

# 掉头场景下自动驾驶车辆轨迹规划与跟踪控制

## 摘要

随着自动驾驶技术不断发展,复杂交通场景的研究是研究难点:相对于无信号控制交叉口,掉头场景中的车辆要处理更为复杂的交通场景问题,比如,对向冲突车辆的间隙选择、交通标识识别、信号灯阶段判断等。自动驾驶车辆需要快速准确地识别和响应这些因素,才能安全地完成掉头操作。为保障车辆的安全与效率,需要对自动驾驶的掉头场景进行深入研究。车辆的轨迹规划和运动控制是实现自动驾驶的关键技术,因此,城市的掉头场景与自动驾驶规划与控制研究的结合尤为重要。为此,本文以掉头场景的车辆为研究对象,优化改进了自动驾驶掉头车辆的轨迹规划和控制方法,具体工作内容如下:

(1)建立掉头场景的决策模型。首先通过实际调研的数据分析掉头车辆的轨迹特性、冲突特性。同时,为确保自动驾驶车辆的安全运行,考虑了掉头车辆如何汇入对向车道的问题,分别以单个或多个掉头车辆的具体场景构建了掉头场景下的车辆决策模型,根据不同驾驶条件利用有限状态机转换主车的驾驶状态。

(2)优化掉头车辆的轨迹规划模型。为方便轨迹求解,先构建 Frenet 曲线坐标系,并将参考线进行平滑处理。在路径规划中,利用动态规划算法确定路径粗解,再通过二次规划对粗解进行优化,以达到不与任何障碍物碰撞且满足约束的规划目的。在速度规划中,对规划的路径进行速度分配,并根据实际的道路条件和车辆运行状况,加入对应的约束条件,以确保轨迹的安全性、舒适性和可行性。通过将路径与速度分离,轨迹规划模块将复杂的三维问题转换成更加简单的二维问题,实现掉头场景下掉头车辆的轨迹规划。接着使用 Matlab 中的 Driving Scenario Designer 模块搭建规划场景,利用优化后的轨迹规划方法实现车辆的掉头、跟车、换道等功能。

(3)实现掉头车辆轨迹跟踪。为实现对规划路径的精确跟踪,围绕自动驾驶车辆在掉头场景下的运动控制问题优化了模型预测控制方法,考虑了掉头车辆的半径约束、运动学模型对车辆运行稳定性和转向特性的影响,利用二自由度车辆模型建立路径跟踪偏差状态方程,并基于滚动优化的思想对轨迹进行求解,以确保车辆稳定和安全运行。

(4)搭载联合仿真模型。为验证本文提出的掉头场景下的规划和控制算法性能,在算法验证部分使用 CarSim 构建车辆模型,以 Simulink 作为仿真信号接口,搭载了掉头场景,并对规划的轨迹进行跟踪。结果表明,轨迹规划算法能够产生

无碰撞的轨迹，运动控制模块有良好的控制性能，本文方法在时间消耗上优于线性二次调节器方法的控制效果。

**关键词：**

自动驾驶车辆，掉头场景，有限状态机，路径速度规划，模型预测控制

# **Research of Path Planning and Control for Autonomous Driving Vehicles under U-turn Scenarios**

## **Abstract**

With the continuous development of autonomous driving technology, the study of complex traffic scenarios is a research difficulty. Compared with unsignalized intersections, vehicles in U-turn scenarios have to deal with more complex traffic scenarios, such as the gap selection of conflicting vehicles, traffic sign recognition, signal light stage judgment, etc. Autonomous vehicles need to quickly and accurately identify and respond to these factors in order to safely cross the U-turn intersections. In order to ensure the safety and efficiency, it is necessary to conduct research on U-turn scenarios of autonomous driving. Trajectory planning and motion control of vehicles are the key technologies to realize autonomous driving. Therefore, the combination of urban U-turn scenarios and autonomous driving planning and control research is particularly important. Thus, this paper takes the vehicles in U-turn scenarios as the research object and optimizes the methods of trajectory planning and control. The specific work is as follows:

(1) Establish a decision-making model for U-turn scenes. First, the trajectory characteristics and conflict characteristics of U-turn vehicles were analyzed through actual investigation data. At the same time, to ensure the safety of autonomous vehicles, the problem of how U-turn vehicles merge into oncoming traffic lanes is considered. The vehicle decision-making model is constructed for single or multiple U-turn vehicles in specific scenarios and the driving status is switched according to different driving conditions using a finite state machine.

(2) Optimize the trajectory planning model for U-turn vehicles. To solve trajectory planning problem, a Frenet frame is first established, and the reference line is smoothed. In path planning, the dynamic programming algorithm is used to find solution and then the solution is optimized by quadratic programming to achieve the planning goal of not colliding with any obstacle and satisfying constraints. In speed planning, the planned path is assigned with a speed, and corresponding constraint conditions are added based on the actual road conditions to ensure the safety, comfort, and feasibility. By separating the path and speed, the trajectory planning module converts the complex 3D

problem into a simpler 2D problem, achieving trajectory planning for U-turn vehicles. Then, the driving scenario designer module in Matlab is used to build the planning scenario, and the optimized trajectory planning method is useful.

(3) Implement trajectory tracking for U-turn vehicles. To achieve accurate tracking of the planned path, the model predictive control method is optimized in U-turn scenarios. Considering the radius constraint of U-turn vehicles and the influence of kinematic models, the deviation state equation is established based on a two-degree-of-freedom vehicle model, and the trajectory is solved based on the rolling optimization method.

(4) Load a joint simulation model. To verify the performance of the proposed planning and control algorithms for U-turn scenarios, CarSim was used to build the vehicle dynamic model, with Simulink serving as the simulation signal interface. The results show that the trajectory planning algorithm can generate collision-free trajectories and the motion control module has good control performance, and the method proposed in this article is superior to the control effect of the linear quadratic regulator method in terms of time consumption.

**Keywords:**

autonomous vehicles, U-turn scenarios, finite-state machine, path and speed planning, model predictive control

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

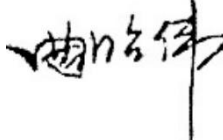
（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别：硕士 博士

学科专业：交通信息工程及控制

论文题目：掉头场景下自动驾驶车辆轨迹规划与跟踪控制

作者签名：

指导教师签名：

2023年 5月 31日

---

## 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 .....                | 1  |
| 1.1 研究背景及意义 .....              | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....              | 2  |
| 1.2.1 自动驾驶轨迹规划与跟踪控制研究现状 .....  | 2  |
| 1.2.2 掉头轨迹与掉头组织研究现状 .....      | 4  |
| 1.2.3 研究现状总结 .....             | 5  |
| 1.3 研究内容 .....                 | 5  |
| 1.4 技术路线 .....                 | 7  |
| 第 2 章 掉头车辆的决策模型 .....          | 9  |
| 2.1 掉头车辆特性分析 .....             | 9  |
| 2.1.1 轨迹特性分析 .....             | 9  |
| 2.1.2 冲突特性分析 .....             | 12 |
| 2.2 掉头车辆决策模型 .....             | 14 |
| 2.2.1 掉头车辆风险参数确定 .....         | 14 |
| 2.2.2 掉头场景分类决策 .....           | 16 |
| 2.3 本章小结 .....                 | 24 |
| 第 3 章 自动驾驶掉头车辆的路径速度规划 .....    | 27 |
| 3.1 SL 图构建 .....               | 28 |
| 3.1.1 掉头场景的 Frenet 坐标系转换 ..... | 28 |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 3.1.2 | 掉头车辆参考线平滑 .....            | 30 |
| 3.1.3 | 障碍物的 SL 投影 .....           | 32 |
| 3.2   | 掉头车辆路径规划算法 .....           | 33 |
| 3.2.1 | 基于动态规划的掉头路径算法 .....        | 34 |
| 3.2.2 | 掉头车辆路径的二次规划求解 .....        | 37 |
| 3.3   | 掉头车辆速度规划算法 .....           | 40 |
| 3.3.1 | ST 图构建.....                | 40 |
| 3.3.2 | 速度曲线求解 .....               | 41 |
| 3.3.3 | 掉头车辆速度曲线优化 .....           | 43 |
| 3.4   | 路径速度规划结果 .....             | 45 |
| 3.4.1 | 掉头场景规划过程 .....             | 45 |
| 3.4.2 | 轨迹规划仿真实验 .....             | 46 |
| 3.5   | 本章小结 .....                 | 48 |
| 第 4 章 | 自动驾驶掉头车辆的轨迹跟踪控制与仿真实验 ..... | 49 |
| 4.1   | 基于模型预测控制方法的掉头车辆跟踪控制 .....  | 50 |
| 4.1.1 | 运动学模型建立 .....              | 50 |
| 4.1.2 | 模型线性离散化 .....              | 51 |
| 4.1.3 | 掉头车辆目标函数构建 .....           | 52 |
| 4.1.4 | 控制输入滚动求解 .....             | 54 |
| 4.2   | 跟踪算法仿真验证 .....             | 54 |
| 4.2.1 | 参数设置 .....                 | 55 |

|                   |                |    |
|-------------------|----------------|----|
| 4.2.2             | 轨迹跟踪仿真实验 ..... | 55 |
| 4.3               | 本章小结 .....     | 63 |
| 第 5 章             | 总结与展望 .....    | 65 |
| 5.1               | 论文总结 .....     | 65 |
| 5.2               | 论文创新 .....     | 66 |
| 5.3               | 展望 .....       | 66 |
| 参考文献              | .....          | 69 |
| 作者简介及在学期间所取得的科研成果 | .....          | 75 |
| 致 谢               | .....          | 77 |





## 图目录

|        |                           |    |
|--------|---------------------------|----|
| 图 1.1  | 自动驾驶结构 .....              | 2  |
| 图 1.2  | 技术路线 .....                | 7  |
| 图 2.1  | 掉头车辆轨迹信息采集 .....          | 10 |
| 图 2.2  | 车辆掉头起始位置概率累计 .....        | 10 |
| 图 2.3  | 掉头轨迹拟合曲线 .....            | 10 |
| 图 2.4  | PET 区域确定 .....            | 12 |
| 图 2.5  | 直方图与累计分布曲线 .....          | 13 |
| 图 2.6  | 后车风险示意图 .....             | 15 |
| 图 2.7  | 前车风险示意图 .....             | 15 |
| 图 2.8  | 掉头场景示意图 .....             | 16 |
| 图 2.9  | 单辆掉头车辆场景 .....            | 17 |
| 图 2.10 | 掉头决策模型 .....              | 20 |
| 图 2.11 | 多辆掉头车辆场景 .....            | 22 |
| 图 2.12 | 多辆掉头车辆判断流程 .....          | 24 |
| 图 3.1  | 轨迹规划框架 .....              | 27 |
| 图 3.2  | Frenet 坐标系与笛卡尔坐标系转换 ..... | 28 |
| 图 3.3  | 坐标转换示意图 .....             | 28 |
| 图 3.4  | 掉头车辆参考系转换结果 .....         | 29 |
| 图 3.5  | 轨迹平滑 .....                | 30 |
| 图 3.6  | 平滑代价示意图 .....             | 30 |

|        |                      |    |
|--------|----------------------|----|
| 图 3.7  | 掉头车辆参考线平滑结果 .....    | 32 |
| 图 3.8  | 路径规划算法示意图 .....      | 33 |
| 图 3.9  | 动态规划过程 .....         | 34 |
| 图 3.10 | 掉头车辆动态规划节点连接结果 ..... | 36 |
| 图 3.11 | 动态规划推导过程 .....       | 36 |
| 图 3.12 | SL 图构建 .....         | 36 |
| 图 3.13 | SL 路径求解结果 .....      | 39 |
| 图 3.14 | ST 图例子 .....         | 40 |
| 图 3.15 | ST 图构建 .....         | 40 |
| 图 3.16 | ST 图求解结果 .....       | 45 |
| 图 3.17 | 掉头规划结果示意图 .....      | 46 |
| 图 3.18 | 轨迹规划结果一 .....        | 47 |
| 图 3.19 | 轨迹规划结果二 .....        | 47 |
| 图 4.1  | 模型预测控制流程 .....       | 49 |
| 图 4.2  | 二自由度车辆模型 .....       | 50 |
| 图 4.3  | 算法验证框架 .....         | 54 |
| 图 4.4  | Simulink 模型搭建 .....  | 55 |
| 图 4.5  | 掉头轨迹跟踪结果 .....       | 56 |
| 图 4.6  | 掉头轨迹跟踪误差 .....       | 56 |
| 图 4.7  | 掉头车辆不同预测时域结果 .....   | 57 |
| 图 4.8  | 掉头车辆速度敏感性分析结果一 ..... | 58 |

|        |                      |    |
|--------|----------------------|----|
| 图 4.9  | 复杂掉头模拟场景 .....       | 59 |
| 图 4.10 | 掉头车辆速度敏感性分析结果二 ..... | 59 |
| 图 4.11 | MPC 与 LQR 结果对比 ..... | 60 |
| 图 4.12 | 掉头轨迹跟踪结果 .....       | 61 |
| 图 4.13 | 前轮转角输出结果 .....       | 62 |
| 图 4.14 | 掉头场景的车辆输出结果 .....    | 63 |

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/285341220323011114>