

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqfh.250974

# 面向eVTOL的城市空中交通基础设施特征分析

夏 佳

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

**摘 要:** 系统分析了面向电动垂直起降飞行器(electric vertical takeoff and landing, eVTOL)的城市空中交通及其配套基础设施的关键特征。首先梳理了多旋翼、复合翼与倾转旋翼3种主流eVTOL构型的技术特点与性能优劣,通过与传统低空交通工具的对比,凸显eVTOL在结构设计上的先进性与适用性。在此基础上,结合各类eVTOL的设计航程、速度及起飞重量等参数,明确了其在不同城市应用场景中的分布特征,如短途观光、城际通勤与应急救援等。进而通过与城市地面及空中交通方式的比较,揭示了eVTOL交通在巡航速度、运营成本及噪声控制等方面的显著优势。最后,重点探讨了与eVTOL运行相适应的城市基础设施特征,涵盖垂直起降场的类型划分、布局选址、功能区配置以及航路安全保障体系,以期eVTOL融入未来城市立体交通网络提供理论参考与实践指导。

**关键词:** eVTOL;城市空中交通;基础设施;特征分析

中图分类号: V279;U491

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0001-12

## Analysis on Characteristics of Urban Air Traffic Infrastructure Oriented to eVTOL

XIA Jia

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

**Abstract:** The key features of urban air traffic and its supporting infrastructures oriented to the electric vertical takeoff and landing (eVTOL) are systematically analyzed. Firstly, the technical characteristics and the performance advantages and disadvantages of the three mainstream eVTOL configurations, namely multi-rotor, compound rotor and tiltrotor, are sorted out. Compared with the traditional low-altitude transportation vehicles, the advanced nature and applicability of eVTOL in structural design are highlighted. On this basis, combined with the design range, speed and takeoff weight and other parameters of various eVTOL, its distribution characteristics in the application scenarios of the different cities are clarified, such as short sightseeing, intercity commuting and emergency rescue. Furthermore, by comparing with urban ground and air transportation methods, the significant advantages of eVTOL transportation in terms of cruise speed, operating costs and noise control are revealed. Finally, the focus is on discussing the characteristics of urban infrastructure that are compatible with the operation of eVTOL, which covers the type classification, layout and site selection, functional area configuration of vertical takeoff and landing fields, and the airway safety guarantee system, aiming to provide the theoretical references and practical guidance for the integration of eVTOL into the future urban three-dimensional transportation network.

**Keywords:** eVTOL; urban air traffic; infrastructure; feature analysis

## 0 引 言

城市空中交通(urban air mobility, UAM)涵盖私人飞行、旅游观光、物流运输以及应急救援等多样化场景应用,对飞行器的综合性能提出了更高的要求。传统直升机在安全、环保方面的缺陷以及固定翼飞机难以实现垂直起降与低速悬停的劣势,限制了其

广泛应用<sup>[1-4]</sup>。近年来,电动垂直起降飞行器因其环保、安全和经济的特点迎来迅速发展,并引起全球各界的广泛关注和研究<sup>[5-8]</sup>。

根据摩根士丹利发布的一系列行业分析报告,城市空中交通行业的全球市场规模将在2040年达到1万亿美元,并有望在2050年增长至9万亿美元<sup>[9]</sup>,如图1所示。此外,根据市场分析估计,中国有望成为全球最大的UAM单一市场,2050年中国市场的规模可能占到全球的28%以上(约2.1万亿美元)<sup>[10-12]</sup>。

近年来,科学技术的快速发展催生了各种

收稿日期: 2025-10-15

作者简介: 夏佳(1981—),男,硕士,高级工程师,从事道路与机场工程施工管理工作。

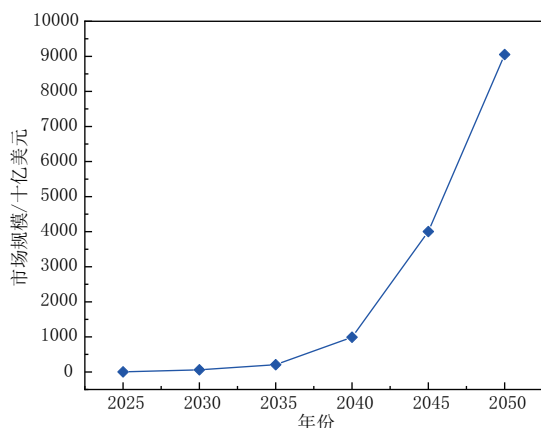


图1 全球城市UAM市场规模预测

eVTOL 航空器, 尽管其仍处于早期发展阶段, 但在全球范围内已朝着实际应用迈出了重大步伐。在 eVTOL 航空器实际应用方面, 美国的 Joby Aviation 公司处于行业领先地位, 已于 2022 年获得 FAA (Federal Aviation Administration) 135 部运营合格证, 其型号认证目前仍在推进中<sup>[13]</sup>, 此外, Archer 公司也有望于 2025 年实现 eVTOL 的商业化运营<sup>[14]</sup>。欧洲的 Volocopter、Lilium 及 Airbus 等企业在 eVTOL 航空器研发方面取得显著进展, 其中 Volocopter 公司在巴黎附近建设了 eVTOL 垂直起降场<sup>[15]</sup>。中国企业如亿航智能等也在积极参与 eVTOL 研发, 其中亿航 EH216-S 无人机已获得全球 eVTOL 领域的首张型号合格证<sup>[16]</sup>。此外, 由于 eVTOL 在运营维护成本低、噪声低及能量效率高等方面具有优势<sup>[17-19]</sup>, 2020 年 2 月, 美国空军启动“敏捷至上”项目, 旨在验证 eVTOL 飞行器在短途运输、特种作战及搜救等军事任务中的应用潜力<sup>[20]</sup>。

除了 eVTOL 航空器实际应用方面, 全球各地在建设 eVTOL 航空器相适应的城市空中交通基础设施上也有一些成效。在国外 eVTOL 基础设施城市建设成果中, 阿联酋阿布扎比市的混合式垂直起降场首次获得阿联酋民航总局的批准, 该起降场被设计为可同时容纳传统直升机和 eVTOL, 是阿布扎比空中出租车项目的重要组成部分<sup>[21]</sup>; 此外, 阿布扎比市也在积极开展无人机物流测试, 并公布了载重 250 kg 的混合动力 eVTOL 货运飞机计划<sup>[22]</sup>。美国的迈阿密城市与 eVTOL 制造商 Wisk 进行合作, 评估在迈阿密国际机场等地点建设 eVTOL 空中出租车基础设施的潜力<sup>[23]</sup>。

在国内城市 eVTOL 基础设施建设成果中, 中国青岛利用城市内地铁站的楼顶空间建立 eVTOL 垂直起降点, 被用于供 2 t 级的 eVTOL 航空器起降<sup>[24]</sup>。中

国武汉也在建设一个综合性低空经济枢纽——武汉阳逻低空生态中心, 此枢纽规划占地 17.33  $\text{hm}^2$ , 并计划建设 20 个以上起降平台, 目标年产 200 架 eVTOL 航空器<sup>[25]</sup>。中国安徽建设了一条 eVTOL 跨城货运航线, 航线长度约 160 km, 实现了无人机与无人车的接驳运输<sup>[26]</sup>。中国合肥也在积极探索 eVTOL 无人系统运营平台, 并在 2025 世界制造业大会上展示低空智航飞行应用平台 (GEOVIS iFlight), 旨在实现万架无人机的协同调度与空域管理<sup>[27]</sup>。中国深圳目前正在建设陆空一体智能网联综合交通测试基地, 建设项目包括 1 个直径 32 m 和 3 个直径 15 m 的 eVTOL 起降场, 以及机库、试验场地等<sup>[28]</sup>。

鉴于电动垂直起降飞行器及其配套城市空中交通基础设施的广阔应用前景, 本文分析了 eVTOL 不同构型的优缺点并通过与传统低空交通工具的对比, 以突出 eVTOL 航空器的结构特征。在此基础上从设计航程和设计速度 2 个角度对 eVTOL 进行分类说明, 并详细分析了 3 种机型在城市空中交通应用场景的分布。然后通过 eVTOL 航空器交通方式与现有城市交通方式的对比分析, 突出 eVTOL 交通的特征优势。最后基于其功能需求对与 eVTOL 航空器相适应的城市空中交通基础设施进行特征分析。

## 1 eVTOL 航空器特点分析

电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 是城市空中交通领域的一种新型飞行器, 具有巨大的市场潜力。eVTOL 区别于传统的固定翼飞机及直升机的主要技术特征包括垂直起降能力、分布式电推进系统以及全电或混合动力架构等。并且, 目前市面上主流的 eVTOL 航空器可分为多旋翼、复合翼和倾转旋翼 3 种构型, 每种构型各有优缺点。

### 1.1 eVTOL 机型分类

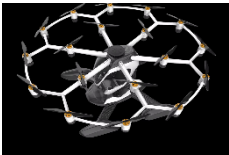
#### 1.1.1 多旋翼构型

多旋翼 eVTOL 飞行器采用对称分布的电动旋翼布局, 依靠多个旋翼结构提供升力和推进力。此类设计使其具备卓越的机动性与稳定的悬停能力, 能在悬停和低速飞行状态下提供优异的空气动力性能<sup>[29]</sup>。由于无需传统螺旋桨、固定翼或倾转机翼, 其结构重量显著减轻, 不仅制造成本较低, 控制系统也更为简化, 这些特点有力地促进了其商业化进程和短途城市空中交通应用的部署。但其也在巡航效率、载荷能力、续航能力和飞行速度等方面存在明显局限。

目前, 多旋翼构型在 eVTOL 领域展现出较高的

技术成熟度,其代表性机型包括 Hexa、VoloCity、亿航 EH216 以及汇天旅航者 X2 等,如表 1 所示。

表 1 多旋翼 eVTOL 代表产品

| 产品名称                       | Hexa                                                                              | VoloCity                                                                          | EH216-S                                                                            | 旅航者 X2                                                                              |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 外观                         |  |  |  |  |
| 所属企业                       | LIFT Aircraft                                                                     | Volocopter                                                                        | 亿航智能                                                                               | 小鹏汇天                                                                                |
| 载客数量/人                     | 1                                                                                 | 2                                                                                 | 2                                                                                  | 2                                                                                   |
| 起飞重量/kg                    | 196                                                                               | 1 000                                                                             | 620                                                                                | 760                                                                                 |
| 最大载荷/kg                    | 113                                                                               | 200                                                                               | —                                                                                  | 200                                                                                 |
| 续航时间/min                   | 15                                                                                | —                                                                                 | 25                                                                                 | 35                                                                                  |
| 最大航程/km                    | —                                                                                 | 20                                                                                | 30                                                                                 | —                                                                                   |
| 最高速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 101                                                                               | 100                                                                               | 130                                                                                | 130                                                                                 |
| 巡航高度/m                     | 366                                                                               | 100~500                                                                           | 200                                                                                | 1 000                                                                               |
| 动力来源                       | 纯电动                                                                               | 纯电动                                                                               | 纯电动                                                                                | 纯电动                                                                                 |

1.1.2 复合翼构型

集成升力旋翼与巡航推进系统的复合翼构型 eVTOL 飞行器发展迅速,该设计理念的核心在于通过机翼分担升力,降低旋翼在平飞阶段的负载。在悬停和低速飞行时,飞行器以垂直起降构型运行,同时螺旋桨系统转为提供前向推力<sup>[30]</sup>。在高速巡航状态下,旋翼转速通常可减少至约一半,此时仅需承担约 20% 的飞行器重量。该模式的主要目标是实现更高飞行速度<sup>[31]</sup>。通过降低旋翼转速

并优化桨叶攻角,有翼复合 eVTOL 能够延缓前行旋翼的失速现象,并减轻后退旋翼的气流分离,从而有助于提升飞行速度、扩大航程、减少振动,并增强机动性能。但该构型 eVTOL 存在两套动力系统,不仅增加了重量和阻力,而且使得有效载荷受到限制。

复合翼构型的 eVTOL 通常适用于中长途任务,如城市通勤等,其代表机型包括 Alia-250、ATEA、峰飞 V2000 以及 M1 等,如表 2 所示。

表 2 复合翼 eVTOL 代表产品

| 产品名称                       | Alia-250                                                                            | ATEA                                                                                | V2000 EM                                                                             | M1                                                                                    |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 外观                         |  |  |  |  |
| 所属企业                       | Beta                                                                                | Ascendance                                                                          | 峰飞航空                                                                                 | 御风未来                                                                                  |
| 载客数量/人                     | 5                                                                                   | 5                                                                                   | 5                                                                                    | 5                                                                                     |
| 起飞重量/kg                    | 3 200                                                                               | 2 000                                                                               | 2 200                                                                                | 2 000                                                                                 |
| 最大载荷/kg                    | —                                                                                   | 400                                                                                 | 250                                                                                  | 500                                                                                   |
| 续航时间/min                   | —                                                                                   | 120                                                                                 | —                                                                                    | —                                                                                     |
| 最大航程/km                    | 400                                                                                 | 400                                                                                 | 250                                                                                  | 250                                                                                   |
| 最高速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 270                                                                                 | 200                                                                                 | 200                                                                                  | 200                                                                                   |
| 巡航高度/m                     | 2 438                                                                               | —                                                                                   | —                                                                                    | —                                                                                     |
| 动力来源                       | 纯电动                                                                                 | 混合动力                                                                                | 纯电动                                                                                  | 纯电动                                                                                   |

1.1.3 倾转旋翼构型

倾转旋翼构型 eVTOL 采用可倾转的旋翼单元,实现在垂直起降与高速巡航之间的模式转换。在起降及悬停阶段,旋翼处于垂直状态以提供升力;达到一定空速后,旋翼或发动机短舱逐渐转向水平位置。此时,机翼成为主升力面,显著降低旋翼负荷,使其

转而作为螺旋桨提供前向推力,从而兼顾垂直起降能力与固定翼飞机的高效高速巡航性能<sup>[32]</sup>。尽管倾转旋翼与复合翼构型在功能上都致力于结合垂直起降与高速巡航,但两者在技术路径上存在本质区别。复合翼构型采用“升推分离”的冗余设计,通常拥有独立的升力旋翼系统和推进螺旋桨系统,结构相对

简单但气动阻力较大;而倾转旋翼构型则通过“一套系统、两种功能”的旋翼结构设计,实现了更高的气动效率和更紧凑的机体设计,这使其在追求小型化、轻量化和更高巡航速度的平台上有明显优势,但其机械复杂度和控制难度也相应更高。

倾转旋翼构型的eVTOL通常适用于需要高速度的中长途任务,如城际通勤等,其代表机型包括Joby S4、Nexus、沃飞AE200以及ZG-T6等,如表3所示。

表3 倾转旋翼eVTOL代表产品

| 产品名称                       | Joby S4                                                                           | Nexus                                                                             | AE200                                                                              | ZG-T6                                                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 外观                         |  |  |  |  |
| 所属企业                       | Joby Aviation                                                                     | Textron Aviation                                                                  | 沃飞长空                                                                               | 零重力飞机工业                                                                             |
| 载客数量/人                     | 5                                                                                 | 5                                                                                 | 4~6                                                                                | 6                                                                                   |
| 起飞重量/kg                    | 2 404                                                                             | 3 600                                                                             | 2 500                                                                              | 2 500                                                                               |
| 最大载荷/kg                    | 453                                                                               | —                                                                                 | —                                                                                  | —                                                                                   |
| 续航时间/min                   | —                                                                                 | —                                                                                 | —                                                                                  | 90                                                                                  |
| 最大航程/km                    | 160                                                                               | 180                                                                               | 200                                                                                | 300                                                                                 |
| 最高速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 322                                                                               | 216                                                                               | 248                                                                                | 250                                                                                 |
| 巡航高度/m                     | 360                                                                               | —                                                                                 | 1 000                                                                              | —                                                                                   |
| 动力来源                       | 纯电动                                                                               | 纯电动                                                                               | 纯电动                                                                                | 纯电动                                                                                 |

1.2 与传统低空交通工具对比

前一小节内容主要综述了不同构型的eVTOL航空器优缺点,本小节在此基础上,将Joby S4型号的eVTOL与传统的燃油直升机(罗宾逊R44直升机)、货运无人机(AT 200)的型号参数进行对比分析,结果如表4所示。从表4可以看出,与传统的R44燃油直升机相比,电动垂直起降飞行器在巡航速度、有效载荷方面均具有较大优势;与AT 200货运无人机相比,最大航程及有效载荷方面均存在明显劣势。但与两者相比,电动垂直起降飞行器采用纯电力,环保优势明显。

表4 eVTOL航空器与传统低空交通工具对比

| 参数                         | Joby S4 | 罗宾逊R44直升机   | AT200货运无人机 |
|----------------------------|---------|-------------|------------|
| 座位数/个                      | 5       | 4           | —          |
| 起飞重量/kg                    | 2 404   | 1 090       | 2 000      |
| 有效载荷/kg                    | 453     | 370         | 1 500      |
| 机身长度/m                     | 7.3     | 11.76       | 11.84      |
| 机身高度/m                     | 2.5     | 3.28        | 4.04       |
| 翼展/m                       | 10.7    | 10.04(旋翼直径) | 12.80      |
| 续航时间/min                   | 45      | 180         | 480        |
| 最大航程/km                    | 160     | 645         | 2 183      |
| 巡航速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 322     | 210         | 313        |
| 动力能源                       | 纯电动     | 航空汽油        | 航空汽油       |

除性能之外,本小节还进一步总结了eVTOL航空器与传统罗宾逊R44直升机的配套基础设施及其对应标准规范,结果如表5所示。从表5中可以看

出,eVTOL航空器的障碍物限制面基本与传统直升机相同,但其配套的通信导航监视设备、进近设备以及管制服务等与传统直升机存在明显不同,因而与eVTOL功能需求相适应的城市空中交通基础设施也存在较大差异。

2 eVTOL应用场景分布

目前,城市空中交通应用场景主要包括城际通勤、城市通勤、短途观光以及高层建筑消防等四类场景<sup>[33-34]</sup>,因此,本节内容主要根据设计速度、设计航程以及起飞重量对第一节内容中不同构型的主要eVTOL航空器进行分类,如图2所示。

由图2可知,从整体上来看,在100~250 km航程范围内的载人通勤主要以倾转旋翼构型的eVTOL为主,其余两种构型的eVTOL航空器则主要适用于100 km航程范围内的载人通勤等场景。基于此,本节内容主要根据设计航程及设计速度对三种构型的eVTOL航空器应用场景进行分类说明并举例论证。

2.1 设计航程

如图2所示,从设计航程的角度来看,多旋翼构型的eVTOL航空器省去了传统螺旋桨、机翼或倾斜旋翼等复杂结构,实现了整体轻量化<sup>[35-36]</sup>,但由于此构型航空器飞行时旋翼两侧气流的不对称会导致气动效率下降,因此其设计航程不大,适合执行城市短距离<sup>[37-38]</sup>,具体场景应用包括短距离(50 km以内)的

表5 低空交通工具配套基础设施对比

| 基础设施   | Joby S4                                                     | 罗宾逊 R44 直升机                                   |
|--------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 障碍物限制面 | 与传统直升机相同                                                    | 遵循 FATO、TLOF、SA 等区域的障碍物限制面规定                  |
| 通信设备   | 主要依赖地空宽带数据链,如 5G 技术等,语音通信作为备份                               | 高频/甚高频语音通信、管制员-飞行员数据链通信                       |
| 导航设备   | GNSS 并辅以视觉辅助导航和基于 5G 基站的增强定位                                | 地基导航设施,如 VOR/DME、ILS、惯性导航/卫星导航等               |
| 监视设备   | 基于 4G/5G 网络的监视和 ADS-B In/Out、基于机载 Ad-Hoc 网络的空空监视            | 一次雷达、二次雷达以及广播式自动相关监视                          |
| 进近设备   | 初期以目视飞行为主;<br>成熟阶段将依赖基于性能的导航和增强现实/虚拟视景引导,由 UTM 系统生成数字化进近走廊  | 仪表着陆系统、精密进近雷达、微波着陆系统                          |
| 管制服务   | 无人机系统交通管理/U-space 系统提供高度自动化、去中心化的交通管理服务;人工负责监视和应急处置         | 空中交通管制提供集中、分扇区的指令式管制;管制员通过雷达和飞行计划对飞机进行间隔管理和排序 |
| 参照标准   | 《广州市低空垂直起降设施场址选择及建设技术指引(试行)》;<br>《电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求》等 | 《民用直升机场飞行场地技术标准》等                             |

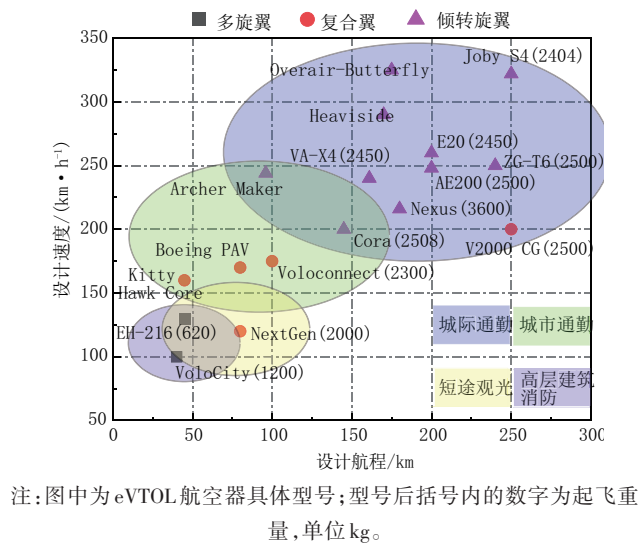


图2 不同eVTOL机型的城市应用场景分布<sup>[34]</sup>

观光旅游及高层建筑消防。例如亿航智能的EH-216型号的eVTOL正积极布局旅游观光、城市交通以及消防应急等多元化商业场景;此外,御风未来等企业也在积极研发用于城市空中交通的多旋翼eVTOL产品,同时也规划了未来的运营蓝图。

复合翼构型的eVTOL航空器在飞行时旋翼旋转速度和机翼迎角会被系统性地降低,有效地增强了航空器的机动性<sup>[39-40]</sup>,因此此类构型的eVTOL航空器适合于中距离(100 km左右)的应用场景,包括城市之间的货物运输、旅游观光等<sup>[41]</sup>。例如2025年9月,峰飞航空的复合翼构型的eVTOL航空器(V2000CG 凯瑞鸥)成功完成了安徽安庆怀宁县至合肥瑶海区的跨城货运任务。此次任务航程约160 km,用时约1 h,运输效率较传统陆运提升约50%。2025年合肥建成全国首个城市空中交通枢纽港,且去年合肥低空经济产业链的总营收超360亿元。2024年2月,峰飞航空自主研发的“盛世龙”复合翼eVTOL完成从珠海九洲港码头到深圳蛇口的全球首次模拟

载人飞行测试,将地面交通时间从3 h缩短至0.5 h内,往返航程超过100 km。

倾转旋翼构型的eVTOL航空器的推进系统被专门设计成在高速状态下可提供水平推力,从而避免了气流逆转等不利影响,有利于实现更高的飞行速度<sup>[42-43]</sup>,适用于长距离(约200 km)的应用场景,包括城际通勤、货物运输等<sup>[44-45]</sup>。例如2024年,蔚蓝空间公司的倾转旋翼构型eVTOL航空器“云帆-2”在山东青岛对海岛运输、医疗救援以及城市内转场飞行等场景进行应用验证,展示其多任务能力。2025年,在四川成都,沃飞长空的AE200型号的eVTOL规划用于探索城市中心、郊区和机场间的高效公务航空出行,航程覆盖200 km的成都市空中交通圈,并计划于2026年完成适航取证。

2.2 设计速度

如图2所示,从设计速度的角度来看,多旋翼构型的设计速度约为100 km/h,复合翼构型的设计速度为150 km/h,而倾转旋翼构型的设计速度约为250 km/h。由此可以看出,多旋翼构型的eVTOL航空器适用于需求低速度、高稳定性的应用场景,如高层建筑消防等;复合翼eVTOL则适用于需求中等速度的城市之间的通勤场景;而倾转旋翼eVTOL则适用于需求高速度的城际之间的货物运输,如快递物流、紧急救援等。

3 eVTOL交通方式特点分析

前两节内容主要综述了eVTOL不同构型的研究现状及其优缺点,详细分析了目前正在使用或正在开发的eVTOL在城市空中交通网络中的具体应用场景。基于此,本节内容将对eVTOL和不同的城市交通方式之间的对比进行综述性研究,以分析eVTOL

航空器交通方式的特点。

3.1 eVTOL与地面交通方式对比

eVTOL与地面交通方式作为城市交通生态系统的基本组成之一,呈现出“双轨并行”的发展态势。表6给出了eVTOL和不同地面交通方式的优劣势分析及适用场景。从表6中可以看出,与传统的地面

交通方式相比,eVTOL具有速度极快且不受地面拥堵影响的独特优势,但其劣势也非常明显,如基础设施要求高且极易受天气和空域管制的影响。这些劣势使得eVTOL在城市交通生态系统中适用场景受限。因此,城市日常出行应综合考虑距离、时间、成本、天气、出行目的等多种因素,以选择合适的交通方式。

表6 eVTOL与主要地面交通方式优劣势对比<sup>[46-51]</sup>

| 交通方式    | 优势                                            | 劣势                                          | 适用场景                                        |
|---------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| eVTOL   | 速度极快;<br>点对点直线飞行,不受地面拥堵影响;<br>绿色环保(纯电驱动)      | 基础设施要求高;<br>受天气和空域管制影响大;<br>技术成熟度和法规仍在完善中   | 紧急医疗运输、应急救援;<br>高端商务出行、城市空中游览;<br>特定场景物流配送等 |
| 出租车/网约车 | 门到门服务,便捷性高;<br>灵活性高,可随时叫车;<br>舒适性相对较高         | 成本高昂;<br>易受交通拥堵影响,通行时间不确定                   | 夜间或公共交通停运时段出行;<br>对舒适性和隐私有要求的出行等            |
| 轨道交通    | 运量大,效率高;<br>有独立路权,不受路面交通影响;<br>节能环保(电力驱动)     | 固定线路和站点,灵活性差;<br>高峰期拥挤,舒适度较低;<br>建设成本高昂,周期长 | 通勤高峰时段的大客流运输;<br>对时间确定性要求高的出行等              |
| 公交车     | 覆盖网络广泛,尤其深入社区;<br>票价低廉,经济性好;<br>与地铁等形成接驳,方便换乘 | 速度慢,效率较低;<br>准时性差,等待时间不确定                   | 短途出行;<br>浏览城市风光等                            |

目前,eVTOL正处在测试、开发及早期商用探索阶段,但它在50~400 km中短途距离展现出的速度以及能彻底规避地面交通的拥堵等特色,使其具有巨大的市场潜力。此外,eVTOL航空器定线航路的规划与建设正逐步成为行业关注重点,这类专用航路系统能为eVTOL提供结构化的空中通道,是实现其规模化、安全高效运行的重要基础。但目前eVTOL仍面临基础设施配套薄弱、定线航路网络尚未成熟,且受天气和空管限制较大等劣势,其大规模应用还为时尚早。

综上所述,eVTOL更适合在特定场景或预设航路中开展初步应用,离融入普通大众的日常通勤可能还有较长时间。此外,即便未来eVTOL发展成熟,地面交通方式因其网络密度、经济性和灵活性,依然是城市交通的绝对主体和基石。未来eVTOL很有可能作为现有交通体系的补充和延伸,与地面交通

一起构成立体多维的城市交通网络。

3.2 eVTOL与空中交通方式对比

近年来,现有的城市空中交通主要以传统直升机等燃油飞行器为主,eVTOL则作为一种新型的交通方式集成到城市空中交通网络中。参考文献主要对比分析了Joby S2类型的eVTOL与R22罗宾逊直升机<sup>[52]</sup>、Vans RV-7固定翼飞行器<sup>[53]</sup>的性能特征。结果表明,与传统的燃油直升机相比,eVTOL在最大航程及飞行速度上具有明显优势;与此同时,在固定翼飞行器相比,eVTOL在最大载荷与最大航程上存在劣势。同时,文献<sup>[52]</sup>还进一步比较了不同的空中交通工具购买和使用成本,如表7所示。从表中可以看出,eVTOL的经济成本与新能源汽车大致相同,但由于eVTOL飞行速度更快且不受地面交通的影响,其经济效应明显更优。此外,与传统燃油飞行器相比,eVTOL经济性显著升高。

表7 不同空中交通工具经济成本分析<sup>[54]</sup>

| 成本         | Joby S2 | 罗宾逊R22  | Vans RV-7 | 特斯拉 Model S |
|------------|---------|---------|-----------|-------------|
| 价格/美元      | 200 000 | 291 700 | 110 000   | 100 000     |
| 每英里能源成本/美元 | 0.05    | 0.53    | 0.27      | 0.04        |
| 每英里运营成本/美元 | 0.20    | 1.30    | 0.44      | 0.15        |

除性能、成本之外,不少研究学者还对比分析了eVTOL和其他空中交通工具的噪声水平。例如,Stoll等人<sup>[55]</sup>的研究中采用试飞的方法详细检测出Joby S4型号的eVTOL以及AW109、R44型号等直升机的噪声水平,研究结果如图3所示。从图3中可以看出,与传统直升机相比,eVTOL的噪声水平平均降低

了约15 dB,原因可能是eVTOL飞行旋翼的桨尖速度能大幅降低,从而减少了全机的气动噪声。

4 eVTOL城市交通基础设施特征分析

基于前述eVTOL交通方式的优势分析,为了更好地将eVTOL整合到城市空中交通生态系统中,本

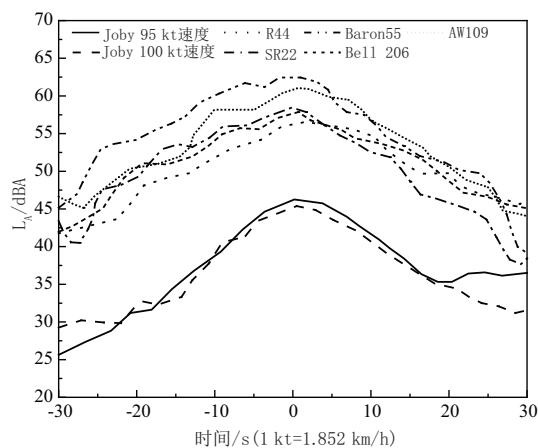


图3 不同飞行器的A计权声压级变化曲线对比<sup>[55]</sup>

节内容将对与建成eVTOL航空器交通网络对应的城市基础设施特征进行分析和阐述,以期为eVTOL未来发展提供参考方向。

4.1 垂直起降场的特征分析

垂直起降场是eVTOL航空路径进出关键节点,其规划直接影响城市空中交通网络的布局与发展。Uber通过多式联运的方法将空中交通网络融入城市交通体系,并借助类似站点拼车的共享模式来提升经济效益与运营规模<sup>[56]</sup>。因此,本节内容将主要综述eVTOL垂直起降场的类型分布、布局选址以及配

套功能区等特征。

4.1.1 类型分布特征

已有的研究或规范中通常根据占地规模、功能、布局方式、选址位置、服务等特征对eVTOL垂直起降场进行分类。基于前述的eVTOL构型特征及城市空中交通设计因素,本小节将从选址位置角度对垂直起降场进行讨论分类,结果如表8所示。由表8可得,eVTOL垂直起降场根据其选址位置和与现有城市环境的融合方式可以将其分为四种类型:楼顶/高空型、地面型(城市绿地/近郊)、交通枢纽集成型以及特殊功能型。其中楼顶/高空型垂直起降场的选址位置位于城市中心和高流量区域,可用于服务高端商务、紧急公务等对时间价值极度敏感的客群。地面型垂直起降场的选址位置主要是城市绿地或城市近郊,是当前阶段最易于规划和实施的类型,典型案例包括法国巴黎大区外的垂直起降场。交通枢纽集成型垂直起降场的选址主要与城市交通枢纽相融合,扩大了城市交通的服务半径。特殊功能型垂直起降场的选址则根据功能需求进行一一对应,此类起降场专注于垂直领域应用,社会效益和商业价值较为明确。

表8 不同类型的垂直起降场

| 类型分布 | 楼顶/高空型                                                                              | 地面型(城市绿地/近郊)                                                                        | 交通枢纽集成型                                                                              | 特殊功能型                                                                                 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 现场照片 |  |  |  |  |
| 选址特征 | 位于城市中心区高层建筑(写字楼、商场、酒店)的顶部或高架桥、立交桥等基础设施之上                                            | 利用城市内部的公园、广场、河岸空地或城市近郊的闲置土地                                                         | 与现有的综合交通枢纽(机场、高铁站、地铁站)紧密结合,通常位于其周边或顶部                                                | 选址服务于特定场景需求,如高速公路服务区、海岛、山区、医院楼顶等                                                      |
| 选址优势 | 充分利用稀缺的土地资源,实现“点对点”的超高效直达,完美融入现有城市交通体系                                              | 选址相对灵活,对现有建筑影响小,土地获取和改造成本低于楼顶型,可设计更大容量                                              | 实现“空陆”无缝衔接,最大化出行效率,吸引巨大客流,运营效益潜力大                                                    | 解决特定痛点,如长途出行休息换乘、应急救援、弥补偏远地区交通短板                                                      |
| 实际案例 | 英国考文垂市中心的城市航空港 Air-One 等                                                            | 广州天德广场、海心沙起降场等地的地面起降场以及重庆梁平区起降点等                                                    | 深圳蛇口邮轮母港、珠海九洲港码头等                                                                    | 沈阳的浑南奥林匹克公园3号码头设置起降点,用于低空观光旅游等                                                        |

综上所述,未来城市空中交通网络的形成,离不开这四类eVTOL垂直起降场的协同发展。其发展趋势可能从特殊功能型和近郊地面型起步,并逐步向枢纽集成型扩展,最终在技术、法规和成本条件成熟时,谨慎地嵌入楼顶型站点,最后构建一个立体化的城市空中交通网络。

4.1.2 布局选址特点

垂直起降场是未来eVTOL运营所必需的基础设施,为了提高eVTOL的运行效率,垂直起降场的布局

选址应考虑以下因素。

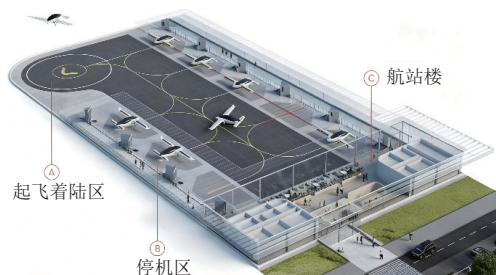
- (1)垂直起降场应靠近人流量大、公共交通需求量多的城市交通枢纽区域,如火车站、汽车站及飞机场等地方<sup>[57]</sup>;
- (2)垂直起降场应考虑周围建筑物的密度和高度,确保有足够的空间供eVTOL安全起飞和降落<sup>[58]</sup>。
- (3)场址选择应充分考虑飞行器噪声及对周边居民空间隐私侵犯等问题<sup>[59]</sup>;

(4)应充分利用城市现有的基础设施,如直升机场、建筑物顶层等<sup>[60]</sup>。

此外,垂直起降场的布局选址还应综合考虑城市交通需求、交通性能与运营模式等多方面因素。例如,Fadhil 等人<sup>[61]</sup>的研究基于地理信息系统的分析方法,为垂直起降场的布局提供全新思路,研究成果通过加权线性组合方法实施适宜性分析,为洛杉矶与慕尼黑两座大城市的基础设施布局提供依据。Rothflood 等人<sup>[62]</sup>的研究通过城市交通系统的性能来确定垂直起降场的布局变化。屈文秋<sup>[63]</sup>的研究根据交通规划四阶段法,对成都市内的城市空中交通需求进行预测,研究结果为场址实际选址提供了参考。

### 4.1.3 配套功能区特色

eVTOL垂直起降场功能配置的配套设施主要参考现有直升机场的设计理念,具有3个组成部分:起飞着陆区域、停机区以及航站楼<sup>[64]</sup>,如图4所示,其中每个组成部分都包括专用设施设备及消防设施<sup>[65]</sup>。

图4 eVTOL垂直起降场<sup>[64]</sup>

#### 4.1.3.1 起飞着陆区域

起飞着陆区域通常设有多个起降坪,并配备精确的助航灯光系统、通信导航设备和气象传感器,以确保eVTOL能全天候安全运行。同时,该区域需进行净空管理,并设置安全隔离设施,防止地面车辆与人员误入。

#### 4.1.3.2 停机区

停机区主要用于eVTOL航空器的停放、日常维护、能源补充(充电或氢燃料补给)<sup>[66]</sup>及调度等日常功能。该区域需合理规划机位布局和地面滑行路线,并配备机坪操作系统、专用供电装置及防火设施,以实现多机协同作业与快速周转,进而提升垂直起降场整体运行容量<sup>[67]</sup>。

#### 4.1.3.3 航站楼

航站楼设计应注重客流效率与舒适性,并提供无缝接驳其他交通方式的接口与集成智能化管理系统,支持身份验证、航班信息显示和乘客

引导等功能。

此外,垂直起降场的设计(如灯光、通信、充电接口)还应趋向标准化和模块化,以提升其对不同环境的适应性与扩展能力,从而能够便捷地融入现有的停车场、屋顶或其他城市基础设施,进而支撑城市空中交通网络的快速扩展。

为确保 eVTOL 垂直起降场的运行安全,各国民航管理机构均制定了相应的障碍物限制规范与技术参数。通过系统对比美国联邦航空管理局 (FAA)、欧洲航空安全局 (EASA) 及中国民航局的相关标准可见,各体系在基础理论框架上具有共性,均以障碍物限制面为核心管理工具,并涵盖障碍物标识与照明要求。然而,在技术理念与具体参数设定上存在明显差异:FAA 延续传统直升机场标准,采用多层级平面管理方法;EASA 则创新提出“无障碍空间”三维概念,更适应高密度城市环境;中国民航局在沿用扇形面管理方法的基础上,增设了电磁干扰限制区要求。具体参数上,各标准在过渡面坡度、核心保护区半径等关键指标上有所不同,体现出各自的地域环境特点与技术发展导向。这些差异既反映了航空安全管理的通用原则,也展现出针对区域条件的灵活调整,为未来国际标准的协调与统一提供了有益参考。

## 4.2 垂直起降机坪尺寸特征

目前城市空中交通领域中垂直起降机坪的设计尺寸主要参考直升机场的设计理念。依据相关的规范标准《广州市低空垂直起降设施场址选择及建设技术指引(试行)》,可将eVTOL垂直起降机坪分成3个组成部分:起飞和着陆区域(TLOF)、最终进近和起飞区域(FATO)以及安全区(SA),如图5所示。

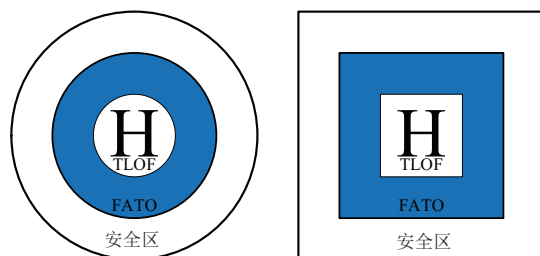


图5 垂直起降机坪组成要素

#### 4.2.1 起飞和着陆区域(TLOF)

TLOF 是指垂直起降场内 eVTOL 航空器可以离地或接地的区域。垂直起降场内应至少设置一个 TLOF,其形状通常设计为圆形或矩形。美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)在最新的规范标准《垂直起降机场设计》中规定,当 TLOF

形状为矩形时,其最小长度与最小宽度均为  $1.0RD$ ;当其形状为圆形时最小直径为  $1.0RD$ 。其中  $RD$  是指 eVTOL 航空器上所有转子从尖端到尖端的最大长度。欧盟航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)则在《垂直起降机场原型设计技术规范》中规定 TLOF 的最小尺寸为  $0.83D$  或者飞机飞行手册规定的长度(两者中取较大者)。此外,中国现行的规范标准《广州市低空垂直起降设施场址选择及建设技术指引(试行)》规定 TLOF 的尺寸应至少能够内切一个设计机型  $1.0D$  的圆,同时应满足航空器中断起飞需求。其中  $D$  为指水平面上包围整个 eVTOL 航空器投影的最小圆的直径。

4.2.2 最终进近和起飞区域(FATO)

FATO 是供 eVTOL 航空器完成进近悬停或着陆的最后阶段并由此开始起飞的区域。每个 TLOF 上方均设有一个 FATO,且两者形状保持一致。根据 FAA 的规定,若该区域形状为正方形时,其最小宽度和长度均不小于  $2RD$ ;若形状为圆形时,则最小直径须为  $2RD$ 。此外,EASA 则要求 FATO 的最小尺寸为  $1.5D$  或者飞行手册规定的长度(两者中取较大者)。中国的规范则规定 FATO 的形状可以为圆形和多边形,并建议优先采用正多边形或圆形,其尺寸应至少能够内切一个设计机型  $2D$  的圆,同时应满足 eVTOL 航空器中断起飞需求。此外,中国规范还要求相邻两个 FATO 的间距应至少大于等于  $5\text{ m}$  或  $0.5D$ 。

4.2.3 安全区(SA)

SA 是指垂直起降场中环绕 FATO 的特定区域。该区域内除必要的导航设施外不得有任何障碍物,其主要用于降低 eVTOL 航空器在意外偏离 FATO 时发生损坏的风险。每个 TLOF 均配置有与之对应的 SA,且 3 者(TLOF、FATO 和 SA)几何形状保持一致。根据 FAA 规范,若 SA 形状为正方形,其最小宽度和长度均须不小于  $2.5D$ ;若形状为圆形,则最小直径应为  $2.5D$ 。而 EASA 则要求 SA 自 FATO 边界向外延伸的距离至少为  $0.25D$  或  $3\text{ m}$ (两者中取较大值)。中国的规范标准则规定 SA 应从 FATO 的四周至少向外延伸  $5\text{ m}$  或  $0.5D$  的距离(两者中取较大值)。此外,中国规范还规定因功能要求必须设置于 SA 内的物体,不应超过以 FATO 边界上方  $25\text{ cm}$  高度为底边、向外升坡为  $5\%$  的斜面,如图 6 所示。其中不同机构对 eVTOL 垂直起降机坪的尺寸大小规定对比如表 9 所示。



图 6 安全区(SA)物体限高示意图

表 9 不同机构机坪尺寸规定对比

| 参数   | 美国联邦航空管理局  | 欧盟航空安全局                     | 中国民用航空局                      |
|------|------------|-----------------------------|------------------------------|
| TLOF | $1.0RD$    | $0.83D$                     | $1.0D$                       |
| FATO | $2.0RD$    | $1.5D$                      | $2.0D$                       |
| SA   | $2.5D$     | 向外延伸 $0.25D$ 或 $3\text{ m}$ | 向外延伸 $0.5D$ 或 $5\text{ m}$   |
| 参照规范 | 《垂直起降机场设计》 | 《垂直起降机场原型设计技术规范》            | 《广州市低空垂直起降设施场址选择及建设技术指引(试行)》 |

4.3 航路安全保障措施特征

为保证城市空中交通网络运行的安全,需为 eVTOL 航空器构建包括低空公共航路、通信设备、导航设备与监视设备在内的全方位航路安全保障支撑体系。该体系主要包括低空航路规划、依托 5G 通信网络实现的低空通信能力、高精度 RTK 定位服务网、精细化气象预报系统以及 eVTOL 航空器实时监控等功能。

4.3.1 低空公共航路规划

低空公共航路是基于高精度地理信息、动态空域管理、近地气象监测以及通信网络等基础设施,为多种 eVTOL 预先构建的结构化航线系统,是保障低空 eVTOL 安全高效运行的新型基础设施<sup>[68]</sup>,如图 7 所示。其“公共”属性<sup>[69]</sup>体现为面向多机型、多用途用户共享使用,通常设有多条平行航道,并实行统一的空域准入规则和航空器认证标准。通过对低空公共航路网进行科学规划,能够在顶层设计阶段就对各类航空器的飞行路径进行统一规范,从而在确保空域安全无冲突的前提下,显著提升低空运行容量,适应多机型、多任务航空器的协同运行需求,如复合翼 eVTOL 需预留更大的尾流间隔等。这一机制体现了对城市空中交通网络的精细化与系统化管控<sup>[70-71]</sup>。

4.3.2 通信设备

为确保 eVTOL 航空器能在复杂的城市低空环境中安全运行,低时延、高稳定性的通信链路是不可或缺的关键条件。与传统航空通信方式<sup>[73]</sup>如甚高频通信系统(very high frequency, VHF)和卫星通信相比,5G 通信技术<sup>[74]</sup>在成本、可靠性和覆盖范围方面具有明显优势。然而,现有 5G 基站主要服务于地面用户,难以满足低空区域的通信需求。因此,为实现城

图7 低空公共航路概念图<sup>[72]</sup>

市空中交通基于5G的可靠通信,需结合eVTOL航路规划设计,对地面通信基站进行基础布局,并针对低空航路实施增强型覆盖建设,从而确保eVTOL航路的安全。

#### 4.3.3 导航设备

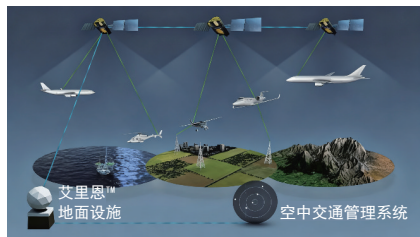
导航设备可为eVTOL航空器提供环境感知与航路指引,使其具备实时感知与自主避障能力,进而有效应对飞行中突然出现的静态或动态障碍物。此外,导航设备还可通过获取eVTOL航空器的实时位置、速度、航向及航路信息,从而保障其安全高效地完成飞行任务。其中,eVTOL航空器的主要导航方式<sup>[75]</sup>包括惯性导航(inertial navigation system, INS)、卫星导航(global navigation satellite system, GNSS)和视觉导航三类。

#### 4.3.4 监视设备

民用航空的监视技术主要以广播式自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)为主,如图8所示。ADS-B作为一种协同监视技术,具有定位精度高、覆盖范围广等优势,并可实现信息的自动实时广播。这些特性有助于缩小航空器间隔、优化航路结构以及提升空域容量。然而,ADS-B系统依赖全球导航卫星系统和地面基站支持,自身无法独立验证目标位置。因此,中国民用航空局规定<sup>[76]</sup>,民用微型、轻型和小型无人驾驶航空器不得在任何空域使用ADS-B发射机广播运行识别数据,但可加装ADS-B接收机,以实现有人驾驶航空器的感知与识别。

## 5 总结与展望

本文详细综述了电动垂直起降飞行器(eVTOL)的研究现状及未来发展。本文首先简单介绍了三种

图8 ADS-B概念示意图<sup>[77]</sup>

不同构型eVTOL的结构特征和优缺点分析;然后在此基础上为不同的eVTOL匹配对应的城市应用场景;之后将eVTOL与现有的城市交通方式进行对比分析以突出其空中优势;最后详细阐述了与eVTOL功能对应的城市基础设施的技术现状和未来发展。根据已有的研究,可得出以下结论。

(1)根据电动垂直起降飞行器的结构特征,可将其主流机型分为多旋翼构型、复合翼构型和倾转旋翼构型三种类型,同时通过与传统低空交通工具的对比,突出eVTOL航空器的优势特征。

(2)依据不同构型eVTOL航空器的设计航程、设计速度及起飞重量等特征对其进行分类,并设计航程与速度两个角度对3种机型在城市空中交通应用场景分布进行说明。即多旋翼适用于市内任务,如高空消防、旅游观光等;复合翼适用于城市之间的任务,如物流配送等;倾转旋翼则适用于需求更高速度的城市之间任务,如紧急救援等。

(3)基于eVTOL航空器应用场景分布,将其与现有的城市交通方式进行对比分析,以便突出eVTOL交通方式的优势特征。与城市地面交通相比,eVTOL具有速度快且不受地面拥堵影响的优势;与城市空中交通相比,eVTOL具有更低的噪声水平以及更高的经济效益。

(4)结合eVTOL与城市交通相融的发展需求,对与其相适应的城市交通基础设施进行特征分析。垂直起降场因选址位置的不同可分为四种类型,其选址可充分利用现有城市基础设施,如建筑屋顶、直升机场位等;垂直起降机坪可分为FATO、TLOF、SA 3个区域,其尺寸特征依据各国规范进行设定;eVTOL航路安全主要依靠航路规划及通信导航监视设备进行保障。

总体来看,尽管eVTOL技术发展已取得长足进步,但其仍面临诸多挑战。要实现eVTOL在城市交通中的成功应用,仍需通过跨学科协同合作以攻克技术挑战,并逐步构建起广泛的公众信任与完善的监管体系。虽然eVTOL发展仍面临诸多挑战,但其

前景令人期待。相信在不远的将来,eVTOL这一新型交通方式有望真正融入城市交通生态系统中,成为人们日常出行的组成部分。

#### 参考文献:

- [1] Ji H, Chen R, Li P. Real-time simulation model for helicopter flight task analysis in turbulent atmospheric environment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92:289-299.
- [2] 蒙迪, 韩冰, 宁方立, 等. 全电/混动直升机发展及动力/传动系统综述[J/OL]. *航空工程进展*, 2025: 1-18. (2025-05-09)[2025-09-09]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZBmzy5eCHcb2H2-1DyHiSeGLBOKScSsDpbRfECq8c4aTg7kuYHiU\\_POt71mBnzjdB4LYv0v0eVz7v3c-HKQanKNfqiT54mC2F74k2EW19QmYBxDzowGqS1Sur58z-gH5gIL2a1bsUmjRinFwoX535bpYbL\\_c6wJ-Vd8Oi3MjRUHRZQ9HvLpWRA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZBmzy5eCHcb2H2-1DyHiSeGLBOKScSsDpbRfECq8c4aTg7kuYHiU_POt71mBnzjdB4LYv0v0eVz7v3c-HKQanKNfqiT54mC2F74k2EW19QmYBxDzowGqS1Sur58z-gH5gIL2a1bsUmjRinFwoX535bpYbL_c6wJ-Vd8Oi3MjRUHRZQ9HvLpWRA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [3] 张啸迟, 万志强, 章异赢, 等. 旋翼固定翼复合式垂直起降飞行器概念设计研究[J]. *航空学报*, 2016, 37(1): 179-192.
- [4] Brelje B J, Martins J R R A. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 104: 1-19.
- [5] Straubinger A, Rothfeld R, Shamiyeh M, et al. An overview of current research and developments in urban air mobility-Setting the scene for UAM introduction[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 87: 101852.
- [6] Denso Corporation. Electric vertical takeoff and landing aircraft: EP4023550A1[P]. 2022-07-06.
- [7] FAA. Urban air mobility and advanced air mobility [EB/OL]. (2022-06-19) [2025-09-08]. [https://www.faa.gov/uas/advanced\\_operations/urban\\_air\\_mobility](https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/urban_air_mobility).
- [8] Xiang S, Xie A, Ye M, et al. Autonomous eVTOL: A summary of researches and challenges[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2024, 3(1): 100140.
- [9] Morgan Stanley. eVTOL/Urban Air Mobility TAM Update: A Slow Take-off, but Sky's the Limit [EB/OL]. (2022-06-19) [2025-09-08]. [https://assets.vertical-mag.com/wp-content/uploads/2021/05/Morgan-Stanley-URBAN\\_20210506\\_0000.pdf](https://assets.vertical-mag.com/wp-content/uploads/2021/05/Morgan-Stanley-URBAN_20210506_0000.pdf).
- [10] 华经产业研究院. 2025—2031年中国城市空中交通(UAM)行业发展全景监测及投资方向研究报告[R]. 北京: 华经产业研究院, 2025.
- [11] BIS Research. Urban Air Mobility (UAM) Market-A Global and Regional Analysis[EB/OL]. (2021-03-20) [2024-08-30]. <https://bisresearch.com/industry-report/global-urban-air-mobility-market.html>.
- [12] Ploetner K O, Al Haddad C, Antoniou C, et al. Long-term application potential of urban air mobility complementing public transport: an upper Bavaria example[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2020 (11): 991-1007.
- [13] FAA. Joby receives Part 135 certification from the FAA [EB/OL]. (2023-02-20) [2023-11-30]. <https://www.jobyaviation.com/news/joby-receives-part-135-air-carrier-certificate/>.
- [14] eVTOL Insights Editorial. "Take a bow midnight": Archer unveils its production aircraft[EB/OL]. (2023-02-20) [2025-09-08]. <https://evtolinsights.com/2022/11/take-a-bow-midnight-archer-unveils-its-production-aircraft>.
- [15] Alcock C. Vertiport testbed evaluates eVTOL air services at Paris airport[EB/OL]. (2022-11-10) [2025-09-08]. <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-11-10/vertiport-testbed-opens-paris-air-mobility-development-project>.
- [16] 中国民用航空局. 亿航EH216-S型无人驾驶航空器系统专用条件[Z]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- [17] Hu L, Yan X, Yuan Y. Development and challenges of autonomous electric vertical take-off and landing aircraft[J]. *Heliyon*, 2025, 11(1): e41055.
- [18] Velaz-Acera N, Ruiz-Marin R, Borge-Diez D. Comparative economic, energy, and environmental analysis of fuel cell and electric eVTOL systems: Case study of Iberian Peninsula[J]. *Journal of cleaner production*, 2025(3): 495.
- [19] Preis L, Herniczek M T K, German B J. Assessing prominent eVTOLs based on vertiport throughput, noise, and speed using multi-dimensional pareto fronts[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2025, 159.
- [20] 穆作栋, 袁成. 美国空军敏捷至上电动垂直起降飞行器项目分析[J]. *飞航导弹*, 2021(2): 59-63; 75.
- [21] 人民网. 阿联酋推进城市空中交通基础设施建设[EB/OL]. (2025-04-23)[2025-09-24]. <http://world.people.com.cn/n1/2025/0423/c1002-40466640.html>.
- [22] Expert Insights News. Abu Dhabi Completes Drone Delivery Trial and Unveils 250kg VTOL Cargo Aircraft Breakthrough[EB/OL]. (2025-04-20) [2025-09-24]. <https://expertinsightsnews.com/breaking-news/uae/abu-dhabi-completes-drone-delivery-trial-and-unveils-250kg-vtol-cargo-aircraft-breakthrough-arabian-business-latest-news-on-the-middle-east-real-estate-finance-and-more/>.
- [23] 网易新闻. 全球eVTOL赛道竞争加剧, 中国方案崭露头角[EB/OL]. (2025-09-22) [2025-09-24]. [https://www.163.com/dy/article/K9S09JBV05568E2X.html?spss=dy\\_author](https://www.163.com/dy/article/K9S09JBV05568E2X.html?spss=dy_author).
- [24] 山东省科学技术厅. 山东省低空经济高质量发展行动方案发布[EB/OL]. (2025-09-18) [2025-09-24]. [http://kjt.shandong.gov.cn/art/2025/9/18/art\\_333096\\_10321381.html](http://kjt.shandong.gov.cn/art/2025/9/18/art_333096_10321381.html).
- [25] 湖北日报. 武汉汉阳“低空经济”加速起飞, 打造立体交通新范式[EB/OL]. (2025-09-21) [2025-09-24]. [https://news.hubeidaily.net/mobile/c\\_3864703.html](https://news.hubeidaily.net/mobile/c_3864703.html).
- [26] eVTOL产业迎来政策东风, 万亿市场蓄势待发[EB/OL]. 东方财富网. (2025-09-18) [2025-09-24]. <https://finance.eastmoney.com/a/202509183517529140.html>.
- [27] 中国通信网. 低空通信网络成为5G-A新战场[EB/OL]. (2025-09-21) [2025-09-24]. [https://www.comnews.cn/m/content/2025-09/21/content\\_56397.html](https://www.comnews.cn/m/content/2025-09/21/content_56397.html).
- [28] 中华网. 中国十七冶深圳陆空一体智能网联综合交通测试基地主体工程完工[EB/OL]. (2025-08-29) [2025-09-24]. [https://m.life.china.com/2025-08/29/content\\_480941.html](https://m.life.china.com/2025-08/29/content_480941.html).
- [29] M Ding, Y Zhang, S Zhu, et al. Aerodynamic Simulation of a Typical Multirotor eVTOL Aircraft Configuration[C]//2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). New York: IEEE, 2022: 765-769.
- [30] M. W. Floros, W. Johnson. Performance analysis of the slowed-rotor Compound helicopter configuration[J]. *Journal of The American*

- Helicopter Society, 2009, 54(2): 022002.
- [31] M.W. Floros, W. Johnson. Stability and control analysis of the slowed-rotor compound helicopter configuration[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2007, 52(3): 239-253.
- [32] Yan X, Chen R. Augmented flight dynamics model for pilot workload evaluation in tilt-rotor aircraft optimal landing procedure after one engine failure[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 32(1): 92-103.
- [33] 张洪. eVTOL 飞行器的发展态势与应用场景综述[J]. 空运商务, 2022(12): 22-28.
- [34] Xiang S, Xie A, Ye M, et al. Autonomous eVTOL: A summary of researches and challenges[J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2024, 3(1): 100140.
- [35] 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.
- [36] 谢安恒. 高效可靠多旋翼电动垂直起降飞行器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [37] Zhang T, Barakos G, Furqan. On the aerodynamic performance of redundant propellers for multi-rotor eVTOL in cruise[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 145: 108846.
- [38] Chen G, Chow J, Qiao X. Aerodynamic Investigation of a New Layout for eVTOL Aircraft[C]// Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology. Singapore: Springer, 2024.
- [39] 王兴隆, 王友杰. 面向城市低空的多机型 eVTOL 安全间隔评估[J]. 航空学报, 2025, 46(1): 275-290.
- [40] Yuan Y, Thomson D, Chen R. Investigation of lift offset on flight dynamics characteristics for coaxial compound Helicopters[J]. Journal of Aircraft, 2019, 56(6): 2210-2222.
- [41] Bacchini A, Cestino E. Electric VTOL configurations comparison[J]. Aerospace, 2019, 6(3): 26.
- [42] Xufei Y, Renliang C, Bin L, et al. Study on control strategy for tilt-rotor aircraft conversion procedure[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1924(1): 012010.
- [43] Yukei O, Mohsen R, Joon C. Conceptual design and analysis of a box fan-in-split-wing tiltrotor eVTOL aircraft[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2024, 96(9): 1139-1151.
- [44] Xiang S, Xie A, Ye M, et al. Autonomous eVTOL: A summary of researches and challenges[J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2024, 3(1): 100140.
- [45] 尤少春, 张晓丽, 吴飞飞, 等. 电动垂直起降飞行器发展现状及其在航空医疗救援中的应用展望[J]. 医疗卫生装备, 2024, 45(2): 82-86.
- [46] Garrow A L, Mokhtarian L P, German J B, et al. Market segmentation of an electric vertical takeoff and landing (eVTOL) air taxi commuting service in five large U.S. cities[J]. Transportation Research Part A, 2025, 191: 104-267.
- [47] 小牛行研. 上海临港-虹桥交通枢纽 eVTOL 飞行与地面交通对比[EB/OL]. (2025-02-24) [2025-09-08]. <https://www.hangyan.co/charts/3348587069969532673>.
- [48] 北京租车网. 京牌出租车行业优势与挑战解析[EB/OL]. (2025-07-04) [2025-09-08]. <http://qxtynj.com/news/7166>.
- [49] 立鼎产业研究网. eVTOL 行业概念、产品特性、技术路线及厂商布局分析[EB/OL]. (2024-04-10) [2025-09-08]. <https://www.leadingir.com/hotspot/view/4015.html>.
- [50] 飞行汽车网. 低空经济万亿市场, 飞行汽车是智商税还是未来刚需[EB/OL]. (2025-09-05) [2025-09-08]. <https://www.feiauto.com/wd/1587.html>.
- [51] 刘文静, 陈跃峰, 林伟. 低空经济助力智慧城市建设更新发展的对策建议[J]. 西部人居环境学刊, 2025, 40(3): 34-40.
- [52] Robinson Helicopter Company. R22 pilots operating hand-book and FAA approved rotorcraft flight manual[EB/OL]. (2021-11-17) [2025-09-08]. <https://robinsonheli.com/r22-pilots-operating-handbook>.
- [53] Van's aircraft-aircraft models: RV-7/7A performance[EB/OL]. (2020-07-01) [2025-09-08]. <http://www.vansaircraft.com/public/rv7perf.htm>.
- [54] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 55-77.
- [55] Stoll A, Aviation J, Bevitt J. Development of eVTOL aircraft for urban air mobility at Joby aviation[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 78th Annual Forum. New York: Curran Associates, 2022.
- [56] Holden J, Goel N. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation[R]. San Francisco: Ober Elevate, 2016.
- [57] Thompson P, Neir R, Reber R, et al. Civil tiltrotor missions and applications. Phase 2: The commercial passenger market[R]. US: NASA/FAA, 1991.
- [58] Cohen M M. The vertiport as an urban design problem [R]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [59] Parker D, Vascik, et al. Analysis of Urban Air Mobility Operational Constraints[J]. Air traffic control quarterly, 2018, 26(4): 133-146.
- [60] Grandl G, Ostgathe M, Cachay J, et al. The future of vertical mobility [J]. Porsche Consulting, 2018: 1-36.
- [61] Fadhil D N, Rothfeld R, Luftfahrt B, et al. A GIS-based Analysis for Selecting Ground Infrastructure Locations for Urban Air Mobility[J]. 2018.
- [62] Rothfeld R, Balac M, Ploetner K O, et al. Agent-based simulation of urban air mobility: AIAA-2018-3891[R]. Reston: AIAA, 2018.
- [63] 屈文秋. 基于四阶段法的城市空中交通(UAM)流量需求预测研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- [64] Lilium. Designing a scalable vertiport[EB/OL]. (2020-7-2) [2025-09-08]. <https://lilium.com/newsroom-detail/designing-a-scalable-vertiport>.
- [65] T/CCAATB 0062—2024 电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求[S].
- [66] Kohlman L W, Patterson M D. System-level urban air mobility transportation modeling and determination of energy-related constraints [C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, Georgia: AIAA, 2018.
- [67] Shao Q, Shao M, 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(11): 132.
- [68] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平, 等. 无人机应用发展关键基础设施与低空公共航路网规划[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 977-988.
- [69] 廖小罕, 黄耀欢, 徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2607-2620.
- [70] Neto E C P, Baum D M, Almeida J R, et al. A trajectory evaluation platform for urban air mobility (UAM)[J]. IEEE transactions on