

# 车辆队列协同控制综述

于树友<sup>1,2†</sup>, 冯阳阳<sup>1</sup>, 曲 婷<sup>2</sup>, 李永福<sup>3</sup>, 施树明<sup>4</sup>, 余建华<sup>5</sup>, 陈 虹<sup>1,6</sup>

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025;  
3. 重庆邮电大学 自动化学院, 重庆 400065; 4. 吉林大学 交通学院, 长春 130025;  
5. 东风商用车技术中心, 武汉 430058; 6. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092)

**摘 要:** 通信技术和自动驾驶技术的高速发展为车辆队列协同控制带来了新的机遇. 车辆队列协同控制能够有效提高车辆的行驶安全性, 增加交通容量, 减少交通拥堵, 降低燃油消耗, 具有重要的社会效益, 已成为智能交通系统重要研究方向和学术研究的热点. 鉴于此, 针对车辆队列协同控制的现有研究进展, 从车辆队列建模、通信拓扑结构、单队列与多队列协同控制、队列性能分析 4 个方面分别概述现有研究方法及其优缺点, 并对未来车辆队列协同控制的研究进行展望, 为后续更深入的研究提供参考.

**关键词:** 车辆队列建模; 通信拓扑结构; 单队列; 多队列; 协同控制; 队列性能

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1209

引用格式: 于树友, 冯阳阳, 曲婷, 等. 车辆队列协同控制综述[J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 3889-3909.

## A survey of cooperative control of vehicle platoons

YU Shu-you<sup>1,2†</sup>, FENG Yang-yang<sup>1</sup>, QU Ting<sup>2</sup>, LI Yong-fu<sup>3</sup>, SHI Shu-ming<sup>4</sup>, YU Jian-hua<sup>5</sup>, CHEN Hong<sup>1,6</sup>

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. State Key Laboratory of Automotives Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China; 3. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 4. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130025, China; 5. Dongfeng Commercial Vehicle Technology Center, Wuhan 430058, China; 6. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The rapid development of communication technology and autonomous driving technology has brought new opportunities for cooperative control of the vehicle platoon. Cooperative control of vehicle platoons can effectively enhance the driving safety of vehicles, increase traffic capacity, decrease traffic congestion, and reduce fuel consumption, which has a major social and economic value, thus it has become an important research direction and academic research hotspot of intelligent transportation systems. Aiming at the existing research results of the cooperative control of the vehicle platoon, this paper outlines the existing research methods and their advantages and disadvantages from four aspects, namely, vehicle platoon modeling, communication topology, cooperative control of single-vehicle platoons and platoon splitting/merging, platoon performance analysis. Furthermore, outlooks on the future research of the cooperative control of vehicle platoons are given, which provides guidance for the deeper research afterwards.

**Keywords:** vehicle platoons modeling; communication topology; single-vehicle platoon; platoon splitting/merging; cooperative control; platoon performance

## 0 引 言

2019年9月, 国务院发布了《交通强国建设纲要》, 其中指出智能交通战略的主要建设目标是全面建成世界领先的智能交通系统, 引领全球智能交通发展. 智能交通系统将车辆自动驾驶技术、车用无线通

信 V2X (vehicle to everything) 技术及计算机技术等综合运用到交通系统中, 基于 V2X 实现车-路/车-车通信, 使进入公路系统的车辆组成车队, 并保持期望的跟车间距和车辆速度行驶<sup>[1]</sup>. 根据美国国家公路交通安全管理局的数据显示, 大约 90% 的交通事故是由

收稿日期: 2023-08-25; 录用日期: 2024-02-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1964202); 吉林省自然科学基金项目(YDZJ202101ZYTS169); 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(2019FF01).

责任编委: 吴淮宁.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: shuyou@jlu.edu.cn.

驾驶员因素引起的<sup>[2]</sup>,车辆队列行驶可以显著减轻驾驶员的负担,预防因误操作、疲劳驾驶等因素导致的交通事故,从而极大地提高车辆行驶的安全性。根据荷兰应用科学研究院的报告数据显示,车辆队列行驶可节约10%~15%的能源消耗<sup>[3]</sup>。此外,通过车辆队列协同控制还可以有效降低人力成本,提高道路交通容量,缓解交通拥堵。鉴于其极大的节能、安全、高效的潜力,车辆队列协同控制已成为智能交通研究的热点<sup>[4-5]</sup>。

目前,车辆队列协同控制已成为汽车厂商竞争的关键技术以及国家节能战略的重要组成。车辆队列协同控制的研究最先始于美国1986年的PATH (partners for advanced transportation technology)项目<sup>[6]</sup>,该项目的目的是缓解交通拥堵,提高道路的通行能力和车辆行驶安全性,促进节能减排。PATH项目通过对重型卡车的实车试验,表明车辆队列行驶能够提高交通运输能力,并且当车间距控制在3~4m时,领航车辆能够节油10%,跟随车辆能够节油10%~15%<sup>[7]</sup>。2021年12月,美国自动驾驶卡车初创公司Locomotion发布的环境影响报告中显示,配备Locomotion公司开发的自动驾驶队列行驶技术的卡车可降低21%的燃油消耗,减少22%的温室气体排放,同时降低19%的运营成本<sup>[8]</sup>。美国Peloton Technology公司开发的车辆队列系统,与政府和大学资助的研究项目不同,是唯一一个在公共道路上测试并计划部署到车队的商业编队系统。测试发现,当车辆在103 km/h的车速下且保持11m车间距行驶时,跟随车辆能够节省燃油10%,领航车辆能够节省燃油4.5%<sup>[9]</sup>。日本车辆队列协同控制的研究始于2008年的Energy ITS (energy intelligent transportation systems)项目,该项目通过对3辆全自动驾驶载货汽车的实车试验显示,当车辆在80 km/h的车速下行驶且保持10m车间距时能够减少15%燃油消耗<sup>[10]</sup>。韩国现代汽车2019年11月在韩国京畿道骊州市智能高速公路上进行了卡车队列行驶试验,成功展示了队列加速行驶、紧急制动以及其他车辆加入/离开队列等场景<sup>[11]</sup>。欧盟于2009年主导了SARTRE (safe road trains for the environment)项目,重点研究了混合车型(轿车、SUV、商用车等)队列协同控制技术。该项目的目的在于通过车辆队列协同控制实现车辆行驶的安全、环保和节能<sup>[12]</sup>。2018年由欧盟资助、荷兰应用科学研究院领导的ENSEMBLE项目旨在实现并展示欧洲道路上的多品牌卡车编队,以提高燃油经济性,减少二氧化碳排放,并增加道路货运

行业的交通能力和吞吐量<sup>[13]</sup>。此外,欧洲也相继开展了SCANIA-platooning<sup>[14]</sup>、GCDC (grand cooperative driving challenge)<sup>[15]</sup>等项目,旨在研究如何通过对车辆队列协同控制实现整个车队的安全与节能。相比于国外,我国在21世纪才逐步开展相关研究,基本上处于早期阶段。2018年4月,一汽解放在青岛港进行了国内首个卡车智能队列行驶运营演示,现场演示了卡车编队自动驾驶、申请编队和离开编队等场景<sup>[16]</sup>。2019年5月7日,天津市西青区举行了首次大规模商用车队列跟驰标准公开验证试验,这项试验由东风商用车、福田汽车和中国重汽三家重卡企业共同参与,试验内容包括队列加速、减速和变道等多个方面的测试项目<sup>[17]</sup>。同年11月,上汽红岩在上海开展了卡车队列行驶的试验验证,不仅实现了卡车自动跟驰、紧急制动等纵向功能,还完成了车道保持、换道等转向操作<sup>[18]</sup>。同年12月,图森未来在京礼高速顺利完成国内首个高速公路环境的自动驾驶卡车队列行驶试验,试验显示当3辆卡车以最高80 km/h的速度且保持10m车间距行驶时,队列在节约燃油消耗、缓解道路拥堵方面具有巨大的优势<sup>[19]</sup>。

对于车辆队列系统的研究,大致分为下面几个方面:

1) 车辆队列建模。车辆队列建模是设计车辆队列协同控制器和进行系统分析的基本前提。

2) 通信拓扑结构。通信拓扑结构对于车辆队列中的信息传递起着决定性作用,不同的通信拓扑结构将对车辆队列的性能产生不同的影响。目前应用于车辆队列的通信技术主要有基于美国联邦通信委员会制定的DSRC (dedicated short range communications)技术和基于蜂窝网通信技术的C-V2X (cellular vehicle-to-everything)。DSRC技术通信延迟小,安全性高,但有效通信距离短,需要大量的路测设备,而C-V2X包括LTE-V2X (long-term evolution vehicle-to-everything)通信技术和5G-V2X (5th generation vehicle-to-everything)通信技术,可实现长距离和更大范围的可靠通信。目前我国的LTE-V2X技术标准已基本成熟,5G-V2X通信技术也处于国际领先地位。

3) 单队列与多队列协同控制。其主要任务是基于V2X通信技术,将道路中行驶的车辆通过交互协同的方式组成混合的柔性队列。单队列协同控制方法多采用分布式控制,对于多队列协同控制的研究主要有车辆队列汇入-汇出协同控制和多队列群体协同控制。

4) 队列性能分析. 车辆队列内稳定性和串稳定性是车辆队列协同控制系统在设计时需要考虑的性能指标, 保证车辆队列系统的内稳定性和串稳定性可以确保队列中车辆保持稳定的编队行驶, 避免由于扰动的影响而导致整个队列失稳.

## 1 车辆队列建模

车辆队列建模是设计车辆队列协同控制器以及进行系统分析的基础, 现有文献对于车辆队列建模往往抽象为质点模型, 在非线性车辆模型中只考虑其纵向非线性特性, 或纵横向独立建模, 但实际车辆运动过程中纵向与横向是相互耦合的, 单独建立纵向和横向控制模型, 将影响协同控制器的控制性能, 从而导致队列中的车辆失去操纵稳定性. 目前车辆队列模型的研究有一阶积分模型<sup>[20-21]</sup>、二阶积分模型<sup>[22-24]</sup>、三阶积分模型<sup>[25-27]</sup>、纵向非线性模型<sup>[28-29]</sup>以及纵横向独立建模<sup>[30-35]</sup>.

在一阶积分模型中, 车辆的位置为状态量, 车辆的速度为控制量, 其模型表达式<sup>[20-21]</sup>为

$$\dot{p}_i(t) = u_i(t), \quad i \in 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

其中:  $p_i(t)$  为车辆位置,  $u_i(t)$  为车辆速度,  $N$  为车辆队列中跟随车辆的个数. Lin等<sup>[20]</sup>采用一阶积分模型表达车辆系统, 并设计了最优控制器实现车辆的队列行驶, 该控制器设计过程中车辆队列中每辆车只能获取邻近车辆的信息. Wang等<sup>[21]</sup>针对一阶积分模型, 设计了基于动态增益的分布式控制律, 实现车辆的队列行驶. 一阶积分模型是最简单的车辆队列模型, 其优点是极大地简化了控制器的理论分析, 但与实际的车辆动力学偏差较大, 无法用于复杂工况的车辆队列控制<sup>[21]</sup>.

在二阶积分模型中, 车辆的位置和速度为状态量, 车辆的加速度为控制量, 二阶积分模型的表达式<sup>[22-24]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t), \end{cases} \quad i \in 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

其中:  $v_i(t)$  为车辆速度,  $u_i(t)$  为车辆加速度. Li等<sup>[22]</sup>基于车辆二阶积分模型, 提出一种分布式一致性控制算法, 用于存在异质时变时滞情况下的车辆队列. Hao等<sup>[23]</sup>采用二阶积分模型, 研究了车辆队列系统的稳定性和鲁棒性. Khatir等<sup>[24]</sup>采用二阶积分模型证明了在直线道路上运动的车辆队列系统, 存在一个不完全相同的分散式控制器, 使系统具有有界稳定性和串稳定性的性质. 二阶积分模型仍然无法描述车辆动力学的一些特性, 如车辆驱动系统的惯性延

迟, 这可能导致车辆的失稳.

在三阶积分模型中车辆的位置、速度、加速度为状态量, 其模型表达式<sup>[25-26]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t), \\ \dot{a}_i(t) = -\frac{1}{\tau_i} a_i(t) - \frac{1}{\tau_i} u_i(t), \end{cases} \quad i \in 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

其中:  $\tau_i$  为惯性延迟的时间常数;  $a_i(t)$  为车辆实际加速度;  $u_i(t)$  为控制量, 即车辆期望加速度. 该三阶积分模型忽略了车辆纵向动力学特性. Wang等<sup>[25]</sup>基于三阶积分模型设计了分布式模型预测控制器, 同时保证了队列的稳定性和最小燃油消耗. Xiao等<sup>[26]</sup>基于三阶积分模型, 分析了执行器延迟对车辆队列串稳定的影响. 注意在实际车辆队列行驶过程中, 基于线性积分模型(1)、(2)、(3)设计控制器, 计算得到的控制量不能直接作用于车辆, 需要与下层控制器结合, 实现对车辆队列协同控制. 即采用分层控制结构, 将上层控制器决策出的控制量转化为车辆行驶所需的节气门开度或制动主缸压力<sup>[27]</sup>.

车辆队列非线性模型的研究目前集中在车辆的纵向非线性特性, 主要考虑发动机、变速器、风阻等非线性环节. Zheng等<sup>[28]</sup>和 Gao等<sup>[29]</sup>提出的纵向非线性模型, 目前已广泛应用于车辆队列协同控制中, 其数学描述如下所示:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t), \\ m_i \dot{v}_i(t) = \frac{\eta_{T,i}}{r_{w,i}} T_i(t) - C_{A,i} v_i^2(t) - m_i g f_i, \\ \dot{T}_i(t) = -\frac{1}{\tau_i} T_i(t) + \frac{1}{\tau_i} T_{des,i}(t), \end{cases} \quad i \in 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

其中:  $m_i$  为车辆质量,  $C_{A,i}$  为空气阻力系数,  $g$  为重力加速度常数,  $f_i$  为滚动阻力系数,  $T_i(t)$  为车辆实际的驱动力或制动力的力矩,  $T_{des,i}(t)$  为期望的驱动力或制动力的力矩,  $r_{w,i}$  为车轮半径,  $\eta_{T,i}$  为传动系统的机械效率.

上述模型只适用于在直线道路上纵向行驶的车辆队列, 其控制目标只需保证队列中的车辆之间保持一定的安全距离, 跟随车辆与领航车的车速保持一致. 而对于在弯道上行驶的车辆队列, 除了考虑车辆纵向动力学外, 还应考虑其横向动力学的影响<sup>[30-31]</sup>. 对于车辆队列纵横向的研究, 目前主要集中在纵横向独立建模与独立设计控制器. Zhang等<sup>[32]</sup>采用非线性自行车模型描述车辆横向动力学, 并设计了预测控制器保证车辆的纵向跟踪性能和横向稳定

性能. 文献[33-35]采用车道保持模型描述车辆的横向动力学, 并且一个车道保持控制器被设计, 使得队列中的车辆在指定的车道内行驶. 纵向及横向独立建模策略均忽略了车辆纵横耦合特性, 难以准确描述车辆队列的纵横向耦合运动. 李玲等<sup>[36]</sup>和Shi等<sup>[37]</sup>指出车辆纵向和横向耦合特性会显著影响车辆队列高速行驶的操纵稳定性, 基于解耦的车辆纵横向动力学模型分别设计的纵向和横向控制器会导致队列中跟随车辆失去操纵稳定性.

在车辆队列协同控制的研究中, 车辆动力学模型选择与设计存在以下问题: 车辆系统简单抽象为质点或只考虑其纵向非线性特性. 对于在弯道上行驶的车辆队列采用解耦车辆的纵横向动力学, 而忽略了车辆动力学的纵横向耦合特性. 因此, 如何建立综合考虑车辆非线性、纵横向耦合特征的多车动力学模

型是面临的挑战性问题.

## 2 通信拓扑结构

通信拓扑决定了队列中车辆的信息交互, 不同通信拓扑结构具有不同的车辆队列性能. 随着车-车(vehicle-to-vehicle, V2V)通信技术的发展, 分布式通信拓扑结构变得更加多样化<sup>[38]</sup>. 常见的通信拓扑结构包括前车跟随(predecessor-following, PF)通信拓扑<sup>[39]</sup>、领航车-前车-跟随(leader-predecessor following, LPF)通信拓扑<sup>[40]</sup>、双向跟随(bidirectional following, BDF)通信拓扑<sup>[41]</sup>、领航车-双向跟随(leader-bidirectional following, LBDF)通信拓扑<sup>[42]</sup>、双前车-跟随(two-predecessors following, TPF)通信拓扑<sup>[43]</sup>和领航车-双前车-跟随(leader-two-predecessors following, LTPF)通信拓扑<sup>[44]</sup>等, 常见的通信拓扑结构如图1所示.

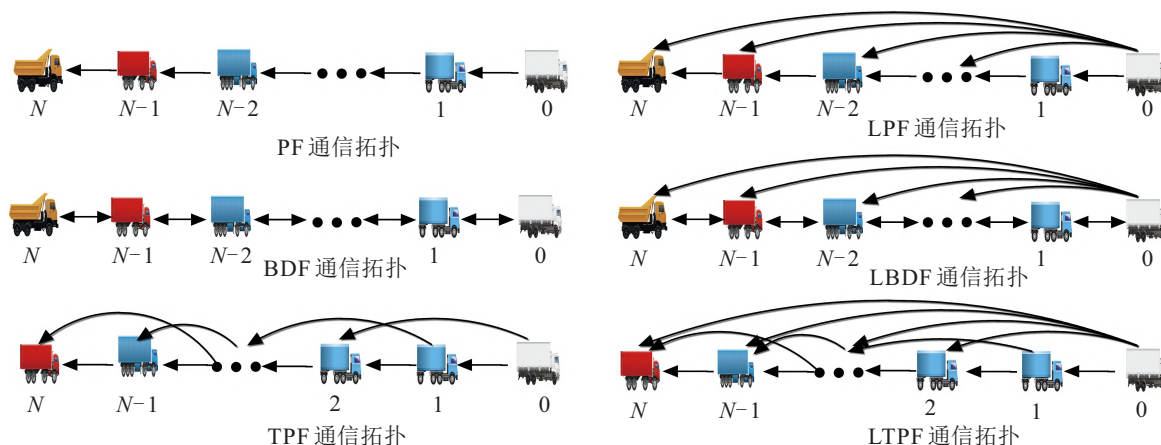


图1 通信拓扑结构

通信拓扑结构将队列中车辆相互连接起来, 不同通信拓扑结构将对队列的一致性、串稳定性、鲁棒性等产生不同的影响<sup>[45]</sup>. Ploeg等<sup>[46]</sup>针对PF通信拓扑结构提出一种车辆队列控制算法, 并分析了通信拓扑结构与系统稳定性的关系. Hao等<sup>[23]</sup>指出车辆队列在设计的线性控制器作用下, PF通信拓扑结构相比BDF通信拓扑结构具有更快的收敛速度, 而后者相比于前者具有更好的鲁棒性. Ghasemi等<sup>[41]</sup>基于BDF通信拓扑结构设计一种耦合滑模控制器, 提高了队列的控制性能和稳定性. Seiler等<sup>[47]</sup>分别基于PF、BDF、LPF通信拓扑结构, 探讨了通信拓扑结构对于车辆队列稳定性的影响. 基于BDF、PF、TPF等通信拓扑结构, Li等<sup>[48]</sup>提出一种具有有界参数不确定性的队列鲁棒分布式控制方法, 通过相似变换和Lyapunov稳定性理论推导出鲁棒稳定性的充分条件. 对比于PF跟随通信拓扑结构, BDF通信拓扑结构

对车辆队列规模具有更高的敏感度. Zheng等<sup>[49]</sup>研究了PF、LPF、BDF、LBDF、TPF、LTPF通信拓扑结构对同质车辆队列闭环稳定性的影响, 然而该研究缺乏全面和定量的比较. Ruan等<sup>[50]</sup>探讨了PF、LPF、LTPF通信拓扑结构在稳定性区域、鲁棒性、安全性和排放方面的差异, 结果显示LTPF通信拓扑结构在稳定性区域、安全性和排放方面稍有优势, LPF通信拓扑结构在鲁棒性方面更好, 而PF通信拓扑结构在各方面表现稍差. Dai等<sup>[51]</sup>研究了车辆队列分别在PF、LPF、BDF、LBDF、TPF、LTPF通信拓扑结构下的稳定性问题, 结果显示队列中的车辆获得其他车辆的信息越多, 系统的稳定区域越大, 车辆队列的稳定性和安全性越好. Yan等<sup>[52]</sup>从跟踪能力、速度平滑性、燃油经济性、通信效率等方面论证了PF、LPF、BDF、LBDF、TPF、LTPF通信拓扑结构对车辆队列性能的影响, 结果显示队列中的车辆与其他车辆的通信连接

越多,其跟踪能力、速度曲线平滑性、燃油经济性和通信效率越好. 上述通信拓扑结构主要为固定通信拓扑结构,实际中车辆间的通信拓扑结构会不断发生变化,即通信拓扑结构在一定时间间隔后切换为其他通信拓扑结构,这种通信拓扑结构的切换将会对队列性能产生影响<sup>[53]</sup>. Li等<sup>[54]</sup>综合考虑车辆跟驰行为和不同通信拓扑结构,包括固定通信拓扑结构和切换通信拓扑结构的影响,提出一种基于非线性一致性的队列控制策略,分析了车辆队列的有限时间稳定性与一致性. Li等<sup>[55]</sup>提出一种基于联合邻域集的Lyapunov分析方法,用于车辆队列在切换通信拓扑结构下的稳定性分析. 此外,队列中车辆间的通信不可避免地存在通信时延、数据丢包、网络攻击等问题,严重影响队列的性能. Liu等<sup>[56]</sup>针对车辆之间通信时延问题,提出一种基于一致性的控制算法,并推导出保证队列闭环稳定和串稳定性的充分条件. Zhang等<sup>[57]</sup>针对车辆队列通信时延问题,对能够缓解通信时延的补偿策略进行了总结和展望. Wang等<sup>[58]</sup>研究了时延、丢包等异常通信下的通信拓扑切换和控制策略,控制器根据不同的通信拓扑和间距策略进行切换,以保证队列串稳定性. Zhao等<sup>[59]</sup>研究了随机数据丢包对车辆队列性能的影响,并提出一种系统方法来分析不同丢包情况下队列的闭环稳定性和串稳定性. Zhang等<sup>[60]</sup>针对受DoS (denial-of-service) 攻击车辆队列,提出一种切换时滞系统方法,并设计分布式状态反馈控制器,保证队列的跟踪性能和安全性能. Mousavinejad等<sup>[61]</sup>针对车辆之间的通信由于受到恶意网络攻击而导致传感器测量和控制命令数据被破坏的问题,提出一种分布式攻击检测算法和分布式恢复机制,从而减轻网络攻击的影响,并保证攻击存在时队列的串稳定性. 为消除网络攻击对车辆队列稳定性和安全性的影响, Lyu等<sup>[62]</sup>设计一种通信拓扑安全响应系统,在网络攻击下灵活调整队列的通信拓扑结构,从而解决队列在遭受网络攻击时的交通事故威胁. 综上所述,良好的通信状态是队列系统正常运作的基础,通信的实时性、准确性对队列性能具有很大的影响.

现有的车辆队列通信拓扑结构的研究多集中于模拟阶段,缺乏实际道路环境下的测试和验证. 在实际道路环境下,队列中车辆之间的通信更具随机性、多样性和复杂性,因此车辆队列在实际道路环境下的测试和验证是必不可少的. 此外,综合考虑车辆队列行驶安全性、队列稳定性、燃油经济性、通信效率等因素,如何决策出最优通信拓扑结构也是一个值得研究的课题.

### 3 队列协同控制

车辆队列协同控制的主要任务是基于V2V通信,将道路上行驶的车辆组成混合的柔性队列,通过交互协作的方式实现车辆间的协同. 车辆队列协同控制可分为单队列协同控制和多队列协同控制. 对于单队列协同控制主要考虑的是两辆或两辆以上的车辆,通过V2V通信,将队列中领航车或前车的速度、加速度、位置等信息实时传递给跟随车辆,并利用自适应巡航、车道保持等自动控制技术使队列中车辆以相同的速度和近距离间距的编队形式在道路上行驶. 对于多队列协同控制,目前主要考虑的是非队列中的车辆汇入车队或队列中的车辆汇出车队等现实场景以及多队列群体协同控制.

实际道路环境下,车辆不仅要经过直线道路还要经过弯曲道路,因此队列协同控制的控制目标包括纵向跟踪性能和横向路径跟随性能. 队列协同控制的纵向控制目标是车辆队列中的跟随车辆与领航车辆速度保持一致,并且车与车之间保持一个安全的跟车间距,控制目标的数学描述<sup>[63]</sup>为

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} [v_i(t) - v_0(t)] = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} [p_{i-1}(t) - p_i(t) - d_{i-1,i}(t)] = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $v_0(t)$  为领航车的速度;  $d_{i-1,i}(t)$  为相邻车之间期望的跟车间距.

根据相邻车辆间跟车间距的不同,车辆队列协同控制的跟车安全间距可以划分为3种,即恒定距离型<sup>[64-65]</sup>、恒定时距型<sup>[46,66]</sup>和非线性距离型<sup>[67-68]</sup>.

对于恒定距离型车辆队列,  $d_{i-1,i}(t)$  设置为给定的常数,数学描述为

$$d_{i-1,i}(t) = d_0, \quad i \in 1, 2, \dots, N,$$

其中  $d_0 > 0$ .

对于恒定时距型车辆队列,  $d_{i-1,i}(t)$  一般设置为关于自车车速的一个线性函数,即

$$d_{i-1,i}(t) = t_h v_i(t) + d_0, \quad i \in 1, 2, \dots, N.$$

其中:  $t_h$  为跟车时距,  $v_i(t)$  为自车车速.

对于非线性距离型车辆队列,  $d_{i-1,i}(t)$  为自车车速的一个非线性函数,即

$$d_{i-1,i}(t) = g(v_i(t)), \quad i \in 1, 2, \dots, N,$$

其中  $g(v_i(t))$  为一个非线性函数.

不同的跟车安全间距策略将直接影响队列稳定性以及交通利用率,对于恒定距离型跟车间距策略,能够保证车辆以相对较小的车间距行驶,同时能够显著地增加道路交通容量. 但在车速较高、通信时



延等情况下容易导致队列不稳定,甚至发生碰撞风险<sup>[69-70]</sup>.对于恒定时距型跟车间距策略,其队列稳定性更好.但车速较高时车间距较大,不利于提高队列行驶的节油率,同时导致队列更松散,从而降低道路的交通容量<sup>[71-72]</sup>.Zheng等<sup>[73]</sup>分别对恒定距离型跟车间距策略和恒定时距型跟车间距策略进行了研究.对于非线性距离型跟车间距策略,可以从增加交通容量、保证队列稳定性等角度选择非线性函数,但实际过程对于非线性函数参数区间的选择比较困难<sup>[74-75]</sup>.Chen等<sup>[76]</sup>分别对恒定距离型跟车间距策略和非线性距离型跟车间距策略进行了研究.

队列协同控制的横向控制目标是队列中的车辆尽可能地跟随参考路径行驶,如图2所示.车辆相对于参考路径的横向位置偏差 $e_i^y(t)$ 和航向角偏差 $e_i^\varphi(t)$ 能够渐近地收敛到零,不进入相邻车道或超出道路边界,数学描述为

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} e_i^y(t) = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} e_i^\varphi(t) = 0, \end{cases} \quad i \in 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

其中: $e_i^y(t)$ 和 $e_i^\varphi(t)$ 分别是跟随车辆相对于前车或参考路径的横向位置偏差和航向角偏差.根据参考路径的不同,车辆队列横向路径跟随可分为车道线跟随<sup>[33-35]</sup>、直接前车跟随<sup>[77-79]</sup>和前车路径跟随<sup>[80-81]</sup>.车道线跟随方法<sup>[33-35]</sup>是通过前瞻摄像头检测和绘制车道标线,作为横向的参考路径.由于队列中的车辆跟踪固定的参考路径,车辆的横向动力学之间不相互关联,因此车辆横向位置偏差 $e_i^y(t)$ 向车队下游传递的过程中不会被逐渐累计.该方法的主要问题为在几乎看不见车道标线和恶劣的天气条件下,可能导致较差的测量,同时在车间距较小时,由于前瞻摄像头检测被前方车辆阻挡,只能检测到关于即将到来的道路的有限信息,从而使得控制器难以准确跟踪参考路径.对此直接前车跟随方法被提出,其通过队列中的车辆直接跟随前车进行行驶,而不是固定的参考路径.由于跟随车直接跟随前车,车辆的横向动力学之间相互关联,车辆横向位置偏差 $e_i^y(t)$ 向车队下游传递的过程中会被逐渐累计而放大.此外,该方法的主要问题为在弯曲道路环境下,跟随车辆行驶的路径可能不等于前方车辆行驶的路径,这可能会导致切角现象<sup>[82]</sup>.直接前车跟随的切角现象如图3所示.为了消除此现象,基于前车路径跟随方法被提出,其通过构建前方车辆行驶路径作为跟随车辆的横向参考路径,避免出现切角现象,但增加了系统的复杂性,同时也不能避免车辆横向位置偏差 $e_i^y(t)$ 向车队下游传递的过程中被逐渐累计而放大.

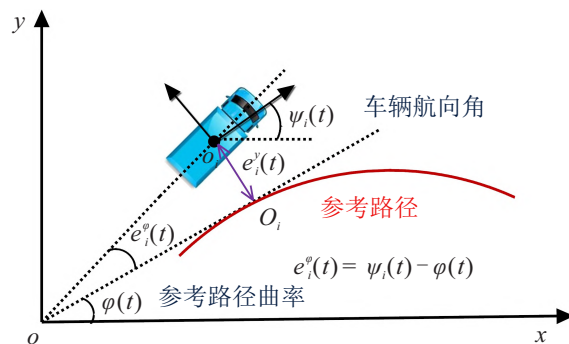


图2 跟随参考路径

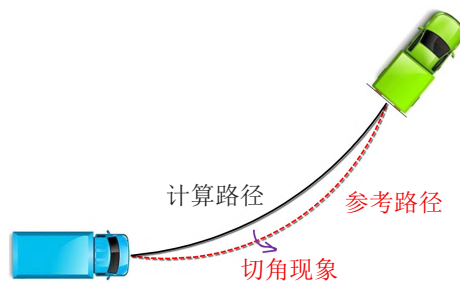


图3 切角现象

1) 非队列中的车辆汇入车队: 非队列中的车辆加入到队列中的某一位置, 形成一个新的队列, 新队列在协同控制器作用下保持稳定状态, 如图4所示.

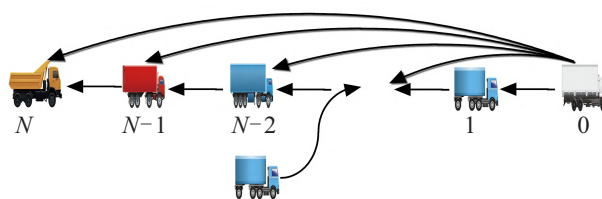


图4 汇入车辆队列

2) 队列中的车辆汇出车队: 基于已形成的车辆队列, 队列中的某一成员车进行车道变换离开车队, 离开后的车辆队列在协同控制器作用下继续保持稳定状态, 如图5所示.

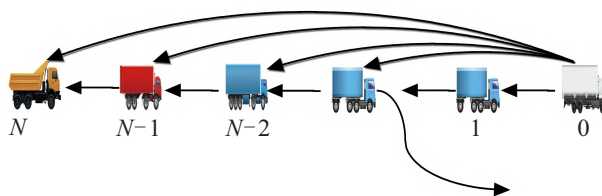


图5 汇出车辆队列

多队列群体协同控制主要包括两个场景: 多队列并行协同驾驶模式和多队列串行协同驾驶模式. 针对多队列并行协同驾驶模式, 在初始状态下, 多车道上存在多个稳定的车辆队列, 其中每个车辆队列的速度和相对位置不一致. 多队列通过V2X进行信息交互, 并通过车辆队列协同控制器, 保持多个车辆队列的速度和相对位置一致, 此时车辆队列在多车

道上进行并行行驶,场景如图6所示。多队列串行协同驾驶模式是指在多队列并行行驶的过程中,会出现在道路前方只保留一个车道供车辆通行,其余车道关闭,阻止车辆通行的场景。为了应对车道的变化,多队列将在车辆队列协同控制器的作用下,合并成一个车辆队列,合并后的车辆队列能够以稳定的速度通过仅有一个车道的路段,在此过程中,车辆队列协同控制器会保证车辆队列维持稳定的速度和车间距,从而实现车辆队列串行行驶场景,如图7所示。Li等<sup>[83]</sup>提出基于群一致性的多队列协同控制策略,保证队列中车辆状态的局部一致性,即确保队列中的车辆保持相同的期望车间距和车速。同时保证多车道上队列间车辆状态的群一致性,即确保每个车道上的车辆队列都具有相同的期望车间距和车速,从而实现了多队列串行和并行两种协同驾驶模式,同时分析了这两种场景下的道路通行能力。

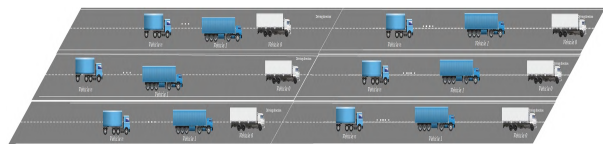


图6 多队列并行协同驾驶



图7 多队列串行协同驾驶

### 3.1 车辆队列速度规划

车辆队列在道路上行驶时,整个车队的油耗受实际路况的影响很大,因此,基于ADAS (advanced driver assistance systems) 地图,通过V2X通信技术获取前方道路的坡度、曲率、限速等道路信息,合理规划车辆队列行驶的最优速度,可显著降低车辆队列的燃油消耗<sup>[84]</sup>。

基于道路地形预览信息的车辆队列自适应巡航控制,也称为预见性协同自适应巡航控制<sup>[85]</sup>,可通过优化车辆的速度轨迹进一步提高车辆队列的燃油效率<sup>[86]</sup>。王琼等<sup>[87]</sup>充分考虑了道路坡度以及车辆质量对车辆队列整体油耗的影响,基于构造的油耗模型提出一种滚动时域动态规划算法,以获得车辆队列行驶的最优节油参考速度。Guo等<sup>[88]</sup>研究了通过车速规划来探索高速公路环境下车辆队列的节能问题,提出一种分层控制结构。第1层为速度规划层,基于车辆队列平均模型和油耗-行驶时间成本函数,提出一种滚动动态规划算法,计算车辆队列的最优节油参考速

度;第2层为跟踪车辆速度的控制层,基于反步法设计车辆队列控制算法,保证跟随车辆跟踪最优节油参考速度和车辆队列串稳定性。Guo等<sup>[89]</sup>基于模型预测控制,提出了一种既考虑降低燃油消耗又考虑提高运输效率的车辆队列最优速度优化算法,通过设计分布式自适应三步法控制器,确保整个车辆队列能够以最优速度行驶以及在动态扰动下的串稳定性。Turri等<sup>[90]</sup>提出双层控制结构,上层为车辆队列协同控制器,以队列总耗能为优化目标,利用道路地形和速度限制的预览信息计算安全的速度轨迹,同时该速度轨迹被传送到下层车辆控制层;车辆控制层采用分布式预测控制方法对队列中的车辆进行控制,实现车辆对于速度轨迹跟随误差的最小化,同时保证跟随车辆之间具有一个期望的安全间距。Alam等<sup>[91]</sup>对于货运卡车提出了3层控制结构:第1层为运输层,用于规划卡车队列的运输路线;第2层为速度规划层,利用前方道路预览信息计算最优速度轨迹;第3层为车辆层,用于对车辆进行实时控制,以跟踪最优的速度曲线,同时保证安全。Zhai等<sup>[92]</sup>针对在变坡度道路上行驶的车辆队列,基于分布式模型预测控制提出了一种使燃油效率最大化的预见性协同自适应巡航控制,与Turri等<sup>[90]</sup>提出的控制策略不同,队列中的所有车辆可以同步以分布式方式优化其速度轨迹。

车辆队列在道路上行驶,可以通过缩小车间距的方式降低跟随车辆的空气阻力,从而提高燃油经济性。但过小的车间距会导致队列安全性问题,因此在进行车辆队列的速度规划时,需要考虑后车的跟踪能力,考虑队列中后方车辆允许的纵向速度和加减速度边界,在综合利用道路交通信息的基础上,同时保证车辆队列行驶安全性和最小化车辆队列的燃油消耗。

### 3.2 单队列协同控制

车辆队列协同控制主要考虑安全性、速度跟踪、燃油经济性、舒适性、稳定性等。根据拓扑结构关系,车辆队列控制主要分为集中式控制和分布式控制。集中式控制通过中央控制器,收集和处理所有车辆的数据信息,并生成控制指令协调每一辆车的运动,其优点是实现了全局优化和协调,缺点是处理的信息量大,计算负担重,队列灵活性不够,控制器失效或者发生故障将使整个系统无法正常工作。分布式控制策略没有统一的控制单元,队列中每辆车分别设计自身的控制器(根据相邻车辆信息进行运动控制)。由于分布式控制结构简单,每辆车设计自身的控制器,计算量小,可靠性强。目前分布式控制策略被广泛应用于车辆队列控制,结构框图如图8所示。

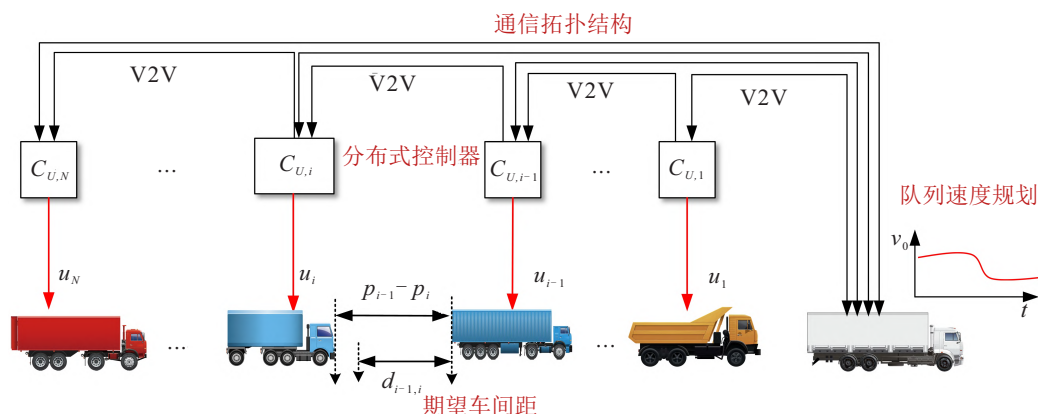


图8 车辆队列分布式控制结构

常见的车辆队列分布式控制策略有分布式一致性控制、分布式滑模控制、分布式 $H_\infty$ 鲁棒控制、分布式模型预测控制等。

分布式一致性控制是最常见的车辆队列控制方法。Sheikholeslam等<sup>[93]</sup>研究了理想情况下(不考虑通信延迟、通信数据丢包、车辆动力学、外部扰动)的车辆队列分布式一致性控制算法。Ploeg等<sup>[94]</sup>基于分布式一致性控制算法,研究了车辆队列的串稳定性,在 $L_p$ 串稳定性定义的基础上给出了更为严格的 $L_2$ 和 $L_\infty$ 串稳定性定义,并通过6辆乘用车进行了实验验证。Bernardo等<sup>[95]</sup>针对V2V通信存在时变延迟的情况,提出一种新的分布式一致性控制器,保证了车辆队列的串稳定性。Peters等<sup>[96]</sup>研究了在分布式一致性控制器作用下,跟随车在接收领航车信息存在一定时间延迟的情况下,车辆队列的串稳定性问题。Oncu等<sup>[97]</sup>基于分布式一致性控制器,详细分析了采样、零阶保持、恒定网络延迟对车辆队列串稳定性的影响。Zheng等<sup>[49,98]</sup>基于分布式一致性控制器,研究了不同通信拓扑结构对车辆队列闭环稳定性的影响,利用代数图论和Routh-Hurwitz稳定性准则证明了一个统一的内稳定性定理。虽然一致性控制器设计简单,易于实现和理论分析,但不能处理约束和扰动<sup>[99]</sup>。

滑模控制(sliding mode control, SMC)能够有效处理非线性系统不确定性和扰动,因此近年来不少学者将分布式滑模控制策略引入到车辆队列协同控制中。对于非线性车辆队列, Wu等<sup>[100]</sup>提出了一种分布式SMC算法,该算法通过引入一种新的拓扑结构函数设计滑模面和趋近律,使得分布式SMC策略能够有效处理信息拓扑多样性。Gao等<sup>[29]</sup>提出了一种分布式自适应滑模控制方案,采用基于分布式滑模面的自适应律消除参数不确定性,基于LMI(linear matrix inequality)结构分解方法解决车辆间信息交互引起的耦合问题。Guo等<sup>[101]</sup>提出了一种新的分布式自适

应积分滑模控制器,能够保证车辆队列在外部干扰下的有限时间稳定性和串稳定性,该方案不需要知道外界干扰的最大值和最小值,具有很好的实际应用价值。Guo等<sup>[102]</sup>基于分布式自适应积分滑模控制器,解决具有非线性加速度不确定性(包括车辆加速度扰动、侧向风和参数不确定性)的车辆队列有界稳定性和串稳定性问题。Li等<sup>[103]</sup>提出一种分布式集成滑模控制策略,结合了相邻车辆之间的间距误差和速度误差,以及车辆之间的跟驰相互作用。此外,基于Lyapunov分析了控制器的收敛性,基于传递函数法分析了队列串稳定性。对于分布式SMC,虽然能够实现较好的控制效果,但是车辆队列的内稳定性和串稳定性依赖于控制器参数调验进行实现<sup>[104]</sup>。

现实驾驶环境中存在各种不确定性和干扰,使得车辆队列协同控制的实现成为一个具有挑战性的问题,而 $H_\infty$ 鲁棒控制能够很好地抑制不确定性和干扰。Li等<sup>[105]</sup>针对车辆动力学模型的不确定性,提出一种解耦分布式 $H_\infty$ 控制方法,以平衡车辆队列的鲁棒稳定性、干扰抑制和串稳定性。Gao等<sup>[106]</sup>针对具有通信延迟和参数不确定性的异质车辆队列,提出了分布式 $H_\infty$ 控制策略,保证车辆队列的鲁棒稳定性、串稳定性和跟踪能力。Wang等<sup>[107]</sup>提出了分布式自适应 $H_\infty$ 控制方案以抑制不确定车辆动力学、外部干扰和异质时变通信延迟对车辆队列的影响,同时保证了车辆队列的鲁棒稳定性和串稳定性。Zheng等<sup>[108]</sup>研究了具有无向拓扑连接的车辆队列系统鲁棒性和分布式 $H_\infty$ 控制器综合问题。Gao等<sup>[109]</sup>针对车辆动力学和通信拓扑结构存在不确定性的情况,提出分布式 $H_\infty$ 控制器,保证了车辆队列的鲁棒稳定性和跟踪性能。Chen等<sup>[110]</sup>在考虑车辆动力学和外部干扰的情况下,建立了V2X条件下同质车辆在交通信号灯附近的协同驾驶模型,基于该模型设计了分布式 $H_\infty$ 鲁棒控制器,不仅保证了车辆可以根据交通信号



信息跟踪速度变化,而且能够提高速度跟踪性能,降低油耗。Elahi等<sup>[111]</sup>针对存在通信数据丢包、通信时间延迟的车辆队列,提出分布式 $H_\infty$ 控制器,保证了车辆队列在存在扰动和模型不确定性下的 $L_2$ 串稳定性。张晓东等<sup>[112]</sup>通过引入空间变量和空间移动算子,建立了车辆队列的多维空间关联系统模型,并采用分布式 $H_2/H_\infty$ 控制策略平衡车辆队列行驶过程中的动态性能和燃油消耗。对于分布式 $H_\infty$ 鲁棒控制器,虽然能够在保证车辆队列跟踪性能的情况下实现其鲁棒稳定性,但是控制器的设计往往只考虑线性系统。

分布式模型预测控制具有显式处理约束和多目标优化问题的能力,可以通过预测系统未来的动态来优化整个系统的性能<sup>[113]</sup>。在车辆队列协同控制中,分布式模型预测控制已被广泛应用。该方法通过V2V通信,将预测模型和优化算法分布在多个车辆之间,从而实现整个车辆队列的协同控制<sup>[114]</sup>。Zheng等<sup>[28]</sup>和Tapli等<sup>[115]</sup>针对具有定向通信拓扑的异质车辆队列,提出一种分布式模型预测控制算法,通过添加终端等式约束确保车辆队列的渐近稳定性,其中终端等式约束被设计为每个车辆的终端状态等于其相邻车辆的平均状态。Dunbar等<sup>[116]</sup>和Feng等<sup>[117]</sup>针对纵向行驶的车辆队列,提出一种保证渐近稳定性和串稳定性的分布式模型预测控制算法,其中终端等式约束被设计为每个车辆的终端状态等于其期望状态。对比终端等式约束,终端不等式约束更容易数值求解,因此不少研究采用终端不等式约束来分析基于分布式模型预测控制器车辆队列的渐近稳定性<sup>[118-123]</sup>。Yan等<sup>[118]</sup>针对纵向行驶的车辆队列,提出一种双模分布式预测控制策略。在双模控制策略中,分别设计分布式模型预测控制器和局部状态反馈控制器,以保证渐近稳定性,同时减少计算负担和节省通信资源。He等<sup>[119]</sup>和陈龙等<sup>[120]</sup>提出一种新的具有保证燃油经济性的分布式预测控制策略,通过添加终端不等式约束保证编队过程的渐近稳定性,同时使得约束非线性车辆队列系统的燃油经济性最大(即燃油消耗最小)。Li等<sup>[121-122]</sup>针对具有输入和状态约束的非线性车辆队列,设计一种新的分布式滚动时域算法,通过添加终端不等式约束保证车辆队列的渐近稳定性。Lu等<sup>[123]</sup>提出一种基于终端不等式约束的分布式经济模型预测控制器,保证车辆队列的渐近稳定性。此外,为消除参数不确定性和外部扰动对队列性能的影响,提出了鲁棒分布式模型预测控制器<sup>[124]</sup>。Lan等<sup>[125]</sup>提出一种具有V2V通信延迟的分布式最小-最大鲁棒模型

预测控制算法,保证车辆队列在未建模不确定性和领航车速度扰动下的渐近稳定性。Feng等<sup>[126]</sup>针对混合车辆队列,提出一种基于tube的鲁棒分布式模型预测控制算法,保证混合车辆队列在外部扰动下的渐近稳定性。Mao等<sup>[127]</sup>和Feng等<sup>[128]</sup>针对存在扰动和饱和约束的车辆队列,提出一种基于tube的鲁棒分布式模型预测控制器,保证队列的闭环稳定性和串稳定性。Feng等<sup>[129]</sup>将前车加速度视为扰动,设计基于tube的鲁棒分布式模型预测控制器,解决前车加速度信息未知的车辆队列控制问题。对比于分布式最小-最大鲁棒模型预测控制器<sup>[125]</sup>,基于tube的鲁棒分布式模型预测控制器显著提高了计算速度。车辆队列分布式模型预测控制器要求在采样间隔内完成对周围车辆和地理信息、车辆状态的处理,求解局部优化问题,并将控制指令作用于系统,但由于其滚动优化的机制,使得优化问题的求解需占用大量计算资源。

行驶在复杂道路上的车辆队列不仅需要纵向上保持速度一致以及与安全距离,还需要保证队列可以沿指定车道通过弯曲道路,因此需要协同控制纵横向运动。队列横向协同控制是指在获取车辆及道路相关信息的基础上,通过设计协同控制器实现对队列中车辆的转向控制,保证车辆安全地完成转弯或者换道。Xu等<sup>[31]</sup>采用3个线性解耦的纵向、横向和横摆系统来表示车辆队列模型,设计 $H_\infty$ 鲁棒控制器减少通信延迟和干扰的影响并保证车辆队列的串稳定性和道路跟踪性能。Zhang等<sup>[32]</sup>建立解耦的纵向和横向车辆队列模型,设计预测控制器来保证车辆队列在弯道路面上的纵向跟随性能和操纵稳定性。Rajamani等<sup>[33]</sup>提出一种用于实车实验的车辆队列纵向和横向集成控制系统,其中纵向和横向控制系统都是独立开发的。Lan等<sup>[34]</sup>采用考虑纵向速度的横向模型,设计了一种线性变车道保持控制器保证车辆横向稳定性,并设计 $H_\infty$ 鲁棒控制器保证车辆队列纵向跟踪性能。Kianfar等<sup>[35]</sup>基于横向模型考虑纵向速度的影响,提出了一种纵向与横向相结合的车辆队列分布式预测控制方法,但纵向和横向控制器仍然独立设计。Wei等<sup>[130]</sup>提出了一种集成纵向和横向车辆队列跟踪控制框架,实现了车辆的纵向跟踪和横向前车轨迹的跟踪。Caiazzo等<sup>[131]</sup>采用纵横向解耦模型设计车辆队列控制器,提出了一种分布式扩散纵向协议和基于势函数的分布式横向控制策略,该策略能够处理通信延迟并实现队列间的合并/分离。Guo等<sup>[132]</sup>基于轮胎非线性的动力学模型提出了一种分层递阶的控制策略,其中纵横向独立设计控制器,实

现车辆的跟踪性能. 上述车辆队列纵横向协同控制器通常采用解耦控制策略, 忽视了车辆纵横向运动的耦合特性. 李玲等<sup>[36]</sup>和 Shi 等<sup>[37]</sup>指出车辆队列采用解耦控制策略会显著影响车辆队列的跟踪性能, 在高速时甚至导致队列中跟随车辆失去操纵稳定性. 针对车辆纵横向耦合运动控制, Dang 等<sup>[133]</sup>设计了一种考虑车辆纵横向耦合特性的非线性模型预测控制算法. Zhao 等<sup>[134]</sup>提出一种基于非线性模型预测控制的电动汽车纵向、横向和垂向的一体化控制策略, 该策略同时考虑了车辆的操控性、稳定性和舒适性要求. Ge 等<sup>[135]</sup>提出一种用于自动驾驶车辆纵向和横向耦合运动控制的无偏移模型预测控制算法. 基于考虑纵向、横向和横摆运动的车辆运动学模型, Chu 等<sup>[136]</sup>提出一种模型预测控制方法以有效跟踪参考轨迹. 基于考虑纵向和横向耦合的车辆动力学模型, Chowdhri 等<sup>[137]</sup>提出一种非线性模型预测控制方法用于执行规避机动和避免追尾碰撞. Da 等<sup>[138]</sup>提出一种考虑纵横向耦合的滑模控制器, 用于操纵车辆避免发生碰撞. 上述对车辆纵横向耦合运动控制的研究主要集中于单车控制, 而整个车辆队列的纵横向耦合协同控制仍然是一个极具挑战性的问题.

车辆队列协同控制器设计通常采用解耦控制策略, 即采用纵横向解耦建模反映车辆队列运动行为, 设计独立控制器控制车辆队列纵横向运动. 但是解耦建模失去了车辆运动的耦合特性, 解耦策略难以避免车辆队列行驶过程中受到外部扰动而导致车辆失去操纵稳定性. 为保证车辆队列在复杂工况下的操纵稳定性, 不仅需要建立反映队列纵向与横向运动的耦合模型, 还需要采用纵横向耦合控制策略来保证车辆队列高速行驶时的操纵稳定性. 此外, 分布式预测控制算法凭借显式处理约束、鲁棒性强、能够有效处理系统非线性和不确定性的优点, 被广泛应用于车辆队列协同控制. 但如果考虑具有纵横耦合非线性特性的复杂车辆动力学模型, 则使得分布式预测控制的优化问题求解占用大量的计算资源, 因此亟需研究考虑纵横耦合非线性特性的车辆队列分布式预测控制的高效求解算法, 从而保证队列协同控制的实时性.

### 3.3 多队列协同控制

在车辆网环境下, 智能车采用 V2X 通信获取周围车辆及路况等信息, 同时车辆之间共享信息并采用协同控制策略, 以实现多队列之间的协同运动. 多队列行驶是车联网环境下车辆队列协同控制的重要研究内容.

#### 3.3.1 车辆队列汇入-汇出协同控制

车辆队列的汇入-汇出驾驶策略主要依据多车协同控制理论, 将若干单个车辆或者队列, 组成混合的柔性队列或者是拆分成若干个车或车队. 对于只考虑车辆队列的汇入操作, Khaisongkram 等<sup>[139]</sup>基于 BDL 通信拓扑结构, 提出了一种多队列协同驾驶策略, 并证明了系统的稳定性, 通过双车道中车辆的汇入操作验证了策略的有效性. Goli 等<sup>[140]</sup>研究单个或若干车辆汇入车队的问题, 提出两种不同的汇入车辆的横向轨迹规划方法, 保证了汇入车辆能够以不同的速度执行横向操作, 同时避免了过大的横向加速度. 张荣辉等<sup>[141]</sup>基于 V2X 环境, 建立一种自动驾驶车辆换道汇入的驾驶模型, 并设计了车辆换道汇入的轨迹规划和跟踪控制器, 保证车辆汇入队列过程中的安全性. Uno 等<sup>[142]</sup>研究协同自适应巡航策略对车辆队列融合的影响, 提出在车辆队列前方设置一个虚拟车, 方便地为待汇入车辆提供合适的间距. Pueboobpaphan 等<sup>[143]</sup>提出一种适用于混合交通情况的分散式车辆汇入算法, 通过最小化冲突和限制速度变化保证交通流的稳定性. Hu 等<sup>[144]</sup>针对车辆队列的汇入操作, 构建了一个车辆汇入模型, 该模型由两部分组成: 纵向轨迹模型和汇入持续时间预测模型, 适用于人工驾驶和自动驾驶的车辆队列. Liu 等<sup>[145]</sup>提出了一种考虑无人驾驶车辆之间最小安全间距的车辆队列汇入方法, 基于 LQR (linear quadratic regulator) 控制器, 为汇入车辆留出合适的间距, 并提出一种分布式模型预测控制器, 生成从当前车道汇入到目标车辆队列的平滑轨迹. Goli 等<sup>[146]</sup>针对多车融合问题, 设计了两个解耦控制器, 其纵向采用 PD (proportional derivative) 控制, 横向采用具有预见性的模型预测控制, 该策略既能执行单个车辆的汇入操作, 又能执行多车辆的汇入操作.

对于同时考虑车辆队列的汇入-汇出操作, Xavier 等<sup>[147]</sup>基于车辆的自行车模型, 提出了一种分散式 PID (proportional-integral-derivative) 控制器, 用于车辆队列的纵向和横向控制, 从而实现车辆队列行驶过程中汇入-汇出场景. Farag 等<sup>[148]</sup>基于单个车辆的动力学模型, 分别建立了队列纵向模型和横向模型. 基于纵向模型采用 Lyapunov 方法控制车辆的速度, PID 控制器控制车辆之间的间距; 基于横向模型, 采用自适应模型预测控制, 在不同的纵向速度下实现车辆汇入-汇出机动时的安全变道. Basiri 等<sup>[149]</sup>提出了一种分布式非线性模型预测控制器, 用于具有单向拓扑结构的异质车辆队列执行汇入-汇出操作, 并通

过跟踪期望速度和保持车辆之间的安全期望间距来避免碰撞. Liu等<sup>[150]</sup>采用一种非迭代分布式模型预测控制策略,通过一系列线性矩阵不等式保证整个闭环系统的稳定性,解决了单个车辆可以动态汇入和汇出的柔性队列问题. Huang等<sup>[151]</sup>提出了一种基于人工势场与模型预测控制相结合的控制策略,人工势场模型用来描述车辆与环境的交互,模型预测控制实现对车辆汇入-汇出操作的路径规划.

队列中车辆进行汇入-汇出协同控制时,必须注重考虑车辆纵横耦合的动力学特性,同时设计合适的切换控制策略使得车辆的“汇入-汇出”过程得以安全、高效和平稳地实现.

### 3.3.2 多队列群体协同控制

无论是多智能体还是多队列协同控制,目前的研究热点大都集中于考虑群一致性的控制策略. 群一致性定义为<sup>[152]</sup>:多智能体系统的每个子系统相互通信并共享信息,基于共享的信息设计协同控制器,实现所有子系统的状态趋于一致. 在车辆队列群一致性方面,主要考虑车辆队列之间的协同控制,即由于匝道等道路结构造成的车辆队列汇流成单个车辆队列,或由单个车辆队列分流成多队列等.

在进行多队列协同控制时需要考虑车辆自身状态信息、周围邻近车辆状态信息以及道路交通信息等. Jia等<sup>[153]</sup>基于V2X通信技术建立了一个协同微观跟车交通模型,并提出一种基于一致性的改进控制算法,该算法同时考虑局部交通状态信息和下游交通状态信息,保证了局部交通流的稳定性. Park等<sup>[154]</sup>基于IntelliDrive系统提供的车-车通信和车-路通信功能,开发了一种具有可变车间距的IntelliDrive换道咨询算法,该算法建议高速公路选定的车辆尽早变道,以在匝道合并区内创造更多空间,从而减少高速公路合并冲突. 评估结果表明,通过对高速公路选定车辆提供变道建议,高速公路运营可以得到显著改善. 吴黎兵等<sup>[155]</sup>基于V2X环境下车-车共享的路径信息,提出一种车辆协同路径规划方法. 该方法通过收集并分析道路中行驶车辆的轨迹信息,给车辆提供更适用于当前交通状况的路径行驶方案,降低了车辆自身的选路行为对道路交通的负面影响. 通信网络拓扑结构对于多车协同控制策略具有重要影响,在实际应用中,需要根据实际情况选择合适的拓扑结构和协同控制策略. 刘丹<sup>[156]</sup>研究了通信拓扑结构的连通性对多智能体群集运动控制的影响,针对多智能体系统存在的模型局限性以及通信拓扑连通性限制,提出了考虑智能体实际半径和基于通信拓扑优化的多

智能体群集分布式控制算法,实现了多智能体系统的群集、目标追踪及避障行为. Fernandes等<sup>[157]</sup>基于交通流仿真软件SUMO(simulation for urban mobility),建立了具备V2V通信的车辆队列模型,同时设计了队列车辆协同驾驶微观模拟场景,仿真结果证实了模型的正确性和鲁棒性,以及通信延迟对队列稳定性的影响. 李科志<sup>[158]</sup>提出了一种基于群体一致性思想的分层协同控制策略,用于解决多队列的协同控制问题,基于Routh稳定理论和Lyapunov方法分析多队列的局部一致性和群一致性,实现了多队列的串行和并行协同控制. Yashiro等<sup>[159]</sup>提出了PFA(platoon-formation algorithm)理论,主要包括两部分:组建车队和重组车队. 在PFA理论中,当车辆队列进行组建和融合时,假设每一辆车都有相同的目的地. 结果表明使用PFA理论可以提高道路容量和驾驶舒适度,但其设定的工况较为简单,只是针对同向行驶车辆的队列控制,而且将车辆简化为质点,没有考虑车身形状及空气动力学.

目前多队列协同控制多采用线性一致性控制器,实现队列中车辆位置差和速度的一致性,而线性一致控制器不能有效考虑队列中车辆异质特性、车辆间的相互作用和耦合关系,以及通信延时对多队列协同控制的影响,因此有必要针对多队列的群一致性问题,综合不同车辆队列中车辆的异质特性、动力学特性、车辆之间的通信拓扑和通信延时以及车辆跟驰行为,设计多队列协同控制策略,并分析多队列群系统的一致性和稳定性.

## 4 队列性能分析

在车辆队列协同控制器的设计中,对于车辆队列性能分析,主要考虑的是车辆队列系统的内稳定性和车辆队列的串稳定性. 车辆队列系统的内稳定是指在车辆队列行驶过程中车辆之间的跟驰误差随时间衰减到零. 车辆队列的串稳定性包括纵向串稳定性和横向串稳定性,前者指领航车或者队列中其他车辆速度的变化不会导致跟随车辆车间距误差的变化,可以避免队列中的前后车辆发生碰撞;后者指领航车或者队列中其他车辆航向角的变化不会导致后续车辆之间横向位置误差的变化,可以确保队列中的车辆在指定的车道内行驶,不偏离道路或进入相邻车道.

### 4.1 队列内稳定性

车辆队列系统的内稳定性是队列最基本的性能指标,在控制系统的设计中,保证队列系统的内稳定性可以使得车辆队列系统保持期望的队形行驶,避免发生危险. 对于采用一致性控制方法的车辆队

列, Zheng等<sup>[98]</sup>研究了信息流拓扑结构对同质车辆队列系统内稳定性的影响, 在一致性控制器作用下, 利用代数图论和Routh-Hurwitz稳定性准则提出内稳定性定理. Chehardoli等<sup>[160]</sup>基于Lyapunov-Razumikhin定理和Lyapunov-Krasovskii定理, 对时变通信拓扑车辆队列系统的内稳定性进行了分析. Chehardoli等<sup>[161]</sup>分别在PF、LBDF和TPF三种不同的通信拓扑结构下, 设计基于恒定时距型策略的自适应一致性控制方法, 保证具有时变通信拓扑结构的车辆队列系统内稳定性. Chehardoli等<sup>[162]</sup>介绍了两种新的集中式和分散式一致性控制方法, 并分别对非均匀通信拓扑下的车辆队列系统进行了内稳定性分析. 对于采用滑模控制方法的车辆队列, 通常采用Lyapunov函数法来分析车辆队列的内稳定性, 基于Lyapunov稳定性判据推导出保证队列具有内稳定性的充分条件<sup>[103,163]</sup>. 对于采用 $H_\infty$ 鲁棒控制方法的车辆队列, Wang等<sup>[107]</sup>利用Lyapunov稳定性理论给出保证车辆队列内稳定性的充分条件. Zhou等<sup>[164]</sup>基于Hurwitz准则给出保证车辆队列内稳定性的充分条件. Halder等<sup>[165]</sup>基于Lyapunov-Krasovskii的LMI方法获得满足有界 $H_\infty$ 范数的状态反馈控制增益, 从而确保车辆队列的内稳定性. 对于采用模型预测控制方法的车辆队列, 通常采用在局部优化问题中设计终端等式约束<sup>[28,115-117]</sup>或终端不等式约束<sup>[118-123]</sup>的方式来保证车辆队列的内稳定性.

内稳定性是车辆队列协同控制系统在设计时首要考虑的性能指标, 除内稳定性外, 对于车辆队列系统往往还需考虑其在参数、模型不确定以及扰动下的鲁棒性问题. 秦晓辉<sup>[166]</sup>基于建立的非线性车辆队列模型, 在考虑模型参数摄动、外界干扰、通信时延和通信连接不稳定的情况下设计控制器来提高车辆队列系统的鲁棒稳定性.

## 4.2 队列串稳定性

在队列控制系统的设计中, 保证队列串稳定性可以使车辆队列保持期望的编队行驶, 避免由于扰动的影响导致整个队列失稳. Feng等<sup>[167]</sup>对车辆队列串稳定性研究进行总结, 对不同类型的串稳定性定义和分析方法进行比较, 讨论了不同分析方法和定义的优缺点.

目前纵向串稳定性研究主要集中在恒定间距误差和恒定时距误差. 针对前者, Swaroop等<sup>[168]</sup>研究了在恒定间距的策略下, 参数不确定性(车辆质量、空气阻力、轮胎阻力等因素)对车辆队列串稳定性的影响. Guo等<sup>[169]</sup>针对车辆执行器延时(如驱动和制

动延迟)以及传感器数据采集受限的问题, 提出一种保证串稳定性的车辆队列控制算法. Ge等<sup>[170]</sup>针对异质车辆队列之间通信时延问题, 提出一种基于加速度信号的协同自适应巡航控制算法, 保证车辆队列的串稳定性. 针对后者, Naus等<sup>[171]</sup>基于车辆队列中车-车通信受距离限制的问题, 设计一种分布式控制器以保证车辆队列的串稳定性, 并给出保证车辆队列串稳定的充分条件. Rogge等<sup>[172]</sup>提出一种保证队列串稳定性的控制策略, 其中队列中的车辆耦合在一个单向环中. 为了研究时延对车辆队列串稳定性的影响, Besselink等<sup>[173]</sup>提出一种基于时延的车辆间距控制策略, 以保证所有车辆可以跟踪上领航车, 且车辆队列的串稳定性不受车辆速度干扰的影响. Sakhdari等<sup>[174]</sup>提出一种基于预测参考调速器的车辆队列协同自适应巡航控制器, 其中预测参考调速器处理队列的串稳定约束. 上述队列纵向串稳定性的研究主要采用Peppard<sup>[175]</sup>提出的在频域保证车辆队列具有PF串稳定性的分析方法, 即通过定义第*i*辆车的车间距误差传递函数 $E_i(s)$ 与第*i*-1车的车间距误差传递函数 $E_{i-1}(s)$ 之间满足 $\|\tilde{G}_{i,i-1}(s)\|_\infty = \left\| \frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)} \right\| \leq 1$ 的条件, 从而确保车辆队列具有PF串稳定性. 对于时域而言, 需要将频域分析转化为时域分析, 对此Dunbar等<sup>[116]</sup>提出一种在时域保证车辆队列具有PF串稳定性的分析方法, 即通过定义第*i*辆车的车间距误差 $e_i(t)$ 与第*i*-1车的车间距误差 $e_{i-1}(t)$ 之间满足 $\max_{t \geq 0} |e_i(t)| \leq \alpha_i \max_{t \geq 0} |e_{i-1}(t)|$ ,  $\alpha_i \in (0, 1)$ 的条件, 从而确保车辆队列具有PF串稳定性. Feng等<sup>[117]</sup>通过对PF串稳定性<sup>[116]</sup>的扩展, 提出一种分布式模型预测控制算法, 同时保证车辆队列具有LF和PF串稳定性. Li等<sup>[121-122]</sup>提出一种保证车辆队列具有 $\gamma$ 增益串稳定性(对PF串稳定性<sup>[116]</sup>的扩展)的分布式模型预测控制算法. Luo等<sup>[176]</sup>提出一种经济分布式模型预测控制算法, 同时保证车辆队列具有PF和 $\gamma$ 增益串稳定性. 为了防止扰动造成的影响在向队列下游传递过程中被逐渐放大, 扰动队列串稳定性(disturbance string stability, DSS)被提出<sup>[177]</sup>. Mao等<sup>[127]</sup>和Feng等<sup>[128]</sup>提出的基于tube分布式鲁棒模型预测控制算法保证了异质车辆队列在外部扰动和饱和约束的情况下是DSS. 此外, 输入-状态串稳定性被用来抑制扰动造成的影响在向队列下游传递过程中被逐渐放大<sup>[125,129]</sup>的现象.

对于车辆队列横向协同控制的研究可总结为车道线跟随<sup>[33-35]</sup>、直接前车跟随<sup>[77-79]</sup>和前车路径跟随<sup>[80-81]</sup>. 车道线跟随方法采用的是跟随固定参考, 不



需要考虑横向串稳定性问题.直接前车跟随方法和前车路径跟随方法存在车辆横向动力学的相互关联,导致车辆相对于参考路径的横向位置偏差 $e_i^y(t)$ 向队列下游传递的过程中被逐渐放大,从而导致车辆进入相邻车道或超出道路边界.目前横向串稳定性的研究主要集中在解耦车辆的纵横向动力学,即不考虑纵向因素对横向的影响.Kianfar等<sup>[178]</sup>假设纵向速度不变,基于车辆横向轨迹跟踪模型,提出了一种用于车辆队列主动转向控制的分布式预测控制算法,通过设计时域串稳定性约束来保证车辆队列的横向串稳定性.Solyom等<sup>[78]</sup>提出一种基于直接前车跟随的PD(proportional-derivative)控制器,以保证车辆队列的横向串联稳定性.Hassanain等<sup>[179-180]</sup>采用单轨自行车模型描述车辆的横向动力学,提出了一种 $H_\infty$ 控制策略实现车辆队列的主动转向并保证横向串稳定性.Mcaree等<sup>[181]</sup>基于估计的横向位置,提出一种横向控制策略,该策略可以在不超过最大传感器延迟的情况下保证车辆队列的横向串稳定性.Idelchi等<sup>[182]</sup>基于传感器测量前方车辆的横向位置信息,以及通过车-车通信传输的前方车辆的状态信息,提出了一种分布式横向控制器设计方法,以确保车辆队列的横向串稳定性.Geus<sup>[183]</sup>提出了一种利用车辆横向位置偏差和车辆航向角偏差反馈的经典级联控制策略,探讨了从横向角度保证串稳定性的算法.Geiger等<sup>[184]</sup>开发出一种保证同质车辆队列横向串稳定的分布式预测控制器,分别在噪声和侧向风干扰的环境下验证了队列横向串稳定性.

复杂的路面信息会影响队列的串稳定性.当前在车辆队列控制的研究中,通常将路面附着系数和曲率设定为常值.在队列行驶过程中,道路附着系数和道路曲率变化会影响队列中车辆的运动,进而影响队列中车辆的间距误差和队列的串稳定性.为了保证队列纵向行驶安全性和横向安全性(不超出道路边界线),队列控制策略需要考虑道路信息.Hou等<sup>[185]</sup>为了提高车辆在不同附着系数路面上的转向稳定性,提出了一种适应路面附着系数变化的分级转向控制策略.Liu等<sup>[186]</sup>针对高、中、低附着系数路面分别建立了3种误差模型,并提出了一种多模型切换控制框架,可以根据当前路面附着力条件选择合适的模型,提高了车辆在复杂路面上轨迹跟踪的稳定性.预测前方道路信息并估计路面附着系数的研究将有助于提高车辆在复杂工况下的行驶安全性.余卓平等<sup>[187]</sup>基于不同路面材质的激光雷达反射强度差异,设计了一种路面附着系数概率估计算法.考虑到参考路面

数据难以获取,且设备成本过高,目前更多地采用基于“滑移率-路面附着系数曲线”的路面附着系数估计方法.Guan等<sup>[188]</sup>提出了一种基于路面类型分类的最大路面附着系数和最佳滑移率的鲁棒识别方法,保证车辆对道路变化具有良好的适应性.汪龔等<sup>[189]</sup>依据交通环境信息,设计了一种考虑路面附着条件的协调避撞控制器,实现了紧急工况下车辆的自适应主动避撞.

目前车辆队列串稳定性研究主要集中于对车辆的纵横向进行解耦分析,没能充分考虑车辆纵横向耦合运动和复杂的路面信息.在这种情况下,车辆受到外部扰动影响时无法保证车辆队列的内稳定性,也无法保证车辆队列的串稳定性.

## 5 结 论

车辆队列协同控制技术能够提高车辆队列的稳定性和行驶安全性,减少燃油消耗,是智能交通系统的发展目标.本文针对车辆队列协同控制现有的研究进展,分别从车辆队列建模、通信拓扑结构、队列协同控制、队列性能分析4个方面分别阐述现有的研究方法及其挑战.基于车辆队列协同控制当前的研究现状,未来的研究工作可以从以下几个方面展开:

1)在车辆队列协同控制的研究中,车辆纵横耦合非线性特性对车辆队列协同控制器设计和队列稳定性具有重要的影响,因此如何建立综合考虑车辆非线性、纵横向耦合特征的车辆队列模型是面临的挑战性问题.

2)在真实道路环境下,队列中车辆之间的通信更具随机性、多样性和复杂性,因此对车辆队列在真实道路环境下的测试和验证是亟待解决的挑战性问题.此外,研究综合考虑车辆队列行驶安全性、队列稳定性、燃油经济性、通信效率等因素下的通信拓扑结构最优问题也是面临的挑战.

3)对于单队列协同控制而言,在考虑复杂道路环境、车辆纵横耦合特性、复杂通信环境的情况下,通过车辆队列纵横耦合协同控制,实现车辆队列行驶的安全性、舒适性、燃油经济性正面临挑战.对于车辆队列分布式预测策略而言,由于其滚动优化的机制以及车辆强非线性特性使得优化问题的求解需占用大量计算资源,因此研究队列分布式预测控制的高效求解算法,实现队列实时控制是需要进一步解决的挑战性问题.考虑到非队列中的车辆“汇入”车队或队列中的车辆“汇出”车队等现实场景,如何设计合适的切换控制策略使得车辆的“汇入-汇出”过程得以安全、高效和平稳地实现面临挑战.同时,考虑到真实场景

中前方道路出现变宽或变窄情况,如何决策出多队列中的领航车辆,研究基于群一致性的多队列协同控制方法以实现多队列协同行驶也是面临的挑战。

4) 目前车辆队列串稳定性的研究往往未能充分考虑实际情况,如纵横向耦合运动、异质非线性车辆、道路信息等。在这种情况下,车辆队列在行驶过程中受到外部扰动影响时,会导致队列失去串稳定性,因此车辆队列在复杂多变的外部环境下的串稳定性研究需要进一步完善。

#### 参考文献(References)

- [1] Yu S Y, Hirche M, Huang Y J, et al. Model predictive control for autonomous ground vehicles: A review[J]. *Autonomous Intelligent Systems*, 2021, 1(1): 32-48.
- [2] Braun R, Randell R. Futuramas of the present: The “driver problem” in the autonomous vehicle sociotechnical imaginary[J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2020, 7(1): 1-10.
- [3] Janssen R, Zwijnenberg H, Blankers I, et al. Truck platooning[Z]. 2015.
- [4] Matin A, Dia H. Impacts of connected and automated vehicles on road safety and efficiency: A systematic literature review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(3): 2705-2736.
- [5] Zhu T, Liu Z Y. Intelligent transport systems in China: Past, present and future[C]. *The 7th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Nanchang, 2015: 581-584.
- [6] 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.
- [7] Browand F, McArthur J, Radovich C. Fuel saving achieved in the field test of two tandem trucks[DB/OL]. (2004-06-01). <https://escholarship.org/uc/item/29v570mm>.
- [8] Ashley C P. Locomotion's autonomous truck platform promises serious cost, emissions savings[EB/OL]. (2021-09-03) [2021-09-03]. <https://www.freightwaves.com/news/locomotions-autonomous-truck-platform-promises-serious-emissions-savings>.
- [9] Lammert M P, Duran A, Diez J, et al. Effect of platooning on fuel consumption of class 8 vehicles over a range of speeds, following distances, and mass[J]. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2014, 7(2): 626-639.
- [10] Tsugawa S, Kato S, Aoki K. An automated truck platoon for energy saving[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, 2011: 4109-4114.
- [11] Jihan R. Hyundai conducted the company's first platooning of trailer trucks[EB/OL]. (2019-12-11) [2019-12-11]. <https://www.hyundai.news/uk/articles/press-releases/hyundai-conducted-the-companys-first-platooning-of-trailer-trucks.html>.
- [12] Eric C. Sarter automated platooning vehicles[J]. *Towards Innovative Freight and Logistics*, 2014, 2: 137-150.
- [13] Konstantinopoulou L, Coda A, Schmidt F. Specifications for multi-brand truck platooning[C]. *The 8th International Conference on Weigh-In-Motion*. Paris, 2019: 8.
- [14] Bergenhem C, Shladover S, Coelingh E, et al. Overview of platooning systems[C]. *Proceedings of the 19th Intelligent Transport Systems World Congress*. Vienna, 2012: 1-8.
- [15] Ploeg J, Shladover S, Nijmeijer H, et al. Introduction to the special issue on the 2011 grand cooperative driving challenge[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 989-993.
- [16] 于晶, 张卫. 解放实力证明: 自动驾驶商业化将率先在商用车领域实现[J]. *商用汽车*, 2018(4): 19-21. (Yu J, Zhang W. The commercialization of autonomous driving will take the lead in commercial vehicles[J]. *Commercial Vehicle*, 2018(4): 19-21.)
- [17] 解瀚光. 汽标委完成全国首次大规模商用车队列队跟驰公开验证试验[J]. *中国汽车*, 2019, 29(6): 2. (Xie H G. NTCAS completed China's first large-scale public testing of commercial vehicles platooning[J]. *China Auto*, 2019, 29(6): 2.)
- [18] 钟睿, 肖献法. 搭载北斗卫星导航系统: 上汽红岩智能重卡商业化进程加速[J]. *商用汽车*, 2019, 1: 54-55. (Zhong R, Xiao X F. Equipped with the BeiDou navigation satellite system: SAIC Hongyan intelligent heavy truck accelerates the commercialization process[J]. *Commercial Vehicle*, 2021, 1: 54-55.)
- [19] 吴楠. 无人驾驶卡车赋能智慧物流[J]. *互联网经济*, 2019(12): 72-75. (Wu N. Driverless trucks empower smart logistics[J]. *The Internet Economy*, 2019(12): 72-75.)
- [20] Lin F, Fardad M, Jovanovic M R. Optimal control of vehicular formations with nearest neighbor interactions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(9): 2203-2218.
- [21] Wang J G, Luo X Y, Wong W C, et al. Specified-time vehicular platoon control with flexible safe distance constraint[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 10489-10503.
- [22] Li Y F, Tang C C, Peeta S, 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.
- [23] Hao H, Barooah P. Stability and robustness of large platoons of vehicles with double-integrator models and nearest neighbor interaction[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2013, 23(18): 2097-2122.
- [24] Khatir M E, Davidson E J. Bounded stability and eventual

- string stability of a large platoon of vehicles using non-identical controllers[C]. 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Nassau, 2004: 1111-1116.
- [25] Wang Q, Guo G, Cai B B. Distributed receding horizon control for fuel-efficient and safe vehicle platooning[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(12): 1953-1962.
- [26] Xiao L Y, Gao F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1184-1194.
- [27] Li S E, Gao F, Cao D P, et al. Multiple-model switching control of vehicle longitudinal dynamics for platoon-level automation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4480-4492.
- [28] Zheng Y, Li S E, Li K Q, 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.
- [29] Gao F, Hu X S, Li S E, et al. Distributed adaptive sliding mode control of vehicular platoon with uncertain interaction topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6352-6361.
- [30] Chang C, Yuan Z. Combined longitudinal and lateral control of vehicle platoons[C]. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control. Dalian, 2017: 848-852.
- [31] Xu L W, Zhuang W C, Yin G D, et al. Simultaneous longitudinal and lateral control of vehicle platoon subject to stochastic communication delays[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2019, 141(4): 044503.
- [32] Zhang D Z, Li K Q, Wang J Q. A curving ACC system with coordination control of longitudinal car-following and lateral stability[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(7): 1085-1102.
- [33] 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]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 695-708.
- [34] Lan J L, Zhao D Z, Tian D X. Robust cooperative adaptive cruise control of vehicles on banked and curved roads with sensor bias[C]. 2020 American Control Conference. Denver, 2020: 2276-2281.
- [35] Kianfar R, Ali M, Falcone P, et al. Combined longitudinal and lateral control design for string stable vehicle platooning within a designated lane[C]. The 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Qingdao, 2014: 1003-1008.
- [36] 李玲, 姚喜贵, 施树明. 轮胎非线性对自主车队稳定性的影响分析[J]. 汽车工程, 2019, 41(9): 1065-1072.  
(Li L, Yao X G, Shi S M. An analysis on the effects of tire nonlinearity on autonomous platoon stability[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(9): 1065-1072.)
- [37] Shi S M, Li L, Mu Y, et al. Stable headway prediction of vehicle platoon based on the 5-degree-of-freedom vehicle model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers — Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(6): 1570-1585.
- [38] Kenney J B. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1162-1182.
- [39] Santhanakrishnan K, Rajamani R. On spacing policies for highway vehicle automation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(4): 198-204.
- [40] Luo Q Y, Nguyen A T, Fleming J, et al. Unknown input observer based approach for distributed tube-based model predictive control of heterogeneous vehicle platoons[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 2930-2944.
- [41] Ghasemi A, Kazemi R, Azadi S. Stability analysis of bidirectional adaptive cruise control with asymmetric information flow[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers — Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(2): 216-226.
- [42] Kwon J W, Chwa D. Adaptive bidirectional platoon control using a coupled sliding mode control method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2040-2048.
- [43] Gong S Y, Zhou A Y, Peeta S. Cooperative adaptive cruise control for a platoon of connected and autonomous vehicles considering dynamic information flow topology[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(10): 185-198.
- [44] Tapli T, Kiran U. A modified distributed model predictive control approach for handling vehicular platoon communication problems[C]. IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rhodes, 2020: 1-6.
- [45] Li S E, Zheng Y, Li K Q, et al. An overview of vehicular platoon control under the four-component framework[C]. 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Seoul, 2015: 286-291.
- [46] Ploeg J, Shukla D P, van de Wouw N, et al. Controller synthesis for string stability of vehicle platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 854-865.
- [47] Seiler P, Pant A, Hedrick K. Disturbance propagation in vehicle strings[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(10): 1835-1841.
- [48] Li S E, Qin X H, Li K Q, et al. Robustness analysis and controller synthesis of homogeneous vehicular platoons with bounded parameter uncertainty[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 1014-1025.
- [49] Zheng Y, Li S E, Wang J Q, et al. Influence of information flow topology on closed-loop stability of vehicle platoon with rigid formation[C]. The 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.

- Qingdao, 2014: 2094-2100.
- [50] Ruan T C, Wang H, Zhou L J, et al. Impacts of information flow topology on traffic dynamics of CAV-MV heterogeneous flow[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 20820-20835.
- [51] Dai Y L, Yang Y W, Zhong H M, et al. Stability and safety of cooperative adaptive cruise control vehicular platoon under diverse information flow topologies[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, DOI: 10.1155/2022/4534692.
- [52] Yan Y, Du H P, He D F, et al. Pareto optimal information flow topology for control of connected autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(1): 330-343.
- [53] 闫茂德, 君萌萌, 左磊. 马尔科夫链通信拓扑下的车辆队列最优能耗控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 161-170.  
(Yan M D, Jun M M, Zuo L. Energy consumption optimization control of vehicle platoon with Markovian switching topologies[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 161-170.)
- [54] Li Y F, Tang C C, Li K Z, et al. Nonlinear finite-time consensus-based connected vehicle platoon control under fixed and switching communication topologies[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2018, 93: 525-543.
- [55] Li K Q, Bian Y G, Li S E, et al. Distributed model predictive control of multi-vehicle systems with switching communication topologies[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 118: 102717.
- [56] Liu Y G, Gao H L, Zhai C J, et al. Internal stability and string stability of connected vehicle systems with time delays[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(10): 6162-6174.
- [57] Zhang Y Q, Xu Z H, Wang Z J, et al. Impacts of communication delay on vehicle platoon string stability and its compensation strategy: A review[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 10(4): 508-529.
- [58] Wang P W, Deng H, Zhang J, et al. Model predictive control for connected vehicle platoon under switching communication topology[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 7817-7830.
- [59] Zhao C C, Cai L, Cheng P. Stability analysis of vehicle platooning with limited communication range and random packet losses[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(1): 262-277.
- [60] Zhang D, Shen Y P, Zhou S Q, et al. Distributed secure platoon control of connected vehicles subject to DoS attack: Theory and application[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(11): 7269-7278.
- [61] Mousavinejad E, Yang F W, Han Q L, et al. Distributed cyber attacks detection and recovery mechanism for vehicle platooning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(9): 3821-3834.
- [62] Lyu H, Wang T, Cheng R J, et al. Improved longitudinal control strategy for connected and automated truck platoon against cyberattacks[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2022, 16(12): 1710-1725.
- [63] Liu A Q, Li T, Gu Y, et al. Cooperative extended state observer based control of vehicle platoons with arbitrarily small time headway[J]. *Automatica*, 2021, 129: 109678.
- [64] Swaroop D, Hedrick J K. Constant spacing strategies for platooning in automated highway systems[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1999, 121(3): 462-470.
- [65] Shaw E, Hedrick J K. String stability analysis for heterogeneous vehicle strings[C]. 2007 American Control Conference. New York, 2007: 3118-3125.
- [66] Kianfar R, Falcone P, Fredriksson J. A receding horizon approach to string stable cooperative adaptive cruise control[C]. 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington, 2011: 734-739.
- [67] Zhou J, Peng H. Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, 6(2): 229-237.
- [68] 闫茂德, 宋家成, 杨盼盼, 等. 基于信息一致性的自主车辆变车距队列控制[J]. *控制与决策*, 2017, 32(12): 2296-2300.  
(Yan M D, Song J C, Yang P P, et al. Consensus based platoon for autonomous vehicles with time varying intervehicle distance[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(12): 2296-2300.)
- [69] Massow K, Radusch I, Shorten R. A numerical study on constant spacing policies for starting platoons at oversaturated intersections[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 43766-43786.
- [70] Yue W, Wang L Y, Guo G. Event-triggered platoon control of vehicles with time-varying delay and probabilistic faults[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 87: 96-117.
- [71] Klinge S, Middleton R H. Time headway requirements for string stability of homogeneous linear unidirectionally connected systems[C]. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference. Shanghai, 2009: 1992-1997.
- [72] Zhang Y, Bai Y, Hu J, et al. Control design, stability analysis, and traffic flow implications for cooperative adaptive cruise control systems with compensation of communication delay[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674(8): 638-652.
- [73] Zheng Y, Xu M, Wu S N, et al. Development of



- connected and automated vehicle platoons with combined spacing policy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(1): 596-614.
- [74] Bayar B, Sajadi-Alamdari S A, Viti F, et al. Impact of different spacing policies for adaptive cruise control on traffic and energy consumption of electric vehicles[C]. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens, Piscataway: IEEE, 2016: 1349-1354.
- [75] Chen J Z, Liang H, Li J, et al. Connected automated vehicle platoon control with input saturation and variable time headway strategy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(8): 4929-4940.
- [76] Chen J Z, Zhou Y, Liang H. Effects of ACC and CACC vehicles on traffic flow based on an improved variable time headway spacing strategy[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(9): 1365-1373.
- [77] Castro R, Schaub A, Satzger C. A vehicle following controller for highly actuated vehicles[C]. Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Munich, 2016: 105-110.
- [78] Solyom S, Idelchi A, Bin Salamah B. Lateral control of vehicle platoons[C]. 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Manchester, 2013: 4561-4565.
- [79] Lu G, Tomizuka M. A practical solution to the string stability problem in autonomous vehicle following[C]. Proceedings of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004: 780-785.
- [80] Gehrig S K, Stein F J. A trajectory-based approach for the lateral control of vehicle following system[C]. IEEE International Conference on Intelligent Vehicles. San Diego, 1998: 156-161.
- [81] Awawdeh A M H, Espinosa F, Mazo M. Non-linear trajectory generation and lateral control new algorithms to minimize platoon's oscillations[C]. Proceedings of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004: 3345-3350.
- [82] Bayuwindra A, Aakre Ø L, Ploeg J, et al. Combined lateral and longitudinal CACC for a unicycle-type platoon[C]. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: ACM, 2016: 527-532.
- [83] Li Y F, Tang C C, Li K Z, et al. Consensus-based cooperative control for multi-platoon under the connected vehicles environment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(6): 2220-2229.
- [84] 卢自宝, 田凯健, 方明星, 等. 基于运输成本的高速公路车辆协同调度与速度规划[J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1637-1645.  
(Lu Z B, Tian K J, Fang M X, et al. Cooperative scheduling and speed planning of vehicles on highways based on transportation cost[J]. Control and Decision, 2023, 38(6): 1637-1645.)
- [85] Zhang L L, Chen F, Ma X X, et al. Fuel economy in truck platooning: A literature overview and directions for future research[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020: 2604012.
- [86] Hellstrom E. Look-ahead control of heavy vehicles[D]. Linköping: Linköping University, 2010.
- [87] 王琼, 郭戈. 车队速度滚动时域动态规划及非线性控制[J]. 自动化学报, 2019, 45(5): 888-896.  
(Wang Q, Guo G. Platoon speed receding horizon dynamic programming and nonlinear control[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(5): 888-896.)
- [88] Guo G, Wang Q. Fuel-efficient en route speed planning and tracking control of truck platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(8): 3091-3103.
- [89] Guo H Y, Liu J, Dai Q K, et al. A distributed adaptive triple-step nonlinear control for a connected automated vehicle platoon with dynamic uncertainty[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 3861-3871.
- [90] Turri V, Besselink B, Johansson K H. Cooperative look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 12-28.
- [91] Alam A, Besselink B, Turri V, et al. Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2015, 35(6): 34-56.
- [92] Zhai C J, Luo F, Liu Y G. Cooperative look-ahead control of vehicle platoon for maximizing fuel efficiency under system constraints[J]. IEEE Access, 2018, 6: 37700-37714.
- [93] Sheikholslam S, Desoer C A. Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: A system level study[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(4): 546-554.
- [94] Ploeg J, van de Wouw N, Nijmeijer H.  $L_p$  string stability of cascaded systems: Application to vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 786-793.
- [95] Bernardo M, Salvi A, Santini S. 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.
- [96] Peters A A, Middleton R H, Mason O. Leader tracking in homogeneous vehicle platoons with broadcast delays[J]. Automatica: Journal of IFAC, 2014, 50(1): 64-74.
- [97] Oncu S, Ploeg J, van de Wouw N, et al. Cooperative adaptive cruise control: Network-aware analysis of string stability[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1527-1537.
- [98] Zheng Y, Eben Li S, Wang J Q, et al. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study

- on the influence of information flow topologies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(1): 14-26.
- [99] Li S E, Zheng Y, Li K Q, et al. Platoon control of connected vehicles from a networked control perspective: Literature review, component modeling, and controller synthesis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, DOI: 10.1109/TVT.2017.2723881.
- [100] Wu Y J, Li S E, Cortes J, et al. Distributed sliding mode control for nonlinear heterogeneous platoon systems with positive definite topologies[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(4): 1272-1283.
- [101] Guo X G, Wang J L, Liao F, et al. Distributed adaptive integrated-sliding-mode controller synthesis for string stability of vehicle platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(9): 2419-2429.
- [102] Guo X G, Wang J L, Liao F, et al. Distributed adaptive sliding mode control strategy for vehicle-following systems with nonlinear acceleration uncertainties[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 981-991.
- [103] Li Y F, Tang C C, Peeta S, et al. Integral-sliding-mode braking control for a connected vehicle platoon: Theory and application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4618-4628.
- [104] 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]. 北京: 清华大学, 2015.  
(Zheng Y. Dynamic modeling and distributed control of vehicular platoon under the four-component framework[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.)
- [105] Li S E, Gao F, Li K Q, et al. Robust longitudinal control of multi-vehicle systems—A distributed H-infinity method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(9): 2779-2788.
- [106] Gao F, Li S E, Zheng Y, et al. Robust control of heterogeneous vehicular platoon with uncertain dynamics and communication delay[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10(7): 503-513.
- [107] Wang J Y, Zheng H Q, Guo J H, et al. Distributed adaptive robust  $H_1$  control of intelligent-connected electric vehicles platooning subject to communication delay[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2021, 15(5): 699-711.
- [108] Zheng Y, Li S E, Li K Q, et al. Platooning of connected vehicles with undirected topologies: Robustness analysis and distributed H-infinity controller synthesis[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(5): 1353-1364.
- [109] Gao F, Lin F X, Liu B. Distributed  $H_1$  control of platoon interacted by switching and undirected topology[J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(1): 259-268.
- [110] Chen D, Zhao M, Sun D H, et al. Robust  $H_1$  control of cooperative driving system with external disturbances and communication delays in the vicinity of traffic signals[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 542: 123385.
- [111] Elahi A, Alfi A, Modares H.  $H_1$  consensus of homogeneous vehicular platooning systems with packet dropout and communication delay[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(6): 3680-3691.
- [112] 张晓东, 姚小兰, 李晖, 等. 车辆编队系统的多目标分布式控制[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 294-298.  
(Zhang X D, Yao X L, Li H, et al. Multi-object distributed control of vehicle platoon system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(3): 294-298.)
- [113] Negenborn R R, Maestre J M. Distributed model predictive control: An overview and roadmap of future research opportunities[J]. IEEE Control Systems, 2014, 34(4): 87-97.
- [114] Giselsson P, Rantzer A. On feasibility, stability and performance in distributed model predictive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(4): 1031-1036.
- [115] Tapli T, Akar M. Cooperative adaptive cruise control algorithms for vehicular platoons based on distributed model predictive control[C]. IEEE 16th International Workshop on Advanced Motion Control. Kristiansand, 2020: 305-310.
- [116] 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.
- [117] Feng Y, Yu S, Chen H, Li Y, Shi S, Chen H. Distributed MPC of vehicle platoons with guaranteed consensus and string stability[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 10396.
- [118] Yan M D, Ma W R, Zuo L, et al. Dual-mode distributed model predictive control for platooning of connected vehicles with nonlinear dynamics[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(12): 3091-3101.
- [119] He D F, Qiu T X, Luo R S. Fuel efficiency-oriented platooning control of connected nonlinear vehicles: A distributed economic MPC approach[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(4): 1628-1638.
- [120] 陈龙, 何德峰, 李壮. 约束非线性车辆队列分布式多目标模型预测控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3122-3128.  
(Chen L, He D F, Li Z. Distributed multi-objective model predictive control for constrained nonlinear vehicle platoons[J]. Control and Decision, 2022, 37(12): 3122-3128.)
- [121] Li H P, Shi Y, Yan W S. Distributed receding horizon control of constrained nonlinear vehicle formations with guaranteed  $\gamma$ -gain stability[J]. Automatica, 2016, 68: 148-154.
- [122] Li H P, Yan W S, Shi Y. Distributed receding

- horizon control of nonlinear vehicle formations with constraints[C]. Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan, 2016: 1715-1720.
- [123] Lu L Y, Song X L, He D F, et al. Stability and fuel economy of nonlinear vehicle platoons: A distributed economic MPC approach[C]. The 37th Chinese Control Conference. Wuhan, 2018: 7678-7683.
- [124] 穆建彬, 冯阳辉, 何德峰. 有界扰动下异质车辆队列分布式鲁棒经济预测控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1386-1394.
- (Mu J B, Feng Y H, He D F. Distributed robust economic predictive control of heterogeneous vehicle platoons under bounded disturbances[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1386-1394.)
- [125] Lan J L, Zhao D Z. Min-max model predictive vehicle platooning with communication delay[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 12570-12584.
- [126] Feng S, Song Z Y, Li Z J, et al. Robust platoon control in mixed traffic flow based on tube model predictive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 6(4): 711-722.
- [127] Mao X Y, Li P S, Weng Z X, et al. Distributed tube model predictive control for string stability of heterogeneous vehicle platoons[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2023, 237(10): 1777-1788.
- [128] Feng S, Sun H W, Zhang Y, et al. Tube-based discrete controller design for vehicle platoons subject to disturbances and saturation constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(3): 1066-1073.
- [129] Feng Y H, Mu J B, He D F. Distributed tube-based predictive control of vehicle platoons via disturbance compensation[C]. 2022 13th Asian Control Conference. Jeju, 2022: 563-568.
- [130] Wei S Y, Zou Y, Zhang X D, et al. An integrated longitudinal and lateral vehicle following control system with radar and vehicle-to-vehicle communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1116-1127.
- [131] Caiazzo B, Lui D G, Petrillo A, et al. Distributed double-layer control for coordination of multi-platoons approaching road restriction in the presence of IoV communication delays[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4090-4109.
- [132] Guo J H, Li K Q, Luo Y G. Coordinated control of autonomous four wheel drive electric vehicles for platooning and trajectory tracking using a hierarchical architecture[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2015, 137(10): 101001.
- [133] Dang D F, Gao F, Hu Q X. Motion planning for autonomous vehicles considering longitudinal and lateral dynamics coupling[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3180.
- [134] Zhao H Y, Lu X H, Chen H, et al. Coordinated attitude control of longitudinal, lateral and vertical tyre forces for electric vehicles based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 2550-2559.
- [135] Ge L H, Zhao Y, Ma F W, et al. Towards longitudinal and lateral coupling control of autonomous vehicles using offset free MPC[J]. Control Engineering Practice, 2022, 121: 105074.
- [136] Chu D F, Li H R, Zhao C Y, et al. Trajectory tracking of autonomous vehicle based on model predictive control with PID feedback[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(2): 2239-2250.
- [137] Chowdhri N, Ferranti L, Iribarren F S, et al. Integrated nonlinear model predictive control for automated driving[J]. Control Engineering Practice, 2021, 106: 104654.
- [138] Da Silva Junior A, Birkner C, Jazar R N, et al. Coupled lateral and longitudinal controller for over-actuated vehicle in evasive maneuvering with sliding mode control strategy[J]. IEEE Access, 2023, 11: 33792-33811.
- [139] Khaisongkram W, Hara S. Performance analysis of decentralized cooperative driving under non-symmetric bidirectional information architecture[C]. IEEE International Conference on Control Applications. Yokohama, 2010: 2035-2040.
- [140] Goli M, Eskandarian A. Evaluation of lateral trajectories with different controllers for multi-vehicle merging in platoon[C]. International Conference on Connected Vehicles and Expo. Vienna, 2014: 673-678.
- [141] 张荣辉, 游峰, 初鑫男, 等. 车-车协同下无人驾驶车辆的换道汇入控制方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 180-191.
- (Zhang R H, You F, Chu X N, et al. Lane change merging control method for unmanned vehicle under V2V cooperative environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 180-191.)
- [142] Uno A, Sakaguchi T, Tsugawa S. A merging control algorithm based on inter-vehicle communication[C]. Proceedings IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems. Tokyo, 1999: 783-787.
- [143] Pueboobpaphan R, Liu F, van Arem B. The impacts of a communication based merging assistant on traffic flows of manual and equipped vehicles at an on-ramp using traffic flow simulation[C]. The 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Funchal, 2010: 1468-1473.
- [144] Hu J, Wang H R, Li X, et al. Modelling merging behaviour joining a cooperative adaptive cruise control platoon[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(7): 693-701.
- [145] Liu H, Zhuang W C, Yin G D, et al. Strategy for heterogeneous vehicular platoons merging in automated

- highway system[C]. Chinese Control and Decision Conference. Shenyang, 2018: 2736-2740.
- [146] Goli M, Eskandarian A. MPC-based lateral controller with look-ahead design for autonomous multi-vehicle merging into platoon[C]. American Control Conference. Philadelphia, 2019: 5284-5291.
- [147] Xavier P, Pan Y J. A practical PID-based scheme for the collaborative driving of automated vehicles[C]. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Shanghai, 2009: 966-971.
- [148] Farag A, Hussein A, Shehata O M, et al. Dynamics platooning model and protocols for self-driving vehicles[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Paris, 2019: 1974-1980.
- [149] Basiri M H, Ghoghj B, Azad N L, et al. Distributed nonlinear model predictive control and metric learning for heterogeneous vehicle platooning with cut-in/cut-out maneuvers[C]. The 59th IEEE Conference on Decision and Control. New York: ACM, 2020: 2849-2856.
- [150] Liu P, Kurt A, Ozguner U. Distributed model predictive control for cooperative and flexible vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(3): 1115-1128.
- [151] Huang Z C, Chu D F, Wu C Z, et al. Path planning and cooperative control for automated vehicle platoon using hybrid automata[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(3): 959-974.
- [152] 孙凤兰. 多智能体网络的一致性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
(Sun F L. On consensus of multi-agent networks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.)
- [153] Jia D Y, Ngoduy D. Enhanced cooperative car-following traffic model with the combination of V2V and V2I communication[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2016, 90: 172-191.
- [154] Park H, Bhamidipati C S, Smith B L. Development and evaluation of enhanced Intellidrive-enabled lane changing advisory algorithm to address freeway merge conflict[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2243(1): 146-157.
- [155] 吴黎兵, 范静, 聂雷, 等. 一种车联网环境下的城市车辆协同选路方法[J]. 计算机学报, 2017, 40(7): 1600-1613.  
(Wu L B, Fan J, Nie L, et al. A collaborative routing method with internet of vehicles for city cars[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(7): 1600-1613.)
- [156] 刘丹. 基于拓扑连通性的多智能体系统目标追踪群集控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.  
(Liu D. Flocking control in target pursuit for multi-agent systems based on topology connectivity[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.)
- [157] Fernandes P, Nunes U. Platooning of autonomous vehicles with intervehicle communications in SUMO traffic simulator[C]. The 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Funchal, 2010: 1313-1318.
- [158] 李科志. 车联网环境下基于反馈的智能车辆编队控制研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017.  
(Li K Z. Feedback-based formation control for autonomous vehicles under connected environment[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.)
- [159] Yashiro T, Kasagi K, Ariyasu K, et al. Construction and performance evaluation of the platoon-formation algorithm considering the destination of each vehicle[C]. Proceedings of Conference on Intelligent Vehicles. Tokyo, 1996: 35-40.
- [160] Chehardoli H, Homaeinezhad M R. Switching decentralized control of a platoon of vehicles with time-varying heterogeneous delay: A safe and dense spacing policy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(8): 1036-1046.
- [161] Chehardoli H, Ghasemi A. Adaptive centralized/decentralized control and identification of 1-D heterogeneous vehicular platoons based on constant time headway policy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(10): 3376-3386.
- [162] Chehardoli H, Ghasemi A, Najafi A. Centralized and decentralized distributed control of longitudinal vehicular platoons with non-uniform communication topology[J]. Asian Journal of Control, 2019, 21(6): 2691-2699.
- [163] Zhang J Y, Suda Y, Iwasa T, et al. Vector Lyapunov function approach to longitudinal control of vehicles in a platoon[J]. JSME International Journal, 2004, 47(2): 653-658.
- [164] Zhou Y, Ahn S, Wang M, et al. Stabilizing mixed vehicular platoons with connected automated vehicles: An H-infinity approach[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2020, 132: 152-170.
- [165] Halder K, Gillam L, Dixit S, et al. Stability analysis with LMI based distributed  $H_1$  controller for vehicle platooning under random multiple packet drops[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 23517-23532.
- [166] 秦晓辉. 多型通信拓扑下车辆队列分布式控制中的稳定性问题[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
(Qin X H. Stability analysis of distributed control in vehicular platoons under generic communication topologies[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.)
- [167] Feng S, Zhang Y, Li S E, et al. String stability for vehicular platoon control: Definitions and analysis methods[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 81-97.
- [168] Swaroop D, Hedrick J K, Choi S B. Direct adaptive longitudinal control of vehicle platoons[J]. IEEE

- Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(1): 150-161.
- [169] Guo G, Yue W. Autonomous platoon control allowing range-limited sensors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2901-2912.
- [170] Ge J I, Orosz G. Dynamics of connected vehicle systems with delayed acceleration feedback[J]. Transportation Research — Part C: Emerging Technologies, 2014, 46(9): 46-64.
- [171] 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.
- [172] Rogge J A, Aeyels D. Vehicle platoons through ring coupling[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1370-1377.
- [173] Besselink B, Johansson K H. A delay-based spacing policy for vehicle platooning: Analysis and control[J]. Time Delay Systems: Theory, Numerics, Applications, and Experiments, 2017, 7: 249-262.
- [174] Sakhdari B, Azad N L. A distributed reference governor approach to ecological cooperative adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(5): 1496-1507.
- [175] Peppard L. String stability of relative-motion PID vehicle control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(5): 579-581.
- [176] Luo J, He D F, Zhu W, et al. Multiobjective platooning of connected and automated vehicles using distributed economic model predictive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 19121-19135.
- [177] Besselink B, Johansson K H. String stability and a delay-based spacing policy for vehicle platoons subject to disturbances[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(9): 4376-4391.
- [178] Kianfar R, Falcone P, Fredriksson J. A distributed model predictive control approach to active steering control of string stable cooperative vehicle platoon[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 750-755.
- [179] Hassanain O, Alirezaei M, Ploeg J, et al. String-stable automated steering in cooperative driving applications[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(5): 826-842.
- [180] Hassanain O. String-stable automated steering in cooperative driving applications[D]. Delft: Delft University of Technology, 2017.
- [181] Mcaree O, Veres S M. Lateral control of vehicle platoons with on-board sensing and inter-vehicle communication[C]. European Control Conference. Aalborg, 2016: 2465-2470.
- [182] Idelchi A, Salamah B B. Lateral control of vehicle platoons[D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2010.
- [183] Geus J D. Practically string stable, lateral control solution for a homogeneous platoon of vehicles: A centralized vs distributed approach[D]. Delft: Delft University of Technology, 2021.
- [184] Geiger S A. Laterally string stable control at large following distances using DRTK and TDCP[D]. Alabama: Auburn University, 2018.
- [185] Hou R F, Zhai L, Sun T M. Steering stability control for a four hub-motor independent-drive electric vehicle with varying adhesion coefficient[J]. Energies, 2018, 11(9): 2438.
- [186] Liu D L, Xu K, Cui Y D, et al. Learning-based motion control of autonomous vehicles considering varying adhesion road surfaces[C]. IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Macau, 2022: 4259-4264.
- [187] 余卓平, 曾德全, 熊璐, 等. 基于激光雷达的无人车路面附着系数估计[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(7): 124-127.  
(Yu Z P, Zeng D Q, Xiong L, et al. Road adhesion coefficient estimation for unmanned vehicle based on lidar[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 47(7): 124-127.)
- [188] Guan H, Wang B, Lu P P, et al. Identification of maximum road friction coefficient and optimal slip ratio based on road type recognition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 1018-1026.
- [189] 汪龔, 殷国栋, 耿可可, 等. 基于不同紧急工况辨识的车辆主动避撞自适应控制[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 115-124.  
(Wang Y, Yin G D, Geng K K, et al. Active collision avoidance adaptive control based on identification of different emergency conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 115-124.)

## 作者简介

于树友(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为预测控制、鲁棒控制以及预测控制与鲁棒控制在机电系统中的应用, E-mail: shuyou@jlu.edu.cn;

冯阳阳(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为分布式预测控制、车辆队列控制, E-mail: yfeng19@mails.jlu.edu.cn;

曲婷(1982—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为汽车智能驾驶、人机共驾、多源传感信息融合, E-mail: quting@jlu.edu.cn;

李永福(1983—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能网联汽车、智能交通系统、车路协同控制, E-mail: liyongfu@cqupt.edu.cn;

施树明(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为车辆运行仿真与智能化、车辆操纵稳定性, E-mail: shishuming@jlu.edu.cn;

余建华(1966—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为商用车智能驾驶、商用车发动机控制, E-mail: yujh@dfcv.com.cn;

陈虹(1963—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为预测控制、非线性控制、汽车控制, E-mail: chenh@jlu.edu.cn.