

分类号: TP273
研究生学号: 2018524051

单位代码: 10183
密 级: 公 开



吉 林 大 学

硕士学位论文

(专业学位)

纵向行驶的车辆队列系统分布式预测控制策略

Distributed model predictive control of longitudinal driving
vehicle platoon

作者姓名: 陈浩

类 别: 工程硕士

领域(方向): 控制工程

指导教师: 于树友 教授

培养单位: 通信工程学院

2021 年 6 月

纵向行驶的车辆队列系统分布式预测控制策略

Distributed model predictive control of longitudinal
driving vehicle platoon

作者姓名：陈浩

领域（方向）：控制工程

指导教师：于树友 教授

类别：工程硕士

答辩日期：2021年5月29日

吉林大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：陈浩

日期：2021年5月29日

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林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、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别： 硕士 博士

学科专业： 控制工程

论文题目： 纵向行驶的车辆队列系统分布式预测控制策略

作者签名： 陈浩

指导教师签名：

于树友

2021年5月29日

作者联系地址（邮编）： 吉林省长春市南关区人民大街5988号
(130022)

作者联系电话： 15688959189

摘要

车辆编队技术是智能网联车辆协同控制的关键技术，可以有效地降低因为疲劳驾驶、驾驶员误操作等人为因素导致的交通事故；另外车辆编队技术通过减小车间距离，降低了队列高速行驶时的空气阻力，进而可有效减少燃油消耗和尾气排放。考虑到车辆队列纵向行驶过程的安全性、一致性和乘坐舒适性等条件，传统的控制算法往往难以达到车辆编队系统的要求。所以，本文采用能够有效的处理多目标与系统约束的模型预测控制方法，对纵向行驶车辆编队系统进行仿真实验来验证所设计的控制器的有效性。

本文首先对车辆的纵向动力学进行简化，随后根据纵向跟车运动学模型，建立车辆队列的状态空间模型，采用分层控制方案来实现编队控制。上层采用模型预测控制求解出期望加速度，下层采用前馈加反馈的控制方法，跟踪上层控制器给定的期望加速度。

然后，基于分布式模型预测控制原理，将车辆编队的优化问题转化为带约束的二次规划问题，将安全性、乘坐舒适性等性能问题转化为约束；并设计了基于纳什迭代的分布式模型预测控制器，利用多次迭代与通信，使整个车辆队列达到纳什均衡。

最后，为了解决多次通信与迭代所带来的巨大的通信与计算负担，以及车辆编队的串稳定性问题。采用“虚拟”状态轨迹来替换多次通信，同时在优化问题中加入保证串稳定性的约束，使得车辆队列在出现瞬态误差的情况下，可以保证车间距误差并不会随着车辆队列的传播而增大，并从理论上进行了证明。最后通过Carsim/MATLAB联合仿真，验证所设计的分布式模型预测控制算法的有效性。

关键词：

纵向车速控制，车辆编队，分布式模型预测控制，纳什最优，串稳定性

Abstract

Vehicle platoon technology is the key technology of intelligent networked vehicle cooperative control, which can effectively reduce the traffic accidents caused by human factors such as fatigue driving. In addition, the platoon technology can effectively reduce the distance between the vehicles and reduce the air resistance when the platoon drive at high speed, thus reducing the fuel consumption and exhaust emissions. Considering the safety, consistency and ride comfort of longitudinal vehicle platoon, traditional control algorithms are difficult to meet the requirements of vehicle platoon system. Therefore, this paper adopts the model predictive control method which can effectively deal with multi-objective and system constraints, and carries out simulation experiments on the longitudinal driving vehicle platoon system to verify the effectiveness of the algorithm.

In this paper, the longitudinal dynamics of vehicles is firstly simplified, and then the state-space model of vehicle platoon is established according to the longitudinal kinematics model of vehicle, and the layered control scheme is adopted to realize platoon control. The upper layer uses the model predictive control to solve the expected acceleration, and the lower layer uses the feed-forward and feedback control method to track the expected acceleration given by the upper controller.

Then, based on the principle of distributed model predictive control, the optimization problem of vehicle platoon is transformed into a quadratic programming problem with constraints, and the performance problems such as safety and ride comfort are transformed into constraints. A distributed model prediction controller based on Nash iteration is designed, which makes the whole vehicle platoon reach Nash equilibrium by multiple iterations and communication.

Finally, the huge communication and calculation burden caused by multiple communication and iteration, as well as the string stability of vehicle platoon are solved. The "virtual" state trajectory is used to replace the multiple communication, and the constraint of ensuring the string stability is added into the optimization problem, so that when the vehicle platoon appears transient error, the workshop distance error will not increase with the propagation of the vehicle platoon, which is proved theoretically. The effectiveness of the proposed distributed model predictive control algorithm is verified by the Carsim/Matlab co-simulation.

Key Words:

Longitudinal Speed Control, Vehicle Platoon, Distributed Model Predictive Control,
Nash Optimum, String Stability

目 录

第1章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 车辆编队技术发展现状	2
1.3 本论文的研究重点和方向	7
1.4 本文的主要研究内容和结构安排	7
第2章 车辆队列系统的建模与分析	9
2.1 引言	9
2.2 单车动力学分析	9
2.3 车辆队列建模	11
2.3.1 通信拓扑结构	11
2.3.2 车辆队列模型	13
2.4 车辆编队整体控制方案	15
2.5 下位控制设计方案	16
2.5.1 Carsim仿真软件	16
2.5.2 车辆逆向动力学	18
2.6 本章小结	20
第3章 基于纳什最优的分布式算法设计	21
3.1 引言	21
3.2 模型预测控制的分析	21
3.2.1 模型预测控制的基本原理	21
3.2.2 状态空间模型预测算法	22
3.2.3 分布式模型预测控制	23
3.3 车辆编队控制器设计	24
3.3.1 车辆编队的控制目标及约束条件	25
3.3.2 优化问题的数学表达	26
3.3.3 基于迭代的纳什最优	27
3.4 仿真结果及分析	28
3.5 本章小结	31

第4章	保证串稳定性的分布式预测控制算法	33
4.1	车辆队列系统描述及串稳定性定义.....	33
4.1.1	车队系统描述.....	33
4.1.2	车辆队列的串稳定性.....	34
4.2	保证串稳定性的分布式预测控制器设计.....	34
4.2.1	编队优化问题.....	35
4.2.2	控制算法.....	37
4.2.3	串稳定性证明.....	38
4.3	算法的MATLAB仿真及分析.....	40
4.4	Carsim与MATLAB联合仿真实验.....	43
4.5	本章小结.....	47
第5章	全文总结与展望	49
5.1	全文总结.....	49
5.2	未来工作展望.....	49
	参考文献	51
	作者简介及研究成果	59
	致谢	61

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着人工智能技术的日益成熟，其在汽车领域方面的应用也受到了愈来愈多的关注，智能车的发展也已经受到了各国政府工业和汽车厂商的重点关心，所以，各国均制定明确的智能网联汽车发展战略规划，在《中国制造2025》中明确指出汽车产业应当发展智能网联车、美国交通部于2015年发布的《美国智能交通系统战略规划》中详细制定智能网联汽车的发展规划、日本提出将于2030年实现完全自动驾驶汽车的目标。

车辆作为货物及生鲜等商品主要的运输工具之一，对保障人们的生产、生活具有至关重要的作用，虽然车辆运输为人们生活带来了巨大的便利，但是车辆行驶过程中的安全问题，环境污染问题需要人们着重关注。智能网联车辆编队技术对于提高车辆的行驶安全性、节约能源及降低排放具有重大的社会和经济价值。车辆编队技术可以显著降低驾驶员的劳动强度，避免由于驾驶员误操作或违规操作导致的交通事故(大约84%的交通事故是由驾驶员引起)，甚至跟随车可以不需要配备驾驶员，极大的提高车队的行驶安全性，同时降低了人工成本。另外，车辆编队技术可有效减小车间距离，跟随车在领航车的屏障作用下进入尾流区，降低了队列高速行驶时的空气阻力，进而可减少燃油消耗和尾气排放。因此，在现有汽车智能化和网联化技术的基础上，研究多车编队技术具有广阔的市场前景和重大的实际工程意义。

以自动化、信息化为基础的智能网联技术给车辆编队控制带来了新的机遇。在自动化层面，线控转向、制动及驱动控制系统的飞速发展，为车辆纵向控制提供了前提基础；强化学习/深度学习等智能控制方法为复杂系统的建模与优化带来了全新的解决思路；滚动时域优化等优化控制方法可以有效解决带有约束的非线性多目标优化问题，为实现安全性约束下的编队控制算法的开发提供了解决方案，同时面向并行计算的控制系统硬件的飞速发展，使得非线性滚动时域优化控制的车载嵌入式系统实时求解成为可能。

目前，已有公司将模型预测控制方法成功应用于涡轮增压汽油发动机控制中并进行量产。因此，基于线控技术和智能控制方法，借助滚动时域优化的思想，为实现基于未来交通状态预测的车辆编队控制带来了新的机遇。在信息化层面，通信技

术的迅猛发展，5G的网络环境，毫秒级的传输延时、10-20Gbit/s的峰值速率、100万个/km的连接数密度，能够满足自动驾驶和V2X的严格通信要求。除此之外，云预测、云计算等新技术的发展和应用，也必将为智能网联车辆编队控制的发展保驾护航。智能网联编队控制由于融合了先进的自动化技术和高效的通信技术，具有极大的节能、安全、高效的潜力，成为全球汽车产业的研究发展方向和学术研究的热点。

本课题的目的在于研究车辆编队控制技术，结合车辆模型，以及车辆之间通信结构对整个车队系统进行分析建模，然后利用分布式控制方法对编队控制问题进行研究。

1.2 车辆编队技术发展现状

目前智能车通过控制技术已经能够在一定程度上实现编队行驶，但是难以适应复杂多变的实际交通环境。随着电子信息、通讯技术、以及智能控制算法的成熟及在车联网中的应用，车辆之间可以利用无线通信技术将各个成员车之间相互联系起来，由于获得了其他成员车的探测信息，使得每个车辆的环境感知能力有所提升，可以达到更加理想的控制效果，为此各国都已展开了对车辆编队控制的研究。

欧洲各国从安全环保的角度出发，通过互相的交流学习，已经进行许多关于车辆编队控制的研究。

欧洲于2009年，4个国家的7个公司联合开展了SARTRE项目^[1]，以安全节能为主要的目标，从车辆队列本身展开研究，利用车间通信设备、短程通信技术和车内传感(毫米波雷达，360度摄像头等)，来获取车辆信息和环境信息，来实现更加精准的车辆编队控制。同时该项目还从商业角度对车辆编队技术进行分析，试图使所有编队的参与者(后台服务和驾驶者)同时获益，推动整个行业的发展。于2012年5月，该项目完成了研究结果的公开展示^[2, 3]，实现了在公路上的五辆异质车的(卡车和轿车)编队控制，并且每辆车还配备了人机交互界面，车内人员可以查看车队的状态。该项目核心思路是沿用ACC(自适应巡航)的控制方法，实现车辆编队行驶。公开展示包含了车速的自适应跟驰，整个车队的拆分和组合，驾驶员对驾驶的干预，以及其余车辆的汇入-汇出，并且保证了横向控制的精度不超过0.5米^[4]。

于2010年开始，由瑞典斯堪尼亚汽车公司开展了SCANIA-PLATOON项目，将研究目光锁定在了重型卡车的编队控制上。主要解决卡车的燃油消耗问题^[5]，该项目利用无线通信和传感获得车队其他成员车的状态信息，从单车控制的角度对车队的安全和节能进行研究。但是该项目的研究重点集中在车队的纵向控制上，利用分布式控制做到车队节能消耗的效果^[6]。

日本为了解决汽车行驶在交叉路口和视觉盲区所遇到的问题困难，于2008年开展了Energy ITS项目^[7]，期望通过研发智能交通技术来填补驾驶员自身驾驶经验和驾驶技术的不足。并以此来减少汽车能源消耗和温室气体的排放。该项目对智能驾驶进行了分类：1) 无人驾驶，主要通过自主传感器感知环境和周围车辆，来实现自动控制。2) 协同驾驶，利用无线通信将人、车、环境协同起来，增大自身车辆的感知范围，为进行更好的控制效果做铺垫。该项目已经实现了三辆商用车在80km/h的车速以10m的车间距编队行驶，采用了毫米波雷达和激光雷达共同感知，并结合短程通信技术(DSRC)来进行车间信息的传递，该项目的研究表明采用协同编队行驶可以节约百分之十五的能源消耗，并且可以减少百分之二点一的二氧化碳排放量。同时该项目也考虑了横向控制，具体算法在文献[8]和[9]中给出。

美国从安全的角度出发，意于改善交通流量，于1997年便开展了PATH项目^[10]，从车辆横纵向控制入手，对车辆的纵横向进行了建模。随后又进行了更为详细的研究，于2004年进行了实车试验，如果可以将车间距控制在3m到4m，领航车将可以节省百分之五的能源消耗，其余车辆则可以节省百分之十至百分之十五的能源消耗^[11]，该项目的研究结果证明了研究编队行驶的重大意义。

国内对编队控制的起步较晚，只有一些高校和科研机构对车辆编队的研究较为深入，如清华大学、北京理工大学、上海交通大学、吉林大学以及一汽，东风等企业的研发部门，但是对车辆编队控制也做出了不小的贡献。国内一般将车辆编队控制分为四部分进行展开，分别是车辆动力学、队列几何构型、分布式控制律和通信拓扑结构^[12]。

1. 车辆动力学

车辆动力学建模是车辆队列协同控制器设计与分析的基础。现有文献在设计车辆队列协同控制器时，不考虑车辆系统自身的动力学特征，将车辆视为质点。在纵向控制研究中，文献[13]利用位移和速度表达车辆系统，并考虑通信延迟建立了基于资源效率的协同自适应巡航控制车辆系统模型，仿真结果表明，建立面向协同自适应巡航控制系统的模型是可行的，该方案不仅节省了车辆间的通信资源，而且保证了系统性能的稳定。文献[14]增加车辆的加速度作为车辆系统的状态，但是忽略了车辆自身的纵向动力学特征，通过系统模型证明了线性级联系统的稳定条件，并对理论结果进行了实验验证。文献[15]针对智能车辆队列控制问题，建立了整车纵向动力学模型，并证明了该系统模型可减轻空气阻力和滚动阻力对纵向控制的影响。在纵横向协同控制方面，文献[16]在转弯工况下对车辆建立了纵横耦合的车队控制模型，并对耦合特征进行了线性化，虽然验证了控制律的有效性和稳定性，但仅能表达部分纵横耦合特征。现有的研究多是分别建立纵向与侧向的控制模型，控制器的设计多针对位置及速度的运动学

关系、通信延迟及互联拓扑结构。

2. 车辆编队结构

车辆队列的拓扑结构决定了车辆队列的通信结构，主要有恒定距离和恒定时距两种。随着短程通信等技术的发展，V2V通信为分布式队列控制提供了便捷条件^[17]，减轻所需的通信负担，对于分布式控制方法，利用通信车辆的状态量信息来计算自身的控制量信息。通信拓扑代表了整个车队的信息流通方式，对于相互通信的车辆，利用通信车辆的信息来扩大自身车辆的感知环境。不同的通信拓扑对于整个车队所产生的效果也不尽相同。典型的通信拓扑结构主要包括前车-跟随拓扑(Predecessor-following topology, PF topology)、前车-领航者-跟随拓扑(Predecessor-leader following topology, PLF topology)、双向拓扑(Bidirectional topology, BD topology)、双向-领航者拓扑(Bidirectional-leader following topology, BDLF topology)、两前车-跟随拓扑(Two-predecessors following topology, TPF topology)以及两前车-领航者-跟随拓扑(Two-predecessors-leader following topology, TPLF topology)等。对于双向拓扑结构，相邻车辆的信息流通是相互的，即都可以获得对方的状态信息，而基于双向-领航者拓扑结构，整个车辆队列中每辆车不仅可以获得前车与后车的状态信息，同时还与领航车有着信息交互。文献[18]针对双向拓扑结构，考虑对于一个车辆队列，运用耦合滑模控制方法对其进行控制，通过使用这种控制方法使得整个车辆队列的稳定性有所提升。文献[19]针对前车-跟随、两前车-跟随拓扑等通信拓扑结构，考虑到拓扑存在实数或复数特征值的情况，得到了车辆队列鲁棒稳定性的充分条件。但是，由于双向拓扑结构对于整个车队的长度有所要求。而在前车-跟随通信拓扑结构下，车队中的车辆只能获取到前车的状态信息，而基于前车-领航者-跟随通信拓扑结构，车队中的车辆不仅可以得到前车的信息还可以获得领航车所传递出来的信息。

文献[20]针对三种典型的通信拓扑(前车-跟随拓扑、前车-领航者-跟随拓扑、双向拓扑)，主要研究了不同的通信拓扑结构对于车队串稳定性的影响效果。文献[21]针对前车-领航者-跟随通信拓扑，考虑异质通信延时，以车辆队列的一致性为目的，设计了基于一致性的编队控制算法。文献[22]基于跟车模型考虑不同拓扑结构下的队列性质，并对固定拓扑结构与切换拓扑结构对于车辆队列所产生的影响进行了分析，设计了针对不同通信拓扑情况的基于一致性非线性有限时间队列控制协议，并根据LaSalle不变集原理和Lyapunov稳定性理论，分析了车辆队列的有限时间稳定性与一致性。通过上述文献分析可得，良好且有效的通信拓扑结构是得以保障车辆队列安全稳定行驶的前提，通信的信息对于整个队列控制有很大的影响。

队列内的行车安全性主要通过车辆间的安全跟随距离和汽车自身的制动能力来保障。文献[23]在上述策略的基础上引入了车队行驶速度，进一步调整车间距策略，速度

可以是车队中单车速度最小值、平均值或最大值。固定车间时距算法简单，考虑了跟随车辆速度对固定车间时距的影响，能保证车队稳定性。但由于未考虑前车的速度变化，在很多复杂的情况下不够灵活和稳定。比如车队行驶速度较高时车间距过大，严重影响车队节能效果以及道路使用率低。文献[24]进一步考虑前车或领航车速度、加速度，衍生出可变车间时距策略和制动安全车间距。文献[25]根据大众的驾驶习惯，加入前车加速度来表示前车的速度变化趋势，因为队列行驶过程中的车间距不能为负，而且过大的车间时距会被换道插入，因此采用饱和函数，使得车间时距的取值更加合理。文献[26]通过引入道路曲线曲率 K ，优化可变车间时距策略，解决了自适应巡航(ACC)系统中由于曲线的雷达局限性导致跟踪错误车辆或无法跟踪车辆的问题。文献[27]从行车安全(避免碰撞)、技术故障(系统可靠性)、人为因素三方面回顾车辆队列安全性的研究情况，指出当前对车辆队列安全性的研究较为分散，缺乏系统的研究方法和评价指标。文献[28]考虑重型车辆队列的行车安全，提出利用最优控制和博弈论建立重型车辆的安全判据，特别指出后车刹车能力越强，车间距离可越小。文献[29]研究同质商用车队的最小安全距离，提出一种重型车辆安全问题分析框架。文献[30]研究紧急制动情况下货车队列的安全性问题，提出驾驶模拟器和实车试验相结合的方法并多次分析制动间隙的距离，得出当最大减速度 $0.6g$ 情况下车间距应不小于 $10m$ ，否则无法避免车辆发生碰撞。

3. 车辆编队控制方法

单一的控制算法往往难以满足复杂被控系统的性能要求，因此考虑适用单队列车队协作的分层递阶控制结构。目前现有的分层控制的策略为上层控制运动状态和规划路径，下层执行上层指令。文献[31]针对异质车辆，提出一种分层协同控制器，其中上层为反馈线性化控制器，下层为分布式双向比例微分控制器。文献[32]针对一致性控制问题，设计了分层控制策略，上层采用模糊策略与加速度控制相结合，实现了对所需控制动作的快速跟踪；下层采用滑模控制，减少了由参数不确定性和干扰引起的状态误差，提升了控制器的鲁棒性。文献[33]考虑了网联车辆队列控制设计的复杂性，提出一种分层设计框架，并根据前方车辆运动状态信息设计了上层控制器，用于产生期望控制输出，设计的下层控制器用于调节发动机扭矩并选择适当的档位使车辆跟踪期望的运动状态。文献[34]考虑队列中多车辆状态信息以及通信延时的影响，设计分层控制器，其中上层控制器产生期望的控制输出，下层控制器基于自适应滑模式调节器来调节发动机扭矩，以便车辆在外扰动情况下跟踪期望的运动状态。文献[35]针对队列的纵向运动建立了一种新的混合模型，并基于该模型设计了分层控制器，上层为反馈线性化控制器，将非线性系统简化为线性模型，下层为 H_∞ 控制器，可以保证车辆队列的串稳定性和鲁棒性。

分布式预测控制是模型预测控制的一种，可以对未来的控制序列进行预测，作为

各个子车辆的未来预估值，以此来使得整个车辆队列控制效果变好。国际上众多学者对分布式预测控制进行了深入的研究，根据不同性能要求设计相应协调策略，涉及到系统的耦合约束问题，稳定性、安全性和可行性的分析等各个方面^[36]。文献[37]针对带有输入约束的系统，给出了一种具有最小互扰的分布式预测控制方法，该方法通过优化状态和输入约束集来应对不断变化的干扰集，减少由于动态耦合带来的相互干扰，保证系统的可行性和指数稳定性。文献[38]设计了一种基于分布式Lyapunov的非线性预测控制器来协调它们的操作，考虑到异步和延迟测量，算法能够保证闭环系统最终保持在包含原点的闭环区域内。为了协调各个子系统，文献[39]提出了一种协调分布式预测控制策略，采用“预测驱动”算法对局部协调分布式预测控制器进行协调，给出了预测驱动算法的收敛性，并证明了协调分布式控制下的闭环系统的稳定性。针对具有稀疏问题数据的强凸优化问题，文献[40]提出了一种适用于对偶问题的分布式优化算法，并将其应用于分布式预测控制的大规模稀疏优化问题上。文献[41]提出了一种基于事件触发的分布式模型预测控制(DMPC)，这种控制方法有两种触发机制，第一种触发机制利用每个代理的邻居信息来解决优化问题，并且仅在触发瞬间交换信息，实现了异步协调；第二种触发机制引入考虑邻居影响的动态变量，更显著地降低了计算成本。

车辆除了考虑自身稳定性，还要兼顾车队稳定性，而车队稳定性是由串稳定性在不同车间距策略下利用频域分析法来刻画的。车间距策略分为恒定间距和可变间距。文献[42]提出了可变间距策略的新方法，考虑降低汽车之间的通信量，减小了汽车之间的距离，几乎等于恒定间距策略，并且提高了稳定性和鲁棒性，同时避免控制扭矩饱和。考虑在高速行驶工况下，固定车间距策略会造成车间距过大的问题，严重影响车队节能效果。制动安全车间距是保证车辆在纵向运动过程中行车安全的最小车间距，选取合适的制动安全车距可有效的防止交通事故的发生。针对弯道行驶等车辆横纵耦合运动的情况，现有的车间距策略没有考虑横向运动对车辆纵向性能的影响，也并没有关注到车辆队列系统本身的非线性情况，相关研究结果存在较大局限性。例如文献[43]使用一维纵向动力学模型研究高速行驶(纵向速度 $26, 29m/s$)过程中急加减速(加速度 $[-1.5, 1.5]m/s^2$) 工况下的车队稳定性。

串稳定性的研究主要集中于同质车队和异质车队两种，文献[44]主要研究了同质车队的串稳定性，在同质车队内，车辆的状态信息均相同。不同于同质车队，异质车队内部车辆的引擎状态、动态信息、自适应巡航策略等都不相同，为了实现串稳定性，速度误差动态模型和空间误差动态模型必须满足一致性，文献[45]中提出了时距、空间误差与碰撞风险之间的关系。文献[46]中提出了基于简化模型所设计的控制器，当队列中车辆过多时，队中任何车辆受到干扰时都会造成车辆队列不稳定。文献[47]分析了在保证队列安全性下的串稳定性，提出在复杂的车辆感知交互系统中，队列中车辆可以

利用其他多个车辆的状态信息，使队中车辆连接更加牢固，串稳定性更强。

为了使编队控制更为具体全面，还有一些研究将关注点放在了其他可能会影响车队行驶状态的因素，例如车间通信延时、通信数据丢包等相关问题。文献[48]针对队列行驶车间通信问题，设计了相关控制方法来解决由于通信时延所造成的问题，以保证车队可以稳定行驶，并进一步设计了控制器保证车队的抗干扰性。文献[49]针对队列行驶时在扰动衰减干扰下出现的数据丢包情况，提出了一种最优控制器设计方法。文献[50]针对车辆动力学不确定性以及车-车之间存在通信延时的情况，提出了一种满足鲁棒性以及串稳定性的控制方法。文献[51]提出一种考虑通信丢包和随机延时情况的车辆队列控制器，并通过分析车辆的协方差动力学，得到了其稳定性条件。文献[52]针对跟踪滞后和通信延时的影响，通过基于加速度的前馈方法，使每个车辆的距离误差独立于其他车辆的行为，改善了车辆队列的串稳定性以及跟踪效果。

总结国内外关于车辆编队的研究现状可以发现，分层控制结构对于研究车辆队列有很好的效果。对于控制器的设计，关于如何保证编队行驶过程中的串稳定性，以及同时兼顾多个目标还需要进行进一步的研究。

1.3 本论文的研究重点和方向

作为智能交通领域的一个重要分支，车辆编队控制虽然经过了多年的发展，但是仍然有多的部分需要改进。

1) 车间通信过程得到的通信车辆的信息如何使用才能兼获良好的控制效果与控制速度，以及怎样使车队达到平衡状态。

2) 采用何种车间距策略，使整个车辆队列的控制更为灵活。

3) 车辆队列研究中极为重要的一个问题便是车队的串稳定性，现有文献对串稳定性的研究也相对较少，如何保证车队行驶过程中的串稳定性。

本文先是设计一种基于迭代的分布式模型预测控制，并在此基础上，对控制器进行合理简化，在减少通信以及计算负担的同时，通过施加约束条件，完成对编队的串稳定性分析。并通过建立MATLAB与Carsim的联合仿真，验证整个分层控制对于复杂车辆模型的有效性。

1.4 本文的主要研究内容和结构安排

本篇论文主要针对车辆编队的相关控制问题，采用分布式模型预测控制方法。在分析车辆队列行驶系统与模型预测控制的理论知识背景下，构建车辆队列动力学模

型，采用分层控制的结构，设计相应的分布式模型预测控制器作为上层控制器，并采用前馈加反馈的控制方法进行下层控制，最后通过软件仿真验证算法的有效性。

为了完成本课题所提出的研究，论文主要分为以下几部分内容：

第1章主要针对车辆队列控制的研究背景和研究意义进行简单的阐述，并概括了国内外的研究概况，随后简述了本文的研究重点和方向。

第2章主要针对车辆队列系统的建模问题进行了详细的分析。首先建立单车模型，然后根据通信拓扑结构和车间距策略构建跟车模型，随后对车辆队列系统采用分层控制结构。上层控制器根据车队优化目标决策出期望加速度，下层控制器根据车辆逆动力学和上层控制器给出的期望加速度决策出制动力与油门开度，再作用给车辆模型。

第3章主要针对编队控制的上层控制进行研究。设计了基于纳什迭代的分布式模型预测控制器，来使整个车辆队列达到纳什均衡，随后进行了仿真分析。并通过与线性反馈控制方法的对比体现出分布式模型控制的优越性。

第4章主要针对第三章控制方法的改进，通过构造“虚拟”状态轨迹来替代重复通信，同时在优化目标中加入保证串稳定性的约束，设计可以保证车辆队列串稳定性的分布式模型预测控制器，并从理论角度分析了整个车辆队列的串稳定性。最后将上下层控制器联系起来，进行Carsim/MATLAB联合仿真。

第5章对全文进行总结与展望。

第2章 车辆队列系统的建模与分析

2.1 引言

从多智能体的角度看，一个智能车辆队列可以看成是由N个单一车辆通过信息交互，组成一个相互耦合的动态系统，而车辆队列的控制一般分为四个步骤：

- 1)考虑车辆动力学和运动学，建立单个车辆的模型；
- 2)根据车辆队列的通信情况选取合适通信拓扑结构；
- 3)根据车间距策略以及车辆队列的几何结构，建立整个车辆队列的模型；
- 4)根据编队行驶的目标，研究车辆编队控制器的设计。

本文关于车辆编队的研究也是根据这四个步骤，从单车模型入手，进一步研究整个车辆队列模型，并采用分层控制结构对整个车辆队列进行控制。

2.2 单车动力学分析

对于纵向行驶的车辆，且考虑到车辆的发动机系统、制动系统、变速器设置、地面摩擦力、迎风阻力等，其纵向动力学是强非线性的，研究起来也是较为困难，所以本文对研究的车辆模型进行如下简化：

- 1)只研究车辆的纵向运动，忽略车辆在横向和垂向所产生的运动；
- 2)忽略路面的湿滑只针对良好的路面条件，忽略车辆轮胎的滑移。

基于以上两点研究单车模型，对车辆建模的前提是需要熟悉车辆行驶时的运动特征，然后再选择合适的控制算法对车辆进行控制。本章所研究的车辆均将看成质点，分析车辆纵向行驶的运动规律特性，对车辆建立合适的动力学模型^[53]，为下一章的编队上层控制算法提供模型基础。

1.纵向动力学分析

首先分析车辆在纵向行驶过程中的受力情况，会受到汽车牵引力、迎风阻力和地面阻力等相关作用力，而车辆的行驶情况与车辆自身的具体参数、道路的摩擦系数的数值紧密相关。想要完成车辆的建模首先需要对车辆进行动力学分析，对于纵向行驶

的车辆，根据牛顿第二定律，可以得到车辆受力与车辆的加速度关系如下：

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin(\varphi) \quad (2.2.1)$$

上式中 F_{xf} 表示汽车的前轮纵向力， F_{xr} 表示汽车的后轮纵向力， F_{aero} 表示汽车的纵向空气阻力， R_{xf} 表示汽车前轮的滚动阻力， R_{xr} 表示汽车后轮的滚动阻力， φ 表示路面的倾斜角度，本文默认倾斜角度为0， mg 表示汽车的重力，分别是质量与重力加速度。根据上式我们可以对式子中的各个纵向力进行分析。

2.纵向轮胎力分析

轮胎纵向力也可以被描述为轮胎与地面之间相互作用的摩擦力，当默认路面摩擦系数为1时，车辆轮胎的纵向力可以用下式描述，

$$\begin{aligned} F_{xf} &= C_{\sigma f} \sigma_{xf} \\ F_{xr} &= C_{\sigma r} \sigma_{xr} \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

$C_{\sigma f}$ 和 $C_{\sigma r}$ 分别为前后轮胎的纵向轮胎刚度； σ_{xf} 和 σ_{xr} 分别为前后轮的纵向滑移率，纵向滑移率指的是车轮轴上的实际纵向速度与轮胎转速之间的差值与自身的比值。

上式中的参数在不同的行驶情况下有不同的表示方法，在制动的情况下如下式：

$$\sigma_x = \frac{r_{\text{eff}}\omega_w - V_x}{V_x} \quad (2.2.3)$$

在加速的情况下：

$$\sigma_x = \frac{r_{\text{eff}}\omega_w - V_x}{r_{\text{eff}}\omega_w} \quad (2.2.4)$$

式(2.2.4)中 r_{eff} 表示轮胎有效半径， ω_w 表示轮胎转速。

3.滚动阻力分析

对于车辆在正常行驶的过程中，车辆轮胎不单单受到纵向力的作用，还会有滚动摩擦力的作用，通常情况下轮胎受到的滚动阻力与轮胎受到的纵向力成比例关系，如下式所示

$$\begin{aligned} R_{xf} + R_{xr} &= f(F_{zf} + F_{zr}) \\ F_{zf} &= \frac{-F_{\text{aero}}h_{\text{aero}} - m\ddot{x}h - mgh \sin(\varphi) + mgl_r \cos(\varphi)}{l_f + l_r} \\ F_{zr} &= \frac{F_{\text{aero}}h_{\text{aero}} + m\ddot{x}h + mgh \sin(\varphi) + mgl_f \cos(\varphi)}{l_f + l_r} \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

式(2.2.5)中 F_{zf} 和 F_{zr} 表示车辆前后轮胎的轮胎载荷与车辆自身相关。 f 表示为滚动阻力系数，一般选取0.01-0.04之间。

3.空气阻力分析

车辆在行驶过程中还会受到一定的空气阻力，可用下式表示

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho_a C_d A_F (V_x + V_{\text{wind}})^2 \quad (2.2.6)$$

式(2.2.6)中 ρ_a 表示空气质量密度, C_d 表示空气阻力系数, A_F 表示车辆的正面迎风面积, V_x 和 V_{wind} 表示车辆的纵向速度和风速。 A_F 的选取与空气质量密度有关, 查阅相关资料可得标准情况下车辆的迎风面积可以表示为 $A_F = 1.6 + 0.00056(m - 765)$ 。

文献[54]介绍了汽车在前进过程中的动力主要来自于地面和轮胎之间的摩擦力, 汽车行驶过程中的轮胎转速与发动机扭矩和车辆的变速器和变矩器相关, 变矩器主要由泵、涡轮机以及变速箱油液组成。组成变矩器泵的叶轮连接在与发动机的飞轮联结在一起, 从而使泵具有与发动机相同的转速; 涡轮机连接到变速器, 并使变速器以涡轮机相同的速度旋转, 从而驱使汽车移动; 涡轮机与泵之间通过变速箱油液连通, 在变矩器中扭矩从泵向涡轮机传递。通过对发动机的动态模型分析可以得到发动机的扭矩与加速度的关系如下式所示:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{J_e}{R_p r_{eff}} \ddot{x}_{des} + [c_a R_p^3 r_{eff}^3 \omega_e^2 + R_p (r_{eff} R_x)] \\ J_e &= I_e + I_t + (m r_{eff}^2 + I_\omega) R_p^2 \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

其中 I_e 为发动机转动惯量, ω_e 为发动机转速, T_e 为净发动机扭矩, 即燃烧产生的扭矩除去附加扭矩以及摩擦损耗后的值, R_p 为变速齿轮比, J_e 为发动机有效的转动惯量。

2.3 车辆队列建模

车辆队列模型可以理解为车辆队列的几何结构, 将车队中的单个车辆视为质点模型, 考虑整个车队车辆之间的通信拓扑结构, 利用跟车模型来构建车辆队列模型。

2.3.1 通信拓扑结构

通信拓扑结构最早出现在多智能体系统中, 用于描述任意智能体与其他智能体通过相应的链接拓扑实现信息交互, 来实现获得其他智能体的状态信息。这种交互关系, 抽象为数学语言就是一个拓扑图^[58]。作为多智能体之间的信息交流方式, 通信拓扑在多智能系统中占据着重要位置。通常情况下, 拓扑图包含着顶点, 连接顶点的边和关联函数三个要素。其中, 每一个顶点表示一个智能体, 顶点与顶点之间的连接边表示了相连的两个智能体存在着信息流通, 这种方法可以统称为代数图论^[59]。

通信拓扑结构对于车辆队列系统同样有着至关重要的作用, 表示整个车队中所有车辆之间的通信情况, 每个车辆的行为都会对整个车辆队列产生影响, 不同的通信拓扑结构对于车队也会产生不同的行驶效果。

对于一个包含 N 辆车和一个领航车的车辆队列, 整个车队之间的信息流通结构用有向图 $G_N = \{\mathcal{V}_N, \mathcal{E}_N\}$ 来表示, 式子中的 $\mathcal{V}_N = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示车辆的个数也就

是有向图中的顶点， $\mathcal{E}_N = \mathcal{V}_N \times \mathcal{V}_N$ 表示有向图的边集，进一步引入邻接矩阵 $A_N = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$ 来描述通信拓扑结构，假如第 j 个车辆能够收到第 i 个车辆的信息，那么 $a_{ij} > 0, \forall i \neq j, a_{ij}$ 表示边 (i, j) 的权重；否则 $a_{ij} = 0$ ，如果车辆对角线元素 $a_{ii} = 0$ 。特别地，当 a_{ij} 的取值不只是0或1时就称这种图为加权图，如下式所示：

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.3.1)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (j, i) \in \mathcal{E}_N \\ 0, & (j, i) \notin \mathcal{E}_N \end{cases}, \quad i, j \in N$$

进一步可以定义每个车辆邻域集 $N_i = \{j \mid a_{ij} = 1\}$ ，表示与第 i 辆车相通信的车辆集合。车队中通信拓扑结构反映了车辆之间信息传递的拓扑结构，即哪些车之间需要建立通信。对于纵向行驶的车辆队列，信息流的拓扑结构描述了可以用于每个车辆自身纵向控制器设计的信息，即车辆的分布式控制可以采用的信息。常见的用于设计控制器的通信拓扑结构有以下4种：前车跟随式（predecessor following, PF）、双向跟随式（bidirectional, BD）、前车-领航者跟随式（predecessor-leader following, PLF）、双向-领航者跟随式（bidirectional-leaderfollowing, BDL），4种通信拓扑结构如图 2.1所示

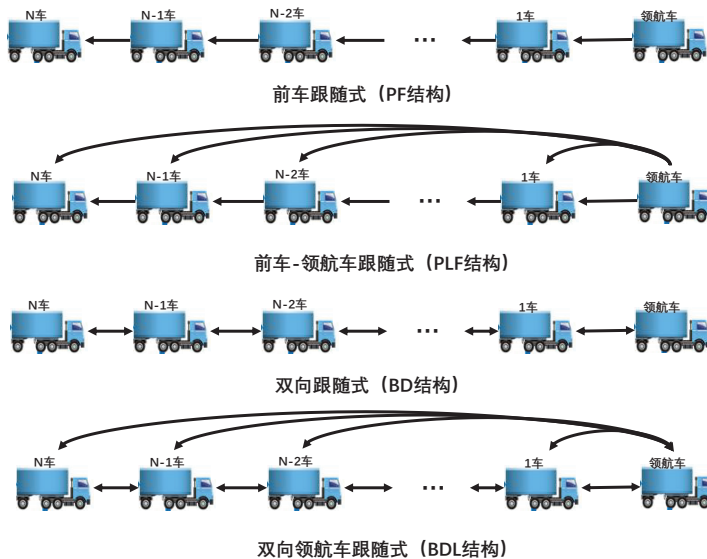


图 2.1 通信拓扑

2.3.2 车辆队列模型

1. 单车运动学模型

考虑车辆的纵向行驶模型，忽略垂向与横向的车辆运动，可以将车辆的纵向运动看成一个非线性的三阶模型，具体可以用下式来进行表示：

$$\begin{aligned}\dot{s} &= v \\ \dot{v} &= a \\ \dot{a} &= f(v, a) + g(v)\eta\end{aligned}\quad (2.3.2)$$

式中 s 、 v 、 a 表示车辆的纵向位置、速度和加速度， η 为发动机的控制输入。上式中的 f 和 g 表示非线性函数关系，可以用下式表示：

$$\begin{aligned}f(v, a) &= \frac{-2c_d}{m}va - \frac{1}{\tau(v)} \left[a + \frac{c_d}{m}v^2 + \frac{d_m}{m} \right] \\ g(v) &= \frac{1}{m\tau(v)}\end{aligned}\quad (2.3.3)$$

上式中 C_d 代表了气动阻力系数， τ 为车辆发动机的时间常数， d_m 为车辆的机械阻力，为非零常数，但在车速为零时等于零。上述各式为汽车的纵向运动学方程，代表了自主车辆纵向运动过程的运动状态。文献[54]利用反馈线性化的相关知识，将上式各个参数视为先验已知，则将原有的非线性模型反馈线性化，如下式所示

$$\eta = ma_{des} + C_d v^2 + d_m + 2\tau C_d v a \quad (2.3.4)$$

将 a_{des} 为期望加速度，进一步将公式(2.3.4)代入到(2.3.3)可以得到线性化后的车辆运动学方程

$$\begin{aligned}\dot{s} &= v \\ \dot{v} &= a \\ \dot{a} &= -\tau^{-1}a + \tau^{-1}a_{des}\end{aligned}\quad (2.3.5)$$

上式为车辆纵向行驶过程中的三阶线性模型，采用期望加速度作为控制输入。

2. 车间距策略

对于正在行驶的车辆队列，任意两车之间都需要保证一个安全距离，车队中的安全距离指的是车队在行驶过程中，保证任意两车之间不会发生碰撞的距离，安全距离的选择对于道路容量的提升以及减少车队的能源消耗有很大的效益，所以安全距离的选择尤为重要。关于车队之间的安全距离通常有以下三种选择：

1) 固定车间距策略：所谓的固定车间距策略，指的是车队在行驶过程中，任意两辆车之间的车间距是固定值。非常明显，该策略结构简单，且能够提高交通流量，但是却没有将车辆安全性考虑全面，也没有完全利用上道路的特点，如果在高速公路上，较为容易发生追尾现象。

2) 固定车头时距策略：车头时距是指在同一条道路上，相邻两车的车头在通过同一位置相隔的时间差，可以用相邻两车的车间距除以车辆速度求得。可见固定车头时距与车辆的速度有关。在该控制策略下，车间距被定义为： $D_{i,des} = D_0 + h_i v_i$ ，其中 D_0 表示最小安全距离， h_i 为车头时距，为固定值， v_i 为车辆当前的速度，如图 2.2所示。可以看到，采用固定车头时距策略，车辆之间的车间距与车速成正比关系，当速度增大时，其期望的车间距离也随着增大，更加符合现实中的要求，随着进行更多的研究发现，固定车间距策略构成简单，且能够满足驾驶员的需求，对与更多的行驶工况更为实用，但是对于一些极端的行驶环境还是不适用，比如根据道路系数的不同则应该选择不同的车头时距。

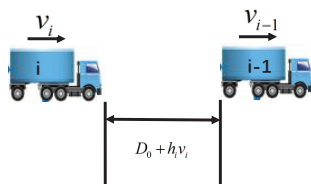


图 2.2 固定车头时距

3) 可变车头时距策略：相较于固定车头时距，可变车头时距认为车头时距是随周围环境变化而变化的量，是与车辆行驶速度相关的函数，在该策略下的期望距离被定义为 $D_{i,des} = D_0 + h_i(v_i)v_i$ 。文献[42]指出可变车头时距不光与自身车辆速度有关，还应该与前车行驶速度有关，相比固定车头时距而言，可变车头时距的车队稳定性更好，保证了交通流的稳定性，且大大的提高了车队行驶的抗扰性。

虽然可变车头时距可以使整个车队在更多复杂的环境中行驶，但是具体应用方法过于复杂，而且如何确定车头时距的变化仍然还需进行更多研究，因为固定车头时距结构简单且由不错的安全性与稳定性，所以受到了更多的关注，本文也采用固定车头时距策略。

3. 跟车结构建立

对于由 N 辆汽车组成的车辆队列， s_i 代表第 i 辆车的位置状态信息， v_i 、 a_i 分别代表第 i 辆车的速度和加速度，则第 i 辆车与前车（ $i-1$ 辆车）的车间距误差为下式：

$$e_{s,i} = s_{i-1} - s_i - D_{i,des} \quad (2.3.6)$$

其中 $D_{i,des}$ 是第 i 辆车距前车的期望车间距离。这样便可利用跟车模型来表示整个车辆队列的模型，则对于第 i 辆车而言，它与前车的间距误差如下式 (2.3.7)所示，式中的期望距离为如图 2.3所示

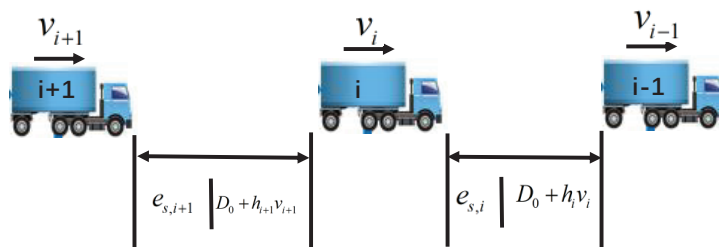


图 2.3 队列结构

$$D_{i,\text{des}} = D_0 + h_i v_i \quad (2.3.7)$$

对于第*i*辆车与前车之间的速度差如下式所示

$$e_{v,i} = v_{i-1} - v_i \quad (2.3.8)$$

根据公式 (2.3.5)、(2.3.6)、(2.3.7) 和 (2.3.8) 可以进一步得到整个车辆队列系统的跟车模型。对于任意一辆车*i*都有下式

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_{1i} u_i(t) + B_{2i} \omega_i(t) \\ A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -h_i \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad B_{1i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad B_{2i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ x_i &= \begin{bmatrix} e_{s,i} & e_{v,i} & a_i \end{bmatrix} \quad u_i = a_{\text{des}} \quad \omega_i = a_{i-1} \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

如上式所示，对整个车队中第*i*辆车建立偏差状态空间方程，选取位置偏差 $e_{s,i}$ ，速度偏差 $e_{v,i}$ 和自身车辆的加速度 a_i 作为状态量，采用自身车辆的期望加速度 a_{des} 作为控制输入，前车加速度作为干扰输入，便完成了整个车队的模型建立。

2.4 车辆编队整体控制方案

目前国内外关于车辆编队系统，主流的控制方法大致可以分为两种，分别是直接式控制与分层式控制。直接式控制是指对于一个车辆仅由一个控制器进行控制，根据车辆所要达到的目标，通过唯一的控制器计算出车辆进行加减速所需要的油门踏板与制动踏板开度，传递给被控车辆进而实现车辆加速与减速。但是考虑到车辆本身的非线性结构，采用直接控制将会导致整个控制过程冗长。一旦出现行驶工况的变化，会增加许多的不稳定因素，将会导致控制精度下降，对于控制器的稳定性有较大的影响 [54, 55]。

为了避免出现直接式控制的弊端，研究出了分层控制方法对车辆进行控制，顾名思义分层控制就是将整个控制分为上下两层控制结构，将整个控制系统分成上下位控制器两部分来实现。对于编队控制，上位控制器的主要功能根据车队期望达到的目标决策出车辆期望得到的加速度信息，而下位控制器主要是接收到上位控制器计算出的期望加速度，通过计算得出车辆在实际行驶过程中所需的制动压力与油门开度，并将其作用给实际车辆，实现加速度的跟踪。分层控制的结构框图如图 2.4 所示，采用分层控制可以避免车辆在工况切换时出现的不连续情况，还可以分别解决分割出来的各自的优化问题，提高鲁棒性。相比于直接式控制，分层控制灵活性较强，且开发难度较

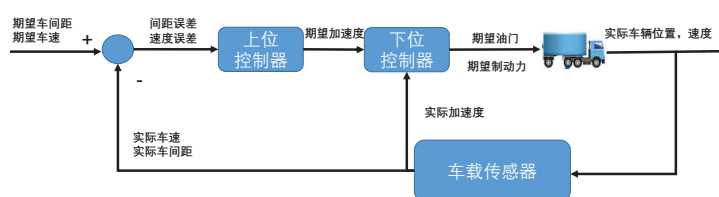


图 2.4 分层控制框图

小，因此成为当下智能车辆纵向控制的主要研究方向。上位控制器根据雷达采集到的其他车辆的速度、位置等信息^[56, 57]，根据所选择的期望车间距，由自身的车辆控制器计算出自身车辆的纵向加速度。下位控制器主要是实时跟踪上位控制器计算出的期望加速度，通常采用响应速度较快的控制方法，所以本文采用前馈加反馈的控制方法进行下层控制。

2.5 下位控制设计方案

2.5.1 Carsim仿真软件

Carsim是一种可以进行高精度车辆动力学建模的仿真软件^[65]，界面如图 2.5所示，车辆参数设置如图 2.6所示，包括了车体、传动系统、转向系统、制动系统、空气动力学、悬架及轮胎七个车辆部位，可以进行不同类型的车辆模型建立，以及道路环境参数的设计。而且Carsim的输入输出变量有上千个，可以观察车辆在油门开度输入、制动压力以及转向输入等输入下的行驶情况，也可以通过内部数据分析车辆的燃油经济性以及操作稳定性，在给定的环境(道路的形状，摩擦系数以及

风阻)下接收控制信号来观察车辆的性能，目前已经有30多个汽车制造商以及100多个高校研究所在利用Carsim进行车辆仿真，Carsim还可以与许多软件相连接，可以与MATLAB/Simulink进行联合仿真，主要功能如下：

- 1) 可以模拟多种车辆模型，比如乘用车、商用车、货车、SUV等多种运输车辆。
- 2) 可以对建立的车辆模型进行性能分析，如车辆行驶的燃油经济性，稳定性等等。
- 3) 可以与MATLAB、Prescan等仿真软件联合使用，内置车辆模型求解器，三维动画回放模块等。可以具体分析车辆状态，对车辆的仿真结果进行三维效果演示。

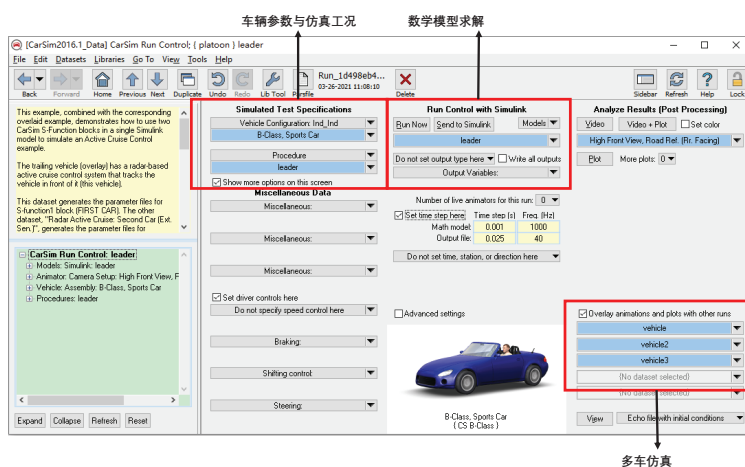


图 2.5 Carsim界面

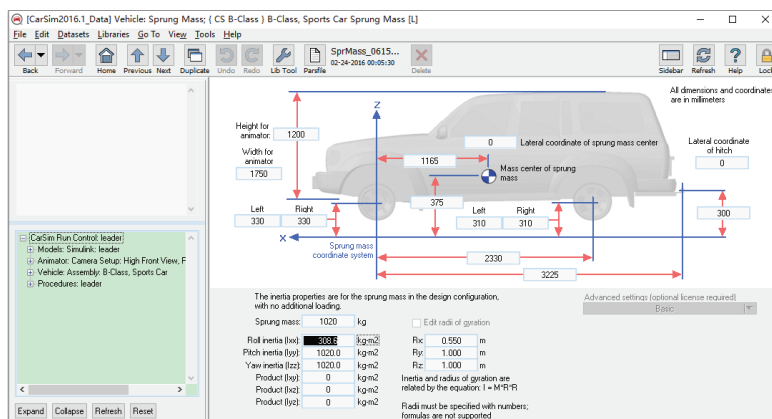


图 2.6 车辆参数

2.5.2 车辆逆向动力学

结合上文对分层控制的分析，汽车在实际纵向行驶过程中通常只与油门踏板开度与制动踏板压力相关。若希望汽车加速行驶，需给定汽车一定的油门开度输入，汽车发动机会根据给定的油门开度输出相应的扭矩，通过变矩器再送给车辆的变速器，最后生成四个驱动力矩作用到车辆的四个轮胎上。至此，便完成车辆的加速行驶。若期望车辆制动，则需要车辆输入制动压力，由制动系统生成相应的制动力矩再作用到车轮上。所以车辆上位控制器决策出的期望加速度还需要进一步的处理，使其转化为车辆的油门开度或制动压力才能完成整个车辆控制，实现编队功能，接下来便对车辆的加速和制动两种行驶情况进行进一步分析^[66]。

1. 车辆加速控制

根据上文对车辆纵向动力学的分析，可以得到车辆加速过程中发动机期望扭矩与期望加速度的数学关系式如下式所示

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{J_e}{R_p r_{eff}} a_{des} + [c_a R_p^3 r_{eff}^3 \omega_e^2 + R_p (r_{eff} R_x)] \\ J_e &= I_e + I_t + (m r_{eff}^2 + I_\omega) R_p^2 \end{aligned} \quad (2.5.1)$$

进一步推导车辆的逆向动力学模型，考虑到汽车质量远远大于其他量^[54]，可以近似将逆向动力学表示为下式

$$T_{e,des} = R_p r_{eff} (m a_{des} + F_{areo} + R_x) \quad (2.5.2)$$

根据公式 (2.5.2) 可以将上位控制器求得的期望加速度转换为期望扭矩，进一步根据Carsim软件里已有的发动机转矩特性map图，采用查表法根据已有的发动机转速与发动机扭矩求得相应的油门踏板开度，发动机map如图 2.7所示。利用插值法先对发动机转速相邻两项进行线性插值，然后根据计算出来的发动扭矩寻找相应的油门踏板开度，如果计算出来的发动机扭矩超过已有的发动机扭矩则给油门踏板开度为1。

下位控制器一般要求可以快速跟踪上位控制器所给出的期望加速度，所以通常的下位控制器结构比较简单，本章采用PID控制器作为车辆底层的控制方法；利用前馈加反馈的方法设计控制器^[67]，对Carsim模型输出的实际加速度采用PID控制算法进行误差校正，控制流程图如图 2.8所示，经过反复的实验验证得出PID的参数分别为 $K_P = 0.1$, $K_I = 1$, $K_D = 0.01$ ，则最终采用的加速度 α_s 如 (2.5.3)所示。

$$\alpha_s = a_{des} + K_P (a_{des} - a_s) + K_I \int (a_{des} - a_s) dt + K_D \frac{d(a_{des} - a_s)}{dt} \quad (2.5.3)$$

2. 车辆制动控制

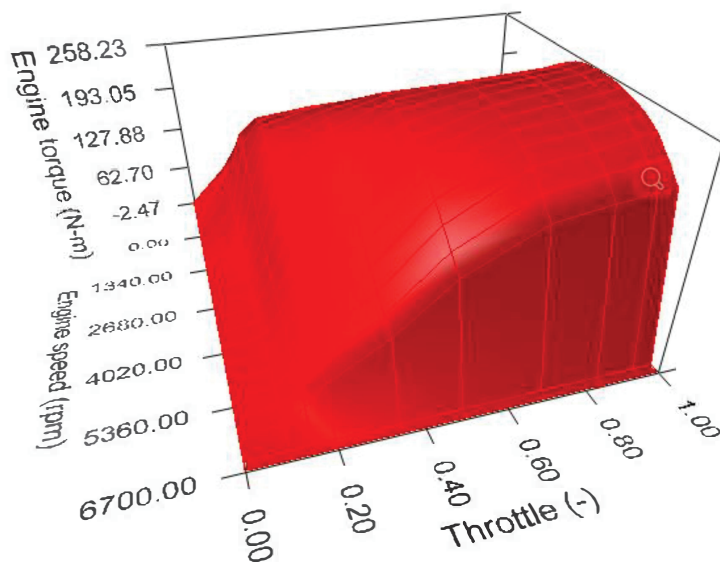


图 2.7 发动机map图

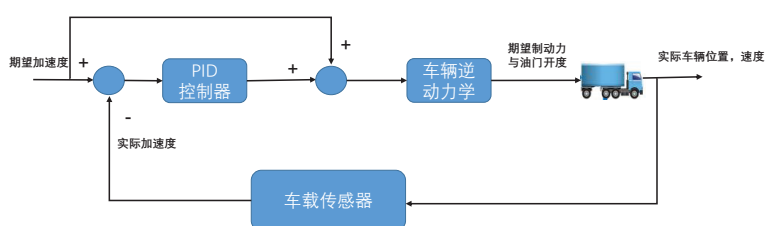


图 2.8 底层控制

车辆在制动行驶时，仍然可以根据所给的期望加速度来求出车辆所需的制动压力，根据牛顿第二定律可以写出车辆在制动过程中的动力学方程如下式

$$ma_{des} = -F_b - F_{areo} - R_x \tag{2.5.4}$$

式中 F_b 表示车辆的制动力， F_{areo} 为空气阻力， R_x 表示轮胎阻力，考虑正常路面汽车行驶过程中的制动力与制动压力为线性关系如下式所示

$$F_b = K_s p_b \tag{2.5.5}$$

根据相关文献与Carsim实际情况可以得到 $K_s = 1300$ 。根据式(2.5.4)与式(2.5.5)可以得到制动压力与加速度之间的关系如下式所示

$$p_b = \frac{|-ma_{des} - F_{areo} - R_x|}{K_s}$$

根据上式可以将上位控制器决策出来的负加速度传送给下位控制器，并转换为制动压力。采用与加速行驶过程中相同PID控制方法，利用前馈加反馈设计控制器，对车辆的加速度进行误差校正如上文所示，采用相同的PID参数 $K_P = 0.1, K_I = 1, K_D = 0.01$ 进行控制。

2.6 本章小结

本章首先对车辆的纵向动力学进行了详细的分析，将复杂的车辆模型简化质点模型。然后对整个车辆控制方法进行分析，采用上下位分层控制，根据反馈线性化及车辆运动学建立车辆行驶过程的三阶线性模型。在选择了固定车头时距的安全距离基础上，建立了整个车辆编队的跟车偏差模型，为接下来的上层控制器设计提供基础，同时采用前馈加反馈的控制方法对车辆下层进行控制，并介绍了Carsim软件的相关知识。

第3章 基于纳什最优的分布式算法设计

3.1 引言

车辆编队主要是期望整个车辆队列以固定的队形和相同的车速共同行驶。但是传统的PID控制方法应用在车辆队列行驶时，会出现车队在行驶过程中车间距小于车队的安全距离、执行机构饱和即控制器计算的控制输入过大无法实现、以及车辆在控制输入作用下的将会导致车辆速度过大超过了车队速度的限制等情况。模型预测控制可以根据目标函数与预测模型对未来的动作进行控制，可以在约束范围内进行求解，成为车队研究的热点。本章对模型预测控制与分布式模型预测控制之间的关系进行了介绍，并基于第二章建立的车辆编队系统模型，对整个车队设计基于纳什最优的分布式模型预测控制器，最后通过数值仿真验证所设计算法的有效性。

3.2 模型预测控制的分析

3.2.1 模型预测控制的基本原理

经过近几十年的研究与发展，模型预测控制也愈加的完善，其主要包含基于模型的预测、在线滚动优化和反馈校正三个主要内容^[60, 61]。

1) 基于模型的预测：模型预测控制(MPC)是一种基于模型的控制算法。根据被控对象的自身特性建立预测模型并进行控制，根据当前时刻的状态预测未来的输出值，预测模型通常分为以下几种，分别是：卷积模型，状态空间模型、传递函数模型等。因此，模型预测相比于传统控制策略，降低了对模型结构的要求。

2) 在线滚动优化：MPC不同于传统的离线最优控制方法，采用在线优化方式，通过使自身最优目标函数最小来计算未来的控制作用。MPC与最优控制算法的不同点在于它并不采用一个不变的全局优化指标，MPC的目标函数只与未来一段时间相关。在计算完当前采样时刻后，将时域向前推移，在下一个采样时刻继续进行求解。

3) 反馈校正：面对系统存在的干扰、参数摄动、以及模型失配等情况，引入了反馈校正这一思想。在每一个时刻系统得到所需要的控制输入，在下一个时刻检测自身

的实际输出，并通过反馈作用得到的实际输出实时修正预测模型，然后再进行新一轮的优化。采用反馈矫正对于整个模型预测控制来讲，提高了模型预测控制克服系统中不确定扰动的能力。

3.2.2 状态空间模型预测算法

设计模型预测控制器的前提是需要找到可以描述系统的预测模型，考虑到第二章我们已经得到的车辆队列的状态空间方程，这里利用状态空间方程作为预测模型，对系统离散化后可得离散的线性状态空间模型：

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \bar{A}x(k) + \bar{B}_1u(k) + \bar{B}_2\omega(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

其中 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 表示系统的状态， $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 表示系统可测量的输出， $u(k) \in \mathbb{R}^p$ 为控制输入而 $\omega(k)$ 为干扰输入。如果系统的状态量以及干扰视为可测，将干扰在整个预测周期内视为不变，即 $\omega(k+j|k) = \omega(k)$ 。那么整个系统的状态预测方程可以用下式表示出来：

$$\left\{ \begin{aligned} x(k+1|k) &= \bar{A}x(k) + \bar{B}_1u(k|k) + \bar{B}_2\omega(k) \\ x(k+2|k) &= \bar{A}x(k+1|k) + \bar{B}_1u(k+1|k) + \bar{B}_2\omega(k) \\ &= \bar{A}^2x(k) + \bar{A}\bar{B}_1u(k|k) + \bar{B}_1u(k+1|k) + (\bar{A}\bar{B}_2 + \bar{B}_2)\omega(k) \\ &\vdots \\ x(k+N|k) &= \bar{A}x(k+N-1|k) + \bar{B}_1u(k+N-1|k) + \bar{B}_2\omega(k) \\ &= \bar{A}^Nx(k) + \bar{A}^{N-1}\bar{B}_1u(k|k) + \cdots + \bar{B}_1u(k+N-1|k) + \\ &\quad n(\bar{A}^{N-1}\bar{B}_2 + \bar{A}^{N-2}\bar{B}_1 + \cdots + \bar{A}\bar{B}_2 + \bar{B}_2)\omega(k) \end{aligned} \right. \quad (3.2.2)$$

上式中 N 表示的是系统的预测步长也叫预测时域， $x(k+j|k)$ 表示基于 k 时刻系统对 $k+j$ 时刻状态的预测值，因为整个预测过程中，预测时刻的控制量未知，于是假设 k 时刻的控制输入也就是 $u(k|k)$ 。对于其余的各个预测时刻的控制输入可以控制增量 Δu 进行表示，则 $k+j$ 时刻的预测控制输入与 $k+j-1$ 时刻的预测控制输入和 $k+j$ 时刻的预测控制输入增量之和。

$$u(k+j|k) = u(k+j-1|k) + \Delta u(k+j|k) \quad (3.2.3)$$

而在 k 时刻上一时刻所采取的控制输入 $u(k-1)$ 是已知的，那么对于 k 时刻的控制输入可以用下式进行推出。

$$\left\{ \begin{aligned} u(k|k) &= \Delta u(k|k) + u(k-1) \\ u(k+1|k) &= \Delta u(k+1|k) + \Delta u(k|k) + u(k-1) \\ &\vdots \\ u(k+N_c-1|k) &= \Delta u(k+N_c-1|k) + \cdots + \Delta u(k|k) + u(k-1) \end{aligned} \right. \quad (3.2.4)$$

上式中 N_c 表示的是控制步长也叫控制时域，根据文献[60]以及状态方程可以得到预测输出：

$$y(k+j|k) = Cx(k+j|k) \quad (3.2.5)$$

则目标函数如下式所示

$$J_k = \sum_{j=1}^N \|y(k+j|k) - y_{ref}(k+j|k)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \Delta u(k+j|k)_R^2 \quad (3.2.6)$$

式中 $y_{ref}(k+j|k)$ 表示输出的参考状态，可以为预先设定的轨迹或者是根据自身当前状态选择的， Q ， R 分别为所选取的加权矩阵。上式表明性能指标主要是通过使实际输出跟踪上参考输出，以及对控制量的变化量进行制约。控制结构如图3.1所示

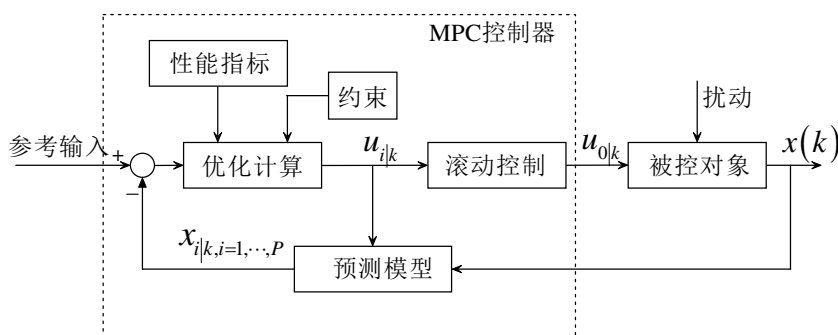


图 3.1 MPC结构

3.2.3 分布式模型预测控制

随着计算机的迅速发展，模型预测控制也随之发展，目前已被广泛地应用在各种工业过程中。然而实际系统往往都是高维且非线性，所涉及到的控制量和约束的数目通常会达到几十个甚至是几百个，对于这么庞大的系统，降低模型预测控制的求解速度显得十分重要。如果采用集中式方法进行整体求解，则需要能够快速计算以及信息处理的高级计算机，这类计算机的价格也较为昂贵，不满足控制的经济性，随着网络与现场总线的发展，分布式控制和分散式控制应运而生，我们可以把一个复杂大规模系统的在线求解问题分散到各个子系统去实现，同时各个子系统之间通过网络进行通信和信息共享，从而降低了问题的规模和复杂性，提高了控制性能。

编队控制一般分为三种：集中式控制，分散式控制和分布式控制。集中式控制方法需要求解整个系统的优化问题，这样求得的控制量也是全局最优的，但是因为考虑

了整个系统的目标函数，计算量较大，一旦控制器发生故障，那么整个系统将会陷入瘫痪，无法继续工作。

分散式控制将整个队列系统划分为若干子车辆，每个子车辆分别设计自身的控制器，且每个子车辆之间不进行信息传递，这样将整个系统分解成互不交流的子系统，大大降低了计算负担。但是由于不存在子车辆之间的信息传递，使整个队列系统的连通性降低。

分布式控制则是将车辆队列整体的控制问题分解给每个子车辆中分别解决，各个子车辆之间通过通信实现信息交互，分布式控制既减小了在线求解的计算量，又使得子系统之间存在信息交互，可以使整个系统的控制效果更好。

分布式模型预测控制便是将分布式控制的思想与模型预测控制相结合。车辆队列系统中各子车辆彼此互连，相互通信，共同完成整个队列系统的任务。对于由 N 个车辆组合而成的车辆队列系统，在 k 时刻预测系统未来 P 个时刻的输出可以用下式进行表示

$$\begin{aligned} Y_{PM}(k) &= f(Y_{P0}(k), u_{1,M}(k), \dots, u_{N,M}(k)) \\ Y_{PM}(k) &= [Y(k+1|k) \cdots Y(k+P|k)]^T \\ Y_{P0}(k) &= [Y_0(k+1|k) \cdots Y_0(k+P|k)]^T \\ u_{i,M}(k) &= [u_i(k) \cdots u_i(k+M-1)]^T \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

式中 $Y_{P0}(k)$ 为整个车队系统在 k 时刻的初始值， P 为预测时域， M 为控制时域， f 为某种函数关系，则整个车队系统的优化目标函数可以写成下式

$$\min_{u_{1,M}(k) \cdots u_{N,M}(k)} J = \sum_{j=1}^P L[Y(k+j|k), u_{1,M}(k), \dots, u_{N,M}(k)] \quad (3.2.8)$$

式中 L 为输出变量和输入增量的非线性函数。采用分布式模型预测控制的思想，如果一个车队系统存在 N 个子车辆，且整体系统的目标函数是可分的，那么第 i 个子车辆的目标函数为

$$\min_{u_{i,M}(k)} J = \sum_{j=1}^P L_i[y_i(k+j|k), u_{i,M}(k)] \quad (3.2.9)$$

对于第 i 个子系统的预测输出状态方程可以写成下式

$$y_{i,PM}(k) = f[y_{i,P0}(k), u_{1,M}(k), \dots, u_{N,M}(k)] \quad (3.2.10)$$

这样将车队整体的优化目标分解到各个子车辆中，而且每个子车辆的输出仍然与所有的输入变量有关，每个子车辆并行求解优化问题计算出所需的控制量，并作用回本车。

3.3 车辆编队控制器设计

根据前文所介绍的关于车辆编队的知识以及分布式预测控制的思想，本章设计基

于纳什迭代的分布式模型预测控制方法用以控制车辆编队。利用车载传感器（激光雷达、加速度传感器等）获取求解控制动作所需要的状态信息；将这些状态信息作为分布式模型预测控制器的输入；通过对这些信息进行处理，优化求解出当前时刻的控制量，并作用给自身车辆。

3.3.1 车辆编队的控制目标及约束条件

本文对车辆编队控制的研究建立在以下几点假设的基础上：

- 1) 本文所研究的车辆均是同质车，既为相同类型、相同载重的车辆，可以看成是质点，并且仅研究车辆的纵向行驶过程，忽略车辆的横向和垂向运动；
- 2) 车队中所有车辆的时钟同步，即车队中的所有车辆共用相同的一个时钟；
- 3) 忽略所有车辆的通信时延，即车队中的车辆在通信过程中不会出现数据丢包以及噪声干扰等情况。

在以上假设条件的基础上，车辆编队的控制目标可被总结如下：

- 1) 车队中任意两车之间的车间距应趋近于期望车间距，且车辆速度应趋于一致，如下式所示

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i(t) - v_0(t)\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|s_{i-1}(t) - s_i(t) - d_{i,des}\| = 0 \end{cases}, i \in N$$

- 2) 车队中如有车辆状态存在瞬态误差，应当保证误差不会随着车队的传播而增大，即保证车队的串稳定性。

编队控制的最终目的是设计相应控制器使整个车队保持稳定的队形，即两车之间的车间距可以维持在期望车间距，所以在设计控制器的时候需要满足以下约束要求：

- 1) 安全性要求：要求车队中任意两车的车间距误差保证在允许的范围内：

$$e_{s,\min} \leq e_s(t) \leq e_{s,\max} \quad \forall t \geq 0 \quad (3.3.1)$$

式中 $e_{s,\min}$ 表示车间距误差的最小值，通常设为0，即保证任意两车的车间距都大于安全距离，这样便能阻止车辆发生碰撞的交通事故； $e_{s,\max}$ 指的是所允许的与前车的最大间距误差，即保证整个车辆队列的队形不散，并防止整个车队长度过大影响交通。

- 2) 整体性：考虑到编队行驶是使车辆队列以一个稳定的车速行驶，则车队在行驶过程中任意两车的速度偏差应在限定范围内：

$$e_{v,\min} \leq e_v(t) \leq e_{v,\max} \quad \forall t \geq 0 \quad (3.3.2)$$

通过设置速度偏差的最大值和最小值来保持相邻车辆之间的跟随状态。

3) 乘客舒适度: 考虑到车内乘坐人员的感受, 则车辆在进行加速减速的过程中, 不宜有过大的加速度, 需控制加速度在乘客可以接受的范围内:

$$a_{\min} \leq a(t) \leq a_{\max} \quad \forall t \geq 0 \quad (3.3.3)$$

式中 a_{\min} 代表乘客感到舒适范围内的最大减速度, a_{\max} 代表乘客感到舒适范围内的最大加速度。

3.3.2 优化问题的数学表达

分布式模型预测控制将车辆的控制目标分解到每一个车辆上, 每一个车辆仅仅与与它相通信的车辆有关, 并且求解自身的优化问题, 并传递给通信车辆。结合第二章所建立的车队模型, 车队中的车辆 i 在 k 时刻的控制输入序列如下式所示

$$U_i(k) = \{u_i(k | k), u_i(k + 1 | k), \dots, u_i(k + M - 1 | k)\} \quad (3.3.4)$$

我们能够得到每辆车的开环优化问题可以用下式表示

$$\begin{aligned} & \underset{U_i(k)}{\text{minimize}} J_i(x_i(k), U_i(k)) \\ & \text{subject to:} \\ & x_i(k + j + 1 | k) = A_i x_i(k + j | k) + B_{2i} u_i(k + j | k) + B_{1i} \bar{a}_{i-1}(k + j | k) \\ & x_i(k | k) = x_i(k) \\ & s_{i-1}(k + j + 1 | k) - s_i(k + j | k) - D_i \in [0, e_{\max}] \\ & e_{vi}(k + j | k) \in [e_{vi,\min}, e_{vi,\max}] \\ & a_i(k + j | k) \in [a_{i,\min}, a_{i,\max}] \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

$$J_i(x_i(k), U_i(k)) = \sum_{j=0}^{M-1} \|\tilde{x}_i(k + j | k)\|_Q^2 + \|u_i(k + j | k)\|_R^2 \quad (3.3.6)$$

其中 $\tilde{x}_i = [e_{s,i} e_{v,i} a_i - \bar{a}_i]^T$ M 是预测时域, Q 和 R 正定矩阵, \bar{a}_i 为领航车的加速度, $\bar{a}_{i-1}(k + j | k)$ 表示为前车加速度的预测序列, 是通过上一时刻预测得来的, 如下式所示

$$\bar{a}_{i-1}(k + j | k) := \begin{cases} \bar{a}_{i-1}(k + j | k - 1) & j \in [0, M - 2] \\ 0 & j = M - 1 \end{cases} \quad (3.3.7)$$

求解上述优化问题, 然后将控制序列的第一个值 $u_i^*(k|k)$ 作用给车辆 i , 滚动到下一时刻, 重复上述步骤。

3.3.3 基于迭代的纳什最优

纳什最优首先出现于非合作博弈论中。非合作博弈指的是各个成员之间并非合作关系，相互制约构成整体。纳什优化作为一种迭代式优化算法，可以用于车辆队列系统中，为每一个子车辆寻找自身的最优解，判断整个系统是否满足迭代终止条件，满足，迭代就会终止；反之，每一个子车辆之间会再次通信跟新状态信息并进入下一次迭代，直至整个系统收敛到纳什均衡点。

纳什最优也是一种局部最优，并不是全局最优。在基于纳什迭代的分布式预测控制中，每一个子车辆都参与进迭代过程中，通过各个子系统之间的通信来交换彼此的状态，为迭代求解提供信息，通过固定的迭代次序优化自身的性能指标，整个系统最终达到纳什均衡点^[62]。对于有 N 辆车的车辆队列，纳什最优条件如下式所示

$$\begin{aligned} J_i(u_1^*(k), \dots, u_i^*(k), \dots, u_N^*(k)) \\ \leq J_i(u_1^*(k), \dots, u_i(k), \dots, u_N^*(k)) \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

当整个车辆队列系统满足上式则表明系统已经达到纳什均衡。任何一个子车辆都已采用当前时刻对整个系统最有利的选择。每个车辆在求得纳什最优解时，都需要知道其他车辆对应优化问题的纳什最优解，分布式预测控制中各个子车辆通过通信分享相互的最优解。

纳什最优需要每一个子车辆对自身的最优解给出一个预估值，传递自身的预估值并接收其他子车辆的预估值，随后求解自身的优化问题；然后每个子车辆比较新求出的最优解与刚刚传递出去的最优解，根据终端迭代条件判断是否需要继续进行迭代，并通过通信网络通知给其他子车辆结果。如果不满足终止迭代条件，则说明整个车队还未达到纳什平衡，还需要进一步改变控制决策来使整个系统达到纳什最优，因此需要继续迭代直至满足给定的精度。

本章提出基于纳什迭代分布式模型预测控制算法来解决车辆编队控制问题，在每一次迭代中，每个车辆接收到通信车辆传递的状态信息，并求解自身的优化问题，计算当前迭代最优控制量，当满足迭代收敛条件即预估值与真实值相差不多或者达到最大迭代次数，则终止迭代，如果相差较多，则更新预估值并再次通信进入下一次迭代，具体的分布式模型预测控制算法如下：

step1 在 k 时刻，每个车辆给出控制量的预估初值，并通知给其它车辆，令 $l = 0$,

$$U_{i,M}^l(k) = [u_i^l(k), u_i^l(k+1), \dots, u_i^l(k+M-1)]^T$$

step2 每个车辆并行地计算各自的预测控制优化问题，得到本次迭代的最优解 $U_{i,M}^{l+1}(k)$ 。

step3 检查所有车辆的预估迭代收敛条件是否满足，即对给定的精度 ε_i 是否存在下式条件

$$\| U_{i,M}^{l+1}(k) - U_{i,M}^l(k) \| \leq \varepsilon_i$$

如果所有车辆的迭代收敛条件均成立，则 $U_{i,M}^*(k) = U_{i,M}^{l+1}(k)$ 迭代计算结束，跳转到Step 4；否则，令 $U_{i,M}^l(k) = U_{i,M}^{l+1}(k), l = l + 1$ ，返回Step 2。

step4 取 k 时刻最优控制序列的第一个控制量 $u_i(k) = \begin{bmatrix} I & \dots & 0 \end{bmatrix} U_{i,M}^*(k)$ ，并将该控制量作用给车辆。

step5 滚动移位到下一时刻，即 $k + 1 \rightarrow k$ ，返回到Step 1，重复以上过程。

3.4 仿真结果及分析

在本节主要通过MATLAB仿真来验证所设计的基于纳什迭代的分布式模型预测控制算法是否能够解决车辆编队的控制问题，考虑了四辆车的车队，并且采用前车跟随拓扑(一个领航车，三辆跟随车)，如图 3.2 所示。将四辆车均考虑为质点模型，将前车加速度考虑为干扰输入。

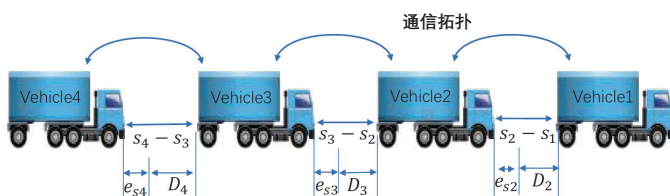


图 3.2 车队位置信息

仿真工况：1) 领航车的位置和速度为 $s_1 = 30, v_1 = 0m/s$ ，其余三辆车的位置分别为 $20m, 12m, 6m$ 。初始速度均为 $0m/s$ ，由领航车开始匀加速行驶，其余三辆车跟随领航车开始行驶形成队列；

2) 当领航车加速到12秒时开始缓慢降低自身的加速度直至为0，随后保持匀速行驶，整个队列保持稳定速度行驶。

领航车的加速度信息如式 3.4.1所示，具体的车辆状态信息如表 3.1所示，权重信息如表 3.2所示， Q, R 为目标函数的权值信息， N, P 表示采取的预测时域步长和控制时域步长， d_0 和 h 表示最小安全距离和车头时距， C 表示输出状态矩阵。

表 3.1 车辆初始状态信息

车辆序号	车辆初始位置	车辆初始速度	车辆初始加速度
领航车	30m	0m/s	1.5m/s ²
2车	20m	0m/s	0m/s ²
3车	12m	0m/s	0m/s ²
4车	6m	0m/s	0m/s ²

表 3.2 权重

权重	Q	R	N	P	d_0	h	C	u_{\max}	u_{\min}
数值	diag(20,16,6)	1	15	15	0	1	diag(1,1,1)	3	-3

$$a_1 = \begin{cases} 1.5 & t \leq 12s \\ 1.5 - 0.1t & 27s \geq t > 12s \\ 0 & t > 27s \end{cases} \quad (3.4.1)$$

根据设定的仿真环境进行数值仿真，整个车队的车辆纵向位置信息如图 3.3(a)所示；整个车队的前后车的车间距关系如图 3.3(b)所示；整个车队的速度信息如图 3.3(c)所示；车队的前后车速度差如图 3.3(d)所示；车队中的加速度信息如图 3.3(e)所示。

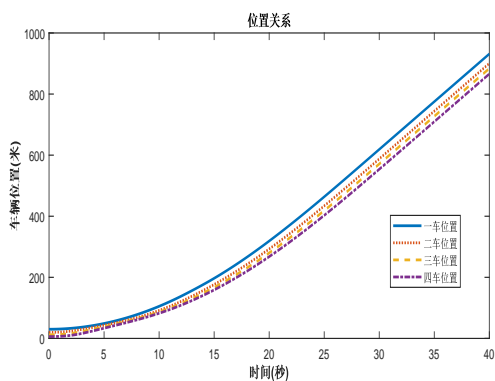
由仿真图可以看出车间距随着车速的上升也在增加，且最终稳定在1秒的车头时距。从初始情况4辆车形成车队，随着车速的变化，整个车队队形也随之变化；当车速稳定的时候，整个车队也趋于稳定，所设计的基于纳什迭代的分布式模型预测控制可以实现控制车辆编队的形成以及稳定行驶。

为了验证所设计的算法对车队抗扰性，在领航车的加速度中加入了扰动信息，加速度的扰动如式 3.4.2所示，即车队在行驶过程中有加速度的突变。

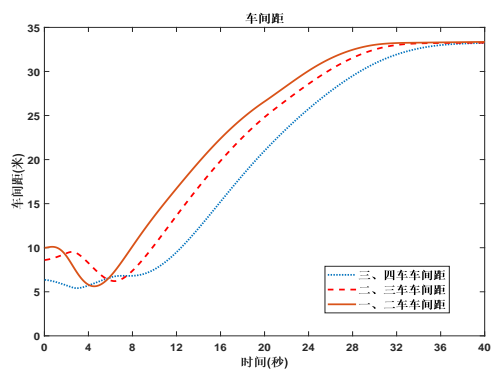
$$w = \begin{cases} 0.2 & t \in [20, 20.2] \\ 0 & t \notin [20, 20.2] \end{cases} \quad (3.4.2)$$

根据所设计的工况进行数值仿真，在存在扰动的前提下整个车队的车间距情况如图 3.4(a)所示；车队中车速情况如图 3.4(b)所示，车队中前后车车速偏差如图 3.4(c)所示，整个车队的加速度信息如图 3.4(d)所示。从仿真图可以看出当领航车的加速度发生跳变，整个车队仍然可以及时的恢复，对车间距和车速的影响不大。

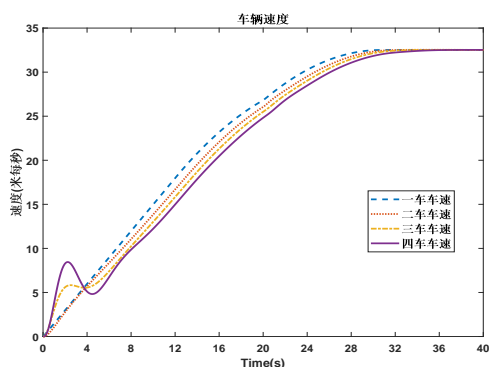
为了观察基于迭代的分布式模型预测控制器的控制效果，另外设计了线性反馈控制器，控制量采用公式 $u = k_1 e_s + k_2 e_v + k_3 e_a$ ，式中 e_s 、 e_v 、 e_a 表示前后两车之间的位



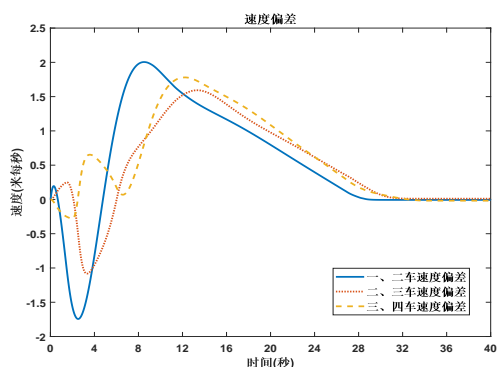
(a) 车队位置信息



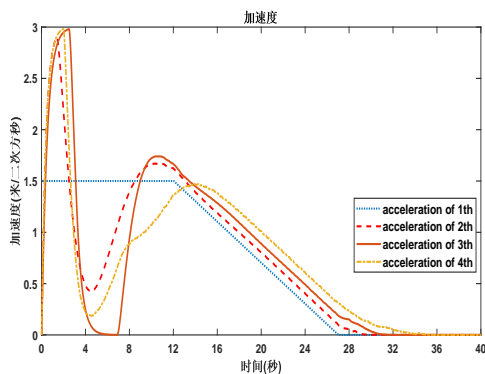
(b) 车间距信息



(c) 速度信息



(d) 速度偏差信息



(e) 加速度信息

图 3.3 车队车辆状态

置偏差，速度偏差和加速度偏差，利用相应的偏差乘以相应的权值作为反馈控制的输入，并作用回第二章的车辆模型。设置 $k_1 = 1, k_2 = 0.8, k_3 = 0.4$ [54]，采用不加扰动的仿真工况，仿真结果如图 3.5所示，经过与前文基于纳什迭代的分布式预测控制方法比较，可以看到虽然线性反馈控制仍然可以保证车队形成队列，但是车队的加速度瞬间值可以达到 $6m/s^2$ ，与车辆实际行驶过程不符。在形成车辆队列的过程中车各车之间的

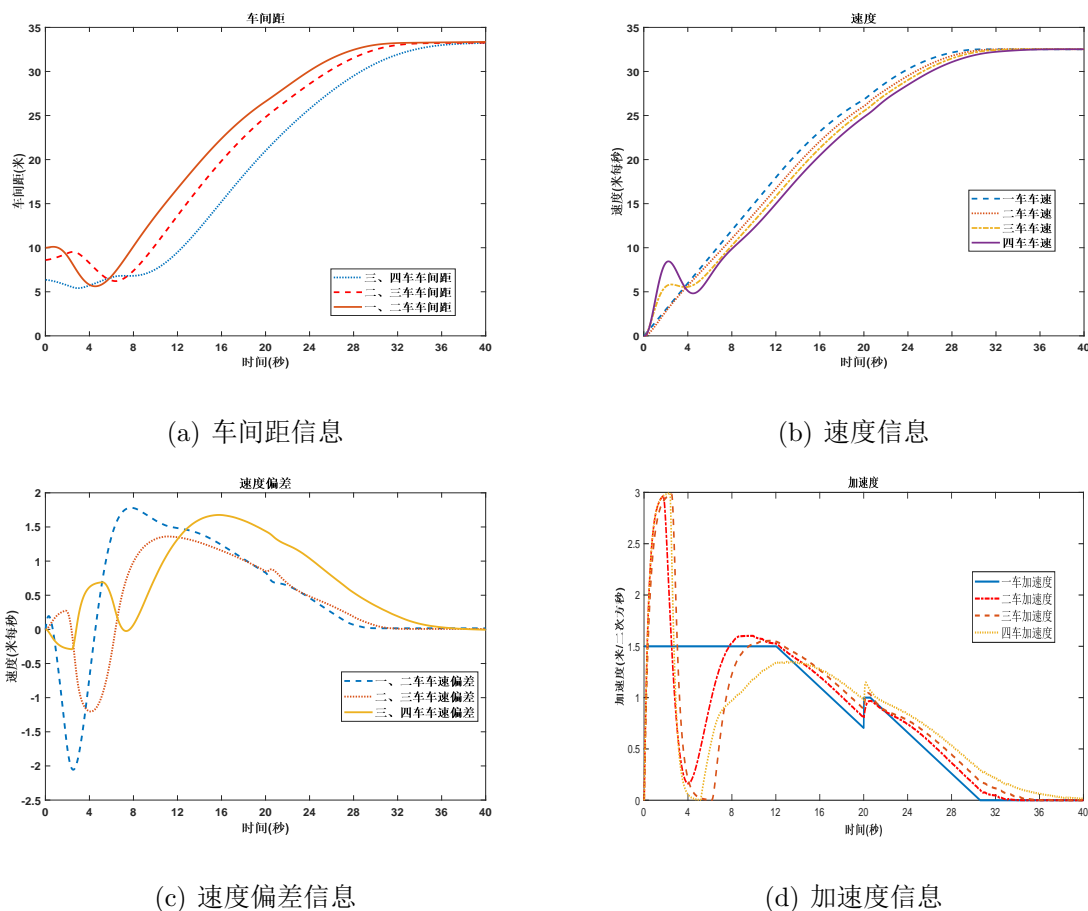


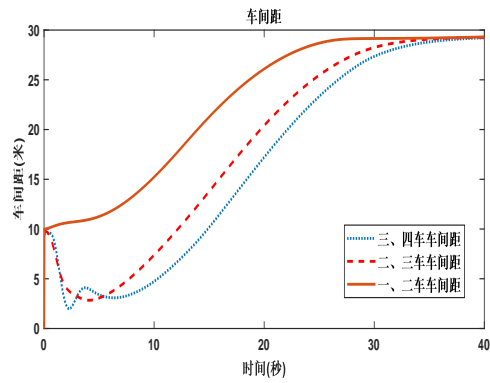
图 3.4 车队车辆状态(存在扰动)

车速差距过大，整个控制效果不如分布式模型预测控制效果顺滑。

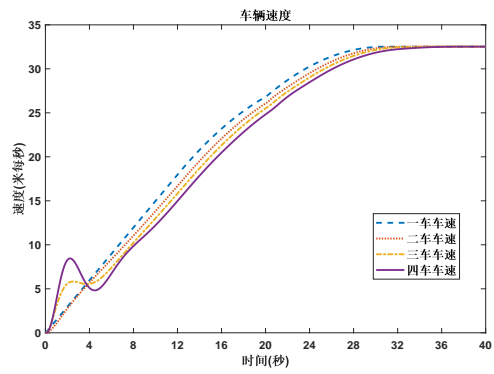
从仿真结果可以看出本章所设计的基于迭代的分布式MPC算法可以实现车辆的编队控制，并且在有扰动的情况下依然可以车辆队列的编队行驶。

3.5 本章小结

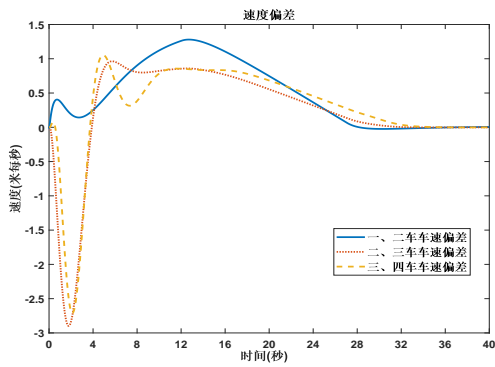
本章设计了车辆队列的基于纳什迭代的分布式模型预测控制器，通过数值仿真实验以及与线性反馈控制方法作对比，证实了基于迭代的分布式模型预测控制算法的有效性，以及处理带约束优化问题的优越性。



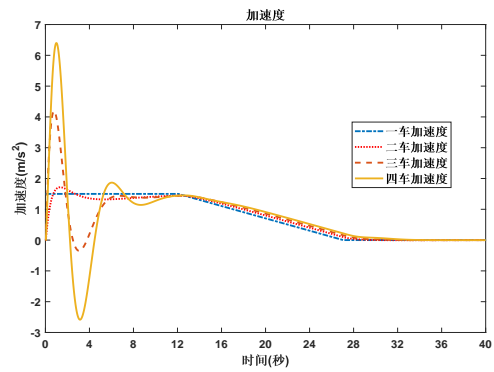
(a) 车间距信息



(b) 速度信息



(c) 速度偏差信息



(d) 加速度信息

图 3.5 车队车辆状态(线性反馈控制)

第4章 保证串稳定性的分布式预测控制算法

前面我们采用基于纳什迭代的分布式预测控制算法实现了车辆编队的控制。在每一个采样时刻，通过重复通信交换控制器信息，以及迭代计算来使整个车队达到纳什均衡，但是因为引入了重复通信与迭代控制也增加了车队中的计算负担。为了解决这一问题，在本章提出改进的分布式控制算法，并进一步证明设计的控制算法能够保证车队的串稳定性。

4.1 车辆队列系统描述及串稳定性定义

在本小节，采用跟踪理想参考位置的状态偏差模型与单车运动学模型来构建整个车辆队列模型，随后又介绍了车辆编队行驶的串稳定性定义。

4.1.1 车队系统描述

如第三章所示，想要对整个车辆队列进行控制，首先需要对整个车辆队列进行描述。考虑纵向直线行驶的拥有 N 辆车的车辆队列(1辆领航车， $(N - 1)$ 辆跟随车)，对于第 i 辆车的位置和速度都可以用 $(x_i(t), v_i(t))$ 来进行表示，同时为了解决第三章的控制算法所带来的计算负担，本节采用跟踪理想参考位置的方法，不再跟踪前车，领航车跟踪由云端提供的根据前方路况信息所给出的轨迹和速度 $x_L(t), v_L(t)$ 。对于任意一辆车 $j(j \geq 2)$ 的参考位置和参考速度用 $x_L(t) - (j - 1)d_{des}$ 和 $v_L(t)$ 来表示， d_{des} 表示车辆之间的理想车间距。继续沿用第三章采用反馈线性化后的三阶线性运动学模型，采用期望加速度 a_{des} 作为控制输入，如下式所示

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \\ \dot{v} &= a \\ \dot{a} &= -c^{-1}a + c^{-1}u \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

x 为车辆的位置， v 为车辆的速度， a 为车辆的实际加速度， c 为时间常数。与第二章的跟踪前车类似，跟踪参考位置也可以构建偏差模型，利用车辆当前位置和其参考位置构建偏差状态

$$\begin{cases} x_{i,e}(t) = x_i(t) - x_L(t) + (i - 1)d_{des} \\ v_{i,e}(t) = v_i(t) - v_L \end{cases} \quad (4.1.2)$$

进一步根据单车模型与状态偏差模型构建系统的状态空间方程如下式所示

$$\begin{aligned} \dot{z}_i(t) &= Az_i(t) + B_1u_i(t) + B_2\omega(t) \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -(i-1)h_i \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{c} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{c} \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ z_i &= [x_{i,e} \quad v_{i,e} \quad a_i]^T, \quad u = a_{i,des}, \quad \omega = a_L \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

4.1.2 车辆队列的串稳定性

对于一队正在行驶的车辆队列，当需要进行车速调整或者遇到突发情况时，每辆车的位置状态偏差随着车辆队列的传播而发生变化。

车辆队列的串稳定性定义：当稳定行驶的车辆队列发生车速变化时，对于车队中的任意一辆车，它与前车之前的最大车间距误差是要小于前车与“前车的前车”的车间距误差。也就是说串稳定性要求整个车队在所设计的控制器的作用下，车间距误差随着车辆队列的延伸呈逐渐减小的趋势。可以下式来定义车队的串稳定性

$$\max_{t \geq 0} |x_{i,e}(t)| \leq \alpha_i \max_{t \geq 0} |x_{(i-1),e}(t)| \quad (4.1.4)$$

对于任意一个车辆*i*，存在一个常数 $\alpha_i \in (0, 1)$ 能够使得上式成立，则证明队列尾部的车间距误差是依次小于前一辆车的车间距误差。这样便保证了整个车队的串稳定性，如图 4.1所示

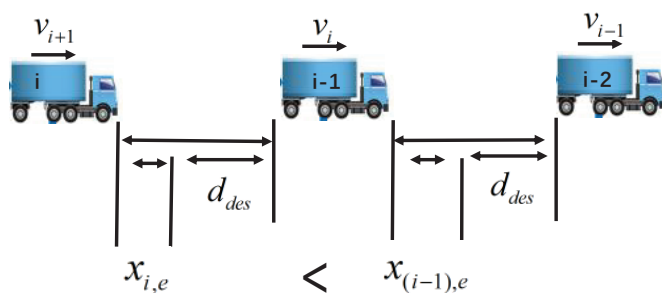


图 4.1 串稳定性

4.2 保证串稳定性的分布式预测控制器设计

在本小节，采用分布式预测控制方法研究车辆编队控制问题，将编队行驶分成两

部分：1) 车队在稳定行驶时需要改变车速的第一时刻，2) 改变车速后的其余时刻。在不同部分，求解优化问题的时加入不同的保证串稳定性的约束，并以此来保证车队行驶的串稳定性。

4.2.1 编队优化问题

如第三章所示，模型预测控制可以对未来预测时域内的状态进行预测。定义预测时域为 T ，采用时间为 δ ($\delta > 0$)，则时刻可以表示为 $t_k = t_0 + \delta k$ 其中 $t_0 = 0, k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 。

定义在 t_k 时刻的预测时域内的最大位置偏差，和一个采样时刻内的最大位置偏差定义如下式所示

$$\begin{aligned} |x_{j,e}^*(t; t_k)|_{\infty} &= \max_{t \in [t_k, t_k + T]} |x_{j,e}^*(t; t_k)| \\ |x_{j,e}^*(t; t_k)|_{\infty, \delta} &= \max_{t \in [t_k, t_k + \delta]} |x_{j,e}^*(t; t_k)| \end{aligned}$$

为了取代再次通信与迭代来确定通信车辆的状态信息，本章设计一种“虚拟”状态轨迹^[63]，顾名思义，“虚拟”状态轨迹是对车辆未来状态的假设，以此来代替重复通信获得通信车辆的信息。

对于任意一个预测区间内 $[t_k, t_k + T], \tau \in [t_k, t_k + T]$ 有三种状态轨迹分别是： $z_i^p(\tau; t_k)$ 表示车辆的预测状态轨迹； $z_i^*(\tau; t_k)$ 表示车辆的最优状态轨迹； $\hat{z}_i(\tau; t_k)$ 表示车辆的“虚拟”状态轨迹，其中“虚拟”状态轨迹用来传递给通信车辆，作为当前车辆状态轨迹的预测，车辆“虚拟”状态轨迹的定义如下式所示。

$$\hat{z}_i(\tau; t_{k+1}) = \begin{cases} z_i^*(\tau; t_k), & \tau \in [t_{k+1}, t_k + T] \\ z_i^*(t_k + T; t_k), & \tau \in [t_k + T, t_{k+1} + T] \end{cases} \quad (4.2.1)$$

同上一章相同，编队行驶便是希望整个车辆队列可以以固定的队形以及相同的车速共同行驶，车车之间的距离可以保障为期望车间距，由此抽象出控制目标：车队中的任意车辆与它的参考位置和参考速度的误差趋近于0，如下式所示

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x_{i,e}(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} v_{i,e}(t) = 0 \end{cases} \quad (4.2.2)$$

车队保证队形的行驶过程中还需要保证车队行驶的安全性、整体性与乘客舒适度如(3.3.1), (3.3.2), (3.3.3)所示。对于第一部分的（车辆在稳定行驶时需要改变车速的第一时刻）分布式预测优化问题如下所示

$$\underset{u_i^p(\cdot; t_0)}{\text{minimize}} J_i(z_i^p(\cdot; t_0), u_i^p(\cdot; t_0))$$

subject to:

$$\dot{z}_i^p(\tau; t_0) = Az_i(\tau; t_0) + B_1 u_i^p(\tau; t_0) + B_2 w(\tau; t_0), \tau \in [t_0, t_0 + T] \quad (4.2.3a)$$

$$z_i^p(t_0; t_0) = z_i(t_0) \quad (4.2.3b)$$

$$(1 - \xi_i) \gamma_i |x_{1,e}^*(\tau; t_0)| \leq |x_{i,e}^p(\tau; t_0)| \leq (1 + \xi_i) \gamma_i |x_{1,e}^*(\tau; t_0)| \quad (4.2.3c)$$

$$x_{i,e}(\tau; t_0) \in [x_{i,e,\min}, x_{i,e,\max}] \quad (4.2.3d)$$

$$v_{i,e}(\tau; t_0) \in [v_{i,e,\min}, v_{i,e,\max}] \quad (4.2.3e)$$

$$u_i(\tau; t_0) \in [u_{i,\min}, u_{i,\max}] \quad (4.2.3f)$$

其中

$$J_i(z_i^p(\cdot; t_0), u_i^p(\cdot; t_0)) = \int_{t_0}^{t_0+T} \left\{ \|z_i^p(\tau; t_0)\|_{Q_i}^2 + \|(z_i^p(\tau; t_0) - \hat{z}_i(\tau; t_0))\|_{F_i}^2 + \|(z_i^p(\tau(s); t_0) - \hat{z}_{i-1}(\tau; t_0))\|_{G_i}^2 + \|u_i^p(\tau; t_0)\|_{R_i}^2 \right\} d\tau$$

上式中 Q_i, F_i, G_i 均为正定矩阵，考虑本章所有车辆均为同质车，所以都采用相同的正定矩阵。 $\|(z_i^p(\tau; t_0) - \hat{z}_i(\tau; t_0))\|_{F_i}^2$ 为移动抑制项； $\|(z_i^p(\tau(s); t_0) - \hat{z}_{i-1}(\tau; t_0))\|_{G_i}^2$ 为相邻两车的相对误差。公式(4.2.3c)为第一部分初始时刻的串稳定性约束，是为了保证在初始时刻车队中所有车辆的最大位置偏差可以随着车队的延伸而减小，为其余时刻的串稳定性做保障，式中 $\xi_i, \gamma_i \in (0, 1)$ 为参数。

对于第二部分的（改变车辆速度的其余时刻）分布式预测优化问题如下所示

$$\underset{u_i^p(\cdot; t_k)}{\text{minimize}} J_i(z_i^p(\cdot; t_k), u_i^p(\cdot; t_k))$$

subject to:

$$\dot{z}_i^p(\tau; t_k) = Az_i(\tau; t_k) + B_1 u_i^p(\tau; t_k) + B_2 w(\tau; t_k), \tau \in [t_k, t_k + T] \quad (4.2.4a)$$

$$z_i^p(t_k; t_k) = z_i(t_k) \quad (4.2.4b)$$

$$\left| x_{i,e}^p(\tau; t_k) - \hat{x}_{i,e}(\tau; t_k) \right|_{\infty} \leq \varepsilon_{i,k+1} \min \left\{ |\hat{x}_{i-1,e}(\tau; t_k)|_{\infty, \delta}, |x_{i,e}^p(\tau; t_k)|_{\infty, \delta} \right\} \quad (4.2.4c)$$

$$x_{i,e}(\tau; t_k) \in [x_{i,e,\min}, x_{i,e,\max}] \quad (4.2.4d)$$

$$v_{i,e}(\tau; t_k) \in [v_{i,e,\min}, v_{i,e,\max}] \quad (4.2.4e)$$

$$u_i(\tau; t_k) \in [u_{i,\min}, u_{i,\max}] \quad (4.2.4f)$$

$$J_i(z_i^p(\cdot; t_k), u_i^p(\cdot; t_k)) = \int_{t_k}^{t_k+T} \left\{ \|z_i^p(\tau; t_k)\|_{Q_i}^2 + \|(z_i^p(\tau; t_k) - \hat{z}_i(\tau; t_k))\|_{F_i}^2 + \|(z_i^p(\tau(s); t_k) - \hat{z}_{i-1}(\tau; t_k))\|_{G_i}^2 + \|u_i^p(\tau; t_k)\|_{R_i}^2 \right\} d\tau$$

第二部分的优化问题与第一部分的区别表现在式(4.2.4c)，该式是对于当前车辆的预测位置偏差和“虚拟”位置偏差做了一个限定，为了保证后续时刻车辆队列的串稳定性，式中 $\varepsilon_{i,k+1}$ 为参数。

本章控制器研究须在以下假设的基础上进行：

- 1) 车辆队列中所有车均视为质点且为同质车，且仅研究车辆的纵向行驶过程。
- 2) 所有车辆的“虚拟”状态轨迹均是由可行解计算出来的，并且在加入串稳定性约束后，分布式模型预测控制器仍然可以求出可行解。
- 3) 车队中的每辆车都安装了车内时钟，并且车内时钟是同步的。每辆车都可准时接收到通信车辆传递的“虚拟”状态轨迹，期间不会发生数据丢失等情况。

4.2.2 控制算法

为了保证编队行驶的串稳定性，在本节设计了保证串稳定性的分布式预测控制编队算法^[64]。下面对整个编队控制算法流程进行介绍，整个控制算法分为两部分，分别为改变期望车速之前与改变期望车速之后。

在即将改变参考车速之前，整个车队处于稳定状态，在 $(-\delta, 0)$ ，由领航车传递出想要改变的期望车速，所有的车辆将会接收到新的期望车速，具体步骤如下所示：

算法一步1 领航车求解自身的优化问题(4.2.3)（不加入式(4.2.3c)的约束），计算出自身的位置偏差 $x_{1,e}^*(\cdot; t_0)$ ，并传递给其他车辆。

算法一步2 车队中的其余车辆接收到期望车速和领航车的位置偏差，求解自身的优化问题式(4.2.3)，并将求得的控制量作用给本车。

当初始时刻的控制器求解结束后，对于其余时刻 $[t_k, t_{k+1}]$, $k \in \mathbb{N}$ ，控制算法如下所示

算法二步1 第 i 辆车应用 t_k 时刻的控制输入计算预测状态序列 $z_i(t_{k+1}) = z_i^*(t_{k+1}; t_k)$

算法二步2 计算自身的“虚拟”状态轨迹 $\hat{z}_i(\tau; t_{k+1})$ 如式(4.2.1)所示。

算法二步3 传递自身的“虚拟”状态轨迹给通信车辆，并接收通信车辆 j 的“虚拟”状态轨迹 $\hat{z}_j(\tau; t_{k+1})$ ，用于求解自身的目标函数。

算法二步4 每辆车求解本车的优化问题(4.2.4)求得本车的控制量序列 $u_i^*(\tau; t_k)$ 。

算法二步5 将求得的控制量的第一个值作用回自身，滚动到下一时刻，重复进行。

算法二第二步中的“虚拟”状态轨迹是利用“虚拟”输入计算得到的，“虚拟”输入的计算方法如公式(4.2.5)所示，下一时刻的“虚拟”控制输入采用的是上一时刻计算得到预测控制序列，而最后缺少的预测值用0代替，这样便组成了“虚拟”控制输入序列，并根据得到的“虚拟”控制序列和当前时刻的状态值计算得到“虚拟”状

态轨迹。

$$\hat{u}_i(\tau; t_{k+1}) = \begin{cases} u_i^*(\tau; t_k), & \tau \in [t_{k+1}, t_k + T) \\ 0, & \tau \in [t_k + T, t_{k+1} + T] \end{cases} \quad (4.2.5)$$

整个控制过程可以分成两个部分，第一部分是初始时刻也就是即将改变参考速度的时刻，采用初始时刻的控制算法，求解加入初始时刻控制约束的优化问题。第二部分是剩余时刻的编队控制，采用加入保证串稳定性约束的控制方法，对整个车队进行控制。

4.2.3 串稳定性证明

如果车队行驶时不存在数据丢失、时延等干扰情况。只需要找到当前车辆的最大位置偏差与前车的最大位置偏差之间的关系，那么便可以证明整个车队的串稳定性。

定理： 如果所有车辆的优化问题在任意时刻均有可行解，对于车队中的所有车辆都采用上述算法一和算法二进行优化问题求解，并且参数选择如下所示， $i = 2, \dots, N$ ，可保证整个车辆队列串稳定性。

$$\beta_i + \beta_i \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_{i-1,k} + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_{i,k} (1 + \varepsilon_{i-1,k}) < 1 \quad (4.2.6)$$

证明 对于初始时刻，我们通过求解带约束的优化问题(4.2.3)可以得到关于第 i 和第 $i-1$ 辆车的位置偏差关系，如下式所示

$$(1 - \xi_i) \gamma_i |x_{1,e}^*(t; t_0)| \leq |x_{i,e}^*(t; t_0)| \leq (1 + \xi_i) \gamma_i |x_{1,e}^*(t; t_0)| \quad (4.2.7)$$

$$(1 - \xi_{i-1}) \gamma_{i-1} |x_{1,e}^*(t; t_0)| \leq |x_{i-1,e}^*(t; t_0)| \leq (1 + \xi_{i-1}) \gamma_{i-1} |x_{1,e}^*(t; t_0)| \quad (4.2.8)$$

观察(4.2.7)(4.2.8)可以看到第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的位置偏差都与领航车的位置偏差有关，所以可以通过对第 i 辆车位置偏差的上限与第 $i-1$ 辆车的下限建立某种关系来建立第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的最大位置关系。设置参数如下式所示

$$\begin{aligned} \beta_2 &= (1 + \xi_2) \gamma_2 \\ \beta_i &= ((1 + \xi_i) / (1 - \xi_{i-1})) (\gamma_i / \gamma_{i-1}), \quad i = 3, \dots, N \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

利用上式参数的设置,可以使得公式(4.2.8)的下界等于(4.2.7)的上界,来保证保证

$$|x_{i,e}^*(t; t_0)| \leq \beta_i |x_{i-1,e}^*(t; t_0)|, \quad \forall t \in [t_0, t_0 + T] \quad (4.2.10)$$

利用初始时刻当前车辆与前车最大位置偏差的关系式，通过选取合适的参数 β_i ，来保证最大位置偏差是依次递减的。

通过设置参数，并求解初始时刻的优化问题，可以得到相邻两车的最大位置误差的关系式

$$|x_{i,e}^*(t; t_0)|_{\infty, \delta} \leq \beta_i |x_{i-1,e}^*(t; t_0)|_{\infty, \delta} \quad (4.2.11)$$

由初始时刻 t_0 出发，进一步推到当 t_1 时相邻两车的最大位置误差关系，对于第 i 辆车，利用三角不等式 $|A| + |C| \geq |A - C|$

$$\begin{cases} |x_{i,e}^*(t; t_1) - \hat{x}_{i,e}(t; t_1)| = A \\ |\hat{x}_{i,e}(t; t_1)| = C \end{cases}$$

可以得到下式关系

$$|x_{i-1,e}^*(t; t_1)| \leq |x_{i-1,e}^*(t; t_1) - \hat{x}_{i-1,e}(t; t_1)| + |\hat{x}_{i-1,e}(t; t_1)| \quad (4.2.12)$$

将上式与优化问题的约束 $|x_{i,e}^p(t; t_{k+1}) - \hat{x}_{i,e}(t; t_{k+1})|_{\infty} \leq \varepsilon_{i,k+1} |\hat{x}_{i-1,e}(t; t_{k+1})|_{\infty, \delta}$ 联立可以得到下式

$$|x_{i,e}^*(t; t_1)| \leq \varepsilon_{i,1} |\hat{x}_{i-1,e}(t; t_1)|_{\infty, \delta} + |\hat{x}_{i,e}(t; t_1)| \quad (4.2.13)$$

从上式可以看到第 i 辆车的最大位置偏差与第 $i-1$ 辆车的“虚拟”偏差有关，进一步利用三角不等式

$$\begin{cases} |x_{i-1,e}^p(t; t_{k+1}) - \hat{x}_{i-1,e}(t; t_{k+1})|_{\infty} = A \\ |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} = C \end{cases}$$

与约束 $|x_{i-1,e}^p(t; t_{k+1}) - \hat{x}_{i-1,e}(t; t_{k+1})|_{\infty} \leq \varepsilon_{i-1,k+1} |x_{i-1,e}^p(t; t_{k+1})|_{\infty, \delta}$ 联立，对第 $i-1$ 辆车构造下式

$$|\hat{x}_{i-1,e}(t; t_1)| \leq \varepsilon_{i-1,1} |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} + |x_{i-1,e}^*(t; t_1)| \quad (4.2.14)$$

由“虚拟”状态轨迹的定义(4.2.1)可得上一时刻的位置偏差与下一时刻的“虚拟”位置偏差是相同的，根据初始条件的结论(4.2.11)可得下式

$$|\hat{x}_{i,e}(t; t_1)| \leq \beta_i |\hat{x}_{i-1,e}(t; t_1)| \quad (4.2.15)$$

将公式(4.2.15)与(4.2.14)代入到(4.2.12)中，可以进一步得到 t_1 时刻相邻两车的位置偏差关系

$$|x_{i,e}^*(t; t_1)| \leq (\varepsilon_{i,1} (1 + \varepsilon_{i-1,1}) + \beta_i \varepsilon_{i-1,1}) |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} + \beta_i |x_{i-1,e}^*(t; t_1)| \quad (4.2.16)$$

因为 $|x_{i-1,e}^*(t; t_1)| \leq |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta}$ ，所以可以得到下相邻两车的最大位置误差关系。

$$|x_{i,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} \leq (\beta_i + \varepsilon_{i,1} (1 + \varepsilon_{i-1,1}) + \beta_i \varepsilon_{i-1,1}) \times |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} \quad (4.2.17)$$

这样便得到了 t_1 时，前后两车的最大间距误差关系。

沿用关于(4.2.14)的证明思路，利用三角不等式与约束条件，对于时间间隔 $[t_2, t_2 + T]$ 内，利用三角不等式

$$\begin{cases} |x_{i,e}^*(t; t_2) - \hat{x}_{i,e}(t; t_2)| = A \\ |\hat{x}_{i,e}(t; t_2)| = C \end{cases}$$

并将约束 $|x_{i-1,e}^p(t; t_{k+1}) - \hat{x}_{i-1,e}(t; t_{k+1})|_{\infty} \leq \varepsilon_{i-1,k+1} |x_{i-1,e}^p(t; t_{k+1})|_{\infty, \delta}$ 带入, 可以得到下式

$$|x_{i,e}^*(t; t_2)| \leq \varepsilon_{i,2} (1 + \varepsilon_{i-1,2}) |x_{i-1,e}^*(t; t_2)|_{\infty, \delta} + |\hat{x}_{i,e}(t; t_2)| \quad (4.2.18)$$

利用约束条件(4.2.1.c)与推出(4.2.14)的思路一致, 我们可以进一步推出下式

$$\begin{aligned} |\hat{x}_{i,e}(t; t_2)| &\leq (\varepsilon_{i,1} (1 + \varepsilon_{i-1,1}) + \beta_i \varepsilon_{i-1,1}) |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} + \beta_i |\hat{x}_{i-1,e}(t; t_2)| \\ &\leq (\varepsilon_{i,1} (1 + \varepsilon_{i-1,1}) + \beta_i \varepsilon_{i-1,1}) |x_{i-1,e}^*(t; t_1)|_{\infty, \delta} \\ &\quad + \beta_i \varepsilon_{i-1,2} |x_{i-1,e}^*(t; t_2)|_{\infty, \delta} + \beta_i |x_{i-1,e}^*(t; t_2)| \end{aligned} \quad (4.2.19)$$

对于所有的 $t \in [t_2, t_2 + T]$, 将上式整理可以进一步推出

$$\begin{aligned} |x_{i,e}^*(t; t_2)| &\leq \beta_i |x_{i-1,e}^*(t; t_2)| + \max_{l=1,2} |x_{i-1,e}^*(t; t_l)|_{\infty, \delta} \\ &\quad \times \left(\beta_i (\varepsilon_{i-1,1} + \varepsilon_{i-1,2}) + \sum_{j=1}^2 \varepsilon_{i,j} (1 + \varepsilon_{i-1,j}) \right) \end{aligned}$$

与(4.2.17)同理, 存在 $|x_{i-1,e}^*(t; t_2)| \leq |x_{i-1,e}^*(t; t_2)|_{\infty, \delta}$, 进一步将式子简化可以得到 t_2 时刻相邻两车的最大车间距误差关系

$$|x_{i,e}^*(t; t_2)|_{\infty, \delta} \leq \max_{l=1,2} |x_{i-1,e}^*(t; t_l)|_{\infty, \delta} \times \left(\beta_i + \beta_i (\varepsilon_{i-1,1} + \varepsilon_{i-1,2}) + \sum_{j=1}^2 \varepsilon_{i,j} (1 + \varepsilon_{i-1,j}) \right) \quad (4.2.20)$$

进行归纳推理, 对于 t_n 时刻的车间距误差关系

$$|x_{i,e}^*(t; t_n)|_{\infty, \delta} \leq \max_{l=0, \dots, n} |x_{i-1,e}^*(t; t_l)|_{\infty, \delta} \times \left(\beta_i + \beta_i \sum_{k=1}^n \varepsilon_{i-1,k} + \sum_{k=1}^n \varepsilon_{i,k} (1 + \varepsilon_{i-1,k}) \right) \quad (4.2.21)$$

从上式可以看出要想确定相邻两车之间的最大位置偏差关系, 可以通过对 $\{\beta_i, \varepsilon_i\}$ 进行参数给定就可以满足车辆编队行驶的串稳定性, 设 $\varepsilon_{i,k} = \varepsilon_i^k, \varepsilon_i = \xi$ 并利用 $\sum_{n=0}^{\infty} x^n = 1 + x + x^2 + \dots = 1/(1-x), |x| < 1$ 的结论进一步对参数进行简化得到

$$\begin{aligned} &\beta_i + \beta_i \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_{i-1,k} + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_{i,k} (1 + \varepsilon_{i-1,k}) \\ &= \beta_i + \beta_i \left[\frac{1}{1-\varepsilon_{i-1}} - 1 \right] + \frac{1}{1-\varepsilon_i} + \frac{1}{1-\varepsilon_{i-1}\varepsilon_i} - 2 \\ &= \frac{\beta_i}{1-\varepsilon_{i-1}} + \frac{1}{1-\varepsilon_i} + \frac{1}{1-\varepsilon_{i-1}\varepsilon_i} - 2 \end{aligned}$$

进一步只需要给定 $\{\beta_i, \varepsilon_i\} \in (0, 1)^2$ 来满足下式, 进而保证车辆队列的串稳定性

$$\frac{\beta_i}{1-\varepsilon_{i-1}} + \frac{1}{1-\varepsilon_i} + \frac{1}{1-\varepsilon_{i-1}\varepsilon_i} < 3 \quad (4.2.22)$$

4.3 算法的MATLAB仿真及分析

在本章节主要通过MATLAB仿真来验证设计的保证串稳定性的分布式模型预测控制能否解决车辆编队控制的串稳定性问题。考虑四辆车, 采用前车-领航车跟随拓扑(一

辆领航车，三辆跟随车)如图 4.2所示，四辆车均视为质点模型，将仿真实验分成两部分，分别为形成队列过程（不加入串稳定性约束），和出现瞬态车速变化的情况下（加入串稳定性约束）实验。

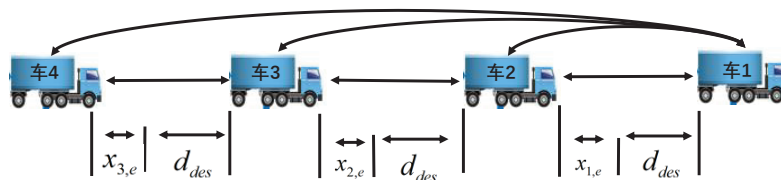


图 4.2 前车-领航车跟随拓扑

仿真工况：1) 将领航车的位置与速度设置为 $x_1 = 50m, v_1 = 0m/s$ ，其余三辆车分别为 $40m$ $30m$ $20m$ 的初始位置，初始速度也设置为 $0m/s$ ；

2) 采用固定车头时距与第三章一样，由领航车开始匀加速行驶，其余三辆车跟随领航车开始行驶形成队列；

3) 当领航车加速到15秒时，开始缓慢降低自身的加速度直至为0，随后整个车队稳定匀速行驶；

3) 在行驶至60秒时，期望车速发生突变持续了一秒后又恢复正常。

期望轨迹的加速度信息如式 (4.3.1)所示，车辆初始状态信息如表 4.1所示，目标函数的权重信息如表 4.2所示，约束参数信息如表 4.3所示， Q, F, G, R 为目标函数的权值信息， N, P 表示采取的预测时域步长和控制时域步长， d_0 和 h 表示最小安全距离和车头时距， C 表示输出状态矩阵，即为全状态输出。

表 4.1 车辆初始状态信息

车辆序号	车辆初始位置	车辆初始速度	车辆初始加速度
领航车	$50m$	$0m/s$	$0m/s^2$
2车	$40m$	$0m/s$	$0m/s^2$
3车	$30m$	$0m/s$	$0m/s^2$
4车	$20m$	$0m/s$	$0m/s^2$

表 4.2 权重信息

权重	Q	F	G	R	N	P	d_0	h	C
数值	diag(20,16,3)	diag(10,8,3)	diag(10,8,3)	1	15	15	0	1	diag(1,1,1)

表 4.3 参数信息

车辆	二车	三车	四车
ε	0.6	0.6	0.6
β	0.99	0.99	0.99
γ	0.618	0.14	0.04

$$a_1 = \begin{cases} 1.5 & t \leq 15s \\ 1.5 - 0.1t & 30s \geq t > 15s \\ 0 & 60s \geq t > 30 \\ 2 & 61s \geq t > 60 \\ -2 & 62s \geq t > 61 \\ 0 & t > 62s \end{cases} \quad (4.3.1)$$

根据设定的仿真工况进行数值仿真，从形成队列到保证车队串稳定性的车辆状态信息如图 4.3所示，车队中四车辆的位置、车间距、车间距偏差、速度、以及速度偏差如(a)-(e)所示。

为了更清晰的表达，将仿真结果按照两个仿真工况分解，对于形成队列的车辆状态如图 4.4所示，从形成队列的仿真图可以看出，随着参考加速度的变化，整个车队也随之变化，当参考速度趋于稳定，整个车队也趋于稳定，对于不加串稳定性约束的分布式模型预测控制算法可以实现车辆编队的形成。

整个车队达到稳定后，在60秒要改变参考车速的时候，采用保证串稳定约束的分布式模型预测控制算法，仿真结果如图 4.5所示，可见加入了串稳定性约束可以保证车间距误差随着车队的传播而减小。

为了验证串稳定性约束的效果，对于同样的仿真工况，不加入串稳定性约束的车间距误差曲线如图 4.6,可见不加串稳定性约束的控制算法无法保证车间距误差随着车队传播而减小。

从仿真结果可以看出，加入了串稳定性约束的分布式模型预测控制算法在车队达到稳定后，当出现瞬态偏差时，可以保证车辆队列的串稳定性。

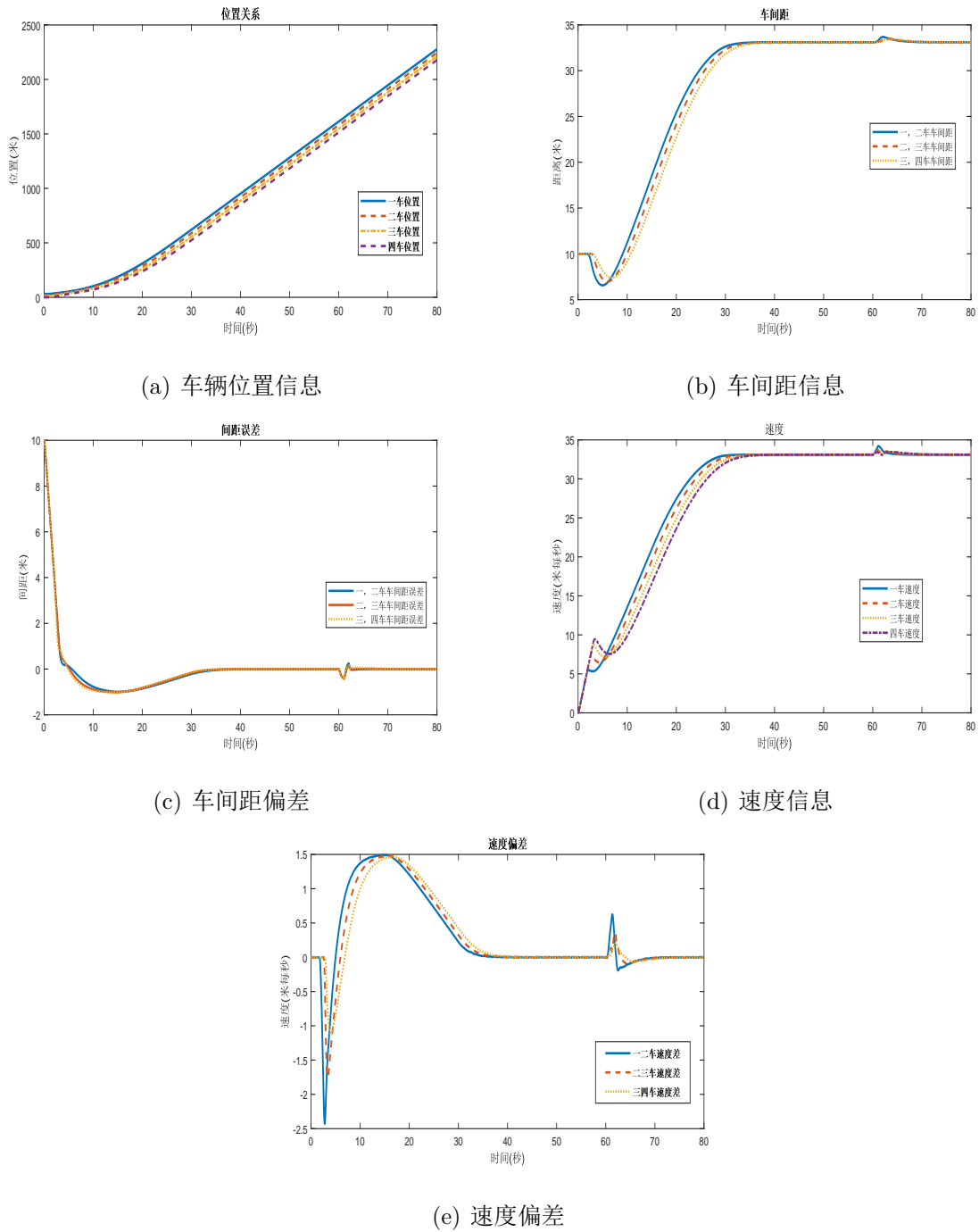


图 4.3 车队车辆状态

4.4 Carsim与MATLAB联合仿真实验

在Carsim仿真软件中建立四辆B级车，采用2km的摩擦系数为1.0的车道作为仿真环境，每辆车输入为油门踏板和制动压力，并输出车辆的位置、速度、加速度、发动机

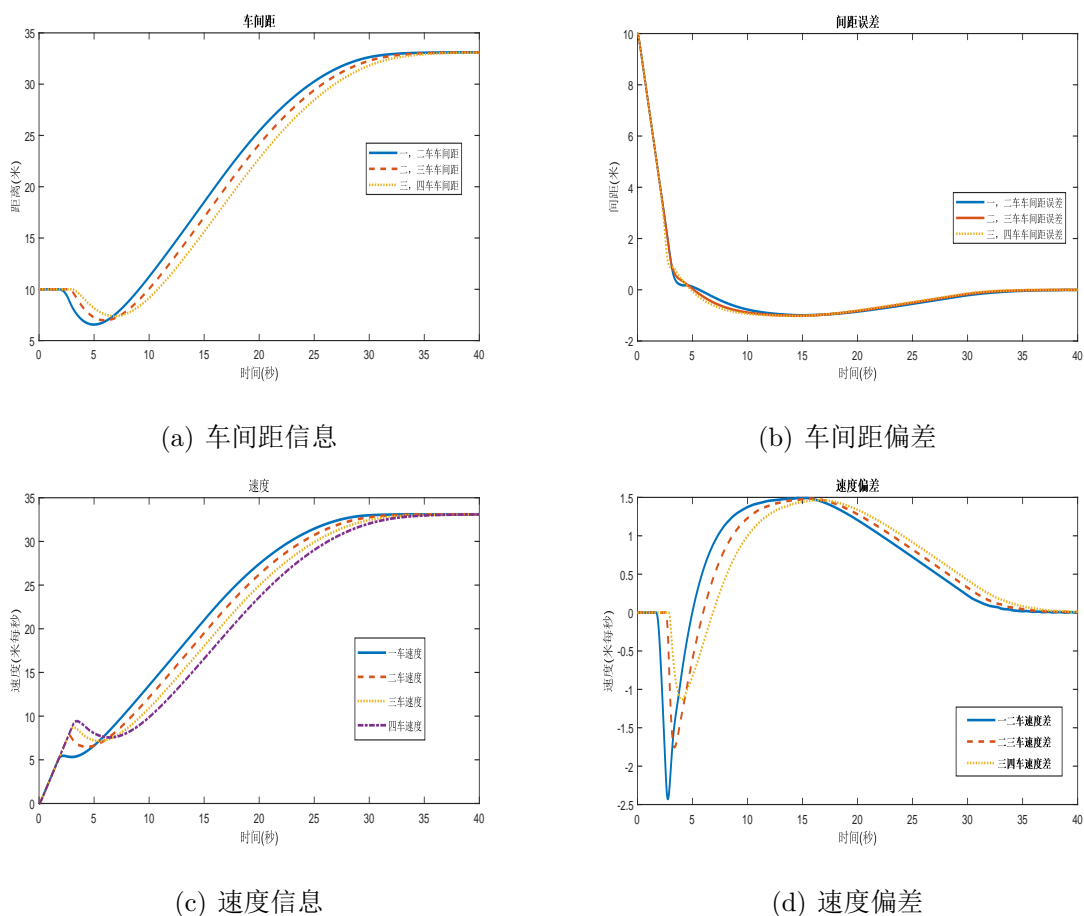


图 4.4 形成队列的车辆状态

转速和车辆挡位，并采用前车-领航车跟随拓扑，即每辆车既可以获得前车车辆状态信息，还可以获得领航车的状态信息。每辆车接收到上层控制器决策出的期望加速度，并结合自身的加速度信息通过PID控制，通过计算求得应当采用的车辆油门踏板和制动踏板，进而输送给Carsim模型，完成车辆的控制,Carsim与MATLAB联合仿真实验系统的结构拓扑如图 4.7。

结合Carsim模型与逆车辆动力学对车辆的各个参数设置如下所示

车辆质量为 $m = 1020 \text{ kg}$ ，迎风面积 $A_F = 2\text{m}^2$ ，空气阻力系数为 $C_d = 0.39$ ，车轮有效半径为 $r_{eff} = 0.298 \text{ m}$ ，变速器传动比为 $I_g = [3.538; 2.06; 1.404; 1; 0.713; 0.582]$ ，车头时距设置 $h = 1\text{s}$ ，如表 4.4所示

如上文所述利用上位控制器得出期望加速度，由下位控制器计算出需要的油门与制动踏板作用给Carsim，Carsim设置的仿真步长为 0.001s ，同样设置Simulink 的仿真步长也为 0.001s ，但是上位控制器的预测采样间隔为 0.02s ，在仿真工况中设置四辆车的初始位置分别为 50m 40m 30m 20m ，初始速度为 0m/s ，如表 4.5所示，期望轨迹的

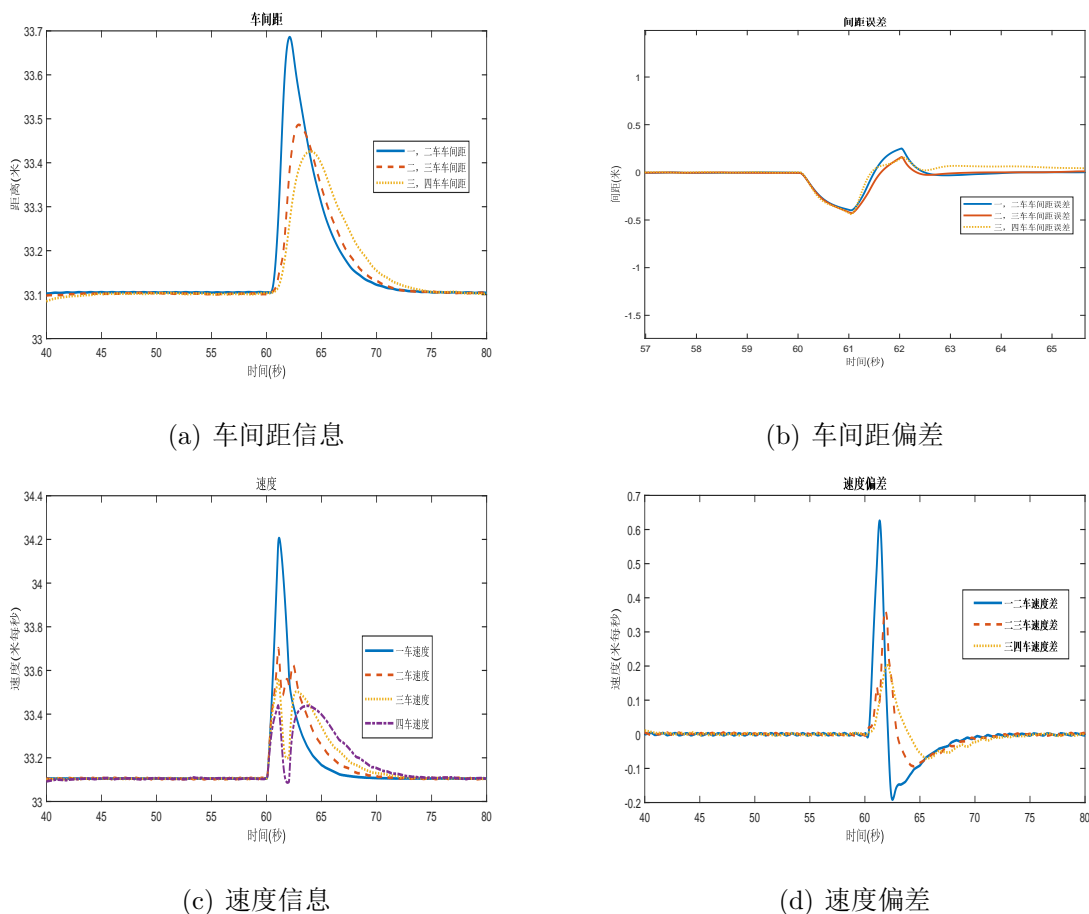


图 4.5 保证串稳定性的车辆状态

表 4.4 车辆参数值

参数名称	数值	参数名称	数值
车辆质量 m	$1020kg$	迎风面积 A_F	$2m^2$
空气阻力系数为 R_p	0.39	有效半径 r_{eff}	0.298m

加速度信息如式 4.4.1所示

$$a_1 = \begin{cases} 1 & t \leq 15s \\ 1 - 1t & 16s \geq t > 15s \\ 0 & 16s \geq t > 30 \\ 2 & 55s \geq t > 45 \\ 0 & t > 55s \end{cases} \quad (4.4.1)$$

根据设定的仿真工况进行数值仿真，将设定好的四个相同的车辆模型导

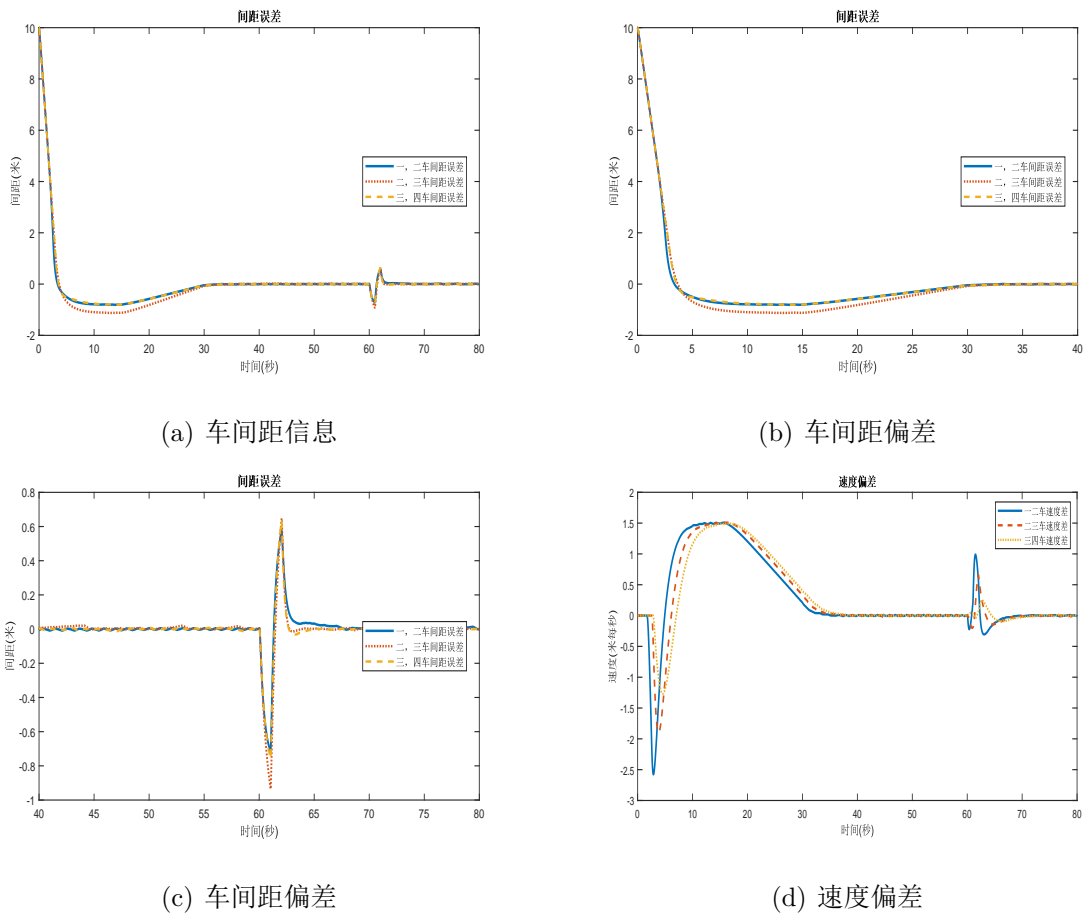


图 4.6 不加串稳定性约束的车辆状态

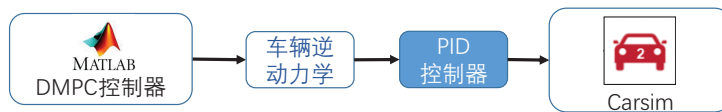


图 4.7 Carsim/MATLAB结构拓扑图

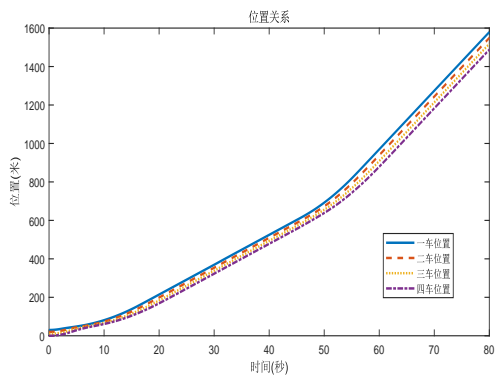
入Simulink中，进行MATLAB/Carsim的多车联合仿真，跟踪给定的期望状态，车队中四辆车的位置、车间距、车间距偏差、速度、以及速度偏差如图 4.8(a)-(e)所示。从仿真结果可以看出，基于分层控制的车辆队列可以按照期望的行驶状态共同行驶；当出现扰动后，还是可以迅速恢复期望状态，加速度信息也满足给定的约束条件。

表 4.5 车辆初始状态

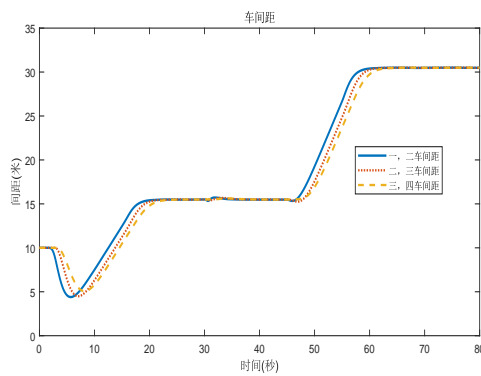
车辆序号	车辆初始位置	车辆初始速度	车辆初始加速度
领航车	50m	0m/s	0m/s ²
2车	40m	0m/s	0m/s ²
3车	30m	0m/s	0m/s ²
4车	20m	0m/s	0m/s ²

4.5 本章小结

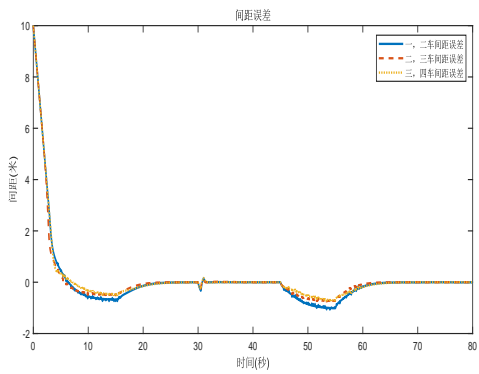
本章为了解决第三章存在的需要多次通信及多次迭代所导致的过长的通信时间与计算时间，通过构造“虚拟”状态轨迹来代替重复通信与迭代过程，随后由通过在求解优化问题时加入串稳定性约束，设计了保证串稳定性的分布式模型预测控制算法。从理论上证明了加入串稳定性约束后，可以保证车队的车间距误差不会随着车队的传播而增大，即保证了车队的串稳定性。通过MATLAB进行数值仿真实验，由实验结果可以看出所设计的保证串稳定性的分布式模型预测控制算法可以保证编队行驶过程中的串稳定性。最后联合第二章所设计的车辆下位控制器，采用Carsim作为复杂车辆模型，对整个车辆编队的分层控制进行仿真，仿真结果验证了整个分层控制结构和所设计算法的有效性。



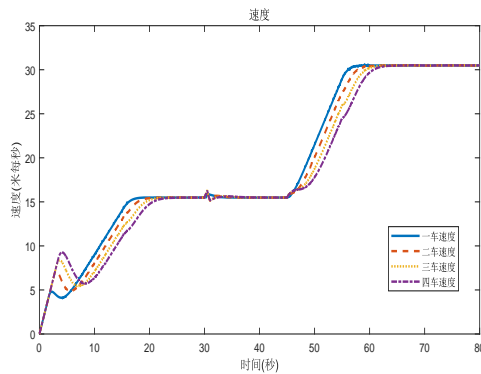
(a) 车辆位置信息



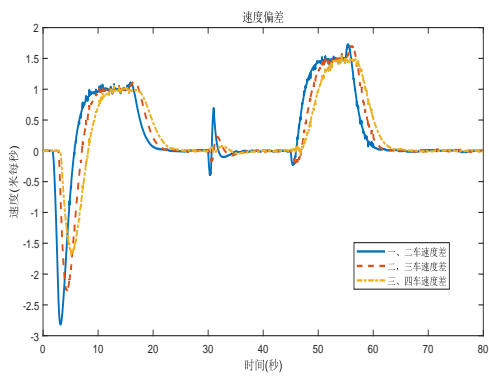
(b) 车间距信息



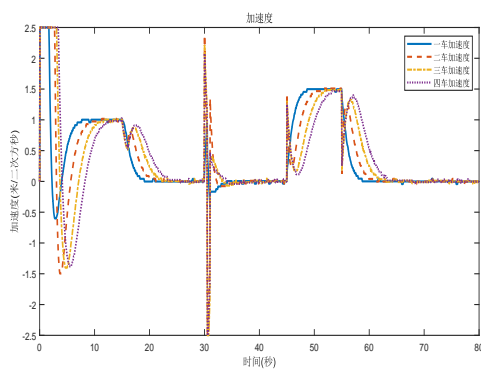
(c) 车间距偏差



(d) 速度信息



(e) 速度偏差信息



(f) 加速度信息

图 4.8 车队车辆状态

第5章 全文总结与展望

5.1 全文总结

本文主要研究纵向行驶的车辆队列的分布式模型预测控制器的设计。对单车进行动力学分析，利用跟车模型建立整个车辆队列的模型。对整个车辆队列采用分层控制方法，上层采用分布式模型预测控制，下层采用前馈加反馈的控制方法。为了使车辆编队有更好的控制效果，对分布式预测控制策略开展了进一步的研究。总结起来，本文的研究主要分为以下几个方面：

1) 本文利用单车模型与跟车模型构建了整个车辆队列的状态空间方程，然后采用分层控制思想对整个车辆队列进行控制。上层控制器根据编队行驶的目标计算出期望加速度，下层控制器跟踪上层控制器给出的期望加速度并计算出车辆行驶的制动压力与油门开度。本文根据车辆逆向动力学与前馈加反馈的控制方法对车辆下层进行控制。

2) 考虑整个车队的行驶目标以及相关的队列行驶约束，研究编队控制策略。利用纳什最优的思想，设计了基于纳什迭代的分布式模型预测控制器，通过多次通信与迭代使得整个车辆队列达到纳什均衡。通过数值仿真验证了所设计的算法的有效性，并与线性反馈控制的效果进行对比，证明了基于纳什迭代的分布式预测控制算法的优点。

3) 通过引入“虚拟”状态轨迹来代替重复通信与迭代所获得的通信车辆的状态信息，并在优化问题中加入保证串稳定性的约束条件，保证整个车队具有串稳定性，通过数值仿真和Carsim联合仿真，验证算法的有效性。

5.2 未来工作展望

作为车辆协同控制的一个方向，车辆编队还有很多相关问题需要进一步的探索。

1) 本文所研究的车辆均看为同质车和质点模型，而实际车辆在纵向与侧向的运动不可忽略；本文只考虑车辆的纵向行驶过程。今后可考虑建立纵横向耦合的高自由度车辆模型。

2) 本文进行的研究是考虑理想的环境下, 不考虑通信延迟以及数据丢失等情况, 然后在实际通信过程中, 不可能保证通信一直都是畅通无阻的, 因此, 可以考虑存在通信时延或者数据丢包等情况时的编队控制问题。

参 考 文 献

- [1] BERGENHEM C, HUANG Q, BENMIMOUN A, ET AL. Challenges of platooning on public motorways[C]. 17th World Congress on Intelligent Transport Systems. 2010: 1-12.
- [2] CHAN E, GILHEAD P, JELÍNEK P, ET AL. Cooperative control of SARTRE automated platoon vehicles[C]. Proceedings of the Intelligent Transportation System WorldCongress. 2012.
- [3] CHAN E, RICARDO U K. Overview of the SARTRE platooning project: technologyleadership brief[J]. Navigation, 2013: 03-18.
- [4] BERGENHEM C, HEDIN E, SKARIN D. Vehicle-to-vehicle communication for a platooning system[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 48: 1222-1233.
- [5] ALAM A. Fuel-Efficient Distributed Control for Heavy Duty Vehicle Platooning[J]. Kth Royal Institute of Technology, 2011.
- [6] BERGENHEM C, SHLADOVER S, COELINGH E, ET AL. Overview of platooning systems[C]. Proceedings of the 19th ITS World Congress, Oct 22-26, Vienna, Austria (2012).2012.
- [7] TSUGAWA S, KATO S, AOKI K. An automated truck platoon for energy saving[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS),2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2011: 4109-4114.
- [8] TSUGAWA S, KATO S, AOKI K. An automated truck platoon for energy saving[C]. Proc. 10th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control (2010).
- [9] TOSHIYUKI SUGIMACHI, TAKANORI FUKAO, JUN YOSHIDA, YUYA HIRATA, YOSHITADA SUZUKI,AND KEIJI AOKI:. Autonomous Driving Based on LQ Path Following Control and Platooning with Front and Rear Information[C]. Proc. 17th ITS World Congress (2010).

-
- [10] SHLADOVER S E, DESOER C A, HEDRICK J K, ET AL. Automated vehicle control developments in the PATH program[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 1991, 40(1): 114-130.
- [11] RAJAMANI R, TAN H S, LAW B K, ET AL. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2000, 8(4): 695-708.
- [12] 郑洋. 基于四元素构架的车辆队列动力学建模与分布式控制[D]. 清华大学,2015.
- [13] S. WEN, G. GUO, B. CHEN, AND X. GAO. Cooperative adaptive cruise control of vehicles using a resource-efficient communication mechanism[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(1): 127-140.
- [14] J. PLOEG, N. V. W. DE, AND H. NIJMEIJER. LP string stability of cascaded systems: application to vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 786-793.
- [15] S. E. LI, Y. ZHENG, K. LI, Y. WU, J. K. HEDRICK, F. GAO, AND H. ZHANG. Dynamical modeling and distributed control of connected and automated vehicles: challenges and opportunities[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(3): 46-58.
- [16] 岳伟, 郭戈.. 自主车队的非线性建模与控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 996- 1000.
- [17] J. B. KENNEY. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1162-1182.
- [18] J. KWON AND D. CHWA. Adaptive bidirectional platoon control using a coupled sliding mode control method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2040-2048.
- [19] S. E. LI, X. QIN, K. LI, J. WANG, AND B. XIE. Robustness analysis and controller synthesis of homogeneous vehicular platoons with bounded parameter uncertainty[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 1014-1025.
- [20] P. SEILER, A. PANT, AND K. HEDRICK. Disturbance propagation in vehicle strings[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(10): 1835-1842.

-
- [21] D. M. BERNARDO, A. SALVI, AND S. SANTINI. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 102-112.
- [22] Y. LI, C. TANG, K. LI, S. PEETA, X. HE, AND Y. WANG. Nonlinear finite-time consensus-based connected vehicle platoon control under fixed and switching communication topologies[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018: 525-543.
- [23] A. ALI, G. GARCIA, AND P. MARTINET. Urban platooning using a flatbed tow truck model[C]. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2015: 374-379.
- [24] M. AMOOZADEH, H. DENG, C. N. CHUAH, H. M. ZHANG, AND D. GHOSAL. Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET[J]. *Vehicular Communications*, 2015, 2(2): 110-123.
- [25] D. YANAKIEV AND I. KANELLAKOPOULOS. Variable time headway for string stability of automated heavy-duty vehicles[C]. *Proceedings of 34th IEEE Conference on Decision and Control*, 1995, 4: 4077-4081.
- [26] J. MA, K. QIAN, AND Z. Y. GONG. Optimization of ACC system spacing policy on curved highway [C]. *American Institute of Physics Conference Series*, 2017.
- [27] J. AXELSSON. Safety in vehicle platooning: a systematic literature review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(5): 1033-1045.
- [28] A. GATTAMI, A. A. ALAM, K. H. JOHANSSON, AND C. J. TOMLIN. Establishing safety for heavy duty vehicle platooning: a game theoretical approach[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 3818-3823.
- [29] A. ALAM, A. GATTAMI, K. H. JOHANSSON, AND C. J. Tomlin. Guaranteeing safety for heavy duty vehicle platooning: safe set computations and experimental evaluations[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 3818-3823.
- [30] R. ZHENG, K. NAKANO, S. YAMABE, M. AKI, H. NAKAMURA, AND Y. SUDA. Study on emergency-avoidance braking for the automatic platooning of trucks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(4): 1748-1757.

-
- [31] A. GHASEMI, R. KAZEMI, AND S. AZADI. Stable decentralized control of a platoon of vehicles with heterogeneous information feedback[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4299-4308.
- [32] Y. MA, Z. LI, R. MALEKIAM, R. ZHANG, X. SONG, AND A. MIGUEL. Hierarchical fuzzy logic-based variable structure control for vehicles platooning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018: 1-12.
- [33] L. ZHANG, C. HE, J. SUN, AND G. OROSZ. Hierarchical design for connected cruise control[C]. *Dynamic Systems and Control Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [34] L. ZHANG, J. SUN, AND G. OROSZ. Hierarchical design of connected cruise control in the presence of information delays and uncertain vehicle dynamics[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(1): 139-150.
- [35] G. GUO AND W. YUE. Hierarchical platoon control with heterogeneous information feedback[J]. *IET control theory applications*, 2011, 5(15): 1766-1781.
- [36] P. GISELSSON AND A. RANTZER. On feasibility, stability and performance in distributed model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(4): 1031-1036.
- [37] J. LIU, X. CHEN, D. M. DE LA PENA, AND P. D. Christofides. Iterative distributed model predictive control of nonlinear systems: handling asynchronous, delayed measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(2): 528- 534.
- [38] J. LIU, D. M. DE LA PENA, AND P. D. Distributed model predictive control of nonlinear systems subject to asynchronous and delayed measurements[J]. *Automatica*, 2010, 46(1): 52-61.
- [39] N. I. MARCOS, J. F. FORBES, AND M. GUAY. Prediction-driven coordination of distributed MPC controllers for linear unconstrained dynamic systems[J]. *International Journal of Control*, 2014, 87(8): 1496-1512.
- [40] [Z. WANG AND C. J. ONG. Distributed model predictive control of linear discrete-time systems with local and global constraints[J]. *Automatica*, 2017: 184-195.

-
- [41] Y. ZOU, X. SU, S. LI, Y. NIU, AND D. LI. Event-triggered distributed predictive control for asynchronous coordination of multi-agent systems[J]. *Automatica*, 2019: 92-98.
- [42] A. ALI, G. GARCIA, AND P. MARTINET. Minimizing the inter-vehicle distances of the time headway policy for urban platoon control with decoupled longitudinal and lateral control[C]. *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2013: 1805-1810.
- [43] S. KONDURI. Robust string stability of vehicle platoons with communication[D]. Texas: Texas AM University, 2017.
- [44] J. K. HEDRICK AND D. SWAROOP. Dynamic coupling in vehicles under automatic control[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1994, 23(S1): 209-220.
- [45] X. LINGYUN AND F. GAO. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1184-1194.
- [46] L. PEPPARD. String stability of relative-motion pid vehicle control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(5): 579-581.
- [47] C. C. CHIEN AND P. IOANNOU. Automatic vehicle-following[C]. *American Control Conference*, 1992: 1748-1752.
- [48] 岳伟, 郭戈. 通讯网络影响下自主车队的控制[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(7): 1041-1048.
- [49] [P. SEILER AND R. SENGUPTA. An H^∞ approach to networked control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(3): 356-364.
- [50] S. E. LI, Y. ZHENG, F. GAO, AND D. KUM. Robust control of heterogeneous vehicular platoon with uncertain dynamics and communication delay[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2016, 10(7): 503-513.
- [51] W. B. QIN, M. M. GOMEZ, AND G. OROSZ. Stability and frequency response under stochastic communication delays with applications to connected cruise control design[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(2): 388-403.

- [52] A. GHASEMI, R. KAZEMI, AND S. AZADI. Exact stability of a platoon of vehicles by considering time delay and lag[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(2): 799-805.
- [53] RAJAMANI R. Vehicle Dynamics and Control[M]. Springer US, 2006:87-125
- [54] 陈奕峰. 基于MPC的自主车辆协同控制研究[D]. 华南理工大学,2018.
- [55] 马国成. 车辆自适应巡航跟随控制技术研究[D]. 北京理工大学, 2014.
- [56] LIANG H, CHONG K T, NO T S, ET AL. Vehicle longitudinal brake control using variable parameter sliding control[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(4):403-411.
- [57] LU X Y, HEDRICK J K. Longitudinal control design and experiment for heavy-duty trucks[C]. American Control Conference, 2003. Proceedings of the. IEEE, 2003:36-41 vol.1
- [58] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [59] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(9):1520-1533.
- [60] 邹涛,丁宝苍, 张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 化学工业出版社,2010:115-139
- [61] 陈飞. 模型预测控制器的性能评价与监控[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2004
- [62] 杜晓宁,席裕庚,李少远. 分布式预测控制优化算法[J]. 控制理论与应用,2002(05):793-796.
- [63] ZHENG Y , LI S E , LI K , ET AL. Distributed Model Predictive Control for Heterogeneous Vehicle Platoons Under Unidirectional Topologies[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(3):899-910.
- [64] DUNBAR W B , CAVENEY D S . Distributed Receding Horizon Control of Vehicle Platoons: Stability and String Stability[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(3):620-633.
- [65] 裴学杰. 基于Carsim 的整车模型的建立和仿真分析[J]. 轻工科技,2016(8):59-60

- [66] YI K, LEE S, KWON Y D. An investigation of intelligent cruise control laws for passenger vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2001, 215(2):159-169
- [67] 王秋 基于滚动优化的车辆自适应巡航控制[D]. 吉林大学,2017.
- [68] WIJNBERGEN PAUL,JEENINGA MARK,BESSELINK BART. Nonlinear spacing policies for vehicle platoons: A geometric approach to decentralized control[J]. Systems Control Letters,2021,153.
- [69] 余世明,李壮,陈龙,何德峰. 可扩展非线性异构车队系统分布式模型预测控制[J]. 系统科学与数学,2021,41(03):602-614.
- [70] WU JIAMING,AHN SOYOUNG,ZHOU YANG,LIU PAN,QU XIAOBO. The cooperative sorting strategy for connected and automated vehicle platoons[J]. Transportation Research Part C,2021,123.
- [71] 郭景华,王班,王靖瑶,罗禹贡,李志强. 智能网联混合动力汽车队列模型预测分层控制[J]. 汽车工程,2020,42(10):1293-1301+1334.
- [72] YANG ZHOU,SOYOUNG AHN,MENG WANG,SERGE HOOGENDOORN. Stabilizing mixed vehicular platoons with connected automated vehicles: An H-infinity approach[J]. Transportation Research Part B,2020,132.
- [73] QILIANG LI,WENTONG DAI,ZHIGANG YANG,QING JIA. Investigation on aerodynamic characteristics of tailing vehicle hood in a two-vehicle platoon[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering,2020,234(1).
- [74] LIU BO,DING ZHENGTAO,LV CHEN. Platoon control of connected autonomous vehicles: A distributed reinforcement learning method by consensus[J]. IFAC PapersOnLine,2020,53(2).

攻读硕士学位期间的研究成果

作者简介：

作者：陈浩，男，1996年3月生于吉林省吉林市，汉族。2014年至2018年于吉林大学通信工程学院进行本科学习，专业自动化。2018年9月于吉林大学通信工程学院控制工程专业攻读硕士研究生，主要研究方向为模型预测控制。

攻读硕士学位期间参加的科研项目：

1. 智能网联商用车多车协同控制理论及关键技术，国家自然科学基金委-中国汽车产业创新发展联合基金，项目编号：U1964202。
2. 多智能体系统协调控制与仿生机器人，重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室开放基金，项目编号：2019FF01

攻读硕士学位期间发表的论文：

Shuyou Yu,Hao Chen, Yangyang Feng,Yajing Zhang,Yongfu Li,Christian Ebenbauer,Hong Chen. Nash optimality based distributed model predictive control for vehicle platoon[C].IFAC World Congress, 2020.

致谢

行文至此，也意味着我三年的研究生生活即将结束，回首这几年的生活，有欢乐、有压力、更有成长！但此时此刻，我内心最多的是感恩！

桃李不言，下自成蹊，有太多的人需要感恩，首先是最敬爱的于树友老师，感谢您为我们提供了这么好的学习平台，从研究生学习生涯开始，于老师基本上每周都会听我们的学习进度汇报，给我们答疑解惑，及时的指正我们在研究上存在的问题，规划好下一步的研究方向，给了我面对问题的新角度，处理问题的新思路，让我在攻读硕士期间解决各个方面问题的能力均大大提升，更让我终生受益。感谢您在生活和工作中的帮助和指导！

感谢实验室的冯阳阳师兄在我学习车辆队列的过程中予了我很多的帮助，并教会了在科研方面应该保持的严谨，同时也感谢施主清、刘艺、孟凌宇、张健建、厉庆华等师兄师姐以及同届的褚建新、曹瑞丽、徐明生、蔡坤阳、李建普等同学，感谢他们三年的陪伴和帮助。同时感谢师弟李文博、卢星昊、张松林、常欢、师妹宋佳、张亚静在给我无尽帮助的同时，也包容我的错误和任性，你们的陪伴使得原本艰辛枯燥的研究生生活变得明媚起来。

最后，感谢我的父母和家人，三年间一直是他们在背后默默的支持和鼓励着我，让我拥有这个世界上最温暖的家，感谢你们坚定的支持与鼓舞，让我有机会实现自己小小的理想和愿望，感谢你们无穷无尽的爱，使我拥有一颗勇敢的心，这将永远是我最为宝贵的财富！