

# 自动驾驶汽车路径跟踪控制方法研究综述

黄榕 查云飞

(福建理工大学,福州 350118)

【欢迎引用】黄榕,查云飞. 自动驾驶汽车路径跟踪控制方法研究综述[J]. 汽车文摘, 2025(4): 23-28.

【Cite this paper】HUANG R, ZHA Y F. A Review of Path Tracking Control Methods for Autonomous Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(4): 23-28.

【摘要】通过对PID控制、鲁棒控制、滑模控制和模型预测控制进行综述,分析了各方法在自动驾驶中的应用特点。PID控制实现简单,但在复杂环境下表现有限;鲁棒控制能处理不确定性和干扰,但设计偏保守;滑模控制响应迅速且抗扰力强,却可能导致抖振问题;模型预测控制提供精确轨迹优化,计算资源需求高。研究表明,PID适合简易环境,鲁棒控制用于稳定性要求高的场合,滑模控制应对快速调整任务,模型预测控制适用于需要高精度的场景。未来研究将聚焦于多策略融合提升性能,适应不同工况,确保稳定性和精度;开发高效实时算法,结合机器学习增强自适应性及提高控制效率和可靠性,实现精准路径跟踪。

关键词:路径跟踪;模型预测控制;滑模控制;鲁棒控制

中图分类号:U471.15 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240042

## A Review of Path Tracking Control Methods for Autonomous Vehicles

Huang Rong, Zha Yunfei

(Fujian University of Technology, Fuzhou 350118)

【Abstract】Through the literature review of PID control, robust control, sliding mode control and model predictive control, the characteristics of each method's application in autonomous driving are analyzed. PID control is simple to implement but limited in complex environments. Robust control can deal with uncertainty and interference, but the design tends to be conservative. Sliding mode control offers rapid response and strong resistance to disturbances, yet it may cause chattering issues. Model predictive control provides precise trajectory optimization which requires high computational resources. The study shows that PID control is suitable for simple environments, robust control is suitable for situations requiring high stability, sliding mode control is applied to tasks that require for rapid adjustments, and model predictive control is suitable for scenarios that demand high precision. Future research will focus on integrating multi-strategy to improve performance, adapt to various working conditions, and ensure stability and accuracy. Moreover, it is also necessary to develop efficient real-time algorithms, combine machine learning to enhance adaptability, improve control efficiency and reliability, and achieve accurate path tracking.

Key words: Path tracking, Model prediction control, Sliding mode control, Robust control

## 0 引言

随着城市化进程加速,交通系统面临着日益增长的压力,包括道路拥堵、交通事故频发以及环境污染等问题。自动驾驶汽车作为一种创新的交通解决方案,正逐步成为改变未来出行方式的关键因素。自动驾驶汽车依靠人工智能、视觉计算、雷达、监控装置和全球定位系统协同合作,实现车辆的自动安全驾驶<sup>[1]</sup>。它不仅能够提高交通安全性和效率,减少人为错误导

致的事故,还能优化交通流量管理,降低能源消耗和排放。

路径跟踪控制的目标是确保车辆能够精确地跟随预定路线行驶,同时保证车辆行驶的稳定性 and 驾乘舒适性<sup>[2]</sup>。控制系统不仅要实时处理来自多种传感器(如摄像头、雷达和GPS等)的数据,还要具备高度的适应性和响应速度,以应对复杂多变的道路环境。因此,高效的路径跟踪算法对于提升自动驾驶汽车性能至关重要。本文主要介绍常用的路

径跟踪控制方法,包括比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制、鲁棒控制、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)、模型预测控制(Model Predictive Control, MPC),分析其工作原理、适用范围及其优缺点,并总结当前研究中的共性问题和发展趋势,提出未来可能的研究方向。

## 1 PID控制

PID控制作为经典的控制方法,广泛应用于自动驾驶汽车路径跟踪领域。该系统结构简单、易于实现,但是PID控制也有不足,特别是控制非线性和不确定目标。传统的PID控制器参数固定难以适应复杂的非线性控制系统,但通过引入自适应机制和其他控制方法,PID控制器可以实现对车辆路径跟踪控制<sup>[3]</sup>。在自动驾驶汽车路径跟踪控制研究中,张卫波等<sup>[4]</sup>设计了一种位置误差控制器,由期望横摆角速度生成器和模糊PID控制器组成。为了降低路径跟踪的误差,骆嫚等<sup>[5]</sup>提出回旋曲线-直线-圆弧拼接法,生成了垂直车位下曲率连续变化的泊车路径,针对自动泊车场景下车速低、曲率大等特点,研究了基于预瞄误差的PID路径跟踪控制器,大幅提高了路径跟踪精度。

由于车辆在行驶的过程中容易受到耦合、非线性以及气流的干扰,从而影响汽车行驶的稳定性和减少随机干扰对行驶过程中车辆稳定性的影响,Sun等<sup>[6]</sup>提出了一种模糊PID控制方法,利用3个PID控制参数与偏差信号之间的模糊关系对PID控制参数进行在线调整,在复杂多变的环境中快速有效地降低了车辆姿态控制系统的偏差。曾方正等<sup>[7]</sup>对于自动驾驶纵向控制算法在实车应用中存在的动态不平稳问题,提出了一种基于实车调参的模糊PID纵向控制算法,当车辆的期望速度发生动态变化时可进行PID参数自适应调节,所设计的控制系统响应迅速、准确性高,有效保证了纵向控制的动态性能。

针对控制对象发生变化时传统PID控制器难以对其控制参数进行实时调整的问题,张佳奇等<sup>[8]</sup>提出了一种以预瞄理论为基础的模糊自适应PID控制方法,设计了基于横向偏差和航向偏差的模糊自适应PID路径跟踪控制器。仿真试验表明,模糊自适应PID控制方法改善了控制器的动态性能且具有良好的自适应能力。

在处理多状态系统中车辆横向、纵向运动耦合问题时,PID控制存在较大的局限性。此外,车辆速度的

大范围波动导致系统参数的显著变化,进一步增加了PID控制难度。因此,如何在多变量时变系统中保持PID控制的效果是研究难点。

## 2 鲁棒控制

鲁棒性是指当控制系统某些参数发生变化时,系统能保持原有性能的特性。在自动驾驶汽车路径跟踪中,应用较多的鲁棒控制包括 $H_{\infty}$ 控制理论和结构奇异值理论( $\mu$ 理论)。由于车辆在行驶过程中容易受到各种环境和不同路况的影响,使路径跟踪精度有所下降。然而,将鲁棒控制理论用于控制器中可以减小外界干扰对模型灵敏度的影响,从而使得系统维持原有的性能。针对车辆侧向速度检测困难的问题,Jing等<sup>[9]</sup>提出了一种鲁棒 $H_{\infty}$ 输出反馈控制策略,实现了在不依赖横向速度信息的情况下进行轨迹跟踪。Jin等<sup>[10]</sup>用T-S(Takagi-Sugeno)模糊建模方法设计了非线性车辆横向动力学控制策略,开发出鲁棒模糊 $H_{\infty}$ 控制器用于提高车辆横向稳定性和操纵性能。Kayacan等<sup>[11]</sup>提出了一种新的鲁棒控制方法,该方法利用路径跟踪误差,为了保证精确的线性和曲线跟踪,将前馈和鲁棒控制技术相结合,并开发了线性模型预测控制器。

在状态检测、信息传递等环节中,存在大量的延迟、丢包等现象,这不仅会导致控制精度下降,还会对系统的稳定产生不利影响。针对以上问题,Wang等<sup>[12]</sup>研究了无人驾驶汽车存在时滞和数据丢包情况下的鲁棒 $H_{\infty}$ 轨迹跟踪控制问题,设计了既能进行轨迹跟踪又能进行侧向运动的鲁棒 $H_{\infty}$ 控制器。宋彦等<sup>[13]</sup>提出了以横摆稳定控制为内环、路径跟随控制为外环的串级控制结构和基于 $\mu$ 综合的横摆稳定控制方法。与传统的PID控制和 $H_{\infty}$ 控制相比,所设计的控制器具有更好的鲁棒性能。

鲁棒控制在自动驾驶汽车领域中表现出强大的稳定性和适应性,可以有效处理系统的不确定性和外界干扰,确保车辆在各种工况下稳定运行。但是,由于鲁棒控制设计较为复杂、运算量大、依赖于高性能硬件,在实车上难以实现最优控制,需进一步优化。

## 3 滑模控制

SMC又称非结构控制,是一种特殊的非线性控制,其非线性特性以控制不连续的形式体现,可以在动态过程中根据控制系统当前的状态有目的地不断

变化,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。在研究自动驾驶汽车的运动控制时,需要考虑车辆与路径之间的运动关系和车辆的非线性动力学,这增加了控制系统的复杂度。对于这类具有高维非线性、外部扰动和内部模型不确定性的被控对象,可以降低状态空间的维度,并利用非线性控制理论对其进行鲁棒性分析和控制。Ji等<sup>[14]</sup>采用了径向基神经网络来估计侧偏刚度的不确定性,开发了反步滑模变结构控制器,旨在保持车辆的横摆稳定性,同时减小了侧向位移跟踪误差。为解决路面曲率变化、路面超高和侧风干扰等复杂道路条件下自动驾驶横向控制精度不高、稳定性差的问题,高秀晶等<sup>[15]</sup>提出了基于反步滑模的自动驾驶横向控制器,有效地提高了路径跟踪精度和控制稳定性。郑雁南<sup>[16]</sup>采用将滑模控制与启发式优化算法相结合的反步滑模控制器,基于具有良好抗外部扰动的滑模控制算法来设计纵向控制器,并利用反步滑模横向控制器实现对车辆路径的跟踪与保持,以及与前方车辆对齐。

目前在自动驾驶汽车泊车系统的研究中,忽略实际车辆转向约束和初始位姿条件会影响实际车辆跟踪参考路径效果,姜立标和杨杰<sup>[17]</sup>结合非时间参考路径跟踪控制和终端滑模控制方法,提出基于趋近律的非时间参考终端滑模路径跟踪控制方法,大幅度提高了路径跟踪效果。江绍康等<sup>[18]</sup>为了解决由于车辆在低速泊车时速度变化而引起的轨迹跟踪精度较低的问题,提出了反演滑模自适应控制策略,试验证明所设计的泊车控制器能达到良好的路径跟踪效果。姜立标<sup>[19]</sup>针对现有自动驾驶汽车路径跟踪精度低和鲁棒性差的问题,结合滑模控制响应迅速、强抗干扰能力的优点,研究了基于趋近律的滑模控制算法。该趋近律通过将特定的幂次函数与反双曲线正弦函数相结合,使系统状态趋近速度得到提升的同时抑制了抖振现象,从而达到对目标轨迹的平稳、快速跟踪。黄华等<sup>[20]</sup>以线控转向系统为研究对象,以解决线控转向系统在未知干扰下的动力学响应特性与轨迹追踪精度问题为目标,构建了新型滑模趋近律实现趋近速度的动态调节,仿真结果证明改进滑模控制方法能够改善线控转向系统对转角的动态响应性能,提高路径跟踪精度。

在单横向控制方法的背景下,自动驾驶汽车路径跟踪存在的鲁棒性较差和易出现抖动的问题,陶捷等<sup>[21]</sup>设计了一种预瞄模型。利用二自由度车辆动力学模型作为基础,将方位偏差与横向偏差进行结合,

进一步集成先进的控制算法,创新开发了模糊滑模控制器。李哲等<sup>[22]</sup>学者为减小传统滑模控制带来的抖振问题,设计了自适应切换增益调节功能的模糊滑模控制器。Sun等<sup>[23]</sup>针对线控转向系统设计了嵌套自适应超扭曲滑模控制器(Nested Adaptive Super-twisting Sliding Mode Controller, NASTSM),该控制器采用嵌套自适应律,通过处理复杂时变外部干扰来提高跟踪精度,并采用超扭滑模控制(Super-Twisting Sliding Mode Control, STSM)组件,在保证强鲁棒性的同时减轻抖振现象。Feng等<sup>[24]</sup>将无模型自适应控制(Model-Free Adaptive Control, MFAC)与SMC相结合,提出了无模型自适应滑模控制(Model-Free Adaptive Sliding Mode Control, MFASMC)方法。通过与反馈-前馈控制方法的比较,MFASMC方法能更好地提高控制效果和抗扰动性能。

由于自动引导车(Automated Guided Vehicle, AGV)具有较强的非线性、耦合特性,受制于外部干扰和复杂的驾驶条件,难以建立精确的数学模型。这就要求AGV路径跟随控制具有较强的鲁棒性。Wu等<sup>[25]</sup>提出了基于非奇异终端滑模(Nonsingular Terminal Sliding Mode, NTSM)和自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)的AGV鲁棒路径跟踪控制策略。研究表明,所提出的控制策略能使AGV在保证整车稳定性的前提下快速准确地跟随参考路径,具有较强的鲁棒性。为了满足高速自主导航智能车的鲁棒性精度和刚性时间限制要求,Jun等<sup>[26]</sup>基于结构和运动模型设计了滑模控制器。该控制器通过对线速度和角速度的有效控制,实现了自动驾驶汽车对随机轨迹的高精度跟踪。

滑模控制对系统不确定性和外界环境干扰具有较强的鲁棒性,尤其对非线性系统展现出了良好的控制效果。此外,滑模控制方法能够快速响应,提供较为理想的控制输出。然而,滑模控制对模型误差较敏感、计算量较大,限制了其在复杂系统中的应用以及控制的实时性。同时,滑模控制的精度有限,在控制过程中容易产生抖振现象,影响车辆的稳定性以及路径跟踪的准确性。在实际应用中,需要权衡滑模控制方法的优缺点,并根据需求选择合适的控制策略进行优化。

#### 4 模型预测控制

MPC是实时优化闭环控制方法,属于反馈控制。与其他传统控制器相比较,MPC可以实现系统多输

入、多输出的控制,综合考虑车辆状态、驱动命令以及多种动力学约束等问题以实现目标轨迹的跟踪和预测,广泛应用于自动驾驶汽车路径跟踪的研究中。赵颖等<sup>[27]</sup>对比分析了基于预瞄的纯跟踪(Pure Pursuit, PP)算法、前轮反馈控制算法和MPC算法的车辆模型,发现MPC算法在不同速度下均具有良好的横向跟踪性能,并且在同一工况下MPC算法具有更优的控制性能。Lin等<sup>[28]</sup>在自动驾驶汽车的路径跟踪控制中引入线性三自由度车辆动力学模型作为预测模型,结合模型预测控制和模糊比例-积分-导数控制,实现车辆横摆稳定性和侧倾稳定性的同时控制,从而提高跟踪精度。

为了解决自动驾驶汽车高度非线性、强耦合的复杂运动控制问题,谢辉和刘爽爽<sup>[29]</sup>利用分层纵向控制器和逆纵向动力学模型,提出了基于MPC的横纵向综合控制方法,实现速度跟踪和协调驱动,同时通过横向控制器预测系统状态变化。王开峰<sup>[30]</sup>针对自动驾驶汽车横向控制问题,根据跟踪误差模型、目标函数、约束条件3个方面设计了基于MPC的轨迹跟踪控制器,有效提高了路径跟踪控制精度。

自动驾驶汽车在大曲率转弯工况下由于纵横向动力学的耦合和约束等问题会导致轨迹跟踪精度和稳定性的下降。针对以上问题,陈龙等<sup>[31]</sup>将非线性模型预测控制(Nonlinear Model Predictive Control, NMPC)和障碍函数法(Barrier Function, BM)相结合,提出了基于NMPC的横纵向综合轨迹跟踪控制方法,有效提高跟踪精度并改善了行驶稳定性。李培庆等<sup>[32]</sup>设计了可根据参考轨迹曲率自适应调节目标函数权重矩阵的模型预测控制算法,实现实时提高轨迹的跟踪精度。Shi等<sup>[33]</sup>研发了考虑路径曲率扰动的自适应模型预测控制(Adaptive Model Predictive Control, AMPC)轨迹跟踪系统,用于自动轮式装载机的非均匀轨迹跟踪中,有效改善了路径曲率变化对车辆的影响。

在低速路径跟踪控制研究中,车辆对控制器实时性要求较低,研究者们主要考虑前轮转角约束等系统约束对路径跟踪精度的影响。而NMPC所表现出的减少系统约束的影响、无需人为设置预瞄距离,以及对定位误差等扰动因素具有较强的鲁棒性等特点,能够满足低速路径跟踪控制的需求。而高速路径跟踪控制同时还面临着行驶稳定性的挑战,采用以计算成本较低的线性模型预测控制(Linear Model Predictive Control, LMPC)为基础,纳入动力学系统约束,同时增

设速度调节和权重分配等模块的控制方法对高速路径跟踪精度和行驶稳定性进行控制<sup>[34]</sup>。石振新等<sup>[35]</sup>提出基于MPC和模糊控制的轨迹跟踪控制器,用于自动驾驶汽车在高速工况下的路径跟踪,利用MPC控制前轮转角,模糊控制减少横摆角速度和质心侧偏角误差,提高了高速工况下路径跟踪的精度。

施竹清<sup>[36]</sup>考虑人机信任关系设计了稳定区域人机协同转向模型预测控制方法,同时针对极限工况车辆转向稳定性控制问题,提出了准无限时域非线性模型预测控制方法,通过仿真实验证明了所提出的方法能保证车辆转向稳定性和行驶安全性。Rafaila等<sup>[37]</sup>通过建立车辆转向控制系统运动学模型,提出了用于地面车辆自动转向的非线性模型预测控制方法,大幅度提升了路径跟踪精度。

胡珍宇<sup>[38]</sup>建立基于BP神经网络与MPC的避障控制器,利用行车风险因子和车辆失稳因子训练BP神经网络,并将权重输入至MPC控制器,有效改善了危险工况下的避障效果。吴永刚<sup>[39]</sup>为改善模型预测控制器在不同工况下的适应性,分析时域和约束等参数对控制器性能的影响,根据实时状态和道路信息,实现参数自适应机制,优化了控制器的跟踪性能。Wang等<sup>[40]</sup>提出了鲁棒模型预测控制器,用于在未知干扰下车辆的路径跟踪。采用带滑移的虚拟误差向量模型和自适应最小-最大模型预测控制方法,保证了跟踪的鲁棒性和准确性。

模型预测控制在自动驾驶汽车路径跟踪研究中展现出显著的优势,特别是在处理复杂道路环境时,可以有效处理系统约束、优化控制目标。但是与滑模控制相同,MPC需要强大的高性能硬件,并且复杂的计算不适合用于实时跟踪控制,未来MPC将向算法优化、实时性提升等方向发展。

## 5 总结与展望

本文综述自动驾驶汽车路径跟踪中常见的4种控制方法,包括PID控制、鲁棒控制、滑模控制、模型预测控制,这些方法各有优缺点,且适用于不同的场景和需求,不同控制算法比较如表1所示。

(1)自动驾驶汽车路径跟踪控制算法要满足多种不同工况的适用性,以确保车辆在各种道路条件和驾驶场景下都能保持稳定,且具有较高的跟踪精度。目前,对自动驾驶汽车路径跟踪控制的研究多聚焦于经典工况的仿真试验。近年来,研究者们也逐渐开始研究复杂工况下路径跟踪控制算法。针对具有强非线性

性、不确定性和耦合性等特点的复杂工况,需要融合多种控制算法对其进行设计研究,以得出运算成本低、控制效果好的最优控制方法。

表1 不同控制算法优、缺点

控制算法	优、缺点
PID控制	优点:结构简单,具有一定的鲁棒性,无需建立数学模型 缺点:不适合用于非线性系统
鲁棒控制	优点:可以处理系统的不确定性,适应不同的道路条件和驾驶场景 缺点:设计开发难度较高,高度依赖于参数的选择和调整
滑模控制	优点:具有较强的鲁棒性,响应速度快 缺点:计算量大,控制过程中易产生抖振
模型预测控制	优点:可对未来车辆的状态进行预测,可处理多变量和约束条件,实现系统的多输入多输出 缺点:计算复杂度较高,不适合用于实时操作

(2)自动驾驶汽车要实现路径跟踪控制算法实时响应,需要具备强大运算能力。为了在实时环境中运行复杂的控制算法,需要对算法进行优化,根据车辆的实时状态和环境变化,动态调整控制参数,提高跟踪精度和稳定性。同时引入由事件驱动的控制逻辑,使得车辆在必要时发出控制动作,减少不必要的计算和动作,提高实时性能。结合神经网络深度学习,训练出高效、自适应的控制策略,实现精准的路径跟踪。

(3)随着自动驾驶技术的快速发展,路径跟踪安全性和鲁棒性将会成为研究热点。结合人工智能与机器学习技术,利用多传感器融合与信息融合技术,提高传感器数据的准确性和可靠性,降低误差和不确定性,为自动驾驶汽车路径跟踪提供更加可靠的信息,有效提升路径跟踪的安全性。

#### 参 考 文 献

[1] 陈慧岩,熊光明,龚建伟,等. 无人驾驶汽车概论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.

[2] 龚建伟,刘凯,齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制第2版[M]. 北京:人民邮电出版社,2020.

[3] CAO J B, CAO B G, CHEN W Z, et al. Neural Network Self-Adaptive PID Control for Driving and Regenerative Braking of Electric Vehicle[C]// IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan, China: IEEE, 2007: 2029-2034.

[4] 张卫波,张麒麟,马宁,等. 基于模糊PID的智能车辆路径跟踪控制技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(2): 167-170+174.

[5] 骆嫚,熊胜健,隋立洋,等. 基于预瞄PID的自动泊车路径

跟踪分析[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(11): 66-71.

[6] SUN L H, MA J, YANG B Q. Fuzzy PID Design of Vehicle Attitude Control Systems[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference (CC-DC). Hefei, China: IEEE, 2020: 1826-1830.

[7] 曾方正,高秀晶,袁志群,等. 基于实车调参的自动驾驶模糊PID纵向控制算法[J/OL]. 中国测试, (2023-05-29) [2025-01-20]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/51.1714.TB.20230526.1639.006.html>.

[8] 张佳奇,张涛,杨佳龙,等. 基于模糊自适应PID的无人驾驶车辆路径跟踪控制[J]. 大连民族大学学报, 2021, 23(3): 218-222.

[9] JING H, HU C, YAN F J, et al. Robust  $H_{\infty}$  Output-Feed-Back Control for Path Following of Autonomous Ground Vehicles[C]// 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Osaka: IEEE, 2015: 1515-1520.

[10] JIN X J, YU Z T, YIN G D, et al. Improving Vehicle Handling Stability Based on Combined AFS and DYC System via Robust Takagi-Sugeno Fuzzy Control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(8): 2696-2707.

[11] ERKAN K, HERMAN R, WOUTER S. Robust Trajectory Tracking Error Model-Based Predictive Control for Unmanned Ground Vehicles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 806-814.

[12] WANG R R, JING H, HU C, et al. Robust  $H_{\infty}$  Path Following Control for Autonomous Ground Vehicles with Delay and Data Dropout[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7): 2042-2050.

[13] 宋彦,赵盼,陶翔,等. 基于 $\mu$ 综合的无人驾驶车辆路径跟随串级鲁棒控制方法[J]. 机器人, 2013, 35(4): 417-424.

[14] JI X W, HE X K, LV C, et al. Adaptive Neural Network Based Robust Lateral Motion Control for Autonomous Vehicle at Driving Limits[J]. Control Engineering Practice, 2018, 76: 41-53.

[15] 高秀晶,陶林君,黄红武,等. 复杂道路下自动驾驶车辆的横向运动鲁棒控制策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(4): 454-461.

[16] 郑雁南. 基于反步滑模的智能车辆路径跟踪控制研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2023.

[17] 姜立标,杨杰. 基于滑模控制的自动泊车系统路径跟踪研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 356-364.

[18] 江绍康,江浩斌,马世典. 基于反演滑模自适应策略的自动泊车路径跟踪控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(10): 9-16.

- [19] 姜立标, 吴中伟. 基于趋近律滑模控制的智能车辆轨迹跟踪研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 381-386.
- [20] 黄华, 高艺鹏, 王伟达, 等. 基于新型趋近律的智能无人车辆线控转向系统滑模控制[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(8): 773-782.
- [21] 陶捷, 郑思远, 黄昭焯, 等. 智能车辆路径跟踪的模糊滑模横向控制[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(2): 43-47.
- [22] 李哲, 王扬帆, 尹凯璇, 等. 基于模糊滑模控制的无人车路径跟踪[J]. 河北水利电力学院学报, 2022, 32(1): 9-15.
- [23] SUN Z, ZHENG J C, MAN Z H, et al. Nested Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Control Design for a Vehicle Steer-by-Wire System[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 122: 658-672.
- [24] FENG Z Q, JIANG H B, WEI Q Z, et al. Model-Free Adaptive Sliding Mode Control for Intelligent Vehicle Longitudinal Dynamics[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(7): 1904.
- [25] WU Y, WANG L F, ZHANG J Z, et al. Path Following Control of Autonomous Ground Vehicle Based on Nonsingular Terminal Sliding Mode and Active Disturbance Rejection Control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6379-6390.
- [26] YANG J, MA R, ZHANG Y R, et al. Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Intelligent Vehicle[J]. Physics Procedia, 2012, 33: 1160-1167.
- [27] 赵颖, 俞庭, 张琪, 等. 路径跟踪控制算法仿真分析与试验验证[J]. 汽车技术, 2022(7): 15-24.
- [28] LIN F, WANG S B, ZHAO Y Q, et al. Research on Autonomous Vehicle Path Tracking Control Considering Roll Stability[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(1): 199-210.
- [29] 谢辉, 刘爽爽. 基于模型预测控制的无人驾驶汽车横纵向运动控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(3): 326-333.
- [30] 王开峰. 基于 MPC 的自动驾驶汽车横向控制算法研究[J]. 无线互联科技, 2022, 19(24): 34-36.
- [31] 陈龙, 邹凯, 蔡英凤, 等. 基于 NMPC 的智能汽车纵横向综合轨迹跟踪控制[J]. 汽车工程, 2021, 43(2): 153-161.
- [32] 李培庆, 杨正龙, 陈一锴, 等. 变权重矩阵下的 MPC 轨迹跟踪研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(7): 62-68.
- [33] SHI J R, SUN D Y, QIN D T, et al. Planning the Trajectory of An Autonomous Wheel Loader and Tracking Its Trajectory via Adaptive Model Predictive Control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 131(9): 103570.
- [34] 白国星, 孟宇, 刘立, 等. 无人驾驶车辆路径跟踪控制研究现状[J]. 工程科学学报, 2021, 43(4): 475-485.
- [35] 石振新, 冯剑波, 王衍学. 基于 MPC 和模糊控制的智能汽车路径追踪研究[J]. 车辆与动力技术, 2022(2): 7-11.
- [36] 施竹清. 面向自动驾驶保证车辆转向稳定性的模型预测控制[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [37] RAFAILA R C, LIVINT G. Nonlinear Model Predictive Control of Autonomous Vehicle Steering[C]// 2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). Romania: IEEE, 2015: 466-471.
- [38] 胡珍宇. 基于模型预测控制的智能车辆避障控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [39] 吴永刚. 无人驾驶车辆自适应模型预测横向控制方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2022.
- [40] WANG X, JAVAD T, JAY K. Robust Model Predictive Control for Path Tracking of a Tracked Vehicle with a Steerable Trailer in the Presence of Slip[J]. IFAC Papers On Line, 2016, 49(16): 469-474.

(责任编辑 明慧)