

中文引用格式:胡小兵,卢泽,李航,等. 基于实时备降安全约束的无人机风电场巡检路径规划[J]. 中国安全科学学报,2025,35(2):28-39.

英文引用格式:HU Xiaobing, LU Ze, LI Hang, et al. Unmanned aerial vehicle wind farm inspection path planning based on real-time potential landing safety constraints[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2):28-39.

基于实时备降安全约束的无人机风电场 巡检路径规划*

胡小兵¹教授, 卢泽¹, 李航¹, 周航²副教授

(1 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300; 2 中国民航大学
中欧航空工程师学院, 天津 300300)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.02.0865

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助(62201577); 天津市自然科学基金资助(23JCQNJC00230, 23JCQNJC00080); 中央高校基本科研业务费(3122019057)。

【摘要】 为提高无人机(UAV)风机巡检过程的巡检效率和安全性,合理规划无人机巡检路径,提出一种基于实时备降安全约束的无人机巡检路径规划方法。首先,基于风速风向影响下无人机的动态续航能力、航迹备降等约束条件,建立备降区安全性计算模型,评估巡检路径安全性,建立安全约束;然后,针对无人机巡检路径长度的目标函数,提出基于涟漪扩散算法(RSA)特征的最优巡检路径规划方法,依据RSA算法离散式、多智体的方法特点,在安全性约束下有效求解无人机风电场巡检的旅行商问题(TSP),规划风电场巡检路径;最后,对于不同算法进行对比试验和风电场仿真试验。结果表明:实时备降安全约束模型能够综合不同的风险因素计算出安全路线,提高巡检路径的安全性,RSA算法则能够在保证精确度的条件下快速求解安全约束下的风电场巡检TSP问题,提高巡检路径规划水平。

【关键词】 实时备降; 安全约束; 风电场; 无人机(UAV); 巡检; 路径规划; 涟漪扩散(RSA)算法; 旅行商问题(TSP)

Unmanned aerial vehicle wind farm inspection path planning based on real-time potential landing safety constraints

HU Xiaobing¹, LU Ze¹, LI Hang¹, ZHOU Hang²

(1 College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China; 2 College of Electronic Information and Automation,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to improve the inspection efficiency and safety of UAV inspections for wind turbines, a reasonable planning of the UAV inspection path was proposed. A method for UAV inspection path planning based on real-time emergency landing safety constraints was introduced. First, a safety calculation model for emergency landing areas was established. It based on the dynamic endurance capacity of UAV affected by wind speed and direction, as well as constraints such as flight path emergency landing, to assess the safety of the inspection path and establish safety constraints. Then, regarding the

objective function of the length of UAV inspection path, an optimal inspection path planning method based on the characteristics of RSA was proposed. This method effectively solved TSP for UAV inspections in wind farms under safety constraints, utilizing the discrete and multi-agent characteristics of RSA algorithm to plan the inspection path for wind farms. Finally, comparative experiments and simulations of wind farms were conducted for different algorithms. results indicated that the real-time emergency landing safety constraint model can comprehensively calculate safe routes by integrating various risk factors, enhancing the safety of the inspection path. RSA algorithm can quickly solve TSP problem for wind farm inspections under safety constraints, improving the level of inspection path planning.

Keywords: real-time emergency landing; safety constraint; wind farm; unmanned aerial vehicle (UAV); inspection; path planning; ripple spreading algorithm (RSA); traveling salesman problem (TSP)

0 引言

随着我国风电行业的快速发展,风电安全生产及风机巡检成为该领域的核心议题。风电场数量的激增及巡检环境的日益复杂,为巡检工作带来了前所未有的挑战。在当前低空经济蓬勃发展背景下,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术作为一种前沿且高效的技术手段,已成为电力行业的重要巡检手段之一^[1]。同时,这也对无人机巡检的安全性提出了更为严格的要求。

目前,该行业多采用风机停机巡检的无人机巡检方式,无人机每单次起飞巡检一台风机,效率低且经济成本较高。为寻求高效率、安全的巡检方式,将无人机巡检路径规划问题等同于一个小型的旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)进行研究。TSP作为一个完全组合路径优化问题,一直是计算机算法理论研究的热点话题。在现实工程中,许多优化问题可以建立TSP模型,各种针对该问题的算法也层出不穷^[2]。目前,求解TSP的算法主要分为精确算法和启发式算法2大类,两者的矛盾在于求解效率和求解精度的平衡。精确算法虽能保证求解的精度,但在大规模问题时效率不高。启发式算法能在较短时间内得到可行解,但存在易陷入局部最优、收敛速度较慢等问题。多年来学者们根据TSP问题的特性改进与应用了不同启发式算法,DENG Yanlan等^[3]提出了模拟退火混合细胞遗传算法;EZUGMU等^[4]提出了融合模拟退火的共生生物搜索优化算法;余丽等^[5]提出了遗传禁忌搜索算法;陈科胜等^[6]提出了自适应升温模拟退火算法;刘海龙等^[7]提出了改进融合灰狼优化算法等。在无人机的巡检安全与路径规划结合方面,张树卓等^[8]考虑风力对巡检无人机的影响,构建了在航程约束下无人机在常值风场下的巡检飞行时间代价模型;韩

鹏等^[9]结合蚁群算法探究距离和安全双重约束条件下的航路规划方法;王猛等^[10]将时间窗和三维空间作为约束条件,在考虑安全威胁的情况下使用非支配排序遗传算法求解航迹规划问题。但这些研究不适用于风电场的TSP问题模型,并且鲜有对于备降安全约束做出描述文献研究。

因此,笔者拟通过综合考虑无人机在风向风速影响下的有限续航能力,以及备降区域的安全性约束条件,以无人机巡检路径长度作为优化目标,构建TSP优化模型;并依据TSP问题的求解逻辑,设计涟漪扩散算法(Ripple Spreading Algorithm, RSA),以更好地提高巡检路径求解的效率和精确度,同时确保能够有效规避潜在的安全风险,保障巡检作业的安全顺利进行。

1 基于备降安全的路径规划问题模型

在规划无人机风电场巡检路径时,需要考虑对每台风机不可重复巡检等一系列约束条件,在保证实时备降安全性前提下,为风电场内分布在不同位置的所有风机规划最短的巡检路径,使得在最短时间、最短飞行距离内对规定区域内的所有风机完成巡检。由于在实际无人机巡检过程中情况较为复杂,故做如下假设:

1) 无人机备降的安全距离应由具体的无人机性能决定,常在无人机的基建手册中规定,以保证飞行器的安全备降和可作业时长。并且,由于风电场风速大、风向相对变化小,无人机续航距离应由具体风速风向影响下的航程计算公式计算。

2) 由于风电场规模较大,无人机无法一次起飞完成对风场内所有风机的巡检,需将风机依据无人机续航能力分组,一般6~13台为一组。且无人机沿预定航线飞行,包括上升、巡航和下降3个阶段,故在无人机降落时,规定无人机会先水平飞行到降

落点上方,再进行垂直降落。

3) 无人机巡检路径长度仅包括在风机间的飞行路径长度,在实际巡检过程中,无人机还会针对每一台风机进行绕飞巡检,具体绕飞巡检长度根据风机风轮半径进行计算,所以巡检路径规划长度应小于无人机续航的 10%。

图 1 为安全约束前后路径规划的具体示例模型,在模型中将不满足安全约束的路径定义为风险路径,满足安全约束的路径定义为安全路径。对于坐标系中 $\{(0, 2), (3, 5), (3, 3), (3, 0), (6, 4), (5, 1)\}$ 中 6 个点生成最短路径,每 2 点间的距离即为路径成本,其中,1 号点为起点,路径需遍历 6 个点之后回到起点,以完成对所有节点的巡检过程,图 1 中,所有节点间的路径都满足安全需求,算法计算的最优路径为 1-3-2-4-5-6-1,而图 2 中由于 2 号点与 5 号点之间和 3 号与 6 号点的路径不满足安全需求,在路径选择时,不能选择风险路线作为路径,故对其进行不可达约束,所生成的最短 TSP 路径发生了改变,路径为 1-2-3-4-5-6-1。

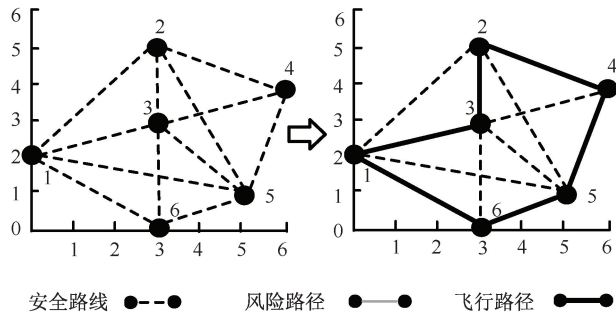


图 1 安全约束前路径规划示例

Fig. 1 Example diagram of path planning before safety constraints

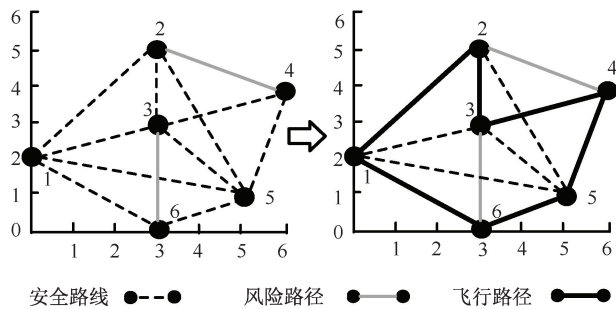


图 2 安全约束下路径规划示例

Fig. 2 Example diagram of path planning with safety constraints

无人机在实时备降安全约束下的巡检路径规划问题可以描述为:无人机需在满足安全性约束的航线上,以最短距离对规定的风机进行绕飞巡检。现

给定路网 $G = \{N, E\}$, 其中, $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 为节点集合; n_n 为节点个数; $E = \{e_{ij} | i \in N, j \in N\}$ 为链接集合,其中囊括了所有的相连节点间的链接; e_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的链接; c_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间路径距离。是否实际可通行由 $x_{ij} \in (0, 1)$, $(i, j) \in G$ 决策变量所决定,表示节点 i 和节点 j 之间的链接是否可达,起点和终点定义为同一点 n_k 。 $s_{ij} \in (0, 1)$, $(i, j) \in G$ 为是否是安全路径的决策变量,其取值由安全性约束的计算决定,当 s_{ij} 取 0 时,不能够作为通行路径,即 x_{ij} 取 0; 当 s_{ij} 取 1 时,可作为通行路径, x_{ij} 可以取 0 或 1。

目标函数可以描述为从起点出发遍历所有的节点之后回到终点所经过的距离最短的路径:

$$\min \sum_{i \in G} \sum_{j \in G, i \neq j} c_{ij} x_{ij}$$

具体的约束条件包括,在最短路径规划中的任一路径都应满足安全性,即每一条路径的安全约束因素 s_{ij} 都取 1, 表示为下式:

$$s_{ij} = 1, \forall (i, j) \in G \quad (1)$$

在巡检过程中,每台风机只能由一个风机到达,并且每个风机只能到达一个风机,即:

$$\sum_{j \in G, j \neq i} x_{ij} = 1, \forall i \in G \quad (2)$$

$$\sum_{i \in G, i \neq j} x_{ij} = 1, \forall j \in G \quad (3)$$

在求解过程中,避免在求解 TSP 问题过程中子集的产生,其表达式为:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S, i \neq j} x_{ij} \leq |S| - 1, \forall S \in V, |S| \geq 2 \quad (4)$$

式中: S 为风机集合; $|S|$ 为集合 S 中的元素个数。

无人机每次巡检所消耗的续航里程不可超过无人机的续航能力,见下式:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij}(t) x_{ij}^k \leq E, \forall k \in K \quad (5)$$

无人机在受风影响下实际消耗的续航里程,如图 3 所示,设有 2 航点 i 和 j , 其距离为 d_{ij} , 无人机风阻系数和抗风能力分别为 α 和 β , 此时风速为 $v(t)$, 无人机航向与风向夹角为 $\gamma(t)$ 。无人机飞过相同航段,由于风向风速以及飞行方向的不同,无人机所消耗的续航里程也不同。

无人机匀速飞过 2 航点所需要的时间、无人机在受风影响下实际消耗的续航里程和无人机完成所有巡检任务飞行的总里程,分别见下式:

$$\Delta t_{ij} = \frac{d_{ij}}{V} \quad (6)$$

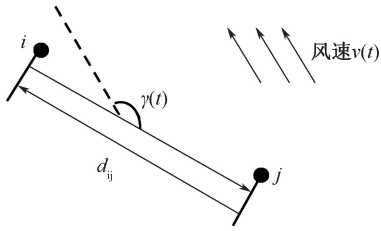


图 3 受风影响的无人机航程

Fig. 3 UAV range affected by wind

$$c_{ij}(t) = d_{ij} \times \left(1 - \alpha \cos \gamma_{ij}(t) \times \frac{v(t)}{\mu} \right) \quad (7)$$

$$D = \sum_{k \in K} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij}(t) x_{ij}^k \quad (8)$$

对于不同高度的风速,应用风廓线公式进行计算,其中, V_h 表示高度为 h 处的风速, V_f 为参考高度 h_f 处的风速, α 为幂律指数,对于平坦、少树、少建筑的地方, α 通常取 0.14,其表达式为:

$$V_h = V_f \left(\frac{h}{h_f} \right)^\alpha \quad (9)$$

2 安全性约束

安全性约束主要强调无人机在巡检过程中,当遇到影响无人机运行安全的众多要素时,如气象要素、地理要素和通信要素等^[11],能够在安全时间内降落到备降区域,从而避免动态环境中未知意外导致的无人机损坏,及无人机损坏带来的意外伤害和财产损失,将无人机整个巡检过程保持在可控的飞行范围之内。针对无人机的飞行习惯和飞行规则,提出一种基于三维空间内的飞行路径到不规则图形备降区域内距离最近点的计算方法,其基本流程如图 4 所示。

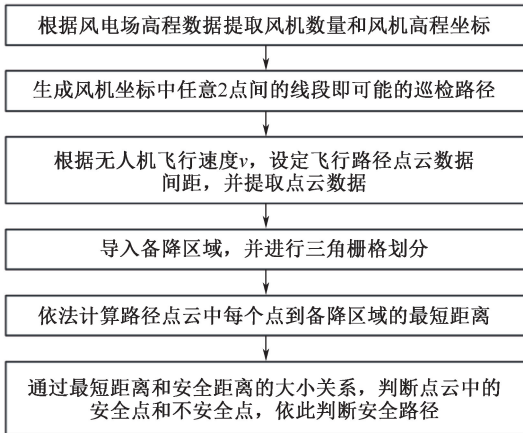


图 4 安全性约束流程

Fig. 4 Safety constraints flowchart

2.1 备降区的定义

在备降区的算法设计中,规定无人机在巡检航

线的任一位置都具有在备降航程之内的备降区域供无人机进行紧急备降,则将该路线定义为安全路线。同时在实际备降过程中优先选择最近的备降区域进行紧急备降。备降区范围在实际规划时,由于风电场多位于复杂自然环境中,备降区的选择受限于地形与成本,应依据风场的地形特征,实地勘测选定的开阔地带(如平地、公路、草地)作为备降区域。图 5 展示了稻田风场地形中的宽敞道路,并设为备降区域,供巡检无人机备降。

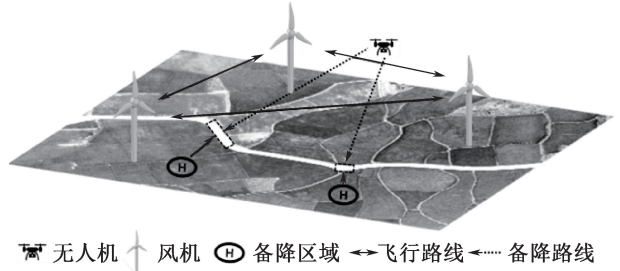


图 5 实时备降模拟

Fig. 5 Real-time potential landing simulation

鉴于备降区形态和面积的不规则性,将其细分为若干面积均衡的小三角形,以实现高效的几何建模与安全性精细计算。如图 6 所示,在 python 中使用 scipy 库的 Delaunay 函数对输入的不规则图形进行三角剖分^[12],并提取三角形栅格化后的每个小三角形的顶点坐标。通过将不规则图形进行三角剖分,简化了复杂区域的计算难度,为无人机备降区的安全性评估提供了更为精确的数学基础。

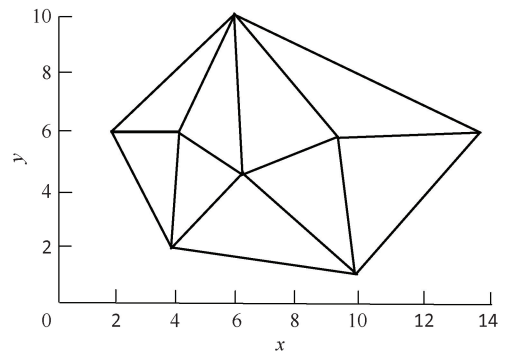


图 6 三角剖分

Fig. 6 Three-dimensional section diagram

2.2 路径安全性判断原理

安全距离的计算即无人机沿规划路径飞行时,能否在安全时间内返回至备降区域。鉴于无人机尺寸与飞行速度的差异,对安全距离的需求也不同。

由于路径理论上由无限多个点组成,直接计算将增加数据的冗余度,所以保障安全性的前提下,采用路径点云提取方法简化处理。假设 2 航点间距离

为 L , 以 d 作为路径点云间距, 即在距离为 L 的线段上每隔 d 间距提取一个路径点进行到备降区域的安全距离计算。在此过程中, 优先评估与当前路径点距离较近的备降区域, 一旦满足备降条件即终止当前计算, 并继续对下一路径点执行相同流程, 路径点云提取策略如图 7 所示。

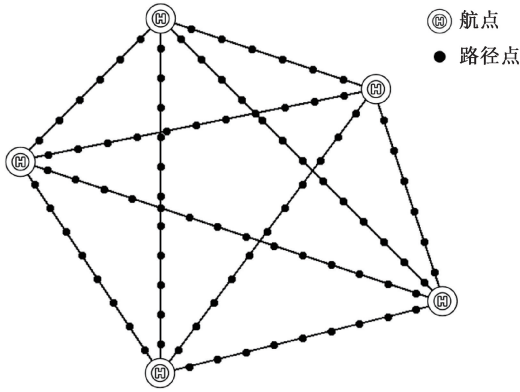


图 7 路径点云提取

Fig. 7 Path point cloud extraction

有关路径点到备降点的距离 f , 提出以下计算方法: 假设路径点为 p , 在 xy 平面内的投影点为 p' , 首先判断 p' 是否在备降区域内, 路径点的集合为 $V = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 备降区域三角形的集合为 $S = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, 若计算 $p'(x, y)$ 是否在三角形区域 g_1 内, 设 g_1 的 3 个顶点分别为 $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$ 对平面内任意一点都有:

$$p' = A + u \cdot (C - A) + v \cdot (B - A) \quad (10)$$

$$\text{假设: } v_0 = C - A, v_1 = B - A, v_2 = P - A$$

计算:

$$u = \frac{((v_1 \cdot v_1)(v_2 \cdot v_0) - (v_1 \cdot v_0)(v_2 \cdot v_1))}{((v_0 \cdot v_0)(v_1 \cdot v_1) - (v_0 \cdot v_1)(v_1 \cdot v_0))} \quad (11)$$

$$v = \frac{((v_0 \cdot v_0)(v_2 \cdot v_1) - (v_0 \cdot v_1)(v_2 \cdot v_0))}{((v_0 \cdot v_0)(v_1 \cdot v_1) - (v_0 \cdot v_1)(v_1 \cdot v_0))} \quad (12)$$

若 $u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1$, 则 p' 点位于三角形 g_1 内部, 在取 ' $=$ ' 时, p' 点位于三角形边界上, 在文中也判断为位于三角形内部, 则路径点 p_1 到备降区 g_1 的距离为 $f = h$, 否则 p_1 则位于三角形 g_1 之外。重心坐标法如图 8 所示。

若 p' 点位于三角形之外, 则计算 p' 点到三角形 g_1 最近的那条边的距离, 依据平面内到直线的距离公式, 点到 AB, BC, CA 的距离分别为:

$$d_{AB} = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y) - (x_1 - x)(y_2 - y_1)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (13)$$

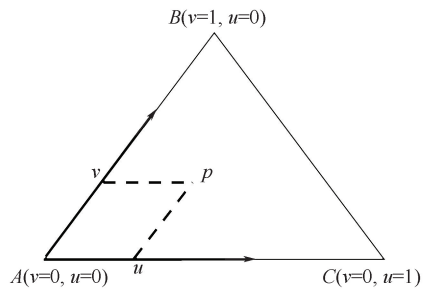


图 8 重心坐标法

Fig. 8 Center of gravity coordinate method

$$d_{BC} = \frac{|(x_3 - x_2)(y_2 - y) - (x_2 - x)(y_3 - y_2)|}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \quad (14)$$

$$d_{CA} = \frac{|(x_1 - x_3)(y_3 - y) - (x_3 - x)(y_1 - y_3)|}{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}} \quad (15)$$

$$d_{\min} = \min(d_{AB}, d_{BC}, d_{CA}) \quad (16)$$

路径点 p_1 到备降区 g_1 的距离为 p_1 的高度 h 加上点到三角形的最短距离 d_{\min} , 即 $f = h + d_{\min}$ 。当安全距离为 m 时, 若两航点间任一路径点到备降点的 $f > m$, 则该 2 航点间的路径 s_{ij} 取 0 即为风险路径; 若 2 航点间的路径点所对应的所有 $f < m$, 则该 2 航点间的路径 s_{ij} 取 1 即为安全路径。对路径点 $V = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 依次进行到备降区的距离计算, 其中, 点集 V 所对应的距离集合为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 并依次判断路径的安全性。

3 RSA 设计

3.1 基于 RSA 求解 TSP 问题的的算法设计

RSA 是一种启发式优化算法^[13], 它通过模拟涟漪在水面上的扩散过程进行搜索, 涟漪以相同的速度扩散, 优先到达最近的节点, 然后新的节点将会产生新的涟漪继续扩散。这一优化原理可以具体地应用于解决 TSP 问题, 其自适应、并行化、基于多智体的算法特点, 能够有效地适用于中小规模 TSP 问题的求解和局部最优解的搜索, 提高算法的鲁棒性, 为产生全局最优路径提供理论性保证。

将 RSA 应用于求解 TSP 问题, 根据 TSP 问题特性设计微观智体的行为(即节点如何产生涟漪)和宏观终止条件(即涟漪接力赛何时结束), 其基本流程如图 9 所示。

针对实时备降安全约束条件下的风机节点间路径巡检规划问题, 旨在通过融合风机节点与备降节

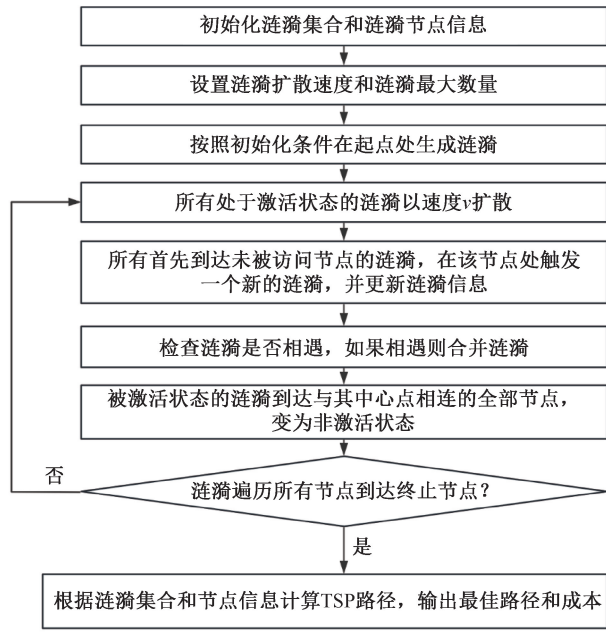


图 9 RSA 流程

Fig. 9 RSA flow chart

点的安全性评估机制(基于第 3 节阐述的安全性计算原理),对潜在巡检路径进行安全性分析。在确保所有路径均满足实时备降安全要求前提下,采用 RSA 算法优化路径规划策略,具体实施流程概述如下,流程中使用的符号说明见表 1。

表 1 RSA 符号说明

Table 1 RSA notation description

| 变量符号 | 含义 |
|---------------|---|
| G | $G = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 网格节点坐标集合 |
| n_k | TSP 问题的起始和终止节点 |
| $S(n_i, n_j)$ | 表示 n_i 和 n_j 节点间的路径为风险路径 |
| c_{ij} | 表示 n_i 和 n_j 节点间路径的距离 |
| F | 节点间的路径距离集合 |
| v | 涟漪的传播速度 |
| D_{\max} | 涟漪的最大传播范围,等于最大节点间距离 |
| Ω_A | 处于激活状态涟漪的集合 |
| Ω_S | 处于等待状态涟漪的集合 |
| E | $E = \{e_{1j}, e_{2j}, \dots, e_{ij}\}$ 为链接集合 |
| R_n | 产生的第 n 个涟漪,按时间先后顺序产生 |

步骤 1:初始化路网,给定 TSP 问题的网格节点坐标集合 G 、起始网格点 n_k 及不满足安全约束的风险路径 $S(n_i, n_j)$,并计算出节点间的路径距离集合 F 。

步骤 2:初始化各涟漪状态,设置涟漪的扩散速度 $v = \min c_{ij}$ 和涟漪的最大传播范围 $D_{\max} = \max c_{ij}$,并开始记录每个节点的涟漪信息,即表中 8~9 行,涟漪 R_1 从起点开始,通过网格向外扩散涟漪范围随时间增加,跟踪记录每个节点上新触发的涟漪数量

和其对应的涟漪编号 R_n ,根据其涟漪半径和网络链接情况触发新的涟漪,更新涟漪的状态和路径信息,包括涟漪的半径,到达每个节点的总代价等。

步骤 3:在涟漪扩散过程中由于将 $S(n_i, n_j)$ 的距离视为无穷大,从而不选择其作为步进路径,检查涟漪是否已经覆盖了所有节点或超出了节点最大传播范围 D_{\max} ,如超过则涟漪停止。

步骤 4:算法会不断检查是否已经找到了覆盖所有节点的路径,当覆盖了所有节点并且路径当涟漪传播到达终止节点 n_k 时,记录下涟漪的传播路径。

步骤 5:检查是否存在 2 个涟漪在网络链接的中间相遇。如果 2 个涟漪在链接的中间相遇,并且它们的涟漪节点数之和等于网络节点数加 1,并且它们的涟漪半径之和大于或等于链接的 2 个节点之间的距离,那么说明发现了一条完整的 TSP 路径。

步骤 6:将所有 TSP 路线和成本存储到 Result 结构体中,取路径成本最小路线输出为 TSP 路径。

3.2 算法示例

图 10 为 RSA 求解安全约束下 TSP 问题的具体示例。RSA 的涟漪接力赛从 1 号点处的涟漪 R_1 开始, R_1 依次到达节点 3、4、2、5,并依次触发新的涟漪 (R_2, R_3, R_4, R_5), R_1 消失,因为它已经到达了与 1 号点相连的所有节点。产生的涟漪继续扩散, R_2 到达节点 2,在节点 2 处触发新的涟漪 R_6 , R_6 应到达节点 1、3、5,但由于这条路径已经到达过节点 1 和 3,故无法在节点 1 和 3 处触发新的涟漪,又因为限制了节点 2 和节点 5 之间的链接, R_6 也无法在节点 5 处触发新的涟漪, R_6 将继续到达节点 4 触发新的涟漪。节点 4 产生的涟漪将到达节点 5 触发新的涟漪,节点 5 产生的涟漪将继续扩散到达节点 1 从而生成一条完整的 TSP 路径,即 1-3-2-4-5-1。在涟漪的扩散过程中,涟漪不会到达路径中记录的节点和不满足安全约束的节点,且每到达一个节点,都会使路径的节点数减 1,直至遍历所有节点后,最后一个节点产生的涟漪将会回到原点。在涟漪扩散的求解过程中,会有多个涟漪同时进行扩散从而计算最优路径,直至计算完所有路径之后,将停止扩散,但会优先输出最优路径。文中共有 60 条安全 TSP 路径,其中最短路径为 1-2-3-5-4-1。

3.3 算法的最优性和复杂性分析

对于求解 TSP 的 RSA 的最优性和复杂性,有如下理论保证。

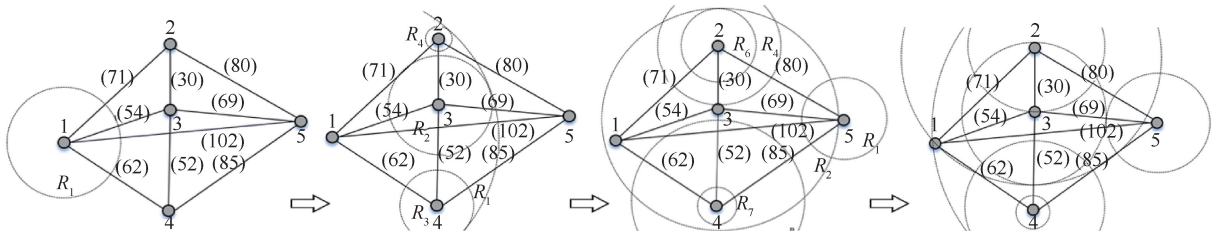


图 10 RSA 求解安全约束下 TSP 问题的示例

Fig. 10 Example of RSA solving TSP with safety constraints

定理 1:从起点出发,最先遍历所有节点回到起点的涟漪所经过的路径具有最优性。

证明:RSA 通过恒定的涟漪扩散速度 v 扩散,在 TSP 问题中,节点间的链接长度是一定的,根据 RSA 优化思想,每个节点产生的涟漪都会同时进行扩散,它们总是先到达最近的节点,即使有些链接被限制,但路径搜索原理仍然一致。节点位置、链接长度和扩散速度是一定的,首先遍历所有节点回到起点的涟漪所经过的路径必定是经过 TSP 的最短路径,定理 1 得证。

定理 2:RSA 会对解空间进行优化。

证明:RSA 在寻优过程中,不同的涟漪进行扩散会计算出不同长度的 TSP 路径,但总会优先输出

最优的路径,如定理 1 所证,当该路径输出后,算法继续计算可能路径的子问题,若子问题的路径长度计算值达到最优解长度,但仍未生成完整的 TSP 路径,将停止对于该子问题的计算,即只计算是否存在由于最优解长度的解,从而缩小搜索的解空间。RSA 寻优过程如图 11 所示,以该网格点的 3 条 TSP 路径为例,在计算图 11a 路径网格的 TSP 路径时,会优先输出图 11b 中的 1 号路径,并记录路径长度,从而在计算第 2、3 号路径时,由于路径长度大于 1 号路径,则不会计算完整的 TSP 路径,从而缩小搜索的计算量,定理 2 得证。同时在与穷举算法对比时,该定理也为 RSA 算法的计算更优性提供了保证。

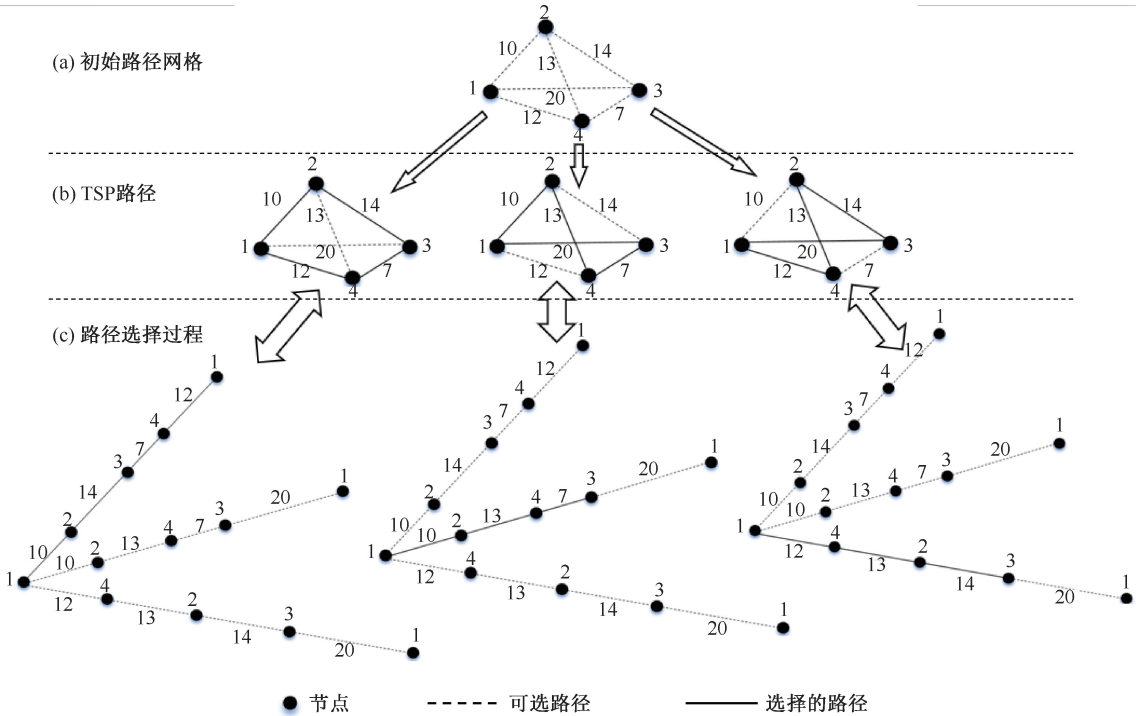


图 11 RSA 寻优过程

Fig. 11 RSA optimisation process diagram

定理 3:RSA 的计算复杂度为 $O(n_1 \times n_e \times n_T)$, 其中, n_{atu} 为涟漪通过路网中链接的平均时间。

证明:在 RSA 中,涟漪通过在链接上进行扩散,并通过对比涟漪和链接的长度,来决定是否产生新

的涟漪。假设网格 G 拥有 n_1 个节点,每个节点平均有 n_e 条链接相连,每个涟漪平均花费 n_{att} 个模拟时间通过一条边,其中起点最多可以产生 n_e 个涟漪。终点与起点为同一点,并且不会再次产生涟漪,其他每个节点产生涟漪的数量不会超过 n_e 。那么基于 RSA 的路径寻优过程会执行 $n_e \times n_T + (n_1 - 1) \times n_e \times n_T$ 次计算,其计算复杂度为 $O(n_1 \times n_e \times n_T)$ 。

4 算法测试分析

4.1 大规模随机对比试验

假设每组平均拥有 N 个节点,其中每 2 个节点相连。选取穷举算法和遗传算法进行对比试验。3 种算法在相同的网络中运行,综合对比得到的 TSP 路径长度、运算效率,并提出以下对比条件^[14]。

1) 完全随机网络。定义网络的节点数量和结构信息,依据网格生成理论,随机生成固定数量的节点,供 2 种算法进行试验。

2) 网格状网络。该矩形网络拥有行和列,每个节点只与其周围的节点相连,路径长度定义为实际的空间距离。

3) 规定限制链接。试验在安全约束下进行,将限制风险链接,在 3 种算法中均给出限制链接,并在算法试验规定限制链接禁止通行。在测试中使用节点总数 $N = \{5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20\}$ 。

穷举法是一种精确算法,其会枚举所有解空间从而找到最优解,但其计算复杂度和空间复杂度较高,不适用于大规模的 TSP 问题。遗传算法是一种群体性算法,具有一定的自组织、自适应和自学习性,可以同时处理多群体中的多个个体,但对于好的初解具有一定依赖性。实际应用中,种群大小和迭代次数的选择对算法性能和解决问题的质量有很大影响,因此,需要在效率和解的质量之间权衡,选取 2 种参数的遗传算法进行对比,2 组参数分别设定为:第 1 组:初始化种群数目 $N=200$,染色体基因维数为 $L=31$,最大进化代数 $G=1\ 000$;第 2 组:初始化种群数目 $N=400$,染色体基因维数为 $L=31$,最大进化代数 $G=2\ 000$ 。具体的对比组数设置见表 2。

表 2 对比组数设置

Table 2 Comparison group setting

| 节点数量/个 | 限制链接 |
|----------------|-----------------|
| 5 | 1—5,2—4 |
| 10、11、12 | 1—5,6—7,3—8 |
| 13、14、15 | 2—3,4—6,1—9 |
| 16、17、18、19、20 | 3—5,4—7,1—6,2—8 |

对比试验结果见表 3。并增加了 15 和 20 个节点的以 RSA 解为初值的遗传算法试验,且没有优化计算所得的路径长度,仍为 7 883.196 6 和 8 435.145 6 m,和 RSA 算法的结果一致。

表 3 对比试验结果

Table 3 Comparison of experimental results

| 节点数量 | 对比参数 | 穷举算法 | RSA 算法 | 遗传算法 (第 1 组) | 遗传算法 (第 2 组) |
|------|----------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 5 | 路径长度/m | 4 920.455 7 | 4 920.455 7 | 4 920.455 7 | 4 920.455 7 |
| | 平均计算时间/s | 0.003 6 | 0.062 5 | 0.204 6 | 0.204 6 |
| 10 | 路径长度/m | 6 302.533 4 | 6 302.533 4 | 6 302.533 4 | 6 302.533 4 |
| | 平均计算时间/s | 1.703 1 | 0.328 1 | 0.343 7 | 1.451 6 |
| 11 | 路径长度/m | 6 312.800 3 | 6 312.800 3 | 6 312.800 3 | 6 312.800 3 |
| | 平均计算时间/s | 18.904 0 | 0.3714 | 0.380 6 | 1.677 1 |
| 12 | 路径长度/m | — | 6 518.413 2 | 6 995.178 | 6 518.413 2 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 0.609 4 | 0.437 5 | 1.698 9 |
| 13 | 路径长度/m | — | 7 102.741 8 | 7255.3917 | 7179.808 6 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 0.640 6 | 0.454 7 | 1.821 5 |
| 14 | 路径长度/m | — | 7 551.191 3 | 7703.8413 | 8212.586 8 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 2.625 0 | 0.447 3 | 2.162 9 |
| 15 | 路径长度/m | — | 7 883.196 6 | 8 111.321 7 | 7 969.666 8 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 3.875 0 | 0.450 6 | 1.885 3 |
| 16 | 路径长度/m | — | 8 224.882 9 | 8 290.993 4 | 8 290.993 4 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 12.578 1 | 0.504 2 | 2.106 1 |
| 17 | 路径长度/m | — | 8 295.178 0 | 8 582.807 7 | 9 186.072 6 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 43.328 1 | 0.486 5 | 2.096 5 |

续表 3

| 节点数量 | 对比参数 | 穷举算法 | RSA 算法 | 遗传算法 (第 1 组) | 遗传算法 (第 2 组) |
|------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 18 | 路径长度/m | — | 8 347. 271 1 | 8 654. 3731 | 8 347. 271 1 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 89. 187 5 | 0. 580 9 | 2. 219 3 |
| 19 | 路径长度/m | — | 8 424. 510 6 | 9 725. 751 1 | 9947. 725 4 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 311. 03 13 | 0. 600 2 | 2. 249 7 |
| 20 | 路径长度/m | — | 8 435. 145 6 | 8 727. 888 6 | 8 497. 369 1 |
| | 平均计算时间/s | >12 h→43 200 | 469. 062 5 | 0. 592 3 | 2. 382 3 |

4.2 测试结果分析

1) 在所有试验中,随着节点数量增加,迭代次数的规模增大,穷举法计算量会呈指数级增长,在 12 个节点时由于计算量的巨幅增加,导致穷举法无法在 12 h 内输出运算结果,因此,穷举法只适用于小规模 TSP 问题。遗传算法则随着节点数量的增多,输出的最短路径开始变得不稳定,不能保证求解理论最优解,算法在多次试验中只能在一定的误差范围内找到尽可能好的解,算法后期迭代收敛性较差,可能是迭代到一定程度种群多样性较低。

2) 就求解最优路径而言,穷举法和 RSA 都能够求解出相同的最优 TSP 路径,且 RSA 能够进行较大规模 TSP 问题的计算。而遗传算法则不能保证结果最优性,在小规模试验时可以求解出与其他 2 种算法相同的最优路径,但随着问题规模的增大,试验结果不能保持稳定。

3) 在以 RSA 结果为初值的遗传算法求解过程中,基础数据不变的情况下,遗传算法求解的最优路径长度没有发生改变,并且在小规模的问题中穷举法能保证求解理论最优解,这 2 种试验结果皆证明了 RSA 解的最优性。

4) 就平均计算时间 (Computational Time, CT) 而言,问题规模对所有 3 种方法都会产生影响,都会引起 CT 增加。穷举法受问题规模影响最大,RSA 相较于遗传算法受节点影响较大,但在小规模计算中仍能保持优于遗传算法的计算速度,遗传方法的 CT 虽随问题规模变化较慢,但结果也逐渐不稳定。

5) 在限制链接的情况下,会更加限制遗传算法和穷举法的计算速度,而对 RSA 的影响很小,这与 3 种算法的基本求解逻辑有很大关系。

6) 通过试验对比也可以得出结论,RSA 更适用于无人机续航约束、安全条件约束下的中小规模无人机巡检路径规划问题,该算法能够保证无人机巡检的最优路径规划,同时由于无人机续航条件的约束,一般的巡检问题规模(大多在 6~13 台)应在

RSA 的最速计算范围内,并且 RSA 的算法原则,也更有利于设定实时备降安全的链接限制约束。

4.3 仿真试验

以天津某风电场为测试算例,风电场高程数据来自航天飞机雷达地形测绘数据,高程数据栅格精度为 20 m。数据地理空间范围为 E117.2 ~ E117.5, N39.3 ~ N39.6,高度为海拔 0~100 m。测试当日 8:00—11:00 时段内风向为 22.5°,风速为 8 m/s,11:00—14:00 时段内风向为 25°,风速为 9 m/s,依据风廓线公式计算 80 m 高处的最高风速分别为 10.7 和 12 m/s。选取抗风能力为 7 级、有效航程为 90~100 km 的大型油电无人机作为测试无人机,根据风向风速的模拟值,可算出无人机续航里程 $R = 76$ km,航迹路线里程范围最大约束为 7.6 km。依据航程约束,将风机按照所处位置分成 2 组,分时段进行巡检规划,并设置安全返航距离为 300 m。该风电场采用风轮直径 80 m,78 m 高的塔架 V90(3 MW) 机组,共有 22 台风电机,14 个备降点。第 1 组 10 台风机、6 个备降点、8:00—11:00 时段内巡检;第 2 组 12 台风机、8 个备降点、11:00—14:00 时段内巡检。

通过栅格化风机、备降点位置及高程信息的风电场高程数据完成风电场整体数学模型的建立^[15],由于备降区域在实际选取过程中,应具体到单位 m 来规定范围,故在本试验的模型建立过程中,通过 GIS 转换工具,依据风机和备降中心点的坐标将其度分秒经纬度转换为具体的以米为单位的 xy 平面如图 12 所示。其中, H 表示风电场中设置的备降点,在本试验中根据地理信息系统数据,对备降区域进行了具体的形状规定,图中黑色圆点表示风电场中无人机巡检不同风电机时的所在位置,黑色连线为依据路径安全性判断计算出的风险路径。

对文中改进的 RSA 在 Matlab 软件中编程,基于试验设定的参数进行求解。算法在主频为 2.60 GHz 的 Intel Core i7-10750H 中央处理器、

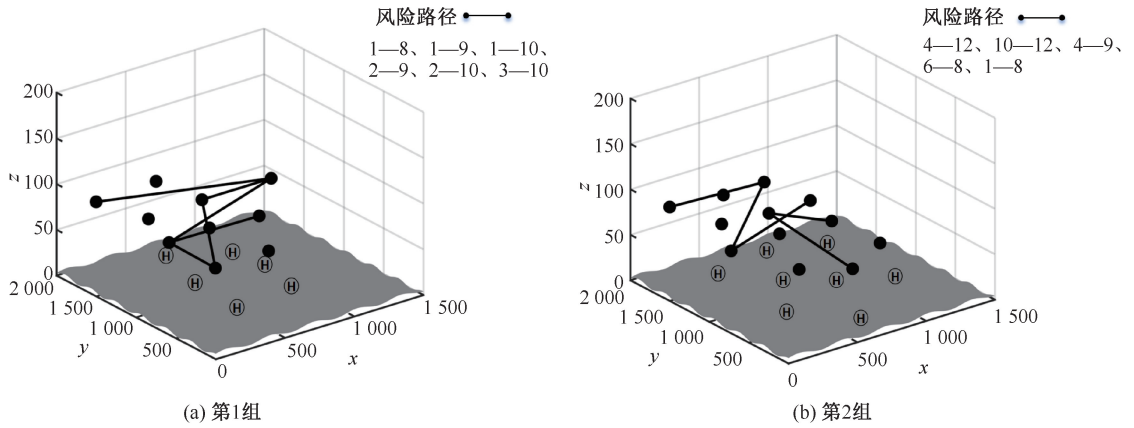


图 12 栅格化风电场模型

Fig. 12 Rasterised wind farm model

Windows 10 操作系统的环境下运行,通过运行本文设计的算法求解基于所建立模型的风电场在安全约

束下路径规划问题,巡检方案如图 13、图 14 所示(第 2 组数据穷举法无法计算路径)。

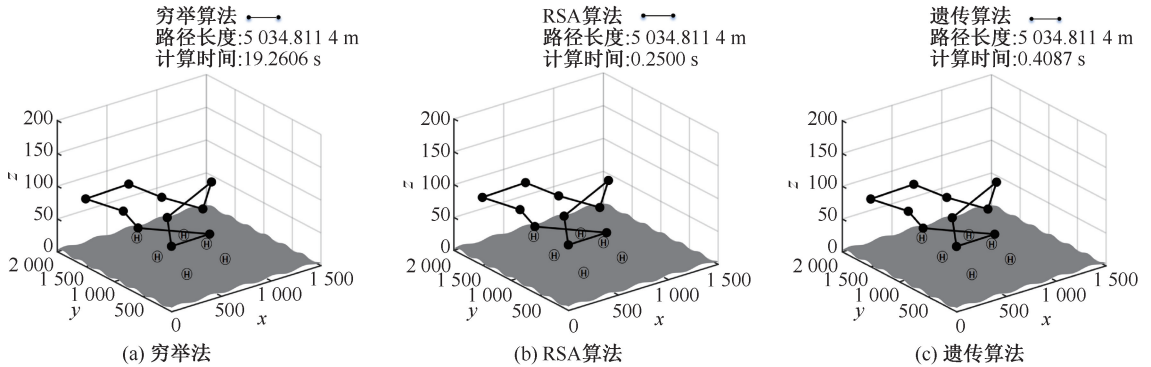


图 13 风电场第 1 组风机巡检方案

Fig. 13 Inspection programme for first group of wind turbines at wind farm

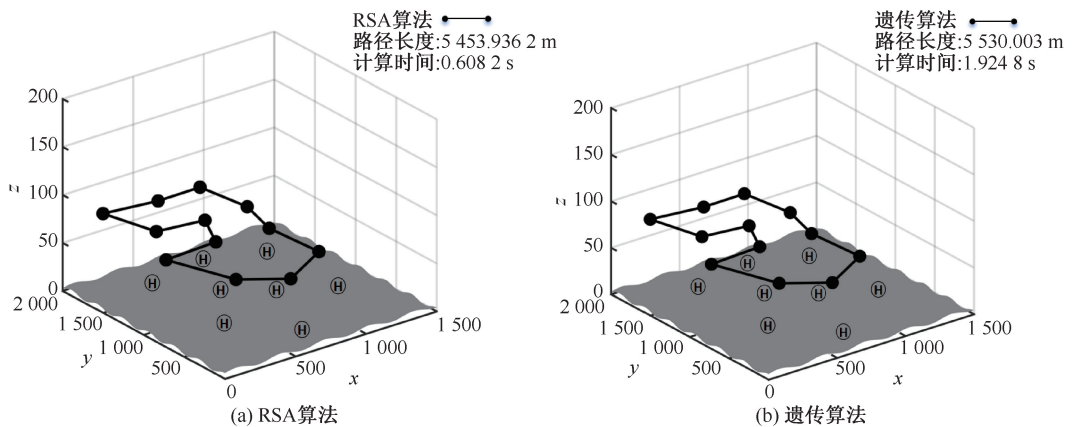


图 14 风电场第 2 组风机巡检方案

Fig. 14 Inspection programme for second group of wind turbines at wind farm

试验结果表明:安全约束条件对风险路径具有安全性限制,在路径的计算过程中可避免选择风险路径作为巡检路径,从而满足实时备降的安全约束条件。改进后的 RSA 能够在满足实时备降约束的

条件下,短时间内求得无人机风电场巡检的最优路径,并计算路径长度以满足无人机续航的需求。在与穷举法和遗传算法的对比求解过程中可以看出,风机节点的增多会大大增加穷举算法的计算量,影

响遗传算法的稳定性,致使2种算法无法稳定地计算出最优路径,而RSA能在较短的求解时间内稳定求得最优路径。因此,文中提出的RSA对于无人机巡检路径规划问题的计算效率和结果质量提升方面是有效的。

5 结 论

1) 从无人机巡检的安全风险、飞行特性和操作原则等角度总结出的实时备降安全性计算原理,有助于评估无人机巡检过程中备降安全性,综合不同

的风险因素计算出安全路线。

2) 针对安全约束下的TSP问题,结合链滴扩散算法多智体同时扩散的算法特性,能够实现对TSP问题的有效求解,能够避免在求解过程中陷入局部最优,同时,降低运算的冗余度,有利于准确、高效的规划实时备降安全约束下无人机风电场巡检的最优路径。

3) 文中研究重点在于飞行路径规划和飞行过程中的安全考量,而在风机的具体巡检流程方面,仅作了初步探讨,未来需要深入研究。

参 考 文 献

- [1] 刘智勇, 赵晓丹, 祁宏昌, 等. 新时代无人机电力巡检技术展望[J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 1-5.
LIU Zhiyong, ZHAO Xiaodan, QI Hongchang, et al. Prospect of UAV power inspection technology in new era[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 1-5.
- [2] 高珩, 鲍鹏. 旅行商问题求解算法综述[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 67-68.
- [3] DENG Yanlan, XIONG Juxia, WANG Qiuhong. A hybrid cellular genetic algorithm for the traveling salesman problem[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(2): DOI:10.1155/2021/6697598.
- [4] EZUGWU E A, ADEWUMI O A, FRINCU E M. Simulated annealing based symbiotic organisms search optimization algorithm for traveling salesman problem[J]. Expert Systems With Applications, 2017, 77: 189-210.
- [5] 余丽, 陆锋, 杨林. 交通网络旅行商路径优化的遗传禁忌搜索算法[J]. 测绘学报, 2014, 43(11): 1197-1203.
YU Li, LU Feng, YANG Lin. A hybrid algorithm for traveling salesman problem in road network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(11): 1197-1203.
- [6] 陈科胜, 鲜思东, 郭鹏. 求解旅行商问题的自适应升温模拟退火算法[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(2): 245-254.
CHEN Kesheng, XIAN Sidong, GUO Peng. Adaptive temperature rising simulated annealing algorithm for traveling salesman problem[J]. Control Theory and Applications, 2021, 38(2): 245-254.
- [7] 刘海龙, 雷斌, 王菡莹, 等. 求解TSP问题的改进融合遗传灰狼优化算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9): 333-338.
LIU Hailong, LEI Bin, WANG Wanying, et al. Improved fused genetic grey wolf optimization algorithm for solving TSP[J]. Computer Simulation, 2023, 40(9): 333-338.
- [8] 张树卓. 计及风场的输电线路无人机巡检路径规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
ZHANG Shuzhuo. Research on UAV path planning of transmission line inspection considering wind field[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [9] 韩鹏, 张冰玉. 基于改进蚁群算法的无人机安全航路规划研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 24-29.
HAN Peng, ZHANG Bingyu. Safety route planning of UAV based on improved ant colony algorithm[J]. China Safety Science Journal. 2021. 31(1): 24-29.
- [10] 王猛, 王道波, 王博航, 等. 基于改进NSGA-II的多无人机三维空间协同航迹规划研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(11): 73-80.
WANG Meng, WANG Daobo, WANG Bohang, et al. Three-dimensional multi-UAV cooperative path planning based on an improved NSGA-II algorithm[J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(11): 73-80.
- [11] 韩鹏, 赵焱飞. 基于飞行环境建模的UAV地面撞击风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 142-147.
HAN Peng, ZHAO Yifei. Study on ground impact risk of UAV based on flight environment[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(1): 142-147.
- [12] 曾薇, 孟祥旭, 杨承磊, 等. 平面多边形域的快速约束Delaunay三角化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(1): 142-147.

2005, 17(9): 1 933-1 940.

ZENG Wei, MENG Xiangxu, YANG Chenglei, et al. Fast constrained delaunay triangulation for planar polygonal domains[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(9): 1 933-1 940.

[13] HU Xiaobing, WANG Ming, LEESON M S, et al. Deterministic agent-based path optimization by mimicking the spreading of ripples[J]. Evolutionary Computation, 2016, 24(2): 319-46.

[14] 胡小兵, 袁莉燕, 李航, 等. 基于涟漪扩散算法的应急疏散路径优化方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 253-261.

HU Xiaobing, YUAN Liyan, LI Hang, et al. Optimization of emergency evacuation route based on ripple-spreading algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2024, 24(1): 253-261.

[15] 王永峰, 徐莹, 王涛. 基于数字高程模型制作山区坡度分级栅格数据[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(12): 36-38.

WANG Yongfeng, XU Ying, WANG Tao. Mapping slope graded map of mountainous area based on digital elevation model[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(12): 36-38.

作者简介: 胡小兵 (1975—),男,四川攀枝花人,博士,教授,主要从事计算智能、人工智能理论与方法研究。E-mail:huxb1975@163.com。



《中国学术期刊影响因子年报(2024 版)》发布

由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社出版、中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2024 版)》(简称《年报 2024 版》)发布。

《年报(2024 版)》计量指标统计显示:《中国安全科学学报》影响力指数(CI)为 1 330.207,CI 学科排序为 1/20。其他指标如下:2023 年载文量为 433,可被引文献量为 354,可被引文献比为 0.82。复合总被引频次为 12 892,即年指标为 0.206,复合影响因子为 2.947,复合他引影响因子为 2.355,5 年影响因子为 3.014,他引 5 年影响因子为 2.620。

中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2024版)

期刊名称: 中国安全科学学报
主办单位: 中国职业安全健康协会
学科类别: 安全科学技术
研究层次: 技术研究
CN/ISSN: CN 11-2865/X ISSN 1003-3033

计量指标统计表

| 一、影响力指数 (CI) | | 他引 CI | | CI 学科排序 | |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 本刊数 | 433 | 433 | 354 | 1/20 | 1/20 |
| 载文量 | 433 | 433 | 354 | 1/20 | 1/20 |
| 可被引文献量 | 354 | 354 | 354 | 1/20 | 1/20 |
| 可被引文献比 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 |
| 复合总被引频次 | 12892 | 12892 | 12892 | 12892 | 12892 |
| 即年指标 | 0.206 | 0.206 | 0.206 | 0.206 | 0.206 |
| 复合影响因子 | 2.947 | 2.947 | 2.947 | 2.947 | 2.947 |
| 5 年影响因子 | 3.014 | 3.014 | 3.014 | 3.014 | 3.014 |
| 他引 5 年影响因子 | 2.620 | 2.620 | 2.620 | 2.620 | 2.620 |

二、载文量、可被引文献量 (篇)

| 2023 年 | | 2022 年 | | 2021 年 | |
|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| 载文量 | 433 | 433 | 433 | 433 | 433 |
| 可被引文献量 | 354 | 354 | 354 | 354 | 354 |

三、被引频次 (A 刊被引频次/总被引频次)

| 2023 年 | | 2022 年 | | 2021 年 | |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 复合总被引频次 | 12892 | 12892 | 12892 | 12892 | 12892 |
| 即年被引频次 | 433 | 433 | 433 | 433 | 433 |
| 他引被引频次 | 12459 | 12459 | 12459 | 12459 | 12459 |

四、影响因子 (JIF)

| 即年影响因子 | | 复合影响因子 | | 5 年影响因子 | |
|------------|-------|--------|-------|---------|-------|
| 本刊数 | 433 | 433 | 433 | 433 | 433 |
| 载文量 | 433 | 433 | 433 | 433 | 433 |
| 可被引文献量 | 354 | 354 | 354 | 354 | 354 |
| 可被引文献比 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 |
| 复合总被引频次 | 12892 | 12892 | 12892 | 12892 | 12892 |
| 即年指标 | 0.206 | 0.206 | 0.206 | 0.206 | 0.206 |
| 复合影响因子 | 2.947 | 2.947 | 2.947 | 2.947 | 2.947 |
| 5 年影响因子 | 3.014 | 3.014 | 3.014 | 3.014 | 3.014 |
| 他引 5 年影响因子 | 2.620 | 2.620 | 2.620 | 2.620 | 2.620 |

五、其他参考指标

中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2024 版)》(简称《年报 2024 版》)发布。

1. 本表数据来源于《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社出版、中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2024 版)》。

2. 中国期刊“5 年影响因子”是指“5 年影响因子”。

中国科学文献计量评价研究中心 电子杂志编辑部 2024 年 01 月 01 日