

无人机机载检测技术在特种设备检验检测中应用探讨

李 健 杨新雷

内蒙古自治区特种设备检验研究院通辽分院 内蒙 通辽 028000

摘要: 无人机机载检测技术通过搭载高清相机、红外热像仪等传感器,实现对特种设备的非接触式检测。该系统由无人机平台、机载传感器、数据处理系统构成,具备自主导航、路径规划功能。在起重机械、大型游乐设施等高空特种设备检验中,该技术可突破传统检测对脚手架或升降平台的依赖,近距离捕捉设备顶部及立面的细微缺陷,降低了人工巡检的安全风险,提高了检测效率与精准度,为特种设备检验提供了智能化解决方案。

关键词: 无人机;机载检测系统;特种设备检验;应用前景

引言:特种设备朝着大型化、高参数、强刺激方向发展,传统检验检测方法在高大结构型式设备应用中存在局限性。无人机搭载有效任务载荷,能够实现对高处各种目标任务的执行,这是传统手段无法比拟的。目前,无人机在电力巡查、桥梁检测等领域已有应用基础,但在特种设备检验检测领域的研究相对较少。有必要对无人机机载检测装置在特种设备检验检测领域开展研究工作,作为传统检验检测手段的有益补充,具有很强的实际意义。

1 无人机机载检测技术的核心构成与技术原理

1.1 无人机平台系统

无人机作为机载检测技术的空中载体,其机身结构与飞行性能是保障检测任务顺利执行的基础。机身结构设计需兼顾轻量化与高强度,以适应不同检测场景的载重需求。飞行稳定性是核心指标之一,尤其在复杂气象条件或强电磁干扰环境下,无人机需通过先进的姿态控制算法维持平稳飞行。续航能力直接影响检测范围与效率,高能量密度电池与智能电源管理系统的应用,可显著延长单次飞行时长。抗干扰设计涵盖机械振动隔离、电磁屏蔽等多维度技术,确保无人机在工业现场等复杂环境中稳定运行。飞行控制系统是无人机自主作业的核心中枢,集成了精准定位、自主导航与路径规划三大核心功能^[1]。依托多模态融合定位技术,无人机可结合GPS、北斗卫星信号与视觉里程计数据,实现厘米级定位精度。自主导航算法通过实时感知环境信息,动态调整飞行姿态与速度,确保在狭窄空间或障碍物密集区域安全通行。路径规划模块根据检测目标分布与地形特征,生成最优飞行轨迹,兼顾覆盖率与能耗效率,支持手动修正与全自动执行双模式切换。

1.2 机载检测传感器技术体系

视觉检测类传感器是获取设备表面状态信息的关键

工具。高清相机通过高分辨率成像捕捉细微裂纹、腐蚀等缺陷,配合宽动态范围技术适应强光与暗光交替环境。红外热像仪利用热辐射差异检测设备过热部位,提前预警潜在故障,其非接触式测量特性尤其适用于高压、高温等危险场景。物理量检测类传感器针对设备运行参数进行精准测量。声呐传感器通过超声波反射分析结构内部缺陷,雷达传感器利用电磁波穿透非透明介质检测隐蔽损伤,气体传感器则通过电化学或光学原理识别泄漏成分与浓度。这些传感器需根据检测对象特性进行适配,例如选择合适频段的雷达波以优化穿透深度与分辨率。传感器数据传输与同步技术确保多源信息实时融合。无线通信模块采用抗干扰编码与频跳技术,保障数据传输稳定性。时间同步协议通过统一时钟源消除多传感器数据时差,为后续分析提供准确时空基准。

1.3 数据处理与分析系统

实时数据预处理技术对原始信号进行滤波、增强与压缩,去除噪声干扰并保留关键特征。图像识别算法基于深度学习框架,通过卷积神经网络自动提取缺陷特征,支持裂纹、变形等多类缺陷分类。特征提取模块结合传统图像处理与机器学习方法,量化缺陷尺寸、位置等参数,为评估设备健康状态提供量化依据。检测结果通过三维建模、热力图等可视化方式呈现,使技术人员可直观定位问题区域,辅助制定维修策略。

1.4 检测任务规划与执行流程

一个完整的无人机机载检测任务始于周密的规划。任务规划系统需集成地理信息、设备三维模型与检测标准,预先划定飞行禁区、设定安全高度与最优观测角度。执行流程遵循“预设航线-自动采集-实时监控-应急干预”的闭环逻辑。在飞行过程中,地面站监控系统实时显示飞行状态、传感器数据与初步处理结果,操作人员可根据现场情况随时介入调整。任务结束后,原始数据

被完整归档并传输至数据分析系统，形成从任务下发到报告生成的标准化作业链，确保检测过程的可控、可追溯与高效。

2 无人机机载检测技术在特种设备检验中的应用维度

2.1 基于空间场景的应用分类

无人机机载检测技术针对不同空间场景的特性，形成了差异化的应用模式。针对高空特种设备，如塔式起重機、烟囱及输电塔等，无人机可突破传统检测对脚手架或升降平台的依赖，通过垂直起降与悬停功能，近距离捕捉设备顶部及立面的细微缺陷，例如在检测200米高输电塔时，无人机可悬停在距离塔身2米处进行详细检测。在密闭或半密闭空间，如储罐内部与管道网络，无人机搭载微型传感器与照明模块，可深入人员难以抵达的区域，利用三维激光扫描技术构建内部结构模型，精准定位焊缝裂纹或腐蚀坑洞^[2]。对于大跨度结构，例如桥梁与厂房钢结构，无人机通过预设航线实现全覆盖扫描，结合多视角图像拼接技术生成整体变形图谱，替代人工拉线测量等低效方式。

2.2 基于检测需求的应用分类

从检测目标出发，无人机技术可满足多层次需求。外观缺陷检测领域，高清相机与红外热像仪协同工作，前者通过光学成像识别表面裂缝、锈蚀及变形，后者利用热辐射差异检测隐蔽损伤，例如管道保温层脱落引发的局部过热。运行参数监测方面，无人机搭载气体传感器与声学传感器，可实时采集设备周边环境中的可燃气体浓度与异常振动频率，为化工装置与压力容器的安全运行提供动态数据支持。结构完整性评估环节，无人机通过激光雷达扫描获取设备三维点云数据，结合有限元分析算法量化结构应力分布，预测剩余寿命，尤其适用于老旧设备升级改造前的状态评估。这种非接触式、高效率的检测方式，不仅降低了人工巡检的安全风险，更通过数据驱动的决策模式，推动了特种设备检验向智能化方向演进。

2.3 应用效益与局限性初步分析

无人机机载检测技术的应用效益显著体现在效率提升、风险降低与数据深化三个方面。它极大减少了搭建辅助设施的时间与成本，使大规模、高频次检测成为可能，同时将检验人员从高危环境中解放。获取的高分辨率图像与多维数据为设备状态评估提供了前所未有的详实依据。然而，其局限性亦不容忽视。目前，检测结果在很大程度上依赖于传感器的性能上限与环境适应性，对于深层缺陷或特定材质的识别能力有限。此外，单次任务的经济效益受设备初始投资、数据处理成本及任务

复杂度的综合影响，在简单、小范围的常规检测中，其成本优势可能并不明显。

3 无人机机载检测技术应用的关键问题与制约因素

3.1 技术层面的核心问题

在复杂环境条件下，无人机飞行稳定性与检测精度控制面临双重挑战。强风、电磁干扰或空间局促等场景易导致无人机姿态偏移，进而影响传感器采集数据的空间定位精度。例如，在输电塔检测中，金属结构产生的电磁场可能干扰无人机导航系统，需通过抗干扰算法与冗余传感器设计提升系统鲁棒性。传感器数据的抗干扰性同样关键，视觉传感器在逆光或雾天易出现成像模糊，红外热像仪可能因环境温度波动产生测量误差，需结合硬件屏蔽设计与软件滤波算法优化数据质量。多源检测数据的融合分析则存在技术瓶颈，视觉、激光、声学等不同模态数据的时空对齐难度大，传统分析方法难以充分挖掘数据关联特征，需引入深度学习框架构建跨模态融合模型，以实现缺陷特征的精准识别与分类。

3.2 应用层面的制约因素

不同类型特种设备的结构特性与检测需求差异显著，导致检测适配性成为应用推广的阻碍。例如，储罐内部检测需无人机具备防爆认证与微距成像能力，而桥梁检测则要求长续航与大范围扫描性能，现有通用型无人机难以同时满足多样化需求。检测流程的标准化与规范化缺失进一步限制了技术落地效果，目前缺乏针对无人机检测的作业指导文件与结果评判标准，不同团队的操作方式与数据分析方法差异较大，影响检测结果的可比性与可信度^[3]。技术操作人员的专业能力要求与培养难度同样突出，操作人员需兼具无人机飞行控制、传感器原理、缺陷识别等多领域知识，而当前培训体系多侧重单一技能，复合型人才培养制约了技术规模化应用。设备维护、数据安全等配套机制的不完善，也增加了技术推广的隐性成本。

3.3 标准化体系与成本效益深化分析

构建统一的标准化体系是破解应用制约的关键。这包括无人机检测装备的性能评级标准、针对不同设备类型的检测操作流程标准（SOP）、以及基于机载数据的缺陷识别与等级评定标准。标准化不仅能规范市场，提升检测质量的可信度，也是实现检测结果互认和融入现有特种设备法定检验体系的前提。从成本效益深化分析角度看，需建立全生命周期成本模型，综合考虑硬件购置、软件授权、人员培训、数据运维及设备折旧等成本，并与传统检测方法在效率、安全性、数据价值及可能避免的停机损失等方面进行综合对比。只有当其长期

综合效益明确优于传统方法,或能解决传统方法无法解决的问题时,该技术的规模化商业应用才有坚实基础。

4 无人机机载检测技术的优化方向与发展前景

4.1 技术优化路径

无人机平台与传感器的小型化、集成化升级是技术突破的核心方向。通过采用新型复合材料与模块化设计,无人机机身重量可进一步减轻,同时搭载更多类型传感器而不影响飞行性能。传感器集成化则聚焦于多模态融合,例如将光学相机、红外热像仪与激光雷达集成于同一云台,实现数据同步采集与空间对齐,提升检测效率。人工智能算法在数据处理中的深度应用正重塑技术逻辑,卷积神经网络可自动提取缺陷特征,图神经网络能分析结构应力分布,而强化学习算法则能优化飞行路径规划,减少人工干预。针对极端环境的技术突破同样关键,高温场景需开发耐热涂层与冷却系统,强电磁环境需采用光纤传输与屏蔽设计,高压区域则需强化设备绝缘性能,这些改进将显著拓展技术应用边界。

4.2 应用拓展方向

多机协同检测模式的构建将有效释放群体智能潜力,通过高效的分布式通信与动态任务分配算法,实现系统整体效能优化。多架无人机可灵活分工,协同完成大面积区域快速扫描、重点部位精准复检与突发状况应急响应等任务,从而构建起一个覆盖广泛、响应迅捷的“空中检测网络”。全生命周期检测与预测性维护的深度融合进一步推动技术向价值链高端延伸,无人机定期采集的高精度设备状态数据可直接输入数字孪生模型,结合多维度的历史运行记录实现剩余寿命智能预测,为提前制定科学维修计划提供可靠依据。跨行业检测经验的迁移与适配将显著加速技术普及进程,例如将化工领域成熟的防爆检测方案经过适应性改造应用于能源行业,或将桥梁检测中验证有效的算法移植至建筑结构健康监测中,通过系统性的参数调整与场景适配,能够更好地满足不同行业的差异化需求。

4.3 行业发展前景展望

在技术持续赋能下,特种设备检验模式正经历一场深刻变革,传统以人工为主的巡检方式逐步向“空中+地面”一体化的立体检测体系转型,使得检测周期大幅缩短、数据维度日益丰富、风险预警能力显著提前,这已成为行业发展的新常态^[4]。技术落地所释放的产业化潜力不断显现,无人机检测服务市场已形成涵盖专用设备研发、智能数据处理、行业标准制定等环节的完整产业链,随着5G通信与边缘计算等技术的普及应用,实时在线检测与云端远程智能诊断即将成为现实。在价值空间方面,该技术不仅有助于降低企业日常运维成本,更能通过减少非计划停机来直接提升生产运行效率,未来在能源、交通、制造等重点行业的应用规模有望持续扩大,从而整体推动特种设备检验行业朝着更智能化、更精准化的方向稳步迈进。

结束语

无人机机载检测技术在特种设备检验检测中的应用,为传统检验方法提供了有力补充。通过搭载高清相机、红外热像仪等传感器,实现了对高空、高温、有毒有害等高危作业环境的远程检测,提升了检验效率与安全性。随着传感器技术、人工智能算法的不断发展,无人机检测系统在特种设备检验领域的作用将更加重要,推动检验工作向智能化、精准化方向迈进。

参考文献

- [1]李旺,刘超,修士哲,等.特种设备高空结构件无人智能检测技术[J].大众标准化,2025(3):182-184.
- [2]钟海龙,梁冬磊,孙长江.无人机在特种设备检验检测中的应用[J].空中美语,2021(8):1177-1178.
- [3]李邵峰,樊玲.特种设备检验检测的安全管理措施研讨[J].模具制造,2024,24(07):246-248.
- [4]唐志成.无损检测技术在承压类特种设备检验检测中的应用[J].中国质量监管,2024,(06):76-77.