
分类号：O231.3

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2221030102

题 目 通讯受限情形下智能网联汽车队列控制
问题研究

题 目 Research on Platoon Control for
Intelligent Connected Vehicles with
Communication Constraints

学 生 姓 名 : 王博

指 导 教 师 : 刘宏建 教授

专 业 : 系统科学

研 究 方 向 : 复杂系统建模与控制

论文答辩日期: 2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，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及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

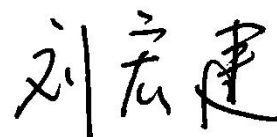
本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：



指导教师签名：



日期：2025 年 5 月 14 日

日期：2025 年 5 月 14 日

通讯受限情形下智能网联汽车队列控制问题研究

摘 要

智能网联汽车队列作为智能交通系统的核心组成部分，其研究在近年来取得了显著进展，但仍面临诸多关键技术挑战：在通信可靠性方面，V2V/V2I 通信存在时延与丢包问题，而 5G-C-V2X 与 DSRC 异构网络切换可能引发队列震荡；在控制算法鲁棒性方面，非线性动力学耦合及扰动传播对系统稳定性构成严峻考验；此外，复杂环境适应性挑战包括混合交通流干扰以及极端天气影响。这些因素共同制约着队列协同控制的实时性与安全性。

本文旨在研究通讯受限情形下两类特殊信号传递过程的状态估计问题，如不抗抗力情形下控制器输入信号丢包或受外界干扰的汽车队列状态估计问题。针对这些新的问题，本文基于 U-K 方程将拉格朗日坐标系下的汽车队列模型转化为动力学方程，并通过微分同胚方法将有界的双边不等式约束转换到无界空间中进行进一步地推导。首先，本文在实际背景下，充分考虑系统与环境的随机性及相关状态限制等因素，建立新的系统模型；其次，考虑在最小安全距离模型中由于引入通讯受限对系统方程设计所带来的影响，在改进或建立的车辆模型的基础上，建立新的车辆的状态方程，然后推导出新的情形下的车辆队列的状态方程，并在此基础上通过期望设计出新的控制模型。

具体而言，本文工作如下：

（1）基于 U-K 方法的智能网联汽车队列控制器设计

在 U-K 方法的转化下，我们将传统的智能网联汽车队列状态方

程转换为新的状态方程，在这之中由于 U-K 方法不能直接处理双边不等式约束，我们采用微分同胚法将双边不等式约束转换为新的空间中的等式约束，并将新的等式约束代入系统状态方程得到在 U-K 方法下智能网联汽车队列的状态方程。如此状态方程更加边界的同时也包含了更多的约束，将车辆队列中可能出现的问题进行更加准确地描述，更加符合实际情况。

（2）通讯受限情形下智能网联汽车队列的控制问题

在智能网联汽车队列模型系统中，我们考虑通信受限现象来进行模型建立。通过在假设情形下模拟信号受限情形，构造新的车辆队列控制器，通过求期望来研究该类通讯受限情形下系统控制问题，使得队列系统具有更高的鲁棒性和稳定性。

关键词：智能网联汽车，队列控制，通讯受限，鲁棒控制，最小安全距离

RESEARCH ON PLATOON CONTROL FOR INTELLIGENT CONNECTED VEHICLES WITH COMMUNICATION CONSTRAINTS

Abstract

Intelligent connected vehicle queues, as a core component of intelligent transportation systems, have made remarkable progress in research in recent years. However, they still face many key technical challenges: In terms of communication reliability, V2V/V2I communication has problems of delay and packet loss, while the heterogeneous network switching between 5G-C-V2X and DSRC may cause queue oscillations; In terms of the robustness of the control algorithm, nonlinear dynamic coupling and disturbance propagation pose a severe test to the stability of the system. In addition, complex environmental adaptability challenges include mixed traffic flow interference and the impact of extreme weather. These factors jointly restrict the real-time performance and security of queue cooperative control.

The objective of this paper is to investigate the state estimation of two specific signal transmission processes under limited communication scenarios, such as controller input signal packet loss in a noise-free environment or vehicle queue state estimation subject to external interference. To address these novel challenges, this paper transforms the vehicle queue model in the Lagrange coordinate system into a dynamic equation based on the U-K equation and further derives unbounded constraints in an extended space using the differential homomorphism

method. Specifically, under realistic conditions, this study comprehensively considers the randomness of the system and environment, along with relevant state constraints, to establish a new system model. Additionally, considering the impact of introducing communication limitations in the minimum safe distance model on the system equation design, a revised vehicle state equation is formulated based on an improved vehicle model, leading to the derivation of the vehicle queue state equation under the new scenario and the design of a new control model based on expectation.

Specifically, the work of this paper is as follows:

(1) Design of intelligent networked vehicle queue controller based on U-K method

Under the transformation of U-K method, we transform the traditional state equation of intelligent network vehicle queue into a new state equation. In this process, since U-K method can not directly deal with bilateral inequality constraints, we use differential homeomorphism method to transform bilateral inequality constraints into new equality constraints in space. The new equation constraint is substituted into the system state equation to obtain the state equation which can only be connected to the vehicle queue under U-K method. In this way, the equation of state is more boundary, but also contains more constraints, which can describe the possible problems in the vehicle queue more accurately and more in line with the actual situation.

(2) The control problem of intelligent networked vehicle queue in the case of limited communication

In the intelligent network vehicle queuing model system, we consider the communication constraint phenomenon to build the model. A new vehicle queue controller is constructed to simulate the signal limited situation in the hypothetical case, and the control problem of the system

under the communication limited situation is studied by obtaining the expectation, so that the queue system has higher robustness and stability.

Bo Wang (Applied Mathematics)

Supervised by Prof. Liu Hongjian

KEY WORDS: Intelligent connected car, queue control, communication limitations, robust control, minimum safety distance

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	3
1.1 论文研究背景	4
1.1.1 智能网联汽车队列技术发展现状	4
1.1.2 Udwadia-Kalaba 方法	5
1.1.3 微分同胚方法	6
1.1.4 通讯受限	6
1.2 内容提纲	7
第 2 章 智能网联汽车队列模型的建模与转换	9
2.1 问题描述	9
2.2 标准情形下智能网联汽车队列的系统建模	10
2.2.1 车辆动力学模型	10
2.2.2 队列系统中的约束	12
2.3 队列系统的约束转换	12
2.4 本章总结	13
第 3 章 无参数不确定性情形下汽车队列的控制方法	14
3.1 队列控制器设计	14
3.2 随机丢包情形下队列的控制方法	15
3.3 控制器受外界干扰情形下队列的控制方法	16
3.4 数值仿真与总结	19
3.4.1 随机丢包情形下队列控制器的仿真结果	19
3.4.2 受外界干扰情形下队列控制器的仿真结果	21
3.5 本章总结	22
第 4 章 参数不确定性影响下的汽车队列控制方法	23

4.1 队列控制器设计	23
4.2 随机丢包情形下队列的控制方法	25
4.3 控制器受外界干扰情形下队列的控制方法	28
4.4 数值仿真与总结	30
4.4.1 随机丢包情形下队列控制器的仿真结果	31
4.4.2 受外界干扰情形下队列控制器的仿真结果	33
4.5 本章总结	34
第 5 章 总结与展望	35
5.1 总结	35
5.2 展望	36
参考文献	37
攻读硕士期间取得的学术成果	42
致 谢	43

第1章 绪论

智能网联汽车是未来智能交通、智慧城市的重要单元，也是全球汽车产业发展的战略必争之地。在各方共同努力下，我国智能网联汽车产业发展取得积极成效，基本与全球先进水平处于并跑阶段。面对国际上智能网联汽车产业的竞争，在我国智能网联汽车发展过程中，特别是产业化发展过程中，还存在着一系列挑战。近年来，智能网联汽车问题已经成为学术界的研究热点，在多个领域发挥重要作用^[1-3]。智能网联汽车是未来智能交通、智慧城市的重要单元，也是汽车产业发展的战略必争之地。它可以根据模型模拟多种不同的车链队列的实际情况，如在巡航、减速、加速等情形下都有着广泛的应用。经过近十年的发展，智能网联汽车领域已经在提高模型精度、增加车辆模型的稳定性和可靠性等方面展现了巨大的优势^[4-5]。然而，在建模或信息传输过程中，由于汽车物理设备的诸多限制、以及外部环境的复杂性和不确定性，不可避免地会对模型产生一系列的影响，这将极大地降低系统的稳定性。

在现实国内外已有的文献中，大部分讨论的智能网联汽车队列都是一种基于理想情况下的模型^[6]。例如，在高速公路环境下的智能网联汽车队列控制关键技术研究，在通讯时延实车测试的车辆队列最小安全距离建模与分析中就排除了道路、天气等影响因素。基于现实，干扰随处可见，我们只能将部分因素考虑在内，看作是一种在特殊因素影响下的理论模型。车辆队列模型中的随机因素可能会严重影响队列稳定性，若缺乏有效约束，可能导致系统性能下降等不良动力学特性。尽管目前针对智能网联汽车队列问题已经有了一些初步的研究成果，但对于通讯受限情形下的讨论研究成果依旧很有限。鉴于此，开展基于通讯时延下的智能网联汽车队列控制方法问题的研究是十分必要的。通讯受限下的智能网联汽车队列控制方法与正常汽车队列控制方法的最主要的区别是，在原有的汽车队列模型中添加了通讯受限情形，这种新的变量通常会比正常情形下的智能网联汽车队列具有更杂乱的状态扰动。因此，在实际车辆队列模型中该方法有望能在通讯受限的情形下模拟对实际车辆队列的影响，提前预估其状态变化。而近年来智能网联汽车队列也越来越受到人们的广泛关注^[7-8]。

由于网络技术的飞速发展，通信网络的介入使得控制系统变得更加灵活、可

靠,但是对车辆模型进行特性的分析和综合也随之地变得更加困难、复杂。车辆系统受限于网络带宽、承载能力和服务能力,数据包的传输不可避免地存在时延、丢包等问题^[9],从而降低系统的控制性能,破坏系统的稳定性。而大多数学者在进行车辆队列控制的研究时都没有考虑到通讯受限的情况,只是从理想车辆队列系统模型进行研究^[10],将队列系统的大多数影响因素进行了讨论,而相应的结合通信受限问题尚未得到充分研究。综上所述,在通讯受限情形下,考虑车辆队列系统的状态方程问题,对通讯受限情况下队列系统的相应控制器的设计具有深刻的理论意义和应用价值。

1.1 论文研究背景

1.1.1 智能网联汽车队列技术发展现状

智能网联汽车队列技术是当前交通领域备受关注的前沿课题,它融合了自动驾驶、车联网通讯以及智能交通控制等多项关键技术。

近些年来,国外学术界以及产业界均对汽车队列技术展开了广泛研究,取得了显著进展。欧美国家较早开展智能网联汽车队列技术的研究,如欧盟的 SARTRE、ENSEMBLE 计划和美国的 PATH 项目,其技术突破方向主要聚焦于研究不同车型与自动驾驶等级车辆混编队列的异构队列控制、应用于 V2X 数据防止篡改的通信安全区块链技术以及人机共同驾驶的信任机制技术,并通过实车实验验证了智能网联汽车队列行在节能减排、提高道路通行效率以及安全性方面的巨大潜力^[11]。

而近年来我国也在大力推动智能网联汽车队列的技术发展,我国通过“十四五”智能汽车创新发展规划等政策推动 CAVP 发展,北京、上海、重庆等地已开展示范应用。同时清华大学、同济大学、长安大学等高校与知名企业华为、百度、蔚来合作,聚焦车路协同与队列控制算法优化技术。其侧重点主要在于队列稳定性控制、通信协议优化以及封闭场合和仿真平台队列算法的鲁棒性。与此同时我国也积极开展相关标准制定、技术研发以及实车测试示范,例如国家智能网联汽车试点示范区、常熟智能车辆综合技术研发中心等机构均进行了对队列驾驶的实验与应用探索^[12]。

而随着智能网联汽车技术的快速发展,现代交通系统逐步走向智能化、网联化。智能网联汽车队列结合车载传感器、无线通信等技术,实现了‘车-车(V2V)、车-路(V2I)、车-云(V2C)’的信息交互,从而提高车辆自主决策能力和交通管理效率。智能网联汽车队列的控制同时也是智能交通系统的关键技术之一,旨在通过车辆间的协同控制,优化车队行驶状态、提高通行效率、降低能源消耗,并提升交通安全性^[13]。

近年来,智能网联汽车队列控制在自动驾驶、高速公路编队、城市交通优化等领域得到了广泛关注。大部分国内外研究都遇到了共性关键技术挑战,其包括通讯瓶颈、控制算法的复杂度、安全与伦理以及大规模验证。这些技术挑战直接或间接的推进了智能网联汽车的进步,如今也有不少国内外文献对智能网联汽车队列进行了未来的展望,其中包括 AI 驱动以及新型通讯的技术融合、从高速到城市道路的应用场景扩展以及将交通工程、通信、计算机、心理学进行深度融合的算法进步。

1.1.2 Udvardia-Kalaba 方法(简称 U-K 方法)

U-K 方法是一种基于分析力学的控制系统设计方法,其核心思想是将受约束系统的运动控制问题转化为一种具有显式解析解的最优控制问题。该方法通过构造约束方程,并利用广义逆矩阵获得系统控制力的精确表达式,使得对系统的控制更加直接、高效且精确^[42]。近年来,随着智能网联汽车队列技术的快速发展,U-K 方法也逐步被引入到各种力学模型的设计之中,其中尤其是汽车队列的控制。例如文献[15]将 U-K 方法用于自行车机器人平衡控制上,通过构造运动学约束并推导控制扭矩解析解,实现了对系统状态的高精度控制。其中 U-K 方法作为文献中的核心控制策略,不仅优化了系统响应,还展示了其在非线性欠驱动系统中的显著优势,为智能移动机器人控制问题提供了新的思路;文献[16]则利用了 U-K 方法研究了交通锥机器人编队摆放的动态控制。文章首先针对交通锥机器人的编队摆放问题进行了约束建模,明确了机器人的位置和姿态需求。然后利用 U-K 方法将系统模型转化成的力学方程,并构建了满足约束的机器人动力学模型。随后利用所建立的动力学模型,设计了一种基于模型的队列摆放控制器。值得注意的是,在这篇文献中施加在交通锥机器人编队上的约束可以直

接应用在 U-K 方程上，而当所施加的约束例如双边不等式约束的时候，U-K 方法并不能直接处理，我们此时就需要引入新的方法来进行解决，这为了文章后面所研究的微分同胚方法提供了基础。

1.1.3 微分同胚方法 (Differential Diffeomorphism Approach)

微分同胚方法是一种源自微分几何的非线性系统控制设计方法，其基本思想是通过一类状态变换将复杂的非线性系统转化为线性系统或标准形式，从而实现系统的反馈线性化和控制器设计^[17]。微分同胚的核心优势在于能够保留系统原有的拓扑结构与动力学特性，并在此基础上简化控制律的求解过程，使得系统控制更具理论解析性和工程适应性^[18]。在文献[19]中提出了一种基于拟共形理论的分阶多尺度微分同胚图像配准模型，旨在解决网络重叠现象和贪婪配准问题。在文献中传统的配准方法可能产生非物理的形变，文献利用微分同胚方法保持了图像的拓扑性质，同时相比整数阶导数，在微分同胚方法下的分阶实现了更精确的图像描述。在文献[20]中，该文献提出了一种基于微分同胚的运动控制方法，专门用于解决具有约束条件的车辆运动控制问题。该文献首先将车辆动力学模型表达为受限控制系统，而为了使系统满足了控制线性化的条件，文献通过微分同胚方法构造了新的坐标系，将复杂的非线性系统转化为了更简单便捷的形式。同时在智能网联汽车队列控制中，车辆间的动力学模型也通常具有强非线性特征，且在实际通信中存在约束条件。微分同胚方法可将原始车辆队列系统在保持约束一致的前提下映射为更容易控制的形式，特别适合用于解决含等式与不等式约束的轨迹跟踪与编队问题。

1.1.4 通讯受限

在实际工程系统中，通讯丢包和外界干扰是影响多智能体协同控制性能的两类典型问题，其中通讯丢包指的是车辆间通过无线通信交换信息时，部分数据包由于信道不稳定、拥塞或干扰而未能成功到达接收端。这种不连续信息传输会影响从车对前车状态的实时感知，导致队列控制精度下降，甚至引发系统振荡或不稳定^[21]。外界干扰包括道路摩擦变化、突发横风、测量误差、系统噪声等物理环境因素。这类干扰直接作用于车辆动力学系统，若未妥善处理，极易引发车辆队

列车间距放大或编队形态偏移^[22-23]。而智能网联汽车队列强调多车之间的协同运行，需实时共享速度、加速度、位置等状态信息，以实现精准的车距控制和能耗优化。然而在通讯受限场景下，通讯丢包会中断信息流，而外界干扰会造成车辆运动偏差，两者都会使得队列系统面临更严峻的稳定性与鲁棒性挑战。在文献[24]中，文献以“通讯受限”为前提，构建了一种兼顾效率、节能与鲁棒性的分布式多机器人线性编队算法，并通过位置预测机制克服了信息受限所带了的队形调整滞后问题，为智能车辆队列、无人机群等系统在弱通信环境下的自主编队控制提供了重要参考与技术路径。在文献[25]中设计了一种面向多移动机器人系统的模型预测控制方案，并着重考虑了通信不及时与环境干扰对系统编队与避障性能的影响。该方法通过动态窗口预测技术，对未来状态进行补偿，并在存在部分数据缺失或突发扰动时保持机器人队列的稳定协作。与机器人系统的模型相似，在智能网联汽车队列控制中，车辆间的间距误差也会受到外界干扰。如何设计出一个合适的控制器来使得队列系统稳定，这正是我们所要研究的内容。

1.2 内容提纲

本文研究了通讯受限情形下智能网联汽车队列的控制方法。首先，研究了基于 U-K 方法的车辆动力学模型，然后提出基于微分同胚的约束转换方法，优化传统 U-K 方法，使其适用于双边不等式约束的智能网联汽车队列模型控制问题。随后在原先的车辆动力学模型的基础上推导建立通讯受限环境下的车辆队列数学模型，分析数据丢失、通信时间延迟对队列稳定性的影响，设计概率鲁棒控制器，确保车辆队列系统仍能保持稳定行驶。随后证明控制方法的有效性，通过数值仿真测试队列控制策略的性能，并分析其在不同工况下的适应性和鲁棒性。

全文结构如下：

第一章介绍了课题的研究背景以及现状，其中包括智能网联汽车队列、U-K 方法、微分同胚方法以及通讯受限的现状研究，并在最后列出了本课题的内容提纲。

第二章研究了智能网联汽车队列模型的建模与转换，在本章节中我们针对传统队列模型中处理约束的缺陷，提出基于微分同胚的双边约束转换机制。首先构建最小安全距离动态模型，结合 U-K 方程建立广义动力学模型；最后设计 sigmoid

型微分同胚函数，将施加在车辆队列中的双边不等式约束映射至无界空间，以实现在 U-K 力学方程下的约束处理，为后续控制策略设计奠定理论基础。

第三章研究了理想状态下无参数不确定性的智能网联汽车队列模型的建模，同时针对通信中的信号丢包问题以及车辆队列在现实行驶过程中所受到的外部干扰，提出概率鲁棒控制策略。基于伯努利分布以及外界扰动分别建立随机丢包模型，设计包含自适应补偿项的混合控制器并进行实验仿真。

第四章我们将智能网联汽车队列的建模转化为包含参数不确定性的智能网联汽车队列模型，在新的模型中分别引入遵循伯努利分布的随机变量以及未知扰动。在此基础上利用李雅普诺夫函数进行鲁棒控制策略并进行实验仿真。

第五章则是本文的总结与展望。

第 2 章 智能网联汽车队列模型的建模与转换

随着城市交通网络面临严峻挑战，高速公路系统频现低速行驶、流量波动及局部拥堵等问题^[26-28]。智能网联汽车通过 V2V/V2I 通信技术展现出了巨大潜力，其队列行驶不仅能提升空气动力效率，还能借助路侧单元通信增强交通稳定性。实证研究表明，CAV 队列通过信息共享与行为协调，可将车距安全大幅度缩短，显著提升道路通行能力^[29]。这种技术革新使 CAV 成为解决现代交通问题的关键突破口。而自 1939 年概念提出以来，CAV 队列控制历经多个发展阶段：1986 年 Stankovic 团队首创分散重叠控制架构，开创了降阶观测器应用先河^[30]；2000 年后，Lee 等人引入模糊滑动算法应对模型不确定性^[31]，Antonelli 提出双阶段任务导向控制框架^[32]；近年来，Ghasemi 的混合控制器、Kayacan 的 H_∞ 控制公式等不断推进智能网联汽车队列的控制问题研究进展^[33]。值得关注的是，机器学习技术开始渗透该领域——Desjardins 团队开发的梯度下降学习算法，实现了控制策略的实时动态优化^[34]。

2.1 问题描述

智能网联汽车队列控制作为智能交通系统的核心课题，其核心挑战在于动态行驶环境下多车协同控制的鲁棒性与安全性。现有研究主要存在以下三方面技术瓶颈^[35]：

（1）动态约束建模缺陷：传统车距控制模型多采用固定阈值法，难以适应气动阻力时变特性。实验数据显示，当车速从 60km/h 提升至 120km/h 时，传统模型的车距波动大幅度增加，严重威胁队列稳定性。

（2）约束处理方法局限：经典 U-K 方程仅适用于等式约束系统，而实际车距约束为双边不等式约束，U-K 方程下不能直接处理双边不等式约束。

（3）通信受限应对不足：现有研究多基于理想通信假设，未充分考虑实际信道特性。实测表明，城市峡谷环境中信号丢包率可达 35%，传统 PID 控制在此场景下间距误差增大 210%。

2.2 标准情形下智能网联汽车队列的系统建模

考虑到车辆队列由 n 辆相同车型的车组成，其中包括一辆头车和 $n-1$ 辆跟随车辆。且所有车辆均配备车载传感器，可以测量自身的位置、速度和加速度信息，并遵循前导——跟随通讯拓扑(前车状态信息仅传递给后方距离最近的跟随车辆)^[36]。

在车辆队列中定义：

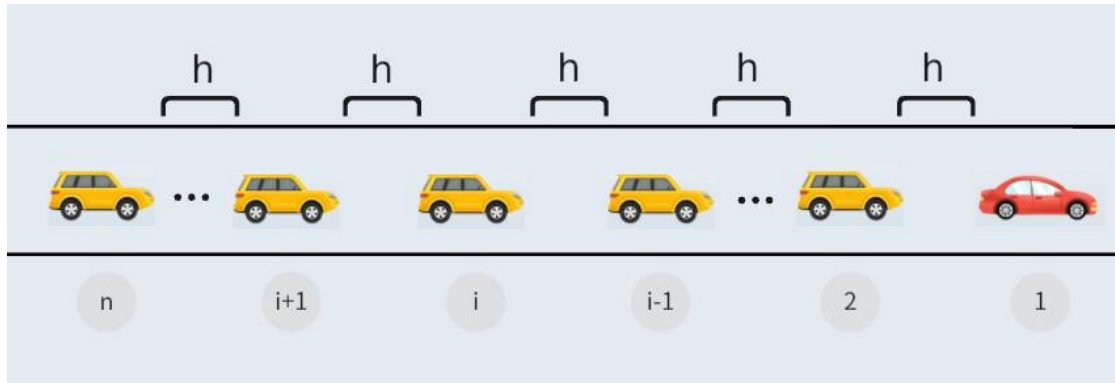
位置 x_i ：第 i 辆车在大地坐标系中的位置。

速度 v_i ：第 i 辆车的速度。

加速度 a_i ：第 i 辆车的加速度。

间距 h_i ：第 i 辆车与前车的实际间距。

而队列系统的主要目标是确保持车辆间距 h_i 维持在期望间距 h_i^* 附近，以保



持行驶安全性和交通效率。

2.2.1 车辆动力学模型

第 n 辆车的位置基于大地坐标由 x_k 表示。因此，第 i ($1 \leq i \leq n$) 辆车的非线性纵向车辆动力学模型可以描述为^[37]：

$$\begin{aligned} v_i &= \dot{x}_i \\ m_i v_i &= u_i - C_i v_i |v_i| - F_i \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中 $m_i \in R$ 表示第 i 辆车的质量； v_i 是第 i 辆车的速度； u_i 表示控制输入（即为控制系统对第 i 辆车的加速度控制）； $-C_i v_i |v_i|$ 为标称气动阻力； F_i 是作用在

第 i 辆车上的其他阻力以及干扰。其中函数 $C_i(\cdot)$ 和 $F_i(\cdot)$ 都是连续的。

此外车辆在行驶过程中的实际间距 h_i 我们可以计算为：

$$h_i = x_{i-1} - x_i - L_i \quad (2-2)$$

其中， L_i 为车辆队列中第 i 辆车的长度。

而队列系统的控制目标是使车辆间距 h_i 逐渐收敛到期望值 h_i^* ，我们定义间距误差为：

$$e_i = h_i - h_i^* \quad (2-3)$$

满足：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_i = 0 \quad (2-4)$$

而在车辆队列系统中，车辆的误差动态方程我们可以描述为：

$$m_i \ddot{e}_i = u_i - C_i v_i |v_i| - F_i - m_i \ddot{x}_{i-1} \quad (2-5)$$

在误差动态方程中，我们显而易见 $-C_i v_i |v_i| - F_i - m_i \ddot{x}_{i-1}$ 是施加在第 i 辆车上的力，其中 u_i 为我们要求解的控制输入。

此时我们令 $G_i = -C_i v_i |v_i| - F_i - m_i \ddot{x}_{i-1}$, $G_i^c = u_i$ ，由此我们可以得到广义 U-K 力学下的误差动态方程为：

$$\ddot{e}_i = \frac{G_i}{m_i} + \frac{G_i^c}{m_i} \quad (2-6)$$

由于车辆行驶过程中与空气以及轮胎与地面摩擦引起的阻力是非线性的，我们显然可以知道系统（2-6）也是非线性的。

而在本文的推理过程中，我们一律将系统视为非线性的，即我们后面所有的推导理论都可以应用于线性系统^[38]。

而考虑到参数不确定性，误差动态方程中的参数 C 和 F 可以重新描述为：

$$\begin{aligned} C(e, \dot{e}, \sigma, t) &= C_0(e, \dot{e}, t) + \Delta C(e, \dot{e}, \sigma, t) \\ F(e, \dot{e}, \sigma, t) &= F_0(e, \dot{e}, t) + \Delta F(e, \dot{e}, \sigma, t) \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中 ΔC 和 ΔF 为不确定部分， $\sigma \in R^p$ 为可能随时间变化的不确定参数。而在现实中， σ 总是有界的；因此， Σ 用于表示 σ 的可能边界。同时假设函数 C_0 、 ΔC 、 F_0 和 ΔF 是连续的。其中 Σ 是未知的。

为了进一步分析误差的收敛性，我们可以引入 U-K 力学方法进行改写，由此可以得到考虑到参数不确定性的运动方程为：

$$\ddot{e}_i = \frac{\tilde{G}_i}{m_i} + \frac{\tilde{G}_i^c}{m_i} \quad (2-8)$$

2.2.2 队列系统中的约束

为了确保车辆队列在速度变化过程中以及速度稳定后依然保持安全性和稳定性，在此我们引入以下约束条件。

在车辆加速或减速过程中，需要防止：1）第 i 辆车起步慢，第 $i-1$ 辆车起步快，可能导致 h_i 过小甚至为零（即追尾碰撞）；2）第 i 辆车起步快，第 $i-1$ 辆车起步慢，可能由于 h_i 过大，从而影响后方车辆的安全距离；

因此需要保持：

$$h_i - h_{\max} \leq e_i \leq h_i - h_{\min} \quad (2-9)$$

在速度变化完成后，队列中的车辆应以稳定的跟车距离行驶，即：

$$h_i = h_i^* \quad (2-10)$$

此外为了确保队列最终达到稳定状态，车辆队列应该还需要满足：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_i = 0 \quad (2-11)$$

即位置误差 e_i 收敛到零，速度误差 $\dot{e}_i$ 收敛到零，加速度误差 $\ddot{e}_i$ 也收敛到零。

此时为了确保汽车队列在速度变化过程后车辆队列保持稳定，我们对车辆队列系统施加一个等式约束：

$$\zeta_1 e_i + \zeta_2 \dot{e}_i = 0 \rightarrow e_i = e_i(t_0) e^{-\frac{\zeta_1}{\zeta_2} t} \quad (2-12)$$

其中， ζ_1 和 ζ_2 都是标量常数。由上式我们可以很明显的得到，当车辆队列趋于稳定行驶的过程中，当时间足够长的时候， e_i 会收敛到零。

2.3 队列系统的约束转换

在上述的过程中，车辆间距受到的约束 $h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max}$ 是一个双边不等式约束

且 $e_i \in (h_i - h_{\max}, h_i - h_{\min})$ 。而由于双边不等式约束在 U-K 力学下引入了非线性，使得我们求解的时候算法收敛困难。所以我们不能直接处理双边不等式约束，因此我们采用微分同胚方法将其转化为无界空间^[39]。

微分同胚的定义如下：对给定的两个光滑流形（状态空间） X 和 Y ，若 $T: X \rightarrow Y$ ，且其逆为 $T^{-1}: Y \rightarrow X$ ，并且 T 和 T^{-1} 均为光滑映射。则称 T 为微分同胚。

此时我们选取如下微分同胚变化：

$$s_i = T(h_i) = \frac{I}{1 + e^{k_i^1 \cdot e_i + k_i^2}} + k_i^3 \quad (2-13)$$

其中 k_i^1 、 k_i^2 和 k_i^3 是待确定的系数； k_i^1 和 k_i^2 可以通过将(2-25)代入(2-26)来计算；而 k_i^3 代表微分同胚的柔度，根据控制问题的具体情况而有所不同。

变换后， e_i 可以改写为

$$e_i = T^{-1}(s_i) \quad (2-14)$$

分别对其分别微分和二次微分，将其同时代入到施加在队列系统中的等式约束中我们可以得到

$$T^{-1}(s_i) + \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i} \cdot \dot{s}_i = 0 \quad (2-15)$$

通过 U-K 力学重新改写上述公式我们可以得到：

$$\hat{A}(s, \dot{s}, t) \ddot{z} = \hat{b}(s, \dot{s}, t) \quad (2-16)$$

$$\text{其中, } \hat{A} = A \cdot \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i}, \quad \hat{b} = b - A \cdot \frac{\partial^2 T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \cdot \dot{s}_i^2。$$

2.4 本章总结

本文研究了智能网联汽车队列的建模与转换，针对传统队列模型中处理约束的缺陷，我们提出基于微分同胚的双边约束转换机制。我们首先建立了大地坐标系下的车辆运动学模型，在利用 U-K 方法建立广义动力学模型，再推导出包含参数不确定性的扩展方程；最后利用微分同胚方法，将施加在车辆队列中的双边不等式约束映射至无界空间，以实现在 U-K 力学方程下的约束处理，为后续

控制策略设计奠定理论基础。

第3章 无参数不确定性情形下汽车队列的控制方法

在许多工程控制系统中，若已知系统的动力学模型参数较为准确，或者系统参数在运行过程中变化较小，则可以采用不带有参数不确定性的控制器来简化控制设计^[40]。此类控制器在保证了系统稳定性的同时避免了自适应补偿的计算复杂度，从而提高了队列系统的控制效率^[41]。

而在本研究中，我们设计了一种不带有参数不确定性的控制器，其核心由约束力和反馈力组成。其中，约束力用于确保队列系统满足预设约束条件，是状态变量沿着期望的轨迹进行演化。而反馈力则负责误差收敛，提供稳定的负反馈控制信号。此外，我们还考虑到了显示复杂情况队列行驶过程中反馈力随机丢失以及受到外界高斯噪声干扰的情形，并在此基础上在李雅普诺夫稳定框架下，严格分析了系统的误差动态特性^[42]。

通过构造适当的李雅普诺夫函数并结合均值和二阶矩分析，我们证明了在仅依赖约束力和反馈的情形下，系统仍能保持最终稳定性，即误差在足够长的事件后收敛到一个有限的稳定区域。相比于带有自适应控制力的含有参数不确定性的队列系统，该控制器适用于系统参数已知或变化较小的场景，在保证稳定性的同时，减少了计算开销，使其更易于在实时控制系统中实现。

3.1 队列控制器设计

假设在系统中不考虑车辆轮胎与地面滑动造成的影响。我们可以排除车辆队列中所有的非理想约束，之后的队列中我们只考虑理想约束对队列系统造成的影响。而经过上文中微分同胚的转化，我们可以得到车辆队列系统关于 s_i 的运动方程：

$$\hat{m}\ddot{s} = \hat{G}(s, \dot{s}, t) + \hat{G}^c(s, \dot{s}, t) \quad (3-1)$$

$$\text{其中, } \hat{m} = m \cdot \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i}, \hat{G} = G - m \cdot \frac{\partial^2 T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \cdot \dot{s}_i^2。$$

而由于微分同胚的特性，我们可以得到状态空间中的 s_i 中的等式约束具有跟我们施加在车辆队列速度变化后为了使车辆队列稳定所施加的约束一样的形式，即：

$$\zeta_1 s_i + \zeta_2 \dot{s}_i = 0 \quad (3-2)$$

而在现实中，车辆队列形式过程中或多或少会出现些许偏差，此时我们需要构造一个反馈力来引导车辆队列中车辆的实际位置满足我们所期望的轨迹。此时我们可以将第 i 辆车的实际位置和期望位置之间的偏差定义为 β_i ：

$$\lim_{t \rightarrow t_\infty} \beta_i = \zeta_1 s_i + \zeta_2 \dot{s}_i \rightarrow 0 \quad (3-3)$$

其中， t_∞ 是一个很大的抽象值，根据我们需要控制问题的具体情况而定。

由此我们可以设计以下控制器：

$$\hat{G}_i^c = u_1 + u_2 \quad (3-4)$$

其中， $u_1 = \hat{\tau}_i$ 表示约束力， $u_2 = \lambda_i \hat{m}_i \beta_i$ 表示控制偏差的反馈力， λ_i 是一个标量常数。

我们将上文中无参数不确定性的控制器代入到运动方程中，我们可以得到：

$$\begin{aligned} \ddot{s} &= \hat{m}^{-1} \left(\hat{Q}_i(s, \dot{s}, t) + \hat{m}_i^{-1} \hat{B}_i^+ (\hat{b}_i - \hat{A}_i \hat{a}_i) + \lambda_i \hat{m}_i \beta_i \right) \\ &= \hat{A}_i^{-1} \hat{b}_i \left(\frac{\zeta_1}{\zeta_2} \dot{s}_i \right) + \lambda_i \beta_i. \end{aligned} \quad (3-5)$$

3.2 随机丢包情形下队列的控制方法

基于上述情况以及上文中控制器的设计，我们在控制器 $u_i(t) = u_1 + u_2$ 中的反馈力 u_2 中施加一个遵循伯努利分布的随机变量 θ ，其中 $\theta \in \{0, 1\}$ ，且 $P(\theta = 1) = p$ ， $P(\theta = 0) = 1 - p$ 。这里的 $p (p > 0)$ 是反馈力生效的概率。

定理 1： 在插入随机变量 θ 后，在控制器的作用下系统在期望意义下仍能保持稳定，且收敛速度与概率 p 成正比。

证明：由上文可知，在插入随机变量 θ 之后，反馈力变为：

$$u'_2 = \theta \cdot \lambda_i \hat{m}_i \beta_i \quad (3-6)$$

其中，随机变量 θ 遵循伯努利分布。

系统的动态方程变为：

$$\hat{m} \ddot{s} = \hat{G}(s, \dot{s}, t) + u_1 + \theta \cdot u_2 \quad (3-7)$$

由此我们选用李雅普诺夫函数来证明系统的稳定性。

$$V_i = \frac{1}{2} \hat{m}_i \beta_i^2 \quad (3-8)$$

而有上文我们可以得到 $\dot{\beta}_i = \frac{1}{\zeta_2} \dot{s}_i + \theta \lambda_i \beta_i$ 。

由此我们可以求出李雅普诺夫函数导数为：

$$\dot{V}_i = \hat{m}_i \beta_i \dot{\beta}_i = \hat{m}_i \beta_i \left(\frac{1}{\zeta_2} \dot{s}_i + \theta \lambda_i \beta_i \right) \quad (3-9)$$

对其取期望可得：

$$\begin{aligned} E[\dot{V}_i] &= E \left[\hat{m}_i \beta_i \left(\frac{1}{\zeta_2} \dot{s}_i + \theta \lambda_i \beta_i \right) \right] \\ &= \frac{1}{\zeta_2} \hat{m}_i \dot{s}_i E[\beta_i] + p \lambda_i \hat{m}_i E[\beta_i^2] \end{aligned} \quad (3-10)$$

由于 β_i 在随着时间流逝的过程会趋向于零且标量常数 $\lambda_i < 0$ ，我们可以得知：

$$E[\dot{V}_i] \leq -p \lambda_i \hat{m}_i E[\beta_i^2] \quad (3-11)$$

由于 $E[\dot{V}_i]$ 是负定的，我们可以证明在反馈力随机丢失的情形下，系统仍能保持稳定，并且误差 β_i 仍然收敛。

3.3 控制器受外界干扰情形下队列的控制方法

在现实车辆行驶过程中，车辆所遭遇的干扰不仅仅是反馈力随机丢失这一种^[43]，基于上文中控制器的设计，我们在此我们引入一种新的干扰情形。我们在控制器 $u_i(t) = u_1 + u_2$ 中的反馈力 u_2 中加入一个外部干扰 $\kappa_i(t)$ ， $\kappa_i(t)$ 遵循高斯分布且期望为零，方差为 σ^2 。由此我们可以得到修改之后的控制器为：

$$u_i(t) = u_1 + u'_2 \quad (3-12)$$

其中, $u'_2 = u_2 + \kappa_i(t)$, 此时我们将反馈力 u_2 设计为 $u_2 = -Ks_i$, 通过上文中对车辆队列施加的约束, 则存在常数 $g > 0$ 使得 $2s(u_i - Ks_i) \leq -gs^T s = -gV(s_i)$ 。

$\kappa_i(t)$ 则为遵循高斯分布的外界干扰。

定理 2: 在无参数不确定性的条件下, 若在反馈力 u_2 中叠加一个服从高斯分布的外界干扰, 车辆队列系统依然满足最终一致有界性, 即存在常数 $g > 0$ 和噪声相关常数 σ^2 , 使得车辆队列系统的 $It\hat{o}$ 生成元满足:

$$LV(s) = \frac{\partial V}{\partial s} [u_i + u_2] + \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial s^2} \quad (3-13)$$

则存在常数 $g > 0$ 和噪声相关常数 σ^2 , 使得车辆队列系统的 $It\hat{o}$ 生成元满足:

$$LV(s) = 2s[u_i + u_2] + \sigma^2 I \leq -gV(s) + \sigma^2 \quad (3-14)$$

由此, 存在常数 $M = \sqrt{\frac{\sigma^2}{g}}$ 以及充分长的时间 $T > 0$, 使得对于所有的 $t \geq T$ 有

$$\|s(t)\| \leq M。$$

证明: 假设系统的反馈力 u_2 受到外界干扰 $\kappa_i(t)$, 且 $\kappa_i(t)$ 遵循高斯分布, 期望为零, 方差为 σ^2 。此时我们的反馈力可以表示为:

$$u'_2 = u_2 + \kappa_i(t) \quad (3-15)$$

由此我们选用李雅普诺夫函数来证明系统的稳定性。

$$V(s) = s^T s \quad (3-16)$$

由选取的李雅普诺夫函数可知这个函数是正定的, 并且满足 $V_i = \|s\|^2$ 。

而在随机系统中, 由于外界噪声的存在, 系统状态的演化具有随机性, 而传统的确定性李雅普诺夫方法只考虑状态沿轨迹的一阶导数, 无法捕捉噪声带来的二阶效应。为此我们引入 $It\hat{o}$ 公式来构造生成元, 从而全方面地描述随机微分方程中李雅普诺夫函数的演化过程。

利用 $It\hat{o}$ 公式, 对 $V(s)$ 应用生成算元, 有:

$$LV(s) = \frac{\partial V}{\partial s} [u_i + u_2] + \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial s^2} \quad (3-17)$$

计算上述公式我们可以得到:

$$\frac{\partial V}{\partial s} = 2s, \frac{\partial^2 V}{\partial s^2} = 2I \quad (3-18)$$

进而我们可以在期望意义下得到：

$$LV(s) = 2s[u_1 + u_2] + \sigma^2 \quad (3-19)$$

此时根据控制器的设计要求，在无噪声的情形有：

$$2s[u_1 + u_2] \leq -gV(s) \quad (3-20)$$

其中 $g > 0$ 为设计常数。故有：

$$LV_i(s) \leq -gV_i(s) + \sigma^2 I \quad (3-21)$$

进而在期望意义下得到：

$$E[\dot{V}_i(s)] \leq -gE[V_i(s)] + \sigma^2 \quad (3-22)$$

根据微分不等式比较原理，对上述不等式积分后可以得到：

$$E[V_i(s(t))] \leq e^{-gt}V_i(s(0)) + \frac{\sigma^2}{g}(1 - e^{-gt}) \quad (3-23)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时，我们可以得到：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup E[V_i(s(t))] \leq \frac{\sigma^2}{g} \quad (3-24)$$

而又上文叙述我们可以得到 $V_i = \|s\|^2$ ，故有：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup E\|s(t)\|^2 \leq \frac{\sigma^2}{g} \quad (3-25)$$

此时我们定义：

$$M = \sqrt{\frac{\sigma^2}{g}} \quad (3-26)$$

则存在充分长的收敛时间 T ，使得对于所有的 $t > T$ 满足：

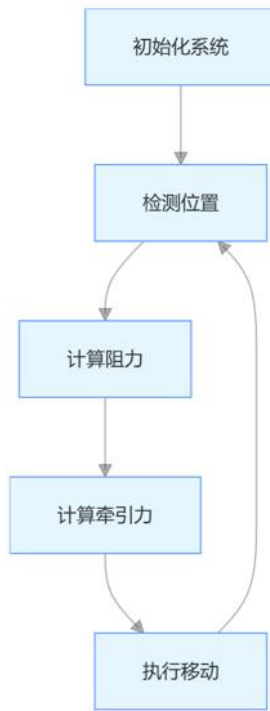
$$\|s(t)\| \leq M \quad (3-27)$$

这证明了经过微分同胚变换后的闭环状态 $s_i(t)$ 最终被限制在半径为 M 的区域内，即系统具有最终一致有界性。

3.4 数值仿真与总结

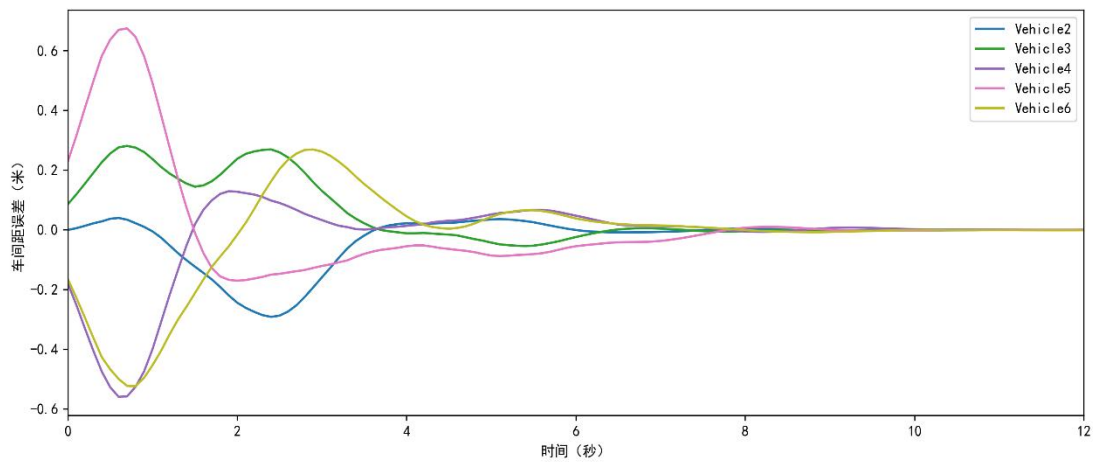
本文使用 MATLAB 代码建模进行数值仿真，以用来验证所提出的队列控制算法的稳定性以及有效性。本小节中的仿真实验为无参数不确定性的系统模拟，并分别在系统上施加遵循伯努利分布的随机变量以及遵循高斯分布的外界噪声扰动进行实验。

我们假设队列系统中每一辆单独的车辆都是独立运行的，并且都有着本研究中所提出的控制器。对于 CAV 队列中的每一辆车，他们的工作流程都如下所示：



3.4.1 随机丢包情形下队列控制器的仿真结果

在本次仿真实验中，我们假设智能网联汽车队列中所有车辆都在所提出的控制器下进行实验仿真，车辆队列初始静止在路面上，在开始进行模拟后车辆队列速度逐渐增加至 100km/h ，车辆之间的车间距我们按照最小安全距离模型设定为 15m ，车距的不等式约束范围为 $[10\text{m}, 20\text{m}]$ 。连续智能网联汽车之间的初始车距误差在 $[-5\text{m}, 5\text{m}]$ 区间内随机选取，且头车由人为驾驶，其加速度为固定的 2.2 m/s^2 ，服从伯努利分布的随机变量 θ 的丢包概率 $p = 0.2$ 。



由此在所提出的控制器我们可以得到队列中 CAV 的性能如下图所示：

图 1 车间距误差变化

图 2 速度变化

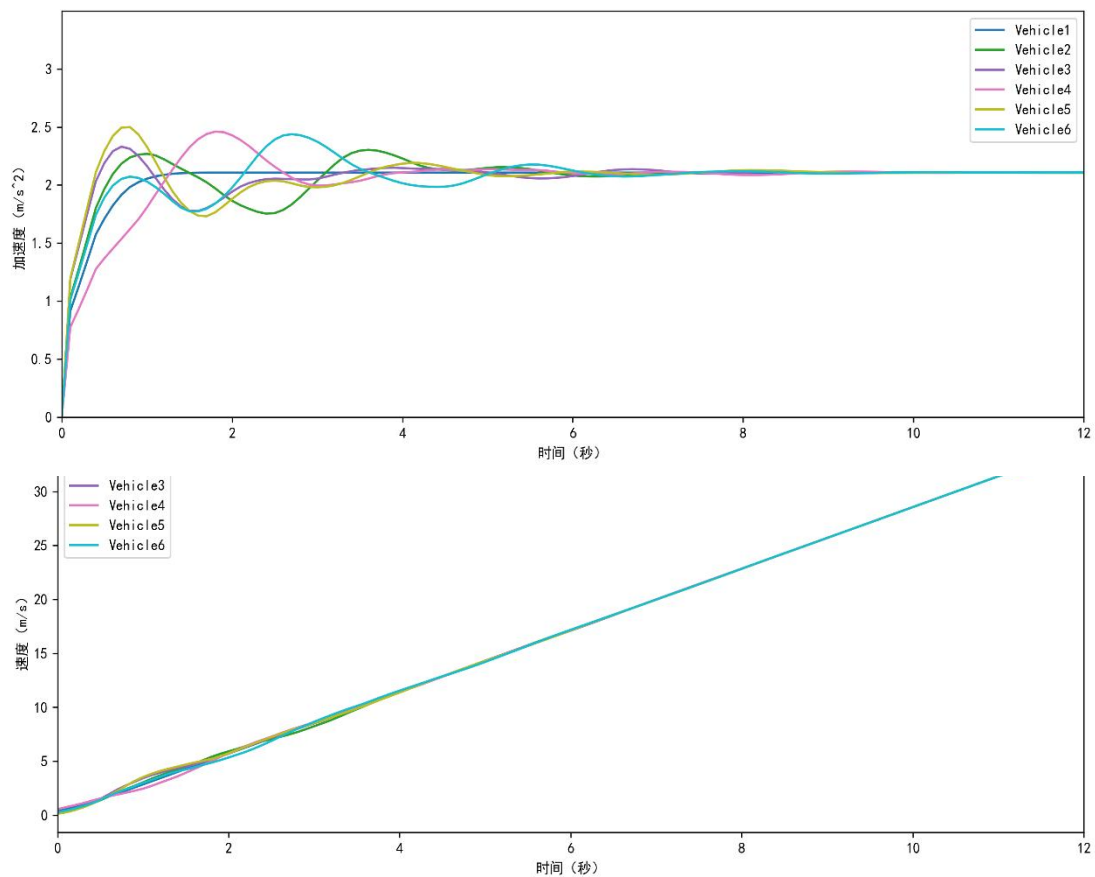


图 3 加速度变化

如图 1 所示，车辆之间的车间距误差一开始都是散乱分布的，但随着时间的推移，车辆之间的车间距误差变得逐渐稳定并且逐步趋向于零，这意味着在我们

所提出的控制器作用下，车辆之间的车间距误差在随着时间的推移慢慢消失。而在保证安全车距的情形下，队列中所有车辆的车间距误差在 9s 后基本完全消除。

而图 2 中描述了车辆队列中每辆车的速度变化，可以清晰的看到由于随机变量对控制器造成的影响下，车辆队列中车辆的速度在起步阶段时毫无规律的，但随着时间的推移，在我们所设计的控制器作用下，各个车辆之间的驱动状态逐渐趋于协同。此时我们对照图 3 可以明确的看到各个车辆之间的加速度变化，这同样证明了在控制器下车辆队列的稳定性。

3.4.2 受外界干扰情形下队列控制器的仿真结果

与随机丢包情形下无参数不确定性队列的控制器仿真相比，在外界干扰的作用下，不仅在加速情形下，车辆队列在减速的过程也会受到明显的干扰。但随着时间的推移，车辆队列会在我们所设计的控制器作用下逐步稳定，具体表现在车间距误差随着时间推移逐步平稳趋近于零。且队列中的车辆车速和加速度也会在控制器的作用下逐步趋于相对稳定。这证明了在我们所提出的控制器控制下，智能网联汽车队列系统最终收敛且最终一致有界。

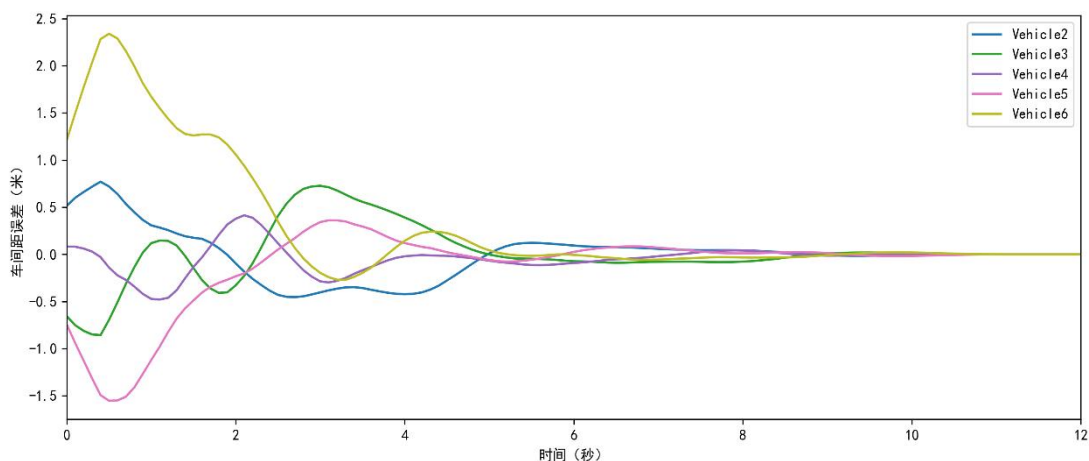


图 4 车辆车间距误差变化

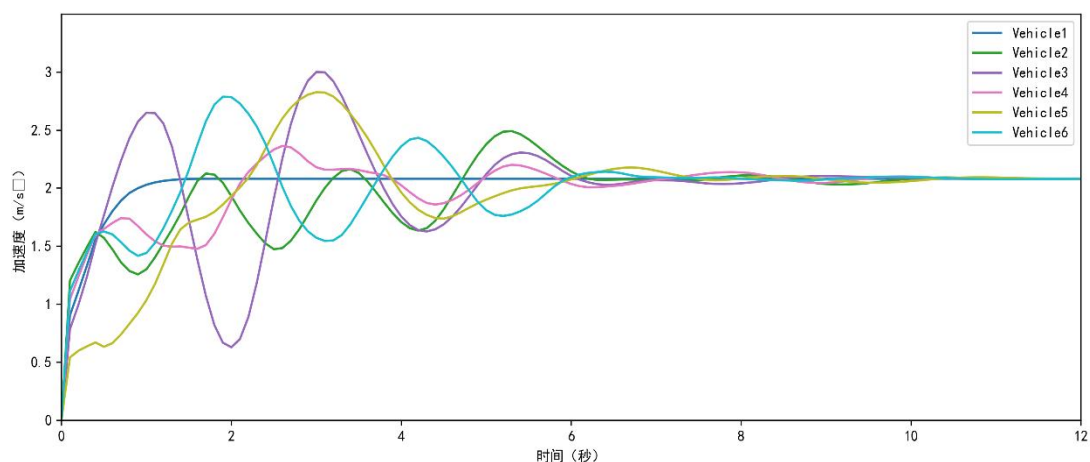
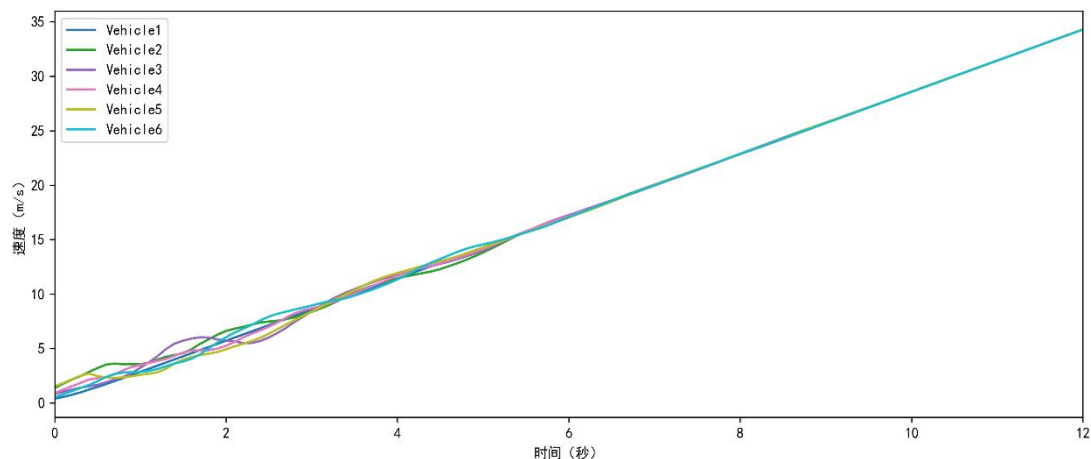


图 5 车辆速度变化

图 6 车辆加速度变化

3.5 本章总结

本节研究了一类在只考虑理想情形下即不考虑参数不确定性对车辆队列的影响前提下，关于控制器反馈力的随机丢包以及受到外界干扰的情况。通过分析车辆队列的动力学模型建立无参数不确定性的车辆队列误差动态方程并设计相应的控制器，在设计的控制器的基础上分别引入随机变量以及外界干扰，通过推理证明了车辆队列控制器的可行性，并在最后通过仿真实验验证了我们所设计的控制器的控制效率。

第4章 参数不确定性影响下的汽车队列控制方法

在实际工程应用中，车列队列系统往往面临着参数不确定性的挑战，例如车辆动力学参数的变化、环境扰动、传感器误差等等，这些因素都会影响控制器的性能和稳定性^[44]。因此，在原有的控制框架的基础上，我们引入参数不确定性补偿机制，以增强系统的鲁棒性和自适应能力^[45]。

为此，我们设计了一种带有参数不确定性的控制器，其中包含自适应控制力 u_3 ，用于实时估计和补偿未知或变化的系统参数，同时结合反馈力 u_2 以确保误差收敛，并在约束力的作用下满足系统动态约束^[46]。此外，我们进一步考虑外界随机干扰，例如随机丢包以及高斯噪声的影响，并在李雅普诺夫稳定性框架下，严格分析了系统在参数不确定性和随机扰动共同作用下的最终稳定性^[47]。

通过构造合适的李雅普诺夫函数并结合均值和二阶矩进行分析，我们证明了该控制器能够在参数不确定性存在的情形下仍然保持最终稳定，确保系统的稳定性和控制精度。这一设计思路为实际应用中的智能网联汽车队列控制提供了更加优秀的理论支撑。

4.1 队列控制器设计

而在现实情形下，我们不仅要考虑无参数不确定性的队列控制器控制，也要同时考虑到参数不确定性队列控制器的控制，由此我们通过将带有不确定参数的式子以及微分同胚状态下 s_i 的一阶微分以及二阶微分代入到考虑参数不确定性的运动方程中，我们可以得到参数不确定的运动方程如下：

$$\begin{aligned}
 \ddot{s}_i &= -\frac{\partial T^{-1}(z_i)^{-1}}{\partial z_i} \ddot{x}_{i-1}(t) - \frac{\partial T^{-1}(s_i)^{-1}}{\partial s_i} \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial z_i^2} \cdot \dot{s}_i^2 \\
 &+ \left(m \cdot \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i} \right)^{-1} \left[-C_i v_i(t) |v_i(t)| - F_i - \Delta C_i v_i(t) |v_i(t)| - \Delta F + \tilde{G}_i^c \right] \\
 &= \left(m \cdot \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i} \right)^{-1} \tilde{G}_i^c - \frac{\partial T^{-1}(s_i)^{-1}}{\partial s_i} \ddot{x}_{i-1}(t) - \frac{\partial T^{-1}(s_i)^{-1}}{\partial s_i} \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \cdot \dot{s}_i^2 \\
 &- \left(m \cdot \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i} \right)^{-1} \left[C_i \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \cdot \dot{s}_i + \dot{x}_{i-1}(t) \left| \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \right| \cdot \dot{s}_i + \dot{x}_{i-1}(t) + F_i \right] \\
 &- \left(m \cdot \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i} \right)^{-1} \left[\Delta C_i \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \cdot \dot{s}_i + \dot{x}_{i-1}(t) \left| \frac{\partial T^{-1}(s_i)}{\partial s_i^2} \right| \cdot \dot{s}_i + \dot{x}_{i-1}(t) + \Delta F_i \right]
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

我们在本小节中重新利用参数不确定性来构造控制器。

由于在无参数不确定性因素下我们构造的控制器中包含约束力与反馈力，而当我们考虑到参数不确定性因素造成的影响时，我们需要施加一个额外的力来抵消参数不确定性。因此我们将控制器定义为：

$$u_i(t) = u_l + u_2 + u_3 \tag{4-2}$$

其中 u_3 就是我们施加用来补偿抵消参数不确定性的自适应控制力。

u_l 约束力且 $u_l = \tilde{\tau}_i$ 仍然成立， $u_2 = \lambda_i \hat{M}_i \beta_i$ 。

因此，基于 σ 和 Σ 之间的相互联系，我们引入以下假设。

我们提出如下自适应控制力 u_3 ：

$$u_3 = \hat{M}_i \gamma_i \mu_i \Pi_i \tag{4-3}$$

其中，

$$\gamma_i = \begin{cases} \frac{1}{|\mu_i|}, & \text{if } |\mu_i| > \epsilon_i \\ \frac{1}{\epsilon_i}, & \text{if } |\mu_i| \leq \epsilon_i \end{cases} \tag{4-4}$$

$$\mu_i = \beta_i \Pi_i = (\eta_i^l z_i(t) + \eta_i^2 \dot{z}_i(t)) \Pi_i \tag{4-5}$$

其中， $\epsilon_i > 0$ 是一个标量常数，已知函数 $\Pi_i(\cdot)$ ， $\sigma_i \in \Sigma_i$ 时，对于所有向量

$(s_i, \dot{s}_i, \sigma_i, t) \in R \times R \times R \times R$ ，使得

$$\begin{aligned}
 & \max_{\sigma_i \in \Sigma_i} \left\| \left(M \cdot \frac{\partial T^{-l}(z_i)}{\partial z_i} \right)^{-l} \right. \\
 & \cdot \left[\Delta C_i \frac{\partial T^{-l}(z_i)}{\partial z_i} \cdot \dot{z}_i + \dot{x}_{i-l}(t) \left| \frac{\partial T^{-l}(z_i)}{\partial z_i} \cdot \dot{z}_i + \dot{x}_{i-l}(t) \right| + \Delta F_i \right] \Big\| \\
 & \leq \Pi_i(z_i, \dot{z}_i, \sigma_i, t)
 \end{aligned} \tag{4-6}$$

上式表示不确定性的最坏情况效应的参数化。

如上述内容所叙述的一样，具体参数不确定性是未知的，但其边界可以通过已知函数 $\Pi_i(\cdot)$ 来限制。

4.2 随机丢包情形下队列的控制方法

正如 3.1 描述的基于无参数不确定性的队列控制器的控制方法，在现实生活中，为了车辆队列的行驶安全，我们不能只考虑理想约束，同时也要考虑非理想约束^[48]。于此同时，我们可以利用先前设计的带有参数不确定性的控制器，在反馈力 u_2 上引入等同于 3.1.1 中的遵循伯努利分布的随机变量来模拟车辆队列行驶过程中反馈力丢失的情形。在此基础上，我们对模型进行分析、推导，并证明系统在满足某些条件下是最终稳定的。

定理 3: 基于上述情况以及上文中控制器的设计，我们在控制器 $u_i(t) = u_1 + u_2 + u_3$ 中的反馈力 u_2 中施加一个遵循伯努利分布的随机变量 θ ，其中 $\theta \in \{0, 1\}$ ，且 $P(\theta = 1) = p$ ， $P(\theta = 0) = 1 - p$ 。

则系统仍然最终稳定，即存在常数 d_i ，使得对于所有的 $t > t_0 + T(d_i, r_i)$ ，系统状态误差满足 $\|\beta_i(t)\| \leq d_i$ 。

证明：我们假设车辆队列在显示行驶过程中控制器中的反馈力 u_2 存在反馈丢失，并且丢失遵循伯努利分布。由此我们可以得到新的反馈力 u'_2 ：

$$u'_2 = \theta \cdot u_2 = \theta \cdot \lambda_i \hat{m}_i \beta_i \tag{4-7}$$

由上文原始的控制器的设计中我们可以得到系统的误差动态方程：

$$\dot{\beta}_i = \frac{1}{\zeta_2} (u_1 + u_2 + u_3) \tag{4-8}$$

此时我们将新构造的反馈力 u'_2 带入到误差动态方程中得到：

$$\dot{\beta}_i = \frac{1}{\zeta_2} (u_l + u'_2 + u_3) \quad (4-9)$$

其中， u_l 为约束力保证系统状态满足物理约束且不受丢包影响，因此我们可以将 u_l 的贡献看作一个固定项，不影响误差的收敛分析； u'_2 为控制误差收敛的主要力，但是丢包会导致反馈力不稳定； u_3 用于补偿系统的不确定性，例如在误差较大时，按照 u_3 的设计会为系统提供额外补偿，具体有 $u_3 = \hat{m}_i \gamma_i u_i \Pi_i$ 。其中 γ_i 是增益调增参数，在系统误差出现过大过小的情形下会改变自身形式来调整系统， $u_i \Pi_i$ 依赖于误差，保证补偿方向于误差相反。

而为了分析系统的稳定性，我们使用李雅普诺夫函数理论对系统的稳定性进行推导验证。此时我们定义李雅普诺夫函数：

$$V_i = \frac{1}{2} \hat{m}_i \beta_i^2 \quad (4-10)$$

我们的主要目标则是证明 $\dot{V}_i < 0, \forall t > 0$ 。

此时我们对 V_i 进行求导：

$$\dot{V}_i = \hat{m}_i \beta_i \dot{\beta}_i \quad (4-11)$$

将李雅普诺夫函数的导数导入到运动方程中：

$$\dot{V}_i = \frac{\hat{m}_i \beta_i}{\zeta_2} (u_l + \theta \cdot \lambda_i \hat{m}_i \beta_i + u_3) \quad (4-12)$$

逐项展开：

$$\dot{V}_i = \frac{\hat{m}_i \beta_i}{\zeta_2} u_l + \frac{\theta \cdot \lambda_i \hat{m}_i^2}{\zeta_2} \beta_i^2 + \frac{\hat{m}_i \beta_i}{\zeta_2} u_3 \quad (4-13)$$

对上述方程求期望：

$$\begin{aligned} E[\dot{V}] &= E\left[\frac{\hat{m}_i \beta_i}{\zeta_2} u_l\right] + E\left[\frac{\theta \cdot \lambda_i \hat{m}_i^2}{\zeta_2} \beta_i^2\right] + E\left[\frac{\hat{m}_i \beta_i}{\zeta_2} u_3\right] \\ &= \frac{\hat{m}_i E[\beta_i]}{\zeta_2} u_l + \frac{\theta \cdot \lambda_i \hat{m}_i^2}{\zeta_2} E[\beta_i^2] + \frac{\hat{m}_i}{\zeta_2} u_3 E[\beta_i] \end{aligned} \quad (4-14)$$

而由于 θ 是随机变量，即在每个时刻 i 也是随机的，因此我们分析其期望的趋势，目标是为了证明误差的均方值在期望意义上收敛。

而由于反馈增益 λ_i 是一个充分大且为负值，丢包率 $p \leq 1$ ，同时控制力 u_i 可以确保车辆队列的间距不会失控，且自适应力 u_3 能对因参数不确定性而造成的误差持续进行补偿从而使得导致不会引发过度振荡。

而在系统中我们定义了 $\lim_{t \rightarrow t_\infty} \beta_i = \zeta_1 s_i + \zeta_2 \dot{s}_i \rightarrow 0$ ，结合我们引入的外界干扰，即可得知在足够大的时间 t 后，误差的二阶矩 $E[\beta_i^2]$ 收敛到某个界限，即我们假设：

$$E[\beta_i^2] \leq \frac{E[u_3]}{(1-p)|\lambda_i|\hat{m}_i^2/\zeta_2} \quad (4-15)$$

这表明误差在长时间后不会无限增大，而是进入一个稳定有界区，并且收敛所需要的时间由以下公式所决定：

$$T(d_i, r_i) = \frac{E[u_3]}{(1-p)|\lambda_i|\hat{m}_i^2/\zeta_2} \quad (4-16)$$

则系统仍然是有界的，并且误差满足：

$$\|\beta_i(t)\| \leq d_i = \sqrt{\frac{E[u_3]}{(1-p)|\lambda_i|\hat{m}_i^2/\zeta_2}} \quad (4-17)$$

即当足够长的时间 t 后，系统状态进入稳定区：

$$\|\beta_i(t)\| \leq d_i, \forall t > t_0 + T(d_i, r_i) \quad (4-18)$$

其中， $T(d_i, r_i) = \frac{E[u_3]}{(1-p)|\lambda_i|\hat{m}_i^2/\zeta_2}$ 。

由此我们可以证明系统最终稳定，即存在常数 d_i ，使得对于所有的 $t > t_0 + T(d_i, r_i)$ ，系统状态误差满足 $\|\beta_i(t)\| \leq d_i$ 。

4.3 控制器受外界干扰情形下队列的控制方法

参考 3.1.2 中考虑时变参数不确定性的施加在车辆上的整体外力 $\tilde{Q}_i$ 以及参数不确定的运动方程 $\ddot{z}_i$ 。我们在此仿照上文对 u_2 再次施加一个有界的外界干扰项^[49]，来证明在存在参数不确定性的情形下，我们所设计的带有参数不确定性的控制器仍能保持系统的稳定。

定理 4: 在基于上述智能网联汽车队列控制器的设计上，我们在反馈力 u_2 中施加一个遵循高斯分布且期望为零外界干扰 $\kappa_i(t)$ 后，系统在扰动下依然满足最终一致有界性，即 $\exists N > 0$ ，使得：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup E[s_i^2(t)] \leq N \quad (4-19)$$

证明：为了方便我们对系统的稳定性分析，我们在此设计新的控制器为：

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = u_1 - ks_i + \kappa_i(t) + u_3 \quad (4-20)$$

其中，我们定义：

u_1 为约束力；

$u_2 = -ks_i(t) + \kappa_i(t)$ 为反馈力其中包含遵循高斯分布的外界干扰，其中 $k > 0$ 时反馈增益， $\kappa_i(t)$ 为外界扰动；

u_3 为自适应控制力，为了抵消参数不确定性对控制器造成的干扰。

由上文叙述中关于车辆动力学的基础间距误差模型和微分同胚方法，我们可以重新阐释 s_i 在空间中的具体动态为：

$$\ddot{s}_i = T''(e_i)\dot{e}_i^2 + T'(e_i)[\Delta f_i + \Delta u_1 - k(\Delta s_i(t)) + (\kappa_i(t) - \kappa_{i-1}(t)) + \Delta u_3] \quad (4-21)$$

其中 Δf_i 为车辆系统的非线性动态差值； Δu_1 与 Δu_3 分别为系统的约束力差和自适应力差； Δs_i 和 $\Delta \kappa_i$ 分别为系统的误差变量差值和扰动差。

此时我们定义如下线性微分算子：

$$L[s_i(t)] := \ddot{s}_i(t) + ks_i(t) \quad (4-22)$$

代入上式我们可以得到：

$$L[s_i(t)] = T''(e_i)\dot{e}_i^2 + T'(e_i) \cdot [\Delta f_i + \Delta u_l - k(\Delta s_i(t)) + (\kappa_i(t) - \kappa_{i-l}(t)) + \Delta u_3] \quad (4-23)$$

而为了进一步对系统的稳定性进行定量分析, 我们需要引入一个能够全面反映系统状态的标量函数。由于系统在 s_i 空间中为二阶非线性动力学, 并且控制器的反馈力直接作用于 s_i , 因此我们可以通过构造一个关于 s_i 及其导数的能量泛函, 对系统状态的偏离程度进行刻画。

为此, 我们定义如下能量泛函:

$$V_i(t) = \frac{1}{2}(\dot{s}_i + \alpha s_i^2) \quad (4-24)$$

其中 $\alpha > 0$ 时可调参数。用来表示“误差速度+状态幅度”的二次能量。

对其求导我们可以得到:

$$\dot{V}_i(t) = \dot{s}_i(\ddot{s}_i + \alpha s_i) = \dot{s}_i(L[s_i] + (\alpha - ks_i)) \quad (4-25)$$

而为了简化分析, 我们取 $\alpha = k$, 如此我们可以得到:

$$\dot{V}_i(t) = \dot{s}_i \cdot L[s_i] \quad (4-26)$$

由此, 我们可以带入到前面的 $L[s_i]$ 中, 有:

$$\dot{V}_i(t) = T''(e_i)\dot{e}_i^2\dot{s}_i + T'(e_i)\dot{s}_i(\Delta f_i + \Delta u_l + \Delta u_3 - ks_{i-l} + \kappa_i - \kappa_{i-l}) \quad (4-27)$$

对其取数学期望。由于高斯噪声期望为零, 我们可以得到:

$$E[\dot{s}_i(\kappa_i - \kappa_{i-l})] = 0 \quad (4-28)$$

考虑到在物理系统中系统动力学中 $f_i(x_i, \dot{x}_i)$ 通常满足连续可微或者 Lipschitz 条件, 而我们的系统在微分同胚的映射下也是连续可导函数, 因此我们可以将系统函数项视为有界或满足 Lipschitz 条件, 控制器中 $\Delta u_l, \Delta u_3$ 项则根据设计结构, 可进一步视为可控函数。

在上述条件下, 我们可以运用 Lipschitz 性以及 Cauchy-Schwarz 不等式, 对相应乘积项进行期望估计, 为后续的收敛性分析提供有界上限, 其具体如下:

$$E[T''(e_i)\dot{e}_i^2\dot{s}_i] \leq \delta_1 E[\dot{s}_i^2]$$

$$E[T'(e_i)\dot{s}_i\Delta f_i] \leq \delta_2 E[\dot{s}_i^2] + \delta_3 E[s_i^2]$$

$$E[T'(e_i)\dot{s}_i\Delta u_l] \leq \epsilon_l E[\dot{s}_i^2] + \epsilon_2$$

$$E[T'(e_i)\dot{s}_i\Delta u_3] \leq -\eta E[s_i^2]$$

合并得：

$$E[\dot{V}_i(t)] = -\lambda_l E[s_i^2] + \lambda_2 E[\dot{s}_i^2] + N_0 \quad (4-29)$$

其中 $\lambda_l, \lambda_2 > 0$ 为由反馈与补偿控制带来的收敛因子； $N_0 > 0$ 为来自耦合项与外部扰动的常数上界。

而由于能量泛函 $\dot{V}_i(t) = \frac{1}{2}(\dot{s}_i^2 + ks_i^2)$ ，即存在正数 $\lambda_l > 0$ ，使得：

$$E[\dot{V}_i(t)] \leq -\lambda_l E[\dot{V}_i(t)] + N \quad (4-30)$$

而根据微分型 *Grönwall* 不等式，有：

$$E[V_i(t)] \leq V_0(0)e^{-\lambda t} + \frac{N}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \sup E[V_i(t)] \leq \frac{N}{\lambda} \quad (4-31)$$

即：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup E[V_i(t)] \leq \frac{2C}{\lambda k} =: N_l \quad (4-32)$$

由此可得在系统反馈力一项中施加遵循高斯分布的外界干扰后，车辆间距误差在高斯噪声的干扰与系统参数不确定的情形下，其状态满足最终一致有界性。

4.4 数值仿真与总结

本章节于第三章相似，我们使用 MATLAB 代码建模进行数值仿真，以用来验证所提出的队列控制算法的稳定性以及有效性。本章节中的仿真实验为带有参数不确定性的系统模拟，并分别在系统上施加遵循伯努利分布的随机变量以及遵循高斯分布的外界噪声扰动进行实验。而由上文的叙述我们可以得知，由于每一段道路的地面摩擦情况以及空气阻力都在队列行驶过程中都无法准确预估，所以参数不确定性的值我们是具体得到的，但是参数不确定性的边界我们在上文描述中提到过假设它是满足假设（4-6），所以在接下来的关于参数不确定性的控制器仿真过程中，我们继续假设参数不确定性的边界满足：

$$\Pi_i(s_i, \dot{s}_i, \sigma_i, t) = 0.5\Delta\dot{s}_i + 0.05\Delta s_i \quad (4-33)$$

基于上述假设,我们对参数不确定性造成的干扰进行随机选值,如下表所示。对于车辆队列中每一辆车的不确定性在下面的仿真中通过随机初始相位实现。在车辆行驶过程中,由于每个地方的道路施工材料不同会导致所受到摩擦系数实时变化,同时由于天气或者其他原因,由空气跟汽车引起的摩擦力也是实时变化的。因此我们需要用一个有界函数来模拟这个变化范围。

序号	$\Delta C_t(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	$\Delta F_t(\text{N})$
1	$0.5 \sin(0.1t)$	$300 \sin\left(t + \frac{3\pi}{4}\right)$
2	$0.5 \cos\left(0.2t + \frac{\pi}{4}\right)$	$300 \sin\left(0.9t - \frac{5\pi}{4}\right)$
3	$0.5 \sin\left(0.3t - \frac{1\pi}{2}\right)$	$300 \sin\left(0.8t + \frac{3\pi}{2}\right)$
4	$0.5 \sin\left(0.4t + \frac{3\pi}{4}\right)$	$300 \cos\left(0.7t - \frac{7\pi}{4}\right)$
5	$0.5 \sin(0.5t - \pi)$	$300 \sin(0.6t)$
6	$0.5 \cos\left(0.6t + \frac{5\pi}{4}\right)$	$300 \sin\left(0.5t - \frac{\pi}{4}\right)$
7	$0.5 \cos\left(0.7t + \frac{3\pi}{2}\right)$	$300 \sin\left(0.4t - \frac{\pi}{2}\right)$
8	$0.5 \cos\left(0.8t + \frac{7\pi}{4}\right)$	$300 \cos\left(0.3t + \frac{3\pi}{4}\right)$
9	$0.5 \sin(0.9t)$	$300 \sin(0.2t - \pi)$
10	$0.5 \sin\left(t - \frac{\pi}{4}\right)$	$300 \cos\left(0.1t + \frac{5\pi}{4}\right)$

表 1 参数不确定性车辆参数

4.4.1 随机丢包情形下队列控制器的仿真结果

在本次仿真实验中,我们使用于 3.4.1 小节中相同的初始条件。由此在所提出的控制器我们可以得到队列中 CAV 的性能如下图所示:

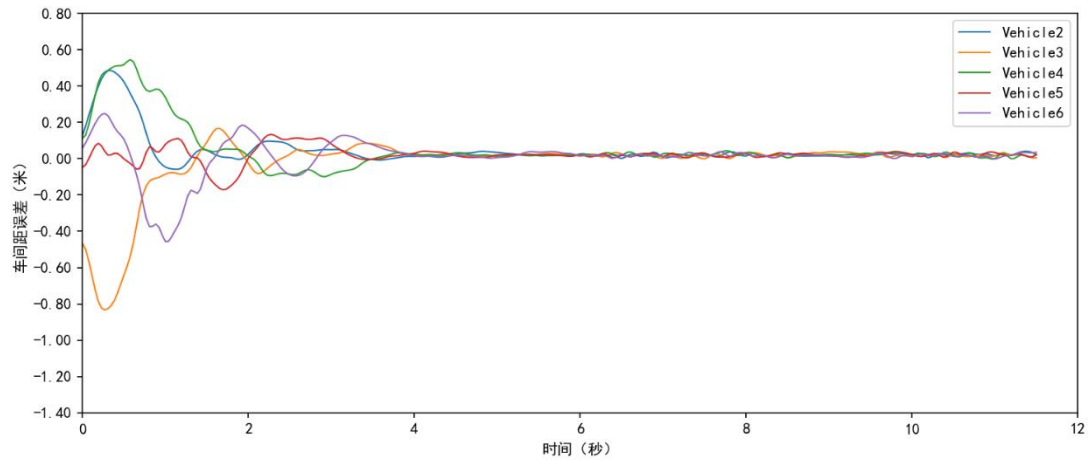


图 7 车辆车间距误差变化

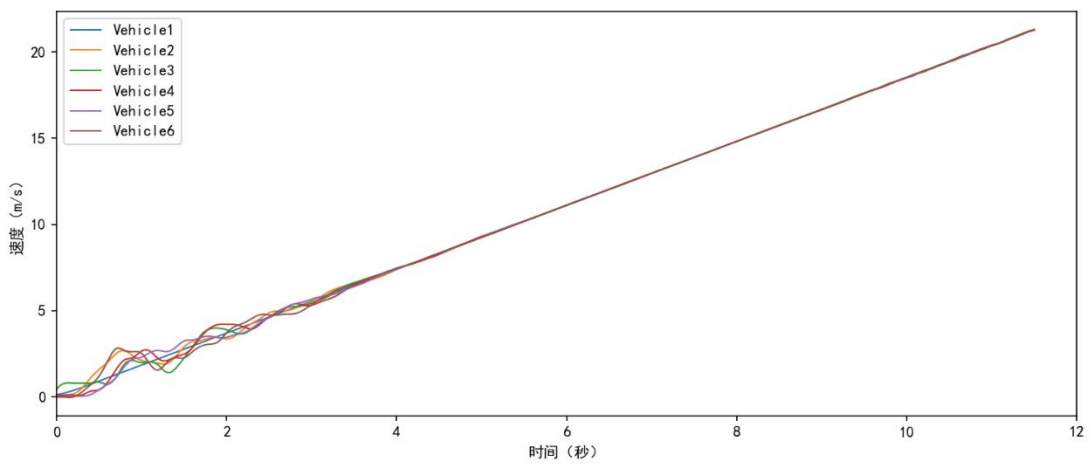
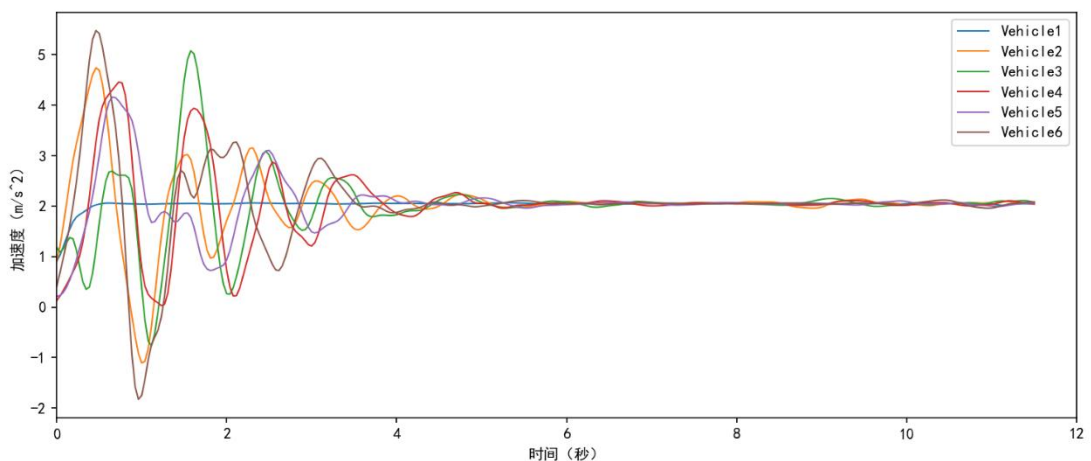


图 8 车辆速度变化

图 9 车辆加速度变化

由图 7 我们看到,由于参数不确定性以及反馈力的随机丢失对系统控制器造成的影响,间距误差、速度和加速度的曲线都出现了明显的波动。但汽车队列中的车间距误差的走向随着时间的推移,整体是趋向于零的。显然当参数不确定性以及随机丢失在汽车队列中控制器中存在时,会对我们的控制效果产生波动,但波动不会通过交流而传播放大。这同时证明了我们所提出的控制器约束了动态 CAV 队列系统使他们趋于稳定有界。



4.4.2 受外界干扰情形下队列控制器的仿真结果

与随机丢包情形下含有参数不确定性队列的控制器仿真相比,在外界干扰的作用下,不仅在加速情形下,车辆队列在减速的过程也会受到明显的干扰。但随着时间的推移,车辆队列会在我们所设计的控制器作用下逐步稳定,但由于参数不确定性的存在,逐步稳定的曲线走向中会出现明显的波动,具体表现在车间距误差随着时间推移逐步平稳,其在趋近于零之前都会产生波动。且队列中的车辆车速和加速度也会在控制器的作用下逐步趋于相对稳定。这证明了不确定动态CAV队列系统在所提出的控制器在约束下最终稳定。

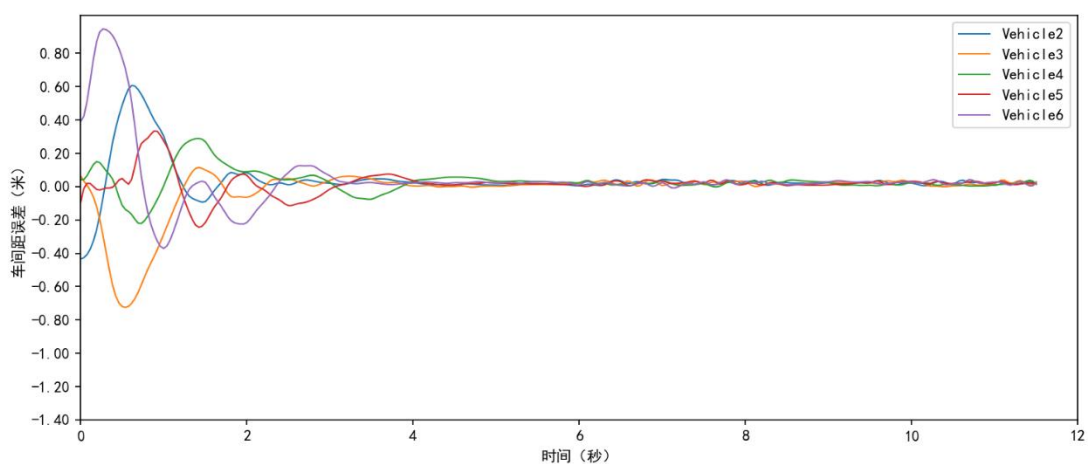


图 10 车辆车间距误差变化

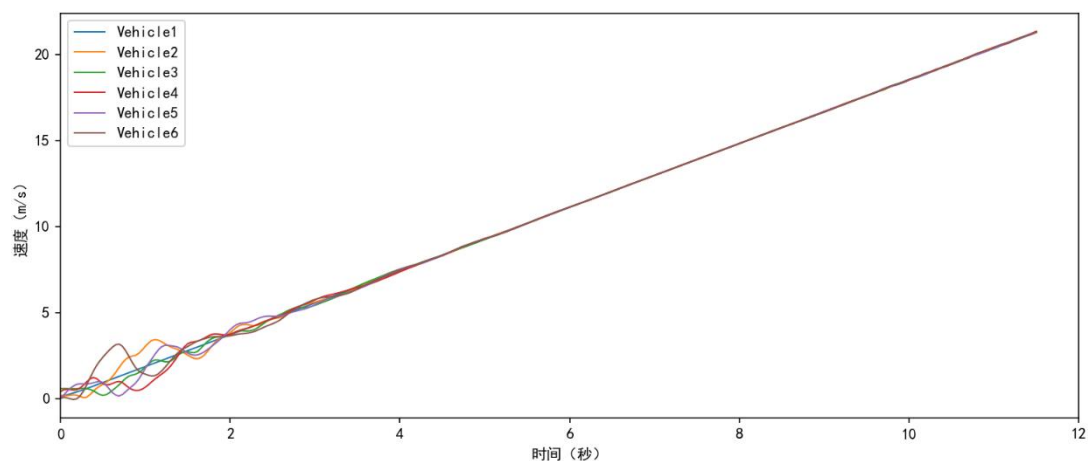


图 11 车辆速度变化

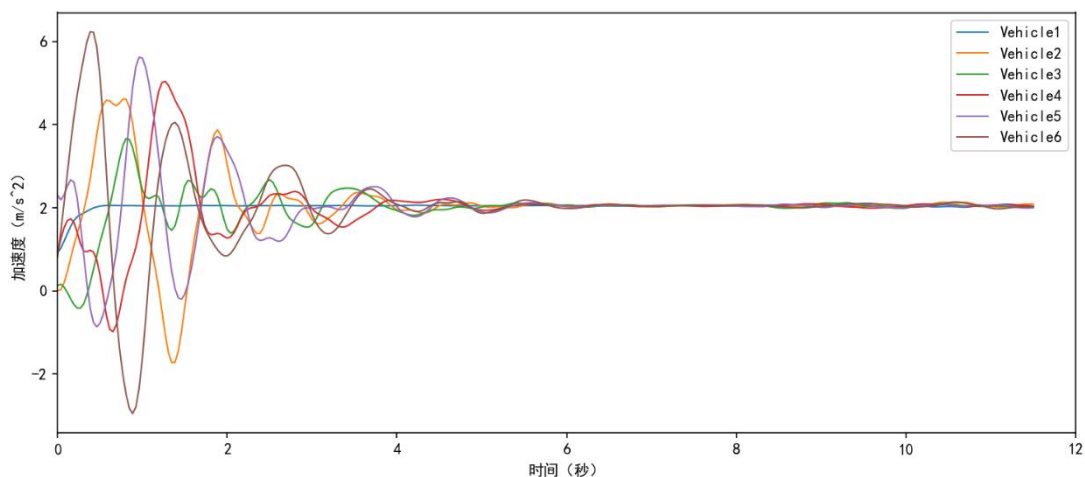


图 12 车辆加速度变化

4.5 本章总结

本文在第三章的基础上研究了带有参数不确定性的车辆队列系统,关于控制器中反馈力随机丢包以及受到外界干扰的情况下,系统是否能保持车辆队列的稳定性进行了可行性分析以及实验证明。

首先我们分析车辆的动力学模型,并建立参数不确定性影响下的车辆队列误差动态方程,同时设计相应的控制器。不同于无参数不确定性模型中的控制器,我们所设计的控制器中我们引入了新的自适应力来对参数不确定性造成的影响进行处理。与此同时,我们还在设计的新控制器的基础上分别引入随机变量以及外界干扰,通过推理与仿真,不仅在理论上证明了控制器在引入新的受限情形下依旧稳定,同时也在最后通过仿真实验证明了我们所设计的控制器的控制效率。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文围绕通讯受限情形下智能网联汽车队列控制问题展开研究,针对现有研究中存在的动态约束建模缺陷、约束处理方法局限以及通信受限应对不足等问题,提出了一系列创新性解决方案。分别为以下两类:1.基于无参数不确定性情形下的理想车辆队列模型的基础上对两种通讯受限情形进行讨论;2.基于带有参数不确定性下的非理想车辆队列模型的基础上对两种通讯受限情形进行讨论。

首先我们基于车辆动力学的基础模型得到车辆队列的模型,同时利用 U-K 力学方法以及微分同胚方法对系统进行转化,得到了处理了双边不等式约束后的在无界空间上的车辆队列误差方程。

随后我们基于参数不确定性将内容分为无参数不确定性理想情形下汽车队列的控制方法以及含有参数不确定性非理想情形下汽车队列的控制方法。

我们基于车间距误差动态方程设计了无参数不确定性的队列控制器,随后我们分别在反馈力上引入了遵循伯努利分布的随机变量以及遵循高斯分布的外部干扰,在此控制器设计的基础上,我们构建了李雅普诺夫函数对我们所设计的控制器进行分析,最终严格地证明了系统稳定的结论。

同理我们随后设计了带有参数不确定性的队列控制器,相似地分别在反馈力上引入了遵循伯努利分布的随机变量以及遵循高斯分布的外部干扰,在此控制器设计的基础上,我们构建了李雅普诺夫函数以及引入微分算子对我们所设计的控制器进行分析,最终严格地证明了系统稳定有界的结论。

本文的创新点有:

第一,使用了 U-K 力学方程去处理车辆动力学模型,同时利用微分同胚方法处理了双边不等式约束,将车辆误差动态方程转换到无界空间方便我们后面的控制器设计以及稳定性分析。

第二,本文将通讯丢包问题以及外部干扰问题引入了无参数不确定性的队列系统控制器中,为此模拟车辆队列在行驶过程中发生通讯丢失或者受到未知干扰情形下队列控制的稳定性。在此基础上我们设计了新的控制器,通过对控制器进

行稳定性分析，证明了其稳定性。最后用 MATLAB 仿真实验证明控制器的有效性以及实用性。

第三，本文将通讯丢包问题以及外部干扰问题引入了带有参数不确定性的队列系统控制器中，为此模拟车辆队列在行驶过程中不仅仅会受到路面问题而引发的参数不确定性干扰，也会受到车辆自身问题引发的通讯丢失或者未知干扰情形。在此基础上我们设计了新的控制器，通过对控制器进行稳定性分析，证明其稳定性。最后用 MATLAB 仿真实验证明控制器的有效性以及实用性。

5.2 展望

尽管本文在通讯受限情形下智能网联汽车队列控制方面取得了一定的研究成果，但仍有一些问题值得进一步探讨^[50-53]：

1.超低时延通信的融合应用：随着 5G-V2X 技术的不断发展，未来可以进一步探索超低时延通信在智能网联汽车队列控制中的应用，进一步提升系统的响应速度和稳定性。

2.多物理场耦合建模研究：在实际交通环境中，车辆队列不仅受到气动阻力的影响，还可能受到其他物理场的耦合作用。未来可以开展多物理场耦合建模研究，进一步提升模型的精度和鲁棒性。

3.复杂城市交通场景下的控制优化：本文主要针对高速公路场景下的队列控制问题展开研究，未来可以进一步探索复杂城市交通场景下的控制优化问题，提升系统在复杂环境中的适应能力。

4.机器学习与深度学习的应用：随着人工智能技术的快速发展，未来不久的时间中，人工智能可以将先进算法应用于智能网联汽车队列控制中，进一步提升系统的智能化水平和自适应能力。

综上所述，本文的研究成果为通讯受限情形下智能网联汽车队列控制提供了新的理论和方法支撑，具有重要的理论意义和工程应用价值。未来，随着相关技术的不断进步，智能网联汽车队列控制技术将在智能交通系统中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 沈国江, 张伟. 城市道路智能交通控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 北京交通发展研究中心[R]. 2015 年北京市交通发展年度报告, 2015.
- [3] 孙正良. 英国自动驾驶汽车道路测试法规简介[J]. 汽车与安全, 2016(7):3.
- [4] 刘国平, 林可春. 智能网联汽车技术与标准发展研究[J]. 内燃机与配件, 2024, (09):132-134.
- [5] Braskstone M, McDonald M. Car following: a historical review, transportation research part F. 2[J]. Pergamon, 2000.
- [6] Kamalanathsharma R. K., Rakha H. Leveraging Connected Vehicle Technology and Telematics to Enhance Vehicle Fuel Efficiency in the Vicinity of Signalized Intersections [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2016, 20(1): 33-44.
- [7] Bertolazzi E, Biral F, Da Lio M, et al. Supporting drivers in keeping safe speed and safe distance: the SASPENCE subproject within the European framework programme 6 integrating project PReVENT[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 525-538.
- [8] Touran A, Brackstone M A, McDonald M. A collision model for safety evaluation of autonomous intelligent cruise control[J]. Accident Analysis & Prevention, 1999, 31(5): 567-578.
- [9] 张硕, 吴雨洋, 汪洋, 等. 基于模型预测控制的无人车编队避障方法[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(01):34-41.
- [10] 程翔, 吴家仪, 张昌凡, 等. 基于级联干扰观测器的货运列车分布式控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(09):223-233.
- [11] Zhou Y, Wang M, Ahn S. Distributed model predictive control approach for cooperative car-following with guaranteed local and string stability[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 128.
- [12] Jia D, Lu K, Wang J, et al. A survey on platoon-based vehicular cyber-physical systems[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2015, 18(1): 263-284.

- [13]Moradi-Pari E, Mahjoub H N, Kazemi H, et al. Utilizing model-based communication and control for cooperative automated vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(1): 38-51.
- [14]Udwadia F E, Kalaba R E. On the foundations of analytical dynamics[J]. International Journal of non-linear mechanics, 2002, 37(6): 1079-1090. V.
- [15]张佳乐,赵睿英,冯艳丽,等.基于 Udwadia-Kalaba 理论的自行车机器人平衡控制方法[J].工程科学学报,2023,45(02):318-325.
- [16]张佳乐,赵睿英,焦生杰,等.基于 Udwadia-Kalaba 方程的交通锥机器人编队摆放控制方法[J].中国公路学报,2023,36(07):236-248.
- [17]王慧楠,韩欢.基于拟共形理论的分度阶多尺度微分同胚图像配准[J].数学物理学报,2024,44(06):1665-1688.
- [18]张俊杰,孙浩宇,王威.一个 Lebesgue 稠密定理在动力系统中的应用[J].淮北师范大学学报(自然科学版),2023,44(04):10-14.
- [19]丁自娟,韩欢.基于多尺度方法的多模态微分同胚图像配准[J].数学物理学报,2023,43(05):1620-1640.
- [20]Hui Y ,Hwa Y C ,Dejie Y .Vehicle motion control under equality and inequality constraints: a diffeomorphism approach[J].Nonlinear Dynamics,2019,95(1):175-194.
- [21]张佳龙,赵迪,张普,等.通讯受限下无人机集群自适应追踪控制[J/OL].系统工程与电子技术,1-12[2025-03-31].
- [22]黄子场.通讯受限下的无人艇编队控制研究[D].哈尔滨工程大学,2023.
- [23]张似晶.通讯受限情形下的状态、未知输入和故障估计[D].东华大学,2023.
- [24]罗家祥,关振峰,刘海明,等.通讯受限条件下的机器人编队算法[J].控制理论与应用,2021,38(07):1091-1101.
- [25]彭积广,肖涵臻.模型预测控制下多移动机器人的跟踪与避障[J].广东工业大学学报,2022,39(05):93-101.
- [26]Dey K C, Yan L, Wang X, et al. A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(2): 491-509.

-
- [27]Naus G J L, Vugts R P A, Ploeg J, et al. String-stable CACC design and experimental validation: A frequency-domain approach[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2010, 59(9): 4268-4279.
 - [28] Xu Q, Sengupta R. Simulation, analysis, and comparison of ACC and CACC in highway merging control[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2003.
 - [29]Shladover S E, Desoer C A, Hedrick J K, et al. Automated vehicle control developments in the PATH program[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 1991, 40(1): 114-130.
 - [30]Xu B, Li S E, Y Bian, et al. Distributed conflict-free cooperation for multiple connected vehicles at unsignalized intersections[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2018, 93(AUG.):322-334.
 - [31]Curts K. Temples and turnpikes in — the world of tomorrow || : Religious assemblage and automobility at the 1939 new york world's fair[J]. Journal of the American Academy of Religion, 2015, 83(3): 722-749.
 - [32]Stankovic S S, Stanojevic M J, Siljak D D. Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(5): 816-832.
 - [33]Antonelli G, Chiaverini S. Kinematic control of platoons of autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(6): 1285-1292.
 - [34]Chen N, Wang M, Alkim T, et al. A Robust Longitudinal Control Strategy of Platoons under Model Uncertainties and Time Delays[J]. Journal of advanced transportation, 2018, In press(PT.2):1-13.
 - [35]Dong F, Zhao X, Han J, et al. Optimal fuzzy adaptive control for uncertain flexible joint manipulator based on D-operation[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(9): 1286-1298.
 - [36]Lee G D, Kim S W. A longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm[J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 97-118.
 - [37]Kayacan E. Multiobjective H_{∞} Control for String Stability of Cooperative Adaptive Cruise Control Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(1): 52-61.

- [38]Pappalardo C M. A natural absolute coordinate formulation for the kinematic and dynamic analysis of rigid multibody systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 81(4): 1841-1869.
- [39]Liu X, Zhen S, Huang K, et al. A systematic approach for designing analytical dynamics and servo control of constrained mechanical systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(4): 382-393.
- [40]郭研研.智能网联汽车未来之路[J].数字经济,2023(Z2)27-31
- [41]黄学江. 基于单向通信拓扑的智能网联混合动力汽车队列分层控制研究[D]. 重庆交通大学,2023
- [42]刘珺,张欣刚,张树翠,等.Udwadia-Kalaba 方法在四足机器人单腿轨迹跟踪控制约束问题的应用[J].动力学与控制学报,2024,22(09):55-61.
- [43]Chen Y H. Constraint-following servo control design for mechanical systems[J]. Journal of Vibration and Control, 2009, 15(3): 369-389.
- [44]沈剑平,于峰.智能网联汽车行业发展趋势分析[J].上海汽车,2023(09)1-4Y.
- [45]闫茂德,张钰瑶,杨盼盼等.基于多目标优化的智能网联汽车队列换道方法[J]. 计算机仿真,2022,39(03)145-149+329
- [46]Chen Y H, Zhang X. Adaptive robust approximate constraint-following control for mechanical systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2010, 347(1): 69-86.
- S
- [47]Zou R, Sun J, Sun J, et al. Leader-Following Constrained Distributed Adaptive Dynamic Programming Design for Multiagent Systems[C]// 2019 Chinese Automation Congress (CAC). 2019. Y
- [48]Min H, Yang Y, Fang Y, et al. Constrained optimization and distributed model predictive control based merging strategies for adjacent connected autonomous vehicle platoons[J]. IEEE Access, 2019, PP(99):1-1.
- [49]杨颖,徐照明.面向智能网联汽车的车联网技术应用研究[J].专用汽车,2023(09)69-71.
- [50]Shladover S E, Desoer C A, Hedrick J K, et al. Automated vehicle control developments in the PATH program[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 1991, 40(1): 114-130.

- [51]Li S E, Yang Z, Li K, et al. Scalability limitation of homogeneous vehicular platoon under undirected information flow topology and constant spacing policy[C]// Control Conference. IEEE, 2015. J.
- [52]Li Y, Tang C, Srinivas P, et al. Nonlinear Consensus-Based Connected Vehicle Platoon Control Incorporating Car-Following Interactions and Heterogeneous Time Delays[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(6):2209-2219..
- [53]Arslan S, Saritas M. The effects of OFDM design parameters on the V2X communication performance: A survey[J]. Vehicular Communications, 2017, 7(JAN.):1-6.

攻读硕士期间取得的学术成果

[1]第一获奖人，第七届中国高校智能机器人创意大赛国家级二等奖

[2]第一获奖人，第一届安徽省高校智能机器人创意大赛省级二等奖

[3] 第一作者，Platoon Control for Intelligent Connected Vehicles under Parameter Uncertainties, International Journal of Systems Science (SCI 源刊)，已投稿

致 谢

三年的研究生生活转眼间即将落下帷幕。回首这段求学之路，仿佛昨日重现，历历在目。此刻，我的心中百感交集，不仅仅有对过去的怀念，也有对未来生活无限的向往，同时我的内心里还包含着对那些在这三年生活中帮助过我的人无尽的感谢。

“春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干。”首先，我要将最诚挚的谢意献给我的导师刘宏建教授。刘老师不仅为人风趣端庄、学识渊博，而且还在我的学业生活中给予我莫大的鼓励与帮助。从论文选题的反复推敲，到论文内容的精心设计，再到论文撰写的每一个公式每一段话，刘老师始终对我倾注着极大的热情和耐心。而每当我取得一点进步时，刘老师又会及时给予肯定，激励我继续前行。在这三年的相处过程中，刘老师的每一句教诲，每一次行动都将在我的人生中熠熠生辉使我受益终身。

“桃李不言，下自成蹊。”在此我也要同时特别感谢谭海龙、张志娜、刘钰妃等老师在我论文撰写过程中对我倾力指导，帮我不断拓宽认知视野、提高学术理解与推理能力。不仅提高了我的科研技巧，更是帮助我掌握了学习方法，实是受益匪浅，影响深远；此外，特别感谢安徽工程大学数学与金融学院的所有任课老师，正是你们的悉心帮助和认真栽培，我才能安心、稳定地走到这段学术生涯的终点。

“海内存知己，天涯若比邻。”在此我更要郑重地感谢章冉、潘德发、董鹏博以及张婧菲等实验室的师兄师姐们，是他们在我初入实验室时给予我无私的帮助和指导，让我能够快速融入师门并学习到专业的知识。我也要感谢我的同门申亚港、李中原、张心怡、徐雯瑶、王也、盛梦瑶、张吉，在研究生三年的学习生涯中，我们共同度过了难忘的三年时光。同时我也要感谢我的室友袁飞和申亚港，是他们让我在安徽工程大学找到了家的温暖与关怀。最后，感谢实验室的杨露、丁汝葭、刘威、汪伟桀等，三年时光，有你们相伴实乃我之荣幸。

“谁言寸草心，报得三春晖。”在此我也要特别感谢我的父母，你们始终如一地支持我、鼓励我，是我最坚强的后盾。你们让我能够心无旁骛地投入到学习和科研中，也让我在面对挫折时能够勇敢前行。

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。”最后，我要感谢所有参与我论文评审和答辩的专家教授，感谢你们在百忙之中抽出时间审阅我的论文，并提出宝贵的意见和建议。

在转瞬即逝的三年学习生涯中，我不仅收获了知识，提升了能力，也收获了珍贵的友谊。这段经历将成为我人生中宝贵的财富，激励我在未来的道路上不断前行。此时此刻，千言万语汇成一句：感谢研究生期间所有的老师与同学，感谢你们在我的研究生生涯中的陪伴！