

# 光伏发电智能清洁机器人设计与实现

叶光伟, 刘海哲, 李长武

(黑龙江省建设科创投资有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** 针对光伏发电板清洁需求, 设计一种能够自动清洁光伏发电板的智能清扫机器人。该机器人结合先进的软硬件技术, 进行全程智能化设计, 涉及的关键技术包括模块化设计的行走驱动装置、智能电源管理系统、专家级远程监控运维平台, 以及可调速和防滑轮胎设计等。光伏发电智能清洁机器人可通过远程控制系统或现场操作界面设定清洗任务参数(如时间、速度等), 机器人上下主动式引导轮沿光伏板外沿铝合金边沿行走, 根据现场情况自动调整清洗方式和行走速度, 每天可清洁 3 MW ~ 5 MW 光伏组件, 清洗后的光伏板发电效率可提高 20% ~ 30%。

**关键词:** 光伏发电; 自动清洁; 智能机器人

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7241(2025)09-0095-05

## Design and Implementation of Intelligent Cleaning Robot for Photovoltaic Power Generation

YE Guangwei, LIU Haizhe, LI Changwu

(Heilongjiang Construction Technology Venture Capital Co., Ltd., Harbin 150000, China)

**Abstract:** This paper describes the design of an intelligent cleaning robot that can automatically clean photovoltaic panels. The robot combines advanced software and hardware technologies and been designed with full intelligence, involving key technologies such as modular design of the walking drive device, intelligent power management system, expert-level remote monitoring and operation platform, adjustable speed and anti-skid tire design. The intelligent cleaning robot for photovoltaic panels can set cleaning task parameters (such as time, speed, etc.) through remote control system or on-site operation interface. The robot's active guide wheels move along the aluminum alloy edge of the photovoltaic panel, automatically adjusting the cleaning method walking speed according to the on-site situation. It can clean 3 MW ~ 5 MW of photovoltaic components per day, and the power generation efficiency of the cleaned photovoltaic panels can be increased by 20% ~ 30%.

**Keywords:** photovoltaic power generation; automatic cleaning; intelligent robots

## 0 引言

在生态环境日趋恶化、化石燃料日趋紧张的今天, 太阳能作为一种清洁可再生的资源拥有着很大的应用前景。随着对太阳能的研究, 太阳能转换电能的效率得到了提高, 光伏发电技术也在逐渐成熟, 太阳能有可能替代其他各种能源的关键能源之一。光伏产业的发展成本渐渐降低, 光伏行业对其他各个领域的渗透逐日增多, 在建筑体系当中, 光伏并网技术快速发展让光伏建筑的统一规划得以实现<sup>[1]</sup>。

灰尘是影响光伏电池组件能量转换效率的关键因素之一, 天气干燥、风沙较大、空气中的浮尘含量较多, 增加了光伏组件的表面落尘量。此外, 在较小降雨量的地区, 组件通过雨水的自清洁能力较差, 导致光伏组件表面的灰尘落尘量相对较大。我国北方, 冬季降雪频繁且雪量较大不易融化, 造成太阳能光伏蓄电池板表面长期积雪

无法发电, 进而影响光伏发电系统的总发电量<sup>[2]</sup>。

现阶段以人工清理作为当前光伏灰尘清洁的最主要方式, 针对大型的光伏阵列或者光伏电站, 人工清理所带来的人力劳动成本和水资源消耗却是一种负担, 因此利用清洁机器人有效地、经济地清扫光伏组件的积灰、积雪, 对于提高光伏产业的经济效益至关重要<sup>[3]</sup>。

国内目前的光伏发电板清洗方式多为用水清洗, 人力成本高的同时还带来了水资源的大量消耗<sup>[4]</sup>。据统计, 以一个 10 MW 的光伏发电站为例, 使用传统的高压水枪进行清洗, 仅仅是经济成本, 每年所需的费用就达到了 35 万元(每月清洗一次), 若使用相对节约成本的喷淋系统对光伏发电板进行清洗, 则每年所需的清洁费用则为 25 万元 ~ 30 万元。如果不使用设备, 而是使用传统的人工擦洗方式, 每年产生的人工费用则为 25 万元, 使用大型清洁车的每年成本则约 34 万元<sup>[5]</sup>。同时, 以上方式并未考虑消耗水资源对自然环境带来的压力, 同时消耗大量

的淡水资源对光伏发电板进行清洗的行为本身也不符合光伏发电环保节能、对环境友好的建设初衷<sup>[6]</sup>。

## 1 机器人总体设计

机器人的设计采用无水清洗方案,节约水资源;利用互联网通信技术进行远程控制,操作简单;刷头为柔性尼龙拒尘材料,长期使用不会划伤电池板;采用高耐候电池以及高效充电管理技术,实现无水,可靠、高耐候的户外自动清扫。机器人样机如图1所示。

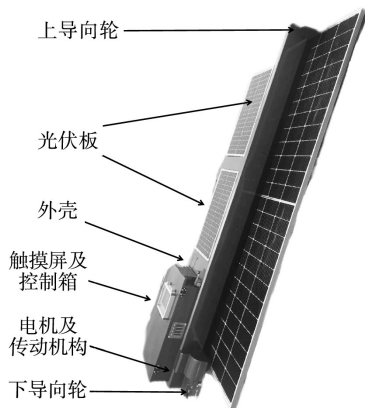


图1 机器人样机

同时,机器人也具有强大的越障能力,能够适应光伏板在40°倾角、支架前后错位25 mm、高低落差0.5 m以内的工作环境,连续上坡能力不大于24°,上下错位不大于12°、水平跨越间隙不大于85 mm,平单轴之间系统剪刀角度不大于10°。

为了节约淡水资源,对环境友好,机器人设计采用了尼龙材质的柔性拒尘毛刷,能够提高高速旋转清扫光伏板上的脏污、灰尘等影响发电效率的灰尘,无需用水,因此避免了二次污染的问题,同时因为刷毛柔软,不会对光伏板造成损伤和隐裂。

能源方面,机器人自身带有光伏板以及蓄电装置,使用时无需外部电源,即可支持机器人连续进行清洁工作2 h-4 h。蓄电装置的重放次数可达到800次以上。

### 1.1 清扫机器人与换行车的结构组成

智能光伏清洁机器人主要由清扫机器人,自行车及相关附件组成。其中,清扫机器人主要用于光伏组件的清洁,换行车主要用于载运清扫机器人更换到下一行光伏组件上。

### 1.2 清扫机器人的结构组成

清扫机器人由主体支架、传动部件、清洁部件、控制部件、传感器组件、蓄电池组、自充电组件(光伏板)、上导向轮、下导向轮、外壳等部分组成,如图2所示。

上导向轮为机器人行走提供定位与导向,在机器运

行时,保障机器人在路径上运行,保护机器人不会脱离行走轨道。同时在机器停靠时起到防脱作用,防止恶劣天气下机器被强风吹落或滑脱。

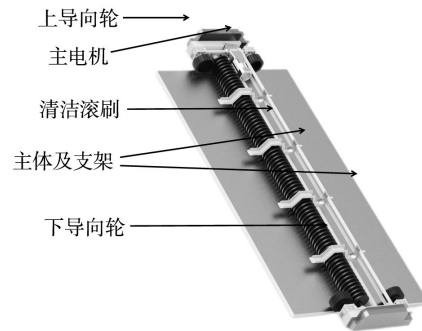


图2 清扫机器人机械结构

行走轮支撑用于机器人沿轨道移动。采用铝合金轮毂包覆三元乙丙橡胶,具有优异的耐老化特性、耐化学性、绝缘性和极宽的工作温度范围。

行走电机采用一台直流无刷电机控制机器人行走与清扫,使用寿命大于10 000 h,结构简单可靠。

电机头传动总成用于分配机器人传动比,使机器人清扫达到比较好的效果。

毛刷辊用于清除光伏板表面的附着物。毛刷采用尼龙610材料,具有较长的使用寿命;通过科学测试选定的毛刷硬度、在保证清扫效果的同时不会对光伏板表面造成任何伤害。

机械停止开关采用机械式开关,用于机器检测停车区停止位置并自动停止。

机械折返采用机械式开关,用于机器检测折返装置并自动折返。

外壳采用不锈钢外壳,具有高强度、高韧性、抗老化、耐腐蚀、不易变形等优点。

电控箱主要用于放置电池,安装电控主板、通讯模块、充电/电源模块、控制开关等主要部件,同时连接外部各类传感器、控制电机运行,防护等级IP65。

电源开关用于连接/断开主控板和电池、充电板,往上为开、往下为关。

手动开关用于现场操作机器人,按下向左清扫,再次按下使按钮弹起,停止向左运行。按下向右清扫,再次按下使按钮弹起,停止向右运行。

通信天线安装在电控箱上部,通过天线与网关相连。

充电模块采用具有MPPT模式的高效充电器,可最大程度吸收光伏板发电功率,为电池提供充足的后备电源;自带电池管理功能和温度补偿特性,满足各类电池充电曲线要求,最大化延长电池在户外运行的寿命。

蓄电池组根据用户需求,可分别配备三元锂电池组、

磷酸铁锂高耐候电池组等,电池容量可以根据阵列运行需求进行扩展。

自充电光伏板采用轻质高效率光伏板,为机器人电池组提供能源、满足机器正常出仓和后备供电的需求。

### 1.3 自行车的结构组成

换行车主要由机架、电控箱、换行车传感器、换行车自充电光伏板等组成。主要用于运载清扫机器人进行换行清扫,换行车通过时钟控制自身的启停与清扫工作。

机架用于支撑换行车井身结构与运载换行车清扫机器人。

电控箱内部主要由电池、控制板、开关、天线等组件组成,防护等级为IP65,用于控制换行车自身的启停及向换行清扫机器人发送指令。

换行车自充电光伏板采用轻质高效率光伏板,为换行车电池组提供能源、满足换行车正常启动运行和后备供电的需求。

换行车传感器用于控制换行车的减速、停止、折返、定位及信号传递。

手动开关用于现场紧急状况急停作用。

换行车轨道用于支撑换行车及换行车行走、定位。

## 2 远程控制平台设计

### 2.1 通信系统组成

机器人的通信系统由 LoRa 通信系统组成,如图 3 所示。LoRa 是一种低功耗广域网(LPWAN)通信协议,具有长距离、低功耗和大规模连接等特点,非常适合光伏板分布式的工作环境。因为光伏板通常分布在广阔的区域,而 LoRa 无线传输技术能够在不消耗大量能量的前提下,实现长距离的数据传输。

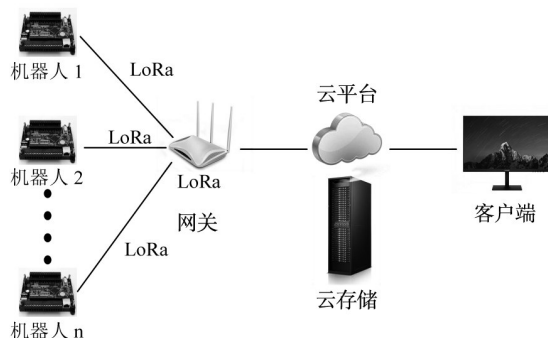


图3 机器人通信系统

智能光伏机器人作为 LoRa 节点,每台机器人都能够实时收集并处理自身的数据,包括工作状态、电量、位置信息等。这些数据通过 LoRa 无线传输技术,被汇集到 LoRa 网关。LoRa 网关作为数据传输的中转站,负责将接

收到的数据定时上传至物联网云平台<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.1.1 LoRa 节点设计

采集节点与智能光伏机器人控制系统之间进行实时数据通信,负责采集监测信息并将其上报至网关。主控芯片利用定时功能实现定期的数据采集与上传,计时完成后获取传感器数据,并根据预设格式进行处理,随后通过指定的通信协议将数据传递至 LoRa 模块,最终将信息发送至网关。为了满足采集节点对性能稳定性和低功耗的需求,本设计选用亿佰特 E32-TTL-100 型 LoRa 模块,其核心芯片为 SX1278 射频芯片,工作频段为 410 MHz 至 441 MHz,最大通信距离可达 3 km。

#### 2.1.2 LoRa 网关节点设计

网关节点负责数据的集中处理与转发,是 LoRa 网络的核心组成部分,同时也是局域网与公共网络之间的关键桥梁。本设计选用 NB-IoT 技术作为数据上传至云服务器的解决方案。与 LoRa 相比,NB-IoT 的显著优势在于其只需连接基站即可与运营商网络进行数据交互,并且在授权频段内进行通信,从而提升了网络的安全性。主控芯片与 LoRa 模块及数据采集节点一致,而 NB-IoT 模块则采用高性能、低功耗的 BC26 模块,充分满足小型化设计的需求,并提供丰富的外部接口和协议栈。

### 2.2 物联网云平台

物联网云平台是智能光伏机器人的大脑,它负责处理和分析从各个机器人传来的数据。通过云计算和大数据技术,平台能够实时监控光伏板的工作状态,预测可能出现的问题,并提供优化建议。这不仅提高了光伏板的工作效率,还大大降低了运维成本<sup>[9]</sup>。

此外,智能光伏机器人还具备自主学习和优化的能力。通过物联网平台的分析结果,机器人能够自动调整工作策略,以适应不同的环境和光照条件。这种智能化的管理方式,使得光伏板的发电效率得到了极大的提升<sup>[10]</sup>。

综上所述,智能光伏机器人采用低功耗 LoRa 无线传输技术,为光伏行业带来了革命性的进步。它不仅提高了光伏板的工作效率,降低了运维成本,还通过物联网云平台实现了实时监控和智能化管理。随着科技的不断发展,有理由相信,智能光伏机器人将在未来的光伏行业中发挥更加重要的作用<sup>[11]</sup>。通过远程控制平台,设定机器人工作频率及时间,机器人即可实现自动清扫工作,无需人工干预,如图 4 所示。

远程控制平台主要具有以下功能,进入控制平台界面后,选择需进行设置的光伏清洁机器人,可直接控制该机器人正向启动清扫工作或反向启动清扫工作。点击该

机器人的参数设置按钮,即可按照需求设定机器人的工作模式,开始时间与清洁间隔<sup>[12]</sup>。机器人电池电压以及充电光伏板电压均会受到平台监测。电量过低情况下,机器人会自动返回停车区,停止运行。可选择查看机器人运行数据,例如机器人的行走距离、设备环境温度、设备温度等。按需求设置,生成机器人工作月报、周报。

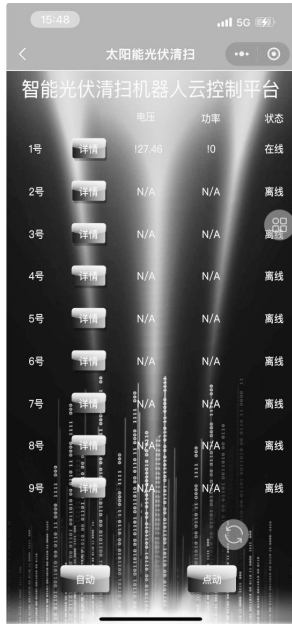


图4 远程控制平台

### 3 控制系统软件编程

控制系统采用国产控制器,该控制器负责驱动电机及调速装置,并与电量采集模块进行实时数据交互,以监测电池的电压、电流、功率和温度等关键参数,并具备低电量自动返航的功能,如图5所示。

MAIN	通讯程序	模拟量程序	电机启停子程序
1	ID TON T45, 30		
2	ID EU LD A AN EU OLD S	T45 自动按钮:M4.2 自动定时触发:M5.3 电压低报警:M5.7	S0.0, 1
3	ID ED LD ED OLD R	自动按钮:M4.1 自动按钮:M4.2	S0.0, 4 左行走自动启动:M4.6, 3
4	ISCR	S0.0	
5	ID LPS S A TON LRD A S R LFP A TON	Always_On:SM0.0 蜂鸣器自动报警M1:M5.0, 1 蜂鸣器自动报警M1:M5.0, 1 T38, 50 T38 左行走自动启动:M4.6, 1 蜂鸣器自动报警M1:M5.0, 1 左行走自动启动:M4.6 T39, 30	

图5 电量采集模块通信及低电量返航程序

专家系统在评估设备整体运行状态及监测设备使用寿命方面发挥着至关重要的作用。通过对轮胎行驶里程、蓄电池充放电周期、毛刷清扫面积、电动机累计工作时长及整机运行时长等关键指标的实时监测,专家系统能够为设备的维护、管理及性能优化提供强有力的支持,如图6所示。

部件名称	当前状态	操作
易操作工作次数	0次	详情 清零
轮胎行走里程	0.00km	详情 清零
充满电次数	0次	详情 清零
剩电剩余时间		详情 清零
毛刷清扫面积	0.00m²	详情 清零
电机累计工作时长	0小时 00分00秒	详情 清零
整机累计运行里程	0小时 00分00秒	详情 清零

MAIN	通讯程序	模拟量程序	电机启停子程序
1	ID O LPS AR>= AR<= MOVR *R LRD AR>= AR<= MOVR *R LRD AR>= AR<= MOVR *R LRD AR>= AR<= MOVR *R LFP AR<= MOVR *R	Q0.6 Q0.7 速度给定:VD124, 40.0 速度给定:VD124, 50.0 1.0, 行走里程M1:VD412 0.16, 行走里程M1:VD412 速度给定:VD124, 30.0 速度给定:VD124, 40.0 0.8, 行走里程M1:VD412 0.16, 行走里程M1:VD412 速度给定:VD124, 20.0 速度给定:VD124, 30.0 0.6, 行走里程M1:VD412 0.16, 行走里程M1:VD412 速度给定:VD124, 10.0 速度给定:VD124, 20.0 0.4, 行走里程M1:VD412 0.16, 行走里程M1:VD412 速度给定:VD124, 10.0 速度给定:VD124, 20.0 0.2, 行走里程M1:VD412 0.16, 行走里程M1:VD412	
2	ID EU LD O ALD +R +R MOVR	Clock_1s:SM0.5 Q0.6 Q0.7 行走里程M1:VD412, 行走里程:VD160 行走里程M1:VD412, 清扫面积M1:VD416 0.0, 行走里程M1:VD412	
3	ID EU MOVR MOVR	行走里程清零:M6.3 0.0, 行走里程:VD160 0.0, 行走里程M1:VD412	
4	ID MOVR	Always_On:SM0.0 清扫面积M1:VD416, 清扫面积:VD164	

图6 专家数据

### 4 系统运行试验

选取适合的光伏电站及光伏板。根据预设程序启动清洗机器人,记录清洗开始时间。观察机器人在不同光伏板上的适应性和清洗效果。清洗前后定期记录采集光伏板的发电数据,并监测机器人运行状态。智能光伏机器人能够有效去除光伏板表面的灰尘和污垢,清洗效率达到85%以上。清洗后光伏电池板的发电效率平均提高了15%~20%。机器人在整个清洗过程中表现出良好的稳定性,运行时间较长,适应性强。

### 5 结束语

光伏发电智能清洁机器人采用了先进的自动化技术

和控制系统,能够迅速遍历整个光伏阵列,确保每一个光伏板面都能得到及时清洗。相比传统的人工清洗方式,机器人清洗不仅速度更快,而且能够全天候不间断工作,不受天气和时间限制,大大提高了清洗效率。在实际应用中,光伏发电智能清洁机器人的操作流程需要不断优化,以提高工作效率和清洗质量。可以通过引入智能学习算法,让机器人能够自主学习和优化清洗策略,根据不同的光伏板污染程度和类型,选择合适的清洗方式和速度。

#### 参考文献:

- [1] 崔永琴,孙家欢,肖建华. 干旱地区大型光伏电站的光伏组件除尘技术研究现状及展望[J]. 太阳能, 2021(12): 11-25.
- [2] 吴颖超. 积尘对光伏电站发电量的影响及清洁方式分析[J]. 太阳能, 2021(9): 47-51.
- [3] 许国泽. 考虑多因素影响的光伏发电功率智能预测研究[J]. 自动化技术与应用, 2023(10): 79-82.
- [4] 马永, 王俊, 张子健, 等. 基于遥感核AI图像的建筑物屋顶光伏资源潜在容量估计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2): 140-144.
- [5] 金国辉, 汤伟, 杨世俊. 光伏板积灰清理方案综合评价研究[J]. 科技促进发展, 2019, 15(7): 746-753.
- [6] 李凯. 荒漠化地区光伏板积尘规律及除尘机器人设计[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [7] 秦建民. 露天煤矿疏干道路喷淋降尘系统流量调控方法设

计[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(5): 40-43.

[8] 杨征鹤, 陈毅飞, 杨会民, 等. 基于LiDAR的温室对靶喷雾机器人的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 83-89.

[9] 王鹏飞, 马小珍, 何丽娟, 鲍永胜. 大规模清洁能源接入下的电力系统安全自动监测系统[J]. 自动化技术与应用, 2024(1): 61-65.

[10] 贺延蒙, 强兴运. 基于PLC的日光温室智能控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7): 39-43, 48.

[11] 杨亚林, 朱德兰, 李丹, 等. 积灰和光照强度对光伏组件输出功率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 203-211.

[12] 赵晓庆, 张玉婷, 杨娜, 等. 基于JetBot小车的清洁机器人设计[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(3): 30-32, 71.

作者简介: 叶光伟(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 智慧建筑。

(上接第88页)

#### 参考文献:

- [1] 刘颖, 刘宝华. 基于相移的三维扫描数据自动配准方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 39-43.
- [2] 孔华永, 聂志勇, 隋立林, 等. 结合关键点和注意力机制的人员着装检测方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(2): 206-214.
- [3] 蒋永丛, 何飞. 图正则重加权稀疏约束的深度非负矩阵分解算法用于高光谱图像解混[J]. 中国测试, 2022, 48(12): 154-161, 180.
- [4] 夏军勇, 王康宇, 周宏娣. 基于改进Faster R-CNN的食品包装缺陷检测[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 131-136, 151.
- [5] 周波, 江佩峰, 段昶, 等. 面向单一背景的改进RetinaNet目标检测方法研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 137-142.
- [6] YANG J, WU S, GOU L, et al. SCD: A stacked carton dataset for detection and segmentation[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3617.
- [7] 赵亚琴, 蒋林权, 陈越, 等. 与视频背景颜色相似的纹理缺乏前景目标检测方法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(8): 265-268, 285.
- [8] 周黎源. 基于多标签分类的数字图书馆文本特征抽取方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(6): 62-64, 141.
- [9] 史永丰, 张育浩, 程婷, 等. 基于空间多边形三角剖分的曲面分割求交算法[J]. 图学学报, 2019, 40(3): 447-451.
- [10] 王晓明, 张淑艳, 张婕, 等. 一种深度残差学习的含噪图

像轮廓重建方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(3): 66-71.

[11] 李雅梅, 谢秉旺. 基于自适应分割和多尺度Retinex的图像增强算法[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(10): 135-138.

[12] 马海霞, 李峻宇, 李中兴, 等. 基于YOLOv3的扶梯缺陷图像识别研究与应用[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(11): 45-48.

作者简介: 陈玉良(1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 智能控制技术 & 维护。