

控制与决策

Control and Decision

电力巡检机器人路径规划技术及应用综述

毛建旭, 贺振宇, 王耀南, 张辉, 钟杭, 易俊飞, 陶梓铭, 陈诺天

引用本文:

毛建旭, 贺振宇, 王耀南, 张辉, 钟杭, 易俊飞, 陶梓铭, 陈诺天. 电力巡检机器人路径规划技术及应用综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3009–3024.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

移动机器人运动规划中的深度强化学习方法

Deep reinforcement learning for motion planning of mobile robots

控制与决策. 2021, 36(6): 1281–1292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0470>

基于 $\text{pm}3\sigma$ 正态概率区间分族遗传蚁群算法的移动机器人路径规划

Path planning of mobile robot based on $\text{pm}3\sigma$ normal probability interval population division using genetic ant–colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(12): 2861–2870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0745>

机器人信息增益RRT环境探索算法

Robot RRT based on information gain for environment exploration

控制与决策. 2021, 36(11): 2683–2689 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1007>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A–star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

机器人抓取检测技术的研究现状

Recent researches on robot autonomous grasp technology

控制与决策. 2020, 35(12): 2817–2828 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1145>

电力巡检机器人路径规划技术及应用综述

毛建旭^{1,3†}, 贺振宇^{1,3}, 王耀南^{1,3}, 张 辉^{2,3}, 钟 杭^{2,3}, 易俊飞^{1,3}, 陶梓铭^{1,3}, 陈诺天^{1,3}

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学 机器人学院, 长沙 410082;
3. 湖南大学 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心, 长沙 410082)

摘要: 电力巡检是保障电力设备安全与稳定的关键. 传统的巡检方式以人工为主, 其高风险、低效率、易漏检的缺点难以满足电力巡检要求, 将机器人应用于电力巡检具有安全高效、自主分析、智能决策的优势. 路径规划技术通过求解巡检路线以实现遍历巡检与自主避障, 是电力巡检机器人的关键技术之一. 对此, 首先分析不同电力场景的巡检内容与要求; 然后, 综述电力单体巡检机器人路径规划技术与协同巡检机器人路径规划技术, 并总结电力巡检机器人路径规划技术在发电站、变电站以及输电线路场景下的应用效果; 最后, 对电力巡检机器人路径规划关键技术进行展望, 即未来电力巡检机器人路径规划技术将向着多源异构信息融合、深度强化学习以及云边端协同路径规划方向发展.

关键词: 电力巡检; 机器人; 路径规划; 协同巡检; 多源异构; 深度强化学习

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2219

引用格式: 毛建旭, 贺振宇, 王耀南, 等. 电力巡检机器人路径规划技术及应用综述 [J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3009-3024.

Review of research and applications on path planning technology for power inspection robots

MAO Jian-xu^{1,3†}, HE Zhen-yu^{1,3}, WANG Yao-nan^{1,3}, ZHANG Hui^{2,3}, ZHONG Hang^{2,3}, YI Jun-fei^{1,3}, TAO Zi-ming^{1,3}, CHEN Nuo-tian^{1,3}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Robotics, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. National Engineering Research Center of RVC, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Power inspection is the key to ensuring the safety and stability of power equipment. The traditional inspection method is mainly manual, which has the disadvantages of high risk, low efficiency and easy to miss inspection, but it is difficult to meet the requirements of power inspection. Path planning technology is one of the key technologies for power inspection robots by solving inspection routes to achieve traversal inspection and autonomous obstacle avoidance. We firstly analyzes the inspection contents and requirements of different power scenarios, then reviews the path planning technology of power single inspection robots and collaborative inspection robots, and summarizes the application effects of the path planning technology of power inspection robots in power stations, substations and transmission line scenarios. Finally, an outlook is provided on the key technologies for the path planning of power inspection robots, which will be developed in the direction of multi-source heterogeneous information fusion, deep reinforcement learning and cloud-edge-end collaborative path planning.

Keywords: power inspection; robots; path planning; collaborative inspection; multi-source heterogeneity; deep reinforcement learning

0 引言

随着国内工业生产和人民生活水平的不断提高, 社会用电需求也愈来愈大. 据统计, 2021 年中国工业用电量达 55 090 亿千瓦时, 同比增长 9.1%; 城乡居民

生活用电量达 11 743 亿千瓦时, 同比增长 7.3%. 工业生产与居民生活用电呈现快速增长的趋势, 给电力系统的安全稳定运行提出了更高要求. 为了预防电力故障发生以及延长电力设备寿命, 电力巡检^[1]成为

收稿日期: 2022-12-28; 录用日期: 2023-06-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62133005); 国家重点研发计划项目 (2022YFB4701800); 湖南省科技重大专项项目 (2021GK1010); 湘江实验室重大项目 (22xj01006); 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ40124).

†通讯作者. E-mail: maojianxu@hnu.edu.cn.

电力设备维护的常态化手段. 电力巡检场景^[2]主要包括发电站^[3]、变电站^[4]及输电线路^[5]等, 发电站巡检^[6]主要对锅炉、管道等进行定期检查, 包括温度、振动、声波噪声等多方面物理指标的检测, 避免爆炸、泄漏等发电站事故的发生^[7]. 变电站巡检^[8]主要是对站内仪器指针与气味灰尘等进行检测, 使变电站内设备正常运作来确保变电站的电能分配与输送正常^[9]. 输电线路^[10]长期暴露在户外复杂环境, 比如太阳暴晒、风雨侵蚀、鸟禽干扰等, 因此输电线路经常出现线路破损、绝缘子异物搭挂^[11]等问题, 定期检测输电线路缺陷和故障点是对输电线路效率与安全性的保障. 传统的电力巡检方式以人工巡检为主, 由巡检工人完成巡视检查工作, 其存在以下缺点:

1) 人工巡检效率低. 电力巡检场景通常占地面积大, 设备多而繁杂, 电厂内部空间构造复杂, 使人工巡检工作范围广、工作区域可达性低、工作任务量大, 导致巡检效率大大降低.

2) 人工巡检易漏检. 电力巡检场景具有电压幅值高、电磁干扰强、待检器件多的特点, 判断电力器件是否存在缺陷往往依赖巡检人员的经验, 并且电力器件可辨别性差, 这种巡检方式难以遍历所有待检器件, 导致易发生漏检少检的情况, 为电力设备运转带来危险与隐患.

3) 人工巡检风险高. 电力巡检场景常需要人工攀爬完成巡检, 其海拔地势高、环境极端、气候变化大的特点导致容易发生巡检事故, 同时长期处于高空高压的工作环境给工作人员的身心健康带来极大危害.

总之, 电力人工巡检是一项效率低、易漏检、风险高的巡检方式, 局限性较大. 基于对作业效率、施工人员生命安全的考虑, 利用机器人完成电力自主

巡检是必要的. 国内外都在大力发展机器人技术, 已经研制出了发电站、变电站、输电线路等系列巡检机器人. 发电站、变电站等地面电力场景主要是利用移动机器人^[12]在地面角度对待检器件与设备进行检查, 输电线路等高空电力场景主要通过无人机或者飞行机器人^[13]在空中进行杆塔与巡线检测, 如图1所示. 电力巡检机器人通过自身装载的激光雷达、红外成像传感器、深度相机^[14]等传感器完成待检场景的环境感知^[15], 在此基础上利用路径规划技术^[16]求解电力巡检机器人在待检区域内的最佳巡检路线, 实现自主化巡检. 相比于传统的人工巡检方式, 部署了路径规划技术的巡检机器人充分优化巡检路径^[17], 节省巡检时间, 并且提高巡检过程中的自主化与智能化水平. 目前, 电力巡检机器人在发电站、变电站、输电线路等电力场景已经被应用, 在一些区域面积不大、场景情况较简单的环境下利用单体巡检机器人即可完成巡检, 然而电力场景存在着一些具有复杂狭窄、单区域大面积以及跨区域覆盖式的特点, 需要机器人协同其他作业单位共同完成巡检任务. 单体电力巡检机器人可分为地面巡检机器人与空中巡检机器人, 因作业环境的不同面临着侧重点不同的难题, 地面巡检机器人需要考虑巡检区域遍历^[18]、突发情况避障^[19]的巡检需求, 空中巡检机器人则面临着续航时间有限、图像质量较差的特殊挑战. 实际上, 电力巡检机器人的路径规划归根结底是一个依赖于环境模型的多目标多约束条件的优化问题, 需要充分考虑电力场景特殊性影响和因素, 使电力巡检机器人的路径规划问题得到合理解决. 因此, 电力巡检机器人路径规划技术需要在电力场景约束条件的基础上进一步研究.

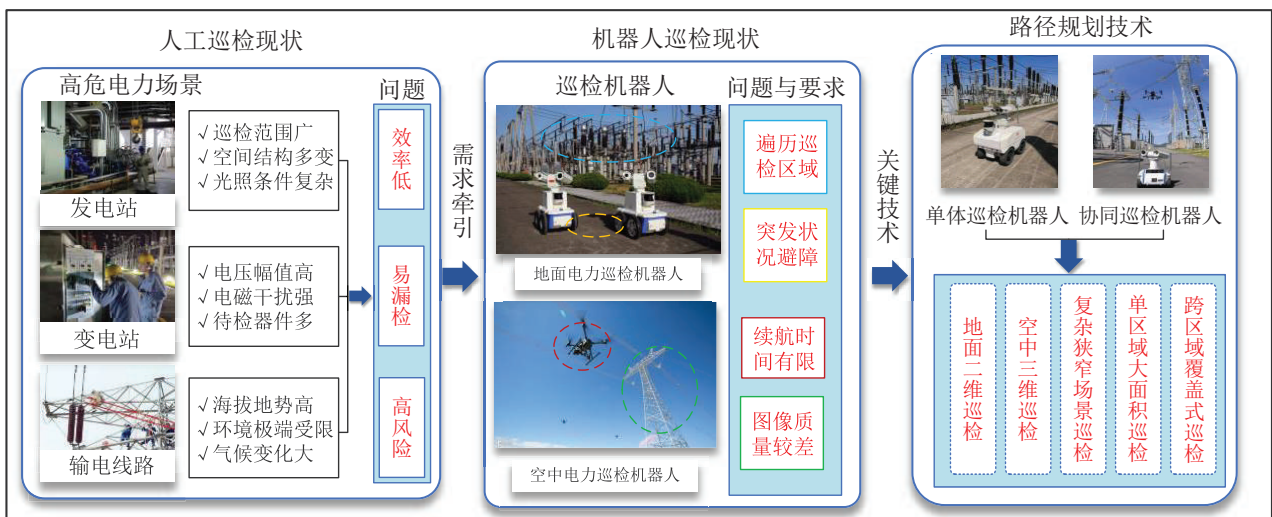


图1 电力巡检机器人及其路径规划关键技术

本文面向复杂受限的电力场景,首先综述电力巡检机器人的路径规划关键技术研究现状,并对电力巡检机器人在典型电力场景下的应用进行总结,最后对电力巡检机器人路径规划关键技术的发展趋势进行展望.

1 电力巡检机器人路径规划关键技术

通常,不同电力场景下巡检难度与工作量是有区别的,例如小型变电站等电力场景下的电力巡检任务

相对轻松,单体巡检机器人^[20]即可完成巡检任务.但是在复杂狭窄电力场景、大面积变电站或者长距离输电线路执行巡检任务时,由于其作业风险大、巡检面积大、跨越区域多的特点导致单体电力巡检机器人耗时长、效率低,需要其他作业单位参与协同完成巡检任务.所以,本文将电力巡检机器人路径规划技术划分为单体巡检机器人路径规划与协同巡检机器人^[21]路径规划技术,从电力场景的特殊性和难点来阐述电力巡检机器人路径规划技术,如图2所示.

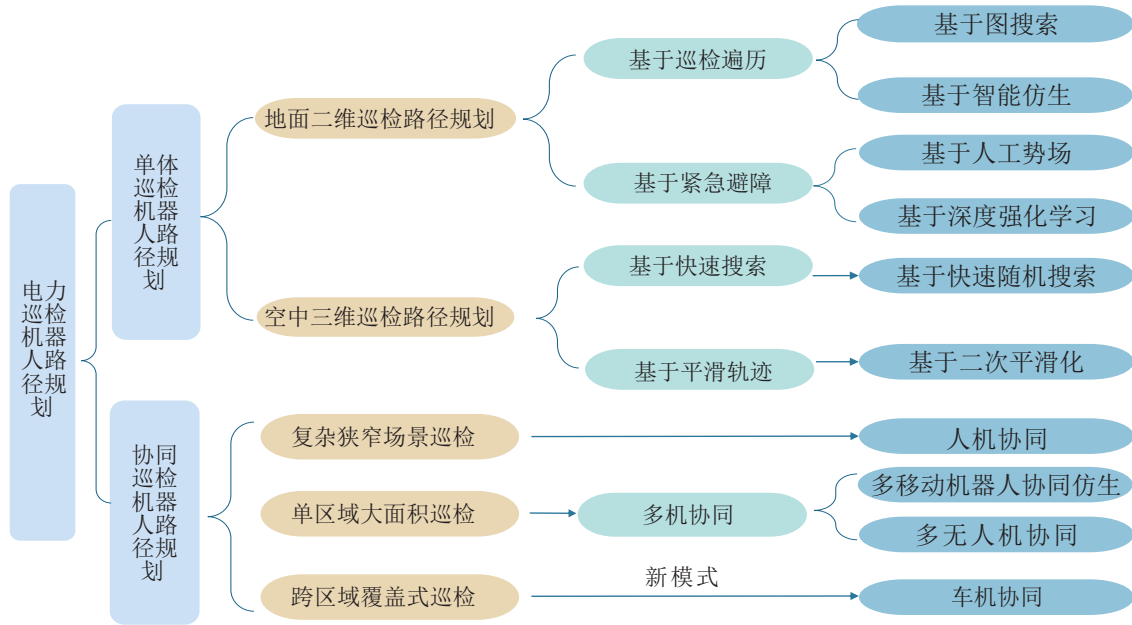


图 2 电力巡检机器人路径规划方法

1.1 单体巡检机器人路径规划技术

单体巡检机器人路径规划具体指单个机器人在特定电力场景自主规划巡检路线独立完成巡检任务,比如发电站、变电站、输电线路等电力场景.在发电站、变电站等地面电力场景下,通常使用移动机器人^[22]进行电力巡检;在高压输电线路、配网等空中电力场景下,目前兴起的无人机技术^[23]成为了电力巡检绝佳的选择.因此,根据电力场景的特殊性和机器人类别将单体巡检机器人路径规划分为地面二维巡检路径规划与空中三维巡检路径规划,本文将从两者的重难点出发分别对相对应的路径规划技术进行阐述和区分.

1.1.1 地面二维巡检路径规划技术

地面二维路径规划主要指移动机器人在发电站、变电站等地面电力场景自主规划路线进行巡检,其特点为规划的路线是二维平面的.与普通移动机器人路径规划技术不同,电力巡检对设备检查的完备和安全程度要求极高,移动机器人除了实现从出发点至终

止点的基本要求以外,在规划路径的过程中必须考虑到是否巡检遍历、是否在未知环境下紧急避障等约束条件.因此,根据单体移动机器人在平面电力场景下路径规划所面向的特殊难点将地面二维路径规划方法分为基于巡检遍历的路径规划方法、基于紧急避障的路径规划方法.

1) 基于巡检遍历的路径规划方法.

巡检遍历指移动机器人在巡检过程中必须对所有待巡检的电力器件和设备进行检查测试,意味着在建立巡检地图时,待巡检点都需要纳入移动机器人的巡检路线中,在这一约束条件下移动机器人进行路径规划,规划出一条能够遍历所有巡检点的路线.实质上,基于遍历巡检的路径规划问题^[24]可以视为考虑多巡检点的路径规划问题,在基于环境模型的路径规划方法上进行拓展和改良基本能实现巡检遍历.目前较为常见的基于环境模型的路径规划方法有基于图搜索的路径规划方法^[25]和基于智能仿生^[26]的路径规划方法,如表1所示.

表1 基于巡检遍历的路径规划方法比较

文献	算法	应用场景	改进点	实际效果
[27]	A*	配电房	将危险源距离信息引入代价函数	能够遍历危险源和规避障碍物
[28]	Dijkstra	变电站	增加转弯次数和角度为评价指标	在遍历节点的同时减少了转弯次数
[29]	GA	大型变电站	改进适应度函数和遗传算子	快速完成站内寻址
[30]	ACO	高压变电站	融合模糊神经网络	在遍历同时找到低场强环境下的最短路径
[31]	ACO	变压器室	利用偏差对信息素更新	解决双目标问题,提高了遍历搜索能力

图搜索^[32]指直接在图中寻找路径,常见的图搜索算法有广度优先搜索算法^[33]、深度优先搜索算法^[34]、Dijkstra算法^[35]、贪婪最佳优先搜索算法^[36](greedy best first search, GBFS)、A*算法^[37]等。其中A*算法是一种启发式搜索算法,其启发函数的计算公式^[38]如下:

$$f(x) = g(k) + h(k). \quad (1)$$

其中:自变量 k 表示节点, $g(k)$ 表示节点 k 与起始点距离的代价, $h(k)$ 表示节点 k 与目标点距离的代价, $f(k)$ 表示在节点(k)上考虑起始点与目标点的综合代价,通过启发函数选择综合代价最小的点作为下一个遍历点。

目前解决巡检遍历路径规划问题的一种思路是将多巡检点纳入图搜索算法的启发函数,在此基础上进行路径规划。例如,文献[27]将危险源和电力应急机器人的距离关系以及风险曲线函数 Q 引入A*算法的代价函数,结果表明改进的A*算法能够在复杂场景下进行路径规划,能够遍历危险源和规避障碍物,很好地适应环境变化。文献[28]对Dijkstra算法进行改进并应用于变电站电力巡检机器人的路径规划,通过增加转弯次数和转弯角度作为评价指标使算法更适合实际应用,在实现遍历节点的同时减少了电力巡检机器人的转弯次数,使路径更为优化。

仿生算法主要根源于动物种群的行为与习惯^[39],包括遗传算法^[40](genetic algorithm, GA)、粒子群优化算法^[41](particle swarm optimization, PSO)、蚁群算法^[42](ant colony optimization, ACO)等。GA模型是一种自然选择和生物进化的寻求最优解的数学计算模型^[43],其算法过程由染色体编码、初始群体选取以及适应度函数^[44]评价组成。文献[45]针对群鸟觅食问题提出了PSO,相比GA缺少了交叉与变异操作,通过迭代寻求最优解,该算法的优点是效率高、收敛快。ACO最早被用于解决旅行商问题^[46](travel salesman problem, TSP),通过群体中个体间的协作行为及启发信息寻找到最优路径^[47]。

GA、PSO、ACO等仿生算法原理都源于自然界,通过将自然界规律融入到算法对问题进行优化,很好地解决了路径规划中的多目标点的寻优问题,并且仿生算法能够与其他算法进行融合使用,如文献[29]针对大型变电站的站内寻址问题,通过改进GA算法的适应度函数和遗传算子实现巡检机器人在大型变电站内的遍历寻址。文献[31]针对电网巡检提出了基于边缘计算的两层启发式算法,在ACO的基础上利用偏差对信息素进行更新解决了路径规划的双目标问题^[48],并引入模拟退火算法^[49]加速算法收敛,该方法有效地提高了多目标搜索能力,避免陷入局部最优,提高了算法收敛速度。

2) 基于紧急避障的路径规划方法。

在变电站等地面电力场景中,巡检环境通常是动态多变的,只依赖于已建模的地图信息进行静态式的路径规划能够规划出一条遍历巡检的路线,但是面对动态多变的环境中的障碍物需要传感器获取环境信息进行局部路径规划以达成紧急避障的目的。电力场景下的局部路径规划^[50]指巡检机器人通过传感器获取障碍物的位置、大小、形状等信息,为巡检机器人获取一条无碰撞的最优路径。目前较为常见的避障路径规划方法有基于人工势场^[51]的路径规划方法与基于机器学习^[52]的路径规划方法,如表2所示,能够为电力巡检机器人路径规划的紧急避障问题提供参考。

人工势场法为解决地面巡检机器人路径规划的紧急避障问题提供了理论与方法,其原理^[60]是将目标点视为一个引力场,将障碍点视为一个斥力场,通过计算合力来控制机器人的路径与轨迹。该方法适用于局部动态环境,其关键数学模型为引力场函数和斥力场函数,引力场与斥力场的和构成了人工势场,最后通过梯度下降法来求解局部最小值。人工势场法本质上是数值算法,其优点是具有反馈机制,在进行避障时误差较小。但是人工势场法受环境影响较大,地面电力场景巡检区域大、待检器件多,使构建

表 2 基于紧急避障的路径规划方法比较

文献	算法	实际环境	改进措施	优势	适用场景
[53]	APF	障碍物环境	提出 new point-APF, 在障碍物阻挡直线路径时创建具有吸引力的新势场点	避障的同时提高了算法效率	变电站、发电站
[54]	APF	室内障碍物环境	提出左转势场法, 引入虚拟目标点	有效实现紧急避障	配电房
[55]	APF	动态复杂环境	重构势场函数模型, 引入位姿	克服了线性干扰, 实现目标可达与避障	变电站、发电站
[56]	APF	室内障碍物环境	将机器学习中的决策树引入路径规划	实现避障, 降低震荡	配电房
[57]	APF	电力场站	引入计数法设置算法时间	在设定时间内有效避障	电力场站
[58]	深度强化学习	变电站	在云计算的基础上进行实现	实现障碍物紧急避障并且精准规划巡检路径	变电站
[59]	深度强化学习	变电站	将 Q 网络与改进卷积神经网络结合	实现避障同时将路径规划精准度提高到 98.3 %	变电站

的地图模型中的目标点与障碍点具有数量繁多、分布复杂的特点, 导致人工势场的作用力属性具有复杂性和多样性. 其缺点如下: 势场合力为 0 时可能会使巡检机器人停止运动, 受困于障碍区域; 利用梯度下降法进行反向运算时, 易陷入局部最小值. 为解决以上问题, 已面向电力场景展开研究, 文献[57]将计数法与人工势场法相结合, 通过计数法来设置算法避障的运行时间, 使巡检机器人能够在设定时间内有效避障, 利用定位模块来优化电力机器人的巡检路径, 从而避免巡检机器人陷入局部最小值以致于绕路花费更多的时间.

在基本实现地面巡检机器人路径规划的紧急避障的基础上, 自主性和交互性是电力巡检对机器人避障规划提出的更高挑战. 机器学习在近 10 年间飞速发展, 与不同领域的各项技术进行交叉融合^[61]. 目前路径规划技术方面的避障规划与机器学习相结合在路径质量上有着显著的优势, 为地面巡检机器人避障规划的自主性和交互性实现提供了理论支撑, 其发展正走向智能化新时期^[62]. 目前, 人工智能的主要研究方向有强化学习^[63]、深度学习^[64]等, 前沿的网络结构有卷积神经网络^[65]、全连接神经网络^[66]等. 与传统路径规划算法相比, 机器学习方法的优越性在于路径的决策, 例如深度强化学习, 通过深度学习与强化学习能够自主选择出更加优化的路径, 提高路径质量, 改善避障效果. 文献[67]为提高未知环境下路径规划的鲁棒性与有效性, 提出一种新的基于深度神经网络的实时在线路径规划方法 OTDPP-Net: 一种端到端的神经网络架构来学习三维布局与路径规划策略,

基于 DNN 的路径规划计算时间与有效性可以保持与环境条件无关, 能够在大规模复杂环境下进行路径规划. 文献[68]为解决强化学习在路径规划决策中存在的维度灾难问题, 提出将强化学习与深度学习相结合, 利用深度学习的感知优势解决强化学习的决策问题. 文献[69]为提高短时间内路径规划质量, 利用卷积神经网络来估计使用传统算法生成的路径. 文献[70]为提高机器人路径规划在动态障碍物环境下的成功率与性能, 提出一种多智能体进化强化学习方法.

目前机器学习方法逐渐在电力巡检机器人路径规划技术领域进行试验与研究, 电力巡检机器人通过深度学习的方式获取场景中的深层环境信息, 利用强化学习进行决策, 与环境不断进行交互完成神经网络的迭代优化, 最后输出相对准确的动作参数实现机器人的避障规划^[71], 如图 3 所示. 基于神经网络的路径规划方法针对电力场景展开研究, 文献[58]提出了一种基于云计算的变电站巡检机器人路径规划方法, 通过对基于图像识别的变电站场景等效建模, 构建巡检机器人的运动模型, 利用改进的深度强化学习算法规划机器人巡检路径, 实现了障碍物的紧急避障, 解决了变电站巡检任务重、人工巡检可视化水平低等问题, 所提出的深度强化学习路径规划方法更有利于对变电站巡检机器人巡检路径的精准规划, 同时提高了变电站巡检能力与自动化水平. 文献[59]等为减小变电站巡检机器人路径规划误差, 提高巡检效率, 提出一种改进的深度强化学习路径规划方法, 深度学习用于外部环境感知, 强化学习用于机器人动作决

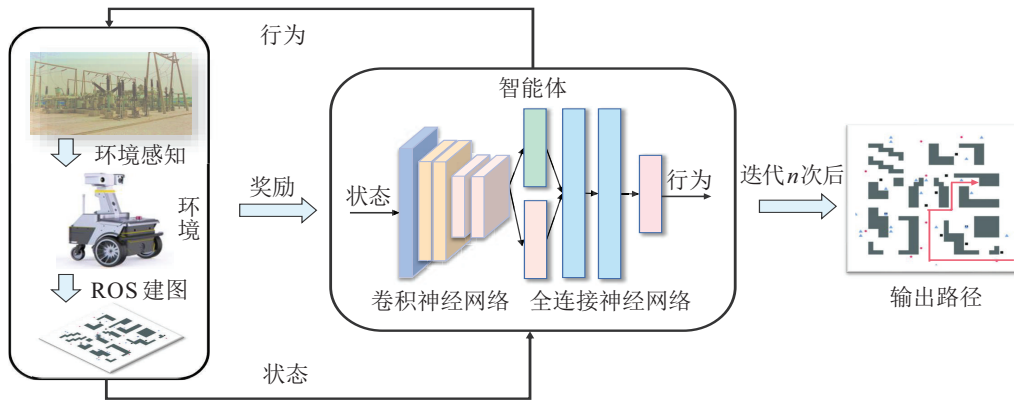


图3 基于深度强化学习的电力巡检机器人路径规划方法

策,在实现避障规划的同时将路径规划精准度提高到98.3%,算法收敛速度更快,提高了巡检效率,有效提高了模型与环境的交互程度.机器学习方法具有鲁棒性强、非线性运算、适配性高的特点,适合电力场景中的动态复杂环境,但是其对硬件算力要求较高,低配置的处理难以实现电力巡检机器人的实时避障规划.随着芯片与存储器性能的提升,目前高性能硬件设备能够满足模型收敛速度与网络复杂度的要求,使机器学习方法特别是深度强化学习在电力巡检机器人的避障路径规划方面具有强大的潜力.

综上所述,针对地面巡检机器人所提出的巡检遍历、紧急避障两大难点,目前解决的主要思路是在利用移动机器人常规路径规划算法的基础上,结合地面电力场景的特点加以解决,比如将多巡检点纳入图搜索算法的启发函数;同时,随着人工智能方法的迅速发展,巡检机器人在复杂电力场景下能够自主与环境进行交互,同时可以在复杂的情况下做出决策.

1.1.2 空中三维巡检路径规划技术

空中三维路径规划^[72]是指无人机或者飞行器在架空输电线路或者配网等空中电力场景规划路线完成巡检任务,其特点是巡检路径基于三维空间.与地面二维巡检路径规划技术不同之处在于输电线路场景的空间模型比较复杂,基于三维环境建模难度比较大,而且无人机悬浮在空中,具有不稳定性.考虑到巡检拍摄图像的质量问题,无人机规划的路径应当是平滑的,以便于无人机在空中更好地获取高质量图像.因此,根据空中电力场景中所面临的三维空间建模困难和拍摄图像质量问题,将空中三维巡检路径规划分为基于快速搜索的路径规划方法与基于平滑轨迹的路径规划方法.

1) 基于快速搜索的路径规划算法.

通常情况下,无人机或者飞行器在进行空中路径规划时首先需要基于场景信息构建环境模型,然

而与地面二维电力场景建模不同(地面二维电力场景仅需构建平面地图便可实现巡检机器人的基本路径规划),无人机则需要对电力场景的三维信息(如高度、立体形状、外部细节信息)^[73]进行具体建模,难度较大;且无人机的续航时间有限,要求无人机能够快速规划路线以及在未知或者部分已知的复杂环境下快速做出决策来完成巡检任务.因此,三维建模困难以及快速决策规划的需求为无人机的三维路径规划方法提出了挑战.

快速搜索随机树^[74](rapidly-exploring random tree, RRT)的路径规划算法为无人机的三维路径规划难点的解决提供了基本算法模型,是一种直接快速搜索式算法,在起始点以“枝”的形式随机扩张,通过生成一个随机树来搜索目标点^[75],避免了复杂的三维建模计算.它能对随机生成点进行碰撞检测,所以可同时在未知或者部分已知的复杂电力场景下进行决策规划. RRT算法采样方式影响着巡检路径的规划效果,根据RRT算法对目标点的采样方式的多样性,在表3中分别对不同的RRT算法性能进行了比较.

RRT算法具有搜索速度快、避障能力好的特点,符合空中巡检机器人三维路径规划的需求.但是该算法存在以下缺点:随机性较强,算法收敛困难,在复杂环境下可能被困在障碍物区域;结果路径是可行的无碰撞路径,而不是最优化路径.针对以上问题对算法进行研究,文献[81]提出了一种改进的RRT方法并应用于电力飞行机器人的巡检路径规划,改进的RRT在采样过程引入概率搜索减小了传统算法的随机性,通过对比试验改进的RRT算法收敛速度更快,并且实现了避障.由上述方法可看出,在电力场景下利用RRT算法进行路径规划重点在于两个步骤:1)根据电力场景特点改进采样方式减小搜索随机性;2)在所有可行性路径中寻找最优化路径.

2) 基于平滑轨迹的路径规划算法.

表 3 基于快速搜索的路径规划方法比较

文献	算法	采样方式	改进措施	突出性能	适用场景
[76]	IRRTC	定向采样有方向偏差的节点	引入定向搜索策略;融合 APF 算法	规划最优化	四旋翼无人机等在复杂静态环境下的路径规划
[77]	Hybrid RRT	Informed 采样	采用双向搜索;起始树与目标树合并	规划成功率,规划时间	无人机等非完整约束系统的路径规划
[78]	RRT	端点定向采样	采用端点定向采样,并利用贝塞尔曲线进行平滑轨迹	规划时间,路径长度	无人机在高压输电线路场景下的路径规划
[79]	RRT*	设置随机采样概率为 50%,增加空间中随机样本的概率	增加路径区域中树分支的密度来改进优化	规划时间	无人机在三维场景下的路径规划
[80]	RRT	采用自适应动态步长和 Gibbs 采样策略	引入柯西变异策略和列维飞行策略降低搜索的盲目性	规划时间,路径长度	无人机在变电站场景下的三维路径规划

平滑轨迹^[82]是对空中三维路径规划提出的特殊需求,无人机或者飞行机器人在巡检过程中需要在空中保持稳定,如果规划的路径仅达到可巡检、可避障的要求,而不考虑路径的弯曲程度或者平滑性对无人机控制的影响,其传感器获取到的图像质量是较差的。而巡检恰好对于图像质量有着极高的要求,意味着巡检机器人在空中的路径具有一定的平滑性,便于摄像头能够平稳地拍摄。实际上,基于平滑轨迹的三维路径问题是在实现基本三维路径规划的基础上进一步对路径进行平滑化处理,将初始路径通过平滑算法实现二次优化,达到巡检机器人高质量巡检的目的。

文献[83]提出了一种贝塞尔曲线与 PSO 结合的方法解决光伏电站无人机路径规划问题,结果表明该方法能找到一条最优路径,所有曲线都很平滑,拍摄俯仰角在接受范围内。文献[84]提出了一种基于人工势场法与 RRT 算法结合的无人机路径规划算法,主要分为外部组合法和内部组合法,其核心思想是利用 RRT 算法搜索速度快的特点快速做出路径的整体规划,再利用势场模型来完成局部路径的避障规划。通过集合两种算法各自的优点,该方法能够找到一条合适的平滑路径,克服了 RRT 算法平滑性较差、人工势场法易陷入局部最优的缺陷。

综上所述,空中巡检机器人在进行三维路径规划时由于电力场景的特殊性面临着三维建模困难、续航时间受限、巡检图像质量差等难题,针对以上难点,对基于快速搜索的路径规划方法以及基于平滑轨迹的路径规划方法分别展开研究。前者的解决思路主要是利用通用的搜索算法(如 RRT 算法),结合电力场景环境模型的特点对其采样方式进行改进来适配空

中巡检机器人的三维路径规划;后者的解决思路是在基本实现空中巡检机器人的三维路径规划的基础上利用平滑算法(如贝塞尔曲线),对初始路径进行二次优化来实现路径平滑化处理,以获取到高质量的巡检图像。

1.2 协同巡检机器人路径规划技术

电力场景下机器人协同巡检主要指电力巡检机器人与其他单位共同完成电力巡检任务^[85],由于电力场景的多样性和特殊性,协同单位通常有人、机器人、巡检车等,根据协同单位的不同协同巡检模式可具体总结为人机协同、多机协同、车机协同等 3 类,下文将结合具体电力场景对不同协同巡检模式下机器人路径规划技术展开介绍与总结。

1.2.1 人机协同——复杂狭小场景电力巡检

目前,电力行业正在利用并推广机器人代替人工巡检以提高电力巡检效率与安全性,然而电力场景存在一些复杂狭小的空间,机器人可能无法进入或者巡检目标被遮挡,需要发挥人的灵活性以达到在不同视角辅助检查的目的,实现狭窄遮挡电力场景下的巡检。

人机协同巡检模式^[86]可分为人工巡检和机器人巡检两大任务,例如在输电线路场景以多旋翼无人机和人工协同巡检模式完成对杆塔的检测,人工巡检不适合无人机飞行的区域,无人机自主规划路径完成离地面较高的区域巡检。

人机协同的路径规划技术的关键集中在机器人的路径规划,首先为机器人划分巡检区域与待检目标,通过路径规划算法优化巡检路径,并且设置避障算法对障碍物进行规避,完成机器人区域的巡检,配

合人工巡检最终实现人机协同巡检。

1.2.2 多机协同——单区域大面积电力巡检

对于单区域内大面积的电力巡检任务,比如大型变电站和输电线路巡检,单一机器人难以完成庞大繁重的巡检任务,为了提高巡检效率,目前通常采用多机协同巡检模式。多机协同主要指多无人机协同与多移动机器人协同,分别在输电线路和变电站电力场景应用,通过将繁重的电力巡检任务分解成各项子任务给多个单体机器人,各单体机器人按照子任务自主进行巡检作业,协同完成整个巡检工作。下面基于电力场景的特殊性和难点分别从多移动机器人与多无人机协同路径规划进行阐述。

1) 多移动机器人协同路径规划

多移动机器人协同路径规划技术^[87]主要应用于变电站、发电站等单区域大面积电力场景,其特点是在地面上行驶并且基于电力场景进行平面建图来规划巡检路径。相比于单体巡检机器人路径规划,作为一个整体的多移动机器人系统^[88]必须进行个体与整体的任务分配来协调避碰,保证巡检系统的安全性。

针对变电站、发电站等电力场景巡检作业中的任务繁杂和冲突问题,通过基于优先级规则的任务分配策略实现对任务与计划的排序^[89],提高多移动机器人的协同巡检效率,降低冲突发生概率。文献[90]针对复杂变电站环境下多机器人的协同巡检问题提出了一种基于时间窗口算法的解决方案,将Dijkstra的最短路径算法与时间窗口算法相结合,使用基于优先级的调度策略进行任务分配,仿真实验结果说明该方法能有效避免路径规划中不同类型的冲突。在地图环境已知的情况下,利用交通规则法对多移动机器人系统中个体进行动态式的任务调配^[91],实现系统的高效与安全运行。针对电力场景下多机器人协同巡检的路径规划技术,文献[92]面向电力智能巡检提出了交通规则法与多机器人协同的路径规划算法,与APF相比,该算法运行时间较短,提高了整个系统的运行效率。然而算法在机器人数目较多时表现欠佳,基于优先级的交通规则算法会出现交通拥堵,秩序混乱;基于定时等待的交通规则算法会因等待信号灯浪费运行时间,未来研究方向可以将两种交通规则融合。

2) 多无人机协同路径规划

多无人机协同路径规划技术^[93]主要应用于输电线路高空场景,其特点是检测区域位于高空中并且受续航时间、巡检里程、负载能力约束。通过多无人机协同的方式,设置多站点供无人机充电,以保证巡检

任务的完整与高效完成。

实际上,电力场景下多无人机协同路径规划也是一个多约束优化问题,需要考虑续航时间、巡检里程、站点位置、计算速度等约束条件,在此基础上设计多无人机协同路径规划算法优化多无人机的巡检路径,实现多无人机对高空输电线路的高效与遍历巡检。文献[94]为解决输电线路巡检系统中多无人机协同路径规划优化问题,提出了一种新的混合式元启发式算法,在路径规划问题上具有较好的寻优能力,并且考虑到了无人机的续航时间、巡检里程、负载能力等限制条件,提高了系统的稳定性和鲁棒性。文献[95]为解决多无人机协同巡检存在的计算速度慢的问题,提出了一种基于多智能体强化学习混合网络的任务规划算法,采用该算法解决多无人机目标侦查问题,缩短了巡检任务时间,提高了巡检效率。

针对电力场景巡检存在的问题和局限性,通过对多机协同路径规划算法不断进行改进和优化,电力巡检机器人的巡检效率得到大幅度提升。但是,多机协同巡检着重通过增加机器人数量的方式来提高巡检效率,面向跨区域覆盖式的电力场景巡检采用多机协同将导致机器人或者无人机能耗过载、成本过高的问题,如何解决多机协同巡检导致能耗增大、成本升高的问题成为亟需突破的研究重点。

1.2.3 车机协同——跨区域覆盖式电力巡检

目前,为解决多机协同巡检存在能耗过载、成本高、续航困难等问题,并且能够适用于跨区域电力场景巡检,电力行业正在推广一种基于机器人的新型电力巡检模式——车机协同巡检。车机协同巡检主要用于跨区域输电线路巡检,具体指无人机与巡检车共同完成跨区域输电线路巡检任务^[96],巡检车用于运送无人机到巡检驻车点,无人机完成对应不同区域的输电线路巡检任务,充分利用巡检车的运输和续航能力以及无人机巡检的高效率和高精度优点,并且实现了跨区域覆盖式的电力巡检,是电力巡检模式的重大突破。文献[97]研究了一种地面车辆和无人机协同的新型高压电力线路巡检系统,提出了基于“cluster first, route second”和“route first, split second”的启发式方法来解决车辆路线问题和无人机路线问题,引入局部搜索对启发式方式进行改进。文献[98]将车机协同巡检划分成驻车点选址、无人机任务分配、巡检车路径规划3个子问题,提出了一种面向大面积巡检区域的巡检车路径规划方法,设计了一套多层嵌套的启发式算法求解。针对驻车点选址问题选择了一种鲁棒性和收敛性更强的全局优化算法,采用遗传算

法求解驻车点无人机的任务序列,采用免疫算法进行巡检车路径规划.在以巡检总作业时间最小为优化目标下,该方法实用性很强,给予电力企业很高的参考价值.文献[99]针对多无人机与作业车协同巡检模式中的实际问题提出了一种作业车与多无人机协同巡检任务分配模型,包括单作业圈划分、停车点定位、多无人机任务分配以及作业车的路径规划4个子问题,采用改进 K -means 算法划分单作业圈,将重心法用于停车点选址,利用启发式的遗传算法解决多无人机的任务分配和作业车的路径规划问题,该方案在电力公司实践运维区域已经应用,结果表明了该方法的有效性和实际性.

车机协同巡检模式为电力行业提供了很高的参

考价值,但是同时存在以下尚待解决的问题:巡检机器人数目过多可能会导致机器人出现交通紊乱的情况,相互干扰;车机协同巡检任务多,路径规划算法复杂度高,未来需要对算法进一步优化来满足实际电力场景对巡检效率以及巡检效果的要求.

2 电力巡检机器人路径规划技术实际应用

目前国内电力巡检需求较大,为了减小人力消耗、提高巡检智能化水平,国家电网、南方电网等电力公司在电力场景推广应用电力巡检机器人.本节对发电站、变电站、输电线路及其他场景巡检机器人进行阐述,介绍电力巡检机器人在路径规划技术实际场景下的应用效果(如表4所示),为未来电力巡检机器人发展提供参考.

表 4 电力巡检机器人实际场景应用效果

文献	研究单位	研究方法	应用场景	实际应用效果
[100]	国网新源控股公司	提出多种规划算法融合解决路径规划等任务规划问题	桐柏抽水蓄能电站	实现合理规划,巡检效率大大提升
[101]	东南大学 哈尔滨工业大学	提出基于效率与安全机制的核电站巡检与应急机器人的局部路径规划方法	泰山核电站第三核电有限公司	能够在不同的安全等级下规划出相对应的路径使机器人快速到达目标点,提高了核电站巡检机器人的巡检效率
[102]	山东大学	提出一种Dijkstra算法与模拟退火算法融合的路径规划方法,并且开发了一个机器人跟踪与路径规划的电子地图系统	某变电站	实际应用过程中提高了机器人的巡检效率
[103]	周口师范学院	提出一种改进的Dijkstra算法与模拟退火算法结合的全局路径规划算法	本地220kV变电站	完成500kV区域全任务巡检一次约70min,220kV区域与35kV区域全任务巡检一次约150min
[104]	广东电网有限责任公司 电力科学研究院	提出改进蚁群算法的路径规划方法	某市大型变电站	能够根据路径对变电站内20个巡检点进行遍历,满足了大型变电站巡检效率的需求
[105]	国家电网有限公司	提出一种基于分层强化学习的数字化输电线路路径规划方法	承德百万千瓦风电基地输电线路	能够在更高精度的地形划分条件下收敛,减少了不合理跨越区域,降低了路径规划的成本
[106]	冀北电力有限公司 经济技术研究院	提出基于云平台的输电线路三维数字化设计路径规划方法	冀北-廊坊花科110kV线路	相比于人工设计方法,该方法实际应用的路径规划效率提升了65%,架设成本节省了5%

2.1 发电站巡检机器人

发电站根据产生电力的能量源不同可分为火电站、水电站、风电站、核电站等,发电站内光照条件复杂,并且具有强电磁辐射干扰,目前采用机器人巡检取代人工巡检成为发电站巡检发展趋势.国网新源控股公司^[100]为满足抽水蓄能电站巡检需求,采用多种规划算法融合的方法来解决智能巡检机器人的任务规划问题,包括了运动规划以及路径规划.目前所研制的巡检机器人已经在桐柏抽水蓄能电站实际投

入使用,通过多种规划算法融合来部署巡检任务.东南大学与哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室^[101]提出了一种基于效率与安全机制的核电站巡检与应急机器人的局部路径规划方法,利用所提出的效率与安全机制优化可行性的局部路径.该机器人目前已经在泰山核电站第三核电有限公司实际应用,能够在不同的安全等级下规划出相对应的路径使机器人快速到达目标点,提高了核电站巡检机器人的巡检效率.

2.2 变电站巡检机器人

变电站巡检机器人主要针对站内电力设备进行红外测温、指针读数以及故障识别等工作。山东省机器人与制造自动化技术重点实验室^[102]提出一种Dijkstra算法与模拟退火算法融合的变电站巡检机器人路径规划方法,并在SQL Sever和Visual C++平台下开发了一个机器人跟踪与路径规划的电子地图系统,在某变电站投入运行,在实际应用中提高了机器人的巡检效率。周口师范学院^[103]自主设计了一种集合路径规划、视觉导航等关键技术的智能变电站巡检机器人,如图4所示,提出了一种改进的Dijkstra算法与模拟退化算法结合的全局路径规划算法,在本地220 kV变电站实际投入运行,完成500 kV区域全任务巡检一次约70 min,220 kV区域与35 kV区域全任务巡检一次约150 min。广东电网有限责任公司电力科学研究院^[104]为提高变电站机器人巡检效率提出了一种基于改进蚁群算法的变电站巡检机器人路径规划方法,通过在传统蚁群算法中引入方向夹角启发因子来提高算法收敛速度。所提出的关键技术在某市大型变电站已经得到应用,巡检机器人从变电站的充电室出发,使用改进蚁群算法进行路径规划寻找出最优路径,应用效果表示巡检机器人能够根据路径对变电站内20个巡检点进行遍历,满足了大型变电站巡检效率的需求。



图4 变电站巡检机器人

2.3 输电线路巡检机器人

输电线路巡检机器人主要针对输电线路上的电力器件与杆塔进行巡检,具有全自主巡检、无巡视盲区、巡视周期短、巡检费用低的优势。国家电网有限公司^[105]针对数字化输电线路路径规划过程中存在的维度灾难问题,提出了一种基于分层强化学习的数字化输电线路路径规划方法,在承德百万千瓦风电基地二期输电线路项目实际应用,采用分层强化学习的路径规划算法能够在更高精度的地形划分条件下收敛,减少了不合理跨越区域,降低了路径规划的成本。冀北电力有限公司经济技术研究院^[106]针对三维数字化输电线路路径规划中的海量数据挖掘问题,提

出了一种基于云平台的输电线路三维数字化设计路径规划方法,并在冀北-廊坊花科110 kV线路实际应用,相比于人工设计方法,该方法实际应用的路径规划效率提升了65%,架设成本节省了5%。

3 结论与展望

本文对目前电力人工巡检的缺点进行分析,阐明了采用机器人自主巡检的必要性。论文综述了单体巡检路径规划与协同巡检路径规划关键技术,对基于巡检遍历、紧急避障的地面二维路径规划技术和基于快速搜索、平滑轨迹的空中三维路径规划技术进行了详细阐述和分析,概括了人机协同、多机协同与车机协同三种协同巡检模式下的路径规划技术,并总结了电力巡检机器人在发电站、变电站与输电线路等电力场景下的应用成效。

随着电力线路与站点的日益增多,人工巡检方式已经难以满足电力巡检的要求。为了提高巡检效率和减小人力消耗,通过电力巡检机器人自主路径规划来满足电力巡检对效率与智能化的要求。但是,目前电力机器人路径规划技术还存在前端信息处理难度大、智能化程度待提高和算法效率仍有上升空间等问题,下面针对这些问题进行展望(如图5所示)。

1) 电力巡检机器人在传感器信息获取技术上未来将朝着多源异构信息融合的方向发展。电力场景本身具有可测信息不完备、场景地图较复杂、障碍物遮挡等特点,电力巡检机器人完成路径规划的前提是建立环境模型,环境模型质量的好坏取决于电力巡检机器人的传感器信息获取技术的优劣。通常情况下,电力巡检机器人通过机载的传感器获取多源环境信息,在此基础上通过数据处理算法进行环境建模。多源异构信息融合技术能够在数据层、特征层以及决策层实现数据多层次融合^[107],使数据具有更高的可靠性与系统性,在此基础上进行建模具有高精度、抗干扰、实时性等明显优势。目前电力场景环境信息复杂度较高,电力巡检机器人装载的光学传感器、声学传感器、温度传感器等多传感器获取的非结构化数据在数据特征、数据形式、数据存储结构等方面存在差异,导致电力巡检机器人在路径规划的前端建模阶段面临数据计算量大、信息冗余度高的缺陷,所以亟需将多个信息源获得的不同存储结构数据进行统一处理与分析,为电力巡检机器人提供质量更好的环境模型,实现电力巡检机器人在路径规划技术上的突破。

2) 未来电力巡检机器人路径规划技术与新兴的人工智能模型将会联系更为紧密。人工智能模型一



图 5 电力巡检机器人路径规划技术展望

般包括深度学习、强化学习、深度强化学习等算法框架,是一类求解最优化问题的智能学习与决策框架。与传统的决策与优化方法相比,深度强化学习首先将深度学习融入其中,并且不需要建立模型,通过智能体定义奖励直接与环境进行交互就能实现局部最优。电力巡检机器人的路径规划通常面临着待检目标繁杂、待检区域需完全遍历、巡检目标遭到遮挡等巡检条件的约束,实际上电力巡检机器人的路径规划本质上是多目标多约束条件的优化问题,将人工智能算法用于解决电力巡检机器人的路径规划问题是极其具有科学前景的。

3) 未来电力巡检机器人的路径规划将成为基于5G通信的云边端协同控制路径规划。目前基于5G通信的云计算方式已经出现^[108],云计算方式突破了时间与空间的限制,通过云端完成大网络的分布式运算,具有计算高效、灵活机动的优点,将多源异构数据融合与深度强化学习应用于边缘层,采用云边协同的方式能够更快地完成路径规划算法任务。传统的路径规划算法运算通常在巡检机器人本体上完成,依赖于机器人自身有限的计算硬件资源,导致算法实时

性较差,效率受限。5G通信具有低时延、高并发、高速率的优势,为云计算实时完成路径规划任务提供可能,因此基于5G通信的云边端协同控制路径规划方法也是未来研究的重要方向。

参考文献(References)

[1] Nguyen V N, Jenssen R, Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 107-120.

[2] Katrasnik J, Pernus F, Likar B. New robot for power line inspection[C]. 2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Chengdu, 2008: 1195-1200.

[3] Fu X G, Yan G Z, Yan B, et al. A new robot system for auto-inspection of intersected welds of pipes used in nuclear power stations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(5): 596-601.

[4] Lu S Y, Zhang Y, Su J J. Mobile robot for power substation inspection: A survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 830-847.

- [5] Kishore T S, Singal S K. Optimal economic planning of power transmission lines: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 949-974.
- [6] Bao N S, Kuang H L, Simeone A, et al. A machine vision-based automatic inspection system for power station coal bunkers maintenance[J]. *Procedia CIRP*, 2021, 103: 250-255.
- [7] Lim J, Kim H, Park Y. Review of the regulatory periodic inspection system from the viewpoint of defense-in-depth in nuclear safety[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2018, 50(7): 997-1005.
- [8] 陈南凯, 王耀南, 贾林. 基于改进生物激励神经网络算法的多移动机器人协同变电站巡检作业[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1453-1459.
(Chen N K, Wang Y N, Jia L. Multi-mobile robot cooperative inspection operation based on improved biological excitation neural network algorithm in substation[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(6): 1453-1459.)
- [9] Lu S Y, Zhang Y, Su J J. Mobile robot for power substation inspection: A survey[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(4): 830-847.
- [10] 邵瑰玮, 刘壮, 付晶, 等. 架空输电线路无人机巡检技术研究进展[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 14-22.
(Shao G W, Liu Z, Fu J, et al. Research progress of UAV inspection technology for overhead transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 14-22.)
- [11] Okamoto S, Millis A J. Electronic reconstruction at an interface between a Mott insulator and a band insulator[J]. *Nature*, 2004, 428(6983): 630-633.
- [12] 黄志清, 李鼎鑫, 王庆文. 非平坦地形下移动机器人安全路径规划[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 323-330.
(Huang Z Q, Li D X, Wang Q W. Safe path planning of mobile robot in uneven terrain[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(2): 323-330.)
- [13] 张世勇, 张雪波, 苑晶, 等. 旋翼无人机环境覆盖与探索规划方法综述[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 513-529.
(Zhang S Y, Zhang X B, Yuan J, et al. A survey on coverage and exploration path planning with multi-rotor micro aerial vehicles[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(3): 513-529.)
- [14] Izadi S, Kim D, Hilliges O, et al. KinectFusion: Real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera[C]. *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Santa Barbara, 2011: 559-568.
- [15] Chen Q P, Xie Y F, Guo S F, et al. Sensing system of environmental perception technologies for driverless vehicle: A review of state of the art and challenges[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 319: 112566.
- [16] Aggarwal S, Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges[J]. *Computer Communications*, 2020, 149: 270-299.
- [17] Wang H W, Yu X C, Song H B, et al. A global optimal path planning and controller design algorithm for intelligent vehicles[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 23(5): 1165-1178.
- [18] Lattanzi D, Miller G. Review of robotic infrastructure inspection systems[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(3): 04017004.
- [19] Lu S Y, Zhang Y, Su J J. Mobile robot for power substation inspection: A survey[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(4): 830-847.
- [20] Xu F Y, Wang X S, Cao P P. Design and application of a new wheel-based cable inspection robot[C]. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, 2011: 4909-4914.
- [21] Krieger Y S, Schiele S, Detzel S, et al. Shape memory structures-automated design of monolithic soft robot structures with pre-defined end poses[C]. *2019 International Conference on Robotics and Automation*. Montreal, 2019: 9357-9362.
- [22] Guo R, Han L, Sun Y, et al. A mobile robot for inspection of substation equipments[C]. *The 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*. Montreal, 2010: 1-5.
- [23] Li L X. The UAV intelligent inspection of transmission lines[C]. *Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*. Zhengzhou, 2015: 1542-1545.
- [24] Tang Q C, Ma L, Sun Y K, et al. A heuristic path planning algorithm for inspection robots[C]. *The 39th Chinese Control Conference*. Shenyang, 2020: 3834-3839.
- [25] Ping L I, Zhu J Y, Peng F, et al. Path planning based on visibility graph and A* algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(3): 193-195.
- [26] Yu N G, Zhai Y J, Yuan Y H, et al. A bionic robot navigation algorithm based on cognitive mechanism of hippocampus[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(4): 1640-1652.
- [27] 路永鑫, 魏云冰, 赵启承, 等. 基于层次分析法和改进A*算法的电力应急机器人路径规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 82-89.
(Lu Y X, Wei Y B, Zhao Q C, et al. Path planning of a power emergency robot based on an analytic hierarchy process and improved A* algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 82-89.)
- [28] Zhang X, Liu S G, Xiang Z. Optimal Inspection Path planning of substation robot in the complex substation environment[C]. *2019 Chinese Automation Congress*.

- Hangzhou, 2020: 5064-5068.
- [29] 陈玮光, 胡晓静, 郑鑫, 等. 基于改进遗传算法的变电站巡检机器人行驶轨迹优化[J]. 广东电力, 2021, 34(6): 48-54.
(Chen W G, Hu X J, Zheng X, et al. Optimization of traveling track of inspection robot in substation based on improved genetic algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(6): 48-54.)
- [30] Zhang S L. Application of joint immune ant colony algorithm and fuzzy neural network to path planning and visual image processing of inspection robot in substation[C]. The 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data. Chengdu, 2020: 142-148.
- [31] Ye F C, He N H, Wu X T. Research on power grid inspection path based on edge computing[C]. 2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science. Zhuhai, 2020: 231-234.
- [32] Ma S, Li J, Hu C M, et al. Big graph search: Challenges and techniques[J]. Frontiers of Computer Science, 2016, 10(3): 387-398.
- [33] Zhou R, Hansen E A. Breadth-first heuristic search[J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(4/5): 385-408.
- [34] Tarjan R. Depth-first search and linear graph algorithms[J]. SIAM Journal on Computing, 1972, 1(2): 146-160.
- [35] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [36] Asai M, Fukunaga A. Improving greedy best-first search by removing unintended search bias[C]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. San Francisco: 2017: 1.
- [37] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [38] 张永旭. 基于路径搜索的改进A*算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
(Zhang Y X. Research on improved A* algorithm based on path search[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.)
- [39] 于振中, 李强, 樊启高. 智能仿生算法在移动机器人路径规划优化中的应用综述[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(11): 3210-3219.
(Yu Z Z, Li Q, Fan Q G. Survey on application of bioinspired intelligent algorithms in path planning optimization of mobile robots[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(11): 3210-3219.)
- [40] Joo A, Ekart A, Neirotti J P. Genetic algorithms for discovery of matrix multiplication methods[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2012, 16(5): 749-751.
- [41] 孙波, 陈卫东, 席裕庚. 基于粒子群优化算法的移动机器人全局路径规划[J]. 控制与决策, 2005, 20(9): 1052-1055.
(Sun B, Chen W D, Xi Y G. Particle swarm optimization based global path planning for mobile robots[J]. Control and Decision, 2005, 20(9): 1052-1055.)
- [42] Parpinelli R S, Lopes H S, Freitas A A. Data mining with an ant colony optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 321-332.
- [43] 杨嘉, 刘虎, 杨新坤, 等. 基于遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 机电工程技术, 2020, 49(12): 97-98.
(Yang J, Liu H, Yang X K, et al. Path planning of mobile robot based on genetic algorithm[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(12): 97-98.)
- [44] Buche D, Schraudolph N N, Koumoutsakos P. Accelerating evolutionary algorithms with Gaussian process fitness function models[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2005, 35(2): 183-194.
- [45] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, 1995: 39-43.
- [46] Sánchez O N A, De la Rosa R F. Path planning and following using genetic algorithms to solve the multi-travel salesman problem in dynamic scenarios[C]. The 18th International Conference on Advanced Robotics. Hong Kong, 2017: 204-209.
- [47] 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18-27.
(Liu J H, Yang J G, Liu H P, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18-27.)
- [48] Marler R T, Arora J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6): 369-395.
- [49] Rutenbar R A. Simulated annealing algorithms: An overview[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 1989, 5(1): 19-26.
- [50] 宋莉, 李彩虹, 王小宇, 等. 移动机器人局部避障路径规划仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(7): 279-284.
(Song L, Li C H, Wang X Y, et al. Simulation research on local obstacle avoidance path planning for mobile robot[J]. Computer Simulation, 2018, 35(7): 279-284.)
- [51] Chen Y B, Luo G C, Mei Y S, et al. UAV path

- planning using artificial potential field method updated by optimal control theory[J]. *International Journal of Systems Science*, 2016, 47(6): 1407-1420.
- [52] Panov A I, Yakovlev K S, Suvorov R. Grid path planning with deep reinforcement learning: Preliminary results[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 123: 347-353.
- [53] Lee D, Jeong J, Kim Y H, et al. An improved artificial potential field method with a new point of attractive force for a mobile robot[C]. *The 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering*. Shanghai, 2017: 63-67.
- [54] Chen Z Y, Xu B. AGV path planning based on improved artificial potential field method[C]. *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications*. Shenyang, 2021: 32-37.
- [55] He N F, Su Y F, Guo J L, et al. Dynamic path planning of mobile robot based on artificial potential field[C]. *2020 International Conference on Intelligent Computing and Human-Computer Interaction*. Sanya, 2020: 259-264.
- [56] Lin X, Wang Z Q, Chen X Y. Path planning with improved artificial potential field method based on decision tree[C]. *The 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Petersburg, 2020: 1-5.
- [57] 杨海, 高山峻, 许文斌, 等. 电力巡检机器人自动避障与轨迹规划系统研究[J]. *自动化与仪表*, 2020, 35(8): 37-41.
(Yang H, Gao S J, Xu W B, et al. Research on automatic obstacle avoidance and trajectory planning system of electric inspection robot[J]. *Automation & Instrumentation*, 2020, 35(8): 37-41.)
- [58] Tang M, Xia F, Song H, et al. Research on path planning of substation robot inspection based on cloud computing[C]. *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*. Chongqing, 2022: 47-50.
- [59] 张晶, 蔡志全, 韩永成, 等. 基于深度强化学习技术的变电站巡检机器人的路径规划研究[J]. *冶金动力*, 2021, 40(3): 4-7.
(Zhang J, Cai Z Q, Han Y C, et al. Research on path planning of substation inspection robot based on deep enhanced learning technology[J]. *Metallurgical Power*, 2021, 40(3): 4-7.)
- [60] 王迪, 李彩虹, 郭娜, 等. 改进人工势场法的移动机器人局部路径规划[J]. *山东理工大学学报: 自然科学版*, 2021, 35(3): 1-6.
(Wang D, Li C H, Guo N, et al. Local path planning for mobile robot based on improved artificial potential field method[J]. *Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition*, 2021, 35(3): 1-6.)
- [61] Vrontis D, Christofi M, Pereira V, et al. Artificial intelligence, robotics, advanced technologies and human resource management: A systematic review[J]. *The International Journal of Human Resource Management*, 2022, 33(6): 1237-1266.
- [62] Zhang H Y, Lin W M, Chen A X. Path planning for the mobile robot: A review[J]. *Symmetry*, 2018, 10(10): 450.
- [63] Li Y X. Deep reinforcement learning: An overview[J/OL]. 2017, arXiv: 1701.07274.
- [64] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [65] Gu J X, Wang Z H, Kuen J, et al. Recent advances in convolutional neural networks[J]. *Pattern Recognition*, 2018, 77: 354-377.
- [66] Liu W B, Wang Z D, Liu X H, et al. A survey of deep neural network architectures and their applications[J]. *Neurocomputing*, 2017, 234: 11-26.
- [67] Wu K Y, Wang H, Esfahani M A, et al. Achieving real-time path planning in unknown environments through deep neural networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(3): 2093-2102.
- [68] Long Y X, He H J. Robot path planning based on deep reinforcement learning[C]. *2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science*. Shenyang, 2020: 151-154.
- [69] Sartori D, Zou D P, Pei L, et al. CNN-based path planning on a map[C]. *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Sanya, 2022: 1331-1338.
- [70] Liu Z X, Chen B M, Zhou H Y, et al. MAPPER: multi-agent path planning with evolutionary reinforcement learning in mixed dynamic environments[C]. *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, 2021: 11748-11754.
- [71] 张宁. 基于强化 Q 学习和BP神经网络的移动机器人局部路径规划行为研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
(Zhang N. Research on local path planning behavior of mobile robot based on reinforcement Q learning and BP neural network[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.)
- [72] Hrabar S. 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft UAVs[C]. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, 2008: 807-814.
- [73] Sun Y F, Ma O. Automating aircraft scanning for inspection or 3D model creation with a UAV and optimal path planning[J]. *Drones*, 2022, 6(4): 87.
- [74] LaValle S M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning[R]. Ames: Iowa State University,

- 1998.
- [75] 陈秋莲, 蒋环宇, 郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(16): 10-17.
(Chen Q L, Jiang H Y, Zheng Y J. Summary of rapidly-exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(16): 10-17.)
- [76] Zhang D G, Xu Y, Yao X T. An improved path planning algorithm for unmanned aerial vehicle based on RRT-connect[C]. The 37th Chinese Control Conference. Wuhan, 2018: 4854-4858.
- [77] Mashayekhi R, Idris M Y I, Anisi M H, et al. Hybrid RRT: A semi-dual-tree RRT-based motion planner[J]. IEEE Access, 2020, 8: 18658-18668.
- [78] Lebedev I, Izhboldina V. Method for inspecting high-voltage power lines using UAV based on the RRT algorithm[C]. Electromechanics and Robotics. Singapore, 2022: 179-190.
- [79] Aguilar W, Morales S. 3D environment mapping using the kinect V2 and path planning based on RRT algorithms[J]. Electronics, 2016, 5(4): 70.
- [80] Yang X H, Ye X, Cao J N, et al. High-altitude inspection technology of substation based on fusion of unmanned aerial vehicle and multiple sensors[J]. Sensors and Materials, 2022, 34(8): 3191.
- [81] 杨国田, 苏荣强, 吴华, 等. 飞行机器人的电力杆塔巡检路径规划[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015(S1): 324-327.
(Yang G T, Su R Q, Wu H, et al. Power tower inspection path planning of flying robot[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015(S1): 324-327.)
- [82] Nam L H, Huang L, Li X J, et al. An approach for coverage path planning for UAVs[C]. 2016 IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control. Auckland, 2016: 411-416.
- [83] Luo X J, Li X X, Yang Q, et al. Optimal path planning for UAV based inspection system of large-scale photovoltaic farm[C]. 2017 Chinese Automation Congress. Jinan, 2018: 4495-4500.
- [84] Lu Y F, Wu A P, Chen Q Y, et al. An Improved UAV Path Planning method Based on RRT-APF Hybrid strategy[C]. The 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering. Dalian, 2020: 81-86.
- [85] Huang Z, Wang H X, Zhang T P, et al. The collaborative power inspection task allocation method of "unmanned aerial vehicle and operating vehicle" [J]. IEEE Access, 2021, 9: 62926-62934.
- [86] 岳灵平, 章旭泳, 韦舒天, 等. 输电线路无人机和人工协同巡检模式研究[J]. 电气时代, 2014(9): 81-83.
(Yue L P, Zhang X Y, Wei S T, et al. Research on cooperative inspection mode of UAV and manual for transmission lines[J]. Electric Age, 2014(9): 81-83.)
- [87] 张永涛. 变电站多机器人协同巡检区域划分与路径规划[J]. 山东电力技术, 2021, 48(9): 12-16.
(Zhang Y T. Area division and path planning for multi-robot collaborative inspection in substation[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(9): 12-16.)
- [88] Rizk Y, Awad M, Tunstel E W. Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey[J]. ACM Computing Surveys, 2019, 52(2): 1-31.
- [89] Regele R, Levi P. Cooperative multi-robot path planning by heuristic priority adjustment[C]. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2007: 5954-5959.
- [90] Chen X, Zhang X, Huang W Z, et al. Coordinated optimal path planning of multiple substation inspection robots based on conflict detection[C]. 2019 Chinese Automation Congress. Hangzhou, 2020: 5069-5074.
- [91] Huo J X, Zheng R H, Zhang S L, et al. Multi-robot path planning algorithm in dense environments using particular collision-free traffic rules[C]. 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Sapporo, 2022: 10-15.
- [92] 琚泽立, 杨博, 孙浩飞, 等. 面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 92-97.
(Ju Z L, Yang B, Sun H F, et al. Cooperative path planning of multi-robot system for power grid intelligent inspection[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 92-97.)
- [93] 赵畅, 刘允刚, 陈琳, 等. 面向元启发式算法的多无人机路径规划现状与展望[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1102-1115.
(Zhao C, Liu Y G, Chen L, et al. Research and development trend of multi-UAV path planning based on metaheuristic algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1102-1115.)
- [94] 李晓辉, 张路, 刘传水, 等. 电力巡检中的无人机群路径规划算法[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(3): 241-247.
(Li X H, Zhang L, Liu C S, et al. UAVs routing planning algorithm in power inspection[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(3): 241-247.)
- [95] 马瑞, 欧阳权, 吴兆香, 等. 基于深度强化学习的多无人机电力巡检任务规划[J]. 计算机与现代化, 2022(1): 98-102.
(Ma R, Ouyang Q, Wu Z X, et al. Multi-UAV power inspection task planning technology based on deep reinforcement learning[J]. Computer and Modernization, 2022(1): 98-102.)
- [96] 伍国华, 毛妮, 徐彬杰, 等. 基于自适应大规模邻域搜

- 索算法的多车辆与多无人机协同配送方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(1): 201-210.
(Wu G H, Mao N, Xu B J, et al. The cooperative delivery of multiple vehicles and multiple drones based on adaptive large neighborhood search[J]. Control and Decision, 2023, 38(1): 201-210.)
- [97] Liu Y, Shi J M, Liu Z, et al. Two-layer routing for high-voltage powerline inspection by cooperated ground vehicle and drone[J]. Energies, 2019, 12(7): 1385.
- [98] 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 F, Cui S H, Jing Z J, 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.)
- [99] Huang Z, Wang H X, Zhang T P, et al. The collaborative power inspection task allocation method of “unmanned aerial vehicle and operating vehicle” [J]. IEEE Access, 2021, 9: 62926-62934.
- [100] 常玉红, 鲍友革, 何秋, 等. 智能巡检机器人在抽水蓄能电站巡检任务规划的优化策略[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(3): 63-67.
(Chang Y H, Bao Y G, He Q, et al. Optimization strategy of inspection task planning for intelligent inspection robot in pumped storage power station[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(3): 63-67.)
- [101] 熊鹏文, 宋爱国, 东辉, 等. 基于效率与安全机制的核电站巡检与应急机器人的局部路径优化方法[J]. 机器人, 2015, 37(2): 196-203.
(Xiong P W, Song A G, Dong H, et al. Local path optimization for nuclear inspection and emergence robot based on efficiency and security mechanism[J]. Robot, 2015, 37(2): 196-203.)
- [102] 陈瑶, 陈阿莲, 李向东, 等. 变电站智能巡检机器人全局路径规划设计[J]. 山东科学, 2015, 28(1): 114-119.
(Chen Y, Chen A L, Li X D, et al. Globalpath planning design of transformer substation intelligent inspection robot[J]. Shandong Science, 2015, 28(1): 114-119.)
- [103] 陈园园, 王涛, 周虎成. 智能变电站巡检服务机器人[J]. 周口师范学院学报, 2018, 35(5): 45-49.
(Chen Y Y, Wang T, Zhou H C. Smart substation inspection service robot[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2018, 35(5): 45-49.)
- [104] 谢志文, 汪政, 王锐, 等. 基于改进蚁群算法的变电站巡检机器人路径规划研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(12): 212-216.
(Xie Z W, Wang Z, Wang R, et al. Study on path planning of substation inspection robot based on improved ant colony algorithm[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(12): 212-216.)
- [105] 宋涛, 李丹, 路宁. 基于分层强化学习的数字化输电线路路径规划研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 91-97.
(Song T, Li D, Lu N. Research of digital transmission line path planning method based on hierarchical reinforcement learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 91-97.)
- [106] 谢景海, 姜宇, 卢诗华, 等. 基于云平台三维数字化输电线路路径规划方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 61-67.
(Xie J H, Jiang Y, Lu S H, et al. Path planning method of 3D digital transmission line based on cloud platform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 61-67.)
- [107] Li L, Zhu F, Sun H, et al. Multi-source information fusion and deep-learning-based characteristics measurement for exploring the effects of peer engagement on stock price synchronicity[J]. Information Fusion, 2021, 69: 1-21.
- [108] 王万良, 陈浩立, 李国庆, 等. 基于深度强化学习的多配送中心车辆路径规划[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2101-2109.
(Wang W L, Chen H L, Li G Q, et al. Deep reinforcement learning for multi-depot vehicle routing problem[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 2101-2109.)

作者简介

毛建旭(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人系统、机器视觉等研究, E-mail: maojianxu@hnu.edu.cn;

贺振宇(1999—), 男, 硕士生, 从事机器视觉、移动机器人等研究, E-mail: HeZhenyu@hnu.edu.cn;

王耀南(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事智能机器人控制、机器视觉感知与图像处理等研究, E-mail: yaonan@hnu.edu.cn;

张辉(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器人视觉检测与控制、多机器人协同控制等研究, E-mail: zhanghui1983@hnu.edu.cn;

钟杭(1990—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事空中机器人、集群机器人等研究, E-mail: zhonghang@hnu.edu.cn;

易俊飞(1997—), 男, 博士生, 从事机器视觉、图像处理等研究, E-mail: yijunfei@hnu.edu.cn;

陶梓铭(1996—), 男, 博士生, 从事深度学习、移动机器人等研究, E-mail: taozimingphd@hnu.edu.cn;

陈诺天(2001—), 女, 硕士生, 从事机器视觉、图像处理等研究, E-mail: 1611975837@qq.com.