

## 一种针对无人机配送网络的能量自维持调度方案

徐佳<sup>1,2</sup>, 袁鸣<sup>1</sup>, 吴思徐<sup>1</sup>, 谭芯<sup>1</sup>, 骆健<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学江苏省大数据安全与智能处理重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 近年来, 快递行业需求快速增长, 物流配送行业压力剧增。无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 配送凭借其人力成本低、灵活方便等特性成为车辆配送的有益补充。然而, 无人机配送受续航能力和负载能力等因素的制约, 需要低成本且能量自维持的配送和充电调度方案来支持多无人机的协同配送。提出了两阶段的能量自维持的多无人机协同配送及充电调度方案。第一阶段在满足无人机能量和载重容量约束的前提下, 最小化能完成区域内所有配送任务所需的无人机数量, 并给出对应配送路线。提出了无人机配送调度算法 (UDSA, UAV delivery scheduling algorithm), 并从理论上证明了 UDSA 的近似度。第二阶段对具有不同到达时间的无人机进行充电调度, 最小化所有无人机的最大充电完成时间。提出了一种具有近似度的无人机充电调度算法 (UCSA, UAV charging scheduling algorithm) 来求解该问题。仿真实验结果表明, 与基准算法相比, UDSA 最多可以减少 44.17% 的无人机数量; UCSA 最多可以缩短 18.87% 的最大充电完成时间。

**关键词:** 无人机; 配送调度; 车辆路由问题; 无线充电调度

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00359

## An energy self-sustaining scheduling scheme for UAV delivery networks

XU Jia<sup>1,2</sup>, YUAN Ming<sup>1</sup>, WU Sixu<sup>1</sup>, TAN Xin<sup>1</sup>, LUO Jian<sup>1,2</sup>

1. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Big Data Security and Intelligent Processing, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

**Abstract:** In recent years, the demand of express industry has increased rapidly, and the express industry is under increasing pressure. The unmanned aerial vehicle (UAV) delivery has become an effective supplement to vehicle delivery due to its low human cost, flexibility and convenience. However, UAVs are often limited by factors such as endurance and load capacity, requiring a low-cost and energy self-sustaining scheduling scheme for delivery and charging to support collaborative delivery of multiple UAVs. A two-stage self-sustaining multiple UAV cooperative delivery and charging scheduling scheme was proposed. The first stage aims at finding the delivery routes of UAVs to complete all delivery tasks in the region such that the number of UAVs was minimized under the energy and load capacity constraints of UAVs. The UAV delivery scheduling algorithm (UDSA) was proposed, and the approximation of UDSA was proved theoretically. The second stage aims to schedule the charging of UAVs with different arrival times to minimize the maximum charging completion time of all UAVs. An approximate UAV delivery scheduling algorithm (UCSA) was proposed to solve the problem. The simulation results show that, compared with the benchmark algorithm, UDSA can reduce the number of UAVs by

收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2023-09-15

通信作者: 徐佳, xujia@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.62372249, No.62072254, No.62272237, No.62171217, No.62302236, No.62372250)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62372249, No.62072254, No.62272237, No.62171217, No.62302236, No.62372250)

44.17% at most, and UCSA can reduce the maximum charging completion time by 18.87% at most.

**Key words:** UAV, delivery scheduling, vehicle routing problem, wireless charging scheduling

## 0 引言

近几年,随着经济的快速发展,物流市场不断扩大。特别是电子商务市场的快速增长使得小型包裹递送服务需求激增。运输智能(TI, transport intelligence)《2022年全球快递和小包裹》报告<sup>[1]</sup>显示,快递和小包裹市场在2021年增长了12.2%。物流订单的增加给物流配送行业带来了极大的压力,再加上人工快递投放的延误率较高,偏远地区投放难度大,物流成本逐年升高,使得物流配送市场需要更加快捷、方便、现代化的物流配送新模式。

与典型的车辆运输系统相比,无人机配送具有显著的优势<sup>[2]</sup>:首先,无人机配送系统独立运行,不需要人工干预,因此无人机的配送时间相对不受人为影响;其次,无人机每千米的运输成本远低于其他方式,配送成本更低;最后,无人机在空中移动,不受地面道路和交通条件的限制,配送及时性得到更好的保障。近年来,许多公司投资于无人机配送的研究。例如,亚马逊发布了Amazon Prime Air<sup>[3]</sup>,谷歌发布了Project Wing<sup>[4]</sup>,此外,京东物流<sup>[5]</sup>也在2015年开始探索无人机送货技术,并自主研发了全球首个无人智慧配送站。无人机正逐渐用于包裹递送,但无人机存在续航有限、负载不足的缺点。此外,无人机的运营成本一直以来也是一个需要考虑的重要问题。根据中通研究院2021年发布的《“末端+支线”无人机运营场景成本分析》<sup>[6]</sup>,无人机的运营成本主要由3个方面构成,包括无人机设备成本、供能设备成本以及能源使用成本。经初步测算,该无人机生命周期内运营的总成本为8.575万元,可运输的包裹数共7.5万个,其中,无人机设备及供能设备成本占比超过95%。因此,提高无人机使用效益,减少无人机数量,对降低无人机配送的成本十分关键。因此,如何设计一个低成本且能量自维持的配送和充电调度方案来支持多无人机的协同配送已经成为一个重要的问题。目前对无人机配送的研究主要分为车辆与无人机结合进行的配送和仅使用无人机进行的配送两类。首先,对于车辆和无人机结合进行的配送。Murray等<sup>[7]</sup>考虑车辆与无人机结合进行配送,建立了一个混合整数

线性规划模型,设计了一种启发式算法来对车辆和无人机的路线进行规划,目标是 최소화最大完成时间。然而,无人机每次只能为一位客户提供服务。Mathew等<sup>[8]</sup>解决了在城市环境中执行自动交付的协作车辆团队的任务调度和路径规划问题,基于枚举和求解旅行商问题的算法思想规划车辆和无人机的路线,以 최소화车辆和无人机的移动距离,但仅考虑了由单个车辆搭载单个无人机,因此一次配送服务的客户数量有限,且成本较高。Sergio等<sup>[9]</sup>提出了一种先聚类后路由的方法,即一个车辆搭载一个或多个无人机进行串联交付,先使用K-means算法确定无人机的有效发射位置,然后使用遗传算法解决车辆的路由问题,以 최소화车辆数量和无人机的总旅行时间以及能量消耗。但是,该文献在发射无人机进行包裹投递时,没有考虑无人机飞行范围的限制,假设性较强。Poikonen等<sup>[10]</sup>和Roberti等<sup>[11]</sup>考虑了单车搭载多个无人机的配送问题,并提出了精确算法来解决运载多个无人机的路由问题,但由于精确算法的时间复杂度较高,不适用于大规模情况。Wu等<sup>[12]</sup>和Ermagan等<sup>[13]</sup>提出了智能启发式的方法来解决这个问题,该解法适用于大规模的情况。Gu等<sup>[14]</sup>考虑了多辆车搭载多个无人机的场景,通过制定一个容量有限的集合覆盖位置模型,确定车辆停靠点的数量和可行位置,并提出了一个多级模型进一步优化决策。上述研究并没有将无人机的有限电池容量及载重能力纳入考虑。另外,由于需要同时对车辆和无人机进行路径规划,在地面道路不畅通的情况下,这些依赖车辆的解决方案可能无法实施。

对于无人机独立配送,Gentili等<sup>[15]</sup>探讨了向只有直升机或无人机才能到达的偏远地区运送易腐物品的一般问题,基于紧急医疗用品的易腐烂性来 최소화总负效用值,但是该研究并没有考虑多无人机的协调交付问题。Dorling等<sup>[16]</sup>提出了无人机配送的车辆路径问题模型的两种变体。第一种是在配送时间限制下 최소화总运营成本,第二种是在预算约束下优化配送时间。作者设计了一种模拟退火启发式算法来求解该问题。Cheng等<sup>[17]</sup>进一步扩展了Dorling等人的研究。在考虑时间窗的多次旅行的无人机路

由问题模型中,采用分支界定法求解无人机路由问题。虽然上述文献在求解无人机的独立配送时,都考虑了无人机的能量约束,但是,在作为车辆的替代工具用于执行快递配送任务时,无人机的载重容量限制并没有被纳入考虑。Choi等<sup>[18]</sup>研究了一种自动的无人机配送系统,利用电池容量、载重容量和飞行范围之间的关系来优化无人机的数量。但由于求解中假设客户需求都是相同的,算法的普适性不高。Song等<sup>[19]</sup>构建了一个混合整数规划数学模型,在无人机载重容量和飞行时间的限制下,允许无人机一次服务多个地点,实现所覆盖任务总数和配送服务期间总旅行距离的联合优化。但是,该算法并不能保证区域内的所有配送任务都被完成。Yakici<sup>[20]</sup>利用一个基于位置路由问题的整数线性规划模型来优化无人机的飞行路线,目标是将覆盖节点对应权值的总和最大化,设计了一种蚁群优化元启发式算法来解决该问题。然而,具有低权值的节点可能无法得到服务。Shi等<sup>[21]</sup>针对多行程无人机选址路由问题提出了一个双目标混合整数规划模型,允许同时取货和配送,设计了一种包含双层编码的改进的非支配排序遗传算法来求解该模型,但是并没有考虑无人机的充电续航问题。

综上所述,现有的无人机配送大多以单无人机单一配送为主,受限于自身属性和可执行配送任务复杂度的影响,难以实现短时间内所有包裹的一次性投递。随着无人机技术的进步,无人机载重量已经极大增加。例如,大疆生产的能够携带多个包裹的无人机 DJI Spreading Wings S900<sup>[22]</sup>能够携带 8.2 kg 的包裹;FreeFly Alta 8<sup>[23]</sup>能够携带高达 18 kg 的包裹。因此,有必要对无人机多包裹配送调度问题进行研究,从而达到优化无人机配送成本的目的;另外,现有工作缺乏同时考虑能量约束和载重容量约束的无人机配送规划方法,在实用性上有待提高;最后,现有方法对无人机的能量自维持问题研究较少。目前,无人机的续航能力有限仍是无人机配送的一大瓶颈,有必要将配送方案和充电调度方案进行联合优化。

针对上述问题,本文针对配送网络提出了一个自维持的多无人机协同配送及充电调度方案。无人机配送网络能量自维持调度方案的设计是具有挑战性的。首先,现有的研究大多仅关注无人机配送路径的优化,忽视了无人机配送的能量可持续性,因

此如何构建一个能量自维持的多无人机协同配送系统模型具有一定的挑战;其次,需要在同时考虑无人机的载重容量和容量的限制的情况下对无人机的配送路径进行求解。同时考虑以上两种约束的无人机配送调度方案设计比经典的 NP 难的带距离约束的车辆路由问题 (DVRP, distance constrained vehicle routing problem)<sup>[24]</sup>更难。本文的主要贡献如下。

1) 本文构建了一个能量自维持的多无人机协同配送模型,该模型允许无人机在一次配送过程中完成多个目标快递站点的投递任务,且能对无人机进行能量补充,使无人机可以持续工作。

2) 本文形式化了无人机配送调度问题,在无人机自身载重容量和电池容量的限制条件下,最小化完成区域内所有站点配送任务的无人机数量。设计了一个无人机配送调度算法 (UDSA, UAV delivery scheduling algorithm),理论证明了UDSA的近似度。

3) 本文形式化无人机充电调度问题,对返回快递中心的具有不同到达时间和剩余电量的无人机进行充电调度,最小化所有已使用无人机的充电完成时间,利用基于贪心思想的无人机充电调度算法<sup>[25]</sup> (UCSA, UAV charging scheduling algorithm) 进行求解。

4) 实验结果表明,与基准算法相比,UDSA最多可以减少44.17%的无人机数量,UCSA最多可以缩短18.87%的最大充电完成时间。

## 1 系统模型与问题形式化

### 1.1 系统模型

本文考虑构建一个能量自维持的无人机配送系统,无人机配送系统如图1所示。首先,无人机从快递中心出发进行快递配送,一个无人机在一次飞行中可以完成多个目标站点的投递任务。无人机在自身载重容量和电池容量的限制条件下,完成区域内所有站点配送任务,目标是 minimized 用于配送的无人机数量,从而减少无人机的成本。其次,当无人机完成其配送任务后,返回快递中心的充电桩进行充电,目标是 minimized 所有已使用的无人机的充电完成时间,使得无人机有更多的时间用于执行配送任务。常用符号见表1。

#### 1.1.1 无人机快递配送模型

考虑一个配送网络,快递中心用于无人机充电和快递分拣,用完全图  $G = (N \cup \{r\}, E)$  表示该网

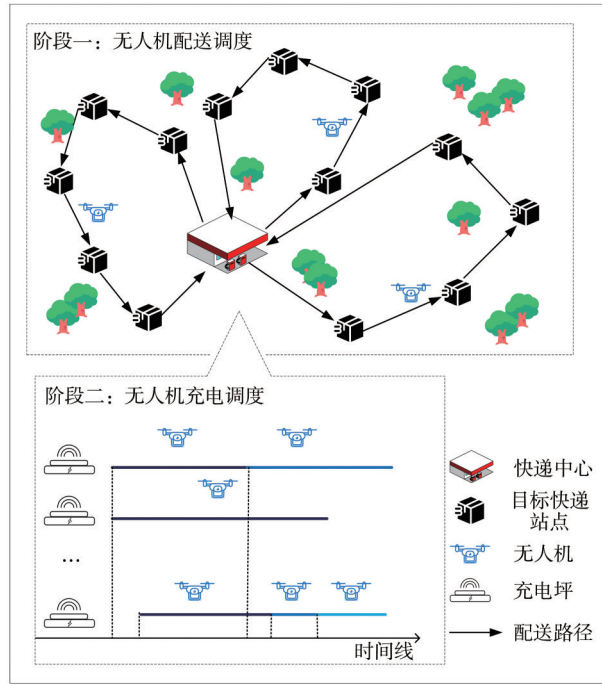


图1 无人机配送系统

络。其中， $r$ 表示快递中心。 $N = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示分布在区域内的需配送的快递站点集合。对于每一个站点 $v_i \in N$ ，需要卸载货物质量 $q_i$ ，货物卸载时间 $s_i$ 。 $E$ 表示网络中边的集合。对于每一条边 $e_{ij} \in E$ ， $d_{ij}$ 表示从站点 $v_i$ 到站点 $v_j$ 的欧氏距离。特别地， $d_{r,i}$ 表示从快递中心 $r$ 到站点 $v_i$ 的欧氏距离。考虑由一组无人机进行快递配送，每个无人机都是同构的，有相同的飞行速率 $u$ 、电池容量 $B^{\max}$ （即无人机能量约束）和载重容量 $Q^{\max}$ 。为了完成所有目标站点的配送任务，无人机应该被有效地调度，即为每个无人机指派一条配送回路。在配送过程中，无人机在零时刻以满电量状态从快递中心出发，并在完成其对应的配送任务后返回快递中心。用 $K$ 表示无人机的配送回路集合，对于每条回路 $k \in K$ ， $N_k (\subseteq N)$ 表示无人机在该回路上配送的站点集合， $E_k$ 表示该回路上的边集合。

无人机悬停在站点卸货或飞行时，都需要消耗能量。对于每个站点 $v_i$ ，定义无人机单位时间的悬停卸载能耗为 $\mu$ ，则无人机在每个站点的悬停卸载能耗为

$$w_1(v_i) = \mu s_i, \quad \forall v_i \in N \quad (1)$$

定义单位时间的飞行能量消耗为 $\eta$ ，则无人机在每条边 $e_{ij}$ 上的飞行能耗为

表1 常用符号

符号	描述
$N, n$	快递站点集合, 快递站点个数
$F, f$	无人机集合, 无人机个数
$M, m$	充电桩集合, 充电桩个数
$q_i$	站点 $v_i$ 的需要卸载货物质量
$s_i$	站点 $v_i$ 的货物卸载时间
$d_{i,j}$	站点 $v_i$ 到站点 $v_j$ 的欧氏距离
$u$	无人机的飞行速度
$B^{\max}$	无人机的电池容量
$Q^{\max}$	无人机的载重容量
$K$	无人机配送回路集合
$N_k$	无人机在回路 $k$ 上配送的快递站点集合
$E_k$	无人机在回路 $k$ 上的边集合
$\eta$	无人机单位时间的飞行能耗
$\mu$	无人机单位时间的悬停卸载能耗
$G$	网络模型的初始完全图
$G'$	只有边权重的辅助图
$w_1(v_i)$	$G$ 中的点权重值, 即无人机在站点 $v_i$ 的卸载能耗值
$w_2(e_{ij})$	$G$ 中的边权重值, 即无人机在边 $e_{ij}$ 上的飞行能耗值
$w'(e_{i,j})$	$G'$ 中的边权重值, 即边 $e_{i,j}$ 上的能耗值
$N_h$	根据能耗边权重值划分的第 $h$ 个快递站点集合
$B_k^c$	无人机 $u_k$ 到达快递中心的剩余电量
$t_k$	无人机 $u_k$ 到达快递中心的时间
$p_l$	充电桩 $c_l$ 的充电功率
$F_l$	充电桩 $c_l$ 上的无人机集合
$\Omega_l = (\omega_l(1), \omega_l(2), \dots, \omega_l( F_l ))$	充电桩 $c_l$ 上的无人机充电序列
$ST_{l,k}$	充电桩 $c_l$ 上第 $k$ 个无人机的充电开始时间
$CT_{l,k}$	充电桩 $c_l$ 上第 $k$ 个无人机的充电时长
$T_l^{\text{avail}}$	充电桩 $c_l$ 的空闲时间
$T$	最大充电完成时间

$$w_2(e_{ij}) = \eta \frac{d_{ij}}{u}, \quad \forall e_{ij} \in E \quad (2)$$

因此，任意无人机在其配送回路 $k$ 上进行配送所消耗的总能量可表示为

$$B_k = \sum_{v_i \in N_k} w_1(v_i) + \sum_{e_{ij} \in E_k} w_2(e_{ij}) \quad (3)$$

此外，任意无人机在其配送回路 $k$ 上的货物总卸载量为

$$Q_k = \sum_{v_i \in N_k} q_i \quad (4)$$

### 1.1.2 快递中心充电调度模型

快递中心除了进行快递分拣外，还提供无人机

充电服务。设快递中心有一组充电桩  $M = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ ，其中， $m$  表示充电桩的个数。设任意充电桩  $c_i \in M$  的充电功率为  $p_i$ 。无人机和充电桩进行一对一充电，并且无人机充电将独占充电桩，直至充满电。

无人机在完成快递配送任务后，将返回快递中心进行电量补充。设执行配送任务的无人机集合为  $F = \{u_1, u_2, \dots, u_f\}$ ,  $f = |K|$ ，其中， $f$  表示执行配送任务的无人机数。由于每个无人机的配送回路不同以及在站点处悬停卸载货物的能耗不同，各无人机到达快递中心的时间与所需能量不同。对于任意无人机  $u_k \in F$ ，定义其到达快递中心的时间和剩余电量分别为  $t_k$  和  $B_k^{re}$ （到达时间和剩余电量可以通过第一阶段的无人机配送调度得到）。

对于每一个充电桩  $c_i$ ，用集合  $F_i$  表示在该充电桩处充电的无人机集合，用序列  $\Omega_i = (\omega_i(1), \omega_i(2), \dots, \omega_i(|F_i|))$  表示无人机的充电顺序。用  $CT_{i,k}$  表示充电桩  $c_i$  上第  $k$  个无人机的充电时长，无人机的充电时长为

$$CT_{i,k} = \frac{B^{\max} - B_k^{re}}{p_i} \quad (5)$$

用  $ST_{i,k}$  表示充电桩  $c_i$  上第  $k$  个无人机的充电开始时间。当该无人机到达且上一个无人机的充电任务已完成时，才可以开始充电。因此有

$$ST_{i,k} = \begin{cases} t_k, & k = 1 \\ \max\{ST_{i,k-1} + CT_{i,k-1}, t_k\}, & k > 1 \end{cases} \quad (6)$$

本文的目标是最小化最大充电完成时间，即最小化所有充电序列中最晚完成充电任务的无人机的充电完成时间，则最大完成时间表示为

$$T = \max_{c_i \in M} \{ST_{i,|F_i|} + CT_{i,|F_i|}\} \quad (7)$$

## 1.2 问题形式化

为了调度无人机配送路线和充电序列，本节分别形式化无人机配送调度问题和无人机充电调度问题。

### 1.2.1 无人机配送调度问题

无人机配送调度问题的目标是在满足能量约束和载重容量约束的前提下，最小化完成区域内所有配送任务所需的无人机数量。该问题可形式化为

$$\begin{aligned} & \min |K| & (8) \\ \text{s.t. } & B_k \leq B^{\max}, \quad \forall k \in K & (8a) \end{aligned}$$

$$Q_k \leq Q^{\max}, \quad \forall k \in K \quad (8b)$$

$$\bigcup_{k=1}^K N_k = N \quad (8c)$$

$$N_k \cap N_{k'} = \emptyset, \quad \forall k \neq k', k, k' \in K \quad (8d)$$

其中，约束(8a)保证任意一个无人机在其配送回路上所消耗的能量不超过无人机自身的电池容量；约束(8b)保证任意一个无人机的卸载货物质量不超过无人机的载重容量；约束(8c)保证所有配送任务都被完成；约束(8d)保证一个站点只被一个无人机访问。

### 1.2.2 无人机充电调度问题

在第一阶段配送任务完成后，需要对在不同时间到达快递中心且有不同能量需求的无人机进行充电调度，以最小化所有无人机的最大充电完成时间。因此无人机充电调度问题形式化为

$$\min T \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \Omega_i \cap \Omega_{i'} = \emptyset, \quad \forall i \neq i', c_i, c_{i'} \in M \quad (9a)$$

$$\bigcup_{i=1}^m F_i = F \quad (9b)$$

其中，约束(9a)保证一个无人机只能在一个充电桩处进行充电；约束(9b)表示所有无人机的充电需求都被满足。

## 2 无人机配送调度算法设计与分析

### 2.1 难度分析

**定理1:** 无人机配送调度问题是NP难的。

**证明:** 首先构建带距离约束的车辆路由问题<sup>[24]</sup>的一个实例：二维平面上有一组固定位置的节点集合  $N = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，由一组车辆进行调度来访问该平面上所有节点，每辆车都有一定的行驶距离限制  $B^{\max}$ ，这些车辆初始时停靠在仓库  $r$  处，并在访问完节点后返回仓库。带距离约束的车辆路由问题的目标是设计出互不相交的车辆路线，在满足车辆的行驶距离限制的前提下，最小化访问所有节点的车辆数量。

下面给出无人机配送调度问题的一个实例：对于一组快递站点集合  $N = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，每个站点  $v_i$  有不同货物卸载需求  $q_i$ ，快递中心  $r$  派遣一组无人机向各个站点配送快递，无人机在配送过程中有飞行能耗以及在站点卸载货物的悬停卸载能耗。每个无人机都有严格的电池容量  $B^{\max}$  约束和载重容量  $Q^{\max}$  约束。问题是设计互不相交的无人机飞行路线，在满足无人机能量约束和载重容量约束的前提

下，最小化能完成所有快递任务所需的无人机数量。将无人机配送调度问题中的悬停卸载能耗和无人机电重容量约束去除，形成简化的无人机配送调度问题。显然该简化的无人机配送调度问题等价于带距离约束的车辆路由问题。由于带距离约束的车辆路由问题是NP难的，因此本文的无人机配送调度问题也是NP难的。

## 2.2 算法设计

求解无人机配送调度问题的基本思路如下：首先，构建辅助图，将站点上无人机的悬停卸载能耗转化到边上；然后，根据从快递中心到各个目标快递站点的能耗，对所有具有相近配送能耗的站点进行分组。一个无人机只对同一组中的站点进行配送。在每组快递站点集合内生成最少数量路径的问题等价于无根的带距离约束的车辆路由问题<sup>[26]</sup>，可以被近似地求解。最后将生成的路径与快递中心连接，形成无人机快递配送回路。UDSA如算法1所示，具体由以下5个步骤组成。

### 步骤1 构建辅助图

构造辅助图 $G'$ 将节点上的悬停卸载能耗转化到边上，辅助图中每条边的权重表示为

$$w'(e_{ij}) = \frac{w_1(v_i) + w_1(v_j)}{2} + w_2(e_{ij}), \quad (10)$$

$$\forall v_i, v_j \in N \cup \{r\}, \forall e_{ij} \in E$$

即将原来每个点上悬停卸载货物的能耗平均分摊到与之相连的两条边上。显然，在辅助图中进行求解与在原始图中进行求解是等价的。初始化无人机的配送回路集合 $K$ 为空集。

### 步骤2 根据边权重进行站点分组

根据 $N$ 中各目标快递站点的无人机在辅助图中前往快递中心所需的不同能量消耗值，将这些站点划分为不同的集合 $N_0, N_1, \dots, N_h, \dots, N_z$ ， $z =$

$$\left\lceil \text{lb} \frac{B^{\max}}{2 \left( \frac{B^{\max}}{2} - \Delta + 1 \right)} \right\rceil, \quad \text{其中}, \Delta = \max_{v_i \in N \cup \{r\}} \left\{ \frac{w_1(v_i)}{2} +$$

$$w_2(e_{r,i}) \right\} = \max_{v_i \in N \cup \{r\}} \left\{ w'(e_{r,i}) \right\} \text{表示辅助图中与快递中心}$$

相连的最大的边权重值。为简便，用 $\delta = \frac{B^{\max}}{2} - \Delta + 1$ ，因此 $z = \left\lceil \text{lb} \frac{B^{\max}}{2\delta} \right\rceil$ 。特别地，需要满足 $\Delta \leq \frac{B^{\max}}{2}$ ，

否则该问题无解。具体划分方式为

$$N_h = \begin{cases} \left\{ v_i: \frac{B^{\max}}{2} - \delta < w'(e_{r,i}) \leq \Delta \right\}, & h = 0 \\ \left\{ v_i: \frac{B^{\max}}{2} - 2^h \cdot \delta < w'(e_{r,i}) \leq \frac{B^{\max}}{2} - 2^{h-1} \cdot \delta \right\}, & 1 \leq h \leq z-1 \\ \left\{ v_i: 0 < w'(e_{r,i}) \leq \frac{B^{\max}}{2} - 2^{z-1} \cdot \delta \right\}, & h = z \end{cases} \quad (11)$$

对于上述每个子集 $N_h, h = 0, 1, 2, \dots, z$ ，分别执行以下步骤3~步骤5。

### 步骤3 计算无根路径

用 $E(N_h)$ 表示 $N_h$ 中任意两个站点之间的边集合。生成一个只包含 $N_h$ 中站点的无向完全图 $G'_h = (N_h, E(N_h))$ 。为了生成最少数量的配送回路，且满足无人机 $B^{\max}$ 的能量约束，在该无向完全图中通过调用近似度为3的无根带距离约束的车辆路由问题算法unrooted DVRP<sup>[26]</sup>先求解无根路径集合 $\Phi_h$ ，该集合中的每条不包含快递中心 $r$ 的无根路径满足 $2^h \cdot \delta - 1$ 的能量约束。

### 步骤4 连接快递中心

将 $\Phi_h$ 中的每个无根路径的两端分别与快递中心 $r$ 连接，用 $\circ$ 符号表示路径之间的连接，即组成配送回路 $r \circ \varphi \circ r$ 。用 $\Phi'_h$ 表示 $N_h$ 中的所有配送回路集合，此时得到的临时配送回路集合满足无人机能量约束。

### 步骤5 根据载重容量约束划分回路

由于对上述临时配送回路的求解并未考虑无人机的载重容量约束，因此对 $\Phi'_h$ 内超过无人机电重容量的回路进一步执行装箱算法Packing<sup>[27]</sup>，即将这些临时配送回路划分为满足载重容量约束的子回路，并将这些子回路加入最终结果集 $K$ 。

## 算法1: UDSA

**输入:** 无向完全图 $G = (N \cup \{r\}, E)$ ，无人机电池容量 $B^{\max}$ ，无人机电重容量 $Q^{\max}$

**输出:** 无人机配送回路集合 $K$

步骤1: 构建辅助图

将图 $G$ 转换为只有边权重的图 $G'$ ，其中每条边上的权重为

$$w'(e_{ij}) = \frac{w_1(v_i) + w_1(v_j)}{2} + w_2(e_{ij}) \quad \forall v_i, v_j \in N \cup \{r\},$$

$$\forall e_{ij} \in E; K \leftarrow \emptyset;$$

步骤2: 根据边权重进行站点分组

$$\Delta \leftarrow \max_{v_i \in N \cup \{r\}} \{w'(e_{r,i})\};$$

$$\delta \leftarrow \frac{B^{\max}}{2} - \Delta + 1, z \leftarrow \left\lceil \text{lb} \frac{B^{\max}}{2\delta} \right\rceil;$$

**for**  $h = 0$  **to**  $z$  **do**

$$N_h \leftarrow \emptyset;$$

**for each**  $v_i \in N_h$  **do**

$$\text{if } \frac{B^{\max}}{2} - \delta < w'(e_{r,i}) \leq \Delta$$

$$\text{then } N_0 \leftarrow N_0 \cup \{v_i\};$$

**end if**

$$\text{if } 0 < w'(e_{r,i}) \leq \frac{B^{\max}}{2} - 2^{z-h} \cdot \delta$$

$$\text{then } N_z \leftarrow N_z \cup \{v_i\};$$

**end if**

**for**  $h = 1$  **to**  $z - 1$  **do**

$$\text{if } \frac{B^{\max}}{2} - 2^h \cdot \delta < w'(e_{r,i}) \leq \frac{B^{\max}}{2} - 2^{h-1} \cdot \delta$$

$$\text{then } N_h \leftarrow N_h \cup \{v_i\};$$

**end if**

**end for**

**end for**

**end for**

步骤3: 计算无根路径

**for**  $h = 0$  **to**  $z$  **do**

$$G_h' \leftarrow (N_h, E(N_h));$$

$$\Phi_h \leftarrow \text{unrootedDVRP}(G_h', 2^h \cdot \delta - 1);$$

$$\Phi_h' \leftarrow \emptyset;$$

步骤4: 连接快递中心

**for each**  $\varphi \in \Phi_h$  **do**

$$\Phi_h' \leftarrow \Phi_h' \cup \{r \circ \varphi \circ r\};$$

**end for**

步骤5: 根据载重容量约束划分回路

**for each**  $\varphi' \in \Phi_h'$  **do**

$$K \leftarrow K \cup \text{Packing}(\varphi', Q^{\max});$$

**end for**

**end for**

**return**  $K$ ;

### 2.3 算法分析

**引理1:** UDSA的时间复杂度为  $O\left(\left(\text{lb} \frac{B^{\max}}{2} + 1\right)n^3\right)$ 。

**证明:** UDSA的时间复杂度主要由第3个for循环主导。其中,  $\text{unrootedDVRP}(\cdot)$ <sup>[26]</sup>函数需要  $O(n^3)$ 的时间,  $\text{Packing}(\cdot)$ <sup>[27]</sup>函数需要  $O(n \text{lb} n)$ 的时间。因此, 循环内部时间复杂度为  $O(n^3)$ 。本文将快递站点集合  $N$  划分为  $z + 1$  个子集, 其中  $z = \left\lceil \text{lb} \frac{B^{\max}}{2\delta} \right\rceil$ 。因此, UDSA执行了  $z + 1$  次循环。又因为  $\delta = \frac{B^{\max}}{2} - \Delta + 1$  且  $\Delta \leq \frac{B^{\max}}{2}$ , 因此, 整个for循环的时间复杂度为  $O\left(\left(\text{lb} \frac{B^{\max}}{2\delta} + 1\right)n^3\right) \leq O\left(\left(\text{lb} \frac{B^{\max}}{2} + 1\right)n^3\right)$ 。

**定理2:** UDSA具有  $6\left(\text{lb} \frac{B^{\max}}{B^{\max} - 2\Delta + 2} + 1\right) + 8$  的近似比, 其中  $B^{\max}$  表示无人机的电池容量,  $\Delta$  表示无人机到达距离快递中心最远的快递站点所需的能耗。

**证明:** 本文首先证明UDSA中得到的每条配送回路满足  $B^{\max}$  的能量约束和  $Q^{\max}$  的载重容量约束, 然后进一步证明所得解的近似比。

对于  $N_h (h = 0)$  的情况: 从快递中心  $r$  到  $N_0$  中无根路径任意一个端点的能耗至多为  $\Delta$ , 且  $N_0$  中无根路径能耗最多为  $\delta - 1$ , 又因为  $\Delta \leq \frac{B^{\max}}{2}$ , 此时得到的临时配送回路的总能耗为  $2\Delta + \delta - 1 = \Delta + \frac{B^{\max}}{2} \leq B^{\max}$ , 满足无人机能量约束; 然后步骤5将不符合载重容量约束的回路进行了划分, 确保了所有回路都满足无人机的载重容量约束。

对于  $N_h (1 \leq h \leq z)$  的情况: 根据步骤2的划分, 从快递中心  $r$  到  $N_h$  中无根路径任意一个端点的能耗至多为  $\frac{B^{\max}}{2} - 2^{h-1} \cdot \delta$ , 对于每条无根路径  $\varphi \in \Phi_h$ , 其能耗至多为  $2^h \cdot \delta - 1$ , 此时得到的临时配送回路的能耗为  $2\left(\frac{B^{\max}}{2} - 2^{h-1} \cdot \delta\right) + 2^h \cdot \delta - 1 = B^{\max} - 1 < B^{\max}$ , 满足无人机能量约束; 然后步骤5将不符合载重容量约束的回路进行了划分, 确保了所有回路都满足无人机的载重容量约束。因此, 算法1产生的解可行。

接下来证明该算法的性能。用  $\text{OPT}'$  表示不考虑无人机的载重容量  $Q^{\max}$  但满足能量约束  $B^{\max}$  的配送回路的无人机数量的最优解,  $\text{OPT}$  表示考虑无人机

载重容量  $Q^{\max}$  且满足能量约束  $B^{\max}$  的配送回路的无人机数量的最优解。显然，有  $\text{OPT} \geq \text{OPT}'$ 。在对网络图中的站点进行划分顶点集合后，本文定义  $\Pi$  表示  $\text{OPT}'$  得到的无人机配送回路集合，考虑任意一条配送回路  $\pi \in \Pi$ ， $\pi_h$  表示由  $\pi$  推出的在  $N_h$  顶点集合内的路径。本文假设所有的能耗权值都为整数：这可以通过一个适当的比例来保证。因此根据划分不等式(11)， $N_h$  集合中任意顶点距离快递中心  $r$  的能耗至少为  $\frac{B^{\max}}{2} - 2^h \cdot \delta + 1$ ，所以可以推出  $\pi_h$  的能耗至多为  $B^{\max} - 2\left(\frac{B^{\max}}{2} - 2^h \cdot \delta + 1\right) = 2^{h+1} \cdot \delta - 2$ 。所以每个路径  $\pi_h$  可以划分为两个能耗至多为  $2^h \cdot \delta - 1$  的无根路径。因此以这种方式在  $\Pi$  中分割每条路径得到一组新的路径集合  $\Theta$ ，在  $N_h$  上至多有  $|\Theta| = 2|\Pi| = 2\text{OPT}'$  的无根路径，又因为算法中的 unrooted DVRP 的近似比为  $3^{[26]}$ ，所以对于所有顶点集合  $N_0, N_1, \dots, N_h, \dots, N_z$ ，本文可以得到  $|\Phi_h| \leq 6\text{OPT}'$ ，因此满足无人机能量约束为  $B^{\max}$  的配送回路的总数量至多为  $6(z+1)\text{OPT}'$ 。

由于载重容量的约束，算法需要对大于载重容量的配送回路进行切分，这将生成一些额外的回路。因为在本文中无人机的快递配送任务不可分割，并使用一个 2-近似的装箱算法 Packing<sup>[27]</sup> 划分子回路，所以额外生成的回路至多为  $2\left(\frac{1}{Q^{\max}} \sum_{v_i \in N} q_i\right)$ 。又因为即使只考虑载重容量约束，当配送任务不可分割时，无人机数量不可能少于  $\frac{1}{Q^{\max}} \sum_{v_i \in N} q_i$ 。因此，有  $\text{OPT} \geq \frac{1}{Q^{\max}} \sum_{v_i \in N} q_i$ 。所以最终可行解中无人机的配送回路的数量满足  $6(z+1)\text{OPT}' + \frac{2}{Q^{\max}} \sum_{v_i \in N} q_i \leq 6(z+1)\text{OPT} + 2\text{OPT} = (6z+8)\text{OPT}$ ，即该算法近似比为  $6\left(\text{lb} \frac{B^{\max}}{B^{\max} - 2A + 2} + 1\right) + 8$ 。

### 3 无人机充电调度算法设计与分析

#### 3.1 难度

**定理3：** 无人机充电调度问题是 NP 难的。

**证明：** 给出无人机充电调度问题的一个实例：有一组充电坪  $M = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ ，每个充电坪  $c_l \in M$  有不同的充电功率  $p_l$ 。有一组无人机  $F =$

$\{u_1, u_2, \dots, u_f\}$ 。对于任意无人机  $u_k \in F$ ，充电需求为  $B^{\max} - B_k^{\text{rc}}$ ，到达时间为  $t_k$ 。若无人机  $u_k$  在充电坪  $c_l$  进行充电，则需花费  $\frac{B^{\max} - B_k^{\text{rc}}}{p_l}$  的时间。该问题的

目标是确定所有无人机的充电调度，以确保在所有无人机的最大充电完成时间最短。显然，本文的无人机充电调度问题等价于具有不同释放时间的统一并行机器调度问题<sup>[25]</sup>。由于具有不同释放时间的统一并行机器调度问题是 NP 难的，无人机充电调度问题也是 NP 难的。

#### 3.2 算法设计

本文采用一个具有近似度的算法<sup>[25]</sup>来求解该问题，算法的基本思想如下：将无人机的不同到达时间看作执行充电任务后的额外时间，在每次迭代中选择当前充电完成时间最短的充电坪，最后将每个充电坪的无人机队列逆向排序，获得最终的充电队列。

UCSA 如算法 2 所示。首先将到达充电站的无人机以到达时间非递增的顺序进行排序，形成一个新队列。定义每个充电坪的空闲时间为  $T_l^{\text{avail}}$ ，并初始化为 0，且每个充电坪上的无人机序列为空。然后对于到达的每个无人机，选择当前充电完成时间最短的充电坪进行充电，并更新充电坪的状态。在所有无人机选择完毕后，将所有队列逆向排序，更新各个无人机的开始充电时间，得到每个充电坪上无人机的充电序列。

#### 算法 2：UCSA

**输入：**待充电无人机集合  $F$ 、充电坪集合  $M$ 、无人机充电量  $B^{\max} - B_k^{\text{rc}}$ 、无人机到达时间  $t_k$ 、充电坪功率  $p_l$

**输出：**无人机充电序列  $\Omega_l = (\omega_l(1), \omega_l(2), \dots, \omega_l(|F_l|))$ ，充电开始时间  $ST_{l,k}, \forall c_l \in M$

根据无人机到达时间非递增顺序排列，形成无人机队列  $F$ 。

**for each**  $c_l \in M$  **do**

$T_l^{\text{avail}} \leftarrow 0, \Omega_l \leftarrow \emptyset;$

**end for**

**for each**  $u_k \in F$  **do**

$c_l \leftarrow \underset{c_l \in M}{\text{argmin}} \left\{ T_l^{\text{avail}} + \frac{B^{\max} - B_k^{\text{rc}}}{p_l} + t_k \right\};$

将  $u_k$  加入  $\Omega_l$  队尾;

$$T_l^{\text{avail}} \leftarrow T_l^{\text{avail}} + \frac{B_k^{\text{max}} - B_k^{\text{re}}}{p_l};$$

end for

for each  $\Omega_l$  do

    将  $\Omega_l$  逆向排序;

    for each  $u_k \in \Omega_l$  do

$$ST_{l,k} \leftarrow \max\{T_l^{\text{avail}}, t_k\};$$

$$T_l^{\text{avail}} \leftarrow ST_{l,k} + \frac{B_k^{\text{max}} - B_k^{\text{re}}}{p_l};$$

    end for

end for

return  $\Omega_l, ST_{l,k}, \forall c_l \in M;$

### 3.3 算法分析

引理2: UCSA 的时间复杂度为  $O(flbf + fm)$ 。

证明: UCSA 由排序与两个 for 循环主导。其中, 排序需要  $O(flbf)$  的时间, 第 1 个 for 循环需要  $O(f)$  的时间, 第 2 个 for 循环需要  $O(fm)$  的时间, 因此, UCSA 总共所需的时间复杂度为  $O(flbf + fm)$ 。

定理4: UCSA 具备  $1 + a + \frac{\sqrt{4m - 4 + (1 - a)^2}}{2}$

的近似度, 其中  $a = \frac{t^{\text{max}}}{\max\{t^{\text{max}}, CT^{\text{max}}\}}, 0 \leq a \leq 1, t^{\text{max}}$

表示无人机到达时间的最大值,  $CT^{\text{max}}$  表示无人机充电时长的最大值,  $m$  为充电坪数量。

## 4 性能评估

### 4.1 仿真设置

通过选取南京鼓楼区的部分真实快递配送站位置数据进行仿真模拟。快递站点的位置如图 2 所示, 其中, 圆点表示快递站点, 星号标记表示快递中心。进一步地, 为了测试本文提出的算法在大规模场景中的性能, 随机产生样本进行了仿真数据集的大规模模拟实验, 将快递站点随机分布在一个  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的二维平面上。仿真参数设置<sup>[28]</sup>见表 2。本文将改变某些关键参数的值, 以评估算法的性能。每个测量值均为 100 个实例取平均所得。实验运行在配有锐龙 R7-4800HS2.90 GHz CPU, 16 GB 内存的 Windows 10 操作系统上。

### 4.2 无人机配送调度算法的性能评估

本文将提出的 UDSA 与以下 3 种算法进行了比较。

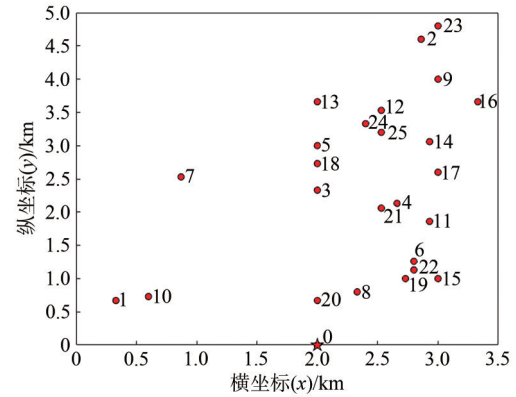


图2 南京鼓楼区部分快递站点分布位置信息

表2 仿真参数设置<sup>[28]</sup>

参数	真实数据集	仿真数据集
电池容量 $B^{\text{max}}$	48 Ah	48 Ah
载重容量 $Q^{\text{max}}$	10 kg	10 kg
单位时间飞行能耗 $\eta$	1 500 J/s	1 500 J/s
单位时间悬停卸载能耗 $\mu$	2 000 J/s	2 000 J/s
站点卸载量 $q_i$	[1, 3] kg	[1, 3] kg
站点卸载时间 $s_i$	(0,1] min	(0,1] min
快递站点数 $n$	25	200
无人机飞行速度 $u$	72 km/h	72 km/h
充电坪充电功率 $p_l$	[1 200, 1 300] W	[1 200, 1 300] W
充电坪个数 $m$	5	20

1) 最优配送算法 (OPTD, optimal solution for delivery)

无人机配送调度问题的最优解。枚举所有满足无人机能量和载重容量约束的可行配送回路方案, 选择能以最少无人机数量完成区域内所有配送任务的方案。

2) 贪婪算法 (GA, greedy algorithm)

对于每次迭代, 在满足无人机能量和载重容量约束的前提下, 贪心地选择覆盖完成最多配送任务的无人机配送回路, 然后将已配送的站点移除。直到所有站点被配送, 迭代终止。

3) 搜索优化算法 (SOA, search optimization algorithm)

根据文献<sup>[29]</sup>提出的一种局部搜索算法, 首先采用贪心的思想找到一个满足约束的无人机配送回路集合, 作为初始解, 然后采用列生成方法进行线性规划松弛, 对所获得的配送回路进行优化, 若是能找到以更少的无人机数量覆盖所有的站点的解, 则将当前解作为最优解且继续进行搜索优化, 否则停止算法获得局部最优解。

首先进行真实数据集的仿真模拟。真实数据集模拟中的无人机数量与无人机电池容量、无人机载重容量、快递站点数的关系如图3所示。由图3(a)可以看出，无人机的数量随着无人机电池容量的增加而减少，UDSA的无人机数量与OPTD相比，平均增加了OPTD的54.28%。由图3(b)可以看出，无人机的数量随着无人机载重容量的增加而减少，UDSA的无人机数量与OPTD相比，平均增加了OPTD的51.72%。由图3(c)可以看出，无人机的数量随着快递站点的数量增加而整体呈上升趋势，UDSA的无人机数量与OPTD相比，平均增加了OPTD的31.25%。因为当快递站点的数量较少时，一个无人机可以满足所有的配送需求，且对于同一个快递站点集合，两种算法以相同的方式确定配送方案。然而，当快递站点数量增加时，需要更多的无人机，UDSA只能得到近似解。

接着，在真实数据集上将快递站点数设置为25，其他参数设置为默认值，得到各算法在该地区进行无人机配送回路，如图4所示。可以看出，本文提出的算法优于其他对比算法。UDSA所需的配送无人机数量为6个，而SOA和GA所需的配送无人机数量分别为8个和10个。其中，数字0表示快

递中心，数字1~25表示需要配送的25个站点，不同颜色代表不同无人机的配送回路。

然后，本文进行了仿真数据集的大规模模拟来评估本文所提出的算法的可扩展性。大规模网络中的无人机数量与无人机电池容量、无人机载重容量、快递站点数的关系如图5所示，由图5(a)可以看出，3种算法的无人机数量都随着无人机电池容量的增加而整体呈下降趋势，这是因为当无人机电池容量增加时，无人机的续航得到提升，因此能以更少的无人机完成所有的站点配送任务。并且UDSA的性能主要取决于无根的带距离约束的车辆路由问题的近似解的性能，以及划分的具有相近能耗的站点集合的个数，这与定理2中给出的对UDSA的性能分析是一致的。由图5(b)可以看出，3种算法的无人机数量都随着无人机载重容量的增加而减少。这是因为无人机载重容量越大，在相同配送需求的情况下，所需要的无人机就越少。最后，通过将分布的快递站点从100个变化到400个，测试站点数量对算法性能的影响。由图5(c)可以看出，3种算法的无人机数量都随快递站点的增加而增加，这是因为配送需求越多，需要用于交付的无人机就越多。

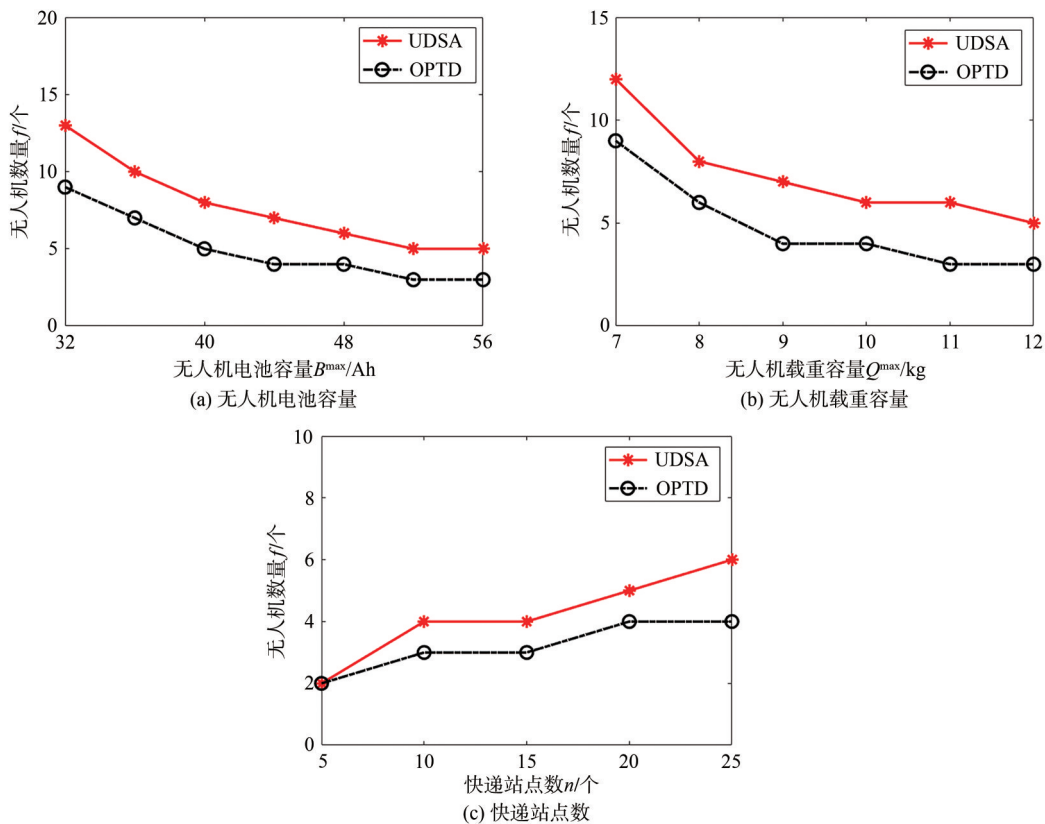


图3 真实数据集模拟中的无人机数量与无人机电池容量、无人机载重容量、快递站点数的关系

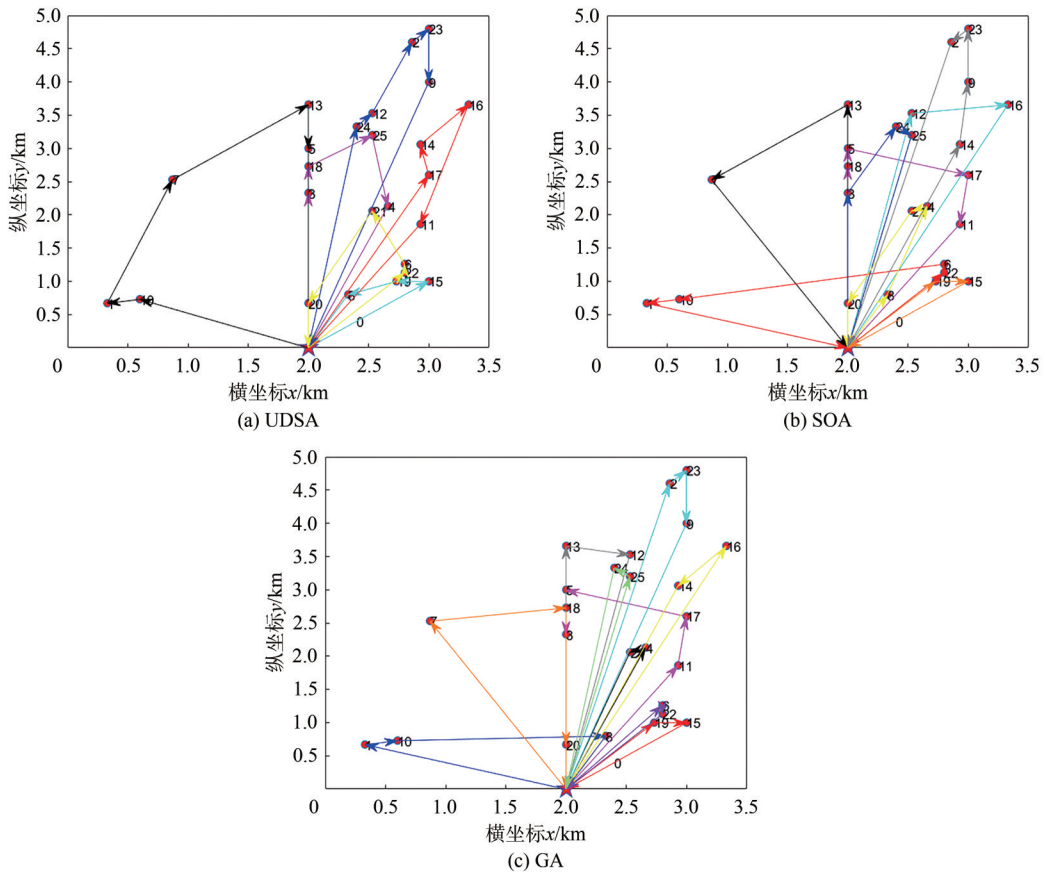


图4 无人机配送回路

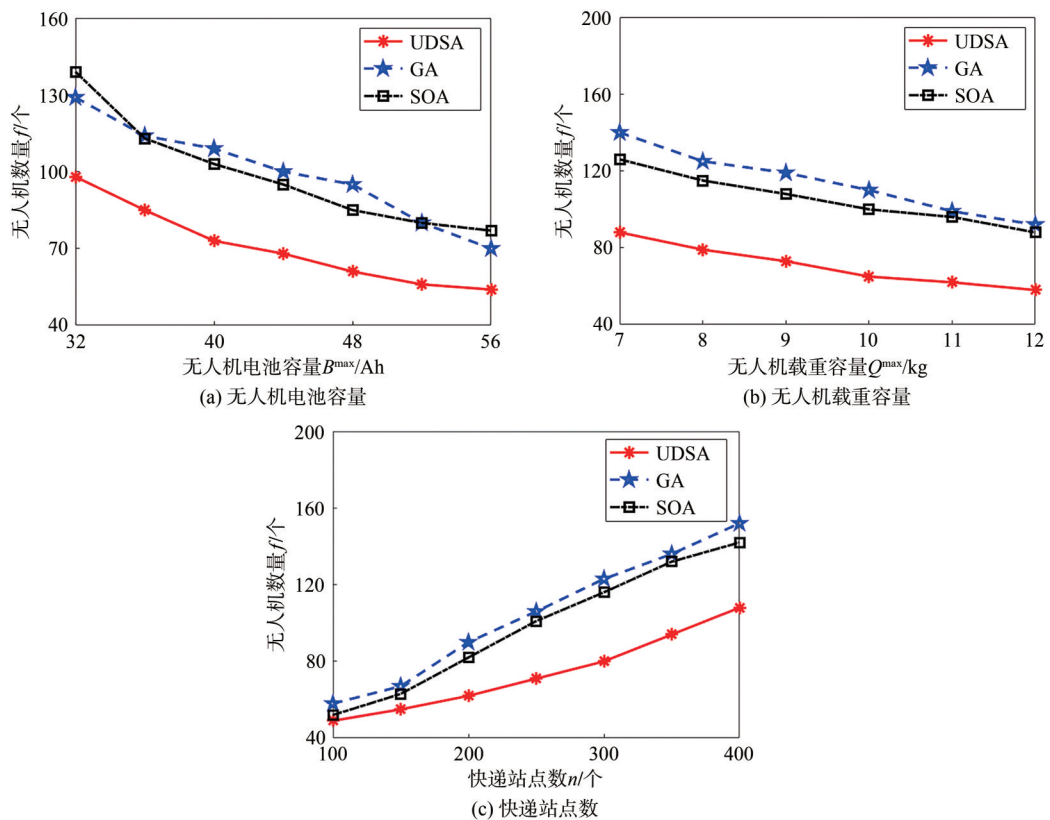


图5 仿真数据集模拟中的无人机数量与无人机电池容量、无人机电重容量、快递站点数的关系

从图5中可以看出, UDSA的解决方案始终优于GA和SOA。这是因为GA和SOA在进行配送调度时, 每次都是基于无人机的载重容量, 尽可能地选择能完成较多的配送任务, 由此在选择时未考虑下一个站点的距离, 因此有较大的能量消耗, 从而需要更多的无人机。

具体来说, 当无人机电池容量变化时, UDSA的无人机数量较GA平均减少了40.8%, 较SOA平均减少了38.8%。当无人机载重容量变化时, UDSA的无人机数量较GA平均减少了44.17%, 较SOA平均减少了41.53%。当快递站点数变化时, UDSA的无人机数量较GA平均减少了41.04%, 较SOA平均减少了32.56%。

最后, 测试本文提出的算法的运行时间。UDSA、OPTD、GA和SOA算法的运行时间如图6所示, 图6(a)显示了UDSA和OPTD算法在真实数据集中的运行时间, 图6(b)显示了UDSA、GA和SOA在仿真数据集的大规模模拟中的运行时间。从图6中可以看出, 本文提出的算法比OPTD算法所需的运行时间快得多, 当所需配送的快递站点数为25个时, OPTD算法的运行时间已经达到了1 770.64 s, 而本文提出的算法在快递站点数为300个时, 只需要4.96 s。

### 4.3 无人机充电调度算法的性能评估

本文将UCSA与以下算法进行对比。

1) 最优充电算法 (OPTC, optimal solution for charging)

无人机充电调度问题的最优解。枚举无人机充电调度问题的所有可行调度方案, 并选择能完成所有无人机充电且充电最大完成时间最短的方案。

2) 贪婪充电算法 (GAC, greedy algorithm for charging)

对于每次迭代, 先对到达的无人机根据所需充

电时长进行排序, 然后无人机选择当前最先空闲的充电桩进行充电, 无人机完成充电任务后移出队列, 直到所有的无人机完成充电任务, 迭代终止。

3) 列表调度充电算法 (LSAC, list schedule algorithm for charging)

根据文献[30]提出的具有不同释放时间的作业调度的离线算法, 取无人机到达时间和充电桩空闲的较大值作为无人机开始充电时间, 不断将到达的无人机分配到空闲的充电桩处进行充电, 直到所有的无人机完成充电任务。

首先, 在真实数据集模拟中将本文提出的算法与OPTC算法进行了比较。真实数据集中的无人机充电最大完成时间与充电桩数量、充电桩功率的关系如图7所示, 由图7(a)可以看出, 无人机的最大充电完成时间随着充电桩数量的增加而整体呈下降趋势。UCSA与OPTC算法相比, 平均增加了OPTC算法的4.23%, 但随着充电桩数量的增加, 两种算法的结果趋于相同。这是因为当应用于小规模区域配送的无人机数量不变, 快递中心的充电桩数量增加时, 使得充电桩数量大于无人机数量, 因此每个无人机都有独立的充电桩进行充电, 无须进行调度, 此时本文提出的算法得到的结果等于OPTC算法。由图7(b)可以看出, 无人机的最大充电完成时间随着充电桩功率的增加而减少。UCSA与OPTC算法相比, 平均增加了OPTC算法的15.24%。这是因为当充电桩功率增加时, 无人机的充电时间会相应缩短, 所以所有无人机的充电完成时间也会缩短。

然后进行仿真数据集的大规模模拟来评估本文所提出的算法的性能。大规模网络中的无人机充电最大完成时间与无人机电池容量、无人机的载重容量、快递站点数、充电桩功率、充电桩数量的关系如图8所示, 可以看出, UCSA的性能始终优于

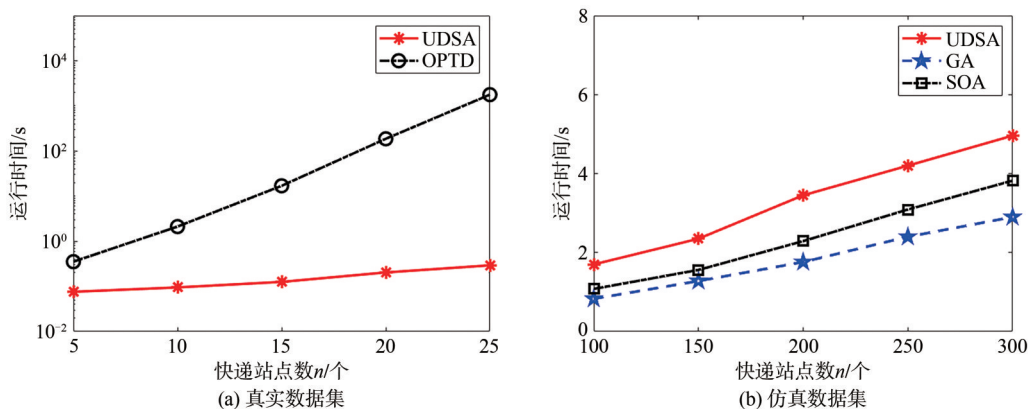


图6 UDSA、OPTD、GA和SOA算法的运行时间

GAC和LSAC。由图8(a)可以看出,3种算法的最大完成时间随着无人机电池容量的增加而整体呈上升趋势但略有抖动,这是因为随着无人机电池容量的增加,无人机所需的充电时长也会随之增加,而抖动的出现是因为与第一阶段所得的无人机数量的变化以及取随机样本有关。具体来说,UCSA的最大完成时间较GAC平均减少了16.10%,较LSAC平均减少了13.15%;由图8(b)可以看出,3种算法的最大完成时间随着无人机电载容量的增加而整体呈下降趋势,这是因为当无人机电载容量增加时,需要用于配送的无人机数量会减少,相应的最大完

成时间也会有所减少。UCSA的性能始终优于GAC和LSAC。具体来说,UCSA的最大完成时间较GAC平均减少了16.12%,较LSAC平均减少了15.52%。由图8(c)可以看出,3种算法的最大完成时间随着快递站点数的增加而增加,这是因为无人机配送需求增加所需的无人机数量增多,从而无人机充电需求也有所增加。UCSA的性能优于GAC和LSAC。具体来说,UCSA的最大完成时间较GAC平均减少了13.48%,较LSAC平均减少了11.66%。

由图8(d)可以看出,将充电坪功率从[800,900]W变化到[1400,1500]W,UCSA、GAC和LSAC的

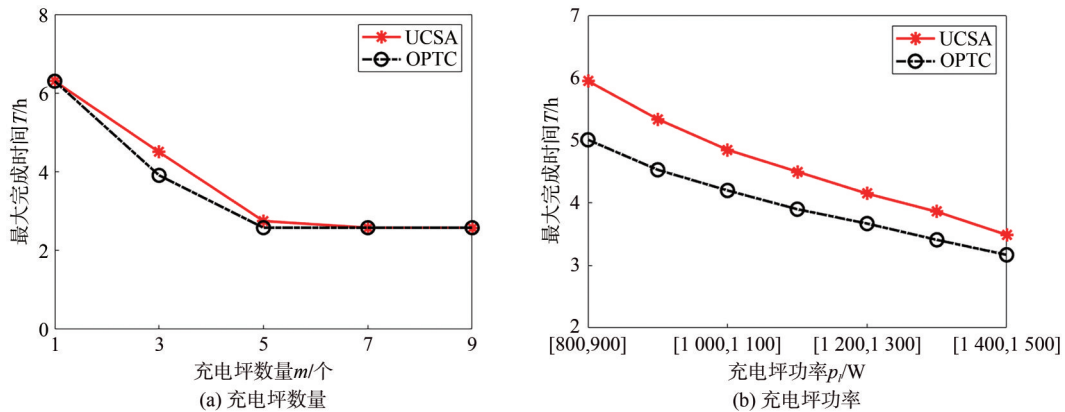


图7 真实数据集模拟中的无人机充电最大完成时间与充电坪数量、充电坪功率的关系

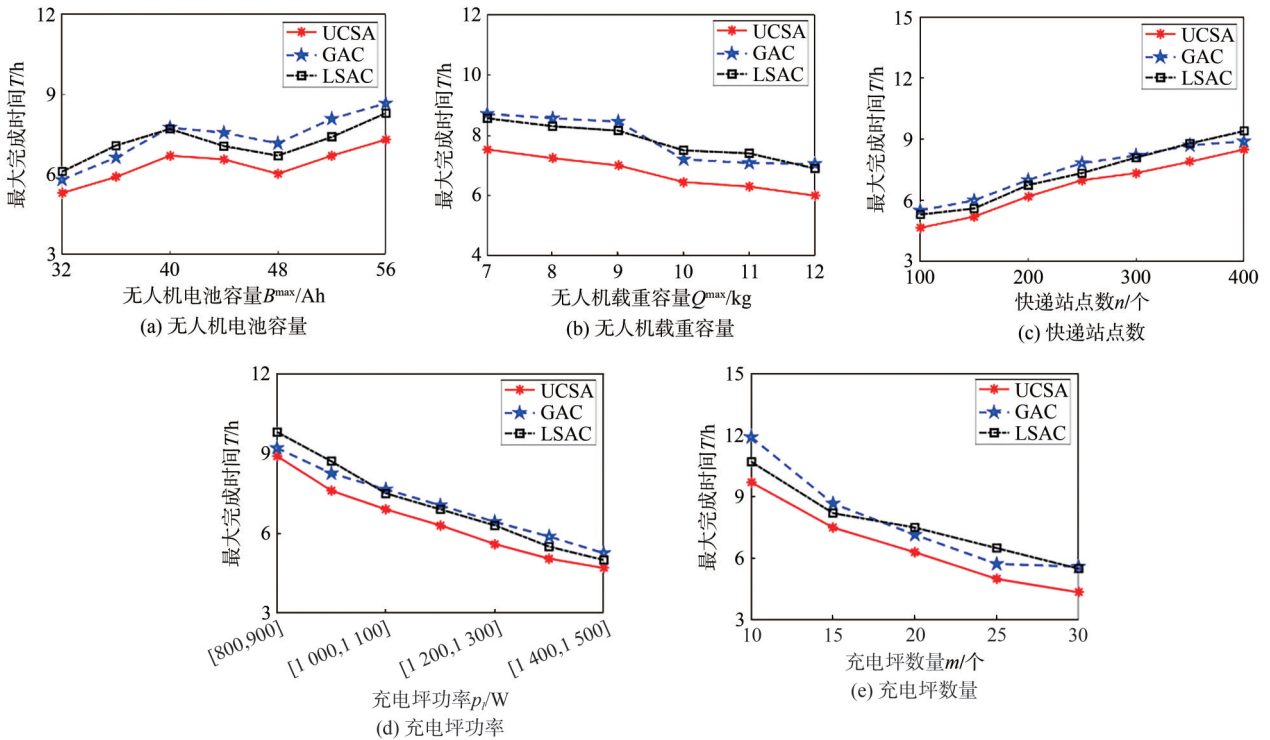


图8 仿真数据集模拟中的无人机充电最大完成时间与无人机电池容量、无人机电载容量、快递站点数、充电坪功率、充电坪数量的关系

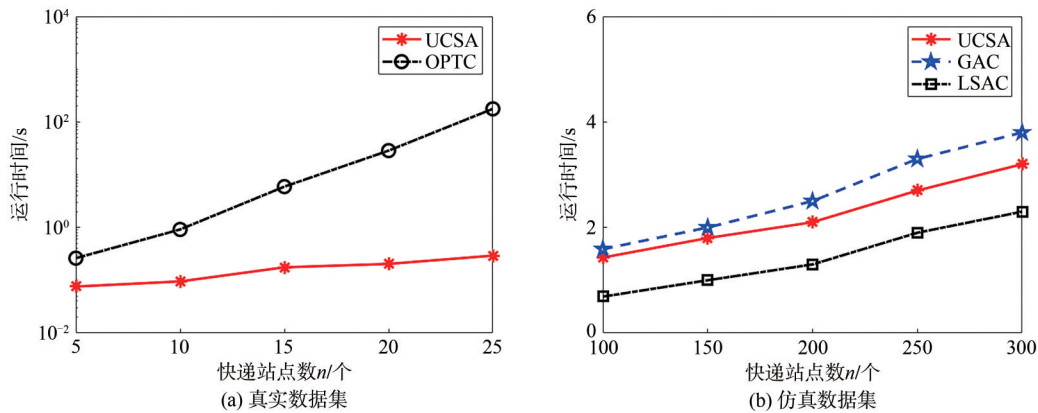


图9 UCSA、OPTC、GAC和LSAC算法的运行时间

最大充电完成时间均随着充电功率的增加而降低。这是因为当充电功率增长时，无人机所需的充电时间变短，因此整体的最大充电完成时会降低。具体来说，UCSA的最大完成时间较GAC平均减少了14.37%，较LSAC平均减少了12.32%。由图8(e)可以看出，将充电桩个数从10变化到30，UCSA、GAC和LSAC的最大充电完成时间均随着充电桩个数的增加而降低。这是因为当充电桩数量增多时，到达电站的无人机有更多的空闲充电桩进行选择，因此整体的最大充电完成时间降低。可以看出，UCSA的性能明显优于基准测试算法，这是因为GAC和LSAC总是直接将到达的无人机分配给当前最先空闲的充电桩，而忽略了不同无人机充电时长的影响。具体来说，UCSA的最大完成时间较GAC平均减少了18.87%，较LSAC平均减少了16.89%。

最后，测试本文提出的算法的运行时间，UCSA、OPTC、GAC和LSAC算法的运行时间如图9所示。图9(a)显示了UCSA和OPTC算法在真实数据集模拟中的运行时间，图9(b)显示了UCSA、GAC和LSAC算法在仿真数据集的大规模模拟中的运行时间，可以看出，当快递站点数量增加时，3种算法的运行时间都随之快速增加。3种算法的本质都是贪心算法，其中，GAC的平均运行时间与UCSA的平均运行时间较为接近，这是因为两者都有排序的过程。从图9中可以看出，本文提出的算法比OPTC算法所需的运行时间快得多。当所需配送的快递站点数为25个时，OPTC算法已经达到了187.01 s，而所提算法在快递站点数为300个时，只需要3.2 s。

## 5 结束语

本文提出了一种能量自维持的多无人机协同配送系统模型，从两个阶段来求解无人机的配送和充

电调度问题。首先提出了带有无人机能量和载重容量约束的最少无人机配送调度问题，提出了具有 $6\left(\ln\frac{B^{\max}}{B^{\max}-2A+2}+1\right)+8$ 近似度的近似算法进行求解。广泛的仿真实验结果表明，与基准算法相比，该算法最多可减少44.17%的无人机数量。本文提出了具有不同到达时间的无人机充电调度问题，使用了一个具有 $1+a+\frac{\sqrt{4m-4+(1-a)^2}}{2}$ 近似度的算法来解决该问题。仿真实验结果表明，与基准算法相比，该算法最多可减少18.87%的无人机最大充电完成时间。

## 参考文献：

- [1] HUDSON N, CHAPMAN P, RAMACHANDRAN R. Global express and small parcels[EB]. 2022.
- [2] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone[J]. SSRN Electronic Journal, 2015.
- [3] GLASER A. Watch Amazon's prime air make its first public U.S. drone delivery[EB]. 2017.
- [4] GROTHAUS M. This is how Google's project wing drone delivery service could work[EB]. 2022.
- [5] 正北方网. 京东物流智能配送机器人在内蒙古送出首单[EB]. 2018.  
North News. JD logistics intelligent delivery robot delivers first order in inner mongolia[EB]. 2018.
- [6] 中通研究院. “末端+支线”无人机运营场景成本分析[EB]. 2022.  
Zhongtong Research Institute. Cost analysis of “terminal+branch” UAV operation scenario[EB]. 2022.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MOURELO FERRANDEZ 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.
- [10] POIKONEN S, GOLDEN B. Multi-visit drone routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2020(113): 104802.
- [11] ROBERTI R, RUTHMAIR M. Exact methods for the traveling salesman problem with drone[J]. Transportation Science, 2021, 55(2): 315-335.
- [12] 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.
- [13] ERMAĞAN U, YILDIZ B, SALMAN F S. A learning based algorithm for drone routing[J]. Computers & Operations Research, 2022, 137: 105524.
- [14] GU Q C, FAN T J, PAN F, et al. A vehicle-UAV operation scheme for instant delivery[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 149: 106809.
- [15] GENTILI M, MIRHCANDANI P B, AGNETIS A, et al. Locating platforms and scheduling a fleet of drones for emergency delivery of perishable items[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 168: 108057.
- [16] 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.
- [17] CHENG C, ADULYASAK Y, ROUSSEAU L M. Drone routing with energy function: formulation and exact algorithm[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 139: 364-387.
- [18] CHOI Y, SCHONFELD P. Optimization of multi-package drone deliveries considering battery capacity[C]. Transportation Research Board 97th Annual Meeting, [S.l.:s.n.], 2017
- [19] SONG B D, PARK K, KIM J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 120: 418-428.
- [20] TAKICI E. Solving location and routing problem for UAVs[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 102: 294-301.
- [21] SHI Y H, LIN Y, LI B, et al. A bi-objective optimization model for the medical supplies' simultaneous pickup and delivery with drones[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 171: 108389.
- [22] DJI. Spreading wings s900[EB]. 2022.
- [23] FLYNT J. How much weight can a drone carry?[EB]. 2017.
- [24] BAZGAN C, HASSIN R, JERME M. Approximation algorithms for some vehicle routing problems[J]. Discrete Applied Mathematics, 2005, 146(1): 27-42.
- [25] KOULAMAS C, KYPARISIS G J. Makespan minimization on uniform parallel machines with release times[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 157(1): 262-266.
- [26] ARKIN E M, HASSIN R, LEVIN A. Approximations for minimum and Min-max vehicle routing problems[J]. Journal of Algo-

rithms, 2006, 59(1): 1-18.

- [27] HOFRI M. A probabilistic analysis of the Next-Fit Bin packing algorithm[J]. Journal of Algorithms, 1984, 5(4): 547-556.
- [28] ZONKE IED. SF ARK 40[EB]. 2023.
- [29] CAVALIERE F, BENDOTTI E, FISCHETTI M. An integrated local-search/set-partitioning refinement heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem[J]. Mathematical Programming Computation, 2022, 14(4): 749-779.
- [30] LI R, HUANG H C. On-line scheduling for jobs with arbitrary release times[J]. Computing, 2004, 73(1): 79-97.

### [作者简介]



徐佳(1980-), 男, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为群智感知、无线充电、边缘计算和区块链等。



袁鸣(1997-), 女, 南京邮电大学计算机学院硕士生, 主要研究方向为路径规划和无线充电。



吴思徐(1997-), 男, 南京邮电大学计算机学院博士生, 主要研究方向为无线充电传感器网络。



谭芯(1998-), 女, 南京邮电大学计算机学院硕士生, 主要研究方向为边缘计算。



骆健(1976-), 女, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为数据挖掘和机器学习。