

# 浅析光伏电站清洁机器人的应用现状

董伯先

(中民新科(北京)能源技术研究院有限公司, 北京 100089)

**摘 要:** 从积灰对光伏电站发电性能的影响出发, 结合目前国内清洁机器人技术的现状, 介绍了各类清洁技术, 并论证分析了各类技术的优、缺点; 指出了清洁机器人目前存在的技术问题, 探索性地给出了解决方案; 最后对清洁机器人的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 积灰; 清洁机器人; 光伏电站; 单排清洁; 跨排清洁; 便携式清洁; 自锁

**中图分类号:** TK519

**文献标志码:** A

## 0 引言

研究发现, 地表颗粒及人类活动带来的积灰是影响光伏电站发电量的重要因素<sup>[1-5]</sup>。采用清洁机器人对潍坊市某分布式光伏电站的组件进行清洁, 对比清洁前后的效果可以发现: 大气环境良好时, 该电站的日发电量可提升近20%; 大气污染严重时, 电站日发电量提升近40%。由此可见, 组件的清洁度对发电量的影响至关重要。

我国自2012年开始对组件清洁技术展开研究, 将国外先进技术与国内光伏电站相结合, 研发出了多种机械式清洁技术。目前, 机械式清洁(也称为“清洁机器人”)主要包括单排清洁、跨排清洁和便携式清洁3种技术路线, 而跨排清洁和便携式清洁均由单排清洁技术演变而来。

本文对上述3种清洁机器人技术路线进行了系统地阐述, 并对其应用现状进行了总结与展望。

## 1 清洁机器人的3种技术路线

### 1.1 单排清洁技术

单排清洁技术是指清洁机器人仅能完成一排

光伏组件的清洁, 不能越排。国内对该技术的研究最为深入, 成果也较多, 其中, 高校和科研院所的研究主要集中在清洁机器人的结构设计和控制系统等方面。巫江等<sup>[6]</sup>研究了一种采用新型凸轮式清扫机构的自动除尘装置, 朱赵慧娟<sup>[7]</sup>提出了一种绞缆式自动养护机器人; 马磊等<sup>[8]</sup>研究了清洁机器人的控制系统, 并提出了电源、角度、位置等模块的控制原理; 孙卫红等<sup>[9]</sup>、李园等<sup>[10]</sup>研究了清洁机器人的控制原理、组成及逻辑算法; 王龙等<sup>[11]</sup>研究了清洁机器人的零部件的轻量化设计。

目前, 采用单排清洁技术并已得到产业化应用的产品主要分为3个方向, 分别以南京天创电子有限公司(以下简称“南京天创”)、以色列的Ecoppia Scientific Ltd.(以下简称“Ecoppia公司”)、南京索能多思智能科技有限公司(以下简称“南京索能多思”)等公司的产品为代表。

1) 以南京天创的产品为代表的清洁机器人目前应用最为广泛。生产该类产品的代表公司还有上海安轩自动化科技有限公司(以下简称“上海安轩”)、山东豪沃电气有限公司(以下简称“山东豪沃”)、北京中电博顺智能设备技术有限公

收稿日期: 2019-06-14

通信作者: 董伯先(1983—), 男, 硕士、高级工程师, 主要从事新能源技术的研发和优化方面的工作。dongbx01@163.com



司(以下简称“中电博顺”)等。该类产品由行走系统、导向系统、清洁系统、电池和控制系统组成。其中,行走系统的4个行走轮对称布置在产品的上、下位置,用于完成前进和后退,4个行走轮可共用1台电机或每2个行走轮共用1台电机,中电博顺已实现“单轮单控”;导向系统主要用于产品的限位和导向,防止因速度过快而使产品超出组件边框。

该类产品的的工作原理为:工作时,清洁机器人的行走轮沿组件边框行走,用于清洁的毛刷高速转动,且转动方向与行走轮的行进方向相反;毛刷在转动过程中,先将积灰从组件表面掸起,然后在毛刷的冲击和旋转气流的共同作用下将积灰驱赶至组件缝隙处脱落。

该类产品的优点在于可实时感知自身所在位置及电机、电池等核心部件的工作状态,人机交互功能良好,也可实现远程实时监控。但其最大的缺点在于行走系统对光伏组件安装精度要求苛刻,一旦组件出现高低落差、倾斜安装的情况,清洁机器人的行走轮很容易因行走不协调而导致“自锁”。各厂家都在探索解决该问题的方式,但目前仍未完美解决。比如,上海安轩研发了履带式清洁机器人,但履带的寿命及上、下履带的协调性并不理想;南京天创试图在安装清洁机器人之前先对组件进行调整,但因前期工程费用太高而无法进行推广;中电博顺的“单轮单控”技术提高了清洁机器人的越障能力,基本解决了“自锁”问题,但性价比不高。



图1 单排清洁机器人  
Fig. 1 Single-row cleaning robot

## 2) 以 Ecoppia 公司生产的 Ecoppia 清洁机器

人<sup>[12]</sup>为代表。该清洁机器人是由横向行走轮、主体框架、纵向清洁装置、拖曳电机、电池和控制系统组成,典型特点是行走方向与清洁方向为正交,清洁机器人在行走方向上断续进行。

该类产品的工作原理为:工作时,清洁机器人的横向行走轮沿专用导轨行走至未清洁的组件时停车;然后纵向清洁装置启动,通过超细纤维毛刷旋转并辅以气流吹扫,自上而下对积灰进行清洁;清洁完毕后,清洁机器人行走至其他未清洁的组件。

该产品在沙尘较大的中东沙漠地区应用广泛,但由于其需要在横向行走路径上全程铺设导轨,价格昂贵,因此性价比不高。



图2 Ecoppia 清洁机器人  
Fig. 2 Ecoppia cleaning robot

3) 以南京索能多思的产品为代表。该类产品设计方案独特,由驱动与传感系统、输导装置、临时停车台、清洁装置组成。该产品的典型特色有2点:一是清洁装置无需自主转动,仅依靠输导装置的钢丝绳拖动前行;二是整套设备仅使用1台驱动电机,且驱动电机的电源取自其所在光伏阵列,并固定在阵列的某一端。

该类产品的工作原理为:工作时,驱动电机带动钢丝绳拖曳着清洁装置的毛刷和刮尘橡胶板将积灰向前推行,至组件间的缝隙时推落;当传感计数器达到阈值时,电机停止转动进入散热状态,此时设备正好到达停车台;散热结束后,驱动电机反转,设备进入“返回清洁”模式。由于单次清洁效果不明显,在一个清洁周期内通常需要多次清洁。

该产品在多数应用场景下具有较大优势,尤其是在大幅面光伏电站,如建于农业大棚上的光



图3 南京索能多思生产的清洁机器人

Fig. 3 Cleaning robot produced by Nanjing Solenergy

光伏电站。目前,南京索能多思正在开展智能化、远程监控、闭环诊断等方面的研究,力图解决产品在行走打滑、由于预紧力丢失造成的行走不协调甚至钢丝绳断裂等方面的技术难题。

### 1.2 跨排清洁技术

已进行规模化应用的跨排清洁技术主要有车载清洁式和摆渡车式2种。

1) 车载清洁式机器人多采用有水清洁,清洁装置安装在工程车上,由工程车实现前后的跨排清洁。该类产品的代表厂家为青岛昱臣智能机器人有限公司、重庆太初新能源有限公司等<sup>[13-14]</sup>。由于该类产品的体型笨重,因液压系统无法自适应复杂的地形地貌,清洁装置易对组件造成损坏,因此主要适用于我国西北部地势相对平坦的光伏电站,但这类地区水资源相对匮乏,因此使用该类产品有一定的局限性。



图4 应用于西部地区的车载清洁式机器人

Fig. 4 Vehicle cleaning robot used in western China

2) 摆渡车式清洁机器人主要由清洁机器人、摆渡车及轨道等附属设施组成。目前该产品仅在少数分布式光伏电站应用,而在地面光伏电站的应用仍处于样机试验阶段,这是因为采用该技术的现场施工量大、施工周期长,对轨道载体的平整度要求高,复杂的环境和地形地貌会导致成

本陡增,且设备易发生倾覆。该类产品受限于性价比、环境适应性及稳定性等问题,发展前景不乐观。



a. 应用于分布式光伏电站的摆渡车式清洁机器人



b. 应用于地面电站的摆渡车式清洁机器人

图5 跨排清洁机器人样机

Fig. 5 Shuttle car type cleaning robot prototype

3) 除上述2种已规模化应用的跨排清洁技术外,还有一种新研发但尚未量产的专门针对平单轴跟踪系统研发的跨排清洁技术。这一技术的典型特点是轨道安装在平单轴跟踪系统的转动轴上,完全摆脱了轨道对地面的依赖<sup>[15]</sup>。清洁时,首先由清洁机器人与平单轴跟踪系统交互确认,当平单轴跟踪系统与轨道角度一致时,清洁机器人从轨道行进至组件上进行清洁。该技术可适应前后排组件6个自由度方向上的大范围偏差,对项目现场的施工质量包容性强,可匹配所有型号的清洁机器人,具备适用性广、制作成本低等特点。目前该技术也已展开相关样机的试验工作。

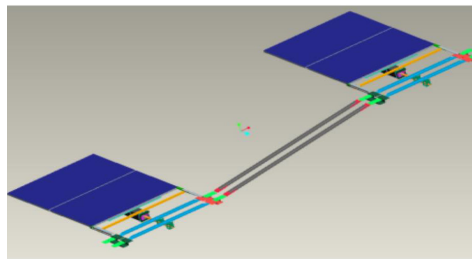
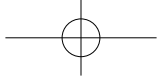


图6 应用于平单轴跟踪系统的跨排轨道模拟图

Fig. 6 Cross-row track simulation applied to single-axis tracking system



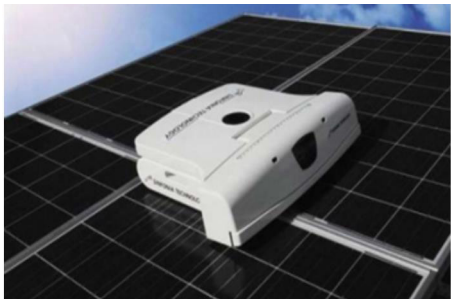


### 1.3 便携式清洁技术

分布式光伏电站存在障碍物多、排布不规则的问题，单排和跨排清洁机器人都无法完全清洁整个电站，但便携式清洁机器人可解决这一难点。采用便捷式清洁技术的厂家有日本的 Sinfonia Technology Co., Ltd.(以下简称“Sinfonia”)、深圳创动科技有限公司(以下简称“深圳创动”)、深圳晟鑫科技有限公司等。该类产品具有对障碍物适应性强且随到随洗的特点，日益得到电站业主的青睐。

便携式清洁机器人是在组件表面爬行过程中通过高速转动的毛刷来对组件表面进行清洁，通过行走轮的转速差实现机器人的转向。为防止清洁机器人从组件上跌落，多以人工现场控制为主，个别厂家正在研发基于视觉跟踪系统的位置判断技术。

但便携式清洁机器人存在电池容量小的缺点，单块电池仅能清洁容量为 0.8 MW 的组件；此外，在机器人清洁期间仍需要人工遥控指挥，智能化水平有待提高。



a. Sinfonia 生产的便携式清洁机器人<sup>[16]</sup>



b. 深圳创动生产的便携式清洁机器人

图7 Sinfonia 和深圳创动生产的便携式清洁机器人  
Fig. 7 Portable cleaning robots produced by Sinfonia and Innopower

## 2 清洁机器人技术存在的问题及技术发展方向

### 2.1 存在的问题

目前，所有厂家都致力于提高清洁机器人的越障和抗“自锁”能力，并研发了多种方案，比如，分散驱动、新型传动技术、机体结构优化等，但还未找到高性价比的解决方案。

研究发现，当清洁机器人倾斜导致导向轮正压力过大及行走轮越障能力不足时，其易发生“自锁”。针对这一问题，一种可能的解决方案是：通过建立空间力系的平衡方程，优化毛刷分布密度、长度和硬度，行走轮直径和间距，导向轮数量、间距和直径，以及机器人框架的尺寸、驱动电机的输出扭矩等参数，并辅以电机控制算法，及时感知和调整行走轮状态，避免产生“自锁”。

### 2.2 技术发展方向

对光伏组件进行清洁的清洁机器人技术的发展方向主要体现在以下几个方面：

1) 细分应用场景：针对光伏电站的形式研发适用于不同应用场景的清洁机器人，场景可细分为大倾角式、平铺式、大幅面平铺式、平单轴跟踪系统等。

2) 深入优化设计：研究方向集中在轻量化设计、零部件选材、驱动方式及算法、充电方式、越障算法等方面。

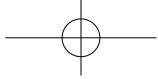
3) 智能化：为清洁机器人建立云平台，共享设备运行参数、电站发电量、大气环境等大数据，辅以机器学习算法，以提高设备的智能化。

## 3 结论

本文针对用于光伏组件清洁的清洁机器人，介绍了单排清洁、跨排清洁和便携式清洁3种技术路线，并阐述了各种技术的优、缺点；最后对清洁机器人的发展方向进行了展望。

### 【参考文献】

- [1] 鲍官军. 光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 909 - 913.
- [2] JIANG H, LU L, SUN K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance



- of solar photovoltaic(PV)modules[J]. Atmospheric environment, 2011, 45(25): 4299 – 4304.
- [3] KALDELLIS J K, CHALVATZIS K J, PYROPOULOS G C. Trans-boundary air pollution balance in the new integrated European environment[J]. Environmental science and policy, 2007, 10(7): 725 – 733.
- [4] FRAGOS P, PALIATSOS A G, KALDELLIS J K. Experimental analysis of the air pollution impact on photovoltaic panels' energy yield[C]//Proceedings of the world renewable energy congress, July 19-25, 2008, Glasgow, Scotland, 2008: 324 – 328.
- [5] SCHILL C, BRACHMANN S, KOEHL M. Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules[J]. Solar energy, 2015, 112: 259 – 262.
- [6] 巫江, 龚恒翔, 朱新才, 等. 光伏组件自动除尘装置设计与研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(3): 92 – 97.
- [7] 朱赵慧娟. 光伏电站自动养护机器人的设计与研究[J]. 工业设计, 2017(3): 151.
- [8] 马磊, 杨国华, 徐维昌. 光伏组件自动清洗机控制系统的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(1): 29 – 33.
- [9] 孙卫红, 覃剑戈, 岳云涛. 煤矿塌陷区光伏电站太阳能电池板清洁机器人的研究[J]. 中国煤炭, 2018, 44(4): 144 – 149.
- [10] 李园, 赵熙, 汪贵平. 光伏电池板智能清洁系统[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(10): 41 – 44.
- [11] 王龙, 王云霞, 陈健飞, 等. 光伏板清扫机器人支撑架轻量化优化设计[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 182 – 185.
- [12] Ecoppia. E4 Product Overview[EB/OL]. [2019-01-05]. <https://www.ecoppia.com>.
- [13] 光伏电站组件清洁除垢解决方案[EB/OL]. [2019-01-05]. <http://www.cqtechu.com/news/26.html>.
- [14] 数码之家. 中国首台无水光伏组件智能清洁机器人发布[EB/OL]. (2014-09-11). <http://bbs.mydigit.cn/read.php?tid=1007339>.
- [15] 江红胜, 董伯先. 用于平单轴跟踪系统光伏电站跨排清洁的轨道系统和方法: 201810620415.7[P]. 2018-06-15.
- [16] Sinfonia 新型机器人清洁工自动清洁太阳能面板[EB/OL]. (2014-03-19). <https://m.hc360.com/info-clean/2014/03/191453280830.html>.

## ANALYSIS OF THE APPLICATION OF CLEANING ROBOT FOR PV POWER STATION

Dong Boxian

(CMIG Xinke (Beijing) Power Technology Research Institute, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In terms of ash accumulation, various domestic robot cleaning technologies were introduced for the power station. The advantages and disadvantages of the cleaning technologies were analyzed while the technical problems of cleaning robots are pointed out. The solution was explored and the development trend of cleaning robots was finally predicted.

**Keywords:** ash accumulation; cleaning robot; PV power station; single-row cleaning; cross row cleaning; portable cleaning; self-locking