

文章编号:

## 面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述

李诚龙<sup>1</sup>, 屈文秋<sup>1</sup>, 李彦冬<sup>1</sup>, 黄龙杨<sup>1</sup>, 卫鹏<sup>2</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307; 2. 乔治·华盛顿大学  
机械与航空航天工程学院, 华盛顿特区 20052)

**摘要:** 回顾了城市空中运输(UAM)的起源与发展演变, 定义了UAM交通管理基本概念, 分析了UAM产生的社会和技术因素, 提出了面向近未来时期国家层面UAM交通管理的基础架构, 将基于电推进垂直起降(eVTOL)航空器的UAM交通管理问题划分为3个方面进行讨论(空域规划、地面基础设施、交通规则及运行控制)并对近5年来UAM交通管理相关文献所提出的代表性观点进行了梳理, 总结了UAM近未来阶段所需解决的关键问题, 展望了UAM交通管理的发展趋势。研究表明: 空域规划方面, UAM需要对现有低空非管制空域进行更精细化的规划管理, 结构化的空域划设方式应该在UAM交通管理初期被应用, 高度层空域结构能较好平衡运行安全和空域容量之间的矛盾; 地面基础设施方面, 需通过城市OD数据预测UAM的交通需求来进行地面垂直起降站点选址, 选址管理工作将直接影响空中航线网络结构和所需的地面通信导航监视台站的布设; 交通规则与运行控制方面, UAM将直接面对更为复杂的有人机、无人机融合运行场景, UAM交通规则需要革新并对现有的运输航空交通规则保持兼容, 高带宽的通信技术会促使UAM运行控制向空地协同决策和自动驾驶方向发生转变, 未来交通管理中如何处理人与系统的关系至关重要。总的来说, UAM交通管理将可能会和现有无人机交通管理体系产生交集并逐渐融合, 面对这一新型运输方式国家将更可能采用集中管理、试点运行、有序放开的交通管理发展路线。

**关键词:** 航空运输; 城市空中交通; 电推进垂直起降; 空域规划管理; 运行控制; 通信导航监视

**中图分类号:** V355

**文献标识码:** A

**DOI:** 19-23593 (2019)

### Overview on traffic management of urban air mobility(UAM) with eVTOL aircraft

LI Cheng-long<sup>1</sup>, QU Wen-qiu<sup>1</sup>, LI Yan-dong<sup>1</sup>, HUANG Long-yang<sup>1</sup>, WEI Peng<sup>2</sup>

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, George Washington University, Washington DC 20052, USA)

**Abstract:** The emergence and development of urban air mobility (UAM) were reviewed in this work, and the concept of UAM traffic management was defined. The social and technical factors which promoted UAM industry were analyzed. The basic framework of UAM traffic management in the near future was proposed and discussed in three aspects (airspace management, ground infrastructures, traffic rules and operation). Literature about UAM in recent five years were reviewed to summarize the representative viewpoints. The key issues of UAM traffic management to be resolved over the next few years

**收稿日期:** 2020-03-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(U1733105); 中国民航局安全能力建设项目(0241928); 中央高校基本科研业务费成果转化与创新基金(CJ2018-02); 中央高校教育教学改革专项(E2020083); 四川省大学生创新创业训练计划 (S201910624031);

**作者简介:** 李诚龙(1990-), 男, 四川绵阳人, 讲师, 主要研究方向为无人机空中交通管理, 城市空中交通与自动驾驶。通讯邮箱: [lcl@cafuc.edu.cn](mailto:lcl@cafuc.edu.cn);

**引用格式:** 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向 eVTOL 航空器城市空中运输的交通管理综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4):

**Citation:** LI Cheng-long, QU Wen-qiu, LI Yan-dong, et al. Overview on traffic management of urban air mobility(UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4):

were also proposed. In addition, a prospect of the development of UAM traffic management in the future was made. The research shows that, in terms of airspace management, UAM is required to manage low-altitude urban airspace which used to be uncontrolled. Most related literature agrees that the airspace should be structured and points out that the layers structure can better balance the contradiction between operation safety and airspace capacity. In terms of ground infrastructure, we can locate the site of vertiports by predicting the traffic flow demand of UAM based on city OD data. Also, vertiport site management will directly affect the structure of air route network and layout of CNS(Communication, Navigation, and Surveillance) stations. In terms of traffic rules and operation, UAM will directly face more complex integration airspace where UAVs and manned aircraft operate together. The traffic rules of UAM need to be innovated and keep compatible with the ATM and UTM. High bandwidth communication technology will promote the UAM operation change to the direction of coordinated decision making and self-pilot. How to deal with the relationship between human and air traffic control system is very important to future air traffic management. In general, UAM traffic management is likely to intersect with the existing UTM system and gradually integrate with it. In the face of such a new transportation form like UAM, our country will probably adopt the development route which includes centralized management, operation in specific region and then orderly release.

**Keywords:** air transportation; urban air mobility; eVTOL; airspace management; operation and control; CNS

**Author resume:** Li Cheng-long(1990), male, lecture, lcl@cafuc.edu.cn.

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(U1733105); Safety Capacity Building Program of Civil Aviation Administration of China (0241928); The Special Fund of Chinese Central University for Basic Scientific Research (CJ2018-02); The Central University Education and Teaching Reform Project(E2020083); Sichuan Province College Students' Innovative Entrepreneurial Training Plan Program(S201910624031)

## 0 引 言

伴随着电力推进、自动驾驶、5G通信等多领域技术突破<sup>[1]</sup>, 城市空中运输(Urban Air Mobility, UAM)概念被Uber<sup>[2]</sup>, 美国国家航空航天局(NASA)<sup>[3]</sup>, Airbus<sup>[4]</sup>, Embraer<sup>[5]</sup>, MITRE<sup>[6]</sup>, 亿航<sup>[7]</sup>等机构相继提出并引起国内外航空运输市场广泛关注。战略咨询公司罗兰贝格对UAM的市场潜在需求和产业化前景调研后指出:“市区到远郊民航机场摆渡、空中出租车、邻近城市的航班等应用将是打开城市空中运输市场的重要应用方式”<sup>[8]</sup>。利用具有自动驾驶能力的电推进垂直起降(eVTOL)航空器在城市空中进行交通运输的优势是显而易见的,它具有按需响应、更低廉的人员成本、更灵活的空域使用方式、噪音更小等特点。另外需要重点提到的是,在城市空中交通网络中,由于可以分高度层运行,航空器往往可以选择更短直、灵活的路径规划方式,产生交通流拥堵的概率也会更低,因此能从系统层面降低交通延误,保证到达时间。

根据NASA定义,城市空中运输的广义概念包含物流和载人运输两方面。在物流领域,以京

东<sup>[9]</sup>、亚马逊<sup>[10]</sup>为代表的电商企业在2015年之前已开始布局货运无人机领域,考虑利用旋翼类无人机解决最后一公里终端级配送应用场景,经过一定技术积累,现目前京东公司已在陕西、四川等省面向乡村偏远地区开展常态化运行,走的是“农村包围城市”的路子;而迅蚁这样的初创企业则更多希望获得资本市场的关注,着力探索配送需求更高的大型城市小件物流“闪送”场景,但城市作业场景对无人机智能化程度和适航提出了更严苛的要求,在获得普通大众对其安全性的信任上也面临着更大的挑战。在载人方面,由于城市空中载客运输是一个需求空间更大利润回报率更高的市场<sup>[8]</sup>,因此,相比城市物流运输获得了学术界和航空器制造厂商更多的关注。我们总结近5年来以UAM为关键词的文献发现,大多数论文都是围绕利用可垂直起降航空器进行载人运输应用的相关研究。这类运输场景所使用的载运具绝大部分为小型航空器级别<sup>[11]</sup>(CCAR-121部规定起飞全重不大于5 700 kg)的eVTOL航空器,其中典型的几类气动布局包括:多旋翼构型(如

Volocopter 2X、Ehang216); 倾转旋翼构型(如 Airbus Vahana); 固定翼与多旋翼复合型(如 KittyHawk Cora), 因此, 本文将主要聚焦于城市空中运输的载人运输应用相关研究(图1), 对近未来(即1.2小节中第3阶段2020~2030年)新载运具和运行模式下的UAM交通管理科学问题、工程实践情况进行综述。

本文将从以下章节逐一展开对UAM交通管理问题的讨论: 第1节给出UAM交通管理的基本概念, 回顾城市空中运输的起源和发展演变, 阐述影响当下阶段UAM交通管理的主要技术和社会经济因素, 并提出面向未来UAM交通管理基本框架; 第2节为空域规划, 代表着对UAM所需空侧资源的开发使用与管理, 这一节将对城市低空空域相关研究进行讨论分析, 界定UAM空域与其他传统航空器(如通航直升机、轻小型无人机)的运行边界, 根据需要对空域进行结构化划设或动态占用, 讨论可能影响运行的地形建筑物或关键区域周边保护区划设方法, 从宏观层面尽可能减少交通冲突和碰撞事故; 第3节为地面基础设施管理, 代表着UAM交通管理中的陆侧资源部分, UAM地面基础设施主要分为垂直起降机场和用于保障空中交通管理所需的通信导航监视技术及其地面台站; 第4节为交通规则与运行控制, 代表了UAM交通管理的核心业务。首先分析探讨了UAM运行所需的基本交通规则, 然后对UAM运行所引入的交通管制、流量控制和

签派运行管理的文献进行了评述, 比较了UAM与传统运输航空交通管制的改变; 第5节为结论与展望, 总结了UAM交通管理中潜在的研究方向和关键问题, 对本文所引用的文献的观点进行归纳, 最后对UAM未来发展趋势进行了展望。

## 1 UAM交通管理基本概念与发展演变

### 1.1 基本概念和定义

早至20世纪40年代, 在城市低空空域利用航空器进行商业化载人运输的设想已经被提出并付诸实践。但限于航空工业技术水平和此种交通方式的运营规模, 世界各国对城市空中运输管理几乎没有展开过多研究。而近年来伴随着各类eVTOL航空器的出现, “UAM”一词作为城市空域航空运输概念的拓展和延续被NASA首先提出。在中国相关文献和报道中UAM多被称为城市空中交通或城市空中出行, 但由于UAM本质是提供运输服务, 因此在本文中译为城市空中运输。如图1所示, 我们综合多篇文献<sup>[2-4, 12]</sup>的表述将UAM定义为: “一种新型城市低空交通运输应用设想, 以eVTOL航空器为主要载运具提供城市区域内的载人或载货运输服务。”可以预见的是, 基于eVTOL的UAM在短期内仍将会与传统有人驾驶航空器(例如直升机)共用城市低空空域运行, 甚至存在着地面基础设施和航线网络复用的可能性。但eVTOL航空器其本质是航空电

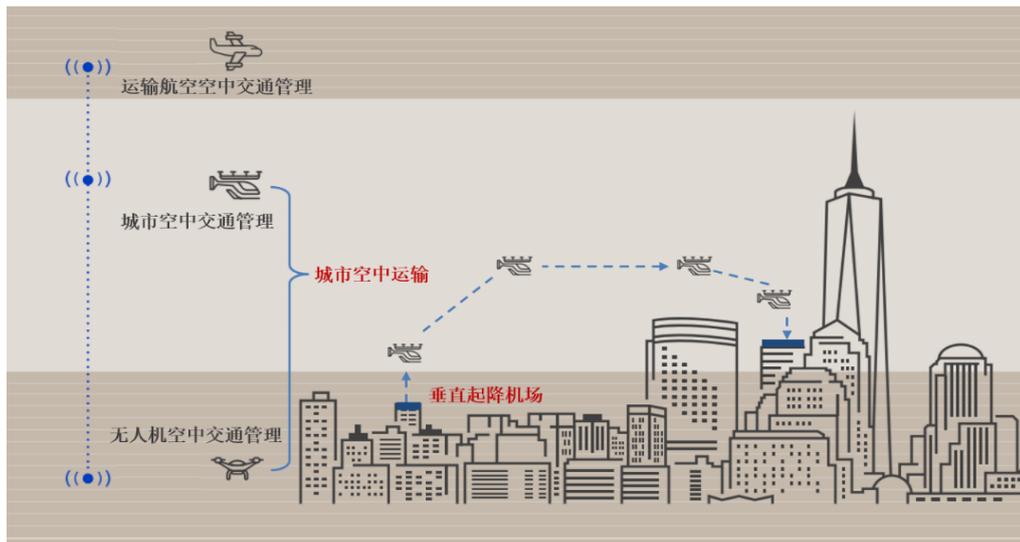


图 1 基于eVTOL载运具的UAM<sup>[5]</sup>

Fig. 1 UAM operations with eVTOL aircraft

气化革命的产物,相比直升机更容易降低成本和扩大生产规模,符合市场化的需要。

城市空中运输的实施将极大的拓展当下通用航空的应用场景,并逐渐与城市地面交通紧密耦合,其发展依赖于地面基础设施的建设,兼具有航空运输的计划性和地面共享交通按需响应的实时性。然而,已有的通用航空空中交通管理手段或地面道路交通管理方式均不能很好的应用于UAM管理当中,即便是各国正在构建的无人机空中交通管理框架(UAS Traffic Management, UTM)也仅针对120 m以下空域无人驾驶航空器,既不能覆盖UAM所涉及的空域范围,也不能完全满足UAM运行管理需求,因此,构建与UAM应用相适合的交通管理体系对城市低空运输产业发展具有重要意义<sup>[13]</sup>。

面向UAM的交通管理的根本目的是组织和保障UAM运行安全,促进城市空中运输的高效运行。在交通管理过程中,目标又可细分为3个层面:第1是从安全间隔的角度减少运行过程中的碰撞冲突,使得UAM运行事故率降低到一个可以接受的水平(近期达到驾车安全水平的2倍,远期接近运输航空安全水平)<sup>[2]</sup>;第2是效率,即通过优化空域结构和运行流程,缩短送达时间;第3是环保,即整个飞行过程能耗更省,排放更少,对地面居民噪音污染更小。

## 1.2 城市航空运输交通管理的历史阶段

回顾城市航空运输的起源及其不同时期交通管理的技术特点,我们将城市空中运输的发展分为以下3个阶段:

第1阶段为1947~1971年,洛杉矶航空公司和纽约航空公司用直升机进行城域之间的固定航线短途商业运输,运营量从1957年15.5万名增加到1967年的120万名乘客运输量<sup>[14]</sup>。除了固定航班,还有超过100余家运营商利用直升机作为“空中出租车”提供包机运输<sup>[15]</sup>。但1968年洛杉矶航空公司发生的两起直升机机械故障事故坠机造成了数十人死亡,1977年纽约航空发生直升机桨叶摔出坠落致行人一死一伤。两家代表性的航空公司各自事故发生后因停飞所导致的财务问题而终止运营,至此美国城市空中运输进入到一个低潮阶段<sup>[3]</sup>。这一阶段利用直升机运输的交通流密度低,

城市低空空域主要为非管制的报告空域,并未有充足的管制手段和专门的通信导航监视设施建设,航空器管理主要依赖于驾驶者之间的目视飞行间隔保持,面向城市空中运输的交通管理概念没有被大多数文献提及。

第2阶段兴起于2000年以后,NASA著名航空器设计师Mark Moore首次提出了面向个人的新型航空器(Personal Aerial Vehicles, PAV)概念,该类航空器使用定位为供人们在城市内部及其郊区短途通勤驾驶、价格低至个人家庭可支付水平的私人航空器<sup>[16]</sup>。基于上述类型航空器概念,来自NASA Langley研究中心的Joseph Chambers在其报告中对新型城市空中运输概念做出了具体表述,里面出现了市区内短途出行(Intra-urban short trips)的定义<sup>[17]</sup>。这一阶段面向城市空中载人运输的航空器更像是“飞行汽车”这一形象,它具有不同于传统直升机的新型气动布局,但仍需要有人驾驶。而与此同时,基于电力推进的轻小型无人机技术也正快速发展,低空空域的无人机交通管理系统框架被正式提出<sup>[18]</sup>,主要面向轻小型无人机提供120 m(约400英尺)以下低空空域动态使用、地理围栏、自动化的管制间隔等交通管理服务。

第3阶段为2015年至今(我们称之为UAM近未来阶段),它与第2阶段其实并无明显的时间界限划分,但一个重要标志是工业界真正开始投入到eVTOL载人航空器样机研发工作中,城市空中运输(UAM)、按需出行(On-demand Mobility)和eVTOL关键词被大量文献提及,尤其是近5年该研究领域正变得十分活跃。2016年,Uber在首届Elevate峰会上发布白皮书对城市空中运输系统的使用场景进行了重定义和展望<sup>[2]</sup>。NASA的UCAT团队提出了城市空中运输成熟度等级(UAM Maturity Levels, UML)模型<sup>[19]</sup>(图2),从载运具、空域、社区接受度3个方面将UAM未来发展阶段分成6个层级并指出了每一阶段所应面对的挑战。麻省理工学院(MIT)的研究者Vascik<sup>[20]</sup>指出空中交通管制将成为限制UAM规模进一步扩大的主要因素之一。除美国外,像巴西圣保罗这样交通拥堵并已拥有城域直升机运输网络的大型城市也开始转型探索基于eVTOL的城市低空运输模式<sup>[21]</sup>。一旦自动驾驶的空中载人运输应用得到验证并进入到规模化推广,传统的空中交通管制(Air

Traffic Control, ATC)手段和通航飞行规则将不再适用于UAM运行管理。UAM近未来阶段的交通管理会迎来一系列新问题, 例如: 城市低空空域应该如何面向UAM开发使用, UAM飞行规则如何设置, 地面基础设施如何建设, 开发什么样的通信导航监视技术(Communication, Navigation and Surveillance, CNS)才能满足空域信息场的覆盖和航空器环境感知的需求<sup>[22]</sup>, 应如何对UAM进行交通管制和流量调控, 如何与现有ATM或UTM管理体系保持兼容? 上述这些问题都是现阶段UAM交通管理相关研究正探索解决的。

### 1.3 影响UAM交通管理的技术因素

纵观城市空中运输的发展阶段, 我们必须明确的是空中交通管理的发展是以载运具转变为先导展开的。2020年5月, NASA在UAM基础上进一步提出先进空中运输 (Advanced Air Mobility, AAM) 概念<sup>[23]</sup>, 加大力度继续探索新型eVTOL载运具为核心的城市空中运输方式。就像当年也经历了数十年探索才最终确定直升机这种技术形态的载运具, 目前适合城市空中运输的

eVTOL载运具最终形态仍处于演进之中。但与当年直升机发展所不同的是, 以无人机为代表的现代民用航空器技术的蓬勃发展促使低空空域将同时存在着不同用途、不同等级和不同驾驶方式航空器融合运行的需求, eVTOL载人航空器的诞生面临着比直升机或其他传统通用航空器更为复杂的低空空域环境和城市地形起降条件, 因此, 研究如何革新现有的空中交通管理手段以保障eVTOL这一类新型载人航空器在城市空中运输场景下的运行安全其重要性不言而喻<sup>[20]</sup>。

讨论未来5~10年UAM所需的交通管理手段必然要明确这一阶段载运具的技术特征。相比于直升机, 现阶段eVTOL航空器概念主要强调基于电力推进的新型气动布局设计和无人驾驶这两方面技术转变: 第1, 引入电力推进技术将更方便设计出具有非常规空气动力学布局的航空器, 这将使载运具能够在城市等复杂地形条件下具备垂直起降能力并应用于空中交通运输领域<sup>[24]</sup>; 第2, 由于eVTOL续航有限, 载荷不大, 运营者更倾向远程机长驾驶系统(Remotely Pilot Air System, RPAS)或自动驾驶方式来将更多的载荷留给乘客。

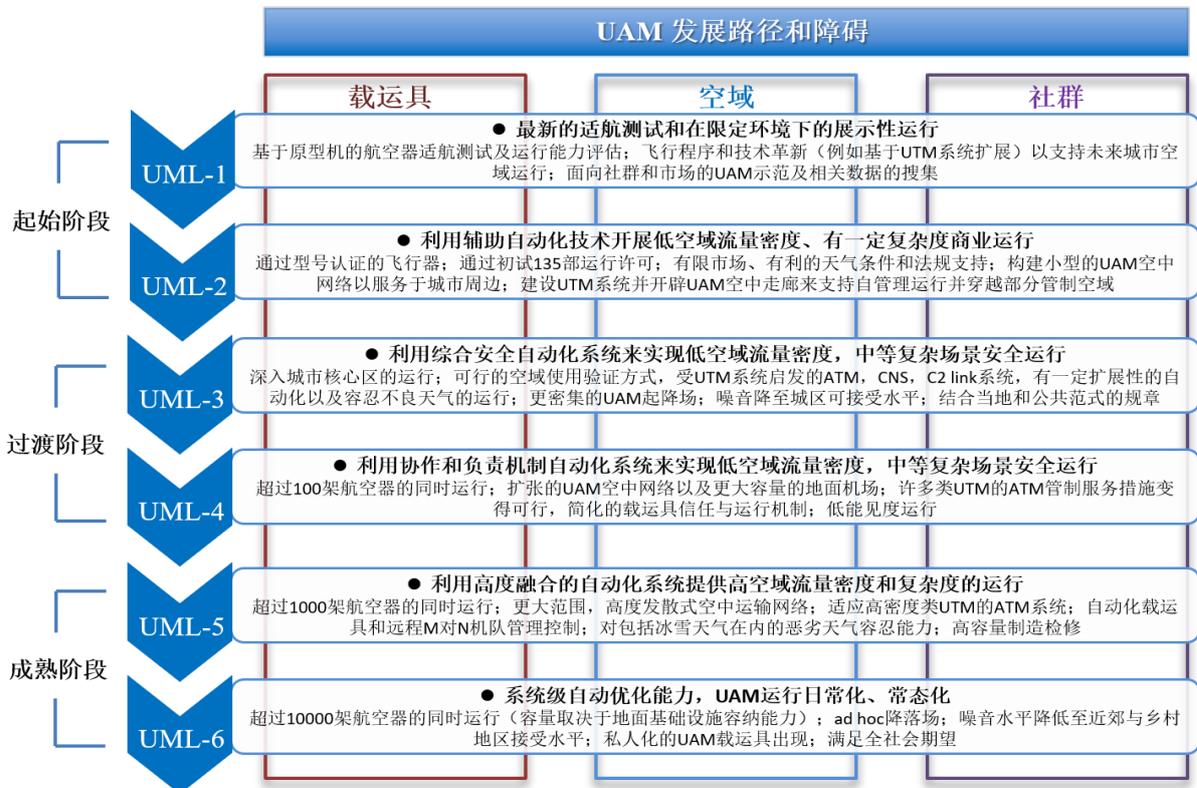


图 2 UAM成熟度模型<sup>[19]</sup>

Fig. 2 UAM maturity levels model

总的来说,这两方面的转变有利于简化航空器结构、减少运营中的人员成本、降低使用门槛,从而最终将UAM运营成本控制到可更大范围推广的水平。相比于城市道路交通,在城市低空空域运输的航空器不受复杂地面环境和随机行人干扰,解决冲突的运动自由度更高,在飞行中具有更少的环境不确定性和更多的避撞裕度,因此,也更适合发展自动驾驶技术<sup>[25]</sup>。

除了载运具的发展,UAM需要不同于现有运输航空的通信导航监视及自动化手段以保障交通管理的实施。从目前技术现状来看,ADS-B,GNSS和LTE/5G蜂窝网络等技术将最有可能满足小型无人机城市空域运行所需的CNS服务。George等<sup>[22]</sup>补充指出CNS局限性和布设密度成本将首先限制无人驾驶航空器所需的安全间隔控制能力,从而间接影响到我们对空域结构的使用方式,即UAM发展的初期仍然应以结构化方式而不是自由航线方式对空域进行划设和使用,因此,面向城市空域CNS技术的发展将与eVTOL技术水平共同决定现阶段UAM交通管理的方式和架构<sup>[26]</sup>。

#### 1.4 推动UAM发展的社会因素

除了技术变革的驱动,人类交通出行的变革离不开社会经济的发展,UAM概念的提出和世界城市化进程的发生密不可分。2016年联合国人居署发表报告指出,世界城市化进程已超过50%,其中有22个像纽约、上海这样人口规模的超大城市<sup>[27]</sup>。超大城市的扩张催生了城市周边卫星城的发展但也带来了交通拥堵、运输机场外迁等问题,人群和货流在这类大型城市中的运输时间显著增加。以中国北京为例,城市人口2 100万,日均约610万人选择公共交通出行,六环内平均通勤时间为56 min,平均通勤距离12.4 km<sup>[28]</sup>。在北美,洛杉矶市民每人每年平均花280 h往返于办公室和家之间<sup>[29-30]</sup>。这意味着陪伴家人时间不足,改善经济状况的工作时间减少,却将更多的收入用在汽车燃油上。人们改善出行舒适度,缩短通勤时间意愿正变得明显,倡导共享出行的Uber公司在2016年发布的白皮书中指出城市空中运输能够将人们通勤时间缩短5倍,并详细核算了城市空中运输服务的成本:“这一新兴交通服务收费标准

将有望在实际运营阶段降低至9元每公里,接近于Uber X服务价格”<sup>[2]</sup>。但同时,罗兰贝格的Stephan<sup>[8]</sup>也指出在UAM发展初期阶段首先使用的应该是高层次收入人群。且会倾向于UAM应用场景中非通勤的使用方式。

从能源和环保的角度来看,UAM所使用的eVTOL载运具提倡使用电力驱动方式,这使载运具在空中运行过程的碳排放量降低至近乎零的水平。但锂电模式存在能量密度不高的情况,以现在能量密度水平最高的三元锂电池(NCA)为例,其能量密度为 $300 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而传统汽油的这一数值为 $12\ 000 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[31]</sup>。这意味着锂电储能会占用更大的机身载荷来存储能源,这会影响到载运具的载客量和续航时间,也是目前eVTOL航空器实用性获得突破的主要限制。而反过来看,正是由于采用了电力作为机载储能和动力驱动方式<sup>[32]</sup>,eVTOL载运具可以更容易的做成分布式推进系统以减小单个桨叶尺寸,翼尖线速度更低,这意味着eVTOL航空器能够做到比直升机更低的气动噪声水平从而减少噪声污染,这是eVTOL载运具被推崇在城市上空使用的重要原因。

#### 1.5 面向新一代UAM交通管理的基本架构

基于上述技术水平发展情况和社会因素的推动,多篇文献对城市空中运输的应用场景进行了阐述,以载人为主的运输应用方式主要有3种<sup>[26]</sup>:第1种是服务于一定规律人口流动的固定班期(By-schedule)公共运输,例如城市早晚高峰期间市区与郊区间的通勤;第2种是由统一平台运营的,按需响应(On-Demand)“空中出租(Air Taxi)”和“共享拼机(Riding-Share)”形式的出行服务;第3种是乘坐所有权归属个人的航空器(Personal Aerial Vehicles)出行。产业界实践方面,国内亿航公司的EHang216飞行器所设计面向的运营模式更类似于上述第二种,目前中国民用航空局适航审定司已发布指导意见支持亿航、迅蚁等公司探索城市空域载人和物流无人机的适航审定<sup>[33]</sup>。

虽然UAM交通管理模式尚未明确,但我们借鉴国内现有的民航运输体系,提出了一种可能的UAM交通管理基本框架。如图3所示,城市空中运输的关系中应有4种角色:第1,政府交通管理部门,负责对整个行业进行宏观性管理和监察,

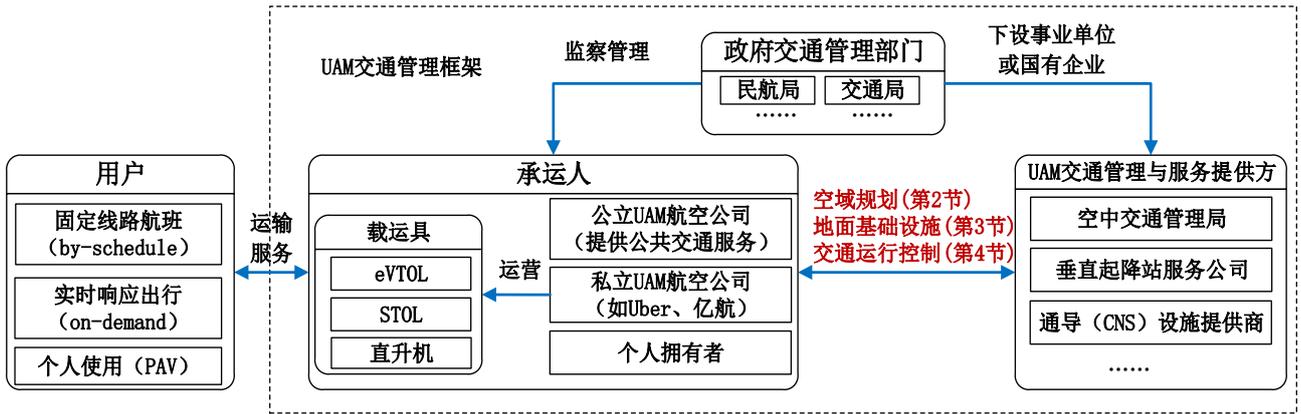


图 3 UAM交通管理基本框架

Fig. 3 Basic Framework of UAM Traffic Management

制订法律规章制度, 并间接通过下设的事业单位或国有企业对城市UAM执行具体管理; 第2, 空中交通管理服务提供方, 是交通管理工作的具体执行者, 主要负责空域规划、地面基础设施管理与保障、交通运行与管制服务等; 第3, 承运人或航空器个人拥有者, 利用载运具从事空中运输经营活动或个人交通使用, 需接受空中交通管理方的管理服务; 第4, 用户, 购买使用承运人提供的具体运输服务, 不在空中交通管理主要框架之内。本文后续2~4节讨论的UAM交通管理三方面问题(空域规划、地面基础设施、交通规则与运行控制)主要存在于承运人和交通管理服务提供方之间。

## 2 空域规划

### 2.1 空域范围

城市空中运输在以应用示范为目标的初期阶段, 空域划设将被要求与现有民航空域分类标准保持一致。如图4所示, 美国联邦航空管理局 (FAA)将空域分为6级, UAM起始地、目的地城区附近有不同大小的运输航空或通用航空机场而被归于B、C、D级空域<sup>[34]</sup>, 而与运输航空所使用的A级空域没有交集。Parker等<sup>[35]</sup>认为E、G空域高度较低, 在此空域运行的eVTOL可以不接受运输航空ATC的分离和航向规划服务, 适用于能高度自主飞行的eVTOL载运具的运行。城市低空空域的划设还需考虑与地面高层建筑的最小水平间隔、部分禁飞保护区(重要政治建筑、运输机场)等因素的限制, Jungwoo等<sup>[36-37]</sup>提出了一种基于可变参数拓扑学方法的城市三维空域可用性评价体系, 该方法考虑了地面楼宇对城市低空空域的影响, 为灵活定义和找到城市低空可用空域边界

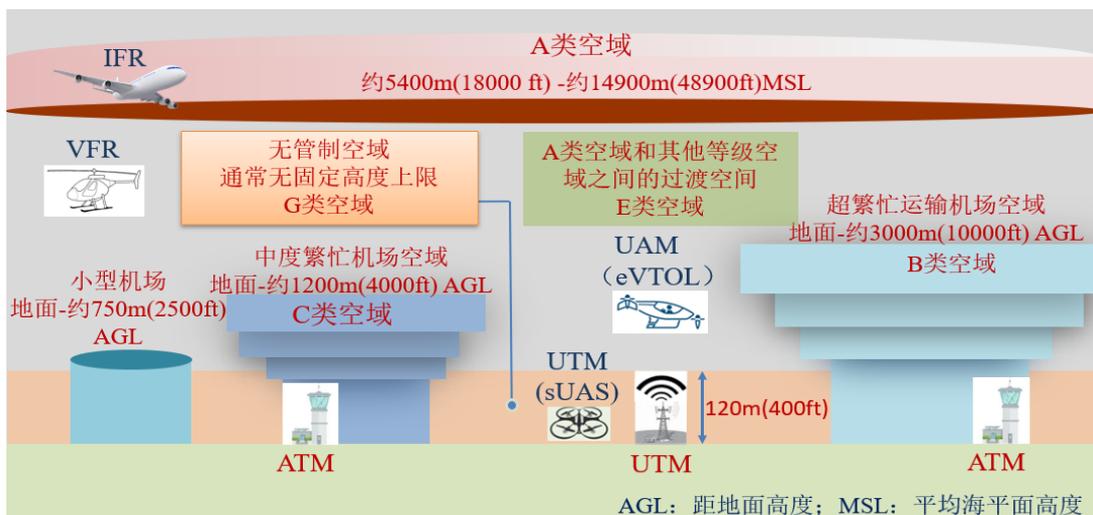


图 4 空域分级

Fig. 4 Classification of Airspace

提供了一种解决思路。面向未来城市空中载人运输这一愿景,空中客车公司<sup>[4]</sup>和巴西航空工业公司<sup>[5]</sup>在其各自最新的技术报告中对属于城市空中运输管理的新模式进行了定义,考虑到未来UAM运输规模增长,两份报告都认同需要分配比UTM更大的空域空间用于UAM运行,即城市区域载人eVTOL航空器可以爬升超过现有UTM边界,在120 m(400英尺)以上的空间进行巡航。上述空域划设的构想可以减少载人eVTOL和近地面轻小型无人机(drones)冲突,但在进近和起飞阶段,eVTOL不可避免的存在与轻小型无人机共用空域的情况。为保障载人eVTOL航空器与轻小型无人机共用空域融合运行的安全,NASA提出拓展UTM系统功能的设想,考虑对120 m以上高度进行类UTM空域管理,将对象拓展至通用航空和UAM<sup>[34]</sup>,以克服当下城市低空空域不同类型航空器完全隔离运行的障碍,提高对低空空域的整合利用。

## 2.2 空域结构与航路划设

空域范围确定后,UAM还需更进一步讨论应该选择类似运输航空的结构化空域(Structured Airspace)还是非结构化的自由飞行(Free Flight)方式对空域进行使用?NASA团队在其UML模型中提出在UAM发展的近未来阶段(UML-2),将以开辟空中走廊(Corridors)的结构化方式来使用空域,并预测达到成熟阶段(UML-5),一座城市将会在典型的30~40 n mile直径范围内容纳超过1000架eVTOL航空器穿梭运行,空域密度会达到现目前实施仪表飞行规则空域最大容量的400倍<sup>[34]</sup>。在如此高空域密度要求下,现有直升机航线网络即使采用目视飞行标准也无法满足未来UAM运输量需求,因此,Zhu<sup>[38-39]</sup>提出一种面向城市空中出行的无冲突航线预规划方法,借鉴UTM中动态地理围栏概念对空域进行按需占用,能有效提高城市低空空域的使用率。欧洲方面由代尔夫特理工大学(TU Delft)、荷兰国家航空实验室(NLR)、法国国立民航大学(ENAC)共同组成的Metropolis项目组<sup>[40-44]</sup>针对PAV(eVTOL概念的前身)和UAV航空器在城市空域运行的概念提出了非结构化空域(Full Mix)运行概念和3种结构化空域(Layers, Zones, Tubes)使用设想,讨论了不同空域航路结

构与极限交通流密度的关系<sup>[42]</sup>,分析得出了影响空域容量的重要因素<sup>[43]</sup>,并采用快实时仿真手段对上述问题进行验证,得出两点重要结论<sup>[44]</sup>:第一,由于城市空中运输的需求发起随机性较强,对空域水平方向过度结构化的路径设置会制约空域容量的提高;第二,将不同飞行航向的航空器垂直分离能够通过减少同一高度层中航空器之间的相对速度来提高交通效率。

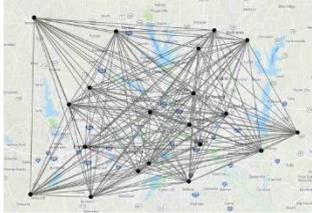
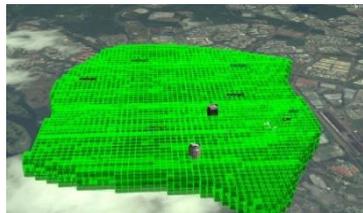
尽管上述研究结论指出水平航路划设会限制空域容量,但在eVTOL载人运输出现的近未来阶段,交通管理所需的通信导航监视技术存在滞后性,将限制对城市空域的全面覆盖,因此,有必要设置结构化的可飞空域来限定航空器的飞行范围,这可以最大限度保证eVTOL航空器运行安全<sup>[24]</sup>。不同于地面铺装道路交通需要大量建设维护,UAM空中航路设置是灵活而立体的。灵活是指UAM的航路设置可以随eVTOL载运具技术水平和交通管理手段的进步动态调整;立体则是指UAM的航路设置会更多的与地形空间耦合,从水平和垂直多维度进行划设:

### (1) 水平航路结构设置

UAM与UTM最重要的一个区别是eVTOL航空器的飞行线路必须以固定位置的垂直起降机场(Vertiport)为起止点,且飞行特性上来说轻型eVTOL航空器更像是一种新型直升机,因此,UAM初始运行阶段会与一些大都市区(例如Dallas DFW区域)保有的直升机运营网络存在相似性甚至是复用性<sup>[45]</sup>。在空域条件允许且交通密度较小的情况下,可以选择机坪到机坪的直达航路划设方式,短直航路设置既节约能耗,也更能发挥eVTOL快于其他城市交通载运具的时间优势。如表1方式一所示,仅达拉斯大都会区(DFW Metroplex)20个直升机机坪间就可以建立190条直线航线网络,航路在空域水平面之内将存在大量交汇冲突点,并且航线双向使用存在着航空器对头相撞的风险,需要配合高度层划分消除潜在风险。如表1中方式2所示,南洋理工大学研究团队<sup>[46]</sup>提到要利用城市现有基础设施(如地面路网、屋顶上空)或已有的自然区域(河道、林地)进行空中航路设置规划。引入上述结构化的航路有助于将航空器数量增多而造成的空中冲突概率控制在多项式级数增长,同时减少航空器事故坠落

表 1 城市低空空域水平航路结构设置方式

Table 1 Horizontal Route Planning for Low-altitude Urban Airspace

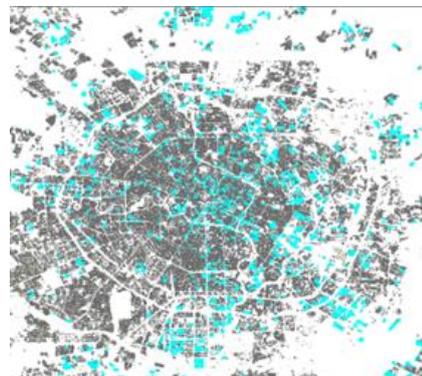
	 方式 1: 交通枢纽为中心的放射式航路规划[45]	 方式 2: 结合现有城市基础设施的航路规划[46]	 方式 3: 基于可用空域网格(AirMatrix)的航路规划[46]
适用场景	UAM 试运行阶段城市中有高频次交通需要的两节点之间进行运输, 如城市候机厅到机场/市区到卫星城的快速通勤	中等运行规模, 高安全要求的应用场景, 如已经进入试点运行阶段的空中出租车, 微小型 eVTOL 的物流配送	已达到成熟运输阶段的 UAM 运行, 按需生成路径起始节点与目的节点之间的路径并对所需空间栅格进行结构化占用, 适合个人 eVTOL 推广普及阶段
优势	路径固定, 容易设计运行规则, 从路径结构上容易实现系统整体安全性	可配合中心式运输管理系统提高载运具运行速度和效率, 减小冲突次数, 减少飞过人员活动区域上空的概率	对空域使用更为灵活, 提高了空域利用率, 可以实现门到门式的空中路径规划
弊端	不能完全满足点到点运输需要, 航线需占用多个高度层, 对空域利用不够	空域容量有所提高, 但仍处于相对较低水平, 因为空中飞行的安全间隔远比地面道路上车辆间隔更大, 基于该航路飞行的路径通常都不是最短路径	冲突概率随空域密度增大成指数式增长, 对空中交通避撞技术提出了巨大挑战

后造成对地面人员二次伤害的概率<sup>[13]</sup>, 但这种过于简单直接复制地面路网的空中航路划设方式浪费了大量可飞空域, 不利于体现出UAM点到点直达的优势。如表1中方式3所示, Salleh等<sup>[46]</sup>提出了一种基于空域网格化(AirMatrix)的动态路径划设方式, 该方式能够满足更大的空域容量和交通吞吐量需求, 但它要求对整个空域航路分配采用中央指挥控制平台, 需要高度自动化和鲁棒的都市空中交通管理系统进行统一调度, 现有通信导航监视与空管自动化技术水平无法满足其要求。

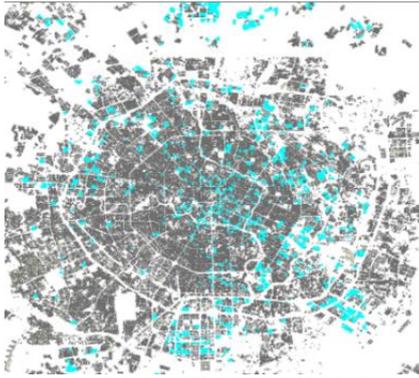
(2) 高度层设置

首先, 由于UAM航空活动与地面建筑区域相互影响制约, 因此, 在高度层设置上应首先解决eVTOL最低巡航高度问题。Johnson等<sup>[19]</sup>指出UAM航空器噪音水平将成为确定航空器最低飞行高度的主要因素。Arntzen等<sup>[47]</sup>给出了针对城市空中运输噪声水平和衰减的计算方法, 并比较了Metropolis项目组中4种不同的空域航路结构设想下的交通流噪声水平, 特别提出城市空中运输可接受噪音标准, 即航空器距地面250英尺(约80米)高度时, 到达地面的噪音水平不高于67 dB。除了噪声因素, 在最低巡航高度选取上航空器还需保持对地面大部分障碍物的安全超障高度。如图5所示, 我们以成都市为例分析城市楼宇高度

分布, 其中蓝色部分区域为超出对应高度层阈值的建筑物区域。通过对比, 我们可以得到两个结论: 第一, 即使是在超大城市, 其主要城市区域的大部分楼层高低于15层(约50 m), 这为城市低空空域运行留出了较为广阔的空间。第二, 城市中心区域的高层建筑物很大一部分都超过了25层(约80 m), 因此, 从能耗和续航的角度考虑, eVTOL航空器没必要选择超过城市里所有建筑物高度的飞行高度层作为最低巡航高度, 而只需要在满足噪音要求、安全超障和能耗最优之间选择一个最低高度值对少部分超高建筑从侧向上进行绕飞即可。



(a) 超过 15 层建筑物区域分布



(b) 超过 25 层建筑物区域分布

图 5 成都市楼宇高度分布

Fig. 5 Building height distribution in Chengdu City

其次，需要确定航空器航路的高度分层，Sunil等<sup>[42]</sup>指出分高度层空域(Layered-Airspace)结构在安全性上表现最佳，即航空器的巡航高度层应关联航路方向进行设置。如图6所示，Metropolis项目组所考虑的Layers模型为每300 ft（约100 m）一个高度层，每个高度层对应45° 航向角范围，这种方法<sup>[44]</sup>能减小同一高度层航空器之间的相对速度，提高直飞航线效率，降低平面飞行的冲突。Hoekstra等<sup>[48]</sup>进一步结合仿真方法论述了这种高度分层方式中不同参数对空域容量和安全程度的影响，对应一个高度层的航向范围区间越窄，越有利于降低同一平面冲突概率，但一个高度层对应的航向区间也不宜过窄，因为这会使得城市空中具有潮汐特性的交通流（如早晚通勤高峰）集中在某一高度层而导致对其他高度层使用不够均衡。并且从降低能耗和缩短运输时间的角度出发，城市短途运输不宜让eVTOL航空器爬升过高，Metropolis项目组提出的300 ft（约90 m）安全高度间隔（运输航空的标准）用于城市低空空域划设不够精细，有必要在后续研究中探讨适合eVTOL航空器的最小安全高度层设置，基于航空器碰撞模型、高度传感器误差模型、导航系统精度和城市气象条件等因素对缩减eVTOL低空巡航高度层的极值进行探索和验证。

### 2.3 空域容量

空域容量是评价空域管理水平的重要指标，在UAM近未来阶段后续发展中，空域范围、航路结构和技术手段都将共同作用于空域容量的大小。如图7所示，Mueller<sup>[34]</sup>给出了UAM发展过程中空域容量增长的技术路线图，在eVTOL投入实

际运行的近未来阶段，主要需通过发展新的通信导航监视技术来覆盖更多的城市低空空域从而实现航空器运行数量的增长；而在UAM向高密度运行发展的过程中，则需要更高水平感知避撞技术来实现更小的运行间隔标准，在有限空间内容纳更多航空器，从而提高空域容量。

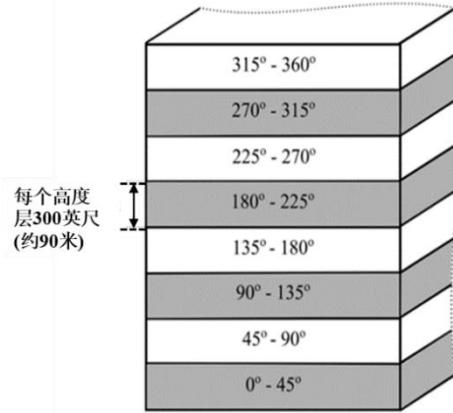


图 6 高度层-空域模型 [44]

Fig. 6 Layers-airspace Model

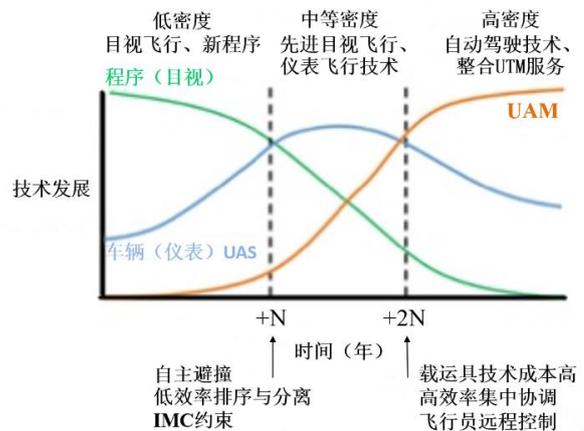


图 7 UAM空域容量增长路线图<sup>[34]</sup>

Fig. 7 UAM Airspace Capacity Growth Roadmap

在UAM发展的近未来阶段（2020~2030年），空域容量和飞行需求矛盾不会立刻凸显，这一阶段城市上空运行的航空器相对稀少，例如通用航空直升机在城市低空飞行时仅通过ADS-B监视和VHF陆空通话等传统通导技术手段就能实现空中交通管制。但新型eVTOL中EHang216这样一类选择自动驾驶技术路线的航空器的出现对低空空域交通管制技术提出了极大的挑战。目前EHang216已开展载人或空载试飞累计2000余次。因为选择运营商4G网络作为其地空数据链提供地

空通信和监视, EHang216航空器航线试飞只能尽量选择在低空4G信号覆盖较好的高度范围内进行,这限制了UAM对城市400 ft以上空域的开发和使用。另一方面,主动雷达监视技术的局限性和布设密度成本过高又很难对城市复杂地形条件下的空域进行全面多重覆盖<sup>[22]</sup>,因此,只能通过水平结构化的空域路径设置来将航路冲突位置限定在有限数量节点处。这样的处置方式虽然降低了对eVTOL航空器避撞技术要求,但也会进一步降低空域利用率,限制空域容量的增长。

当UAM发展到更为成熟的阶段(预计2030~2050年),UAM将有望提供门到门运输服务,运行线路也会变得更加个性化和多样化<sup>[49-50]</sup>,在这一阶段,Salleh等<sup>[46]</sup>所提出的与交通密度需求相适应的城市空域管理(Adaptive Urban Airspace Management, AdUrAM)模式不失为一种新思路。对空域利用更加灵活充分的自由飞行会部分替代结构化的空域使用,eVTOL航空器需要完备的环境感知和冲突避撞能力来帮助实现自由飞行<sup>[51-52]</sup>,从而使同样的空间内能容纳更多的eVTOL航空器。Yang等<sup>[53-54]</sup>以空客Vahana这一具体机型为例研究了自由飞行空域的eVTOL航空器自主避撞问题,提出了基于马尔科夫决策过程建模和蒙特卡洛树搜索求解的避撞技术,并通过仿真方式探讨了应用该算法后能够实现的极限空域容量。

### 3 地面基础设施

#### 3.1 垂直起降站

地面基础设施(Ground Infrastructure)也是UAM交通管理中重要组成部分<sup>[29]</sup>,也是影响UAM空域形态的重要因素。UAM交通管理所使用的陆侧设施资源主要分为2个部分:垂直起降机场(Vertiport)和通信导航监视地面基站。本小节将首先讨论对垂直起降机场的交通管理工作。

##### (1) UAM垂直起降机场选址

垂直起降机场或垂直起降站是城市空中运输网络的关键节点,它们的选址会反向作用于空中交通航线网络的发展与形成,属于广义交通管理的范畴。Holden等<sup>[2]</sup>在Uber白皮书中提出了面向eVTOL航空器垂直起降机场选址、交通流模拟等问题,预测了UAM将会以多式联运和站点拼车

形式出现,这意味着站点选址将会成为UAM早期交通管理中的关键。而影响UAM站点选址的因素是多方面的,Vascik等<sup>[29]</sup>指出对Vertiport选址影响最大的因素仍然是噪声水平。NASA研究人员提出UAM系统中的基础设施应与现有地面交通设施结合使用,eVTOL登机站可以在火车站等重要交通枢纽处,也可以是建筑物顶层、直升机场等已有基础设施处,这有利于降低前期基础设施建设成本。Fu等<sup>[55]</sup>以问卷形式调查了慕尼黑地区人群的潜在出行需求,并从交通需求发生角度进行UAM垂直起降站选址研究,基于交通仿真软件MATSim对UAM这一新兴交通方式实现了建模与分析<sup>[56]</sup>。Fadhil<sup>[57]</sup>针对选址问题提出了一种基于地理信息系统技术筛选的层次分析方法,综合人口密度、中位数收入、写字楼租金水平、兴趣点(POI)数量等因素进行UAM站点选址分析,可为选址实际操作提供参考和借鉴。

##### (2) UAM地面运行管理

由于UAM垂直起降站场面结构相对简单,因此,其交通管理问题主要集中在容量设计和起降流程优化上。借鉴现有直升机起降场(Heliport)设计思路,Vascik等<sup>[58]</sup>在其报告中提出了将城市空中交通的机场场面区域简化为起降区(TLOF Pads),登机口(Gates),停机位(Staging Stands)3类区域,首次给出了垂直起降站场面运行详细流程(图8),并基于整数规划方法构建了垂直起降机场容量包线模型(Vertiport Capacity Envelope)(图9)。Vertiport场面区域及其接地离地区域(TLOF)同样属于陆侧交通管理范畴,这要求预想的进出路径中存在无障碍的下滑角,即垂直起降场地点四周不能有高层建筑。而在亿航216航空器的试飞实践中,航空器在接地前有一段垂直爬升下降阶段,这大大降低了对垂直起降站周边障碍物高度进行管理的要求,符合在城市低空空域使用的实际情况。

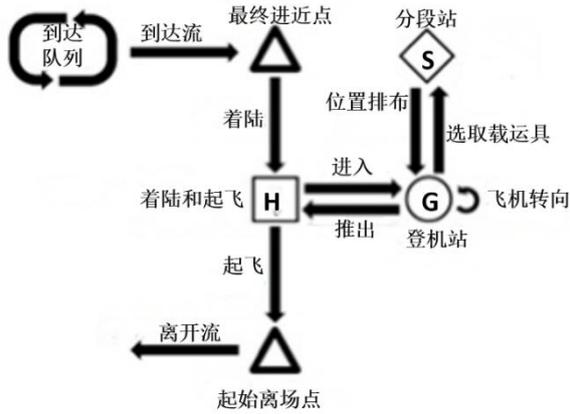


图 8 垂直起降机场场面运行管理<sup>[58]</sup>

Fig. 8 Surface Operation Management of Vertiport

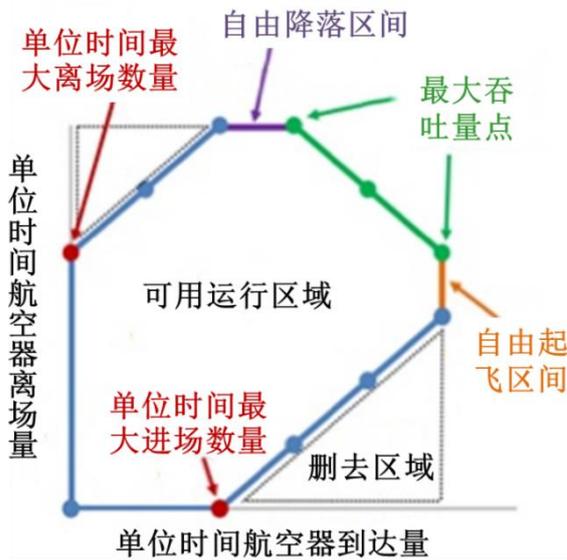


图 9 垂直起降机场场面容量包线模型<sup>[58]</sup>

Fig. 9 Envelope Model of Vertiport Capacity

### 3.2 通信导航监视设施

地面通信导航监视设施作为UAM的重要组成部分，负责为UAM交通运行管理提供技术保障。与运输航空相比，UAM需要航空器在更高密度交通流和复杂城市地形环境下运行，eVTOL航空器驾驶方式会逐渐无人化，地面通信导航监视系统提供服务的形式也将随之发生转变，由地面管制员对飞行员提供间隔管制服务转变为地面人员利用地面通信导航监视设施和中央控制系统对航空器提供全自动化制导服务。

上述地面通信导航监视设施服务形式转变对地面通信导航监视基站的信号连续性、有效性

（监视覆盖范围）、实时性（通信延时）、可靠性（平均连续无故障时间）等关键指标均提出了更高的要求。运输航空使用的ACARS或甚高频地空数据通信链路带宽很小（传输速率约32 kb，半双工工作模式），会因为过大的通信延迟无法应用于UAM领域<sup>[59]</sup>。而如表2所示，5G通信技术的出现将可能成为解决上述问题的关键<sup>[60]</sup>。但针对地面移动电话蜂窝网络布设的5G地面通信基站并不足以保证对空域的覆盖。UAM运行需要有针对性的改进地面基站选址和天线布设（例如调整天线辐射方向，发射功率和信号增益等），从而实现城市低空空域的多重完整覆盖。

表 2 运输航空与UAM所需通信导航监视设备对比

Table 2 Comparison of CNS Infrastructures required by Civil Air Transportation and UAM

	民航运输航空	城市空中运输
通信服务	地面甚高频发射机提供VHF陆空通话、ACARS甚高频地空数据通信链路	地面基站提供5G通信网络（数字信号）、机载Ad-hoc网络
导航服务	VOR/DME/NDB导航台站提供无线电导航，ILS提供降落引导，GNSS/IMU提供组合导航	GNSS/IMU组合导航、城域空间高分辨率3D高程地图服务，基于通信基站的定位和路径规划服务、在线视觉识别辅助定位
监视服务	一次雷达、二次雷达监视、ADS-B	基于地面5G通信链路的中心交换合作相关监视、基于机载Ad-hoc网络的空-空监视
管制服务	管制员指挥的雷达管制、程序管制（航路、进近、机场等区域）	自主飞行/接受地面控制中心统一指令调度；人工负责监视和应急处置
飞行情报	提供ATS自动情报通报服务，通报信息包括机场本场和航路气象条件	全空域流量信息，Vertiport机位状态，城域空间精细化气象信息，航路上的尾流信息
告警服务	当航空器处紧急状况时，由管制单位对空域进行告警服务、基于二次模式应答机代码的告警	通过5G网络的全空域告警，当自动运行的航空器出现故障时机载设备主动广播

从故障管理的角度考虑，地面中心化指挥控制平台仍存在出现失效的可能，这将使得UAM高密度运行面临巨大风险，Gupta等<sup>[61]</sup>讨论了面向无人机应用的多跳无中心自组织Ad-hoc网络特性，该分布式网络更倾向于航空器完成无中心指挥情况下的局部区域自组网交通避撞，可以作为中心式空管失效情况下的一种有效补充。在这一过程中，UAM载运具在运行的同时其本身也会成为整个交通系统的探测传感器和通信网络节点

[1], 机载电子信息系统最终将会与地面通信导航监视系统实现一致性共享(空地协同自动化或空地物联网)。

### 4 交通规则与运行控制

#### 4.1 UAM交通规则

本文在第2、3节中分别讨论了UAM所需使用的空域和地面基础设施。但城市空中运输的核心业务仍是对载运具的运行管理, 针对这一问题, 第4节将从空中交通规则、空中交通管制与流量控制、签派运行管理3个方面展开讨论。首先讨论UAM所需的交通规则。

UAM交通规则与空中交通管制的方法紧密耦合, 相互作用, 空域的划设是空中交通规则的前置条件。通过引入统一交通规则, 提高航空器运输行为的一致性将会使UAM运行控制变得更加高效安全。如表3所示, Mueller<sup>[34]</sup>对比分析了

表 3 现有空中交通规则应用于UAM的比较<sup>[34]</sup>

Table 3 Comparison of Existing Air Traffic Rules

Applied to UAM

规则类型	目视飞行规则(VFR)	仪表飞行规则(IFR)	无人驾驶空中交通规则(UTM)
优点	在现代 ATC 管制体系中拥有最大程度自由度	能够支持更多气象和时段条件下的运行	能够支持低空空域更高容量的运行密度
缺点	对气象条件要求较高、空域容量小, 不能夜间运行	主要针对人在环路的管理模式, 容量可扩展性较弱	暂不考虑 UAM 在 120m 以上空域范围的运行需求, 技术手段和规则仍处于研究中

目视飞行规则(VFR)、仪表飞行规则(IFR)到UTM规则应用于UAM的优势和不足, 并指出自动驾驶是实现UAM在低空空域高密度融合运行的关键。针对自动驾驶和远程机长(Pilot-in-Command)驾驶形式, Mueller<sup>[34]</sup>还提出了路径交汇点处的避让规则和基于机载设备水平的空域准入规则。MITRE机构的Brock等人更为务实的讨论了在不影响现有ATC体系和正在发展的UTM体系前提下, UAM融入空域所应增加的一些规则, 提出了增强目视规则(Augmented VFR)和动态分配走廊(Dynamic Delegated Corridors, DDC)概念, 这类规则主要针对航空器在120 m以上空域运行情形, 且航空器应基于机载装备性能运行(Performance-

Based Operation)规则来控制与其他航空器之间的间隔。由此可见, 现阶段制订UAM交通规则的难点在于: eVTOL厂商所生产的航空器气动布局性能差异较大, 机载设备要求并未统一, 驾驶方式尚未达成共识<sup>[11]</sup>。

#### 4.2 空中交通管制与流量控制

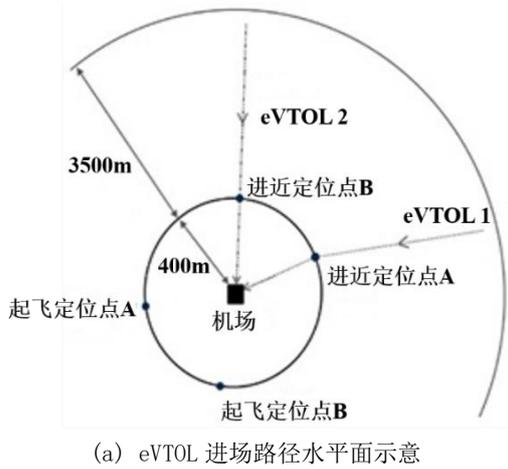
在中国现有民用航空体系下, 空中交通管制工作主要由各地区空中交通管理局(负责航路、进近、塔台)和机场管制部门(负责场面管制)共同完成, 其主要职责是利用通信导航监视手段对航行活动进行调控, 保证航行活动安全高效有序。对于UAM而言, 应用于管制和空中流量控制的技术手段会领先于运输航空, 但其根本目的是与运输航空一致的。根据UAM所需空中交通管制手段的宏观和微观属性、调控提前时间量不同将其划分为战术交通控制(Tactical Traffic Control)和战略交通管制(Strategrical Traffic Control)。

##### (1) 战术交通管制

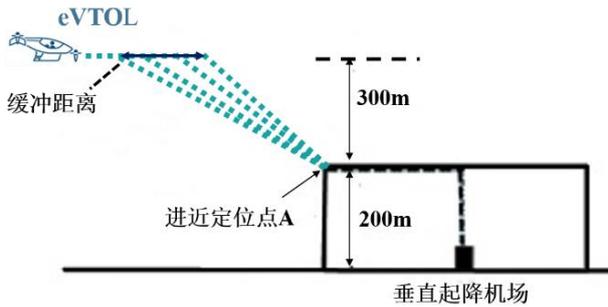
UAM中的战术交通管理可类比于运输航空空中交通管制, 是以保障安全间隔, 提高运行效率为主要目的实时交通控制。这一过程中自动化程度更高的C2(Command and Control)数据链路能够消除人在环路语音指挥方式的指令延时和信息传递偏差, 从而应对UAM所需更小间隔的运行需求。

运输航空基于监视数据对航空器飞行过程中的每一架航空器进行合理的指令控制和轨迹优化, 可以采取的手段通常有雷达引导排序、速度控制、高度控制、空中等待。与之类似, UAM在结构化空域设计中, 城市空域中垂直起降机场(Vertiport)起降空域通常会为众多航线汇聚点, 具有流量密集特性并存在冲突风险。Pradeep等<sup>[62]</sup>针对UAM在该区域的最终进近着陆过程, 提出了插入局部搜索(Insertion and Local Search)算法。该算法基于混合整数线性规划(MILP)模型和时间优先(TA)策略来保障城市空域中eVTOL航空器请求到达时间内能顺利降落。如图10展示的eVTOL进场运行方式所示, Kleinbekman等<sup>[63]</sup>设定了航路(En-route)到起始进近定位点(Approach Fix)这一区间的航路结构, 并基于混合整数线性规划方法,

在剩余电池充电状态和起降场容量限制条件下计算出最优要求到达时间以优化UAM进近排序。但是，上述两篇文献并未综合考虑航空器离场对垂直机场上空进近空域的共用情况，使这类方法应用于实际时存在局限性。



(a) eVTOL 进场路径水平面示意



(b) 侧视图-eVTOL 进场下降剖面

图 10 eVTOL航空器进场运行概念<sup>[63]</sup>

Fig. 10 Operation Concept of eVTOL Arrivals at a Vertiport

此外，由于近年来人工智能技术在计算决策领域取得了巨大的成功<sup>[64]</sup>，部分研究也开始尝试采用人工智能的技术来实现城市空域中的排序与间隔管理。Brittain等<sup>[65]</sup>利用深度学习与强化学习技术(DQN)对无人机进入Vertiport的排序与间隔管理进行了应用研究。其仿真试验证明，通过DQN网络的自主学习可以对多架航空器的排序间隔管理实现安全决策。但是，人工智能方法应用于空中交通流排序与间隔管理的鲁棒性还有待进一步提高。为解决众多空中交通避障方法没有统一测试标准的问题，Min等<sup>[66]</sup>针对城市空域场景设计了仿真测试平台(Fe3)，以完成各避撞算法在城市低空密集交通流中的性能比较。

(2) 战略流量调控

UAM战略交通管制可类比于运输航空中交通流量管理(Air Traffic Flow Management, ATFM)，目标是解决城市空中容量与实际交通流量不平衡问题<sup>[67]</sup>。但城市空中运输的服务提供模式更加倾向于按需响应(On-Demand)，eVTOL单次航程时间短(典型任务时间是20 min)，飞行路线随机性强，机场起降频次更高，不能像运输航空一样提前一天做好次日航班计划。可以预见的是，UAM战略交通调控中有2个关键问题需要解决：第一，如何提前找到空域中流量瓶颈区域；第二，采用何种拥塞管理手段以减少容流不平衡带来的延误，提高UAM运行效率。在调控手段方面，MIT的Odoni团队提出了地面延误等待程序(Ground Delay Program, GDP)为主的流量管理策略<sup>[68]</sup>。运输航空航空器在地面等待比在空中更省油也更安全，这类方法对于eVTOL续航时间普遍不长的UAM同样适用。另一种方法是通过路径重规划的方式来减小城市空中某区域的流量压力，相关代表性的研究成果是Zhu<sup>[69,70]</sup>和Hoffman<sup>[71]</sup>等提出的协同航迹选择程序(Collaborative Trajectory Options Program, CTOP)。该方法能够自动应对天气等因素造成的局部容量下降所造成的容流不平衡。上述两类方法(GDP、CTOP)已成熟应用于运输航空领域，也为未来UAM战略交通调控的研究探索提供了参考。随着城市低空空域航空器数量逐步增多，我们相信战略性的流量管理在UAM领域研究和应用价值将会逐渐凸显。

4.3 签派运行管理

签派运行管理是指航空承运人(航空公司)在遵守交通管制条件下，对单架次航班进行的运行管理工作，它的目标代表了承运人的利益，即以提高服务质量和经济效益、保证航班正常为目的。UAM的签派管理工作与所使用的航空器性能密切相关，根据Silva等<sup>[72]</sup>对研制或已经接近产品阶段的eVTOL航空器的调研情况，它们共同点是受限于锂电池能量密度和热失控的风险，多数续航时间和运输半径较短，垂直起降和悬停状态耗电量远大于其水平前飞的巡航状态，因此，如何通过优化飞行剖面而实现较优的能量管理是

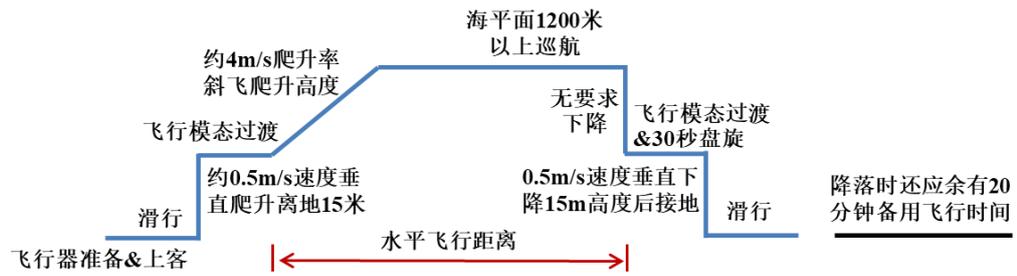


图 11 UAM典型任务的飞行剖面<sup>[72]</sup>

Fig. 11 Typical Flight Profile of UAM Mission

UAM签派运行中一个重要目标。

在实际运行中，现阶段eVTOL载运具环境感知和避障能力仍有欠缺，EHang216等航空器多采取“倒U型航线”以避免与地形障碍物相撞。但这种飞行策略会使航空器在垂直爬升下降阶段耗时过长，从而不利于节省能耗。如图11所示，Silva等<sup>[72]</sup>给出了一种典型的eVTOL航空器任务剖面，提出了先垂直爬升至地面高度之上(Above Ground Level, AGL)，然后斜飞爬升至巡航高度的运行方式。该方案通过缩短垂直爬升航段时间节省了能耗，同时也缩短了总任务执行时间。如图12所示，Priyank<sup>[73-74]</sup>以Ehang184和Airbus Vahana两种不同气动布局无人机为例，结合无人机实际性能研究了UAM进近过程中的最优能耗下滑剖面选择问题，也论证了UAM运行管理的研究价值。

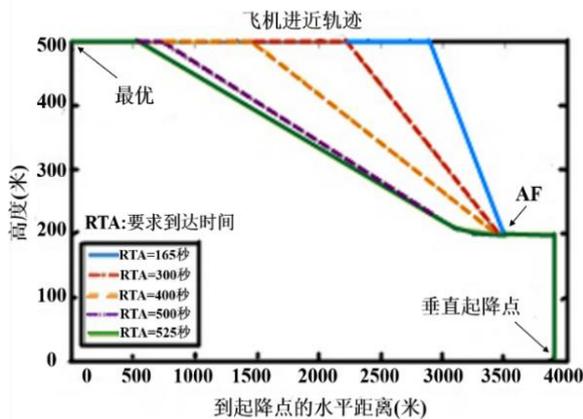


图 12 eVTOL航空器进近下滑剖面优化

Fig. 12 Optimization of eVTOL Approach Flight Profile

### 5 结论与展望

#### 5.1 关键问题

城市空中运输打开了一个全新的交通运输视

角，要厘清城市空中运输交通管理中的关键问题，仅仅沿用传统ATM空中交通管理问题分类来概括UAM的交通管理是不太合适的，应当采用新的问题框架。如图13所示，我们在传统运输航空交通管理的问题分类基础上做了调整，对比了UAM和ATM的问题框架，其中UAM空域规划和地面设施的管理之间将产生更紧密的联系并共同服务于UAM的运行过程，空地协同的管理方式将成为应对UAM高密度、融合化运行挑战的最好手段<sup>[75]</sup>。因此，我们依照UAM新的问题框架从3个方面对关键科学与技术问题进行总结和讨论。

第一方面，空侧管理。UAM空域管理是打开城市空中运输空间的首要环节，现有研究尝试讨论eVTOL载人运输融入国家空域体系的具体实施路径，这一过程中存在着以下几个关键问题：

(1) UAM运行所使用的空域边界到底在哪里？对于这一问题我们必须深入分析UAM、UTM、传统通用航空及ATM管制下各类载运具运行特点，明确运行体系之间的相互关系，找到他们各自的空域边界和共用空域区间，通过顶层空域结构设计来管理和降低城市低空空域融合运行的风险；

(2) 不管UAM选择动态的空域结构还是固定的航线划设方式，现有研究对采取结构化的空域使用方式已达成了较为一致共识，那么应该如何确定城市空中运输航路结构设计的安全参数？该问题中所提到的参数主要是指超障高度、航路宽度、转弯半径、高度层、与地面建筑物之间的安全间隔等这些约束航路设计的关键参数<sup>[76]</sup>，这些指标将主要取决于航空器导航、性能以及城市场景下气象特点几部分共同作用，因此，需要找到一套通用的针对eVTOL载运具航路参数计算方法，研究结合地面噪声要求、能耗等因素的航路划设方

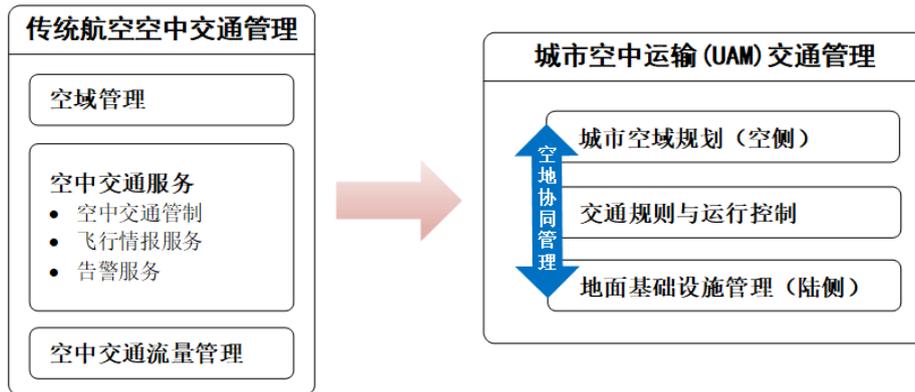


图 13 传统空中交通管理与城市空中运输交通管理问题框架对比

Fig. 13 Framework comparison between conventional air traffic management and UAM traffic management

法；（3）如何对不同类型航空器融合运行条件下的城市低空空域容量进行评估？空域容量是关系到运行控制过程中进行空域流量调控的关键阈值，尤其是引入新的运输模式（例如eVTOL编队飞行运输）和新技术（例如自动驾驶技术）后对空域容量的评估方法将会不同于传统航空的评价方式，需要针对这一转变建立新的容量评价体系，并关注动态空域管理和潮汐航路等新的空域使用理念对UAM低空空域容量所带来的影响。

第二方面，陆侧管理。由于城市空中运输的最终目的是实现城市区域的快捷运输，因此，它的起降站点是与城市空间紧密耦合的，且相比于运输航空，这些地面垂直起降站选址拥有更多影响空中航路结构划设的能力，在发展城市空中运输产业中我们应该有把交通管理思路融入地面基础设施建设过程中，这也是为什么我们选择将地面基础设施管理纳入到UAM交通管理的框架。UAM陆侧管理牵涉到UAM与其他地面交通工具多式联运、地面垂直起降站点和通信导航台建设问题，目前该方向主要存在以下一些关键技术问题：

（1）如何针对具体城市预测UAM的实际需求，并进行地面起降站点的选址建设？不可回避的是中国通用航空运输尤其是城市区域的直升机运输业并未很好的得到开发，中国缺乏相关空中通航运行数据来对UAM未来运行需求进行预测，因此，考虑基于城市地面交通流OD数据、出行问卷调查等手段来预测未来eVTOL载运具实用化后的客运量需求及交通分担率是一种新的思路，在这一点上，Fadhil<sup>[57]</sup>以慕尼黑市区为例做出了一些尝试，并在地面仿真软件基础上做改进以实现UAM的交通仿真；（2）应该选择何种通信导航

监视技术及地面设施来为UAM空中运行提供服务？无人机技术的扩散使得对空域监视的难度增大，城市复杂地形环境也制约了传统甚高频通信导航台应用于城市场景的可行性。而交通管理的革新是需要空管系统信息化做支撑的，其本质还是采用最新的技术，因此，探索论证新型通信导航监视技术（4G/5G通信、视觉导航、基于Lidar的主动探测手段）来满足城市空中运输应用通信导航监视需求的可行性。

第三方面，运行与控制。不论是针对城市空域管理还是地面设施管理，其核心仍然是支撑建立一种更好的交通规则和运行控制策略，保证飞行安全，因此，在航空通信带宽迅速增加的今天，空地协同运行控制手段将成为空中交通管理技术的发展趋势，但空地协同也不能仅停留在狭义的信息共享上，更应该转换到广义的信息决策上<sup>[75]</sup>。为实现这一目标，UAM交通规则与运行控制方面存在以下关键问题。

（1）如何设计面对融合空域运行环境下多样化管制目标的通用交通规则，通过何种方法验证所设计规则的有效性？由于目前eVTOL载运具驾驶方式并未有统一范式，所设计的交通规则必须要考虑能够满足统一分类下不同性能等级的航空器融合运行需求，在交通规则设计上绕不过仿真手段的使用，但如何保证对航空器运行场景穷尽的仿真，如何实现交通仿真中人在环路环节的建模仍存在着重要阻碍。

（2）针对自动化和智能化程度更高的eVTOL载运具，UAM的空管运行系统到底应该做成一个中心化的大系统还是一个仅提供交通服务信息的小系统？大的中心化管制系统将集中地

对整个空域内eVTOL载运具运行过程保持实时监控和动态管制; 而小系统则是指UAM在传统ATM空管系统上进一步简化, 仅提供类似于UTM系统的空中交通服务功能, 而把具体的间隔管制、冲突告警及避撞解脱的功能完全下放给eVTOL载运具本身。辩证的来看, 这两类系统各有优劣, 大系统虽然能够掌握每一架航空器全局运行情况, 但需要更高水平空域态势感知能力、更冗余可靠的通信导航设施及更复杂的中心运算控制能力, 这在现阶段技术水平上是较难实现的, 且一旦中心空管系统出现故障, 高密度运行下的城市空中运输系统将可能发生不可预知的连环碰撞事件。而小系统虽然经济成本更小, 建设相对更小, 但其本质是把管制所需的感知与计算能力分散部署到每一架载运具上, 这对eVTOL智能化水平和冲突解脱能力提出了更高的要求, 但由于不依赖于中心式的管制指挥, 该体系下空管系统即使停止交通服务, 航空器之间也能够很好的采用自组网和分布式自治管制手段来协调运行, 运行系统具有更好的鲁棒性。

(3) 应该如何处理交通管制人员和交通管理系统的关系, 航空器之间安全间隔保持的职责应该如何界定? eVTOL对自动驾驶技术的引入也同时改变了交通管制回路、驾驶回路及避撞控制方式, 传统有人机管制回路结构相对简单, 人在空中飞行冲突解脱和避撞职责相对明确。但对于引入自动驾驶或远程遥控驾驶能力的eVTOL航空器而言, 无疑存在着与传统通用航空不同的管制和驾驶回路, 这意味着不同的管制回路机制将共同作用于同一空域下的航空器, 帮助他们决策完成安全间隔保持和冲突解脱, 甚至航空器之间也存在着自组网自发交通管制的可能性, 在这一情境下如何界定管理人员与系统之间的职责边界, 如何论证多管制回路共同作用于同一空域的系统稳定性这些基础问题都有待解决。

## 5.2 总结与展望

由于UAM交通管理问题范畴包括了无人机交通管理系统在城市的管制区域, 因此, 以上总结的关键问题不仅仅是UAM交通管理所面临的, 也是超低空空域轻小型无人机交通管理系统所面对和解决的。本文回顾了城市空中运输的发展

历史, 提出了面向近未来UAM交通管理基本框架, 并从空域规划、地面基础设施、交通规则与运行控制三个方面总结梳理了UAM交通管理方向的研究进展(文献总结见表4), 为后续研究方向的选择和深入提供了参考。就中国的实际情况而言, 未来城市空中运输的需求会更加旺盛, 因为中国拥有世界上数量最多的超大城市。但从UAM落地方式上来讲, eVTOL航空器依然要绕不开航空业的安全文化, 对于载人类的eVTOL航空器适航方法会比货运应用更复杂, 如果定位于城市应用场景其适航取证周期还会更长。从这一点来看, eVTOL厂商大概率会选择“农村包围城市”, 即在城市远郊线路或其他人口相对稀疏场景下进行载人运输实践, 积累足够的安全飞行小时数后再向城市推广, 在交通管理和运行方式上, 中国更可能会倾向于集中管理、试点运行、有序放开飞行的交通管理发展路线。

总的来说, UAM近未来阶段的交通管理将面临以下几项挑战: 第一, UAM城市空中交通流密度将远大于运输航空水平, 且存在与其他类型航空器(轻小型无人机、直升机)共用城市低空空域情况; 第二, UAM起降站点散布于城市区域中, eVTOL要在楼宇间降落, 需要寻找新的通信导航监视技术来保障UAM空中交通管制的功能需求; 第三, eVTOL航空器引入自动驾驶技术后, 将不再适用于人(管制员、飞行员)在环路的交通管制方式, 需要寻求新的管制方案。

面向UAM的交通管理最终是为了提高空域容量, 解决航空器数量持续增长和飞行安全之间的矛盾。它的发展也同样符合未来航空交通管理的趋势, 包括: 空中流量更加密集; 飞行间隔进一步缩减; 空地管理一体化程度进一步提高; 航空器环境感知和自主飞行能力进一步增强; 不同气动布局和动力特性的航空器在同一空域融合运行。在这一发展过程中, 人在空中交通管理过程中的角色将从决策者、执行者向系统监督者和维护者进行转变, 航空器智能化水平和通信导航监视技术将帮助人们对城市低空空域更精细化的管理和使用, 从而最终实现eVTOL航空器大规模应用于城市空中运输的愿景。

表4 文献总结  
Table 4 Literatures Review

问题分类	所属章节	文献主要观点	年份	第一作者及其所属机构
空域规划	2.1 空域范围	提出 UAM 空域开发的一个全局框架, 划定了 UAM 空域范围, 指出 UAM 主要使用空 E、G 级空域, 少量占用 B、C、D 级空域, 不会进入 A 级空域	2018	David Thippavong(NASA) <sup>[31]</sup>
		分析了 UAM 融入现有国家空域体系的主要障碍, 指出了空中交通管制是限制 UAM 运行向高密度交通流阶段发展的关键因素	2018	Parker Vascik(MIT) <sup>[35]</sup>
		在文献[25]基础上, 提出了改进 alpha-shape 算法的几何拓扑方法用于处理城市低空复杂地形空间的可用三维地图, 为动态获得 UAM 可用空域边界提供了有效方法	2019	Parker Vascik(MIT) <sup>[37]</sup>
	2.2 空域结构与航路划设	代表 Metropolis 项目组首次提出 Full Mix, Layers, Zones, Tubes 四种城市低空空域使用方式概念	2014	Emmanuel Sunil(NLR) <sup>[42]</sup>
		引入交通复杂度概念评价文献[29]中所提出的 Full Mix, Layers, Zones, Tubes 四种空域结构, 指出 Layers 高度层模型能在结构化和非结构化空域的优势间取得平衡	2015	Andrija Vidos-avljevic(ENAC) <sup>[41]</sup>
		在文献[30]基础上讨论了 Layers 空域分层模型与交通流密度之间的关系, 证实这种空域结构是对随机交通运输需求具有最高容量的空域划设方案	2016	Jacco Hoekstra(TU Delft) <sup>[48]</sup>
		提出基于地理围栏、感知避撞技术的无人机城市场景的商业运输应用, 特别阐述了动态城市空中走廊的概念	2016	Lakshmi Pathiyil(NTU) <sup>[76]</sup>
		提出了一种基于动态地理围栏信息的低空空域起飞前飞行计划协调算法, 为城市低空动态航路划设赋予了时间属性	2016	Guodong Zhu(ISU) <sup>[39]</sup>
		对 Metropolis 项目成果进行了总结, 结合仿真验证手段, 对 Full Mix 等四种空域结构的空域容量、通行效率、噪声水平、运行鲁棒性等指标进行了对比	2016	Emmanuel Sunil(NLR) <sup>[43]</sup>
	2.3 空域容量	指出 UAM 航线初期网络可与部分城市已有的直升机航线网络复用	2018	Christabelle Bosson(NASA) <sup>[45]</sup>
		提出城市空域网格化方法的动态航线规划方式(Airmatrix)和自适应城市空域管理(AdUAM)框架	2018	Mohammed Salleh(NTU) <sup>[46]</sup>
		将城市低空空域交通密度分为三个时期(low-density, medium-density, high-density), 指出逐步提高 UAM 城市空域容量所需的关键技术和实现路径	2017	Eric Mueller(NASA) <sup>[34]</sup>
地面基础设施	3.1 垂直起降站	通过改进避撞决策方法探索 eVTOL 载运具在二维平面避撞的可行性, 以及在同一空域同高度层内可以达到的极限交通流密度	2018	Xuxi Yang(ISU) <sup>[53]</sup>
		分析了 UAM 发展到不同阶段的航空器运行数量需求, 指出满足高密度交通流的空域容量是 UAM 发展的必然趋势	2018	Kenneth H Goodrich(NASA) <sup>[50]</sup>
		提出了 UAM 地面垂直起降站(Vertiport)选址问题, 并建议通过 k 均值聚类算法进行行程起止位置点的筛选	2016	Jon Peterson(Uber) <sup>[2]</sup>
		指出在城市区域影响 eVTOL 航空器垂直起降站选址最重要的因素是噪声水平	2017	Parker Vascik(MIT) <sup>[29]</sup>
		提出了基于地理信息系统筛选的 UAM 地面选址方法	2018	Dimas Numan Fadhill(TUM) <sup>[57]</sup>
		提出 UAM 垂直起降站可与部分城市已有的直升机坪等基础设施进行复用	2019	Christabelle Bosson(NASA) <sup>[45]</sup>
	3.2 通信导航监视设施	基于人群出行需求研究了 UAM 未来运营模式及垂直起降站选址	2019	Mengying Fu(TUM) <sup>[55]</sup>
		详细规划了 UAM 垂直起降机场面区域和场面运行管理流程, 提出了场面容量计算包线模型	2019	Parker Vascik(MIT) <sup>[58]</sup>
		讨论了 5G 通信技术应用于城市空中航空器通信(C2)链路, 导航, 监视的可行性	2019	Nozhan Hosseini(USC) <sup>[60]</sup>
		分析城市区域无人间隔管制服务所需通信导航监视技术所面临的挑战	2019	George Hunter(Mosaic ATM) <sup>[22]</sup>
		提出了 UAM 地面垂直起降站(Vertiport)选址问题, 并建议通过 k 均值聚类算法进行行程起止位置点的筛选	2016	Jon Peterson(Uber) <sup>[2]</sup>
		指出在城市区域影响 eVTOL 航空器垂直起降站选址最重要的因素是噪声水平	2017	Parker Vascik(MIT) <sup>[29]</sup>
交通规则与运行控制	4.1 UAM 交通规则	提出了 UAM 地面垂直起降站(Vertiport)选址问题, 并建议通过 k 均值聚类算法进行行程起止位置点的筛选	2016	Jon Peterson(Uber) <sup>[2]</sup>
		指出在城市区域影响 eVTOL 航空器垂直起降站选址最重要的因素是噪声水平	2017	Parker Vascik(MIT) <sup>[29]</sup>
		提出了基于地理信息系统筛选的 UAM 地面选址方法	2018	Dimas Numan Fadhill(TUM) <sup>[57]</sup>
	4.2 空中交通管制与流量控制	提出 UAM 垂直起降站可与部分城市已有的直升机坪等基础设施进行复用	2019	Christabelle Bosson(NASA) <sup>[45]</sup>
		基于人群出行需求研究了 UAM 未来运营模式及垂直起降站选址	2019	Mengying Fu(TUM) <sup>[55]</sup>
		详细规划了 UAM 垂直起降机场面区域和场面运行管理流程, 提出了场面容量计算包线模型	2019	Parker Vascik(MIT) <sup>[58]</sup>
		讨论了 5G 通信技术应用于城市空中航空器通信(C2)链路, 导航, 监视的可行性	2019	Nozhan Hosseini(USC) <sup>[60]</sup>
		分析城市区域无人间隔管制服务所需通信导航监视技术所面临的挑战	2019	George Hunter(Mosaic ATM) <sup>[22]</sup>
		讨论比较了 VFR、IFR、UTM 飞行规则应用于 UAM 的局限性, 指出关键问题是找到统一规则解决不同类型航空器之间的间隔保持问题	2018	Eric Mueller(NASA) <sup>[34]</sup>
	4.3 签派运行管理	提出路径交汇点处的避让规则, 且应根据机载设备水平提供对应优先级的服务	2019	George Hunter(Mosaic ATM) <sup>[22]</sup>
		提出 UAM 融入有人驾驶航空器空域所应增加的一些规则, 包括增强目视规则(Augmented VFR)、基于性能的运行规则(PBO)、动态分配空中走廊(DDC)	2019	Brock Lascara(MITRE) <sup>[6]</sup>
		基于整数线性规划方法完成了 UAM 最终进近阶段的自动化排序方法	2018	Priyank Pradeep(ISU) <sup>[62]</sup>
提出改进混合整数线性规划方法, 用于在电池状态、起降容量约束下的 UAM 进场排序优化		2018	Imke Kleinbekman(TU Delft) <sup>[63]</sup>	
基于强化学习方法完成了 VTOL 进入垂直起降站(Vertiport)排序		2018	Marc Brittain(ISU) <sup>[65]</sup>	
为实现空域分布式机载自主间隔保持, 提出基于马尔可夫决策过程建模和蒙特卡洛树搜索求解的 UAM 自主避撞技术多机使用版本		2018	Xuxi Yang(ISU) <sup>[54]</sup>	
4.3 签派运行管理	搭建了 Fe3 仿真测试平台, 用于 UAM 和 UTM 管制运行仿真和各类算法性能测试	2018	Min Xue(NASA) <sup>[66]</sup>	
	在文献[43]基础上引入自组织协调机制, 实现了多机版本的无人机自主间隔保持和避撞决策, 提高了原算法性能和实用性	2019	Xuxi Yang(ISU) <sup>[54]</sup>	
	以 EHang184 多旋翼气动布局构型 eVTOL 为例, 结合具体机型特性选择飞行剖面从而实现到达时间约束条件下的能耗最优	2018	Priyank Pradeep(ISU) <sup>[73]</sup>	
构建倾转旋翼 eVTOL(Airbus Vahana)动力学方程, 指出在最迟到达时间约束下应尽量可能将飞行时间用于巡航阶段, 缩减垂直起降阶段用时, 从而减少能耗	2018	Priyank Pradeep(ISU) <sup>[74]</sup>		
给出一种 eVTOL 航空器在城市区域作业的典型任务剖面	2019	Christopher Silva(NASA) <sup>[72]</sup>		

## 参考文献

- [1] MENOVAR H, GUVENC I, AKKAYA K, et al. UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: applications and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3): 22-28.
- [2] HOLDEN J, GOEL N. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation[R]. San Francisco: Uber Elevate, 2016.
- [3] THIPPHAVONG P, APAZA R, BARMORE B, et al. Urban air mobility airspace integration concepts and considerations[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018: 3676-3681.
- [4] BALAKRISHNAN K, POLASTRE J, MOOBERRY J, et al. Blueprint for the sky. The roadmap for the safe integration of autonomous aircraft[R]. Santa Clara Valley: Airbus A<sup>3</sup>, 2018.
- [5] EMBRAER. Flight plan 2030: an air traffic management concept for urban air mobility[R]. St. Jose Duskamp: EmbraerX, 2019.
- [6] LASCARA B, SPENCER T, DEGARMO M, et al. Urban air mobility landscape report[R]. McLean: MITRE, 2018.
- [7] XU H X. The future of transportation: white paper on urban air mobility systems[R]. Guangzhou: EHang, 2020.
- [8] BAUR S, SCHICKRAM S, HOMULENKO A, et al. Urban air mobility: the rise of a new mode of transportation[R]. Hamburg: Roland Berger, 2018.
- [9] ZHAO Jing, XIE Feng-jie. Cognitive and artificial intelligence system for logistics industry[J]. International Journal of Innovative Computing and Applications, 2020, 11(2/3): 84-88.
- [10] 吴永鑫. 物流无人机在中国农村电商物流市场应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- WU Yong-xin. The research of the application of the logistics unmanned aerial vehicle in the China's rural electricity supplier logistics[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017. (in Chinese)
- [11] 张 丹, 吴陈炜, 谢安桓. 城市交通问题的空中解决方案——自主载人飞行器研究综述[J]. 无人系统技术, 2018, 1(2): 1-13.
- ZHANG Dan, WU Chen-wei, XIE An-huan. Aerial solution for urban traffic problems: overview of autonomous manned aircraft[J]. Unmanned Systems Technology, 2018, 1(2): 1-13. (in Chinese)
- [12] REICHE C, MCGILLEN C, SIEGEL J, et al. Are we ready to weather urban air mobility (UAM)?[C]//IEEE. 2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). New York: IEEE, 2019: 1-7.
- [13] SALLEH M, TAN D Y, KOH C H, et al. Preliminary concept of operations (ConOps) for traffic management of unmanned aircraft systems (TM-UAS) in urban environment[C]//AIAA. Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace Infotech. Reston: AIAA, 2017: 1-13.
- [14] Joint DOT/NASA. Concepts studies for future intracity air transportation systems[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [15] DAJANI J S, WARNER D, EPSTEIN D, et al. The role of the helicopter in transportation[R]. Durham: Duke University, 1976.
- [16] MOORE M D. Personal air vehicles: a rural/regional and intra-urban on-demand transportation system[J]. Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, 2646:1-20.
- [17] CHAMBERS J R. Innovation in flight: research of the NASA Langley Research Center on revolutionary advanced concepts for aeronautics[R]. Hampton: National Aeronautics and Space Administration(NASA), 2005.
- [18] KOPARDEKAR P. Unmanned aerial system (UAS) traffic management (UTM): enabling low-altitude airspace and UAS operations[R]. Hampton: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2014.
- [19] JOHNSON W C. UAM coordination and assessment team (UCAT)[R]. Ames: National Aeronautics and Space Administration(NASA), 2019.
- [20] VASCIK P D, HANSMAN J. Scaling constraints for urban air mobility operations: air traffic control, ground infrastructure, and noise[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018: 3849-3875.
- [21] SHIHAB S A M, WEI Peng, SHI Jie, et al. Optimal eVTOL fleet dispatch for urban air mobility and power grid services[C]//AIAA. Aviation 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 1-17.
- [22] GEORGE H, WEI Peng. Service-oriented separation assurance for small UAS traffic management[C]//IEEE.

- 2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). New York: IEEE, 2019: 1-11.
- [23] National Academies of Sciences. Advancing aerial mobility: a national blueprint[R]. Washington DC: The National Academies Press, 2020.
- [24] POLACZYK N, TROMBINO E, WEI P, et al. A review of current technology and research in urban on-demand air mobility applications[C]//RAM J, KENDRA B. 8th Biennial Autonomous VTOL Technical Meeting and 6th Annual Electric VTOL Symposium. Mesa: FAA, 2019: 1-11.
- [25] 全 权, 李 刚, 柏 艺 琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议综述[J]. 航空学报, 2020, 41(1):6-34.
- QUAN Quan, LI Gang, BAI Yi-qin, et al. Low altitude UAV traffic management: an introductory overview and proposal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1):6-34. (in Chinese)
- [26] SHIHAB S A M, WEI P, RAMIREZ D S J, et al. By schedule or on demand? a hybrid operation concept for urban air mobility[C]//AIAA. Aviation 2019 Forum. Reston : AIAA, 2019: 1-13.
- [27] 联合国人居署. 2016世界城市状况报告, 城市化与发展: 新兴未来[R]. 肯尼亚内罗毕:联合国人居署, 2019.
- UN-Habitat. Urbanization and development: emerging futures[R]. Nairobi: UN-Habitat, 2019. (in Chinese)
- [28] 北京交通发展研究院. 北京市居民公共交通出行特征分析[R]. 北京: 北京交通发展研究院, 2019.
- Beijing Transport Institute. Analysis on the characteristics of public transportation in Beijing[R]. Beijing: Beijing Transport Institute, 2019. (in Chinese)
- [29] VASCIK P D, HANSMAN J. Evaluation of key operational constraints affecting on-demand mobility for aviation in the Los Angeles basin: ground infrastructure, air traffic control and noise[C]//AIAA. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2017: 1-20.
- [30] VASCIK P D, HANSMAN R. J. Constraint identification in on-demand mobility for aviation through an exploratory case study of los angeles[C]//AIAA. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2017:1-26.
- [31] 弓永峰, 陈俊斌, 刘海博, 等. 产业化加速, 氢能时代临近——燃料电池行业专题报告[R]. 北京: 中信证
- 券, 2019.
- GONG Yong-feng, CHEN Jun-bin, LIU Hai-bo, et al. The era of hydrogen energy is approaching -- a special report on fuel cell industry[R]. Beijing: Citic Securities, 2019. (in Chinese)
- [32] 王 莉, 戴泽华, 杨善水, 等. 电气化飞机电力系统智能化设计研究综述[J]. 航空学报. 2019, 40(2): 5-19.
- WANG Li, DAI Ze-hua, YANG Shan-shui, et al. Review of intelligent design of electrified aircraft power system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(2): 5-19. (in Chinese)
- [33] 中国民用航空局航空器适航审定司. 基于运行风险的无人机适航审定指导意见[R]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2019.
- CAAC. Guidance on UAV airworthiness certification based on operational risk[R]. Beijing: Aircraft Airworthiness Certification Department of CAAC, 2019. (in Chinese)
- [34] MUELLER E. Enabling airspace integration for high density urban air mobility[R]. Ames: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2017.
- [35] VASCIK P D, BALAKRISHNAN H, HANSMAN J. Assessment of air traffic control for urban air mobility and unmanned systems[C]//FAA&EUROCONTROL. The 8th International Conference for Research in Air Transportation (ICRAT). Barcelona: EUROCONTROL, 2018: 1-9.
- [36] CHO Jungwoo, YOON Yoonjin. How to assess the capacity of urban airspace: a topological approach using keep-in and keep-out geofence[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.
- [37] VASCIK P D, CHO Jungwoo, BULUSU V, et al. Geometric approach towards airspace assessment for emerging operations[C]//AIAA. Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019). Reston: AIAA, 2019:1-12.
- [38] ZHU, Guo-dong, WEI Peng. Pre-departure planning for urban air mobility flights with dynamic airspace reservation[C]//AIAA. Aviation 2019 Forum. Reston: AIAA, 2019: 1-11.
- [39] ZHU Guo-dong, WEI Peng. Low-altitude UAS traffic coordination with dynamic geofencing[C]//AIAA. 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations

- Conference. Reston: AIAA, 2016: 1-16.
- [40] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J. Metropolis-urban airspace design[R]. Delft: Technical University of Delft National, 2014.
- [41] VIDOSAVLJEVIC A, DELAHAYE D, SUNIL E, et al. Complexity analysis of the concepts of urban airspace design for metropolis project[C]//EIWAC. 4<sup>th</sup> ENRI International Workshop on ATM/CNS. Tokyo: Springer, 2015: 1-11.
- [42] SUNIL E, HOEKSTRA J, ELLERBROEK J, et al. Metropolis: re11 ensities[C]//EUROCONTROL. 11<sup>th</sup> USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar. Lisbon: EUROCONTROL, 2015: 1-11.
- [43] SUNIL E, HOEKSTRA J, ELLERBROEK J, et al. The influence of traffic structure on airspace capacity[C]//FAA&EUROCONTROL. The 7<sup>th</sup> International Conference for Research in Air Transportation(ICRAT). Philadelphia: FAA, 2016: 1-9.
- [44] 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, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, 40(1): 38-51.
- [45] BOSSON C, LAUDERDALE T A. Simulation evaluations of an autonomous urban air mobility network management and separation service[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta: AIAA, 2018:1-14.
- [46] SALLEH M F B, CHI Wan-chao, WANG Zhen-kun, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations[C]//AIAA. 2018 AIAA Information Systems Infotech@ Aerospace, Kissimmee: AIAA 2018:1-12.
- [47] ARNTZEN M, AALMOES R, BUSSINK F, et al. Noise computation for future urban air traffic systems[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory(NLR), 2015.
- [48] HOEKSTRA J, MAAS J, SUNIL E. How do layered airspace design parameters affect airspace capacity and safety?[C]//FAA&EUROCONTROL. The 7<sup>th</sup> International Conference for Research in Air Transportation(ICRAT). Philadelphia: AIAA, 2016: 1-8.
- [49] Booz Allen Hamilton. Urban air mobility (UAM) market study[R]. Ames: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2018.
- [50] GOODRICH K H, BARMORE B. Exploratory analysis of the airspace throughput and sensitivities of an urban air mobility system[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018:1-9.
- [51] KOCHENDERFER M J, HOLLAND J E, CHRYSSANTHACOPOULOS J P. Next-generation airborne collision avoidance system[R]. Lexington: Massachusetts Institute of Technology-Lincoln Laboratory, 2012.
- [52] YU Xiang, ZHANG You-min. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74: 152-166.
- [53] YANG Xu-xi, WEI Peng. Autonomous on-demand free flight operations in urban air mobility using Monte Carlo tree search[C]//FAA&EUROCONTROL. The 8<sup>th</sup> International Conference for Research in Air Transportation (ICRAT). Barcelona: FAA, 2018: 1-8.
- [54] YANG Xu-xi, DENG Li-seng, WEI Peng. Multi-agent autonomous on-demand free flight operations in urban air mobility[C]//AIAA. Aviation 2019 Forum. Dallas: AIAA, 2019: 1-13.
- [55] FU Meng-ying, ROTHFELD R, ANTONIOU C. Exploring preferences for transportation modes in an urban air mobility environment: Munich case study[J]. Transportation Research Record, 2019(2673): 427-442.
- [56] ROTHFELD R, BALAC M, PLOETNER K, et al. Agent-based simulation of urban air mobility[C]//AIAA. Modeling and Simulation Technologies Conference. Atlanta: AIAA, 2018: 1-10.
- [57] FADHIL D N. A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility[D]. Munich: Technical University of Munich, 2018.
- [58] VASCIK P, HANSMAN J. Correction: development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors[C]//AIAA. SciTech 2019 Forum. San Diego: AIAA, 2019: 1-26.
- [59] 杨秀玉. 基于5G移动通信的无人机与民用飞机防相撞技术研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2019.
- YANG Xiu-yu. Research on anti-collision technology based on 5G between UAV and civil aircraft[D]. Deyang:

- Civil Aviation Flight University of China, 2019. (in Chinese)
- [60] HOSSEINI N, JAMAL H, HAQUE J, et al. UAV command and control, navigation and surveillance: a review of potential 5G and satellite systems[C]//IEEE. 2019 Aerospace Conference. New York: IEEE, 2019: 1-10.
- [61] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 18(2): 1123-1152.
- [62] PRADEEP P. Arrival management for eVTOL aircraft in on-demand urban air mobility[D]. Ames: Iowa State University, 2019.
- [63] KLEINBEKMAN I, MITICI M A, WEI P. eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility[C]//IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference. London: IEEE, 2018: 1-7.
- [64] SILVER D, HUANG A, MADDISON C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, 2016, 529(7587): 484.
- [65] BRITAIN M, WEI Peng. Autonomous aircraft sequencing and separation with hierarchical deep reinforcement learning[C]//FAA&EUROCONTROL. The 8th International Conference for Research in Air Transportation. Barcelona: ICRAT, 2018: 1-8.
- [66] XUE Min, RIOS J, SILVA J, et al. Fe3: an evaluation tool for low-altitude air traffic operations[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta: AIAA, 2018: 1-13.
- [67] BELOBABA P, ODoni A, BARNHART C. The global airline industry[R]. Cambridge: John Wiley & Sons, 2015.
- [68] BALL M O, HOFFMAN R, ODoni A R, et al. A stochastic integer program with dual network structure and its application to the ground-holding problem[J]. Operations Research, 2003, 51(1): 167-171.
- [69] ZHU Guo-dong, WEI Peng, HOFFMAN R, et al. Risk-hedged multistage stochastic programming model for setting flow rates in collaborative trajectory options programs (CTOP)[C]//AIAA. Science and Technology Forum and Exposition. Reston: AIAA, 2019: 1-16.
- [70] HOFFMAN R, HACKNEY B, WEI P, et al. Enhanced stochastic optimization model (ESOM) for setting flow rates in collaborative trajectory options programs (CTOP)[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018:1-16.
- [71] ZHU Guo-dong, WEI Peng, HOFFMAN R, et al. Centralized disaggregate stochastic allocation models for collaborative trajectory options program (CTOP)[C]//IEEE. 37th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference (DASC). New York: IEEE, 2018: 1-10.
- [72] SILVA C, JOHNSON W R, SOLIS E, et al. VTOL urban air mobility concept vehicles for technology development[C]//AIAA. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta: AIAA, 2018: 1-10.
- [73] PRADEEP P, WEI Peng. Energy-efficient arrival with RTA constraint for multirotor eVTOL in urban air mobility[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2019, 16(7): 263-277.
- [74] PRADEEP P, WEI Peng. Energy optimal speed profile for arrival of tandem tilt-wing eVTOL aircraft with RTA constraint[C]//IEEE. 2018 CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Beijing: IEEE, 2018: 1-6.
- [75] 陈志杰. 未来空中交通管制系统发展面临的技术挑战[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(6): 1-5.
- CHEN Zi-jie. Technological challenges of future air traffic control system development[J]. Control Information System and Technology, 2016, 7(6): 1-5. (in Chinese)
- [76] PATHIYIL L, LOW K H, SOON B H, et al. Enabling safe operations of unmanned aircraft systems in an urban environment: a preliminary study[C]//German Institute of Navigation. The International Symposium on Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications. Berlin: German Institute of Navigation, 2016: 1-10.