

挂板式光伏清扫机器人动力学建模与控制

陈柄焱, 梅 益

贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年4月26日; 录用日期: 2023年7月10日; 发布日期: 2023年7月17日

摘 要

随着光伏技术发展, 光伏电站规模的扩大, 不少光伏电站开始利用清扫机器人取代工人来进行光伏面板的清扫, 挂板式光伏清扫机器人结构简单, 工作效率高, 可适用于绝大多数场合, 是现在较为常见的一类光清扫机器人, 但挂板式光伏清扫机器人运行过程中容易出现上下驱动无法保持同步导致机器人发生偏摆, 严重情况下机器人与光伏板间的相会作用力可能会造成零部件损坏甚至机器人从光伏板上掉落, 存在较大安全隐患。为了解决这个问题, 采用机理建模的方式对挂板式光伏清扫机器人进行研究。基于对上端悬挂装置的弹性形变分析, 给出机器人平移和旋转运动的完整描述, 并建立了挂板式光伏清洁机器人动力学模型。通过研究机器人与光伏板间力和运动关系, 提出了一种基于线性二次型调节器(LQR)的控制方案, 以保证机器人的上下端协同运动, 抑制偏摆问题, 避免机器人卡死的情况发生。仿真结果表明, 设计的线性二次型调节器能够快速纠正挂板式光伏清扫机器人的偏摆, 具有良好的稳定性, 保证机器人平稳运行, 为挂板式光伏清扫机器人的控制系统设计提供了理论基础。

关键词

光伏清扫机器人, 动力学模型, 线性二次型调节器, MATLAB

Dynamic Modeling and Control of Hanging-Type Photovoltaic Cleaning Robot

Bingyi Chen, Yi Mei

School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 26th, 2023; accepted: Jul. 10th, 2023; published: Jul. 17th, 2023

Abstract

With the development of photovoltaic technology and the expansion of photovoltaic power plant

scale, an increasing number of photovoltaic power plants are beginning to use cleaning robots to replace workers for the cleaning of photovoltaic panels. Among them, the hanging-type photovoltaic cleaning robot is a common cleaning robot, which has the advantages of simple structure, high efficiency, and applicability to most occasions. However, during the operation of the robot, asynchronous up and down driving may occur, causing the robot to swing. In severe cases, the robot may fall, causing component damage and safety hazards. To solve this problem, a mechanism modeling method was used to study the hanging-type photovoltaic cleaning robot. Based on the analysis of the elastic deformation of the upper hanging device, a complete description of the robot's translational and rotational motion is given, and a dynamic model of the hanging-type photovoltaic cleaning robot is established. By studying the force and motion relationship between the robot and the photovoltaic panel, a control scheme based on a linear quadratic regulator (LQR) is proposed to ensure the coordinated motion of the upper and lower ends of the robot, suppress the swing problem, and avoid the robot getting stuck. The simulation results show that the designed LQR can quickly correct the swing of the hanging-type photovoltaic cleaning robot, has good stability, and ensures smooth operation of the robot, providing a theoretical basis for the control system design of the hanging-type photovoltaic cleaning robot.

Keywords

Photovoltaic Cleaning Robot, Dynamic Model, Linear Quadratic Regulator, MATLAB

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源需求的增加,光伏发电作为一种清洁能源得到了广泛的关注[1]。但是,由于光伏板长期暴露在室外,容易受到雨水、尘埃和脏污等因素的影响,导致光伏板表面积累大量的灰尘和污垢,影响了光伏发电效率[2] [3] [4] [5]。因此,对于光伏板的清洁非常必要。

现有清洁方式主要包括自然雨水清洁、自动喷淋清洁、人工清洁、车载设备清洁、光伏板清洁机器人清洁等。其中,自然雨水清洁虽然成本低但清洁力度不够,在污染和干旱地区不适用[6];自动喷淋清洁效率高但需要大量用水,不适用于缺水地区[7];人工清洁成本高且清洁质量不稳定,存在安全隐患[8];车载设备清洁不适用于小型光伏电站且价格高昂[9]。光伏板清洁机器人效率高、安全可靠,对光伏板进行全面彻底的清洁,具有广阔应用前景[10] [11]。

目前光伏清洁机器人主要有三种路线:导轨式、小型便携式和挂板式。以以色列 Ecoppia 公司的 Ecoppia E4 机器人为代表导轨式清洁机器人[12],通过专用导轨行走,适用于沙漠等沙尘较大的地区,此类机器人的问题在于需要铺设导轨,费用高昂且使用效率低。以 Ecovacs Robotics 公司设计制造的 Raybot [13]为代表小型便携式清洁机器人结构灵活,不需要复杂安装,但需要依靠吸附装置固定在光伏板表面上,存在难以跨越板间缝隙、板间高度差等问题,续航能力也较差。挂板式清洁机器人清洁效率高,适用于多种场景,如 Washpanel [14]、Ecopia T4 等都可归为挂板式清洁机器人。挂板式光伏清洁机器人主要有清扫机构、行走机构、悬挂机构等组成,此类机器人的主要问题在于容易在运动过程中因上下端运动不协同而发生偏摆甚至卡死,而机器人上下驱动协同运动问题受到机器人与光伏板间的相互作用与机器人主体框架所带来的约束影响。本文针对挂板式光伏清洁机器人结构,采用机理建模的方式,基于对上端悬挂装置的弹性形变分析给出机器人平移与旋转运动的完整描述,并通过研究机器人与光伏板间力和运

动关系,建立了挂板式光伏清洁机器人动力学模型,并根据其数学模型提出机器人运动控制方案以保证机器人上下端的协同运动,抑制偏摆问题,避免卡死的发生。

2. 机器人整体结构与运动学描述

挂板式光伏清洁机器人上下端各有一个箱体,其中上箱体内安装了滚刷电机和硬件控制系统,同时与悬挂装置和上端行走装置相连。下箱体则主要连接下端行走装置。滚刷通过上下箱体上的轴承座进行固定,并由上箱体内的电机进行驱动。

光伏清扫机器人可以简单地用图1所示的一般配置来描述。由于本文主要研究的是对机器人整体的运动控制,因此建模时忽略负责清扫的滚刷结构。机器人的运动部分主要由两根横梁、防偏架和两个直流无刷电机驱动的履带轮组成,由于机器人需要在倾斜的光伏板上运行,为此,设计一个包含一对弹性滚轮结构的防偏架,防偏架安装在机器人一侧,既能起到支承作用,也能够一定程度上防止机器人运动过程中出现过大的偏摆。

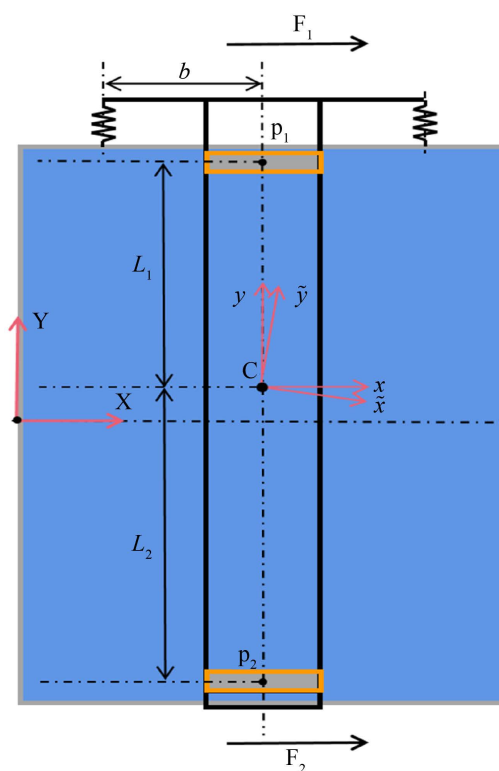


Figure 1. Simplified model of photovoltaic cleaning robot

图1. 光伏清扫机器人简化模型

设 OXY 为固定惯性坐标系, x 轴平行于光伏板排列方向。设 C 点为整机器人的质心, 令 Cxy 为 C 处与 OXY 平行的移动坐标系, $C\tilde{x}\tilde{y}$ 为 C 处机器人的固定坐标系。点 P_1 为轴与两履带轮中线的交点, $|CP_1| = L_1$ 、 $|CP_2| = L_2$ 。机器人结构左右对称, 防偏架上弹簧到机器人对称轴的投影距离为 b 。

弹性滚轮结构可以简化为刚度系数为 k 的弹簧, 机器人沿光伏板排列的 x 方向前进, 两履带轮同步驱动时, 防偏架上的两个弹簧轮沿 y 轴压缩相同的长度, 此时防偏架仅对机器人起支撑作用, 而当如图二所示, 两履带轮不同步时机器人相对于光伏板发生偏转, 由于弹簧位置始终与机器人保持一致, 此时

弹簧的压缩方向也将与机器人偏转相同的角度, 这时两个弹簧的压缩长度将不再相同, 会产生一个与车身偏转方向相反的弹性力矩和 x, y 两个方向的分力, 如图 2 所示。

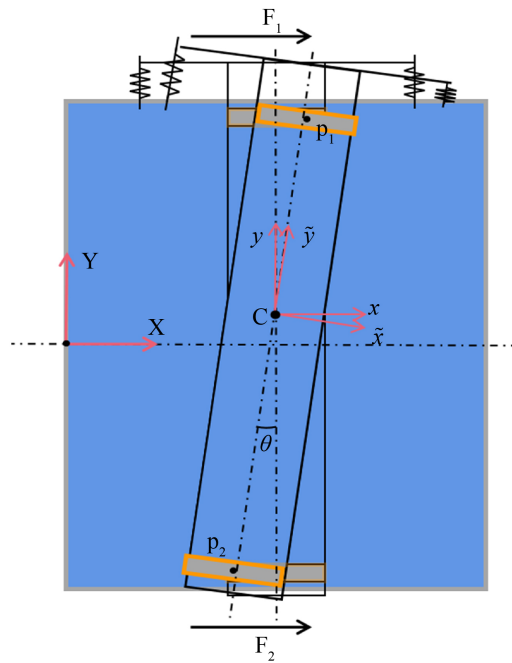


Figure 2. Linear and rotational motion model of robot
图 2. 机器人的线性和旋转运动

图 3 描述了机器人偏转前后悬挂装置的几何关系的变化。

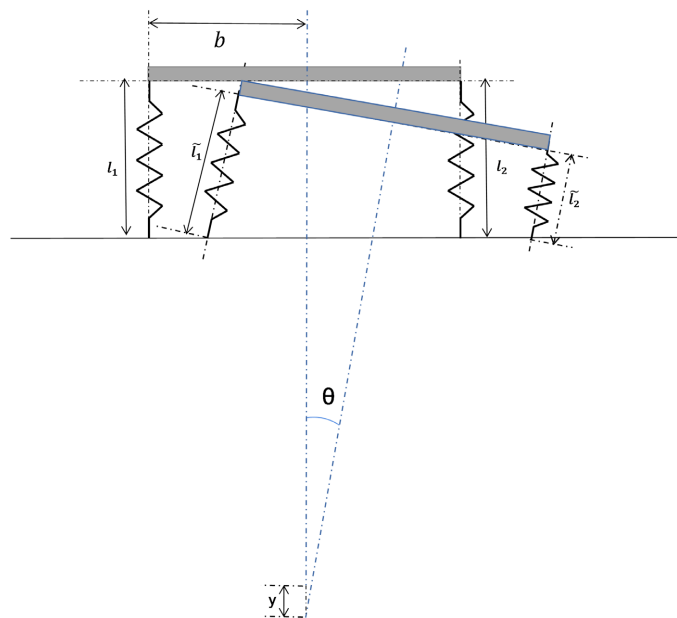


Figure 3. The geometric relationship of the hanging device before and after the deviation of the robot
图 3. 机器人偏转前后悬挂装置的几何关系变化

根据图3, 机器人偏转后的几何关系:

$$l_1 = l_2 \quad (1)$$

$$\tilde{l}_1 = L_1 - \frac{(L_1 - l_1 + y)}{\cos \theta} + b \cdot \tan \theta \quad (2)$$

$$\tilde{l}_2 = L_1 - \frac{(L_1 - l_1 + y)}{\cos \theta} - b \cdot \tan \theta \quad (3)$$

其中为两弹性滚轮在机器人未发生偏转时的长度, 为机器人发生偏转时两个弹性滚轮的长度。

3. 动力学建模

根据上述定义, 在固定坐标 OXY 中光伏清扫机器人的运动可以用以下三个广义坐标完全描述: C 的两个位置坐标 x_c 和 y_c , 以及固定坐标系和 $Cx\tilde{y}$ 的旋转角度 α , 则系统的动力学方程为:

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_c &= (F_1 + F_2)\cos \alpha - F_{r1} - F_{r2} + F_x + \Delta_x \\ M\ddot{y}_c &\approx 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$I\ddot{\theta} = F_1L_1 - F_2L_2 + M_r + M_\theta + \Delta_\theta$$

式中, M 和 I 表示整个机器人的质量和围绕 C 点的转动惯量, Δ_x 和 Δ_θ 代表系统建模误差及其他干扰, F_x 为机器人偏转时防偏架上两弹型滚轮被压缩后产生的弹力在 x 方向的分力, 其表达式为:

$$F_x = \left[Mg \sin \varphi + 2k_1(L_1 - l_1)(\sec \theta - 1) + \frac{k_1 y}{\cos \theta} - 2k_2(L_2 - l_2)(\sec \theta - 1) - \frac{k_2 y}{\cos \theta} \right] \sin \theta \quad (5)$$

其中 φ 为光伏板平面与水平地面间的夹角, g 为重力加速度。

F_i 为履带轮的驱动力; F_r 为履带轮和光伏板间的粘性摩擦和库仑摩擦的组合, 其表达式为:

$$F_{ri} = B_i \dot{x}_{pi} + A_{fi} S_{fi}(\dot{x}_{pi}) \quad (6)$$

$$\dot{x}_{pi} = \dot{x}_c + (-1)^i \dot{\theta} L_i \cos \theta \quad (7)$$

其中 B_i 和 A_{fi} 是机器人驱动轮与光伏板间的粘性和库仑摩擦系数, $S_{fi}(\bullet)$ 是用于近似符号函数 $\text{sgn}(\bullet)$ 的连续函数, 如 $\frac{2}{\pi} \text{atan}(1000\bullet)$, M_r 为机器人转动时机身受到的摩擦力矩, 其表达式为:

M_θ 为机器人偏转时防偏架上两弹型滚轮变形量不同所产生的力矩, 可以根据式(1)、(2)、(3)可以得到:

$$M_r = F_{r2}L_2 - F_{r1}L_1 \quad (8)$$

因此, 由于机器人运动过程中的偏摆角 θ 非常小, 因此 $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, $\tan \theta \approx \theta$, 则公式可近似为:

$$M\ddot{x}_c = F_1 + F_2 - B\dot{x}_c - B_f\dot{\theta} - A_{f1}S_f(\dot{x}_c + \dot{\theta}L_1) - A_{f2}S_f(\dot{x}_c - \dot{\theta}L_2) + (Mg \sin \varphi)\theta + \Delta_x \quad (9)$$

$$I\ddot{\theta} = F_1L_1 - F_2L_2 - B_f\dot{x}_c - B_g\dot{\theta} - A_{f1}S_f(\dot{x}_c\theta + \dot{\theta}L_1) + A_{f2}S_f(\dot{x}_c - \dot{\theta}L_2) - 2kb\theta + \Delta_\theta \quad (10)$$

其中 $k = k_1 + k_2$, $B = B_1 + B_2$, $B_f = B_1L_1 - B_2L_2$, $B_g = B_1L_1^2 + B_2L_2^2$ 。

由于公式(9)、(10)中存在各种变量之间的耦合关系, 使挂板式光伏清洁机器人模型变得十分复杂。并且该模型是传统的非线性模型, 这就使得系统的稳定性分析变得更为复杂, 因此为了能更好地对模型进行分析和设计控制算法, 本文暂时忽略非线性库仑摩擦力等的影响。可以将公式(9)、(10)做近似线性

化处理:

$$M\ddot{x}_c = F_1 + F_2 - B\dot{x} - B_l\dot{\theta} + (2Mg \sin \varphi)\theta \quad (11)$$

$$I\ddot{\theta} = F_1L_1 - F_2L_2 - B_l\dot{x}_c - B_g\dot{\theta} - 2kb\theta \quad (12)$$

得出上述基本模型后, 还需要构建出标准的状态空间表达式, 即系统的状态方程和输出方程, 形式如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (13)$$

其中, x 为状态向量, 是系统的状态参数; u 为输入向量, 是系统的控制量; y 为输出向量, 是需要观测的参数; 矩阵 ABCD 为系数矩阵, 由系统的自身特性决定。

对于光伏清洁机器人, 其系统的状态于 x 方向位移、 x 方向速度、偏摆角度和偏摆角速度有关, 故系统的状态向量设置为 $x = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$, 观测对象和状态向量相同, $y = x$, 系统运动状态与两行走装置的输入驱动力直接相关, 所以选择控制量为驱动力, $u = [F_1 \ F_2]^T$ 。状态空间表达式变为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{M} & \frac{2g \sin \varphi}{M} & -\frac{B_l}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_l}{I} & -\frac{2kb}{I} & -\frac{B_g}{I} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/M & 1/M \\ 0 & 0 \\ \frac{L_1}{I} & -\frac{L_2}{I} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

式中各项具体参数如表 1 所示。

Table 1. Simulation parameters
表 1. 仿真参数

| 符号 | 值 | 单位 |
|-----|------|-------------------|
| M | 17.2 | kg |
| g | 9.83 | m/s ² |
| I | 1.73 | kg·m ² |

Continued

| | | |
|-------|-------|-----|
| k | 10000 | N/m |
| L_1 | 0.849 | m |
| L_2 | 1.156 | m |
| b | 0.2 | m |

4. 控制器设计

在前文中, 我们已经推导出了挂板式光伏清洁机器人的线性化模型, 并对模型系统的可控性和可观性进行了分析。接下来, 我们需要利用状态反馈控制律来实现对其速度、位移和防偏摆的控制。在线性化模型的基础上, 对于线性系统, 我们可以选择 PID、模糊 PID、LQR 等控制方法。考虑到控制器的设计难度和控制效果, 本文决定采用线性二次型调节器(LQR)。

线性二次型调节器(LQR)是一种以较低成本对线性系统进行调节的控制策略[15], 具有较高的可靠性和鲁棒性。LQR 控制属于最优控制问题, 即给定初态和终态, 在定义的问题空间内找到一个控制向量函数, 使以状态变量和控制变量的二次型函数的积分为性能指标函数达到最优。与输出反馈不同, LQR 控制是对系统内部状态进行反馈, 因此能够反映更多的状态信息。

本文中只考虑连续时间的线性定常系统, 文中所有假设和结论都基于连续时间线性时不变系统。设系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (15)$$

对于挂板式光伏清洁机器人系统, 其控制目标为机身防止偏摆和直行运动, 因此为其设计一个输出跟踪型的 LQR 控制器, 将跟踪误差定义为:

$$e = [e_x, e_\theta]^T = [x_c(t) - x_{cd}(t), \theta(t) - \theta_d(t)]^T \quad (16)$$

$[x_{cd}(t), \theta_d(t)]^T$ 为期望的轨迹。理论上我们期望机器人运行过程中能以速度 v 匀速运行的同时不发生偏转, 因此 $x_{cd}(t) = vt$, $\theta_d(t) = 0$, 控制目标是控制输入 u 使得 $x_c(t)$ 跟踪设计平滑参考轨迹 $x_{cd}(t)$ 密切同时 $\theta(t)$ 保持尽可能小。

将式带入机器人动力学模型, 令:

$$E = [e_x, \dot{e}_x, e_\theta, \dot{e}_\theta]^T \quad (17)$$

此时系统的性能目标函数 J 为:

$$J_{\min} = \int_0^{\infty} (E^T Q E + u_2^T R u_2) dt \quad (18)$$

式中的 Q 和 R 皆为正定对角矩阵, $Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4]$, $R = \text{diag}[r_1, r_2]$, 其中 q_1, q_2, q_3, q_4 分别表示为机器人质心 C 在 x 方向的位移跟踪误差, 质心 C 在 x 方向的速度跟踪误差, 机器人偏转的角度和角加速度所占的权重, 越是被重视, 希望它能够尽量小的误差分量所对应的 q_i 的数值就应该越大。加入 $u_2^T R u_2$ 项的目的是对输入量进行约束, r_1, r_2 的大小分别表示了对输入 u_{21}, u_{22} 的重视程度, r_i 的越大则对相应输入 u_{2i} 的限制越大。因此, 在设计 LQR 控制器时, 矩阵 Q 和 R 的选择决定了最终的控制效果。在选定好矩阵 Q 和 R 后, 可直接利用 matlab 软件求得相应的反馈矩阵 K :

$$K = \text{lqr}(A, B, Q, R) \quad (19)$$

进而可以得到:

$$u_2 = -KE \quad (20)$$

利用 MATLAB 中的 $lqr(A, B, Q, R)$ 求解控制算法中的反馈增益矩阵 K , 将表一中的参数带入状态空间表达式, 可以得到:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.01 & 9.83 & -0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -2352.94 & -0.06 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 \\ 0.35 & -0.41 \end{bmatrix}。$$

结合 Q 、 R 矩阵实际意义和多次对比分析, 最后选取

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix};$$

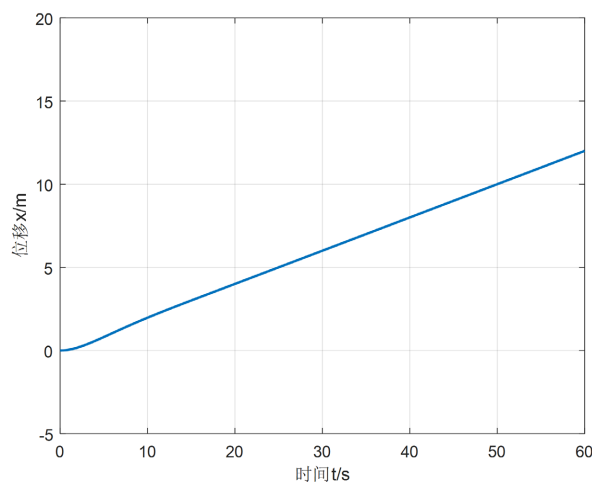
$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

将 A , B , Q , R 代入方程, 得到增益矩阵 K :

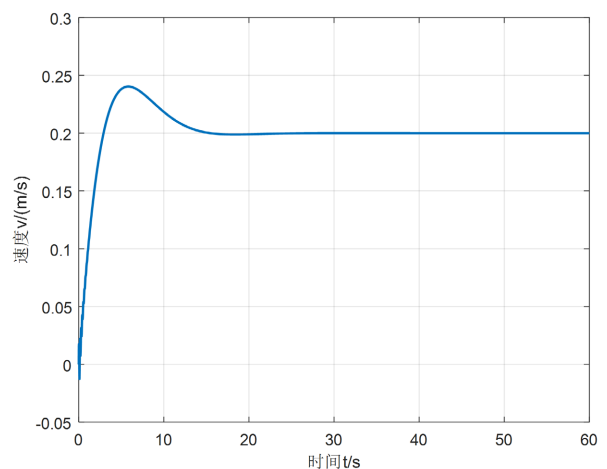
$$K = \begin{bmatrix} 0.72 & 2.75 & -0.19 & 6.45 \\ 0.70 & 2.66 & -0.20 & -7.50 \end{bmatrix}$$

5. 仿真验证

图 4 中 4 张图片分别表示在施加控制状态下的光伏清扫机器人 x 方向位移、x 方向速度、偏摆角 θ 、偏摆角加速度的控制仿真结果。



(a) 机器人 x 方向位移变化



(b) 机器人 x 方向速度变化

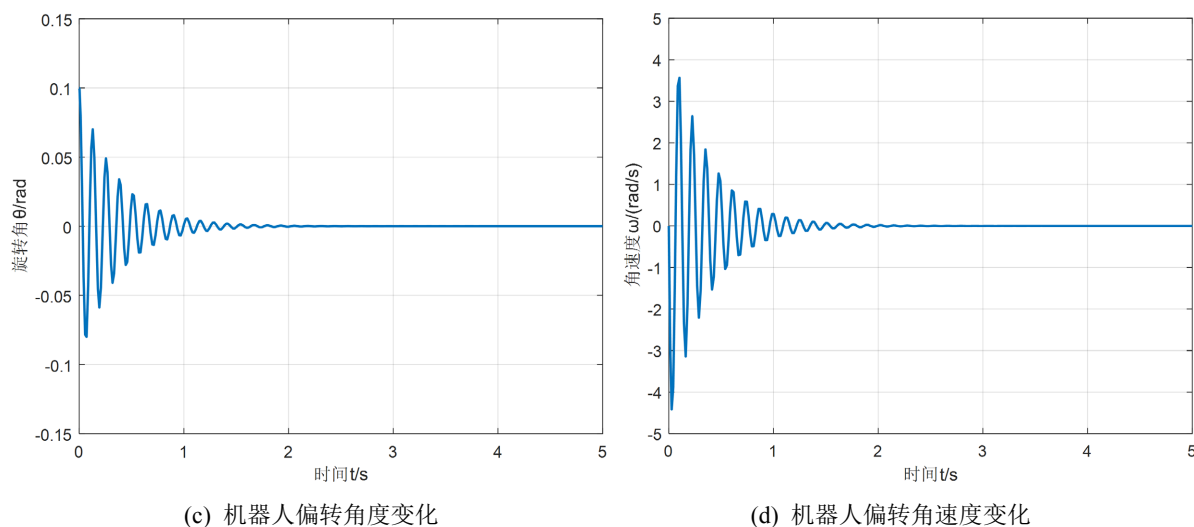


Figure 4. Simulation results of photovoltaic cleaning robot control scheme
图 4. 光伏清扫机器人控制方案仿真结果

从图 4 可以看出, 在本文提出的控制方法下, 光伏清扫机器人可以在 2 秒内从 0.1 rad 的偏转角度快速回到平衡态, 同时机器人的速度能快速达到并保持在预设的 0.2 m/s, 相应的位移也满足匀速运动的要求, 说明本次设计的控制方法有效。

为进一步说明控制方法的有效性, 对仅进行速度控制的仿真结果和在本文所设计的控制下的运行的仿真结果进行对比。

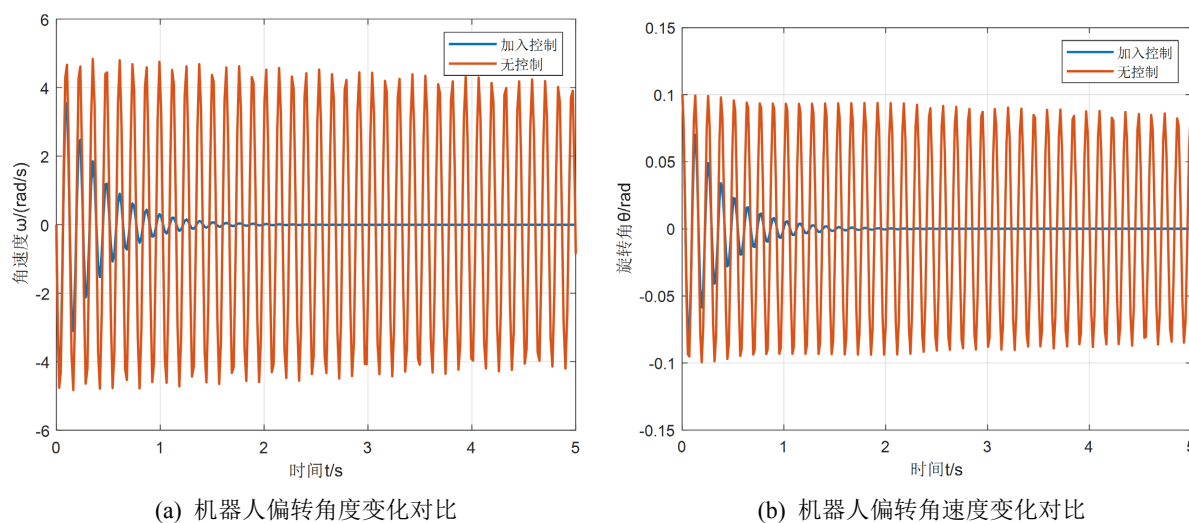


Figure 5. Comparison of simulation results with and without control
图 5. 施加控制与不施加控制仿真结果对比

如图 5 所示, 在不施加控制的情况下, 仅凭防偏架本身的作用很难在短时间内实现旋转角的收敛, 机器人将来回摆动无法稳定运行。因此本文提出的防偏摆控制方案对保证机器人稳定运行具有重要意义。

6. 结论

本文针对挂板式光伏机器人运行过程中可能出现的偏摆卡死问题, 对机器人的运动控制方案进行研

究。通过对挂板式光伏清洁机器人的运动分析, 给出了机器人平移与旋转运动的完整描述, 并研究了机器人与光伏板间的力和运动关系, 建立了挂板式光伏清洁机器人动力学模型。基于所建立的运动学模型, 提出了一种基于 LQR 控制基本理论的机器人控制方案。最后在 MATLAB simulink 模块中对模型和控制器进行了仿真研究。仿真结果表明, 所提出的控制方案可以在较短时间内快速的纠正机身的偏摆, 可以保证挂板式光伏清洁机器人的稳定运行。

参考文献

- [1] Alaaeddin, M.H., Sapuan, S.M., Zuhri, M.Y.M., *et al.* (2019) Photovoltaic Applications: Status and Manufacturing Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **102**, 318-332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.026>
- [2] Chaichan, M.T. and Kazem, H.A. (2016) Experimental Analysis of Solar Intensity on Photovoltaic in Hot and Humid Weather Conditions. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, **7**, 91-96.
- [3] Mejia, F., Kleissl, J. and Bosch, J.L. (2014) The Effect of Dust on Solar Photovoltaic Systems. *Energy Procedia*, **49**, 2370-2376. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.251>
- [4] Sayyah, A., Horenstein, M.N. and Mazumder, M.K. (2014) Energy Yield Loss Caused by Dust Deposition on Photovoltaic Panels. *Solar Energy*, **107**, 576-604. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>
- [5] Mazumder, M.K., Sharma, R., Biris, A.S., *et al.* (2011) Electrostatic Removal of Particles and Its Applications to Self-Cleaning Solar Panels and Solar Concentrators. In: Kohli, R. and Mittal, K.L., Eds., *Developments in Surface Contamination and Cleaning*, Elsevier Inc, Amsterdam, 149-199. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7885-4.10005-3>
- [6] Myyas, R.N., Al-Dabbasa, M., Tostado-Veliz, M., *et al.* (2022) A Novel Solar Panel Cleaning Mechanism to Improve Performance and Harvesting Rainwater. *Solar Energy*, **237**, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>
- [7] Zorrilla-Casanova, J., Piliouguine, M., Carretero, J., *et al.* (2011) Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules: *Proceedings of the World Renewable Energy Congress—Sweden*, Linköping, 8-13 May 2011, 2985-2992. <https://doi.org/10.3384/ecp110572985>
- [8] Elnozahy, A., Rahman, A., Ali, A., *et al.* (2015) Performance of a PV Module Integrated with Standalone Building in Hot Arid Areas as Enhanced by Surface Cooling and Cleaning. *Energy & Buildings*, **88**, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.012>
- [9] 付锦. 光伏电池板清洁机器人的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [10] 董伯先. 浅析光伏电站清洁机器人的应用现状[J]. *太阳能*, 2020(3): 46-50.
- [11] Antonelli, G., Zobel, P.B., Marcellis, A.D., *et al.* (2020) Autonomous Robot for Cleaning Photovoltaic Panels in Desert Zones. *Mechatronics*, **68**, Article ID: 103272. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102372>
- [12] Patil, P.A., Bagi, J.S. and Wagh, M.M. (2017) A Review on Cleaning Mechanism of Solar Photovoltaic Panel. *Proceedings of 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Chennai, 1-2 August 2017, 250-256.
- [13] Hashim, N., Mohammed, M.N., Selvarajan, R.A., *et al.* (2019) Study on Solar Panel Cleaning Robot. *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 29-29 June 2019, Selangor. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2019.8825028>
- [14] Grando, M., Maletz, E.R., Martins, D., *et al.* (2019) Robots for Cleaning Photovoltaic Panels: State of the Art and Future Prospects. *Revista Tecnología y Ciencia*, 137-150. <https://doi.org/10.33414/rtyc.35.137-150.2019>
- [15] 刘豹. 现代控制理论[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2004.