

无人机清洗技术在低空经济场景中的应用及瓶颈探索

朱亚辉 杨凯

湖南凯诺晟野科技有限公司

DOI:10.12238/ej.v8i10.3005

[摘要] 在全球产业变革与技术创新的双重驱动下,低空经济作为融合航空制造、信息技术、现代服务、现代农业的战略性新兴产业集群,正成为区域经济高质量发展的新引擎。近日,芜湖完成了试点无人机幕墙清洗应用;由低空公司组织实施的绍兴市文化中心和科技中心外立面清洗项目顺利完成外场作业任务,成功采用“无人机+人工协同”方式破解高层建筑外立面清洗难题;扬州经开区低空经济应用场景——空中柔韧清洗机器人亮相智谷楼宇,完成了一次高效的高空玻璃幕墙清洗作业。无人机清洗楼面技术作为低空经济的重要应用场景,以“高效、安全、环保”优势颠覆传统高空清洁模式,将成为高空清洁行业的主流解决方案,推动低空经济与城市智能化发展。

[关键词] 低空经济;楼面清洗;应用场景;解决方案;智能化发展

中图分类号: F0 **文献标识码:** A

Exploration of the Application and Bottlenecks of Unmanned Aerial Vehicle Cleaning Technology in Low-altitude Economic Scenarios

Yahui Zhu Kai Yang

Hunan Keno Shengye Technology Co.,Ltd.

[Abstract] Driven by the dual forces of global industrial transformation and technological innovation, the low-altitude economy, as a strategic emerging industry cluster integrating aviation manufacturing, information technology, modern services, and modern agriculture, is becoming a new engine for high-quality regional economic development. Recently, Wuhu completed a pilot application of unmanned aerial vehicle (UAV) for building facade cleaning; the exterior cleaning project of Shaoxing Cultural Center and Science and Technology Center, organized and implemented by the Low-altitude Company, successfully completed the field operation tasks, successfully solving the problem of cleaning the facades of high-rise buildings by adopting the "UAV + manual collaboration" approach; the low-altitude economy application scenario – the flexible aerial cleaning robot made its debut in the Zhigu building in Yangzhou Economic Development Zone, completing an efficient high-altitude glass facade cleaning operation. As an important application scenario of the low-altitude economy, the technology of using drones to clean building facades, with its advantages of "efficiency, safety and environmental friendliness", has disrupted the traditional high-altitude cleaning model and will become the mainstream solution in the high-altitude cleaning industry, promoting the development of the low-altitude economy and urban intelligence.

[Key words] Low-altitude economy; Building facade cleaning; Application scenarios; Solutions; Intelligent development

引言

近日,在安徽省芜湖市湾沚区某办公大楼外,一场无人机高空喷淋清洗幕墙的实地演示顺利完成。两架搭载高压水枪和火炮的系留无人机,在百米高空精准悬停,对建筑外墙玻璃进行全面清洗;由低空公司组织实施的浙江省绍兴市文化中心和科技中心外立面清洗项目顺利完成外场作业任务,成功采用“无人机

+人工协同”方式破解高层建筑外立面清洗难题,与以往传统“蜘蛛人”清洗方式不同,本项目首次引入“无人机”清洗模式,通过无人机高压冲洗,不仅显著提升了清洁效率,还大大提高了高空作业的安全性,让建筑外立面清洗不再成为高风险作业;江苏省扬州经开区低空经济应用场景——空中柔韧清洗机器人亮相智谷楼宇,完成了一次高效的高空玻璃幕墙清洗作业,高空清洗

行业面临的安全性、成本问题都能通过无人机解决——它能替代“蜘蛛人”，显著降低了高空作业风险，一定程度上消除了安全隐患，成本更低，大幅度提升了工作效率，远高于传统人工。



图1 无人机清洗楼面

1 无人机清洗技术在低空经济场景中的应用优越性

低空经济无人机技术已趋于成熟阶段，其应用场景也越来越广泛，并深刻融入到百姓生活的角角落落。

之前大家经常看到“蜘蛛人”悬挂在外墙，拿着清洁工具逐块进行楼面的清洁工作，且周期相对较长，也存在安全风险，特别是怕大风来袭。无人机清洗楼宇幕墙的问世，一定程度上解决了“蜘蛛人”工作的一系列缺陷，带来了多方面的优越性，主要有以下几点。

1.1 安全性高

无人机清洗通过技术升级和标准化管理，可显著提升楼宇幕墙清洗的安全性，是替代传统高处作业的有效解决方案。

减少高空作业风险，传统“蜘蛛人”清洗需在高空作业，面临绳索断裂、大风等风险，年事故率约0.3%。而无人机由地面操作人员远程控制，飞手无需直接接触高空环境，从根本上消除了人员高空坠落等风险，实现“零事故”作业。

智能避障与稳定飞行，无人机配备激光雷达、视觉传感系统和厘米级定位技术(如北斗/GPS+RTK)，能自动识别障碍物并触发避障机制，确保在复杂建筑结构(如异形曲面、遮阳棚)中稳定飞行。部分系留无人机还可抗7级风，恶劣天气下仍能安全作业。

多重安全保障设计，系留无人机通过地面电源供电，可24小时不间断飞行，避免电池续航问题导致的意外坠落。同时，配备安全绳、备用电源等冗余系统，即使设备故障也能保障安全降落。

标准化作业流程与监管，无人机清洗需操作人员持民航局颁发的CAAC民用无人驾驶航空器操控员执照，作业前需进行现场勘查、设备预检、风速监测等标准化流程，并设置警示围栏、专人监护，确保作业合规安全。

数据记录与可追溯性，无人机作业全程数据实时传输，包括飞行轨迹、清洗参数等，便于追溯和管理，降低法律纠纷风险，也为后续维护提供数据支持。

1.2 效率显著提升

无人机清洗通过技术优化和智能化操作，突破了传统人工

清洗的效率瓶颈，实现了快速、精准、连续的幕墙清洗作业，为高层建筑维护提供了高效解决方案。

集群作业与连续作业能力，多台无人机协同作业可覆盖大面积幕墙，效率可达人工的5-8倍。配备快充电池与自动换电系统，能实现24小时不间断清洗，尤其适用于夜间低干扰场景，大幅缩短整体作业时间。

精准路径规划，通过建筑BIM模型预载清洗路径，减少重复覆盖，可节省30%以上的作业时间，确保清洗过程高效有序。

快速部署与灵活调整，无人机无需搭建脚手架或吊篮，1分钟内即可完成部署，相比传统人工清洗的繁琐准备工作，显著提高了作业启动效率。同时，可根据幕墙结构和污渍情况灵活调整清洗策略，避免人工因体力限制导致的效率下降。

适应复杂环境，无人机具备抗风(6级以下)、防水(IP54以上)能力，能在恶劣天气条件下作业，不受传统人工清洗对天气的依赖，确保清洗任务按时完成，减少因天气延误导致的时间损失。

1.3 成本效益突出

无人机清洗楼宇幕墙，虽然设备初期投入较高，但通过高效、安全、低成本的作业方式，使人工成本、保险费用及事故处理成本大幅降低，为建筑维护提供了更具成本效益的解决方案，是传统人工清洗的有效替代。

降低人工成本，传统人工清洗依赖“蜘蛛人”或吊篮作业，需大量高空作业人员，人力成本高且安全风险大。无人机清洗可减少80%以上的人工配置，单台无人机配合少量地面人员即可完成大面积清洗任务，大幅降低人力成本。

提高清洗效率，无人机清洗效率远超人工，每小时可清洗600-1200平方米，是人工的5-10倍。例如，传统人工清洗一座百米高楼需数天，无人机仅需半天即可完成，显著缩短作业周期，提高建筑使用效率。

降低综合成本，无人机清洗综合成本降至1.5-3元/平方米，仅为人工成本的50%-70%。同时，减少了脚手架搭设、安全防护设备投入及因高空作业导致的保险费用，长期运营成本优势明显。

环保节能，无人机采用微水清洁技术，节水率超70%，并可使用环保清洁剂，减少化学污染，符合绿色建筑要求，降低对环境和建筑表面的损害。

安全风险低，无人机作业无需人员高空作业，彻底消除坠落风险，安全成本大幅降低。智能避障系统和抗风设计确保作业安全，减少因安全事故导致的额外成本。

1.4 环保性能优越

无人机清洗楼宇幕墙通过技术创新，采用高压水流或环保清洗剂，减少化学清洁剂使用，降低对幕墙和环境的污染，实现了环保性能的全面提升，不仅符合绿色建筑和可持续发展的要求，也为城市环境的保护和改善做出了积极贡献。

减少化学清洁剂使用，传统人工清洗常依赖大量化学清洁剂，这些物质可能对土壤、水体和生态系统造成污染。无人机清洗则采用高压水流或无化学物质的清洁设备，或使用可降解清

洁剂,用量仅为传统方式的三分之一左右,有效降低了化学污染风险。

节约水资源,无人机通过精准喷淋控制系统,能将清洗用水量较传统方式节省50%-60%以上。部分无人机还配备水雾回收技术,可循环利用90%的清洁剂,进一步提高水资源利用率,符合可持续发展理念。

降低能源消耗,相比传统人工清洗所需的大量人力和设备,无人机清洗效率更高,减少了因长时间作业产生的能源消耗。同时,无人机的智能化操作减少了不必要的重复劳动,进一步优化了能源利用。

减少噪音污染,无人机清洗过程中产生的噪音远低于传统人工清洗时的设备运行噪音,对周边居民和环境的影响极小,有助于营造安静、舒适的居住和工作环境。

适应复杂环境,减少二次污染,无人机可灵活应对各种建筑结构和复杂环境,避免因人工操作困难而产生的清洁死角或过度清洁导致的二次污染。其精准的清洗能力确保了对建筑表面的温和处理,减少了对建筑物本身的损害,间接降低了因修复或更换材料带来的资源消耗和环境压力。

1.5 清洁效果精准

无人机清洗通过技术手段,配备高清摄像头、传感器、多角度喷头和智能路径规划,实现了精准定位、智能调整 and 高效清洗,有效提升了楼宇幕墙的清洁效果,尤其在复杂结构和大面积清洗场景中优势明显。

精准定位与避障,无人机搭载毫米级雷达波和厘米级RTK GPS定位系统,能精确识别幕墙轮廓,自动避开窗户、空调外机等障碍物,确保清洗路径无死角。例如,在复杂建筑结构(如穹顶、异形立面)清洗中,无人机可通过三维建模技术规划专属清洗路径,实现精准覆盖。

智能污渍识别与调整,通过图像识别技术和AI算法,无人机可实时分析幕墙污渍类型和分布,自动调整清洗压力、水流量和清洗剂浓度。例如,针对顽固油渍或灰尘,系统会智能切换清洗模式,确保不同区域的清洁效果一致。

高压喷射与均匀清洗,无人机配备高压水雾喷射系统,喷射距离超过10米,水流量稳定,能均匀覆盖幕墙表面。相比人工清洗,无人机可避免因体力差异导致的清洗疏漏,实现大面积、高效率的精准清洗。

环境适应性与稳定性,部分无人机可在6级以下风力环境中稳定作业,突破传统人工清洗受天气限制的瓶颈。同时,水电双系留技术解决了续航与载重难题,确保连续作业能力,进一步保障清洗效果的稳定性。

1.6 适用范围广泛

无人机清洗凭借高效、安全、环保等优势,适用范围广泛,能适应各种建筑结构,包括异形建筑、斜面玻璃、复杂装饰外立面等,尤其在传统人工难以到达的区域(如高处、狭窄空间),覆盖了从常规建筑到特殊场景的广泛需求,是建筑清洁领域的重要创新方向。

建筑类型多样,适用于各类高层建筑,包括写字楼、商业综合体、酒店、住宅楼等。无论是玻璃幕墙、石材幕墙还是金属幕墙,无人机均可通过定制化清洗方案实现高效清洁。例如,南京、福州等地的商业综合体已成功应用无人机清洗,效率较传统人工提升3倍以上。

建筑结构复杂,能应对异形建筑、穹顶、采光顶、倾斜幕墙等特殊结构。无人机可通过三维建模和智能避障技术,精准清洗传统方式难以触及的区域,如上海中心大厦、深圳平安金融中心等超高层建筑的拐角、女儿墙等部位。

环境适应性强,在城市密集区域、机场周边、文物保护单位等特殊环境下也能应用。例如,机场周边建筑清洗需遵守净空管制要求,无人机可通过民航局认证的限飞系统确保安全;在文物保护单位,低噪音设计可避免惊扰文物。

应用场景拓展,除幕墙清洗外,还可用于工业设施清洗,如大型储罐、烟囱、冷却塔等,以及光伏板、桥梁、风机等高空清洗需求。未来在历史建筑保护、应急救援与监测等领域也有广阔应用前景。

综上,无人机清洗楼宇幕墙在安全、效率、成本、环保等方面均展现出显著优势,是建筑清洁领域的重要创新方向。

2 面临的多维度瓶颈

无人机清洗技术在实际应用中虽然取得了明显的进步和卓越的成绩,与此同时,也面临着多维度瓶颈,反映了无人机清洗技术在技术成熟度、成本控制、数据安全和政策配套等方面的挑战,主要体现在以下方面。

2.1 复杂环境作业能力受限

极端气候适应性不足:主流机型抗风等级多在6-7级,风速较高时无法作业,暴雨、暴雪、高温等极端天气也会影响作业稳定性。

超复杂建筑结构覆盖盲区:对于内凹曲面幕墙、密集连廊等复杂结构,无人机避障雷达探测角度有限(通常 180° - 270°),部分区域需人工补洗。

低空电磁干扰风险:在变电站、通讯基站等强电磁环境中,无人机导航信号易漂移,需切换至视觉导航模式,作业稳定性降低。

2.2 成本壁垒与投资回报周期长

设备初始投入高:单台专业清洗无人机采购成本达25-50万元,配套地面站、水质处理系统等辅助设备需额外投入10-15万元,远高于传统高空作业工具。

运营成本较高:无人机的电池损耗、喷头模组更换、飞控系统升级等成本不低,且需专业飞手操作,人力成本也较高。

2.3 数据安全隐患

无人机搭载的高清摄像头可能拍摄到建筑内部场景(如写字楼办公室、居民住宅),若数据管理不善,易引发隐私泄露和法律纠纷,行业在数据采集权限、存储周期等方面的监管尚存空白。

2.4 超微污染处理能力不足

对于半导体厂房外墙的纳米级粉尘、光学仪器表面的油膜污渍等超微污染,无人机高压冲洗可能造成二次污染,部分顽固污渍仍需依赖人工擦拭。

2.5超高层监管审批周期长

大部分地区对于超高层建筑(>200米)清洗,除履行报备手续外,还需额外申请作业空域,审批周期较长,影响项目进度。

2.6通水管道过长限制作业区域

无人机在清洗作业时,目前的水流亦是通过管道从地面水源到无人机机体,再通过程序控制喷头进行清洗作业,同时管道长度及管道内水量所产生的重力会直接影响到无人机的飞行姿态及精准控制,因此对无人机作业能力的有着一定程度的制约,涉及到无人机续航、信号传输或操作灵活性等方面的问题。

3 面临瓶颈的解决方案探索

针对无人机清洗面临的多维度瓶颈,现结合具体问题给出相应的解决方案,可在一定程度上对上述问题进行突破,相信在不久的将来,相关机构和部门有胆识、有实力逐一攻克其瓶颈问题,并同时去解决未来新发现的相关问题。

3.1复杂环境作业能力受限解决方案

无人机清洗在复杂环境作业中面临极端气候适应性不足、超复杂建筑结构覆盖盲区、低空电磁干扰等问题,以下是一些针对性的解决方案。

3.1.1提升极端气候适应性

优化动力系统:采用氢燃料电池或更高能量密度的电池技术,延长续航时间,增强抗风能力。部分机型已实现抗12米/秒强风作业,未来可进一步提升抗风等级。

智能避险算法:结合气象数据实时调整作业计划,风速超过安全阈值时自动暂停或切换至安全模式,待条件允许后继续作业。

3.1.2解决超复杂建筑结构覆盖盲区

多传感器融合感知:集成激光雷达、毫米波雷达、视觉传感器等,实现360°环境感知,精准识别内凹曲面、密集连廊等复杂结构,自动规划清洗路径。

多机协同作业:通过5G网络实现多无人机协同,分工覆盖不同区域,提高整体覆盖率,减少人工补洗工作量。

3.1.3应对低空电磁干扰

抗干扰设计:优化无人机导航系统,增强电磁兼容性,减少强电磁环境对信号的干扰。

备用导航模式:配备高精度视觉导航系统,在电磁干扰严重时自动切换,确保作业稳定性。

3.2成本壁垒与投资回报周期长解决方案

无人机清洗技术在建筑运维、新能源维护等领域展现出显著优势,但设备初始投入高、运营成本高、投资回报周期长等问题仍是制约其广泛应用的关键因素,以下是一些针对性的解决方案。

3.2.1选择性价比高的设备

初期可优先采购中端工业级无人机,兼顾性能与价格。例

如,部分国产无人机品牌推出的功能简化版机型,能满足基础清洗需求,采购成本可控制在15-20万元,相比高端机型降低30%-50%。同时,配套地面站和水质处理系统可选择模块化设计的产品,按需组合,减少一次性投入。

3.2.2与设备供应商合作

采用租赁模式获取无人机及配套设备,租赁期可根据项目规模和频率灵活调整,降低前期资金压力。此外,通过行业平台或区域联盟,实现设备共享,提高设备利用率,分摊成本。

3.2.3延长设备使用寿命

建立严格的设备维护制度,定期对无人机进行保养、校准和零部件更换。例如,采用防水、防尘等级高的电池和喷头模组,可延长其使用寿命20%-30%。同时,合理规划作业任务,避免设备过度损耗。

3.2.4提高作业效率

利用集群作业技术,多台无人机协同完成大面积清洗任务,减少单机作业时间。例如,在光伏电站清洗中,3-5台无人机组成的集群可将单日作业面积提升至2-3万平方米,显著提高设备利用率,摊薄单位成本。

3.3数据安全隐患解决方案

无人机清洗数据安全隐患主要源于数据采集、存储和传输过程中的风险,如影像数据泄露、敏感信息暴露等,以下是一些针对性的解决方案。

3.3.1数据加密与权限管理

对无人机采集的影像数据进行端到端加密,采用AES等强加密算法,确保数据在存储和传输过程中不被窃取或篡改。

建立严格的权限管理系统,根据用户角色分配最小必要权限,仅允许授权人员访问和处理数据,防止未授权访问。

3.3.2数据脱敏与匿名化处理

在数据采集和存储阶段,对可能涉及敏感信息的区域(如建筑内部、居民住宅等)进行自动脱敏处理,模糊或删除敏感细节,降低数据泄露风险。

对于非必要公开的数据,采用匿名化技术,去除可识别个人或机构的信息,保护隐私。

3.3.3安全存储与备份

使用加密存储设备或云存储服务,确保数据存储的安全性。定期对数据进行备份,并将备份存储在安全、隔离的环境中,防止数据丢失或损坏。

采用区块链技术记录数据操作日志,确保数据的可追溯性和完整性,便于在发生安全事件时快速定位和恢复。

3.3.4飞行区域与任务管理

严格规划无人机的飞行区域,避免在敏感区域(如军事设施、私人住宅等)进行不必要的拍摄。通过地理围栏技术限制无人机的飞行范围,防止误操作或恶意行为。

在任务前明确数据采集的目的和范围,避免过度采集数据,减少数据泄露的可能性。

3.3.5人员培训与安全意识提升

对无人机操作人员和相关工作人员进行数据安全培训,提高其对数据安全重要性的认识,规范操作流程,避免因人为失误导致数据泄露。

建立安全管理制度,对违反安全规定的行为进行严肃处理,确保数据安全措施得到有效执行。

3.3.6法律法规与监管合规

遵循国家和地方关于无人机使用的法律法规,确保数据采集和处理活动合法合规。配合监管部门的要求,及时报备数据采集和使用情况,接受监管检查,保障数据安全。

3.4超微污染处理能力不足解决方案

针对无人机清洗超微污染处理能力不足的问题,可从技术优化、设备升级、清洗剂改进及作业流程优化等多方面综合解决,以下是具体方案。

3.4.1技术优化与设备升级

提升感知与识别精度:升级无人机搭载的传感器,如采用更高分辨率的摄像头、更先进的激光雷达等,结合AI算法,增强对超微污染的识别能力,精准定位纳米级粉尘、油膜等污染物的位置和分布。

优化喷射系统:研发更精细的喷嘴和喷射技术,如采用微孔喷嘴或雾化喷嘴,实现更均匀、更细腻的喷射效果,减少对超微污染的冲击力,避免二次污染。同时,可根据不同污染物类型和表面材质,智能调节喷射压力、角度和流量。

增加辅助清洁模块:在无人机上集成旋转刷毛、静电吸附等辅助清洁装置。对于一些顽固的超微污染,如油膜污渍,可先通过旋转刷毛进行物理摩擦,再配合清洗剂进行冲洗;对于纳米级粉尘,可利用静电吸附原理,吸附并清除粉尘。

3.4.2清洗剂改进

研发专用清洗剂:针对半导体厂房外墙的纳米级粉尘、光学仪器表面的油膜等超微污染,开发具有针对性的专用清洗剂。这些清洗剂应具有更强的渗透性、乳化性和溶解性,能够有效分解和去除超微污染,同时对被清洗表面无腐蚀、无损伤。

优化清洗剂配方:在现有清洗剂的基础上,调整配方,降低清洗剂的表面张力,提高其在超微污染表面的铺展性和润湿性,使清洗剂能够更好地与污染物接触并发生反应,从而提高清洗效果。

3.4.3作业流程优化

分阶段清洗:对于超微污染严重的区域,可采用分阶段清洗的方式。先进行预处理,使用低压力、低流量的清洗剂对污染物进行初步溶解和松动;然后再进行主清洗,采用适当的压力和流量进行彻底清洗;最后进行冲洗,确保清洗剂和污染物被彻底清除。

人工辅助清洗:在无人机清洗完成后,对于一些仍存在超微污染的区域,可安排人工进行局部擦拭或精细处理。人工操作可以更灵活地针对特定部位进行清洁,弥补无人机清洗的不足。

3.4.4加强培训与管理

操作人员培训:对无人机操作人员进行专业培训,使其熟悉

不同污染物的特性和清洗方法,掌握无人机的操作技巧和清洗参数的调整方法。通过培训,提高操作人员的技能水平和应急处理能力,确保无人机清洗作业的高效和安全。

建立质量监控体系:建立完善的质量监控体系,对无人机清洗作业的过程和结果进行实时监测和评估。通过质量监控,及时发现清洗过程中存在的问题,如清洗不彻底、二次污染等,并采取相应的措施进行改进。

3.5超高层监管审批周期长解决方案

针对无人机清洗超高层建筑监管审批周期长的问题,可从以下几方面寻求解决方案。

3.5.1提前规划与准备

精准申报材料:提前与监管部门沟通,明确审批所需材料清单,确保申报文件(如作业方案、安全预案、设备资质等)完整、准确,减少因材料不全导致的审批延误。

联合多方协作:与建筑管理方、物业、空域管理部门等提前协调,共同制定作业计划,确保各方需求和安全要求在申报中充分体现。

3.5.2优化作业方案

分阶段作业:对于超高层建筑,可采用“无人机初洗+人工精洗”结合的模式,优先申报无人机作业部分,后续再补充人工精洗环节,降低单次审批压力。

灵活调整时间:根据审批进度,合理安排作业时间,如选择非高峰时段或夜间作业(需符合安全规范),减少对城市运行的影响,提高审批通过率。

3.5.3加强技术保障与安全措施

设备适航认证:确保无人机及配套设备通过民航局等相关部门的适航认证,提供设备性能、安全防护(如避障系统、冗余导航)等技术资料,增强审批可信度。

实时监控与应急响应:部署实时监控系統,展示作业过程中的安全状态(如飞行高度、避障情况等),并制定完善的应急处置预案,降低监管部门对安全风险的担忧。

3.5.4推动政策优化与行业规范

参与行业标准制定:企业可联合行业协会、监管部门,共同推动无人机清洗超高层建筑的行业标准和规范出台,明确审批流程、技术要求等,为审批提供更清晰的依据。

案例示范与推广:分享成功案例(如绍兴市文化中心项目),展示无人机清洗的安全性、高效性,推动监管部门对新技术的认可,加快审批流程。

3.6通水管道过长限制作业区域解决方案

无人机清洗时因通水管道过长限制作业区域,可从优化设备、改进技术、调整作业方式等方面综合解决,以下是具体方案。

3.6.1优化设备与技术

采用高压小流量水泵:选择高压小流量的水泵,能在较短管道长度下提供足够压力,减少因管道过长导致的压力损失,确保清洗效果。如一些无人机清洗系统配备的高压水泵,可在较短管道内实现较高水压,满足清洗需求。

使用柔性管道:采用柔性、抗压且内径较大的管道,减少水流阻力和压力损失。柔性管道能更好地适应无人机的运动和作业环境,同时较大的内径可降低水流速度,减少压力损失,延长有效作业距离。

3.6.2改进作业技术与策略

采用无人机系留系统,通过物理线缆将无人机与地面供电和供水设备连接,实现持续电力和水源输送,支持无人机在限定空域内完成超长航时作业,减少因管道过长带来的限制。

3.6.3改进供水模式

可将水管供水模式更改为可携带水箱供水模式,在水箱内的水用水完毕,立即返回基站进行水箱更换,同时采用多机联合作业的形式,进一步提高工作效率。

4 结语

无人机清洗技术,正从科幻走向现实,从试点走向普及。它不仅仅是一种新的清洁工具,更是高空作业领域的一场深刻变革。

未来,随着智慧城市、新型基础设施建设的推进,无人机清洗技术将与机器人、物联网、大数据深度融合,其应用场景将更加多元,作业能力将更加强大。

[参考文献]

[1]亿欧智库《2025全球无人机清洗系统市场应用发展白皮书》。

[2]曹璟玉,王嘉宇,及廷行,等.新型外墙喷涂无人机设计[J].现代盐化工,2019(5):37-38.

[3]李华泽.玻璃幕墙清洗机器人的简要设计[J].机电技术,2015(4):38-40.

[4]陈小龙.基于专利分析的建筑壁面清洁无人机技术创新态势研究[J].海峡科技与产业,2015(4):43-49,62.

[5]李蕾.壁面清洗无人机的研究[D].西安:西安科技大学,2017.

[6]李思圻,李成彬,杨艳.基于多旋翼无人机平台的壁面清洗机器人[J].科技与创新,2020(19):36-37,40.

[7]赵晨懿.浅谈无人机的发展现状与技术支持[J].海峡科技与产业,2017(9):133-135.

[8]贺良国,苏宇涛,尹正浩,等.一种基于四旋翼飞行器的高层楼宇外墙清洁装置[J].科技风,2020(27):11,33.

[9]何镜奎,陈洪土,冯青.高空清洁刷洗机构的设计[J].机械工程师,2017(12):94-95.

[10]邓琳翔,石玥,倪子涵.小高层建筑外墙及玻璃清洁无人机设计与验证[J].设计,2020,33(2):137-139.

作者简介:

朱亚辉(1986--),男,汉族,山东菏泽人,大学本科,高级工程师,长期从事飞行器强度领域基础技术研究、核心能力攻关和重大型号研制工作,现从事低空经济无人机开发技术研究。