

文章编号:1671-1637(2026)03-0106-12

基于多商品流模型的城市低空垂直起降机场 吞吐量包络分析

常 鑫^{1,2}, 唐 尧¹, 汤新民^{*1,2}, 高建树¹, 姚志洪³

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室, 天津 300300; 3. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756)

摘要:为探究城市低空垂直起降机场起降方式选择及其吞吐量影响因素,构建了垂直起降机场多商品流模型,系统分析了垂直起降平台(TLOF)数量、登机口数量对垂直起降机场吞吐量的影响;实现了对设施利用率量化计算以及场面吞吐量包络图的生成,在此基础上揭示了保障设施最优数量配置,并对比了不同起降方式下的性能差异,为优化垂直起降机场设施配置提供了科学依据,提升了场面空间利用效率,实现了垂直起降机场集约化设计与运行。研究结果表明:单 TLOF 机场登机口数量的合理区间为 4~5 个,此时 TLOF 利用率分别为 92%和 100%,登机口利用率分别为 55%和 57%,登机口等待率分别为 7%和 12%,5 个登机口相比 4 个提供了更高的设施利用率,但同时导致了显著的离场排队;多 TLOF 机场独立起降方式对场面吞吐量的提升最为显著,在所考虑的 2、3 个 TLOF 机场中相比单一起降方式分别提升了 57%和 135%;单一起降方式下 TLOF 数量对吞吐量的影响有限;平行起降方式展现了与独立起降方式一致的吞吐量增长和最大不平衡进场量增长,但其包络面积小于后者。研究成果可为城市空中交通垂直起降机场吞吐量计算、基础设施方案设计以及运行管制决策提供理论方法支持,进一步推动低空基础设施建设标准化发展。

关键词:低空交通;垂直起降机场;多商品流模型;包络分析;吞吐量;起降方式

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.087

Throughput envelopment analysis of urban low-altitude vertiports based on multi-commodity flow model

CHANG Xin^{1,2}, TANG Yao¹, TANG Xin-min^{*1,2}, GAO Jian-shu¹, YAO Zhi-hong³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Key Laboratory of Technology and Equipment of Tianjin Urban Air Transportation System, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 3. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: To explore the takeoff and landing mode selection and influencing factors for throughput of urban low-altitude vertiports, a vertiport multi-commodity flow model was constructed. The impact of the number of touchdown and lift-off facilities (TLOF) and the number of boarding gates on the throughput of vertiports was systematically analyzed. The

出版历程:2025-07-14 收稿,2025-10-15 修回,2025-11-27 录用

基金项目:天津市科技计划项目(25JCLQJC00080)

作者简介:常 鑫(1991-),男,河南南阳人,讲师,工学博士,E-mail:xchang@cauc.edu.cn.

*通信作者:汤新民(1979-),男,湖南常德人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:xmtang@cauc.edu.cn.

引用格式:常 鑫,唐 尧,汤新民,等.基于多商品流模型的城市低空垂直起降机场吞吐量包络分析[J].交通运输工程学报,2026,26(3):106-117.

Citation:CHANG Xin, TANG Yao, TANG Xin-min, et al. Throughput envelopment analysis of urban low-altitude vertiports based on multi-commodity flow model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 106-117.

quantitative calculation of facility utilization rate and the generation of surface throughput envelope map were performed. On this basis, the optimal quantity configuration of support facilities was revealed. The performance differences under different takeoff and landing modes were compared to provide a scientific basis for optimizing the facility configuration of vertiports. The utilization efficiency of surface space was improved and the intensive design and operation of vertiports were achieved. The research results show that the reasonable range of the number of boarding gates in a single TLOF vertiport is 4 - 5. At this time, the utilization of TLOF is 92% and 100%, respectively. The utilization of boarding gates is 55% and 57%, respectively. The waiting rate of boarding gates is 7% and 12%, respectively. Compared with 4 boarding gates, 5 boarding gates provide higher utilization of facilities, but lead to significant departure queues. The independent takeoff and landing mode of multiple TLOF vertiports has the most significant improvement on the surface throughput, which is 57% and 135% higher than that of the single takeoff and landing mode among 2 - 3 TLOF vertiports considered. The influence of TLOF number on throughput is limited under the single takeoff and landing mode. The parallel takeoff and landing mode demonstrates the same throughput growth and maximum unbalanced approach growth as the independent takeoff and landing mode. However, the envelope area of the former is smaller than that of the latter. The research results can provide theoretical and methodological support for calculating the throughput of urban air traffic vertiports, designing infrastructure schemes, and making operational control decisions, thus promoting the standardized development of low-altitude infrastructure construction.

Keywords: low-altitude traffic; vertiport; multi-commodity flow model; envelopment analysis; throughput; take-off and landing mode

Publication history: Received 2025-07-14; Received in revised form 2025-10-15; Accepted 2025-11-27

Funding: Tianjin Science and Technology Plan Program (25JCLQJC00080)

* **Corresponding author:** TANG Xin-min, professor, PhD, E-mail: xmtang@cauc.edu.cn.

0 引言

城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)作为低空经济发展的重要组成部分,旨在提升城市、郊区及区域间的交通流动性,缓解地面交通压力,为城市提供更多的出行空间^[1]。其核心构成包括各类垂直起降航空器(Vertical Take-off and Landing-capable Aircraft, VTOL-VCA),以及为支撑其运行而专门建设的基础设施——垂直起降机场。垂直起降机场在UAM系统中承担着乘客上下、能源补给、航空器维修等多项关键任务,必须具备足够的航空器与乘客吞吐能力,以支持远超传统直升机场的大规模、高频次运行需求。Chen等^[2]设计了一种混合变量邻域搜索的启发式算法,实现了城市中垂直起降机场的高效选址;Sun等^[3]从不同关键维度进行了政策重点分析,为垂直起降机场的建设提供了政策解析。然而城市空间的限制对垂直起降机场的设计与布局提出了严峻挑战,在受限空间内实现吞

吐能力的最大化成为当前研究的关键问题之一^[4],通过优化场面运行模式,能够进一步提升垂直起降机场的通行能力,从而更好地满足UAM系统的高效运行需求。

现有对垂直起降机场的研究主要集中在拓扑结构优化、容量关键因素识别、运行效率提升以及空域规划等方向。构建垂直起降机场多商品流模型与场面吞吐量估算是合理规划垂直起降机场的基础^[5-6],但现有研究未能系统分析空域划设与垂直起降机场起降方式之间的耦合关系。Zelinski^[7]提出通过优化垂直起降机场的拓扑结构设计能够在空间受限的城市环境中实现吞吐能力的最大化,从而提升运行效率并满足安全间距要求。Su等^[8]通过构建多目标模型和奖励适应机制,在考虑垂直起降机场最大化效益的同时最小化电动垂直起降航空器(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)之间的拥堵情况。Rimjha等^[9]指出,识别影响城市区域垂直起降机场吞吐量的关键因素,对于提升UAM网络

整体运行效率具有重要意义。Escribano Macias 等^[10]则强调减少航空器在垂直起降机场的等待时间是降低 UAM 网络运营成本的关键路径之一。张洪海等^[11]强调应充分考虑低空空域环境的复杂性开展科学合理的空域规划,以实现低空空域资源的优化配置与安全高效运行。此外基于国际民航组织与欧洲航空安全局的相关标准,张洪海等^[12]设计了适用于城市物流无人机的垂直起降程序,在中低流量与低限流条件下显著提升了飞行稳定性与物流效率。

在运行调度与吞吐量评估方面,现有研究主要针对不同拓扑结构与运行参数进行评估,但未能有效评估起降平台之间在土地与空域资源上的竞争关系。Preis 等^[13-14]构建基于智能体的仿真模型实现了对垂直起降机场运行流程的敏感性分析,提高对垂直起降机场吞吐量评估的准确性,还引入了每个区域的每小时乘客吞吐量作为性能指标,对不同规模的垂直起降机场进行比较,以分析垂直起降机场能够管理和运营的客运量及场面吞吐量对变化的敏感性。魏志强等^[15]针对 eVTOL 在垂直起降机场的任务规划与吞吐量估算问题开展了深入研究,构建了高效的任務规划模型,有效提升了机场的运行效率与容量韧性,为 eVTOL 的运行调度提供了理论支持与实践路径。Vascik 等^[16]构建了基于整数规划的垂直起降机场吞吐量包络线模型,针对不同拓扑结构与运行参数的吞吐量及其敏感性进行分析,证明了整数规划模型在场面吞吐量分析与资源配置优化方面的有效性,为高密度城市区域垂直起降机场的紧凑型设计与吞吐量最大化提供了理论基础与方法论支撑。陈正磊等^[17]提出一种多智能体建模和蒙特卡洛仿真方法,对不同运行模式下的机场容量进行了评估,同时分析了运行模式等因素对机场容量的影响。

综上所述,现有关于垂直起降机场的研究主要集中于拓扑结构设计 with 运行参数优化,部分研究虽关注登机口数量、起降时长等因素并探讨了无人机运行程序的设计但缺乏对垂直起降机场运行模式、终端空域与土地资源等的综合考量。这种缺失导致现有拓扑优化方案在运行保障适应性方面存在明显局限,难以支撑高密度城市环境下 UAM 系统的可持续运行。本文基于整数规划构建垂直起降机场多商品流模型,将起降方式量化为可计算的决策变量并嵌入终端空域资源联动机制使空域冲突成为吞吐量评估的显性约束。该模型可差异化量化各起降航

线冲突对吞吐量的边际影响,进而实现垂直起降机场的集约化设计。针对独立起降、平行起降与单一起降 3 种典型方式刻画了有限场面资源下航空器周转的全过程,实现对有限场面资源条件下的动态占用特征研究,精准识别各方式的资源瓶颈与效率差异,为起降方式优化提供直接依据。研究成果可为高密度城市垂直起降机场的起降平台布局优化与起降方式设计提供科学的吞吐量决策支持,提升其在复杂城市空域环境中的适应性与运行韧性。

1 垂直起降机场运行网络流

1.1 运行任务分析

Bertsimas 等^[18]在垂直起降机场研究中引入多商品流模型,并采用整数规划(Integer Programming, IP)方法进行求解。该方法将不同类型的垂直起降航空器视为具有不同运行参数的商品,从而能够精确刻画每架航空器在垂直起降机场内的运行路径。本文考虑垂直起降机场具有如图 1 所示的结构,其中包含用于上下乘客的登机口(G)、用于航空器起降的垂直起降平台(Touchdown and Lift-off Facilities, TLOF)(H)和用于航空器在设施间移动的滑行道。为构建运行任务网络,本文将垂直起降航空器(Capable Aircraft, VCA)在垂直起降机场中执行的各项任务抽象为节点,任务间的过渡关系抽象为路径,如图 2 所示。该运行网络流示意图中的垂直起降机场包含 2 个最终起飞与着陆区、2 个登机口和 2 套进离场程序。图 2 中圆形节点表示抽象后的任务节点,节点间的连线表示 VCA 在不同任务之间过渡所需完成的动作。其中“起点”表示航空器从进场队列进入垂直起降机场管制范围,而“结束”表示航空器离开垂直起降机场管制范围进入周围空域系统。

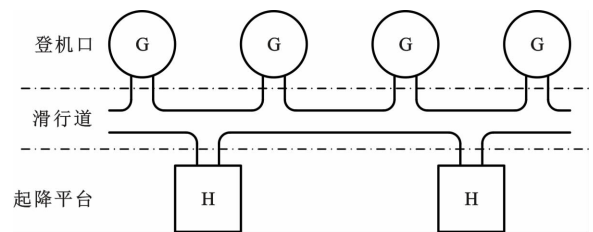


图 1 垂直起降机场结构

Fig. 1 Structural of vertiports

对所考虑的垂直起降机场,模型使用降落、起飞 2 个独立节点表示到达 TLOF 和离开 TLOF 任务,同时引入“进近点”和“离场点”刻画垂直起降机场起降航线。由此,模型引入 TLOF 冲突约束条件:在

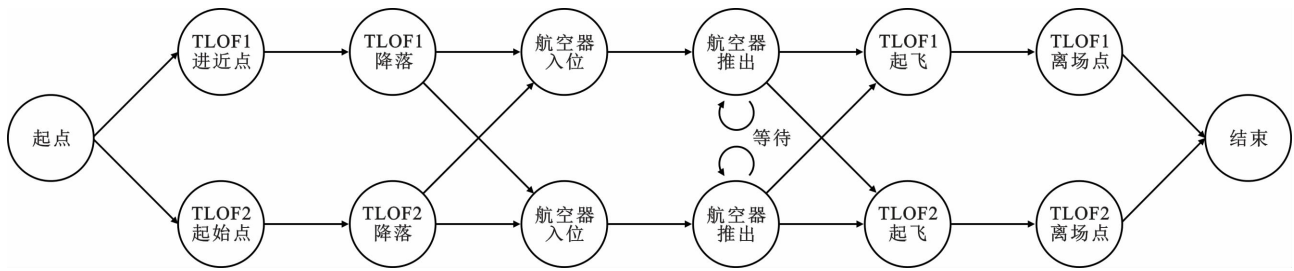


图2 垂直起降机场运行网络流

Fig. 2 Operational network flow of vertiports

任意时刻,不允许多架航空器同时从与同一 TLOF 平台相关的节点到达或离开。类似地,在运行网络流中,每个登机口被相似地拆分为入位和推出节点,“航空器入位”节点代表到达空闲登机口的航空器,“航空器推出”节点代表完成装载并准备离开登机口的航空器,模型引入约束:在任意时刻,不允许多架航空器同时在与同一登机口相关的节点执行入位或推出操作。

运行网络流中每个路径均与航空器经历该路径所需的行程时间相关联。这些行程时间与第 2.1 节中提出的操作参数相对应。航空器在节点上不会停留,而是从一个路径过渡到另一个路径。此外,模型中所有路径均为单向路径,且一般限制在 1 架航空器的容量之内。

1.2 运行参数

垂直起降机场的吞吐量评估与其建设规模及运行规则密切相关。目前,成规模且专为低空航空器服务的垂直起降机场仍较为稀缺,相关研究尚处于探索阶段。垂直起降机场吞吐量评估研究主要聚焦于航空器的起降运行流程。与传统民航机场相比,专为低空航空器服务的起降场虽然规模较小,但功能完备,在有限的场面环境中,能够实现起飞、降落、能源补给、装卸货物以及应急服务等关键功能。任何一个环节的疏漏,都可能降低整体场面运行效率,进而影响场面吞吐量,导致资源浪费。

Vascik 等^[16]对航空器在场面内的运行流程进行系统建模,进而使用整数规划算法求解场址所能服务的最大航空器架次。Zhang 等^[19]进一步考虑了无人机延误场景,提出一种基于排队论的垂直起降机场容量评估方法。Rimjha 等^[9]重点研究了充电速率、服务时间等因素对垂直起降机场容量的影响并指出垂直起降机场是城市空中交通航线网络的关键结点,直接影响整个 UAM 系统的运行效率。

本文通过整数规划模型对构建的垂直起降机场运行网络流进行求解,模型中所考虑的基础设施变

量如下。

(1)TLOF,场面接地和离地区是供垂直起降航空器接地或离地的一块承载区。垂直起降航空器并不一定在这个位置上实际接地或离地(如航空器使用悬停滑行模式进入或离开该区域时)。本研究聚焦于配置有 1~3 个 TLOF 区域的垂直起降机场,且不包括专为接收悬停滑行模式的垂直起降航空器而设置在机位上的 TLOF 区域。

(2)专用登机口,专用登机口是垂直起降机场内用于完成乘客及行李装卸操作的指定区域。本研究聚焦于配置有 0~8 个专用登机口区域的机场拓扑。

本文参考有关垂直起降航空器滑行时间与进离场调度等相关研究^[20-21],参考亿航 EH216-S 型电动垂直起降航空器运行演示视频,选取垂直起降航空器在垂直起降机场场面或所属空域完成特定任务所需的运行参数如表 1 所示,其中到达时间、离场时间、登机口准备时间和登机口乘降时间以参考数据向仿真时间步($15 \text{ s} \cdot \text{步}^{-1}$)取整,登机口滑行时间假设为仿真最小时间步。

2 垂直起降机场吞吐量估算

吞吐量指在单位时间内系统成功处理任务数量,党庆庆等^[20]提出垂直起降机场吞吐量一般定义为在给定的时间内,进行的飞行器起降次数。本文考虑将垂直起降机场在单位时间内所能承载的最大航空器进离场数量作为垂直起降机场吞吐量,并将其作为评价指标。为此构建并求解了基于整数规划框架的机场多商品流模型,以实现 VCA 在垂直起降机场内的高密度协同运行。该模型通过刻画 VCA 在时空网络上 TLOF 独占性、登机口独占性及终端空域冲突等约束,精确描述了 VCA 在垂直起降进场内的运行流程。模型以最大可服务的进离场航班数量作为优化目标函数,通过动态调节进离场奖励系数,绘制精细化的场面吞吐量包络图,为识别吞吐量瓶颈提供了量化依据,为机场资源配置优

表1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

| 参数名称 | 设定值 | 说明 |
|---------|-----|---|
| 到达时间 | 60 | 航空器从终端区开始最终进近着陆、着陆或悬停在 TLOF 上方、滑行至 TLOF 安全区域边缘所需的时间 |
| 离场时间 | 60 | 航空器从安全区域边缘滑行到 TLOF、起飞、进入终端区所需的时间 |
| 登机口滑行时间 | 15 | 航空器从 TLOF 安全区域边缘滑行到登机口边缘或反方向滑行所需的时间 |
| 登机口准备时间 | 15 | 航空器从登机口边缘滑行至航空器停稳、旋下旋翼(必要时)所需的时间 |
| 登机口乘降时间 | 300 | 航空器在登机口执行乘客/行李卸载和装载任务,然后滑行至登机口区域边缘所需的时间 |

化提供科学指导。

2.1 多商品流模型目标函数与约束

整数规划算法将飞机分配到垂直起降机场网络模拟运行周期的每个时间步的各个路径上,以最大化目标函数值。

运用整数规划方法求解模型的目标是得到规定仿真时间内,基于仿真设定的进、离场奖励 c^a 和 c^d , 获取垂直起降机场所能达成的最优运行规划。当飞机完成到达路径并过渡向滑行路径的瞬间,获得到达奖励,表示有一架航空器抵达垂直起降机场。航空器完成离场路径并过渡向结束路径的瞬间,获得离场奖励,表示由一架航空器离开垂直起降机场。为求解基于上述设定下垂直起降机场所能实现的最大进离场架次数量,整数规划中所采用目标函数 Z 为

$$Z = \max \left[\sum_{k,t,j=\text{dest}(k)} c^d x_{k,i,j}(t) + \sum_{k,t,i=\text{arr}(k)} c^a x_{k,i,j}(t) \right] \quad (i,j) \in N(k)$$

式中: $\text{dest}(k)$ 为 k 类型航空器可以使用的所有离场节点; $N(k)$ 为 k 类型航空器可以使用的路径; $x_{k,i,j}(t)$ 为在 t 时刻节点 i 至节点 j 路径上类型为 k 的航空器数量,为整数型变量; $\text{arr}(k)$ 为 k 类型航空器可以使用的所有进场节点。

目标函数表示在当次仿真设定的进离场奖励下, VCA 的最优起降架次目标函数。其中进场奖励和离场奖励能够区分在模型优化过程中主要侧重起飞还是降落。通过动态调整进离场奖励,可以系统的描述在不同运行侧重下场面的最优起降架次,进而绘制出详细的场面吞吐量包络图。

为确保 VCA 在多商品流模型中的运行,对所有中间节点 i 流入的航空器数量必须等于流出的航空器数量。此外,各类型航空器的流入数量也必须等于流出数量,以维护运行的连续性。式(1)~(6)详细描述了整数规划求解过程中所采用的部分关键约束条件。

流量守恒约束: 确保每个节点(如 TLOF、登机

口)的流入航空器数量等于流出数量,计算如下

$$\sum_{(j,i) \in N(k)} x_{k,j,i}(t - t_{j,i}) - \sum_{(i,j) \in N(k)} x_{k,i,j}(t) = 0 \quad i \in S, k \in K \quad (1)$$

式中: $t_{j,i}$ 为航空器从节点 j 运行至节点 i 所需的时间; S 为商品流模型中所有节点的集合; K 为商品流模型中起降场所能运行的航空器类型集合。

进离场航线冲突约束: 当垂直起降机场的进离场航线存在交叉时,通过约束式(2)确保在任意时刻存在交叉的若干航线上仅有一架飞机正在进行进离场操作

$$\sum_{(i,j) \in R} \sum_{t' \in (t-t_{i,j}, t]} x_{k,i,j}(t') \leq 1 \quad (2)$$

式中: R 为存在冲突的若干航线集合; t' 为 $t - t_{i,j}$ 至 t 时间段内的时刻。

TLOF 冲突约束: 在任意时刻 t 的前一操作周期内,由其他任务点指向 TLOF 相关操作的路径或从 TLOF 指向下一任务点的路径中仅允许存在一架航空器,以确保在任意时刻仅有一架飞机处于与 TLOF 节点相关的进近、滑入、滑出或离场状态如下

$$\sum_{k \in K} \left[\sum_{(i,P) \in N(k)} \sum_{t' \in (t-t_{i,P}, t]} x_{k,i,P}(t') + \sum_{(P,j) \in N(k)} \sum_{t' \in (t-t_{P,j}, t]} x_{k,P,j}(t') \right] \leq 1 \quad (3)$$

式中: P 为图 2 中相同 TLOF 的落地、离场 2 个相关节点。

登机口冲突约束: 在任意时刻 t 的前一操作周期内,由其他任务点指向登机口相关操作的路径或从登机口指向下一任务点的路径中仅允许存在一架航空器,以确保在任意时刻仅有一架飞机在滑行进、滑出或乘降状态,计算如下

$$\sum_{k \in K} \left[\sum_{(i,G) \in N(k)} \sum_{t' \in (t-t_{i,G}, t]} x_{k,i,G}(t') + \sum_{(G,j) \in N(k)} \sum_{t' \in (t-t_{G,j}, t]} x_{k,G,j}(t') \right] \leq 1 \quad (4)$$

式中: G 为图 2 中相同登机口的入位和推出 2 个相关节点。

路径容量约束: 在任意时刻 t , 各路径中的航空

器数量不应超过模型设定的路径容量,其约束条件如下

$$\sum_k x_{k,i,j}(t) \leq C_{i,j} \quad (5)$$

式中: $C_{i,j}$ 为节点*i*至节点*j*路径上可以容纳的航空器数量。

正整数约束:在任意时刻*t*,各路径中的航空器数量应为正整数,其约束条件如下

$$x_{k,i,j}(t) \in \mathbb{Z} \quad (6)$$

垂直起降机场多商品流模型属于整数规划问题,本文使用 Gurobi 求解优化问题。Gurobi 求解的具体流程为:使用对偶单纯形法或内点法求解线性松弛问题,得到连续解及其目标值,作为原问题的下界。若松弛解中存在非整数值,Gurobi 启动分支定界过程。选择某一非整数变量进行分支,生成两个子问题:一个约束该变量小于等于某个整数值,另一个约束该变量大于等于该值。每个子问题再次求解其线性松弛问题,更新上下界。在分支过程中,若某子问题的松弛解目标值差于当前最优解,则剪枝该分支;若其解为整数且优于当前解,则更新最优解。重复上述过程直到算法收敛,最终得到满足所有约束的整数最优解。

2.2 垂直起降机场吞吐量包络图

通过调整离场奖励 c^d 和进场奖励 c^a 能够改变机场运行侧重点,从而实现机场吞吐量的动态计算,并使进离场航班数的坐标沿吞吐量包络线移动。本研究取坐标 (c^d, c^a) 为以原点为圆心,半径为 1 的圆上等间隔的 32 个点坐标,绘制机场吞吐量包络曲线。

吞吐量包络曲线可作为吞吐量可视化方法,以登机口数量为 8 为例,如图 3 所示的吞吐量包络示

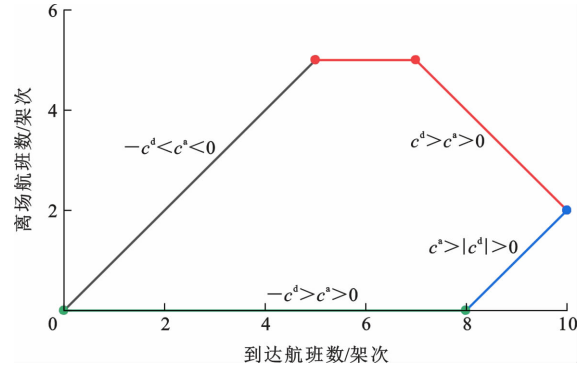


图 3 垂直起降机场吞吐量包络曲线
Fig. 3 Throughput envelope curve of vertiports

意图展示了吞吐量包络中各部分与进离场奖励函数的关系。当目标函数同时奖励进场和离场,且离场奖励大于进场时,可绘制吞吐量包络右上曲线;当目标函数进场奖励大于离场奖励或惩罚时,可绘制吞吐量包络右下曲线;当目标函数惩罚进场、奖励离场时,可绘制吞吐量包络左曲线;当目标函数到达奖励小于离场惩罚时,可绘制吞吐量包络下曲线。通过调整进离场奖励值,即可绘制如图 3 的完整包络曲线,其中右上顶点(7,5)代表了垂直起降机场所具有的最大吞吐量,右下顶点(8,0)代表了垂直起降机场所具有的最大不平衡进场能力。

研究同时采用 TLOF 利用率、登机口利用率和登机口等待率对场面各设施利用率进行评价。其中,TLOF 利用率表示 TLOF 占用时间占总仿真时间的比例;登机口利用率表示登机口占用时间占总仿真时间的比例;登机口等待率表示航空器在登机口等待时间占总仿真时间的比例。式(7)~(9)依次给出了 TLOF 利用率 U_P 、登机口利用率 U_G 和登机口等待率 H_G 的计算方法

$$U_P = \frac{\sum_{k \in K, (i,P) \in N(k), t} x_{k,i,P}(t)t_{i,P} + \sum_{k \in K, (P,j) \in N(k), t} x_{k,P,j}(t)t_{P,j}}{tn_P} \quad (7)$$

$$U_G = \frac{\sum_{k \in K, (i,G) \in N(k), t} x_{k,i,G}(t)t_{i,G} + \sum_{k \in K, (G,j) \in N(k), t} x_{k,G,j}(t)t_{G,j}}{tn_G} \quad (8)$$

$$H_G = \frac{\sum_{k \in K, (G_r, G_r) \in N(k), t} x_{k,G_r,G_r}(t)t_{G_r,G_r}}{tn_G} \quad (9)$$

式中: G_r 为图 2 中相同登机口的推出节点; n_P 为仿真中垂直起降机场具有的 TLOF 节点数量; n_G 为仿真中垂直起降机场具有的登机口节点数量。

场面各设施利用率计算基于优化结果为吞吐量包络图中最大运行能力点的模型参数设置,实现对垂直起降机场设施达到充分利用时的使用效率

评估。

图 4 展示了垂直起降机场中登机口与 TLOF 比例的一般趋势。提出的 9 个吞吐量包络分别对应于配置 1 个 TLOF 平台和 0~8 个登机口的垂直起降机场。各垂直起降机场基础架构组件的利用率如表 2 所示。在本次仿真中,运行参数设置为到达时

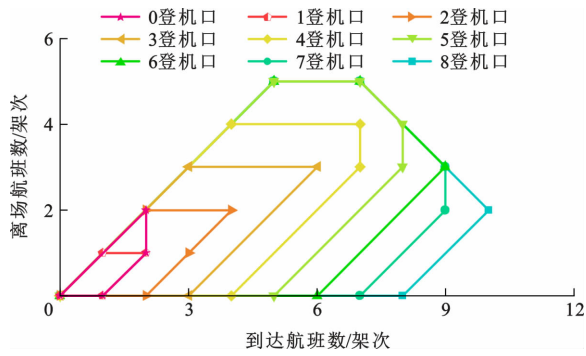


图4 一个TLOF时不同登机口的垂直起降机场吞吐量包络曲线

Fig. 4 Throughput envelope curves for vertiports with one TLOF and varying boarding gates

表2 一个TLOF时不同登机口的垂直起降机场设施利用率

Table 2 Facility utilization rates for vertiports with one TLOF and varying boarding gates

| 登机口数量/ 个 | TLOF 利用 率/% | 平均登机口 利用率/% | 平均登机口 等待率/% |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 93 | 0 | 0 |
| 1 | 25 | 38 | 0 |
| 2 | 58 | 72 | 1 |
| 3 | 83 | 72 | 6 |
| 4 | 92 | 55 | 7 |
| 5 | 100 | 57 | 12 |
| 6 | 100 | 48 | 19 |
| 7 | 100 | 46 | 17 |
| 8 | 100 | 40 | 18 |

间为60 s,离场时间为60 s,滑行时间为15 s,飞机上下客时间为300 s。此外,还规定了在同一时刻,仅允许一架飞机接近、离开或滑行到/离开TLOF平台,且仅允许一架飞机进入或离开终端区。

图4中登机口数量为0时表示垂直起降机场不具有单独的登机口设置,航空器在该垂直起降机场降落后将在TLOF上完成乘客的乘降后原地起飞。与航空器直接在TLOF上下客相比,增加的首个登机口引入了额外滑行时间,在一定程度上降低了垂直起降机场的最大吞吐量。

当登机口数量由1个增长至5个时(对本组操作参数),垂直起降机场的吞吐量呈上升趋势,TLOF利用率也随之增加。然而,当增设第6个登机口时最大吞吐量及TLOF利用率均未能实现进一步提升。此时TLOF利用率已达到100%表明其已经处于饱和状态,这明确表明单纯增加登机口数量无法有效提升场面吞吐量。

在单TLOF垂直起降机场,超过6个的额外登机口不会带来最大吞吐量的边际增加,能够处理额外的不平衡操作,这在吞吐量包络图中显示为额外

的到达数量。此外,随着登机口数量的增加,飞机等待进入TLOF起飞的平均滞留时间也随之增加。除0个和1个登机口外登机口的利用率呈下降趋势。

登机口数量由3个增加至4个时,登机口利用率出现显著下降;由5个增加至6个时,登机口等待率显著上升。与此同时登机口数量为5个时,场面吞吐量达到最大值。这表明在TLOF利用率接近其最大值时,登机口利用率的显著下降与登机口等待率的显著上升之间存在一个关键区间,此时场面吞吐量达到相对最大值,场面各设施得到充分利用。在此区间内,运行登机口数量越大,TLOF利用率越高,反之登机口利用率越高。

3 垂直起降方式对机场吞吐量影响

3.1 垂直起降方式

垂直起降机场的起降方式受到场面TLOF间距及其起降航线的显著影响。当TLOF平台间距较近或起降航线存在冲突点时,机场需采用平行起降等特定方式运行。现有通用航空管理规定要求直升机在起降阶段应保持60 m以上间距,但对于VCA在起降阶段应保持的距离,目前仍处在研究阶段。Zhang等^[22]以无人机和商用飞机为研究对象展开了相关研究;张洪海等^[23]利用球体碰撞盒建立了基于三维高斯分布的碰撞模型,提出无人机安全间隔标定方法,并以M600 Pro无人机型为算例进行了验证。王兴隆等^[24]的进一步研究表明轻型多旋翼、轻型复合翼、中型复合翼、重型复合翼之间的最小安全间隔分别为82、83、93、102 m。目前各管理部门均提出多个TLOF同时使用应具有充足的安全间隔,但尚未出台明确的数值规定。

以“A-TLOF”表示垂直起降机场中的进场航线,以“TLOF-D”表示离场航线,根据TLOF平台运行约束,进场航线、离场航线与滑行进入、离开TLOF四项任务存在冲突,同一时刻仅能执行其中一项。在实际运行中,各国管理机构均明确指出,当TLOF间距过近或进离场航线存在干扰时,TLOF平台不能同时执行起降任务。参考现有关于垂直起降阶段路径设计及机场起降方式的研究^[25],本文设想并着重研究如图5所示的3种不同的起降方式,其中同一虚线框中的起降航线不能同时使用。

3.1.1 独立起降

独立起降方式适用于多个TLOF之间具有充足安全间隔的场景。在垂直起降机场的设计过程中

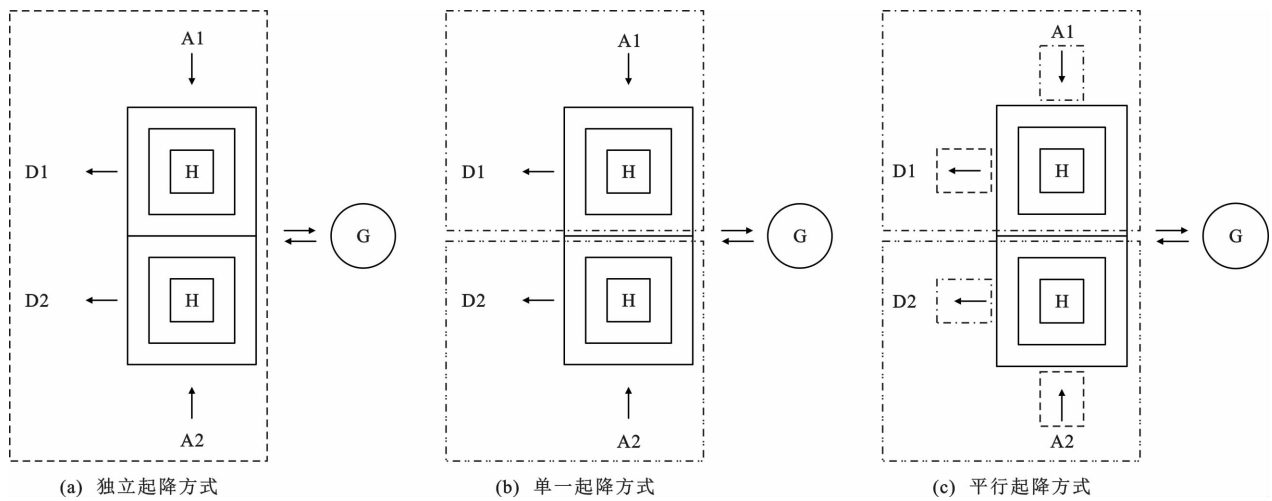


图 5 垂直起降机场起降方式

Fig. 5 Takeoff and landing modes of vertiports

需充分考虑预计使用的 VCA 旋翼下洗流的影响, 确定合理的间距, 从而避免气流的相互干扰。每个 TLOF 应设计有独立的进近和离场航线且这些航线之间均不存在交叉。空中交通管制能够为每个 TLOF 独立地分配和排序进场与离场航班, 无需协调彼此的情况下, 到达或离开可在任一 TLOF 上进行, 且与任何其他 TLOF 上正在或即将进行的操作无关。在仿真环节, 将式(2)中的参数 R 设置为仅包含空集实现独立起降方式约束。

例如, 在编号①的 TLOF 上, 一架 eVTOL 正在起飞/降落, 与此同时在另一个编号②的 TLOF 上, 另一架 eVTOL 也可以独立的执行起飞/离场任务, 两者操作完全独立, 互不影响。在卫星拓扑结构下, 地面保障设施(停机位、服务)也完全分离, 降落在 TLOF①的飞机滑行至其专属停机位时不会阻挡 TLOF②的离场飞机滑出, 反之亦然。在这种配置下, 整个垂直起降机场的理论最大吞吐量几乎是单个 TLOF 垂直起降机场的 2 倍(或随 TLOF 数量线性增长), 因为瓶颈(TLOF 占用时间)被完全解耦。此时, 垂直起降机场吞吐量实现最大化。

3.1.2 单一起降

单一起降方式适用于 TLOF 间距较小(仅满足最低安全间隔), 程序上难以实现真正独立操作的场景。在此场景下, 各 TLOF 进近和离场航线间高度重合或存在冲突点。空中交通管制强制要求任何时候只能有一个 TLOF 在进行起飞或着陆操作。当一个 TLOF 被占用(即使飞机只是短暂停留进行快速周转), 其他所有 TLOF 均不得进行起降。在仿真环节, 将式(2)中的参数 R 设置为仅包含集合 $\{A1-TLOF1, A2-TLOF2, TLOF1-D1, TLOF2-D2\}$

实现单一起降方式约束。

例如, 当 TLOF①上有一架飞机正在降落、短暂停留或起飞时, TLOF②必须保持完全空闲不允许有任何起飞或降落操作发生。即使 TLOF②处于空闲状态该方式也不允许使用它, 因为 TLOF②与 TLOF①是“绑定”的。在这种情况下, 额外增加的 TLOF 和登机口对最大吞吐量提升非常有限。因为系统瓶颈在一次只能处理一架飞机的起降操作(占用 TLOF 的时间)。

3.1.3 平行起降

以具有 2 个 TLOF 平台的垂直起降机场类型为例, 平行起降方式适用于进场航线 A1-TLOF1 与离场航线 TLOF2-D2、进场航线 A2-TLOF2 与离场航线 TLOF1-D1 存在冲突的场景。该方式适用于 TLOF 之间存在合理间隔(大于单一起降方式但可能小于独立起降方式)且各 TLOF 的进近和离场航线间存在冲突点的垂直起降机场。空中交通管制允许多个 TLOF 同时用于进场操作, 或多个 TLOF 同时用于离场操作, 但不允许一个 TLOF 执行进场任务的同时另一个 TLOF 执行离场任务(反之亦然)。在仿真中, 将式(2)中的参数 R 设置为包含集合 $\{A1-TLOF1, TLOF2-D2\}$ 与 $\{A2-TLOF2, TLOF1-D1\}$, 确保 2 个 TLOF 在同一操作周期内不会同时出现进场飞机和离场飞机, 从而实现平行起降方式。

在此方式下, 进港高峰时段 TLOF①和 TLOF②可以同时接纳不同的进场航班着陆。着陆后的飞机沿预定的地面滑行路径前往共享或分配的停机位; 出港高峰时段准备就绪的离港飞机从停机位滑行至各自分配的 TLOF(如 TLOF①和 TLOF②), 随后完成起飞。

3.2 不同起降方式下吞吐量包络分析

针对配备 2 个 TLOF 的垂直起降机场,分别绘制 3 种起降方式下的吞吐量包络图并计算场面吞吐量,各起降方式下场面吞吐量分别如图 6 中独立运行、平行起降、单一起降 3 条包络线所示。当 2 个 TLOF 因航线冲突或间距不足导致无法同时起降时,场面吞吐量处于最低水平仅能支持单架航空器的起飞或降落。当允许 2 个 TLOF 同时降落/起飞或完全无冲突限制时吞吐量达到最大值,此时运行效率为单一起降方式的 1.57 倍。尽管平行起降与独立运行 2 种起降方式的最大理论吞吐量相同,但后者能够在更多场景(到达航班数为 10~12 架次)下维持最大吞吐量,通过独立优化离场或进场航班的流量分配从而提升整体运行效率。

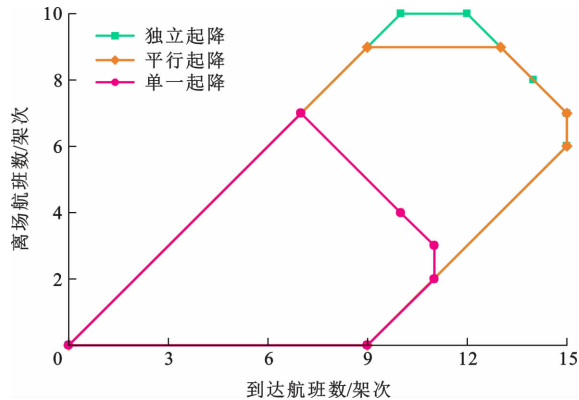


图 6 两个 TLOF 时不同起降方式的吞吐量包络曲线
Fig. 6 Throughput envelope curves of two TLOFs with varying takeoff and landing modes

对配备 3 个 TLOF 平台的垂直起降机场,分别计算了独立运行、平行起降、单一起降 3 种起降方式的吞吐量。各起降方式下的场面吞吐量分别如图 7 中独立运行、平行起降、单一起降 3 条包络线所示。在单一起降方式下,由于 TLOF 之间的航线冲突或间距不足,导致无法同时起降,垂直起降机场的最大吞吐量受到 TLOF 运行能力的限制,处于最小水平,其包络线呈现极端的三角形。当允许多个 TLOF 同时降落/起飞,或完全无冲突限制时,吞吐量达到最大值,此时运行效率为单一起降方式的 2.35 倍。此时,平行起降与独立运行 2 种起降方式呈现与 2 个 TLOF 垂直起降机场一致的趋势,即具有相同的最大理论吞吐量,但独立起降方式能够在更多场景下维持最大吞吐量,拥有更大的运行能力包络,能够通过独立优化离场或进场航班的流量分配,从而提升整体运行效率。

本文使用 Gurobi 12.0.1 仿真求解垂直起降机

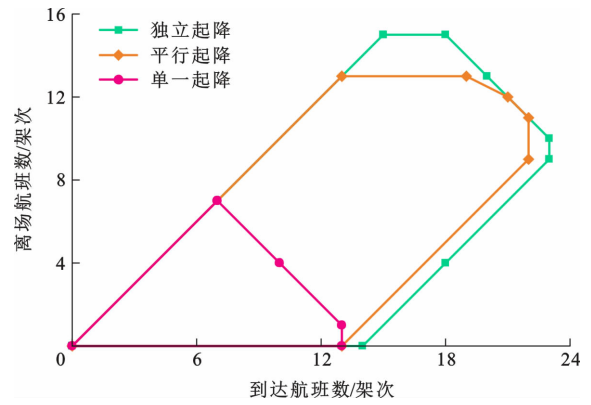


图 7 三个 TLOF 时不同起降方式的吞吐量包络
Fig. 7 Throughput envelopes for vertiports with three TLOFs and varying takeoff and landing modes

场的吞吐量,分别计算理想场景下航空器“降落-业务保障-离场”时机场的最大吞吐量,以及最不利场景下(如恶劣天气下航空器降落后停放)航空器降落后无下一航段飞行任务(无离场任务)时机场的最大不平衡进场容量。同时,本文将 1 个 TLOF、8 登机口,2 个 TLOF、8 登机口,3 个 TLOF、12 登机口的配置分别与 1 个 TLOF、4 登机口的配置进行对比分析,得到机场最大吞吐量增长率(图 8)、机场最大不平衡进场容量(图 9)。

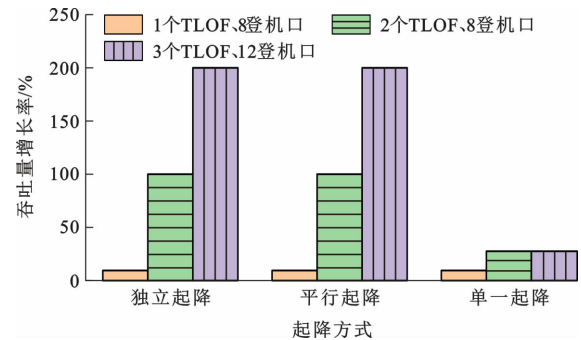


图 8 相邻 TLOF 起降方式对最大吞吐量的影响
Fig. 8 Effects of adjacent TLOF takeoff and landing modes on the maximum throughput

图 8 呈现了在同时奖励进场和离场航班的条件下,不同起降方式下场面最大吞吐量相较于 1 个 TLOF、4 登机口配置时的增长百分比,直观展示了在最理想场景下机场场面吞吐量的增长幅度。图 9 则展示了在奖励进场但惩罚离场,且进场奖励小于离场惩罚的条件下,不同起降方式场面最大不平衡进场量相较于 1 个 TLOF、4 登机口配置时的增长百分比,清晰反应了在极不理想场景下,即机场只有进场航空器而无离场航空器时,机场场面吞吐量的变化情况。

如图 9 所示,在独立起降方式下,最大不平衡进

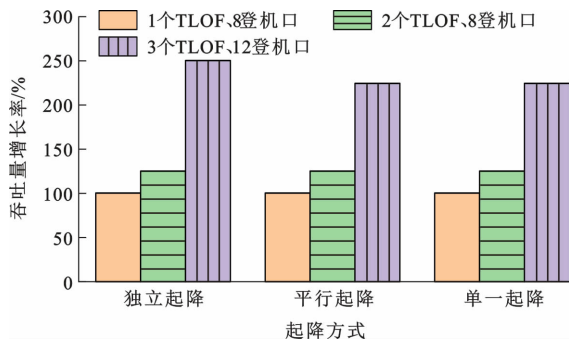


图9 相邻 TLOF 起降方式对最大不平衡进场量的影响

Fig. 9 Effects of adjacent TLOF takeoff and landing modes on the maximum unbalanced approach

场量较 1 个 TLOF、4 登机口时分别增长了 100%、125% 和 250%，为 3 种起降方式中增长率之最，且与 TLOF、登机口总增长数量保持一致。这表明更多的 TLOF 和登机口数量为航空器提供了更多的停放空间，从而显著提升了最大不平衡进场量。平行起降方式和单一起降方式下的最大不平衡进场量展现出了相同的变化趋势，这进一步证实了 3 种起降方式下场面的最大不平衡进场量主要影响因素均为场面所拥有的停机位数量（包括 TLOF、登机口等）。然而值得注意的是，在 15 min 的仿真周期内，尽管 3 种方式所承载的最大不平衡吞吐量增长量接近，但独立起降方式与平行起降方式能够在更短的时间内完成航空器的接收工作。这一差异在天气快速转变等需要快速接收大量飞机的场景中具有重要意义。

另外，从图 8 的结果可以看出，在独立起降方式下，最大吞吐量分别增长了 9%、100% 和 200%，同样是 3 种起降方式中增长率之最，且与 TLOF 增长数量一致。这表明在相同数量的 TLOF 与登机口配置下，独立起降方式能够充分利用场面各设施。如果垂直起降机场进一步使用码头拓扑结构，多个 TLOF 共享一组登机口，吞吐量增益可能会超过 2 倍。例如，TLOF①的飞机降落并使用完一个共享登机口后，该登机口可以被 TLOF②降落的飞机使用（反之亦然），从而提高了登机口的利用率。然而平行起降的核心能力依然依赖于 TLOF 本身的物理和程序独立性。在 1 个 TLOF、8 登机口的配置下，增加的登机口带来的更高的 TLOF 利用率，表现为最大吞吐量增长 9%。平行起降方式下的最大吞吐量呈现出与独立起降方式相同的增长量，这表明当场面空间受限，尤其是空域资源受限不足以满足独立起降方式时，采用平行起降方式能够在受限资源与运行能力之间取得良好平衡。它避免了独立

起降方式所需的完全冗余的进离场航线资源和配套设施成本，同时通过允许多个 TLOF 并行工作，显著提升了吞吐量。这表明独立起降方式和平行起降方式场面吞吐量的主要影响因素均为机场所拥有的 TLOF 平台数量，同时证明了在精心设计的运行程序和配套设施支持下，无需追求极端的运行隔离，也能获得接近最优的吞吐量。相比之下，单一起降方式下的最大吞吐量相比其他方式存在显著的下落，最大吞吐量仅分别增长了 9%、27% 和 27%。这表明在单一起降方式下，额外的 TLOF 和登机口对场面吞吐量的提升极为有限，其吞吐量的主要影响因素为机场起降方式本身，增加的资源主要提供冗余和应对不平衡流量，支持场面承受更多不平衡到达或离开的航空器。

4 结 语

(1) 构建了垂直起降机场多商品流模型，提出基于整数规划并使用 Gurobi 优化求解器进行仿真求解的方法。通过动态调整模型目标函数中的奖励值绘制机场吞吐量包络图，直观反映机场场面运行能力及变化趋势。

(2) 各设施使用率分析结果为机场各部分基础设施建设提供科学依据。仿真结果表明，在单一 TLOF 布局中，登机口数量以 4~5 个为优，其中 4 个登机口时登机口利用率更高，5 个时 TLOF 利用率更高。该结果能够支撑单一 TLOF 垂直起降机场设计与建设，并为多 TLOF 垂直起降机场的设计提供参考。

(3) 起降方式分析结果表明，随垂直起降机场进离场航线冲突点数量增加，起降方式由独立起降逐渐转为单一起降，运行包络随之不断减小。如在 2 个 TLOF 与 8 登机口配置中，单一起降方式最大吞吐量为 14 架次·h⁻¹，平行与独立起降达 22 架次·h⁻¹，提升 57%；在 3 个 TLOF 与 12 登机口配置中，单一起降为 14 架次·h⁻¹，平行与独立起降为 33 架次·h⁻¹，提升 135%。尽管平行起降与独立起降的最大吞吐量相同，但独立起降时包络面积更大，操作灵活性更高。

(4) 不同起降方式下吞吐量对比结果分析可知，在多 TLOF 场景下起降方式对吞吐量的影响显著，从单一起降转为平行起降可带来显著吞吐量提升：2 个 TLOF 和 3 个 TLOF 配置中分别提升 73% 与 173%。这表明在垂直起降机场的设计阶段应尽量满足独立起降方式和平行起降方式的条件，合理规

划 TLOF 位置及进离场航线,以实现更大的吞吐量和更高的资源利用效率。

(5)后续可以进一步调整进离场航线冲突约束中的冲突航线集合 R ,探索多 TLOF 垂直起降机场的更多起降方式动态占用特征,为中大型垂直起降机场的集约化设计、建设和运行提供更全面的理论支持。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 徐志刚,申丹丹,高 赢,等.基于文献计量的综合交通研究综述[J].交通运输工程学报,2025,25(2):37-60.
XU Zhi-gang, SHEN Dan-dan, GAO Ying, et al. Review of multimodal transport research based on bibliometrics [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25 (2): 37-60.
- [2] CHEN L T, WANDEL T S, DAI W B, et al. Scalable vertiport hub location selection for air taxi operations in a metropolitan region[J]. INFORMS Journal on Computing, 2022, 34(2): 834-856.
- [3] SUN X Q, WANG S, ZHANG X J, et al. LAERACE: Taking the policy fast-track towards low-altitude economy [J]. Journal of the Air Transport Research Society, 2025, 4: 100058.
- [4] 王俊潼,包丹文,周佳怡,等.低空空域规划研究现状与展望[J].航空学报,2025,46(11):82-107.
WANG Jun-tong, BAO Dan-wen, ZHOU Jia-yi, et al. Low-altitude airspace planning: A review and prospect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(11): 82-107.
- [5] 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.
LIAO Xiao-han, QU Wen-qiu, XU Chen-chen, et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 6-34.
- [6] LAARMANN L, THOMA A, MISCH P, et al. Automotive safety approach for future eVTOL vehicles [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2023, 14(2): 369-379.
- [7] ZELINSKI S. Operational analysis of vertiport surface topology [C] // IEEE. 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC). New York: IEEE, 2020: 1-10.
- [8] SU P Y, MAHESHWARI C, TUCK V M, et al. Incentive-compatible vertiport reservation in advanced air mobility: An auction-based approach[C]//IEEE. 2024 IEEE 63rd Conference on Decision and Control (CDC). New York: IEEE, 2024: 7720-7727.
- [9] RIMJHA M, TRANI A. Urban air mobility: Factors affecting vertiport capacity[C] // IEEE. 2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS). New York: IEEE, 2021: 1-14.
- [10] ESCRIBANO MACIAS J, KHALIFE C, SLIM J, et al. An integrated vertiport placement model considering vehicle sizing and queuing: A case study in London[J]. Journal of Air Transport Management, 2023, 113(C): 102486.
- [11] 张洪海,夷 珈,李 姍,等.低空空域容量评估研究综述[J].交通运输工程学报,2023,23(6):78-93.
ZHANG Hong-hai, YI Jia, LI Shan, et al. Review on research of low-altitude airspace capacity evaluation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23 (6): 78-93.
- [12] 张洪海,李靖宇,费毓哈,等.城区物流无人机垂直起降程序设计方法[J].指挥信息系统与技术,2022,13(5):1-10.
ZHANG Hong-hai, LI Jing-yu, FEI Yu-han, et al. Design method for vertical take off and landing procedures for logistics UAVs in urban areas [J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(5): 1-10.
- [13] PREIS L, HORNUNG M. Vertiport operations modeling, agent-based simulation and parameter value specification[J]. Electronics, 2022, 11(7): 1071.
- [14] PREIS L. Estimating vertiport passenger throughput capacity for prominent eVTOL designs [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2023, 14(2): 353-368.
- [15] 魏志强,肖鑫隆.垂直起降机场运行任务规划模型与容量估算方法[J/OL].北京航空航天大学学报,2024,https://link.cnki.net/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0249.
WEI Zhi-qiang, XIAO Xin-long. Vertiport operational task planning model and capacity estimation method [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, https://link.cnki.net/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0249.
- [16] VASCIK P D, HANSMAN R J. Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors [C] // AIAA. AIAA Scitech 2019 Forum. Reston: AIAA, 2019: AIAA2019-0526.
- [17] 陈正磊,种小雷,刘超佳,等.基于多智能体建模和蒙特卡洛仿真的跑道容量评估[J].交通运输工程学报,2023,23(6):244-256.
CHEN Zheng-lei, CHONG Xiao-lei, LIU Chao-jia, et al. Runway capacity evaluation based on multi-agent modeling and Monte Carlo simulation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 244-256.
- [18] BERTSIMAS D, PATTERSON S S. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach[J]. Transportation Science, 2000, 34 (3): 239-255.
- [19] ZHANG H H, FEI Y H, LI J Y, et al. Method of vertiport capacity assessment based on queuing theory of unmanned aerial vehicles[J]. Sustainability, 2023, 15(1): 709.
- [20] 党庆庆,李 焕,王光秋,等.面向城市空中交通的垂直起降机场发展综述[J/OL].北京航空航天大学学报,2025,https://link.cnki.net/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0301.
DANG Qing-qing, LI Huan, WANG Guang-qiu, et al. A

- review on development of vertiport for urban air mobility[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, <https://link.cnki.net/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0301>.
- [21] 包丹文,尚静萱,韦达,等.漏斗形空域结构下无人机双目标起降联合调度模型[J].*交通运输工程与信息学报*,2025,23(4):36-49.
BAO Dan-wen, SHANG Jing-xuan, WEI Da, et al. Joint scheduling model for dual-target takeoff and landing of unmanned aerial vehicles (UAV) under funnel-shaped airspace structure[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23(4): 36-49.
- [22] ZHANG Z G, LU X H, ZHANG Y C, et al. Research on collision risk between light unmanned arial vehicles and aircraft windshield[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 40(5): 534-546.
- [23] 张洪海,李博文,刘 峰,等.自由空域下多旋翼无人机安全间隔标定方法[J].*系统工程与电子技术*,2023,45(10):3149-3156.
ZHANG Hong-hai, LI Bo-wen, LIU Hao, et al. Demarcation method of safety separation for multi-rotor UAV in free airspace [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(10): 3149-3156.
- [24] 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.
WANG Xing-long, WANG You-jie. Safety interval evaluation for multi-aircraft eVTOL in urban low altitude[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(1): 275-290.
- [25] 李诚龙,屈文秋,李彦冬,等.面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述[J].*交通运输工程学报*,2020,20(4):35-54.
LI Cheng-long, QU Wen-qiu, LI Yan-dong, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(4): 35-54.