

摘要

变道场景下的自动驾驶车辆轨迹规划算法研究

随着汽车保有量的快速增加，汽车已成为成人们首选的出行交通工具，但伴随着交通活动的进行，也产生了大量的交通事故。自动驾驶汽车作为智能交通系统（ITS）的重要组成部分，对提高出行效率、减少交通事故具有重要作用。变道场景作为自动驾驶技术中的典型场景，一直备受关注。在自动驾驶车辆行驶过程中，根据道路及周围环境的动态情况，合理选择变道时机以及生成安全、舒适的变道轨迹，是本文的研究重点。

本文首先对变道决策和变道区域进行了研究，将研究的对象设定为自动驾驶车辆在行驶过程中的自由变道问题。提出累计行车不满意度和最佳车辆间隔的概念，并给出计算方法。累计行车不满意度用于描述自动驾驶车辆在原车道行驶过程中车速、车距未达到期望目标的程度，而最佳车辆间隔则为选择目标车道提供了依据。在此基础上将变道过程分为直行阶段和汇入阶段，通过一定范围内的加速度和汇入用时采样，计算得到汇入开始点和汇入结束点，并给变道过程提供参考车速和车道边界约束。

在对比多种变道轨迹的基础上，采用分段五次多项式曲线作为变道参考轨迹组成部分。在变道开始时，基于“采样→评估→搜索”的方式生成变道参考轨迹，该方法在 Frenet 坐标系下对变道区域进行采样，使用五次多项式曲线连接各采样点，在已知纵向参考车速的情况下对轨迹曲线进行评估，通过动态规划搜索的方式得到参考轨迹。

本文将变道轨迹优化问题转化为带有约束的非线性最优控制问题。通过障碍函数消除约束，从而可以使用迭代式线性二次调节器(ILQR)算法求解该最优化控制问题。在问题求解中考虑了控制量上下限、动态障碍物以及车道边界对变道轨迹的影响。针对复杂的车道边界的约束，本文提出了一种新的约束方法，即使用轨迹在该车道界上的投影点切线代替该点处局部车道边界，从而简化了车道边界约束形式。

通过轨迹规划仿真器 TPSim，实现了背景车辆匀加速和变加速两种变道场景，对本文所提方法进行验证。实验结果表明，本文所提的自由变道决策方法可以根

据交通情况选择变道时机，变道轨迹规划可以规划出满足车辆运动学特性和舒适安全的变道轨迹，并能根据动态环境对轨迹进行实时调整。

关键词：

自由变道，变道决策，参考轨迹，轨迹优化，ILQR

ABSTRACT

Research on Automatic Driving Vehicle Trajectory Planning Algorithm in Lane Change Scene

With the rapid increase in the number of automobiles, cars have become the preferred means of transportation for adults. However, along with the progress of traffic activities, a large number of traffic accidents have also occurred. As an important component of Intelligent Transportation Systems (ITS), autonomous vehicles play a significant role in improving travel efficiency and reducing traffic accidents. Lane changing scenarios have always been a focus in autonomous driving technology. During the driving process of autonomous vehicles, this paper focuses on the rational selection of lane changing timing and the generation of safe and comfortable lane changing trajectories based on dynamic road and surrounding environmental conditions.

First, research was conducted on lane-changing decisions and lane-changing areas, with the research object set as the problem of free lane-changing for autonomous vehicles during driving. The concept of cumulative driving dissatisfaction and optimal vehicle spacing is proposed, along with the calculation method. Cumulative driving dissatisfaction is used to describe the degree to which the speed and distance of autonomous vehicles during driving in the original lane fail to meet the expected target, while the optimal vehicle spacing provides a basis for selecting the target lane. Based on this, the lane-changing process is divided into a straight-line stage and a merging stage, and by sampling the acceleration and merging time within a certain range, the merging start point and merging end point are calculated, providing reference speed and lane boundary constraints for the lane-changing process.

Based on the comparison of various lane-changing trajectories, a segmented fifth-order polynomial curve is used as a component of the reference trajectory. At the beginning of the lane-changing process, a lane-changing reference trajectory is generated based on the "sampling→evaluation→search" approach. This method samples the lane-changing area in the Frenet coordinate system, connects the sampling

points using a fifth-order polynomial curve, evaluates the trajectory curve given the known longitudinal reference speed, and obtains the reference trajectory through dynamic programming search.

This paper transforms the lane-changing trajectory optimization problem into a constrained nonlinear optimal control problem. The iterative linear quadratic regulator (ILQR) algorithm is used to solve the optimization control problem by eliminating constraints through obstacle functions. Control limits, dynamic obstacles, and lane boundaries are considered in the problem-solving process to address their impact on the lane-changing trajectory. To deal with the constraints imposed by complex lane boundaries, a new constraint method is proposed in this paper, which uses the tangent of the projection point of the trajectory on the lane boundary instead of the local lane boundary at that point, simplifying the form of the lane boundary constraint..

The trajectory planning simulator TPSim was used to validate the proposed method by simulating two lane-changing scenarios: background vehicles with constant acceleration and variable acceleration. Experimental results show that the proposed free lane-changing decision method can choose the appropriate time to change lanes based on traffic conditions, and the lane-changing trajectory planning can generate trajectories that meet the vehicle's kinematic characteristics and provide a comfortable and safe ride. The trajectory can also be adjusted in real-time based on the dynamic environment..

Keywords:

Free Lane Changing, Lane Changing Decision, Reference Trajectory, Trajectory Optimization, ILQR.

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	3
1.2.1 自动驾驶研究现状	3
1.2.2 轨迹规划研究现状	4
1.2.3 变道规划研究现状	6
1.3 本文主要研究内容	7
第 2 章 相关原理与技术	9
2.1 行为决策与轨迹规划	9
2.2 车辆运动学模型	10
2.3 轨迹规划坐标系	11
2.4 时空维度下的轨迹规划	14
2.4.1 时空解耦式轨迹规划	14
2.4.2 时空耦合式轨迹规划	16
2.5 轨迹优化理论基础	16
2.5.1 最优控制问题	17
2.5.2 离散 LQR 算法	18
2.5.3 离散 ILQR 算法	20
第 3 章 变道决策与变道区域计算	23
3.1 交通信息预处理	24
3.1.1 环境信息坐标转换	24

3.1.2	运动区域划分	25
3.2	变道场景分析	26
3.2.1	强制变道	26
3.2.2	自由变道	27
3.2.3	自由变道统一模型	27
3.3	自由变道决策研究	28
3.3.1	期望安全距离	29
3.3.2	累计行车不满意度	30
3.3.3	最佳车辆间隔选择	30
3.4	自由变道区域研究	34
3.4.1	自由变道过程分析	34
3.4.2	汇入开始点计算	35
3.4.3	汇入结束点计算	36
3.5	变道意图与变道区域仿真验证	38
3.5.1	相邻车道无前后车	38
3.5.2	相邻车道有前后车	40
3.6	本章小结	43
第 4 章	变道参考轨迹与轨迹优化	44
4.1	常见的变道轨迹	44
4.2	基于 DP 搜索的参考轨迹生成	45
4.2.1	变道区域内采样	45
4.2.2	变道参考轨迹评估	47

4.2.3	变道参考轨迹搜索	49
4.2.4	参考轨迹仿真验证	50
4.3	基于 ILQR 算法的轨迹优化	51
4.3.1	带约束 ILQR 问题	51
4.3.2	车辆状态方程	52
4.3.3	变道轨迹代价函数	53
4.3.4	控制量约束限制	54
4.3.5	车辆形位模型	55
4.3.6	障碍物约束限制	56
4.3.7	车道边界约束限制	57
4.4	本章小结	59
第 5 章	系统设计及仿真验证	60
5.1	仿真系统设计	60
5.1.1	系统整体架构	60
5.1.2	地图及车辆元素	60
5.1.3	模拟交通流	62
5.2	变道场景仿真验证	65
5.2.1	背景车辆匀加速工况	67
5.2.2	背景车辆变加速工况	68
5.3	本章小结	70
第 6 章	总结与展望	71
6.1	主要工作与结论	71

6.2 工作展望	71
参考文献	73
作者简介及科研成果	78
致谢	79

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1886年，汽车作为代替马车的交通工具登上历史舞台^[1]。在一百多年的风雨历程中，汽车技术的发展日新月异。每年的汽车保有量在快速的增加，汽车成为越来越多人首选的出行交通工具。据公安部统计，截止到2022年底，我国机动车保有量达4.17亿辆，其中汽车3.19亿辆；机动车驾驶人达5.02亿人，其中汽车驾驶人4.64亿人^[2]。

交通运输的发展促进了生产要素的流动，推动了社会经济的发展。然而，随着交通运输活动的进行，也出现了大量的交通事故。近年来，交通安全问题越来越受到研究人员、运输行业和政府机构的关注。2018年美国有36560人死于与机动车相关的车祸，这意味着每天大约有100人因交通事故死亡。而其中94%至96%的机动车碰撞都涉及人为错误。根据中国统计年鉴2022^[3]的统计结果，我国2021年机动车车交通事故233729起，造成的直接财产损失13.5亿元。图1.1列出了我国历年机动车事故统计情况，数据来源于我国统计局历年统计年鉴。在交通事故中，超过90%的事故是由人为失误所导致，而其中驾驶员不合理的变道行为则是造成事故的主要原因。

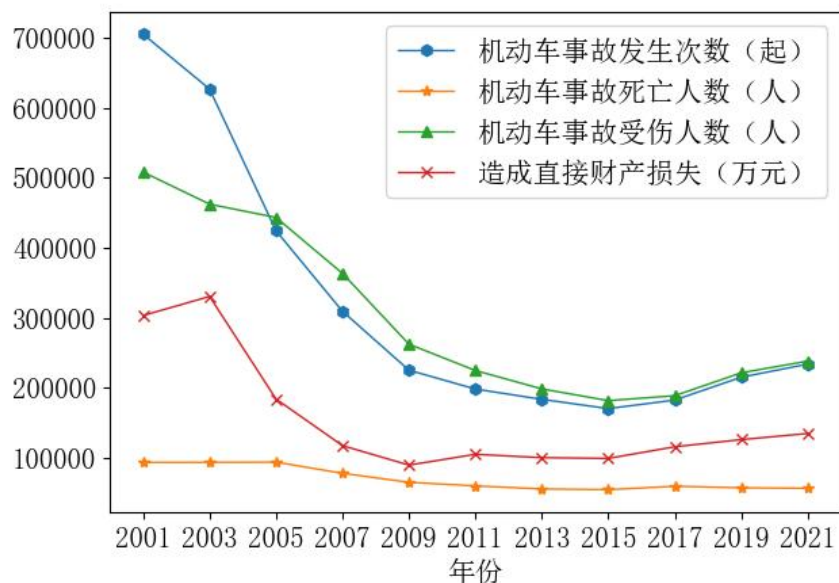


图 1.1 我国机动车交通事故统计

除交通事故外，交通运输的外部总成本也不可忽视，由于交通拥堵产生的经济

损失占美国 GDP 的 0.7%，欧洲 GDP 的 2%，亚洲 GDP 的 2%-5%，在一些新兴经济体的城市甚至占到 GDP 的 10%^[4]。在中国，北京市居民每天通勤所经历的拥堵时间平均为 44.98 分钟。根据每个人每年所经历的拥堵时间为 174 小时的计算，每个人每年所遭受的经济损失约为 8400 元左右^[5]。

智能交通系统（Intelligent Transportation System, ITS）是提升交通效率以及减少交通事故最有前景的方法^[6]。自动驾驶汽车作为智能交通系统（ITS）的一个重要组成部分，更是引领着未来交通技术的发展。自动驾驶汽车利用先进的车载传感器和信息处理器对外部环境进行感知分析，利用机器学习等人工智能技术代替驾驶员进行决策判断，从而控制车辆安全、高效地行驶。自动驾驶技术不仅可以提高汽车舒适度，还可以降低人为误操作风险减少交通事故的发生率，同时还可以提高交通效率缩短出行时间，已成为改变交通模式重要因素。

据不完全统计，每年因变道超车所导致的交通事故占有所有交通事故的 15% 以上。变道场景作为自动驾驶技术的典型场景，一直备受关注。自动驾驶车辆通过传感器和算法对周围环境进行感知和分析，基于行驶安全和效率的考虑，决定是否进行变道操作以超越前车。该操作需要综合考虑多种因素，如车速、车距、车道宽度、交通状况、道路状况等，并根据实际情况进行合理决策和调整。在人类驾驶情况下，驾驶员凭借自身驾驶经验和周围的环境状况执行变道行为，能否顺利变道很大程度取决于驾驶员的驾驶经验。相比于人类驾驶员的变道行为，自动驾驶车辆的变道行为是建立在大量传感器(如相机，激光雷达、毫米波雷达等)对周围环境进行感知的基础上，通过决策规划模块对环境实时进行分析，代替人类驾驶员进行变道行为决策和实时轨迹规划。

目前国内外大量关于变道场景的研究主要集中在变道远离、变道意图产生、变道轨迹规划和变道轨迹跟踪控制等方面。本文对自动驾驶变道场景下的变道决策和变道轨迹规划进行研究，对完善自动驾驶车辆变道技术，推进自动驾驶车辆整体研究，提升用户体验有着重要的研究意义和工程价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 自动驾驶研究现状

自动驾驶等方面的探索欧美起步较早。自动驾驶汽车的概念最早可以追溯到上世纪车辆配备的基本安全功能，如防抱死制动（Antilock Brake System, ABS）和自适应巡航控制（Adaptive Cruise Control, ACC）。上个世纪三十年代美国通用汽车公司在纽约世博会上首次展出无人驾驶概念车设计，提出了一种朴素的自动化高速公路设想。直至 1987 年，卡耐基梅隆（Carnegie Mellon University, CMU）研制了世界上真正意义上的自动驾驶汽车^[7]。

进入 21 世纪后，电子稳定控制和车道偏离警告等更先进的驾驶员辅助技术正在开发中，以进一步提高安全性和减轻驾驶员负荷，这也为自动驾驶技术铺平了道路。美国国防部先进研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）为了推动自动驾驶汽车技术发展，先后三次举行无人驾驶汽车比赛^[8]，规定参赛车辆自主行驶，并在不同的情境下完成特定的任务。这些比赛促进参赛者采用最先进的技术和算法，以实现更加精确和可靠的自动驾驶汽车。

自 2010 年以来，以 Google 和百度为代表的互联网公司陆续启动了自动驾驶相关项目。2012 年，Google 研发的无人车首次获得美国内华达州颁发世界上第一个无人驾驶车辆牌照。2016 年，Google 将自动驾驶业务进行拆分，由此成立 Waymo 自动驾驶公司，以加速自动驾驶车辆商业化进程。也是在 2016 年，美国 Uber 公司正式面向公众开放无人车出现服务。2013 年，百度发起自动驾驶项目，三年时间累计投入超 200 亿元，实现市内环路以及高速公路混合路况下行驶。2018 年，百度 Apollo 无人车亮相春晚，同年百度与金龙客车合作生产的 L4 级别的无人巴士向公众开放试乘。2019 年，基于百度 Apollo 开放平台的自动驾驶出租车在湖南长沙试运营。

随着自动驾驶汽车的发展，自动驾驶技术的分级也越来越清晰。2021 年 4 月 30 日，国际自动机工程师协会发布了更新版的 SAE 驾驶自动化分级标准^[10]，该标准定义了六个不同的自动驾驶级别，澄清了一些易被大众误解的概念。此外，该标准还将某些定义重新组合为更具逻辑性的分组如表 1.1。

表 1.1 自动驾驶分级说明^[10]

级别	L0	L1	L2	L3	L4	L5
功能说明	仅限警告和瞬时协助	仅转向或加速（制动）支持	同时包含转向和加速（制动）支持	在有限条件下可控制车辆，除非满足所要求条件，否则无法运行		可在任何条件下可控制车辆
功能示例	AEB 紧急制动，盲区警告，车道偏离警告	LCC 车道居中辅助或ACC自适应巡航控制	LCC 车道居中辅助和ACC自适应巡航控制	交通阻塞驾驶	区域无人出租车	与L4功能相同，但无条件限制
驾驶员的职责	无论这些功能是否开启，都属于驾驶员在驾驶车辆			当上述功能开启时，无需驾驶员驾驶车辆		
	驾驶员需要监督上述功能的执行过程			当功能请求接管时，需要驾驶员接管	该级别下的功能不会请求驾驶员接管	

1.2.2 轨迹规划研究现状

通常，自动驾驶规划模块可以分为全局路径规划和局部轨迹规划两部分，其中全局规划倾向于导航性质，借助地图拓扑结构，使用搜索算法得到一条从当前位置到目标位置的全局路径，该路径相对粗糙，只包含需要经过的道路、路口等基本信息，不涉及车辆速度、动态障碍物等内容。由于自动驾驶车辆在行驶过程中的周围环境不断动态变化，需要调整车辆运动状态以适应周围环境，即局部轨迹规划。

变道轨迹规划属于局部轨迹规划，在变道过程中综合考虑感知与定位模块提供的环境信息和车辆状态，生成一条安全、平滑、可行的轨迹，并输入控制模块执行。按照轨迹生成方式分类，常见的轨迹规划方法可以被归为图搜索、采样、插值曲线和数值优化等方法。

基于图搜索的轨迹规划方法，其基本思想是将规划空间网格化形成状态空间，

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/626143210224010054>