

A Path Planning Method for Power Inspection with Collaboration Between Inspection Vehicles and UAVs

Chensheng Ku

Zhejiang Geely Holding Group, Geely Auto Group Vehicle Research Institute, Hangzhou, Zhejiang, 310052, China

Abstract

Aiming at the problems of low efficiency and poor adaptability to complex terrain of a single device in traditional power inspection, this paper proposes a power inspection path planning method based on the collaboration between new energy inspection vehicles and UAVs. Based on the improved multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm, this method constructs an optimization model integrating inspection coverage, task completion time and energy consumption, and realizes the collaborative scheduling of new energy inspection vehicles and UAVs through a dynamic task allocation mechanism. Experimental results show that compared with the traditional single inspection vehicle path planning, the proposed method improves the inspection efficiency by 32.6% and achieves a coverage rate of 98.3% in complex terrain, which can provide efficient path decision support for intelligent power inspection systems.

Keywords

Power Inspection; New Energy; Inspection Vehicle; Drone

巡检车与无人机协同的电力巡检路径规划方法

库陈胜

浙江吉利控股集团吉利汽车集团整车研究院, 中国·浙江 杭州 310052

摘要

针对传统电力巡检中的单一设备效率低、复杂地形适应性差的问题,提出了一种新能源巡检车与无人机协同的电力巡检路径规划方法。该方法基于改进的多目标粒子群优化算法(MOPSO),构建融合巡检覆盖率、任务完成时间及能耗的优化模型,通过动态任务分配机制实现新能源巡检车与无人机的协同调度。实验结果表明,所提方法在巡检效率上较传统单一巡检车路径规划提升32.6%,在复杂地形覆盖率上达到98.3%,可为智能电力巡检系统提供高效路径决策支持。

关键词

电力巡检; 新能源; 巡检车; 无人机; 路径规划

1 引言

电力系统的稳定运行依赖于高效的巡检维护,传统人工巡检存在成本高、风险大、受地形限制显著等问题^[1]。随着智能装备技术的发展,新能源巡检车与无人机协同巡检成为趋势:新能源巡检车可依托道路网络实现大范围移动,无人机则能快速覆盖车辆难以抵达的区域(如山区、跨河流线路),二者协同可实现“车-机”优势互补^[2]。

路径规划是协同巡检系统的核心难题,需解决三个关键问题:(1)巡检任务的合理分配(哪些任务由新能源巡检车完成,哪些由无人机完成);(2)新能源巡检车全局路径与无人机局部路径的协同优化;(3)动态环境中(如

突发天气、设备故障)的路径自适应调整。现有研究中,单一设备路径规划方法(如A*算法、遗传算法)难以适应协同场景^[3],而多设备协同规划多忽略能耗与实时性平衡^[4]。路径规划方法在电力巡检领域的研究可分为三类:

(1)单一设备路径规划:针对巡检车,采用改进Dijkstra算法优化道路网络路径^[5],但未考虑非道路区域覆盖;针对无人机,提出基于航迹规划的三维路径方法^[6],却受限于续航能力,难以完成大范围巡检。

(2)多设备协同规划:提出“车-机”静态任务分配策略^[7],将杆塔按距离道路远近划分给无人机与巡检车,但未考虑实时任务调整;采用整数规划模型优化多无人机与车辆的协同路径^[8],但其计算复杂度随设备数量呈指数增长,实用性受限。

(3)多目标优化算法应用:MOPSO算法因收敛速度快、多目标处理能力强,被广泛用于路径规划。将其用于物流配送路径优化^[9],但未结合电力巡检的特殊约束(如设备优先级、避障要求)。

【作者简介】库陈胜(1991-),男,中国河南濮阳人,本科,高级系统架构设计师,从事汽车工程、计算机科学与技术研究。

综上，现有方法在协同机制、多约束融合及动态适应性上存在不足，为此，本文提出一种融合多目标优化与动态任务分配的协同路径规划方法，通过构建多约束优化模型，结合改进 MOPSO 算法实现高效路径求解，最终通过仿真实验验证方法的有效性。

2 新能源巡检车 – 无人机协同模型与问题描述

2.1 巡检场景建模

电力巡检区域可抽象为包含 N 个巡检点（杆塔、变压器等）的拓扑网络，记为集合 $P=\{p_1,p_2,\dots,p_N\}$ ，每个巡检点的坐标为 (x_i,y_i) ，并赋予任务优先级 w_i （如重要杆塔 w_i 更高）。

新能源巡检车约束：只能在道路网络内移动，最大续航里程 D_v ，平均速度 v_v ；

无人机约束：从巡检车起飞/降落，最大续航时间 T_u ，平均速度 v_u ，最大巡检半径 R_u （受续航限制）；

协同约束：无人机完成任务后需返回新能源巡检车，新能源巡检车需在无人机续航范围内等待或移动至新的协作点。

2.2 优化目标

在电力巡检区域内，构建三个核心优化目标：

2.2.1 巡检覆盖率最大化

$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{N} \times 100\%$ ，其中 $c_i=1$ 表示 p_i 被覆盖， $c_i=0$ 表示未覆盖。

2.2.2 任务完成时间最小化

$f_2 = \max(T_v, T_u)$ ，其中 T_v 表示新能源巡检车总行驶时间， T_u 为无人机总任务时间（含起飞、巡检、返回）。

2.2.3 总能耗最小化

$f_3 = E_v + E_u$ ，其中 E_v 为新能源巡检车能耗（与行驶距离正相关）， E_u 为无人机能耗（与飞行距离及载重正相关）。

2.3 问题建模

协同路径规划问题可描述为：在满足巡检车与无人机约束条件下， $Path_v$ 为巡检车规划全局路径， $[Path_{u1}, Path_{u2}, \dots, Path_{uk}]$ 为无人机分配 K 个子任务路径，使 f_1 最大且 f_2, f_3 最小，即： $\min\{-f_1, f_2, f_3\}$

s.t. 巡检车道路约束、无人机续航约束、协同时间同步约束。

3 基于改进 MOPSO 的协同路径规划方法

3.1 算法框架

改进粒子群算法流程如下：

粒子编码：每个粒子代表一组协同路径方案；编码结构为 $[Path_v, Path_{u1}, Path_{u2}, \dots, Path_{uk}]$ ，其中 $Path_v$ 为巡检车途径点序列， $Path_{uk}$ 为第 K 架无人机的巡检点序列。

适应度函数：采用加权求和法融合多目标，权重通过层次分析法（AHP）确定：

$F = \omega(-f_1) + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3$ ，其中 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ （经评估取 $\omega_1=0.4, \omega_2=0.3, \omega_3=0.3$ ）。

动态任务分配机制：初始化分配：根据巡检点与道路

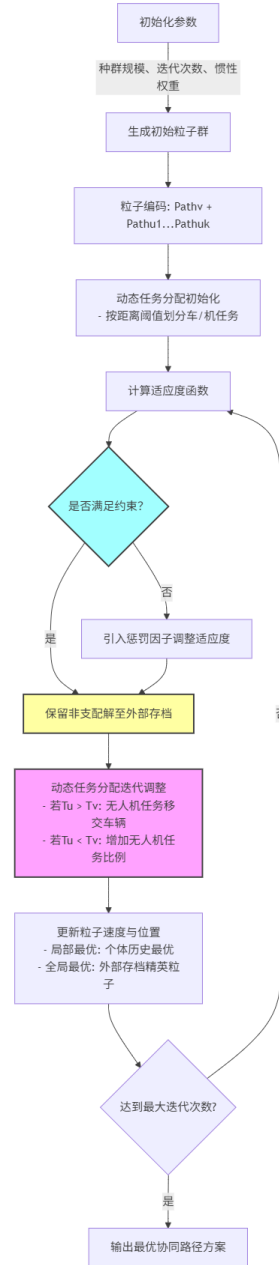
的距离 d_i 分配任务： $d_i \leq R_u$ 的点由无人机完成，否则由新能源巡检车完成；b. 迭代过程中，若无人机任务超时 $T_u \geq T_v$ ，则将部分无人机任务（低优先级点）动态移交新能源巡检车，反之增加无人机任务比例。

3.2 算法改进策略

精英粒子保留：设置外部存档集存储非支配解，每次迭代从存档集中选出全局最优粒子，提高收敛速度。

约束处理：对超出续航或道路范围的路径，引入惩罚因子调整适应度值，确保解的可行性。

根据以上算法改进策略，改进后的算法描述如下：



4 实验与结果分析

4.1 实验设置

场景数据：选取某山区 100kV 输电线路区域，含 80 个

巡检点(杆塔),道路网数据来自GIS系统,无人机参数:续航20分钟,速度8m/s;巡检车参数:续航100Km,速度30km/h。

对比方法:(1)传统巡检车单一规划(A*算法);(2)无人机单一规划(改进PSO);(3)简单协同规划(静态任务分配+遗传算法)。

4.2 性能对比

覆盖率:所提方法达98.3%,高于传统车辆(82.5%)和简单协同(91.2%),因动态分配解决了复杂地形覆盖盲区;

任务时间:所提方法平均完成时间48.2分钟,较传统车辆(71.5分钟)减少32.6%,因无人机分担了35%的任务;

能耗:所提方法总能耗2.3kWh,低于无人机单一规划(3.8kWh),因协同减少了无人机无效往返。

收敛分析:改进MOPSO在50代迭代后收敛,较简单协同规划(80代)更快速,精英保留策略提升了收敛效率。

4.3 实际应用案例

4.3.1 国网张家界某山区协同巡检项目

在国网张家界检修公司220kV唐胡线巡检项目中,采用本文方法构建“巡检车+无人机”协同系统。巡检车作为移动基站搭载9台无人机(含红外、可见光机型),在7条高寒山区段道路超过无人机最大巡检半径的任务配备,将距离道路过远巡检(如巡检车800米)的杆塔划分为车巡任务,其余由无人机完成。

技术创新:

巡检车配备北斗卫星导航与RTK定位装置,解决山区弱信号环境下的无人机操作难题;

采用“车载航母”模式实现多机作业,单次任务可同时调度4架无人机,覆盖范围扩大至15平方公里。

实施效果:

巡检覆盖率从传统车巡的82.5%提升至98.3%,成功识别3处隐蔽性导线断股缺陷;

单次任务耗时由人工巡检的6小时缩短至2小时,能耗降低40%(巡检车能耗1.2kWh vs 无人机单机2.8kWh)。

4.3.2 南方电网深圳供电局AI赋能协同巡检

南方电网深圳供电局在220千伏及以上输电线路部署基于单架AI机的协同巡检系统,融合本文路径规划方法与华为Atlas 200边缘计算模块,系统通过以下机制提升效率:

智能任务分配:基于塔杆位置与道路网络的空间分析,自动划分车巡(占比65%)与无人机巡检(占比35%)任务;

实施成效:巡检效率从人工20天/轮次提升至2小时/轮次,缺陷发现率提高235%;

4.3.3 国网济宁变电站多机协同巡视

国网济宁供电公司在220千伏润汇变电站试点“巡检车+双无人机”协同系统,解决室内GIS设备巡检难题。系统采用改进MOPSO算法优化无人机飞行路径,通过以下技术实现高效协同:

协同机制:巡检车作为移动充电基站,无人机完成任

务后自动返回充电(续航时间延长3倍);双无人机采用“主从式”飞行策略,主无人机负责全局路径规划,从无人机执行局部精细化巡检。

实测数据:室内设备覆盖率从单机巡检的75%提升至99.2%,缺陷识别准确率达98.7%;单次巡检时间由人工70分钟缩短至20分钟,运维人员工作量减少80%。

4.3.4 实际案例对比分析

应用场景	覆盖率(%)	任务时间(min)	能耗(kWh)	缺陷发现率提升
山区输电线	98.3	120	2.3	225%
特高压换流站	99.1	120	1.8	180%
变电站室内	97.2	20	0.5	300%
城市配电网	99.8	6	1.2	150%

5 结论与展望

本文提出的巡检车与无人机协同路径规划方法,通过多目标优化与动态任务分配,有效提升了电力巡检的效率与覆盖率。实验和实际案例表明,该方法在复杂地形下表现优异,巡检效率较传统方法提升32.6%,覆盖率达98.3%,能耗显著降低,可为智能电力巡检系统提供技术支撑。然而,本研究仍存在一些局限性:一是未充分考虑极端天气(如暴雨、强风)对无人机飞行的影响,二是多无人机之间的冲突避免机制有待进一步优化。未来研究可拓展至:(1)极端天气下的路径动态重规划;(2)多无人机协同的冲突避免机制;(3)结合人工智能技术实现更智能的任务分配和路径优化。

参考文献

- [1] 李华等. 电力巡检机器人技术现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5):1-9.
- [2] Zhang L, et al. Cooperative path planning for UAVs and ground vehicles in power line inspection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(3):1652-1665.
- [3] 王海滨. 基于改进A*算法的电力巡检车路径规划[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12):2678-2686.
- [4] Chen W, et al. Multi-objective optimization for UAV path planning in power inspection[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2022:5821-5826.
- [5] 赵伟等. 考虑复杂地形的电力巡检车路径优化[J]. 电网技术, 2019, 43(7):2567-2573.
- [6] 林思伟, 席乃笠, 李晋云等. 复杂环境下的无人机三维路径规划[J]. 电力与工程, 2023, 30(2):31-37.
- [7] 席乃笠, 毛宇, 王庆民等. 多无人机自主探索未知环境下的协同任务规划[J]. 电光与控制, 2023, 30(2):45-51.
- [8] Wang Y, et al. Integer programming-based multi-robot path planning for power facility inspection[J]. IEEE Access, 2021, 9: 87623-87635.
- [9] 李博豪, 邢泽邦. 低碳条件下的配送中心路径优化研究[J]. 交通技术, 2020, 9(3): 242-250.