

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.045

基于改进双向 A* 算法的巡检机器人路径规划研究

郭永强¹, 王督¹, 吴小燕², 高伟²

(1. 国网河南省电力公司信息通信分公司, 河南 郑州 450052;

2. 福建亿榕信息技术有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 针对现有巡检机器人路径规划方法存在的规划路径长、效率低等问题, 提出一种改进的双向 A* 算法和改进的人工场势法相结合的混合路径规划方法用于变电站巡检机器人。通过采样策略、搜索策略、路径平滑策略优化双向 A* 算法完成全局路径规划, 并使用改进的人工场势法进行局部规划。结果表明: 改进后路径规划更加安全和高效, 缩短了路径长度和搜索时间。

关键词: 巡检机器人; 路径规划; 双向 A* 算法; 人工场势法

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0233-05

Research on Path Planning of Inspection Robot Based on Improved Bidirectional A* Algorithm

GUO Yongqiang¹, WANG Du¹, WU Xiaoyan², GAO Wei²

(1. Information Communication Branch of State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

2. Fujian Yirong Information Technology Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: A hybrid path planning method combining an improved bidirectional A* algorithm and an improved artificial field potential method is proposed for substation inspection robots to address the problems of long planning paths and low efficiency in existing path planning methods for inspection robots. The bidirectional A* algorithm is optimized through sampling strategy, search strategy and path smoothing strategy to complete the global path planning, and the improved artificial field potential method is used for local planning. The results show that the improved path planning is more secure and efficient, reduction in path length and search time.

Keywords: inspection robot; path planning; bidirectional A* algorithm; artificial potential field method

0 引言

互联网和机器人技术的不断发展助力了双碳目标的实施, 促进了电网数字化和智能化的发展, 变电站已朝着现代化、无人化方向发展^[1]。传统的人工巡检方法逐渐过渡到机器人巡检, 这弥补了人工巡检的缺陷和不足。路径规划方法作为巡检机器人的核心技术之一, 对其进行研究具有一定的实际意义^[2]。目前, 国内外有许多研究人员对智能变电站巡检机器人路径规划方法进行研究。路径规划是指在有障碍物的情况下, 规划一条尽可能短和尽可能平滑的无碰撞轨迹, 研究主要集中在蚁群算法、A* 算法、人工场势法、禁忌搜索算法等^[3-10]。虽然上述方法可以完成路径规划, 但规划路径和效率仍不理想, 适应性有待进一步提高。基于此, 本文结合改进的双向

A* (bidirectional A*) 算法和改进的人工场势法 (artificial potential field method, APFM) 用于智能变电站巡检机器人的路径规划。采用改进的双向 A* 算法进行全局路径规划, 采用改进 APFM 用于局部规划, 并通过仿真进行验证。

1 系统概述

巡检机器人路径规划要结合智能变电站环境, 确保巡检机器人能够安全有效地执行。需要建立环境拓扑模型和路径规划方法, 从而保证巡检机器人到达目标位置后能够安全有效地进行巡检^[11]。巡检机器人原型采用开放式结构和控制系统, 可配备多种执行器。图 1 所示为巡检机器人系统结构。系统分为后台监控和机器人本体两部分。监控后台主要负责机器人状态监测和数据处理等, 巡检机器人完成任务的分解、协调和执行

第一作者简介: 郭永强 (1977—) 男, 河南浚县人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为信息系统运维、大数据技术及人工智能, guoyongq01@163.com。

等。路径规划方法是巡检机器人研究的核心问题之一,根据变电站的环境模型,在无动态障碍物的情况下,使机器人可以寻找到设定起点到终点的最优路径。本文对巡检机器人的路径规划方法进行了研究。

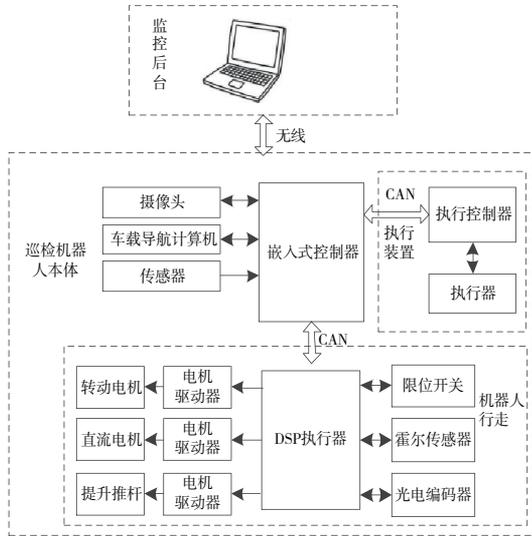


图1 巡检机器人系统结构

2 混合路径规划方法

用栅格法描述智能变电站巡检机器人的检测环境^[12]。在生成的栅格图中,采用改进的双向A*算法进行全局规划,采用改进的APFM进行局部规划。

2.1 全局路径规划

双向A*算法是A*算法的一种扩展,为了提高双向A*算法的性能,利用智能采样策略、精英搜索策略、路径平滑策略优化双向A*算法进行全局规划。代价函数为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $g(n)$ 和 $h(n)$ 分别为实际代价和计算代价; $f(n)$ 为搜索节点的代价函数。

双向A*算法在地图的起点和目标点同时采用A*算法的代价函数来规划路径。如果搜索区域重叠,则将链表中确定的路径点进行组合,生成最优路径。对双向A*算法进行了3个方面的改进。

1) 采样策略优化

利用采样函数对双向A*算法进行优化,有两种情况。

第1种情况,中点位于无障碍区域,则直接使用双向A*算法进行路线规划^[13]。根据式(2)和

式(3)计算起点和目标点之间的中点。

$$x_c = (x_s + x_t) / 2 \quad (2)$$

$$y_c = (y_s + y_t) / 2 \quad (3)$$

式中: x_s 和 y_s 为起点坐标; x_t 和 y_t 为目标点坐标; x_c 和 y_c 为中点坐标。

第2种情况,当中点位于障碍区域时,采样优化的原理如图2所示。中点位于障碍区域,则对双向A*算法进行采样优化。

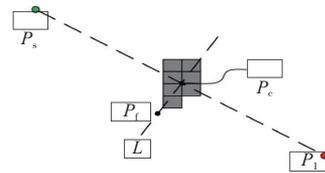


图2 采样策略简图

由式(4)和式(5)可以得到通过起点 P_s 、目标点 P_t 和中点 P_c 的垂直平分线 L 的表达式,围绕 P_c 展开,在直线 L 上可以找到最接近 P_c 和无障碍区间的固定点 P_f ,然后从起点和终点到固定点进行路径搜索。

$$k = -\frac{x_t - x_s}{y_t - y_s} \quad (4)$$

$$y = k(x - x_c) + y_c \quad (5)$$

式中: x 和 y 为无障碍区的不动点坐标; k 为采样系数。

2) 搜索策略优化

使用搜索策略对双向A*算法进行优化,提高搜索效率,具体步骤如下^[14]。

步骤1,通过式(6)和式(7)得到当前点 P_n 与目标点 P_t 的差分坐标 (x_d, y_d) 。

$$x_d = x_t - x_n \quad (6)$$

$$y_d = y_t - y_n \quad (7)$$

步骤2,根据式(8)判断目标点 P_t 的象限。

$$P_t = \begin{cases} \text{第一象限: } x_d > 0, y_d > 0 \\ \text{第二象限: } x_d < 0, y_d > 0 \\ \text{第三象限: } x_d < 0, y_d < 0 \\ \text{第四象限: } x_d > 0, y_d < 0 \\ x \text{ 轴或 } y \text{ 轴: 其他} \end{cases} \quad (8)$$

步骤3,根据 P_t 象限使用不同的搜索矩阵。如果 P_t 在 x 轴和 y 轴上时,则算法使用传统的搜索矩阵。

3) 路径平滑策略

当双向A*算法搜索区域相交,保存最初生成路径点放在辅助链表中,将目标节点设置为当前点 $P_n(x_n, y_n)$ 。根据式(9)和式(10)求得通过当

前点和其祖父节点 $P_{n-2}(x_{n-2}, y_{n-2})$ 的直线,判断 (x_n, x_{n-2}) 是否处于障碍区间。不处于则删除当前父节点 $P_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$,更新父节点。否则,不做任何更改,搜索完成^[15]。

$$K = \frac{y_n - y_{n-2}}{x_n - x_{n-2}} \quad (9)$$

$$Y = K(x - x_n) + y_n \quad (10)$$

路径平滑策略如图 3 所示。

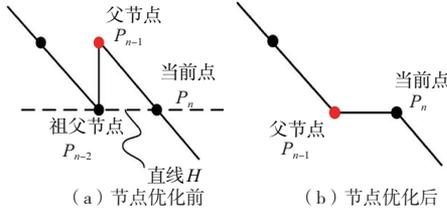


图 3 路径平滑策略

全局规划步骤如下。

a) 根据采样策略,判断起点和目标点的中点是否在障碍物范围内。

b) 判断是否有固定点 P_f 。在路径搜索间隔不接触的情况下,当一方的路径搜索间隔先到达固定点时,继续按原搜索方向进行,直到起点 S_{a1} 区间、目标点 S_{a2} 区间路径搜索区间不接触为止。

c) 合并两个路径搜索间隔生成的路径节点,从目标点追溯到起点,生成初始路径。

d) 使用路径平滑策略对路径进行优化,生成更加平滑的路径。

2.2 局部路径规划

APFM 使用虚拟力场来移动机器人,在路径局部规划中的实时性更好、路径更加平滑^[16]。其基本原理是通过虚拟势场,机器人在力的作用下运动。如图 4 所示,障碍物对机器人产生排斥力,目标点对机器人产生吸引力,机器人在这些作用力下移动。

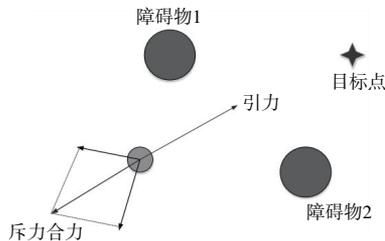


图 4 人工场势法简图

将机器人在空间中的坐标位置和目标点的坐

标分别定义为 $X_g = [x_g, y_g]^T$ 和 $X = [x, y]^T$, 机器人受力如式(11)所示。

$$F_h = F_a(x) + F_r(x) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + k_1 (X_g - X), & \rho \leq \rho_0 \\ k_1 (X_g - X), & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_h 为机器人在空间中所受合力; $F_a(x)$ 为空间引力场相应的吸引力; $F_r(x)$ 为空间斥力场相应排斥力; ρ 为与障碍物的相对距离, $\rho = (X_g - X)$; ρ_0 为斥力场作用范围; k_1, η 为增益系数。

理论上,整个空间势场的最小值点就是目标点,但在障碍物分布复杂的区域,机器人受到合力为 0,识别不出来就会下降到最小点。在实际应用中,拥挤的障碍物会在机器人移动时改变施加在机器人上的力,导致路径振动、摇摆或无法向前移动。本文从以下两方面进行改进。

1) 斥力势场函数的优化

目标点的势场必须为 0 时机器人才能顺利到达目标点。即机器人在目标点不会受到任何力,为最小势场点。然而,虽然目标点处的重力势场为 0,但斥力势场并不一定为 0。因此,通过在斥力场函数中增加相对距离 $\|x - x_g\|^u$ 来改进,使目标点斥力势场为 0,斥力计算如式(12)所示^[17]。

$$F_r(x) = \begin{cases} F_{r1}(x) + F_{r2}(x), & \rho < \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (12)$$

斥力分解的两个合力如式(13)所示。

$$\begin{cases} F_{r1}(x) = \eta \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \frac{1}{\rho^2} \cdot (x - x_g)^u \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ F_{r2}(x) = -\frac{u}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)^2 (x - x_g)^{u-1} \frac{\partial (x - x_g)}{\partial x} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $F_{r1}(x)$ 和 $F_{r2}(x)$ 为 $F_r(x)$ 的分解力, $F_{r1}(x)$ 为障碍物指向机器人, $F_{r2}(x)$ 为机器人指向目标点。

2) 机器人运动角度的优化

检测障碍物几何信息,调整机器人运动角度,改进的人工场势步骤如下。

步骤 1: 算法初始化,对起点和目标点进行设置。

步骤 2: 计算作用力,使机器人向目标点运动。

步骤 3: 对是否到达目标点进行检测,到达目标点则停止移动,未到则执行下一步。

步骤4:检测障碍物几何信息,结合目标点的信息来确定行进方向并避开障碍物。

步骤5:检查机器人是否到达目标点,如果没有,重复步骤2,到达则停止移动并输出局部路径图。

2.3 混合路径规划方法

混合路径规划算法采用分治思想。该算法由两部分组成,在全局环境信息已知的情况下,使用改进的双向A*算法规划一条全局路径。在此基础上,利用改进的APFM规划局部路径以避开障碍物。混合路径规划流程如图5所示。

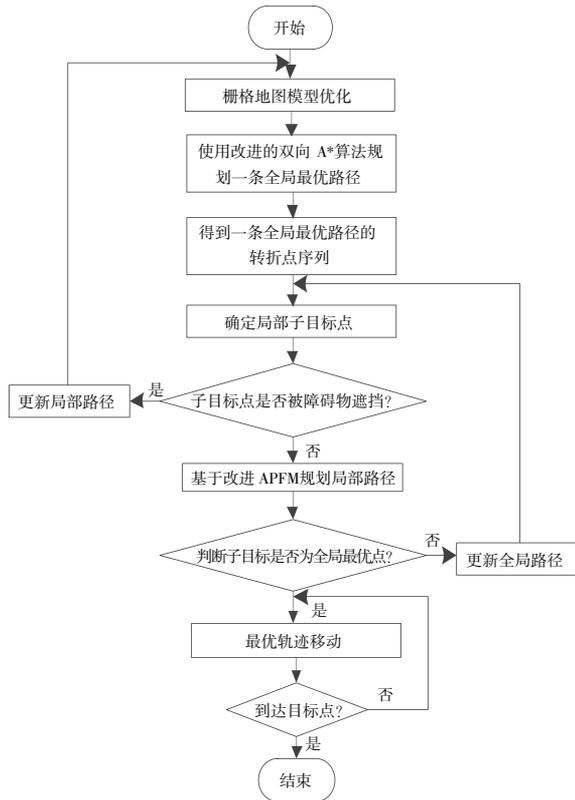


图5 混合路径规划流程

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

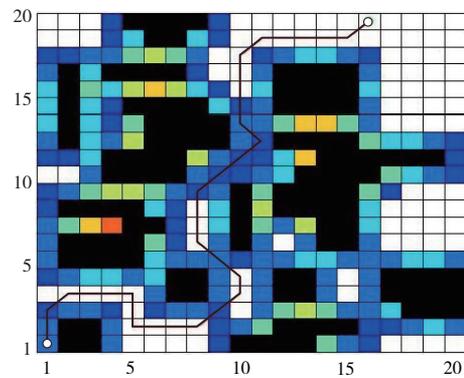
为了验证文中规划方法的有效性,在同一试验环境下将文中路径规划方法与传统方法进行对比分析。仿真PC为i52450M CPU、8G内存、Win11系统,采用Matlab进行仿真。本文采用栅格图模型,机器人的边长尺寸与最小栅格尺寸相等,因此将障碍物的尺寸向外扩展一个栅格的大小,标记为障碍物。表1所示为仿真参数。

表1 仿真参数

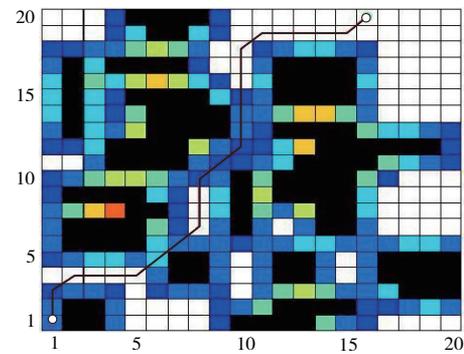
参数	数值
栅格数	20×20
栅格规格/m	20×20
机器人步长/m	0.2
障碍物最大影响距离/m	2
引力系数	5
斥力系数	3

3.2 仿真分析

文中选择20×20的栅格图作为仿真环境,对双向A*算法改进前后得到的全局规划路径图进行分析。通过对比分析验证了文中改进的双向A*算法的有效性。使用不同规划方法路径仿真结果如图6所示。图中黑色为障碍物,白色为空闲。



(a) 双向A*算法



(b) 改进双向A*算法

图6 两种算法的全局规划路径

从图6可以看出,双向A*算法路径点多且耗时长,改进后路径更加平滑,路径搜索时间和路径长度都得到相应改善,尤其是路径长度方面优势明显,提高了路径规划的效率。表2所示为全局规划算法的仿真结果。

表 2 全局规划算法仿真结果

算法	路径长度/m	搜索时间/s
双向 A* 算法	37.55	0.050
改进双向 A* 算法	26.94	0.038

由表 2 可知,与双向 A* 算法相比,改进的双向 A* 算法在生成路径长度和搜索时间两个方面分别降低了 28.26% 和 24.00%。由此验证了改进双向 A* 算法的优越性。

文中方法从全局算法得到的关键网格节点序列生成全局最优路径节点,并加入改进的人工场势法进行局部路径修改。图 7 所示为不同混合规划方法路径仿真结果。

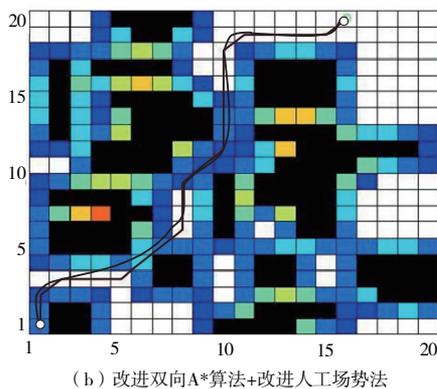
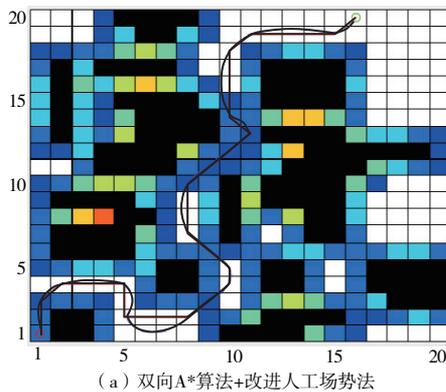


图 7 混合策略仿真结果

在图 7 中,红色圆圈的栅格是起点,蓝色圆圈的栅格是目标点(本刊为黑白印刷,有疑问之处请咨询作者)。试验结果表明,该算法能够在全局最优路径结果的条件下来避开障碍物,混合规划算法的结果如表 3 所示。

表 3 混合规划算法仿真结果

算法	路径长度/m	搜索时间/s
双向 A* 算法+改进人工场势	33	1.544
改进双向 A* 算法+改进人工场势	22	1.434

从表 3 可以看出,文中混合路径规划方法的路径长度分别比全局规划方法降低了 12.65% 和 18.34%。文中混合规划方法比改进前降低了 33.33%,搜索时间降低了 7.12%。在混合规划中添加改进的人工场势方法可以减少距离并提高平滑度。进一步验证了文中方法的准确性。

为了进一步说明文中全局+局部规划方法的优越性,将文中方法与文献[18]中方法进行对比分析,试验环境同上。表 4 所示为不同规划方法的仿真结果。

表 4 不同规划算法仿真结果

算法	路径长度/m	搜索时间/s
文献[18]	37	1.566
改进双向 A* 算法+改进人工场势	22	1.434

从表 4 中可以看出,就规划路线的长度而言,文中方法所规划的路径长度和搜索时间都优于文献[18]中方法。相比于文献[18],本文方法路径长度降低了 40.54%,搜索时间降低了 8.43%,具有一定的实用价值。

4 结语

文中提出了一种混合路径规划方法用于智能变电站巡检机器人。采用改进双向 A* 算法用于全局规划,采用改进 APFM 用于局部规划。结果表明,与双向 A* 算法相比,改进后的双向 A* 算法生成路径长度和搜索时间分别降低了 28.26% 和 24.00%。相比于双向 A* 算法与改进的 APFM 相结合的混合路径规划,文中方法规划路径长度降低了 33.33%,搜索时间降低了 7.12%。相比于文献[18],文中方法路径长度降低了 40.54%,搜索时间降低了 8.43%。文中所提方法不仅改进了路径规划,而且提高了路径规划效率,具有一定的优越性。但也存在一些不足,如仅对单一环境进行了仿真分析。在此基础上,逐步改进和完善将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 许伦辉,曹宇超,林培群. 基于多影响因素 RDMA* 算法的无人驾驶动态路径规划[J]. 交通信息与安全, 2020,38(2):24-36.
- [2] 王森弛. 基于 A* 算法的机器人路径规划[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.

(下转第 253 页)

