

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.001

## 城市场景无人机物流航线规划方法综述

赵嶷飞<sup>1</sup>, 李仲明<sup>2</sup>, 任新惠<sup>3</sup>

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300;  
3. 中国民航大学经济与管理学院, 天津 300300)

**摘要:** 随着近几年城市物流无人机运输快速发展, 旋翼无人机凭借垂直起降、灵活机动的特性, 已在多个城市形成覆盖范围广、运行模式多样的航线网络。然而, 城市低空空域受制于高层建筑物、复杂地形及动态风场等限制因素, 同时还面临通信中断与公众可接受度低等现实挑战, 这些使得科学的航线规划成为保障运行安全与效率的关键环节。首先, 梳理了国内主要运营人航线设计方案, 提炼出物流航线各功能航段在空间布局与衔接顺序上的基本特征, 定义了物流航线结构参数化模型。其次, 通过文献调研归纳出坠地风险、天气条件、公众可接受度、基础设施等航线规划影响要素, 以及空中航线与进离场航线主要规划方法及其适用性与优缺点。最后, 综合形成包含空域、航线、航线网络的, 涵盖空中航线和进离场航线的一体化的物流航线规划框架。本文研究成果将为后续理论研究和实践运行提供方法论层面的指导。

**关键词:** 无人机; 物流航线; 航线规划; 空中交通管理

中图分类号:U8;V355

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2025)06-1013-13

## Review on Logistics Air Route Planning Methods for Unmanned Aerial Vehicles in Urban Environments

ZHAO Yifei<sup>1</sup>, LI Zhongming<sup>2</sup>, REN Xinhui<sup>3</sup>

(1. School of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
2. School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
3. School of Economics and Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** With the rapid development of urban logistics unmanned aerial vehicle (UAV) transportation, multirotor UAVs, due to their vertical take-off and landing capability and agile maneuverability, have formed air route networks with wide coverage and diverse operational modes in many cities. However, urban low-altitude airspace is constrained by high-rise buildings, complex terrain, and dynamic wind fields. It also faces practical challenges such as communication interruptions and low public acceptance. These factors make scientific air route planning a key component for ensuring operational safety and efficiency. First, this study reviews the air route design schemes of major domestic operators. It extracts the basic characteristics of the spatial layout and the sequential connection of functional segments within logistics air routes, and defines a parameterized structural model for logistics air routes. Second, through a literature review, this study summarizes the key factors influencing air route planning, including ground impact risk, weather conditions, public acceptance, and infrastructure. It also examines the main planning methods for en-route air routes and

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费(210525001482)。

**收稿日期:** 2025-09-16; **修订日期:** 2025-11-02

**作者简介:** 赵嶷飞, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为交通运输规划与管理。

**通信作者:** 赵嶷飞, E-mail:yfzhao@cauc.edu.cn。

**引用格式:** 赵嶷飞, 李仲明, 任新惠. 城市场景无人机物流航线规划方法综述[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(6): 1013-1025. ZHAO Yifei, LI Zhongming, REN Xinhui. Review on logistics air route planning methods for unmanned aerial vehicles in urban environments[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1013-1025.

departure/arrival air routes, together with their applicability, advantages, and disadvantages. Third, the study develops an integrated logistics air route planning framework. This framework includes airspace, air routes, and air route networks, covering both en-route air routes and departure/arrival air routes. The findings of this study provide methodological guidance for future theoretical research and practical operations.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV); logistics air route; air route planning; air traffic management

城市物流无人机凭借响应迅速、配送速度快、自动化程度高等优势,为提升城市配送效率和服务质量提供了新的解决途径。典型的多旋翼无人驾驶航空器系统包括多旋翼无人机、地面遥控站(台)、指挥和控制链路及其配套收发部件,以及用于货物装卸的起降场地或者空投柜<sup>[1]</sup>。多旋翼无人机垂直起降、自由悬停的特点<sup>[2]</sup>,使其更加适合在城市楼宇间起降、飞行。北京三快科技有限公司(注册商标美团无人机,以下简称美团)、杭州迅蚁网络科技有限公司(以下简称迅蚁)、丰翼科技(深圳)有限公司(以下简称丰翼)、西安京东天鸿科技有限公司(以下简称京东)是国内主要的无人机物流配送服务企业,在部分城市已经达到相当的运输规模。美团在深圳龙岗区星河 World 商场楼顶中央机场高峰小时起降量超过 700 架次,繁忙程度远超航班运输机场。

城市物流无人机运行高度低、在居民楼宇附近起降,不可避免带来噪音、侵犯公众隐私等方面的质疑。与此同时,低空楼间复杂风场、电磁信号干扰也带来诸多安全风险。为保证飞行安全和公众接受度,美团、迅蚁等无人机物流运营人综合各种限制因素,在空中预先划设固定的无人机物流航线(以下简称物流航线),控制无人机按照该航线飞行。因此,城市复杂条件下,规划与设计安全高效的物流航线成为支撑无人机物流运输健康发展的基础性关键技术。本文将在充分调研基础上,回顾物流航线发展情况,探讨航线规划设计方法。

## 1 物流航线发展历程及结构

### 1.1 物流航线发展历程

2017 年,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)启动整合试点计划(Integration Pilot Program),目的是探索无人机在国家空域系统内的安全运行模式<sup>[3]</sup>。以 Zipline 为代表的物流企业,按照事前审批的路径在离地数十英尺至百余英尺高度投放包裹后离开,无需地面设施支持<sup>[4-5]</sup>。该模式下,无人机单机点到点飞行,未形成结构化物流航线<sup>[6]</sup>。2018 年,京东在西安郊区开通的无人机物流航线就是这一类航线,如图 1 所示。

随着订单数量、配送及时性要求的增加,在同

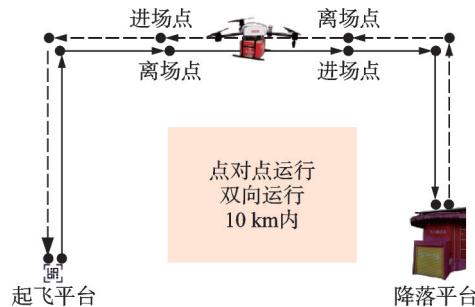


图 1 京东无人机物流航线(2018年)  
Fig.1 JD's unmanned aerial vehicle logistics air route (2018)

一起止点间需要安排多架无人机完成运输货物。与此同时,城市楼宇间人员密集的狭小空间也不允许空投货物。为此,专门划设的无人机起降场地或者自动化程度更高的空投柜开始出现,物流航线也细分为连接起降场地之间的空中航线和专门用于起飞、降落的进离场航线<sup>[7]</sup>。为进一步降低往返过程中空中相撞风险,各国民航管理部门、各物流企业都采用了单向、保持侧向和垂直间隔的单向往返航线<sup>[8-10]</sup>。随着配送规模的不断扩大,多条物流航线相互连接,物流航线网络也开始出现。2019 年,迅蚁公司在杭州市余杭区构建的无人机物流航线及网络如图 2 所示。

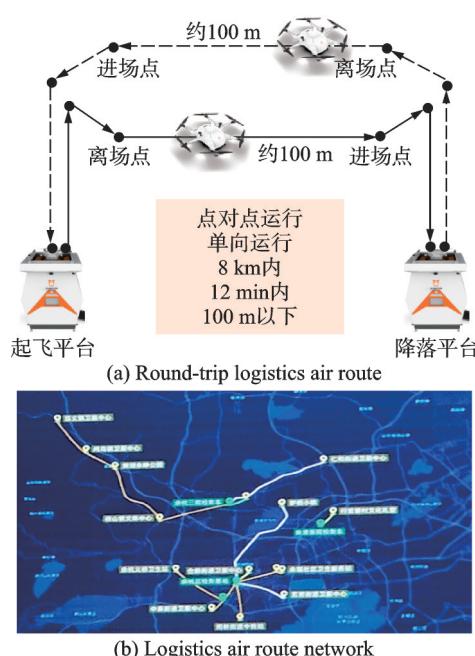


图 2 杭州迅蚁无人机物流航线及网络(2019年)  
Fig.2 Antwork's unmanned aerial vehicle logistics air route in Hangzhou (2019)

与图1相比,图2(a)所示的物流航线中出现了按照进离场方向设置的进场点、离场点,支持往返不同航线的无人机在同一平台起降。图2(b)中,则展示了以少数枢纽起降场地为关键节点的航线网络,标志着城市无人机物流运输规模化开始出现。除迅蚁外,美团、丰翼在广东也开展了类似的无人机物流服务,物流航线建设驶入快车道。截至2025年10月,深圳全市已开通航线449条,同步开通深圳至珠海、中山和东莞的跨城跨海航线,货运无人机日均飞行超1000架次、运输快件约2万票,显示出多航线、高频次、网络化运行的典型特征<sup>[11]</sup>。

## 1.2 物流航线定义

2022年,中国民航局全面汇总国内无人机物流企业实践经验,发布了全球首个《城市场景轻小型无人驾驶航空器物流航线划设规范》,将物流航线定义为空中航线、进离场航线、起降平台(备降平台)3个部分,如图3所示。图3中,起降平台表示供所有无人机起飞、降落、滑行、停放以及其他活动使用的划定地面区域。备降平台表示用于备降活动的起降平台。进离场航线表示起降平台内无人

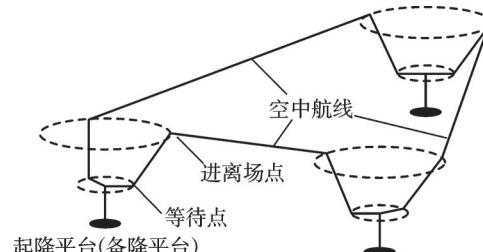


图3 物流航线组成

Fig.3 Components of a logistics air route

机进入/飞出进离场空域的航线。空中航线则指为完成特定飞行任务,运营人对无人机规划的连接起降平台的航线。以上定义,明确了物流航线基本框架,为后续研究奠定了基础。

## 1.3 物流航线结构

以图3为基础,物流企业、研究单位对空中航线和进离场航线都开展了进一步的探索。

### 1.3.1 空中航线

在实地调研基础上,美团、迅蚁、京东、丰翼等无人机物流企业空中航线划设方案可以归纳为4类,如图4所示。

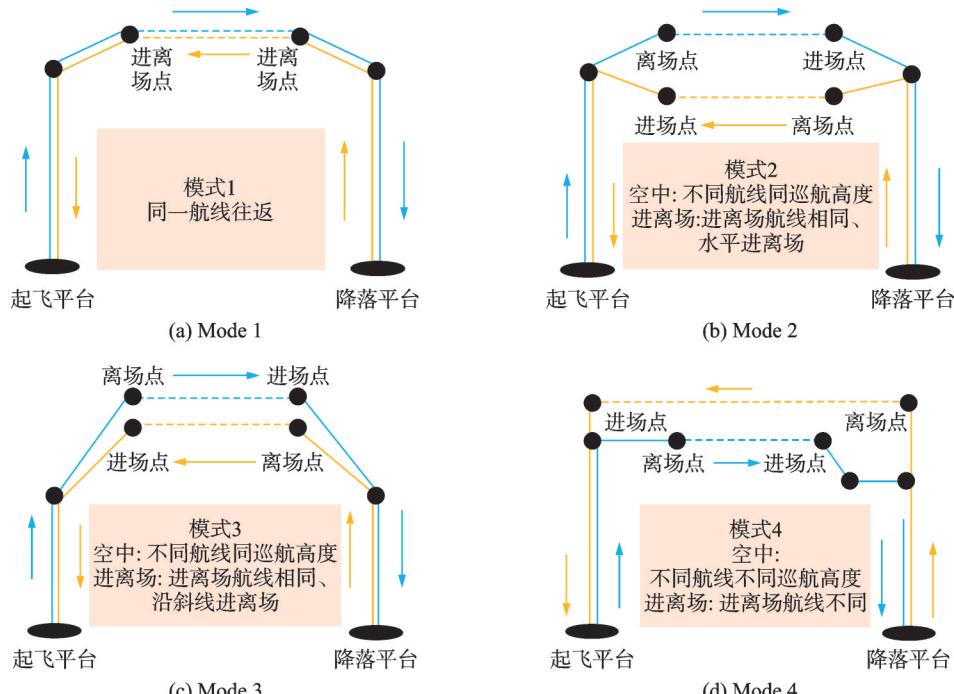


图4 物流航线空中航线结构

Fig.4 Structures of the air route of a logistics air route

从图4可以看出,4个方案最主要的差别是往返高度(巡航高度)是否一致,以及进场点、离场点是否重合。后者显然与进离场航线的设计密切相关。

空中航线结构对运行性能具有显著影响,并呈现出稳定的规律性。前期研究表明<sup>[12]</sup>,若进离场点重合,航线呈独占运行模式,等待时延明显增加;若进离场构型一致且往返巡航高度相同,则较低的

巡航高度可缩短潜在对头冲突集中的垂直起降航段,从而有效降低时延;若往返高度不同,则去程高度较低者在时延上略占优势。进一步比较高度一致与不一致的两类方案:当一致高度等于不一致方案中的较低高度时,高度一致略优;当一致高度等于较高高度时,则高度不一致在降低时延方面具有显著优势。

### 1.3.2 进离场航线

与较为简单的空中航线不同,无人机在起飞、降落过程中,靠近地面运行,受地面各种因素限制更大,且起降交通流交织,使得进离场航线设计更为复杂,这一直是研究的热点。现有研究已经提出4种无人机进场航线设计方案<sup>[13-19]</sup>,如图5所示。

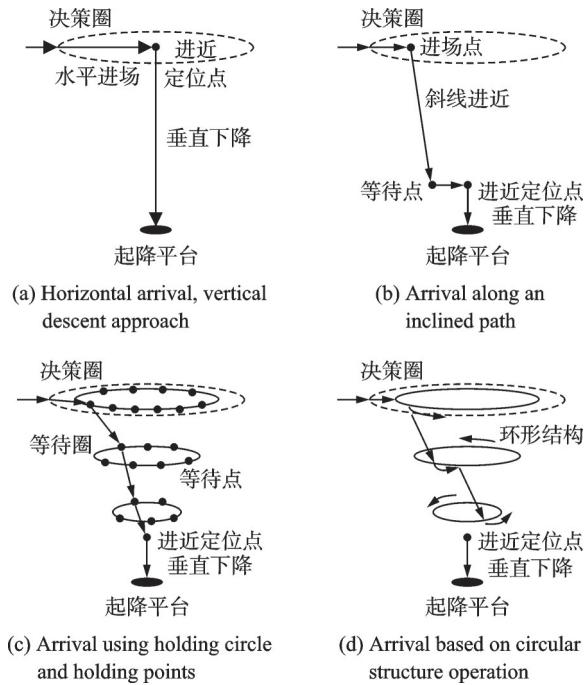


图5 物流航线进场航线结构

Fig.5 Structures of the arrival route of a logistics air route

图5(a)中,无人机直接飞临起降平台上空,对准起降平台后,垂直落地。考虑无人机垂直下降能耗高于倾斜下降,Pradeep等<sup>[13]</sup>在图5(a)基础上提出图5(b)方案,并综合对准起降平台和降低进场能耗的需求,优化得到图5(b)中的等待点。在此基础上,Park等<sup>[14]</sup>引入航空器动力学模型,设计了更为节能的曲线进离场航线。考虑多机、多方向进场排序要求,Song等<sup>[15]</sup>引入等待点和等待圈概念,要求多方向进场无人机在等待点或者等待圈指定位置处等待,直至得到指令后再继续下降,如图5(c)所示。为了充分利用等待圈上空余的等待位置,Song等<sup>[16-17]</sup>进一步引入环形航线结构,如图5(d)所示。进场无人机沿相同方向绕圈飞行,并依据优先级顺序由外圈向内圈移动,最后移动至进近定位点并垂直下降。在此基础上,Lei等<sup>[18]</sup>将等待点和等待环结构扩展到双起降平台。Shao等<sup>[19]</sup>则将环形航线结构扩展到多起降平台。图5(a,b)空域占用少、使用简便,但容量较小。图5(c,d)虽然容量更大,但空域占用大,易受地面多种因素限制,实际使用中常常需要缩减尺寸<sup>[20]</sup>。

在理论研究基础上,综合无人机物流企业实际采用的设计方案,本文将进离场航线概括为以下4种,如图6所示。

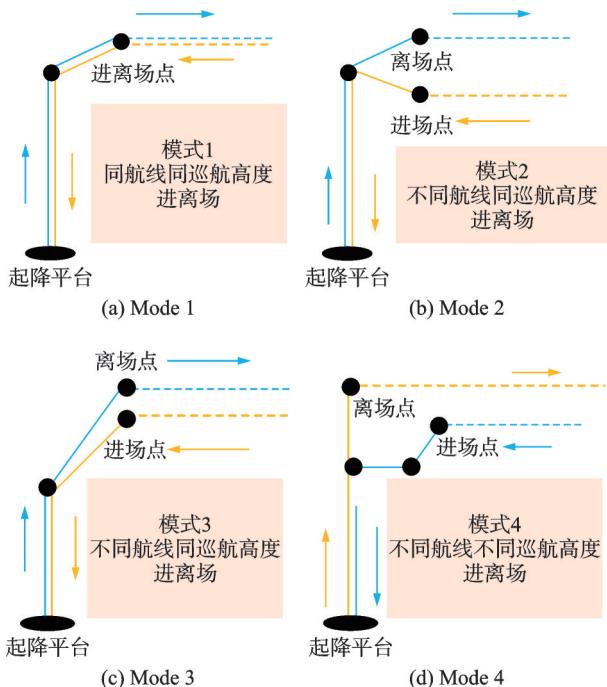


Fig.6 Structures of the arrival and the departure routes of a logistics air route

从图6可以看出,4个方案最主要的差别是进入/飞出进离场空域高度是否一致,是否具备等待程序,进离场航线的空间形态,以及进场点、离场点是否重合。由于进离场航线在组织结构上的差异性突出,因此需对其特征进行抽象,形成统一的航线结构参数表示。

进离场航线结构差异对于运行性能同样具有规律性影响。前期研究表明<sup>[12]</sup>,不同模式组合形成的单向往返航线在等待时延上存在显著差异:在相同场景下,模式4最优,其次为模式3、模式2,模式1最差。此外,在航线设计方案固定的情况下,为起飞起降平台上方的离场航线增加等待航段能够有效降低整体等待时延,而在其他位置增设等待航段则未表现出稳定的规律性。

### 1.3.3 物流航线结构参数化模型

综合空中航线、进离场航线研究成果,无人机物流航线结构如图7所示<sup>[12]</sup>。图7中各参数含义如表1所示。图7和表1将当前研究和实际运行中的物流航线进行归纳,形成统一的参数化表示,不仅为后续研究提供了可供借鉴的基本框架,也极大丰富了1.2节中定义的物流航线结构,为该标准进一步发展提供了借鉴。

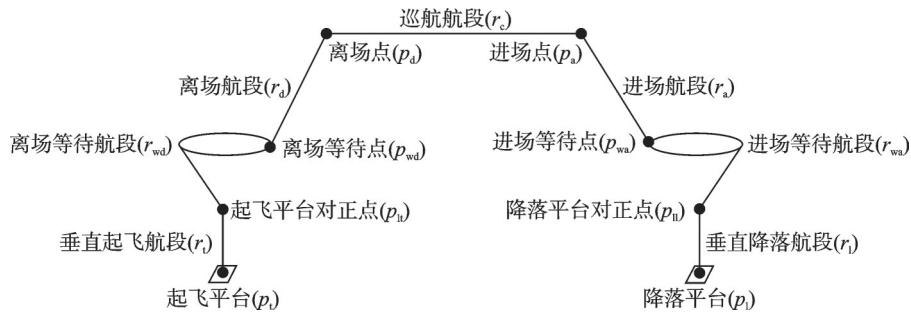


图7 城市物流无人机物流航线结构

Fig.7 Structure of an urban logistics unmanned aerial vehicle route

表1 城市物流无人机物流航线结构参数

Table 1 Structural parameters of urban logistics unmanned aerial vehicle routes

航段名称	起点和终点	功能	设计影响因素	参数化考虑
垂直起飞航段 ( $r_v$ )	从起飞平台( $p_t$ )到起飞平台对正点( $p_{ht}$ )	从地面快速爬升	起飞平台周围障碍物限制,巡航高度等	不做参数化考虑
离场等待航段 ( $r_{wd}$ )	从 $p_{ht}$ 到离场等待点( $p_{wd}$ )	离场无人机进入离场航段前等待	可用空域,无人机尺寸,离场无人机数量,安全间隔等	与图7中等待圈数量对应,按照容纳无人机数量分类
离场航段 ( $r_d$ )	从 $p_{wd}$ 或 $p_{ht}$ 到离场点( $p_d$ )	上升高度,进入空中航线	周边障碍物,无人机性能	如图7所示,可以分为水平、垂直、倾斜3类
巡航航段 ( $r_c$ )	从 $p_d$ 到进场点( $p_a$ )	离场点到进场点间飞行航段	空域限制,地面障碍物,电磁干扰,城市风场,噪声隐私等	按照不同的巡航高度分类
进场航段 ( $r_a$ )	从 $p_a$ 到进场等待点( $p_{wa}$ )或降落平台对正点( $p_{ll}$ )	下降高度,飞临降落平台上方	周边障碍物,无人机性能	如图7所示,可以分为水平、垂直、倾斜3类
进场等待航段 ( $r_{wa}$ )	从 $p_{wa}$ 到 $p_{ll}$	进场无人机落地前等待	可用空域,无人机尺寸,进场无人机数量,安全间隔等	与图7中等待圈数量对应,按照容纳无人机数量分类
垂直降落航段 ( $r_l$ )	从 $p_{ll}$ 到降落平台( $p_l$ )	无人机对准起降平台落地	降落平台周围障碍物,降落过程中无人机定位与控制性能	不作参数化考虑

## 2 城市无人机物流航线规划方法

### 2.1 概述

参照工程学中对路径规划的定义<sup>[21]</sup>,物流航线规划方法可以定义为:一种用于在可用飞行空域内,生成从起始位置到目的地成本最小的物流运输路径的方式。其中,每一段路径(网络边)根据不同的影响因素被赋予相应的权重和约束。相较于传统路径规划,物流航线规划的核心特征在于其系统目标并非仅生成一条可行路径,而是在规模化运行条件下实现网络吞吐量与周转效率的综合优化,这也决定了其理论基础与传统路径规划具有本质差异。

与传统民航航线相比,低空空域的高度低、范围小,其间划设的物流航线受地面影响大。在开展航线规划前,应充分评估各影响因素,以确保航线可行性。现有研究提出了坠地伤人风险<sup>[22]</sup>、危险天气<sup>[23]</sup>、运行噪声<sup>[22]</sup>、隐私担忧<sup>[24]</sup>、基础设施覆盖程度<sup>[23]</sup>等多类影响因素,可以归纳为坠地风险、公众可接受度、天气条件以及基础设施4大类。

#### (1) 坠地风险

无人机在失控坠落后,存在一定的概率对地面

人员财产造成伤害。一方面,无人机高速旋转的螺旋桨会割伤或者刺伤人员,高空坠落的动能会撞击行人头部、车辆顶部。另一方面,坠落无人机携带的锂电池等易燃易爆物品,还可能引发火灾或爆炸,造成更大伤亡。

城市区域运行的无人机应着重考虑坠地伤人风险,分析无人机坠地伤人事故发生概率和事故伤害严重程度。目前对地面风险评估主要依据国际无人机规则制定联合体提出的特定类无人机运行风险评估方法(Specific operations risk assessment, SORA)<sup>[25]</sup>,这是将坠地风险量化并加以控制的一种系统化方法。

#### (2) 公众可接受度

虽然存在视线干扰等其他因素影响<sup>[26]</sup>,但是噪声和隐私是影响公众可接受度的关键因素<sup>[7]</sup>。无人机在运行过程中,噪声的主要来源是旋翼转动<sup>[27]</sup>。旋翼发出的噪音会让地面上的行人感到烦恼,通过评估人类对无人机噪音的反应,研究人员发现参与者由于无人机噪音产生的烦恼会随着无人机与社区间距离的增加而逐渐降低<sup>[28]</sup>。此外,由于城市物流无人机的尺寸更小,其噪音特性与传

统旋翼航空器具有显著差异,弦长雷诺数较低,使得宽带噪声的能量分布更为分散,频谱范围更宽,噪声更易被察觉<sup>[29]</sup>。

由于无人机通常配备机载摄像设备,公众往往对其潜在的隐私风险有一定担忧<sup>[30]</sup>。在城市低空复杂环境下,无人机机载摄像头与被拍摄对象之间的距离更近,更容易引发公众的不满<sup>[31]</sup>。为缓解公众对隐私泄露的忧虑,一方面,可通过合理调控航线高度与摄像头分辨率,降低地面目标的识别度,从而降低隐私暴露风险<sup>[24]</sup>;另一方面,也可引入区块链等数据加密与可追溯技术,加强影像数据的存储与传输过程的安全防护,实现隐私保护与数据安全的双重保障<sup>[32]</sup>。

### (3) 天气条件

对于城市内低高度运行的无人机,风向、风速是其最关注的天气条件<sup>[33]</sup>。高风速区中无人机会偏出航线、甚至完全失控<sup>[34-35]</sup>。即便在中低风速中,风速、风向也会增加或者减少无人机能量消耗,增加飞行控制难度<sup>[36-38]</sup>。

### (4) 基础设施

基础设施指的是为保障无人机安全高效运行而提供对应服务的重要设施。航线规划过程中重要的基础设施包括起降平台和通信导航监视设施。

起降平台选址问题需在成本、覆盖率、时间等多目标间权衡,并受续航距离、载荷、电池寿命与能耗波动等约束影响,呈现多约束特征<sup>[39]</sup>。最新研究中,充电站、补给点及中继或者枢纽节点设计也被纳入进来<sup>[39]</sup>,逐步发展成网络级起降平台选址规划问题。

通信、导航和监视系统的协同运行可实现无人机与运营人间的信息互通、精确定位与实时态势感知,是确保低空飞行安全性与可控性的关键保障。为实现可靠的低空通信,需要引入长期演进(Long term evolution,LTE)、5G 及更高代蜂窝通信技术,并结合卫星链路与地面基站网络,构建统一的空地通信体系。然而,面对低空飞行的无人机,当前无线通信仍面临信号可用性不足、时延波动、能耗偏高及网络安全防护薄弱等诸多不足<sup>[40]</sup>。进一步研究表明,蜂窝网络增强覆盖、接入边缘计算优化时延、以及加密与身份认证机制等新技术都可以提升通信安全与稳定性<sup>[40]</sup>。

全球卫星导航系统是低空导航主用方式。受地面高大建筑物遮挡,低空定位精度显著下降。城市峡谷环境中定位误差高达 20 m<sup>[41]</sup>。为保障无人机在城市空域连续高精度定位,必须在提升卫星导航性能的同时,引入惯性导航、视觉定位、地基增强等方式,实现低空高精度、连续的定位支持<sup>[42]</sup>。

低空监视主要依靠无人机主动报送身份识别、下传位置数据,单独加装机载 Remote ID 设备、广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)设备,通过手机通信网络连接地面基站是目前主要监视手段。对于没有相关机载设备的非合作空中目标,则主要采用 5G-A、光电探测等被动监视方式。监视盲区、多源监视数据融合、监视数据延迟和身份解析冲突等问题都是当前低空监视主要难点<sup>[43]</sup>。

## 2.2 空中航线规划方法

物流航线空中航线规划方法的核心是在多元约束条件耦合作用下,为无人机系统规划总成本最小的有效飞行路径。针对由传统路径规划问题演化而来的空中航线规划研究,国内外学者已经展开相关研究,形成了较为成熟的方法分类,如图 8 所示。



图 8 空中航线规划方法

Fig.8 Air route planning methods

### (1) Dijkstra 算法

Dijkstra 算法是求解最短路径问题的贪心算法,其主要方式是从起始点开始遍历与其相连的最短路径,在搜索的过程中迭代更新最短路径,直至完成所有节点的探索。Choudhary 等<sup>[44]</sup>将 Dijkstra 算法扩展为多目标 Dijkstra,综合考虑包裹配送率、延误等多个网络性能指标,为每个指标设定不同权重,在路径搜索过程中平衡这些指标的贡献,以优化网络性能。Zhang 等<sup>[45]</sup>将图模型的边权从固定距离改为内容传输时延,构建加权无向图,采用 Dijkstra 算法对无人机边缘计算的传输网络进行计算,减少信号时延。

### (2) 粒子群算法

粒子群优化算法<sup>[46]</sup>的核心在于粒子依赖历史经验不断调整搜索方向,通过群体共享信息实现全局搜索,群体最优经验引导整个搜索过程。Yildiz 等<sup>[47]</sup>借助改进的扩展随机树搜索算法具有在大范围环境中高效运行、快速收敛到目标点的特性,将该算法生成的路径再由粒子群优化算法优化,以搜索全局最优的无人机路径。Wei 等<sup>[48]</sup>提出了一种非线性自适应更新策略,动态调整学习因子与惯性权重,实现全局搜索与局部开发的平衡,加快收敛速度,提升规划路径的质量。Haris 等<sup>[49]</sup>将双曲正切函数应用于粒子群优化算法的加速度更新机制,

通过非线性映射改善搜索行为的动态调节能力,减少陷入局部最优的风险。

### (3) 快速扩展随机树

针对快速扩展随机树(Rapidly-exploring random trees, RRT)算法收敛速度慢、搜索范围随机性大的问题,Fan等<sup>[50]</sup>提出了目标导向策略和双向采样机制,提高了算法的速度;在搜索的过程中,引入人工势场方法,减少了双向树结构的迭代次数。Huang等<sup>[51]</sup>通过构建搜索引导策略,减少了树结构的过度随机探索引发的计算复杂度;通过建立顶点的优化策略,减少了树结构在探索过程中的不必要绕行。Guo等<sup>[52]</sup>引入数据驱动的风险网络与反馈模块,能够从态势数据中提取风险信息以约束随机树的生长方向,并通过反馈机制动态调整搜索偏置,从而提高路径规划的效率与鲁棒性。

### (4) 深度强化学习

深度强化学习(Deep reinforcement learning, DRL)将无人机的飞行任务建模为强化学习问题,无人机在与环境的不断交互中改变其位置、速度、

高度等状态空间,在奖励函数的引导下不断学习优化路径<sup>[53-54]</sup>。Wang等<sup>[55]</sup>提出一种结合区域划分与累积奖励机制的DRL路径规划框架,以提高学习效率并增强算法在复杂环境下的全局搜索能力。所提出的区域划分算法旨在降低DRL智能体陷入局部最优陷阱的概率;所提出的累积奖励模型同时考虑了节点到目标点的距离及其周围障碍物密度,有效缓解了DRL在路径规划任务中面临的训练数据稀疏问题。针对无人机调度问题,Mao等<sup>[56]</sup>提出了一种双层DRL框架。在上层DRL模型中,设计了编码器-解码器结构的策略网络,用于将任务合理分配给不同无人机;在下层DRL模型中,采用基于注意力机制的策略网络,为每架无人机生成最优路径,在满足最大航程约束的前提下,最大化任务执行总价值。Shi<sup>[57]</sup>针对低空物流无人机在复杂狭窄环境中路径规划与避障效率低的问题,提出了与人工势场方法结合的改进型DRL智能规划方法,显著提升了路径优化、能耗控制与飞行安全性。各方法的对比如表2所示。

表2 无人机空中航线规划方法对比

Table 2 Comparison of unmanned aerial vehicle air route planning methods

方法类别	核心原理	优点	局限性	典型适用场景
图搜索方法 (Dijkstra、A* 及其变种)	将空域离散为图模型, 基于边权搜索全局 最优路径	算法原理清晰、计算稳定、 能获得全局最优解; 易与成本函数结合	离散化导致计算量大; 动态环境下需频繁 更新图结构	静态或半静态环境 下的最短路径、风 险或能耗最优规划
智能优化方法 (粒子群、蚁群等)	通过群体协作和启发式 机制进行全局搜索	全局搜索能力强;能 处理多约束和非线性 问题;适用于复杂地形	收敛速度慢;对参数 敏感;易陷入局部最优	多目标优化、复杂 城市环境路径搜索
随机采样方法(RRT、 概率路图(Probabilistic road map, PRM)等)	在空间中随机采样 构建树或图结构, 逐步逼近可行路径	能在高维空间中高效搜索; 易融合动力学约束	路径质量波动大;随机性 强;在狭窄通道成功率低	动态障碍环境 可行路径生成
人工智能方法 (DRL)	结合深度学习与强化 学习,智能体通过交互 与奖励自学习最优策略	自学习能力强; 可适应复杂、时变环境; 无需显式建模	训练样本需求大;收敛 不稳定;泛化能力有限	非结构化或实时 环境下的自适应 航线规划

总体而言,各类方法在最优性、实时性、稳定性与环境适应性之间存在明显权衡:图搜索法偏向确定性最优,适合静态场景;智能优化与采样法注重全局可行性与复杂约束求解;人工智能方法则在自适应与动态决策方面更具潜力。

## 2.3 进离场航线规划方法

由于进离场空域狭小,来自各方向交通流交织<sup>[58]</sup>,进离场航线规划的核心在于生成无冲突、程序化且可复用的下降、起飞路径,空中航线规划方法难以直接应用。现有研究主要聚焦于高密度、多方向交通流情境中规划路径,如图5(c,d)所示,其方法大体可分为基于马尔科夫决策过程(Markov decision process, MDP)方法、基于仿真方法和给定航线结构下的路径搜索方法。

(1) 基于MDP的方法将无人机在进离场空域(图5(d))中的机动过程建模为顺序决策问题,通过分布式控制保持安全间隔并自主生成最优进离场路径。Bertram等<sup>[59]</sup>采用高效的分布式MDP求解算法,实现了同向绕飞、自动保持水平间隔的高密度自组织进离场路径规划。Waltz等<sup>[60]</sup>则在无预设空域结构的自由飞行环境中,通过强化学习获得了自主机动策略,结果显示无人机接近起降平台时会自发形成类似环形等待的稳定交通流,该结构具有内在稳定性,能够减少追赶与对向交汇冲突,并为进场管理提供有序排队机制。

(2) 构建包含等待点、等待圈结构及其相关使用规则的进离场路径(图5(c)),并采用仿真方法评估、修正路径参数。Song等<sup>[16]</sup>提出在图5(c)结

构中实施分支进近、顺序自由移动和带移动圆顺序移动等 3 种使用规则,并通过仿真方法验证其安全性和效率。Shao 等<sup>[19]</sup>则将等待点视为空中交叉口,引入类似地面交通信号的相位控制规则,确保交通流稳定的同时提高了通行效率。Wang 等<sup>[61]</sup>比较以上两种模式发现,多机盘旋飞行、按照规则进入降落序列虽然可以提升安全性,但总体等待时间大大增加。

(3) 虽然由于情况复杂,无法直接使用空中航线规划中采用的路径搜索算法,但前期进离场航线

结构的研究成果(图 5)为进离场航线规划提供了新的可搜索空间,这使得经典路径优化方法重新得以应用。Li 等<sup>[62]</sup>针对不确定风场、定位误差以及高大地面障碍物带来的多重干扰,以偏航容差为间隔标准构建了分层同心圆环式的进离场空域网络模型,并通过空间隔离确保航线之间的无冲突运行。在此框架下,研究者在路径规划问题中引入航线不相交约束,结合改进的 A\* 算法,实现了轮辐式航线网络中心枢纽上空的高密度进离场路径规划。各方法的对比如表 3 所示。

表 3 无人机进离场航线规划主要方法比较

Table 3 Comparison of major unmanned aerial vehicle arrival and departure air route planning methods

方法类别	核心原理	优点	局限性	典型适用场景
基于 MDP 的方法(FastMDP、强化学习)	通过分布式策略求解无人机机动,实现满足最小间隔约束的最优进离场路径生成	可处理不确定性和复杂动态场景;不依赖预设固定空域结构,适应性强	训练成本高,难以验证安全性;对环境模型依赖强,泛化受限	绕环飞行、非结构化或实时环境下的自适应进离场航线规划
基于仿真 的方法	基于一定的规则控制无人机过等待点的时刻以生成无冲突进离场路径	规则清晰、可控性强;固化路径下稳定性高、效率好	依赖预设空域结构,灵活性差;难以应对动态环境扰动	具有明确飞行程序的进离场航线规划
给定航线 结构下的 路径搜索方法 (A*及其变种)	将空域离散为图模型,在保证航线间空间隔离的前提下,基于边权搜索全局最优路径	结果可解释、可验证;算法结构清晰、计算成本低;顶点分布基于安全间隔确定,航线结构与监管要求天然一致	依赖于复杂空域网络的提前构建;对于突发风场/障碍变化适应性弱	静态环境下的能耗最优路径规划

总体来看,进离场规划方法呈现出“空域模型由简到繁、使用规则从无到有、求解算法由复杂到直接”的发展规律。随着飞行密度增加、进离场空域结构愈发复杂,基于结构的、引入使用规则的路径智能规划方法将成为研究重点。

#### 2.4 航线网络规划方法

航线网络规划可视为多路径搜索(Multi-path finding, MPF)问题<sup>[63]</sup>。按照决策方式,可分为集中式与分布式方法。其中,集中式方法由单一计算单元统一求解全体路径<sup>[64]</sup>,并根据求解质量进一步分为全局最优和次优近似两类。

全局最优求解算法通过在整个搜索空间内直接寻找最优无冲突解。基于冲突树的算法是其中的典型代表。Sharon 等<sup>[65]</sup>首次将冲突树用于航线网络规划,其高层节点表示各路径代价组合,底层则枚举满足代价约束的所有路径组合以寻找无冲突解。随后,Sharon 等<sup>[66]</sup>提出逐步冲突处理机制,为每条路径独立执行受约束的最短路径搜索直至获得无冲突解。在多目标优化导致搜索维度急剧增加的背景下,Ren 等<sup>[67]</sup>进一步采用冲突分解策略,仅对发生冲突的路径进行重规划,以降低全局搜索的计算开销。

次优方法中,基于优先级的策略应用最为广泛。其基本思想是按预设准则对航线排序并依次

规划,低优先级航线需绕行以避让高优先级航线。典型的分层协作式 A\*(HCA\*) 算法<sup>[68]</sup>采用随机顺序逐条规划并将已生成路径视为不可通行区域。He 等<sup>[63]</sup>在此基础上按紧急程度与预期利润排序,以最大化空域利用率为目优化航线生成。针对大规模场景下 HCA\* 搜索成功率下降的问题,Zhang 等<sup>[69]</sup>引入博弈论思想,通过路径间代价让步或协同调整提高解的可行性。

分布式方法将每条待规划路径视为独立的计算单元,通过通信与协商机制协调路径间冲突<sup>[70]</sup>。随着航线数量增多,计算与通信开销急剧增加。Wang 等<sup>[71]</sup>通过引入本地化决策与有限通信,提高了算法的可扩展性。Ho 等<sup>[72]</sup>进一步把运营商作为最小决策单元,在局部管理各自航线,并将运营商间的冲突构建为博弈问题,通过协商逐步解决。He 等<sup>[73]</sup>则采用拥堵代价机制,从系统层面协调需求点间的竞争关系,以缓解拥堵并改善空域利用效率。各方法的对比如表 4 所示。

总而言之,3 类方法在求解质量、效率与适用场景上形成互补:全局最优方法解质量最高,适合小规模静态规划;次优方法求解速度快,在中等规模、适度冲突场景中更实用;分布式方法最具灵活性,能适应多主体与动态环境,但难以保证全局最优。

表4 无人机航线网络规划主要方法比较

Table 4 Comparison of major unmanned aerial vehicle air route network planning methods

方法类别	核心原理	优点	局限性	典型适用场景
全局最优求解 (冲突树等)	检测冲突并添加互斥约束,在约束下分别求解最短路径,逐步收缩解空间获得无冲突解	解全局最优、决策过程可追溯、易与多目标优化等理论结合	计算量随航线数指数增长;不适用于大规模或动态环境	小规模网络、静态环境、对最优性要求高的规划任务
次优求解 (基于优先级的方法)	为航线赋予优先级,按序逐条规划,高优先级占用空域,低优先级绕行	结构简单、速度快;易实现、可扩展	易形成链式冲突;不保证最优性;密集环境性能下降	中等规模、冲突密度较低、对计算速度敏感的场景
分布式决策方法	将航线视为独立主体,通过本地决策与通信/协商协调冲突	可扩展性强;适应多主体、去中心化环境;支持实时局部调整	全局最优难保证;通信与同步成本随主体增加上升	多运营主体、无集中调度、需处理实时任务注入或局部动态变化的场景

### 3 一体化物流航线规划方法

物流航线规划无疑与空域环境密切相关。前期诸多研究中,普遍将空域中存在的各类运行约束作为航线规划中的约束条件。而在实际运行中,除考虑这些约束之外,空域政策及其中规划的可用空域范围,则是航线规划中更为重要的前提条件。随

着低空飞行量的不断增加,飞行范围的不断扩大,航线规划问题也逐步向航线网络规划方向演变,成为更为宏大的城市级低空运输系统的重要组成部分。鉴于以上变化,归纳前期研究成果和实践经验,提出包含空域、航线、航线网络的,涵盖空中航线和进离场航线的一体化的物流航线规划框架,如图9所示。

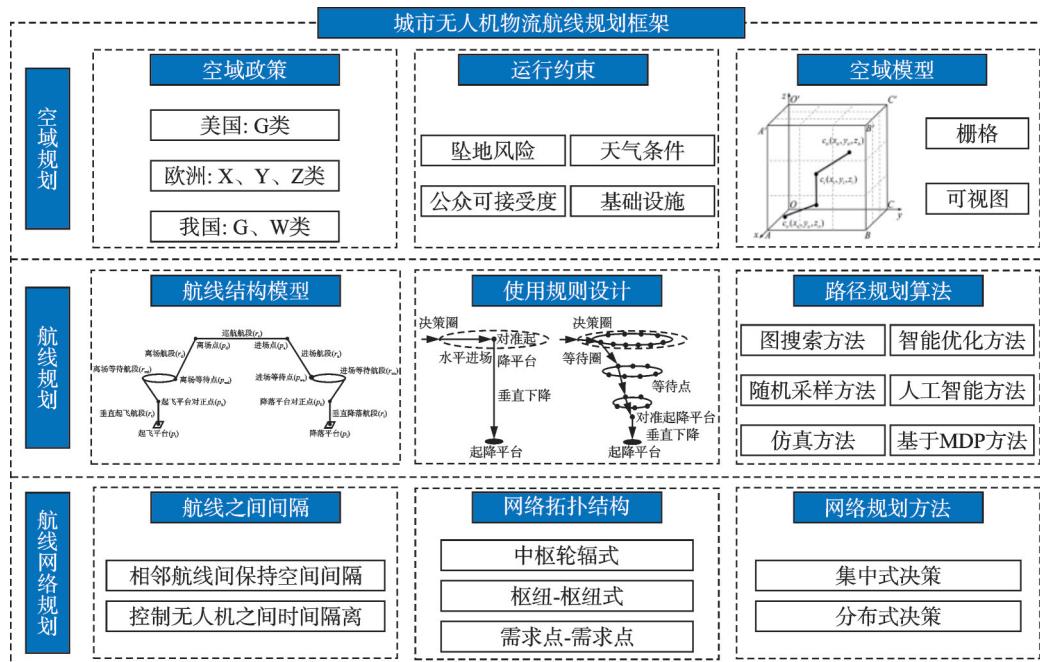


图9 一体化物流航线规划框架

Fig.9 Integrated logistics air route planning framework

如图9所示,该体系框架由空域规划、航线规划与航线网络规划3大模块构成。

在空域规划层,首先依据各国空域管理政策,确定法律法规层面可飞空域水平和垂直范围,然后剔除各类运行约束造成的不可用区域得到可飞空域。针对空中航线、进离场航线用空需求的显著差异,依据飞行阶段对可飞空域进行分区,采用网格方法或者可视图方法分别建模。这两类模型将空域从物理意义上的可飞空间转化为数学意义上可计算模型,为后续航线规划奠定基础。

在航线规划层,基于图7所示的航线结构模型,首先定义各个航段和关键点。其次,由于进场航段、进场等待航段、离场航段、离场等待航段通常位于起降平台上方同一空域内,需要在构建的空域模型中,按照交通流走向定义空域网格或者空域网络节点的使用规则。最后,根据各航段起止点及其使用规则,使图搜索等算法分段规划并有机组合,实现跨航段路径统一规划<sup>[62]</sup>。进场、离场、空中航线分段规划中,还可以引入多种算法提升路径规划的实时性与鲁棒性<sup>[74-75]</sup>。

在航线网络规划层,首先需要确定多航线间安全间隔。这一间隔可以通过事先碰撞风险评估<sup>[76]</sup>或者限制无人机沿航线时间间隔确定(如丰翼)。其次,无人机物流企业需要根据其需求分布、起降场地分布选择航线网络拓扑结构。各物流企业采用的拓扑结构可以归纳为中枢轮辐式(如美团)、枢纽-枢纽式(如丰翼)、需求点-需求点式(如迅蚁)3种。确定拓扑结构后,采用航线规划层中方法,依次规划各条航线并形成航线网络,后规划航线必须避让先规划航线,并与后者保持安全间隔。这一过程中,规划顺序对结果影响较大,可以采用全局式集中安排顺序、或者各起止点间分别安排等方式完成。

由于充分考虑了空域限制、物流运输需求,本方法成功构造了满足城市无人机物流需求的“可运行网络”。图9所示框架覆盖了从空域规划到航线规划的全流程,各环节、各模块层层递进,共同构成可计算、可扩展的物流航线规划方法框架。

## 4 结 论

近年来,随着低空经济兴起与应用场景不断增加,城市无人机物流配送正在快速发展,以其显著的数字化、智能化特征,成为新质生产力的重要代表。物流无人机虽然拥有配送速度快、自动化程度高等特点,但同样受低空障碍物、复杂风场、噪音、公众隐私等多重因素限制。科学合理地规划物流航线,已成为推动城市无人机物流运输安全高效发展的前提条件。本文围绕城市场景无人机物流航线规划方法面临的挑战,进行以下研究:

首先,梳理国内主要运营人航线设计方案,提炼出物流航线各功能航段在空间布局与衔接顺序上的基本特征,定义了物流航线结构参数化模型。其次,通过文献调研归纳出坠地风险、天气条件、公众可接受度、基础设施等航线规划影响要素,以及空中航线与进离场航线主要规划方法及其适用性与优缺点。最后,综合形成包含空域、航线、航线网络的,涵盖空中航线和进离场航线的一体化的物流航线规划框架,为后续理论研究和实践运行提供了方法论层面的指导。

未来研究可进一步丰富城市物流无人机航线结构参数模型中各航段设计参数和连接方式,引入面向不同飞行任务的航线构造需求,形成更为丰富的多参数航段、航线、航线网络协同优化方法。以此为基础,面向实时规划需求,将电磁干扰、灵活使用空域、动态改航备降、超高密度运行等限制和需求纳入规划过程,不断完善动态要素评估能力,开发适应性更强、更为高效的路径规划算法,实现一

体化规划方法持续提升整体的同时,为更为丰富和复杂的运行场景提供理论和技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 城市场景物流电动多旋翼无人驾驶航空器(轻小型)系统技术要求[EB/OL]. (2022-03-07). [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202203/t20220311\\_212298.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202203/t20220311_212298.html). Civil Aviation Administration of China. Technical requirements of multi-rotor electric unmanned aircraft system (small and light) for urban logistics[EB/OL]. (2022-03-07). [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202203/t20220311\\_212298.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202203/t20220311_212298.html).
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 多旋翼无人机系统通用要求[EB/OL]. (2020-02-01). <https://hbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/c8eb7b91287500e08796610ffac679cd94236accf0c28d3dfec77ee922fb42>. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. General requirements for multi-rotor unmanned aircraft system[EB/OL]. (2020-02-01). <https://hbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/c8eb7b91287500e08796610ffac679cd94236accf0c28d3dfec77ee922fb42>.
- [3] Federal Aviation Administration. UAS integration pilot program final report[EB/OL]. (2021-12-17). [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/programs\\_partnerships/completed/integration\\_pilot\\_program/IPP\\_Final\\_Report\\_20210712.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/programs_partnerships/completed/integration_pilot_program/IPP_Final_Report_20210712.pdf).
- [4] Federal Aviation Administration. Draft environmental assessment: Zipline International Inc. drone package delivery operations in pea ridge, arkansas and surrounding area[EB/OL]. (2022-06-13). [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/EA\\_Zipline\\_Pea%20Ridge-and-Surrounding-Area.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/EA_Zipline_Pea%20Ridge-and-Surrounding-Area.pdf).
- [5] Zipline. 2024 behind the scenes with Zipline[EB/OL]. (2024-09-20). <https://www.youtube.com/watch?v=nY2RjINT1K0>.
- [6] KESTELOO H. Zipline showcases innovative drone traffic management system[EB/OL]. (2024-07-17). <https://dronexl.co/2024/07/17/zipline-drone-traffic-management-system/>.
- [7] 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[EB/OL]. (2022-08-11). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202208/t20220811\\_214939.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202208/t20220811_214939.html). Civil Aviation Administration of China. Route design specification of the light-small unmanned aircraft system for urban logistics[EB/OL]. (2022-08-11). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202208/t20220811\\_214939.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202208/t20220811_214939.html).
- [8] 中国民用航空局. 民用无人驾驶航空发展路线图

- V1.0(征求意见稿)[EB/OL].(2022-08-23).<https://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/HDJL/YJZJ/202208/P020220822615871900-321.pdf>.
- Civil Aviation Administration of China. Civil unmanned aircraft development roadmap V1.0 (Draft for comments) [EB/OL]. (2022-08-23). <https://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/HDJL/YJZJ/202208/P020220822615871900-321.pdf>.
- [9] Federal Aviation Administration. Urban air mobility (UAM) concept of operations 2.0 [EB/OL]. (2023-04-26). <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0.pdf>.
- [10] VERMA S, DULCHINOS V, WOOD R D, et al. Design and analysis of corridors for UAM operations [C]//Proceedings of 2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference. Portsmouth, USA: IEEE, 2022: 1-10.
- [11] 深圳市政府. 做大低空物流 推动深港低空跨境航线常态化运行[EB/OL]. (2025-10-13). [https://www.sz.gov.cn/cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post\\_12431527.html](https://www.sz.gov.cn/cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_12431527.html).
- [12] LI Z M, ZHAO Y F, REN X H. Parametric modeling and evaluation of departure and arrival air routes for urban logistics UAVs[J]. Drones, 2025, 9(7): 454.
- [13] PRADEEP P, WEI P. Energy-efficient arrival with RTA constraint for multirotor eVTOL in urban air mobility[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2019, 16(7): 263-277.
- [14] PARK J, KIM I, SUK J, et al. Trajectory optimization for takeoff and landing phase of UAM considering energy and safety[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 140: 108489.
- [15] SONG K, YEO H, MOON J H. Approach control concepts and optimal vertiport airspace design for urban air mobility (UAM) operation[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021, 22(4): 982-994.
- [16] SONG K, YEO H. Development of optimal scheduling strategy and approach control model of multicopter VTOL aircraft for urban air mobility (UAM) operation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128: 103181.
- [17] SONG K. Optimal vertiport airspace and approach control strategy for urban air mobility (UAM)[J]. Sustainability, 2023, 15(1): 437.
- [18] LEI Y, QIN R, LI Q, et al. TLOF final approach methodology proposal utilizing dual landing pads[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2023, 17(10): 2052-2062.
- [19] SHAO Q, SHAO M X, LU Y. Terminal area control rules and eVTOL adaptive scheduling model for multi-
- vertiport system in urban air mobility[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103385.
- [20] BAURANOV A, RAKAS J. Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100726.
- [21] ScienceDirect. Route planning[EB/OL].(2021-01-01). <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/route-planning#definition>.
- [22] 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): 028521.
- LIAO Xiaohan, QU Wenqiu, XU Chenchen, 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): 028521.
- [23] 张洪海, 李姗, 夷珈, 等. 城市低空航路规划研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 827-838.
- ZHANG Honghai, LI Shan, YI Jia, et al. Review on urban low-altitude air route planning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 827-838.
- [24] LI Z P, GAO C, YUE Q G, et al. Toward drone privacy via regulating altitude and payload[C]//2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Honolulu, USA: IEEE, 2019: 562-566.
- [25] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. JARUS guidelines on specific operations risk assessment (SORA)[EB/OL]. (2019-01-30). [https://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar\\_del\\_wg6\\_d\\_04\\_jarus\\_sora\\_v2.0.pdf](https://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_del_wg6_d_04_jarus_sora_v2.0.pdf).
- [26] Federal Aviation Administration. Desk reference for unmanned aircraft systems environmental review[EB/OL]. (2024-10-01). [https://www.faa.gov/uas/advanced\\_operations/nepa\\_and\\_drones/Desk-Reference-for-UAS-Environmental-Review.pdf](https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/nepa_and_drones/Desk-Reference-for-UAS-Environmental-Review.pdf).
- [27] PETTINGILL N A, ZAWODNY N S, THURMAN C S. Aeroacoustic testing of UAS-scale rotors for a quadcopter in hover and forward flight[C]// Proceedings of the 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference. Southampton, UK: AIAA, 2022: 3110.
- [28] TORIJA A J, NICHOLLS R K. Investigation of metrics for assessing human response to drone noise[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(6): 3152.
- [29] MANKBADI R R, AFARI S, GOLUBEV V V. Simulations of broadband noise of a small UAV propeller[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, USA: AIAA, 2020: 1493.

- [30] PILLAI G M, SURESH A, GUPTA E, et al. Priva-dome: Delivery drones and citizen privacy[J]. Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 2024, 2024(2): 29-48.
- [31] PARK S H, LEE K H. Developing criteria for invasion of privacy by personal drone[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon). Busan, South Korea: IEEE, 2017: 1-7.
- [32] VERMA A, BHATTACHARYA P, ZUHAIR M, et al. VaCoChain: Blockchain-based 5G-assisted UAV vaccine distribution scheme for future pandemics[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2022, 26(5): 1997-2007.
- [33] MURRAY C W, IRELAND M L, ANDERSON D. On the response of an autonomous quadrotor operating in a turbulent urban environment[C]//Proceedings of 2014 Conference: AUVSI's Unmanned Systems. Orlando, USA: [s.n.], 2014.
- [34] JEONG S, YOU K, SEOK D. Hazardous flight region prediction for a small UAV operated in an urban area using a deep neural network[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 107060.
- [35] RUBIO-HERVAS J, GUPTA A, ONG Y S. Data-driven risk assessment and multicriteria optimization of UAV operations[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77: 510-523.
- [36] LIU Z L, SENGUPTA R, KURZHANSKIY A. A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Miami, USA: IEEE, 2017: 310-315.
- [37] STOLAROFF J K, SAMARAS C, O'NEILL E R, et al. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 409.
- [38] KIRSCHSTEIN T. Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 78: 102209.
- [39] DUKKANCI O, CAMPBELL J F, KARA B Y. Facility location decisions for drone delivery: A literature review[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 316(2): 397-418.
- [40] ZENG Y, LYU J B, ZHANG R. Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 120-127.
- [41] NIU Z, NIE P, TAO L, et al. RTK with the assistance of an IMU-based pedestrian navigation algorithm for smartphones[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3228.
- [42] ZHANG C, YANG Z, ZHUO H Z, et al. A light-weight and drift-free fusion strategy for drone autonomous and safe navigation[J]. Drones, 2023, 7(1): 34.
- [43] RUSENO N, LIN C Y, CHANG S C. UAS traffic management communications: The legacy of ADS-B, new establishment of remote ID, or leverage of ADS-B-like systems?[J]. Drones, 2022, 6(3): 57.
- [44] CHOUDHARY A, KANG S S, SINGLA S. Multi-objective dijkstra algorithm for enhancing QoS in SDN through balanced routing[C]//Proceedings of 2024 7th International Conference on Circuit Power and Computing Technologies. Kollam, India: IEEE, 2024: 1169-1175.
- [45] ZHANG J, BAI J P. Dijkstra algorithm based cooperative caching strategy for UAV-assisted edge computing system[J]. Wireless Networks, 2024, 30(3): 1201-1219.
- [46] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95—International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [47] YILDIZ B, ASLAN M F, DURDU A, et al. Consensus-based virtual leader tracking swarm algorithm with GDRRT\*-PSO for path-planning of multiple-UAVs[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 88: 101612.
- [48] WEI J, ZHANG Y H, WEI W H, et al. HSEPSO: A hierarchical self-evolutionary PSO approach for UAV path planning[C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. Malaga, Spain: ACM, 2025: 1577-1584.
- [49] HARIS M, BHATTI D M S, NAM H. A fast-convergent hyperbolic tangent PSO algorithm for UAVs path planning[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2024, 5: 681-694.
- [50] FAN J M, CHEN X, LIANG X. UAV trajectory planning based on bi-directional APF-RRT\* algorithm with goal-biased[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 119137.
- [51] HUANG T, FAN K G, SUN W. Density gradient-RRT: An improved rapidly exploring random tree algorithm for UAV path planning[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 252: 124121.
- [52] GUO J, XIA W, HU X X, et al. Feedback RRT\* algorithm for UAV path planning in a hostile environment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 174: 108771.
- [53] JAFARI B, HASNA M, PISHRO-NIK H, et al. DRL-based UAV path planning for coverage hole avoidance: Energy consumption and outage time minimization trade-offs[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025, 6: 4194-4205.

- [54] PAN J N, LI Y, CHAI R, et al. Multiobjective trajectory planning for UAV-assisted IoT networks based on DRL approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(11): 15840-15852.
- [55] WANG Z P, NG S X, EI-HAJJAR M. Deep reinforcement learning assisted UAV path planning relying on cumulative reward mode and region segmentation [J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2024, 5: 737-751.
- [56] MAO X, WU G H, FAN M F, et al. DL-DRL: A double-level deep reinforcement learning approach for large-scale task scheduling of multi-UAV[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 22: 1028-1044.
- [57] SHI J Q. Research on low altitude logistics path planning and obstacle avoidance strategy for unmanned aerial vehicles based on DRL[C]//Proceedings of International Conference on Mechatronics and Artificial Intelligence (MAI 2025). Jeju Island, South Korea: SPIE, 2025: 224-234.
- [58] 赵嶷飞,袁一凡.小型多旋翼城市物流无人机进场航线设计方法研究[J].飞行力学,2024,42(4): 78-87.  
ZHAO Yifei, YUAN Yifan. Research on approach flight route design method of small multi-rotor urban logistics UAVs[J]. Flight Dynamics, 2024, 42(4) : 78-87.
- [59] BERTRAM J, WEI P. Distributed computational guidance for high-density urban air mobility with cooperative and non-cooperative collision avoidance[C]// Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, USA: AIAA, 2020.
- [60] WALTZ M, OKHRIN O, SCHULTZ M. Self-organized free-flight arrival for urban air mobility[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 167: 104806.
- [61] WANG R M, JIANG B, YANG R, et al. Performance evaluation of operational modes in terminal airspace of UAV takeoff and landing areas[J]. Journal of Air Transport Management, 2026, 131: 102894.
- [62] LI Z M, ZHAO Y F, REN X H, et al. Air route network planning for urban logistics with vertihub: An air-space model[J]. Aerospace Science and Technology, 2026, 168: 111242.
- [63] HE X Y, HE F, LI L S, et al. A route network planning method for urban air delivery[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 166: 102872.
- [64] FELNER A, STERN R, SHIMONY S, et al. Search-based optimal solvers for the multi-agent pathfinding problem: Summary and challenges[J]. Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search, 2017, 8(1): 29-37.
- [65] SHARON G, STERN R, GOLDENBERG M, et al. The increasing cost tree search for optimal multi-agent pathfinding[J]. Artificial Intelligence, 2013, 195: 470-495.
- [66] SHARON G, STERN R, FELNER A, et al. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding [J]. Artificial Intelligence, 2015, 219: 40-66.
- [67] REN Z Q, RATHINAM S, CHOSET H. A conflict-based search framework for multiobjective multiagent path finding[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(2): 1262-1274.
- [68] SILVER D. Cooperative pathfinding[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, 2005, 1(1): 117-122.
- [69] ZHANG K X, MAO J L, CHEN M F, et al. Multi-agent priority gaming for path planning in chain-like blocking situation[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 61: 102523.
- [70] LUMELSKY V J, HARINARAYAN K R. Decentralized motion planning for multiple mobile robots: The cocktail party model[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(1): 121-135.
- [71] WANG H L, RUBENSTEIN M. Walk, stop, count, and swap: Decentralized multi-agent path finding with theoretical guarantees[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 1119-1126.
- [72] HO F, GERALDES R, GONÇALVES A, et al. Decentralized multi-agent path finding for UAV traffic management[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 997-1008.
- [73] HE X Y, LI L S, MO Y F, et al. A distributed route network planning method with congestion pricing for drone delivery services in cities[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 160: 104536.
- [74] VENU S, GURUSAMY M. A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous navigation[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 107750.
- [75] RIBEIRO M, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J. Using reinforcement learning to improve airspace structuring in an urban environment[J]. Aerospace, 2022, 9(8): 420.
- [76] WEIBEL R, EDWARDS M, FERNANDES C. Establishing a risk-based separation standard for unmanned aircraft self separation[C]//Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, USA: AIAA, 2011: 6921.