

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.038

太阳能光伏板清洁机器人关键技术及应用

刘丹¹, 李雪玲¹, 谢少华¹, 张双侠¹, 孙文磊²

(1. 新疆农业职业技术大学, 新疆维吾尔自治区 昌吉 831199;

2. 新疆大学, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830046)

摘要: 基于光伏板表面积尘导致的发电效率衰减问题, 采用传统人工清洁方式成本高、效率低且存在安全隐患, 难以满足大规模光伏电站的运维需求。通过对近年来国内外相关专利、期刊论文、硕士学位论文及外文文献的系统梳理, 围绕太阳能光伏板清洁机器人的关键技术及应用展开系统研究。分析移动技术、导航技术、清洁技术、能源管理、路径规划及环境感知等核心关键技术, 比较履带式、轮式、负压吸附等移动方式的适应性, 以及干式、湿式、超声波等清洁技术的特点; 进而对履带式、负压吸附式、吸盘式及模块化清洁机器人的实际应用场景与性能表现进行全面综述, 旨在为该领域的后续研究与产业应用提供参考。

关键词: 光伏板清洁机器人; 关键技术; 自主导航; 清洁技术

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0195-05

Key Technologies and Applications of Cleaning Robots for Solar Photovoltaic Panels

LIU Dan¹, LI Xueling¹, XIE Shaohua¹, ZHANG Shuangxia¹, SUN Wenlei²

(1. Xinjiang Agricultural Vocational and Technical University, Changji 831199, China;

2. Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Against the backdrop of global energy transition and the large-scale development of the photovoltaic industry, the issue of power generation efficiency degradation caused by dust accumulation on the surfaces of photovoltaic panels has become increasingly prominent. Traditional manual cleaning methods, characterized by high costs, low efficiency, and potential safety hazards, are struggling to meet the operation and maintenance demands of large-scale photovoltaic power plants. Based on this, this paper conducts a systematic study on the key technologies and applications of solar photovoltaic panel cleaning robots by reviewing relevant domestic and international patents, journal articles, master's theses, and foreign literature in recent years. Firstly, core key technologies such as mobility technology, navigation technology, cleaning technology, energy management, path planning, and environmental perception are analyzed. The adaptability of mobility modes including tracked, wheeled, and negative pressure adhesion is compared, along with the characteristics of cleaning technologies such as dry, wet, and ultrasonic methods. Furthermore, a comprehensive review is provided on the practical application scenarios and performance of crawler-type, negative pressure adsorption-type, suction cup-type, and modular cleaning robots. The study aims to offer references for subsequent research and industrial application in this field.

Keywords: photovoltaic panel cleaning robot; key technologies; autonomous navigation; cleaning technology

0 引言

全球能源转型与“双碳”目标下, 太阳能光伏发电装机规模快速增长, 但光伏板暴露户外易沉积污染物, 影响发电性能与寿命。传统人工清洁劳动强度大、成本高且存在安全风险。湿式清洁

在干旱地区浪费水资源, 干式清洁易划伤板面、降低效率^[1]。因此, 研发高效智能、适应性强的光伏板清洁机器人成为行业迫切需求, 其可提升运维效率与经济效益, 推动光伏产业规模化、智能化发展, 是能源装备领域研究热点。

基金项目: 2024年中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2024QY03); 2024年新疆农业职业技术大学院级课题项目(XJNZYKJ202403)

第一作者简介: 刘丹(1990—), 女, 河南许昌人, 工程师, 本科, 研究方向为农业装备, 253866930@qq.com。

通信作者简介: 张双侠(1967—), 男, 河南太康人, 教授, 硕士, 研究方向为农业装备, 1109473583@qq.com。

1 光伏板的清洁机器人关键技术

1.1 移动技术与越障技术

光伏板清洁机器人的移动与越障技术,是实现高效、稳定清洁作业的基础。

1) 履带式移动技术与越障技术

履带式移动结构具备良好的越障与复杂地形适应能力,结合多传感器感知与步态规划算法,可在起伏不平的光伏阵列中实现稳定移动。该类机器人通常搭载惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)和视觉传感器,实时检测光伏板倾角与表面障碍,并基于运动学模型进行步态优化,实现跨越电缆、边框等典型障碍^[2]。其履带采用高摩擦因数橡胶材质,在提升抓地力的同时尽量减少对光伏板表面的磨损。该类系统适用于地面光伏电站及倾角超过 30° 的复杂场景,但移动效率较低,且在持续作业中需关注对组件表面的潜在微损伤。

2) 轮式移动技术与路径规划技术

轮式结构因其高移动效率和低表面磨损特性,广泛应用于屋顶光伏与平坦地面电站^[3]。为提升其在湿滑或倾斜表面的适应性与防跌落能力,现代轮式清洁机器人通常集成激光雷达(LiDAR)或深度摄像头,结合 SLAM 技术实现实时定位与地图构建,并基于导航算法(如 A*、DWA)进行动态路径规划。

3) 负压吸附融合移动与精准作业控制

负压吸附与轮式/履带式结合的移动系统特别适用于高倾角、垂直立面及光伏建筑一体化(BIPV)场景。机器人通过无刷直流风机在密封腔体内形成负压,提供可靠吸附力,再结合高精度编码器电机驱动轮组或履带实现移动。为保障作业稳定性与越障能力,系统需引入气压传感与力矩控制,实时调节吸附力与移动速度,并借助视觉定位与轨迹跟踪算法实现精准对接和跨框移动^[4]。此类系统结构较为复杂,能耗较高,但能够在极端倾角甚至倒置工况下完成清洁作业,代表了高端光伏清洁机器人的重要发展方向。

1.2 导航技术与定位技术

导航与定位技术是清洁机器人实现自主作业的核心。

1) 视觉导航技术

视觉导航技术利用摄像头等视觉传感器获取光伏板及其周围环境的图像信息,通过图像处理和计算机视觉算法实现机器人的定位和导航。在

光伏板清洁机器人中,视觉导航系统可以识别光伏板的边缘、排列方向以及障碍物等信息^[5]。工作原理是基于计算机视觉原理,通过摄像头采集环境图像,运用特征提取和模式识别算法进行定位导航。采用边缘检测算法识别光伏板边界,通过视觉里程计估计机器人位姿。

2) 激光导航技术

激光导航技术通过激光雷达发射激光束,测量激光束与周围物体的距离和角度信息,从而构建环境地图并实现机器人的定位和导航。在光伏板清洁场景中,激光雷达可以快速、准确地检测光伏板的位置和障碍物的分布^[6]。工作原理是基于飞行时间测距原理(ToF),通过测量激光脉冲从发射到接收的时间差计算距离。采用 SLAM 算法同步构建环境地图并实现自主定位。

3) 惯性导航与视觉/激光导航融合技术

为了提高导航的准确性和可靠性,一些清洁机器人采用了惯性导航与视觉或激光导航融合的技术。工作原理是基于多传感器融合原理,通过卡尔曼滤波算法融合 IMU 数据与视觉/激光的绝对定位信息^[7]。IMU 提供高频短时精确定位,视觉/激光系统提供低频绝对位置校正。

1.3 清洁技术

光伏板清洁机器人的清洁技术直接决定其除尘效果和对光伏板表面的影响。

1) 干式清洁技术

干式清洁技术主要通过机械刷、气流等方式去除光伏板表面的灰尘和污垢^[8]。机械刷通常采用柔软的刷毛,如尼龙刷毛,在旋转或往复运动过程中将灰尘从光伏板表面扫落。工作原理是基于机械摩擦原理和空气动力学原理。旋转刷通过刷毛与光伏板表面的物理摩擦去除灰尘,气流清洁利用高速气流的剪切作用带走表面颗粒物^[9]。

2) 湿式清洁技术

湿式清洁技术使用清洁液和水对光伏板表面进行清洗。通常,清洁机器人会配备水箱和喷头,将清洁液均匀地喷洒在光伏板表面,然后通过旋转刷或海绵等清洁工具对光伏板进行擦拭,最后用清水冲洗干净。工作原理是基于表面润湿和溶解原理^[10]。通过喷洒清洁液降低污渍与板面的附着力,再借助机械刷的物理作用彻底清除污垢,最后用清水冲洗残留物。

3) 超声波清洁技术

超声波清洁技术利用超声波在液体中产生的

空化效应来去除光伏板表面的污垢。当超声波在液体中传播时,会产生微小的气泡,这些气泡在超声波的作用下不断膨胀和破裂,产生强大的冲击力,将光伏板表面的污垢剥离^[11]。工作原理是基于空化效应原理。超声波换能器产生高频振动,在液体中形成微小的真空气泡,气泡破裂时产生冲击波,从而剥离表面的污物。

1.4 能源技术

能源技术是保障清洁机器人持续、自主作业的关键。

1) 电池供电技术

目前,大多数光伏板清洁机器人采用电池作为能源供应。工作原理是基于电化学储能原理,通过锂离子在正负极之间的嵌入和脱嵌实现能量的存储和释放。采用电池管理系统(battery management system, BMS)实现充放电管理和安全保护^[12]。

常见的电池类型包括锂电池、铅酸电池等。锂电池具有能量密度高、充放电效率高、寿命长等优点,逐渐成为清洁机器人的主流电池选择。例如,一些小型光伏板清洁机器人采用锂电池供电,能够满足其数小时的工作需求。为了提高电池的使用效率和续航能力,清洁机器人通常会配备BMS,对电池的充放电过程进行实时监测和控制,防止电池过充、过放和过温等情况的发生^[13]。

2) 太阳能充电技术

为了实现清洁机器人的长时间自主运行,一些机器人集成了太阳能充电技术。通过在机器人表面安装太阳能电池板,将太阳能转化为电能,为电池充电。工作原理是基于光伏效应原理,通过PN结半导体材料将光能直接转换为电能。采用MPPT算法实时追踪最大功率点,提高充电效率。

3) 能源回收技术

在清洁机器人的移动和清洁过程中,会产生一定的能量损耗。能源回收技术可以将这些损耗的能量进行回收和再利用,提高能源利用效率^[14]。例如,一些清洁机器人采用了制动能量回收技术,在机器人减速或制动时,将电机的动能转化为电能并存储在电池中。此外,还可以通过优化机器人的机械结构和运动控制算法,减少能量损耗,提高能源利用效率。

1.5 路径规划技术

路径规划技术决定了清洁机器人的作业效率和覆盖完整性。根据光伏板的布局和污染程度,

机器人采用全局路径规划与局部动态调整相结合的策略。基于栅格地图或拓扑地图,运用A*算法、Dijkstra算法等实现全覆盖清洁路径规划^[15]。

1.6 环境感知与避障技术

环境感知与避障技术确保机器人能够识别和应对作业过程中的各种障碍物和突发情况。通过立体视觉、超声波传感器和红外传感器等多源感知系统的融合,机器人能够实时检测光伏板表面的灰尘分布、障碍物位置以及边缘界限^[16]。

2 光伏板的清洁机器人的应用

2.1 履带式清洁机器人

在光伏板清洁领域,履带式清洁机器人作为一类广泛应用的自动化设备,其代表型号是某科技公司开发的Resola机器人。该设备以防滑履带为核心移动机构,其独特纹理和材质设计保证了光伏板表面具备充分摩擦力,即使在潮湿或倾斜环境中也能维持可靠运行^[17]。

全球首款免水且能自动在太阳能电池板上移动清扫的机器人已由日本某公司宣布成功研发出来。如图1所示,质量大约10.9 kg的该种机器人,其机身配有蓄电池,有着可达2 h的工作时长,具备对约400 m²面板实施清扫的能力,在干旱缺水的沙漠地区,其清洁效果能达到与人工清洁程度相媲美的程度^[18]。



图1 无水清扫机器人

2014年,某公司推出了一款履带式光伏板清洁机器人,如图2所示。该设备通过滚刷设计实现了无水清洁功能。由于这款机器人具备出色的环境适应能力,即便在高海拔或极端高温条件下,也能维持稳定性能,并提供高效的清洁效果,成功防止了二次扬尘的发生^[19]。然而,尽管其清洁表现卓越,该系统在实际作业过程中却仍存在耗水量较大和便携性不足的问题,这在实际应用中构成了制约。

2.2 负压吸附式清洁机器人

负压吸附式清洁机器人作为无水清洁技术的关键进展,其运作机制建立在“6轮移动+双负压



图2 清扫机器人

吸附”的复合设计理念上,其中6个独立驱动的橡胶轮赋予其灵活的运动能力^[20]。

2022年,Mogahid Farah团队开发了一款小型移动机器人,专为自主清洁光伏板阵列而设计,如图3所示。在IMU和超声波传感器的引导下,该装置能够沿着预设轨迹高效清扫光伏板表面的灰尘;2018年,Michele Gabrio Antonelli等利用Arduino构建的光伏板自主清洁机器人,采用半履带结构作为其行走机构,前后各安装一个螺旋刷,这些刷子在机器人运动过程中交替工作,以清除光伏板表面的灰尘。



图3 小型吸附式光伏板清洁机器人

2021年,某科技有限公司推出了一款吸盘式便携光伏板清扫机器人,如图4所示。这款设备借助多种传感器融合技术,实现对周围环境的识别和障碍物的探测;前端的吸盘向前推进时,后方的吸盘则模仿虫类姿态缓慢移动^[21]。它能在倾斜度最高达45°的光伏板上稳定行走,并采用无水清洁的模式工作。



图4 吸盘式便携光伏板清扫机器人

2.3 吸盘式无水清洁机器人

吸盘式无水清洁机器人吸附机构由多个高弹性硅胶吸盘构成,当分布式真空泵组在吸盘内形成稳定的负压时,机器人便能在倾斜角度高达70°的光伏板表面牢固吸附并自由移动。

2023年,周亮军等设计的一款直列式清扫机器人以单电机搭配涡轮减速器来驱动整个行走机

构和清洁滚刷,并且在清扫系统中选用了滚刷-高压喷水的混合清洗方式实现对光伏板表面灰尘的高效清洁;2021年,潘瞳等建立了光伏板表面积灰数学模型并依据此设计了一款光伏板清扫机器人,该清扫机器人进行清扫时对光伏板覆盖率可达100%,清扫后的清洁度可达95%,使用该清扫机器人定期对光伏板进行清洁可使光伏板输出功率提高20%^[22]。如图5所示。



图5 吸盘式无水清洁机器人

2.4 模块化履带式清洁机器人

2023年,某智能光伏清洗机器人的模块化履带式设计,反映了当前光伏清洁设备向柔性化和可定制化发展的主流方向,如图6所示。在移动系统部分,该机器人依托于特殊设计的凸起背胶履带,借助优化履带花纹的几何形状及橡胶配方,在确保充足摩擦力的前提下,显著减轻了对光伏板表面的磨损影响^[23]。



图6 模块化履带式清洁机器人

2017年,杨东宇开发了一款专为荒漠环境打造的大型光伏阵列清扫机器人,如图7所示。考虑到光伏电站规模和尺寸的差异性,该设备能够灵活拼接以适应各种配置,同时它配备了平刷、转刷和滚刷3种清扫模式,这种结构上的适应性显著增强了环境应对能力,并高效提升了清扫效率^[24]。



图7 拼接式清扫机器人

尽管模块化设计会造成系统复杂度的加剧和

初期成本的升高,但未来的研究重点涵盖了优化模块接口标准并创建智能自诊断系统,旨在降低维护难度和使用成本。

3 结语

光伏板清洁机器人领域在持续发展中催生了多种解决方案,不同机型在移动方式、清洁手段和能源配置等方面展现出鲜明特色。履带式 and 轮式机器人因其稳固性被广泛应用于地面电站,而吸附式设计在屋顶光伏场景中凸显优势,多足式与机械臂式机器人则为特殊应用开辟了新途径。尽管如此,适应复杂环境、节约水资源以及平衡清洁效率等问题仍需进一步研究。未来方向将聚焦智能化、多功能化和轻量化,人工智能与物联网技术的结合将完成“感知-决策-执行”全流程自动化,数字孪生技术支持远程监控和预测性维护。同时,清洁-检测-维修一体化设计将演变为产品主流,超轻型结构和仿生技术会增强环境适应力。

参考文献:

- [1] SARVER T, AL-QARAGHULI A, KAZMERSKI L L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 698-733.
- [2] ANDERSON M, GRANDY A, HASTIE J, et al. Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays [C]// *Mobile Robotics*. Istanbul, Turkey. WORLD SCIENTIFIC, 2009: 367-377.
- [3] MOHARRAM K A, ABD-ELHADY M S, KANDIL H A, et al. Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 68: 266-272.
- [4] KANDIL H A, ELSHERIF H. Fully automated cleaning systems for photovoltaic panels and reflectors, presented at the work-shop of the proposed joint cooperation research imitative on renewable energies and smart grid [D]. New Cairo City: German University in Cairo (GUC), 2011.
- [5] SHEN K, QIU Q F, WU Q L, et al. Research on the development status of photovoltaic panel cleaning equipment based on patent analysis [C]// 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Wuhan, China: IEEE, 2019: 20-27.
- [6] FARAH M, ALSHEHAB M, ALSHEHRI K. Design and implementation of an autonomous mobility algorithm for photovoltaic panel surface cleaning robots based on webots [C]// 2022 6th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Wuhan, China: IEEE, 2022: 138-143.
- [7] 王林, 孙慧平, 汪金芝. 负压吸附式无轨光伏板清洁机器人结构设计 [J]. *宁波工程学院学报*, 2022, 34(1): 26-31.
- [8] 周亮军, 陈尔佳, 王琪, 等. 一种滚刷盘高压喷水混合式光伏电池板清扫机器人的研究 [J]. *电气时代*, 2023(2): 83-87.
- [9] 潘瞳, 孙文磊, 李红, 等. 光伏组件智能清扫机器人设计 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(7): 146-151.
- [10] 侯凡博, 姬鹏飞, 张修太, 等. 一种太阳能光伏板清扫机器人的设计 [J]. *科技风*, 2020(23): 8-9, 12.
- [11] 王龙博. 便携式光伏板清扫机器人系统设计与分析 [D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
- [12] 林春阳, 陈军, 林伟民, 等. 太阳能光伏系统表面积尘及清洁方法综述 [J]. *能源与环保*, 2025, 47(4): 140-146.
- [13] 何强. 光伏板清洁机器人设计及运动控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [14] 王凯璐, 李子强, 端木维禹, 等. 光伏板清洁装置的优缺点分析与前景展望 [J]. *上海节能*, 2024(1): 139-142.
- [15] 张然. 光伏板清洁机器人防偏摆运动控制模式研究及应用 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [16] 高楠. 一种新型光伏板清洁系统的设计与实现 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [17] 赵勇成, 罗金海, 蒙明明. 中央空调管道清洁机器人的创新设计与分析 [J]. *机电信息*, 2025(17): 41-43, 48.
- [18] 李雯珊, 张美娜. 智能家居清洁机器人市场需求旺盛 [N]. *证券日报*, 2025-09-05 (B03).
- [19] 张龙龙, 冯浩明, 范美庭, 等. 基于视觉的泳池清洁机器人设计 [J]. *科技与创新*, 2025(16): 81-83, 87.
- [20] PANG Y. Classification and technical characteristics analysis of collection mechanisms for water surface garbage cleaning robots [J]. *Journal of Engineering Innovations & Technology*, 2025, 7(4): 1-13.
- [21] 王国权, 张晓鹏. 基于 ANSYS Workbench 的高空幕墙清洁机器人主移动机构的仿真分析 [J]. *工程机械*, 2025, 56(8): 99-105.
- [22] DU X, WANG C H, WEI D F, et al. Hydrodynamic resistance calculation and structural optimization of hull cleaning robot [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 3068(1): 012099.
- [23] LI Q C, ZHAO Y Q, LI Y J, et al. A kansei-oriented morphological design method for industrial cleaning robots integrating extenics - based semantic quantification and eye-tracking analysis [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(15): 8459.
- [24] LIN S C. Application of water surface cleaning robot and shore station in teaching [J]. *Frontiers in Educational Research*, 2025, 8(7): 193-201.

收稿日期: 2025-10-12