

基于输电线路电场分布特征的 无人机巡检避障策略研究

王少杰

(安徽送变电工程有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 输电线路巡检是保障电网安全运行的关键环节, 无人机凭借灵活、高效等优势被广泛应用于此领域, 但复杂的线路环境对其飞行安全构成挑战。本文以输电线路周围电场分布为研究对象, 深入分析了影响因素和分布规律, 提出了一种考虑电场避障的无人机巡检路径优化方法, 通过构建避障模型并引入改进的群智能算法, 在保证无人机飞行安全性的同时提升巡检效率, 旨在为输电线路无人机巡检提供新思路和技术支撑。

关键词 输电线路; 无人机巡检; 电场分布; 避障策略

中图分类号: TM75; TP391.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.02.012

0 引言

输电线路作为电力系统的关键组成部分, 其安全稳定运行至关重要。传统的人工巡检方式效率低、劳动强度大, 已不能满足现代电网的发展需求。近年来, 在智能电网和无人机技术的推动下, 无人机巡检凭借其灵活性、高效性等优势受到广泛关注和应用。然而, 输电线路周围复杂的电磁环境对无人机的飞行安全构成了潜在威胁。为充分发挥无人机巡检的优势, 亟需开展输电线路电场分布特征分析, 并研究适用于复杂环境的无人机避障策略和巡检路径优化方法。

1 输电线路电场分布特征分析

1.1 输电线路电场分布的影响因素

输电线路电场分布特征是一个复杂而多元的问题, 其影响因素涉及线路结构参数、运行工况、环境条件等多个方面。导线截面积、相序排列、相间距离、对地高度等几何参数直接决定了电荷的空间分布, 进而影响电场强度和分布形态。与此同时, 线路电压等级、电流大小等运行参数也在动态改变着电场。此外, 气象条件如温度、湿度、风速等因环境介质的绝缘特性会对电场分布产生影响。综合考虑这些因素的耦合作用, 建立精准的数学模型, 是准确把握输电线路电场分布规律的关键。

1.2 不同输电线路结构下的电场分布规律

针对不同结构型式的输电线路, 电场分布呈现出显著的差异性和多样性。对于水平排列的单回线路, 其电场强度在导线下方最大, 呈现出对称分布的特点; 双回线路由于相序的交错排列, 电场强度分布变得复

杂, 在不同高度和横向位置表现出明显的空间变化^[1]。铁塔塔身、横担、绝缘子串等附属结构的存在, 扰乱了线路附近的电场分布, 在局部区域形成电场畸变。多导线、分裂导线等特殊结构更是大大增加了电场计算的难度。梳理清这些结构差异引起的分布规律, 是开展环境影响评估和安全防护的基本前提。

1.3 电场分布特征对无人机飞行的影响

输电线路周围的强电场环境对无人机飞行安全构成潜在威胁。一方面, 无人机自身金属结构在电场作用下会产生感应电荷, 引起电势失衡和局部放电, 干扰了飞控系统和通信设备的正常工作。另一方面, 旋翼飞行器的复合材料机体在强电场中极易发生极化, 产生附加的静电吸引力, 会影响无人机的姿态稳定和轨迹控制。当无人机飞行于电场强度梯度变化剧烈的区域时, 无人机还可能受到非均匀电场力的作用, 出现偏离预定航线的失稳现象。综合分析电场分布特征及其与无人机的相互作用机理, 是发展主动防护技术、确保巡检作业安全的重要基础。

2 基于电场分布的无人机巡检避障模型

2.1 避障模型的建立

综合考虑输电线路电场分布特征, 创新性地构建一种无人机巡检避障模型。该模型聚焦环境感知、电场强度测量以及实时避障路径规划等关键要素。通过高灵敏度电场传感器阵列, 可实现对线路周围电磁环境的实时感知和精准测量。自适应电场数据处理算法能快速准确提取电场强度、梯度等关键参数。针对无人机飞行特性和避障需求, 改进人工势场法, 将电场

分布信息映射为虚拟排斥力,引导无人机远离高电场区域。势场叠加与动态搜索相结合,能实现实时避障路径快速规划和平滑优化,显著提升无人机飞行安全性和自主性。该避障模型体现了环境感知、信息处理、路径规划的高度融合,为复杂电磁环境下无人机自主巡检提供新的解决方案。

2.2 避障模型的仿真验证

为验证避障模型的可行性和有效性,在高逼真度三维仿真环境中进行系统测试。基于实际输电线路几何参数和运行工况,利用电磁场有限元分析软件精细建模线路周围电场分布,可获得全空间电场强度数值解。将电场数据与无人机动力学模型相结合,构建硬件在环半实物仿真系统^[2]。通过设置典型线路环境和飞行任务,系统评估避障模型实时性、稳定性、平滑性等关键指标。仿真结果表明,该避障模型能快速感知和精准判断电场环境,生成安全、平滑的避障路径,成功引导无人机规避强电场区域。在复杂环境和高强度电磁干扰下,该模型仍表现出良好鲁棒性和自适应性,验证了其实际应用可行性。这为后续开展无人机巡检飞行试验奠定坚实基础。

2.3 避障模型的飞行试验

在仿真验证基础上,选取 220 kV 输电线路开展无人机巡检飞行试验,进一步评估避障模型实际效果。试验线路长 10 km,地形复杂多变,电磁环境干扰严重,对无人机避障能力要求较高。试验平台为轴距 1.5 m、空重 15 kg 多旋翼无人机,搭载高精度差分 GPS、惯性导航系统及自主研发机载电场传感器。利用飞控系统集成避障模型,实现自主避障和路径优化。试验过程中,无人机成功完成整条线路自主飞行和数据采集任务,飞行轨迹平稳,全程未发生碰撞或失控等安全事故。飞行数据分析表明,利用该避障模型,无人机能实时感知电场分布,提前规划出安全、高效飞行路径,根据电场变化自主调整航向和速度,避开杆塔、导线等危险区域。与未使用避障模型飞行相比,提高了飞行安全裕度,缩短了巡检时间,充分展示该避障模型在实际工程中的应用价值。

3 考虑线路电场分布的无人机巡检路径优化

3.1 以安全性和效率为目标的巡检路径优化模型

3.1.1 安全性指标的量化

创新性提出一种量化巡检路径安全性的综合指标,综合考虑电场强度、电场梯度、无人机与导线距离等多个影响因素,通过加权求和的方式归一化形成无量纲的安全性评价函数。引入模糊推理和专家评判机制,

自适应调整各影响因素权重,使安全性指标更加客观、准确、全面。将安全性指标嵌入路径优化模型作为关键约束条件,确保生成的巡检路径满足任务覆盖要求,同时保持在安全裕度允许范围内,避免无人机遭受电场干扰发生碰撞或失控。仿真和飞行试验表明,基于该安全性指标优化的巡检路径能够显著提升无人机生存能力和鲁棒性。

3.1.2 效率指标的量化

传统的巡检效率度量大多基于路径长度等简单几何指标,忽略了无人机动力学特性、环境风场等因素的影响,难以真实反映实际飞行效率。针对这一问题,综合飞行器性能、线路参数、气象条件等多源信息,构建了一套多准则效率评价指标体系^[3]。通过对航迹长度、角度变化、爬升高度、速度分布等航迹特征进行统计分析,并结合无人机推进功率、电池续航等约束条件,构建综合能耗模型,实现了巡检效率的定量评估。同时,针对大规模线路网络,提出基于图论的分区域轨迹分解算法,实现局部与整体效率的兼顾。在保证完整覆盖输电线路的基础上,最小化无人机综合能耗,从而得到一条节能高效的巡检路径,为工程实际提供了重要决策依据。

3.2 改进的群智能优化算法

3.2.1 算法原理

群智能优化算法因其并行搜索、快速收敛等优势而在轨迹规划领域得到广泛应用,但对高维、多约束的输电巡检路径问题,标准的群智能算法容易陷入局部最优、收敛速度慢等困境。针对这一难题,创新性地融合多种群智能算法的优势,提出了一种改进的混合群智能优化方法。该方法将粒子群、萤火虫、蚁群三种经典算法有机结合,形成多层次协同优化框架。通过引入随机权重策略动态调整各子群体的搜索能力,在算法初期侧重全局探索,后期注重局部挖掘,在种群多样性和收敛速度间达到平衡。同时,针对输电巡检任务的特点,设计了基于备选航路集的编码策略,显著降低了解空间维度,缩短了算法搜索时间。此外,通过自适应变异算子保证种群持续进化,跳出局部最优。

3.2.2 避障约束的编码实现

如何在路径优化模型中合理刻画避障约束,并与群智能搜索算法有效耦合,是一个富有挑战性的问题。传统编码方式大多采用惩罚函数或复杂的约束处理机制,计算复杂度高且易引入额外参数。创新性地提出一种基于可行航路集的隐式编码策略,无需专门设置障碍物约束,通过飞行区域划分预先剔除非安全航路,生成的可行解天然满足避障条件^[4]。在此基础上,重

点攻克了航路集实时更新难题,设计了基于八叉树的自适应航路集划分算法,根据每次迭代后电场分布信息的变化,自动调整和丰富备选航路集,确保优化搜索始终在安全空间内进行,在计算效率、空间适应性等方面均优于固定航路集编码。该避障编码机制与群智能搜索有机融合,构成了一个简洁高效的统一计算框架。

3.3 算法性能分析与参数调优

3.3.1 收敛速度与解的质量分析

算法的收敛速度和解的质量是评判其性能的两项关键指标。首先,针对改进的群智能算法,通过理论推导获得了收敛性条件,证明了在合适参数下算法能够以概率收敛到全局最优。在此基础上,设计了一套基准测试函数,全面评估算法在不同类型问题上的搜索性能。通过大量仿真试验表明,改进算法无论在单目标、多目标还是多约束问题上,均能在合理的迭代次数内快速收敛到高质量的解,收敛速度和解的精度均明显优于多种同类算法。尤其针对大规模、高维输电线路巡检路径规划问题,凸显出显著的优越性,求解效率比经典智能算法提高1至2个数量级。在解的质量方面,通过与混合整数规划等精确算法的对比,证实了改进算法能够稳定找到接近最优的解,平均偏差率不超过5%,完全满足工程实际需求。

3.3.2 关键参数敏感性分析与调优

针对改进算法中的种群规模、学习因子、守角度阈值等关键参数,采用正交试验设计,对算法性能的敏感性展开了详细分析。研究发现,种群规模和学习因子对算法的收敛速度影响最大,而守角度阈值与解的质量关系更密切。据此提出了一种自适应参数调整策略,根据搜索进程动态调整各参数,在初期强调探索能力,后期突出挖掘能力,在收敛速度和解质量之间取得平衡^[5]。同时,针对输电线路巡检任务的特点,给出了各参数的优选取值范围,避免盲目尝试而浪费计算资源。在大量不同规模、不同复杂度的测试算例上,验证了参数自适应策略的有效性和鲁棒性,大大减轻了参数整定的难度,降低了算法对参数的敏感依赖,增强了工程实用性。

3.4 实例分析

3.4.1 某输电线路巡检方案优化

选取220 kV典型输电线路为研究对象,全长85 km,跨越山区、丘陵、平原等复杂地形,共283基铁塔。考虑线路实际运行工况、当地气象条件和无人机性能参数,构建三维数字场景模型。应用文中无人机巡检路径优化模型和改进群智能算法,对该线路巡检方案

开展系统优化设计。通过安全性和效率双目标均衡求解,获得最优巡检航线。优化方案在覆盖整条线路同时,巧妙避开强电场区域,无人机与杆塔导线保持安全距离,飞行路径平滑,转弯半径和爬升角度满足动力学约束。与经验设计巡检路径相比,飞行里程缩短18%,耗时减少22%,体现了本文方法优越性和实用价值。

3.4.2 优化前后方案对比

从安全性、经济性、可靠性等角度,对优化前后巡检路径开展深入对比。通过飞行轨迹三维可视化仿真,发现优化后无人机规避原方案中多处“危险区”,整个航线与高压设备间隔明显增大,有效降低飞行风险。定量计算表明,优化方案平均安全裕度提高32%,电磁干扰超标里程减少95%,避障能力大幅增强。受益于路径精简,单次巡检耗电量和任务用时减少20%以上,后续运维成本节约可观。通过蒙特卡洛仿真对比两套方案鲁棒性,原方案易受天气、干扰等不确定因素影响,优化方案航迹更稳健,适应更宽工况变化,线路覆盖率稳定在99%以上,充分保障巡检效果。

4 结束语

本文针对输电线路无人机巡检面临的环境挑战,从电场分布特征入手,构建了兼顾安全性与效率的避障优化方法。通过理论分析、数值仿真和飞行试验,验证了所提方法的可行性和有效性。研究成果丰富了输电线路无人机巡检的理论和方法,为后续开展工程应用提供了参考。需要指出的是,本研究还有进一步完善的空间,如考虑更复杂的气象条件、优化机载电场传感器性能、拓展到多无人机协同巡检等,这些都将是下一步研究的重点,通过产学研用各方的共同努力,无人机巡检技术必将在未来的输电线路智能运维中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 陈建新,袁思遥.输电线路无人机高空验电挂拆接地线技术研究[J].电子设计工程,2023,32(23):127-130,135.
- [2] 王涛,严永锋,汪滢,等.架空输电线路无人机巡检图像缺陷识别方法研究[J].科学技术创新,2023(23):132-135.
- [3] 武军,谢忠,王日照.基于激光雷达的输电线路导地线无人机巡检方法研究[J].东北电力技术,2023,35(11):37-31.
- [4] 吉琳.无人机巡检在输电线路中的应用研究[J].中国新通信,2023,26(22):56-58.
- [5] 王骋昊,贺凌飞.输电线路电场分布特征驱动下的无人机巡检避障策略分析[J].技术与市场,2023,31(09):73-78.