

四足机器人协同系留无人机巡检系统设计与实现

杨景懿 付康平

龙源(北京)新能源工程技术有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i3.21362

[摘要] 针对光伏电站、电力线路等大面积、复杂地形场景的巡检作业需求,传统人工巡检及单一无人机巡检模式存在作业效率低、续航时长有限、巡检覆盖范围不全等工程短板。本文设计一套四足机器人协同系留无人机的空地一体化智能巡检系统。该系统以四足机器人为移动承载平台,集成无人机自动起降机构、系缆自适应收放装置及远程管控单元。文中系统阐述了巡检系统的总体架构、设计方案,并通过实地测试验证了系统在复杂地形的稳定性。试验结果表明,该系统兼具优异的地形通行能力、长续航作业特性性能,可为工业场景智能化巡检提供可行的技术方案。

[关键词] 四足机器人; 系留无人机; 空地协同; 智能巡检系统

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Design and Implementation of Inspection System Based on Quadruped Robot and Tethered UAV Cooperation

Jingyi Yang Kangping Fu

LongYuan (Beijing) New Energy Engineering Technology Co.

[Abstract] Aiming at the inspection requirements for large-scale and complex-terrain scenarios such as photovoltaic power stations and power transmission lines, traditional manual inspection and single unmanned aerial vehicle (UAV) inspection modes suffer from engineering deficiencies including low operational efficiency, limited endurance, and incomplete inspection coverage. In this paper, an air-ground integrated intelligent inspection system based on quadruped robot cooperating with tethered UAV is proposed. Taking the quadruped robot as the mobile bearing platform, the system integrates an automatic UAV takeoff and landing mechanism, an adaptive tether retracting device, and a remote management and control unit. The overall architecture and design scheme of the inspection system are systematically elaborated, and the stability of the system in complex terrain is verified through field tests. The experimental results show that the proposed system possesses excellent terrain traversability and long-endurance operation performance, which can provide a feasible technical solution for intelligent inspection in industrial scenarios.

[Key words] quadruped robot; tethered unmanned aerial vehicle; air-ground cooperation; intelligent inspection system

1 引言

随着光伏新能源、电力运维、智能制造等领域的快速发展,复杂地形、高危区域、大范围厂区的智能化巡检需求持续增长。常规多旋翼无人机具备机动灵活、快速巡检的优势,但受机载电池容量制约,有效续航时长普遍不足30min,无法支撑长距离、不间断巡检作业,同时易受恶劣气象条件与现场电磁干扰影响,作业稳定性与环境适应性较差。

四足机器人凭借突出的非结构化地形适配能力、越障性能与移动稳定性,已成为工业巡检领域的核心移动载体。吴越等^[2]结合数字孪生技术与四足机器人,搭建变电设备巡视协同架构,

实现非预置位动态巡检,有效弥补了传统固定点位巡检的视觉盲区。童喆锴等^[3]研发的四足机器人巡检系统,融合视觉、红外、声纹多维度感知技术,实现了钢铁厂狭窄通廊内的高精度导航与设备故障检测。扈霖等^[4]针对异构四足机器人集群设计一体化监控系统,通过多设备协同机制提升了复杂环境的态势感知能力。刘小罗等^[5]将四足机器人接入智能制造数字孪生体系,实现了巡检任务远程分发与设备状态实时监测。

系留无人机依托地面持续供电与有线通信链路,适用于长时程定点与区域巡检场景。陈增烁^[1]将系留无人机应用于架空输电线路高空作业,结合时空图卷积网络完成作业行为特征提

取,实现了违章行为的高精度识别。唐俊等^[6]系统梳理了系留无人机在应急监测、照明辅助、通信中继等场景的应用潜力,明确了其长航时、高稳定性的核心应用优势。

现有研究多集中于四足机器人或系留无人机的单一设备独立作业,针对二者空地协同巡检的融合研究仍存在明显不足。基于此,本文提出一种四足机器人协同系留无人机空地一体化巡检系统。以四足机器人作为移动基座,集成无人机自动起降、系统张力自适应控制核心模块,充分结合四足机器人强通行能力与系留无人机长时驻空巡检的优势,有效解决传统巡检模式效率低、续航短等痛点。

2 系统总体设计

本章从总体架构、核心结构组成、功能运行逻辑三个维度,完成四足机器人协同系留无人机巡检系统的整体方案设计。系统以四足机器人作为移动承载主体,搭载轻量化无人机起降平台与自适应系统缆收放装置。

2.1 总体架构设计

系统采用模块化分布式架构设计,整体由四足机器人承载单元、无人机自动起降平台、自适应系统缆装置、机载控制系统、远程调度终端五大核心模块构成。各模块功能独立、接口标准化,通过机械装配与电气对接实现一体化集成。

四足机器人作为系统移动基座,机身背部预留标准化安装接口,可实现起降平台与系统装置的快速拆装与可靠固定。起降平台与系统缆装置一体化集成,构成可移动无人机起降基座,通过导轨式连接结构固定于机器人背部,可适配机器人行走、爬坡、越障等多姿态工况,保障作业过程的结构稳定性。机载控制系统内嵌于机器人机身内部,具备良好的防护性能与环境适配性;远程调度终端为独立管控单元,通过无线通信链路 with 机载系统实时交互,实现任务调度、状态监测与数据接收功能,不参与设备结构承载。

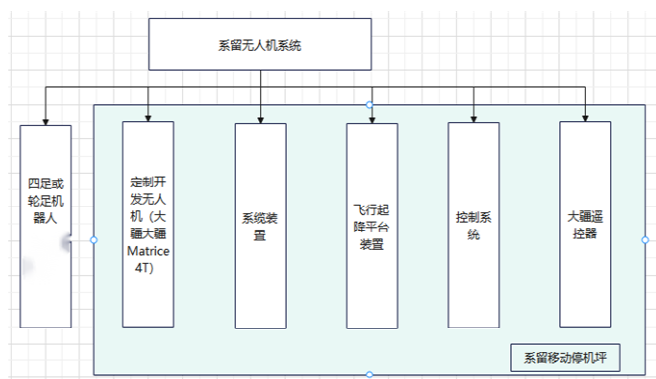


图1 系统架构图

2.2 核心结构组成设计

2.2.1 自动起降平台结构设计

自动起降平台采用轻量化高强度铝合金框架结构,关键受力区域做加固处理,框架结构的优势在于降低结构自重、适配机器人负载限制,此外还能有效保障整体结构刚度与作业可靠性。

采用该种结构能最大限度保障无人机精准起降、姿态稳定。

平台整体采用矩形平面结构,内部集成自动归中定位机构、柔性缓冲组件与水平姿态校准结构。机器人背部连接方式为螺栓与导轨固定,可支持快速拆装与维护。

自动归中定位机构采用丝杆滑轨传动单元,滑杆在无人机降落时水平双向同步进行推顶动作,可将无人机精准归位至平台中心区域。

柔性缓冲组件采用弹性支撑结构,可吸收无人机降落过程的冲击载荷,降低震动对机身、机载传感器及平台结构的损伤。

平台底部集成了水平姿态校准结构,可根据机器人实时姿态动态微调平台水平度。该结构确保起降工作面始终保持水平状态,保证无人机起降、悬停作业的稳定。

平台整体结构简洁、可靠性强,主要适配了小型工业巡检无人机的起降作业需求,是空中巡检单元的稳定地面支撑载体。

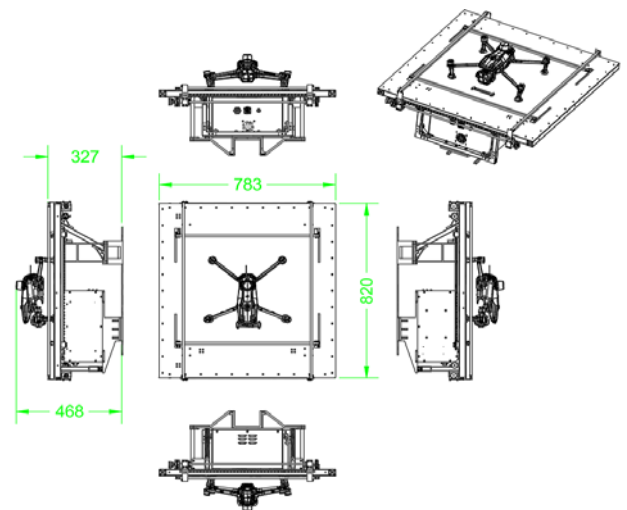


图2 系留移动停机坪简图

2.2.2 自适应系统缆装置结构设计

自适应系统缆装置的作用为保障系留无人机长航时作业,具备持续供电、有线通信、线缆平稳收放与张力调控功能。装置主体采用碳纤维复合板材制备,具备自重轻、结构强度高、耐磨损、抗腐蚀的特性,通过该自适应系统缆装置可实现四足机器人在恶劣工况中无人机部分的可靠运行。

装置整体分为线缆收放主体、张力调节结构、导向保护结构三部分:线缆收放主体内置精密传动收卷机构,通过闭环传动控制实现线缆匀速释放与回收,实现线缆收放均匀有序,解决作业过程中线缆缠绕、堆积等故障问题;张力调节结构搭载自适应传感与调控组件,可实时采集线缆张力参数,动态匹配收放速度与阻力,使线缆始终维持适度绷紧状态,避免线缆松弛缠绕或过度拉扯断裂,适配无人机升降、悬停、位置调整等动态作业工况;导向保护结构设置专用线缆导向槽与封闭式防护外壳,能够有效约束线缆运动轨迹,减少线缆摩擦磨损,同时阻隔现场粉尘、杂物、水汽侵入内部传动结构,提升设备在复杂工业环境的运行可靠性。

装置通过专用固定支架,固定于机器人背部,起降平台下方。装置整体位置为机器人背部,运行时随机器人全域移动,为无人机供电。

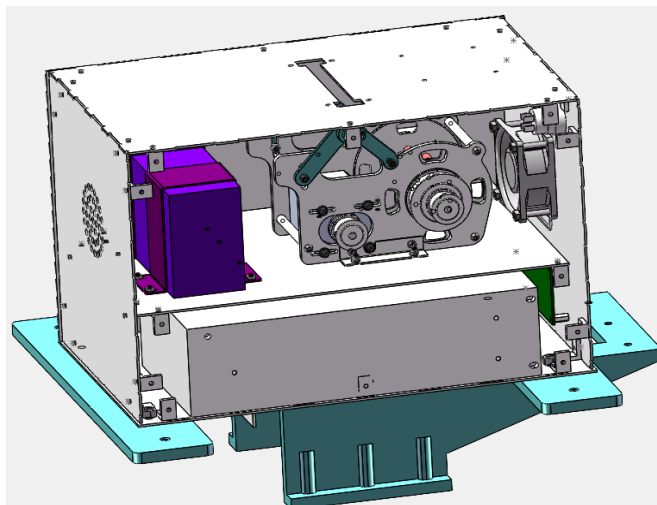


图3 系缆装置示意图

3 实地测试与结果分析

研发人员选取山地光伏电站开展实地整机测试,验证该空地一体化巡检系统在实际使用场景下的作业性能、结构稳定性。山地场景地形起伏大、地面路况复杂、作业空间受限的特征,是对该系统的地形适配能力、结构可靠性、空地协同控制精度及巡检作业的有效验证,为巡检设备拓展到工业巡检中的其它各类复杂工况提供参考。

实地测试结果表明,系统整体运行状态稳定。四足机器人可适应山地坡度变化与凹凸路面工况,实现长距离连续移动,作业全程姿态平稳、越障顺畅,未出现卡顿、侧翻、轨迹偏移等故障。机器人搭载的自动起降平台可在机器人多姿态工况下维持水平基准稳定,无人机起降过程平稳、定位精度良好,连续作业起降成功率稳定,验证了起降平台结构设计的合理性与机械可靠性。



图4 山地光伏实测图



图5 无人机巡视画面图

4 结论

本文针对复杂工业场景智能化巡检的工程需求,设计实现了一套四足机器人协同系留无人机空地一体化巡检系统。系统以四足机器人为移动承载平台,完成轻量化自动起降平台、自适应系缆装置等核心结构的自研设计与集成优化,构建了可移动、长航时、高精度的空地协同巡检体系,充分融合了四足机器人强地形通行能力与系留无人机长时驻空、大范围巡检的技术优势。

后续研究将重点优化系统整体轻量化结构设计,提升设备极端环境抗干扰与耐受能力;同时引入人工智能智能识别与自主决策算法,强化系统故障自主识别、任务自主规划能力,推动该系统在光伏运维、电力巡检等场景的规模化落地应用,为工业设备智能运维提供技术支撑。

【参考文献】

- [1]陈增烁.基于时空图卷积网络的系留无人机架空输电线路高空作业违章行为识别[J].科技创新与应用,2025(35):65-68.
- [2]吴越,倪广义,席涵,等.基于数字孪生的变电巡视四足机器人非预置位巡检技术研究与应用[J].自动化应用,2026,67(2):12-15.
- [3]童喆镨,吴瑞珉.基于四足机器人的钢铁业皮带运输机巡检系统[J].机电工程技术,2026,55(5):133-137.
- [4]扈霖.面向校园应急救援的四足机器人监控系统设计[J].无线互联科技,2026(7):43-46.
- [5]刘小罗,陈玉龙,刘佳琦,等.四足机器人在智能制造系统中的应用研究[J].空间电子技术,2025,22(5):10-16.
- [6]唐俊,魏鹏烜,张鑫磊,等.系留无人机系统的应用及发展前景[J].科技与创新,2026(3):5-11.

作者简介:

杨景懿(1999--),男,汉族,湖南长沙人,硕士研究生,助理工程师,研究方向:智能装备。

付康平(1991--),男,汉族,吉林辽源人,硕士研究生,研究方向:智能装备。