

立体城市低空空域城市设计框架研究

董君, 秦潇

(大连理工大学, 辽宁 大连 116000)

摘要: 针对立体城市发展中低空空域设计研究不足的问题, 对立体城市与低空空域的关联关系进行了系统研究。通过文献综述与理论分析, 厘清了立体城市与低空空域的基本概念, 梳理了国内外相关研究现状, 指出低空空域在立体城市领域仍处于初步探索阶段。采用定性与定量相结合的方法, 构建了“原则—内容—实施”三位一体的低空空域城市设计框架, 实现了从宏观总体规划到微观节点设计的系统整合。在实施与管理层面, 基于城市设计及低空经济相关政策文件, 建立了涵盖安全韧性、运行效率、社会效益、经济价值、生态影响等5个维度的量化评估指标体系, 以检验设计框架的适用性与可操作性。同时, 从空间功能、飞行路径、交通模式等方面, 分析了传统城市地上空间与低空空域整合过程中可能出现的主要冲突类型, 并提出相应的预防策略。研究结果表明, 该框架有助于提升低空空间与地面城市空间的协调程度, 增强低空空间的复合利用效率, 改善地空一体化的空间衔接关系。

关键词: 城市设计; 低空经济; 低空空域; 立体城市; 城市设计框架; 空间衔接

Urban Design Framework for Low-Altitude Airspace in Three-Dimensional Cities

Dong Jun, Qin Xiao

(Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116000, China)

Abstract: Addressing the lack of research on low-altitude airspace design in the context of three-dimensional city development, this paper conducts a systematic investigation into the relationship between three-dimensional cities and low-altitude airspace. Through a literature review and theoretical analysis, the paper clarifies the basic concepts of three-dimensional cities and low-altitude airspace, summarizes the current state of related research both in China and internationally, and points out that low-altitude airspace remains in the preliminary exploration stage within the field of three-dimensional cities. By combining qualitative and quantitative methods, this paper establishes a three-pronged urban design framework for low-altitude airspace, comprising "principles, content, and implementation", achieving systematic integration from macro-level master planning to micro-level node design. At the implementation and management levels, based on policy documents related to urban design and the low-altitude economy, a quantitative evaluation indicator system covering five dimensions — safety and resilience, operational efficiency, social benefits, economic value, and ecological impact — is established to test the applicability and operability of the design framework. Meanwhile, the paper analyzes the main types of conflicts that may arise during the integration of traditional urban surface spaces and low-altitude airspace in terms of spatial functions, flight paths, and transportation modes, and proposes corresponding preventive strategies. The research findings indicate that the framework helps enhance the coordination between low-altitude airspace and ground-level urban space, improve the efficiency of mixed-use in low-altitude airspace, and optimize the spatial integration between ground and airspace.

Keywords: urban design; low-altitude economy; low-altitude airspace; three-dimensional city; urban design framework; spatial integration

收稿日期: 2025-11-11

作者简介: 董君(1972—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为城市设计, 电子邮箱 dongjun@dlut.edu.cn。

通信作者: 秦潇(2000—), 女, 黑龙江呼玛人, 硕士研究生, 研究方向为城市设计, 电子邮箱 1272874622@qq.com。

引用格式: 董君, 秦潇. 立体城市低空空域城市设计框架研究[J]. 城市交通, 2026, 24(4): 11-25.
Dong Jun, Qin Xiao. Urban design framework for low-altitude airspace in three-dimensional cities[J].
Urban Transport of China, 2026, 24(4): 11-25.

0 引言

在第四次工业革命推动下, 全球低空经济(low-altitude economy)正从探索阶段迈入快速增长期。当前, 低空经济已在物流、旅游、农业等领域实现多种商业化应用, 突破传统航空范畴, 深度参与城市空间重构。在新型城镇化与数字中国建设的双重驱动下, 2021年中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》首次提出发展低空经济, 并在湖南、江西、安徽、四川及海南5省开展试点^[1]。通过一系列政策推动, 中国低空空域的开放和无人机产业的规范化发展取得了显著进展。面对城市土地资源紧缺的现状, 传统二维规划亟待向三维规划转型。作为立体城市中的新兴层次空间, 低空空域在未来城市发展中扮演着重要角色。这一角色的转变, 迫切要求建立适配的城市设计体系, 以支撑低空资源的高效整合与立体城市的协同发展。

在此背景下, 如何科学设计低空空域并实现其与其他空间层次的协同发展, 如何在推动低空经济高效运行的同时提升城市空间功能和整体活力, 成为亟待解决的关键问题。本文针对低空空域规划理论缺失的现状, 结合国际经验, 提出面向立体城市的低空空域城市设计框架, 为城市空间治理从平面向立体协同的转型提供理论支撑与实践指引。

1 立体城市与低空空域的关联性研究

1.1 低空空域定义与分层

空域一般被定义为地球表面以上可供航空器飞行的一定范围的空气空间, 即可航空空间^[2]。低空空域(low altitude airspace)原则上是指全国范围内真高1 000 m(含)以下区域, 超低空空域一般指真高120 m(含)以下区域。根据空域使用需求类别和航空器活动特点, 低空空域可划分为管制空域、监视空域和报告空域3类^[3]。

从空域分类方式上看, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)参考国际民用航空组织(International

Civil Aviation Organization, ICAO)的空域划分建议, 将所有空域分为A, B, C, D, E, G类^[4]。其中, G类空域为非管制空域, 其余为管制空域。A类空域并非低空无人机交通管理和城市空中交通的主要运行空间。低空空域主要位于E类和G类空域, 在特定运行场景中可能局部覆盖B, C, D类空域(见图1a)。中国于2023年12月发布的《国家空域基础分类方法》将空域分为A, B, C, D, E, G, W类, 其中G和W类空域为非管制空域, 其余为管制空域(见图1b)。2024年施行的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》提出, 真高120 m以上空域为管制空域, 管制空域范围以外的空域(即120 m以下空域)为微型、轻型、小型无人驾驶航空器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的适飞空域。非管制空域与管制空域的主要区别在于: 空中交通管制(Air Traffic Control, ATC)单位为管制空域提供不同程度的服务, 但不为400英尺(约合122 m)以下及G类空域运行的航空器提供相关分离服务。此外, 二者在处理飞行计划方面也存在差异: 管制空域(除D, E类空域外)的飞行计划一般需经过审批, 航空器进入前须获得空中交通管理部门许可; G类空域的飞行计划需报备, W类空域航空器在飞行过程中应当通过广播方式自动发送识别信息^[5]。

1.2 立体城市研究现状

1.2.1 立体城市概念

立体城市(three-dimensional city)是一种面向高密度城市发展的城市区域空间组织形态。它以大运量公共交通为支撑, 采用公共交通导向开发(Transit-Oriented Development, TOD)模式, 通过高强度、功能复合和空间集约的开发方式, 构建立体步行网络, 实现多种交通方式之间的立体衔接与转换, 并将区域内不同城市功能空间有机整合, 形成城市功能、城市空间与城市交通相互融合的一体化三维网络体系, 从而缓解城市发展与资源环境之间的矛盾, 提升运营效率与空间品质^[6]。立体城市在城市设计层面包含城市空间结构、城市形态公共空间要素、城市功能和城市实体要素的立体化。关于立体城市的

概念，韩冬青^[7]提出，城市立体化指的是“对用地进行地上、地面、地下三维的综合开发，以构成一个连续的、流动的空间体系”。

1.2.2 立体城市发展与研究现状

立体城市理念可追溯至文艺复兴时期达·芬奇(Leonardo da Vinci)提出的“人车立体交通分流”的设想^[8]。20世纪，勒·柯布西耶(Le Corbusier)提出“光辉城市”(The Radiant City)理论，主张通过立体交通向高空发展，将地面空间还给城市^[9]，马赛公寓成为其实践典范。希尔伯塞默(Ludwig Hilberseimer)提出将大都市垂直化^[10]。日本学者户所隆则在《都市空间的立体化》中，结合高层建筑、地下商业街和居住空间等多种城市要素，对立体城市的空间利用方式及其组织模式进行了更为细致的探讨^[8]。《雅典宪章》更将三维空间开发纳入城市规划原则。曼哈顿 CBD 的城市设计通过整合动线，使地上与地下空间在功能上和视觉上成为一体化的立体城市^[11]。上述探索可以被视为立体城市的早期思考和实践。近 10 年，国外学者多将立体城市的理念与建筑的可持续性^[12]、技术创新^[13]、功能复合^[14]、空间形态^[15]等方面联系起来。D. C. K. Poon 等^[16]强调超高层建筑需突破垂直交通技术瓶颈；S. C. Reinke^[17]倡导搭建空中花园等人性化设计；A. M. Muñoz^[18]提出通过空中连廊或屋顶广场重构社会联系。尽管既有研究对立体城市的垂直生态和空间设计进行了深入探讨^[19]，但针对立体城市视角下低空空域城市设计的研究仍缺乏系统性框架。

中国关于立体城市研究的雏形可追溯至朱旗^[20]于 1985 年提出的开拓地下空间建设立体城市的理念。21 世纪后，中国学者开始关注城市空间的多层次开发，许建^[21]在 2000 年提出将二维平面的用地转变为三维立体的多功能空间。近 10 年，李若帆^[22]主张通过垂直功能叠加实现城市的立体化发展；林云峰^[23]结合香港“垂直空间+公共交通”模式探索本土化实践。其中，刘泉等^[3]首次将研究范围扩展至低空维度，提出无人机物流将重构空域结构；庄宇等^[24]提到未来城市应整合低空空域，但均未深入探讨低空空域与立体城市的关系，也未提出具体的设计框架。

综合国内外研究现状，可以发现尽管立体城市相关研究已经取得许多有价值的成果，但在低空空域方面依然存在空白。这一不足不仅体现在研究主题上，也体现在传统城市设计体系框架之中。

1.2.3 传统城市设计体系框架在“低空维度”的局限

在低空经济快速发展的背景下，传统城市设计体系的局限性日益明显。传统城市设计主要关注静态空间的设计与控制(见图 2)，固守以地面为主导的规划思维。在总体规划层面，尚未将低空经济纳入城市发展战略；片区层面仍采用平面功能分区模式，难以解决低空交通与地面建筑空间之间的矛盾；实施层面则存在诸多技术盲区，如无人机起降点布局、建筑适航性设计等问题尚未得到有效解决。

低空空域具有明显的动态特征。在人口密集、交通压力大的城市中，无人机的飞行路线需根据城市活动强度实时调整，电动垂直起降航空器(electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)的起降节点布局也需根据建筑的实际用途进行动态安排，低空交通流组织须与地面设施协同配合。此外，城市低空空域与传统高空管制空域不同，必须考虑由建筑物、地形、飞鸟等因素引起的地理空间复杂性^[25]。如今，在低空航空器与城市建

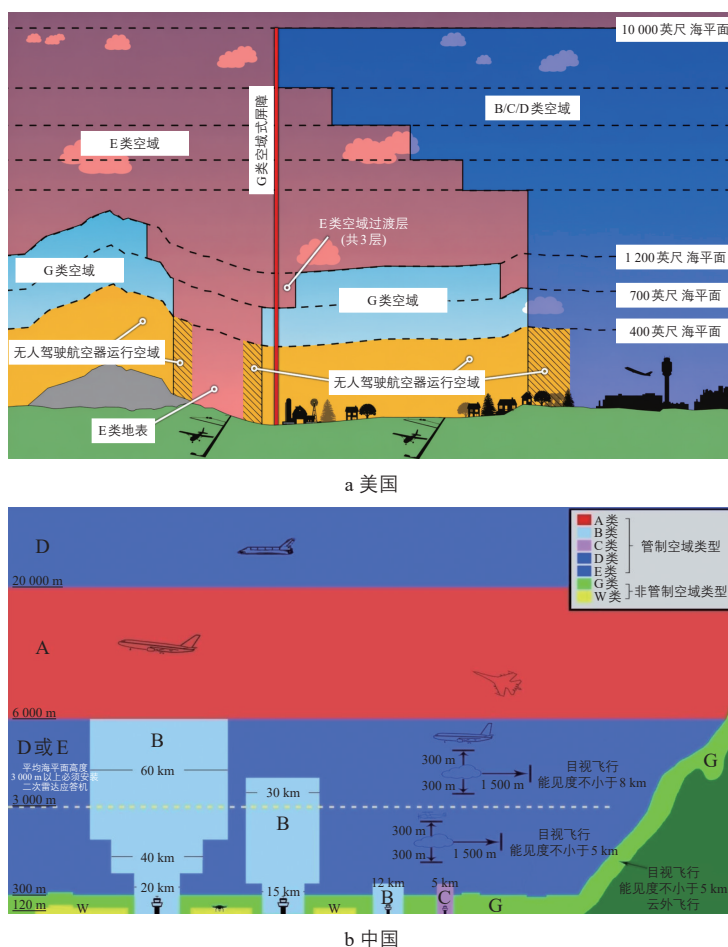


图 1 美国和中国空域基础分类示意

Fig.1 Basic airspace classification in the United States and China

筑、基础设施之间互动关系越来越复杂的情况下,随着低空空域的不断开发,城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)与地面建筑之间的新型矛盾也逐渐浮现。刘宛^[26]在城市设计定义和分类中提出了注重三维空间设计的城市设计理论体系,但该理论并未涵盖低空空域这一“第四维度”。因此,城市设计也需与时俱进,引入“四维空间设计”的理念,以更好地应对新的城市发展需求。

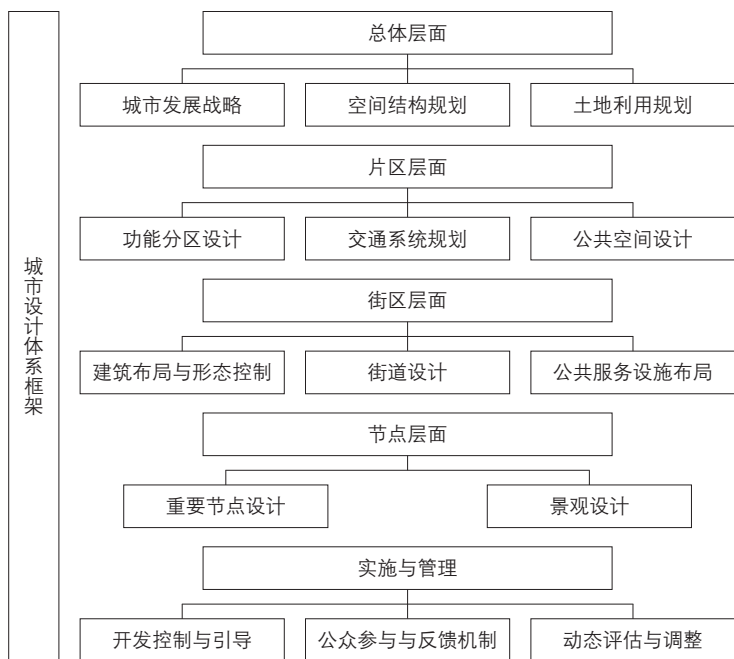


图2 传统城市设计体系框架

Fig.2 Framework of the traditional urban design system

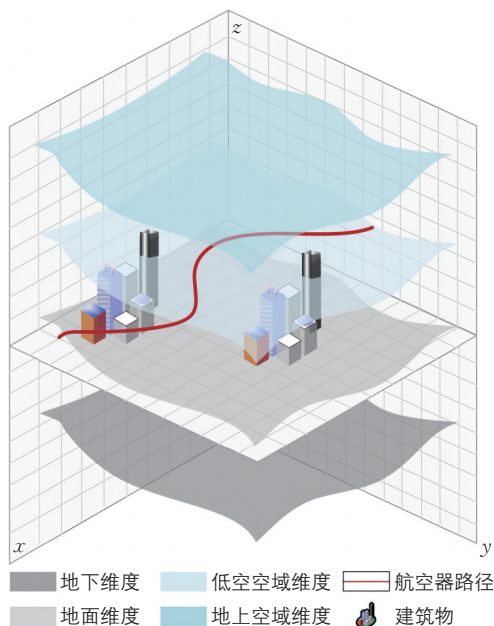


图3 城市“第四维度”(低空空域)三维模型示意

Fig.3 Three-dimensional model of the urban "fourth dimension" (low-altitude airspace)

2 低空经济驱动下的立体城市空间重构机制

2.1 立体城市设计的空域整合框架

从城市设计的角度分析,低空经济的兴起正在重新定义城市空间的范围与功能界限。传统城市设计聚焦地面、地上及地下的二维或三维布局,而低空空域的融入则形成了城市“第四维度”(见图3)。这一新兴空间既是低空经济发展的基础,也是城市系统的重要组成部分,需要通过调整功能分区方法、改进城市设计框架来实现整合。在垂直维度上,应构建“地面—低空—高空”的立体空间网络,并根据低空物流、交通等应用场景对空域进行分层细化;在水平维度上,需协调低空功能区与城市既有功能之间的关系,同时利用屋顶起降平台、空中连廊等节点设计,实现低空空域与地面交通、地上建筑、地下空间的立体衔接,形成高效协同的空间体系。

基于以往研究经验和实践案例,本文进一步提出“三维整合”的立体城市设计框架理念,为低空“第四维度”的引入提供可衔接的空间治理基础。该理念强调在统一框架下统筹地上、地面与地下3类空间系统:在总体层面,以城市发展战略、空间结构规划与土地利用规划为统领;在设计层面,围绕功能组织、空间形态、交通流线与景观生态实现协同,形成“功能无冲突、空间连续、交通一体、生态成网”的立体格局;在实施层面,通过规则引导、多主体协作与动态评估反馈构建保障机制,使3类空间能够根据城市活动强度与发展需求进行动态调整与优化。

2.2 低空经济与立体城市的动态交互机制构建

随着空中交通在城市中日益普及,低空经济正在重塑城市空间格局。与传统高空航空器不同,低空航空器能够与居民活动紧密联系。这要求城市发展不能只关注地面和地下空间,而应利用低空空域建立地空协同的垂直空间系统,以实现三维功能布局和资源的高效利用。因此,低空经济与立体城市之间的空间关系重构,不仅是技术发展推动下的必然趋势,也是缓解空间资源紧张、推动城市现代化的重要路径。

通过解析低空经济与立体城市的关系,

本文构建了二者之间“驱动-反馈”双向作用的动态关系模型(见图4)。该模型解释了低空经济与立体城市两种系统如何协同发展。低空经济涵盖无人机物流、空中交通、环境监测、商业创新等多种模块,这些模块与立体城市各层面之间形成多向交互网络。在政策与管理方面,通过空域分层管控与权属协调建立保障制度;在技术支持层面,依托数字孪生、5G通信技术搭建虚拟与现实空间的连接平台。其中,数字孪生平台可用于低空交通流模拟与运行场景推演,对不同航线组织方式和节点布局方案进行动态评估,并提前识别潜在的空域冲突与安全风险;5G与物联网技术则为无人机与地面设施之间的高频通信和状态感知提供支撑,使低空运行状态、环境变化与管理指令能够实现实时联动,从而提升低空空域的精细化管理能力与设计响应能力。模型中间部分形成了无人机物流、空中交通等低空经济要素与地上空间、低空空域等立体城市模块的交互网络,其核心目标体现在3个方面:空间高效利用、功能立体协同和城市韧性提升。其中,实线箭头表示技术发展直接影响低空活动对建筑空间形态的塑造,例如无人机物流的发展驱动城市增设屋顶起降平台和配送站点;虚线箭头则反映持续评估运行效果,并将评估结果用于调整空间功能布局。

2.3 低空经济与立体城市的功能协同路径

低空空域为立体城市增添了“第四维度”,通过交通、空间、生态和产业4个功能的整合,推动城市空间结构向立体化发展,实现与地面、地下空间的有机结合。

1) 交通系统的立体优化。

在现代城市规划中,汽车的使用被看作是用地与交通的核心议题^[27];同样,低空经济也可能对当前的城市交通体系产生深远影响^[28]。例如,低空物流系统能够避开地面拥堵区域,实现物资的快速运输;空中急救等公共服务可以突破地形限制,直接抵达目标区域;低空空域与地铁枢纽、地下车库等设施结合,可构建新型TOD模式。这种空地互补的关系不仅能优化交通网络,还能提升城市整体的交通运输效率。

2) 空间结构的立体化重构。

低空空域改变了传统立体城市以建筑物为主的空间布局方式,是对立体城市空间形式的补充。通过增设航空器起降平台等基础

设施,低空空域能够与地面和地下空间形成垂直闭环,极大地拓展空间适用范围,提高空间利用率,促进城市不同功能的衔接,进一步完善立体城市的空间结构。城市空中交通是智慧城市的一个方面,低空无人机实际上填补了航空器与地面之间未被充分利用的空域^[25]。

3) 生态系统的立体协同。

巧妙利用城市立体空间发展空中绿化景观,有助于推动生态城市的落地。地空结合的生态网络能够提升城市绿色覆盖率,改善环境质量。可利用建筑垂直绿化,如屋顶花园、屋顶农场、可食用花园、空中露台、垂直绿化墙以及建筑立面上的种植箱等形式,开展城市空中绿化^[29];同时通过无人机监测来优化城市蓝绿空间布局,建设“亲生物城市”,丰富城市生物多样性,促进城市绿色风貌的形成^[30]。

4) 产业资源的立体化激活。

低空经济正在改变城市空间的使用方式。这种改变使得公共服务与基础设施、交通设施和文化商业设施向低空延伸,形成新的城市功能布局。随着城市资源紧张和土地利用不足的问题日益突出,城市存量与增量发展之间的矛盾也愈发凸显。这种情况下,低空空域的利用可通过“置换”或“补充”地面功能来缓解这一压力。例如,对建筑屋

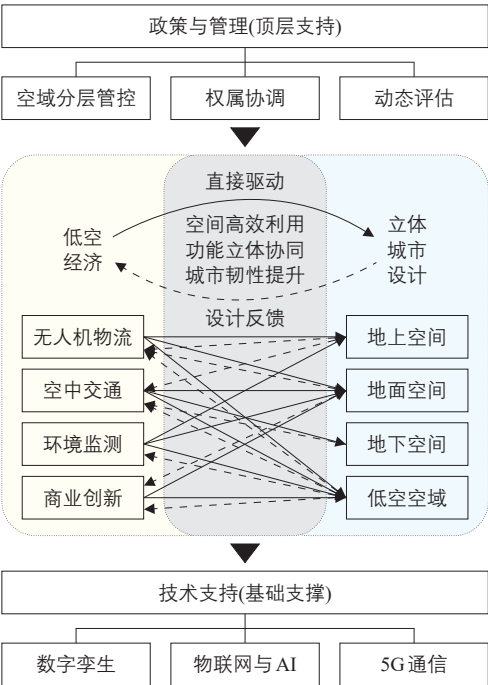


图4 低空经济与立体城市的动态关系模型
Fig.4 Dynamic relationship model between the low-altitude economy and the three-dimensional city

面进行低空化改造,将低空设施与交通枢纽等功能置入现有空间结构,推动城市更新与低空经济协同发展;也可以在新区规划中预留低空设施用地,为未来城市迭代升级提供弹性空间。这种向上发展的新模式打破了地面空间限制,不仅完善了立体城市的结构,也推动了产业间的深度融合,加速产业的立体化发展。根据物流无人机相关行业报告,2019年中国物流无人机需求规模仅为0.01亿元,2023年增至143.97亿元。根据四部门联合印发的《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》^[31],到2027年,智能电动化无人机将在城市空运、物流配送领域实现商业应用,预计2030年物流无人机占民用无人机的比例达23.8%。由此可以看出,低空经济已不再只是对空间形态的补充设想,而正在成为重塑城市空间形态的重要因素。

3 低空经济背景下立体城市低空空域城市设计框架

3.1 设计框架

目前,低空空域城市设计的探索仍主要集中在以交通为主导的交通网络节点设计层面,缺乏针对总体规划、各类要素设计的系统性框架。现有的低空空域城市设计大多为个案研究,缺少相应的标准和准则。因此,本文提出“原则—内容—实施”三位一体的低空空域城市设计框架(见图5)。

同时,针对不同类型的城市,需因地制宜形成差异化的设计策略。对于超大城市,如北京、上海、深圳等,建筑密度高、交通强度大、人口较多,低空活动通常呈现高频、多业态叠加的特点,规划重点在于将低空空域作为有序的公共通行空间进行组织,减少不同低空活动之间以及与地面城市功能之间的相互干扰。对于山地城市,如重庆、贵阳等,地形起伏大、可用廊道较少,规划时应顺应和利用地形,依托台地、桥头、高差平台形成起降节点。对于滨水城市,如武汉、兰州、大连等,具有明确的线型走廊,适宜构建沿江沿海的低空主廊道,并串联港口、枢纽车站与公共空间节点;但滨水空间通常存在生态敏感区,规划时需要加强避让或分高度带运行。对于历史文化名城,如西安、苏州等,对城市天际线和风貌要求严格,规划时应将常态化起降与物流节点布置在城外或新城片区,老城核心区则采用绕行廊道、限时限高、低噪声机型与严格隐私边

界控制等措施。综上,开展低空空域城市设计时,应结合不同城市类型的空间特征,形成差异化的设计策略。

3.2 设计原则

低空空域城市设计的目标在于使低空空域更好地融入立体城市发展,并提出可操作的实施方法。为此,低空空域城市设计需遵循以下原则:

1) 低空飞行的安全性原则。

与传统城市设计不同,低空领域存在监管差异大、技术手段滞后、标准不明确等诸多问题。因此,在对低空空域进行设计时,应遵循安全性原则,明确不同空域层级的飞行规则与安全距离,确保航空器、地面设施和公众的安全。

2) 地空一体化的功能协同性原则。

城市垂直空间的利用已成为现代高密度城市进一步发展的必然选择。当前,城市垂直生长主要有两种趋势:一是向地下延伸,建设地下设施;二是向城市上空发展,包括高层建筑、空中连廊、交通枢纽上盖综合开发等。低空空间的利用有助于更好地发挥空中资源作用,缓解地面空间日益紧张的问题^[32]。因此,低空空域城市设计应具备宏观思维,遵循地空一体化的功能协同性原则,使地面交通系统、地下空间资源和城市功能节点之间协调发展,提升立体空间的利用效率。

3) 可持续发展的绿色生态原则。

绿色生态城市建设已成为全球城市规划的重要趋势。在城市设计中需全面思考人与自然、人与人以及人与社会的关系。遵循可持续发展的绿色生态原则,一方面要尊重自然,另一方面也要促进城市内部各功能区之间的协调发展。城市低空开发利用应在该原则指导下,采取规范低空飞行线路、规定直升机飞行高度以及航空器起降操作流程等措施,实现经济效益与环境保护的双赢。

4) 人本体验与包容共享原则。

城市低空空间开发过程涉及多个用户主体。当前的城市空间开发尚未建立弹性的空间共享机制,多个用户共同挤占有限的空域资源,相互制约且缺乏协调与共享,形成了低空空间开发中的诸多掣肘现象。然而,城市空间应始终服务于人的活动与感受,低空空域的开发同样应体现以人为本的设计理念^[33]。

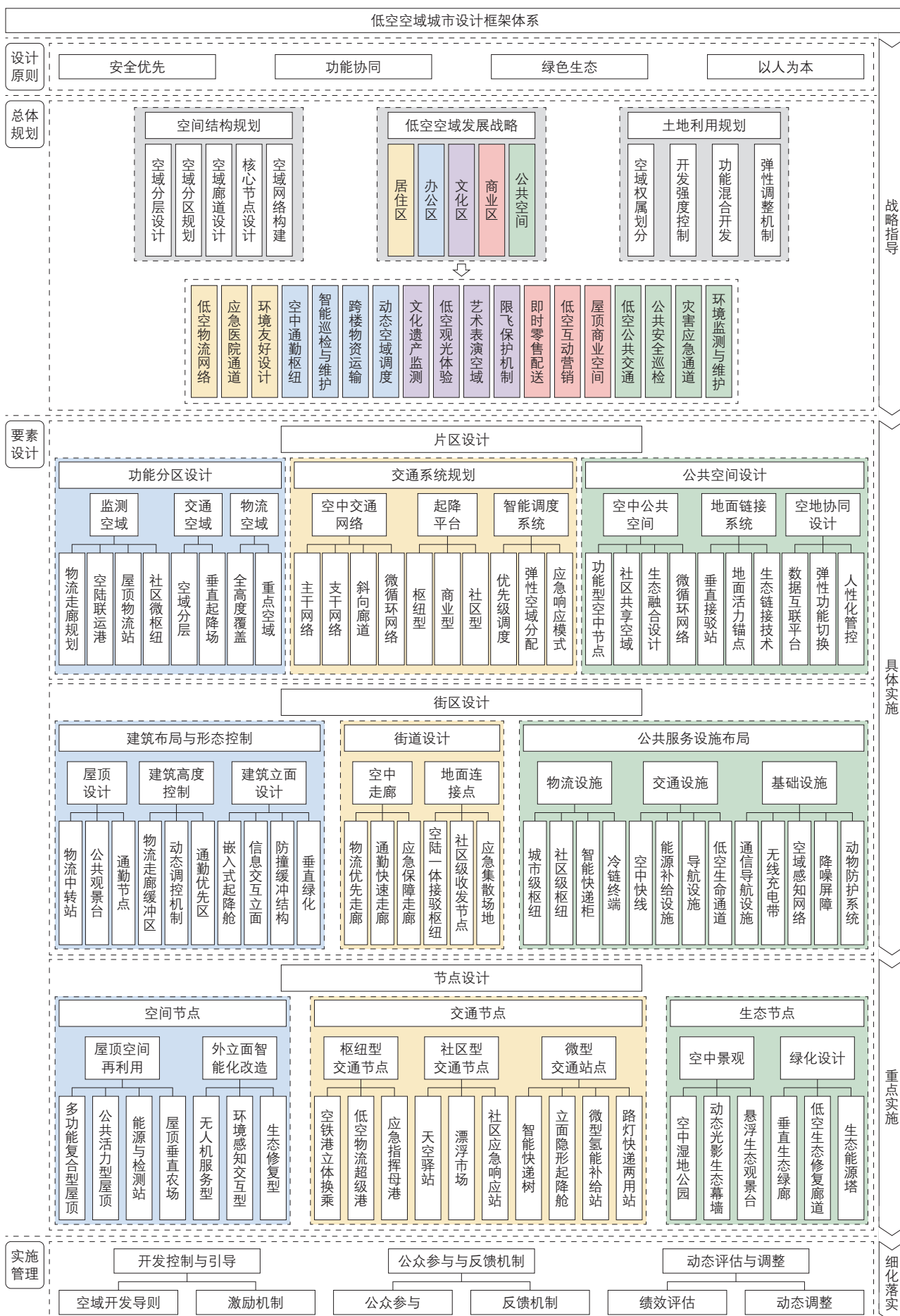


图5 低空空域城市设计框架

Fig.5 Urban design framework for low-altitude airspace

3.3 总体规划

总体规划主要涵盖3个层面：空间结构规划、低空空域发展战略和土地利用规划。受制于过往技术，传统城市空间结构规划存在许多不合理之处，难以承载未来城市居民的活动需求^[34]。

低空空域内的城市空间结构应考虑空域分层设计、空域分区规划、空域廊道设计、核心节点设计和空域网络构建等内容，从整体上有机组织各类行为场所，从而提高整体社会效益。低空经济并非单一业态，不同应用模块在运行高度、运行频次、航线稳定性与节点密度等方面存在显著差异，这些差异将直接转化为总体规划中的控制重点与空间组织方式。例如，高频活动区更需要密集的基础设施和短途航行网络；而安全稳定的航线则需要固定廊道和枢纽设施等。因此，总体规划在进行分层分区和网络构建时，需引入差异化的控制策略，在保证安全稳定与高效运行的同时，为后续分区设计提供更精细的条件和基础。低空空域发展战略需要逐步向居住区、办公区、文化区、商业区、公共空间等细化落实，以指导各分区的具体城市设计。土地利用规划则应着重考虑空域权属划分、开发强度控制、功能混合开发、弹性调整机制4个方面，以保障地面与空中资源的协调使用。

空域的垂直分层是总体规划的重点，也是实现与既有城市空间高效融合的重要途径。分层方式包括2个层面：1)以功能为主的空域垂直分层，依据低空经济应用场景，分为物流基础层、载人交通层和应急监测层(见表1)；2)依据空间属性和环境敏感性的分层，将城市分为高强度服务区(如CBD、交通枢纽等)、中低强度协调区(如住宅区、文体教育、医疗等)和生态敏感区(如湿地、山体等)。由此形成“功能分层—空间分区”

叠加的复合管控体系，为廊道布局、节点选址与网络结构提供可执行的规划依据。

3.4 要素设计

在明确设计原则和总体规划的基础上，进一步开展低空空域内重点发展片区的设计。将要素设计分为片区设计、街区设计和节点设计3类。

3.4.1 片区设计

片区层面的核心任务，是在城市既有功能结构与立体交通体系之上，统筹低空空域的功能分区与空间组织。应在片区层面协调城市空域的功能分区设计，包括监测空域、交通空域和物流空域等，其在面对城市紧急情况时的优先级依次降低。在进行城市标准分区时，应结合片区的空域发展特征，识别低空空域设计的重点区域和发展类型，并制定差异化的分区发展策略。

为实现低空空域与地面交通的时空协同，应加强低空航路及起降设施与地面综合交通枢纽、地下交通空间之间的垂直衔接，构建空中、地面与地下多层次贯通的立体交通体系，从而提升交通网络的运行效率、换乘便捷性与空间覆盖能力。通过三维交通网络的拓扑优化，设立垂直廊道、水平廊道和斜向廊道。垂直廊道布局在超高层建筑群中，以方便无人机垂直起降；水平廊道分为主干廊道和支干廊道，主干廊道沿城市快速路、滨水带布设，连接城市核心功能区与交通枢纽，支干廊道布设在居住区内道路上空，服务于末端物流配送并衔接社区商业网点；斜向廊道为动态廊道，主要服务于城市交通枢纽和物流中心等，支持立体接驳，并在高峰时段或突发事件处置时开放临时通道。

3.4.2 街区设计

在街区层面，应根据片区的详细规划，重点考虑建筑布局与形态控制、街道设计和公共服务设施布局，确保低空条件下的建筑布局与城市整体风貌协调一致。建筑布局与形态控制主要包括建筑屋顶空间的复合利用与功能更新、建筑高度控制以及适应低空航空器起降需求的建筑屋顶与立面一体化设计。低空空域内的街道交通网络强调三维立体耦合，可与周边建筑、公共汽车站、出租汽车停靠站、城市轨道交通车站等交通设施有机结合。在低空交通系统的分层、分区与廊道结构设计基础上，构建地空协同的新型TOD枢纽。枢纽分为3级：一级节点以城市

表1 空域垂直分层规划

Table 1 Vertical stratification planning of airspace

层级名称	高度范围/m	功能定位	空间适配措施
物流基础层	0~60	无人机物流配送、基础设施巡检	结合建筑退界空间设置安全缓冲带；利用坡屋顶或退台设计减少湍流干扰
载人交通层	60~120	eVTOL通勤、空中出租汽车、紧急医疗运输	沿城市主干路布设双向固定航线；高层建筑顶部50 m范围内设置过渡缓冲区
应急监测层	120~300	消防救援、警务巡逻、气象监测	沿通道设置垂直绿化带；利用声波驱鸟装置保护生态安全

主要交通枢纽为主体，如机场、高铁车站、市级商业中心等高强度客流集聚区，构建城市级综合交通枢纽，此类节点需配置大量城市客流和物流航空器的起降与换乘设施；二级节点位于城市区域中心，如大型产业园区、医疗中心顶部，可配置相应的应急物资储备舱；三级节点为服务于居民的社区级站点，布局在社区商业综合体、物流配送站屋顶或建筑空中花园等位置，支持无人机“最后一公里”配送。空中走廊和新型TOD枢纽的形成，能够有效提升交通设施对立体空间开发的服务能力，加强低空航路、起降节点与地面街道系统之间的空间联系和换乘衔接。在此基础上，应统筹规划物流、交通等基础设施，确保低空空域的公共服务设施能满足城市居民的日常需求。

建筑层面，不同功能的建筑在使用人群敏感性、运行安全需求及环境承载能力方面存在显著差异。居住类建筑对噪声敏感且对安全性要求较高，不宜布置常态化航空器起降点，以避免低空活动对日常生活环境造成干扰；办公、商业、交通、工业类建筑的屋顶或退台一般会有较好的结构条件和独立出入口，对噪声的容忍度较高，宜作为低空通勤、物流、巡检及应急节点的承载对象；教育、养老等公共服务设施因其人群构成的特殊性和较高的安全性要求，需要严格控制飞行路径，避免设置低空活动节点，或采取分时段运行措施。

3.4.3 节点设计

在进行节点设计时，应结合城市规划和

交通规划的相关规范，围绕空间、交通、生态3个方面，对低空空域城市设计要点进行研究。确定各类低空空域的空间尺度范围时，需重点考虑建筑高度、密度以及人流和物流的活动强度与密度。尺度的确定应与建筑的空间形态、结构体系和低空经济功能需求深度融合，使建筑界面从传统的静态结构转变为动态服务载体，既能满足低空起降需求，又能与城市生活节奏和居民体验相契合。

“空中廊道”作为新型线性公共空间，应明确运行廊道的宽度、安全缓冲带的范围，以及其与两侧建筑形态、屋顶界面的互动关系。在视觉层面应强调通透性，避免景观视线被附属设施遮挡或杂乱叠加，从而提升人的感官体验。在空间尺度层面，应控制廊道与建筑界面的距离、转弯半径及主要节点的开敞度，确保形成具有尺度感和可识别性的“空中街道”(见图6)。例如，《深圳山海城市特色风貌规划设计导则》中提到，为保障生态廊道，与低空公共航路的空间间距应不小于1 000 m，廊道内建筑高度不应大于120 m。这种设置不仅保证了飞行安全，也提升了环境的舒适性和视觉美感。

在存量城市规划的现实要求下，可操作性较强且成本较低的空间策略是以建筑屋顶与立面为载体，构建具备复合功能和弹性空间的低空服务网络(见表2)。例如：《深圳市城市第六立面提升设计导则》提出，屋顶可作为低空基础设施的载体，在核心区和交通枢纽周边预留起降平台；同时要求屋顶避让主通道，设置空中通廊与缓冲区，制定走廊

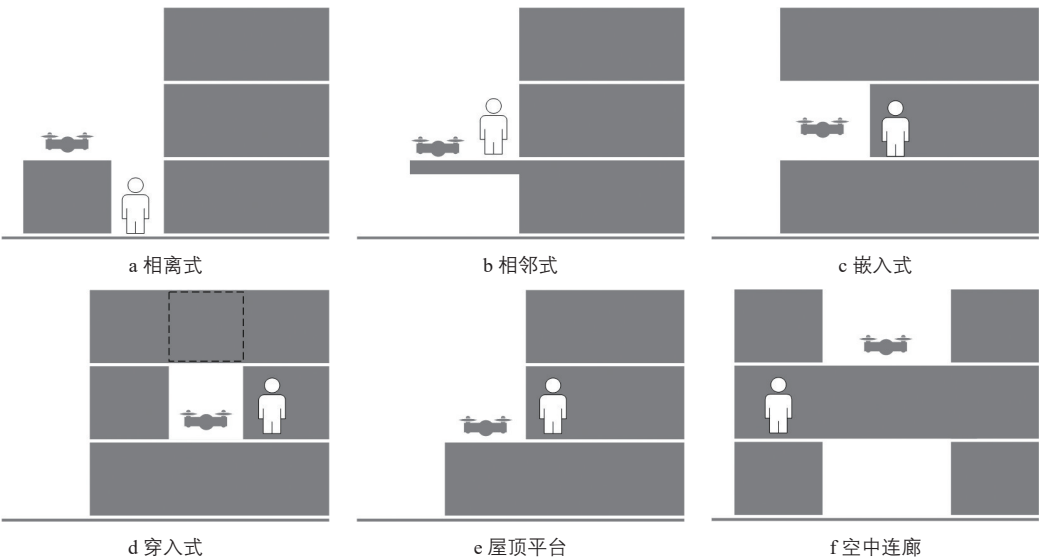


图6 空中廊道与建筑形态、屋顶界面的关系

Fig.6 Relationship between air corridors, building forms, and roof interfaces

城市作为人工景观的综合体,在低空经

低空空域城市设计的实施, 首先应构建

Table 2 Roof designs for different types of buildings

20

编制体系,充分衔接法定规划,实现从总体层面到微观层面的上传导和管控落实。进一步考虑将低空空域规划纳入国土空间规划体系,与城市总体规划、控制性详细规划等相互联动,并在法治保障层面明确低空空域使用权^[37]。可通过增设空域利用专项篇章,将低空空域纳入国土空间规划体系,形成空间结构、分区分管、容量控制、设施体系4类成果,并根据详细规划的控制条文及指标,对用途、建筑指标等进行控制与规范,使国土空间规划的内涵由传统的地面、地下、临海扩展至低空空域范围^[38]。在这一框架下,应明确管控内容与要素,进行全面调查、比较与归纳,提出各层次城市设计的主要任务、基本类型、基础分析以及编制要求,并根据不同层级需求制定针对性的管控措施。核心管控维度包括安全管控、功能引导和空间形态。例如:划定禁飞区、限高区、噪声敏感区等,建立电子围栏与动态监控系统,进行实时控制;按空域用途分类进行功能引导;规范低空空域内建筑及建筑部件的设计标准,制定空中连廊的视觉通透性要求等。通过明确的空域开发导则和激励机制,既可有效引导空域资源的合理利用与创新发展,也能提升低空空域在国土空间规划中的可操作性与法律保障水平。与此同时,低空空域的使用权、收益权和管理权的界定问题也是规划实施中的核心法律问题,应结合《中华人民共和国民法典》《中华人民共和国民用航空法》等法律法规进行灵活调整。

3.5.2 公众参与与反馈机制

要确保低空空域规划的合理性并使其被公众广泛接受,需要引导公众参与决策过程并收集反馈意见,不断优化规划方案,确保规划与实际需求相符。可以建立空域使用协商平台,允许企业申请临时空域使用权,促进企业与政府之间的沟通与协作。此外,还应设立线上投诉系统,实时受理隐私侵犯、噪声扰民等问题,并与监管部门联动,快速响应民众需求。在社区层面,可开放部分空域供居民体验无人机配送、紧急医疗运输等服务。

3.5.3 动态评估与调整

低空空域管理应灵活应对技术迭代与城市发展需求,建立定期的动态评估机制,并根据评估结果调整管理措施。构建低空空域城市设计动态评估指标体系(见表3),从安全韧性、运行效率、社会效益、经济价值、

生态影响5个维度展开,明确评估实施阶段、适用尺度、技术手段、监控类型和指标属性,以保障低空空域管理的效率与质量。

4 传统城市地上空间与低空空域整合的潜在冲突及预防策略

4.1 空间整合冲突

1) 空间功能冲突。

作为国家战略性新兴产业,低空经济的空间需求特征(如复合化、立体化、网络化)已区别于传统产业^[39]。传统的城市地上空间规划主要关注地面和一定高度范围内的区域,而低空空域的开发涉及航空器等高新技术在空中开展的活动场景,如空中出租汽车和无人机配送可能飞过建筑密集区,从而影响建筑采光、通风或隐私保护等既有功能。目前,低空经济高度依赖城市中的可利用开放空间,如屋顶空间、公园、广场、建筑平台等。随着低空活动的增多,地面与低空空间之间的功能冲突将日益明显。

2) 飞行路径与建筑密度冲突。

低空航空器在高楼间飞行时,需要有足够的低空空间进行转弯、调头、等待或避让。在高密度城市区域,有限的空域会增大航空器与建筑物发生碰撞的风险,也可能增大噪声对地面居民的影响。此外,高密度的建筑群会使低空空域呈现“拼图式”空间,飞行路径难以保持连贯。这些冲突的叠加将直接影响低空空域运行的安全性、稳定性,进而影响社会接受度。

3) 空中交通与地面交通的冲突。

随着低空经济的发展,低空空域逐渐被纳入整体交通体系,形成地空一体化的新型交通模式。然而,空中交通设施对周围空间的连续性和净空范围有较高要求,而城市地面空间早已高度饱和,难以再提供大尺度的安全缓冲区和障碍物控制区。同时,传统地面交通本身供给不足,扩建难度大。从现有资料看,起降坪、停机坪等低空配套设施大多属于地面基础设施,并非完全在空中运行,这意味着它们将进一步占用紧缺的建设用地,与道路、停车场、交通枢纽形成竞争关系。

4.2 预防策略与解决方案

1) 提升城市空间用途兼容性。

随着低空经济对屋顶、平台以及各种开

放空间的需求不断增加，应在规划前期对空间用途进行兼容性评价，避免高频低空活动对居住、教育等噪声和隐私敏感的区域造成影响。可以在建筑的屋顶、立面以及城市道路、桥梁等位置预留空间，使未来低空功能的介入不会破坏原有的采光、通风和隐私条件，并配合合理的缓冲带与飞行高度控制，从整体上增强城市空间对低空交通的适应性。

2) 优化城市空间结构，为低空交通预留发展条件。

针对高密度空间中低空飞行路径容易碎片化的问题，可以从优化城市空间结构入

手，保障低空通道的相对连贯性。例如：通过控制建筑高度、调整组团布局、预留一定的开放界面等方式，构建较为顺畅的空中走廊；同时，还需要对飞行转弯半径、安全距离等关键参数做出明确规范，为低空空域运行提供长期稳定、可持续的基础条件。

3) 推动空中与地面交通系统的协同布局。

在城市土地资源紧张、地面交通供给不足的背景下，应避免低空设施与地面交通设施在建成区形成竞争关系。规划中可以优先在综合交通枢纽、产业园区及城市边缘地区布局低空设施，使其与地面交通形成有序协

表3 低空空域城市设计动态评估指标体系
Table 3 Dynamic evaluation indicator system for urban design in low-altitude airspace

指标 维度	指标名称	评估实施 阶段	适用尺度	技术手段	监控类型	指标属性
安全 韧性	空中交通冲突频率/%	中、后	城市级、 区段级	实时监测	预警型	约束性
	无人机航线合规率/%	中	城市级	GIS轨迹分析	普通型	预期性
	空域突发事件响应时间/min	后	城市级	应急平台统计	普通型	预期性
	冲突应急演练频次/(次·a ⁻¹)	前、中	城市级	计划审核+调查	普通型	预期性
	冲突事故公众知晓率/%	前、中	城市级	问卷+媒体数据	普通型	预期性
运行 效率	航线运行准点率/%	中、后	城市级	交通数据平台	普通型	预期性
	航线通达率/%	中	城市级	GIS分析	普通型	预期性
	低空飞行能源效率/(Wh·km ⁻¹)	中	城市级	能耗监测	普通型	预期性
	任务平均完成时长/(min·次 ⁻¹)	中	区段级	作业记录统计	普通型	预期性
	运行平台智能化水平/分	中	城市级	专家打分	普通型	预期性
社会 效益	公众服务可达率/%	中、后	城市级	空间分析+ 人口数据	普通型	预期性
	低空物流响应时效/min	中、后	区段级	平台数据	普通型	预期性
	医疗物资低空配送率/%	中、后	城市级	平台数据	普通型	预期性
	公众参与平台活跃度/(次·月 ⁻¹)	前、中	城市级	平台登录+ 发言频率	普通型	预期性
	公众满意度/%	后	城市级	问卷	普通型	预期性
经济 价值	空域产业产值增长率/%	后	城市级	财政年鉴	普通型	预期性
	空域经济就业带动率/%	后	城市级	统计数据	普通型	预期性
	空域基础设施投资额/亿元	前、中	城市级	政府项目公开数据	普通型	预期性
	空域土地利用收益比/%	后	城市级	成本收益分析	普通型	预期性
	低空产业链本地化率/%	中、后	城市级	企业调查	普通型	预期性
生态 影响	噪声扰动区覆盖面积/km ²	中、后	区段级	声环境监测	预警型	约束性
	单位飞行CO ₂ 排放强度/(kg·架次 ⁻¹)	中	城市级	能源平台+碳核算	预警型	约束性
	低空飞行对鸟类迁徙干扰率/%	中、后	区段级	环境监测+ 协会数据	普通型	预期性
	自然保护区飞行禁区合规率/%	中	城市级	空域管控系统	普通型	预期性
	生态敏感区域监测频率/(次·a ⁻¹)	中	区段级	监测计划与 频次记录	普通型	预期性

同。同时，可通过优化接驳方式、合理组织交通流线等手段，提升“空—地”系统的整体运行效率，并结合信息共享和联合调度机制，减少不同系统叠加带来的不确定性，让运行更加稳定、可控。

4) 加强立体城市设计与建筑设计。

通过规划与建筑设计层面的硬性要求与引导措施，可有效减少低空航空器和建筑物之间的干扰。在规划设计阶段，应当提前考虑低空经济的发展需求，为未来低空空域的使用预留足够的空间，并将低空活动与城市绿地、公共空间等非建筑物区域结合，形成更加灵活、多元的立体空间结构。在建筑设计阶段，应根据空中交通需求，尽量避免高层建筑阻碍低空飞行路径。以深圳为例，深圳市近年来建设用地开发强度近50%，高密度开发使地面新增设施的空间日益紧张，也增加了低空航路组织和起降设施布局的难度。因此，有必要通过立体城市设计统筹空域、建筑与地面空间，并在建筑设计阶段预留低空经济相关功能。为此，针对新型产业、工业上楼、低空经济配套的产业用房和首层空间设计，深圳市在地方规范与指南中提出将首层层高提高至6~8 m，以满足大型设备与无人机的使用需求^[40]。

5 结束语

作为一种新型城市发展理念，低空空域城市设计为城市空间立体化与运营模式创新提供了新的方向。本文构建了“原则—内容—实施”三位一体的低空空域城市设计框架，揭示了低空经济驱动下立体城市空间由平面向立体重构的内在机制，为将低空空域纳入城市规划体系提供了方法论层面的支撑。研究表明，在合理的规划与管控条件下，低空空域能够强化“地—空”空间的衔接，促进城市功能复合化与空间布局协调化，实现城市空间资源的高效配置与集约利用。该框架从总体规划到节点设计均具备可操作性，为低空经济背景下城市空间结构优化与低空基础设施布局提供了系统化的设计思路。

然而，城市设计是一项涉及领域较广、研究内容复杂的学科。在空域管理、基础设施布局、环境安全与社会接受度等方面仍存在不确定性与局限性的背景下，低空空域城市设计框架仍需要不断补充与完善。未来研

究应围绕低空空域相关法律法规与设计标准的完善，深化多部门协同管理机制，强化技术支撑体系建设，并在城市更新与新区开发中持续验证与优化设计框架，以确保低空空域城市设计的科学性、合法性与可持续性。

参考文献：

References:

- [1] 赵崇煦，刘聪，王喆. 关于广州打造大湾区低空经济枢纽城市的对策建议[J]. 中国工程咨询，2023(10): 37-42.
- [2] 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，2020，41(1): 1-29.
Quan Quan, Li Gang, Bai Yiqin, et al. Low altitude UAV traffic management: an introductory overview and proposal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 1-29.
- [3] 刘泉，陈瑶瑶，洪晓苇，等. 面向无人机的城市低空空域规划的国际经验[J]. 城市规划学刊，2024(5): 64-70.
Liu Quan, Chen Yaoyao, Hong Xiaowei, et al. International experience of urban low altitude airspace planning for drones[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 64-70.
- [4] Bauranov A, Rakas J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100726.
- [5] 中国民用航空局. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[A/OL]. (2023-06-28)[2025-11-01]. https://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/MHGZ/202401/t20240115_222642.html.
- [6] 罗卫兵，晁旭彤. “立体城市”发展的思考与启示[J]. 四川建筑，2012，32(5): 4-7.
- [7] 韩冬青，冯金龙. 城市·建筑一体化设计[M]. 南京：东南大学出版社，1999.
Han Dongqing, Feng Jinlong. Holistic design on urban architecture[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999.
- [8] 谭茜. 立体城市交通无障碍系统化设计研究[D]. 广州：华南理工大学，2019.
Tan Xi. Research on accessible design of three-dimensional city traffic system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [9] Rodríguez-Lora J, Navas-Carrillo D, Pérez-Cano T M. Le Corbusier's urbanism: an urban characterisation of his proposals for inner cities[J]. Frontiers of Architectural Research,

- 2021, 10(4): 701-714.
- [10] Köhler D. Large city architecture: the mereological mode of the quantified city[J]. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2017, 32(S1): S163-S172.
- [11] Zipp S. *Manhattan projects*[M]. Oxford, NY: Oxford University Press, 2010.
- [12] Al-Kodmany K. Sustainability and the 21st century vertical city: a review of design approaches of tall buildings[J]. *Buildings*, 2018, 8(8): 102.
- [13] Akristiniy V A, Boriskina Y I. Vertical cities-the new form of high-rise construction evolution[J/OL]. *E3s Web of Conferences: High-Rise Construction* 2017, 2018, 33: 01041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183301041>.
- [14] Lin Zhongjie. Vertical urbanism: re-conceptualizing the compact city[J/OL]. *Cross Americas: Probing Disglobal Networks*, 2016: 122-127. <https://doi.org/10.35483/AC-SA.Intl.2016.26>.
- [15] Martínez-Muñoz A. Skyways: a strategy to humanize the mobility of the vertical cities [J]. *International Journal of Transport Development and Integration*, 2021, 5(4): 393-404.
- [16] Poon D C K, Chairman V, Tomasetti T, et al. Mega size mixed-use projects: redefining vertical urbanism[C]//*Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Cities to Megacities: Shaping Dense Vertical Urbanism*. Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2016: 122847455.
- [17] Reinke S C. The future of workplace in vertical cities: hanging gardens, roof terraces and vertical plazas[J]. *International Journal of High-Rise Buildings*, 2020, 9(1): 71-79.
- [18] Muñoz A M. Humanizing the vertical city: three strategies to bring the ground level closer to the clouds[J]. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2020, 249: 57-69.
- [19] Al-Kodmany K. The vertical farm: a review of developments and implications for the vertical city[J]. *Buildings*, 2018, 8(2): 24.
- [20] 朱旗. 开拓地下空间 建立立体城市: 一个高效率的方案[J]. *地下空间*, 1985(3): 48-56.
- [21] 许建. 论城市居住环境空间的多层次开发[J]. *福建建筑*, 2000(1): 5-8.
- [22] 李若帆. 高密度大城市土地立体利用模式的思考: 以东京和香港为例[J]. *建筑与文化*, 2025(1): 94-96.
- Li Ruofan. Reflections on the three-dimensional land utilization model in high-density megacities: taking Tokyo and Hongkong as examples[J]. *Architecture & Culture*, 2025 (1): 94-96.
- [23] 林云峰. 解构多维度下中国香港城市的立体化发展[J]. *建筑实践*, 2023(11): 28-41.
- Lin Yunfeng. Deconstructing the multi-dimensional verticalization of urban development of Hong Kong, China[J]. *Architectural Practice*, 2023(11): 28-41.
- [24] 庄宇, 陈杰. 探索高密度下的立体城市[J]. *时代建筑*, 2023(2): 6-13.
- Zhuang Yu, Chen Jie. Exploring high-density three-dimensional cities[J]. *Time Architecture*, 2023(2): 6-13.
- [25] Cho J W, Yoon Y J. 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.
- [26] 刘宛. 城市设计概念发展评述[J]. *城市规划*, 2000, 24(12): 16-22.
- Liu Wan. An introduction to the evolution of urban design concepts[J]. *City Planning Review*, 2000, 24(12): 16-22.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Urban Redevelopment Authority. Guidelines for landscape replacement areas within new developments in (Part) Downtown Core, (Part) Straits View, (Part) Kallang and (Part) Jurong East Planning Areas[EB/OL]. (2009-04-29)[2005-11-01]. <https://www.ur.gov.sg/Corporate/Guidelines/Circulars/dc09-09>.
- [30] 杨文越, 邱宇欣. 新加坡“亲生物城市”

- 规划建设经验[J]. 科技导报, 2022, 40(22): 33-42.
- Yang Wenyue, Qiu Yuxin. The experience of biophilic city planning and construction in Singapore[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(22): 33-42.
- [31] 中华人民共和国中央人民政府. 工业和信息化部 科学技术部 财政部 中国民用航空局关于印发《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》的通知(工信部联重装〔2024〕52号)[A/OL]. (2024-03-27) [2005-11-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm.
- [32] 陆晓华, 郑林, 张奇, 等. 高密度城市低空空空间综合开发利用的思考[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会. 交通治理与空间重塑: 2020年中国城市交通规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 279-285.
- [33] 王汝梅, 魏晓芳, 吕飞. 低空经济趋势下的未来城市空间规划应对[J]. 城市观察, 2025(2): 120-130.
- Wang Rumei, Wei Xiaofang, Lyu Fei. Urban spatial planning strategies in response to the rise of low-altitude economy[J]. Urban Insight, 2025(2): 120-130.
- [34] 董晓翠, 张馨月, 马馥旋. 大数据背景下国土空间规划和智慧城市建设分析[J]. 智慧中国, 2025(1): 84-86.
- [35] 宫继萍, 胡远满, 刘淼, 等. 城市景观三维扩展及其大气环境效应综述[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 562-570.
- Gong Jiping, Hu Yuanman, Liu Miao, et al. Review on three-dimensional expansion and its atmosphere environmental effects of urban landscape[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 562-570.
- [36] 谭文浩, 王婷. 浅谈米兰垂直森林对中国城市发展生态意义[J]. 现代园艺, 2017, 40(3): 95-96.
- [37] 高志宏. 低空经济法律制度构建的价值体系阐释[J]. 江西社会科学, 2025, 45(3): 48-59.
- [38] 黄启翔, 王东. 低空经济规划编制特点与技术框架体系[J]. 城市交通, 2025, 23(2): 29-38.
- Huang Qixiang, Wang Dong. Characteristics and technical framework system of low-altitude economic planning[J]. Urban Transport of China, 2025, 23(2): 29-38.
- [39] 何忠东. 存量建设用地再开发与低空经济产业空间适配机制研究: 以深圳市宝安区为例[C]//中国城市规划学会. 迈向中国式现代化: 规划的价值与作为: 2025中国城市规划年会论文集(03城市更新). 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 2076-2083.
- [40] 汪星, 陈伟新. 城市更新背景下深圳“工业上楼”现象研究: 以宝安区甲岸工业园更新为例[C]//中国城市规划学会. 人民城市, 规划赋能: 2022中国城市规划年会论文集(02城市更新). 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 332-342.

(上接第113页)

- [11] 杨瀚文, 邹尚恩, 胡一可. 城市街道绿化泛类结构的视觉感知特征: 以天津市市内六区为例[J]. 风景园林, 2025, 32(5): 37-44.
- Yang Hanwen, Zou Shang'en, Hu Yike. Research on pedestrians' visual perception characteristics based on USGGS: a case study of the six inner-city districts of Tianjin[J]. Landscape Architecture, 2025, 32(5): 37-44.
- [12] 韩善灵, 朱平, 林忠钦. 道路交通噪声评价及预测新方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 111-114.
- Han Shanling, Zhu Ping, Lin Zhongqin. Evaluation and prediction new methods of road traffic noise[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 111-114.
- [13] 张博, 顾方哲, 徐涛, 等. 基于遥感数据的济南市旅游景区通用热气候指数(UTCI)研究[J]. 地理科学, 2024, 44(12): 2195-2204.
- Zhang Bo, Gu Fangzhe, Xu Tao, et al. Universal thermal climate index in tourist attractions of Jinan city based on remote sensing data[J]. Geographical Science, 2024, 44(12): 2195-2204.
- [14] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.