

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2025.04.006

引用格式: 夏小明, 杨天祥, 赵俊程, 等. 低成本履带式光伏板清洁机器人设计与控制应用[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(4): 48-61.

低成本履带式光伏板清洁机器人设计与控制应用

夏小明, 杨天祥, 赵俊程, 葛亚飞

(江苏海洋大学 海洋工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 针对光伏板在使用过程中其表面易被灰尘等颗粒覆盖进而大幅度影响光伏板发电效率的问题, 设计了一种低成本的光伏板清洁机器人。该机器人以履带式底盘机构为载体, 使用 STM32 单片机作为主控, 实时采集小车姿态与底盘编码转速信息; 同时采用双闭环 PID 控制方式, 实现了对机器人行进方向、转向、移速和清洁毛刷转速的稳定控制。在硬件感知能力有限的条件下, 利用清洁刷的 PWM 占空比数值变化检测光伏板边缘, 有效防止跌落, 并基于此设计了一种适用于该机器人的清扫路径规划方案, 可对光伏板表面的覆盖物进行自动清洁。实验结果验证了所提出方案的可行性。

关键词: 光伏板清洁机器人; 清洁路径规划; 边缘检测; 低成本

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2025)04-0048-14

Design and control application of a low-cost tracked photovoltaic panel cleaning robot

XIA Xiaoming, YANG Tianxiang, ZHAO Juncheng, GE Yafei

(School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: To mitigate the significant decline in power generation efficiency caused by dust and particulate accumulation on photovoltaic (PV) panel surfaces during operation, this study presents the design of a low-cost autonomous cleaning robot. The robot employs a tracked chassis as its mobility platform and is controlled by an STM32 microcontroller, which facilitates real-time acquisition of posture and encoder speed data. A dual closed-loop PID control strategy is implemented to ensure precise and stable regulation of the robot's trajectory, turning, translational velocity, and brush rotation speed. In light of limited onboard sensing capabilities, the system leverages variations in the PWM duty cycle of the cleaning brush to detect panel edges, thereby effectively preventing accidental falls. Building on this mechanism, a tailored path planning algorithm is developed to enable efficient and autonomous surface cleaning of PV panels. Experimental evaluations confirm the effectiveness and feasibility of the proposed robotic system and its cleaning strategy.

Key words: photovoltaic panel cleaning robot; cleaning path planning; edge detection; low-cost

太阳能光伏板为人类较早投入研发的清洁能源产业之一, 产业链成熟、适应范围广且造价低廉^[1]。

据国家能源局数据, 截至 2024 年底, 我国太阳能发电装机容量约 890 GW, 同比增长 45.2%。随着光伏

收稿日期: 2025-01-14; 修订日期: 2025-06-25

基金项目: 江苏海洋大学研究生科研与实践创新计划项目(KYCX2024-07)

作者简介: 夏小明, 讲师, 博士, 研究方向为无人船、水下机器人编队控制, (E-mail) xiaxiaoming@jou.edu.cn。

通信作者: 杨天祥, 硕士研究生, 研究方向为机器人控制与路径规划, (E-mail) yangtx_7@126.com。

装机量的快速增长,关于其维护问题也日益显现,尤其以表面被灰尘、沙石等颗粒物遮蔽的问题最为突出,若不及时清理会导致发电效率大幅降低。林志鸿等^[2]对某地半年未清洗的光伏组件进行研究,发现表面积灰导致发电功率的损失比率均值高达15.27%。孟繁旭^[3]对灰尘成分进行研究发现,积灰中含量较多的成分主要有石英、云母、钠长石和粒硅钙石等;并对在不同环境因素下的光伏板积灰进行研究,发现随着积灰密度增加,辐照光强度越大,输出功率的下降幅度越显著。此外,对于运行在沙漠地区的光伏电站,光伏板表面的沙尘堆积问题可能导致电力效率降低高达80%^[4-5]。

传统由人工用扫帚、抹布等工具进行清洁的方式维护效率低、成本高,且若维护不当可能造成光伏板表面损坏。因此,目前已有各种针对光伏板清洁问题的方案被提出^[6-7],如采用半自动旋转清洁刷、履带式清洁机器人、导轨式清洁机器人、负压吸附式清洁机器人以及各类形式的结合等。半自动旋转清洁刷采取长杆连接电机驱动清洁刷旋转并辅以喷头进行喷水的方式,依靠人力移动刷头清扫表面灰尘,自动化程度不高,同时,杆子尺寸会制约清理范围。王冠杰^[8]提出了一种通过导向轮进行轨道式滑动的自动清洁机器人,将光伏板上下两侧作为导轨,进行双向运作完成清灰任务,但受限于结构形式,仅适用于太阳能电池板数量较多且集中的光伏电站。Ghodki^[9]采用红外传感器,开发了基于机械臂的自动除尘系统,借助轨道在光伏面板间移动机械臂,但需铺设导轨,不便于安装拆卸。Zhao等^[10]设计了一种基于辅助移动机架的真空式光伏组件清洁机器人,采用可折叠式设计,导向轮与传动装置配合进行移动清洁,但整体结构上仍然受制于光伏板的配合,不适用于多行非密集排布的光伏板。芮宏斌等^[11]设计了车载式光伏阵列清洁机器人,但整体系统尺寸大,能耗相对较高,面对复杂地形和光伏板排布空间局促情况时适配度不佳。张久超^[12]以及蒋利雷^[13]提出负压吸附式光伏板清洁机器人,减少了清洁过程中的滑移风险,引入算法提高了整体机构的运行灵活性,但随之而来的硬件成本也大幅度上升,对于工程应用的稳定性也需进一步验证。此外,还有一些利用其他原理或结构的清洁形式被提出。如Lu等^[14]设计了一种基于线性压电驱动器的光伏板清洁系统,利用压电原理调节刮水器和太阳能板之间的压力,并通过振动驱动刮水器清理太阳能板表面的灰尘;

Kawamoto等^[15]提出了一种用于光伏板的静电清洁系统,将高电压施加于光伏板表面的玻璃层中,利用静电力排斥和推离覆盖在板上的沙子,进而达到清洁目的,但该系统在面对非干燥的光伏组件表面时清洁效果不佳。

履带式清洁机器人具有体积小、灵活度高的优势,可利用智能算法实现自动化清洁。近年来有诸多的改进形式被提出。如徐晨阳等^[16]提出的自动清洁机器人具有现实意义,但对于应用在实际环境下可能伴随的情形仍有待改进余地,这些未被考虑的因素可能会导致自动清洁任务失败。蒋李亚等^[17]提出的基于光电视觉的清洁机器人,将机器视觉应用于光伏板清洁使机器人,进一步提高了对外界的感知能力,但由于需要视觉传感器以及搭载配套的高性能处理器,成本仍然较高,且图像传感器易受环境光的影响。Bisht等^[18]提出了一种在履带上增加黏附机构的清洁机器人,在垂直的玻璃幕墙实验中展现出了良好的吸附能力,但结构上较为复杂,传动履带和底盘中心均需要安装多个吸附装置用于自身的移动和旋转,成本较高,稳定性有待进一步验证。Antonelli等^[19]设计了一种用于沙漠地区清洁光伏板的自主机器人,在机器人前后端各安装有清洁刷用于无水清洁,使用超声波传感器定位机器人的清洁路径,在硬件成本上有所降低,但由于传感器的特性,在光伏板的外侧边缘需要间隔一定距离放置垂直障碍物挡板用于反射超声波,以换算得出机器人的当前位置,安装维护成本仍然较高,且路径切换轨迹需提前设定。

在实际应用场景中,光伏阵列的安装方式往往复杂多样,光伏板排列的间距可能狭窄拥挤,并排面积大,安装位置相对较高。因此,为了适配不同光伏板的安装方式,需要对小型、灵活的清洁机器人进行探索,实现自动化清洁,使其应用范围更加广泛。同时,应考虑市场需求,进一步降低运维以及硬件成本。

本文设计的光伏板清洁机器人,主要基于市售常用材料设计组合而成,硬件结构简单,采用了较少数量的传感器与电机,结合工程导向选用高性价比的电子元件,进一步降低了机器人成本与维护成本,无需铺设轨道,无需借助外部传感器或标定参照物即可对光伏板表面的沙尘覆盖物进行自主清洁。具体形式为:基于履带式机构为运动执行载体,通过大扭矩编码电机驱动履带,机器人底盘前端置有旋转清洁刷,由带有霍尔编码器的直流电机传动控制,以

低成本 32 位单片机作为主控,实时采集小车位姿与电机转速信息。同时,为了避免机器人在行进过程中底盘履带遭遇侧滑等问题进而影响直线行驶,采用双闭环偏航-速度 PID 控制方式,实现了对机器人行进方向、转角和移速的稳定控制。此外,在检测到顽固灰尘时,由于清洁刷所受阻力存在差异,将作用于清洁刷所连接、传动的电机上,可通过实时检测单位时间内的电机编码脉冲数,根据刷子的载荷利用速度 PID 控制器增加或降低 PWM 占空比,自动调节电机转矩、转速,保持清洁刷的稳定运行。使用红外传感器作为车体的左右侧与尾部的防跌落感应。另外,在不增加额外传感器基础上,设计了通过监测驱动清洁刷 PWM 占空比数值的方式,防止机器人前进至边缘时跌落。最后,针对该低成本机器人设计了一种与之适配的自动清洁路径规划方案。实验结果验证了所提出设计方案的可行性与有效性。

1 机器人整体设计

本文设计的机器人样机整体长为 27.5 cm, 宽为 27 cm, 高为 12.5 cm, 总质量为 4 kg。各部分硬件结构如图 1 所示。

1.1 底盘执行机构

光伏板清洁机器人的底盘主要由金属片、大扭矩电机、履带等组合而成。使用履带式底盘具有负载大、稳定性高、转向灵活等优点。由于履带为硬质塑料,存在滑移现象,故在每节间隔的缝隙处粘贴有条形硅胶,以增加在光伏板上的摩擦阻力。使用大扭矩直流编码电机驱动履带转动,该电机减速比为 1:30,

额定扭矩为 $0.25 \text{ N}\cdot\text{m}$, 电机经齿轮减速后的最大输出转速为 $330 \text{ r}/\text{min}$ 。实测在 $30 \text{ r}/\text{min}$ 转速下即可满足工况,同时电机带有霍尔编码器。使用额定电压 12 V 、容量 $2550 \text{ mA}\cdot\text{h}$ 的锂电池为机器人供电。

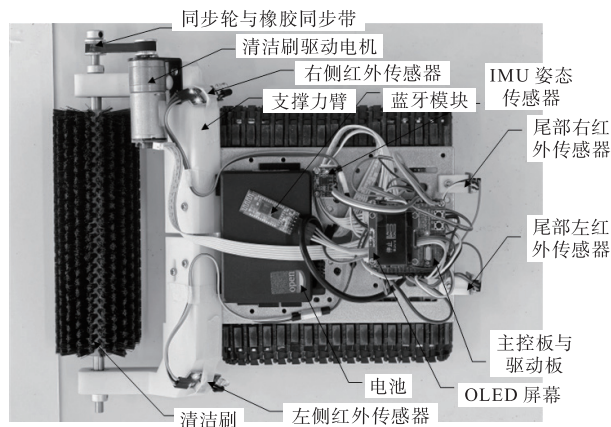


图 1 清洁机器人总体结构

Fig. 1 Overall structure of the cleaning robot prototype

1.2 清洁刷装置设计

清洁刷装置主要由清洁刷、3D 打印支撑力臂、驱动电机、轴承与同步齿轮等组合而成。

清洁刷采用定制工业辊刷,刷毛为中等硬度的尼龙材质,在不损伤光伏板表面的前提下对其表面覆盖的灰尘进行有效清扫,其尺寸如图 2 所示。设计刷毛的长度为 20 mm ,清洁刷中刷毛覆盖部分的长度为 170 mm 。刷体两端延伸出有金属轴,用作清洁刷的旋转支撑,其中一端作延长并加工为 D 字型轴用以固定旋转同步轮。

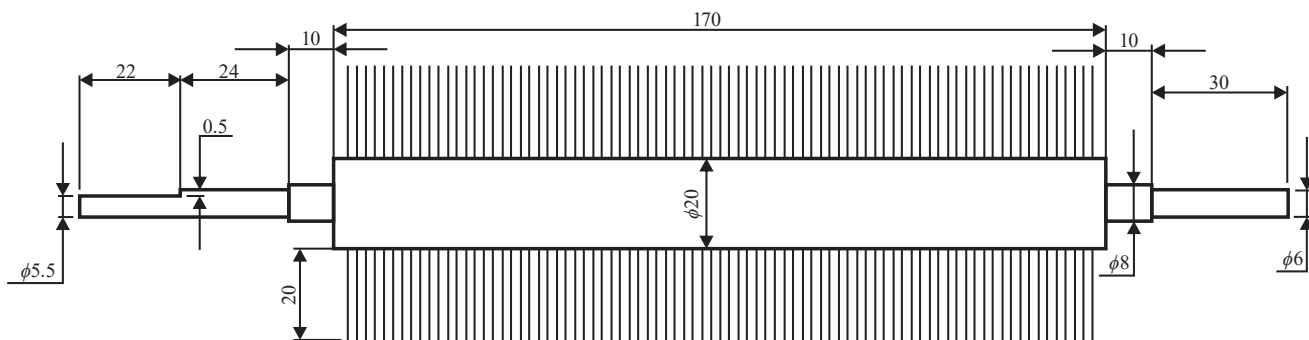


图 2 清洁刷结构设计 (单位: mm)

Fig. 2 Cleaning brush structure design (unit: mm)

在车头前端延伸出两个左、右支撑臂用于搭载清洁刷,支撑臂由树脂材料进行 3D 打印光固化而成,如图 3 与图 4 所示。同时,为避免刷体金属轴在

旋转过程中对支撑臂直接摩擦,在金属轴与力臂接触面间设计有轴承孔,分别配合使用带挡边与普通轴承,串联填充贯穿的孔道作为过渡。在支撑臂主

干部分均采用了镂空与加强筋设计, 有效减少了本体质量和打印材料的开销, 力臂主干上的长条孔位为可调节长度设计, 固定在车体前方时可根据需求调节向外延展的长度。此外, 在右支撑臂上预留有电机支架固定孔, 通过电机支架固定直流编码电机。该电机额定扭矩为 $0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$, 额定最大转速为 260 r/min , 减速比为 $1:34$, 在电机输出轴上安装同步轮, 使用橡胶同步带与清洁刷金属轴所固定的同步轮建立传动关系。同时, 在力臂的轴承孔外侧各使用了限位环以固定外侧的带挡边轴承。组装完成后的清洁刷装置, 刷体轴中心距离地面为 55 mm , 保证了刷毛与地面留有 $3\sim 5 \text{ mm}$ 的接触长度。

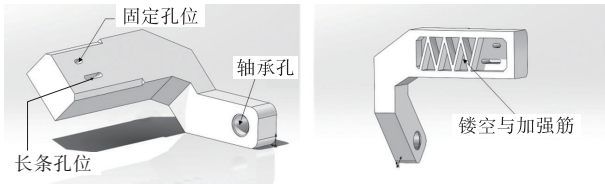


图 3 左支撑力臂结构
Fig. 3 Left support lever structure

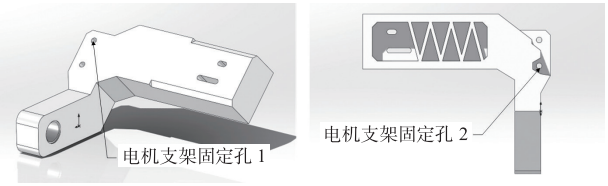


图 4 右支撑力臂结构
Fig. 4 Right support lever structure

1.3 防跌落设计

机器人带有行驶至光伏板边缘的防跌落设计, 在机器人前部由检测清洁刷驱动电机的 PWM 占空比大小实现, 同时在车体尾部与左右侧各设置了红外检测传感器, 共计 4 枚。红外检测传感器的直线探测距离可达 9 cm 。尾部红外传感器采用 3D 打印支架配合, 与机器人车体底平面相垂直安装, 其红外收发头距车体底平面为 2 cm 。

2 机器人控制系统设计

图 5 展示了机器人控制系统各部分的电子硬件组成。

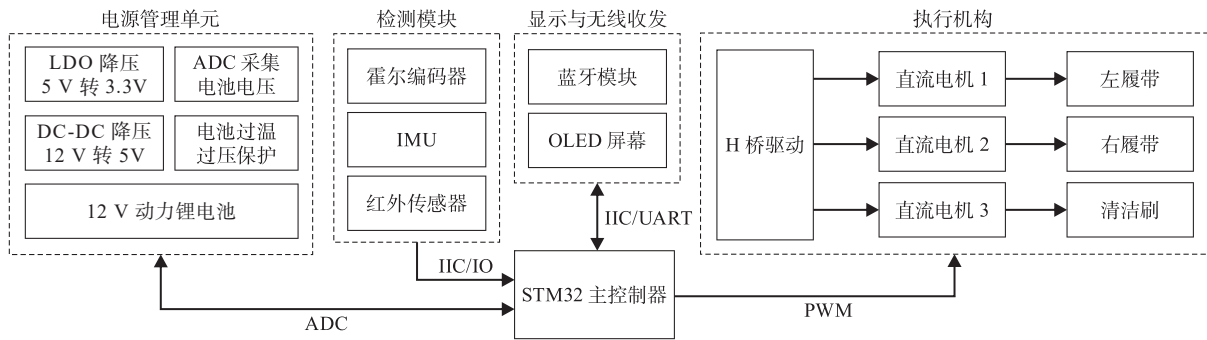


图 5 机器人控制系统运行框图
Fig. 5 Block diagram of robot control system

2.1 电子硬件设计

2.1.1 执行机构

机器人的执行机构主要分为运动与清洁两个部分。运动部分为控制底盘下方的两个电机旋转, 进而驱动各自侧方的履带, 使机器人呈现不同的运动状态; 清洁部分负责驱动电机通过同步带传递力矩以控制清洁刷的旋转速度与旋转方向。两部分共同使用了一块集成 TB6612 芯片的 H 桥电机驱动模块, 主控制器向驱动模块发送 PWM 与方向信号, 即可控制电机转速与正反转方向。

2.1.2 主控制器

机器人的主控制器负责数据处理与控制。

该部分采用了成本低廉的 32 位单片机, 型号为 STM32F103C8T6, 运行主频为 72 MHz 。片上共有 4 个 TIM 定时器, 使用 TIM1 输出 3 路 PWM 信号, 分别提供给底盘两个电机与清洁刷电机作转速控制, 其余 3 个 TIM 定时器分别用作各电机的编码脉冲捕获。霍尔编码器产生的编码脉冲经单片机 I/O 口输入后会进行片上的硬件滤波 (设为 10), 对脉冲的上升/下降边沿进行计数, 将原脉冲进行 4 倍频输出, 增加控制精度。TIM1 计数值设为 3 599, 即设置 PWM 脉冲频率为 20 kHz , 开启溢出更新中断, 用作系统状态运行的时间基数, 以周期性地执行相关任务。开启片上的 UART 外设, 负责蓝牙模块的数据收

发。使用软件 IIC 驱动 OLED 屏幕。在开发过程中,采用 HAL 库以提高开发效率,在 STM32CubeMX 软件中完成相关的初始化配置,使用 Keil5 进行代码编写。

2.1.3 电源管理单元

电源管理主要分为 DC-DC 降压、LDO 降压、ADC 采集监测锂电池电压 3 个部分,负责整个系统运行的电量供给。DC-DC 降压采用 RT8289 芯片,接入锂电池经降压后向后级输出 5 V 电压以及最大 5 A 电流,同时,所得的 5 V 电压将提供给 LDO 降压芯片、蓝牙模块、电机驱动芯片等使用。LDO 降压则采用 RT9013 线性稳压芯片,将 5 V 电压再次转化为 3.3 V 电压,供给单片机、OLED 显示屏、IMU 传感器等。在锂电池输入端经由两个高精度电阻分压后,连接至单片机的 ADC 引脚通道不断采集电池电压,实时监测电池状态。此外,具备电池保护功能,如电池温度升高至一定阈值则关闭电源输出。

2.1.4 检测模块单元

检测模块主要包含检测电机转速的霍尔编码器、负责获取机器人姿态的 MPU6050 传感器和用于机器人左右侧、尾部防跌落的红外检测传感器,单片机通过 I/O 端口连接至传感器读取数据。对 MPU6050 使用 IIC 进行数据读取,同时,由于 MPU6050 内部并未集成磁力计,因而随着时间推移 YAW 将会产生零点漂移。本文在设计时使用了官方所提供的 DMP 解析库来从软件上抑制该问题,实测在上电初始化数秒内 YAW 会出现较大波动,此后数

值保持相对稳定。以上传感器的数据不断实时地反馈给单片机以进行控制决策和执行逻辑切换。

2.1.5 显示与无线收发单元

该部分包含 OLED 显示模块与 HC-05 蓝牙收发模块。OLED 显示屏负责显示机器人当前的运行状态,如机器人的运动方向、电机运行的 PWM 占空比、位姿参数等。蓝牙收发模块则主要负责与上位机端进行无线通信,通过 UART 串口转发任务指令给主控制器,实现数据交互。

2.2 软件算法设计

2.2.1 控制逻辑设计

图 6 为光伏板清洁机器人的任务执行流程图。当机器人启动完成初始化后,放置于光伏板上的起点处区域,此时由无线模块接收上位机指令,当上位机下达自动清洁指令时会进入自动清洁模式,否则为手动遥控清洁模式。在自动模式下,机器人采用状态机跳转方式,根据 IMU 姿态传感器的引导以及清洁刷、红外传感器的限位修正进行纵向的往返清洁,一旦在最后一次纵向清洁或进行路径切换过程中探测到机器人右侧为光伏板的边缘,即判定为清洁任务完成,进入等待其他指令状态,具体实现步骤将在“2.2.4”节阐述。在手动模式下,清洁机器人的运行通过无线遥控实现,机器人根据指令进行前进、后退以及左右转、清洁刷的启停,当检测车体前后方为光伏板边缘后,自动进行防跌落控制,等待其他指令。此外,在自动模式运行全过程中,上位机端可随时介入进行手动控制接管,以防止意外情形。

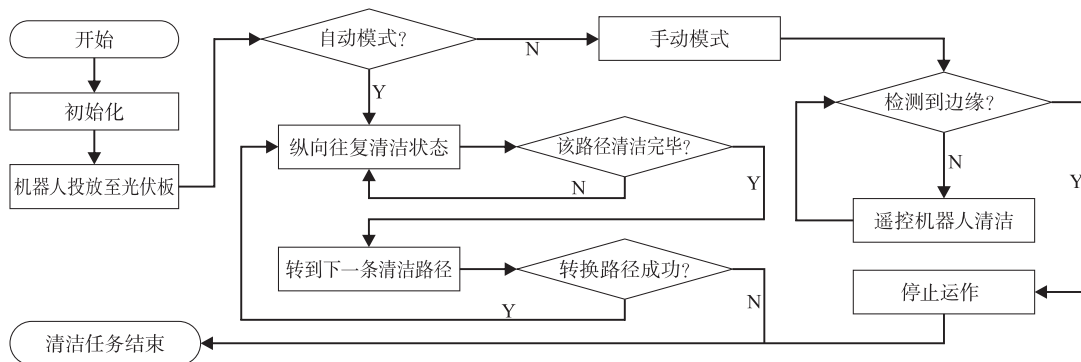


图 6 任务执行流程图

Fig. 6 Flow chart of task execution

2.2.2 控制器设计

本文使用增量式 PID 作底层控制器设计,其表达式为

$$\Delta U(t) = K_p [e(t) - e(t-1)] + K_i e(t) + K_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)]. \quad (1)$$

式中: $e(t)$ 为当前 t 时刻期望与实际的误差; $e(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻期望与实际的误差; $e(t-2)$ 为

$t-2$ 时刻期望与实际的误差。 K_p, K_i, K_d 分别负责调节比例、积分、微分环的增益大小, 合并输出当前时刻的控制量 $U(t)$ 。与位置式 PID 相比, 增量式 PID 仅与前 3 个误差相关, 无需积分限幅, 因而减少了超调量, 过渡过程更平滑, 不会带来积分过饱和问题, 仅需对控制器的输出进行限幅, 动态性能相对更强。

在机器人行进过程中, 仅对底盘电机的转速进行控制并不能保证两侧履带的运行轨迹一致。在实际工况下, 虽然履带上置有防滑硅胶贴, 但在有灰尘等颗粒覆盖的光伏板表面上运动时仍可能会伴随有侧滑现象, 同时, 由于机器人的自身配重分布不均等因素影响, 无疑会加剧某侧履带滑移, 最终导致机器人行驶方向发生严重偏离, 继而无法保持清扫路径为期望的路线, 清洁任务失败。针对以上行驶过程中航向偏离问题, 在控制电机速度 PID 控制器基础上, 增加了偏航角 (YAW) PID 控制器, 组成串级双闭环的偏航 - 速度 PID 控制系统, 如图 7 所示。

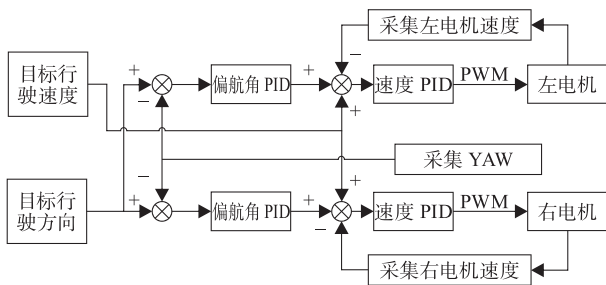


图 7 底盘电机控制器框图
Fig. 7 Block diagram of motor controller

图 7 为机器人底盘左右电机控制的运行框图, 执行频率为 50 Hz。为便于计算, 反馈回路中的采集电机速度数值为获取单位时间内的编码脉冲个数 N 。设电机速度为 R_p (r/min), N 与 R_p 的转换关系为

$$N = \frac{R_p \times P_r \times 4 \times R_d \times T}{1000 \times 6} \quad (2)$$

式中: P_r 为电机所搭载的霍尔编码器线数, 本文所使用的编码器均为 13 线数, 在 STM32 中对编码脉冲的捕获设置为 4 倍频, 需对 P_r 再次乘以 4; 因大扭矩直流电机通常由齿轮减速的方式将力矩增大后传递至电机输出轴, 故在计算脉冲个数 N 时需考虑减速比 R_d , 大小由电机参数确定; T 为控制系统执行周期的时间, 取 20 ms, 在分母中对单位进行统一, 将 R_p 单位由 r/min 换算至 r/ms。反馈回路中的采集 YAW 为从 IMU 中获取 YAW 角度, 精确到小数点后一位, 频率为 12.5 Hz。

在初始状态, 设置期望机器人运行的偏航角, 通过在底盘上的 IMU 传感器不断检测自身的当前 YAW 角度, 与期望偏航角方向作比较得到误差后, 输入到偏航角 PID 控制器中计算出底盘电机的差速值, 输入至设定目标的行驶速度上作加权, 然后一并转化为控制单位时间内的目标编码数, 输入给速度 PID 控制器, 计算得出 PWM 占空比输入给相应的电机执行, 再不断采集当前单位时间内的电机编码脉冲数与机器人 YAW 方向进行反馈, 完成控制闭环。以下对本文机器人的偏航角基准与方向变换作阐述。

如图 8 所示, 设机器人当前的偏航角为 Cur_Yaw , 目标的偏航角为 Tar_Yaw , 当前偏航角与目标偏航角之间的偏航角误差记为 Err_Yaw 。机器人本体上的 IMU 所解算出的偏航角为: 以初始化时刻的 Cur_Yaw 方向为 0° 基准, 机器人进行左旋时 YAW 为正值, 变化范围为 $[0^\circ, +180^\circ]$, 机器人右旋时 YAW 为负值, 变化范围为 $[0^\circ, -180^\circ]$, 故在计算当前偏航角与目标偏航角之间的方向误差时需作最小转向角度的变换, 即设计式 (3) 的转化关系:

$$\begin{cases} Err_Yaw = Cur_Yaw - Tar_Yaw, \\ Cur_Yaw \in [-180^\circ, +180^\circ], Tar_Yaw \in [-180^\circ, +180^\circ]; \\ \text{if } (Err_Yaw > 180^\circ), Err_Yaw = Err_Yaw - 360^\circ; \\ \text{else if } (Err_Yaw < -180^\circ), Err_Yaw = Err_Yaw + 360^\circ. \end{cases} \quad (3)$$

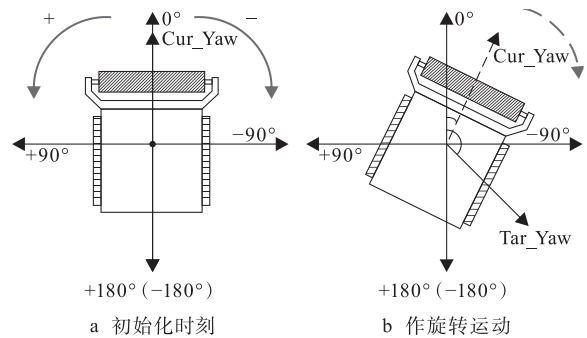


图 8 机器人作旋转运动时 YAW 方向变化示意图
Fig. 8 Schematic diagram of YAW direction change when the robot makes rotational motion

在程序判断时, Err_Yaw 值为正则底盘需顺时针旋转, 值为负则底盘需逆时针旋转以减少误差。

与底盘控制器类似, 清洁刷控制同样采用闭环 PID 策略, 通过采样驱动电机的单位时间脉冲数来调节 PWM 占空比, 从而使刷体维持稳定速度旋转。此控制器的执行频率为 50 Hz。

2.2.3 边缘检测防跌落设计

(1) 利用清洁刷检测边缘。设置清洁刷的期望转速后,当清洁刷在光伏板上运行时,由于摩擦阻力的影响以及控制器对所需目标转速保持稳定的动态调节,驱动清洁刷以设定速度旋转时的PWM占空比与清洁刷处在悬空运行时的PWM占空比大小存在差异。

对于采用硬质刷毛与地面留存有5 mm接触长度的机器人样机,在正常的光伏板上执行清洁过程中,一旦运行中清洁刷不再受到摩擦阻力作用而突然出现悬空运转状态,则对应着机器人前方行进至光伏板边缘。基于以上思路,利用这一特性进行机器人在光伏板上前进过程中的防跌落设计,即一旦检测到驱动清洁刷的PWM占空比数值出现断崖式下降且低于一定阈值,则立即采取制动措施,停止前进,并失能上位机的前进控制,等待下一步控制指令;当检测到清洁刷的PWM数值再次高于该阈值时,使能上位机的前进控制,即可有效预防机器人前方的跌落风险。

(2) 利用红外传感器检测边缘。在机器人尾部安装有2枚红外传感器,与车体底平面相垂直,红外探头向下发射红外光,若底部有光伏板,则接收头将会接收到反射光,反之,则代表底部无光伏板,即机器人尾部已抵达边缘,应立即制动。同理,在机器人左右两侧也各倾斜安装有1枚红外传感器,用于机器人左右侧防跌落。

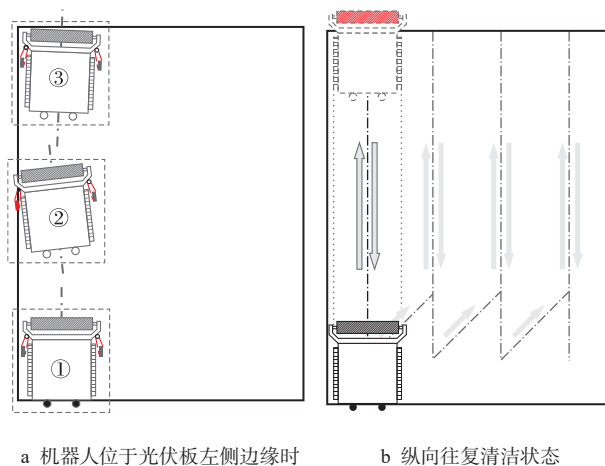
2.2.4 自动清洁模式设计

由于所述清洁机器人采用低成本设计,其搭载的传感器较为精简,对外界的感知会在相当程度上受限,故本文提出了一种适用于低成本硬件设计的光伏板自动清洁路径规划方案^[20-22]。

(1) 起始时刻,机器人投放于光伏板左下角,即位于图9a中的序号①虚线框内,待IMU读数平稳后初始化结束。图9b中,黑色点虚线为机器人行驶的轨迹。在收到自动清洁指令后,开始纵向往复清洁状态,记当前的YAW数值为期望角,开启清洁刷且旋转方向与机器人前进运行方向一致,同时助力车身爬升。前进过程中不断利用IMU修正为期望前进方向角,保持行进路线为稳定直线。

(2) 若在行驶过程中出现图9a中序号②虚线框内的状态,则表示此刻机器人的左侧红外探测到了边缘,存在跌落风险。应在期望偏航角方向基础上向右作微小偏离,直至左侧红外传感器不再检测

到边缘时,即图9a中的序号③虚线框内的状态,再次恢复原期望的偏航角方向行驶,依此可反复多次执行。



a 机器人位于光伏板左侧边缘时

b 纵向往复清洁状态

图9 自动清洁模式运行路径
Fig. 9 Running path of automatic clean mode

(3) 机器人在光伏板上的实际运行工况如图10所示。当机器人纵向行进抵达至光伏板顶端边缘时,检测到清洁刷空转,机器人立即制动停止并作倒车后退运动,原路返回。此时,清洁刷相对于机器人的运行方向为逆向旋转,若机器人车体方向出现了倾斜,如图10c所示。由于清洁刷材质为中等硬度,且刷毛与接触面之间留有3~5 mm的接触长度,因此,在清洁刷的反向旋转力与机器人后退移动力共同作用下,刷毛会在光伏板边缘抵住车身,继而消除了偏离误差,此后再对刷毛进行与车身后退移动朝向的同向旋转即可使刷毛助力机器人驶离光伏板顶部边缘,达到修正纵向行驶方向的效果。随后,在原路倒车返回至光伏板底部过程中,再次开启清洁刷并反向旋转,使清洁过程更为精细、有效。

(4) 在返回至光伏板底端边缘时,机器人的尾部红外将会检测到悬空状态,此时立即制动停止。但在实际的纵向后退清洁过程中,可能会由于侧滑,同时伴随IMU零点漂移、控制死区与清洁刷摩擦力、重力等因素的叠加,导致期望轨迹与实际轨迹之间出现偏离,如图10a所示。故随后可能出现机器人尾部两颗红外传感器中的某一颗率先检测到边缘情形,如图10b所示,右红外传感器率先检测到了边缘(标注为黑色),即该时刻机器人相对于光伏板发生了右倾。此时保持右履带静止,左履带进行运动,使车体作左旋运动,直到左红外探测到边缘时立即停

止, 便可在一定程度上让车体朝向修正回期望纵向轨迹方向。当机器人发生左倾时同理。

在进行制动停止后, 再次向前行驶小段距离直至尾部红外不再检测为边缘状态, 此时依靠 IMU 导航作基准利用控制器对机器人向右顺时针旋转 θ 角度, 这里取 $\theta=45^\circ$ 。

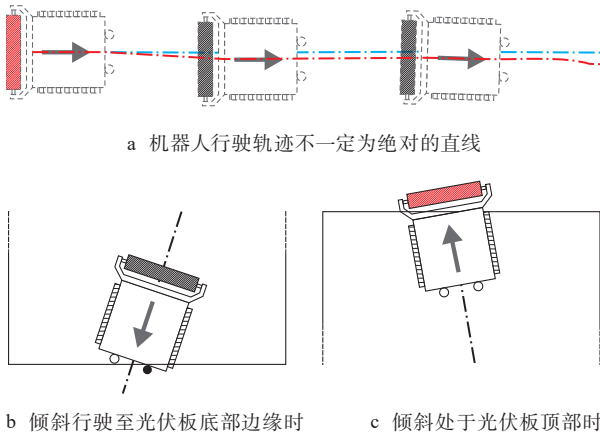


图 10 机器人在光伏板上的实际运行工况
Fig. 10 Actual operating conditions of the robot on the photovoltaic panel

(5) 旋转 θ 角度完成后, 机器人向前行进, 以一定速度控制行驶时间 T_s 向前行驶距离 L , 如图 11 所示。距离与时间的计算方式为 $L = \frac{R_p \times T_s \times 2\pi r}{60}$ 。其中 r 为底盘电机输出轴中心至履带接触面底部的距离, 为保证对光伏板的清洁覆盖程度, 应满足 $L \leq \frac{L_c}{2 \cdot \sin \theta}$; L_c 为清洁刷刷毛覆盖部分的长度 (见图 2), 可根据实际工况对 θ 与 L 进行取值, 以调节每条纵向清洁轨迹线的间隙。如 $L=17 \text{ cm}$, 又 $R_p=24 \text{ r/min}$, $r=2 \text{ cm}$, 故 $T_s \approx 3.4 \text{ s}$ 。而在实际应用中, 通过运行时间和速度来控制机器人移动指定距离的方法可能存在误差, 导致车体实际移动距离常大于或小于计算值。因此, 机器人在纵向往复清洁时, 轨迹线之间难以保持严格的等间距。故为了让清扫面积尽可能地覆盖整块光伏板, 需要通过控制 T_s , θ 与 L , 使每条纵向清洁轨迹线的间距小于 L_c , 这样在清洁过程中便形成了重叠交叉的覆盖面积, 仍可以保证对整块光伏板清洁的有效性。

(6) 在上一步骤完成后, 机器人向左逆时针回转角度 θ 至目标方位, 继续向前直线清扫, 直至抵达光伏板顶部边缘, 以此类推, 不断往复循环 (3)~(6) 步骤, 直到满足任一终止条件: 机器人在光伏板底部试

图向右侧行驶以转换清洁路径时检测到边缘, 或在纵向清洁过程中检测到车体右侧为光伏板边缘。

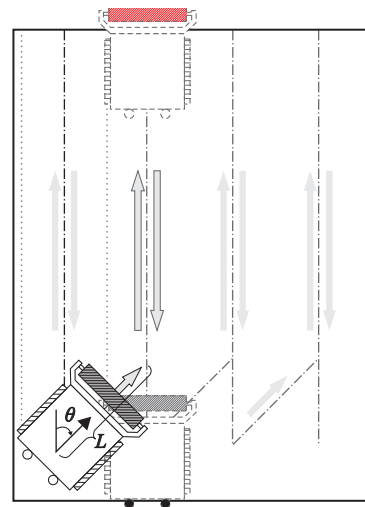


图 11 机器人转换清洁路径
Fig. 11 Robotic path switching for cleaning

(7) 机器人位于光伏板右侧边缘时状态与自动清洁模式形成的路径轨迹如图 12 所示。若在转换清洁路径时清洁刷触碰到光伏板边缘, 则立即制动停止, 如图 12a 中的序号④或⑤的虚线框内状态所示。此时, 向车体正后方后退, 直到不再检测到处于光伏板边缘状态后停止运行, 自动清洁结束; 若在纵向清洁中检测到右侧为光伏板边缘 (对应图 12a 中的⑥状态), 则应在期望偏航角方向基础上向左微调, 待右侧红外传感器脱离边缘后, 恢复原期望方向行驶, 此过程可重复多次, 直到返回光伏板底部, 清洁任务结束, 停止所有动作。

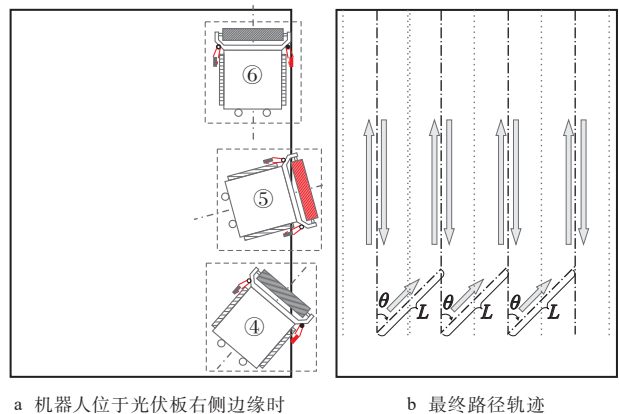


图 12 机器人位于光伏板右侧边缘时状态与自动清洁模式形成的路径轨迹
Fig. 12 Robot status at right edge and the corresponding path trajectory during autonomous cleaning

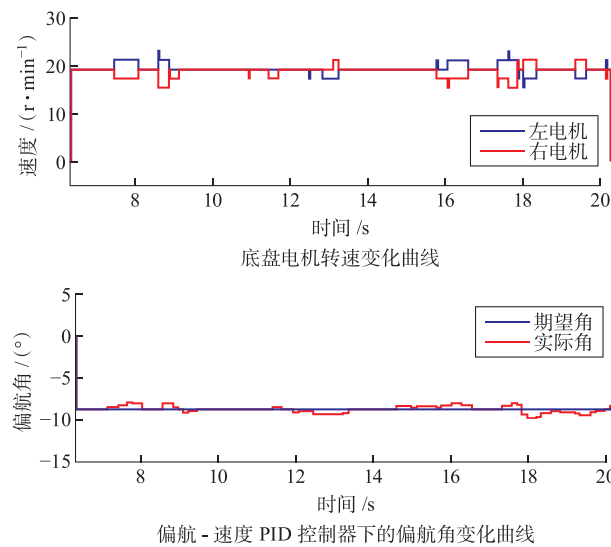
经过多次纵向往复清洁,最终的自动清洁路径如图12b所示,即图中的黑色点虚线轨迹,从而实现了光伏板的自动清洁任务。

3 机器人实验与验证

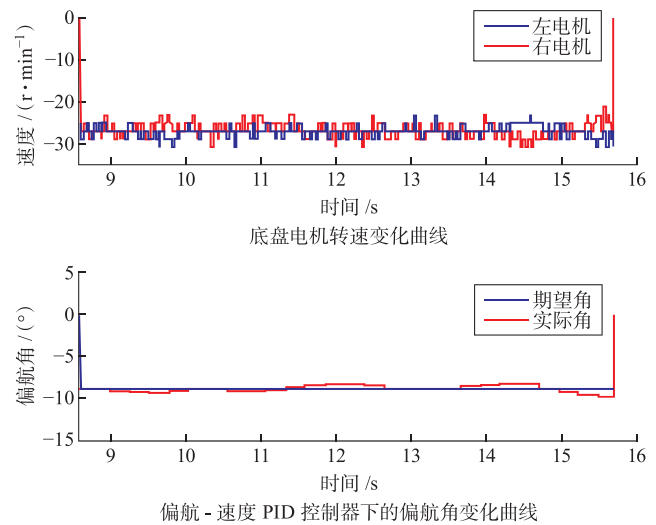
实验环境选取100 cm×60 cm尺寸,与光伏组件表面相同材质的钢化玻璃板模拟光伏板,采用直径约0.08~0.3 mm大小的细沙颗粒模拟光伏板在使用过程中表面沉积的沙尘^[23-25]。

基于闭环响应的试凑法,采集实机数据进行多次实验对比,整定底盘电机速度PID的参数,分别为 $K_p=25$, $K_i=12$, $K_d=16$;底盘左电机偏航角PID的参数分别为 $K_p=0.8$, $K_i=0.006$, $K_d=0.1$;底盘右电机偏航角PID的参数分别为 $K_p=1$, $K_i=0.005$, $K_d=0.1$;清洁刷PID控制器的参数分别为 $K_p=16$, $K_i=5$, $K_d=2.5$ 。

考虑到修正偏航角时转速过快可能增加侧滑的风



a 机器人执行前进清洁



b 机器人执行后退清洁

图13 偏航-速度PID控制机器人直线运行情况

Fig. 13 YAW-velocity PID controlling the linear operation of the robot

图14展示了机器人清洁刷驱动电机由负载进入空载时的PWM占空比状态变化,并附以同一时刻该电机转速状态的变化曲线。清洁刷启动后,不断采集单位时间内驱动电机的编码器脉冲,由PID控制转速稳定至-154 r/min,在第13 s时刻,机器人行驶至边缘,清洁刷进入悬空运行状态,占空比数值随即降至1 900以下,这表明清洁刷在光伏板上受摩擦运行时负载的占空比大于清洁刷悬空未受到阻力时空载的占空比。以下对不同状态下清洁刷电机的

险,将偏航PID控制器输出值限幅为40。同时,为了增加电机的使用寿命,留有一定的冗余度,将速度PID控制器与清洁刷PID控制器的输出占空比数值均限幅为3 550,即PWM占空比的调节范围为0~3 550。设置清洁刷的旋转运行速度为-154 r/min。上位机波形数据的采样频率为140至150 Hz。

图13为偏航-速度PID控制机器人直线运行清洁时的状态变化。图13a展示了机器人以-8.8°偏航角为期望方向直线前进运行时的方向变化与修正;图13b为机器人以-8.8°偏航角为期望方向作后退运行时的方向变化与修正,此时清洁刷的运行方向与机器人后退方向相反。结果表明,在履带侧滑、刷头高速摩擦及配重不均等多重干扰因素下,机器人仍能相对保持跟踪期望的偏航角度,而机器人后退运行时由于清洁刷旋转方向与运动方向相反,将会引入额外的扰动。

PWM占空比变化进行实验。

通过多组实验统计了机器人清洁刷电机在玻璃板不同倾角、电池电压变化影响下工作时,负载、空载状态的PWM占空比均值与标准差,如图15所示,玻璃板表面为无沙尘覆盖。当电池电压一定时,光伏板的放置倾角变化对清洁刷驱动电机的占空比数值影响较小;保持玻璃板倾角为10°,不断消耗机器人电量,电池电压由12.2 V降至9.2 V,随着电压逐渐降低,PWM占空比数值总体呈递增趋势,即电

机供电电压下降时, 需要电机驱动板上 MOS 管更大的导通时间以维持清洁刷转速。图 15 还表明, 在清洁过程中的占空比均值显著高于抵达边缘时的占空比均值, 原因是清洁刷在板上旋转运行时受到了玻璃板与表面杂质的摩擦阻力, 故 PID 控制器需控制

电机输出更大的力矩以保持转速, 而机器人前方行驶至边缘时清洁刷处于悬空运转, 不再受到板上的阻力, 因而控制器将减小电机输出力矩。另外, 图 15 展示了本方案所设计的机器人可在 0° 至 20° 倾角的光伏板上执行清洁任务。

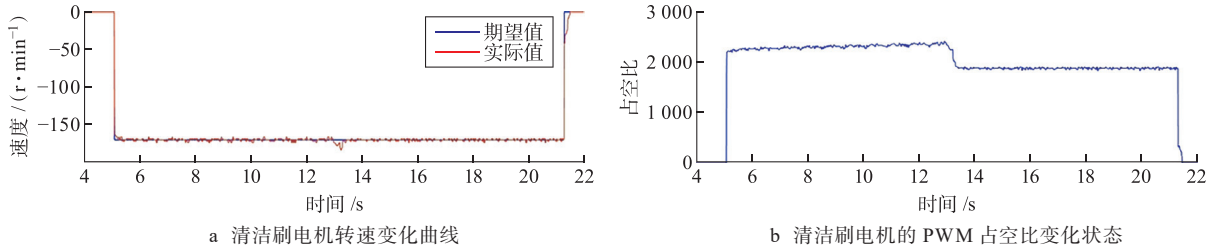


图 14 清洁刷驱动电机由负载进入空载时的状态变化
Fig. 14 State transition of the cleaning brush drive motor from load to no-load

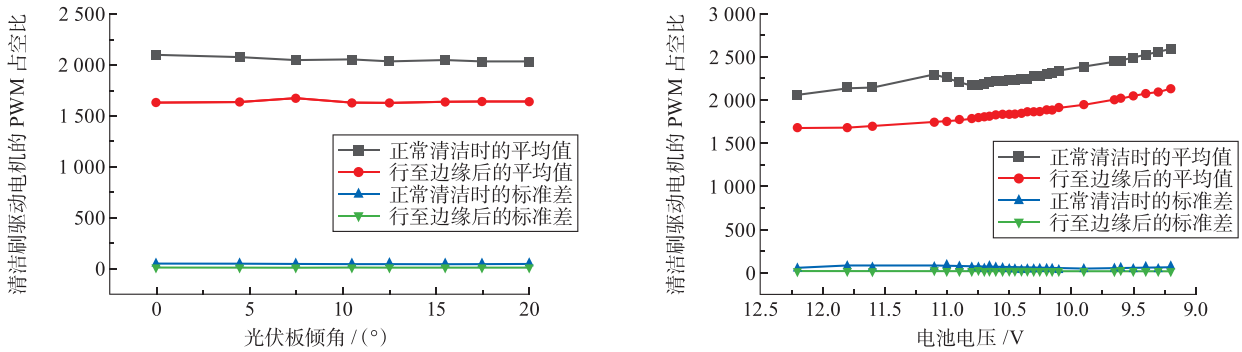


图 15 无沙尘状态下清洁刷电机 PWM 占空比的多因素影响统计
Fig. 15 Multi-factor impact on brush motor PWM duty cycle in the absence of dust

保持玻璃板倾角为 10° , 电压稳定在 12.3 V 附近, 通过多组实验统计了机器人清洁刷电机在玻璃板表面不同沙尘覆盖密度变化影响下工作时 PWM 占空比的均值与标准差, 如图 16 所示。

电站, 在干燥缺水、风沙大、无降雨工况下, 光伏板上的积灰密度平均每天增加约 0.1388 g/m^2 ^[26], 以此为依据将本组实验中的沙尘覆盖密度的范围选取为 $0 \sim 60 \text{ g/m}^2$ 。图 16 表明, 当清洁刷在板上运行时, 随着表面沙尘覆盖密度增大, 摩擦阻力变大, 占空比数值也在逐渐增加; 而行至边缘后, 清洁刷空转时的占空比统计数值变化较小, 始终保持为相对稳定状态。

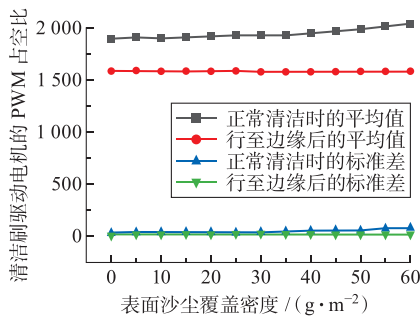


图 16 不同沙尘密度下清洁刷电机 PWM 占空比的变化统计
Fig. 16 Statistics of PWM duty cycle for the cleaning brush motor under different dust densities

抽取某组占空比数值变化样本进行概率密度估计分析, 如图 17a 所示。在 1 800 与 2 150 处附近各出现峰值, 分别对应机器人抵达边缘时与在光伏组件上运行清洁时的占空比概率密度分布, 各自位于不同的区间范围, 且各峰值总体呈现正态分布。利用工业设计中常见的“六西格玛”标准^[27], 对概率密度图中的双峰进行区间划分, 获得分割阈值, 从而通过占空比数值的“跳变”判别机器人是否抵达光伏板边缘。图 15 与图 16 显示, 机器人在正常清洁、行至边缘两种工况下工作时, 占空比受电池电压变化的影

有数据表明, 对于地处于中国西北某地的光伏

响较大,均呈现相近的增减趋势;而在电压一定时,光伏板表面的沙尘覆盖密度对机器人行至边缘工作时的占空比统计值变化影响相对较小,可忽略不计。据此,主要考虑电压变化对占空比的影响,如图17b所示。基于电压变化影响下机器人清洁刷的各组占空比统计数据,以行至边缘状态的峰值为中心分别求取 $+6\sigma$ 区间,区分行至边缘与正常清洁时的概率密度双峰,获得多组离散点阈值,再使用三次多项式进行数据拟合,得到电池电压与边缘检测阈值的变化曲线: $y=-3x^3+143.31x^2-2\ 175.89x+12\ 455.16$ 。

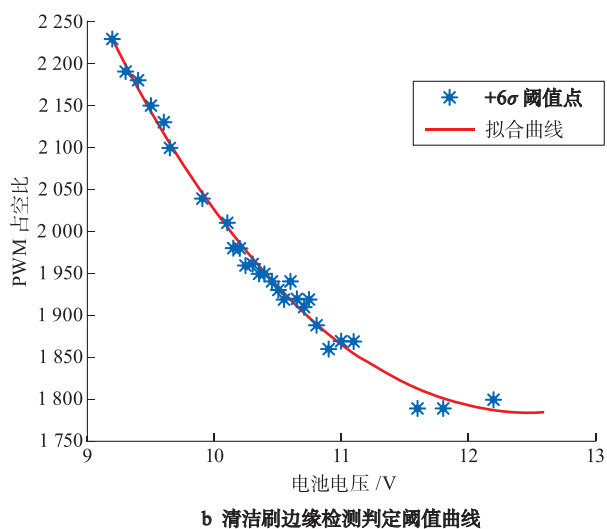
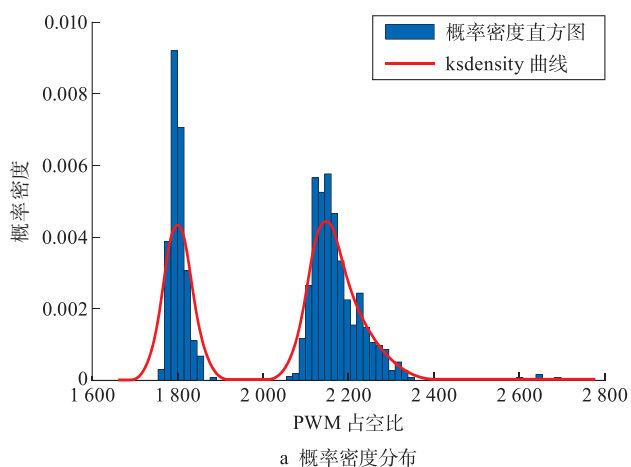


图17 分析清洁刷的占空比实验数据

Fig. 17 Analysis of experimental duty cycle data for the cleaning brush

对所获得的边缘检测阈值曲线进行验证,如图18所示,此时电池电压为10.4 V。在5.7 s时,机器人启动前进,清洁刷保持旋转;在18.3 s时,机器人行至光伏板边缘,清洁刷进入悬空运转状态,清洁刷电机的PWM占空比数值瞬间出现尖峰并降至1 850

以下,低于拟合曲线上10.4 V电压所对应的阈值1 951,此时,显示该底盘电机的速度也随之降低至0,即主控检测到占空比低于阈值后就立即对机器人进行了制动。而在后续进行的50余次自动清洁模式实验过程中,也均有效地执行了针对边缘防跌落的制动措施。

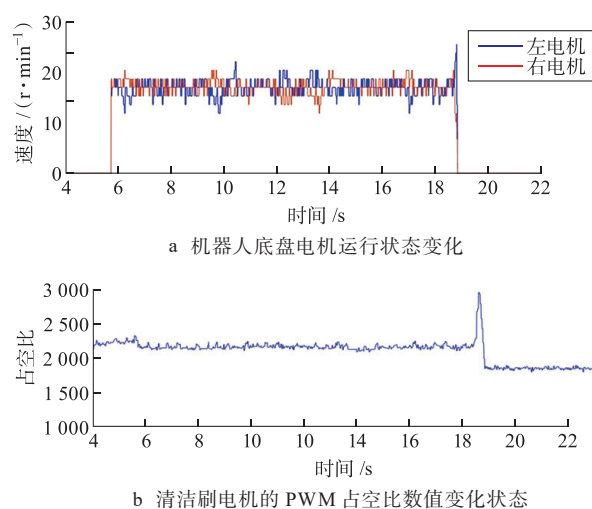


图18 清洁刷边缘检测触发底盘运行状态变化

Fig. 18 Chassis state change triggered by cleaning-brush edge detection

图19模拟了在实际使用过程中光伏组件表面被沙尘颗粒覆盖的场景,沙尘覆盖密度取较为极端的 60 g/m^2 ,并展示了利用自动模式的清洁过程与清洁效果。选用 $100\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 尺寸表面光滑的钢化玻璃板,以 10° 倾角放置。机器人由左下角开始,对每条路径往返清洁一次后自动切换至下一条清洁路径,同时,利用车体上的红外传感器、姿态传感器与清洁刷作边缘检测限位与位置修正;最后在抵达右侧边缘底部时结束清洁任务。倒数第二张图为完成一次自动清洁过程的效果,因沙尘覆盖密度较大,板上仍有残留,故进行第二次自动清洁,最后一张图为二次自动清洁后的效果。最终清洁效果表明,板上所遍布的细沙均被有效地清扫至了底部,验证了整体设计方案的可行性。对于底部清洁死角的沙尘,可在机器人自动清扫结束后,人工对光伏板底部进行清理抹除或依靠自然风与重力吹落。在未来的设计中可在机器人前端加装高压喷头,在清洁时辅以喷水清理、增加流动性,或在尾部额外添加清洁刷,均可有效解决清洁过程中板子底部的沙尘堆积问题,让清扫效果更为干净整洁。

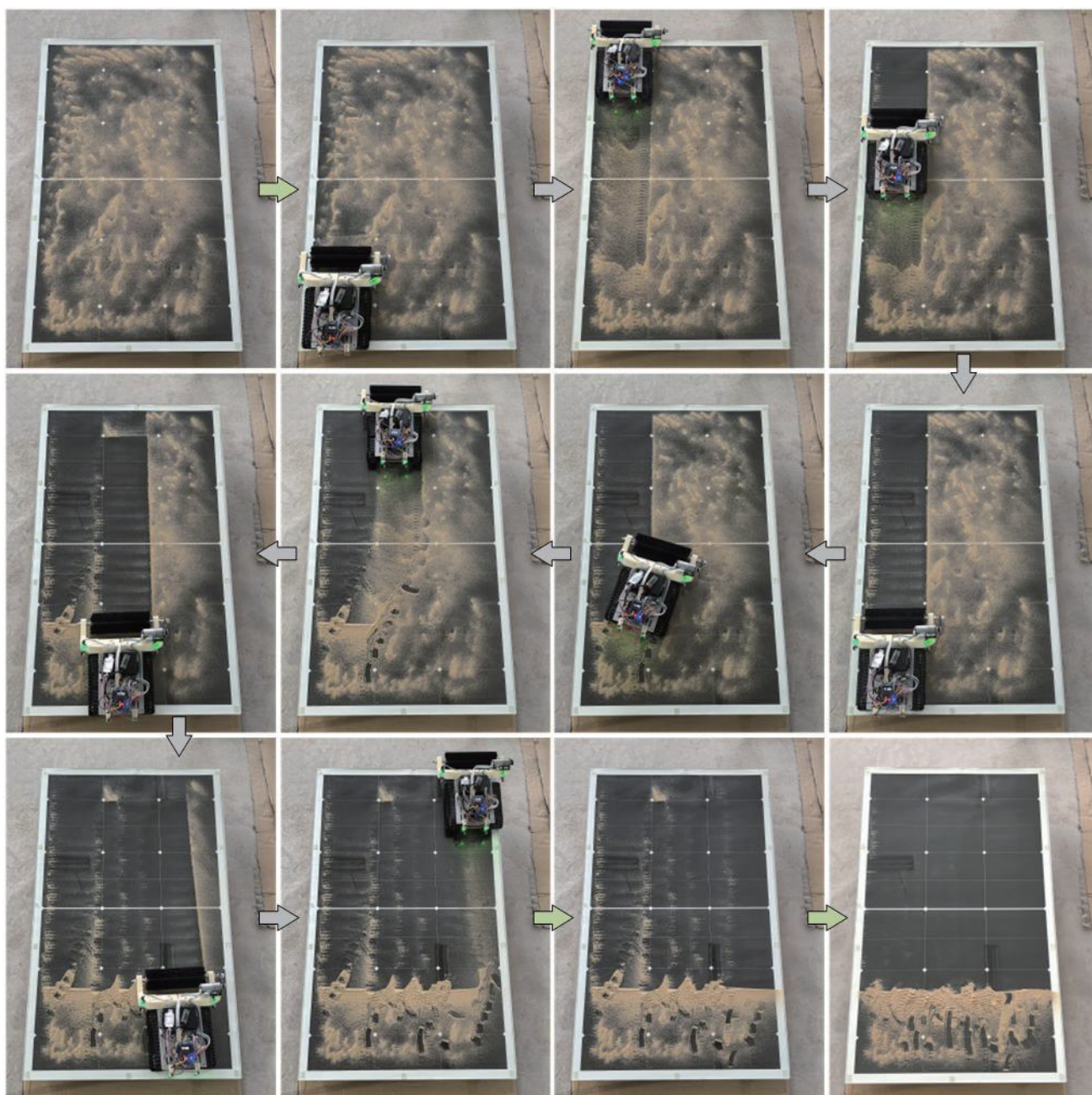


图 19 实际自动清洁过程与效果

Fig. 19 Actual automatic cleaning process and effect

在 $100\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 大小、表面无沙尘覆盖的钢化玻璃板上进行 50 次自动清洁实验, 机器人电池电压由 11.4 V 降至 9.6 V , 记录每次的电压差值与时间开销, 如图 20 所示。对实验数据进行整理计算, 可得单次清洁过程电池电压平均下降约 0.0338 V , 平均耗时为 163.02 s 。由于当前结构设计原因, 底部存在一定的清洁死角, 无法实现完全清理, 平均清洁覆盖率为 74.6% 。需注意的是, 在本文设计的机器人清洁机制中, 其清洁死角为固定值, 即光伏板的纵向

高度越大, 底部清洁死角所占比例越小。又机器人电池满电电压为 12.6 V , 放电截止电压为 9 V , 则在满电量下可完成约 106.5 次自动清洁, 即在本实验条件下, 机器人的平均清洁效率为 $27.46\text{ cm}^2/\text{s}$, 换算可得清洁总面积约 47.67 m^2 。

将本文提出的设计方案与其他同类型履带式清洁机器人方案进行对比, 结果如表 1 所示。本方案在实现自动清洁、边缘检测防跌落等功能的同时, 总体硬件开销更小, 具有成本低廉的优势。

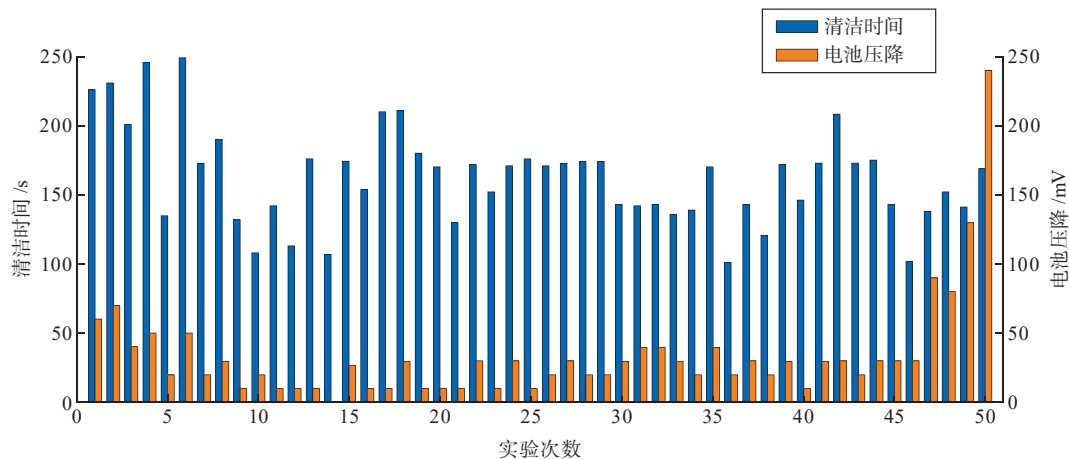


图 20 多次自动清洁实验中记录的电池压降与所需时间

Fig. 20 Battery voltage drop and time required recorded from multiple autonomous cleaning experiments

表 1 与同类机器人的硬件设计方案对比分析

Table 1 Comparative analysis of hardware design schemes with peer robots

硬件结构	视觉光电式机器人	智能清洁机器人	本文设计机器人
视觉传感器	需要图像传感器	不需要	不需要
姿态传感器	未知	需要	低成本 MPU6050
光电传感器	需要	需要	低成本红外发射接收管
处理器	需高性能 ARM 处理器	普通 MCU	低成本 MCU
真空负压仓	需要	不需要	不需要
水泵喷头	需要	需要	不需要
整体体积	较大	较大	较小

4 结论

通过对样机的测试,本文设计的低成本光伏板清洁机器人,可对光伏板表面的覆盖物进行有效清洁。同时,采用双闭环偏航角-速度 PID 控制方式,减小了机器人在行进过程中由于底盘履带遭遇滑移等原因进而影响直线行驶的问题,实现了对机器人的行进方向、转角和移速的稳定控制。此外,根据清洁不同覆盖物所受到的阻力载荷不同,利用速度 PID 控制器动态调节 PWM 占空比,保持了清洁刷的稳定清洁。另外,在不增加额外传感器的基础上,设计了通过监测驱动清洁刷电机 PWM 占空比的方式,可有效防止机器人前进清洁过程中边缘跌落风险。实验结果验证了所构想方案的可行性。在后续的改进设计中可在底盘上使用具备防滑、耐磨材质的履带。同时,为增大摩擦力,可使用弹性支撑装置下压底侧履带,保证其在运行过程中与地面的有效持续接触面积,亦可采用吸附性结构使机器人适配不同的光伏板倾斜角,并设计自适应控制算法、路径优化算法等,增强机器人运行的鲁棒性。当前判断

边缘的方式仅对单板进行了实验验证,后续可延伸扩展对多块实地光伏板阵列进行分析论证。为了进一步提升清洁效果,覆盖清洁死角,后续可在机器人前方或后方放置高压喷水装置,并改进清洁刷结构设计,如设计可调节清洁刷下压力度的结构等,都会使清洁效果更为显著。

参考文献:

- [1] 吴迎新, 田李剑. 太阳能光伏发电现状研究及问题分析[J]. 技术与市场, 2019, 26(1): 115-116.
- [2] 林志鸿, 曾飞, 王哲, 等. 灰尘对光伏电站发电性能的影响[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(12): 90-93.
- [3] 孟繁旭. 光伏电站组件表面积灰实验研究与数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [4] SAYYAH A, HORENSTEIN M N, MAZUMDER M K. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels[J]. Solar Energy, 2014, 107: 576-604.
- [5] GHAZI S, SAYIGH A, IP K. Dust effect on flat surfaces—a review paper[J]. Renewable and Sustainable

- Energy Reviews, 2014, 33: 742-751.
- [6] 章筠, 范展豪, 欧阳丽. 光伏电站智能化清扫应用研究[J]. 机械制造, 2024, 62(11): 60-65.
- [7] KHADKA N, BISTA A, ADHIKARI B, et al. Current practices of solar photovoltaic panel cleaning system and future prospects of machine learning implementation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 135948-135962.
- [8] 王冠杰. 全覆盖式太阳能电池板移动清洁机器人设计与分析[D]. 宁波: 宁波大学, 2020.
- [9] GHODKI M K. An infrared based dust mitigation system operated by the robotic arm for performance improvement of the solar panel[J]. Solar Energy, 2022, 244: 343-361.
- [10] ZHAO Bo, YANG Jiaying, CAO Shengxian, et al. Design of a vacuum-type PV module cleaning robot based on an auxiliary mobile frame[J]. Solar Energy, 2024, 275: 112634.
- [11] 芮宏斌, 曹伟, 孙宁宁. 基于BP神经网络的光伏阵列清洁机械臂逆运动学分析与时间最短运动规划[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 43-51.
- [12] 张久超. 自供能全天候清洁光伏电站太阳能机器人的设计研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
- [13] 蒋利雷. 光伏组件积灰负压吸附式六轮无水清洁机器人的研制[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [14] LU Xiaolong, ZHANG Qi, HU Junhui. A linear piezoelectric actuator based solar panel cleaning system[J]. Energy, 2013, 60: 401-406.
- [15] KAWAMOTO H, SHIBATA T. Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 73: 65-70.
- [16] 徐晨阳, 周全民, 王春旭, 等. 光伏板智能清洁机器人设计与实现[J]. 机床与液压, 2024, 52(11): 13-19.
- [17] 蒋李亚, 张家乐, 夏侯智聪, 等. 基于视觉-光电传感器的光伏板清洁机器人研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 106-112.
- [18] BISHT R S, PATHAK P M, PANIGRAHI S K. Design and development of a glass façade cleaning robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 168: 104585.
- [19] ANTONELLI M G, BEOMONTE ZOBEL P, DE MARCELLIS A, et al. Autonomous robot for cleaning photovoltaic panels in desert zones[J]. Mechatronics, 2020, 68: 102372.
- [20] 徐晨晨, 杨瑞, 吴一非, 等. 基于聚集—置换策略的机器人路径规划方法[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, 32(1): 27-36.
- [21] 刘意杨, 李浩, 于洪霞, 等. 基于自适应粒子群算法的园区能源互联网调度优化[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2020, 29(4): 47-53.
- [22] 孙靖, 匡源, 查明明. 含地形约束的动态多目标水下移动无线传感器网络调度[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2021, 30(3): 38-46.
- [23] 牛坤. 荒漠化地区光伏板表面沙尘沉积过程仿真及其对光透过率影响研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2019.
- [24] 王辉. 太阳能光伏板积灰形成机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2025.
- [25] 赵明智, 苗一鸣, 张旭, 等. 沙漠沙尘粒径对太阳能光伏组件性能影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 803-808.
- [26] 宁会峰, 程荣展, 王伟志, 等. 积灰对光伏发电的影响及除尘效果实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 120-125.
- [27] KOZIOŁEK S, DERLUKIEWICZ D. Method of assessing the quality of the design process of construction equipment with the use of DFSS (design for Six Sigma) [J]. Automation in Construction, 2012, 22: 223-232.

(责任编辑: 褚金红)