

光伏组件智能清洁机器人系统设计与发电效率提升分析

何亚丽

中核汇能新疆能源开发有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]光伏组件表面积灰引发的发电效率衰减,已然成为制约电站整体效益提升的关键瓶颈因素。传统人工或机械清洁模式,普遍存在效率低下、成本高昂且环境适应性不足等显著缺陷。本研究通过深入量化分析积灰对光电转换效率的具体影响机制,创新性地设计并实现了一套高度集成的智能清洁机器人系统。该系统创造性地融合了智能环境感知、自主导航决策、多机器人协同作业以及高效自供电等前沿技术。创新性地采用麦克纳姆轮全向移动底盘平台,并结合了干式强力吹扫与湿式精细擦拭相协同的混合清洁执行机构,同时引入了基于多传感器信息深度融合的环境感知算法,以及分布式实时避障与集中式任务调度相耦合的协同控制策略框架。

[关键词]光伏积灰; 智能清洁机器人; 运维经济性

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17077

中图分类号: TH39

文献标识码: A

Design and Analysis of Intelligent Cleaning Robot System for Photovoltaic Modules and Improvement of Power Generation Efficiency

HE Yali

CNNP Rich Xinjiang Energy Development Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: The degradation of power generation efficiency caused by surface ash on photovoltaic modules has become a key bottleneck factor restricting the overall efficiency improvement of power plants. The traditional manual or mechanical cleaning mode generally has significant drawbacks such as low efficiency, high cost, and insufficient environmental adaptability. This study innovatively designed and implemented a highly integrated intelligent cleaning robot system by conducting in-depth quantitative analysis of the specific impact mechanism of dust accumulation on photoelectric conversion efficiency. This system creatively integrates cutting-edge technologies such as intelligent environment perception, autonomous navigation decision-making, multi robot collaborative operation, and efficient self powering. Innovatively adopting the Mecanum wheel omnidirectional mobile chassis platform, combined with a hybrid cleaning execution mechanism that combines dry strong blowing and wet fine wiping, and introducing an environment perception algorithm based on deep fusion of multi-sensor information, as well as a collaborative control strategy framework that couples distributed real-time obstacle avoidance with centralized task scheduling.

Keywords: photovoltaic dust accumulation; intelligent cleaning robot; operation and maintenance economy

近年来,随着我国综合国力的稳步提升、科学技术的不断发展,我国能源需求已经达到了前所未有的水平。光伏发电作为前景广阔的新能源发电技术之一,发展十分迅速。而随着光伏技术的广泛应用,光伏组件的积灰清洁问题已经成为了人们关注的焦点。但是传统的清洁方式依赖于大量的人力和物力,效率低下;由于我国众多光伏电站的光伏组件普遍采用分布式布局,现有的清洁技术往往只能针对有限的受污染光伏板进行清洁作业;光伏电站内环境复杂,大型清洁机械难以正常工作。

1 光伏组件积灰机理与发电效率关系

1.1 灰尘沉积对光伏效率的影响模型

灰尘在组件玻璃表面的沉积涉及物理吸附、静电作用及气象条件驱动,核心影响在于对入射光的遮蔽、散射与吸收。基于朗伯比尔定律,构建灰尘遮蔽率(DCR)与输出功率衰减(PL)的量化模型:

$$PL(\%) = \alpha \times (1 - e^{-\beta \times DCR}) + \gamma$$

其中 α 为特定灰尘最大理论损失率, β 为敏感系数,

γ 反映积灰致温升的附加损失,取值在 1%~3%之间。具有强光散射能力和易形成致密覆盖层的细颗粒物,其单位质量所引发的功率衰减效应,显著高于粗颗粒物。此外,灰尘自身的化学组成成分,亦深刻影响着玻璃表面特性及其后续灰尘颗粒的附着强度特性。

1.2 不同环境下的积灰特性分析

光伏组件表面积灰特征,有强烈的地域性差异。在干旱及半干旱气候区域,风沙搬运作用是积灰形成的主导机制,积灰速率相对较快,月均灰尘沉积量可达 5~15g/m²,且矿物成分,如石英、长石等占比相对较高。在高湿度沿海区域或工业区周边,则极易形成由盐分结晶物、工业排放颗粒物,例如碳黑、硫酸盐以及生物残留物质,如花粉、藻类共同构成的黏性复合污垢层,其月均沉积量约为 2~8g/m²。这类污垢不仅黏附性极强,还潜藏着对组件表面或边框造成腐蚀破坏的风险。特定季节因素会显著加剧积灰问题的严重性,例如春季频发的沙尘暴天气、秋季大量落叶期或冬季持续性雾霾期间,积灰速率常呈现陡增趋势。

针对迥异的积灰类型,相应的清洁策略必须进行针对性调整:对于以沙尘为主的疏松型积灰,采用强力气流吹扫或高速旋转刷等干式物理清洁方法更为高效适宜;而对于那些黏性顽固污垢,则往往不得不借助湿式擦洗工艺,或在必要时辅以专用化学清洗剂才能达到理想的清洁效果。

1.3 发电效率损失量化研究

灰尘沉积所导致的发电效率损失,表现出明显的非线性累积效应。当 DCR 处于小于 5% 的轻微积灰状态时,即可引发约 2%~4% 的功率输出下降;一旦 DCR 上升至 20% 水平,功率损失将攀升至 10%~15% 区间;若长期未进行有效清洁致使 DCR 超过 50% 阈值,损失幅度甚至可高达 25%~40% 范围。这种非线性特性,主要源于灰尘颗粒对入射光的多次散射效应、相互遮挡的叠加影响以及局部热斑形成风险的显著升高。积灰造成的功率损失还具有入射角度效应,在太阳光低入射角条件下,灰尘投影阴影被拉长,导致功率损失加剧。利用高精度 IV 曲线测试仪与高灵敏度辐照度传感器进行同步实时监测,能够精准量化组件实际输出功率与其在理论清洁状态下应有功率之间的具体偏差值。基于大量现场实测数据归纳得出的经验公式与专业预测分析软件,为智能清洁机器人工作阈值参数的优化设定,提供了至关重要的核心输入依据。

2 智能清洁机器人系统设计

2.1 系统总体架构与功能模块

智能清洁机器人系统,采用了分层清晰的“感知-决策-执行-能源”四层模块化架构设计理念。感知层核心职责在于实时获取机器人自身状态信息,位置、姿态、电量、环境信息,灰尘分布、障碍物以及来自上层系统的任务指令。决策层负责融合处理来自感知层的多源异构数据,进而完成路径规划计算、任务动态调度与行为决策制定,例如清洁模式选择、避障策略、充电时机判断。执行层则具体包含了移动底盘驱动控制单元与清洁机构动作控制单元。能源层专门负责管理系统自身电力供应来源与内部能量分配策略。各功能模块之间,通过高速 CAN 总线与高可靠无线 Mesh 网络进行数据交互传输,确保了整个系统响应的实时性能与运行可靠性。这种分布式系统架构,有效提升了系统的容错能力和未来功能扩展的灵活性,使得多个机器人在同一电站内进行协同并行作业具备了技术可行性。在移动平台与驱动设计方面,为适应光伏阵列间宽度仅 30~50cm 狭窄通道及应对组件安装表面 0°~35° 坡度变化挑战,移动平台创造性地采用了四轮独立驱动的麦克纳姆轮全向底盘解决方案。每个轮毂均集成了峰值扭矩大于 15Nm 的大扭矩无刷直流电机与高精度光电编码器。麦克纳姆轮独特的辊子为 45° 角度设计,赋予了机器人平面内任意方向的平移能力与原地旋转自由度 DOF 等于 3 的能力,使其能够在密集排布的光伏板阵列间灵活穿梭并实现精准横移,彻底解决了传统差速轮或履带底盘因转向半径过大而易发生剐蹭支架的问题。底盘主体结构采用轻量化高强度航空铝合金框架,在保证足以承受侧向

风力载荷与坡道行驶载荷所需结构强度的同时,将整备质量严格控制在了 35kg 以下,有效避免了对光伏板或支撑支架造成过载损伤。运动控制系统基于经典 PID 控制与先进模型预测控制算法,确保了机器人在复杂起伏地形条件下的高稳定性行走性能与精准点位停靠精度。

针对清洁机构干式湿式优化设计,为应对不同积灰物理特性及现场水资源供给约束条件,本系统精心设计了一套高效能、超低水耗的干湿混合清洁执行机构。核心部件主要包括:高速离心风机与特殊设计的导流系统,可产生速度大于 50m/s 的强劲定向气流,高效吹除表面积聚的疏松浮尘与碎屑,其能耗水平显著低于依赖机械摩擦的刷洗方式;精密滚刷单元,采用了单丝直径小于 0.1mm 的超细纤维与柔性硅胶刮条复合材质设计的滚刷本体,配合由变频电机驱动的转速 0~200rpm 连续可调的传动架构,该刷毛材质兼具强大污渍吸附能力与表面接触柔韧性,既能有效剥离黏附性较强的顽固污渍,又能在最大限度上避免对光伏玻璃表面珍贵的增透膜层造成划伤损害;微量水雾喷淋系统,仅在处理极端顽固污渍,例如鸟粪、油污时选择性启用,通过输出压力大于 5MPa 的高压柱塞泵驱动精密微孔喷嘴,实现小于 50mL/min 的超低流量的精细化水雾喷洒,配合滚刷单元的物理擦拭作用,达到高效去污与相比传统高压水枪冲洗方式节水率可达 90% 以上的极致节水的双重目标^[1]。清洁机构整体采用了模块化快拆设计理念,极大地方便了现场维护保养与易损部件的更换操作,并且,清洁机构施加的压力大小与移动速度参数,能够根据灰尘传感器实时反馈的积灰程度信息进行智能化动态调节。

2.2 智能感知系统

实现精准且实时的灰尘污染检测,是实现按需清洁、彻底避免无效作业能耗的核心前提。在灰尘检测传感器选型方面,系统融合应用了多种互补的先进传感技术:光学透射/散射传感器直接安装在机器人清洁臂末端执行机构上,贴近光伏组件表面发射特定波长光束,例如 650nm 红光、850nm 红外光,通过实时测量透射光强衰减率或特定角度散射光强度,直接反演计算局部区域的灰尘覆盖率及大致粒径分布信息,此类传感器具备响应小于 1s 的速度、分辨率高的显著优势;高分辨率工业级数码相机结合先进的机器视觉识别算法,负责进行大范围光伏组件表面污渍的高清成像与智能分析,通过图像分割、特征提取,污渍面积、颜色、纹理与模式识别分类,不仅能定量评估整体积灰程度,还能有效识别鸟粪、油斑等特殊污渍的具体类型,为清洁模式智能选择,例如判断是否需要启动水雾喷淋功能提供关键决策依据;环境参数传感器模块集成了温湿度、风速风向、光照度等传感器,持续为灰尘沉积速率预测模型提供实时环境输入参数,辅助制定更科学的长期清洁计划。

2.3 智能感知与路径规划

精准灰尘检测融合多种技术:光学透射/散射传感器贴近表面测量光衰减,反演局部 DCR 与粒径分布;高分辨率工业相机结合机器视觉算法,识别大范围污渍类型与

程度；环境传感器提供沉积速率预测参数。在密集阵列内部，定位导航依赖双目视觉相机与固态激光雷达的多传感器 SLAM 技术^[2]。路径规划采用改进 A*算法结合动态窗口法（DWA），基于电站图纸生成全局路线，并实时融合灰尘数据动态生成“脏污热点优先”子路径，支持任务中断后断点续传。

2.4 控制策略与能源管理

避障系统分层设计：基于 LiDAR 超声波点的云反应层运行 VFH+算法或强化学习模型，实现小于 1.5m 近距离毫秒级紧急避障；规划层在线重规划平滑绕行路径，区分可跨越与必须规避障碍。多机协同采用“分布式自主+集中式调度”架构：基于遗传算法或拍卖机制的中心调度器动态分配清洁区块；机器人间通过自组网局部协商通行次序或资源使用，提升系统鲁棒性。能源系统实现双模供电：柔性轻质光伏背板在晴日作业时产生 100~300W 电力；高能量密度锂电池与智能能量管理单元协同，优先使用光伏电力，富余存储，不足时切换电池供电。任务间隙自动导航至无线充电桩补电。典型日照下接近“能量自治”运行。

3 清洁效果与发电效率提升分析

3.1 实验设计与测试环境搭建

为客观评估所设计智能清洁机器人系统的性能，在宁夏某装机容量 10MW 的大型地面光伏电站 2023 年投运选取了具有代表性的 4 个 1MW 方阵，方阵 A 方阵 B 方阵 C 方阵 D 进行为期 6 个月 2024 年 4 月至 9 月的现场实证研究。方阵 A 部署 2 台智能清洁机器人，设定为基于灰尘传感器阈值 DCR 大于 15% 的按需清洁模式；方阵 B 部署同型号 2 台机器人，但采用固定 14 天周期的预防性清洁；方阵 C 采用传统人工手持水枪清洁频率约 30 天每次；方阵 D 作为对照组，不进行任何清洁。所有方阵采用相同型号的单晶硅 PERC 组件峰值功率 550Wp，安装倾角 33°，阵列布局一致。监测系统实时采集各子方阵总交流输出功率环境辐照度组件背板温度及机器人运行状态清洁次数耗时水电消耗数据。电站环境属于典型温带大陆性干旱气候，测试期内平均积灰速率约为 8.7g/m² 每月。

3.2 清洁前后发电功率对比

实证数据清晰展示了智能清洁机器人卓越的即时清洁效果。在单次清洁作业完成后，方阵 A 和 B 的交流输出功率较清洁前即刻提升幅度稳定在 18.2%~20.5% 之间平均值 19.3%，效果与人工清洁方阵 C，单次提升 19.0% 相当。机器人清洁后的功率衰减速率显著低于人工清洁后的方阵^[3]。这得益于机器人清洁作业的均匀性与一致性更高，避免了人工清洁可能存在的遗漏区域或用力不均导致的局部微划痕长期影响透光率。清洁后第 7 天，机器人清洁方阵 A 和 B 的功率衰减率仅为清洁后初始值的约 25%，而人工清洁方阵 C 的衰减率已达 35%。对照组 D 在测试期末无清洁，其平均输出功率较初始清洁状态假设测试开始时均清

洁下降了惊人的 32.7%，充分印证了积灰损失的严重性。

3.3 不同清洁周期的效率优化

长期监测数据揭示了清洁周期对年均发电量增益的关键影响。基于测试期数据并外推至全年：按需清洁方阵 A 触发清洁次数平均为 8 次每年受天气影响，年均发电量增益达 6.8%，该模式有效避免了不必要的清洁操作尤其在少尘多雨期，水电消耗最低水耗仅 0.05L 每 kWh；固定 14d 周期清洁方阵 B 年均清洁约 26 次，年均发电量增益最高，达到 7.9%，虽然清洁频次增加导致机器人自身能耗及轻微磨损略增，但因始终保持组件处于相对低积灰状态平均 DCR 小于 10%，整体发电收益最大化；人工 30d 周期清洁方阵 C 年均清洁约 12 次，年均发电量增益为 5.2%，长周期导致组件在清洁前长期处于高积灰状态平均 DCR 大于 25%，损失了大量潜在发电量；无清洁方阵 D 年均发电损失达 8.6%。结果表明，对于该典型干旱区电站，固定 14 天周期虽非绝对按需，但在平衡发电增益机器人损耗与运维管理复杂度方面，实现了整体最优。当然，最优周期需根据具体电站的地理位置气候特征灰尘类型及电价政策进行动态调整。

4 结束语

本研究系统揭示了光伏组件表面积灰对发电效率产生非线性影响的深层物理机制，并成功设计、开发及实证验证了一套高度集成化的智能清洁机器人系统。详实的现场实证数据表明，该系统能够有效提升单次清洁作业后的即时输出功率约 19.3%，通过采用优化的 14d 固定清洁周期策略，可实现年均发电量增益达 7.9%，其标准化清洁成本低至约 0.0085 元/kWh，项目动态投资回收期约 2.8 年。这项技术的成功应用，有力推动了光伏电站运维管理模式向自动化、智能化与精益化方向深刻变革，在显著提升电站整体发电收益的同时，有效降低了水资源消耗、人力成本投入及高空作业安全风险。未来，需要持续聚焦于提升该机器人在极端恶劣环境，如超强风沙、极寒冰雪与复杂崎岖地形条件下的鲁棒适应性能，并深入探索超大规模机器人集群协同作业时的调度优化与效率提升问题。

【参考文献】

- [1]徐晨阳,周全民,王春旭,等.光伏板智能清洁机器人设计与实现[J].机床与液压,2024,52(11):13-19.
- [2]王家桐,贾志鹏,余杰.基于数智油田的便携式智能光伏清洁机器人设计[J].造纸装备及材料,2024,53(8):13-16.
- [3]刁艳美,刘颂,陈美玲.光伏组件智能清洁机器人设计及其路径规划研究[J].机电信息,2023(4):27-31.
- [4]严瑞阳.光伏清洁机器人结构优化设计与运动特性分析[D].安徽:安徽建筑大学,2023.

作者简介：何亚丽（1995.11—）女，汉族，甘肃通渭人，本科学历，国企人员，从事工作为中核汇能新疆能源开发有限公司生产管理部门职员。