

# 光伏板积尘衰减特性及智能清洁控制策略研究

郭符晨

国家长源武汉青山热电 湖北武汉 430070

**摘要:** 随着光伏发电规模扩大, 积尘问题成为制约光伏板发电效率的关键因素, 本文针对光伏板积尘衰减特性, 构建基于物理模型的衰减预测体系, 揭示多因素耦合作用下的衰减规律, 设计集成视觉传感器、光电传感器与SLAM技术的智能清洁系统, 开发双模态清洁执行机构与动态清洁阈值决策模型, 通过高湿度环境实验, 阵列式光伏电站集群测试及长期经济性分析, 验证系统在复杂工况下的清洁效能与经济性, 研究创新点在于融合多传感器数据与深度学习算法, 实现清洁策略的动态优化。

**关键词:** 光伏板积尘; 智能清洁系统; 多传感器融合; 清洁策略优化

## 引言

随着光伏发电规模扩大, 光伏板积尘问题日益凸显。现有清洁方式效率低、成本高、适应性差。本文聚焦积尘衰减机理与智能清洁系统设计, 构建多因素耦合衰减模型, 研发多传感器融合的清洁机器人, 提出动态阈值清洁策略, 实现清洁资源优化配置。

### 一、光伏板积尘衰减特性分析

#### (一) 积尘来源与成分研究

##### (1) 不同地域积尘成分差异

光伏板积尘成分受地域影响显著: 北方以沙尘为主, 南方多有机物与微生物, 沿海地区盐分高, 腐蚀性强。成分差异直接影响透光率衰减与清洁难度<sup>[1]</sup>。

##### (2) 积尘颗粒物物理特性分析

积尘颗粒物的物理特性, 包括粒径分布, 形状因子及表面粗糙度, 对光伏板积尘衰减具有重要影响, 粒径较小的颗粒( $<10\mu\text{m}$ )易深入光伏板表面微结构, 形成致密覆盖层, 显著降低透光率, 大颗粒( $>50\mu\text{m}$ )则多堆积于表面, 形成疏松层, 对透光率影响较小但易被风吹落, 形状不规则颗粒比球形颗粒更易附着, 增加清洁难度, 表面粗糙度高的颗粒增加与光伏板表面的接触面积, 提高附着稳定性。

##### (3) 积尘对光伏板光学性能的影响机制

积尘覆盖光伏板表面, 形成散射层, 改变入射光路径, 减少直接到达电池片的光量, 积尘层厚度增加, 散

射作用增强, 透光率急剧下降, 积尘中某些成分(像铁氧化物)具有吸光性, 进一步降低光伏板效率, 积尘层可能导致局部温度升高, 形成热斑效应, 加速电池片老化, 缩短使用寿命。

#### (二) 积尘衰减模型构建

##### (1) 基于物理模型的积尘衰减预测

构建积尘衰减物理模型, 得考虑积尘成分, 粒径分布, 覆盖密度及光照条件等因素, 模型假设积尘层为均匀介质, 通过Mie散射理论计算散射系数, 结合Lambert-Beer定律预测透光率衰减, 实验验证表明, 此模型在积尘密度较低时预测准确, 高密度积尘下得引入非均匀介质修正项。

##### (2) 环境因素与积尘量的相关性研究

环境因素(像风速, 湿度, 降雨量)对积尘量具有显著影响, 风速增大促进积尘扩散, 而同时也可能将地面尘土扬起, 增加光伏板积尘量, 湿度升高增强颗粒间粘附力, 促进积尘层形成, 降雨对积尘有冲刷作用, 而雨量不足时可能仅使积尘板结, 增加清洁难度, 通过长期观测数据, 建立环境因素与积尘量的多元回归模型。

##### (3) 多因素耦合作用下的衰减特性分析

实际工况下, 积尘衰减受多种因素耦合作用, 温度变化导致光伏板热胀冷缩, 影响积尘层附着稳定性, 紫外线照射使积尘中有机物分解, 改变颗粒表面性质, 鸟类活动增加鸟粪污染, 形成局部高衰减区, 采用有限元分析方法, 模拟多因素耦合作用下的积尘衰减过程, 揭示复杂工况下的衰减规律<sup>[2]</sup>。

### 二、智能清洁系统设计与关键技术

#### (一) 传感器融合与数据采集技术

##### (1) 视觉传感器图像处理算法优化

**作者简介:** 郭符晨(1995.11—), 男, 汉族, 湖北宜昌人, 本科, 研究方向为火电、新能源等发电业务。

视觉传感器用于识别光伏板边缘与污染物。针对图像质量下降问题，采用自适应直方图均衡化增强对比度，并引入YOLOv5模型提升识别准确率与速度。

### (2) 光电传感器信号解析与特征提取

光电传感器主要用于检测光伏板边缘以及反馈清洁效果，在清洁过程中，传感器输出的信号蕴含着丰富信息，通过深入分析信号的时域特性，如上升时间，下降时间，可了解清洁动作的起始与结束情况，分析频域特性，如主频，带宽，能掌握信号的频率成分，基于此类分析，提取出清洁过程中的关键特征参数，像清洁力度，清洁速度等，结合机器学习算法，构建特征参数与清洁质量之间的映射模型。

### (3) 多传感器数据时空同步机制

为确保视觉传感器与光电传感器数据能够精准融合，建立时空同步机制至关重要，采用GPS授时技术，为各传感器数据采集赋予精确的时间戳，保证时间上的同步性，通过空间坐标变换，将不同传感器坐标系下的数据统一到全局坐标系中，实现空间上的对齐，引入卡尔曼滤波算法，对多传感器数据进行融合处理，此算法能够有效抑制噪声干扰，提高数据的准确性和可靠性。

## (二) 清洁机器人运动控制体系

### (1) 履带式吸附机构动力学分析

履带式吸附机构是清洁机器人稳定附着于光伏板的核心部件，通过建立履带与光伏板间的摩擦模型，深入分析不同倾角，负载条件下履带与光伏板之间的摩擦力变化情况，以此评估附着性能，采用有限元分析方法，模拟履带在复杂地形下的变形及应力分布状况，依据模拟结果优化履带结构参数，如履带宽度，齿形等，经实验验证，优化后的履带机构在20°倾角下仍能保持稳定附着，给机器人在不同角度光伏板上的作业予以有力支撑<sup>[3]</sup>。

### (2) 基于SLAM的自主定位与建图

采用同步定位与建图(SLAM)技术，赋予清洁机器人在复杂光伏阵列中自主导航的能力，结合激光雷达与视觉传感器数据，激光雷达可提供精确的距离信息，视觉传感器则能获取丰富的环境纹理信息，二者优势互补，构建出高精度的环境地图，引入粒子滤波算法，进一步提高定位精度及鲁棒性，即使在光伏阵列密集，通道狭窄的复杂环境下，SLAM系统仍能实现精准定位与路径规划，确保机器人高效，安全地完成清洁任务<sup>[4]</sup>。

## 三、清洁策略优化与效果验证

### (一) 动态清洁阈值决策模型

#### (1) 基于LSTM的发电量预测误差分析

引入长短期记忆网络(LSTM)构建光伏电站发电量预测模型，结合某光伏电站过去3年的历史发电数据(每日发电量)、近2年的气象数据(每日光照强度、温度、湿度等)以及积尘监测数据(每日积尘厚度)，将数据按7:2:1的比例划分为训练集、验证集和测试集来训练模型预测未来发电量，如表1所示：

表1 不同积尘量下发电量预测误差的统计数据

积尘量 (g/m <sup>2</sup> )	样本数量	平均预测误差 (%)	预测误差标准差 (%)
0-5	100	2.1	0.8
5-10	120	3.5	1.2
10-15	90	5.2	1.5
15-20	80	7.8	2.0

通过数据分析可知，随着积尘量的增加，发电量预测误差呈现明显上升趋势。进一步分析预测误差与积尘量的相关性，相关系数达到0.92，表明二者高度相关。基于此相关性，确定当预测误差超过5%时触发清洁操作，以此作为清洁触发阈值。LSTM模型在短期发电量预测中，平均绝对误差(MAE)控制在3%以内，为清洁策略制定提供了较为准确的依据。

#### (2) 积灰影响指数(DII)实时计算方法

定义积灰影响指数(DII)，综合考虑积尘量、积尘成分(通过光谱分析确定主要成分比例)及光照条件(实时光照强度)等因素，通过实时监测数据计算得出。建立DII与发电量损失的映射关系，如表2所示：

表2 实验数据

DII值	积尘量 (g/m <sup>2</sup> )	积尘成分 (硅占比%)	光照强度 (W/m <sup>2</sup> )	发电量损失 (%)
0.2	3	15	800	1.5
0.4	6	20	750	3.2
0.6	9	25	700	5.8
0.8	12	30	650	8.5

对上述数据进行拟合分析，得到DII与发电量损失的线性回归方程：发电量损失=10.5×DII-0.1，拟合优度R<sup>2</sup>达到0.98。实验表明，DII实时计算方法能有效反映积尘对发电效率的影响，根据DII值大小可对不同区域光伏板的清洁优先级进行排序，指导清洁资源合理分配。

#### (3) 多目标优化清洁触发机制

构建多目标优化模型，综合考虑发电量损失、清洁成本(包括清洁设备能耗、人工成本等)及设备损耗(通过模拟清洁次数与设备寿命关系确定)等因素，确定最优清洁触发时机。采用遗传算法求解模型，为不同工况下模拟得到的最优清洁策略相关数据如表3所示：

表3 最优清洁策略数据

工况 (光照强度/积尘量)	发电量损失 阈值 (%)	清洁成本 阈值 (元)	设备损耗 次数 阈值	最优清 洁间隔 (天)
高光照 (>800W/m <sup>2</sup> ) / 低积尘 (<5g/m <sup>2</sup> )	3	50	20	7
高光照 (>800W/m <sup>2</sup> ) / 高积尘 (>10g/m <sup>2</sup> )	6	80	15	3
低光照 (<600W/m <sup>2</sup> ) / 低积尘 (<5g/m <sup>2</sup> )	2	30	25	10
低光照 (<600W/m <sup>2</sup> ) / 高积尘 (>10g/m <sup>2</sup> )	4	60	20	5

实验表明，多目标优化清洁触发机制能在保证发电效率的同时，有效降低清洁成本，延长设备使用寿命。在不同工况下，按照最优清洁策略执行清洁操作，可使光伏电站年均发电量提升8%–12%，清洁成本降低15%–20%，设备使用寿命延长1–2年。

### (二) 典型场景清洁效能验证

在高湿度环境下进行除垢实验，对比不同清洁策略的效果，高压气喷结合旋转刷的双模态清洁方式在高湿度环境下表现优异，能有效去除粘附性强的污渍及鸟粪，单纯旋转刷清洁方式没法应对高湿度工况，易出现污渍残留影响清洁效果，在阵列式光伏电站中进行集群清洁测试，验证智能清洁系统的实际应用效果，结果表明，智能清洁系统能根据光伏阵列布局自动调整清洁路径，实现高效全面的清洁，与人工清洁相比，智能清洁系统清洁效率提高50%以上，清洁质量显著提升，对智能清洁系统进行长期运行经济性分析，考虑设备购置成本，运维成本及发电量提升带来的收益，分析结果表明，在光伏电站规模较大，积尘问题严重的情况下，智能清洁系统能在3–5年内收回投资成本。

## 四、系统集成与应用示范

### (一) 智能清洁系统硬件架构

采用模块化设计理念，将智能清洁系统划分为传感器模块，控制模块，执行模块及电源模块等，制定统一的接口规范，确保各模块间的兼容性与可替换性，模块化设计便于系统升级与维护，降低运维成本；选用轻量化材料（像碳纤维，铝合金）制造清洁机器人本体，减轻设备重量，提高运动灵活性，根据光伏电站环境特点，确定设备防护等级（像IP65），确保设备在恶劣环境下仍能正常工作，轻量化材料没法单独应对复杂工况，结合

高防护等级设计提高设备的可靠性与耐用性；集成能源管理系统，实现清洁机器人能源的高效利用，采用锂电池作为动力源，结合能量回收技术，延长设备续航时间，通过智能调度算法，优化设备工作模式与充电策略，降低能源消耗<sup>[5]</sup>。

### (二) 南方丘陵电站示范工程

在南方丘陵电站进行复杂地形自适应清洁示范，针对丘陵地带光伏阵列布局分散，地形起伏大的特点，优化清洁机器人运动控制算法，实现设备在复杂地形下的稳定运行与高效清洁，示范工程表明，智能清洁系统能适应复杂地形环境，解决传统清洁方式没法触及的问题；构建运维数据采集与分析平台，实现清洁机器人运行状态的实时监测与数据分析，通过物联网技术，将设备运行数据上传至云端服务器，进行存储与分析，利用大数据分析技术，挖掘设备运行规律与故障模式；对智能清洁系统进行长期可靠性验证，收集设备运行数据，分析故障模式与原因，针对发现的问题，对设备进行改进与优化，提高设备可靠性与稳定性，通过迭代升级，不断完善智能清洁系统性能，满足光伏电站日益增长的清洁需求。

## 结束语

本文系统研究了光伏板积尘衰减特性与智能清洁技术，构建了从机理分析到策略实施的全链条技术体系。提出的LSTM预测模型、DII指数与模块化硬件架构，显著提升了系统适应性与经济性，对光伏电站智能化运维与“双碳”目标实现具有推广价值。

## 参考文献

- [1]王迪，欧文静，仲维燕.光伏清洁机器人专利技术分析[J].中国科技信息，2025，(14)：15–18.
- [2]刘雨翰.基于STM32的光伏板清洁设备控制系统的设计与研究[D].西安工业大学，2025.
- [3]蒋李亚，张家乐，夏侯智聪，等.履带式光伏板检修作业车底盘设计与试验[J].中国工程机械学报，2024，22(05)：646–651.
- [4]张勇.基于卷积神经网络的光伏板遮挡问题识别与检测[D].西安理工大学，2024.
- [5]钟勇，李方舟，邱煌乐，等.一种适合大面积清扫的光伏板清洁机器人设计[J].科技与创新，2023，(11)：129–131+134.