

无人机展放导引绳放线技术要点分析

王海军

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 为了实现无人机展放导引绳作业的高效、安全和精确, 本文系统分析了无人机航线规划、导引绳释放、飞行与放线同步协调、路径控制与稳定性保障等关键技术要点, 旨在为相关工程设计与应用提供参考。研究结果表明, 优化的飞行路径规划和高度控制能够提高导引绳的释放精度; 张力调控与防缠绕设计降低了断绳和摆动风险; 同步飞行与放线速度匹配策略保障了复杂地形下的操作稳定性; 结合实时监测与反馈控制可快速识别异常并实施应急响应。

关键词 电力线路架设工程; 无人机; 展放; 导引绳; 放线技术

中图分类号: V19; TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.001

0 引言

在电力线路架设工程中, 传统导引绳放线方式面临诸多挑战。复杂地形如高山、峡谷、跨越江河等区域, 人工放线难度大、效率低, 且安全风险高。同时, 恶劣天气条件也会严重影响施工进度和质量。随着无人机技术的日益成熟, 其在多个领域展现出强大的应用潜力。将无人机应用于导引绳放线, 可充分发挥其飞行灵活、不受地形限制等优势, 快速、精准地完成导引绳的展放工作, 有助于解决传统放线难题, 并提升电力建设水平。

1 无人机航线规划与控制技术要点

1.1 飞行高度与距离控制要求

在无人机展放导引绳作业中, 飞行高度和距离控制是关键要点。无人机高度需要高于地面障碍物的最大高度, 以防止绳索与地面接触或受地面风影响。一般推荐飞行高度保持在 30 ~ 50 m 之间, 实际高度可根据任务现场的障碍物高度进行调整。飞行距离需与导引绳长度匹配, 如 500 m 长的导引绳, 航线设计应在 500 m 内平稳释放绳索。基于此, 系统需要使用高精度 GPS (全球定位系统) 定位和惯性测量单元数据, 并在飞控系统中加入高度和距离的实时反馈功能, 确保在飞行过程中, 任何偏离目标的高度或距离变化都能迅速被纠正, 从而保障导引绳的展放质量^[1]。

1.2 飞行路径精度与轨迹稳定性

飞行路径的精度直接决定了导引绳的展放位置是否符合预期目标, 因此需要在航线规划时严格控制路径误差。精确的航线规划首先要求使用高精度的数字地图和地理信息系统 (GIS) 数据, 以便在规划阶段就

避免可能的地形干扰。飞行轨迹稳定性则依赖于无人机的姿态控制能力、外部传感器数据的可靠性, 以及飞控算法的优化。通过融合差分 GPS 和 RTK (实时动态定位) 技术, 可以将路径误差降低到厘米级, 确保导引绳沿预定线路展放。

1.3 避障能力与环境感知技术应用

无人机展放导引绳作业通常在复杂环境中进行, 跨越森林、建筑物或电线杆等场景对避障能力要求较高。环境感知技术的引入可以提升无人机应对复杂场景的能力。激光雷达、视觉传感器、超声波传感器等技术可用于实时扫描无人机前方障碍物, 生成高精度三维环境模型, 同时通过飞控算法动态调整飞行路径。避障能力的参数要求探测距离达到 20 m 以上, 角度覆盖前后左右 360°, 并将避障响应时间控制在 100 ms 以内。在路径规划时还需考虑风力影响和突发环境干扰因素, 如鸟类飞行和地面车辆移动^[2]。

2 导引绳释放系统技术要点

2.1 放绳机构结构与释放控制方式

放绳机构的关键部件包括放绳轮组、张力调节组件以及导向装置。在设计时, 放绳轮组需要选用高强度耐磨材料, 并具有良好的表面处理工艺以减少摩擦。轮组直径应根据导引绳的直径和张力求确定, 在 10 ~ 20 cm 之间, 同时采用多轮组并联方式以分散张力, 降低绳索的磨损; 导向装置必须保证导引绳按固定路径展开, 避免由于偏离轨迹造成的断裂或缠绕问题, 其角度误差应控制在 $\pm 3^\circ$ 以内, 保证绳索展放的平稳性。在释放控制方面, 需要结合电子控制系统与机械结构。电子控制系统通过对绳索张力的实时监测,

动态调整释放速度,释放速度宜在0.5~1.5 m/s之间,具体值取决于环境复杂程度和无人机的飞行速度。

2.2 导引绳张力调控机制

张力调控机制首先要实现实时的张力感知。张力传感器应具有高灵敏度和快速响应能力,其量程应覆盖实际作业张力范围,一般为5~50 N。通过传感器采集的张力数据,控制系统可以快速调整放绳轮的转速与制动器的扭矩,从而维持理想的张力值。

在动态调控过程中,张力变化速率需控制在0.5 N/s,确保绳索的平稳释放和无人机的飞行稳定。控制算法可采用模糊控制或PID控制方式,根据实时数据调整输出,避免因环境干扰造成张力过高或过低。可用如下公式表示张力调节过程:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中, $u(t)$ 为控制输出用于调节张力的动作变量,例如放绳速度或制动器力矩; $e(t) = T_{\text{目标}} - T(t)$ 为实时张力误差, $T_{\text{目标}}$ 是目标张力值, $T(t)$ 是当前实际张力; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数。通过实时调整 $u(t)$,系统可动态控制张力变化速率,确保张力平稳变化和无人机飞行稳定。

2.3 断绳与缠绕风险防控措施

断绳的主要原因是绳索材料强度不足、张力控制不当或外部环境干扰。针对这些问题需采取以下措施:

首先,需要选择高强度的绳索材料,如高分子聚合物纤维,并经过多次疲劳测试与抗拉试验。绳索的额定强度应至少是实际最大张力的两倍。

其次,在张力控制方面,需要设定安全阈值。当张力超过设定值时,放绳机构应立即触发自动缓冲功能,降低释放速度或停止释放。为进一步防止断绳,在关键节点上安装应力监测装置,实时记录应力峰值并自动生成预警信号。

最后,缠绕风险主要源于绳索在释放过程中的不规则摆动或外界障碍物干扰。

3 无人机飞行与放线同步协调技术

3.1 放线速度与飞行速度匹配策略

为了绳索始终保持适度张力,放线速度应与无人机的飞行速度保持精准同步。通过实时监测无人机的飞行速度数据,放绳系统需动态调整绳索释放速率,确保张力稳定在目标范围内,如10~20 kN。在实际操作中,使用飞行控制系统和放绳控制系统的通信接口,利用差分GPS和惯性导航数据,实时计算无人机的瞬

时速度,再将其作为放绳速度的参考输入值。若无人机飞行速度波动超过1 m/s,放绳系统则应在200 ms内响应并调整放线速率,以避免绳索松弛或过度拉紧。

3.2 起始点与终止点控制精度

在导引绳展放作业中,起始点与终止点的位置精度直接关系到绳索的整体布放质量。起始点精度要求无人机在放绳前准确悬停于指定位置,其误差应控制在10 cm以内,使用高精度RTKGPS和激光测距仪结合的方式,确保无人机在悬停时位置稳定。在放线过程中,无人机需沿预定路径稳定飞行,最终在终止点精准停止。终止点的精度需要达到20 cm以内,以确保绳索完全展放到设计位置而不偏离路径。

3.3 转弯、跨越等复杂地形下的同步控制要点

在复杂地形如转弯和跨越河流或障碍物的情况下,无人机的飞行速度会发生变化,因此放线速度需要实时调整以维持稳定的绳索张力。飞行路径转弯时,飞行速度通常减小,此时放线速度应同步降低。通过路径预测算法,系统可以预先获取转弯区域的路径曲率,并根据此数据提前调整放线速率,确保绳索张力变化在安全范围内。为实现同步控制精度,系统需采用高响应速度的传感器和快速控制算法,响应时间需控制在200 ms以内。路径调整算法每5 cm重新计算绳索轨迹,确保放线过程的精细化控制。通过集成激光雷达、视觉传感器和实时数据融合,感知复杂地形变化,并实时调整飞行和放线参数,确保绳索展放过程的稳定性。在控制参数上,每个关键节点的张力误差不得超过1 N,放线速度误差需保持在0.1 m/s以内,以确保复杂地形下的同步控制效果^[3]。

4 导引绳路径控制与稳定性保障

4.1 避免导引绳摆动与脱落的路径设计要求

导引绳路径设计需严格控制展开路线,避免绳索因摆动或脱落而影响放线质量。路径规划时,首先要精确计算绳索张力和重力的分布,通过轨迹仿真和风洞试验确定理想展开轨迹。轨迹仿真模型需包含绳索长度、直径、密度等参数,以及无人机的飞行速度和高度数据。设计时,尽可能避免急剧转弯或高度变化,弧度和角度变化应缓慢平滑,每米距离的轨迹偏差不得超过10 cm。滑轮表面采用低摩擦涂层,减少滑动时的摩擦阻力,进一步抑制摆动。

4.2 提升绳索贴地贴物性能的技术措施

为确保绳索贴合地表或物体表面,放绳机构需安装导向槽和贴地滚轮,滚轮表面带有柔性橡胶层以增

加附着力。滚轮直径设置为 20 ~ 30 cm, 并保持高转速以防止绳索打滑或悬空。进一步提升贴地性能的措施包括在路径设计阶段加入预压装置, 利用绳索自身的重量和张力使其自然贴附地表, 确保每段绳索贴地的实际接触面积大于 80%。在现场环境中对绳索贴地性能进行实时监测, 实时反馈调节绳索张力和放线速率, 达到理想的贴合状态。

4.3 风力、障碍物等外界扰动下的导引绳稳定技术

在风力较大的环境下, 采用主动张力调节系统对绳索张力进行动态补偿。当风速超过 5 m/s 时, 系统自动增大绳索张力以抵消风力引起的摆动, 同时通过增加导引滑轮的摩擦系数来降低绳索的晃动幅度。对于障碍物干扰, 结合三维路径规划算法绕过障碍, 同时在无人机飞行过程中调整路径方向, 使导引绳始终保持稳定^[4]。

5 实时监测与反馈控制要点

5.1 导引绳状态实时感知技术

实时感知导引绳的张力、位置和运动状态是保障放线过程稳定的关键。张力传感器需具备高灵敏度和快速响应能力, 量程应覆盖常规作业张力范围, 推荐值为 5 ~ 50 N, 采样频率至少 10 Hz。通过传感器反馈的实时张力数据, 放线系统可在张力超出目标范围时迅速调整绳索释放速度。

位置感知需要结合高精度的 RTKGPS 和惯性导航单元, 精度要求在 1 cm 以内。采用多点分布式传感器布置, 监测绳索不同位置的张力分布和运动状态, 帮助识别潜在的断裂或摆动风险。结合摄像头或激光雷达进行辅助监测, 可确保在动态环境中获得可靠的绳索状态数据。

5.2 数据回传与飞控系统联动机制

实时监测数据需要通过高效的通信链路回传至飞控系统, 通信延迟应低于 200 ms, 以便及时调整无人机的飞行参数和放绳控制策略。采用的通信协议需具备低延时、高带宽的特性, 如工业级无线网桥或 5G 模块。飞控系统收到实时监测数据后, 根据设定的张力范围和位置误差范围 (例如张力偏差 ± 1 N, 位置误差 ± 5 cm) 计算调整量, 立即调整飞行速度、高度或释放速度。联动机制的核心是确保放线控制算法与飞控算法协同工作, 形成闭环控制系统。在现场环境中, 还可通过地面站实时监控数据变化, 远程下发指令, 对复杂作业场景中的绳索状态进行快速干预^[5]。

6 作业完成后的收绳与落点控制技术

6.1 落点定位精度保障技术

在完成导引绳展放作业后, 确保绳索精确落在预定位置, 精度保持在 ± 10 cm, 以便实现高效回收和固定。采用 RTKGPS 和高精度激光测距仪进行位置监测, 提供实时厘米级定位, 补激光测距仪用于校正和充距离测量, 二者结合将最终定位误差控制在 5 cm 左右。为进一步提升落点精度, 飞控系统需要提前规划回收路径和终点位置, 结合惯性导航单元和视觉定位技术, 在接近落点时减速并调整悬停高度至 10 m 以下。

6.2 收绳或固定方式的安全性与稳定性

绳索在回收阶段可能会受到残余张力或风力的影响, 导致摆动或缠绕。因此, 回收系统需要具备动态张力调节功能, 实时调整张力以保持绳索平稳。调节过程中, 张力传感器需支持 5 ~ 50 N 的测量范围, 采样频率达到 10 Hz 以上, 确保任何异常变化能迅速反馈并处理。在固定方式方面, 采用电动收绳滚筒, 滚筒表面设置防滑橡胶层, 直径 20 ~ 30 cm 之间, 有效防止绳索滑脱。固定完成后, 系统应执行张力释放操作, 使绳索在低张力状态下被稳固存储。

7 结束语

无人机展放导引绳放线技术的关键要点涵盖航线规划、导引绳释放系统、飞行与放线同步协调、路径控制、实时监测及作业完成后的收绳与落点控制等方面。这些技术要点相互关联、协同作用, 共同保障放线作业的精准性、稳定性与安全性。未来, 随着无人机技术的持续进步与应用场景的不断拓展, 无人机展放导引绳放线技术将朝着更高效、更智能、更可靠的方向发展, 为相关领域施工建设提供更为有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 伍元铭, 付贵, 朱新宇. 系留无人机收放线系统模糊 PID 同步控制研究 [J]. 机械工程与自动化, 2023(01):172-174.
- [2] 伍元铭. 系留无人机自动收放线系统设计与研究 [D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [3] 陈虎. 架空输电线路无人机放线工艺 [J]. 电工技术, 2024(06):178-180, 184.
- [4] 李君章, 朱兆伟. 基于无人机连续穿越放线滑车的架线技术及应用 [J]. 企业管理, 2023(S2):322-323.
- [5] 高志琪. 旋翼无人机展放牵引绳技术在输电线路施工中的应用 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(07):70-73.