

光伏阵列清洁机器人路径跟踪改进型自抗扰控制^{*}

芮宏斌¹ 曹伟^{1†} 朱玲仪² 彭家璇¹ 郭璇¹ 王天赐¹

(1.西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

(2.西安理工大学 土木建筑工程学院,西安 710048)

摘要 针对光伏阵列清洁机器人清洁作业过程中存在路径跟踪精度低与外界不确定干扰等问题,提出了一种改进型自抗扰控制策略来控制驱动单元模型,实现驱动单元角速度(力矩)的高鲁棒性控制,从而提高了机器人的路径跟踪精度.通过分析机器人的运动状态,得到清洁机器人实际运动位姿与期望运动位姿之间的误差.由于外界环境以及其他不确定因素的干扰,通过建立清洁机器人移动底盘带不确定干扰因素的动力学控制模型,在传统自抗扰控制器的基础上通过改进 fal 函数,提出了一种运动学与动力学内外嵌套的改进型自抗扰策略.改进型扩张状态观测器来实时观测并补偿不确定干扰因素,从而实现清洁机器人高精度跟踪作业目标路径.通过多种目标路径的跟踪仿真实验,最终都表现出了较好的跟踪结果.证明了本文所设计的基于改进型自抗扰控制的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制算法的优越性与有效性,提高了光伏阵列清洁机器人的清洁作业路径跟踪精度.

关键词 光伏清洁机器人, 路径跟踪, 干扰因素, 自抗扰控制

中图分类号:TP242

文献标志码:A

Path Tracking Improved Active Disturbance Rejection Control for Photovoltaic Array Cleaning Robot^{*}

Rui Hongbin¹ Cao Wei^{1†} Zhu Lingyi² Peng Jiaxuan¹ Guo Xuan¹ Wang Tianci¹

(1.School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2.School of civil and architectural engineering, Xi'an University of technology, Xi'an 710048, China)

Abstract Aiming at the problems of low path tracking accuracy and external uncertain interference in the cleaning process of photovoltaic array cleaning robot, an improved active disturbance rejection control strategy is proposed to control the driving unit model, which realizes the high robustness control of the angular velocity (torque) of the driving unit and improves the path tracking accuracy of the robot. Error between actual and expected motion poses of a cleaning robot by analyzing the motion state of the robot. Due to the interference of the external environment and other uncertain factors, by establishing the dynamic control model of the mobile chassis of the cleaning robot with uncertain interference factors, and by improving the fal function on the basis of the traditional ADRC, an improved ADRC strategy with embedded kinematics and dynamics is proposed. Cleaning robot realizes high precision tracking target path by improved extended state observer observing uncertain disturbance factors in real time. The robot showed good tracking results through a variety of target path tracking simulation experiments.

2022-08-14 收到第 1 稿,2022-10-14 收到修改稿.

^{*} 陕西省技术创新引导专项(2018ZKC-160),陕西省教育厅重点科研计划项目(22JY051),陕西省科技计划重点研发项目(2023-YBGY-357), Shaanxi Provincial Technical Innovation Guidance Special Project (2018ZKC-160), Shaanxi Provincial Department of Education Key Research Project (22JY051), Shaanxi Province Science and Technology Plan Key Research and Development Project (2023-YBGY-357).

[†] 通信作者 E-mail:weic_0000@126.com

Therefore, it proves the superiority and effectiveness of the path tracking control algorithm of photovoltaic array cleaning robot based on improved auto disturbance rejection control, and improves the path tracking accuracy of photovoltaic array cleaning robot.

Key words photovoltaic cleaning robot, path tracking, interference factor, active disturbance rejection control

引言

随着人类社会的发展,能源在各个领域扮演着重要的角色.所以新能源取代传统化石能源趋势已经势不可挡^[1].目前应用太阳能资源的主要方式为光伏发电.由文献[2,3]可知光伏阵列面板长期聚集灰尘会使光伏阵列的光电转换效率下降10%~25%,所以使用移动式清洁机器人在恰当的时间里高效率地清扫太阳能光伏阵列表面的灰尘意义重大.

光伏阵列清洁机器人在光伏组件之间沿着作业目标路径行走来清洁光伏阵列面板上的灰尘,因此需要一种高精度、高鲁棒性的路径跟踪控制策略来提高光伏阵列清洁机器人的作业效率.移动机器人因为其控制存在非完整约束的性质,因此近几年移动机器人控制深受国内外学者的青睐^[4-7].将非线性控制方法应用到非完整约束的移动机器人底盘路径控制当中,是当下移动机器人底盘控制的主要研究方向之一.典型的控制方法例如模糊PID系统、自适应控制等.Chen H等学者^[8]针对移动机器人路径跟踪过程中鲁棒性较差的问题,搭建自适应滑模变结构控制策略来排除外界不确定干扰对路径跟踪的影响.仿真数据表明所设计控制策略的正确性与实用性.李睿等人^[9]针对非道路环境中特种作业车辆路径跟踪控制问题,为了提高跟踪控制精度以及加强鲁棒性,将误差符号鲁棒积分引入到自适应路径跟踪控制方法当中.通过样机实验检验了学者所提控制方法的实用性.吴艳学者^[10]针对传统机器人路径跟踪控制算法中准确的数学模型中无法适应环境突变问题,提出滑模控制与自抗扰控制相结合的移动机器人路径跟踪控制算法.最后在虚拟仿真环境下对不同控制算法进行验证,仿真结果表明学者所提算法具有控制精度高,鲁棒性好的优势.李希等^[11]为了解决外界不确定干扰因素对飞行器的干扰问题,提出了一种自适应RBFNN算法来

实时观测并补偿外界干扰因素.仿真和实验均证明了该算法的有效性.孙娜^[12]以双功率下车辆弯道路径跟踪为研究对象,设计了一种采样时间转换控制器,最后通过仿真检验了较单率采样的优越性.

本文针对清洁机器人在光伏组件的清洁作业过程中存在外界不确定干扰的问题,建立了清洁机器人带不确定干扰因素的控制模型.在传统自抗扰控制器的基础上通过改进fal函数,提出了一种改进型自抗扰控制的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制策略.通过作业目标路径的跟踪仿真实验证明了本文所提路径跟踪控制算法的优越性与有效性,提高了光伏阵列的清洁作业效率.

1 光伏阵列清洁机器人底盘运动学建模

本文所针对的光伏阵列清洁机器人行走模式为后轮两侧电机驱动,属于差速运动模式移动机器人,通过控制后轮驱动电机的转速来控制清洁机器人移动底盘的作业速度和行进方向.清洁机器人需要在光伏组件之间精确地跟踪目标路径来完成光伏阵列地清洁作业,如图1所示.因此需要一种高精度、高稳定性的路径跟踪控制策略来提高光伏阵列清洁机器人的作业效率.

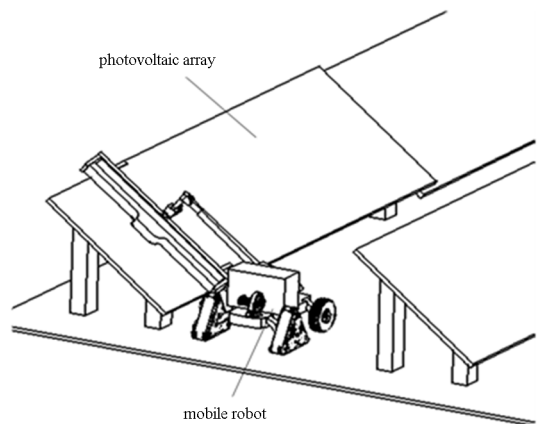


图1 机器人清洁作业状态
Fig.1 Robot cleaning operation state

如图2所示,在全局坐标系E-AB下,用向量 s

$(v, \omega)^T$ 来表示光伏阵列清洁机器人的姿态. P 是目标路径上的一个参考点, O 点为此时机器人的实际位置, 为清洁机器人实际前进方向与坐标轴 EA 的夹角, b 为理想目标点切线方向与坐标轴 EA 的夹角. 局部坐标系下 v 表示光伏阵列清洁机器人的线速度, ω 表示光伏阵列清洁机器人的角速度.

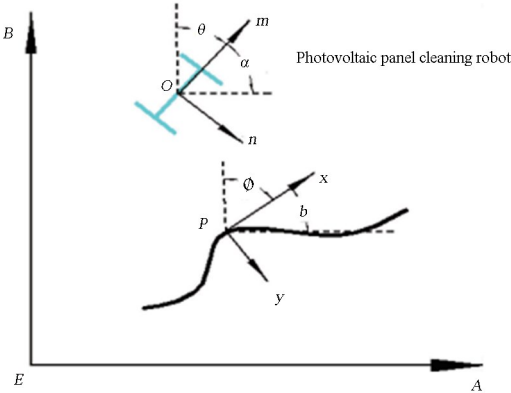


图2 光伏阵列清洁机器人运动模型

Fig.2 Motion model of photovoltaic array cleaning robot

清洁机器人理想的运动学模型为:

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{y}_B \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 \\ \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{s} \quad (1)$$

差速驱动式清洁机器人移动底盘的位姿可以通过控制两侧驱动轮的速度差来间接控制. 清洁机器人想要高精度跟踪预先规划的路径, 则需要计算移动机器人准确的线速度 v 和角速度 ω , 使清洁机器人的实际位姿准确无误的跟踪期望位姿.

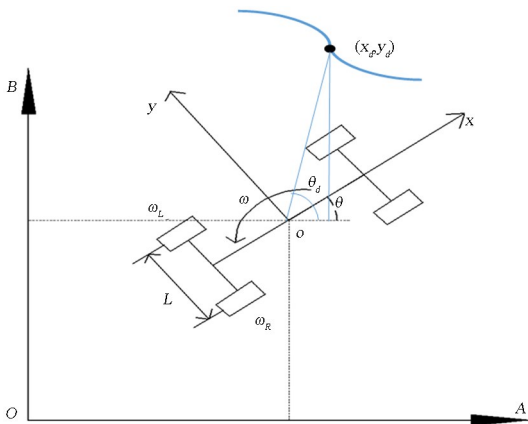


图3 差速驱动式清洁机器人的运动学模型

Fig.3 Kinematic model of differential drive cleaning robot

根据图3的几何关系, 后驱动轴与车体刚性连接且机器人中心点和后驱动轴中点均于机器人中轴线上, 两点运动轨迹基本重合. 则清洁机器人

的线速度 v 、角速度 ω 、左驱动轮线速度 V_L 以及右驱动轮线速度 V_R 之间的数学关系式如式(2)所示:

$$\begin{cases} V_L = R \cdot \omega_L \\ V_R = R \cdot \omega_R \\ \omega = \frac{V_R - V_L}{L} \\ v = \frac{V_L + V_R}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 R 为驱动轮半径; L 为两驱动轮之间的距离.

全局坐标系下清洁机器人的运动学如式(3)所示:

$$\begin{cases} X_A = v \cdot \cos\theta \cdot t \\ Y_A = v \cdot \sin\theta \cdot t \\ \theta = \omega \cdot t \end{cases} \quad (3)$$

2 清洁机器人路径跟踪运动学控制器分析

假设光伏阵列清洁机器人所要跟踪的理想路径位姿状态为 $\mathbf{P}_d = [x_d \ y_d \ \theta_d]^T$, 清洁机器人的实际位姿状态为 $\mathbf{P}_s = [x_s \ y_s \ \theta_s]^T$. 如图3所示, 局部坐标系下清洁机器人的轨迹误差 e_r 通过坐标变化矩阵求出, 如式(4)所示:

$$\mathbf{e}_r = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x_s \\ y_d - y_s \\ \theta_d - \theta_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中 x_d 为全局坐标系下清洁机器人在 A 坐标轴的期望位移; y_d 为全局坐标系下清洁机器人在 B 坐标轴的期望位移; θ_d 为全局坐标系下清洁机器人的期望横摆角; x_s 为全局坐标系下清洁机器人在 A 坐标轴的实际位移; y_s 为全局坐标系下清洁机器人在 B 坐标轴的实际位移; θ_s 为全局坐标系下清洁机器人的实际横摆角.

将式(4)对时间 t 求导数, 可以获得清洁机器人位姿误差的每个分量的微分方程, 如式(5)所示:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = e_y \omega_s + v_d \cos e_\theta - v_s \\ \dot{e}_y = -e_x \omega_s + v_d \sin e_\theta \\ \dot{e}_\theta = \omega_d - \omega_s \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, ω_d 为清洁机器人期望角速度; ω_s 为清洁机器人实际角速度; v_d 为清洁机器人期望速度; v_s 为清洁机器人实际速度.

通过式(6)将误差分量 e_x, e_y 组合成一个误差

分量 e_{xy} , 误差分量 e_θ 的计算表达式如(7)所示:

$$e_{xy} = \sqrt{(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2} \quad (6)$$

$$e_\theta = \arctan \frac{y_d - y_s}{x_d - x_s} - \theta_s \quad (7)$$

清洁机器人实际运动位姿与期望运动位姿之间的误差为 $[e_{xy} \quad e_\theta]^T$, 清洁机器人跟踪作业目标路径的实质是将误差分量 e_{xy} 与误差分量 e_θ 一直变小最后逼近于零. 将以上两个误差分量作为运动控制系统的输入, 其中 e_{xy} 作为机器人运动控制系统中速度控制环节的输入, 以机器人速度作为速度控制环节的输出. 假设清洁机器人在跟踪期望路径时, 速度与 e_{xy} 成正比, 清洁机器人的线速度可以用比例积分环节控制, 其中积分环节是 e_{xy} 为零时继续提供速度, 控制器如式(8)所示:

$$v = K_i \cdot e_{xy} + K_p \cdot \int e_{xy} dt \quad (8)$$

将误差 e_θ 作为横摆角控制系统的输入, 以机器人角速度为控制器的输出. 假设清洁机器人在跟踪期望路径时, 横摆角速度与 e_θ 成正比, 清洁机器人的横摆角速度可以用比例环节控制, 控制器如式(9)所示:

$$\omega = K_d \cdot e_\theta \quad (9)$$

3 清洁机器人路径跟踪动力学控制模型分析

第2小节分析了机器人的运动学控制方略, 在某些精度要求不高的使用场合可以满足移动机器人的路径跟踪控制要求, 但在光伏组件的清洁作业过程中, 由于外界环境以及其他不确定因素的干扰, 要配合清洁机械臂进行光伏阵列的清洁作业, 必须建立移动机器人系统的动力学模型. 本文清洁机器人的驱动单元为永磁式无刷直流电机, 通过改进型自抗扰控制器来控制驱动单元模型, 实现驱动单元角速度(力矩)的高鲁棒性控制, 进而简化了建立清洁机器人整机模型的繁杂性.

鉴于以上原因, 考虑各种外界不确定因素在内的永磁式无刷直流电机动力学模型^[13]如(10)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{r_a B_v + K_e K_t}{L_a J} x_1 - \frac{r_a J + L_a B_v}{L_a J} x_2 + \frac{K_t}{L_a J} u + d(t) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中 $[x_1 \quad x_2]^T = [\omega \quad \dot{\omega}]^T$ 代表驱动单元的角速度和角加速度; r_a 代表驱动单元电枢电路的电阻总和; B_v 代表驱动单元阻尼系数; K_e 代表反电势系数; K_t 代表转矩系数; L_a 代表绕组电感总值; J 代表转子转动惯量; u 代表驱动单元输入电压; $d(t)$ 代表外界不确定干扰及系统模型的不确定因素.

将式(10)做如下变化:

$$\begin{cases} -\frac{r_a B_v + K_e K_t}{L_a J} x_1 - \frac{r_a J + L_a B_v}{L_a J} x_2 = f(x, t) \\ \frac{K_t}{L_a J} = m \end{cases} \quad (11)$$

清洁机器人驱动电机的动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + mu + d(t) \\ y = x_1 = \omega \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 ω 为驱动电机的角速度.

4 路径跟踪改进型自抗扰控制(ADRC)器设计

自抗扰控制理论是我国韩京清学者在有效结合现代控制方法的基础上, 经过一系列优化之后提出的新型控制理论^[14]. 自抗扰控制器分别由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)以及非线性状态误差反馈率(NLSEF)所组成.

韩京清学者为了解决高频率震荡问题, 在前期的实验基础上选择了函数, 具体表达如下:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \delta^{1-\alpha} e & |e| \leq \delta \\ \text{sign}(e) |e|^\alpha & |e| > \delta \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中 e 为系统偏差; α 为非线性因子; δ 为滤波因子.

由(13)式可以看出传统的 fal 函数在分段点 δ 处连续但是不可导, 光滑性和连续性较低, 对光伏阵列清洁机器人的路径跟踪精度有着制约. 为了使传统 fal 函数在分段点连续可导, 对传统的 fal 函数(13)进行如下的改进^[15]:

$$sfal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \left[\frac{e^*}{e^* \left(\frac{-e}{\delta} \right) + 1} - 1 \right] & |e| > \delta \\ \delta^\alpha \left[\frac{e^*}{e^* \left(\frac{-e}{\delta} \right) + 1} - 1 \right] & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中为了与 fal 函数中的系统误差 e 区分, e^*

的实际意义为自然数 e , 鉴于篇幅原因, 式(14)在分段点的连续性及其可导性省略。

假设驱动单元动力学模型中 $f(x, t)$ 光滑且可导, $d(t)$ 有界可导, 令 $f = f(x, t) + d(t)$, $\dot{f} = g$, 则带改进型扩张状态的驱动单元动力学如式(15)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = \dot{\omega} \\ \dot{x}_2 = x_3 + mu \\ \dot{x}_3 = g \\ y = x_1 = \omega \end{cases} \quad (15)$$

采用上述改进型 $sfal$ 函数的离散扩张状态观测器为:

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + T[z_2(k) - \beta_1 e] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + T[z_3(k) - \beta_2 sfal(e, \alpha_1, \delta) + mu(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - T\beta_3 sfal(e, \alpha_2, \delta) \\ e = z_1(k) - y(k) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中, e 为光伏阵列清洁机器人左右驱动单元的角速度误差; z_1, z_2 以及 z_3 分别代表路径跟踪系统状态变量估计与不确定函数变量估计, u 代表自抗扰控制器的控制量, b, β_1, β_2 和 β_3 是增益系数。

状态误差反馈率用以上改进型 $sfal$ 函数实现状态误差的反馈:

$$\begin{cases} u_0 = \beta_1 sfal(e_1, \alpha, \delta) + \beta_2 sfal(e_2, \alpha, \delta) \\ e_1 = z_1 - v_1 \\ e_2 = z_2 - v_2 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中 e_1 为控制器输入信号与跟踪信号的误差, e_2 为控制器中误差的微分形式, β_1, β_2 是增益系数。

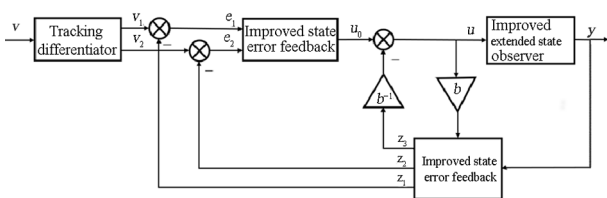


图4 改进型自抗扰控制系统框图

Fig.4 Block diagram of improved active disturbance rejection control system

根据式(16)、(17)可以看出, 改进后的扩张状态观测器逐渐收敛, 如若自抗扰控制器中各个参数设置合理^[14], 可以有效提升光伏阵列清洁机器人

路径跟踪的能力。

5 基于改进型自抗扰控制的光伏阵列清洁机器人控制器搭建

根据当前自抗扰控制器在工业控制领域的应用来说, 自抗扰控制器并不要求对控制系统中的被控对象建立高精度的数学模型, 针对差速移动式光伏阵列清洁机器人移动底盘, 改进型自抗扰控制器的搭建步骤如下所示:

(1) 预期路径生成器生成期望轨迹 $[x_d \ y_d \ \theta_d]^T$;

(2) 利用第二小节设计的清洁机器人运动学控制器得到清洁机器人的线速度 v 、角速度 ω 的控制律, 并计算得到电机的参考输入指令, 即左右两驱动轮的角速度 ω_L, ω_R 。清洁机器人驱动轮的角速度与清洁机器人的线速度 v 、角速度 ω 之间的数学关系如式(18)所示:

$$\begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & -\frac{L}{2R} \\ \frac{1}{R} & \frac{L}{2R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (18)$$

(3) 生成驱动单元角速度指令后, 利用式(5)~式(10)的动力学模型, 搭建改进型自抗扰控制器, 完成清洁机器人左右驱动电机力矩的输出, 快速跟踪左右驱动电机的期望指令;

(4) 依据光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制效果, 对改进型自抗扰控制器中微分跟踪器、扩张状态观测器以及非线性状态误差反馈率的各个参数进行调整。

本文设计的清洁机器人路径跟踪控制框架通过运动学与动力学的内外嵌套, 在动力学模块采用改进型自抗扰控制器来控制永磁式无刷直流电机系统模型, 使改进型扩张状态观测器来实时观测并补偿不确定干扰因素, 最终提高清洁机器人的路径跟踪精度。

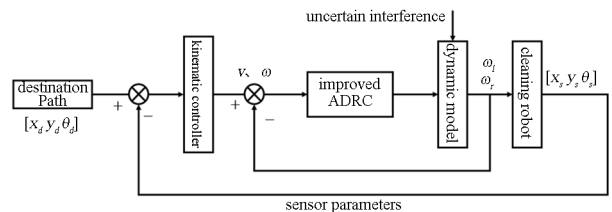


图5 基于改进型自抗扰控制器的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制系统框图

Fig.5 Block diagram of path tracking control system of photovoltaic array cleaning robot based on improved active disturbance rejection controller

图 5 为依据实际的被控变量,采用改进型自抗扰控制器搭建的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制系统框图。

依据图 5 路径跟踪控制思想,采用 MATLAB Simulink 工具搭建光伏阵列清洁机器人的路径跟踪控制仿真系统图,如图 6 所示。▽代表预期路径生成器;✱代表运动学控制器;✱代表改进型自抗扰控制器;!代表光伏阵列清洁机器人运动学模型。

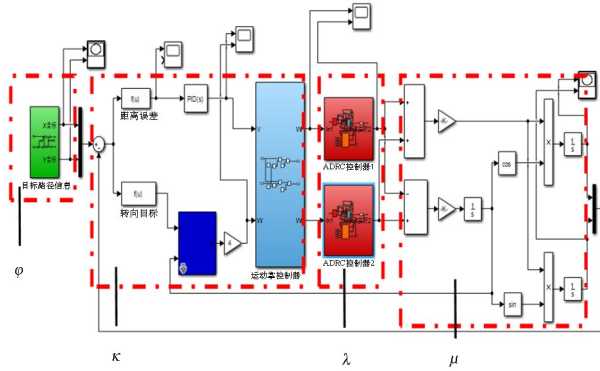


图 6 光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制仿真系统框架图
Fig.6 Schematic diagram of path tracking control simulation system for photovoltaic array cleaning robot

本文光伏阵列清洁机器人移动底盘参数,驱动轮直径为 300mm,左右两驱动轮的距离为 1300mm.改进型自抗扰控制器各个参数取值如表 1 所示。

表 1 改进型自抗扰控制器各个参数取值表
Table 1 Values of each parameter of the improved ADRC controller

Parameter	Numerical value
$T(TD)$	0.02
$r(TD)$	100
$\beta_1(ESO)$	50
$\beta_2(ESO)$	220
$\beta_3(ESO)$	630
$\alpha_1(ESO)$	0.75
$\alpha_2(ESO)$	0.1
$\delta(ESO)$	5
$\beta_1(NLSET)$	50
$\beta_2(NLSET)$	2
$\alpha_1(NLSET)$	0.5
$\alpha_2(NLSET)$	0.75
$\delta(NLSET)$	0.001

电机驱动单元的动力学参数如表 2 所示:

表 2 电机驱动单元的动力学参数表
Table 2 Dynamic parameters of motor drive unit

Parameter	Numerical value
L_a	100mH
K_e	13.3V/(Krpm)
K_t	1.87N·m/A
B_v	0.52N·m/r·min ⁻¹
J	25kg·cm ²
r_a	48Ω

对光伏阵列清洁机器人做以下路径跟踪仿真实验。

仿真实验一:目标点跟踪.初始位姿分别为(8, 5, $\pi/2$)、(5, 8, π)、(2, 5, $3\pi/2$)以及(5, 2, 0),跟踪目标点(5, 5).跟踪结果如图 7 所示,路径 1 为初始位姿为(8, 5, $\pi/2$)的跟踪结果;路径 2 为初始位姿为(5, 8, π)的跟踪结果;路径 3 为初始位姿为(2, 5, $3\pi/2$)的跟踪结果;路径 4 为初始位姿为(5, 2, 0)的跟踪结果。

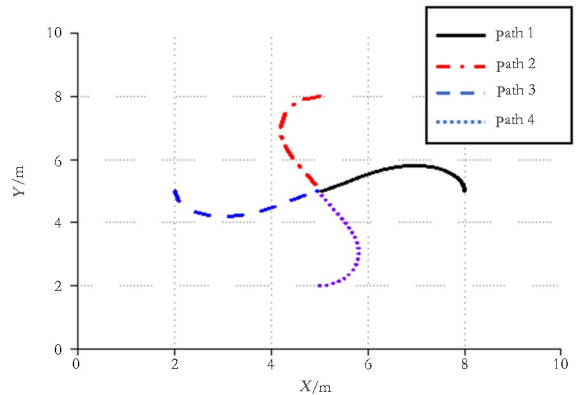


图 7 光伏阵列清洁机器人目标点跟踪结果
Fig.7 Target point tracking result of photovoltaic array cleaning robot

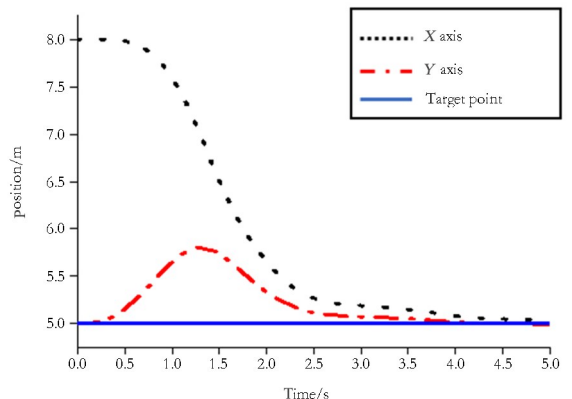


图 8 路径 1 跟踪位置曲线图
Fig.8 Trace position curve of path 1

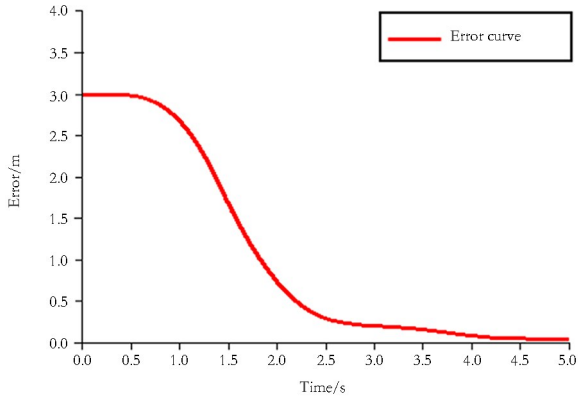


图9 路径1跟踪位置误差曲线图

Fig.9 Tracking position error curve of path 1

路径1跟踪位置曲线如图8所示,其位置误差曲线如图9所示,最小位置误差为 $1.993 \times 10^{-2} \text{ m}$,跟踪效果较好.

仿真实验二:直线轨迹跟踪.机器人的初始位姿为 $(8, 6, \pi/2)$,所跟踪的直线方程为式(19)所示.跟踪结果如图10所示,其位置误差曲线如图11所示,最小位置误差为 $1.042 \times 10^{-5} \text{ m}$.

$$x - 2y + 6 = 0 \tag{19}$$

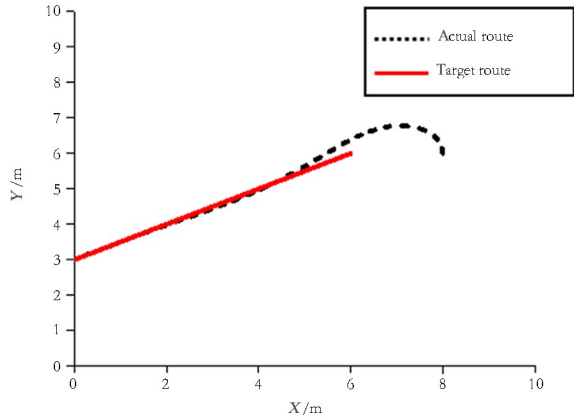


图10 机器人直线跟踪结果曲线

Fig.10 Linear tracking result curve of robot

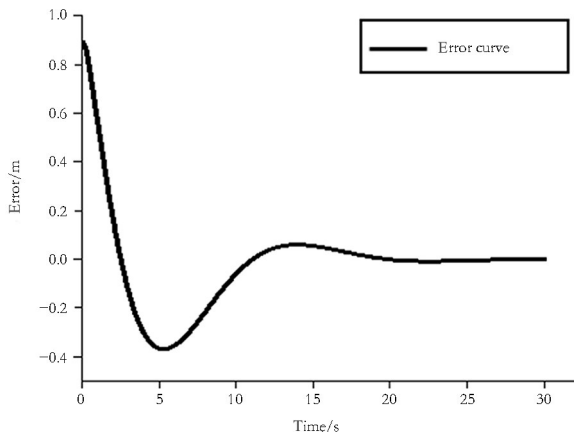


图11 直线跟踪位置误差曲线图

Fig.11 Line tracking position error curve

仿真实验三:圆弧轨迹跟踪.跟踪目标路径的出发点位姿为 $(2, 0, \pi/2)$,半径为 2000 mm 的圆,角速度为 $\pi/5 \text{ rad/s}$.参数方程如式(20)所示.光伏阵列清洁机器人的初始位姿为 $(0, 0, 0)$.为了检验上述改进型自抗扰控制器的优越性,采用改进型和传统型ADRC控制器对光伏阵列清洁机器人进行圆弧路径跟踪仿真实验,控制器各个参数取值相同.跟踪结果如下所示,图12为传统自抗扰控制器路径跟踪仿真结果,图13为改进型自抗扰控制器路径跟踪仿真结果.

$$\begin{cases} x_d = \cos(t) \\ y_d = \sin(t) \end{cases} \tag{20}$$

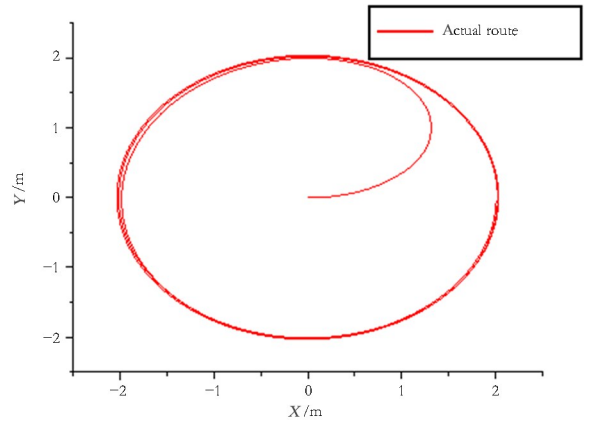


图12 传统型自抗扰控制器跟踪结果

Fig.12 Tracking results of traditional active disturbance rejection controller

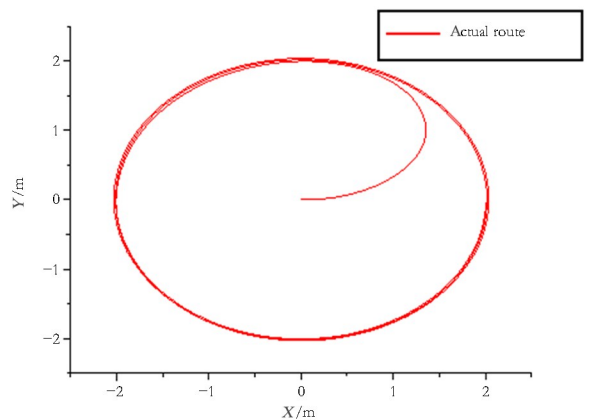


图13 改进型自抗扰控制器跟踪结果

Fig.13 Tracking results of improved active disturbance rejection controller

路径跟踪过程中偏差变化曲线结果如图14、图15所示,其中图14表示X方向跟踪误差,图15表示Y方向跟踪误差.根据仿真结果可以看出,采用改进型自抗扰控制器的机器人路径跟踪过程中X方向与Y方向的误差较传统型自抗扰控制器均

有所减小,从而提高了清洁机器人的清洁作业效率.

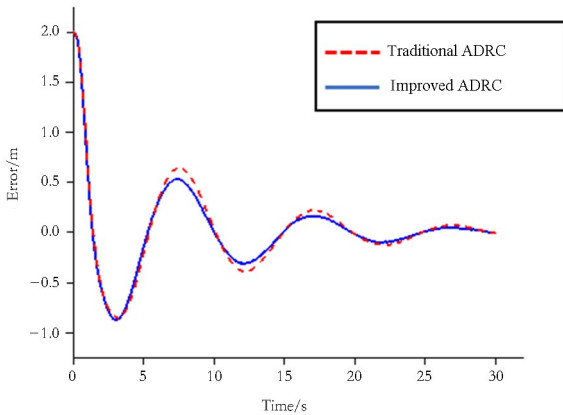


图14 路径跟踪过程中X方向偏差对比

Fig.14 Comparison of X-direction deviation during path tracking

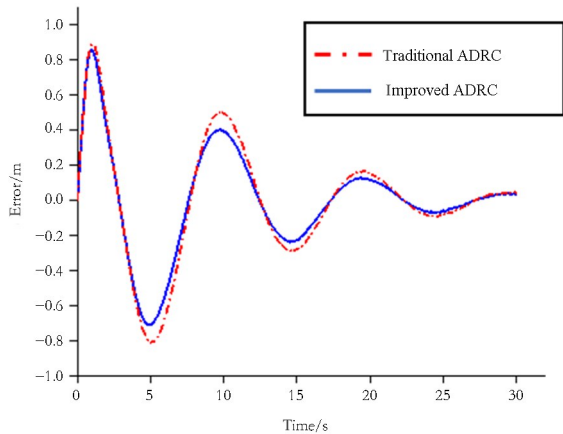


图15 路径跟踪过程中Y方向偏差对比

Fig.15 Comparison of Y-direction deviation during path tracking

通过以上仿真实验结果可以看出,本文设计的基于改进型自抗扰控制的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制器,与传统自抗扰控制器对比,前者有着较好的稳定性与路径跟踪精度.光伏阵列清洁机器人对目标点、目标直线以及目标圆弧路径都表现出了较好的跟踪结果.仿真实验结果检验了本文所设计的基于改进型自抗扰控制的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制器的有效性与优越性.

6 结论

通过对光伏阵列清洁机器人移动底盘运动状态的分析,得到了差速驱动式清洁机器人在局部坐标系下的位姿误差.针对清洁机器人在光伏组件的清洁作业过程中,存在外界不确定干扰的问题,建立了清洁机器人底盘带不确定干扰因素的动力学控制模型.

在传统自抗扰控制器的基础上通过改进fal函数,提出了一种运动学与动力学内外嵌套的改进型自抗扰策略.改进型扩张状态观测器实时观测并补偿不确定干扰因素,从而实现清洁机器人高精度跟踪作业目标路径.通过多种目标路径的跟踪仿真实验,其最终都表现出了较好的跟踪结果.证明了本文所设计的基于改进型自抗扰控制的光伏阵列清洁机器人路径跟踪控制算法的优越性与有效性,一定程度上提高了光伏阵列的清洁作业效率.

参考文献

- [1] AL-MAAMARY H M S, KAZEM H A, CHAI-CHAN M T. The impact of oil price fluctuations on common renewable energies in GCC countries [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75:989-1007.
- [2] MANI M, PILLAI R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9):3124-3131.
- [3] 余操,许盛之,姚建曦,等.灰尘导致的光伏电站发电损失的对比实验 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(4):243-248.
- [4] YU C, XU S Z, YAO J X, et al. The contrast experiment of photovoltaic power station of power lost due to dust [J]. *Journal of Solar Energy*: 2022, 43(4):243-248. (in Chinese)
- [5] 张丹凤.基于路径边沿引导策略的蛇形机器人路径跟踪方法 [J]. *机器人*, 2021, 43(1):36-43.
- [6] ZHANG D F. Path tracking method of snake-like robot based on path edge guidance strategy [J]. *Robot*, 2021, 43(1):36-43. (in Chinese)
- [7] 李逃昌.农业轮式移动机器人自适应滑模路径跟踪控制 [J]. *中国机械工程*, 2018, 29(5):579-584.
- [8] LI T C. Adaptive sliding mode path tracking control for agricultural wheeled mobile robots [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(5):579-584. (in Chinese)
- [9] 陈朝峰,杜志江,张慧,等.基于柔性驱动关节的下肢外骨骼双模态切换控制 [J]. *机器人*, 2021, 43(5):513-525.
- [10] CHEN C F, DU Z J, ZHANG H, et al. Double-mode switching control of a lower limb exoskeleton

- based on flexible drive joint [J]. *Robot*, 2021, 43(5): 513–525. (in Chinese)
- [7] 李一春, 乔毅. 四轮机器人路径跟踪控制器设计与仿真 [J]. *电子测量技术*, 2019, 42(13): 11–16.
LI Y C, QIAO Y. Design and simulation of path tracking controller for four-wheel robot [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(13): 11–16. (in Chinese)
- [8] CHEN H, WANG C, ZHANG B, et al. Saturated tracking control for nonholonomic mobile robots with dynamic feedback [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2013, 35(2): 105–116.
- [9] 李睿, 项昌乐, 王超, 等. 自动驾驶履带车辆鲁棒自适应轨迹跟踪控制方法 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(6): 1128–1137.
LI R, XIANG C L, WANG C, et al. Robust adaptive trajectory tracking control method for autonomous tracked vehicle [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1128–1137. (in Chinese)
- [10] 吴艳, 王丽芳, 李芳. 基于滑模自抗扰的智能车路径跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2019, 34(10): 2150–2156.
WU Y, WANG L F, LI F. Intelligent vehicle path tracking control based on sliding mode active disturbance rejection [J]. *Control and Decision Making*, 2019, 34(10): 2150–2156. (in Chinese)
- [11] 李希, 谭建豪. 基于自适应 RBFNN 噪声估计的自抗扰控制在姿态控制中的应用 [J]. *机器人*, 2019, 41(1): 9–18.
LI X, TAN J H. Application of the active disturbance rejection control based on adaptive rbfnn noise estimating to attitude control [J]. *Robot*, 2019, 41(1): 9–18. (in Chinese)
- [12] 孙娜. 基于双率采样的智能车辆弯道轨迹跟踪控制 [J]. *动力学与控制学报*, 2019, 17(4): 348–355.
SUN N. Curve trajectory tracking control of intelligent vehicle based on double rate sampling [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(4): 348–355. (in Chinese)
- [13] 江道根, 吕龙进, 潘世华, 等. 移动机器人轨迹跟踪快速终端滑模自抗扰控制 [J]. *控制工程*, 2022, 29(1): 91–100.
JIANG D G, LV L J, PAN S H, et al. Fast terminal sliding mode active disturbance rejection control for mobile robot trajectory tracking [J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(1): 91–100. (in Chinese)
- [14] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律—NLSEF [J]. *控制与决策*, 1995(3): 221–225.
Han J Q. Nonlinear state error feedback control law—NLSEF [J]. *Control and Decision*, 1995(3): 221–225. (in Chinese)
- [15] 芮宏斌, 曹伟, 王天赐. 基于改进型自抗扰控制的光伏板清洁机器人路径跟踪控制研究 [J]. *机械设计*, 2021, 38(2): 79–83.
Rui H B, Cao W, Wang T C. Research on path tracking control of photovoltaic panel cleaning robot based on improved active disturbance rejection control [J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(2): 79–83. (in Chinese)