复杂动态环境下智能汽车局部路径规划与跟踪算法分析

刘桂超 * 李玉满
共青科技职业学院，机电工程学院，江西 九江 332020

摘要：智能车辆在复杂动态环境中的局部路径规划和跟踪算法是其核心技术。本项目以九江市基础研究计划项目“车辆动态智能调节尾翼的应用研究”为依托，对智能汽车在复杂环境下所遇到的技术瓶颈进行系统性的剖析。在此基础上，本项目将深入探索环境感知与建模、路径规划与路径跟踪等关键技术，建立性能评价指标体系和优化策略，为我国智能汽车自主导航系统的研制提供理论支撑和技术指导，对提高我国汽车在复杂环境中的驾驶性能和安全性具有重要意义。

关键词：汽车工程；路径规划；粒子群优化；路径跟踪

Analysis of Local Pathways Planning and Tracking Algorithms for Intelligent Vehicles in Complex Dynamic Environments

Liu,Guichao* Li,Yuman

School of Mechanical and Electrical Engineering, Gongqing Institute Of Science And Technology, Jiujiang, Jiangxi, 332020, China

Abstract: The local path planning and tracking algorithms for intelligent vehicles in complex dynamic environments are their core technologies. Based on the Jiujiang Municipal Basic Research Program Project “Research on the Application of Vehicle Dynamic Intelligent Adjustable Spoilers”, this project systematically analyzes the technical bottlenecks encountered by intelligent vehicles in complex environments. On this basis, the project will deeply explore key technologies such as environmental perception and modeling, path planning and path tracking, establish a performance evaluation index system and optimization strategies, provide theoretical support and technical guidance for the development of autonomous navigation systems for intelligent vehicles in China, and is of great significance for improving the driving performance and safety of Chinese vehicles in complex environments.

Keywords: Automotive engineering; Path planning; Particle swarm optimization; Path tracking

DOI: 10.62639/sspis24.20250208

随着汽车产业智能化和网联化进程的加快，复杂动态环境下智能汽车自主导航成为其技术突破的重要突破口。城市道路车流密度大、行人轨迹变化大、道路结构复杂、极端天气等特点，对智能车辆路径规划和跟踪算法提出了苛刻的要求。九江市“基础研究计划”重点围绕汽车动态智能调节尾翼技术展开研究，以提高整车的稳定性、经济性和安全性为目标，开展基于空气动力学特性的汽车尾翼优化研究。其中，局部路径规划和跟踪算法是智能车辆自主导航的核心模块，与智能尾翼系统协同工作，可进一步提升车辆在复杂环境中的动态响应和行驶性能。因此，开展智能汽车在复杂动态环境中的局部路径规划和跟踪方法研究，对于促进智能汽车技术的发展，提高道路交通安全性具有重要的理论和实际意义。

一、复杂动态环境下智能汽车面临的技术挑战

（一）环境感知的不准确性

智能汽车依靠多种类型的传感器来获取环境信息，如激光雷达，摄像头，毫米波雷达等。但是，复杂动态环境下传感器数据容易受到外界干扰。如雨雾天气中激光雷达的探测距离因粒子散射而大大减小；在隧道出入口等光照变化的场景下，相机极易出现过曝、不足曝光、颜色畸变等现象。这些感知误差可能造成环境建模的偏差，从而影响路径规划和跟踪算法的决策精度。

（二）动态障碍物的实时处理难题

动态障碍物（如机动车、行人和非机动车）的位置和运动状态是不断变化的。智能汽车需要能够实时感知和快速处理动态障碍物信息，并能在极短的时间内完成路径规划和跟踪策略调整。这就要求算法既要有高效率的计算效率，又要有很强的鲁棒性，以保证行车安全。

（三）车辆动力学与运动学约束限制

智能汽车在行驶过程中受到运动学和动力学条件的限制。最小转向半径决定了汽车转向性能，加速度和制动性能决定了车速变化范围。当所规划的路径超过汽车的实际运动能力时，就会导致路径失效，所以算法的设计必须充分考虑车辆的动力学和运动学特征。

（四）多目标优化的复杂性

在复杂动态环境下，智能汽车需要同时满足多

（稿件编号：IS-25-8-59001）

通讯作者：刘桂超（1982-），女，汉族，山东德州人，共青科技职业学院机电工程学院，副教授、高级技师、高级双师，硕士在读，主要研究方向机械工程。

基金项目：九江市基础研究计划项目：“关于汽车动态智能调控尾翼的应用研究”（编号：2025_000784）。

个目标：避障、路径最短、行驶平稳性和最优能耗。多个目标间存在着相互制约的关系，如最短路径会伴随着频繁的转向而导致行驶不稳定，而追求平稳则会增加行驶距离和能源消耗。如何在多个目标之间寻找最佳平衡点是算法设计中的一个关键问题。

二、智能汽车局部路径规划算法分析

（一）环境感知与建模技术

环境感知是航迹规划的基本步骤，利用卡尔曼滤波和贝叶斯网络等方法，将激光雷达三维空间信息、相机视觉信息和毫米波雷达的距离和速度信息融合起来，实现对周边环境的全方位感知。然后，利用环境建模技术把传感数据转换成计算机可以处理的模型。栅格地图采用离散化的栅格单元表示，环境信息以二进制（可通行 / 不可通行）的方式直观呈现，适合实时性要求较高的场景；拓扑图利用节点和边构建环境拓扑，实现了大规模环境下的高效存储和快速检索；同时，语义地图还可以将道路类型和交通规则等语义信息加入到基础地图中，为道路规划提供更加丰富的决策依据。

（二）传统路径规划算法

1. A 算法及其改进版本

A 算法是一种经典的启发式搜索算法，它将节点到起点的实际成本和目标点的估算代价相结合，来指导搜索方向，从而达到最短路的目的。但是，在复杂的动态环境中，传统的 A− 算法需要不断地更新环境信息，导致计算量急剧增加，实时性不能满足要求。D 算法采用逆向搜索和增量更新策略，实现了路径的动态调整，使其更适合于动态的障碍场景；加权 A 算法通过调节启发式函数的权值，实现了搜索效率和路径优化的灵活平衡。

2. Dijkstra 算法的应用局限

在静态环境中， Dijkstra 算法以宽度优先的搜索策略为基础，保证在静态环境中寻找到全局最短路径。然而，在复杂动态环境下，每一次环境变化都需要重新计算，计算量随环境变化呈指数级增长，难以满足实时需求，制约了其在动态场景下的应用。

3. 人工势场法的优缺点

人工势场法把环境中的障碍物看作斥力源，把目标点看作重力源，两者之间的作用力对载体进行引导。该算法具有计算简单，响应速度快的特点，适用于实时路径规划。但是，在复杂的环境下，车辆极易陷入斥力和引力平衡态，从而导致路径规划失败。

（三）智能路径规划算法

1. 遗传算法的优化机制

该算法模拟生物的演化过程，通过选择、交叉和变异等操作实现全局寻优。该算法具有全局搜索能力强、鲁棒性好等优点，适合在复杂动态环境中进行路径规划。但是，该算法的收敛性很差，需要大量的计算资源来支持迭代过程。

2. 粒子群优化算法的协同搜索

粒子群算法受到鸟群觅食行为的启发，通过粒子之间的信息共享和协作，在解空间内寻找最优解。该算法易于实现，但容易陷入局部极值，特别是在复杂多模态情况下。

3. 强化学习算法的自主学习特性

强化学习是一种基于奖赏反馈机制的智能体与环境相互作用来学习最优的行为策略。在路径规划过程中，个体不断地尝试错误，逐步掌握复杂环境下的路径选择策略，表现出较强的适应性和学习能力。但是，该算法对训练数据的依赖性很强，计算资源也很多，训练时间很长。

4. 路径规划算法的对比与选择策略

不同的路径规划算法具有各自的优点和局限性。传统算法如 A, Dijkstra 等，在静态和简单的动态环境中都能保证路径规划的准确性，但是实时性差；遗传算法和粒子群算法对复杂动态环境的适应能力较强，但其计算量大。在实际应用中，为了达到最佳的性能，需要综合考虑环境的复杂性，实时性，计算资源等。

三、智能汽车路径跟踪算法研究

（一）路径跟踪的基本原理与模型构建

路径跟踪的目的就是让车辆按规划路线行驶，其核心是建立精确的车辆运动模型。在此基础上，本项目拟将车辆动力学和运动学方程相结合，综合考虑当前车辆状态（位置、速度、位姿）和目标路径信息，计算出合适的控制输入（转向角，油门，制动），从而实现对目标路径的准确跟踪。

（二）传统路径跟踪算法

1. 纯追踪算法的几何控制策略

纯追踪算法是根据汽车后轮中心点到目标路径的相对位置来确定方向盘转角的，它是一种基于几何关系的跟踪算法。该算法具有结构简单，实时性好等优点，适用于低速情况。但是，由于对汽车动力学特性的考虑不够充分，导致在高速、大弯道等情况下，容易造成跟踪误差的增加。

2. 线性二次调节器（LQR）算法的最优控制理论应用

在优化控制理论的基础上，建立了汽车线性化模型和性能指标函数，对最优控制策略进行了研究。该算法具有较高的精度和较强的鲁棒性，同时具有较高的模型精度。但是，对于模型的精度要求非常高，模型参数稍有偏差，就会导致控制性能的下降。

3. 模糊控制算法的经验规则应用

该算法把人的驾驶经验转换成模糊规则，利用模糊推理的方法来控制车辆。该方法不需要建立精确的数学模型，因而适用于非线性系统。但是，模糊规则的设计依赖于经验，很难保证全局最优的控制效果，也很难对规则库进行优化调整。

（三）智能路径跟踪算法

1. 模型预测控制（MPC）算法的滚动优化策略

预测控制算法以滚动时域优化思想为基础，建立车辆预测模型，在每一控制周期内求出最优控制序列，并将其应用到汽车上。该算法能够兼顾车辆动力学约束和路径跟踪误差，在复杂动态环境中具有良好的跟踪性能和鲁棒性，但其计算量大，需要较强的硬件运算能力。

2. 神经网络控制算法的非线性映射能力

神经网络控制算法通过对神经网络进行训练，使神经网络逼近汽车的非线性动力学模型，从而实现对整车的端到端控制策略学习。然而，训练过程需要海量数据支持，网络结构设计和参数调整缺乏普适性，模型泛化能力易受训练数据的影响。

3. 自适应控制算法的参数动态调整

自适应控制算法可以根据系统的工作状态和环境的变化对控制参数进行实时调整。在路径追踪方面，本项目拟通过对车辆动力学参数和外界扰动特征的在线辨识，自适应地调整控制策略，提高跟踪精度和鲁棒性。常用的模型参考自适应控制，自调整控制等。

（四）路径跟踪算法的性能对比与选择依据

传统的路径追踪算法计算简单且易于实现，但是对于复杂动态环境下的跟踪精度和自适应能力较差；虽然智能算法具有较高的跟踪精度和较强的自适应能力，但对计算资源的要求较高。在实际应用中，需要综合考虑车辆动力学特性、环境复杂性和实时性等因素，选择合适的算法或者设计适合不同应用场景的混合跟踪策略。

四、智能尾翼系统与路径规划跟踪算法的协同机制

（一）智能尾翼系统的功能架构

智能尾翼由传感器、数据处理和执行机构三部分组成。采用速度传感器、加速度传感器和角速度传感器对车辆进行实时检测；数据处理控制系统根据预先设定的策略，分析、处理各传感器数据，产生尾翼角度调节指令；执行器按照指令驱动马达或者液压系统，精确地调整尾翼角度，优化整车的气动性能。

（二）协同工作原理与流程

在复杂动态环境下，智能尾翼系统和路径规划算法是相互配合的。在航迹规划过程中，综合考虑气动参数（升力系数、阻力系数等），对航迹规划方案进行优化，保证航迹的可行性和安全性。轨迹跟踪算法根据智能尾翼实时调整车辆动态特性，对控制输入进行动态修正，提高轨迹跟踪精度。同时，智能平尾系统根据轨迹规划和跟踪结果，自适应地调节平尾倾角，如增大大迎角等，提高汽车横向稳定性能，为轨迹跟踪奠定良好的动力学基础。

（三）协同工作的性能提升效果

二者协同工作将显著提升智能汽车的性能。智能尾翼系统优化了空气动力特性，减少了阻力，提高了燃油经济性；通过调节平尾倾角来提高汽车的稳定性和操控性，为轨迹规划和跟踪算法提供更加稳定的动力学依据，从而提高汽车的轨迹跟踪精度和避障能力，降低汽车的磨损，延长汽车的使用寿命，全面提高汽车在复杂动态环境中的行驶性能和安全性。

五、算法性能评估与优化策略

（一）性能评估指标体系构建

1. 路径规划性能评估指标

以路径长度、搜寻时间和避障成功率来衡量路径规划的效能。路径长度反映了算法规划路线的经济性；搜索时间体现了算法的实时性；动态障碍环境中的避障成功率评价算法的可靠性，三者构成了路径规划算法性能评估的核心维度。

2. 路径跟踪性能评估指标

通过跟踪误差，最大侧向偏差，最大纵向偏差，行驶平稳性等指标来评价路径跟踪性能。航迹跟踪的精度直接体现在跟踪误差上；最大的横向和纵向偏移测量了汽车从目标路径上的最大偏差；利用加速度变化率、转向角变化率等参数对汽车行驶舒适性和安全性进行了定量评价。

（二）算法优化策略

1. 算法参数优化方法

采用试错方法、遗传算法和粒子群算法等方法，对机器人的运动轨迹规划和跟踪算法进行了优化。例如，通过调整 A* 算法的启发函数的权值，使搜索效率和路径最优性达到最优；调整纯跟踪算法的预瞄距离，在精度和响应速度之间进行权衡，利用参数优化提高算法的性能。

2. 多算法融合技术

结合各种算法的优点，设计一种混合算法。结合 A 算法的启发式搜索能力和再入式学习的路径寻优能力，实现快速路径生成和动态寻优；将纯跟踪算法实时性和预测控制算法优化相结合，提高复杂环境下路径跟踪性能。

3. 硬件加速技术应用

本项目拟采用高性能处理器和 GPU 的并行运算技术，提高算法的执行效率。例如，利用 GPU 众核运算能力，通过 NVIDIACUDA 平台，将路径规划和跟踪算法并行化，以满足智能汽车的实时性需求。

六、结束语

综上所述，本项目拟对复杂动态环境中智能汽车的局部路径规划和跟踪算法进行系统分析，在环境感知、算法设计和多目标优化等方面提出了新的技术挑战。在此基础上，深入剖析传统和智能的路径规划和跟踪算法，揭示其原理、优缺点和适用场合。研究智能尾翼系统和算法之间的协作机理。通过本项目的研究，将为车辆自主导航算法的设计和应用提供理论和技术支持。

参考文献：

[1] 丁志杰，王亚飞，章翼辰，等．基于复合动态采样的自动驾驶矿车节能路径规划方法 [J]．汽车工程，2024, 46(04)：588-595+642.

[2] 魏凯，刘树伟，李刚．融合风险势场的离散优化局部路径规划方法研究 [J]．燕山大学学报，2023, 47(06)：492-505.

[3] 张智能，李以农，余颖弘，等．复杂动态环境下智能汽车局部路径规划与跟踪算法研究 [J]．中国公路学报，2022, 35(09)：372-386.

[4] 王明强，王震坡，张雷．基于碰撞风险评估的智能汽车局部路径规划方法研究 [J]．机械工程学报，2021, 57(10)：28-41.

[5] 陈禹．智能汽车局部路径规划方法现状与发展分析 [J]．科技与创新，2020, (14)：60-61+66.