

[机器人]

# 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

文/周亮军<sup>1</sup> 陈尔佳<sup>1</sup> 王 琪<sup>2</sup> 王 飞<sup>2</sup>

1. 广东立胜综合能源有限公司; 2. 佛山科学技术学院机电与自动化学院

研究一种滚刷盘-高压喷水混合式光伏电池板清扫机器人, 该设计采用以单电动机为核心的一级传动结构带动二级传动结构的模式, 减少电动机的使用, 从而大大提高经济效益。独特的行走轮辅助轮垂直安装方式, 解决了传统清洁机器人在光伏组件上稳定性差的问题。

近年来, 随着疫情和战争对世界的冲击, 各国对传统能源的争夺愈发激烈, 为避免出现能源受限的局面, 对新能源的开发和利用就变得尤为重要。而新能源中, 太阳能凭借其优秀的经济性、便利性 & 普遍性占据着重要地位。根据国家统计局发布的相关报告, 截至2021年底, 全国太阳能发电装机容量23.8亿kW, 年均增长8.4%。2021年发电量8.5万亿kW·h, 年均增长6.1%, 可见国家对太阳能的重视。

然而灰尘等污染物在光伏板上的堆积, 不仅会使其发电效率降低到90%以下, 而且还会因为污染物分布不均引发暗斑效应, 可能导致光伏板表面热量散发程度的差异, 进而加速光伏板的老化甚至损坏。另外, 灰尘的酸碱成分会与光伏板内的SiO<sub>2</sub>及CaO成分在雨水条件下进行化学反应, 进而腐蚀光伏板。被腐蚀过的光伏板表面不再平整, 这又会引发漫反射效应, 这些影响会随着时间不断增长加剧。综上所述, 光伏板表面的清扫就成为了后期运维不可或缺的工作。

当前各发电站对光伏板表面的污染物清洁主要采取以下措施: 自然条件下的被动清洁、人工清洗、机械清洗、智能机器人清洁及更加先进的电除尘技

术。自然条件下的被动清洗和人工清洗都存在效率低下、清洁周期长和保障性差的问题。机械清洁是一种人工搭配大型机械设备的清洁方式, 清洁效率高、保障性好, 自动化程度较高, 但缺点同样十分明显, 比如投资巨大、需要专业人士操作和对场地要求苛刻等。电除尘技术目前还处在小规模运用阶段, 虽然其自动化程度和清洁效率很高, 但高昂的成本使其不可能短期内大规模应用。对比以上除尘方法, 智能清洁机器人凭借高程度的自动化、高保障性 & 较低的价格, 成为发电站进行清洁的首选方案。该装备由远程遥控设备、机械控制机构、驱动机构、传动机构和设置于传动机构上的清洁装置组成。不管是与传统清洁方式还是与当前最新的清洁方式进行比较, 其优势都相当明显。

基于智能机器人良好的经济效益和社会效益, 国内外各企业及高校都投入了很大的精力并取得了一系列的成果。在光伏运维方面起步较早的是欧美及日本, 市面上第一款成熟的相关商业产品是意大利UEMME公司推出的。2013年, 日本的Sinfonia Technology公司将最优路径算法加入其中, 率先实现了清扫智能化。同年, 以色列研发出一款在光伏板表面横向运动并清洁的机器人, 灰尘清洁度最高

基金项目: 国家自然科学基金资助(项目编号: 61803087)

可达到95%。相比之下，国内相关研究起步较晚，2014年，诚宇公司研发出首款商用的清洁机器人，该产品能无水清洁，但由于体积大和适用性差等原因很快就退出市场。2015年，新疆大学和新疆电联院联合开发了一款在光伏组件上横向运动并物理清洁的产品，但清洁效果有限。之后国内也一直在进行相关开发，但始终存在着成本高、智能化差和清洁效果不佳等问题。

在对国内外设计进行分析后，提出一款可适用于大中型发电站的清扫机器人，该机器人由单电机传动，可以大大节约成本，同时滚刷-喷水混合清扫的方式可以有效解决传统机器人清洁不佳的问题，最后其高程度的自动化水平能完全满足电厂对无人工作的需求。

## 系统组成

### 1. 系统总体结构及控制框图

光伏板及清扫机器人的整体布置如图1所示。

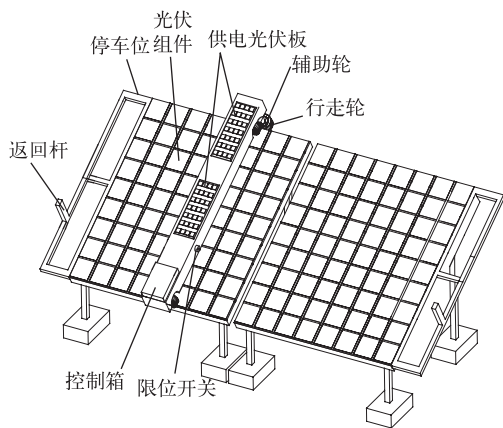


图1 整体布置图

清洁机器人在支持力和重力的共同作用下爬附在光伏板表面进行工作。本设备利用驱动和行走结构可实现在光伏组件表面横向运动，同时进行毛刷-喷水混合清扫，并通过自带太阳能电池板和锂电池实现自供电，无须外接电源，适合户外长期使用。

本设计由主控箱、行走机构、驱动机构、供电机构和信息采集机构组成。主控箱对各个系统机构进行控制，对驱动机构控制传输指令；驱动机构同时带动行走机构和清扫装置，实现运动和清洁功能；信息采集机构为控制箱采集外部信息，保证机器人的稳定运行。机器人结构示意图如图2所示。

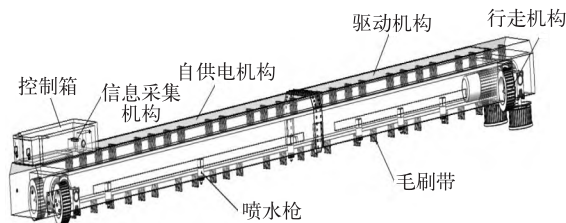


图2 结构示意图

## 系统结构设计

### 1. 行走机构

行走机构由主副行走轮、毛刷清洁带、供电光伏板、传动系统和喷水枪组成。主行走轮位于机器人两端，副行走轮安装在近电动机端。近电动机侧的主副轮垂直摆放，在传动系统的作用下，实现机器人在光伏组件上的横向运动。传动系统在工作的同时通过传动滚筒为毛刷清洁带提供转矩，协同喷水枪共同完成清扫工作。

为了充分利用太阳辐射能量，光伏组件都是倾斜安装而不是水平安装。倾斜安装的条件造成机器人清洁工作时侧翻的风险，同时随着安装倾角的增大，侧翻的风险随之增高。机器人在斜面上的受力分析如图3所示。

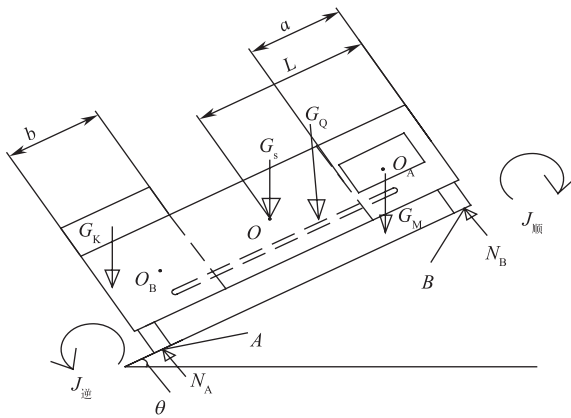


图3 爬附式结构受力分析

将机器人理想化为整体质量均匀分布的刚体，因为辅助轮所受到的支持力与光伏组件平行，用来防止机器人滑落，所以无法对防止侧翻起到作用。行走轮在运动时，受到的摩擦力与运动方向垂直，不会造成侧翻，故省略掉辅助轮支持力和轮胎摩擦力的受力分析。将机器人受力简化为平面图分析，图3中， $G_s$ 为机器人外壳所受的重力， $G_M$ 和 $G_K$ 分别

为机器人后端和前端受到的重力总和； $N_A$ 、 $N_B$ 分别为行走轮与光伏板接触时提供的支持力； $a$ 、 $b$ 分别为上、下端负荷长度； $L$ 为半外壳长度； $O$ 为机器人质量中心； $O_A$ 、 $O_B$ 分别为上、下端负荷质量中心； $\theta$ 为安装倾角。

将A、B视为铰支点，计算机器人绕A、B两点逆时针、顺时针旋转时的转矩为

$$\begin{cases} J_{\text{逆}} = 2N_B L - \cos \theta (G_s L + 0.5a G_M) - (L - 0.5a) g \cos \theta \int_0^{2L-0.5a} q dL \\ J_{\text{顺}} = 2N_A L - \cos \theta (G_s L + 0.5b G_K) - (L - 0.5b) g \cos \theta \int_0^{2L-0.5b} q dL \end{cases} \quad (1)$$

式中， $a=b=0.2$  m； $L=1.86$  m； $q$ 为清扫履带线密度， $q=2.3$  kg/m<sup>3</sup>； $G_s=348$  N， $G_M=202.86$  N； $G_K=145.04$  N； $\theta=15^\circ$ ， $g=9.8$  N/Kg。

对光伏板平行面竖直分析得支持力

$$\begin{cases} N_A = \left( G_K + \frac{G_s}{2} \right) \cos \theta \\ N_B = \left( G_M + \frac{G_s}{2} \right) \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中， $G_s=348$  N； $G_M=202.86$  N； $G_K=145.04$  N； $\theta=15^\circ$ 。由此可得 $N_A$ 、 $N_B$ ，联立式（1）可解出 $J_{\text{顺}}$ 、 $J_{\text{逆}}$ 。

转矩平衡时，由受力关系可得稳定时安全系数为

$$\alpha = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3)$$

式中， $\theta=15^\circ$ ；求得 $\alpha=1.03$ 。

定义机器人的安全系数为

$$\alpha_1 = \frac{J_{\text{逆}}}{J_{\text{顺}}} \quad (4)$$

安全系数 $\alpha$ 为无量纲数，当 $\alpha_1 > \alpha$ 时，即逆时针方向的压板转矩大于顺时针方向的压板转矩，此时机器人可牢固地爬附在光伏组件上。经过计算得到 $\alpha_1=1.34$ ，所以机器人在斜面上工作时不会发生侧翻的情况。

## 2. 主控箱

控制箱由微控制单元（MCU）、继电器、蜂鸣器、急停开关和通信天线等其他控制部件组成，主要功能是运动控制、通信连接和报警等。MCU使用意法半导体公司生产的STM32L162RETB，该芯片的高性能和超低功耗十分符合机器人的应用场景。限位开关在接触到返回杆和停车杆时将相应信号传递给MCU，MCU接受处理后将命令传输到继

电器，实现机器人在光伏组件的自动运行。同时，MCU可通过无线信号进行外部通信，外部控制器可对MCU发出指令，实现对机器人运动的远程控制。如图4所示。经过试验，收发指令在150 m以内均有效。

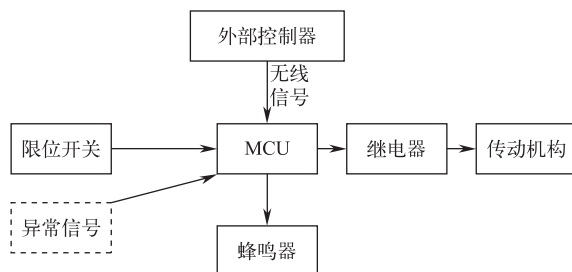


图4 MCU控制流程图

## 3. 信息采集机构

信息采集机构由超声波测距系统、限位开关和收发天线组成，超声波测距系统和限位开关均能采集清洁机器人的位置，超声波测距系统通过超声波判断机器人与返回杆及停车杆的距离，当超声波测距监测到机器人到达返回杆时，对MCU传输相关信号，MCU则立即对继电器发出命令，实现机器人的返回运动以避免其掉下光伏组件。超声测距监测到停车杆时，MCU发出相关指令完成自动停车。而限位开关通过物理接触返回杆和停车杆实现上述命令。

接收外部控制器的信号同样可以完成对机器人的控制，收发天线接收到信号后将其传输到MCU，MCU对信号进行分析处理后，对相应设备发出命令，现在可实现的远程控制功能有机器人的启停、单程运动、往返运动和周期性清洁。

## 4. 供电机构

供电机构由机器人外壳顶部两块供电光伏板、最大功率点跟踪（MPPT）和锂电池三部分组成。供电光伏板在机器人工作时将太阳能转换为电能。MPPT能够实时侦测太阳能板的发电电压，并追踪最高电压、电流值，使系统以最大功率输出，对锂电池进行充电。锂电池充完后作为电源，为主控板、驱动机构和信息采集机构供电，电池为主控板供电时要经过DC-DC转换模块，将24 V电压转换为MCU可接受的5 V电压。因为机器人自带供电板，所以只要在光照正常的情况下，都可进行自供电工作，不需外部充电，大大延长工作时长。供电流程

图如图5所示。

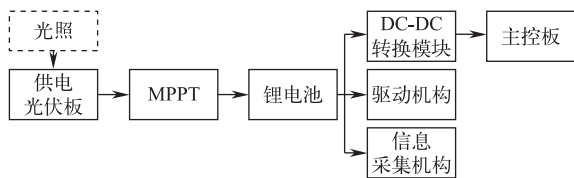


图5 供电流程图

#### 4. 驱动机构

驱动机构由一二级传动结构组成，一级传动结构由单个直流电动机和一级减速器组成，一级传动结构再通过传动轴对二级减速器输出转矩，将转矩传输到行走轮来实现机器人的横向运动。近电动机端的二级传动结构由一级减速器通过连接轴直接带动，远电动机端的二级传动结构通过一级传动结构对连接轴输出转矩并带动传动滚筒，再通过两端的传动滚筒与毛刷带进行传送带转动达到清扫目的。驱动机构是完全受MCU控制的，在MCU接收到返回杆和停止杆信号后，分别传输相应的命令到驱动机构，驱动机构的控制框图如图6所示。

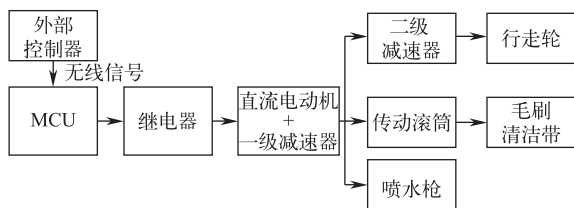


图6 驱动机构控制框图

为实现相应要求设计的电路，输入接口模块通过检测位置开关的状态，经过光电耦合器处理，给MCU输入高低电平。电动机控制电路通过控制两个继电器的开通和闭合实现电动机的正反转。输入接口模块和电动机控制电路分别如图7、图8所示。

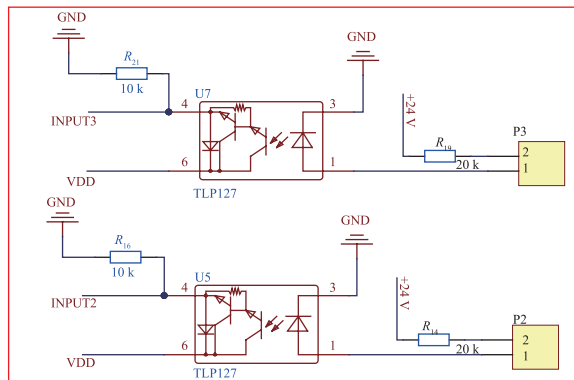


图7 输入接口模块

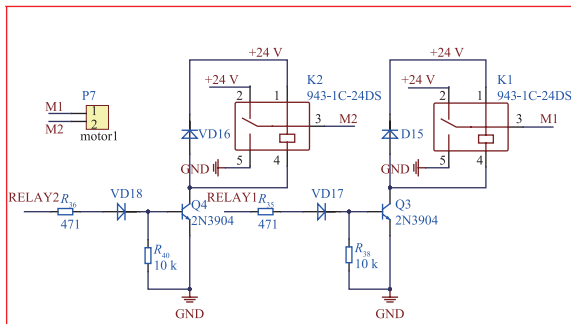


图8 电动机控制电路

### 机器人硬件介绍

#### (1) 行走轮辅助轮组合结构

本设计使用外径15 cm、高6 cm及内径10 cm尺寸的行走轮，同时使用外径17 cm、高6 cm的辅助轮。相比行走轮，辅助轮增设1 cm挡边防止清洁装置跌落下光伏板，表面使用柔软橡胶材料覆盖来增大摩擦，防止在行走过程中的相对滑动。同时选用的橡胶材料能防水侵蚀和空气氧化，可以很好地适应机器人的工作环境。行走轮与辅助轮组合结构如图9所示。

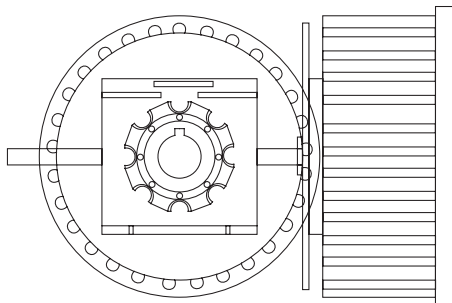


图9 行走轮辅助轮组合结构

#### (2) 传动滚筒

本设计采用外径为11.5 cm、内径为10.5 cm的支撑滚筒。滚筒长度为10.5 cm，前后端各一个，与二级减速器进行连接，通过二级减速器输出的转矩带动毛刷清洁带转动，实现毛刷清扫。传动滚筒如图10所示。

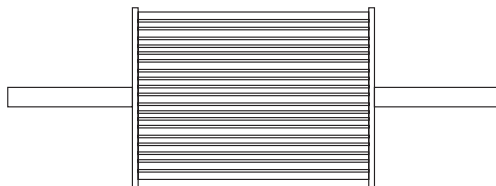


图10 传动滚筒

### (3) 一级传动结构

一级传动结构由单个电动机搭配蜗轮减速器组成, 本设计采用OB-5GU9RC型电动机用于将输入的电压信号转换为电动机轴上的机械输出量拖动被控制元件, 达到控制目的。蜗轮减速器选择的是GRV030型, 输入转速及输出转速分别为1 400 r/min和14~200 r/min, 是一种动力传递元件, 可与普通电动机、无级变速器等传动产品配套使用。一级传动结构三视图如图11所示。

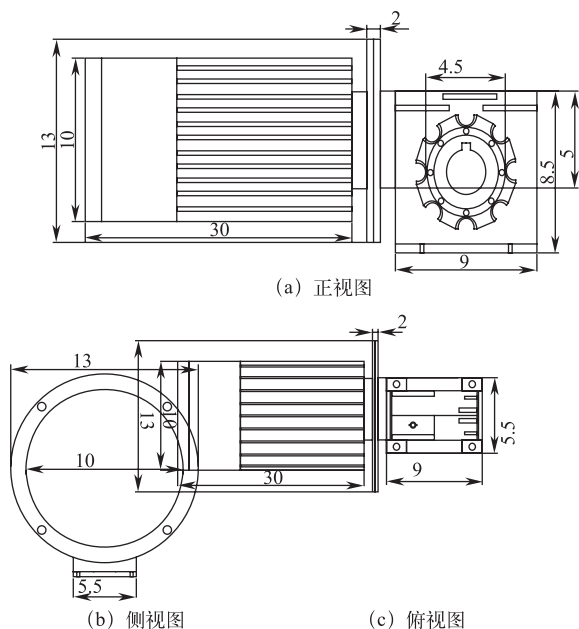


图11 一级传动结构三视图 (单位: cm)

### 控制系统的软件设计

根据清扫机器人的工作流程及硬件电路设计开发控制程序。控制程序如图12所示。

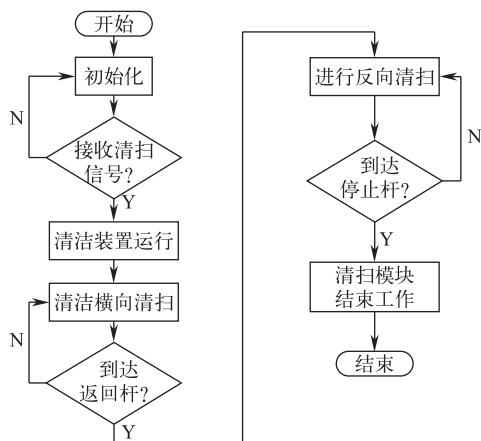


图12 控制系统软件流程图

### 实验结果

在实验室内搭建实验平台, 设计机器人行程: 机器人自动完成一个清洁周期, 在机器人接触到返回杆后按照预计行程运动, 没有出现掉落的情况, 同时机器人以3.5 m/min的速度进行清洁工作, 具有良好的清洁效率。此外, 机器人能用于实现清理太阳能光伏板边框、拐角污物, 光伏板上的灰尘、积雪、鸟粪和落叶等。结果如图13所示, 清洁效果良好。

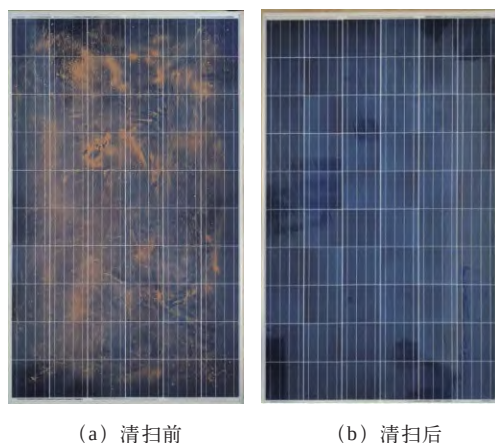


图13 清扫效果图

### 结束语

针对光伏电池板表面积灰问题, 本文设计了一种滚刷盘-高压喷水混合式光伏清扫机器人。机器人采用直列爬附式运动方式, 利用行走轮与辅助轮垂直安装的结构, 通过重力作用可以在光伏组件上平稳地进行清扫工作, 同时以单电动机为核心的一级传动结构带动二级传动结构, 不仅能减少电动机的使用, 大大提高经济效益, 同时稳定且简单的结构能合理分配所有可用资源并减小后期维修难度。在现场实验中, 机器人清扫效果良好, 已满足大部分光伏电站要求, 可以应用在各类型光伏电站中。接下来的研究会加入污染物识别及定位功能, 实现机器人更进一步的智能化。

(收稿日期: 2022-12-26)

### 参考文献

- [1] 白雅静. 大型并网光伏电站AGC/AVC多模式自动控制系统设计与实现[J]. 电气应用, 2021, 40(10): 78-86.