

城市空中交通规划方法研究及杭州市探索实践

刘川, 顾侃, 程国宏, 郁伟

(杭州市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 开展城市空中交通规划、科学引导低空交通空间布局, 是促进低空经济发展和完善综合交通体系的重要抓手。城市空中交通兼具民航运输与城市道路交通特征, 面临航空器及其运行支撑技术、需求场景、行政管理逻辑等多重不确定性。提出以空域利用、公共航路、基础设施为规划内容, 以空地条件和潜在需求梳理为基本方法, 构建企业与政府协同推进的动态渐进式空中交通规划框架。详细阐述空域规划要点, 包括空域划设与优化方法、分层分片使用规则; 低空公共航路规划要点, 包括航路分类分级方法、航路规划选址与运行组织规则; 基础设施规划要点, 包括起降场分级与选址方法、新基建布局策略。最后, 以杭州规划实践为例, 探讨规则先行探索、需求与条件引导、动态扩展方案的城市空中交通规划思路。

关键词: 交通规划; 城市空中交通; 空域利用; 公共航路; 基础设施; 杭州市

Urban Air Mobility Planning Methods and Practice in Hangzhou

LIU Chuan, GU Kan, CHENG Guohong, YU Wei

(Hangzhou Transportation Planning Design Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: Carrying out urban air mobility (UAM) planning and scientifically guiding the layout of low-altitude transportation is an important approach for promoting the development of low-altitude economy and improving the comprehensive transportation system. UAM combines the characteristics of civil aviation transportation and urban road transportation, facing multiple uncertainties such as aircraft and its operational support technologies, demand scenarios, and administrative management logic. This paper proposes a progressive UAM planning framework based on airspace utilization, public air routes, and infrastructure as the planning content, with the basic methods of sorting out air-and-ground conditions and potential demands, as well as collaborative promotion by enterprises and governments. Furthermore, the paper elaborates on the key points of airspace planning, including airspace demarcation and optimization methods, and rules for layered and segmented use; key points of low-altitude public air routes planning, including route classification and grading methods, air routes planning site selection and operational organization rules; key points of infrastructure planning, including classification and site selection methods for takeoff and landing sites, as well as new infrastructure layout strategies. Finally, taking Hangzhou's planning practice as an example, the paper discusses the UAM planning ideas of "exploring with rules in advance, guiding with demands and conditions, and dynamically expanding plans".

Keywords: transportation planning; urban air mobility; utilization of airspace; public air routes; infrastructure; Hangzhou

收稿日期: 2024-12-19

作者简介: 刘川(1986—), 男, 湖北利川人, 硕士, 高级工程师, 注册城乡规划师, 注册咨询工程师(投资), 副主任工程师, 研究方向为区域与城市交通规划, 电子邮箱 liuchuan86@126.com。

0 引言

2023年12月, 中央经济工作会议将“低空经济”确立为战略性新兴产业。2024年3月, “低空经济”首次被写入《政府工作报告》。2024年7月, 党的二十届三中全

会进一步强调要“发展通用航空和低空经济”。多个省市也陆续出台促进低空经济高质量发展的实施意见和支持政策。随着低空应用场景的快速拓展, 无论是保障飞行安全、控制邻避效应, 还是加强产业引导、优化公共资源配置, 都亟待开展城市空中交通

统筹规划工作。

目前,城市空中交通规划尚缺乏成熟的规范和实践先例。既有相关研究主要聚焦于发展前景与技术概念探讨^[1-4],但针对规划实践的方法论研究并不多。本文以杭州市规划实践为基础,提出动态渐进的城市空中交通规划方法,对空域、航路、基础设施等规划要点进行分析。

1 城市空中交通特征与规划框架

1.1 内涵演变

2010年8月,《国务院、中央军委关于深化我国低空空域管理改革的意见》(国发〔2010〕25号)开启了低空空域管理改革。改革初期,低空交通主要指通航飞行,包括固定翼通用飞机、直升机以及热气球、滑翔机等文体旅类航空器。由于城市空间资源紧张,则以直升机应用为主,使用场景和用户群体均较为有限。

近年来,随着无人化、电动化、垂直起降等颠覆性技术的发展,新型低空交通系统呈现运营成本降低、安全性提升、噪声污染减少、空间利用集约、能源清洁化等特征。城市低空应用已从高端私人出行和特殊应急执勤等小众领域,逐步扩展至低空摄影、城市治理以及客货运输等大众化场景。其中,低空客货运输对应国内外广泛研究的城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)概念,指利用有人或无人驾驶航空器在大都市区范围内开展的载人载货运输活动^[5]。随着新一代航空器技术发展和应用场景向区域及城乡地域延伸,更广义的先进空中交通(Advanced Air Mobility, AAM)概念逐渐形成,而UAM则成为AAM体系中的一个子集^[6]。

UAM兼具民航运输和城市道路交通的双重特征:一方面,在空域资源利用、飞行

流程(包括起降与巡航)以及通信、导航、监视、气象等保障要求方面,与民航运输体系高度相似;另一方面,在出行距离与目的、高频高密度交通流特征等方面,则呈现出与城市道路交通类似的属性(见表1)。因此,UAM规划既不能简单归类于传统民航领域,也无法完全纳入城市交通规划范畴,需要整合航空运输与城市交通既有相关知识与经验,加强交叉融合探索。

1.2 规划面临的不确定环境

1) 技术发展不确定性。

低空航空器产品多样,在续航里程、整机尺寸等关键性能上存在显著差异(见表2),相关技术标准体系尚不完善。同时,支撑高密度运行的通信、导航、监视以及气象服务等核心技术路径尚未形成行业共识^[7-8]。未来,航空器关键性能指标优化以及运行可靠性的实证验证,仍需技术持续突破和规模化应用检验。

2) 需求场景不确定性。

城市低空应用场景呈现类型多、规模小、可持续商用场景稀缺的特点。以杭州市为例,现有应用可划分为公共服务与商业化运营2大类、10小类、超过100种具体场景(见表3)。然而,具备大规模商业化推广价值的成熟场景仍较为匮乏。同时,低空交通工具的速度优势和成本制约均较为突出,无人机运输相对城市道路交通运输能大大节约时间,但运营成本也远高于地面运输体系。UAM市场需求受到出行安全、出行成本、出行时间紧迫性和出行可靠性等多重因素影响^[9-10]。这种复杂的供需关系,使得未来可规模化商业落地的具体应用场景仍存在较大不确定性。

3) 行政管理逻辑不确定性。

近年来,多部委相继出台了与无人机相

表1 城市空中交通与公共航空运输、通航运输、道路交通的区别与联系

Tab.1 Differences and relations between UAM with public air transportation, general aviation, and road transportation

交通类型	载运工具	能源动力	运行环境	需求特征	交通量特征	管控方式
城市空中交通	非常多样	电动为主	较为多样	中短距离、多样出行目的	高频、高流量密度	计划监管与规则约束相结合
公共航空运输	相对统一	燃油为主	局限	长距离、弹性出行	高频、低流量密度	计划监管、完全受控系统
通航运输	较为多样	燃油为主	局限	中长距离、弹性出行	低频、低流量密度	计划监管、完全受控系统
道路交通	非常多样	燃油、电动及其他	多样	各种距离、多样出行目的	高频、高流量密度	规则约束下的开放运行系统

关的条例和规章。部分地区加强了军方、民航部门和地方政府在空域管理改革方面的沟通协调，计划通过试点推进低空资源的高效利用。2024年1月施行的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》明确规定：“县级以上地方人民政府及其有关部门按照职责分工负责本行政区域内无人驾驶航空器有关管理工作”。目前，部分省市市政府已启动管理机构调整工作，未来将探索发改、交通、公安、自然资源、工信、住建等多部门协同管理体制。行政管理架构和纵向事权划分将对UAM发展产生深远影响。

1.3 规划模式与总体思路

UAM规划主要包括低空空域划定、公共航路和起降场布局，以及通信、导航、监视、气象和航空情报等配套基础设施规划。当前，UAM规划主要遵循两种模式：1)企业根据场景需求发起规划。企业在初步评估航路条件后，向空域管理单位提出申请，以核准空域可用性及具体范围。同时，企业还需自行核实必要的通信、导航、气象等运行支撑条件。2)政府部门主导规划工作。首先应进行空地条件和潜在需求分析，进而划定公共航路和布局公共起降场，最后根据分期

表2 城市空中交通物流运输无人机机型及性能参数

Tab.2 Types and performance parameters of unmanned aircraft for UAM logistics transportation

企业	型号	荷载/ kg	续航里程/ km	最大航速/ (km·h ⁻¹)	整机尺寸/ m	类型
丰翼	方舟150	50	20	72	3.2×3.2×1.2	多旋翼
	丰舟90	20	65	108	5.60×4.00×1.25	固定翼
	方舟40	10	20	50	对称轴距1.7	多旋翼
	方舟E15	3	280	72	2.50×1.26×0.39	复合翼
	魔鬼鱼40	8	100	94	2.39×3.53×0.97	固定翼
美团	美团第四代无人机	2.5	10	72	对称轴距0.895	多旋翼
大疆	大疆FC30	30	16	72	2.80×3.085×0.947	多旋翼
迅蚁	RA3	4	18	72	对称轴距1.30	多旋翼
	SK3	1.72	66	72	对称轴距0.95	多旋翼
	TR9S	9	30	72	对称轴距1.55	多旋翼
	TR9SD	5	15	72	对称轴距1.55	多旋翼

表3 杭州市低空应用场景

Tab.3 Low-altitude application scenarios in Hangzhou

应用类别	细分领域	应用场景
公共服务	城市治安	无人机同步出警、喊话执法、案件与事故现场勘查、早晚高峰巡逻等
	应急救援	杭州市消防无人机智能调度系统
	生态治理	环境问题巡查管控、水质采样、空气监测等
	执法巡查	高速公路路面巡检、桥下巡查、服务区临检、“三高路段”隐患排查、高空施工作业检查、码头巡查、航道巡查、船舶临检等；
	地理测绘	小区高层违建、工地施工秩序、重要城市道路巡查、流动摊贩监管等
商业化运营	低空物流	血液及医学标本、外卖及快递配送、轻量高附加值货物
	低空客运	低空短途直升机通勤航线，通航机场至安徽黄山、浙江舟山、上海金山、江苏镇江、浙江横店、安徽芜湖等长途航线
	低空文旅	灯光秀、无人机表演、低空观光游线等
	低空体育	青少年培训、竞赛等
	农林植保	病虫害防治、施肥、播种、农情监测、作物搬运等

发展目标,完善通信、导航、监视、气象等新基建布局(见图1)。

企业申请型模式要求企业对空域准入政策、航路及运行环境要求有较深了解,存在进入门槛较高、申请周期较长、试错成本较大等特点。政府主导型模式由政府或者国资平台方负责整体规划。该模式有利于打造公开透明的低空运行环境,引导应用场景围绕公共航路和起降枢纽集聚发展,既能实现多企业协调共用空域和基础设施以提高效率,又能减少低空运行对城市的负面影响。然而在多重不确定环境下,规划工作仍面临供需预判、技术认识和社会效应评估等方面的挑战。

建议综合企业申请和政府主导两种模式,将企业能动性和政府统筹作用相结合,采用动态渐进的UAM规划框架(见图2)。一方面,评估并整合部分企业自有航路和设施,逐步实现公共化,以提升资源利用效率;同时,鼓励相关企业持续参与场景规划,并为其提供空域和航路规划支持,以降低进入门槛、促进应用推广。另一方面,政

府在既有航路运行管理经验基础上,加强经验总结和测试研究,进而开展规划条件和潜在需求预判,实现系统性、规范性和基础性引导。通过平衡政府干预与企业能动性,动态调整和深化规划内容,形成空地一体、数实融合的方案构建策略。

2 空域利用规划

2.1 空域划设与优化

空域划设旨在明确飞行禁限区及可利用空域的权责关系,重点涉及空域基础分类划定、地面敏感地带上空飞行限制要求,以及军方关于空域使用和审批要求的落实等。2023年12月,中国民用航空局发布《国家空域基础分类方法》,依据空域环境、航空器飞行规则和空管服务内容等要素,将空域划分为A,B,C,D,E,G,W共7类。其中,A,B,C,D,E类为管制空域,G,W类为非管制空域,该分类方法首次在管制空域之外规定了拟开放空域。低空空域划设的基础工作即按照该分类方法,明确划定G,

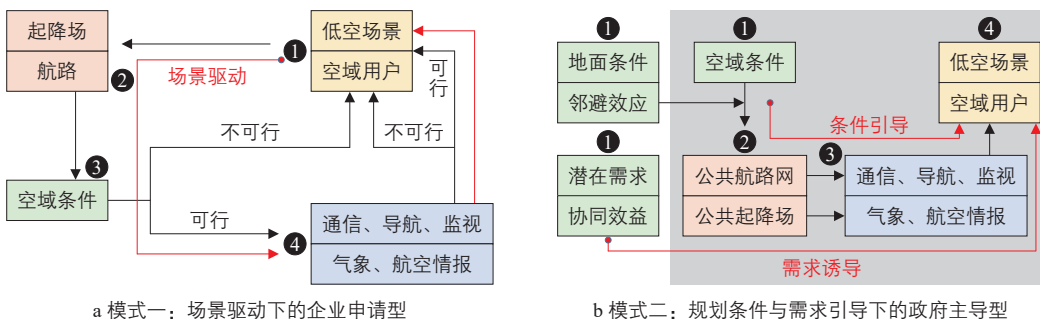


图1 城市空中交通规划模式分析比较

Fig.1 Analysis and comparison of UAM planning models

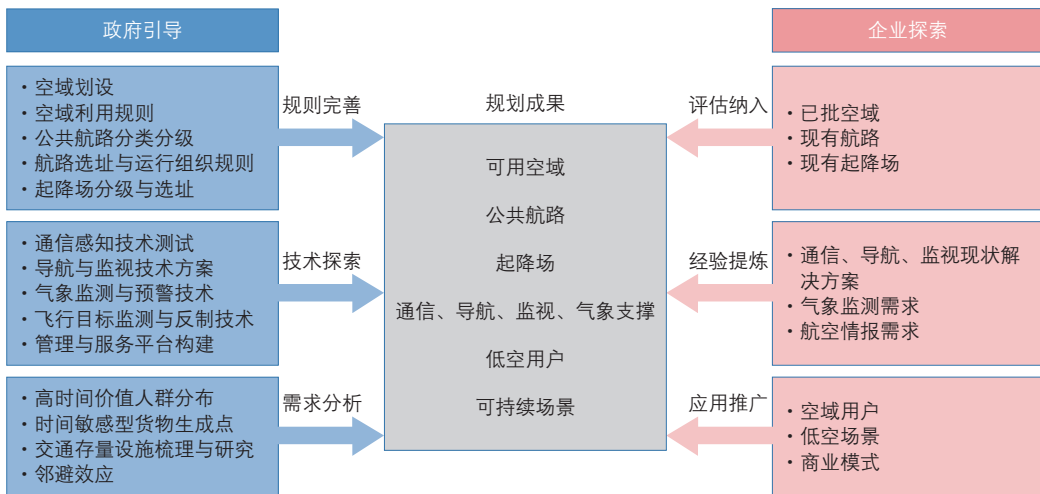


图2 企业与政府协同推进的城市空中交通规划框架

Fig.2 UAM planning framework jointly promoted by enterprises and governments

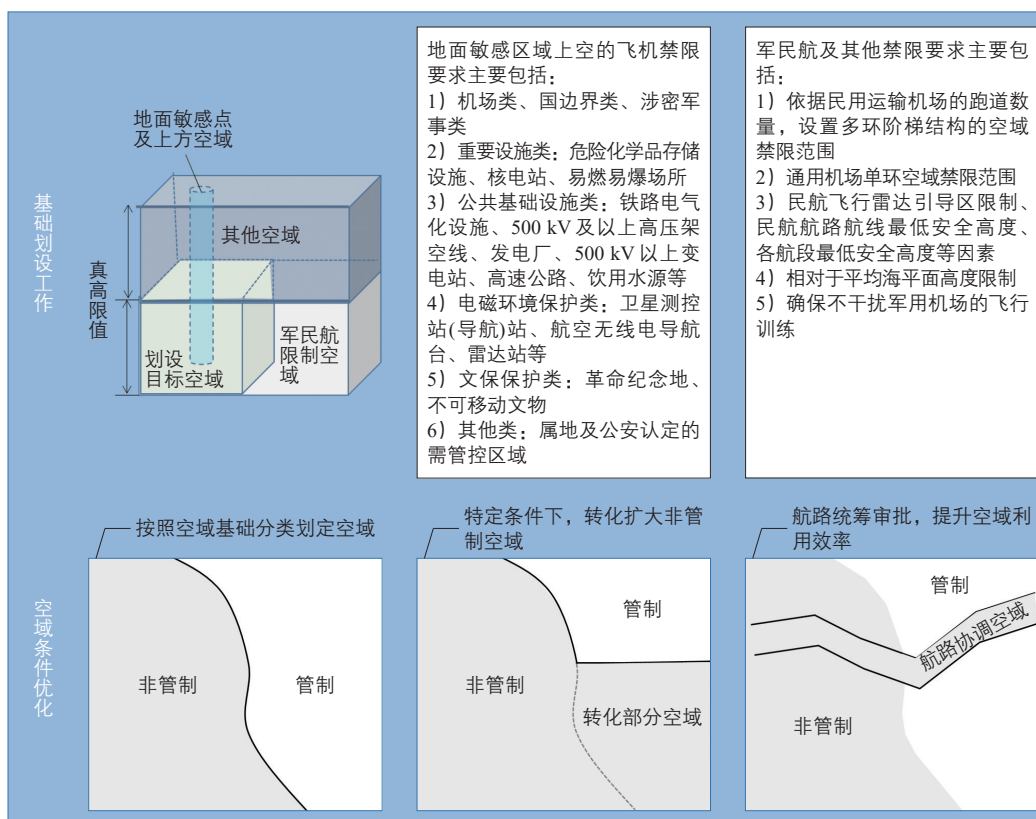


图3 空域划设与优化

Fig.3 Airspace delineation and optimization

W类空域范围, 确定地面敏感区域上空及周边一定范围内的管制地带, 并排除对军用和民用机场飞行活动可能造成干扰的空域范围(见图3)。

在规划实践中, 空域分类划设完成后仍需持续优化, 包括空域动态配置调整和灵活使用机制的建立。一方面, 需要建立空域动态配置机制, 对现有空域划分进行优化调整。主要考虑在管控能力提升的基础上, 逐步缩小军用和民用机场及地面敏感区域周边的管制半径, 同时探索管制与非管制空域间的转换条件和机制。空域配置应结合UAM试点工作实现政策的动态调整。另一方面, 需要建立空域灵活使用机制, 在保持空域性质不变的前提下, 通过公共航路建设形成特定空域, 并建立多方协同审批机制。依托飞行服务管理平台, 提升沟通协调和审批管理效率, 实现同一航路空域在多企业间的高效共享和复用。

2.2 空域分层分片

依托结构化的空域利用规则, 可提升运行安全和使用效率。根据低空交通活动特征, 针对“端到端”和“片区内”两类低空交通活动(见图4), 可采用“分层、分片”

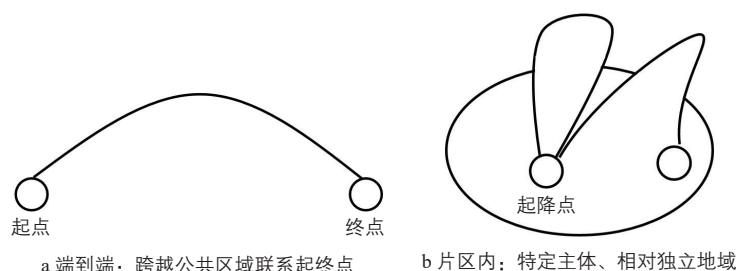


图4 低空交通活动分类

Fig.4 Classification of low-altitude transportation activities

相结合的空域利用规则。分层主要适用于起终点位于不同权属主体地域范围内的“端到端”低空飞行活动, 这类飞行具有公共出行特征, 如跨地市及城市内部的低空客货运输航线。分片则主要针对起终点在同一地点或同一权属主体地域范围内的“片区内”低空飞行活动, 包括文体旅、农林牧渔、产业测试场飞行等。原则上分层与分片的空域利用不应交叉; 若确需交叉, 则应做好时间和高度层的协调, 以最大程度减少相互干扰。

在分层、分片框架下, 需要通过测试来确定大量细则和参数。鉴于当前多层使用场景和运行经验值非常缺乏, 杭州市基于实际情况, 拟采取逐层叠加、渐进完善参数的方法。规划初期重点针对近期主要运行的轻小

型航空器,根据调研得到的企业经验值,暂定 50 m 的运行层高参数。中大型航空器的运行层高需结合未来的运行经验值确定。同时,应综合考虑机型大小、场景类别、出行距离等多方面因素,以优化分层逻辑。

2.3 空域使用规则

城市低空环境复杂,空域精细规划及飞行规则尚未形成统一规章或标准^[11]。部分学者对不同空域结构的容量和效率问题进行了仿真研究^[12],肯定了分层利用在安全和容量提升方面的优势,而水平方向的过度约束航空器飞行自由则会带来对网络容量和航空器运行便利性的较大制约。也有学者从飞行冲

突建模角度进行基础理论研究^[13-14],通过构建网络特征参数,建立飞行冲突的精细探测方法以及目标优化模型,为飞行规则的制定与评估提供理论支撑。

由于 UAM 远未达到高密度运行的状态且管控技术尚处于探索之中,规划实践仍以较大安全冗余为分析前提。如杭州市(一阶段成果)参考《中华人民共和国飞行基本规则》,提出了“单层单向、东单西双”的规则设想,作为规划阶段规则探讨的基础框架(见图 5)。然而,相较于民航运输,UAM 具有自身特性和发展阶段特征。结合上位法规 and 实际需求,杭州市在 UAM 管理办法和飞行规则研究中动态调整并持续优化相关规则和参数。

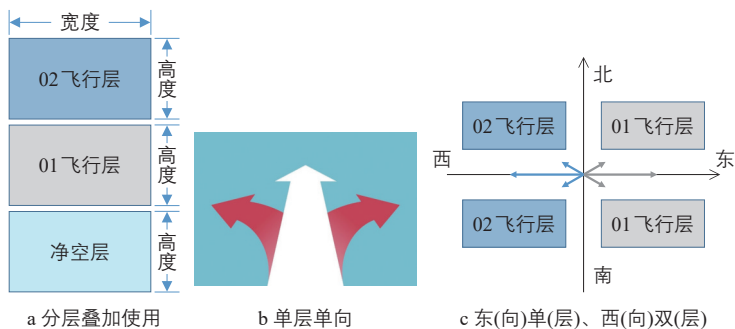


图 5 杭州市空域使用规则基础框架

Fig.5 Basic framework for Hangzhou airspace usage rules

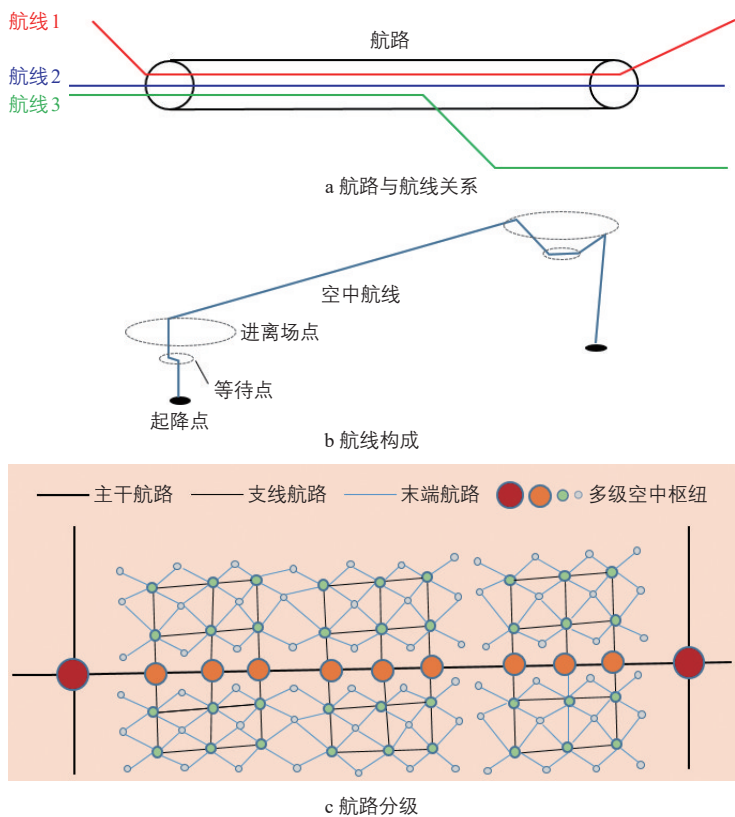


图 6 航路概念与分级

Fig.6 Concept and classification of air routes

3 低空公共航路规划

3.1 航路分类分级

航线是航空器飞行的具体路线,确定了飞行的方向、起讫点和经停地点。低空公共航路是一种基于精准地理信息、动态地理围栏、近地面气候条件以及移动公网等基础设施,为多航空器预先规划的结构化航路网络,是保障安全高效运行的新型基础设施^[2]。规划构建低空公共航路以约束航空器飞行路径和方向,能达到提升系统安全性、控制对地面人居环境影响、促进空域高效利用的目的。

根据低空飞行廊道在低空航路网络中的功能定位,规划形成公共航路和专用航路两类、“干支末”三级的航路体系(见图 6)。主干航路为跨地市和市(区)内主要航路,是全域低空航路网络的骨架;支线航路为片区内部骨架,也是连接主干航路的通道;末端航路为片区内非骨干的局域线路。主支航路可通过市、区(县)两级规划划定,形成低空网络中的中长距离公共航路,强化飞行活动沿走廊引导并与综合交通协调融合,促进多企业对空域廊道的复用和协调。片区内的末端航路则可结合具体场景在航线申请阶段同步划定,按需作为专用或公共航路使用。

3.2 航路规划与选址

航路规划是综合考虑空域禁限要求、自然地理条件、人工障碍物、低空需求分布、基础设施条件等因素后对航路网络的总体布局,包括空域网格化和数字化、三维地理和

障碍物建模、航路约束和需求引导要素提取等步骤^[15-17]。绝大部分城市当前的低空交通需求较少，考虑到投入产出效益、政策环境的不确定性和应用场景、待研究的运行支撑技术等因素，其很难形成全域蓝图式航路规划成果。实践中，可将现有部分航线经评估纳入合规航线，与同走廊规划航线结合形成首批公共航路；同时，结合空域地面条件和需求分析，布局一批引导型骨干公共航路，形成既有与谋划相结合、局部与网络双向推动的渐进式规划方法。根据航路规划，再进行航路及其关联环境的三维数字化建模和新基建投入，实现资源精准配置和方案动态调整。

航路选址是航路规划的落地环节，承接规划层面的功能定位和总体走向。规划选址需结合走廊条件明确具体路径，按照现场踏勘、方案设计、模拟仿真、试飞验证、航线发布与实施等步骤选定^[18]。根据实践经验，航路在城市中心城区宜选址在地面投影区域人员活动少、基础设施不密集的区域，如河流、湖泊、生态廊道上方或者高速公路、国道、省道、快速路、城市主次干路两侧绿化带上方等。在方案设计阶段，需重点对通信、导航、监视、气象等支撑能力进行核查，完善新基建布局，并对拟选航路从安全性、运行技术可靠性、运行环境可靠性、公众接受度等方面进行综合比选。

3.3 航路运行组织规则

航空器在航路内的运行方式决定了低空走廊的断面需求。根据相关研究，航路进行组织规则由简单到复杂包括单层单向无超越管道化组织、垂直方向设置超越空间、水平方向设置超越空间和双向多车道运行^[6]；规划应适应低空交通实际飞行量和监管能力，按照由简单到复杂的原则考虑。在初期低流量密度阶段，规划宜采用单层单向且无超越的管道化组织规则；随着需求增长和监管能力提升，可逐步过渡到更复杂的运行组织规则，以提高航路运行效率。

4 基础设施规划

4.1 起降场分级与选址

引导起降场前瞻布局，有利于低空场景有序拓展。在企业自建起降点基础上，规划需重点推进枢纽型公共起降场布局，以加强地面场地及支撑设施共享，同时引导低空飞

行集聚和有序发展。参考2024年中国民航局及中国民用机场协会发布的《民用垂直起降场地技术要求(征求意见稿)》《电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求》(T/CCAATB 0062—2024)及2022年9月美国联邦航空管理局发布的《公共和私人垂直起降场设计指南(暂行)》(Engineering Brief No.105, Vertiport Design)^[19]，可计算得到单个航空器起降单元空间需求。在此基础上，结合起降枢纽的客货功能、公共与私有属性、起降单元数量等因素，在规划中进一步明确枢纽分类分级。在杭州规划实践中，重点对货运物流起降枢纽进行分类分级布局(见表4)。据调研，为满足3家及以上企业全天候、较高频次起降需求，规划以3对6个起降单元为基础，形成枢纽型公共起降场与末端起降点间的分类阈值。另外，通过机库、应急备降区、货物暂存区、设施布置等配套空间需求调研，提出相应配套空间标准，作为场站规划暂行要点。

起降场选址步骤为：1)引导性因素分析，排查人口与就业岗位分布、高净值人群分布、物流枢纽与商超市场分布、既有交通存量场站等因素，形成选址布局的正面清单；2)限制性因素排查，对空、地限制条件进行梳理，包括机场空域及净空控制、易燃易爆点、环境敏感区域、气象及自然灾害影响区域等，形成选址场站的负面清单；3)覆盖范围分析，在引导和限制因素确定的备选场址中，结合枢纽覆盖半径等要求，进行场址和规模推荐。

4.2 低空运行新基建布局

UAM基础设施是空地耦合、数实结合的基建体系，其中通信、导航、监视、反制、气象服务等能力是关键纽带，相应的新基础设施是UAM安全高效运行的技术底

表4 杭州市货运物流起降枢纽分类分级规划要点(暂定)

Tab.4 Key points for classification and grading planning of freight logistics takeoff and landing sites planning in Hangzhou (provisional rules)

分级	主要航空器类型	起降单元数/个	最小起降空间需求/m ²	最小配套设施空间/m ²	规划面积最小标准值/m ²	净空条件
枢纽型公共起降场	轻小型	≥6	600	300	900	起降场(点)100 m范围内无遮挡障碍物
	中大型	≥6	2 400	1 200	3 600	
末端起降点	轻小型	1~5	40	10	50	
	中大型	1~5	100	50	150	

座。当前,地面移动通信基础设施布局无法有效覆盖300 m高度以上的无人机^[20],面向低空三维空间的导航地图尚属空白,针对无人机尤其是非合作目标的低空监视网络还不成熟,且面向低空空间的微气象监测体系等均处于起步探索阶段。一方面,需加强运行测试场规划布局,如杭州市在余杭、钱塘、建德等区县规划布局了低空测试场,为上下游产业和飞行服务测试提供场地。近期重点落实了余杭测试场的新基建布局方案,并引导多家通信运营商和低空飞行服务企业开展协同测试。另一方面,要探索新基建布局总体策略,强化与UAM走廊结合,如杭州规划实践中提出公共航路、起降场、新基础设施建设三者之间耦合布局的总体要求。未来,在技术能力测试基础上,还需进一步开展新基建成本效益分析,从技术性、经济性和兼容性等多方面明确新基建组网和布局方案。

UAM是一个高度数字化的运行环境,基于数据的服务与管理平台也是极其重要的基础设施。服务与管理平台按照授权组织航空器运行管理工作,履行态势监控、空域管理、资料整编及发布职责,实现飞行审批、告警、情报接发、接管控制、综合处置等功能;整合空域、航路、起降场、新基建等设施信息;联动监管方和运营方,向国家空管平台和有关城市空管运行机构提供数据,并为低空交通运营者提供飞行支持服务。

5 杭州市UAM规划实践

5.1 规划目标与定位

为适应UAM发展特征,杭州市采取“规则先行探索、方案逐步扩展”的总体思路。首先明确规划框架,研究空域、航路、基础设施等规划要点,然后制定3年近期行动计划。规划目标为:至2027年建成各类无人机起降场(点)275个以上(其中枢纽型公共起降场40个以上),开通城市、城际低空航线500条以上,加快建设各类低空航空器测试场、智能基站、气象观测站等新基础设施建设,构建空域、公共航路、起降场(点)与新基建一体融合的发展格局。

从空间、交通、民生、产业4个维度发挥UAM的新质生产力作用。空间方面,推动杭州国际化大都市能级提升,重塑区域、城乡和城市时空格局,落实区域协调、都市圈一体化、城乡一体等空间战略,提升城市

辐射带动能力。交通方面,构建陆空一体交通新格局,充分利用绿色空域资源,客观分析UAM在综合交通系统中的优劣势,构建更加高效便捷的综合立体交通体系。民生方面,深化智治共享的公共服务体系,解决社会治理难点,充分利用低空新技术,促进城市治理水平提升和公共服务均等化。产业方面,引导低空应用和关联产业蓬勃发展,支持现有低空产业和应用持续壮大,构建开放、公开、透明的UAM发展环境,推动产业集聚,打造可持续、可复制的创新应用。综合来看,UAM将成为重塑区域、城乡和城市时空格局的重要手段,推动区域协调、都市圈一体化和城市能级再提升。

5.2 发展需求与条件分析

以回应空间治理挑战为目标,将UAM作为推动城市发展转型的新质生产力。聚焦杭州市域西部、城区、都市区及城市群不同空间尺度的禀赋特征和发展挑战,分别提出以文旅发展和山区治理、产业集聚和城市治理、枢纽共享和同城快联、跨湾跨城联动为重点的差异化发展思路(见图7)。

以空地条件和潜在需求研究为抓手,分析低空发展走廊和枢纽空间布局。在空域条件方面,主要将空域划设及优化结果与已批航线空域整合,建立清晰的可用空域清单;地面条件包括三维地理及障碍物分析、既有交通场站及公共停车场等场地梳理、新基建基础条件等,强化空地交通方式整合及空地发展条件耦合;在需求方面,围绕UAM高时效性、高成本特征,基于多源数据梳理出高净值人群、高价值房产和高密度就业岗位等低空客运需求热点,以及高档生鲜、既有快递分拨中心等高时效性货运需求分布空间,明确UAM走廊和枢纽布局的潜在空间。

5.3 动态扩展规划方案

首先,在发展需求和条件分析的基础上,明确UAM规划布局总体方案。然后,规划方案按照整体廊道、骨干通道、片区网络、航路选址等层次逐层展开。最后,根据航路、起降枢纽、新基建一体化协同布局原则,有序推进近期起降场和新基础设施建设。在上述规划与实施过程中,同步评估并吸纳部分企业既有航路及基础设施,实现政府规划引导和企业场景推动相结合;结合低空应用场景策划,动态扩展规划方案,实现

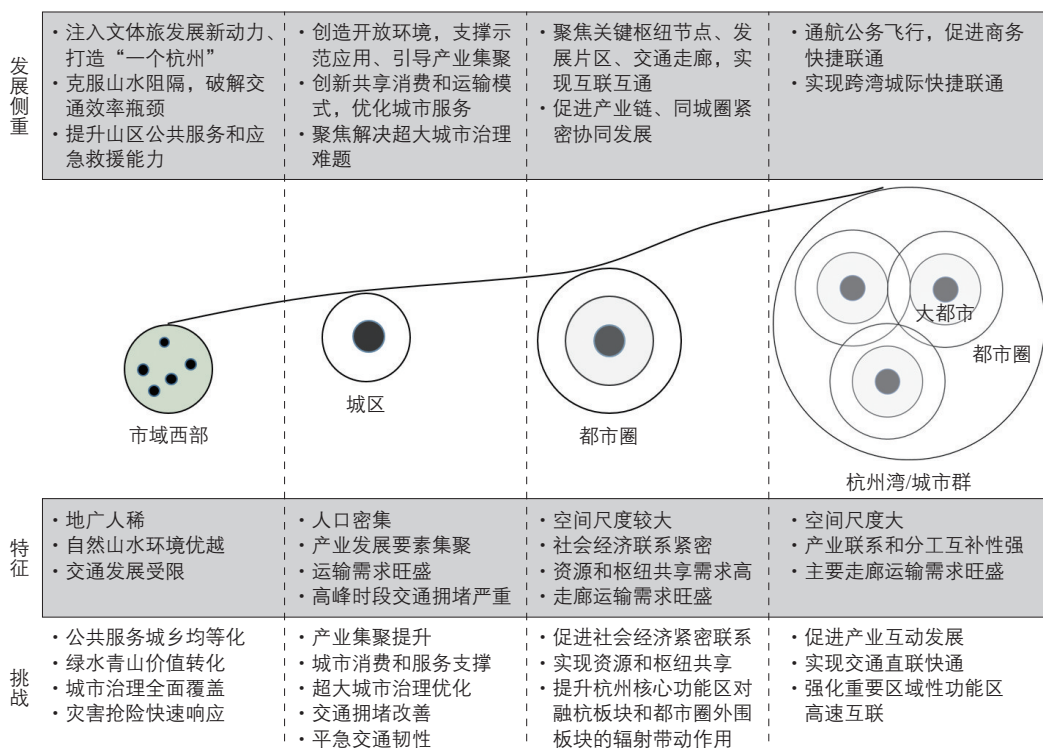


图7 杭州市分区域差异化发展思路

Fig.7 Development strategies for regional differentiation in Hangzhou

需求有效对接和资金等要素精准投入。通过动态扩展与滚动实施的规划方案，适应当前多重不确定性的发展背景，使UAM发展既满足总体规划框架，又保持适度弹性。

6 结束语

基于技术发展、需求场景和行政管理逻辑等多重不确定性背景，本文提出构建动态渐进的UAM规划方法，强调空域、航路、基础设施三位一体的规划内容，形成企业和政府协同推进的UAM规划框架，并采取空地一体、数实融合、动态调整扩展的方案构建策略。结合杭州市规划实践，提出空域利用、低空公共航路、基础设施规划中的工作要点和暂行规则。此外，提出分区域差异化发展目标与思路，通过空域条件、存量设施条件，以及高净值人群低空客运需求和高时效性货运需求分析，明确UAM走廊和枢纽布局的潜在空间。需要注意的是，本文提出的规划框架和要点是基于杭州实践的阶段性总结，其他城市可以结合自身UAM发展阶段和特点，对具体分类方法、参数取值等进行调整。未来研究可选取更多城市案例，通过比较归纳和科学测试，推动建立UAM规划更加完备的概念体系和更具通用性的标准规范。

参考文献:

References:

- [1] 陈志杰. 加强天地融合智联，助推低空经济腾飞[J]. 信息通信技术, 2023, 17(5): 4-7.
- [2] 廖小罕, 屈文秋, 徐晨晨, 等. 城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J]. 航空学报, 2023, 44(24): 6-34.
- [3] LIAO X H, QU W Q, XU C C, et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2023, 44(24): 6-34.
- [4] 任晓栋, 张玉. 低空经济领域城市交通运输的发展思考[J]. 中国市政工程, 2024(4): 1-6.
- [5] REN X D, ZHANG Y. Thoughts on the development of urban transportation in the field of low altitude economy[J]. China municipal engineering, 2024(4): 1-6.
- [6] 黄子翼. 基于eVTOL的城市垂直交通系统构建[J]. 城市交通, 2024, 22(4): 95-105.
- [7] HUANG Z Y. Urban vertical travelling system based on eVTOL[J]. Urban transport of China, 2024, 22(4): 95-105.
- [8] THIPPHAVONG D P, APAZA R D, BARMORE B E, et al. Urban air mobility airspace integration concepts and considerations[R]. AIAA-2018-3676. Reston: AIAA, 2018.
- [9] Federal Aviation Administration. UTM Con-

- cept of operations Version 2.0 (UTM ConOps v2.0)[R]. Washington DC: Office of NextGen, 2022.
- [7] 樊邦奎, 刘德康, 张瑞雨, 等. 大规模无人机集群通信定位一体化技术[J]. 信号处理, 2024, 40(1): 7-16.
- FAN B K, LIU D K, ZHANG R Y, et al. Integrated technology of communication and positioning in large-scale UAV clusters[J]. Journal of signal processing, 2024, 40(1): 7-16.
- [8] 吴盘龙, 黄樊晶, 何山, 等. 无人机系统控制研究综述[J]. 电光与控制, 2024, 31(10): 1-9.
- WU P L, HUANG F J, HE S, et al. A review on unmanned aircraft system control[J]. Electronics optics & control, 2024, 31(10): 1-9.
- [9] HADDAD C A, CHANIOTAKIS E, STRAUBINGER A, et al. Factors affecting the adoption and use of Urban Air Mobility[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2020, 132: 696-712.
- [10] BALAC M, VETRELLA A R, ROTHFELD R, et al. Demand estimation for aerial vehicles in urban settings[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems magazine, 2019, 11(3): 105-116.
- [11] 陈义友, 张建平, 邹翔, 等. 民用无人机交通管理体系架构及关键技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13221-13237.
- CHEN Y Y, ZHANG J P, ZOU X, et al. System framework and key technologies of civil unmanned aircraft system traffic management[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(31): 13221-13237.
- [12] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J, et al. An analysis of decentralized airspace structure and capacity using fast-time simulations[J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 2017, 40(1): 38-51.
- [13] 谢华, 苏方正, 尹嘉男, 等. 复杂低空无人机飞行冲突网络建模与精细管理[J]. 航空学报, 2023, 44(18): 221-241.
- XIE H, SU F Z, YIN J N, et al. Network modeling and refined management of UAV flight conflicts in complex low altitude airspace[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2023, 44(18): 221-241.
- [14] 杨建航, 张福彪, 王江. 基于可达集的无人机低空飞行冲突解脱算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(7): 1813-1827.
- YANG J H, ZHANG F B, WANG J. Conflict resolution algorithms for UAV low-altitude flight based on reachable set[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(7): 1813-1827.
- [15] 谢华, 尹嘉男, 朱永文, 等. 数字低空空域栅格化的表征度量与最优标定[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(1): 31-43.
- XIE H, YIN J N, ZHU Y W, et al. Characterization, calculation and optimal calibration for rasterization in digital low-altitude airspace system[J]. Journal of data acquisition and processing, 2024, 39(1): 31-43.
- [16] 权在昕, 武丁杰, 高嘉静, 等. 城市低空空域交通及无人机路径规划研究综述[J]. 航空计算技术, 2024, 54(2): 121-126.
- QUAN Z X, WU D J, GAO J J, et al. Overview of urban low altitude air mobility and UAV path planning[J]. Aeronautical computing technique, 2024, 54(2): 121-126.
- [17] 冯登超, 秦焕禹, 曾湧, 等. 基于三维可视化空中走廊体系的城市低空空域航图绘制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 58-64.
- FENG D C, QIN H Y, ZENG Y, et al. Research on city chart drawing in low altitude airspace based on three-dimensional visualization of aerial corridor[J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2018, 32(4): 58-64.
- [18] 中国民用航空局. 城市场景轻小型无人驾驶航空器物流航线划设规范: MH/T 4054—2022[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- Civil Aviation Administration of China. Route design specification of the light-small unmanned aircraft system for urban logistics: MH/T 4054—2022[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022.
- [19] Federal Aviation Administration. Engineering Brief No.105, Vertiport Design[R/OL]. (2022-09-21) [2024-11-01]. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/eb-105-vertiports.pdf>.
- [20] 中国民航局飞行标准司. 低空联网无人机安全飞行测试报告[R]. 北京: 中国民用航空局, 2018.