

面向超薄承载机器人的横向运动控制算法研究

罗天宇¹ 吴俊^{1,2} 高东光² 刘子俊² 董若霆²

(1. 湖南师范大学, 长沙 410081; 2. 湖南立中科技股份有限公司, 长沙 410221)

【摘要】针对智能网联汽车测试中超薄承载机器人(UCR)在复杂测试场景下路径追踪能力受限的问题,提出了一种改进的斯坦利(Stanley)横向运动控制算法。首先基于阿克曼转向原理建立UCR的运动学模型,并采用自行车模型简化UCR的转向系统,然后,在传统Stanley算法基础上引入模糊PID控制器以增强算法的自适应反馈能力。CarSim与MATLAB/Simulink联合仿真结果表明,相较于传统算法,改进后的Stanley算法在不同速度下的平均横向误差平均下降了50.67%,最大横向误差平均下降了41.76%。实车测试进一步证实了改进算法在中高速直线与变道场景下性能良好,平均横向误差均小于0.05 m,最大横向误差均小于0.17 m,满足智能网联汽车在不同场景下的测试要求,实现了对UCR的高速、高精度横向运动控制。

关键词:超薄承载机器人 斯坦利算法 模糊PID 横向控制 智能网联汽车测试 路径跟踪
中图分类号:U467.4 **文献标志码:**A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240421

Research on Lateral Motion Control Algorithm for Ultra-Thin Carrier Robots

Luo Tianyu¹, Wu Jun^{1,2}, Gao Dongguang², Liu Zijun², Dong Ruoting²

(1. Hunan Normal University, Changsha 410081; 2. Hunan Lizhong Science and Technology Co., Ltd., Changsha 410221)

【Abstract】To address the issue of limited path tracking ability of Ultra-thin Carrier Robot (UCR) in complex test scenarios in intelligent connected vehicle testing, this paper proposes an improved Stanley lateral motion control algorithm. Firstly, the kinematic model of the UCR is established based on the Ackermann steering principle, and the bicycle model is used to simplify the steering system of the UCR. Then, a fuzzy PID controller is introduced on the basis of the traditional Stanley algorithm in order to enhance the adaptive feedback capability of the algorithm. The results of the joint simulation of CarSim and MATLAB/Simulink show that the modified Stanley algorithm reduces the average lateral error by 50.67% and the maximum lateral error by 41.76% at different speeds compared with the traditional algorithm. The real-vehicle test further confirms that the improved algorithm performs well in medium and high-speed straight line and lane changing scenarios, with the average lateral error less than 0.05 m and the maximum lateral error less than 0.17 m. It meets the testing requirements of intelligent connected vehicles in different scenarios and realizes high-speed and high-precision lateral motion control of the UCR.

Key words: Ultra-thin Carrier Robot (UCR), Stanley algorithm, Fuzzy PID, Lateral control, Intelligent connected vehicle testing, Path tracking

【引用格式】罗天宇, 吴俊, 高东光, 等. 面向超薄承载机器人的横向运动控制算法研究[J]. 汽车工程师, 2025(5): 23-28.

LUO T Y, WU J, GAO D G, et al. Research on Lateral Motion Control Algorithm for Ultra-Thin Carrier Robots[J]. Automotive Engineer, 2025(5): 23-28.

1 前言

随着自动驾驶技术的不断进步,对车辆智能化

动态性能的测试与验证变得尤为重要^[1-2]。超薄承载机器人(Ultra-thin Carrying Robot, UCR)是智能网联汽车测试中的重要工具,能够承载不同的目标物

在不同测试场景下按规划路径行驶,中型UCR驱动轮直径只有60 mm左右,最高速度可达80 km/h。UCR的重要技术指标之一是路径追踪能力,优良的横向控制算法能够极大提高路径追踪的准确性和抗干扰性。

在横向控制方面,常用的方法包括比例积分微分(PID)控制、纯跟踪(Pure Pursuit)控制、线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)和模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)等。Han等提出了一种自适应PID神经网络横向控制器,该控制器利用反向传播(Back Propagation, BP)算法调整权重,从而实现了对PID参数的在线自适应调整,提高了预测精度^[3]。张成亮等提出了一种基于模糊控制纯跟踪模型的四轮转向农业机械路径跟踪算法,利用模糊控制器将航向偏差和横向偏差在每个控制周期内转化为总横向偏差作为输入,解决了纯跟踪算法中前视距离难以确定的问题^[4]。Yang等提出了一种基于前馈与预测LQR算法的智能车辆横向控制器,结合了前馈控制、预测控制和LQR的优势,能够根据路径跟踪误差模型进行精确调整^[5]。梁忠超等提出了一种基于自适应MPC的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制方法,通过不断更新卡尔曼状态估计器的相关增益系数矩阵及控制器状态,保证了系统的快速响应与收敛能力^[6]。上述方法均基于固定控制对象,而UCR在不同测试场景下受到的风阻与负载随搭载不同质量和体积的目标物改变,尤其是在高速场景下,细微不平的路面对小轮径的UCR也会产生较大干扰,因此对运动控制算法提出了较高的要求。

本文在此基础上提出一种基于UCR的斯坦利(Stanley)横向控制器,并结合模糊PID控制器的基本原理,在保证路径跟踪精确度的同时,提高横向控制的自适应抗干扰能力,以满足不同场景下的智能汽车测试要求。

2 基于改进斯坦利算法的UCR横向运动控制

2.1 UCR运动学模型

UCR的转向系统基于阿克曼转向原理设计,结合其结构特点,将UCR简化为自行车模型。自行车模型不考虑车辆在垂直方向的运动,即假设在二维平面内运动。视左、右两侧轮胎在任意时刻具有相同的转向角度和转速,两侧轮胎的运动可以合并为一个轮胎描述。简化后的UCR运动学模型如图1所示。

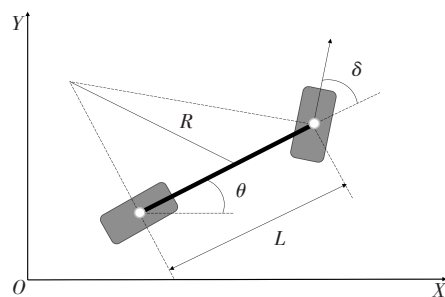


图1 简化后的UCR运动学模型

UCR前轮转角 δ 与轴距 L 、转弯半径 R 的关系为:

$$\tan \delta = \frac{L}{R} \quad (1)$$

2.2 Stanley算法

Stanley算法是一种无人车辆路径跟踪算法,该方法采用非线性反馈函数,基于横向跟踪误差实现横向误差的指数级收敛至零,其中横向跟踪误差为前轮中心点至路径最近参考点的距离^[7-11]。如图2所示,Stanley算法输出的前轮转角 δ 由航向误差转角 δ_φ 与横向误差转角 δ_y 组成:

$$\delta(t) = \delta_\varphi(t) + \delta_y(t) \quad (2)$$

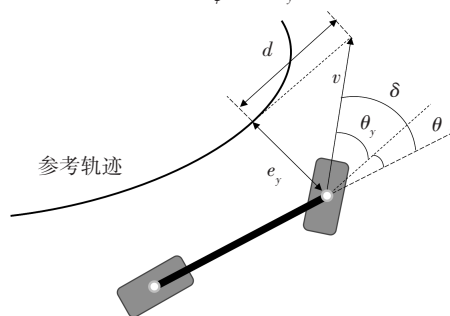


图2 Stanley算法原理示意

只考虑航向误差时,有:

$$\delta_\varphi(t) = \theta_\varphi(t) \quad (3)$$

式中: θ_φ 为车辆航向与最近路径点切线方向之间的偏角。

只考虑横向误差时,前轮转角与横向跟踪误差呈正相关。车辆预期轨迹在给定路径的最近点切线上,并在与最近点距离为 d 处相交,由几何关系可得如下非线性比例函数:

$$\delta_y(t) = \theta_y(t) = \arctan \frac{e_y(t)}{d(t)} = \arctan \frac{ke_y(t)}{v(t)} \quad (4)$$

式中: θ_y 为基于横向误差的偏角, e_y 为横向误差, $d=v/k$, v 为车速, k 为增益参数。

综上,输出前轮转角为:

$$\delta(t) = \theta_\varphi(t) + \arctan \frac{ke_y(t)}{v(t)} \quad (5)$$

由几何关系可知,横向误差变化率为:

$$\dot{e}_y(t) = \frac{-ke_y(t)}{\sqrt{1 + \left(\frac{ke_y(t)}{v(t)}\right)^2}} \quad (6)$$

当横向跟踪误差 e_y 极小时,式(6)改写为:

$$\dot{e}_y(t) \approx -ke_y(t) \quad (7)$$

积分可得:

$$e_y(t) = e_y(0)e^{-kt} \quad (8)$$

因此,横向误差指数收敛于 $e_y(0)=0$,增益参数 k 决定了收敛速度。

2.3 改进的 Stanley 算法

传统 Stanley 算法基于运动学的基本原理,在低速条件下具备较好的路径跟踪精度,但在高速场景下,由于缺乏误差反馈机制,在变道、转弯时横向跟踪精度下降,易出现滑移、过冲等现象^[12]。为解决上述问题,本文提出一种改进的 Stanley 横向控制器,引入模糊 PID 控制器提高跟踪性能与响应速度,以实现 UCR 前轮转角的动态反馈调整。

PID 控制器是一种线性反馈控制器^[13],在控制领域,PID 参数的设计与调节需要适应不同的系统与场景,在复杂工况下,固定参数的经典 PID 控制器无法抑制多变的外界干扰,输出易出现超调与振荡等现象。

模糊 PID 控制器在传统 PID 控制器的基础上加入了模糊控制器。模糊 PID 控制器的输入为误差和误差变化率,通过建立基于工程经验或者算法优化的模糊规则自适应调整 PID 控制器的参数来达到实时最优控制效果^[14]。

图 3 所示为改进后算法的基本原理,横向控制器的控制目标是 Stanley 算法中的横向误差与航向误差均趋于零,因此目标转角 $\delta_{\text{target}}=0$ 。模糊控制器的输入为目标转角 δ_{target} 与 Stanley 控制器输出之差 e 及其随时间的变化率 de/dt ,经过模糊化、模糊推理以及去模糊后输出比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d ,PID 控制器接收后输出期望转角:

$$\delta_{\text{output}}(t) = K_p e(t) + K_i \int e dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

输入转角差值 e 和转角差值变化率 de/dt 的论域分别为 $[-52^\circ, 52^\circ]$ 和 $[-2\ 500\ (^{\circ})/s, 2\ 500\ (^{\circ})/s]$,隶属度函数为三角形函数。输出 K_p 、 K_i 和 K_d 的论域分别为 $[0, 3]$ 、 $[0, 2]$ 和 $[0, 3]$,隶属度函数为高斯型函数。其中,解模糊方法为重心法^[15]。

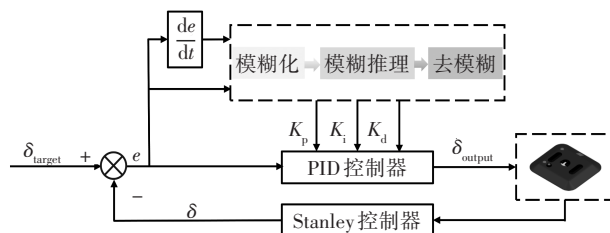


图3 改进后的 Stanley 控制器原理

3 仿真实验

3.1 仿真平台与工况

为验证改进的 Stanley 横向控制器的可行性,建立 CarSim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台。在 Simulink 中建立横向控制器与 PID 纵向控制器,CarSim 提供车辆动力学模型,搭建的仿真平台如图 4 所示。

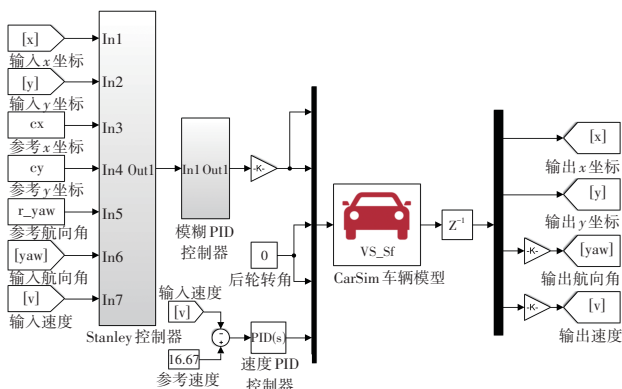


图4 仿真平台

双移线 (Double Lane-Change, DLC) 测试是一种标准的紧急避障测试,用于评估车辆在紧急情况下躲避障碍物的能力。建立 UCR 分别在 40 km/h、60 km/h 和 80 km/h 下的双移线工况,统计仿真横向误差,以验证在不同速度下算法改进后的跟踪效果。其中,Stanley 算法增益参数 k 均设置为 3,为模拟沥青地面,地面附着系数设置为 0.85。

3.2 仿真结果与分析

图 5 所示为不同速度下采用传统 Stanley 算法和改进 Stanley 算法控制时 UCR 双移线轨迹跟踪对比结果,平均横向误差与最大横向误差如图 6 所示。分析可知,算法改进前、后横向误差均随速度提高而增大,但相较于传统 Stanley 算法,改进后的 Stanley 算法平均横向误差在不同速度下平均减小了 50.67%,最大横向误差平均减小了 41.76%。由此可见,改进后的 Stanley 算法具备较好的路径追踪与抗干扰能力。

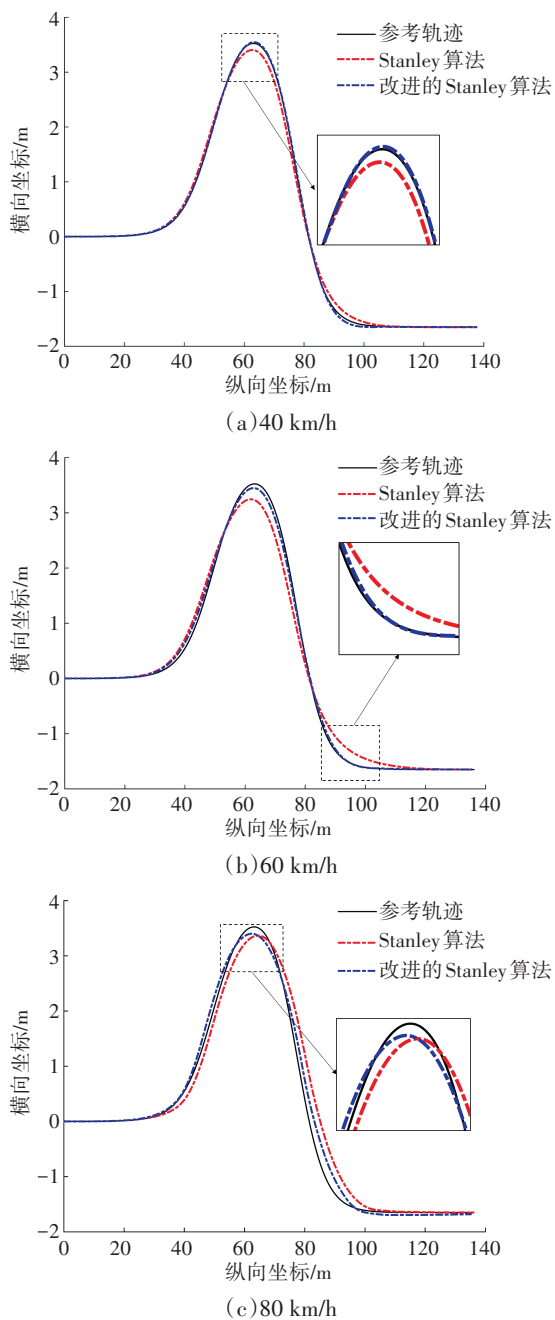


图5 不同速度下双移线工况轨迹跟踪仿真结果

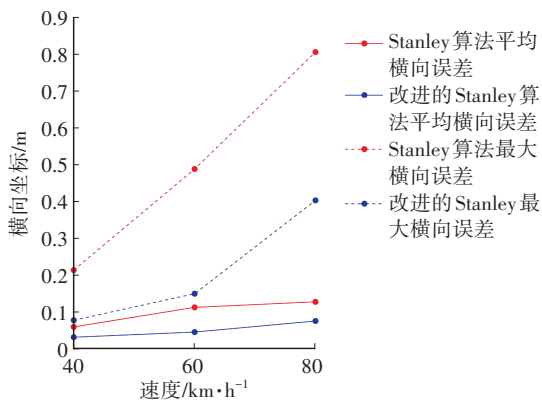


图6 双移线工况轨迹跟踪仿真横向误差

4 实车试验

4.1 试验平台

UCR的整车硬件与转向结构如图7所示。UCR采用伺服电机和电推缸输出直线运动,通过直拉杆拉动一边的车轮转动,再通过横拉杆传递到另一边车轮,实现机械转向。UCR的硬件系统分为弱电控制盒、驱动单元、电池系统、高精组合导航系统及引出模块等多个子系统,各子系统间建立电气连接,为提高UCR的防水防尘性能,各子系统单独进行密封处理,并预留防水航空插头供各子系统进行电气连接,同时对各舱室进行密封处理。

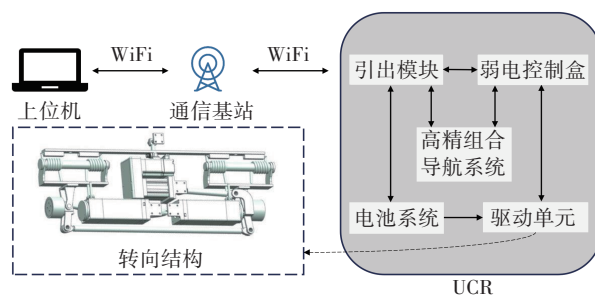


图7 UCR控制与转向系统

在实车测试过程中,期望轨迹通过上位机软件下发给底层控制器,同时底层控制器接收并处理(滤波、转换坐标)高精组合导航系统采集到的数据,如UCR坐标信息等。一方面,处理后的导航数据传入上位机软件储存并实时显示。另一方面,部分导航数据如速度、航向角等作为改进Stanley横向控制器的输入,结合期望轨迹计算并输出期望前轮转角。其中高精组合导航系统的定位精度为1 cm,满足UCR的路径跟踪要求。

UCR的底层控制器划分成主线程、电机控制线程和低实时性线程:电机控制线程优先级最高,能够保证电机控制算法的实时性,从而提高UCR控制的精度及稳定性;主线程具有中等优先级,能够快速响应主控卡的指令;低实时性线程可以在电机控制线程及主线程空闲时执行实时性要求低的任务,如电池数据采集。此外,为保证各线程正常运行,增加了看门狗安全机制。

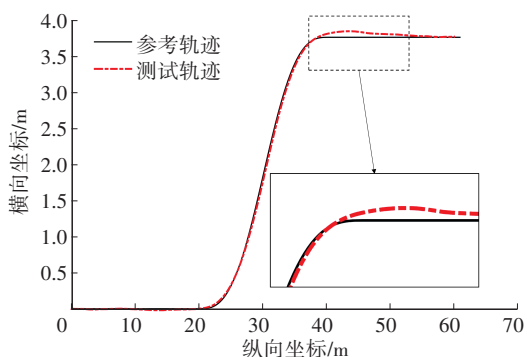
4.2 试验结果与分析

根据欧洲新车评价规程和中国新车评价规程,搭载目标物的UCR的测试场景多为直线与变道场景,如图8所示。为验证改进后的Stanley算法的轨迹跟踪效果,设置了30 km/h、40 km/h速度下的变道场景以及50~80 km/h速度下的直线场景。不同速

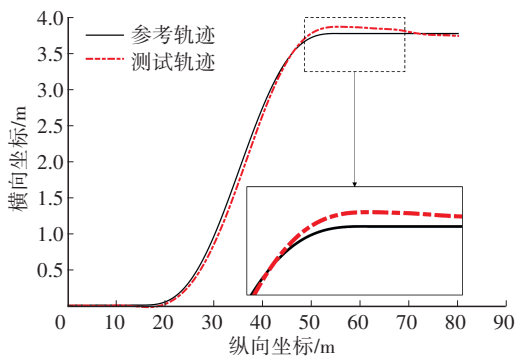
度下变道场景、直线场景实车测试轨迹分别如图9、图10所示,各场景下的平均横向误差与最大横向误差如表1所示。



图8 搭载摩托车目标物的UCR

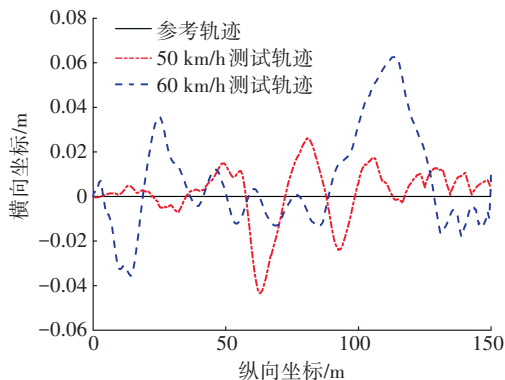


(a)30 km/h

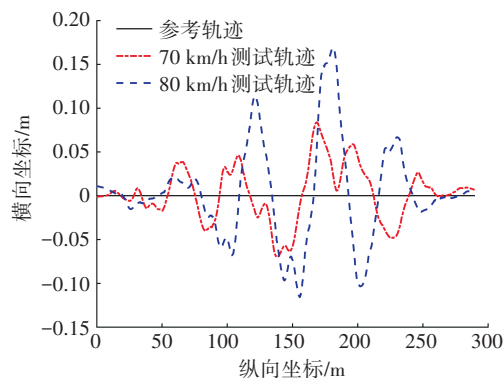


(b)40 km/h

图9 不同速度下变道场景轨迹跟踪测试结果



(a)50 km/h和60 km/h



(b)70 km/h和80 km/h

图10 不同速度下直线场景轨迹跟踪测试结果

表1 不同场景下的横向误差

测试场景	车速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	平均横向误差/m	最大横向误差/m
变道场景	30	0.023	0.103
	40	0.049	0.137
直线场景	50	0.009	0.042
	60	0.015	0.063
	70	0.024	0.084
	80	0.039	0.169

由图9、图10和表1可知:在变道场景下,平均横向误差小于0.05 m,最大横向误差小于0.15 m,横向误差主要集中在变道的后半段,表现为变道后的过冲现象;在直线场景下,随目标速度提高,平均横向误差逐渐增大,但均小于0.04 m,最大横向误差均小于0.17 m。上述测试结果表明,UCR在各场景下均满足测试要求。

5 结束语

针对智能网联汽车测试中超薄承载机器人路径追踪精度低和抗干扰能力差的问题,本文基于阿克曼转向原理建立了UCR的运动模型,对传统的横向控制Stanley算法进行了改进,引入模糊PID控制器建立自适应反馈机制,并进行了仿真验证和实车测试,结果表明:改进后的Stanley算法具备优良的路径追踪能力,具备不同速度下的自适应调节能力,能有效抑制外界干扰,相较于传统Stanley算法,鲁棒性得到提高,满足智能网联汽车在各场景下的测试要求。

但本文改进后的Stanley算法仍缺乏对路径的预见性,后续可对预瞄距离与增益参数k进行动态控制研究。

参考文献

[1] 李克强,戴一凡,李升波,等.智能网联汽车(ICV)技术的

- 发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 123-134.
- LI K Q, DAI Y F, LI S B, et al. State-of-the-Art and Technical Trends of Intelligent and Connected Vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 123-134.
- [2] 李伟男, 王宇, 李林润, 等. 自动驾驶汽车仿真测试场景生成方法综述[J]. 汽车工程师, 2024(7): 1-10.
- LI W N, WANG Y, LI L R, et al. An Overview of Generation Methods for Autonomous Vehicle Simulation Test Scenarios[J]. Automotive Engineer, 2024(7): 1-10.
- [3] HAN G N, FU W P, WANG W, et al. The Lateral Tracking Control for the Intelligent Vehicle Based on Adaptive PID Neural Network[J]. Sensors, 2017, 17(6).
- [4] ZHANG C L, GAO G L, ZHAO C Z, et al. Research on 4WS Agricultural Machine Path Tracking Algorithm Based on Fuzzy Control Pure Tracking Model[J]. Machines, 2022, 10(7).
- [5] YANG T, BAI Z W, LI Z Q, et al. Intelligent Vehicle Lateral Control Method Based on Feedforward+ Predictive LQR Algorithm[J]. Actuators, 2021, 10(9).
- [6] 梁忠超, 张欢, 赵晶, 等. 基于自适应MPC的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 835-840.
- LIANG Z C, ZHANG H, ZHAO J, et al. Trajectory Tracking Control of Unmanned Vehicles Based on Adaptive MPC[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(6): 835-840.
- [7] 李文礼, 易帆, 封坤, 等. 基于改进Stanley算法的目标假车路径跟踪控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(2): 20-31.
- LI W L, YI F, FENG K, et al. Path Tracking Control of Soft Target Vehicle Based on Improved Stanley Algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(2): 20-31.
- [8] WANG L, ZHAI Z Q, ZHU Z X, et al. Path Tracking Control of an Autonomous Tractor Using Improved Stanley Controller Optimized with Multiple-Population Genetic Algorithm[J]. Actuators, 2022, 11(1).
- [9] DEBARSHI S, SUNDARAM S, SUNDARARAJAN N. Robust EMRAN-Aided Coupled Controller for Autonomous Vehicles[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 110.
- [10] ABDELMONIEM A, ALI A, TAHER Y, et al. Fuzzy Predictive Stanley Lateral Controller with Adaptive Prediction Horizon[J]. Measurement and Control, 2023, 56(9/10): 1510-1522.
- [11] CIBOGLU M, KARAPINAR U, SÖYLEMEZ M T. Hybrid Controller Approach for an Autonomous Ground Vehicle Path Tracking Problem[C]// 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Valletta, Malta: IEEE, 2017.
- [12] CAMPBELL S F. Steering Control of an Autonomous Ground Vehicle with Application to the DARPA Urban Challenge[D]. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [13] 吴宏鑫, 沈少萍. PID控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003, 10(1): 37-42.
- WU H X, SHEN S P. Basis of Theory and Applications on PID Control[J]. Control Engineering of China, 2003, 10(1): 37-42.
- [14] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- WANG S Y, SHI Y, FENG Z X. A Method for Controlling a Loading System Based on a Fuzzy PID Controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172.
- [15] 王季方, 卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学, 2000, 18(4): 348-351.
- WANG J F, LU Z D. The Determine Method of Membership Function in Fuzzy Control[J]. Henan Science, 2000, 18(4): 348-351.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2024年12月31日。

(上接第22页)

- [13] RIEDMAIER S, PONN T, LUDWIG D, et al. Survey on Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles[J]. IEEE Access, 2020(8): 87456-87477.
- [14] 朱冰, 张培兴, 赵健. 面向多维度逻辑场景的自动驾驶安全性聚类评价方法[J]. 汽车工程, 2020, 42(11): 1458-1463+1505.
- ZHU B, ZHANG P X, ZHAO J. A Clustering Evaluation Method for Autonomous Driving Safety in Multi-Dimensional Logical Scenarios[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(11): 1458-1463+1505.
- [15] 白先旭, 左瑜, 李维汉, 等. 自动紧急制动系统控制模块的SOTIF量化评价[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1655-1665.
- BAI X X, ZUO Y, LI W H, et al. Quantitative Evaluation of SOTIF for Control Module of AEBs[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(9): 1655-1665.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2024年10月15日。