

风电低空飞行巡检机器人关键技术研究进展与展望

姜苏娜

(福建福州闽投海上风电有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 在全球推进清洁能源转型背景下, 风电产业迅速扩张。然而, 传统人工巡检模式存在效率低、成本高、安全性差等瓶颈。为此, 以垂直起降平台为核心的低空巡检机器人应运而生, 其融合多模态作业机构, 具备强机动性、高灵活性及高效数据采集优势。本文系统梳理结构系统设计与控制技术的研究进展, 重点剖析多源传感器融合精度不足、路径规划算法实时性受限等核心技术难题。未来需深度融合人工智能、新型材料及 5G 通信技术, 突破动态环境感知、自主决策优化等关键技术, 推动风电巡检机器人向智能化、集群化方向发展, 为新能源产业高质量发展提供技术支撑。

关键词: 风电巡检; 低空飞行机器人; 结构系统设计; 控制技术

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Research Progress and Prospects of Key Technologies for Wind Power Low Altitude Flight Inspection Robots

JIANG Suna

(Fujian Fuzhou Mintou Offshore Wind Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Against the backdrop of global promotion of clean energy transformation, the wind power industry is rapidly expanding. As one of the important tools to ensure the reliable operation of wind turbines, low altitude flight inspection robots for wind power have attracted much attention for their technological development. This article introduces the key technological research progress in the fields of control technology and structural design. In addition, this article summarizes the limitations of existing technologies in terms of multi-sensor fusion accuracy and real-time path planning algorithms. In the future, with the development of artificial intelligence, new materials, interdisciplinary integration, and communication technology, the performance and reliability of wind power low altitude flight inspection robots are expected to be further improved, providing stronger support for efficient operation and maintenance of the wind power industry.

Keywords: wind power inspection; low altitude flying robot; control technology; structural design

1 引言

随着全球对清洁能源需求的增长, 风力发电凭借清洁可再生优势在能源结构中发电量占比达 8.1% (截至 2024 年底), 全球累计装机突破 1 142.6GW, 中国以 45.6% 的份额居首且年减碳约 18 亿吨。然而, 风力发电机组多处于复杂且恶劣的自然环境中, 无论是海上风电场面临的高盐、潮湿气候, 还是内陆风电场遭遇的风沙、极端

温差, 都对空中作业机器人系统的可靠性构成严峻挑战。传统人工巡检方式不仅效率低下、成本高昂, 还因环境危险而存在诸多安全隐患, 已难以满足风电产业快速发展的需求。

风电低空飞行巡检机器人, 尤其是空中作业型无人机, 以其高度的机动性、灵活的作业能力和高效的数据采集优势, 逐渐成为风电巡检领域的主力军。对其

关键技术的深入研究，对于提升风电巡检的质量和效率，确保风力发电系统的稳定运行，具有重要的现实意义。

风电低空飞行巡检机器人技术沿“单机功能→多技术协同”演进，结构轻量化与仿生设计降低负载，能源系统向混合供电升级，传感器多模态融合提升检测精度，控制技术从抗风扰发展至多机智能规划。各技术模块通过“减重-节能-感知-控制”形成协同闭环，突破复杂风场巡检瓶颈，为风电运维提供技术支撑。

2 结构系统设计

2.1 结构轻量化与仿生设计

飞行系统的结构创新是提升巡检机器人续航与机动性的核心。Lin^[1]等设计的用于输电线路巡检的四旋翼系统，通过采用轻质材料和优化结构布局，有效减少了机器人的能耗。例如，使用碳纤维等轻质高强度材料制作机器人框架，在减轻重量的同时，保证了结构强度，提高了机器人携带有效载荷的能力。

高机动性需求催生了飞行器结构紧凑型设计，Guo^[2]等提出一套旋翼无人机框架的集成化设计方法。该方法通过可配置设计确定框架初始几何域，利用基于惯性释放理论的拓扑优化技术将模型转化为薄壁结构，并采用冲压工艺提升制造效率。设计将拓扑优化后的实体截面替换为高刚度-质量比的薄壁部件，通过螺栓连接实现模块化维护，提高了框架的可维护性。以八旋翼植保无人机为例的研究验证了该设计方法的工程可行性，实际设计中可根据作业需求优化框架尺寸与结构。

借鉴自然仿生设计则为动态风场适应性提供了一种新灵感，吴正阳^[3]等基于翠鸟入水策略的跨介质飞行器构型仿生设计研究，为风电巡检机器人的结构设计提供了创新思路。借鉴鸟类飞行姿态调整方式，如模仿鸟类翅膀结构设计可变形机翼，能使机器人在不同风况下更好地调整飞行姿态，提高飞行稳定性和机动性。

仿生设计在提升无人机性能方面的潜力还有待进一步挖掘，Floreano^[4]等探讨了小型自主无人机的科技发展和未来方向，强调了在风电巡检机器人设计中，模仿昆虫或鸟类翅膀结构，开发新型飞行器结构，有望提高机器人在复杂风场环境下的适应性。这种从材料到形态的设计逻辑，本质上是通过降低机身惯性质量与气动阻力，

为能源系统减轻负载压力。

结构轻量化与仿生设计为能源系统优化奠定了物理基础——更轻的机身不仅直接降低飞行能耗，还为能源设备搭载释放了重量空间。形成“结构减重→能耗降低→能源密度需求下降→续航能力提升”的正向循环。这种硬件层面的协同，为后续传感器集成与复杂控制算法的运行提供了更灵活的物理平台。

2.2 能源与动力系统优化

能源与动力系统优化需充分考量设备运行环境、任务需求及结构特性的协同适配，通过动态调节能源分配与动力输出，实现系统能效、稳定性与续航能力的综合提升。为了延长飞行作业时长，Elkerdany^[5]等提出一种质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PMFC）与锂电池的混合电源系统，通过多输入多输出框架调节功率流，解决PMFC对突发负载响应迟缓的问题。研究对比模糊逻辑控制（Fuzzy Logic Control, FLC）与自适应神经模糊推理系统（Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS）在不同飞行模式下的性能，发现ANFIS在动态负载过渡阶段的功率流稳定性更优。在无人机能源效率优化实际应用中，可根据飞行模式与负载需求选择合适的控制策略，以平衡氢气利用率与电池应力。

在巡检机器人中采用太阳能、氢能等可再生能源，并优化储能系统设计，可提高能源利用效率。如在巡检机器人上安装高效太阳能电池板，结合先进储能电池管理系统，能有效延长机器人的续航时间，如图1所示。Yang^[6]等对太阳能无人机能源推进系统基于任务的设计和改造研究，考虑了螺旋桨滑流效应。通过优化螺旋桨设计和布局，利用螺旋桨滑流效应提高能源利用效率，提升了太阳能巡检机器人的续航能力和飞行性能，使其在有限能源下能飞行更远距离。

在实际应用中，可再生能源的管理和控制也是一个现实的技术挑战，Farah^[7]等对并网混合可再生能源系统中储能设计参数的投资优化研究，为巡检机器人的能源存储和管理提供了参考。黄羨飞^[8]等对海上风电场巡检和海洋数据采集的无人机能耗优化研究发现，结合风电场地形和风力分布情况，合理规划飞行路径和动力系统参数，可有效降低无人机能耗。例如，根据风电场风向和风速分布规划顺风飞行路径，能显著减少能源消耗，延长机器人工作时间。

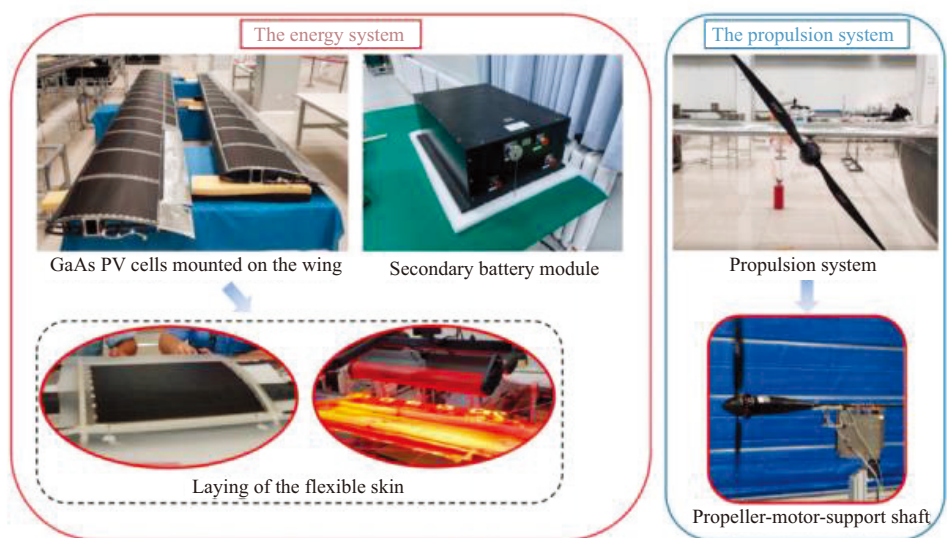


图1 太阳能动力无人飞行器能源和推进系统

能源系统的高效运行为传感器集成提供了持续电力支撑，但感知能力的提升又对硬件载体提出了更高要求。例如，高光谱成像传感器的功耗是普通视觉传感器的3倍，这就需要能源系统在电池能量密度与功率输出之间重新平衡。同时，传感器采集的环境数据量随精度提升呈指数级增长，对数据传输与处理硬件的能耗提出了新挑战，这种“感知需求-能源供给”的动态平衡，推动着物理系统向集成化、低功耗方向演进。

2.3 传感器集成与可靠性

环境感知精度直接影响巡检质量，准确的环境感知依赖于传感器的集成与可靠性。针对风机叶片缺陷检测，Yang^[9]等研究的用于无人机风轮机叶片检查的精确图像拼接技术，通过提高图像拼接准确性，可获取更完整的叶片表面信息。在实际巡检中，利用该技术将多个角度拍摄的叶片图像拼接成完整图像，能大幅提高缺陷检测的准确性。

实际风电巡检应用需要动态调整无人机巡航高度与路径规划，为了优化系统寿命与吞吐量，Abu-Baker^[10]等提出基于粒子群优化（Particle Swarm Optimization, PSO）与遗传算法（Genetic Algorithm, GA）的联合优化框架，用于风电巡检中的传感器网络聚类与无人机位置优化。PSO算法解决传感器节点的聚类问题以实现负载均衡，GA基于地形特征求解无人机最优三维位置。研究建立海拔-损耗量化模型，发现地形对信号的遮挡效应随无人机海拔变化的规律。

在风电巡检机器人中，集成激光雷达、红外传感器等多种传感器，可实现对风机设备的全方位、多模态检测。Rizk^[11]等利用高光谱成像和3D卷积神经网络进行风力涡轮机叶片损伤检测。高光谱成像提供丰富的光谱信息，结合3D卷积神经网络强大的特征提取能力，能够准确识别叶片微小损伤，显著提高了损伤检测的精度和可靠性。

尽管传感器采集的环境信息需通过控制算法转化为运动指令，但复杂风场下的精准控制绝非单一技术可实现。例如，当激光雷达检测到前方风机叶片时，控制算法需同时处理风扰引起的机身抖动、传感器数据延迟以及执行器响应滞后等多重挑战。这就要求控制技术在抗风扰的基础上，构建“感知-决策-执行”的实时闭环，而物理系统设计中预留的计算资源与通信带宽，则为控制算法的高效运行提供了必要条件。

3 控制技术

3.1 抗风扰与鲁棒控制

风电场的阵风干扰是巡检机器人面临的重大挑战之一。Guo^[12]等提出的针对四旋翼飞行器的新型鲁棒姿态控制方法，在执行器故障和阵风干扰下仍能保持稳定飞行。该方法通过设计自适应控制器，实时补偿执行器故障和阵风干扰的影响，显著提高了机器人在恶劣环境下的可靠性。在强风环境下，采用该方法的机器人能够迅速调整姿态，确保稳定飞行和数据采集的准确性。

此外，控制模型的不确定性也是另一个需要解决的

挑战。Mofid^[13]等采用的自适应超扭曲终端滑模控制方法，实现了在模型不确定性和风力干扰下四旋翼无人机的稳定期望跟踪。该方法的强鲁棒性确保了机器人在复杂风电环境中，即使存在模型误差和风力不确定性，也能准确跟踪预定轨迹，完成巡检任务。

面对实际应用中的强风干扰，Hao^[14]等针对固定翼无人机在强风环境下的路径跟踪问题，提出一种风干扰

补偿引导向量场策略，如图2所示。该策略通过干扰观测器估计复合风干扰，引入动态缩放因子调整补偿比例，并设计级联内环跟踪控制器与外环引导向量场协同工作。研究通过李雅普诺夫稳定性分析证明了路径跟踪误差与干扰估计误差的一致最终有界性，为解决固定翼无人机在风电场地形复杂区域因风干扰导致的漂移问题提供了有效方案。



图2 四旋翼无人机的户外飞行

考虑到风扰的估计和补偿，Wang^[15]等提出基于状态补偿函数观测器（State Compensation Function Observer, SCFO）与跟踪微分器（Tracking Differentiator, TD）的抗干扰滑模控制方法。SCFO整合位置、速度等反馈状态提升加速度与干扰估计精度，TD用于预测干扰变化趋势优化补偿策略。研究设计参考模型生成过渡状态参考，解决传统扩展状态观测器（Extended State Observer, ESO）的非导数形式缺陷，并通过遗传算法优化无人机三

维位置以适应丘陵地形干扰。

小型无人机气流扰动运动过程如图3所示，对小型无人机抗风扰动飞行控制方法的研究，任子君^[16]等通过精确建模和优化控制器设计，提高了小型无人机在强风环境下的飞行性能。在实际风电场应用中，小型无人机凭借该技术能够更好地应对强风干扰，稳定采集数据，为风机维护提供可靠依据。

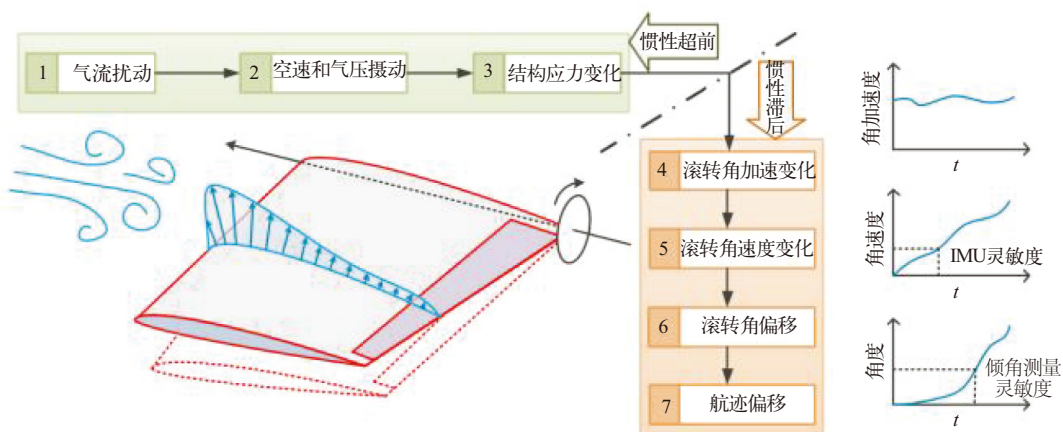


图3 小型无人机气流扰动运动过程

为采用自适应控制方法进一步提升应对风扰的性能提升，黄天彭^[17]等将鲁棒自适应控制与路径规划相结合，

提出了一套综合解决方案。使巡检机器人在应对风扰时，不仅能保持稳定飞行，还能根据环境变化实时调整路径，

进一步提高了机器人在复杂风场中的适应性和作业能力。针对风扰问题，为增强巡检机器人的稳定性和可靠性，Simplicio^[18]等提出的鲁棒智能控制方法，进一步提升了四旋翼无人机在阵风环境下的应对能力，为风电巡检提供了更可靠的技术支持。形成“干扰建模-控制器设计-轨迹优化”的技术路径。

除了传统控制框架，新型的智能学习方法也可应用于提升抗干扰性能。Ma^[19]等利用深度强化学习提出了无人机抗风干扰控制策略。通过大量模拟训练，机器人能够学习到最优控制策略，适应不同强度和方向的风扰。这一策略使机器人在复杂风场环境中具备更强的适应性和稳定性，有效保障了巡检任务的顺利进行。

抗风扰控制确保了机器人的基础稳定性，但应对静态风场干扰性能可能受限。当巡检环境中出现移动障碍物或复杂地形时，机器人需要具备更高层级的环境理解与决策能力。自主导航与避障技术正是在此需求下发展起来的，前端传感器数据为输入，通过算法实时构建环境模型，再结合抗风扰控制提供的稳定平台，实现动态障碍物规避，这标志着控制技术从“被动稳定”向“主动适应”的升级。

3.2 自主导航与避障

在复杂的风电巡检环境中，巡检机器人必须具备精准的自主导航与避障能力。Peng^[20]等提出的 SplineVO 方法，借助样条视觉里程计技术实现多无人机协作避障。该技术使多架无人机在作业时能够实时共享环境信息，提高了避障精度和效率。例如，在某风电场的实际测试中，多架采用 SplineVO 方法的无人机，能够在密集的风机群中快速、准确地规划各自的飞行路径，有效避免相互碰撞，并顺利完成巡检任务。利用融合预测和基于梯度的优化算法，Fu^[21]等实现了机器人在线轨迹重规划以避开移动障碍物。在风电场中，移动障碍物如作业车辆、飞鸟等时有发生，该算法通过对障碍物运动的精准预测，提前为机器人规划出安全的巡检轨迹。这一技术增强了机器人在动态环境下的适应性，保障了巡检工作的连续性和安全性。

在避障过程中，需要同时考虑控制和路径规划，Xiong^[22]等对四旋翼无人机的位姿跟踪控制展开研究，为巡检机器人在复杂环境下实现精准定位和稳定飞行奠定了理论基础。其研究成果有助于提升机器人自主导航的准确性，确保无人机在靠近风机等复杂结构时也能稳定

作业。Singh^[23]等提出的最小冲击轨迹规划结合姿态与位置控制方法，有效减少了无人机飞行时的振动。该方法不仅提高了飞行机器人的稳定性，还降低了对设备的潜在损害风险，保障了巡检任务的安全进行。

针对智能电网巡检与故障诊断，袁铭均^[24]等提出综合运用激光雷达、视觉传感器等多种传感器数据，是实现机器人对环境精确感知和定位的关键。其中，激光雷达能够快速获取周围物体的距离信息，视觉传感器则可识别障碍物的形状和特征，二者相辅相成，为机器人提供全面、准确的环境数据。以某风电场应用为例，搭载了激光雷达和视觉传感器的巡检机器人，成功检测到风机叶片上的微小异物，并及时调整飞行轨迹，减小了碰撞风险。

单机自主能力的提升催生了多机协作需求，但大规模风电场巡检仅靠单机组网仍面临效率瓶颈。因此，路径规划与多机协作技术需要从“单机最优”转向“系统最优”，结合风电场拓扑结构、风机故障概率、能源续航等多维度约束，构建全局优化策略，这正是控制技术向智能化、系统化演进的必然方向。

3.3 路径规划与多机协作

合理的路径规划和高效的多机协作策略是提高风电巡检效率的核心技术之一。Kyriakakis^[25]等提出的累积无人机组路问题方法，为风电巡检路径优化提供了新的思路。通过应用该方法，巡检机器人能够规划出更高效的飞行路径，减少不必要的飞行距离和时间，从而降低能耗，提高巡检效率。拓展到三维空间，Torres^[26]等的3D地形重建无人机覆盖路径规划研究成果，在风电场景中具有重要应用价值。在复杂地形的风电场中，该方法帮助机器人依据地形和风机位置规划出最佳巡检路径，确保对风机的各个部件进行全面、细致的检测。

虽然遗传算法、粒子群优化算法等常被用于求解最优巡检路径，但在复杂环境下，这些算法存在收敛速度慢、易陷入局部最优等问题。Jiang^[27]等对无人机路径规划的进化计算方法进行了全面综述之后指出，在实际应用中，需根据风电场的具体情况，选择合适的算法或结合多种算法的优势，以提升路径规划的效果。

在大型风电场中，多架巡检机器人通过该策略分工合作，可同时对不同区域的风机进行巡检，大幅提高了巡检效率。如在某大型海上风电场，采用该策略的多架无人机在短时间内完成了对大量风机的巡检工作，及时发现并反馈了潜在问题。Sun^[28]等提出的基于多无人机协

作的多动态目标覆盖跟踪控制策略，实现了多架无人机的协同作业，如图4所示。

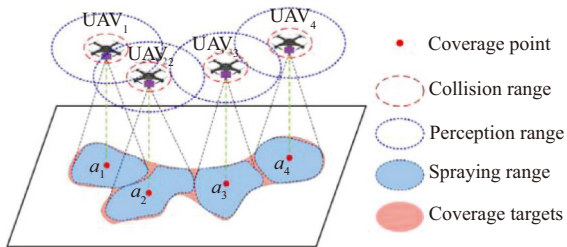


图4 基于多无人机协作的覆盖清除示意图

考虑到风电场中风机布局、地形地貌等因素，栗骏龙^[29]等针对风电场巡检场景，提出了更具针对性的路径规划算法。该算法充分使路径规划更贴合实际应用需求，有效提升了巡检效率和质量。为突破在未知环境中自主导航与飞行控制的关键技术难题，宋春林^[30]针对四旋翼

无人机提出了一套融合高精度导航、鲁棒控制与智能规划的策略，为多机协作在复杂风电环境下的作业提供了系统性解决方案。

针对本文所关注的风机叶片巡检的航迹规划问题，朱凯华^[31]专注于利用智能学习和传统控制相结合方法，其成果有助于提高对风机关键部件巡检的精度和效率。马雨菲^[32]等对无人机在风电检修领域视觉惯性定位系统展开研究，为无人机在风机叶片巡检过程中的精准定位提供了新途径，对多机协作巡检的定位协同具有重要意义，形成“单机路径-多机任务分配-全局优化”的策略体系。

4 研究成果汇总

综上所述，在国内风电低空飞行巡检机器人关键技术领域，多个团队取得的部分成就见表1。

表1 风电低空飞行巡检机器人关键技术部分研究成果

研究团队	研究对象	技术方法	研究成果
GUO ^[2] 等	旋翼无人机框架轻量化设计	配置设计→拓扑优化→工艺设计，基于惯性释放理论	框架质量 2.332kg，设计周期缩短，中央枢纽核心部件跌落发生塑性变形可更换
吴正阳 ^[3]	仿生跨介质飞行器	翠鸟头部与龙虱身体组合仿生设计，CFD 数值模拟与入水试验	后掠 40° 升阻比最大；头部可压缩体入水 3.96m/s 时峰值加速度下降 71%
Yang ^[6] 等	太阳能无人机能量 / 推进系统	高保真多学科设计框架，DNN 预测滑流影响	PV 覆盖率 80%、电池 30 575Wh，可行任务区扩大 3.3 倍
Yang ^[9] 等	无人机拍摄的风力涡轮机叶片图像拼接	粗到细拼接策略，引入 Blade30 数据集	5 400×3 600 分辨率下拼接误差 7.6 像素，Blade30 含 1 302 张图 /30 叶片 /156 缺陷
Mofid ^[13] 等	带输入延迟 / 干扰的四旋翼无人机	自适应超扭曲终端滑模控制，结合参考模型和观测器	位置误差 <0.05m；风速变化时误差波动 <15%；实验轨迹偏差 <0.1m
Wang ^[15] 等	风干扰下的无人机轨迹跟踪	基于参考模型的抗干扰滑模控制，结合 SCFO 和 TD	风切变实验最大偏差 0.149m（上升 63.4%）；TD 延迟 <0.1s 时性能最佳
Peng ^[20] 等	多无人机协作动态避障	心跳信息过滤机制 + UDP 通信，Spline_VO 方法	信息算法较直接 UDP 时间下降 12.5%；避障路径转弯角下降 40%、平滑度上升 35%
Fu ^[21] 等	固定翼无人机在线轨迹重规划	融合 CVM 和 KMP 预测障碍物，梯度优化	融合预测较单独模型 RMSE 下降 30%~50%

5 研究局限

在结构系统设计方面，结构轻量化与仿生设计在实际应用中面临材料成本高、制造工艺复杂的难题。新型轻质材料的研发和仿生结构的制造需要投入大量人力、物力和时间成本，限制了其大规模推广应用。能源与动力系统优化方面，可再生能源在巡检机器人中的应用受能源转换效率低、储能技术瓶颈等因素制约。目前太阳

能电池板转换效率有限，无法满足机器人长时间、高负荷工作要求；储能电池的能量密度和充放电效率也有待提高，导致机器人续航能力不足。

传感器集成与可靠性方面，多传感器融合算法的性能仍有提升空间，不同传感器之间的数据融合精度和实时性难以平衡。同时，传感器在恶劣环境下的可靠性和耐久性有待进一步增强，在高温、高湿、强电磁干扰等

环境中，传感器易出现测量数据不准确或失效的情况。

在控制技术方面，尽管抗风扰与鲁棒控制、自主导航与避障、路径规划及多机协作已经取得了显著进展，但在复杂风电场环境下，多传感器融合仍存在精度和稳定性问题。不同传感器的测量误差、数据更新频率差异及环境噪声干扰，容易导致机器人对环境感知出现偏差，进而影响导航和控制精度。此外，现有的路径规划算法在大规模风电场中，面对动态变化的环境和复杂约束条件时，计算复杂度高，难以实现实时规划。例如，在大型海上风电场中，风机数量众多且环境变化频繁，现有算法可能无法在短时间内计算出最优路径，从而影响巡检效率。

6 未来展望

随着人工智能技术的飞速发展，在结构设计方面，新型材料的研发将为结构轻量化和能源效率提升带来新突破。纳米材料、智能材料等具有独特性能的材料有望应用于巡检机器人的结构制造和能源系统，提高机器人的性能和可靠性。随着微机电系统（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）技术的发展，传感器将朝着微型化、集成化、智能化方向发展，进一步提高精度和可靠性，降低成本。未来的传感器将具备多种功能，能够实现对风机设备的全方位监测，并通过智能算法自动处理和分析数据，提高监测的准确性和效率。

深度学习、强化学习等将在风电巡检机器人控制技术中得到更广泛应用。通过构建更复杂、智能的模型，机器人将能够更好地处理复杂环境下的感知、决策和控制问题。例如，利用深度强化学习算法实现机器人在未知风电场环境中的自主探索和最优路径规划，提高其适应能力和巡检效率。未来，机器人有望通过深度学习自动识别风机故障类型，并根据故障情况制定个性化巡检策略，进一步提高巡检的针对性和效率。

此外，多学科交叉融合将成为风电巡检机器人发展的重要趋势。未来的巡检机器人将融合机械工程、电子技术、计算机科学、材料科学和控制科学等多个学科的前沿技术。例如，将生物学中的微机电传感器技术应用于机器人健康监测，实时检测关键部件状态，提前预警故障；将航空航天领域的先进导航和控制技术引入风电巡检机器人，提高其在复杂环境下的飞行性能。

随着 5G 等通信技术的普及，风电巡检机器人将实现更高速、稳定的数据传输，支持远程实时监控和智能决策。结合云计算、大数据技术，能够对大量巡检数据进行快

速处理和分析，为风电场运维管理提供更准确、全面的决策支持。未来，风电场管理人员可通过 5G 网络实时获取巡检机器人采集的数据，利用云计算和大数据技术进行深度分析，及时发现风机潜在问题，制定合理维护计划，提高风电场的运行效率 and 安全性。

7 结论

风电低空飞行巡检机器人的关键技术在于结构设计和控制技术等方面已取得显著进展，但仍存在一些局限性。未来，通过人工智能、新型材料、多学科融合及通信技术的协同发展，有望进一步提升巡检机器人的性能和可靠性，为风电产业的高效运维提供更有力的支持。在实际应用中，需根据不同风电场的特点和需求，综合考虑各种技术因素，持续优化巡检机器人的设计和控制策略，推动风电巡检技术不断发展。

参考文献

- [1] LIN X, MIAO F, CHEN Y, et al. Design of quadrotor system for transmission line inspection[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2203 (1): 1-6.
- [2] GUO H, LI M, SUN P, et al. Lightweight and maintainable rotary-wing UAV frame from configurable design to detailed design[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13 (7): 1-16.
- [3] 吴正阳. 基于翠鸟入水策略的跨介质飞行器构型仿生设计及入水性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [4] FLOREANO D, WOOD R J, technology and the future of small autonomous drones[J]. Nature, 2015 (521): 460-466.
- [5] ELKERDANY M S, SAFWAT I M, YOUSSEF A M M, et al. Intelligent energy management system for enhanced performance in electric UAVs[J/OL]. (2025-01-26)[2025-04-13].<https://link.springer.com/article/10.1007/s42401-025-00343-3>.
- [6] YANG X, MA D, ZHANG L, et al. Mission-based design and retrofit for energy/propulsion systems of solar-powered UAVs: Integrating propeller slipstream effects[J]. Drones, 2024, 8 (10): 1-31.
- [7] FARAH S, ANDRESEN G B. Investment-based optimisation of energy storage design parameters in a grid-connected hybrid renewable energy system[J]. Applied Energy, 2024, 355: 1-23.

- [8] 黄羨飞. 海上风电场巡检和海洋数据采集的无人机能耗优化研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [9] YANG C, LIU X, ZHOU H, et al. Towards accurate image stitching for drone-based wind turbine blade inspection[J]. *Renewable Energy*, 2023 (203): 267-279.
- [10] ABU-BAKER A, SHAKHATREH H, SAWALMEH A, et al. Efficient data collection in UAV - assisted cluster - based wireless sensor networks for 3D environment: Optimization study[J]. *Journal of Sensors*, 2023, 2023 (1): 1-21.
- [11] RIZK P, RIZK F, KARGANROUDI S S, et al. Wind turbine blade inspection with hyperspectral imaging and 3D convolutional neural networks for damage detection[J]. *Energy and AI*, 2024 (16): 1-10.
- [12] GUO Y, JIANG B, ZHANG Y. A novel robust attitude control for quadrotor aircraft subject to actuator faults and wind gusts[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 5 (1): 292-300.
- [13] MOFID O, MOBAYEN S, ZHANG C, et al. Desired tracking of delayed quadrotor UAV under model uncertainty and wind disturbance using adaptive super-twisting terminal sliding mode control[J]. *ISA Transactions*, 2022 (123): 455-471.
- [14] HAO L U, LAN G A O, YUNDA Y A N, et al. Wind disturbance compensated path-following control for fixed-wing UAVs in arbitrarily strong winds[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37 (2): 431-445.
- [15] WANG Q, WANG W, SUZUKI S. UAV trajectory tracking under wind disturbance based on novel ant disturbance sliding mode control[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024 (149): 1-14.
- [16] 任子君. 小型无人机抗风扰动飞行控制方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
- [17] 黄天彭. 四旋翼无人机鲁棒自适应控制与路径规划研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [18] SIMPLÍCIO P V G, BENEVIDES J R S, INOUE R S, et al. Robust and intelligent control of quadrotors subject to wind gusts[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2024, 18 (18): 2594-2611.
- [19] MA Q, WU Y, SHOUKAT M U, et al. Deep reinforcement learning-based wind disturbance rejection control strategy for UAV[J]. *Drones*, 2024, 8 (11): 1-28.
- [20] PENG M, MENG W. Cooperative obstacle avoidance for multiple UAVs using spline_VO method[J]. *Sensors*, 2022, 22 (5): 1-14.
- [21] FU Q, ZHAO W, FANG S, et al. Online trajectory replanning for avoiding moving obstacles using fusion prediction and gradient-based optimization[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2024, 14 (18): 1-15.
- [22] XIONG J J, ZHENG E H. Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV[J]. *ISA transactions*, 2014, 53 (3): 725-731.
- [23] SINGH B K, KUMAR A. Attitude and position control with minimum snap trajectory planning for quadrotor UAV[J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2023, 11 (5): 2342-2353.
- [24] 袁铭均. 无人机在线路巡检中的自主导航与避障技术分析 [J]. *电子技术*, 2024, 53 (3): 240-241.
- [25] KYRIAKAKIS N A, STAMADIANOS T, MARINAKIS M, et al. Dataset for the cumulative unmanned aerial vehicle routing problem[J]. *Data in Brief*, 2023 (48): 1-6.
- [26] TORRES M, PELTA D A, VERDEGAY J L, et al. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016 (55): 441-451.
- [27] JIANG Y, XU X X, ZHENG M Y, et al. Evolutionary computation for unmanned aerial vehicle path planning: A survey[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2024, 57 (10): 267.
- [28] SUN Q, LIU W, CAI L. Multi-dynamic target coverage tracking control strategy based on multi-UAV collaboration[J]. *Control Engineering Practice*, 2025 (155): 1-14.
- [29] 栗骏龙. 面向风电场巡检场景的无人机自动路径规划方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
- [30] 宋春林. 四旋翼无人机在未知环境中自主导航和飞行控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [31] 朱凯华. 面向风机叶片巡检的无人机自动航迹线规划研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [32] 马雨菲. 综合点线特征的叶片巡检无人机视觉惯性定位系统 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
-
- 作者简介: 姜苏娜 (1990—), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为新能源并网与运维。
- 收稿日期: 2025-07-22