

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.041

变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法

贾宁,王永超,海霞,陈婧,童超

(中国能源建设集团 新疆电力设计院有限公司,新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830002)

摘要:受变电站机器人巡检环境及机器人运行约束的限制,使得变电站机器人巡检轨迹的合理性难以得到保障。为此,提出基于改进 A* 和人工势场算法的变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法。在构建变电站机器人巡检环境模型的基础上,借助改进 A* 算法构建机器人巡检轨迹路径点代价函数,在引入人工势场算法的基础上,实现对变电站机器人巡检路径点的优化。测试结果表明:在完成全覆盖巡检的前提下,对应的时间开销、重叠路径总长度以及碰撞次数均低于对照组,具有良好的应用效果。

关键词:改进 A*; 人工势场算法; 变电站机器人; 巡检路径; 点筛选轨迹; 巡检环境模型; 代价函数

中图分类号: TM726.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0223-05

Optimization Method for Selecting Trajectories of Robot Inspection Path Points in Substation

JIA Ning, WANG Yongchao, HAI Xia, CHEN Jing, TONG Chao

(Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group, Urumqi 830002, China)

Abstract: With regard to the difficulty in guaranteeing the rationality of substation robot inspection trajectory due to the constraints of substation robot inspection environment and robot operation constraints, the trajectory optimization method of substation robot inspection path point screening based on improved A* and artificial potential field algorithm is proposed. On the basis of construction of the robot inspection environment model of the substation, the robot inspection trajectory path point cost function is constructed with the help of improving A* algorithm. Based on the introduction of the artificial potential field algorithm, the optimization of the path point of the substation robot inspection is realized. The test results show that on the premise of completing the full coverage inspection, the corresponding time overhead, the total length of the overlapping path and the collision number are all lower than that of the control group, with good application effect.

Keywords: improve A*; artificial potential field algorithm; substation robot; inspection path; point screening track; inspection environment model; cost function

0 引言

随着电力系统的规模不断扩大,变电站的数量也在不断增加,这给电力系统的维护和管理带来了很大的挑战^[1]。传统的人工巡检方式已经无法满足现代电力系统的需求,其存在巡检效率低、劳动强度大、容易出错等问题。因此,采用机器人巡检成为一种趋势^[2]。变电站机器人巡检能够实现自动化、高效、准确,提高电力系统的维护和管理水平^[3],保障电力系统的安全稳定运行。在开展变电站机器人巡检路径点筛选轨迹规划时,需要克服的问题主要包括以下几个方面:1) 路径规划的复杂性。变电站的布局和环境比较复杂^[4],需要考虑各种因素,如障碍物、道路状况、天气等,

这使得路径规划变得非常复杂。2) 精度要求高。机器人巡检需要精确到达每个巡检点,并且需要保持一定的速度和稳定性,这需要高精度的路径规划技术^[5]。3) 安全性要求高。变电站是一个高风险的环境,机器人巡检需要保证自身的安全和稳定,同时也需要保证不会对周围环境和设备造成损害。4) 适应性要求高。变电站的环境和设备可能会发生变化,机器人巡检需要具有较强的适应性和自适应性,能够适应不同的环境和设备变化。结合上述要求,由于变电站的规模较大,需要计算的路径点较多,因此需要高效的计算方法和优化的算法来提高计算效率。其中,张威等^[6]提出了一种以进一步提高智能变电站巡检机器人的巡检效率为核心的智能变电站巡检机器人路径

第一作者简介: 贾宁(1982—),男,新疆维吾尔自治区乌鲁木齐人,高级工程师,本科,研究方向为变电工程设计、电力工程技术等,meilouliafb@163.com。

优化方法,缩短了智能变电站巡检机器人优化路径,提高了路径规划效率。柯清派等^[7]充分考虑了变电站巡检机器人路径规划问题与经典 TSP 问题之间的差异,在改进遗传算法的基础上开展了巡检路径规划研究,使得相同环境下对应的路径平均长度明显缩短,并具有良好的收敛性和稳定性。

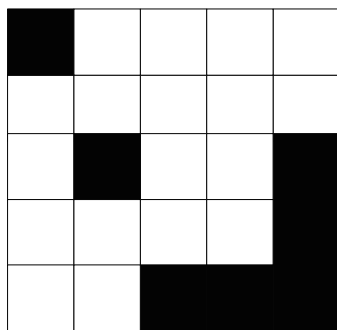
结合上述研究,本文提出基于改进 A* 和人工势场算法的变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法,并采用对比测试的方式,对设计方法的性能进行分析。

1 变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法设计

1.1 变电站机器人巡检环境建模

为了能够实现对变电站机器人巡检路径点筛选轨迹的合理优化,充分考虑实际的变电站机器人巡检环境是极为必要的。为此,本文首先对变电站机器人巡检环境进行建模处理。

在具体的创建模型过程中,本文以三维建模软件 Blender 为基准^[8],创建一个新的模型。根据变电站的布局图,建立相应的场景模型。这包括变电站的建筑物、墙壁、地面、天花板等^[9]。需要注意的是,根据设备清单,选择合适的三维模型库或使用建模软件自带的工具创建各个设备的三维模型是关系到最终巡检路径点筛选轨迹优化效果的关键。本文结合变电站的实际构成,在变电站机器人巡检环境模型中添加了变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等^[10],并将创建好的设备模型按照变电站的布局图进行摆放,确保位置准确且符合实际环境。图 1 为基础的栅格地图。



注:白色方块为变电站机器人巡检可执行路径;黑色方块为添加的变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等设备。

图 1 变电站机器人巡检环境模型

在此基础上,考虑到变电站机器人巡检的实际功能需求,本文为环境模型中的每个设备添加了类型标识,例如变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等。这可以通过为每个设备添加标签或使用编码实现。同时,为每个设备添加位置坐标^[11],以便机器人在巡检过程中能够精确定位。也可以通过为每个设备添加标签或使用编码实现。

以此为基础,根据变电站的布局 and 实际巡检需求,在规划机器人的巡检路径时,在场景中创建一条或多条路径线条时,需要指示机器人巡检的方向和轨迹。为了确保巡检路径能够覆盖所有的设备^[12-13],并能够根据实际需求进行优化和调整,本文为变电站机器人巡检环境设置了可执行运行方向信息,具体如图 2 所示。

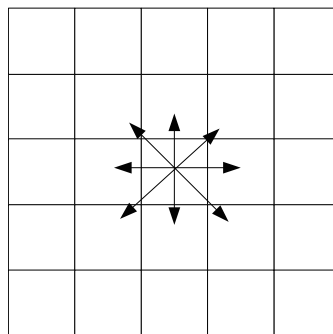


图 2 变电站机器人巡检可执行运行方向

按照上述所示的方式,实现对变电站机器人巡检环境的建模处理,为后续的巡检路径点筛选轨迹优化提供可靠的基础。

1.2 基于改进 A* 算法的机器人巡检轨迹路径点代价函数计算

在对机器人巡检路径选轨迹进行优化时,本文结合 1.1 节构建的变电站机器人巡检环境模型,首先计算变电站机器人巡检环境中巡检轨迹的代价函数。在变电站机器人巡检环境模型上,每个节点(代表一个位置)均为对应一个代价函数^[14-15]。对于代价函数,主要根据碰撞风险来计算,具体可以按照以下步骤进行。

1) 障碍物信息获取:首先需要获取变电站机器人巡检环境模型上每个节点的障碍物信息。这可以通过对场景进行扫描或使用已有的变电站机器人巡检环境模型数据来实现。在获取障碍物信息后,可以确定每个节点周围是否存在障碍物以及障碍物的位置和大小。

2) 碰撞风险评估:根据获取的障碍物信息,可

以对每个节点的碰撞风险进行评估。碰撞风险可以根据障碍物的大小、形状、位置以及机器人的尺寸和速度等因素来计算。例如,如果一个节点周围存在一个大型障碍物,那么该节点的碰撞风险可能会相应增加。此外,如果机器人的速度过快或方向不正确,也可能导致碰撞风险增加。

3) 代价函数计算:根据碰撞风险评估结果,本文利用代价函数来衡量每个节点对于机器人巡检轨迹的优劣。具体的代价函数可以包括多个因素,包含距离、方向、速度、碰撞风险等。具体来说,代价函数的计算方式可以表示为

$$C = w_1 \times d_{is} + w_2 \times d_{ir} + w_3 \times s_p + w_4 \times c_{ri} \quad (1)$$

式中: C 表示机器人巡检路径选轨迹路径点的代价函数; d_{is} 表示机器人到达该节点的距离; d_{ir} 表示机器人到达该节点的方向是否合适; s_p 表示机器人到达该节点的速度是否合适; c_{ri} 表示该节点的碰撞风险; w_1 、 w_2 、 w_3 和 w_4 是权重系数,用于调整各个因素对于代价函数的影响程度。

在定义代价函数后,需要对不同巡检轨迹的代价函数进行优化。在该阶段,本文引入了改进 A* 算法,在考虑机器人的运动约束、巡检任务的时间要求等因素的基础上,利用启发式函数对机器人巡检路径选轨迹路径点代价函数进行优化。具体来说,启发式函数包括以下几个部分:

- 1) 距离启发式:考虑目标点和当前节点之间的距离,鼓励算法选择距离更短的路径;
- 2) 方向启发式:考虑机器人到达目标点的方向是否合适,鼓励算法选择方向正确的路径;
- 3) 速度启发式:考虑机器人的移动速度和巡检时间要求,鼓励算法选择更快的路径;
- 4) 碰撞风险启发式:考虑节点的碰撞风险,鼓励算法选择碰撞风险更低的路径;
- 5) 运动约束启发式:考虑机器人的运动约束,鼓励算法选择符合约束条件的路径。

机器人的运动约束包括最大速度、最大加速度、最小转向半径等。这些约束条件可以限制机器人的运动行为,从而影响最优路径的选择。为此,在代价函数中增加一个惩罚项,以限制机器人超过最大运动状态^[16],其可以表示为

$$k(n) = \frac{v}{\lambda_1} + \frac{a}{\lambda_2} + \frac{\alpha}{\lambda_3} \quad (2)$$

式中: $k(n)$ 表示在代价函数中增加的惩罚项; v 表示机器人运动约束中的最大速度; a 表示机器人运动约束中的最大加速度; α 表示机器人运动约束中的最小转向半径; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别表示机器

人的运动约束中最大速度、最大加速度、最小转向半径的函数权重。

其次就是巡检任务时间要求的约束,巡检任务通常有时间要求,即需要在特定时间内完成巡检。这也在一定程度上限制了最优路径的选择,需要考虑到机器人的移动速度和巡检时间^[17]。为此,在启发式函数中,本文在代价函数中增加一个与时间相关的惩罚项,以鼓励算法选择更快的路径。具体可以表示为

$$T(p, q) = \frac{\sum (px_i - qx_i)}{v} \quad (3)$$

式中: $T(p, q)$ 表示为代价函数增加的时间惩罚项; p 和 q 分别表示机器人巡检轨迹路径点的起始位置和终点位置; x_i 表示曼哈顿距离。

通过考虑以上因素,利用设计启发式函数可以有效指导算法搜索最优路径。

1.3 基于人工势场算法的变电站机器人巡检路径点优化

结合上述对机器人巡检轨迹路径点代价函数的计算,本文在对变电站机器人巡检路径点进行优化的过程中引入了人工势场算法。首先定义目标吸引力和障碍物排斥力。其中,目标吸引力为机器人当前位置与目标点之间的吸引力的强度。具体的强度根据机器人和目标点之间的距离来调整,距离越近,吸引力越大^[18]。目标吸引力可以表示为

$$F_i = k_i \cdot \left(\frac{1}{d_i}\right)^2 \quad (4)$$

式中: F_i 表示机器人当前位置与目标点之间的吸引力的强度; k_i 为一个常数,表示目标吸引力的大小; d_i 表示机器人当前位置与目标点之间的距离。

类似地,障碍物排斥力为机器人当前位置与障碍物之间的排斥力的强度。具体的强度根据机器人和障碍物之间的距离来调整,即距离越近,排斥力越大^[19-20]。障碍物排斥力可以表示为

$$F_o = k_o \cdot \left(\frac{1}{d_o}\right)^2 \quad (5)$$

式中: F_o 表示机器人当前位置与障碍物之间的排斥力的强度; k_o 为一个常数,表示障碍物排斥力的大小; d_o 表示机器人当前位置与障碍物之间的距离。

在此基础上,计算在每个时间步中机器人在目标吸引力和障碍物排斥力作用下的加速度。具

体的加速度通过将力和机器人的质量相除得到。具体可以表示为

$$a = \frac{(F_i + F_o)}{m} \quad (6)$$

式中 m 表示机器人的质量。

在每个时间步中,根据机器人巡检所处轨迹路径点代价函数,更新机器人的位置和速度^[21]。具体可以表示为

$$\begin{aligned} x(t+1) &= x(t) + v(t) \cdot dt + 0.5 \cdot a \cdot dt^2 \quad (7) \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} \min C = w \cdot d_{is} + w_2 \cdot d_{ir} + w_3 \cdot s_p + w_4 \cdot c_{ri} \\ k(n) = \frac{v}{\lambda_1} + \frac{a}{\lambda_2} + \frac{\alpha}{\lambda_3} \\ T(p, q) = \frac{\sum (px_i - qx_i)}{v} \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $x(t+1)$ 表示 $(t+1)$ 时刻机器人的位置更新结果; $x(t)$ 表示机器人在 t 时刻的位置; $v(t)$ 表示机器人在 t 时刻的速度; dt 表示时间步长。

按照上述所示的方式,可实现对变电站机器人巡检路径点筛选轨迹的优化。

2 测试与分析

2.1 测试环境

在对本文设计的基于改进 A* 和人工势场算法的变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法性能进行分析时,以某 750 kV 变电站工程为基础开展了对比测试。其中,参与测试的对照组分别为文献[6]提出的以改进灰狼算法为基础的变电站巡检机器人路径规划方法以及文献[7]提出的以改进遗传算法为基础的变电站巡检机器人路径规划方法。

对具体的测试环境基本情况进行分析,该变电站位于一个山区地带,占地面积约为 100 万 m^2 。变电站内有多个建筑物和设备,包括变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等。站内建筑物和设备的布局较为复杂,需要考虑多种因素,如地形、道路、建筑物位置、设备类型和位置等。对应巡检机器人的任务是按照预先设定的路径进行巡检,包括对设备外观、状态、温度等方面的检查。机器人需要能够在复杂的环境中自主导航、规划路径,并能够避障、绕障,保证巡检的安全性和稳定性。

结合上述对测试环境基本情况以及巡检机器人任务的分析,巡检机器人的路径规划需要综合克服的困难如表 1 所示。

表 1 测试测试环境巡检机器人路径规划要求

环境与要求	巡检机器人路径规划影响因素
地形和道路情况	变电站位于山区地带,地形复杂,道路状况不佳,需要考虑地形和道路情况对机器人巡检的影响
建筑物和设备布局	变电站内建筑物和设备的布局较为复杂,需要考虑建筑物和设备的位置、大小、高度等因素以及机器人与建筑物和设备的距离和角度等
障碍物情况	变电站内存在多种障碍物,如变压器、电线杆、铁塔等,需要考虑障碍物对机器人巡检的影响
巡检任务	需要按照预先设定的路径进行巡检,需要考虑巡检任务的要求和顺序以及每个巡检点的位置和要求
安全性和稳定性	需要保证巡检的安全性和稳定性,需要避免与建筑物和设备发生碰撞或损伤,同时需要保持稳定的速度和轨迹

2.2 测试方案设置

在具体的测试阶段,以部分区域为基础,开展具体测试,其中构建的机器人巡检环境模型如图 3 所示。

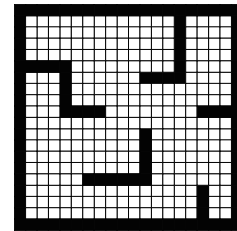


图 3 测试机器人巡检环境模型

在此基础上,使用 Gazebo 进行机器人巡检路径规划和仿真,将机器人在环境模型中进行运动。通过 Python 编程语言结合 ROS 框架开发相关算法和控制逻辑,在 Gazebo 仿真环境中设置测试场景,分别运行改进灰狼算法、改进遗传算法和基于改进 A* 和人工势场算法,生成并优化巡检机器人的路径点,开展具体的对比测试。对于具体的变电站机器人巡检路径点筛选轨迹评价,本文从 3 个角度展开,分别是完成全覆盖巡检的时间开销、完成全覆盖巡检的重叠路径总长度以及完成全覆盖巡检的碰撞次数。

2.3 测试结果与分析

首先,对 3 种不同方法下,完成全覆盖巡检的时间开销进行统计,得到的数据结果如图 4(a) 所示。其次,对 3 种不同方法下,完成全覆盖巡检的重叠路径总长度进行统计,得到的数据结果如图 4(b) 所示。最后,对 3 种不同方法下,完成全覆盖巡检的碰撞次数进行统计,得到的数据结果如图 4(c) 所示。

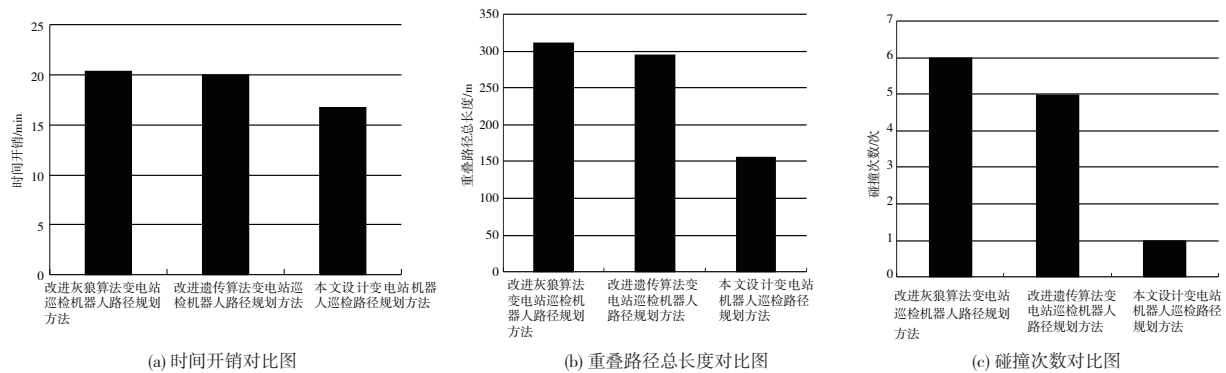


图4 完成全覆盖巡检时间开销、重叠路径总长度及碰撞次数对比图

结合图4所示的测试结果可以看出,本文设计的基于改进A*和人工势场算法的变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法在完成全覆盖巡检的前提下,对应的时间开销、重叠路径总长度以及碰撞次数均低于对照组,具有良好的应用效果。

3 结语

本文提出了基于改进A*和人工势场算法的变电站机器人巡检路径点筛选轨迹优化方法,在构建变电站机器人巡检环境模型的基础上,借助机器人巡检轨迹路径点代价函数,实现了对变电站机器人巡检路径点的优化,切实提高了变电站机器人巡检路径点筛选轨迹的合理性。

参考文献:

- [1] 连兴文,朱旭东,陈云海,等. 基于改进A*算法的变电站智能巡检机器人路径优化方法研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(18): 95-99.
- [2] 马锋,高明亮,许崇耀,等. 基于仿真优化智能变电站巡检机器人路径研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 14-20.
- [3] 刘步尧. 基于BIM的建筑巡检机器人路径规划及避障研究分析[J]. 中国高新科技, 2023(16): 12-14.
- [4] 张可,宋呈群,程俊,等. 基于多目标快速探索随机树的移动机器人巡检路径优化方法[J]. 集成技术, 2023, 12(4): 32-41.
- [5] 聂秀珍,焦迎雪,张霞. 融合优化遗传算法和变步长蚁群算法的矿山巡检机器人路径规划[J]. 金属矿山, 2023(7): 248-253.
- [6] 张威,张鑫中,王丛佼,等. 改进灰狼算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(6): 129-135.
- [7] 柯清派,史训涛,袁智勇,等. 基于改进遗传算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 144-149, 156.
- [8] 普子恒,陈志刚,史星涛,等. 考虑合成电场影响的换流站直流场巡检机器人路径优化[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 178-184, 192.

- [9] 程森海,郭涛,项明明,等. 基于改进蚁群算法的电力信息网络设备智能巡检机器人路径规划方法[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(3): 40-43, 58.
- [10] 王远国,俞海兵,李云臣,等. 基于改进人工蜂群算法的核电巡检机器人路径优化策略设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(6): 70-74.
- [11] 王言军. 改进蚁群算法的输电线巡检机器人避障路径规划[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(11): 44-48.
- [12] 童泉军,陈洋,路浩,等. 面向表计读数的变电站巡检机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 167-177.
- [13] 于飞,卢朝霞. 基于改进蚁群算法的四足巡检机器人全局路径规划方法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(7): 154-157.
- [14] 王兴涛,唐永成,李文永. 基于视觉伺服的巡检机器人返航路径确定方法[J]. 机械与电子, 2022, 40(3): 71-75.
- [15] 徐明. 基于改进深度学习的变电站机器人巡检路径规划研究[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(1): 36-39, 59.
- [16] 姜骞,刘亚东,严英杰,等. 面向高变倍场景的变电站巡检机器人云台相机对准方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3337-3347.
- [17] 彭明智,樊培培,胡永波,等. 变电站机器人沿轨道自主巡检的方法研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(1): 50-55.
- [18] 靳丹,刘晓光,石刚,等. 基于红外图像特征融合的变电站机器人巡视轨迹三维点云配准方法[J]. 红外技术, 2023, 45(6): 678-684.
- [19] 喻洋,董明知. 光伏变电站智能巡检机器人功能设计与实现[J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 40-45.
- [20] 万俊,孙薇,葛敏,等. 基于含避障角人工势场法的机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 409-418.
- [21] 张国胜,李彩虹,张耀玉,等. 基于改进人工势场法的机器人局部路径规划[J]. 计算机工程, 2025, 51(1): 88-97.

收稿日期: 2023-12-07