

智慧交通与低空经济协同发展的 空间规划策略研究

杜智民, 高超, 陈泽鹏

(长安大学人文学院, 陕西 西安 710064)

摘要:随着技术革命与空间革命对人类社会的加速重塑,推动智慧交通系统与低空经济的协同发展成为构建三维立体城市空间的关键路径。基于空间协同理论、复杂系统理论、空间句法理论、新经济地理学理论、韧性城市理论等,分析智慧交通系统的空间布局特征和低空经济的空间发展模式,探索两者的空间协同机制和协同发展的空间规划策略。研究发现,智慧交通系统为低空经济提供了高效的地面支撑和空间信息服务,低空经济的发展推动了智慧交通系统向三维空间的延伸和创新;低空经济的空间发展模式正在形成一个立体化、网络化、智能化的新型城市空间体系,通过科学规划低空交通走廊、合理布局空中枢纽、优化地空接驳设施的空间分布,低空经济能够创造出新的城市空间形态和经济增长点;智慧交通与低空经济的空间协同机制体现了城市系统的复杂性和整体性,可以通过空间布局、技术应用和管理制度的协同,构建三维立体交通网络,优化空地一体化枢纽布局,推进智慧空间信息系统建设,完善空间规划法规和管理机制等,形成新型城市空间治理模式,推动城市向智能、高效、宜居的方向发展。

关键词:城市空间;智慧交通;低空经济;空间规划;协同发展

中图分类号:F562;F572

文献标志码:A

文章编号:1671-6248(2024)05-0084-17

收稿日期:2024-07-09

基金项目:陕西省哲学社会科学研究专项重点智库项目(2923ZD0621);西安市社会科学规划基金重点项目(24GL122)

作者简介:杜智民(1969-),男,陕西合阳人,教授,博士研究生导师,工学博士。

**Study on spatial planning strategies for the coordinated
development of smart transportation and
low-altitude economy**

DU Zhimin, GAO Chao, CHEN Zepeng

(School of Humanities, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: As technological and spatial revolutions reshape human society at an accelerated pace, fostering the coordinated development of smart transportation systems and low-altitude economy has become a crucial approach for constructing three-dimensional urban spaces. This paper, grounded in spatial coordination theory, complex system theory, space syntax theory, new economic geography theory, and resilient city theory, analyzes the spatial layout characteristics of smart transportation systems and the spatial development model of the low-altitude economy. It explores the mechanisms of spatial coordination between the two and proposes spatial planning strategies for their coordinated development. The study finds that smart transportation systems provide essential ground support and spatial information services for the low-altitude economy, while the growth of the low-altitude economy drives the extension and innovation of smart transportation into three-dimensional space. This spatial development model is creating a new urban system that is three-dimensional, networked, and intelligent. By scientifically planning low-altitude transportation corridors, strategically positioning air hubs, and optimizing the spatial distribution of ground-to-air transfer facilities, the low-altitude economy can foster new forms of urban space and stimulate economic growth. The spatial coordination mechanism between smart transportation and the low-altitude economy reflects the complexity and interconnectedness of urban systems. Through the alignment of spatial layouts, technological applications, and management systems, a comprehensive three-dimensional transportation network can be established, with optimized air-ground integrated hubs, advanced intelligent spatial information systems, and improved spatial planning regulations and management mechanisms. Together, these strategies shape a new urban governance model, promoting cities toward intelligence, efficiency, and enhanced livability.

Key words: urban space; smart transportation; low-altitude economy; spatial planning; coordinated development

21 世纪以来,全球范围内正在经历一场深刻的技术革命和空间革命。人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的迅猛发展正在重塑城市空间结构和社会生活方式,智慧交通系统作为这一变革的重要组成部分应运而生^[1]。与此同时,低空经济作为一种新兴的经济形态和空间利用模式,正在为城市发展开辟新的空间维度,为解决地面交通拥堵、提高资源利用效率提供了创新性解决方案^[2]。低空经济涵盖无人机物流、城市空中交通、低空旅游等多个领域,其发展潜力巨大,被学界和业界普遍认为是未来经济增长的重要驱动力之一。

在国家战略层面,交通强国建设已成为中国式现代化进程中的重要目标。2020 年以来,《交通运输部关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》明确提出要发展智慧交通,推进交通基础设施数字化、网络化^[3]。《关于推动城乡建设绿色发展的意见》进一步强调了发展智慧交通、构建绿色低碳交通体系的重要性^[4]。2024 年 8 月党的二十届三中全会审议通过的《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》,对“健全现代化基础设施建设体制机制”作出了系统部署,包括“发展通用航空和低空经济”等重要内容^[5]。这一系列政策导向为智慧交通与低空经济的协同发展创造了有力的政策支持和发展机遇。

从技术创新的角度来看,5G 通信、边缘计算、区块链等前沿技术的应用正在为智慧交通系统赋能,显著提升其感知、分析和决策

能力^[6]。同时,电动垂直起降(eVTOL)飞行器、自主飞行控制系统等创新技术的突破,正在为低空经济的规模化发展奠定技术基础^[7]。这些技术的实际应用不仅改变了传统的交通模式,也正在重塑城市的空间结构和功能布局。

然而,随着智慧交通系统和低空经济的快速发展,如何协调二者的空间发展、构建面向未来的三维立体城市空间,已成为城市规划和管理领域亟待解决的重大课题。这一问题不仅涉及技术创新和空间规划的整合,更关乎城市治理能力的提升和可持续发展目标的实现。目前,学界对智慧交通系统和低空经济的研究多集中于各自领域,相对缺乏系统性的协同发展研究^[8-9]。

基于上述背景,本研究立足于新时代的背景,深入贯彻相关政策精神,聚焦智慧交通与低空经济协同发展的空间规划策略,通过系统梳理相关理论基础,深入分析智慧交通系统的空间布局特征和低空经济的空间发展模式,探索两者的空间协同机制,旨在为构建面向未来的城市空间提供理论支撑和实践指导。

本研究的理论意义在于:试图弥合智慧交通研究和低空经济研究之间的鸿沟,提出一个整合性的空间规划框架,有助于推进城市空间理论的创新;通过跨学科的研究方法,为城市空间研究提供了新的范式。本研究的实践意义在于,研究成果可为城市决策者和规划者提供新的思路 and 工具,助力智慧城市建设和空间治理能力的提升。

一、智慧交通与低空经济协同发展的空间规划理论基础

智慧交通与低空经济的协同发展是一个复杂的系统工程,其空间规划需要多学科理论的支撑和指导。本研究构建了一个综合理论框架,涵盖空间协同理论、复杂系统理论、空间句法理论、新经济地理学理论和韧性城市理论,为智慧交通与低空经济的空间协同发展提供了坚实的理论基础。

(一) 智慧交通与低空经济协同发展文献综述

近年来,随着科学技术的快速进步和城市发展需求的不断变化,智慧交通和低空经济已成为学术界和产业界关注的热点。然而,这两个领域的协同发展,特别是在空间规划方面的研究仍处于起步阶段。智慧交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)的概念最早可追溯到20世纪90年代^[10]。随着信息技术的快速发展,ITS的内涵和外延不断扩展。KAFFASH et al. 对智慧交通系统的发展历程进行了系统回顾,指出其已从最初的交通信号控制发展到包括车联网、自动驾驶等先进技术的综合应用^[11]。这一演变过程反映了智慧交通系统在技术和应用范围上的显著进步。

在技术应用方面,NEILSON et al. 探讨了大数据在智慧交通中的应用,强调了数据驱动决策在优化交通空间布局中的重要性;他们的研究表明,大数据分析能够为交通规划和管理提供更精准的决策支持^[12]。此外,

MACHIN et al. 研究了人工智能技术在智慧交通系统中的应用,指出AI可以显著提高交通预测的准确性和交通管理的效率^[13]。在空间规划方面,Zhang et al. 探讨了智慧交通系统对城市空间结构的影响,指出智慧交通不仅改变了交通模式,还重塑了城市形态^[14]。然而,他们的研究主要聚焦于平面空间,对垂直空间的关注相对不足。

低空经济作为一个新兴研究领域,近年来受到国内外学界的广泛关注。樊邦奎等对全球低空经济发展趋势进行了系统分析,预测到2035年,低空经济市场规模将达到3150亿美元^[15]。这一预测凸显了低空经济的巨大发展潜力,也引发了学界对其空间影响的思考。在城市空间方面,李诚龙等研究了城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)的发展前景,指出其将重塑城市空间结构和交通模式^[16]。他们的研究为理解低空经济对城市空间的影响提供了重要视角。然而,这些研究主要关注低空经济本身,对其与地面交通系统的协同考虑较少。国际上,GARROW et al. 探讨了UAM对城市规划的影响,提出了“空中城市”的概念,但其研究主要停留在概念层面,缺乏具体的空间规划策略^[17]。STRAUBINGER et al. 则从政策和监管角度探讨了UAM的发展,为低空经济的制度建设提供了参考^[18]。

尽管智慧交通和低空经济各自的研究较为丰富,但二者协同发展的空间规划研究相对匮乏。关积珍较早提出了智慧交通与城市空中交通融合的概念^[19],但未深入探讨其空间规划策略。这一研究为本领域的探索提供

了初步框架,但在具体实施方面仍有待深入。近年来如 WANG et al. 开始关注智慧交通与低空经济的协同效应,探讨了两者在信息共享和交通管理方面的潜在合作^[20]。然而,他们的研究主要集中在技术层面,对空间规划的考虑不足。还有学者从系统工程的角度探讨了智慧交通与低空经济的整合,但这些研究仍缺乏具体的空间规划策略。本研究提出一个综合理论框架来指导智慧交通与低空经济的协同空间规划。

(二) 智慧交通与低空经济协同发展相关理论基础

1. 空间协同理论

空间协同理论源于 HAKEN 提出的协同学,强调系统中各要素之间的相互作用和协调发展^[21]。在智慧交通与低空经济的融合背景下,空间协同理论为两者的协调发展提供了重要的理论支撑。该理论指导我们在进行智慧交通和低空经济空间规划时,应当同时考虑功能协同、信息协同和发展协同 3 个维度。具体而言,智慧交通系统的地面设施布局应当考虑低空经济活动的空间需求,例如在规划智能交通枢纽时,应当预留与低空交通接驳的空间。同时,应建立统一的信息平台,实现数据共享和信息互通,从而优化整体空间资源配置。此外,规划过程中还需同步考虑智慧交通和低空经济的未来发展需求,预留足够的空间和资源,以适应技术进步和需求变化。

2. 复杂系统理论

复杂系统理论为理解和规划智慧交通与低空经济的空间协同发展提供了系统性和整

体性的思维方法^[22]。该理论认为,城市是由多个子系统组成的复杂适应系统,各子系统之间存在非线性相互作用,系统整体表现出自组织、涌现等特性。在智慧交通与低空经济的空间规划中,复杂系统理论的应用主要体现在整体性思维、非线性思维、自组织性和涌现性 4 个方面。该理论强调规划应当从城市整体功能出发,构建多层次、立体化的城市空间结构,同时认识到智慧交通系统和低空经济之间可能存在的非线性相互作用。此外,规划中应预留一定的弹性空间,允许系统在一定程度上自我调节和适应,并关注智慧交通与低空经济协同发展可能带来的新兴空间形态和功能。

3. 空间句法理论

空间句法理论由 HILLIER et al. 提出,为分析和优化智慧交通与低空经济的空间布局提供了科学的方法论^[23]。该理论通过量化空间构型,揭示空间结构与人类行为之间的内在联系,为空间规划提供了重要的决策依据。在智慧交通与低空经济的空间规划中,空间句法理论的应用主要体现在可达性分析、空间结构优化、多尺度分析和空间预测 4 个方面。通过计算整合度和选择度等指标,可以评估智慧交通网络和低空经济活动空间的可达性,优化交通流线和空间布局。利用空间句法的轴线分析和视域分析等方法,可以优化智慧交通设施和低空经济活动节点的空间分布,提高空间利用效率。此外,空间句法理论还允许我们在不同空间尺度上评估智慧交通系统和低空经济活动的空间关系,并预测其对城市空间结构的长期影响。

4. 新经济地理学理论

新经济地理学理论由保罗·克鲁格曼(PAUL KRUGMAN)等提出,为理解智慧交通与低空经济在城市空间中的集聚现象提供了理论框架^[24]。该理论强调运输成本、规模经济和知识溢出效应对经济活动空间分布的影响。在智慧交通与低空经济的协同发展中,新经济地理学理论的应用主要体现在集聚效应分析、空间均衡模型构建、核心-边缘结构分析和运输成本影响评估4个方面。通过这一理论,我们可以解释为什么某些区域会形成智慧交通和低空经济的集聚中心,例如智能交通枢纽周边往往会吸引低空经济相关产业的聚集。同时,我们可以构建智慧交通与低空经济的空间均衡模型,预测不同政策和投资决策对空间格局的影响,并分析可能导致的核心-边缘空间结构。此外,该理论还有助于我们评估智慧交通系统对运输成本的影响,以及这种影响如何重塑低空经济活动的空间分布。

5. 韧性城市理论

韧性城市理论源于生态学中的韧性概念,强调城市空间应具有应对各种挑战和变化的适应能力^[25]。在智慧交通与低空经济的空间规划中,韧性理念的引入有助于构建更加灵活和可持续的城市空间系统。韧性城市理论在智慧交通与低空经济协同发展的空间规划中的应用主要体现在多功能空间设计、冗余与多样性引入、模块化设计、自我修复能力培养和跨尺度连接5个方面。在规划智慧交通系统时,应预留未来低空交通发展的空间,设计可转换、多功能的交通设施,以

适应未来可能的需求变化。同时,引入适度的冗余和多样性,例如设置备用的交通路径和多样化的低空经济活动空间,可以提高系统的抗风险能力。采用模块化的空间设计理念,使智慧交通系统和低空经济活动空间能够灵活组合和调整,以应对未来的不确定性。此外,在空间规划中还应考虑系统的自我修复能力,设计能够快速恢复的智能交通网络和具有弹性的低空经济活动空间。此外,注重不同空间尺度之间的连接和协调,构建从局部到整体的多层次韧性空间体系,是实现整体城市韧性的关键。

(三) 智慧交通与低空经济协同发展理论框架整合

基于上述理论基础,本研究提出了智慧交通与低空经济协同发展的空间规划理论框架。该框架以空间协同理论为核心,将复杂系统理论、空间句法理论、新经济地理学理论和韧性城市理论有机结合,旨在构建一个能够指导实践的理论体系。这一框架强调以下5个方面:(1)地面交通与空中交通的空间协同;(2)新型空间结构的复杂性和涌现性;(3)三维空间网络的可达性和连通性;(4)经济活动的空间集聚和均衡;(5)城市空间系统的适应性和韧性。

这些理论之间并非相互独立,而是相互补充、相互强化。例如,空间协同理论为整体框架提供了基本思路,复杂系统理论则理解这种协同过程中的非线性相互作用提供了工具。空间句法理论和新经济地理学理论共同指导具体的空间布局优化,而韧性城市理论则确保了整个系统的长期可持

续性。

通过这一理论框架,我们可以更好地理解 and 指导智慧交通与低空经济协同发展的空间规划实践,为构建高效、可持续和韧性的未来城市空间提供理论支撑。这一框架不仅响应了国家关于推进新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步发展的战略部署,也为实现交通强国和数字中国的宏伟目标提供了创新性思路和方法论支持。在后续研究中,我们将基于这一理论框架,深入分析智慧交通系统的空间布局特征、低空经济的空间发展模式,以及两者的空间协同机制,并提出面向未来城市空间的具体规划策略。

二、智慧交通系统的 空间布局特征

智慧交通系统作为新型城市基础设施的重要组成部分,其空间布局直接影响着城市的整体功能和效率。本研究从地面交通网络空间结构、交通信息节点分布模式和智能化设施空间配置策略 3 个维度,深入分析智慧交通系统的空间布局特征,以揭示其在现代城市规划中的创新性和前瞻性。这种多维度的分析方法与复杂系统理论相呼应,体现了对智慧交通系统整体性和多层次性的认识。

(一) 地面交通网络空间结构

智慧交通系统的地面网络结构是城市空间组织的骨架,其设计直接影响着城市的运行效率和生活品质。在智慧交通的理念下,地面交通网络呈现出多元化和适应性强的特

点,体现了对未来城市发展的前瞻性规划^[26]。

智慧交通网络正在打破传统的层级划分,呈现出更加灵活和动态的特征。城市核心区通常采用网格化布局,这种规则结构有利于智能化设备的系统部署和交通流的均衡分配。同时,放射状结构在连接城市中心与周边区域时发挥着重要作用,提高了空间可达性,促进了区域一体化发展。高速路、主干道、次干道和支路等不同等级的道路正在形成一个有机整体,通过智能化手段实现无缝衔接。这种网络结构的优化与空间句法理论所强调的空间可达性和连通性分析相契合,体现了智慧交通系统对城市空间结构的深刻影响。

智慧交通网络的空间布局更加注重与城市功能区的协调。例如,在商业中心区,交通网络设计更加密集,以应对高峰时段的大量人流;而在生态敏感区,则采用更加环境友好的设计,如设置绿色廊道和生态桥梁,实现人与自然的和谐共处。这种差异化的设计策略体现了智慧交通系统对城市多元需求的适应性,与新经济地理学理论中强调的空间均衡和功能分异相呼应。

此外,智慧交通网络的空间结构还体现了对未来发展的前瞻性规划设计。许多城市在规划中预留了低空交通走廊和垂直起降设施的空间,为未来空中出租车等新兴交通方式做好准备。这种前瞻性思维不仅体现了智慧交通的创新特性,也为城市的可持续发展提供了可能性,与韧性城市理论所强调的适应性和前瞻性规划相一致。

(二) 交通信息节点分布模式

在智慧交通系统中,交通信息节点犹如城市的神经元,感知、传递和处理着海量的交通数据,为城市的智能决策提供支撑。这些节点的空间分布模式直接影响着整个系统的响应速度和管理精度。

交通信息节点的分布呈现出多中心、网络化的特征。在城市的关键区域,如交通枢纽、商业中心和重要路口,往往设置高密度的信息采集点和处理中心。这些区域就像城市交通的“大脑”,汇聚和分析着实时交通数据,为交通管理决策提供依据。同时,整个城市范围内还分布着大量的基础信息采集设备,它们如同毛细血管一样遍布城市的各个角落,实时监测交通状况。这种分布模式与复杂系统理论中的网络结构和信息流动概念高度一致,体现了智慧交通系统的自组织和适应性特征。

交通信息节点的分布正在突破传统的平面思维,向三维空间延伸。随着低空经济的发展,一些城市开始在高层建筑和制高点布置信息节点,以更好地监测和管理低空交通。这种立体化的分布模式不仅拓展了智慧交通的覆盖范围,也为未来的空中交通管理系统奠定了基础。

此外,交通信息节点正在变得越来越智能和多元。许多节点不再局限于单一的数据采集功能,而是集成了数据处理、信息发布和应急响应等多项功能。例如,一些先进的交通信号灯不仅能根据实时交通流自动调节信号周期,还能为附近的行人和车辆提供交通信息服务。这种功能融合与跨系统整合的趋

势,与空间协同理论所强调的要素间协同和信息共享理念相符,体现了智慧交通系统在空间规划中的整体性思维。

(三) 智能化设施空间配置策略

智能化设施是智慧交通系统的重要组成部分,其空间配置直接关系到系统的运行效果和服务质量。在现代城市规划中,智能化设施的空间配置正在经历从“点状分布”到“网络化覆盖”的转变,呈现出全面性、精准性和前瞻性的特点。

智能化设施正在实现全域覆盖,从城市中心到边远郊区,从主干道到社区街巷,成为城市基础设施的标配。同时,配置策略也体现出明显的重点倾斜。在交通密集区域、事故多发路段和重要公共场所,往往部署更高级别、功能更强大的智能化设备。这种差异化的配置策略既保证了关键区域的管理需求,又避免了资源的浪费,与新经济地理学理论中的空间集聚和资源优化配置理念相呼应。

随着城市的垂直发展和低空经济的兴起,智能化设施的配置正在向立体化发展。一些城市开始在高层建筑、天桥和空中走廊上部署智能交通设施。同时,智能化设施的配置正在与城市的总体设计更加紧密地结合,努力将智能交通设施与城市景观相融合,既保证功能性,又注重美观性。这种立体化发展和景观融合的趋势,体现了智慧交通系统在空间规划中的创新性和整体性思维,与空间协同理论和韧性城市理论核心理念相契合^[27]。

智能化设施的空间配置还体现了对未来

技术发展的考虑。许多城市在进行智能化改造时,都预留了升级和扩展的空间。这种前瞻性的规划为新技术的应用和系统的持续优化创造了条件。此外,一些城市开始尝试使用移动式智能交通设施,可以根据需求灵活部署,进一步提高了资源利用效率。这种灵活适应的策略与韧性城市理论所强调的系统适应性和可持续性理念高度一致,为智慧交通系统的长期发展提供了保障。

总的来说,智慧交通系统的空间布局特征反映了现代城市对高效、舒适和可持续交通环境的追求。无论是地面交通网络的结构优化,还是交通信息节点的智能分布,抑或是智能化设施的精准配置,都体现了“以人为本、科技赋能”的理念。这些空间布局不仅提升了城市的交通效率,还为未来的城市发展和技术创新预留了空间,为构建全智慧的城市交通系统奠定了坚实的基础。通过这些布局特征与前文所述的理论基础相结合,我们可以更深入地理解智慧交通系统在城市空间规划中的重要作用和发展方向。

三、低空经济的空间发展模式

低空经济作为新兴的经济形态,正在重塑城市的空间结构和发展模式。随着技术的进步和政策的支持,低空空间正逐渐成为城市发展的新蓝海。低空经济的空间发展模式主要体现在低空交通走廊的规划、空中枢纽的布局以及地空接驳设施的分布等方面。这些元素共同构成了一个立体化、网络化的低

空经济空间体系,为城市的可持续发展提供了新的可能性。本节将从低空交通走廊规划原则、空中枢纽布局策略和地空接驳设施空间分布3个方面深入探讨低空经济的空间发展模式,并与前文论述的空间协同理论、复杂系统理论等建立联系。

(一) 低空交通走廊规划原则

低空交通走廊是低空经济发展的重要空间载体,其规划直接影响着低空经济活动的效率和安全。在规划低空交通走廊时,需要综合考虑城市空间结构、地面交通网络、气象条件等多方面因素,这与复杂系统理论中强调整体性思维和多因素相互作用的观点相呼应。

低空交通走廊通常倾向于沿着城市的主要交通动脉和绿色廊道布置,这种布局策略不仅可以最大限度地避免对地面活动的干扰,还能够实现与地面交通系统的有效衔接,体现了空间协同理论中的功能协同原则。在垂直空间的划分上,低空交通走廊通常被设定在120米到1000米的高度范围内,并进一步细分为多个层级。例如,部分城市将300米以下的空间规划为城市内部短途运输层,300米到1000米的空间规划为城际运输层。这种分层设计有助于提高空间利用效率,降低空中交通冲突的风险,符合空间句法理论中对空间结构优化的要求。

值得注意的是,低空交通走廊的规划正在突破传统的二维思维,向三维网络化方向发展。一些前沿城市正在尝试构建“空中立交”和“空中环线”等创新性设计,以应对日益复杂的低空交通需求。这种立体化的规划

理念不仅提高了空间利用效率,还为未来可能出现的新型空中交通工具预留了发展空间,体现了韧性城市理论中的适应性和前瞻性规划思想。

(二) 空中枢纽布局策略

空中枢纽是连接低空交通与地面活动的重要节点,其布局直接影响着低空经济的可达性和服务效能。在空中枢纽的布局策略上,呈现出分散与集中相结合的特点,这与新经济地理学理论中的空间集聚和均衡发展理念相契合。

一方面,为了提高服务的可及性,城市倾向于在各个功能区设置小型的垂直起降设施,如楼顶停机坪、社区航站楼等。这种分散布局能够满足不同区域的差异化需求,提高低空交通的便捷性。另一方面,在城市的重要交通节点和功能中心,往往会规划大型的综合性空中枢纽。这些枢纽不仅具备客货运输功能,还集成了商业、办公、休闲等多元化功能,成为城市新的地标和经济增长极^[28]。

在空中枢纽的具体选址上,需要充分考虑城市空间结构、人口分布、经济活动等因素。通常情况下,空中枢纽倾向于布置在交通便利、人口密集、经济活跃的区域,以最大化其服务效能。同时,为了确保飞行安全,空中枢纽的选址还需要考虑周边建筑高度、气流条件等因素,避免对周围环境造成不利影响。

(三) 地空接驳设施空间分布

地空接驳设施是连接低空交通与地面交通的关键环节,其空间分布直接关系到低空经济与城市其他功能的融合度。在地空接驳

设施的空间分布上,呈现出网络化、多层次的特点,这与空间句法理论中强调的空间网络连通性相呼应。

在城市的主要功能区,如商务中心、重要交通枢纽、大型公共设施周边,往往会设置高密度的地空接驳设施。这些设施不仅包括传统的直升机停机坪,还包括为未来电动垂直起降飞行器设计的新型接驳平台。在居住区和社区中心,正在探索设置小型、分散的地空接驳点。这种社区级的接驳设施不仅提高了低空交通的可及性,还有助于降低对社区环境的影响。

在垂直空间的利用上,地空接驳设施正在向多层次发展。除了传统的地面和楼顶设施外,一些创新性的设计正在将地空接驳功能整合到建筑的中层或者悬臂结构中。这种立体化设计不仅提高了空间利用效率,还为乘客提供了更多样化的体验,反映了韧性城市理论中的多功能空间设计理念。

值得注意的是,地空接驳设施的设计正在朝着智能化、整合化的方向发展。许多城市正在探索将地空接驳设施与智能交通系统、能源补给系统、信息服务系统等有机结合,打造多功能的“智慧航站楼”。这种整合不仅提高了运营效率,还为乘客提供了更加流畅、便捷的出行体验,体现了智慧城市理论中的系统集成和服务创新理念。

总的来说,低空经济的空间发展模式正在形成一个立体化、网络化、智能化的新型城市空间体系。通过科学规划低空交通走廊、合理布局空中枢纽、优化地空接驳设施的空间分布,低空经济正在与城市的传统功能有

机融合,创造出新的城市空间形态和经济增长点。这种发展模式不仅有望缓解地面交通压力,还将为城市带来新的活力和机遇,推动城市向更加可持续、宜居的方向发展。

四、智慧交通与低空经济的空间协同机制

智慧交通与低空经济的协同发展正在重塑城市的三维空间结构和运行模式。这种协同不仅体现在空间布局、技术应用和管理制度等方面,还反映了城市系统的复杂性和整体性。本节将从空间布局协同、技术应用协同和管理制度协同3个维度深入探讨智慧交通与低空经济的空间协同机制,并与前文论述的空间协同理论、复杂系统理论等建立联系。

(一) 空间布局协同

智慧交通系统与低空经济活动在空间布局上的协同正在重塑城市的三维结构,体现了空间协同理论中的功能协同和发展协同原则。地面智能交通网络为低空经济活动提供了重要的支撑和接入点,而低空交通走廊则拓展了传统交通网络的垂直维度。这种协同关系使得城市空间结构呈现出新的特征和动态,符合复杂系统理论中对系统涌现性的描述。

在这种协同过程中,传统交通枢纽正在经历显著的升级转型。例如,将智能公交站台与垂直起降设施相结合,打造“空地一体”的综合交通枢纽,这种立体化的空间布局不仅提高了空间利用效率,还为民众提供

了更多样化的出行选择。这种转型反映了韧性城市理论中多功能空间设计的理念,增强了城市交通系统的适应性和灵活性。

同时,低空经济活动的布局也在考虑与地面智慧交通系统的协调。在规划空中走廊时,充分利用现有的交通廊道和绿地系统,最大限度地减少对城市既有格局的干扰。这种空间布局的协同正在创造一种新的城市空间形态,使城市在竖向空间上得到了更充分的利用和发展^[29]。这种协同布局策略与空间句法理论中对空间结构优化和可达性分析的观点相呼应,有助于提高整体城市空间的效率和连通性。

(二) 技术应用协同

技术应用的协同是智慧交通与低空经济融合发展的核心驱动力,体现了智慧城市理论中的技术创新和系统集成思想。这种协同主要体现在数据共享、系统集成和技术创新3个层面。

第一,智慧交通系统积累的海量数据正成为低空经济发展的重要资源。通过大数据分析和人工智能技术,城市可以精准预测低空交通需求,优化航线规划和资源配置。这种数据驱动的决策模式与复杂系统理论中强调的信息流动和自组织特性相契合,有助于提高整个交通系统的适应性和效率。

第二,低空交通系统的实时数据也被整合到智慧交通管理平台中,实现了空地交通的协同调度和无缝衔接。一些前沿城市正在开发“空地一体化”的交通管理系统,能够根据实时交通状况,灵活调整地面和空中交通的运力分配,最大化提高整体交通效率。这

种系统集成反映了空间协同理论中的信息协同原则,促进了智慧交通与低空经济在信息层面的深度融合。

此外,新兴技术如5G、边缘计算、区块链等在智慧交通和低空经济领域的应用,正在促进两个领域的技术融合与创新。例如,基于5G网络的低空交通管控系统可以实现对飞行器的实时精准定位和控制,大大提高了低空活动的安全性和效率。这种技术协同不仅推动了智慧交通和低空经济的发展,还为城市空间的智能化管理提供了新的可能性。

(三)管理制度协同

管理制度的协同是确保智慧交通与低空经济健康发展的制度保障,反映了韧性城市理论中的适应性管理和多元治理理念。这种协同正推动着城市管理模式从传统的二维交通管理向三维立体管理转变。

第一,在组织架构上,一些城市已经开始探索设立“空中交通管理局”,统筹管理地面和低空交通,打破了传统部门之间的壁垒。这种机构设置的创新体现了空间协同理论中的发展协同原则,有助于形成更加统一和高效的管理体系^[30]。

第二,在法规制度方面,有些法规和标准正在制定中,以规范和促进智慧交通与低空经济的协同发展。这些法规不仅涉及技术标准和安全规范,还包括空间使用权、隐私保护等方面的内容。这种全面的法规体系建设反映了复杂系统理论中对系统边界和约束条件的关注,为智慧交通和低空经济的协同发展提供了明确的制度框架。

第三,在管理机制上,正在形成跨部门、

跨领域的协同机制,如建立智慧交通和低空经济的联合应急响应机制,提高城市对突发事件的应对能力。这种协同机制的建立体现了韧性城市理论中的自我修复和适应能力,有助于增强城市系统的整体韧性。

第四,公众参与机制也在不断完善,通过听证会、公众咨询等方式,确保在制定相关政策时能够充分考虑各方利益。这种多元参与的管理模式与新经济地理学理论中强调的利益相关者参与相呼应,有助于形成更加包容和可持续发展模式。

总的来说,智慧交通与低空经济的空间协同机制体现了城市系统的复杂性和整体性。通过空间布局、技术应用和管理制度的协同,正在形成一种新型的城市空间治理模式。这种协同不仅提高了城市空间利用效率,还为未来城市的可持续发展提供了新的路径和可能性^[31]。

五、面向未来城市空间的规划策略

基于对智慧交通与低空经济空间协同机制的深入分析,本研究提出了面向未来城市空间的规划策略。这些策略旨在构建一个高效、可持续的三维城市空间,充分体现了空间协同理论、复杂系统理论和韧性城市理论核心理念。以下将从构建三维立体交通网络、优化空地一体化枢纽布局、推进智慧空间信息系统建设以及完善空间规划法规和管理机制4个方面详细阐述这些策略。

(一)构建三维立体交通网络

构建三维立体交通网络是未来城市空间

规划的核心策略,体现了空间协同理论中的功能协同和发展协同原则。这个网络将地下、地面和空中交通系统有机整合,形成一个全方位、多层次的交通体系。在地下层面,智能化的地铁系统将与地面交通实现无缝衔接。在地面层面,智能道路网络不仅支持传统车辆,还将为自动驾驶汽车提供必要的基础设施支持。在空中层面,低空交通走廊将被划分为不同的功能区,满足各类飞行器的需求。

这3个层面并非孤立存在,而是通过垂直交通设施如智能电梯、空中走廊等紧密连接。例如,一些创新性的设计正在探索将高架桥改造成“空中走廊”,上层用于低空飞行,下层留给地面车辆通行,实现空间的立体利用。这种设计理念与复杂系统理论中的层次性和涌现性概念相呼应,体现了城市交通系统的自组织特性。

这种三维交通网络不仅能够大幅提升城市的通行能力,还能为市民提供更加丰富和便捷的出行体验,也为未来可能出现的新型交通方式预留了发展空间。这种前瞻性的规划策略与韧性城市理论中强调的适应性和灵活性相一致,有助于增强城市交通系统的长期可持续性^[32]。

(二) 优化空地一体化枢纽布局

优化空地一体化枢纽布局是实现未来城市高效运转的关键策略,体现了新经济地理学理论中的空间集聚和功能整合思想。这些枢纽不再是简单的交通节点,而是集聚了交通、商业、文化等多种功能的城市综合体。在设计这些枢纽时,首要考虑的是不同交通方

式之间的无缝衔接,如何让乘客能够方便快捷地在地面交通和低空交通之间转换。

同时,这些枢纽还需要与周边城市功能有机融合,创造出全新的城市生活空间。例如,一些城市正在规划“空中 TOD”(Transit-Oriented Development, TOD),将传统的公交导向开发理念拓展到低空领域,在垂直起降设施周边布局办公、商业和住宅等功能。这种布局不仅能提高土地利用效率,还能减少不必要的交通需求。

此外,这些枢纽的设计还需要考虑未来的可扩展性和灵活性,能够适应技术发展和需求变化带来的新要求。通过优化这些空地一体化枢纽的布局,城市将形成一个个功能完善、交通便利的“小宇宙”,大大提升城市的宜居性和活力。

(三) 推进智慧空间信息系统建设

推进智慧空间信息系统建设是支撑未来城市高效运行的技术基础,体现了智慧城市理论中的数据驱动和系统集成思想。这个系统将整合来自地面和空中的海量数据,构建城市的“数字孪生体”。通过这个系统,城市管理者可以实时监测和调控城市的运行状态,包括交通流量、能源消耗、环境质量等各个方面^[33]。

对于市民而言,这个系统则能提供个性化的出行建议和服务,让城市生活更加便捷和智能。例如,系统可以根据实时交通状况和个人偏好,为用户推荐最优的出行路线和方式,包括地面交通和低空交通的组合^[34]。这种功能与复杂系统理论中强调的信息流动和自适应性相呼应,有助于优化整个城市系

统的运行效率。

在建设这个系统时,需要特别注重数据的全面性和实时性,建立覆盖全市的感知网络,并通过5G、物联网等技术实现数据的实时传输和处理。同时,还需要建立健全的数据治理机制,确保数据的安全性和隐私保护。这些规划反映了空间协同理论中的信息协同原则,有助于实现智慧交通与低空经济在信息层面的深度融合。

(四) 完善空间规划法规和管理机制

完善空间规划法规和管理机制是确保未来城市有序发展的制度保障。面对新技术和新业态带来的变革,传统的城市规划法规和管理模式已显得力不从心。

第一,需要建立适应三维空间发展的新型法规体系,明确空中权益的分配和使用规则,规范低空经济活动。这包括制定低空空分的分层使用标准、空中交通管制规则、空地协同的安全管理条例等。

第二,需要创新管理模式,例如探索建立“空中交通管制”与“地面交通管理”协同的新机制,确保空地交通的安全和效率。这可能涉及到跨部门的机构重组或职能调整,以适应三维空间管理的需求。这种管理创新与空间协同理论中的发展协同原则相一致,有助于形成更加统一和高效的管理体系。

第三,需要建立灵活的规划调整机制,能够及时响应技术进步和社会需求的变化,对规划内容进行动态更新。这种动态调整机制与复杂系统理论中强调的系统演化和自组织特性相呼应,有助于增强城市规划的适应性

和前瞻性。

第四,公众参与也应该成为未来城市空间规划的重要环节,通过多方协商来平衡不同利益群体的诉求,实现城市发展的共识。这可以通过建立常态化的公众参与平台、定期举行城市规划听证会等方式来实现。这种多元参与的管理模式与新经济地理学理论中强调的利益相关者参与相呼应,有助于形成更加包容和可持续发展模式。通过这些法规和机制的完善,可以为智慧交通和低空经济的协同发展创造一个有序、安全、公平的制度环境^[35]。

六、结论和启示

本研究围绕智慧交通与低空经济的协同发展,探讨了未来城市空间的规划策略,为构建更加高效、宜居的城市提供了新的理论框架和实践指导。通过对智慧交通系统的空间布局特征、低空经济的空间发展模式以及两者之间的空间协同机制进行系统分析,本研究得出了以下主要结论和启示:

第一,智慧交通与低空经济的融合发展正在重塑城市的空间结构。传统的二维城市空间正在向三维立体空间演进,这不仅提高了空间利用效率,还为城市发展提供了新的可能性。地面智能交通网络与低空交通走廊的有机结合,正在形成一个全方位、多层次的立体交通体系,这将极大地提升城市的通行能力和运行效率。这一发现与空间协同理论和复杂系统理论的核心观点相一致,体现了城市空间系统的涌现性和自组织特性。

第二,技术创新被证实是驱动智慧交通与低空经济协同发展的核心动力。大数据、人工智能、5G 等新兴技术的应用,使得空地一体化的交通管理成为可能。智慧空间信息系统的构建,为城市管理者提供了全面、实时的决策支持,同时也为市民带来了更加便捷、个性化的出行体验。这种技术驱动的发展模式与智慧城市理论中强调的数据驱动和系统集成思想高度契合。

第三,制度创新对于保障智慧交通与低空经济的健康发展至关重要。本研究发现,传统的城市规划法规和管理模式已难以适应新的发展需求。建立适应三维空间发展的新型法规体系、创新管理模式、完善公众参与机制,都是未来城市治理面临的重要课题。这一发现反映了韧性城市理论中强调的适应性管理和多元治理理念的重要性。

基于这些发现,本研究提出了面向未来城市空间的规划策略,包括构建三维立体交通网络、优化空地一体化枢纽布局、推进智慧空间信息系统建设以及完善空间规划法规和管理机制等。这些策略为城市规划者和决策者提供了有价值的参考框架,不仅有助于缓解当前城市面临的交通压力和空间限制,还为未来城市的可持续发展指明了方向。

然而,也应该认识到智慧交通与低空经济的协同发展是一个复杂的系统工程,其实施过程中必然会面临诸多挑战。如何平衡发展效益与环境保护、如何协调不同利益群体的诉求、如何确保新技术应用的安全性和可靠性等,这些都需要在未来的研究和实践中进一步探索。展望未来,随着技术的不断进

步和制度的持续完善,智慧交通与低空经济的协同发展将为城市带来前所未有的机遇,不仅将改变居民的出行方式,还将重塑城市空间,创造新的经济增长点,最终推动城市向更加智能、高效、宜居的方向发展。

作为新兴的研究领域,智慧交通与低空经济的协同发展还有许多值得探索的地方。未来的研究可以进一步深入具体的技术应用场景,探讨不同城市类型下的最佳实施路径,以及评估这种协同发展对城市经济、社会、环境的长期影响等。同时,跨学科、跨领域的合作研究也将为这一领域带来新的视角。尽管面临诸多挑战,但通过持续的技术创新、制度完善和跨领域合作,智慧交通与低空经济的协同发展必将为城市的可持续发展注入新的动力。

参考文献:

- [1] 王少华,卢浩,黄骞,等. 智慧交通系统关键技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2013(S1):88-91.
- [2] 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(6):59-64.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见(交规划发〔2020〕75号)[EB/OL]. (2020-08-03)[2024-07-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/06/content_5532842.htm.
- [4] 中共中央办公厅国务院办公厅印发《关于推动城乡建设绿色发展的意见》[J]. 中华人民共和国国务院公报,2021(31):43-48.
- [5] 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[N]. 人民日报,2024-07-

- 22(1).
- [6] 赵光辉. 数字经济赋能智慧交通构建的路径探讨[J]. 企业经济,2022(10):5-15,2.
- [7] RAJENDRAN S, SRINIVAS S. Air taxi service for urban mobility: a critical review of recent developments, future challenges, and opportunities [J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2020(1):102090.
- [8] FAN L, WANG X, YANG J, et al. Social radars for social vision of intelligent vehicles: a new direction for vehicle research and development [J]. IEEE transactions on intelligent vehicles, 2024(3):4244-4248.
- [9] FAN J, FAN L, NI Q, et al. Perception and planning of intelligent vehicles based on BEV in extreme off-road scenarios [J]. IEEE transactions on intelligent vehicles, 2024 (34): 4568-4572.
- [10] LEVINE J, UNDERWOOD S E. A multiattribute analysis of goals for intelligent transportation system planning [J]. Transportation research part C: emerging technologies, 1996 (2):97-111.
- [11] KAFFASH S, NGUYEN A T, ZHU J. Big data algorithms and applications in intelligent transportation system: a review and bibliometric analysis [J]. International journal of production economics, 2021, 231:107868.
- [12] NEILSON A, DANIEL B, TJANDRA S. Systematic review of the literature on big data in the transportation domain: concepts and applications [J]. Big data research, 2019, 17:35-44.
- [13] MACHIN M, SANGUESA J A, GARRIDO P, et al. On the use of artificial intelligence techniques in intelligent transportation systems [C]//2018 IEEE wireless communications and networking conference workshops (WCNCW). Barcelona:IEEE, 2018:332-337.
- [14] ZHANG H, LUO G, LI Y, et al. Parallel vision for intelligent transportation systems in metaverse: challenges, solutions, and potential applications [J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2022 (6): 3400-3413.
- [15] 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空互联网与无人机产业应用 [J]. 地理科学进展, 2021(9):1441-1450.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] STRAUBINGER A, VERHOEF E T, DE GROOT H L F. Will urban air mobility fly? the efficiency and distributional impacts of UAM in different urban spatial structures [J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2021, 127:103124.
- [19] 关积珍. 中国智能交通的创新发展成就与未来展望 [J]. 可持续发展经济导刊, 2021 (Z2): 45-48.
- [20] 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.

- [21] HAKEN H. Advanced synergetics:instability hierarchies of self-organizing systems and devices [M]. Berlin:Springer,2012.
- [22] MITCHELL S D. Unsimple truths:science, complexity, and policy [M]. Chicago: University of Chicago Press,2009.
- [23] HILLIER B,PENN A,HANSON J,et al. Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement [J]. Environment and planning B:urban analytics and city science,1993(1):29-66.
- [24] MARTIN R,SUNLEY P. Paul Krugman's geographical economics and its implications for regional development theory:a critical assessment [J]. Economic geography,1996(3):259-292.
- [25] MEEROW S,NEWELL J P,STULTS M. Defining urban resilience:a review [J]. Landscape and urban planning,2016,147:38-49.
- [26] 刘刚,蒋贵川. 智慧交通系统的总体框架体系[J]. 中国交通信息化,2019(11):86-89.
- [27] 白俊红,蒋伏心. 协同创新、空间关联与区域创新绩效[J]. 经济研究,2015(7):174-187.
- [28] 顾朝林,石爱华,王恩儒. “新经济地理学”与“地理经济学”——兼论西方经济学与地理学融合的新趋向[J]. 地理科学,2002(2):129-135.
- [29] 陈旭浩,吕莹,孙会君,等. 基于风险度量的多交通方式协同应急救援方案优化[J]. 交通运输工程与信息学报,2023(2):79-94.
- [30] 张旭. 低空空域开发现状与低空经济发展策略[J]. 中国航务周刊,2024(13):57-59.
- [31] 王来军,孙晓玲. 空中交通管理与机场管理的衔接性[J]. 长安大学学报(社会科学版),2008(4):30-33,40.
- [32] 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.
- [33] GAO C,WANG J,DONG S,et al. Application of digital twins and building information modeling in the digitization of transportation:a bibliometric review [J]. Applied sciences, 2022(21):11203.
- [34] 刘向龙,刘好德,李香静,等. 中国出行即服务(MaaS)体系框架与发展路径研究[J]. 交通运输研究,2019(3):1-9.
- [35] 孙彤宇. 智慧城市技术对未来城市空间发展的影响[J]. 西部人居环境学刊,2019(1):1-12.

(责任编辑:杨海挺)