

# 基于模型预测控制 (MPC) 的智能车路径跟踪控制

杨文佳 刘志昊 远 雨

青岛恒星科技学院 山东青岛 266041

**摘要:** 智能车路径跟踪技术在自动驾驶领域具有重要意义,能够有效提升车辆的行驶安全性与准确性。本文针对智能车在复杂道路环境下的路径跟踪问题,提出了一种基于模型预测控制(MPC)的路径跟踪控制方法。该方法通过智能车动力学建模,结合预测性的优化控制策略,实现对车辆横向与纵向运动的协同调节,有效抑制路径偏离和不稳定因素。研究表明,MPC能够提前预测智能车的运动轨迹,并根据道路曲率和车辆状态动态地调整控制输入,显著提高了智能车的路径跟踪精度与鲁棒性。同时,MPC方法在处理约束条件方面显示出良好的适应能力,能够确保车辆平稳、安全地行驶于预设路径。该研究成果对智能车自动驾驶控制系统的设计与开发具有重要参考价值,为智能驾驶技术的实际应用提供了理论支持和技术保障。

**关键词:** 模型预测控制;智能车;路径跟踪;自动驾驶;运动协同调节

## 引言

随着智能技术和无人驾驶技术不断发展,车辆按照既定路线行驶的精确控制已经成为无人驾驶系统开发中的核心部分。路线跟随水平直接影响到车辆行驶过程中的安全性、乘坐舒适程度以及能源消耗效率,成为实现高级无人驾驶的基本条件。城市里面交通情况非常复杂,对路线跟随的精确程度、反应快慢程度、抗干扰能力提出更高更严格的标准。超过70%的无人驾驶事故发生原因都和偏离预定路线以及控制功能失灵有直接关系。过去常用的PID控制方法和几何计算方法虽然实际使用起来比较方便,但是遇到车辆本身运动规律限制、道路情况出现强烈非线性变化以及受到多种外界干扰这些情况时,很容易出现明显的位置偏差并且整体运动表现明显变差。充分考虑智能车辆运动具有强烈非线性以及多个变量互相影响这些特点,先进的预测优化控制方法逐步开始应用到路线跟随研究领域里面。模型预测控制MPC因为可以在受限时域中改进控制输入,并且机动解决状态和输入约束,愈加使用于路径跟踪领域。MPC方法在提高路径跟踪精度、灵活适应性及系统鲁棒性方面展现显著,然而实际部署时依旧面临建模精度、即时求解能力及约束解决等技术挑战。本文以智能车路径跟踪为研究对象,构建适配于控制设计的车辆动力学模型,建议依托MPC的路径跟踪控制策略。通过对车辆状态的即时预估和最佳控制输入的灵活调节,本文致力于为智能车在复杂道路环境下达成高精度、强鲁棒性和高安全

性的路径跟踪控制给予理论依据与技术支持。

## 一、智能车路径跟踪问题概述

### 1.1 智能车发展背景与自动驾驶技术

智能车的发展背景和自动驾驶技术的进步紧密相关<sup>[1]</sup>。随着人工智能、传感器技术和信息通信技术的快速发展,智能车逐渐成为未来交通系统的重要组成部分。自动驾驶技术的研究始于二十世纪中期,但近年来,随着技术的突破和市场需求的增加,其发展速度明显加快。智能车通过集成多种传感器,如激光雷达、摄像头和毫米波雷达,能够获取周围环境信息,并依托先进的数据处理和算法技术,实现对车辆的自动控制。自动驾驶技术的成熟,将显著提升道路的安全性和效率,减少人为错误导致的交通事故,进一步推动智能交通系统的实现和优化<sup>[2]</sup>。在这种背景下,路径跟踪控制作为自动驾驶的核心技术之一,正面临着新的挑战 and 机遇。

### 1.2 智能车路径跟踪的挑战与应用

智能车路径跟踪技术面对众多挑战,涵盖应对繁杂道路环境的要求还有保证稳固性和精准性的技巧难题。不断变化的道路情形下,智能车必须高效解决例如陡拐弯、车道汇入和动静态障碍物等等状况,从而达成平安可信的自动驾驶。路径跟踪技术必须对付传感器噪声和延时造成的不确定,保证车辆可以准确地维持在设定路径上,防止偏移。智能车路径跟踪在自动驾驶中拥有普遍运用,包含城市交通导航、高速公路行车和停车辅助

等各种情境。借助提高路径跟踪性能，智能车可以明显增强行车安全性和效能，对自动驾驶技术的进一步发展打下基础。

### 1.3 基于模型预测控制 (MPC) 的控制策略概述

模型预测控制MPC作为一种先进的控制策略，用其预测性和优化性特点于自动驾驶领域里获取普遍使用。MPC借助构造预测模型，运用当前车辆状态和目标路径信息，预估将来若干时刻的系统行为，因此改进控制输入。该关键取决于即时解决一项受限时间的优化问题，灵活调节车辆的横纵向动作，用以达成路径跟踪任务的准确实施。通过对系统模型和约束条件的有效刻画，MPC可以于复杂多变的道路环境中维持智能车的平稳和无危操控。

## 二、模型预测控制 (MPC) 理论基础

### 2.1 MPC 基本原理与控制框架

模型预测控制属于优化控制方式，常常应用路径跟随场合。核心原理利用车辆动力学模型提前估算未来时刻车辆状态变化，接着通过实时优化计算确定最佳控制指令。模型预测控制结构一般包含预测模型、滚动优化以及反馈校正三个部分。预测模型根据车辆当前状态结合系统动态规律，计算出一段时间状态变化轨迹。滚动优化根据计算结果反馈校正部分负责及时调整预测出现偏差，从而提升系统稳定能力。模型预测控制这种结构优势能够复杂条件下灵活应对路径变化，依靠实时运算加上即时优化功能，大幅提高控制准确程度，给自动驾驶技术提供强有力支持。

### 2.2 MPC 在路径跟踪中的应用优势

模型预测控制MPC在智能车路径跟踪中的应用优势表现在其可以预先预判车辆的运动轨迹，并且顺应道路的变化即时调节控制输入。MPC运用车辆状态和道路曲率信息，借助改进计算获取最优控制输入，因此达成车辆的准确横纵向协调控制。MPC还拥有应对多种约束条件的能力，保障车辆在复杂环境下的稳定与无险运行。相较传统控制方法，MPC在动态环境顺应性和预判性调节上更为优势，明显提高了路径跟踪的精度与稳定性。其应用为智能车自动驾驶技术给予了可信保障。

### 2.3 MPC 控制器设计中的关键问题

在研制MPC控制器时，核心问题涵盖模型的精确度、预测时域的选取以及控制最优的计算效能。精确的车辆动力学模型是保障预测精度的前提，并且选用适当的预测时域长度会影响控制决断的实时性和精度。最优

算法必须在即时环境下快速计算，以达到智能车迅捷反应的需求。对于约束条件的应对性能左右了控制系统在严峻道路环境下的适应能力。MPC研制应当全面兼顾以上要素，以保障路径跟踪的准确度和稳健性。

## 三、智能车动力学建模与约束条件分析

### 3.1 智能车动力学模型

智能车运动模型成为路径跟踪控制系统设计基础。这个模型通常包括车辆横向运动状态描述和纵向运动状态描述，用来准确模拟智能车道路行驶行为。横向运动通过计算侧向力以及偏航角速度，描述车辆转向时候横向位置变化。纵向运动通过动力传动系统性能参数，描述车辆速度变化以及加速度变化。智能车运动模型里面常见状态变量包括横摆角速度、侧向加速度、前轮转角等等，这些状态变量共同决定车辆运动轨迹。为了提高路径跟踪精确度，还必须考虑道路曲率变化以及外部干扰因素，这些因素明显影响智能车运动稳定性以及响应能力。建模过程当中，必须结合真实车辆运动特性以及外部环境限制，建立一套能够快速适应复杂道路条件的智能车运动模型。

### 3.2 路径跟踪控制中的约束建模

路径跟踪控制中的约束建模包含智能车于运行进程中必须符合的各种限制条件。关键约束涵盖车辆的动力学约束、物理约束以及环境约束。车辆动力学约束纳入了车速、加速度和转向角等因素，保证控制输入未超出车辆的能力范围。物理约束包含轮胎的接地摩擦力限制，还有车辆的重量分布对于操控性的作用。环境约束则顾及道路宽度、曲率以及障碍物位置，对于车辆路径施加限制。借助恰当的约束建模，能保障路径跟踪进程中车辆达成平稳、可靠并且迅捷的运动。

### 3.3 车辆模型与控制约束的关系分析

车辆模型与控制约束之间的关系是智能车路径跟踪系统设计的核心。智能车的动力学模型为描述车辆的真实运动行为提供了数学基础，它涵盖了横向和纵向动力学。此模型需要精准以确保路径跟踪控制的有效性。通过定义路径跟踪中的约束条件，例如车辆的最大转向角、加速度和速度限制，可以保证车的操控稳定性和安全性。这些约束在MPC框架中被严格遵守，通过优化问题的形式来处理，确保车辆在应对复杂道路环境时能安全和有效地执行路径跟踪任务。车辆模型与约束条件的高度耦合使得路径跟踪系统在多变的驾驶环境中具有出色的适应能力。

## 四、MPC在智能车路径跟踪中的应用

### 4.1 MPC算法的具体实现

智能车路径跟踪中，模型预测控制算法具体实现依靠预测模型搭建还有优化控制策略设计。挑选合理车辆动力学模型作为预测模型，这个模型必须精确刻画车辆动态特性。采集车辆实时状态信息，预测模型计算未来多个时刻车辆运动状况。构建性能指标函数，这个函数全面考量路径偏差、平顺性、能耗这些因素，将它们作为优化目标。控制输入优化使用滚动优化方式，每个控制周期都对未来时间范围控制输入进行优化，输出当前时刻控制指令。考虑实际应用各种约束条件，车辆速度、转向角度这些限制，优化求解必须约束条件全部满足情况下完成。通过这个实现过程，模型预测控制算法能够灵活调整车辆控制输入，确保路径跟踪精度高并且稳定性好。

### 4.2 路径跟踪精度与鲁棒性分析

路径跟踪精确程度以及抗干扰能力研究里面，模型预测控制方法利用提前计算车辆行驶路线，根据当前道路弯曲程度和车辆运行情况调整控制信号，提高了路线跟随的精确水平。模型预测控制方法在减少路线偏移方面表现突出，能够及时消除因为道路形状不平整以及车辆动力特性改变引起的偏移。抗干扰能力方面，模型预测控制方式显示出面对各种环境和困难情况时的出色适应能力，遇到不确定干扰，比如侧向风影响和地面附着系数改变，模型预测控制系统仍然保持车辆运行稳定，既保证了驾驶过程安全，还提升了路线跟随的整体效果。

### 4.3 动态调整控制输入与路径偏差补偿

非常关键地实时调节控制输入与路径偏差修正，在智能车路径跟踪中非常关键。模型预测控制MPC借助即时获得道路曲率、车辆速度及状态等信息，展开预估解析和寻优计算，达成对控制输入的实时调节。融合反馈机制和预测模型，MPC可以很好修正路径偏差，提高系统对于环境变化的适应能力，保证车辆可以以较高准确度按照设定路径运行。借助调节横纵向运动参数，MPC给出了一类实用的路径跟踪方案，拥有很强的鲁棒性和灵敏的控制能力，提高自动驾驶系统的可靠性和安全性。

## 五、控制系统的仿真与性能评估

### 5.1 仿真环境与实验设置

仿真环境的选择针对精确评测智能车路径跟踪控制系统的性能十分关键。仿真环境搭建在MATLAB/Simulink平台基础上，该平台凭借其卓越的动态系统建

模和仿真能力并被普遍使用。智能车的路径跟踪实验设置涵盖曲线路段、高速直线路段和包含若干障碍物的复杂场景。这些场景目的在于仿真真实世界里的多样驾驶条件，保证对控制系统的完整评测。

实验使用的车辆模型依据前面提到的动力学建模，并且加入真实驾驶过程中普遍存在的约束条件，例如速度限制和转向角限制。控制器参数采用模型预测控制优化方法进行调整，从而实现车辆路径偏差和方向控制的精确调节。确保路径跟踪控制可靠水平和工程应用实际可行水平。

### 5.2 控制系统性能评估指标

控制系统性能评估主要关注路径跟踪精确程度、系统响应快慢、稳健程度以及计算快速程度这些方面。路径跟踪精确程度通过测量车辆真实行驶轨迹跟预设路径之间偏差大小来进行分析。系统响应快慢评估包括控制器面对路径改变时候适应能力大小还有反应延迟时间长短。稳健程度考察车辆遇到各种外部干扰以及复杂道路环境情况下保持稳定状态，验证控制系统承受不确定情况能力大小。计算快速程度涉及MPC算法用于实时控制时候运算速度快慢，能够通过控制输入需要计算时间长短来进行评估。这些性能指标共同形成对MPC路径跟踪控制系统全面评估。

### 5.3 仿真结果与性能对比分析

模拟数据表明，依靠模型预测控制方法的智能车辆路径跟随控制系统在多种困难道路条件下都表现出非常优秀的水平。跟普通PID控制方式比较，模型预测控制方式在路径跟随准确程度和车辆稳定程度方面具有明显更好效果。尤其当道路弯曲程度突然发生很大变化的时候，模型预测控制方式能够快速改变控制量大小，有效降低路径误差大小。各项性能评价数据清楚显示，模型预测控制系统在横向位置误差大小以及控制量变化平顺程度这两个方面拥有更加出色抗干扰能力和环境适应能力，确保智能车辆平稳并且可靠按照提前设定好的路线行驶。

## 结束语

本研究针对智能车于复杂道路环境中的路径跟踪控制问题，设计了依托模型预测控制MPC的路径跟踪控制方法。借助对于智能车动力学模型的建立，并且集成预测性优化控制策略，达到了对于车辆横向和纵向运动的协调调控，进而高效削弱了路径偏离和不平稳因素。实

验结果显示, MPC不但可以预先预判车辆运动轨迹, 实时修正控制输入来适配道路曲率和车辆状态, 而且于应对多种约束条件时表现出优异的鲁棒性与适应能力。该方法明显提高了智能车路径跟踪的精度和可靠稳定性, 为自动驾驶控制系统的优化设计给予了稳固的理论基础和技术支持。文章仍然存在若干缺点: 第一, 模型参数准确程度依靠真实车辆数据, 极端道路环境高动态场景可能产生预测偏差, 第二, MPC计算规模较大, 实时性会受到硬件能力限制, 需要继续深入优化控制算法, 第三, 路径跟踪仅仅考虑车辆运动学限制, 环境动态障碍物处理多车协同控制目前还没有涉及, 针对这些缺点, 今后研究可以从以下方向继续扩展: 采用精度更高的车辆动力学模型以及状态估计技术, 提高预测精确水平, 开发计算量更小速度更快的MPC求解方法, 提升实时控制性能, 结合环境感知决策规划功能, 完善多车协作动态障碍物避让机制, 从而满足复杂场景自动驾驶系统实际应用需要。上述工作将进一步推动智能车路径跟踪与

自动驾驶技术的工程化应用。

### 参考文献

- [1] 潘公宇, 刘一. 基于模型预测轮廓控制的自动驾驶车辆路径跟踪控制[J]. 河北工业科技, 2021, 38(04): 272-279.
- [2] 邹旭东, 贾志强, 张丽霞. 智能车辆路径跟踪与稳定性的模型预测控制[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2021, 35(04): 315-321.
- [3] 刘林, 葛万成. 基于模型预测控制的智能车辆轨迹跟踪研究[J]. 信息与电脑, 2022, 34(04): 7-9.
- [4] 杨俊, 樊继东. 基于自适应模型预测控制的智能车轨迹跟踪[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2021, 35(01): 6-10.
- [5] 余文翌, 韩素敏, 徐海祥, 魏跃峰. 智能船舶路径跟踪自抗扰模型预测控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2023, 51(04): 55-61.