

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.056

风电场集电线路无人机自主巡检的 CRS-RRT 航迹规划算法

王梓屹

(大唐山西新能源有限公司,山西 太原 030006)

摘 要:由于风电场复杂的线路布局和地形条件,使得无人机难以准确识别并跟踪线路,导致规划的巡检航迹较长,影响巡检效率。为此,提出面向风电场集电线路无人机自主巡检的 CRS-RRT 航迹规划算法。基于风电场集电线路区域的地形数据和地理信息构建数字高程模型和障碍物模型;结合动态环境模拟对无人机飞行环境进行建模,并利用无人机性能参数计算无人机避障距离,由此求取相邻两个航迹点之间的距离,确定航迹点位置,完成航迹点集初始化;引入 CRS-RRT 算法对冗余航迹点进行剔除,并平滑与优化巡检航迹,规划最佳巡检路线。实验结果表明:应用所提方法基于不同待巡检几率所生成的航迹点数量低于 100,缩短了航迹长度,提升了巡检效率。

关键词:风电场;集电线路;无人机自主巡检;CRS-RRT 算法;航迹规划

中图分类号:V279 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0287-06

CRS-RRT Path Planning Algorithm for UAV Autonomous Inspection of Wind Farm Collection Lines

WANG Ziyi

(Datang Shanxi New Energy Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract:Due to the complex line layout and terrain conditions in wind farms, it is difficult for unmanned aerial vehicles (UAVs) to accurately identify and track the lines, resulting in long planned inspection paths and reduced inspection efficiency. To address this issue, a CRS-RRT path planning algorithm for UAV autonomous inspection of wind farm collection lines is proposed. A digital elevation model and an obstacle model are constructed based on terrain data and geographic information of the collection line area in the wind farm. Combined with dynamic environment simulation, the UAV flight environment is modeled. Using UAV performance parameters, the obstacle avoidance distance is calculated, thereby determining the distance between two adjacent waypoints and their positions to complete the initialization of the waypoint set. The CRS-RRT algorithm is introduced to eliminate redundant waypoints, smooth and optimize the inspection path, and plan the optimal inspection route. Experimental results show that the number of waypoints generated by the proposed method under different probabilities of required inspection is below 100, which shortens the path length and improves inspection efficiency.

Keywords:wind farm; collection lines; UAV autonomous inspection; CRS-RRT algorithm; path planning

0 引言

风电场通常位于偏远地区,集电线路分布广泛,环境复杂,传统的巡检方法存在效率低、成本高、风险高等问题。因此,使用无人机进行自主检查已成为一种新的解决方案。在常规方法中,无人机巡检通常依赖于手动预设的航路点或固定路线,这不仅缺乏灵活性,而且难以应对复杂和不断变化的路线环境。此外,传统的轨迹规划算法在具有特殊地形和复杂线路结构的风电场收集线等场景中往往性能较差,由此导致检测效率低。因此,研究一种高效的无人机巡检航迹规划技术就显得尤为重要。

文献[1]将弹性 Hebbian 学习规则与神经网络相结合,将无人机的巡检任务和环境信息输入网络,通过网络学习和训练,逐步优化无人机的巡检路径。该方法在规划过程中不需要人工干预,实现了智能路径规划。然而,这种方法在某些极端情况下,无法找到全局最优路径。文献[2]通过地面滤波和 Delaunay 三角剖分处理环境点云,并构建了一个以交叉点为节点、通道为边的树形拓扑图,通过深度优先算法实现路径重新规划。该方法能够适应不同地形环境的特点,具有很强的通用性和灵活性。但此方法仅适用于单一环境与网络,在其他复杂或开放的环境中还需要进一步优化和调整。文献[3]基于无人机的动力学方

作者简介:王梓屹(1985—),男,山西霍州人,工程师,本科,研究方向为电气工程及自动化,WangZiyi688hx@163.com。

程,并考虑了无人机之间的异质性以及安全避障的需求,采用 MASAC 算法来寻求巡检路径规划的近似最优策略。该方法可以使多架无人机学习和协作,提高了任务完成率。但该方法参数调整困难,使得其实际应用效果有限。文献[4]利用航路点信息建立了一个适合描述无人机编队相对状态的旋转坐标系,并根据无人机 3 自由度运动学模型的特点优化了一致性算法,实现了对无人机飞行路径规划。该方法可以根据飞行过程中的变化实时重新规划飞行路径,实时性较好。但如果通信质量差或受到干扰,可能会影响无人机之间的信息交换和协作效果。

针对上述问题,为提高无人机巡检效率,本研究提出了一种用于风电场集电线路的约束随机采样快速探索随机树(constrained random sampling-based rapidly-exploring random tree, CRS-RRT) 航迹规划算法,以期实现无人机在复杂环境中的自主导航和高效巡检。

1 无人机自主巡检航迹规划算法设计

1.1 无人机飞行环境建模

无人机飞行环境通过航拍图像与处理技术生成风电场集电线路区域的数字地图,以模拟无人机飞行时的环境动态变化,能够为无人机航迹规划算法提供线路、塔架和障碍物等空间信息^[5],从而生成满足约束条件飞行路径,保证飞行航迹的合理性。

采用无人机航拍和地面测量等方式采集风电场集电线路区域的地理和气象信息,并以地面中心点为坐标原点,建立三维直角坐标系,引入 K 均值算法将线路位置点进行聚类^[6],计算公式如下

$$C_r = \frac{\varepsilon_c}{v_a} \times \frac{q_f}{g_k} \quad (1)$$

式中: ε_c 表示无人机最远航程距离; v_a 表示无人机 a 最多可执行的巡检任务数量; q_f 表示无人机能够执行的巡检任务集合; g_k 表示风电场面积; C_r 表示聚类中心个数。

将每组的聚类中心作为无人机机巢的位置,结合地形数据构建集电线路区域的数字高程模型^[7],即

$$X_e = \frac{C_r}{b_q} / \left\| \frac{\varpi_d}{F_0} \right\| \quad (2)$$

式中: b_q 表示坐标原点距离测量点的垂直高度; ϖ_d 表示变换函数,用于描述地表高度随水平坐标

变化的函数关系; F_0 表示无人机与障碍物之间的最小距离限制。

根据收集到的障碍物信息和障碍物距离,在三维坐标系中将无人机当作质点处理^[8],由此建立障碍物模型,如图 1 所示。

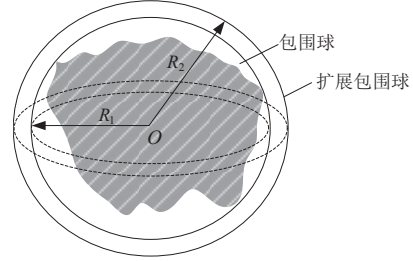


图 1 障碍物建模示意图

图 1 中, R_1 和 R_2 分别表示包围球和扩展包围球的半径,深色部分为障碍物范围。假设障碍物范围内任意一点的坐标为 (x, y, z) , 则障碍物模型的数学表达式可表示为

$$D_a = X_e \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{b_a(R_1 + R_2)} / N_0 \quad (3)$$

式中: b_a 表示障碍物扩展包围球的膨胀系数; N_0 表示障碍物上距离最远两点之间的决策函数。

考虑风速变化与障碍物移动等因素,模拟动态环境^[9],以此对风电场集电线路区域进行建模。表达式如下

$$\Omega = D_a \times \beta_c \times s_t \quad (4)$$

式中: β_c 表示无人机与障碍物之间的安全距离阈值; s_t 表示无人机 t 时刻在空间中的位置。

基于风电场集电线路区域的地形数据和地理信息构建数字高程模型和障碍物模型,结合动态环境模拟生成无人机飞行环境模型,这为后续航迹点集初始化奠定基础。

1.2 无人机巡检航迹点集初始化

无人机巡检航迹点集初始化是指在巡检开始前,根据巡检任务需求、无人机性能以及飞行等多方面因素,初步确定无人机在巡检过程中需要经过的一系列关键位置点^[10]。这些航迹点构成了无人机飞行的基本框架,为后期航迹规划提供了基础。

基于风电场集电线路的巡检目标、范围和精度要求,确定无人机的性能参数^[11],如下式所示

$$\begin{cases} v_a = \frac{\Omega}{\varpi_s \cdot q_v} \\ j_w = \left\| \frac{\sigma_c}{A_e} \right\| \end{cases} \quad (5)$$

式中: Ω 表示无人机飞行环境三维模型; ϖ_s 表示无人机的拍摄角度; q_v 表示无人机到拍摄目标的距离; v_a 表示无人机飞行速度; σ_e 表示巡检区域内障碍物集合; A_e 表示无人机起始航向; j_w 表示无人机转弯半径。

引入球坐标系使得无人机偏转角与俯仰角产生相互关系, 由此得到无人机的避障距离, 即

$$d_y = \frac{v_a}{j_w} \exp\left(-\frac{\delta_r}{T_i \cdot h_q}\right) \quad (6)$$

式中: δ_r 表示偏转角; T_i 表示俯仰角; h_q 表示转换函数。

结合无人机飞行方向的角度, 确定相邻两个航迹点之间的最短距离^[12], 公式如下

$$\begin{cases} x_0 = \frac{d_y}{B_n} \\ L_{i,j} = \sum_{i=1}^n x_0 \times J_w \end{cases} \quad (7)$$

式中: B_n 表示无人机加速度; x_0 表示初始航迹点的位置; n 表示初始规划的航迹点数目; J_w 表示系数矩阵; $L_{i,j}$ 表示第 i 个航迹点和第 j 个航迹点之间的距离。

通过式 (7) 计算每对相邻航迹点之间的距离, 以此确定各个航迹点的具体位置, 完成无人机巡检航迹点集初始化, 便于最终无人机巡检航迹规划的实现。

1.3 基于 CRS-RRT 的无人机巡检航迹生成

通过初始化后的航迹点组成了一条初步的无人机巡检路径, 但是该航迹无法满足无人机的飞行需求, 需要对其进行优化与平滑处理, 获取最佳巡检航迹。

首先初始化 CRS-RRT 算法的相关参数, 包括随机采样点的数量和随机树的生长方向, 并引入人工势场法中的引力场势能函数以引导随机树的拓展方向^[13]。表达式如下

$$V_g = L_{i,j} \times \zeta_0 \times p_a \quad (8)$$

式中: $L_{i,j}$ 表示第 i 个航迹点和第 j 个航迹点之间的距离; ζ_0 表示引力场势能函数; p_a 表示随机采样点的数目。

进一步可得到巡检目标点与预设采样点之间的欧式距离为

$$l_d = \frac{V_g}{\sqrt{F_s/q_f}} \quad (9)$$

式中: F_s 表示势场系数; q_f 表示扩展步长。

将上述生成的航迹点看作随机树的枝节点, 并利用贪婪算法对其进行剪枝优化, 以删除冗余航迹点^[14], 公式如下

$$M_d = l_d \cdot \eta_e \quad (10)$$

式中 η_e 表示目标点与随机点之间的引力。

将引力值小于预设阈值的点视为冗余航迹点, 并予以剔除。对剩余的航迹点进行平滑优化处理^[15], 公式为

$$U_g = \frac{M_d}{\rho_d} \quad (11)$$

式中 ρ_d 表示随机矢量。

进而生成平滑的无人机巡检可行路径, 表达式如下

$$Q(t') = \delta_0 t' + \delta_1 t' + \dots + \delta_m t' \quad (12)$$

式中: δ_m 表示第 m 优化后的航迹点位置; t' 表示飞行时间; $Q(t')$ 表示航迹段。

通过初始化 CRS-RRT 算法的相关参数, 计算巡检任务空间内目标点与随机采样点之间的距离, 并引入贪婪算法对随机树进行剪枝优化, 以删除冗余航迹点, 进一步通过航迹平滑处理, 生成无人机可行飞行路径, 实现风电场集电线路无人机巡检航迹规划。

2 实例论证分析

为了验证上述风电场集电线路无人机自主巡检的 CRS-RRT 航迹规划算法在实现无人机航迹规划中的应用性能, 在上述理论设计基础上, 对本文提出的算法进行性能测试与验证, 并基于实验结果分析所提方法的应用可行性。

2.1 研究背景

本文实验的研究背景为某风电场, 其占地面积为 30 km², 共安装了 28 台风力发电机, 每台发电机的额定功率为 2 MW。这些风机呈阵列式排布, 便于无人机进行巡检作业。

风电场中的集电线路由 35 kV 电缆和架空线路组成, 总长度约 20 km, 升压站位于风电场较居中的位置。这些线路沿着风电场内的道路和草地铺设, 将各台风力发电机产生的电能汇集到升压站, 再经过升压后输送到电网中。风电场俯视图及其集电线路区域布局如图 2 所示。

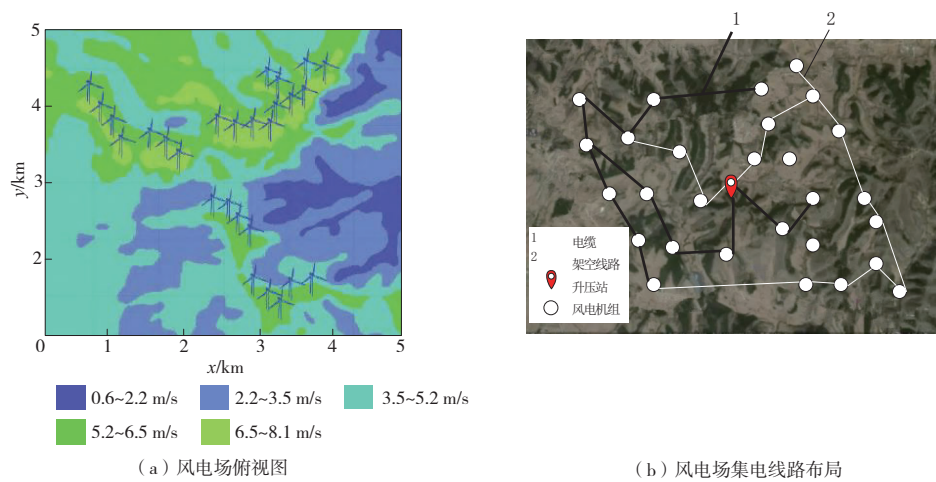


图 2 风电场俯视图及其集电线路区域布局

本文以该风电场为研究背景,针对其集电线路进行无人机巡检,并通过无人机巡检路径规划,分析本文方法的可靠性。

2.2 实验准备

实验中采用大疆经纬 M30 无人机对该风电场集电线路区域进行自主巡检。无人机巡检参数如表 1 所示。

表 1 无人机巡检参数

参数	数值
工作频率/GHz	2.40;5.8
发射功率/dBm	≤20
悬停精度/m	垂直±0.1;水平±0.3
RTK 位置精度	1 cm + 1 ppm(水平); 1.5 cm + 1 ppm(垂直)
最大旋转角速度/(°/s)	俯仰轴 150;航向轴 100
最大俯仰角度/(°)	35
最大上升/下降速度/(m/s)	6;5
最大倾斜下降速度/(m/s)	7
最大水平飞行速度/(m/s)	23
最大飞行海拔高度/m	500
最大可承受风速/(m/s)	12
图像传输距离/km	15

基于无人机的巡检参数设定,采集风电场集电线路区域的地理信息、地形测量数据以及气象数据,对无人机的飞行环境进行建模,如图 3 所示。

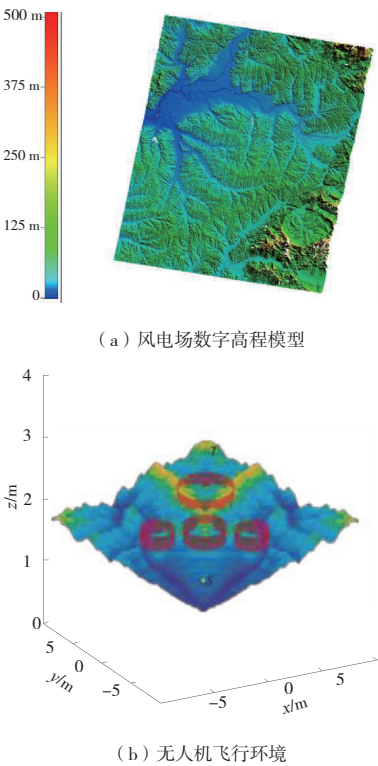


图 3 风电场数字高程模型及无人机飞行环境模型

在无人机飞行三维空间内生成巡检航迹点,并通过航迹平滑与优化,获取最佳巡检路径。

2.3 实验说明

实验平台包括大疆经纬 M30 无人机系统、地面控制站 Android 平板电脑和相关软件平台 OSDK 开发套件。

设定无人机在飞行过程中与集电线路和风力发电机之间的最小安全距离分别为 5 m 和 8 m,以

确保飞行安全;飞行速度为 15 m/s;航摄距离为 20 m;每个目标点拍摄的照片数量为 5 张。

实验过程如下:使用 3D 建模软件根据可见光图像重建风电场的 3D 点云模型;根据风电场的三维点云模型和实验参数设置,规划无人机的飞行路径;在地面控制站输入待检线路的编号和飞行参数,开始无人机起飞。本文采用的 CRS-RRT 算法相关参数设置如表 2 所示。

表 2 CRS-RRT 算法参数设定

参数	数值
随机采样范围	$[-10, 10]$
步长	0.1
目标采样率	0.2
最大迭代次数	50
路径平滑参数	0.02
剪枝次数	10
采样点数量	20
目标点数量	2
随机矢量	0.01

基于以上实验准备与相关参数的设置,对本文提出的无人机巡检航迹规划算法展开性能测试与验证。

2.4 风电场集电线路无人机巡检航迹规划结果

实验中引入文献[2]基于语义拓扑结构的方法(方法 1)、文献[4]基于改进一致性理论的(方法 2)作为本文方法的对比方法。分别采用 3 种方法对该风电场集电线路区域进行无人机自主巡检,各方法规划的巡检路径如图 4 所示。

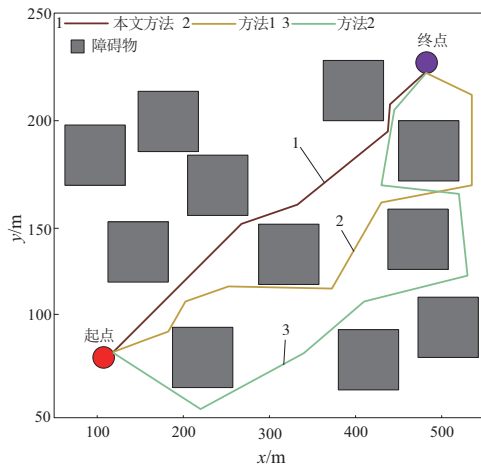


图 4 无人机巡检航迹规划结果

根据图 4 可以看出,分别应用不同方法进行风电场集电线路无人机巡检路径规划,3 种方法生成的巡检航迹均能够避开障碍物,完成巡检任务。但与对照组方法相比,本文方法规划的巡检路径包含的冗余节点较少,同时减少了转向次数,使得巡检航迹长度更短,提高了巡检效率。

2.5 对比实验与分析

为进一步验证本文方法在缩短无人机巡检航迹长度方面的有效性,本次实验对不同方法生成的巡检路径的航迹点数目进行统计与比较,由此分析巡检效率。对比结果如图 5 所示。

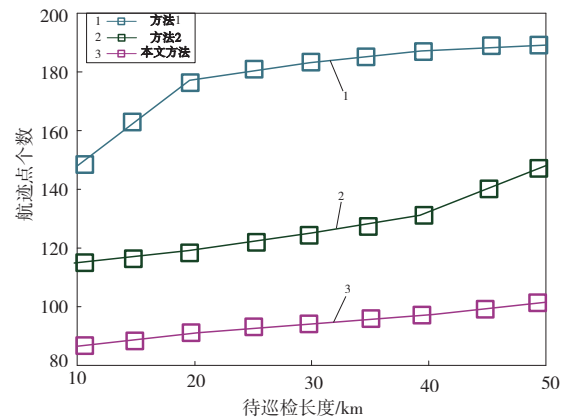


图 5 基于不同方法的巡检路径航迹点数量对比

通过分析图 5 可知,在 10~50 km 的待巡检长度范围内,采用本文方法生成的航迹点数目均少于 100,明显低于对照组方法,表明本文方法能够在初始巡检路径基础上,自动优化航迹,减少不必要的航迹点,缩短巡检路线长度,从而提升了整体巡检速度与效率。

3 结语

本研究通过对 CRS-RRT 轨迹规划算法的深入探索,实现了无人机对风电场集电线路的自主巡检,有效提高了巡检的效率和安全性。本研究不仅为其他类似复杂环境中的无人机路径规划问题提供了有益的参考,对于推动无人机技术在风电场运维领域的广泛应用也具有重要现实意义。

参考文献:

- [1] LI R, ZHANG L, YI C Y, et al. Drone inspection path planning with self-organizing neural network of elastic Hebbian learning rule [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2816(1): 012104.
- [2] 颜玮杉,陈敏,程煌坤,等. 基于语义拓扑结构的井下

- 无人机自主飞行路径规划方法[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(4): 61-66, 73.
- [3] 方城亮, 杨飞生, 潘泉. 基于 MASAC 强化学习算法的多无人机协同路径规划[J]. 中国科学(信息科学), 2024, 54(8): 1871-1883.
- [4] 乔港, 吴宇. 基于改进一致性理论的无人机编队航迹在线规划[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(4): 86-93.
- [5] 景会成, 曹育铭, 葛超, 等. 基于混合策略改进蜣螂优化算法的无人机三维路径规划[J]. 现代电子技术, 2024, 47(13): 144-152.
- [6] 解瑞云, 海本斋. 多策略鼠群优化算法的无人机三维航迹规划[J]. 机械设计与制造, 2024(9): 112-119.
- [7] 段云涛, 毛鹏军, 娄晓恒, 等. 基于改进双向 RRT 算法的无人机三维路径规划[J]. 电光与控制, 2024, 31(7): 13-19.
- [8] 郭志明, 娄文忠, 李涛, 等. 基于改进蝗虫优化算法考虑任务威胁的多无人机协同航迹规划[J]. 兵工学报, 2023, 44(增刊 2): 52-60.
- [9] 谢继武, 席建新. 瞬态搜索金枪鱼优化城市物流无人机路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(12): 3745-3753.
- [10] 舒健生, 周于翔, 郑晓龙, 等. 基于深度强化学习的无人机实时航迹规划[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(12): 133-141.
- [11] 傅晋博, 张栋, 王孟阳, 等. 面向目标定位精度提升的无人机航迹规划[J]. 兵工学报, 2023, 44(11): 3394-3406.
- [12] 陈先亮, 黄元君, 范勤勤. 基于多模态多目标进化算法的无人机三维路径规划[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(11): 32-39.
- [13] 张世良, 郭彤彤, 郑立华. 数字孪生技术下的输电线路无人机巡检数据聚合模型[J]. 电子设计工程, 2024, 32(17): 102-106.
- [14] 陈兴, 邴超. 面向电力设施的无人机多目标监测与反制系统[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 220-224.
- [15] GANAPATHY R, THRON C. Optimized real time single-drone path planning for harvesting information from a wireless sensor network[J]. Drones and Autonomous Vehicles, 2024, 1(3): 10007.

收稿日期: 2024-12-02