

DOI: 10.3901/JME.2020.10.127

# 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述<sup>\*</sup>

熊璐<sup>1,2</sup> 杨兴<sup>1,2</sup> 卓桂荣<sup>1,2</sup> 冷搏<sup>1,2</sup> 章仁燮<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学汽车学院 上海 201804;  
2. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804)

**摘要:** 回顾无人驾驶车辆的运动控制问题。从系统模型、控制方法以及控制结构等角度切入,分别在纵向运动控制、路径跟踪控制和轨迹跟踪控制三个层面对国内外的研究进展进行综述,并提出对无人驾驶车辆运动控制技术的发展展望。当前运动控制研究多集中于常规工况,为实现无人驾驶车辆在处理人类驾驶员认为具有挑战性或缺乏操纵能力的复杂动态场景下的潜力,运动控制研究须从常规工况向极限工况拓展,但是极限工况下车辆的非线性和多维运动耦合特征显著增强,对系统建模以及算法的自适应性和鲁棒性的要求进一步提高。同时,为应对复杂场景下的多目标协调优化问题,考虑环境不确定性的运动规划与控制集成设计需要深入研究。增加执行器手段可以提升极限工况下车辆的侧向响应速度和控制裕度,但是冗余异构执行器的控制分配研究仍有待突破。运动控制的实现依赖于路面附着系数、质心侧偏角等信息输入,因此基于多源传感信息融合的关键状态与参数估计问题亟需解决。此外,将机器学习应用到车辆运动控制领域也是一个重要的发展方向。

**关键词:** 无人驾驶车辆; 运动控制; 纵向控制; 路径跟踪; 轨迹跟踪

**中图分类号:** U46

## Review on Motion Control of Autonomous Vehicles

XIONG Lu<sup>1,2</sup> YANG Xing<sup>1,2</sup> ZHUO Guirong<sup>1,2</sup> LENG Bo<sup>1,2</sup> ZHANG Renxie<sup>1,2</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804;  
2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** The motion control problem of autonomous vehicles is reviewed. From the perspective of model, algorithm, and control structure, the domestic and foreign research progress is reviewed at three levels of longitudinal motion control, path following and trajectory tracking control, and the development prospect of motion control technology for autonomous vehicles is proposed. The current motion control research mainly focuses on normal conditions. In order to realize the potential of autonomous vehicles in handling critical scenarios that human drivers find challenging or lack the ability to navigate, it is necessary to extend the research to extreme working conditions. However, the properties of non-linearity and multi-dimensional coupled dynamics are significantly enhanced in extreme working conditions. The requirements of system modeling and adaptability and robustness of motion control algorithm are further increased. At the same time, in order to deal with the multi-objective coordination in complex scenarios, the integration of motion planning and control considering environmental uncertainty needs to be studied in depth. Adding actuators can increase the lateral response speed and control margin, but the research of control allocation of redundant and heterogeneous actuators is still to be broken through. The realization of motion control depends on road adhesion coefficient, sideslip angle, etc. Therefore, it is urgent to solve the problem of key state and parameter estimation under multi-source sensor information fusion. In addition, the application of machine learning to the field of vehicle motion control is also an important development direction.

**Key words:** autonomous vehicles; motion control; longitudinal control; path following; trajectory tracking

## 0 前言

由于在提升车辆主动安全性、改善交通效率以

及降低能耗等方面的巨大潜能,无人驾驶车辆技术已经成为当前汽车行业的研发热点<sup>[1-2]</sup>。

根据实现无人驾驶的技术思路,无人驾驶系统划分为基于规则和端到端两类。基于规则的方法需要理解整个场景之后再做决策,系统可解释性强,但规则构建相对复杂、计算量大。而端到端<sup>[3-4]</sup>的方

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFB0104805)和国家自然科学基金(U1564207)资助项目。20190427 收到初稿,20191012 收到修改稿

法由输入端的图像信息直接得到输出端的执行器指令,相比于基于规则的方法降低了系统工程复杂度,但可解释性很低。

对基于规则的无人驾驶车辆系统而言,其关键技术主要包括环境感知、高精地图与组合定位、智能决策与运动规划以及车辆的运动控制。其中,车辆的运动控制根据运动规划输出和实时反馈的车辆行驶状态来控制底盘执行器的动作,使车辆稳定、平滑、精确地跟踪期望路径/轨迹。运动控制作为无人驾驶架构体系的核心环节之一,其性能表现直接影响车辆行驶安全和用户体验,因而具有很强的理论研究意义和工程应用价值,国内外学者在这个领域开展了大量的研究工作<sup>[1, 5-7]</sup>。需要说明的是,这里重点关注无人驾驶车辆控制系统中的纵/侧向运动控制,而底层的底盘执行器控制不展开介绍,可以参阅文献[8-10]等。

根据控制目标的不同,无人驾驶车辆的运动控制问题可以分为路径跟踪和轨迹跟踪两类<sup>[1]</sup>。两者区别在于路径跟踪问题中的参考路径与时间参数无关,通过设计侧向运动控制器使无人驾驶车辆的行驶路径趋近期望路径。而轨迹跟踪问题中的参考轨迹是依赖于时间参数的函数,需要同时考虑车辆的纵向位移和侧向位移误差,通过对车辆纵向和侧向运动的综合控制,使无人驾驶车辆在给定的时间到达对应的参考轨迹点。路径跟踪的实现相对于轨迹跟踪比较简单,可以理解为轨迹跟踪问题的简化情况。

本文分别从纵向运动控制、路径跟踪控制和轨迹跟踪控制这三个层面出发,对无人驾驶车辆运动控制的国内外发展现状进行归纳分析,在此基础上提出对无人驾驶车辆运动控制技术的发展展望,为今后的研究提供参考。

## 1 纵向运动控制

无人驾驶车辆的纵向运动控制主要是指通过对驱动和制动执行器的协调,实现对期望车速或期望距离的精确跟随。纵向控制通常会采用分层控制结构,上层控制器根据距离或速度闭环得到期望加速度或期望转矩,下层控制器协调驱动和制动指令跟踪上层控制器给出的期望值。其中,控制精度和执行动作的平滑程度是评价纵向控制性能的关键指标。按控制方法划分,现有的典型纵向运动控制方案如表 1 所示。

无人驾驶车辆的纵向运动控制中比例积分微分(Proportional integral derivative, PID)控制方法应用最为广泛,其最大优点是不依赖于精确的系统模型,

简单实用,但无法抑制系统参数不确定性以及外部扰动对纵向控制性能的影响。斯坦福大学的 Stanley 无人车<sup>[11]</sup>使用了简单 PI 控制。南京理工大学陈刚等<sup>[12]</sup>在 PID 控制的基础上引入模糊逻辑实现参数自适应整定以提高控制精度。文献[13]则在车辆启停工况的纵向控制中采用智能 PID 方法补偿未建模的动力学特性。

表 1 纵向运动控制方案

控制方法	参考文献
PID 控制	[11-14]
LQR 控制	[14-15]
滑模控制	[16-19]
模型预测控制	[20-21]
模糊控制	[22-23]
内模控制	[24-25]
其他	[26-28]

金斯顿大学 SHAKOURI 等<sup>[14]</sup>分别设计了增益调度的 PI 和线性二次型调节器(Linear quadratic regulator, LQR)两种控制器来控制节气门开度,其中, LQR 依赖于准确的模型,模型失配会导致控制器性能退化。密歇根大学 XU 等<sup>[15]</sup>提出了基于最优预瞄控制的纵向车速跟踪方法,把多点预瞄道路坡度增量和期望车速增量引入新状态矢量,将非线性最优控制问题重构为增广 LQR 问题,在降低计算负担的同时得到了优化问题的解析解。相比 PI 控制,最优预瞄控制的跟踪精度更高并且动作更加平滑。

为提高系统对参数不确定性和外部扰动的鲁棒性,加州伯克利大学 GERDES 等<sup>[16]</sup>采用了滑模控制方法,首先通过滑模控制进行速度或位置闭环计算得到期望加速度,然后根据逆纵向动力学模型计算得到驱/制动力矩,最后通过滑模控制分别实现驱动和制动执行器对期望转矩的跟踪。帕维亚大学 FERRARA 等<sup>[17]</sup>通过二阶滑模控制方法实现编队行驶车辆的纵向控制,保证车间安全距离。同济大学 HANG 等<sup>[18]</sup>将径向基神经网络与滑模控制结合设计了自适应车速控制律。虽然滑模控制具有较强的鲁棒性,但是算法在滑模面附近容易产生抖动。为降低滑模控制抖振,南京理工大学陈刚等<sup>[19]</sup>提出一种基于非线性干扰观测器的模糊滑模车速控制方法,通过模糊逻辑对滑模控制的反馈增益系数进行在线调节,非线性干扰观测器则用于估计和补偿模型不确定性与外部扰动,进一步减小模糊滑模控制的反馈增益系数。

模型预测控制(Model predictive control, MPC)可以处理多变量约束优化控制问题,其适用范围非

常广泛。北京理工大学 ZHU 等<sup>[20]</sup>在车速跟踪上层控制器中使用线性模型预测控制计算得到期望加速度。文献[21]则结合非线性模型预测控制(Nonlinear model predictive control, NMPC)设计了车速跟踪控制器, 但仅通过仿真进行了验证。模型预测控制在计算量大, 尤其是对于非线性模型预测控制, 实时应用依赖于高性能的计算单元。

文献[22-23]在纵向控制中采用了模糊逻辑控制方法, 模糊控制虽然不需要精确的系统建模, 但是制定实用的规则库依赖于先验的专家知识, 通常需要进行大量的试验标定。

针对路况变化以及车辆自身参数变化扰动, 国防科学技术大学 WANG 等<sup>[24]</sup>基于加减速非参数模型设计了比例内模控制器, 将所有扰动统一滤波处理后进行补偿。内模控制不需要精确的对象模型, 结构简单实用性强, 具有良好的抗扰动能力。吉林大学刘柏楠<sup>[25]</sup>考虑到道路坡度和整车质量扰动因素的变化速率不一致, 设计道路坡度和车辆质量联合估计器, 在控制器中分别对两者进行补偿, 提高算法对道路坡度和车辆质量的自适应能力。

俄亥俄州立大学 CHEN 等<sup>[26]</sup>针对轮胎-路面附着系数的不确定性设计了自适应控制算法, 保证速度跟踪误差的渐进收敛。考虑到道路阻力变化影响, 同济大学熊璐等<sup>[27]</sup>构建了道路阻力估计器, 并基于条件积分方法设计了耦合的车速和加速度控制律, 通过积分自动调节和切换策略实现了车速控制和加速度控制的平滑切换。为应对执行器系统的强非线性以及未建模误差, 首尔大学 KIM 等<sup>[28]</sup>基于线性化车辆模型设计了时变参数自适应控制算法, 跟踪上层控制器给出的期望加速度, 并通过构造李雅普诺夫函数证明了系统稳定。

综上所述, 目前大部分纵向运动控制研究所涉及的车辆工况比较简单, 因而很少考虑到轮胎的非线性特性、车辆在大侧向加速度下的纵侧耦合特性和轮胎力约束的影响。另外, 车辆纵向动力学模型中道路坡度、整车质量、轮胎-路面附着系数等参数存在时变不确定性, 是进行纵向运动控制设计时所面临的重要挑战。基于此, 纵向运动控制进一步研究可以围绕以下两方面展开, 一方面考虑极限工况下车辆非线性因素和纵侧耦合特性对纵向控制的作用机理, 建立纵侧向轮胎力协调机制, 在控制纵向运动时保证车辆行驶稳定性; 另一方面, 研究无人驾驶车辆多源传感信息融合的关键状态与参数估计方法, 分析观测器与控制器组成的闭环系统的稳定条件, 探索面向复杂动态环境的实时估计与控制一体化纵向运动系统, 提升算法

的自适应能力和控制精度。此外, 对于执行手段有限的无人驾驶汽车, 可以借鉴加速度矢量控制技术<sup>[29-30]</sup>的控制思路, 通过对纵向加速度的控制在一定程度上改善无人驾驶车辆的操纵稳定性。

## 2 路径跟踪控制

如图 1 所示, 无人驾驶车辆的路径跟踪可以定义为在车辆上选取一点作为控制点来跟踪一条与时间参数无关的几何曲线(位置的空间序列( $X(s), Y(s)$ ),  $s$ 为 Frenet 坐标系下的行进距离), 即在给定速度下让控制点  $P_c$  跟踪期望路径上的目标路径点  $P_d$ 。通常假设纵向车速不变进而设计侧向运动控制器, 让控制点与期望路径间的侧向位移误差和航向角误差渐进收敛到数 0。

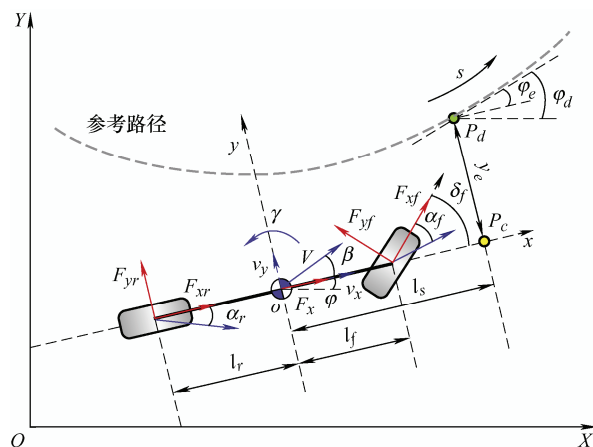


图 1 路径跟踪模型示意图

根据系统模型和控制方法的不同, 将现有的典型路径跟踪控制方案进行划分, 如表 2 所示。

表 2 路径跟踪控制方案

系统模型	控制方法	参考文献
几何学模型	纯追踪算法	[31-33]
	Stanley 算法	[11, 32, 34]
运动学模型	链式变换	[32, 35-36]
	反馈线性化	[37]
	模型预测控制	[38]
运动学&动力学模型	PID 控制	[41-43]
	全状态反馈控制	[32, 44-49]
	滑模控制	[50, 53-56]
	模型预测控制	[57-63]
	鲁棒控制	[65-66]
	自抗扰控制	[68-69, 71]
	微分平坦理论	[71]
	模糊控制	[72-73]
	其他	[74-77]

## 2.1 基于几何学模型

几何学模型是指无人驾驶车辆转向操纵时的几何关系,其中包括车辆与参考路径间的相对位姿关系和阿克曼转向几何关系。基于几何学模型的无人驾驶车辆路径跟踪控制的经典算法有纯追踪算法和 Stanley 算法。

### 2.1.1 纯追踪算法

纯追踪算法是早期卡内基梅隆大学学者提出的路径跟踪控制策略<sup>[31-32]</sup>。图 2 给出了纯跟踪控制的几何关系示意图,其基本原理是通过控制车辆的转向半径  $R$ ,使车辆后轴中心控制点沿圆弧到达前视距离为  $l_d$  的参考路径目标点  $(g_x, g_y)$ ,然后基于阿克曼转向模型计算得到控制所需前轮转向角  $\delta_f$ 。

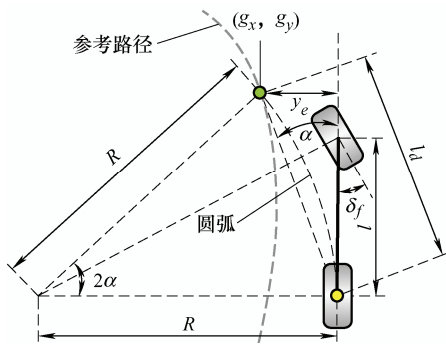


图 2 纯跟踪算法的几何关系示意图

根据几何关系

$$\frac{l_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \quad (1)$$

可得车辆转向半径  $R$  和转向曲率  $\rho$  分别为

$$R = \frac{l_d}{2\sin\alpha} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{2\sin\alpha}{l_d} = \frac{2}{l_d^2} y_e \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为车辆中心平面与前视矢量的夹角,  $y_e$  为侧向位移误差。

基于需求的转向半径  $R$ , 根据阿克曼转向模型得到前轮转向角  $\delta_f$  的控制律为

$$\delta_f = \arctan \frac{2l \sin\alpha}{l_d} \quad (4)$$

式中,  $l$  为车辆轴距。

从式(3)可以看出, 算法本质上可以理解为转向曲率  $\rho$  是关于侧向位移误差  $y_e$  且增益系数为  $2/l_d^2$  的比例控制。值得注意的是, 纯追踪算法的核心在于前视距离  $l_d$  的选取, 前视距离过小会使车辆行驶路径产生振荡, 而过大则会导致车辆过弯时拐小弯。

文献[33]将模糊控制的思想与纯追踪算法相结合, 把速度和航向偏角作为模糊控制器输入, 实现对前视距离的动态调节。相比于固定前视距离的纯追踪算法, 跟踪效果得到明显提高。

纯追踪算法简单实用, 对道路曲率扰动具有良好的鲁棒性, 但其跟踪性能严重依赖于前视距离的选择, 最优值很难获取。此外, 纯追踪算法是基于简单的几何学模型, 并未考虑车辆动力学特性和转向执行器动态特性。高速下转向曲率的快速变化易使车辆产生侧滑, 系统模型与实际车辆特性相差较大, 会导致跟踪性能恶化, 因此纯追踪算法多适用于较低车速和小侧向加速度下的路径跟踪控制。

### 2.1.2 Stanley 算法

2005 年斯坦福大学 Stanley 赛车应用 Stanley 算法取得了美国国防高级研究计划局(DARPA)沙漠挑战赛的冠军<sup>[11]</sup>。如图 3 所示, Stanley 算法中根据前轴中心控制点到最近的参考路径目标点  $(g_x, g_y)$  的侧向位移误差  $y_e$  和航向角误差  $\phi_e$  设计了如式(5)所示的非线性前轮转向角反馈控制律, 该非线性控制器可以保证侧向位移误差  $y_e$  指数收敛到 0。

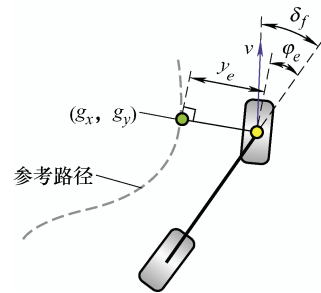


图 3 Stanley 算法的几何关系示意图

$$\delta_f = \phi_e + \arctan \frac{ky_e}{v} \quad (5)$$

式中,  $v$  为车速,  $k$  为增益系数。

文献[32]中仿真对比分析表明, Stanley 算法相比于纯追踪控制算法更适用于相对更高车速的行驶工况, 但是对期望路径的平滑程度要求较高, 在道路曲率光滑性不理想的情况下容易出现车辆响应超调过大的问题。由于忽略了车辆动力学特性和转向执行器动态特性, 在当车辆侧向加速度较大时跟踪性能较差。斯坦福大学 HOFFMANN 等<sup>[34]</sup>进一步通过航向角速度偏差补偿和转向修正等方式改进了控制律, 能够在一定程度上改善 Stanley 算法路径跟踪性能。

## 2.2 基于运动学模型

与依赖于车辆位姿关系和阿卡曼转向的几何学模型不同, 运动学模型进一步考虑了车辆的运动方



程, 但不涉及车辆本身物理性质(如质量等)和作用在车辆上的力。

在基于运动学模型研究车辆运动控制问题时, 通常假设车辆不存在侧滑, 即质心侧偏角为 0, 满足非完整约束条件。如图 4 所示, 可以在 Frenet 坐标系下建立运动学模型, 将路径曲线表示为行进距离  $s$  的函数。描述车辆运动的参考坐标系可以根据算法设计需求选取, 常用的还包括车辆坐标系和大地坐标系。

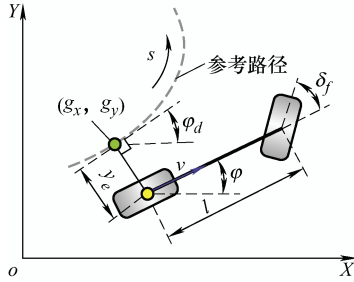


图 4 运动学关系示意图

Frenet 坐标系下的运动学模型可以表达为

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{v \cos \varphi_e}{1 - \rho(s)y_e} \\ \dot{y}_e = v \sin \varphi_e \\ \dot{\varphi}_e = \frac{v \tan \delta_f}{l} - \frac{v \rho(s) \cos \varphi_e}{1 - \rho(s)y_e} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\rho(s)$  为在  $s$  处的参考道路曲率。

文献[35-36]针对非完整轮式移动机器人的路径跟踪问题, 通过状态和输入反馈变换将运动学模型转化为链式标准型, 并给出了光滑时变反馈控制律。文献[32]中仿真结果表明, 该方法仅在中低速时跟踪效果较好, 并且与 Stanley 算法类似, 在道路曲率不连续工况下性能较差。

明尼苏达大学 RAJAMANI 等<sup>[37]</sup>研究了前轮转向车辆倒车场景下的路径跟踪问题, 在非线性运动学模型基础上, 分别设计了输入状态反馈线性化控制器和基于预瞄的输入输出反馈线性化控制器, 试验结果表明引入预瞄可以有效提高侧向控制性能。

塞维利亚大学 RAFFO 等<sup>[38]</sup>基于离散线性化后的时变运动学模型, 提出了广义模型预测控制路径跟踪控制方法, 并在初始误差过大时采用纯追踪算法以避免小角度假设不成立导致的模型失配。但算法受嵌入式系统的计算能力限制, 适用于低速工况。

基于运动学模型的路径跟踪控制方法不依赖于车辆动力学模型, 简单实用, 在中低速和小曲率工况下, 通常具有较好的控制效果。但是实际车辆在

大侧向加速度工况下运动时存在较为明显的侧滑, 不满足非完整约束条件的前提假设, 所以基于运动学模型的方法不适用于高速和大侧向加速度工况。

### 2.3 基于运动学及动力学模型

由于基于几何学/运动学模型的路径跟踪控制方法忽略了车辆系统动力学特性, 适用工况具有局限性。因此, 为了获取更加精确的跟踪控制效果, 尤其是在高速和大曲率工况下, 有必要在路径跟踪控制设计时考虑车辆系统动力学特性。

无人驾驶车辆是高度非线性并具有强耦合特征的复杂动力学系统, 扩张模型维度虽然可以提高模型精度, 但同时会增加建模难度, 也给算法的快速求解带来了挑战, 所以对其建模时需要权衡考虑模型的复杂度和保真度。密歇根大学 LIU 等<sup>[39]</sup>分析指出常规工况下使用线性二自由度车辆模型的控制效果与十四自由度模型相当, 但是极限工况下轮胎非线性与载荷转移在建模时不可忽略。因此, 复杂的模型并不一定是最好的选择, 根据应用场景和算法特点建立合适的动力学模型, 寻求自适应鲁棒控制方法对路径跟踪控制来说仍是一大挑战。另外, 极限工况下多维运动耦合给系统控制建模提出了更高的要求, 比如侧倾对垂向动力学和侧向动力学的影响显著, 但这一方面也鲜有研究<sup>[40]</sup>。

以图 1 所示的前轮转向车辆的路径跟踪控制为例, 基于小角度假设和车辆线性二自由度模型假设, 在车辆坐标系下给出结合运动学和动力学的路径跟踪系统状态方程, 如式(7)所示

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_e \\ \dot{\varphi}_e \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & v_x & -v_x & -l_s \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & a_{11} & a_{12} \\ 0 & 0 & a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_e \\ \varphi_e \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \delta_f + \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rho \quad (7)$$

$$\text{式中, } a_{11} = \frac{-2(C_{af} + C_{ar})}{mv_x}, \quad a_{21} = \frac{-2(C_{af}l_f - C_{ar}l_r)}{I_z},$$

$$a_{12} = \frac{-2(C_{af}l_f - C_{ar}l_r)}{mv_x^2} - 1, \quad a_{22} = \frac{-2(C_{af}l_f^2 + C_{ar}l_r^2)}{I_z v_x},$$

$$b_1 = \frac{2C_{af}}{mv_x}, \quad b_2 = \frac{2C_{af}l_f}{I_z}, \quad l_s \text{ 为预瞄距离, } y_e \text{ 为控制点处的侧向位移误差, } \varphi_e \text{ 为航向角跟踪误差, } \beta \text{ 为车辆的质心侧偏角, } \gamma \text{ 为车辆的横摆角速度, } \rho \text{ 为目标点处的道路曲率, } C_{af} \text{ 和 } C_{ar} \text{ 分别为前后轴单轮侧偏刚度, } l_f \text{ 和 } l_r \text{ 分别为前后车轴到质心处的距离, } v_x \text{ 是车辆质心处的纵向车速, } I_z \text{ 是车辆的横摆转动惯量, } \delta_f \text{ 是前轮转向角。}$$

按照控制结构的不同, 可以将考虑车辆动力学特性的路径跟踪控制算法归纳为两类: 一类是直接

基于系统模型进行反馈控制；另一类是先根据运动学关系计算表征车辆运动的虚拟控制量如横摆角速度等，然后根据车辆动力学特性进行跟踪，分层控制结构可以将车辆高维非线性控制问题分解，同时也便于直接横摆力矩控制等传统车辆动力学控制手段在无人驾驶车辆上的扩展应用。若按控制方法不同，则可以将基于运动学和动力学模型的路径跟踪算法分类如下。

### 2.3.1 PID 控制

与船舶自动驾驶驾驶中广泛应用的视线导航方法类似，北京理工大学赵熙俊等<sup>[41]</sup>采用航向误差反馈控制，首先由运动学关系确定期望航向误差，然后基于车辆-道路动力学模型按行驶速度设计了分段固定增益 PID 算法，实车试验结果表明该方法在非结构道路上具有较好的跟踪效果。

文献[42]提出了基于小脑模型神经网络和 PID 复合的无人驾驶车辆侧向控制算法，其中小脑模型神经网络作为前馈环节，是通过学习训练被控对象的动态特性，逼近车辆侧向运动的逆动态模型，PID 作为反馈环节确保控制的准确性，相比于单独作用的 PID 控制器，可以改善系统的动态特性。

罗马第二大学 MARINO 等<sup>[43]</sup>提出了基于串级 PID 的侧向控制方法，其中外环回路根据侧向位移误差得到期望横摆角速度，内环回路通过 PI 控制实现横摆角速度跟踪，并通过极点配置调整控制器参数保证了整个系统的渐进稳定。但是算法是基于车辆相对于路径的运动学关系线性化后的模型设计的，无法保证侧向位移误差在大范围内的渐进收敛，并且算法没有考虑执行器约束对控制效果的影响。

虽然 PID 控制简单有效，理论上基于模型对 PID 参数进行整定可以取得最好的效果，但是当模型未知或时变时，参数整定往往是结合经验试凑，工作量极大，并且在系统不确定性和外部扰动存在时无法有针对性地进行补偿，无法保证在大范围内的渐进稳定。除此之外，一般 PID 算法容易发生由于执行器能力饱和而导致的积分运算发散，需要额外采取措施实现抗积分饱和。

### 2.3.2 全状态反馈控制

LQR 通过全状态线性反馈控制律构成闭环最优控制系统，线性二次型最优控制问题已经形成了规范化的求解过程，可以得到最优解的解析表达式，同时能够兼顾多项性能指标。

斯坦福大学 SNIDER<sup>[32]</sup>概述了 LQR 在路径跟踪中的应用。以车辆质心作为控制点建立含道路曲

率扰动的系统模型，直接忽略扰动项设计 LQR 反馈控制律虽然可以使系统趋于稳定，但由于扰动项的存在系统的稳态误差不为 0。为此，在 LQR 反馈控制的基础上增加道路曲率前馈环节以消除侧向位移稳态误差。但是由于质心处控制点预瞄距离为 0，前馈项只能被动反应，会产生较为明显的超调，引入预瞄后可以改善控制效果。密歇根大学 XU 等<sup>[44]</sup>提出了基于最优预瞄控制的路径跟踪算法，把有限时窗内的多点预瞄道路曲率引入增广状态矢量，将非线性优化控制问题重构为增广 LQR 问题，得到的最优转向控制律由镇定跟踪误差的反馈控制和处理未来道路曲率的前馈控制两部分组成。相比于无预瞄的 LQR 控制，最优预瞄控制能大幅降低跟踪误差并减小超调使转向操作更加平滑；而相比于 MPC 控制，最优预瞄控制可以在达到相近的路径跟踪性能的同时有效降低计算负担。

斯坦福大学 KRTITAYAKITANA 等<sup>[45]</sup>利用车辆振动中心点处侧向加速度与后轴侧向力解耦的性质，以此作为控制点并将轮胎侧向力作为控制输入设计了前馈加全状态反馈结合的路径跟踪控制律，使得前馈不受后轴侧向力影响从而避免了复杂的求解。结合线性矩阵不等式(Linear matrix inequality, LMI)通过李雅普诺夫函数理论证明了闭环系统的渐进稳定，实车试验结果表明车辆在轮胎附着极限下路径跟踪性能良好。但与 LQR 不同的是，其状态反馈增益系数是根据经验选取的定值，无法使控制器性能达到最优。另外，将轮胎力作为控制输入虽然便于考虑轮胎非线性特性，但通过轮胎逆模型数值求解得到的前轮转角变化较为剧烈。

车辆实际航向角是由质心侧偏角和横摆角构成的，但现有研究大多将横摆角直接作为航向角加以控制，大侧向加速度工况下质心侧偏角增大会使得航向角跟踪稳态误差增大。斯坦福大学 KAPANIA 等<sup>[46]</sup>发现控制车辆质心侧偏角方向与参考路径的切线方向相同可以改善路径跟踪性能，然而直接通过反馈实现这一目标会使横摆动力学欠阻尼导致车辆产生抖振，通过前馈方式实现稳态质心侧偏角方向对期望路径切线方向的跟踪则既可以保证闭环系统稳定性又能改善跟踪性能。

基于道路曲率前馈和 LQR 反馈结合的控制框架，伊朗科技大学的 GOODARZI 等<sup>[47]</sup>在前轮主动转向的基础上增加直接横摆力矩控制手段，来解决转向执行器在大侧向加速度工况下由于侧向力饱和导致的控制性能受限问题。

引入分布式驱动等执行器条件，进而增加系统

的控制自由度,不仅能够提高无人驾驶车辆在极限工况下的控制裕度,而且有利于提高侧向运动的响应速度。基于前轮主动转向与直接横摆力矩协调的路径跟踪控制设计有两种结构,一种是分散式结构,直接横摆力矩子控制器根据路径跟踪子控制器得到的转角计算参考横摆角速度并跟踪;另一种是集中式结构,将直接横摆力矩和转角同时作为控制输入设计路径跟踪控制器。萨里大学 CHATZIKOMIS 等<sup>[48]</sup>仿真对比了这两种控制框架的差异。基于分布式驱动无人驾驶车辆平台,文献[49-50]采用分层控制思想先计算得到前轮转角和附加横摆力矩,然后通过广义力分配得到四轮转矩。目前控制分配算法以实时性好、分配精度高的二次规划和伪逆法为主。然而,这些研究多数停留在仿真和简单场景验证阶段,对算法在极限工况下的适用性及鲁棒性尚缺乏足够验证。由于都是对轮胎力的调节,所以执行器间存在明显的动作耦合和相互制约,并且执行器动态特性也存在差异。另外,对于执行器冗余控制系统,还需要加强故障诊断<sup>[51]</sup>与容错控制<sup>[52]</sup>研究,保障控制系统运行的可靠性。

LQR 本质上是针对线性系统的无约束优化方法,求解时假设控制量不受约束并且依赖于较为精确的数学模型,在参数时变和外部扰动存在时无法保证系统的鲁棒性,因而在非线性特征显著的极限工况下跟踪控制精度会降低。另外,全状态反馈中所需的质心侧偏角不易获取,依赖于高精度的状态估计算法或高成本的传感器如 RT3003 等。

### 2.3.3 滑模控制

当无人驾驶车辆运动控制中考虑车辆相对于路径间的运动学关系和车辆非线性动力学后,其控制系统维度较高。针对这类高维非线性并且存在外部扰动和内部模型不确定性的被控对象,可以对高维状态空间降维,利用非线性控制理论具有针对性地进行鲁棒性分析与控制。滑模控制的不连续性特性可以迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动,这种滑动模态是可以设计的且不受系统参数变化和扰动影响,所以滑模控制方法在运动控制中被广泛使用。

基于分层控制思想,德国航天航空研究院 ACKERMANN 等<sup>[53]</sup>首先根据侧向位移误差设计作为虚拟控制量的参考横摆角速度来控制车辆的侧向位移,再应用滑模控制方法使车辆实际横摆角速度跟踪参考横摆角速度。通过李雅普诺夫函数理论证明了侧向位移误差的渐进收敛,仿真验证了算法的有效性。但是没有深入探讨被控对象非线性特性,

也没有分析航向角作为系统内动态的稳定性。

同济大学余卓平等<sup>[54]</sup>以无人差动转向车辆为平台,分析了被控对象动力学模型以及非线性轮胎模型特性,同时考虑到车辆在运动过程中轮胎滑移以及执行器力矩受限对车辆驱/制的影响,设计了抗积分饱和的差动转向车辆动力学滑模控制器。

贡比涅技术大学 TAGNE 等<sup>[55]</sup>采用高阶超螺旋滑模控制方法实现了车辆侧向位移误差渐进收敛,并减轻了滑模面附近的抖振现象。清华大学 JI 等<sup>[56]</sup>通过径向基神经网络估计侧偏刚度不确定项,设计了反步滑模变结构控制器,在减小侧向位移跟踪误差的同时保证车辆横摆稳定性。

滑模控制方法对参数不确定性和外部扰动具有强鲁棒性,但是由于滑模控制会在有延迟或未建模的高频动态特性时产生抖动现象,一旦遇到传感器信号波动,或执行器控制效果不佳时,容易使车辆在运行过程中发生抖振,影响车辆的稳定性。减轻或消除抖动的方法比较常用的有两种,一种是将控制分解为连续控制和切换控制两部分,以减小切换部分的幅度,另一种办法是用饱和函数代替控制律中的符号函数。

### 2.3.4 模型预测控制

无人驾驶面临着动态变化的复杂环境,必须满足关键的安全约束和执行器约束等条件,而模型预测控制算法具有系统地考虑预测信息和处理多约束优化问题的能力,并且理论和计算能力的并行发展扩大了实时 MPC 的应用范围,因此近年来学者们对基于模型预测控制的无人驾驶车辆运动控制应用开展了诸多研究。

萨尼奥大学 FALCONE 等<sup>[57]</sup>针对低附着道路下的无人驾驶车辆变道场景,分别设计了基于非线性模型预测控制和线性时变模型预测控制的侧向控制器,通过侧偏角软约束将轮胎力限制在线性区以保证车辆的稳定性,分析给出了线性时变模型预测控制闭环系统渐进稳定条件<sup>[58]</sup>。非线性模型预测控制计算负担大,而线性时变模型预测控制实时计算量相对较小,但当状态偏离线性化工作点时可能会产生较大的预测误差从而导致系统不稳定。文献[59]在前轮主动转向执行器的基础上增加四轮独立制动,改善路径跟踪时车辆稳定性。

北京理工大学龚建伟等<sup>[60]</sup>系统地介绍了应用模型预测控制理论进行无人驾驶车辆运动控制的基础方法。吉林大学 GUO 等<sup>[61]</sup>提出了一种基于双包络面的路径跟踪控制方法,将自车车身外形和道路

边界分别看作内、外包络面,引入到 MPC 优化问题的约束以避免车辆发生碰撞或超出道路边界,但仅有仿真验证。

上述文献中都只考虑了整车层面的动力学特性,而极限工况下车辆对转向执行器响应速度要求较高,有必要考虑执行器的动态特性。釜山大学 KIM 等<sup>[62]</sup>在模型预测路径跟踪控制器中引入了二阶转向模型。NAM 等<sup>[63]</sup>对转向系统进行了更为精确的建模,包括了系统扰动和执行器带宽特性,并在紧急转向场景下验证了算法的有效性。

对于模型预测控制而言,随着车辆动力学模型和约束的维度增加其优化求解的计算量增大,并且无人驾驶车辆的速度提升也会进一步增加优化求解的难度,因此计算的实时性是 MPC 在运动控制上应用的主要技术瓶颈之一。另外,传统 MPC 对系统不确定性的处理能力是有限的,当系统模型描述不准确或者存在外部扰动时,往往难以实现既定的控制目标。为了满足不确定性系统的控制需求,鲁棒模型预测控制(Robust model predictive control, RMPC)和随机模型预测控制(Stochastic model predictive control, SMPC)是未来的发展方向<sup>[64]</sup>。除此之外,证明模型预测控制算法的渐进稳定性较为困难,通常需要满足终端等式约束和终端域约束等条件。

### 2.3.5 鲁棒控制

本小节所述控制方法是指狭义的鲁棒控制,主要包括  $H_\infty$  控制理论和结构奇异值理论( $\mu$  理论)等。由于车辆行驶工况变化、外部干扰以及建模误差带来的模型不确定性会导致路径跟踪性能下降,为解决这一问题,鲁棒控制理论用于使控制器对模型不确定性灵敏度最小来保持系统的原有性能。

中国科学院宋彦等<sup>[65]</sup>设计了以横摆稳定控制作为内环、路径跟随控制作为外环的串级控制结构,提出了基于  $\mu$  综合横摆稳定控制方法,并通过与 PID 控制和  $H_\infty$  控制对比来验证其优越的鲁棒稳定性和鲁棒性能。 $\mu$  综合方法在设计控制器时充分考虑了系统的结构不确定性,避免了  $H_\infty$  设计理论的保守性。

针对测量信号 CAN 网络传输时的延迟和数据丢包及系统不确定性和外部扰动对路径跟踪性能的影响问题,东南大学 WANG 等<sup>[66]</sup>设计了鲁棒  $H_\infty$  状态反馈控制器。

上述研究仅在仿真环境下验证了算法的有效性,基于鲁棒控制理论的路径跟踪控制器往往控制阶数过高,运算量大,依赖于高性能的硬件控制器。

### 2.3.6 自抗扰控制

自抗扰控制(Active disturbance rejection control, ADRC)把作用于被控对象的所有不确定性因素都归结为未知扰动,通过设计扩展状态观测器进行估计并给予补偿<sup>[67]</sup>。鉴于自抗扰控制器结构简单并可以很好地处理系统不确定性的优点,曼尼托巴大学 CHU 等<sup>[68]</sup>应用线性 ADRC 设计了用于车道保持的转向控制器,基于李雅普诺夫指数方法证明了系统在平衡点附近是指数稳定的。文献[69]结合定量反馈理论对 ADRC 控制器进行参数整定,以满足灵敏度和闭环稳定性的要求,并在微缩小车上试验对比了 ADRC 和 PID 的性能差异。

但是这些研究仍处于仿真或简单试验阶段,并且相比于线性 ADRC,非线性 ADRC 稳定性证明和控制参数整定与优化等方面还缺乏深入的研究。

### 2.3.7 微分平坦理论

对于一个非线性系统,如果可以找到一组系统平坦输出,使得所有状态变量和输入变量都可以由这组输出和其导数表示,那么该系统即为微分平坦系统<sup>[70]</sup>。微分平坦理论通过选择合理的平坦输出可以有效减小系统的维数,实现非线性系统反馈线性化,因此是处理欠驱动非线性问题的有效方法。

考虑到路径跟踪单输入(前轮转角)多自由度(侧向和横摆)的欠驱动特性,北京理工大学 XIA 等<sup>[71]</sup>通过微分平坦将线性化后的系统模型转化到平坦输出空间,并结合 ADRC 处理模型简化带来的不确定性,但算法仅在仿真中验证。

微分平坦理论能够实现对系统状态轨迹的快速跟踪并具有良好的动态性能,如何找到合适的平坦输出最为关键,但目前还没有普遍适用方法。

### 2.3.8 模糊控制

科英布拉大学 SILVA 等<sup>[72]</sup>构建以航向角误差和侧向位移误差作为状态输入,前轮转角为状态输出的模糊逻辑实现了车辆的路径跟踪。大连理工大学 GUO 等<sup>[73]</sup>通过遗传算法对横向模糊控制器隶属度函数参数和控制规则进行优化,实现了基于速度分区的无人车遗传模糊侧向控制。

模糊控制虽不需要精确的系统建模,但模糊控制建立需要先验知识建立实用的规则库,并且缺乏理论上的稳定性证明。

### 2.3.9 其他

贡比涅技术大学 TAGNE 等<sup>[74-75]</sup>分别基于浸入与不变原理和无源性控制理论设计了路径跟踪算法。浸入与不变原理通过选择浸入映射和设计控制律,使得被控系统的任何轨迹都是目标系统在该浸



入映射(降阶系统)的像,并且设计的控制律能够使目标系统的像为不变吸引流形,从而保证系统平衡点的稳定性。因此,算法在侧向位移误差渐进收敛的同时,可以保证车辆的质心侧偏角收敛。

针对基于前轮主动转向和直接横摆力矩控制协调的路径跟踪问题,东南大学 WANG 等<sup>[76]</sup>提出了复合非线性反馈控制方法实现对期望横摆角速度和侧向速度跟踪的渐进收敛。为了有效抑制扰动并增强算法的鲁棒性,进一步提出了积分滑模控制和非线性复合控制结合的控制策略<sup>[77]</sup>。其中,非线性复合控制可以有效改善瞬态响应。

综上所述,虽然路径跟踪控制研究已经取得了长足的发展,但仍有相关问题尚未得到很好解决。

(1) 在系统模型层面,对于小侧向加速度的常规工况,采用简单的几何学/运动学模型或线性动力学模型通常可以满足需求。而在大侧向加速度下的极限工况,模型不准确可能会导致跟踪性能恶化,因此需要考虑轮胎的非线性、滑移、侧倾/俯仰运动、执行器动态特性等影响因素,建立高保真的非线性动力学模型。但模型的复杂度增加必然会带来控制律设计难度和计算量的增加,如何构建面向极限工况的高保真且便于控制实现的数学模型需要进一步深入研究。

(2) 在控制方法层面,各类控制方法存在各自的优缺点,控制算法的设计应该建立在对被控对象和应用场景的深入理解和把握的基础上。无人驾驶车辆路径跟踪存在高维非线性控制问题,如何有针对性地参数不确定性、外部扰动等进行鲁棒控制研究仍是其重点和难点,需要不断探索和完善。针对模型预测控制等方法存在的在线计算量大,不易在低成本开发平台上硬件实现的问题,如何通过优化算法结构和求解过程等手段降低在线计算量也是一大挑战。

(3) 在工况复杂度层面,现有研究大多还集中在小侧向加速度的常规工况,对车辆在大侧向加速度的极限工况和曲率不连续、路面突变等复杂工况考虑不足,算法的适用性和鲁棒性尚缺乏足够验证。为了更好地应对工况复杂度增加,可以从执行器的角度出发,引入直接横摆力矩控制等手段提升车辆的侧向响应速度和控制裕度,但极限工况下执行器存在动作耦合和动态响应特性差异,冗余异构执行器的控制分配问题需要解决,同时故障诊断和容错控制技术有待完善。此外,路面附着系数和质心侧偏角是极限工况控制下至关重要的信息输入,受制于成本限制,高精度的车辆状态与参数估计不可或缺。而无人驾驶车辆信

息源更加丰富,比如可以结合图像预估和传统车辆动力学进行路面附着系数融合估计,如何针对多源异构传感系统的时序混杂和冗余互补特性深度融合这些信息成为新的问题。

### 3 轨迹跟踪控制

根据图 5 所示,车辆的轨迹跟踪可以定义为在车辆上选取一点作为控制点来跟踪来一条带有时间属性的轨迹(位置的时空序列 $(X(t), Y(t))$ ),即让控制点 $P_c$ 跟踪给定时刻对应的沿期望轨迹运动的移动目标轨迹点 $P_d$ 。轨迹跟踪相比路径跟踪会多考虑被控对象在纵向上的位移变化,使车辆的纵向和侧向位移误差同时收敛,因此在轨迹跟踪控制设计中要综合考虑车辆的纵向运动和侧向运动。

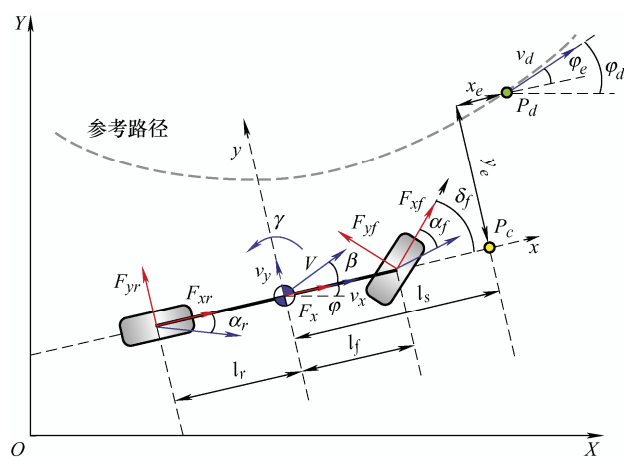


图5 轨迹跟踪模型示意图

对于无人驾驶运动控制而言,车辆的纵向运动与侧向运动间的耦合效应<sup>[78-79]</sup>包括三类:运动学耦合、轮胎力耦合以及载荷转移耦合。运动学耦合指的是由于车轮转向角的存在,转向轮侧偏力在纵向的分量会影响纵向运动,同时侧向运动也受纵向速度影响;轮胎力耦合是指轮胎侧向力和纵向力之间相互作用,两者合力受到摩擦椭圆约束;载荷转移效应是指纵向加速度引起的前后轴载荷转移或侧向加速度引起的左右轮载荷转移带来的轮胎垂直载荷重新分配,进而对纵侧向动力学产生影响。

参照车辆动力学集成控制的分类方式,按照控制结构的不同,可以将现有的轨迹跟踪控制为分散式控制和集中式控制。分散式控制是指通过对纵侧向运动进行解耦,把轨迹跟踪问题分解为纵向运动控制和侧向路径跟踪问题,分别设计子系统相应的控制律。而集中式控制是指将轨迹跟踪问题中的纵侧向运动统一考虑,由一个全局控制器给出纵侧向的控制输入。

### 3.1 分散式控制

俄亥俄州立大学 YU 等<sup>[80]</sup>推导了车辆坐标系下的纵侧向误差动力学方程,在误差较小时两者可以近似看作解耦,对误差方程简化后分别设计纵/侧向运动控制律。其中,侧向控制中考虑了轮胎非线性影响,通过侧偏刚度参数自适应提升轨迹跟踪性能。

常规工况下侧向运动对纵向控制的影响可以忽略,但是纵向车速变化会极大地影响着侧向动力学。为了反映这一耦合关系,文献[81-82]在侧向控制器设计时考虑了时变的纵向车速参数。

为解决由于存在纵向位移误差而导致车辆偏离期望轨迹的问题,同济大学章仁燮等<sup>[83]</sup>假设初始纵向位移误差为 0 并令轨迹点期望车速的纵向分量与控制点纵向车速相等,弱化了纵向运动约束,但这样相当于对期望轨迹进行了重规划,存在一定程度的碰撞风险。在分层控制架构下采用条件积分算法进行侧向控制器设计,与纵向车速控制相结合使车辆行驶在期望的轨迹上。文献[84]进一步引入了基于小增益定理的互联稳定条件,来保证无人驾驶车辆侧向运动控制在有界输入-有界输出框架下的有限增益  $L$  稳定。

这些算法对车辆的运动学耦合进行了简化处理,但都没有考虑载荷转移耦合和轮胎力耦合特性对轨迹跟踪控制的影响。无人驾驶车辆为应对紧急避障等突发状况,需要具备在极限工况下操纵的能力以保证车辆行驶安全。但相比于常规工况,极限工况下车辆的非线性和轮胎力纵侧耦合特征显著增强,这给控制器的自适应性和鲁棒性提出了更高的要求。

上阿尔萨斯大学 ATTIA 等<sup>[85]</sup>基于非线性模型预测控制设计了侧向控制器,其非线性预测模型中包含了运动学耦合和轮胎力耦合特性。

斯坦福大学 TALVALA 等<sup>[86-87]</sup>受到赛车启发,提出将无人驾驶车辆推到极限的思路,从而充分利用路面附着能力实现赛道圈速提升。一方面在路径-速度解耦规划时考虑轮胎力的耦合,利用简单摩擦圆表征车辆极限生成给定路径下的参考速度;另一方面在纵向控制中设计轴滑移率圆控制器实现纵侧向力的协调,优先满足转向控制的侧向力需求<sup>[88]</sup>。另外,还对自动漂移进行了探索以充分挖掘无人驾驶车辆的潜力<sup>[89]</sup>。北京理工大学 NI 等<sup>[90-91]</sup>利用试验测试得到的 G-G 图替代简单摩擦圆表征车辆极限,并且在方程式赛车上验证了算法的有效性。

在上述文献中,轨迹规划与控制都是分层实现的,控制层只需跟踪规划给出的无碰撞轨迹,避障

不会在控制目标中明确体现。然而,规划中可能存在对车辆动力学和道路状态突变考虑不足的情况,导致输出的期望轨迹对实际车辆来说不可行。为解决这一问题,可以将避障引入到 MPC 目标函数中,在单一控制器内同时实现局部规划与控制。对于分散式结构,侧向控制由 MPC 控制器实现,纵向控制由另一独立的控制器实现。斯坦福大学 BROWN 等<sup>[92]</sup>提出了极限工况下基于 MPC 的局部规划与控制框架,并且通过变步长的模型离散化方法提升计算效率,其核心思想是保证车辆始终处于包络线约束<sup>[93-94]</sup>内,在多目标冲突时可以一定程度偏离上层规划算法给出的参考轨迹,实车验证了算法在同时保障车辆稳定性和避障方面的有效性。在此基础上,斯坦福大学 FUNKE 等<sup>[95]</sup>提出了优先级次序依次为避障、车辆稳定性、路径跟踪的多目标协调策略,即在避障需求下允许车辆短暂偏离车辆稳定性约束。针对动态避障问题,吉林大学 GUO 等<sup>[96]</sup>提出了基于 MPC 的轨迹规划和跟踪集成控制方法。北京理工大学刘凯等<sup>[97]</sup>研究了高速无人驾驶车辆在滑移及侧倾约束下的最优运动规划与控制,考虑道路曲率和地形条件建立了等效动力学模型,并针对滑移和侧倾等安全因素推导了基于包络线和零力矩点的动力学稳定性约束。然而,这些研究都集中在对转向的优化。为提升系统性能,密歇根大学 LIU 等<sup>[98]</sup>通过同时优化转向角和参考速度来控制车辆,能够在没有环境先验知识和没有参考轨迹的情况下,在高速行驶过程中控制车辆避开障碍物。整体上,目前基于规划与控制集成的避障研究多数集中在仅有静态障碍物的简单场景,现有报道中缺少对复杂交通场景下障碍物运动不确定性的考量,结合障碍物轨迹预测是未来的发展趋势。

分散式结构的轨迹跟踪控制实现相对简单,可以在纵向运动控制和侧向路径跟踪控制的算法基础上进行协调设计。但分散式控制只是对纵侧向运动控制系统进行协调甚至直接忽略两者耦合,当转向角较大和车速急剧变化时运动学耦合增强亦或是极限工况下的动力学耦合增强,都可能会导致跟踪性能退化。分析轮胎力耦合和载荷转移耦合因素对轨迹跟踪的作用机理,对完善极限工况下的纵侧向控制律协调设计具有重要意义。

### 3.2 集中式控制

在研究前轮线控转向车辆轨迹跟踪控制问题时,部分学者基于非完整约束将这类车辆看作轮式机器人进行控制。图 6 给出了基于零质心侧偏角约束三轮车辆建立的运动学位姿误差模型示意图。

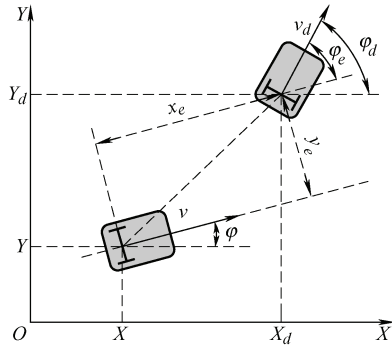


图 6 位姿误差模型

位姿误差从大地坐标系转换到车辆坐标系表示为

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ \varphi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_d - X \\ Y_d - Y \\ \varphi_d - \varphi \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中,  $(X_d, Y_d, \varphi_d)^T$  和  $(X, Y, \varphi)^T$  分别为大地坐标系下的车辆期望位姿和车辆当前实际位姿。 $(x_e, y_e, \varphi_e)^T$  为车辆坐标系下车辆实际位姿和期望位姿间的误差。

车辆的非完整运动约束可表达为

$$\begin{cases} \dot{X} \cos \varphi + \dot{Y} \sin \varphi = v \\ \dot{X} \sin \varphi - \dot{Y} \cos \varphi = 0 \end{cases} \quad (9)$$

结合式(9), 对式(8)的方程左右两边分别求导可得运动学位姿误差微分方程

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega y_e - v + v_d \cos \varphi_e \\ \dot{y}_e = -\omega x_e + v_d \sin \varphi_e \\ \dot{\varphi}_e = \omega_d - \omega \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\omega_d$  和  $\omega$  分别是车辆参考横摆角速度和实际横摆角速度,  $v_d$  和  $v$  分别是车辆参考车速和实际车速。

加利福尼亚大学 KANAYAMA 等<sup>[99]</sup>基于式(10)所示的运动学位姿误差模型, 利用李亚普诺夫直接法求解纵向和侧向综合控制问题, 并证明了平衡点局部指数稳定。悉尼大学 JIANGDAGGER 等<sup>[100]</sup>考虑到式(10)中的侧向位移误差  $y_e$  并非直接受控, 为解决这一问题提出了基于积分器反步的时变状态反馈跟踪控制方法。文献[101]将闭环系统表达成线性变参数形式, 通过优化求解 LQR-LMI 问题调整李雅普诺夫控制器参数。但这些研究是基于运动学模型的, 仅考虑了运动学耦合, 忽略了车辆系统动力学特性。

加州伯克利大学 LIM 等<sup>[78]</sup>分析了车辆纵侧向运动耦合机理, 基于动态面滑模控制设计了补偿耦合效应的控制律。仿真表明考虑耦合效应能有效改善轨迹跟踪效果。但是算法在求解前轮转向角时使用轮胎逆模型无法获得解析解, 实际应用中映射关系不准确。

考虑到车辆运动耦合效应, 加州伯克利大学

PHAM<sup>[102]</sup>将纵侧向控制合并成单一问题, 但是建立在轮胎线性、单轨模型和无滑移等假设基础上的, 只适用于部分工况。为了使分析具有全局性并扩大应用工况范围, 加州伯克利大学 LEE 等<sup>[103]</sup>将上述简化假设移除, 针对多输入-多输出非线性系统采用反步法设计了鲁棒自适应控制算法。文献[104-105]通过神经网络补偿轨迹跟踪系统参数不确定性、强非线性和耦合效应影响。

麻省理工学院 PETERS 等<sup>[106]</sup>提出了基于微分平坦理论的轨迹跟踪控制方法, 以前轴中心位置作为微分平坦输出, 并对车辆轨迹跟踪过程中的内动态横摆动力学进行了稳定性分析。巴黎高等矿业学校的 MENOUR 等<sup>[107]</sup>利用代数估计得到平坦输出的导数和滤波, 然后结合微分平坦理论设计纵侧向控制律。文献[108]则进一步关注了车辆垂向运动与侧向运动的耦合特性。但是这些研究仅进行了仿真验证。

在 MPC 框架下可以将纵侧向控制转化为同一带约束的优化问题, 以充分考虑车辆运动耦合效应。加州伯克利大学 GAO 等<sup>[109-110]</sup>针对车辆避障问题提出了两种基于 MPC 的控制架构, 一种是规划和控制分层实现, 另一种是规划和控制在同一 MPC 控制器内实现。分层控制的好处是规划可以采用较为简单的模型, 计算量相对较小, 而集成控制则可以避免规划产生不可行轨迹, 但是实时应用较为困难。针对高动态场景下的避障问题, 斯坦福大学 BROWN 等<sup>[111]</sup>考虑了轮胎纵侧向力耦合特性, 基于 NMPC 进行了轨迹规划与控制集成设计, 实车验证了控制器在紧急避障过程中协调纵侧向力的能力, 但是非凸优化问题有可能会陷入局部最优, 并且其计算量随着系统阶数的增加而迅速增加。为了应对系统不确定性, 加州伯克利大学 GAO 等<sup>[112]</sup>在规划控制分层架构下, 研究了基于 Tube 的鲁棒模型预测控制的避障方法。

极限工况下车辆动力学的高度非线性和建模难度使控制器设计变得更加困难。为此, 瑞士苏黎世皇家理工学院 KABZAN 等<sup>[113]</sup>采用相对简单的名义模型并通过高斯过程回归进行模型误差的在线学习, 建立了数据驱动和机理混合模型, 实车试验结果表明模型学习方法可以有效改善模型不确定性。此外, 还有部分学者研究了迭代学习控制在无人驾驶赛车轨迹跟踪控制上的应用<sup>[114-115]</sup>。

集中式结构的轨迹跟踪控制从系统整体的角度出发, 可以在控制律设计过程中更加充分地考虑纵向运动控制和侧向运动控制间耦合特性, 但是相比于分散式结构, 系统模型的维度和复杂度的增加给

控制律设计带来了更大的挑战,同时计算量更大、物理实现成本高。整体上,极限工况下轨迹跟踪控制的轮胎力协调机制设计至关重要。

## 4 结论与展望

本文概述了无人驾驶车辆运动控制的发展现状,分析总结得到以下五个方面的结论与展望。

(1) 无人驾驶车辆运动控制研究须从常规工况向极限工况拓展,但现有极限工况运动控制研究较少,并且多数停留在仿真验证和典型工况试验验证阶段,对算法在复杂工况下的适用性及鲁棒性尚缺乏足够验证。极限工况下运动控制系统存在着时变不确定性、强非线性和空间域上的多维运动耦合等科学挑战,相关问题尚未得到很好解决。因而,分析非线性因素影响以及纵/侧/垂多维运动耦合作用机理,构建高保真且便于控制实现的数学模型,设计鲁棒性优越且运算成本低的控制律需要进一步深入研究。

(2) 运动规划有可能由于未充分考虑车辆动力学特性输出对实际车辆来说不可行的轨迹,进而引发跟踪控制、车辆稳定性、避障多目标冲突,为解决这一问题可以基于模型预测控制进行局部规划和控制的集成设计,但目前涉及场景简单,尚处于起步研究阶段。在城市道路等复杂交通场景,结合实时感知和预测信息,研究考虑环境不确定性的运动规划与控制集成方法,对推动无人驾驶车辆落地应用具有重要意义。

(3) 增加控制自由度条件如直接横摆力矩控制,可以提升车辆在极限工况下的侧向响应速度并扩展控制裕度,但目前对多执行器协调下的无人车极限工况运动控制研究相当有限,如何结合轮胎力耦合和执行器动态响应特性进行冗余执行器系统的控制分配是需要解决的关键科学问题,另一方面需要突破故障诊断与容错控制技术,完善系统可靠性。

(4) 运动控制执行动作的实现受到路面峰值附着系数约束,同时质心侧偏角、坡度等也是重要的信息输入,如何针对多源异构传感系统的时序混杂和冗余互补特性进行关键状态与参数估计是一大难点,其次需要探讨观测器与控制器组成的闭环系统的稳定性,建立实时估计与控制一体化系统。

(5) 随着机器学习理论和无人驾驶车辆计算能力的并行发展,将机器学习应用到运动控制领域是重要的发展方向。其中,应用场景包括极限工况下数据驱动和机理混合建模、数据驱动控制等。

## 参考文献

- [1] PADEN B, CAP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 33-55.
- [2] 姜岩, 陈慧岩, 熊光明, 等. 无人驾驶汽车概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.  
JIANG Yan, CHEN Huiyan, XIONG Guangming, et al. Introduction to self-driving vehicles[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [3] CHEN C, SEFF A, KORNHAUSER A, et al. Deep driving: Learning affordance for direct perception in autonomous driving[C]// IEEE International Conference on Computer Vision. Santiago: IEEE, 2015: 2722-2730.
- [4] BOJARSKI M, DEL TESTA D, DWORAKOWSKI D, et al. End to end learning for self-driving cars[J]. Arxiv, 2016: 1604.07316.
- [5] BUEHLER M, IAGNEMMA K, SINGH S. The DARPA urban challenge: Autonomous vehicles in city traffic[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [6] 郭景华, 李克强, 罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2016(2): 151-159.  
GUO Jinghua, LI Keqiang, LUO Yugong. Review on the research of motion control for intelligent vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016(2): 151-159.
- [7] AMER N H, ZAMZURI H, HUDHA K, et al. Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: A review of state of the art and challenges[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 86(2): 225-254.
- [8] 余卓平, 章仁燮, 熊璐, 等. 考虑线控转向非线性和不确定性的转向角控制[J]. 同济大学学报, 2017, 45(1): 79-86.  
YU Zhuoping, ZHANG Renxie, XIONG Lu, et al. Steering angle control of steer-by-wire systems considering nonlinear characteristic and uncertainty parameters[J]. Journal of Tongji University, 2017, 45(1): 79-86.
- [9] KIM W, SON Y S, CHUNG C C. Torque-overlay-based robust steering wheel angle control of electrical power steering for a lane-keeping system of automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4379-4392.
- [10] 余卓平, 韩伟, 徐松云, 等. 电子液压制动系统液压力控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2017(14): 1-15.  
YU Zhuoping, HAN Wei, XU Songyun. Review on hydraulic



- pressure control of electro-hydraulic brake system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(14): 1-15.
- [11] THRUN S, MONTEMERLO M, DAHLKAMP H, et al. Stanley: The robot that won the DARPA grand challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9): 661-692.
- [12] 陈刚, 张为公. 基于模糊自适应 PID 的汽车驾驶机器人的车速控制[J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 511-516.
- CHEN Gang, ZHANG Weigong. Speed control of vehicle robot driver based on adaptive fuzzy PID control[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(6): 511-516.
- [13] CHOI S, D'ANDRÉANOVEL B, FLIESS M, et al. Model-free control of automotive engine and brake for stop-and-go scenarios[C]// Proceedings of the European Control Conference. Budapest: IEEE, 2009: 3622-3627.
- [14] SHAKOURI P, ORDYS A, LAILA D S, et al. Adaptive cruise control system: Comparing gain-scheduling PI and LQ controllers[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 12964-12969.
- [15] XU S, PENG H, SONG Z, et al. Accurate and smooth speed control for an autonomous vehicle[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Changshu: IEEE, 2018: 1976-1982.
- [16] GERDES J C, HEDRICK J K. Vehicle speed and spacing control via coordinated throttle and brake actuation[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(11): 1607-1614.
- [17] FERRARA A, VECCHIO C. Second order sliding mode control of vehicles with distributed collision avoidance capabilities[J]. Mechatronics, 2009, 19(4): 471-477.
- [18] HANG P, CHEN X, ZHANG B, et al. Longitudinal velocity tracking control of a 4WID electric vehicle[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 790-795.
- [19] 陈刚, 吴俊. 无人驾驶机器人车辆非线性模糊滑模车速控制[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 114-123.
- CHEN Gang, WU Jun. Nonlinear fuzzy sliding mode speed control for unmanned driving robotic vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 114-123.
- [20] ZHU M, CHEN H, XIONG G. A model predictive speed tracking control approach for autonomous ground vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 138-152.
- [21] 朱大吉. 基于状态观测的纯电动汽车纵向车速控制[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- ZHU Daji. Longitudinal speed control for electric vehicles based on state observation[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [22] NARANJO J E, GONZALEZ C, GARCIA R, et al. ACC+stop&go maneuvers with throttle and brake fuzzy control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 213-225.
- [23] NARANJO J E, GONZALEZ C, GARCIA R, et al. Cooperative throttle and brake fuzzy control for ACC+stop&go maneuvers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1623-1630.
- [24] WANG J, SUN Z, XU X, et al. Adaptive speed tracking control for autonomous land vehicles in all-terrain navigation: An experimental study[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(1): 102-128.
- [25] 刘柏楠. 道路坡度及车辆质量自适应的自动驾驶车辆纵向速度控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- LIU Bainan. Research on longitudinal speed control for autonomous vehicles adaptive with road grade and vehicle mass[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [26] CHEN Y, WANG J. Adaptive vehicle speed control with input injections for longitudinal motion independent road frictional condition estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 839-848.
- [27] 熊璐, 付志强, 柏满飞, 等. 一种考虑加速度需求的车速自适应控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2019(1): 1-8.
- XIONG Lu, FU Zhiqiang, BAI Manfei, et al. A vehicle speed adaptive control method considering acceleration demand[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019(1): 1-8.
- [28] KIM H, KIM D, SHU I, et al. Time-varying parameter adaptive vehicle speed control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 581-588.
- [29] YAMAKADO M, TAKAHASHI J, SAITO S, et al. Improvement in vehicle agility and stability by g-vectoring control[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(suppl1): 231-254.
- [30] YAMAKADO M, NAGATSUKA K, TAKAHASHI J. A yaw-moment control method based on a vehicle's lateral jerk information[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(10): 1233-1253.
- [31] COULTER R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm[R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University Pittsburgh PA Robotics Institute, CMU-RI-TR-92-01, 1992.
- [32] SNIDER J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking[R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University Pittsburgh PA Robotics Institute, CMU-RI-



- TR-09-08, 2009.
- [33] 吕文杰, 马戎, 李岁劳, 等. 基于纯追踪模型的路径跟踪改进算法[J]. 测控技术, 2011(30): 93-96.  
LÜ Wenjie, MA Rong, LI Suilao, et al. An improved algorithm based on pure pursuit model for path tracking[J]. Measurement & Control Technology, 2011(30): 93-96.
- [34] HOFFMANN G M, TOMLIN C J, MONTEMERLO M, et al. Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing[C]// American Control Conference. New York: IEEE, 2007: 2296-2301.
- [35] DE LUCA A, ORIOLO G, SAMSON C. Feedback control of a nonholonomic car-like robot[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [36] PLASKONKA J. The path following control of a unicycle based on the chained form of a kinematic model derived with respect to the Serret-Frenet frame[C]// International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics. Miedzydroje: IEEE, 2012: 617-620.
- [37] RAJAMANI R, ZHU C, ALEXANDER L. Lateral control of a backward driven front-steering vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(5): 531-540.
- [38] RAFFO G V, GOMES G K, NORMEY-RICO J E, et al. A predictive controller for autonomous vehicle path tracking[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(1): 92-102.
- [39] LIU J, JAYAKUMAR P, STEIN J L, et al. A study on model fidelity for model predictive control-based obstacle avoidance in high-speed autonomous ground vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(11): 1629-1650.
- [40] HU C, WANG Z, TAGHAVIFAR H, et al. MME-EKF-Based path-tracking control of autonomous vehicles considering input saturation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5246-5259.
- [41] 赵熙俊, 陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究[J]. 汽车工程, 2011(5): 382-387.  
ZHAO Xijun, CHEN Huiyan. A study on lateral control method for the path tracking of intelligent vehicles[J]. Automotive Engineering, 2011(5): 382-387.
- [42] 赵盼. 城市环境下无人驾驶车辆运动控制方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.  
ZHAO Pan. Research on motion control approaches of autonomous vehicle in urban environments[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [43] MARINO R, SCALZI S, NETTO M. Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(12): 1459-1467.
- [44] XU S, PENG H. Design, analysis, and experiments of preview path tracking control for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 48-58.
- [45] KRITAYAKIRANA K, GERDES J C. Using the centre of percussion to design a steering controller for an autonomous race car[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1): 33-51.
- [46] KAPANIA N R, GERDES J C. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(12): 1687-1704.
- [47] GOODARZI A, SABOOTEH A, ESMAILZADEH E. Automatic path control based on integrated steering and external yaw-moment control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2008, 222(2): 189-200.
- [48] CHATZIKOMIS C, SORNIOTTI A, GRUBER P, et al. Comparison of path tracking and torque-vectoring controllers for autonomous electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(4): 559-570.
- [49] HU C, WANG R, YAN F, et al. Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4033-4043.
- [50] GUO J, LUO Y, LI K. An adaptive hierarchical trajectory following control approach of autonomous four-wheel independent drive electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018: 1-11.
- [51] ZHANG H, WANG J. Active steering actuator fault detection for an automatically-steered electric ground vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 3685-3702.
- [52] YANG H, COCQUEMPOT V, JIANG B. Optimal fault-tolerant path-tracking control for 4WS4WD electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 237-243.
- [53] ACKERMANN J, GULDNER J, SIENEL W, et al. Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(1): 132-143.
- [54] 余卓平, 章仁燮, 熊璐, 等. 基于条件积分方法的无人差动转向车辆动力学控制[J]. 机械工程学报, 2017(14): 29-38.

- YU Zhuoping, ZHANG Renxie, XIONG Lu, et al. Dynamic control for unmanned skid-steering vehicle with conditional integrators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017 (14): 29-38.
- [55] TAGNE G, TALJ R, CHARARA A. Higher-order sliding mode control for lateral dynamics of autonomous vehicles, with experimental validation[C]// Intelligent Vehicles Symposium. Queensland: IEEE, 2013: 678-683.
- [56] 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.
- [57] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 566-580.
- [58] FALCONE P, BORRELLI F, TSENG H E, et al. Linear time-varying model predictive control and its application to active steering systems: Stability analysis and experimental validation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2008, 18(8): 862-875.
- [59] FALCONE P, TSENG H E, BORRELLI F, et al. MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(Suppl.): 611-628.
- [60] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- GONG Jianwei, JIANG Yan, XU Wei. Model predictive control for self-driving vehicles[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [61] GUO H, LIU J, CAO D, et al. Dual-envelop-oriented moving horizon path tracking control for fully automated vehicles[J]. Mechatronics, 2017, 50: 422-433.
- [62] KIM E, KIM J, SUNWOO M. Model predictive control strategy for smooth path tracking of autonomous vehicles with steering actuator dynamics[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(7): 1155-1164.
- [63] NAM H, CHOI W, AHN C. Model predictive control for evasive steering of an autonomous vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(5): 1033-1042.
- [64] MAYNE D Q. Model predictive control: Recent developments and future promise[J]. Automatica, 2014, 50(12): 2967-2986.
- [65] 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.
- SONG Yan, ZHAO Pan, TAO Xiang. UGV robust path following control under double loop structure with  $m$  synthesis[J]. Robot, 2013, 35(4): 417-424.
- [66] WANG 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.
- [67] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [68] CHU Z, SUN Y, WU C, et al. Active disturbance rejection control applied to automated steering for lane keeping in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2018, 74: 13-21.
- [69] CHU Z, WU C, SEPEHRI N. Automated steering controller design for vehicle lane keeping combining linear active disturbance rejection control and quantitative feedback theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2018, 232(7): 937-948.
- [70] FLIESS M, LEVINE J, MARTIN P, et al. Flatness and defect of non-linear systems: Introductory theory and examples[J]. International Journal of Control, 1995, 61(6): 1327-1361.
- [71] XIA Y, PU F, LI S, et al. Lateral path tracking control of autonomous land vehicle based on ADRC and differential flatness[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3091-3099.
- [72] SILVA M, GARROTE L, MOITA F, et al. Autonomous electric vehicle: Steering and path-following control systems[C]// IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Yasmine Hammamet: IEEE, 2012: 442-445.
- [73] GUO J, HU P, LI L, et al. Design of automatic steering controller for trajectory tracking of unmanned vehicles using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2913-2924.
- [74] TAGNE G, TALJ R, CHARARA A. Design and validation of a robust immersion and invariance controller for the lateral dynamics of intelligent vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2015, 40: 81-92.
- [75] TAGNE G, TALJ R, CHARARA A. Design and comparison of robust nonlinear controllers for the lateral dynamics of intelligent vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(3): 796-809.

- [76] WANG R, HU C, YAN F, et al. Composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7): 2063-2074.
- [77] HU C, WANG R, YAN F. Integral sliding mode-based composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(2): 221-230.
- [78] LIME H M, HEDRICK J K. Lateral and longitudinal vehicle control coupling for automated vehicle operation[C]// American Control Conference. San Diego, California: IEEE, 1999: 3676-3680.
- [79] 陈慧岩, 陈舒平, 龚建伟. 智能汽车横向控制方法研究综述[J]. 兵工学报, 2017(6): 1203-1214.  
CHEN Huiyan, CHEN Shuping, GONG Jianwei. A review on the research of lateral control for intelligent vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2017(6): 1203-1214.
- [80] YU Z, WANG J. Automatic vehicle trajectory tracking control with self-calibration of nonlinear tire force function[C]// American Control Conference. Seattle: IEEE, 2017: 985-990.
- [81] TURRI V, CARVALHO A, TSENG H E, et al. Linear model predictive control for lane keeping and obstacle avoidance on low curvature roads[C]// International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Hague: IEEE, 2013: 378-383.
- [82] 明廷友. 智能汽车的轨迹跟随控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
MING Tingyou. Research on trajectory tracking control for intelligent vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [83] 章仁燮, 熊璐, 余卓平, 等. 基于条件积分算法的无人驾驶车辆轨迹跟踪鲁棒控制方法[J]. 机械工程学报, 2018(18): 129-139.  
ZHANG Renxie, XIONG Lu, YU Zhuoping, et al. Robust trajectory tracking control of autonomous vehicles based on condition integration method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018 (18): 129-139.
- [84] YU Z, ZHANG R, XIONG L, et al. Robust hierarchical controller with conditional integrator based on small gain theorem for reference trajectory tracking of autonomous vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 57(8): 1143-1162.
- [85] ATTIA R, ORJUELA R, BASSET M. Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(2): 261-279.
- [86] TALVALA K L R, KRITAYAKIRANA K, GERDES J C. Pushing the limits: From lanekeeping to autonomous racing[J]. Annual Reviews in Control, 2011, 35(1): 137-148.
- [87] LAURENSE V A, GOH J Y, GERDES J C. Path-tracking for autonomous vehicles at the limit of friction[C]// American Control Conference. Seattle: IEEE, 2017: 5586-5591.
- [88] KRITAYAKIRANA. Autonomous vehicle control at the limits of handling[D]. San Francisco: Stanford University, 2012.
- [89] GOH J Y. Automated vehicle control beyond the stability limits[D]. San Francisco: Stanford university, 2019.
- [90] NI J, HU J. Dynamics control of autonomous vehicle at driving limits and experiment on an autonomous formula racing car[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 90: 154-174.
- [91] NI J, HU J, XIANG C. Envelope control for four-wheel independently actuated autonomous ground vehicle through AFS/DYC integrated control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11): 9712-9726.
- [92] BROWN M, FUNKE J, ERLIEN S, et al. Safe driving envelopes for path tracking in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61: 307-316.
- [93] BEAL C E, GERDES J C. Model predictive control for vehicle stabilization at the limits of handling[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1258-1269.
- [94] ERLIEN S M, FUJITA S, GERDES J C. Safe driving envelopes for shared control of ground vehicles[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 831-836.
- [95] FUNKE J, BROWN M, ERLIEN S M, et al. Collision avoidance and stabilization for autonomous vehicles in emergency scenarios[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1204-1216.
- [96] GUO H, SHEN C, ZHANG H, et al. Simultaneous trajectory planning and tracking using an MPC method for cyber-physical systems: A case study of obstacle avoidance for an intelligent vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 4273-4283.
- [97] 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(14): 141-151.  
LIU Kai, GUO Jianwei, CHEN Shuping, et al. Dynamic modeling analysis of optimal motion planning and control

- for high-speed self-driving vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018(14): 141-151.
- [98] LIU J, JAYAKUMAR P, STEIN J L, et al. Combined speed and steering control in high-speed autonomous ground vehicles for obstacle avoidance using model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(10): 8746-8763.
- [99] KANAYAMA Y, KIMURA Y, MIYAZAKI F, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot[C]// *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Osaka: IEEE, 1990: 384-389.
- [100] JIANGDAGGER Z, NIJMEIJER H. Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping[J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1393-1399.
- [101] ALCALA E, PUIG V, QUEVEDO J, et al. Autonomous vehicle control using a kinematic Lyapunov-based technique with LQR-LMI tuning[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 73: 1-12.
- [102] PHAM H A. Combined lateral and longitudinal control of vehicles for the automated highway system[D]. San Francisco: University of California, Berkeley, 1996.
- [103] LEE H, TOMIZUKA M. Coordinated longitudinal and lateral motion control of vehicles for IVHS[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2001, 123(3): 535-543.
- [104] GUO J, LUO Y, LI K. Adaptive coordinated collision avoidance control of autonomous ground vehicles[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2018, 232(9): 1120-1133.
- [105] KUMARAWADU S, LEE T. Neuroadaptive output tracking of fully autonomous road vehicles with an observer[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(2): 335-345.
- [106] PETERS S C, FRAZZOLI E, IAGNEMMA K. Differential flatness of a front-steered vehicle with tire force control[C]// *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco: IEEE, 2011: 298-304.
- [107] MENOUR L, D'ANDRÉA-NOVEL B, FLIESS M, et al. Coupled nonlinear vehicle control: Flatness-based setting with algebraic estimation techniques[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 22: 135-146.
- [108] FERGANI S, MENHOUR L, SENAME O, et al. Integrated vehicle control through the coordination of longitudinal/lateral and vertical dynamics controllers: Flatness and LPV/ $H_\infty$ -based design[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, 27(18): 4992-5007.
- [109] GAO Y, LIN T, BORRELLI F, et al. Predictive control of autonomous ground vehicles with obstacle avoidance on slippery roads[C]// *ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference*. Cambridge: 2010: 265-272.
- [110] GAO Y. Model predictive control for autonomous and semiautonomous vehicles[D]. San Francisco: University of California, Berkeley, 2014.
- [111] BROWN M, GERDES J C. Coordinating tire forces to avoid obstacles using nonlinear model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2020, 5(1): 21-31.
- [112] GAO Y, GRAY A, TSENG H E, et al. A tube-based robust nonlinear predictive control approach to semiautonomous ground vehicles[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(6): 802-823.
- [113] KABZAN J, HEWING L, LINIGER A, et al. Learning-based model predictive control for autonomous racing[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4): 3363-3370.
- [114] KAPANIA N R, GERDES J C. Path tracking of highly dynamic autonomous vehicle trajectories via iterative learning control[C]// *American Control Conference*. Chicago: IEEE, 2015: 2753-2758.
- [115] ROSOLIA U, CARVALHO A, BORRELLI F. Autonomous racing using learning model predictive control[C]// *American Control Conference*. New York: IEEE, 2017: 5115-5120.

作者简介: 熊璐, 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆系统动力学与控制。

E-mail: xiong\_lu@tongji.edu.cn

杨兴, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学与控制。

E-mail: yang\_xing@tongji.edu.cn

卓桂荣(通信作者), 女, 1968 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为车辆系统动力学与控制。

E-mail: zhuoguirong@tongji.edu.cn

冷搏, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学与控制。

E-mail: harrisonleng@gmail.com

章仁燮, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学与控制。

E-mail: zhangrenxie@126.com