

【航空科学与工程研究】

直升机电力巡检临时停机点选址优化研究

李佳骏¹, 千月欣², 周肖东¹, 张天雄³, 江 柱¹

(1. 国网电力空间技术有限公司, 北京 102209; 2. 河南通航无人机科技有限公司, 河南 郑州 450018;
3. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘 要:随着输电线路巡检方式逐渐从人工巡检转变成立体巡检+集中监控, 停机点的选址成为影响电力巡检运营总成本及工作效率的关键因素。基于粒子群优化算法联合 Voronoi 图建立了直升机电力巡检临时停机点目标规划模型, 并以华东某片区两个枢纽基地为例进行模拟仿真。结果表明: 基于改进粒子群与 Voronoi 图的临时停机点选址模型的目标总成本相较于基础粒子群算法模型下降了 29.3%, 改进效果显著。

关键词: 电力巡检; 直升机停机点选址; 目标规划; 粒子群优化; Voronoi 图

中图分类号: V 351 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.06.005

0 引言

《中国电力行业年度发展报告 2022》^[1]显示, 电力行业正处于高速发展期, 2021 年全国 220 千伏及以上输电线路回路长度达 84 万千米。然而, 在电力基础设施中, 输电线路存在点多、分布面广, 所处地形复杂、自然环境恶劣等特点, 并且电力线及杆塔附件极易发生磨损、断裂、腐蚀等损伤。所以, 为了随时掌握输电线路运行及动态情况, 对线路进行定期巡视检查成为电力部门一项繁重且必不可少的工作。

传统巡检方式是工作人员现场近距离观察, 存在劳动强度大、危险性极高、耗时、效率低、成本高等缺点。现如今, 利用直升机、无人机等进行巡检的方式得到广泛应用, 从技术上看, 直升机^[2]通过可见光及红外热像仪等巡检设备进行巡视检查, 并通过图片回传方式提供给专业技术人员实时情况, 技术含量高; 从运行效率来看, 直升机由于其机动性和灵活性强, 可以按照预先规划的线路沿电力输电线路巡检, 也可以在疑似故障点附近悬停做定点检测, 工作效率高; 从安全角度来说, 直升机巡检不受地域影响, 所需人力少, 安全系数高。但直升机电力巡检方案的设计极易受航巡里程的制约。

此外, 关于停机点选址方面的研究有很多, 并且应用于不同的场景。李高磊等^[3]将机场选址的影响因素分为限制性、风险性和经济性三个等级, 提出一种结合熵权法-优劣解距离法模型和 P-中值模型的综合选址方法。任新惠等^[4]以综合运营成本最佳和能耗最小为目标, 根据运营成本、电池能耗、配送中心管理成本等信息构建选址-路径模型。Cao 等^[5]针对传统路径规划算法难以满足复杂环境和任务要求的现状, 对粒子群算法的权值和学习因子进行改进, 利用 MATLAB 软件仿真验证了其算法的有效性和可行性。

收稿日期: 2023-04-13

基金项目: 四川省 2022 年大学生创新创业项目(S202210624137); 中国民用航空飞行学院交通运输工程优势特色学科建设项目(D202103)

第一作者简介: 李佳骏(1996—), 男, 四川绵阳人, 硕士, 主要从事空中交通运行规划与管理、电力系统研究。

E-mail: 18482163929@163.com

Xiang 等^[6]针对综合选址问题,通过运行条件风险评估,以经济性、距离、时间和覆盖面积为基本考虑因素建立了多目标规划模型,为学者提供了科学合理的分析框架和思路。梁晨等^[7]综合考虑物流末端配送特点和航空器性能,构建了基于遗传算法的物流末端配送起降点的选址分配模型。Dai 等^[8]为降低无人机与核心网络之间的传输延迟和链路负载,考虑了多种性能指标和各类优化变量的最佳化问题,提出一种基于强化学习的无人机有效部署方法。

为保障区域内电力巡检任务高效完成,达到不重复、不遗漏的要求,本文从直升机临时停机点选址角度出发,以总成本最低为目标,综合考虑空域、交通、建设成本、停机点可服务范围半径、电力巡检需求度、飞机续航里程与航空保障等因素,使用粒子群智能算法,旨在给出区域内最优停机点布局方案。

1 直升机电力巡检临时停机点选址建模

针对电力巡检线状分布现状,为保证巡检质量,避免发生重复、遗漏等,实际作业中往往遵循从局部到整体的原则,将各线路分段,通过线路节点确定巡检进度。从方向上来说,电力巡检一般分为单向和双向巡检两种,本文的研究主要基于双向巡检,具有起始位与终止位归于一点的特征。

1.1 停机点选址影响因素的确定

(1)地理因素。从运输便利性角度来看,停机点选址时需要充分考虑区域(城市、山区、乡村等)交通网络布局约束;从电力网络规划角度来看,停机点作为电力巡检作业中重要的中转站,其选址应与电网近远期规划、建设与改造、所需基础设施等相融合;从巡检需求度来看,停机点地址应选择巡检需求比较大和方便的区域;此外,还必须考虑区域的适应性和运营成本等因素。

(2)停机点服务半径。一方面,直升机的续航能力受燃油量或电池容量的制约,必定存在单次飞行里程上限。为保证直升机电力巡检工作正常进行,两个相邻临时停机点间的距离不能太远。另一方面,为了避免资源浪费,在满足日常电力巡检工作需求的前提下,应尽可能避免临时停机点分布过于集中,相邻两停机点的距离不能太近。

(3)空域问题。中国民用航空总局令第 122 号《民用航空使用空域办法》^[9]规定,为保证航空器飞行安全,提高空域资源利用率,需按照国家规定征得有关部门同意后,民用航空飞行活动所用空域对有关航空器开放使用。而空域是直升机电力巡检作业中的必要条件,其审批难度直接影响巡检工作的稳定性。

1.2 基于粒子群优化的临时停机点选址模型

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[10-11]原理简单,参数设置少,易实现,其核心思想是群体中个体与个体之间信息的相互交换,使整个群体运动在问题求解域或空间内从无序运动到有序运动演化,从而获得问题求解域的最优解。粒子群算法主要基于以下 3 点假设:(1)假定粒子本身无质量无体积,只有速度和位置属性;(2)假定粒子运动于解空间中,其方向和位置根据速度的改变而改变;(3)将经过最少代数搜索到的粒子视为当前追踪的最优解。

粒子群算法个体位置变化基本公式为

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{jd}^t - x_{jd}^t), x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}.$$

式中: c_1, c_2 表示学习因子,一般取值为 $c_1 = c_2 = 2$; r_1, r_2 是介于 $(0, 1)$ 之间随机数。具体实现步骤^[12]如下:

第一步:初始化种群。

第二步:获取种群中不同位置的适应度值。

第三步:对种群中不同位置和速度的粒子进行更新,即更新个体最优适应度函数。

第四步:得到最优结果,并进行对比选择。

第五步:计算每个个体的最优适应度函数是否达到最大迭代次数或者精度要求。

第六步:判断个体最佳适应度函数是否达到预期目标,若达到预期精度即可停止循环。

在该算法中,每一个粒子在迭代过程中会根据不同的环境变化而改变自己的位置和速度,因此每一次

迭代都会得到一些不同的新信息, 从而对自身情况进行调整。

以区域内直升机电力巡检运营总成本最小为目标建立临时停机点选址规划数学模型, 其目标规划函数表示为 $\min F_{\text{cost}} = F_{Ap} + F_{Air} + F_{Car}$ 。式中: F_{Ap} 代表枢纽基地的建设成本, F_{Air} 代表飞机作业成本, F_{Car} 代表航空保障成本。

枢纽基地主要是为了满足直升机起飞、降落、停放、维护、保障燃油供应的机场或场地, 临时停机点则更为简易, 可以是小型机场、空地甚至草坪, 满足作业中直升机的起飞、降落和停放即可, 其成本主要考虑建设基地数量、固定建设成本、折旧率、日常运行维修成本等, 用公式表达为

$$F_{Ap} = \sum_{k \in \Lambda_A} \sum_{i \in \Lambda_{Apk}} [G_i \frac{r_0(1+r_0)^z}{(1+r_0)^z - 1} + \omega_i]$$

式中: k 表示第 k 个空域, i 表示第 i 个临时停机点, Λ_A 表示空域集合, Λ_{Apk} 则表示第 k 个空域的临时停机点集合, G_i 表示第 i 个临时停机点的固定建设成本, z 为临时停机点的折旧年限, r_0 是贴现率, ω_i 则为第 i 个临时停机点每年的运行维护成本。

直升机作业成本主要从作业距离和飞机自身油耗两个方面考虑。用 μ_{A_0} 表示飞机油耗系数(元/km), j 表示第 k 个空域的第 j 个任务点, Λ_{ApTik} 代表第 k 个空域第 i 个临时停机点可辐射任务点集合, d_{ij} 表示第 i 个临时停机点到第 j 个任务点的距离, d_{\max} 是飞机航程的推荐上限, D_{\min} 为临时停机点之间的最小距离约束, 具体公式为

$$\begin{cases} F_{Air} = \mu_{A_0} \sum_{k \in \Lambda_A} \sum_{i \in \Lambda_{Apk}} \sum_{j \in \Lambda_{ApTik}} d_{ij}, \\ d_{ij} \leq d_{\max}, i \in \Lambda_{Ap}, j \in \Lambda_{ApTi}, \\ D_{i_i, i_j} \geq D_{\min}, i_i, i_j \in \Lambda_{Ap}, i_i \neq j. \end{cases}$$

飞机燃油一般会集中储存在几个固定的枢纽基地, 在实际巡检作业过程中, 航空燃油需要从枢纽基地运输至临时停机点以保证直升机的燃油需求, 此时会产生航空保障成本, 其按公式表达为

$$F_{Car} = \mu_{C_0} \sum_{k \in \Lambda_A} \sum_{t \in \Lambda_{ck}} \sum_{j \in \Lambda_{cApk}} \lambda_{tj} d_{tj}$$

式中: μ_{C_0} 是保障车油耗系数, 单位元/km; t 是指第 t 个枢纽基地; Λ_{ck} 表示第 k 个空域的枢纽基地集合; Λ_{cApk} 表示第 t 个枢纽基地可辐射的临时停机点集合; λ_{tj} 表示第 t 个枢纽基地到第 j 个临时停机点的道路曲折系数; d_{tj} 表示第 t 个枢纽基地到第 j 个临时停机点的距离。

2 基于改进粒子群与 Voronoi 图的临时停机点选址优化模型

为提高直升机电力巡检临时停机点选址模型的可靠性、适用性, 本文对粒子群优化算法进行改进, 结合 Voronoi 图划定每个临时停机点的辐射范围, 实现区域点动态寻优, 提高模型搜索能力。

2.1 改进粒子群算法

在粒子群优化迭代初期, 存在容易陷入局部最优解的问题; 在迭代后期, 可能会发生围绕全局最优解振荡的现象。为此, 本文进行改进。粒子的惯性权重系数 β 较小时, 对局部的寻优能力较强; 粒子的惯性权重系数 β 较大时, 对全局的寻优能力较强。对此本文采取线性递减惯性权重系数, 使得粒子群算法在初期具有较强的全局收敛能力, 而后期有较强的局部收敛能力, 具体公式为 $\beta = \beta_{\max} - \frac{n \times (\beta_{\max} - \beta_{\min})}{n_{\max}}$ 。式中: β 为粒子的惯性权重系数, β_{\max} 为惯性权重系数最大值, β_{\min} 为惯性权重系数最小值, n 为当前迭代次数, n_{\max} 为最大迭代次数。

2.2 泰森多边形理论

泰森多边形^[13-14]又叫 Voronoi 图, 是由一组连接两临点直线的垂直平分线组成的连续多边形。凭借其点集划分区域到点的距离最近的特点, 在计算几何学科中占据着重要地位, 目前被广泛应用于地理学、

航天、机器人、气象学等领域^[15]。

本节使用 Voronoi 图的目的是实现临时停机点服务区域的划分。图 1 展示的是改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合求解流程图。

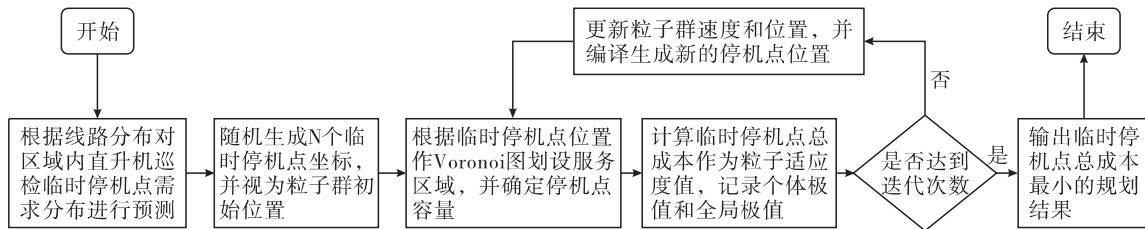


图 1 改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合求解流程图

3 模型仿真

3.1 背景描述

以华东某片区已有的两个直升机枢纽基地为背景,对已构建的直升机电力巡检临时停机点选址模型进行仿真验证。如图 2 所示,地形、道路条件复杂的设定区域内由计算机生成三条长度和曲折度各不相同的电力通道,每条线路通过巡航任务点划分为不同航检段,并且随机产生两个不同的空域,其中左侧虚线范围内为空域 1,右侧虚线范围内为空域 2。坐标正负仅代表方向。

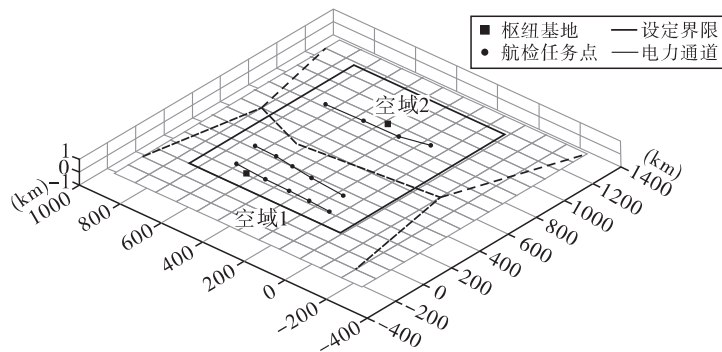


图 2 仿真背景图

3.2 基于粒子群优化的临时停机点选址仿真实验

将图 2 设定区域进行网格化处理,对各点的停机点建设成本赋初始值,同时根据电力巡检服务优先度对每个航检段打分,表 1 为图 2 中 14 个巡航任务点的优先度模拟数据。

表 1 巡航任务点数据

巡航任务点 X 坐标	巡航任务点 Y 坐标	服务优先度评分	空域编号	巡航任务点 X 坐标	巡航任务点 Y 坐标	服务优先度评分	空域编号
145	610	4 370	2	300	445	1 000	2
130	460	5 320	2	280	340	3 100	2
125	340	12 000	2	260	170	2 000	2
120	240	3 000	2	820	640	1 000	1
110	135	1 088	2	825	460	900	1
320	640	1 600	2	830	290	2 200	1
316	535	4 000	2	870	164	1 400	1

基于停机点选址规划模型,通过计算区域内各点至巡航任务点的空间距离、至枢纽基地的行驶距离和

可抵达度,对每点的综合成本进行计算。受空域审批条件影响,本文设定每个停机点优先服务于同空域内的电力线路,得到如图 3 所示的基于粒子群优化的临时停机点选址方案图。坐标正负仅代表方向。

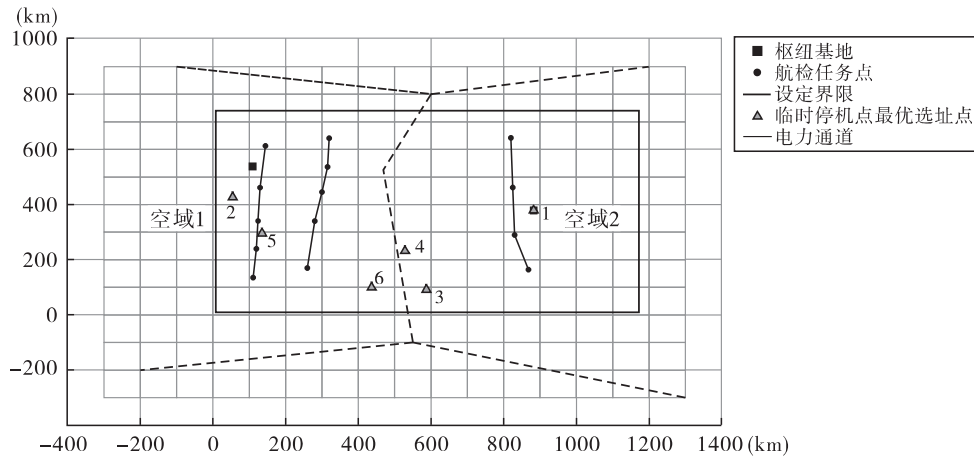


图 3 仿真结果图

从图 3 可以看出,考虑电力巡检工作量(巡检频率、线路长短、优先度等)、地理环境、地价成本、建设及运营成本等综合影响,共选出 6 个临时停机点,空域 1 和空域 2 范围内各分布三个。位于空域 2 内的已建枢纽基地可直接作为临时停机点使用,直接受益于其空域内的一条线路,2 号和 5 号停机点位于空域 1 中两条线路附近,以便就近提供电力巡检服务。剩余三个分布于三条线路位置中线附近,可随机实现任意一条线路的巡检工作。

3.3 基于改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合求解模型实验

使用改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合求解模型对停机点选址进行优化处理,通过系统智能动态寻优,得到如图 4 所示的改进算法模型仿真结果图,图中坐标正负代表方向。与图 3 相比,图 4 显示更多的临时停机点分布于空域 1 范围内。一方面,枢纽基地无论是基础设施条件还是直升机停放量都远远优于临时停机点,可执行作业量是停机点的至少两倍,一个枢纽基地完全可以满足空域 2 中单条线路三段任务的巡检需求。另一方面,空域 1 中线路及航检多,工作量大,将多个停机点建在两条电路附近不仅可以满足日常巡检工作量需求,而且大大减少了飞机空中行驶的燃油和时间成本,提高巡检工作应急响应度。

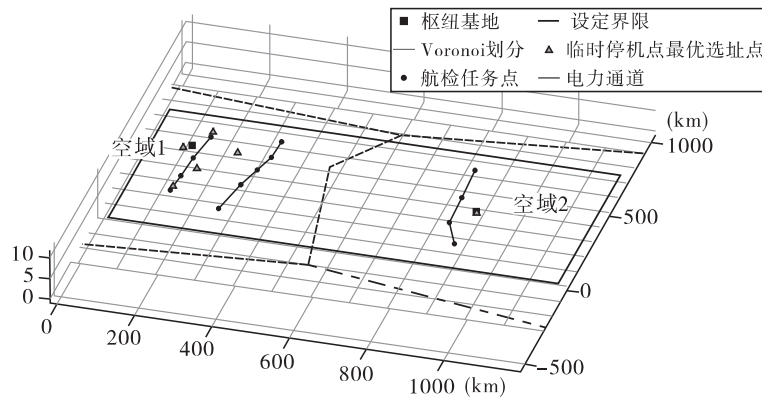


图 4 改进算法模型仿真结果图

根据 Voronoi 图绘制原理,将各临时停机点之间两两连线,画出垂直中心线,圈出每个临时停机点的服务范围,如图 4 中的实线所示。区域划分不仅可以确保整个区域内电力巡检分工明确,又能通过距离优势减少巡检作业成本。

3.4 仿真结果分析

将建立的粒子群优化选址模型与改进后的基于粒子群优化算法和 Voronoi 图联合的选址模型作对比,图 5 为模型优化前后运行迭代对比情况。图中,带方点实线表示优化前模型迭代值,带圆点实线则代表优化后模型迭代值。经对比,基于粒子群优化的临时停机点选址模型在迭代初期陷入了局部最优,基于改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合模型达到了全局最优。比较之下,基于改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合后目标寻优速度有小幅减慢,这是由于 Voronoi 图的划分增加了算法的计算量,但总成本相较于改进前下降了 29.3%,进一步证明了改进后模型的优越性。

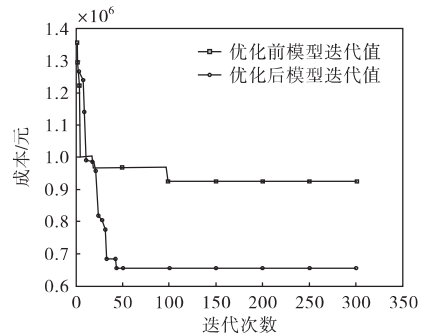


图 5 模型优化前后迭代情况对比图

4 总结

本文提出了基于改进粒子群优化算法与 Voronoi 图联合的电力巡检临时停机点选址模型,通过仿真实验验证了该模型的有效性。结果表明,该模型能够快速找到全局最优解,并在考虑多种因素的情况下,为电力巡检任务选择最优的临时停机点,从而降低了巡检成本和提高了工作效率。

参考文献:

- [1] 中国电力网. 中电建协发布《中国电力建设行业年度发展报告 2022》[EB/OL]. (2022-08-29)[2022-10-23]. <http://www.chinapower.com.cn/xw/gnxw/20220829/165036.html>.
- [2] 彭向阳,易琳,钱金菊,等. 大型无人直升机电力线路巡检系统实用化[J]. 高电压技术,2020,46(2): 384-396.
- [3] 李高磊,高扬,郭钊,等. 大型无人机机场选址方法[J]. 科学技术与工程,2022,22(17):7212-7219.
- [4] 任新惠,王佳雪,王梦琦. 考虑动态能耗的无人机配送选址路径规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2023,59(13):273-280.
- [5] CAO H,ZHANG H,LIU Z,et al. UAV path planning based on improved particle swarm algorithm [C]//2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics. IEEE,2021: 284-287.
- [6] XIANG Y,CAO W,ZHENG H,et al. Optimization research on the site selection of fire safety for mega projects sites based on multi-objective particle swarm[J]. Evolutionary intelligence,2020(3): 1-17.
- [7] 梁晨,曹博凯,邢蓉,等. 多层次物流末端配送无人机选址的 LRP 模型[J]. 中国储运,2022(7):73-75.
- [8] DAI H,ZHANG H,WANG B,et al. The multi-objective deployment optimization of UAV-mounted cache-enabled base stations[J]. Physical communication,2019,34:114-120.
- [9] 中国民航局. 民用航空使用空域办法[EB/OL]. (2004-5-26)[2022-10-23]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201711/t20171116_47595.html.
- [10] 刘俊贤,王宏强,陶新龙. 基于改进多目标粒子群优化算法的雷达资源分配方法[J]. 中国电子科学研究院学报,2022,17(6):549-556.
- [11] 李冰晓,万睿之,朱永杰,等. 基于种群分区的多策略综合粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(3):85-94.

- [12] 孙滢. 若干最优化问题的粒子群算法及应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [13] 章扬. 基于泰森多边形的农村基本公共服务设施空间布局优化研究[D]. 济南:山东建筑大学,2021.
- [14] 侯顿,崔羽. 泰森多边形在城市变电站布局中的应用研究[C]//城市基础设施高质量发展:2019年工程规划学术研讨会论文集(下册). 北京:中国建筑出版社,2021:352-362.
- [15] 郭宇帅. 基于改进 Voronoi 图的终端扇区动态规划研究[J]. 中国民航大学学报,2022,40(4):27-31.

Study on Optimization of Site Selection of Temporary Stopping Point for Helicopter Power Inspection

LI Jiajun¹, QIAN Yuexin², ZHOU Xiaodong¹, ZHANG Tianxiong³, JIANG Zhu¹

(1. State Grid Electric Power Space Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Henan General Aviation UAV Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450018, China;

3. College of Air Traffic Management,

Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: With the change of transmission line inspection mode from manual inspection to three-dimensional inspection + centralized monitoring, the location of the stop point has become a key factor affecting the total operating cost and work efficiency of power inspection. Based on particle swarm optimization algorithm and Voronoi diagram, the objective planning model of temporary stop point of helicopter power inspection is established in the paper, and two hub bases in East China are taken as examples for simulation. The results show that based on improved particle swarm optimization and Voronoi diagram, the total target cost of the temporary stop location model is reduced by 29.3% compared with the basic particle swarm optimization model, and the improvement effect is significant.

Keywords: power inspection; helicopter landing site selection; goal planning; particle swarm optimization; Voronoi diagram

(责任编辑:唐立平)