

文章编号:1005-0523(2025)03-0001-11



无人机物流配送问题与优化调度方法研究综述

洪芳宇¹, 伍国华²

(1. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:随着低空经济有关政策的出台,无人机配送作为提升物流行业新质生产力的重要推力,已经得到了广泛关注。由于单架无人机在续航能力和载重能力上的限制,学者们在无人机配送模式和系统上进行了大量的研究和探索。文章旨在总结无人机配送现有研究进展并探索未来可能的研究方向,从无人机物流配送问题类型、模式与优化调度方法3个角度进行文献回顾。根据提供的服务将无人机物流配送问题分为只取货或只送货、同时取送货、点到点取送货3种类型;根据无人机是不是唯一的取送货工具,将无人机交付模式分为无人机配送、无人机与其他车辆协同配送两类;介绍无人机物流配送常见的优化目标,并梳理求解无人机物流配送问题的单目标优化方法与多目标优化方法。

关键词:无人机配送;协同配送;只取货或只送货;同时取送货;点到点取送货;无人机调度方法

中图分类号:U116.2

文献标志码:A

本文引用格式:洪芳宇,伍国华. 无人机物流配送问题与优化调度方法研究综述[J]. 华东交通大学学报,2025,42(3):1-11.

A Literature Review on Drone Delivery Problems and Optimization Scheduling Methods for Drones

Hong Fangyu¹, Wu Guohua²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410073, China;

2. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the introduction of policies related to low-altitude economy, drone delivery, as an important driving force for enhancing new types of productivity, has gained widespread attention. Due to the limitations of drones in terms of batteries capacity and payload constraints, scholars have conducted extensive research on drone delivery models and systems. This paper aims to review the current literature in drone delivery and explore possible future research directions. This paper is conducted from three perspectives: the types of drone delivery problems, the modes of drone delivery systems, and the optimization scheduling methods for drone delivery systems. First, drone delivery problems are categorized into three types based on the services provided: pick-up only, delivery only, pick-up and delivery simultaneous, and point-to-point delivery. Second, drone delivery modes are divided into two categories based on whether drones are the sole tools for pick-up and delivery: drone delivery systems and vehicle-drone collaborative delivery systems. Third, the paper introduces common optimization objectives in drone delivery problems, and reviews both single-objective and multi-objective optimization methods for solving drone delivery problems.

Key words: drone delivery; vehicle-drone collaborative delivery; delivery only or pickup only; pickup and deliv-

收稿日期:2024-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(62373380)

ery; point-to point delivery

Citation format: HONG F Y, WU G H. A literature review on drone delivery problems and optimization scheduling methods for drones[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(3): 1–11.

随着物流行业的发展和无人机相关技术的成熟,无人机已广泛应用于各种交通领域,如包裹配送、交通数据采集和交通监控^[1-4]。其中,无人机物流配送是近年来一个热点研究课题。无人机作为新的物流配送载体,具有灵活性高、成本低廉和可靠性高等优势,被越来越多地用于“最后一公里”交付^[5]。

与车辆等传统配送载体相比,无人机机动灵活且易于操作。将无人机用于物流配送几乎不受道路交通状况的限制并缓解快递员配送压力,可有效提高物流配送效率并降低配送成本,具有较高的经济优势。许多国家和地区正在规范空域管理,发展低空经济。例如,中国已批准运营20个民用无人机物流系统测试基地(第1批13个,第2批7个,其中河南、浙江和深圳的目标定位是针对城市场景的无人驾驶试验),包括2个无人机物流测试区和3个无人机交付城市测试区^[6]。经济和政策的双重刺激极大地促进了无人机物流配送系统的研究与发展。与传统配送方式相比,无人机配送可以有效缓解人工配送的压力。

无人机灵活且易于操作,将无人机用于物流配送几乎不受交通状况的限制。无人机可以为客户提供取件和配送服务,并有可能为“最后一公里”的配送带来更好的服务质量,尤其是在拥挤的城市环境。然而,由于无人机的电池容量有限,目前单无人机在物流配送时受到一定的约束,如飞行距离约束和载重能力约束^[7]。因此,使用无人机完成大范围包裹的运输仍然充满挑战,需要对无人机物流配送问题展开研究。

无人机配送问题是在旅行商问题(travelling salesman problem, TSP)的基础上,考虑各种无人机物流模式带来的复杂约束,同时针对用户或运营商需求设计多种优化目标,使得无人机物流配送问题和数学模型更加复杂化和现实化。Garg等^[8]重点关注了无人机物流配送有关工作中的3个关键概念:通过无人机应用提高消费者可及性、无人机提供的

成本节约和减少排放的潜力以及无人机超越卡车和电动汽车等传统配送方式的条件。Dukkanci等^[9]回顾了2016—2023年有关无人机配送的研究,主要关注无人机物流配送系统中包括无人机基站(固定或临时),其他车辆基站,无人机充电站,仓库点和临时停靠点等设备的功能定位并讨论了经典问题中无人机相对于车辆的独特特征。

鉴于无人机物流配送具有较好的应用前景,本文将通过研究国内外相关文献,从问题类型、模式设计、求解方法等方面入手,回顾其研究发展历程,从而厘清无人机物流配送问题的研究现状,把握未来可能的发展趋势。

1 问题类型

无人机物流配送可根据提供服务类型的不同分为3种主要类型^[10]:第1种类型是只取货或只送货问题,其中每个客户点都涉及单一类型取货或送货服务;第2种类型是同时取送货问题,其中每个节点都可以作为取货和送货的节点,无人机可以同时完成取货和送货服务;第3种类型是点到点取送货问题,其中每个节点对应一个唯一的取货和送货节点,需要从一个节点取货然后送到另一个节点。

1.1 只取货或只送货问题

在只取货或只送货问题中研究最多的是只送货问题。2013年,亚马逊提出无人机配送的概念,并发布Prime Air无人机快递配送计划,旨在在仓库周边的客户提供服务^[11]。DHL快递公司进行了实验用无人机为一个车辆难以抵达的小岛配送药品^[12]。Murray等^[13]提出了卡车和无人机协同的配送问题。其中,无人机和卡车均从仓库出发,携带包裹为多个客户提供配送服务;并在之后的工作中进一步拓展了这个问题,研究了一辆卡车携带多架无人机为客户提供包裹配送服务的调度问题^[14]。Dorling等^[15]提出一种多行程TSP用于解决无人机配送问题,证明了无人机在单次飞行中可访问多个

客户的可能性。Song等^[16]提出了一种并行无人机包裹配送问题,其中多架无人机可同时为不同客户提供配送服务。Wen等^[17]研究了异构无人机包裹配送模式,由大小无人机协同完成包裹配送。Luo等^[18]研究了带灵活时间窗卡车与无人机包裹配送模式。伍国华等^[19]提出了一种多车辆与多无人机协同配送模式,考虑了无人机有效载荷对无人机电量损耗的动态影响。

1.2 同时取送货问题

近两年关于无人机同时完成取货和送货的研究较多。Ham^[20]研究了无人机并行取货和送货的物流模式,无人机在完成一个配送任务后可以选择返回仓库继续完成下一个配送任务,或者直接飞往另一个客户点完成取货任务再返回仓库。Luo等^[21]提出了一个具有送货和取货服务的卡车与无人机协同路由问题,他们的研究允许无人机在完成送货服务后为客户提供取货服务。Hong等^[22]提出了一种多无人机取送货调度问题,由多架无人机和自动设备协同完成包裹取货和送货。以上研究都是建立在假设无人机一次只能携带一个包裹这一前提下。最近,有些研究放开了这一限制,探索了无人机一次携带多个包裹完成取送货任务的调度问题。Meng等^[23]研究了卡车与无人机协同的取送货路径规划问题,他们假设无人机可以在一次飞行中携带多个包裹,为客户提供取货和送货服务。

1.3 点到点取送货问题

点到点取送货问题主要存在于即时送餐或同城物流场景,这类问题的特征是需要从一个节点处取货将其送到另一个节点。Ulmer等^[24]研究了即时送餐问题,一组配送员在客户最晚送达时间之前将食物从一组餐厅送到客户手中,考虑了客户下单时间与餐馆备餐时间两项不确定因素对决策的影响。Chen等^[25]针对美团外卖即时送餐场景,构造订单后悔值矩阵匹配候选骑手,以整体效益最大化为原则完成订单和候选骑手的匹配。Wang等^[26]提出了一种基于众包配送的即时送餐订单分配方法完成骑手与订单的匹配,根据众包骑手的偏好向适合的众包骑手推荐订单来分配订单。以上研究都是基于传统的人力配送模式,无人机完成点到点取送货任务的研究相对较少。Huang等^[27]提出了一种无人机送餐问题,建立了一个以最小延误时间为优化目标的混合整数规划模型并设计了一种提出了一

种迭代启发式框架(随机事件调度)来周期性地调度任务,该框架由任务集和动态任务调度阶段组成。Liu等^[28]研究了一种无人机动态送餐问题,其中送餐请求包含取件地点、送达地点、发货物品的估计重量和客户将为送餐服务支付的金额等信息。在设定的时间内,每个送餐请求将得到接受或拒绝的响应。如果请求被接受,一架无人机将在接下来的一个小时内被派遣完成送餐任务。Meng等^[29]研究了包含取货、送货和同时取送货(取货后送货)3种任务类型的卡车与无人机协同取送货问题,其中同时取送货任务需要无人机或卡车从一个地点取货后送到另一个地点。Sun等^[30]研究了一种无人机骑手并行的动态取送货调度问题,无人机和骑手都可以执行取货和送货任务。

从以上文献可以看出,无人机物流配送有关研究在起步阶段大多仅关注单一的取货或送货问题,且在建模时设置了很多假设条件来简化模型。随着研究的深入,问题的复杂度逐渐提高,比如,最初的文献大多只研究无人机用于包裹配送,且假设无人机一次飞行中只能完成一个任务。而近年来的文献开始研究无人机物流系统同时提供取货和送货服务,点到点取送货问题开始从单一的骑手服务发展到多种无人机服务模式。此外,建立的模型也融入了更多的现实因素。如早期的模型通常假设无人机在飞行过程中速度和电池损耗是恒定的,但近年来的文章已经注意到无人机有效载荷、风力等因素对无人机电量损耗的影响,也关注到无人机在一次飞行中访问多个客户的可能性。

2 模式设计

根据无人机物流配送系统中无人机在取货和送货功能上的不同,可以将无人机物流配送系统分为两类:无人机配送和无人机与其他运输工具(如卡车)协同完成取货、送货任务。其中,无人机配送是指在无人机运输系统中无人机是唯一的运输载体。

2.1 无人机配送

无人机配送通常是无人机与基站协同完成取送货任务。在这种模式中,无人机担任运输工具,基站为无人机提供电池更换服务。无人机从基站起飞,访问各个客户点后回到基站。Dorling等^[13]提出了多无人机配送模式,在他们的研究中,无人机

通过在有限航程内访问尽可能多的客户来补偿每架无人机有限的运载能力。他们的研究表明增加电池和有效载荷的重量会导致无人机能量消耗显著增加,而平衡有效载荷重量、电池重量和飞行时间是最小化无人机交付成本或交付时间的重要考虑因素。为此,他们在建模时考虑了有效载荷对无人机能耗的影响,大大增加了模型的实用性。Campuzano等^[31]研究了不同速度对无人机能耗的影响。上述研究主要通过最大化无人机自身能力以提高配送效率。

有研究通过多个无人机之间协作完成取送货任务以提升无人机物流系统的整体效能。Song等^[16]提出了一种无人机物流配送系统的调度模型。在他们所提的系统中有多个无人机基站和多个无人机。无人机基站可以视为配送中心,负责装卸和存放无人机包裹。无人机携带包裹从无人机基站起飞,将包裹送达客户后返回基站。为提高配送效率,无人机基站提供无人机充电服务。Wen等^[17]提出了一种异构无人机配送系统,大型无人机携带多架小型无人机与包裹从仓库起飞,飞到特定区域后大无人机释放小无人机,小无人机携带包裹飞到配送点。小无人机完成配送任务后飞往无人机基站,无人机基站回收所有小无人机,Liu等^[32]与文旭鹏等^[33]的工作拓展了这一研究。Wang等^[34]研究了多异构无人机配送问题,在他们的研究中,多架不同类型的无人机从仓库出发,将包裹配送给客户,完成所有配送任务后返回仓库。其中,仓库提供无人机充电服务。

也有研究关注了无人机在一次飞行中可为多个客户服务的潜力,如Hong等^[22]提出了一种楼顶多无人机取送货系统,在他们的研究中,无人机在完成配送任务后可继续为需要取货服务的客户服务。为提高取送货系统效率,无人机可在楼顶的自动存取设备上更换电池然后飞往下一个节点。

2.2 无人机与其他车辆协同

无人机与车辆协同配送是近年来的研究热点,这种模式由Murray等^[13]在2015年首次提出,在他们的研究中一架无人机可以单独完成配送任务,也可以和一辆卡车协同完成配送任务。Agatz等^[35]在他们的研究基础上提出了有无人机的旅行商问题(traveling salesman problem with drone, TSP-D)。Mathew等^[36]提出了一种卡车和无人机协同的包裹

配送模式。在他们的研究中,无人机可以为客户提供配送服务;卡车作为无人机配送的辅助设备,为无人机提供包裹运输、充电和其他服务。Karak等^[37]研究了用多个无人机和一辆卡车协同为客户提供包裹取送服务。Salama等^[7]研究了一辆卡车与多架无人机协同为一组客户交付订单的模式。在他们研究的模式中卡车仅作为无人机的起降平台和仓库,无人机为客户配送包裹。此外,他们将交货地点划分为多个簇,并计算每个簇的中心,卡车经过每个簇中心时发送无人机为这个簇所有的客户配送包裹。Wang等^[38]提出了一种卡车与无人机协同为道路两旁客户提供配送服务的模式。在他们的研究中,卡车携带无人机行驶在城市环形高速公路上,为分布在道路两旁的客户提供包裹配送服务。卡车和无人机都可以完成包裹的配送,卡车还能充当仓库和无人机的起降平台。该模式与传统的卡车配送模式相比可以有效减少配送时间。Dayarian等^[39]研究了一种新的包裹递送模式,在他们的模式中,卡车用于向客户递送包裹,无人机则负责卡车的包裹补给。也就是说,无人机将包裹从仓库运输到卡车,卡车再将包裹配送给客户。

Luo等^[18]研究了一辆卡车与多架无人机协同配送的模式,他们假设卡车携带多架无人机从仓库出发进行配送,无人机完成配送任务后可返回卡车继续执行下一个配送任务,直到完成所有配送任务后车与无人机一起返回仓库。车和无人机需要在规定的时间窗内访问客户并完成取货和送货任务,否则就会影响客户对服务的满意程度。随后,他们将该问题拓展到取送货任务上,用一辆卡车与多架无人机完成取货、送货和取送货任务^[21]。其中,完成送货服务的无人机可以飞到另一个需要取货服务的客户那里,使得无人机在一次飞行中可同时完成多个任务。Meng等^[29]研究了多辆卡车与无人机协同完成取送货的模式,无人机一次可以携带多个包裹,在起飞后可以访问多个客户。以上研究均采用卡车与无人机协同完成取送货任务。Cheng等^[40]的工作创新性地提出了公交车与无人机协同配送系统。其中,每个公交车配备一架无人机完成包裹运输和乘客运输。公交车在运输乘客的同时可以承担包裹存储和装卸服务。由于公交车在每一个停靠站都有固定的停靠时间,因此客户可在公交车停靠时间内取包裹,乘客也可在此时上下车。对于客户不能

自取的包裹,无人机从公交车车顶起飞完成包裹递送,然后在公交车上降落和更换电池。

总之,无论是无人机配送模式还是无人机与其他运输车辆协同配送模式,其本质都是充分开发无人机本身潜力或利用其他车辆优势来弥补单架无人机航程和载荷小的限制,使得无人机物流系统可以服务更多数量的客户和覆盖更大范围的区域。目前物流需求从最开始单一的“最后一公里”配送需求拓展到了同城物流、即时配送等多样化需求,相应的无人机物流系统需要根据具体的需求进行设计,因此还有很大的拓展研究空间。同时,随着无人机物流系统的建设落地,全自动、高稳定、低成本的无人机物流系统是未来的趋势。

3 求解方法

3.1 单目标优化求解

在车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)和TSP中,最小化成本、时间、距离和最大化客户利益是常见的优化目标^[41]。其中成本可以包括运输成本、运营成本。运输成本一般和行驶距离成正比,也有研究将能耗成本考虑到运输成本中。时间通常是运输时间、客户等待时间、无人机或卡车协作过程中的等待时间、服务所有客户的总完工时间。距离是指无人机物流系统中无人机或车辆的行驶时间。

单目标优化求解方法大致可以分成精确算法、启发式算法、智能优化算法和机器学习方法^[22]。精确算法可以确定小规模问题的最优解。Ham^[20]提出一种约束规划方法求解多无人机多仓库整合调度问题。Liu^[42]提出一种列生成算法和一种暴力路径枚举算法求解多无人机即时送餐问题。Pei等^[43]提出一种基于分支切割的精确算法求解无人机送餐问题。然而,精确算法的计算复杂度较高^[44],求解大规模问题时计算时间较长,效率较低。相对而言,启发式算法、智能优化算法和机器学习方法更适合解决大规模问题。Kitjacharoenchai等^[45]提出了一个大规模邻域搜索算法为卡车和无人机寻找高质量的路径规划方案。Li等^[46]提出了一种用于卡车和无人机调度的大规模邻域搜索算法。Mourello等^[47]采用K-means算法和遗传算法一起来优化卡车和无人机的路径规划方案。Liu等^[48]将禁忌列表应用于模拟退火算法,在短时间内禁止解的循环或重

复,实验表明,该算法可以有效减少求解时间。Peng等^[49]提出了一种混合遗传算法来解决TSP-D。Wu等^[50]采用基于编码器-解码器框架的强化学习方法求解卡车与无人机协同配送问题,并通过实验证明了其良好的性能。Wang等^[51]提出了一种深度强化学习方法求解带回程的VRP。设计的编码器包括两个阶段的自我注意力和异构注意力,可以产生更具信息量的节点表示从而提供高质量的解决方案。

从以上研究可知,启发式算法可以应用于不同的问题,但如果没有较好的算法设计,其优化效果可能不稳定。智能优化算法通常面向特定问题,但通常依赖于特定的搜索规则。机器学习方法的优化效果取决于训练集质量,其训练时间较长而训练好的模型决策时间短。目前大量的研究都在致力于提高算法的优化能力、决策效率,以及鲁棒性。

3.2 多目标优化

由于物流配送服务日趋复杂,单个优化目标已经不能满足决策者需求。多目标优化通常需要建立具有多个互相冲突的优化目标模型,并且通过多目标优化算法求解出一组帕累托最优解集以在不同优化目标之间权衡^[52-53]。最小化多目标优化问题的模型通常为以下形式^[54-56]

$$\min f(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)) \quad (1)$$

$$\text{s.t.: } g_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

式中: $f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)$ 表示待优化的目标函数,且它们之间相互冲突,其中一个目标改善的同时,其他优化目标会相应的变差^[55]; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示一个 n 维的决策变量; $g_i(X)$ 表示模型的约束条件。决策空间是由多个约束条件确定的,目标空间则是由多个目标函数确定的。

多目标优化算法求解的结果是找到一组帕累托前沿解而不是一个解,这与单目标优化算法不同。帕累托前沿包含决策空间内的所有非支配解集,且非支配解之间是互不支配的关系。判断两个解 X_1, X_2 的支配关系时, X_1 支配 X_2 需满足以下条件^[57]

$$\forall i \in 1, 2, \dots, m \quad f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (3)$$

$$\exists i \in 1, 2, \dots, m \quad f_i(X_1) < f_i(X_2) \quad (4)$$

对于“最后一公里”包裹交付,在现实场景中经常涉及许多相互冲突的目标。为响应不同配送系

统内的决策需求,学者们在建模时倾向于设置多个优化目标。比如,Salama等^[7]针对卡车与无人机协同问题构建了以无人机的固定成本、卡车和无人机的行驶距离等为优化目标的混合整数规划模型;Han等^[58]构建了一个最小化卡车总能耗、无人机总能耗和卡车总数的卡车与无人机协同多目标优化模型;Wang等^[59]所做的工作中构建了一个卡车与无人机协同的双目标优化模型,其中第1个优化目标是 minimized 运输成本和等待成本之和,第2个优化目标是 minimized 卡车或无人机返回最后一个节点的最晚时间;Das等^[1]提出了一辆卡车携带一架无人机同步配送的模式,并建立了优化目标为最小化卡车与无人机旅行成本、最大化客户满意水平的多目标优化模型;Luo等^[18]针对一辆卡车与多架无人机协同的路径规划问题,构建了一个最小化卡车与无人机的运输成本和最大化总体客户满意度的多目标优化模型。

对于多优化目标问题,VRP通常采用加权和方法确定多个目标的权重,并将其建模为加权组合目标进行求解^[23]。然而,如何衡量不同目标的权重以及理解不同优化目标之间的关系^[18]仍然是一个挑战。鉴于此,多目标优化方法最近变得流行起来。与单目标优化方法一次仅提供一个解决方案相比,多目标优化方法可提供多个代表目标之间权衡的解决方案,供决策者选择^[60]。多目标优化方法根据其进化思想可分为3类^[61]:帕累托支配关系^[62-66],空间分解^[67-69],评价指标^[70-71]。

NSGA-II是基于帕累托支配关系的典型多目标优化算法,它由Deb等^[57]提出,该算法提出非支配解策略,按照解的支配关系对种群所有个体进行等级排序,筛选出种群的非支配解;当两个解的等级相同时,拥挤度排序策略将保留两个解中拥挤度更大的个体;两种策略可在保证种群多样性的同时加快收敛。许多学者在NSGA-II的基本框架上进行了拓展研究。栗三一等^[72]改进NSGA-II并提出一种基于密度的局部搜索方法NSGA2-DLS。NSGA2-DLS使用极值优化策略和随机搜索策略来探索决策域空间,以在求解单模态多目标问题时获得高质量的解决方案。Deng等^[73]提出了一种改进的快速非支配解排序遗传算法,该算法采用NSGA-II作为算法的主要框架,同时设计了一种自适应多策略交叉策略,使算法能够在操作过程中判断种群的多样

性和收敛性。特殊拥挤度策略选择优秀的后代个体进行进化。在求解多模态多目标优化问题时,该算法有效改进了NSGA-II无法在决策空间中找到具有良好分布和收敛性的解集这一问题。

基于分解的多目标优化算法(MOEA/D)由Zhang等^[74]提出,将多目标优化问题分解为多个标量优化子问题,并同时对其进行优化。每个子问题的求解仅使用与之相邻的子问题信息,这可以降低MOEA/D在每次迭代的计算复杂度。他们的研究表明,MOEA/D在求解多目标0-1背包问题和连续多目标优化问题时优势明显。陈黄科等^[61]基于空间分解的思想,提出了一种基于目标空间分解的自适应多目标进化算法,并设计子空间进化概率自适应分配策略推进种群的优化。Zhao等^[75]基于MOEA/D算法框架提出了MOEA/D-AWNs,其主要思想是通过自适应调整权重向量和邻域来分配计算资源,从而提高进化效率,实验表明该算法在运行时间、收敛性和多样性方面有明显优势。

Carlos等人提出的MOPSO是基于评价指标的经典多目标优化算法^[76]。Dai等^[77]提出了一种基于分解的多目标粒子群优化算法(MPSOD),该算法构造了一组特殊的方向向量,以确保每个子空间都有解,以保持种群的多样性。Deng等^[78]设计了一种基于小生境协同进化策略和增强粒子群优化的改进量子进化算法(IPOQEA),用于求解三目标优化问题。Zhang等^[79]提出了一种改进的粒子群多目标优化算法,实验结果表明,该算法在求解多峰多目标优化问题时具有良好的性能。

4 结束语

本文回顾了无人机物流配送问题的相关研究,根据提供的物流服务类型将问题分为只取货或只送货,同时取货和送货,点到点取送货3类。同时,根据无人机在物流系统中的功能将现有的无人机物流系统分为无人机配送,无人机与其他运输车辆协同配送两类。此外,将无人机取送货问题的求解方法分为单目标优化和多目标优化两类。无人机取送货问题现有相关文献在问题类型、模型构建和求解方法上都进行了大量探索,为未来研究更复杂的问题、更贴合实际的模型和更高效的方法奠定了良好的基础。

1) 从问题角度而言,大多数无人机物流系统忽

略了系统建设成本。很多文献假设通过多架无人机与卡车、基站等组合实现取货或送货,但没有关注到无人机、卡车、基站等要素的采购与维护成本。系统投入使用后如何收回成本甚至实现盈利是无人机物流系统落地必须考虑的关键因素。鉴于此,如何以最少的无人机、无人机基站或卡车覆盖最大面积或最多数量的客户,以保障无人机物流系统正常运营,是一个亟待研究的问题。

2) 从模型角度而言,现有的文献建模时简化了很多现实因素,存在大量的理想化假设。大多数文献假设无人机在有限电量下能飞行固定时间或范围,无人机在有效载荷允许的情况下可以装载多个包裹,无人机飞行高度恒定。然而,无人机电池消耗受到风力、有效载荷等因素的影响,因此航程和飞行时间并非固定不变。而且,大多数文献没有考虑突发状况对无人机取送货系统的影响:如恶劣天气、无人机故障等对无人机运行的影响及其解决方案,这些都是无人机应用于现实场景时亟待解决的问题。鉴于此,未来的研究应考虑更贴合实际的因素。例如,对于无人机一次可装载多个包裹的假设,需要考虑无人机装箱体积的限制以及无人机自动装卸多个包裹的方法。

3) 从算法的角度而言,尽管现有文献开发了大量无人机取送货系统调度方法,但现有方法普遍存在泛化性不足的问题。现有方法大多会因为无人机物流系统服务模式、协同方式和数学模型的变化而失效。生成式人工智能模型在诸多问题上展现了强大的逻辑理解能力,探索像大模型那样泛化性更强的方法以实现无人机物流系统的有效调度,是未来的研究方向。而且,现有方法大多依据具体问题设置固定的算法参数,而现实中问题往往充满不确定性。鉴于此,需要开发鲁棒性更强的优化方法。此外,现有文献问题规模大多局限在500个客户点以内,然而现实中客户规模庞大。鉴于此,应深入研究运行速度快、优化效率高的并行计算方法。

参考文献:

- [1] DAS D N, SEWANI R, WANG J W, et al. Synchronized truck and drone routing in package delivery logistics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 5772-5782.
- [2] CHUNG S H, SAH B, LEE J K. 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.
- [3] XU B J, ZHAO K X, LUO Q Z, et al. A GV-drone arc routing approach for urban traffic patrol by coordinating a ground vehicle and multiple drones[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2023, 77: 101246.
- [4] 董华军, 王宇栖. 基于改进YOLOv5s的无人机小目标检测算法研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 118-126.
DONG H J, WANG Y X. Research on UAV small target detection algorithm based on improved YOLOv5s[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 118-126.
- [5] MENG Z Y, ZHOU Y T, LI E Y, et al. Environmental and economic impacts of drone-assisted truck delivery under the carbon market price[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 401: 136758.
- [6] 洪芳宇. 面向城市物流取送货服务的多无人机协同路径规划方法[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
HONG F Y. Collaborative route-planning methods of multiple drones for urban package pickup-delivery service[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [7] SALAMA M, SRINIVAS S. Joint optimization of customer location clustering and drone-based routing for last-mile deliveries[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 620-642.
- [8] GARG V, NIRANJAN S, PRYBUTOK V, et al. Drones in last-mile delivery: a systematic review on efficiency, accessibility, and sustainability[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 123: 103831.
- [9] DUKKANCI O, CAMPBELL J F, KARA B Y. Facility location decisions for drone delivery: a literature review[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 316(2): 397-418.
- [10] CRIŞAN G C, NECHITA E. On a cooperative truck-and-drone delivery system[J]. Procedia Computer Science, 2019, 159: 38-47.
- [11] YANPIRAT N, SILVA D F, SMITH A E. Sustainable last mile parcel delivery and return service using drones[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 124: 106631.
- [12] XIA Y, ZENG W J, ZHANG C R, et al. A branch-and-

- price-and-cut algorithm for the vehicle routing problem with load-dependent drones[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2023, 171: 80-110.
- [13] 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.
- [14] MURRAY C C, RAJ R. The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: parcel delivery with multiple drones[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 110: 368-398.
- [15] DORLING K, HEINRICHS J, MESSIER G G, et al. Vehicle routing problems for drone delivery[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(1): 70-85.
- [16] SONG B D, PARK K, KIM J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 120: 418-428.
- [17] WEN X P, WU G H. Heterogeneous multi-drone routing problem for parcel delivery[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 141: 103763.
- [18] 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.
- [19] 伍国华, 毛妮, 徐彬杰, 等. 基于自适应大规模邻域搜索算法的多车辆与多无人机协同配送方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1): 201-210.
- WU G H, MAO N, XU B J, et al. The cooperative delivery of multiple vehicles and multiple drones based on adaptive large neighborhood search[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1): 201-210.
- [20] HAM A M. Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time-window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 91: 1-14.
- [21] LUO Q Z, WU G H, TRIVEDI A, et al. Multi-objective optimization algorithm with adaptive resource allocation for truck-drone collaborative delivery and pick-up services[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(9): 9642-9657.
- [22] HONG F Y, WU G H, LUO Q Z, et al. Logistics in the sky: a two-phase optimization approach for the drone package pickup and delivery system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(9): 9175-9190.
- [23] 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.
- [24] ULMER M W, THOMAS B W, CAMPBELL A M, et al. The restaurant meal delivery problem: dynamic pickup and delivery with deadlines and random ready times[J]. *Transportation Science*, 2020, 55(1): 75-100.
- [25] CHEN J F, WANG L, REN H, et al. An imitation learning-enhanced iterated matching algorithm for on-demand food delivery[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 18603-18619.
- [26] WANG X, WANG L, WANG S Y, et al. Recommending-and-grabbing: a crowdsourcing-based order allocation pattern for on-demand food delivery[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(1): 838-853.
- [27] HUANG H P, HU C X, ZHU J, et al. Stochastic task scheduling in UAV-based intelligent on-demand meal delivery system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 13040-13054.
- [28] LIU Y C. An optimization-driven dynamic vehicle routing algorithm for on-demand meal delivery using drones[J]. *Computers & Operations Research*, 2019, 111: 1-20.
- [29] MENG S S, CHEN Y R, LI D. The multi-visit drone-assisted pickup and delivery problem with time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 314(2): 685-702.
- [30] SUN X T, FANG M H, GUO S, et al. UAV-rider coordinated dispatching for the on-demand delivery service provider[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 186: 103571.
- [31] CAMPUZANO G, LALLAR E, MES M. The drone-assisted variable speed asymmetric traveling salesman problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 176: 109003.
- [32] LIU H, WU G H, YUAN Y F, et al. An iterative two-phase optimization method for heterogeneous multi-drone routing problem considering differentiated demands[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2024, 10(5): 6449-6466.
- [33] 文旭鹏, 伍国华, 夏扬坤. 基于三阶段优化的大无人机辅

- 助小无人机物流配送方法[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(8): 1386-1395.
- WEN X P, WU G H, XIA Y K. Three stage optimization method for large UAV assist small UAV parcels delivery [J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(8): 1386-1395.
- [34] WANG X D, LIU Z Y, LI X P. Optimal delivery route planning for a fleet of heterogeneous drones: a rescheduling-based genetic algorithm approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 179: 109179.
- [35] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone[J]. Transportation Science, 2018, 52(4): 965-981.
- [36] MATHEW N, SMITH S L, WASLANDER S L. Planning paths for package delivery in heterogeneous multirobot teams[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(4): 1298-1308.
- [37] KARAK A, ABDELGHANY K. The hybrid vehicle-drone routing problem for pick-up and delivery services[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 102: 427-449.
- [38] WANG H P, SONG S Y, GUO Q H, et al. Cooperative motion planning for persistent 3D visual coverage with multiple quadrotor UAVs[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(3): 3374-3383.
- [39] DAYARIAN I, SAVELSBERGH M, CLARKE J P. Same-day delivery with drone resupply[J]. Transportation Science, 2020, 54(1): 229-249.
- [40] CHENG R, JIANG Y, NIELSEN O A, et al. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for a passenger and parcel share-a-ride problem with drones[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 153: 104203.
- [41] 任璇, 黄辉, 于少伟, 等. 车辆与无人机组组合配送研究综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(10): 2313-2327.
- REN X, HUANG H, YU S W, et al. Review on vehicle-UAV combined delivery problem[J]. Control and Decision, 2021, 36(10): 2313-2327.
- [42] LIU Y C. Routing battery-constrained delivery drones in a depot network: a business model and its optimization-simulation assessment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 152: 104147.
- [43] PEI Z, FANG T, WENG K B, et al. Urban on-demand delivery via autonomous aerial mobility: formulation and exact algorithm[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(3): 1675-1689.
- [44] HONG I, KUBY M, MURRAY A T. A range-restricted recharging station coverage model for drone delivery service planning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 90: 198-212.
- [45] KITJACHAROENCHAI P, MIN B C, LEE S. Two echelon vehicle routing problem with drones in last mile delivery[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 225: 107598.
- [46] LI H Q, WANG H T, CHEN J, et al. Two-echelon vehicle routing problem with time windows and mobile satellites[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 138: 179-201.
- [47] MOURELO F S, HARBISON T, WEBER T, et al. Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm[J]. Journal of Industrial Engineering and Management, 2016, 9(2): 374-388.
- [48] LIU H, LI X M, WU G H, et al. An iterative two-phase optimization method based on divide and conquer framework for integrated scheduling of multiple UAVs[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 5926-5938.
- [49] PENG K, DU J X, LU F, et al. A hybrid genetic algorithm on routing and scheduling for vehicle-assisted multi-drone parcel delivery[J]. IEEE Access, 2019, 7: 49191-49200.
- [50] WU G H, FAN M F, SHI J M, et al. Reinforcement learning based truck-and-drone coordinated delivery[J]. IEEE Transactions on Artificial Intelligence, 2023, 4(4): 754-763.
- [51] WANG C H, CAO Z G, WU Y X, et al. Deep reinforcement learning for solving vehicle routing problems with backhauls[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2025, 36(3): 4779-4793.
- [52] 丁进良, 陈佳鑫, 马欣然. 基于自适应差分进化的常压塔轻质油产量多目标优化[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 604-612.
- DING J L, CHEN J X, MA X R. Multi-objective optimization of light oil production in atmospheric distillation column based on self-adaptive differential evolution[J]. Control and Decision, 2020, 35(3): 604-612.
- [53] CHEN H K, WU G H, PEDRYCZ W, et al. An adaptive resource allocation strategy for objective space partition-based multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions

- on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(3): 1507-1522.
- [54] HUA Y C, LIU Q Q, HAO K R, et al. A Survey of evolutionary algorithms for multi-objective optimization problems with irregular pareto fronts[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(2): 303-318.
- [55] 曾亮, 曾维钧, 李燕燕, 等. 基于自适应聚合距离的多目标进化算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1113-1122.
- ZENG L, ZENG W J, LI Y Y, et al. A multi-objective evolutionary algorithm based on adaptive aggregation distance[J]. Control and Decision, 2024, 39(4): 1113-1122.
- [56] 梁正平, 林万鹏, 胡凯峰, 等. 基于帕累托前沿面曲率预估的超多目标进化算法[J]. 软件学报, 2023, 34(9): 4096-4113.
- LIANG Z P, LIN W P, HU K F, et al. Many-objective evolutionary algorithm based on curvature estimation of Pareto front[J]. Journal of software, 2023, 34(9): 4096-4113.
- [57] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [58] HAN Y Q, LI J Q, LIU Z, et al. Metaheuristic algorithm for solving the multi-objective vehicle routing problem with time window and drones[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(2): 172988142092 0031.
- [59] WANG K Z, YUAN B, ZHAO M T, et al. Cooperative route planning for the drone and truck in delivery services: a bi-objective optimisation approach[J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71(10): 1657-1674.
- [60] ZHANG H Z, ZHANG Q W, MA L, et al. A hybrid ant colony optimization algorithm for a multi-objective vehicle routing problem with flexible time windows[J]. Information Sciences, 2019, 490: 166-190.
- [61] 陈黄科, 伍国华, 霍离俗, 等. 基于目标空间划分的自适应多目标进化算法[J]. 软件学报, 2018, 29(9): 2649-2663.
- CHEN H K, WU G H, HUO L S, et al. Objective space division based adaptive multiobjective optimization algorithm[J]. Journal of Software, 2018, 29(9): 2649-2663.
- [62] MCCLYMONT K, KEEDWELL E. Deductive sort and climbing sort: new methods for non-dominated sorting[J]. Evolutionary Computation, 2012, 20(1): 1-26.
- [63] ZHANG X Y, TIAN Y, CHENG R, et al. An efficient approach to nondominated sorting for evolutionary multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(2): 201-213.
- [64] HU W, YEN G G. Adaptive Multiobjective particle swarm optimization based on parallel cell coordinate system[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(1): 1-18.
- [65] CHENG R, JIN Y C, NARUKAWA K, et al. A multiobjective evolutionary algorithm using gaussian process-based inverse modeling[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(6): 838-856.
- [66] ZHANG X Y, TIAN Y, CHENG R, et al. A decision variable clustering-based evolutionary algorithm for large-scale many-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(1): 97-112.
- [67] ZHANG Q F, ZHOU A M, JIN Y C. RM-MEDA: a regularity model-based multiobjective estimation of distribution algorithm[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(1): 41-63.
- [68] QI Y T, YU J S, LI X D, et al. Reservoir flood control operation using multi-objective evolutionary algorithm with decomposition and preferences[J]. Applied Soft Computing, 2017, 50: 21-33.
- [69] QI Y T, BAO L, SUN Y Y, et al. A memetic multi-objective immune algorithm for reservoir flood control operation[J]. Water Resources Management, 2016, 30(9): 2957-2977.
- [70] BADER J, ZITZLER E. HypE: an algorithm for fast hypervolume-based many-objective optimization[J]. Evolutionary Computation, 2011, 19(1): 45-76.
- [71] LIU C, ZHAO Q, YAN B, et al. Adaptive sorting-based evolutionary algorithm for many-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2019, 23(2): 247-257.
- [72] 栗三一, 李文静, 乔俊飞. 一种基于密度的局部搜索NSGA2算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(1): 60-66.
- LI S Y, LI W J, QIAO J F. A local search strategy based on density for NSGA2 algorithm[J]. Control and Decision, 2018, 33(1): 60-66.
- [73] DENG W, ZHANG X X, ZHOU Y Q, et al. An enhanced fast non-dominated solution sorting genetic algorithm for multi-objective problems[J]. Information Sciences, 2022, 585: 441-453.
- [74] ZHANG Q F, LI H. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.

- [75] ZHAO Q, GUO Y N, YAO X J, et al. Decomposition-based multiobjective optimization algorithms with adaptively adjusting weight vectors and neighborhoods[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2023, 27(5): 1485-1497.
- [76] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [77] DAI C, WANG Y P, YE M. A new multi-objective particle swarm optimization algorithm based on decomposition[J]. Information Sciences, 2015, 325: 541-557.
- [78] DENG W, XU J J, ZHAO H M, et al. A novel gate resource allocation method using improved PSO-based QEA[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 1737-1745.
- [79] ZHANG X W, LIU H, TU L P. A modified particle swarm optimization for multimodal multi-objective optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 95: 103905.



第一作者:洪芳宇(1995—),女,博士研究生,研究方向为智能优化决策方法与无人机物流调度。E-mail: fangyuhong@csu.edu.cn。



通信作者:伍国华(1986—),男,教授,博士生导师,研究方向为智能优化与决策、计算智能、空天资源调度、智能任务规划。E-mail: guohuawu@csu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)