

数据，普通小型空调在标准工作模式下的噪音水平一般在 50-60 分贝之间。采用直流变频压缩机的小型空调相比传统压缩机，噪音通常降低 5-10 分贝。这一降噪效果主要得益于变频压缩机在低负荷情况下的低速运行和风机的优化设计。此外，风机叶片的设计和风道的布局对噪音有直接影响，优化的风道设计能有效减少空气流动中的涡流，从而降低噪音。通过优化气流路径和增加吸音材料，空调的噪音水平能进一步降低至 45 分贝以下，接近图书馆的安静环境。舒适度的评估则涉及温度均匀性、风速调节和湿度控制。现代移动空调系统配备了智能温控和湿度感应器，能够根据环境条件自动调节风速和温度设置，从而达到最佳的舒适性。测试结果表明，在温度变化较大的环境中，智能控制系统可以保持室内温度波动在 2°C 以内，提升了用户的舒适感^[3]。

5 小型移动空调系统的性能优化策略

5.1 优化制冷循环与热交换效率

为了提升制冷效率，优化制冷循环是提升空调性能的关键措施之一。优化制冷循环可以通过多种方式实现，主要包括提高压缩机效率、优化冷凝器和蒸发器设计以及改进制冷剂流动路径。压缩机作为制冷循环中的核心部件，其效率直接影响整体能效。采用变频直流压缩机可以根据负荷变化调节转速，从而避免不必要的能量消耗。冷凝器的翅片设计也是影响热交换效率的重要因素，通过增加翅片的数量和优化翅片形状，可以提升热交换效果。蒸发器的表面也应采用抗污染涂层，减少灰尘积聚，确保热交换效率。此外，系统管路应优化设计，减少弯曲与阻力，确保制冷剂流动的顺畅。通过这些优化，空调的制冷循环效率可以提高约 15%-20%，提升了整体系统的性能。

5.2 提高系统的能源利用率

提高能源利用率的策略包括优化压缩机和冷凝器的配合、采用高效的变频控制技术以及选择低 GWP 的环保制冷剂。直流变频压缩机能根据负荷调节运行功率，相较于传统的定频压缩机，变频压缩机在低负荷时能大幅度降低能耗，整体能效提升约 25%。冷凝器的优化设计，如采用高效翅片材料和提升散热面积，也能有效提高系统的能源利用率。为了进一步提升能效，现代小型移动空调普遍采用智能控制系统，该系统能够实时监控室内温度、湿度和外部环境变化，并自动调整空调的运行模式。根据测试，采用智能控制系统

的小型空调，其能源消耗比传统空调低 15%-20%。此外，制冷剂的选择对能效也有影响，采用 R32 等低 GWP 制冷剂的空调，其能效比传统 R410A 系统提高了 10%-15%^[4]。

5.3 改善系统控制与智能化管理

智能化控制系统是提升小型移动空调系统性能的一个重要方面。现代空调系统配备了温湿度传感器、红外传感器和智能调节系统，能够根据环境条件自动调节工作状态。例如，当室内温度过高时，空调系统能自动开启强制制冷模式；当温度接近设定值时，系统则自动调节至节能模式。通过微处理器控制技术，空调能够实时监控温度变化，避免过度制冷或制热，减少能源浪费。数据表明，采用智能控制系统的空调，其能源消耗较传统控制方式降低了 15%-20%。此外，智能化管理还可实现远程操作与监控，用户可通过智能手机进行远程开关机、温度调节等操作，提升了使用便捷性。通过智能控制系统，空调的整体性能得到了大幅提升，且能在不同环境条件下保持最佳的运行效果。

6 结语

通过对小型移动空调系统结构设计与性能优化的深入研究，本文探讨了该系统在设计要求、结构设计、性能评估及优化策略等方面的关键技术与方法。在系统设计中，注重提高能源效率、优化功能模块以及确保舒适性和低噪音，是实现高效制冷和用户满意度的基础。通过合理选择压缩机、冷凝器、蒸发器以及风机的设计与布置，能够有效提升热交换效率和制冷能力。与此同时，能源消耗与环保性能的优化以及智能化控制系统的引入，进一步推动了系统的能效和智能化水平。通过这些优化策略，能够显著提高小型移动空调的综合性能，满足现代用户对于高效、环保和舒适生活环境的需求。

参考文献

- [1] 肖喜平.移动空调系统降噪优化设计措施[A].2023年中国家用电器技术大会论文集[C].中国家用电器协会:2023:1038-1042.
- [2] 刘娟.基于人性化设计的移动空调造型设计研究[J].科技风,2022,(05):4-6+77.
- [3] 秦艺萌,吴其洲.基于单片机的移动空调系统设计[J].测试技术学报,2021,35(04):364-368.
- [4] 刘娟.智能化及低噪声节能的移动空调造型设计[J].机械设计,2020,37(05):145.

Design and Implementation of an Autonomous Wind Turbine Blade Inspection System Based on Unmanned Aerial Vehicles

Lele Li

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

Abstract

Aiming at the problems of low efficiency and high risks in traditional wind turbine blade inspection, this paper introduces an autonomous inspection system based on unmanned aerial vehicles (UAVs). It primarily analyzes the system architecture composed of the flight platform, payload system, route planning module, and data analysis platform. The paper elaborates on the complete workflow, which encompasses 3D route planning, autonomous data acquisition, AI-based image analysis, 3D reconstruction, and report generation. The research demonstrates that this integrated system can significantly enhance inspection safety and efficiency, enable precise assessment and preventive maintenance of blade conditions, thus providing effective technical support for the intelligent operation and maintenance of wind farms.

Keywords

UAV; blade inspection; wind power operation and maintenance

基于无人机的风机叶片自主巡检系统设计与实现

李乐乐

山东电力工程咨询院有限公司，中国·山东济南 250013

摘要

针对传统风机叶片巡检效率低、风险高的问题，介绍了一套基于无人机的自主巡检系统，主要分析了由飞行平台、载荷系统、航线规划与数据分析平台组成的系统架构，重点阐述了从三维航线规划、自主数据采集、AI图像分析到三维重建与报告生成的完整工作流程。研究表明，该集成系统能显著提升巡检安全性与效率，实现叶片状态的精准评估与预防性维护，为风电机场智能化运维提供了有效技术支撑。

关键词

无人机；叶片巡检；风电运维

1 引言

风电机组叶片是风力发电系统的核心组件之一，其状态和完整性对运行安全至关重要^[1-2]。如果叶片存在潜在的损伤，可能会导致叶片断裂、碎片飞散或整个机组故障，对人员和设备造成严重危害。传统的人工风机叶片巡检方式安全性差、效率低下，无法满足风电日益增长运维需求^[3-4]。基于无人机的叶片自主巡检技术具有非破坏性、速度快、测量精度高、自动化程度高、安全性高等特点，通过定期进行叶片巡检，可以及早发现潜在的问题，采取维护和修复措施，延长叶片的使用寿命，提高系统的可靠性和持续运行时间^[5-6]。

2 整体设计

无人机叶片巡检系统是基于无人机、高清相机、机载电脑、激光测距、人工智能、图像识别等技术，实现对风机叶片自主巡航检测。通过无人机航线规划，实时对风机叶片进行全方位的扫描监测，将影像数据回传后端数据处理服务器，通过AI图像智能系统分析影像中的异常情况（结构损坏、叶片雷击、叶片开裂等），确定叶片隐患位置及损伤类型。整体的架构设计如图1所示

架构包含如下几个层次：

- (1) 无人机、无人机载荷及其他相关硬件负责完成航迹智能控制和数据采集，通过文件传输接口上传平台。
- (2) 前端应用即交互层负责承载呈现给最终用户的交互信息，主要通过数据化大屏等可视化的方式来完成。
- (3) 管理后台及业务层包含各种具体的业务逻辑，可根据业务需求进行扩充。

【作者简介】李乐乐（1990-），男，中国山东济南人，硕士，从事电力行业智慧运维及在线监测等研究。

- (4) 数据中心构建在硬件系统之上，对各类数据进行存储管理，送到算法中心进行分析和使用。
- (5) 算法引擎实现缺陷的自动分析和自动定位。
- (6) 基础组件和基础设施实现软件和硬件上的基础支撑。

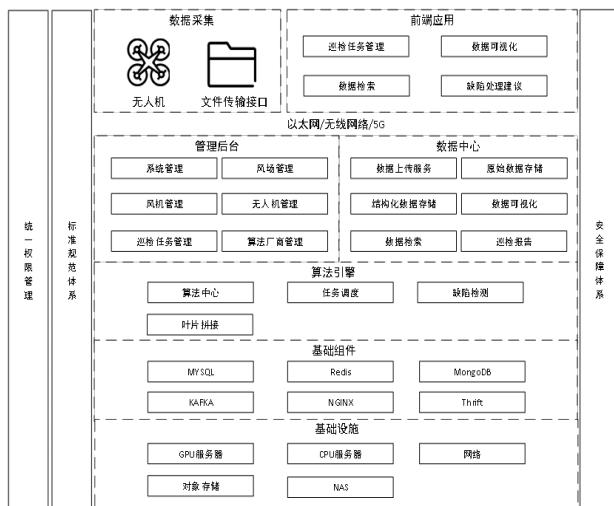


图 1 整体架构设计

3 硬件和软件系统的设计

无人机叶片巡检系统的硬件主要包括无人机飞行器、荷载系统、数据处理服务器等，当风电场站需要进行无人值守时，还需要进行无人值守起降平台的建设，值守平台需要充足的空间进行自动起降、充电、维护等操作。



图 2 无人机飞行器

无人机飞行器主要实现自主或遥控的稳定飞行，包括起飞、空中悬停、航线飞行、避障和精准降落，是执行任务的移动平台；荷载系统是无人机搭载的任务设备，包括高清相机、红外相机、激光雷达等传感器，其功能是直接执行叶片检测的任务；数据服务器主要是对后续的数据进行处理和分析。

无人机巡检系统的软件主要包括飞任务规划与飞行控制、数据采集与实时回传、数据分析与缺陷识别、数据管理与报告生成等基本的功能模块，四个模块共同构成一个高效的闭环系统。飞任务规划与飞行控制模块主要负责巡检前的航线自动规划和飞行过程中的自主控制；数据采集与实时回

传模块主要控制无人机搭载的载荷（如相机）进行数据采集，并通过网络将数据实时发送回后台；数据分析与缺陷识别模块是核心，利用 AI 算法对采集的图像和视频进行自动分析，识别缺陷；数据管理与报告生成模块主要负责存储和管理所有的巡检数据，并自动生成结构化的巡检报告。

4 无人机静态巡检的基本流程

4.1 入场手续的办理

人员抵达现场，完成飞行作业前的安全培训、资质审查以及技术交底的准备工作。针对叶片检查项目的各个合作环节可能涉及的安全事项，技术人员需要进行安全培训，同时进行飞行人员专业资格证的资格审查，最后进行技术交底。

4.2 风机基础数据的准备

无人机抵近风机绕叶片飞行，采集高清图像，对叶片表面细微缺陷进行辨识，因此需准备风机的基础数据，用于进行后续计算，包括：风机中心经纬度坐标、风机轮毂中心高程、叶片尺寸、机舱尺寸、塔筒直径等。

4.3 三维建模

通过建模航线规划、建模数据采集、模型自动生成、姿态智能分析过程获得风机姿态及叶片关键点，用于后续巡检航线规划，确保叶片数据采集过程安全、完整。

图像三维重建是一个计算密集型过程，其耗时较长的特性显著制约了风机叶片巡检的整体效率。因此，在实现重建功能的同时，应着力于算法优化，旨在保证模型精度的前提下，显著提升建模速度，以平衡模型精度与生成效率，满足现场应用的实时性需求。

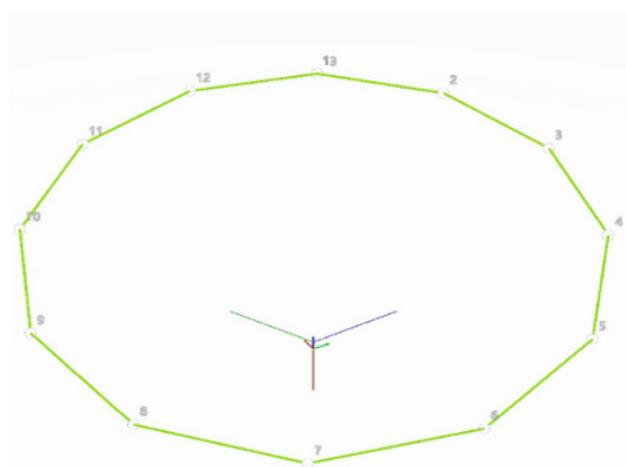


图 3 三维建模示意图

三维重建是从二维图像序列中恢复物体三维几何结构的技术过程，其标准工作流程通常包含以下几个核心环节：

4.3.1 图像采集

重建过程始于图像数据的获取。需使用数码相机、无人机载荷等设备，围绕目标物体从多视角、多方位采集一系