

低空经济下低空空域利用的规划应对策略

王纪武, 王奕宁, 章俊岫

【摘要】我国的低空经济发展虽然已进入低空应用场景建设、低空资源开发利用阶段,但是仍缺乏对低空空域利用规划的深入研究,这在一定程度上制约了低空经济的持续、高质量发展。据此,从空地协同的资源利用规划视角开展低空空域规划研究:通过分析低空空域的资源属性与空间特征,厘清低空空域的规模容量测度、起降点与航路网络规划、空间权属管理等重要规划内容;辨析经济社会与城市发展需求在低空空域利用中的主体性地位,聚焦低空规划的关键内容,从低空应用场景拓展、低空基础设施布局、三维宗地空间权属等方面探讨相应的场景类型、影响因素、结构模式及解决对策。

【关键词】低空经济;低空空域;空间资源;空地协同;空间规划

【文章编号】1006-0022(2025)04-0031-08 **【中图分类号】**TU984.11⁺3、F293.2、F542.3 **【文献标志码】**A

【引文格式】王纪武,王奕宁,章俊岫.低空经济下低空空域利用的规划应对策略[J].规划师,2025(4):31-38.

Planning Response Strategies for the Utilization of Low-altitude Airspace in the Context of low-altitude Economy/WANG Jiwu, WANG Yining, ZHANG Junshen

【Abstract】 Low-altitude economy in China has entered the stage of practical implementation and space resource utilization. However, the absence of low-altitude airspace utilization planning research has restricted the sustainable and high quality development of low-altitude economy. Based on the perspective of the air-ground collaborative resource utilization, the low-altitude airspace planning research is carried out in this paper: with an analysis of the resource attribute and spatial characters, the carrying capacity measurement of low-altitude airspace, take-off and landing points, air route network, and spatial attribute management are clarified; the subjectivity status of socioeconomic and urban development needs in low-altitude airspace utilization is analyzed; scenario types, influencing factors, structural patterns, and solutions of low-altitude airspace utilization are studied from the aspects of scenario selection, infrastructural layout, three-dimensional land-space property rights etc.

【Keywords】 low-altitude economy; low-altitude airspace; spatial resource; air-land collaboration; spatial planning

0 引言

低空经济是以低空飞行活动为牵引,辐射带动相关领域发展的综合型经济形态。其以先进制造业为基础、以信息技术为支撑,通过低空空域的开发利用来促进经济社会发展,具有新质生产力的核心特征。自2021年《国家综合立体交通网规划纲要》发布以来,我国的低空经济发展迅速。工业和信息化部统计数据显示,至2023年我国低空经济规模已超5000亿元,增速达33.8%。

2024年,“低空经济”被写入政府工作报告,相关产业被列为战略性新兴产业。在制造端和技术端的驱动与支持下,当前以低空基础设施规划和低空应用场景建设为主的低空经济已然进入重要发展阶段。

作为新兴的综合型经济形态,低空经济的发展需要多部门、多学科的协同支撑。一方面,低空空域是低空经济的重要空间载体,与地面经济社会活动具有密切的空间和功能联系;另一方面,随着低空经济的快速发展,低空空域将从“天然存在的公共资源”转

【基金项目】 国家社会科学基金项目(22BRK020)、自然资源部2024年部省合作项目(2024ZRBSHZ073)

【作者简介】 王纪武,博士,浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师,浙江大学城乡规划与设计研究所所长。wangjiwu@zju.edu.cn

王奕宁,通信作者,工程师,浙江大学城乡规划与设计研究所博士研究生。ywang13@zju.edu.cn

章俊岫,硕士,高级工程师,浙大启真未来城市科技(杭州)有限公司总经理。

变为“重要的战略空间资源”。然而，相较于我国低空经济的蓬勃发展，低空空域利用规划的研究相对滞后，这必然会制约低空经济的持续、高质量发展。因此，开展低空空域利用规划研究，不仅响应了国家战略性新兴产业的发展需求，还对优化城市建成环境的功能机制、拓展空间规划理论与方法具有重要意义。

综上所述，为实现空间资源的规划与管理，保障低空空域的有序利用，有必要开展低空空域资源的规划利用研究。首先，通过梳理分析相关学科领域的研究进展，总结低空空域及其利用的资源属性与特征；其次，理清经济社会与城市发展需求在低空空域利用中的主体性地位；再次，剖析当前实践存在的低空空域规划利用问题；最后，从空地协同的利用管控、应用场景和空间规划3个方面提出应对策略。

1 相关研究

1.1 低空空域的空间分异

近年来，加拿大滑铁卢大学、美国航空航天局、新加坡南洋理工大学、荷兰代尔夫特理工大学，以及中国的南京航空航天大学、北京航空航天大学等先后开展了城市低空航路规划的研究^[1-4]。总体来看，低空空域利用的核心在于通过低空交通实现非传统的物流、人流和信息流的自由流动，这也是低空空域利用的基本内涵与特征。因此，低空空域利用规划的相关研究主要集中在低空航路的规划与管理方面。由于城乡在经济社会与发展建设等方面存在显著差异，两者对低空空域利用的要求与方式也截然不同。城市环境对低空空域的利用规模和方式具有重要影响。密集的城市建筑、设施以及大规模的市民流动与聚集，不仅影响了低空空域的安全利用，形成了大量的管制空域，还对地面的安全风险

防范提出了更高要求^[5-6]。可见，低空空域资源并非均质分布，其受到来自“地面”的需求影响与约束，呈现出显著的时空分异特征。

《中华人民共和国空域管理条例(征求意见稿)》按照高度将空域分为管制空域(A、B、C、D、E类)和非管制空域(G、W类)两级七类。其中，G类、W类空域为低空空域利用提供了支撑(表1)。相对于土地利用规划，低空空域开发利用规划与管理的三维分层特征显著。随着低空空域利用的规模化发展，精细化的三维分层空域规划管理是实现低空空域由“空间”向“资源”转化的重要手段。

1.2 低空空域的利用规划

1.2.1 低空空域容量测度

确定低空空域容量是进行空间资源规划与管理的前提和基础。相对于土地管理的用地规模、容积率等指标对发展规模和开发强度的控制，低空空域容量管理的核心内容是流量管理^[7]。因此，航路网络与起降点作为影响低空空域流量的主要因素，是目前低空空域容量管理的主要研究对象^[8]。有研究将低空空域容量定义为一定空域内航路网络所能承载的最大飞行器数量；也有学者提出以一定时空范围内能够降落到任意一个起降点的最大飞行器数量(即吞吐量)来反映低空空域容量^[9]。但是，二者都忽视了低空空域利用的空地协同特征、地面建成环境的限制和物质形态特征，以

及空中的三维空间权属、空间邻避等因素对低空空域容量的影响。

1.2.2 起降点选址规划

起降点是实现航路网络“落地”的关键因素，对低空空域容量、航路网络结构及低空空域利用效率有重要影响。目前，基于飞行器的航程限制、起降点吞吐量、覆盖率最大化等构建选址模型，是研究起降点布局的主要方法和内容^[10-11]。然而，城市风场环境、高层建筑的遮挡、飞行器对市民隐私的干扰以及噪声污染等同样对起降点的布局有重要影响^[12]。从空间布局来看，在飞行器的航程、起降点、吞吐量等的约束下，起降点选址规划以服务半径为基础配置设施，以覆盖率为指标服务于地面需求，具有显著的空间尺度特征。具体而言，低空空域利用的重要目标之一是满足经济社会与城市发展建设的需求，而这些需求在建成环境中的空间体现又对其具体的规划利用方式产生了重要影响。

1.2.3 航路网络规划

合理的航路网络规划对于确保低空空域的安全和高效利用至关重要。当前的研究主要将城市低空航路网络构建路径分为以下3类：①基于低空空域容量和吞吐量的容量导向型构建路径；②基于低空空域的高效利用和飞行器最短航迹的效率导向型构建路径；③基于复杂建成环境和飞行器低空避障、避撞等安全要求的安全导向型构建路径^[13]。

现有基于航路网络实现低空空域利

表1 低空空域类别与利用特征

高度/m	类别	管制属性	主要飞行器	主要应用场景
1 000 ~ 3 000	D 或 E 类空域	管制类空域	直升机	通用航空运输等
300 ~ 1 000	D 或 E 类空域	管制类空域	eVTOL	城市空中交通、观光旅游等
120 ~ 300	G 类空域	非管制类空域	行业无人机	城市管理、物流配送、航拍测绘等
< 120	W 类空域	非管制类空域	消费类无人机	

资料来源：根据《中华人民共和国空域管理条例(征求意见稿)》整理绘制。

用的研究, 总体经历了“利用—高效利用—安全高效利用”的发展历程, 已形成具有实践意义的计算分析与构建方法, 为解决“如何飞”的问题提供了必要的研究工具。但是, 已有研究对当前低空经济发展普遍关注的“为什么飞”的问题(即源自地面经济社会发展需要的应用场景)尚缺乏深入研究。

2 对低空空域利用的再认识

联合国环境规划署将自然资源定义为在一定时间和技术条件下, 能够产生经济价值、提高人类当前和未来福利的自然环境因素的总称。可见, 自然资源具有技术进步相对性和社会需求相对性的特征属性, 即自然资源是在技术进步的基础上能够被开发利用的自然物(可行性), 是适应社会发展需求并产生社会经济价值的自然物(必要性)。因此, 对于具有新质生产力特征的低空空域资源, 只有理清其与经济社会发展需求的主体性辩证关系, 才能更好地进行科学利用。

2.1 地面经济社会活动对低空空域利用具有主体性

空间是相对于人的经济社会实践而存在的。低空空域不是完全脱离地面经济社会活动与城市发展需求的“抽象空间”, 它同时具有“作为人的技术的社会属性”和“作为技术的物质属性”的双重属性特征^[14]。前者决定了低空空域对特定经济社会发展需求的依赖性; 后者则体现了低空空域对城市形态与功能构造的特殊影响和作用。因此, 低空空域资源的价值和意义在于: 一方面, 为满足和实现特定经济社会发展的需求与目标提供相应支持; 另一方面, 通过改变或影响经济社会活动的参与方式, 形成新的经济社会和城市功能结构组织机制。

目前, 各地普遍关注并加速建设低空应用场景, 这本质上是对低空空域“空间功能”的规划及实施。因此, 在制造端和技术端的驱动与支持下, 理清低空空域利用的特征、优势以及“宜居、韧性、智慧”目标导向下城市发展的重要需求, 进而构建具有针对性和可行性的空间利用供需关系, 是实现低空应用场景落地、推动低空空域由“空间”向“资源”转化的基本原则与方法(图1)。

2.2 低空空域利用对地面经济社会活动的影响与作用

以飞行器为主的低空空域利用具有显著的技术驱动特征。一方面, 不同城市的经济社会发展及建成环境存在差异(即需求差异), 其低空空域利用方式必然也不同; 另一方面, 以飞行器为主的空间开发利用方式, 使低空空域具有“流动空间”的一些特征, 这在一定程度上或在某些方面改变了“随着空间距离增加, 关联互动作用逐步降低”的基本经济社会空间分布规律。

目前, 以各类飞行器为载体的低空空域的人流、物流和信息流具有“低、慢、小”的功能实现特征^[5-6]。其中: “低”指飞行器的飞行高度低, 与建成环境之间存在密切、复杂的交互关系; “慢”指飞行器的绝对飞行速度慢, 但其对于某些特殊或应急需求又具有“快”的相对优势; “小”主要指飞行器的运载规模小,

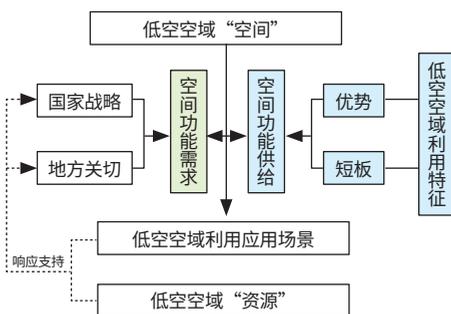


图1 低空空域利用应用场景的形成机制

单次运行成本较高, 但在成本敏感性较低、交通效率和信息时效要求高的功能需求方面具有一定的优势。因此, 低空空域的开发利用将使城市某些功能联系的时空距离敏感性降低, 进而在一定程度上影响或改变城市经济社会活动的空间组织方式与结构(图2)。

3 低空空域利用的问题

3.1 低空空域的权属问题

低空空域通过拓展可利用物理空间来提升经济社会效益。因此, 明确的空间权责关系是实现低空空域高效利用、规范管理的基础, 也是推动低空经济持续、健康发展的重要保障^[15-17]。

2023年发布的《中华人民共和国空域管理条例(征求意见稿)》是目前进行低空空域利用管理的主要依据。该条例具有以下特点: ①相对于《中华人民共和国土地管理法》规定的全民所有制、集体所有制两种类型, “空域资源所有权由国家空中交通管理领导机构代表国家行使”, 即没有城乡差别; ②低空空域由“各级空中交通管理机构按照职责分工负责有关空域管理工作”, 即由功能性的专业部门(交通)实施管理; ③规定了“空域用户依法享有使用空域的权利, 并履行相关义务”。但该条例所依据的法律、法规较为模糊, 具有“原则性规定”的特征。与之类似, 《中华人

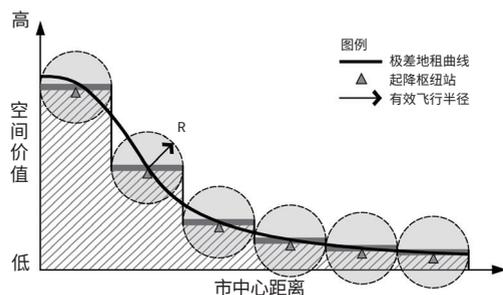


图2 低空空域利用可能对城市结构的影响和作用示意图
注: 低空空域利用使得城市空间价值突破因与市中心距离增加而降低的规律。

民共和国物权法》(以下简称《物权法》)对地表、地上或地下建设用地的使用权也仅做了原则性规定。

《国有建设用地使用权出让合同(示范文本)》(GF—2008—2601)规定:出让宗地空间范围是以平面界址点所构成的垂直面和上、下界限高程平面封闭形成的空间范围。用地使用权的“三维箱体”特征对低空航线、起降点乃至低空空域容量均具有重大影响(图3)。调研结果显示,目前在实践中涉及第三方的起降点选址,均是服务方通过解释、协商获得第三方同意后,在其建筑屋顶或用地地上设置起降点,仍存在责权不清的问题,影响了低空空域的持续、有序利用。

总体来看,随着低空经济的发展,相关的法律法规也呈现快速发展的态势,整体研究呈现出显著的“技术供给”特征,即以保障低空交通安全、高效运行为主要研究内容和目标。但是,基于地面经济社会活动与城乡发展建设的要求,目前尚缺乏从空地协同的角度对低空空域资源进行规划管理的针对性研究。

3.2 低空空域の利用问题

低空空域利用通过新技术的应用在消费端创造新的社会经济需求和供给关系。因此,新空间供需关系的构建是低空空域这一新型空间生产关系与新质生产力融合的关键^[18]。

2024年发布的《2024低空经济场景

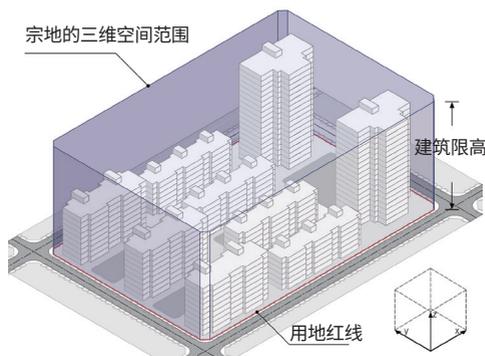


图3 宗地的三维空间范围示意

白皮书》系统地汇集并总结了低空空域的应用创新实践,并提出未来低空经济生产力的发展方向。低空空域利用具有以下特点:①低空空域开发利用的前景广阔,涵盖和关联的领域众多,即低空空域的开发利用具有多元化的特征。但是由于低空空域飞行活动、参与主体的多样性,低空空域应用场景的空、地交互联动复杂性较高,低空空域的开发利用将受到一定制约;②低空空域各类开发利用技术的广度和深度兼备、飞行器零部件和整机制造产业完备,即低空空域利用的产业生态链完备。然而,低空经济在消费需求端的产值仅占整体价值链的15%^[19],以下游消费需求为牵引的低空空域开发利用模式尚未形成。

总体而言,我国各行业、各领域对以低空空域为载体的低空飞行活动及其作业的熟悉度和接受度均有待提高。虽然低空空域的开发利用具有良好的发展基础,但是与地面类似活动相比,低空应用场景尚未形成明显优势。如何选择并实现低空场景的应用,以有效带动低空空域的高效、可持续利用,是各地当前需解决的重要问题。

3.3 低空空域的规划问题

新的低空经济生产方式必然产生新的空间资源配置模式,并使传统的规划范式面临新的挑战^[20]。由于低空空域利用与地面经济社会活动之间存在复杂的交互影响关系,地面安全保障设施的三维空间邻避要求对低空空域容量具有巨大的影响和约束作用。据此,可利用的城市低空空域容量的测度公式如下:

$$V_i = (A \times H) - (a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 + \dots + a_i \times h_i) \quad (1)$$

式中: V_i 为城市低空空域容量; A 为城市建设用地范围; H 为低空空域管控高度; a_i 为第 i 类重点管控区域及其周边一定范围; h_i 为第 i 类重点管控区域及

其周边一定范围的管控高度要求。

由于“地面”功能的特殊性(如机场用地、供电用地等),我国相关条例规定了具有“三维空间邻避”特征的空间管制要求。各类对低空空域利用具有管制要求的用地不仅对低空空域的容量具有重要影响和作用,还对航路网络、起降点的规划布局提出了特殊要求。但是,相关条例仅是较为原则性地表述为“周边一定范围的区域”,这直接影响了航路网络与起降点规划布局的可行性。因此,为了有效实施低空空域利用规划,支持低空应用场景的建设实施,低空空域空间规划的首要问题是研究并明确划定必要的空间管制区域(表2)。

4 低空空域利用的规划应对策略

4.1 空地协同的利用管控

低空空域不仅是低空经济发展的重要空间载体,也是地面功能与需求向低空空域的延伸。低空空域与地下空间利用具有相似的经济、技术驱动机制。低空空域作为三维特征显著的“新”开发利用区域,明确其空间权属的法律法规还较为欠缺。因此,明确空间权属关系、完善相应的规则和规范对于低空空域的规划利用具有重要作用。

4.1.1 低空空域利用的优先权

低空空域利用及其规划具有显著的时空动态特征,即与功能性质相对明确并具有排他性的城市用地性质不同,同一低空空域或航路可能承载不同的空间功能,因此需要在低空空域利用规划中引入时间维度。

参照城市建设用地的分类,可将城市低空空域的使用功能分为公共管理服务和商业服务两类。按照具体的功能特征又可将两类使用功能细分为安全保障类、补充增强类、丰富提升类等。其中:安全保障类功能主要是通过低空空域的

利用在城市安全保障方面起到重要作用的功能，如安全巡检、应急救援等；补充增强类功能主要是以既有的城市功能为基础，起到保障或辅助作用的功能，如物流交通、植保测绘等；丰富提升类功能主要是在低空空域利用的基础上发挥丰富市民需求的作用，如观光娱乐、教育培训等。

一方面，安全保障是城市发展的底线和基础，相应的用地功能需求也应具有低空空域的优先使用权；另一方面，低空空域具有公共资源的属性特征，即公共管理服务功能具有优先使用权。因此，按照“先安全再其他、先公共后商业”的原则对低空空域主要的利用功能进行整合分析(表3)，可以确定实施低空空域时间维度规划(使用次序)的基本原则：优先安排“S+A”“S+B”功能，其次安排“A+E”功能，最后考虑“B+E”“A+P”“B+P”功能。

4.1.2 三维宗地的空间利用权属

低空空域是重要的空间资源，其空间使用权对于起降点和航线的布局与运行，以及规划管理、权责划分等都具有重要的影响和作用。根据目前低空空域利用的实际情况，涉及的空域主要包括两类。

(1) 出让宗地向上延伸的未建设利用空间

《国有建设用地使用权出让合同(示范文本)》(GF-2008-2601)规定，出让宗地空间范围是以平面界址点所构成的垂直面和上、下界限高程平面封闭形成的空间范围。由此推论，宗地向上延伸的未建设利用空间、现状建筑物的屋顶及外部空间的空间使用权应属于土地使用者。然而，土地使用者通过缴纳土地出让金获得土地使用权的过程中，并未明确宗地中未建设利用空间的使用权益和责任。因此，需要尽快完善、明确三维宗地的概念界定、权属关系以及相关

空间管理制度。

(2) 低空空域中剔除三维宗地后的空间范围属于公共空间资源

《物权法》第136条规定，新设的建设用地使用权不得损害已设立的用益物权。由此推论，在使用低空空域公共空间资源的过程中，不能对既有建筑空间的安全与使用构成影响。进一步来说，

应通过三维空间的距离管控，避免飞行器对城市建筑安全的潜在影响，以及对市民正常工作与生活的噪声影响、视觉影响乃至隐私影响。但是，现有的管理制度、技术规范等都难以满足这些要求。此外，目前低空空域的商业化利用主要采用主管部门负责的报批制度，并没有类似“土地出让金”的公共空间资源使

表2 城市低空空域利用的管制区域

类别代码			类别名称	管制区域
大类	中类	小类		
A	A3	A35	科研用地	需要对电磁环境进行特殊保护的射电天文台、卫星测控(导航)站等设施及周边一定范围的区域
	A7		文物古迹用地	重要革命纪念地、重要不可移动文物及周边一定范围的区域
B	B4	B41	加油(气)站用地	加油(气)站等公共基础设施及周边一定范围的区域
W	W3		三类物流仓储用地	易燃易爆等危险品的生产和仓储区，可燃重要物资的大型仓储区域
S	S3		综合交通枢纽用地	公共交通枢纽、港口等公共基础设施及周边一定范围的区域
U	U1	U11	供水用地	供水厂等公共基础设施及周边一定范围的区域
		U12	供电用地	发电厂、变电站、航电枢纽等公共基础设施及周边一定范围的区域
		U16	邮政设施用地	邮政中心局、邮政支局、电信局、移动基站、微波站等设施用地及周边一定范围的区域
		U16	广播电视设施用地	广播电视的发射、传输和监测设施用地及周边一定范围的区域
H	H2	H21	铁路用地	铁路电气化线路等公共基础设施及周边一定范围的区域
		H22	公路用地	高速公路等公共基础设施及周边一定范围的区域
		H24	机场用地	机场净空区等涉密单位及周边一定范围的区域；需要对电磁环境进行特殊保护的航空无线电导航台、雷达站等设施及周边一定范围的区域
H3		区域公用设施用地	重大水利设施、饮用水水源保护区等公共基础设施及周边一定范围的区域	
H4	H41		军事用地	军事管制区、重要军工设施保护区域、核设施控制区域等涉密单位及周边一定范围的区域；国界线、实际控制线、边境线向我方一侧一定范围的区域
		H42	安保用地	监狱及周边一定范围的区域

资料来源：根据《中华人民共和国空域管理条例(征求意见稿)》《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137-2019)整理得出。

表3 低空空域功能分类

按照功能属性分类	按照功能特征分类		
	安全保障类(S)	补充增强类(E)	丰富提升类(P)
公共管理服务类(A)	S+A	A+E	A+P
商业服务类(B)	S+B	B+E	B+P

用或出让制度，这不利于低空空域资源价值的实现。

总的来看，低空空域本身以及城市建成环境都存在大量复杂的空间权属问题。因此，及时推进针对性的研究，完善相应的规则制度和技术规范，将有利于保障低空空域的有序规划与利用，切实将低空空域转化为低空资源，从而促进低空经济的全面、快速和可持续发展。

4.2 空地协同的应用场景

低空空域利用应用场景是保障相应装备制造和信息技术产业持续发展，促进经济社会与城乡高质量发展的新质生产力的关键领域之一。在制造端和技术端的驱动下，各地在积极实施产业布局、提升研发能力的同时，也在加快统筹推进低空新基建建设、拓展低空空域应用场景。可见，应用场景及其配套基础设施建设是实现低空空域转化为低空资源的关键环节。

低空空域应用场景从地理区域角度可分为城市场景和非城市场景。其中，城市场景是低空空域的主要应用场景，从服务功能角度可将其分为安全保障型（如巡检检测、应急救援等）、补充增强型（如物流交通、植保测绘等）、丰富提升型（如观光娱乐、教育培训等）等3类。城市场景本质上是以服务地面城市高质量发展与治理为目标，以飞行器为载体实现低空空域人流、物流、信息流的自由流动。因此，遵循空地协同的发展利用理念，梳理分析我国经济社会的重大战略（目标导向）和城市发展的重大需求（问题导向），并进一步结合低空空域利用的优势来进行低空空域规划，是实现可持续应用场景的重要原则和策略。

4.3 空地协同的空间规划

4.3.1 低空空域利用的基础设施系统

低空空域利用的基础设施系统包括

地面基础设施和空间系统，这是保障和支持低空空域利用的基础。由于低空空域利用的特殊要求，其地面基础设施系统的规划布局与空间管理也具有相应的特殊性。根据地面基础设施系统的实际功能，其主要子系统包括起降点系统和通信支持系统。其中：起降点系统又可分为专用空港、枢纽空港、末端空港等；通信支持系统则主要用于支持飞行器的导航、监控与信息传递，通常与已有的通信基站结合设置。综合来看，起降点系统是低空空域利用规划与管理的主要基础设施子系统。

(1) 枢纽空港

枢纽空港是低空基础设施系统中具有综合性、集成性的关键设施，不仅决定了低空空域利用的结构、模式和功能，同时也是低空空域联系和服务城市发展的关键节点。因此，枢纽空港的规划布局需在平面布点方面结合独立的用地空间，综合考虑枢纽空港及其配套设施的用地需求、城市功能结构以及道路网络等因素；在三维空间布局方面考虑大规模飞行器起降的空间要求、周边用地与建筑的邻避要求，以及便捷高效的航线划设要求等，并在保障飞行器安全飞行的基础上，以空地协同为前提，实现与建成环境的形态、结构和需求的有机结合。

(2) 专用空港

专用空港是根据具体的功能需求为特定的部门和机构设计的小流量空港。在选址方面，其布点数量较少、功能需求明确，具有较强的专业化特点，通常与具体机构或部门的用地空间进行一体化建设，并配置相应的配套空间。在三维空间方面，专用空港需要适应周边用地与建筑的邻避要求，一般无需与枢纽空港产生联系。因此，专用空港的规划布点具有一定的独立性，需要根据其专业化的功能和航线需求，对其建设的可

行性（包括既有空间的更新、改造或拓展）和飞行器飞行的可行性（空间邻避要求）进行评估论证。

(3) 末端空港

末端空港具有功能多样、空间分布广、规模大、数量多的特点，与城市经济社会生活的联系最为密切。在选址布点方面，末端空港注重对目标片区的覆盖，并与城市末端交通系统积极衔接，且通常需结合城市既有的建筑空间进行混合布置，因此涉及更为复杂的空间权属问题。在三维空间方面，末端空港注重与枢纽空港的联系，且受周边用地与建筑邻避要求的影响较为显著，同时也存在飞行器大量进入或穿过三维空地空域的情况。因此，末端空港的选址布点需与枢纽空港、目标片区进行一体化规划布局，面临的空间权属问题更为突出和复杂。

4.3.2 低空空域利用的空间组织模式

(1) 起降方式及其空间利用特征

不同的飞行器具有不同的流量规模和起降方式，并对建成环境中起降点布局的可行性和安全性产生重要影响。因此，有必要理清不同的起降方式及其所需空间的特征，以更好地实施起降点系统规划。由于飞行器的起降方式及其空间管制具有相似性，本文主要分析讨论飞行器降落进场的方式。目前，飞行器降落进场的方式基本可分为4类（图4，表4）：①水平进场、垂直下降的进场方式；②沿斜线进近的进场方式；③利用等待圈和等待点的进场方式；④基于环形结构运行的进场方式。不同的进场方式具有不同的低空空域占用特征，并对地面建成环境造成差异化的影响和作用，因此也需制定针对性的规划布局 and 空间管制措施。

(2) 航路网络的构成与组织

起降点系统由枢纽空港、专用空港和末端空港构成，是支撑低空空域利用、

实现空地协同的空间资源利用的关键支撑。在低空经济发展初期，低空空域的利用模式较为简单，主要表现为需求点或专用空港—目标空间或末端空港的飞行活动(即图5中的“O—r—D”模式)，其航线是城市低空空域航线系统中的支线。随着城市对低空空域资源利用需求的增长，逐步形成了有组织、系统化的低空利用模式，即由需求点向枢纽空港发出服务需求，再由枢纽空港提供更为高效、集成化的低空利用服务(即图5中

的“O—H—R—D”模式)，其航线是城市低空空域航线系统中的次干线。枢纽空港是联系航线和任务的重要纽带与桥梁，是航路网络的重要节点和低空空域利用的中枢。枢纽空港通过理清服务需求和组织集成飞行服务，实现不同层级空港之间飞行器及相关物流、信息流的高效、安全流动。枢纽空港与专用空港、末端空港之间的城市低空航路系统化集成组织模式可分为串联式和复合式两种(图6)。根据具体的航线任务需求，航线

航班网络可灵活选择合适的组织模式，实现飞行器的安全、协同管理以及低空空域的高效利用。

(3) 航路网络的空间组织结构

“枢纽空港—枢纽空港”航线是城市低空空域航路网络的主干线，即以枢纽空港为核心，形成具有一定有效覆盖面积(或半径)的城市低空服务单元。以枢纽空港为关键网络节点且其相互连接形成的干线航路，与联系枢纽空港、末端空港和专用空港的次干线航路、支线

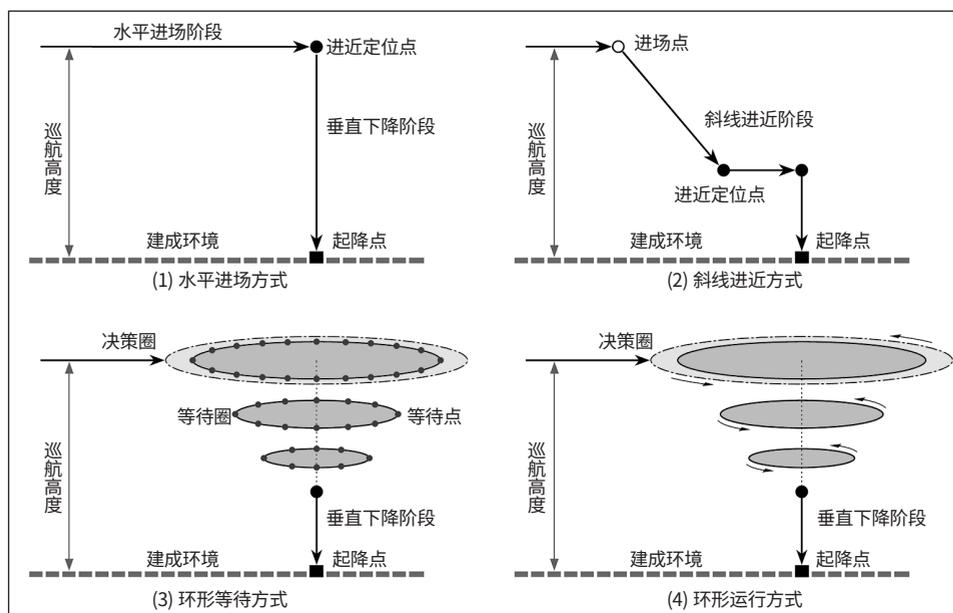


图4 飞行器进场方式示意
资料来源：根据参考文献[12]改绘。

表4 飞行器进场方式比较分析

进场方式	优点	缺点	相应起降点类型
水平进场	占用空间小，适合起降空间受限的环境	长距离直线下降的危险系数高；可容纳的飞行器数量有限	结构简单，可容纳的飞行器数量有限，适用于末端空港和专用空港
斜线进近	飞行距离和时间得到优化	占用空间较大；下方净空要求高；不适合大规模进场运行	
环形等待	利用悬停节约能耗；可容纳的飞行器数量多	占用空间大；进场航线易产生冲突，安全风险高	结构复杂，适合大流量运行，适用于枢纽空港
环形运行	适合较大规模的飞行器依次进场运行	占用空间大；能耗高；进场航线易产生冲突，安全风险高	

资料来源：根据参考文献[12]整理绘制。

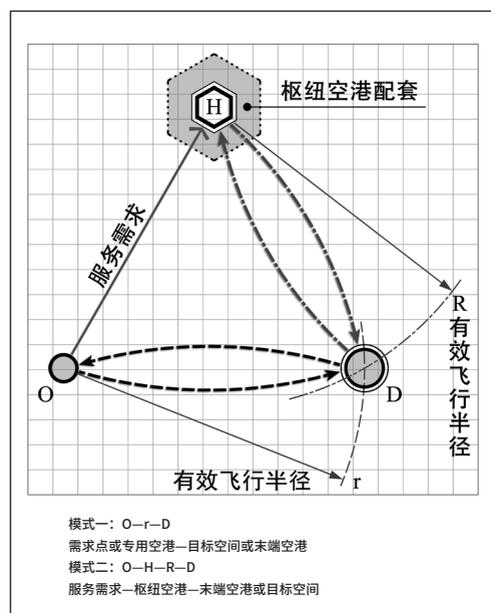


图5 城市低空航路基本联系模式

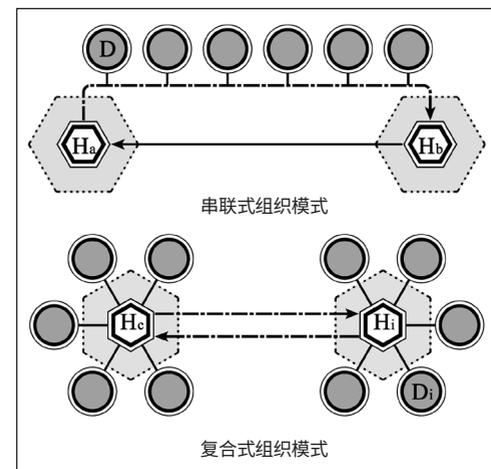


图6 低空航路系统集成组织模式

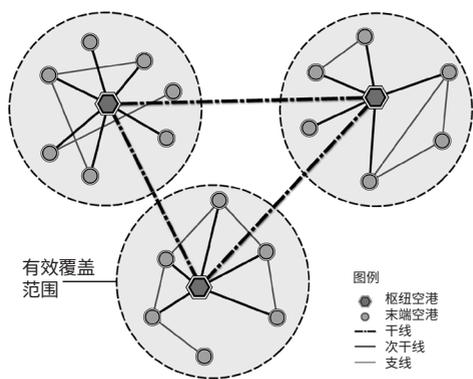


图7 低空航路系统网络结构模式

航路共同构成了三维复合的航路网络。同时，这一航路网络的投影以枢纽空港为关键节点，以有效覆盖范围(半径)为基础，在城市建成环境中形成类似小世界网络的空间结构(图7)。因此，低空空域资源的利用规划与管理，既要做好不同等级航线的三维分层规划，又要协同短距离组团式起降点系统的布局与管理。

5 结束语

低空经济对我国经济社会的持续高质量发展具有重要意义。在制造端和技术端的推动下，我国低空经济已进入低空空域的开发利用阶段。然而，从空间资源利用规划与管理的角度看，我国针对低空空域的系统性研究明显滞后。作为一种新型空间资源，低空空域的资源属性以及低空空间规划利用的特征、方法、依据等都尚未明晰。本文通过梳理相关研究，分析了低空空域利用特征，探讨了低空基础设施系统规划，明确了经济社会与城市发展建设在低空空域利用中的主体性地位，为后续研究提供了必要的价值基点和基本原则。同时，探讨了低空空域规划与管理需要解决的重要问题，如低空空域利用的优先权、三维空间权属问题等，为进一步探讨低空空域利用的规划与管理提供参考。

【参考文献】

- [1] GHARIBI M, BOUTABA R, WSALANDER S L. Internet of drones[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1148-1162.
- [2] BOSSON C, LAUDERDALE T A. Simulation evaluations of an autonomous urban air mobility network management and separation service[C]//Proceedings of Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018.
- [3] 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(7): 82-106.
- [4] QUAN Quan, LI Mengxin, FU Rao. Sky highway design for dense traffic[J]. IFAC-Papers On Line, 2021(2): 140-145.
- [5] 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(24): 6-34.
- [6] 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(4): 35-54.
- [7] 张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J]. 控制理论与应用, 2015(10): 133-139.
- [8] SUNIL E, ELLERBROK J, HOEKSTRA J, et al. The influence of traffic structure on airspace capacity[C]//USA: 7th International Conference on Research in Air Transportation, 2016.
- [9] GUERREIRO N, HAGEN G, MADDALON J, et al. Capacity and throughput of urban air mobility vertiports with a first-come first-served vertiport scheduling algorithm[C]//Proceedings of AIAA Aviation 2020 Forum, 2020.
- [10] 徐博, 陈立平, 谭彧, 等. 基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J]. 农业工程学报, 2015(23): 173-178.
- [11] HONG I, KUBY M, MURRAY A T. A range-restricted recharging station coverage model for drone delivery service planning[J]. Transportation Research, 2018, 90: 198-212.
- [12] 赵巍飞, 袁一凡. 小型多旋翼城市物流无人机进场航线设计方法研究[J]. 飞行力学, 2024(9): 1-9.
- [13] XI Lin, WANG Chengzhang, WANG Kaiping, et al. Trajectory planning for unmanned aerial vehicles in complicated urban environments: A control network approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128: 103120.
- [14] 王纪武, 郑浩宇. 网络空间概念、属性、作用与城市规划响应: 兼述国外相关研究[J]. 城市发展研究, 2016(9): 40-46.
- [15] 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(11): 1997-1204.
- [16] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. 航空学报, 2020(1): 6-34.
- [17] 刘淑娟, 赵广英, 宋聚生. 基于物权制度的城市设计导控体系构建[J]. 规划师, 2023(7): 94-101.
- [18] 王伟, 向柯颖, 陈一鸣, 等. 北京数字经济产业的空间融合体模式与规划响应策略[J]. 规划师, 2023(8): 49-57.
- [19] 樊一江, 李卫波. 我国低空经济阶段特征及应用场景研究[J]. 中国物价, 2024(4): 98-103.
- [20] 许闻博, 王兴平, 王乙喆. 无人经济趋势下的未来城市空间创新与规划应对[J]. 规划师, 2024(6): 39-45.

[收稿日期] 2024-09-11;

[修回日期] 2024-12-18