

# 智能汽车横纵向控制研究综述

徐伟瑞

(重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

【欢迎引用】徐伟瑞. 智能汽车横纵向控制研究综述[J]. 汽车文摘, 2025(1): 1-7.

【Cite this paper】XU W R. A Review on Transverse and Longitudinal Control of Autonomous Vehicle[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(1): 1-7.

**【摘要】**智能汽车作为汽车产业和全球智能化的关键一环,在整个智能化系统中扮演着至关重要的角色。为了探索智能汽车实现自动驾驶的关键技术,研究车辆的横向和纵向控制方法,利用车辆的运动学、动力学模型及轮胎模型,分析智能车辆的横向控制和纵向控制,采取解耦策略简化控制难度,确保车辆按照预定路径安全行驶。为确保车辆在运动时的稳定性,加强对车辆纵向控制的研究,以优化汽车速度管理。研究了车辆的耦合控制,以克服车辆耦合效应带来的问题,优化横向和纵向控制的精确度。总结了各种相关控制算法的优缺点,并提出了智能车辆横向和纵向控制的未来发展方向,包括:深化横向控制算法研究以提升安全性;优化纵向控制以确保运动稳定性;提升耦合控制精度以增强整体控制效果。

**关键词:** 智能汽车; 车辆模型; 横纵向控制; 控制算法

中图分类号: U461.6 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230040

## Research on Transverse and Longitudinal Control of Autonomous Vehicle

Xu Weirui

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

**【Abstract】** As a key component of the current automotive industry and global intelligence, intelligent vehicles play a crucial role in the entire intelligent system. To explore the key technologies for achieving autonomous driving in intelligent vehicles, researches on the lateral and longitudinal control methods of vehicles have been conducted. By utilizing the vehicle's kinematic, dynamic models, and tire models, the lateral and longitudinal control of intelligent vehicles is analyzed. A decoupling strategy is adopted to simplify control complexity, ensuring that the vehicle travels safely along the predetermined path. To guarantee the stability of the vehicle in motion, research on longitudinal control is strengthened to optimize the management of vehicle speed. The study of vehicle coupling control aims to overcome the problems caused by vehicle coupling effects, optimizing the precision of lateral and longitudinal control. The advantages and disadvantages of various related control algorithms are summarized, and future development directions for the lateral and longitudinal control of intelligent vehicles are proposed, including deepening the research on lateral control algorithms to enhance safety, optimizing longitudinal control to ensure motion stability, and improving the precision of coupling control to enhance overall control effectiveness.

**Key words:** Autonomous driving, Vehicle model, Horizontal and longitudinal control, Control Algorithm

## 0 引言

汽车智能化概念的广泛传播使智能汽车的安全性、可靠性与高效性愈发受到重视。其中智能汽车横、纵向控制是确保车辆稳定、精确跟踪行驶的关键环节。汽车在实际行驶过程中,行驶工况复杂,同时受到多方向作用力,而车辆的横、纵向运动之间存在

较强的耦合关系,因此被理解为非线性运动约束系统<sup>[1]</sup>。车辆横、纵向控制可以通过解耦控制和耦合控制2种方式实现。通过改变自然坐标系和Frenet坐标系坐标将车辆横、纵向控制解耦为横向转向和纵向速度。横向控制通常解释为将当前车辆可观测位姿和目标位姿进行对比,转换到车辆坐标系,得到横向误差,将其最小化算出前轮转角,执行元件通过控制该

控制量使车辆沿着预定目标轨迹路径行驶。纵向控制则是通过协同控制车辆油门和制动,从而控制发动机节气门开度和制动压力,使得车速得到有效控制,实现加速、减速、紧急制动、避撞、巡航等功能。车辆纵向控制具有参数不确定性、滞后性和高度非线性等特征,对车辆的运动具有较大影响。因此,加强对车辆的相关控制研究具有重要意义。对车辆的横、纵向进行耦合控制也是一种值得深入研究的方向,可以提高车辆控制精度,优化车辆特性。

随着智能控制技术研究的深入,一些先进的控制理论逐渐应用到自动驾驶的横纵向控制中,目前普遍运用的控制算法主要包括滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)、比例-微分-积分控制(Proportional-Integral-Derivative control, PID)、模糊控制算法、线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)、模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)以及自适应控制(Adaptive Controller, AC)等。

本文从车辆模型、横向控制和纵向控制算法等方面,对车辆横、纵向控制发展现状进行归纳分析,在此基础上提出对无人驾驶汽车横纵向控制技术发展的展望,旨在为相关研发人员提供一定的参考。

## 1 智能车辆模型

基于对智能车辆的横、纵向控制的研究,通常需建立较为精确的车辆模型,如车辆运动学模型、动力学模型或轮胎模型。实际应用中,车辆模型通常可以在一定假设条件下简化为二自由度单车模型、三自由度车辆模型或多自由度车辆模型,同时借助简化和近似估计等方法,尽可能准确地反映车辆运动特性,有利于车辆横、纵向控制器的设计<sup>[2]</sup>。

### 1.1 车辆运动学模型

运动学模型从几何学角度分析车辆运动规律,主要研究车辆的位置、姿态以及车辆速度与时间的关系,其中涉及多个关键参数,主要包括车辆航向角、质心偏角、前轮转角、前后轴到质心距离、车辆速度及加速度等。运动学模型能够通过参数之间的关系揭示车辆在运动过程中的基本规律,为车辆控制和设计提供理论基础。车辆运动学模型通常基于二自由度单车模型,如图1所示,该模型仅考虑横向运动和横摆运动2个自由度,适用于低速行驶工况,如自动泊车。

车辆运动学模型通常基于二自由度单车模型,如图1所示, $v$ 为质心速度, $v_x$ 为纵向速度, $v_y$ 为横向速度, $\beta$ 为质心侧偏角,为横摆角速度, $\delta_f$ 为车辆前轮转

角, $F_{yf}$ 和 $F_{yr}$ 为前后轮胎的侧向力, $l_f$ 和 $l_r$ 为车辆前后轴到质心的距离, $\alpha_f$ 和 $\alpha_r$ 为前后轮侧偏角。该模型仅考虑横向运动和横摆运动2个自由度,适用于低速行驶工况,如自动泊车。

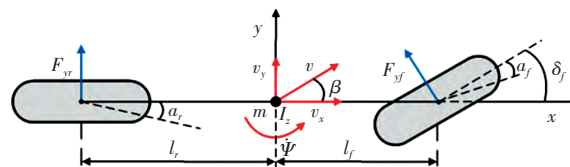


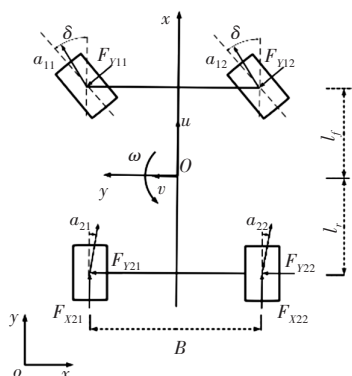
图1 车辆二自由度模型<sup>[3]</sup>

在车辆运动控制过程中应用运动学模型有助于使车辆运动更切合实际(如跟踪既有轨迹或自动泊车情况下),满足行驶过程中的运动学几何约束。同时基于运动学模型设计的控制器可以提供更可靠的控制性能,有效降低控制误差。

### 1.2 车辆动力学模型

车辆动力学模型主要研究车辆与路面之间力的关系,主要包括轮胎的侧偏滑移、车辆侧倾、横摆以及翻滚等工况。相比于运动学模型,动力学模型也适用于高速工况。车辆动力学模型主要分为研究车辆平顺性的驱动力动力学模型和分析车辆操纵稳定性的轮胎动力学模型。根据受力方向又可分为横向动力学模型和纵向动力学模型,一般通过坐标变换对其进行解耦后进行研究。横向模型可以通过控制前轮转角实现路径跟踪、转向避撞、防侧倾等。纵向模型通常通过控制车速实现速度跟踪、紧急制动等。

基于车辆动力学模型研究车辆轮胎的纵向力和侧向力,可以提高汽车行驶稳定性,优化跟踪控制轨迹。在研究过程中,可以引入适当约束条件提高计算精度。车辆动力学模型可根据研究需求简化为不同自由度的车辆模型。模型的自由度越高,其对车辆动力学特征的描述越完整,同时增加模型的复杂性和求解难度。二自由度单车模型是当前最常用的简化模型,三自由度、七自由度车辆模型也受到广泛使用。江浩斌等<sup>[4]</sup>搭建包括横向、纵向和横摆运动的三自由度动力学模型,被用作MPC的预测模型,用于研究工况自适应路径跟踪。曾望云、隗寒冰等<sup>[5]</sup>搭建的包括横向、横摆、纵向和4个轮胎转动的七自由度动力学模型被用于换道轨迹研究,如图2所示, $v$ 为质心速度, $u$ 为纵向速度, $y$ 为侧向速度, $F_{y11}$ 、 $F_{y12}$ 、 $F_{y21}$ 和 $F_{y22}$ 分别为车辆左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的侧向力, $F_{x21}$ 和 $F_{x22}$ 分别为车辆左、右后轮的驱动力, $l_f$ 和 $l_r$ 为车辆前后轴到质心的距离, $B$ 为轮距, $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{21}$ 和 $\alpha_{22}$ 分别为车辆左前轮、右前轮、左后轮和右后轮侧偏角。

图2 车辆七自由度模型<sup>[6]</sup>

车辆处于运动状态时,轮胎与路面进行相对运动。轮胎受到垂直载荷、横纵向力以及回正力矩,对车辆稳定性与安全性产生一定影响。在忽略车辆悬架的情况下,轮胎侧偏特性对汽车操纵稳定性具有重要影响。若在高速行驶或路面附着系数变化等复杂工况下,轮胎的承受力易达到饱和状态。若轮胎承受的地面作用力和力矩不足以维持车辆的稳定性,车辆操纵稳定性无法得到有效保障,车辆易发生失控,出现侧滑和甩尾现象。

车辆动力学模型基于牛顿力学原理建立,综合考虑了轮胎特性,相较于运动学模型更为精准。在研究车辆动力学时,需要对车辆轮胎模型进行探究。轮胎的动力学特征对车辆的操纵稳定性和平顺性具有显著影响,当前主流轮胎模型主要分为理论轮胎模型、经验轮胎模型和物理轮胎模型。理论模型基于研究轮胎物理结构和变形,如Fiala模型、Gim模型和刷子模型<sup>[7]</sup>。经验与半经验轮胎模型基于实验数据,如Pacejka提出的半经验魔术公式(Magic Formula, MF)轮胎模型<sup>[8]</sup>、用于非线性仿真的Dugoff轮胎模型<sup>[9]</sup>、能实时仿真的Burdhardt轮胎模型<sup>[10-11]</sup>以及考虑静态现象(如附着和摩擦)的LuGre物理轮胎模型<sup>[12]</sup>。此外,基于MF轮胎模型引入人工神经网络、粒子群算法的自适应轮胎模型应用也较为广泛。建立轮胎模型可以更精确的表达轮胎与地面之间的相互作用,可以通过对轮胎参数和道路参数的辨识和估计更精确地实现车辆横、纵向控制。

## 2 智能汽车横向控制

行驶中的车辆不仅受到自身驱动力作用,还受到地面和空气施加的侧向力作用。驾驶员可以通过操纵转向盘控制车辆的前轮转角控制车辆航向角和横向位移,确保转向稳定性和轨迹跟踪准确性,同时实现防侧倾和转向防撞功能。横向控制的核心在于控

制器根据预设的跟踪轨迹,依据目标轨迹点信息以及车辆当前状态输出控制量,调节控制量实现轨迹精准跟踪。本节将重点介绍横向控制相关的控制算法并阐述其特点。

### 2.1 PID控制

传统PID控制算法起步较早,发展较为成熟。PID控制过程中无需对被控对象进行建模且所需参数较少,其在车辆控制领域得到广泛应用。

PID控制算法在车辆纵向控制中的应用较为普遍。在智能汽车横向控制方面,由于车辆参数和道路环境的变化以及对于高级智能控制的需求,单独使用传统PID控制算法无法适应高级智能控制,因此传统PID控制应用正在逐步减少,倾向采用与其他控制器相结合的复合控制方法,如蔡清志等<sup>[13]</sup>基于预测控制和输出递归模糊小波神经网络进行在线参数学习和识别的自适应PID算法、模糊PID<sup>[14]</sup>等。

### 2.2 LQR

LQR常用于车辆横向运动最优控制,解决线性二次型最优控制问题。该方法基于现代控制理论,研究状态空间形式的线性系统,以对象状态和控制输入的二次型函数作为目标函数。在一定时域内对跟踪误差函数进行线性化,建立线性误差模型,在当前时域内对误差模型进行二次优化,得到最优反馈控制量,从而实现针对目标路径的优化跟踪控制<sup>[15]</sup>。

基于车辆动力学模型求出误差方程,并将其改写为状态方程。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

式中: $x$ 为状态向量, $A$ 为状态矩阵, $B$ 为控制矩阵, $u$ 为控制向量。

在应用LQR进行车辆横向控制时,首先需要将连续线性状态方程通过欧拉法离散化,随后求解离散化后的黎卡提(Riccati)方程。但LQR控制策略在稳态条件下可能存在误差(如稳态横摆角误差),为了消除误差,通常需要引入适当的前馈控制量。

$$u = -ke_r + \delta_f \quad (2)$$

式中: $e_r$ 为稳态误差, $\delta_f$ 为前馈控制量(前轮转角)。

LQR横向控制的目标是求解出最优控制律,使得如下性能评价函数 $J$ 取得最小值。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [e^T(t)Qe(t) + U^T(t)RU(t)] dt \quad (3)$$

式中: $Q$ 为控制器加权半正定权重矩阵, $R$ 为正定权重矩阵, $e$ 为误差向量, $U$ 为控制矩阵。

LQR控制器的设计与应用关键步骤主要包括状

态方程求解、LQR 离散化处理以及稳态误差消除。在实际应用运用中,LQR 控制器多与其他控制器或者优化算法共同使用。孙明晓等<sup>[16]</sup>基于改进灰狼优化算法的 LQR 控制器,减少有效载荷摆动,优化控制效果。集成多策略的控制方法在提高车辆控制系统的性能方面展现出一定优势。

### 2.3 模型预测控制

MPC 于上世纪 70 年代提出,最先应用于航天领域,其主要优势在于能够为系统引入多个约束条件。在智能车辆行驶过程中,在路径规划层面和控制方面均需满足一定约束条件。因此,近年来,相关团队均持续对模型预测控制进行研究,并将其应用于智能车辆控制系统。邵毅明等<sup>[17]</sup>提出一种考虑轮胎侧偏角约束的线性时变 MPC 方法,提升了车辆在高速工况下的路径跟踪效果。Taghavifar 等<sup>[18]</sup>提出一种基于多约束并考虑防侧倾的非线性 MPC 策略以提高车辆控制性能。

模型预测控制在整个控制过程中包含基于模型的预测、滚动优化和反馈校正控制 3 个部分。其中滚动优化主要根据某一性能指标设计代价函数并在一定约束下求解,下一时刻继续在约束下求解,反复在线进行滚动求解直到结束。存在一些干扰因素可能会导致实际状态与理想不符,为了避免这种情况,需要将实际输出作为反馈去调整优化。正是这种滚动优化的特性,使得模型预测控制在模型失配以及其他复杂多变的工况下更稳定有效<sup>[19]</sup>。

在搭建预测模型前,由于车辆轮胎具有高度非线性化,需要基于轮胎动力学模型对车辆轮胎进行受力分析,从而降低系统复杂程度。

每个时域最优解序列中第一个作用于系统的值为前馈补偿,而每个时域经过控制后又得到新的测量值,进而计算出新的系统状态,以此进行反馈校正控制。其预测控制流程图如图 3 所示。

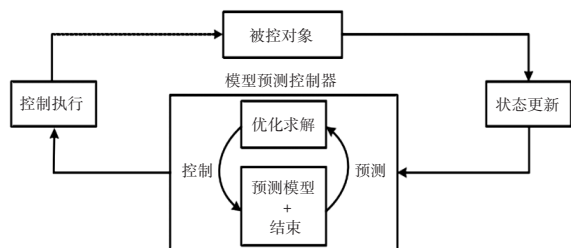


图 3 预测控制流程图

MPC 控制器涉及基于模型的目标函数与约束条件的求解过程。MPC 策略通过整合预测、滚动优化和反馈校正 3 个模块确定当前时刻的控制量,将其传输至被控对象。在优化控制的作用下,被控对象得到此

刻输出和状态变量,并将其传递至状态估计器,以预估无法直接测量的状态变量。将状态估计量输入 MPC 进行下一时刻的预测、滚动优化和反馈校正。同时下一时刻的优化控制作用再次被输入至被控对象,形成连续的循环过程,构成了 MPC 控制原理的基本框架。

在设计模型控制器时,可以采用近似线性化方法处理非线性车辆动力学模型,通过应用泰勒公式展开模型,忽略其高阶项,保留一阶项,从而得到雅克比矩阵。将矩阵离散化,得到线性时变方程。

MPC 和 LQR 在状态空间和控制实现方面均存在相似之处。LQR 的研究对象是基于状态空间的线性系统,而 MPC 的研究对象既可以是线性系统,也可以是非线性系统,MPC 通常会先对非线性系统进行线性化处理,再对线性化后的系统进行离散化求解。LQR 和 MPC 线性系统状态方程较相似,但 MPC 还存在非线性状态方程。在操作时域方面,LQR 工作时域固定,但理论上可视为无限长。而 MPC 的工作时域则限制在有限的采样时段内。表 1 为 LQR 和 MPC 特征对比分析。

表 1 LQR 与 MPC 特征对比

特征	LQR	MPC
研究对象	线性系统	线性/非线性
状态方程	$\dot{x} = Ax + Bu$	$x(t + 1) = Ax(t) + Bu(t)$
工作时域	固定时域	滚动时域
目标函数	积分形式	求和形式
求解方法	变分法求黎卡提	二次规划求解
局限性	误差较大、无约束	算力、成本要求高

传统的 MPC 已较为成熟,目前的研究重点集中于对 MPC 算法的改进上,如基于参数自适应、变步长或时域自适应模型预测控制(Adaptive Model Predictive Control, AMPC)、多控制器联合算法以及引入的其他智能算法(如蚁群算法、神经网络算法、遗传算法)。

### 2.4 模糊控制

模糊控制(Fuzzy Control, FL)算法的显著特点是其无需对被控对象建立较精确的数学模型。该算法的核心流程分为 3 个环节,即模糊化、推理模糊和去模糊。模糊化是将输入量的确定值转换为与之对应的模糊变量值的过程,其中某个变量变化的实际范围称为该变量的基本论域。为实现模糊化,需将离散化的精确量与表示模糊语言的模糊量相对应,得到论域中的元素与模糊语言变量相对应的隶属度。隶属度用来描述某个确定量隶属于某个模糊语言变量的程度。同

时通过建立模糊控制规则,进行模糊推理运算。在模糊系统的研究与应用中,传统的推理方法通常仅能得到近似推理结果。现可以采取不同的模糊推理方法,匹配所有类型的模糊规则,提高推理的精度和适应性。去模糊化环节的作用是将模糊控制系统得到的模糊输出值转换为实际控制过程中的精确指令,实现对被控对象的直接控制。模糊算法本身是逐次求精的过程,其重点在于判断当前误差大小,并据此选择合适的系统控制策略。模糊算法通常与其他控制算法配合使用,如模糊PID,模糊LQR、模糊MPC等。

## 2.5 滑模控制

SMC算法具有较高控制性能,可以快速响应非线性变结构,其结构随时间变化。滑模变结构控制是指控制器将状态或误差代入滑模面并使其保持在滑模面上,即将不稳定的相平面图组合为稳定的相平面图。由于滑模运动特性为预先按照要求设计,因此其对参数变化及扰动不敏感,系统具有极强的鲁棒性。此外,若将SMC应用于非线性系统,其优势在于无需进行复杂的线性化处理,能更便捷稳定地实现控制。其缺点在于状态轨迹到达滑模面后,难以严格地沿着滑模面移动至平衡点,而是在滑模面两侧穿过,易发生抖振问题。

为了改善这一现象,SMC通常与其他控制器或算法结合使用,如李鹤年等<sup>[20]</sup>基于遗传算法整定滑模参数,而马瑞梓等<sup>[21]</sup>基于神经网络实现滑模变结构以提高控制精度和效果。

## 2.6 自适应控制

自适应控制能基于工况或者参数变化自动调节更新状态特性,使系统能持续以最优状态进行控制。自适应控制的应用对象主要是具有不确定性的系统,其可以实现更新修正自身状态以适应动态特性变化,优化某一特定的性能指标。如自适应控制可被视为一种包含在线参数识别的反馈的控制算法。自适应控制包括模型参考自适应控制(Model Reference Adaptive Control, MRAC)、参数自适应控制(Parameter Adaptive Control, PAC)等。相比于一般控制器的固定参数和结构,自适应控制器可以基于一定自适应规则进行修正调整,适用于被控对象未知或者扰动特性变化范围大的被控对象。

## 2.7 其他智能控制算法

在实际工程应用中,控制算法的复合使用是一种常见策略。例如,基于神经网络的滑模控制通过学习准则进行训练,实现错误记录排错。每次训练过程

中,模型得到持续的优化与改进,考虑车辆实际行驶时的高非线性动态特征,以此为基础设计滑模控制器。苑风霞等<sup>[22]</sup>基于遗传算法的权重系数自适应MPC控制,引入衰减速率先慢后快的高斯衰减函数对预测步长对应预测量的权重值和对应控制增量的权重值进行合理分配。结合车辆状态和路况信息,应用遗传算法实现高斯函数标准差的自适应优化,从而提高车辆路径跟踪精确度。基于神经网络的深度学习也应用于模型训练,与横向控制器结合,实现避免碰撞功能。扩展卡尔曼滤波应用于在线估计车辆状态、路面附着系数等信息,并与MPC控制器或PID控制器等配合使用。

除此之外应用更为广泛的是复合控制,即多控制器融合,其主要包括双PID控制算法、自适应控制算法结合PID、模糊算法结合LQR、LQR结合PID、MPC结合模糊控制等。

## 3 智能汽车纵向控制

智能汽车的纵向控制主要涉及车辆的动力与制动,即车速控制。通过操纵制动踏板和发动机节气门的开度调节发动机进气量,控制发动机运转,从而控制其纵向行驶车速和加速度,达到预期的安全行驶距离,实现紧急制动避障、巡航等功能。实现汽车纵向控制的重点在于动力系统和制动系统的精准标定、系统的鲁棒性以及轮胎的滑移分析。纵向控制可分为直接式纵向控制和分层式纵向控制2种类型。

### 3.1 直接式纵向控制

直接式纵向控制通过直接调节车辆的节气门开度和制动压力实现对车辆的控制,如图4所示。其输入包括车辆在行驶时的预设期望车速和纵向距离等,通过设计的纵向控制器实现精准控制,具有精确度高、响应速度快的特点。但由于车辆本身是一个复杂系统,除制动能力外,还需考虑稳定性、自适应性以及其它性能。因此,采用单一的直接式控制器无法满足车辆系统的控制需求。

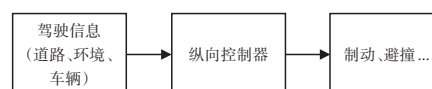


图4 直接式纵向控制策略原理

### 3.2 分层式纵向控制

智能汽车的纵向动力学模型是一个复杂的非线性模型,其中大多数测量参数并不精确,上述的直接式纵向控制策略难以实现有效控制。相比之下,分层

式纵向控制策略可以有效降低控制难度。

如图5所示,分层式纵向控制结构包括上位控制器和下位控制器。上位控制器负责将车辆输入的纵向车距和车速等信息转化为车辆的预期加速度。下位控制器通过上位控制器输入的预期加速度调节发动机节气门开度和制动压力,从而控制车速实现加速或者制动。

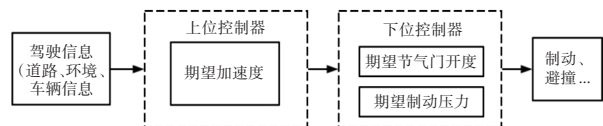


图5 分层式纵向控制策略原理

### 3.3 纵向控制器

PID控制器因其具有结构简单、可靠性强且实用性高的特点,经常应用于智能车辆纵向控制。基于反馈控制的PID控制器可以实现智能车辆在不同车速下的路径跟踪,并具有较高的跟踪精度和行驶稳定性。基于遗传算法的PID纵向分层控制<sup>[23]</sup>的上层控制器采用遗传算法对PID中3个参数进行迭代训练优化,得到误差最小的一组参数作为PID控制参数,使其能在不同的参考车速下获得最优的期望加速度。下位控制器基于上位控制器输出的预期加速度,控制发动机节气门开度和制动压力。

除了传统的PID控制器,还有基于模糊控制器、MPC控制器以及其他控制器的纵向控制应用。如将MPC作为上层控制器,建立包含跟踪精度和稳定性的目标函数,并引入松弛因子以优化控制效果,得到优化后的期望加速度,并据此调节节气门开度和制动压力,实现对车辆纵向运动的精准控制。

## 4 横、纵向耦合控制及其影响约束

横、纵向控制存在耦合效应,尤其在高速过弯等复杂工况下,车辆难以实现理想控制效果。因此,在研究横、纵向控制时,通常采取解耦分离控制方案以降低控制研究难度,但也相应降低了实际控制的精度。

在实际复杂工况中,车辆的横、纵向耦合关系不可避免。因此,横、纵向耦合控制研究更应该深入研究,克服非线性和控制难度等问题,使耦合控制更加精确。例如,基于线性时变的模型预测控制<sup>[24]</sup>处理非线性问题,许芳等<sup>[25]</sup>提出的路径跟踪横、纵向耦合实时预测控制器,实现高速低附着工况下车辆实时跟踪控制。卢永杰等<sup>[26]</sup>以轮胎的动载荷来耦合车辆垂向动力学模型和横向动力学模型,并基于模糊PID优化车辆在转向过程中的横纵向运动特性。

此外,智能汽车的横、纵向控制还受到多种约束影响,如路面附着条件、轮胎侧偏刚度、滑移率、风阻和胎压、时变的道路曲率以及路面倾角等。本节主要讨论路面附着和侧偏刚度对横、纵向控制的影响。

### 4.1 路面附着条件

路面摩擦系数直接影响车辆的侧向稳定性。摩擦系数大的路面能够提供足够的侧向力,避免发生甩尾现象,保证车辆的稳定性。路面附着系数的影响因素包括路面粗糙程度、轮胎表面磨损程度、车辆行驶速度和载荷等,其共同作用于车辆的纵向加速度和横向加速度,显著影响车辆的动态行为。当路面附着系数较小时,地面提供的侧向力不足以维持车辆稳定性,导致车辆失稳。为了估计路面附着系数,可以建立横、纵向控制动力学模型,包括轮胎模型,并建立轮胎与路面附着相关的观测方程,根据车辆的运动状态估计轮胎与路面间的附着系数。

### 4.2 轮胎侧偏刚度

轮胎侧偏刚度与轮胎侧偏力、侧偏角之间的关系可以通过特定公式转换。侧偏角和侧偏刚度对车辆的横向控制、稳定性以及乘坐平顺性等方面具有较大重要影响。因此,在设计车辆横、纵向控制器时,应当加入侧偏约束条件。考虑车辆状态和路面参数,采用递归最小二乘法在线估计轮胎侧偏刚度<sup>[27]</sup>。如在MPC控制器的设计中,将此约束纳入MPC二次规划的求解,减少其负面影响。

## 5 结束语

智能汽车的横、纵向控制是实现车辆运动控制的基础,是车辆实现路径规划和轨迹跟踪以及实现转向换道、超车、制动、避撞等工况的核心。目前,针对智能汽车的横、纵向控制已有较深入的研究并获得许多成果,但仍有许多不足需要加以改进。首先,便于控制研究的车辆模型大多采用简易的二自由度单车模型,虽然降低了研究难度,但也降低了车辆控制精度,因此需要考虑选取多自由度的车辆模型来提高计算精度。其次,如今单一的传统控制器并不能满足复杂的非线性车辆系统的高精度、高稳定性要求,横、纵向控制的发展方向应当是考虑多约束、多控制器融合、优化算法、仿生算法等与控制器融合的复合控制或智能控制。最后,常规的横、纵向解耦控制并不能很好地体现实际工况下的车辆特性,因此需要深入研究车辆的耦合控制,克服耦合效应带来的相关问题。

## 参 考 文 献

- [1] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 智能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.
- [2] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 智能车辆模型预测控制[M]. 北京理工大学出版社, 2020, 27-31.
- [3] 张志达, 郑玲, 张紫微, 等. 基于自适应模型预测的智能汽车横向轨迹跟踪控制[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 305-316.
- [4] 江浩斌, 韦奇志, 李傲雪, 等. 一种面向智能汽车的工况自适应路径跟踪控制方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(6): 1-11.
- [5] 曾望云, 隗寒冰. 基于车辆动力学模型的换道轨迹规划研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(6): 815-824.
- [6] 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.
- [7] O'NEILL A, PRINS J, WATTS J F, et al. Enhancing Brush Tyre Model Accuracy Through Friction Measurements[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(6): 2075-2097.
- [8] BAKKER E, NYBORG L, PACEJKA H B, et al. Tyre Modelling For Use in Vehicle Dynamics Studies[J]. SAE 1987 Transactions, 1987: 870421.
- [9] DU H P, LAM J, CHEUNG KIE-Chung, et al. Side-Slip Angle Estimation and Stability Control for A Vehicle with A Non-Linear Tyre Model and A Varying Speed[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(4): 486-505.
- [10] HUANG X Y, ZHANG H, ZHANG G G, et al. Robust Weighted Gain-Scheduling  $H_{\infty}$  Vehicle Lateral Motion Control with Considerations of Steering System Backlash-Type Hysteresis[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(5): 1740-1753.
- [11] DAVID V, RODOIFO O, MATTHIAS S, et al. An Adapted Burckhardt Tire Model for Off-Road Vehicle Applications[J]. Journal of Terramechanics, 2022, 104: 15-24.
- [12] SIMONI L, BESCHI M, VISIOLI A, et al. Inclusion of the Dwell Time Effect in the LuGre Friction Model[J]. Mechatronics, 2020, 66: 102345-102345.
- [13] TSAI C C., YU C C, TSAI C T. Adaptive ORFWNN-Based Predictive PID Control[J]. International Journal of Fuzzy System, 2019, 21: 1544 - 1559.
- [14] PHU D N, HUNG N N, AHMADIAN A, et al. A New Fuzzy PID Control System Based on Fuzzy PID Controller and Fuzzy Control Process[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020, 22 (7): 1-25.
- [15] 林棻, 倪兰青, 赵又群. 考虑横向稳定性的智能车辆路径跟踪控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 78-84.
- [16] SUN M X, JI C Y, LUAN T T, et al. LQR Pendulation Reduction Control of Ship-Mounted Crane Based on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24 (3): 395-407.
- [17] 邵毅明, 陈亚伟, 束海波. 自动驾驶汽车的轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(8): 1-6.
- [18] TAGHAVIFAR H. Neural Network Autoregressive with Exogenous Input Assisted Multi-Constraint Nonlinear Predictive Control of Autonomous Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6293-6304.
- [19] 邓国红, 肖皓鑫, 韩龙海. 基于模型预测控制的车辆纵向跟踪控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 18-26+57.
- [20] 李鹤年, 王海, 杨春来, 等. 改进 GA 整定滑模参数的直流电机控制研究[J/OL]. 机械科学与技术. [2023-03-14]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230080>.
- [21] 马瑞梓, 张艺婕. 基于 RBF 神经网络的鲁棒因子滑模变结构多自由度机械臂精确跟踪控制研究[J]. 系统与数学, 2023, 43(1): 1-14.
- [22] 苑风霞, 张华, 陈丰, 等. 基于模型预测和遗传算法的智能车辆轨迹跟踪控制[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 393-400.
- [23] 康腾. 基于遗传算法的智能驾驶车辆纵向 PID 控制研究[J]. 汽车文摘, 2022(10): 52-56.
- [24] ÁDAM D, VIKTOR T. LTV-MPC Approach for Automated Vehicle Path Following at the Limit of Handling[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5807.
- [25] 许芳, 张君明, 胡云峰, 等. 智能车辆路径跟踪横纵向耦合实时预测控制器[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2287-2294.
- [26] YONGJIE L, TONGTONG W, HANGXING Z. Multi-objective Synchronous Control of Heavy-Duty Vehicles Based on Longitudinal and Lateral Coupling Dynamics[J]. Shock and Vibration, 2022: 6987474.
- [27] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 智能车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.

(责任编辑 梵玲)