

分类号: TP3
学号: 20222108046

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于群智能的变电站无人机巡检路径规划系统 设计与实现

学位申请人	贾丁毅
指导教师	周杰 教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

分类号: TP3
学号: 20222108046

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于群智能的变电站无人机巡检路径规划系统 设计与实现

学位申请人	贾丁毅
指导教师	周杰 教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

**Design and implementation of UAV inspection path planning system
for substation based on swarm intelligence**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Jia Dingyi

Electronic Information

Dissertation Supervisor: Prof. Zhou Jie

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 贾丁毅

时间： 2025年5月15日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 贾丁毅

时间： 2025年5月15日

导师签名： 周杰

时间： 2025年5月15日

摘要

随着我国变电站数量的逐年增加及电网安全运行要求的不断提高，传统人工巡检方式面临效率低、难度大的挑战，智能电网建设逐渐成为电网发展的重要方向。在此背景下，引入无人机智能巡检技术替代人工巡检已成为研究热点。尽管无人机技术在输配电领域已有一定程度应用，但针对复杂变电站环境的无人机路径规划研究相对薄弱，尤其缺乏直观展示与实用性验证。本文基于变电站巡检的实际需求和现场作业经验，研究并设计了无人机巡检路径规划方法与系统，并在 TF 股份有限公司某变电站开展了实验验证，主要研究内容如下：

(1) 针对变电站巡检路径规划模型构建问题，本文首先详细分析变电站环境特点，构建了能够反映环境特征的三维模型。在此基础上，结合巡检任务的复杂性、航程需求以及巡检区域的特殊性，选择了适合的无人机机型，并对无人机的飞行航程、曲率和高度等关键参数进行了约束。为了进一步提升无人机飞行的稳定性，本文对生成的路径进行了平滑处理，确保路径的连续性和可执行性。

(2) 针对无人机巡检单任务点路径规划问题，本文提出了一种改进黑翅鸢-动态窗口混合算法。在全局路径规划中，设计了莱维正弦增强的黑翅鸢优化算法，该算法不仅提升了全局搜索能力和局部寻优精度，同时优化了计算效率。仿真结果表明，与传统的路径规划算法相比，该算法能够将路径长度缩短至少 5.31%，并将运行时间减少 16.22%。在局部路径规划中，提出了自适应动态窗口法，通过起始位姿调整和评价函数优化进一步提升算法的性能。仿真结果显示，与传统动态窗口法相比，该算法能够将路径长度缩短 6.87%，并将规划时间减少 14.64%。最终，通过结合两种算法，实现了全局与局部路径规划混合，使算法兼具高效的路径规划能力与动态避障能力。

(3) 针对无人机巡检多任务点路径规划问题，本文提出了一种混沌差分 3-opt 灰狼优化算法，并与改进黑翅鸢-动态窗口混合算法进行融合。针对传统优化算法在解决三维复杂环境下多任务点排序问题中的局限性，本文通过混沌初始化、差分变异策略和 3-opt 优化对灰狼算法进行了改进。仿真结果表明，在 56 个任务点情形中，所提算法规划的路径长度相比于传统优化算法缩短了至少 3.66%，运行时间减少了 13.41%。在此基础上，将改进的灰狼算法与上一章节提出的改进黑翅鸢-动态窗口混合算法相融合，成功规划出从起点出发，遍历所有任务点并返回起点的最优巡检路径。

(4) 针对无人机在变电站巡检中的应用需求，设计并实现了一套无人机巡检路径规划系统，完成了变电站设备全场景的可视化智能巡检。首先，结合变电站巡检任务的实际特点，完成了系统的总体架构设计，确保系统能够满足路径规划与动态数据交互的需求。随后，基于 Unity 与 MATLAB 进行系统开发，构建了包含任务点管理、路径规划执行及动态避障展示等核心功能模块。通过 Unity 与 MATLAB 的深度集成，利用动态链接库实现了两者之间的高效数据通信，完成了单任务点与多任务点三维路径规划的全过程可视化实验。最后，通过系统运行与测试，验证了系统在路径规划精度、动态避障能力及用户交互界面方面的可靠性与实用性。

关键词：变电站；无人机巡检；群智能算法；路径规划

Abstract

With the increasing number of substations in China and the growing demand for secure grid operations, traditional manual inspection methods face significant challenges, including low efficiency and high operational difficulty. Consequently, the development of smart grids has become a key direction for power grid advancement. Against this backdrop, the adoption of intelligent UAV inspection technology to replace manual inspections has emerged as a research hotspot. Although UAV technology has been applied to some extent in power transmission and distribution, research on UAV path planning in complex substation environments remains relatively underdeveloped, particularly in terms of intuitive visualization and practical validation. This thesis, based on the actual needs of substation inspections and on-site operational experience, investigates and designs a UAV inspection path planning methodology and system, which has been experimentally validated at a substation operated by TF Energy Co., Ltd. The main research contributions are as follows:

(1) Construction of the UAV Inspection Path Planning Model: To address the problem of substation inspection path modeling, this thesis first analyzes the environmental characteristics of substations in detail and constructs a three-dimensional model that accurately reflects these environmental features. Based on this model, considering the complexity of inspection tasks, flight range requirements, and the uniqueness of inspection areas, a suitable UAV model is selected, with key parameters such as flight range, curvature, and altitude constrained accordingly. To further enhance UAV flight stability, the generated path is smoothed to ensure continuity and feasibility.

(2) Path Planning for a Single Task Point: To optimize UAV path planning for single-task points, this thesis proposes an improved Black-Winged Kite–Dynamic Window hybrid algorithm. In global path planning, a Lévy sinusoidal-enhanced Black-Winged Kite Optimization Algorithm is designed, which improves both global search capability and local optimization accuracy while enhancing computational efficiency. Simulation results indicate that, compared to traditional path planning algorithms, the proposed method reduces path length by at least 5.31% and decreases runtime by 16.22%. For local path planning, an adaptive Dynamic Window Approach (DWA) is introduced, incorporating initial pose adjustments and optimized evaluation functions to further enhance algorithm performance. Simulations demonstrate that, compared to the traditional DWA, the proposed method shortens the path length by 6.87% and reduces planning time by 14.64%. By integrating the global and local path planning approaches, the algorithm achieves both high efficiency in path planning and dynamic obstacle avoidance.

(3) Multi-Task Point Path Planning: To tackle UAV path planning for multiple task points, this thesis proposes a chaotic differential 3-opt Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, which is then integrated with the improved Black-Winged Kite–Dynamic Window hybrid algorithm. Recognizing the limitations of

traditional optimization algorithms in handling multi-task point sequencing problems in three-dimensional complex environments, this thesis enhances the GWO algorithm using chaotic initialization, differential mutation strategies, and 3-opt optimization. Simulation results demonstrate that in scenarios with 56 task points, the proposed algorithm reduces path length by at least 3.66% and decreases runtime by 13.41% compared to conventional optimization algorithms. Furthermore, by integrating the improved GWO algorithm with the previously proposed hybrid algorithm, the thesis successfully generates an optimal inspection path that starts from an initial point, visits all task points, and returns to the starting location.

(4) Development of a UAV Inspection Path Planning System: To meet the practical requirements of UAV-based substation inspections, a UAV inspection path planning system is designed and implemented, enabling intelligent visualization of substation equipment inspections across the entire facility. First, the overall system architecture is developed, ensuring that it meets both path planning and dynamic data interaction requirements. The system is then implemented using Unity and MATLAB, incorporating core functional modules such as task point management, path execution, and dynamic obstacle avoidance visualization. Through deep integration between Unity and MATLAB, efficient data communication is achieved via dynamic link libraries, allowing comprehensive three-dimensional visualization experiments for both single-task and multi-task point path planning. Finally, system testing and validation confirm its reliability and practicality in terms of path planning accuracy, dynamic obstacle avoidance, and user interaction interface quality.

Key words: Transformer substation; Unmanned aerial vehicle inspection; Swarm intelligence algorithm; Path planning

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 无人机电力巡检研究.....	2
1.2.2 变电站巡检研究.....	4
1.2.3 无人机路径规划算法研究.....	6
1.3 主要研究内容.....	8
1.4 章节结构安排.....	10
第 2 章 变电站无人机巡检三维路径规划问题建模.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 变电站环境分析与建模.....	11
2.2.1 变电站环境特点分析.....	11
2.2.2 变电站环境建模.....	12
2.3 无人机机型选择与性能约束.....	14
2.3.1 无人机机型选择.....	14
2.3.2 无人机物理性能约束.....	15
2.4 路径平滑函数.....	16
2.5 本章小结.....	18
第 3 章 基于混合优化算法的变电站巡检单任务点路径规划.....	19
3.1 引言.....	19
3.2 基于改进黑翅鸢优化算法的三维全局路径规划.....	19
3.2.1 莱维正弦增强的黑翅鸢优化算法.....	19
3.2.2 仿真实验与分析.....	24
3.3 基于改进动态窗口法的三维局部路径规划.....	26
3.3.1 自适应动态窗口法.....	27
3.3.2 仿真实验与分析.....	31
3.4 基于混合优化算法的单任务点路径规划.....	32
3.4.1 单任务点路径规划方案设计.....	32
3.4.2 仿真实验与分析.....	33
3.5 本章小结.....	35

第 4 章 基于融合改进灰狼算法的变电站巡检多任务点路径规划	36
4.1 引言	36
4.2 变电站巡检多任务点排序分析	36
4.2.1 多任务点排序问题数学模型	36
4.2.2 改进的距离矩阵构造方法	37
4.3 基于改进灰狼优化算法的变电站巡检多任务点排序	38
4.3.1 混沌差分 3-opt 灰狼优化算法	38
4.3.2 仿真实验与分析	44
4.4 基于融合改进灰狼优化算法的多任务点路径规划	52
4.4.1 多任务点路径规划方案设计	52
4.4.2 仿真实验与分析	53
4.5 本章小结	54
第 5 章 变电站无人机巡检路径规划系统设计与实现	55
5.1 引言	55
5.2 系统总体设计	55
5.2.1 系统需求分析	55
5.2.2 系统架构设计	56
5.3 变电站巡检无人机与场景建模	58
5.3.1 无人机模型构建	58
5.3.2 变电站场景搭建	59
5.4 交互与系统集成	61
5.4.1 数据交互与通信模块	61
5.4.2 用户界面设计与实现	62
5.5 可视化系统运行与测试	63
5.6 本章小结	68
第 6 章 总结与展望	69
6.1 总结	69
6.2 展望	69
参考文献	71
致谢	76
作者简介	77

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着碳达峰、碳中和“双碳目标”的提出，我国电力系统正朝着高效、智能、绿色的方向转型。国家电网和南方电网在“十四五”规划中明确提出，将建设集电能收集、传输、存储与分配为一体的新型变电站，以支持新型电力系统的构建。变电站作为电力系统的核心节点，其安全稳定运行直接关系到整个电网的可靠性^[1]。然而，变电站设备复杂、环境多变，任何故障都可能引发大范围供电中断，对社会经济和民众生活造成严重影响^[2]。2021年4月，安徽省繁昌县某变电站因防误系统故障引发弧光放电，导致设备损坏及停电事故；2023年7月，印度新德里一座220kV变电站因设备老化问题发生火灾，造成大面积停电，影响范围覆盖数十万居民用电。因此，保障变电站的安全稳定运行已成为电力系统建设的重中之重。

传统的变电站巡检主要依赖人工操作，巡检人员通过感官或基本工具定期检查设备状态^[3]。然而，随着电网规模的扩大和变电站智能化水平的提高，传统巡检方式存在效率低、误判率高、漏检率高、人工成本高以及巡检风险高等问题。特别是在恶劣天气或特殊保电情况下，人工巡检的局限性更加明显^[4]。为提高巡检效率，智能巡检机器人^[5]和摄像头图像识别技术^[6]被引入变电站巡检中，但这些方法仍存在维护难度大、建设成本高、适应性差等不足。因此，探索一种新型的巡检方式成为当前研究的重点。

近年来，无人机技术在输电线路巡检中取得了显著成效，其高效、灵活、低成本的特点为变电站巡检提供了新的思路^[7]。无人机能够快速覆盖大面积区域，克服人工巡检的盲区，特别是对高处设备及隐蔽缺陷的检测具有独特优势。此外，无人机搭载的高清摄像头、红外热成像仪等设备，能够实时采集设备状态数据，并通过智能算法进行分析，显著提高巡检的准确性和效率。然而，将无人机技术应用于变电站巡检仍面临诸多挑战。变电站环境复杂，设备密集，电磁干扰强，这对无人机的路径规划、避障能力和稳定性提出了更高要求。特别是在多任务点、多障碍物的环境下，如何规划一条高效、安全的巡检路径，成为当前研究的难点。

路径规划是无人机巡检的核心技术之一，其目标是在复杂环境中为无人机规划一条从起点到终点的最优路径，同时确保路径的安全性和可行性^[8]。传统的路径规划算法（如A*算法）在简单环境中表现优异，但在变电站这种设备密集、障碍物多的复杂环境中，其计算效率和适应性往往不足。群智能算法（如粒子群优化算法、蚁群算法等）通过模拟自然界中生物群体的行为，能够在复杂环境中快速找到全局最优解。这类算法具有并

行计算能力强、适应性强、鲁棒性高等特点，非常适合用于变电站无人机巡检的路径规划^[9]。通过引入群智能算法，可以有效解决传统算法在复杂环境中的局限性，提高路径规划的效率和精度。

TF 能源股份有限公司作为国内领先的能源企业，在电力系统建设与运维方面具有丰富经验，旗下运营多个变电站，涵盖 220kV、110kV 等多个电压等级。随着电网规模的不断扩大，公司现有的巡检方式面临挑战，迫切需要引入无人机技术，以提升变电站巡检的智能化和自动化水平。此外，传统的二维巡检模式难以全面掌握变电站设备的空间分布信息，容易导致盲区检测不足。因此，结合无人机技术和三维可视化技术，建立变电站的数字化巡检系统，能够显著提升巡检效率和精确度，为设备状态评估和故障预测提供更直观的数据支撑。

本文以群智能算法与无人机技术相结合为核心，依托重点领域科技攻关项目“变电站设备智能巡检平台研发与应用”，致力于解决变电站巡检中的效率低、成本高、盲区多等问题，并在 TF 能源股份有限公司某个变电站进行了实验验证。通过将无人机技术与群智能算法相结合，设计一套高效、智能的巡检路径规划系统，能够在一定程度上提高变电站巡检的自动化水平和智能化程度。研究的意义在于提高巡检效率、降低巡检风险，并推动技术创新。通过无人机的高效覆盖和群智能算法的路径规划，能够进一步缩短巡检时间，降低人工成本；通过无人机的远程操作和智能避障功能，能够减少巡检人员在危险环境中的暴露时间；同时，本文为变电站智能化巡检提供了新的技术路径，推动无人机技术和群智能算法在电力系统中的应用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 无人机电力巡检研究

随着工业无人机技术的不断发展，电力行业已经逐步实现了无人机的广泛应用，尤其是在输电线路巡检领域。无人机巡检以其高效、灵活、低成本的特点，成为传统人工巡检的重要补充和升级手段。相较于人工巡检，无人机能够在无需停电的情况下完成对输电线路的全面检测，不仅大幅降低了巡检人员的劳动强度和作业风险，还将巡检效率提升了数倍。根据国家电网公司的实践数据显示，无人机巡检的效率可达传统人工巡检的 8 倍以上，尤其在复杂地形和恶劣环境下的巡检任务中，无人机的优势更加显著^[10]。无人机巡检系统通常由巡线无人机和地面工作站两部分组成。地面工作站负责飞行任务规划、数据接收与处理，其形式包括便携式和车载式，以适应不同场景的需求；巡线无人机则搭载高清摄像头、红外测温传感器、激光雷达、GPS 定位模块等多种设备，能够实时采集线路状态数据及地理位置信息，为后续的故障诊断和分析提供精准依据^[11]。

针对输电线路巡检领域的无人机巡检效率和安全等方面,国外学者开展了大量的研究工作。Cantieri 等人^[12]提出了一种无人机与无人地面车辆协同架构,通过共享位置信息提升了巡检效率和安全性,为无人机路径规划与协同控制提供了重要的理论支持。Foudeh 等人^[13]全面回顾了无人机技术在架空电力线路巡检中的发展,重点关注了多旋翼无人机的先进学习控制策略,以提升其机动性,并探讨了适宜的充电策略和电机控制,以提高任务的自主性。Fahmani 等人^[14]介绍了遗传算法和蚁群优化算法在无人机路径规划中的应用,比较了两种算法的效率和收敛速度,进一步推动了无人机在电力线路巡检中的应用发展。在电力传输系统故障诊断领域, Kim 等人^[15]提出了一种基于无人机的智能巡检系统,利用紫外线相机检测局部放电现象,通过图像处理和统计异常检测方法实现自动线路跟踪和缺陷位置估算,有效克服了地理限制,提升了巡检的准确性和便利性。Ahmed 等人^[16]则专注于自主多旋翼无人机的制造和进展,利用深度学习技术解决电力线路绝缘子检测与故障识别问题,其实验结果表明了深度学习架构在电网绝缘子智能检查中的潜力,并为无人机电力巡检提供了新的数据支撑。Cantieri 等人^[17]提出的基于增强现实标签的辅助定位系统,提高了无人机在电力塔架巡检中的定位精度,增强了定位系统的可靠性。Diniz 等人^[18]提出了一种结合检测与跟踪电力输电线的策略,并设计了辅助控制的降落方法,通过视觉感知和跟踪技术实现无人机的自主导航。Foudeh 等人^[19]针对风扰动与噪声影响,提出了基于重复学习控制的解决方案,通过开发最优迭代学习控制算法,提升了无人机的轨迹跟踪性能,为电力线路检测中的路径规划和控制提供了新的优化思路。Ahmed 等人^[20]探讨了无人机系统在巡检中的应用优势,并提出了将深度学习、导航控制技术和先进传感器相结合的理念,以提升无人机的智能化水平和巡检效率。

随着无人机技术在电力巡检领域的快速发展,国内外的研究热度持续升温。尽管我国在无人机输电线路巡检领域的研究起步相对较晚,目前仍处于初步探索阶段,但在国家政策的大力支持和众多学者的共同努力下,我国在该领域的研究水平与发达国家的差距正逐步缩小,展现出强劲的发展势头。

2021 年 8 月 25 日,在安徽池州九华的特高压密集输电通道,5 架多旋翼无人机同步起飞,仅用 8 分钟便完成了 5 座超特高压输电线路杆塔的精细化自动巡检。此外,2022 年,云南省迪庆藏族自治州德钦县的 35 千伏永德线路成功实施无人机自主巡检,标志着云南 35 千伏及以上输电线路全面实现无人机自主巡检,覆盖范围达 9 万公里。该技术利用三维激光点云技术,实现了自动避障、拍照和录像,适应了云南复杂的地形地貌和气候条件,显著提升了电网运行维护的效率、安全性和智能化水平。截至 2024 年 8 月底,国网新疆电力有限公司实现了 2 万余公里输电线路的建模工作,并对 10 万余处缺陷进行了人机协同的双向识别,有效克服了新疆地区地广人稀、配电设施分布广泛、偏远地区信号覆盖不足等挑战,对传统巡视工作模式产生了显著改善。这些实践表明,

无人机在国内输电线路巡检中的应用正逐步深化，为电力行业的智能化转型提供了强有力的技术支撑。

针对无人机输电线路巡检领域中的路径规划技术研究，刘书山等人^[21]指出，传统的单一启发式算法在处理复杂的巡检任务时，往往会导致航迹重叠和局部最优解的问题。为了解决这些问题，作者提出了一种结合遗传算法和模拟退火算法的混合优化方法。通过这种方法，无人机可以在三维空间内更有效地规划巡检路径，减少航迹重叠并避免陷入局部最优。张佳庆等人^[22]针对跨越林区的高压输电线路巡检问题，提出了一种基于网络分析法和遗传算法的无人机巡检路径规划方法。研究指出，高压输电线路可能诱发森林火灾，而现有研究在路径规划中未充分考虑火灾风险因素及其相互影响。为此，作者结合历史数据和实地调研，识别了森林火灾的典型风险因素，并对线路周边林区进行了火灾风险评估，划分出高火险区域作为巡检节点。在此基础上，利用遗传算法规划出最短巡检路径，并引入最大偏转角约束对路径进行优化。朱程雯等人^[23]在其研究中构建了无人机巡线作业的环境模型，并以能耗最低和可巡线时间最长为目标函数，采用蚁群算法对巡检路径进行优化。同时，研究结合 GPS 定位技术，实现了无人机的自动巡线功能，并建立了相应的指挥系统。通过仿真和实际应用验证，该算法在确保巡检任务完成的前提下，显著缩短了巡检路径，减少了照片采集和分析的工作量，从而提高了整体巡检效率。于文强^[24]将无人机巡检的避障路径规划分为远距离和近距离两种维度，并提出了改进的快速随机探索树算法和椭球形人工势场算法，以应对不同巡检需求和提高路径规划的质量。刘靠^[25]探讨了无人机在电力线路巡检中的应用，并将路径规划分为全局和局部规划，提出以粒子群算法和约束随机采样为基础的方法，分别解决全局路径优化和局部避障问题。梁华尘等人^[26]考虑了电力杆塔和电力线路的多目标联合巡检，提出了基于“图论”理论的车载无人机协同巡检路径规划方法，通过改进中国邮递员问题和模拟退火算法，实现了协同巡检路径的优化。

通过分析无人机在输电线路巡检领域中的应用，无人机技术正逐步成为提高运维效率和保障电网安全的关键手段。当前研究集中于提升无人机的自主导航、智能路径规划、精确故障检测以及系统集成等方面。通过融合高级传感器、机器学习算法和增强现实技术，无人机已能够执行精确的巡检任务，提升了巡检效率和数据质量。尽管技术发展迅速，但在实际应用中，无人机巡检仍面临一定的挑战，如在复杂地形下的飞行稳定性，尤其是在变电站场景中，复杂的设备布局 and 空间限制使得巡检任务的执行更加困难。因此，需要探索更为先进的路径规划算法，利用人工智能技术优化无人机在复杂变电站环境中的飞行路径，减少碰撞风险，同时提高巡检效率。

1.2.2 变电站巡检研究

在 220kV 和 110kV 常规变电站的巡视过程中，人工巡检仍是主要的作业方式，通

常包括月度定期巡检、夜间红外测温特巡、因天气变化而进行的气温骤降特巡以及暴雨后的应急巡检等^[27]。传统的人工巡检方法依赖于巡视人员的经验，采用目测、耳听、鼻嗅、手触等手段进行设备状态评估。然而，这种方式存在明显的安全隐患，巡视人员的人身安全容易受到威胁；同时，由于人为操作和主观判断等因素，巡检结果的可靠性难以得到保证，进而影响到设备故障的发现与维护响应。

随着智能电网的快速发展，变电站巡视逐渐引入了智能机器人技术^[28]。智能巡视机器人是一种多学科交叉融合的产物，涉及高电压与绝缘技术、电子通信技术、控制理论、机械工程、计算机科学和人工智能等多个领域。该类机器人主要用于检测变电站设备的热缺陷、运行异常和仪表读数等问题，并将故障信息及潜在风险反馈给站内工作人员^[29]。现有的智能机器人分为有轨式和轮式两种类型，其中轮式机器人在变电站中的应用较为广泛。然而，轮式机器人的应用仍存在一些问题，如容易受到地面障碍物的阻碍，导致巡视效率低下，且故障率较高，维修成本也较为昂贵。此外，由于机器人结构设计的限制，其巡检视角通常较低，难以检测到设备上方或后方的区域，这对于高压设备的全面检测提出了挑战。

近年来，随着无人机技术的发展，有关变电站场景下多旋翼无人机巡检方案及其路径规划的研究逐步展开^[30]。多旋翼无人机结合红外成像、图像识别、雷达成像、无线图传等先进技术，已能够在变电站环境中执行巡检任务。无人机相比传统人工巡检和机器人巡检具有显著优势，能够大幅降低人员工作强度，减少漏巡率，提高故障识别的准确性，且具有较低的成本。得益于其灵活的飞行特性，无人机能够突破地面障碍，获得更广泛和精确的巡检视角。

在变电站无人机巡检方案设计方面，北京数字绿土科技股份有限公司基于数字化点云模型，开发了无人机自主巡检航线规划系统。该系统考虑了无人机在变电站飞行过程中的多重挑战，如自主起降安全、拍摄距离及焦距控制等，并实现了航线规划，以期确保巡检任务的全面性和高效性。然而，针对多约束条件下的最短飞行路径规划以及动态避障能力，该系统仍存在一定的改进空间。此外，航线规划的优化依赖于现有的点云数据模型，但在面对某些特殊环境时，如何根据实时变化进行有效调整仍是一个尚待解决的问题。国网福建省电力有限公司对无人机智能巡检系统在变电站中的应用进行了研究。该系统集成了无人机平台、传感器模块和控制系统，旨在实现无人机的智能化巡检。针对变电站高处设备，研究提出了专门的航线规划方法，考虑了设备的高度、结构和巡检需求，以规划适合高处设备的飞行路径，从而提升了巡检效率。然而，该航线规划方法在复杂的设备布局和环境中的仍然存在一定的局限性，尤其是在动态环境下，飞行路径的灵活性和适应性不足，这在实际应用中可能影响巡检效果。

在变电站无人机巡检路径规划的研究中，伍星宇^[31]提出了一种三维双向 A*路径规划算法。相较于传统的 A*算法，该算法缩短了路径长度并减少规划时间，从而提高了

路径规划的效率。然而，该方算法在动态避障能力方面存在不足，未能有效应对实时环境中的突发障碍，限制了其在复杂动态环境中的应用。普子恒等人^[32]针对变电站换流变压器区域的巡视盲区问题，提出了基于电磁环境影响的无人机巡检方案。研究构建了变电站的三维模型，并利用有限元法计算电磁场分布，确保电磁场强度低于安全阈值，从而规划出了一条安全的巡检路径。然而，尽管该方法针对特定区域的电磁干扰进行了优化，但并未实现对变电站全域设备的全面路径规划，导致其在复杂和大规模的巡检场景下的适用性受到一定限制。刘家辛等人^[33]针对变电站三维巡检需求，提出了一种基于三维点云数据的无人机路径规划方法。研究通过激光雷达获取的点云数据，结合环境障碍和安全距离，构建了变电站的三维栅格地图，并采用改进的 A*算法进行路径规划，目标为最小化路径长度并避开障碍。通过定制节点扩展策略和优化代价函数，显著提高了路径规划的效率。然而，该方法未进行局部路径规划的优化，未能充分考虑局部环境的复杂性，可能导致在复杂场景下路径的局部适应性不强。

变电站内的智能巡检机器人在一定程度上实现了巡检自动化，但仍存在维修成本高、故障率较大、巡检视角受限等问题，限制了其在实际应用中的推广。随着变电站无人机巡检路径规划研究的开展，目前尚处于初步阶段。现有的路径规划算法通常未充分考虑变电站特有的应用场景以及无人机的性能约束，且在实际路径规划中存在轨迹不平滑、路径点冗余、动态避障效果不佳等问题。因此，亟需针对变电站无人机巡检的特殊需求，设计一套高效、鲁棒的路径规划方案，以提升巡检效率、降低运维成本，并确保巡检过程的安全性和可靠性。

1.2.3 无人机路径规划算法研究

无人机路径规划是无人机自主巡检的核心技术之一，其目标是在复杂环境中生成一条安全、高效且满足任务需求的飞行路径。路径规划的质量直接影响到无人机巡检的效率、安全性以及任务完成的效果。在变电站巡检场景中，无人机不仅需要避开复杂的静态障碍物，还需要应对动态威胁，同时还需考虑巡检任务的特殊性，如对特定设备的近距离观测、多目标点覆盖等。因此，路径规划算法需要具备高效性、鲁棒性和适应性，以应对复杂多变的巡检环境。

根据算法的实现原理，无人机路径规划算法主要分为传统算法和群智能算法两大类。传统算法通常基于数学建模和确定性搜索方法，具有计算效率高、理论成熟的特点；而群智能算法则受自然界生物群体行为的启发，通过模拟群体协作与竞争机制实现全局优化，具有更强的适应性和鲁棒性，适用于复杂环境下的路径规划。

传统算法的主要代表是 Dijkstra 算法、A*算法、RRT 算法等，王云亮等人^[34]针对传统 A*算法在路径规划中存在的执行效率低和路径转折点过多的问题，提出了一种改进的 A*算法。该算法通过优化关键点选取和路径平滑处理，提升了路径规划的性能。王

志特等人^[35]针对传统 A*算法在路径规划中的局限性, 同样对其进行了改进。改进后的算法通过动态权重分配实际代价函数和预估代价函数, 优化了前端路径搜索的初始轨迹质量。同时, 作者结合曼哈顿距离和对角线距离设计了新型启发函数, 能够更精确地估算节点与目标节点的距离, 从而实现全局路径最短化, 并有效减少寻路时间和转向次数。Chen 等人^[36]在其研究中针对 RRT 算法收敛速度慢和搜索范围随机性大的问题, 提出了一种基于目标偏向人工势场的改进 RRT 算法, 用于无人机轨迹规划。研究通过引入目标偏向策略, 引导随机采样点的生成, 从而加速算法的收敛速度。同时, 结合改进的人工势场方法, 减少了迭代次数, 并提高了新生成节点的质量, 降低了路径成本。Guo 等人^[37]针对无人机在三维环境中的路径规划问题, 提出了一种基于飞行成本的改进 RRT 算法。该算法在标准 RRT 的基础上, 通过设计包含威胁强度和路径长度的飞行成本函数, 全面评估路径节点间的连接关系, 以满足无人机的安全需求和飞行约束。研究首先利用飞行成本函数和飞行约束启发新节点的扩展, 从前端解决路径规划问题; 其次, 通过成本函数引导父节点更新, 使算法在生成路径时同时考虑威胁和路径长度。

近年来, 随着计算能力的提升和优化理论不断发展, 群智能算法在无人机路径规划领域得到了广泛应用。Chen 等人^[38]提出了一种改进的黑猩猩优化算法, 以解决三维复杂环境下的路径优化问题。研究指出, 现有路径规划方法往往难以同时兼顾复杂飞行环境和无人机自身性能约束。为此, 作者通过引入差分变异算子增强了算法的搜索能力, 避免了早熟收敛问题; 同时, 采用改进的反向学习策略扩大了搜索范围, 确保算法不会遗漏高质量解; 此外, 提出了相似性偏好权重, 防止个体过度同化, 提升了算法跳出局部最优的能力。Zhang 等人^[39]在其研究中针对地震灾区物资配送的复杂环境, 提出了一种基于灰狼优化算法的改进自适应灰狼优化算法, 用于无人机的三维路径规划。作者设计了一种自适应收敛因子调整策略和自适应权重因子, 用于更新个体位置, 并通过收敛分析和测试函数仿真实验验证了改进算法的有效性。Phung 等人^[40]提出了一种基于球面向量的粒子群优化算法, 用于解决无人机在复杂多威胁环境下的路径规划问题。该算法通过粒子位置与无人机的速度、转向角及爬升/俯仰角的对应关系, 高效搜索配置空间以找到最小化成本函数的最优路径。昌吉祥^[41]采用改进的双向快速搜索随机树算法, 提升了电力线路巡检的寻优精度和规划速度。此外, 通过金鹰优化算法及其改进策略, 针对复杂环境下特定设备的巡检, 研究有效降低了路径规划的时间复杂度和计算量。

传统算法虽然在特定场景下表现优异, 但在面对变电站巡检中的复杂环境时, 往往存在适应性不足、计算复杂度高等问题。群智能算法在解决复杂环境下的路径规划问题时表现出较强的适应性, 但其计算效率较低。针对以上问题, 可以采用算法融合的方法, 取长补短, 将不同算法的优点结合起来。刘宏胜^[42]结合蚁群算法和模拟退火算法来提升收敛速度, 减少无人机的全局路径长度。同时, 利用改进的稀疏 A*算法减小局部避障路径的角度变化量, 确保路径的平滑性。Zhang 等人^[43]提出了一种启发式交叉搜索与救