

文章编号:1672-4747(2022)02-0095-10

面向巡检车与无人机协同电力巡检的车辆路径规划方法

曹峰^{1,2}, 崔少华², 荆治家¹, 姚宝珍¹

(1. 大连理工大学, 汽车工程学院, 大连 116024; 2. 北京航空航天大学, 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要:为解决电力巡检无人机续航时间短、远距离机动性弱等问题,电力企业试点推广了无人机与巡检车协同巡检的新型作业模式,即车机协同巡检。这种模式实现了无人机和巡检车的优势互补,可用于大面积输电线路巡检作业。车机协同电力巡检作业过程中,巡检车的行驶路径直接影响无人机任务杆塔分配方案和巡检效率。考虑到车机协同电力巡检作业特性,将驻车点选址、驻车点处无人机任务分配及巡检车路径规划问题相结合,提出了一种面向大面积巡检区域的巡检车路径规划方法。本文以最小化巡检车完成整片运维区域巡检任务的总作业时间为优化目标,在考虑每个驻车点处无人机巡检任务分配的基础上构建了车机协同巡检车辆路径模型,设计了一种多层嵌套的启发式算法进行求解,可根据运维区域杆塔分布求解近似全局最优的驻车点选址方案及该方案下巡检车的近似最优行驶路径。最后,基于真实杆塔数据进行的实例分析展示了算法的求解效果,得出了巡检车在每个工作日访问的驻车点序列及行驶路径,可为电力企业编排车机协同巡检作业排班计划提供参考。

关键词:智能交通;车辆路径;启发式算法;车机协同巡检;任务分配

中图分类号:U492.2*2

文献标志码:A

DOI:10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.07.043

Vehicle Route Planning Method for Cooperative Power Inspection by Inspection Vehicles and Drones

CAO Feng^{1,2}, CUI Shao-hua², JING Zhi-jia¹, YAO Bao-zhen¹

(1. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Power inspection drones have limitations such as short endurance and weak mobility over long distances. Therefore, electric companies have employed a new operation mode through cooperative inspection using drones and inspection vehicles. This mode can also be called vehicle-drone cooperative inspection and can be used to realize the complementary advantages of drones and inspection vehicles. The mode is usually used for large-area transmission line inspection operations. In the cooperative inspection process, the driving path of the inspection vehicle directly impacts the drones' task allocation scheme and inspection efficiency. This study considers the operational characteristics of cooperative inspection and combines the site selection of parking spots, drones' task allocation for each parking spot, and inspection vehicle route planning problems. Accordingly, an inspection vehicle route planning model is constructed for vehicle-drone cooperative inspection opera-

收稿日期:2021-07-31

录用日期:2021-10-28

网络首发:2021-11-05

审稿日期:2021-07-31~08-04; 08-10~08-17; 09-02~09-11; 10-20~10-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFE0201200)

作者简介:曹峰(1997—),男,博士研究生,研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:caofeng07@buaa.edu.cn

通信作者:姚宝珍(1976—),女,教授,研究方向为智能交通,E-mail:yaobaozhen@dlut.edu.cn

引文格式:曹峰,崔少华,荆治家,等.面向巡检车与无人机协同电力巡检的车辆路径规划方法[J].交通运输工程与信息学报,2022,20(2):95-104.

CAO Feng, CUI Shao-hua, JING Zhi-jia, et al. Vehicle Route Planning Method for Cooperative Power Inspection by Inspection Vehicles and Drones[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20(2): 95-104.

tions considering the drones' tasks at each parking spot. The optimization goal of the model is to minimize the total operation time required by the inspection vehicle to complete all the inspection tasks. A multi-layer nested heuristic algorithm is designed to solve this model. This algorithm solves the approximate global optimal site selection scheme for parking spots and the approximate optimal driving path of the inspection vehicle under this scheme. Finally, a case study based on actual tower data is used to demonstrate the effectiveness of the algorithm. The proposed algorithm yields a sequence of parking spots and driving paths visited by the inspection vehicle during each working day. The results of this study can be used as a reference for power companies when designing a scheduling plan for vehicle-drone cooperative inspection operations.

Key words: intelligent transportation; vehicle routes; heuristic algorithm; vehicle-drone cooperative inspection; task assignment

0 引言

小型多旋翼无人机凭借其机动性强、作业效率高、易于发现杆塔平口以上缺陷等人工巡检无法比拟的优势,目前已成为输电线路巡检的主要设备之一^[1-2]。为了解决无人机电力巡检作业中存在的航迹规划难、大范围快速机动性差、自主规划控制能力弱等问题,部分电力企业提出了巡检车与无人机协同巡检(即车机协同巡检)作业模式。该作业模式中,智能巡检车为无人机提供能源补给并运载其进行远距离移动,由无人机直接对杆塔进行巡检,可实现巡检车与无人机的优势互补,极大程度提升了电力巡检的自动化程度和巡检效率。电力企业日常运营过程中,为了更好地管理巡检作业,需要合理编排巡检排班方案。车机协同巡检排班方案涉及每个工作日巡检车作业范围、驻车点位置、行驶路径等,科学的排班方案能够显著提升巡检效率,最大程度发挥车机协同巡检的优势。

目前,物流配送、农业植保、电力巡检等领域正试点推广车辆与无人机协同作业模式,将车辆在地面远距离移动性能和无人机在中小范围作业能力相结合,突破传统单车或单机作业的局限性。特别地,在输电线路巡检领域,无人机目前已成为重要的巡检方式之一,国内外学者针对无人机电力巡检作业过程中的任务分配^[3]、路径规划^[4]等问题展开了深入的研究。

长期以来,车辆路径及其变种问题已被广泛研究^[5]并解决了众多实际问题^[6]。随着车辆与无人机协同作业模式的推广,车辆携带无人机的路径问题已成为车辆路径问题的热点研究方向之一^[7-8]。在旅行商模型的基础上建立的TSP-D(Traveling Salesmen Problem with Drone)模型可专门用

于研究车辆与无人机协同路径规划问题。该模型中,无人机作为车辆的“助手”,帮助车辆完成部分客户点的配送服务,该模型需要在同一个优化目标的基础上协同求解车辆的路径和无人机的路径。Roberti等人^[9]针对多种TSP-D的变体,提出了一种紧凑的混合整数线性模型,并使用动态编程递归的方式求解“最后一英里”交付问题中车辆和无人机的路径规划。王菊^[10]根据电力巡检作业约束,基于TSP-D模型建立了一种面向电力巡检的TSP-D模型(TTI-TSP-D),设计了一种奇偶分层编码的遗传算法对上述模型进行求解,并通过实例分析验证了算法的正确性和有效性。此外,根据车辆与无人机在协同作业中携带的货物类型、访问的客户点类型等不同,多种更具针对性的模型被提出。Murray等人^[11]针对两种车辆与无人机协同作业方式,分别提出了FSTSP(Flying Sidekick Traveling Salesman Problem)模型和PDSTSP(Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem)模型,并设计了启发式算法进行求解。不同于上述模型中车辆和无人机均能完成部分交付任务的作业方式,实际中存在车辆仅用于运载无人机和货物,不直接访问任一客户点的模式。该模式下车辆和无人机的路径问题可转化成两级配送问题,包含三个设施层次:一级配送中心、二级配送中心、客户点。其中,车辆只访问第一级配送网络中的一级配送中心和二级配送中心,无人机在第二级配送网络中从二级配送中心出发前往客户点完成配送任务。杨溢乐^[12]根据配送中心、驻车点、客户点组成的两级物流配送网络,建立了两级选址-路径(2E-LRP)模型。针对该模型,采用先求解无人机路由层,再求解车辆路由层的方式,设计了模拟退火算法进行求解,结合两层的结果计算

全局最优解。

车机协同巡检作业模式下,巡检车只负责运载无人机,不直接对输电线路进行巡检。该问题若采用两级配送模型进行建模,能够更加真实地描述车辆和无人机构成的网络拓扑结构,也便于采用多阶段求解算法对问题进行简化计算,降低求解复杂度和计算规模,但是该种求解方式仅能得到各阶段局部最优解的叠加。本文针对输电线路车机协同巡检作业模式下的车辆路径问题,考虑到电力企业实际作业需求与约束,设计多层次嵌套的启发式算法综合求解无人机任务分配、驻车点选址、巡检车路径规划三个问题。本文所提方法能够得到近似全局最优的驻车点选址方案及各个工作日巡检车的行驶路径,为电力企业制定车机协同巡检作业排班方案提供科学有效的决策方法。

1 车机协同巡检下巡检车路径规划模型

巡检车路径规划问题实际上包括巡检车驻车点选址、在每个驻车点处无人机的任务分配并基于分配方案优化巡检车访问驻车点的顺序。本研究的目的是在进行大面积电力巡检作业过程前,通过求解巡检车最优行驶路径来编排合理的作业排班方案,从而提升车机协同巡检作业效率。

1.1 问题描述

假设电力公司运维区域内有一个运维站、 n 个备选驻车点、 m 个待巡检的杆塔。现有一辆巡检车,每个工作日从运维站出发,访问若干个驻车点后返回运维站。巡检车在每个驻车点处驻车一次,多架无人机由巡检车起降平台上起飞,前往各自目标杆塔,完成相应巡检任务后降落至巡检车起降平台进行补能或由巡检车运载前往下一作业区域。巡检车每个工作日的总作业时间由行驶时间和在驻车点处等待无人机巡检作业时间两部分组成。

已知运维站、备选驻车点、待巡检杆塔的位置坐标。根据作业约束及相关参数,以完成整个运维区域巡检任务的总作业时间最小为优化目标,预先编排巡检排班计划,包括从备选驻车点中选择合适的驻车点集合,计算所需工作日数量并规划巡检车每个工作日访问被选中的驻车点的路径。

1.2 问题假设

考虑到模型建立及求解的复杂性,增加模型

的适应性及可理解性,同时贴近电力巡检真实作业场景,本文对巡检车路径规划模型做以下假设:

(1)访问假设:由于运维站与待巡杆塔间的距离远远超过无人机单次飞行的最远距离,所以无人机必须由巡检车运载至各驻车点后方可访问待巡杆塔。由于道路限制,巡检车只能访问运维站和驻车点,不能访问待巡杆塔。

(2)运维站起始假设:每个工作日巡检车从运维站出发,完成当天全部巡检任务后返回运维站。

(3)路径假设:由于本文研究的巡检车路径仅为巡检车访问驻车点的先后顺序,不依据真实路网对巡检车进行实际路径规划,故假设巡检车从上一个驻车点到下一个驻车点行驶距离为地理直线距离,由两点间经纬度坐标直接计算可得。

(4)巡检车假设:巡检车的能源方式一般为燃油,可满足单日作业需求,巡检车数量为1辆。

(5)工作时间假设:由于车机协同巡检作业模式仍需巡检人员操作设备,故巡检车单个工作日作业时长不超过电力企业设定的巡检人员工作日最长作业时长。

(6)起降及充电假设:无人机更换电池及起降时间忽略不计;巡检车上搭载多块无人机电池,可满足单个工作日无人机更换电池的需求。

(7)无人机任务假设:巡检车上搭载的多架无人机是同质的,且无人机往返驻车点与目标杆塔间的飞行速度相同;无人机在待巡检杆塔处的巡检时间均相同;无人机单次起降只完成一基杆塔的巡检任务;无人机必须同点起降;无人机在驻车点与待巡检杆塔间直线飞行,忽略无人机起飞与降落阶段的飞行距离。

1.3 数学模型

车机协同巡检下巡检车路径规划模型的标号和参数说明如表1所示。

表1 模型标号和参数说明

符号	参数含义
A	运维站集合, $A = \{a_0\}$
P	驻车点集合, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$
集合	T 待巡检杆塔集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$
符号	G 车辆路径点集合, $G = P \cup A$
U	无人机集合, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$
W	工作日集合, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_q\}$
目标	Z_{total} 巡检车总作业时间
函数	Z_q 第 q 个工作日巡检车的作业时间, $q \in W$

续表1

符号	参数含义
Z_{\max}	电力企业设定的巡检人员工作日最长作业时长
V	巡检车平均行驶速度
$D_{i'j'}$	车辆路径点 <i>i'</i> 和车辆路径点 <i>j'</i> 之间的地理直线距离, $i' \in G, j' \in G$
参数 C_i	驻车点 <i>i</i> 处巡检车的驻车时间,即驻车点 <i>i</i> 的巡检时间, $i \in P$
d_{it}	杆塔 <i>t</i> 和驻车点 <i>i</i> 间的地理直线距离, $t \in T$
v_k	无人机 <i>k</i> 往返杆塔与驻车点间的平均飞行速度, $k \in U$
c_t	无人机在杆塔 <i>t</i> 处的巡检时间
变量 z_{ik}	无人机 <i>k</i> 在驻车点 <i>i</i> 处的任务时间
f_{ik}	无人机 <i>k</i> 在驻车点 <i>i</i> 处起飞的次数
$h_{i'}$	第 <i>i'</i> 个备选驻车点或运维站被选择作为车辆路径点时为1,否则为0
x_{qi}	巡检车第 <i>q</i> 个工作日访问第 <i>i</i> 个备选驻车点时为1,否则为0
$y_{qi'j'}$	巡检车第 <i>q</i> 个工作日由车辆路径点 <i>i'</i> 行驶至车辆路径点 <i>j'</i> 时为1,否则为0
r_{it}	第 <i>t</i> 个待巡检杆塔由第 <i>i</i> 个备选驻车点服务时为1,否则为0
s_{ik}	第 <i>t</i> 个待巡检杆塔由无人机 <i>k</i> 巡检时为1,否则为0

车机协同巡检作业模式下巡检车路径规划模型如下:

$$\min Z_{\text{total}} = \sum_{q \in W} Z_q \quad (1)$$

$$\text{s.t. } Z_q = \sum_{i \in P} h_i \times x_{qi} \times C_i + \sum_{i' \in G} \sum_{j' \in G} \frac{h_{i'} \times h_{j'} \times y_{qi'j'} \times D_{i'j'}}{V} \leq Z_{\max}, \forall q \in W \quad (2)$$

$$\sum_{j \in P} y_{qij} = \sum_{j \in P} y_{qji} = 1, \forall q \in W, i \in A \quad (3)$$

$$\sum_{q \in W} \sum_{i' \in G} h_{i'} \times y_{qi'j} = 1, j \in P \quad (4)$$

$$\sum_{q \in W} \sum_{j' \in G} h_{j'} \times y_{qi'j'} = 1, i \in P \quad (5)$$

$$\sum_{i \in P} h_i \times r_{it} = 1, t \in T \quad (6)$$

$$y_{qi'j'} \leq x_{qi'} \times x_{qj'}, i' \in G, j' \in G, q \in W \quad (7)$$

$$h_i \geq x_{qi}, \forall i \in P, q \in W \quad (8)$$

$$h_{i'}, y_{qi'j'} \in \{0, 1\}, \forall i', j' \in G \quad (9)$$

$$x_{qi}, r_{it} \in \{0, 1\}, \forall i \in P, q \in W, t \in T \quad (10)$$

$$\text{其中, } C_i = h_i \times \max z_{ik}, \forall i \in P \quad (11)$$

$$z_{ik} = h_i \times \left\{ \frac{[2 \times \sum_{t \in T} (r_{it} \times s_{ik} \times d_{it})]}{v} + \sum_{t \in T} (r_{it} \times s_{ik} \times c_t) \right\}, \forall i \in P, k \in U \quad (12)$$

$$\sum_{k \in U} s_{ik} = 1, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{k \in U} h_i \times f_{ik} = \sum_{t \in T} r_{it}, \forall i \in P \quad (14)$$

$$s_{ik} \in \{0, 1\}, t \in T, k \in U \quad (15)$$

$$z_{ik} \geq 0, \forall i \in P, k \in U \quad (16)$$

式(1)表示优化目标为最小化巡检车总作业时间,即所有工作日作业时间之和;式(2)表示每个工作日巡检车的作业时间由该工作日访问的被选中驻车点的总巡检时间与该工作日巡检车总行驶时间两部分组成,且每个工作日巡检车的作业时长不超过电力企业设定的巡检人员工作日最长作业时长;式(3)表示巡检车每个工作日由运维站驶出,并最终返回运维站;式(4)和式(5)共同表示每个被选中的驻车点都只能被巡检车在某个工作日访问有且仅有一次,且访问某一被选中的驻车点后必会离开该驻车点;式(6)表示所有待巡杆塔均被有且仅有一个被选中的驻车点服务;式(7)表示某工作日的任意一段车辆路径的两个端点,必被该工作日的巡检车访问;式(8)表示若某个驻车点在某个工作日被巡检车访问,则该驻车点必为被选中的驻车点;式(9)和式(10)为决策变量约束。

其中,由于巡检车在每个驻车点处需放飞所携带的无人机完成巡检任务,所有无人机同时作业,当且仅当所有无人机均完成各自巡检任务并降落至巡检车时,巡检车才会运载全部无人机前往下一驻车点,故式(11)表示巡检车在每个被选中驻车点处的巡检时间等于该驻车点耗时最长的无人机的任务时间;式(12)表示在每个被选中驻车点处,每架无人机的任务时间由往返驻车点与杆塔间的飞行时间和在杆塔处的巡检时间两部分组成;式(13)表示每基杆塔有且仅被一架无人机访问一次,式(14)表示在每个被选中的驻车点处,所有无人机的总起飞次数等于该驻车点服务的杆塔总数,式(13)和式(14)共同表示单架无人机单次起飞只巡检一基杆塔;式(15)和式(16)表示变量属性,其中 s_{ik} 为0-1变量, z_{ik} 为非负实数。

2 算法设计

车机协同巡检作业模式下巡检车路径规划问

题是在备选驻车点中选择合适的驻车点进行巡检作业,并根据已选择驻车点的巡检时间规划巡检车的行驶路径。该问题实际上需要解决驻车点选址、各驻车点无人机任务分配、巡检车路径规划三个问题。其中,驻车点选址是无人机任务分配和巡检车路径规划的基础,各驻车点无人机任务分配是为了计算驻车点处巡检时间以提供车辆路径时间参数。驻车点选址方案直接影响无人机任务序列和巡检车行驶路径,同时,决策者难以在备选驻车点集合中确定最优的被选中驻车点的数量和组合。基于此,本文以驻车点选址算法为主程序,巡检车路径规划算法为子程序,计算巡检车最优路径的总作业时间并作为驻车点选址方案优劣的评价标准。此外,无人机任务分配算法为巡检车路径规划算法的子程序,用来计算各被选中驻车点的巡检时间并传入巡检车路径规划算法。综上,本文设计的多层嵌套的启发式算法求解流程如图1所示。主程序每次迭代都会生成一个新的驻车点选址方案,并由无人机任务分配算法计算该选址方案下各驻车点的巡检时间传入巡检车路径规划算法。巡检车路径规划算法计算该选址方案下近似最优的巡检车行驶路径并将该路径的总作业时间传入主程序,以使驻车点选址主程序朝着全局最优解的方向演变。

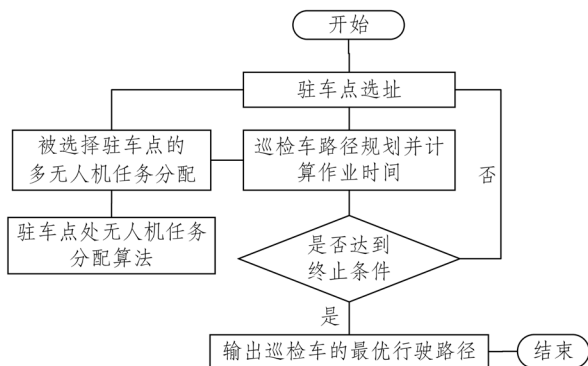


图1 巡检车路径规划问题求解算法流程图

2.1 驻车点选址算法

根据驻车点选址问题的特性,本文选择了一种在水资源领域应用较为成功的全局优化算法——SCE-UA算法作为主程序。SCE-UA算法最早由Duan等人^[13]提出,相较于遗传算法等传统进化算法,具有更强的鲁棒性和更佳的收敛性。

本文使用SCE-UA算法求解驻车点选址问题的流程如图2所示,具体步骤如下所述:

(1)初始化。设定初始化参数,包括参与进化

的复合形的个数 $v(v \geq 1)$ 和每个复合形所包含的样本数目 $m(m \geq n + 1)$,其中 n 为参数个数,所以,样本点数目 $s = v \times m$ 。

(2)产生样本。随机产生 s 个样本点,并逐一判断各样本点是否可行,若不可行则重新产生样本,直至产生 s 个可行的样本点。其中,判断样本点是否可行的方式为判断所有的杆塔是否都有至少一个小于作业半径距离的被选中的驻车点为其服务。若所有杆塔都有对应的小于作业半径距离的驻车点为其服务,则样本点可行,反之不可行。本算法的样本点编码方式为0-1编码,各样本点的编码长度等于备选驻车点的数目。编码位为0则表示该编码位代表的驻车点没有被选中,反之,为1则表示被选中。以10个备选驻车点为例,[0110111010]为一个样本点编码示例,该样本点编码长度为10,每一位编码位都对应一个驻车点。该样本点编码表示第2、3、5、6、7、9号驻车点被选中,1、4、8、10号驻车点没有被选中。

(3)排序标号。计算每个样本点的函数值,根据函数值的大小对样本点进行排序及标号。其中,每个样本点的函数值为在该样本点代表的选址方案下,巡检车的最优总作业时间,由巡检车路径规划算法计算得出。

(4)构造复合形。将 s 个样本点划分为 v 个复合形,每个复合形包含 m 个样本点。

(5)复合形进化。复合形进化是SCE-UA算法的核心部分,采用竞争的复合形进化算法(CCE)对复合形进行进化操作。

2.2 驻车点处无人机任务分配算法

在每个驻车点处多架无人机同时作业,需要对巡检车携带的多架无人机进行任务分配,以使各无人机任务时间相近,避免出现多架无人机长时间等待某架无人机的情况,缩短各驻车点的巡检时间。本文采用遗传算法求解各驻车点处无人机的任务序列,并将耗时最长的无人机的任务时间作为该驻车点的巡检时间传入巡检车路径规划子程序。

遗传算法的染色体编码方式采用实数编码,每个染色体均为1行 m' 列的数列,其中 m' 为该驻车点服务的杆塔总数。划分每个驻车点服务的杆塔集合的方法为:每个待巡检杆塔均由距离最近的已选中的驻车点服务。同时,通过设置中断点的方式将完整染色体分为多个子段,中断点的个数为 $k-1$,其中, k 为无人机架数,每个染色体子段

对应一架无人机的任务序列。初始染色体的生成方式为随机生成 $1\sim m'$ 的随机数列。

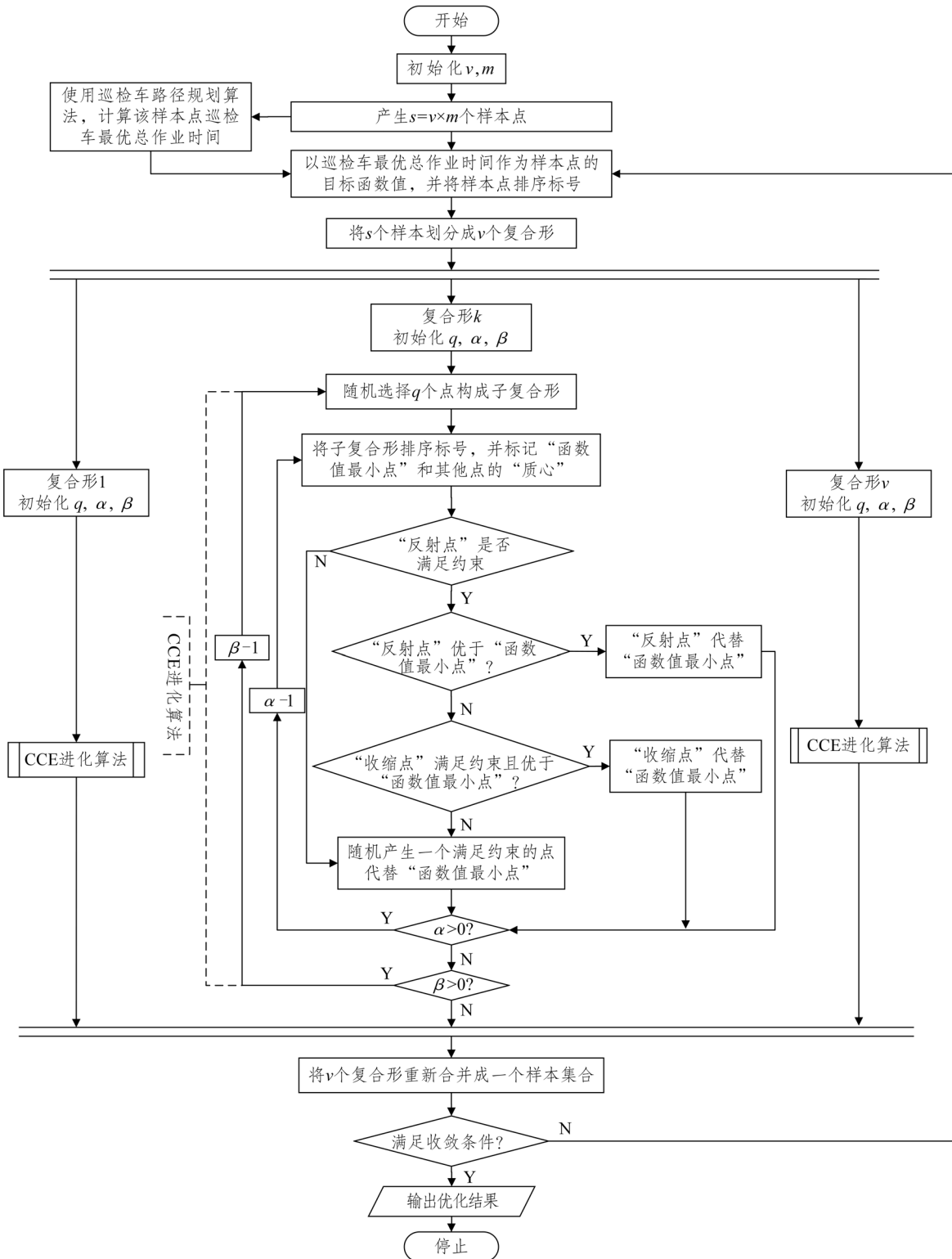


图 2 SCE-UA 算法流程图

种群中每个个体的适应度函数值为该个体染色体对应的无人机任务分配方案中耗时最长的无人机的任务时间。
选择运算采用轮盘赌法从种群中选择最优个

体, 个体选择的概率与其适应度函数值成反比。
交叉算子采用 2-opt 方法, 变异算子采用随机选择两对不相邻基因位互换基因值的方式。

2.3 巡检车路径规划算法

巡检车路径规划算法是根据任意一个可行的选址方案及该选址方案下每个被选中的驻车点的巡检时间,求解巡检车从运维站出发访问所有被选中的驻车点的最优路径,即算法的输入为选址方案及每个被选中的驻车点的巡检时间,输出为巡检车的最优路径及总作业时间。进一步地,由于巡检车需要满足工作时间约束,在单个工作日无法完成全部巡检任务的情况下,需要将巡检任务划分为多个工作日的巡检任务,并规划每个工作日巡检车的行驶路径。基于以上分析,本文采用免疫算法进行巡检车路径规划。

免疫算法的抗原为巡检车路径的总作业时间,包括巡检车的行驶时间及所有被选中的驻车点的巡检时间两部分。

免疫算法抗体编码方式为实数编码。根据驻车点选址主程序中传入的驻车点选址方案,确定被选中的驻车点的集合。若被选中的驻车点的个数为 p ,则随机生成多个1行 p 列的数列组成初始抗体群。其中,每个抗体都代表一条巡检车访问驻车点的序列,每个初始抗体中的各元素均为在该选址方案下某一个驻车点的编号。

进一步地,由于每个抗体表示的巡检车的路径为多个工作日的路径,本算法采用从抗体第一位开始依次添加路径点并判断作业时长的方式对路径进行划分。若添加路径点前该路径满足单个工作日最长作业时长约束,但添加后不满足该约束,则添加前的路径作为一个工作日的路径,并从添加的这第一位开始,继续进行上述操作,直到所有位都被分配到某一个工作日的路径中为止。

本算法中对抗体群中的个体评价标准采用的是个体的期望繁殖率。生成父代抗体群的方式为在初始抗体群中按期望繁殖率降序对抗体进行排序,取与初始抗体群规模相同大小的前 N 个抗体作为父代抗体群。

对父代抗体群执行免疫操作,包括选择、交叉、变异等,由父代抗体群生成子代抗体群,再将记忆库中的个体取出,共同组成新抗体群。其中,本算法的个体选择方法为轮盘赌法,个体的期望繁殖率直接决定其被选择的概率。本算法的交叉操作采用2-opt的方法,从父代抗体生成子代抗体。变异操作采用随机选择变异位进行变异的方式。

3 算例分析

为了测试本文所提算法的性能,本研究采用真实设备数据及杆塔数据进行实例计算及分析。本节对比了Gurobi求解器和本文提出的多层嵌套的启发式算法对小规模算例的计算效果,并利用本文所提算法进行了大规模算例的求解,可作为电力企业制定排班方案的参考示例。

3.1 算法对比分析

为了测试本文提出的多层嵌套的启发式算法的求解效果,针对小规模算例分别采用Gurobi求解器和本文所提算法进行求解。其中,由于本文所建立的模型中存在多处变量相乘,导致Gurobi求解器无法求解,故本研究在求解器中采用穷举法进行求解。具体而言,对于 h_i 每一种可能的取值,都分别求解该取值下无人机的任务分配结果及巡检车路径规划结果。最终,求解器输出最优的 h_i 值及其对应的排班方案作为该算例的精确最优解。对于每组小规模算例,设定Gurobi求解器求解限制时间为3 600 s,本文所提算法运行10次取最好结果。本文实验均在同一实验环境下进行,运行环境为CPU(Intel(R) Core(TM) i7-6700)/RAM(16GB)的个人计算机,编程语言为MATLAB R2020a。

根据实际工程数据及大量实验,确定相关实验参数如下:

(1)电力巡检相关作业参数:巡检车数量为1辆,平均行驶速度为40 km/h,单次驻车作业半径为2.5 km,无人机往返电力杆塔与驻车点间的平均飞行速度为60 km/h,每个电力杆塔处的巡检时间为20 min。

(2)SCE-UA算法相关参数:复合形个数为20,每个复合形的样本个数为10,最大迭代次数为100,子复合形中点的选取个数为10,产生子代个数为1。

(3)遗传算法相关参数:种群规模为24,最大迭代次数为100,交叉概率为0.9,变异概率为0.01。

(4)免疫算法相关参数:种群规模为60,最大迭代次数为100,记忆库容量为10,交叉概率为0.5,变异概率为0.1,多样性评价参数为0.9,相似度阈值为0.7。

Gurobi求解器和本文所提算法求解效果比较如表2所示。其中,备选驻车点数为 n ,待巡杆塔总数为 m ,无人机架数为 k ,选中的驻车点个数为 $SelectP$,总巡检时间为 Z_{total} min,计算时间为 $Time$ s,Gap栏为本文所提算法的最好结果与Gurobi求解结果的

差值。特别地,由于启发式算法求解小规模算例较易找到近似最优解(或精确最优解),若SCE-UA算法终止条件为达到最大迭代次数,则会造成算法无

意义迭代。故求解小规模算例时,SCE-UA算法的终止条件为达到最大迭代次数和当前解连续没有得到改善的迭代次数达到10次。

表2 小规模算例计算结果比较

n	m	k	多层嵌套的启发式算法			Gurobi			Gap	
			SelectP	Z _{total}	Time	SelectP	Z _{total}	Time	SelectP/%	Z _{total} /(%)
3	7	2	1	82.442 2	39.53	1	82.442 2	10.26	0	0
3	20	2	2	214.397 7	48.66	2	214.397 7	12.15	0	0
3	20	3	1	151.131 5	66.57	1	151.131 5	464.85	0	0
4	20	2	2	215.182 6	55.83	2	215.182 6	38.85	0	0
4	20	3	1	151.302 3	88.75	1	151.302 3	459.03	0	0
5	25	2	3	272.742 4	64.95	3	272.742 4	210.70	0	0
5	25	3	1	188.380 3	72.73	—	—	—	—	—
6	30	2	4	318.535 6	85.84	4	318.535 6	159.63	0	0
6	30	3	3	217.159 6	105.26	—	—	—	—	—

由于算例问题的难求解性,Gurobi求解器在求解5个备选驻车点、25基待巡检杆塔、3架无人机的算例和6个备选驻车点、30基待巡检杆塔、3架无人机的算例时,达到设定求解时间时未完成全部 h_i 取值可能性下排班方案的求解。在其余算例中,本文所提算法求得的最优解均与Gurobi求解器求得的精确解相等,并且随着算例规模的增加,多层嵌套的启发式算法求解时间明显优于Gurobi求解器,表现出了较为良好的求解效果。

3.2 关键作业参数分析

小规模算例对比分析实验中所取电力巡检相关作业参数为某电力公司实际工程数据,为了进一步为电力公司实际巡检作业提供参考,本节探究了作业参数对车机协同巡检车辆路径问题的模型及求解算法的影响。本研究的主要作业参数为:巡检车数量*Vehicle*,平均行驶速度*V*,单次驻车作业半径*R*,搭载的无人机架数*k*,无人机往返电力杆塔与驻车点间的平均飞行速度*V_k*,每基电力杆塔处的巡检时间*C*。关键作业参数分析实验采用6个备选驻车点、30基待巡杆塔的小规模算例进行多次对照实验,实验结果如表3所示。其中,总巡检时间和平均求解时间均为五次相同实验的平均值,启发式算法所取参数同3.1节小规模算例对比实验。特别地,由于本文建立的车机协同巡检路径规划模型只考虑单个巡检车作业的场景,表中多个巡检车算例中的总巡检时间*Z_{total}*为多个巡检车作业时间之和。

由表3可以看出,上述关键作业参数对于总巡检时间和算法求解时间的影响不尽相同。从巡检

表3 关键作业参数分析结果

Vehicle/辆	V/(km/h)	R/km	k/架	V _k /(km/h)	C/min	Z _{total} /min	Time/s
1	40	2.5	2	60	20	318.535 6	94.268
2	40	2.5	2	60	20	322.250 9	98.96
3	40	2.5	2	60	20	325.334 2	113.40
1	20	2.5	2	60	20	328.434 2	102.55
1	60	2.5	2	60	20	315.236 0	87.17
1	40	0.5	2	60	20	326.473 7	113.608
1	40	1.5	2	60	20	318.535 6	110.04
1	40	2.5	1	60	20	674.316 1	116.004
1	40	2.5	3	60	20	217.159 6	197.17
1	40	2.5	2	40	20	322.854 0	109.94
1	40	2.5	2	50	20	320.262 9	109.64
1	40	2.5	2	60	10	168.535 6	104.40
1	40	2.5	2	60	15	243.535 6	100.55

时间角度来说,若总巡检时间不超过单个工作日最长作业时长,由于*Z_{total}*为多个巡检车作业时间之和,巡检车数量的增加会导致每个巡检车都必须从运维站出发前往各自目标驻车点并返回运维站,增加了所有巡检车总行驶距离从而导致总巡检时间增加。其次,若总巡检时间超过单个工作日最长作业时长,由于各巡检车独立作业,则多个巡检车执行巡检任务等同于单个巡检车执行多个工作日巡检任务,所有巡检车的总巡检时间不会发生变化。此外,巡检车行驶速度、巡检车携带的无人机架数、无人机平均飞行速度的增加能够降低总巡检时间,而每基电力杆塔处的巡检时间与总巡检时间成正相关。从计算时间角度来说,巡检车数量的增加会导致巡检车路径规划子算法的复杂性增加,从而增加了总计算时间。特别地,巡检车单次驻车作业半径的增加会降低计算时间,这是由于较为狭窄的作业半径区间会导致驻车点

选址算法产生不可行解的可能性增加,算法需要重新生成可行解以替代不可行解。

实验表明,电力企业在实际应用过程中,可通过硬件更新等方式提升巡检车行驶速度、无人机平均飞行速度,通过优化无人机拍摄步骤等方式降低无人机在杆塔处巡检时间,从而在不增加设备数量的前提下缩短总巡检时间以提升巡检效率。

3.3 大规模算例实验

实际工程应用中,电力公司运维区域面积较大,需要巡检的杆塔数量众多。本节使用所提的多层嵌套的启发式算法求解大规模车机协同巡检车辆路径问题,可为电力企业提供参考。

某电力公司运维区域长22.15 km,宽16.10 km,共有205基待巡检杆塔。出于杆塔实际坐标数据保密等原因,算例中杆塔坐标均在真实杆塔坐标数据的基础上统一添加了一个随机数。该操作既能保证处理后的杆塔数据不失输电线路杆塔分布规律,又能扩大杆塔数据的随机程度,以验证算法的适用性。该运维区域内共有25个备选驻车点,备选驻车点和运维站的位置坐标已知。假设电力企业设定的巡检人员工作日最长作业时长为8小时,本实例以通过车机协同巡检作业方式完成所有巡检任务的总作业时间最小为优化目标,使用本文所提算法求解巡检车每个工作日的最优行驶路径。算例中待巡检杆塔、运维站及备选驻车点位置分布如图3所示,图中横坐标为经度,纵坐标为纬度。

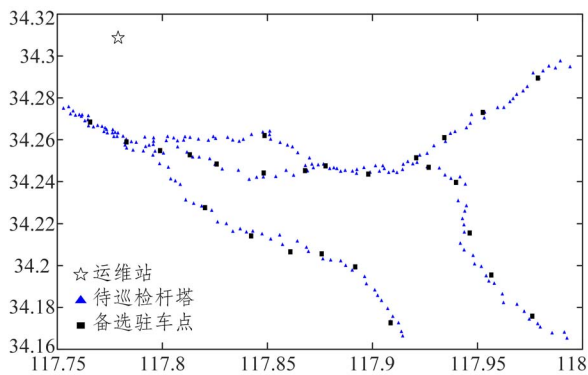


图3 算例中待巡检杆塔、运维站及备选驻车点位置分布

本实验参考文献[14]中公开的智能巡检车携带的无人机架数,设定巡检车搭载4架无人机。本实验中其他相关实验参数设置、实验环境同3.1节中小规模算例求解对比实验。

将所有坐标数据,相关参数输入SCE-UA算法主程序中,经过100次迭代后,驻车点选址算法的收敛曲线如图4所示。其中,SCE-UA算法的函数

值即为巡检车的总作业时间,该算法计算出的最优巡检车总作业时间为1357.46 min。

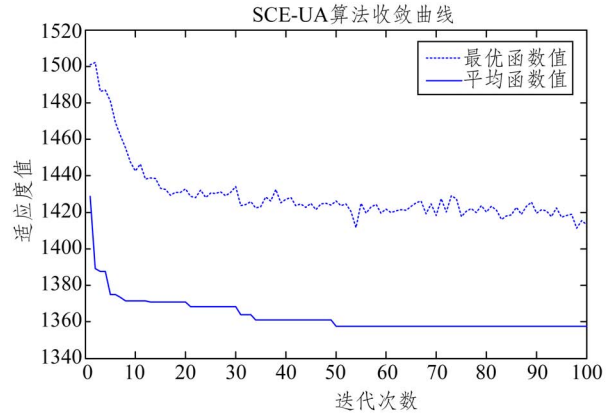


图4 SCE-UA算法收敛曲线

SCE-UA算法输出的最优样本点所代表的驻车点选址方案如图5所示。

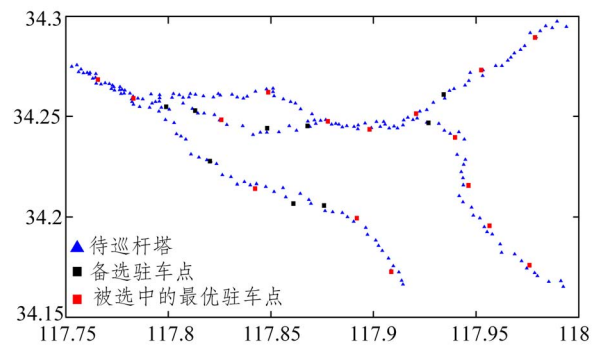


图5 最优样本点代表的驻车点选址方案

最优样本点的编码为:[111111101001000010101111],对应的被选中的驻车点集合为:[1 2 3 4 5 6 7 9 12 17 19 20 22 23 24 25],共有16个备选驻车点被选中。

其中,算法得出的最优选址方案对应的每个被选中的驻车点的巡检时间由驻车点处无人机任务分配算法计算可得,具体如表4所示。

表4 被选中的驻车点的近似最优巡检时间

被选中的 驻车点编号	该驻车点 巡检时间/min	被选中的 驻车点编号	该驻车点 巡检时间/min
1	86.00	12	43.02
2	65.48	17	152.91
3	162.93	19	64.76
4	66.72	20	62.25
5	63.46	22	43.21
6	63.27	23	105.34
7	63.59	24	42.68
9	41.70	25	65.01

近似最优驻车点选址方案对应的算法计算出的巡检车最优行驶路径如图6所示。巡检车完成整片运维区域需要三个工作日,每个工作日的行驶路径分别如下:

工作日1:运维站—备选驻车点4—备选驻车点19—备选驻车点22—备选驻车点20—备选驻车点9—备选驻车点12—备选驻车点5—运维站;

工作日2:运维站—备选驻车点2—备选驻车点1—备选驻车点7—备选驻车点24—备选驻车点25—备选驻车点6—运维站;

工作日3:运维站—备选驻车点3—备选驻车点17—备选驻车点23—运维站。

每个工作日巡检车的作业时间如下:工作日1: 459.39 min; 工作日2: 448.71 min; 工作日3: 449.35 min。

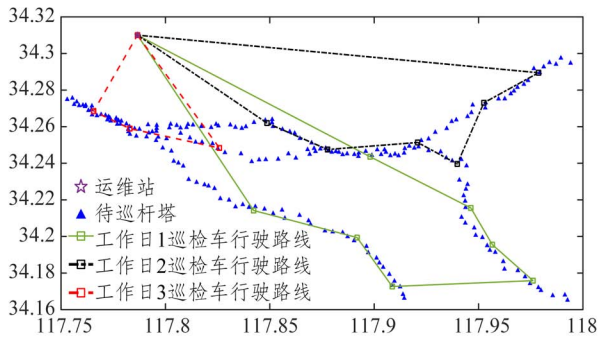


图6 算法计算得出的巡检车最优行驶路径

综上所述,在已知待巡杆塔、运维站、备选驻车点位置坐标的情况下,本文提出的巡检车路径规划方法能够综合求解驻车点选址、无人机任务分配、巡检车路径规划三个子问题。使用本文所提算法可以在巡检车总作业时间最小的优化目标下,求得近似最优的驻车点选址方案及该方案下巡检车每个工作日的行驶路径及作业时间。该方法能够为电力企业进行大面积巡检时提供完整的巡检车路径规划决策方案,实用价值较高。

4 结束语

本文以车机协同巡检作业方式下巡检车的路径规划问题为研究对象,以巡检车总作业时间最小为优化目标建立了巡检车路径规划模型。考虑到车机协同巡检作业规模,设计了多层嵌套的启发式算法。该算法可求解大面积巡检区域下巡检车的近似最优路径,能够为电力企业制定巡检作

业排班计划提供指导。实际应用中,电力企业可根据算法求解出的访问驻车点的顺序,结合真实路网环境,对巡检车的行驶路径进一步进行优化,以便于对巡检车进行跟踪与管理。

参考文献

- [1] 缪希仁, 刘志颖, 鄢齐晨. 无人机输电线路智能巡检技术综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 198-209.
- [2] 李建峰, 段宇涵, 王仓继, 等. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 62-65, 70.
- [3] 徐思雅, 邢逸斐, 郭少勇, 等. 基于深度强化学习的能源互联网智能巡检任务分配机制[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 191-204.
- [4] 罗隆福, 李冬, 钟杭. 基于改进RRT的无人机电力杆塔巡检路径规划[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(10): 80-86.
- [5] 马俊, 张纪会, 郭乙运. 基于混合修正策略的随机时间车辆路径优化方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(4): 87-97.
- [6] 苏欣欣, 伊廷刚, 秦虎. 分支定价割平面法求解带时间窗和人力分配的车辆路径问题[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(4): 75-86.
- [7] 杜茂康, 罗娟, 李博文. 基于多车场的车载无人机协同配送路径优化[J]. 系统工程, 2021, 39(6): 90-98.
- [8] 李绍斌, 姜大立, 方海洋, 等. 基于车载模式的战场物资多无人机联合配送任务分配研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(3): 19-25.
- [9] ROBERTI R, RUTHMAIR M. Exact methods for the traveling salesman problem with drone[J]. Transportation Science, 2021, 55(2): 315-335.
- [10] 王菊. 面向电力杆塔巡检的车辆与车载无人机协同路径规划方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [11] MURRAY C, CHU A. The flying sidekick traveling salesman problem: optimization of drone-assisted parcel delivery[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 54: 86-109.
- [12] 杨溢乐. 有车载无人机配送路径优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [13] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1993, 76(3): 501-521.
- [14] 王金虎, 姜海波, 王红星, 等. 适于输电线路的无人机智能巡检作业车和巡检方法: CN110103800B[P]. 2020-04-21.

(责任编辑:刘娉婷)