

考虑无人机能耗的卡车无人机同步配送研究

刘旭, 张明*, 高翔, 孙丽超

(南京航空航天大学 通用航空与飞行学院, 南京 211106)

摘要:以现代物流领域中使用卡车和无人机进行末端配送为背景,为商用物流配送企业提供卡车与无人机同步配送的新方案,针对卡车无人机配送的成本较高且效率较低问题,考虑了无人机有效载荷、飞行状态对无人机能耗及实际飞行航程的影响,对非同步运行模型进行改进,提出了考虑无人机能耗的卡车无人机同步运行选址模型,利用粒子群算法求解,通过对比不同载荷、飞行状态、客户点规模和运行模式下的差异证明了本文的配送模式下无人机能耗对选址结果的影响,并使传统卡车配送最低选址成本分别降低了20.67%, 25.77%, 29.14%和19.47%,增强配送的时效性及准确率,为未来物流配送一体化研究提供依据。

关键词:物流工程; 交通规划; 无人机; 同步配送; 粒子群算法

中图分类号: U116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0946(2024)05-0622-09
DOI: 10.19492/j.cnki.1672-0946.2024.05.014

Research on truck-drone synchronized delivery considering drone energy consumption

LIU Xu, ZHANG Ming*, GAO Xiang, SUN Lichao

(College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In the context of last-mile delivery in the modern logistics field, presented a new solution for commercial logistics delivery companies that integrated truck and drone collaboration. Addressing the issue of high costs and low efficiency in truck-drone delivery, considered the impact of drone payload and flight status on drone energy consumption and actual flight range. Improved the asynchronous operation model and proposed a truck-drone synchronized operation location selection model that took into account drone energy consumption, which was solved using a particle swarm algorithm. By comparing different payload capacities, flight statuses, customer point scales, and operation modes, this paper demonstrated the impact of drone energy consumption on location selection results. As a result, it achieved a reduction in the minimum site selection cost for traditional truck deliveries by 20.67%, 25.77%, 29.14%, and 19.47% for different payload capacities,

收稿日期: 2023-11-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52272350); 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20220732)

作者简介: 刘旭(1999-)男, 硕士研究生. 研究方向: 交通运输规划与管理 E-mail: chn.liuxu@nuaa.edu.cn

通信作者: 张明(1975-)男, 博士生导师. 研究方向: 交通运输规划与管理 E-mail: zhangming_nuaa@126.com

flight statuses, customer point scales, and operation modes, respectively. This enhanced the efficiency and accuracy of the delivery system and provided a foundation for future research in integrated logistics and delivery.

Key words: logistics engineering; traffic planning; drones; synchronous delivery; particle swarm algorithm; site selection

随着我国经济的迅速发展,物流运输需求也与日俱增,如何在物流运输的末端将包裹低成本、快速、高效地送达客户已经成为末端物流运输发展面临的重要问题。

在自主飞行的应用场景中,续航能力是一个关键的问题。同时电池系统是无人机的关键系统,通常无人机的飞行不携带重物,其实际续航时间约为标准情况下的续航时间,但是无人机在进行包裹配送过程中有效荷载对其续航时间有很大影响。Rabta^[1]提出了救灾行动中轻型救援物资的无人机运送模型,该问题的数学模型用于求解四种不同的载荷和电池尺寸值的场景。Dhote^[2]模拟了四种基于无人机的定位和路由问题。已有的文献中都通过加入各种约束条件来设置充电桩或设置充电站解决载具的续航时间问题。Shao^[3]提出了一个使用充电站/维修站的远程无人机配送模型。目标是找到无人机路线,最小化在充电站降落的次数及配送路径距离。任新惠^[4]探讨了内外因素对无人机配送路径规划的影响。本文考虑了对无人机的能耗和续航里程的影响,建立无人机续航能力随有效荷载变化的曲线,得到无人机随有效荷载变化的能耗模型。

传统的非同步运行为卡车停靠在原地等待回收无人机,Liao^[5]首先确定最优停车点数,临时停车点为货车由 $K - \text{means}$ 算法确定为货物的交付和起飞点无人机。然后,通过遗传算法计算卡车和无人机的最优路径。Boysen^[6]提出了无人机放飞后卡车停靠点选址的两个模型,通过改变无人机的数量对一组多达 100 个客户点的问题进行若干计算分析,确定了最佳卡车和无人机的路线。

而在卡车与无人机同步配送模式下,卡车灵活移动至后续客户点停靠等待回收无人机,Gunay - Sezer^[7]解决了一个新的路线问题,即无人机旅行推销员问题(traveling salesman problem with drone

TSP - D)。该问题的目标是建立一条路线,通过卡车或无人机将包裹送到一组客户手中,从而最大限度地降低运营成本。Agatz^[8]提出了一种同步的卡车与无人机配送的模型,该模型允许卡车在发射地点或卡车路线的后续客户点停靠回收发射的无人机,同时还开发了基于动态规划的启发式和精确算法来求解。Carlsson^[9]使用启发式方法来计算卡车和无人机之间的协调路线,并通过相关算例证明了结论的正确性。Karak^[10]开发了一个基于 MILP 模型的混合启发式算法,以最小化总的取货和送货成本,求解出卡车停靠的位置与无人机的具体路径。彭勇^[11]设计嵌入简单启发式算法的混合邻域搜索算法,通过不同规模算例运算时间及多次运算解的波动性验证算法的有效性;通过对 TSP 算法、邻域搜索算子的不同组合的分析,找出最优的组合。

尽管以往的卡车无人机配送模式^[12-14]较多,但针对无人机的部分却较少,本文着重考虑由无人机进行配送,根据无人机的飞行续航能力来确定卡车停靠点的位置;通过对比不同荷载、飞行状态下的差异,并与卡车无人机非同步配送模式下的选址成本进行对比。证明了提出的选址模型可以减少总配送成本,提高了末端物流配送的经济性以及高效性。

1 无人机有效载荷与飞行状态对无人机续航能力的影响

在进行卡车与无人机配送的过程中不能只考虑理论上的无人机续航飞行能力,还需要把无人机有效荷载与无人机爬升、水平飞行、降落状态对无人机实际飞行航程的影响加入到建立模型的约束中,在此基础上规划出的结果才符合实际配送的要求,顺利完成配送任务。

关于旋翼无人机没有一个公认的能量消耗模型,本文基于气动理论^[15]引用了旋翼无人机的近

似功耗模型. 无人机水平飞行时的功率见式(1).

$$P_{hor} = \frac{1}{\eta_{hor}} W \left(V_{hor} \sin \alpha(V_{hor}) + \sqrt{-\frac{V_{hor}^2}{2} + \sqrt{\frac{V_{hor}^4}{4} + \left(\frac{W}{2\rho S}\right)^2}} \right) \quad (1)$$

无人机爬升时的功率见式(2)^[16].

$$P_c = \frac{W}{\eta_c(v_c)} \left(\frac{v_c}{2} + \sqrt{\frac{v_c^2}{4} + \frac{W}{2\rho S}} \right) \quad (2)$$

无人机降落时的功率见式(3).

$$P_d = \frac{W}{\eta_d(v_d)} \left(\frac{-v_d}{2} + \sqrt{\frac{v_d^2}{4} + \frac{W}{2\rho S}} \right) \quad (3)$$

其中: ρ 为空气密度, W 为总重量包括无人机自重与有效载荷, S 为无人机旋翼面积, v_c 为无人机爬升速度, v_d 为无人机降落速度, V_{hor} 为无人机水平飞行的速度, $\alpha(V_{hor})$ 为水平飞行时的迎角, η_{hor} 为水平飞行时的效率系数, $\eta_c(v_c)$ 、 $\eta_d(v_d)$ 均为经验系数. 运用“MK8-3500 标准”旋翼无人机的实际试验数据, 对旋翼无人机水平飞行时的功率方程(1)进行线性回归分析, 得到以下回归方程:

$$p_{hor}(w) = \beta_0 + \beta_1 w \quad (4)$$

其中: w 为无人机有效载荷, $p_{hor}(w)$ 为有效载荷为 w 时的飞行功率, β_0 、 β_1 为回归系数. 经计算在回归方程(4)中平均误差百分比为 0.006 4%, 最大差异为 0.021 kW. 因此可以看出在无人机水平飞行的过程中, 随着有效载荷的增加, 功率需求近似线性地增加.

无人机的实际续航时间见式(5), 将式(4)代入式(5)中, 计算无人机的飞行时间.

$$T_{true} = \frac{\mu C V_n}{P(w)} \quad (5)$$

其中: T_{true} 为无人机的实际续航时间, μ 为能量传输效率(此处取 0.7), C 为电池容量, V_n 为 n 个电池的额定电压, $P(w)$ 为无人机消耗功率.

运用线性回归分析得到无人机飞行所需功率和无人机有效载荷重量的方差、平均百分误差与最大误差从而判断功率与有效载荷的线性关系, 见图 1. 由此可知式(4)通过计算得到的无人机飞行时间与实验得到的飞行时间大致相符.

设无人机在不携带包裹条件下水平飞行时的功率为 $P(w_{uav})$ 、爬升时的功率为 P'_c 、降落时的功

率为 P'_d , 无人机的自身质量为 w_{uav} 、无人机携带的有效载荷为 w_{bag} . 当无人机携带有效载荷进行飞行时, 式(4)中 w 为 $(w_{uav} + w_{bag})$, 设此时携带包裹条件下的无人机水平飞行功率为 $P(w_{uav} + w_{bag})$, 无人机爬升的功率为 P'_c , 无人机降落时的功率为 P'_d .

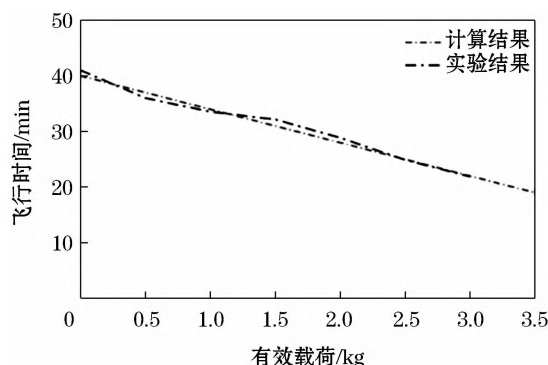


图1 计算与实验的飞行时间对比

Figure 1 Calculate time - of - flight comparison with experiments

本文将无人机空载在 t 时间内起飞和降落消耗的功率转化为无人机在 t 时间内水平飞行的功率, 同时将携带包裹的无人机在 t 时间内起飞和降落时消耗的功率转化为无人机在空载且水平飞行时消耗的功率, 并最终将上述能量的消耗转换为实际水平飞行航程的增加.

$$\sigma_1 = \frac{P(w_{uav} + w_{bag})}{P(w_{uav})} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{P'_c}{P(w_{uav})} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \frac{P'_d}{P(w_{uav})} \quad (8)$$

$$\sigma_4 = \frac{P'_c}{P(w_{uav})} \quad (9)$$

$$\sigma_5 = \frac{P'_d}{P(w_{uav})} \quad (10)$$

其中: σ_1 为无人机携带包裹时水平飞行的功率与无人机空载水平飞行时功率的比值; σ_2 为无人机携带包裹降落时的功率与无人机空载水平飞行时功率的比值; σ_3 为无人机携带包裹降落时的功率与无人机空载水平飞行时功率的比值; σ_4 为无人机空载时爬升功率与无人机空载水平飞行时功率的比值; σ_5 为无人机空载时降落功率与无人机空

载水平飞行时功率的比值。

设无人机水平飞行时间为 t , 爬升与降落时间均为 t' , 无人机的水平飞行速度为 v 。则在无人机携带包裹条件下无人机水平飞行时间 t , 对应标准情况下(无人机空载) 无人机航程 S_1 由式(11) 所示, 在爬升时间为 t' 无人机携带包裹爬升时对应标准情况下(无人机空载) 的无人机航程 S_2 由式(12) 所示, 在降落时间为 t' 无人机携带包裹降落时所对应标准情况下(无人机空载) 的无人机航程为 S_3 由式(13) 所示, 在爬升时间为 t' 无人机空载爬升时对应标准情况下(无人机空载) 的无人机航程为 S_4 由式(14) 所示, 在降落时间为 t' 无人机空载降落时所对应标准情况下(无人机空载) 的无人机航程为 S_5 由式(15) 所示。

$$S_1 = vt\sigma_1 \quad (11)$$

$$S_2 = vt'\sigma_2 \quad (12)$$

$$S_3 = vt'\sigma_3 \quad (13)$$

$$S_4 = vt'\sigma_4 \quad (14)$$

$$S_5 = vt'\sigma_5 \quad (15)$$

通过以上对考虑无人机有效载荷、无人机起飞、水平飞行、降落状态对无人机实际飞行航程的影响, 并且考虑卡车不仅仅有运载无人机的功能, 同时具有配送包裹的功能, 针对以往研究中的选址模型进行改进, 建立卡车无人机同步配送的选址模型。

2 考虑无人机能耗的卡车无人机同步配送的选址模型

考虑无人机的飞行状态、无人机有效载荷对无人机实际飞行航程的影响, 以配送成本最小为目标函数, 对卡车停靠点释放无人机的位置确定问题进行建模。

2.1 模型假设

- 1) 每个客户点需求量均已知。
- 2) 卡车和无人机不能重复对某个客户点进行配送服务, 每个客户点有且只能服务一次。
- 3) 考虑无人机实际避障带来的影响, 设置预留能耗系数。
- 4) 各个客户点的具体经纬度坐标已知, 无人机飞行的距离按照各个客户点之间的欧式距离

计算。

5) 无人机携带包裹与不携带包裹时的爬升和降落时间均相等, 且爬升速度与降落速度也相等。

6) 无人机的有效载荷为无人机携带包裹的质量。

2.2 变量与参数

见表 1。

表 1 模型变量

Table 1 Model variables

参数	含义
N	全部客户点集合
N_1	只能由卡车进行配送的客户点
N_2	最终由无人机进行配送的客户点
M	备选为卡车停靠点的集合
f	需求量大于无人机最大负载的客户点
$e_{a,b}$	无人机从卡车停靠点 a 到客户点 b 的欧氏距离(m)
c_{uav}	无人机单位距离配送成本(元/m)
$c_{a, trunk}$	卡车对客户点 a 配送所花费固定成本(元/次)
L_{max}	无人机的最大飞行航程(m)
t_{uav}	无人机爬升与降落的时间
δ	无人机能耗预留系数
v_{uav}	无人机匀速飞行的速度(m/s)
$L_{a,b,d}$	考虑无人机有效载荷、飞行状态下的无人机从卡车停靠点 a 起飞配送第 b 个客户点降落到卡车停靠点 d 所需要消耗的总航程(m)
Z_1	卡车停靠点选址成本的大小(元)
x_a	备选点 a 被选中为卡车停靠点则为 1, 否则为 0
y_b	客户点 b 被选中为卡车停靠点则为 1, 否则为 0
$x'_{a,b}$	客户点 b 由备选无人机起飞卡车停靠点 a 服务则为 1, 否则为 0
$y'_{b,d}$	客户点 b 由备选无人机降落卡车停靠点 d 服务则为 1, 否则为 0

2.3 模型建立

在本文中建立考虑无人机能耗的卡车无人机同步配送选址模型, 考虑以配送成本最低为目标函数, 见式(16)。

$$\min Z_1 = \sum_{a=1}^M \sum_{b=1}^{N_2} \sum_{d=1}^M c_{uav} x'_{a,b} y'_{b,d} L_{a,b,d} + \sum_{a=1}^M c_{a, trunk} x_a \quad (16)$$

模型的约束为:

$$\sum_{a=1}^M x'_{a,b} = 1, k = 1, 2, 3, \dots, M \quad (17)$$

$$\sum_{d=1}^M y'_{b,d} = 1, k = 1, 2, 3, \dots, M \quad (18)$$

$$\sum_{d=1}^M \sum_{a=1}^M x'_{a,b} y'_{b,d} = 1, k = 1, 2, 3, \dots, M \quad (19)$$

其中:式(17)表示每个客户点只能由一个释放无人机的卡车停靠点为其服务;式(18)表示每个客户点只能由一个回收无人机的卡车停靠点为其服务;式(19)表示一组卡车停靠点可以服务多个周围的客户点,且每个无人机配送的客户点只能由一组卡车停靠点为其服务。

$$\sum_{a=1}^M x_a = \sum_{d=1}^M y_d \quad (20)$$

$$\sum_{f=1}^{N_1} \sum_{b=1}^{N_2} x'_{f,b} + y'_{b,f} = 1 \quad (21)$$

$$L_{a,b,d} = d_{a,b} \sigma_1 + d_{b,d} + v_{\text{uav}} t_{\text{uav}} (\sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5) \quad (22)$$

$$S_{a,b,d} \leq S(1 - \delta) \quad (23)$$

$$x'_{a,b} \leq x_a, a \in M, b \in N_2 \quad (24)$$

式(20)表示选出的释放无人机的卡车停靠点与后续回收无人机的卡车停靠点数量相等;式(21)表示每个需求量大于无人机最大负载的客户点必定被选为卡车停靠点;式(22)表示无人机在进行包裹配送时,考虑了无人机携带包裹与空载情况下的爬升、降落、水平飞行状态,由此根据式(6)~(10)求解得到的无人机实际航程;式(23)表示无人机需要满足设置的能耗预存系数;式(24)表示当 a 客户点被选为无人机释放的卡车停靠点时才可能存在需要无人机进行配送的客户点由从该点起飞的无人机进行配送;

$$y'_{b,d} \leq y_d, d \in M, b \in N_2 \quad (25)$$

$$x'_{a,b} = \{0, 1\}, a \in M, b \in N_2 \quad (26)$$

$$x'_a = \{0, 1\}, a \in M \quad (27)$$

$$y'_{b,d} = \{0, 1\}, d \in M, b \in N_2 \quad (28)$$

$$y'_d = \{0, 1\}, d \in M \quad (29)$$

式(25)表示若 d 客户点被选为无人机回收的卡车停靠点时才可能存在服务完点 b 的无人机进行降落;式(26)表示无人机从 a 点卡车停靠点释放飞出向客户点 b 则为1,否则为0;式(27)表示 a 被选作释放无人机的卡车停靠点则为1,否则为0;

式(28)表示无人机从客户点 b 配送完成后飞至卡车停靠点 d 回收则为1,否则为0;式(29)表示 d 被选作回收无人机的卡车停靠点则为1,否则为0。

本节建立的卡车无人机同步配送的选址模型,考虑了无人机有效载荷、无人机起飞、水平飞行、降落状态对无人机实际飞行航程的影响,并且考虑卡车不仅仅有运载无人机的功能,同时具有配送包裹的功能。

3 算法设计

基于粒子群算法^[20]求解卡车无人机同步配送选址模型的步骤如下:

步骤1 确定粒子群规模 m ,最大迭代次数 n ,以及学习因子 c_1, c_2 与惯性权重 ω ,生成距离矩阵,并确定目标函数: Z_1 为卡车停靠点的选址总成本即式(30),卡车停靠点的成本越小越符合计算要求。

$$\min Z_1 = \sum_{a=1}^{|M|} \sum_{b=1}^{|N_2|} \sum_{d=1}^{|M|} c_{\text{uav}} x'_{a,b} y'_{b,d} L_{a,b,d} + \sum_{a=1}^{|M|} c_{a,\text{truck}} x_a \quad (30)$$

步骤2 将卡车停靠点组合以成对的方式生成,按照上文介绍的种群初始化的规则随机产生 m 个可行解 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$,每个解的矩阵行数为卡车停靠点的组合数。找到未开放的选址组合在距离矩阵中相应位置为无穷大,找到每行中非0以外的最小位置,并生成指派矩阵满足式(19)~(21),并判断矩阵中的解是否满足。若满足则计算 X_i 的适应度并且将初始适应度作为初始个体极值 $P_{\text{best},i}$,由于卡车停靠点选址问题中的目标函数是卡车停靠点选址成本最低,所以将所有 $P_{\text{best},i}$ 中的最小值赋给 G_{best} 作为初始全局极值, v_i 的初始值设为0。

步骤3 按照式(31)、(32)更新粒子群的位置和速度,粒子在迭代过程中的位置和速度变化为:

$$v_{i,d}^{n+1} = \omega v_{i,d}^n + c_1 r_1^n (p_{i,d}^n - x_{i,d}^n) + c_2 r_2^n (p_{h,d}^n - x_{i,d}^n) \quad (31)$$

$$x_{i,d}^{n+1} = x_{i,d}^n + v_{i,d}^{n+1} \quad (32)$$

步骤4 在更新后按照式(30)计算更新后每个个体对应的卡车停靠点选址成本,如果粒子 i 的

卡车停靠点选址成本低于此前个体极值 $P_{best,i}$, 则将其置为 $P_{best,i}$, 如果最佳的 $P_{best,i}$ 优于此前的全局的极值 G_{best} 则将其置为 G_{best} .

步骤5 如果满足收敛条件或达到的最大迭代次数, 就停止计算, 否则返回步骤3.

4 算例分析

4.1 数据获取及相关参数设计

本文所用的无人机型号为科卫泰 X6L, 无人机基本的数据参数和模型算法具体参数见表2、3, 同时模拟了个客户点的坐标与需求量.

表2 参数表
Table 2 Parameter

参数	含义	值
ρ	空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.29
$\eta_c(V_c)$	经验系数	0.528
$\eta_d(V_d)$	经验系数	0.36
v_d	无人机降落速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4
$c_{a, \text{trunk}}$	卡车配送成本元/次	10
δ	能耗预留系数	0.2
η_{hor}	水平飞行的效率系数	0.733
v_c	无人机爬升速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4
t_{uav}	无人机爬升降落时间/s	60
c_{uav}	无人机飞行成本 (元/km)	0.000 87

表3 科卫泰 X6L 无人机参数及粒子群算法参数数据
Table 3 Kevat X6L UAV parameters and particle swarm algorithm parameter data

参数	含义	值
$w_{\text{lag, max}}$	无人机最大负载/N	50
t_{max}	无人机最大续航时间/min	70
v_{uav}	无人机水平飞行速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	15
w_{uav}	无人机自重/N	110
S	无人机旋翼面积/ m^2	4.71
c_1, c_2	学习因子	2
pop	种群规模	50
iter_{max}	迭代次数	300
ω	惯性权重	2

4.2 物流配送选址结果

采用粒子群算法求解卡车无人机同步运行的选址模型得到的解为若干组卡车停靠点以及每组

卡车停靠点对应的无人机可以服务的客户点, 在100客户点规模下的卡车停靠点选址问题, 其结果见表4.

表4 科卫泰 X6L 无人机 100 客户点下的选址结果
Table 4 Site selection results under 100 customer points

卡车停靠点序号	服务客户点序号
5 12	9 13 15
14 1	8 10 11 2 3 4 6 7
47 20	19 21 17 18 36 40 16
58 35	37 46 33 34 60 62 64 80 32
38 49	48 59 39 33 22 23 50 41 42 43 49
79 70	78 81 85 86 90 66 71 72 74 84 89
87 69	82 88 75 76 77 83
68 57	63 99 100 65 67 73 56 61
51 29	91 92 24 25 28 52 53
97 26	54 55 95 91 98 45 93 94

4.3 对比验证

4.3.1 载荷对无人机能耗的影响

为了验证无人机携带包裹有效载荷对卡车停靠点选址结果的影响, 选取在50客户点规模下, 对于需求量大于5 kg的客户点(必须卡车进行配送的客户点)不改变其需求量, 对于需求量小于等于5 kg的客户点将其需求量分别统一设置为1、2、3、4、5 kg. 分别计算五种需求量规模下的选址数量与选址成本. 由式(2)~(4)可以看出无人机的有效载荷和无人机飞行状态的功率成正相关, 随着无人机有效载荷的增加, 无人机的飞行功率也会增大, 导致无人机最大续航能力下降, 由表5可知随着无人机携带包裹有效载荷的增加, 选址成本也增加.

表5 选址结果随有效载荷的变化
Table 5 Site selection results scale vary with payload

需求量/kg	选址数量	选址成本/元
1	6	354.012
2	6	372.636
3	6	384.479
4	7	416.270
5	7	448.248

4.3.2 不同客户点规模选址成本对比

为了验证无人机配送的爬升、水平飞行、降落的飞行状态对卡车停靠点选址结果产生影响,在其他数量客户点的规模下,分别计算考虑无人机飞行状态产生里程约束(17)、(18)的选址数量与不考虑无人机飞行状态产生里程约束的选址数量,由表6可以看出,当不考虑飞行状态对能耗产生影响时,各个客户点规模下的选址数量均比考虑无人机飞行状态时的选址数量少,且选址成本也较小.因此本文提出的考虑无人机能耗的卡车无人机同步运行选址模型更加贴合实际配送场景,对无人机配送包裹时的能耗考虑更加精确,提高了配送方案设计的安全性及准确性.

表6 各客户点规模下是否考虑无人机飞行状态的
选址成本对比

Table 6 Comparative of whether the location cost
of UAV flight status is considered under the scale of
each customer site

客户点 规模/个	是否考虑无人机 飞行状态约束	选址数量/个	选址成本/元
25	是	5	237.836
25	否	5	224.544
50	是	6	377.621
50	否	5	330.212
75	是	9	675.775
75	否	8	648.621
100	是	10	847.669
100	否	9	783.243

4.3.3 同步与非同步运行下的选址成本

为了比较卡车与无人机同步与非同步运行下配送的选址成本优劣,在算例中从以下几个方面进行验证:

1) 为了降低粒子群算法求解中的偶然性,对卡车无人机同步运行配送模式与卡车无人机非同步运行配送模式下的选址各求解10次,消除偶然误差,同时在比较该模型的选址成本时,可能存在客户点数量即服务规模对模型的影响,因此选取了四种数量规模不同的客户点:25个客户点、50个客户点、75个客户点、100个客户点.

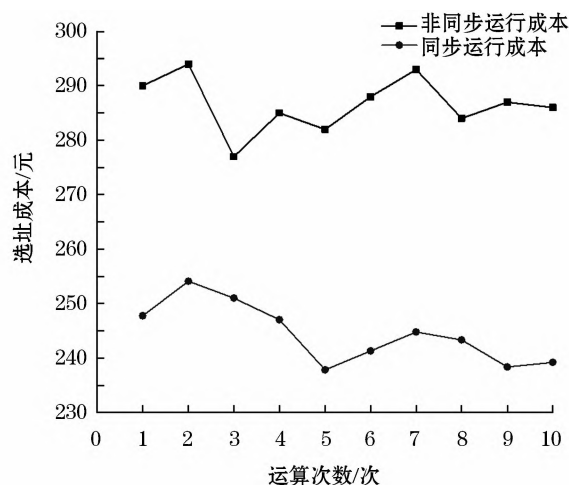


图2 25 客户点选址对比

Figure 2 25 customer site selection comparison chart

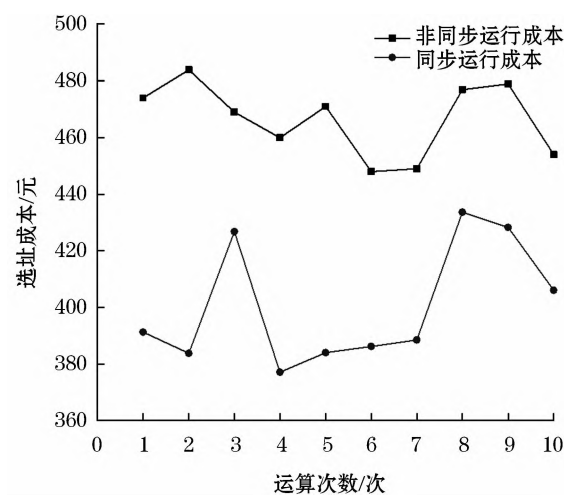


图3 50 客户点选址对比

Figure 3 50 customer site selection comparison chart

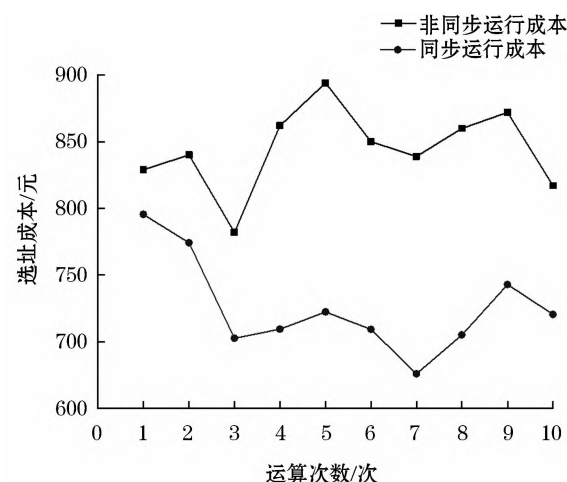


图4 75 客户点选址对比

Figure 4 75 customer site selection comparison

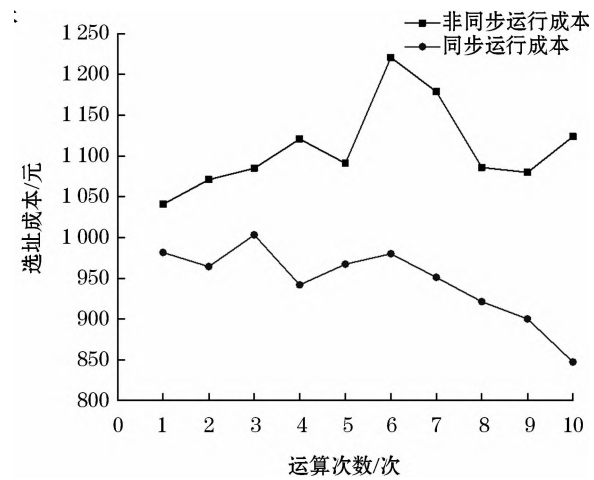


图 5 100 客户点选址对比

Figure 5 100 customer site selection comparison

从图 2 ~ 5 可知在四种客户点规模下,十次的运算结果均是卡车与无人机非同步运行配送模式的选址成本高于同步运行配送模式的选址成本. 综上,在算例中既考虑了运算次数可能导致的误差也考虑了客户点规模可能导致的误差,结果都证明了该模型的优越性.

2)在本文提出的同步运行配送模式下,卡车可以在无人机执行配送任务时单独前往下一个客

户点执行配送任务并回收执行完任务的无人机,提高了卡车与无人机的利用率,节约了配送成本,所以停靠点选址数量总是少于卡车与无人机非同步运行配送模式下的停靠点选址数量.

表 7 两种配送模式不同选址规模下选址数量

Table 7 Number of sites selected under different site selection scales for the two distribution modes

客户点数量 规模	卡车与无人机同步运行配送模式的选址数量/组	卡车与无人机非同步运行配送模式的选址数量/组
25	5	6
50	9	11
75	9	12
100	10	14

3)为了进一步探究两种卡车与无人机联合配送模式的优劣,我们计算出 10 次运算后选址成本的均值,并且计算成本变化率,发现在不同数量的客户点规模下卡车与无人机同步运行配送模式相比于卡车与无人机非同步运行配送模式成本分别节约 20.67% ,25.77% ,29.14% 和 19.47% .

成本变化率 = $\frac{\text{非同步运行选址成本均值} - \text{同步运行选址成本均值}}{\text{同步运行模式选址成本均值}} \times 100\%$

(33)

表 8 两种模式不同客户点规模下选址成本均值以及成本变化率

Table 8 Average site selection cost and cost change rate under different customer point sizes of the two models

客户点规模 数量	同步运行模式 选址成本 均值/元	非同步运行 模式选址成本 均值/元	成本 变化率/%
25	239.672	289.213	20.67
50	380.554	478.619	25.77
75	684.775	884.325	29.14
100	945.669	1 129.755	19.47

综上所述,在实际算例中通过增加算法运算次数、增加在不同数量规模的客户点条件下的选址成本比较、比较不同配送模式下的选址数量以及选址成本变化率等方面验证了考虑无人机能耗的卡车无人机同步运行选址模型在选址成本上更优,更加

符合实际配送场景.

5 结 语

本文不仅考虑了无人机进行包裹配送有效载荷对能量消耗的影响,还考虑了无人机在携带包裹与空载时的爬升、水平飞行、降落飞行状态的能量消耗,将上述因素作为选址模型的约束,提出了考虑无人机能耗的卡车无人机同步运行选址模型. 为了验证提出的模型的有效性,我们比较了不同载荷和飞行状态下无人机能耗对结果的影响,并在四种配送规模下将求解的结果与卡车与无人机非同步运行时的选址成本进行比较,得出在 25、50、75、100 个客户点规模下本文所建立的模型相比较于以往研究的卡车与无人机非同步配送的模型,最低选址成本分别降低了 20.67% ,25.77% ,29.14% 和 19.47% ,结果验证了所提出的模型求解的选址成本更低,提高了卡车的利用率,更加符合物流配

送的要求。

但是本文设置的配送环境下考虑无人机的飞行状态对续航能力影响时,近似把无人机的爬升、水平飞行与降落的状态当作了理想状态,但是实际无人机的飞行状态受到很多因素比如风、气压等影响,在后续的研究中可以更加全面详细地考虑多种环境因素。

参考文献:

- [1] RABTA B, WANKMÜLLER C, REINER G. A drone fleet model for last-mile distribution in disaster relief operations[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 28: 107-112.
- [2] DHOTE J, LIMBOURG S. Designing unmanned aerial vehicle networks for biological material transportation - The case of Brussels [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 148: 106652.
- [3] SHAO J, CHENG J, XIA B, *et al.* A novel service system for long-distance drone delivery using the "Ant Colony + A*" algorithm[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 15(3): 3348-3359.
- [4] 任新惠,武 彤. 基于配送模式的无人机城市配送路径规划[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(32): 13638-13649.
- [5] LIAO Y. Cooperative delivery of drones and truck based on K-means algorithm with soft time window [J]. *Scientific Journal of Intelligent Systems Research* Volume, 2023, 5(2).
- [6] BOYSEN N, BRISKORN D, FEDTKE S, *et al.* Drone delivery from trucks: Drone scheduling for given truck routes[J]. *Networks*, 2018, 72(4): 506-527.
- [7] GUNAY-SEZER N S, CAKMAK E, BULKAN S. A hybrid metaheuristic solution method to traveling salesman problem with drone[J]. *Systems*, 2023, 11(5): 259.
- [8] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4): 965-981.
- [9] CARLSSON J G, SONG S. Coordinated logistics with a truck and a drone[J]. *Management Science*, 2018, 64(9): 4052-4069.
- [10] 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.
- [11] 彭 勇,黎元钧. 考虑疫情影响的卡车无人机协同配送路径优化[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 73-82.
- [12] 高娇娇,郭秀萍. 考虑卡车无人机协同配送模式下的车辆路径问题研究[J]. *工业工程与管理*, 2022: 1-16.
- [13] 蒋 丽,梁昌勇,臧晓宁. 卡车与无人机协同的无接触式配送问题的双层启发式算法[J]. *中国管理科学*, 2022: 1-11.
- [14] 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.
- [15] WANG Z, SHEU J B. Vehicle routing problem with drones [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2019, 122: 350-364.
- [16] KULKARNI, ORCHARD, GOEBEL, *et al.* Battery health management for small-size rotary-wing electric unmanned aerial vehicles: An efficient approach for constrained computing platforms [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019(182): 166-178.