

广东工业大学硕士学位论文

(工程硕士)

FSAC 赛车横向控制系统设计与研究

李金畅

二〇一九年五月

分类号：

学校代号：11845

UDC:

密级：

学 号：2111601190

广东工业大学硕士学位论文

(工程硕士)

FSAC 赛车横向控制系统设计与研究

李金畅

校内导师姓名、职称：阳林教授

校外导师姓名、职称：陈功代

学科(专业)或领域名称：机械工程

学生所属学院：机电工程学院

论文答辩日期：2019年5月

A Dissertation Submitted to Guangdong University of Technology
for the Degree of Master
(Master of Engineering Science)

Design and research of lateral control system of FSAC racing
car

Candidate: Li Jinchang

Supervisor: Prof. Yang Lin

May 2019

School of Electromechanical Engineering
Guangdong University of Technology
Guangzhou, Guangdong, P. R. China, 510006

摘要

自 2010 年 FSAE（中国大学生方程式汽车大赛）第一届 FSC 成功举办以来，逐渐形成以 FSC(燃油车赛)、FSEC（电动车赛）、FSAC（无人车赛）三类汽车为一体的综合性赛事。大赛的发展也正彰显了汽车行业向着新四化（电动化、智能化、网联化、共享化）的方向前进。其中三类赛车技术水平要求最高的便是 FSAC。运动控制是无人赛车的关键技术之一，包括横向运动控制与纵向运动控制，本文主要针对横向运动控制进行研究。

针对 FSAC 大赛特殊的比赛环境及目前赛车路径跟踪误差较大等情况，本文对无人车的横向运动控制系统进行研究。在满足安全性及操作稳定性的基础上，进行控制策略的研究及横向运动控制器的设计，并以 Simulink 与 Carsim 联合仿真来验证控制器的鲁棒性。本文对 FSAC 赛车横向运动控制系统的设计与研究工作，具体内容如下：

1. 传感器布置及执行机构的设计。分析赛事规则，确定以原有电动赛车进行无人赛车的改装设计。分析主要传感器的工作原理，通过调研对比来确定传感器的选型，根据赛事规则及传感器的特点确定布置方案。基于 EPS 原理对转向执行机构进行设计，确定伺服电机及控制器。

2. 整车模型的建立。以广东工业大学电动赛车 E05 为研究对象，在保证路径跟踪精确、稳定的条件下分别建立车辆动力学模型与运动学模型。根据“魔术公式”进行轮胎力学特性分析，在车辆动力学理论基础上，建立三自由度非线性车辆动力学模型。基于阿克曼转向原理，建立二自由度车辆运动学模型。

3. 控制器的设计。首先，根据模型预测控制理论，在车辆动力学模型的基础上设计了线性时变模型预测控制器。之后，根据纯跟踪理论，在车辆运动学模型的基础上进行算法的改进，建立基于横向预瞄偏差的前馈控制及基于航向偏差的反馈控制。

4. 仿真验证。根据 FSAC 大赛动态赛确定双移线为仿真参考路径，搭建 Simulink 与 Carsim 联合仿真平台，分别基于速度、附着系数、预测时域、控制时域四种工况进行模型预测控制器的仿真，分析模型预测控制器的影响因素。最后将线性时变模型预测控制器及前馈-反馈控制器进行仿真对比，结果表明，模型预测控制器比前馈-反馈控制器适用范围更广，更加稳定。

关键词：FSAC 赛车；无人驾驶；模型预测控制；前馈-反馈控制；控制器

ABSTRACT

Since the first FSC of FSAE (Formula SAE of china) was successfully held in 2010, it has gradually formed a comprehensive competition integrating FSC (fuel car race), FSEC (electric car race) and FSAC (unmanned car race). The development of the competition also highlights the automobile industry toward the new four (electric, intelligent, network, sharing) direction forward. The most technically demanding of the three was the FSAC. Motion control is one of the key technologies of unmanned racing, including lateral motion control and longitudinal motion control. This paper focuses on lateral motion control.

In view of the special competition environment of FSAC and the large track tracking error of racing car at present, the lateral motion control system of unmanned vehicle is studied in this paper. On the basis of satisfying the security and operation stability, the control strategy and the design of lateral motion controller are studied, and the robustness of the controller is verified by the simulation of Simulink and Carsim. In this paper, the design and research of lateral motion control system for FSAC racing car are described as follows:

1. Sensor layout and actuator design. Analyze the rules of the game and determine the modified design of the unmanned car with the original electric car. Analyze the working principle of the main sensor, determine the sensor selection through investigation and comparison, and determine the layout according to the rules of the game and the characteristics of the sensor. The steering actuator is designed based on the EPS principle to determine the servo motor and controller.

2. Establishment of vehicle model. Taking the E05 of Guangdong University of Technology as the research object, the vehicle dynamics model and the kinematics model are established under the condition of ensuring accurate and stable path tracking. Based on the "magic formula", the mechanical properties of the tire were analyzed. Based on the theory of vehicle dynamics, a three-degree-of-freedom nonlinear vehicle dynamics model was established. Based on the Ackerman steering principle, a two-degree-of-freedom vehicle kinematics model is established.

3. Controller design. Firstly, based on the model predictive control theory, a linear time-varying model predictive controller is designed. Then, based on the pure tracking theory,

the algorithm is improved on the basis of the vehicle kinematics model, and the feedforward control based on the transverse preview deviation and the feedback control based on the course deviation are established.

4. Simulation verification. According to the dynamic competition of FSAC competition, double shift line was determined as the simulation reference path, and the Simulink and Carsim joint simulation platform was built. The simulation of model prediction controller was carried out based on four working conditions of speed, the adhesion coefficient, prediction time domain and control time domain respectively, and the influencing factors of model prediction controller were analyzed. The simulation results show that the model predictive controller has a wider application range and is more stable than feed-forward feedback controller.

Key words: FSAC racing; Driveless; Model predictive control; Feed-forward feedback control; The controller

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
目录	IV
CONTENTS	VII
第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 无人驾驶汽车关键技术	2
1.3 国内外研究现状	4
1.3.1 国外研究现状	5
1.3.2 国内研究现状	7
1.3.3 无人车横向控制系统研究现状	8
1.4 本文主要研究内容	9
第二章 FSAC 赛车的体系结构	11
2.1 赛事规则	11
2.2 FSAC 赛车总体结构	11
2.2.1 赛车总成设计参数	11
2.2.2 传感器系统	12
2.2.3 无人车通信系统	17
2.3 FSAC 赛车底层控制系统硬件改装设计	18
2.3.1 转向电机	19
2.3.2 电机控制器	20
2.3.3 编码器	20
2.4 本章小结	21
第三章 车辆动力学及运动学模型	23
3.1 轮胎模型	23
3.1.1 轮胎坐标系	23
3.1.2“魔术公式”轮胎模型	24
3.1.3 轮胎力学特性	24

3.2 车辆动力学模型.....	27
3.3 车辆运动学模型.....	31
3.3.1 阿克曼转向.....	31
3.3.2 车辆运动学建模.....	32
3.4 前馈-反馈控制器设计.....	34
3.4.1 基于横向预瞄偏差的前馈控制.....	34
3.4.2 基于航向偏差的反馈控制系统.....	37
3.5 本章小结.....	38
第四章 FSAC 赛车 MPC 横向控制器设计.....	39
4.1 模型预测控制理论.....	39
4.1.1 模型预测控制原理.....	39
4.1.2 模型预测控制特点.....	41
4.2 线性时变模型预测控制算法研究.....	42
4.2.1 非线性系统线性化.....	42
4.2.2 线性时变模型预测控制算法.....	43
4.3 FSAC 赛车横向运动控制器设计.....	47
4.3.1 线性误差方程.....	48
4.3.2 约束条件.....	49
4.4 本章小结.....	51
第五章 FSAC 赛车横向控制系统仿真分析.....	53
5.1 Carsim 介绍.....	53
5.2 联合仿真平台搭建.....	54
5.2.1 动态赛分析.....	54
5.2.2 参考轨迹.....	55
5.2.3 仿真参数设置.....	56
5.3 MPC 控制器的仿真验证.....	58
5.3.1 不同速度对于轨迹跟踪的影响.....	58
5.3.2 附着系数对于轨迹跟踪的影响.....	60
5.3.3 预测时域对于轨迹跟踪的影响.....	62

5.3.4 控制时域对于轨迹跟踪的影响.....	64
5.4 仿真对比.....	66
5.5 本章小结.....	67
总结与展望.....	69
参考文献.....	71
攻读硕士期间学术成果.....	74
学位论文独创性声明.....	76
学位论文版权使用授权声明.....	76
致谢.....	77

CONTENTS

ABSTRACT(Chinese).....	I
ABSTRACT(English).....	II
CONTENTS(Chinese).....	IV
CONTENTS(English).....	VII
Chapter 1 Preface.....	1
1.1 Background and significance of the research.....	1
1.2 Key technologies for driverless cars.....	2
1.3 Research status at home and abroad.....	4
1.3.1 Oversea research status.....	5
1.3.2 Domestic research status.....	7
1.3.3 Research status of unmanned vehicle lateral control system.....	8
1.4 Research content in this paper.....	9
Chapter 2 the architecture of the FSAC racing car.....	11
2.1 Competition rules.....	11
2.2 Overall structure of FSAC racing car.....	11
2.2.1 Racing car design parameters.....	11
2.2.2 Sensor system.....	12
2.2.3 Unmanned vehicle communication system.....	17
2.3 Hardware modification design of the bottom control system of FSAC racing car....	18
2.3.1 Steering motor.....	20
2.3.2 Motor Controller.....	20
2.3.3 Encoder.....	21
2.4 Chapter summary.....	22
Chapter 3 vehicle dynamics and kinematics models.....	23
3.1 Tire model.....	23
3.1.1 Tire coordinate system.....	23
3.1.2 "Magic Formula" tire model.....	24
3.1.3 Tire mechanical properties.....	24

3.2 Vehicle Dynamics Model	27
3.3 Vehicle kinematics model	31
3.3.1 Ackman turned.....	31
3.3.2 Vehicle kinematics modeling.....	33
3.4 Feedforward - feedback controller design.....	34
3.4.1 Feedforward control based on transverse preview deviation.....	35
3.4.2 Feedback control system based on heading deviation.....	37
3.5 Chapter summary.....	38
Chapter 4 FSAC Racing MPC Horizontal Controller Design.....	40
4.1 Model Predictive Control Theory.....	40
4.1.1 Model Predictive Control Principles.....	40
4.1.2 Model Predictive Control Features	42
4.2 Research on predictive control algorithm for linear time-varying models.....	43
4.2.1 Linearization of nonlinear systems.....	43
4.2.2 Linear time-varying model predictive control algorithm.....	44
4.3 FSAC Racing Lateral Motion Controller Design	48
4.3.1 Linear error equation.....	49
4.3.2 Constraints.....	50
4.4 Chapter summary.....	52
Chapter 5 simulation and analysis of lateral control system of FSAC racing car.....	54
5.1 Introduction to Carsim.....	54
5.2 Joint Simulation Platform Construction.....	55
5.2.1 Dynamic Game Analysis.....	55
5.2.2 Reference track.....	56
5.2.3 Simulation parameter settings	57
5.3 Simulation verification of MPC controller.....	59
5.3.1.Effects of different speeds on trajectory tracking.....	59
5.3.2Effect of adhesion coefficient on trajectory tracking.....	61
5.3.3Effect of predicting time domain on trajectory tracking.....	63

5.3.4Controlling the influence of the time domain on trajectory tracking.....	66
5.4Simulation Comparison.....	67
5.5Chapter summary.....	69
Conclusions and prospects.....	70
References.....	72
Academic achievements during the degree study.....	75
Dissertation originality statement.....	76
Dissertation Copyright Licensing Statement	76
Acknowledgement.....	77

第一章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

随着经济的高速发展，汽车产业的崛起改变了人们的出行方式，汽车的保有量不断上升。据公安部统计，截至 2018 年年底，全国汽车保有量达 2.4 亿辆，比 2017 年增加 2285 万辆，增长 10.51%^[1]。汽车带给人们生活便捷性及舒适性的同时，也造成了环境污染、交通拥堵、交通事故等一系列问题。据世界卫生组织（World Health Organization, WHO）统计，全世界每年约有 135 万人死于道路交通事故^[2]。面对这些越来越严重的社会问题，“电动化”、“网联化”、“智能化”、“共享化”汽车“新四化”成为行业公认的发展趋势。

无人驾驶汽车是经过传感系统来获得行驶环境信息，自动规划并控制车辆到达预定目标的智能汽车^[3]。无人驾驶解放人的双手来节约驾驶时间，减少由于驾驶员驾驶经验、驾驶状态与驾驶风格等因素引起的道路堵塞，进而使车辆能够安全、可靠的行驶^[4]。

为培养适用于现代汽车产业发展的专业类人才，无人驾驶汽车方程式汽车大赛在国内外开始举办，其中德国于 2017 年 8 月举办第一届 FSD (Formula Student Driverless, 大学生无人驾驶方程式大赛)，吸引了包括瑞士苏黎世联邦理工学院、美国麻省理工大学、德国慕尼黑工业大学、中国北京理工大学等 22 所世界各地名校参加，最终苏黎世联邦理工学院车队荣获冠军；我国于 2017 年 11 月在襄阳举办首届 FSAC (Formula Student Autonomous Of China)，来自北京理工大学、吉林大学、哈尔滨工业大学、合肥工业大学、东南大学等 7 支高校无人驾驶赛车队同场竞技，其中北京理工大学无人驾驶大学生方程式赛车队携自主研发、设计、制造的赛车“灰鲨”拔得头筹。



图 1-1 苏黎世联邦理工学院“Flüela”

Fig.1-1 "Flüela" of Zurich federal institute of technology



图 1-2 北京理工大学“灰鲨”

Fig.1-2 "Grey shark" of Beijing institute of technology

FSAC 大赛分别设置了动态赛和静态赛共 8 个比赛项目，其中动态赛所占分值最重，主要是测试无人车的自主识别、路径规划、路径跟踪的能力。具体动态赛项目分值如下表 1-1：

表 1-1 FSAC 动态赛及分值
Tab.1-1 FSAC dynamic match and score

名称	分值
直线加速测试	100
8 字绕环测试	100
高速识别循迹测试	150
镜像 PK 赛	250
总分	600

汽车行驶的主要目的是沿着驾驶员期望路径行驶，最终到达目的地。由此可知，无人驾驶汽车的核心问题是控制车辆按照期望路径行驶，即运动控制。运动控制分为纵向控制与横向控制。纵向控制是对纵向速度的控制，主要通过油门踏板与制动踏板的协调控制来实现的。横向控制是对前轮转角的实时控制来保证汽车按照期望路径行驶，主要通过调整方向盘来实现控制。

首届 FSAC 大赛除了北京理工大学车队正常完赛，其余车队均未能完赛。主要问题是横向运动控制器的鲁棒性及实时性无法满足赛事要求，导致路径跟踪偏差较大而偏离跑道。目前国内外的相关研究主要集中在商用无人车方面，而针对无人驾驶方程式赛车的研究资料寥寥无几。FSAC 赛车不同于普通商用车，特殊的结构及行驶工况导致商用无人车技术无法直接应用到 FSAC 赛车上。所以本课题着重研究无人驾驶方程式赛车的横向运动控制系统。

1.2 无人驾驶汽车关键技术

无人驾驶汽车作为一个复杂的系统，集自动控制、体系结构、人工智能、视觉计算等众多技术于一体，是计算机科学、模式识别和智能控制技术高度发展的产物^[5]。具体包括以下几部分关键技术：

1.2.1 感知系统

传统汽车正常驾驶的前提条件是驾驶员能够通过视觉、听觉等感官组织来获得驾驶信息，而无人驾驶汽车则利用传感器来代替人的感官组织。汽车的驾驶信息不仅包

括车辆自身状态信息，如纵向速度、前轮偏角、车辆航向角等，还包括周围的环境信息，如道路位置、道路方向、障碍物位置及速度、交通标志等。因此，感知系统是车辆实现避障、自定位及路径规划的基础。主要传感器包括摄像头、激光雷达、毫米波雷达、转向编码器、轮速传感器等^[6]。

表 1-2 环境感知传感器的功能比较

Tab.1-2 Comparison of functions of environmental perception sensors

功能	激光雷达	毫米波雷达	摄像头
车道线识别	√	×	√
路沿检测	√	×	√
障碍物相对位置、距离检测	√	√	√
障碍物运动状态判断	√	√	√
障碍物识别与跟踪	√	√	√
障碍物分类	×	×	√
红绿灯、交通标志识别	×	×	√
Slam 地图创建及定位	√	×	√

1.2.2 定位导航

车辆定位导航的目的是为了能够确定车辆在不同时刻所处位置及状态，以此来判断车辆实际运动路径与期望路径之间的误差，为车辆的路径规划提供依据。车辆定位一般是通过 GPS(Global Positioning System)、惯性导航、SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)技术来实现，由于 GPS 属于民用定位系统，定位精度及准确性无法保证无人驾驶汽车的需求，而采用差分 GPS 可提高其定位精度达到厘米级，并结合惯性传感器 IMU(Inertial Measurement Unit)、里程计 (Odometry) 及推算定位 (Dead Reckoning) 等技术，提高定位更新频率和准确度。SLAM 技术主要是用来当车辆无法接收 GPS 信号时，为车辆提供相对准确的定位信息。导航技术是根据定位信息，结合高精度地图、实时交通等信息，生成车辆的全局行驶路线。

1.2.3 路径规划

路径规划是指在确定了起点与终点之后，根据实际的行驶环境及路况进行期望轨迹的规划。路径规划分为全局路径规划与局部路径规划，全局路径规划根据已确定的实际地图^[7]，按照一定的性能指标规划出一条安全、无碰撞的最优路径。局部路径规划

则是通过感知系统采集的实时路况信息进行的路径规划，当前速度无法满足正常转弯或躲避障碍时，局部规划器会进行相应的调整来规划出一条新的且满足当前状况的行驶轨迹，然后在通过转弯及避障后，继续按照全局路径规划向终点行驶。路径规划主要依据环境建模及路径搜索算法来实现。

1.2.4 运动控制

无人车的运动控制是基于上层路径规划及一定规则进行车辆运动状态的决策，再将控制命令发送给转向盘、油门踏板、制动踏板执行机构。运动控制的目的是为了消除实际的行驶路径与规划路径之间的横向误差，使车辆能够按照期望车速沿着规划的最优路径行驶。无人驾驶汽车运动控制分为纵向运动控制与横向运动控制^[8]。纵向运动控制是指对于车辆纵向速度的控制，也即是对于油门踏板及制动踏板的有效控制，横向运动控制主要是指控制车辆实际行驶轨迹与期望轨迹的误差以及航向角误差。

1.3 国内外研究现状

在自动驾驶研究初期，自动驾驶的分类体系有多种，但最终国际汽车工程师学会（SAEInternational）于 2014 年发布自动驾驶的六级分类体系成为通行的分类原则。具体的级别划分和描述如表 1-3 所示：

表 1-3 自动驾驶分级
Tab.1-3 Classification of autonomous driving

级别	名称	定义	驾驶操作	周边监控	接管	应用场景
L0	人工驾驶	由驾驶者完全驾驶汽车	驾驶员	驾驶员	驾驶员	所有场景
L1	辅助驾驶	车辆对于转向和加减速中一项操作提供驾驶，驾驶员负责其余驾驶操作	驾驶员和车辆	驾驶员	驾驶员	限定场景
L2	部分自动驾驶	车辆对于转向和加减速中一项操作提供驾驶，驾驶员负责其余驾驶操作	车辆	驾驶员	驾驶员	

表 1-3 自动驾驶分级 (续表)
Tab.1-3 Classification of autonomous driving (continued to table)

L3	条件自动驾驶	车辆完成大部分驾驶操作, 驾驶员保持注意力以备不时之需	车辆	车辆	驾驶员	限定场 景
L4	高度自动驾驶	车辆完成所有驾驶操作, 驾驶员不必保持注意力, 单项顶道路及环境条件	车辆	车辆	车辆	
L5	完全自动驾驶	车辆完成所有驾驶操作, 驾驶员不必保持注意力	车辆	车辆	车辆	所有场 景

根据自动驾驶的分级体系, 目前无人驾驶汽车正处于 L3 级别, 即车辆能够完成大部分驾驶操作, 但一些特殊情况仍需要人工驾驶的干预。

1.3.1 国外研究现状

国外发达国家对于无人驾驶的研究开始于 20 世纪 70 年代, 主要是为了应用在军事方面。其中, 美国的无人驾驶技术最具代表性。

上世纪 80 年代初, 美国国防部高级计划研究局 (DARPA) 开展了一项名为自主地面车辆 (ALV) 的新项目。在 DARPA 的支持下, 以卡耐基梅隆大学、麻省理工大学、斯坦福大学等为代表的高校, 逐渐开始研究无人驾驶车辆相关技术^[3]。其中卡耐基梅隆大学研发的 Navlab 系列无人车最具代表性^[9]。1995 年, Navlab-V 建成, 并完成了横跨美国大陆的长途自动驾驶实验, 但是 Navlab-V 仅仅是完成了方向控制, 而没有进行速度控制 (由测试人员操纵油门与档位)。



图 1-3 AL
Fig.1-3 AL



图 1-4 Navlab-V
Fig.1-4 Navlab-V

自 2004 年起, DARPA 举办了三届智能车辆挑战赛, 首届赛事在莫哈维沙漠开展,

全程共 270km，共有 17 支车队参赛，但没有一支队伍跑完全程。2007 年，第三届 DARPA 挑战赛在美国加利福尼亚州一个后勤空军基地举行。比赛要求在 6 小时内完成 96km 的城市道路行驶，同时遵守交通规则。最终卡耐基梅隆大学的智能车 BOSS 以总时长 4 小时 10 分 20 秒，平均速度 22.53km/h 的成绩取得了冠军^[10]。该车以力矩电机来驱动转向盘转动，以此来控制车辆转向；采用电机作为动力，钢丝传动的方式来控制车辆的刹车踏板、油门踏板和换挡机构^[11]。该车执行机构的改装优点是充分考虑自动驾驶与人工驾驶的切换问题。



图 1-5 Stanley
Fig.1-5 Stanley



图 1-6 Boss
Fig.1-6 Boss

2009 年，谷歌进入无人车领域。第一代无人车是基于丰田普锐斯（图 1-7）改装而成的，使用了 Velodyne-64 线激光雷达，且在前保险杠及前翼子板安装了毫米波雷达；为了获得轮速信息，在左后轮上安装了外接的轮速传感器；在前挡风玻璃下安装有摄像头，来识别交通指示灯。

2014 年 5 月，谷歌的第 3 代无人车间世（图 1-8）。该无人车将谷歌广告及地图服务进行整合，增强人机交互体验，更加注重行人安全。且除去制动器、方向盘及油门，最大速度被限制在 25mile/h。一年后，在山景城对这款车进行路测^[12]。至 2018 年年底，谷歌无人车行驶了相当于绕地球 400 圈的公路，由此积累了大量的行驶数据。



图 1-7 第一代谷歌无人车

Fig.1-7 First generation Google unmanned vehicle



图 1-8 谷歌自主无人车

Fig.1-8 Google autonomous unmanned vehicle

1.3.2 国内研究现状

我国无人车的发展起始于上世纪 80 年代，与国外研究相比，我国科研水平与技术都相对落后。国防科技大学是国内最先研究无人驾驶技术的高校，其研制的 CITAVT-I 至 CITAVT-IV、CITAVT-HQ 等一系列无人车逐步问世，其中 CITAVT-IV 以 75.6km/h 的速度最高，且能实现自动驾驶与人工驾驶的相互切换、低速自动驾驶在非结构化道路和完全自动驾驶在结构化道路上^[13]。

自 1988 年开始，清华大学开始 THMR 系列无人车的研究，THRM-V 实现了车道线的识别、准结构化道路的路径跟踪、非结构化道路的避障等功能，其车速最高达 150km/h。

上世纪 90 年代，吉林大学在无人车的平台体系、道路识别、路径跟踪及运动控制等方面取得了一定成果^[14]，相继开发 JLUIV、DLIUV 系列无人车。



图 1-9 红旗 HQ3

图 1-10 宝马 GT3

Fig.1-9 Red flag HQ3

Fig.1-10 BMW GT3

国内除了各大高校及研究所开展无人驾驶的研究外，以上汽集团、一汽集团、长安汽车为代表的车企也纷纷参与。一汽集团联合国防科技大学开展无人车技术的研究工作，基于红旗 HQ3 进行样车改装设计，并进行高速公路自主驾驶实验。2011 年 7 月，红旗 HQ3 成为我国首辆行驶在复杂交通工况（高速公路）下的无人车。

伴随着计算机及网络通信技术的迅猛发展，除了传统车企及各大高校，互联网公司及造车新势力也纷纷要在无人驾驶领域进行分一杯羹，其中以百度、蔚来等为代表。百度公司于 2013 年宣布进入无人驾驶领域，其技术核心是人工智能系统，也被称作“百度汽车大脑”。2015 年 12 月，百度与宝马合作改造的宝马 3 系 GT 无人车进行道路测试，测试选择的是京新高速 30km 部分路段，历时 40 分钟，最高车速曾达到 100km/h。2016 年 3 月，百度与长安汽车签署战略合作协议^[15]，共同开发无人驾驶技术，百度将车辆互联技术大量植入长安汽车中，共同开发人车交互，用以实现量产。

作为汽车工程师培养摇篮的中国 FSAE 是不可能忽视无人车的热潮。因此，2017 年，中国 FSAE 新增一项 FSAC 无人车赛事，来自北京理工大学、哈尔滨工业大学、吉林大学等 7 支高校无人驾驶赛车队同场竞技，最终除了北京理工大学无人车完赛，其他六支车队都没能完成比赛。2018 年 11 月，第二届 FSAC 大赛在珠海航展中心成功举办，此次参赛车队达到 13 支，较去年翻一番，竞争更加激烈。

1.3.3 无人车横向控制系统研究现状

无人驾驶汽车运动控制是车辆保持期望轨迹行驶的关键技术，包括保持期望速度控制的纵向运动控制、消除汽车行驶轨迹与期望轨迹横向误差的横向运动控制。横向运动控制是保持汽车能够稳定、安全、准确按照期望轨迹行驶的基础，是无人驾驶研究的核心内容。由于车辆是一个强耦合且参数不确定性的非线性系统，所以无法以精确模型来描述。

在国外，无人车横向运动控制的研究始于 1988 年，通过仿真与实车试验进行验证，具体工作是进行建模、设计控制器、开环仿真、闭环仿真以及实车实验^[16]。

1990 年到 1991 年间，Peng 等基于前馈—反馈控制算法设计横向运动控制器，前馈控制量是基于道路曲率确定的前轮转角，反馈控制算法采用频率线性二次型(FSLQ)最优控制理论来设计，该算法不仅考虑了路径跟踪误差也保证了乘坐舒适性^[17]。

1991 年，Hessburg 等针对非前瞻式参考系统进行研究。基于离散磁道钉参考系统来验证前馈-PID 反馈控制对实车横向控制的可行性^[18]。

1999 年，Tan 等在非前瞻式参考系统的基础上，并基于变化的车辆参数，以此来设计横向控制器^[19]。

DARPA 挑战赛对横向控制技术的发展起到巨大推力作用。2005 年，Stanley 根据车-路几何模型设计的横向控制器，该控制器由航向偏差与横向偏差两部分组成，并通过比例增益来调节不同车速下的控制律^[20]。2007 年，无人车 Boss 综合目标、行为和运动 3 层规划系统，以 48km/h 的速度行驶在城市工况^[21]。

2015 年，Hong 等使用模型预测控制策略。该策略基于侧倾运动，以侧倾最小化为目标，使用滚动最优控制技术设计的横向运动控制器，能预先对车辆将产生的侧倾运动做出反应^[22]。

2016 年，Wang 等进行了四轮独立驱动的车辆路径跟踪研究，使用主动转向和横摆力矩共同控制的方法来设计控制器^[23]。

国内对于无人驾驶横向运动控制的研究起步较晚，主要研究方向集中在横向运动控制策略方面。具体有：

2006 年马莹等基于有限时间最优预瞄算法设计横向运动控制器，其特点是使用了二次型性能指标函数，且该函数考虑了当前横向偏差、预瞄点偏差及控制变量，能够保证路径跟踪的实时性^[24]。

2007 年陈杨等基于反馈线性化算法，并考虑非完整运动约束设计了车辆路径跟踪控制器^[25]。

2010 年赵熙俊等设计了基于期望期望航向偏差生成器和反馈控制器构成的横向控制系统，其特点是期望航向偏差是在车辆运动学模型的基础上来确定的，反馈控制器是在车辆动力学模型的基础上建立的鲁棒 PID 控制器^[26]。

2014 年陈无畏等基于模糊控制理论设计了横向运动控制器，其特点使用遗传算法来优化模糊规则库，通过模糊规则来选择预瞄距离，以此来控制横向误差及降低侧向加速度，使控制器性能最佳^[27]。

2018 年梁政焘等基于模型预测控制理论设计了一种路径跟踪控制算法，其特点是在车辆运动学模型的基础上，以动态跟踪偏差最小为目标，运用模型预测控制算法，考虑车辆实际情况对预测模型添加约束，实现路径跟踪的最优控制^[28]。

1.4 本文主要研究内容

针对目前 FSAC 赛车研究资料过少的问题，本文进行 FSAC 赛车横向运动控制系统的研究，为后续 FSAC 赛车的研究提供一定参考。本文从 FSAC 赛车横向运动控制系统硬件及软件两个方面进行研究，通过分析赛事规则及动态赛工况，基于模型预测控制理论，设计线性时变模型预测横向运动控制器，并利用 Simulink 与 Carsim 软件联合仿真来验证鲁棒性及实时性。具体工作如下：

第一章主要阐述论文的研究背景及意义，通过学习国内外文献，介绍了目前无人车及横向运动控制系统的现状。

第二章主要是分析 FSAC 大赛规则，根据规则进行主要传感器的选配及横向控制系统执行机构的设计。

第三章首先分析了轮胎的力学特性，并以此为基础进行车辆动力学的建模，最终得到三自由度非线性动力学模型；进行车辆运动学建模，并以此为基础设计了前馈-反馈控制器。

第四章基于模型预测控制理论（Model Predictive Control， MPC），将非线性动力学模型线性化，设计线性时变模型预测控制器。

第五章搭建 Carsim 与 Simulink 联合仿真平台，并进行上述两种横向运动控制器的仿真，对比仿真结果，来验证线性时变 MPC 控制器的。

第二章 FSAC 赛车的体系结构

根据中国大学生无人驾驶方程汽车大赛的赛事规则，参赛车队必须是通过以下两种方式研制的赛车才能够参赛：第一种是改装之前参赛的电车为无人车，第二种是打造一辆全新电动无人驾驶方程式赛车，第二种较第一种研制方式花费时间长、成本高，因此大部分车队选择第一种研制方式。为实现广东工业大学 FSAC 赛车从无到有的突破，我校基于 2016 年广东工业大学大学生方程式赛车 E05 进行 FSAC 赛车的改装设计。本课题的研究也正是基于 E05 进行的，本人负责 FSAC 赛车的横向运动控制系统的设 计，包括硬件的改装以及控制策略的设计。

2.1 赛事规则

为研制广东工业大学第一辆 FSAC 赛车，必须严格按照《中国大学生方程式汽车大赛规则》中关于无人车的规则要求^[29]。具体规则有以下几点：

- (1) 基础车型：参赛车辆应是满足大学生电动方程式赛车技术规则的纯电动方程式赛车。除针对无人赛车提出的技术规则外，其余技术要求参考《中国大学生方程式汽车大赛规则》中的通用技术规范、代替车架规则及电车规则。
- (2) 驾驶舱：无人车驾驶舱内部空间的检测板高度比电车降低 50mm，主要是要适应转向执行系统的改装。
- (3) 底层执行机构：允许转向系统与制动系统进行线控改装，但是要保留机械结构，也即是既能够无人操作，也能够进行人工操作。
- (4) 电气规范：参赛车辆必须装有无人驾驶系统主开关以及遥控急停系统，赛车除了能够接收遥控急停信号外，只能单向发送状态信息。

2.2 FSAC 赛车总体结构

2.2.1 赛车总成设计参数

无人赛车的改装设计需要首先确定赛车总成的各部分参数，然后根据赛事规则进行机械结构的改装设计、传感器及信息采集设备的布置。E05 的总成设计参数如下表所示：

表 2-1 赛车尺寸参数

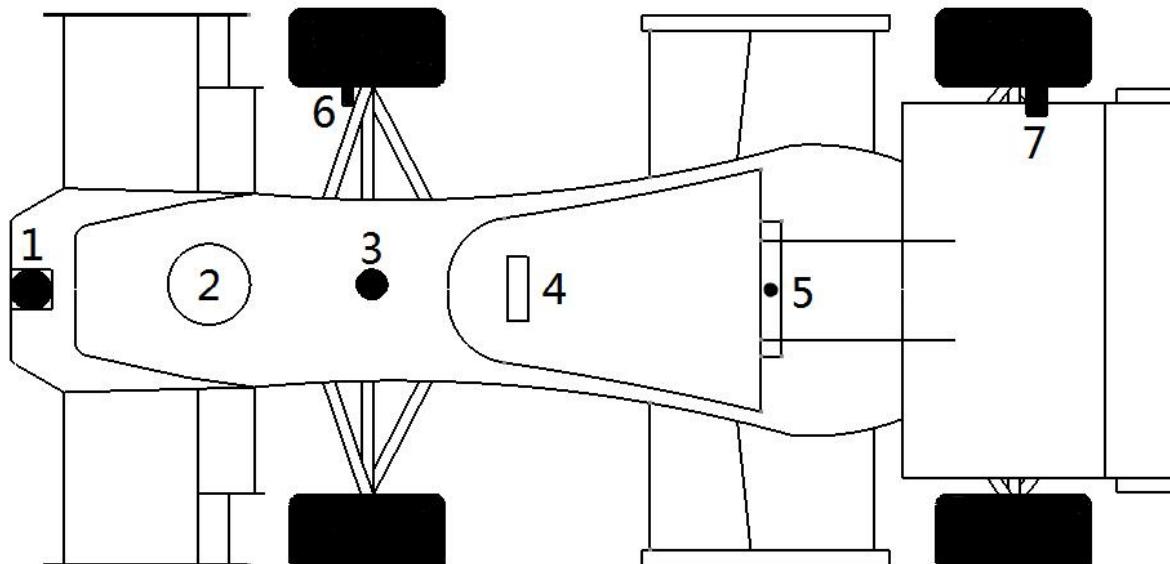
Tab.2-1 Racing size parameters

整车参数	数值	整车参数	数值
总长 (mm)	3025	重心高度 (mm)	260
总宽 (mm)	1400	前轴荷 (kg)	101
总高 (mm)	1192	后轴荷 (kg)	144
轴距 (mm)	1570	整备质量 (kg)	245
前轮距 (mm)	1210	后轮距 (mm)	1180

2.2.2 传感器系统

FSAC 赛车与传统车辆最大区别就在于能够自动驾驶，自动驾驶需要自动采集、处理外部环境信息，并按照一定规则做出决策，最终发送命令给执行机构。人类驾驶员正是通过眼睛、耳朵等来搜集外部信息，并经过大脑整合信息做出判断，再通过四肢来进行操作。因此，传感器系统是无人驾驶的核心之一，是车辆进行路径规划、决策控制的前提条件。主要传感器为激光雷达、GPS/INS 惯性导航、摄像头、编码器等。

根据大赛规则及传感器特性进行布置，具体如下图所示：



1. 激光雷达 2.GPS 3.转角编码器 4.惯性测量单元 5.立体相机 6.轮速传感器 7.转子位置编码器

图 2-1 传感器布置

Fig.2-1 Sensor arrangement

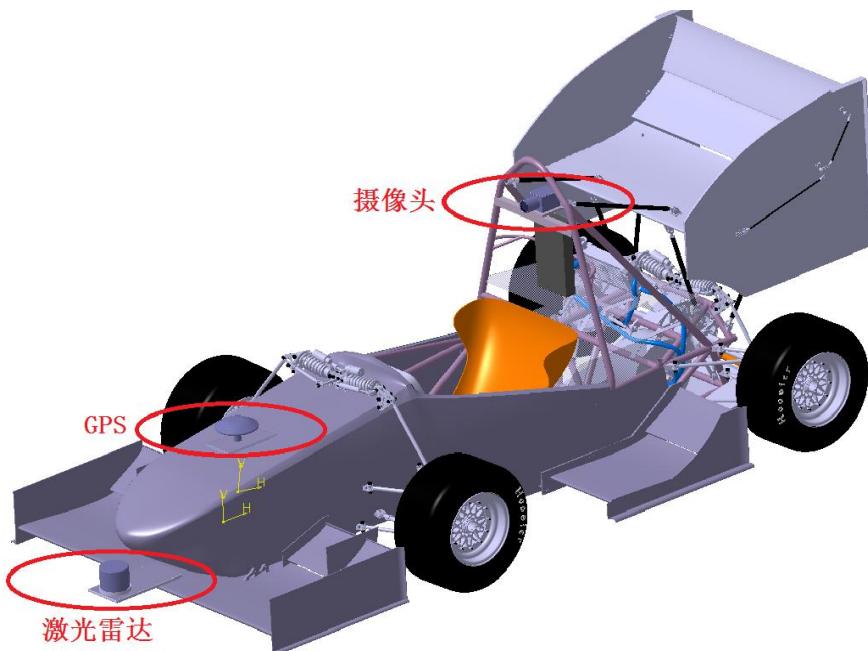


图 2-2 FSAC 赛车传感器布置三维图

Fig. 2-2 Three-dimensional layout of FSAC racing sensors

激光雷达是一种精确获取三维位置信息的传感器，可识别周围物体的形状、距离、姿态，为车辆定位导航、路径规划和决策控制提供信息。激光雷达时刻向周围环境发射光束，来获得周围物体的状态信息，对比普通雷达具有精度高、范围宽广等特点。

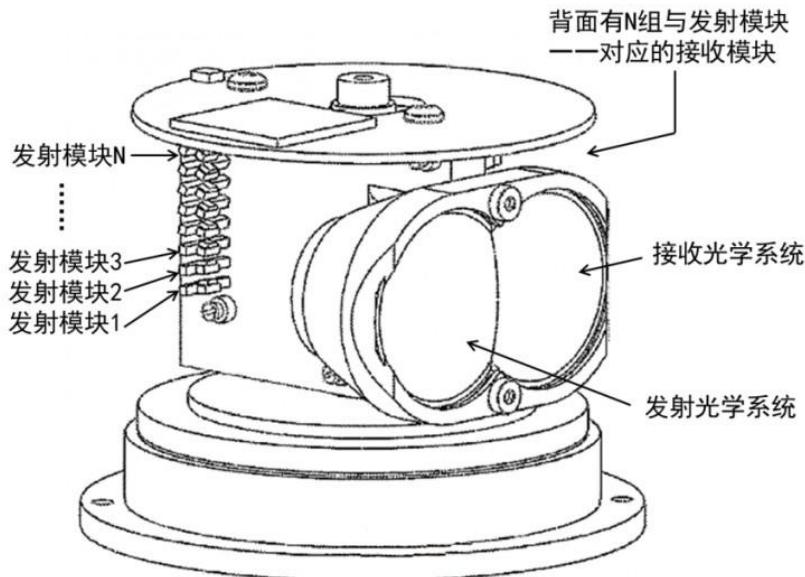


图 2-3 激光雷达工作原理图

Fig. 2-3 Schematic diagram of lidar operation

激光雷达的工作原理如图 2-3 所示，通过发射激光光束来探寻目标，并通过搜集反射回来的光束来形成点云和获取数据，这些数据经光电处理后可生成为精确的三维立体图像。采用这项技术，可以准确的获取高精度的物理空间环境信息，测距精度可

达厘米级。通过多束激光竖列而排，绕轴进行 360° 旋转，每一束激光扫描一个平面，纵向叠加后呈现出三维立体图形。

激光雷达按照其线束的多少分为单线束激光雷达与多线束激光雷达，多线束激光雷达可分为 16 线、32 线、64 线。单线束激光雷达由于是向外发射单激光束，所以点云密度低而导致分辨率不高的问题；多线束激光雷达可扫描更多的平面，以此获取目标的信息也就越详细。激光雷达是无人车上是必不可少的传感器，生产厂家对于激光雷达的定价也比较高，以 Velodyne 公司生产的多线激光雷达为例，其技术参数及售价如表 2-2 所示。因此，考虑其作用及成本问题，选用 16 线激光雷达。根据赛事规则及激光雷达的特征，将激光雷达安装在车身最前方中间位置。

表 2-2 Velodyne 激光雷达公司主要产品参数

Tab.2-2 Main product parameters of Velodyne lidar company

产品图片			
特性	HDL-64	HDL-32	VLP-16
售价	8 万美元左右	2 万美元左右	7999 美元
激光束	64	32	16
范围	120m	100m	100m
精度	$\pm 2\text{cm}$	$\pm 2\text{cm}$	$\pm 3\text{cm}$
数据类型	距离/密度	距离/校准发射率	距离/校准发射率
数据频率	1.3M 像素/秒	700000 像素/秒	300000 像素/秒
垂直角度	26.9°	40°	30°
水平角度	360°	360°	360°
功率	60W	12W	8W
体积	203*284mm	86*145mm	104*72mm
重量	15kg	1kg	0.83kg

GPS/INS 惯性导航是为了确定车辆在不同时刻的位置，对比该时刻行驶路径与期望路径之间的偏差，进行路径的跟踪，这就对于 GPS 定位的精确度、实时性、抗干扰能力提出了严格的要求。

GPS 工作原理是通过无人车上安装信号接收器来接收卫星的信号，测量出无人车与卫星之间的距离，在综合整理多颗卫星数据即可完成无人车定位。无人车的定位需要十分精确，但民用 GPS 的定位精度无法达到无人车定位的要求，所以需要进行差分定位技术进行修正，使其定位精度达到厘米级。差分定位的工作原理是：基准站通过接收 GPS 信号可以得到卫星的测量距离，再根据基准站的真实位置坐标与卫星真实位置坐标计算出二者实际距离，测量距离与实际距离的对比即可得到修改数，然后基准站再实时将修改数据发送给无人车，无人车即可得到精确的定位坐标。与目前最为成熟的差分技术是伪距差分技术，伪距差分技术的工作原理如下式：

$$R^i = \sqrt{(x^i - x_0)^2 + (y^i - y_0)^2 + (z^i - z_0)^2} \quad (2.1)$$

$$\Delta\rho^i = R^i - \rho^i \quad (2.2)$$

$$\Delta\dot{\rho}^i = \frac{\Delta\rho^i}{\Delta t} \quad (2.3)$$

$$\rho = \rho_u^i + \Delta\rho^i + \Delta\dot{\rho}^i(t - t_0) \quad (2.4)$$

式中： (x_0, y_0, z_0) 、 (x^i, y^i, z^i) 分别为参考站及可视卫星的真实位置坐标， R^i 为参考站与可视卫星的真实距离。 ρ^i 为参考站测得的与可视卫星的伪距，其包含所有的误差， $\Delta\rho^i$ 为伪距修正数， $\Delta\dot{\rho}^i$ 为伪距修正数变化率， ρ_u^i 为赛车测量与可视卫星的伪距， ρ 为改正后的伪距。

赛车位置的实时性对于赛车行驶轨迹有着重要的影响，但 GPS 信号很容易因为树木、建筑而中断，造成赛车无法实时定位而增大行驶误差，因此需要 GPS 与惯性导航综合使用来解决这个问题。惯性导航是采用陀螺仪、加速度传感器作为惯性传感器，不间断采集载体的瞬时加速度、瞬时角速度和旋转角度，以牛顿力学三大定律为理论推算无人赛车的运行速度和运行轨迹，通过不断的实时计算得到无人赛车位置信息^[30]。

通过伪距差分技术、GPS 与惯性导航相结合的方式能够极大地提高无人车定位的精确度及实时性。根据赛事规则及传感器特性将 GPS 接收天线安装在前隔板上方的车

身上，惯性测量单元安装在赛车质心座椅下部。

摄像头的作用是为了能识别结构化道路的车道线或者赛道上的交通标志，同时也能够对于障碍物的信息进行采集，然后进行信息的整合和运动的控制。无人车上常用的有单目摄像头与双目摄像头。

单目摄像头是首先通过识别目标，分析大量数据才能够确定与障碍物的距离，且对于障碍物的位置及距离感知容易出现误差。

双目摄像头就如同人的眼睛一样，双目摄像头基于不同角度且同一时间获得障碍物的数字图像，再根据视差原理来得到物体三维几何信息的方法^[31]。原理图如图所示：

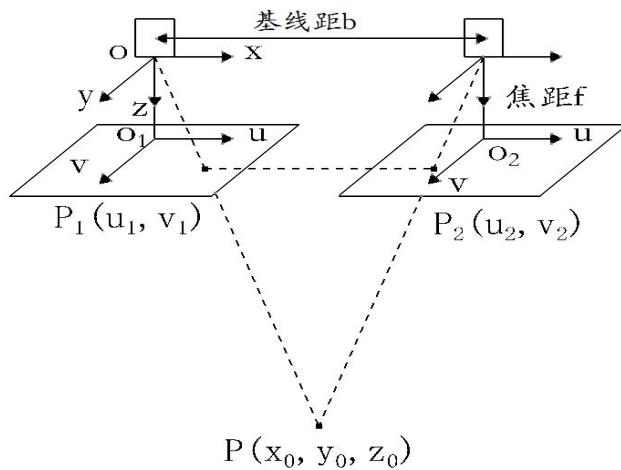


图 2-4 双目立体成像原理图

Fig. 2-4 Schematic diagram of binocular stereoscopic imaging

基线距表示两个摄像头之间的距离，以左侧摄像头光心为坐标原点建立空间坐标系，点 P 为空间中任意一点，其坐标为 (x_0, y_0, z_0) ，将成像平面绘制在摄像头光心前 f 处，以摄像头光轴与成像平面的焦点为原点分别建立两个坐标系 uo_1v 与坐标系 uo_2v ，以便于计算。其中，两个摄像头成像位于同一个平面，点 P 在左右两个摄像头成像平面的坐标分别为 $P_1(u_1, v_1)$ 、 $P_2(u_2, v_2)$ ，则 v_1 与 v_2 相等。由三角形相似得：

$$u_1 = f \frac{x_0}{z_0} \quad u_2 = f \frac{(x_0 - b)}{z_0} \quad v_1 = v_2 = f \frac{y_0}{z_0} \quad (2.5)$$

$$d = u_1 - u_2 = \frac{f * b}{z_0} \quad (2.6)$$

$$x_0 = \frac{b * u_1}{d} \quad y_0 = \frac{b * v}{d} \quad z_0 = \frac{b * f}{d} \quad (2.7)$$

其中 d 表示左右两个摄像头成像之间的位置差，也即是时差。通过上述计算公式，只要找到目标点在两个摄像头的成像位置，再由摄像头参数便能够确定目标点的坐标。

双目摄像头较单目摄像头成像精度高且没有识别率限制，所以本课题选用双目立体摄像头。为了能够最大限度发挥摄像头的宽广角，摄像头需要在视野比较开阔的位置，但局限于规则要求必须安装在主环最高处和四轮外边缘围成的表面积区域之内，所以这里摄像头选择安装在主环上。

2.2.3 无人车通信系统

FSAC 赛车的通信系统是由上层环境感知系统、规划决策系统、底层控制系统、遥控急停系统四部分构成，上层环境感知系统包括感知传感器及车辆数据采集系统，规划决策系统包括全局路径规划、局部路径规划、路径跟踪、数据决策、数据融合，底层控制系统包括横向运动控制系统、纵向控制系统。其具体通信系统如图 2-5 所示：

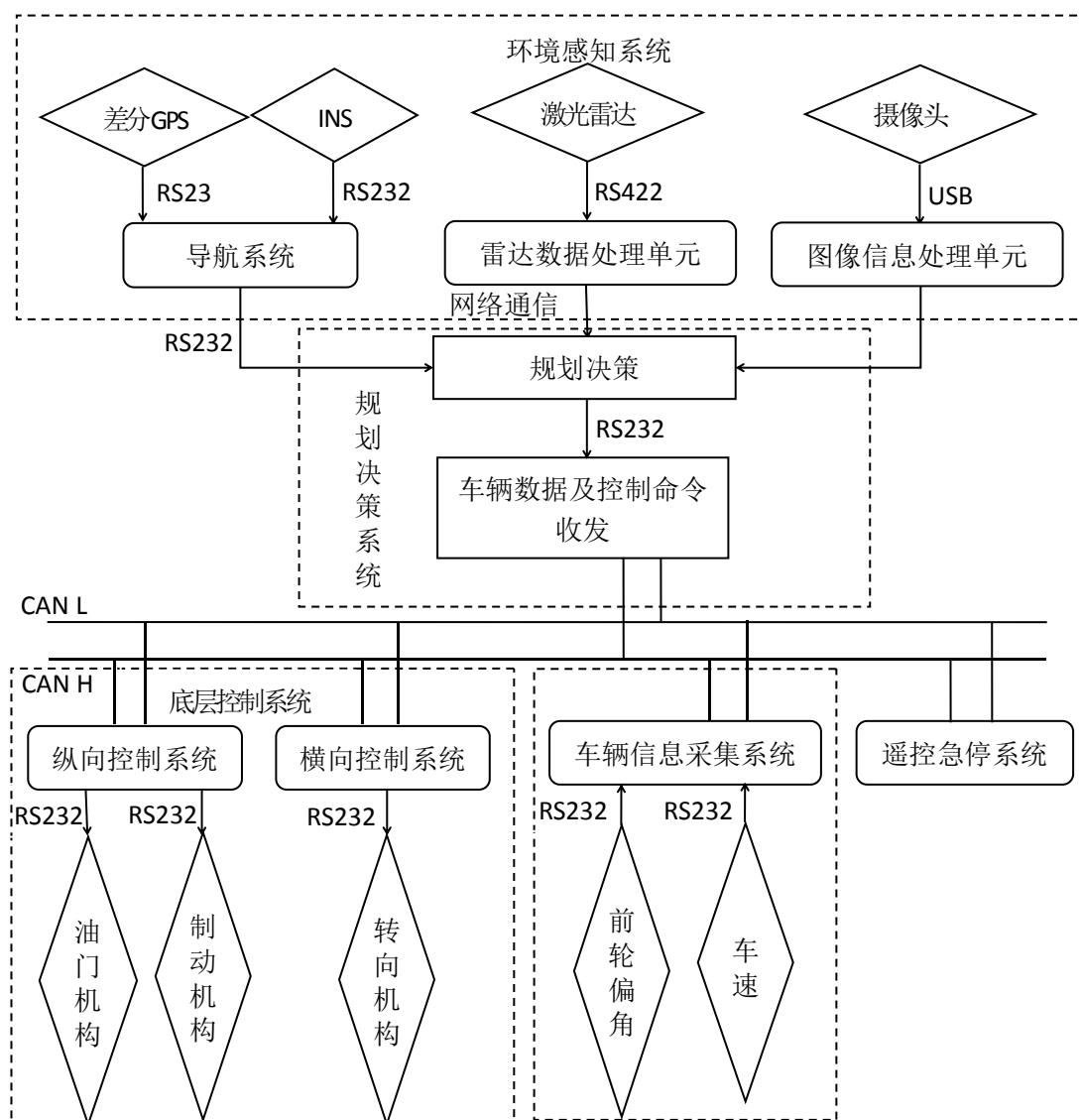


图 2-5 通信系统
Fig.2-5 Communication system

2.3 FSAC 赛车底层控制系统硬件改装设计

FSAC 赛车运动控制器只是根据路径跟踪算法决策出了控制命令,仍需要将命令发送给执行机构,执行机构完成最后的动作才算一个完整控制过程,所以执行机构是实现自动操作的基础。执行机构作为运动控制的最后一个环节,需要能够快速、准确的执行上层控制器的命令。因此,执行机构的设计必须严谨。执行机构的设计包括转向机构改装、制动机构改装、油门机构改装,由于本文主要研究横向运动控制,所以对于制动执行机构及油门机构的改装不再赘述。本节基于广东工业大学首辆 FSAC 赛车进行转向执行机构的设计。

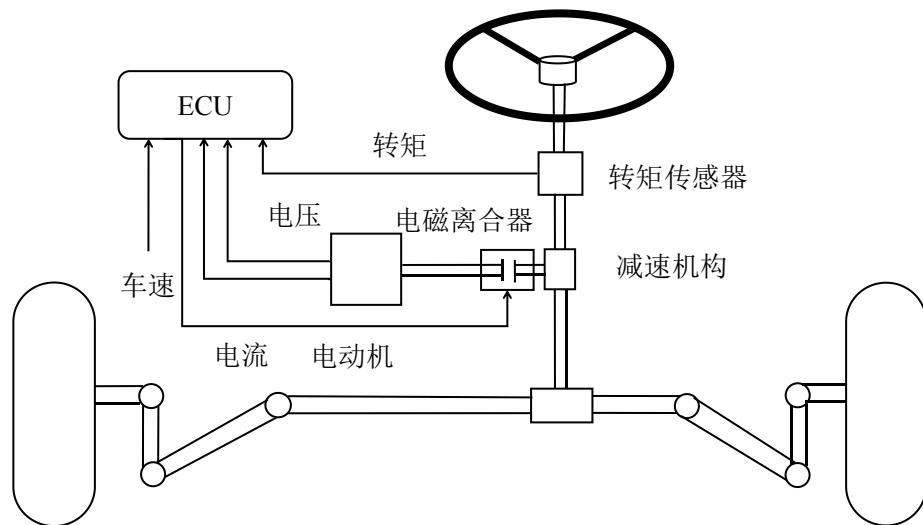


图 2-6 EPS 工作原理

Fig.2-6 Operating principle of EPS

FSAC 赛车规则对于转向执行机构的要求是可以进行线控改装,但同时能够进行人工转向。由于 FSAC 赛车空间有限且线控改装的难度过大,因此一般基于 EPS (电动助力转向) 进行改装。EPS 作为目前在乘用车上最为成熟的技术,一体化的结构能够满足赛车对于轻量化及空间的要求,稳定性及实时性能够保证车辆进行精确转向。EPS 工作原理如图 2-6 所示,当转向盘转动时,扭矩传感器能够检测转向力矩的大小以此来产生一个信号,再将信号发送给 ECU, ECU 分析该信号以及当前车速信号,决策此时转向电机应该输出的电流以及方向,进而控制转向电机的转动,实现助力。对于无人车而言,转向盘不是人为驱动的,此时扭矩传感器无法产生助力信号,但为了形成转向系统闭环控制,当汽车转向时,扭矩传感器产生的信号将作为转向的反馈信号。

转向机构改装设计如图 2-7 所示:

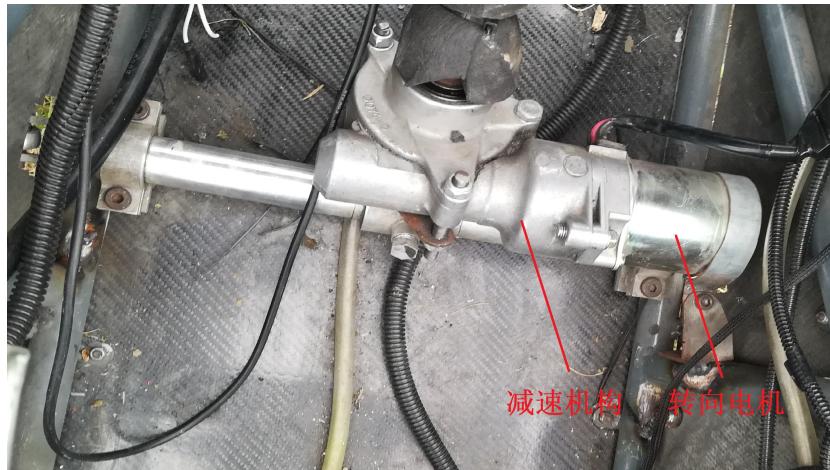


图 2-7 转向执行机构
Fig. 2-7 Turning actuator

2.3.1 转向电机

直流电机带动转向需解决的阻力，主要是前轮转动阻力、车轮稳定阻力、轮胎形变阻力和系统内摩擦阻力等，但无法计算出这些阻力的精确值。所以，这里凭借比较精确的半经验公式来衡量汽车的最大原地转向阻力矩^[32]：

$$M_r = \frac{f}{3} \sqrt{\frac{G_1^3}{p}} \quad (2.8)$$

式中， M_r 表示原地转向阻力矩； f 表示轮胎与路面的摩察系数，取 0.7； G_1 表示前轴负荷，值为 1345.1N； p 表示轮胎胎压，取 0.18MP；计算得到 M_r 的值为 $27130 N \cdot mm$ 。

通过下列式子计算转向轴力矩：

$$T = \frac{M_r}{i_\omega \eta_+} \quad (2.9)$$

式中， T 表示转向轴力矩； i_ω 表示转向角传动比，取 4.6； η_+ 表示转向器正效率，取 0.8，计算得到 T 的值为 $7372.3 N \cdot mm$ 。

EPS 助力电机常用的有两种类型，一种是直流有刷电机，另一种是直流无刷电机。直流有刷电机采用强度高的永磁材料，其中空心杯无铁芯转子作为核心部件，其特点是动力强劲、结构紧凑、低转子惯量^[33]。在考虑需要克服的转向阻力矩及安全因数的情况下，选用 57 闭环步进电机，其特点是转向力矩大，达到 $3.0 N \cdot m$ ，转向精度高，适合 FSAC 赛车转向执行机构。

2.3.2 电机控制器

传统电机伺服控制器一般选一个或多个单片机，但此类控制器外围电路复杂，计算时间过长，无法达到高运算律、高精度及实时控制要求。故本文选用思科赛公司生产的伺服控制器，该控制器基于 DSP 数字开发技术及矢量闭环控制技术设计的伺服控制器，集电机驱动器、PLC 功能等为一体，具有强大的计算能力，且能够控制多种类型的电机，包括直流有刷电机、直流无刷电机等。控制器的实物图像如图 2-8 所示。



图 2-8 电机控制器
Fig. 2-8 Motor controller



图 2-9 增量式编码器
Fig. 2-9 Incremental encoder

其参数如表 2-3 所示：

表 2-3 电机控制器参数
Tab.2-3 Motor controller parameters

控制器参数			
名称	57 系列步进电机伺服控制器	报警、到位信号	支持
脉冲电压	5V-24V 信号兼容	型号	HBS57
响应频率	最大 200KHz	脉冲方式	单脉冲、双脉冲均可
相电流	5A/Pha	冷却方式	自然冷却
处理器	32 位 DSP 数字式	外形尺寸	118*75*34 (mm)

2.3.3 编码器

编码器是将信号编译为可用以传输、储存信号形式的设备。转向执行编码器常见增量式和绝对式两类。增量式编码器工作原理是把位移转变为周期性电信号，之后再将电信号转换成计数的脉冲，以脉冲的数量来表示位移大小^[34]。绝对式编码器是每一个位置对应一个确定的数字码，则其示值仅和测量的起止位置有关，与测量过程无关。

参照一机构需要能够迅速、准确的执行上层的命令，根据上述两种编码器的特点及转向执行机构的要求，本设计选用欧姆龙公司的增量式编码器 E6B2-CWZ6C，实物如图 2-9 所示，具体参数如表 2-4 所示。

表 2-4 编码器参数
Tab. 2-4 Encoder parameters

类型	规格	类型	规格
电源电压	DC5-24V	输出极位差	A 相、B 相位差 $90\pm45^\circ$
消费电流	80mA 以下	启动扭矩	0.98mN·m 以下
输出状态	NPN 开路集电极输出	惯性力矩	$1\times10^{-6}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 以下
输出容量	外加电压：DC30V 以下 吸入电流：35mA 以下 残留电压：0.4V 以下	允许最高转速	6000r/min
最高相应频率	1000kHz	允许力	径向～30N 轴向～20N
环境温度	-10～+70°C	环境湿度	35～85%RH

大赛规则要求 FSAC 赛车的转向执行机构既能够根据上层控制器完成自动转向，也能够完成人工转向。因此需要设计在自动驾驶模式下转向执行机构的整体运行框架。

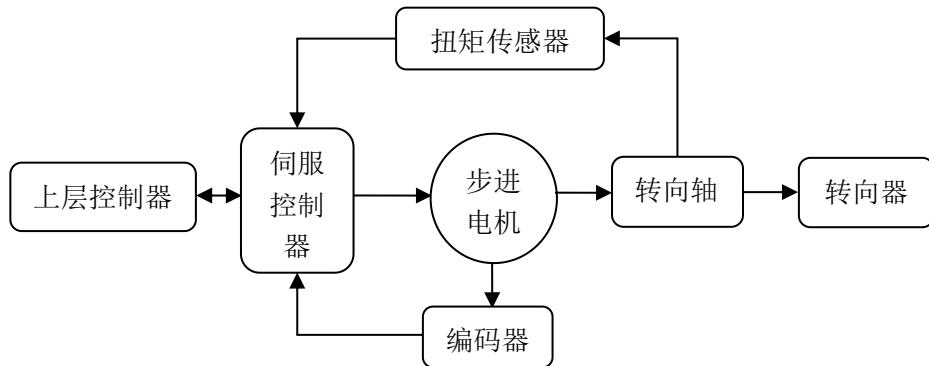


图 2-10 转向执行机构框架图
Fig. 2-10 Frame diagram of steering actuator

2.4 本章小结

本章分析了中国大学生无人驾驶方程式汽车大赛的规则，并根据规则进行 FSAC 赛车的改装设计，主要包括传感器的布置及执行机构的设计。分析了主要传感器的工作原理及选型，并根据其各自特性及大赛规则进行了布置设计。由于本文研究的是 FSAC 横向运动控制，所以这里只介绍了转向系统的改装设计，转向系统是基于 EPS

电动助力转向进行设计，包括电机、伺服控制器、编码器等硬件的选配。

第三章 车辆动力学及运动学模型

3.1 轮胎模型

FSAC 赛车是一个集电机、电池、底盘、车身、电气设备等为一体的综合体，其各项性能都与车辆的结构密切相关。车辆在地面上行驶时，唯一与地面接触的就是轮胎，轮胎既要承受来自车辆本身的载荷及操作，也要与地面发生力的作用，驱动车辆的前行以及缓冲减震。也即是轮胎的结构参数以及力学特性直接关系到车辆的动力性能、制动性能、平顺性、行驶安全性与操纵稳定性等性能^[35]。轮胎力学特性的描述准确与否，将直接影响车辆动力学模型的精确度，最终影响车辆运动控制。所以在进行车辆动力学建模之前需要对轮胎进行力学特性分析，建立合适的轮胎模型。

3.1.1 轮胎坐标系

轮胎是一个结构复杂的弹性体，具有明显的非线性特性^[36]。轮胎的侧偏特性也即是侧向力、回正力矩与侧偏角之间的关系，轮胎力学特性的分析实质上是为了得到精确的侧向力与车轮滑移率，为进一步的车辆动力学建模做基础。为方便研究轮胎的力学特性，需要建立一个空间坐标系，如图 3-1 所示。以轮胎与地面的接触点为坐标原点 O，以车轮前进方向为 X 轴，以车轮前进方向时向左方向为 Y 轴，以向上方向为 Z 轴。轮胎承受来自地面的作用力及相对应的力矩，分别是沿着三条坐标轴的力以及绕坐标轴旋转的力矩。

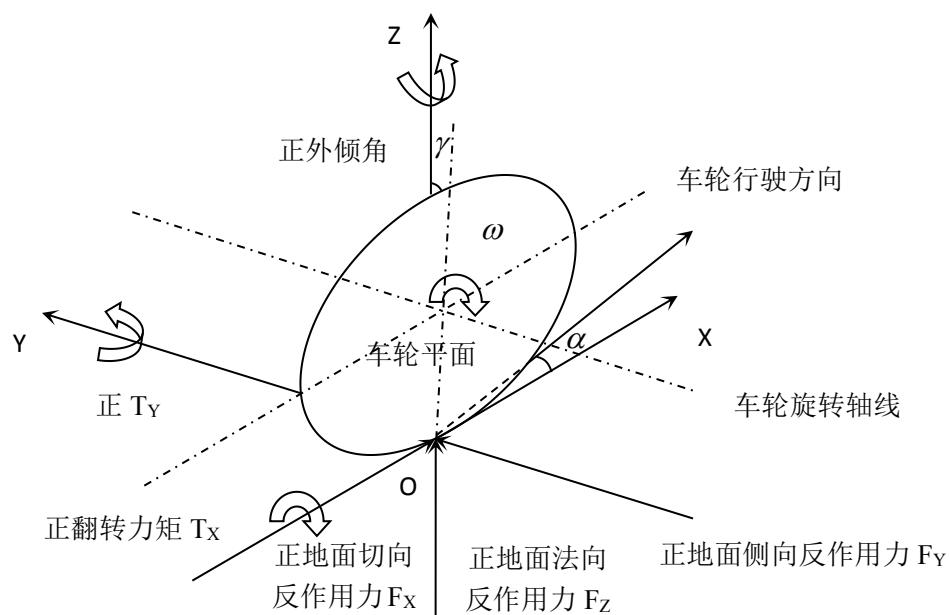


图 3-1 轮胎的坐标系

Fig.3-1 Tire coordinate system

3.1.2“魔术公式”轮胎模型

轮胎模型可以分为理论模型、经验模型、半经验模型。理论模型是根据轮胎的力学特性，进行简化而建立物理模型，其代表模型是线性模型与 UA 模型等；经验模型是根据试验得到的数据进行拟合得到的经验公式，以“魔术公式”精度最高；半经验公式则是在试验数据和理论的基础上进行分析得到的含有拟合参数的半经验公式，以郭孔辉提出幂指数模型为代表。其中，由 Pacejka 教授提出的“魔术公式”使用最为广泛，其特点是以三角函数来拟合轮胎试验的数据，得到了一个同时能够表达纵向力、侧向力、回正力矩的轮胎模型。当侧向加速度不大于 $0.4g$ 、轮胎侧偏角不大于 5° 时，“魔术公式”轮胎模型的拟合精确度比较高，且方便接下来的仿真分析，所以本文以“魔术公式”轮胎模型进行轮胎力学特性分析。

“魔术公式”轮胎模型表达式为：

$$Y(x) = D \sin \left\{ C \arctan \left[Bx - E \left(Bx - \arctan(Bx) \right) \right] \right\} \quad (3.1)$$

其中， x 表示输入量； Y 表示输出量； B 为刚度因子； C 为形状因子； D 为峰值因子； E 为曲率因子。上述因子是由车辆载荷以及车轮定位参数决定的。输入可以是轮胎侧偏角或者轮胎滑移率，输出可以是纵向力、侧向力或者回正力矩。因此，“魔术公式”轮胎模型的主要作用是能够确定轮胎的侧向力、纵向力、回正力矩与轮胎侧偏角、轮胎滑移率之间的关系。“魔术公式”轮胎模型输入与输出之间的关系如图 3-2 所示。

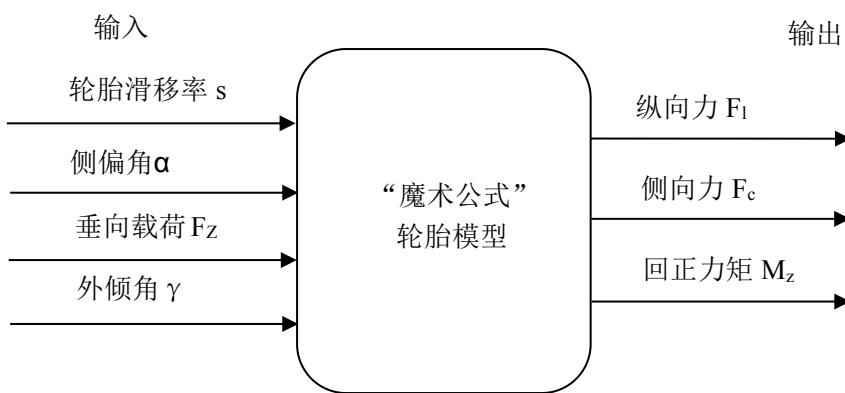


图 3-2 “魔术公式”轮胎模型输入输出关系

Fig.3-2 "Magic formula" tire model input/output relationship

3.1.3 轮胎力学特性

汽车行驶过程将受到来自不平路面的侧向倾斜、转向时的离心力的作用，车轮的

中心沿 Y 轴方向将作用有侧向力 F_c , 相应的在地面上产生侧向力的反作用力 F_Y , 我们称之为侧偏力^[37]。

本文所选轮胎是参赛规定轮胎 Hooiser43105, 其外径为 18 英寸, 胎面宽度为 7.5 英寸, 重量为 4.54kg, 具有质量轻、附着面积大的特点。根据魔术公式可以得到轮胎侧偏力的计算公式:

$$F_Y = -D \sin \left\{ C \arctan \left[Bx - E \left(Bx - \arctan (Bx) \right) \right] \right\} - S_v \quad (3.2)$$

其中, S_h 表示曲线水平方向漂移, S_v 表示曲线垂直方向漂移, 各参数计算公式如下:

$$\begin{cases} x = \alpha + S_h \\ C = A_0 \\ D = A_1 F_z^2 + A_2 F_z \\ E = A_6 F_z + A_7 \\ S_h = A_9 F_z + A_{10} + A_8 \gamma \\ S_v = A_{11} F_z \gamma + A_{12} F_z + A_{13} \\ B = A_3 \sin(2 \arctan(F_z / A_4)) \times (1 - A_5 |\gamma|) / (C \times D) \end{cases} \quad (3.3)$$

在纯侧偏工况下, 侧倾角为固定值, 纵向滑移率为 0。进行侧偏力与侧偏角关系仿真分析, 分别计算垂向载荷为 1KN、2KN、3KN、4KN、5KN 对应的侧偏力与侧偏角关系, 如图 3-3 所示:

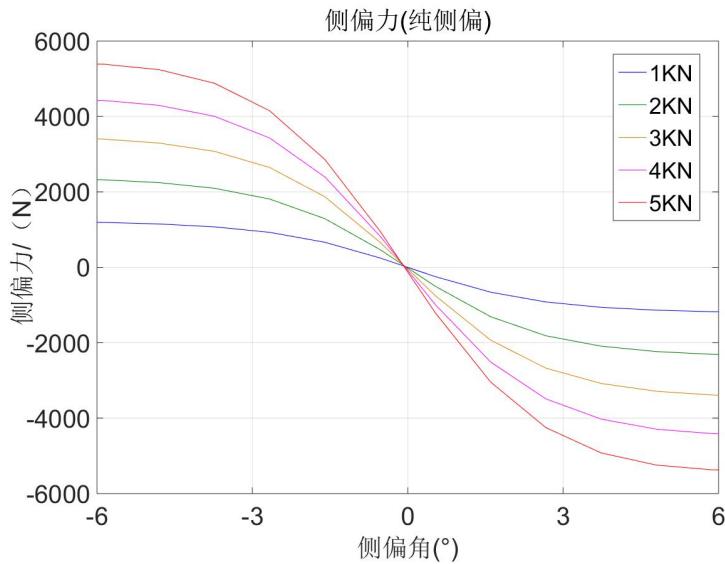


图 3-3 侧偏力侧偏角关系图

Fig.3-3 Relation diagram of lateral deflection Angle of lateral deflection force

由上图可知, 垂向载荷越大, 在相同侧偏角条件下侧偏力也越大; 侧偏力随着侧

偏角的增大而增大，但超过一定范围，侧偏力趋于稳定；整体来看，侧偏力与侧偏角呈非线性关系，但当侧偏角在 $\pm 3^\circ$ 以内，侧偏角与侧偏力成线性关系。

根据“魔术公式”可以得到轮胎的纵向力计算公式：

$$F_l = D \sin \left\{ C \arctan [Bx - E(Bx - \arctan(Bx))] \right\} + S_v \quad (3.4)$$

其中， S_h 表示曲线水平方向漂移， S_v 表示曲线垂直方向漂移，值为 0，各参数计算公式如下：

$$\begin{cases} x = s + S_h \\ C = B_0 \\ D = B_1 F_z^2 + B_2 F_z \\ E = B_6 F_z^2 + B_7 F_z + B_8 \\ S_h = B_9 F_z + B_{10} \\ S_v = 0 \\ B = (B_3 F_z^2 + B_4 F_z) \times e^{-B_5 F_z} / (C \times D) \end{cases} \quad (3.5)$$

在纯侧滑工况下，外倾角是固定值，侧偏角为 0。在不同垂直载荷下，进行纵向力与纵向滑移率关系的研究，具体在 1KN、2KN、3KN、4KN、5KN 对应的垂直载荷下，其图像如图 3-4 所示。

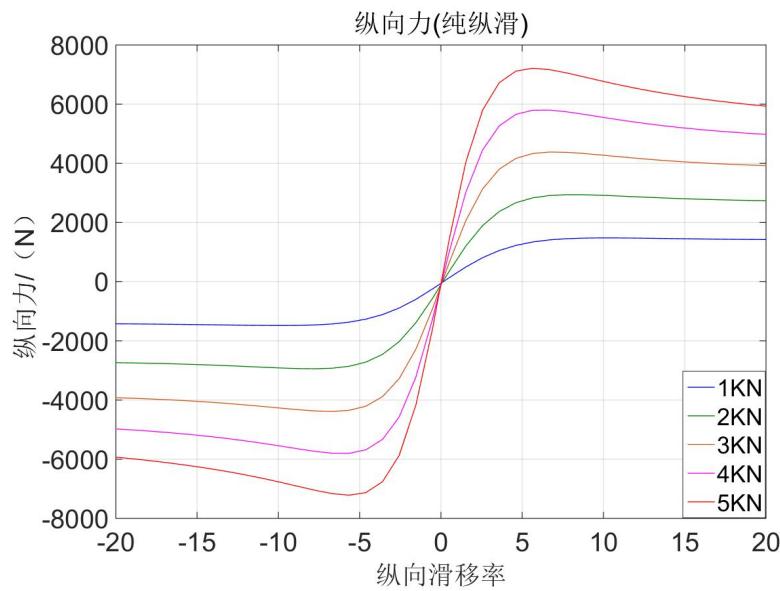


图 3-4 纵向力与纵向滑移率关系

Fig.3-4 Relationship between longitudinal force and longitudinal slip rate

通过上图可知，在一定范围内，纵向滑移率固定时，侧向力随着垂向载荷的增大

而增大；同一垂向载荷下，纵向滑移率在 ± 5 的范围内，纵向力随着滑移率的增大而增大，呈线性关系，但超过这个范围，纵向力随着滑移率的变化而逐步趋向于稳定，且此时二者呈非线性关系。

通过以上两种工况分析可知，虽然轮胎具有特别明显的非线性，但在较小侧偏角及滑移率变化范围内，轮胎的力学特性可以进行线性拟合。

3.2 车辆动力学模型

无人车的运动控制需要建立在汽车模型的基础上进行，但汽车是一个多自由度变参数的非线性系统，所以需要对于一些状态参数进行约束，建立合适的汽车模型，减少控制量的计算，以达到横向控制的实时性、精确性。无人车横向运动控制本质上是汽车的操纵稳定性的范畴，操纵稳定性研究需要对汽车纵向及侧向动力学进行分析。因此，汽车动力学建模可以在以下假设条件下进行：

- (1) 不考虑车辆的垂向运动、翻转及侧倾，车辆只有平面的运动。
- (2) 认为悬架是刚性的，忽略悬架与车身的耦合作用。
- (3) 忽略轮胎的侧向与纵向耦合作用，只考虑侧偏。
- (4) 没有载荷的偏移。
- (5) 左右轮转角及载荷一样。
- (6) 忽略空气动力学。

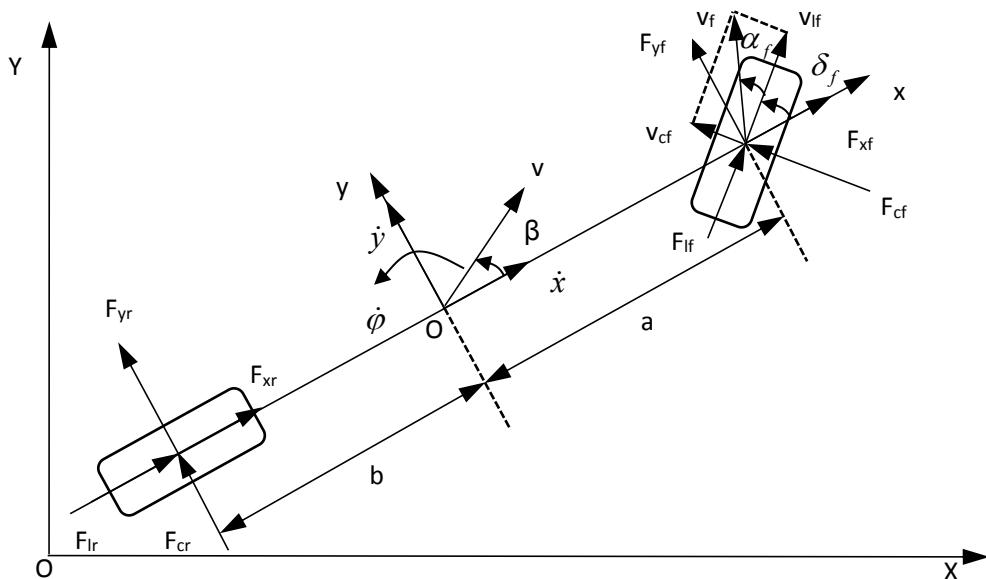


图 3-5 车辆单轨模型
Fig.3-5 Monorail model of vehicle

在以上假设条件下建立 3 自由度车辆动力学模型，车辆在平面运动只存在纵向、

侧向、横摆三个自由度。车辆单轨模型如图 3-5，其中以 OXY 为惯性坐标系，以车辆质心为坐标原点建立车辆坐标系 oxyz，xoz 在汽车左右对称平面内，x 轴沿着汽车前进方向，y 轴垂直于汽车前进方向指向左侧，z 轴垂直大地向上。

其中： F_{xf} 、 F_{xr} 分别表示车辆前后轮所受的 x 方向的力； F_{yf} 、 F_{yr} 分别表示车辆前后轮所受的 y 方向的力； F_{lf} 、 F_{lr} 分别表示车辆前后轮所受纵向力； F_{cf} 、 F_{cr} 分别表示车辆前后轮所受纵向力； a 表示前轮轴线到质心的距离， b 表示后轮轴线到质心的距离； φ 表示质心侧偏角； δ_f 表示前轮转角； α_f 表示前轮侧偏角。

根据建立的单轨车辆模型可知，车辆左右侧轮胎的受力相同，且车辆只有平面运动，所以根据牛顿经典力学可以得到平衡方程：

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2F_{xf} + 2F_{xr} \\ m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2F_{yf} + 2F_{yr} \\ I_z\ddot{\varphi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr} \end{cases} \quad (3.6)$$

其中： m 表示车辆整备质量， I_z 表示车辆绕 z 轴的转动惯量。

根据轮胎的受力分析可以得到：

$$\begin{cases} F_{xf} = F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f \\ F_{xr} = F_{lr} \\ F_{yf} = F_{lf} \sin \delta_f + F_{cf} \cos \delta_f \\ F_{yr} = F_{cr} \end{cases} \quad (3.7)$$

将 (3.7) 带入 (3.6) 得

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2(F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f) + 2F_{lr} \\ m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2(F_{lf} \sin \delta_f + F_{cf} \cos \delta_f) + 2F_{cr} \\ I_z\ddot{\varphi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr} \end{cases} \quad (3.8)$$

车辆轮胎的纵向力及侧向力跟轮胎侧偏角、滑移率、路面的摩擦系数、垂向载荷等参数有关^[38]，具体关系可以通过以下函数关系表示：

$$\begin{cases} F_l = f_l(\alpha, s, \mu, F_z) \\ F_c = f_c(\alpha, s, \mu, F_z) \end{cases} \quad (3.9)$$

其中， μ 表示路面摩擦因数，它的值取决于路面； s 表示滑移率； α 表示侧偏角； F_z 表示垂向载荷，取决于车辆整备质量。

轮胎滑移率 s 计算公式如下：

$$s = \begin{cases} \frac{r\omega_t}{v} - 1 & (v > r\omega_t, \omega_t \neq 0) \\ 1 - \frac{r\omega_t}{v} & (v < r\omega_t, \omega_t \neq 0) \end{cases} \quad (3.10)$$

式子中， ω_t 表示车轮的转速， r 表示车轮自由半径。

侧偏角的大小取决于侧向速度 v_c 与纵向速度 v_l ，根据图 3-5 可到计算侧偏角的公式：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_c}{v_l} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} v_l = v_y \sin \delta_f + v_x \cos \delta_f \\ v_c = v_y \cos \delta_f - v_x \sin \delta_f \end{cases} \quad (3.12)$$

式子中， v_x, v_y 分别表示 x、y 轴方向的速度。

前后轮的速度都有侧向速度与纵向速度组成，其计算公式如下：

$$\begin{cases} v_{yf} = \dot{y} + a\dot{\phi} \\ v_{yl} = \dot{y} - b\dot{\phi} \\ v_{xf} = \dot{x} \\ v_{xl} = \dot{x} \end{cases} \quad (3.13)$$

前面进行汽车动力学建模时，明确限制车辆只有平面运动，要忽略前后轴载荷的转移，所以前后轴载荷的大小只与质心位置以及车辆整备质量有关，其计算公式分别为：

$$\begin{cases} F_{zf} = \frac{bmg}{2(a+b)} \\ F_{zr} = \frac{amg}{2(a+b)} \end{cases} \quad (3.14)$$

通过上一节的建立轮胎模型进行轮胎特性力学的分析可知，在小角度变化范围内，轮胎的侧偏力及纵向力都可以进行线性拟合得到，所以可以得到以下公式进行计算侧向力及纵向力：

$$\begin{cases} F_l = C_l s \\ F_c = C_c \alpha \end{cases} \quad (3.15)$$

式子中， C_l 为轮胎纵向刚度， C_c 为轮胎侧向刚度。

为了简化车辆动力学模型，在小角度变化范围内，即当角度接近于 0 时，做以下规定：

$$\begin{cases} \cos \alpha = 1 \\ \sin \alpha = \alpha \\ \tan \alpha = \alpha \end{cases} \quad (3.16)$$

所以，之前所推导的有关轮胎侧偏角的计算公式即可转化为：

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}} - \delta_f \\ \alpha_r = \frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}} \end{cases} \quad (3.17)$$

将式子 (3.18) 带入到式子 (3.16) 中得到前后轮的侧向力：

$$\begin{cases} F_{cf} = C_{cf}(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}) \\ F_{cr} = C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \end{cases} \quad (3.18)$$

在小角度范围内的线性化轮胎模型条件下，设计如下的车辆动力学模型：

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \\ m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2 \left[C_{lf}S_f - C_{cf}(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}})\delta_f + C_{lr}S_r \right] \\ m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2 \left[C_{lf}S_f\delta_f + C_{cf}(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}) + C_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right] \\ I_z = 2a \left[C_{lf}S_f\delta_f + C_{cf}(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}) \right] - 2bC_{cr} \frac{b\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}} \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \end{cases} \quad (3.19)$$

综合式子 (3.1) - (3.19)，便可以得到三自由度车辆动力学模型。除了路面摩擦系数外，其他数据都可以通过上述计算公式得到。路面摩擦系数是根据路面的情况来确定的，可以作为一个已知数据。综上即可将车辆动力学模型用状态空间方程来表示：

$$\begin{cases} \dot{\xi} = f[\xi(t), \mu(t)] \\ \eta = h(\xi) \end{cases} \quad (3.20)$$

车辆动力学模型是横向运动控制预测模型的基础，而横向运动控制的目的是能够保证车辆按照期望轨迹行驶，即对于转向的控制，因此控制量选择车轮转角。本文研究

的对象是无人赛车，其转向方式是前轮转向，所以控制量是前轮转角 δ_f ，即 $\mu(t)=\delta_f$ 。

通过上述参数的推导，状态量选择为 $\xi(t)=[\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^T$ ，输出为 $\eta=[\varphi, Y]^T$ ，其中

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

3.3 车辆运动学模型

车辆运动学及动力学模型是进行无人车运动控制的前提，其中，车辆高速行驶运动控制主要受车辆动力学约束；中低速行驶的车辆运动控制主要受运动学约束。车辆动力学模型是根据牛顿经典力学建立的力学微分方程；车辆运动学模型则是根据车辆几何关系建立的运动微分方程。上一节已经完成了三自由度车辆动力学模型的研究，而本节进行车辆运动学模型分析与建立。

3.3.1 阿克曼转向

FSAC 赛车横向运动控制本质是进行转向控制，转向系统的设计对于横向运动控制精度影响最为明显，因此，需要明确 FSAC 赛车转向系统的设计。传统的转向几何模型是不考虑侧偏角的阿克曼转向模型，其横向加速度较低，要求轮胎处在纯滚动的状态。但对于需要进行大量的转向操作，且横向加速度高的车辆，需要考虑带有侧偏特性的阿克曼转向模型。

转向几何模型的关键是要确定车辆瞬心位置，对于不考虑侧偏特性的阿克曼转向，由于四个轮胎全部都是纯滚动，且 FSAC 赛车为前轮转向，所以根据三心定理能够确定其瞬心位于后轴所在的直线上，原理如图所示：

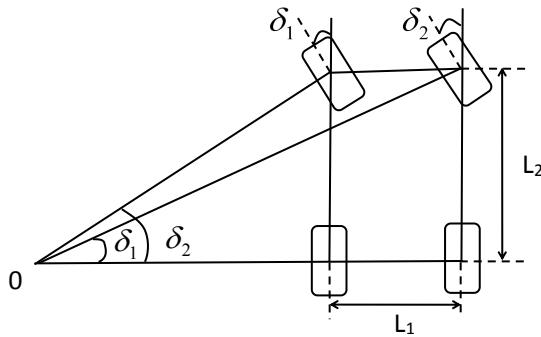


图 3-6 无侧偏特性的阿克曼转向

Fig. 3-6 Ackerman steering with unbiased characteristics

图中， δ_1 表示左前轮转向角， δ_2 表示右前轮转向角， L_1 表示车辆轮距， L_2 表示车辆轴

距。

$$\cot \delta_2 - \cot \delta_1 = \frac{L_1}{L_2} \quad (3.21)$$

对于实际的车辆而言，侧偏角对操纵稳定性的影响无法忽视，所以需要将侧偏角对于转向机构的影响考虑在内。考虑侧偏特性的阿克曼转向原理如图所示：

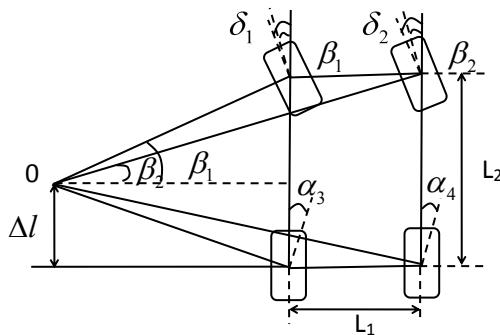


图 3-7 考虑侧偏特性的阿克曼转向

Fig. 3-7 Ackman steering with sidetracking characteristics in mind

式中， α_1 表示左前轮侧偏角， α_2 表示右前轮侧偏角， $\beta_1 = \delta_1 - \alpha_1$ ， $\beta_2 = \delta_2 - \alpha_2$ ， α_3 表示左后轮侧偏角， α_4 表示右后轮侧偏角。根据转向机构的几何特性以及阿克曼转向特点可知：

$$\begin{cases} \cot(\delta_2 - \alpha_2) - \cot(\delta_1 - \alpha_1) = \frac{L_1}{L_2 - \Delta L} \\ \cot \alpha_4 - \cot \alpha_3 = \frac{L_1}{\Delta L} \end{cases} \quad (3.22)$$

FSAC 赛车作为竞赛型车辆，需要设计结构简单、实时性好的横向运动控制器。因此，为了后续便于建立运动学模型、计算简单，这里选用无侧偏特性的阿克曼转向模型，且将阿克曼转向几何简化为自行车模型，即左右轮为相同的转向角。

3.3.2 车辆运动学建模

车辆运动状态与车辆结构及外部行驶工况有关，故需要考虑车辆结构及外部工况的限制。车辆本身具有多自由度及不确定性，无法建立精确的数学模型，但对于本文所研究的 FSAC 赛车而言，严格的比赛规则及良好的行驶路况，为车辆的运动控制简化模型提供了条件。因此，在进行运动学建模之前可以进行以下条件的假设：

- (1) 将 FSAC 赛车视为刚体；
- (2) FSAC 赛车只在平面上运动，没有侧倾、翻转、俯仰运动；

(3) 轮胎接触地面没有形变，只有纯滚动；

基于上述假设进行 FSAC 赛车运动学模型的建立，如图 3-8 所示：

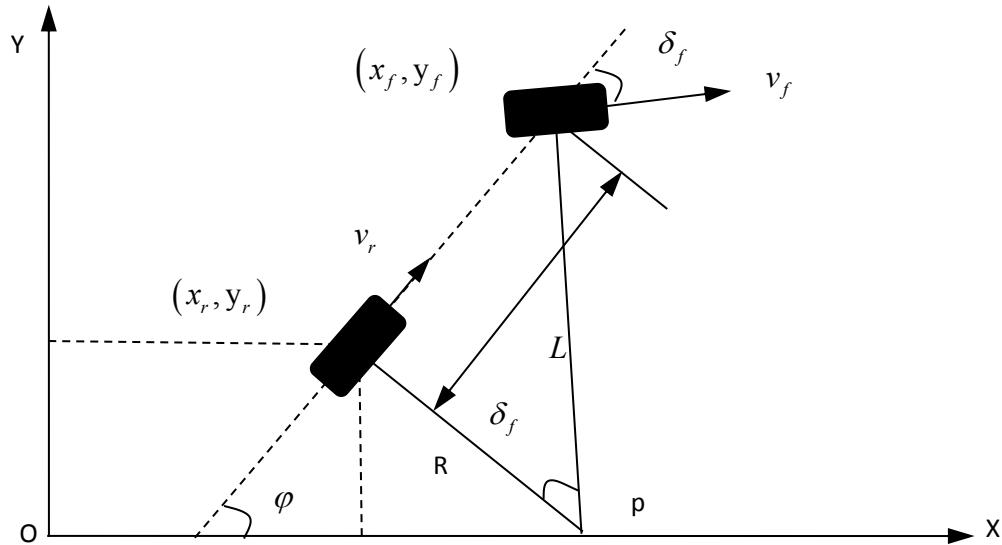


图 3-8 车辆运动学模型
Fig.3-8 Vehicle kinematics model

坐标系 XOY 为惯性坐标系，其中 (x_r, y_r) 为后轴中心的坐标， (x_f, y_f) 为前轴中心的坐标， φ 为汽车航向角， δ_f 为前轮转向角， v_f 为前轴中心速度， v_r 为后轴中心速度， L 为车辆轴距，点 P 为车辆瞬心， R 为转向半径。

根据运动学理论能够得到后轴中心速度 v_r 以及运动学微分方程，规定逆时针角度为正值，具体计算方法如下公式：

$$\begin{cases} \dot{x}_f \sin(\varphi + \delta_f) = \dot{y}_f \cos(\varphi + \delta_f) \\ \dot{x}_r \sin(\varphi) = \dot{y}_r \cos(\varphi) \\ v_r = \dot{x}_r \cos \varphi + \dot{y}_r \sin \varphi \end{cases} \quad (3.23)$$

进一步整理上式得到：

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_r \cos(\varphi) \\ \dot{y}_r = v_r \sin(\varphi) \end{cases} \quad (3.24)$$

根据前后轴中心坐标及轴距的几何关系可知需满足：

$$\begin{cases} x_f = x_r + L \cos(\varphi) \\ y_f = y_r + L \sin(\varphi) \end{cases} \quad (3.25)$$

根据阿克曼转向可知，横摆角速度需要满足：

$$\omega = \frac{v_r}{L} \tan \delta_f \quad (3.26)$$

综合式 (3-24) 与式 (3-26) 即可得车辆运动学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ \tan \delta_f / L \end{bmatrix} v_r \quad (3.27)$$

3.4 前馈-反馈控制器设计

纯跟踪算法最早应用在机器人路径跟踪上，具有跟踪精度高、响应迅速的特点。无人驾驶车辆作为机器人领域的重要分支，该算法同样适合于无人车的路径跟踪。纯跟踪算法是一种很成熟的路径跟踪算法，能够很好的跟踪上层规划的路径，但纯跟踪算法易受道路曲率、车速的影响。所以，本节针对以上分析，进行纯跟踪算法的改进。为提高路径跟踪的准确性及稳定性，在纯跟踪算法的基础上，结合仿驾驶员模型横向运动控制算法，设计前馈-反馈控制器。

3.4.1 基于横向预瞄偏差的前馈控制

纯跟踪算法是根据几何原理来得到前轮转角，实现路径跟踪。计算车辆当前位置到预瞄点的弧形轨迹。基本原理如图 3-9 所示，将车辆简化为自行车模型，以后轴为切点，车辆纵向车身为切线，通过控制前轮转角，实现由当前位置向目标位置的行驶。

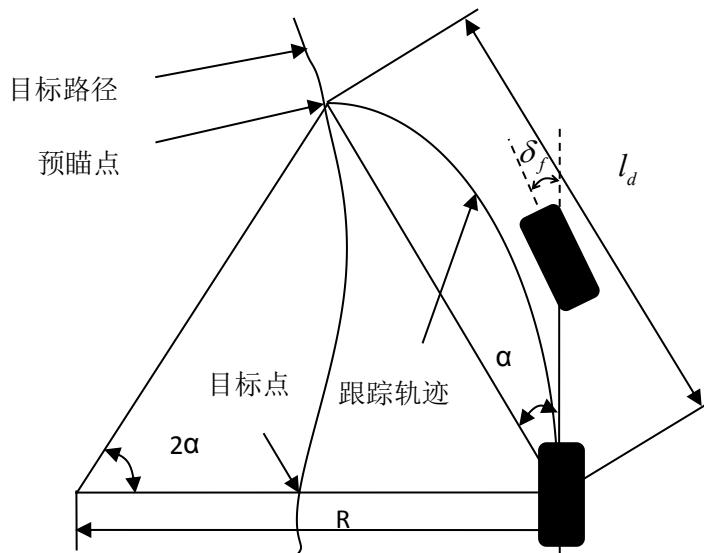


图 3-9 纯跟踪示意图
Fig.3-9 Pure trace schematic diagram

图中， α 表示纵向车身与预瞄点的夹角； l_d 表示车辆当前后轴位置与预瞄点之间的距离； R 表示转向半径；后轴与预瞄点之间的弧线即纯跟踪算法规划的行驶轨迹。若想到达

预瞄点，前轮转角的控制是关键。根据几何学可以推导出以下公式：

$$\frac{l_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \quad (3.28)$$

$$R = \frac{l_d}{2 \sin \alpha} \quad (3.29)$$

根据阿克曼转向原理可知：

$$\delta_f = \tan^{-1}\left(\frac{L}{R}\right) \quad (3.30)$$

将式 (3-29) 带入式 (3-30) 可得：

$$\delta_\alpha(t) = \tan^{-1}\left(\frac{2L \sin \alpha(t)}{l_d}\right) \quad (3.31)$$

预瞄距离的选取对于路径跟踪的影响很明显，预瞄距离过短将导致车辆转向振荡，车辆沿着蛇形工况行驶；预瞄距离过长会导致抄近道的问题。参考文献[39]可得预瞄距离的计算公式：

$$l_d = AV^2 + BV + C \quad (3.32)$$

式中，V 为车辆速度；A、B、C 都是常系数项，A 的值取决于最大制动加速度，B 的值一般为 0.2，C 表示最小转弯半径，取 5.5m。

$$A = \frac{1}{2a_{\max}} \quad (3.33)$$

式中， a_{\max} 表示最大制动加速度，根据车辆测试可知其最大值为 3m/s^2 。

将上述 A、B、C 的值分别带入式 (3.32) 得：

$$l_d = \frac{1}{6}V^2 + \frac{1}{5}V + 5.5 \quad (3.34)$$

基于最小预瞄距离与最大预瞄距离，将式子 (3.34) 变成分段形式，具体如下式：

$$l_d = \begin{cases} l_{\min} & V \leq V_{\min} \\ \frac{1}{6}V^2 + \frac{1}{5}V + 5.5 & V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ l_{\max} & V \geq V_{\max} \end{cases} \quad (3.35)$$

预瞄距离与车速之间的关系图：

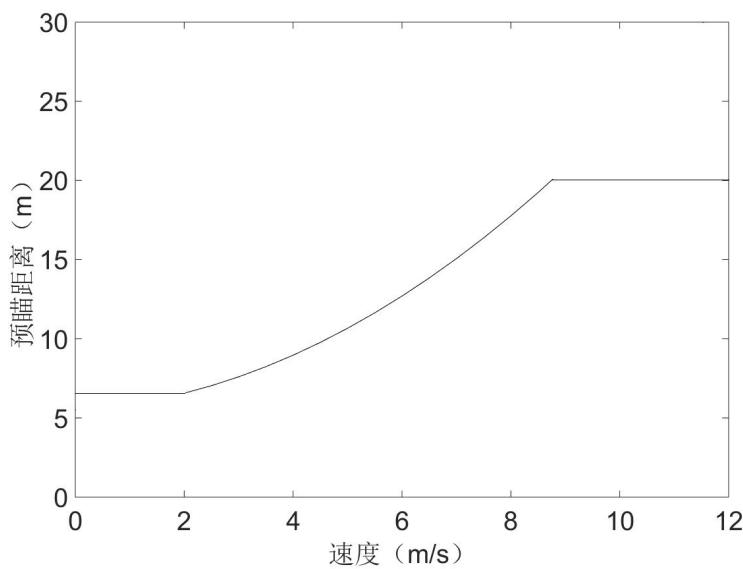


图 3-10 预瞄距离与车速关系

Fig. 3-10 Relationship between preview distance and vehicle speed

通过导航定位系统得到车辆当前位置坐标，当前位置信息再匹配规划路径最近点作为目标点。以目标点为圆心，预瞄距离为半径的圆与规划路径的交点也即是预瞄点，但是交点一共有两个，这就需要确定真实的预瞄点，根据经过后轴中心到交点的方向向量与航向向量的夹角在 $\pm 90^\circ$ 范围内，交点才是预瞄点，由图 3-11 可知该时刻的预瞄点为 N_1 。

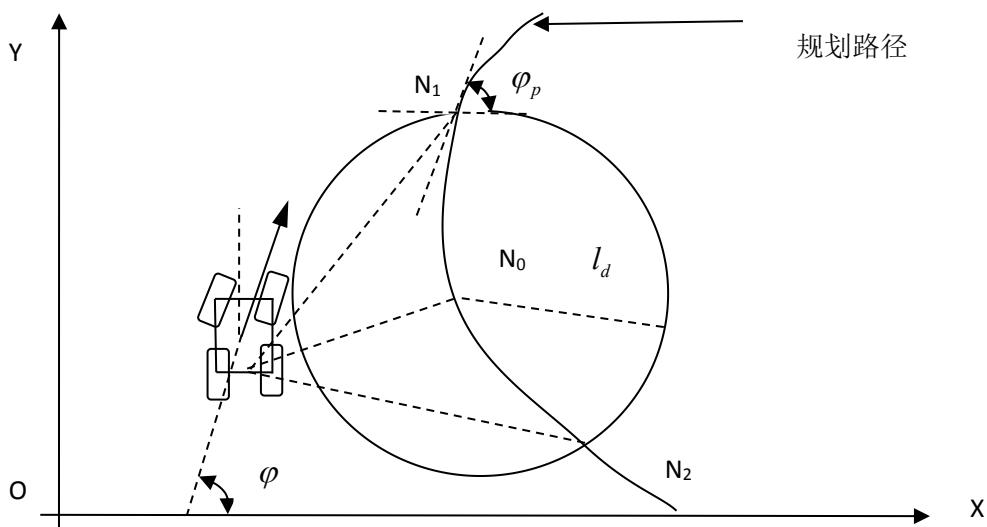


图 3-11 确定预瞄点示意图

Fig.3-11 Determine the schematic diagram of the preset point

3.4.2 基于航向偏差的反馈控制系统

上述主要是基于纯跟踪控制进行了控制算法的改进，同时建立了基于横向误差与前轮转角之间的传递函数，至此，便完成了前馈控制系统的搭建。只有前馈控制，仍无法克服外部干扰及系统不确定性引起的航向偏差，所以，需要反馈控制系统去进一步消除误差。反馈系统的主要功用便是消除航向偏差，使无人车的路径跟踪更加稳定。路径跟踪的衡量因素不仅是横向偏差，还有航向角，航向角反映了控制器对于规划路径切线方向的跟踪能力。

通过图 3-11 可知， φ 为车辆当前航向角， φ_p 为预瞄点处航向角。因此，航向角偏差为：

$$e_\varphi = \varphi_p - \varphi \quad (3.36)$$

这里采用增量式 PID 控制航向角偏差，增量式 PID 不同于一般的 PID 控制，增量式 PID 控制讲当前时刻的控制量与上一时刻的控制量做差，以差值做为新的控制量，是一种递推算法。虽然是一种递推算法，但控制量仅与最近 3 次采样有关；增量式 PID 将原来的积分环节进行了替换，避免了计算冗长及节省存储空间。

$$\delta_k = K_p \left[e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right] \quad (3.37)$$

$$\delta_{k-1} = K_p \left[e_{k-1} + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + T_d \frac{e_{k-1} - e_{k-2}}{T} \right] \quad (3.38)$$

由式 (3-37) 与式 (3-38) 做差得：

$$\Delta\delta_k = A e_k - B e_{k-1} + C e_{k-2} \quad (3.39)$$

式中， $A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$ ， $B = K_p \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right)$ ， $C = K_p \frac{T_d}{T}$ 。

由此，通过权重系数来分配前馈控制器与反馈控制器输出转角的权重值，最终的前轮转角值为：

$$\delta_f = A_\alpha \delta_\alpha + B_\varphi \delta_\varphi \quad (3.40)$$

式中， A_α 、 B_φ 为权重系数。

通过上述算法的推导，设计相对应的控制流程图如下所示：

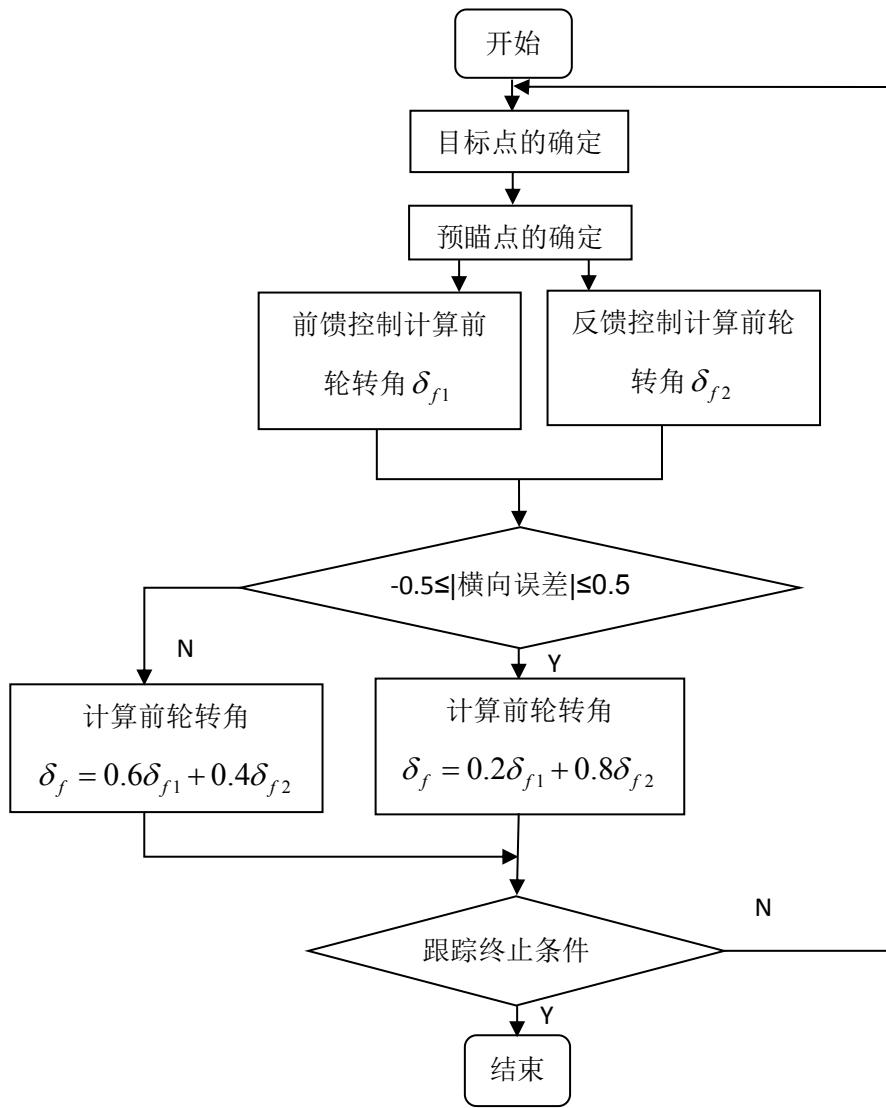


图 3-12 前馈-反馈控制流程图
Fig. 3-12 Feed-forward feedback control flow chart

3.5 本章小结

本章首先分析了轮胎的工作特性，确定轮胎模型，建立“魔术公式”轮胎模型，根据魔术公式进行轮胎力学特性分析，了解到小角度假设下轮胎的力学特性可以进行线性拟合得到，为接下来车辆动力学模型做基础。之后，在一定假设条件下，进行三自由度单轨车辆动力学分析，得到其非线性动力学模型；然后将非线性动力学模型改写成空间状态方程，并确定状态量及控制量。最后，进行车辆运动学分析，对比了不带侧偏角的阿克曼转向与带侧偏角的阿克曼转向的区别，根据赛车控制的实时性要求，选择了不带侧偏角的阿克曼转向模型，基于此得到了车辆二自由度运动学模型。基于运动学模型，设计了基于横向预瞄偏差的前馈控制与基于航向偏差的反馈控制。

第四章 FSAC 赛车 MPC 横向控制器设计

FSAC 赛车横向运动控制的实质是保证车辆能够进行路径跟踪，而跟踪精度及实时性是衡量控制器鲁棒性的标准。通过研究发现，大多数控制策略对于单输入输出、简单线性系统具有很好的鲁棒性，但 FSAC 赛车作为一个多输入多输出、复杂的非线性系统，需要选择合适的控制策略才能满足控制器的要求，其中模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）能够很好的处理高耦合、多自由度、不确定性的非线性系统。MPC 分为非线性模型预测与线性模型预测，非线性模型预测求解时长由于其求解方程的复杂程度而增长，故线性模型预测比非线性模型预测控制有实时性及计算简单的优势。FSAC 车辆是一种竞赛性质的车辆，对于速度的要求较高，也即是要求控制器的响应迅速。因此，本文所设计的横向运动控制器是基于线性时变模型预测理论。

4.1 模型预测控制理论

控制理论发展至今形成了三种类型的控制理论，分别是经典控制理论、现代控制理论及智能控制。经典控制理论对象一般是线性定常系统，利用传递函数、常微分方程来描述单一输入与单一输出的系统，常见有 PID 控制及反馈控制。现代控制理论源于经典控制理论^[40]，现代控制理论是建立在状态空间的一种自动控制理论，主要对象是时变或非线性系统，是通过计算机技术、数学模型、综合复杂的控制来实现对于系统输入与输出关系的描述。智能控制理论是一种模仿人工智能，基于自动控制理论、运筹学、计算机科学的控制技术，主要对象是不确定模型、高度非线性、复杂任务要求的系统，常见遗传算法、模糊、神经网络、自适应等控制理论。

对于汽车而言，它本身是一个多参数、多耦合、多约束、不确定的非线性系统，很难建立一个精确的数学模型，因此不适合用经典控制理论来进行车辆的运动控制。模型预测控制作为一种能够处理高维多变量复杂系统的控制技术，逐渐成为各领域控制技术的首选。

4.1.1 模型预测控制原理

MPC 是一种基于预测模型的闭环优化控制策略，核心算法是预测系统下一时刻的动态反应，在线反复优化设计并滚动实施的控制以及模型失配、干扰等误差。MPC 原理如图 4-1 所示。

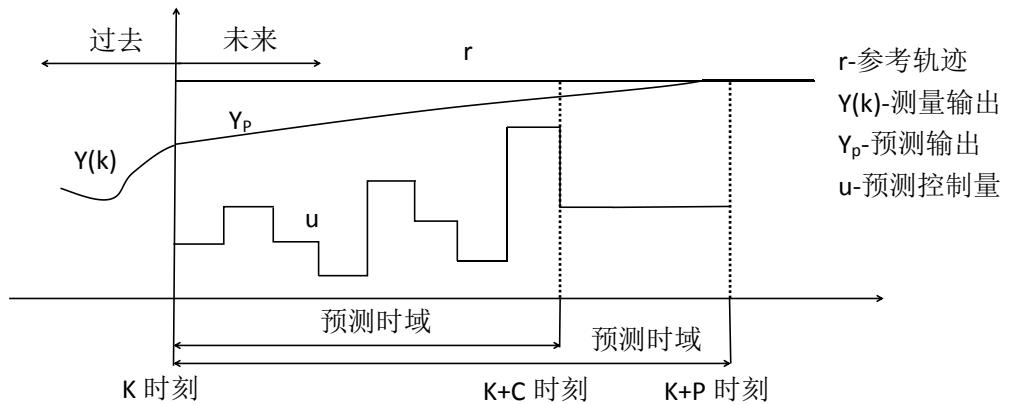


图 4-1 模型预测控制原理图

Fig. 4-1 Schematic diagram of model predictive control

$$\begin{cases} X(k+1) = f(X(k), u(k)), X(0) = X_0 \\ Y(k) = h(X(k), u(k)) \end{cases} \quad (4.1)$$

式子中, $X(k)$ 表示 k 时刻系统的状态, $u(k)$ 表示 k 时刻系统的控制输入, $Y(k)$ 表示 k 时刻系统输出。在预测时域 P 范围内, 都可以通过 k 时刻的测量输出 $Y(k)$ 来预测未来的输出。模型预测的目的是为了能够使预测输出与期望输出误差最小, 但要满足 $u(t)$ 约束与 $Y(t)$ 约束:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(k+i) \leq u_{\max}, 0 \leq i \leq P \\ Y_{\min} \leq Y(k+i) \leq Y_{\max}, 0 \leq i \leq P \end{cases} \quad (4.2)$$

在约束条件下, 可以根据预测输出与期望输出累计误差运用最小二乘法得到目标函数:

$$G(Y(k), u(k)) = \sum_{i=k+1}^{k+P} (r(i) - Y_p(i/k))^2 \quad (4.3)$$

式子中, $r(i)$ 表示 i 时刻对应的期望输出。

MPC 具体算法框图如图 4-2 所示。MPC 控制器通过模型进行预测、并在约束条件下对目标函数进行最优求解, 以此来得到 k 时刻最优控制输入 $u(k)$, 输入到被控平台得到 k 时刻的输出, 然后状态观测量 $X(k)$ 发送给状态估计器, 得到估计的状态量 $X_0(k)$ 。估计状态量在经过 MPC 控制器的处理得到最佳输入, 循环往复以此来完成整个控制器的作用。

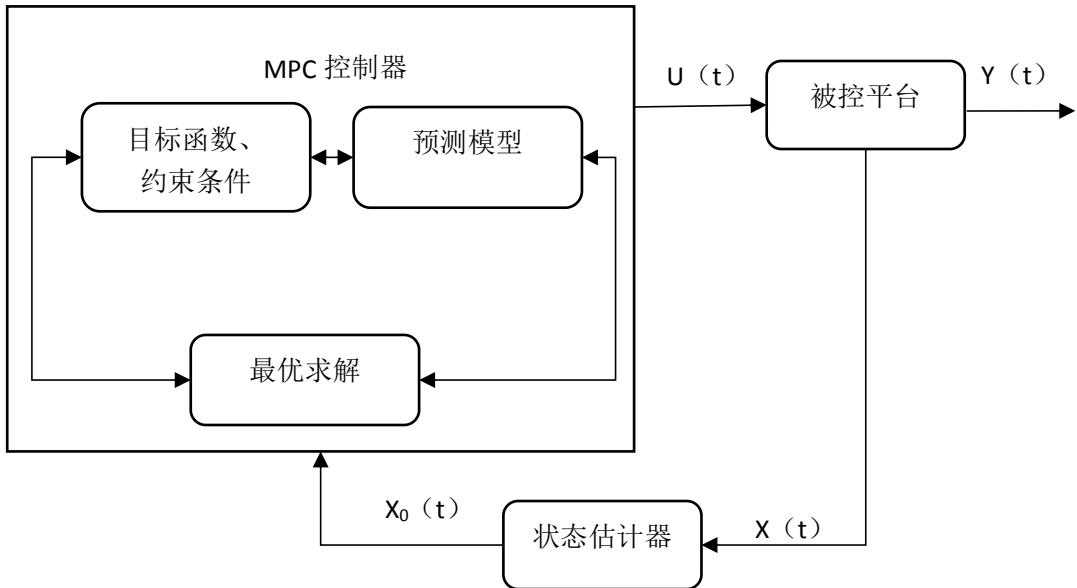


图 4-2 MPC 算法框图

Fig.4-2 MPC algorithm block diagram

4.1.2 模型预测控制特点

MPC 是一种通过获得当前时刻输出来预测未来输出的控制理论，其特点是基于模型进行控制，但对于模型的精确度要求不高，采用滚动优化的策略，以局部优化来取代全局优化，利用实测信息反馈校正。MPC 的控制具有效果好、鲁棒性强的优点，可以克服控制过程中出现的耦合性、时变性、非线性，并且能够处理被控量及操纵变量的各种约束。具体特点如下：

(1) 预测模型。预测模型作为 MPC 的基体，是用来描述系统的状态的。主要作用是根据当前时刻响应进行下一时刻响应的预测。预测模型的形式有两种，一种是参数模型，主要是微分方程与差分方程；另一种是非参数方程，主要是脉冲响应与阶跃响应。

(2) 滚动优化。滚动优化又称最优控制，是根据某一指标来进行最优化控制，即当系统的预测输出与实际输出有所偏差，那么接下来的偏差会越来越大，这就达不到控制的目的了，滚动优化的作用就是在线时刻进行偏差的控制，根据一定的指标，决定是否优化偏差，以降低下一时刻预测输出的偏差，滚动优化是一个局部优化的过程，但随着采样时刻的推移而优化将继续。虽然滚动优化仅得到全局次优解，但其滚动实施却能顾及因模型失配、时变、干扰等导致的不确定性，并进行弥补，始终将新的优化建立在实际的基础上进行，使控制保持实际上的最优^[41]。滚动优化如图 4-3 所示。

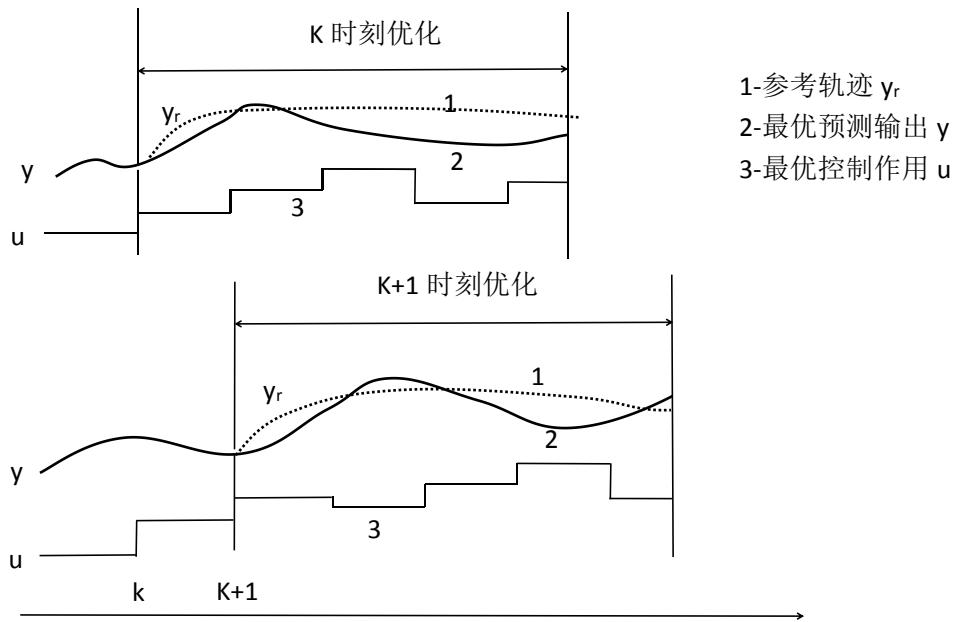


图 4-3 滚动优化示意图

Fig. 4-3 Schematic diagram of rolling optimization

(3) 反馈校正。反馈校正的作用是通过对实际的输出对预测输出进行修正，然后再次进行优化，对每一时刻的实际输出与预测输出进行的修正，滚动优化不但只是根据模型优化，而且利用了反馈信息进行优化，以此来构成闭环优化。也正是因为有了反馈校正，MPC 控制器才具有抗强干扰、克服不确定的能力。

4.2 线性时变模型预测控制算法研究

4.2.1 非线性系统线性化

由于车辆是一个非线性系统，而本文所设计的是线性时变模型预测横向运动控制器，因此需要将非线性系统线性化。非线性系统线性化的方法常见的有两种，其一是近似线性化，其二是精确线性化。虽然精确线性化对于非线性系统线性化的精度高，但精确线性化对于系统模型的要求较高，并且应用条件苛刻，计算量大，所以其适用性不广。近似线性化是基于传统方法的优势，再利用近似解决的方式，以保证控制系统不失真，进而来实现非线性系统线性化。由于 MPC 对于预测模型本身精度要求不是很高，再通过一系列的约束进行优化求解，近似线性化能够很好的满足要求。故本文选择近似线性化。

近似线性化的原理是不间断的给系统一个不变的控制量，能够通过每一时刻控制量的得到相对应的状态量，以此来获得一条理想的状态轨迹，然后对比实际状态量与

理想状态量之间的差值来设计模型预测算法。

非线性系统的状态量及控制量输入之间满足以下的关系式：

$$\dot{\xi}_r = f(\xi_r, u_r) \quad (4.4)$$

将上式在 (ξ_r, u_r) 处进行泰勒展开，不要高阶项，且只保留一阶项：

$$\dot{\xi} = f(\xi_r, u_r) + \frac{\partial f}{\partial \xi} \Big|_{\substack{\xi=\xi_r \\ u=u_r}} (\xi - \xi_r) + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{\substack{\xi=\xi_r \\ u=u_r}} (u - u_r) \quad (4.5)$$

也即是：

$$\dot{\xi} = f(\xi_r, u_r) + J_f(\xi)(\xi - \xi_r) + J_f(u)(u - u_r) \quad (4.6)$$

其中， $J_f(\xi)$ 表示 f 对 ξ 的雅可比矩阵， $J_f(u)$ 表示 f 对 u 的雅可比矩阵。

把式子 (4.4) 带入 (4.6) 得到：

$$\dot{\xi} = \xi_r + J_f(\xi)(\xi - \xi_r) + J_f(u)(u - u_r) \quad (4.7)$$

为方便计算，将做以下规定： $\tilde{\xi} = \xi - \xi_r, \tilde{u} = u - u_r, A(t) = J_f(\xi), B(t) = J_f(u)$ ，则上式即可转化为：

$$\dot{\tilde{\xi}} = A(t)\tilde{\xi} + B(t)\tilde{u} \quad (4.8)$$

经过上述推导，式子 (4.8) 即由非线性系统状态方程转化为线性化状态方程。模型预测控制是采样时间控制，因此，需要对状态方程进行离散化：

$$\begin{cases} \dot{\xi}(k+1) = A_{k,t}\tilde{\xi}(k) + B_{k,t}\tilde{u}(k) \\ A_{k,t} = I + TA(t) \\ B_{k,t} = TB(t) \end{cases} \quad (4.9)$$

其中 I 为单位矩阵， T 为采样周期。

至此，便完成了由非线性系统模型向线性化模型的转化。

4.2.2 线性时变模型预测控制算法

线性时变模型预测控制算法是在线性化模型的基础上进行的，经过上述推导已经得到线性化模型，所以可以进行线性时变模型预测控制器算法的推导。线性时变模型预测控制是要经过 4.1.2 所述模型预测原理时所说的三个步骤，即预测模型、滚动优化以及反馈校正。

对上一节所推导的离散线性化模型进行一定的变形：

$$x(k+1) = A_{k,t}x(k) + B_{k,t}u(k) \quad (4.10)$$

设定

$$\xi(k|t) = \begin{bmatrix} x(k|t) \\ u(k-1|t) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

由此得到:

$$\begin{cases} \xi(k+1|t) = \tilde{A}_{k,t}\xi(k|t) + \tilde{B}_{k,t}\Delta u(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{C}_{k,t}\xi(k|t) \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\text{其中, } \tilde{A}_{k,t} = \begin{bmatrix} A_{k,t} & B_{k,t} \\ 0_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} B_{k,t} \\ I_m \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}_{k,t} = \begin{bmatrix} C_{k,t} & 0 \end{bmatrix},$$

为了计算方便需要进一步简化, 作出假设:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{k,t} &= \tilde{A}_t, k = 1, \dots, t+N-1 \\ \tilde{B}_{k,t} &= \tilde{B}_t, k = 1, \dots, t+N-1 \end{aligned} \quad (4.13)$$

规定系统的控制时域为 N_c , 预测时域为 N_p , 且控制时域要小于预测时域, 则由式子(4.9)和(4.10)可以推出:

$$\begin{cases} \xi(t+1|t) = \tilde{A}_t \xi(t|t) + \tilde{B}_t \Delta u(t|t) \\ \xi(t+2|t) = \tilde{A}_t^2 \xi(t|t) + \tilde{A}_t \tilde{B}_t \Delta u(t|t) + \tilde{B}_t \Delta u(t+1|t) \\ \xi(t+3|t) = \tilde{A}_t^3 \xi(t|t) + \tilde{A}_t^2 \tilde{B}_t \Delta u(t|t) + \tilde{A}_t \tilde{B}_t \Delta u(t+1|t) + \tilde{B}_t \Delta u(t+2|t) \\ \dots \\ \xi(t+N_p|t) = \tilde{A}_t^{N_p} \xi(t|t) + \tilde{A}_t^{N_p-1} \tilde{B}_t \Delta u(t|t) + \dots + \tilde{A}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_t \Delta u(t+N_c|t) \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\eta(t+N_p|t) = \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p} \xi(t|t) + \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-1} \tilde{B}_t \Delta u(t|t) + \dots + \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_t \Delta u(t+N_c|t) \quad (4.15)$$

其中式子(4.11)表示预测时域系统状态量表达式, 式子(4.12)表示预测时域系统输出量表达式。将系统未来时刻的输出量通过矩阵的形式来表示:

$$Y(t) = \Psi_t \xi(t|t) + \Theta_t \Delta U(t) \quad (4.16)$$

其中:

$$\begin{aligned}
Y(t) &= \begin{bmatrix} \eta(t+1|t) \\ \eta(t+2|t) \\ \dots \\ \eta(t+N_c|t) \\ \dots \\ \eta(t+N_p|t) \end{bmatrix} & \Psi_t &= \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{A}_t \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^2 \\ \dots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c} \\ \dots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p} \end{bmatrix} & \Delta U(t) &= \begin{bmatrix} \Delta u(t|t) \\ \Delta u(t+2|t) \\ \Delta u(t+3|t) \\ \dots \\ \Delta u(t+N_c-1|t) \\ \Delta u(t+N_c|t) \end{bmatrix} \\
\Theta_t &= \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{B}_t & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{B}_t & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c-1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c-2} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{B}_t \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c-1} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-2} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_t \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

以上式子能够很直观的实现预测目的，也即是在预测时域内，当前状态量 $\xi(t|t)$ 与控制输入增量 $\Delta U(t)$ 能够预测下一时刻输出量及状态量。

上述预测方程中的控制增量是未知的，如果要实现预测下一时刻的输出量，需要得到一系列的最优控制增量，而最优控制增量无法通过传感设备获取，因此，这里需要建立目标函数，基于目标函数进行优化求解才能够得到预测时域内的最优控制增量序列。设置目标函数是为了能够使车辆迅速、准确的跟踪参考路径，所以目标函数中必然包含输出状态量、控制量以及参考值。参考文献[42]将模型预测控制问题转化为二次规划问题，设置的目标函数为：

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(t+i|t)\|_R^2 \quad (4.17)$$

其中， Q 与 R 都是权重矩阵， $\eta_{ref}(t+i|t)$ 表示参考输出量。目标函数的设置主要是考虑系统对于参考轨迹跟踪的误差，保证跟踪误差达到最小。另外，控制量的输入变化不能太过于剧烈，故要保持其变化量的稳定性。最终目的是基于目标函数优化参数，使得无人车能够平稳快速的跟踪目标路径。在参数优化求解的过程中，需要考虑实际系统的约束，包括控制量、控制增量、输出量的约束。

$$\begin{cases} u_{\min}(t+k) \leq u(t+k) \leq u_{\max}(t+k), \\ \Delta u_{\min}(t+k) \leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{\max}(t+k) \\ y_{\min}(t+k) \leq y(t+k) \leq y_{\max}(t+k) \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, N_c - 1 \quad (4.18)$$

通过上述目标函数及约束条件进行优化求解得到的控制序列，只能在一段时间之内是有效的，因为系统具有实时性，所以需要控制序列不断更新。这里是通过增加松弛因子来对目标函数进行优化求解的。则增加松弛因子之后的目标函数为：

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u(t+i|t)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (4.19)$$

其中 ρ 为权重因子， ε 为松弛因子。

将 (4.16) 进一步简化计算，通过矩阵的计算可以得到：

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = [\Delta U(t)^T, \varepsilon]^T H_t [\Delta U(t)^T, \varepsilon] + G_t [\Delta U(t)^T, \varepsilon] + P_t \quad (4.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_t = \begin{bmatrix} \Theta_t^T Q_e \Theta_t + R_e & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \\ G_t = \begin{bmatrix} 2E(t)^T Q_e \Theta_t & 0 \end{bmatrix} \\ Y(t) = \Psi_t \xi(t|t) + \Theta_t \Delta U(t) \\ Y_{ref}(t) = [\eta_{ref}(t+1|t), \dots, \eta_{ref}(t+N_p|t)]^T \\ P_t = E(t)^T Q_e E(t) \\ E(t) = Y(t) - Y_{ref}(t) \end{array} \right. \quad (4.21)$$

目标函数进行优化求解是为了得到一系列控制增量，也即是约束条件只能以控制增量的形式或者控制增量进行转化为矩阵的形式，所以将约束条件 (4.18) 进行变形：

$$u(t+k) = u(t+k-1) + \Delta u(t+k) \quad (4.22)$$

设：

$$U_t = l_{N_c} \otimes u(t-1) \quad (4.23)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes I_m \quad (4.24)$$

其中： l_{N_c} 为一个 N_c 行的列向量， I_m 为一个 m 维单位向量，上式表示二者的克罗内积。

通过上面的变形，约束条件控制增量与控制增量需要满足：

$$\begin{cases} \Delta U_{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max} \\ U_{\min} \leq u(t-1) + \sum_{i=1}^k \Delta U(i) \leq U_{\max} \end{cases} \quad (4.25)$$

模型预测控制中的目标函数优化求解是基于约束的条件下进行的，因为求解过程需要进行计算机处理，所以要将求解问题转化为在线求解带约束的二次规划问题，也即是

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta U_t, \varepsilon} \left[\Delta U(t)^T, \varepsilon \right]^T H_t \left[\Delta U(t)^T, \varepsilon \right] + G_t \left[\Delta U(t)^T, \varepsilon \right] + P_t \quad (4.26) \\ & s.t. \begin{cases} \Delta U_{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max} \\ U_{\min} \leq u(t-1) + \sum_{i=1}^k \Delta U(i) \leq U_{\max} \\ Y_{\min} - \varepsilon \leq \Psi_t \xi(t|t) + \Theta_t \Delta U(t) \leq Y_{\max} + \varepsilon \\ \varepsilon > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

通过优化求解得到控制时域的一系列控制输入增量：

$$\Delta U_t^* = \left[\Delta u_t^*, \Delta u_{t+1}^*, \dots, \Delta u_{t+N_c-1}^* \right]^T \quad (4.27)$$

该控制输入序列的第一个元素将作用于系统，用来预测下一时刻的预测输出，也即是：

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u_t^* \quad (4.28)$$

该控制输入增量序列一直起作用到下一个控制时域，然后在下一个控制时域，再根据其状态进行更新控制输入增量序列，作用于系统，预测其输出。如此不停地进行着该过程，直至控制状态结束。

4.3 FSAC 赛车横向运动控制器设计

FSAC 赛车横向运动控制器基于模型预测控制算法设计的，控制器的主要作用是保证车辆能够按照期望轨迹行驶，控制行驶过程中车辆的转向、消除外界干扰等作用。MPC 控制器的组成如图 4-4 所示，其中以三自由度动力学模型为预测模型，用来描述车辆状态的数学模型，根据当前时刻车辆的状态量及输出量，来预测控制时域输出量。 y_{sp} 是控制系统中的设定输出， y_r 是用来作为参照的轨迹， u 作为车辆的控制输入量， y 表示输出量的实际值， y_m 则表示预测模型的输出， y_c 为预测输出。

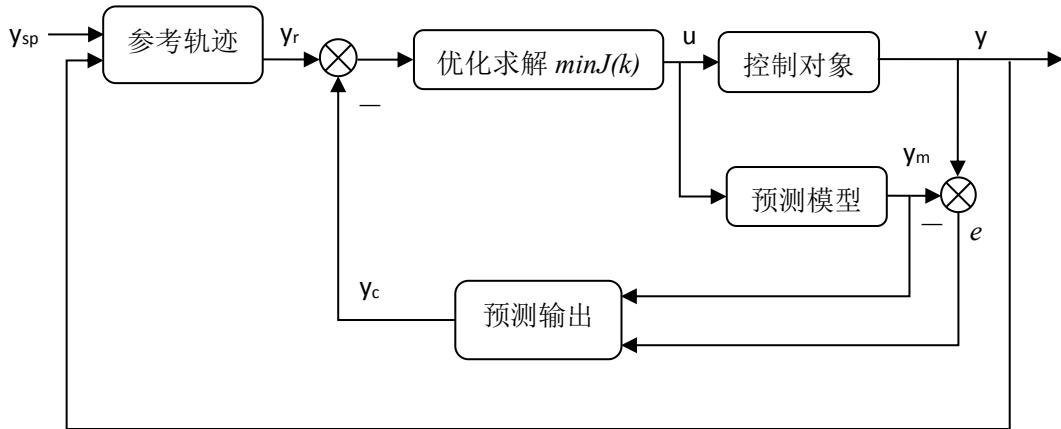


图 4-4 模型预测控制器构成

Fig. 4-4 Structure of model prediction controller

4.3.1 线性误差方程

FSAC 赛车作为非线性系统，根据模型预测算法，需要将预测模型线性化。第三章推导出了三自由度非线性动力学模型，空间状态方程 $\dot{\xi} = f[\xi(t), \mu(t)]$ ，其中状态量 $\xi(t) = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^T$ ，输出 $\eta = [\varphi, Y]^T$ 。将其力学模型（3.19）进行线性化，得到线性时变预测模型：

$$\dot{\xi}_{dyn}(t) = A_{dyn}(t)\xi_{dyn}(t) + B_{dyn}(t)u_{dyn}(t) \quad (4.29)$$

其中， $B_{dyn}(t) = \frac{\partial f_{dyn}}{\partial u_{dyn}}|_{\xi_t, u_t} = \left[\frac{2C_{cf}}{m}, \frac{2C_{cf}\left(2\delta_{f,t-1} - \frac{\dot{y}_t + a\dot{\varphi}_t}{\dot{x}_t}\right)}{m}, 0, \frac{2aC_{cf}}{I_z}, 0, 0 \right]$ ，

$$A_{dyn}(t) = \frac{\partial f_{dyn}}{\partial \xi_{dyn}}|_{\xi_t, u_t}$$

$$\begin{bmatrix}
 \dot{\varphi} - \frac{2C_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} & \frac{2C_{cf}\delta_{f,t-1}(\dot{y}_r + a\dot{\varphi}_t)}{m\dot{x}_t^2} & 0 & \dot{y}_t - \frac{2aC_{cf}\delta_{f,t-1}}{m\dot{x}_t} & 0 \ 0 \\
 \frac{-2(C_{cf} + C_{cr})}{m\dot{x}_t} & \frac{2C_{cf}(\dot{y}_r + a\dot{\varphi}_t) + 2C_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\varphi}_t)}{m\dot{x}_t} - \dot{\varphi}_t & 0 & -\dot{x}_t + \frac{2(bC_{cr} - aC_{cf})}{m\dot{x}_t} & 0 \ 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \ 0 \\
 \frac{2(bC_{cr} - aC_{cf})}{I_z\dot{x}_t} & \frac{2aC_{cf}(\dot{y}_r + a\dot{\varphi}_t) - 2bC_{cr}(\dot{y}_t - b\dot{\varphi}_t)}{I_z\dot{x}_t^2} & 0 & \frac{-2(a^2C_{cf} + b^2C_{cr})}{I_z\dot{x}_t} & 0 \ 0 \\
 \cos(\varphi_t) & \sin(\varphi_t) & \dot{x}_t \cos(\varphi_t) - \dot{y}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 \ 0 \\
 -\sin(\varphi_t) & \cos(\varphi_t) & -\dot{y}_t \cos(\varphi_t) - \dot{x}_t \sin(\varphi_t) & 0 & 0 \ 0
 \end{bmatrix}$$

对上式线性时变模型利用一阶差商的方法进行离散化处理，得到：

$$\xi_{dyn}(k+1) = A_{dyn}(k)\xi_{dyn}(k) + B_{dyn}(k)u_{dyn}(k) \quad (4.30)$$

式子中， $A_{dyn}(k) = I + TA_{dyn}(t)$, $B_{dyn}(k) = TB_{dyn}(t)$ ， I 为单位矩阵， T 为离散时间。为降低静态误差，将式 (4-23) 进行增量形式的转化：

$$\Delta\xi(k+1) = A_{k,t}\Delta\xi(k) + B_{k,t}\Delta u(k) \quad (4.31)$$

4.3.2 约束条件

在上一节已经提过，目标函数是基于约束条件进行求解的，本研究是以前轮转角为控制量，需要对前轮转角和前轮转角增量进行约束。但由于 FSAC 赛车是一个多耦合的复杂系统，在保证汽车操作稳定性的基础上，需要根据车辆动力学特性添加一定的约束。因此，除了对于控制增量进行约束外，还需要进行轮胎侧偏角、质心侧偏角及附着条件的约束。

根据上一章对于轮胎力学特性的分析可知，轮胎侧偏角只有在一定的范围之内，侧偏力才与侧偏角成线性关系，一旦侧偏角超过允许范围，侧偏力将达到饱和，不再随侧偏角的增大而增大，此时的轮胎所需附着力将超过附着极限，车辆出现侧滑，因此，需要对于轮胎侧偏角进行约束。

汽车动力学模型中的状态量不包括轮胎侧偏角，所以需要用所设置的状态量或控制量进行计算，根据第三章分析轮胎特性可知在任一时刻的轮胎侧偏角为：

$$\begin{cases} \alpha_{f,t} = \frac{\dot{y}_t + a\dot{\phi}_t}{\dot{x}_t} - \delta_{f,t-1} \\ \alpha_r = \frac{\dot{y}}{\dot{x}_t} - b\dot{\phi}_t \end{cases} \quad (4.32)$$

式子中，前后轮胎侧偏角的计算跟前轮转角及状态量有关。

根据分析的轮胎力学特性可知，轮胎侧偏角在 $\pm 3^\circ$ 范围之内，轮胎的侧偏力与侧偏角才成线性关系，因此，这里对于侧偏角的要求是：

$$-3^\circ \leq \alpha \leq 3^\circ \quad (4.33)$$

汽车的稳定性是进行汽车控制需要考虑的关键问题，其影响因素有很多，其中最为重要的一个便是质心侧偏角。当质心侧偏角超过一定范围，汽车表现为非线性，其中轮胎模型也将处于非线性工作区域，车辆易出现安全隐患。所以，需要将质心侧偏角约束在一定的范围之内。许多学者及车企对于质心侧偏角进行了深入研究，其中以BOSCH公司对于质心侧偏角范围的研究作为参考。根据文献[43]与[44]可知：在附着系数良好路面行驶时，质心侧偏角的范围在 $\pm 12^\circ$ ；当行驶在像冰雪等附着系数较小的路面上时，质心侧偏角的范围在 $\pm 2^\circ$ 。所以，质心侧偏角的约束为：

$$\begin{cases} -12^\circ \leq \beta \leq 12^\circ & (\text{良好路面}) \\ -2^\circ \leq \beta \leq 2^\circ & (\text{冰雪路面}) \end{cases} \quad (4.34)$$

FSAC赛车行驶所需要的驱动力是地面对于轮胎的作用力。原理是驱动电机转动产生扭矩，传动装置将扭矩传到驱动轮，驱动轮作用给地面一个圆周力，路面产生的反作用力施加给轮胎，也即是汽车驱动力。因此，驱动力的大小不仅取决于驱动电机转矩的大小，更取决于地面附着系数的大小。地面附着系数对于纵向加速度与横向加速度的限制为：

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \leq \mu g \quad (4.35)$$

若纵向速度保持不变，则加速度约束只要满足：

$$|a_y| \leq \mu g \quad (4.36)$$

上述公式是对横向加速度的限制，横向加速度主要影响车辆的舒适度，理论上横向加速度变化区间越小越舒适，但横向加速度变化过小将导致优化求解失败。所以，综合考虑舒适度及优化求解，该约束设置为软约束，即：

$$a_{y,\min} - \varepsilon \leq a_y \leq a_{y,\max} + \varepsilon \quad (4.37)$$

式子中， $a_{y,\min}$ 、 $a_{y,\max}$ 表示横向加速度的极限约束。

4.3.3 优化求解

在之前 MPC 算法中，已经提出了目标函数的建立，其优化求解是为了得到控制时域内一系列控制增量输入，具体目标函数如下：

$$J(\xi_{dyn}(t), u_{dyn}(t-1), \Delta U_{dyn}(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta_{dyn}(t+i|t) - \eta_{dyn,ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u_{dyn}(t+i|t)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (4.38)$$

目标函数数值最小，则代表控制器控制车辆行驶轨迹与期望路径误差最小。综合上述目标函数及约束条件，FSAC 赛车 MPC 横向控制器优化求解的具体公式及约束条件如下：

$$\min_{\Delta U_{dyn,\varepsilon}} \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta_{dyn}(t+i|t) - \eta_{dyn,ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u_{dyn}(t+i|t)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (4.39)$$

$$s.t. \begin{cases} \Delta U_{dyn,min} \leq \Delta U_{dyn,t} \leq \Delta U_{dyn,max} \\ U_{dyn,min} \leq A \Delta U_{dyn,t} \leq \Delta U_{dyn,max} \\ y_{hc,min} \leq y_{hc} \leq y_{hc,max} \text{ (硬约束输出)} \\ y_{sc,min} - \varepsilon \leq y_{sc} \leq y_{sc,max} + \varepsilon \text{ (软约束输出)} \\ \varepsilon > 0 \end{cases}$$

式中， $y_{hc,min}$ 与 $y_{hc,max}$ 分别表示硬约束输出的极限值，也即是保证汽车的工作范围在线性范围之内； $y_{sc,min}$ 与 $y_{sc,max}$ 分别表示输出软约束的极限值。

在经过一个控制时域范围后，通过求解 (4.39) 得到了一系列控制输入增量及松弛因子：

$$\Delta U_{dyn,t}^* = [\Delta u_{dyn,t}^*, \Delta u_{dyn,t+1}^*, \dots, \Delta u_{dyn,t+N_c-1}^*, \varepsilon]^T \quad (4.40)$$

将上式中的首个元素作为真实的控制输入增量给系统，也即是：

$$u_{dyn}(t) = u_{dyn}(t-1) + \Delta u_{dyn,t}^* \quad (4.41)$$

该周期结束之后，进入下一个周期，将继续新的循环，如此一直持续到路径跟踪结束。

4.4 本章小结

本章首先论述了模型预测控制理论，分析了经典控制理论与现代控制理论的适用范围。由于实际 FSAC 赛车是一个多约束、多参数、不确定的非线性系统，而 MPC 对于多输入、多输出的非线性系统的鲁棒性最高，因此确定横向运动控制使用 MPC 控制策略。之后，论述了线性时变模型预测控制的算法推导，包括非线性系统线性化的方法以及线性时变模型的推导过程。最后，设计了基于线性时变模型预测控制的横向运动控制器。

第五章 FSAC 赛车横向控制系统仿真分析

前文完成了横向运动控制算法的推导及 MPC 控制器的设计，本章则主要是进行仿真验证，并对仿真结果进行分析。

5.1 Carsim 介绍

Carsim/TrucksimMSC (Mechanical Simulation Corporation) 是一家专门从事汽车动力学仿真软件开发的公司，开发了 CarSim、TruckSim、BikeSim 和 SuspensionSim 等多款仿真软件。Carsim 是一款专门针对汽车动力学研究的仿真软件，该软件被大多数汽车制造厂商、汽车零部件厂商及科研机构所使用，已经成为了汽车行业标准性仿真软件。

Carsim 主要作用是可以仿真来自驾驶员、外部环境对于车辆输入的响应以及进行车辆系统建模，以此来得到评价汽车操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性、经济型的相关参数，绘制各参数之间的关系图像，并进行控制系统的级联设计。Carsim 是一个具有使用方便、精确、稳定可靠、标准化及可拓展的仿真软件。Carsim 是由前处理、处理、后处理三部分组成，前处理是用来设置车辆参数及仿真工况，处理主要进行数学模型的求解，后处理则是用来进行 3D 视频演示及参数图像的绘制，其具体操作界面如图 5-1 所示。

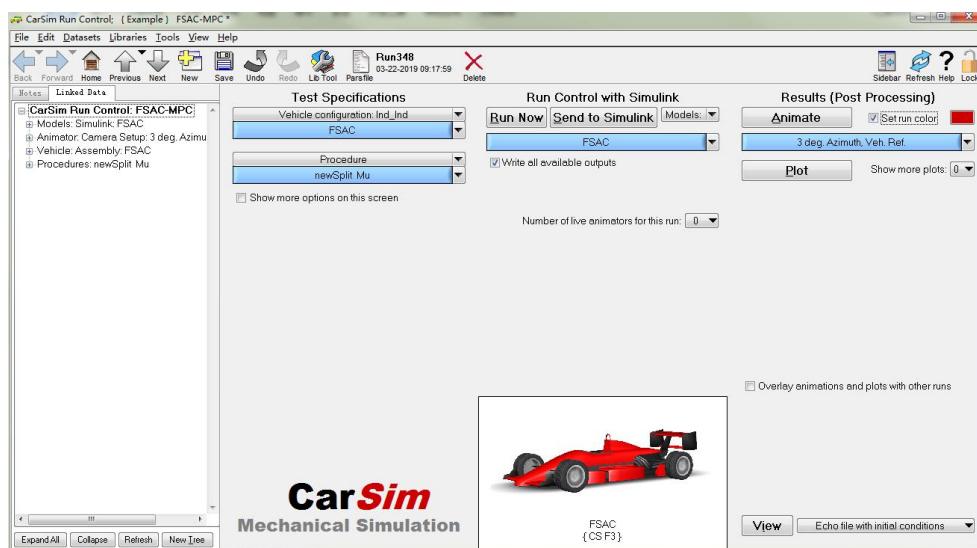


图 5-1 Carsim 操作界面

Fig. 5-1 Carsim operation interface

Carsim 前处理的作用之一是进行整车参数的设置，整车参数包括车辆的尺寸参数、各系统总成参数、性能参数等；另一个作用是进行仿真工况的设置，仿真工况包括道路条件、外部环境等。处理模块是用来设置整车模型的输入与输出，并进行模型的计

算。后处理是进行仿真过程的视频演示及仿真结果的图像绘制。

5.2 联合仿真平台搭建

本文横向运动控制器的验证是基于 Carsim 与 Simulink 的联合仿真，其中 Carsim 是用来创建整车模型，Simulink 则是用来进行控制器的设计及联合仿真参考路径的搭建，其中控制器的执行程序是由 MATLAB 编写的 m 文件。

5.2.1 动态赛分析

中国大学生方程式汽车大赛是由静态赛与动态赛组成，其中静态赛是设计答辩，考察的是感知系统、控制系统、安全防护方面的设计。动态赛包括直线加速、8字绕环、高速识别轨迹测试、镜像 PK 赛，主要考察赛车动力性、制动性、传感设备响应的实时性、操纵稳定性等整车性能。

直线加速要求 FSAC 赛车在长为 75 米、宽为 4.9 米的平面道路上完成由启动、加速、制动、停止的过程。直线加速是为了考察 FSAC 赛车在平面直线行驶的加速性、制动性、稳定性。其赛道如图 5-2 所示，车道两侧摆放有间隔为 4.9 米的路标桩锥，且在两侧路标桩锥外侧 4 米位置有紧急停止线，紧急停止线的作用是使偏离赛道的 FSAC 赛车能够检测并进行紧急制动。

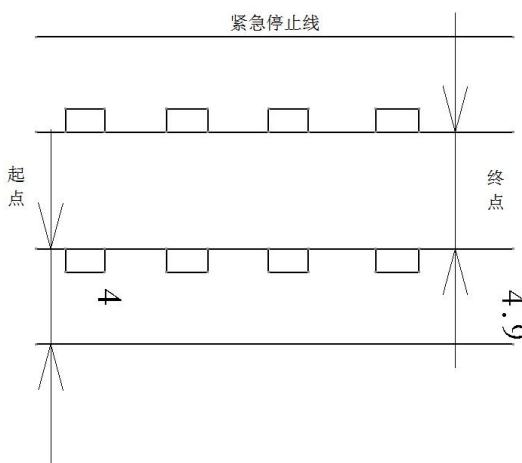


图 5-2 直线加速赛道示意图

Fig. 5-2 Schematic diagram of linear acceleration track

8 字绕环是一个进行定半径转向的比赛项目，该项赛事是考验定曲率工况 FSAC 赛车轨迹跟踪的精确度及横向稳定性。其赛道如图 5-3 所示，8 字是由两个同心圆分布两侧构成，车道宽度为 3 米，其中内车道小圆直径为 15.25 米，外车道大圆直径为 21.25 米，左侧内车道小圆与左侧外车道大圆外切，左侧外车道大圆与左侧内车道小圆外切。

两个圆心的连线作为起点线与终点线，由起点线绕圆旋转回到终点线的行程被定义为一圈。赛事要求 FSAC 赛车一共需要行驶四圈，即绕每个圆形车道行驶两圈。

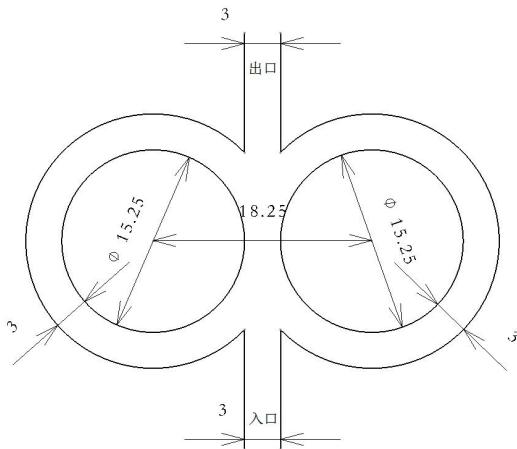


图 5-3 8 字绕环赛道示意图

Fig.5-3 Schematic diagram of 8-word circuit

高速识别追踪测试是要求 FSAC 赛车在一条具有直道、定半径弯、发夹弯、减速弯、连续弯、半径渐小弯等复合赛道上行驶，主要考验 FSAC 赛车的路径规划、路径跟踪的控制算法的稳定性。该赛道的直线距离大约为 400 米，赛道宽度至少达到 4 米，赛道的最外侧设置有紧急停止线。直道的长度取决于两端弯道的类型，若两端为发夹弯，直道最长为 50 米，若一端为大弯道，则最长为 40 米；定半径弯的半径大小区间为 11.5 米到 22.5 米；发夹弯外径至少要达到 9 米。高速识别追踪测试的赛道工况比较复杂，既有直道又有弯道，由此可知该项比赛是对 FSAC 赛车路径识别、路径规划及运动控制的综合考验。

镜像赛规定两个参赛车队为一组，同时进行比赛，先进行一圈主动识别道路环境及路径规划，之后再进行一轮，每个车队都是取两轮中最好成绩。该项比赛主要是考察 FSAC 赛车的传感器识别及路径规划等上层算法的稳定性。赛车垂直驶入赛道，行驶过程冲出赛道但没有触及紧急停止，仍可返回比赛，但不能横穿赛道。PK 镜像赛是对 FSAC 赛车识别、规划、控制等关键技术的考验，是赛车综合性能的测试。

5.2.2 参考轨迹

通过上一节对于中国大学生无人驾驶方程式汽车大赛动态赛的介绍可知，动态赛考验的是赛车路径跟踪能力，即横向运动控制器的鲁棒性和实时性。赛道道路包括定曲率赛道、大弯道、发夹弯、直道四种，对于此类复合工况的仿真通常选择双移线。本文参考文献[45]中双移线工况，进行 MPC 横向运动控制器的仿真。其参考轨迹包括两

部分，其一是横向位置 Y_{ref} ，其二是横摆角 φ_{ref} ，且二者都与纵向位置 X 是非线性关系。

双移线及横摆角参考轨迹公式计算如下：

$$\begin{cases} Y_{ref}(X) = \frac{d_{y1}}{2} (1 + \tanh(z_1)) - \frac{d_{y2}}{2} (1 + \tanh(z_2)) \\ \varphi_{ref}(X) = \arctan \left(d_{y1} \left(\frac{1}{\cosh(z_1)} \right)^2 \left(\frac{1.2}{d_{x1}} \right) - d_{y2} \left(\frac{1}{\cosh(z_2)} \right)^2 \left(\frac{1.2}{d_{x2}} \right) \right) \end{cases} \quad (5-1)$$

式中：

$$\begin{cases} z_1 = \frac{2.4}{25} (X - 27.19) - 1.2 \\ z_2 = \frac{2.4}{21.95} (X - 56.46) - 1.2 \\ d_{x1} = 25, d_{x2} = 21.95 \\ d_{y1} = 4.05, d_{y2} = 5.7 \end{cases}$$

双移线及横摆角参考轨迹图像如图 5-4 所示：

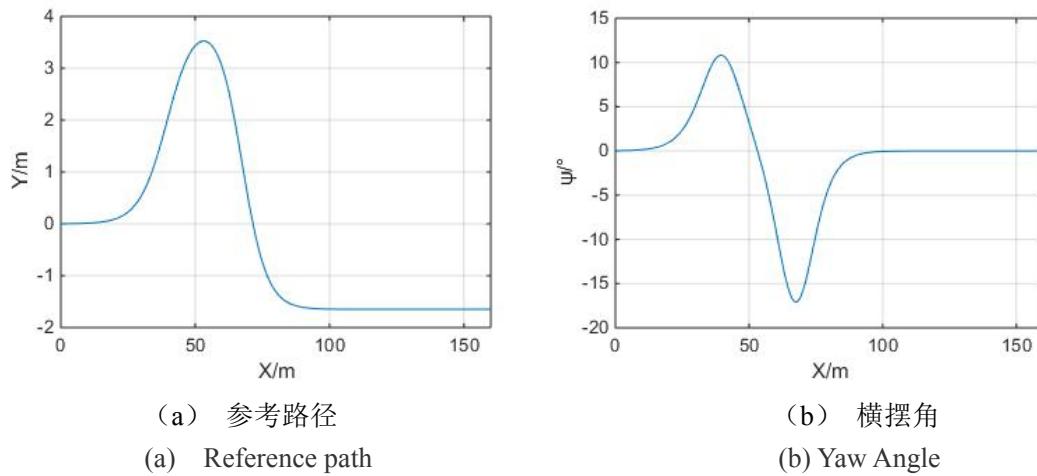


图 5-4 参考轨迹

Fig.5-4 Reference trajectory

5.2.3 仿真参数设置

本文横向运动控制器的可行性是基于 Carsim 与 Simulink 的联合仿真来验证的，其中 Carsim 创建整车参数模型，Simulink 搭建控制器模型，Carsim 通过路径的设置将车辆参数模型导入到 Simulink 中，成为一个 S-function 函数模块，然后将 S-function 函数模块拖入事先建立控制器 mdl 中，至此便完成了联合仿真平台的搭建。

Carsim 中整车建模是依据广东工业大学 E05 赛车数据，其中具体尺寸参数如表 2-1

所示，各总成类型如下表所示。

表 5-1 总成类型
Tab.5-1 Assembly types

名称	类型	名称	类型
前悬架	推杆式上下不等长双横臂 独立悬架	后悬架	推杆式上下不等长双横臂 独立悬架
前轮胎	Hoosier18.0×7.5-10 R25B	后轮胎	Hoosier18.0×7.5-10 R25B
转向	齿轮齿条转向	转向助力	EPS
制动	双轮浮动盘式制动	电机	径向磁通永磁同步外转子 电机
传动方式	一级链传动	主减速器传动比	3.46:1

仿真工况的设置，指的是车速、制动、转向、档位、道路、仿真时间、仿真步长等，具体设置以下：

- ①车速设置为固定车速，具体值根据仿真类型设置；
- ②制动设置为 No breaking；
- ③转向设置为 No Steering；
- ④档位设置为闭环 Neurtal Mode；
- ⑤路面设置为 1km Square；
- ⑥仿真时间设置为 20 秒；
- ⑦仿真步长设置为 0.002。

整车参数及仿真工况的设置并不是一成不变的，可以根据车型、行驶条件进行设置。

完成前处理的设置，接着需要进行 Carsim 与 Simulink 的联合仿真路径设置。首先，确定车辆模型的输入与输出，输入是车轮转角，输出是横向速度、纵向速度、横向位置、纵向位置、横摆角、横摆角速度。最后，在 Carsim 里面设置传送路径为 Simulink。这样就完成了 Carsim 的完整设置，

Carsim 的设置完成之后，点击 Carsim 处理模块中的 Send To Simulink,求解的结果将发送到 Simulink 中成为一个 S-Function 模块，同时事先建立好的空白 mdl 也将被打开，再将 S-Function 模块拖入该空白 mdl 中，完成控制器模型的搭建。至此，联合仿

真平台的搭建就全部完成了。

5.3 MPC 控制器的仿真验证

上一章基于模型预测控制理论及车辆动力学模型设计了 MPC 控制器，为了验证 MPC 控制器的鲁棒性及稳定性，本节利用 Carsim 与 Simulink 软件进行联合仿真。考虑到车辆状态参数、外部工况、设计参数对于控制效果的影响，则分别对不同车速、不同附着系数道路、不同预测时域、不同控制时域四种工况进行仿真分析，以此来得到合适参数，达到控制效果的最优化。

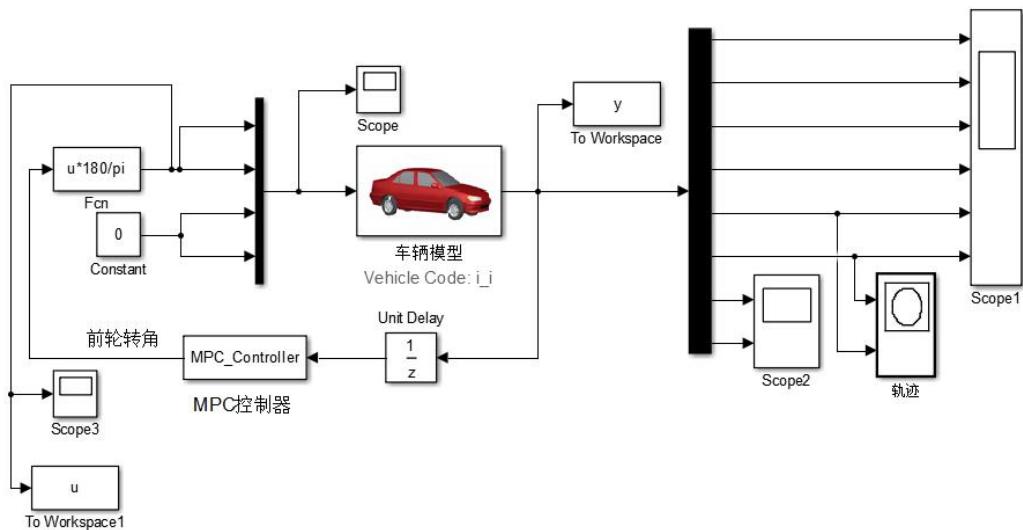


图 5-5 MPC 控制器的联合仿真
Fig.5-5 Joint simulation of MPC controller

5.3.1. 不同速度对于轨迹跟踪的影响

FSAC 赛车是为了能够参加中国大学生无人驾驶方程式汽车大赛并获得理想的成绩，因此，需要分析 MPC 横向运动控制器对于速度的鲁棒性。分别对速度为 10m/s、15m/s、20m/s 的工况进行仿真，其他参数相同，其中路面附着系数为 0.85，预测时域为 25，控制时域为 5，仿真步长为 0.02s，仿真得到如下图像，其中蓝色实线表示参考轨迹，棕色虚线表示速度为 20m/s 的工况，绿色点线表示速度为 15m/s 的工况，红色点画线表示速度为 10m/s 的工况。

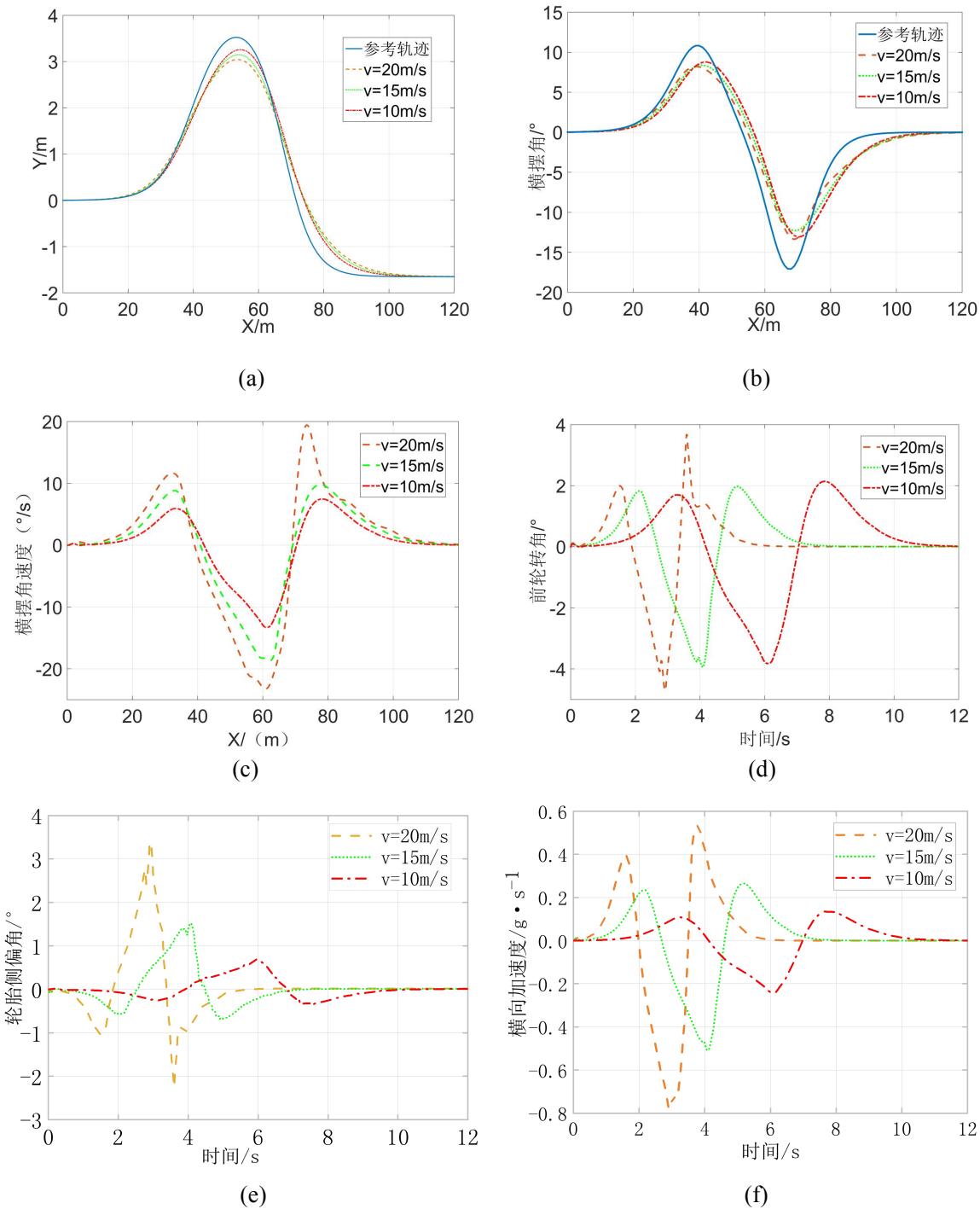


图 5-6 三种速度工况的轨迹跟踪

Fig.5-6 Trajectory tracking under three velocity conditions

图（a）是实际轨迹与参考轨迹之间的横向偏差。根据图（a）可知三种速度下的实际轨迹与参考轨迹基本吻合，说明 MPC 横向运动控制器能够满足赛事要求。通过对三种追踪效果可知，速度为 20m/s 时，实际轨迹与参考轨迹之间的偏差最为明显，最大横向偏差为 0.42m ，但与车辆宽度相比仍在偏差允许范围之内；当速度为 10m/s 时，偏差最小，最大横向偏差为 0.25m ，故可以得到速度越小路径跟踪越精确。在弯道处，

速度为 $20m/s$ 的车辆先于另外两种车速的车辆转向，主要是为了控制路径跟踪的精确性及转向的稳定性。

图 (b) 是实际横摆角与参考轨迹横摆角。通过图像可知：在直线路段，三种实际横摆角与参考轨迹横摆角基本重合；在转弯处，实际横摆角与参考轨迹横摆角偏差较大，其中速度为 $20m/s$ 的偏差最大，为 4° 左右，但仍能满足轨迹跟踪的要求。

图 (c) 是横摆角速度。通过图像可知：在直线行驶路段，车辆横摆角速度为 0；在转弯处，横摆角速度发生变化，且随着车轮转角的变化而变化。速度为 $20m/s$ 时，其横摆角速度的极值大于另外两种工况下的横摆角速度极值。

图 (d) 是前轮转角。速度为 $10m/s$ 、 $15m/s$ 两种工况下的前轮转角变化基本一致，最大正向转角都是 1.8° ，最大反向转角都是 3.8° ；速度为 $20m/s$ 工况下的前轮转角虽然变化范围较大，但仍能满足控制器输入的约束要求。

图 (e) 是轮胎侧偏角。通过对三种速度工况下轮胎侧偏角可知，速度为 $20m/s$ 的前轮侧偏角变化范围最大，为 -2.2° 到 3.0° ，但仍然能够满足侧偏角的约束，轮胎侧偏角工作在线性范围之内，车辆能够稳定行驶。

图 (f) 是横向加速度。横向加速度是衡量汽车稳定性的参数，通过图像可知三种工况下的横向加速度的变化都比较平稳，但速度为 $20m/s$ 工况，在起始点处侧向加速度便有了变化，分析可知由于直线路段过短，车辆在高速下提前进行了转向。

综合以上图像分析可知，三种速度工况下路径跟踪的效果满足预期要求，且各状态参数都在约束范围之内。随着速度的增加，在弯道处，横向位置偏差及横摆角偏差均增大，横摆角速度增大；车辆提前转向，前轮转角、侧向加速度提前变化，轮胎侧偏角增大。所以，MPC 横向运动控制器对于中低速车辆的控制效果最好。

5.3.2 附着系数对于轨迹跟踪的影响

车辆行驶在不同附着系数的路面，其动力学参数将发生改变，如侧偏刚度发生改变，将导致轮胎侧向力的变化。这对横向运动控制器的稳定性提出挑战。因此，对不同附着系数下的 MPC 控制器进行仿真，以此来得到附着系数对于路径跟踪的影响。分别取附着系数为 0.4、0.6、0.8 的工况进行仿真，其他参数相同，其中预测时域为 25，控制时域为 5，纵向速度为 $20m/s$ ，仿真步长为 $0.02s$ ，仿真结果如下图所示，其中蓝色实线表示参考轨迹，棕色虚线表示附着系数为 0.8 的工况，绿色点线表示附着系数为 0.6 的工况，红色点画线表示附着系数为 0.4 的工况。

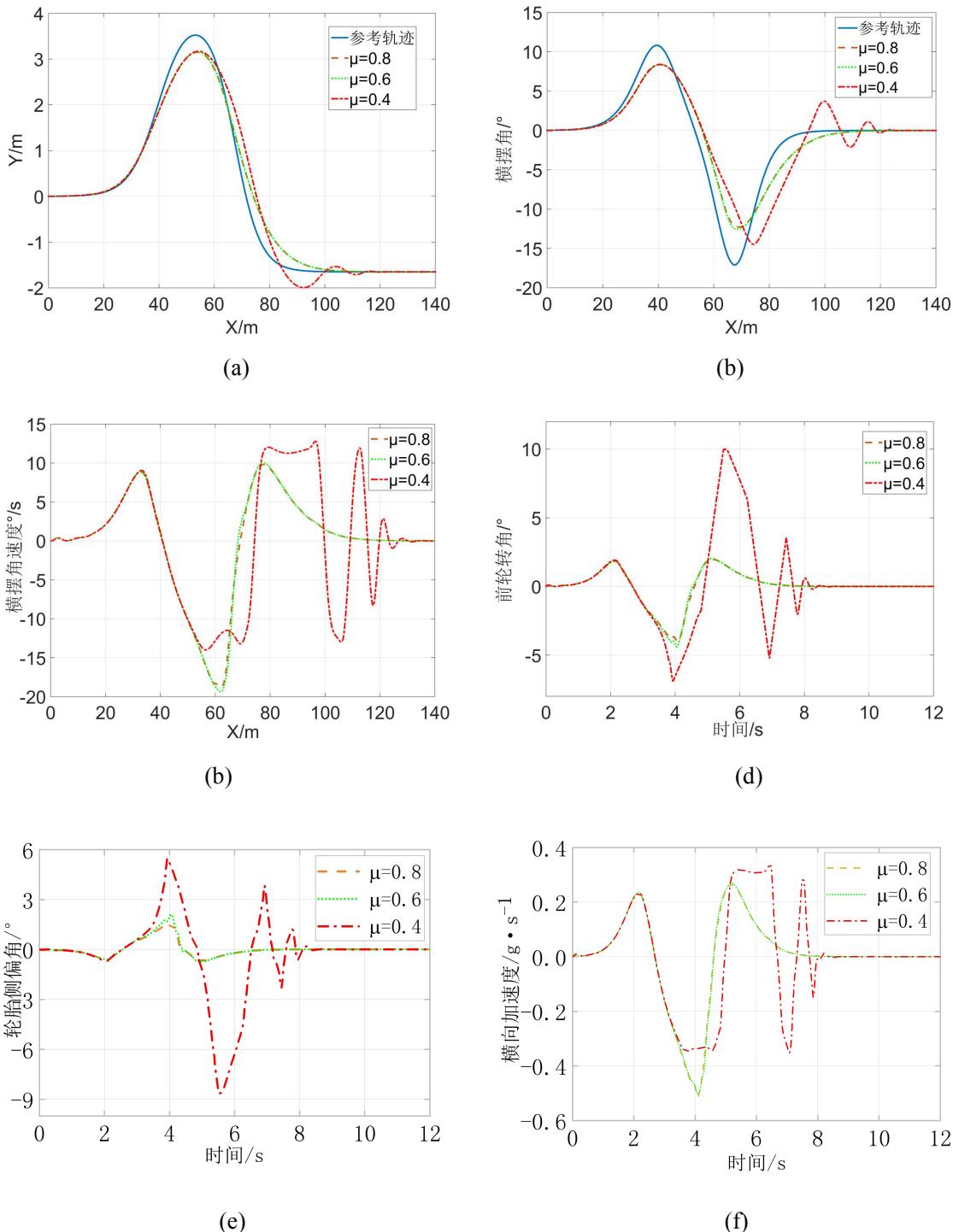


图 5-7 三种附着系数工况的路径跟踪

Fig.5-7 Path tracking of three adhesion coefficient conditions

图 (a) 为三种附着系数工况下实际轨迹与参考轨迹图像。附着系数为 0.8 与 0.6 工况下实际轨迹与参考轨迹高度吻合, 但附着系数为 0.4 工况的实际轨迹与参考轨迹有明显的偏差, 特别是在纵向位移为 90 米附近, 横向偏差波动较大。

图 (b) 为三种附着系数工况横摆角与参考轨迹横摆角, 附着系数为 0.8 与 0.6 工

况下的横摆角与参考轨迹横摆角基本吻合，但附着系数为 0.4 工况的横摆角与参考轨迹横摆角偏差较大。

图 (c) 为三种附着系数工况横摆角速度。附着系数为 0.8 与 0.6 工况下的横摆角速度基本一致，且变化比较平滑，在纵向位移为 32m 处，最大正向横摆角速度为 $8^\circ/\text{s}$ ，在纵向位移为 62m 处，最大反向横摆角速度为 $-18^\circ/\text{s}$ 。附着系数为 0.4 工况的横摆角速度振荡比较剧烈，最大正向横摆角速度为 $13^\circ/\text{s}$ ，最大反向横摆角速度为 $-14^\circ/\text{s}$ 。

图 (d) 为三种附着系数工况前轮转角。附着系数为 0.8 与 0.6 工况下的前轮转角基本一致，且变化比较平滑，在直线路段，前轮转角基本为 0，在弯道，前轮转角变化均在约束范围之内。但附着系数为 0.4 工况下的前轮转角在 4s 到 8s 时间段变化剧烈，呈现振荡的状态。

图 (e) 为三种附着系数工况前轮侧偏角。附着系数为 0.8 与 0.6 工况的前轮侧偏角变化都在约束范围之内，轮胎工作在线性区域。而附着系数为 0.4 工况的前轮侧偏角变化超出了前轮侧偏角约束，轮胎工作在非线性区域，控制器产生非可行解，前轮出现侧滑，所以该工况下路径跟踪误差过大。

图 (f) 为三种附着系数工况横向加速度。附着系数为 0.8 与 0.6 工况下的横向加速度变化基本一致，且变化比较平滑。附着系数为 0.4 工况的横向加速度变化比较剧烈，在 4s 附近由于前轮转角及侧偏角的急剧增加导致轮胎侧偏特性处于非线性区域，车辆发生侧滑，方向无法立刻发生改变，侧向加速度短时间保持不变，控制器根据约束条件产生可行解，来控制前轮转角与侧偏角，之后侧向加速度才会发生改变。

综合以上图像分析可知，MPC 控制器对大部分类型路面都具有良好的稳定性，能够实现路径跟踪。与附着条件较好的路面（如正常干燥沥青路面）路径跟踪对比，附着条件差的路面（如冰雪路面）跟踪误差大。当附着系数较低时，由于轮胎侧向力不足，车辆前轮转角偏差增大，MPC 控制器将修正偏差，虽说最终偏差趋于 0，但修正过程仍会有振荡。

5.3.3 预测时域对于轨迹跟踪的影响

模型预测控制设计参数的选取是通过工程经验和试凑法得到的，但对于无人车横向运动控制设计参数的选取缺少相应基准，故设计参数的选取具有一定盲目性。设计参数（预测时域、控制时域、仿真步长等）对于控制器控制效果的影响不同，这里主要研究预测时域对于 MPC 控制器的影响。分别对预测时域为 14、22、30 的 MPC 控制

器进行仿真，其他参数相同，其中控制时域为 5，纵向速度为 20m/s，仿真步长为 0.02s，附着系数为 0.85。仿真结果如下图所示，其中蓝色实线表示参考轨迹，棕色虚线表示预测时域为 30 的控制器，绿色点线表示预测时域为 22 的控制器，红色点画线表示预测时域为 14 的控制器。

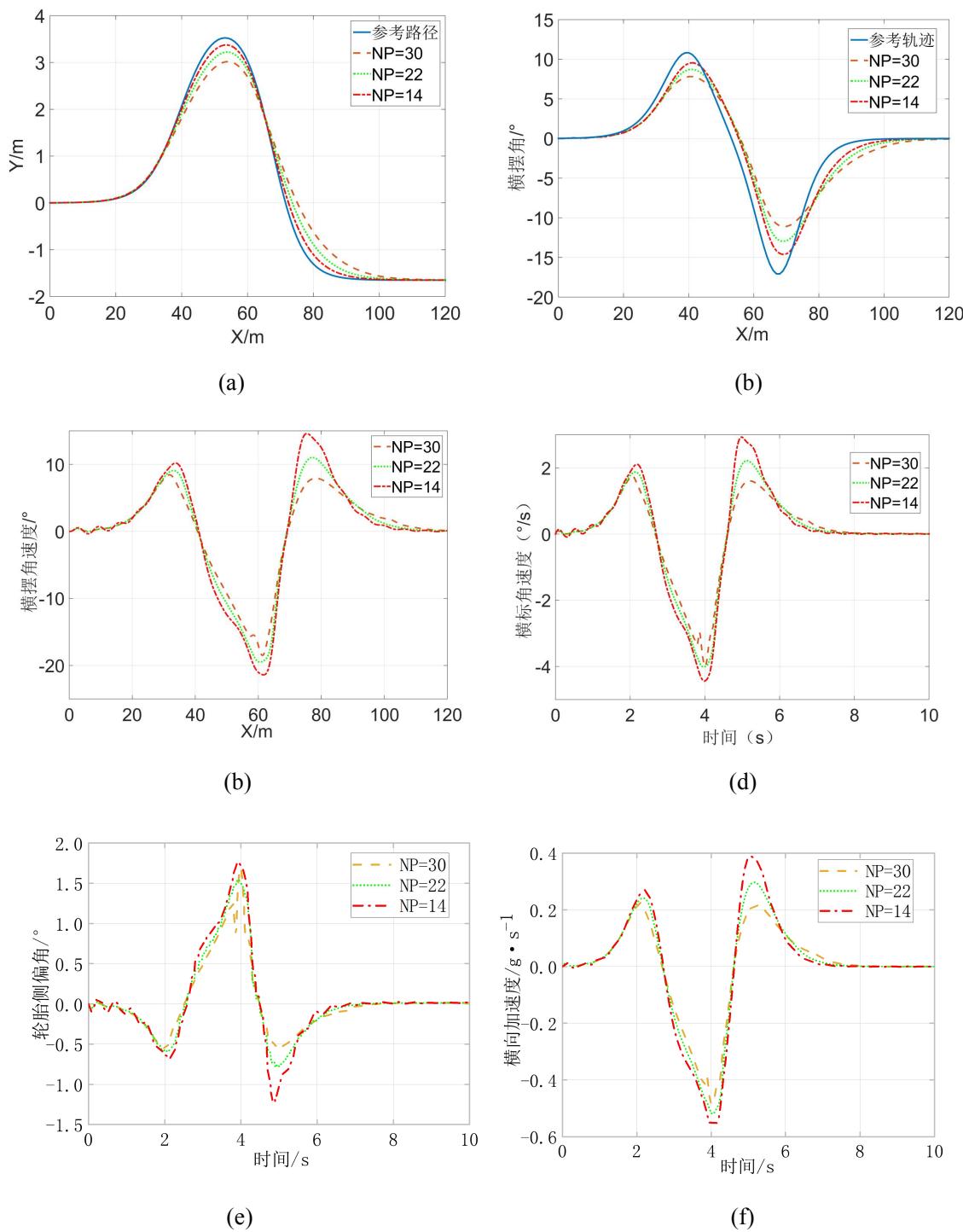


图 5-8 三种预测时域工况的路径跟踪

Fig.5-8 Path tracking of three predicted time-domain working conditions

图（a）为实际轨迹与参考轨迹。通过图像可知，预测时域为 14 的横向偏差最小，其次是预测时域为 22 的横向偏差，最大的则是预测时域为 30 的实际轨迹。由此可知预测时域越大，跟踪效果越差。

图（b）为实际横摆角与参考轨迹横摆角。通过图像可知，预测时域为 14 的横摆角与参考轨迹横摆角误差最小，其次是预测时域为 22 的横摆角误差，最大的是预测时域为 30 的横摆角误差。

图（c）为横摆角速度。其中预测时域为 30 的横摆角速度波动最小，车辆行驶比较稳定；预测时域为 14 的横摆角速度波动幅度最大，且在每个弯道处都比另外两种控制器转角大。

图（d）为前轮转角。预测时域为 30 的前轮转角波动最小，其中在直线路段转角基本为 0，在弯道的转角最大，但转角变化比较平顺；预测时域为 14 的前轮转角波动最大，且在初始位置变出现转角，且不断振荡。

图（e）为前轮侧偏角。图像上三种控制器的前轮侧偏角都在约束范围之内，但随着预测时域的增大前轮侧偏角变化范围增大。

图（f）为横向加速度。图像显示预测时域为 14 时的横向加速度最大，由此可知预测时域的大小对于舒适性有一定的影响，且预测时域越小影响越明显。

综合上述图像分析可知，预测时域对于路径跟踪有显著的影响，预测时域决定滚动优化的长度，预测时域较大将导致计算量激增，控制器实时性受限；预测时域较小，将导致控制器的抗干扰能力及鲁棒性下降。虽然预测时域越长，路径偏差越大，且实时性受限。但当预测时域达到一定值之后，横向偏差便不再增加，且较大的预测时域，能保证路径跟踪过程各状态参数稳定变化，如横摆角速度、侧向加速度、前轮转角、前轮侧偏角等稳定变化。因此，在保证跟踪响应的基础上，可以增大预测时域。

5.3.4 控制时域对于轨迹跟踪的影响

上一节主要研究预测时域对于轨迹跟踪的影响，本节则主要分析控制时域对于轨迹跟踪的影响。分别对控制时域为 5、10、15 的 MPC 控制器进行仿真，其他参数相同，其中预测时域为 20，纵向速度为 20m/s，仿真步长为 0.02s，附着系数为 0.85。仿真结果如下图所示，其中蓝色实线表示参考轨迹，棕色虚线表示控制时域为 15 的控制器，绿色点线表示控制时域为 10 的控制器，红色点画线表示控制时域为 5 的控制器。

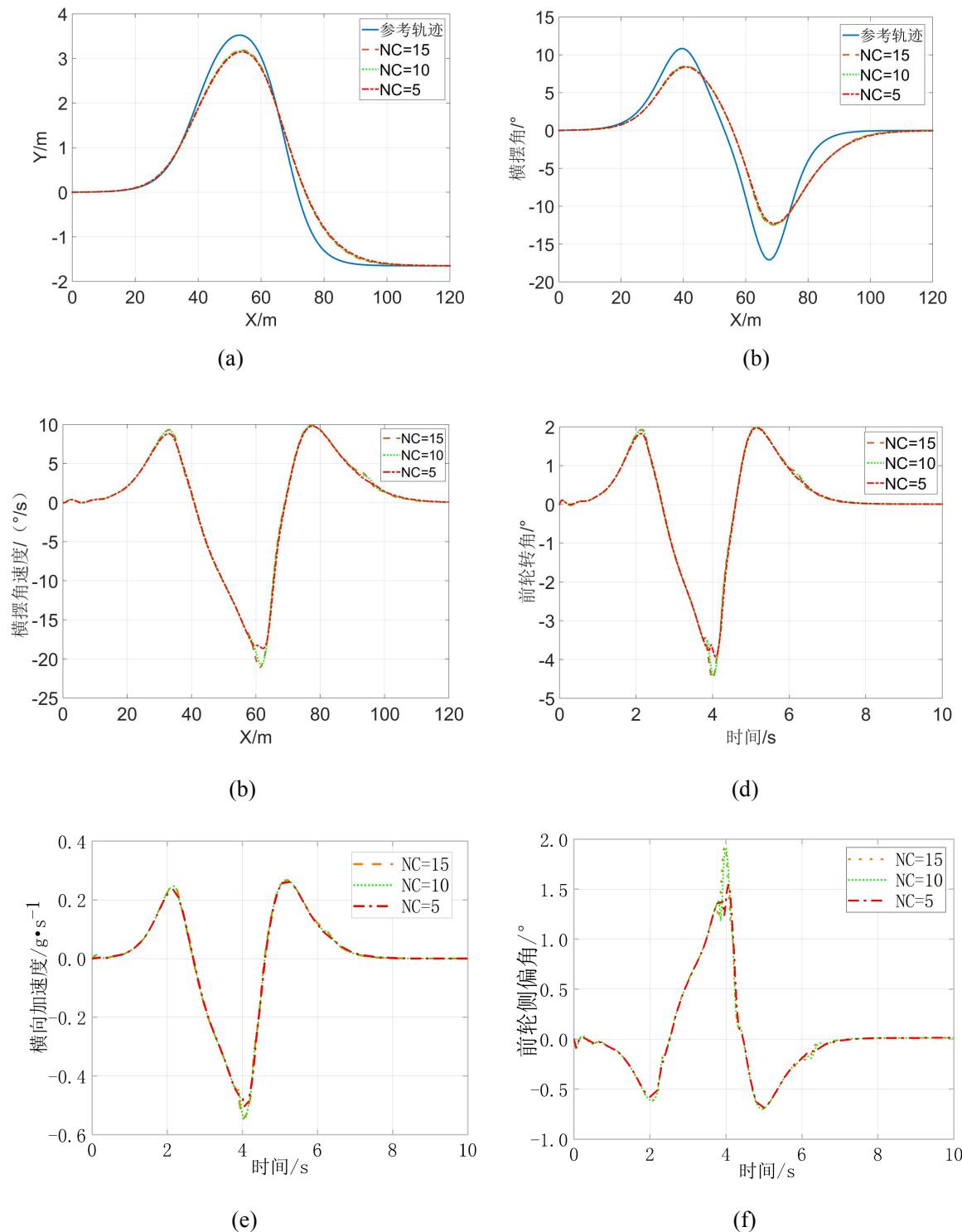


图 5-9 三种控制时域工况的路径跟踪

Fig.5-9 Path tracking of three control time-domain working conditions

图（a）是实际轨迹与参考轨迹。观察图（a）可知，控制时域为 15 的横向偏差最小，控制时域为 5 的横向偏差最大。由此可知，控制时域越大，车辆实际行驶轨迹与参考轨迹之间的横向偏差越小，偏差收敛速度就越快，则控制器就越稳定。

图（b）横摆角与参考横摆角的对比图。由图（b）可知，控制时域为 15 的横摆角

与参考横摆角偏差最小，控制时域为 5 的偏差最大。

图 (c)、图 (d)、图 (e) 及图 (f) 分别为三种控制时域下的横摆角速度、前轮转角、前轮侧偏角及横向加速度。通过观察上述四幅图像可知，控制时域越大，对应参数峰值就越大。其中控制时域为 15 与控制时域为 10 的参数变化基本一致，但控制时域过长将导致优化求解时间变长，对于控制器的要求更高。

综合分析可知，控制时域对于控制器的影响不是很明显，但为提高控制器的鲁棒性及稳定性，不能忽视控制时域的取值。控制时域越长，控制器就越稳定，但优化求解时间就越长，故可选取适当的控制时域，以满足稳定性及实时性的要求。

上述分析可知，MPC 控制器能够满足 FSAC 赛车路径跟踪实时性与鲁棒性要求。

5.4 仿真对比

为了验证 MPC 算法对于 FSAC 赛车路径跟踪的鲁棒性及实时性，只有自身的仿真并不具备说服力，这里通过与第三章设计的前馈-反馈控制进行仿真对比。

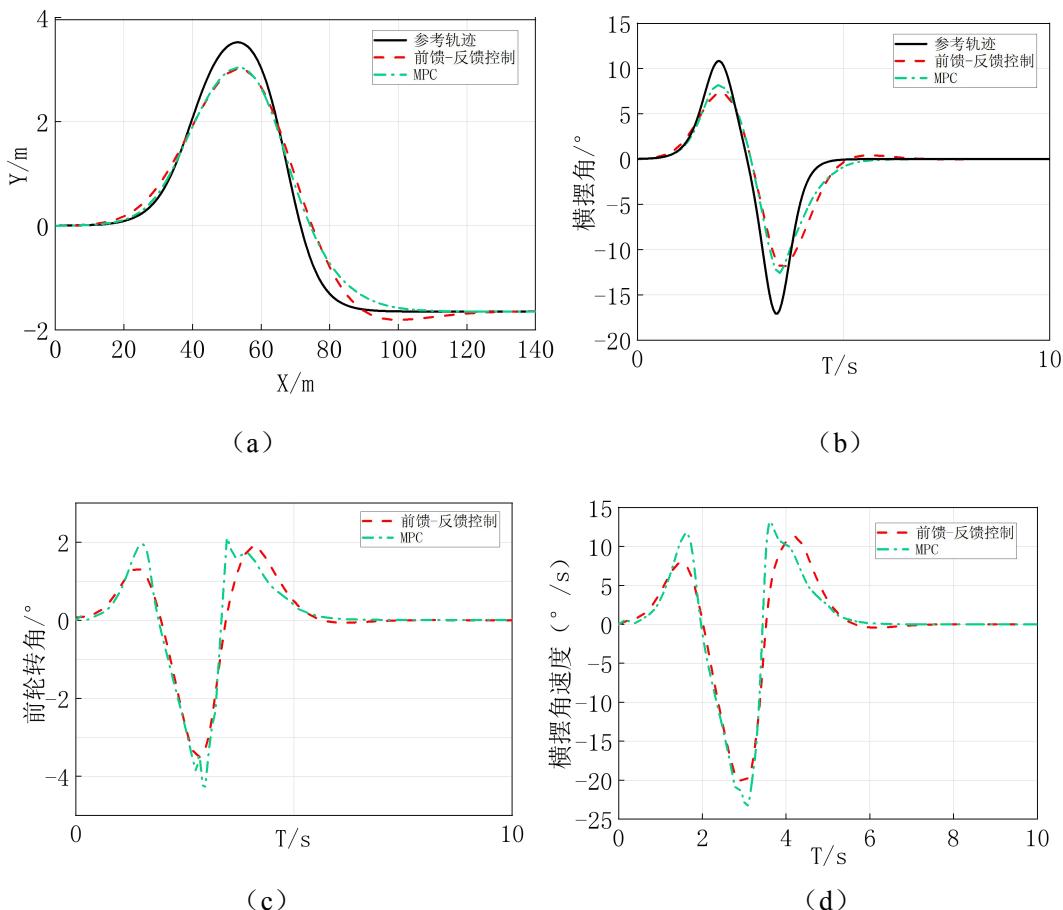


图 5-10 MPC 控制器与前馈-反馈控制器

Fig. 5-10 MPC controller and feed-forward feedback controller

第三章已经完成了前馈-反馈控制算法的推导，本节主要基于上述理论进行仿真验证，仿真使用的软件是 Carsim 与 Simulink，二者进行联合仿真，Carsim 建立整车模型，Simulink 则搭建控制器。车辆参数仍然按照之前表 2-1 中的数据，仿真工况选择双移线工况。由于 FSAC 赛车作为竞赛性质车辆，其大部分时候速度比较高，因此，仿真速度选择 54km/h，除了二者控制策略不同外，其余参考路径、附着系数等均相同。仿真结果如下图所示：

图 5-10 中，(a) 为 MPC 控制器与前馈-反馈控制器的路径跟踪及参考路径，通过图像可知，两种控制器都能完成路径跟踪，且误差都在允许范围之内，但是二者之间的区别也比较显著。图中 X 为 90m 时，前馈-反馈控制器的横向出现较大的波动，而 MPC 控制器比较稳定，图像显示 MPC 控制器的横向误差比前馈-反馈控制器的小。因此，MPC 控制器控制效果更好。(b) 为 MPC 控制器与前馈-反馈控制器对应的横摆角随时间变化图，二者的横摆角变化都比较平稳，说明两种控制器都具有比较好的稳定性。但 MPC 控制器的横摆角与参考轨迹横摆角误差较小，说明控制器鲁棒性更好。(c) 为 MPC 控制器与前馈-反馈控制器对应前轮转角随着时间的变化，总体来说，两种控制器下的前轮转角都在一定范围内稳定变化，但观察图像可知，MPC 控制器的前轮转角响应更迅速，而前馈-反馈控制器的前轮转角有明显的提前或滞后，波动较大。(d) 为 MPC 控制器与前馈-反馈控制器对应横摆角速度随时间的变化，这两种控制器的横摆角速度都在一定范围内变化，没有剧烈波动，但图中可以看出，前馈-反馈控制器的前轮转角在 T 为 6s 时还没有趋于 0，由此可知，MPC 控制器控制响应更加迅速。

表 5-2 两种路径跟踪偏差
Tab.5-2 Two path tracking deviations

控制器	最大横向偏差	最大横向偏差发生位置	最大航向偏差	最大航向偏差发生时间
MPC 控制器	0.42m	55m	4.4°	3.4s
前馈-反馈控制器	0.50m	56m	5.6°	3.6s

综上所述，MPC 控制器无论是路径跟踪误差还是实时性等方面，都比前馈-反馈控制器效果好。二者的对比更能够突出 MPC 控制器的鲁棒性及实时性。

5.5 本章小结

本章是对前面 MPC 横向运动控制器的仿真分析及验证。首先介绍了 Carsim 车辆

动力学仿真软件；接着进行仿真平台的搭建，通过分析无人驾驶方程式汽车大赛的动态赛，确定仿真参考路径使用双移线，分别设置基于 Carsim 的汽车动力学模型及基于 Simulink 的控制流程；然后分别基于速度、附着系数、预测时域、控制时域四种工况进行仿真，分析它们对于 MPC 控制器的影响；最后，通过对前馈-反馈控制器的仿真情况，来验证 MPC 控制器的鲁棒性及稳定性。

总结与展望

本文基于广东工业大学电动方程式赛车改装的无人赛车平台，进行 FSAC 赛车横向控制系统的研究，用以解决目前 FSAC 赛车路径跟踪困难、横向运动控制器鲁棒性不足的问题。基于模型预测控制理论及建立的三自由度汽车动力学模型设计了 MPC 控制器，为了验证 MPC 控制器的鲁棒性及实时性，进行 Carsim 与 Simulink 联合仿真。具体研究结果总结如下：

1. 分析 FSAC 大赛比赛规则，确定总体改装设计方案。分析激光雷达、GPS 惯性导航、摄像头等关键传感器的工作原理及作用，确定选用 Velodyne-16 激光雷达、GPS/INS 惯性导航系统、双目摄像头等，基于传感器特性及规则进行传感器的布置设计；横向运动控制系统执行机构的改装，基于 EPS 进行设计使用伺服电机驱动转向轴实现自动转向，利用经验公式计算出最大原地转向阻力矩为 $27130N\cdot mm$ ，在考虑需要克服的转向阻力矩及安全因数的情况下，选用 57 闭环步进电机，其特点是转向力矩大，达到 $3.0N\cdot m$ ，转向精度高，适合 FSAC 赛车转向执行机构。

2. 基于“魔术公式”建立赛车轮胎模型，通过 MATLAB 进行仿真，并分析轮胎的力学特性，得到侧偏角在 $\pm 3^\circ$ 范围，轮胎工作在线性区域，即轮胎侧向力与侧偏角成线性关系。在轮胎模型的基础上，建立了三自由度非线性车辆动力学模型。基于阿克曼转向原理，建立二自由度的车辆运动学模型。为后续验证 MPC 控制器的鲁棒性及实时性，建立了基于横向偏差的前馈控制器及基于航向偏差的反馈控制器。

3. 基于模型预测控制理论，设计线性时变模型预测控制器。将非线性汽车动力学模型进行线性化转变，离散线性化车辆模型，得到预测模型，为了提高 MPC 控制器的稳定性，进行前轮转角、前轮转角增量、输出、轮胎侧偏角的约束，建立优化目标函数，将优化求解问题转化为在线求解带约束的二次规划问题，保证控制器的精度。

4. 搭建 Carsim 与 Simulink 仿真平台，验证 MPC 控制器的鲁棒性及实时性。基于不同车速下的 MPC 控制器进行仿真，结果显示 MPC 控制器在中低速工况下能够保证路径跟踪的精确性，且随着车速的增加，横向偏差增大，其中，车速为 $72km/s$ ，最大横向偏差为 $0.42m$ ，相对车身宽度及赛道宽度该偏差在允许范围之内。对不同附着系数下的 MPC 控制器进行仿真，结果显示 MPC 控制器在不同道路上稳定性依旧。针对不同预测时域下 MPC 控制器进行仿真，结果显示预测时域长度需要适中，预测时域过长实

时性将受限，过短将抵抗干扰的能力及动态响应速度下降。针对不同预测时域下 MPC 控制器进行仿真，结果显示控制时域对于 MPC 控制器的影响不是很明显。为了进一步验证 MPC 控制器的鲁棒性及实时性，与前馈-反馈控制器仿真进行对比，结果显示，MPC 的控制效果优于前馈-反馈控制器。

总结本文的研究内容，对 FSAC 赛车横向控制系统后续研究提出如下展望：

1. 由于目前针对 FSAC 赛车的研究刚起步，只考虑了车辆的纵向、横向、横摆三个自由度，但 FSAC 赛车作为一个复杂的集成系统，还要受俯仰、侧倾、垂向三个自由度的影响，因此，后续研究可以增加这三个自由度来建立更为精确的车辆动力学模型。
2. 横向控制系统与纵向控制系统具有强耦合特性，在后续研究中可以考虑二者相结合的控制策略。
3. 由于受限于时间与实验设备，赛车的改装设计还没有完成，暂时无法将 MPC 控制策略进行实车验证，希望后续能够进行实车验证。

参考文献

- [1] 2018 年全国小汽车保有量首次突破 2 亿辆. [2019.1.12]. <http://www.mps.gov.cn/>.
- [2] 全球道路安全现状报告. [2018.12.7]. <https://www.who.int/>.
- [3] 龚毅. 一种无人驾驶车辆路径跟踪控制方式研究[D].南京: 南京理工大学,2014.
- [4] 戴斌,聂一鸣,孙振平等.地面无人驾驶技术现状及应用[J].汽车与安全, 2012(03): 46-49.
- [5] 邓学,陈平,郑宏达等. 汽车颠覆时代无人驾驶热血而来[J]. 机器人产业, 2016, (4): 46-56.
- [6] 袁澳麟. 浅析无人驾驶及其环境感知技术[J]. 数字通信世界, 2017, (11):75-76.
DOI:10.3969 /J.ISSN.1672-7274.2017.11.050.
- [7] 汪明磊. 智能车辆自主导航中避障路径规划与跟踪控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2013.
- [8] 汪瑞杰. 考虑非线性与不确定性的自主无人车辆视觉系统与横向控制系统研究[D].南京:东南大学, 2017.
- [9] 邬紫阳. 基于机器视觉的前碰撞预警系统车辆检测方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [10] 刘昕. 智能车辆换道轨迹跟踪控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [11] C.Urmson et al. Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge[J]. Field Robotics, 2008, 25(8):425-466
- [12] 何佳,戎辉,王文扬等. 百度谷歌无人驾驶汽车发展综述[J].汽车电器, 2017, (12) : 19-21.
- [13] 孙振平,安向京,贺汉根. CITAVT-IV——视觉导航的自主车[J]. 机器人, 2002, (02):115-121.
- [14] 蔡自兴. 智能驾驶技术研究的重要进展[J]. 机器人技术与应用, 2019(03):37-39.
- [15] 宋宛泽. 基于互联智能汽车产业振兴吉林经济的思考[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(16):25-26.
- [16] 陈慧岩,陈舒平,龚建伟. 智能汽车横向控制方法研究综述[J]. 兵工学报, 2017,38(06):1203-1214.
- [17] Peng H, Tomizuka M. Vehicle lateral control for highway auto-mation [C] // 1990

- American Control Conference. San Diego, CAUS: IEEE, 1990: 788—794.
- [18] Hessburg T, Peng H, Tomizuka M, et al. An experimental study on lateral control of a vehicle[C]// 1991 American Control Conference. Boston, MA, US: IEEE, 1991: 3084—3089.
- [19] Peng H, Tomizuka M. Preview control for vehicle lateral guidance in highway automation[C]// 1991 American Control Conference (ACC) . Boston, MA, US: IEEE, 1991: 3084—3089.
- [20] Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, et al. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9) : 661-692.
- [21] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, et al. Autonomous driving in urban environments: boss and the urban challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(8) : 425-466.
- [22] Hong S, Hedrick J K. Roll prediction-based optimal control for safe path following[C]// 2015 American Control Conference. Chicago, IL, US: IEEE, 2015: 3261-3266.
- [23] Wang R R, Hu C, Yan F J, et al. Composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7) : 2063-2074.
- [24] 马莹,李克强,高峰,郭磊等. 改进的有限时间最优预瞄横向控制器设计[J]. 汽车工程, 2006 (05):433-438.
- [25] 陈杨,刘大学,贺汉根等. 基于车辆动力学的轨迹跟踪器设计[J]. 中国工程科学, 2007 (11): 68-73.
- [26] 赵熙俊,陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(05):382-387.
- [27] 陈无畏,王家恩,汪明磊等. 视觉导航智能车辆横向运动的自适应预瞄控制[J]. 中国机械工程, 2014, 25(05):698-704.
- [28] 梁政焘,赵克刚,裴锋等. 基于 MPC 的智能车轨迹跟踪算法[J]. 机械与电子, 2019, 37(01): 66-70.
- [29] 2017 中国大学生方程式汽车大赛组委会. 2017 中国大学生方程式汽车大赛. 参赛手册. 2017
- [30] 戎飞腾,吴燕华, 陈超. 无人驾驶汽车如何解放司机双手? [N]. 南方日报, 2015.11.30.

- [31] 李明超. 基于 OpenCV 的机器人双目手眼标定系统的研究与实现[D]. 济南: 山东科技大学, 2012.
- [32] 李江,朱燕兮. 钢板弹簧客车液压助力转向系统的匹配设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014, 41(01): 25-28+32.
- [33] 夏天. 智能车速度规划及路径跟踪控制方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [34] 陈召磊.基于内装式摩擦提升机变频矢量控制系统编码器改造的研究与应用[J].煤矿机械, 2018, 39(05):49-51.
- [35] Sc A E D, Arem B V, Amditis A, et al. Handbook of Intelligent Vehicles[J]. 2012:1217-1267.
- [36] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M].北京: 机械工业出版社, 2005.
- [37] 余志生. 汽车理论[M].北京: 机械工业出版社, 2012.
- [38] 龚建伟,姜岩,徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.
- [39] 刘凯. 无人驾驶车辆体系结构与定位导航技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2010.
- [40] 谢亚军. 浅析经典控制理论与现代控制理论的异同[J]. 科学与财富, 2013,(5):136-137.
- [41] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [42] Kuhne F, Lages WF, et al. Model predictive control of a mobile robot using linearization[J]. Proceedings of Mechatronics and Robotics,2004(4): 525-530
- [43] Zanten A T V, Erhardt R, Landesfeind K, et al. VDC Systems Development and Perspective[J]. Vacuum, 1998, 28(12):429.
- [44] Zanten A T V, Erhardt R, Bartels H, et al. Simulation for the Development of the Bosch-VDC[J]. Proceedings of the Institute of Natural Sciences Nihon University, 1996:36
- [45] AOUCHE G S, LUDERS B D, JOSEPH J M et al. Probabilistically safe motion planning to avoid dynamic obstacles with uncertain motion patterns[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(1): 51–76

攻读硕士期间学术成果

- [1] 李金畅, 阳林, 邱灿文, 钟兴华, 陈志恒. 基于电动赛车的无人赛车设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, (10): 录用待发表.
- [2] 李金畅, 阳林, 钟兴华, 骆文星, 左宇城. 发动机积碳分析及处理方法[J]. 汽车零部件, 2019(02):60-62.
- [3] 李金畅, 阳林, 邱灿文, 钟兴华. 依托汽车大赛的跨学科多专业创新创业人才培养[J]. 时代汽车, 2017(14):56-57.
- [4] 李金畅, 阳林, 钟兴华, 邱灿文. 任务驱动式教学与汽车大赛相结合的人才培养模式[J]. 教育现代化, 2017, 4(40):41-42+45.
- [5] 李金畅, 阳林, 邱灿文, 钟兴华. 基于汽车大赛促进创新创业人才培养[J]. 教育现代化, 2017, 4(33):1-2.
- [6] 邱灿文, 阳林, 李金畅, 钟兴华. 车辆在对开路面的制动仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(03):45-47+54.
- [7] 邱灿文, 阳林, 钟兴华, 李金畅. FSE 赛车后悬架的设计与零件校核[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(02):29-32.
- [8] 钟兴华, 阳林, 李金畅, 骆文星, 杨凯明. 基于 ANSYS 的 FSEC 赛车制动盘仿真分析[J]. 汽车实用技术, 2018(22):84-87.
- [9] 曾繁俊, 阳林, 万婷婷, 李金畅, 刘延伟. PBL 与汽车大赛相结合的跨学科创新人才培养模式探索[J]. 教育现代化, 2017, 4(43):4-5.
- [10] 万婷婷, 阳林, 曾繁俊, 李金畅. 汽车大赛与构建主义相结合的跨学科创新人才培养模式探索[J]. 教育现代化, 2017, 4(43):11-12+17.
- [11] 邱灿文, 阳林, 李金畅, 赵晶. CDIO 与方程式汽车大赛相结合的人才培养模式[J]. 教育现代化, 2017, 4(40):4-6.
- [12] 钟兴华, 阳林, 邱灿文, 李金畅. 基于方程式汽车大赛, 提升学生创新实践能力[J]. 教育现代化, 2017, 4(28):1-2.
- [13] 邱灿文, 阳林, 李金畅, 万婷婷. 依托学科竞赛探索跨学科多专业创新人才培养模式[J]. 科技创新导报, 2017, 14(18):222-223.
- [14] 邱灿文, 阳林, 钟兴华, 李金畅. 依托学科竞赛探索创新型人才培养新模式[J]. 时代汽车, 2017(12):59-60.

- [15] 阳林,李金畅,钟兴华,邱灿文,骆文星. 一种发动机增压进气系统[P]. 广东: CN108869103A, 2018-11-23.
- [16] 阳林,万婷婷,李金畅,钟兴华,梁振鸿,陈钟宏. 一种 FSE 方程式赛车电控多片式尾翼 [P]. 广东: CN206704328U, 2017-12-05.
- [17] 阳林,邱灿文,李金畅,钟兴华,刘佑明,陈进. 一种快拆式轮毂安装结构[P]. 广东: CN206690793U, 2017-12-01.
- [18] 阳林,邱灿文,李金畅,钟兴华,骆文星,陈航. 一种 FSE 赛车车身[P]. 广东: CN109018024A, 2018-12-18.
- [19] 阳林,钟兴华,邱灿文,李金畅,刘佑明,陈进. 一种赛车集成化轮毂结构[P]. 广东: CN206781436U, 2017-12-22.
- [20] 阳林,曾繁俊,万婷婷,李金畅,梁振鸿,陈剑. 一种赛车制动能量回收系统[P]. 广东: CN206749554U, 2017-12-15.
- [21] 阳林,曾繁俊,万婷婷,李金畅,梁振鸿,陈剑. 一种赛车制动能量回收系统及其控制方法[P]. 广东: CN107379972A, 2017-11-24.

学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明，并表示了谢意。本人依法享有和承担由此论文所产生的权利和责任。

论文作者签名: 李金雨 日期: 2019.5.31

学位论文版权使用授权声明

本学位论文作者完全了解学校有关保存、使用学位论文的规定，同意授权广东工业大学保留并向国家有关部门或机构送交该论文的印刷本和电子版本，允许该论文被查阅和借阅。同意授权广东工业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、扫描或数字化等其他复制手段保存和汇编本学位论文。保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名: 李金雨 日期: 2019.5.31

指导教师签名: 吴伟平 日期: 2019.5.31

致谢

时光飞逝，三年的研究生生涯即将结束。在此，向所有帮助过我的人表示由衷的感谢。

首先，衷心感谢我的导师阳林教授。阳老师严谨的治学态度、实事求是的工作作风、平易近人的性格对我的学习及生活有着深远影响。学习上，阳老师的谆谆教导，使我受益良多。生活上，阳老师的关怀，使我铭记于心。从确定研究方向、开题报告、直至论文完成，阳老师都提出了许多宝贵的意见与建议。在此，再次感谢阳老师，并衷心祝愿您身体健康，万事如意。

感谢汽车系熊锐教授、彭美春教授、冯桑副教授和赵晶副教授等，感谢他们平时对我的帮助以及论文开题时提出的宝贵建议。

感谢叶磊师兄、田硕师兄、曾繁俊师兄、万婷婷师姐，自我入学时便帮助我适应研究生生活，从论文选题到开题报告给予我许多建议和帮助。感谢钟兴华、邱灿文、李继龙、陈则飞等同学，通过与他们的讨论、交流让我得到了很大的帮助，也感谢骆文星、利仁滨、陈德升、梁绍臻师弟们的帮助与支持。

感谢我的家人在求学过程中对我的支持和陪伴，感谢他们对我的信任及付出，是他们让我拥有坚持不懈的力量。

最后，我还要向在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家表示由衷的感谢。

李金畅

2019年5月于广东工业大学