
中图分类号：TP242.6

UDC 分类号：629

越野环境中智能车辆编队行驶规划控制技术研究

| | |
|---------|-----------------------|
| 作 者 姓 名 | <u>丁 勇 强</u> |
| 学 院 名 称 | <u>机械与车辆学院</u> |
| 指 导 教 师 | <u>陈慧岩 教授</u> |
| 答辩委员会主席 | <u>邹 渊 教授</u> |
| 申请学位级别 | <u>工学硕士</u> |
| 学 科 专 业 | <u>机械工程</u> |
| 学位授予单位 | <u>北京理工大学</u> |
| 论文答辩日期 | <u>2019 年 6 月 6 日</u> |

Research on Control and Planning Techniques for Intelligent Vehicles Formation in Off – Road Environment

| | |
|--------------------------|---|
| Candidate Name: | <u>Yongqiang Ding</u> |
| School or Department: | <u>School of Mechanical Engineering</u> |
| Faculty Mentor: | <u>Prof. Huiyan Chen</u> |
| Chair, Thesis Committee: | <u>Prof. Yuan Zou</u> |
| Degree Applied: | <u>Master of Science</u> |
| Major: | <u>Mechanical Engineering</u> |
| Degree by: | <u>Beijing Institute of Technology</u> |
| The Date of Defence: | <u>June, 2019</u> |

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 日期：
导师签名： 日期：

研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签 名： 日期：

摘要

本文重点研究越野环境下智能车辆编队行驶中的路径规划和纵向车间距控制两个问题。要实现编队行驶，主要的引导信息来源于前方车辆。编队车辆需要以此为依据，自动地调整自身位姿和车速，从而达到对前车位置跟踪的同时，与前车维持某个期望间距策略。在行驶过程中，自动驾驶的编队车辆还要能够实现避障功能。本文基于车间无线通信的方式搭建了两车编队行驶的整体结构框架。

在编队车辆路径规划层面，本文提出基于前车行驶轨迹并结合了横向偏移采样和优化理论的路径生成方法，从而达到编队车辆能够躲避障碍物的同时实现“不跟丢”前车的目的。首先通过车车通信手段获取到前车行驶过的历史路径作为本车的参考路径，接着对参考路径进行横向偏移采样从而得到粗糙的候选路径集合，进而通过非线性优化理论计算出本车位置到每条候选路径的过渡路径，从而得到最终候选路径集合。对最终候选路径集做避障分析，通过设计成本函数，从中选择一条成本最低的无碰撞路径作为本车的期望路径。通过对参考路径的横向偏移采样能够使车辆在越野环境下实现避障功能的同时保证对前车位置的跟踪，通过非线性优化生成过渡路径可以保证所有候选路径满足车辆运动学约束，使车辆能够跟踪最终选择的最优候选路径。

在编队车辆的车间距控制层面，本文提出了基于模型预测的多模式纵向车间距控制方法，能够实现编队车辆之间维持某个车间距策略行驶，同时保证不会与前车发生碰撞。本文首先建立了编队车辆之间的运动学模型，然后根据控制目标设计了优化目标函数，目标函数中包括了车间距要求、舒适性要求和安全性要求。考虑到面向的环境为越野环境，车间距控制器也考虑了车辆的动力学特性，设计了约束条件，包含最大加速度、最大减速度和安全距离约束。此外，采用了虚拟前车的概念，从而对车间距控制器做出了改进，拓宽了其应用场景。由于车间距控制器有多个工作模式，最后也给出了不同工作模式之间的切换方法。

最后分别基于 V-REP/ROS 仿真平台和实车平台，对本文所提出的编队控制方法进行了试验验证。试验结果表明，在越野环境中，利用本文所提出的编队控制方法能够实现编队车辆在直行道路、左/右转弯道路、U 型弯道路、S 型弯道路上的编队行驶，并能够与前方车辆保持 24~31m 的动态车间距离，车速最快达到 20km/h。

关键词：智能车辆 编队行驶 期望路径 模型预测控制 车间距控制

Abstract

This paper focuses on the path planning and longitudinal vehicle spacing controlling for intelligent vehicle formation driving in off-road environment. The formation vehicle needs to adjust its own position and speed to track the preceding vehicle's position and maintain a certain desired distance strategy with the vehicle ahead. During the driving process, the platooning vehicle is also required to be able to avoid the obstacles. This paper builds the overall framework of the two-car formation based on V2V communication.

At the level of formation vehicle routing, this paper proposes a path generation method based on the driving trajectory of the preceding vehicle combined with the lateral offset sampling and optimization theory, so as to achieve the purpose of the formation vehicle to avoid obstacles while achieving the "not to lose" vehicle. Firstly, the historical path traveled by the preceding vehicle is obtained as the reference path of the vehicle by means of vehicle and vehicle communication, and then the reference path is laterally offset sampled to obtain a rough candidate path set, and then the vehicle position is calculated by the nonlinear optimization theory. The transition path of each candidate path, thus obtaining the final candidate path set. The final candidate path set is used for obstacle avoidance analysis. By designing the cost function, an optimal collision-free path is selected as the expected path of the vehicle. By sampling the lateral offset of the reference path, the vehicle can realize the obstacle avoidance function in the off-road environment while ensuring the tracking of the preceding vehicle position. The nonlinear optimization generates the transition path to ensure that all candidate paths satisfy the vehicle kinematic constraints and make the vehicle Ability to track the optimal candidate path for the final selection.

In the aspect of vehicle spacing control of formation vehicles, this paper proposes a multi-mode longitudinal vehicle spacing control method based on model prediction, which can achieve a certain vehicle spacing strategy between formation vehicles, and ensure that there will be no collision with the preceding vehicle. Firstly, the kinematics model between the formation vehicles is established, and then the optimization objective function is designed according to the control target. The objective function includes the vehicle spacing requirement, the comfort requirement and the safety requirement. Considering that the environment is an off-road environment, the vehicle spacing controller takes full account of the dynamic characteristics of the vehicle and designs constraints including maximum

acceleration, maximum deceleration and safety distance constraints. In addition, the concept of virtual front vehicle is proposed, which improves the vehicle spacing controller and broadens its application scenario. Since the vehicle spacing controller has multiple working modes, this paper also gives a switching method between different working modes.

Finally, based on the V-REP/ROS simulation platform and the real vehicle platform, the multi-vehicle formation control method proposed in this paper is tested and verified. The test results show that in the off-road environment, the multi-vehicle formation control method proposed in this paper can realize the formation of the formation vehicles on the straight road, left/right turn road, U-bend road and S-bend road, and can The vehicle in front maintains a dynamic workshop distance of 24 ~ 32m, and the speed is up to 20km/h.

Key Words: intelligent vehicle; formation driving; desired path; model predictive control; vehicles spacing control

目录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题研究背景和意义 | 1 |
| 1.2 国内外发展趋势和研究现状 | 2 |
| 1.2.1 编队技术发展及现状 | 2 |
| 1.2.2 智能车辆纵向控制方法 | 10 |
| 1.2.3 智能车辆横向控制方法 | 12 |
| 1.3 本文研究内容及论文结构 | 13 |
| 第 2 章 越野环境下编队控制系统体系结构 | 16 |
| 2.1 编队系统功能分析与功能指标 | 16 |
| 2.1.1 系统功能分析与分解 | 16 |
| 2.1.2 编队控制系统功能指标 | 18 |
| 2.2 编队系统的等效简化 | 19 |
| 2.2.1 编队系统及其弦稳定性 | 19 |
| 2.2.2 编队系统的简化 | 20 |
| 2.3 编队系统框架结构与车辆平台搭建 | 22 |
| 2.3.1 领航车辆框架结构 | 22 |
| 2.3.2 编队车辆框架结构 | 25 |
| 2.3 本章小结 | 28 |
| 第 3 章 越野环境下编队车辆路径规划方法 | 30 |
| 3.1 前车信息获取及其位置更新策略 | 30 |
| 3.1.1 编队前后车辆的位置关系描述 | 31 |
| 3.1.2 前车位置信息更新策略 | 32 |
| 3.2 编队车辆的避障分析与路径规划方法 | 33 |
| 3.2.1 基于横向偏移的粗糙候选路径集生成 | 34 |
| 3.2.2 基于优化的最终候选路径集生成 | 36 |
| 3.2.3 避障分析与候选路径选择 | 39 |
| 3.3 本章小结 | 42 |
| 第 4 章 编队车辆纵向车间距控制器设计 | 43 |
| 4.1 编队车辆车间运动学模型建立 | 43 |

| | |
|----------------------------|----|
| 4.1.1 车间运动学关系描述 | 44 |
| 4.1.2 车间距控制策略分析 | 44 |
| 4.2 基于模型预测的车间距控制方法 | 46 |
| 4.2.1 模型预测控制理论简介 | 46 |
| 4.2.2 越野环境下纵向车间距控制算法 | 48 |
| 4.2.3 纵向车间距控制器稳定性分析 | 52 |
| 4.3 纵向控制器工作模式及其自适应切换 | 54 |
| 4.4 本章小结 | 57 |
| 第 5 章 试验验证 | 58 |
| 5.1 仿真试验验证 | 58 |
| 5.1.1 仿真平台搭建 | 58 |
| 5.1.2 编队车辆纵向车间距控制试验 | 60 |
| 5.1.3 编队车辆路径规划避障仿真试验 | 63 |
| 5.2 实车试验验证 | 65 |
| 5.2.2 编队车辆纵向车间距控制试验 | 66 |
| 5.2.1 编队车辆路径规划实车试验 | 67 |
| 5.3 本章小结 | 70 |
| 结论 | 71 |
| 研究成果总结 | 71 |
| 本文创新点 | 71 |
| 未来研究工作展望 | 72 |
| 参考文献 | 73 |
| 攻读学位期间发表论文与研究成果清单 | 78 |
| 致谢 | 79 |

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景和意义

近年来，全球范围内对自动驾驶技术的研究如火如荼，无论是企业高校还是政府组织都对自动驾驶技术展现出了巨大的热情。专家学者认为自动驾驶技术能够改变人类的未来出行方式，在军用和民用领域都有着广阔的发展前景^[1]。自动驾驶车辆在未来有多种多样的应用场景，其中智能车辆编队行驶是一个能够快速落地的应用场景，也能够最早让人们感受到自动驾驶带来的好处。多车编队行驶，顾名思义就是多台智能车辆组成队列同向行驶，本质上是编队车辆能够依据前方车辆的位置和速度等信息、自身状态信息和行驶环境信息，自主地规划出一条能够跟踪前车的无碰撞路径并且与前车保持某个车间距策略。

在民用领域，车联网技术的研究如火如荼。在车与车之间的协作与配合基础上，多车编队场景是车路协同系统中最有前景的方向之一。车辆编队技术是对车辆横向、纵向和横纵向控制的综合与完善，智能车辆多车编队技术的应用将有利于降低排放、提高交通效率，提升驾驶的安全性^[2]。智能车辆多车编队技术能够提高汽车列队的行驶稳定性，降低现有交通出行的复杂程度。通过分析编队车辆行驶的空气动力学，车辆编队行驶时能够有效降低车辆的空气阻力，降低车辆的燃料消耗。研究表明，智能车辆编队行驶时会减少燃料消耗 25% 左右，能够将交通效率提升 3~4 倍^[3]。多车编队行驶技术可以减少人为造成的交通事故，保证驾驶的安全性。

在军用领域，车辆编队控制技术在物资运输、战场通行等领域有着广泛的应用需求。多车编队行驶技术能够把多台车辆组成一个车队，从而完成货物运输任务，一方面能减少运输途中的人力投入，另一方面能降低因疲劳驾驶导致的交通事故。当车辆在战场区域中通行时，可以把具备清障排爆能力的无人驾驶车辆作为头车，从而引导后续车队完成编队行驶，一方面能够使编队车辆快速通过危险区域，另一方面也能提高整个车队行驶的安全性。

在军用领域，多车编队控制技术多应用于越野等非结构化环境，非结构化环境是指环境中没有路面条件的先验知识^[5]。具体到本课题中，越野环境是指：在自然条件下，路面没有车道线等标志信息，路面条件是非铺装的土路，道路两边没有较为显著的道路边界，且道路的形状和道路边界不能预知先验。如图 1.1 所示。



图 1.1 典型越野环境示例

在越野环境中编队行驶，环境中的道路边界并不显著，编队车辆需要根据前方车辆的位姿信息和环境地图信息实时地计算出一条平滑可跟踪的无碰撞期望路径。相较于结构化道路，越野环境地形情况复杂，拥有众多平面环境不具有的土坡障碍、坑道和水体等不同类型的路面条件。所以一方面要求试验平台车辆具备一定的越野机动性外，还需要在车间距控制方法中考虑编队车辆的动力学特性，其中包括编队车辆的加速能力，最大速度和制动能力等，此外对车辆底层纵向控制器的要求也相对较高。

我国陆军装备部在过去举办的“跨越险阻 2016—地面无人系统挑战赛”和“跨越险阻 2018—地面无人系统挑战赛”中，特别设置了 B 组比赛，用来考核地面无人系统在野外战场环境下编队行军过程中的多车引导-跟随能力，集中检验地面无参赛平台在执行编队行军任务时的安全性、稳定性、灵活性和快速性。这反映了我军对于越野环境下智能车辆编队控制技术的迫切需求。本课题的研究重点是越野环境下多车编队行驶技术中的运动规划与控制问题。目前编队控制技术的研究主要是面向于城市公路和高速公路等结构化道路，而越野环境中的多车编队技术研究相对较少，所以开展本课题研究具有很重要的现实意义。

1.2 国内外发展趋势和研究现状

本节首先介绍了国内外多车编队行驶技术在军用领域和民用领域的发展现状，军用领域的试验环境一般为越野环境，民用领域的试验环境一般为公路等结构化环境。然后对智能车辆编队行驶技术的横向控制与纵向控制方法进行了介绍。

1.2.1 编队技术发展及现状

1) 军用领域的发展概况

美国奥什科什公司基于其 TerraMax 地面无人车辆进行了军用重型车辆的多车编队技术研究。该地面无人车辆能够实现全功能的自动驾驶，车辆搭载了底层、定位、环境感知和规划控制等核心功能模块。TerraMax 地面无人车底层采用全线控技术，集成了制动、转向、发动机和传动系统^[6]。由于军用要求较高，其导航定位系统采用的 GPS 具有较高的定位精度和较强的抗干扰能力。出于安全性和冗余性考虑，其感知系统装备了激光雷达、毫米波雷达等，能够实现有较强的可靠性^[7]。最后，通过深度学习算法对感知系统输出的环境信息进行处理^{[8][9]}。如图 1.2 所示，该公司在越野环境下进行了多台智能车辆的编队试验，领航车是无人车辆的工作车辆，负责排爆清障任务，中间的车辆是无人驾驶车辆，负责货物运输，最后一台是有人驾驶车辆，车辆中的驾驶员可以远程监控领航车辆的作业情况并能够随时进行人为干预。在多车编队行驶中，编队车辆利用自身搭载的感知系统实现对方车辆的定位与跟踪，而不使用前方车辆的 GPS 提供的前车位置信息。



图 1.2 TerraMax 多车编队演示

洛克希德·马丁空间系统公司与美国陆军坦克汽车研究中心合作开发了自主运动辅助系统（Autonomous Mobility Appliqué System, AMAS）。AMAS 套件包括双线主动安全套件和自主套件。它使用 GPS, 激光雷达系统, 车载无线电探测和测距（Radar）以及商用汽车传感器。AMAS 的驾驶员辅助模式可帮助驾驶员完成诸如避开障碍物, 保持与前方车辆的安全距离以及车道保持行驶等任务。军队中的车辆护航工作十分辛苦, 因此 AMAS 能够提供车辆基本自动驾驶能力, 缓解了驾驶员士兵的压力, 并使他们能够更加警惕周围环境。AMAS 的 Leader-Follower 模式能够将大量车辆连接在一起作为一个车队。AMAS 提高了地面车队士兵安全性和战场生存能力, 增强了机组人

员的态势感知和认知能力，减少事故、伤害，和物资货物的损失。

AMAS 硬件和软件旨在自动执行当前战术车辆的驾驶任务。AMAS 的无人任务模块部分包括高性能的激光雷达和先进的算法，作为套件安装，几乎可用于任何军用车辆。该计划的目标是使整个陆军和海军陆战队的这些装备标准化，使战士能够在 2020 年之前将普通车辆转变为可选载人车辆。如图 1.3 所示，AMAS 系统进行了多车编队的应用演示，车队包含七台不同的车辆，所有车辆均为自动驾驶，面向的环境有公路和土路两种^[10]。



(a) AMAS 公路演示



(b) AMAS 土路演示

图 1.3 AMAS 多车编队演示

2017 年，欧洲防务局成功完成一份关于“有人-无人车辆混合编队”的合作研究项目。此外，该项目还有助于军方进一步了解重型无人地面车辆。该项目的目标包括：通过分析和定义车辆编队的使用案例，论证无人地面系统与有人驾驶系统在未来作战任务中协同作战的可行性；开发一套混合编队的演示验证装置。这套装置由一辆有人驾驶控制与指挥车及一辆无人驾驶车辆组成，计划用于执行情报和监视任务。无人车辆可以由控制站的操作人员远程操纵，也可以配置为跟随主车自主机动^[11]。

在“跨越险阻 2016—地面无人系统挑战赛”B 组比赛中，前后两辆（或多辆）参赛平台编队从起点出发，前车人工驾驶按照既定路线行进，后车跟随前车，在无人操控条件下实现自主机动，编队一同穿过越野环境下的静态障碍区，穿过桥梁和隧道，行驶至终点停车，比赛全程约 10 千米。参赛平台编队在比赛过程中应满足车速和车距要求。在“跨越险阻 2018—地面无人系统挑战赛”B 组比赛中，参赛的编队车辆从起点出发，完成指定路段物资输送任务，有人车辆作为头车，多台无人车辆与其完成编队任务，根据敌情和路况保持或变换编队队形和车速，到达终点停车，全程约 15 千米，比赛环境为越野环境。我国陆军装备部举办的“跨越险阻”系列赛事中专门设置

B 组比赛,主要考核地面无人系统在野外战场环境下编队行军过程中的多车引导-跟随能力。集中检验地面无人参赛平台在执行编队行军任务时的安全性、稳定性、灵活性和快速性。



(a) 跨越险阻 2016



(b) 跨越险阻 2018

图 1.4 我国“跨越险阻”地面无人系统系列赛事

2) 民用领域的发展概况

在民用领域,智能车辆多车编队技术的研究主要面向公路等结构化道路。与在越野环境中相比,在结构化环境中,编队车辆的路径规划就简单多了,由于道路存在明显的道路边界与车道线信息,编队车辆能够通过识别此类信息实现车辆的路径规划。在民用领域,智能车辆的多车编队驶技术的研究取得了更加丰硕的成果。

1986 年,美国加利福尼亚开展 PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) 计划,他是北美第一个专注于智能交通系统的研究项目。其中主要研究问题之一就是多车编队行驶。在 2010 年,项目把多辆卡车编队行驶作为研究关键点提上日程,希望利用编队行驶降低整个车辆行驶时受到的空气阻力。1989 年,福特公司为该项目支持了四辆能够实现纵向自动控制的车辆。1992 年,PATH 项目第一次完成了多车编队试验。1994 年在圣地亚哥北部,成功地在群众面前完成了四辆车编队行驶的演示。

整个车辆编队系统是由车车通信系统、车辆控制系统、车载传感器系统、底层数据采集系统组成^[13]。编队车辆之间通过数传电台达到车车通信的功能,编队车辆之间可以共享彼此的行车数据,共享的数据包含编队车辆识别序号、数据发送时间、编队车辆车速、编队车辆航向角和 GPS 位置等。另外,多车编队系统也考虑了通信故障情况,如果车间通信持续停止 3s 时,系统会发出错误提示。在实际的结构化道路多车编队测试中,编队最多节约燃油可以达到 20%左右^[14]。



(a) “PATH” 轿车编队演示

(b) “PATH” 卡车编队演示

图 1.5 “PATH” 项目编队演示

2009 年，一项由欧盟出资的名为“环保安全公路列车”（SARTRE）的研究项目小组计划通过“公路列车”的行驶方式削减 20% 的 CO_2 排放量，同时解决欧洲高速公路拥堵的问题。该项目的思路是通过无线传感器将八辆车连接起来，形成公路列车。每辆列车中处于首位的车辆由专人控制，如长途卡车司机。这样后面七辆车的司机就可以稍事休息或读书看报，想离开车队时，只需控制自身车辆就可以随心所欲的离开了。公路列车要收取一定服务费，但比起节省下来的燃料费，还是相当划算的^[15]。在该项目中，车辆直接使用原车的 ACC 系统和电动助力转向系统。2012 年 1 月，在实际的道路试验中，编队车辆之间能够保持保持 4~25m 的车间距，试验时的最高车速达到 90km/h^[16]。

在 2013 年，欧盟开展了车辆动态编队项目，主要目标是提高交通通行安全和降低车辆燃料消耗与尾气排放。他们把车辆控制器分为规划层和响应层，其中规划层主要负责车辆的路径规划和编队车辆的协同控制^[17]。路径规划模块的作用是计算生成车辆期望的速度曲线和期望车距；编队协同控制模块的作用是使编队车辆之间有机协作行驶，例如当有其他车辆要加入编队时，需要事先与队列车建立通信，然后提出插队申请并报出插队位置，这就是动态编队的概念，也就是编队车辆没有必要有同样的起点和终点，而是在实际道路行驶的过程中，车辆主动地插入与目的地一致的车队。

在合作驾驶挑战赛（Grand Cooperative Driving Challenge, GCDC）旨在将工业界和学术界联合起来，加快推进智能卡车编队行驶的发展，减少拥堵、提高交通效率，降低卡车 CO_2 排放量^[18]。车辆仅在纵向方向上自动控制，通过无线技术将同向行驶的卡车进行连接，后面尾随的车辆可以接收到前面车辆加速、刹车等信息，并在最短的时间内做出反应。这样的好处是可以尽可能的缩短卡车之间跟车的距离，让后面跟随

的卡车有最小的行驶风阻，从而达到省油的目的。



图 1.6 欧洲“SARTRE”项目混合编队



图 1.7 欧洲“GCDC”项目混合编队

2008 年，日本启动了“Energy ITS”研究项目^[19-23]，研究目标是通过对基于卡车的多车编队控制技术的研究，以达到节约资源消耗和减少 CO₂ 排放的目的。项目把关于智能车辆多车编队控制技术研究分为了三个发展阶段，如表 1.1 所示。在编队行驶状态下，因为车距十分接近，两车之间形成气流真空区，不会产生空气涡流，因而能有效降低空气阻力，从而降低燃油消耗。编队车辆能够实现单车道行驶、变更车道行驶、和车间距控制功能。通过多车编队的自动驾驶，可以有效减轻驾驶员工作强度，增加驾驶安全性。日本的这个项目在其对媒体的演示中，重卡在编队行驶过程中的速度能够达到 80km/h，同时编队车辆之间的车间距离能够保持在 10m 左右。通过最终的测试计算，编队中的中间车辆能够实现节油 21%，头车节油 6%^[24]。在整个演示过程中，编队车辆还实现了换道超车动作。

表 1.1 “Energy ITS”多车编队技术发展方案

| | 2015-2020 年 | 2020-2030 年 | 2030 年之后 |
|------|-------------|---------------|-------------|
| 研究内容 | 自适应巡航系统 | 协同式自适应巡航系统 | 多车编队控制 |
| 研究目标 | 节能减排 | 节能减排，提高交通效率 | 实现高效率的交通 |
| 试验环境 | 开放交通环境 | 开放交通环境 | 专用试验车道 |
| 研究指标 | 节能驾驶 | 降低空气阻力（8-15%） | 降低空气阻力（18%） |
| | 安全驾驶 | 提高交通流量（+5%） | 减少燃料消耗（10%） |
| 编队数量 | 2-3 台车 | 3 台车 | 3-4 台车 |



图 1.8 日本“Energy ITS”项目卡车编队

此外，一些整车企业也逐渐加入了智能车辆多车编技术的研究行列中，也陆续取得了一定的成果。2016 年，在荷兰鹿特丹举办了“卡车列队行驶挑战赛”。本次比赛也得到了欧洲汽车制造商协会的支持。比赛的目的是加快推进欧洲各国卡车自动驾驶技术的发展与应用，加强欧洲各国之间在此方面的合作，合作建立智能运输系统。在此次比赛中，沃尔沃、曼恩、奔驰、斯堪尼亚、达夫、依维柯六家整车企业均参与了比赛，如图 1.9 所示。最终，排列整齐的卡车穿越了欧洲多个地区最终到达了目的地荷兰鹿特丹。



(a) 沃尔沃无人卡车编队



(b) 曼恩无人卡车编队



(c) 沃尔沃无人卡车编队



(d) 曼恩无人卡车编队



(e) 达夫无人卡车编队



(f) 依维柯无人卡车编队

图 1.9 各整车企业的无人卡车编队

稳健的一步步前行，先利用车辆上成熟的驾驶辅助系统进行组合完善，从单一的单车自动/半自动驾驶，演进是否能利用信息技术组建智能的半自动车队这样接地气的技术线路，多车编队技术就是欧洲商用车厂现在积极努力的方向。荷兰方面表示，此次挑战会让列队行驶更进一步接近现实，而且有望在 2020 年在欧洲实现。但是新方案的实施，需要不同国家对交通法规做出一定的修改。所以，卡车自动驾驶编队能否在欧洲率先取得成功，取决于必要的法规基础和监管框架，并要求欧洲各国提高相互之间的合作深度和水平。

国内的对于智能车辆多车编队技术的研究也逐渐从实验室理论转移到实际的应用于研发之中。科技公司与汽车企业强强联手，自动驾驶技术蓬勃发展。相对于自动驾驶乘用车，物流、运输行业对自动驾驶商用车的需求更加迫切，或许卡车运输行业将更快实现自动驾驶商业落地。2016 年，环宇智行科技有限公司开始了 L4 级别的自动驾驶卡车技术方案研究，该公司希望通过车车之间实现编队协同，从而有效避免前车紧急刹车造成的追尾事故，大幅提升公路安全^[25]。同年，该公司在公路上演示了多车编队的方案。编队由三辆东风重卡组成，编队车辆沿着车道线进行直行、变道和转弯。2019 年 1 月 18 日在上海临港，环宇智行的两台重卡实现网联编队自动驾驶首秀。在整个演示体验路段，环宇智行的自动驾驶卡车依次完成了跟车起步、低速 ACC、拥堵模式、高速 ACC、自主超车、社会车辆插入车队后的自动紧急制动，两车编队行驶，单车自动驾驶等功能，整个行驶过程实现有人坚守但全程无接管，流畅且平稳。

赢彻科技有限责任公司从一开始就瞄准城际公开道路的 L3/L4 级自动驾驶技术的开发与场景落地，提供多种模式的自动驾驶运输资产服务。技术上，卡车编队技术是赢彻科技商用车自动驾驶的关键技术，利用该技术可以降低企业成本，提升效益：降低空气阻力，减少燃油消耗及燃气排放；降低驾驶员劳动强度，减少疲劳驾驶事故发

生率；即刻反应，即刻刹车，同时可以优化道路利用。

2019 年 5 月 4 日，东风商用车有限公司（以下简称“东风商用车”）与中国信科集团旗下大唐移动通信设备有限公司（以下简称“大唐移动”）联合发布“智能网联车辆编队应用”。在中国汽车技术研究中心有限公司（以下简称“中汽中心”）组织下，大唐移动与东风商用车在天津市西青区道路上进行了智能网联车辆编队演示应用，这也是我国首次大规模商用车编队测试，是智能网联汽车走向商用化的重要阶段。车辆编队应用作为双方在智能网联车辆方向的首个应用，2019 年 1 月起，东风商用车技术中心和大唐移动分别从 V2X 通信可靠性、编队算法优化以及解决方案匹配性等维度在武汉、襄阳等地展开多轮联调和筹备。本次发布和现场演示应用分别实现了列队加速、列队换道和列队减速三种场景，如图 1.10 所示。东风商用车编队应用，基于大唐移动 V2X 智能网关提供的低时延、高可靠的车车通信条件，编队车辆行驶期间控制信息调度传递稳定，车辆完成由静止加速至 60km/h,车车间距可稳定保持在 20m 左右；车队在规定区间内执行换道操作，换道过程车车横向距离偏移量均小于 0.5m；车队完成制动至车辆停止过程中，列队中车辆减速平稳、间距均匀，整体业务应用体验良好，符合演示和应用发布预期。



图 1.10 东风商用车编队行驶

随着中国对于自动驾驶产业发展与法规完善愈发重视，行业资本热度不减，各大企业纷纷确定量产落地进程，围绕商业化展开的竞争日趋激烈。未来，随着监管、基础设施、技术等方面继续释放利好，智能车辆多车编队技术的发展有望翻开新篇章。

1.2.2 智能车辆纵向控制方法

智能车辆多车编队纵向控制的目的是根据前方车辆位置和速度，自动的调整自身

车辆的行驶速度，从而与前车保持某个期望的间距策略。在智能车辆多车编队的纵向控制中，常用的车辆纵向控制方法主要有 PID 控制、模型预测控制、模糊控制等控制方法。

北京理工大学张威选择定间距策略，并使用质量—弹簧—阻尼模型来描述两车编队系统，同时对该模型下编队系统的弦稳定性做了分析，并针对编队受到干扰后的稳定恢复设计了扰动控制器，针对编队的形成过程设计动态控制器，二者结合后成为编队车辆之间的车距辅助控制系统^[27]。武汉理工大学张蕊等人从编队车辆的车间距入手，首先建立的车车之间的运动学模型，然后在被建的运动学模型中引入了路面条件、道路限速和车道线等信息，简化了求解过程，该控制器能够实现速度跟随和车间距保持功能^[26]。北京理工大学的朱敏充分考虑了车辆执行器的指令执行用时，并提出车间反应距离的概念，其设计的控制器能够实现编队车辆在全速范围内的编队行驶^[28]。

针对同时考虑编队车辆前后车状态的纵向控制问题，哈尔滨工业大学的张京明等人采用了基于非线性车辆纵向动力学模型^[29]，设计了车辆编队系统的车间距控制规律。通过对一类无限维非线性非关联系统的研究，得到了系统稳定性的判据。基于此判据，作者对编队系统的稳定性做了分析，计算得到系统参数的收敛区间，试验表明作者的方法编队系统中能够较快的趋于期望车间距和消除车速误差。军事交通学院的李明喜等人为了更好地实现车辆的速度控制，提出虚拟前车的概念。通过分析前后车之间的运动学关系，建立了本车与虚拟前车之间的车间距模型，也是前后车之间的运动学模型，通过模型预测控制方法从而实现编队车辆的行驶速度控制^[32]。北京航空航天大学的张晓媚提出柔性杆模型，该模型就是假设编队车辆之间存在一根虚拟的柔性杆相连，柔性杆的长度就是前后车之间的路径长度，柔性杆的弯曲程度就是前车的转向半径，从而设计了柔性杆长度与安全距离的加速度分类模糊集，从而对编队车辆的速度进行控制^[33]。王建都等人在为了克服只依据车间距控制编队车辆的行驶车速的局限性，作者提出了一种改进之后的 OVD (Optimal Velocity Difference) 模型，然后对模型的稳定性进行了小振幅摄动法分析^[34]。北京理工大学的郭孔辉提出一种基于车间距误差模型和滑模控制理论结合的车间距控制方法，作者设计了基于指数的趋近律和基于变速的趋近律的滑模控制器，这样就消除了平衡位置的抖动现象^[74]。

1.2.3 智能车辆横向控制方法

智能车辆多车编队行驶横向控制的目的是使编队车辆能够对前车位置做出跟随的前提下,还可以实现避障功能。目前,主要的研究思路是后车尽量沿着前车的历史轨迹行驶,从而实现对前车位置的跟踪。

由于常规化的引导-跟随编队控制技术在复杂环境的鲁棒性较差,西南科技大学赵明等人提出改进之后控制方法^[35]。作者在编队控制算法中引入动态变化 φ 值。的当编队车辆中的引导车航向突变时(或者由于避障改变航向), φ 值也成为动态变化的,它与随领航车辆的航向角有一定的关系,从而使编队车辆规划的路径更加平滑易跟踪。武汉理工大学郑新娟引入虚拟领航车的概念,提出基于此的分散式控制策略^[36]。该方法中,虚拟领航车辆采用改进的VFH+算法进行本车的路径规划,编队车辆一虚拟领航车的轨迹为期望路径,从而完成编队行驶。南洋理工大学的学者提出了一种基于虚拟结构思想的轨迹跟踪控制系统^[37],它由模型预测控制单元和主动安全装置组成。该模型采用两根虚拟刚性杆连接编队中的前后两车,虚拟刚性杆是铰链连接的。该模型在弯道处的路径跟踪横向偏差较大。

对于这个问题,北京航空航天大学的张晓媚等人提出一种基于柔性杆模型的车辆跟踪算法^[38]。该模型就是假设编队车辆之间存在一根虚拟的柔性杆相连,柔性杆的长度就是前后车之间的路径长度,柔性杆的弯曲程度就是前车的转向半径,用短圆弧记录领航车辆的转弯半径,该模型在转弯时也可以保证路径的平滑和路径的跟踪精度。北京航空航天大学的戴冠雄等人通过三次样条曲线插值的方法来对前车轨迹进行拟合,从而获取到前车轨迹的解析表达式^[39]。北京理工大学的郭孔辉充分利用前车的历史轨迹信息,并对前车轨迹做了五次多项式曲线拟合。作者在获取前车位置坐标时,首先通过无迹卡尔曼滤波算法对前车位置做了滤波估计,才对前车位置做出更新^[74]。

常规的人工势场法很容易出现局部极小问题,这个缺陷在实际的应用中常常出现。吉林大学付帅等人提出了人工协调场法^[40]。作者将目标点的运动加入到势函数的构造中,并提出协调力的定义。协调力能够与排斥力进行合成,最后的合力能够解决出现的局部极小问题。常规的人工势场法中,当目标点与障碍物的距离较小时,车辆难于接近并到达目标点,直接导致编队车辆并不能准确按照前车的历史轨迹行驶。哈尔滨工业大学的闫继宏等采人并没有使用力矢量,而是采用势场强度的方法对编队车辆进行路径规划^[41]。此外,华东理工大学的刘士荣等人基于位姿误差对编队运动的行为做了设计,并提出一种虚拟目标跟踪控制模式^[42]。他们把编队车辆的动作分为直线运动

和旋转运动两个基本动作。

1.3 本文研究内容及论文结构

通过 1.2 节对编队技术在国内外发展趋势和研究现状的介绍，可以知道国内外的编队技术研究和应用大部分是在公路和高速路等结构化道路。由于结构化道路存在红绿灯、车道线和道路边界等显著丰富的先验信息，而且结构化道路还存在一定的交通规则，因此编队车辆的路径规划问题相对来说较为容易，编队车辆只需要沿着前车轨迹行驶或者沿着车道线行驶即可。在结构化道路下，道路的路面条件较好且较稳定一致，这非常有利于智能车辆的纵向控制，对于智能车辆车辆的底层控制器来说，结构化道路下的纵向干扰较少，所以对控制器影响较小。在越野环境下，道路复杂多变且没有显著的道路边界，这对编队车辆的路径规划能力提出较高的要求，要求车辆既能跟踪前车位置，也能同时实现避障。越野环境下的道路路面条件较差，而且路面可能同时存在水坑，凹坑和坑洼路面，这也要求车辆纵向车间距控制器能够充分考虑车辆动力学特性，使得车间距控制器具备一定的鲁棒性。

1.2 节介绍了几种智能车辆编队控制方法，基于行为的方法和虚拟结构法都存在明显的不足，在越野环境下无法适应复杂未知的环境。领航-跟随法的控制规则较为简单，只能适应简单的道路，在越野环境中，不能实现实时的避障，而且对领航车辆的定位准确度要求较高，越野环境下很容易出现通信丢包掉帧现象。本文采用了基于前车历史轨迹横向偏移采样和凸优化结合的方法，能够使编队车辆年实现避障的同时，也能对前车位置做出有效跟踪。然后采用基于模型预测的纵向车间距控制方法，能够使编队车辆之间维持某个间距策略。考虑到本课题所针对的环境为越野环境，编队车辆之间可能存在不在视距之内或者相距太远等多种场景，本文设计的纵向车间距控制器有多种工作模式，并且给出了不同模式之间的切换规则，从而保证编队车辆在保证安全性的前提下维持某个纵向车间距策略。本文内容结构如图 1.11 所示。

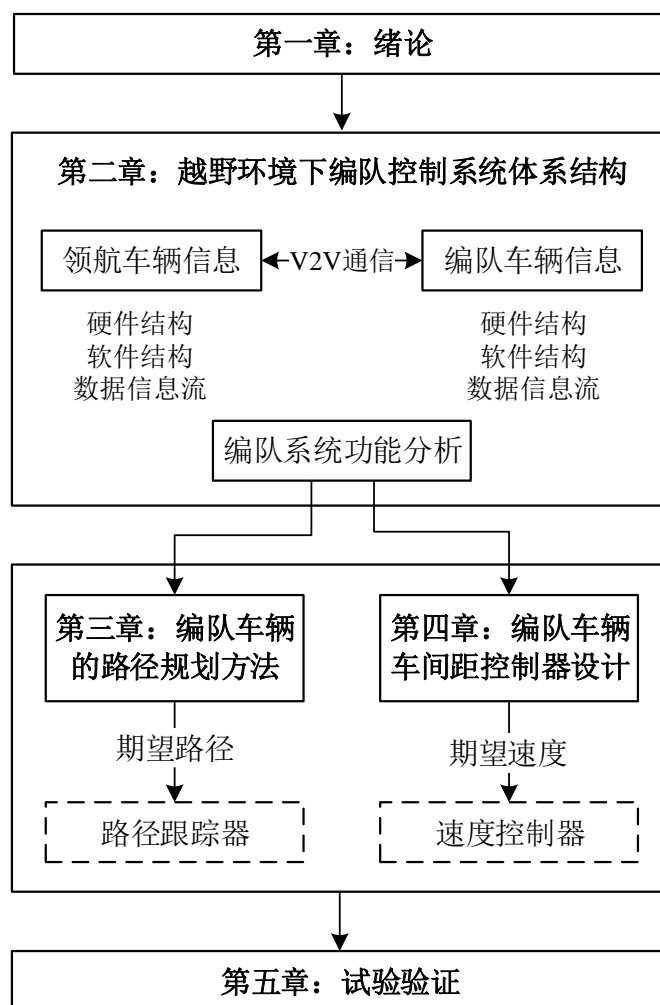


图 1.11 本文内容结构图

第一章：首先介绍了智能车辆编队行驶技术在军用领域和民用领域的发展状况。然后介绍几种常用的横向控制方法和纵向控制方法的研究现状。最后针对常用方法中的不足，提出了本课题的主要研究内容和方法，并对本文每个章节的内容做了简要概括。

第二章：首先对编队控制系统进行了功能分析，并将编队行驶控制问题分解为几个子问题。针对分解后的子问题，提出越野环境下编队行驶控制系统的功能指标，并对相应的功能指标进行了阐述与分析。然后将多车编队系统等效简化为两车的编队系统。最后设计并搭建了编队控制系统的整体框架结构，并从软件层面和硬件层面对课题试验平台进行了结构设计及介绍。

第三章：根据第二章中对编队行驶问题的分解，第三章主要解决越野环境下编队车辆的路径规划问题。首先介绍了前方车辆位姿信息的获取以及其历史轨迹的更新。接着介绍了基于横向偏移采样的候选路径集生成和通过凸优化生成最终的候选路径

集的方法。最后从安全性方面设计了候选路径选择的成本函数，从而选择一条最优的候选路径作为编队车辆的期望路径。

第四章：根据第二章中对编队行驶问题的分解，第四章主要解决编队车辆之间纵向车间距控制问题。在第三章计算出编队车辆期望路径的前提下，论文选择了基于模型预测的纵向车间距控制方法。首先介绍了模型预测理论，然后详细说明了基于模型预测的车间距控制算法，其中包括模型建立，目标函数选取，约束条件建立和权重参数选择等。然后对车间距控制器进行了稳定性分析。由于本文设计的纵向车间距控制器有多种工作模式，从而能够应对多种场景。最后给出了不同模式之间的切换方法，既保证了编队车辆之间的功能性，也提高了车辆控制的安全性。

第五章：仿真试验和实车试验验证。首先描述了仿真平台的搭建及其数据接口等，其次针对第三章提出的编队车辆路径规划方法和第四章提出的编队车辆之间车间距控制方法的性能和效果做了仿真和实车验证，证明了本文提出的越野环境下编队控制方法的有效性和鲁棒性。

第2章 越野环境下编队控制系统体系结构

智能车辆的编队控制是一个十分复杂的问题。在硬件层面，编队至少需要两台车辆，且有一台必须能够全功能的自动驾驶，自动驾驶的编队车辆需要搭载多个传感器、计算平台和通信供电线缆，且该车辆必须能够实现线控。在软件功能层面，编队控制系统主要包括车车通信系统、环境感知系统、决策规划系统和车辆控制系统。由于本课题研究的是越野环境下的编队控制问题，其中涉及到的规划模块和车辆控制模块又会变得复杂一些，需要规划控制方法具有广泛的适应性，从而适应复杂多变的越野环境。

为了实现越野环境下智能车辆编队行驶，本章首先对多车编队控制系统进行了功能分析，并将编队行驶控制问题分解为几个子问题，从而最终得到越野环境下的多车编队行驶的控制方法，实现本课题的预期效果。然后提出越野环境下多车编队行驶控制系统的功能指标，并对相应的功能指标进行了详细的阐述与分析。本章通过对多车编队系统进行弦稳定性分析后，将多车编队系统等效简化为两车编队系统，并对其原理进行了说明与阐述。最后设计了多车编队行驶控制系统的整体框架结构，并从软件层面和硬件层面对课题试验平台进行了结构设计介绍。

2.1 编队系统功能分析与功能指标

2.1.1 系统功能分析与分解

智能车辆编队行驶，顾名思义就是队列中至少有两辆车，其中第一辆车是人工驾驶的领航车，后面的车辆均是自动驾驶的编队车辆。编队车辆能够自主地根据前方车辆的运动，自动调整自身位姿和车速，从而达到对前车位置跟踪的同时，并与前方车辆维持某个期望间距策略。在行驶过程中，自动驾驶的编队车辆还要求能够实现避障功能。总而言之，编队控制系统要求编队车辆实现避障的同时既要能“不跟丢”前方车辆，还要与前方车辆维持某个期望车间距策略。

1) 实时的路径规划功能

能“不跟丢”前方车辆，就是要保证编队车辆能够跟随前方车辆完成转弯、避障、倒车等行为，这就是编队车辆的横向控制，也就是编队车辆的路径规划问题。在结构化道路上，编队车辆的行驶路径是通过车载视觉传感器获取到的车道线信息

来生成的，故编队车辆的横向控制较为简单。本课题面对的环境为越野环境，在此环境下，道路形状复杂多变，而且道路两边会存在树木等遮挡物，可能直接导致编队车辆之间不在同一视距范围内。由于本课题中的编队车辆搭载了车车通信设备，编队车辆能够通过 V2V 通信获取到前车的位姿和车速信息。编队车辆需要根据前方车辆的位姿信息、本车的位姿信息和实时获取到的环境地图信息，计算规划出一条本车的期望路径。规划出的期望路径需要满足三个条件：

- (1) 期望路径应该是一条无碰撞的车辆可通行路径；
- (2) 期望路径应该是一条平滑连续，且满足编队车辆运动学约束的路径；
- (3) 期望路径的终点应该指向前方车辆的行驶方向，即期望路径能够有效跟踪前方车辆的位置，从而实现“不跟丢”；

当编队车辆计算得到一条满足上述三个要求的期望路径后，可将该期望路径发给轨迹跟踪控制器，从而计算得到实际的期望前轮偏角，完成编队车辆的横向控制功能。

2) 编队车辆纵向车间距保持功能

编队车辆纵向车间距保持功能的必要前提是期望路径已经计算得到。因为在编队行驶中，表征队列中前后两车车间距的不是实际的两车位置的直线距离，而是两车之间的路径长度。所以，纵向车间距控制的前提是期望路径已经获取到。在编队车辆计算得到的期望路径上，通过合适的纵向车间距控制方法，使得编队车辆能够沿着期望路径与前方车辆维持某个车间距策略。

相较于结构化道路，越野环境地形比较复杂多变，可能存在不同路面条件的道路，例如土路、石子路、水体和凹凸障碍等。所以一方面要求试验平台车辆具备一定的越野机动性外，还需要在车间距控制方法中考虑编队车辆的动力学特性，其中包括编队车辆的加速能力，最大速度和制动能力等。在越野环境下，编队车辆的纵向车间距保持功能有以下三个子功能：

- (1) 前方车辆从静止到运动，编队车辆能够自动随着前车的启动而开始行使，并与之保持某个期望车间距策略；
- (2) 前方车辆做非激烈的任意变速运动，编队车辆应该能够自动的调整自身的行驶速度，从而动态地与前车维持某个期望车间距策略；
- (3) 前方车辆减速至停车时，编队车辆应该能够及时减速，并与前车保持在安全距离之外。

编队车辆纵向车间距控制本质上就是编队车辆过的纵向规划与控制。通过选择合适的纵向车间距控制方法，计算得到编队车辆的期望速度和期望加速度，再将期望速度与期望加速度发送给车辆底层控制器，从而计算得到具体的期望控制量，完成编队行驶的纵向车间距控制功能。

2.1.2 编队控制系统功能指标

本课题研究的环境为越野环境，从实际的应用需求角度出发，编队控制系统的总体功能指标如下：

- 1) 在越野环境中，编队车辆能够依据前方车辆的位姿信息，自主地跟随前方车辆行驶，并能够实时避障；
- 2) 在编队行驶过程中，编队车辆能够随着前方车辆实现自然道路条件下的左右转弯、U 型转弯、S 型转弯功能；
- 3) 在越野环境中，编队车辆以不低于 18km/h 的速度跟随前方车辆行驶，且编队车辆之间的车间距不超过 30m；
- 4) 越野环境下，编队车辆行驶全过程中车车间之间的距离需要维持在安全距离之外。

第一条功能指标本质上是要求编队系统路径规划方法具备实时性。越野环境道路复杂多变，而且道路上可能存在静态或者动态的障碍物，此时需要编队控制系统能够实时的规划出期望路径。在实际的应用中，一般要求路径规划周期不大于 100ms。第二条功能指标是要求编队控制系统的路径规划方法具备有效性和鲁棒性。越野环境下，编队车辆之间的位姿关系有很多种情况，环境也是复杂未知的，此时要求编队车辆的路径规划方法能够适应众多的场景，并且规划出的期望路径具有一定的稳定性，而不是频繁跳变的期望路径，因为频繁跳变的期望路径会导致车辆行驶出现频繁摆动，车辆行驶稳定性很难保证。第三条功能指标是编队系统最基本的要求。由于本课题针对的是越野环境，车辆在此环境中不宜高速行驶，而且考虑到课题试验平台的动力特性，所以行驶速度定为不低于 18km/h 和期望车间距为 30m。第四条功能指标是编队系统的安全性要求。

2.2 编队系统的等效简化

2.2.1 编队系统及其弦稳定性

车辆编队系统是自动化公路系统（Automated Highway System, AHS）的重要组成部分，许多国内外的研究机构和学者对编队行驶做了大量研究，希望能够提高交通安全和交通效率。车辆编队行驶，就是一列车辆按照某个期望间距策略“串联”组成，如图 2.1 所示。车辆编队行驶时，车辆之间的车间距可以更小，从而保证公路车辆密度的同时提高交通流量。目前的主流思想是对所有编队行驶的车辆进行宏观建模，即把所有的编队车辆看做一个系统，编队车辆之间能够进行无线通信共享彼此的状态信息。通过对多车编队系统进行整体建模，从而使编队系统具备较高的效率性和弦稳定性。

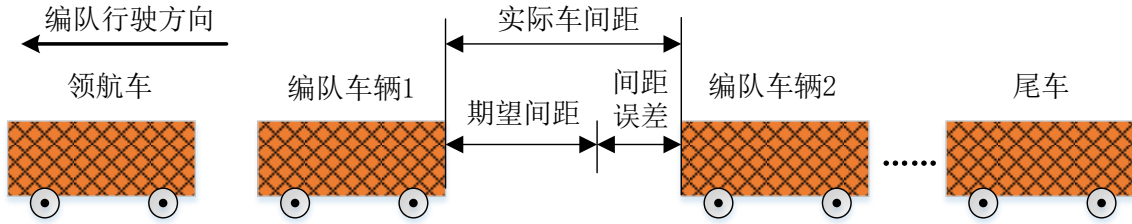


图 2.1 多车编队系统示意图

根据研究目的不同，编队系统的建模方法和侧重也会有所不同。目前的主流思想是对所有编队行驶的车辆进行宏观建模，即把所有的编队车辆看做一个系统，编队车辆之间能够进行无线通信共享彼此的状态信息，编队系统中相邻两辆车之间的位置关系如图 2.2 所示。

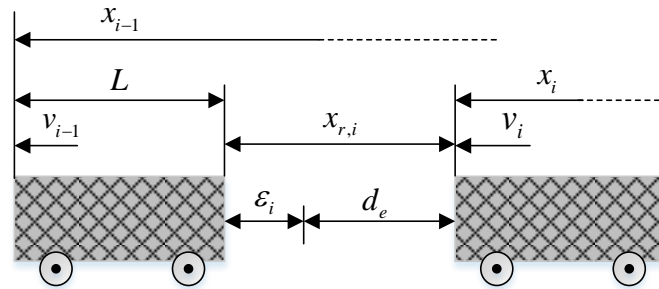


图 2.2 多车编队系统相邻两车的位置关系

图 2.2 中， x_{i-1} 和 x_i 分别表示前后车辆的位置， $x_{r,i}$ 表示两车实际车间距离， L 为车辆长度， d_e 为编队车辆间的期望车间距， ϵ_i 为距离误差， v_{i-1} 和 v_i 分别表示前后车的速度。则距离误差 ϵ_i 和相对速度 $v_{r,i}$ 可以表示为：

$$\varepsilon_i = x_{i-1} - x_i - L - d_e = x_{r,i} - d_e \quad (2.1)$$

$$v_{r,i} = v_{i-1} - v_i \quad (2.2)$$

当领航车速度发生变化时，必然导致与第一辆编队车辆产生间距误差，第一辆车进行车间距调整时，又会导致后方的车辆也产生间距误差，这样的话间距误差就会在编队车系统中向后传递。编队系统的弦稳定性就是要求编队系统的间距误差在向后传递过程中逐渐衰减，即：

$$|\varepsilon_{i+1}| < |\varepsilon_i| \quad (2.3)$$

根据研究目的不同，编队系统的整体建模方法和侧重也会有所不同。通过对多车编队系统进行整体建模，从而使编队系统具备较高的效率性和弦稳定性。北京理工大学张威^[27]证明了对编队系统整体建模能够保证编队系统具有弦稳定性。

2.2.2 编队系统的简化

对编队系统整体进行建模的前提是编队车辆的动力学参数相同，即所有编队车辆的纵向动力学特性要一致。此外对于在越野环境行驶的多车编队系统，并不适合对多车编队系统做整体的建模，原因如下：

- 1) 越野环境下，路面条件复杂多变，环境对车辆纵向控制器的干扰很多，对编队系统整体建模很难适用于实际的越野道路，需要额外对路面的扰动做辨识；
- 2) 对编队系统整体建模对车车之间的通信要求较高。由于在越野环境中树木的遮挡，车间通信丢帧现象不可避免，此时一旦车间无线通信不稳定，这将会对编队系统的稳定性造成严重影响。

本文第4章提出的基于模型预测的编队车辆纵向车间距控制方法，本质上是一种带约束的线性优化问题，并且能够保证该优化问题是凸的，因此能够保证计算得到的最优控制量是全局最优的解。这就意味着本文提出的基于模型预测的车间距控制器是能够在只考虑前车信息的前提下得到全局最优的期望控制量。文献^[10]中已经证明，针对多车编队系统而言，如果只考虑相邻车辆的状态信息并且车辆之间的车间距控制器是局部最优或者全局最优的，多车编队系统仍然具有弦稳定性。这是因为，当仅允许相邻车辆进行通信时，由于队列中相邻车辆之间的车间距控制器是全局最优的，所以在车间距误差向后传递过程中，每一对相邻车辆都可以通过算法中的松弛因子获得最

优解或者次优解。

综上所述，一方面由于本课题提出的基于模型预测的车间距控制方法对于多车编队系统而言仍具有弦稳定性，另一方面编队车辆的路径规划与编队中成员车辆数量无关，因此本课题的研究对象可以由多车编队系统简化为两车编队系统。可以将本课题提出的两车编队控制方法同理拓展到多车编队系统，拓展后的多车编队系统组网原理如图 2.3 所示。

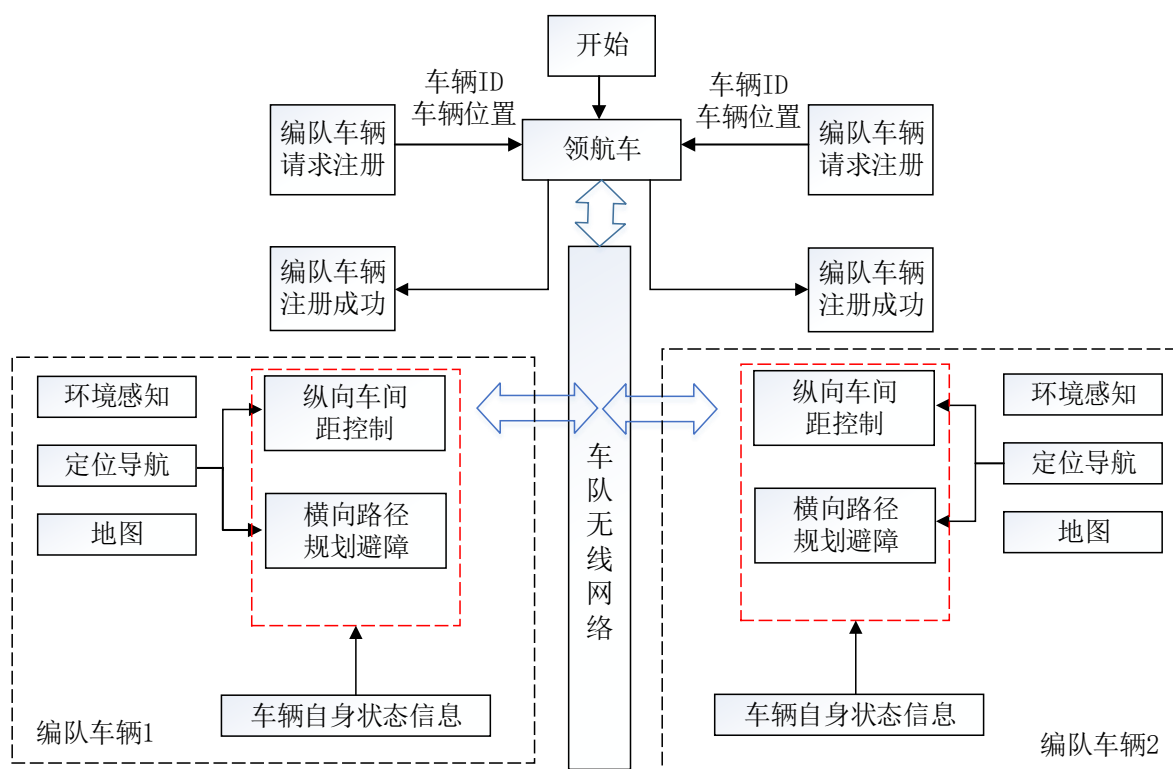


图 2.3 两车编队系统拓展到多车编队系统的组网原理图

由图 2.3 所示，红色虚线方框内是本课题提出的两车编队的控制方法，编队车辆能够充分考虑自身的动力学特性和响应特性，从而构建出结构体系相同，但控制方法内部参数和约束不同的编队个体。然后每辆编队车辆需要通过无线通信的方式向领航车提出注册请求，领航车驾驶员按照编队车辆的 ID 号确定编队车辆顺序，编队车辆注册成功后，只需要按照本课题提出的基于两车编队的控制方法跟随本车前方车辆即可。这样，本文提出的基于两车的编队控制方法就拓展到了多车编队系统，并且依然具有弦稳定性和车间距保持功能。

2.3 编队系统框架结构与车辆平台搭建

本课题中所研究的编队控制系统包含两台车辆，前方车辆为人工驾驶，也可称为领航车车辆，编队车辆为自动驾驶，也可称为跟随车辆。基于模块化的思想分别对领航车辆和跟随车辆进行设计^[43]，本节分别从硬件和软件两个方面分别介绍了领航车辆和跟随车辆试验平台的搭建。

2.3.1 领航车辆框架结构

如图 2.4 所示，领航车辆是一辆丰田陆地巡洋舰 4700，经过对其油门、制动和转向系统的线控改装，该平台能够实现自动驾驶。在本课题中，领航车是人工驾驶的，为编队车辆提供引导信息。



图 2.4 领航车辆试验平台

丰田陆地巡洋舰 4700 是日本丰田公司生产的一款越野车，具有较强的越野性和动力性，车辆主要参数如表 2.1 所示。

表 2.1 领航车辆平台参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|--------|---------|------|---------|
| 车长 | 5080 mm | 最高车速 | 180km/h |
| 车宽 | 1940 mm | 接近角 | 32° |
| 车高 | 1890 mm | 离去角 | 27° |
| 最小离地间隙 | 225 mm | 驱动方式 | 全时四驱 |

领航车辆主要包括由惯性导航单元和 GPS 组成的定位导航模块、由数据转换单片

机和车辆 ECU 组成的车辆底层模块和由数传电台组成的无线通信三个模块，领航车的核心功能是采集获取自身得车速、档位、方向盘转角和位姿等信息，然后按照一定的协议将这些信息打包为数据帧，通过建立好的车间通信将这些数据发送给后方车辆。领航车辆需要采集的自身状态信息如表 2.2 所示。

表 2.2 领航车辆的状态信息

| 状态信息 | 数据来源 | 数据的作用 |
|------|----------|-----------------|
| 经度 | 网络差分 GPS | 领航车定位，领航车历史路径生成 |
| 纬度 | | 计算编队中前后车的欧氏距离 |
| 航向 | 惯性导航单元 | 坐标转换与位置更新 |
| 加速度 | | 作为车间距控制器的初始控制输入 |
| 速度 | 车辆底层 CAN | 编队车辆车间距控制 |
| 挡位 | | 判断前方车辆是否处于前进挡位 |

1) 硬件结构

根据编队中领航车的功能与作用，搭建了如图 2.5 所示的领航车辆的硬件架构。图中带有箭头的实线表示信息流，箭头方向表示信息流向。

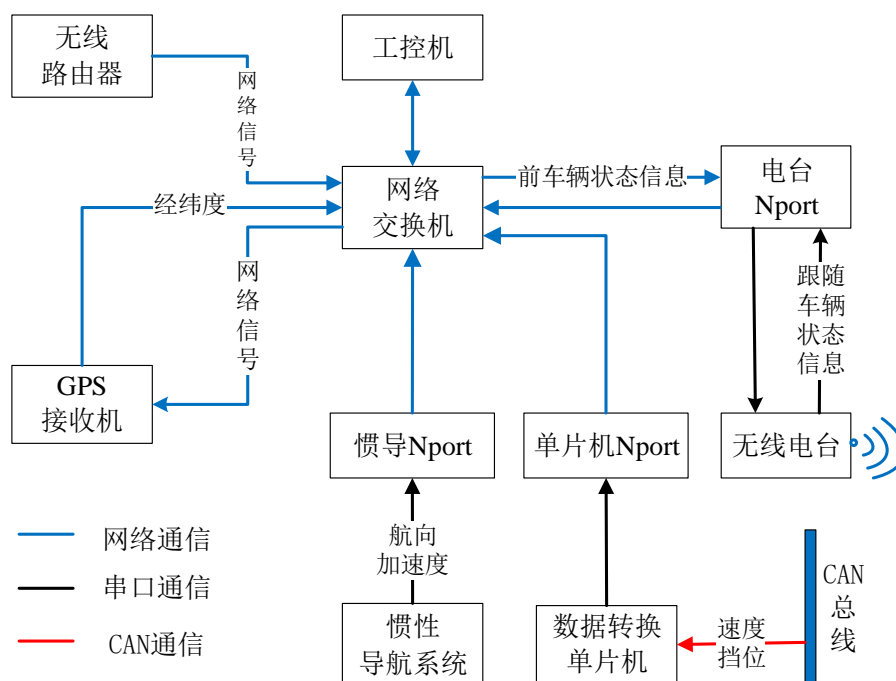


图 2.5 领航车辆硬件结构及信息流向

为了实现领航车辆高精度的定位需求，本课题采用了千寻公司提供的网络差分

GPS 服务。在图 2.5 所示的硬件结构中，无线路由器可以插入 SIM 卡进行上网，它能够为 GPS 接收机通过网络与千寻公司的服务器建立连接，使得 GPS 接收机可以接收千寻公司的高精度定位服务。常规的 GPS 主要通过卫星去定位，没有任何定位增强系统，而由于信号传播有误差，所以定位精度在米级。千寻公司搭建了许多基站，这些基站分布在各个地图。基站的目的主要是将卫星发过来的信息误差进行修改，使得定位更加准确。因此千寻定位需要配合卫星完成精准定位，精度级别在厘米级别。千寻位置将引入全国 CORS 网，实现了提高定位精度。图 2.5 中，领航车辆一方面将自身的状态信息发送到编队车辆，另一方面也接收编队车辆发来的状态信息。本课题中选用的无线数传电台，其一些主要参数如下表 2.3 所示：

表 2.3 数传电台主要参数

| 项目 | 数据指标 |
|------|--------------------------|
| 传输距离 | 偶极子天线室内可达 900m，室外可达 22km |
| 传输速率 | 最大 115kbps |
| 工作温度 | -40 ~ 80 摄氏度（工业级） |
| 尺寸 | 36.5mm×6.05mm×0.51mm |
| 电源电压 | 7 ~ 28V 直流电 |

与图 2.5 对应的系统硬件实物图如下图 2.6 所示。

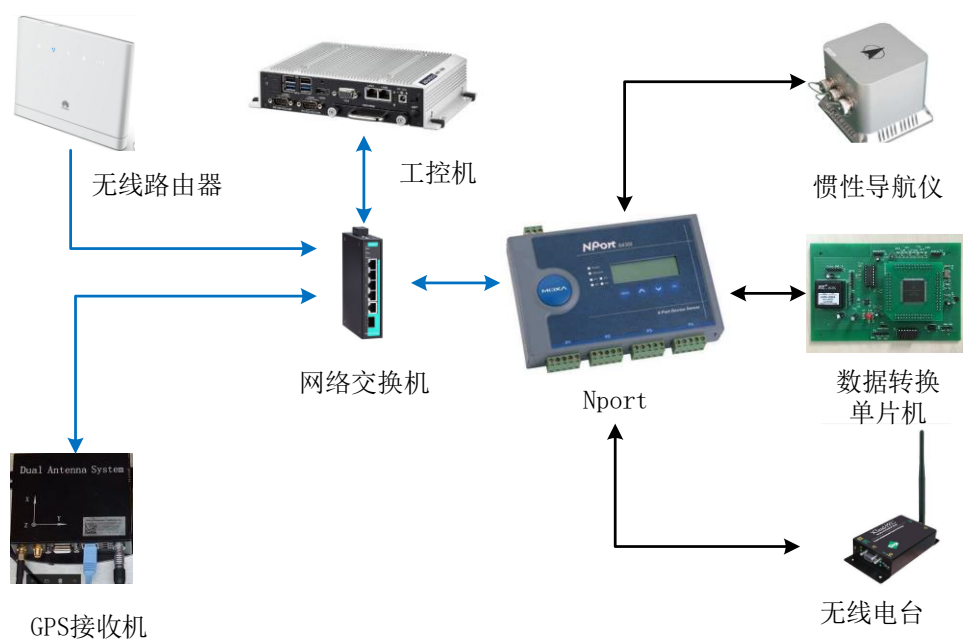


图 2.6 领航车辆硬件实物图

2) 软件结构

领航车辆按照一定的协议将表 2.2 所示的数据汇总打包，通信程序将该数据包发送到本车的无线数传电台，然后本车的无线电台在通过无线通信发送到编队车辆的无线电台，进而编队车辆再对接收到的数据包进行解析。领航车辆的通信软件结构如图 2.7 所示。

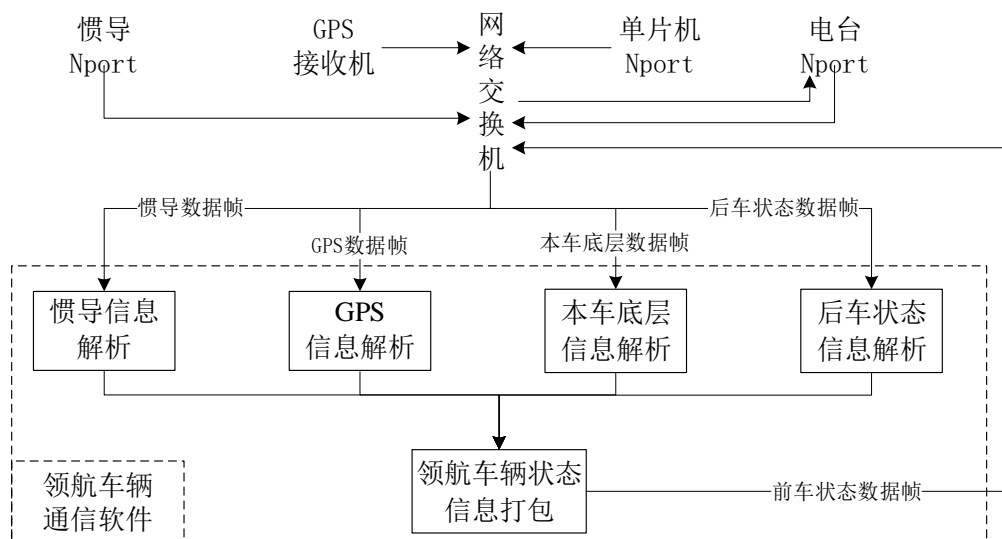


图 2.7 领航车辆软件结构

2.3.2 编队车辆框架结构

本课题的主要研究对象是编队车辆的控制，与领航车辆相比，编队车辆无论在硬件结构还是软件功能方面都要复杂的多。编队车辆不仅要接收并解析领航车辆发送来的数据包，同时也会将自身位姿、速度、档位等信息发送到领航车辆，这样做的目的是领航车辆的驾驶员可以轻松监测到后方编队车辆的行驶情况，遇到紧急情况时，驾驶员可以随时进行干预。



(a)



(b)

图 2.8 编队车辆试验平台

如图 2.8 所示, 编队车辆是一辆某型号的混合动力履带平台, 整车系统分为控制系统、能量系统和驱动系统三大子系统。控制子系统结合当前行驶工况要求和期望行驶路径下发控制指令, 可实现有人遥控驾驶和无人自动驾驶功能。能量子系统根据期望工况计算期望功率, 由能量控制器统一下发控制指令到发动机发电机组 (APU) 和电池管理系统 (BMS)。驱动子系统则根据期望路径和期望车速计算分布式驱动电机的转速或转矩以及自动变速箱 (AMT) 的期望档位, 由整车控制器统一下发控制指令, 完成车辆行驶。

该混合动力履带平台的综合控制系统是实现平台各子系统集成化控制和状态信息反馈、监测并调节平台机动行驶状态的集成化、智能化综合控制系统。该平台的主要参数如表 2.4 所示。

表 2.4 编队车辆平台参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|------|---------|--------|--------|
| 车长 | 4630 mm | 最高越野车速 | 30km/h |
| 车宽 | 2978 mm | 最大爬坡度 | 32° |
| 车高 | 1165 mm | 最大侧倾坡度 | 20° |
| 平台自重 | ≈6t | 动力类型 | 油电混合动力 |

1) 硬件结构

编队车辆的硬件结构如图 2.9 所示, 图中带有箭头的实线表示信息流, 箭头方向表示信息流向。由于编队车辆在行驶过程中, 除了要对前车位置做跟踪, 同时还要实现避障功能。因此与领航车辆相比, 编队车辆的硬件中增加了激光雷达。在编队车辆中, 激光雷达信息首先获取到的原始点云信息发送到雷达工控机, 雷达工控机对点云信息做进一步处理得到环境地图。环境地图有不同的表示形式, 本课题使用的二维栅格地图。然后再将环境地图发送给规划工控机。规划工控机一方面接收来自感知系统的环境地图, 另一方面还要接收网络中的车速, 车辆位姿等信息, 根据这些信息计算规划出一条期望路径和期望速度, 接着进一步将其转换为左右履带的期望轮速, 通过底层控制单片机将其下发到履带驱动电机控制器。与图 2.9 所示的硬件结构示意图对应的系统硬件实物图如图 2.10 所示。

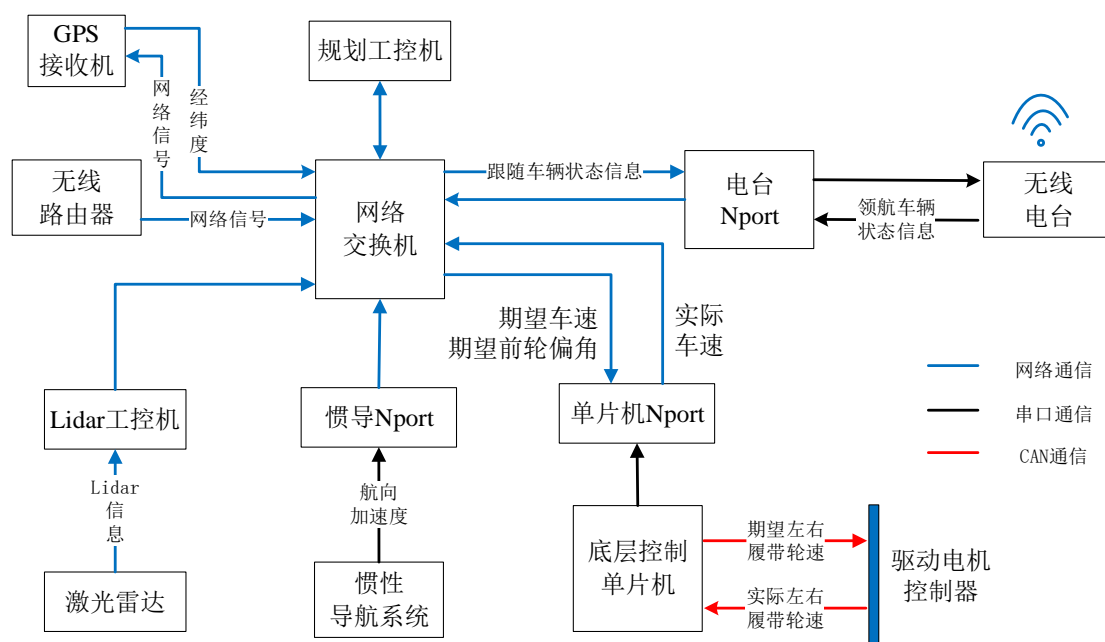


图 2.9 编队车辆硬件结构及信息流向

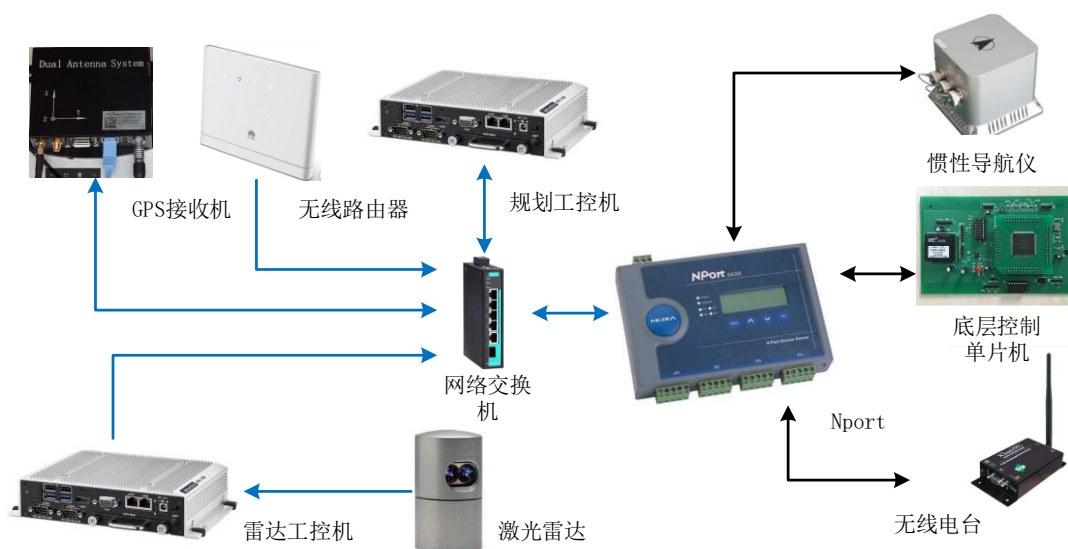


图 2.10 编队车辆硬件实物图

2) 软件结构

编队车辆的软件需要实现三个功能，一是接收了领航车辆发送来的数据包将其解析后得到领航车辆的位姿、速度档位等信息；二是将自身的状态信息以同样的协议发送到领航车辆；三是根据自身状态信息、领航车辆信息以及感知模块发送来的环境地图信息，规划工控机计算生成一条编队车辆的期望路径和期望速度，从而实现与领航车辆的编队行驶。然后，底层控制器会根据期望路径和期望速度计算出车辆的期望转

角, 进而计算出左右履带的期望轮速, 进而驱动车辆与前车进行编队行驶, 整个流程如图 2.11 所示。

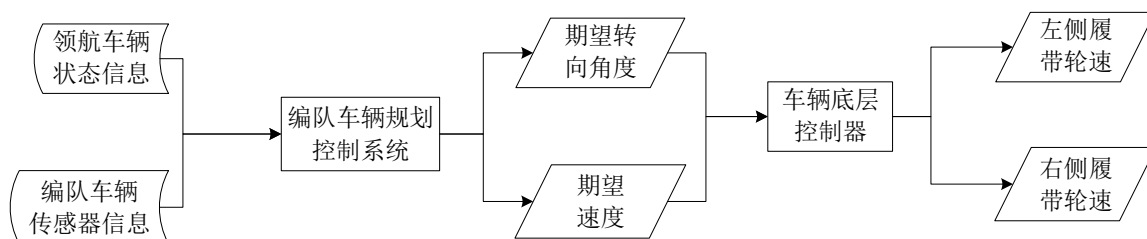


图 2.11 编队行驶实现流程

对应图 2.9 所示的跟随车辆的硬件结构和图 2.11 所示的编队行驶实现流程, 编队车辆的软件结构如下图 2.12 所示。

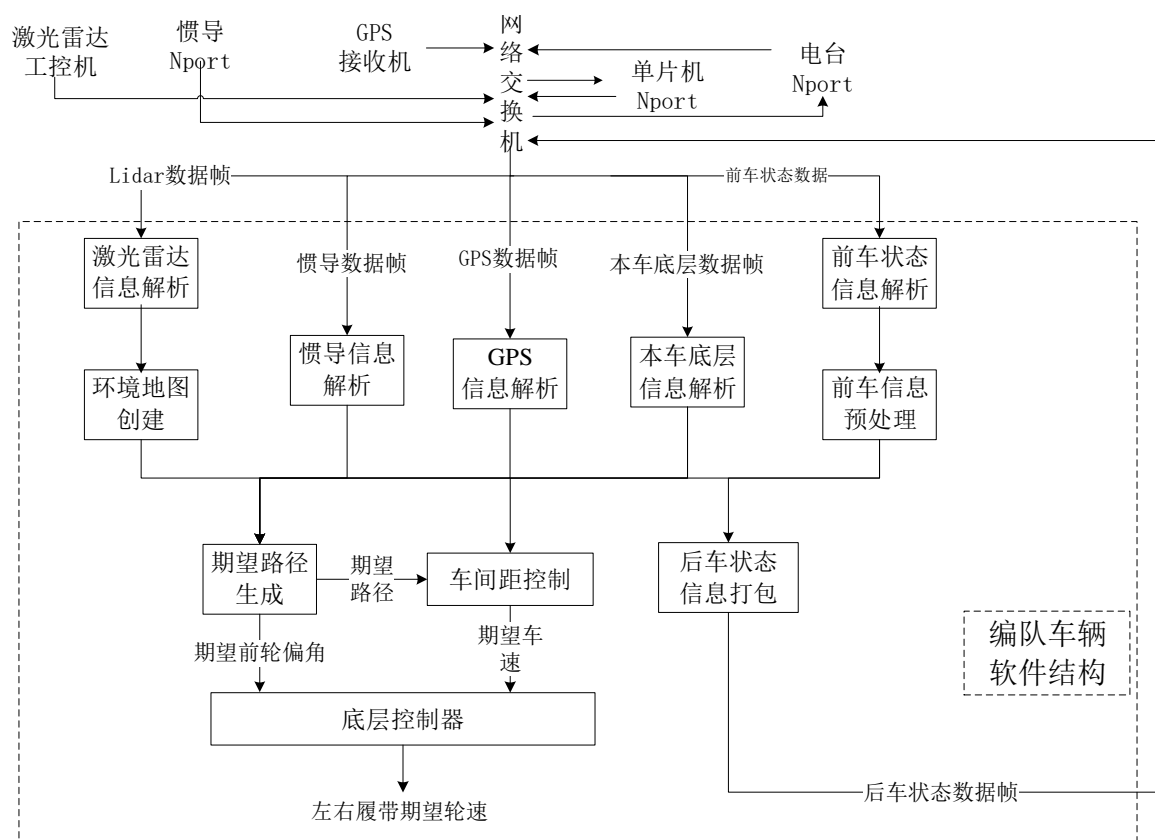


图 2.12 编队车辆软件结构

2.3 本章小结

为了实现越野环境下智能车辆编队行驶的功能, 本章首先对编队控制系统进行了功能分析, 并将编队行驶控制问题分解为几个子问题, 即编队车辆能够自主地根据前方车辆的运动, 自动调整自身位姿和车速, 从而达到对前车位置跟踪的同时, 并与前方车辆维持某个期望间距策略, 在行驶过程中, 自动驾驶的编队车辆还要求能够实现

实时的避障功能。总而言之，编队控制系统要求编队车辆实现避障的同时既要能“不跟丢”前方车辆，还要与前方车辆维持某个期望车间距策略。然后从实际的应用需求角度出发提出越野环境下编队行驶控制系统的功能指标，并对每个功能指标进行了详细的阐述与分析。本章通过对多车编队系统进行弦稳定性分析后，将多车编队系统等效简化为两车编队系统，并对其原理进行了说明与阐述。最后设计了基于车车无线通信的编队行驶控制系统的整体框架结构，并介绍了车辆之间的通信内容。最后介绍了领航车辆和编队车辆的平台参数、硬件结构、软件结构和数据流。

第 3 章 越野环境下编队车辆路径规划方法

根据第 2 章中对编队行驶问题的分解, 本章主要研究编队车辆的路径规划方法。对于在越野环境中的编队行驶, 道路形状复杂多变, 并且道路中不存在车道线和较为显著的道路边界, 编队车辆的路径规划要以前方车辆的历史路径为参考。编队车辆需要根据前方车辆的位姿信息和环境地图信息计算规划出一条平滑可跟踪的无碰撞期望路径, 此外, 该期望路径还要能够对前车位置做跟随。

在进行本车路径规划之前, 首先需要得到前方车辆的历史状态信息, 历史状态信息包含前车的经纬度, 航向角和车速等信息。再通过一定的前车状态信息更新策略, 就能够获取到前车走过的历史路径。然后编队车辆会以前方车辆的车历史轨迹为参考轨迹, 采用横向偏移采样与最优控制结合的路径规划算法来生成一条从本车出发指向前车的无碰撞路径, 该路径满足自身车辆的运动学约束和动力学约束, 并且连续平滑可跟踪。最后, 将规划出的路径发送给横向控制器即可计算求得车辆的期望转向角度。需要说明的是, 由于本课题用到的横向控制器是基于模型预测控制的轨迹跟踪器, 路径规划模块发给横向控制器的路径表达形式是一系列间距为 0.5m 的平滑离散路径点的坐标, 而不是路径的数学解析表达式。

3.1 前车信息获取及其位置更新策略

在本课题中, 编队车辆通过无线通信的方式相互共享每辆车的状态信息。在越野环境下, 道路两边可能存在高大的树木遮挡, 丢帧现象不可避免。但是, 由于车辆搭载了感知传感器, 并且路径规划模块能够实现实时避障的, 所以对通信的丢帧要求并不严格。本课题中所提出前车辆状态信息获取方法基于以下两个前提条件:

1) 编队所有车辆的定位系统的定位精度具有一致性, 即领航车辆与编队车辆定位系统自身的系统误差是相同的。当把前方车辆的全局 GPS 坐标转换到本车车体坐标系后, 前车的位置是在本车车体坐标系下描述的。这个过程能够消除定位系统本身的定位误差。

2) 编队车辆间的无线通信持续中断的时间有一定的上限。在本课题中, 编队车辆间的无线通信周期为 50ms, 若通信失败持续时间超过 3s, 即连续丢帧超过 60 帧, 编队车辆则会减速停车, 等通信恢复。

3.1.1 编队前后车辆的位置关系描述

目前我们的定位信息依赖于全球定位系统 GPS，GPS 依赖于 WGS84 坐标系，是一种地心坐标系，但是 GPS 给定的定位信息是以经纬度的形式给出的，在无人驾驶车辆中难以计算实际道路中位置之间的距离关系，因此，一般需要将经纬度坐标转为大地坐标。一般会使用 UTM 来描述大地坐标系，从而将经纬度之间的距离关系转化为米制单位下的距离关系。

越野环境下的编队行驶中，需要将前车的位置航向信息转换到本车的车体坐标系下，然后再做进一步的处理。这样做的原因主要有两个，一方面是为了消除编队车辆定位系统自身的定位误差，另一方面，这样做的话路径的位置信息在数值上是从 0 开始的，更方便计算和求解。

建立了编队前后两车的位置关系如图 3.1 所示，本车在大地坐标系下的坐标为 $P_h(x_h, y_h, \theta_h)$ ，前车在大地坐标系下的坐标为 $P_l(x_l, y_l, \theta_l)$ ，前车在本车车体坐标系下的坐标为 $P_r(x_r, y_r, \theta_r)$ 。大地坐标系以正东方向为其 X 轴正方向，以正北方向为其 Y 轴正方向。

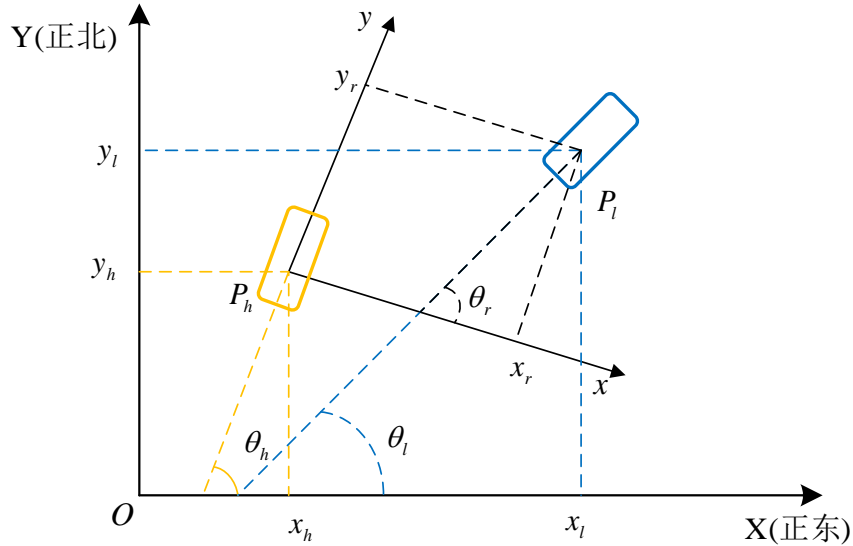


图 3.1 编队车辆坐标转换关系示意图

由图 3.1 中所示的编队车辆间的几何位置关系可以得到前方车辆在本车车体坐标系下的坐标，如式(3.1)所示。

$$\begin{cases} x_r = (x_l - x_v) \sin \theta_h - (y_l - y_h) \cos \theta_h \\ y_r = (x_l - x_h) \cos \theta_h + (y_l - y_h) \sin \theta_h \\ \theta_r = \theta_l - \theta_h + \pi/2 \end{cases} \quad (3.1)$$

3.1.2 前车位置信息更新策略

编队车辆会通过无线通信方式互相发送接收彼此的行车信息，同样，本车会持续的接收到前车发来的前车的位置信息，发送频率为 20Hz。本车收到前车位置信息时，并不会直接存储其位置数据，而是需要通过一定的更新策略来保存其历史位置信息，从而获取前车行驶过的历史路径。对前车的位置做更新处理主要有两个目的，其一是删除过早前方车辆走过的历史路径，其二是不断补充前方车辆新走的路径点。前方车辆早期走过的路径对于本车并没有用处，反而会增加车载电脑的存储压力和降低算法的效率，所以要及时删除前车过早的历史路径。在编队行驶过程中，前车不断地行进，其最新的位置信息一定要在前车历史路径的最前边，所以需要对其位置不断地做更新存储和删除。本文设计的前车历史路径获取整体流程如图 3.3 所示。

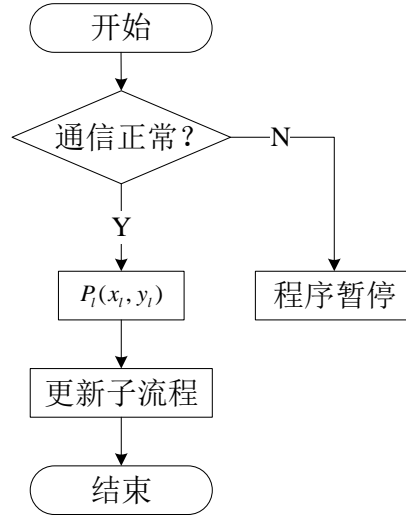


图 3.2 前车历史路径获取整体流程图

在图 3.2 中，第一步先判断领航车辆与编队车辆之间的通信是否正常，如果通信正常，编队车辆通过无线通信获取到前方车辆的最新位置 $P_l(x_l, y_l)$ ，然后进入到“更新子流程”，如图 3.3 所示。如果车车通信建立失败，则会暂停程序运行，等待通信重新建立。

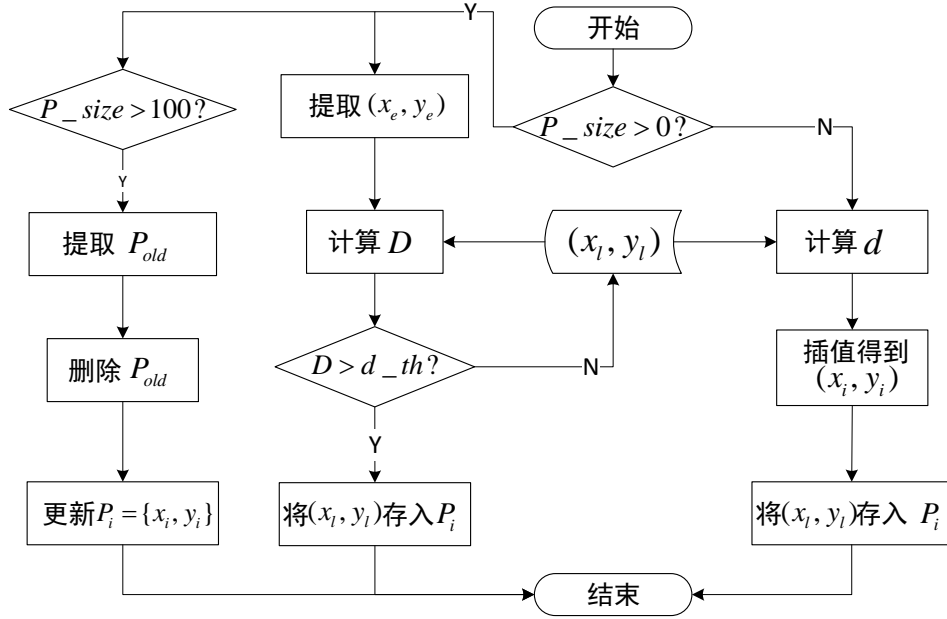


图 3.3 “更新子流程”框图

在图 3.3 中，点集 P_i 用于存储前方车辆信息，首选判断点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中领航车辆位置点的个数 P_size ，如果 $P_size \leq 0$ ，说明点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中没有有效的领航车辆信息点，则计算此时前方车辆与编队车辆之间的直线距离 d ，并对该直线距离进行线性插值，间距为 $d_th = 1\text{m}$ ，这样就会得到一组离散路点 (x_i, y_i) ，并将其存储到点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中。

如果 $0 < P_size \leq 100$ ，说明点集中存有效路点，那么计算前方车辆当前位置信息 (x_l, y_l) 与点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中最后一个路点 (x_e, y_e) 的距离 D ，若 $D > d_th$ ，就将 (x_l, y_l) 存储到点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中，否则重新读取新的前方车辆状态信息。

如果 $P_size > 100$ ，说明点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中已经存储了较多的前方车辆信息点，说明存储的路点数量已经超过人为的限值，此时要删除点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ 中所有本车已经走过的路点 P_{old} ，保留前方车辆与编队车辆之间的路点。

3.2 编队车辆的避障分析与路径规划方法

经过前方车辆历史信息的预处理，编队车辆可以得到一个储存前方车辆历史位置信息的点集 $P_i = \{x_i, y_i\}$ ，该点集就是前方车辆走过的历史路径。前车的历史路径由于是前车真实走过的路径，所以该历史路径天然是一条平滑且满足车辆运动学约束的路径，但是该路径对于后车来说虽然满足车辆运动学约束，但是并不能保证是无碰撞路径。主要原因有两个，一方面获取到的前车路径可能由于本车定位系统的定位误差导

致该路径对于本车来说存在碰撞，另一方面，若前后车之间存在动态障碍物，此时前车的历史路径对于本车来说也会存在碰撞风险。基于上述两点原因，前车的历史路径并不能被后车直接跟踪，需要通过本章提出的方法对前车历史路径做进一步的处理，从而规划出本车的期望路径。

所以前车的历史路径对于本车来讲，只保证了本车对前车位置具有跟踪功能，并不具备实时避障功能。下面将介绍基于路径生成和选择的局部路径规划方法如何实现避障功能。为使本车的路径规划具有避障功能，需要生成多条可以跟踪前车位置的本车期望路径；然后依次对候选路径进行避障分析，判断路径上是否存在障碍物；最后通过设计的成本函数，选择候选路径中安全性、平顺性等综合性能较优的路径作为本车期望路径。

3.2.1 基于横向偏移的粗糙候选路径集生成

通过对前车历史路径的横向偏移采样，得到候选路径的集合。由于前车的历史路径已经是平滑且满足车辆运动学约束的，从而横向偏移之后得到的候选路径集也具有同样的性质，所以候选路径集无需做平滑处理。然后在每条候选路径上选择合适的参考点，通过求解两点边值问题计算生成从车辆位置出发到每个参考点的平滑路径，从而得到最终完整可直接跟踪的候选路径集，具体流程如图 3.4 所示。

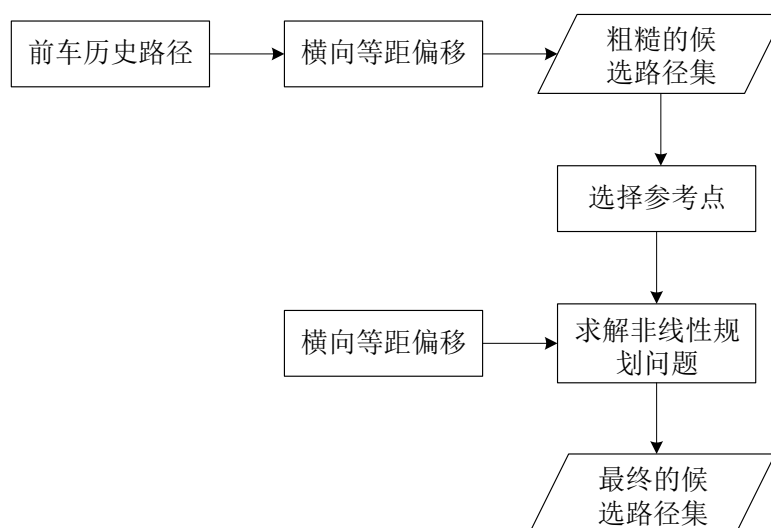


图 3.4 候选路径集流程图

前车历史路径的横向偏移采样是将前车历史路径点按照其航向的法线方向偏移固定距离，如图 3.5 所示。图中 P_0 是前车历史路径， P_i 为横向偏移后的候选路径， d

为横向偏移距离， p_0 为 P_0 上一点， p_1 为偏移后在 P_i 上的点。

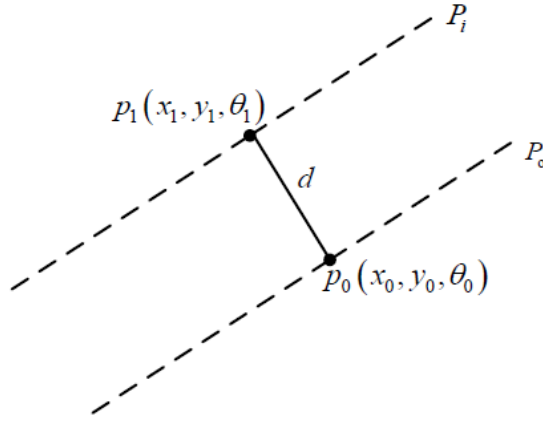


图 3.5 路径横向偏移示意图

以 p_0 点为例介绍计算横向偏移路径方法，横向偏移时不改变路径点的航向，由此得到：

$$\theta_1 = \theta_0 \quad (3.2)$$

由几何关系和式(3.2)得到：

$$\begin{cases} \frac{x_1}{y_1} = \frac{x_0}{y_0} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = d^2 \end{cases} \quad (3.3)$$

按照式(3.3)即可推算出 p_1 的位置。

如图 3.6 所示，中间的黑色实线表示前车的历史路径，虚线表示对前车历史路径进行等距横向偏移后得到一组粗糙的候选路径集， P_h 是车辆位置。可以看出，直接等距偏移后得到的粗糙的候选路径集并不与车辆位置重合，所以粗糙的候选路径并不能被车辆直接跟随。

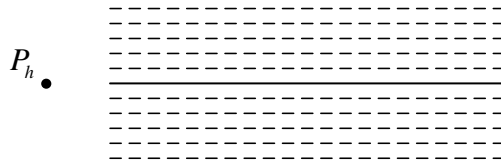


图 3.6 粗糙的候选路径集示意图

3.2.2 基于优化的最终候选路径集生成

为了使粗糙的候选路径能够被车辆直接跟踪，平滑连接车辆位置与候选路径集中的各条候选路径，本文将这个题转换为个两点边值问题(two-point boundary value problem, TPBVP)，采用非线性优化技术进行求解。两点边值问题需要已知车辆状态和目标状态，而目标状态需要从候选路径上通过选择参考点来确定。在文献中，已经有很多种路径的参数化表达形式被提出，包含 B-样条曲线^[44,45]、贝塞尔曲线^[46,47]、分段线性曲线^[48]、回旋曲线^[49-51]、多项式曲线^[52,53]和高阶螺旋线^[54,55]。由于其曲线定义和在笛卡尔坐标系下对 x 和 y 分别独立进行参考化表示，B 样条曲线、贝塞尔曲线、分段线性曲线和多项式曲线并不能满足车辆模型的运动学约束。三阶多项式螺旋线如(3.4)却足以满足两边界处的位置，航向和曲率约束，同时保持着可接受较低参数空间维度。一个曲线如果其曲线上的速度是单位速度，那么该曲线可以被认为是由弧长参数化的曲线^[56]。众所周知，每一个常规曲线都有其弧长参数化表达形式^[57]。类似文献^[55]中的方法，通过将控制输入表示成三阶螺旋线（如公式(3.4)所示），一个嵌入车辆运动学约束的弧长参数化路径曲线模型可以被定义。

$$\kappa(s) = a + bs + cs^2 + ds^3 \quad (3.4)$$

车辆的运动模型关于弧长的非线性方程组为，

$$\begin{cases} x(s) = x_0 + \int_0^{s_f} \cos(\theta(s))ds \\ y(s) = y_0 + \int_0^{s_f} \sin(\theta(s))ds \\ \theta(s) = \theta_0 + \int_0^{s_f} \kappa(s)ds \end{cases} \quad (3.5)$$

其中， $x(s)$ ， $y(s)$ 表示车辆位置， $\theta(s)$ 表示车辆航向， $\kappa(s)$ 表示路径曲率。而曲率 $\kappa(s)$ 可以通过公式 $\Phi(s) = \arctan(L \cdot \kappa(s))$ 映射到车辆方向盘转角 $\Phi(s)$ 控制量，其中 L 表示车辆轴距。方程组(3.5)可以借助关系 $s = V \cdot t$ 和 $ds = V \cdot dt$ 由一个典型的车辆运动学模型推导而来，其中 V 表示车辆的纵向速度， s 表示车辆行驶的距离， t 表示车辆行驶的时间。

式(3.5)表示的车辆运动学模型定义了车辆在 s 处的一个构型，

$$q(s) = (x(s), y(s), \theta(s)) \quad (3.6)$$

笛卡尔坐标系下路径的弧长参数化表达式为：

$$\mathbf{r}(\mathbf{p}) = (x(\mathbf{p}), y(\mathbf{p})) \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} x(\mathbf{p}) = \int_0^s \cos(\int_0^s \kappa(\mathbf{p}) ds) ds \\ y(\mathbf{p}) = \int_0^s \sin(\int_0^s \kappa(\mathbf{p}) ds) ds \\ \kappa(\mathbf{p}) = a + bs + cs^2 + ds^3 \end{cases} \quad (3.8)$$

其中 a 为已知的当前车辆状态所对应的曲率， s_f 同时也是到目标状态的弧长，且 $\forall s \in [0, s_f]$ 。 b ， c ， d 和 s_f 是需要优化的变量。变量 $\mathbf{p}_c = (b, c, d, s_f)^T$ 定义了系统参数向量。由此参数定义的工作空间路径 $\mathbf{r}(s)$ 至少二阶连续，至多五阶连续。

相对于直接使用参数向量 \mathbf{p}_c 空间进行直接优化，本文采用曲线拟合^[58]中结点参数化技术进行重参数化。对 \mathbf{p}_c 进行左乘一个非线性变换矩阵，得到一个新的参数空间向量 \mathbf{p} 如下所示，

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa(\frac{s_f}{3}) \\ \kappa(\frac{2s_f}{3}) \\ \kappa(s_f) \\ s_f \end{pmatrix} = T \cdot \mathbf{p}_c \quad (3.9)$$

其中，

$$T = \begin{pmatrix} \frac{s_f}{3} & (\frac{s_f}{3})^2 & (\frac{s_f}{3})^3 & 0 \\ \frac{2s_f}{3} & (\frac{2s_f}{3})^2 & (\frac{2s_f}{3})^3 & 0 \\ s_f & (s_f)^2 & (s_f)^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

而参数化空间向量 \mathbf{p} 或 \mathbf{p}_c 的选择对于工作空间路径的参数化并不存在区别，因为他们在数学上是等效的^[54]。这种重参数化使得算法优化不仅仅是数学符号上的变化，而是有具体的物理含义与之对应。在原始的系数参数化空间内，待优化的参数没有具

体的物理意义，因此很难给出一个清晰的具有物理意义的上界和下界。但是在结点参数空间内，待优化的参数拥有具体的物理意义，很容易给出其上下边界。那么，当给定车辆的初始状态 q_{init} 和目标状态 q_{end} ，路径生问题可表示为

$$q_{init} = (x_{init}, y_{init}, \theta_{init}, \kappa_{init}) \quad (3.11)$$

$$q_{end} = (x_{end}, y_{end}, \theta_{end}, \kappa_{end}) \quad (3.12)$$

$$\text{Minimize } J = J_{smoothness}(\mathbf{p}_r) = \int_0^{s_f} \|\kappa(\mathbf{p}_r)\|^2 ds \quad (3.13)$$

$$\text{subj.to. } q(r(\mathbf{p}_r)) = q_{init}, s = 0 \quad (3.14)$$

$$q(r(\mathbf{p}_r)) = q_{end}, s = s_f \quad (3.15)$$

其中 $\mathbf{p}_r = (p_1, p_2, p_3)^T$ ， $0 \leq s_f \leq s_{max}$ 。已知参数 s_{min} 和 s_{max} 为用户给定的曲线弧长的上下边界， κ_L 和 κ_U 是曲线上曲率的下界和上界。路径平滑目标函数 $J_{smoothness}$ 是曲线曲率平方对于弧长的积分，

$$J_{smoothness} = \int_0^{s_f} \|\kappa(\mathbf{p}_r)\|^2 ds \quad (3.16)$$

其中， $\|\kappa(\mathbf{p}_r)\|$ 是路径曲率的标量。连接车辆状态和目标状态，并最小化目标函数 $J_{smoothness}$ 的曲线叫做最小弯能量曲线^[59]。通过求解式(3.13)、式(3.14)和式(3.15)所示的非线性规划问题，即可生成满足边界条件的平滑曲线。由于上述优化目标中目标状态包含终点位置约束，而位置表达式是菲涅耳积分，没有解析表达式，本文采用下述复化辛普森公式^[60]近似该积分，

$$\begin{aligned} x(s) &= \int_a^b f(s) ds \\ &\approx \frac{h}{6} \left(f(a) + 4 \sum_{i=0}^{n-1} f(s_{i+1/2}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(s_i) + f(b) \right), \quad h = \frac{b-a}{n} \end{aligned} \quad (3.17)$$

通过上述方法，即可计算出连接车辆位置 P_h 和粗糙候选路径起点的平滑曲线（图 3.7 中虚线所示部分），最终得到如图 3.7 所示的最终候选路径集。最终的候选路径集中的每条候选路径都是能够被车辆直接跟踪的。

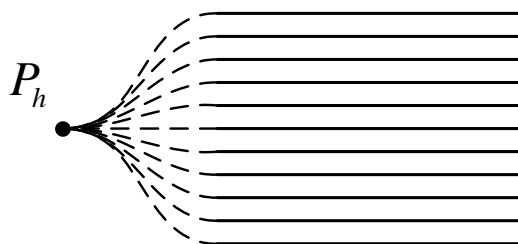


图 3.7 最终的候选路径集示意图

3.2.3 避障分析与候选路径选择

通过上节能够计算得到一个最终的候选路径集，而且其中的每条候选路径既能保证对前车位置的跟踪，又能被本车横向控制器直接跟踪。但是，候选路径集中的路径并不保证是无碰撞的。所以，需要将候选路径集中的所有路径投影到栅格地图中做碰撞检测，若某条路径存在障碍物，则删除该路径碰撞点之后的路点。这样就得到了一组新的候选路径集，该候选路径集中的路径有长有短，甚至可能不存在路径。

候选路径集中的路径选择的整体流程图如图 3.8 所示。首先需要把图 3.7 所示的最终候选路径集投影到栅格地图，对每条路径做碰撞检测计算，截断碰撞的路径，得到一组新的候选路径集， $Path_count$ 是新的候选路径集中的路径数量。若 $Path_count = 0$ ，则表示新的候选路径集中不存在候选路径，此时需要把上周期的期望路径取出来做碰撞检测计算，如果该路径是无碰撞的，则将其选取为本次的期望路径，若该路径也是碰撞的，则只能停车。若 $Path_count > 0$ ，则表示候选路径集中存在候选路径，此时需要判断路径集中是否存在无截断路径， $FreePath_count$ 表示无截断路径的数量。若 $FreePath_count > 0$ ，表示存在无截断路径，则从其中选择一条距离车辆位置最近的一条作为期望路径。若 $FreePath_count = 0$ ，表示候选路径集中的所有候选路径均是被截断的，此时需要计算每条路径的代价函数值，选择其中代价最小的路径作为期望路径。

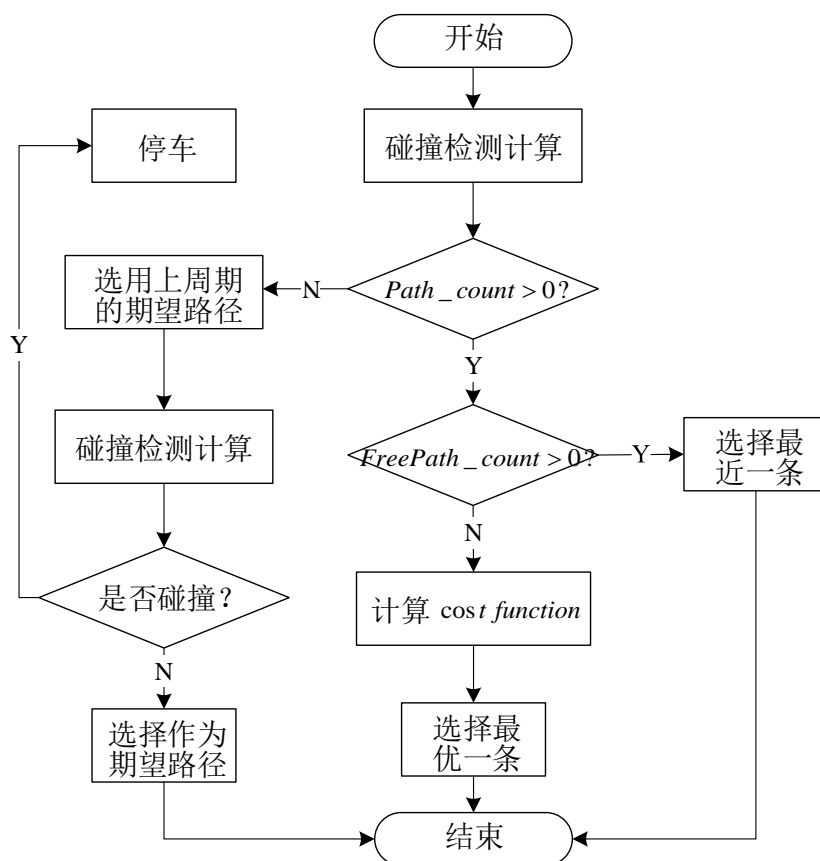


图 3.8 候选路径选择整体流程图

如图 3.9 所示，在避障分析后，发生碰撞的路径被截断，剩下的候选路径上的点都不会与障碍物发生碰撞。为了从候选路径集中选择一条相对较优的路径作为编队车辆实际要执行的期望路径，设计如式(3.18)所示的成本函数，对每条候选路径进行评价，评价结果中成本值最小即为期望路径。

$$C[i] = w_s C_s[i] + w_o C_o[i] \quad (3.18)$$

其中， i 为每条候选路径的标号， C 是候选路径的总成本值， C_s 为候选路径的安全性成本， C_o 为候选路径的横向偏差成本， w_s 和 w_o 是对应成本的权重系数。

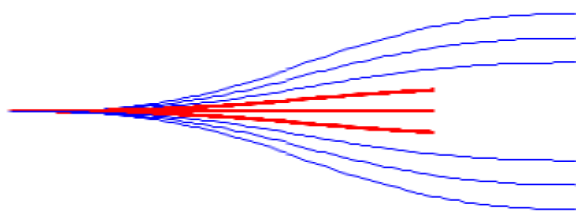


图 3.9 避障分析后的候选路径集

1) 安全性成本

如果编队车辆距离障碍物过近时，会存在安全隐患，同时不利于无人车速度的提高，所以安全性成本主要体现为候选路径与障碍物的距离。候选路径与障碍物的距离主要用纵向距离来表征，纵向距离主要体现在候选路径长度上，即希望路径可以越长越好。如图 3.10 所示，候选路径中有部分路径存在碰撞，路径越短，表示车辆距离障碍物越近，则越危险。因此候选路径的安全性成本可由式(3.19) 来表示，其中 $l[i]$ 是第 i 条候选路径的长度， w_l 为权重系数。

$$C_s[i] = w_l l[i] \quad (3.19)$$

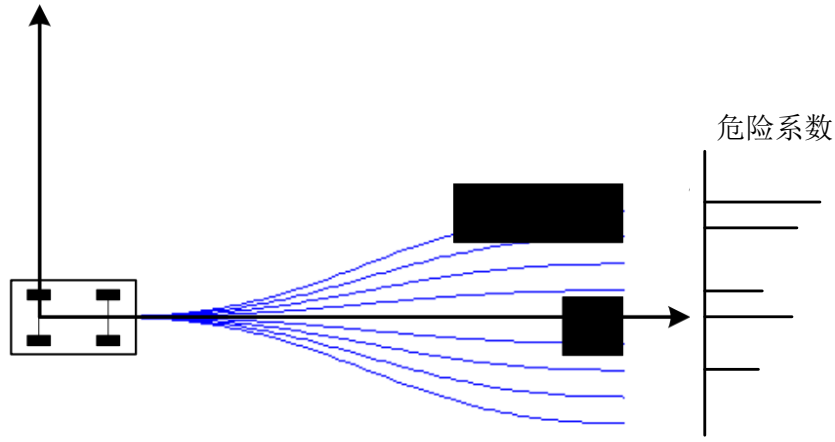


图 3.10 候选路径危险系数示意图

2) 横向偏差成本

在候选路径集中，最中间的前车历史路径对前车位置的跟踪能力是最强的，所以，在选择最优路径时，希望优先选择距离前车历史路径距离最近的一条，从而保证被选择的期望路径对前车位置的跟踪能力。因此设计了如式(3.20)所示的横向偏差成本。

$$C_o[i] = e^{|d[i]|} - 1 \quad (3.20)$$

其中， $d[i]$ 是第 i 条候选路径与前车历史路径的横向偏差。候选路径的横向偏差成本可由式(3.15)计算得出。图 3.11 表示出候选路径的横向偏差与横向偏差成本之间的关系。从中可以看出随着横向偏移距离的变大，横向偏差成本增长速度加快。当期望路径为前车走过的历史路径时，横向偏差成本为零。

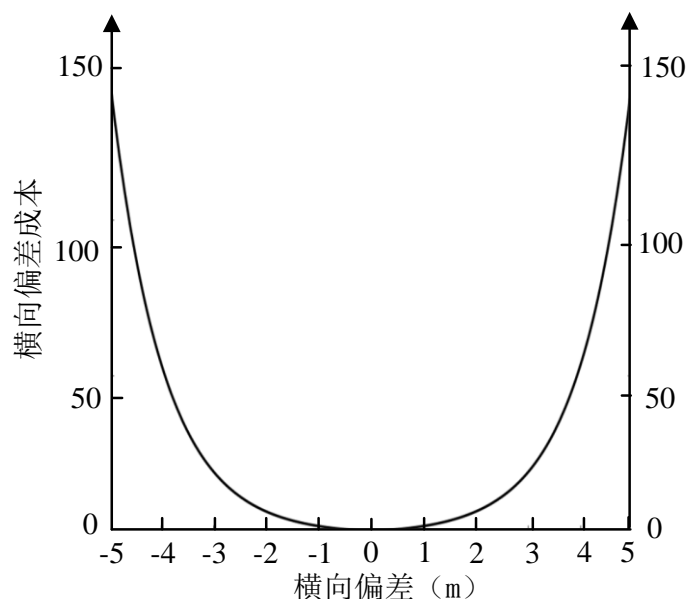


图 3.11 候选路径横向偏差成本

3.3 本章小结

根据第 2 章中对编队行驶问题的分解，本章主要研究编队车辆的路径规划方法。在进行本车路径规划之前，首先需要得到前方车辆的历史状态信息，历史状态信息包含前车的经纬度，航向角和车速信息。再通过一定的前车状态信息更新策略，就能够获取到前车走过的历史路径信息。然后编队车辆会以前车历史轨迹为参考轨迹，采用横向偏移采样与最优控制的路径生成算法来生成候选路径集合。在避障分析后，发生碰撞的路径被截断，剩下的候选路径上的点都不会与障碍物发生碰撞。为了从候选路径集中选择一条相对较优的路径作为编队车辆实际要执行的期望路径，从安全性成本和横向偏差成本方面考虑设计了成本函数对每条候选路径进行评价，评价结果中成本值最小即为期望路径，该路径满足自身车辆的运动学约束和动力学约束，并且连续平滑可跟踪。最后，将规划出的期望路径发送给横向控制器即可计算求得车辆的期望偏角。

第4章 编队车辆纵向车间距控制器设计

对于智能车的编队控制技术而言，编队车辆的纵向控制是一个极为关键的问题。本车需要能够自适应的调整运动速度从而达到与前车保持某个车间距策略。基于模型预测的纵向车间距控制器需要完成的主要任务就是能够快速的调整成员车辆的间距和速度，形成稳定的编队。越野环境地形比较复杂多变，可能存在不同路面条件的道路，例如土路、石子路、水体和凹凸障碍等。所以一方面要求试验平台车辆具备一定的越野机动性外，还需要在车间距控制方法中考虑编队车辆的动力学特性，其中包括编队车辆的加速能力，最大速度和制动能力等。

第3章中给出了越野环境下编队车辆的路径规划方法，这样编队车辆就可以获得能够跟随前车的本车期望路径。编队车辆需要沿着本车的期望路径向前行驶，通过纵向控制器实现与前车的车间距保持。编队车辆的纵向控制本质上就是通过一定的方法自动地调整编队车辆的速度，从而实现与前方车辆维持某个期望的车间距策略。在智能车辆编队行驶中，每辆单独的编队车辆的纵向控制需要遵循一些原则^[61]：

（1）安全性原则

编队车辆之间或者编队车辆与障碍物之间的距离应该时时刻刻处于安全距离之外，如果车辆与前方车辆或前方障碍物的距离小于安全距离，则要求本车与前车的相对速度要小于零。

（2）舒适性原则

在编队行驶过程中，在满足安全性原则的前提下，尽量减少编队车辆加速度过大或者减速度过大的工况。

（3）快速性原则

当编队车辆的期望路径已经计算完成的前提下，编队车辆应该能够较快的调整本车速度与前车维持某个期望车间距，从而形成稳定的编队。而且，编队车辆整体的行驶速度尽可能高一些，这样能够提高交通效率。

4.1 编队车辆车间运动学模型建立

车间运动学模型描述的是一种描述两辆同向行驶的车辆之间位置变化关系的数学模型。在已有路径的前提下，车间运动学模型主要描述的是本车与前方车辆之间纵向运动关系。本节首先建立了本车与前车之间的纵向运动学关系模型，然后介绍了常

用的几种间距策略。

4.1.1 车间运动学关系描述

本车与前方车辆的运动学关系如图 4.1 所示。其中 x_h 和 x_l 分别表示本车与前车的位置， d_{des} 表示前后两车之间的期望车间距， Δd_{error} 表示两车之间的实际车间距 $x_l - x_h$ 与期望车间距 d_{des} 之差， v_h 和 v_l 分别本车和前车的速度， a_h 和 a_l 分别表示本车和前车的加速度。

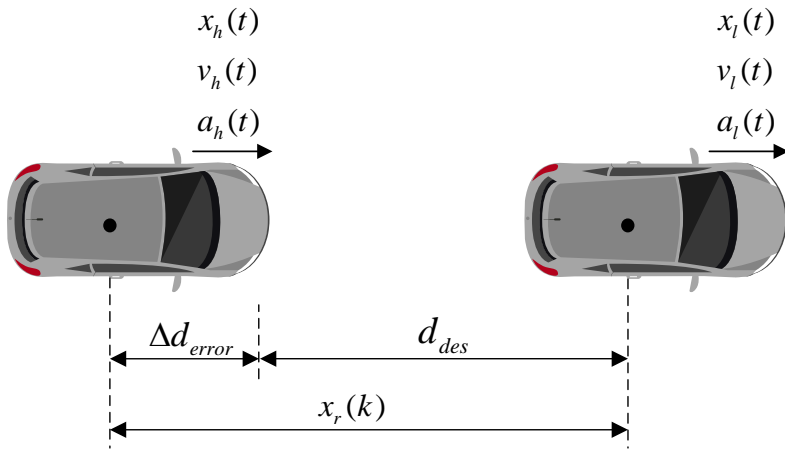


图 4.1 本车与前车的车间纵向运动学模型

因此可以得出某个时刻 t 下车间运动学方程：

$$\begin{cases} x_r(t) = x_r(0) + \int_{t_0}^t v_r(t) dt \\ v_r(t) = v_r(0) + \int_{t_0}^t a_r(t) dt \\ v_h(t) = v_h(0) + \int_{t_0}^t a_h(t) dt \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} a_r(t) = a_l(t) - a_h(t) \\ v_r(t) = v_l(t) - v_h(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

其中， $a_r(t)$ 是前后两车的相对加速度， $v_r(t)$ 是前后两车的相对速度。

4.1.2 车间距控制策略分析

在编队控制技术研究，车间距策略的选择也很重要。不同的应用场景应该选择不同的车间距策略。车间距策略对于编队行驶的通行效率有重要影响，也对控制器的

控制效果有着重要影响。目前有三种应用较为广泛的车间距策略^[62]：基于固定距离间隔的定车间距策略、基于固定时间间隔的定车头时距策略和定安全系数策略。

1) 定车间距策略

定车间距策略是指本车与前车的期望间距与编队车辆的行驶速度无关，是一个常数。即：

$$d_e = h \quad (4.3)$$

式中 d_e 为本车与前车的期望车间距， h 为一常数。

定车间距策略^[63]简单直接，并且由于期望车间距不会随着编队行驶速度而变大，所以定车间距策略可以在一定程度上提高交通效率，所以，国内外的编队行驶一般都选择定车间距策略。在此间距策略下，编队车辆获得较多的前后车信息从而保证整个编队的弦稳定性^[64]。

2) 定车头时距策略

定车头时距策略是指自车与前车的期望相对距离与自车的行驶速度线性相关，一般的，随着速度的增加，期望间距逐渐增大：

$$d_e = h_e v_h + d_{\min} \quad (4.4)$$

式中 h_e 为固定车头时距， v_h 为跟随车辆的当前实际的行驶速度， d_{\min} 最小车间距离。定车头时距策略需要的前车信息并不多，需要的前车信息一般能够通过车载的毫米波雷达等传感器就能获取，所以该间距策略广泛应用于乘用车的自适应巡航系统中。一般轿车的 h_e 值为 1.5s 左右，重型车辆为 3s 左右或者更大^[65]；最小车间距离 d_{\min} 表示自车速度很小时，仍然需要维持的车间距离，一般为一个常数。

3) 定安全系数策略

定安全系数策略是指自车与前车的期望相对距离为自车在当前车速下的紧急制动距离乘以一个系数^[66]，这个系数大于 1。这种策略一般用在防撞报警和前向防撞系统中。对制动距离的估算方法是这种策略的核心问题。后车的紧急制动距离：

$$d_e = K_{safe} \cdot [T_e v_h + \frac{1}{2} (\frac{v_h^2}{a_h} - \frac{v_l^2}{a_l})] \quad (4.5)$$

式中 K_{safe} 为安全系数， T_e 为跟随车辆从其最大加速度 $a_{h\max}$ 转换为最大减速度 $dec_{h\max}$ 所需要的时间， v_h 和 v_l 分别表示本车和前车当前的实际行驶速度， $a_h = dec_{h\max}$ 为本车的

最大减速度, $a_l = dec_{l\max}$ 为前车的最大减速度。

由以上介绍分析可知, 定间距策略的编队不仅具有不受编队平均速度影响的稳定的交通密度, 同时具备交通流量的稳定性。因此本文研究的编队系统采用定间距策略。

4.2 基于模型预测的车间距控制方法

基于模型预测的车辆纵向控制能够实现本车速度控制和车间距的保持。由于传统的模型预测控制算法无法满足智能车辆多工况下的纵向控制, 所以设计了一种基于模型预测的多模式纵向控制器。该纵向控制器有多个工作模式包括车间距保持模式、速度跟随模式和自动紧急制动模式。基于模型预测的多模式纵向控制器能够根据车辆的驾驶场景自动选择不同的工作模式, 并且能够实现不同模式之间的自主切换。

4.2.1 模型预测控制理论简介

模型预测控制算法本质上是求解一个开环最优控制问题。它的思想与具体的模型无关, 但是实现则与模型有关。它能够考虑到未来一段时间内的系统行为, 从而求解出系统当前的最优控制量是模型预测控制的优势所在, 该过程是在一个有限的预测时域内实现的。基于预测控制的算法有多种形式, 但一般来说, 预测控制算法包含三个主要方面: 预测模型、滚动优化与反馈校正^[68]。

(1) 模型预测

预测控制应具有预测功能, 即能够根据系统的现时刻的控制输入以及过程的历史信息, 预测过程输出的未来值, 因此, 需要一个描述系统动态行为的模型作为预测模型。预测模型具有展示过程未来动态行为的功能, 这样就可像在系统仿真时那样, 任意的给出未来控制策略, 观察过程不同控制策略下的输出变化, 从而为比较这些控制策略的优劣提供了基础。无论分布式参数系统、线性稳定系统还是非线性系统, 只需有必要的预测作用就可用作预测模型。

预测模型可以基于控制输入显示未来系统的动态行为。因此, 预测模型可用于为模型预测控制的目标优化提供先验知识, 然后确定以何输入序列进行控制, 才能使预测时域内的被控对象输出的动态行为符合期望的目标。

(2) 滚动优化

在线滚动优化是模型预测控制主要的特征。模型预测控制算法通过优化一个或一系列性能指标来确定系统未来的控制输入, 这些性能指标与未来系统的动态行为相关。

预测控制可以根据预测模型预测的未来动态行为在一段时间内实现滚动优化，有限时间的滚动优化是与传统意义下离散最优控制差异的最主要表现。在每个采样时刻，优化性能指标仅指从未来时刻到下一个采样时刻的有限时间，同时优化周期随之前移。优化的性能指标在不同优化周期内形式上是相同的，但内容上随着优化周期的推移也是实时更新的。因此，滚动优化的含义就是，在预测控制过程中，目标的性能优化不是一次离线完成的，而是在线的反复进行。同时，预测控制有区别于其他传统最优控制的最根本的特点也就是在线滚动优化。

(3) 反馈校正

过程控制算法采用的预测模型是经过某些假设简化的系统模型，并不能完全表示系统的动态特性，所以反馈策略是必需的。预测控制经过目标的动态优化确定未来的控制输入序列，但为了防止由于环境干扰、模型失配等原因导致的控制误差增大，预测控制只在本此采样周期作用。在下次采样周期中，控制器首先检测系统的实际状态输出，并根据使用该实时反馈信息校正模型的预测，然后执行新的优化过程。反馈校正的形式各种各样，既可以在保持预测模型不变的基础上去补偿未来的误差，也可以根据在线识别的原理直接修改预测模型。其实无论采取何种反馈方式，预测控制的优化过程都是基于系统的实际情况，对系统未来的动态行为进行有效的补偿。所以，预测控制不仅是基于预测模型的优化控制，也通过采集真实的控制量与输出的动态行为，进行闭环反馈优化^[69]。

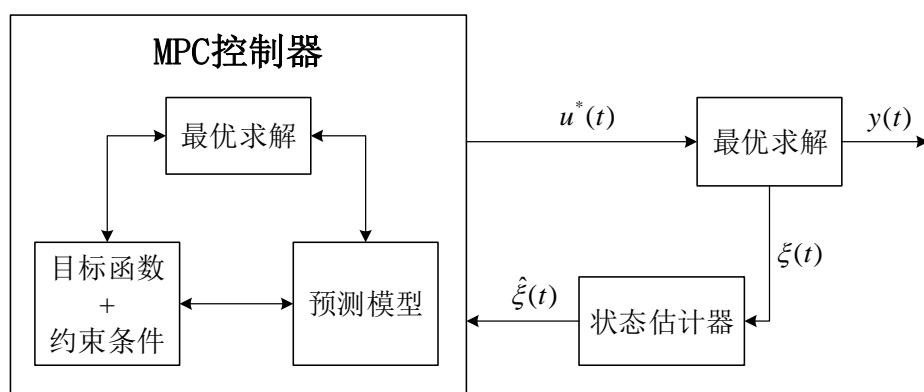


图 4.2 模型预测控制原理图

模型预测控制原理框图如图 4.2 所示，包含了 MPC 控制器、被控平台和状态估计器这三个模块。其中，MPC 控制器结合预测模型、目标函数和约束条件进行最优化求解，得到当前时刻的最优控制序列 $u^*(t)$ ，输入到被控平台，被控平台按照当前的控制量进行控制，然后将当前的状态量观测值 $\xi(t)$ 输入给状态估计器。状态估计器对于那

些无法通过传感器观测得到或者观测成本过高的状态量进行估计，比较常用的方法有卡尔曼滤波、粒子滤波等。估计的状态量 $\hat{\xi}(t)$ 输入 MPC 控制器，再次进行最优化求解以得到未来一段时刻的控制序列。如此循环，构成了完成的模型预测控制过程。

4.2.2 越野环境下纵向车间距控制算法

本节主要详细介绍了基于模型预测的车间距控制算法的框架，首先对车间纵向运动学关系模型做离散化处理，并且设计了优化目标函数和约束条件。

1) 车间运动学模型离散化

为了建立基于模型预测的纵向控制器，对式(4.1)进行向前离散化，得到设采样时间为 T_s ，那么离散形式的车间运动学模型可表示为：

$$\begin{cases} x_r(k+1) = x_r(k) + v_r(k)T_s + \frac{1}{2}(a_l(k) - a_h(k))T_s^2 \\ v_r(k+1) = v_r(k) + (a_l(k) - a_h(k))T_s \\ v_h(k+1) = v_h(k) + a_h(k)T_s \end{cases} \quad (4.6)$$

其中， $k \in N$ 。一方面由于采样时间非常短，前方车辆的加速度对模型影响很小；另一方面由于前车的加速度并不能直接获取，通过数学方法获取的值与真值也会存在差异，故认为采样周期内前车作匀速运动，即 $a_l(k) = 0$ 。可以把式(4.6)写成矩阵形式：

$$\xi(k+1) = A\xi(k) + Bu(k) \quad (4.7)$$

$$\xi(k) = [x_r(k) \ v_r(k) \ v_h(k)]^T \quad (4.8)$$

式(4.7)对车间纵向运动学模型进行了系统表述， $\xi(k)$ 是一个三维的系统状态变量。 A 和 B 是系统矩阵， $u(k)$ 系统输入量，其中，

$$u(k) = a_h(k) \quad (4.9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}T_s^2 & -T_s & T_s \end{bmatrix}^T \quad (4.11)$$

通过获取当前时刻的系统状态 $\xi(0)$ 和当前系统输入 $u(0)$ ，即可预测在输入 $u(k)$ 时 $k(k=1,2,3,\dots,N_p)$ 个采样时刻车辆的运动状态 $\xi(k)$ ， N_p 是预测时域的长度。

2) 优化目标函数与约束条件

在编队行驶过程中，本车与前方车辆需要保持某个车间距策略。其性能主要是通过两车相对车间距和相对速度来评价，需要满足两个要求：一是本车与前车的车间距要收敛于期望车间距 d_{des} ，二是本车与前车的相对速度收敛于零，即：

$$\begin{cases} x_r(k) \rightarrow d_{des} \\ v_r(k) \rightarrow 0 \end{cases}, k=1,2,3,\dots,N_p \quad (4.12)$$

此外，考虑到车辆的乘坐舒适性，还需要满足两个要求：一是预测时域内车辆的加速度需要接近于参考加速度 $a_{ref}(k)$ 。采用文献^[70]提出的线性跟车驾驶员模型可得，参考加速度可以表示为：

$$a_{ref}(k) = K_V v_r(k) + K_D \Delta d_{error}(k) \quad (4.13)$$

其中， K_V 和 K_D 是模型系数，分别取 0.25 和 0.02。 Δd_{error} 为实际车间距与期望车间距的差值，即：

$$\Delta d_{error}(k) = x_r(k) - d_{des} \quad (4.14)$$

另一需要满足的舒适性要求就是车辆行驶过程总的冲击度应尽可能地小，即

$$\min |j(k)| = \min |u(k) - u(k-1)| \quad (4.15)$$

基于上述目标分析，将需要优化的多个性能指标以加权的形式写成如下优化目标函数：

$$J_1 = \sum_{k=0}^{N_p-1} \left[\rho(u(k) - a_{ref}(k)) + \alpha(u(k) - u(k-1)) + \|\xi(k) - \xi_{ref}(k)\|_Q \right] \quad (4.16)$$

其中， ρ 是线性跟车驾驶员模型的置信度系数，若认为线性跟车驾驶员模型对预测比较准确，则 ρ 的值可以取的相对大些。 $u(k) - u(k-1)$ 是控制量增量，同时也表示车辆的冲击度， α 则是其惩罚系数。 Q 是系统状态变量的权重系数矩阵， $\xi_{ref}(k)$ 是系统状

态变量的目标值，是一个常向量。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{ref}(k) = [d_{des} \quad 0 \quad v_{max}]^T \quad (4.18)$$

考虑到车辆的安全性与平顺性，还需要对系统变量做出约束，主要包括五个方面：

- (1) 车辆的最大加速度或减速度不能超过车辆的动力极限；
- (2) 车辆的冲击度的绝对值不能超过允许的最大冲击度；
- (3) 与前车的车间距离不能小于安全距离；
- (4) 车辆行驶速度不允许出现负值；
- (5) 车辆行驶速度不得超过最大速度限制。

上述约束可以用不等式组(4.19)和(4.20)来表示，即：

$$\begin{cases} u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} \\ |u(k) - u(k-1)| \leq j_{max} \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\begin{cases} x_r(k) \geq d_{safe} \\ v_h(k) \leq v_{max} \\ v_h(k) \geq 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

其中， u_{min} 和 u_{max} 是车辆的最大制动减速度和最大加速度， j_{max} 是允许的最大纵向冲击度， d_{safe} 是本车与前车的安全距离， v_{max} 是最大速度限制。

一方面，如果采用式(4.20)表示的硬约束容易导致因上下边界不可超越而无最优解的问题；另一方面，当不存在前方车辆时，基于模型预测的纵向控制算法还可以工作在速度跟随模式（4.3 节中会介绍）。由于此时并没有真实前车存在，所以两车的相对车间距要求可以变为软约束。为此，可以采用向量约束管理法来解决不可求解问题^[71]。为了保证始终存在最优解，当系统输入或者系统输出超出相应的约束范围时，可以采用向量松弛因子法。这个方法就是对所有硬约束分别进行软化，可以拓宽问题中约束的上下边界，保证预测优化问题存在最优解。由于式(4.19)表示的约束条件表述了车辆的动力性能，车辆动力学参数无法改变，故此约束无法软化。所以只能对是(4.20)

表示的约束条件进行软化。软化后的约束条件可表示为：

$$\begin{cases} x_r(k) \geq d_{safe} - \varepsilon_1 \\ v_h(k) \leq v_{\max} + \varepsilon_2 \\ v_h(k) \geq 0 - \varepsilon_3 \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} 0 \leq \varepsilon_1 \leq \delta_{\max}^d \\ 0 \leq \varepsilon_2 \leq \delta_{\max}^v \\ \delta_{\min}^v \leq \varepsilon_3 \leq 0 \end{cases} \quad (4.22)$$

其中， ε_1 、 ε_2 和 ε_3 称为松弛因子，后面也会作为待优化的变量。 δ_{\max}^d 、 δ_{\min}^v 和 δ_{\max}^v 称为硬约束边界松弛系数， $\delta_{\max}^d \geq 0$ ， $\delta_{\max}^v \geq 0$ ， $\delta_{\min}^v \leq 0$ ，其均为常数。松弛系数可以用来表征对不同变量的软化程度。将式(4.21)和式(4.22)写成矩阵形式，即：

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\xi}(k) \leq \mathbf{G} + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \quad (4.23)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -d_{safe} & v_{\max} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.25)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \varepsilon_{\max}^d \\ \varepsilon_{\max}^v \\ -\varepsilon_{\min}^d \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 是由松弛因子构成的松弛向量。但是若松弛因子太大，硬约束可能失去大部分强制能力，导致车辆状态不会收敛于期望状态，甚至可能导致与期望状态偏差越来越大。所以要对松弛因子进行惩罚，故将其写成加权形式作为优化目标之一：

$$J_2 = \sum_{k=0}^{N_p-1} \|\boldsymbol{\varepsilon}(k)\|_{\mathbf{R}} \quad (4.27)$$

式中， \mathbf{R} 是对松弛向量各项的权重系数矩阵， $\mathbf{R} = \text{diag}(r_1, r_2, r_3)$ 。综上所述，基于模型

预测的纵向车间距控制算法就可以转换为一个带约束的优化问题：

$$\text{Minimize} \quad J = J_1 + J_2 \quad (4.28)$$

$$\text{subj. to.} \quad \begin{cases} u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \\ |u(k) - u(k-1)| \leq j_{\max} \\ \mathbf{H}\boldsymbol{\xi}(k) \leq \mathbf{G} + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \end{cases} \quad (4.29)$$

如式(4.28)和(4.29)所示的带约束的优化问题，可以通过现有的求解器进行数值求解。由于上述的优化问题从数学上可以变换为一个二次规划问题，所以本文选择 CVXGEN 求解器。CVXGEN 是一个无需安装的高效求解器，它能对表示为二次型的凸优化问题进行数值求解。

4.2.3 纵向车间距控制器稳定性分析

模型预测控制算法是一种在有限时域内的进行滚动优化的控制算法，本文涉及到的车间运动学模型是线性模型，最终的优化目标函数也是能够用二次型表示，所以可以将带约束的线性优化问题转换为一个二次规划问题，且该二次规划问题是凸的。虽然能够保证每次求得的解是全局最优，但还需要证明控制器也是稳定的。本文添加终端约束的方法，对车间距控制的稳定性进行分析。

式(4.7)表示的系统模型可以写成隐式表示的如下被控对象模型：

$$\boldsymbol{\xi}(k+1) = f(\boldsymbol{\xi}(k), u(k)) \quad (4.30)$$

在每个周期内，都是求解以下优化问题得到最优解的，

$$V(k) = \sum_{i=1}^{N_p} l(\hat{\boldsymbol{\xi}}(k+i|k), (\hat{u}(k+i-1|k))) \quad (4.31)$$

式中 $l(\boldsymbol{\xi}, u) \geq 0$ ，当且仅当 $x = 0$ 且 $u = 0$ 时， $l(\boldsymbol{\xi}, u) = 0$ 。然后添加终端约束条件：

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}(k+N_p|k) = 0 \quad (4.32)$$

式中的 $\boldsymbol{\xi}$ 和 u 都是带有约束的，即

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}(k+i|k) \in \Xi, \quad \hat{u}(k+i|k) \in U \quad (4.33)$$

其中 Ξ 和 U 都是包含原点的非空集合。假设 $x=0$ 和 $u=0$ 是系统的一个平衡状态，也就是 $0=f(0,0)$ 。每个周期求解得到的最优控制量序列为：

$$U^* = \{u^*(k|k), u^*(k+1|k), u^*(k+2|k), \dots, u^*(k+N_p-1|k)\} \quad (4.34)$$

每个控制周期内，只将最优控制序列中的第一个控制作用 $u^*(k|k)$ 施加到被控对象上。假设每个周期内的优化问题都有可行解，则计算得到的解是全局最优解，从而可以认定系统在原点 $x=0$ 和 $u=0$ 处是稳定的。

采用控制理论中常用的李雅普诺夫第二法来对控制器稳定进行证明。李雅普诺夫第二法又称为直接法，它无需求解系统的运动方程，而是借助一个李雅普诺夫函数来直接对系统平衡状态的稳定性做出判断，它是从能量观点进行稳定性分析的。如果一个系统被激励后，其储存的能量随着时间的推移逐渐衰减，达到平衡状态时，能量将达到最小，那么，这个平衡状态是渐进稳定的。反之，如果系统不断地从外界中吸收能量，储能越来越大，那么这个平衡状态就是不稳定的。如果系统的储能既不增加，也不消耗，那么这个平衡状态就是李雅普诺夫意义下的稳定。

但是，由于系统的复杂性与多样性，往往不能直接得找到一个能量函数来描述系统的能量关系，于是李业谱诺夫定义了一个正定的标量函数 $V(x)$ ，作为虚构的广义能量函数，然后根据 $\dot{V}(x)=dV(x)/dt$ 的符号特征来判别系统的稳定性。对一个系统，如果能找到一个标量函数 $V(x)$ ，系统稳定性判据有如下三条：

- 1) 若标量函数 $V(x)$ 是正定的，而 $\dot{V}(x)$ 是负定的，则系统是渐进稳定的。
- 2) 若标量函数 $V(x)$ 是正定的， $\dot{V}(x)$ 也是正定的，则系统是不稳定的。
- 3) 若标量函数 $V(x)$ 是正定的， $\dot{V}(x)$ 是半负定的，则系统是李业谱诺夫意义下的稳定

把满足稳定性条件的标量函数称为李雅普诺夫函数。因此利用李雅普诺夫函数法判断系统稳定性的关键是找到合适的李雅普诺夫函数，使得李雅普诺夫函数 $V(x)$ 正定且 $\dot{V}(x)$ 负定。将优化目标函数的最优值 $V_{opt}(k)$ 作为李雅普诺夫函数， $V_{opt}(k)$ 表达式如下：

$$V_{opt}(k) = \min \sum_{i=1}^{N_p} l(\hat{\xi}(k+i|k), (\hat{u}(k+i-1|k))) \quad (4.35)$$

由式(4.31)可知，当 $x=0$ 且 $u=0$ 时， $V(k)=0$ ；当 $x \neq 0$ 或 $u \neq 0$ 时， $V(k)>0$ ，因

此, $V_{opt}(k)$ 是正定的。现在只需要证明 $V'_{opt}(k)$ 是负定的, 即 $V_{opt}(k+1) < V_{opt}(k)$, 假设被控对象模型是无偏的, 且不考虑噪声干扰, 所以经过预测得到的系统状态应该与实际状态一致, 即若 $u(k+i) = \hat{u}(k+i|k)$, 则 $\xi(k+i) = \hat{\xi}(k+i|k)$ 。于是有:

$$\begin{aligned}
 V_{opt}(k+1) &= \min \sum_{i=1}^{N_p} l(\hat{\xi}(k+i+1|k), (\hat{u}(k+i|k))) \\
 &= \min \sum_{i=1}^{N_p} l(\xi(k+i+1), (u(k+i))) \\
 &= \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_p} l(\xi(k+i), (u(k+i-1))) - l(\xi(k+1), (u(k))) + l(\xi(k+1+N_p), (u(k+N_p))) \right\} \\
 &= -l(\xi(k+1), (u(k))) + \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_p} l(\xi(k+i), (u(k+i-1))) + l(\xi(k+1+N_p), (u(k+N_p))) \right\} \\
 &= -l(\xi(k+1), u_0^*) + V_{opt}(k) + \min \{ l(\xi(k+1+N_p), u(k+N_p)) \} \quad (4.36)
 \end{aligned}$$

根据式(4.32)表示的终端约束条件 $\hat{\xi}(k+N_p|k) = 0$, 因此可以保证:

$$\min \{ l(\xi(k+1+N_p), u(k+N_p)) \} = 0 \quad (4.37)$$

由于 $l(\xi(k+1), u(k)) \geq 0$, 进而能够推出 $V_{opt}(k+1) \leq V_{opt}(k)$, 所以 $V_{opt}(k)$ 是系统的一个李雅普诺夫函数, 原系统在原点 $x=0$ 和 $u=0$ 的稳定性得证, 因此可以认为基于模型预测的车间距控制器在每个周期内都是稳定的。

4.3 纵向控制器工作模式及其自适应切换

在车辆编队行驶过程中, 本车需除了实时地与前方车辆维持某个车间距策略外, 也需要能够跟随前方车辆起步和停止, 也就是说当前方车辆起步时, 本车能够自动启动出发, 前方车辆停车时, 本车能够及时减速停车, 这是与前车保持车间距的两个特殊情况。此外, 为了保证算法能够覆盖所有车辆行驶工况, 若编队车辆间通信暂时中断甚至不存在前方车辆时, 本车也能够按照某个行驶策略行驶。

为了使纵向控制器能够更多的适应驾驶场景, 对上述基于模型预测的纵向控制器做了改进, 使之能够实现多个工作模式。此外, 一般对于多目标优化问题来讲, 车辆的速度跟随能力、舒适性要求与安全性要求并不能同时兼得最好的性能。在不同的场景下, 车辆应该有不同主要性能指标侧重。为了实现这个功能, 对上述基于模型预

测的纵向控制器做出了改进，它可以在以下三种场景下拥有不同的工作模式，并给出了不同工作模式之间的切换算法的伪代码，如表 4.1 所示。

(1) 若存在前方车辆，纵向控制器的工作模式为车间距控制模式；

(2) 若本车前方是自由区域，不存在前方车辆和障碍物，纵向控制器的工作模式为速度跟随模式；

(3) 若出现需要紧急制动情况，例如前车快速停车或者前方突然出现障碍物，纵向控制器的工作模式为自动紧急制动模式；

表 4.1 纵向控制器工作模式切换方法

| 纵向控制器工作模式切换方法 |
|---|
| <p>输入： 前方车辆的速度 v_l 和前后车车间距 $x_r(0)$</p> <p>输出： 纵向控制器的工作模式 $Mode$</p> <pre> 1: function <i>MODE CONVERSION</i>($v_l, x_r(k)$) 2: 获取前车的行驶速度 v_l 3: 计算前后车辆的车间距变化率 $\dot{x}_r(k)$ 4: if $v_l = None$ then 5: $Mode \leftarrow speed_tracking$ 6: else 7: $Mode \leftarrow stop_go\ or\ car_following$ 8: end if 9: if $\dot{x}_r(0) \leq -5\ m \cdot s^{-2}$ then 10: $Mode \leftarrow emergency_brake$ 11: end if 12: return $Mode$ 13: end function </pre> |

在表 4.1 的伪代码中，若车载传感器探测到不存在车辆（第 4 行），纵向控制器为速度跟随模式，速度跟随就是控制车辆按照某个速度策略行驶，包括定速行驶和按照某条速度曲线行驶。速度策略一般是由更上一层的规划器根据环境感知信息给出或者人工预先设定。若车在传感器探测到存在前方车辆（第 6 行），纵向控制器为车间距控制模式，其功能就是要与前车保持某个固定的车间距离，其中还包括本车能够随

前车自动起步和减速停车。若前方的车辆急减速或者本车前方存在静止障碍物，那么相对距离变化率 \dot{x}_r 则会急剧减小。若相对距离变化率低于一定值（第 9 行），纵向控制器则会切到自动紧急制动模式。此外，若在速度跟随模式中，速度曲线出现骤降情况，纵向控制器也会切换到自动紧急制动模式进行减速甚至停车。纵向控制器的每个工作模式均是基于同一个模型和算法框架的，但是每个模式下的模型参数、权重系数和约束条件都是不同的。

如果本车前方没有车辆或障碍物时，车间纵向运动学关系模型无法建立，上述的统一模型预测控制算法框架是不适用的。因此，当前方存在静止障碍物时，可认为障碍物是一辆速度为零的真实前车；当不存在前方车辆时，可以在本车前方某个位置假想存在一辆虚拟前车，且虚拟前车的速度是按照某个速度策略行驶的，从而将其转换为一个速度跟随模式。值得注意的是，虚拟前车位置的设置是非常关键的。通过多次设置不同的目标跟随速度与不同的虚拟前车初始位置，利用前述的纵向控制方行驶，验证速度跟随效果，采用稳态时的速度超调量来表征对目标速度跟随效果。拟前车的位置设置与待跟随的参考速度有关。如图 4.3 所示，当跟随不同的参考速度并设置不同的虚拟前车位置时，分析车辆跟随参考速度时的速度超调量。

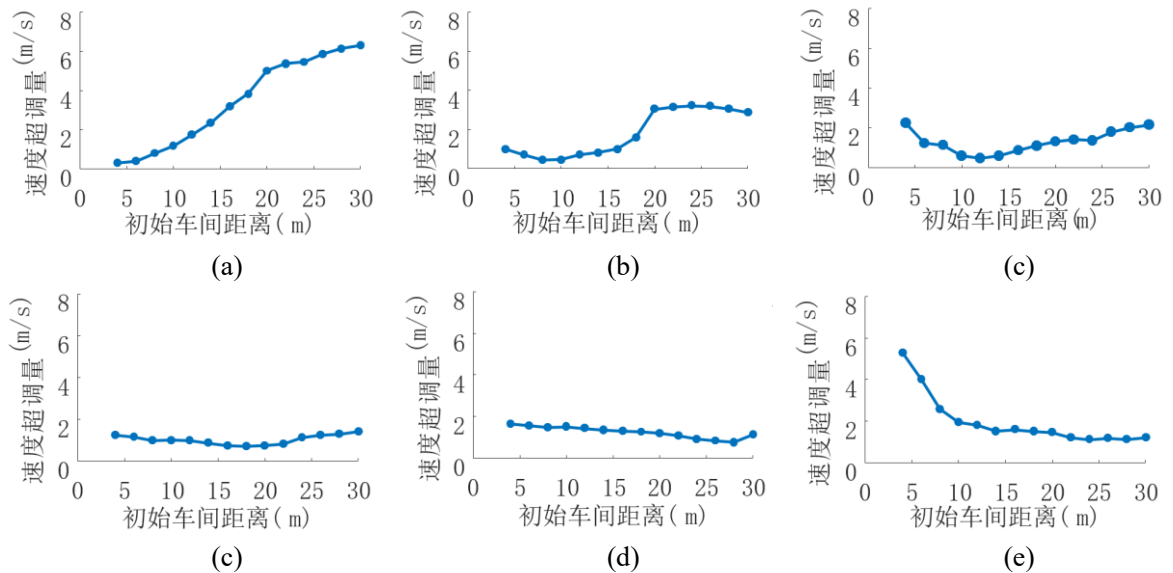


图 4.3 不同参考车速下的速度超调-初始车间距关系

图 4.3 中，横轴是本车与虚拟前车的初始距离，纵轴是本车跟随参考速度时的稳态速度超调量，图 4.3 (a) 至图 4.3 (f) 的参考速度分别是 3m/s、6 m/s、9 m/s、12 m/s、15 m/s 和 18 m/s。以图 4.3 (c) 为例，参考速度 v_{ref} 为 9m/s，分别把虚拟前车初始位置设置在本车前 3m、6m、9m、12m、15m、18m、21m、24m、27m 和 30m 处，利用本

章提出的纵向控制方法去对参考速度做跟随，把其相应的稳态速度超调绘制出来。当把虚拟前车设置在本车前 12 米处时，速度超调量是最小的。从图 4.3(a)-(e)中可以看出，当本车跟踪不同的参考速度时，总会存在一个最佳的虚拟前车位置使得速度跟随超调最小。通过多次试验，可以拟合出二者之间的数学关系：

$$x_r(0) = 1.47v_{ref} + 25 \quad (4.30)$$

其中 $x_r(0)$ 为虚拟前车的初始位置， v_{ref} 是需要跟踪的目标车速。当前方车辆距离本车很远或者不存在前方车辆时，可以通过假想一辆虚拟前车在本车前方，虚拟前车位置可由式(4.30)计算求得。这样，4.2 节提出的编队车间距控制方法依然适用。当不存在前方车辆时，虚拟前车的方法不仅使得车间运动学模型成立，还拓宽了车间距控制方法的应用场景，提高了控制算法的鲁棒性和稳定性。

4.4 本章小结

根据第 2 章中对编队行驶问题的分解，本章主要解决编队车辆之间纵向车间距控制问题。在第 3 章之计算出编队车辆的期望路径的前提下，本文选择了基于模型预测的纵向车间距控制方法。首先介绍了模型预测理论，然后详细说明了基于模型预测的车间距控制算法，其中包括模型建立，目标函数选取，约束条件建立和权重参数选择等。越野环境地形比较复杂多变，可能存在不同路面条件的道路，例如土路、石子路、水体和凹凸障碍等。所以车间距控制方法中考虑编队车辆的动力学特性，其中包括编队车辆的加速能力，最大速度和制动能力等。然后对设计的基于模型预测的车间距控制器进行了稳定性分析和证明。此外对于对越野环境，编队车辆之间可能存在多种位置关系，所以本文设计的纵向车间距控制器有多种工作模式，从而能够应对多种场景。最后给出了不同模式之间的切换方法，既保证了编队车辆之间的功能性与也提高了车辆控制的安全性。

第 5 章 试验验证

根据本文第 2 章对越野环境下编队行驶问题的功能分解, 本文分别提出了越野环境下编队车辆的路径规划方法和编队车辆车间距控制方法。第 3 章提出的基于前车行驶轨迹并结合了横向偏移采样和优化理论的路径生成方法, 从而达到在复杂多变的越野环境中能够躲避障碍物的同时实现“不跟丢”前车的目的, 通过这个方法, 很好的解决了越野环境下的编队车辆路径规划问题。第 4 章提出了基于模型预测的多模式纵向车间距控制方法, 能够实现编队车辆之间维持某个车间距策略行驶, 同时保证不会与前车发生碰撞。针对本文提出编队行驶问题的解决方法, 本章分别设计仿真试验和实车试验对其有效性和性能进行了验证。

5.1 仿真试验验证

本文选择通过 Vrep 仿真软件对第 4 章提出的车间距控制算法进行有效性验证。这是因为, 车间距控制算法涉及到车辆的实时状态信息, 所以需要通过仿真车辆来试验。针对第 3 章提出的编队车辆路径规划算法, 算法不涉及车辆位置和速度等车辆状态信息, 故不需要在 Vrep 中进行仿真验证。为了更加真实的对编队车辆路径规划算法进行仿真, 本课题首先采集了多种实际的越野环境地图数据, 然后基于此真实环境地图进行路径规划算法仿真。路径规划算法的仿真本质上一种离线数据回放, 并在 Rviz 中进行路径规划结果的可视化, 这样能够清晰地看到编队车辆路径规划方法实时计算出来的期望路径

5.1.1 仿真平台搭建

Vrep (Virtual robot experimentation platform) 是一种高效的机器人仿真软件, 它是基于一种分布式的控制策略构建的仿真环境。在它里面没有主要的或是核心的功能, 而是拥有一些相互独立的功能, 并且可以根据需要随时启用或关闭。可以通过详的 API 函数和脚本功能轻松集成和组合^[72]。Vrep 中有许多基本元, 这些基本元可以用来组成各种环境或者物体, 常用的基本元有关节、路径、形体、照相机与光线、距离传感器、视觉传感器、力传感器和图表等。这些基本元是 Vrep 仿真环境中物体构造的基础。

在仿真环境中的物体被构造出来以后, 仿真环境中的物体需要根据控制目标和要求进行动力学或者运动学计算, 从而实现物体正确的运动。这就涉及到 Vrep 仿真环

境中的控制策略。Vrep 提供了物体控制策略接口,用户也可以自己定义仿真器的功能。Vrep 本质上是由一个巨大的函数库构成的具有复合功能的整体平台,并且需要一个具体的子程序进行仿真。Vrep 默认的子程序非常简单,它负责加载扩展模块,对消息进行登记并将他们转接到扩展模块中,初始化仿真环境,并且处理仿真应用以及仿真计算循环。用户能够通过使用 Lua 语言编写脚本程序或者使用 Vrep 自带的扩展模块或插件,从而添加自己想要的仿真功能。

1) 使用 Lua 语言编写脚本程序。Lua 是一种轻量的扩展语言,被设计用来进行过程式编程。Lua 的脚本解释器被集成到 Vrep 中,并且被 Vrep 中数以百计的控制指令进行扩展。脚本在 Vrep 中为一种主要的仿真控制机制。

2) Vrep 的扩展模块。扩展模块允许登记和处理用户指令。一个高层的脚本命令(例如 robotMoveAndAvoidObstacles)在下层的控制层可以通过运行相应的逻辑以及底层 API 函数来进行实现,这种实现方式是以一种快速而且隐蔽的方式进行的。

在仿真环境中,可以通过键盘来控制仿真环境中的领航车辆,上下左右方向键和空格键分别代表车辆的加速、减速、左转、右转和紧急停车。仿真环境中,领航车程序能够通过仿真软件的 API 函数能够读取到领航车辆的位置和车速信息^[73],然后通过 UDP 通信将领航车辆的信息发送到编队车辆的车间距控制程序。编队车辆车间距控制程序通过软件 API 与编队车辆模型实现通信,车间距控制程序一方面能够获取编队车辆模型的状态信息,另一方面也能将最终的控制指令下发给编队车辆,从而实现与领航车的编队行驶。仿真环境中的编队车辆之间的通信结构如图 5.1 所示。

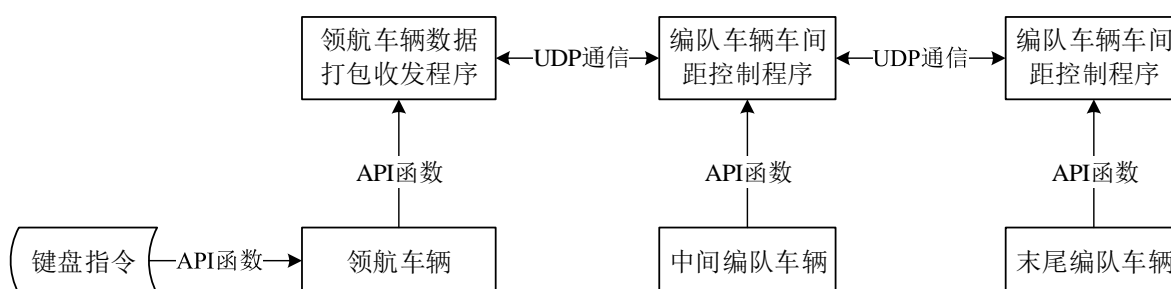


图 5.1 仿真车辆通信示意图

对于编队车辆的车间距控制问题,本课题提出的车间距控制方法并没有直接生成车辆的具体控制量,而是期望速度。为了更准确的验证本课题提出车间距控制方法的有效性和性能,在仿真中要尽量减少车辆动力特性的影响。因此,仿真环境中车辆模型都是经过简化的,车辆的行驶与转向都是由电机驱动的,通过下发期望转速就可以驱动车辆模型运动,这样的车辆模型能够最大程度反映前后两车之间的运动学关系,

体现算法性能。车辆模型如图 5.2 所示。

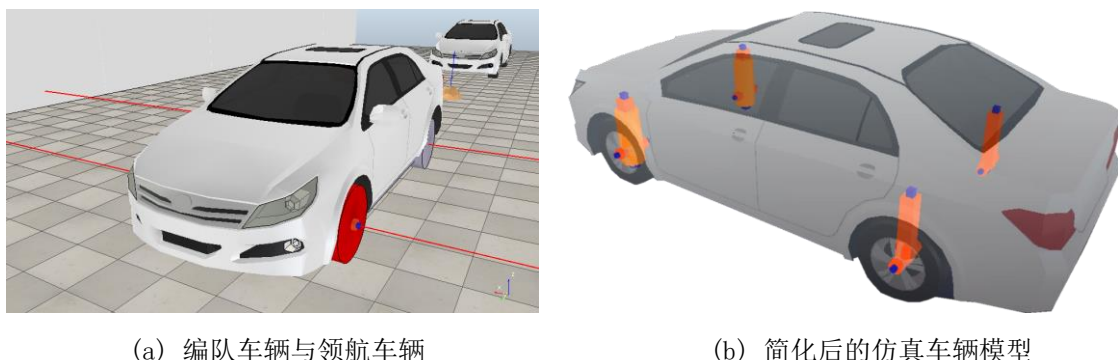


图 5.2 仿真车辆模型

需要说明的是，虽然仿真环境中的车辆模型为一台轮式车辆，而实车试验的试验平台是一辆速差转向的履带车，但是对于路径规划算法来讲都是无异的。因为编队车辆的路径规划功能是计算得到一条期望路径，此过程中不涉及车辆行走方式，路径规划中涉及到的车辆运动学约束主要为车辆的最小转向半径，对于轮式车而言，最小转向半径是确定的，对于速差转向的履带车而言，可以设置为 0，也可以认为设置一个合理的值，无论如何设置，运动学约束总是用一个最小转向半径这个定值来表征。

对于编队车辆的车间距控制方法来讲，轮式车辆和速差转向的履带车辆是能够等效的。因为车间距控制方法最终计算得到的是车辆的期望速度和期望加速度，轮式车辆的底层控制器能够将期望速度和期望加速度转换为具体的油门量和制动量，从而驱动车辆行驶。对于速差转向的履带车而言，它能够将期望速度加上路径规划模块计算得出的期望前轮偏角能够计算得到左右履带的期望轮速，从而驱动履带车行驶。综上所述，仿真环境中使用轮式车完全能够验证编队控制方法的有效性，并且能够与速差转向的履带车的试验结果具有一致性。

5.1.2 编队车辆纵向车间距控制试验

纵向车间距控制主要考察在编队行驶过程中，编队车辆之间的距离能否快速趋于并稳定在期望车间距附近，同时还要求前后两车以较高的速度行驶。所以，车间距控制主要考察前后两车行驶过程中，编队行驶的快速性和车间距的稳定性，与道路形状无关，所以此仿真环境选择为直行道路，方便通过键盘控制前车的速度。

在纵向车间距控制仿真试验中，一共有三辆车。领航车由键盘控制，两辆编队车辆由程序控制，中间车跟随领航车，末尾车跟随中间车。根据 2.2 节将两车编队系扩

展到三车编队系统。仿真道路环境如图 5.3 所示，仿真工况参数如表 5.1 所示。

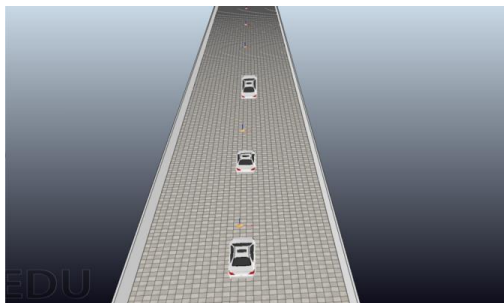


图 5.3 纵向车间距控制仿真环境与结果

表 5.1 纵向车间距仿真试验工况参数

| 最大速度 | 最大加速度 | 期望车间距 | 安全距离 |
|--------|---------------------|-------|------|
| 15 m/s | 2.5 m/s^2 | 10 m | 6 m |

为了更好地验证纵向车间距控制算法的鲁棒性，在 Vrep 仿真环境中，通过人工操作键盘来控制领航车辆进行变速行驶，中间车和末尾车辆由程序控制。领航车辆从静止逐渐加速到某一速度，然后速度大小随时改变，最后急减速至停车。通过上述复杂且更贴近实际的车辆运动，来验证本课题中纵向车间距控制算法性能。在仿真试验过程中，记录保存领航车、中间车和末尾车的速度和位置坐标信息。三车编队行驶过程中的车速、车间距和加速度变化如图 5.4、图 5.5 和图 5.6 所示。

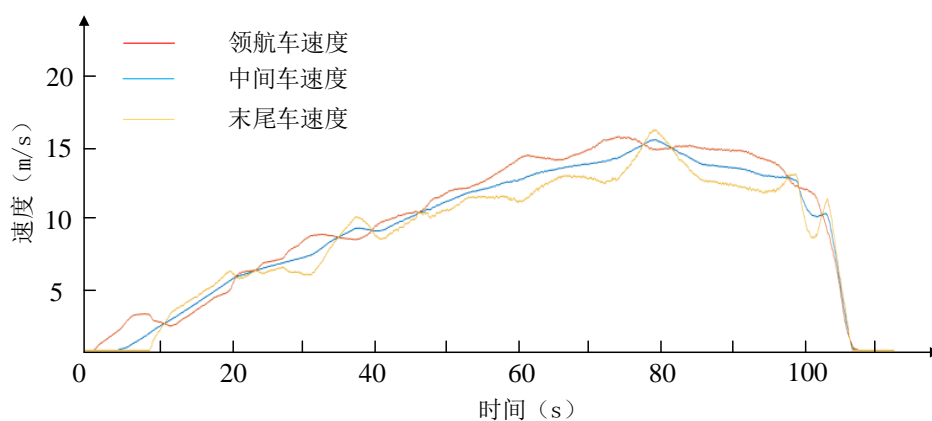


图 5.4 编队车辆速度-时间关系变化图

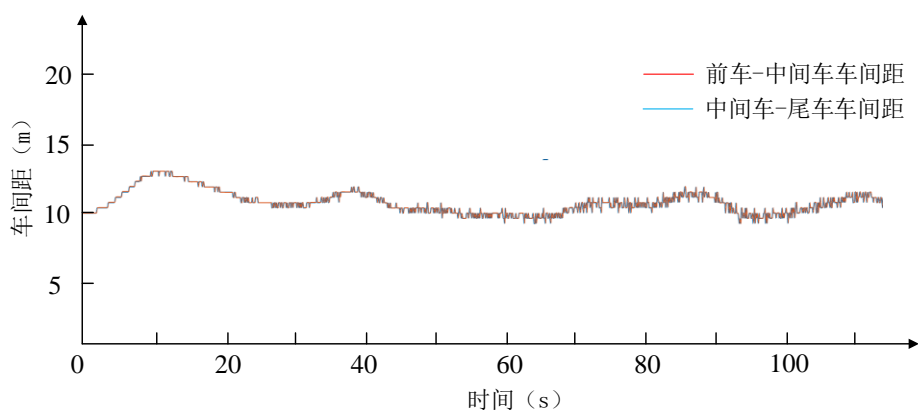


图 5.5 编队车辆车间距-时间关系变化图

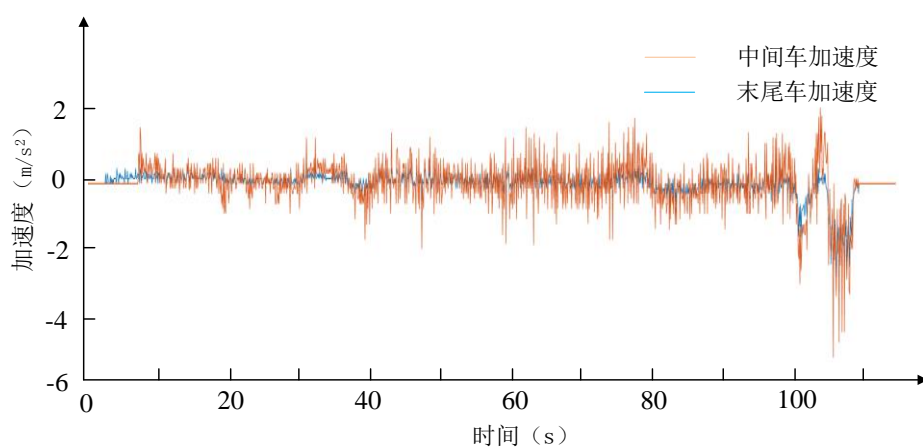


图 5.6 编队车辆加速度-时间关系变化图

由图 5.4 可以看出，前车从静止起步逐渐加速前进，然后减速停车。在 4s 处，中间车随着领航车的起步开始起步行驶，8s 处，末尾车跟随中间车起步行驶。4s 到 100s 中领航车为自由行驶，从图 5.5 中可以看出，程序控制的中间车辆与末尾车辆能够跟随各自的前方车辆行驶并与之保持 10 米左右的距离，从图 5.5 中可以看出，4s 到 100s 过程中编队车辆的最大加速度没有超过 1.5m/s^2 ，最大减速度没超过 -3.6m/s^2 ，程序控制的编队车辆的加速度能够保持在人体舒适度范围以内。这个过程中，纵向控制器的工作模式为车间距保持模式，与前车保持稳定的车间距和舒适性是主要的考量指标。该车间距保持模式下的纵向控制器参数如表 5.2 所示。

表 5.2 车间距保持模式下的纵向控制器参数

| 参数 | q_1 | q_2 | q_3 | r_1 | r_2 | r_3 | ρ |
|----|----------|------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| 数值 | 30 | 30 | 10 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 参数 | α | v_{\max} | d_{des} | d_{safe} | u_{\max} | u_{\min} | j_{\max} |
| 数值 | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 m/s^2 | -3.6 m/s^2 | 1 m/s^3 |

从图 5.4 中可以看出,当领航车急剧减速时(100s),中间车和末尾车随之也紧急制动减速,前车减速停车后,编队车辆也随之减速停车,并且与前车距离保持在安全距离之外。在这个过程中,纵向控制器的工作模式为紧急制动模式,安全性成为主要考量指标。如图 5.6 所示,中间车和末尾车的制动减速度最低达到 -6m/s^2 ,停车后中间车与领航车的车间距为 11m,末尾车与中间车的车间距为 11m,车间距均大于安全距离,达到了安全性要求。紧急制动模式下的纵向控制器参数如表 5.3 所示。由此可以看出,本课题的纵向车间距控制算法能够在前车复杂运动前提下,与前车保持某个期望车间距。

表 5.3 紧急制动模式下的纵向控制器参数

| 参数 | q_1 | q_2 | q_3 | r_1 | r_2 | r_3 | ρ |
|----|----------|------------|------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| 数值 | 40 | 20 | 10 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 参数 | α | v_{\max} | d_{des} | d_{safe} | u_{\max} | u_{\min} | j_{\max} |
| 数值 | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 m/s^2 | -6 m/s^2 | 2 m/s^3 |

本课题提出的编队车辆车间距控制方法的研究重点为相邻两辆车之间的车间距控制,可以利用本课题提出的车间距控制方法将多辆车“串联”起来,即中间编队车辆跟随领航车辆,末尾编队车辆跟随中间编队车辆,从而将两车编队系统扩展到多车编队系统,并且仍能保证相邻车辆之间的控制器每个求解周期均能得到最优解或次优解,从而实现编队车辆整体的弦稳定性。

5.1.3 编队车辆路径规划避障仿真试验

为了更加真实的对编队车辆路径规划算法进行仿真,本课题首先采集了多种实际的越野环境地图数据,然后基于此真实环境地图进行路径规划算法仿真。路径规划算法的仿真本质上一种离线数据回放,可以根据离线测试的效果调整算法参数,从而找到一组最优的算法参数。针对编队车辆的路径规划仿真试验,本节分别采集了的真实自由环境和真实复杂多变的越野环境的原始点云数据,然后经感知模块处理得到不同环境下的真实栅格地图数据。

将环境地图、前后车位置和期望路径通过 Rviz 进行可视化。Rviz 是 ROS 自带的一个三维可视化工具,很好的兼容了各种基于 ROS 软件框架的机器人平台,可以方便的对 ROS 程序进行图形化操作,可以实现对建立地图以及导航路径的动态观测。

在下述仿真结果示意图中，白色方框表示前车，绿色方框表示本车。紫色的虚线表示偏移后的粗糙的候选路径集，绿色实线表示从最终候选路径集中选择出最优的路径，也就是本车的期望路径，黑色斑块为障碍物。仿真试验中的路径规划算法参数如表 5.4 所示。

表 5.4 编队车辆路径规划仿真试验算法参数

| 参数 | 描述 | 数值 | 单位 |
|------------|----------|--------|-----------------|
| s_{\min} | 过渡路径弧长下界 | 两点直线距离 | m |
| s_{\max} | 过渡路径弧长上界 | 50 | m |
| κ_L | 过渡路径曲率下界 | -0.2 | m^{-1} |
| κ_U | 过渡路径曲率上界 | 0.2 | m^{-1} |
| n | 单侧横向偏移数量 | 10 | 条 |
| d | 横向偏移间距 | 0.5 | m |
| res | 栅格地图分辨率 | 0.2 | m |

(1) 自由环境下的编队车辆路径规划仿真

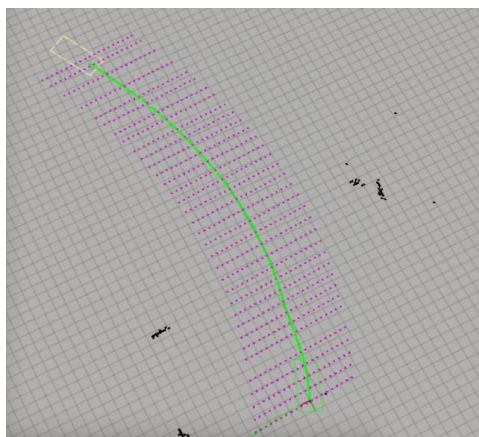


图 5.7 自由环境下的路径规划仿真结果

如图 5.7 所示，编队车辆所处的环境中障碍物较少，环境广阔几乎均为自由区域，且前后之间不存在动态障碍物。由于前车走过的历史路径对于后方的编队车辆来说依然是无碰撞且可跟踪的，所以经过本文提出的编队车辆路径规划方法计算，计算得到的期望路径依然是前车的历史路径，即本车只需要沿着前车的历史路径行驶即可，如图 5.7 中绿色曲线所示。由此可见，在自由区域内，编队车辆能够以最高效率规划出一条期望路径来跟踪前车位置。

(2) 非自由环境下路径规划避障功能仿真

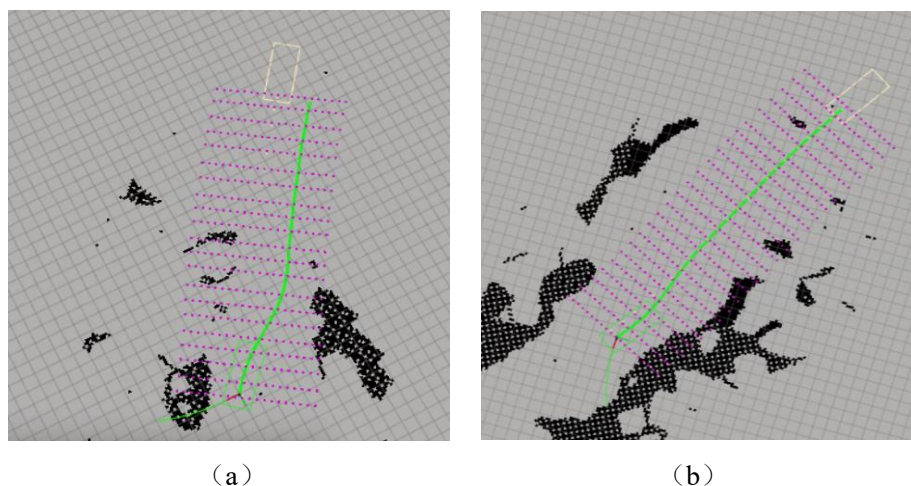


图 5.8 非自由环境下的路径规划仿真结果

在图 5.8 中，编队车辆所处的环境中障碍物较多，编队车辆之间也存在障碍物。前车走过的历史路径对于后方的编队车辆来说是存在碰撞的。所以，编队车辆首以前车走过的历史路径为参考路径，对参考路径进行等距横向偏移采样，得到一组粗糙的候选路径集，如图 5.8 中紫色虚线所示。然后利用非线性优化方法计算车辆到每条候选路径的过渡路径，并将其投影到环境地图中做碰撞检测，删除存在碰撞的候选路径。最后通过本文设计的成本函数选择出一条最优的无碰撞路径作为编队车辆的期望路径，如图 5.8(a)和 5.8(b)中的绿色曲线所示。从图 5.8 中可以明显看出，车辆的期望路径是由通过非线性优化方法计算得到的过渡路径和前车历史路径横向偏移某个距离后的路径组成的。由此可见，本文提出的编队车辆路径规划方法能够有效的在复杂多变的越野环境中规划出一条期望路径，跟踪前车位置的同时还能实现避障。

5.2 实车试验验证

相较于仿真试验，实车试验与之有几点不同需要说明。第一，本课题提出的编队车辆路径规算法与编队车辆车间距控制方法本质上未触及车辆执行层面，即本课题只根据车辆信息与环境信息计算规划出一条期望路径，对于跟踪这条期望路径，需要将期望路径发送到路径跟踪器从而计算得到车辆的期望转角。编队车辆车间距控制方法计算得到的是期望速度和期望加速度，并不能直接得到车辆的实际控制量，还需要将期望速度和期望加速度发到底层控制器从而得到具体的控制量。第二，在实际试验中，编队车辆之间的通信丢帧现象不可避免，这会在一定程度上影响本课题的试验效果。

试验场地为河北省元氏县某坦克试验场，如图 5.9 所示。实车试验中，领航车辆

是丰田陆地巡洋舰 4700，由人工驾驶前行。编队车辆是基于混合动力电动履带车改装而成的线控无人驾驶车辆平台，为自动驾驶。



图 5.9 编队行驶试验平台

5.2.2 编队车辆纵向车间距控制试验

纵向车间距控制算法试验主要验证本课题中所提出的车间距控制方法的有效性，考察车间控制器能否控制本车与前车的车间距快速趋于期望的间距，然后将车间距离维持在期望间距附近。选取的试验道路如图 5.9 所示，编队车辆车间距控制实车试验的工况如表 5.5 所示。

表 5.5 纵向车间距实车试验工况参数

| 最大速度 | 最大加速度 | 期望车间距 | 安全距离 |
|---------|---------------------|-------|------|
| 20 km/h | 2.5 m/s^2 | 28 m | 10 m |

为了更好地验证纵向车间距控制算法的鲁棒性，前方车辆从静止逐渐加速到某一速度，然后速度大小随时改变，最后急减速至停车。通过上述复杂且更贴近实际的车辆运动，来验证本课题中纵向车间距控制算法实车性能。在车辆行驶过程中，记录保存两车的速度和位置坐标信息。两车行驶过程中的车间距和速度变化如图 5.10 所示。

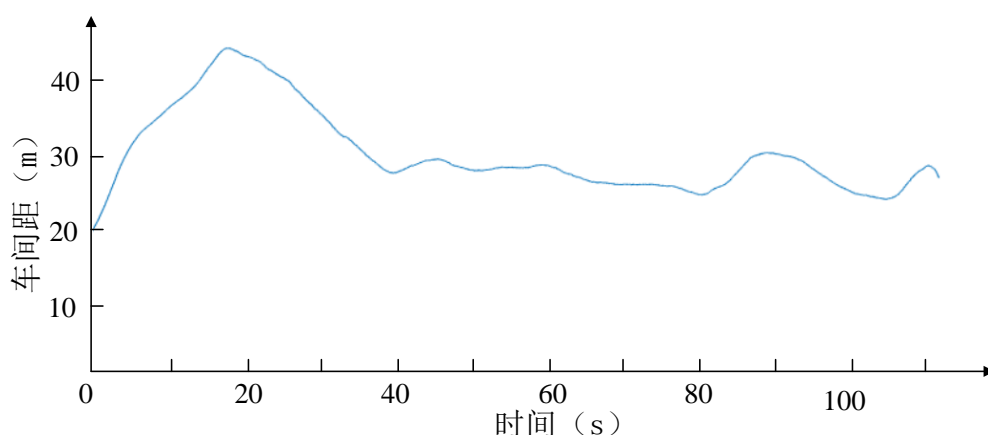


图 5.10 纵向车间距控制试验结果

从图 5.10 可以看出,前后两车均是由静止出发。静止时的初始车间距为 20m,前车启动出发,初期由于前车起步较快,两车车间距迅速拉开超过 40 米,在纵向车间距控制程序的控制下,两车间距快速趋于期望车间距 28 米,并在以后的行驶过程中,能够持续将车间距离保持在 24~31m 之间。在越野环境道路上,两车的行驶速度最快达到 25km/h。最后前车逐渐减速至停车,本车能够随之减速至停车,最终停车后前后两车的距离为 29m。通过此项试验可以证明,在前车变速运动的情况下,课题提出的纵向车间距控制算法依然能够与前车维持期望车间距左右。

5.2.1 编队车辆路径规划实车试验

编队车辆路径规划试验主要验证车辆在越野环境下,跟随前车行驶并实现避障的能力。主要考察车辆对前车辆路径的跟踪精度,具体的试验场景包括环形道路试验、S 型弯道路试验。在实车试验中,本文选择采用两车编队系统来对编队车辆的控制算法进行实车试验。前车为人工驾驶的丰田陆地巡洋舰 4700,后车是由程序控制的油电混动履带平台。

(1) 环形道路下路径规划试验

环形道路试验环境如下图 5.11 所示。试验中初始时刻,两车停在同一直线上,初始车间距为 25-30 米,前车以 4 m/s 的速度行驶,连续经过两个 U 型转弯之后停车。本试验主要考察本车辆的路径规划算法能否跟踪前车位置。图 5.12 中表示的是两车的行驶轨迹,红色曲线表示前车轨迹,蓝色曲线表示本车轨迹。



图 5.11 环形道路试验场景

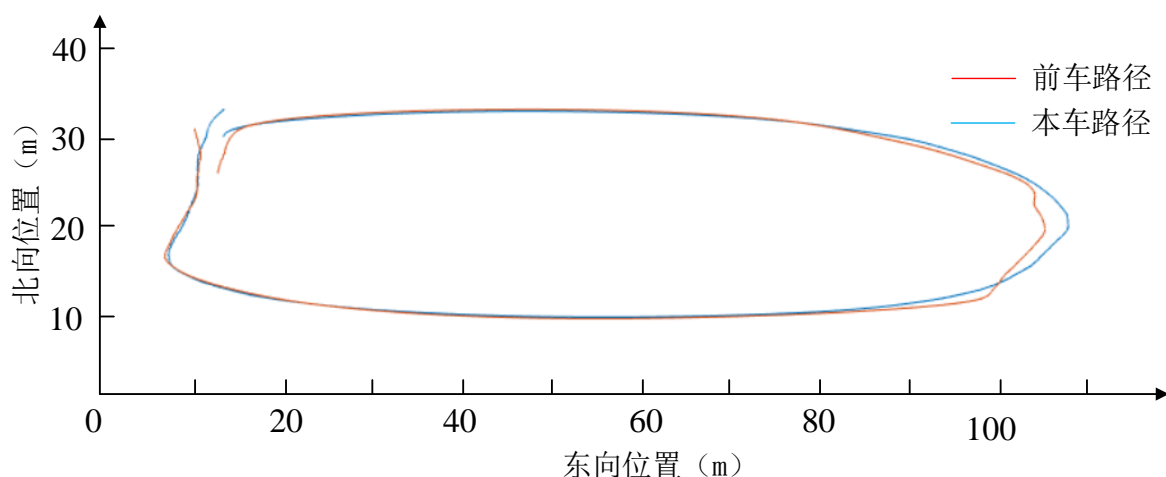


图 5.12 环形道路场景下路径规划试验结果

从图 5.12 中可以看出，前后两车在较直的道路行驶时，前后两车的行驶轨迹保持着较高的一致性，两车轨迹横向误差基本维持在 0.5m 之内，具有很高的重合度。在 U 型转弯过程中，由红色曲线可以看出，前车出现明显的定位误差，前车路径出现不合理的弯折，后车依然能够规划出一条平滑的路径对前车位置做出跟踪。由此可以验证本课题的路径规划算法能够有效跟踪前车位置的前提下规划出一条期望路径。

(2) S 型弯道下路径规划试验

S 型弯试验的试验环境如图 5.13 所示。使用三排锥桶构建道路中的 S 型弯道，弯道的尺寸参数如图 5.14(a)所示。试验中，初始时刻，两车停在同一直线上，初始车间距为 25~30 米，前车辆以 3m/s 的速度行驶通过 S 型弯道，本车跟随前车通过三排锥桶。实时记录保存编队车辆的位置信息，两车的行驶路径如图 5.14(b)所示，红色曲线表示前车轨迹，蓝色曲线表示本车轨迹。



图 5.13 S 型弯道试验场景

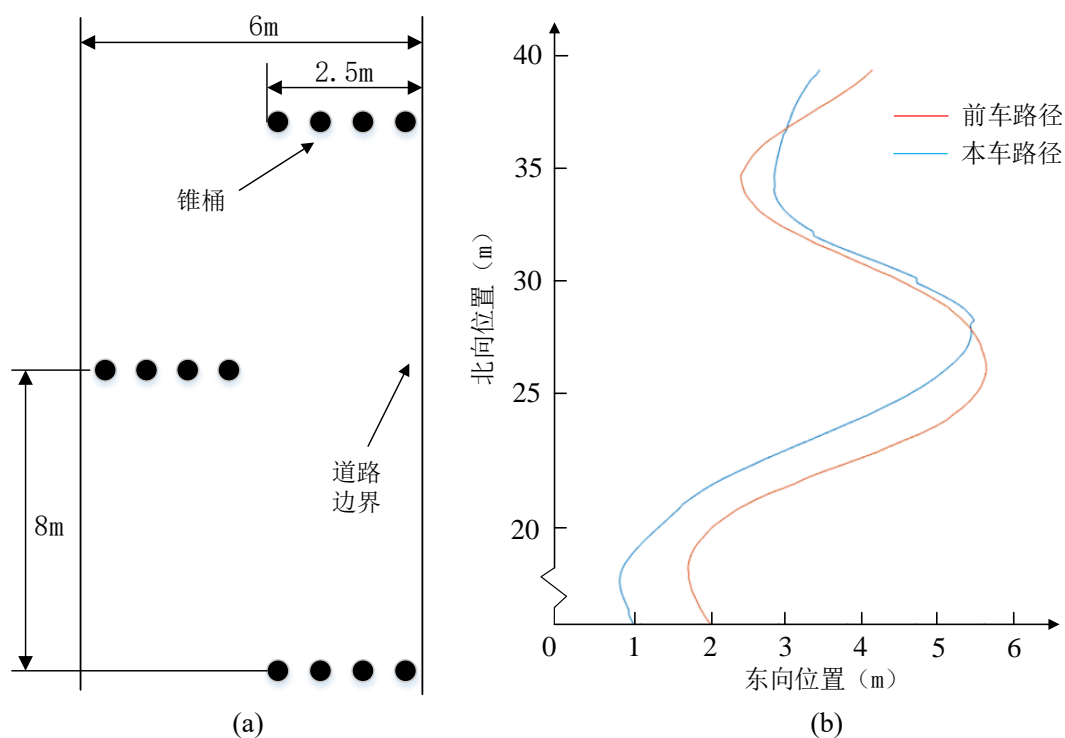


图 5.14 S 型弯道参数和路径规划试验结果

图 5.14 所示的 S 型弯道在自动驾驶车辆看来属于典型的复杂环境。由图 5.14(a)所示的 S 弯尺寸参数可知，相较于试验车辆平台的车身尺寸，道路宽度并不宽敞。从图 5.14(b) 所示的路径规划结果可以看出，本车能够根据前车历史路径和实际环境中的障碍物信息，实时规划出一条能够跟踪前车位置的无碰撞期望路径，并且期望路径与前车历史路径的横向偏车能够控制在 1m 以内。由此能够证明，本课题的路径规划程序能够有效跟踪前车位置并实现避障功能。

5.3 本章小结

本章分别通过仿真平台和实车平台对本课题中所提出的编队控制方法进行了验证。通过仿真试验可以看出，在越野环境中，利用本课题提出的编队控制方法，跟随车辆能够较为准确跟踪前车位置并实现避障功能。在自由道路上，前后两车轨迹的横向偏差基本在 0.2m 左右；当期望车间距设置为 10m 时，编队车辆能够以最快 14m/s 的速度变速行驶，前后两车实际车间距控制在 8~12m 之间。实车试验结果表明，在本课题面向的越野环境下，本课题提出的编队控制方法能够使跟随车辆较为准确跟踪前车位置并实现避障，在自由道路上两车轨迹的横向偏差不大于 0.5m。并且本车能够与前方车辆保持 24 ~ 31m 的车间距行驶，最快速度达到 20km/h。

结论

本文的研究重点为越野环境下智能车辆编队行驶的路径规划与纵向车间距控制。针对越野环境下道路形状复杂多变，道路边界不明显的特点，本文以前车历史轨迹为参考轨迹，采用横向偏移采样与最优控制的路径生成算法来生成一条从本车出发指向前车的无碰撞路径，该路径满足自身车辆的运动学约束和动力学约束，并且连续平滑可跟踪。越野环境地形比较复杂多变，可能存在不同路面条件的道路，例如土路、石子路、水体和凹凸障碍等。本文基于模型预测控制的车间距控制方法还需要考虑编队车辆的动力学特性，其中包括编队车辆的加速能力，最大速度和制动能力等，本文对设计的车间距控制器进行了稳定性分析和证明。最后本文通过仿真试验验证了所提出算法的有效性，最后又通过实车试验验证了所提出的算法的可行性、有效性和鲁棒性。

研究成果总结

1) 通过选择基于优化的车间距控制方法，将多车编队系统简化为基于相邻两车之间的编队系统，进而设计了智能车辆编队行驶的整体框架结构。综合利用前车的实时状态信息与历史状态信息，将智能车辆的编队控制问题转化为编队车辆路径规划问题和纵向车间距控制问题，并搭建了基于车间通信的智能车辆编队实车试验平台。

2) 提出了基于前车行驶轨迹并结合了横向偏移采样和优化理论的路径生成方法，从而达到编队车辆能够躲避障碍物的同时实现“不跟丢”前车的目的。解决了无车道线和无明显环境约束下，编队车辆行驶时的横向约束问题。基于前方车辆的历史路径进行平移生成粗糙的候选路径集，在通过凸优化将其变为车辆可跟踪的最终候选路径集，根据成本函数选择最优的路径作为期望路径，从而实现了对前方车辆位置的准确跟踪。

3) 提出了基于模型预测的多模式纵向车间距控制方法，能够实现编队车辆之间维持某个车间距策略行驶，同时保证不会与前车发生碰撞。在实车试验中，实现了在越野环境下，以 30m 的期望车间距，最快 20km/h 的速度编队行驶。

本文创新点

1) 在编队车辆的路径规划中，以前车历史轨迹为参考轨迹，采用横向偏移采样与最优控制的路径生成算法来计算得到车辆的期望路径。在越野环境中，传统的路径规

划方法可能对复杂多变的越野环境较为敏感，导致车辆行驶不稳定。本文有效利用前车的历史轨迹信息，能够保证编队车辆在复杂多变的越野环境中，期望路径不会出现频繁跳变，从而保证编队车辆行驶的稳定性的；采用横向偏移采样与最优控制结合的方法可以最高效率的在越野环境中实现实时的避障功能。

2) 充分考虑了无人平台的加减速能力，速度极限性能和越野环境下的通过性，使得纵向车间距控制器更具鲁棒性和对平台特性的适应能力。采用了虚拟前车的概念，并给出了虚拟前车初始位置的计算公式。虚拟前车的提出，拓宽了车间距控制器的应用场景，也提高了车间距控制方法的鲁棒性。

未来研究工作展望

1) 本课题中编队车辆之间是通过无线通信的方式共享彼此的行车数据，在越野环境下，数据丢帧的情况仍然不可避免的出现。以后可以尝试通过多传感器融合的方式获取领航车辆状态信息。

2) 本课题的试验是在一台混合电驱动的履带平台上开展的，由于是电机直接驱动，所以车辆响应非常快，可以满足控制精度。但是对于轮式发动机驱动车辆来说，还需要对车辆执行机构系统制作更深的了解，需要对车辆转向机构、油门踏板以及制动系统做进一步的建模与辨识，从而实现精确的车辆控制。

参考文献

- [1] 陈慧岩, 张玉. 军用地面无人机动平台技术发展综述[J]. 兵工学报, 2014, 35(10):1696-1706.
- [2] Chan E, Gilhead P, Jelinek P, et al. Cooperative Control of SARTRE Automated Platoon Vehicles[C]. 19th ITS World Congress, 2012:1-14.
- [3] Marjovi A, Vasic M, Lemaitre J, et al. Distributed Graph-based Convoy Control for Networked Intelligent Vehicles[C], Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2015:138-143.
- [4] Broughton J, Walter L. Trends in Fatal Car Accidents: Analyses of CCIS Data[J]. Published Project Report Ppr, 2007.
- [5] Lorigo L M, Brooks R A, Grimsou W E L. Visually-guided Obstacle Avoidance in Unstructured Environments[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems. 1997:373-379.
- [6] OSKOSH. Unmanned Ground Vehicle Technology TerraMax [EB/OL]. (2013-02-11)[2019-04-25] <http://oshkoshdefense.com/technology-1/unmanned-ground-vehicle/>.
- [7] Broggi A, Cappalunga A, Caraffi C, et al. The Passive Sensing Suite of The TerraMax Autonomous Vehicle[C]. Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2008:769-774.
- [8] Braid D, Broggi A, Schmiedel G. The TerraMax autonomous vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2007:23(9):693-708.
- [9] U. Ozguner, K. A. Redmill, and A. Broggi, Team TerraMax and the DARPA Grand Challenge: A General Overview[C]. Intelligent Vehicles Symposium, 2004:232-237.
- [10] LOCKHEED MARTIN. U.S. Army and Lockheed Martin Complete Second Series of Advanced Autonomous Convoy Demonstrations[EB/OL]. (2017-05-25)[2019-04-25] <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2014/june/mfc-061014-us-army-lockheedmartin-complete-second-series-advanced-autonomous-convoy-demonstrations.html>.
- [11] The Shephard News Team. EDA's Hy-MUP Project Complete[EB/OL]. (2017-02-08)[2019-04-25]<https://www.shephardmedia.com/news/uv-online/eda-completes-hy-mup-project/>.
- [12] Deng, Qichen. Heavy-Duty Vehicle Platooning: Modeling and Analysis[D]. Kungliga Tekniska Hogskolan, 2016.
- [13] Chang K S, Li W, Devlin P, et al. Experimentation With A Vehicle Platoon Control System[C]. Vehicle Navigation and Information Systems Conference. 1991:1117-1124.
- [14] Zabat M, Stabile N, Farascaroli S, et al. The Aerodynamic Performance Of Platoons: A Final

- Report[C], Institute of Transportation Studies, UC Berkeley, 1995.
- [15] Robinson T, Coelingh E. Operating Platoons On Public Motorways: An Introduction To The SARTRE Platooning Programme[J]. 2010.
- [16] Chan , Eric. SARTRE Automated Platooning Vehicles[M]. Towards Innovative Freight and Logistics. 2016.
- [17] Eilers S, Martensson J, Pettersson H, et al. COMPANION -- Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles[C]. International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015:1267-1273.
- [18] GCDC. GCDC 2016 Looks Back on A Successful Event[EB/OL]. (2017-05-25) [2019-04-25] <http://www.gcdc.net/en/>.
- [19] Tsugawa S. An Overview on an Automated Truck Platoon within the Energy ITS Project[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2013, 46(21):41-46.
- [20] Yoshida J, Sugimachi T, Fukao T. Autonomous Driving of a Truck Based on Path Following Control[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2011, 77(783):4125-4135.
- [21] Fukao T. Preceding Vehicle Following Based on Path Following Control for Platooning[C]. Advances in Automotive Control. 2013:47-51.
- [22] Sugimachi T, Fukao T, Yoshida J, et al. Autonomous Driving Based on LQ Path Following Control and Platooning with Front and Rear Information[C]. 17th ITS World Congress. 2010.
- [23] Sugimachi T. Development of Autonomous Platooning System for Heavy-Duty Trucks[C]. Advances in Automotive Control. 2013:52-57.
- [24] Christophe Bonnet and Hans Fritz. Fuel Consumption Reduction Experienced by Two Promote-chauffeur Trucks in Electronic Tow Bar Operation. In World Congress on IST Systems, Torino, Italy, 2000.
- [25] 龚齐飞. 多车编队无人驾驶系统获百万风投有助缓解城市拥堵[EB/OL]. (2016-11-28) [2017-05-25]<http://hb.qq.com/a/20161128/014198.htm>.
- [26] 张蕊, 严新平, 吴超仲. 车路协同环境下车辆自适应巡航控制研究[A]. 中国智能交通协会. 第六届中国智能交通年会暨第七届国际节能与新能源汽车创新发展论坛优秀论文集 (上册) ——智能交通[C]. 北京: 中国智能交通协会, 2011:182-191.
- [27] 张威. 面向编队行驶的车距辅助控制系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.
- [28] 朱敏. 智能车辆纵向速度跟踪与控制方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

- [29] 任殿波, 张京明, 崔胜民, 张继业. 基于向量 Lyapunov 函数方法的顾前顾后型车辆跟随控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010,(06):2195-2200.
- [30] 施继忠. 随机车辆纵向跟随系统的稳定性分析与控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [31] 韩璐. 基于鲁棒自适应控制的车辆领航编队控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [32] 李明喜, 章永进, 彭永胜, 徐友春. 车间运动学模型在智能车速度跟踪控制中的应用[J]. 军事交通学院学报, 2015,(11):49-53.
- [33] 张晓媚, 陈伟海, 刘敬猛, 赵志文. 基于柔性曲杆的车辆跟踪算法设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2011,(07):789-794.
- [34] 王建都, 张俊乐. 前后车辆最优速度差跟驰模型与数值仿真[J]. 计算机工程与应用, 2016,(01):250-253.
- [35] 赵明, 林茂松, 黄玉清. 基于动态 Φ 值的领航跟随法多机器人编队控制[J]. 西南科技大学学报, 2013,(04):57-61.
- [36] 郑新娟. 多机器人路径规划与协同编队研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [37] Pham H. Development and Implementation of a Trajectory Planner and a Tracking Controller for an Autonomous Vehicle[D]. Singapore: School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, 2001.
- [38] 张晓媚, 陈伟海, 刘敬猛, 赵志文. 基于柔性曲杆的车辆跟踪算法设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2011,(07):789-794.
- [39] 戴冠雄, 陈伟海, 吕章刚, 王迪臻, 赵志文. 改进的车辆跟踪虚杆模型算法及仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013,(11):1391-1396.
- [40] 付帅, 刘淑华, 张之雅, 程宇. 基于改进人工协调场的多机器人运动编队[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2010,(02):153-157.
- [41] 于振中, 闫继宏, 赵杰, 陈志峰, 朱延河. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011,(01):50-55.
- [42] 杨帆, 刘士荣, 董德国. 编队控制中的机器人行为与基于服务的运动行为结构设计[J]. 机器人, 2012, 34(1):120-128.
- [43] 徐威, 刘凯, 孙银健, 等. 开放式模块化的无人平台体系结构[J]. 计算机应用, 2014(s1):301-305.
- [44] Pan J, Zhang L, Manocha D, et al. Collision-free and Curvature-continuous Path Smoothing in Cluttered Environments [J]. Robotics: Science and Systems VII, 2012, 17: 233.
- [45] Elbanhawi M, Simic M, Jazar R. Randomized Bidirectional B-spline Parameterization Motion Plan-

- ning [J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2016, 17(2): 406–419.
- [46] Yang K, Sukkarieh S. An Analytical Continuous-curvature Path-smoothing Algorithm [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26 (3): 561–568.
- [47] Han L, Yashiro H, Nejad H T N, et al. Bezier Curve Based Path Planning for Autonomous Vehicle in Urban Environment [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010: 1036–1042.
- [48] Ziegler J, Bender P, Dang T, et al. Trajectory Planning for Bertha – A local, Continuous Method [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2014: 450–457.
- [49] Funke J, Gerdes J C. Simple Clothoid Paths for Autonomous Vehicle Lane Changes at The Limits of Handling [C]. Dynamic Systems and Control Conference, 2013.
- [50] Knowles D. Real Time Continuous Curvature Path Planner for An Autonomous Vehicle in an Urban Environment [J]. California Institute of Technology, Tech. Rep, 2006.
- [51] Gim S, Adouane L, Lee S, et al. Clothoids Composition Method for Smooth Path Generation of Car-Like Vehicle Navigation [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017: 1–18.
- [52] Piazzzi A, Bianco C G L. Quintic G2-splines for Trajectory Planning of Autonomous Vehicles [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000: 198–203.
- [53] Lee J-W, Litkouhi B. A Unified Framework of The Automated Lane Centering/Changing Control for Motion Smoothness Adaptation [C]. IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012: 282–287.
- [54] Matthew M. Parallel algorithms for Real-time Motion Planning [D]. Pittsburgh, Carnegie Mellon University, 2011.
- [55] Kelly A, Nagy B. Reactive Nonholonomic Trajectory Generation via Parametric Optimal Control [J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22 (7-8): 583–601.
- [56] Patrikalakis N M, Maekawa T. Shape Interrogation for Computer Aided Design and Manufacturing (Mathematics and Visualization) [M]. Springer Science & Business Media, 2002.
- [57] Farouki R T, Sakkalis T. Real Rational Curves Are Not ‘Unit Speed’ [J]. Computer Aided Geometric Design, 1991, 8(2):151–157.
- [58] Piegl L, Tiller W. The NURBS Book [M]. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1997.
- [59] Horn B K P. The Curve of Least Energy [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1983, 9(4): 441–460.

- [60] Mathews J H. Numerical Methods for Mathematics, Science, and Engineering [M]. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1992.
- [61] 何潇. 自动驾驶车辆动态城市道路工况跟驰方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [62] 高振海, 严伟, 李红建, 王大志, 王林. 汽车自适应巡航线性参变间距控制算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016,(04):1023-1029.
- [63] Li S E, Zheng Y, Li K, et al. Scalability Limitation of Homogeneous Vehicular Platoon Under Undirected Information Flow Topology and Constant Spacing Policy[C]. Chinese Control Conference. 2015:8039-8045.
- [64] Swaroop D, Hedrick J K. Constant Spacing Strategies for Platooning in Automated Highway Systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1999, 121(3):462-470.
- [65] Xiao L, Gao F. A Comprehensive Review of The Development of Adaptive Cruise Control Systems[J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2010, 48(10):1167-1192.
- [66] Schweizer J. Non-linear Feedback Control for Short Time Headways Based on Constant-safety Vehicle-spacing[M]. 2004.
- [67] Li P, Alvarez L, Horowitz R. AHS Safe Control Laws for Platoon Leaders[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1996, 5(6):614-628.
- [68] 徐祖华. 模型预测控制理论及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [69] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3):222-236.
- [70] LIS, LIK, RAJAMANIR, et al. Model Predictive Multi-objective Vehicular Adaptive Cruise Control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 19(3): 556-566, 2011.
- [71] GARCIA C, PRETT D. Model predictive control: Theory and practice-A Survey [J]. Automation, 1989, 25(3): 335-348.
- [72] E. Rohmer, S. P. N. Singh, M. Freese. V-REP: A Versatile and Scalable Robot Simulation Framework[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 2013:1321-1326.
- [73] 李晓芸. 考虑避撞的多智能车平台动态路径跟踪控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [74] 郭孔辉. 非结构化环境下智能车辆自主跟随前车控制方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.

攻读学位期间发表论文与研究成果清单

■ 发表的学术论文：

- [1] **Yongqiang Ding**, Huiyan Chen, Jianwei Gong, Gang Wang. Model Predictive Enhanced Adaptive Cruise Control for Multiple Driving Situations [C]. In IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV), 2018, Changshu,: 1717-1722. (Accepted, Ei Compendex).

■ 获奖情况：

2018.04：获第 15 届“世纪杯”学生课外学术科技作品竞赛三等奖（北京理工大学，第一作者）

■ 参与的课题项目：

- [1] 2016.7-2016.9：“跨越险阻 2016—地面无系统挑战赛”参赛，负责参赛车辆维护与调试记录；
- [2] 2016.12-2017.11：参与实验室与华为公司共同开展的“基于车联网与传感器融合的自动驾驶技术应用”的前期项目论证和讨论，后期相关算法和程序开发及测试工作，最后参与了技术报告的撰写相应工作。
- [3] 2017.2-2017.9：为华晨汽车、奇瑞前沿技术研究院和华为公司做了自动驾驶车辆路径规划算法方面的报告与交流；
- [4] 2018.5-2018.9：“跨越险阻 2018—地面无系统挑战赛”B 组比赛备赛，负责编队系统的平台设计与搭建，算法开发与测试；

致谢

这篇论文及课题的相关工作是在我的导师陈慧岩教授的悉心指导下完成的。三年间，陈老师在繁忙的工作之际，为我倾注了大量心血与时间。尤其在本课题的研究中，陈老师从最开始选题时为我提供建议，到课题开展过程对我遇到的各种问题的解答都使我受益匪浅。在课题进行试验的过程中，陈老师大力支持，积极协调实验室试验车辆，寻找试验场地。论文撰写完成后，陈老师在百忙之中抽出时间亲自多次修改，着实令我感动。他勤奋踏实的工作态度以及严谨的治学态度给了我极大的影响。硕士期间，我在专业知识和工程实践方面都得到了巨大的提高，也在做人做事方面变得更加成熟严谨。这是离不开陈老师的指导和帮助的。在此，我衷心的向陈老师致以崇高的敬意和诚挚的感谢。

在开展课题研究的过程中，我也得到了龚建伟老师和熊光明老师的大力支持与帮助。龚老师学识渊博、幽默风趣，开阔的学术视野和前瞻性的理念总能让我受益匪浅。熊老师平易近人、他勤奋踏实的工作作风以及吃苦耐劳的精神深深的影响了我。在此，我也向两位老师表示由衷的谢意。

在平日的学习科研过程中，我还得到了许多同学的帮助。感谢鲁浩、郭孔辉、谢兼明、王威、张玉和刘凯几位师兄在我学习过程中提供的大力帮助，感谢王超、杨天、王超然几位师弟在我试验过程中的辛勤工作，感谢和我一起参与试验室项目共同学习的杨磊、季开进、霍钊、孙兆亮、丁泽亮等同学。此外还要感谢试验室的工程师于林、董佳杰、刘晓刚、王跃等在我平时科研工作以及课题开展中的积极配合和无私帮助。

感谢我的室友丁晓林、陈虹百和程向群三年来共同生活中给予我的帮助和鼓励。

感谢我的父亲母亲对我的无私支持与鼓励，你们的信任和关爱是我人生路上不断前行的力量源泉！

最后，感谢于百忙之中评阅本文并提出宝贵意见的各位专家学者。

丁勇强

2019年5月于北京理工大学