

文章编号:1671-1637(2026)03-0118-22

城市即时配送条件下无人机枢纽-骑手联合配送模式研究

杨扬^{*1}, 左博睿², 赏珂琪³

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650504; 2. 云南交通运输职业学院 轨道交通学院, 云南 昆明 650300; 3. 云南交通运输职业学院 智慧交通学院, 云南 昆明 650300)

摘要:针对城市即时配送中传统骑手直送模式的运力瓶颈以及无人机直接配送在高密度城市环境中面临的挑战,提出了无人机枢纽-骑手联合配送模式;采用了“骑手前端取货-无人机枢纽间运输-骑手末端配送”的三段式流程,并衍生出5种拓展模式;基于Logit模型构建了包含经济性和时效性双重属性的分担率模型,推导了新模式与既有模式效用均衡时的临界运距计算公式,评估了竞争力边界;采用蒙特卡洛模拟、基于旅行商问题的数值试验及排队论模型对枢纽间距离期望值、顺路系数及枢纽成本等关键参数进行估算;构建了符合中国城市即时配送特征的基准场景,并通过敏感性分析探究了路网条件、枢纽位置等因素对配送模式竞争力的影响。结果表明:基准场景下联合配送模式的临界运距为3.88 km,处于骑手直送模式主要服务范围内;当枢纽与供需点距离位于2.57~4.32 km且配送距离在5.17~9.49 km时,因无人机续航限制需中转,导致优势区间不连续分布;5种拓展模式的临界运距介于1.57~3.88 km,呈现差异化竞争特征,其中,需求端自提模式临界运距最低(1.57 km),适用于用户自提场景,而端到端直配和全程自主配送模式次低,但均需供给端自配枢纽,且全程自主配送模式需较高自动化水平;在多订单场景下,联合配送模式对时间敏感型货物在更广泛的距离区间内保持竞争优势。所提方法为解决无人机在城市配送中的适应性问题提供了新思路,可为无人机配送网络规划、枢纽选址布局和低空经济政策制定提供定量分析工具。

关键词:低空物流;无人机枢纽-骑手联合配送模式;Logit模型;临界运距;蒙特卡洛模拟;城市即时配送

中图分类号:U121 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.088

Research on drone hub-rider collaborative delivery model under urban instant delivery conditions

YANG Yang^{*1}, ZUO Bo-ru², SHANG Ke-qi³

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China; 2. School of Rail Transit, Yunnan Vocational College of Transportation, Kunming 650300, Yunnan, China; 3. School of Intelligent Transportation, Yunnan Vocational College of Transportation, Kunming 650300, Yunnan, China)

Abstract: To address the capacity bottlenecks of the traditional direct delivery model by riders in

出版历程:2025-07-14 收稿,2025-09-29 修回,2025-11-27 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(72264017)

* 作者简介:杨扬(1974-),男,江苏常州人,教授,工学博士,E-mail:yytongji@kust.edu.cn.

引用格式:杨扬,左博睿,赏珂琪.城市即时配送条件下无人机枢纽-骑手联合配送模式研究[J].交通运输工程学报,2026,26(3):118-139.

Citation: YANG Yang, ZUO Bo-ru, SHANG Ke-qi. Research on drone hub-rider collaborative delivery model under urban instant delivery conditions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 118-139.

urban instant delivery and the challenges faced by direct drone delivery in high-density urban environments, a drone hub-rider collaborative delivery model was proposed. A three-stage process of “rider front-end pickup, drone inter-hub transportation, and rider terminal delivery” was adopted, and five extended models were derived. Based on the Logit model, a modal split model containing the dual attributes of economy and timeliness was constructed; the calculation formulas for the critical delivery distance when the utilities of the new model and existing models reached equilibrium were derived, and the competitiveness boundaries were evaluated. Monte Carlo simulation, numerical experiments based on the traveling salesman problem, and a queueing theory model were adopted to estimate key parameters such as the expected value of inter-hub distance, the enroute coefficient, and hub costs. A baseline scenario conforming to the characteristics of urban instant delivery in China was constructed, and the impacts of factors such as road network conditions and hub locations on the competitiveness of the delivery model were explored through sensitivity analysis. The results indicate that the critical delivery distance of the collaborative delivery model under the baseline scenario is 3.88 km, which is within the main service range of the direct rider delivery model. When the distance between the hub and supply/demand points is 2.57 - 4.32 km, and the delivery distance is 5.17 - 9.49 km, transfers are required due to the endurance limit of the drone, which leads to a discontinuous distribution of the advantage intervals. The critical delivery distances of the five extended models range from 1.57 to 3.88 km, presenting differentiated competitive characteristics. The demand-side self-pickup mode has the lowest critical delivery distance (1.57 km), which is suitable for customer self-pickup scenarios; the end-to-end direct delivery and fully autonomous delivery modes have the second lowest critical delivery distances, but both require supply-side self-equipped hubs, with the fully autonomous delivery mode additionally demanding a higher level of automation. In multi-order scenarios, the collaborative delivery model maintains a competitive advantage over a wider distance range for time-sensitive goods. The proposed method provides a new idea for solving the adaptability problem of drones in urban delivery and can provide a quantitative analysis tool for drone delivery network planning, hub location layout, and low-altitude economic policy formulation.

Keywords: low-altitude logistics; drone hub-rider collaborative delivery model; Logit model; critical delivery distance; Monte Carlo simulation; urban instant delivery

Publication history: Received 2025-07-14; Received in revised form 2025-09-29; Accepted 2025-11-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (72264017)

* **Corresponding author:** YANG Yang, professor, PhD, E-mail: yytongji@kust.edu.cn.

0 引言

随着移动互联网技术的深度渗透和消费者即时性需求的持续增强,即时配送已成为现代城市物流体系的关键支撑^[1]。据统计,2024年中国即时配送订单量突破480亿单,同比增长17.3%,市场规模达2800亿元人民币^[2]。然而,在订单量快速增长的背景下,传统骑手直送模式面临着运力瓶颈、成本刚性上升和安全事故频发等结构性挑战^[3],亟需创新配送模式以突破现有体系的效率边界。

无人机配送凭借其速度快、成本低、物理限制少等技术优势^[4-6],被视为变革城市物流的关键技术。然而,尽管国内外领先企业在该领域投入巨大^[7-8],无人机在城市即时配送中的实际应用规模仍然有限。截至2024年,美团无人机累计完成25万订单^[8],相对于全国480亿的年订单总量而言微乎其微。这一反差揭示了一个关键问题:在中国高密度城市环境中,现有的无人机物流配送模式可能存在深层次的适应性障碍。

既有无人机物流运输模式研究主要围绕2个方

向展开:无人机独立配送模式和地空协同配送模式。前者致力于实现无人机端到端的自主配送能力,后者探索无人机与地面运力的优势互补。在无人机独立配送模式中,早期研究集中于技术可行性探索,关于模型能耗、飞行范围、电池参数的讨论可参考Zhang等^[9]的对比研究,关于无人机路径问题可参考Chung等^[10]的相关综述。然而,受限于续航里程和载重能力等物理约束,性能优化和路径规划难以突破效率瓶颈,独立配送模式研究焦点逐渐转向系统层面的设施布局优化。Pinto等^[11]提出了一种点对点无人机配送网络设计模型,通过引入中间充电站扩展无人机的操作范围;Zhu等^[12]针对灾后紧急物资配送场景,构建了选址-路径两阶段鲁棒优化模型;Park等^[13]研究了急救医疗服务中无人机设施选址和分配问题。具体到城市商业配送领域,任新惠等^[14]结合网格分区与泰森多边形方法优化无人机机场选址;Bruni等^[15]提出考虑非线性能耗模型和飞行时间不确定性的共享蜂巢条件下的无人机路径优化模型,明确考虑了无人机在配送后可飞往其他蜂巢充电或重新装载,而非必须折返初始蜂巢;张春晓等^[16]基于经典的枢纽辐射式网络架构,综合考虑噪声约束、经济成本和对地安全风险等多维因素,构建了城市低空物流网络多目标优化模型。从上述研究脉络可以看出,无人机独立配送模式正呈现枢纽化发展趋势。然而,现有研究多聚焦于“如何布局以提升效率”的优化问题,对“何时适用”和“如何实施”的问题探讨不足,特别是缺乏与传统配送模式的系统性比较分析来明确其适用边界。

关于地空协同配送模式方面,卡车-无人机联合递送模式是其主要研究方向,该模式将无人机作为卡车的延伸运力,执行从卡车出发的分支配送任务。该模式自Murray等^[17]提出后得到广泛发展。现有研究根据送货形式可分为2类:一是无人机起飞后卡车原地等待其返回^[18-19];二是无人机起飞执行任务的同时,卡车继续沿预设路线配送,实现同步作业^[20]。在运载关系上,实际应用和部分研究多采用卡车、无人机“一对一”模式^[21],但也有研究表明“一对多”模式能有效提升整体配送效率^[22]。在研究方法上,无人机物流运输问题常被视为经典旅行商问题的拓展,即“无人机参与的旅行商问题”^[23]。研究者通常构建相应的多目标混合整数规划模型,并采用启发式算法^[17, 23-24]或结合深度学习算法^[25]进行求解。然而,卡车-无人机模式主要适用于国外低密度配送区域和分散型

服务场景,其车辆在城市核心商圈的通行限制、停靠困难以及频繁启停的效率损失,使其难以满足高密度即时配送的运营要求。针对城市即时配送特征,部分研究开始关注无人机辅助骑手的运作模式。赵强柱等^[26]构建了无人机辅助骑手的外卖配送路径优化模型,将无人机定位为骑手的取餐工具——无人机从商家取餐后飞至骑手位置进行空中交接,以节省骑手往返商家的时间;卢福强等^[27]在此基础上考虑了动态订单环境,提出了实时路径调整策略。这些开创性工作为地空协同配送提供了有益探索,但研究重点仍局限于既有配送框架内的效率优化,对如何从系统层面重新构建地空协同机制的探讨相对不足。

综观现有文献,无人机配送研究在技术优化和运营模式探索方面已形成丰富的理论体系,但在向实际应用转化过程中仍面临2个关键挑战:一是研究基于理想化假设,视角局限于自身模式的运营效率提升,对不同配送模式的竞争边界、适用条件和市场选择机制的系统性分析相对薄弱;二是无人机物流枢纽化趋势与地空协同需求之间的内在联系尚未得到充分认识,缺乏将枢纽作为城市配送体系重构节点的整体性思考。

鉴于此,提出“无人机枢纽-骑手联合配送模式”(Drone Hub-rider Collaborative Delivery Model, DHRCDM,以下简称“联合配送模式”),通过分段组合的运作机制,实现地面运输与空中运输的优势互补。区别于现有点对点直送或单边辅助模式,该模式构建了基于固定航路的枢纽网络体系,将配送过程解构为骑手前端取货、无人机中继运输、骑手末端配送3个环节,既发挥无人机中长距离运输优势,又保留骑手服务柔性,同时规避了端对端配送的空域管理难题。此外,基于枢纽网络架构,进一步构建了“1+5”模式体系:以骑手-无人机枢纽联合配送为基准,衍生出供给端直达、需求端自提、末端直飞、端到端直配及全程自主配送5种拓展模式,为不同场景提供差异化解决方案。

然而,创新模式的实践价值取决于其相对传统模式的竞争优势边界。本文从宏观视角探讨运输模式的系统可行性,旨在明确联合配送模式的适用条件和竞争力边界。为此,首先基于离散选择理论构建Logit分担率模型,以经济性和时效性为核心效用函数,推导临界运距解析式,从理论层面刻画模式间竞争均衡;其次,针对模型中顺路系数等关键参数的标定难题,采用蒙特卡洛模拟等方法实现科学估算;

最后,构建立足典型城市配送环境的基准场景,通过敏感性分析系统,识别影响模式选择的关键因素,界定联合配送模式的优势区间。研究成果既为即时配送企业的无人机网络布局提供决策依据,也为低空经济政策制定提供理论支撑。

1 无人机枢纽-骑手联合配送模式

1.1 联合配送模式设计

1.1.1 现有模式的约束与挑战

在中国高密度城市环境下,无人机直接应用于即时配送面临多重系统性约束,这些约束决定了传统点对点配送模式的局限性。

(1)空间环境约束:中国城市人口密度高、建筑密集、垂直化发展特征显著。商业设施多位于建筑内部或地下空间,居住区以高层建筑为主,无人机难以实现精准的“门到门”服务。相比之下,骑手能够进入建筑内部、上楼入户,其在前端取货与末端配送环节的精细化服务能力在短期内具有不可替代性^[28-29]。

(2)监管政策约束:中国低空空域管理体系呈现高度集中化和严格化特征^[30-31]。依据《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》^[30],真高120 m以上空域及机场周边、重要基础设施等敏感区域均属管制空域,飞行活动须履行事前审批程序。即便在非管制空域,点对点配送模式仍面临空域容量不足、缺乏成熟的无人机交通管理系统支撑、复杂城市环境下的技术挑战以及运营复杂度随规模指数级增长等系统性制约^[32-33]。相较而言,基于固定航路的枢纽间运输模式可通过长期飞行活动申请获得常态化运营许可,有利于建立标准化的飞行走廊体系,在监管框架内形成可持续的运营模式。

(3)社会接受度约束:社会接受度约束集中体现为公众对无人机配送的风险感知和心理抵触,主要包括隐私侵犯担忧、安全事故恐惧、噪音污染抵触等^[34]。点对点配送模式需要无人机频繁进入居民区上空,飞行路径的不可预测性加剧了公众担忧。相比之下,枢纽间运输模式的固定航路和可预期的运营规律更容易获得社会认可。

1.1.2 无人机枢纽-骑手联合配送模式设计

基于上述约束分析,提出联合配送模式。该模式引入枢纽作为标准化中转节点,将传统端到端直送解构为“站对站”干线运输与“端对端”末端服务相结合的混合架构,其核心机制是功能分工与优势互补。无人机专注于枢纽间的标准化高速运输,充

分发挥其速度优势;骑手负责复杂城市环境中的灵活取送服务,保留其服务柔性。这种分工既规避了无人机在密度城区的操作限制,又克服了骑手在中长距离运输中的效率瓶颈。具体概念如图1所示。

该模式的核心价值体现在3个层面。

(1)运营价值层面:枢纽作为标准化物流节点,实现多重功能集成。首先,通过订单时空聚合效应,将分散的即时配送需求转化为批量化、规模化的干线运输,显著提升无人机利用率并摊薄固定成本;其次,作为运力资源的动态调配中心,在高峰时段灵活配置骑手与无人机资源,缓解运力瓶颈;最后,提供充换电等运营保障服务,确保配送网络持续稳定运行。

(2)网络价值层面:枢纽将复杂的“多对多”配送网络简化为可控的“枢纽-枢纽”固定航线网络,从根本上降低空域管理复杂度。随着枢纽密度增加,网络覆盖范围和连通性呈现非线性提升,形成显著的网络效应,即每新增一个枢纽节点,均可提升网络路径选择和服务能力。

(3)战略价值层面:枢纽作为标准化基础设施,其建设和运营更容易获得政策支持和社会认可。枢纽网络具有良好的前瞻性和扩展性,即使未来技术进步实现点对点配送,已建成的枢纽仍可转型为区域配送中心或多式联运节点,保障基础设施投资的长期价值。此外,无人机垂直起降的特性使枢纽建设更加灵活,城市绿地、楼顶、停车场等闲置空间均可利用,降低部署成本,支撑密集化布局。

1.2 运作流程

联合配送模式将即时配送过程分解为3个核心环节,具体流程如图2所示。

(1)前端取货环节:骑手接单后从供给点取货(T_1),并将货物送至距离最近的无人机枢纽(T_4)。该环节保留了骑手在复杂商业环境中的取货灵活性。

(2)中继运输环节:包括枢纽接收货物及起飞准备(T_5)、无人机按固定航线飞往目标枢纽(T_6)、到达后的货物处理(T_7)。对于超长距离配送,当配送距离超过无人机续航里程时,系统支持在中途枢纽进行换机中转,通过重复 $T_5\sim T_7$ 流程完成接力运输。

(3)末端配送环节:骑手从目标枢纽取货(T_8)并配送至需求点(T_3),完成“最后一米”的精准交付。

1.3 模式体系与拓展形态

基于无人机枢纽网络架构,构建了“1+5”的配

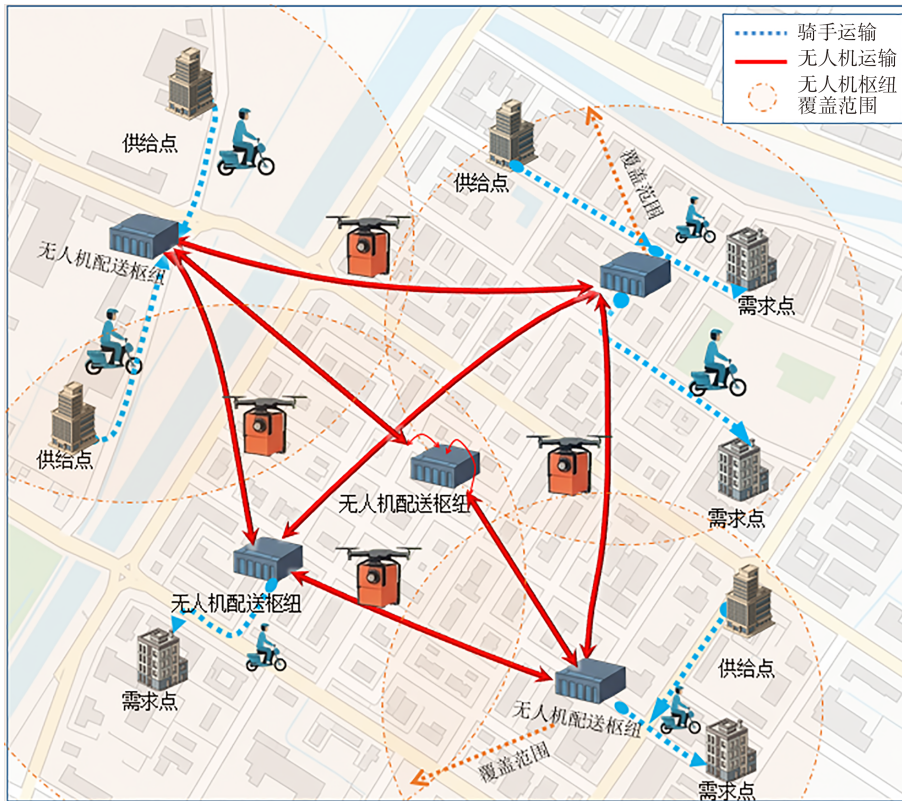


图1 联合配送模式枢纽网络概念

Fig. 1 Conception of DHRCDM hub network

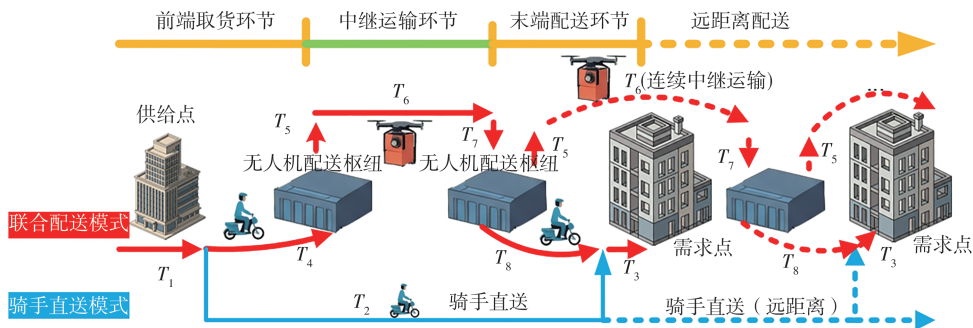


图2 联合配送模式运输流程分析

Fig. 2 Transportation process analysis of DHRCDM

送模式体系。以基准模式(联合配送模式)为核心,通过调整供需两端与枢纽的连接方式,衍生出5种拓展模式,共同构成适应不同场景的解决方案体系,具体如图3所示。

其中,联合配送模式作为基准模式,采用“骑手前端取货-枢纽间运输-骑手末端配送”的完整三段式流程。针对不同运营场景需求和约束条件,构建了5种拓展模式。

(1)供给端直达模式:商家具备配送能力时,可直接将货物送至枢纽,省略前端骑手取货环节,适用于高峰期运力紧张场景。

(2)需求端自提模式:用户可选择到枢纽自提货物,省略末端配送环节,通过让利机制提升用户参与

意愿。

(3)末端直飞模式:当需求点具备临时泊位条件时,无人机可从枢纽直飞完成末端配送,提升时效性。

(4)端到端直配模式:供给端自配无人机枢纽且需求点具备临时泊位条件时,可实现点对点直接配送。

(5)全程自主配送模式:无人机由枢纽出发,独立完成取送全流程并返回就近枢纽,实现配送链路的完全自动化。

这些模式并非相互独立,而是形成了从“人机协同”到“完全自主”的演进谱系:从供需端自提/直达模式(人工主导、枢纽辅助),到末端直飞模式(人机分段

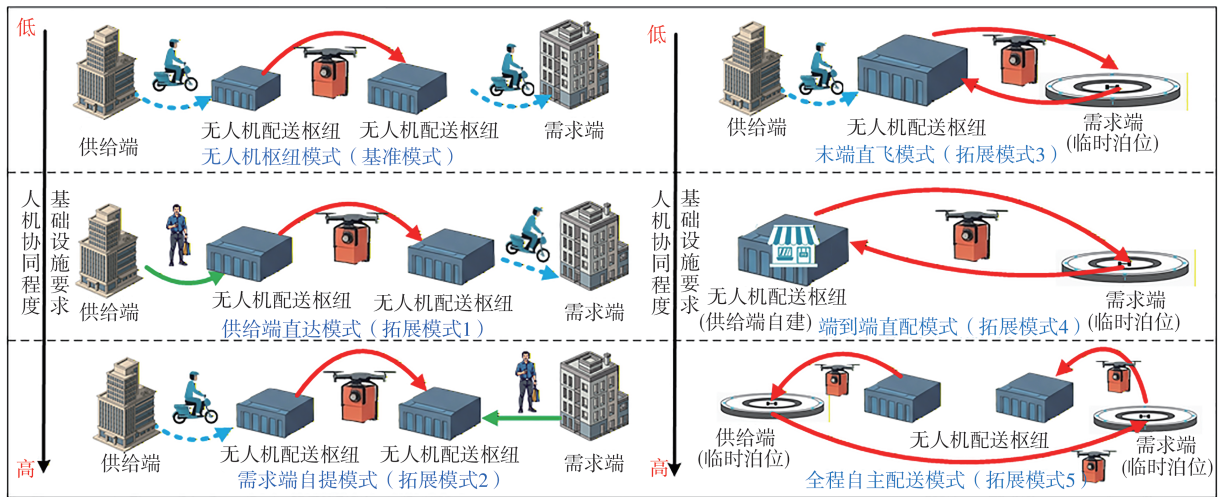


图3 联合配送模式拓展体系

Fig. 3 Extended system of DHRCDM

协作),再到端到端直配和全程自主配送模式(完全自动化),体现了自动化水平逐步提升、对基础设施要求递增的演进特征,共同构成基于枢纽网络的多层次配送解决方案体系。值得注意的是,枢纽在所有模式中均发挥着不可替代的核心作用,即无论是作为货物中转节点、无人机起降基地,还是作为服务接驳终端,每种模式都必须依托枢纽才能实现有效运营。在实际应用中,可根据基础设施成熟度、技术发展水平和市场需求特征,选择合适的模式或组合运营。

然而,无论采用何种形态,联合配送体系能否在实际运营中展现竞争力,根本上取决于其相对于现有骑手直送模式的效用优势。因此,基于Logit模型,构建定量分析框架:首先以基准模式为核心建立分担率模型,推导临界运距的理论框架,然后将分析拓展至完整的模式体系,科学界定不同运营形态的优势区间。

2 配送模式选择的分担率模型

2.1 理论框架与模型选择

关于临界运距的研究方法主要有Logit及其改进模型、Probit模型、博弈论等^[35-37]。其中,基于随机效用理论的Logit模型,由于其简洁的数学形式和明确的经济学含义,被广泛应用于运输方式选择的临界运距分析和分担率研究中^[35]。基于此方法构建骑手直送模式-联合配送模式分担率模型,并计算其临界运距。

根据随机效用理论,决策者在面临多种方案时,总是选择能带来最大效用的方案。任何一种运输方式的效用 U_z 由两部分组成

$$U_z = V_z + \epsilon_z \quad (1)$$

式中: V_z 为第 z 种运输方式可观测效用,反映第 z 种方式成本、时间等可量化属性; ϵ_z 为随机误差项,捕捉不可观测因素的影响,Logit模型假设随机误差项 ϵ_z 服从独立同分布的极值分布,据此可将效用差异转化为选择概率。

对于骑手直送和联合配送2种模式,其选择概率 P_z 为

$$P_z = \frac{\exp(\xi V_z)}{\sum_{z \in \{r, f\}} \exp(\xi V_z)} \quad (2)$$

式中: r 为骑手直送模式; f 为联合配送模式; ξ 为尺度参数,衡量选择概率对效用差异的敏感程度, ξ 越大,意味着决策者对效用差异越敏感,分担率在一种模式获得效用优势时会更迅速地发生转变。

2.2 分担率模型构建

2.2.1 效用函数的构建

运输方式选择研究通常需要综合考虑经济性、时效性、稳定性、安全性、便捷性和绿色性等多维度因素^[35]。然而,在即时配送场景中,2种模式在部分维度上的差异并不显著:稳定性方面,网络数据显示骑手和无人机配送的准点率均超过96%;安全性和便捷性作为主观定性指标,在2种模式均满足基本服务标准的前提下难以量化区分;绿色性方面,2种模式目前主要采用电能驱动。鉴于此,研究聚焦于最具决定性的2个定量指标,即经济性和时效性,构建效用函数为

$$V_z = \theta_C U_{C,z} + \theta_T U_{T,z} \quad (3)$$

式中: $U_{C,z}$ 和 $U_{T,z}$ 分别为配送方式 z 的经济(成本)效用和时间效用; θ_C 和 θ_T 为相应的权重系数,满足 $\theta_C + \theta_T = 1$ 。

θ_C 与 θ_T 的具体分配反映了决策者对成本和时间不同偏好,或者货物本身的不同属性。

为了反映成本和时间与效用之间的负向关系(即成本或时间越高,效用越低)并进行量纲一化处理,效用分量被定义为

$$U_{C,z} = -\frac{C_z}{\sum_{z \in \{r,f\}} C_z} \quad (4)$$

$$U_{T,z} = -\frac{T_z}{\sum_{z \in \{r,f\}} T_z} \quad (5)$$

式中: C_z 和 T_z 分别为配送方式 z 的实际成本和时间。

2.2.2 效用的量化表征

(1) 骑手直送模式成本

现有文献多将运输成本简化为服务费用,但在不完全竞争市场中,真实成本与市场价格存在偏离^[38-40]。骑手配送成本受多因素影响呈现异质性,且作为平台、商家、骑手、消费者四方博弈均衡结果难以精确测算。

对此,采用基于市场均衡的简化方法:从骑手日均运营数据中提取稳定的成本结构,识别平台与骑手都接受的均衡价格。该价格内化了多订单效应和长期博弈结果,为成本标定提供基准。考虑到枢纽模式下骑手可能只承担部分环节,依据市场“固定+距离”定价结构,将配送成本分解为取单、运输、送单3个单元。

这种三段式分解具有三重意义:首先,匹配实际市场定价机制;其次,为枢纽网络中的分段配送提供清晰的成本边界;最后,明确区分可通过共享路径分摊的运输成本与必须独立核算的取送固定成本,从而准确评估不同订单密度场景下的模式竞争力。

基于此框架,骑手直送模式成本 C_r 为

$$C_r = C_{\text{pickup}} + \frac{C_{u-r} d_{ij} \alpha_r \delta(n)}{n+m+1} + C_{\text{delivery}} \quad (6)$$

式中: C_{pickup} 为取单成本; C_{delivery} 为送单成本; C_{u-r} 为骑手单位距离运价; d_{ij} 为供给点 i 至需求点 j 的直线距离; α_r 为路网综合系数,反映路径条件与直线距离的关系; n 为顺路订单,在实际运营中,骑手会在同一商圈内顺路取送多个订单以降低运输成本; $\delta(n)$ 为顺路系数函数,表示搭载 n 个顺路订单时路径的延长比例,具体估算详见第 2.3.2 节; m 为同 (i,j) 对的订单数量,即同一需求点(或相邻需求点)在同一供给点(或相邻供给点)产生的多个订单;区别于顺路订单,同 (i,j) 对订单视为同时发布,不计入额外取送时间。

(2) 骑手直送模式时间

骑手直送模式时间 T_r 为

$$T_r = T_1' \lambda(n) + \frac{60 d_{ij} \alpha_r \delta(n)}{v_r} + T_3'(n+1) \quad (7)$$

式中: T_1' 为单订单基准取货时间,顺路订单需要考虑多次取货时间; $\lambda(n)$ 为多订单等待系数函数,具体估算详见第 2.3.3 节; T_3' 为单次配送上门送货时间,顺路订单的上门送货时间为线性相加; v_r 为骑手平均配送速度。

(3) 联合配送模式运输成本

联合配送模式运输成本 C_f 为

$$C_f = C_{\text{pickup}} + C_{\text{delivery}} + C_{ik,r} + C_{kk',f} + C_{k',r} + C_{\text{per-drone}} + C_{\text{ho}} \quad (8)$$

$$C_{ik,r} = \frac{C_{u-r} d_{ik} \alpha_r}{m+1} \quad (9)$$

$$C_{k',r} = \frac{C_{u-r} d_{k'j} \alpha_r}{m+1} \quad (10)$$

$$C_{kk',f} = \frac{C_{u-f} d_{kk'} \alpha_f \phi(n_z)}{m+1} \quad (11)$$

$$C_{\text{per-drone}} = \frac{F_{\text{drone}}(n_z+1)}{(m+1)Q_{\text{drone}}} \quad (12)$$

$$C_{\text{ho}} = \frac{F_{\text{hub}}(n_z+2)}{365Q_{\text{hub}}} + C_0(n_z+2) \quad (13)$$

式中: $C_{ik,r}$ 为骑手从供给点 i 到最近枢纽 k 的运输成本; $C_{kk',f}$ 为枢纽 k 与 k' 之间的无人机飞行能耗成本; $C_{k',r}$ 为骑手从枢纽 k' 到需求点 j 的运输成本; $C_{\text{per-drone}}$ 为订单所需分摊的无人机固定及运维成本; C_{ho} 为沿途启停枢纽处理订单的成本; C_{u-f} 为无人机单位能耗成本,具体估算详见第 2.3.5 节; d_{ik} 为供给点 i 到最近枢纽 k 的距离; $d_{kk'}$ 为枢纽 k 与 k' 之间无人机飞行直线距离; $d_{k'j}$ 为枢纽 k' 到需求点 j 距离; α_f 为空域复杂系数,虽然无人机运输不必考虑路网,但仍需考虑管制、障碍物等; $n_z = \max\{0, \lceil d_{kk'} \alpha_f / L_d \rceil - 1\}$ 为中转次数,其中 L_d 为无人机续航里程; F_{drone} 、 F_{hub} 分别为无人机、枢纽的运营期内固定及运维成本,其中 F_{hub} 估算详见第 2.3.4 节; Q_{drone} 、 Q_{hub} 分别为无人机、枢纽的日均处理订单; $\phi(n_z)$ 为中转路径延长系数,用于反映前往中转枢纽产生的额外飞行距离,当枢纽网络结构信息不充分时,该参数可采用经验值设定,特别地,当 $n_z=0$ 时, $\phi(n_z)=1$; C_0 为枢纽中每次操作的人工成本。

(4) 联合配送模式运输时间

联合配送模式运输时间 T_f 为

$$T_f = T_1' + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_3' \quad (14)$$

$$T_4 = \frac{d_{ik}\alpha_r 60}{v_r} \quad (15)$$

$$T_5 = T_5'(1+n_z) + \eta(m) \quad (16)$$

$$T_6 = \frac{60d_{kk'}\alpha_f \phi(n_z)}{v_f} \quad (17)$$

$$T_7 = T_7'(1+n_z) + \eta(m) \quad (18)$$

$$T_8 = \frac{60d_{k'j}\alpha_r}{v_r} \quad (19)$$

式中: T_5' 、 T_7' 分别为单订单枢纽无人机起、降时间, $\eta(m)$ 为多订单装卸附加时间, 保守估计取 m ; v_f 为无人机平均飞行速度。

由于无人机枢纽运输暂不考虑顺路订单情况, 故仅考虑基准订单的取送货时间 T_1' 、 T_3' 、 T_4 ~ T_8 详细含义可见第 1.2 节运作流程。

2.2.3 临界运距的计算

临界运距 L^* 定义为 2 种配送模式效用相同时的配送距离

$$V_r(L^*) = V_f(L^*) \quad (20)$$

具体地, 隐式表达为

$$\frac{\theta_c}{\theta_r} \left(\frac{C_f - C_r}{C_f + C_r} \right) = \frac{T_r - T_f}{T_f + T_r} \quad (21)$$

临界运距作为模式竞争力的分界点, 不仅量化了 2 种配送模式的效用均衡条件, 更为配送方式选择提供了清晰的决策边界。

2.3 模型关键参数估算

本节针对临界运距模型中关键参数的标定难

$$E(d_{kk'}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{\{d_{ik} \cos(\theta_1) - [d_{ij} + d_{k'j} \cos(\theta_2)]\}^2 + [d_{ik} \sin(\theta_1) - d_{k'j} \sin(\theta_2)]^2} d_{\theta_1} d_{\theta_2} \quad (22)$$

由于式(22)积分不存在闭式解, 采用蒙特卡洛方法进行数值逼近。在典型的即时配送场景下 ($d_{ik}, d_{k'j} \in [0, 1.5], d_{ij} \in [3, 20]$), 通过 $N=100\,000$ 次独立模拟试验, 结果表明以 d_{ij} 近似 $E(d_{kk'})$ 的主要误差小于 0.1 km, 最大误差小于 0.4 km, 如图 4 所示。基于此精度水平, 即时配送临界运距模型采用 $d_{kk'} = E(d_{kk'}) \approx d_{ij}$ 的简化假设。

2.3.2 顺路系数函数估算

在骑手运营场景中, 顺路配送作为一种高效策略被广泛应用: 骑手可从相邻供给点取单, 通过延长配送路径完成沿途多个订单的配送, 从而分摊运输成本。为兼顾现实性与模型可解性, 将顺路判定简化为空间维度的问题, 暂不考虑时间窗约束的影响。基于对骑手实际配送路径的调查, 先在理想空间下

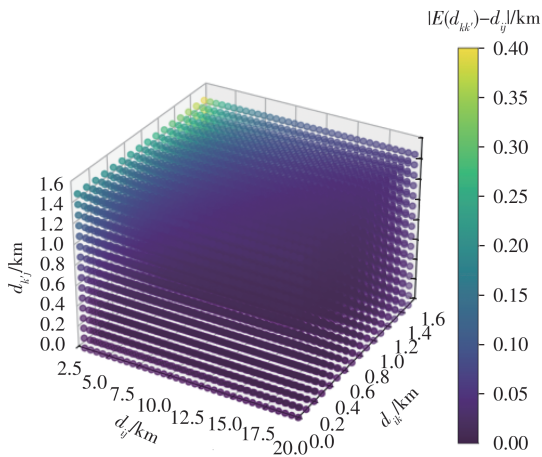
题, 构建了系统化的参数估算框架: ①基于蒙特卡洛模拟, 建立枢纽间期望距离 $E(d_{kk'})$ 与直线距离 d_{ij} 之间的函数关系; ②将顺路配送问题抽象为旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP) 的特殊变体, 通过大规模数值试验拟合顺路系数函数 $\delta(n)$; ③基于均匀分布假设, 推导多订单等待系数 $\lambda(n)$ 的解析表达式; ④引入多服务台/确定性服务时间/多顾客 (M/D/C) 排队论模型, 将枢纽规模设计问题转化为高峰期服务能力配置问题, 进而估算单位订单的枢纽固定成本分摊。此外, 基于 Stolaroff 无人机能耗计算模型估算无人机能耗成本。

2.3.1 枢纽间距离期望值估计

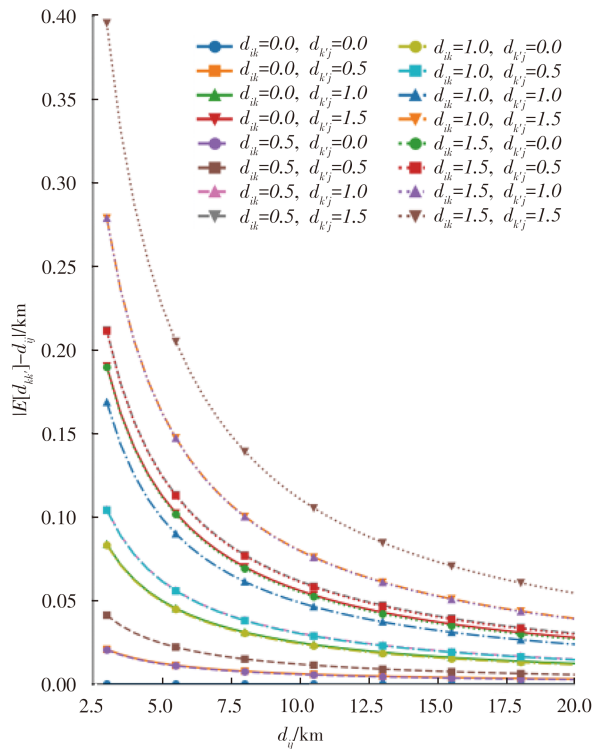
在实际配送网络中, 从供给点 i 到最近枢纽 k 的距离 d_{ik} , 以及从枢纽 k' 到需求点 j 的距离 $d_{k'j}$ 均为不确定变量, 其分布取决于订单的空间分布特征和枢纽网络布局。由此, 对应的 $d_{kk'}$ 同样具有不确定性。为使临界运距模型具有可操作性, 需将不确定性变量 $d_{kk'}$ 转化为确定性参数。基于大数定律, 采用期望 $E(d_{kk'})$ 作为 $d_{kk'}$ 的代表值。为确定期望 $E(d_{kk'})$, 建立如下几何模型: 设供给点 i 与需求点 j 的直线距离为 d_{ij} ; 枢纽 k 位于以 i 为圆心、 d_{ik} 为半径的圆周上; 枢纽 k' 位于以 j 为圆心、 $d_{k'j}$ 为半径的圆周上。由于枢纽相对于供需点的方位具有随机性, 设枢纽 k 的角度位置 θ_1 与枢纽 k' 的角度位置 θ_2 均在 $[0, 2\pi]$ 上服从均匀分布。基于上述几何关系, 枢纽间距离的期望值可表示为

提炼顺路判定准则, 确定 2 个核心参数: 起终点间的直线距离 L 和可行顺路区域的纵横比 σ 。顺路订单的可配送区域定义为长属于 $[0, L]$, 宽属于 $[-L\sigma/2, L\sigma/2]$ 的矩形区域, 在此矩形走廊内随机生成顺路点。

上述参数设置考虑了骑手顺路配送的 2 个关键因素: 其一, 起终点距离越大, 允许的横向偏离范围越大; 其二, 通过纵横比 σ 控制顺路容忍度。在此框架下, 顺路配送问题可转化为: 在矩形顺路走廊内, 寻找从起点出发、遍历所有 n 个顺路点并到达终点的最优路径, 可视为 $(n+2)$ 个点的旅行商问题变体, 属于 NP-hard 问题。现有的渐近 TSP 模型, 如经典的 Beardwood-Halton-Hammersley 定理^[41] 及文献 [42]~[44] 所提出的渐近函数均不适用于研究中小 n 值、非闭合且固定起终点的场景。因此, 采用大规模蒙特卡洛模拟构建顺路系数函数, 具体步骤如下。



(a) 距离偏差 $|E[d_{kk'}]-d_{ij}|$ 三维分布



(b) 不同枢纽距离组合下的偏差曲线

图4 枢纽间距离的蒙特卡洛模拟

Fig. 4 Monte Carlo simulation of inter-hub distance

步骤1:参数空间定义与初始化。考虑典型场景,设定 $L \in \{3\,000, 5\,000, 7\,000, 10\,000\}$, $\sigma \in \{0.1, 0.2, 0.4, 0.6\}$ 及 $n \in \{1, 2, \dots, 20\}$ 且 n 为随机均匀分布。对每组参数 $\{L, \sigma, n\}$,执行5 000次独立试验。

步骤2:路径优化^[45]。在每次试验中,随机生成 n 个节点;采用最邻近算法生成初始解;使用两元素优化算法进行局部优化路径,获得近似最短路径 L' 。 L' 通过优化序列中连续点之间的欧几里得距离计算

$$L' = \sum_{i=0}^n d(p_{x(i)}, p_{x(i+1)}) \quad (23)$$

式中: $d(p_{x(i)}, p_{x(i+1)})$ 为 i 与 $i+1$ 点之间的欧几里得距离; $p_{x(i)}$ 为 i 点平面坐标; $p_{x(0)}$ 为起点, $p_{x(n+1)}$ 为终点。

步骤3:函数拟合。针对每对参数组合 $\{L, \sigma, n\}$,所得路径长度统计均值为 $E(L')$ 。参考文献[41]~[44]中的拟合回归思想,选取7种理论模型进行拟合分析,旨在建立随机节点数 n 与路径长度比率 L/L' 的函数关系。其中,预设模型1、2直接采用上述文献的渐近形式,其余5种为统计学中的常规回归模型。在拟合效果评价中,采用 R^2 为主要评估指标,辅以均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)^[45]进行综合判定,最终确定最优拟合模型,具体结果见表1。

以 $L = 5\,000, \sigma = 0.2$ 为例,具体拟合情况见图5。其中,候选模型包括预设模型1 $[L' = L(1 + \beta_{fit} \sqrt{\frac{n}{\sigma}}) + C_{fit}]$ 、预设模型2 $[L' = L(1 + \beta_{fit} \sqrt{\frac{n}{\sigma}})]$ 、二次模型 $[L' = L(a_{fit} + b_{fit}n + c_{fit}n^2)]$ 、幂函数模型 $(L' = L a_{fit} n^{b_{fit}})$ 、平方根模型、对数模型 $\{L' = L[a_{fit} + b_{fit} \ln(n+1)]\}$ 、线性模型 $[L' = L(a_{fit} + b_{fit}n)]$, $\beta_{fit}, a_{fit}, b_{fit}, C_{fit}$ 为待拟合参数。最终拟合函数为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0.974\,838 + 0.030\,298n + 0.000\,678n^2 & n > 0 \end{cases} \quad (24)$$

由表1及图5可知,尽管顺路配送问题可抽象为TSP的变体,但通过蒙特卡洛模拟得到的拟合结果与文献[41]~[44]中预设的渐近函数(预设模型1、2)存在较大差异。相比之下,二次模型能够更有效地反映所设定参数条件下的顺路系数情况。此外,值得注意的是,基于上述拟合效果,在研究限定的场景内,顺路系数函数的参数主要受纵横比 σ 影响,而与直线距离 L 的相关性较弱。该发现简化了模型在不同配送距离下的应用,提升了其实用性。值得说明的是,构建的顺路系数函数是基于理论抽象和数值试验的参数估算框架。该函数的主要定位是:①在宏观层面捕捉顺路配送的成本分摊效应,为配送模式间的系统性比较提供量化基础;②建立一个可随实际运营数据不断校准和完善的参数体系,而非提供精确的路径长度预测;③在数据约束条件下,通过合理简化保证理论框架的可操作性和普适性。通过顺路系数估算,可为模式间的系统比较提供基础参数支撑。

表 1 基于蒙特卡洛模拟的顺路系数拟合

Table 1 Enroute coefficient fitting based on Monte Carlo simulation

L	σ	最佳拟合模型	R ²	RMSE	L	σ	最佳拟合模型	R ²	RMSE
3 000	0.1	二次模型	0.999 8	0.001 4	7 000	0.1	二次模型	0.999 7	0.001 9
3 000	0.2	二次模型	0.998 2	0.011 4	7 000	0.2	二次模型	0.998 1	0.011 6
3 000	0.4	二次模型	0.998 0	0.021 2	7 000	0.4	二次模型	0.997 9	0.021 9
3 000	0.6	二次模型	0.999 3	0.016 3	7 000	0.6	二次模型	0.999 3	0.016 5
5 000	0.1	二次模型	0.999 8	0.001 8	10 000	0.1	二次模型	0.999 8	0.001 7
5 000	0.2	二次模型	0.998 1	0.010 6	10 000	0.2	二次模型	0.998 2	0.011 2
5 000	0.4	二次模型	0.998 0	0.021 4	10 000	0.4	二次模型	0.997 8	0.022 2
5 000	0.6	二次模型	0.999 3	0.016 7	10 000	0.6	二次模型	0.999 3	0.016 1

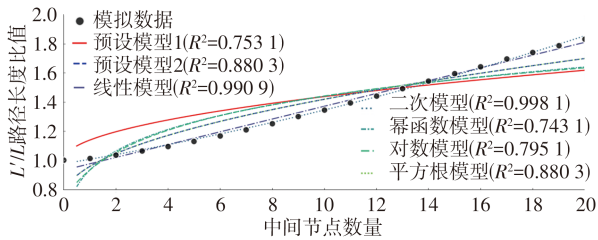


图 5 路径长度拟合

Fig. 5 Path length fitting

2.3.3 多订单等待系数估算

考虑同一商圈在对应基准订单产生时刻 t_0 前后 Δt 时间内共产生 n 个顺路订单,简化考虑相近时刻各订单产生时间 $t_\ell (\ell = 1, 2, \dots, n)$ 服从均匀分布 $U(t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t)$,单订单从发布到取餐平均等待时间为 t_d ,骑手在商圈内移动速度 v_w ,相邻供给点平均距离为 d_w 。基于实际调查,骑手倾向于临近时间的顺路订单一次性取货,此时骑手取货总时间为

$$T(n) = \max \{ t_0 + t_d, \max_{1 \leq \ell \leq n} (t_\ell + t_d) \} + \frac{d_w}{v_w} n \quad (25)$$

$$E[\max(t_1, t_2, \dots, t_s)] = a_w + (b_w - a_w) \frac{s}{s+1} \quad (26)$$

式中: a_w 、 b_w 分别为均匀分布的下界和上界, $a_w = t_0 - \Delta t + t_d$, $b_w = t_0 + \Delta t + t_d$; s 为纳入期望计算的订单总数,简化计算考虑,将基准订单也纳入等待时间期望最大值计算中,即 $s = n + 1$ 。

取得所有订单的期望时间为

$$T(n) = E[T(n)] = (t_0 - \Delta t + t_d) + 2\Delta t \cdot \frac{n+1}{n+2} + n \frac{d_w}{v_w} \quad (27)$$

代入 $T'_1 = t_d$, $T(n) = T'_1 \lambda(n)$, 可得

$$\lambda(n) = \frac{(t_0 - \Delta t + T'_1)}{T'_1} + \frac{2\Delta t}{T'_1} \frac{n+1}{n+2} + \frac{d_w}{v_w} \frac{n}{T'_1} \quad (28)$$

2.3.4 枢纽成本估算

枢纽成本作为联合配送模式的重要组成部分,

其估算准确性直接影响模式竞争力评估的可靠性。区别于现有研究多采用固定成本的简化方法^[12,14],引入 M/D/C 排队论模型^[46-47],通过刻画高峰期服务能力需求确定枢纽规模,进而实现基于订单的枢纽分摊成本估算。该方法基于高峰期服务保障原则:确保系统在订单高峰时段仍能维持可接受的服务水平,既避免容量不足的服务瓶颈,又防止过度配置的资源浪费。基于 M/D/C 排队模型刻画高峰时段系统运行特征如下。

(1)系统配置: c' 架无人机停靠在 c' 个固定泊位上,服务规则为先到先服务。

(2)到达过程:假设在高峰时段订单到达相互独立且到达率在该时段内保持稳定,服从强度为 $\lambda_{hub} = \tau Q_{hub}$ 的泊松过程,其中 τ 为高峰时段占全日运营订单比例。

(3)服务时间:无人机作业流程包括装货、起飞、巡航、降落、卸货等标准化环节,各环节耗时相对稳定。相较于传统物流中人工作业的随机性,无人机具有飞行速度恒定、枢纽间航路固定的特征,使得整体服务时间的变异性显著降低。由此,假设无人机服务时间为确定值 T_{hub} ,服务效率为 $\mu_{hub} = \frac{1}{T_{hub}}$, T_{hub} 的计算基于保守估计原则,即假设无人机完成枢纽间运输任务后均需返航原枢纽,计算如下

$$T_{hub} = 2 \left(T'_5 + \frac{60L_{peak}}{v_f} + T'_7 \right) \quad (29)$$

式中: L_{peak} 为无人机枢纽高峰期平均服务距离,结合即时配送订单主要服务范围,保守估计取 5 km。

基于 M/D/C 系统稳态要求 (利用率 $\rho_{hub} = \frac{\lambda_{hub}}{c' \mu_{hub}} < 1$, 负载为 $a = \frac{\lambda_{hub}}{\mu_{hub}}$), 通过 Erlang C 公式计算所有无人机都处于飞行状态的概率 $P_{c'}$ 为

$$P_{c'} = \frac{a^{c'}}{c'!} \frac{c'}{c' - a} \left(\sum_{\lambda=0}^{c'-1} \frac{a^\lambda}{\lambda!} + \frac{a^{c'}}{c'!} \frac{c'}{c' - a} \right)^{-1} \quad (30)$$

式中: λ 为求和索引。

由于M/D/C系统缺乏精确闭式解,采用Cosmetatos^[47]提出的近似方法估算平均等待时间 W_q ,其可以评估服务水平, W_q 为

$$W_q \approx \frac{P_c'}{2(c'\mu_{\text{hub}} - \lambda_{\text{hub}})} \quad (31)$$

为保障枢纽高峰期运行,同时考虑良好的利用率 $\rho'_{\text{hub}} = 0.9$ 和满足最大容忍平均等待时间 W_t 对应的利用率 ρ''_{hub} ,最终确定枢纽利用率为 $\rho^*_{\text{hub}} = \min\{\rho'_{\text{hub}}, \rho''_{\text{hub}}\}$ 。此时,无人机及对应的泊位数量 c' 为

$$c' = \left\lceil \frac{\lambda_{\text{hub}}}{\mu_{\text{hub}} \rho^*_{\text{hub}}} \right\rceil \quad (32)$$

考虑单台无人机泊位占地面积为 1.44 m^2 ^[48],并考虑场地附属系数1.5(包含工作人员走行区域、充电设备及附属设施),枢纽年固定成本 F_{hub} 为

$$F_{\text{hub}} = 2.16c' C_{\text{unit-rent}} \quad (33)$$

式中: $C_{\text{unit-rent}}$ 为单位面积场地费用(含年租金及场地设备折旧等)。

结合式(13)、(32)、(33)可得,分摊到每个订单的枢纽成本为

$$C_{\text{ho}} = \frac{2.16 C_{\text{unit-rent}} (n_z + 2)}{365 Q_{\text{hub}}} \left[\frac{\tau Q_{\text{hub}}}{\mu_{\text{hub}} \rho^*_{\text{hub}}} \right] + C_o (n_z + 2) \approx (n_z + 2) \cdot \left(\frac{2.16 \tau C_{\text{unit-rent}}}{365 \mu_{\text{hub}} \rho^*_{\text{hub}}} + C_o \right) \quad (34)$$

基于M/D/C模型和其服务水平要求,单订单分摊的枢纽成本仅与高峰时段系数、单位场地租金、服务效率和目标服务水平相关,而与枢纽总订单量无关。

2.3.5 飞行能耗估算

关于飞行单位成本 C_{u-f} ,参考Zhang等^[9]的能耗模型,并考虑即时配送实际载重区间^[20,27],选取保守的Stolaroff模型^[49]

$$C_{u-f} = \frac{(e_{\text{load}} + e_{\text{unload}}) \gamma_k + e_{\text{load}} (1 - \gamma_k)}{2} C_e \quad (35)$$

式中: γ_k 为枢纽 k 的空返系数,即起飞无人机会返回枢纽 k 的平均比例; C_e 为电费单价; e_{load} 为载重时的每公里能耗; e_{unload} 为空载返回时的每公里能耗。

统一的每公里能耗计算为^[49]

$$e = \frac{T_{\text{th}} (v_t \sin(\beta) + v_v)}{3600 \psi v_t} \quad (36)$$

$$T_{\text{th}} = \sum_w q_w g + \sum_w \frac{1}{2} \rho v_t^2 \partial_w A_w \quad (37)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_w \frac{1}{2} \rho v_t^2 \partial_w A_w}{\sum_w q_w g} \right) \quad (38)$$

$$v_v = \frac{2T_{\text{th}}}{\pi y \rho D^2 \sqrt{[v_t \cos(\beta)]^2 + [v_t \sin(\beta) + v_v]^2}} \quad (39)$$

式中: e 为保持无人机稳定飞行时所需能耗; T_{th} 为无人机前进所需推力; v_v 为感应速度; β 为飞行时俯仰角度; ψ 为能量转换效率; $w = \{1, 2, 3\}$ 代表无人机组件{机身、电池、货物}; q_w 为对应部件质量; A_w 为对应部件的投影面积; ∂_w 为对应部件的阻力系数; ρ 为空气密度; y 为无人机转子数量; D 为转子直径; g 为重力加速度。

基于外卖配送作业标准化的考量,假设无人机在所有飞行状态下均搭载标准配送箱,从而产生恒定的箱体配重和空气阻力效应。参照Stolaroff等^[49]提出的7 kg载重配送箱参数体系并结合文献[26]取保守值,设定含箱最大有效载重 Q_1 为5 kg。通过实地调研拟定配送箱空重为1 kg,因此在空载状态下 $q_3 = 1 \text{ kg}$,在承载货物时,无人机实际总载重可表示为

$$q_3 = 1 + (m + 1) q_t \quad (40)$$

式中: q_t 为单件货物的平均质量,参考文献[26]即时配送场景下的货物单重均值取 $q_t = 1 \text{ kg}$ 。

采用该参数结合式(35)~(40)可计算不同载重(空载)条件下的无人机平均能耗。

3 分析与讨论

3.1 场景构建

为验证所构建理论模型的有效性,并探究不同因素对配送模式选择的影响机制,本节基于中国即时配送发展现状构建基准场景。该场景定位于即时配送需求旺盛的新一线及省会城市,以成都(新一线城市代表)和昆明(典型省会城市)为主要参考,确保枢纽分流订单潜力充足。这类城市具备即时配送市场相对成熟、城区人口密度较大、基础设施完善及政策环境相对开放等特征,为无人机配送试点提供了良好条件。

基准场景参数拟定原则:①直接引用,优先引用文献数据、行业报告和平台公开信息;②综合推导,基于多源资料交叉验证,包括文献分析、网络数据、实地调研与理论推导的相互印证;③专家论证,通过行业访谈和情景分析验证基准场景的代表性和典型性,确保所选参数能够反映中国城市即时配送的普

遍特征。所有关键参数均采用保守估计原则,在确保结论稳健性的同时保留了模型的调整空间。3类参数的具体取值分别见表2~4。

表 2 直接引用参数取值

Table 2 Parameter values from direct citation

参数	取值	参数	取值	参数	取值
$v_r^{[26]}$ / (km·h ⁻¹)	25	$C_{e-price}^{[26]}$ / (元·KWh ⁻¹)	0.66	$F_{drone}^{[50]}$ / (元·天 ⁻¹)	46.3
$v_f^{[26]}$ / (km·h ⁻¹)	57.6	$\tau^{[51]}$	0.15	$A_1^{[49]}$ /m ²	0.224
$q_1^{[49]}$ /kg	7	$q_2^{[49]}$ /kg	10	$\phi^{[49]}$	0.7
$A_2^{[49]}$ /m ²	0.015	$A_3^{[49]}$ /m ²	0.092 9	$\partial_1^{[49]}$	1.49
$\partial_2^{[49]}$	1	$\partial_3^{[49]}$	2.2	$g^{[49]}$ / (m·s ⁻²)	9.8
$D^{[49]}$ /m	0.432	$y^{[49]}$ /个	8	$q_i^{[26]}$ /kg	1
$\rho^{[49]}$ / (kg·m ⁻³)	1.225	$Q_i^{[26]}$ /kg	5		

表 3 综合推导参数取值

Table 3 Parameter values from comprehensive derivation

参数	取值	参数	取值	参数	取值
T_1' /min	10	T_3' /min	5	T_5' /min	3
T_7' /min	3	L_d /km	8	α_f	1.1
α_r	1.5	C_{pickup} / (元·单 ⁻¹)	1.3	$C_{delivery}$ / (元·单 ⁻¹)	1.3
C_{u-r} / (元·km ⁻¹)	1.2	$C_{unit-rent}$ / (元·m ² ·年 ⁻¹)	600	C_o / (元·次 ⁻¹)	0.5

表 4 专家论证参数取值

Table 4 Parameter values from expert consultation

参数	取值	参数	取值
$\phi(n_z)$	1.2	σ	0.2
γ_k	0.5	d_{ik} /km	0.5
Q_{drone} /单	24	W_1 /min	1
$d_{k'j}$ /km	1		

鉴于无人机枢纽配送尚处于试点阶段,缺乏大规模运营数据,基准场景的关键参数说明如下。

(1)时间与成本参数:结合网络资料和实地调研,预估骑手取餐时间及无人机装卸货物的标准化作业时间和操作成本^[52]。

(2)骑手成本标定:结合网络数据与实地调研,设定骑手日均收入250元、日接单50单、日骑行100 km作为基准参考并与文献[26]、[53]交叉验证,最终确定基准场景的骑手分阶段成本结构。

(3)空返系数估算: γ_k 理论最优值为0(无人机完成任务后就近承接新订单),但考虑即时配送的潮汐效应和订单时空分布不均特征,采用 $\gamma_k=0.5$ 的保守估计,其反映了约50%的无人机需空载调度以平衡

枢纽间运力。

(4)多订单等待系数函数设置:基于式(28)及实地调查,简化起见,设定 $t_0=0 \text{ min}$, $\Delta t=5 \text{ min}$, $v_w=5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $d_w=200 \text{ m}$,此时

$$\lambda(n) = 0.5 + \frac{n+1}{n+2} + 0.24n \quad (41)$$

(5)顺路系数函数设置:采用第2.3.2节拟合的二次模型,基于实地调查及专家访谈取 $\sigma=0.2$ 。

(6)尺度参数设置:考虑到即时配送市场中决策者(平台和需求点)对配送效用具有较高敏感性,设置尺度参数 $\xi=2$,表明当2种模式效用差异超过临界值后,分担率将快速转移。效用权重设置:在基准场景中,设置 $\theta_c=\theta_T=0.5$,即考虑一般货物时间效用与成本效用相同,并在第3.4节多订单场景中进行不同特征货物对比分析。

3.2 单订单配送模式下临界运距分析

在单订单配送场景下,不存在顺路订单和同 (i,j) 对的订单,即 $m=n=0$ 。随着消费者对配送时效要求不断提升,这种单一订单的独立配送模式正成为即时配送的主要发展方向。

3.2.1 运输外部条件对分担率的影响

为探究不同城市环境特征对配送模式竞争力的影响,设计了3种典型场景:基准场景 $\alpha_r=1.5$, $\alpha_f=1.1$,代表一般城市环境;无人机友好场景 $\alpha_r=2$, $\alpha_f=1.05$,模拟道路拥堵严重、路况复杂但空域条件良好区域;骑手友好场景 $\alpha_r=1.2$, $\alpha_f=1.2$,反映道路通畅但低空障碍物较多的环境。其中路网综合系数的标定基于文献[54]、[55],首先取保守基准值1.2,再结合不同情景下的速度折减系数1.0, 0.8, 0.6,最终确定 $\alpha_r=\{1.2, 1.5, 2.0\}$ 。空域复杂系数取 $\alpha_f=1.1$,反映无人机飞行近似直线但需兼顾管制和障碍物规避的实际情况。3种场景下的分担率变化见图6,在基准场景下, α_r 、 α_f 参数敏感性分析见图7。

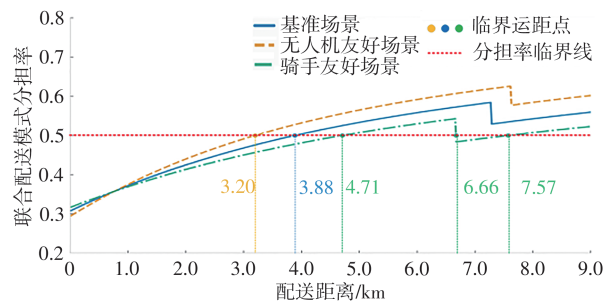


图 6 不同场景下分担率曲线

Fig. 6 Share rate curves under different scenarios

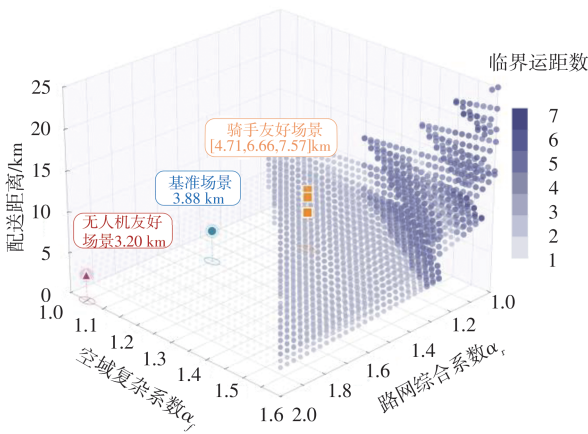


图7 不同参数组合下的临界点

Fig. 7 Critical points under different parameter combinations

由图6可知:基准场景下的临界运距(3.88 km)位于传统骑手配送的主要服务范围内,表明联合配送模式具备与现有模式直接竞争的潜力;在无人机友好场景中,临界运距缩短至3.20 km,较基准场景(3.88 km)降低17.7%;而在骑手友好场景中,临界运距延长至4.71 km,且在4.71~7.57 km两种模式处于激烈竞争状态。由图7可知,随着无人机运输条件的复杂化和骑手配送条件的友好性,加之换乘的影响,部分参数组合下出现多个临界运距,表明了两者间复杂的竞争态势。上述分析也表明了无人机枢纽设置需充分考虑所在区域条件,尽可能设置在

骑手直送模式不利的区域。

3.2.2 基准场景联合配送模式成本、时间分析

在基准场景内,随着配送距离的增加,不同成本间的占比也在变化。图8为联合配送模式运输成本分析,图中选取3.88 km和10 km两个典型配送距离,以截面形式标注了该距离处各成本分项的绝对金额及其占联合配送模式总成本的百分比。可以看出:①固定成本的规模效应,在3.88 km处,骑手端取送成本占总成本的30.0%,构成最大的成本项,而该比例随运距增加而下降;②中转成本的阶跃特征,以10 km距离为例,当配送直线超出无人机续航里程需要中转后,无人机及枢纽相关成本(运输成本+固定成本)占比突增至57%,这种阶跃式增长结合其他不利条件,可形成新的竞争劣势区间,由此凸显续航对于联合配送模式的重要性,此外,配送距离为10 km时骑手取送端运输成本仍占据22%,这也揭示出通过优化枢纽布局降低骑手端取送成本的必要性;③能耗成本占比的发现值得关注,分析显示,即使在10 km长距离运输中,无人机能耗仅占总成本的8%,这一结果提示,现有文献[9]、[14]中以能耗优化和载重分析作为核心研究目标的思路可能需要重新审视;相比之下,将研究重点转向固定成本和运维成本的管控优化,或更具实际意义;④关键参数阈值效应明显。

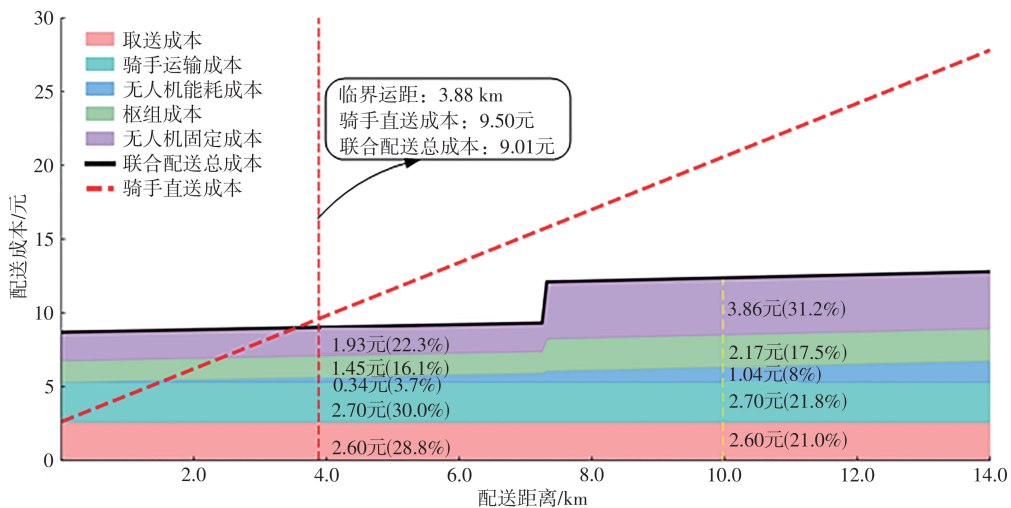


图8 联合配送模式运输成本分析

Fig. 8 Transportation cost analysis of DHRCDM

图9为无人机固定成本、骑手单位运输成本敏感性分析,可以看出:当无人机日均固定成本达到74.1~78.7元时,临界运距快速上升;骑手单位成本在0.84~0.96元·km⁻¹时也显著影响临界运距。这些阈值效应表明,技术进步带来的单位成本下降将

直接决定无人机枢纽模式的应用前景。

在时间方面,图10为联合配送模式运输时间分析,可以看出:在3.88 km处,骑手取送货操作时间占总时间的48.6%,是构成效率提升的主要制约,这一瓶颈在2种模式中同时存在,因此并不影响相

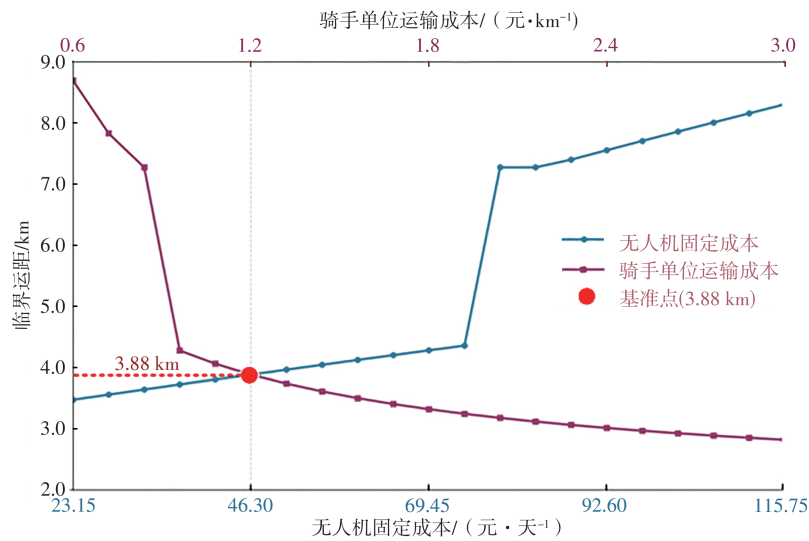


图 9 无人机固定成本、骑手单位运输成本敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of drone fixed cost and rider unit transportation cost

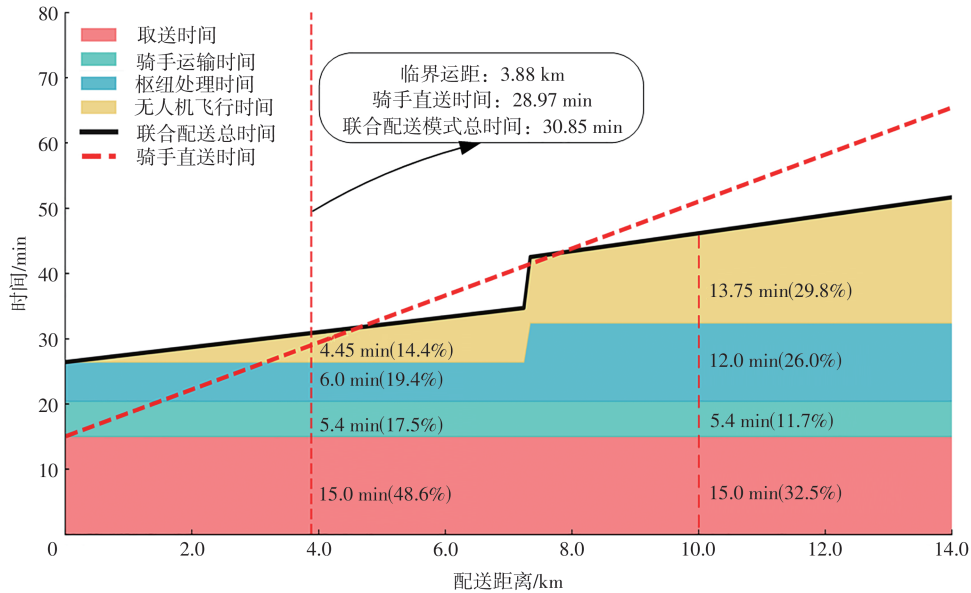


图 10 联合配送模式运输时间分析

Fig. 10 Transportation time analysis of DHRCDM

对竞争力,但指出了优化商家端操作流程的普遍性需求;超过临界运距后,无人机速度优势开始显现,总体时间优于骑手直送模式,然而当配送距离超出续航里程触发中转需求时,额外的中转时间会部分抵消速度优势,因此提升续航能力和优化枢纽中转效率成为增强竞争力的关键。图 11 为无人机速度敏感性分析,可以看出:提升飞行速度虽可降低临界运距,但当速度超过 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,继续提速对分担率的边际改善效果递减,而能耗的同步增长进一步压缩了优化空间,这一现象揭示了在现有电池技术约束下,单纯依靠速度提升难以实现竞争格局的实质性改善。

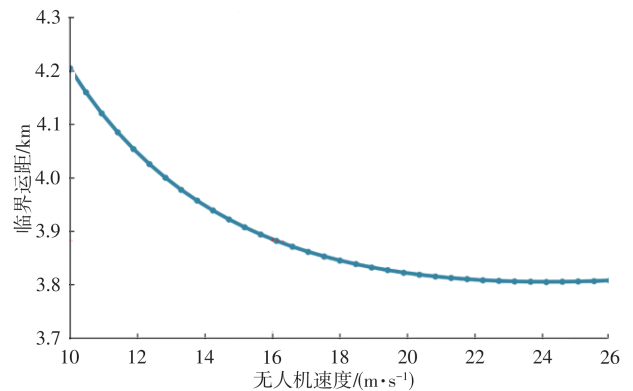


图 11 无人机速度敏感性分析

Fig. 11 Sensitivity analysis of drone speed

3.2.3 枢纽位置对分担率的影响

基于时间成本分析可知,即使是无人机枢纽模式,骑手运输的成本与时间仍需考虑,其主要来源于枢纽距离的影响。图12为枢纽距离-配送距离与联合配送模式分担率的关系,可以看出:枢纽距离对分担率具有显著影响,枢纽距离供需点越近,联合配送模式分担率越高;当枢纽与供需点距离处于2.57~4.32 km且配送距离在5.17~9.49 km时,由于超出续航里程触发中转需求,额外的中转成本和时间开销导致联合配送模式在部分距离段丧失竞争优势,使得整体优势区间呈现不连续分布特征;这一现象揭示了续航限制与枢纽布局的耦合作用,在特定距离组合下,中转需求的触发会显著削弱无人机枢纽模式的竞争力。

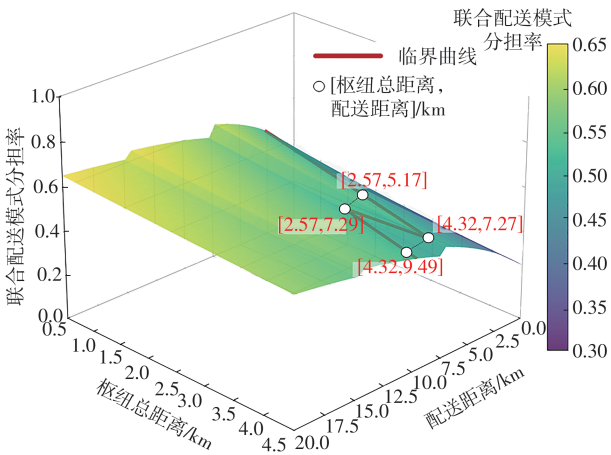


图12 枢纽距离-配送距离与联合配送模式分担率关系

Fig. 12 Relationship between hub distance-delivery distance and share rate of DHRCDM

3.2.4 无人机单量对分担率的影响

无人机配送的经济可行性在很大程度上取决于规模经济效益的实现。固定成本分摊作为联合配送模式成本结构中的关键组成部分,其单位成本随订单量的变化呈现显著的非线性特征。图13为无人机每天订单量对联合配送模式分担率的影响,可以看出:当无人机每天订单量小于15单时,每单分摊成本迅速推高配送距离;当无人机每天订单量大于15单时,临界运距下降趋于平缓,并于订单量达到40单时稳定在3.56 km;从运营管理视角,初期部署应优先确保核心枢纽达到每天15单的最低运营规模,成熟期可通过需求预测和动态调度将各枢纽的日处理量维持在20~40单的高效区间。

3.3 扩展配送模式分析

基于第1.3节提出的模式体系框架,本节对5种拓展模式进行系统的定量分析。通过临界运距计算

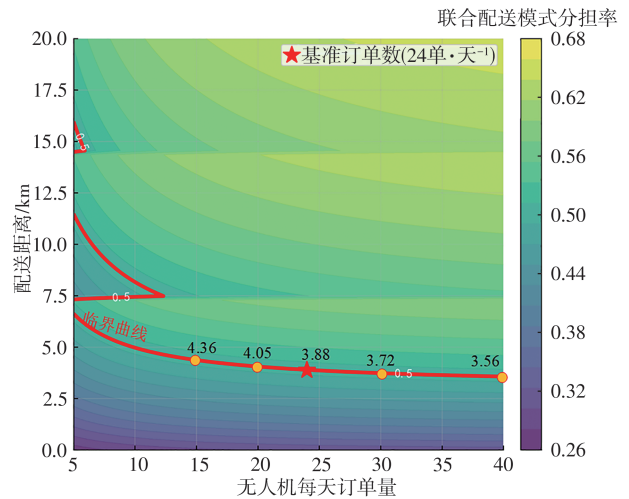


图13 无人机每天订单量对联合配送模式分担率的影响

Fig. 13 Impact of drone daily order volume on DHRCDM share rate and sensitivity analysis,明确各模式的适用场景和竞争力边界,为实际运营中的模式选择提供科学依据。

3.3.1 供给端直达模式

供给端直达模式通过商家自主配送至枢纽,有效缓解了高峰期骑手运力紧张的瓶颈。该模式的核心机制是将前端取货环节的执行主体从平台骑手转变为商家,实现运力资源的多元化配置。其运作机制为商家承担供给点至枢纽的运输任务,获得相应配送收益 $C_{pickup} + C_{ik,r\circ}$ 。这种收益分配机制不仅为商家提供了参与物流价值链的新路径,也为平台在运力高峰期提供了弹性补充方案。

在竞争力分析方面,由于成本结构与基准模式保持一致(仅改变了收益分配主体),供给端直达模式的临界运距仍为3.88 km。然而,该模式的实际推广面临2个关键挑战:①商家参与意愿的异质性,即不同规模和类型的商家对自主配送的接受度差异显著;②操作标准化难题,即需要建立统一的货物交接规范和质量控制体系。

3.3.2 需求端自提模式

此模式允许用户在货物运抵目标枢纽后自行取货,实现了末端配送的柔性化,是降低“最后一公里”末端配送成本的创新方案。

该模式相较于基准模式,节省末端配送成本 $C_{k',r} + C_{delivery}$ 和时间 $T_8 + T_{3\circ}$ 。图14为需求端自提模式分担率曲线,可以看出:在完全成本视角下,临界运距缩短至1.57 km,较基准场景降低60.0%,展现出显著的经济优势。

然而,该模式的实际应用受多维约束影响:①用户自提意愿,包括步行距离和交通便利度及时间机会成本(与用户类型和货物紧急程度相关);②枢纽

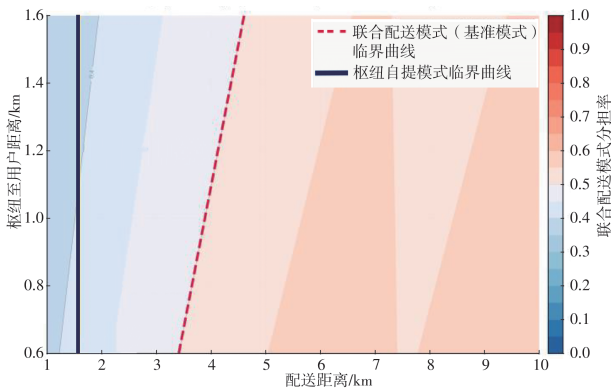


图 14 需求端自提模式分担率曲线

Fig. 14 Share rate curve of demand-side self-pickup model

存储能力和货物保管时限。

3.3.3 末端直飞模式

末端直飞模式假设需求点具备无人机临时泊位条件,实现从枢纽到需求点的直接飞行,显著提升末端配送效率。该模式相较基准模式,参数调整如下: $d_{k'j} = 0, T_3 = 0$,且由于需要考虑无人机往返飞行,有效续航里程约束调整为 $L'_d = \frac{L_d}{2}$ 。图 15 为末端直飞模式、端到端直配模式临界运距分析,可以看出:该模式将基准临界运距从 3.88 km 缩短至 2.73 km (降幅 29.6%),意味着联合配送模式在更短的配送距离上即可具备竞争优势;当配送距离处于 3.63~4.78 km 时,由于触发中转阈值,额外的中转成本和时间导致该模式失去竞争优势。

除续航约束外,末端直飞模式面临 3 个关键实施障碍:①临时泊位建设约束,需要在需求点建设标准化的临时起降点,涉及场地选择、安全评估、居民接受度等多重挑战;②货物交接标准化难题,临时停靠点缺乏专人值守,需建立自动化或半自动化的货物交接机制,包括身份验证、货物固定/释放装置、异常处理流程等,显著增加了系统复杂度;③动态航路规划复杂性,从固定的“枢纽-枢纽”结构演变为动态的“枢纽-任意点”结构,空域管理复杂度呈指数级增长,对空管系统提出更高要求。

3.3.4 端到端直配模式

作为末端直飞模式的延伸,端到端直配模式假设供给端(商家)自建无人机起降设施,需求端具备临时泊位条件,实现从供给点到需求点的直接飞行配送。该模式相较基准模式,参数调整如下: $d_{ik} = d_{k'j} = 0, T_3 = 0$,且由于需要考虑无人机往返飞行,有效续航里程约束调整为 $L'_d = \frac{L_d}{2}$ 。

图 15 为末端直飞模式、端到端直配模式临界运

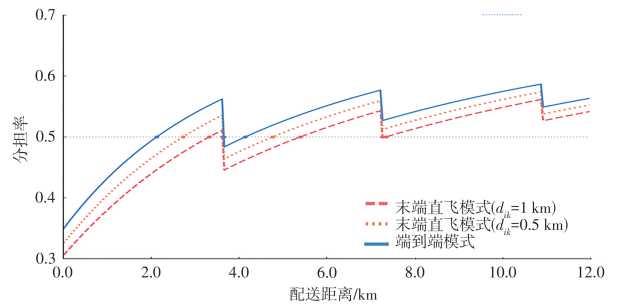


图 15 末端直飞模式、端到端直配模式临界运距

Fig. 15 Critical delivery distance of last-mile direct flight mode and end-to-end direct delivery mode

距,可以看出:端到端直配模式临界运距为 2.13 km,在短距离配送中展现出明显优势;续航限制导致的中转需求使得优势区间呈现断续分布特征,限制了该模式在中长距离配送中的应用。

端到端直配模式面临以下 3 个关键实施障碍:①供给端基础设施要求,商家需要自建符合标准的无人机起降平台,初期投资较大且只有日订单量充足的大型商家才能支撑独立的无人机运营成本;②与末端直飞模式相同,受续航影响,需要解决临时泊位的选址、建设和管理问题;③商家需要独立管理无人机调度、维护等专业事务,对其运营能力要求高。

3.3.5 全程自主配送模式

全程自主配送模式由无人机从枢纽出发完成取货和送货全流程,实现了配送链路的完全自动化。

在该模式下,无人机前往供给点与商家备餐时间可并行处理,且配送完成后返回就近枢纽的时间不计入竞争时间,其时间与成本分别调整为

$$T_{af} = \max \left\{ T_1, T_5 + \frac{60 d_{ik} \alpha_f}{v_f} + T_7' \right\} + T_5 + T_6 + T_7 \quad (42)$$

$$C_{af} = C_{pickup} + C_{delivery} + C_{ik,f} + C_{kk',f} + C_{k',f} + C_{per-drone} + C_{ho} \quad (43)$$

式中: T_{af} 为全程自主配送模式时间; T_5, T_6, T_7 与基准模型一致; C_{af} 为全程自主配送模式成本,各参数计算与基准模型一致。

图 16 为全程自主配送模式临界运距分析,可以看出:基准场景下该模式临界运距降至 2.14 km,相比基准模式下降 45%,展现出显著优势;该模式几乎不受枢纽位置参数影响,呈现参数钝化特征,其原因在于订单准备与无人机飞向供给点作业的并行处理突破了串行作业的时间约束,同时无人机速度优势对接驳距离的有效补偿削弱了枢纽位置偏离对总体效率的影响。这一发现具有重要的网络规划含义,在全程

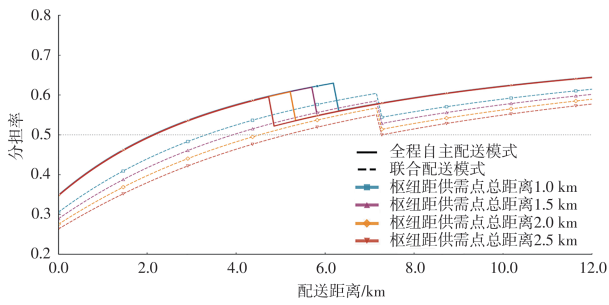


图 16 全程自主配送模式临界运距分析

Fig. 16 Critical delivery distance analysis of fully autonomous delivery mode

自主配送模式下,枢纽选址可从“最小化接驳距离”的效率导向转变为“最大化服务覆盖”的规模导向,为构建广域覆盖的枢纽网络提供了理论依据。

该模式理论优势明显,但短期内规模化应用仍面临多重约束:①更高的自动化水平要求,至少

3次精准自主起降(供给端、枢纽间、需求端)、2次标准化货物自动装卸;②更精确的动态航路规划要求,需复杂环境下的自主导航与避障;③更严格的监管框架要求,完全自主飞行突破了现有“人在回路”的监管模式,涉及更复杂的安全责任认定、事故归责机制和空域管理规则;④更规范的供需两端临时泊位选址建设要求,以适应无人机自动化操作要求。

表 5 为联合配送模式体系对比分析,可以看出:需求端自提模式临界运距最低(1.57 km),适合用户密集且愿意自提的场景;全程自主配送和端到端直配模式技术要求最高,但效率优势明显;供给端直达和末端直飞模式在特定条件下提供了灵活的过渡方案;这种差异化的模式体系为不同发展阶段和应用场景提供了丰富的选择空间。

表 5 联合配送模式体系对比分析

Table 5 Comparative analysis of DHRCDM and its extensions

模式类型	对比基准模型成本/距离参数变化	对比基准模型时间参数变化	续航约束	最小临界运距/km	模型特点	新增实施难度
无人机枢纽模式(基准)			L_d	3.88	基于枢纽建设完成协同配送	
供给端直达模式			L_d	3.88	供给点至枢纽点收益由商家获取	商家的参与意愿和操作能力
需求端自提模式	$-C_{k',r} - C_{delivery}$	$-T_8 - T_3$	L_d	1.57	允许用户在货物运抵目标枢纽后自行取货	用户自提意愿;枢纽存储能力
末端直飞模式	$d_{k'} = 0$	$T_3 = 0$	$\frac{L_d}{2}$	2.73	骑手将货物送至枢纽后,无人机可从枢纽直飞需求点完成末端配送	临时泊位选址建设;货物交接标准化;动态航路规划
端到端直配	$d_{ik} = d_{kj} = 0$	$T_3 = 0$	$\frac{L_d}{2}$	2.13	供需两端具备无人机起降设施,且起飞点为无人机枢纽	临时泊位选址建设;货物交接标准化;动态航路规划;供给端基础设施及订单规模要求;供给端管理要求
全程自主配送模式	$-C_{ik,r} - C_{k',r} + C_{ik,t} + C_{k',t}$	$\max\{T_1', T_5' + \frac{d_{ik} \alpha_t}{v_t} + T_7'\} - T_1' - T_4 - T_8$	L_d	2.14	无人机从枢纽出发完成取货和送货全流程,实现配送链路的完全自动化	高自动化水平要求;监管框架要求动态航路规划;取送端临时泊位选址建设

3.4 多订单场景下临界运距分析

考虑骑手可同时配送多个顺路订单 n 以及无人机与骑手均可批量配送同 (i, j) 对的订单 m , 基于无人机载重约束与骑手配送能力限制, 设定 $n \leq 3, m \leq 3$ 。

图 17 为多订单场景下的多模式优势配送区间, 展示了不同订单组合情形下的模式竞争格局变化。可以得到以下结论。

(1) 多订单的显著影响。以基准模型为例, 在一定范围内, 顺路订单和同 (i, j) 对的订单均通过成本

分摊机制显著增强了骑手直送模式的竞争力。以 $m=3, n=0$ 为例, 联合配送模式的首次优势区间从基准场景的 3.88 km 大幅推后至 6.54 km, 临界运距增加 68.6%。这揭示了顺路订单聚合效应对传统配送模式竞争力的显著提升作用。然而, 随着订单数量的进一步增加, 成本压缩效应呈现边际递减特征, 而时间效用的重要性逐渐凸显, 无人机配送分担率随之回升。以 $m=3, n=3$ 为例, 首次优势区间达到 3.54 km 附近。这表明当订单聚合达到一定规模后, 时间效率优势将重新主导配送模式的选择决策。关

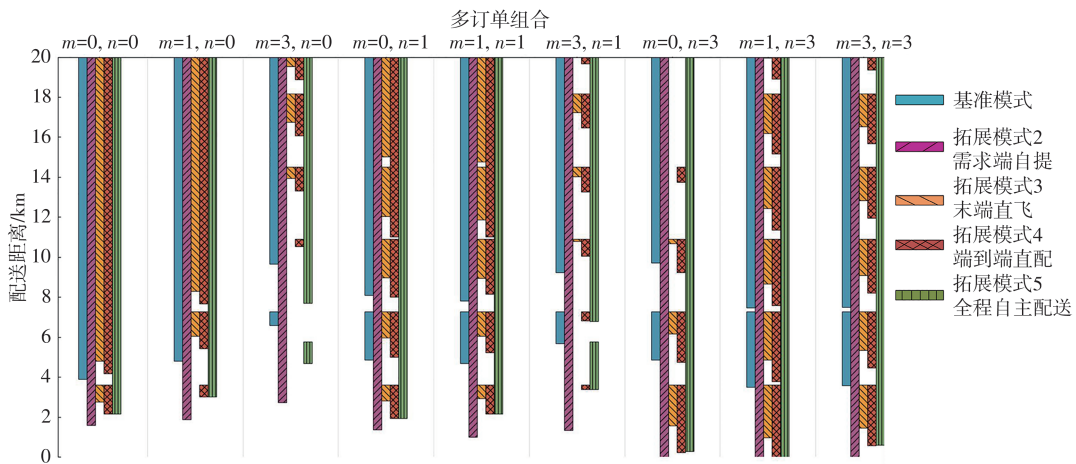


图 17 多订单场景下的多模式优势配送区间

Fig. 17 Advantageous delivery distance intervals of multiple modes in multi-order scenarios

注扩展模型可知,枢纽自提模型无论在何种多订单模式下,均具有较大的竞争优势,这也表明由枢纽提供自提服务有较大可能吸引更多订单。

(2)续航限制下的复合效应。多订单效应与无人机中转成本的叠加值得重点关注。分析表明,在多订单场景下,需考虑往返成本的枢纽直送和点对点运输模式均表现不佳,这直接反映了续航限制对运营效率的制约作用:当配送距离超过续航里程而触发中转需求时,额外产生的中转成本和时间损耗导致了不连续的竞争格局。值得注

意的是,无人机全过程配送模式虽然面临相同的续航约束,但其优势区间表现出更强的连续性特征。这一对比结果凸显了枢纽网络协同配送的潜在价值:相比点对点配送,基于枢纽的协同模式能更好地统筹无人机调度和充电服务,为实际运营提供更优解决方案。

(3)时间-成本的权衡关系。以配送订单 $m=2$ 、 $n=2$ 的基准模型为例,具体见图 18。该参数组合下形成了 3 个临界运距点(4.24、7.28、7.87 km),构成了交替变化的优势区间。

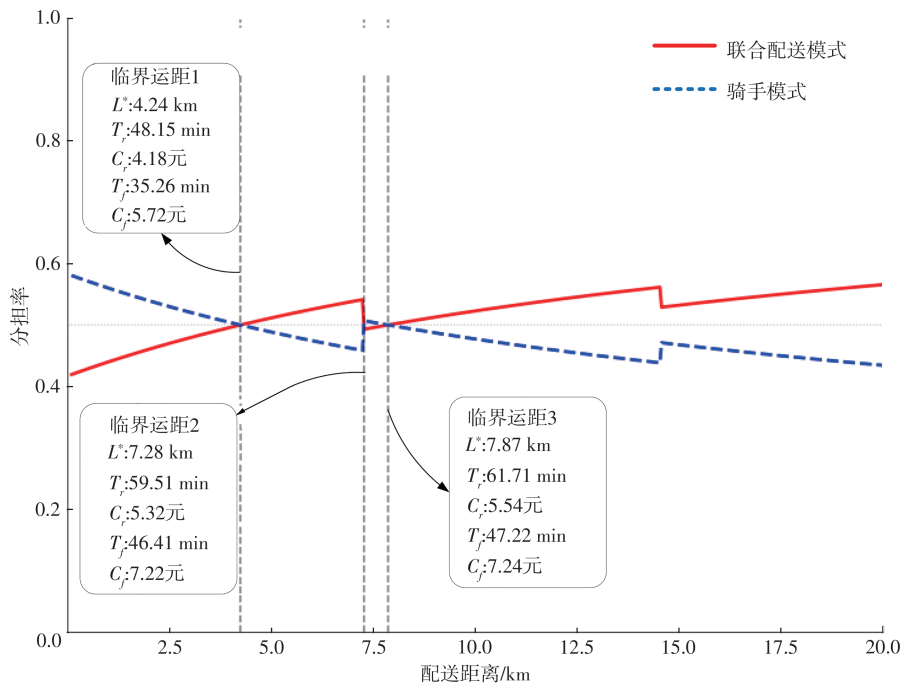


图 18 $m=2, n=2$ 时分担率曲线

Fig. 18 Share rate curves when $m=2$ and $n=2$

这种复杂的竞争格局反映了时间效用与成本效用之间的动态权衡:随着配送距离的增加,2种模式在

时间和成本维度上的差异呈现非线性扩大趋势。特别是当考虑无人机中转成本的阶跃效应时,时间-成

本的权衡关系成为决定临界运距分布和竞争区间演化的关键机制。为进一步考察不同类型货物对时间和成本的敏感度差异,设置了2种典型货物运输场景:时间敏感型货物(如生鲜、医药、热食, $\theta_T = 0.3, \theta_C = 0.7$);成本敏感型货物(如日用品、文件, $\theta_T = 0.7, \theta_C = 0.3$)。图19为多订单场景下时间敏感型货物的多模式优势区间,图20为多订单场景下

成本敏感型货物的多模式优势区间。可以看出:对于时间敏感型货物,联合配送模式及其拓展模式在更广泛的距离区间内保持竞争优势;对于成本敏感型货物,骑手通过顺路配送可在10 km以上的距离保持成本优势,无人机枢纽及其拓展模式的应用空间受到严重压缩。上述结果表明在枢纽布置时需关注市场细分,联合配送模式应优先聚焦时间敏感型配送需求。

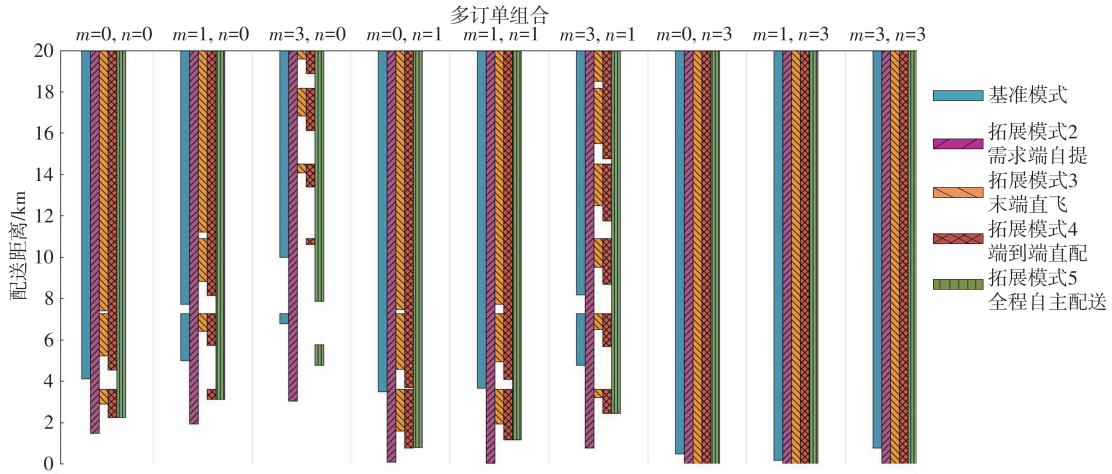


图19 多订单场景下时间敏感型货物的多模式优势区间

Fig. 19 Advantaged delivery intervals of multiple modes for time-sensitive goods in multi-order scenarios

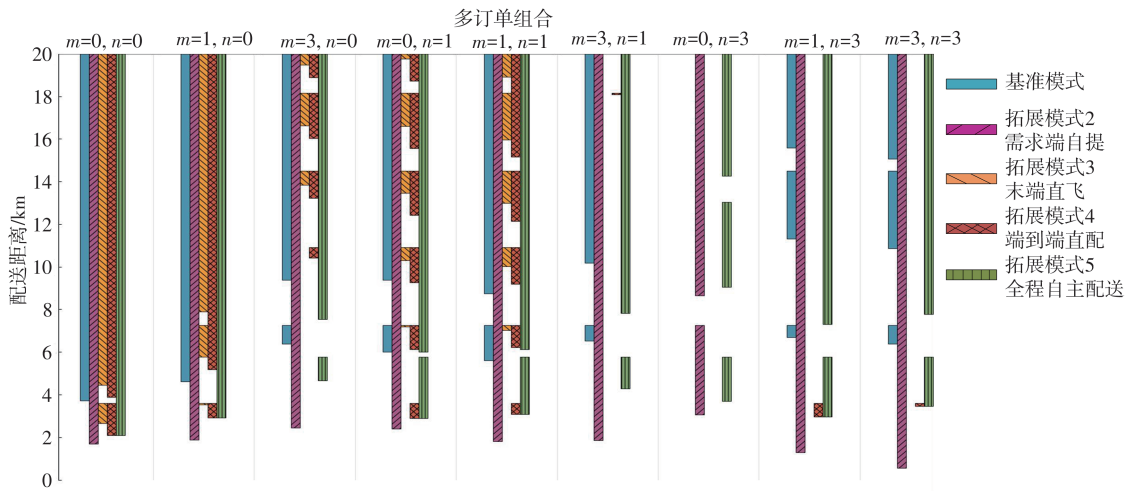


图20 多订单场景下成本敏感型货物的多模式优势区间

Fig. 20 Advantaged delivery intervals of multiple modes for cost-sensitive goods in multi-order scenarios

4 结语

(1)提出的联合配送模式及其“1+5”拓展体系,为无人机在高密度城市即时配送场景中的适应性问题提供了系统性解决方案;所构建的Logit分担率模型与参数估算框架为模式竞争力的定量评估奠定了方法基础。主要发现有:①在基准场景下,联合配送模式在3.88 km以上运距具有竞争优势,与传统骑手配送范围产生直接竞争。②无人机续航能力是关

键制约因素,超出续航里程后的中转成本呈阶跃式增长,形成新的竞争劣势区间。③枢纽位置、路网条件和空域复杂度是决定模式竞争力的关键参数。④5种拓展模式展现出1.57~3.88 km的差异化临界运距分布,需求端自提模式以最低的临界运距适用于用户密集区域;全程自主配送和端到端直配模式虽技术要求较高,但在短距离配送中优势明显。⑤在多订单场景下,顺路效应增强了骑手直送模式的成本优势,但对时间敏感型货物,联合配送模式仍

保持竞争力。

(2)基于上述发现,提出5个方面管理建议:

①市场定位上,联合配送模式应聚焦3~10 km距离、时效要求高的细分市场,优先服务时间敏感型品类。②市场进入策略建议采用“试点先行、逐步扩展”路径,在订单密度高、道路拥堵但空域条件良好的区域先行试点。③网络布局方面,枢纽应优先在核心商圈内/周边布设,枢纽间距应考虑续航里程约束。④运力配置需建立动态人机协同机制,高峰期发挥无人机运力补充作用,平峰期通过跨区域调配确保设备利用率,并根据不同场景灵活运用5种拓展模式——高峰期可激励供给端直达模式缓解骑手压力,用户密集区推广需求端自提模式来降低末端成本,技术成熟区域试点末端直飞或全程自主配送模式探索未来路径。⑤政策层面,枢纽网络的基础设施属性为低空经济长期发展提供了战略缓冲。区别于点对点配送模式对技术突破的高度依赖,枢纽网络架构在降低监管复杂度、提升社会接受度的同时,为未来技术升级预留了充分空间。即使在全自动化配送技术成熟后,现有枢纽仍可转型为综合性物流节点,避免了基础设施投资的沉没成本风险。这一发现对政策制定者同样具有重要价值:支持枢纽化发展不仅能促进当前低空物流试点应用,更能为构建长期可持续的城市空中交通体系奠定基础。

(3)研究存在以下局限:①部分参数因缺乏规模化运营数据支撑,与实际运营情况可能存在偏差,有待运营数据积累后持续校准。②模型假设了完全竞争市场和固定效用权重,未充分考虑动态定价和用户异质性。③顺路系数函数基于理论推导,其在复杂配送环境中的适用性有待实证验证。④分段式配送涉及的责任追溯、质量监控等运营管理问题有待深入研究。

(4)未来研究可重点关注:①结合不同城市形态特征的枢纽网络优化;②基准模式与拓展模式的混合运用机制;③高峰时段的协同调度算法;④包含地面自动配送车辆等多种方式的协同体系。

参考文献:

Reference:

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进即时配送行业高质量发展的指导意见:国办发[2024]3号[EB/OL]. (2024-01-27). https://www.gov.cn/zhengce/content/202409/content_6974606.htm.
General Office of the State Council. Guiding opinions on promoting the high-quality development of the instant delivery

industry: Guo Ban Fa [2024] No. 3 [EB/OL]. (2024-01-27). https://www.gov.cn/zhengce/content/202409/content_6974606.htm.

- [2] Frost & Sullivan. 2024 China instant delivery industry trends white paper[R]. Shanghai: Frost & Sullivan, 2024.
- [3] XUE G Q, WANG Z, WANG G. Optimization of rider scheduling for a food delivery service in O2O business [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 5515909.
- [4] CHIANG W C, LI Y Y, SHANG J, et al. Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization [J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1164-1175.
- [5] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone [J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4): 965-981.
- [6] DUKKANCI O, KARA B Y, BEKTAŞ T. Minimizing energy and cost in range-limited drone deliveries with speed optimization [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 125: 102985.
- [7] JAZAIRY A, PERSSON E, BRHO M, et al. Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective [J]. *The International Journal of Logistics Management*, 2025, 36(7): 1-62.
- [8] 周明阳. 无人机送货前景可期[N/OL]. 新华网, (2024-06-05). <https://www.news.cn/tech/20240605/1fb877357a0d49d19094f5432b986697/c.html>.
ZHOU Ming-yang. Prospects for drone delivery [N/OL]. *Xinhuanet*, (2024-06-05). <https://www.news.cn/tech/20240605/1fb877357a0d49d19094f5432b986697/c.html>.
- [9] ZHANG J, CAMPBELL J F, SWEENEY D C, et al. Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 90: 102668.
- [10] CHUNG S H, SAH B, LEE J. Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions [J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 123: 105004.
- [11] PINTO R, LAGORIO A. Point-to-point drone-based delivery network design with intermediate charging stations [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 135: 103506.
- [12] ZHU T K, BOYLES S D, UNNIKISHNAN A. Two-stage robust facility location problem with drones [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 137: 103563.
- [13] PARK Y, LEE S, SUNG I, et al. Facility location-allocation problem for emergency medical service with unmanned aerial vehicle [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(2): 1465-1479.
- [14] 任新惠,王 柳,王佳雪. 基于分区优化的无人机全自动机场选址研究 [J]. *运筹与管理*, 2023, 32(6): 20-26.
REN Xin-hui, WANG Liu, WANG Jia-xue. Automatic

- vertiport location of unmanned aerial vehicle based on partition optimization[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(6): 20-26.
- [15] BRUNI M E, KHODAPARASTI S, BRUNI M E, et al. A variable neighborhood descent matheuristic for the drone routing problem with beehives sharing [J]. *Sustainability*, 2022, 14(16): 9978.
- [16] 张春晓,郭 通,李宇萌. 城市低空立体物流网络双种群协同优化方法[J]. *航空学报*, 2025, 46(11): 287-306.
ZHANG Chun-xiao, GUO Tong, LI Yu-meng. Dual-population coevolutionary optimization for multi-layer urban air logistics network [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(11): 287-306.
- [17] MURRAY C C, CHU A G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 54: 86-109.
- [18] ZANG X N, JIANG L, LIANG C Y, et al. Optimization approaches for the urban delivery problem with trucks and drones [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 75: 101147.
- [19] LI Y S, ZHANG G Z, PANG Z B, et al. Continuum approximation models for joint delivery systems using trucks and drones [J]. *Enterprise Information Systems*, 2020, 14(4): 406-435.
- [20] 马 飞, 张 洁, 孙少龙, 等. 基于TBL视角的“卡车+无人机”协同配送多目标路径优化[J/OL]. *系统工程理论与实践*, 2025, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20250313.1919.024.html>.
MA Fei, ZHANG Jie, SUN Shao-long, et al. Multi-objective Path Optimization for "Truck + Drone" Collaborative Delivery Based on TBL Perspective [J/OL]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2025, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20250313.1919.024.html>.
- [21] JEONG H Y, SONG B D, LEE S. Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and No-Fly zones [J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 214: 220-233.
- [22] MENG S S, GUO X P, LI D, et al. The multi-visit drone routing problem for pickup and delivery services [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 169: 102990
- [23] LIU M Q, LI Y L, WANG X W. Joint optimization of truck-drone routing for last-mile deliveries in urban areas [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2024, 22: 1-27.
- [24] LUO Q Z, WU G H, JI B, et al. Hybrid multi-objective optimization approach with Pareto local search for collaborative truck-drone routing problems considering flexible time windows [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 13011-13025.
- [25] CHEN X W, ULMER M W, THOMAS B W. Deep Q-learning for same-day delivery with vehicles and drones [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 298(3): 939-952.
- [26] 赵强柱,卢福强,王雷震,等. 无人机骑手联合外卖配送路径优化问题研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(11): 269-278.
ZHAO Qiang-zhu, LU Fu-qiang, WANG Lei-zhen, et al. Research on drones and riders joint take-out delivery routing problem [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(11): 269-278.
- [27] 卢福强,蒋润雪,毕华玲,等. 动态订单下无人机辅助骑手外卖配送路径优化研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 34(2): 79-88.
LU Fu-qiang, JIANG Run-xue, BI Hua-ling, et al. Research on route optimization of drone-assisted rider food delivery under dynamic orders [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 34(2): 79-88.
- [28] ZHOU M, ZHAO L D, KONG N, et al. Understanding consumers' behavior to adopt self-service parcel services for last-mile delivery [J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2020, 52: 101911.
- [29] BOYSEN N, FEDTKE S, SCHWERDFEGER S. Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective [J]. *OR Spectrum*, 2021, 43(1): 1-58.
- [30] 国务院,中央军委. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例: 国务院令 第761号[R]. 北京: 中国法制出版社, 2023.
State Council, Central Military Commission. Interim regulations on the management of unmanned aerial vehicle flights: Order No. 761 [R]. Beijing: China Legal Publishing House, 2023.
- [31] 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.
LIAO Xiao-han, XU Chen-chen, YE Hu-ping, et al. Critical infrastructures for developing UAVs' applications and low-altitude public air-route network planning [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 977-988.
- [32] 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-qi, 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.
- [33] 张洪海,夷 珈,李 姗,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 of low-altitude airspace capacity assessment research [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 78-93.
- [34] SCHMIDT S, SARACENI A. Consumer acceptance of drone-based technology for last mile delivery [J]. *Research in Transportation Economics*, 2024, 103: 101404.
- [35] 孙宗胜,帅 斌,许旻昊. 低碳背景下快捷货物各运输方式间临界运距研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(6): 11-21.
SUN Zong-sheng, SHUAI Bin, XU Min-hao. Critical

- transportation distance analysis for express goods transportation modes considering low carbon emissions[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(6): 11-21.
- [36] XU X D, YANG H C, JEONG K, et al. Teaching freight mode choice models new tricks using interpretable machine learning methods[J]. *Frontiers in Future Transportation*, 2024, 5: 1339273.
- [37] MASOUMI H, MEHRIAR M, NOSAL-HOY K, et al. Logit and probit models explaining mode choice and frequency of public transit ridership among university students in Krakow, Poland [J]. *Urban Science*, 2024, 8(3): 113.
- [38] JANSSON J O. *Transport System Optimization and Pricing* [M]. Chichester: Wiley, 1984.
- [39] MINKEN H, JOHANSEN B G. A logistics cost function with explicit transport costs [J]. *Economics of Transportation*, 2019, 19: 100116.
- [40] PENG Y, MO Z Y, LIU S. Passenger's routes planning in stochastic common-lines' multi-modal transportation network through integrating genetic algorithm and Monte Carlo simulation [J]. *Archives of Transport*, 2021, 59(3): 73-92.
- [41] BEARDWOOD J, HALTON J H, HAMMERSLEY J M. The shortest path through many points[J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1959, 55(4): 299-327.
- [42] DAGANZO C F. The distance traveled to visit N points with a maximum of C stops per vehicle: An analytic model and an application [J]. *Transportation Science*, 1984, 18(4): 331-350.
- [43] CHIEN T W. Operational estimators for the length of a traveling salesman tour[J]. *Computers & Operations Research*, 1992, 19(6): 469-478.
- [44] KWON O, GOLDEN B, WASIL E. Estimating the length of the optimal TSP tour: An empirical study using regression and neural networks [J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(10): 1039-1046.
- [45] CHICCO D, WARRENS M J, JURMAN G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation [J]. *PeerJ Computer Science*, 2021, 7: e623.
- [46] CZACHÓRSKI T, NYCZ T, NYCZ M, et al. *Traffic engineering: Erlang and engset models revisited with diffusion approximation* [C]// *Information Sciences and Systems 2014*. Cham: Springer, 2014: 249-256.
- [47] COSMETATOS G P. Some approximate equilibrium results for the multi-server queue (M/G/r) [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1976, 27(3): 615-620.
- [48] 杭州迅蚁网络科技有限公司. TR9S智能物流无人机[EB/OL]. (2025-04-13) [2025-09-22]. <https://www.antwork.link/> Hangzhou Antwork Network Technology Co., Ltd. TR9S intelligent logistics UAV [EB/OL]. (2025-04-13) [2025-09-22]. <https://www.antwork.link/>
- [49] STOLAROFF J K, SAMARAS C, O'NEILL E R, et al. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 409.
- [50] KONG R, YANG Y C. Meituan AI and robotics layout overview: Unmanned delivery, has the singularity arrived? [R]. Shanghai: TF Securities, 2025.
- [51] 艾瑞咨询. 中国即时配送行业研究报告[R]. 上海: 艾瑞咨询, 2024. InciResearch. China Instant Delivery Industry Research Report [R]. Shanghai: iResearch, 2024.
- [52] MOSHREF-JAVADI M, VAN C K P, MCCUNNEY B A, et al. Enabling same-day delivery using a drone resupply model with transshipment points[J]. *Computational Management Science*, 2023, 20(1): 22.
- [53] 魏子秋, 李孟晓. 考虑双重满意度的外卖配送路径优化 [J]. *物流工程与管理*, 2024, 46(1): 54-57. WEI Zi-qi, LI Meng-xiao. Takeaway delivery route optimization considering double satisfaction[J]. *Logistics Engineering and Management*, 2024, 46(1): 54-57.
- [54] GIACOMIN D J, LEVINSON D M. Road network circuitry in metropolitan areas [J]. *Environment and Planning B*, 2015, 42(6): 1040-1053.
- [55] KIM S, KIM T, JEON J. Implementing dynamic distance-time conversion factors through real-time traffic data for enhancing urban mobility and service accessibility in South Korea [J]. *PLoS One*, 2025, 20(9): e0330266.