

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508190

基于地形因子的草原风场巡检机器人路径规划研究*

寇志伟^{1,2} 景高乐¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010080; 2. 大规模储能技术教育部工程研究中心 呼和浩特 010080)

摘要:草原风场具有风力等级较大、地表高低起伏、地面局部坑洼等特点,地面巡检机器人在不同风力等级状态下执行巡检任务时路径指标与安全性能无法兼顾,对路径规划方法提出了更高的要求。提出了一种基于地形因子的改进A*路径规划算法(terrain factors A*, TF-A*)。首先,基于草原风场的高低起伏地形与局部坑洼地形设计了坡度因子、阶跃因子,优化了代价函数与启发函数,构建了TF-A*路径规划算法。其次,考虑到草原风场环境风力等级较大,优化了不同风力等级状态时坡度因子参数与阶跃因子参数阈值,有效的提高了巡检机器人的安全性能。然后分别开展了TF-A*路径规划算法的短距离仿真测试、长距离仿真测试与实地实验测试。实验结果表明,TF-A*路径规划方法较传统A*算法在两种典型风力状态下路径长度指标分别提升了44.55%、34.82%,搜索时间指标分别提升了22.06%、23.16%,在风力等级较小时优先考虑距离指标,在风力等级较大时兼顾了距离指标与运行安全性。为草原风场非结构化不平坦地形场景的机器人巡检与路径规划提供了新的思路。

关键词: 巡检机器人;草原风场;路径规划;地形因子;TF-A*算法

中图分类号: TP242;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

Study on path planning algorithm for inspection robots in grassland wind power station based on terrain factors

Kou Zhiwei^{1,2} Jing Gaole¹

(1. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 2. Engineering Research Center of Large Energy Storage Technology, Ministry of Education, Hohhot 010080, China)

Abstract: The grassland wind power station is characterized by high wind force levels, undulating terrain, and uneven ground surfaces. When ground inspection robots perform patrol tasks under different wind force conditions, it is challenging to balance path indicators with safety, thus posing higher demands on path planning methods. This paper proposed an A* path planning algorithm enhanced with terrain factors (A* algorithm (TF-A*)). Initially, this paper designed a gradient factor and a step factor based on the undulating terrain with high and low bumps and the terrain with pits and steep slopes of the grassland wind power station, and applied these factors to optimize the cost function and the heuristic function. Building upon these enhancements, the paper successfully developed an A* path planning algorithm enhanced with terrain factors. Subsequently, this paper meticulously tailored the parameters for both the slope factor and the step factor to accommodate varying wind force conditions. By taking into account the significant wind force levels prevalent in the grassland wind power station, which has substantially improved the safety and stability of the inspection robots. Following that, a series of experimental evaluations were meticulously executed, including short-distance and long-distance simulation tests, as well as real-world field experiments, to assess the efficacy of TF-A* path planning algorithm. The experimental outcomes have revealed that the TF-A* path planning method has significantly surpassed the traditional A* algorithm, with a notable 44.55% and 34.82% increase in path length metrics, and a substantial 22.06% and 23.16% reduction in search time metrics across two distinct weather conditions. Specifically, under conditions of low wind force, the method strategically prioritizes distance metrics, where-as under high wind force, it adeptly integrates both distance metrics and operational safety into its considerations. It provides a novel approach for robot inspection and path planning in unstructured and uneven terrains of grassland wind power station.

Keywords: inspection robots; grassland wind power station; path planning; terrain factors; TF-A* algorithm

收稿日期: 2025-02-25 Received Date: 2025-02-25

* 基金项目: 国家自然科学基金(62241309)、内蒙古自治区自然科学基金(2024LHMS06023)、内蒙古科技计划项目(2021GG0256)资助

0 引言

随着人类社会对电力能源需求的不断增长,新能源的开发和利用受到了世界各国的重点关注。大力发展清洁能源,推动经济社会绿色低碳转型,已经成为国际社会应对全球气候变化的普遍共识^[1]。风能作为一种清洁的可再生能源得到了广泛的应用,特别是风力发电技术的推广应用取得了显著的效果^[2]。我国的大型风力发电场主要分布在空旷草原、山间山谷或沿海近海等风能资源丰富的地区。其中,内蒙古地区风能资源非常丰富,是中国的主要风力发电区域之一,占全国可利用风能储量的 40%,风力发电场地形主要以地势相对平坦的草原风电场为主^[3]。草原风电场(简称草原风场)的发电机组分散、数量众多,如何提高发电机组的利用率,降低故障发生率和故障时间已经成为目前风电场日常运维的首要问题^[4]。研制一种可以适用于草原风场特殊环境的风机巡检智能设备对于解决上述问题具有重要的意义。无人机和地面机器人在不同巡检场景都有着出色的表现,但是草原风场具有风力等级较大、瞬时风速变化快等特点,极大的限制了无人机巡检的应用^[5]。因此,草原风场环境下使用地面巡检机器人更具有优越性。

路径规划是在地图上寻找一条从起点到目标点满足条件要求的通路,是机器人导航和控制的基础^[6]。机器人路径规划的方法较多,在不同的场景下有不同的优缺点,一般可分为基于仿生算法^[7-9]、基于势场算法^[10-11]、基于采样算法^[12-13]和基于图搜索算法^[14]等。其中,基于仿生算法是模拟自然界生物进化或生物行为的一种路径规划方法,例如萤火虫算法、粒子群算法、蚁群算法等,对环境的适应性强,存在迭代次数多、路径质量低等问题;基于势场算法通过跟踪由引力部分和斥力部分组成势场的最陡下降规划可行路径,例如人工势场法,其结构简单、易于计算,但存在目标点不可达和局部极值等问题;基于采样算法一般通过碰撞检测获得可行轨迹的节点信息,然后将无碰撞节点连接构成可行的路径轨迹,搜索能力强,但存在无序搜索或不准确的启发式而浪费大量的计算资源。

基于图搜索算法是遍历的确定性搜索方法,通常用于二维空间路径规划,将地图离散成栅格图后利用搜索策略以尽可能小的代价找到路径,搜索过程比较直观,例如 Dijkstra 算法、A* 算法等^[14]。其中,A* 算法基于启发信息寻找最优路径,不需要遍历整个地图,搜索更为直接,具有规划效率较高、寻找最短路径快,算法复杂度低、内存需求小等优点。随着应用环境的变化,其难免出现环境建模计算量大、算法收敛速度慢以及容易陷入局部最优解等问题^[15-17]。

近年来,研究者针对不同的应用环境对 A* 算法的进行了深入研究与多方面的改进。文献[18-19]提出了改变地图模型方法优化的 A* 算法,减少了路径规划的时间,有效提高了运行效率。文献[20-21]提出了基于跳点搜索原理优化的 A* 算法,使用跳点代替算法中的搜索节点,减少搜索时间,提高了机器人规划效率。文献[22-23]提出了基于拓展搜索角度的改进 A* 算法,缩小了节点扩展区域,减小了路径规划的时间,提高了算法的执行效率。文献[24]引入双向搜索策略以提高算法计算速度,提高了搜索效率。

上述机器人路径规划方法的主要应用场所为平坦且结构化的环境。然而在面对丘陵、草原、农田、山地等非结构化不平坦地形场景时,需同时考虑路径效率与安全性能,导致路径规划问题复杂度显著提升,其重点问题在于如何构建地形动态特征与机器人运动规划的耦合模型^[25]。黄志清等^[26]提出了一种分层栅格地图的 Secure A* 路径规划方法,将环境中的高程信息转化为约束因子,以移动机器人到目标点的距离作为自适应因子,引入代价函数中。李鼎鑫^[27]提出基于 2.5D 栅格地图的 Secure A* 算法,将移动机器人的运动能力考虑到路径规划算法中,加入自适应因子提高了算法的精度和效率。苏毅等^[28]提出一种由高分辨率障碍物层和低分辨率高程层组成的复合栅格地图的改进 A* 路径规划算法,引入地形坡度约束、能耗权重与安全系数重构复合代价函数,实验验证了该方法可有效规避陡坡地形与障碍物。郭聚刚等^[29]提出了一种基于改进 A* 算法的全局路径规划方法,通过坡度约束降低了机器人的爬坡角度和侧倾角度,提高了规划路径的安全性。

草原风场的面积广袤,地形不平坦,存在着大量的高低起伏和局部坑洼等。而且草原风场蕴含了充沛的风能,例如内蒙古的辉腾锡勒风场的 10 m 高度年平均风速为 7.2 m/s,40 m 高度年平均风速为 8.8 m/s^[5]。草原风场环境的风力等级较大、地表高低起伏、地面局部坑洼等非结构化不平坦地形特点导致了机器人在巡检过程中需要同时考虑路径效率与安全性能,对路径规划方法提出了更高的要求。综上,本文针对草原风场的风力等级较大、地表高低起伏、地面局部坑洼等环境特点,提出了一种基于地形因子的改进 A* 算法(terrain factors A*, TF-A*),通过地形因子优化了代价函数与启发函数,为草原风场巡检机器人实现安全、稳定的路径规划与巡检提供了新的可能。

1 A* 算法理论基础

传统 A* 算法是一种启发式搜索算法,其基于优先队列的数据结构,通过评估每个节点的启发函数,使得搜索

方向偏向目标节点^[30]。传统 A* 算法在 Dijkstra 算法的基础上引入了启发函数,结合了广度优先搜索和贪婪最佳优先搜索的特点,通过评估函数来找到最佳路径,广泛应用于基于图搜索的路径规划^[31]。

传统 A* 算法通过评估函数计算每个节点的综合代价值,并选择代价值最小的节点来扩展搜索树,其评估函数为:

$$F(n) = G(n) + H(n) \quad (1)$$

式中: $F(n)$ 、 $G(n)$ 、 $H(n)$ 分别为评估函数、代价函数、启发函数, n 为所在路径上的当前节点; 评估函数 $F(n)$ 表示节点 n 的综合优先级, 代价函数 $G(n)$ 表示起始节点到当前节点 n 的实际代价值。

启发函数 $H(n)$ 表示当前节点 n 到目标节点的估计代价值, 不代表实际路径长度, 会使算法尽量沿该方向进行搜索, 有助于提高搜索速度。A* 算法典型的启发函数有欧氏距离 (Euclidean Distance)、曼哈顿距离 (Manhattan Distance)、切比雪夫距离 (Chebyshev Distance) 等^[32]。

实际应用时需要选择不同的启发函数, 上述 3 种启发函数的计算公式为:

$$H_E(n) = \sqrt{(P_x - E_x)^2 + (P_y - E_y)^2} \quad (2)$$

$$H_M(n) = |P_x - E_x| + |P_y - E_y| \quad (3)$$

$$H_C(n) = \max(|P_x - E_x|, |P_y - E_y|) \quad (4)$$

式中: P_x 、 P_y 为当前节点 P 在栅格地图中坐标; E_x 、 E_y 为目标节点 E 的坐标。

3 种典型启发函数表示物理意义如图 1 所示。

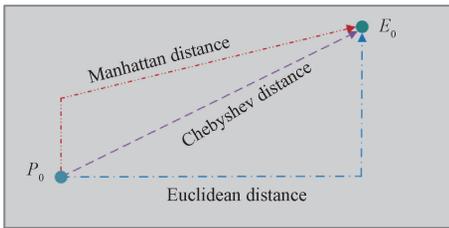


图 1 3 种典型启发函数

Fig. 1 Three typical heuristic functions

符合实际的启发函数可以减少节点搜索的数量和时间, 得到特定要求下的最优路径。A* 算法的搜索过程是以节点的代价评估为基础, 一定程度上保证了 A* 算法能够得到理论上收敛的最佳路径。

2 基于地形因子的改进 A* 算法设计

2.1 算法设计思路

在草原风场的地理环境中, 充沛的风力与高低起伏、局部坑洼等地形所导致的安全问题是不可忽视的。传统 A* 算法在处理这种地理环境的地形时, 可能会忽略地形

生成不够自然的路径, 导致其规划的路径在实际运行中难以跟随或执行。而且, 传统 A* 算法在搜索过程中需要不断维护代价函数、启发函数两个列表, 在草原风场环境下可能需要更多的搜索节点来找到合适的路径。随着搜索空间的增大, 两个列表占用的计算机资源也会增加, 进一步增加了处理器的计算负担。因此针对传统 A* 算法进一步优化是必要的。

传统 A* 算法的扩展邻域通常为当前节点周围的 8 个子节点, 如图 2 所示。

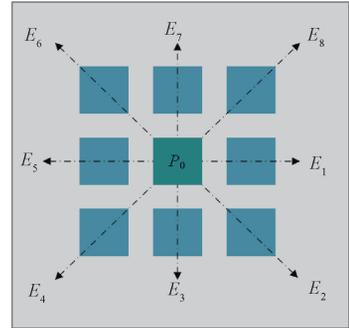


图 2 A* 算法的扩展邻域

Fig. 2 The extended neighborhood of A* algorithm

如果当前节点位于 P_0 , 则机器人会往图 2 中 $E_1 \sim E_8$ 等 8 个方向搜索前进。若在二次搜索更新之后, 减少搜索方向以提高搜索效率, 则根据子节点与当前节点的相对位置关系, 可以减少 3 个搜索方向, 如图 3 所示。

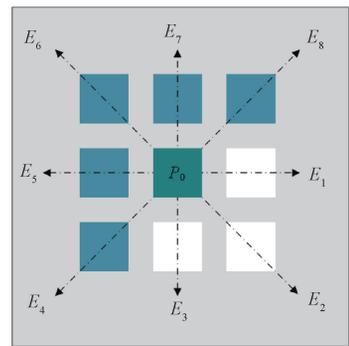


图 3 优化 A* 算法的邻域

Fig. 3 The neighborhood optimization of A* algorithm

例如当前节点位置 P_0 是由图 2 中 8 个节点为父节点搜索而来, 则以当前节点 P_0 为父节点, 接下来搜索时舍弃掉 $E_1 \sim E_3$ 节点, 只搜索 $E_4 \sim E_8$ 节点, 则可以提高搜索效率。

风场巡检机器人优化搜索方式之后, 可以引入地形因子进一步改进, 通过启发函数 $H(n)$ 优化选择地形因子代价较小的方向, 抛弃地形因子代价较大的方向, 进一步提高算法的搜索效率。本文引入的地形因子包含了坡度因子和阶跃因子。

2.2 坡度因子设计

设草原风场巡检机器人工作时能够通过的最大坡度为 θ_{\max} , 即机器人能够正常工作的最大爬坡度。在巡检机器人能够保证自身稳定运行的前提下, 其在风场跨越的地形坡度应该小于最大爬坡度 θ_{\max} 。设巡检机器人在草原风场爬坡的过程是匀速运动过程, 且空气阻力较小, 其动力学示意图如图 4 所示。

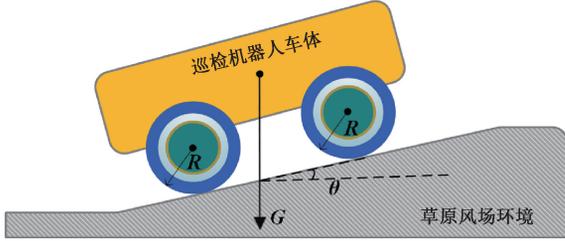


图 4 巡检机器人爬坡示意图

Fig. 4 Inspection robot climbing schematic diagram

则巡检机器人爬坡时的运行方程为:

$$F_d = F_f + F_i \quad (5)$$

式中: F 为巡检机器人的驱动力; F_f 为滚动阻力; F_i 为坡度阻力。代入图 4 中参数得:

$$F = Gf_r \cos\theta + G\sin\theta \quad (6)$$

式中: G 为巡检机器人受到的重力, 其等于巡检机器人的质量与重力加速度的乘积; f_r 为滚动阻力系数; θ 为地形坡度。

设巡检机器人输出最大动力 F_{\max} 时, 其可以达到最大爬坡度 θ_{\max} , 则有:

$$F_{\max} = Gf_r \cos\theta_{\max} + G\sin\theta_{\max} \quad (7)$$

则最大爬坡度 θ_{\max} 为:

$$\theta_{\max} = \frac{\arcsin(F_{\max} - F_f)}{G} \quad (8)$$

则坡度因子 α 可以定义为:

$$\alpha = \frac{\theta}{\theta_{\max}} \quad (9)$$

2.3 阶跃因子设计

草原风场巡检机器人工作时可能遇到局部坑洼等阶跃地形。巡检机器人阶跃的过程可以认为是较慢车速运动的过程, 设其能够通过的最大越程为 h_{\max} , 即能够顺利通过阶跃地形的最大高程差, 其动力学示意图如图 5 所示。

根据后轮驱动的静力学平衡方程可以得到巡检机器人阶跃时的运行方程为:

$$\begin{cases} F_r \cos\varphi + f_r F_r \sin\varphi - f_v F_v = 0 \\ F_r \sin\varphi - f_r F_r \cos\varphi + F_v - G = 0 \\ F_v f_r R + F_v L - GS - f_v F_v R = 0 \end{cases} \quad (10)$$

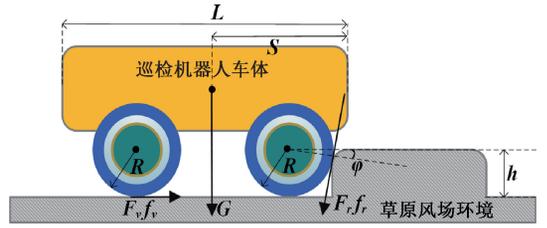


图 5 巡检机器人阶跃示意图

Fig. 5 Inspection robot step schematic diagram

式中: F_r 为地面作用于从动轮的反作用力; φ 为车轮轴心点与阶跃连接点在水平方向上的夹角; f_v 为地面与轮胎之间的负荷系数; F_v 为驱动轴承负荷; R 为机器人的车轮半径; L 为机器人前轮与后轮之间的水平距离; S 为机器人中心与前轮之间的水平距离。

联立求解式(10)可得:

$$-\left(\frac{1}{f_v} - \frac{1 - f_v f_r}{f_v} \cdot \frac{S}{L} - \frac{R}{L}\right) \cos\varphi = \frac{f_r R}{L} \quad (11)$$

根据图 5 可得:

$$\sin\varphi = \frac{R - h}{R} = 1 - \frac{h}{R} \quad (12)$$

式中: h 为地形的阶跃高度。

将式(12)代入式(11), 当 $f_r = 0$ 时, 可以得到巡检机器人的最大阶跃高度 h_{\max} 为:

$$h_{\max} = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{f_v S}{L - S - f_v R} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (13)$$

则阶跃因子 β 可以定义为:

$$\beta = \frac{h}{h_{\max}} \quad (14)$$

2.4 基于地形因子的改进 A* 算法设计

根据草原风场高低起伏、局部坑洼等地形特点以及上述定义的坡度因子 α 和阶跃因子 β , 构建地形因子函数为:

$$f_g(\alpha, \beta) = \max(\alpha, \beta) \quad (15)$$

巡检机器人在进行节点搜索时, 若地形因子函数 $f_g(\alpha, \beta) > 1$, 表明此地形的可通行性超过的机器人的通行极限, 机器人无法通过。

基于地形因子函数构建通行度函数为:

$$f_p(\alpha, \beta) = \frac{1}{f_g(\alpha, \beta)} \quad (16)$$

因此, 巡检机器人在节点搜索判定障碍时只需要识别通行度函数大小即可。当通行度函数 $f_p \leq 1$ 时, 表示此时环境地形的障碍程度超过了机器人可通度的极限, 不可以通行; 若 $f_p > 1$ 时, 表示此时环境地形的障碍程度小于机器人可通度的极限, 可以通行, 而且 f_p 越大, 表示节点越安全, 通行的代价越小, 节点越容易通行。

巡检机器人爬坡时,其部分能量会转化为重力势能。考虑到其在坡面上运行的距离与水平位移距离不相等,因此需要转换。设在同一场景下的坡面和水平地面摩擦系数相同,则当前节点 n 的坡面等效距离和水平位移的转换关系为:

$$S_n = \frac{L_n}{\cos\theta_n} = \frac{\sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2}}{\cos\theta_n} \quad (17)$$

式中: S_n 是坡面等效距离; L_n 为实际水平位移; θ_n 为某节点的坡度。

而且巡检机器人在通过阶跃地形时,会对自身正常运行的安全性造成很大的挑战,为避免巡检机器人多次经过阶跃地形而出现安全问题,需要进一步对阶跃地形进行惩罚。

定义巡检机器人第 i 次经过阶跃高度为 h_i 的阶跃地形时,消耗的能量 W_i 为:

$$W_i = mgh_i \quad (18)$$

构建惩罚函数 $\delta_{cum}(\theta_i, h_i)$ 为:

$$\delta_{cum}(\theta_i, h_i) = \frac{\theta_i}{\theta_{max}} mgh_i = \alpha_i \cdot mgh_i \quad (19)$$

定义危险度函数 f_{cum} 为:

$$f_{cum}(\delta_{cum}) = \sum_{i=n}^{end} \delta_{cum}(\theta_i, h_i) \quad (20)$$

式中: end 为目标点的坐标。

当危险度 f_{cum} 大于设定的安全阈值后,巡检机器人将不再选择阶跃地形通过,即后续阶跃地形节点通行度设置为 0,等同于不可通行的障碍物。

因此,考虑了坡度因子 α 和阶跃因子 β 的改进 A* 算法的代价函数优化设计为:

$$G(n) = G(n-1) + S_n \quad (21)$$

式中: S_n 为当前节点 n 的坡面等效距离。

构造启发函数为:

$$H(n) = \sum_{n=i}^{end} \left(1 + \frac{1}{f_p}\right) \cdot (S_n + mgh_n) \quad (22)$$

巡检机器人在草原风场工作时,环境风力等级的大小也是影响机器人安全稳定运行较大的因素。因此,在算法设计中根据风力等级的实际情况,可以调节坡度因子参数和阶跃因子参数,以保障巡检机器人的安全稳定运行。本文算法设置地形因子与风力等级正相关,后续实验时将草原风场的环境风力等级分为和风和大风两种状态。

为表述方便,将这两种风力状态下的地形因子分别定为 f_{g1} 和 f_{g2} 。环境风力情况为和风状态下(风力等级较小,地形因子为 f_{g1}),风场巡检机器人以快速到达目标地点为主要目标,根据前期试验的经验数据,在可通过的前提下预留 0.2 的地形参数裕量,设置为 0.8,此时允许通过绝大多数地形障碍。环境风力情况为大风状态

下(风力等级较大,地形因子为 f_{g2} 时),风场巡检机器人以安全性为首要目标,根据前期试验的经验数据,在可通过的前提下预留 0.5 的地形参数裕量,设置为 0.5,此时应尽量避免通过高坡度地形和高阶跃地形,如表 1 所示。

表 1 风场天气状况

Table 1 The wind power station weather condition

风力状态	对应风速/($m \cdot s^{-1}$)	坡度因子	阶跃因子
和风状态	≤ 7.9	0.8	0.8
大风状态	≥ 8.0	0.5	0.5

本文根据前期选择的试验环境设置的地形因子参数开展了仿真与实验测试。TF-A* 算法的地形因子参数可以在具体的应用环境中根据试验情况适当调整,从而选择较优的规划策略参数,以满足风场的安全巡检需要。

考虑了坡度因子 α 和阶跃因子 β 的 TF-A* 算法流程如图 6 所示。

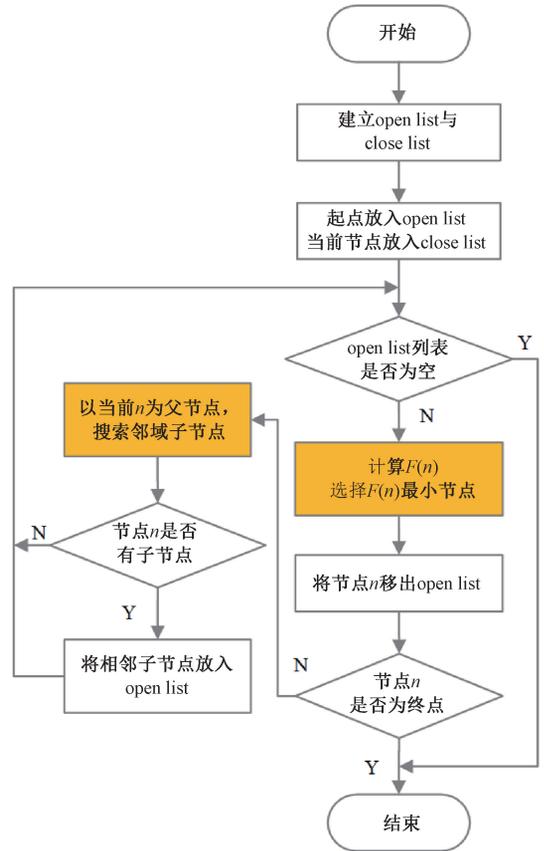


图 6 TF-A* 算法的流程

Fig. 6 Flow chart of TF-A* algorithm

图 6 中黄色部分为考虑了坡度因子 α 和阶跃因子 β 的算法改进步骤,TF-A* 算法节点搜索过程如下:

步骤 1) 建立两个空的列表 open list 与 close list,其中 open list 用于存放沿途可能经过的节点,将起点信息存入 open list 中。

步骤 2) 寻找 open list 列表中与当前节点相邻的 8 个节点, 并将可通行的节点加入 open list 列表, 同时将当前节点加入到 close list 列表并设置为父节点。

步骤 3) 通过评估函数 $F(n)$ 计算 open list 列表中节点的代价, 选择代价最小的节点, 将其邻域不在 close list 的可通行节点加入到 open list。

步骤 4) 判断新加入节点是否已经存在于 open list, 若存在则将当前节点置入到 close list 列表。同时, 计算父节点经由当前节点移动到该邻域节点是否能得到更小的代价函数 $G(n)$ 值, 如果能得到则将父节点重新设为当前节点并更新代价函数 $G(n)$ 和启发函数 $H(n)$ 。

步骤 5) 寻找 open list 列表中与当前节点有方向关系的 5 个节点, 判断启发函数 $H(n)$ 是否为 0, 若为 0 则程序结束, 否则将可通行的节点加入 open list 列表, 将当前节点加入到 close list 列表并设置为父节点, 重复运行步骤 3)。

3 实验验证

3.1 实验设计

为了验证 TF-A* 路径规划算法的有效性, 分别开展了算法仿真测试与实地测试实验。

本文将实验场所巡检起点所在的平面设置为基准面, 也是机器人工作初始状态时所在的平面。根据实验场所地理情况将实验环境分为了 6 种地貌形态, 分别是深坑、浅坑、草地、缓坡、中坡与陡坡。其中, 选择平坦的草地地貌作为巡检的起点, 即实验的基准面 (坡度为 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$); 以基准面为参考点, 取 h_{\max} 、 θ_{\max} 分别为 55° 、 30 cm , 设置阶跃高度 h 为 $0\text{ cm} \sim 15\text{ cm}$ 、 $16\text{ cm} \sim 30\text{ cm}$ 的地形分别为浅坑、深坑, 地形坡度 θ 为 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 、 $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、 $26^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的地形分别为草地、缓坡、中坡、陡坡。定义相邻地貌为地形的一级阶跃, 相隔地貌为地形的二级阶跃。例如, 缓坡的一级阶跃为草地和中坡, 二级阶跃为浅坑和陡坡。

在算法仿真测试阶段, 选取了内蒙古自治区乌兰察布市辉腾锡勒草原风场地形的 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 地图局部, 通过 DEM 数据提取构建仿真地图, 如图 7 所示。

在安全稳定运行的情况下, 风场巡检机器人通过的地形需要尽量平坦, 即机器人在规划巡检路径过程中, 尽可能少的在阶跃地形之间穿梭, 并且不要跨越高阶跃地形。基于上述原则, 草原风场环境下巡检机器人路径规划算法性能的评价重点考虑路径长度、阶跃次数、运行时间等指标。

1) 路径长度, 经过换算过后包括上坡道和下坡道在内的路径长度, 长度越短性能越优。

2) 阶跃次数, 记录不同阶跃类型的跨越次数, 一级阶跃次数越少越好, 二级阶跃次数为 0 最优。

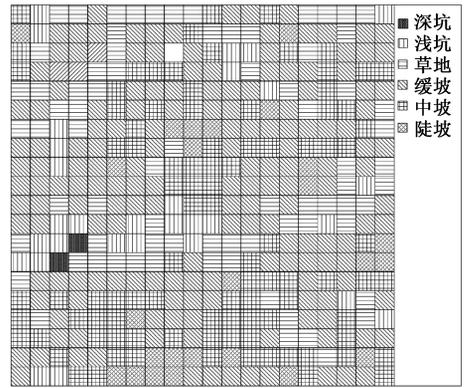


图 7 草原风场仿真栅格地图

Fig. 7 The wind power station simulation grid map

3) 搜索时间, 表征算法运行的时间。在同样的计算机资源条件下, 时间越短性能越优。

传统 A* 算法在结构化的二维平面下, 其环境建模采用传统的二分栅格法, 即不存在不固定的障碍物, 只区分可通行与不可通行的两个状态, 所有不在基准面的地形都视为不可通行的障碍物。

本文基于地形因子重新调整巡检机器人的通行性, 将图 7 的草原风场仿真地图分别按照传统 A* 方法、和风状态 TF-A* 算法、大风状态 TF-A* 算法等 3 种情况进行栅格地图退化, 如图 8~10 所示。

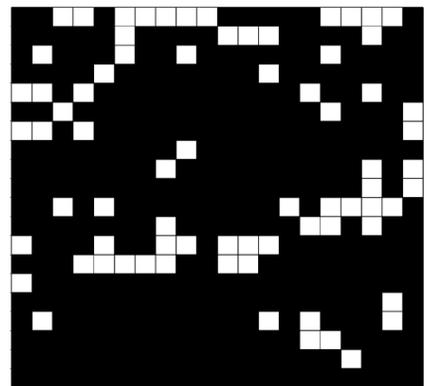


图 8 传统 A* 算法栅格地图

Fig. 8 The traditional A* algorithm grid map

由图 8~10 可见, 传统 A* 算法二分法退化后的栅格地图中可通行区域较少, 大风状态 TF-A* 算法、和风状态 TF-A* 算法的栅格地图中可通行区域相对较多。

3.2 短距离仿真实验

短距离仿真实验以传统 A* 算法的退化栅格地图 (图 8) 为基准, 在可通行的范围内寻找起始点。本文选取直线距离 45 m 的两点作为起点和终点, 如图 11 所示。选取同样的起点和终点, 对应的和风状态 TF-A* 算法、大风状态 TF-A* 算法的实验路径轨迹如图 12、13 所示。

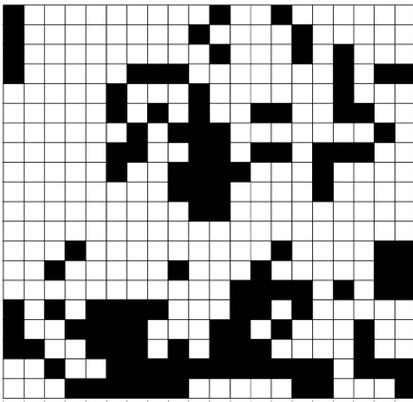


图9 和风状态 TF-A* 算法栅格地图

Fig.9 The TF-A* grid map with light-wind state

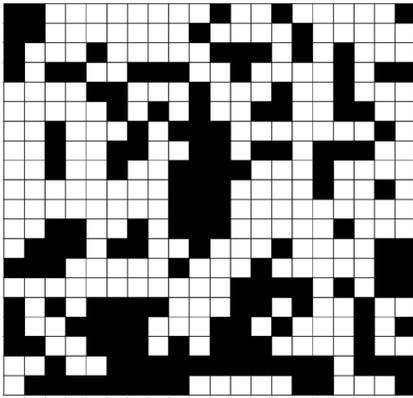


图10 大风状态 TF-A* 算法栅格地图

Fig.10 The TF-A* grid map with strong-wind state

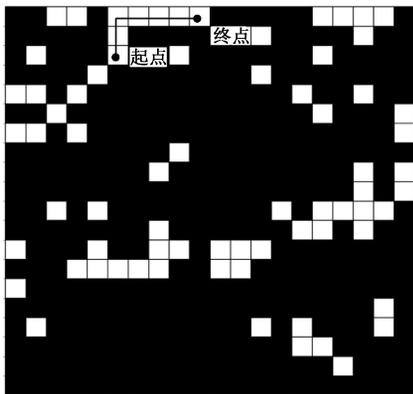


图11 传统 A* 算法轨迹

Fig.11 Trajectories of traditional A* algorithm

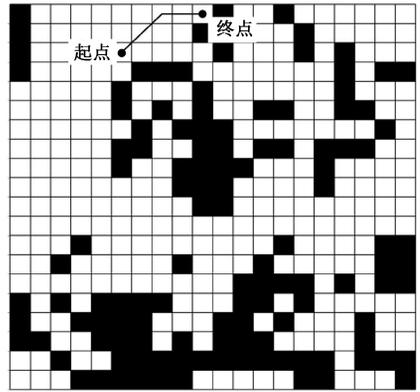


图12 和风状态 TF-A* 算法轨迹

Fig.12 Trajectories of TF-A* with light-wind state

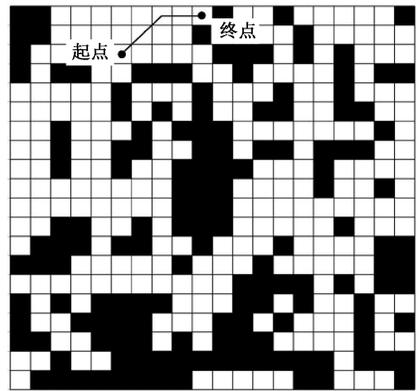


图13 大风状态 TF-A* 算法轨迹

Fig.13 Trajectories of TF-A* with strong-wind state

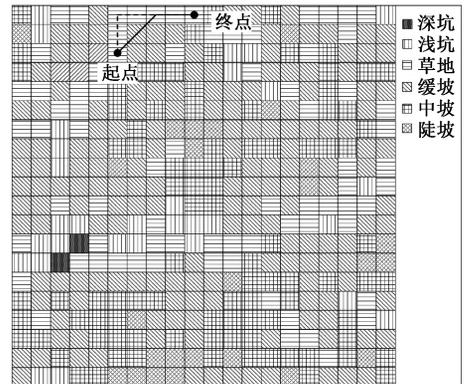


图14 短距离仿真实验轨迹对比

Fig.14 Trajectory of short-distance simulation experiment

表2 短距离仿真测试数据

Table 2 Experiment data of short-distance simulation

算法名称	路径长度/m	一级阶跃次数	二级阶跃次数	搜索时间/s
传统 A* 算法	61.4	0	0	0.316
改进 A* 算法(和风状态)	47.9	2	0	0.289
改进 A* 算法(大风状态)	47.9	2	0	0.274

将上述3种情况下的短距离实验轨迹路线在RGB地图上描述,得到机器人经过路径的阶跃次数如图14所示,短距离实验评价指标数据如表2所示。

由图 14 可知,由于短距离仿真实验以传统 A* 算法的退化栅格地图为基准,除了“草地”地貌以外的地形均被认定为不可通行区域,巡检机器人的可通行区域的安全性很高。此时巡检机器人的安全性问题并不是其稳定运行的首要条件,因此其路径长度可以作为首要评价指标。而且由于机器人在短距离实验时的起始点受限,其起点和终点之间路径经过的地形较为简单,导致其在两种天气状态下的路径规划距离相同。

在路径长度方面,传统 A* 算法的路径长度为 61.4 m,TF-A* 算法在两种天气状态下的路径长度相同,均为 47.9 m,较传统 A* 算法减少了 13.5 m,性能提高了 22.3%。在阶跃次数方面,3 种情况下的二级阶跃次数均为 0,TF-A* 算法在两种天气状态下的一级阶跃次数为两次,阶跃程度较低,不会影响运行的安全性。在搜索时间方面,TF-A* 算法简化了节点的搜索方式,在大风状态、和风状态下搜索时间为 0.274 s、0.289 s,分别比 A* 算法提高了 8.5% 和 13.3%。因此,在短距离路径规划方面,TF-A* 算法相比于 A* 算法在路径长度和运行时间方面的表现效果均有一定程度的提升。

3.3 长距离仿真实验

巡检机器人在长距离仿真实验时,其路径不可避免的要通过部分坡度地形和阶跃地形。因此,传统 A* 算法的地图无法满足长距离仿真实验路径规划的要求。本文以和风状态改进 A* 算法的栅格地图(图 9)为基准,图 9 中的可通行区域中选取直线距离为 150 m 的两点作为起点和终点进行仿真实验。和风、大风状态 TF-A* 算法的实验路径轨迹如图 15、16 所示。

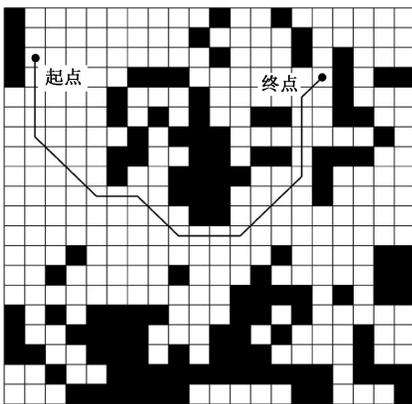


图 15 和风状态 TF-A* 算法长距离轨迹

Fig. 15 Trajectories of TF-A* algorithm with light-wind state

将上述两种情况下的长距离实验的轨迹路线在 RGB 地图上可视化描述,可以得到机器人经过路径的阶跃次数,如图 17 所示。

长距离实验评价指标数据如表 3 所示。

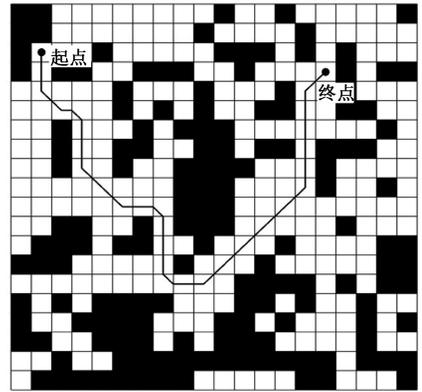


图 16 大风状态 TF-A* 算法长距离轨迹

Fig. 16 Trajectories of TF-A* algorithm with strong-wind state

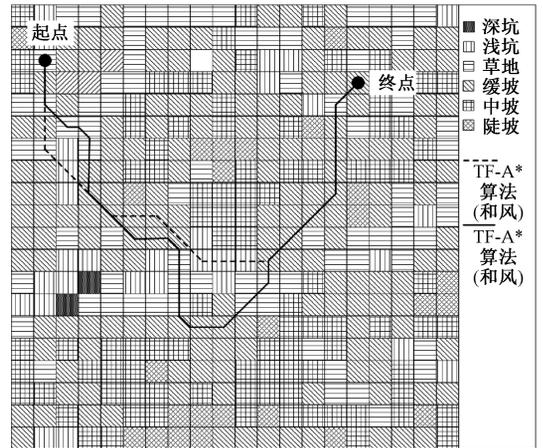


图 17 长距离仿真实验轨迹

Fig. 17 Trajectory of long-distance simulation experiment

表 3 长距离仿真测试数据

Table 3 Experiment data of short-distance simulation

算法名称	路径长度/m	一级阶跃次数	二级阶跃次数	搜索时间/s
改进 A* 算法(和风状态)	268.6	10	3	0.509
改进 A* 算法(大风状态)	306.5	9	0	0.483

由表 3 可知,TF-A* 算法在和风状态下实验轨迹的路径长度为 268.6 m,前进轨迹中包含了 10 次一级阶跃和 3 次二级阶跃,运行搜索时间为 0.509 s;TF-A* 算法在大风状态下实验轨迹的路径长度为 306.5 m,一共有 9 次一级阶跃,没有二级阶跃,运行搜索时间为 0.483 s。

因此,TF-A* 算法可以在地貌环境相对特殊的草原风场实现长距离路径规划,而且在风力等级较大的情况下,TF-A* 算法可以通过牺牲一定的路径长度实现机器人风场巡检的安全性。

3.4 实地测试实验

实地测试实验地点选择在与草原风场地形地貌相同

的(图7)内蒙古自治区某草原,具体经纬度范围是东经 $111^{\circ} 43' 08'' E \sim 111^{\circ} 43' 13'' E$ 、北纬 $40^{\circ} 53' 48'' N \sim 40^{\circ} 53' 48'' N$ 。实验使用的机器人平台如图18所示,其硬件包括 Jetson Xavier NX 工控机、RS-Helios 激光雷达、华测 CGI-410IMU 模块、WheelTec 底盘等。



图18 实验使用的机器人平台

Fig. 18 Patrol robot used in the experiment

在上述实验区域,根据3.1节的地形设置方法,选取了能够包含深坑、浅坑、草地、缓坡、中坡、陡坡等6种地貌形态的草原风场正方形实验测试区域,其长宽均为30 m,如图19所示。

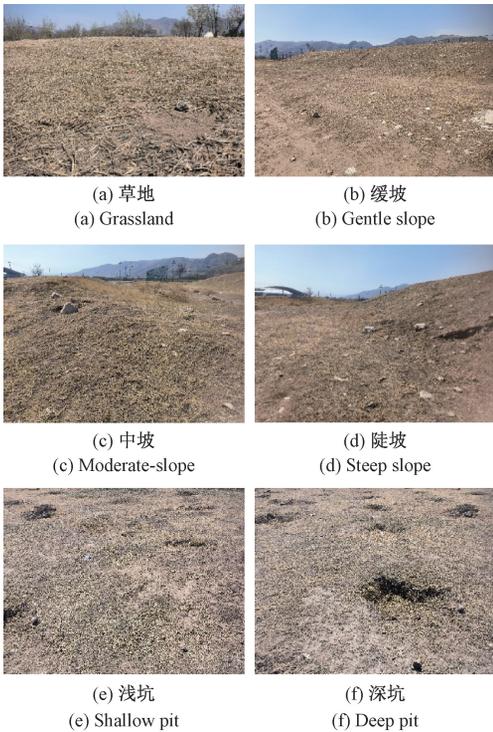


图19 实验场地的地貌形态

Fig. 19 Geomorphic morphology of the experimental site

在试验区域采集激光雷达点云数据与IMU运动数据,录制 bag 包,并且通过 ROS 系统的可视化工具 rviz 进

行地图信息获取。然后根据地形信息得到实际测试场地的栅格地图如图20所示。

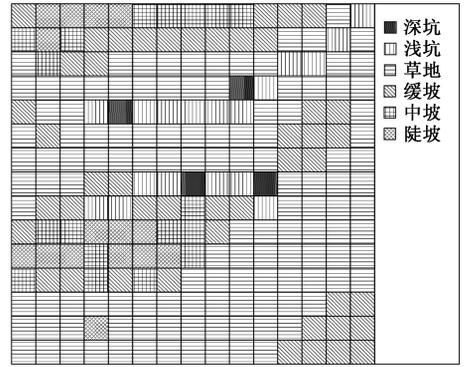


图20 实验场地的栅格地图

Fig. 20 The grid map of the experimental site

在实验场地选取直线距离为30 m的两点进行实地实验,分别按照传统A*算法与不同地形因子的TF-A*算法测试,得到路径轨迹如图21~23所示。

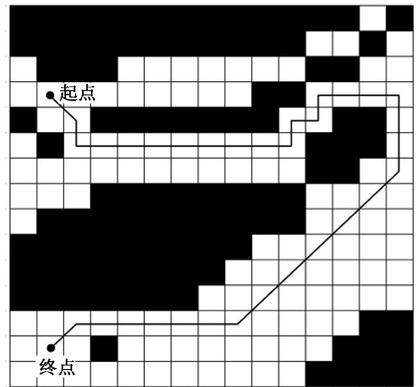


图21 传统A*算法实测轨迹

Fig. 21 Testing trajectory of traditional A* algorithm

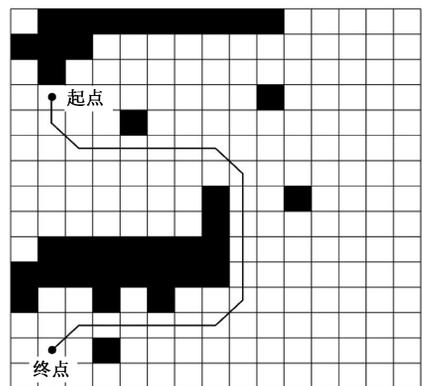


图22 和风状态TF-A*算法测试轨迹

Fig. 22 Testing trajectory of TF-A* with light-wind state

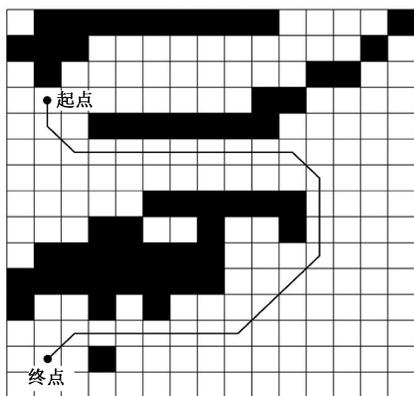


图 23 大风状态 TF-A* 算法测试轨迹

Fig. 23 Testing trajectory of TF-A* with strong-wind state

将上述 3 种情况下的实地实验轨迹路线在 RGB 地图上可视化描述,得到机器人经过路径的阶跃次数,如图 24 所示,实地实验评价指标数据如表 4 所示。

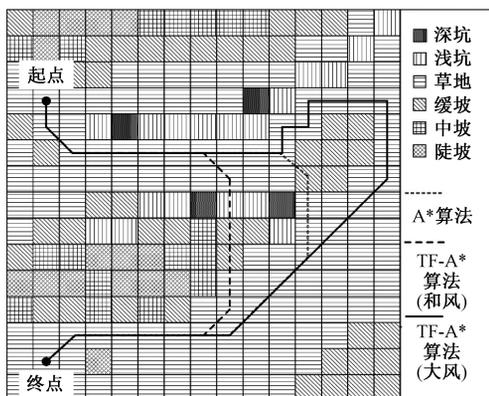


图 24 实地测试实验轨迹对比

Fig. 24 Testing trajectory of experimental site

表 4 实地测试实验数据

Table 4 Experiment data of field test

算法名称	路径长度/m	一级阶跃次数	二级阶跃次数	搜索时间/s
传统 A* 算法	76.1	0	0	0.544
改进 A* 算法(和风状态)	42.2	2	1	0.424
改进 A* 算法(大风状态)	49.6	2	0	0.418

由表 4 可知,传统 A* 算法的路径长度为 76.1 m,算法搜索时间为 0.544 s,阶跃次数为 0;TF-A* 算法在和风状态下的路径长度为 42.2 m,前进轨迹中包含了两次一级阶跃和 1 次二级阶跃,运行搜索时间为 0.424 s;TF-A* 算法在大风状态下的路径长度为 49.6 m,前进轨迹中包含了两次一级阶跃和 0 次二级阶跃,运行搜索时间为 0.418 s。TF-A* 算法在两种天气状态下较传统 A* 算法路径长度指标分别提升了 44.55%、34.82%,搜索时间指

标分别提升了 22.06%、23.16%。

实验表明,传统 A* 算法由于通行的限制,导致了路径长度较长。TF-A* 算法的轨迹路径长度与地形因子相关。当风力等级较小时,优先考虑了距离指标,可以适当的发生二级阶跃,以期尽快的到达目标地点,其距离指标性能较好;当风力等级较大时,则会牺牲部分路径长度以换取其自身的安全稳定运行,基本上禁止了跨越二级阶跃地形造成的翻车、侧滑等安全事故,确保了巡检机器人运行的安全性。

4 结 论

风力发电技术得到了广泛的应用,并取得了显著的效果,研究一种可以适用于草原风场巡检机器人的路径规划方法对于提高草原风电场智慧运维水平具有重要的意义。本文针对草原风场特殊环境的路径规划问题提出了一种基于地形因子的 TF-A* 算法。首先,针对草原风场地表高低起伏、地面局部坑洼等特点,引入了坡度因子 α 和阶跃因子 β ,设计了地形因子函数,构建了通行度函数、惩罚函数,改进 A* 算法的代价函数、启发函数。其次,针对草原风场环境风力等级较大的环境特点,考虑了环境风力的大小对机器人安全稳定运行的影响,并把环境风力的影响转化为坡度因子参数和阶跃因子参数,提出了基于坡度因子 α 和阶跃因子 β 的 TF-A* 路径规划算法。实验结果表明,本文提出的 TF-A* 算法性能指标明显优于传统 A* 算法,能够根据环境的风力等级调整地形参数,在确保安全巡检的前提下实现较好的路径规划性能。

参考文献

[1] TAN W X, TAN K W, TAN K L. Developing high intensity ultrasonic cleaning (HIUC) for post-processing additively manufactured metal components [J]. Ultrasonics, 2022(3) : 321-323.

[2] 张恩琦,于思洋,王皓,等. 风力发电机的发展及应用综述[J]. 电气工程学报,2025,20(1) : 14-25.
ZHANG EN Q, YU S Y, WANG H, et al. Overview of the development and application of wind turbine generators [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025,20(1) : 14-25.

[3] 李明俊. 2024 年内蒙古自治区风电场行业发展现状分析[EB/OL]. (2024-04-21). <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/240419-fca56b94.html>.
LI M J. Analysis of the development status of the wind power industry in inner Mongolia autonomous region in 2024[EB/OL]. (2024-04-21). <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/240419-fca56b94.html>.

[4] ZOU L, WANG Y, BI J W, et al. Damage detection in

- wind turbine blades based on an improved broad learning system model[J]. *Applied Sciences*, 2022(5): 334.
- [5] 中国气象局风能太阳能中心. 中国风能太阳能资源年景公报(2022年)[N]. 中国能源报, 2023-04-10(013).
China Meteorological Administration Wind and Solar Energy Center. Annual report on wind and solar energy resources in China (2022) [N]. *China Energy News*, 2023-04-10(013).
- [6] 杨国,吴晓,肖如奇,等. 改进 A* 算法的安全高效室内全局路径规划[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(7):131-142.
YANG G, WU X, XIAO R Q, et al. Improved A* algorithm for secure and efficient indoor global path planning[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024,38(7):131-142.
- [7] KUMAR V, KUMAR D. A systematic review on firefly algorithm: past, present and future [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(4): 3269-3291.
- [8] FERNANDES P B, OLIVEIRA R, NETO J F. Trajectory planning of autonomous mobile robots applying a particle swarm optimization algorithm with peaks of diversity [J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 116: 108108.
- [9] HAO K, ZHAO J, WANG B, et al. The application of an adaptive genetic algorithm based on collision detection in path planning of mobile robots [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021(5):1-20.
- [10] SOUZA R M J A, LIMA G V, MORAIS A S, et al. Modified artificial potential field for the path planning of aircraft swarms in three-dimensional environments [J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1558.
- [11] 刘冰雁,叶雄兵,王新波,等. 基于改进人工势场的无人地面车辆路径规避算法[J]. *中国惯性技术学报*, 2020, 28(6): 769-777.
LIU B Y, YE X B, WANG X B, et al. Path avoidance algorithm of unmanned ground vehicle based on improved artificial potential field [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(6): 769-777.
- [12] WU Z, CHEN Y, LIANG J, et al. ST-FMT*: A fast optimal global motion planning for mobile robot [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 3854-3864.
- [13] 崔炜,朱发证. 机器人导航的路径规划算法研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(19): 10-20.
CUI W, ZHU F ZH. Review of path planning algorithms for robot navigation [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(19): 10-20.
- [14] ZHANG H C, ZHUANG Q J, LI G. Robot path planning method based on indoor spacetime grid model [J]. *Robot Sensing*, 2022, 14(10): 2357.
- [15] AMMAR A, BENNACEUR H, CHAARI I, et al. Relaxed Dijkstra and A* with linear complexity for robot path planning problems in large-scale grid environments [J]. *Soft Computing*, 2016, 20(10): 1-23.
- [16] LI C, HUANG X, DING J, et al. Global path planning based on a bidirectional alternating search A* algorithm for mobile robots [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 168: 108123.
- [17] 迟旭,李花,费继友. 基于改进 A* 算法与动态窗口法融合的机器人随机避障方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 132-140.
CHI X, LI H, FEI J Y. Research on robot random obstacle avoidance method based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 132-140.
- [18] AYAWLI B B K, MEI X, SHEN M, et al. Mobile robot path planning in dynamic environment using Voronoi diagram and computation geometry technique [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86026-86040.
- [19] LIU Z H, LIU H B, LU Z G, et al. A dynamic fusion path finding algorithm using delaunay triangulation and improved A-star for mobile robots [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 20602-20621.
- [20] 赵晓,王铮,黄程侃,等. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划 [J]. *机器人*, 2018, 40(6): 903-910.
ZHAO X, WANG ZH, HUANG CH K, et al. Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. *Robot*, 2018, 40(6): 903-910.
- [21] 刘子豪,赵津,刘畅,等. 基于改进 A* 算法室内移动机器人路径规划 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(2): 186-190.
LIU Z H, ZHAO J, LIU CH, et al. Path planning of indoor mobile robot based on improved A* algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(2): 186-190.
- [22] 张丹红,陈文文,张华军,等. A* 算法与蚁群算法相结合的无人艇巡逻路径规划 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 13-18.
ZHANG D H, CHEN W W, ZHANG H J, et al. Patrol path planning of unmanned surface-vehicle based on A* algorithm and ant colony algorithm [J]. *Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(6): 13-18.
- [23] 姜媛媛,张阳阳. 改进 8 邻域节点搜索策略 A* 算法的路径规划 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(5): 234-241.

- JIANG Y Y, ZHANG Y Y. Improved path planning of A* algorithm of domain node search strategy 8 [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 234-241.
- [24] 高九州, 刘育航. 基于改进 A* 算法和再优化的避障路径规划[J]. 电子测量技术, 2024, 47(21): 21-27.
GAO J ZH, LIU Y H. Obstacle avoidance path planning based on improved A* algorithm and re-optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(21): 21-27.
- [25] LIU L X, WANG X, YANG X, et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 227: 120254.
- [26] 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 ZH 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.
- [27] 李鼎鑫. 复杂环境下移动机器人路径规划方法研究与应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
LI D X. Research and application of path planning methods for mobile robots in complex environments[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [28] 苏毅, 吴文欢, 李鼎鑫. 基于双分辨率栅格地图的机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 86-100.
SU Y, WU W H, LI D X. Research on robot path planning based on dual-resolution grid maps[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 86-100.
- [29] 郭聚刚, 于军琪, 冯春勇, 等. 基于改进 A* 算法的机器人不平坦地形全局路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(5): 309-322.
GUO J G, YU J Q, FENG CH Y, et al. Global path planning for robots on uneven terrain based on improved A* algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(5): 309-322.
- [30] 赵倩楠, 黄宜庆. 融合 A* 蚁群和动态窗口法的机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 28-38.
ZHAO Q N, HUANG Y Q. Robot path planning based on A* ant colony and dynamic window algorithm [J].

Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 28-38.

- [31] 沈跃, 孙浩, 沈亚运, 等. 基于改进 A* 算法的水空两栖机器人多目标路径规划[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 62-70.
SHEN Y, SUN H, SHEN Y Y, et al. Multi-objective path planning of water-air amphibious robots based on improved A* algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(6): 62-70.
- [32] 朱洪波, 殷宏亮. 分层平滑优化 A* 引导 DWA 用于机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 155-168.
ZHU H B, YIN H L. Hierarchical smoothing optimization A* -guided DWA for robot path planning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 155-168.

作者简介



寇志伟(通信作者), 2006 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 2012 年于内蒙古工业大学获得硕士学位, 2018 年于中北大学获得博士学位, 现为内蒙古工业大学副教授, 主要研究方向为导航与控制、电工理论与新技术。

E-mail: kouzhiwei@imut.edu.cn

Kou Zhiwei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2006, M. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2012 and Ph. D. degree from North University of China in 2018, respectively. Now he is an associate professor in Inner Mongolia University of Technology. His main research interests include navigation and control and electrical theory and new technologies.



景高乐, 2020 年于山东理工大学获得学士学位, 2024 年于内蒙古工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为模式识别与智能系统。

E-mail: 1026502667@qq.com

Jing Gaole received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2020 and his M. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2024. His main research interests include pattern recognition and intelligent systems.