

低空航路地图: 支撑低空经济规模化飞行安全的公共基础设施

唐炉亮^{1*}, 齐恒^{1†}, 施泓羽^{1*}, 杨红¹, 孙乐乐¹, 郭小刚¹, 谭清华¹, 严雪心¹, 丁雨林¹, 凡昆昆¹, 吴宛娴¹, 曾浩³, 杨必胜¹, 李清泉^{1,2}

1. 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079

2. 深圳大学建筑与城市规划学院, 深圳 518060

3. 武汉市测绘研究院, 武汉 430022

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: tll@whu.edu.cn; hongyushi@whu.edu.cn

2025-09-06 收稿, 2025-10-29 修回, 2026-01-29 接受, 2026-02-04 网络版发表

国家重点研发计划(2024YFB3908603)资助

摘要 低空作为地表最邻近圈层, 是人类赖以生存的空间. 低空开发利用是人类扩大认知边界, 拓展生存空间与科学发展的必然, 成为世界科技前沿、未来经济主战场与国家重大战略需求. 规模化飞行是低空经济的前提与基础, 从陆地交通“有路可走”到低空飞行“无路可循”, 城市百万级飞行面临着“哪能飞、怎么飞”的安全时代命题. 低空航路地图是支撑低空经济规模化飞行安全的关键公共基础设施, 构建了一种立体动态、时空稠密、风险-拓扑刻画的新型地图范式. 本文系统定义了其概念与内涵, 梳理了低空风险计算、规则秩序构建、人-机地图表征等关键技术, 归纳形成“适飞建模—航路生成—人机地图”的低空航路地图高精度构建理论. 结合城市级低空航路地图(武汉)与“天路图”平台实践, 分析了低空航路地图在支撑百万级低空有序飞行与安全保障中的可行性, 有望成为打开低空经济飞行安全时代命题的钥匙.

关键词 低空经济, 低空航路地图, 高精度地图, 城市低空飞行安全, 动态建图

低空作为地球表面最邻近圈层, 孕育着大气、水源和生物, 是人类赖以生存的空间. 低空开发利用是人类扩大认知边界, 拓展生存空间与科学发展的必然, 是继深空、深地、深海、深蓝(算力)之后的又一蓝海. 据罗兰贝格(Roland Berger)预测, 2050年低空经济全球市场规模将超过60万亿元, 2028年中国低空经济行业市场规模将达到3.7万亿元. 2024年“低空经济”首次被纳入我国政府工作报告, 并写入26个省市自治区政府工作报告. 同年12月, 国家发展改革委牵头设立低空经济司, 标志着低空经济的顶层设计与战略布局进入实质性阶段. 由此可见, 低空经济是未来经济的主战场, 成

为国家重大战略需求.

规模化飞行是低空经济的前提与基础. 然而, 与陆地交通的“有路可走”相比, 当前低空飞行仍处于“无路可循”的状态, 导致城市大规模、高密度低空飞行的安全问题成为全球性挑战中最复杂、最紧迫的难题之一. “今天地上有多少车, 未来天上有多少无人机”, 如同今天城市的车一样, 未来将有数百万架无人机在城市上空同时飞行, “无路可循”的状态将极大增加飞行冲突与事故发生的风险. 近年来, 低空飞行事故频发, 例如2025年美国华盛顿军用与客机相撞造成67人死亡; 同年, 中国苏州一架直升机在游客密集区域坠落导致1死

引用格式: 唐炉亮, 齐恒, 施泓羽, 等. 低空航路地图: 支撑低空经济规模化飞行安全的公共基础设施. 科学通报, 2026, 71: 2919–2932

Tang L, Qi H, Shi H, et al. Low-altitude sky-lane map: a new infrastructure of the high-density flying safety for low-altitude economy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2919–2932, doi: [10.1360/CSB-2025-5503](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5503)

4伤。因此,规模化低空飞行安全已成为低空经济的时代命题。

低空飞行潜在安全风险来源复杂,主要包括六大方面^[1]:飞行器性能、气象条件、通信系统、规模化飞行碰撞、地面静态碍航物、地面动态人群聚集。其中,飞行器自身性能近年来随科技发展已得到显著提升,涌现出如大疆无人机、小鹏汇天飞行汽车等专业级飞行器。气象条件与通讯系统对于低空飞行是一种非连续性的必要条件。规模化飞行风险是指时空密集飞行过程中飞行器之间可能的碰撞风险。地面静态碍航物,如高层建筑、电力设施及地面起伏,构成固定障碍静态风险。动态人群聚集风险是指低空飞行器坠毁时可能造成地面群体性伤亡隐患。综合而言,规模化飞行碰撞、地面静态碍航物与动态人群聚集三类风险构成低空飞行安全的核心威胁,如何对这三类风险进行有效识别、量化与规避,已成为制约规模化低空飞行安全与低空经济可持续发展的重要瓶颈。

高空民航通过航图和空域管控的方式保障航班的安全运行,以静态划设与人工审批为主,其规则体系面向时空稀疏航班而设计,存在规则僵化、时效性差、智能化低的问题,难以应对低空经济中高密度、高动态、高复杂的飞行活动。如美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)提出空中走廊的概念(<https://www.faa.gov/>)、欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)推出城市飞行出租车服务(<https://www.sesarju.eu/projects/Uspace4UAM/>)、新加坡开展无人机城市航线网络“Skyways”项目(<https://www.airbus.com/>)、中国民航局(Civil Aviation Administration of China, CAAC)制定国家空域基础分类方法(<https://www.caac.gov.cn/>)。然而,现有空域交通管理模式^[2~4]无法直接适用于未来规模化的低空经济安全要求,难以实现“规则-风险”的动态适配。因此,亟需引入一种新的框架体系,以支撑百万级飞行器同时运行的时空协调与冲突化解,保障多机型(小型无人机、垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)、固定翼飞机)、多任务(物流运输、载客出行、应急救援)、多场景(低速巡航、高速通勤)的低空经济安全、高效运行。

地面交通依托道路网络与交通规则,实现了对时空稠密车流的有序组织,保障了城市百万级车辆的安全运行。而低空飞行缺少类似道路的空间约束与明确的规则指引,并且不可能构建物理上的通道。如何

构建兼顾拓扑结构和飞行规则的“低空道路”,建立规模化飞行秩序,是解决低空飞行安全时代命题的关键。

低空航路地图区别于地面道路地图与高空民航航图,作为兼具立体动态、时空稠密、风险-拓扑刻画的新型地图范式,是支撑低空经济规模化飞行安全的公共基础设施。本文系统定义了其概念与内涵,梳理了低空风险计算、航路规则秩序与人-机地图表征等关键技术,归纳形成“适飞建模—航路生成—人机地图”的低空航路地图高精度构建新理论方法,如图1所示。结合城市级低空航路地图(武汉)与“天路图”平台实践,分析了低空航路地图在支撑百万级低空有序飞行与安全保障中的可行性,有望成为打开低空经济飞行安全时代命题的钥匙。

1 低空航路地图的概念与内涵

低空航路地图概念:系统刻画地面风险、适飞区域、航路要素、飞行规则、拓扑关系及动态变化的专题地图,是面向城市规模化低空飞行的新型数字公共基础设施,核心是从复杂、异质且高动态的地表环境中构建有序、安全、可飞行的低空航路,形成一个动态立体、时空稠密、拓扑连通、人-机可读的专题地图框架。

低空航路地图内涵:低空飞行对地面土地利用、人类活动的潜在影响及时空变化在低空中的投影与映射,是承载飞行规则与安全秩序的广义地图。作为连接风险计算、规则秩序与人-机表征的核心平台,低空航路地图不仅能够支撑规模化飞行的精确导航与有序运行,还将为低空经济的发展提供时空信息底座与决策支撑。

1.1 地面道路地图特征

地面道路地图是对现实道路这一物理空间结构的几何化表征,具有平面静态、密集交织的特征^[5]。地面道路地图以二维形式展现,侧重交通网络的平面空间结构(图2)。地面道路的规划和建设具有长期性和持续性,表现为地图的静态和稳定。道路网络呈现高度密集和复杂的结构,由不同等级、不同功能的道路交错连接,服务于稠密的车流。道路地图对应真实世界中可通行的物理结构,是现实道路几何坐标与空间位置的精确映射,真实反映地面交通系统的物理约束与通行边界。



图1 低空航路地图的概念内涵、地图构建与试验验证示意图

Figure 1 Concept, construction, and experimental validation of the low-altitude sky-lane map

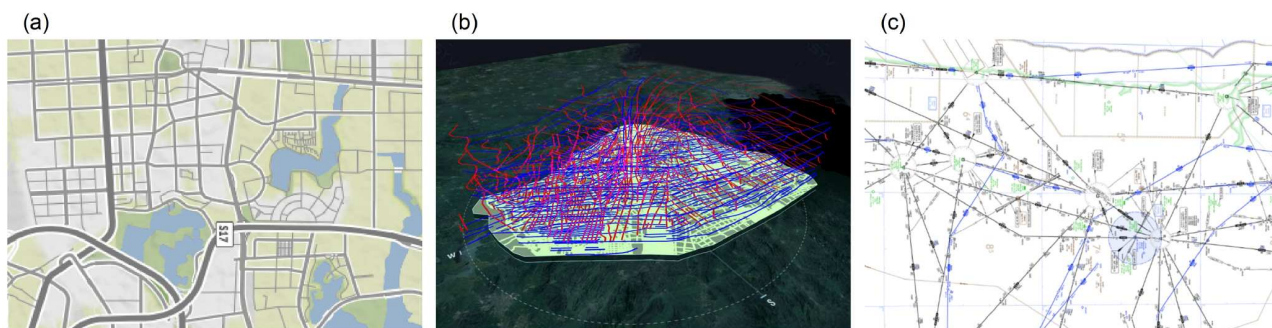


图2 不同地图的概念可视化。(a) 地面道路地图(来源: OpenStreetMap^[7]); (b) 低空航路地图(本文提出); (c) 高空民航航图(来源: 美国联邦航空局民航航图(https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/aeronav/digital_products/ifr/))

Figure 2 Visualization of different map concepts. (a) Ground road map (source: OpenStreetMap^[7]); (b) low-altitude sky-lane map (proposed in this study); (c) high-altitude civil aviation chart (source: Federal Aviation Administration aeronautical charts (https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/aeronav/digital_products/ifr/))

1.2 高空民航航图特征

高空民航航图是空域连通性的数字化建模,其本质是对空域连通性、飞行可达性与需求导向性的建模,具有静态粗略、时空稀疏的特征^[6]。民航航图沿固定航线设计,较少因环境变化而动态调整。高空航图表征高空空域的宏观结构,航路边界与通行约束以概略方式表示,拓扑关系表达相对弱化,且具有航班周期长、飞行频次低、时空分布稀疏等特点,相应地航路网络密度较低,其规则体系与表达方式主要面向时空稀疏的

航空运行需求。

1.3 低空航路地图特征

低空航路地图是“地面风险-低空拓扑”的数字刻画,具有立体动态、时空密集的特征。相较于地面道路地图的二维结构,高空民航航图的层级航线,低空航路地图具有明确的立体结构与飞行规则,飞行器可在垂直空间自主选择航高与通行路径。根据地面动态风险,可实时调整、重构低空航路地图,为飞行器提供安全

的导航支持。其时空密集性体现在低空航路地图服务于未来规模化低空飞行需求,支撑空间高覆盖、时间高频次的百万级飞行器安全运行。

面向世界低空科技前沿、低空经济主战场、交通强国战略重大需求与人民生命安全保障,低空航路地图在功能与属性上体现出以下三个特征:(1)规则承载性:低空航路地图是飞行交通规则的载体,可视为解读与执行低空飞行规则的“字典”,能够为飞行器运行提供明确的制度约束与行为规范,是低空飞行秩序构建的基础层。(2)知识集成性:低空航路地图集成飞行安全经验与运行知识,形成面向低空飞行的“知识库”,能够整合风险数据、安全策略与历史案例,为飞行器运行规避潜在风险提供支持,是飞行规则演化与航路智能生成的认知层。(3)安全保障性:低空航路地图是低空飞行活动最可靠的信息平台,相当于不受干扰的“眼睛”,能够提供精确、动态且可信的航路与风险信息,是支撑飞行器安全运行与系统稳定性的决策层。

规则承载性提供飞行秩序约束,知识集成性支撑规则的学习与优化,安全保障性则体现规则与知识协同作用的结果。三者结合,形成支撑规模化低空飞行安全运行的关键保障与核心技术基础。

2 低空航路地图构建的关键技术

当前国内外尚未形成能够支撑规模化低空飞行的低空航路地图体系,其构建需要攻克以下关键技术:

(1) 风险计算与适飞空间动态建模; (2) 航路拓扑关系构建与智能生成; (3) 人-机可读地图表征与动态更新。

2.1 风险计算与适飞空间动态建模

低空区域风险是指在低空飞行活动中,由自然环境、基础设施及人口分布等因素作用而引发的安全、法律、环境及社会等方面的不确定性与潜在损失。围绕区域风险的精准量化与适飞空间的科学计算,已成为当前低空飞行安全研究的重点方向,但仍面临多源异构数据难融合、动静态多维风险耦合难计算、城市适飞空间难建模等核心挑战。为此,本文归纳了“动静态多因子—多维多级风险—适飞空间动态建模”的理论框架,如图3所示。该框架综合考虑静态基础设施条件、动态人群活动特征,以及安全、法律、环境等多维因素,实现低空飞行区域的多级风险分类与适飞空间的动态建模,为精细化航路生成与秩序管理提供理论支撑与方法基础。

(1) 低空飞行风险类型与来源。低空飞行安全主要面临六类典型风险,包括飞行器性能风险^[8]、气象环境风险^[9]、通信系统风险^[10]、空中撞机风险^[11]、静态碍航物风险^[12]以及动态人群聚集风险^[13]。其中,飞行器性能风险来源于自身机械、控制、动力等因素。近年来随科技发展已得到显著提升,出现了如大疆无人机、小鹏汇天飞行汽车、eVTOL等专业级飞行器。气象环境风险体现为城市风场、湍流、降水、温度等对飞行

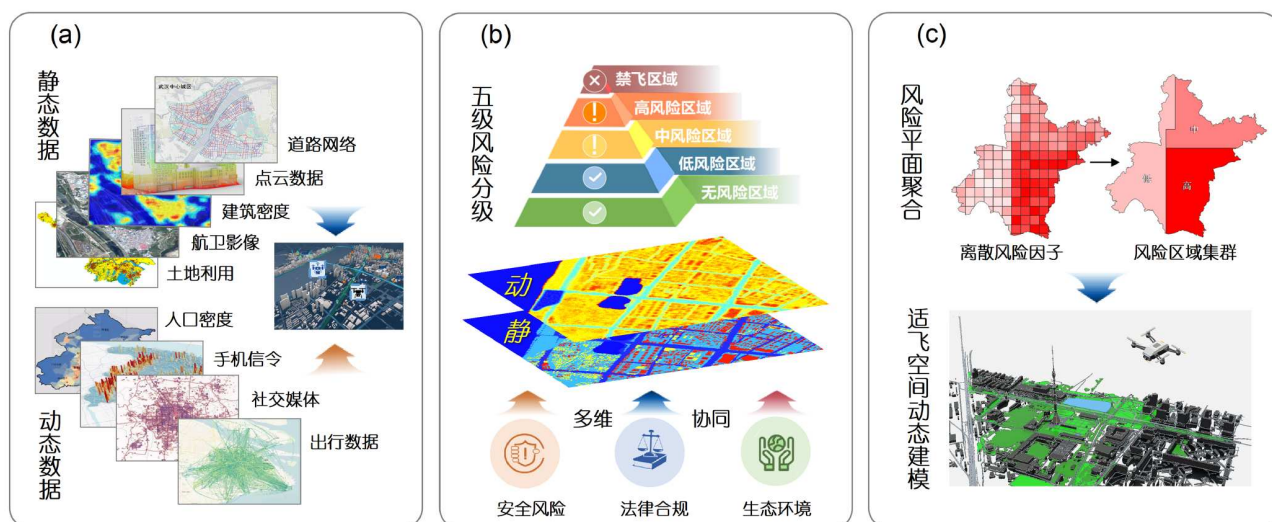


图3 动静态多维多级风险计算。(a) 多源数据融合; (b) 风险量化与分级; (c) 适飞空间动态建模

Figure 3 Computation of multi-dimensional and multi-level dynamic-static risks. (a) Multi-source data fusion; (b) risk quantification and classification; (c) dynamic modeling of flyable airspace

器造成的扰动风险^[14]。通信系统风险反映了飞行器在信息传输中断或不连续条件下面临的运行不确定性。气象环境与通信系统对于低空飞行是非连续性的必要条件,而非航路地图构建的主导因素。

规模化飞行碰撞、地面静态碍航物、地面动态人群聚集风险构成了影响低空飞行安全的关键因素。规模化的飞行碰撞极易发生在时空密集的低空飞行,无规则、拓扑约束将增加飞行冲突与撞机风险。地面静态碍航物,如高层建筑、电力设施及地面起伏,构成固定障碍静态风险。地面动态人群聚集风险是指低空飞行器坠毁时造成的地面群体性伤亡概率。以上三类风险与低空航路地图构建直接相关,用于回答“哪能飞、怎么飞”的安全时代命题。本文从风险计算的角度出发,介绍了动静态多维多级风险量化的相关方法与技术,阐述了低空适飞空间建模理论与存在的挑战。

(2) 动静态多维多级风险计算。低空飞行区域作为城市基础设施与人类活动行为共同构成的复杂空间系统,风险计算需综合考虑静态基础设施与动态人类活动因素^[15,16]。现有研究多集中于无人机坠落模型与地面碰撞影响模型,假设地面人口静态分布,仅量化与人相关的生命安全风险^[17],而对人车流动性、法律合规、生态环境等多维因素的研究显著不足。具体而言,尚缺乏对以下风险的系统刻画:高密度建筑与土地混合利用导致的基础设施损毁风险;人口高聚集与活动强动态带来的伤亡风险;法律违规、隐私泄露与保险成本构成的法律风险;以及噪声污染、生态干扰与公众接受度相关的环境风险。上述不足成为制约城市低空飞行区域风险精准计算与适飞空间动态建模的关键挑战。

地面静态数据主要包括土地利用、航卫影像、建筑高度、建筑密度、点云数据与道路网络,人口动态数据主要包括人口密度、手机信令、社交媒体与出行数据。静态风险计算旨在构建城市“土地类型—建筑特征—风险强度”映射关系,量化地理围栏边界^[18]、建筑财产损失^[19]、地物避难系数^[12]等静态因子。动态风险与人口移动相关^[20],包括早晚高峰潮汐人流、工作日-节假日人口活动分布、昼夜人口密度反转等居民出行模式、社会活动规律。动态风险量化旨在计算事件扰动强度,探测活动事件风险,识别飞行风险区域与时段,规避突发事件对低空飞行路径的干扰,计算人口流动与事件驱动的低空飞行动态风险因子。

“安全-法律-生态”三维风险量化方法,是指对飞行安全风险^[17](国家安全、人员伤亡、财产损毁)、法律

法规风险^[21](法律违规、隐私保护、保险成本)与生态环境风险^[22,23](噪音污染、生态影响、公众接受度)的系统刻画;突破传统单一安全层面风险量化局限,发展生命安全、财产损失、合法合规、噪声传播、生态保护、公众情感多维耦合的飞行风险区域计算方法。多维风险计算模型 $R(c,t)$ 如式(1)所示:

$$R(c,t) = \sum_{i \in \text{安全}} \alpha \cdot S_i(c,t) \cdot D_i(c,t) + \sum_{i \in \text{法规}} \beta \cdot S_i(c,t) \cdot D_i(c,t) + \sum_{i \in \text{生态}} \gamma \cdot S_i(c,t) \cdot D_i(c,t), \quad (1)$$

式中, c 和 t 分别表示空间位置和时间序列, i 表示安全、法规和生态三个维度, $D_i(c,t)$ 和 $S_i(c,t)$ 分别表示动静态风险函数,权重参数 $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ 具备场景自适应性,刻画不同城市空间单元的风险异质性。

现有风险等级大多仅区分有风险或无风险、低风险或高风险,存在类别单一、分级粗略、边界主观的挑战,难以适应复杂的城市用地场景^[24]。精细化风险分级是对低空区域风险的连续性表达,定量化分级标准是对风险可接受度的科学决策。表1展示了“禁-高-中-低-无”五级风险动态分级框架。该分级框架根据风险聚类中心值 μ_i 的大小关系(最高、次高、中等、次低、最低聚类中心)实现风险自适应分级,将低空风险分布的统计特征转化为具有可解释性的等级体系,为低空适飞空间提供更精细化的多级风险映射。

(3) 低空适飞空间动态建模。适飞空间用于描述低空可安全飞行区域,是离散风险到连续航路的关键环节,是地面风险在低空空间的投影与映射。现有研究多侧重于城市建筑物与障碍物约束下的可行空间格局,并将其定义为“空旷空域”,通常视为贴合地面与建筑物的离散空域集合^[25,26]。然而,传统可行空域往往忽略了与人员安全密切相关的低空风险因素,难以充分表征复杂城市环境下的适飞区域特性^[27]。相比之下,低空适飞空间是一种新型结构,通过风险平面聚合、三维立体分层以及几何拓扑连通,实现低空飞行安全与空间约束的刻画。

适飞空间建模包括风险平面聚合与障碍物立面分层,并随动态风险变化而实时更新。具体而言,基于“禁-高-中-低-无”五级风险动态分级结果,结合低空风险相似性和地理空间邻近性,进行同质风险区域集群识别,

合并具有相近风险等级的相邻单元,建立风险等级约束的地理边界;进一步开展1000 m以下低空的“近地层—中间层—高层”垂直障碍分层,明确不同高度层级内障碍物的垂直分布特征;提取区域地形与建筑物的高度、轮廓、边界等几何形态,构建具有统一坐标系与空间参考标准的障碍物三维数据库;结合障碍物面积、体积和形状特征设定分层标准与高度障碍阈值,实现城市低空适飞空间“近地层—中间层—高层”的垂直障碍分层。

2.2 航路拓扑关系构建与智能生成

城市低空交通国际上刚起步,尚未出现低空航路地图,面临航路要素体系缺失、飞行交通规则空白、拓扑结构简单导致城市级低空航路规模化、自动化生成的科学难题。为此,本文在概念层面提出低空航路地图智能生成方法,旨在为低空飞行提供类似于地面道路地图的空间指引;通过建立“点-线-面-体”低空航路要素体系,引入平面平行交替、高程分界分层及低密高疏布局等飞行规则秩序,构建兼顾水平分布与垂直分层的城市低空航路拓扑结构。在此基础上,进一步融合适飞空间数据、飞行规则知识与深度学习算法,构建低空航路生成式人工智能模型(artificial intelligence

generated content-air route, AIGC-AR),实现城市级航路地图的自动生成,为大规模、有序化的低空飞行提供路径支撑与运行保障,形成支撑低空经济规模化运行的数字公共基础设施。

(1) 低空航路要素体系构建。航路要素体系是低空航路地图的基础,是飞行规则与拓扑关系的具象化载体。其本质是将低空飞行所需的升降点、航路线、适飞面与禁飞体,构建为“点-线-面-体”四类基本地图要素,并通过拓扑关系与飞行规则加以组织约束(图4)。

点要素主要包括上升点、降落点及航路中的关键节点,具有流量汇聚、方向切换与高度变换的作用,决定了低空航路地图的可达性与连通性^[28],可表示为三维空间中的点集合 P ,其中 p_i 表示第 i 个升降点的三维坐标 (x_i, y_i, z_i) :

$$P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (2)$$

线要素对应低空航路线,是连接点要素的有向通行结构^[29]。与传统最优路径不同,航路线并非单次飞行的临时结果,而是具备方向性(避免对向冲突)、层级性(不同高度、不同密度)、规则性(速度、间隔、禁飞)的长期通行结构,可建模为一个参数化的路径 L ,其中 $\gamma(t)$ 表示航点 p_i 到 p_j 的路径:

表 1 “禁-高-中-低-无”五级风险动态分级框架

Table 1 A five-level dynamic risk classification framework: “prohibited-high-medium-low-none”

分级标准	风险等级	风险描述
$\mu_5 \in \{\mu_i \mid \mu_5 > \mu_4 > \dots\}$	禁飞区	高层建筑密集区、人口极高密集区、机场净空区、军事管制区等
$\mu_4 \in \{\mu_i \mid \mu_5 > \mu_3 > \mu_3\}$	高风险区	学校、医院、交通主干道等人口密集区域
$\mu_3 \in \{\mu_i \mid \mu_4 > \mu_3 > \mu_2\}$	中风险区	具有一定建筑密度或人口分布区域
$\mu_2 \in \{\mu_i \mid \mu_3 > \mu_2 > \mu_1\}$	低风险区	开放空间、低密度建筑区、低人口密度郊区地带等
$\mu_1 \in \{\mu_i \mid \dots > \mu_2 > \mu_1\}$	无风险区	水域、空旷绿地或远郊无人区

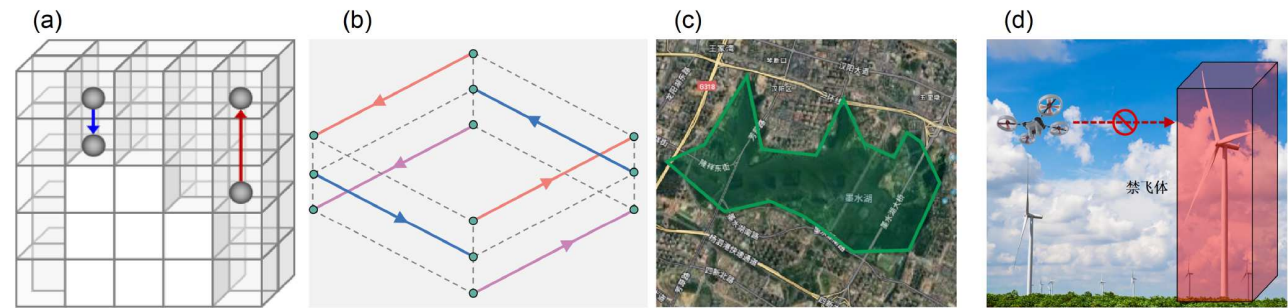


图 4 低空航路“点-线-面-体”要素体系。(a) 升降点; (b) 航路线; (c) 适飞面; (d) 禁飞体

Figure 4 Element system of the low-altitude sky-lane: point, line, surface, and volume. (a) Takeoff and landing points; (b) sky-lane lines; (c) flyable surfaces; (d) no-fly obstacles

$$L = \{\gamma(t) = x(t), y(t), z(t) \mid t \in [0, 1], \gamma(0) = p_i, \gamma(1) = p_j\}. \quad (3)$$

面要素对应低空适飞空间, 是地面风险在低空空域的映射结果, 用于刻画在特定高度范围内连续可飞行区域的空间边界^[27]. 适飞面由高度、地形和范围定义, 表示为高度约束的曲面集合 S , 其中 $D \in R^2$ 为二维平面的适飞区域, $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 分别表示最低、最高适飞高度:

$$S = \{(x, y, z) \mid h_{\min}(x, y) \leq z \leq h_{\max}(x, y), (x, y) \in D\}. \quad (4)$$

体要素对应禁飞体, 表示为刚性三维空间约束, 用于明确低空飞行中严格限制的空间范围^[30]. 禁飞体是三维地理围栏, 可建模为三维空间中的闭合区域集合 B , 其中 B_k 表示第 k 个凸多面体、球体或柱体禁飞体:

$$B = \{B_k \in \Omega \mid k = 1, 2, \dots, m\}. \quad (5)$$

(2) 低空飞行规则及拓扑关系建立. 低空飞行交通国内外尚属起步阶段, 现有研究围绕低空航路规划^[31,32]、空中廊道构建^[33,34]与空域交通管理^[35,36]开展了诸多探索, 提出了空中走廊^[37]、车道式空域^[38]或航路网络^[36]等概念, 但多面向特定任务或局部场景, 尚未在飞行规则^[39]与航路拓扑结构^[31]层面形成支撑城市级规模化运行的统一共识.

为此, 从飞行安全和效率出发, 低空航路应避免空中碰撞、提升空域容量, 亟需一种新的飞行规则和航路拓扑. 不同于现有自由航路或单向廊道, 低空航路地图建立了航路平行交替反向的低空飞行平面交通规则, 明确航路方向指引, 严控航路交叉冲突; 根据飞行器性能、飞行速度以及低空容量设定航路安全间隔; 制定

同层航路平行, 奇偶交替反向规则, 如奇数航路为南→北方向, 偶数航路为北→南逆向, 确保同层相邻航路间形成有效空间隔离与方向互补约束; 制定相邻层垂向设置策略, 如本层为南↔北方向, 上下层为东↔西航路方向, 确保相邻层航路间形成有效空间隔离与方向互补约束, 如图5(a)所示.

现有空域分层规则普遍以飞行任务为导向^[4], 忽略未来密集航路带来的冲突复杂度和运行效率. 低空航路地图将600 m作为城市内与城市间航路的高程分界, 其中600 m以下为城市内航路, 600~1000 m为城市间航路, 城市间航路按需设置, 实现航路城市内外分界管理; 对于城市内航路, 采用每100 m的垂向分层方式, 设置H1-H6共6个航路层, 并构建3套航路网. 其中H1、H3、H5保持同向飞行, H2、H4、H6亦保持同向飞行, 且两组航路层在垂向上交替分布, 从结构上降低跨层对向冲突风险; 结合低空容量与安全间隔, 提出低密高疏的航路拓扑结构, 如图5(b)所示, 其中H1、H2航路间距为100 m, H3、H4为400 m, H5、H6为1600 m, 形成逐层稀疏的城市低空立体交通结构, 实现低空航路的安全运行与低空资源的高效配置.

现有低空航路研究多侧重于航路平面布局与高度分层^[8], 而对不同层级与不同方向航路之间的升降转换关注相对不足. 为此, 低空航路地图构建了升降点专区与交替设置机制, 实现不同方向、不同高度层的航路转换与连接; 针对跨层级的飞行升降需求, 构建航路升降专区, 设计基于升降分离与交替布置的操作机制, 为航路的升降过渡提供精准引导, 避免升降过程中的互

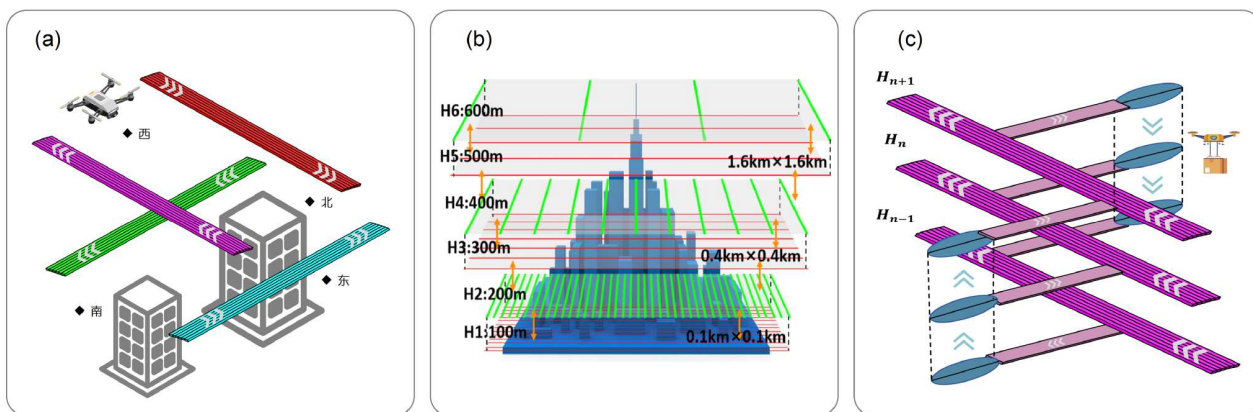


图5 低空飞行规则及航路拓扑关系建立. (a) 低空飞行规则; (b) 航路拓扑结构; (c) 航路升降规则

Figure 5 Low-altitude flight rules and the establishment of sky-lane topology. (a) Low-altitude flight regulations; (b) sky-lane topology; (c) takeoff and landing rules for air sky-lanes

相干扰,提升航路运行效率与飞行安全保障,如图5(c)所示。

(3) 城市级低空航路智能生成技术. 现有低空航路生成方式主要包括人工划定与基于航迹规划算法的半自动化生成两类^[33]. 前者依赖专家经验与规则设定,难以适应城市尺度复杂环境与动态变化;后者本质上仍以单架或少量飞行器的路径优化为目标,强调起讫点约束与局部最优,均难以支撑高密度、大流量、长时段运行条件下的规模化低空飞行需求。

因此,亟需从无人机航迹规划^[29]向航路地图生成转变,研究城市级低空航路的智能生成方法;以低空适飞空间为基础,自动生成满足飞行规则约束、具备拓扑结构与连通关系的航路地图要素,实现航路要素从局部航迹到全局地图的跨越。

随着深度学习的发展,生成式人工智能在复杂结构学习与多模态生成方面展现出显著优势^[40]. 低空航路地图遵循“数据+知识+模型”三驱动的智能生成框架(AIGC-AR),以适飞空间作为数据输入,以飞行规则与拓扑约束作为知识嵌入,以生成式人工智能模型作为核心架构,融合知识蒸馏机制、图神经网络、Transformer与扩散模型,学习航路几何形态、方向组织与空间分布特征,自动生成航路“点-线-面-体”要素之间的连通关系与拓扑结构,如图6所示。

2.3 人-机可读地图表征与动态更新

人-机可读地图表征是指同时满足人类可视化认知与机器结构化处理需求的地图信息表达方式. 在低空航路地图中,该表征通过统一描述“点-线-面-体”航路地图要素,实现人读地图的色彩编码、符号渲染、语

义标注与机读地图的空间拓扑、属性字段、逻辑规则的协同表达. 其目标是兼顾人类在航路认知、决策中的直观理解与无人系统在自主导航、风险规避、规则计算中的高效解析,并支持在风险变化、航路调整、规则更新等情境下的地图增量动态更新,从而构建面向人-机共用的低空航路地图信息基础. 低空航路地图的关键挑战在于人类直观理解与机器智能解析的平衡、可视化与结构化的人-机共用地图表征与动态更新。

(1) 航路地图认知人-机差异. 当前地图模型主要面向人类认知需求设计^[41],对地图信息的理解通过人类感知、加工、记忆和思维等活动,实现实时监控、决策支持、风险区识别、交互管理、三维地图^[42]等,信息的表达主要依靠可视化技术^[43],如色彩编码、建筑渲染、热力图、语义标注、地图符号等. 以人读为中心的认知范式,强调视觉可读性和语义表达清晰度,侧重人类的视觉感知、符号识别与空间推理. 如图7(a)所示,人读地图采用颜色、图像、形状等可视化语言,表征地物类型、道路立体感与延伸感、交通密度与拥堵状况、人类导航视觉标识等空间信息。

随着无人系统的发展,低空航路地图的接收主体由人类向机器迁移,低空航路地图不仅要满足人类的可视化认知需求,更需面向无人机、飞行汽车等机器的可读解析需求. 机读地图侧重数据结构化与规则逻辑化表达,偏向空间拓扑、属性字段、嵌套结构、语义标签等编码形式. 如图7(b)所示,机读地图强调节点-边的拓扑结构、航路属性的逻辑规则、可编程数据接口等结构化表达. 因此,理解航路地图人-机认知差异,统一描述人读视觉表达与机读结构化数据,是发展人-

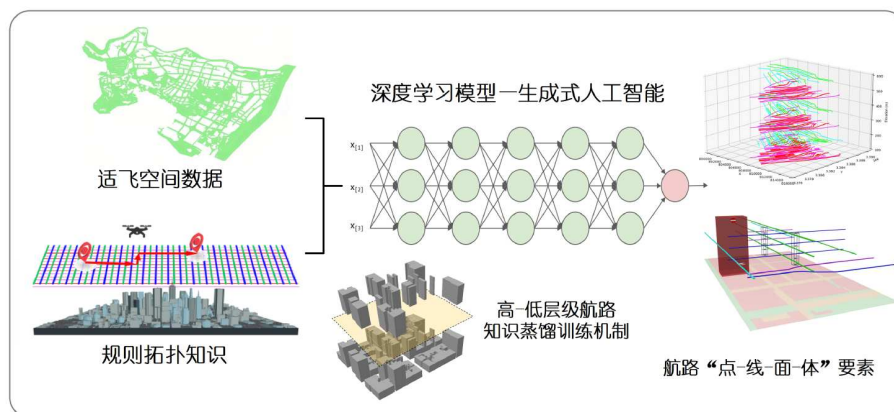


图6 城市级低空航路智能生成模型框架

Figure 6 Framework of the intelligent city-level low-altitude sky-lane generation model

机共用低空航路地图统一表征方法的基础。

(2) 人-机可读低空航路地图统一表征方法. 低空航路地图需同时满足人类可视化认知与无人系统的结构化处理. 一方面, 地图需面向人类提供直观、可解释的空间信息表达; 另一方面, 又必须满足无人系统在信息存储、处理、交互与学习的结构化需求^[44]. 因此, 航路地图模型结构要求结构化数据和逻辑规则编码^[45]. 其中, 结构化数据包括节点坐标、拓扑关系^[46]等参数化的数值; 逻辑规则编码包括时间约束、几何边界、禁飞限制等.

对于航路升降点要素, 将可视化图标与结构化坐标相结合, 实现人类快速识别与机器精确定位的统一; 对于航路线要素, 将可视化航线与拓扑结构嵌套, 使航路在视觉连续性的同时具备可计算的连通关系; 对于适飞面要素, 将风险热力图与面状区域耦合, 使风险等级可感知、可解析; 对于禁飞体要素, 将三维体绘制与体积规则集成, 实现禁飞空间的可视警示与规则约束的统一表达(如表2所示).

融合可视化语义与结构化语义的地图表征方式,

提升人类对低空航路结构、风险分布与运行规则的理解效率, 为飞行器自主导航、冲突规避以及交通管理提供了可表征、可计算、可更新的地图要素输入, 是传统的制图向人-机共用地图演化的关键, 实现人-机共读、共用、共理解的新型地图形态演进, 是支撑未来低空航路智能生成与规模化飞行的关键基础设施.

(3) 航路地图增量动态更新. 传统道路地图或民航航图往往以固定周期(如月度、季度)进行静态更新, 而城市低空存在高频、复杂的动态变化. 因此, 低空航路地图需引入增量动态更新机制, 适配未来低空飞行的运行特点与安全需求. 地图更新包括基于事件触发的更新机制、基于周期采样的更新机制、融合大数据和云计算的动态更新等方法^[47], 结合雷达监测、地面感知、无人机遥测数据等多类航行信息, 实现“日级-小时级-分钟级”更新地表要素、临时活动、突发事件等相关地面风险. 此外, 通过地图匹配和增量更新的方式对局部航路地图进行微调, 仅重构部分区域的飞行风险、航路要素与拓扑结构, 实现时空连续、高效计算、语义一致的低空航路地图增量动态更新.

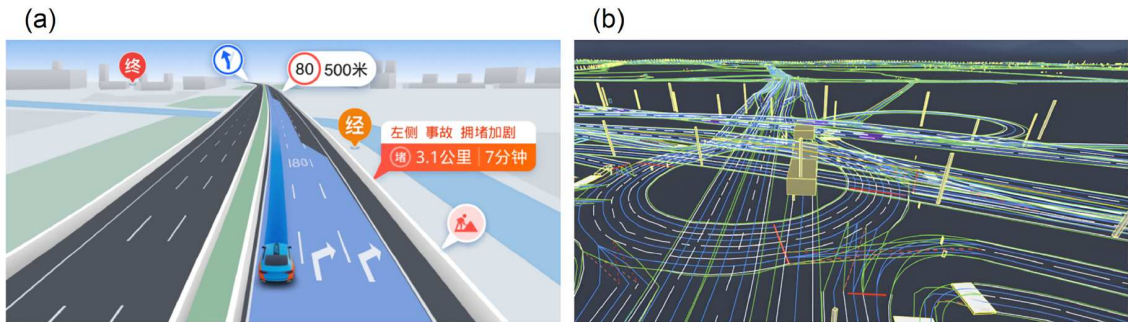


图 7 航路地图认知人-机差异示意图. (a) 人读地图可视化(来源: 高德地图导航图(<https://www.amap.com/>)); (b) 机读地图结构化(来源: 无人驾驶高精度地图(<https://www.apollo.auto/>))

Figure 7 Human-machine cognition differences in sky-lane maps. (a) Human-readable map visualization (source: Amap navigation map (<https://www.amap.com/>)); (b) machine-readable structured map representation (source: autonomous driving high-definition map (<https://www.apollo.auto/>))

表 2 人-机共用低空航路地图统一表征

Table 2 Unified human-machine representation of low-altitude sky-lane map

航路地图要素	人读地图	机读地图
升降点	图标或标志性符号(如飞机上升或下降图标、颜色突出的圆点)	表征为经纬度坐标点(Point(x, y, z)), 附加运行时间、容量、状态、支持机型等属性, 支持快速查询与路径检索
航路线	以线条或箭头形式展示航路方向, 颜色区分航线层级、交通密度	表征为一组有向边(Edge(from,to)), 附加航高 h 、速度 v 、禁飞时间 t 等属性; 以图结构(Graph)表示, 用于路径规划
适飞面	以渐变色多边形展示适飞平面, 结合热力图或风险等级图例(如绿色-安全、红色-危险)	表征为多边形面, 附加时变参数、地面风险、动态禁飞规则; 支持空间布尔运算、实时可达性计算
禁飞体	通过立体符号、体块阴影或立体剖面表示禁飞体	表征为三维多面体、栅格体素或规则几何体, 附加禁飞类型、监管机构、处罚等级、动态变化规则等属性

3 低空航路地图试验

3.1 城市级低空航路地图(武汉)

低空环境复杂多变, 理论研究难以充分支撑实际运行, 需依托试点验证以检验低空航路地图的可行性与应用价值. 设立低空经济“先飞区”, 以长江经济带中心城市武汉为试点区域, 研制城市级低空航路地图. 如图8所示, 低空航路地图(武汉)是一种低密高疏的立体拓扑结构, 高程上以100 m间距垂向分层, 形成三套低空航路网. 其中, 南↔北(东↔西)走向航路共享同一高度层级, 同层航路奇偶反向、交替排列、互不交叉、避免冲突; 相邻层航路互为垂向, 升降过渡. 三套低空航路网平面上纵横交织, 覆盖武汉市中心城区; 立面上分层叠置, 实现城市低空资源的高效开发与利用, 兼顾飞行安全、运行效率、低空通达性与城市空间承载力.

武汉市低空航路地图以适飞空间为基础, 跨越长江、东湖、公园等水体和绿地, 充分考虑城市用地差异与人口动态活动影响下的低空风险分布, 为无人机

物流、城市应急、低空旅游等多样化应用场景提供精细化支撑, 是未来“百万飞行”需求的低空航路资源分配依据, 具有保障飞行安全、有序组织航路、支撑低空管理的责任.

3.2 低空航路地图平台构建——“天路图”

城市级低空航路地图平台“天路图”包括基础浏览、风险量化、适飞计算、飞行规则、航路规划、飞行导航等功能(如图9所示). 该平台整合实景三维数据、地理信息数据及多模态传感器数据等数据, 开展多源数据融合, 搭建精细连续的城市场景数字化底座, 实时计算动静态多因子多维多级风险, 构建航路要素体系与飞行交通规则, 融合低空航路生成式人工智能模型, 表征与更新人-机共用城市级低空航路地图.

“天路图”不仅是一张地图, 更是支撑未来城市低空飞行的数字孪生平台与智能交通中枢. 在数据层面, 平台接入高分辨率遥感影像、激光雷达点云、地理信息数据以及无人机群实时状态数据, 形成多时空尺度

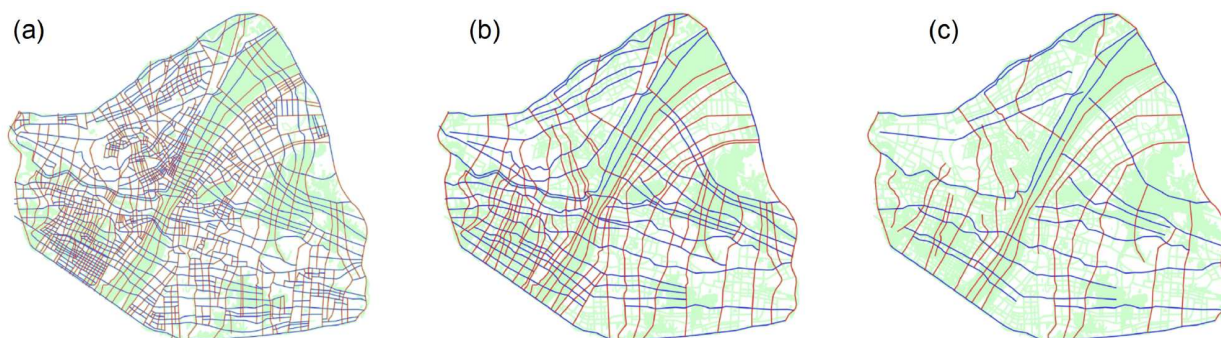


图8 城市级低空航路地图(武汉市). (a) 第一套低空航路网(100~200 m); (b) 第二套低空航路网(300~400 m); (c) 第三套低空航路网(500~600 m)
Figure 8 The city-level low-altitude sky-lane map (Wuhan). (a) First set of low-altitude sky-lane networks (100~200 m); (b) second set of low-altitude sky-lane networks (300~400 m); (c) third set of low-altitude sky-lane networks (500~600 m)

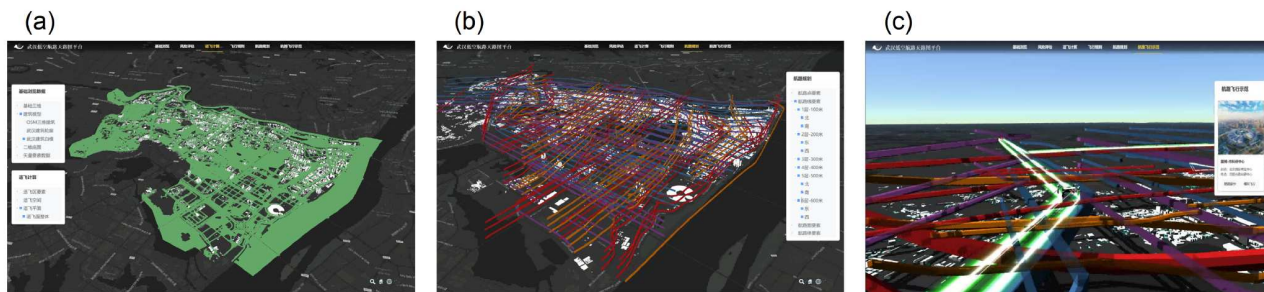


图9 “天路图”平台功能. (a) 城市适飞空间; (b) 城市低空航路; (c) 航路规划导航

Figure 9 Visualization of the functionalities of the “SkyRoute” platform. (a) Urban flyable airspace; (b) urban low-altitude sky-lanes; (c) sky-lane planning and navigation

数据基础平台。在模型层面,引入航路生成式人工智能算法,对城市复杂拓扑结构进行学习与推演,支持风险计算、航路生成和路径规划的高效耦合。在规则层面,平台内嵌飞行规则秩序、低空管理规范及行业标准,形成“数据-规则-模型”的数字孪生平台与低空智能中枢。

4 结论与展望

安全与秩序是支撑低空经济发展的核心,低空航路地图是支撑规模化飞行安全的公共基础设施,成为打开低空经济飞行安全时代命题的钥匙。(1)梳理了低空飞行区域动静态多因子多维多级风险计算与适飞空间建模方法,分析了建筑高密度、用地高混合、人口高密度、活动高动态的城市低空飞行区域风险精准量化的关键挑战;(2)探讨了“数据+知识+模型”深度驱动的低空航路智能生成技术,介绍了低空航路要素体系、飞行交通规则、航路拓扑结构与航路生成模型,实现升降点、航路线、适飞面、禁飞体等城市级低空航路要素智能生成;(3)归纳了人-机可读的低空航路地图表征与动态更新方法,阐述了人读地图可视化与机读地图结构化的差异性,以及人-机适配与航路要素动态更

新面临的挑战。形成“适飞建模—航路生成—人机地图”低空航路地图高精度构建的新理论、新方法与新技术,支撑城市低空数百万无人机“有序飞行”,攻克低空经济发展技术“瓶颈”,解决城市数百万低空飞行安全保障的国际性难题。

未来,低空航路地图将纳入更多维度的安全评估体系,考虑电磁干扰、极端气象、飞行器故障等风险因素。此外,研发低空交通仿真平台是检验低空航路地图安全性的关键环节,通过数字化模拟,可在飞行任务部署前识别潜在风险点、飞行冲突以及运行效率不足等问题。最后,政策法规是发展低空经济的压舱石,未来低空航路地图的数据采集、审核发布、更新监管将朝标准化、法制化、动态化发展,更加完善低空起降、空管、配套基础设施的建设。正如*Nature*曾指出:“科学家、工程师、政策制定者以及公众必须共同努力,在把握机遇与风险防范之间寻求平衡,并在此过程中不断适应技术进步^[48]。”因此,低空航路地图作为一种新兴的地图形态,应在坚持安全优先原则的同时,兼顾技术创新与监管适度的动态平衡,以稳健而开放的姿态,迈向未来低空经济的新范式与必经之路。

参考文献

- 1 Washington A, Clothier R A, Silva J. A review of unmanned aircraft system ground risk models. *Prog Aerospace Sci*, 2017, 95: 24–44
- 2 Shahriar Ahmed S, Fountas G, Lurkin V, et al. The state of urban air mobility research: an assessment of challenges and opportunities. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2025, 26: 1375–1394
- 3 Lee U J, Ahn S J, Choi D Y, et al. Airspace designs and operations for UAS traffic management at low altitude. *Aerospace*, 2023, 10: 737
- 4 Li Y, Guo T, Chen J, et al. Urban air mobility: a review and challenges. *IEEE Intell Transp Syst Mag*, 2025, 17: 67–87
- 5 Li D R, Hu Q W, Guo S, et al. Mobile road measurement system and its application in the Science and Technology Olympics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 312–320 [李德仁, 胡庆武, 郭晟, 等. 移动道路测量系统及其在科技奥运中的应用. 科学通报, 2009, 54: 312–320]
- 6 Zhang Z, Guo D, Zhou S, et al. Flight trajectory prediction enabled by time-frequency wavelet transform. *Nat Commun*, 2023, 14: 5258
- 7 Haklay M, Weber P. OpenStreetMap: user-generated street maps. *IEEE Pervasive Comput*, 2008, 7: 12–18
- 8 Yang S, Pan Y, Cao L, et al. Predefined-time fault-tolerant consensus tracking control for multi-UAV systems with prescribed performance and attitude constraints. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2024, 60: 4058–4072
- 9 Pensado E A, López F V, Jorge H G, et al. UAV shore-to-ship parcel delivery: gust-aware trajectory planning. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2024, 60: 6213–6223
- 10 Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 36–42
- 11 Jia Z, You J, Dong C, et al. Cooperative cognitive dynamic system in UAV swarms: reconfigurable mechanism and framework. *IEEE Veh Technol Mag*, 2024, 19: 90–101
- 12 Primates S, Rizzo A, la Cour-Harbo A. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments. *J Intell Robot Syst*, 2020, 97: 489–509
- 13 Chen Y J, Yu S S, Zhang X J. Ground risk quantitative assessment for UAV operations in urban low-altitude scenarios (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2025, 51: 806–815 [陈艺君, 余莎莎, 张学军. 城市低空场景下无人机运行对地风险量化评估. 北京航空航天大学学报, 2025, 51: 806–815]
- 14 Jeong S, You K, Seok D. Hazardous flight region prediction for a small UAV operated in an urban area using a deep neural network. *Aerospace Sci Tech*, 2021, 118: 107060

- 15 Pang B, Hu X, Dai W, et al. Stochastic route optimization under dynamic ground risk uncertainties for safe drone delivery operations. *Transp Res Part E-Logist Transp Rev*, 2024, 192: 103717
- 16 Pilko A, S bester A, Scanlan J P, et al. Spatiotemporal ground risk mapping for uncrewed aircraft systems operations. *J Aerospace Inf Syst*, 2023, 20: 126–139
- 17 Blom H A P, Jiang C, Grimme W B A, et al. Third party risk modelling of Unmanned Aircraft System operations, with application to parcel delivery service. *Reliab Eng Syst Saf*, 2021, 214: 107788
- 18 Kim J, Atkins E. Airspace geofencing and flight planning for low-altitude, urban, small unmanned aircraft systems. *Appl Sci*, 2022, 12: 576
- 19 Tang H, Zhu Q, Qin B, et al. UAV path planning based on third-party risk modeling. *Sci Rep*, 2023, 13: 22259
- 20 Jiao Q, Liu Y, Zheng Z, et al. Ground risk assessment for unmanned aircraft systems based on dynamic model. *Drones*, 2022, 6: 324
- 21 McTegg S J, Tarsha Kurdi F, Simmons S, et al. Comparative approach of unmanned aerial vehicle restrictions in controlled airspaces. *Remote Sens*, 2022, 14: 822
- 22 Afridi S, Laporte-Devlyder L, Maalouf G, et al. Impact of drone disturbances on wildlife: a review. *Drones*, 2025, 9: 311
- 23 Koh L Y, Lee J Y, Wang X, et al. Urban drone adoption: addressing technological, privacy and task–technology fit concerns. *Tech Soc*, 2023, 72: 102203
- 24 Clothier R A, Palmer J L, Walker R A, et al. Definition of an airworthiness certification framework for civil unmanned aircraft systems. *Saf Sci*, 2011, 49: 871–885
- 25 Cho J, Yoon Y. How to assess the capacity of urban airspace: a topological approach using keep-in and keep-out geofence. *Transp Res Part C-Emerging Technologies*, 2018, 92: 137–149
- 26 Cho J, Yoon Y. Extracting the topology of urban airspace through graph abstraction. *Transp Res Part C-Emerging Technologies*, 2021, 127: 103116
- 27 Oh S, Yoon Y. Urban drone operations: a data-centric and comprehensive assessment of urban airspace with a Pareto-based approach. *Transp Res Part A-Policy Pract*, 2024, 182: 104034
- 28 Tang L, Yue C, Ma L, et al. City Fly: modeling demand and vertiport location jointly for urban commuting. *Travel Behaviour Soc*, 2026, 42: 101142
- 29 Rastgoftar H, Emadi H, Atkins E M. A finite-state fixed-corridor model for UAS traffic management. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2024, 25: 2322–2330
- 30 Stevens M, Atkins E. Geofence definition and deconfliction for UAS traffic management. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2021, 22: 5880–5889
- 31 Liao X H, Xu C C, Ye H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2024, 39: 1966–1981 [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. *中国科学院院刊*, 2024, 39: 1966–1981]
- 32 Zhang H H, Li S, Yi J, et al. Review on urban low-altitude air route planning (in Chinese). *J Nanjing Univ Aeronaut Astronaut*, 2021, 53: 827–838 [张洪海, 李姗, 夷珈, 等. 城市低空航路规划研究综述. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53: 827–838]
- 33 Li Z, Zhao Y, Ren X, et al. Air route network planning for urban logistics with Vertihub: an airspace model. *Aerospace Sci Tech*, 2025, 168: 111242
- 34 Xu C C, Ye H P, Yue H Y, et al. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: theoretical system and technical roadmap (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 917–930 [徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 等. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径. *地理学报*, 2020, 75: 917–930]
- 35 Chen X, Li S, Li M. A hybrid centralized-decentralized traffic control framework for unmanned aerial vehicles in urban low-altitude airspace. *Commun Transp Res*, 2025, 5: 100195
- 36 Wang Z, Delahaye D, Farges J L, et al. Complexity optimal air traffic assignment in multi-layer transport network for Urban Air Mobility operations. *Transp Res Part C-Emerging Technologies*, 2022, 142: 103776
- 37 Bauranov A, Rakas J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches. *Prog Aerospace Sci*, 2021, 125: 100726
- 38 Sacharny D, Henderson T C, Marston V V. Lane-based large-scale UAS traffic management. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2022, 23: 18835–18844
- 39 Qu W, Xu C, Tan X, et al. Preliminary concept of urban air mobility traffic rules. *Drones*, 2023, 7: 54
- 40 Cao Y, Li S, Liu Y, et al. A survey of AI-generated content (AIGC). *ACM Comput Surv*, 2025, 57: 1–38
- 41 You X, Jia F L, Tian J P, et al. Machine maps and their conceptual models (in Chinese). *J Geo Inf Sci*, 2024, 26: 25–34 [游雄, 贾奋励, 田江鹏, 等. 机器地图及其概念模型. *地球信息科学学报*, 2024, 26: 25–34]
- 42 Yang B S, Li Q Q, Gong J Y. A robust algorithm for rapid generation and transmission of multi resolution 3D models (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2006, 41: 1589–1594 [杨必胜, 李清泉, 龚健雅. 一种快速生成和传输多分辨率三维模型的稳健算法. *科学通报*, 2006, 41: 1589–1594]
- 43 Jia F L, Yang J, You X, et al. Cognitive logic and map construction model of machine maps (in Chinese). *Natl Remote Sens Bull*, 2024, 28: 1177–1188 [贾奋励, 杨剑, 游雄, 等. 机器地图的认知逻辑与建图模型. *遥感学报*, 2024, 28: 1177–1188]

-
- 44 Liu J N, Gao K F. Challenges and opportunities for mapping, surveying and location-based services in the age of intelligence (in Chinese). *J Wuhan Univ Inf Sci Ed*, 2017, 42: 1506–1517 [刘经南, 高柯夫. 智能时代测绘与位置服务领域的挑战与机遇. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42: 1506–1517]
- 45 McClelland J L. The place of modeling in cognitive science. *Top Cogn Sci*, 2009, 1: 11–38
- 46 Li Z L, Xu Z, Shen L, et al. Autonomous situatedness map representation: a theoretical discussion on intelligent cartography in the era of large models (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2024, 53: 2043–2052 [李志林, 徐柱, 慎利, 等. 自主式情境化地图表达: 大模型时代的智能化地图制图理论探讨. 测绘学报, 2024, 53: 2043–2052]
- 47 Kim K, Cho S, Chung W. HD map update for autonomous driving with crowdsourced data. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, 6: 1895–1901
- 48 Huang X. The small-drone revolution is coming — scientists need to ensure it will be safe. *Nature*, 2025, 637: 29–30

Summary for “低空航路地图: 支撑低空经济规模化飞行安全的公共基础设施”

Low-altitude sky-lane map: a new infrastructure of the high-density flying safety for low-altitude economy

Luliang Tang^{1*}, Heng Qi^{1†}, Hongyu Shi^{1*}, Hong Yang¹, Lele Sun¹, Xiaogang Guo¹, Qinghua Tan¹, Xuexin Yan¹, Yulin Ding¹, Kunkun Fan¹, Wanxian Wu¹, Hao Zeng³, Bisheng Yang¹ & Qingquan Li^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Survey, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

³ Wuhan Geomatic Institute, Wuhan 430022, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding authors, E-mail: tll@whu.edu.cn; hongyushi@whu.edu.cn

The low-altitude airspace, as the layer nearest to the ground, constitutes the space essential for human survival. Developing and utilizing low-altitude airspace is essential for humanity to broaden cognitive horizons and expand survival space. Furthermore, it has positioned itself at the forefront of global technology, the core of future economic competition, and a major national strategic priority. The precondition and foundation of a low-altitude economy is large-scale flight. However, unlike ground transportation with clearly defined roads, current low-altitude flight operates without established pathways, rendering the safety of large-scale urban low-altitude flights one of the most intricate and pressing global challenges. Urban-level flights at the scale of millions confront the essential safety challenge of determining “where to fly and how to fly”. To address this challenge, this study introduces the low-altitude sky-lane mapping, clarifies its definition and scope, and establishes a three-dimensional, dynamic, spatiotemporally dense low-altitude public infrastructure with risk-topology representation. The low-altitude sky-lane map is defined as a thematic map that systematically represents ground risks, flyable zones, sky-lane components, flight regulations, topological relationships, and dynamic variations. It constitutes a novel type of digital public infrastructure specifically designed for urban-scale low-altitude flight operations. Its primary objective is to generate orderly, safe, and navigable low-altitude sky-lanes from complex, heterogeneous, and highly dynamic surface environments, thereby establishing a dynamic, three-dimensional, spatiotemporally dense, topologically connected, and human-and machine-readable thematic map framework. The essence of a low-altitude sky-lane map is to capture how low-altitude flights potentially affect land use and human activities on the ground, and how these effects are projected and mapped in the low-altitude airspace. It functions as a generalized representation integrating flight regulations, operational safety requirements, and spatial organization principles. Additionally, the low-altitude sky-lane map provides a digital representation of the “ground risk–low-altitude topology,” characterized by dynamic three-dimensionality and high spatiotemporal density. In contrast to the 2D structure of terrestrial road maps and the hierarchical airway charts of high-altitude civil aviation, low-altitude sky-lane maps possess a clear three-dimensional framework with flight regulations, enabling aircraft to independently choose altitude and navigation paths within the vertical dimension. The map can be updated and reconfigured in real time according to dynamic ground risks, offering aircraft reliable navigational guidance. From a technical perspective, the study elaborates on a dynamic and static, multi-factor, multi-dimensional, multi-level risk computation and flyable-space modeling method for low-altitude flight zones, achieving accurate risk quantification in urban areas with dense buildings, highly mixed land use, concentrated populations, and highly dynamic activities. The study establishes a systematic framework of low-altitude sky-lane elements, flight traffic regulations, sky-lane topology, and automated sky-lane generation models, thereby enabling the generation of urban low-altitude sky-lane components, including takeoff and landing points, flight corridors, flyable surfaces, and restricted zones. Moreover, The study summarizes human-and machine-readable low-altitude sky-lane map representations and dynamic updating methods, enabling human-readable map visualization, machine-readable map structuring, human-machine adaptation, and dynamic updates of map elements. In summary, this work advances the state of the art in low-altitude risk computation, regulatory modeling, and human-machine map representation, providing a high-precision framework for constructing low-altitude sky-lane maps structured as “flyability modeling—sky-lane generation—human-machine mapping”. Finally, the Wuhan city-level low-altitude sky-lane map was developed, and the “SkyRoute” platform was implemented, demonstrating the possibility of supporting million-level orderly low-altitude flights with safety assurance, and is expected to serve as a key to addressing the safety-era challenges of the low-altitude economy.

low-altitude economy, low-altitude sky-lane map, high-precision mapping, urban low-altitude flight safety, dynamic mapping

doi: [10.1360/CSB-2025-5503](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5503)