

毛刷式光伏清洗机器人的系统研究及应用分析

李洪涛, 景晓越, 陈 超, 胡文园, 王 聪

(中国大唐集团有限公司宁夏分公司 宁夏 银川 750000)

【摘要】针对大型光伏电站运维中人工清洁方式存在的高成本、低效率和安全风险等问题,本文提出一套毛刷式光伏清洗机器人系统。该系统通过机械结构设计优化、运动控制系统集成和工艺参数调优,实现了基于自然湿度的柔性清洗功能。机器人采用双轴对旋毛刷结构,结合多传感器融合技术,配合夜间及清晨空气湿度特性,完成光伏组件表面的精准清洗作业。研究表明:系统在轻度污染工况下的清洗效率最高达 $2\ 100\ \text{m}^2/\text{h}$,是人工清洗效率的 3.2 倍,清洗后组件表面透光率从 82.5% 提升至 91.8%,标准光照条件下发电效率由 14.2% 提高至 15.3%。该系统为光伏电站的智能化运维提供了高效、低成本的解决方案。

【关键词】光伏清洗;机器人;毛刷式清洗;运动控制;智能运维

【中图分类号】TM61

【文献标识码】A

【文章编号】1009-5624(2025)09-0077-03

0 引言

光伏发电作为清洁能源的重要组成部分,其发展规模持续扩大,组件表面清洁维护逐渐成为影响发电效率的关键因素。传统人工清洁模式存在劳动强度大、作业质量不稳定、高空作业风险高等诸多问题。随着智能化技术发展,自动化清洗设备在光伏电站运维中的应用日益广泛。毛刷式清洗技术利用空气自然湿度,通过柔性接触方式去除组件表面污染物,具有无水化作业、设备结构简单、对组件损伤小等显著优势。开展毛刷式光伏清洗机器人系统研究,对提升光伏电站运维效率、降低维护成本、保障作业安全具有重要的实践意义和应用价值。

1 毛刷式光伏清洗机器人技术基础

光伏组件表面沉积的灰尘、污渍降低了光线透过率,导致发电效率下降。研究表明,组件表面积尘量与发电效率呈负相关,积尘厚度每增加 1 mm,组件发电效率下降 4%~6%。通过对组件表面污染物成分分析,不同地区污染物类型存在差异,这些差异直接影响清洗工艺的选择。毛刷式清洗机器人采用柔性接触清洗方式,通过毛刷与组件表面的相对运动产生摩擦力,实现污物去除^[1]。毛刷材料的选择需综合考虑耐磨性、吸水性和清洗效果,常用聚酯纤维、尼龙等材料。机器人运动控制系统采用多传感器融合技术,结合视觉导航、激光测距等方法,实现对清洗路径的精确规划。通过建立组件倾角、清洗速度、毛刷压力等参数与清洗效果的数学模型,优化清洗工艺参数,确保系统在潮湿环境下稳定运行。

2 毛刷式光伏清洗机器人系统设计与构成

2.1 系统总体架构

毛刷式光伏清洗机器人系统采用模块化设计,由机械执行单元、控制处理单元和供能单元 3 部分构成。①机械执行单元包括行走底盘、清洗机构和升降机构。其中,行走底盘采用四轮独立驱动结构,配备防水电机和减速器,实现全向运动。清洗机构装配两组对旋转毛刷组件,毛刷

轴通过同步带传动。升降机构采用丝杆传动方式,适应不同倾角光伏板^[2]。②控制处理单元由主控制器、运动控制器和传感器系统组成。其中,主控制器采用工业级高性能处理器,内置实时操作系统。运动控制器基于现场可编程门阵列架构,实现多轴协同控制。传感器系统集成倾角传感器、激光测距仪和视觉摄像头,为导航定位提供数据支持。③供能单元配备 48 V 锂电池组,结合动态功率分配算法,为各执行机构供电。系统各单元通过控制器局域网总线连接,采用分层控制架构,确保清洗作业高效稳定进行。

2.2 毛刷清洗机构设计

毛刷清洗机构基于双轴对旋转结构设计,主轴采用高精度轴承支撑,具备 1 200 mm 有效作业长度和 120 mm 标称直径规格。伺服电机驱动系统通过精密同步带传动实现毛刷组件 360° 全方位转动,确保清洗作业全面覆盖。毛刷组采用科学梯形排列方式,单轴装配 48 组标准化毛束单元,毛束材质选用直径为 0.25 mm 规格的高强度尼龙纤维,设定毛束突出长度为 80 mm,硬度值维持在 75 HA(A 型硬度计硬度值)水平,体现出优异的耐磨性能和结构弹性。轴承座结构集成防水设计,搭配氟橡胶材质密封圈,整体防护等级达到 IP66 标准,适应户外恶劣环境。动力系统配置 400 W 级防水型伺服电机,经由同步带传动机构实现 3:1 减速比,支持毛刷转速在 0~180 r/min 范围内平稳调节。压力控制系统采用气动调节方案,配备精密微型气泵与高灵敏度压力传感器,实现毛刷压力在 0~25 N 范围内动态调节,满足各类污染条件下的清洗需求,详见图 1。

2.3 运动控制系统

运动控制系统采用 STM32F407 主控芯片作为核心处理单元,搭载 FreeRTOS 实时操作系统构建底层平台。控制系统通过控制器局域网总线与电机驱动器建立通信连接,驱动器内置 32 位数字信号处理器实现电机的精确控制,采用进程标识符调节算法确保运动平稳性^[3]。系统集成运动规划与轨迹生成模块,基于贝塞尔曲线算法生成平滑运动轨迹,确保转弯半径控制在 0.8 m 范围内。运动反馈系统结合 1 000 线增量式编码器与惯性传感器,应用卡

作者简介:李洪涛(1969—),男,宁夏银川,本科,高级工程师,研究方向:风电、光伏场站的提质增效。

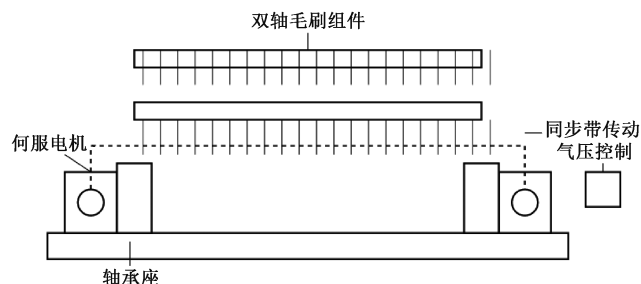


图1 毛刷式清洗机构示意

尔曼滤波算法融合多源数据,实现 ± 5 mm的高精度定位。速度控制策略采用前馈补偿方法,机器人清洗作业时保持 $0.2 \sim 0.5$ m/s的稳定行进速度,转弯阶段自动降速至 0.1 m/s。控制系统内置多重安全保护机制,包含急停与防碰撞功能,设定 300 mm避障触发阈值,有效保障了设备运行安全性。

2.4 传感器系统组成

传感器系统构建于多源信息融合架构基础之上,划分为环境感知单元与状态监测单元两大功能模块。其中,环境感知单元搭载环境湿度传感器实时监测空气相对湿度,为夜间和清晨的清洗作业提供了重要数据支撑。状态监测单元集成 MPU6050 六轴姿态传感器,以 $1\,000$ Hz 高采

样频率持续采集机器人运动状态信息,实现倾角和加速度的精确监测^[4]。传感器系统通过数据融合算法将各传感单元采集的信息进行综合处理,为清洗作业提供准确可靠的环境参数和设备状态数据,确保机器人系统安全稳定运行(图2)。

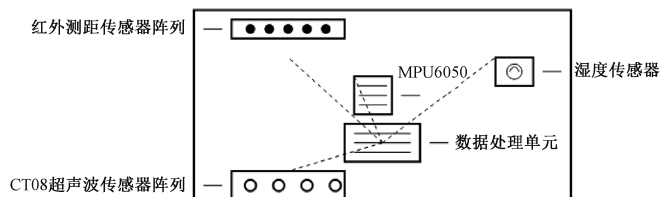


图2 传感器系统布局示意

3 毛刷式清洗工艺优化与研究

3.1 毛刷材料特性分析

毛刷材料特性研究通过力学性能测试和耐久性评估实验,分析不同材料在光伏清洗应用中的适用性。实验选取聚酯纤维、尼龙-66、聚对苯二甲酸丁二醇酯 3 种纤维材料,对其进行力学性能、耐磨性、吸水性和耐候性测试。综合各项性能指标,尼龙-66 材料最适合作为光伏清洗机器人的毛刷材料。各材料性能对比数据如表 1 所示。

表1 光伏清洗机器人毛刷材料性能对比

材料类型 /性能	抗拉 强度/MPa	断裂 伸长率/%	弹性 模量/GPa	质量 损失率/%	吸水率/%	抗拉强度 保持率/%
聚酯纤维	65	130	2.3	0.28	0.4	88
尼龙-66	85	158	2.8	0.15	2.8	94.4
聚对苯二甲酸丁 二醇酯	72	142	2.5	0.22	0.6	90
测试条件	23 ℃, 50%RH	23 ℃, 50%RH	23 ℃, 50%RH	10 000 次循环, 500 g 载荷	25 ℃, 24 h 浸泡	UV 照射下 老化 168 h 后

注:RH 表示相对湿度(relative humidity);UV 表示紫外光(ultra violet)。

3.2 清洗工艺参数优化

清洗工艺参数优化基于多因素正交实验方法开展研究。建立清洗质量评价模型,以透光率提升值 ΔT 作为主要评价指标。

$$\Delta T = k_1 v + k_2 \omega + k_3 F + k_4 h + C \quad (1)$$

式中: v 为机器人行进速度(单位:m/s); ω 为毛刷转速(单位:r/min); F 为毛刷压力(单位:N); h 为环境相对湿度(单位:%); k_1, k_2, k_3, k_4 为待定系数; C 为常数项。

通过 $L9(3^4)$ 正交实验进行参数优化,设定实验因素水平:机器人行进速度 v 分别为 0.2 m/s、 0.3 m/s、 0.4 m/s,毛刷转速 ω 分别为 120 r/min、 150 r/min、 180 r/min,毛刷压力 F 分别为 15 N、 20 N、 25 N,相对湿度 h 分别为 65% 、 75% 、 85% 。实验数据经方差分析表明:各参数对清洗效果的影响顺序为 $F > h > \omega > v$ 。采用响应面法建立参数耦合模型,获得最优参数组合: $v = 0.3$ m/s、 $\omega = 150$ r/min、 $F = 20$ N,在相对湿度 75% 以上的环境下作业。该参数组合下组件表面透光率提升 8.5% ,清洗均匀度达

92% ,可实现工艺参数最优配置。

3.3 清洗质量评价方法

清洗质量评价采用多指标综合评价法,构建包含透光率、清洗均匀度和表面残留率的评价指标体系^[5]。透光率测试采用 TRI-sen 光学透过率仪,在光伏组件表面均匀选取 9 个测点进行采样,清洗质量指数 Q 计算式为

$$Q = w_1 \frac{T}{T_0} + w_2 U + w_3 (1 - R) \quad (2)$$

式中: T 为清洗后透光率; T_0 为理论透光率; U 为清洗均匀度; R 为表面残留率; w_1, w_2, w_3 为权重系数,且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。清洗均匀度 U 通过图像处理方法获取。

$$U = 1 - \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

式中: σ 为清洗区域灰度标准差; μ 为平均灰度值。表面残留率 R 采用显微图像分析法,对清洗后表面进行 100 倍放大拍照,提取污渍残留面积比。

$$R = \frac{A_1}{A_0} \tag{4}$$

式中： A_1 为残留污渍面积； A_0 为观测区域总面积。经实验验证，该评价方法下的系统质量指数 Q 达到 0.92，满足光伏电站运维规范要求。

3.4 清洗效果影响因素

毛刷式光伏清洗效果受环境、设备和工艺参数等多重因素交互影响。其中，在环境因素中，空气相对湿度是关键参数，实验数据显示，相对湿度低于 65% 时去除率下降 25%。环境温度低于 5℃ 时，表面结霜导致清洗阻力增大，效果显著下降。污染物类型分析表明：无机灰尘去除率达 95%，有机污染物去除率则较低，油性污渍去除率仅为 45%。设备因素方面，毛刷磨损程度与清洗效果呈明显相关性，毛刷长度减少 20% 会导致清洗均匀度下降 15%。毛刷布置密度每增加 10%，清洗效率提升 8%，同时驱动功率消耗增加 12%。工艺参数测试显示，接触压力与清洗效果呈非线性关系，压力过大会造成毛刷变形，进而产生 15% 的清洗死角。清洗速度每提高 0.1 m/s，残留率增加 3%。通过建立参数影响量化模型，可实现清洗参数动态优化。

4 系统性能测试与效果分析

4.1 测试方案设计

测试方案设计遵循《光伏组件清洁度 测试方法》(GB/T 34826) 规范，在某 10 MW 光伏电站开展现场实验。

测试区域选取运行超过两年的多晶硅光伏组件，共 180 块，划分为 6 个测试区，每区 30 块组件。测试区按污染程度分为轻度(0.5~1.0 g/m²)、中度(1.0~2.0 g/m²)、重度(>2.0 g/m²)3 类。机器人清洗测试在环境温度 15~30℃、相对湿度 45%~65%、风速<4 m/s 条件下进行，设定标准测试工况：行进速度为 0.3 m/s、毛刷转速为 150 r/min、压力为 20 N。采用数据采集系统记录组件表面温度、清洗压力、行进速度等工艺参数，测试周期持续 30 d。通过透光率测试仪、表面污染物采样、发电效率监测等手段，采集组件清洗前后的性能数据，评估清洗系统实际工作效果。

4.2 清洗效率测试

清洗效率测试从单块组件的清洗时间、日清洗面积和长期运行稳定性 3 个维度进行评估。在不同污染程度条件下，重点分析机器人的清洗效率与人工清洗的对比。测试结果表明：机器人清洗效率随污染程度加重呈非线性下降趋势，但仍显著优于人工清洗。在轻度污染工况下，机器人清洗面积效率最高可达 2 100 m²/h，是人工清洗效率的 3.2 倍。长期运行测试显示，机器人在连续 8 h 工作后，清洗效率降低不超过 5%，体现出良好的持续作业能力。机器人清洗过程中的行进路径更加规范，减少了重复清洗面积，有效提升了清洗作业效率，不同污染程度下清洗效率对比数据如表 2 所示。

表 2 不同污染程度下清洗效率对比

污染程度	污染物密度/ (g/m ²)	机器人清洗 效率/(m ² /h)	人工清洗效率/ (m ² /h)	效率 提升比/%	单次作业 时间/h	清洗 均匀度/%
轻度污染	0.5~1.0	2 100	500	3.2	8	95
中度污染	1.0~2.0	1 800	380	3.7	7	93
重度污染	>2.0	1 500	280	4.4	6	90

4.3 清洗质量评估

清洗质量评估通过组件表面透光率、发电效率提升值和清洗均匀度 3 项指标进行综合分析。测试数据显示：经机器人清洗后组件表面透光率从 82.5% 提升至 91.8%，提升幅度达 9.3%。发电效率在标准光照条件下(1 000 W/m²)由 14.2% 提高至 15.3%，性能恢复率达 94.5%。清洗均匀度评价采用机器视觉方法，处理 2 000 张清洗后组件表面图像，统计分析表明，清洗均匀度达到 92.8%，标准差<3%。残留污渍分析显示，边框区域和支架遮挡处存在轻微清洗死角，面积占比<2%，对整体发电效率影响可忽略。

5 结语

通过对毛刷式光伏清洗机器人系统的研究与应用实践，成功解决了光伏组件自动化清洗中的关键技术问题。实验验证表明：该系统在清洗效率、质量和成本等方面具有显著优势。研究成果为光伏电站智能运维提供了新的

技术路径，具有良好的推广应用价值。未来研究将进一步优化系统性能，提高智能化水平，扩展应用场景，为光伏产业的高质量发展贡献力量。

【参考文献】

[1] 王栋. 光伏板清洗机器人视觉识别及自主导航研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2024.

[2] 潘武星. 面向崎岖地形的光伏板清洗机器人系统构型综合与性能分析[D]. 太原:中北大学,2024.

[3] 杨佳兴. 吸尘式光伏清洁机器人的研制与实验研究[D]. 吉林:东北电力大学,2024.

[4] 罗国甘,产兵兵,邓小钢,等. 新型光伏电站清洗机器人的推广应用及合同能源管理模式探索[J]. 中国设备工程,2024(S1):109-112.

[5] 王学友,周振华. 光伏智能清洗机器人在光伏电站中的应用与分析[J]. 电气时代,2023(9):31-33.