

自动驾驶汽车路径跟踪控制发展综述

邓健贤 查云飞

(福建工程学院,福州 350118)

【欢迎引用】邓健贤,查云飞.自动驾驶汽车路径跟踪控制发展综述[J].汽车文摘 2023(5): 1-8.

【Cite this paper】DENG J X, ZHA Y F. Overview of the Development of Autonomous Vehicle Path Tracking Control[J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(5): 1-8.

【摘要】路径算法的研究目的是为了保证自动驾驶汽车能够精确跟踪由决策与规划层给出的参考路径,并确保路径跟踪过程中车辆的行驶稳定性和乘坐安全性。近年来,路径跟踪控制算法的研究成果丰硕,许多学者对现有算法进行优化、创新,诞生了包括系统模型、控制理论、有无前馈信息、行驶工况方面的多种路径跟踪控制算法。通过综述路径跟踪控制算法准确性和行驶稳定性的研究现状,分析2者之间的耦合关系,梳理路径跟踪控制研究历程中各种新旧算法迭代,提出兼顾准确性和行驶稳定性的控制策略,总结自动驾驶汽车路径跟踪控制未来发展趋势。

关键词:自动驾驶;路径跟踪;准确性;行驶稳定性

中图分类号:U471.15 文献标识码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220139

Overview of the Development of Autonomous Vehicle Path Tracking Control

Deng Jianxian, Zha Yunfei

(Fujian University of Technology, Fuzhou 350118)

【Abstract】The research purpose of path algorithm is to ensure that the autonomous vehicle can accurately track the reference path given by the decision-making and planning layer and ensure the vehicle's driving stability and riding safety in the process of path tracking. In recent years, the researches on path tracking control algorithms have been fruitful. Many scholars have optimized and innovated the existing algorithms, and a variety of path tracking control algorithms have been created, including system model, control theory, with or without feed forward information and driving conditions. By summarizing the research status of the accuracy and ride stability of the path tracking control algorithms, the coupling relationship between the 2 algorithms is analyzed, and various iterations of the old and new algorithms in the course of the path tracking control research are sorted out. The control strategy taking into account the accuracy and ride stability is proposed, and the future development trend of the path tracking control of autonomous vehicles is summarized.

Key words: Automatic driving, Path tracking, Accuracy, Driving stability

缩略语

MPC	Model Predictive Control
ADRC	Active Disturbance Rejection Control
AGV	Automated Guided Vehicle
RTK	Real Time Kinematic
CORS	Continuous Operating Reference Station
L-MPC	Linear- Model Predictive Control
PFS	Path Tracking System
DYC	Direct Yaw-moment Control
LTV	Linear Time Varying

AFS Active Front Steering

ARS Active Rear Steering

0 引言

汽车保有量大幅增加带来了交通拥堵、安全事故等一系列问题,其主要影响因素来自于驾驶员,如身体状态、心理状态、驾驶不当等。自动驾驶汽车能够将驾驶责任转移分担,大大降低人为因素导致交通事故的发生概率^[1]。路径跟踪控制作为自动驾驶技术的难点和关键点,也成为广大学者关注和研究的热点。通过对中国知网(CNKI)期刊库进行关键词组合检索,

并对检索结果进行可视化分析,可知路径跟踪控制方面的研究成果呈逐年增长趋势。在这些研究成果中存在一些共性的技术问题与解决思路^[1]。

路径跟踪控制即通过自动转向控制使车辆始终沿着期望路径行驶^[3],同时保证车辆的行驶安全性和乘坐舒适性。由于汽车具有非线性和强耦合的特点,其横向运动和纵向运动存在高度耦合,导致汽车难以同时保证路径跟踪精度和行驶稳定性,而行驶稳定性是安全性和舒适性的重要影响因素^[4]。针对这对相互耦合的优化目标,产生了一系列路径跟踪控制算法。

本文从外部因素到内部因素进行路径跟踪准确性研究成果梳理,对于行驶稳定性的研究从横摆稳定性和侧倾稳定性2个角度切入,最后通过分析路径跟踪准确性和行驶稳定性的关系,梳理当前提出能够保证这2个指标的方法,主要包括速度调节、权重分配、博弈论方法,同时总结当前方法的不足,提出自动驾驶路径跟踪的未来发展方向。

1 路径跟踪准确性研究现状

自动驾驶汽车对于路径跟踪控制精度提出了很高要求,即在各工况下不能偏离目标路径,即使路面条件潮湿或道路比较曲折,控制器也要具有准确跟踪目标路径的能力,又称为路径跟踪的准确性,是路径跟踪算法的重要评价指标之一^[5]。

1.1 鲁棒性研究

常规工况下,当前大多数算法均能保证自动驾驶汽车实现高准确性跟踪,但恶劣道路条件和工况对于路径跟踪的准确性影响较大,因而算法的鲁棒性成为路径跟踪准确性的研究热点。而当前提高算法鲁棒性的方法主要有以下2类。

(1) 针对控制算法的参数进行自适应调节

文献[6]考虑到常规PID控制器参数确定复杂,且对于外界干扰和车速自适应性差,提出模糊PID控制算法,实现参数的自适应调整,大大改善了PID算法的自适应性,保证了在恶劣工况下的准确性。文献[7]考虑当前控制器多采用固定参数设计,其对不同工况的自适应能力不足,通过分析预测时域、控制时域、约束等对控制器性能的影响,提出一种自适应模型预测控制(Model Predictive Control, MPC),从而提高了路径跟踪控制器的鲁棒性。文献[8]采用鲁棒输出反馈控制,在不考虑车辆横向速度的情况下实现了车辆的路径跟踪。文献[9]为了提高自动驾驶汽车路径跟踪的准确性,设计了一种对外界干扰具有较强鲁棒性的综

合前馈-反馈及自抗扰控制算法(Active Disturbance Rejection Control, ADRC),并利用粒子群算法对控制器参数进行了优化,大大提高了算法的自适应性。文献[10]针对无人艇在路径跟踪过程中,存在环境扰动未知和模型参数难确定的控制问题,提出一种基于遗传算法优化PID控制器的路径跟踪控制方案,利用遗传算法优化了PID控制器参数,大大提高了控制器的自适应能力。

(2) 利用状态观测器提高控制算法鲁棒性

利用状态观测器进行干扰量估计,而后进行控制量补偿,进而达到提高控制算法鲁棒性的目的。文献[11]为了保证车辆在外界干扰下准确跟踪期望路径,将预瞄控制设置为前馈控制,并设计了额外的补偿控制进行转角补偿,避免自动驾驶汽车在路径跟踪中被外界干扰偏离参考路径。文献[12]为减少外界干扰对农用车辆路径跟踪精度的影响,提高路径跟踪系统鲁棒性,提出了一种基于干扰观测器和改进模糊PID算法的农用车辆路径跟踪控制策略。文献[13]以自动导引运输车(Automated Guided Vehicle, AGV)为研究对象,考虑其在路径跟踪过程中易受外部干扰和参数扰动等干扰因素的影响,提出一种基于干扰观察技术的复合干扰鲁棒控制技术,抑制了复合干扰对路径跟踪精度的影响。

1.2 考虑传感器精度的影响

自动驾驶汽车高精度定位是自动驾驶核心技术之一^[14],对于路径跟踪控制器的跟踪性能影响极大,现有定位技术多采用载波相位差分技术(Real Time Kinematic, RTK)定位方法、基于视觉定位方法、网络定位等。文献[15]提出了一种基于连续运行参考站(Continuous Operating Reference Station, CORS)网络定位的路径跟踪方法。文献[16]以激光导引叉车为研究对象,为了改进传统PID算法在路径追踪偏差修正中表现出的鲁棒性差、对环境变化比较敏感等问题,提出了一种模糊PID算法。文献[17]提出一种基于低数据量矢量地图的智能车导航方法,通过基于预瞄点与历史点的几何学算法进行路径跟踪与避障。但受当前技术限制,高精度激光雷达和GPS等传感器价格昂贵,多用于豪华车型,且在封闭厂区、偏僻地区如山区、隧道等弱定位工况下,定位信号的间断、漂移,对路径跟踪影响很大。因此,基于车载信息源的定位方法成为了自动驾驶的一项关键技术。文献[18]基于二自由度车辆模型,采用卡尔曼预测算法根据车辆信息计算车辆的行驶轨迹,大大提高了路径跟踪精度。文

献[19]针对导航定位过程中环境影响导致GPS定位不准确的问题,提出一种多系统多模型混合交互式信息融合定位方法,结合惯性测量单元信息,利用航迹递推算法预测未来短时间内智能车辆位置和方向,一定程度上降低了GPS定位不精确时对路径跟踪的影响。

1.3 考虑模型精度的影响

汽车模型的建立是路径跟踪算法的基础,但由于汽车具有强耦合性、非线性特点,往往需要对模型进行简化、线性化,但这导致所建立的模型精度有限,对于自动驾驶汽车路径跟踪算法的精度有很大的影响^[20]。针对这个问题,当前有2个主要解决方案:

(1)建立更加精确、高自由度的车辆模型,本文着重于路径跟踪算法的研究综述,不在该方面过多描述;

(2)采用MPC算法,该方法仅需要建立预测模型,要求其具备描述系统动态行为的能力,而无需深究内部机理,可以降低模型精度对路径跟踪性能的影响^[21]。

文献[22]基于四轮转向结构,提出模型预测控制与前向反馈控制相结合的控制方案,以最小化横向偏差为控制目标,实现了四轮转向车辆的路径跟踪。文献[23]考虑到路径跟踪中车辆动力学因素、执行器和车辆状态约束问题,提出了一种基于MPC的区域路径跟踪方法,能够在多约束条件下实现路径跟踪。文献[24]为了避免在路径跟踪过程中产生侧滑,在传统MPC的基础上增加了轮胎侧偏角动力学约束,既降低了路径跟踪过程中侧滑的几率,同时提高了路径跟踪的精度。文献[25]以三自由度动力学模型为预测模型,在MPC中额外增加了前轮转角自适应约束。文献[26]注意到了系统约束对自动泊车路径跟踪控制的影响,提出了一种基于线性模型预测控制(Linear-Model Predictive Control, L-MPC)的自动泊车路径跟踪控制方法。

上述方法虽然能够大幅度减小模型精确性对路径跟踪控制的影响,且能够更多考虑轮胎约束、车身状态约束等,大大提高路径跟踪的精度,但复杂的约束调节,大大增加控制器的计算量,导致了较差的实时性。

2 路径跟踪的行驶稳定性研究现状

当自动驾驶汽车行驶在高速过弯、高速避障等极限工况下,如果路径跟踪算法仅仅考虑横向偏差的最小化,而不考虑车辆的行驶稳定性,容易出现侧滑、甩

尾、侧翻等危险,难以保证乘客的安全^[21]。因此,在路径跟踪的定义中就着重提到了行驶稳定性和乘坐安全性。但以往文献大都是从保证路径跟踪精度这一目标开展研究,而往往忽略了对汽车路径跟踪时的稳定性进行研究,这样的控制算法仅仅适用于常规工况,难以满足极限、复合工况。自动驾驶汽车行驶稳定性的研究可以分为2个方面:横向稳定性和纵向稳定性,本文侧重于横向行驶稳定性,主要包括横摆稳定性和侧倾稳定性。

2.1 横摆稳定性控制

横摆和侧滑运动是高速、转向等工况下最常见的运动状态,也是车辆横向稳定性的研究重点之一。轮胎力是驱动车辆行驶的唯一动力来源,对于横向稳定性有着巨大的影响,而轮胎力的产生依赖于轮胎和地面附着系数,在进行路径跟踪算法设计时需要考虑在内。文献[27]考虑到轮胎在摩擦物理极限或接近摩擦物理极限时表现出高度非线性的力响应,并且驾驶条件的变化可能会引起未知的外部扰动,提出了一种新的横向运动控制方法,抑制了横向路径跟踪偏差,提高了控制器承受未知外部干扰的能力,保证了车辆的横摆稳定性。车辆行驶在低附着系数道路上,由于摩擦力不足容易出现失稳和侧滑现象,该工况下的路径跟踪及横向稳定性是当前的技术难点。文献[28]提出了一种自适应滑模控制算法,为避免抖振现象的出现,采用了模糊边界层,并通过CarSim和Simulink对控制算法进行仿真,结果表明该算法在不同摩擦因数道路下均能实现路径跟踪,且保证其横摆稳定性。文献[29]针对低附着系数道路车辆变道工况下路径跟踪的侧向稳定性研究,基于L-MPC设计了路径跟踪控制器,同时考虑了前轮转角约束和用于保证行驶稳定性的侧偏角约束。

除了轮胎力这种已知外界干扰外,还有一些未知外界干扰难以用方程式量化,这些干扰对于路径跟踪的横摆稳定性同样有着一定影响。文献[30]针对高速无人驾驶车辆运动控制过程中的稳定性控制问题,提出ADRC补偿相结合的横向控制算法,通过扩张状态观测器对未建模动态和内外界干扰进行估计,通过将后轮侧偏角控制在参考值附近来补偿前轮转角,提升无人驾驶车辆的转向稳定性和控制器的鲁棒性。文献[31]针对弯道复杂工况下的路径跟踪控制进行了研究,提出了一种基于扩张状态观测器的模型预测多目标优化控制方法,实时估计路径跟踪过程中的干扰量,并对前轮转角进行补偿,大大提高了路径跟踪的

准确性、行驶稳定性和鲁棒性。文献[32]针对自动驾驶横向控制在路面曲率变化、路面超高和侧风干扰等复杂道路下存在精度低和稳定性差的问题,提出了一种基于曲率平滑优化算法和反步滑模的自动驾驶横向运动鲁棒控制策略。

2.2 侧倾稳定性控制

当车辆进行转向时,在离心力的作用下车辆载荷会向外侧转移,产生车辆侧倾,甚至发生侧翻。针对此问题,国内外学者均进行了相关研究。文献[33]针对无人驾驶车辆路径跟踪过程中横摆和侧向稳定性控制,提出一种转向和制动的MPC方案,通过仿真和试验验证,该方案能够在保证跟踪准确度的前提下,大大提高车辆的横摆稳定性和侧倾稳定性。文献[34]提出一种MPC与模糊PID控制相结合的综合控制方法,MPC考虑了路径跟踪过程中的前轮角、侧滑角、轮胎侧滑角和横摆率等因素,用于控制车辆横摆稳定性和跟踪目标路径。模糊PID通过控制每个轮胎的制动力来保持车辆的侧倾稳定性。文献[35]针对分布式四驱电动车的紧急转向工况下的路径跟踪控制问题,设计了基于模糊控制方法的横摆控制与侧倾控制,保证紧急转向避撞过程的路径跟踪效果与车辆稳定性。文献[36]针对高地隙植保机进行研究并设计了一种考虑防侧翻的路径跟踪控制方法,能够实现高地隙植保机精确的跟踪目标路径且不发生侧翻。文献[37]针对高速工况下自动驾驶车辆路径跟踪过程中侧滑与侧翻问题,采用MPC算法考虑滑移和侧倾等稳定性约束,保证了路径跟踪过程中的横向稳定性。文献[38]基于分层控制理论提出了一种分布式驱动无人车辆路径跟踪与稳定性协调控制策略。设计了一种四轮轮胎力优化分配方法,进而达到提高横摆稳定性和侧倾稳定性的目的。

3 路径跟踪准确性和行驶稳定性的分析

文献[39]针对现有智能汽车路径跟踪算法研究中存在的智能汽车路径跟踪精度与操纵稳定性相互耦合和相互制约问题,首先建立了二自由度汽车模型(图1),而后根据牛顿第二定律得到的车辆线性横向动力学方程如式(1)所示。在车辆二自由度模型基础上,设计了基于传统预瞄误差模型的PID控制方法。采用MATLAB/Simulink搭建车辆模型,研究在固定的行驶工况下汽车路径跟踪精度与操纵稳定性的耦合关系。在低车速低曲率工况下,智能汽车路径跟踪精度的提升会导致其操纵稳定性变差,在高速、高曲率

的极限工况下结论相同,由此可知,路径跟踪控制算法的准确性和稳定性呈负相关。

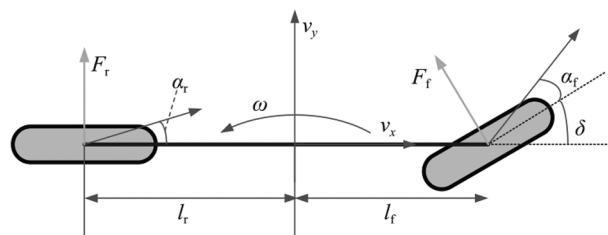


图1 二自由度汽车模型

$$\begin{cases} \beta = \frac{C_f + C_r}{mv_x} \beta + \left(\frac{C_f l_f - C_r l_r}{mv_x^2} - 1 \right) r - \frac{C_f}{mv_x} \delta_f \\ \dot{r} = \frac{C_f l_f - C_r l_r}{I_z} \beta + \frac{C_f l_f^2 - C_r l_r^2}{I_z v_x} r - \frac{C_f l_f}{I_z} \delta_f \end{cases} \quad (1)$$

式中, β 为质心侧偏角($\beta=v_y/v_x$); $\dot{\beta}$ 为质心侧偏角变化率; r 为横摆角; \dot{r} 为横摆角角速度; δ_f 为前轮转角; m 为整车质量; C_f 、 C_r 分别为前、后轮胎的侧偏刚度; l_f 、 l_r 分别为车辆质心至前、后轮胎质心的距离; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量; v_x 为车辆的纵向速度。

现有的路径跟踪控制算法大多只能保证在特定工况下的高精度或强稳定性,为了协调这二者的关系,保证自动驾驶汽车能够在任意工况下,快速、精确、平稳、安全地跟踪期望路径,通过引入速度调节、博弈论、权重分配与路径跟踪算法相结合,进而实现各工况下路径跟踪均能达到最优状态。

3.1 速度调节

路径跟踪算法依据理论可以分为2大类:基于预瞄理论和预测理论。其中,基于预瞄理论的路径跟踪控制算法,能够获得路径曲率等前馈信息,且更符合真实驾驶员操作习惯,受到广泛应用^[40]。在预瞄跟踪控制中,预瞄距离是关键参数之一,其选取尤为重要。文献[41]考虑到车速对于路径跟踪性能的影响,通过仿真分析车速、预瞄距离与路径跟踪性能三者之间的关系,指出预瞄距离对车速自适应性差。因此,在路径跟踪控制算法中引入速度调节模块,进而达到提高路径跟踪精度和行驶稳定性的目的。

文献[42]提出了一种仿驾驶员模型综合考虑横向误差和航向偏差的控制算法。首先建立了无人驾驶汽车运动学模型,采用分段的思想确定了预瞄距离与车速的关系,并基于改进的Pure Pursuit跟踪算法,实现了对目标轨迹的快速、精准、稳定跟踪。文献[43]针对四驱混合动力轿车,提出一种转弯工况下集成横向与纵向运动控制功能的路径跟踪控制策略,采用基于

模糊控制进行速度调节,提高了路径跟踪控制的精确性与横向稳定性。文献[44]提出了一种加入预瞄模型调节车速,在确保汽车行驶稳定性下,提高L-MPC路径跟踪控制精确性的方法。文献[45]提出了一种基于速度调节的路径跟踪控制器,既保证了自动驾驶汽车路径跟踪控制的精确性,也显著提高了路径跟踪过程中车辆的行驶稳定性。

文献[46]综合考量了自动驾驶汽车路径跟踪精度影响因素预瞄距离的影响权重,研究表明该因素对于速度适应性差。为此通过建立汽车运动学模型和预瞄模型(图2),成功建立了速度与距离的关系式(2),进而设计出一种变预瞄距离的路径跟踪模糊控制器。

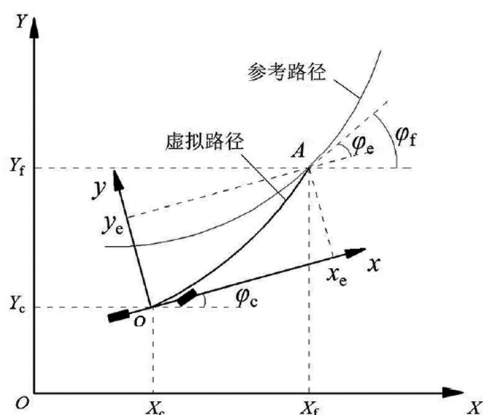


图2 路径跟踪预瞄模型

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_c & \sin \varphi_c & 0 \\ -\sin \varphi_c & \cos \varphi_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_f - X_c \\ Y_f - Y_c \\ \varphi_f - \varphi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, x_c 为预瞄距离; y_c 为车辆坐标系 xoy 下,车辆质心与预瞄点A的横向距离偏差; φ_c 为车辆坐标系 xoy 下,车辆质心与预瞄点A的方向偏差; φ_f 为预瞄点A处参考路径曲线的切线与 x 轴的夹角; φ_c 为车辆纵轴和 x 轴的夹角; X_f 和 Y_f 分别为预瞄点A在惯性坐标系下的横、纵坐标值; X_c 和 Y_c 分别为车辆质心在惯性坐标系下的横、纵坐标值。

3.2 权重分配

MPC算法在路径跟踪控制领域应用越来越广泛,但其目标函数中的权重系数均为常量,当参考路径较复杂或初始横向偏差比较大时,会使得车辆在跟踪过程中不能同时兼顾跟踪精确性与行驶稳定性的要求^[47];石贞红^[48]通过仿真试验研究MPC权重系数对路径跟踪效果的关系,提出了权重系数自适应MPC的解决思路,经验证该算法更加符合各工况下的行驶需求。

文献[49]考虑到自动驾驶汽车路径跟踪过程中车辆的行驶稳定性和跟踪精度问题,提出了一种基于模糊自适应权重控制的改进MPC控制器,并通过与传统

MPC控制器的仿真对比试验验证该控制器的有效性。文献[50]利用分层控制技术,提出了一种新型的自动电动汽车协调路径跟踪系统(Path Tracking System, PFS)和直接偏航力矩控制(Direct Yaw-moment Control, DYC)。在高级控制律设计中,根据车辆纵向速度值引入了一种新的模糊因子,提出了一种基于线性时变(Linear Time Varying, LTV)的MPC来获取车轮转向角和外偏转力矩。文献[51]提出一种依据跟踪偏差和道路曲率自适应调整成本函数权重系数的路径跟踪控制算法,通过模糊控制理论动态优化传统MPC路径跟踪控制器中权重系数矩阵,使得控制器可根据车辆与轨迹偏差大小有针对性地进行调节,保证路径跟踪的准确性和行驶稳定性。文献[52]提出了一种改进的MPC算法,该方法能够根据轨迹曲率自适应调节目标函数的权重矩阵,进而达到提高路径跟踪精度和行驶稳定性的目的。文献[53]基于汽车动力学模型,建立了自适应MPC,通过不断更新卡尔曼状态估计器相关增益系数矩阵以及控制器状态来适应自动驾驶车辆当前的工作环境。文献[54]提出一种考虑车辆稳定性的模型预测路径跟踪方法,额外增加了质心侧偏角约束,并利用二次规划进行求解,添加向量松弛因子解决计算中出现的无解问题。

3.3 博弈论

博弈论目前是一个较为宽泛的概念,根据参与者行动顺序可分为动态和静态博弈。动态博弈论的核心包括3个方面:

- (1) 博弈各方对自身利益和他人利益的态度。
- (2) 各个参与者为达到自己的目标所采取的策略。
- (3) 每个参与者对系统状态的了解。

动态博弈论的分类如图3所示。将动态博弈论的思想应用到系统控制设计中,即为博弈控制论,实现控制中多目标之间的协同控制^[54-55]。博弈控制论因其特点逐渐应用在自动驾驶汽车路径跟踪控制领域,并取得了不错的成效。

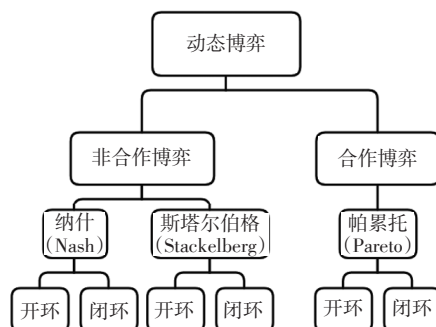


图3 动态博弈论分类

四轮转向技术具有在低速时转向灵活,在高速时操纵稳定的特点,是实现路径跟踪的重要途径之一。文献[56]基于四轮独立驱动电动汽车,采用微分博弈进行四轮主动转向控制研究,设计基于模型预测控制的四轮主动转向路径跟踪控制器,并在实车平台进行了纵向速度跟踪控制试验研究。文献[57]以装备线控四轮转向的智能汽车为研究对象,以实现车辆高速转向时路径跟踪性能与稳定性的协同控制为研究目标,设计了基于多点预瞄驾驶员模型与线性二次型最优控制理论的路径跟踪控制策略,同时基于Nash均衡动态博弈理论推导出了开环Nash均衡控制策略和闭环Nash均衡控制策略。文献[58]考虑到商用车重心高的问题,提出一种基于Pareto最优均衡理论的横向-抗侧倾协同控制策略,既保证了路径跟踪的准确度,同时还保证了车辆较好的侧倾和操纵稳定性。文献[59]针对合作博弈无法实时动态调整合作权重的问题,将模型预测控制与合作博弈相结合,利用模型预测控制滚动优化的特点,实现了合作博弈权重的实时动态自适应调整。文献[60]以四轮独立驱动电动汽车为研究对象,针对实现路径跟踪和稳定性控制时的人机共驾控制策略问题,提出基于非合作纳什博弈的驾驶员AFS-ARS共驾控制策略。

4 总结与展望

本文从路径跟踪算法的侧重点出发,分别阐述路径跟踪控制算法准确性和行驶稳定性的研究现状,而后分析了二者之间的耦合关系,并提出了兼顾准确性和行驶稳定性的控制策略,以及今后自动驾驶汽车路径跟踪控制的研究重点。

在准确性研究方面,可以从3个方面提高:

(1)模型方面,现有方法主要有:提高模型精度和模型预测2种方法,其中模型预测方法的优势在于其对应模型的精度要求不高,且能够处理多约束,但随着约束数量的增多,该方案的实时性将会变差,难以在工程实践中进行应用。

(2)控制算法方面,现有算法通过参数自适应和干扰观测及反馈补偿的方法,大大提高了恶劣工况下路径跟踪性能,这些算法多考虑外界干扰的影响,但现有算法的控制多需要依赖于车身状态参数,因此对于自身参数摄动的鲁棒性研究成为重点。

(3)硬件方面,由于传感器的价格昂贵,且受限于环境条件影响,在弱工况下,对路径跟踪准确性影响较大,因此基于车载信息源的定位算法或为研究

重点。

在行驶稳定性研究方面,其中轮胎力、路面附着系数、道路曲率对于侧向稳定性影响较大,然而现有研究中多基于已知路面附着系数、道路曲率的道路进行仿真试验,但在实际工程实践中,却需要考虑路面附着系数的估计、曲率估计等外界参数估计,这是当下和未来的一个研究点。

在兼顾准确性和行驶稳定性研究方面,难以兼顾二者的情况多发生于高速工况和极限工况。因此,目前多采用的思路是速度调节、权重分配、博弈论,这些现有方法均是对路径跟踪准确性和行驶稳定性2大指标进行权衡,难以保证2大指标均实现最优,如何追求二者的最优为未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 柴梦娜, 刘元盛, 任丽军. 无人驾驶车辆路径跟踪控制方法的研究与发展[C]//中国计算机用户协会网络应用分会2018年第二十二届网络新技术与应用年会论文集, 2018: 206-208+241.
- [2] 彭育辉, 江铭, 马中原, 等. 汽车自动驾驶关键技术研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 691-703.
- [3] 高琳琳, 戎辉, 唐风敏, 等. 自动驾驶汽车横向运动控制方法综述[J]. 汽车电器, 2019(9): 1-4.
- [4] 陈龙, 解云鹏, 蔡英凤, 等. 极限工况下无人驾驶车辆稳定跟踪控制[J]. 汽车工程, 2020, 42(8): 11.
- [5] 白国星, 罗维东, 刘立, 等. 矿用铰接式车辆路径跟踪控制研究现状与进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(2): 193-204.
- [6] 肖灵芝, 王家恩. 基于模糊自适应PID的智能车辆路径跟踪控制[J]. 专用汽车, 2011(2): 68-71.
- [7] 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, 2021.
- [8] JING H, HU C, YAN F, et al. Robust H_{∞} output-feedback control for path following of autonomous ground vehicles[C]//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2015: 1515-1520
- [9] 闫振争, 庄继晖, 程晓鸣, 等. 自抗扰算法在无人车路径跟踪控制中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(3): 61-70.
- [10] 杨琛, 蒋鑫, 白波, 等. 遗传算法优化PID控制器参数的路径跟踪控制[J]. 制造业自动化, 2022, 44(5): 78-81.
- [11] 修彩靖, 陈慧. 无人驾驶车路径跟踪控制研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(10): 128-130.
- [12] 杨子兵, 周军, 孙永佳, 等. 基于干扰观测器和改进模糊PID的农用车辆路径跟踪控制策略[J]. 现代制造工程, 2022(1): 52-60.
- [13] 丁道远. 基于干扰观测器的AGV路径跟踪控制策略研

- 究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [14] 冯黎, 郭承军. 无人车高精度定位的研究现状与发展[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集——S02 导航与位置服务, 2018: 114-117.
- [15] 高伟健, 储江伟, 管湘源. 基于CORS定位的无人驾驶路径跟踪研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(3): 46-52.
- [16] 赵志宏, 车军, 王彩芸. 基于模糊控制的激光叉车AGV路径追踪[J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(2): 1-5.
- [17] 张亚岐. 基于Carsim的车辆运动轨迹跟踪算法[J]. 北京汽车, 2012(2): 22-24.
- [18] 张晓光, 魏东岩, 来奇峰, 等. 一种多系统多模型混合交互式信息融合定位方法: CN104833357A [P]. 2015-08-12.
- [19] 贾志强. 基于预瞄机制的智能车辆运动控制研究与应用[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [20] 贺祥林. 无人驾驶车辆路径跟踪横纵向控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [21] YAKUB F, MORI Y. Minimizing tracking error in path following control of autonomous ground vehicle[J]. Ictic Express Letters, 2015, 9(6): 1-7.
- [22] YU R, GUO H, SUN Z, et al. MPC-based regional path tracking controller design for autonomous ground vehicles [C]//2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE, 2015: 2510-2515.
- [23] 段建民, 田晓生, 夏天, 等. 基于模型预测控制的智能汽车目标路径跟踪方法研究[J]. 汽车技术, 2017(8): 6-11.
- [24] 李楚琳, 唐雪梅, 杨朝阳, 等. 基于前轮转角约束自适应模型预测控制的路径跟踪研究[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(2): 69-75.
- [25] 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.
- [26] YE H, JIANG H B, MA S D, et al. Linear model predictive control of automatic parking path tracking with soft constraints[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 1-13.
- [27] JI X, HE X, 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.
- [28] NOROUZI A, KAZEMI R, AZADI S. Vehicle lateral control in the presence of uncertainty for lane change maneuver using adaptive sliding mode control with fuzzy boundary layer[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems Control Engineering, 2018, 232(1): 12-28.
- [29] JI J, TANG Z R, WU M Y, et al. Path planning and tracking for lane changing based on model predictive control[J]. China Journal of Highway Transport, 2018, 31(4): 172-179.
- [30] 王玉琼, 高松, 王玉海, 等. 高速无人驾驶车辆轨迹跟踪和稳定性控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(10): 1922-1929+1947.
- [31] 赵树恩, 陈文斌, 邓召学, 等. 基于扩张状态观测器的智能汽车弯道轨迹跟踪控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(1): 112-121.
- [32] 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.
- [33] 王凯, 刘彦琳, 李印祥. 基于模型预测的横摆和侧向稳定性控制[J]. 北京汽车, 2018(4): 10-13.
- [34] LIN F, WANG S, ZHAO Y, et al. Research on autonomous vehicle path tracking control considering roll stability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2020, 235(1): 199-210.
- [35] 朱绍鹏, 陈朝鑫, 邱磊, 等. 基于稳定性控制的分布式四驱电动汽车紧急转向避撞策略设计[C]//2021中国汽车工程学会年会暨展览会, 2021: 256-263.
- [36] 李延凯. 考虑防侧翻的高地隙植保机路径跟踪控制方法[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [37] 刘凯, 龚建伟, 陈舒平, 等. 高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制的动力学建模分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 141-151.
- [38] 陈特, 陈龙, 徐兴, 等. 分布式驱动无人车路径跟踪与稳定性协调控制[J]. 汽车工程, 2019, 41(10): 1109-1116.
- [39] 李炜, 吴麟麟, 汪若尘, 等. 智能汽车路径跟踪精度及操纵稳定性耦合机理分析[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(5): 346-353.
- [40] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127-143.
- [41] TAYLOR C J, KOŠECKÁ J, BLASI R, et al. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(5): 442-453.
- [42] 张飞铁, 奉山森, 黄晶. 无人驾驶汽车路径跟踪控制研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(6): 175-178+407.
- [43] 赵治国, 周良杰, 王凯. 四驱混合动力轿车转弯工况路径跟踪控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 695-703.
- [44] 李军, 唐爽, 黄志祥, 等. 融合稳定性的高速无人驾驶车辆纵横向协调控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2020,

- 20(2): 205–218.
- [45] YUAN X, HUANG G, SHI K. Improved adaptive path following control system for autonomous vehicle in different velocities[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019, 21(8): 3247–3256.
- [46] 蒋军锡, 石沛林, 周龙辉, 等. 变预瞄距离的智能车路径跟踪控制[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 70–74+80.
- [47] 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(17): 1–10.
- [48] 石贞洪, 江洪, 于文浩, 等. 适用于路径跟踪控制的自适应 MPC 算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(21): 266–271.
- [49] WANG H, LIU B, PING X, et al. Path tracking control for autonomous vehicles based on an improved MPC[J]. IEEE Access. 2019, 7: 161064–161073.
- [50] GUO J, LUO Y, LI K, et al. Coordinated path-following and direct yaw-moment control of autonomous electric vehicles with sideslip angle estimation[J]. Mechanical Systems Signal Processing, 2018, 105: 183–199.
- [51] 李耀华, 刘洋, 冯乾隆, 等. 基于最优预瞄和模型预测的智能商用车路径跟踪控制[J]. 汽车安全与节能学报. 2020, 11(4): 462–469.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 李军, 唐爽, 周伟. 考虑车辆稳定性的模型预测路径跟踪方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 574–579.
- [55] 李雨涵. 基于博弈论的智能车辆换道行为决策研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- [56] 吴昊伦. 线控四轮转向智能车路径跟踪与稳定性协同控制策略研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [57] 朱侗. 基于多 Agent 框架的 4WID 电动汽车四轮主动转向控制及路径跟踪研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [58] 李玉善, 迟元欣, 季学武, 等. 基于 Pareto 最优均衡理论的商用车路径跟踪与抗侧倾协同控制研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(6): 654–661+687.
- [59] 肖开兴. 基于博弈的四轮独立驱动汽车容错与纵横向运动综合控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [60] 陆嘉峰. 基于模型预测和博弈论的人机共驾控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

【作者简介】

邓健贤: 硕士, 福建工程学院。研究方向: 智能驾驶汽车路径跟踪控制。

E-mail: 1520517906@qq.com