

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.044

基于自抗扰控制的巷道清洗机器人路径跟踪控制研究

杜伟,王江龙,高帅帅

(陕西小保当矿业有限公司,陕西 神木 719302)

摘 要:在巷道清洗机器人路径跟踪控制中,机器人的行走路面环境对于控制的效果有着较大的影响,导致控制后的路径与期望路径存在较大的偏移距离。为此,提出基于自抗扰控制的巷道清洗机器人路径跟踪控制方法。根据机器人行走结构的力学参数进行动力学建模。通过采集巷道环境的点云数据,对机器人行走环境的路面平整度系数进行计算,由此量化行走环境的干扰因素。在此基础上,结合机器人的动力学建模,建立能够自抗扰控制路面不平整度的比例积分微分结构,从而实现巷道清洗机器人的路径跟踪控制。实验结果显示:所提方法在控制精度方面表现出色,控制后的路径与期望路径之间的偏移距离较小,在巷道清洗机器人路径跟踪控制领域中有着良好的应用前景。

关键词:巷道清洗机器人;路径跟踪;自抗扰控制;动力学建模;比例积分微分控制

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0239-06

Research on Path Tracking Control of Tunnel Cleaning Robot Based on Self Disturbance Rejection Control

DU Wei, WANG Jianglong, GAO Shuaishuai

(Shaanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd., Shenmu 719302, China)

Abstract:In order to alleviate the large deviation distance between the controlled path and the expected path due to the significant impact of walking road environment of the robot on the control effect in the path tracking control of tunnel cleaning robots, a path tracking control method for tunnel cleaning robots based on self disturbance rejection control is proposed. Based on the mechanical parameters of the robot's walking structure, corresponding dynamic modeling is conducted. By collecting point cloud data of the tunnel environment, the road flatness coefficient of the robot's walking environment is calculated to quantify the interference factors in the walking environment. On this basis, combined with the dynamic modeling of the robot, a PID structure capable of self disturbance rejection control of road roughness is established to achieve path tracking control of the tunnel cleaning robot. The experimental results show that the proposed method performs well in control accuracy, with a small offset distance between the controlled path and the expected path, and has good application prospects in the field of path tracking control for tunnel cleaning robots.

Keywords:tunnel cleaning robot; path tracking; self disturbance rejection control; dynamic modeling; proportional integral derivative control

0 引言

巷道清洗机器人能够实现自动化的巷道清洗与维护,在长距离的巷道环境管理中有着广泛的应用需求。然而,在机器人的行走过程中,如何保证机器人能够按照预计的路径进行清洗成为一个难题。对此,领域内很多研究人员提出了机器人路径跟踪控制方法。

白国星等^[1]提出了基于前馈模型预测控制的机器人路径跟踪控制方法。建立无预锚点的机器人线性模型预测控制框架。通过引入前馈转向角

信息,对行走路径的锚点进行拟合,以此实现行走路径的跟踪控制。在复杂多变的环境中,外部干扰和系统内部的不确定性因素可能超出模型的预测范围,影响前馈控制器的效果,进而影响机器人行走路径的精度。郝爽等^[2]提出了基于动态频率补偿的机器人路径跟踪控制方法。建立机器人行走路径的障碍函数,以此对目标路径进行高度耦合。在此基础上,建立机器人路径跟踪控制的动态频率补偿器,通过输入转矩等参数,实现路径的跟踪。但该方法在实际应用中受到传感器性能的影响,如果传感器的测量数据出现较大的误差,将

基金项目:陕西省科技厅批准项目(S2024-YD-QCYK-0291)

第一作者简介:杜伟(1988—),男,陕西神木人,工程师,硕士,研究方向为煤矿通风管理,wsr199719@163.com。

对最终的控制结果造成严重影响。张俊娜等^[3]提出了基于速度调节的机器人路径跟踪控制方法。解析机器人行走速度与转速速率之间的映射关系,以此生成相应的预瞄信息。结合非线性模型对机器人行走速度的调节,补偿位移误差,从而实现行走路径的跟踪控制。但在实际应用中,机器人可能受到地面不平整等因素的影响,导致机器人实际运动轨迹与期望路径产生偏差,而该方法可能难以完全消除这种偏差。

考虑到上述研究人员所提出的机器人路径跟踪控制方法在实际应用中存在不同的限制,导致控制的结果无法满足预期需求。为了缓解这一问题,本研究提出一种基于自抗扰控制的巷道清洗机器人路径跟踪控制方法。首先根据机器人行走结构力学参数进行相应的动力学建模,然后通过采集巷道环境的点云数据,对机器人行走环境的路面平整度系数进行分析计算,量化行走环境的干扰因素。在此基础上,结合机器人的动力学建模建立能够自抗扰控制路面不平整度的PID结构并引入扩张状态观测器,实现对系统中不确定性的估计和补偿。最后,将自抗扰控制的跟踪微分结构添加到初始的PID控制结构中,结合机器人的动力学建模,建立机器人的路径跟踪控制结构。

1 巷道清洗机器人路径跟踪控制方法设计

1.1 巷道清洗机器人的运动学建模

为了更好地了解巷道清洗机器人在行走过程中的动态行为,包括质量因素对机器人运动的影响,本文采用D-H参数法进行机器人的运动学建模。

首先分析机器人在直线运动的过程中,巷道清洗机器人的行走轮受力情况^[4]。为简化分析过程,假定机器人的几何中心与质心的点位一致,且巷道行走环境的摩擦因数恒定。在此基础上,定义机器人行走轮受力的表达式,如式(1)所示^[5]。

$$\begin{cases} f-F=mV \\ T-J\omega=fR \\ V=R\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 表示行走轮与巷道地面之间的摩擦因数; F 表示行走驱动力; V 表示机器人的直线行走速度; ω 表示在机器人行走过程中行走轮的转动角速度; m 表示行走轮的质量; T 表示行走轮的驱动力矩; J 表示行走轮的转动惯量; R 表示行走轮的半径。

根据所分析的机器人行走轮的受力情况,结合行走轮之间的连杆,对机器人行走的整体动态过程进行分析。根据机器人的关节轴线,以右手定则的方法确定坐标系的原点及轴向,基于此,建立相应的D-H坐标系 (x, y, z) ^[6]。在该坐标系下,根据行走轮的受力情况,建立整个机器人行走结构的动力学公式,如式(2)所示^[7]。

$$\begin{cases} Mx-f\cos\alpha = \frac{(\tau_L+\tau_R) \cdot \cos\alpha}{Q} \\ My-f\sin\alpha = \frac{(\tau_L+\tau_R) \cdot \sin\alpha}{Q} \\ J\alpha-T_R = \frac{(\tau_L+\tau_R) \cdot W}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 表示巷道清洗机器人的自质量; α 表示在D-H坐标系下,行走轮连杆的 x 轴向夹角; τ_L 和 τ_R 分别表示机器人质心距前轴、后轴的距离; Q 表示约束力项; T_R 表示后轴的驱动力矩; W 表示垂向阻尼力。

将式(2)所示的方程展开为矩阵的形式,如式(3)所示^[8]。

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -f\cos\alpha \\ -f\sin\alpha \\ -T_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\alpha}{2} & \frac{\cos\alpha}{2} \\ \frac{\sin\alpha}{2} & \frac{\sin\alpha}{2} \\ \frac{W}{2} & \frac{W}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\tau_L+\tau_R}{2} \\ \frac{\tau_L+\tau_R}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于展开的矩阵形式,确定机器人在D-H坐标系下的非完整约束方程,如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \alpha \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

在式(4)的方程中,代入巷道清洗机器人的行走速度等参数,建立相应的动力学模型,最终得到机器人的动力学模型表达式,如式(5)所示。

$$\zeta = \frac{RM}{2} - \frac{Rl}{W} \left(M + \frac{J}{l} \right) V^2 - \left(\frac{f}{2} + \frac{T_R}{W} \right) \quad (5)$$

式中: ζ 表示机器人的外部广义力,即动力学方程的表征参数; R 表示行走轮的半径; l 表示连杆质量。

通过上述步骤,完成在D-H坐标系下巷道清洗机器人的运动学建模。

1.2 巷道环境干扰分析

考虑到巷道清洗机器人在行走过程中所接触的地面环境具有较大的不确定性,对机器人行走

路径的控制造成了较大的干扰。针对这一问题,本文通过实时跟踪分析巷道环境的地面条件,解析路径控制的干扰因素。

通过在巷道清洗机器人上搭载激光雷达设备,实时获取巷道环境的点云数据^[9-11]。建立世界坐标系 $O(X,Y,Z)$,并将所采集的点云数据分别投影至 XOY 平面、 XOZ 平面上,由此提取巷道环境的边界轮廓。边界点的判定条件如式(6)所示^[12]。

$$H = \sqrt{\frac{\lambda^2}{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}} \quad (6)$$

式中: H 表示边界点云; (X_i, Y_i) 和 (X_j, Y_j) 分别表示点云数据 i 和 j 在映射平面上的坐标; λ 表示平面映射系数。

根据分析所得的巷道环境的边界轮廓,分析机器人清洗环境的地面平整度干扰,计算相应的路面平整度系数,如式(7)所示^[13]。

$$\beta = G(H_i) \left(\frac{H_i}{n} \right)^{-\varepsilon} \quad (7)$$

式中: β 表示路面平整度系数; G 表示断面点云; n 表示巷道空间内的点云数据量; ε 表示频率指数。

通过上述步骤,完成对机器人所清洗巷道环境的不平整度的干扰因素分析。

1.3 基于自抗扰控制的机器人路径跟踪控制

结合上述分析的巷道清洗环境的不平整度干扰,根据机器人的动力学建模,对机器人的行走路径进行自抗扰的跟踪控制^[14-16]。

引入比例微分积分的 PID 控制结构,如图 1 所示。

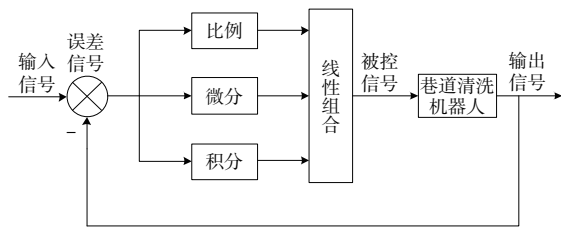


图 1 PID 控制结构

在图 1 所示的控制结构中,巷道清洗机器人行走路径的被控信号表达式描述为式(8)^[17]。

$$u = k_1 \delta + k_2 \int_0^t \delta dt + k_3 \frac{d\delta}{dt} \quad (8)$$

式中: u 表示被控信号; k_1, k_2, k_3 分别表示比例、微分、积分 3 项的系数; δ 表示误差信号; t 表示时间。

在上述的控制结构中,添加分析的巷道清洗

环境的不平整度干扰因素,将量化计算的路面平整度系数建立为跟踪微分结构,如图 2 所示^[18-20]。

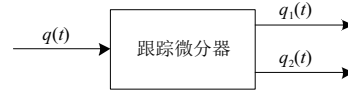


图 2 跟踪微分结构

定义如图 2 所示结构的数学表达式,如式(9)所示^[21]。

$$\begin{cases} q_1(t) = -\beta \left(u - q(t) + \frac{d\delta}{L} \right) \\ q_2(t) = -\beta \left(u + q(t) + \frac{d\delta}{L} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $q(t)$ 表示机器人在 t 时刻的输入信号; $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 分别表示跟踪了路面平整度系数这一干扰因素的跟踪信号和微分信号; L 表示机器人的目标清洗巷道长度。

将这一自抗扰控制的跟踪微分结构添加到初始的 PID 控制结构中,结合机器人的动力学建模,建立机器人的路径跟踪控制结构,如图 3 所示^[22-24]。

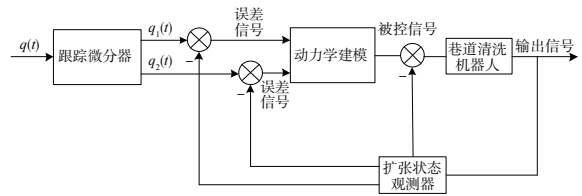


图 3 机器人路径跟踪控制结构

如图 3 所示,本文结合了巷道路面平整度的自抗扰控制,通过将跟踪这一干扰因素的误差信号输入到机器人的动力学建模中,实现在扩张状态观测器下的路径跟踪控制。在这一结果中,扩张状态观测器的表达式如式(10)所示^[25]。

$$P = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} (\eta - gC)\zeta + B \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \end{bmatrix} + gL \quad (10)$$

式中: P 表示扩张状态观测器; η 表示控制结构的前馈补偿; g 表示观测器的增益系数; C 表示观测器的反馈增益矩阵; B 表示观测量; $\hat{X}$ 和 $\hat{Y}$ 分别表示机器人在行走过程中 x 轴和 y 轴的路径误差补偿量。

利用上述建立的控制结构,实现对巷道清洗机器人路径的跟踪控制。

至此,完成基于自抗扰控制的巷道清洗机器人路径跟踪控制方法的设计。

2 测试实验

2.1 巷道清洗机器人

根据巷道清洗工作的实际需要,本次选用了满足基本性能参数的机器人进行测试实验。

所选用机器人如图4所示。



图4 实验用机器人

该机器人配备四轮行走结构,两轮差速转向,单次充电可连续工作8 h,覆盖面积约为10 000 m²。清洗刷系统的主刷直径30 cm,转速150 r/min,采用耐磨尼龙材质,适合多种地面;两侧各有1个边刷,直径15 cm,转速200 r/min,用于清理边角和缝隙。其余性能指标如表1所示。

表1 巷道清洗机器人性能参数

参数	数值
底盘总质量/kg	150
最大负载/kg	50
爬坡能力/(°)	40
工作速度/(m/s)	0.5
工作时间/h	8
越障最大高度/cm	40

在该机器人安装激光雷达设备,以采集巷道清洗环境的数据。所选用设备的性能参数如表2所示。

表2 激光雷达设备性能参数

参数	数值
激光光源波长/nm	905
检测半径/m	30
扫描角度范围/(°)	360
角度分辨率/(°)	0.12
刷新频率/Hz	25
测量误差/mm	≤25
重复精度/mm	±6
抗光干扰/Lux	80 000
抗冲击加速度/(×g)	10
脉冲持续时间/ms	16
抗振动频率/Hz	10~55

通过激光雷达设备的搭载后,将巷道清洗机器人放置在真实的巷道环境中开展本次测试实验。

2.2 机器人路径跟踪控制

为完成参数配置后的机器人设置巷道清洗任务,对本文方法的控制性能进行测试。

根据所选用机器人的性能参数进行动力学建模。在此基础上,利用激光雷达设备采集巷道环境的点云数据,处理得到如图5所示的结果。

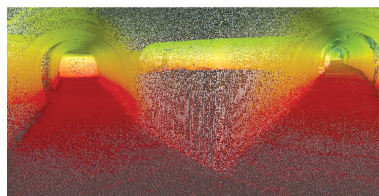


图5 巷道点云图

根据如图5所示的巷道点云图,对巷道环境的路面状态进行分析。通过计算,得到该巷道的路面平整度系数如图6所示。

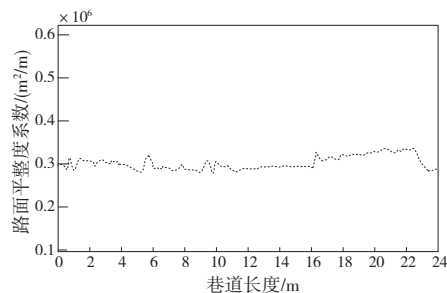


图6 巷道路面平整度

由图6可知,在实验的巷道环境中,其路面平整度基本呈现出较为稳定的水平,但仍存在小幅度的不平整干扰问题。路面平整度系数的波动表明巷道地面存在不平整、坑洼或凸起等情况。这些不平整因素会对巷道清洗机器人的行走稳定性和路径跟踪控制造成一定程度的干扰。在此环境下,通过建立对这一干扰进行自干扰控制的跟踪控制结构,对其阶跃响应情况进行分析,得到如图7所示的结果。

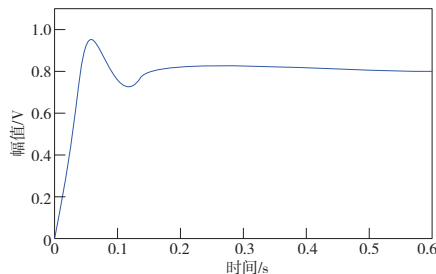


图7 路径跟踪控制结构阶跃响应曲线

由图 7 可知,本文方法所建立的机器人路径跟踪控制结构能够在较短的时间内完成对输入信号的响应,且响应幅度较为稳定。这是因为本文方法通过实时分析并补偿机器人行走环境中的干扰因素,从而提高了控制系统的鲁棒性和响应速度。同时,自抗扰控制结构中的扩张状态观测器能够有效地估计并补偿系统中的不确定性,使得控制结构能够快速且稳定地响应输入信号。

根据本文方法,测试得到巷道清洗机器人的实际行走路径结果如图 8 所示。

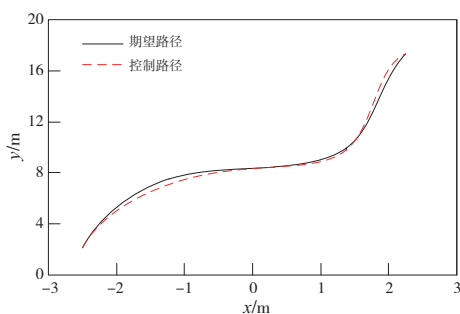


图 8 路径轨迹图

从图 8 可以看出,在本文方法控制下,巷道清洗机器人在完成清洗任务的过程中基本能够按照期望的路径行走,两者之间的误差较小。由此可见,本文方法能够对巷道清洗机器人的路径进行跟踪控制,实现目标的清洗任务。这是因为本文方法通过采集巷道环境的点云数据,对路面平整度系数进行量化分析,并将其作为干扰因素引入控制结构中。这使得控制系统能够实时地感知并补偿环境中的干扰,从而减小了行走路径与期望路径之间的误差。本文方法还结合了 PID 控制结构和自抗扰控制策略,建立了优化的机器人路径跟踪控制结构。这种控制结构不仅具有快速的响应速度,还能够有效地减小行走过程中的误差,使得机器人能够更好地按照期望的路径行走。

2.3 控制精度对比

为了进一步验证本文方法对巷道清洗机器人的控制性能水平,采用对比分析的方法对本文方法的控制精度进行验证。

分别采用基于前馈模型预测控制的机器人路径跟踪控制方法(方法 1)、基于动态频率补偿的机器人路径跟踪控制方法(方法 2)以及基于速度调节的机器人路径跟踪控制方法(方法 3)作为对比。经过多轮次的测试后,得到如图 9 所示的对比结果。

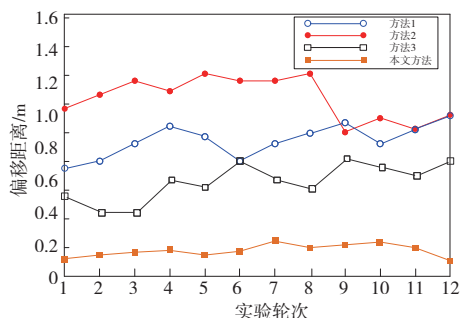


图 9 控制精度对比

由图 9 可见,在多个轮次的测试中,巷道清洗机器人在本文方法控制下的偏移距离均比较小,与期望的清洗路径更为接近,而且其他方法控制的路径偏移距离均与本文方法有着较大的差距。可以看出,本文方法能够更为精准地控制巷道清洗机器人的行走路径,应用性能更优。这是因为本文方法通过自抗扰控制和 PID 控制结构的结合,实现了对机器人行走路径的稳定控制。在多次测试中,该控制结构能够保持一致的控制性能,从而确保了机器人在不同环境下都能保持较小的偏移距离。

3 结语

本文针对巷道清洗工作中所应用的机器人控制问题,提出了基于自抗扰控制的巷道清洗机器人路径跟踪控制方法。该方法通过对扰动因素的控制,实现了在复杂巷道环境中的机器人跟踪控制。在测试实践中,该方法表现出了良好的控制性能,能够较好地抵抗路面平整度系数波动这一干扰因素的影响,保持较高的路径跟踪精度和稳定性。在实际应用中,使用本文方法巷道清洗机器人能够按照预定轨迹高效地完成清洗任务,替代人工的清洗方式,这不仅大幅度降低了人工劳动强度,同时还显著提高了巷道清洗的效率和质量。

参考文献:

- [1] 白国星,伊力夏提·伊力哈木江,付薛洁,等. 基于前馈模型预测控制的类车机器人路径跟踪[J]. 工程科学学报, 2024, 46(6): 1130-1139.
- [2] 郝爽,何玉鹏,陈继尧,等. 多蛇形机器人编队路径跟踪控制[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(7): 2981-2993.
- [3] 张俊娜,白国星. 基于速度调节与路径跟踪的差动机器人运动控制[J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1550-1558.

- [4] 沙莎,王辉平. 轮式移动机器人滑移轨迹跟踪控制策略研究[J]. 机床与液压,2023,51(9):62-69.
- [5] 周亮,刘凯,吴洪涛,等. 基于 EtherCAT 的 6-UPS 并联机器人控制系统设计[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):156-159,172.
- [6] 杨宇航,王恒,周欣,等. 基于事件触发的网络化无人车自适应路径跟踪控制[J]. 控制与决策,2024,39(9):3069-3078.
- [7] 韩陌,何洪文,石曼,等. 基于学习的无人驾驶车辆模型预测路径跟踪控制研究[J]. 汽车工程,2024,46(7):1197-1207.
- [8] 赵状状,张国忠,罗承铭,等. 考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J]. 农业工程学报,2024,40(12):46-54.
- [9] 汪洪波,王春阳,赵林峰,等. 基于强化学习的智能车辆路径跟踪变参数 MPC 多目标控制[J]. 中国公路学报,2024,37(3):157-169.
- [10] 张昊,魏超,胡纪滨,等. 基于转向模式切换的三轴独立转向车辆路径跟踪控制研究[J]. 机械工程学报,2024,60(2):243-251.
- [11] 马莉,刘国威,丁世宏,等. 考虑输入饱和的农用拖拉机路径跟踪有限时间控制[J]. 控制与决策,2024,39(6):1943-1950.
- [12] 王洪晖,李元明,梁银海,等. 智能化验机器人控制指令网络传输优化系统[J]. 电子设计工程,2024,32(18):150-153,158.
- [13] 李东方,张滨新,曾林林,等. 基于跟踪误差约束的机器鱼抗扰动路径跟踪控制[J]. 仪器仪表学报,2024,45(4):282-293.
- [14] 何智成,王煜凡,韦宝倡,等. 基于优化动力学模型的路径跟踪控制研究[J]. 中国机械工程,2024,35(6):1000-1009.
- [15] 胡建玥. 基于力觉伺服轨迹规划的磨抛工业机器人曲面跟踪控制研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(1):196-201.
- [16] 刘进. 轨道交通车辆吹扫机器人智能路径规划研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(4):245-249.
- [17] 陈莎莎. 基于改进乌燕鸥算法的移动音乐机器人路径规划[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):197-202.
- [18] 应泽华,王立辉,顾炜琪,等. 基于改进模型预测控制的机器人自适应路径跟踪控制方法[J]. 中国惯性技术学报,2024,32(11):1142-1150.
- [19] 李宁,何义良,赵建辉,等. 基于双 DQN 算法的机器人手臂带电作业精准导航研究[J]. 电网与清洁能源,2024,40(11):9-15.
- [20] 汤莉莉,文于华,周艳玲. 基于激光雷达的自主机器人移动路径跟踪方法[J]. 激光杂志,2024,45(10):204-208.
- [21] 王文博,赵书尚,李阁强,等. 基于遗传算法优化的 LQR 路径跟踪控制[J]. 机械设计与制造,2025(3):325-329,337.
- [22] 张俊娜,白国星. 基于多层 MPC 框架的类车机器人调速路径跟踪[J]. 工程科学学报,2024,46(8):1469-1478.
- [23] 郑路,张啸,王建国,等. 基于宏微结合的田间作业机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2023,54(9):13-26.
- [24] 汪沛,曾思晓,何杰. 无人驾驶农机避障路径跟踪仿真与验证[J]. 华南农业大学学报,2024,45(3):416-426.
- [25] 罗征志,韩怡可,张鑫,等. 改进 RRT-Connect 与 DWA 算法的巡检机器人路径规划研究[J]. 计算机工程与应用,2024,60(15):344-354.

收稿日期:2024-10-11