

低空经济下 eVTOL 起降场拍卖机制设计

丁一芳¹, 孔祥天瑞², 徐素秀¹

(1. 北京理工大学 管理学院, 北京 100081; 2. 深圳大学 经济学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 在全球科技与产业变革背景下, 低空经济已成为重塑区域竞争力的战略制高点。然而, 针对电动垂直起降飞行器 (electric vertical take-off and landing, eVTOL) 起降场分配与定价的运营管理问题, 现有研究尚缺乏系统深入的探讨。鉴于此, 本文设计了一种既能提升社会总福利, 又能激励真实报价并防止市场垄断的分配定价机制, 以深圳市为案例, 构建了一个基于 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 拍卖理论的 eVTOL 起降场分配模型。通过实验仿真, 比较一次性组合拍卖 (one-shot VCG auction, O-VCG) 与分区域序贯拍卖 (sequential VCG auction, S-VCG) 在多种市场环境下的性能, 重点考察起降场数量、运营商投标行为、跨区域组合偏好及区域划分粒度对资源配置效率的影响。实验结果表明, 最优拍卖机制的选择依赖于市场环境及代理人特征: 1) 拍卖机制 (尤其是 S-VCG) 在社会福利方面优于固定定价机制, 后者虽能提升短期平台收益, 但会降低运营商利润与市场参与度; 2) 分区域拍卖在多数场景下更具鲁棒性, S-VCG 在平台收益方面全面优于 O-VCG, 且在资源充裕或投标活跃时社会福利更高。3) 区域划分存在最优粒度: 区域数量增加会先促进后抑制社会福利, 表明需在激发竞争与保障匹配效率间寻求平衡。本研究为低空经济监管机构提供了基于拍卖理论的科学资源配置工具与决策依据, 证实机制设计在解决复杂空域资源管理问题中具备巨大潜力。

关键词: 电动垂直起降飞行器; 低空经济; 拍卖机制; 资源配置

中图分类号: F406.7; F560.5; F224.32

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2026)01-0024-12

Design of an Auction Mechanism for eVTOL Vertiports in the Low-altitude Economy

Ding Yifang¹, Kong Xiangtianrui², Xu Suxiu¹

(1. School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Economics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Against the backdrop of global technological and industrial transformation, the low-altitude economy has emerged as a strategic frontier for reshaping regional competitiveness. However, existing studies offer no thorough investigation into the operational management issues associated with the allocation and pricing of electric vertical take-off and landing (eVTOL) vertiports. To address this gap, this paper designs an allocation and pricing mechanism that enhances social welfare, incentivizes truthful bidding, and mitigates market monopolization. An eVTOL vertiport allocation model based on Vickrey-Clarke-Groves (VCG) auction theory is developed, with Shenzhen as a case study. Through experimental simulations, the performance of the one-shot VCG auction (O-VCG) and the partitioned sequential VCG auction (S-VCG) is compared across various market environments, with focus on the impact of vertiport quantity, operator bidding behavior, cross-regional package preferences, and regional partition granularity on allocation efficiency. Experimental results demonstrate that the optimal auction mechanism depends on the market environment and agent characteristics. (1) Auction mechanisms, especially the S-VCG auction, outperform fixed pricing mechanisms in terms of social welfare. Although fixed pricing may increase short-term platform revenue, it reduces operator profits and market participation. (2) Partitioned

收稿日期: 2025-11-10 修回日期: 2025-12-11 录用日期: 2025-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72471028)

作者简介: 丁一芳 (2000—), 女, 山西省人, 博士研究生, 主要研究方向为物流管理、拍卖机制设计。Email: dingyifang@bit.edu.cn

通讯作者: 徐素秀 (1984—), 男, 浙江省人, 教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理、拍卖机制设计。

Email: xusuxiu@bit.edu.cn

auctions show greater robustness across most scenarios where S-VCG comprehensively outperforms O-VCG in platform revenue and achieves higher social welfare when resources are sufficient or bidding activity is high. (3) An optimal granularity exists for regional partition. Increasing regional quantity initially promotes but eventually suppresses social welfare, indicating the need to balance competition incentives with matching efficiency. This study provides low-altitude economy regulators with a scientific resource allocation tool and decision basis based on the auction theory, and confirms the substantial potential of mechanism design to address complex airspace resource management problems.

Key words: electric vertical take-off and landing (eVTOL); low-altitude economy; auction mechanism; resource allocation

在全球新一轮科技革命与产业变革的浪潮下，低空经济正迅速崛起，成为重塑区域竞争力的战略制高点。工信部赛迪研究院发布的《中国低空经济发展研究报告(2024)》显示，2023 年中国电动垂直起降飞行器 (electric vertical take-off and landing, eVTOL) 产业规模已达 9.8 亿元，并预计到 2026 年将增长至 95 亿元，展现出巨大的市场潜力。中国政府对这一新兴领域给予了前所未有的重视，从《“十四五”现代流通体系建设规划》对通用航空发展的战略部署^[1]，到 2023 年《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》为产业合规发展提供的制度保障，一系列政策举措为低空经济发展奠定了坚实基础。在中央政策的指引下，各地积极布局，其中深圳市更以其完备的产业链和前瞻性的立法保障，成为全国乃至全球低空经济发展的“领头羊”，其探索的“低空经济”新路径备受瞩目^[2]。

1 研究背景

作为中国低空经济的“试验田”，深圳已形成从 eVTOL 研发制造、飞行保障到运营服务的完整产业生态。在此背景下，各类市场主体积极涌入，并依据各区域功能展开差异化布局。如图 1 所示 (场景示意图，非地图)，宝安区与龙华区凭借机场优势，吸引了顺丰 (丰翼)、京东等物流巨头，成为航空货运的核心枢纽；南山区与罗湖区作为商圈中心，支撑美团等平台部署“分钟级”无人机即时配送网络；龙岗区与福田区凭借医疗与公共管理资源，形成对医疗急救、水务监测等低空公共服务的需求；盐田区与龙岗区东部依托山海资源，吸引了东部通航、亿航智能等企业开拓低空游览业务；而光明区与坪山区则作为上游的研发与制造基地，集聚了如小鹏汇天等整机厂商的研发测试环节。实际上，这种基于区域功能的划分在实践中呈现出显著的复合性与交叉性。例如，顺丰、京东的货运航线需穿越城市

核心空域，与美团的即时配送网络以及东部通航的载人交通路线存在空间重叠；游览航线亦可能与医疗应急、警务飞行等任务通道产生竞争。这种多元主体交织所形成的空域资源竞争性格局，在推动产业发展的同时，也使优化配置问题日益突出，构成了本研究机制设计的现实背景。



图 1 深圳市 eVTOL 起降场分布与低空应用场景示意图
Figure 1 eVTOL vertiport layout and low-altitude application scenarios in Shenzhen

然而，当前学术界的关注点与商业化运营的现实需求之间存在显著错位。大量研究聚焦于低空交通的物理网络与运行系统的构建，致力于解决空域结构、航路规划、起降场选址及飞行控制等技术性难题^[3]，核心在于解决航空器“在哪飞”和“怎么飞”的物理与运行问题。相比之下，对于起降场网络建成后，“分配给谁”以及“如何定价”这一至关重要的运营管理与资源配置问题，现有文献却鲜有深入探讨。传统的行政指派或抽签方式虽能保证形式公平，却无法确保资源流向效率最高的运营商，可能造成社会总福利的损失；而简单的“价高者得”模式虽能提升财政收入，却可能忽视公共服务属性，并诱发企业的非理性竞价行为，甚至导致市场垄断。面对顺丰、京东等物流巨头，美团等即时配送平台，小鹏、亿航等出行服务商，以及公共服务单位多元化且差异化的运营需求，使得“一刀切”的分配方案难以适用。因此，亟需一种能够超越上述局限的分配机制，它既能精准反映资源真实社会价值，

又能有效激励参与者坦诚竞标,并最终保障社会总福利最大化。这已成为推动低空经济从概念走向大规模商业化运营必须解决的核心问题。市场机制设计理论在类似的资源配置问题中展现出显著优势,该理论在无线电频谱分配、机场时刻管理等公共资源领域已形成完整的方法体系,其核心是通过机制设计激励市场主体显示真实需求。拍卖机制作为其中的重要工具,既能有效揭示资源边际价值,又能通过竞争提升配置效率。在停车位分配等公共资源管理场景中,学者们已通过双边拍卖、Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 拍卖^[4]等机制实现了资源的有效配置,这为拍卖理论在复杂资源配置中的应用提供了实践基础。其中 VCG 机制凭借其激励相容特性,在理论层面具有独特优势。该机制通过精心设计的支付规则,使参与者如实报价成为最优选择,从而确保资源流向价值最高的使用者。将 VCG 机制引入 eVTOL 起降场分配,既能满足多元运营需求,又能为政府监管提供科学依据,对低空经济发展具有重要实践价值。

基于以上背景,本文以深圳市为研究案例,旨在构建一个基于 VCG 拍卖理论的 eVTOL 起降场分配与定价机制。针对城市多区域功能差异和运营商组合需求复杂的特点,重点探讨如何在满足区域容量约束和反垄断要求的前提下,设计激励相容的拍卖机制以实现以下目标:1) 在政府主导的拍卖框架下,优化多区域起降场资源的分配效率;2) 促使运营商真实披露其需求偏好;3) 建立公平透明的定价体系,防止关键资源垄断;4) 探索组合拍卖在多区域资源配置中的优势与实施路径。

2 文献综述

2.1 城市空中交通

当前,城市空中交通 (urban air mobility, UAM) 研究已形成系统性的知识体系,其核心聚焦于低空运输系统的物理架构、技术可行性及其与城市空间的融合。这一体系可大致划分为概念框架与市场需求、基础设施与具体场景,以及空域管理与规划 3 个层面。

在概念框架与市场需求层面,已有研究旨在论证 UAM 的可行性与内在驱动力。Yan 等^[5]率先从三维交通的革新视角,论证 UAM 破解城市拥堵的潜力,奠定了领域认知的基础;李诚龙等^[3]则系统梳

理了其发展脉络与生态系统;Huang 等^[6]的综述性研究系统探讨了 UAM 与地面交通系统在技术、设施与政策层面的整合框架。在需求分析方面,Long 等^[7]对客运、货运等多元服务需求的系统性识别,以及 Kim 等^[8]基于离散选择模型的微观实证,量化验证了消费者对新兴服务的偏好,为需求预测与市场定位提供了关键依据,同时揭示了市场需求的关键影响因素。Ren 等^[9]的研究进一步从产业生态系统视角,揭示了 UAM 各参与主体间的共生演化机制,为理解市场结构的复杂性提供新维度。现有需求研究多停留在市场存在的验证与偏好识别层面,未能有效衔接至运营阶段的关键资源配置问题,即如何将异质性的用户需求转化为对有限起降资源的市场化竞标机制。这一缺失使得顶层设计与需求分析难以直接支撑运营阶段的资源高效配置。

在基础设施与具体场景层面,已有研究致力于解决 UAM 系统在城市中的“锚点”问题,并探索其商业化切口。陈俊彦^[10]提出分阶段实施与多网协同的顶层思路;Pons-Prats 等^[11]的研究指出,UAM 的发展将深刻影响城市空间规划与产业布局范式,这进一步凸显了基础设施规划的前瞻性需求。这些研究主要聚焦于设施规划的工程技术层面,建立起概念验证到设施规划的完整知识体系。然而,当研究视角从系统构建转向可持续运营时,现有文献对资源分配机制的理论探讨明显不足。

在空域管理与规划层面,现有研究则致力于解决航空器“安全、有序、高效”飞行的运行规则问题。李诚龙等^[3]针对动态空域结构设计,系统对比了 4 种空域结构在容量、效率、噪声和鲁棒性上的差异,给出 UAM 动态空中走廊与起飞前飞行计划协调算法。在与地面交通协同的运行控制框架 (UTM/U-space) 下,Decker 等^[12]构建一套可竞争的市场化政策组件,系统论证空域进入权、实时数据共享与基础设施投资三者的商品属性,并以欧美制度比较揭示其可交易性。这些研究为起降场的物理布局、运行容量和安全间隔提供了至关重要的技术性约束与运行环境基础。

现有文献虽详尽地回答了“为何发展”“在哪建设”和“如何飞行”等问题^[13],却普遍疏于探讨一个关乎运营效率与公平的核心问题:在由公共资源构建的起降场网络投入使用时,应遵循何种规则,才能将这些稀缺、异质且受空域运行规则约束的资

源, 有效地分配给需求各异且相互竞争的多元化运营商? 传统的行政指派或固定定价模式, 在调节动态供需、揭示真实价值, 以及防止市场垄断方面存在固有缺陷。因此, 引入一种能够与既定的空域运行框架相兼容, 并能实现资源优化配置、激励参与者显示真实偏好的市场化机制, 已成为推动 UAM 从概念验证迈向规模化商业运营的必然要求。

2.2 拍卖与机制设计

拍卖理论作为市场设计的核心工具, 在解决时空稀缺公共资源的分配与定价问题上已建立起成熟的方法论体系, 并在多领域形成经典范式。其应用谱系广泛: 从确立通过价格调节需求的道路拥堵定价^[4], 到处理战略性资源的无线电频谱拍卖^[5]; 从优化高价值网络化机场起降时刻分配的拍卖机制^[6], 到动态分配虚拟化云计算资源的市场设计^[7]。这些案例共同表明, 设计良好的拍卖机制能够有效实现资源配置, 并激励参与者显示真实偏好。

尽管将拍卖机制直接应用于低空 eVTOL 起降场分配的研究尚属前沿, 且规模化实践案例有限, 但基于资源属性的类比与逻辑推演, 其应用前景具有显著合理性。首先, 道路拥堵定价确立了为稀缺时空资源进行市场化定价的经济学原理。其次, 在航空资源属性上, eVTOL 起降场与机场时刻均具有网络效应与互补性, 后者的拍卖研究为前者提供了可借鉴的范式。再次, 在运行环境上, 随着无人机应用的普及, 学界已在无人机空域交通管理 (UTM/U-Space) 框架下, 探讨基于市场机制进行空域资源分配的可能性^[8]。最后, 在资源形态上, eVTOL 起降场与城市共享停车位在“空间位置固定性”“需求瞬时性”和“用户异质性”上高度相似, 而后者的拍卖分配机制已被证实能有效提升配置效率与社会福利。

然而, 将现有拍卖模型直接应用于 eVTOL 起降场分配面临根本性挑战。经典拍卖模型 (如频谱、机场时刻拍卖) 通常处理的是同质化或可简单加总的许可单位, 其价值主要源于排他性使用权。与之相反, eVTOL 起降场是深度嵌入城市三维空间的异质化网络节点, 其价值不仅取决于自身属性, 更受到航线网络互补与组合性的深刻影响。这一本质区别使得传统模型难以刻画运营商对起降场组合的复杂偏好与估值逻辑。

组合拍卖理论为应对资源间的互补性与组合需求, 被引入交通领域。Xu 等^[9]在分布式运输采购中

的研究证实, 基于 VCG 框架的组合拍卖能有效解决线路捆绑投标问题。但这类模型通常隐含一个关键假设: 所有资源单元 (运输线路) 在物理上是均质可替代的。这与起降场固有的区位垄断性 (如市中心枢纽与郊区站点的功能不可互换) 形成矛盾。因此, 上述模型虽提供了处理组合偏好的方法论内核, 却未能充分纳入空间异质性这一 eVTOL 起降场的核心特征。

针对资源异质性问题, 后续研究尝试对 VCG 机制进行适应性改造。Xu 等^[20]提出的“单单位—多单位—加权仿射”VCG 进阶路径, 以及 Feng 等^[21]的加权仿射 VCG 模型, 通过引入权重系数初步刻画了不同资源单元的差异。然而, 这些模型中的权重参数多为外生给定, 其设定依赖于中央规划者的先验判断, 而非源于对运营商异质性私人偏好的有效揭示。在 eVTOL 起降场分配的实际场景中, 不同运营商因其业务模式与服务定位的根本差异, 对同一组起降场组合会形成迥异的私有估值。

在机制可行性层面, 现有研究在简化流程与纳入真实成本方面取得了进展。Xu 等^[19]对偶原始 Vickrey 拍卖通过动态流程减少了信息泄露, 但其“卖方次模性”的前提在竞争不充分的起降场市场中可能难以满足。通过分轮次或分区域的动态机制, 可以简化拍卖流程并保护商业隐私。Husain 等^[22]提出区块链拍卖框架确保了交易安全, 却未深入探讨其在高频、实时决策的空中交通场景中的性能瓶颈。尤为重要的是, Guo 等^[23]将交易成本与边际成本变化纳入模型, 证明了其在节约总成本和提升各方利润上的巨大价值, 这为在起降场分配中, 考虑运营、协调等隐性成本提供了坚实依据。在可行性与复杂性平衡方面, 孔祥天瑞等^[24]基于医药流通真实数据, 验证了其双层单边 VCG 机制, 为在近乎实际的运营环境中应用复杂拍卖机制提供了关键证据。这些研究为提升拍卖的可行性提供了宝贵思路, 但其采用的简化策略 (如分轮、分区) 在 eVTOL 这一高度依赖网络效应的场景中, 对整体配置效率产生的具体影响, 尚未得到充分探讨。

因此, 本研究旨在融合上述脉络的优势, 构建一个能同时兼容起降场的空间网络特性、运营商的组合估值偏好、空域安全容量约束以及现实交易成本的定制化拍卖机制。

3 问题描述与模型构建

3.1 问题描述

考虑一个大型城市, 基于其城市规划、空域管理及功能分区的需要, 被划分为 Z 个不同的地理区域。全市范围内共有 $|J|$ 个可供使用的垂直起降场, 每个起降场 $j(j \in J)$ 都唯一地隶属于一个特定区域 $z(z \in Z)$, 这些起降场是 eVTOL 飞行器进行起降、停放及能源补给的核心基础设施。不同区域内垂直起降场的使用权, 共同决定了各 eVTOL 运营商能否构建其可行的物流或出行网络。运营商 (如顺丰、京东等物流企业, 小鹏、亿航等出行服务公司) 基于业务运营线路, 会产生对于各区域垂直起降场的组合需求。

在本文的设置中, 政府或代表公共利益的第三方平台扮演起降场使用权拍卖商与行业监管者的双重角色。每个运营商 $i(i \in I)$ 作为投标者参与拍卖, 从所有可能的起降场组合 2^J 中选择其感兴趣的若干组合, 构成其竞标集合 $B_i(B_i \subseteq 2^J)$ 。运营商 i 对于每个竞标组合 $b_i^l \in B_i(l = 1, 2, \dots, |B_i|)$ 的估值为 $v_i(b_i^l)$ 。要求运营商向平台提交异或 (exclusive OR, XOR) 投标, 也就是提交的竞标集合中至多有一个竞标胜出。由于本文设计的机制具有激励相容性 (见定理 1), 在此机制下, 运营商的最优策略是报告其真实估值, 后续分析中可认为运营商的报价等于真实估值。另外, 平台作为监管者, 需要维护市场的公平竞争环境, 防止任何运营商在关键区域形成垄断。因此平台会限制每个区域中可被单个运营商获得的起降场数量不得超过 $U_z(z \in Z)$, 并将此信息公开。平台在收集所有运营商的 XOR 竞标后, 选择能最大化社会总福利且满足上述条件的分配方案, 按照 VCG 定价规则向获胜的运营商收取费用。

3.2 模型

根据问题描述, 模型目标为最大化社会福利, 模型如式 (1)~(5) 所示。

$$(IP) \max V(I) = \sum_{i \in I} \sum_{b_i^l \in B_i} v_i(b_i^l) x_i(b_i^l). \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} \sum_{b_i^l \in B_i, j \in b_i^l} x_i(b_i^l) \leq 1, \quad \forall j \in J; \quad (2)$$

$$\sum_{b_i^l \in B_i} x_i(b_i^l) \leq 1, \quad \forall i \in I; \quad (3)$$

$$\sum_{b_i^l \in B_i} |b_i^l \cap J_z| x_i(b_i^l) \leq U_z, \quad \forall i \in I, \quad \forall z \in Z; \quad (4)$$

$$x_i(b_i^l) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall b_i^l \in B_i. \quad (5)$$

其中, 式 (1) 表示最大化平台与运营商的整体效用; 约束 (2) 保证每个起降场 $j(j \in J)$ 最多只能被分配给一个运营商使用; 约束 (3) 保证每个竞标者 $i(i \in I)$ 投出的 XOR 标的最多只能有一个标 b_i^l 被选中, $x_i(b_i^l) = 1$ 表示运营商 i 的 b_i^l 起降场组合被选中, 否则, 为 0; 约束 (4) 表示运营商 i 在城市区域 z 可被分配的起降场数量不能超过 U_z , 其中 $J_z = \{j \in J | z(j) = z\}$, 表示位于区域 z 的所有起降场的索引集合。因此, $|b_i^l \cap J_z|$ 计算了投标组合 b_i^l 中包含的、属于区域 z 的起降场数量。本文的符号定义如表 1 所示。

表 1 符号说明

Table 1 Notations and descriptions

类型	符号	描述
决策变量	$x_i(b_i^l)$	运营商 i 的竞标组合 b_i^l 是否中标, $x_i(b_i^l) \in \{0, 1\}$
	$x_i(b_i^{l,z})$	运营商 i 在区域 z 的竞标组合 $b_i^{l,z}$ 是否中标, $x_i(b_i^{l,z}) \in \{0, 1\}$
	I	参与 eVTOL 起降场拍卖的运营商集合, $i \in I$
	J	可被拍卖的所有 eVTOL 起降场集合, $j \in J$
	Z	含有被拍卖的 eVTOL 起降场的区域集合, $z \in Z$
	J_z	区域 z 覆盖的起降场索引集合, $J_z = \{j \in J z(j) = z\}$
	B_i	运营商 i 对所有区域的一次性竞标集合
	B_i^z	运营商 i 对区域 z 的竞标集合
	l	竞标组合的索引
	b_i^l	运营商 i 的第 $l(l = 1, 2, \dots, B_i)$ 个全局竞标组合
参数	$b_i^{l,z}$	运营商 i 在区域 z 的第 $l(l = 1, 2, \dots, B_i^z)$ 个竞标组合
	U_z	每个运营商在区域 z 可获得的起降场数量上限
	$v_i(b_i^l)$	运营商 i 对于竞标组合 b_i^l 的估值
	$v_i(b_i^{l,z})$	运营商 i 对于区域 z 中竞标组合 $b_i^{l,z}$ 的估值
	p_i	运营商 i 在一次性拍卖中需要支付的价格
	p_i^z	运营商在区域 z 的拍卖中需要支付的价格
	u_i^z	运营商在区域 z 拍卖中的利润
	$V(I)$	所有运营商与平台的整体效用
	$V^z(I)$	所有运营商与平台在区域 z 拍卖的效用

3.3 拍卖机制设计

本节将基于前述模型, 根据竞标场景设计两种不同的拍卖机制以实现起降场使用权的分配: 一次性组合拍卖机制与分区域序贯拍卖机制。两种机制均采用 VCG 定价规则以保证其良好的理论性质。

3.3.1 一次性组合拍卖机制

一次性组合 VCG 拍卖机制 (one-shot VCG

auction, O-VCG), 其设计理念源于平台期望通过单轮全局优化, 实现城市空域资源的最优配置。在该机制下, 运营商需要一次性提交其覆盖多个区域的完整物流与出行网络构建方案。例如, 一个典型的标包可能同时包含前海合作区的国际性核心枢纽、南山区科技园的商务出行站点, 以及龙华区物流园的仓储配送中心。平台则通过求解全局优化模型 (IP), 一次性确定所有起降场的归属, 该拍卖机制规则如下。

- 1) 每个运营商 i 向平台提交竞标集合 B_i 及其中每个竞标组合 b_i 的估值 $v_i(b_i)$ 。
- 2) 平台根据求解模型决定运营商 I 的赢家集合 G 以及对应的获胜竞标组合, 实现起降场 J 的有效分配。
- 3) 平台使用 VCG 定价决定每个赢家 $i(i \in G)$ 需要支付的价格为 $p_i = v_i(b_i) - [V(I) - V(I \setminus i)]$, 每个赢家 i 的效用为 $V(I) - V(I \setminus i)$ 。

这种方法能够高效地捕获不同功能区域起降场之间的网络协同与连接效应 (例如, 获得前海核心枢纽, 将显著提升其获取宝安区末端配送站点的价值), 从理论上保证了社会总福利的最大化。这种机制适用于深圳这类追求高效集约发展、需要进行全市低空经济顶层网络规划的超大型城市。

3.3.2 分区域序贯拍卖机制

分区域序贯 VCG 拍卖 (sequential VCG auction, S-VCG) 机制更贴近于资源逐步释放、企业分步决策的现实管理场景。考虑到城市空域管理的渐进性, 或平台希望分阶段评估不同区域的市场热度, 起降场使用权可以按区域逐批拍卖。在该机制下, 平台按照预定的区域顺序 $z_1, z_2, \dots, z_{|Z|}$ 依次拍卖起降场使用权。运营商根据当前竞标区域, 提交其局部网络构建方案。例如, 在拍卖宝安区的轮次中, 一个标包可能包含宝安国际机场附近的交通枢纽与宝安中心上次的出行站点。平台通过依次求解每个区域的优化模型 (IP) 确定各区域起降场的归属, 其拍卖机制规则如下。

- 1) 在每一轮针对特定区域 z 的拍卖中, 每个运营商 i 向平台提交仅针对该区域 z 的竞标集合 B_i^z 及其中每个竞标组合 $b_i^z \subseteq J_z$ 的估值 $v_i(b_i^z)$ 。
- 2) 平台根据求解仅限于区域 z 的优化模型, 决定当前轮次运营商集合 I 的赢家集合 G_z 以及对应的获胜竞标组合, 实现区域 z 内起降场 J_z 的有效分配。
- 3) 平台使用 VCG 定价决定每个赢家 $i(i \in G_z)$ 在当

前轮次需要支付的价格 $p_i^z = v_i(b_i^z) - [V^z(I) - V^z(I \setminus \{i\})]$, 其中, $V^z(I)$ 是区域 z 拍卖的最优社会福利; $V^z(I \setminus \{i\})$ 是移除运营商 i 后的最优社会福利。

- 4) 当前区域 z 的拍卖结束后, 平台将已分配的起降场从后续拍卖中移除, 并基于更新后的起降场集合, 按照预定顺序开启下一区域的拍卖。每个运营商 i 在整个序贯拍卖中的总支付为其在所有轮次支付的总和, 即 $P_i = \sum_{z \in Z} p_i^z$ 。

为确立 S-VCG 拍卖机制的理论基础并保障其具备良好的性质, 本文引入以下两个核心行为假设。

- 1) 跨期估值独立性: 运营商在不同拍卖轮次中的估值是相互独立的。即运营商对任一区域 z 内起降场组合的估值 $v_i(b_i^z)$, 不受其与其他区域竞标结果的影响。
- 2) 短视最佳响应: 在每一轮拍卖中, 运营商均为短视的最佳响应者 (myopic best-response, MBR) [25-26]。其策略目标是在当前轮次中, 最大化自身的即时期望利润 $u_i^z = v_i(b_i^z) - p_i^z$, 而不考虑当前轮的出价与结果对后续轮次可能产生的战略性交互影响。

在引入上述两个假设后, S-VCG 的每一阶段即构成一个独立的标准 VCG 机制。因此, 投标人在各阶段真实报价为其占优策略, 从而保证 S-VCG 整体仍满足激励相容性。若无上述假设, 投标人可通过跨阶段学习调整策略, S-VCG 将无法保证激励相容。值得注意的是, O-VCG 与 S-VCG 的本质区别并不在于单阶段机制规则, 而在于投标的生成方式与信息结构: 前者需一次性提交全局组合投标, 后者则允许 S-VCG 提交局部投标。这一区别直接影响了运营商的策略空间与网络构建逻辑 (即估值模型), 也是本文系统比较两种机制的出发点。

3.3.3 拍卖机制性质

本文设计的一次性组合拍卖与分区域序贯拍卖机制均满足 VCG 机制的两项核心性质: 激励相容性与个体理性。其中, 一次性组合拍卖作为标准 VCG 框架下的直接应用, 其性质成立是已知结论。而对于分区域序贯拍卖, 在上述的行为假设下, 每一轮的区域拍卖实质上构成一个独立的 VCG 机制, 因此该序贯机制整体仍保持激励相容与个体理性。

定理 1 激励相容。在分区域组合拍卖中, 真实报价为最优策略。

证明 在针对区域 z 的拍卖中, 假设所有其他运营商均真实报价。此时, 若运营商 i 也真实报价, 其将赢得起降场组合 b_i^z , 对应的支付价格为

p_i^z , 所获利润为 $u_i^z = v_i(b_i^{kz}) - p_i^z$ 。

现假设真实报价并非运营商 i 的最优策略, 则其可通过提交一个虚假报价 $v_i'(b_i^{kz}) \neq v_i(b_i^{kz})$ 以获得更高利润。假设在该虚假报价下, 运营商 i 转而赢得组合 b_i^{kz} (其中, b_i^{kz} 为区域 z 内的另一个原子投标), 其支付价格根据 VCG 规则确定为 $p_i^z = v_i'(b_i^{kz}) - [V^z(I) - V^z(I \setminus \{i\})]$ 。其中, $V^z(I)$ 为运营商 i 提交虚假报价后, 平台重新求解赢家确定问题所得的最优社会福利值, 其表达式为 $V^z(I) = v_i'(b_i^{kz}) + \sum_{n \in I \setminus \{i\}} \sum_{b_n^{kz} \in B_n^z} v_n(b_n^{kz}) x_j'(b_n^{kz})$ 。这里的 n 表示除了运营商 i 以外其他参与投标的运营商; x_j' 代表在运营商 i 虚假报价后形成的新最优分配方案。由于已经假设过所有运营商都是短视最佳响应者, 因此其虚假报价获得的利润一定比原本的利润高, 则有

$$v_i(b_i^{kz}) - p_i^z > V^z(I) - V^z(I \setminus \{i\})$$

$$\Leftrightarrow V^z(I) < v_i(b_i^{kz}) - v_i'(b_i^{kz}) + V^z(I)$$

$$\Leftrightarrow V^z(I) < v_i(b_i^{kz}) + \sum_{i \in I} \sum_{b_i^{kz} \in B_i \setminus k} v_i(b_i^{kz}) x_i(b_i^{kz})$$

将 p_i^z 和 $V^z(I)$ 的表达式代入上述不等式, 最终得到的不等式左侧即为在运营商 i 的真实估值 $v_i(b_i^{kz})$ 下, 由虚假报价所诱导出的新分配方案对应的社会总福利。此式表明, 存在一个分配方案 (即虚假报价诱导出的方案), 其社会总福利严格大于平台通过优化模型计算出的原最优社会福利 $V^z(I)$ 。这与 $V^z(I)$ 是全局最优解的定义相矛盾。因此, 初始假设不成立。在分区域序贯拍卖的任一单轮中, 真实报价是运营商的最优策略。结合“跨期估值独立性”与“短视最佳响应”假设, 运营商在各轮次均独立地采用此策略, 所以整个分区序贯拍卖机制都具有激励相容性质。证毕。

4 算例与结果分析

为评估一次性组合拍卖与分区域序贯拍卖两种拍卖机制在配置 eVTOL 起降场资源中的性能, 本节设计了对比实验, 重点分析代理人对跨区域资源的偏好如何影响拍卖结果。

4.1 实验设置与流程

采用同一批代理人的投标数据, 分别在上述两种机制下进行模拟, 以确保结果的可比性。

实验流程如下。

1) 生成基础投标偏好: 为每个代理人生成其偏好的竞标组合集 B_i 及对应的基础估值。

2) 构建一次性拍卖投标集: 基于 B_i , 生成用于一次性组合拍卖的完整投标集 $B_i^{\text{one-shot}}$ 。

3) 衍生分区域拍卖投标集: 以 B_i 为基础, 依据分区域拍卖的规则, 将其拆解并映射至各个区域, 形成区域的投标集 B_i^z , 并依据短视行为假设确定其不同区域中的出价。

代理人 (运营商) 异质性体现为其业务模式 (如物流配送、载人出行、公共服务等) 与运营网络的差异, 进而导致其对起降场组合的估值结构与跨区域偏好存在系统性不同。为模拟代理人的异质性, 本文依据其跨区域组合偏向参数定义了 3 种类型: 低偏向型 (θ_l)、中偏向型 (θ_m) 和高偏向型 (θ_h)。其参数值分别设定为 $[0.6, 0.1, 0.3]$ 、 $[0.3, 0.1, 0.6]$ 与 $[0.1, 0.1, 0.8]$ 。该参数向量依次表示在代理人投标组合 B_i 中, 单个起降场、同区域组合与跨区域组合的构成比例, 直接决定了其投标组合的数量分布。

4.2 估值模型与投标集构建

首先为每个运营商 $i \in I$ 生成其竞标组合集 B_i ($|B_i|$ 为预设值) 及对应的基础估值。

组合估值规则如下: 若 b_i^j 为单个起降场 $\{j\}$, 其估值 $v_i(b_i^j) \sim U(5, 50)$; 若为同区域组合 (即 $\exists z \in Z, b_i^j \subseteq J_z$), 其估值 $v_i(b_i^j) = (1 + \delta_{\text{local}}) \sum_{j \in b_i^j} v_i(\{j\})$, 其中, $v_i(\{j\}) \sim U(5, 30)$, $\delta_{\text{local}} \sim U(0.1, 0.3)$; 若为跨区域组合 (即 $\forall z \in Z, b_i^j \not\subseteq J_z$), 其估值 $v_i(b_i^j) = (1 + \delta_{\text{cross}}) \sum_{j \in b_i^j} v_i(\{j\})$, 其中, $v_i(\{j\}) \sim U(5, 30)$, $\delta_{\text{cross}} \sim U(0.3, 0.5)$ 。

基于上述基础估值, 两种拍卖机制的投标集按以下方式构建。一次性拍卖中, 运营商的投标集 $B_i^{\text{one-shot}}$ 在 B_i 基础上扩展, 为每个跨区域组合 b_i^j 所包含的起降场 j 生成一个额外单项投标, 其估值 $v_i(\{j\}) = \lambda v_i^{[j]}$, 其中, $\lambda \sim U(0.3, 0.7)$; 分区域序贯拍卖中, 投标按区域 z 分解为集合 B_i^z 。完全属于 z 的组合被保留; 跨区域组合则被拆解, 其位于 z 内的起降场作为单项投标纳入 B_i^z , 估值采用原始基础估值 $v_i^{[j]}$ 。估值模型与投标集构建规则总结见表 2。

4.3 实验结果及分析

本节对比一次性组合拍卖与分区域序贯拍卖的性能, 分析其对具有不同跨区域偏向 θ_i 的代理人群

表 2 估值模型与投标集构建规则

Table 2 Valuation model and bid construction rules		
估值规则	一次性组合拍卖 $B_i^{\text{one-shot}}$	分区域序贯拍卖 B_i^f
单项起降场	$v_i(\{j\}) \sim U(5,50)$	$v_i(\{j\}) \sim U(5,50)$
同区域组合	$v_i(\{j\}) \sim U(5,30),$ $\delta_{\text{local}} \sim U(0.1,0.3)$	$v_i(\{j\}) \sim U(5,30),$ $\delta_{\text{local}} \sim U(0.1,0.3)$
跨区域组合	完整组合: $(1 + \delta_{\text{cross}}) \sum v_i(\{j\}),$	
	$v_i(\{j\}) \sim U(5,30),$	拆解单项: $v_i^{[j]}, v_i(\{j\}) \sim U(5,30)$
	$\delta_{\text{cross}} \sim U(0.3,0.5);$	
	拆解单项: $\lambda v_i^{[j]}, \lambda \sim U(0.3,0.7)$	

体的影响。结果基于 50 次随机实例的均值，以消除随机性干扰。为防止垄断，每个运营商在区域 z 的获胜数量上限 U_z 设为 2 与 $|J_z|/3$ 间的随机整数。核心评估指标包括社会福利、平台效用、运营商利润和赢家比例。

本节的仿真参数设计参考深圳市低空经济相关规划与产业报告。运营商数量参考已在深圳开展实质性业务布局的主要企业 (如物流、出行、公共服

务领域); 起降场总数的设置参考深圳市在《低空经济产业创新发展实施方案》中提出的近期建设目标; 区域划分则对应从重点片区试点到全域联网的不同发展阶段。本研究旨在揭示市场结构对机制性能的影响规律。

4.3.1 起降场数量与运营商偏好对拍卖机制的影响分析

为探究 eVTOL 起降场数量对不同拍卖机制及代理人跨区域偏好的影响，本实验设定关键参数如下：运营商数量 $|I|=10$ ，起降场总数 $|J|$ 为 20 ~ 50 之间的整数，区域数量 $|Z|=4$ ，每个代理人的初始异或投标组合数 $|B_i|=30$ 。图中实线代表一次性 VCG 拍卖 (O-VCG)，虚线代表分区序贯 VCG 拍卖 (S-VCG)，蓝色、红色和黄色分别代表高跨区域偏好 (H)、中跨区域偏好 (M) 和低跨区域偏好 (L)。

如图 2 (a) 所示，O-VCG 的社会福利并非一直优于 S-VCG，二者社会福利的曲线存在交点。在交点左侧，O-VCG 凭借保障组合协同性而占优；在交点右侧，S-VCG 则因资源充裕、组合约束减弱而更具效率。且交叉点的位置随代理人跨区域偏好向右移动。这表明最优机制的选择由资源充裕度与代理

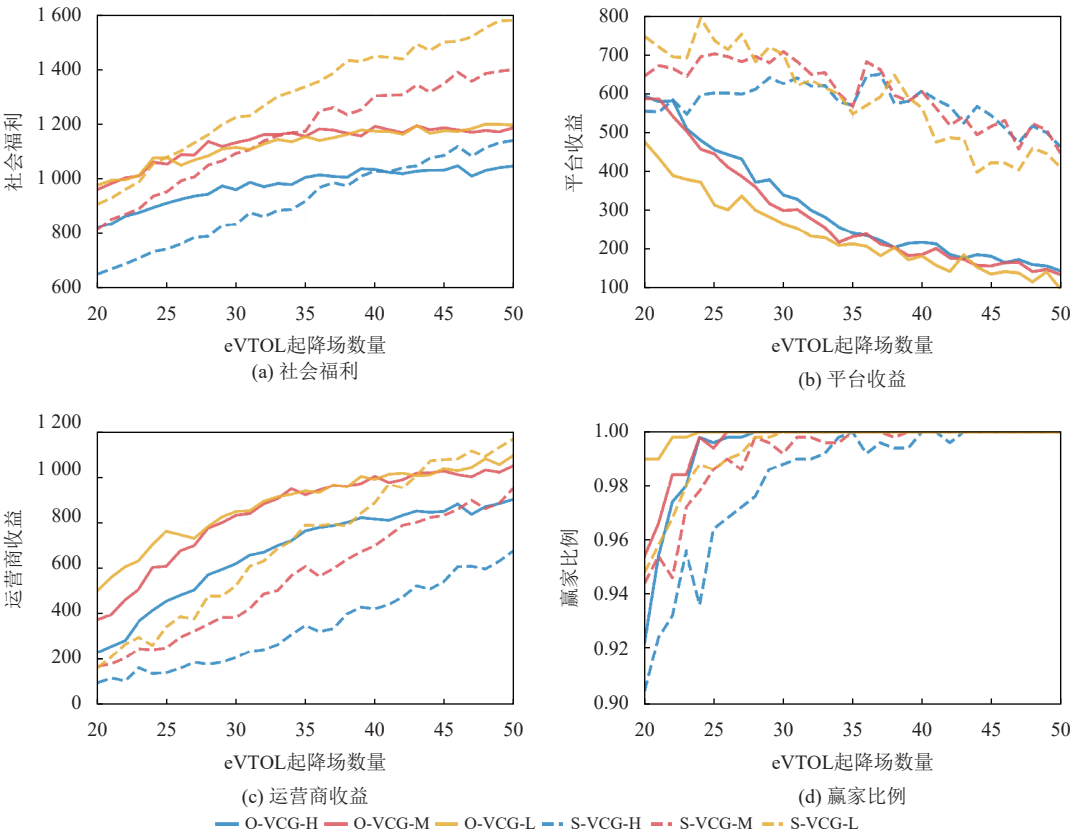


图 2 起降场数量和运营商偏好对拍卖机制的影响

Figure 2 Impact of vertiport quantity and operator preferences on auction mechanisms

人偏好共同决定。高偏好群体在绝大多数场景下 ($|J|=41$) 适用 O-VCG 以保障协同收益; 中偏好群体在资源超过 34 时宜采用 S-VCG; 低偏好群体仅在资源稀缺 ($|J|=25$) 时适用 O-VCG, 资源充裕时 S-VCG 更优。在图 2 (b) 中, S-VCG 的平台收益在所有偏好场景下均优于 O-VCG, 且收益与偏好的关系在两种机制中相反, S-VCG 下低组合偏好收益最高, 而 O-VCG 下高组合偏好收益最高。

运营商收益分析如图 2 (c) 所示, 两种机制的收益曲线同样存在交点, 其变化规律与社会福利相似, 即资源稀缺时 O-VCG 更利于运营商, 但代理人收益与其组合偏好强度呈负相关, 低组合偏好的收益最高, 中偏好次之, 高偏好最低。图 2 (d) 对比了两种拍卖的赢家比例, 当资源较少时, 高组合偏好的运营商的赢家比例最少, 这表明在资源紧张的市场中, 追求复杂组合的策略会面临更高的竞争风险, 导致其更难获得所需资源。

4.3.2 投标数量与运营商偏好对拍卖机制的影响

为探究投标数量对拍卖机制及代理人跨区域偏

好的影响, 本实验设定 $|I|=10$, $|J|=40$, $|Z|=4$, 每个代理人的初始异或投标组合数 $|B_i|$ 在 10 ~ 50 的整数范围内取值。其余设置和 3.3.1 小节相同。

图 3 (a) 中 S-VCG 的社会福利高于 O-VCG, 且二者之间的差距随代理人跨区域组合偏好强度的增加而逐步收窄; 图 3 (b) 在平台收益方面, S-VCG 机制显著高于 O-VCG, 而 O-VCG 机制下不同偏好类型对应的平台收益则基本持平; 图 3 (c) 中 S-VCG 的运营商收益低于 O-VCG, 且运营商收益与组合偏好成负相关; 图 3 (d) 从赢家比例来看, 除高组合偏好群体在部分区间存在轻微波动外, 绝大多数情景下的赢家比例均趋近于饱和状态。从深层次看, 代理人异质性影响了机制表现: 高偏好运营商缩小了两种机制的社会福利差距, 但也承担了更高信息租金 (收益与偏好负相关); S-VCG 的平台收益与运营商类型相关, 而 O-VCG 则对异质性不敏感; 高偏好运营商的中标率在投标数量较少时呈现波动, 表明其复杂的跨区组合需求在信息不完整场景下更易受到机制匹配效率的制约。

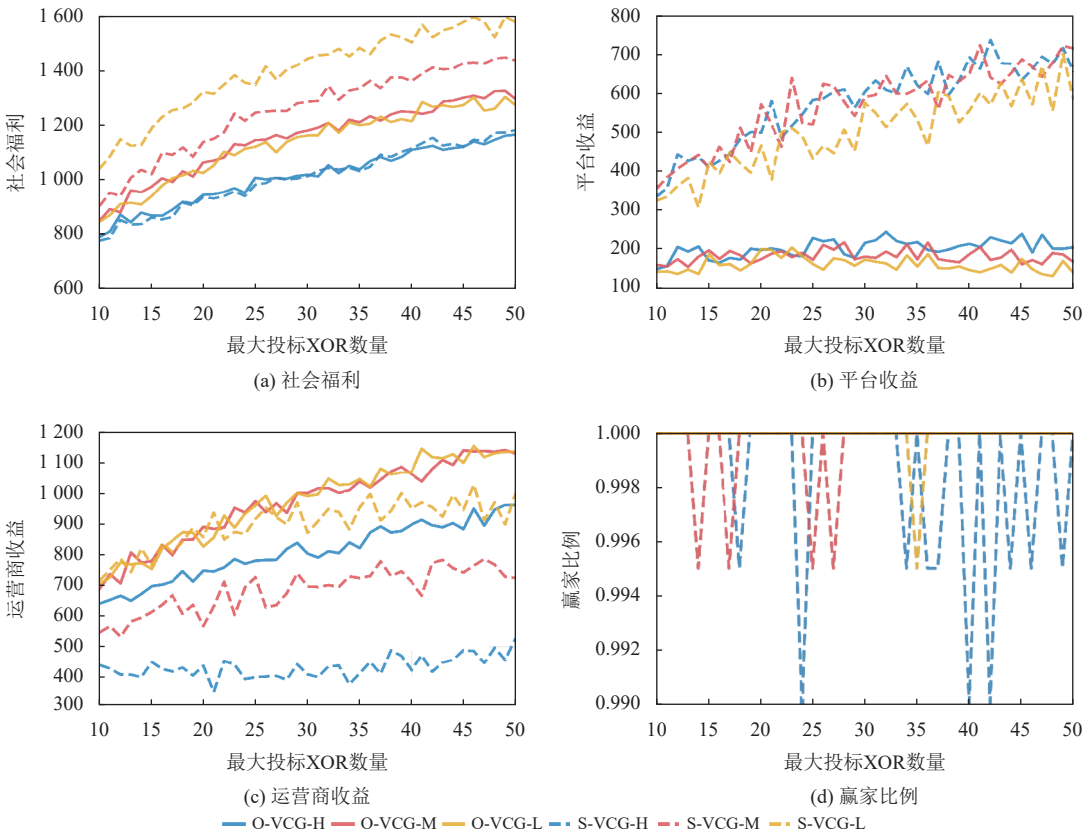


图 3 投标数量和运营商偏好对拍卖机制的影响

Figure 3 Impact of bid quantity and operator preferences on auction mechanisms

4.3.3 拍卖机制与固定定价机制在不同区域划分下的比较分析

实验 3 主要探究区域划分数量对拍卖机制及固定定价模式的影响, 这里的运营商跨区域偏好设定为中等, 同时设定 $|I| = 10$, $|J| = 50$, $|B_i| = 30$, 区域数量为 2、4、6、8。这一设置参考了深圳市的分区情况, 从目前有大量 eVTOL 需求的行政区域到整体可运营 eVTOL 的区域, 反映出低空活动从重点区域试点向全域联网演进的趋势。通过比较不同区域划分下定价机制的表现, 可揭示空域资源管理分区对资源配置效率的影响, 为城市低空经济分区规划提供量化依据。

对比机制包括两种拍卖机制以及固定定价机制。固定定价机制通过设定统一的年度使用权租赁价格 P_{fixed} 进行资源分配。为系统评估该机制在不同市场条件下的表现, 预设 3 个代表性价格水平: 高价 P_h 模拟资源供过于求的状态, 取估值的上四分位数; 中价 P_m 取估值的中位数, 以模拟供需相对均衡的理想情景; 低价 P_l 模拟供不应求的市场状态, 取估值的下四分位数。运营商仅在其估值不低于价格

时申请购买; 若某起降场申请人数超过供给, 则通过摇号随机分配。该机制在分配过程中同样遵循各区域的反垄断数量约束 U_i 。

主要结果如表 3 所示。对比两个拍卖机制, 随着区域数量增加, 社会福利、平台收益及运营商收益均呈现出先升后降的非单调变化趋势。这说明一个适中的区域数量能够在激发市场竞争活力与保障资源匹配效率之间取得最佳平衡, 从而实现社会福利的最大化。超过此最优值后, 因资源被过度分割而导致的“供过于求”假象与组合破裂问题, 反而会抑制整体效率的提升。在总起降场资源固定的现实约束下, 采用分区域序贯拍卖 (S-VCG) 机制, 并辅以科学的区域规划, 能够通过引入适度的区域间竞争, 有效提升资源配置效率与社会福利。这表明, 监管者在进行空域划分时, 不应仅考虑地理或行政边界, 而应综合评估其对市场竞争结构的塑造, 以寻求整体效率最优的规划方案。

对比拍卖机制与固定定价机制的实验结果显示, 3 种固定定价机制 (高价、中价、低价) 所实现的社会福利均低于分区域序贯拍卖 (S-VCG) 机制。

表 3 区域数量与定价机制的影响

Table 3 Impact of the number of regions and pricing mechanisms					
区域数量	机制类型	社会福利	平台收益	运营商收益	赢家比率
2	O-VCG	1 023.99	71.06	952.93	1.00
	S-VCG	1 199.77	197.02	1 002.74	1.00
	固定定价: 高价 P_h	1 154.30	792.24	362.06	0.59
	固定定价: 中价 P_m	1 154.62	653.25	501.37	0.78
	固定定价: 低价 P_l	1 075.08	446.96	628.12	0.89
4	O-VCG	1 172.31	97.41	1 074.89	1.00
	S-VCG	1 471.65	344.52	1 127.13	1.00
	固定定价: 高价 P_h	1 166.78	806.10	360.68	0.58
	固定定价: 中价 P_m	1 179.60	663.80	515.80	0.78
	固定定价: 低价 P_l	1 089.04	458.27	630.77	0.90
6	O-VCG	1 163.70	104.84	1 058.95	1.00
	S-VCG	1 385.41	341.94	1 043.47	1.00
	固定定价: 高价 P_h	1 122.36	780.57	341.80	0.53
	固定定价: 中价 P_m	1 145.68	637.48	508.20	0.72
	固定定价: 低价 P_l	1 081.76	442.64	639.12	0.84
8	O-VCG	1 154.25	109.56	1 044.70	1.00
	S-VCG	1 290.23	246.77	1 043.47	1.00
	固定定价: 高价 P_h	1 109.82	784.78	325.04	0.50
	固定定价: 中价 P_m	1 142.42	626.76	515.66	0.67
	固定定价: 低价 P_l	1 076.50	429.99	646.51	0.78

然而,固定定价机制在平台收益方面表现更为突出,其中中价策略下的平台收益甚至超过拍卖机制,这主要源于其通过设定统一价格直接获取了更高的租金溢价。与此同时,运营商的总体利润在固定定价机制下显著低于拍卖机制,反映了价格管制对市场剩余向消费者(运营商)转移的抑制效应。

此外,固定定价机制的赢家比例普遍偏低,表明在实际应用中,若采用固定定价方法,能够满足价格门槛并成功进入市场的运营商数量将减少,市场参与度下降。这不仅导致整体社会福利的损失,也可能削弱市场竞争活力,长远来看不利于培育健康、多元的低空经济生态。尽管固定定价在短期内能够为公共财政带来更高收益,但其代价是牺牲了资源配置效率、抑制了运营商创新激励,并可能引发市场集中度上升的风险。因此,在低空资源分配政策设计中,需在财政收入最大化与市场长期健康发展之间审慎权衡。

5 结论

本文面向低空经济规模化运营中 eVTOL 起降场这一关键稀缺资源的配置问题,以深圳市多元复合的应用场景为现实背景,将市场设计中的拍卖理论引入空域资源管理领域,系统性地研究并比较了一次性组合拍卖与分区域序贯拍卖以及传统固定定价机制的性能。本研究的主要贡献在于,突破了现有研究多聚焦于技术实现的局限,首次从运营管理和资源配置的视角,为 eVTOL 起降场的分配与定价提供了系统的机制设计方案和量化决策依据。

本研究的核心创新点体现在以下 4 个方面: 1) 构建了一个综合考虑运营商跨区域组合偏好与城市多区域功能约束的拍卖模型,更贴合低空运营的网络化与复杂化特征; 2) 通过仿真实验,首次揭示了资源配置效率与市场环境(如资源稀缺度、投标数量、区域划分)及代理人异质性(组合偏好强度)之间的关系,可为监管者选择最优机制提供参考; 3) 明确了拍卖机制相较于传统固定定价在提升社会福利、保障运营商收益和促进市场多元竞争方面的系统性优势,同时揭示了固定定价虽能短期增加财政收入,但以抑制市场活力与配置效率为代价; 4) 验证了分区域序贯拍卖在多数现实场景下,通过引入适度竞争能带来效率提升,并提出匹配不同发

展阶段的机制选择路径。

基于本研究结论,结合深圳市低空经济发展现状,提出以下管理启示与政策建议: 1) 在运营初期资源稀缺阶段,可采用分区域序贯拍卖(S-VCG)作为主导机制,以降低运营商规划复杂性,便于分片区培育市场; 2) 随着网络成熟与资源增加,应评估引入一次性组合拍卖(O-VCG)以捕获跨区域协同价值的时机; 3) 区域划分应遵循“功能导向、适度竞争”原则,避免过度细分导致资源碎片化; 4) 监管平台应建立透明的信息披露与竞价系统,并设置合理的反垄断上限(U_c),保障市场公平竞争。

基于本研究的局限性,未来工作可从以下 3 方面展开。1) 引入更复杂的行为模型,本研究假设代理人为完全理性的短视个体,未来可探讨其在序贯拍卖中的学习能力与策略性报价行为,使模型更贴近现实。2) 探索多单位与动态拍卖,本文主要关注起降场时间槽的单一单位分配,未来可研究运营商对同一场地多个时间槽的组合需求,并设计与之匹配的多单位动态拍卖机制。3) 深化与运行控制的协同,将资源分配机制与空域流量管理、飞行路径规划等运行控制系统相结合,构建“分配-规划-运行”一体化的决策框架,是推动低空经济安全高效发展的必然方向。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 中共中央国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24)[2025-11-03]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
- [2] 吕绍刚. 深圳低空经济蓄势高飞[N]. 人民日报, 2024-07-06(6).
- [3] 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.
- [4] Kong X T R, Xu S X, Cheng M, et al. IoT-enabled parking space sharing and allocation mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(4): 1654-1664.
- [5] Yan Y P, Wang K, Qu X B. Urban air mobility (UAM) and ground transportation integration: a survey[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2024, 11(4): 734-758.
- [6] Huang H L, Su J C, Wang F Y. The potential of low-altitude airspace: the future of urban air transportation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(8): 5250-5254.
- [7] Long Q, Ma J, Jiang F F, et al. Demand analysis in urban air mobility: a literature review[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2023, 112: 102436.

- [8] Hyun K. Choice model based analysis of consumer preference for drone delivery service[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 84: 101785.
- [9] Ren X H, Wang J R. Symbiotic evolution mechanism of urban air mobility industrial innovation ecosystem: evidence from low altitude air mobility in Shenzhen[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2025, 124: 102750.
- [10] 陈俊彦. 超大城市低空交通体系构建与服务管理能力建设的上海方案[C]//中国城市规划学会城市交通规划专业委员会. 新空间·新业态·新交通——2025 城市交通规划年会论文集. 上海: 上海市城乡建设和交通发展研究院, 2025: 280-289.
- [11] Pons-Prats J, Živojinović T, Kuljanin J. On the understanding of the current status of urban air mobility development and its future prospects: commuting in a flying vehicle as a new paradigm[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 166: 102868.
- [12] Decker C, Chiambaretto P. Economic policy choices and trade-offs for unmanned aircraft systems traffic management (UTM): insights from europe and the united States[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2022, 157: 40-58.
- [13] 傅惠, 崔煜, 赵佳虹, 等. 低空无人机物流配送研究与应用综述[J]. *工业工程*, 2025, 28(1): 9-21.
- Fu Hui, Cui Yu, Zhao Jiahong, et al. A review of research and applications in low-altitude logistics and delivery using unmanned aerial vehicles[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2025, 28(1): 9-21.
- [14] Vickrey W S. Congestion theory and transport investment[J]. *American Economic Review*, 1969, 59(2): 251-260.
- [15] Cramton P. Spectrum auction design[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [16] Lee H, Jung J, Lee D J. An auction-based airport slot reallocation scheme considering the grandfather rights of airlines[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2024, 118: 102612.
- [17] Zaman S, Grosu D. A combinatorial auction-based mechanism for dynamic VM provisioning and allocation in clouds[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2013, 1(2): 129-141.
- [18] 刘方勤. 空域耦合容量管理与时隙资源分配机制的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [19] Xu S X, Huang G Q. Efficient auctions for distributed transportation procurement[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 65: 47-64.
- [20] Xu S X, Zhao Z H, Huang G Q, et al. A meta-auction for on-demand transportation procurement in industry 5.0[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, 193: 103842.
- [21] Feng J H, Yu N, Wang Z H, et al. ChatGPT-enabled two-stage auctions for electric vehicle battery recycling[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 183: 103453.
- [22] Husain Z, El-fouly T H M, Singh S, et al. BlockCharge: a blockchain-based auction framework for EV charging via mobile stations[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124638.
- [23] Guo J T, Zhang J L, Cheng T C E. Truthful multi-unit double auction with transaction costs and sellers' changing marginal costs[J]. *International Journal of Production Economics*, 2024, 278: 109430.
- [24] 孔祥天瑞, 王超, 徐素秀, 等. 数字经销平台统采共配双层拍卖机制设计[J]. *系统管理学报*, 2023, 32(4): 651-663.
- Kong Xiangtianrui, Wang Chao, Xu Suxiu, et al. Hierarchical auction enabled integrated purchasing and delivering mechanism for digital wholesaler platform[J]. *Journal of Systems & Management*, 2023, 32(4): 651-663.
- [25] Shao S J, Xu S X, Yang H, et al. Parking reservation disturbances[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 135: 83-97.
- [26] Beil D R, Wein L M. An inverse-optimization-based auction mechanism to support a multiattribute RFQ process[J]. *Management Science*, 2003, 49(11): 1529-1545.

(责任编辑: 孟晓燕)