

海岛无人机配送中继站选址-路径优化

陆玲玲, 胡志华*

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 为突破海岛应急物流轮渡运输的靠岸点限制,同时降低海岛应急配送总成本,考虑使用无人机将应急物资从码头运往海岛上的无人机配送中继站,再由中继站派出的卡车对需求点进行终端配送服务.建立了海岛无人机配送中继站的选址-路径优化的双层规划模型,并设计K-means聚类算法与改进的模拟退火算法相结合的两阶段算法以求解该模型.将浙江省舟山市普陀山海岛作为典型场景,研究从朱家尖客运中心将一批物资运往普陀山海岛304个需求点的两级配送路径.算例分析结果表明,38个中继站所派出的配送卡车在完成所有任务后的最低系统总成本为1 013.1元,所设计选址与路径一体优化方法与先选址后路径优化的两段优化方法相比,总成本降低10.3%.

关键词: 无人机配送;双层规划;海岛应急物流;K-means聚类算法;模拟退火算法
中图分类号: F252 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb202203010

0 引言

海岛应急物流作为海岛应急管理的关键一环,在面临道路中断、天气恶劣等挑战时,如何快速、安全地将应急生活物资精准运往需求点,在提高救灾效率与安全性的同时,更好地控制系统总成本,是海岛应急物流的核心命题.

作为物流行业迈向自动化、智能化发展的典型代表之一,无人机将成为解决海岛应急物流配送安全和效率问题的一大利器.当海岛出现突发地质灾害等情况时,传统的轮渡运送方式一方面缺乏物资转运的灵活性,另一方面,配送人员的人身安全也无法得到保障.此时,若利用无人机生存能力强、机动性能好等优势,在短时间内将应急物资从码头运往海岛上的无人机配送中继站,再由卡车将物资送往需求点,既能提高抗灾救灾效率,又能降低因为人员疲劳或单调场景作业造成的安全隐患.

“十四五”期间,将进一步扩大无人机物流配送试点范围,服务乡村振兴战略.此前,国内外学者对于无人机在物流领域的应用已有了较为深入的研究.无人机在飞行过程中产生能耗和电池维

护成本,但是投递小型包裹依然具有经济可行性^[1].垂停是无人机设计的关键技术问题,用于包裹配送的无人机同样需要解决和利用悬停控制能力^[2].翁丹宁^[3]剖析了无人机进入商业领域物流配送的主要影响因素.杨代勇^[4]提出构建一个完整的新型物流配送法律体系应从统一行业标准体系、强化监督管理机制、完善相关法律法规3个方面入手.目前已有文献研究了无人机与卡车合作进行交付的配送模式^[5],这种合作模式在最后1 km的物流配送过程中得到了进一步应用^[6].

利用无人机将码头物资运往海岛灾区的重要前提是确定灾区对接点,在海岛中选取一定数量的无人机配送中继站负责将物资送往需求点,再由终端卡车从中继站出发,对该区域所有需求点进行遍历,最终回到无人机配送中继站,从而形成一个两级海岛应急物流网络.von Boventer^[7]最早提出这种将网络中设施选址和路径优化问题综合考虑的选址-路径问题(location-routing problem,LRP),对问题中设施点的选址和运送成本的关系进行了研究.按照节点类型,LRP可分为单层选址-路径问题、双层选址-路径问题和多

收稿日期: 2021-07-11; 修回日期: 2022-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71871136).

作者简介: 陆玲玲(1998-),女,硕士生,E-mail:1419240991@qq.com;胡志华*(1977-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:zhhu@shmtu.edu.cn.

层选址-路径问题, 双层选址-路径问题^[8]通过决策物流网络中备选点的位置和数量来规划两个层级之间的卡车配送路径. 以物流系统总成本最小为目标函数, 建立两阶段随机规划模型^[9]; 加入生产计划与时间窗约束, 利用启发式算法求解^[10]. 此外, 建立 LRP 混合整数规划模型, 应用于生物质资源的供应领域^[11].

国内对于 LRP 的研究开始相对较晚, 汪寿阳等^[12]对 LRP 的主要研究进展作出综述, 分析了求解该问题相关算法的主要特点. 此后, 李冰等^[13]、马艳芳等^[14]、刘建仁^[15]研究了生鲜产品冷链物流背景下的选址-路径问题; 吴迪等^[16]、王诺等^[17]讨论了海运物流体系在构建与优化中所面临的选址-路径问题. 此外, LRP 在逆向物流^[18]和应急物流^[19]领域的研究也在逐步深入.

在现有海岛应急物流研究中, 林婉妮等^[20]给出了如何优化海空协同的群岛救援调度方案. 陈立家等^[21]运用遗传算法, 以舟山港港区船舶溢油事故风险应急联防设备选址为例, 求解了加权距离最小化的优化选址模型. 汪爱娇等^[22]以宁波-舟山海域应急基地选址为例, 运用贪婪算法对海上危险化学品应急基地的选址进行了优化. 佟士祺等^[23]针对群岛海运物流网络的规划布局问题, 采用主成分分析法对群岛内岛屿进行计算分析.

从上述文献的研究成果可以看出, 无人机设备在物流配送中的应用已经有了一定的研究深度. 然而, 目前尚未有文献将无人机设备引入海岛应急物流救援中. 与传统的 LRP 不同, 本文以海岛应急配送为研究背景, 考虑应急物资流向的单向性, 采用无人机在码头与区域配送中继站往返运输的形式. 在海岛应急配送的第一级网络中引入无人机, 因其具有运输成本低、机动性强等优势, 缩短了第二级卡车的配送距离, 更好地控制了系统总成本. 具体做法是对海岛需求点进行聚类分析, 求解不同聚类方案下系统运输总成本, 最终给出使得系统总成本最低的无人机配送中继站数量及选址方案, 并规划各配送区域的终端卡车配送最优路径.

1 问题描述

当前, 海岛应急物流通常采用轮渡将物资运送到对岸海岛(图 1(a)), 再由配送卡车对需求点进行服务. 然而, 由于多数需求点位于海岛中部, 道路交通遭到灾害破坏而被阻断, 配送卡车很难

按时完成繁重的配送任务. 为进一步提高海岛应急物流配送的科学性, 保证物资供应端与接收端的配送畅通性, 做到安全性好、配送量足、针对性强、覆盖面广, 本文将无人机配送引入海岛应急物流选址-路径问题中, 如图 1(b)所示. 将一批物资从供应端码头(D)运往海岛的无人机配送中继站(T), 再由中继站(T)派出卡车将物资分发到每个需求点(Q), 由此形成一个包括 3 类节点和 2 个层级相邻节点之间的配送路径的两级物流网络. 其中, D、T 和 Q 的坐标已知, T 的最大建造数量给定, 且容量不限, 能够承担区域内所有需求点的物资需求. 无人机在满足续航里程的基础上, 可以多次往返 D 和 T 节点, 每个 T 派出 1 台配送卡车对该区域所有需求点进行 1 次服务, 完成配送任务后返回中继站. 考虑无人机配送中继站的选址以及 D-T、T-Q 的配送路径, 使得各配送区域的卡车完成所有配送任务所行驶的总里程最短.

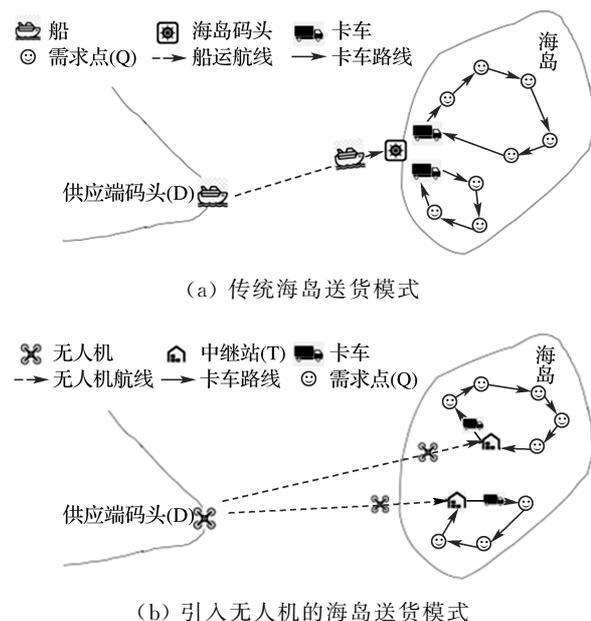


图 1 海岛应急物流两级配送网络对比图

Fig. 1 Comparison diagram of two-level delivery network for island emergency logistics

2 数学模型

在构建无人机-卡车海岛配送模型时, 需要分两个阶段完成. 第一步先给出不同的无人机配送中继站的选址和需求点分配方案, 接着求解各方案下各配送区域终端卡车的最优行驶路径, 并计算无人机和卡车完成所有配送任务的总成本, 最终优化目标是选取使得系统成本最小的方案. 模

型相关符号定义如下：

(1)集合

F , 无人机起点 D 集合, 通过 f 索引;

T , 备选中继站 T 集合, 通过 p, q 索引;

C , 终端需求点 Q 集合, 通过 m, n 索引;

K , 终端卡车集合, 通过 k 索引.

(2)参数

d_{mn} , 网络中节点 m 与节点 n 的距离;

t_{\max} , 无人机配送中继站最大建造数量;

e , 无人机最长续航里程;

c_d , 无人机单位距离运输成本;

c_t , 卡车单位距离运输成本.

(3)决策变量

$w_p \in \{0, 1\}$, 其中 $w_p = 1$ 表示节点 p 被选为中继站; 否则, $w_p = 0$.

$x_{mnk} \in \{0, 1\}$, 其中 $x_{mnk} = 1$ 表示卡车 k 从节点 m 到节点 n ; 否则, $x_{mnk} = 0$.

$y_{nk} \in \{0, 1\}$, 其中 $y_{nk} = 1$ 表示节点 n 由卡车 k 配送; 否则, $y_{nk} = 0$.

$z_{pm} \in \{0, 1\}$, 其中 $z_{pm} = 1$ 表示节点 m 由节点 p 提供服务; 否则, $z_{pm} = 0$.

2.1 模型假设

(1) D 、 T 和 Q 的地理位置已知, 各节点之间的距离已知, 且保持不变.

(2)无人机和卡车均按照两点间的直线距离行驶.

(3)无人机每次只为一个中继站服务.

(4)无人机只能在 D 和 T 处起降.

(5)不考虑越级配送, 即无人机只能将物资送到 T ; 卡车只能由 T 出发, 将物资送到区域内多个 Q .

(6)不考虑无人机和卡车的容量限制.

2.2 双层规划模型

(1)上层模型 U : 无人机配送中继站选址模型

在可选范围内确定中继站的数量和选址, 完成应急物资由一级网络节点向二级网络节点转运. 合理的中继站选址不仅能实现对附近需求点的全覆盖, 还可以使得无人机配送资源的效率最大化, 成为使得系统总成本最小化的选址基础. 本层模型以配送系统总成本(包括从物资供应端码头到无人机配送中继站的无人机运输成本和终端卡车配送成本)最小为目标. 其目标函数如式(1)所示, $A(x_{mnk})$ 表示终端卡车完成配送任务后的总成本, c 表示配送系统总成本.

$$\min c = \sum_{p \in T, f \in D} \omega_p d_{fp} c_d + \sum_{m, n \in TUC, k \in K} A(x_{mnk}) \quad (1)$$

约束(2)为每个需求点只由一个无人机配送中继站提供服务; 式(3)为每一个中继站与无人机出发点的直线距离需在无人机续航里程之内; 式(4)为无人机配送中继站选址的数量约束.

$$\sum_{p \in T} z_{pm} = 1; \quad \forall m \in C \quad (2)$$

$$d_{fp} \leq e; \quad \forall f \in F, p \in T \quad (3)$$

$$\sum_{p \in T} \omega_p \leq t_{\max} \quad (4)$$

变量取值约束为

$$\omega_p, z_{pm} \in \{0, 1\}$$

(2)下层模型 L : 终端卡车路径优化模型

在上层模型 U 所描述的无人机配送中继站选址及需求点划分的基础上, 为了最大化配送效率, 无人机将物资卸载到各区域的 T 后按原路返航, 继而由各区域派出 1 辆配送卡车装载物资对需求点进行服务. 下层模型 L 需要对各区域终端卡车的配送路径进行决策, 使得所有卡车在完成配送任务后配送总成本最小. 目标函数如式(5)所示.

$$\min A(x_{mnk}) = \sum_{m, n \in TUC, k \in K} d_{mn} x_{mnk} c_t \quad (5)$$

约束(6)保证每个需求点只被服务一次; 式(7)规定了卡车不能在两个无人机配送中继站之间行驶; 式(8)表示当卡车 k 经过需求点 n 时, 卡车 k 将对需求点 n 进行一次配送服务; 式(9)、(11)规定了每一个需求点只能由一辆卡车进行一次服务; 式(10)为平衡约束, 保证卡车在需求点进出各一次; 式(12)表示需求点 m 由无人机配送中继站 p 服务.

$$\sum_{m \in TUC, k \in K} x_{mnk} = 1; \quad \forall n \in C \quad (6)$$

$$\sum_{p, q \in T} x_{pqk} = 0; \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{m \in TUC} x_{mnk} = y_{nk}; \quad \forall n \in C, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} y_{nk} = 1; \quad \forall n \in C \quad (9)$$

$$\sum_{n \in TUC} x_{mnk} = \sum_{n \in TUC} x_{mnk}; \quad \forall m \in C, k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{m \in TUC} x_{mnk} \leq 1; \quad \forall n \in C, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{n \in TUC} (x_{pnk} + x_{mnk}) - z_{pm} \leq 1; \quad \forall p \in T, m \in C, k \in K \quad (12)$$

变量取值约束为

$$x_{mnk}, z_{pm}, y_{nk} \in \{0, 1\}$$

利用上述双层模型上下层协同优化的特点对

普陀山无人机配送中继站选址及终端卡车路径优化问题进行构建. 显然, 上层模型 U 和下层模型 L 均为 NP 难问题, 随着问题规模的扩大, 很难在短时间内求出满意解. 因此, 本文开发了一种两阶段算法用于求解上述模型.

3 算法设计

海岛无人机配送中继站选址-路径优化问题结合了选址问题和旅行商问题两个 NP 难问题, 不宜采用精确算法求解. 针对双层规划的主要算法有禁忌搜索算法、遗传算法、灵敏度分析等. 然而, 仅选用单一的启发式智能算法难以同时求解包含两个子问题的选址-路径优化问题. 据此, 本文对 K-means 算法和模拟退火算法重新进行设

计, 分阶段求解, 再根据求解结果对问题的整体加以优化. 具体思路是: 在上层模型 U 通过引入 K-means 算法, 随机选取一个满足中继站取值范围的数值作为聚类中心个数, 将一个区域内距离相对较小的需求点划分为一类, 由此确定区域内的集合覆盖模型, 得到无人机配送中继站的选址及服务需求点区域的划分方案; 在此基础上, 采用改进的模拟退火算法求解下层模型 L, 对每个区域的卡车配送路径进行优化, 求得各区域卡车完成配送任务后的配送成本, 并计算包含无人机和卡车总运输成本在内的系统总成本. 重复上述步骤, 完成对中继站数量、中继站选址、需求点分配方案以及卡车配送路径的优化, 最终得到使系统总成本最优的选址和配送方案. 算法流程如图 2 所示.

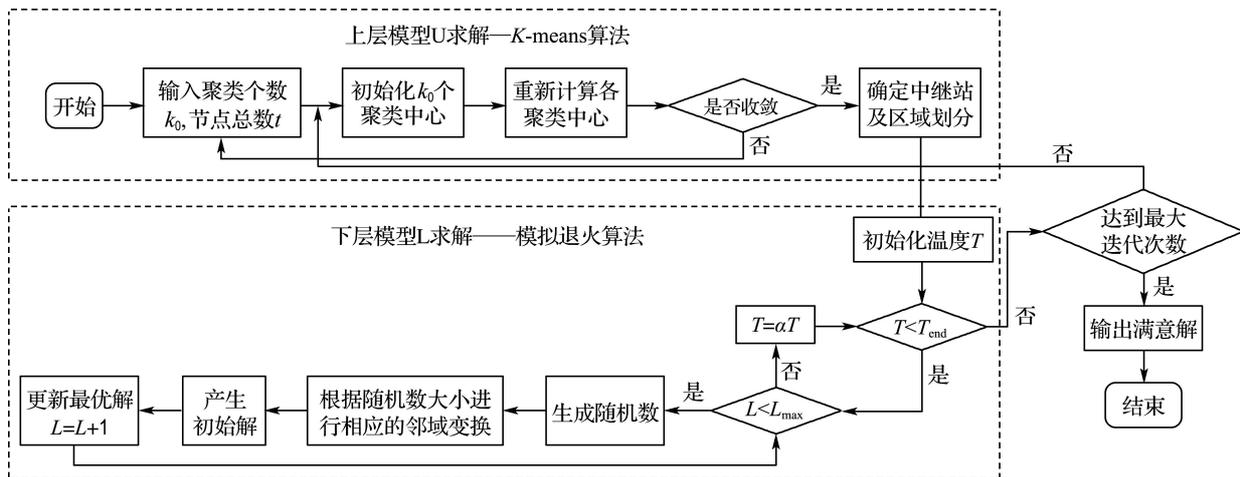


图 2 两阶段算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the two-stage algorithm

3.1 K-means 算法

由于本文所要分析的数据集规模较大, 选取的需求点地理位置均为其经纬度信息, 需求点分布不均且跨度较广, 因此选用 K-means 算法将需求点进行归类, 把一定范围内距离较小的需求点划分为同一配送区域. 将海岛需求点聚类用于确定无人机配送中继站的位置和数量, 以服务于分销区域的需求点. K-means 算法作为一种典型的聚类算法, 在最大化聚类内相似性的同时最小化了聚类间的相似性. 在需求点聚类中应用 K-means 算法时, 需求点被分成 k_0 个聚类, 目标函数是使得需求点与聚类中心的距离之和最小. K-means 算法能够在较短时间内处理规模较大的数

据集合. 在应用该算法的过程中, 首先需要确定 k_0 值, 随机选取 k_0 个初始聚类中心, 然后根据迭代法原理进行求解, 得到无人机配送中继站的选址及服务需求点区域的划分情况.

在算法 1 中, 步骤 3 的 N_j 表示第 j 个聚类中心所包含的样本个数.

算法 1 K-means 算法

输入 初始聚类中心个数 k_0 、节点总数 t

输出 聚类结果, 即无人机配送中继站选址及服务需求点区域划分

步骤 1 任选 k_0 个初始聚类中心;

步骤 2 将 $t - k_0$ 个需求点分配给距离最近的 t_h , 得到聚类集 $S_h, h = 1, 2, \dots, k_0$;

步骤 3 计算 $t'_h = \frac{1}{N_j} \sum_{C \in S_h} C_{t_h}; h = 1, 2, \dots, k_0$;

步骤 4 若 $t'_j \neq t_h (h=1, 2, \dots, k_0)$, 转步骤 2; 否则, 聚类结束.

3.2 改进的模拟退火算法

下层模型 L 研究从无人机配送中继站到终端需求点的卡车配送路径优化问题, 模拟退火算法是一种流行的迭代元启发式算法, 广泛用于解决离散和连续优化问题. 不同于梯度下降法, 模拟退火算法能够依赖其原理以一定的概率有效地跳出局部最优值, 增加了寻找全局最优解的可能性. 因此, 本文选用模拟退火算法求解终端卡车配送路径优化问题.

(1) 编码与初始解的产生

由于海岛无人机配送中继站选址-优化包含多个子问题, 考虑到本文所提出的两阶段算法采取的是自上而下的求解步骤, 因此, 对于第一阶段的选址和第二阶段的路径优化, 本文以统一的形式对配送网络进行编码. 在上层确定好无人机配送中继站集合 $\{1, 2, \dots, k_0\}$ 以及区域分配方案后, 在求解下层卡车配送路径优化时, 将 $t-k_0$ 个需求点进行编号, 一组解空间中, 首位代表中继站的编号, 从第二位编号往后代表卡车依次经过的需求点.

(2) 产生新解

对于传统的模拟退火算法, 在产生新路径时运用的是路径交换法, 主要做法是从所有需求点中随机抽取两个节点, 将这两个节点在原有路径中的位置进行交换, 其他节点位置保持不变, 从而产生一条新路径. 本文在使用路径交换法的基础上, 增加了采用路径倒置产生新解的方式. 以图 3(a) 中继站 1 的解空间为例, 若随机抽取 6 和 10 两个城市, 那么这两个城市之间的路径需要倒置排列以获得新解, 如图 3(b) 所示.

1	<u>6</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	11	2	15
---	----------	----------	----------	----------	-----------	----	---	----

(a) 原始解

1	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>10</u>	11	2	15
---	----------	----------	----------	----------	-----------	----	---	----

(b) 新解

图 3 中继站 1 新解的产生过程

Fig. 3 The generation process of the new solution of relay station 1

改进的模拟退火算法求解步骤如算法 2 所示.

算法 2 改进的模拟退火算法

输入 网络中所有节点的距离矩阵 D 、无人机中继站选址及分配结果 S

输出 各无人机中继站卡车配送最优路径 X_{best} 及距离 $E(X_{new})$

步骤 1 将无人机配送中继站和需求点进行编号, 随机产生一个初始解 X_0 , 令 $X_{best} = X_0$, 计算目标函数 $E(X_0)$.

步骤 2 设置初始温度 $T(0) = T_0$, 迭代次数 $i = 1$, 衰减函数 $T(i+1) = \alpha T(i)$, 链长 L_{max} .

While $T(i) > T_{end}$

for $L = 1$ to L_{max}

产生新解 X_{new} , 得到目标函数的增量 $\Delta E = E(X_{new}) - E(X_{best})$

若 $\Delta E < 0, X_{best} = X_{new}$

若 $\Delta E > 0, p = e^{-\frac{\Delta E}{T(i)}}$

否则

若 $c = \text{random}[0, 1] < p$

$X_{best} = X_{new}$

否则, X_{best} 不变

end

$i = i + 1$

end

步骤 3 输出当前最优值, 计算结束.

4 普陀山海岛配送实例分析

本文以浙江省舟山市普陀山海岛物流配送为例, 验证两阶段算法的可行性. 通过对政府官网和国内各大旅游网站的调研, 选取了 304 个需求点, 包含普陀山海岛内的景点、民宿、小区等物资需求量较大的节点. 无人机从朱家尖客运中心出发, 将应急物资送往无人机配送中继站, 再由各中继站派出卡车对需求点进行服务.

4.1 数据预处理

将需求点名称存入 Excel 文件后, 通过调用百度地图应用程序编程接口, 批量获取 304 个需求点的经纬度信息. 部分需求点地理坐标如表 1 所示. 在获取需求点经纬度坐标的基础上, 计算任意两个需求点的地表距离, 生成需求点的距离矩阵.

本文以普陀山海岛 304 个需求点和 1 个无人机出发点(朱家尖客运中心)的地理坐标为输入数据, 假设无人机的单位运输成本为 10 元/km, 卡车的单位运输成本为 30 元/km.

表 1 部分需求点地理坐标

Tab. 1 Geographical coordinates of some demand points

序号	名称	经度/(°E)	纬度/(°N)
1	法雨寺	122.397 6	30.007 98
2	慧济寺	122.397 7	30.017 69
3	紫竹林	122.399 5	29.983 92
4	佛顶山	122.396 1	30.015 55
5	普济禅寺	122.393 3	29.991 09
6	千步沙(农家乐)	122.397 4	30.000 14
7	荷塘月色民宿	122.384 6	29.993 16
8	喜舍	122.383 8	29.992 62
9	匠心心居民宿	122.383 7	29.992 82
10	红尘居精品民宿	122.382 9	29.992 05
11	瑞驿寺舍民宿	122.383 8	29.987 21
12	龙沙小区	122.383 3	29.994 25
13	龙沙二区	122.383 9	29.992 86
14	西山一区	122.384 0	29.983 44
15	西山二区	122.385 4	29.997 74

注:数据来源于百度地图.

4.2 无人机配送中继站选址及区域划分

将需求点的地理坐标作为 K -means 算法的输入数据,对 304 个分布在普陀山海岛的需求点进行聚类分析.为选取符合实际配送能力且成本相对较低的选址分配方案,在给定最大无人机配送中继站数量的情况下,上层算法通过设置不同的聚类中心数量,并提供各种数量下的最优需求点区域划分方案,由下层算法计算出该方案的系统总成本,在最大迭代次数之内选取使得系统总成本最低的配送方案.无人机配送中继站数量的优化过程如图 4 所示,可以看出,当聚类中心数量为 38 时,即开设 38 个无人机配送中继站时,系统总成本可以达到既定范围内的最低值.

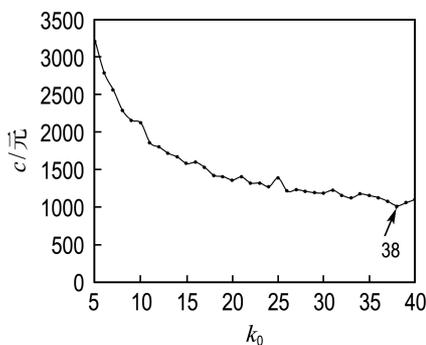


图 4 聚类中心数量优化过程

Fig. 4 Optimization processes of the number of cluster centers

海岛需求点的聚类结果如图 5 所示,部分中继站的名称及地理位置信息如表 2 所示.图 5 包含由 38 种不同颜色所构成的需求点集合,同一颜色的需求点被划分至一个配送区域,由该区域的无人机配送中继站负责配送物资.

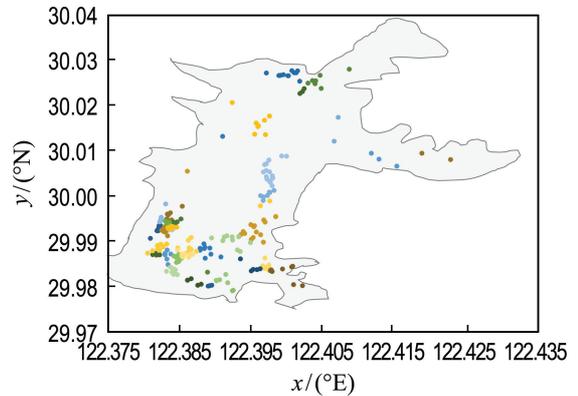


图 5 38 个聚类中心的聚类结果

Fig. 5 Clustering results of 38 cluster centers

表 2 部分无人机配送中继站信息

Tab. 2 Some drone delivery relay station informations

序号	地名	经度/(°E)	纬度/(°N)
1	芥饼禅院	122.381 2	29.987 89
2	熙客客栈	122.382 2	29.988 04
3	福祥居客栈	122.381 7	29.987 08
4	逆旅知行客舍	122.383 9	29.983 13
5	鑫悦驿站	122.383 6	29.994 20
6	禅音民宿	122.382 3	29.993 50
7	福城源客栈	122.383 6	29.993 20
8	龙沙静心客栈	122.382 3	29.992 92
9	归心小筑民宿	122.383 7	29.992 82
10	舟山佛家民宿	122.384 0	29.992 52

注:数据来源于百度地图.

38 个中继站在普陀山海岛地图中的坐标点如图 6 所示.中继站呈南面密集、北面零散的分布态势.这是由于普陀山地势南面平缓,北面高峻,人口大多聚集在南面平地一带,因此需求点也集中于南面.所有无人机配送中继站的选址均在无人机续航里程范围之内,无人机从朱家尖客运中心将物资运往中继站,规定无人机每次仅向一个中继站运送物资,完成任务后返回朱家尖客运中心,装载下一配送区域的物资运往对应的无人机配送中继站,依此类推,每个中继站均与无人机进行一次对接,完成无人机和卡车的海岛两级配送任务.

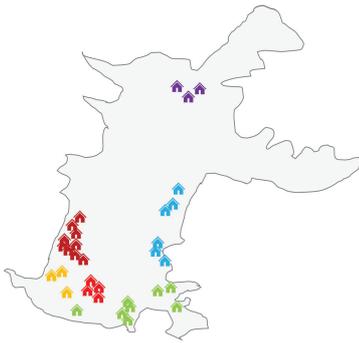


图 6 38 个无人机配送中继站分布图

Fig. 6 Distribution diagram of 38 drone delivery relay stations

4.3 终端路径优化

在此基础上,划分以无人机配送中继站为聚类中心的 38 个配送区域,每个区域拥有 1 辆配送卡车,为包含 38 个中继站在内的共 304 个需求点提供服务.无人机将货物运往各中继站后,卡车装载货物从中继站出发,沿着最优路径依次为所在区域需求点进行物资配送,完成任务后返回中继站.

以所有卡车完成配送任务的卡车配送成本最低为目标函数,利用改进的模拟退火算法求解,算法的参数设置为 $\alpha = 0.99, T_0 = 1\ 000, T_{\text{end}} = 0.01, L_{\text{max}} = 300$.

经计算,所有卡车完成配送任务所行驶的总里程为 28.43 km,配送成本为 853.0 元.各区域终端最优配送路径、卡车配送里程以及卡车配送成本如表 3 所示.

表 3 部分区域配送路径及卡车里程表

Tab. 3 Delivery routes and truck odometers in some regions

序号	配送路径(节点数)	配送里程/km	卡车配送成本/元
1	40,51,40(3)	1.17	35.2
2	129,121,...,129(5)	0.75	22.6
3	138,202,...,138(13)	0.71	21.4
4	303,279,...,303(6)	0.49	14.8
5	175,220,...,175(11)	0.67	20.1
6	101,243,...,101(8)	0.11	3.3
7	110,126,...,110(7)	0.24	7.1
8	137,229,...,137(9)	0.24	7.3
9	149,139,...,149(11)	0.87	26.1
10	219,180,...,219(17)	0.64	19.3

根据表 3 的配送情况,结合无人机从朱家尖客运中心飞往无人机配送中继站的路线,得到完整的无人机-卡车海岛两级物流配送网络,如图 7 所示.图 6 中相同颜色的中继站在图 7 中属于同一张两级配送网络图.

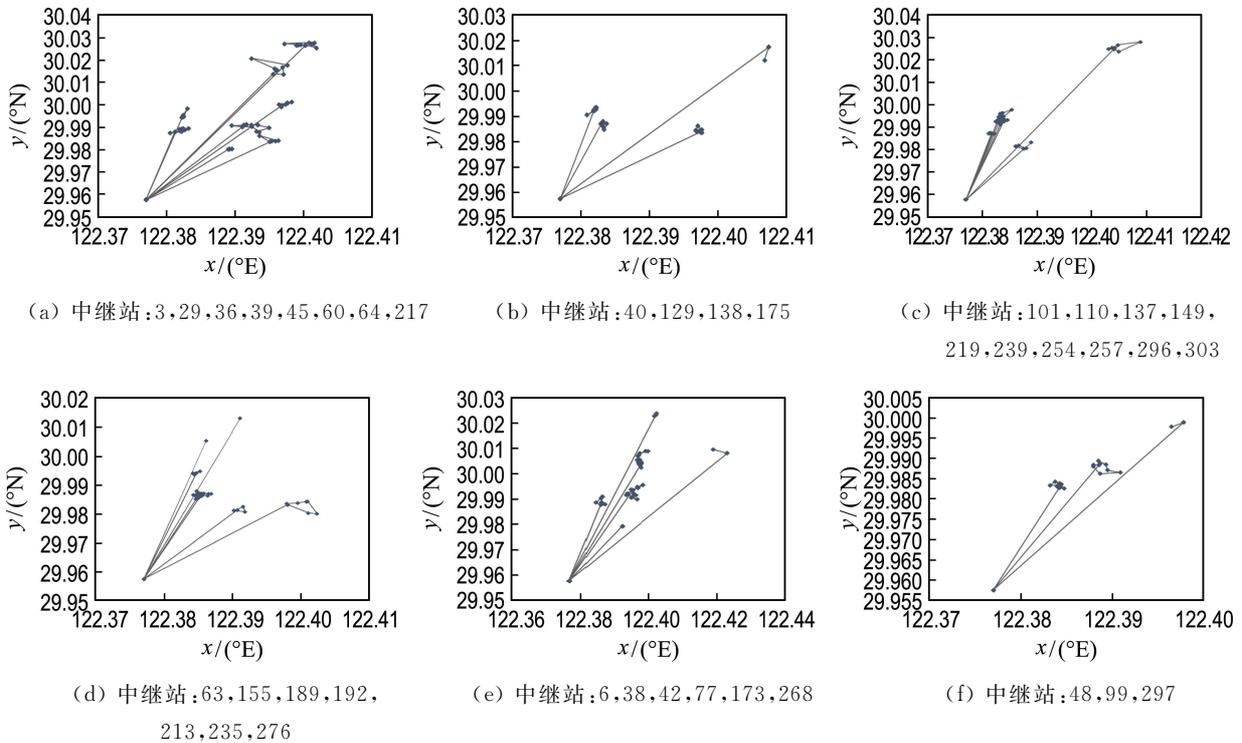


图 7 普陀山海岛应急物流两级网络图

Fig. 7 Two-level network chart of emergency logistics in Putuoshan Island

4.4 优化方法对比

为验证本文所采取的无人机配送中继站选址与卡车路径一体优化的效果,对同一算例设计选址与路径两段优化的策略,先确定无人机配送中继站的数量、选址,在此基础上进行卡车路径优化,求得系统总成本.两种优化方法求解结果对比

如表 4 所示(以 304 个需求点为例),将无人机配送中继站的数量、选址以及卡车路径同时进行优化的效果优于两段优化.通过设置不同的最大中继站建造数量,可以看出,随着最大中继站建造数量的增加,一体优化方法的总成本改进效果更明显.

表 4 两种优化结果对比
Tab. 4 Comparison of two optimization results

验证算例	一体优化			两段优化			改进率/%
	c_1 /元	t_{01}	s_1 /km	c_2 /元	t_{02}	s_2 /km	
$t_{\max}=20$	1 376.9	19	42.65	1 493.1	20	49.32	7.9
$t_{\max}=30$	1 175.8	30	35.89	1 286.6	30	38.74	8.7
$t_{\max}=40$	1 013.1	38	28.43	1 129.1	40	32.25	10.3

注: t_{\max} 为最大中继站建造数量; c 表示系统总成本; t_0 表示中继站数量; s 表示卡车配送里程.

5 结 语

海岛无人机配送中继站的选址-路径优化问题是影响海岛应急配送效率的关键性问题,对物资配送成本和物资转运灵活度有直接影响.本文针对海岛应急物流中引入无人机配送的特征,以系统配送总成本最小为目标,建立了海岛无人机配送中继站的选址-路径优化的双层规划模型.为了求解模型,设计了 K -means 聚类算法与改进的模拟退火算法相结合的两阶段算法.以浙江省舟山市普陀山海岛为背景,研究从朱家尖客运中心将一批物资运往普陀山海岛 304 个需求点的两级配送路径,在这些需求点中选取 38 个无人机配送中继站并为各个中继站所负责的配送区域规划卡车最优路线,使得系统总成本达到最低,为 1 013.1 元.与两段优化方法相比,本文所采用的一体优化方法使得系统总成本降低 10.3%.

本文以无人机和卡车配送系统总成本最小为建模目标,但没有考虑无人机和卡车的容量限制,因此,考虑包含客户需求量和运载工具容量限制是未来研究的主要方向之一.此外,利用 5G 网络超强的信息传送能力,移动网络海量的站点资源可以为无人机提供从点到线再到面的立体覆盖,从而实现无人机超视距控制,随时掌控无人机的位置和空闲状况、安全状况等,将是无人机应急物流领域一个跨时代的新应用场景.

参考文献:

- [1] D'ANDREA R. Guest editorial can drones deliver? [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(3): 647-648.
- [2] HOCHSTENBACH M, NOTTEBOOM C, THEYS B, *et al.* Design and control of an unmanned aerial vehicle for autonomous parcel delivery with transition from vertical take-off to forward flight - Verti KUL, a quadcopter tailsitter [J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2015, 7(4): 395-405.
- [3] 翁丹宁. 无人机物流配送的主要影响因素分析 [J]. *企业改革与管理*, 2015(8): 170, 218.
WENG Danning. Analysis of the main influencing factors of UAV logistics distribution [J]. *Enterprise Reform and Management*, 2015(8): 170, 218. (in Chinese)
- [4] 杨代勇. 无人机物流配送中面临的法律问题及规范 [J]. *物流技术*, 2020, 39(10): 18-22.
YANG Daiyong. Legal and regulatory issues faced in logistics distribution by UAV [J]. *Logistics Technology*, 2020, 39(10): 18-22. (in Chinese)
- [5] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone [J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4): 965-981.
- [6] BOCCIA M, MASONE A, SFORZA A, *et al.* A

- column-and-row generation approach for the flying sidekick travelling salesman problem [J]. **Transportation Research Part C - Emerging Technologies**, 2021, **124**: 102913.
- [7] VON BOVENTER E. The relationship between transportation costs and location rent in transportation problems [J]. **Journal of Regional Science**, 1961, **3**(2): 27-40.
- [8] JACOBSEN S K, MADSEN O B G. A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem [J]. **European Journal of Operational Research**, 1980, **5**(6): 378-387.
- [9] SHEN Z J M, ZHAN R L, ZHANG J W. The reliable facility location problem: formulations, heuristics, and approximation algorithms [J]. **INFORMS Journal on Computing**, 2011, **23**(3): 470-482.
- [10] BALA K, BRCANOV D, GVOZDENOVIC N. Two-echelon location routing synchronized with production schedules and time windows [J]. **Central European Journal of Operations Research**, 2017, **25**(3): 525-543.
- [11] CAO Jinxin, WANG Xiangting, GAO Jiachen. A two-echelon location-routing problem for biomass logistics systems [J]. **Biosystems Engineering**, 2021, **202**: 106-118.
- [12] 汪寿阳, 赵秋红, 夏国平. 集成物流管理系统中定位-运输路线安排问题的研究 [J]. **管理科学学报**, 2000, **3**(2): 69-75.
WANG Shouyang, ZHAO QiuHong, XIA Guoping. Research on combined location-routing problems in integrated logistics systems [J]. **Journal of Management Sciences in China**, 2000, **3**(2): 69-75. (in Chinese)
- [13] 李冰, 党佳俊. 多配送中心下生鲜农产品同步取送选址-路径优化 [J]. **智能系统学报**, 2020, **15**(1): 50-58.
LI Bing, DANG Jiajun. Fresh agricultural cargoes location-routing optimization with simultaneous pickup and delivery for multiple distribution centers [J]. **CAAI Transactions on Intelligent Systems**, 2020, **15**(1): 50-58. (in Chinese)
- [14] 马艳芳, 应斌, 周晓阳, 等. 基于冲突合作关系的生鲜选址-路径多主体优化模型与算法 [J]. **系统工程理论与实践**, 2020, **40**(12): 3194-3209.
MA Yanfang, YING Bin, ZHOU Xiaoyang, *et al.* Multi-agent optimization model and algorithm for perishable food location-routing problem with conflict and coordination [J]. **Systems Engineering - Theory and Practice**, 2020, **40**(12): 3194-3209. (in Chinese)
- [15] 刘建仁. 基于双层规划模型的冷链物流配送开放式车辆路径优化 [J]. **科技通报**, 2019, **35**(6): 208-211, 233.
LIU Jianren. Open vehicle routing optimization for cold chain logistics distribution based on bilevel programming model [J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2019, **35**(6): 208-211, 233. (in Chinese)
- [16] 吴迪, 王诺, 宋南奇, 等. 边远群岛物流体系的选址-库存-路径优化 [J]. **系统工程理论与实践**, 2016, **36**(12): 3175-3187.
WU Di, WANG Nuo, SONG Nanqi, *et al.* The optimization for location inventory routing problem of remote islands logistics system [J]. **Systems Engineering - Theory and Practice**, 2016, **36**(12): 3175-3187. (in Chinese)
- [17] 王诺, 田玺环, 吴迪, 等. 基于陆海协同的海上战略投送选址-路径优化 [J]. **系统工程理论与实践**, 2018, **38**(11): 2929-2941.
WANG Nuo, TIAN Xihuan, WU Di, *et al.* The location-routing optimization for strategic delivery on maritime in land-sea coordination [J]. **Systems Engineering - Theory and Practice**, 2018, **38**(11): 2929-2941. (in Chinese)
- [18] 梁喜, 凯文. 考虑客户聚类与产品回收的两级闭环物流网络选址-路径优化 [J]. **计算机应用**, 2019, **39**(2): 604-610.
LIANG Xi, KAI Wen. Two-echelon closed-loop logistics network location-routing optimization based on customer clustering and product recovery [J]. **Journal of Computer Applications**, 2019, **39**(2): 604-610. (in Chinese)
- [19] 彭春, 李金林, 王珊珊, 等. 多类应急资源配置的鲁棒选址-路径优化 [J]. **中国管理科学**, 2017, **25**(6): 143-150.
PENG Chun, LI Jinlin, WANG Shanshan, *et al.* Multiple relief resources robust location-routing optimization [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2017, **25**(6): 143-150. (in Chinese)
- [20] 林婉妮, 王诺, 沈铭棋, 等. 基于海空协同的群岛救援方案优化模型及算法 [J]. **运筹与管理**, 2020, **29**(5): 1-8.
LIN Wann, WANG Nuo, SHEN Mingqi, *et al.*

- Optimization model and algorithm for rescue plan of islands in shipping-air coordination [J]. **Operations Research and Management Science**, 2020, **29**(5): 1-8. (in Chinese)
- [21] 陈立家, 田延飞, 黄立文, 等. 港区船舶溢油应急联防设备库选址优化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2014, **24**(7): 172-176.
CHEN Lijia, TIAN Yanfei, HUANG Liwen, et al. Optimal location of ship oil spill emergency equipment depot for port areas [J]. **China Safety Science Journal**, 2014, **24**(7): 172-176. (in Chinese)
- [22] 汪爱娇, 林国龙, 王学锋. 海上危险化学品应急基地的优化选址 [J]. 安全与环境学报, 2011, **11**(3): 200-203.
WANG Aijiao, LIN Guolong, WANG Xuefeng. Optimal location of maritime emergency bases of dangerous chemicals [J]. **Journal of Safety and Environment**, 2011, **11**(3): 200-203. (in Chinese)
- [23] 佟士祺, 张晋. 基于轴辐理论的群岛海运物流网络构建及节点选择 [J]. 水运工程, 2014(3): 68-73.
TONG Shiqi, ZHANG Jin. Archipelago shipping logistics network construction and nodes selection based on hub-spoke theory [J]. **Port and Waterway Engineering**, 2014(3): 68-73. (in Chinese)

Location-routing optimization of island drone delivery relay station

LU Lingling, HU Zhihua*

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to break through the docking restrictions of island emergency logistics ferry transportation and reduce the total cost of island emergency delivery, the drones are used to transport emergency supplies from the dock to the island drone delivery relay station, and then the trucks sent by the relay station provide terminal distribution services to the demand points. A two-level programming model for the location-routing optimization of the island drone delivery relay station is established, and a two-stage algorithm combining the K -means clustering algorithm and the improved simulated annealing algorithm is designed to solve the model. Taking Putuoshan Island in Zhoushan City, Zhejiang Province as a typical scene, the two-level delivery route for a batch of materials transported from Zhujiajian Passenger Transport Center to 304 demand points on Putuoshan Island is studied. The analysis results of the calculation example show that the minimum total system cost of the delivery trucks dispatched by 38 relay stations after completing all tasks is 1 013.1 yuan. Comparison between the integrated optimization method of location and path design and the two-stage optimization method of location first and then path optimization shows that the total cost decreases by 10.3%.

Key words: drone delivery; two-level programming; island emergency logistics; K -means clustering algorithm; simulated annealing algorithm