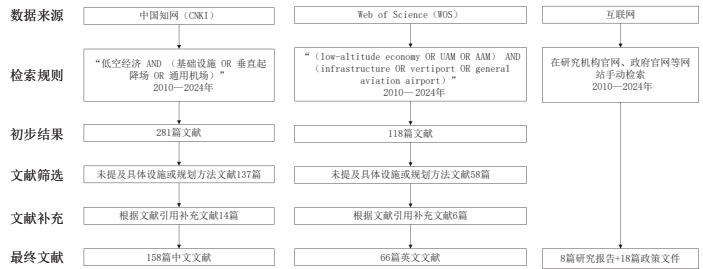


图1 文献检索流程示意
Fig.1 literature research procedure

表1 低空基础设施分类框架汇总

分类视角	分类框架	典型设施
新旧领域导向型 ^[21-23]	传统基础设施	飞机跑道,无人机起降场
	新型基础设施	空天地一体化网络、5G-A通感一体基站、智算中心
软硬范畴导向型 ^[7,24-25]	硬件基础设施	通用机场、飞行起降平台、充换电平台、通信设备
	软件基础设施	空域管理系统、机场管理系统
空间位置导向型 ^[26-27]	地面基础设施	垂直起降场、充电站
	空中基础设施	通信、导航、监视设施、空管系统
设施功能导向型 ^[11]	飞行起降基础设施	大型起降枢纽、微型起降点
	管理保障基础设施	地面保障设施、智能管控设施
	运行支撑基础设施	网络设施、能源设施、物流配套设施
网络层次导向型 ^[28-29]	设施网	通用机场、无人机起降场
	空联网	通信设施、网络设施
	航路网	数字空域系统、低空航路
	服务网	数字化管服系统

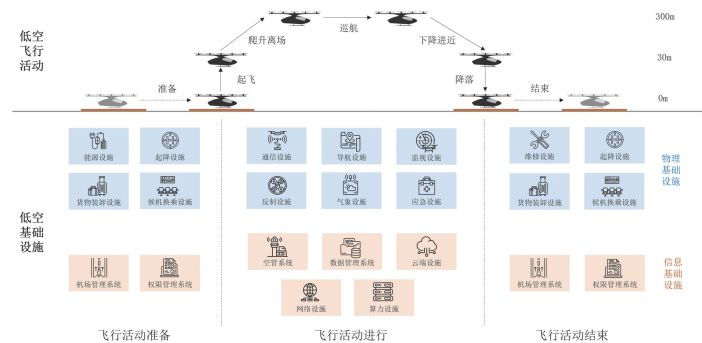


图2 主要低空基础设施示意
Fig.2 overview of key low-altitude infrastructure

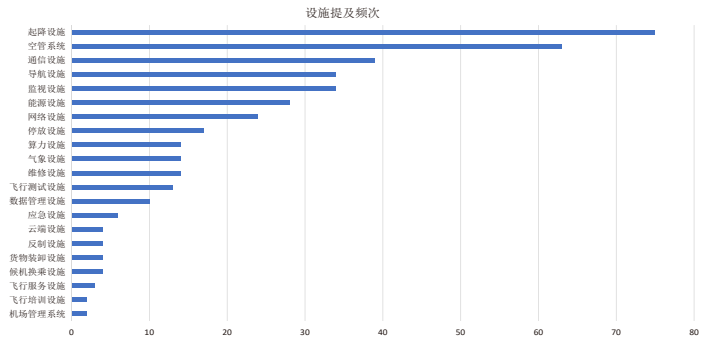


图3 研究中各类低空基础设施提及频次
Fig.3 occurrence frequency of low-altitude infrastructure in literature

施、导航设施与监视设施是被提及最多的几类设施。需要说明的是,“机场”的出现次数同样较多,但是考虑到机场并不是单一功能的设施,而是一个包含起降、通信、服务等多种功能设施的物理场地,为避免重复与混淆未将其列入计算。

重点设施内涵如下:第一,起降设施。起降设施是研究中被广泛提到的核心设施,包括“起降场”“跑道”“滑行道”和“灯光导引系统”等设施,这些设施为低空飞行器的起飞与降落提供直接支撑,是飞行器能够“飞得起”和“降得下”的首要条件。第二,空管系统。空管系统是“空中交通管理系统”(Air Traffic Management, ATM)的简称,在已有文献中被高频提及。根据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)的指导手册^[30],空中交通管理系统包括空中交通服务(Air Traffic Service, ATS)、空中交通流量管理(Air Traffic Flow Management, ATFM)和空域管理(Airspace Management, ASM)三部分(图4)。空管系统覆盖飞行活动的全过程,确保飞行器能够“飞得安全”和“飞得高效”。第三,通信、导航与监视设施。“通信设施”“导航设施”和“监视设施”常被统称为“通导监”(Communication, Navigation and Surveillance, CNS),通信设施实现飞行器与地面或其他飞行器之间的信息交互,导航设施提供飞行器的定位与路径规划功能,监视设施则负责飞行器的实时跟踪与状态监控。这三类设施的功能紧密关联,为飞行器提供了“看得见”和“被看得见”的技术支持。第四,其他重点设施。除了以上几类设施,多个研究都提到能源设施、停放设施、算力设施等,这些设施在支持低空飞行活动的正常运行中同样起到重要作用。其中

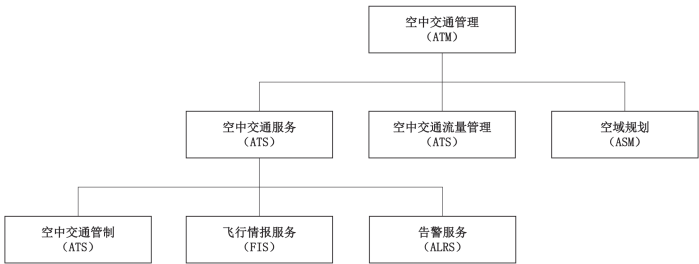


图4 空中交通管理系统组成
Fig.4 structure of air traffic management system

能源设施包括“充电站”“加油站”“加氢站”等,为飞行器提供能源保障;停放设施包括“机库”“停机坪”等,提供飞行器地面停靠与存放服务;算力设施包括“运算中心”“计算平台”等,为低空空域的管理提供数据处理与计算支持。

2 低空基础设施规划研究进展

低空基础设施内涵广泛,包含各类支撑飞行活动正常运行的物理基础设施与信息基础设施。其中信息基础设施主要包括各类软件系统与管理平台,与传统城乡空间规划的关系相对较弱;而物理基础设施具有物质实体,设施的规划建设涉及层级体系、网络布局、存量利用等问题,与城乡规划中的土地利用规划、交通规划等多个领域密切相关,因此本文对于低空基础设施规划的综述,将重点关注物理基础设施。具体而言,本文首先关注宏观尺度的层级体系建设,总结归纳现有研究中低空基础设施的层级划分标准;接着重点关注中观尺度的网络布局规划,整理相关研究的规划思路与规划方法;最后聚焦微观尺度的具体案例,探讨低空基础设施如何与存量空间更好地结合。

2.1 低空基础设施层级体系

明确设施的层级体系与建设标准是开展低空基础设施规划的重要前提,目前各主要国家与地区的低空基础设施分级标准主要有5种(表2)。我国的通用机场建设指南对于通用机场的设施标准给出了详细的建设规范,但是在层级体系构建上存在不足,难以针对不同地区与不同情况给出因地制宜的指导。欧盟航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)、日本民航局(Japan Civil Aviation Bureau, JCAB)等针对低空基础设施中更有代表性的垂直起降场(Vertiport)制定了建设规范与指南,垂直起降场是为电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)提供起降、充电、停放等服务的场地^[31]。但是在层级体系构建上同样相对不足,均仅针对消防救援这一场景开展了体系研究。相比之下,美国相关的体系建设较为完善,美国联邦航

表2 主要国家/地区低空基础设施分级标准

Tab.2 hierarchical standards of low-altitude infrastructure in major countries and regions

制定机构	分级方法	功能定位	支持机型	设施规模	设施要求
中国民航局	A类(A1级; A2级);B类	A类对公众开放; B类不开放	A1: ≥10座 A2: <10座	无规定	A类需具有飞行场地、目视助航、空中交通管制等设施;B类无要求
欧洲EASA	H3;H2;H1;H0	区分消防救援等级	H3: ≤20 m H2: ≤16 m H1: ≤12 m H0: ≤8 m	无规定	储水量要求H3≥1 600 L, H2≥1 200 L, H1≥800 L, H0≥500 L
日本JCAB	V3;V2;V1	区分消防救援等级	V3: ≤35 m V2: ≤24 m V1: ≤15 m	无规定	储水量要求V3≥1 600 L, V2≥1 000 L, V1≥500 L
美国FAA	National; Regional; Local; Basic	National面向国家与洲际交通; Regional与Local服务区域经济; Basic面向偏远地区	National必须支持公务喷气式飞机与多螺旋桨飞机; Regional与Local部分要求; Basic仅要求单螺旋桨飞机	每年IFR起降要求 National≥5000, Regional≥1000, Local≥10, Basic无要求	常驻喷气机要求National≥11架, Regional≥1架, Local与Basic无要求
美国NASA	Vertihub; Vertiport; Vertistop	Vertihub位于城市外围, 联运枢纽; Vertiport位于核心区; Vertistop位于郊区	Vertihub支持大型eVTOL; Vertiport支持中小型eVTOL; Vertistop仅支持小型eVTOL	停机坪要求 Vertihub≥20, Vertiport≥7, Vertistop无要求	Vertihub需具有完善的维护、客运、能源等设施; Vertiport需基本能源、客运设施; Vertistop无要求

空管理局 (Federal Aviation Administration, FAA)、NASA 等机构针对通用机场、垂直起降场等设施制定了明确的分级标准与指导文件，部分州还进行了不同层级基础设施建设的资金测算与空间布局^[32]。NASA 提出的“枢纽—场站—节点”的分级体系 (图5) 针对城市核心区、城市外围与郊区的不同特点给出了各自的功能定位、建设标准与设计指导^[33]，对于我国的低空基础设施体系建设具有重要启发。

2.2 低空基础设施网络布局

设施的空间选址与网络布局是低空基础设施规划的主要内容，根据出发点不同，现有研究中的低空基础设施网络布局规划可以概括为目标驱动型与需求驱动型两种思路。目标驱动型规划从制定规划目标与限制因素出发，基于专家经验得出初步的潜力点位，进一步通过系统化的评价体系筛选出最终方案。需求驱动型规划则从满足实际需求出发，基于对通勤、物流等场景的需求预测，寻找能够最大化运行效率的布局方案。

2.2.1 自上而下的目标驱动型规划

目标驱动型规划可以拆分为两个环节：基于专家经验的预选址与基于量化分析的筛选优化。在第一个环节中，研究往往会在特定地区与问题提出规划目标，接着围绕规划目标分析设施选址的影响因素，并综合考虑其提出的各类影响因素进行预选址，得出初步的选址点位。李高磊等根据文献资料与专家经验提出3大类25小类选址评价体系，并将其应用在重庆市的通用机场选址规划中，得出9个初步点位方案^[34]。普勒特纳 (Ploetner) 等人在德国上巴伐利亚地区的研究中，针对垂直起降场设施选址举办了4次专家研讨会，根据不同出行目的 (通勤、商务、旅游、服务农村地区等) 选出了上百个设施候选位置^[35]。目前已有研究中使用该思路的共14篇文献，各研究提到的影响因素可以归纳为三大类 (表3)。

预选址可以融入专家经验，同时也将选址的不确定性大大缩小，为后续的量化分析提供了可能。在第二个环节中，大部分研究基于预选址得到的点位，利用数学模型或模拟仿真等方法开展深入量化分析，得出效率更高、说服力更强的方案。其中最为典型的是多目标优化模型 (Multi-objective Optimization, MOO)，谈明彦等在上海某地区的无人机监测站选址规划中，以最大化覆盖范围和最小化布置成本为目标函数，利用遗传算法求解，从24个候选点位中选出了12个最终点位^[36]。吴志强等人基于美国佛坦帕湾地区的数据，设定了地面交通时间、建设数量、站点可达性、飞行路径等一系列目标条件，利用改进版 p-median 网络模型进行求解，最终从100个候选点中选出30

个最终选址点，其方案可以优化现有出行需求中约0.2%的路线 (532条)，主要集中在地铁线覆盖不足的地区^[37]。也有很多研究选择单一目标进行求解，包括基于整数规划模型计算最大覆盖范围的方案^[38]，基于 MATSim 交通仿真与启发式算法计算最小化出行阻抗的方案^[39]等。值得注意的是，现有研究中目标函数的设定取决于各自的研究目标，均处于理论与模型推理阶段，还没有公认的方案评价标准，也暂无相关的实证落地支撑^[31]。

2.2.2 自下而上的需求驱动型规划

需求驱动型规划以最大化满足现有的出行或物流需求为出发点，研究大多基于通勤流、出租车路径、人口密度、人均收入等高精度空间数据预测设施需求，接着通过聚类、图论等算法生成最优选址方案。该类规划过程以数据处理和模型运算为主，结果的人工干预相对较少。该思路下的16篇文献中主要有两类规划尺度：建筑尺度与街区尺度，不同尺度的规划研究有不同的数据要求与模型方法 (表4)。建筑尺度的低空基础设施布局规划的原始数据一般需精确到具体坐标，该类研究大部分都采用了聚类算法 (以 K-means 聚类为主)。覃睿等以天津和平区为例，假设其中的每个小区为1个物流需求点，对282个物流需求点进行 K-means 聚类，得到35个聚类中心，最终结合禁飞区限制与 AHP-TOPSIS 分析选取了其中18个作为最终方案^[4]。布卢苏 (Bulusu) 等基于美国旧金山湾区的约30万对跨湾通勤数据，以通勤线路的起止点为需求点进行 K-means 聚类，研究尝试了不同的聚类参数并分别计算方案效果，最终东岸29个点、西岸7个点的方案效果最好，可以让约45.5%的人 (约15万人) 通过换乘 UAM 比地面交通节省至少25%的时间^[40]。阿尔瓦雷斯 (Alvarez) 等则在美国纽约出租车数据的基础上

表3 低空基础设施选址影响因素

Tab.3 key factors influencing the site selection of low-altitude infrastructure			
宏观因素	影响因素	具体描述	提及次数
安全性因素	空域限制	避开禁飞区与限飞区	4
	地理环境	海拔适中、地形平坦、电磁环境干扰小	3
	气象条件	风力与风向稳定、适宜飞行	2
	空间限制	场地周边应设有足够的空中缓冲带	2
经济性因素	设施可达	与机场、火车站、旅游景点等距离较近	9
	土地资源	优先考虑空地或大型建筑屋顶	5
	建设基础	具备给排水、供电、供油、供气等基础工程配套	3
	需求规模	人口密度较大，有较高经济发展水平	2
敏感性因素	居民生活	避开居民区，减少噪声影与气流扰动影响	5
	生态环境	避开自然保护区	4
	鸟类安全	避开候鸟迁徙路线	2

表4 低空基础设施规划基础数据

Tab.4 basic data for low-altitude infrastructure planning			
数据尺度	数据类型	具体描述	提及次数
建筑尺度 (1 m)	通勤流数据	通勤起止点、通勤时长、通勤人员信息等	4
	出租车数据	出租车路线起止点、路线时长、路线花费等	3
	空域管控数据	禁飞区、限飞区等	3
	建筑模型数据	建筑三维点云或倾斜影像	2
	地图数据	高精度卫星影像或矢量地图	2
街区尺度 (100 m)	人口热力数据	特定时段内人口数量或人口密度	5
	人口普查数据	人均收入、人均GDP、受教育程度等	4
	社会经济数据	平均房价、平均房屋租金等	1



图5 NASA提出的垂直起降场分级示意
Fig.5 hierarchical framework of vertiports by NASA

加入泊松分布来更好地模拟现实中的出行需求分布,同样采用K-means聚类算法,最终选出29个站点,并在1 km范围里根据现实情况进行了人工位置微调,确保选址方案切实可行^[41]。

相比之下,街区尺度的低空基础设施布局规划对原始数据的要求较低,已有研究大多使用了街区数据或网格数据。中文翻译格尔曼(German)等基于美国旧金山湾区的人口普查区数据,以人口普查区为单位(一般1~5 hm²),并假设每个区域的中心点是潜在选址点,接着以普查区内的人口与收入数据测算潜在物流需求,通过整数规划模型得出满足最大需求量的选址方案,通过该方案单次物流配送时间与地面相比最多可以节约44 min^[42]。文卡泰什(Venkatesh)等使用了美国佛罗里达州的街区尺度的通勤数据(约2万条),研究同样以街区为单位,通过基于网络流的混合整数规划模型得出最小化通勤时间的选址方案,研究发现建设300个起降点可以覆盖约13.8%的高通勤需求人群^[43]。金南佑(Kim)等的研究则综合使用了美国旧金山和曼哈顿地区的街区尺度的人口普查数据与建筑尺度的三维建筑数据、空域划分数据,研究以人口普查区为单位,通过空间约束聚类(SKATER)算法,将城市划分为若干具有相似人口密度与空域可用率特征的片区,研究提出HH类(高人口密度+高空域可利用率)是最为理想的片区,并在旧金山成功识别出1个最佳片区^[44]。值得注意的是,街区尺度的设施规划研究虽然无法直接得出具体的选址方案,但对于前期布局规划以及大范围宏观布局规划具有重要的指导意义。

2.3 低空基础设施与存量空间结合

设施的规划建设必须考虑与现有系统、现有空间的关系,针对低空基础设施与存量空间结合问题,现有研究主要有两个方向:一是如何更好地与现有交通系统接驳,提高联运效率;二是如何充分利用存量空间,减少建设成本。

与现有交通设施结合是低空基础设施与存量空间结合的一个重要方向,其中机场是与低空基础设施结合潜力巨大且相关研究较多的空间,主要是由于机场一般距离主城区较远,且往返机场的交通出行对于时间的敏感程度往往较高,尤其是在道路高峰拥堵时段,该场景下消费者会有更高的消费意愿^[40]。此外机场具备支撑民航飞机高空飞行活动的一切必要设施,其中的通信、导航、监视、空管系统等设施可以直接或间接服务于低空飞行活动,因此可以充分利用现有设施资源。美国FAA在2024年的垂直起降场建设指南中专门有一章针对机场中的垂直起降场建设提出了指导规范,提供设计示范、选址建议、安全距离规定等内容^[45]。同时,也有不少研究针对某一机场给出了低空基础设施的具体选址方案,费尔德霍夫(Feldhoff)等研究了在德国科隆—波恩机场开展空中出租车服务的所需的基础设施与选址策略,研究综合考虑了乘客可达性、障碍物净空、噪声影响、可拓展性等标准,评估了6个候选场地,并最终选定P2停车楼第2段为最终推荐场地,模拟显示建成后每小时吞吐量约38人^[46]。维塔莱(Vitalle)等在选址时进一步考虑了低空航线与有机场航线的冲突,研究以美国坦帕机场为例,通过SimmodPRO空域建模并采用RTT算法规划最短航线,最终发现现有空域结构下机场内部难以找到确保垂直起降场

完全安全运行的点位,推荐在机场外围选点或采用时段化动态轨迹分配^[47]。里姆贾(Rimjha)等则以美国洛杉矶机场为例,基于问卷调查与混合Logit模型模拟,评估UAM在机场接驳场景的消费潜力与定价策略,研究得出理想的价格上限为2美元/英里^[48]。除了机场,已有研究也考虑了低空基础设施与其他交通系统的结合。马盖特(Maget)等在德国巴伐利亚州的垂直起降场选址时直接以中央车站、火车站等交通枢纽作为候选点^[38],帕特森(Patterson)等则基于美国休斯顿、亚特兰大等地的放射状路网结构,提出基于六边形结构布局垂直起降场点位^[49]。

充分利用现有空地、屋顶、立交桥等闲置空间,是低空基础设施与存量空间结合的另一重要方向,其中屋顶空间被认为是建设低空基础设施的重要潜在空间,因为现有建筑的屋顶很多用于堆放设备或杂物,未被充分利用,屋顶起降场可以充分活化闲置资源、降低建设成本,同时降低飞行器对地面的干扰以及起降能源消耗。FAA针对屋顶垂直起降场制定了技术规范,与空间相关的要求主要包括接地和离地区(TLOF)、最终进近和起飞区(FATO)、安全区(SA)和障碍物限制面四个部分^[45](图6)。冈萨雷斯(Gonzalez)系统调研了美国纽约曼哈顿约48 000座建筑的屋顶,通过GIS分析与机器学习算法,综合评估建筑高度、屋顶面积、土地利用、人口密度、交通可达性等因素,分析现有城市房屋屋顶作为垂直起降场的适宜性,最终选出约5.6%(25 41)的屋顶符合最高适宜等级,应作为优先部署UAM的目标^[50]。郑俊英(Jeong)等在通过模型计算得到韩国首尔都市区内的40个候选点后,将这些候选点手动调整至周边的停车楼屋顶、高楼天台、公园等空间^[51]。戚玉亮等进一步分析了现有屋顶垂直起降场建设存在的噪声问题与振动问题,并提出了隔震支座等解决方案^[52]。值得注意的是,现有的存量空间相关研究大多以经济成本为主要考虑因素,而在城市建设环境中,还会涉及到产权归属、环境影响、公众参与、第五立面管控等内容。

3 低空基础设施规划研究展望

3.1 低空基础设施规划关键问题

低空基础设施规划是一个尚处于起步阶段的新兴领域,具有很大的研究潜力与探索价值。国内研究大多以低空经济为主题,具体的规划研究相对较少,且多采用定性分析,缺少数据与模型的支持

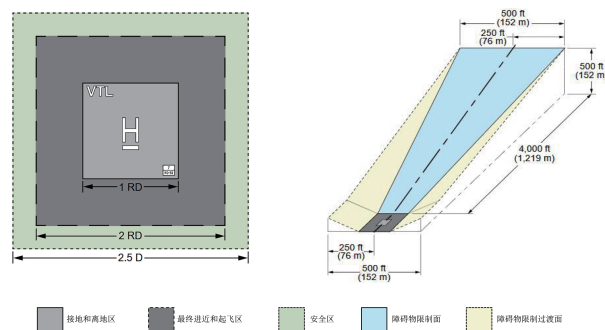


图6 FAA提出的垂直起降场设计规范^①

Fig.6 design guideline of vertiports by FAA

撑。相比之下,国际上的研究大多针对城市空中交通(UAM)这一概念开展,规划研究多采用定量分析与数学模型,关注规划的数据支撑与技术闭环。此外,国际上的研究更加关注UAM落地应用的可能性与技术要求,在市场需求预测、飞行器性能预估、服务定价策略等方面形成了较为完善的技术路径。在借鉴国外低空基础设施规划经验方法的基础上,应结合中国的城市建设现状与空域管理体系进行本土化调整,比如中国城市建设密度相对较高、通用机场建设相对落后、通航飞机出行的消费习惯尚未形成、部分城市存在严格的大范围空域管控等,这对国内的低空基础设施布局与规划提出了更高要求。此外,国内对于高铁站点^[53]、物流配送站^[54]等基础设施的规划选址已经形成相对成熟的技术体系,其规划经验如供需匹配、运营成本分摊、城市开发驱动等在低空基础设施规划领域有待迁移与应用。

低空基础设施中与城乡规划关系较密切的是物理基础设施,尤其是其中的垂直起降场,是众多研究关注的热点。与传统的通用机场或直升机场不同,垂直起降场的服务对象主要是电动垂直起降飞行器(eVTOL),需要更完善的电力基础设施、更频繁的起降频率以及更灵活的位置布局^[45],因此在设施标准、安全保障、效率优化、存量利用等方面仍有待进一步探索。

现有低空基础设施规划的研究主要在以下五个方面存在不足:一是低空基础设施的概念界定与分类标准尚未统一,理论体系呈现多学科、碎片化特点,不同研究对于低空基础设施的概念内涵与具体组成有不同的理解;二是现有研究多集中于大都市地区,比如上海市区、纽约都市区、慕尼黑都市区等,对于郊区以及农村地区的关注相对不足,低空经济突破地理约束、联通偏远地区的价值未能充分发挥;三是应用场景大部分集中在交通领域,这在一定程度上与国外UAM的概念范围有关,虽然低空交通是低空经济应用前景最为广阔的领域之一,但是我国低空基础设施建设应该兼顾低空物流、低空文旅、低空应急救援等多元场景的需求,构建系统化的基础设施体系;四是技术方法多元但是建模过于理想化,尽管设施选址规划中使用了整数规划、K-means聚类、遗传算法等成熟算法,但是研究大多基于空域容量无限与设施处理能力无限的假设进行研究,对于飞行避让、空域分层管理、设施吞吐量等限制考虑较少,缺少高精度模拟低空运行场景的模型算法或仿真系统,此外对于社区接受度、设施缓冲区范围等问题也缺少深入研究;五是现有成果多停留在模型推演阶段,全球范围内缺乏实际运营数据的反馈验证,导致关键参数(如换乘时间、乘客选择率、投资回报率等)设置缺乏实证依据。

3.2 低空基础设施规划体系思考

由于低空飞行活动主要在空域中进行,而绝大部分相关基础设施位于地面,因此低空基础设施规划需综合考虑空域航线网络布局与地面客观物理条件。然而,目前我国空域与地面的管理机制彼此独立,空域由中央空管委统一领导,并由中国民航局和军事航空管理单位协同管理^[55];地面的土地开发、基础设施等建设则随着2019年“多规合一”的推进,由自然资源部统一负责,并由地方城市规

划部门负责实施^[56]。这种空域与地面管理分离的情况将导致低空基础设施的统筹规划变得更加困难。

目前我国正在大力推动空域改革,这为低空基础设施规划体系建设提供了重要基础。据地方发改委报道,中央空管委自2024年11月起将在6个城市试点下放低空空域管理权,具体包括合肥、杭州、深圳、苏州、成都和重庆,这些城市将获得600 m以下空域的管理权限。空域管理权的下放将推动低空空域的进一步开放与改革,为空域与地面协同规划创造可能性,这使得低空基础设施规划中同时管理空域航线布局与地面基础设施成为可能,因此探讨低空基础设施规划如何纳入现有规划体系具有重要意义。

根据独立程度的不同,低空基础设施规划的纳入方式可分为两种:第一种是作为交通基础设施规划的一部分。在此模式下,低空基础设施规划可与道路、铁路等传统交通基础设施规划并列,将其视为交通运输系统中的新形式。这种架构强调低空基础设施的交通属性,便于与传统交通规划进行整合与协同,也可以复用传统交通规划中的规划流程与思路,比如现状分析、需求预测、功能定位、网络布局、枢纽建设、资金测算等,但是需要重点关注低空基础设施的三维属性,这可能会与现有的规划体系与规划工具存在冲突。此外,由于低空基础设施规划具有较大的不确定性,目前的交通基础设施规划可能会限制其战略前瞻性。第二种则是专门设立低空专项规划,赋予低空基础设施规划更大的独立性和灵活性。在此架构下,低空基础设施规划既可以探索符合低空经济特点的规划思路与方法,也可以更好地与空域管理、土地利用、地面交通等部门协同,针对具体问题设立专题研究,例如空地联运专题、环境影响评估与应对专题等。此外,低空专项规划可以适当提高规划更新频率,从而更好地适应低空技术的快速演化与低空经济发展的不确定性。这种方式更适合低空经济的长期战略需求,但对专业人才和知识体系提出了更高要求。

3.3 低空基础设施规划未来发展

高质量发展是我国经济社会进入新阶段的重要特征,与传统发展模式相比,其更加强调建设的质量与效益,要求发展应以人为本、集约高效^[57-58]。在这一背景下,低空基础设施规划需同时应对低空经济发展的全新需求与城市空间发展的现有环境,确保低空基础设施的高效建设与可持续发展。实现这一目标需要妥善处理安全性与高效性、超前性与灵活性、全局性与在地性等三组关系。

安全性与高效性。安全性是低空基础设施规划的首要原则,尤其是在复杂的城市环境中,需要通过空中交通管理、信息服务、应急预案、安全规范等手段,确保低空飞行活动安全运行,城市场景下还需额外关注飞行器对环境的潜在影响及由事故引发的二次伤害问题。在安全保障的前提下,规划需追求高效化布局 and 资源配置,需要充分利用存量用地、盘活低效空间,推动与现有交通系统的协同联动,形成全方位、多层次、多功能的低空基础设施网络,提高整体运行效率。

超前性与灵活性。低空基础设施是推动低空经济发展的先决条件,其规划需具备前瞻性视角,通过预留建设用地与适当超前布

局,为低空经济提供必要的支撑。然而,低空经济的发展伴随着技术的快速迭代与需求的不确定性,这给设施规划提出了更高的灵活性要求。规划方案需具备动态适应能力,既要有技术兼容性,可以适应不同的技术与设备,也要有空间拓展性,可以根据需要调整建设类型与建设规模,避免资源短缺或浪费,充分应对未来的技术变革与需求变化。

全局性与在地性。低空基础设施网络需要服务于大量跨区域、跨城市的飞行活动,这要求规划具备全局视角,通过区域协同构建大范围甚至全国性的设施网络,支持低空经济的空间延展。同时,各地在设施规划时应因地制宜,根据当地资源禀赋、经济特点和特色需求,制定差异化的解决方案。例如,城市化地区需规划高密度、多功能的低空交通枢纽,而乡村与边远地区则应注重简易、低成本设施的布局。在空间选址、航线划定及设施设计时,应结合全局视野与地方特色,构建各有特色的低空基础设施体系。

注释:

- ① 图中D为控制尺寸,指包围整架电动垂直起降飞行器(含旋转部件)在垂直起降状态下水平投影的最小圆直径,用于控制整个平台空间布局;RD为旋翼直径,指包围所有升力部件(旋翼、风扇、起落架接地点等)的最小圆直径,用于起降区与安全区等关键设施的尺寸控制。

参考文献:

- [1] 宋丹,徐政.低空经济赋能高质量发展的内在逻辑与实践路径[J].湖南社会科学,2024(5): 65-75.
- [2] 胥郁,乐乐.低空新质生产力:融合逻辑、内涵本质与推进路径[J].辽宁经济,2024(11): 4-13.
- [3] 李晓津,刘斯迪,刁斯桐,等.低空经济对区域经济贡献的测度研究——以江苏省为例[J].价格理论与实践,2024(10): 184-190.
- [4] 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.
- [5] 张洪海,邹依原,张启钱,等.未来城市空中交通管理研究综述[J].航空学报,2021,42(7): 82-106.
- [6] STRAUBINGER A, ROTHFELD R, SHAMIYEH 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] 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.
- [8] 朱克力.拆解低空经济产业链[J].企业管理,2024(12): 6-12.
- [9] 孔得建,袁泽.低空经济政策法律体系的现状、经验与展望[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2024,37(5): 85-95.
- [10] 王宝义.我国低空经济的技术经济范式分析与发展对策[J].中国流通经济,2024,38(9): 14-26.
- [11] 樊一江,李卫波.前瞻性布局低空基础设施体系的相关建议[J].中国经贸导刊,2024(13): 34-37.
- [12] 沈映春.低空经济:“飞”出新赛道[J].人民论坛,2024(8): 74-79.
- [13] 戴翔.低空经济赋能新质生产力发展:逻辑及路径[J].阅江学刊,2024,16(6): 110-119.
- [14] 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.
- [15] 周思雨.低空经济:创新与机遇的交汇点[J].中国工业和信息化,2024(5): 6-11.
- [16] 张铁柱,王玲.促进低空经济多业态融合健康发展[J].人民论坛·学术前沿,2024(15): 15-24.
- [17] LI X, DANG A. Spatial patterns of drone adoption: Insights from communities in southern California[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 203: 123391.
- [18] ANTCLIFF K R, MOORE M D, GOODRICH K H. Silicon Valley as an Early Adopter for On-Demand Civil VTOL Operations[C/OL]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics[2025-04-01]. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2016-3466>.
- [19] 许艺彤.推动低空经济发展要突出问题导向[J].民航管理,2024(11): 6-10.
- [20] 宋冬林,谢文帅.发展低空经济的政治经济学分析[J].延边大学学报(社会科学版),2024,57(4): 63-72.
- [21] 孙旻,何淼,王亮.低空经济发展趋势及价值展望[J].现代交通技术,2024,21(5): 1-8.
- [22] 姜玉泉,阮晓楠,陈薇.关于低空经济产业发展的若干思考[J].通信世界,2024(13): 15-17.
- [23] 赛迪顾问.中国低空经济发展研究报告2024[R/OL]. [2025-03-19]. https://reportify-1252068037.cos.ap-beijing.myqcloud.com/media/production/s_e2502922_e2502922274fd5067e247c351fa2db44.pdf.
- [24] 吕人力.低空经济的背景、内涵与全球格局[J].人民论坛·学术前沿,2024(15): 45-56.
- [25] 中国信通院.低空经济政策与产业生态研究报告(2024年)[R/OL]. [2025-03-19]. <https://13115299.s21i.faiusr.com/61/1/ABUIABA9GAAGmuWvwYogJWisWE.pdf>.
- [26] 金伟.把握低空经济发展三“航道”[J].中国发展观察,2024(4): 41-45.
- [27] 陈钢.低空经济未来发展的无线电监管思考[J].上海信息化,2024(12): 14-18.
- [28] 张公一,杨晓婧.高质量发展视域下数字技术驱动低空经济发展的机制与路径[J].延边大学学报(社会科学版),2024,57(4): 82-92.
- [29] 欧阳日辉.低空经济助推新质生产力的运行机理与路径选择[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2025,46(1): 118-131.
- [30] International Civil Aviation Organization. Air Traffic Management Automation System: Implementation and Operations Guidance Document[R/OL]. ICAO Asia and Pacific Office[2025-01-18]. <https://www.icao.int>.
- [31] SCHWEIGER K, PREIS L. Urban air mobility: Systematic review of scientific publications and regulations for vertiport design and operations[J]. Drones, 2022, 6(7): 179.
- [32] Utah Government. Utah Advanced Air Mobility Infrastructure And Regulatory Study[R/OL]. [2025-03-31]. <https://www.udot.utah.gov/connect/about-us/operations/aeronautics/aam/>.
- [33] National Aeronautics And Space Administration. Advanced Air Mobility (AAM) Vertiport Automation Trade Study[R/OL]. (2020-11-01)[2025-03-31]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210009757>.
- [34] 李高磊,高扬,郭钊,等.大型无人机机场选址方法[J].科学技术与工程,2022,22(17): 7212-7219.
- [35] PLOETNER K O, AL HADDAD C, ANTONIOU C, et al. Long-term application potential of urban air mobility complementing public transport: an upper Bavaria example[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2020, 11(4): 991-1007.
- [36] 谈明彦,宋平超,田占海.基于遗传算法的无人机监测站选址模型[J].电信快报,2024(9): 38-40.
- [37] WU Z, ZHANG Y. Integrated network design and demand forecast for on-demand urban air mobility[J]. Engineering, 2021, 7(4): 473-487.
- [38] MAGET C, GUTMANN S, BOGENBERGER K. Model-based

- Evaluations Combining Autonomous Cars and a Large-scale Passenger Drone Service: The Bavarian Case Study[C/OL]//2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2020: 1-6[2025-04-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9294183>.
- [39] ROTHFELD R, FU M, BALAC M, et al. Potential urban air mobility travel time savings: An exploratory analysis of Munich, Paris, and San Francisco[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 2217.
- [40] BULUSU V, ONAT E B, SENGUPTA R, et al. A traffic demand analysis method for urban air mobility[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 6039-6047.
- [41] ALVAREZ L E, JONES J C, BRYAN A, et al. Demand and Capacity Modeling for Advanced Air Mobility[C/OL]//AIAA AVIATION 2021 FORUM. VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics[2025-04-01]. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-2381>.
- [42] GERMAN B, DASKILEWICZ M, HAMILTON T K. Cargo Delivery in by Passenger eVTOL Aircraft: A Case Study in the San Francisco Bay Area[C/OL]//2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics[2025-04-01]. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-2006>.
- [43] VENKATESH N, PAYAN A P, JUSTIN C Y, et al. Optimal Siting of Sub-Urban Air Mobility (sUAM) Ground Architectures using Network Flow Formulation[C/OL]//AIAA AVIATION 2020 FORUM. VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics[2025-04-01]. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2020-2921>.
- [44] KIM N, YOON Y. Regionalization for urban air mobility application with analyses of 3D urban space and geodemography in San Francisco and New York[J]. Procedia Computer Science, 2021, 184: 388-395.
- [45] MEYERS M A P. Vertiport Design, Supplemental Guidance to Advisory Circular 150/5390-2D, Heliport Design[R/OL]. [2025-03-31]. https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/eb_105a_vertiports.
- [46] FELDHOFF E, SOARES ROQUE G. Determining infrastructure requirements for an air taxi service at Cologne Bonn Airport[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2021, 12(4): 821-833.
- [47] FREJ VITALE R, ZHANG Y, NORMANN B, et al. A Model for the Integration of UAM operations in and near Terminal Areas[C/OL]//AIAA AVIATION 2020 FORUM. VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics[2025-04-01]. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2020-2864>.
- [48] RIMJHA M, HOTLE S, TRANI A, et al. Urban Air Mobility Demand Estimation for Airport Access: A Los Angeles International Airport Case Study[C/OL]//2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 2021: 1-15[2025-04-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9441659>.
- [49] PATTERSON M D, ANTCLIFF K R, KOHLMAN L W. A Proposed Approach to Studying Urban Air Mobility Missions Including an Initial Exploration of Mission Requirements[C/OL]//Annual Forum and Technology Display. Phoenix, AZ[2025-04-01]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190000991>.
- [50] GONZALEZ C J D. Rooftop-Place Suitability Analysis for Urban Air Mobility Hubs: a Gis and Neural Network Approach[D/OL]. Portugal: Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)[2025-04-01]. <https://www.proquest.com/docview/3059336058/abstract/C9924E862C634FC9PQ/1>.
- [51] JEONG J, SO M, HWANG H Y. Selection of vertiports using K-Means Algorithm and noise analyses for Urban Air Mobility (UAM) in the Seoul Metropolitan Area[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5729.
- [52] 戚玉亮, 黄柯柯, 梁秋河. 面向低空交通的新基建发展机遇分析[J]. 建筑科技, 2024, 8(11): 32-35.
- [53] 段阳, 何震子, 杨家文. 高铁时代交通与土地利用一体化挑战——我国高铁站点选址问题辨析[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(4): 29-35.
- [54] 刘海燕, 李宗平, 叶怀珍. 物流配送中心选址模型[J]. 西南交通大学学报, 2000(3): 311-314.
- [55] 于荣权. 低空经济中的空域管理与安全监管研究[J]. 成都航空职业技术学院学报, 2024, 40(3): 75-80.
- [56] 朱雷洲, 谢来荣, 黄亚平. 当前我国国土空间规划研究评述与展望[J]. 规划师, 2020, 36(8): 5-11.
- [57] 张朝阳, 李翔宇, 翁阳, 等. 基于多源时空数据的北京大型公园绿色绅士化现象研究[J]. 时空信息学报, 2024, 31(6): 773-784.
- [58] 黄竞雄, 党安荣, 李翔宇, 等. 中国城市规划管理现代化发展进程与趋势[J]. 科技导报, 2024, 42(6): 51-60.

图表来源:

图 1-3: 作者绘制

图 4: International Civil Aviation Organization. Air Traffic Management Automation System: Implementation and Operations Guidance Document[R/OL]. ICAO Asia and Pacific Office[2025-01-18]. <https://www.icao.int>.

图 5: National Aeronautics And Space Administration. Advanced Air Mobility (AAM) Vertiport Automation Trade Study[R/OL]. (2020-11-01)[2025-03-31]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210009757>.

图 6: MEYERS M A P. Vertiport Design, Supplemental Guidance to Advisory Circular 150/5390-2D, Heliport Design[R/OL]. [2025-03-31]. https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/eb_105a_vertiports.

表 1-4: 作者绘制

收稿日期: 2025-04-06

(编辑: 申钰文)