

基于多源异构无人机的精巡调度平台研究及应用

赵建昊, 刘振武, 吴俊峰, 郝磊, 王安颖, 王勃

(天津思极科技有限公司, 天津 300010)

摘要: 随着电力网络规模扩大和复杂化, 传统电力巡检面临效率低、风险高、成本大等问题。电力巡检场景多样化与单一类型无人机性能局限性之间的矛盾, 以及多源异构数据处理与多无人机协同调度的困难, 制约了无人机在电力巡检中的应用效果。研究精准起降的实时动态调度管控技术, 基于 RTK 与 AprilTag 融合定位方法和多智能体强化学习算法, 开发了基于多源异构无人机的精巡调度平台。该平台构建了场景特征向量模型、基于信息熵的数据融合框架和能力-任务匹配度的协同调度模型, 实现了多无人机的精准定位、航线动态重规划和任务智能分配。实际应用结果表明, 该平台提高巡检效率 280%, 降低成本 58.3%, 为电力巡检智能化提供了有效解决方案。

关键词: 多源异构; 无人机精准定位; 电力巡检; 多智能体协同

Research and application of precision patrol scheduling platform based on multi-source heterogeneous unmanned aerial vehicles

ZHAO Jianhao, LIU Zhenwu, WU Junfeng, HAO Lei, WANG Anying, WANG Bo

(Tianjin SGIT Technology Co., Ltd., Tianjin 300010, China)

Abstract: With the expansion and increased complexity of power grids, traditional power inspection faces challenges of low efficiency, high risk, and high cost. The contradiction between diversified power inspection scenarios and the performance limitations of single-type UAVs, as well as difficulties in multi-source heterogeneous data processing and multi-UAV collaborative scheduling, have constrained the effectiveness of UAVs in power inspection applications. This paper investigates real-time dynamic scheduling control technologies for precise take-off and landing, develops a precision inspection scheduling platform based on multi-source heterogeneous UAVs using fusion positioning methods combining RTK with AprilTag and multi-agent reinforcement learning algorithms. The platform constructs scene feature vector models, information entropy-based data fusion frameworks, and collaborative scheduling models based on capability-task matching degrees, achieving precise positioning, dynamic route replanning, and intelligent task allocation for multiple UAVs. Practical application results show that the platform improves inspection efficiency by 280%, reduces costs by 58.3%, achieves landing precision of $\pm 5\text{cm}$ in normal weather conditions while maintaining $\pm 15\text{cm}$ in adverse environments, with an investment recovery period of approximately 1.8 years, providing an effective solution for intelligent power inspection.

Keywords: multi-source heterogeneity; UAV precise positioning; power inspection; multi-agent collaboration

天津思极科技有限公司自筹科技项目 (K92400025)

0 引言

随着特高压输电网络的不断扩展和电力基础设施的持续增长,电力设备的运行维护与安全监测面临着前所未有的挑战。传统的电力设备巡检主要依靠人工徒步或车辆巡查,不仅工作强度大、效率低,而且在山区、水域等复杂地形环境下存在较大安全隐患,难以满足现代电网对巡检质量和频次的要求。无人机凭借其机动灵活、成本低廉、智能化程度高等优势,正逐渐成为电力巡检的重要技术手段。特别是在“双碳”背景下,电网向更加智能化、数字化的方向转型,对电力设备运行状态的精细化监测与管理提出了更高要求。无人机智能巡检技术的研究与应用具有重要的理论价值和实践意义。

近年来,无人机技术在电力巡检领域得到了广泛应用,但仍面临着诸多挑战。国内外学者对电力巡检无人机系统开展了大量研究,这些研究主要分为三个方向:一是单一无人机巡检技术研究,文献[1]提出了基于多旋翼无人机平台的高性能电力综合巡检系统,文献[2]深入探讨了高压输电线路巡检机器人的障碍物识别与定位;二是多源数据处理技术研究,文献[3]基于深度强化学习实现了多无人机电力巡检任务规划,文献[4]对多源异构电力工程数据融合处理技术进行了系统研究;三是无人机定位与导航技术研究,文献[5]基于变分模态分解与近似熵实现了输电线路故障诊断。然而,现有研究仍存在以下不足:单一类型无人机难以适应复杂多变的电力巡检环境;多源异构数据的融合处理效率低下;多无人机协同调度算法缺乏自适应性;无人机精准起降技术在复杂电磁环境下可靠性不足。文献[6-7]的研究虽在多无人机协同方面取得进展,但缺乏对异构无人机特性的深入考虑。文献[8-9]在电力巡检场景建模方面提出了新方法,但未解决多场景下任务动态调整问题。文献[10]探讨了面向数字孪生的输变电设备多源异构数据自动采集方法,但未深入研究数据自适应融合技术。文献[11-13]在无人机精准定位方面取

得了一定成果,但在复杂电磁环境下的稳定性仍有待提高。

基于此,本文提出了一种基于多源异构无人机的精巡调度平台,通过融合实时动态载波相位差分技术(Real-Time Kinematic, RTK)与AprilTag的高精度定位技术、基于强化学习的多智能体任务调度算法和微服务架构,保证了电力巡检的高效、精准和安全,为电力行业智能化转型提供了新的技术路径。

1 电力多场景及多源异构

1.1 电力多场景分析

随着电力网络规模的不断扩大和复杂化,电力设备的安全运行维护面临着日益严峻的挑战。电力系统设备分布广泛,地理环境复杂多样,传统的人工巡检面临效率低下、危险性高、成本高昂等问题。无人机巡检技术的引入有效弥补了这些不足,但仍面临着巡检场景多样化与无人机能局限性的矛盾。

电力巡检场景主要包括:①输电线路巡检,需长距离飞行和拍摄;②变电站巡检,需对密集设备进行精细观测;③配电网巡检,需在城市复杂环境中识别设备;④紧急故障排查,需快速响应和精准定位。不同场景对无人机的飞行能力、续航时间、负载能力和采集准确度均有差异化需求。

为量化不同巡检场景的特性差异,采用场景特征评估向量模型,即

$$S_i = \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i, \varepsilon_i\} \quad (1)$$

式中, S_i 为第 i 个场景的特征向量; α_i 为环境复杂度; β_i 为任务紧急度; γ_i 为设备密集度; δ_i 为气象影响因子; ε_i 为安全风险指数。

1.2 多源异构数据分析

电力巡检过程中产生的多源异构数据主要包括可见光图像、红外热成像、激光雷达点云、气象数据和历史运行数据等。这些数据在格式、准确度、维度和时空尺度上存在显著差异,使数据融合和综合分析面临巨大挑战。

针对多源异构数据的特点，基于信息熵的自适应权重融合模型为

$$D_{fu} = \sum_{i=1}^n \frac{H(D_i)}{\sum_{k=1}^n H(D_k)} T_i(D_i) \quad (2)$$

式中， D_{fu} 为融合后的数据； $H(D_i)$ 为数据源 D_i 的信息熵； T_i 为数据转换函数。

该模型优点在于能够根据数据源的信息量动态调整融合权重，避免了传统等权重融合方法的局限性。

数据融合过程中，还建立了基于特征相似度的数据关联度计算模型，公式为

$$S(D_i, D_j) = \frac{\sum_{k=1}^m \omega_k s_k(F_k(D_i), F_k(D_j))}{\sum_{k=1}^m \omega_k} \quad (3)$$

式中， F_k 为第 k 类特征提取函数； s_k 为相应的相似度计算函数； ω_k 为权重系数。

1.3 多源异构无人机协同机制

电力巡检中，常用的无人机类型包括四旋翼无人机、固定翼无人机和垂直起降固定翼无人机等。每种无人机都有其优势和局限性，对比情况见表1。

表1 不同类型无人机对比

Tab. 1 Comparison of different type of drones

无人机类型	优势	局限性	适用场景
四旋翼无人机	悬停能力强，机动性好，起降简便	续航时间短，抗风力有限	变电站精细巡检，铁塔近距离观测
固定翼无人机	续航时间长，飞行速度快，载荷大	无法悬停，起降需要空间	输电线路长距离巡航，大面积概览
垂直起降固定翼	兼具悬停和远航能力	结构复杂，成本高，控制难度大	复杂地形中的综合巡检任务

针对多源异构无人机协同问题，提出基于能力-任务匹配度的协同调度模型，公式为

$$M(U_i, T_j) = \sum_{k=1}^m \eta_k C_k(U_i, T_j) \quad (4)$$

式中， $M(U_i, T_j)$ 为无人机 U_i 对任务 T_j 的适配度； C_k 为第 k 个评估指标； η_k 为指标权重。

在此基础上，构建考虑多目标优化的全局任务分配模型为

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l x_{ij} M(U_i, T_j) - \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l x_{ij} E(U_i, T_j) \quad (5)$$

式中， x_{ij} 为任务分配变量； $E(U_i, T_j)$ 为能源消耗； λ 为平衡参数。

2 无人机精巡技术

2.1 精准定位技术

精准定位是无人机巡检的关键技术之一。针对电力场景中的定位难题，提出RTK与AprilTag视觉标记融合的高精度定位方法。RTK技术利用基准站差分信号可实现厘米级定位，而AprilTag提供基于视觉的相对位置信息。两种技术优势互补，克服了单一技术在不同环境下的局限性。

RTK通过基准站与移动站之间的载波相位差分，能够实现厘米级的定位准确度。其基本原理是：利用已知精确坐标的基准站对卫星信号中的误差进行实时计算和修正，并将修正数据传输给移动站，从而显著提高移动站的定位准确度。AprilTag是一种高精度二维视觉标记系统，由黑白方块阵列组成具有独特ID的标记图案。通过计算机视觉算法，可从图像中提取标记的位置、姿态和ID信息。与传统二维码相比，AprilTag具有更强的抗干扰能力和更高的检测准确度。不同算法法定位准确度对比如图1所示。

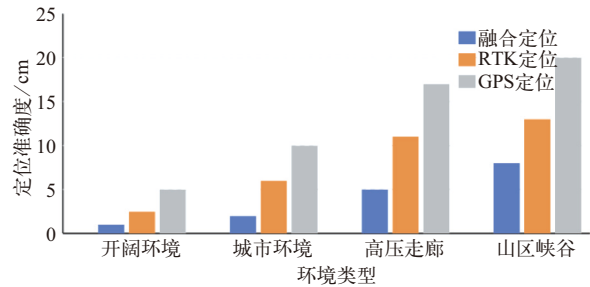


图1 不同算法法定位准确度对比

Fig. 1 Comparison of positioning accuracy between different algorithms

融合定位采用改进的卡尔曼滤波算法，状态更新方程为

$$X_{t|t} = X_{t|t-1} + K_t (Z_t - HX_{t|t-1}) \quad (6)$$

2.2 精准起降控制

精准起降是无人机巡检任务完成后返回充电站或更换电池的关键环节。传统起降方式依赖人工引导或简单的GPS定位，难以满足无人值守的全自动化需求。

基于多传感器融合的精准确降控制系统架构如图2所示。该系统综合利用视觉识别、RTK定位和激光测距等多种技术，实现了对降落平台的精准识别和定位。

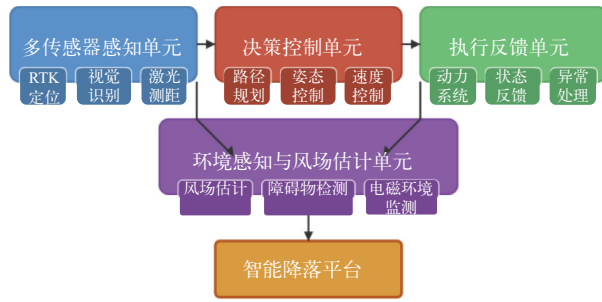


图2 降落控制架构

Fig. 2 Landing control architecture

降落过程采用分段控制策略，定义了三阶段降落控制模型为

$$\begin{cases} V_d = V_{\max} \left[1 - e^{-k_1(d-d_s)} \right], & d > d_{\text{far}} \\ V_d = V_{\text{mid}} \frac{d - d_{\text{near}}}{d_{\text{far}} - d_{\text{near}}}, & d_{\text{near}} < d \leq d_{\text{far}} \\ V_d = V_{\min} \frac{d}{d_{\text{near}}}, & d \leq d_{\text{near}} \end{cases} \quad (7)$$

式中， V_d 为下降速度； d 为距离降落平台的高度； d_{far} 、 d_{near} 和 d_s 分别为远距离阈值、近距离阈值和安全距离； $V_{\max}$ 、 V_{mid} 和 $V_{\min}$ 分别为最大、中等和最小下降速度； k_1 为速度调节参数。

为适应复杂风场环境，风扰动补偿模型为

$$F_{\text{comp}} = \mathbf{M} \hat{\mathbf{W}} f(\rho, A, \theta) \quad (8)$$

式中， $\mathbf{M}$ 为补偿增益矩阵； $\hat{\mathbf{W}}$ 为估计风场向量； $f(\rho, A, \theta)$ 为考虑空气密度 ρ 、作用面积 A 和迎风角 θ 的影响函数。

2.3 自主返航与避障技术

电力巡检环境中，高压线路、铁塔和地形障碍给无人机的安全返航带来挑战。传统返航方式采用简单直线路径或原路返回，安全性和效率均有不足。

针对这一问题，提出了一种基于多层次环境感知的智能返航系统。该系统利用多传感器数据构建三维环境模型，并基于改进的RRT算法进行实时路径规划，即

$$P_{\text{opt}} = \arg \min_{P \in \Omega} \left\{ \int_0^1 [\omega_1 L(P(t)) + \omega_2 E(P(t)) + \omega_3 R(P(t))] dt \right\} \quad (9)$$

式中， $P(t)$ 为参数化路径； L 为路径长度函数； E 为能耗函数； R 为风险函数； ω_1 、 ω_2 和 ω_3 为权重系数； Ω 为可行路径集合。

引入基于能量感知的动态路径调整机制，公式为

$$E_{\text{remain}}(t) = E_0 - \int_0^t P_n(\tau) d\tau - E_{\text{re}} \quad (10)$$

式中， $E_{\text{remain}}(t)$ 为剩余能量； E_0 为初始能量； $P_n(\tau)$ 为飞行功率函数； E_{re} 为安全储备能量。当 $E_{\text{remain}}(t)$ 低于阈值时，系统会自动重规划路径，优先选择能耗更低的路线。

2.4 动态任务调度技术

电力巡检任务调度需要同时考虑设备特性、环境因素和任务优先级等多方面因素。传统的静态分配方式难以适应动态变化的环境和需求。

为此建立基于多智能体强化学习的动态任务调度系统，其核心价值函数更新规则为

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a_t) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (11)$$

该系统采用图3所示的架构，包括状态感知、决策优化、执行控制和学习更新四个功能模块。

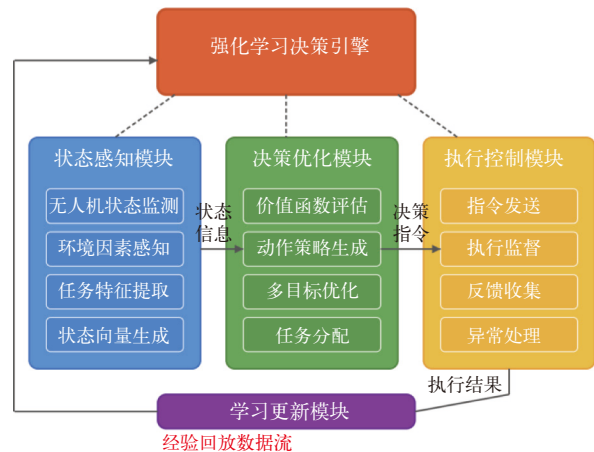


图3 动态任务调度系统架构

Fig. 3 Architecture of dynamic task scheduling system

引入任务紧急度自适应评估机制，公式为

$$U(T_i, t) = U_0(T_i) e^{\beta(t-t_0)} + \sum_{j=1}^k \omega_j F_j(t) \quad (12)$$

式中， $U(T_i, t)$ 为任务 T_i 在时刻 t 的紧急度； $U_0(T_i)$ 为初始紧急度； β 为时间衰减因子； $F_j(t)$ 为外部影响因素（如天气变化、设备状态等）； ω_j 为权重系数。

该机制能够根据环境变化动态调整任务优先级，提高调度的灵活性和适应性。

2.5 航线动态重规划

电力巡检航线面临诸多不确定因素干扰，如天气变化、突发任务和能量限制等。航线动态重规划系统架构如图4所示，包括环境感知、变化评估、触发决策和路径生成四个功能模块。

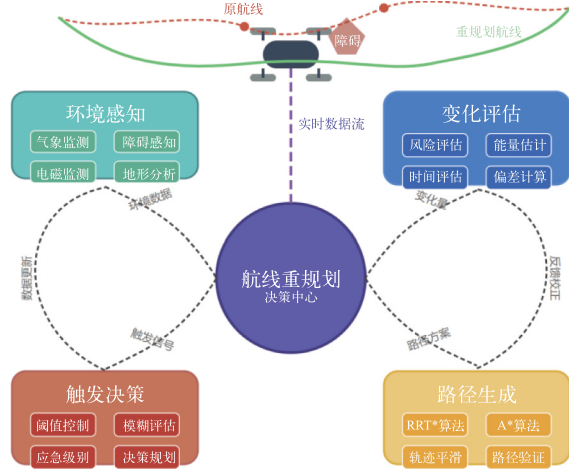


图4 航线动态重规划系统架构

Fig. 4 Architecture of dynamic route planning system

系统核心是基于环境变化的重规划触发评估模型，公式为

$$T_{tr} = \sigma \left(\sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x_i, x_i^0) - \theta \right) \quad (13)$$

式中， σ 为sigmoid函数； f_i 为变化量评估函数； x_i 和 x_i^0 分别为当前值和参考值； ω_i 为权重系数； θ 为触发阈值。

该模型综合考虑风速变化、剩余电量与任务变更等因素，智能决策是否需要重规划航线。一旦触发重规划，系统就基于改进的快速探索随机树算法生成新航线，公式为

$$P_{new} = \arg \min_{P \in \Omega} \{ \omega_1 L(P) + \omega_2 E(P) + \omega_3 R(P) - \omega_4 V(P) \} \quad (14)$$

式中， $L(P)$ 为路径长度； $E(P)$ 为能耗估计； $R(P)$ 为风险评估； $V(P)$ 为路径价值，与访问点重要性相关。

3 精巡调度平台设计

3.1 系统总体架构

精巡调度平台采用分层分布式架构，包括感知层、传输层、计算层和应用层，如图5所示。

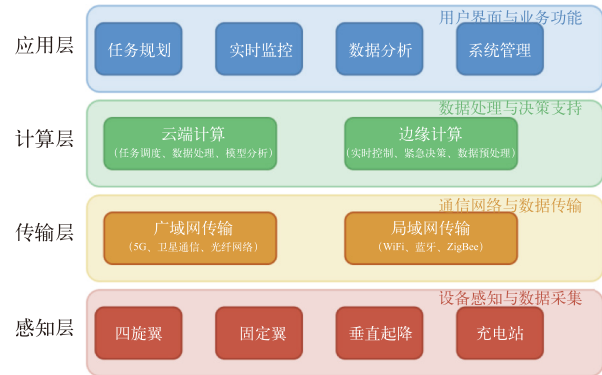


图5 精巡调度平台架构

Fig. 5 Architecture of precision patrol scheduling platform

感知层由各类无人机及其搭载的传感器组成，负责采集基础数据；传输层基于5G、卫星通信等技术构建高可靠、低延时的通信网络；计算层部署于云端和边缘节点，提供数据处理和决策支持能力；应用层提供丰富的业务功能，支持人机交互和系统运维。

平台硬件由服务器集群、网络设备、边缘计算节点和多源异构无人机等组成。硬件配置见表2。

表2 硬件配置

Tab. 2 Hardware configuration

设备类型	数量	主要规格	功能描述
云端服务器	6	64 核 CPU, 256 GB 内存, 8 TB 存储	负责系统核心计算和数据存储
边缘计算节点	12	8 核 CPU, 32 GB 内存, 1 TB 存储	提供本地计算能力, 处理实时数据
通信基站	8	5G+ 卫星 双模, 10 km 覆盖半径	构建覆盖巡检区域的通信网络
四旋翼无人机	10	续航 30 min, 4K 相机, RTK 模块	负责精细巡检和近距离观测
固定翼无人机	4	续航 120 min, 1 080P 相机, 激光雷达	执行大范围线路巡航
垂直起降无人机	2	续航 60 min, 红外 + 可见光双相机	应对复杂环境的综合巡检
无人机充电站	6	支持自动电池更换, 5 kW 充电功率	为无人机提供全天候能源支持

为确保系统高可用性，设计了包含冗余部署、故障自愈和负载均衡的可靠性保障机制，关键系统可用性达到99.99%以上。

3.2 软件系统架构

精巡调度平台的软件系统采用微服务架构，基于容器技术实现松耦合、高可用和易扩展的设计理念。软件架构如图6所示。

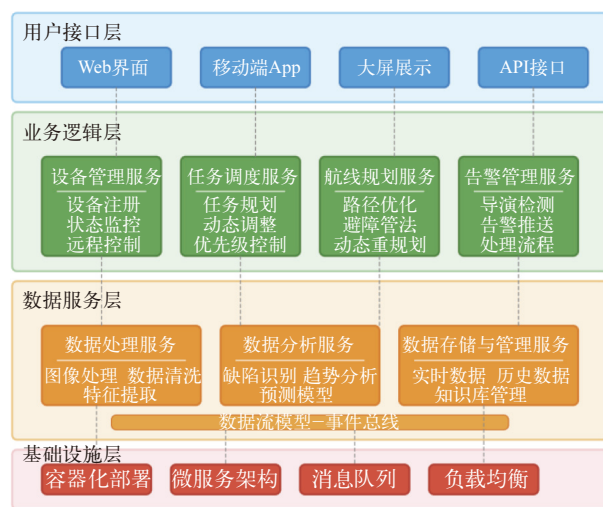


图6 软件架构

Fig. 6 Software architecture

该架构分为四个核心层级：用户接口层基于React/Flutter构建了Web门户、移动应用和大屏展示系统，提供统一的操作体验；业务逻辑层包含设备管理、任务调度、航线规划、数据处理和告警管理等核心业务模块，基于Spring Cloud实现分布式部署；数据服务层采用Kafka消息队列实现异步通信，使用Redis/Hazelcast提供分布式缓存能力，并通过Nacos实现服务注册与发现；基础设施层结合PostgreSQL关系型数据库、InfluxDB时序数据库、MongoDB文档数据库和MinIO分布式文件存储，满足多样化数据需求。整个系统通过API网关统一入口管理，实现了高性能、高可用的多无人机协同调度，支持大规模电力巡检业务。

3.3 系统功能模块

精巡调度平台的功能模块设计采用领域驱动

设计思想，围绕电力巡检业务需求进行划分，实现了高内聚、低耦合的模块结构，如图7所示。

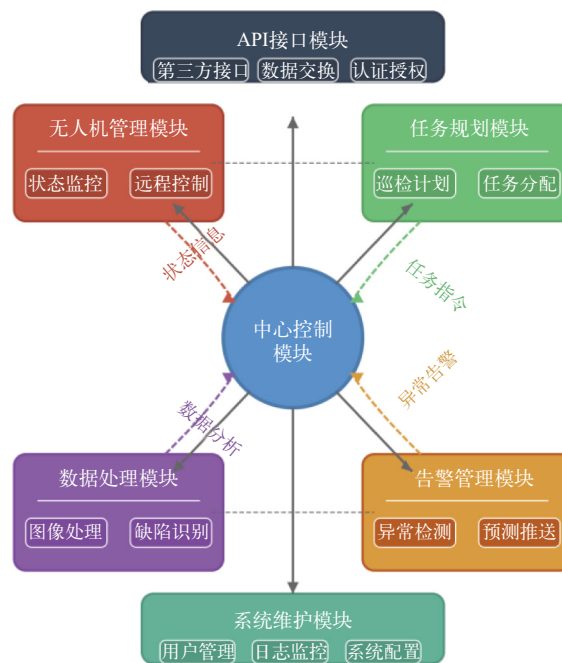


图7 系统功能模块

Fig. 7 System functional modules

精巡调度平台基于领域驱动设计理念构建了高内聚、低耦合的功能模块体系，核心包括：无人机管理模块负责设备全生命周期监控，集成自动注册、状态监测、远程操作和固件管理功能；任务规划模块基于强化学习算法实现多无人机协同调度，支持巡检计划管理、航线智能规划、资源优化分配和执行监督；数据处理模块采用深度学习技术进行图像处理和缺陷识别，支持多源异构数据融合、智能分析和报告自动生成；告警管理模块构建了多级告警规则引擎，提供异常检测、智能过滤、多渠道通知和根因分析能力。各模块通过事件驱动架构实现松耦合协作，核心调度引擎作为中枢协调各模块交互，统一用户界面通过直观的可视化展示和交互操作方式，使复杂的巡检业务流程简单化。

4 算例分析

4.1 仿真场景

为验证精巡调度平台的实际效果，选取某省

电力公司500 kV超高压输电线路为试验场景。线路全长125 km，跨越山地、平原和水域等复杂地形，沿线包含78基铁塔和6处重要交叉跨越点，线路情况见表3。

表3 测试线路基本情况

Tab. 3 Basic information of the testing circuit

参数名称	参数值	备注
线路电压等级/kV	500	超高压线路
线路总长度/km	125	直线距离 98 km
铁塔数量/基	78	平均间距 1.6 km
地形分布	山地 42%，平原 35%， 水域 15%，其他 8%	地形复杂多样
特殊点位	6 处交叉跨越，3 处生态保护区	需特别关注
气候特点	多雨潮湿，多雾，季风显著	巡检难度较大

传统巡检方式采用10人工作团队，配备高空作业车辆和专业装备，通常需5天完成全线巡检，成本约12万元/次，且存在较高安全风险。

4.2 精巡调度平台部署

基于该场景特点，部署了由10台四旋翼无人机、4台固定翼无人机和2台垂直起降无人机组成的多源异构无人机集群，同时搭建了完整的精巡调度平台。整个系统由两人操作团队管理，主要负责平台监控和应急处理。

系统部署了6个无人机充电站，位置分布如图8所示，平均覆盖半径约20 km。通过自动电池更换技术，实现了无人机的全天候连续作业能力。

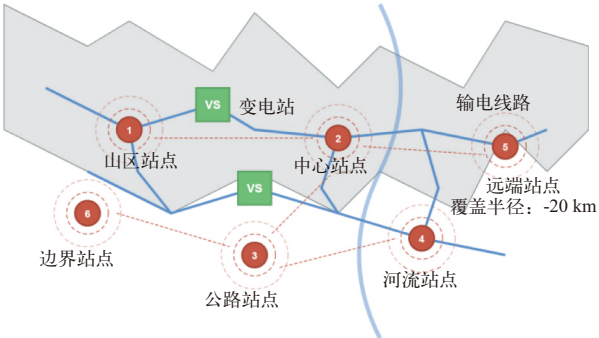


图8 无人机充电站位置分布

Fig. 8 Location distribution of drone charging stations

平台运行一年来，完成常规巡检24次，应急巡检8次，共计飞行3 650 h，巡检里程45 600 km，采集图像数据185 TB。相比传统

巡检方式，整体效率提升了3.8倍，成本降低了58%。

4.3 精准起降性能评估

精准起降技术是实现无人机自动充电和电池更换的关键。通过对系统的长期测试，收集了不同环境条件下的降落准确度数据，见表4。

表4 不同环境条件下的降落准确度

Tab. 4 Landing accuracy under different environmental conditions

环境条件	样本数	平均误差 /cm	最大误差 /cm	成功率 (%)
无风	256	3.2	7.8	100
微风 (3 级以下)	425	5.6	12.3	99.8
中风 (4 ~ 5 级)	187	8.7	17.5	98.4
强风 (6 级以上)	42	14.2	25.6	92.9
轻雾	136	6.8	14.2	98.5
大雾	28	11.5	22.3	85.7
夜间	175	7.2	15.8	97.7
复杂电磁环境	93	9.3	18.6	96.8

数据表明，融合RTK和AprilTag技术的精准降落系统表现优异，即使在6级风或大雾等恶劣条件下，仍能保持较高的降落成功率。

精准起降技术显著提高了无人机与充电站的对接成功率，从传统技术的78%提升至99.5%，大幅降低了人工干预需求，实现了真正意义上的无人值守巡检。

4.4 经济效益分析

精巡调度平台的经济效益分析从初始投入、运行成本和实际效益三个方面进行评估。初始投入包括设备购置、平台建设和人员培训等，总计约200万元。年运行成本包括设备维护、系统升级和人员薪酬等，约30万元。

5 结束语

本文开发了基于多源异构无人机的精巡调度平台，基于多源异构无人机的精巡调度平台在电力巡检领域展现出显著优势：巡检效率提高280%，线路巡检时间从5天缩短至1.3天，应急响应时间从3 h缩短至30 min，综合成本降低58%；消除了高空作业风险，提高了巡检质量和

覆盖率,实现了无人值守的全自动化运行异常情况自动告警、巡检数据自动分析和报告生成。

该平台为电力行业的智能化转型提供了有力支撑。后续发展将重点关注人工智能辅助决策、全自主协同作业以及与电力大数据的深度融合等方向,进一步提升系统的智能化水平 and 应用价值。

参考文献

- [1] 李宁,李波,陈炜,等.基于多旋翼无人机平台的高性能电力综合巡检系统设计[J].电子设计工程,2021,29(24):120-124.
- [2] 张峰,郭锐,卢士彬,等.高压输电线路巡检机器人障碍物识别与定位[J].中国电力,2019,52(4):111-118.
- [3] 马瑞,欧阳权,吴兆香,等.基于深度强化学习的多无人机电力巡检任务规划[J].计算机与现代化,2022(1):98-102.
- [4] 费英群,田林.面向多源异构的电力工程数据融合处理技术研究[J].电子设计工程,2025,33(1):104-108.
- [5] 李振璧,张坤,姜媛媛,等.基于变分模态分解与近似熵的输电线路两相接地故障诊断[J].科学技术与工程,2018,18(5):70-75.
- [6] 李振波,汤春俊,刘田野,等.多无人机电力巡检协同目标跟踪控制[J].电力自动化设备,2020,40(7):136-142.
- [7] 施孟佶,秦开宇,李凯,等.高压输电线路多无

人机自主协同巡线设计与测试[J].电力系统自动化,2017,41(10):117-122.

- [8] 齐波,李浩,胡宝清.输电线路无人机巡检数据处理系统[J].电力信息与通信技术,2019,17(7):46-51.
- [9] 邢博宇,符传福,姚冬,等.输电线路运行状态预警和安全评估系统设计[J].电子设计工程,2019,27(24):75-78.
- [10] 李洵,纪元,张盛春.面向数字孪生的输变电设备多源异构数据自动采集方法[J].自动化技术与应用,2024,43(12):139-143.
- [11] 郗来迎,赵赫男,王松波,等.基于倾斜摄影技术的无人机电力巡检设计[J].电子科技,2019,32(5):85-88.
- [12] 陈驰,彭向阳,宋爽,等.大型无人机电力巡检LiDAR点云安全距离诊断方法[J].电网技术,2017,41(8):2723-2730.
- [13] 程宏波,高雅琦,王勋,等.基于故障类型识别的输电线路自适应测距方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(2):137-144.

作者简介

赵建昊(1991—),男,硕士,工程师,主要研究方向为无人机电力设备巡检及控制。

刘振武(1995—),男,工程师,主要研究方向为无人机控制。

(收稿日期:2025-03-10)