

【交通物流 / Transportation Logistics】

## 区域限制下卡车-无人机联合配送多目标优化

李雨辰, 牟海波, 袁梦, 柴获

兰州交通大学交通运输学院, 甘肃兰州 730070

**摘要:** 针对城市末端物流“最后一公里”成本居高不下、客户价值低以及区域限制造成物流不畅等问题, 以客户价值和客户满意度作为衡量因素, 提出区域限制下无人机可在一架次内访问多位客户的卡车-无人机联合配送模式. 结合客户时间窗、车辆载重、无人机的载重及续航限制等约束条件, 建立以成本最小、客户价值及客户满意度最大化为目标的多目标无人机-卡车联合配送路径优化模型. 根据模型特点, 设计改进第3代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)求解模型, 并采用经典Sioux-Falls交通网络及Eastern-Massachusetts路网中选取的大、中及小算例模型, 验证算法和模型的有效性. 结果表明, 在有效解决限制区的情况下, 考虑客户价值和客户满意度虽然使成本增加了约6.95%, 但客户价值和客户满意度大幅提高, 分别增加了37.52%和13.1%, 对于企业保持优质客户和提高客户忠诚度非常有利, 有助于企业实现可持续发展.

**关键词:** 交通运输规划与管理; 车辆路径问题; 联合配送; 区域限制; 客户价值; 客户满意度; 改进NSGA-III

中图分类号: U121; O221.6

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.02205

## Multi-objective optimization of truck-drone joint delivery with restricted areas

LI Yuchen, MU Haibo, YUAN Meng, and CHAI Huo

School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

**Abstract:** Aiming at the problems of "last mile" cost, low customer value, and poor logistics due to regional restrictions, a truck-drone joint delivery model is proposed, which takes customer value and customer satisfaction as measurement factors under regional restrictions, in which drones can visit multiple customers in one flight. Combined with the constraints such as customer time window, unmanned aerial vehicle (UAV) load and endurance limit, vehicle load, etc., a multi-objective truck-drone joint distribution route optimization mathematical model is established to minimize cost, maximize customer value and customer satisfaction. According to the characteristics of the model, an improved non-dominated sorting genetic algorithm III (NSGA-III) is designed to solve the model, and the effectiveness of the algorithm and model is verified by using large, medium and small calculation models selected from the classical Sioux-Falls traffic network and Eastern-Massachusetts road network. The results show that considering customer value and customer satisfaction increases the cost by about 6.95%, but customer value and customer satisfaction increase significantly by 37.52% and 13.1%, respectively. This is very beneficial for enterprises to maintain quality customers and improve customer loyalty, and helps enterprises achieve sustainable development.

**Received:** 2024-05-10; **Accepted:** 2024-08-02; **Online (CNKI):** 2024-11-27

**Foundation:** National Natural Science Foundation of China (71961015, 61563029)

**Corresponding author:** Professor MU Haibo (mhbmam@mail.lzjtu.cn)

**Citation:** LI Yuchen, MU Haibo, YUAN Meng, et al. Multi-objective optimization of truck-drone joint delivery with restricted areas [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(2): 205-215. (in Chinese)



**Key words:** transportation planning and management; vehicle routing problem; joint distribution; regional restriction; customer value; customer satisfaction; improved NSGA-III

城市末端物流“最后一公里”成本居高不下,如何提高配送经济性一直是困扰物流业发展的难题之一. 无人机配送为优化“最后一公里”配送注入源头活水. Amazon、UPS、顺丰及京东等标杆企业纷纷开展无人机配送应用研究<sup>[1]</sup>. 无人机能够在空中直线运输货物,具有速度快和成本低的优点,但同时也存在载重小和航距短等局限. 采用无人机与卡车联合配送可有效避免这种局限性,然而,如何科学调配两种配送工具,实现配送成本最小化,是联合配送所面临的难题.

无人机协助包裹递送的旅行商问题(flying side-kick traveling salesman problem, FSTSP)由 MURRAY 等<sup>[2]</sup>于 2015 年提出以来受到学者广泛关注. AGATZ 等<sup>[3]</sup>将这类单卡车单无人机物流配送问题称为无人机旅行商问题(traveling salesman problem with drone, TSP-D). WANG 等<sup>[4]</sup>提出无人机车辆路径问题(vehicle routing problem with drones, VRP-D),将问题拓展至多卡车多无人机联合配送,对无人机-车辆配送模式及应用场景进行更深入研究,如 HAM<sup>[5]</sup>提出采用无人机进行取送货任务; NAJY 等<sup>[6]</sup>研究将卡车-无人机配送纳入库存路径问题,并提出一种精确的分支-切割求解方法;柳伍生等<sup>[7]</sup>提出一种以无人机为主导的新型“无人机-车辆”联合配送模式,并为其设计 3 种适配的配送场景以验证模型有效性;李妍峰等<sup>[8]</sup>考虑客户需求的不均衡性,提出需求可拆分的无人机与卡车分区域联合配送路径问题;范厚明等<sup>[9]</sup>结合低碳这一大趋势,提出电动车-无人机联合配送,并建立基于实时交通路网信息的多中心车辆-无人机联合配送路径优化模型;马华伟等<sup>[10]</sup>结合疫情防疫需求,以最短配送时间为优化目标,建立车机协同分区配送规划模型,提升防疫物资配送效率.

道路封锁和空域禁飞是常见的城市交通限行措施,虽然这些措施有益于城市交通减负,但为卡车和无人机联合配送带来了巨大挑战. 针对这一问题,颜瑞等<sup>[11]</sup>构建区域限制条件下卡车搭载无人机车辆路径规划模型,并提出一种结合最短路径算法和禁忌搜索算法的混合算法,展现出高效的计算性能;杨雷博等<sup>[12]</sup>构建以最小配送时间为目标的一车多无人机联合配送双层规划模型,在妥善处理区域限制挑战的前提下,显著提升了末端物流配送效

率;王少华<sup>[13]</sup>针对城市末端物流配送,考虑区域限制和多车型等现实问题,构建卡车与无人机协同配送模式,有效提升配送效率、增强客户满意度.

随着经济发展和企业同质化加剧,市场竞争愈发激烈. 物流企业想要脱颖而出,客户关系管理变得日益重要,其中,客户价值和客户满意度尤为关键. 依据帕累托定律,识别高价值客户并优化资源配置可提升企业效益. 同时,客户满意度决定客户是否再合作. 为此,徐杰<sup>[14]</sup>提出基于客户价值的城市冷链物流时变路径模型,以降低运营成本、增强客户满意度;刘俊刚<sup>[15]</sup>提出考虑客户价值及软时间窗的车辆路径问题,并建立以客户价值最大和运输成本最小为目标的多目标优化模型,该模型能自主寻找总体成本最低的最佳路径,确保高价值客户需求在最佳时间窗内送达;刘秋萍<sup>[16]</sup>通过客户价值和配送时间敏感度对配送客户进行优先等级分类,设置不同时间窗约束,优化冷链物流路径,从而达到提升满意度和降低成本的目的;季琳琳等<sup>[17]</sup>构建以成本与满意度为双目标的冷链水果运输模型;户佐安等<sup>[18]</sup>考虑客户时间窗和货物完好性,建立以客户满意度最大和运输成本最小为目标的优化模型.

关于卡车-无人机联合配送已有诸多研究成果,为区域限制条件下联合配送路径优化问题的研究奠定良好基础,但也存在一定局限性:①多采用 1 架次无人机访问 1 位客户的模式,尚未充分发挥出无人机的运载性能;②未考虑客户价值以及客户满意度,忽略了客户忠诚度及优质客户对企业后续发展的重要作用. 因此,本研究设计一种将客户价值和客户满意度作为衡量因素,在限制区域下无人机在单次配送时可访问多位客户的卡车-无人机联合配送模式,并根据模型特点设计自适应大邻域搜索(adaptive large neighborhood search, ALNS)算法和第 3 代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)相结合的改进 NSGA-III 求解模型.

## 1 问题描述与模型

### 1.1 问题描述

本研究基于区域限制、客户价值及客户满意度考虑无人机与卡车联合配送问题. 将客户配送区域

划分为限行区、禁飞区及普通区3种类型, 并假设卡车禁止在限行区内行驶, 无人机禁止在禁飞区内飞行, 普通区为卡车及无人机都可进行配送的区域. 对于普通区顾客点, 当需求重量超过无人机载重量时, 采用卡车配送. 同时, 不考虑限行区内客户需求超过无人机载重量及里程限制的情况.

本研究的联合配送问题可描述为: 路网中有1个配送中心为客户提供配送服务, 卡车与无人机一对一匹配组成卡车机组, 在满足区域限制和运载工具自身限制的条件下, 卡车机组从配送中心出发对各自的客户点展开配送服务. 卡车在途中作为无人机收发平台承担无人机的接收任务, 完成配送服务后与无人机一起回到中心. 在不超过无人机载重量及续航里程情况下, 无人机可在1架次内对多个客户点进行访问. 为更好构建数学模型, 做如下假设: ① 配送中心及客户的位置和需求已知; ② 配送中心有数量充足且型号功能相同的卡车和无人机; ③ 无人机的载重及续航限制已知; ④ 随车无人机只能从其搭载的车辆出发和回收; ⑤ 无人机在车辆上的起降必须在客户点进行; ⑥ 每个顾客只能访问1次.

1.2 符号说明

将问题定义在无向图  $G = (N, A)$  上, 其中,  $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$  为节点集合, 包含配送中心  $\{0\}$  以及客户节点  $N_C$ ;  $A = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$  为弧集. 由于区域限制的存在, 将客户节点划分为禁飞区  $N_{CH}$ 、限行区  $N_{CD}$  以及普通区  $N_{CP}$ . 本研究中的符号及其意义见表1.

表1 符号及定义

Table 1 Symbols and the corresponding definitions

符号类型	符号	定义
集合	$N_H$	卡车可访问节点集合, $N_H \subset \{N_{CH} \cup N_{CP} \cup \{0\}\}$
	$N_D$	无人机可访问客户点集合, $N_D \subset \{N_{CD} \cup N_{CP}\}$
	$N_S$	无人机起飞点集合, $N_S \subset N_{CP}$
	$N_E$	无人机降落点集合, $N_E \subset N_{CP}$
	$N_{CT}$	普通区内客户需求超过无人机载重限制的客户节点集合, $N_{CT} \subset N_{CP}$
	$K_H$	卡车集合, $K_H = \{1, 2, 3, \dots, k\}$
	$K_D$	无人机集合, $K_D = \{1, 2, 3, \dots, k'\}$
	$R$	无人机 $k'$ 的架次集合 $R = \{1, 2, 3, \dots, r\}$
参数	$f_1$	卡车单位距离行驶成本

续表1

符号类型	符号	定义
	$f_2$	无人机单位距离飞行成本
	$d_{ij}$	卡车从节点 $i$ 行驶到节点 $j$ 的距离
	$l_{ij}$	无人机从节点 $i$ 飞行到节点 $j$ 的距离
	$a$	单辆卡车固定成本
	$b$	单架无人机固定成本
$\alpha, \beta$		违反客户时间窗的早到惩罚成本系数及延迟惩罚成本系数
	$Q_H$	卡车最大载重
	$Q_D$	无人机最大载重
	$q_i$	节点 $i$ 的需求量
	$v^k$	卡车 $k$ 的平均行驶速度
	$v^{k'}$	无人机 $k'$ 的平均行驶速度
	$t_i^s$	节点 $i$ 所需的服务时间
	$t_i^k$	卡车 $k$ 到达节点 $i$ 的时间
	$t_i^{k'}$	无人机 $k'$ 到达节点 $i$ 的时间
	$t_0$	卡车 $k$ 搭载无人机 $k'$ 驶出配送中心的时间
	$t_i$	卡车 $k$ 或无人机 $k'$ 到达节点 $i$ 的时间 ( $t_i \subset \{t_i^k, t_i^{k'}\}$ )
	$B$	无人机最大续航能力
	$[e_i, l_i]$	节点 $i$ 最佳时间窗
	$[E_i, L_i]$	节点 $i$ 可容忍时间窗
	$\lambda$	单位产品利润
	$\eta_i$	节点 $i$ 激发的潜在客户数量
	$pr_i$	节点 $i$ 的重要程度
	$\zeta_0$	信息传播强度
	$\zeta$	信息传播深度
	$\ell_i$	节点 $i$ 的口碑影响范围
	$M$	1个很大的正数
	$g_0$	客户当前价值阈值
	$v_0$	客户潜在价值阈值
决策变量	$x_{ij}^k$	0-1变量, 若卡车 $k$ 从节点 $i$ 行驶到节点 $j$ , $x_{ij}^k = 1$ ; 否则 $x_{ij}^k = 0$
	$y_{ij}^{k'r}$	0-1变量, 若无人机 $k'$ 的第 $r$ 架次从节点 $i$ 飞行到节点 $j$ , $y_{ij}^{k'r} = 1$ ; 否则 $y_{ij}^{k'r} = 0$
辅助决策变量	$g_{ij}^k$	0-1变量, 卡车从点 $i$ 到点 $j$ 的行驶路径未经过限行区, $g_{ij}^k = 1$ ; 否则 $g_{ij}^k = 0$
	$g_{ij}^{k'}$	0-1变量, 无人机从点 $i$ 到点 $j$ 的飞行路径未经过禁飞区, $g_{ij}^{k'} = 1$ ; 否则 $g_{ij}^{k'} = 0$
	$h_i^k$	0-1变量, 若客户点 $i$ 由卡车 $k$ 服务, $h_i^k = 1$ ; 否则 $h_i^k = 0$
	$d_i^{k'}$	0-1变量, 若客户点 $i$ 由无人机 $k'$ 服务, $d_i^{k'} = 1$ ; 否则 $d_i^{k'} = 0$

### 1.3 区域限制分析

区域限制主要包括道路限行和空域禁飞, 根据区域限制规则将客户配送区域划分为限行区、禁飞区以及普通区 3 种类型. 限制区域下卡车-无人机联合配送模式如图 1.

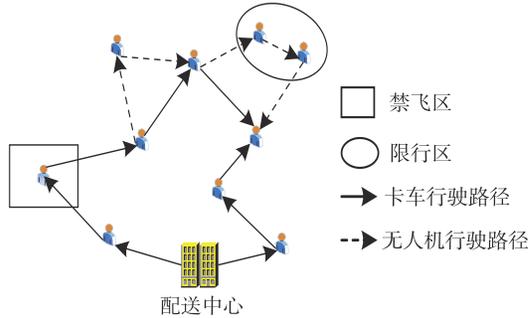


图 1 限制区域下卡车-无人机联合配送模式

Fig. 1 (Color online) Truck-drone joint delivery mode with restricted areas.

由于存在限制区域, 不能将卡车及无人机的行驶路径简单地看作是直线相连的虚拟路径, 而直接采用欧式距离计算路径距离. 本研究采用混合距离计算方法确保配送路径的合理和有效: 对于卡车路径, 考虑到卡车需依托于实际路网完成配送, 故采用 Floyd 算法计算卡车避开限行区后的最短路径; 对于无人机路径, 先采用欧式距离初步估算两个客户点之间的距离, 若路径上存在禁飞区, 则利用人工势场法生成避开禁飞区的路径重新计算路径距离. 通过这种交替计算的方法, 最终完成无人机路径距离的计算.

### 1.4 客户满意度分析

通过改进灰色白化权函数来刻画客户满意度<sup>[19]</sup>. 客户时间窗及产品质量是衡量客户满意度的重要指标, 将各指标分为优、良及差 3 个灰类等级, 明确各灰类分别对应的白化权函数. 提高客户满意度属于优灰类(高满意度)的概率有利于增加客户黏性. 利用改进灰度白化权函数计算节点  $i (i \in N_c)$  的各指标属于优灰的概率  $f_i^\delta(x_i^\delta)$ <sup>[17]</sup>

$$f_i^\delta(x_i^\delta) = \begin{cases} 1, x_i^\delta \in (0, \varphi^\delta(1)) \\ \sin\left[\frac{\varphi^\delta(2) - x_i^\delta}{\varphi^\delta(2) - \varphi^\delta(1)} \times \frac{\pi}{2}\right], x_i^\delta \in [\varphi^\delta(1), \varphi^\delta(2)] \\ 0, x_i^\delta \in (\varphi^\delta(2), \infty) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_i^\delta (\delta = 1, 2, 3)$  中  $x_i^1$  为早于节点  $i$  最佳时间窗到达时间,  $x_i^2$  为迟于节点  $i$  最佳时间窗到达时间,

$x_i^3$  为货损程度;  $\varphi^\delta(1)$ 、 $\varphi^\delta(2)$  及  $\varphi^\delta(3)$  分别为优、良及差 3 个灰类等级转折的阈值, 由实地调研获得.

为避免早到、晚到及货损程度量纲不同对满意度造成影响, 对阈值进行无量纲化处理, 即

$$\phi^\delta = \frac{\varphi^\delta(1)}{\varphi^\delta(1) + \varphi^\delta(2) + \varphi^\delta(3)}, \delta = 1, 2, 3 \quad (2)$$

通过  $\phi^\delta$  构造各指标隶属于优灰类的权重值  $\psi^\delta$ , 即

$$\psi^\delta = \frac{\phi^\delta}{\phi^1 + \phi^2 + \phi^3} \quad (3)$$

因此, 当车辆  $k$  或无人机  $k'$  为客户配送包裹时, 节点  $i$  的总满意度得分为

$$M_i = \begin{cases} f_i^1(e_i - t_i)\psi^1 + \psi^2 + f_i^3(x_i^3)\psi^3, t_i \in [E_i, e_i] \\ \psi^1 + \psi^2 + f_i^3(x_i^3)\psi^3, t_i \in [e_i, l_i] \\ \psi^1 + f_i^2(t_i - l_i)\psi^2 + f_i^3(x_i^3)\psi^3, t_i \in (l_i, L_i] \\ f_i^3(x_i^3)\psi^3, t_i \notin [E_i, L_i] \end{cases} \quad (4)$$

货损程度为

$$x_i^3 = c(t_i - t_0) \quad (5)$$

其中,  $c$  为所配送货物单位时间内的货损系数.

### 1.5 客户价值分析

客户价值包括当前价值和潜在价值, 当前价值  $g_i$  与客户的需求量  $q_i$  相关, 计算为<sup>[20]</sup>

$$g_i = \frac{q_i}{\sum_{i \in N_c} q_i} q_i \lambda \quad (6)$$

其中,  $\frac{q_i}{\sum_{i \in N_c} q_i}$  为客户需求量的比例系数.

客户的潜在价值主要受企业经营能力、企业声誉以及客户未来购买行为等因素影响. 其中, 企业声誉的提升对客户潜在价值影响最为显著. 为简化计算难度, 本研究仅用企业声誉增值来表示客户对于企业的潜在价值. 根据已有的口碑传播模型评估客户正面口碑传播所带来的潜在效益. 客户的潜在价值  $v_i$  为

$$v_i = p_i \eta_i q_i \lambda \quad (7)$$

其中,  $p_i$  为节点  $i$  的满意度评价价值, 当到达时间  $t_i \in [e_i, l_i]$ 、货损程度  $x_i^3 \leq \varphi^3(1)$  时,  $p_i = 1$ ; 否则  $p_i = 0$ . 由于  $\eta_i = \zeta_0 pr_i \zeta \ell_i$ , 式(7)可改写为

$$v_i = p_i \zeta_0 pr_i \zeta \ell_i q_i \lambda \quad (8)$$

客户价值为当前价值与潜在价值之和, 即

$$S_i = W_i (g_i + v_i) \quad (9)$$

其中,  $W_i$  为客户权重, 权重越高表示客户的重要性

越大. 优先服务权重较高的客户会提升优质客户对企业的信赖度, 有益于企业后续发展经营.

### 1.6 模型建立

综合考虑联合配送过程中的运输成本、固定成本以及时间惩罚成本, 建立以总成本最小和客户满意度与客户价值最大为目标的多目标优化模型.

运输成本由卡车在运输中产生的成本及无人机的飞行成本组成, 即

$$Z_1 = f_1 \sum_{i \in N_H} \sum_{j \in N_H} \sum_{k \in K_H} x_{ij}^k d_{ij} + f_2 \sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_D} \sum_{r \in R} \sum_{k' \in K_D} y_{ij}^{k'r} l_{ij} \quad (10)$$

固定成本主要包括无人机的机身使用成本及卡车的启动成本, 即

$$Z_2 = a \sum_{j \in N_H} \sum_{k \in K_H} x_{0j}^k + b \sum_{j \in N_D} \sum_{r \in R} \sum_{k' \in K_D} y_{ij}^{k'r} \quad (11)$$

时间惩罚成本为未在客户规定时间窗 $[e_i, l_i]$ 内送达包裹出现的惩罚成本, 包括早到等候成本及迟到惩罚成本. 计算公式为

$$Z_3 = \sum_{i \in N_C} \sum_{k \in K_H} \left[ \alpha \max(e_i - \max(t_i^k, t_i^{k'}), 0) + \beta \max(\max(t_i^k, t_i^{k'}) - l_i, 0) \right] \quad (12)$$

考虑前述目标及约束条件, 得到模型为

$$\min T_1 = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (13)$$

$$\max T_2 = \sum_{i \in N_C} M_i \quad (14)$$

$$\max T_3 = \sum_{i \in N_C} S_i \quad (15)$$

s. t.

$$\sum_{i \in N_D} \sum_{k' \in K_D} \sum_{r \in R} y_{ij}^{k'r} = 1, \forall j \in N_{CD} \quad (16)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ij}^k = 0, \forall i, j \in N_{CD} \quad (17)$$

$$x_{ij}^k \leq g_{ij}^k, \forall i \in N_C, \forall j \in N_C, \forall k \in K_H \quad (18)$$

$$\sum_{i \in N_H} \sum_{k \in K_H} x_{ij}^k = 1, \forall j \in N_{CH} \quad (19)$$

$$\sum_{i \neq j} y_{ij}^{k'r} = 0, \forall i, j \in N_{CH} \quad (20)$$

$$y_{ij}^{k'r} \leq g_{ij}^{k'}, \forall i \in N_C, \forall j \in N_C, \forall k' \in K_D, \forall r \in R \quad (21)$$

$$\sum_{i \in N_C} q_i h_i^k + \sum_{i \in N_C} q_i d_i^{k'} \leq Q_H, \forall k \in K_H, k' \in K_D \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_D} q_i d_i^{k'} y_{ij}^{k'r} \leq Q_D, \forall k' \in K_D, \forall r \in R \quad (23)$$

$$\sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_D} l_{ij} y_{ij}^{k'r} \leq B, \forall k' \in K_D, \forall r \in R \quad (24)$$

$$\sum_{i \in N_H} \sum_{k \in K_H} x_{ij}^k + \sum_{i \in N_D} \sum_{k' \in K_D} \sum_{r \in R} y_{ij}^{k'r} = 1, \forall j \in N_{CP} \quad (25)$$

$$\sum_{i \in N_D} y_{ij}^{k'r} = \sum_{i \in N_D} y_{ji}^{k'r} = 0, \quad (26)$$

$$\forall j \in N_{CT}, \forall r \in R, \forall k' \in K_D, i \neq j \quad (26)$$

$$\sum_{i \in N_H} x_{ij}^k = \sum_{i \in N_H} x_{ji}^k = 1, \forall j \in N_{CT}, \forall k \in K_H, i \neq j \quad (27)$$

$$\sum_{j \in N_H} x_{ij}^k = \sum_{j \in N_H} x_{0j}^k, \forall k \in K_H \quad (28)$$

$$\sum_{i \in N_H} x_{ij}^k = \sum_{m \in N_H} x_{jm}^k = h_j^k, \forall k \in K_H, \forall j \in N_H \quad (29)$$

$$\sum_{j \in N_D} y_{ij}^{k'r} = 1, \forall i \in N_S, \forall k' \in N_D, \forall r \in R \quad (30)$$

$$\sum_{i \in N_D} y_{ij}^{k'r} = 1, \forall j \in N_E, \forall k' \in N_D, \forall r \in R \quad (31)$$

$$\sum_{i \in N_D} y_{ij}^{k'r} = \sum_{m \in N_D} y_{jm}^{k'r} = d_i^{k'}, \quad (32)$$

$$\forall j \in N_D, \forall r \in R, \forall k' \in K_D, i \neq j \neq m \quad (32)$$

$$\sum_{j \in N_H} \sum_{k \in K_H} x_{ij}^k \geq \sum_{j \in N_D} \sum_{r \in R} \sum_{k' \in K_D} y_{ij}^{k'r}, \forall i \in N_S \quad (33)$$

$$\sum_{i \in N_H} \sum_{k \in K_H} x_{ij}^k \geq \sum_{i \in N_D} \sum_{r \in R} \sum_{k' \in K_D} y_{ij}^{k'r}, \forall j \in N_E \quad (34)$$

$$\sum_{i \in N_H} \sum_{j \in N_H} x_{ij}^k \leq \left(1 - \frac{1}{M}\right) \sum_{i \in N_H} h_i^k + 1, \forall k \in K_H \quad (35)$$

$$\sum_{i \in N_H} \sum_{j \in N_D} y_{ij}^{k'r} \leq \left(1 - \frac{1}{M}\right) \sum_{i \in N_H} d_i^{k'} + 1, \forall k' \in K_D \quad (36)$$

$$t_j^k \geq t_i^k + t_i^s + \frac{d_{ij}}{v^k}, \forall i, j \in N_H, k \in K_H \quad (37)$$

$$t_j^{k'} \geq t_i^{k'} + t_i^s + \frac{l_{ij}}{v^{k'}}, \forall i, j \in N_D, k' \in K_D \quad (38)$$

$$t_j^{k'} \geq t_i^k + t_i^s + \frac{l_{ij}}{v^{k'}}, \quad (38)$$

$$\forall i \in N_S, \forall j \in N_D, \forall k' \in K_D, \forall k \in K_H \quad (39)$$

其中, 式(13)–(15)为目标函数, 分别为最小成本、最大满意度及最大客户价值; 式(16)和(17)确保限行区只能由无人机配送, 禁止卡车驶入限行区; 式(18)控制卡车行驶路径不经过限行区; 式(19)和(20)确保禁飞区只能由卡车配送, 无人机在禁飞区禁止飞行; 式(21)控制无人机路径不经过禁飞区; 式(22)限制卡车载重; 式(23)限制无人机的重量; 式(24)为无人机航程限制; 式(25)表示普通区可选择由无人机或卡车配送, 但每个客户只可访问1次; 式(26)表示超出无人机的重量限制的普通区客户点无人机无法访问; 式(27)表示超出无人机的重量限制的普通区客户点由卡车进行配送; 式(28)表示卡车在配送中心的流量平衡; 式(29)表示卡车在客户点的出入度相同; 式(30)和(31)表示无人机在起降点的出入度相同; 式(32)表示无人机在服务的客户点出入度相同; 式(33)和(34)表示无人机起降点必须有卡车访问以发送和接收无人机; 式(35)和(36)表示卡车(无人机)路径在客户点处不允许出现子回路; 式(37)和(38)表示卡车(无人机)到达客户

点  $j$  的时间; 式(39)表示若节点  $j$  的上一站为无人机发射点时的到达时间.

## 2 算法设计

由于本研究构建的是多目标优化模型, 考虑到 NSGA-III 在解决 3 个及以上目标的优化问题上具有突出表现, 但在种群收敛性方面存在缺陷, 而 ALNS 算法具有较强的搜索效率和性能, 故本研究结合 ALNS 和 NSGA-III 优势, 设计改进 NSGA-III, 通过引入 ALNS 算法增加了初始种群的多样性和整体质量, 加速收敛过程, 降低寻找最优解所需的时间, 提高算法性能. 算法流程见图 2. 其中,  $\eta_{Gen}$  为进化迭代次数; Maxgen 为最大进化迭代次数.

### 2.1 编码方式

采用整数编码形式生成染色体. 用整数 1, 2, 3, ...,  $n$  编码客户节点, 配送中心用 0 编码. 将客户节点随机排列, 根据客户时间窗、卡车载重及无人机载重等约束将 0 插入到排列中. 染色体编码示意图见图 3.

### 2.2 构造初始解

通过 NSGA-III 构造初始解, 具体步骤如下:

**步骤 1** 随机生成初始种群  $P_1$ .

**步骤 2** 选择操作. ① 从父代种群  $P_t$  中通过精英选择策略挑选优质个体加入新种群  $Q_t$ ; ② 将父代种群  $P_t$  和子代种群  $Q_t$  合并形成新子代种群  $R_t$  后, 通过快速非支配排序及参考点的小生境保持算子判断处于同一非支配层级中个体的优劣, 选择优秀个体加入新的子代种群  $Q_t$ .

**步骤 3** 交叉和变异操作. 其中, 交叉方式为洗牌交叉与子路径交叉; 变异操作通过高斯变异来实现.

**步骤 4** 循环迭代, 判断是否达到最大进化代数. 若是, 则进入步骤 5; 否则返回步骤 2.

**步骤 5** 生成初始 Pareto 解.

### 2.3 ALNS 算法

为克服 NSGA-III 因缺乏足够搜索策略而容易陷入局部最优解的缺陷, 本研究利用 ALNS 算法的多邻域搜索机制, 通过破坏算子和修复算子的交替使用, 有效生成新的邻域可行解, 帮助算法跳出局部最优.

#### 2.3.1 破坏算子

1) 随机破坏算子. 从当前解中随机删除无人

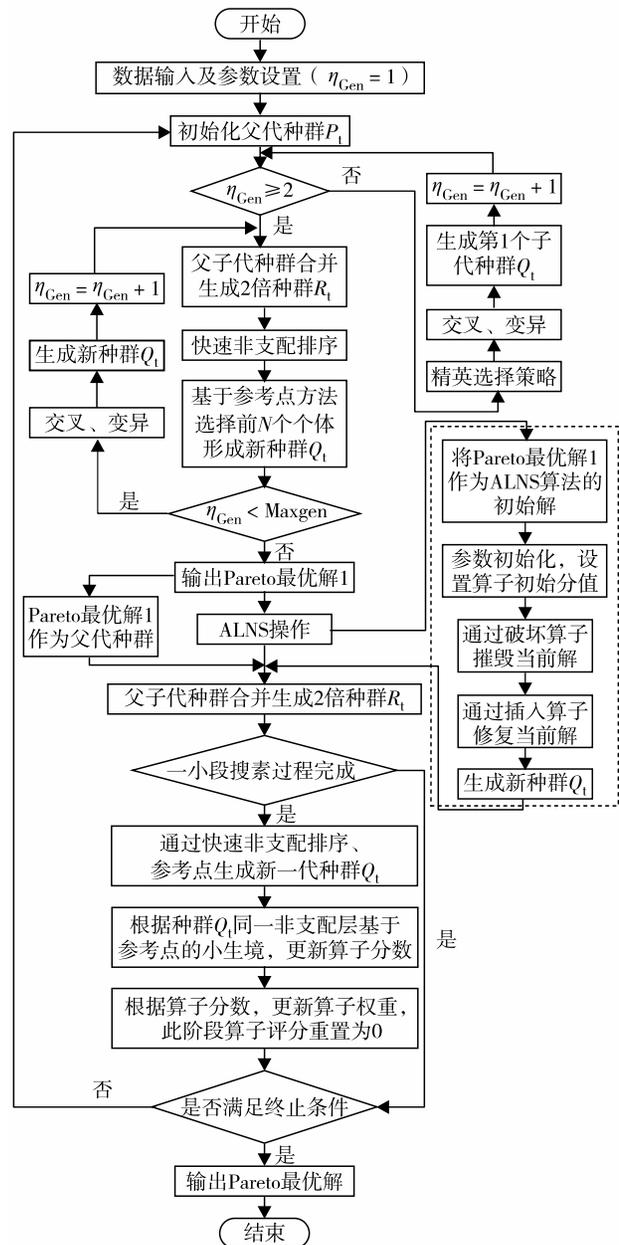


图 2 改进 NSGA-III 流程

Fig. 2 Flow char of improved NSGA-III.

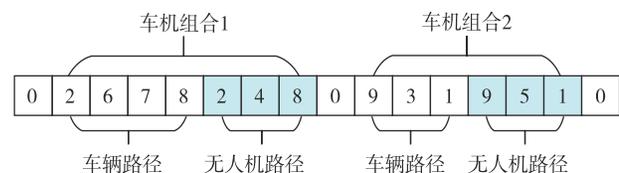


图 3 染色体编码示意

Fig. 3 (Color online) Chromosome coding diagram.

机或卡车路径中的  $m$  个客户点.

2) 最大节约点破坏算子. 删除当前路径中使总成本增加最多的  $m$  个客户点.

3) 相关匹配度最低破坏算子. 根据时间窗匹配程度以及相关客户点之间的距离移除当前路径中相关匹配度较小的  $m$  个客户点,

$$\omega_{ij} = \omega_1 \frac{1}{d_{ij}} + \omega_2 \frac{1}{|e_i - e_j| + |l_i - l_j|} \quad (40)$$

其中,  $\omega_{ij}$  为客户点  $i$  和  $j$  之间的匹配度;  $d_{ij}$  为  $i$  和  $j$  之间的距离;  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为距离和时间窗的权重.

### 2.3.2 修复算子

1) 贪婪修复算子. 包含成本贪婪修复算子、客户价值贪婪修复算子及满意度贪婪修复算子, 贪婪修复算子通过选择适当的位置插入客户点达到降低成本、增加客户价值与满意度的目的.

2) 随机修复算子. 主要包括车辆优先修复算子及无人机优先修复算子.

### 2.3.3 自适应机制

算法开始时, 每个算子都被赋予相同分值  $\sigma_0$ , 通过计算迭代周期内各算子的表现得分, 更新对应算子权重, 提高算子在轮盘中被选中的概率. 随着迭代的进行, 算子根据以下4种情况进行加分: ①当产生新的 Pareto 前沿解时, 加分为  $\sigma_1$ ; ②当获得1个尚未被接受过的改进解时, 加分为  $\sigma_2$ ; ③当接受1个尚未被接受过的劣解时, 加分为  $\sigma_3$  (此举增加了种群多样性, 避免陷入局部最优); ④当产生的解未被接受时, 加分为  $\sigma_4$ .

每进入1个新周期, 将重新计算算子得分. 用前一周各算子的得分计算新的权重用于决定下一周期算子在轮盘赌中被选择的概率, 权重计算为

$$\bar{\omega}_{h,l+1} = \begin{cases} (1 - \rho)\bar{\omega}_{hl} + \rho \frac{d_h^s}{d_h^u}, d_h^u > 0 \\ (1 - \rho)\bar{\omega}_{hl}, d_h^u = 0 \end{cases} \quad (41)$$

其中,  $\bar{\omega}_{hl}$  为第  $l$  个周期算子  $h$  的权重;  $d_h^s$  为算子  $h$  的得分;  $d_h^u$  为算子  $h$  的使用次数;  $\rho$  为衰减系数, 控制权重的变化速度.

## 2.4 算法停止准则

当达到设置的最大迭代次数, 算法停止迭代, 输出最终 Pareto 最优解.

# 3 算例实验及结果分析

## 3.1 实验环境及参数设置

本研究采用 Matlab 2021b 进行改进 NSGA-III 编程, 电脑配置为处理器 12 代 Intel(R)Core(TM)i5-12500H2.50 GHz, 64 位 Windows11 操作系统, 内

存为 16 Gbytes. 经过多次测试, 改进 NSGA-III 参数设置为: 最大迭代次数 150、种群规模 100、变异概率 0.4 及交叉概率 0.1.

## 3.2 模型求解

根据城市物流及模型特点, 选用经典的 Sioux-Falls 交通网络验证算法及模型有效性<sup>[21]</sup>, 见图 4. 路网中共有 24 个节点, 76 条路段. 其中, 节点 10 为配送中心. 各客户点的需求量和时间窗等基本信息见表 2,  $t_i^s$  均为 0.2 h, 其他相关参数设置见表 3.

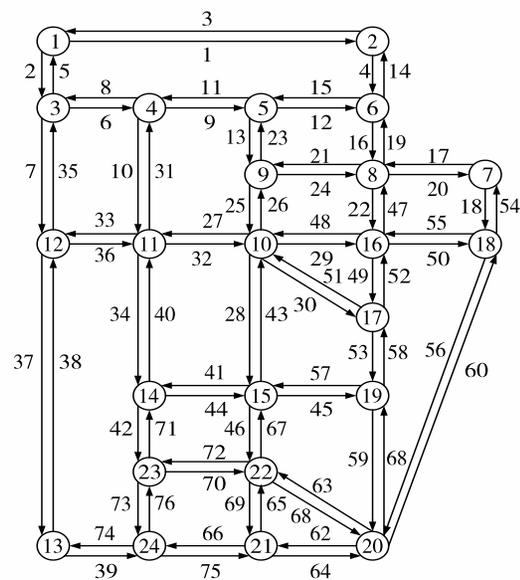


图4 Sioux-Falls网络  
Fig. 4 Sioux-Falls network.

设置限行区为以节点 20 为圆心、半径为 1 的圆形区域, 禁飞区为以节点 1 为中心点边长为  $2 \times 2$  的矩形区域. 算法迭代过程及 Pareto 最优解集分布见图 5 和图 6. 卡车-无人机联合配送路径优化方案见表 4.

## 3.3 适用性分析

为验证模型和算法在不同规模下的普适性和性能, 基于上述算例选取 Eastern-Massachusetts 路网中 10、40 及 74 个客户点作为小规模、中规模和大规模算例进行验证. 由于 Eastern-Massachusetts 路网数据信息较为庞大, 此处不详细列举. 将本研究改进 NSGA-III 与 NSGA-III 的求解结果进行比较, 结果见表 5. 两种算法得到的 Pareto 最优解集可通过扫描文末二维码查看补充材料图 S1.

由表 5 可见, 4 种规模算例的总成本分别减少 8.12%、7.71%、12.18% 和 10.50%, 且相较于 NSGA-III 的客户价值及客户满意度均有提升. 分析

表2 客户节点信息

Table2 Customer node information

节点	$q_i$	$[E_i, L_i]$	$[e_i, l_i]$	$pr_i$	$W_i$	$\ell_i$
1	2	[08:30, 11:30]	[09:30, 10:30]	1.0	1	13
2	6	[08:00, 11:00]	[09:00, 10:00]	1.0	1	20
3	2	[08:00, 11:00]	[09:00, 10:00]	1.0	3	15
4	7	[08:00, 11:00]	[09:00, 10:00]	1.2	2	2
5	7	[07:00, 10:00]	[08:00, 09:00]	1.5	4	5
6	3	[07:00, 12:00]	[09:30, 10:30]	1.0	1	7
7	3	[07:00, 11:00]	[08:30, 09:30]	1.0	1	2
8	5	[08:00, 11:00]	[09:00, 10:00]	1.0	1	11
9	4	[07:30, 11:00]	[08:30, 09:30]	1.3	4	14
11	2	[07:00, 12:00]	[08:30, 10:30]	1.0	1	5
12	12	[07:00, 12:00]	[08:00, 10:30]	1.4	2	2
13	3	[07:00, 10:00]	[08:00, 09:00]	1.7	4	13
14	4	[07:00, 10:00]	[07:30, 08:30]	1.5	4	10
15	6	[08:30, 11:30]	[09:30, 10:30]	1.0	1	11
16	5	[07:00, 10:00]	[08:00, 09:00]	1.2	2	6
17	4	[07:00, 10:00]	[08:00, 09:00]	1.0	1	8
18	2	[07:00, 10:00]	[08:00, 09:00]	1.2	1	9
19	12	[07:00, 12:00]	[09:00, 10:00]	1.0	4	10
20	3	[07:30, 11:00]	[09:00, 10:00]	1.2	3	22
21	4	[08:30, 11:30]	[09:30, 10:30]	1.0	1	12
22	6	[07:30, 11:00]	[09:00, 10:00]	1.0	4	10
23	5	[07:00, 10:00]	[08:00, 09:00]	1.6	4	4
24	10	[08:00, 12:00]	[09:30, 10:30]	1.0	1	5

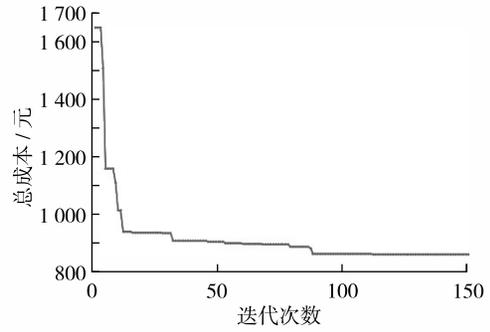
表3 本模型其他相关参数

Table 3 Other relevant parameters of model in this research

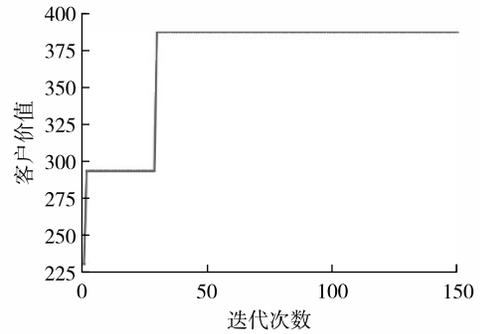
参数	取值	参数	取值
$\lambda/\text{元}$	5	$g_0$	140
$\zeta_0$	0.1	$v_0$	30
$\zeta$	0.125	$c$	0.1
$f_1/(\text{元}\cdot\text{km}^{-1})$	5	$a/(\text{元}\cdot\text{辆}^{-1})$	200
$f_2/(\text{元}\cdot\text{km}^{-1})$	1	$b/(\text{元}\cdot\text{架}^{-1})$	40
$Q_H/\text{kg}$	100	$B/\text{km}$	15
$Q_D/\text{kg}$	12	$\alpha/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	1.0
$v^h/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	40	$\beta/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	2.0
$v^l/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	70		

对比图 6 的 Pareto 前沿解集分布可见, 改进 NSGA-III 的分布更集中、更具规律性, 收敛性更好。因此, 改进 NSGA-III 优于 NSGA-III。

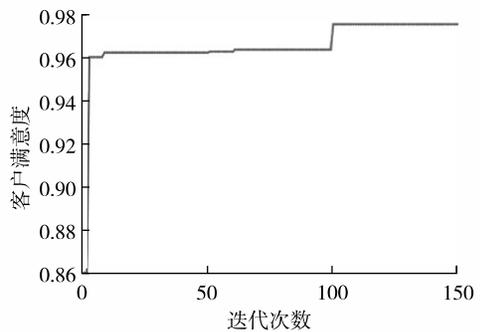
<http://journal.szu.edu.cn>



(a) 以总成本最小为目标



(b) 以客户价值最大为目标



(c) 以客户满意度最大为目标

图5 改进NSGA-III迭代过程

Fig. 5 Improved NSGA-III iterative process diagrams with goal of (a) minimum total cost, (b) maximizing customer value, and (c) maximizing customer satisfaction, respectively.

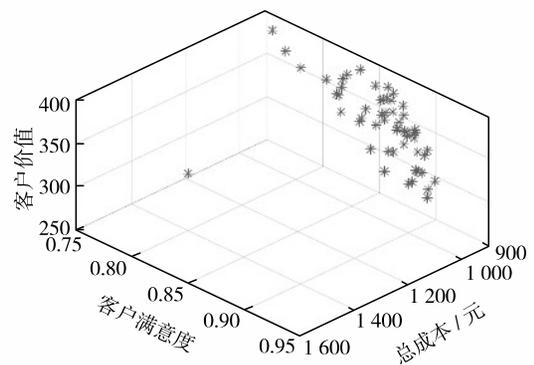


图6 Pareto最优解集分布

Fig. 6 Pareto distribution of optimal solution sets.

表4 优化路径方案  
Table 4 Optimized path scheme

序号	卡车-无人机联合配送路径	成本/元
1		476.8
2		482.7

表5 改进NSGA-III与NSGA-III的求解结果对比  
Table 5 Comparison of the solution results between the improved NSGA-III and NSGA-III

算例	改进NSGA-III			NSGA-III		
	总成本/元	客户价值/元	客户满意度/%	总成本/元	客户价值/元	客户满意度/%
Sioux-Falls	967.1	380.8	92.5	1 052.5	375.2	88.5
小规模	356.8	126.1	89.9	386.7	115.7	86.8
中规模	1 567.9	989.5	90.1	1 785.4	974.9	89.4
大规模	2 826.3	1 659.9	91.2	3 157.9	1 643.9	90.1

3.4 不同配送模型对比分析

1) 为验证联合配送的优越性,在不考虑卡车限行区的情况下,将本研究配送模式同传统卡车单独配送模式进行对比,结果见表6.相比于传统卡车配送,由于投入无人机减少了卡车的使用辆数及行驶距离,在节约成本的同时减轻了环境污染,符

合国家节能减排的政策主张.与卡车相比,无人机在速度方面存在明显优势,能有效节约配送时间,节约比例高达21.27%.在成本方面,联合配送能够节约的成本达28.06%,这对企业控制成本和扩大利润具有积极意义.

表6 不同配送模式结果对比  
Table 6 Comparison of results of different distribution modes

配送模式	成本/元	卡车路径距离/km	无人机路径距离/km	卡车数量/辆	无人机数量/架	配送时间/h
联合配送	998.3	89	64.685	2	2	2.8
传统卡车配送	1 387.7	156		3		3.6

2) 将未考虑客户价值及客户满意度的配送模型与本模型进行对比.其中,未考虑客户价值及客户满意度模型的总成本为904.3元、客户满意度79.4%及客户价值为276.9元;本模型的总成本为967.1元、客户满意度92.5%及客户价值为380.7元.可见,本模型成本增加了约6.95%,这在短期内会增加企业的成本支出,降低企业收益.然而,本模型的客户价值和客户满意度分别提高了37.52%和13.1%,长远来看,这对企业保持优质客户、提高客户忠诚度非常有利,有助于企业实现可持续发展.

有所不同,将会影响联合配送的路径规划,进而影响配送成本,因此,本研究对两种区域限制的灵敏度进行分析,并调整了无人机续航(30 km)和载重(20 kg)以适应不同限行区范围,结果见图7.

3.5 灵敏度分析

区域限制范围不同,其辐射的客户节点数量会

有所不同,将会影响联合配送的路径规划,进而影响配送成本,因此,本研究对两种区域限制的灵敏度进行分析,并调整了无人机续航(30 km)和载重(20 kg)以适应不同限行区范围,结果见图7.由图7可见,随着限行区范围的扩大,其覆盖范围内的客户点数量不断增多,总成本呈下降趋势,但整体变化趋势不大.这一变化主要归因于限行区扩大后,更多客户无法直接由卡车送达,从而影响了卡车的配送路径规划,使得整体成本有所降低.然而,由无人机负责配送的客户点数量并未因限行区内客户点数量的增加而发生显著变化,因此,整体变化趋势不大.

图8为禁飞区区域范围灵敏度分析.可见,随

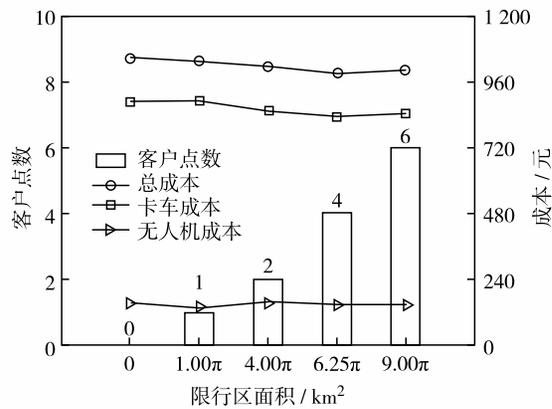


图7 限行区域范围灵敏度分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of the scope of the restricted area.

随着禁飞区面积的扩大,总成本呈上升趋势.由于禁飞区范围扩大,无人机不能进行配送,转而由卡车进行配送,卡车的单位运输成本远高于无人机运输成本,导致成本不断提高.

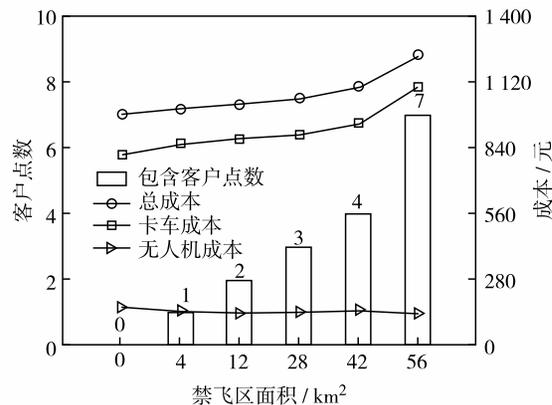


图8 禁飞区区域范围灵敏度分析

Fig. 8 No-fly zone area sensitivity analysis.

## 4 结论

本研究综合考虑客户时间窗、无人机和卡车载重限制及区域限制等因素,以配送成本最低、客户价值和客户满意度最大为目标,建立卡车-无人机联合配送多目标优化模型,将ALNS算法和NSGA-III相结合,并通过算例验证得出以下结论:

1) 考虑客户价值和客户满意度,虽然会增加配送成本,但能显著提高客户对企业的忠诚度和优质客户对企业的信赖,对企业长期经营有益.

2) 本模型考虑了限制区对配送的影响,且在距离矩阵计算中,分别对无人机和卡车路径距离采取不同方法,替代采用欧式距离简单计算客户点之

间的直线距离方法,一定程度上增加了模型求解的难度,但更贴近实际配送生产活动,对指导企业生产具有一定借鉴意义.

未来研究将进一步考虑动态路网和天气等不确定性因素对配送的影响,结合实际问题,建立更符合实际情况的配送模型.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71961015,61563029)

作者简介: 李雨辰(11411097824@qq.com), 兰州交通大学硕士研究生. 研究方向: 交通运输规划与管理.

引文: 李雨辰, 牟海波, 袁梦, 等. 区域限制下卡车-无人机联合配送多目标优化[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(2): 205-215.

## 参考文献 / References:

- [1] WU Guohua, MAO Ni, LUO Qizhang, et al. Collaborative truck-drone routing for contactless parcel delivery during the epidemic [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 25077-25091.
- [2] 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.
- [3] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone [J]. Transportation Science, 2018, 52(4): 965-981.
- [4] WANG Xingyin, POIKONEN S, GOLDEN B. The vehicle routing problem with drones: several worst-case results [J]. Optimization Letters, 2017, 11(4): 679-697.
- [5] 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.
- [6] NAJY W, ARCHETTI C, DIABAT A. Collaborative truck-and-drone delivery for inventory-routing problems [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 146: 103791.
- [7] 柳伍生, 李旺, 周清, 等. “无人机-车辆”配送路径优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 176-186.  
LIU Wusheng, LI Wang, ZHOU Qing, et al. "Drone-vehicle" distribution routing optimization model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(6): 176-186. (in Chinese)
- [8] 李妍峰, 李佳, 向婷. 需求可拆分的无人机与卡车协同路径优化问题[J]. 工业工程, 2022, 25(1): 54-63, 143.  
LI Yanfeng, LI Jia, XIANG Ting. Split-delivery vehicle

- routing problem with drone [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2022, 25(1): 54-63, 143. (in Chinese)
- [ 9 ] 范厚明, 张跃光, 田攀俊. 时变路网下多中心电动车-无人机协同配送路径优化[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(2): 131-142.  
FAN Houming, ZHANG Yueguang, TIAN Panjun. Multi-depot electric vehicle routing problem with drones under time-dependent networks [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(2): 131-142. (in Chinese)
- [ 10 ] 马华伟, 闫伯英. 面向防疫物资分区配送车机协同路径规划问题[J]. *系统仿真学报*, 2025, 37(1): 234-244.  
MA Huawei, YAN Boying. Vehicle routing problem with drones considering zoned distribution of epidemic prevention materials [J]. *Journal of System Simulation*, 2025, 37(1): 234-244. (in Chinese)
- [ 11 ] 颜瑞, 陈立双, 朱晓宁, 等. 考虑区域限制的卡车搭载无人机车辆路径问题研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(5): 144-155.  
YAN Rui, CHEN Lishuang, ZHU Xiaoning, et al. Research on vehicle routing problem with truck and drone considering regional restriction [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(5): 144-155. (in Chinese)
- [ 12 ] 杨雷博, 周俊. 限制区下货车联合无人机配送路径问题研究[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(12): 326-332.  
YANG Leibo, ZHOU Jun. Research on distribution path problem of truck combined with UAV in restricted area [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(12): 326-332. (in Chinese)
- [ 13 ] 王少华. 区域限制下的卡车与无人机联合调度优化问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.  
WANG Shaohua. Research on joint scheduling optimization problem of trucks and drone under regional constraints [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [ 14 ] 徐杰. 基于客户价值的城市冷链物流时变路径问题优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
XU Jie. Research on optimization of time-varying routing problem of urban cold chain logistics based on customer value [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [ 15 ] 刘俊刚. 考虑客户价值及软时间窗的车辆路径问题[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.  
LIU Jungang. Research on customer value and soft time windows of the vehicle routing problem [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [ 16 ] 刘秋萍. 考虑客户等级划分的多目标冷链物流配送车辆路径优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
LIU Qiuping. Optimization of multi-objective cold chain logistics distribution vehicle path considering customer rating classification [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [ 17 ] 季琳琳, 王清威, 周豪, 等. 考虑顾客满意度的冷链水果路径优化[J]. *浙江大学学报工学版*, 2021, 55(2): 307-317.  
JI Linlin, WANG Qingwei, ZHOU Hao, et al. Optimization of cold chain fruit path considering customer satisfaction [J]. *Journal of Zhejiang University Engineering Science*, 2021, 55(2): 307-317. (in Chinese)
- [ 18 ] 户佐安, 贾叶子, 李博威, 等. 考虑客户满意度的车辆路径优化研究[J]. *工业工程*, 2019, 22(1): 100-107.  
HU Zuoan, JIA Yezi, LI Bowei, et al. An optimization of the vehicle routing problem based on customer satisfaction [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2019, 22(1): 100-107. (in Chinese)
- [ 19 ] 李志亮, 罗芳, 阮群生. 一种新的白化权函数的灰色聚类评价方法[J]. *延边大学学报自然科学版*, 2015, 41(4): 318-325.  
LI Zhiliang, LUO Fang, RUAN Qunsheng. A gray clustering evaluation method based on new whitenization weight function [J]. *Journal of Yanbian University Natural Science Edition*, 2015, 41(4): 318-325. (in Chinese)
- [ 20 ] 王宁, 胡大伟, 徐杰, 等. 基于客户价值和满意度的城市冷链物流时变路径问题[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(9): 297-308.  
WANG Ning, HU Dawei, XU Jie, et al. Time-dependent vehicle routing of urban cold-chain logistics based on customer value and satisfaction [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(9): 297-308. (in Chinese)
- [ 21 ] 马昌喜, 何瑞春, 熊瑞琦. 基于双层规划的危险化学品配送路径鲁棒优化[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(5): 165-175.  
MA Changxi, HE Ruichun, XIONG Ruiqi. Robust optimization on distributing routes of hazardous materials based on bi-level programming [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(5): 165-175. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】



补充材料