

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0028-05

长距离输电线路无人机巡检路径智能规划方法

方斌, 胡诚, 万娇, 黄林
(湖南数界科技有限公司, 湖南长沙 430013)

摘要: 针对复杂多变的长距离巡检环境, 传统巡检路径规划方法难以快速适应并调整巡检路径, 导致规划方案不够合理等问题, 研究一种长距离输电线路无人机巡检路径智能规划方法。通过设置模型假设条件, 定义巡检路径长度和转弯次数两个目标函数并结合约束条件构建规划模型, 利用改进粒子群算法求解模型最优解, 得出无人机巡检路径规划方案。结果表明, 无人机巡检路径智能规划方法规划出来的路径长度更短, 转弯次数更少, 规划方案更为合理, 规划能力更强。

关键词: 长距离输电线路; 无人机; 巡检; 目标函数; 改进粒子群算法; 路径规划

中图分类号: TP50.44 文献标志码: A 文章编号: 1003-7241(2026)01-0028-05

Intelligent planning method for unmanned aerial vehicle inspection path of long-distance transmission lines

FANG Bin, HU Cheng, WAN Jiao, HUANG Lin

(Hunan Digital World Technology Co., Ltd., Changsha 430013, Hunan, China)

Abstract: For complex and variable long-distance inspection environments, traditional path planning methods have difficulties in quickly adapting and adjusting the inspection routes, resulting in suboptimal planning solutions. This paper studies an intelligent planning method for unmanned aerial vehicle inspection paths for long-distance transmission lines. By setting up model assumptions, defining two objective functions in terms of the length of the inspection path and the number of turns, and combining them with constraint conditions to construct a planning model, an improved particle swarm optimization algorithm is utilized to solve for the optimal solution of the model, yielding a UAV inspection path planning scheme. The results show that the paths planned by the proposed method are shorter and have fewer turns, indicating that the planning scheme in this paper is more reasonable and the method has stronger planning capabilities.

Keywords: long-distance transmission lines; unmanned aerial vehicle; inspection; objective function; Improve Particle Swarm Optimization Algorithm; path planning

在电力行业的迅猛发展中, 距离输电线路作为电力系统的重要组成部分, 其稳定运行, 不仅关系到电力系统的整体性能, 更是直接影响着电力供应的可靠性和安全性。因此, 对于长距离输电线路的巡检和维护工作, 始终保持着高度的重视和警惕。随着科技的进步, 无人机技术的快速发展为这一难题提供了解决方案。无人机以其高效、灵活、安全的特性, 成为了巡检工作的得力助手。它们可以迅速穿越复杂地形, 抵达人员难以到达的区域, 对输电线路进行全方位、多角度的监测。无论是高空俯瞰还是低空细查, 无人机都能够提供详尽的线路状态信息, 帮助检修人员及时发现潜在的安全隐患^[1]。然而, 尽管无人机技术为巡检工作带来了诸多便利, 但如何为无人机规划出最优的巡检路径, 仍然是一个亟待解决的问题。

国内外学者和相关工作者已经开展了大量的研究工

作, 并取得了一定的成果。例如, 张佳庆等^[2] 首先进行巡检线路网格划分, 将林火高风险区作为巡检节点, 并利用 GA 算法进行飞行路径规划^[2]。但 GA 容易陷入局部最优解, 无法满足实际应用的需求。Singh 等^[3] 将无人机能耗最小化、节点能耗最小化和平均 RSSI 最大化作为目标, 利用多目标 NSGA-II 优化启发式算法对无人机的飞行轨迹进行优化。由于 NSGA-II 算法的计算复杂度较高, 无法实时响应无人机飞行过程中的环境变化和目標变化, 影响飞行性能和任务执行效率。陈丽等^[4] 通过视觉传感器获取巡检目标并构建非完全图, 基于路径长度、视点数目、急转弯次数构建覆盖路径规划模型并利用改进蚁群算法求解模型最优解。该方法主要针对特定的巡检任务和環境设计, 对于不同的巡检任务和環境可能需要重新构建模型和算法, 导致规划方法的适应性不足。单光瑞等^[5] 首先进行

收稿日期: 2024-06-20; 录用日期: 2024-07-25

基金项目: 湖南省重点项目(20240512)

作者简介: 方斌(1992—), 男, 本科, 中级工程师, 研究方向: 测绘与地理信息。

引用本文: 方斌, 胡诚, 万娇, 等. 长距离输电线路无人机巡检路径智能规划方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 28-32. (FANG Bin, HU Cheng, WAN Jiao, et al. Intelligent planning method for unmanned aerial vehicle inspection path of long-distance transmission lines[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 28-32.)

作业任务描述,设计了基于距离的值函数,将该函数作为改进灰狼优化策略的适应度函数并以此进行求解。该方法主要适用于静态或缓慢变化的环境,在动态变化较大的环境中,如风力、风向等条件频繁变化,可能影响模型的规划效果。综上所述,尽管国内外学者和相关工作者在无人机巡检路径规划方面已经取得了一定的成果,但各种方法都存在一定的局限性,特别是在应对复杂多变的长距离巡检环境时,这些局限性尤为突出。因此,需要进一步研究和开发更加智能、高效的无人机巡检路径规划方法。

长距离输电线路往往跨越广阔的地域,地形复杂多变,再加上巡检任务通常具有多样性和复杂性,不同的巡检目标可能需要不同的飞行策略和路径规划,这大大增加了无人机巡检的难度。为此,研究一种长距离输电线路无人机巡检路径智能规划方法。通过该方法以期实现对无人机巡检路径的智能规划,为电力行业的稳定发展提供有力的技术支撑。

1 无人机巡检路径智能规划

一个合理的巡检路径,不仅能够提高巡检效率,减少不必要的飞行时间和能耗,还能够确保无人机在巡检过程中的安全性,避免与障碍物发生碰撞^[6]。为此,研究一种长距离输电线路无人机巡检路径智能规划方法。该方法研究主要分为三部分,即假设条件、规划模型设置以及模型求解。

1.1 模型假设条件

在无人机巡检路径的智能规划中,为了简化问题并确保算法的有效运行,通常会设置一些假设条件^[7]。以下是本次研究中设置的模型假设条件:

1) 假设地形是连续且可预测的,忽略小范围的地形起伏和不规则性。

2) 假设障碍物(如树木、建筑物等)的位置、大小和形状是已知的,且在整个巡检过程中保持不变。

3) 假设无人机的飞行速度、最大飞行距离、最大载重、能耗率等性能参数是已知的且在整个巡检过程中保持不变。

4) 假设无人机具备足够的稳定性和可靠性,以应对巡航过程中的各种环境和天气条件^[8]。

5) 无人机在巡航过程中不会发生故障或损坏,且能够完成预定的巡检任务。

6) 假设巡检任务的需求(如巡检周期、巡检精度、巡检数据类型等)是已知的且在整个巡检过程中保持不变。

7) 假设在巡检过程中,环境条件的变化不会对无人机的飞行性能产生显著影响。

8) 假设无人机与地面控制系统之间的通信链路是稳定的,能够实时传输巡检数据和指令。

9) 假设无人机的导航系统具有足够的精度和可靠性,能够确保无人机按照规划的路径进行巡航。

10) 假设无人机具备动态路径调整能力,能够在遇到

突发情况(如障碍物、恶劣天气等)时实时调整飞行路径^[9]。

11) 假设地面控制系统能够实时获取无人机的飞行状态和环境信息,并据此做出合理的路径调整决策。

这些假设条件为无人机巡检路径智能规划模型提供了一个基础框架,但在实际应用中,可能需要根据具体情况进行调整和优化^[10]。

1.2 规划模型设计

1.2.1 目标函数

目标函数是用于量化评估潜在巡检路径优劣的数学表达式^[11]。在设计无人机巡检路径智能规划模型当中,包括了巡检路径长度和转弯次数两个目标函数。

1) 巡检路径长度

巡检路径长度是指无人机从起始点开始,经过所有巡检点,最终返回起始点所经过的总距离。这个距离是巡检任务完成所需飞行的主要度量。在规划无人机巡检路径时,路径长度是优化的主要目标之一。更短的路径长度意味着无人机可以在更短的时间内完成巡检任务,从而提高巡检效率^[12]。路径长度的计算可以通过一系列路径节点之间的距离累加来实现。例如,假设一条包括 $n + 1$ 个目标点的巡检路径,其中 S 是起始点, E 是终点, P_1, P_2, \dots, P_n 是路径节点。那么路径长度 L 可以表示为

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (1)$$

式中, L 代表路径长度; $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}), (x_i, y_i, z_i)$ 分别代表路径节点 P_{i+1}, P_i 的三维坐标。

2) 转弯次数

转弯次数反映了无人机在巡检过程中航向改变的次数,它关系到无人机的能耗、稳定性和飞行效率^[13]。目标函数可以定义为路径中相邻线段方向改变的次数。首先,需要确定何时算作一次转弯。一种常见的方法是设定一个角度阈值,当相邻线段之间的夹角超过这个阈值时,本文就认为发生了一次转弯。例如,如果夹角超过 45° 或 60° ,则记为一次转弯。

假设巡检路径由一系列的节点 P_1, P_2, \dots, P_n (其中 P_1 和 P_n 可能是相同的起始点和终点)组成,每两个相邻节点 P_{i+1}, P_i 之间的线段定义一个航向。可以通过计算相邻线段之间的夹角来确定转弯次数。定义向量 \vec{G}_i 为从节点 P_i 指向节点 P_{i+1} 的向量,即

$$\vec{G}_i = P_{i+1} - P_i \quad (2)$$

然后,计算相邻向量之间的夹角 a_i ,使用点积和向量模长来计算夹角的余弦值,并通过反余弦函数得到夹角为

$$a_i = \arccos \frac{\vec{G}_{i-1} \cdot \vec{G}_i}{|\vec{G}_{i-1}| \cdot |\vec{G}_i|} \quad (3)$$

式中, \vec{G}_{i-1} 是从 P_{i-1} 到 P_i 的向量。

接下来,定义一个指示函数 $f(a_i)$,当 a_i 超过给定的

阈值 A 时,该函数返回 1(表示发生了一次转弯),否则返回 0。

$$f(a_i) = \begin{cases} 1, & a_i > A \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

最后,转弯次数目标函数可以定义为路径中所有指示函数 $f(a_i)$ 的和,即

$$F = \sum_{i=2}^{n-1} f(a_i) \quad (5)$$

式中,从 $i=2$ 开始累加,因为第 1 个节点 P_1 没有前一个节点与之形成夹角。

1.2.2 综合目标函数

在实际应用中,为了综合考虑巡检路径长度和转弯角度两个因素,可以将它们组合成一个综合目标函数。这通常通过给每个目标函数分配一个权重来实现^[14]。

$$Y = \min\{\alpha L + \beta F\} \quad (6)$$

式中, α 和 β 是权重系数,用于调整两个目标函数在综合目标函数中的重要性。通过调整这些权重系数,可以根据实际需求在巡检路径长度和转弯次数之间进行权衡。

在无人机巡检路径智能规划模型中,目标函数的定义和优化是关键步骤。通过定义合适的目标函数并采用有效的优化算法,可以生成高效、安全的巡检路径,提高无人机的巡检效率和性能。

1.2.3 约束条件

针对上述设置的目标函数,给出约束条件,具体如下:

1) 起始点和终点约束

巡检路径必须始于指定的起始点 P_{start} 并结束于指定的终点 P_{end} 。

$$\text{约束 1} \quad P_1 = P_{\text{start}}, P_{\text{end}} = P_{\text{end}} \quad (7)$$

2) 巡检节点覆盖约束

无人机必须访问所有指定的巡检点至少一次。这通常通过引入一个布尔变量矩阵 U_{ij} 来表示,其中 j 是无人机的索引, i 是巡检路径中节点的索引。如果 j 访问了巡检点 i , 则 $U_{ij} = 1$, 否则为 0。

$$\text{约束 2} \quad \forall_j, \sum_{i=1}^m U_{ij} \geq 1 \quad (8)$$

3) 转弯角度约束

无人机在转弯时可能受到其物理特性的限制,如最小转弯半径。这可以通过限制相邻线段之间的夹角来实现。

$$\text{约束 3} \quad \forall_i \in [2, n-1], a_i \geq a_{\text{min}} \quad (9)$$

式中, a_{min} 代表允许的最小夹角。

4) 路径长度约束

无人机必须在其电池寿命内完成巡检任务,这通常意味着路径长度不能超过某个最大值。

$$\text{约束 4} \quad L \leq L_{\text{max}} \quad (10)$$

式中, L_{max} 代表允许的最大路径长度。

约束条件是规划模型中必不可少的部分,它们限制了可能的解的范围。长距离输电线路无人机巡检路径智能规划模型由综合目标函数以及对应的约束条件组成。

1.3 规划模型求解

规划模型求解,作为一个数学优化方法,是指通过一定的计算技术和策略,在给定的一组约束条件下,寻找能够最大化或最小化某个目标函数的解^[15]。在求解无人机巡检路径的问题中,当考虑到路径长度和转弯次数作为两个优化目标时,所面临的是一个多目标优化问题。这种问题通常没有单一的“最优解”,而是存在一组“帕累托最优解”(Pareto-efficient solutions),也称为非支配解,它们在不同目标之间达到了某种平衡。为了求解这个问题,使用混合 PSO(粒子群算法)-SA(模拟退火算法)算法来进行。这种混合算法的基本思想是先使用粒子群进行搜索,利用其分布式计算和正反馈机制来寻找较优解,并在搜索过程中动态地保留当前的最优解。当粒子群算法陷入局部最优时,即连续多次迭代后解的质量没有明显提升时,算法会切换到模拟退火算法来尝试跳出局部最优,寻找全局最优解。基本步骤如下。

步骤 1 设定粒子群算法和模拟退火算法的参数

步骤 2 建立初始种群,种群中每个个体都代表一条由巡检节点组成的路径。

步骤 3 根据目标函数(如路径长度和转弯次数)计算每条巡检路径的适应度值。计算公式为

$$Q_i(k) = \frac{1}{1 + Y_i(k)} \quad (11)$$

式中, $Q_i(k)$ 代表第 k 次迭代第 i 条巡检路径 x_i 的适应度值; $Y_i(k)$ 代表第 k 次迭代第 i 条巡检路径 x_i 的多目标函数。

步骤 4 比较当前巡检路径的适应度值 $Q_i(k)$ 与个体最优巡检路径和全局最优巡检路径的适应度值,更新个体最优解和全局最优解。

步骤 5 更新巡检路径的速度和位置。

步骤 6 设定一个阈值,当粒子群算法在多次迭代后最优巡检路径没有明显改善时,认为陷入局部最优。

步骤 7 将粒子群算法当前的最优巡检路径作为模拟退火算法的初始巡检路径。使用模拟退火算法对当前巡检路径进行邻域搜索,产生新的候选巡检路径 x_{new} 。

步骤 8 计算 x_{new} 的适应度值,即 $Q_{\text{new}}(k)$ 。

步骤 9 计算新巡检路径 x_{new} 与旧解的适应度值之差 $\Delta Q(k)$ 。

步骤 10 根据模拟退火算法的接受准则(如 Metropolis 准则)判断是否接受新巡检路径。

若 $\Delta Q(k) < 0$, 则 x_{new} 被接受;

若 $\Delta Q(k) \geq 0$, 则 x_{new} 按如下概率进行接受。

$$\beta = \exp\left(-\frac{\Delta Q(k)}{T}\right) \quad (12)$$

式中, T 代表当前退火温度; β 代表接受概率。

步骤 11 根据线性降温策略降低温度 T , 重复上述模拟退火步骤,达到设定的一定次数后,返回粒子群算法继续搜索。

步骤 12 如果满足全局终止条件,则终止算法,输出混合算法找到的最优巡检路径,这种混合算法的优点是能够结合粒子群算法的分布式搜索能力和模拟退火算法的全局搜索能力,提高求解多目标优化问题的效率和效果。然而,算法的性能也取决于参数的设置和问题的特性,因此在实际应用中需要进行适当的调整和优化。

2 测试与分析

2.1 实验环境

以某一段长距离输电线路为例,其巡检环境如图 1 所示。假设在长距离输电线路路上分布着 13 个待巡检点和 4 个障碍区,如图 2 所示。



图 1 实验环境场景图

Fig. 1 Experimental environment scene diagram

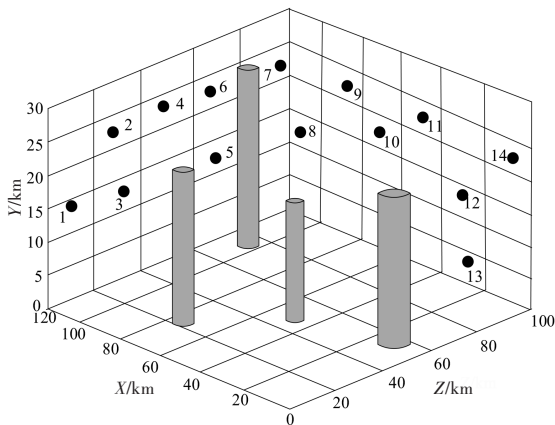


图 2 待巡检点分布图

Fig. 2 Distribution of inspection points to be inspected

从图 2 中可以看出,受到 4 个障碍区影响,测试点呈现出明显的分散性,这些点代表输电线路中的关键节点,变压器、接合点重要支撑塔等。每个待巡检点的位置、障碍区的大小与形状,以及地形的高低起伏,给巡检路径规划带来了很大的难度。

2.2 无人机巡检参数设置

以一个四翼无人机作为巡检设备,如图 3 所示。该无人机巡检时的工作参数设置如表 1 所示。

设置起飞点和降落点坐标均为(0,0,0)无人机巡检路径需要访问所有指定的巡检点至少一次,由此需要进行路径规划。



图 3 巡检无人机

Fig. 3 Inspection drone

表 1 无人机工作参数表

Tab. 1 Operating parameters of drones

名称	参数
类型	四轴飞行器
悬停精度	±0.1 m
飞行高度	25 m
飞行速度	16 m/s
角度控制精度	±0.01 °
可控转动范围	翻滚:360°
最大上升速度	5 m/s
最大下降速度	3.5 m/s
续航时间	10 min

收敛情况与切换判据:当粒子群算法在连续多次迭代后,最优解的质量没有明显提升时,认为算法可能陷入局部最优。此时,记录 PSO 的当前最优解作为 SA 的初始解,并切换到模拟退火算法。在 SA 中,如果在某温度下经过固定次数的迭代后解未再改善,或达到预设的最低温度,则算法终止。

2.3 巡检路径规划方案

设置求解算法参数,求取满足目标函数的最优解,得出巡检路径如图 4 所示。从图 4 中可以看出,所研究方法应用下,完成了路径规划任务,得到了无人机巡检路径,证明了方法的有效性。

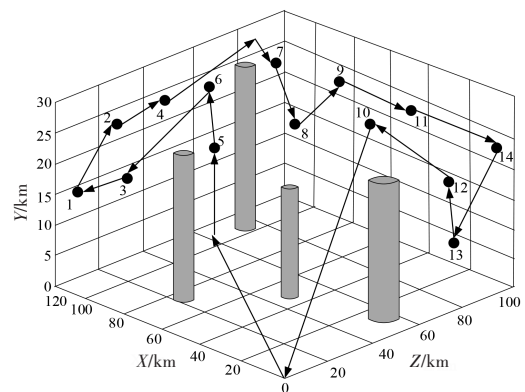


图 4 规划的巡检路径

Fig. 4 Planned inspection path

2.4 对比分析

为验证所研究方法的规划性能,与 4 种传统规划方法进行对比,结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,与其他 4 种方法相比,所研究方法规划出来的路径长度更短,转弯次数更少,这是因为在多目标优化策略中,同时考虑了路径长度和转弯次数,能更全面地评估巡检路径的性能,生

成更平衡的解决方案。并结合粒子群优化和模拟退火的混合算法两者的优势,增强了全局搜索能力和局部精细化能力,有效避免了局部最优问题。并且考虑了实际环境和无人机状态的动态变化,该方法支持动态调整飞行路径,提高了规划的可行性和安全性。通过对模型假设的精确设定和算法参数的细致调优,使规划方案更适应特定的应用环境。这充分说明所研究方法在路径规划方面具有显著的优势。

表2 规划方法对比表

Tab. 2 Comparison of planning methods

方法	路径长度/km	转弯次数
所研究规划方法	249.63	9
文献[2]规划方法	285.14	16
文献[3]规划方法	273.20	14
文献[4]规划方法	268.32	11
文献[5]规划方法	301.12	13

3 结论

面对复杂多变的地理环境和障碍物,规划出一条既高效又安全的无人机巡检路径显得尤为关键。研究正是基于这一目标,通过构建精细的多目标函数,并借助混合寻优算法来求解最优解,从而实现对巡检路径的动态调整,确保无人机能够高效、安全地完成巡检任务。最后,通过实验测试,验证了方法的应用效果。然而,尽管方法已经取得了显著的成效,但在实际应用中仍然面临一些挑战。首先,地理环境和障碍物的变化是复杂且不可预测的,这要求我们的算法必须具备高度的适应性和鲁棒性,以应对各种突发情况。其次,随着无人机巡检任务的日益增多,如何确保算法的高效性和实时性也是一个亟待解决的问题。为了克服这些挑战,我们将继续深入研究,探索更加先进的算法和技术。

参考文献

- [1]刘春,艾克然木·艾克拜尔,蔡天池.面向建筑健康监测的无人机自主巡检与裂缝识别[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(7):921-932,918.
- [2]张佳庆,孙韬,蒋弘瑞,等.基于林火风险的高压输电线路无人机巡检路径规划[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(5):911-921.
- [3]SINGH M K, CHOUDHARY A, GULIA S, et al. Multi-objective NSGA-II optimization framework for UAV path planning in an UAV-assisted WSN[J]. Journal of Supercomputing, 2023, 79(1):832-866.
- [4]陈丽,陈洋,杨艳华.面向三维结构视觉检测的无人机覆盖路径规划[J].电子测量与仪器学报,2023,37(2):1-10.
- [5]单光瑞,赵金,徐婷,等.贝叶斯框架下基于灰狼优化策略的多无人机巡检航迹规划[J].计算机应用与软件,2023,40(2):82-88,150.
- [6]戴永东,王永强,高超,等.电力输电线路无人机巡检航线智能规划方法[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(9):253-260.
- [7]黄郑,高超,赵轩,等.5G信号约束下多无人机协同电力巡检路径规划技术[J].电子测量技术,2023,46(15):81-88.
- [8]成亮,杨沛,贾燕翀,等.配网线路无人机自主巡检的路径规划方法[J].无线电工程,2022,52(7):1213-1221.
- [9]王昊,丁国斌,杨家慧.基于无人机机载AI模块的电力巡检技术[J].沈阳工业大学学报,2024,46(1):49-53.
- [10]梁华尘,周稳,倪旭东,等.面向多目标联合电力巡检的车载无人机协同巡检路径规划方法[J].南方电网技术,2023,17(11):138-147.
- [11]常安,陈振辉,付明,等.无人机电力巡检航线智能规划及自主巡检研究[J].电网与清洁能源,2023,39(7):61-66.
- [12]戴金,方伟,彭苗.输电线路间隔棒安装机器人平衡驱动系统设计[J].电子设计工程,2024,32(11):33-36,41.
- [13]刘书山,刘兰兰,肖乔莎,等.无人机巡检500kV典型铁塔的抗干扰路径规划[J].无线电工程,2023,53(5):1171-1179.
- [14]赵蒙,张博,胡祥培,等.电力巡检车载无人机协同作业优化[J].系统管理学报,2022,31(6):1098-1108.
- [15]刘家辛,温刚,田小壮,等.基于三维点云的变电站无人机巡检路径规划[J].自动化技术与应用,2024,43(6):1-4,9.