
2020 届硕士专业学位论文

分类号: _____

学校代码: 10269

密 级: _____

学 号: 71174500054



華東師範大學

East China Normal University

硕士专业学位论文

MASTER' S DISSERTATION

论文题目：自动泊车系统路径规划 和跟随研究与设计

院 系: 软件工程学院

专业学位类别: 工程硕士

专业学位领域: 软件工程

论文指导教师: 杜德慧 教授

论 文 作 者: 江力明

2020 年 5 月

Dissertation for master degree in 2020

Student ID: 71174500054

University code: 10269

East China Normal University

**Title: Research and Design of Path Planning and
Following for Automatic Parking System**

Department: School of Software Engineering

Type: Master of Engineering

Domain: Software engineering

Supervisor: Prof. Du Dehui

Candidate: Jiang Liming

May , 2020

华东师范大学学位论文原创性声明

郑重声明：本人呈交的学位论文《自动泊车系统路径规划和跟随研究与设计》，是在华东师范大学攻读[√]硕士/博士（请勾选）学位期间，在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名： 江力明

日期： 2020 年 5 月 20 日

华东师范大学学位论文著作权使用声明

《自动泊车系统中的路径规划和跟随研究与设计》系本人在华东师范大学攻读学位期间在导师指导下完成的[√]硕士/博士（请勾选）学位论文，本论文的研究成果归华东师范大学所有。本人同意华东师范大学根据相关规定保留和使用此学位论文，并向主管部门和相关机构如国家图书馆、中信所和“知网”送交学位论文的印刷版和电子版；允许学位论文进入华东师范大学图书馆及数据库被查阅、借阅；同意学校将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于（请勾选）

（ ） 1. 经华东师范大学相关部门审查核定的“内部”或“涉密”学位论文*，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ [√] ） 2. 不保密，适用上述授权。

导师签名 _____

本人签名 江力明

2020 年 5 月 20 日

* “涉密”学位论文应是已经华东师范大学学位评定委员会办公室或保密委员会审定过的学位论文（需附获批的《华东师范大学研究生申请学位论文“涉密”审批表》方为有效），未经上述部门审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权）。

江力明 硕士学位论文答辩委员会成员名单

姓名	职称	单位	备注
彭俊杰	教授	上海大学	主席
杜育根	副教授	华东师范大学	
卜天明	副教授	华东师范大学	

摘要

随着社会进步，汽车工业的不断发展，人们对汽车的智能性、安全性有了更高的要求，智能汽车在提高行驶安全性和降低交通事故发生率有很大的优势，已成为世界范围内的研究热点。自动泊车系统作为未来智能交通系统中重要组成部分，近年来备受企业和国内外学者的关注。路径规划和路径跟随作为泊车系统中的决策者和执行者，是体现泊车智慧水平的直接、关键模块。在此背景下，本文提出了对自动泊车系统中路径规划和路径跟随的研究与设计。

主要包括：

- (1) 通过对泊车场景及工况分析，基于单车运动学模型提出了基于轮速脉冲的轨迹推算方法，此模块能在系统运行后实时计算出车辆位姿。
- (2) 泊车过程中路径规划设计。本文针对泊车过程中对曲率连续以及避障需求，在明确了路径规划场景以及理想路径的基础上，将纯跟踪算法应用到路径规划当中，提出了基于车辆运动学模型的路径规划方法，最后通过仿真实验得到了满足避障要求且曲率连续的泊车路径。
- (3) 路径跟随算法设计。本文在路径跟随横向控制中，基于 PID 控制理论以及纯跟踪算法设计了预瞄前馈+PID 的控制算法，对于纵向控制模块，基于模糊控制理论设计了纵向速度模糊控制器，最后通过车辆与路径的关系将横纵向耦合起来。并针对路径跟随算法提出了评价指标，对不同的泊车场景进行仿真实验，实验仿真表明此路径跟随算法在泊车工况下是能够跟随上目标路径。
- (4) 理论结合实际，通过大量仿真以及实车测试验证，实现了车辆的自动泊车功能，验证了上述方法的可行性和有效性。

关键词：自动泊车、路径规划、路径跟踪、预瞄规划、模糊控制

ABSTRACT

With the progress of society and the continuous development of the automobile industry, people have higher requirements on the intelligence and safety of cars. Smart cars have great advantages in improving driving safety and reducing traffic accidents, and have become a worldwide Research hotspots. As an important part of the future intelligent transportation system, the automatic parking system has attracted the attention of enterprises and scholars at home and abroad in recent years. As the decision maker and executor in the parking system, path planning and path following are the direct and key modules that reflect the level of parking intelligence. In this context, this paper presents the research and design of path planning and path following in automatic parking systems.

The main contents include:

(1) Based on the analysis of parking scenarios and working conditions, a trajectory estimation method based on wheel speed pulses is proposed based on the bicycle kinematics model. This module can calculate the vehicle posture in real time after the system runs.

(2) Path planning and design during parking. In this paper, based on the need for continuous curvature and obstacle avoidance during parking, on the basis of clear path planning scenarios and ideal paths, the pure tracking algorithm is applied to path planning, and a path planning method based on vehicle kinematics model is proposed. Through simulation experiments, parking paths that meet the obstacle avoidance requirements and have continuous curvature are obtained.

(3) Path following algorithm design. In this paper, in the path following lateral control, based on the PID control theory and the pure tracking algorithm, the control algorithm of preview feedforward and PID is designed. For the longitudinal control module, the longitudinal speed fuzzy controller is designed based on the fuzzy control theory. The relationship will be coupled horizontally and vertically. Evaluation indicators are proposed for the path following algorithm, and simulation experiments

are carried out on different parking scenarios. Experimental simulations show that the path following algorithm can follow the target path under parking conditions.

(4) Combining theory with reality, through a lot of simulation and real vehicle test verification, the automatic parking function of the vehicle is realized, and the feasibility and effectiveness of the above method are verified.

Keywords: automatic parking, path planning, path tracking, preview planning, fuzzy control

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 自动泊车系统研究现状概述	2
1.2 研究现状	4
1.2.1 智能车辆规划控制研究现状	4
1.2.2 自动泊车系统中的路径规划与路径跟随研究现状	7
1.3 本文的研究成果和创新性	10
1.4 论文的主要研究内容及结构安排	10
第二章 车辆运动学建模以及轨迹推算	12
2.1 背景以及问题	12
2.2 车辆参数	12
2.3 车辆运动学模型	14
2.3.1 坐标系介绍	14
2.3.2 自行车模型	15
2.3.3 阿克曼转向几何	17
2.4 基于车辆运动学模型的轨迹推算	19
2.4.1 轨迹推算原理	19
2.4.2 轨迹推算误差分析	21
2.5 本章小结	22
第三章 自动泊车系统中的路径规划	23
3.1 背景以及问题	23
3.2 泊车路径规划算法设计	24
3.2.1 预瞄函数设计	24
3.2.2 垂直车位泊车路径规划	27
3.2.3 水平泊车路径规划	29
3.3 泊车规划流程	32
3.4 实验仿真与分析	34
3.5 本章小结	37
第四章 自动泊车系统中的路径跟随	38

4.1 背景以及问题	38
4.2 路径跟随算法设计	38
4.2.1 横向预瞄 PID 控制器设计	39
4.2.2 纵向速度模糊控制器设计	42
4.2.3 算法运行过程	45
4.3 实验仿真与分析	46
4.3.1 仿真平台搭建	46
4.3.2 仿真结果与分析	47
4.4 本章小结	49
第五章 自动泊车系统功能测试	50
5.1 自动泊车系统功能组成	50
5.1.1 环境感知模块	51
5.1.2 泊车控制器	53
5.1.3 执行机构模块	54
5.2 实验准备工作	54
5.2.1 实验设备与仪器	54
5.2.2 实验场地与测试方法	55
5.3 实车测试与结果与分析	56
5.3.1 垂直泊车测试	56
5.3.2 水平泊车测试	58
5.4 本章小结	59
第六章 总结与展望	60
6.1 全文工作总结	60
6.2 研究展望	60
参考文献	62
致 谢	68

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

随着经济的高速发展，私家车的数量正在快速增加，2018 年公安部统计数据显示，新注册登记机动车已经达到 3172 万辆，机动车保有量已达 3.27 亿辆，其中汽车 2.4 亿辆，比 2017 年增加 2285 万辆，增长 10.51%。而随着汽车数量的不断增多、城市化建设，伴随而来却是交通越来越堵和“停车难”的问题，城市停车位空间有限，将汽车安全驶入停车位，时常得花费一番功夫，对于有些新手司机则可能会造成车辆磕碰，甚至交通阻塞。

根据德国联邦统计局（Destatis, 2018）公布的德国交通事故统计数据，超过 98%的交通事故至少部分由人为失误造成的（Destatis, 2018, p. 146）。同样，美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）报告说，美国 94%的严重撞车事故是人为失误造成的（NCSA, 2015, p. 142），深入研究 Destatis 发布的统计数据后，可以认为人类是影响交通安全的一个合理因素。汽车一方面让我们的生活出行变得方便，另一方面却也给我们的生活带来诸多不利，汽车所造成的交通事故、交通阻塞给人类带来了极大的生命威胁与财产安全隐患。随着汽车工业的不断发展，在这个过程衍生了很多让汽车更加安全、更加稳定、更加智能的产品。而其中自动泊车技术就是近些年国内外的研究热点。

自动泊车作为无人驾驶的一个子系统，其中涉及到传感器技术、数字信号处理技术、图像感知技术、自动控制技术及计算机技术等多学科多领域。自动泊车系统利用自身传感器，准确的感知外部环境，并规划出合理的泊车路径，然后控制车辆准确地泊入车位，并避免与障碍物的碰撞。在这个过程中，轨迹规划和车辆控制作为自动泊车的核心模块将直接影响到泊车效果。

1.1.2 自动泊车系统研究现状概述

自动泊车系统，指不用人工干预，车辆低速行驶，自动检测车位并自动泊入目标车位的系统。自动泊车系统首次在大众概念车上进行实车运行，2003 年，丰田开始在日式普锐斯混合动力车搭载自动泊车功能，同年雪铁龙开发出 City Park 自动泊车系统，2006 年，法雷奥推出 Park4U 自动泊车系统，此系统是基于超声波传感器测距实现泊车。国外对泊车技术的研究开展的比较早，对于国内而言，自动泊车技术起步较晚，当前装配 APA (AutoParkingAssist) 功能且销量较多的车型主要来自奔驰、别克、大众、宝马、路虎等国外品牌，以及国产高端品牌领克和长城 WEY 等。目前中国汽车自动泊车系统市场主要竞争者有博世 (Bosch)、大陆汽车 (ConTi)、安波福 (Aptive)、法雷奥 (Valeo) 同致电子 (TTE) 等。

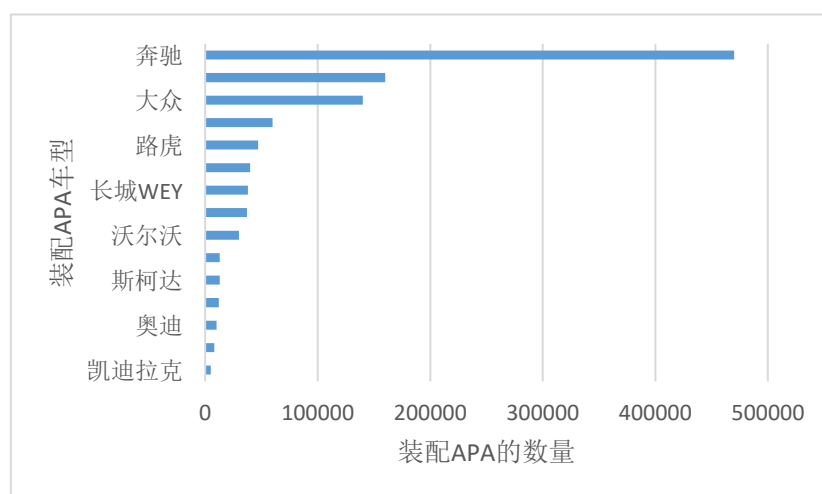


图 1.1 2018 中国乘用车市场自动泊车车款销量

2018 年，吉利推出缤越，配备全自动泊车系统，可实现自动泊入泊出功能，长安汽车主力车型 CS75，可实现人在车外一键泊车，只需点击自动泊车按钮，车辆即可自动搜索车尾，自动完成前进、后退、转动方向盘等操作。随着自动泊车技术的逐步成熟，和各主机厂加大对自动泊车系统研发的投入，自动泊车装配率将在多年的缓慢爬坡后，将从 2020 年起实现快速增长，预计在 2023 年将超过 20%。

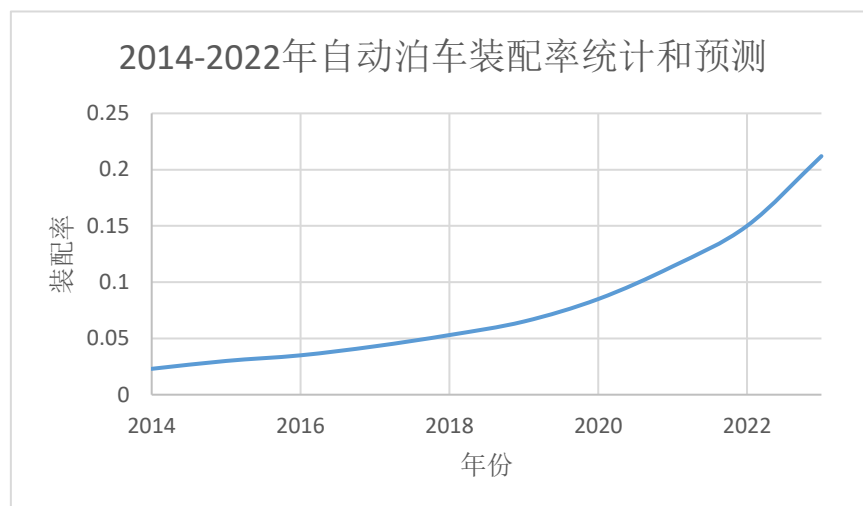


图 1.2 2014-2022 年自动泊车装配率和预测

自动泊车系统按照自动化程度的等级，可以分为：

- 1) 半自动泊车：泊车过程中需要驾驶员控制车速，泊车控制器根据车速以及周边环境来计算并执行转向，对应于如图 1.3 SAE 自动驾驶分级^[1]评定中 L1 级别；
- 2) 全自动泊车：泊车控制器根据周边环境计算并执行转向和速度控制，驾驶员在车内或车外监控，对应于自动驾驶分级 L2 级。

自动驾驶分级		名称	定义	驾驶操作	周边监控	接管	应用场景
NHTSA	SAE						
L0	L0	人工驾驶	由人类驾驶员全权驾驶汽车。	人类驾驶员	人类驾驶员	人类驾驶员	无
L1	L1	辅助驾驶	车辆对方向盘和加减速中的一项操作提供驾驶，人类驾驶员负责其余的驾驶操作。	人类驾驶员和车辆	人类驾驶员	人类驾驶员	限定场景
L2	L2	部分自动驾驶	车辆对方向盘和加减速中的多项操作提供驾驶，人类驾驶员负责其余的驾驶操作。	车辆	人类驾驶员	人类驾驶员	
L3	L3	条件自动驾驶	由车辆完成绝大部分驾驶操作，人类驾驶员需保持注意力集中以备不时之需。	车辆	车辆	人类驾驶员	
L4	L4	高度自动驾驶	由车辆完成所有驾驶操作，人类驾驶员无需保持注意力，但限定道路和环境条件。	车辆	车辆	车辆	所有场景
	L5	完全自动驾驶	由车辆完成所有驾驶操作，人类驾驶员无需保持注意力。	车辆	车辆	车辆	

图 1.3 自动驾驶等级划分

按照所采用的传感器种类的不同，半自动、全自动泊车可以分为：

- 1) 基于超声波泊车：泊车过程中的车位识别与障碍物检测为超声波传感器，早期泊车系统采用的较多；
- 2) 基于超声波与摄像头融合泊车：泊车过程中的车位识别与障碍物检测为摄像头与超声波传感器融合得到的结果，目前此方案被采用更多。

摄像头传感器与超声波传感器的性能对比如表 1.1 所示：

表 1.1 车载摄像头与超声波传感器性能对比

传感器	探测范围	优点	缺点	现状
摄像头	大于 5 米	感知能力强，可识别颜色、形状等更复杂的环境信息	受光照烟雾、影响大，距离信息不精确	多用于泊车辅助，全景环视系统
超声波雷达传感器	UPA 雷达探测范围一般在 15~250cm APA 雷达探测范围一般在 30~500cm	成本低，不受光照、烟雾影响	只能测量距离，不能确定物体确切方位	目前已实现量产，配置自动泊车系统基本都是基于超声波传感器实现

1.2 研究现状

1.2.1 智能车辆规划控制研究现状

在近几年，运动规划最开始作为移动机器人的一个研究分支，在机器人领域，运动规划最初关心的是诸如如何将一架钢琴从一个房间移动到另外一个房间而不与任何其他物体发生碰撞等类似问题，但是该领域已经发展到包括不确定性、多体、动力学等问题。随着自动驾驶领域的不断研究与发展，越来越多的理论与算法被用于无人驾驶领域当中。无人车中的路径规划是指车辆从起点到终点找到一条可行驶路径的过程中并避开障碍物。路径规划可以有全局路径规划和局部路径规划，全局路径规划一般作为宏观上为局部路径规划方向导向，并进行约束，使车辆能够在宏观上总能够向目标方向前行^[2]，局部路径规划可以理解为在车辆沿着目标路径行驶时，通过传感器时时感知外部环境，进行合理转向、避障。前者作为全局规划，一般对实时性没有太大要求，而后者对算法的实时性要求很高。目前更多的难点在于局部路径规划，这也使得更多的学者对局部路径规划展开研究，这些规划算法主要可以分为基于搜索的规划算法，基于采样的规划算法，基于插值的规划算法，人工势场法等。

基于搜索的规划算法主要思想是从当前节点 A 点到目标节点 B 点遍历一个状态空间。这个过程需要先将状态空间栅格化，栅格(Grid)法是由 Howden 提出

^[3]，在栅格化的地图上就可以使用各种搜索算法，Dijkstra, E. W 提出一种启发式路径搜索算法 D*算法^[4]，对于周围环境不断变化时，能够求得最短路径，但是全局搜索的特性会造成它遍历计算的节点很多，效率低下，不利于实时规划。Peter E. Hart 在 D*算法的基础上使用启发函数^[5]来避免对全局状态的遍历，Sandip Aine 提出了 MHA*^[6]算法，通过引入多个启发函数得到路径代价，使算法在有效基础上并保证最优性。Fahad Islam 等人通过动态生成启发函数^[7]，避免了局部最小值的问题。Saranya C 针对在路径规划时也应该考虑周围环境特征，提出了一种改进的 D*路径规划算法^[8]。除了要走的距离，地形坡度估计也被用于代价函数计算来规划路径。对该算法进行了仿真，并在不同坡度条件下进行了测试，给出了不同测试场景下的测试结果。考虑到车辆运动本身的约束，斯坦福 Dmitri Dolgov 等人首次提出了一种满足车辆运动学的算法 Hybrid A*^[9]，并在 (DARPA) 的城市挑战赛中得以运用，2010 在 Hybrid A*的基础上提出了汽车在未知半结构环境中运行的算法^[10]，通过提高非线性优化的质量，来得到最优解，并利用环境的先验拓扑知识来指导规划。

基于采样的规划算法主要是对特征空间或状态空间的随机采样，并将这些采样点进行连接，缺点在于结果的次优性，在无人车当中使用最为广泛的是快速随机扩展树，LaValle 提出的快速搜索随机树算法^[11]，其优点在于复杂度主要决定于寻找路径的难度，跟整个规划场景的大小和构型空间的维数基本无关。对于 RRT 单颗树随机采样影响计算效率的问题，J. J. Kuffner 在随机搜索树基础，使用分别从起始点和终止点进行双向采样^[12]，只要两棵树联通则规划结束。2003 年，Chris Urmson, Reid Simmons 使用启发式函数对 RRT 算法进行改进^[13]，增加扩展代价的结点被采样的概率。对于路径上障碍物的碰撞检查，Peng Cheng, Steven M. LaValle 提出使用惩罚函数^[14]来降低障碍物结点被获得的概率。对于实时性要求高的场景，Dave Ferguson, Anthony Stentz 提出进行随机采样之前，先构建一个随机搜索树^[15]，得到初始解，然后开始采样，从而逐步获得较优的可行解

基于插值的规划算法是在预先给定一系列点的情况下构造和插入一系列新的数据点的过程。这表明算法需要预先给定一系列节点，然后生成一系列有助于

轨迹连续、满足车辆约束和动态环境的导航轨迹,比如用圆弧和直线段代替路径,然后在路径点上插入轨迹点^[16],针对圆弧和直线处曲率不连续的情况则可以用回旋曲线进行改进^[17]。人工势场法一般用于局部避障中,通过构建虚拟力场来设计移动物体的运动,但是在许多实际环境中,若障碍物与目标点离得很近的情况,那么就很难到达目标处,另外在动态环境表现并不是很理想,大量学者展开研究^{[18][19][20]}并对其改进,针对引力函数进行改进,采用分段引力函数解决问题,针对斥力函数重新定义斥力函数当前点与最近障碍物的距离,提出基于粒子群优化人工势场的方法,在人工势场的模型中加入基于障碍物信息的切向量来作为避障过程中的信息。Bence Kovács 基于人工势场法提出了一种移动机器人路径规划的方法^[21],通过适应动物运动属性来辅助人机交互,该算法已在嵌入式系统中实现。

路径跟随也可以看作智能车行驶过程中的车辆运动控制模块,如果说路径规划属于决策者的话,那么路径跟随模块就属于执行者,主要包括纵向速度、加速度或者扭矩控制和横向方向盘转角控制。智能汽车的行驶控制按照控制方向的不同可以分为横向和纵向控制:纵向控制是指通过速度或者力矩使车辆稳定安全行驶,并能够紧急制动,横向控制通过控制方向盘改变车辆航向位姿。

Huei Peng 等人将前轮转角加入到 PID 反馈控制环节中,并最终表示为曲率的函数,提出了基于前馈-PID 反馈控制算法的横向控制^[22],相比与传统 PID 控制,其跟踪性能更优,但在一些恶劣工况下,跟踪性能还是不够稳定,因此其提出使用道路曲率来计算前馈控制量^[23]。模型预测控制顾名思义主要由三个部分组成,1 模型;2 预测;3 控制,模型预测控制需要在每一个时间步迭代求解优化问题,当得到优化问题的最优解后再将这个作为真正的控制器输出作用给被控制对象。相比与传统 PID 控制器,其更擅长处理多输入多输出系统,这种方法鲁棒性较强,能实时处理并动态满足系统。Razvan C. Rafaila 提出了一种多变量非线性模型预测控制策略^[24],采用 2 自由度自行车模型,并结合魔术公式以前轮转向角和前后轮轮速作为控制变量对车辆进行横纵向控制,Zhu M 基于模型预测控制提出了一种无需标定的切换算法^{[25][26]}进行纵向控制,能够自动避免高频振荡,并且比 PI 控制器具有更快的响应速度和更小的超调量,并得到了更高的速度控

制。Kong, Jason 等人基于运动学和动力学进行模型设计,使用模型预测控制比较两种车辆模型运动误差^[27],仿真和实验表明模型预测控制在不同车速下算法的有效性。孙银健基于 6 自由度车辆动力学模型并结合魔术公式,使用模型预测控制理论,设计了线性时变轨迹跟踪器^[28],并且通过仿真验证了考虑侧偏角软约束的前轮主动转向轨迹跟踪控制器综合性能最优。Matthew Brown 提出了一种利用模型预测控制将局部路径规划和路径跟踪相结合的控制框架^[29],该控制器使得能够在必要时安全且最小程度的偏离目标路径,以此避免与障碍物相撞。在传统的控制领域里,控制模型一般都是有精确的传递函数来表示系统的运行状态。然而在很多复杂的非线性系统中,往往很难用精确的数学模型描述系统的动态,因此模糊数学被引入到智能控制领域。郭景华等人设计基于模糊逻辑多滑膜纵向控制^[30],并实验分析控制算法能够克服不确定性干扰的影响,具有精度高和鲁棒性强的特点。Noor Hafizah Amer 利用粒子群优化技术建立了一个知识库,具有模糊监控系统的自适应装甲车辆轨迹跟踪控制系统^[31],并在非线性车辆模型仿真实验,进行评价分析。陈龙提出使用模糊控制改进纯追踪算法^[32],将横向距离误差与航向偏差以及前视距离构建模糊规则,实现纯追踪模型前视距离的动态调整,与固定前视距离的纯追踪模型相比,具有更小的控制误差。Jin-Il Park 提出了一种神经模糊规则自动生成方案^[35],用于支持类车移动机器人的导航。

Okamoto, Kazuhide 主要针对障碍物和不确定性车辆规划的问题,提出了一种基于最优协方差控制的随机线性系统协方差控制^[33],并使用大量的数据仿真验证了所提出的架构。

Jie Ji 提出了一种车辆无碰撞路径规划与跟踪框架^[34],在路径规划中,在车辆有可能与障碍物发生碰撞时,得到理想的避免碰撞的轨迹,路径跟踪控制器将跟踪任务描述为多约束模型预测问题,并计算前轮转角防止与移动障碍物碰撞。

1.2.2 自动泊车系统中的路径规划与路径跟随研究现状

基于路径规划及跟随的自动泊车主要由这几步构成:首先利用雷达或者摄像头进行车位识别,并进行初始定位,接下来路径规划模块根据车辆位姿、目标车

位、碰撞检测计算出可行路径，最后路径跟随模块使用路径信息和车辆信息进行闭环控制。

M. Sugeno 通过对人的停车行为进行建模，建立模糊规则，并实车测试验证了算法的有效性^[36]。Yanan Zhao 针对狭小空间提出了鲁棒模糊控制器^[37]，通过仿真实验，该算法在车辆定位存在误差的情况下，均能实现狭窄空间泊车。D. Kim 等提出了基于停车场的多段式泊车轨迹^[38]，并进行了仿真验证。但泊车路径曲率不连续性会使车辆在路径跟随过程中出现停止打方向盘的现向，会使泊车过程中的体验感降低。CHOI, Sungwoo 基于几何的方法对泊车路径规划进行设计^[39]，该规划方法与车辆初始位置无关，在控制方面，提出了一种无模型的方法补偿动力学误差。李红郭孔辉等人提出了基于样条理论的自动泊车轨迹规划，根据 Ackerman 转向原理建立车辆运动轨迹约束方程，得到了轨迹连续路径点，并对泊车过程状态进行分析，实现了无碰撞泊车^{[40][41][42][43]}。杨妮娜提出一种多段圆弧和直线的平行泊车路径规划方法^[44]，将倒车过程逆化，实现了水平泊车避障。Zhao Liang 使用贝塞尔曲线对多段圆弧产生的轨迹进行平滑处理，得到了曲率连续的路径，并使用模糊 PID 控制方法对路径进行跟踪^[45]。Myung-Wook Park 提出了一种自适应纯跟踪算法的横向控制系统^[46]，对原始纯跟踪算法受前视距离的影响进行了改善，但在低曲率路径上的性能与原路径跟踪算法相差不大。Vorobieva 根据几何关系针对水平泊车进行了路径规划^{[47][48]}，得到了曲率连续的路径点，并且规划方法与车辆初始位姿无关。Zhijie Zhu 针对采样算法生成的轨迹参差不齐的为难题，提出了凸优化轨迹平滑方法^[49]，获得了质量更高的轨迹，用形状-速度两部优化构建凸优化求解，大大加快了运算速度。NGUYEN, DERRICK H 研究了神经网络在控制系统中的应用，使用神经网络模拟控制仿真器^[50]，对实际动态系统进行控制。Yadollah Rasekhipour 提出了一种模型预测控制器^[51]，该路径规划系统在利用车辆动力学规划最优路径时，能够对不同的障碍物和道路结构进行不同的处理。针对复杂的测试场景，通过仿真结果表明该算法下的车辆具有避障能力，并能使车辆动态遵守道路规则。Cao 综合横向自适应前馈控制和纵向速度控制，设计最优模型轨迹跟踪结构^[52]。Tazaki, Yuichi 通过构建不同分辨率的地

图进行自动泊车的轨迹规划^[53]，直到满足车辆的运动学约束以及碰撞要求，只需要很小的计算资源就能实现复杂的泊车轨迹，并通过数值实验验证了该方法的有效性。Hui Zhang 为了提高车辆的横向稳定性和操纵性能，研究了主动前轮转向直接偏航力矩联合控制方法，提出了一种广义比例积分 (PI) 控制律^[54]，将 PI 控制转化为增广系统的状态反馈控制。胡伟龙基于车辆的运动学模型提出了多段式泊车轨迹方法^[55]并设计了满足避障条件的路径。

上述基于路径规划路径跟随的泊车策略来看，虽已有大量的理论算法取得了一些仿真验证和成果，但车辆作为一个十分复杂且多变的研究对象，依然还是存在不少问题：

- (1) 曲率不连续的问题，大多数规划算法在直线和转向时会要求车速很低或者停车打方向盘的问题。这首先会带来泊车体验效果差，智能泊车系统首先强调的是智能，而这种机械式的操作将大大降低人们的感受，其次原地转向时，车轮处于滑动摩擦，这将加速车辆的消耗以及负荷。
- (2) 车辆作为一个耦合性比较高的移动对象，移动过程不能仅就纵向控制或横向控制进行讨论，单方面的去控制往往会导致实际控制效果不理想。
- (3) 对车辆的初始位姿有要求。驾驶员在使用自动泊车的时候，不仅需要车辆与停靠在所需求的停车范围内，还对车辆和库位的夹角有一定，目前大多数自动泊车系统都需要车辆与库位平行，若是存在航向误差，则会增大泊车失败的成功率。
- (4) 不支持多次规划，有的自动泊车系统在进行完整规划过程后，如果车辆最后跟随效果不理想，并不会根据车辆的姿态进行重新规划。
- (5) 泊车结束时车辆的位姿不能得到确保，在规划和跟随完成后，如果车辆与库位还存在一定偏差，这时没有根据车辆和库位的关系库内调整。
- (6) 没有对泊车系统进行鲁棒性测试，现有的泊车系统往往是基于理想环境进行泊车设计，但其实环境中会偶尔存在不确定因素，比如行人通过，这时将会打乱泊车系统的运行，导致泊车失败。

1.3 本文的研究成果和创新性

论文工作的主要成果和创新点为：

1、一种基于脉冲计数轨迹推算方法。

在分析了传统基于车速的运动模型的理论基础上，提出并实现了用车轮脉冲作为轨迹推算的信息源，避免了对车速时间上的积分引起的累积误差。

2、一种融合车辆运动学约束的路径规划方法。

针对路径连续的问题，本文提出将运动学模型引入到路径规划当中，并通过几何约束实现了垂直、水平泊车的避障要求。实车实验表明该方法能够得到满足曲率连续和避障的优点。

3、一种车辆横纵向智能控制系统

在深入研究了现有控制方法的基础上，结合自动泊车的工况特点，分别设计并实现了基于预瞄+前馈 PID 闭环横向控制和基于模糊控制理论的纵向控制，并通过目标路径与实际车辆位姿的几何特性将二者结合控制。

通过大量的实车泊车测试，实现了车辆从寻找库位到自主泊车的全过程，验证了上述方法和理论的可行性。

1.4 论文的主要研究内容及结构安排

在对当前的泊车系统深入了解后，根据当前存在的问题，论文工作以目前公司自动泊车项目为依托，展开对车辆模型、泊车过程轨迹规划以及轨迹跟踪相关方面的研究，以某主机厂量产车为研究平台，项目小组一起分工合作，真正做到面向实际应用，项目量产。为此论文工作的研究内容以及结构安排如下：

第一章：绪论。首先介绍自动泊车相关背景与研究意义，阐述了无人驾驶和自动泊车相关的运动规划和车辆控制技术以及研究现状，为后续各章节的开展做好准备。

第二章：介绍了车辆运动模型的一些基础知识，以及为什么要使用运动学模型来对车辆进行建模，并基于脉冲传感器和角度传感器设计了轨迹推算算法。

第三章：改进了基于几何约束的泊车路径规划。指出了基于几何约束算法的不足，在泊车几何约束的基础上将车辆运动学模型考虑到路径规划中，提出基于预瞄理论的规划的方法，并对泊车流程进行分析。通过仿真实验，对该算法模块进行评估。

第四章：基于路径信息和 DR 定位模块进行横纵向路径跟随算法的研究，横向控制采取预瞄理论+PID 前馈的闭环控制方法，纵向控制上根据实车经验设计了基于模糊控制理论的速度控制，并对路径跟随模块算法提出评价指标，对所设计的算法进行仿真实验与评估。

第五章：分析了自动泊车的功能组成，并对泊车过程进行分析，搭建了泊车测试环境，在基于仿真实验成功的基础上进行实车自动泊车测试。

第六章：总结全文研究内容，指出了论文工作的不足指出以及未来工作的展望。

第二章 车辆运动学建模以及轨迹推算

2.1 背景以及问题

无人车运动规划与控制需要在车辆运动学模型或者动力学模型的基础来实现控制，车辆运动过程是十分复杂的，建立合理的车辆系统模型是整个规划与控制的基础。因此在搭建时，必须考虑车辆所行驶的具体工况，对车辆建模的方法主要包括以下两种：

1) 基于车辆动力学模型的建模方法：主要是对车辆运动的平面进行受力分解，列出微分方程并用多个状态变量描述其运动，涉及到车辆运动与作用力、质量之间的关系。

2) 基于车辆运动学模型的建模方法：运动学是利用车辆运动过程中几何变化来研究车辆的运动规律，包括车辆在空间中位置、速度等随时间产生的变化。

由于车辆在运动过程中动力学过程是非常复杂的，并且关联车身本身的执行器参数，复杂的动力学模型会带来很大的计算量，不利于嵌入式实时计算，考虑到整个泊车系统是在低速环境下工作，车辆的运动过程可以近似看作刚体运动，并且由于实时性强的原因，过于复杂的模型并不利于规划和控制。故本系统主要对车辆进行运动学建模分析，并在此基础上实现轨迹推算。

2.2 车辆参数

车辆在泊车运动过程中主要会受到两个因素影响，一个是车辆本身的物理结构特性，比如车长、车宽、轴距、前轴到前保距离、后轴到后保距离、最大车轮转角也就相当于车辆行驶过程中的最小转弯半径、车辆速度、车辆横摆角速度等；另外一个环境参数，主要包括目标车位长度、目标车位宽度、车辆初始位置、车辆运动通道宽度、泊车路面是否平整等。

自动泊车系统所需车辆部分参数：

车长：车身长度，从车辆前保险杠最突出的位置起，直到后保险杠最突出位置之间的距离，通常来讲，车长越长，泊车过程中需要的运动空间就越大。

车宽：车身不包含左、右后视镜后的位置之间的距离。

车高：车辆空载情况下车轮底部距车轮顶部的距离，不包括天线高度。车身的高度会影响到座位乘客头部空间的舒适度。

轴距：指汽车前轮到后轮中心线的距离。车辆轴距越长，转弯半径越大，故需要的运动空间也就越多。

前后悬：前悬指汽车前轴到车头或车保险杠的距离，同理后悬指汽车后轮到车身尾部最突起的距离，更长的前悬、后悬、轴距无疑会拥有更大的空间。

最小转弯半径：指在 EPS 方向盘控制器能允许打到最大位置，很大程度上表征了汽车能够通过狭窄弯曲地带或绕过不可越过的障碍物的能力，车辆低速行驶过程中车辆后轴中心在路面上行驶后的轨迹圆半径，转弯半径越小，说明车辆的机动性能越好，能泊的车位越小。

通道宽度：指车辆在泊车过程中，所行驶路面两边相距的距离。是路径规划中需要考虑的约束条件。

论文工作仿真车辆使用到的参数如下：

车辆静态参数：

WL	车辆长度	4760	mm
WC	车辆宽度	1931	mm
V_f2head	前轮距车头距离	952	mm
V_rl2tail	后轮距车尾距离	858	mm
l	车辆轴距	2950	mm
δ_{fmaxl}	最大方向盘转角左	160	rad
δ_{fmaxr}	最大方向盘转角右	160	rad

车辆动态参数：

StrWhAng	方向盘转角	Degree
VehSpd	车辆速度	m/s
VehYawRate	车辆横摆角速度	rad/s
VehMovState	车辆挡位	

2.3 车辆运动学模型

2.3.1 坐标系介绍

自动泊车系统里包含多种坐标系，主要有世界坐标系，车辆坐标，相机坐标系，图像坐标系和像素坐标系。

世界坐标系用来描述环境中任何物体的位置，它的设置与具体应用场合有关，一般会在在程序初始化的时候就定义好了，主要作用在对世界坐标系的事物进行绝对定位。

车辆运动坐标系是针对车辆建立的坐标系，为了描述世界坐标系中的事物相对车辆的位置变化。一般车辆坐标系原点设置在车辆后轴中心。论文中自动泊车坐标系是以车辆车身前方为 X 轴，Y 轴平行于地面并垂直于 X 轴，如图 2.2 所示。

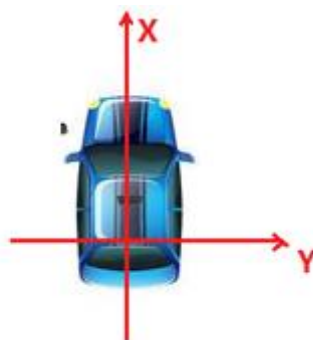


图 2.2 车辆坐标系示意图

相机坐标系一般会遵循传统的视觉定义，也不会改变。一般会建立在摄像机，坐标原点与投影光心重合，Z 轴与成像透镜光轴重合，Y 轴朝下，X 轴朝右。如图 2.3 所示。

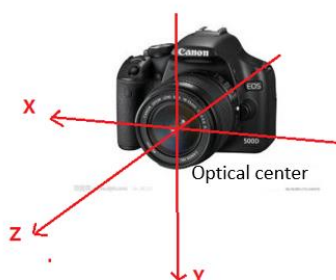


图 2.3 相机坐标系示意图

图像坐标系和像素坐标系都在成像平面上，只是各自的原点和度量单位不一

样，其二者可以相互转换，在自动泊车系统中主要在视觉车位检测中使用，故本文不做过多介绍。

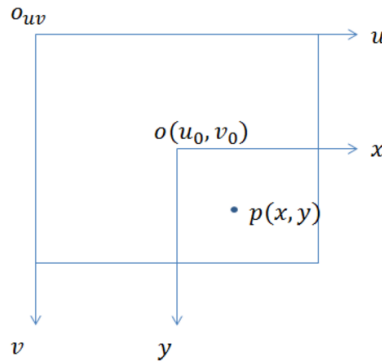


图 2.4 图像坐标系和像素坐标系示意图

2.3.2 自行车模型

要控制车辆的运动，首先要对车辆进行数字化模型，而单车模型就是一种很常见的车辆运动学模型，并且研究表明在侧向加速度很小的工况下，采用 2 自由度自行车模型是能够在低速情况下反映车辆的运动^[56]。

自行车模型的建立需基于如下假设：

- 1) 只对车辆在二维平面进行分析，即不考虑车辆在 Z 轴方向的运动；
- 2) 车辆左右侧轮胎在任意时刻都拥有相同的转向角度和转速；这样车辆的左右两个轮胎的运动可以合并为一个轮胎来描述；
- 3) 车轮属于滚动运动，即不考虑已发生的滑移等运动状态；
- 4) 车身和悬架系统都是刚性系统；
- 5) 车辆的运动和转向是由前轮驱动。

自行车模型运动原点的不同可以分为：以后轴中心为原点的车辆模型和以质心为原点的车辆模型。

以原点为中心车辆模型原理如图 2.5 所示，在二维平面中将车的左右前轮合并为一个点，假设为 A 点，左右后轮也合并为一个点，假设为 B 点，任意时刻车辆的状态可以用 (x, y, θ) 表示，车辆运动中心位于车辆后轴中心，坐标轴与车身平行，速度 v 方向为车身方向。这也是人们实际汽车转向系统最初所依据的原理^[57]。

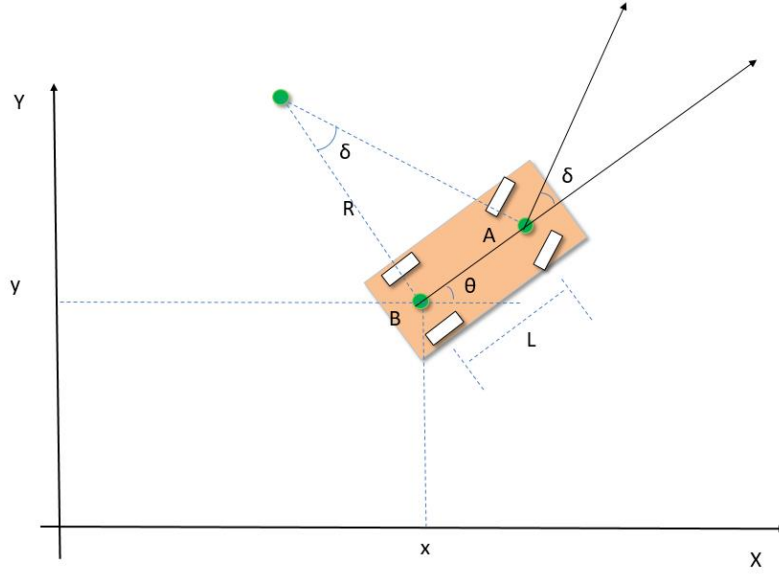


图 2.5 以原点为运动中心单车运动模型原理图

对此模型进行运动分析：在一个非常短的时间 Δt 内，可以近似认为车辆按照车身的方向运动，那么 dx ， dy 可以认为为车辆在 X 轴和 Y 轴运动的距离。

$$\begin{cases} dx = v \cos \theta * \Delta t \\ dy = v \sin \theta * \Delta t \end{cases} \quad (2-1)$$

由公式

$$\tan \delta = \frac{L}{R} \quad (2-2)$$

$$d\theta = \frac{v}{R} \Delta t \quad (2-3)$$

可得

$$d\theta = \frac{v \tan \delta * \Delta t}{L} \quad (2-4)$$

整理成状态方程则为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \frac{\tan \theta}{L} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

以质心为运动原点的车辆模型如下图 2.6 所示，在上述模型基础上增加了 β 为滑移角，质心点 C，质心到前轴的距离 L_f 和质心到后轴之间的距离 L_r ，和前轮转角 δ_f 以及后轮偏角 δ_r

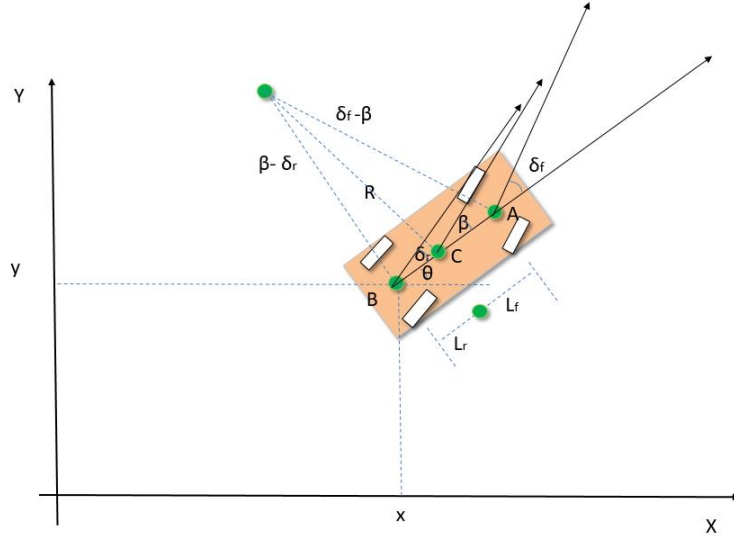


图 2.6 以质心为运动中心单车运动模型原理图

此时根据三角法则可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} \cos(\theta + \beta) \\ \sin(\theta + \beta) \\ \frac{\cos \beta (\tan \delta_f - \tan \delta_r)}{L_f + L_r} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

以及

$$\beta = \cot\left(\frac{L_f \tan \delta_r + L_r \tan \delta_f}{L_f + L_r}\right) \quad (2-7)$$

以质心为原点的车辆模型比以后轴中心为原点车辆模型多了质心点和后轮偏角，考虑到在实际车辆中质心位置往往是不好确定的，前轮偏角可通过方向盘标定得到，而后轮偏角不好确定等因素，故论文工作采用以后轴中心为原点的自行车模型对车辆进行运动分析。

2.3.3 阿克曼转向几何

阿克曼转向是一种现代汽车的转向方式，这种转向机构好处就是，左右车轮可以绕着独立的旋转轴（主销）进行旋转，大大减小了车轮转向需要的空间。汽车在转向时，为了避免车轮在转弯过程中出现不必要的磨损和滑动，四轮需要沿着同一个旋转中心运动为遵循这样的转向几何，转弯时，内侧车轮的摆角要比外侧车轮的摆角大。

围绕阿克曼转向梯形的设计：分为三类，第一类，图 2.7 (a)，阿克曼转向梯

形,内轮转角大于外轮;理想的阿克曼梯形内外轮转角垂线相交于后轴延长线上;第二类,图 2.7 (b),平行转向梯形,内轮转角等于外轮;第三类,图 2.7 (c),反阿克曼转向梯形,内轮转角小于外轮。

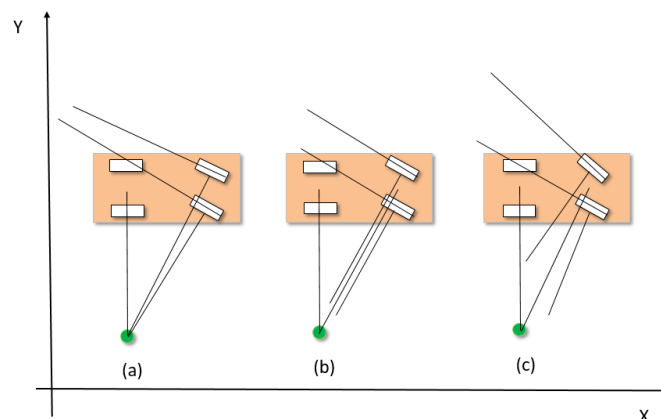


图 2.7 阿克曼模型设计示意图

车辆在低速转弯行驶时,侧向加速度很小(接近零),理想的转向方式如图 2.7 (a) 这种,也被称为理想阿克曼转向。当车辆高速行驶转弯时,由于侧向角速度较大(不能忽略),根据轮胎特性(车轮侧偏角越大越容易达到侧滑极限),内轮更容易侧滑。所以为了增加车辆的转弯极限能力,需要适当减小内轮转角和外轮转角的差值。一些车辆为了追求车辆极限能力,有时会选择使用反阿克曼转角(轮胎特性,外轮轮荷大,更大的侧偏角可以提供更大的侧向力)。

围绕理想阿克曼进行分析,如图 2.8 所示, H 为轴距, W 为轮距。

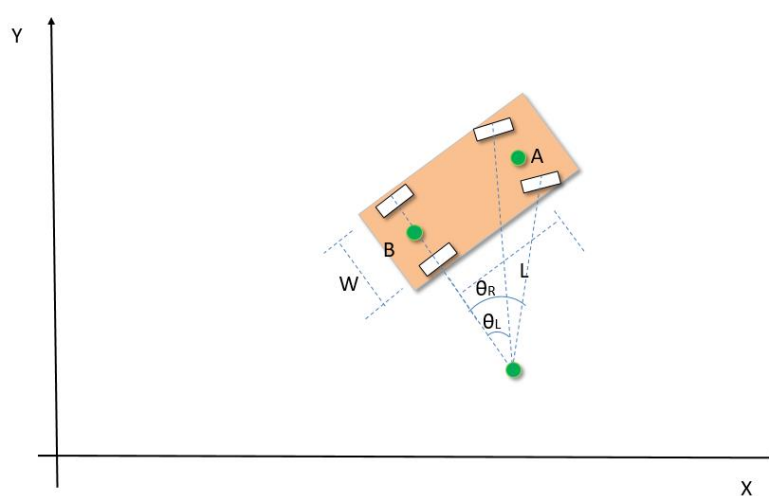


图 2.8 阿克曼转向模型图

根据几何关系可得:

左轮转角：

$$\theta_L = \tan^{-1}\left(\frac{H}{R+W/2}\right) \quad (2-8)$$

右轮转角：

$$\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{H}{R-W/2}\right) \quad (2-9)$$

则此时的车辆前轮平均转角：

$$\theta = \frac{\theta_L + \theta_R}{2} \quad (2-10)$$

由此可得转弯半径：

$$R = L * \cot \frac{\theta_L + \theta_R}{2} \quad (2-11)$$

2.4 基于车辆运动学模型的轨迹推算

轨迹推算技术（简称 DR）是一种自主式导航算法，主要利用车身携带的距离传感器和方位传感器测量出车辆的行驶距离、速度和方位等参数，而不需要借助任何外界信息。短时间内定位精度高，数据可靠。

上一节单车模型中对运动的讨论是获取车辆的速度和航向角，然后对速度进行分解，然而在实际车辆行驶过程中，速度精度并不是很高，还可能波动，而且当速度小于 1 千米每小时时，实际上从车身 CAN 总线上获取到的速度为零，跳动比较大，因此这种情况推导出来的结果是很不准的，而且由于是对速度作积分计算，随着时间的推移，速度误差将会累积，导致与实际的偏差越来越大，因此并不适合自动泊车这种对精度定位精度要求比较高的系统，故论文工作将车辆脉冲计数引入到运动方程中，根据实际运行的路程来更新位姿。

2.4.1 轨迹推算原理

论文工作的航位推算主要通过车辆的 CAN 信息以及运动模型参数实时计算出车辆在世界坐标系下的位姿信息。其基本原理如图 2.9 所示。

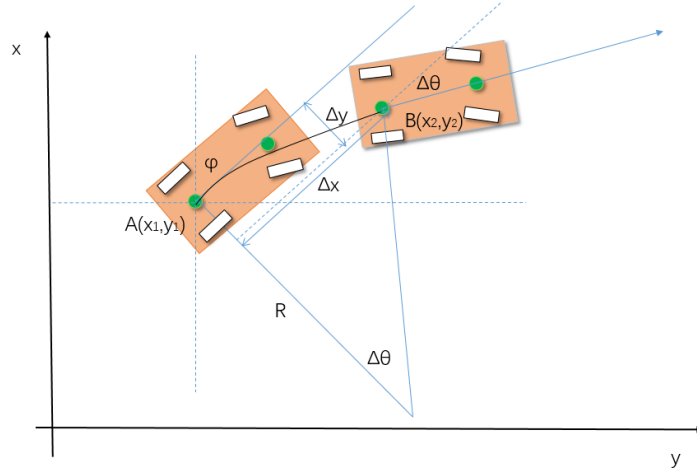


图 2.9 小车航位推算示意图

其中 A 点为车辆的起始位姿包含坐标 (x_1, y_1) 和航向角 φ_1 ，B 点为下一时刻坐标 (x_2, y_2) 和航向角 φ_2 ， P_{RR} 、 P_{RL} 为左右后轮脉冲计数，M 为单位脉冲距离，H 为车辆轴距。

车辆的转弯半径计算如公式 (2-12) 所示：

$$R = H \cot \beta \quad (2-12)$$

然后通过此时刻的转弯半径求得 x 轴的偏移和 y 轴的偏移：

$$\widehat{AB} = M(P_{RR} + P_{RL})/2 \quad (2-13)$$

$$\Delta \theta = \widehat{AB}/R \quad (2-14)$$

$$\Delta x = R(1 - \cos \Delta \theta) \quad (2-15)$$

$$\Delta y = R \sin \Delta \theta \quad (2-16)$$

那么 B 点和 A 点存在如下一种状态转换关系：

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta \theta \quad (2-18)$$

论文工作中提出位姿更新算法如下：

输入：

1. 车辆状态信息 D 包含方向盘转角、左右轮脉冲、挡位等。
 2. 车辆静态信息 Ds 包好车辆长度、宽度、轴距等静态可测数据。
-

输出：下一时刻位置 (x_2, y_2) 和航向角 φ_2 。

```

1  Function UPDATEDR(D)
2  if D is true then
3      curCarData ← {从 D 中将所需要的数据赋值给全局变量 curCarData}

```

```

4      tr ← calRadius(curCarData)
5      d ← calPulse2Distance(curCarData, tr)
6      theta ← calThetaOffect(tr, d, preCarData)
7      pos ← calPos(preCarData, tr, theta)
8      preCarData ← curCarData
9      return pos

```

在轨迹推算过程中，输入数据 D 为车辆本身的状态信息，主要包括方向盘转角、左右轮速脉冲计数、挡位等信息，在程序初始化的时候，会通过初始化函数将车辆本身的静态信息 D_s 更新到 $curCarData$ 和 $preCarData$ 中， $curCarData$ 和 $preCarData$ 为运行过程中保存的当前以及上一时刻的车辆状态信息，并通过 D 实时更新。程序按固定周期调用 $UPDATEDR(D)$ ，故算法的时间复杂度为 $O(1)$ 。算法首先通过 $calRadius(curCarData)$ 计算出当前车辆的转弯半径，然后通过 $calPulse2Distance(curCarData, tr)$ 计算车辆所行走的路程，将 tr, d 代入到 $calThetaOffect(tr, d, preCarData)$ 可以计算车辆所转过的弧度，最后通过 $calPos(preCarData, tr, theta)$ 实时更新当前时刻车辆位姿。

2.4.2 轨迹推算误差分析

本系统航位推算误差可以根据来源不同分为系统误差和非系统误差。

系统误差主要包含：

- (1) 由于根据自身携带的传感器在一段时间内做累加运算求得，故短时间内还算准确，但随着程序的运行，车辆的行驶难免会出现累计误差。
- (2) 由于是通过标定获取车辆单个脉冲距离来进行推算，故存在标定误差。

非系统误差主要包含：

- (1) 行驶路面可能存在不平整现象，而本航位推算模块只对二维平面运动进行考虑，并没有考虑 Z 轴运动。
- (2) 行驶路面若因雨雪天气导致路面摩擦系数降低而存在车轮打滑现象，而出现误差
- (3) 由于长久行驶后导致胎压出现变化而出现误差。

2.5 本章小结

本章主要针对车辆模型进行建模设计,通过对泊车场景进行分析,以实现自动泊车实际应用为目标,分析了基于动力学建模和基于车辆运动学建模的优缺点,最终选择使用基于单车运动学模型对车辆进行建模分析,并通过使用车辆脉冲信号和方向盘转角信号进行轨迹推算。为后续路径规划和路径跟随模块的设计奠定了基础。

第三章 自动泊车系统中的路径规划

本章主要介绍泊车过程中路径规划模块相关问题,根据车与库位之间的几何位姿关系提出了基于预瞄规划的路径规划算法,并在此模型基础上对水平车位和垂直车位进行路径规划的仿真环境搭建设计,并对结果进行分析。

3.1 背景以及问题

路径规划作为泊车系统的重要组成部分,它需要根据泊车环境、车辆运动约束以及碰撞约束规划出从当前起始点到目标车位的合理路径,在确保该路径在本次规划中能够安全避开周围的障碍物基础上能尽量使路径更加平顺、连续。

目标泊车位的尺寸以及行驶车道的宽度对泊车方式有着决定性的影响。车位小或者通道行驶空间不够,常常会造成泊车失败。常见的泊车方式包括垂直泊车和水平泊车,另外还有斜车位泊车。根据中国智能汽车指数泊车辅助系统实验规程,按照车位长度将车位分为大车位,中车位,小车位,大车位的车位长 $X_0 = X + \min\{0.25 * X, 1.5\text{m}\}$; 中车位的车位长 $X_0 = 1/2 * (X + \max\{0.7\text{m}, 0.15 * X\} + X + \min\{0.25 * X, 1.5\text{m}\})$; 小车位的车位长 $X_0 = X + \max\{0.7\text{m}, 0.15 * X\}$ 。本次规划水平车位长度为车长+0.8 米,按照车位宽度不同将垂直车位分为大中小三个车位,大车位为车宽+1.2 米,中车位为车宽+0.9 米,小车位为车宽+0.6 米,本次规划仿真垂直车位为车宽+0.6 米。

目前国内外解决自动泊车的中规划问题主要分为:

1) 根据车辆与车位之间的几何关系以及车辆的运动学模型得到一条合理的路径,并通过路径跟随模块来跟踪该路径完成泊车;

2) 根据神经网络等人工智能算法模拟驾驶员行为得到相应的方向盘转角完成泊车。

Petrov 根据车辆最小转弯半径以及车辆和车位之间的几何约束,得到了符合避障要求的泊车轨迹^[58],但此种情况下计算得到的路径属于曲率不连续,对于曲率突变会对路径跟随带来很大难度,S Zhang 通过使用多项式插值来平滑路径,得到了曲率连续的曲线^[59],但是并没有考虑车辆的碰撞约束,且不适合狭小车位

规划, H Vorobieva 利用回旋曲线对狭小车位进行泊车分析, 得到了曲率连续满足车辆碰撞约束的路径^[60], 并且能够支持小车位泊车的工况, 但是回旋曲线计算量大, 对于嵌入式控制器的计算能力来说是一个挑战。因此论文工作的路径规划模块在基于视觉和超声融合的规划基础上, 融合给出目标泊车位和 DR 给出车辆状态信息之后, 在确定了目标车位和当前车辆的位姿关系后, 将车辆运动约束考虑进路径规划当中, 得到曲率连续的泊车轨迹, 并且通过碰撞点约束避免了车辆与障碍物之间的碰撞, 支持小车位工况, 输出车辆在世界坐标系下的包含目标位置、目标角度、目标车身航向角、目标曲率的路径点。

3.2 泊车路径规划算法设计

3.2.1 预瞄函数设计

传统的基于几何约束的泊车规划算法往往只支持单次规划路径, 即一次性把泊车入库的路径规划好了, 而这样会造成以下缺点:

- 1) 当路径跟随模块跟的不好时, 导致最终泊车结束时车辆停的并不准确, 并不支持多次规划,
- 2) 而基于圆弧和直线的规划算法, 泊车到切点时, 轨迹曲率不连续, 需停车然后打方向盘, 造成泊车体验效果不好。

论文工作的规划算法会基于几何约束获得的由多段圆弧和直线组成的理想路径

下, 考虑车辆的运动模型, 得到一条平滑且曲率连续的路径。

预瞄理论介绍:

预瞄理论最早用于自动驾驶中的车辆控制模块中, 典型应用就是 pursuit 算法, 是移动机器人最常见的路径跟踪方法之一。从自行车模型考虑, 以车辆后轴中心为切点, 车辆纵向车身为切线, 通过连接后轴中心点到车辆前方道路上预瞄的目标点的弧线, 来确定我们当前车辆所需的转向角, 如图 3.1 所示, 目标点 (g_x, g_y) 是我们的预瞄点, 现在要控制车辆经过该点, 可根据正弦关系得到下式:

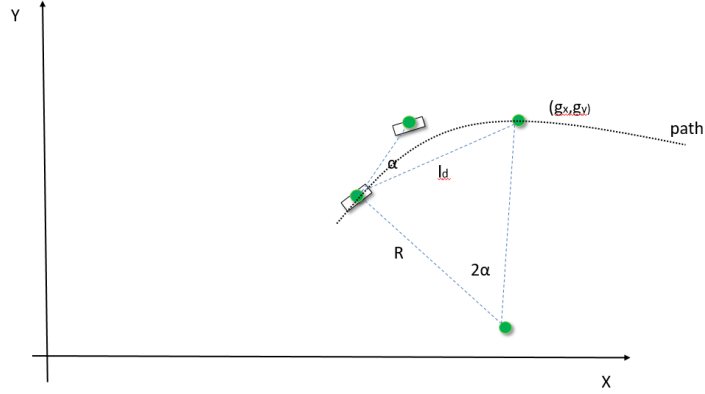


图 3.1 预瞄理论模型图

$$\frac{l_d}{\sin \alpha} = \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2}-\alpha)} \quad (3-1)$$

对其展开后得到

$$\frac{l_d}{\sin \alpha} = 2R \quad (3-2)$$

然后结合车辆运动模型可以得到前轮转角的表达式 $\delta(t)$

$$R = \frac{L}{\tan \delta} \quad (3-3)$$

$$\delta(t) = \tan^{-1} \frac{2L \sin(\alpha(t))}{l_d} \quad (3-4)$$

上式是针对轨迹跟踪模块进行设计,那么我们将车辆的运动模型考虑的路径规划中,设计更符合车辆运动约束的路径。

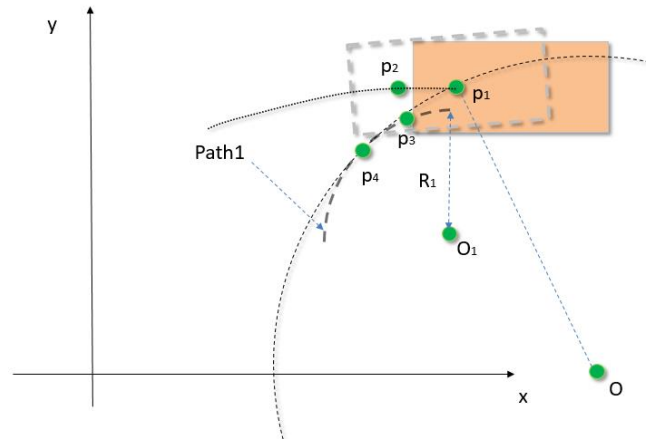


图 3.2 预瞄规划示意图

如图 3.2 所示,假设 Path1 为我们的理想路径,用圆心 $O_1 (O_{1x}, O_{1y})$ 和半径 R_1 表示,路径的曲率为车辆能够转动的最大,也就是以最小转弯半径形成的一条轨迹,此刻车辆后轴中心位于 $p_1 (p_{1x}, p_{1y})$ 点,前轮偏转角 δ 很小,在世界

坐标下的航向角为 θ ，那么怎样的一条实际路径才能使车辆向目标路径逼近？

具体算法如下：

步骤一：根据当前车辆位置点 p_1 以及前轮偏角求得此刻车辆转动中心 O_2 点，并根据车辆运动学模型预测 Δt 时刻车辆的位置点 p_2 假设当前车速为 V 。

$$R_2 = L * \cot \delta \quad (3-5)$$

$$p_{2x} = p_{1x} * \cos(V * \Delta t / R_2) - p_{1y} \sin(V * \Delta t / R_2) \quad (3-6)$$

$$p_{2y} = p_{1x} * \sin(V * \Delta t / R_2) + p_{1y} \cos(V * \Delta t / R_2) \quad (3-7)$$

$$p_{2\theta} = \theta + V * \frac{\Delta t}{R_2} \quad (3-8)$$

步骤二：将预测点 p_2 根据几何信息在目标路径 O_1 上找到对应位置点 p_3 ，并在 p_3 点的位姿做圆周运动往前走 Δd 的距离后求得位置点 p_4 。

$$p_{3x} = O_{1x} + R_1 / (p_{2x} - O_{1x}) * \sqrt{(p_{2y} - O_{1y})^2 + (p_{2x} - O_{1x})^2} \quad (3-9)$$

$$p_{3y} = O_{1y} + R_1 / (p_{2y} - O_{1y}) * \sqrt{(p_{2y} - O_{1y})^2 + (p_{2x} - O_{1x})^2} \quad (3-10)$$

$$p_{4x} = (p_{3x} - C_x) * \cos\left(\frac{\Delta d}{R_3}\right) - (p_{3y} - C_y) \sin\left(\frac{\Delta d}{R_3}\right) + O_{1x} \quad (3-11)$$

$$p_{4y} = (p_{3x} - C_x) * \sin\left(\frac{\Delta d}{R_3}\right) + (p_{3y} - C_y) \cos\left(\frac{\Delta d}{R_3}\right) + O_{1y} \quad (3-12)$$

步骤三：根据车辆当前点和目标点，构建一个过此两点，并与车辆当前方向相切的圆，用此圆的半径来得到实际路径的半径，将半径 R 带入到式 (3-4) 即可求得车辆此刻所需求的前轮转角 δ 。此处用 Δx 表示目标点在车辆坐标系下到 x 轴距离， Δy 为目标点在车辆坐标系下到 y 轴的距离， $C(x, y)$ 为当前新求得圆的圆心。

$$R^2 = (R - \Delta y)^2 + \Delta x^2 \quad (3-13)$$

$$C_x = p_{1x} - R_3 * \sin \theta \quad (3-14)$$

$$C_y = p_{1y} + R_3 * \cos \theta \quad (3-15)$$

步骤四：利用上面计算到的当前车辆点 p_1 的位姿根据运动学模型求解以一定速度运动 Δt 时间的下一位姿点 $p_4(x, y, \theta)$ 并转到世界坐标系下。

$$p_{4x} = (p_{1x} - C_x) * \cos\left(V * \frac{\Delta t}{R_3}\right) - (p_{1y} - C_y) \sin\left(V * \frac{\Delta t}{R_3}\right) + C_x \quad (3-16)$$

$$p_{4y} = (p_{1x} - C_x) * \sin\left(V * \frac{\Delta t}{R_3}\right) + (p_{1y} - C_y) \cos\left(V * \frac{\Delta t}{R_3}\right) + C_y \quad (3-17)$$

$$p_{4\theta} = \theta + V * \frac{\Delta t}{R_3} \quad (3-18)$$

步骤五：判断是否到达目标点，若没到达则回到步骤 1 进行迭代计算，最后输出一系列包含车辆位姿点的集合。

基于直线的 follow：

基于直线的 follow 算法整体设计流程与基于圆弧的一致，只是需要在 Follow 算法设计步骤二加以调整，直线用方程 $y=k_1x+b$ 表示， $p_5(x, y)$ 为斜线上任意一点。

步骤二：将基于圆弧中的前视更新点 p_3, p_4 按照线性运动进行更新而不是圆周运动，以车辆车身方向往目标路径作垂线求得 p_3 ，结合直线方程可求得 P_3 点：

$$p_{3x} = (p_{5y} - (p_{2y} + \frac{1}{\tan p_{2\theta}} * p_x)) / (\frac{1}{\tan p_{2\theta}} - p_{5x}) \quad (3-19)$$

$$p_{3y} = k_1 * p_{3x} + b \quad (3-20)$$

然后再由点 p_3 做线性运动求得 p_4 ，将 (3-16) (3-17) 替换为：

$$p_{4x} = p_{3x} + \Delta d \cos p_{2\theta} \quad (3-21)$$

$$p_{4y} = p_{3y} + \Delta d \sin p_{2\theta} \quad (3-22)$$

3.2.2 垂直车位泊车路径规划

如图 3.3 所示， $P_1P_2P_3P_4$ 为目标车位， D 为过道宽度， W_1 为车位宽， W_2 为车宽， W_3 为车辆后轴中心到前保的距离， d_1, d_2 为车辆与障碍物之间预留的安全距离，欲使车辆从当前位置成功泊入目标车位，那么必须得满足避障安全距离得要求，假设在泊车转弯过程中以最小转弯半径 R 行驶，车辆的外侧轮转弯半径 R_1 ，车辆那么垂直泊车最为理想泊车轨迹则为圆弧和直线结合体。

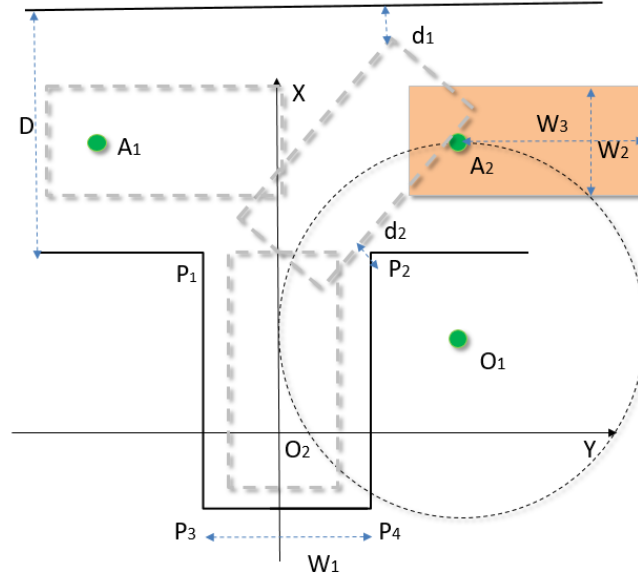


图 3.3 垂直规划模型图

步骤一：由视觉传感器和超声传感器共同检测获得车位宽度 W_1 和过道宽度 D ，并计算出最终泊车终点的位置坐标 $O_2(x, y)$ 和最终泊车角度 θ ，以 O_2 点平行于车身为 X 轴，垂直于车身为 Y 轴建立泊车坐标系。以车辆后轴中心为车辆参考点，首先需要从 $A_1(x, y, \theta_1)$ 点正向行驶到 A_2 点，此过程需要满足车辆往前拉直过程中车辆外角点不与过道上边缘碰撞。

$$R_1 = \sqrt{(R + \frac{W_2}{2})^2 + W_3^2} \quad (3-23)$$

$$A_{1x} - R \sin \theta_1 + R_1 + d_1 < \max(P_{1x}, P_{2x}) + D \quad (3-24)$$

步骤二：将车辆拉直到与车位平行到达初始泊车位置 $A_2(x, y)$ 后，此时有两种泊车方式：一种是直接一步圆倒车入库，这种入库方式常用于库位比较大，且通常车辆在泊车过程中能轧 P_2 点的泊车场景，另外一种是将车辆尾部按照避开 P_2 点的圆弧规划，然后车头往车位上方拉，最后在车位里面规划，这种入库方式可以适用于小车位的场景，也是生活中人们所经常采用的泊车方式。并根据计算泊车圆弧的圆心坐标 $O_1(x, y)$ 。

对于一步圆倒车入库需要满足

$$O_{1x} \geq P_{2x} - \sqrt{(R - \frac{W_2}{2} - d_2)^2 - (O_{1y} - P_{2y})^2} \quad (3-25)$$

$$O_{1y} = R \quad (3-26)$$

$$P_{2y} < \frac{W_2}{2} + d_2 \quad (3-27)$$

对于多次规划圆则只需要倒车过程中不与 P_2 点相撞，

$$O_{1x} = A_{2x} - R \quad (3-28)$$

$$O_{1y} \leq P_{2y} + \sqrt{(R - \frac{W_2}{2} - d_2)^2 - (P_{2x} - O_{1x})^2} \quad (3-29)$$

步骤三：当车辆根据上述圆弧已经进入到车位或车尾已经进入车位时，这时候车辆已经大部分在库位里面了，此时只需要将车辆拉直到 y 轴上与 y 轴平行。

因此最终的垂直泊车路径由 $O1$ 圆和直线 $y=0$ 构成。然后根据预瞄算法生成泊车路径点。

3.2.3 水平泊车路径规划

如图 3.4 所示， $P_1P_2P_3P_4$ 为目标车位， D 为车道宽， L_1 为车位长度， W_2 为车宽， W_3 为车辆后轴中心到前保的距离， d_1, d_2 为车辆与障碍物之间预留的安全距离，欲使车辆从当前位置成功泊入车位，首先得满足避障安全距离得要求，假设在泊车过程中以最小转弯半径 R 行驶，那么按照从高约束区域往低约束区域反向规划往往是容易的，也就是说当车辆能够从目标车位无碰撞的行驶出来，那么从理论上来讲就存在一条可行驶路径能让车开进去。

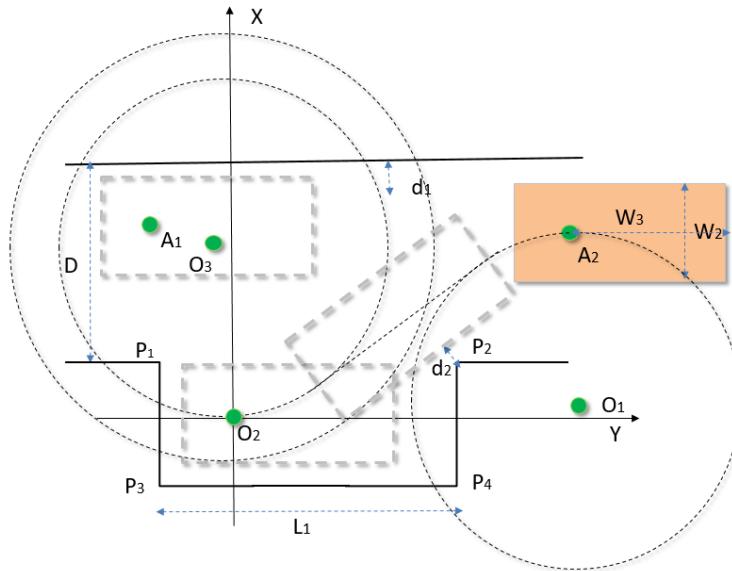


图 3.4 水平规划模型图

具体规划步骤如下：

步骤一：由视觉传感器和超声传感器共同检车测得获得车位长度 L_1 和过道宽度

D 并获得最终泊车终点的位置坐标 $O_2(x, y)$ 和最终泊车角度 θ ，以最终泊车姿态垂直于车身方向为 X 轴，平行于车身方向为 y 轴建立泊车坐标系，然后车当前位姿与目标车位位姿以及过道宽度将车辆规划能绕过 P_2 的 O_1 圆附近，此步需要计算车辆行驶过程中避免上边界碰撞约束：

$$R_1 = \sqrt{(R + \frac{W_2}{2})^2 + W_3^2} \quad (3-30)$$

$$A_{1x} - R \sin \theta_1 + R_1 + d_1 < \max(P_{1x}, P_{2x}) + D + d_2 \quad (3-31)$$

步骤二：计算由车辆能够从车位往外出的 O_3 圆心，具体过程需要车辆一开始方向盘左打满往外行驶，若车辆能一次出去，则记为 O_3 圆，若车辆在行驶出去的过程外角会撞到障碍物 P_2 点，则记下此时位置以及圆心，然后车辆方向盘右打满进行反方向规划，直到车辆尾部将要碰撞车位后边界，然后记住此时车辆状态，进行新一轮泊出尝试，在规定次数内以车辆最终能泊出的那个圆心坐标记为 O_3 ，否则车位太小，无法泊车。此过程需要将车辆模型外角进行处理，将不再是矩形，而是由矩形+圆弧构成，这样的好处是得到的外角半径更小，支持的可泊车位更小，如图 3.5 所示，假设小圆弧半径为 r ， v_1 v_2 v_3 v_4 为车辆模型中内嵌矩形的四个顶点。

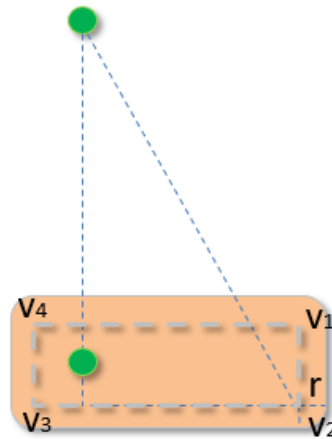


图 3.5 车辆模型示意图

根据几何关系，可得：

若一步能泊出则：

$$O_{3x} = O_{2x} + R * \sin \theta \quad (3-32)$$

$$O_{3y} = O_{2y} + R * \cos \theta \quad (3-33)$$

令最小外角点转弯半径 R' ,

$$R' = \sqrt{(R + \frac{W_2}{2} - r)^2 + (W_3 - r)^2} + r + d_2 \quad (3-34)$$

若车辆能出去则需满足:

$$\sqrt{(P_{2y} - O_{3y})^2 + (P_{2x} - O_{3x})^2} > R' \quad (3-35)$$

若一次不能泊出,则根据几何关系求得碰撞零界点的关系然后进行反向规划然后继续尝试泊出:

首先由坐标变换将车辆的顶点 $v_2(x, y)$ 坐标由车辆坐标系转到世界坐标系中 $v'_2(x, y)$, 并根据临界关系求得世界坐标下与 p_2 点碰撞时的 $v''_2(x, y)$

$$v'_{2x} = -v_{2y} \sin \theta + v_{2x} \cos \theta + v_{2x} \quad (3-36)$$

$$v'_{2y} = v_{2x} \sin \theta + v_{2y} \cos \theta + v_{2y} \quad (3-37)$$

$$v''_{2y} = P_{2y} - r - d_2 \quad (3-38)$$

$$v''_{2x} = O_{3x} - \sqrt{(R' - r - d_2)^2 - (v''_{2y} - O_{3y})^2} \quad (3-39)$$

通过旋转之前的车辆右角点坐标和旋转之后的车辆右角点坐标可以求得车辆此次运动过程中所旋转的角度 θ' , 最后通过旋转变换可以求得车辆在零界点的位姿 $O'_2(x, y, \theta)$ 。

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{v'_{2y} - O_{3y}}{v'_{2x} - O_{3x}} - \tan^{-1} \frac{v''_{2y} - O_{3y}}{v''_{2x} - O_{3x}} \quad (3-40)$$

$$O'_{2x} = -(O_{2y} - O_{3y}) \sin \theta' + (O_{2x} - O_{3x}) \cos \theta' + O_{2x} \quad (3-41)$$

$$O'_{2y} = (O_{2x} - O_{3x}) \sin \theta' + (O_{2y} - O_{3y}) \cos \theta' + O_{2y} \quad (3-42)$$

$$O'_{2\theta} = \theta - \theta' \quad (3-43)$$

最后通过 $O'_2(x, y, \theta)$ 进行反向规划尝试, 先计算反向运动圆心, 然后根据后边界约束得到车辆在临界碰撞点的坐标 $O''_2(x, y, \theta)$ 。最后根据公式继续进行出库尝试直到获得出库点圆心坐标 $O_3(x, y)$ 。

步骤三: 计算由车能够从当前车位往外驶出的 O_1 圆心, 具体过程需要车辆由初

始点 A_1 点行驶到库位 P_2 点前方合适泊车点 A_2 ，此点可以由旋转公式得到，并且需要 A_2 点不与上边界碰撞即公式几 (3-31)，然后右打满进行入库，同时需满足不与 P_2 点相撞。

$$O_{1x} = A_{2x} - R \quad (3-44)$$

$$O_{1y} = P_{2y} + \sqrt{(R - \frac{W_2}{2} - d_2)^2 + (P_{2x} - O_{1x})^2} \quad (3-45)$$

步骤三：求解一条切线满足与两圆同时相切的情况，构成泊车入库的 CLC 三段式路径，并通过引入直线段避免了两段式 CC 入库时曲率变化太大的导致车辆无法及时跟随。

$$\text{令} \quad y = kx + b \quad (3-46)$$

将 R 和 O_1, O_3 圆心坐标代入距离公式

$$R = \left| \frac{kO_x - O_y + b}{\sqrt{k^2 + 1}} \right| \quad (3-47)$$

可以求得直线方程，故最后的泊车轨迹由两个圆和一条直线组成。

3.3 泊车规划流程

为了能够进行多次规划，以及在泊车过程中能够进行障碍物避障需要对泊车进行状态设计，首先根据车辆与车位之间的相对位置信息定义 step0-step2 状态量用以表示当前泊车状态和具体要相往哪边规划。

垂直泊车：step0 表示车辆往前拉直到合适泊车位的过程，step1 表示车辆当前处于跟随一步入库圆的过程，step2 表示车辆大体引进入车位，此时只需在车位内进行揉库调整车辆位姿，具体流程如图 3.6。

水平泊车：step0 车辆往前拉直找到合适泊车位置点的过程，step1 表示车辆运动在 CLC 的过程，也就侧方位泊车的 S 型曲线过程，step2 表示车辆已进入到库位，只需在库位内调整，具体流程如图 3.7。

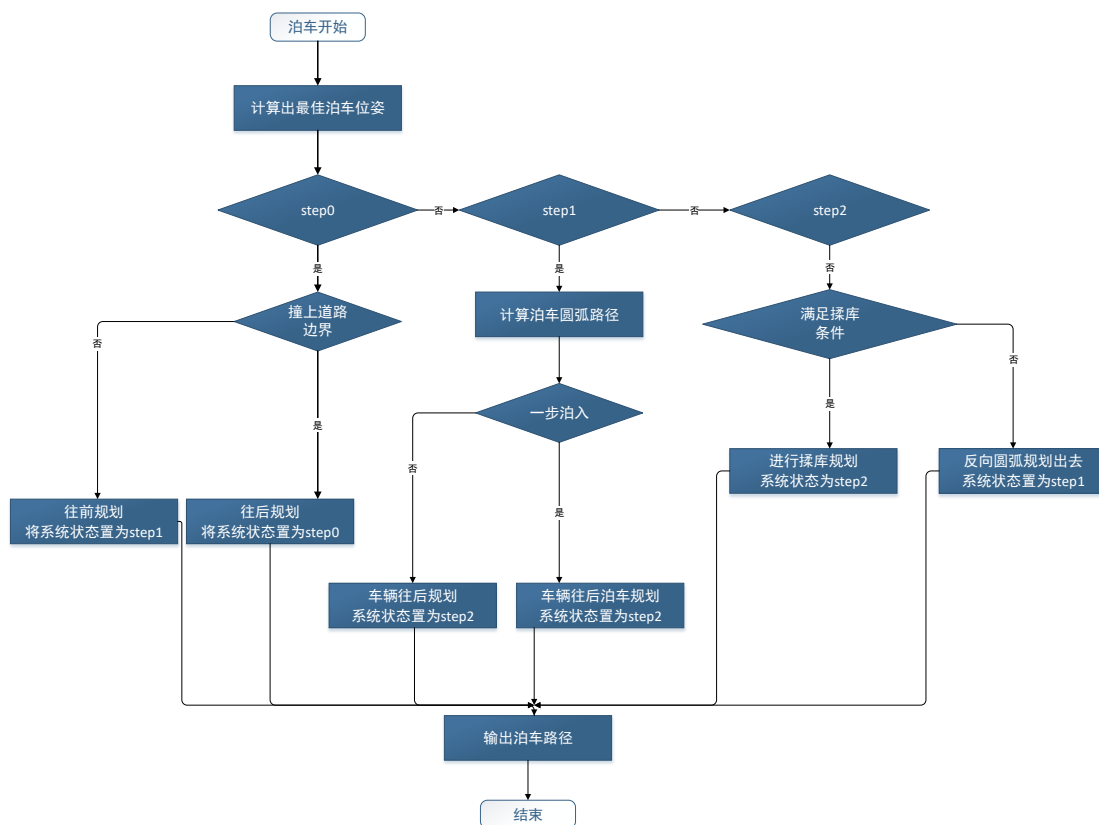


图 3.6 垂直泊车规划流程图

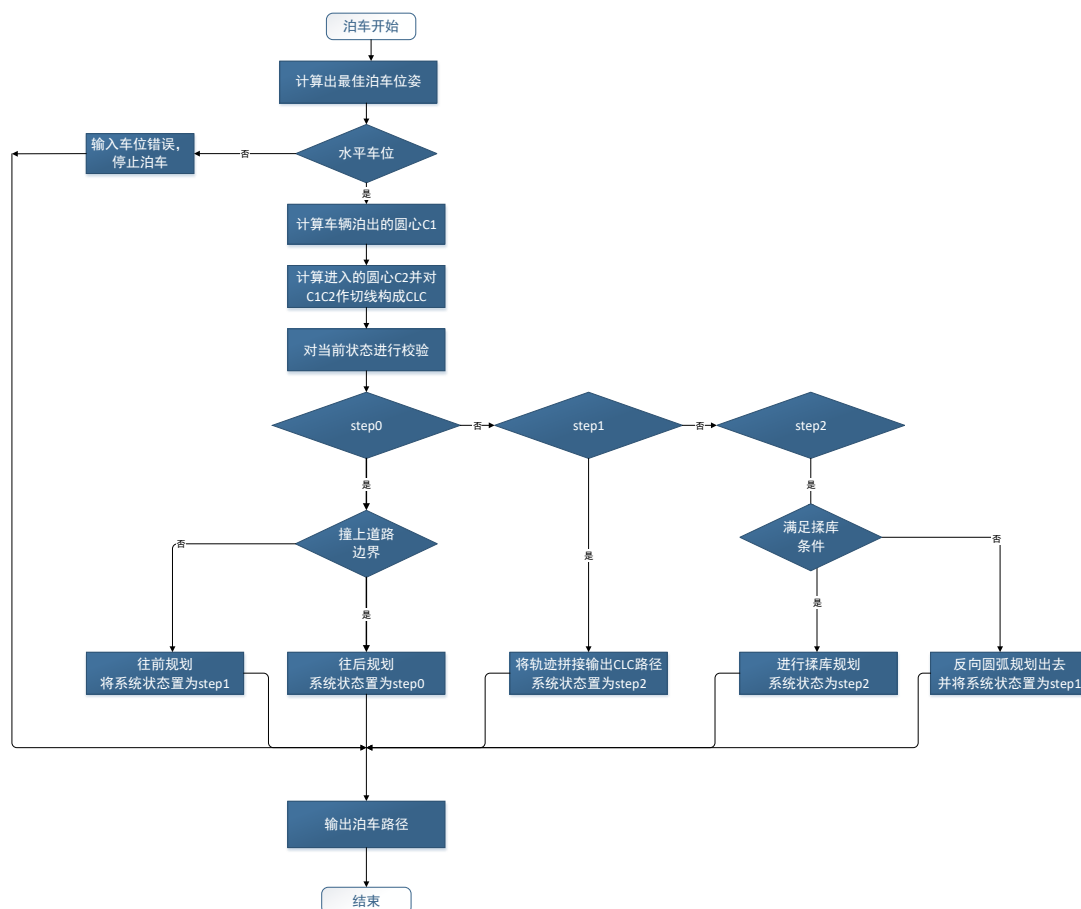


图 3.7 水平泊车规划流程图

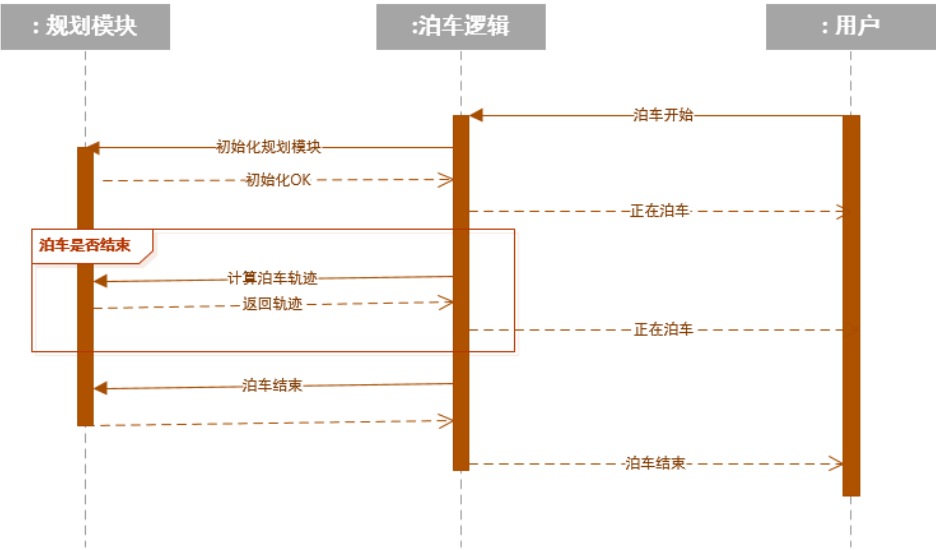


图 3.8 泊车规划时序图

3.4 实验仿真与分析

为了证明所提出的算法的有效性、可行性，在这一部分，将结合第二章介绍的车辆运动模型，参照实验车参数使用 Visual Studio 和 Opencv 视觉库作为软件在环测试平台算法部分使用 C++实现，针对小车位进行垂直和水平泊车仿真分析。

Visual Studio 是一个基本完整的开发工具集。相比于其他编辑器，它具有上手简单、支持多种语言、功能强大、方便调试等优点，在企业中使用的比较多。VS 发展了很多年，有很多版本，到现在已经更新到 VS2019 了，本次实验使用的是 VS 2013。Opencv 是一个开源跨平台计算机视觉应用开发框架，主要由 C 和 C++构成，本实验主要用 Opencv 构建泊车仿真环境和界面显示。

首先在泊车 GUI 中进行车辆模型搭建，具体参数如下。

表 3.1 车辆仿真参数

车辆长度	4760	mm
车辆宽度	1931	mm
前轮距车头距离	952	mm
后轮距车尾距离	858	mm
车辆轴距	2950	mm
最大方向盘转角左	160	rad
最大方向盘转角右	160	rad

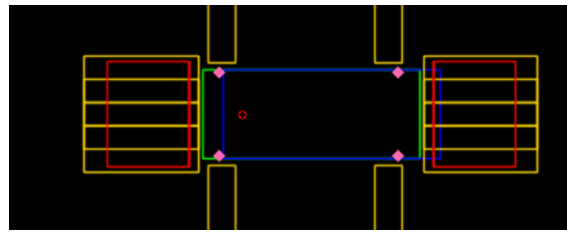
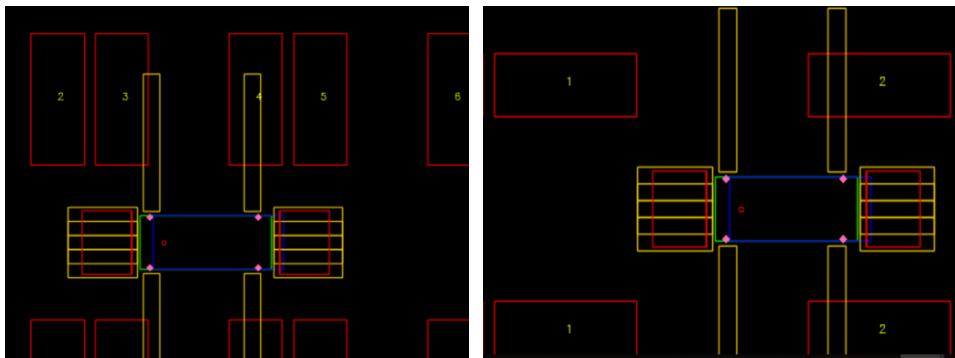


图 3.9 车辆模型示意图

根据所泊车位不同分别进行垂直泊车场景和水平泊车场景车位构建，在泊车场景中由序号标出的红色矩形框为已经停好的车辆，而红色矩形框之间的空白区域为空车位，可以通过按键操作车辆模型来进行车位识别以及车位选定工作，选好之后，由路径规划模块根据车辆位姿和目标车辆位姿实时给出泊车轨迹。

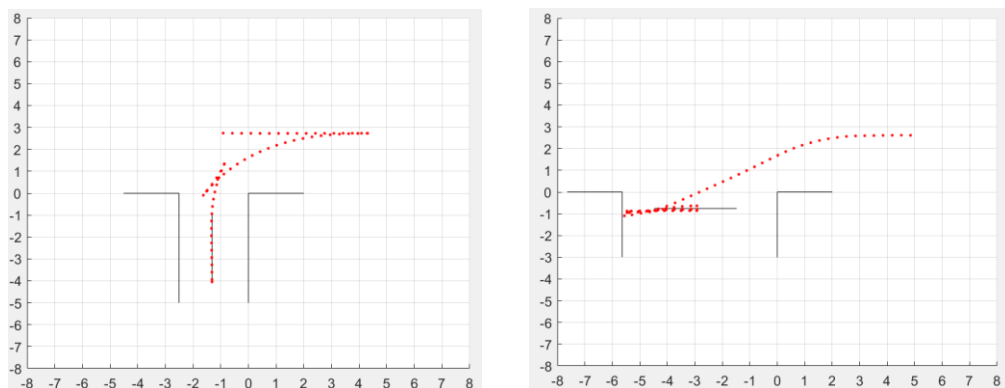


(a) 垂直泊车场景

(b) 水平泊车场景

图 3.10 泊车场景示意图

论文工作仿真主要针对小车位进行仿真，因此垂直车位按照车宽+0.6 米，水平车位按照车长+0.8 米进行规划。引入目标曲率变化率、目标航向角变化率、以及规划次数对本算法进行评估。并将最终数据用 MATLAB 显示出来。仿真时首先按照泊车逻辑先进行泊车巡航，由超声检测车位模块对周边换进进行扫描并给出目标库位，检测到车位后进行车位选择，开始规划泊车。



垂直泊车示例

水平泊车示例

图 3.11 仿真泊车规划路径图

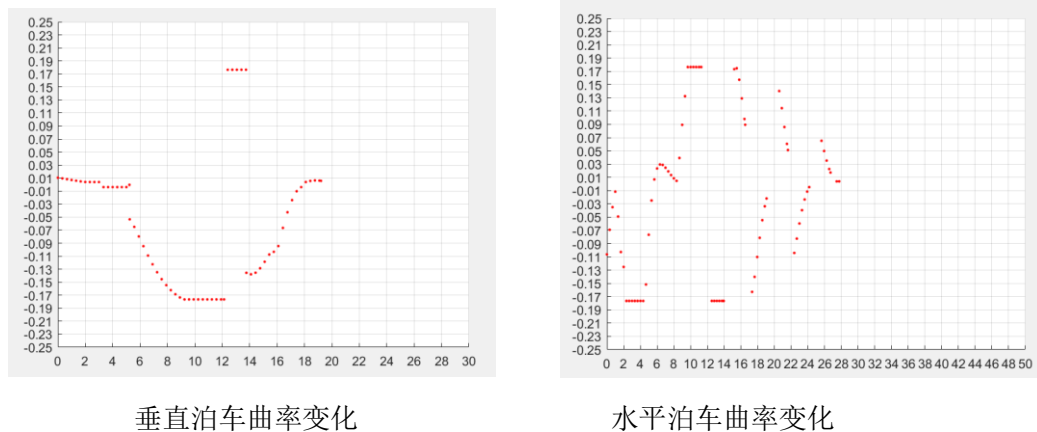


图 3.12 仿真泊车曲率变化图

通过使用 MATLAB 将整个泊车过程路径进行可视化显示，路径由距离相差 0.3 米的点集合表示，由图 3.11 垂直泊车由四条路径组成，一次前进到泊车初始点位，然后进行泊车规划，在计算出一次无法泊入的情况下，然后停车换 D 挡往前走适当距离将车辆拉直，最后换 R 挡进行最终泊入；由图 3.11 水平泊车由图可以看出首先进行 CLC 泊车入库，因为库位比较小，一次泊车无法成功，最终在车位里进行多次揉库将车最终停好。可以看出不论是垂直泊车还是水平泊车，规划出的路径能够很好的将车辆从初始位置规划到目标车位，并满足绕过库位右上角的避障要求。

由图 3.12 垂直泊车目标路径曲率变化图可知，对应着垂直泊车的三条路径，在每段路径中曲率变化比较平滑，没出现突变情况，其曲率的最大值为 0.176478，曲率的最小值为-0.176478，一段路径中曲率由 0 到-0.176478 变化过程中，车辆行驶了 4.02 米，也就说四米路径中车辆进行了一次方向盘由零位向右打满。根据汽车生产商对方向盘的动态转向性能指标要求：车辆移动时转向系统支持最大速度是 500 度每秒。0.176478 曲率对应本次仿真车辆方向盘转角为 480 度，故可以得到假设按照 EPS 支持的最大速度进行转向只需要 1 秒时间，路程为 4.02 米，算出来支持的最大速度为 4m/s，泊车过程中泊车速度是很低的，一般不超过 3km/h，也就是 0.83m/s，因此计算出来的路径符合车辆转向系统的要求。

由图 3.12 水平泊车目标路径曲率变化图可知，由 7 条泊车路径组成，其曲率的最大值为 0.176478，曲率的最小值为-0.176478，每条路径中曲率变化比较平

滑，没出现突变情况，曲率由 0 到-0.176478 变化过程中，车辆行驶了 1.33 米按照 1 秒的过程计算支持的最大速度为 1.33m/s，虽然比垂直路径中支持的最大速度小，但还是能够满足车辆转向系统的要求。

综合水平和垂直泊车情况，可以看出泊车路径规划模块能比较好的完成任务，并且能绕过障碍物，因为泊车最终成果判定是路径跟随模块判定，故只要车辆未处于最终理想的停车位姿，本模块会一直规划，直到超出泊车次数后停止。

3.5 本章小结

本章主要针对水平泊车和垂直泊车提出了一种基于预瞄和几何约束的路径规划方法。根据垂直泊车工况要求，采用圆弧-直线的方法，根据水平工况要求，采用圆弧-直线-圆弧，在安全性上，根据避障设计的思路，假设车位旁边都是障碍物，得到车辆的可行使区域。并结合了与速度有关的预瞄算法，对平行泊车和水平泊车进行相应的分段式规划，并最终生成了符合安全要求且曲率连续的可行泊车路径。最后通过仿真平台对垂直规划和水平规划算法进行了仿真与分析，仿真结果论证了此种方法的可行性。

第四章 自动泊车系统中的路径跟随

本章主要介绍泊车系统中路径跟随模块的问题算法设计以及仿真分析。

4.1 背景以及问题

控制理论作为一门学科，真正应用开始于 18 世纪工业革命时期，控制理论将反馈作为优化的手段，其基本原因是要在不确定性存在的条件下达到性能目标。按照理论不同可分为经典控制理论、现代控制理论以及智能控制理论。经典控制理论是以传递函数为基础的一种控制理论，常用于单输入单输出、线性定常系统，典型控制理论主要有 PID 控制、反馈控制等。现代控制将状态空间概念引入到控制过程中，用状态空间描述了系统内部特性的可控、可观。从不同角度理解，现代控制理论主要包含：最优控制、预测控制、鲁棒控制等；而智能控制作为一种非传统控制方法，是为了更好的模仿人类智能，提高系统的自学习、自适应等智能水平，主要有模糊控制、神经网络控制等，其具有较强的学习能力和鲁棒能力。

在智能车辆的运动控制中主要分为横向控制和纵向控制，横向控制指通过控制前轮转角使车辆能够沿期望路径行驶，纵行控制是指调整车速使车辆保持足够的空间，并在紧急情况下能尽快制动。自动泊车系统中，路径跟随模块关系到整个系统的安全以及舒适性，是泊车系统的核心技术之一，它需要根据路径规划模块给出的合理路径以及当前车体的位姿、车速等信息并分别向油门、制动以及转向等执行系统发出控制指令，使车辆跟随上路径。

4.2 路径跟随算法设计

论文采用模糊控制方法，在此基础上构建将预瞄残差带入到前馈+PID 控制器模型，并将横向控制与纵向控制耦合在一起，论文工作的控制系统架构如图 4.1 所示。

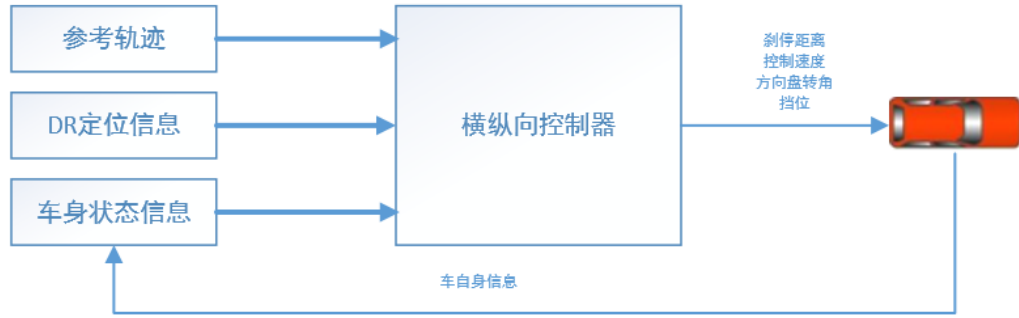


图 4.1 路径跟随模块设计图

4.2.1 横向预瞄 PID 控制器设计

PID 是最常见的控制器，广泛应用于机械和电气系统。它的核心，在于反馈上。P 表示比例环节，用来瞬时大幅度调控，可快速调节偏差，提高系统响应灵敏度，但会存在静态误差，所谓静差，就是系统稳定后输出值和期望值之间的差值，I 表示积分环节，主要是用来消除静差，积分环节可以理解为偏差累计的过程，把累计的误差与原有系统相加用以抵消所存在的静差，D 表示微分，可以反映偏差信号的变化趋势，能够加快系统响应速度，并减弱超调趋势。PID 可以适用于有模型的系统，也可以适用于无模型的系统。

PID 控制器有两种表达式：

一种是连续控制算法表达式， u_t 为控制量， K_p 为比例增益， T_i 为积分时间常数， T_D 为微分时间常数， $e(t)$ 为被控量与给定值的偏差：

$$u_t = K_p(e_t + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (4-1)$$

一种是离散化之后的算法表达式，利于计算机实现， u_t 为控制量， K_p 为比例增益， K_i 为积分参数， K_d 为微分参数， $e(t)$ 为被控量与给定值的偏差， $e(t-1)$ 上一时刻被控量与给定值的偏差：

$$u_t = K_p * e_t + K_i * \sum e(t) + K_d * (e(t) - e(t-1)) \quad (4-2)$$

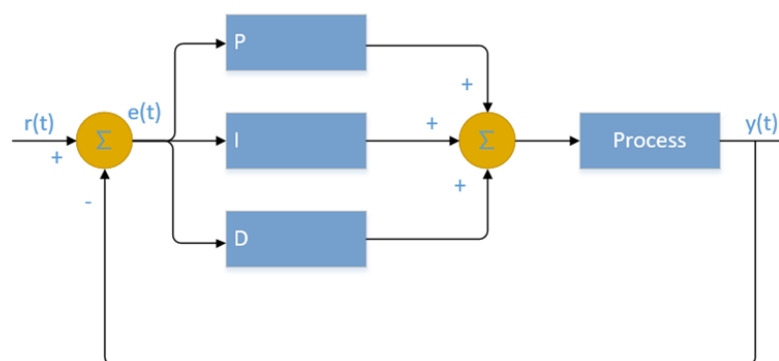


图 4.2 PID 模型示意图

上图中 $y(t) \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ 为满足车辆动态姿态限制的方向盘转角, $e(t)$ 代表当前的跟踪误差, 而这个跟踪的变量误差可以是轨迹的纵向或者横向误差, 曲率误差或者是若干车辆姿态状态变量的综合误差。对这些状态量的控制可以构成一个典型的 PID 反馈。

PID 算法缺点很明显, 单纯使用 PID 很难有效的应用于多变量系统和时变系统, 基本上没有考虑道路特性, 只能应用于低速, 小半径弯道, 且容易出现振荡, 特别是在弯道后期, 方向盘容易出现抖动。高速或大半径弯道则会出现偏离度很大, 急拐, 舒适性极差。

因此引入道路曲率前馈和预瞄跟随控制。预瞄跟随理论是一种人车路的闭环理论, 由我国郭孔辉院士在 1992 年提出, 通常驾驶员在开车时, 会在前方道路上选定一个要达到的点, 这个点称之为预瞄点, 车与预瞄点之间的距离为预瞄距离。驾驶员通过对车辆的操控到达预瞄点, 再选定新的预瞄点, 这就是人类驾驶员的驾驶行为。预瞄跟随法考虑到了道路的几何特性, 这种几何特性的输入一般称之为前馈。

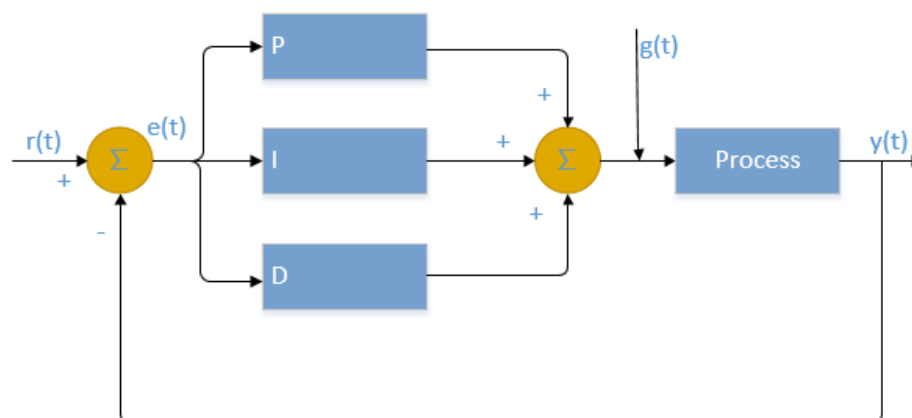


图 4.3 引入前馈 PID 模型示意图

上图在图 PID 控制的基础上增加了 $g(t)$ 作为前馈控制，在本模型中起主要作用，PID 计算出的结果作为反馈来修正前馈值，这样处理的优点是可以有效的消除稳态误差并使系统趋于稳定状态。

本文采用离散的 PID 算法，由上一章路径规划模块的输出，可以得到一组目标路径点，横向控制中控制量为车辆的前轮转角，接下来对此进行数字建模：

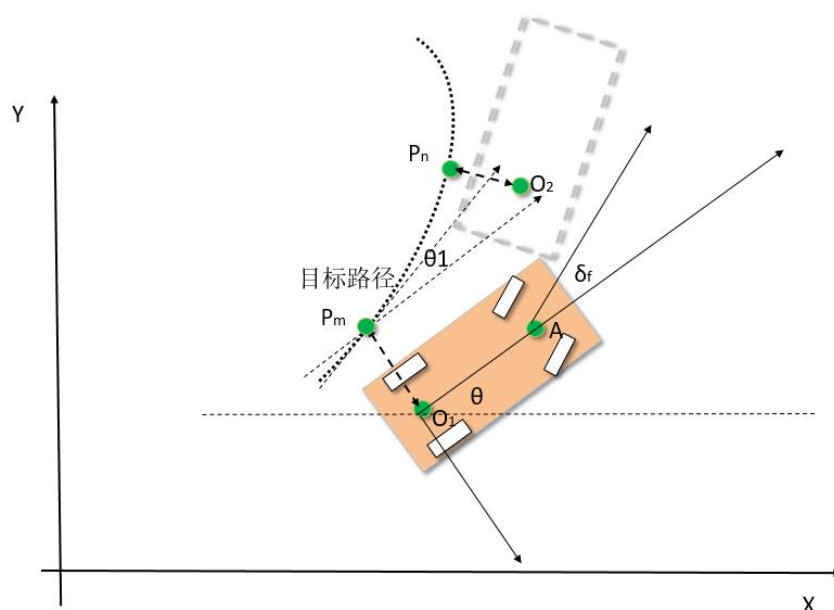


图 4.4 路径跟随模型示意图

如图 4.4 所示，目标路径由一系列包含对应曲率以及带有方向的矢量点构成，此时车辆正以一定速度 v 跟随这条路径，车辆当前航向角为 θ ，对车辆进行偏离量估计：

步骤一：确定当前要跟踪的点 P_m ，并将转换到车辆坐标系下，求得车辆坐标系下的横向误差 d_1 ，转换关系如下：

$$\begin{pmatrix} P'_{mx} \\ P'_{my} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_{mx} - O_{1x} \\ P_{my} - O_{1y} \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

$$d_1 = P'_{1y} \quad (4-4)$$

跟踪点需满足如下条件，否则迭代计算下一个点，

$$P'_{mx} > 0 \quad (4-5)$$

步骤二：利用线性插值的方法求得当前车辆点 O_1 在路径点 P_m 和 P_{m+1} 处的插值点 O'_1 点，并将此点在车辆坐标系下的 y 轴赋予横向距离误差 d_1

$$O'_{1x} = O_{1x} \quad (4-6)$$

$$d_1 = O'_{1y} = \frac{P_{(m+1)x} - O'_{1x}}{P_{(m+1)x} - P_{mx}} P_{my} + \frac{O'_{1x} - P_{mx}}{P_{(m+1)x} - P_{mx}} P_{(m+1)y} \quad (4-7)$$

步骤三：将车辆航向角 θ 与目标路径目标角 θ_1 作差，车辆航向角由 DR 模块输入，目标路径角由插值法公式（4-7）获得，求得向量夹角 $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \theta - \theta_1 \quad (4-8)$$

步骤四：根据第二章得车辆运动模型可以求车辆在 t 时刻的位姿，然后根据公式（4-3）在目标路径上找到对应点，并根据公式（4-4）求得此刻距离路径的横向误差 d_2 。

步骤五：根据误差函数求得求得此刻状态误差量，然后用此刻误差与上一时刻误差带入 PID 公式得到前馈补偿量，最终与目标路径曲率所得到的前轮角相加得到输出转角 δ_t

$$e_t = K_3(K_1 * \theta + K_2 * d_1) + K_4 * d_2 \quad (4-9)$$

$$\delta_{f_t} = K_p * e_t + K_i * \sum e(t) + K_d * (e(t) - e(t-1)) \quad (4-10)$$

$$\delta_t = \delta_{f_t} + \arctan\left(\frac{L}{R}\right) \quad (4-11)$$

4.2.2 纵向速度模糊控制器设计

模糊控制一般是基于工程师或专家经验基础上，对工程师的实践经验加以总结，并使用语言进行描述，得到一种定性的、不精确的控制规则，然后再利用模

糊数学将这些模糊规则进行量化从而得到控制命令。对于一些难以建立精确数学模型的问题，模糊控制可以比较有效的解决。

相较于传统的控制方法，模糊控制具有一些明显的特点：

- (1) 不需要建立精确的数学模型，重要的是能够了解相关专家或工程人员的知识与经验；
- (2) 模糊控制采用人类思维的模糊量，比如“大”、“小”、“多”“少”等，应用价值比较广泛；
- (3) 鲁棒和适应性好；
- (4) 构造容易，易于软件实现。

本文将模糊控制应用到路径跟随中，输入为车辆与路径距离偏差和航向角偏差按照一定的模糊规则得到车辆的控制速度。

模糊控制器设计的步骤主要如下：

步骤一：模糊化接口，确定观测量和控制量。对于输入变量首先设计一个模糊集合，如“N”为负，“Z”为零，“P”为正，“B”为大，“M”为中，“S”为小，首先使用 e_r 表示当前车辆与目标路径的距离，其有三个模糊子集为{负大，零，正大}，记为{NB, ZO, PB}，用 e_θ 表示跟随得到偏航误差，有 5 个模糊子集{负大，负小，零，正小，正大}，记为{NB, NS, ZO, PS, PB}，对应的速度控制 u 为 5 个等级（最小，较小，适中，较大，最大），记为（VS, S, M, L, VL）。三角型隶属函数具有敏感度高等特点，能更加适合自动泊车系统，故论文工作选取三角函数对观测量进行模糊化，同时使用高斯隶属函数进行模糊。

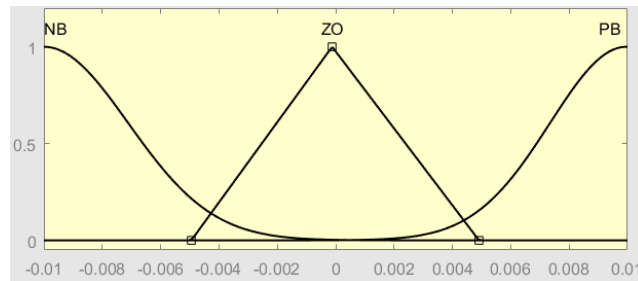


图 4.5 后轴中心误差隶属度函数 (m)

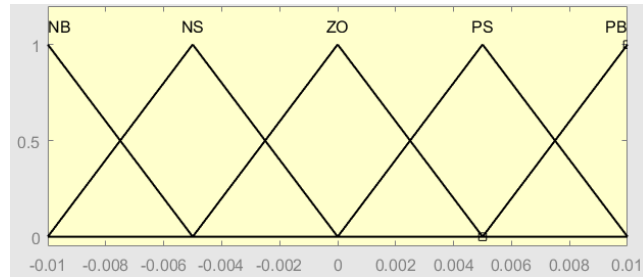


图 4.6 航向角误差隶属度函数

步骤二：建立规则库，模糊控制的核心是控制规则，规则的合理好坏直接影响控制器的性能，设计标准为：距离偏差越大，速度控制量越小；距离偏差越小，速度控制量越大；角度偏差越大，速度控制越小，角度偏差适中，速度控制量适中，角度偏差量越小，速度控制量越大；

- 1) 当误差 e_r 为 PB, e_θ 为 NB 或者 e_r 为 NB, e_θ 为 PB, 此时表明车辆与路径距离较远且航向偏差较大, 此时为了让车辆更好的跟随路径, 应该定义一小的跟随速度。
- 2) 当误差 e_r 为 ZO, e_θ 为 NB 和 PB 或者 e_r 为 PB, e_θ 为 NS 或者 e_r 为 NB, e_θ 为 PS 时, 此种表明车辆与路径距离相差不远, 但车辆航向角与路径航向角偏差比较大; 车辆与路径距离比较远, 但车辆航向角与路径反向偏差较小, 此时应定义一较小控制速度。
- 3) 当误差 e_r 为 ZO, e_θ 为 NS 和 PS 或者 e_r 为 PB, e_θ 为 ZO 和 PB 或者 e_r 为 NB, e_θ 为 NB 和 ZO 时, 此种情况表明车辆与路径距离相差不远, 车辆航向角与路径航向角偏差较小; 车辆与路径正向偏差距离较大, 车辆航向角与路径反向偏差较大或与路径平行时, 此时可定义中等控制速度。
- 4) 当误差 e_r 为 PB, e_θ 为 PS 或者 e_r 为 NB, e_θ 为 NS 时, 此种情况表明车辆与路径正向偏差较大, 车辆航向角与路径反向偏差较小; 车辆与路径反向偏差较大, 车辆航向角与路径正向偏差较小, 此时可定义较大控制速度
- 5) 当误差 e_r 为 ZO, e_θ 为 ZO 时, 此种情况表明车辆与路径距离偏差很小, 车辆航向角与路径偏差很小, 车辆很好的跟随在路径上, 此时

可定义大控制速度。

表 4.1 模糊规则表

<div>e_r \ e_θ</div>	NB	ZO	PB
NB	M	S	VS
NS	L	M	S
ZO	M	VL	M
PS	S	M	L
PB	VS	S	M

步骤三：解模糊接口：通过前面获取的结果还是一个模糊量，并不能作为控制量直接传递给车辆，故需要通过解模糊获得清晰的控制量进行输出。一般解模糊的方法可以有重心解模糊化法、面积重心法、最大隶属度平均值解模糊化法，论文工作中使用面积重心法进行解模糊。

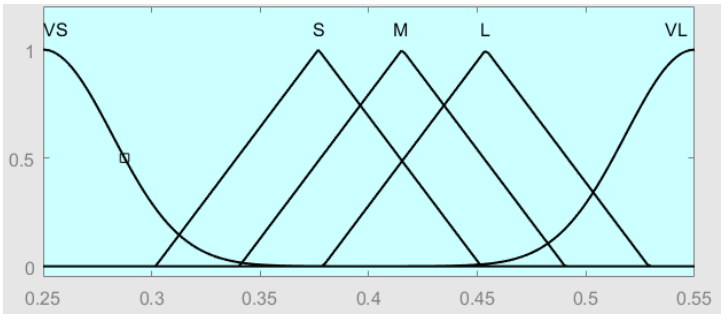


图 4.7 速度控制隶属函数

4. 2. 3 算法运行过程

算法计算过程
论文工作中提出位姿更新算法如下：

输入：

整车状态信息；

路径信息

车身定位信息

控制参数

输出：当前车辆的控制角度、速度、距离等数据。

```
1  Function calCtrlData(canData , carData ,path)
2  for 集合 path 上的每一个节点 path(i)
```

```

3      path(i) = convert(path(i))
4  end for
5  If Pnum < path.num then
6      Pnum ← calPathPoint(carData, path)
7      Pdata ← calDatafromPath(carData, path, Pnum)
8      CtrlData ← calCtrl(carData, path, canData, Pdata)
9  end if
10 return CtrlData

```

在路径跟随算法运行过程中，输入数据为车辆状态信息 canData，主要包括方向盘转角、挡位、以及车速等信息；车辆定位信息 carData，主要包括包含车辆本身的定位位姿；path 主要包含目标路径。算法首先对路径进行遍历，寻找出当前车辆所跟随的目标节点，当找寻到目标节点后，通过 calDatafromPath 对目标节点进行数据预处理得到所需求的数据信息 Pdata，然后将 carData, path, canData, Pdata 等传入到横纵向控制器中得到车量的控制速度、加速度、刹停距离、控制挡位等控制量，算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。

4.3 实验仿真与分析

4.3.1 仿真平台搭建

论文工作采用 Visual Studio 和 Opencv 视觉库作为软件在环测试平台，因为路径规划和路径跟随是自动泊车系统中的一个子模块，所以要对本模块进行仿真实验，可以沿用 3.4 节仿真环境并进行适当调整。

按照泊车场景的不同，分别对垂直和水平进行仿真测试，对于路径跟随模块，实验主要分为：

- 1、垂直泊车实验，根据车位宽度的大小，分别设置仿真目标车位由车宽+0.6 米，车宽+0.8，车宽+1 米的泊车实验；
- 2、水平泊车实验，根据车位的长度大小，分别设置车长+0.8 米，车长+1 米，车长+1.2 米。

泊车后的效果及分析将用 MATLAB 进行定性定量分析。

4.3.2 仿真结果与分析

为了更好的对实验进行分析，我们引入两个指标：路径跟随距离偏差均方根植，路径跟随角度偏差均方根植。

角度偏差均方根值：描述整个泊车过程中路径跟随模块在跟随路径的过程中车辆航向角跟参考航向角的偏差，单位为弧度；

距离偏差均方根值：描述整个泊车过程中路径跟随模块在跟随路径的过程中车辆距离参考路线的偏差，单位为米。

考虑到实际参考路径不是连续的曲线，而是离散的点，将参考路径视为分段的折线，路径参考点就是与折线的交点，参考图 4.8 所示：

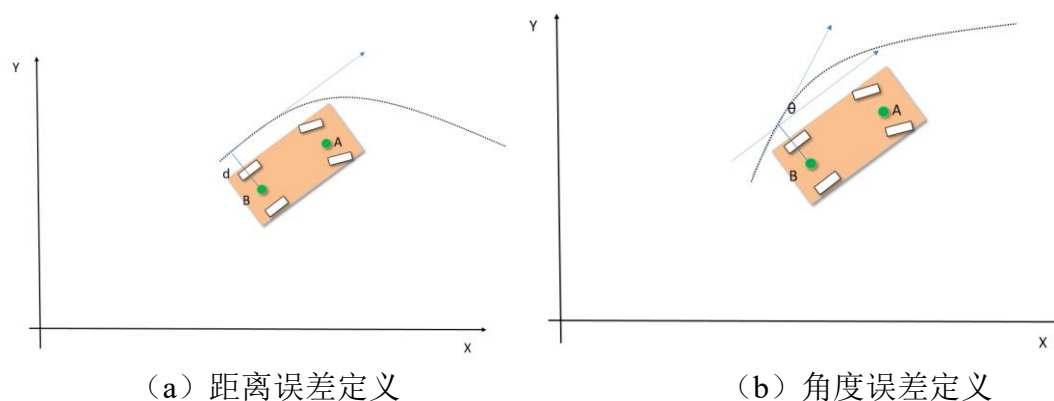


图 4.8 路径跟随偏差评估量定义

根据整个泊车过程，进行定性分析，针对整个泊车场景，我们将直观观察车辆与目标路径相对误差。

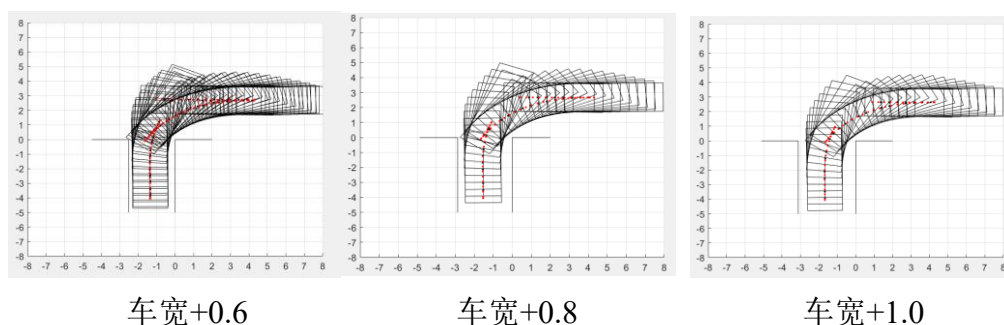


图 4.9 垂直泊车效果图

水平泊车：

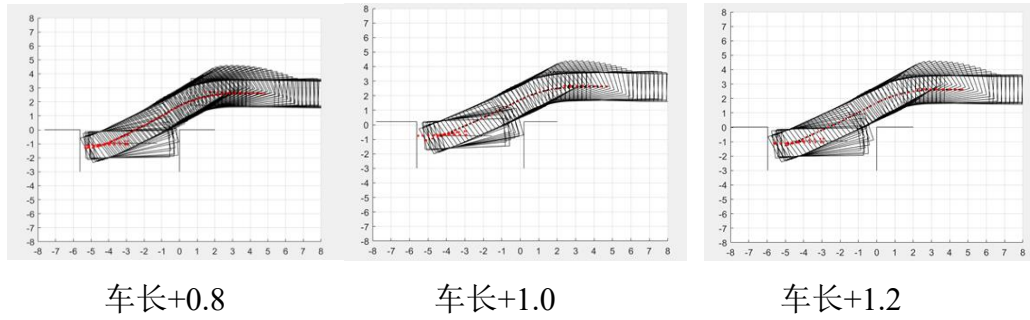


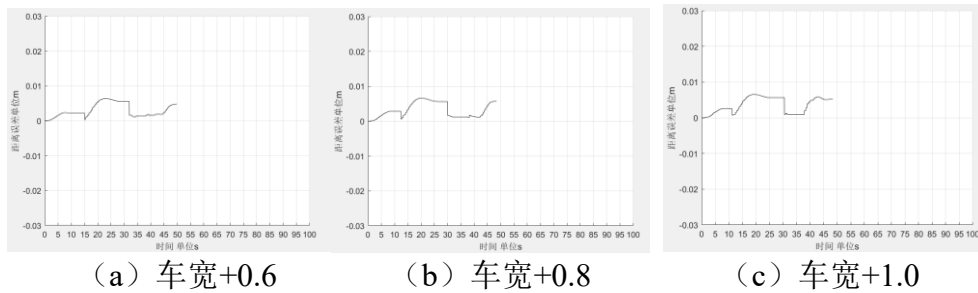
图 4.10 水平泊车效果图

如图 4.10 所示：红色序列点是规划路径，黑色矩形框是模拟车辆行驶过程中留下的印记，车位用黑线描出。可以看出，不管是垂直车位还是水平车位，路径跟随模块都能很好的完成任务，直观看上去，路径与车辆本身也能比较好的拟合。

定量分析：

根据泊车场景，我们将对整个泊车过程进行量化，按照 40ms 进行一次采样分析，进行一次距离和角度误差均方根计算。由垂直泊车仿真结果可以看出，对于车位宽度等于车宽+0.6、车宽+0.8、车宽+1.0 米，整个过程距离误差均方根值均在 1 厘米误差范围之内，而角度偏差均方误差均在 0.01 弧度以内。可以看出能很好的跟随上目标路径。

距离误差均方根值随时间变化



角度误差均方随时间变化

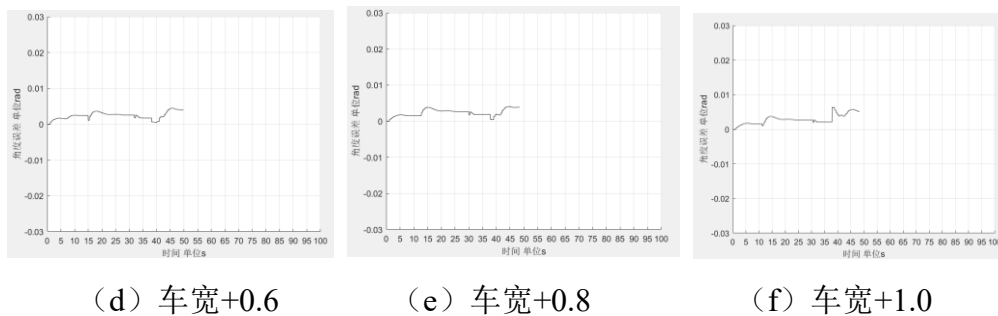
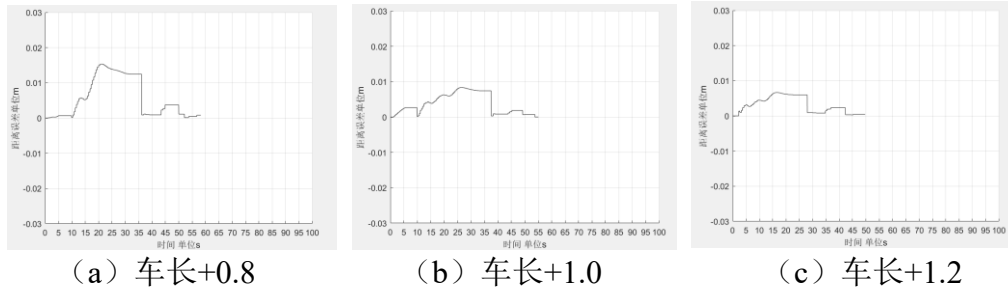


图 4.12 垂直泊车路径跟随误差示意图

由水平泊车仿真结果可以看出，对于车位长度等于车长+0.8、车长+1.0、车

长+1.2 米,整个过程距离误差均方根值均在 2 厘米误差范围之内,其中车长+1.0、车长+1.2 米距离误差在 1 厘米误差范围内,而角度偏差均方误差均在 0.02 弧度以内。可以看出不管是垂直泊车还是水平泊车,路径跟随模块的输出还是比较稳定的。

距离误差均方根值随时间变化



角度误差均方根值随时间变化

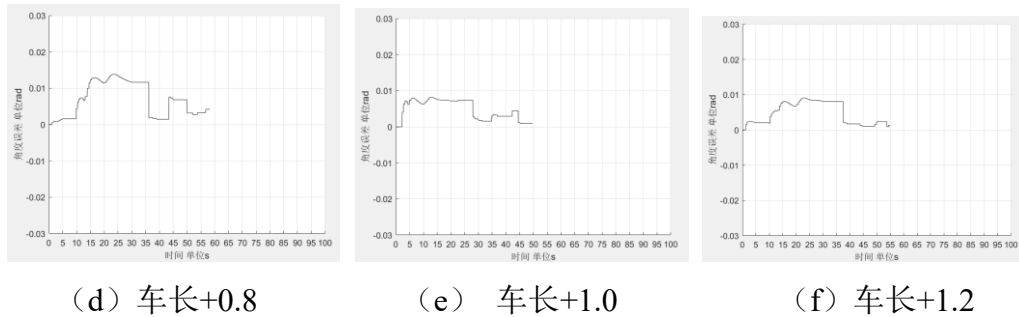


图 4.13 水平泊车路径跟随误差示意图

4.4 本章小结

本章主要针对自动泊车系统中车辆横纵向控制进行研究,由于车辆运动过程是各个部件相互耦合的非线性系统,其横纵向运动相互影响。故论文工作基于二自由度车辆运动学模型,根据预瞄理论并结合模糊控制设计了一种基于预瞄+前馈 PID 的横向控制器和基于模糊控制的纵向控制器,将横向控制耦合到纵向控制中,利用 VS 搭建仿真平台进行垂直和水平泊车,并提出评价指标进行分析,仿真结果表明,在自动泊车系统中具有很高的路径跟随精度和稳定性。

第五章 自动泊车系统功能测试

针对于自动泊车系统中遇到的问题，前面的章节提出一些新的理论和方法去解决它，并分别进行了理论分析和仿真实验，但车辆作为非常复杂的非线性系统，仿真得到的结果只能反映真实的部分情况，将进行进一步的实车验证算法的可行性，试验车由某车厂量产车型，在其基础上进行改装升级，因此，本章主要由泊车系统搭建和泊车功能验证两部分组成。

5.1 自动泊车系统功能组成

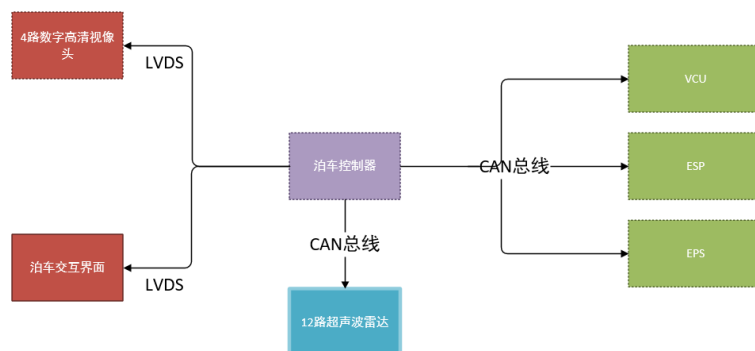


图 5.1 自动泊车系统组成图

如上图 5.1 所示，自动泊车系统主要由环境感知模块、执行机构模块、泊车控制器、实时交互模块组成。并通过 LVDS、CAN 总线等进行实时交互通信。

泊车流程图如下图 5.2 所示：首先系统启动，并自检是否满足各执行器工作条件，低速状态下开始巡航扫描车位，若检测到可泊车位，通过高清环视系统将车位的信息描画出来，然后驾驶员停车，选择可泊车位，并启动泊车，之后自动泊车开始，此时驾驶员无需任何操作，APA 系统开始掌控车辆，泊车系统会进行轨迹规划，和运动控制，在此过程中，泊车控制器会不断自检是否有异常介入，最后车辆自动行驶到目标车位后语音提示泊车结束，归还车辆控制权，关闭系统。在整个泊车过程驾驶员可随时接管车辆。

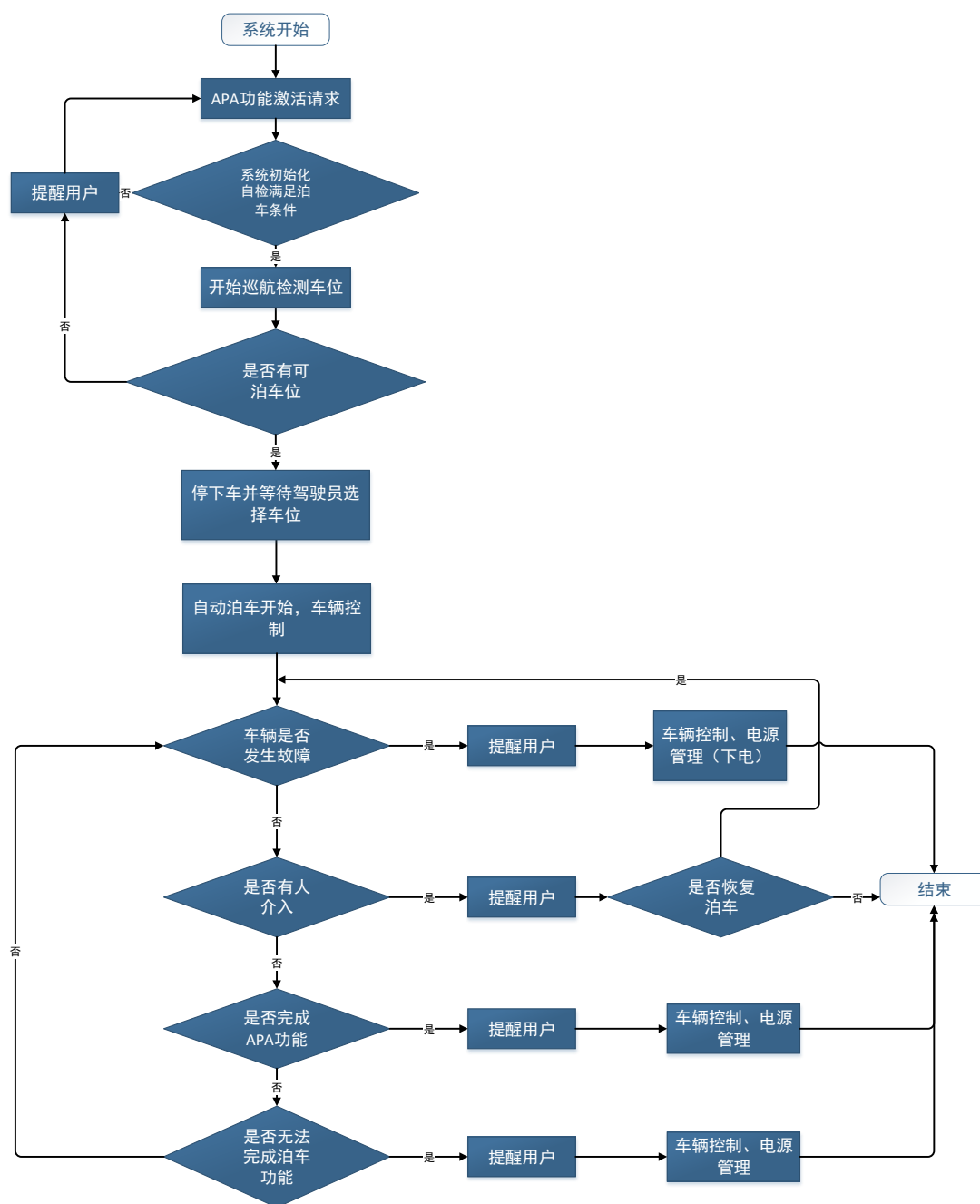


图 5.2 泊车流程图

5.1.1 环境感知模块

环境感知模块：由前后左右 4 个高清数字鱼眼相机，12 个超声波探头组成。

高清数字鱼眼相机主要进行全景环视拼接，将拼接成的鸟瞰图传输到显示模块，给驾驶员辅助监视和基于车位线的车位检测作用。相比于传统高清相机，鱼眼具有更大的摄影视角，但畸变严重，需要进行特殊标定。如下是四路相机成像以及全景拼接后的效果。

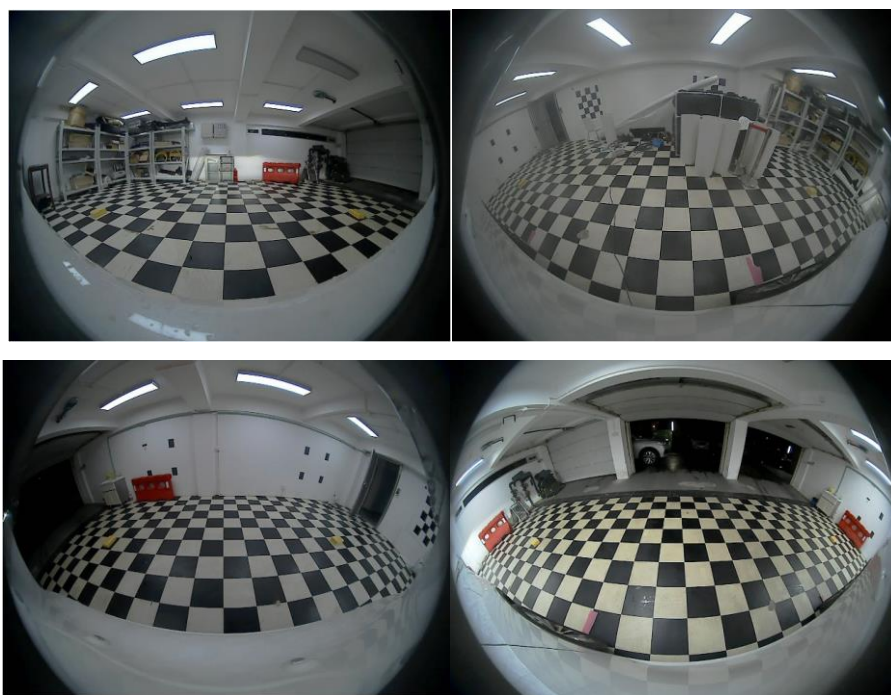


图 5.3 鱼眼相机成像示意图

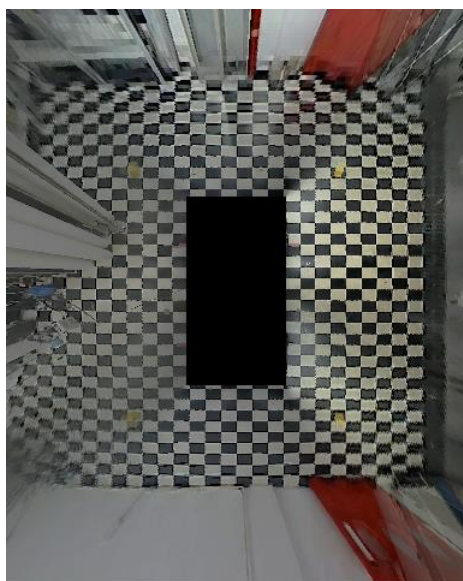


图 5.4 鱼眼畸变矫正拼接效果图

超声波雷达由 4 路 APA 雷达和 8 路 UPA 组成，APA 一般安装在车辆侧面，探测距离一般在 30~500cm 之间，主要进行检测左右两侧障碍物以及车位识别，而 UPA 一般安装在汽车前后保险杠上，探测距离在 15~250cm 之间，用于测量车辆前后方障碍物，在泊车系统中 APA 雷达用于车位识别，APA 和 UPA 共同用于障碍物检测。

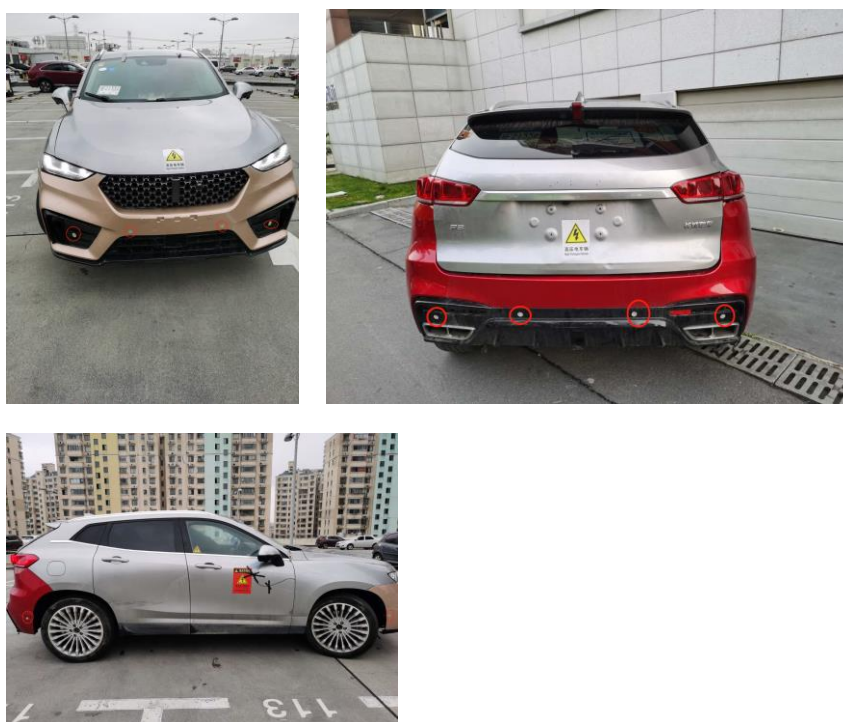


图 5.5 超声波实车安装图

5.1.2 泊车控制器

泊车控制器主要作用有通过超声波处理电路处理超声波雷达探测到的前、后方的障碍物的信号，并由超声识别车位模块进行车位检测，以及 AEB 模块进行障碍物刹停处理；通过摄像头输入解码芯片接入 4 个摄像头的图像，拼接成鸟瞰图，并传输到显示界面进行显示。AVM 有 2D 和 3D 两种模式，和多种辅助驾驶的视角，可以根据用户设置或者使用场景进行智能切换。融合 APA 侧面超声波传感器和车身侧面摄像头自动扫描其车辆周边障碍物、车位线和环境等信息，通过数字信号处理及停车位智能检测算法获取当前停车位的长度和深度等信息，并根据车辆的当前行车信息及其周边泊车环境的情况，调用路径规划模块计算最佳的泊车轨迹，通过显示器或语音等人性化接口给驾驶员提供泊车信息，最后由路径跟随模块实时计算控制速度、方向盘角度，最后通过 CAN 总线传到整车上。

融合泊车控制器如图 5.6 所示：



图 5.6 泊车控制器实物图

5.1.3 执行机构模块

执行机构主要包含横向转向机构 EPS 和纵向控制 ESP 以及挡位控制组成。EPS 也叫电动助力转向系统响应泊车系统对车辆的角度控制；ESP 也叫车身电子稳定系统，响应泊车纵向速度或者加速度控制以及挡位控制。

执行机构和泊车控制器之间通过 CAN 总线进行数据传输。CAN 也叫控制器局域网，是由博世研发最终成为国际通用标准，是一种基于消息广播模式的串行通信总线。泊车控制器通过 CAN 总线获取车辆的轮速、脉冲、方向盘转角、刹车信息、超声波信号等车身状态信息，并将通过实时计算出的控制量发送置各执行模块。

5.2 实验准备工作

5.2.1 实验设备与仪器

1.硬件部分：

- 1) 泊车控制器
- 2) 路由器、网线
- 3) 电源逆变器
- 4) 笔记本电脑
- 5) canlayzer 硬件

6) 读卡器、卷尺、obd 串口线 sd 卡等

2、软件部分

1) Cmake 编译软件

2) Linux 操作系统

3) canlayzer 上位机软件

4) VSCode 编辑软件

5.2.2 实验场地与测试方法

针对自动泊车进行了大量实际测试，以改善自动泊车系统的性能和鲁棒性，增强了自动泊车的安全性。参考《Intelligent Transport Systems — Assisted Parking Systems (APS) — Performance Requirements and Test Procedures》标准设计工况：

实验场地要求：

1) 试验场地应平整、干燥，无可见的潮湿处；无明显的凹坑、裂缝等不良情况，其水平平面度应小于 1%；

2) 试验过程中，其他无相关杂物应及时清除，避免对视觉和超声传感器车位识别时形成干扰；



图 5.7 实车泊车场景图

根据 i-VISTA 自动泊车辅助系统实验规程，在自动泊车系统测试与验证中，根据车位周围是否有障碍物可以分双边界车位、单边界车位、以及白色标线车位，

其中双边界车位泊车难度最大、白色标线泊车难度最小；根据车位的大小不同：垂直车位的宽度 $Y_0=Y+\Delta Y$ 。 ΔY 根据具体车位大小不同，大中小车位的 ΔY 分别为 1.2m、0.9m、0.6m。水平车位根据车位的长度把车位分为大车位，中车位，小车位。大车位的车位长 $X_0=X+\min\{0.25*X, 1.5m\}$ ；中车位的车位长 $X_0=1/2*(X+\max\{0.7m, 0.15*X\}+X+\min\{0.25*X, 1.5m\})$ ；小车位的车位长 $X_0=X+\max\{0.7m, 0.15*X\}$ 。

为了体现算法的精确性与有效性，故对于垂直测试车位的选取，选取难度最高、车位最小的车位进行实车测试，也就是垂直车位宽度为车体宽度+0.6 米，并且左右均有障碍物。实验完成后记录车辆前后轮轮胎外侧接地点与边界车辆外边缘的距离。

对于水平测试车位的选取，选取车长+0.7，车位两端均有障碍物的车位进行实车测试实验完成后记录车辆前后保距离车位的两端的距离，并记录泊车次数。

实验实施方法：

(1) 启动车辆，开启 APA 自动泊车功能，进行车位搜索，搜索车位过程中 APA 车辆与目标车位横向间距为 1.2m；

(2) 待系统提示搜索到车位，系统会发出停车提示，按照系统提示停车，并选择泊车车位进行泊车；

(3) APA 车辆发出结束指令或接管请求，或者与边界车辆或障碍物碰撞则结束试验；

(4) 试验完成后，记录 APS 车辆是否停在目标区域内，并将程序运行后保存下的数据进行数据在环回放分析。

5.3 实车测试与结果与分析

5.3.1 垂直泊车测试

在垂直泊车实验中，主要针对车位较小的双边界车位进行验证



图 5.8 垂直泊车实验

垂直泊车实验场地如图 5.8 所示：车位宽度为 2.53m，车位长度为 5.3m，车辆与车位垂直并且距离车位距离为 1.2m。

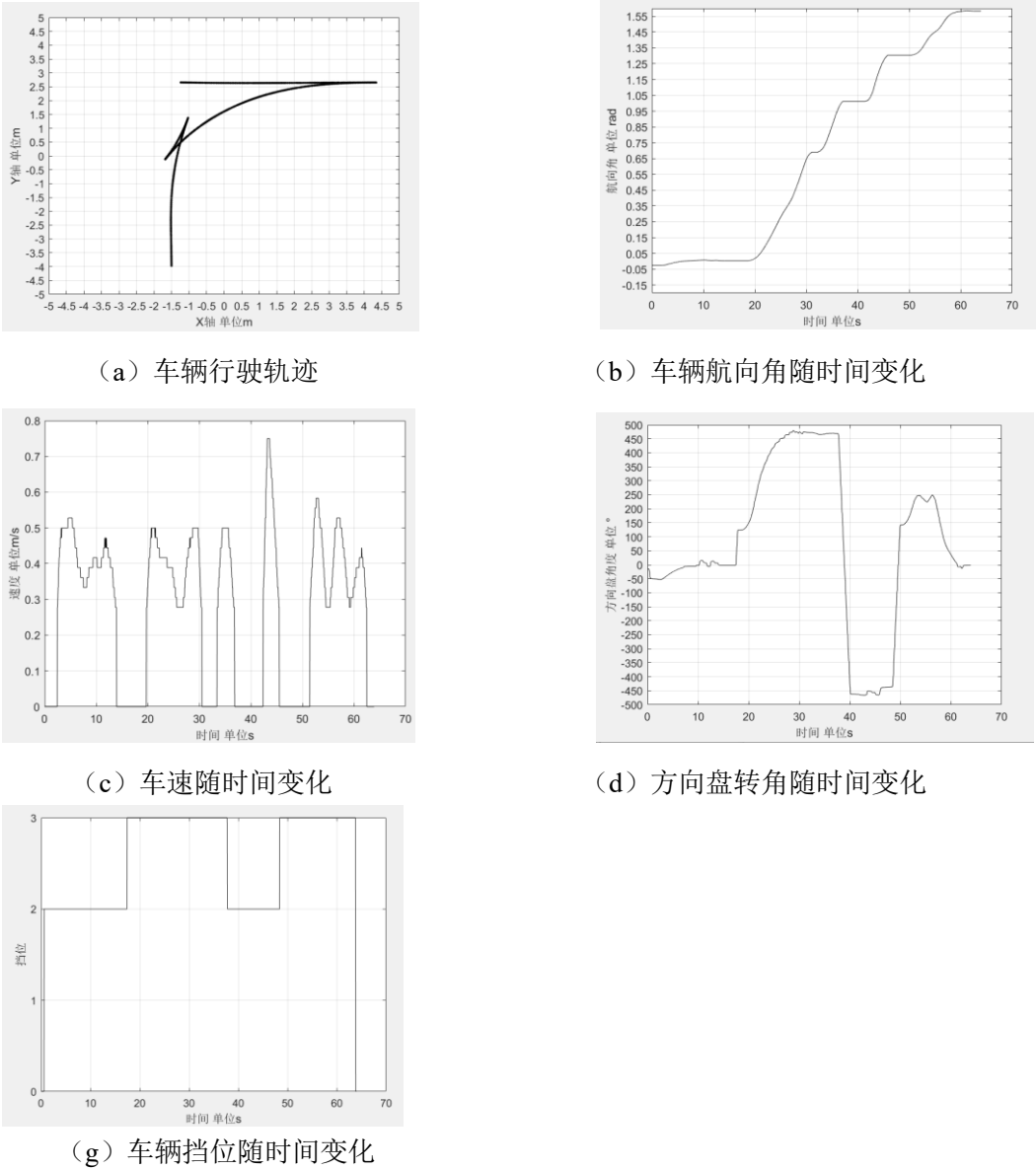


图 5.9 垂直泊车数据分析

垂直泊车过程如图 5.9 所示，车辆在检测到车位之后停车，进行选车位泊车，

然后泊车控制器与车辆启动握手操作, 往前一步将车辆拉直到合适位置。然后换挡进行入库步骤, 因为车位比较小, 故当车辆尾部行进到库位时进行反方向拉直, 最后换挡泊入车位。整个泊车过程换挡 3 次, 车辆轮胎距左边库位 32 厘米, 距右边 28 厘米。方向盘转角曲线由图 5.9 (d) 看出整个过程还是比较平滑。

5.3.2 水平泊车测试

在水平泊车实验中, 主要针对车位较小的双边界车位进行验证

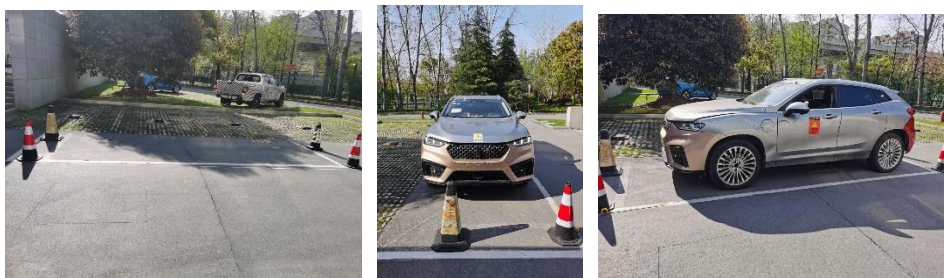
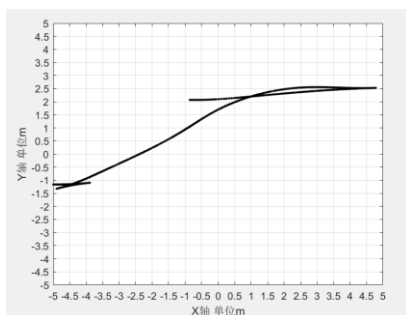
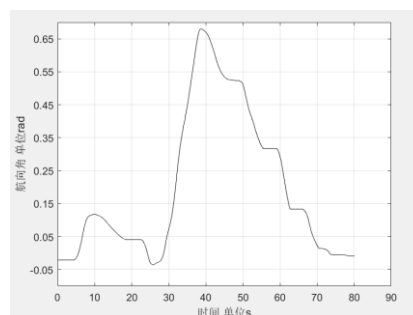


图 5.10 水平泊车实验

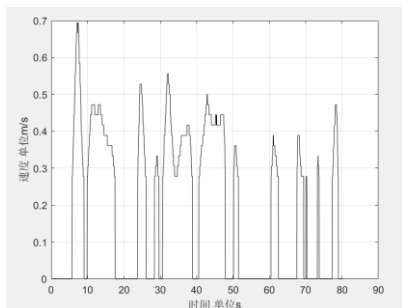
水平泊车实验场地如图 5.10 所示: 车位宽度为 2.4m, 车位长度为 5.46m, 车辆与车位平行并且距离车位距离为 1.1m。



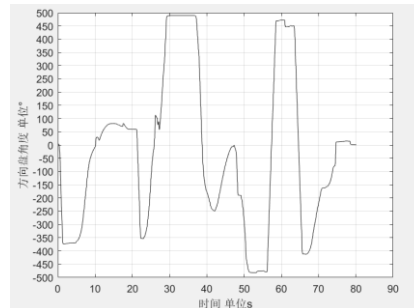
(a) 车辆行驶轨迹



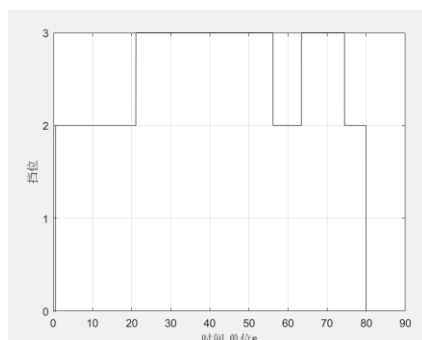
(b) 车辆航向角随时间变化



(c) 车速随时间变化



(d) 方向盘转角随时间变化



(g) 车辆挡位随时间变化

图 5.11 水平泊车实验

水平泊车过程如图 5.11 所示，车辆在检测到车位之后停车，进行选车位泊车，然后车辆启动握手操作，往前一步拉直到合适位置。然后根据规划出的 CLC 路径进行水平入库操作，因为车位比较小，因此在水平车位中进行了 2 次揉库。整个泊车过程换挡 5 次，方向盘转角曲线由图 5.11 (d) 看出整个过程还是比较平滑，泊车结束后车辆尾部距离库位线 24 厘米，车轮头部距车位线 42 厘米。

5.4 本章小结

本章主要完成了以下工作：

- 1) 分析了自动泊车系统的结构组成以及组成模块进行了介绍，并对泊车流程进行分析。
- 2) 搭建了测试环境，并基于泊车控制器、实车完成了小车位情况下的垂直以及水平泊车实车实验，并对实验进行分析，实车基本验证了论文工作中提出的泊车路径规划方法和路径跟随方法有效性。

第六章 总结与展望

6.1 全文工作总结

论文工作以超声和视觉融合泊车的自动泊车系统为主要研究对象,以某车厂量产车为目标车型,结合实际工况,对自动泊车系统的规划和控制进行了研究,完成了自动泊车核心算法的开发,并分别从仿真和实车对算法进行了验证。论文工作的主要研究成果如下:

(1)根据泊车工况,分析并建立了车辆运动学模型,针对泊车定位中常用速度做积分,而会造成累计误差的情况。提出了一种基于脉冲和车辆方向盘角度的航迹推算算法,为后续规划和控制研究工作的展开奠定了基础。

(2)为了充分考虑车辆本身的运动约束,减少路径跟随模块的难度,根据车辆与车位的几何约束,提出了一种基于预瞄理论的路径规划算法,主要针对有障碍式泊车进行设计,使得路径符合车辆转向系统的要求,支持多次规划泊车。并通过仿真和实车测试验证了算法的可行性。

(3)实现了泊车的运动控制设计。在横向控制器设计中,采取的是预瞄+PID+前馈的控制策略,纵向控制模块结合驾驶员泊车经验以及模糊理论知识,设计了纵向速度模糊控制器。提出了车辆路径跟随的算法评价标准,最后通过仿真和实验验证了算法的可行性

6.2 研究展望

在论文工作的研究基础上,将在接下来工作中展开以下研究。

1)定位模块算法优化,论文工作的定位模块是根据车辆自身携带的传感器进行计算的,计算过程中完全相信传感器的数值,但实际上传感器往往都是存在误差的,考虑使用扩展卡尔曼对运动学模型进行优化,解决实际泊车过程中传感器信号造成的误差问题。

2)针对复杂场景泊车作进一步研究,比如坡度较大的上下坡泊车情况,提高泊车系统环境的鲁棒性和工况支持度。

3) 从自动泊车展开到对自主泊车的研究, 将车-手机-云端进行结合, 实现由用户通过手机 APP 进行定位选定唤车点, 然后车辆从停车位自动驶出并低速自动驾驶到达唤车点以及用户将车开到指定地点后使用手机 APP 选定还车, 车辆自主巡航到泊车点进行自动泊车。整个泊车过程中无人监管, 从而实现真正意义上的无人驾驶。

最后, 相信随着辅助驾驶的不断发展, 自动泊车、自主泊车、直至最后智能网联车都将会成为现实。我们的出行将会变得更加安全、更加便捷、更加智慧。

参考文献

- [1]. SAE International in United States. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles[OL]. 2018.
- [2]. Jiang Yan, Gong Jian-Wei, Xiong Guang-Ming, Chen HuiYan. Research on differential constraints-based planning algorithm for autonomous-driving vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2012–2020.
- [3]. Howden W E, The sofa problem. *The Computer Journal*, 1968, 11(3): 299–301.
- [4]. Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs[J]. *Numerische Mathematics*, 1959, 1(1):269--271.
- [5]. Hart P E, MEMBER. IEEE, et al. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 2007, 4(2):100-107.
- [6]. Aine S, Swaminathan S, Narayanan V. et al. Multi-Heuristic A*[J]. *The International journal of robotics research*, 2016, 35(1-3):224-243.
- [7]. Islam F, Narayanan V, Likhachev M. Dynamic Multi-Heuristic A[J]. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015, 2015:2376-2382.
- [8]. Saranya C, Unnikrishnan M, Ali SA, Sheela DS. Laliambika VR. Terrain Based D* Algorithm for Path Planning[J]. *Ifac-PapersonLine*, 2016, 49(1):178-182.
- [9]. Dolgov, D, Thrun S, Montemerlo M, and Diebel J. (2008). Practical search techniques in path planning for autonomous driving. *Proceedings of the First International Symposium on Search Techniques in Artificial Intelligence and Robotics (STAIR-08)*, Chicago, IL. Menlo Park, CA, AAAI.
- [10]. Dolgov D, Thrun S, Montemerlo M. et al. Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(5):485-501.
- [11]. LaValle S M. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning. Technical Report, TR98-11, Ames, USA: Iowa State University. Department of Computer Science, 1998.
- [12]. Kuffner J J, Lavalle S M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path

- planning[C]// [2]Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065). IEEE, 2002.
- [13].Chris Urmson R S. Approaches for heuristically biasing RRT growth[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2003.
- [14].Cheng P, Lavalley S M. Reducing metric sensitivity in randomized trajectory design[C]// Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2001.
- [15].Ferguson D. Stentz A. Anytime RRTs[C]// Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2006.
- [16].Horst J. and Barbera A. "Trajectory generation for an on-road autonomous vehicle," in Proc.Int. Soc. Opt. Symp. Defense Security, 2006, Art. ID 62302J.
- [17].Solovey K. Salzman O. Halperin D. Finding a Needle in an Exponential Haystack: Discrete RRT for Exploration of Implicit Roadmaps in Multi-Robot Motion Planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016,35(5):501-513
- [18].T. H. Hsu, J.-F. Liu, P.-N. Yu, W.-S. Lee, and J.-S. Hsu, "Development of an automatic parking system for vehicle," in Proc. IEEE VPPC, 2008, pp. 1–6.
- [19].Zhou Z , Wang J , Zhu Z , et al. Tangent navigated robot path planning strategy using particle swarm optimized artificial potential field[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 158:639-651.
- [20].Zhu Y , Zhang T , Song J Y . Study on the Local Minima Problem of Path Planning Using Potential Field Method in Unknown Environments[J]. Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8):1122-1130.
- [21].Bence Kovács, Géza Szayer, Tajti F, et al. A novel potential field method for path planning of mobile robots by adapting animal motion attributes[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 82(C):24-34.
- [22].Peng H. Hessburg T. Tomizuka M. et al. A Theoretical and Experimental Study on Vehicle

- Lateral Control[C]// American Control Conference, 1992. IEEE, 1992.
- [23].Peng H. Tomizuka M. Preview Control for Vehicle Lateral Guidance in Highway Automation[C] // American Control Conference. IEEE, 1993.
- [24].Rafaila R C. Livint G. Rusu F A. Multivariate nonlinear predictive control of autonomous vehicle dynamics[C]// 2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS). IEEE, 2016.
- [25].Zhu M. Chen H. Xiong G. A model predictive speed tracking control approach for autonomous ground vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 138-152.
- [26].朱敏. 智能车辆纵向速度跟踪与控制方法研究[D].北京理工大学,2016.
- [27].Kong J . Pfeiffer M . Schildbach G . et al. [IEEE 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) - Seoul, South Korea (2015.6.28-2015.7.1)] 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) - Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design[C]// 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2015:1094-1099.
- [28].孙银健. 基于模型预测控制的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制算法研究[D]. 北京理工大学, 2015.
- [29].Brown M, Funke J, Erlien S, et al. Safe driving envelopes for path tracking in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61: 307-316.
- [30].郭景华, 李琳辉, 胡平, et al. 基于模糊逻辑的无人驾驶车纵向多滑模控制[J]. 中国公路学报, 2013(01):174-180.
- [31].Amer N H, Hudha K, Zamzuri H, et al. Adaptive modified Stanley controller with fuzzy supervisory system for trajectory tracking of an autonomous armoured vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 105: 94-111.
- [32].陈龙,罗杰,杨旭,王小龙.基于模糊纯追踪控制的自动泊车算法研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2019,41(03):316-321.
- [33].Kazuhide O, Panagiotis T. Optimal Stochastic Vehicle Path Planning Using Covariance Steering[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 2276-2281.
- [34].Ji J, Khajepour A, Melek W W, et al. Path Planning and Tracking for Vehicle Collision

- Avoidance Based on Model Predictive Control With Multiconstraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2):952-964.
- [35].Park J I , Cho J H , Chun M G , et al. Neuro-Fuzzy Rule Generation for Backing up Navigation of Car-like Mobile Robots[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2009, 11(3):192-201.
- [36].Sugeno M , Murakami K . Fuzzy parking control of model car[C]// Decision and Control, 1984. The 23rd IEEE Conference on. IEEE, 1985.
- [37].Zhao Y , Collins E G . Robust automatic parallel parking in tight spaces via fuzzy logic[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51(2-3):111-127.
- [38].Kim D, Chung W, Park S. Practical motion planning for car-parking control in narrow environment[J]. Iet Control Theory & Applications, 2010, 4(1):129-139.
- [39].Easy path planning and robust control for automatic parallel parking. Sungwoo C,Boussard C,d" Andréa-Novel B. IFAC Proceedings Volumes . 2011.
- [40].李红, 郭孔辉, 宋晓琳. 基于样条理论的自动垂直泊车轨迹规划[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(7):25-30.
- [41].李红, 王文军, 李克强. 基于 B 样条理论的平行泊车路径规划[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9).
- [42].郭孔辉, 李红, 宋晓琳, et al. 自动泊车系统路径跟踪控制策略研究[J]. 中国公路学报, 2015(09):110-118.
- [43].李红. 自动泊车系统路径规划与跟踪控制研究[D]. 湖南大学, 2014.
- [44].杨妮娜, 梁华为, 王少平. 平行泊车的路径规划方法及其仿真研究[J].电子测量技术, 2011,34(01):42-45.
- [45].Liang Z, Zheng G, Li J. Automatic parking path optimization based on Bezier curve fitting[C]// Automation and Logistics (ICAL), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012.
- [46].Park M, Lee S, Han W. Development of Steering Control System for Autonomous Vehicle Using Geometry - Based Path Tracking Algorithm[J]. Etri Journal, 2015, 37(3): 617-625.
- [47].Vorobieva H, Glaser S, Minoiu-Enache N, et al. Geometric Path Planning for Automatic Parallel Parking in Tiny Spots[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(24):36-42.

- [48]. Vorobieva H, Glaser S, Minoiu-Enache N, et al. Automatic parallel parking with geometric continuous-curvature path planning [C]. Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. IEEE, 2014: 465-471.
- [49]. Zhi J Z, Schmerling E, Pavone M. A convex optimization approach to smooth trajectories for motion planning with carlike robots. In: Proceedings of IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC), Osaka, Japan: IEEE, 2015.
- [50]. Derrick H. Nguyen, Bernard Widrow. Neural networks for self-learning control systems[J]. IEEE, 2012, 8: 333-365.
- [51]. Rasekhipour Y, Khajepour A, Chen S K, et al. A Potential Field-Based Model Predictive Path-Planning Controller for Autonomous Road Vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, PP(99): 1-13.
- [52]. Cao HT, Song XL, Zhao S, et al. An optimal model-based trajectory following architecture synthesising the lateral adaptive preview strategy and longitudinal velocity planning for highly automated vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(8): 1143-1188.
- [53]. Tazaki Y, Okuda H, Suzuki T. Parking Trajectory Planning Using Multiresolution State Roadmaps[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(4): 298-307.
- [54]. Zhang H, Wang JM. Vehicle Lateral Dynamics Control Through AFS/DYC and Robust Gain-Scheduling Approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 489-494.
- [55]. 胡伟龙. 多段式平行泊车轨迹动态规划及系统控制[D]. 合肥工业大学, 2016.
- [56]. Smith D E, Starkey J M. Effects of Model Complexity on the Performance of Automated Vehicle Steering Controllers: Model Development, Validation and Comparison[J]. Vehicle System Dynamics, 1995, 24(2): 163-181.
- [57]. 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 江苏科学技术出版社, 2011.
- [58]. Petrov P, Nashashibi F. Automatic vehicle perpendicular parking design using saturated control[C]// 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT). IEEE, 2015.

- [59].Zhang S, Simkani M, Zadeh M H. Automatic Vehicle Parallel Parking Design Using Fifth Degree Polynomial Path Planning[C] Vehicular Technology Conference. IEEE, 2011:1-4.
- [60].Vorobieva H, Glaser S, Minoiu-Enache N, et al. Automatic Parallel Parking in Tiny Spots: Path Planning and Control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1):396-410.

致 谢

时光荏苒，三年的研究生生活即将结束，在边工作边完成学业的这几年里，让我对在学校学的知识有了更深入的了解，同时在自动驾驶行业的几年工作经验，让我对这个行业有了更深刻的认识，也接触到很多优秀的且勤勉的人。这几年不仅磨练了我的性格，同时也拓展了我的思路，明白了要真正做一款安全有效的辅助驾驶产品是多么不易，明白了理论和实践还是会有差异，明白了处理问题需要更加全面和仔细。

首先，要感谢我的导师杜德慧老师，虽然在学校的时间不长，但是杜老师还是很关心的我的学习情况和论文进度，从开题报告到论文答辩杜老师还是会耐心的给予指导。正是如此，我的论文才得以顺利完成。同时也感谢学院领导和每一位给我们上课的老师，你们不辞辛劳的付出是我知识的源泉，在此，对每一位老师表示感谢。

其次，我要感谢母校华东师范大学和我的家人们，感谢母校的培养以及给我继续学习的机会，感谢母校为我们提供的优秀学习资源与知识，这将是我人生当中一笔取之不尽用之不竭的宝贵财富。感谢家人们在我求学过程中对我的理解与帮助，你们是我坚实的后盾。