

面向无人机的城市低空空域规划的国际经验

刘 泉 陈瑶瑶 洪晓菁 李 昊 钱征寒

提 要 当前,低空经济发展和城市空中交通成为热点,城市中无人机快递物流等活动逐渐兴起,将对城市低空空域的结构带来巨大改变,影响城市低空空域的安全、效率和容量水平,并对城市空间的形态、利用和管理产生巨大影响。未来城市的立体发展将不再限于地面、地上和地下等3个层次,而是与低空空域结合,形成更加完整的空间结构。这一发展趋势将带来城市规划的新变化和新问题。因此,有必要从空域与空间关系角度出发,分析无人机发展带来的影响,总结案例,对面向无人机的城市低空空域规划方法进行综述研究,从而对我国城市规划的创新提出参考。

关键词 智慧城市;低空经济;无人机;城市空间;空域;立体城市;城市规划

International Experience of Urban Low Altitude Airspace Planning for Drones

LIU Quan, CHEN Yaoyao, HONG Xiaowei, LI Hao, QIAN Zhenghan

Abstract: The development of low altitude economy and urban air mobility has become a hot topic, with activities such as drone express logistics gradually emerging in cities. These changes will significantly alter the structure of urban low altitude airspace, affect its safety, efficiency, and capacity, and generate a huge impact on the form, utilization, and management of urban space. The three-dimensional development of future cities will no longer be limited to ground, above ground, and underground levels, but will integrate low altitude airspace to form a more complete spatial structure. This development trend will bring new changes and challenges to urban planning. Therefore, it is essential to analyze the impact of drone development from the perspectives of airspace and urban space, summarize relevant cases, and conduct a comprehensive study on planning methods for urban low altitude airspace in the context of drones. It will provide valuable references for innovating urban planning in China.

Keywords: smart city; low altitude economy; drone; urban space; airspace; vertical city; urban planning

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202405009
文章编号 1000-3363(2024)05-0064-07

1 面向无人机的城市低空空域发展及其空间影响

长久以来,在面向未来发展的城市愿景畅想中,上空布满飞行器往往是未来城市的主要意象之一,空中汽车是科技城市的首要特征^[1]。如:1900年,《波士顿环球报》对城市上空飞艇的畅想^[2];1930—1940年代,勒·柯布西耶(Le Corbusier)的未来城市和弗兰克·劳埃德·赖特(Frank Lloyd Wright)的广亩城市(Broadacre City)中涉及对城市飞行器的描绘^[3];以及2023年,日本的日建设计公司的未来实验室(NIKKEN Future Lab)提出的一种包含了无人机和飞行汽车的AOD(air-mobility oriented development)模式的未来城市设计^[4]。在现实世界,无人机(UAV;drones)和电动垂直起降飞行器(eVTOL,electric vertical take-off and landing vehicle)等技术的应用越来越成熟,对城市空域和城市空间形成了全新且具有现实意义的影响。

在我国,随着低空飞行器技术的发展,城市低空空域正在发生新的变化,低空经济(low altitude economy)得以迅速发展^①,越来越受到重视。2021年,中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》,首次将“低空经济”概念写入国家规划。2023年,低空经济作为万亿元级新兴支柱产业,进一步受到关注。

从城市规划建设的视角来看,与以往高空飞行的通用航空飞行器相比,城市中飞行器所处的位置大多属于低空空域(low altitude airspace),与城市居民活动需求愈加相关,也与城市地面的建成环境更为邻近。城市中无人机快递物流等活动正在逐渐兴起,影响城市低空空域的安全、效率和容量水平,并对城市空间的形态、利用和管理带来巨大

作者简介

刘 泉,深圳市蕾奥规划设计咨询股份有限公司副总规划师,高级工程师,403474330@qq.com
陈瑶瑶,深圳市蕾奥规划设计咨询股份有限公司研发专员
洪晓菁,深圳市蕾奥规划设计咨询股份有限公司研发助理
李 昊,中规院(北京)规划设计有限公司高级城市规划师,通信作者,123541153@qq.com
钱征寒,深圳市蕾奥规划设计咨询股份有限公司副总经理、总规划师、研发总监,高级工程师

改变。

在现代城市规划时期,汽车的使用被看作是用地与交通的核心议题^[5],如同汽车的发明对现代城市规划的影响、无人驾驶汽车技术对当前城市交通体系的影响^[6],低空经济的发展和无人机技术的成熟可能为智慧城市发展时期的城市空间形态重塑带来新的重大影响。

在无人机技术快速发展的背景下,未来城市的立体发展将不再限于地面、地上和地下等3个层次,而是与低空空域结合,形成第4个层次,构建更加完整的空间结构。与eVTOL大多位于120 m以上高度飞行不同,无人机更多位于地面之上120 m以下高度的范围^[7],离地面更近,可能将在面向未来的智慧城市规划建设中成为对地面空间与低空空域之间关系影响更加直接的对象。

因而,有必要从空域与空间关系的角度出发,分析无人机发展带来的意义,总结国内外案例,对面向无人机的城市低空空域规划^[2]方法进行综述研究,从而对我国城市低空空域管理与城市空间规划的创新提供参考。

2 城市低空空域

2.1 城市低空空域的界定

随着低空经济的发展,城市空中交通(UAM, urban air mobility)正在成为重要的趋势,无人机在城市中形成了多种用途,如运输、防火、防灾和测绘等,成为各国发展的重点,无人机的发展将带来空域利用方式的变化。所谓“空域”一词,与飞行器密切相关,一般是指地表以上可供飞行器飞行的空气空间。按照国际民用航空组织(ICAO)提供的空中交通服务和飞行要求,空域分为受控空域和非受控空域两种,共计7类(A、B、C、D、E、F和G)。受控空域包括A类、B类、C类、D类和E类,而非受控空域包括F类和G类^[8]。

低空空域原则上是指真高(离地高度)1000 m(含)以下空域^[9],超低空空域一般是指真高120 m(含)以下空域,属于非受控的G类空域^[3]。按照中国民航局2019年第一季度统计:超低空空域以下的无人机占96.5%,低空空域以下的占99.9%。低空空域与无人机飞行密切

相关。我国2024年公布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》提出面向无人机的适飞空域是指120 m以下空域,120 m以上是管制空域^[10]。因此,本文以120 m以下为重点研究城市范围内的无人机适飞空域。这一空域主要包括两种无人机,一是消费型无人机,二是小型物流运输无人机。

无人机的使用增加意味着城市中低空空域的使用增加,这就产生了如何管理低空空域的问题^[11]。这部分空域是以往空域管理和城市规划较少关注的空间部分,是智慧城市发展趋势下城市未来发展重要的空间组成部分,同时也是具有潜在空间管理问题的区域。因而,这一范围的空域对未来的城市规划管理十分重要,如保罗·丘尔顿(Paul Cureton)提出,城市空中交通是智慧城市的一个方面,低空无人机实际上补充了一个以往飞行器和地面之间缺少利用的真空空域(void space)^[12]。

2.2 空域与空间的关系及问题

城市低空空域由于位于城市范围内,而与城市空间概念形成了关联。要对城市低空空域进行界定,就需要对空域与空间两个主要概念进行梳理。在城市中,空间及空间权受到重视,其概念描述及法律权属均较为清晰。与之不同,我国现有法律未能明确空域概念的具体内涵^[12],对空域权的界定并不充分^[9,13]。这是因为空域范围的确定并不能从过于泛化的视角进行描述,而是特指以航空器理论上能够安全飞行的空间^[9]。特别是所谓低空空域如何从城市规划角度探讨的地上空间视角进行区分,尚不明确。

在城市低空空域,无人机的运行将直接影响地面的建成环境,导致无人机与城市本身交界处的关系发生变化,涉及载客运输、医疗运送、快递货运、急救服务和基础设施维护等多方面内容^[11]。随着无人机数量增加,低空空域作为空间资源的属性得以凸显。由于相关法规并未对无人机活动的最低高度进行限定,在近地空域,空域权与空间权呈现出一种重叠的状态,无人机在城市低空空域的应用“打破了载人航空时代空域权与地面既有权利二者之间的权利缓冲层”^[13]。随着城市低空空域无人机数量

的增多,空域和空间管理的难度将会增加^[10]。

2.3 城市低空空域规划的内容

空域规划概念与空中交通管理及空域管制密切相关,是指空中交通管理模式战略布局,是对空域资源进行的分配和筹划,旨在确保空中交通的安全与效率^[14]。目前,通用航空空域规划的内容包括程序设计、空域结构的架构规划、提供空中交通服务的责任界定、空中交通服务空域分类的确定等^[15]。但城市低空空域的开发利用仍处于早期探索阶段,其规划内容的详尽程度尚未达到通用航空空域规划的成熟水平。

关于城市低空空域规划的内容,张洪海等^[16]、李诚龙等^[17]认为空域规划应包括空域划分、空域结构与空域容量等三方面。在当下发展阶段,无人驾驶航空主要进行典型运行环境和情景下的试点示范运行,空域规划以具体的航线划设为主。在无人驾驶航空的成熟阶段,随着无人机流量激增,空域规划将以空域划分和空域结构为重点,每个无人机兼具安全、公平和效率的航线划设将由“自动飞行规划系统”来设计^[18]。

3 城市低空空域规划的国际经验综述

城市空域的结构设计与无人机飞行方式密切相关,按照空中客车公司的图示,无人机飞行方式可以被划分为基础模式(basic flight)、自由模式(free route)、管道模式(corridor)和混合模式(mixed route)。基础模式是指飞机的基本飞行状态;自由模式是指飞机可以在任何路径上飞行,与其他飞机的路径协调而不冲突;管道模式是指被界定的廊道空间,用于管理高需求的空域或交通流;混合模式是当交通密度高或在任何需要结构化以确保安全操作的位置时,构建的固定飞行路线和相关设施^[19]。见图1。

结合无人机的飞行特性,城市空域可以被划分为完全混合、分层、分区和管道化等4种空域结构的基本模式,涉及不同方向、高度和速度自由性上的差异^[20-21](图2)。低空空域规划可以从空域划分、空域结构与空域容量等三方面

进行综述。

3.1 低空空域划分

部分国家、城市和机构已经开始尝试对低空空域进行分层分区规划管理的研究与实践。如美国联邦航空管理局 (FAA, Federal Aviation Administration) 结合国际民用航空组织的空域划分, 将地面以上至 120 m 以下的超低空非管制空域作为小型无人机的适飞空域。FAA 和美国国家航空航天局 (NASA) 的无人机交通管理系统计划尝试将无人机操作与其他空域类别进行整合, 通过创建过渡区域为无人机保留空域范围, 将无人机与受控空中交通隔离开^[8]。见图3。

在分区方面, 空域分区与无人机飞行的功能要求和城市地面空间的功能要求密切相关, 如无人机的起降区域、禁飞区域应进行专门的划设与管理, 城市中心区、一般地区、乡村及机场周边等不同功能区域对无人机飞行的要求不同, 安全风险不同, 规划要求存在差异。在分层方面, 相关研究实践结合现阶段无人机的技术特点, 对低空空域的层次进行了细分, 如亚马逊公司将城市上空的低空空域分为不同层次: 60 m 以下的空域部分被界定为本地低速交通区域, 用

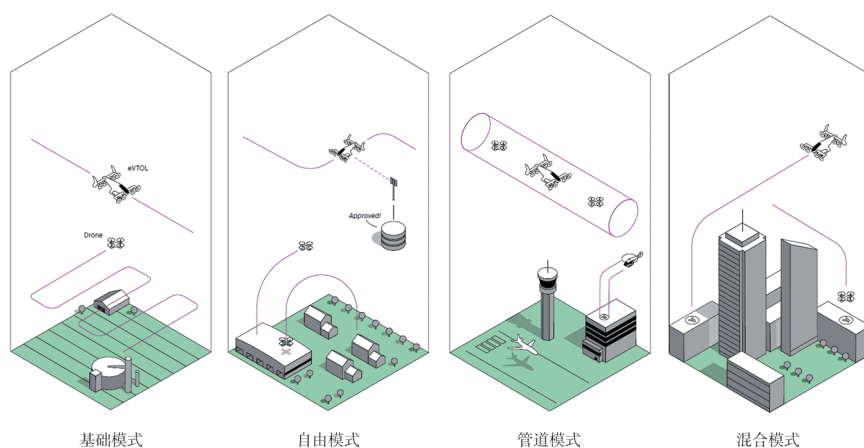


图1 无人机飞行的4种模式^[19]

Fig.1 Four modes of drone flight

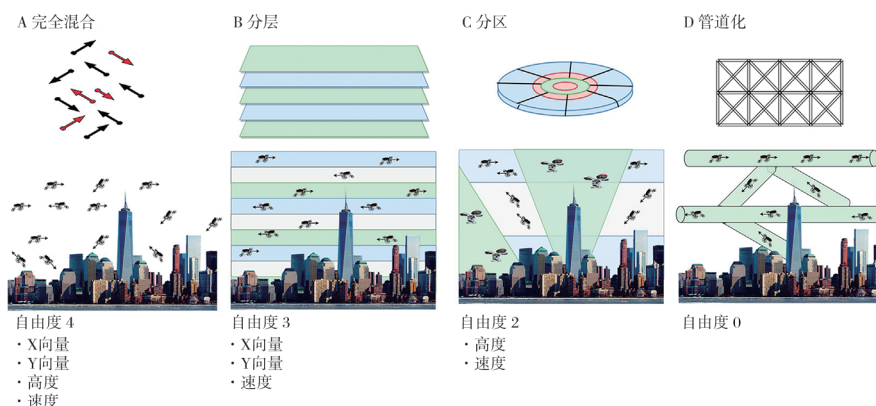


图2 4种空域结构概念^[21]

Fig.2 Four concepts of airspace structure

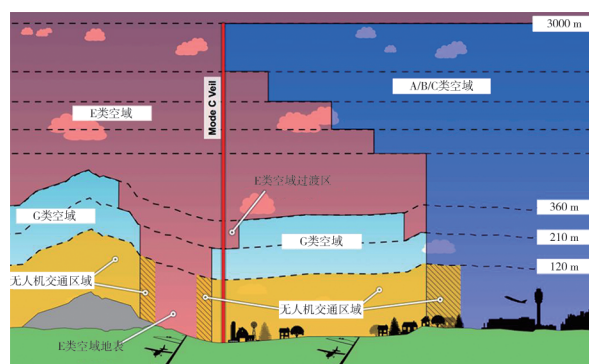


图3 美国空域划分中的无人机运行区^[8]

Fig.3 Operational areas in US airspace zoning

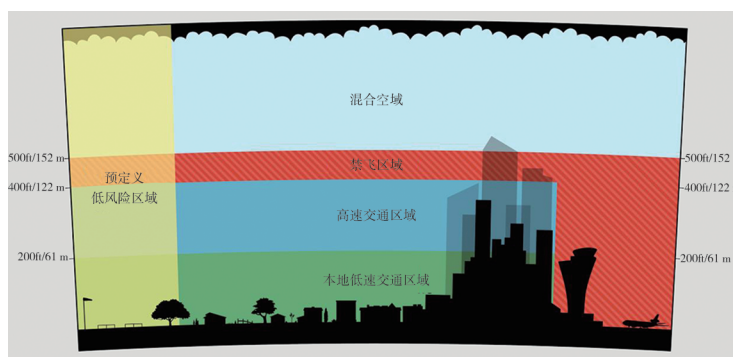


图4 亚马逊公司提出的无人机空域分层分区^[22]

Fig.4 Amazon proposal on drone airspace layering and zoning structure

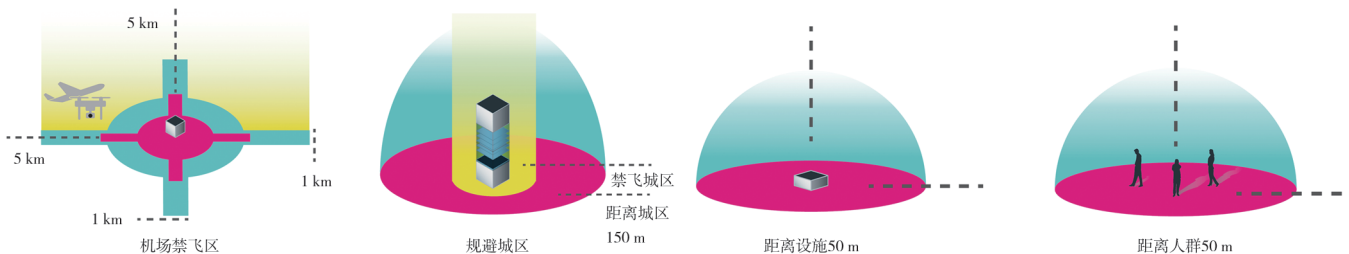


图5 无人机需要规避的人与物^[3]

Fig.5 People and objects that drones need to avoid

于测量、摄像和检查等终端非运输业务,以及装备技术较低的飞行器;60—120 m的空域部分被界定为高速交通区域,用于技术水平较高的飞行器;并在120—150 m的高度设置用于缓冲的禁飞区域;而城市以外的部分则被界定为预定义低风险区域^[22]。见图4。

空域划分需要考虑飞行的风险,与无人机需要规避的人与物的场景相关。针对娱乐用途的消费型无人机,FAA提出不得飞越人群、车流和不得夜航等要求^[23]。相关研究对不同国家无人机对人群、财产、拥堵区域、建筑物、基建等邻避距离的地理围栏约束范围进行了总结,具体距离从30 m到5 km不等^[24]。丘尔顿^[3]总结出无人机规避空间要素的原则,分成4种类型:首先,无人机需要远离机场等航空设施;其次,无人机需要远离禁止飞越的城市区域,距离需要达到150 m以外;再次,无人机需要远离特定设施50 m;最后,无人机需要远离集聚人群50 m。见图5。部分研究^[25-26]提出,无人机起降和飞行中的保护范围在半径10—60 m的区间内。

3.2 低空空域结构设计

随着无人机数量的增多,需要为低空空域设计更加精细化的空中交通结构,以提升交通效率,保障交通安全。NASA在其研究中提出多层划分的城市空域结构,每层都包含1个位于城市上方的空域结构,在密集的高层建筑之间形成多层网络,包括空中通道(sky-lane)、空中管道(sky-tube)和空中廊道(sky-corridor)不同类型。每个结构提供不同数量的自由度。空中通道在高度、航向、速度和位置方面限制最大,而空中廊道则允许最大的自由度^[8]。城市低空空域结构可参照图6所示的G类空域结构,形成包括空域分层及水平、垂直和斜向廊道的完整设计^[27]。

Rakesh Shrestha等基于6G高速通信技术的视角进行研究,总结了无人机飞行的空域结构,进行空域分层,然后设计廊道(corridor),廊道在水平方向、垂直方向甚至对角方向上与层内或层之间的每个交叉点处的节点相连。航路(airway)被配置为使无人机能够根据引导进行飞行。航路的横截面尺寸基于无人机

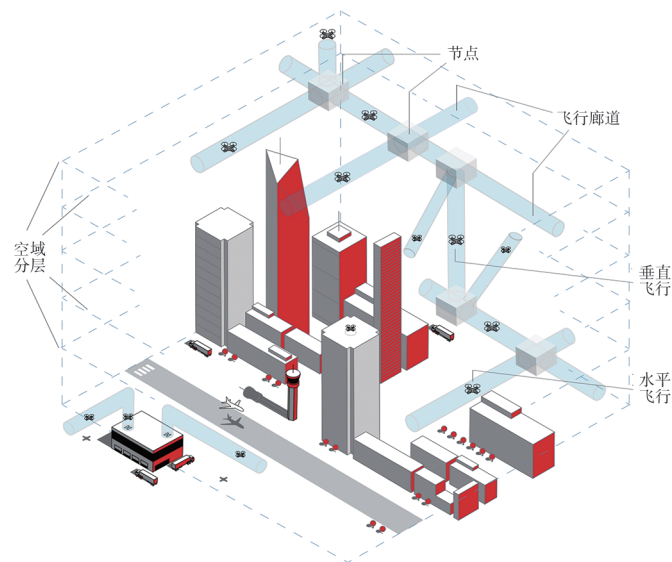


图6 G类空域结构设计^[27]
Fig.6 Design of class G airspace structure

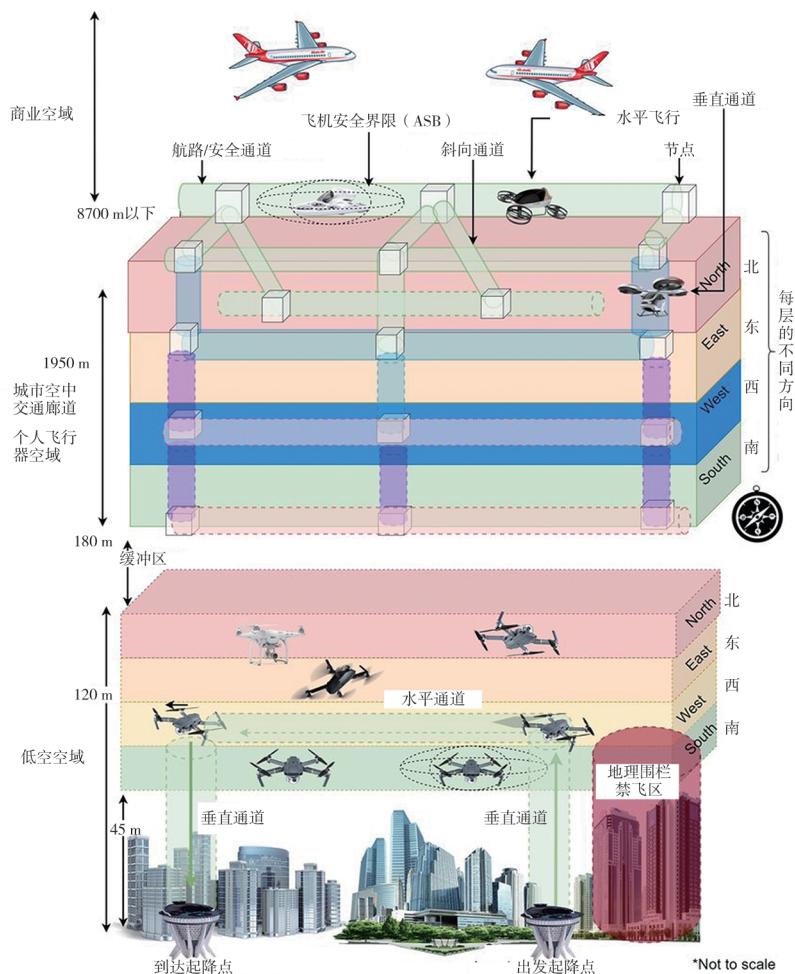


图7 Shrestha等^[28]的空域结构模型
Fig.7 Rakesh Shrestha's airspace structure model

方法；二是规划中充分考虑无人机的产品性能、场景特点以及相应的起降、通信、充电和控制设施的要求，并将这些设施的布局与城乡横断面的模式进行关联，形成分区分类的统筹规划；三是整体规划需要考虑对地风险、空中风险、应急措施等内容，为避免无人机在空中相撞、对路面行人和行驶车辆的安全威胁而进行有针对性的设施布局、容量控制等工作。

4.2 分层、分区、廊道构成的结构设计

空域设计的核心是确定其结构，空域的结构和限制性会影响容量、安全性和效率。结构较少的空域，如图2中自由模式允许更大的容量和路线效率，但需要更强的技术能力，以确保飞行的安全性；而更具限制性的结构，如管道模式，使技术较为简单的飞机能够可靠运行，但可能会减低效率并增加延误^[8,29]。相比之下，结构设计越简单可靠越好^[8]。空域结构的设计需要促进空域接受不同技术能力的飞行器安全飞行，具有较好的包容性，同时也要保障飞行的效率，避免延误和迟滞。

综述相关研究实践，从城市规划的视角出发，面向无人机的城市低空空域的结构设计，涉及分层、分区和廊道等3个方面。一是按照空域高度进行分层，如亚马逊公司，在低空空域进一步划分为高速交通区域和本地低速交通区域，有针对性地进行空域层次细分；二是按照空域类型和地面空间及设施特征进行分区，界定许可区域和禁飞区域；三是设计低空飞行的廊道，具体包括垂直廊道、水平廊道和斜向廊道等，确定廊道的数量、位置和节点，如深圳美团无人机外卖采用线路逐一审批的方式确定廊道。

4.3 无人机设施的规划布局

城市低空空域适飞的小型无人机产品类型多样，性能和尺寸各不相同^[28]，对空间、空域和配套设施的要求也不相同。从产品特征上看，美团无人机在满电状态下可满足半径3 km内的配送需要，配送时间不超过15 min^[36]，而蚂蚁利用智能无人机物流服务站为中心建立半径10—15 km的配送圈^[37]，二者的无人机产

品性能和对对应服务的空间尺度存在差异。

从配套设施上看，不同无人机产品和利用方式所需要的配套设施也存在差异，相关设施应进行系统规划布局，针对不同规模物流需求，开展分级分类的城市物流无人机起降点布局规划^[38]。一是低空空域规划应该结合不同无人机产品，对相应的起降、通信、充电和控制设施进行规划布局，并融入结构设计之中；二是除了交通物流设施以外，针对无人机多样化的功能，低空空域规划也应该关注地面控制站或起降场等应急设施的规划布局。

4.4 针对空地关系的机制标准研究制定

随着无人机在城市中的应用，低空空域的利用价值得到提升，低空空域从自然资源向经济资源转变^[35]，但相关法规并未对低空无人机活动的低限（即能飞多低）予以明确。“这种权利冲突依照传统的物权法观点表现为空域权对空间权的限缩”^[13]。这一矛盾类似汽车路权在城市中的作用以及无人驾驶技术带来传统汽车路权是收缩还是拓展的变化影响，城市沿街界面中退让用地存在的“公权”与“私权”长久以来的矛盾冲突，以及容积率赋值、奖励和转移的管理方法等。与之类似，空间权与空域权变化的影响值得进行前瞻性的探讨。

针对无人机在城市低空空域的发展需求，部分学者提出应在低空权利冲突中运用物权二元论^[20]，以国家干预下的公共产品利用权为核心构建空域权^[9]，从而使“空域使用权”转化为类似“土地使用权”的新型生产要素^[39]。在城市规划领域，应针对空地交界区域的权利关系进行空域和空间管理机制标准的研究制定。一是按照不同用地区域的空间特征和价值差异，有针对性地开展低空空域规划管理的技术研究；二是针对这一公有制财产同私有财产的交集领域，如参考城市中容积率管理及开发权转移的经验，对不同地上空低空空域的价值进行评估，研究相应的管理模式，并设计机制标准。

5 结论

低空空域资源的价值在本质上依然

是“地租”，来源于对低空空域资源的垄断性所有权^[40]。城市区位差异导致空间价值差异，也将带来空域价值差异，从而带来空间价值差异的再次变化。针对这一趋势，城市低空空域规划将形成创新发展，从而推动城市空间规划的整体革新。由于城市低空空域与城市地面建成环境邻近，低空空域与城市空间的关系如何协同将成为城市低空空域规划的重点，而针对城市不同区域，低空空域的规划将与地面城市空间规划形成更加紧密的联系。城市低空空域的规划能否顺利开展涉及能否充分融合空域划分与空间管控的方法理念，能否合理确定低空空域的结构设计，以及能否高效解决空地交界权利关系等问题。未来的城市规划或许将走向空域规划与空间规划融合的新方向，这需要航空领域、信通领域、城市规划领域和法律领域等多方面人员进行协同合作，共同努力。

注释

- ① 本文的研究重点关注无人机的视角。
- ② 本文所述的低空空域规划来源于航空领域的学术论述，以UAM为背景，重点是指低空交通视角下的规划，此外也包括对消费型无人机等其他功能的规划。
- ③ G类空域是指B、C类空域以外真高300 m以下空域（W类空域除外）；平均海平面高度低于6 km、对民航公共运输飞行无影响的空域。B类空域的划设地域及范围划设在民用运输机场上空。C类空域划设地域及范围划设在建有塔台的通用航空机场上空，通常为半径5 km、跑道道面—机场标高600 m（含）的单环结构。
- ④ 不过，120 m的数值是由400英尺翻译而来的，也并不是个绝对的概念，如欧洲和日本部分标准以150 m为低空空域限高，韩国无人机飞行的最大高度设定在300 m，见参考文献[21]。

参考文献

- [1] 卡尔·阿博特. 未来之城: 科幻小说中的城市[M]. 上海社会科学院全球城市发展战略研究创新团队, 译. 上海: 上海社会科学院出版社, 2018.
- [2] 卡洛·拉蒂, 马修·克劳德尔. 智能城市[M]. 赵磊, 译. 北京: 中信出版集团, 2019.
- [3] CURETON P. Drone futures: UAS in

- landscape and urban design[M]. New York: Routledge, 2021.
- [4] 须贺博之, 渡边修一, 小野竜也, ほか. Air-mobility oriented development: 未来のワークワークを加速する次世代の街づくり [EB/OL]. (2023-10-20) [2024-03-01]. https://www.nikken.co.jp/ja/insights/air_mobility_oriented_development.html.
- [5] NODJOMIAN A T, KOCKELMAN K. How does the built environment affect interest in the ownership and use of self-driving vehicles? [J]. Journal of Transport Geography, 2019, 78: 115-134.
- [6] 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 [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132, 103377.
- [7] 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): 6-34.
- [8] BAURANOV A, RAKAS J. Designing airspace for Urban Air Mobility: a review of concepts and approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125, 100726.
- [9] 王立志. 论空域权: 以与空间权的比较为核心[J]. 法律科学(西北政法大学学报), 2017, 35(4): 124-132.
- [10] 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[S/OL]. (2023-06-28) [2024-03-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.
- [11] NESTA. Flying high: the future of drone technology in UK cities[R/OL]. 2018. [2024-03-01]. <https://www.nesta.org.uk/report/flying-high-challenge-future-of-drone-technology-in-uk-cities/exploring-urban-drone-integration/>.
- [12] 张卫彬, 江昊. 空域的概念与争议[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2021, 34(3): 127-133.
- [13] 江昊. 低空空域权与空间权的冲突调和路径[J]. 郑州航空工业管理学院学报(社会科学版), 2020, 39(3): 23-31.
- [14] 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.
- [15] 谢春生, 郭莉, 张洪. 低空空域管理与通用航空空域规划[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [16] 张洪海, 李娜, 夷珈, 等. 城市低空航路规划研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 827-838.
- [17] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向eVTOL航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35-54.
- [18] TANG H L, ZHANG Y, MOHMOODI-AN V, et al. Automated flight planning of high-density urban air mobility[J/OL]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 131, 103324. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103324>.
- [19] BALAKRISHNAN K, POLASTRE J, MOOBERRY J, et al. Blueprint for the sky: the roadmap for the safe integration of autonomous aircraft[R]. Toulouse: Airbus LLC, 2018.
- [20] HOEKSTRA J M, ELLERBROEK J, SUNIL E, et al. Geovectoring: reducing traffic complexity to increase the capacity of UAV airspace[C]// 2018 8th International Conference for Research in Air Transportation. Barcelona: ICRAT, 2018.
- [21] SHRESTHA R, OH I, KIM S. A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management[J]. Frontiers in Future Transportation, 2021, 2, 626935.
- [22] AMAZON. Revising the airspace model for the safe integration of small unmanned aircraft systems[R/OL]. 2015. [2024-02-04]. https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/G/01/112715/download/Amazon_Revising_the_Airspace_Model_for_the_Safe_Integration_of_sUAS.pdf.
- [23] FAA. Operations over people general overview[EB/OL]. (2022-11-10) [2024-07-13]. https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/operations_over_people.
- [24] XU C C, LIAO X H, TAN J M, et al. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude[J]. IEEE Access, 2020, 8: 74175-74194.
- [25] 陈明, 何宁, 宏晨, 等. 改进分层合作A*的无人机交通管理中路径规划[J/OL]. 计算机工程与应用, (2023-11-28) [2024-03-02]: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20231127.1401.016.html>
- [26] OOSEDO A, HATTORI H, YASUI I, et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) simulation of drone delivery models in 2030 Japan[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2021, 33(2): 348-362.
- [27] SAMIR L N, DANOY G, MUSIAL J, et al. Internet of unmanned aerial vehicles: a multilayer low-altitude airspace model for distributed UAV traffic management [J]. Sensors, 2019, 19, 4779.
- [28] SHRESTHA R, BAJRACHARYA R, KIM S. 6G enabled unmanned aerial vehicle traffic management: a perspective[J]. IEEE Access, 2021, 9: 91119-91136.
- [29] CHO J, YOON Y. How to assess the capacity of urban airspace: a topological approach using keep-in and keep-out geofence[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.
- [30] 张洪海, 夷珈, 李娜, 等. 低空空域容量评估研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 78-93.
- [31] 白龙, 路紫, 杜欣儒, 等. 城市区域(超)低空空域无人机活动通道划设规则与方法[J]. 地球科学进展, 2016, 31(11): 1197-1204.
- [32] 覃睿. 再论低空经济(之三): 低空空域的若干问题 [EB/OL]. (2022-12-11) [2024-01-25]. <https://www.163.com/dy/article/HOA783R50530G3Q7.html>.
- [33] FAA. Urban air mobility (UAM): concept of operations version 2.0[R]. 2023.
- [34] SESAR. Joint undertaking. Demonstrating the everyday benefits of U-space: initial results from SESAR demonstrations (2020-2022)[R]. Luxembourg, 2022.
- [35] Duany Plater-Zyberk & Company. Image library: rural-urban transects[EB/OL]. (2008-03-28) [2024-02-10]. http://transect.org/rural_img.html.
- [36] 刘晓鹏. 美团无人机助力“最后一公里”配送[J]. 中国物流与采购, 2022(18): 28-29.
- [37] 汪场. 迅蚁: 末端即时配送延伸“路空一体”空中配送“触角”: 专访杭州迅蚁网络科技有限公司联合创始人庾航[J]. 交通建设与管理, 2020(3): 118-123.
- [38] 张洪海, 冯坤坤, 张晓玮, 等. 城市物流无人机起降点布局规划研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 207-214.
- [39] 粤港澳大湾区数字经济研究院. 低空经济发展白皮书(2.0): 全数字化方案[R]. 2023.
- [40] 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.

修回: 2024-08