

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.06.013

# 多目标优化最低代价无人机机巢选址方法研究

戴永东<sup>1</sup>, 黄政<sup>2</sup>, 高超<sup>3</sup>, 王茂飞<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司泰州供电公司, 江苏泰州 225300; 2. 中南大学自动化学院, 长沙 410083;  
3. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210000)

**摘要:** 无人机巡检作业中, 因为功能与续航距离不同, 常面临异构无人机协同和机巢选址问题。无人机机巢的最优部署位置策略, 可以看作新的选址优化问题, 相对于传统设施选址问题, 无人机机巢部署问题面临更多新挑战。笔者综合运用地理信息系统、优劣解距离法对候选点位做预筛选后使用贪心算法和拉格朗日松弛优化的 p-中值覆盖问题优化方法, 在综合考虑布点原则、飞行任务、飞行半径、功能性冗余等目标因素, 提出一种多目标优化最低代价的无人机机巢选址法, 将机巢分布问题定义为限制因素预选址前提下的 p-中值最低代价问题, 设置原则性约束, 实现多目标优化最低代价的机巢布点, 从多个角度考虑降低巡检成本。实验结果表明: 多目标优化后机巢布点在建造、维护、巡检和综合成本上比传统选点方法有 9.2% 以上的成本节约。

**关键词:** 无人机巡检; 机巢布点; 目标优化; 最低代价; 原则性约束

中图分类号: TM755

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)06-136-09

## A UAV nest deployment method with multi-target optimization and minimum cost

DAI Yongdong<sup>1</sup>, HUANG Zheng<sup>2</sup>, GAO Chao<sup>3</sup>, WANG Maofei<sup>1</sup>

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou, Jiangsu 225300, P. R. China; 2. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, P. R. China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, P. R. China)

**Abstract:** In the unmanned aerial vehicle (UAV) inspection operation, heterogeneous UAVs often face coordination and nest site selection problems due to their different functions and range capabilities. The optimal deployment strategy of the UAV nest can be seen as a new type of location optimization problem. Compared with the traditional facility location problem, the deployment of the UAV nest is facing more new challenges. This paper comprehensively uses geographic information systems and TOPSIS method to pre-screen candidate locations, and then uses a combination of greedy algorithms and Lagrange relaxation optimization of the p-median coverage problem optimization method. After comprehensively considering factors such as node placement principles, flying tasks, flying radius, and functional redundancy, a multi-objective optimization lowest-cost UAV nest location method is proposed. The nest distribution problem is defined as a p-median problem with the lowest

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30742)。

Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province of China(2022JJ30742) .

作者简介: 戴永东(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事智慧电网技术、智能运检技术、无人机智慧巡检技术方向研究,  
(E-mail)dyd1969@163.com。

通信作者: 王茂飞, 男, 工程师, (E-mail)wmf919077969@163.com。

cost under pre-selected restricted factors, and principal constraints are set to achieve multi-objective optimization lowest-cost node placement and reduce inspection costs from multiple perspectives. The experimental results show that the cost savings of the nested distribution after multi-objective optimization are more than 9.2% compared with those of traditional methods in terms of construction, maintenance, inspection, and comprehensive costs.

**Keywords:** UAV inspection; nest deployment; target optimization; minimum cost; principle constraints

随着中国电网规模扩大,无人机自动化电力线路巡检取代人工巡检已成为当下一大趋势。为进一步提升输电变配专业精益化管理水平与运维效率,降低运行成本,缓解巡检人员不足和巡检日益精细化矛盾,提升无人机巡检全自主水平,在电力线路巡检范围内设定不同规模的无人机巢点,作为无人机充电、安放的固定场所至关重要。无人机机巢位置固定,且每个机巢覆盖范围有限,需要通过设置不同机巢,实现电力网络全覆盖目标,由此产生机巢位置的最优部署问题。

无人机机巢的最优部署位置策略,可看作一类新的选址优化问题。相对于传统的设施选址问题,无人机机巢部署问题面临更多新挑战<sup>[1]</sup>。一方面,无人机在三维空间移动时,起飞点和降落点要有一定面积的空旷区域,在飞行途中可能面临避障航迹规划问题<sup>[2]</sup>;另一方面,无人机续航能力有限,其电池容量限制有效载荷和持续工作时间,综合考虑飞行距离、服务时间、巡检质量的同时还需要考虑电量消耗问题。

无人机机巢的选址方法可部分借鉴通信设施的选址问题,然而相比传统通信设施选址,无人机选址过程存在更加复杂的环境约束和更大的优化空间。在进行无人机选址任务时,需要明确原则性约束,比如无人机机巢必须设置在有人看守且方便维护的地方,这些原则性约束构成机巢选址过程的过滤条件集合,能够高效排除不符合这些条件的点位,显著缩小算法的搜索空间。此外,机巢选点问题不同于传统通信基站选点问题的一个关键因素是优化目标不同,在进行通信基站选点时,只需保证通过设立基站达到信号的全域覆盖即可。而在进行无人机机巢选点时,不仅需要达到搜索范围的全域覆盖,还需要针对一次性投入的基站建设成本、巢维护、巡检成本等长期投入成本进行多目标优化。结合使用地理信息系统、优劣解距离法和优化p-中值覆盖方法,综合考虑建造成本、维护成本和巡检成本3种不同成本,基于改进的p-median算法提出可行的选址方案。

## 1 相关研究

机巢布点应首先采用布点规划方法进行布点模拟,再通过遗传算法、禁忌搜索<sup>[3]</sup>等方法进行优化。笔者对布点规划方法现状进行讨论,分析基于地理信息系统(GIS)和优劣解距离法的机巢选址方法,横向对比不同代价函数的集合覆盖问题在机巢选址中的优劣。

### 1.1 基于GIS的选址方法

随着计算机技术的不断发展,地理信息系统(GIS)<sup>[4-6]</sup>已成为因子评估法中的重要辅助决策手段,被广泛应用于机场选址的研究中。GIS可以将自然地理环境因素如地形、地貌等可视化呈现,从而使分析结果更加科学。除了GIS,还有其他的辅助决策手段,如多准则决策分析法(multi-criteria decision analysis, MCDA)<sup>[7]</sup>、模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)<sup>[8]</sup>等,这些方法可以将各种因素进行量化和比较,从而为机场选址提供科学决策依据。机场选址是一个复杂过程,包括GIS需要大量数据支持,数据的质量直接影响到机场选址结果的准确性和可靠性;GIS需要专业的地理信息系统技术人员进行操作和分析,需要投入大量的人力和物力资源,不是所有机构和企业都能承担这种成本;GIS只能考虑到数据中存在的因素,而不能考虑到数据之外其他因素,如政策和法律等因素,可能会导致机场选址结果并不是最优。

### 1.2 基于优劣解距离法的选址方法

优劣解距离法又叫技术偏好排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution,

TOPSIS)是一种常用的多准则决策分析方法,基本思想是通过计算每个决策方案与最优解和最劣解之间的相似度来确定方案的优劣程度。陈俊锋等<sup>[9]</sup>利用自然条件、水域条件和交通条件3个方面构建了EWM-TOPSIS模型,用于水上机场选址。同时,种小雷等<sup>[10]</sup>对障碍物净空条件的影响程度和范围进行了量化研究,为选址阶段场址之间净空条件的优劣判定提供了新的思路和方法。付蓄等<sup>[11]</sup>根据对候鸟迁徙规律研究以及对大连现有和迁建机场周边候鸟的调查数据,比较研究了不同机场建设选址方案对候鸟迁徙的影响。TOPSIS方法的优点是简单易用,不需要事先确定权重,能处理多个评价指标,同时具有较高可解释性。缺点是对标准化处理要求较高,正负样本标注过程较为繁琐,容易受到评价指标的数量和范围等因素影响,需进行灵敏度分析。

### 1.3 最优集合覆盖问题

集合覆盖问题<sup>[12]</sup>(SCP)是运筹学研究中典型的组合优化问题之一,工业领域里的许多实际问题都可建模为集合覆盖问题,如资源选择问题、设施选址问题(移动基站选址、物流中心选址)等<sup>[13]</sup>。SCP一般是在确保覆盖范围的前提下,建立最少的服务设施点以覆盖所有需求点<sup>[14]</sup>,其优化目标为总体费用,覆盖范围为约束条件。集合覆盖问题已被证明是一个NP完全问题,没有多项式时间精确算法,因此实际应用中,往往采用一些近似算法,如贪婪算法;或元启发式算法,如蚁群算法<sup>[15]</sup>、遗传算法<sup>[16]</sup>等来求得近似最优解。

基于SCP的无人机基站部署问题是在满足规定覆盖比例前提下,融合无人机基站相关约束,优化所需无人机数量及部署位置<sup>[17]</sup>。Mozaffari等<sup>[18]</sup>假设无人机基站具有相同发射功率和高度,研究了覆盖半径为 $R$ 的圆形区域所需的最少无人机数量。Lagum等<sup>[19]</sup>研究了地面网络存在下无人机基站部署的集覆盖问题。在应用时根据具体场景,代价计算模型又分为 $p$ -中值模型和 $p$ -中心模型<sup>[20]</sup>。其中, $p$ -中值模型使各任务点到机巢的加权平均距离最小,而 $p$ -中心模型要求使各任务点到机巢的最远距离最小,在无人机巡检语境下,前者可以使单次巡检总路径长度(二阶范数)相对较小,而后者主要使无人机最大响应时间(无穷范数)最小(横向对比如表1所示)。

表1 代价横向对比

Table 1 Horizontal comparison of costs

策略名称	原理	优点	缺点
SCP	在全覆盖的情况下,优化所需无人机数量及位置	以全覆盖为目标,尽量减少成本,方便进行方案调整	不同任务执行频次不同,需要进行人工调整
$p$ -median	使各任务点到机巢的加权平均距离最小	主要考虑整体的覆盖水平,覆盖效率较高	不能考虑距离较远的任务点,不能适应应急场景
$p$ -center	使各任务点到机巢的最远距离最小	能够满足在应急条件下,距离较远的任务也可以以可控的成本完成	整体的覆盖水平较差

## 2 基于多目标优化的无人机机巢布点规划

无人机机巢为无人机起降提供平台和运输导航系统,也为无人机自主巡检提供完善的路线规划和安全保障<sup>[21]</sup>。设置机巢能有效帮助无人机及时完成充电,更好实现飞行巡检任务。

### 2.1 可用机巢类型

无人机机巢根据存放无人机类型不同划分为3种,即大型多旋翼机巢、中型多旋翼机巢和小型多旋翼机巢。在该设计中,3种机巢之间的差异集中体现在覆盖半径和可承担巡检任务上,其中大型无人机巢有效覆盖半径为7 km,中型无人机巢有效覆盖半径为5 km,小型无人机巢有效覆盖半径仅为3 km。因3种类型的无人机巢实际承担的巡检任务要求互不相同,因此考虑将3种不同类型的无人机巢部署视为3次机巢选址过程,分别使用所述机巢选址方法进行独立规划。所述选址方法以小型机巢选址为例,大、中型机巢选址过程同理。

## 2.2 基于地理信息系统的初步位置筛选

无人机固定机巢选址原则主要考虑机巢部署区域不受到外界因素干扰,同时满足机巢供电需求及网络资源需求。为便于管理,部署区域一般定于供电所和本地运维管辖的变电站内。基于这些原则并结合电网地图信息、地形数据和禁飞区信息综合研判可初步筛选获得满足全部硬性要求的候选点位集合。具体来说,这些原则要求可部署固定机巢的位置包括:变电站生活区、供电所空旷区及办公楼楼顶、提供供电及网络区域、无禁飞限制区域等。

除原则性要求外,还需要考虑无人机覆盖半径约束对机巢选址的影响。对每个机巢而言,其只需负责其覆盖半径内的巡检目标。该约束可用欧氏距离表示为

$$|\overrightarrow{(d,u)}| \leq r; d \in D, u \in U, \tag{1}$$

式中: $D$ 为源点集,即本研究中的机巢位置; $U$ 为目标点集,即本研究中的任务点位置; $r$ 为无人机的覆盖半径,在该例中为 3 km;该式限制机巢与其负责的目标点构成矢量模应小于等于机巢覆盖半径。根据该约束信息可得到机巢点-目标点二部图,进而得到小类集合  $S$ ,表示为

算法 1:小类集合生成

**输入:**原点集  $D$ ;目标点集  $U$ ;覆盖半径  $r$ ;

**输出:**小类集合  $S$

- 1) Initialize list  $S, s$ ;
- 2) for  $d$  in  $D$ ;
- 3) 清空  $s$ ;
- 4) for  $u$  in  $U$ ;
- 5) if distance( $d,u$ ) $\leq r$ ;
- 6)  $S.append(u)$ ;
- 7)  $S.append(s)$ ;
- 8) return  $S$ ;

在集合覆盖问题语境下,小类集合  $S$  中的每一项(小类)中元素的交集应等于总集  $U$ ,才可实现覆盖。在实现集合覆盖的前提下,又需要考虑实现覆盖所需要的成本或代价。

基于地理信息系统的初步位置筛选步骤如图 1。

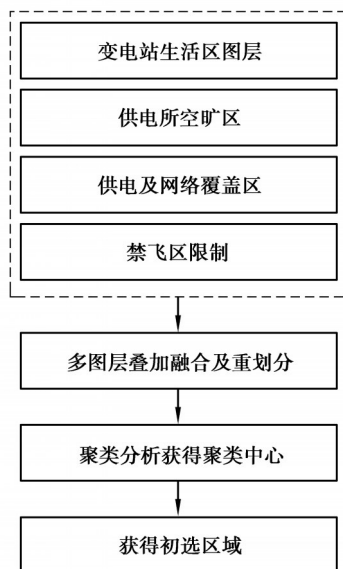


图 1 基于地理信息系统的初步位置筛选流程图

Fig. 1 Preliminary Location Screening Flowchart Based on Geographic Information System

①使用 ArcGIS 对原则要求绘制单一图层, 针对每一个原则, 人为判断是否是适宜区。使用 ArcGIS Toolbox 将适宜区赋值为 1, 不适宜区赋值为 0, 得到变电站生活区图层、供电所空旷区及楼顶图层、可提供供电及网络区域图层和无禁飞区域图层。

②叠加评估。为了得到综合评估结果, 通过对以上 4 个图层设置平均权重, 进行叠加, 根据叠加后综合图层的值进行判断, 设置阈值, 重新划分 0, 1。

③聚类分析。使用基于欧氏距离的 K-means 算法, 以半径距离为 3 km 能够覆盖为前提, 确定  $K$  个聚类中心。

④获得初选区域。根据聚类结果在 GIS 图上得到实际地点坐标。

### 2.3 基于多目标优化的机巢选址

机巢选址问题因其应用特殊性, 不能简单归结为集合覆盖问题。在使用最少基站数量做到全域覆盖的前提下, 还需要考虑实际应用场景下的优化问题。在做多目标优化时, 需要考虑多种目标之间的权衡关系, 该关系通常使用权重  $\lambda$  进行控制, 并利用拉格朗日乘子法等优化方法, 使最终目标达到帕累托最优, 但在本问题中存在区别于传统优化方法的特点, 即机巢位置一旦确定下来, 便难以更改。因此, 在选址时需要确定几个目标之间的权重关系, 即针对一个特定实施方案, 几个目标之间的权重总是静态的。因此针对机巢选址场景, 多目标优化实质上被转化为同质化的代价数值优化, 在此基础上, 确定可量化的代价数值就成为了优化过程的关键。在本方案中着重考虑 3 种类型的代价: 机巢建设代价、机巢维护代价和巡检代价。

#### 2.3.1 机巢建设代价

机巢建设作为一个系统性工程项目, 不同实施难度会直接造成建设成本有所差异。具体来说, 若机巢部署需要额外用地, 则将引入用地成本; 若机巢点位选取在地形复杂、不易施工的地方, 施工成本会相应上升; 若机巢点位选在供电困难的地方, 在部署好机巢后补充供电也会引入额外成本。

#### 2.3.2 机巢维护代价

虽然可确保机巢均被安装在变电站和供电所等方便人员维护的地方, 但是考虑到如果机巢维护需要进行危险作业, 维护人员面临的工作风险也会引入隐性成本; 若机巢安装在气候条件恶劣地方, 则相对容易损坏, 引入维修成本和可靠性成本。

#### 2.3.3 巡检代价

在机巢位置确定下来且投入使用之后, 巡检所需要花费的时间、人力和资源也会成为成本的一部分, 优化机巢布局以使得巡检时的代价最低也被纳入考量。然而这部分成本难以被量化, 主要体现在 2 个方面: 1) 时间成本和人力成本难以统计; 2) 巡检代价随着运行时间增加而增加, 目前还难以确定该系统的使用年限。

在进行多目标优化前, 首先满足硬性需求, 实现无人机巡检范围覆盖辖区全域, 在此前提下再进行代价优化。为满足覆盖需求, 选择提出的 4 种常用覆盖问题求解模型的一种与本方案需求近似模型进行建模。

通过横向对比 4 种覆盖模型, 在每个任务点采样概率相近的假设基础上, p-median 算法和方案要求最为相符, 因此将设计要求建模为 p-median 问题, 即在全覆盖前提下实现最小化覆盖代价, 并在此基础上补充提到的建设成本与维护成本加权后作为额外代价。

在 p-median 问题建模中, 定义巡检任务集合  $I$ , 其中  $i \in I$ , 定义无人机设备集合  $J$ , 其中  $j \in J$ , 为了将问题归为整数线性规划问题解决, 定义决策变量如式 (2)

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果巡检节点 } i \text{ 是由无人机 } j \text{ 执行巡检} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

为了定义某个巡检任务具体是由哪个无人机执行的, 定义决策变量 (3)

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{如果设备 } j \in J \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在以上定义的基础上,可将本问题中所述约束条件如下

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \forall i \in I, \quad (4)$$

$$Y_{i,j} - X_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} X_j < p, \quad (6)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \forall j \in J, \quad (7)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J, \quad (8)$$

其中:式(4)表示每项任务由且只能由一架无人机来执行;式(5)表示只有 $j$ 点有无人机时,任务 $i$ 才能得到 $j$ 处无人机的巡检服务;式(6)表示参与巡检的无人机必须小于投入的无人机总数,其中 $p$ 为投放的无人机总数;式(7)、(8)定义决策变量 $X_j, Y_{ij}$ 的取值范围。

在上述约束条件基础上,进一步将机巢建设代价、机巢维护代价、巡检代价分别表示为

$$C_b = \sum_{j \in J} C'_b * X_j, \quad (9)$$

式(9)表示机巢建设总代价,其中: $C'_b$ 表示机巢 $j$ 在建设时需要花费的成本,该成本由实际建设情况决定,影响因素包括地理位置、用地成本、供电成本、组网成本等。

$$C_m = T * \sum_{j \in J} C'_m * X_j, \quad (10)$$

式(10)表示机巢建设总代价,其中: $T$ 表示系统实际运行周期; $C'_m$ 表示机巢 $m$ 在后续维护时单位运行时间需要花费成本量化后期期望值。该项成本影响因素较为复杂,显性成本包括维护人员的工作报酬、维修价格等,隐性成本包括设备可用性成本、维修过程中的风险因素等。最后将每个机巢在系统运行周期内所需要的成本求和,可得到运行成本,该项无单位。

$$C_w = T * F * \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} d_{ij} * Y_{ij} * P_i, \quad (11)$$

式(11)通过对 $p$ -median方法进行改进,表示在选点方案下巡检总代价的期望。式中: $T$ 表示系统实际运行周期; $d_{ij}$ 表示机巢 $j$ 与巡检目标点 $i$ 之间的距离; $T$ 表示系统运行时间; $F$ 表示巡检频率,单位为次/年。实际情况下每次巡检并不一定需要检查所有的目标点,假设目标点 $i$ 需要进行检查的概率为 $P_i$ ,可近似估计在系统总运行时间内的巡检成本,该项单位为 $\text{km}$ 。

将上述3个优化目标通过多目标优化式统一到一个总优化目标上

$$C_{\text{total}} = \alpha C_b + \beta C_m + (1 - \alpha - \beta) C_w. \quad (12)$$

上述3个优化目标单位不一致,且在部分情况下存在冲突,需要结合实际工程需要,在不同情况下选择多目标优化式(12)中的2个权重系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 。如需要减少前期投入,可适当增大 $\alpha$ ;如需保障系统可用性,可适当增大 $\beta$ ;如需缩短巡检时间,可适当减小 $\alpha$ 和 $\beta$ 。在其他场景下也可进行相应调整。

对于覆盖问题的优化算法有很多,比较有效的包括贪心算法和动态规划算法。然而传统的集合覆盖问题优化算法存在以下2个主要缺陷:首先是求解速度慢,其次是容易陷入局部最优解。因此采用启发式算法,将亚梯度优化的贪心算法与拉格朗日松弛(LR)法结合<sup>[22]</sup>,作为集合覆盖模型求解器,LR近似方法是一种通过松弛原始问题中的约束条件,然后用拉格朗日乘子修正目标函数,并利用LR近似方法来指导贪心算法,从而避免陷入局部最优,并提高全局最优性,从而得到一个下界解决方案,其流程如图2所示。其中,距离测度为针对不同优化目标进行计算时得到的代价数值函数。

结合以上约束、优化目标、覆盖模型与优化器,实际数据向不同目标和需求生成了3种代价选址方案。面向3种代价优化得到的选址方案如图2,其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 在面向建设成本时选取0.8和0.1,面向维护成本时选取0.1和0.8,面向巡检成本进行优化时为0.1和0.1。由图3所示当选择目标不同时,机巢点位会随之产生显著差异。

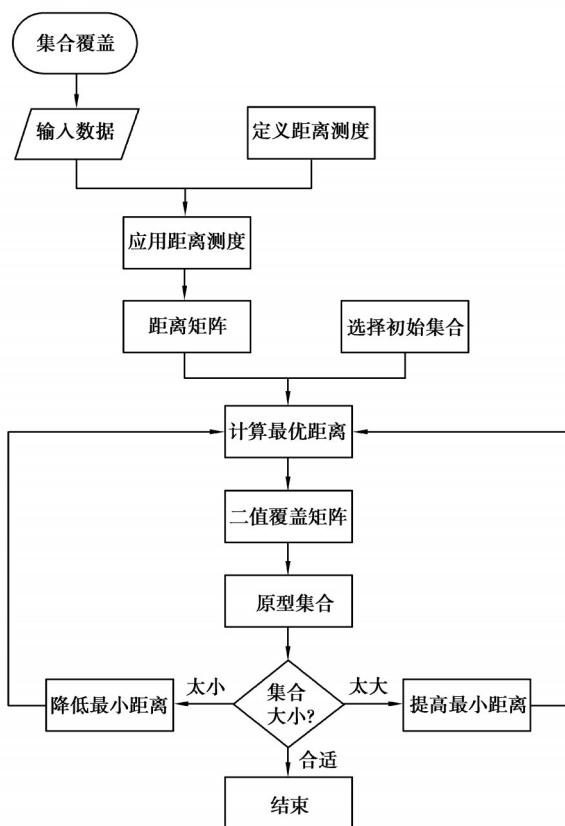


图2 覆盖算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the overlay algorithm

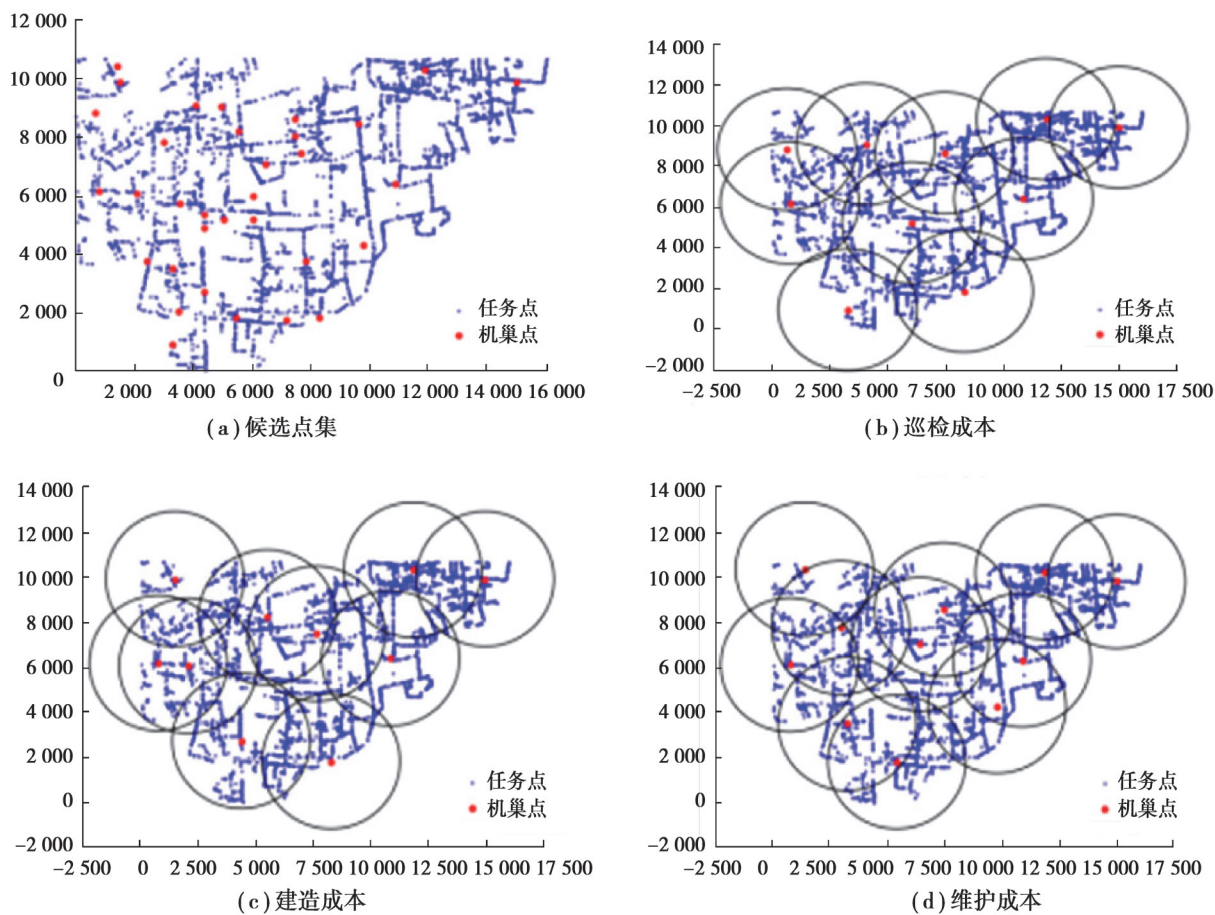


图3 多目标机巢布点仿真结果

Fig. 3 Simulation results of multi-target machine nest layout

### 3 优化结果分析

为了验证多目标优化算法的优越性,根据约束条件下,引入自适应多目标优化方法前人为手动选择的机巢位点,与算法得到的机巢分布点进行比较,如图4所示。其中,提到的超参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别设置为0.2和0.2。

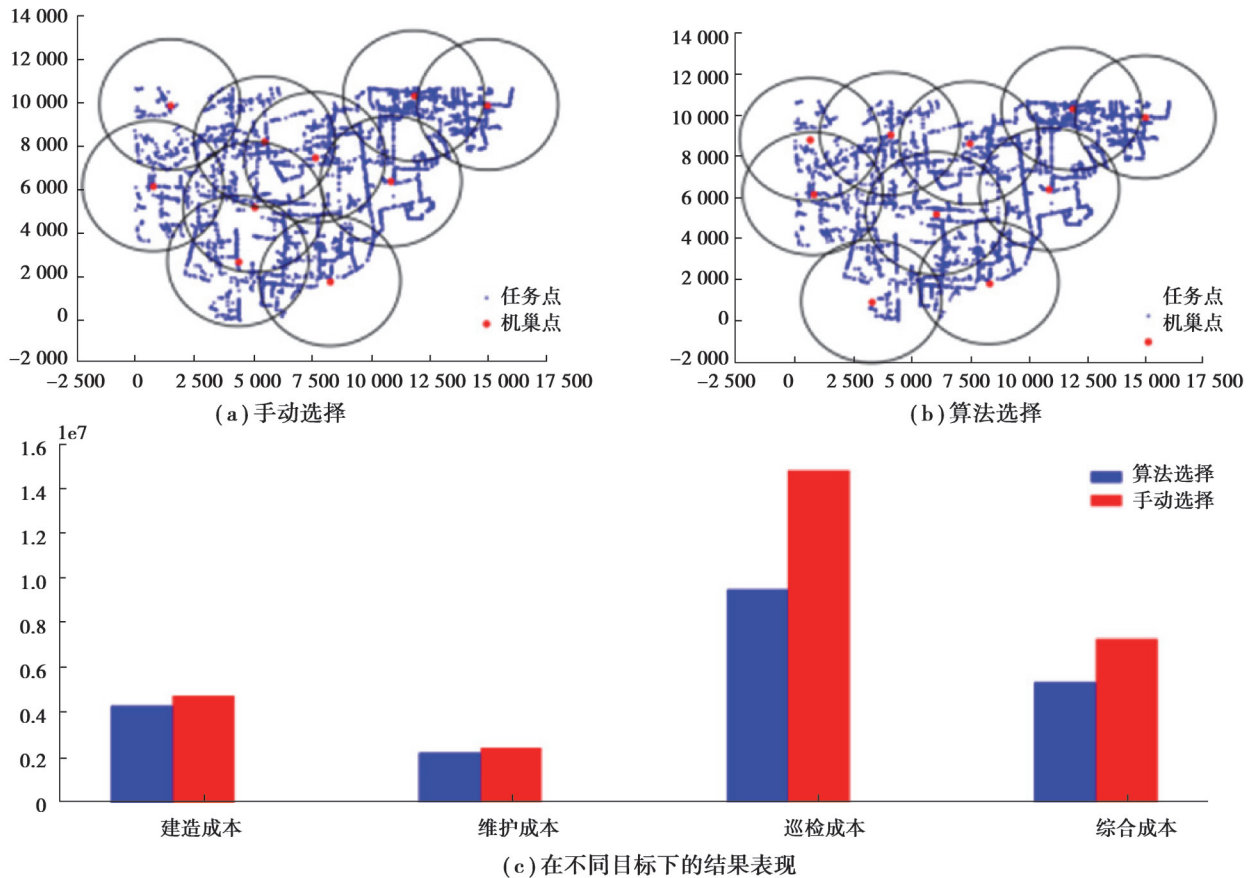


图4 手动选点与算法选择代价对比

Fig. 4 Comparison between manual point selection and algorithm selection costs

图4中分别从建造成本、维护成本、巡检成本和综合成本4个角度对比了传统基于GIS和TOPSIS的人工选择方法和在使用GIS和TOPSIS方法初筛后进行算法选点的代价差异,其中为保证数据可读性,将综合成本表示为前三者的均值。算法选择的无人机机巢分布点在建造成本、维护成本、巡检成本和综合成本上均低于手动选择的机巢分布方案,尤其是在巡检成本上,远低于手动选择。具体来说,在4项数值上,算法选择的结果分别取得了9.8%,9.2%,29.1%和16.3%的成本节省。本实施中的多目标优化算法在机巢选点策略制定上比传统基于GIS和TOPSIS的人工选择方法相比具有一定优越性。

### 4 结 语

提出一种多目标优化最低代价的无人机机巢选址方法,结合GIS方法和TOPSIS方法对机巢候选点进行预筛选,后将机巢分布问题定义为p-median最低代价问题,通过多目标优化方法,最终确定无人机机巢的分布位点,并将算法优化得到的无人机机巢位点与基于GIS和TOPSIS方法的人工选择的无人机机巢位点从建造成本、维护成本、巡检成本等多约束条件进行对比,证明了本优化算法的有效性,对电力线路无人机巡检工作具有实践意义。

#### 参考文献

- [1] 靳晓洁,石建迈,伍国华,等. 无人机基站部署问题综述:模型与算法[J]. 控制理论与应用,2022,39(12):2219-2232.  
Jin X J, Shi J M, Wu G H, et al. Review of the UAV base station deployment problem: models and algorithms[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(12): 2219-2232.(in Chinese)



- [ 2 ] 刘芳正,马博闻,吕博枫等.一种面向移动边缘计算的无人机基站部署方法[J].计算机科学,2022,49(S2):848-854.  
Liu F Z, Ma B W, Lu B F, et al. An UAV base station deployment method for mobile edge computing[J]. Computer Science, 2022,49(S2):848-854.(in Chinese)
- [ 3 ] 方云飞,王晓园,周珍,等.基于禁忌搜索的公共自行车站点及车道选址优化[J].重庆大学学报,2020,43(1):19-27.  
Fang Y F, Wang X Y, Zhou Z, et al. Research of optimal layout of public bike stations and bike lanes based on tabu search[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2020, 43(1): 19-27.(in Chinese)
- [ 4 ] Huang B,Lin J,Zheng X, et al. Airport site selection under complex airspace based on GIS[C]//Fourth International Conference on Transportation Engineering. October 19-20, 2013, Chengdu, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2013: 2188-2194.
- [ 5 ] Alves C J P, da Silva E J, Müller C, et al. Towards an objective decision-making framework for regional airport site selection [J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 89: 101888.
- [ 6 ] 何尧,舒富民,郑皓文.基于GIS多因素加权叠加的机场选址方法[J].中国民航大学学报,2021,39(4)42-47.  
He Y, Shu F M, Zheng H W. Site selection method of airport location based on GIS multi-factor weighted superposition[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2021, 39(4)42-47(in Chinese)
- [ 7 ] Wang J J, Jing Y Y, Zhang C F, et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2263-2278.
- [ 8 ] Feng S, Xu L D. Decision support for fuzzy comprehensive evaluation of urban development[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 105(1): 1-12.
- [ 9 ] 陈俊锋,翁建军,吴兵,等.基于熵权-TOPSIS的水上机场选址研究[J].交通信息与安全,2018,36(2)112-119  
Chen J F, Weng J J, Wu B, et al. A facility location model based on entropy and TOPSIS for sea drones[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(2)112-119(in Chinese)
- [ 10 ] 种小雷,雷继超,张世迪,等.机场选址阶段不同场址净空条件的量化对比[J].科学技术与工程,2020,20(27):11365-11370.  
Chong X L, Lei J C, Zhang S D, et al. Quantitative comparison of clearance conditions of different sites in airport location selection stage[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11365-11370.(in Chinese)
- [ 11 ] 付蕾,王诺.机场选址对候鸟影响评价:以大连为例[J].科学技术与工程,2018,18(19):316-323.  
Fu Q, Wang N. Impact assessment of airport site selection on migratory birds—case of Dalian civil aviation airport[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 316-323.(in Chinese)
- [ 12 ] Church R, ReVelle C. The maximal covering location problem[J].Papers of the Regional Science Association, 1974, 32(1): 101-118.
- [ 13 ] 杨思颖.基于空间-时间-电量网络的电动汽车充电站选址-路径问题研究[D].南京:东南大学.  
Yang S Y. Research on location-routing problem of electric vehicle charging station based on space-time-electricity network [D]. Nanjing: Southeast University,. (in Chinese)
- [ 14 ] Hakimi. Optimal locations of switching centers and the absolute centers and the medians of a graph[J]. Operations Research, 1964, 12: 450-459.
- [ 15 ] Navi S P, Zeiny A S. New approach to improve classification accuracy using ant clony optimization[C]//2010 Fourth UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation. November 17-19, 2010. Pisa, Italy: IEEE, 2011: 46-50.
- [ 16 ] Mirjalili S. Genetic algorithm[C]// Evolutionary Algorithms and Neural Networks. Cham: Springer, 2019: 43-55.
- [ 17 ] 吴钦钦,王珂,樊文有,等.基于连续空间需求的公共图书馆最大覆盖选址方法:以武汉市主城区为例[J].地理与地理信息科学,2020,36(1)27-34,99  
Wu Q Q, Wang K, Fan W Y, et al. Optimizing the public library location based on coverage maximization of continuous space demands: a case study of the downtown of Wuhan city[J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(1)27-34, 99(in Chinese)
- [ 18 ] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1647-1650.
- [ 19 ] Lagum F, Bor-Yaliniz I, Yanikomeroglu H. Strategic densification with UAV-BSSs in cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(3): 384-387.
- [ 20 ] 乔联宝.覆盖类选址问题分类及研究综述[J].物流科技,2015,38(3):59-66.  
Qiao L B. Classification and review on the covering facility location problem[J]. Logistics Sci-Tech, 2015, 38(3): 59-66.(in Chinese)
- [ 21 ] 田力.输电线路无人机巡检综合应用研究[J].通讯世界,2018(11):215-216.  
Tian L. Research on comprehensive application of UAV patrol inspection for transmission lines[J]. Telecom World, 2018(11): 215-216.(in Chinese)
- [ 22 ] Zhu G. A new view of classification in astronomy with the archetype technique: an astronomical case of the NP-complete set cover problem[EB/OL]. 2016: arXiv: 1606.07156. <https://arxiv.org/abs/1606.07156>