

网联自动驾驶货车编队规划与控制研究综述

傅 惠¹, 金诚谦¹, 牛张哲¹, 曾伟良²

(广东工业大学 1. 机电工程学院; 2. 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 物流运输联盟内开展货车编队运行, 有望成为未来物流运输降低运营成本的新形态。本文以网联自动驾驶货车编队规划与控制为研究对象, 通过文献检索来分析网联自动驾驶货车编队的关键技术与研究现状。从市场应用角度, 分析目前实现货车编队市场应用面临的挑战, 以及相关利益方之间的成本分配问题。从技术方法视角, 围绕网联自动驾驶编队规划与运作控制问题, 解读相关技术内涵与实现方法。通过评述网联自动驾驶编队技术研究现状, 总结该领域未来研究方向, 旨在为研究者掌握该方向发展脉络提供参考。

关键词: 网联自动驾驶货车; 物流运输; 编队规划; 编队控制; 系统优化

中图分类号: F407.6; F502

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)01-0025-11

A Review on Planning and Control of Connected Autonomous Truck Platooning

FU Hui¹, JIN Chengqian¹, NIU Zhangzhe¹, ZENG Weiliang²

(1. School of Electromechanical Engineering;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Truck platooning organized by the logistics alliance may become a new form of future logistics transportation for reducing operating cost. The key technologies and related research progress on planning and control of connected autonomous truck (CAT) platooning is analyzed in this paper through literature search. From the perspective of commercial application, the challenges of currently implementing CAT platooning are discussed, also the cost allocation issues among relevant stakeholders are analyzed. From the perspective of technologies, the corresponding fundamentals and methods are interpreted considering planning and control of CAT platooning. By reviewing the existing studies of CAT platooning, the future research interests are concluded. The motivation of this paper is to provide a possible reference for researchers to understand the trends on CAT platooning.

Key words: connected autonomous truck (CAT); logistics and transportation; platoon planning; platoon control; system optimization

电动化、网联化、智能化、共享化, 是当今汽车产业发展的主要趋势。以自动驾驶、共享出行为代表的新兴运输技术, 将为公众出行、道路运输乃至城市发展带来深远影响。业界普遍认为, 自动驾驶应用场景将从封闭场地逐渐过渡到开放道路。比如, 率先应用于物流园区、港口码头等封闭作业场景; 其次是布设专用道的高速路或城市道路; 随着单车智能、车路协同技术的充分积累, 最后将适用于充分开放的道路环境。

相比于旅客运输而言, 自动驾驶技术更有可能

促进物流货运领域产生颠覆性变革。其理由在于, 一是无人驾驶可显著降低货运企业对司机的薪资支出; 二是通过车辆编队提高行车安全并降低运输能耗; 三是提升物流运输效率和公路运输可靠性从而促进公路货运行业发展^[1]。

运输行业对自动驾驶货运的接受程度存在很大差异性, 企业规模、从业人员受教育程度、货物类型、运输距离、新增投入等因素, 不同程度地影响着自动驾驶货运的市场接受度^[2]。为提高自动驾驶货车渗透率, 还需考虑与各相关利益方的协同合

作,包括汽车制造商、技术企业、货运联盟、基础设施、政策制定者等^[3]。

尽管自动驾驶货运尚处于应用探索阶段,国际学术界已表现出对自动驾驶货运编队技术的高度关注,研究内容涵盖货运组织、路径规划、编队管理、管理策略等方面。为分析该领域的研究热点,探讨行业应用面临的挑战,本文通过文献分析,梳理出自动驾驶货运编队管理方面的关键技术及研究现状,以便为国内学者开展相关研究提供借鉴。

1 自动驾驶货车编队应用案例

自动驾驶货运编队研究与应用,源于汽车技术本身的发展。汽车制造商、技术服务商、科技公司,通过持续研发环境感知、安全预警、车道保持、定速巡航、自适应巡航、自动泊车等新型技术,致力于改善车辆运行的安全、便捷、舒适性问题,从而使得商用和乘用车实现从 L0 级到 L5 级的自动驾驶能力跃升。

V2V (vehicle to vehicle) 车车通信、V2X (vehicle to everything) 车路通信等技术的兴起,将自动驾驶技术从单车智能推进到网联自动驾驶汽车 (connected autonomous vehicle, CAV) 新阶段。由于物流货运领域的应用场景更为明确,业界普遍认为,网联自动驾驶货车 (connected autonomous truck, CAT) 相较于私人汽车,更有条件实现落地应用。应用 CAT 的潜在目标,除了提高运输安全之外,最受关注的就是通过货车编队达到降低运输能耗和碳排放。近几十年,世界范围内已开展了不少货车编队示范项目,以期获得货车编队技术在专用测试道路、开放公共道路上的应用启示。

欧盟的 CHAUFFEUR 项目中,编队头车采取人工驾驶 (类似 L2 等级),司机对编队全程负责;而跟随货车均为自动驾驶 (等同 L4 等级),跟车司机起到环境监控和应急处置作用。SARTRE 项目同样采取编队头车人工驾驶模式,探索在不改造道路设施条件下,允许货车或者客车组成混合编队的燃油经济性、驾驶安全性和司机舒适性^[4]。

瑞典货车制造商 SCANIA 也开展了两个编队项目,包括重型车队分布式控制和 iQFleet^[5]。2011 年以来,荷兰 TNO 组织开展了一系列协同自适应巡航控制 (cooperative adaptive cruise control, CACC)

研究,多所大学和研究机构参与 CACC 车辆及其速度控制系统设计,同时还发布了自动驾驶货车编队商业应用白皮书^[6]。CACC 相较于货车编队的区别在于,前者侧重于纵向控制,即车头时距控制策略;后者则包含车辆纵向与横向控制,纵向基于车头间距进行控制。

美国加州的 PATH 货车编队项目,联合沃尔沃、地铁等企业,分析短途运输、长途货运行业对 CAT 编队的市场需求情况,评估货车编队对改善 710 高速公路交通、缓解环境压力的潜在作用。PATH 与沃尔沃还联合开发新一代的拖挂车 CACC 系统,测试其性能及司机适应性,通过货车编队中的跟车间距调节实验,以期降低车辆空气阻力并节省能耗。

为探索交通节能及降低碳排放策略,2008 年日本启动 EnergyITS 项目,并在快速路上开展 CAT 编队运行试验。测试了由 3 辆重型与 1 辆轻型全自动驾驶货车构成的编队,货车上安装前后两组摄像头识别道路标线,安装毫米波雷达和激光雷达用于头车障碍物检测、跟车间距检测。仿真实验表明,在行驶速度为 80 km/h、车头间距为 4 m 情况下,通过货车编队可明显降低风阻,并可节省约 15% 的燃油消耗^[7]。

我国在港口码头、物流园区、矿山作业等封闭场景下^[8],开展自动驾驶卡车及其编队运行技术与试点应用;也针对测试场地和开放道路环境,进行了物流货车编队运行测试工作。比如,2021 年,科技企业文远知行与江铃汽车、中通快递签约,发布中国首款 L4 级自动驾驶货运车^[9]。2023 年,主线科技获准在北京市测试道路开展载货示范应用,并进行京津冀高速干线物流运营网络建设,初步具备跨省开展智能卡车编队测试与示范运营能力^[10];同年,小马智行获得广州首个 CAT 编队行驶测试牌照,获准在广州开放道路上进行 L4 级编队自动驾驶测试^[11]。

2 文献分析与关键问题归纳

2.1 研究方法与论文架构

用主题词 autonomous 和 connected truck 或 autonomous truck 或 automated truck platooning 或 truck platooning 在 Web of Science、Science Direct、Scopus 等主流数据库,以及中国知网、万方等中文

数据库进行检索, 搜索到 1998 ~ 2023 年间与主题高度相关期刊论文近 700 篇。其中英文期刊占比很高, 期刊来源包括 Transportation Research Record、IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems、IEEE Intelligent Vehicles Symposium、Transportation Research Part B/C/E、European Journal of Operational Research、Sustainability、Sensors、交通运

输工程学报、交通运输工程与信息、汽车工程、公路交通科技等, 研究涉及工程技术、交通运输、计算机科学、自动控制、应用数学等领域。

就研究机构的地域分布而言, 中国、美国、德国、瑞典、荷兰、日本发表论文数居于前列。随着近年自动驾驶技术的快速发展, 可以发现 2018 年之后的相关研究呈现明显增长趋势 (见图 1)。

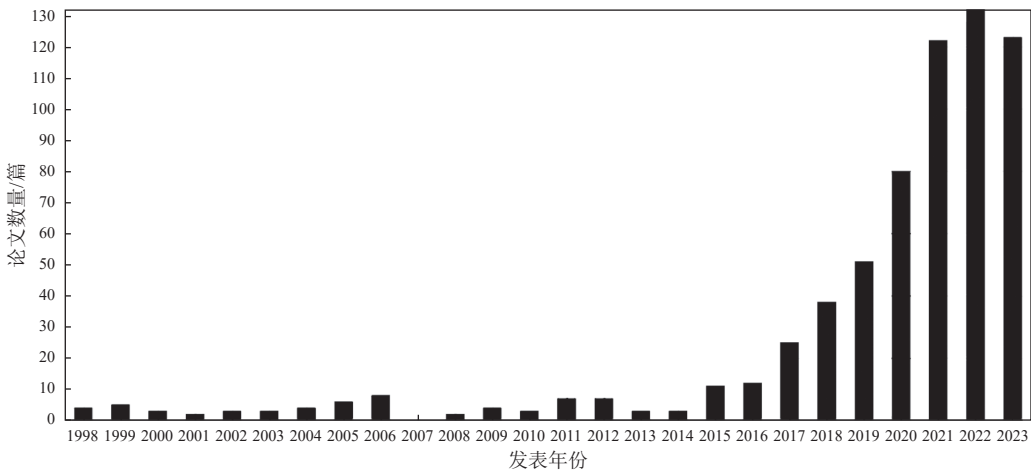


图 1 货车编队相关期刊论文发表数量
Figure 1 Published journal papers on truck platooning

通过对相关文献的关注视角、研究方法、技术特点进行总结梳理, 发现主要围绕高速路、城市道路两种场景, 探讨货车司机、货运企业、道路设施、交通管理、土地规划等相关方的多方利益协同, 借助先进的物流信息平台开展任务协同、编队规划、编队控制等关键技术创新, 实现提高安全、提升效率、减少拥堵、降低排放、控制等目标。

为了便于阅读, 制定如图 2 所示的本文研究架构, 来阐述关键技术的研究现状, 并总结出未来可能的重点研究方向。

2.2 CAT 编队研究相关的关键问题

Guanetti 等^[12]认为 CAV 应用成功与否不仅取决于车辆智能化程度, 还与道路基础设施 (信号路口、匝道控制、道路标志标线等)、其他交通参与者 (其他网联车、非合作汽车、自行车及行人) 等相关。不同于小汽车, 物流货运车辆对路基路面、道路交通具有更显著影响, 除了研究 CAT 编队运行规划控制技术外, 还需要系统评估 CAT 编队带来的潜在不利影响, 并进行市场应用前景评估。因此, 现有 CAT 编队研究的重点, 包括 CAT 编队应用影响评价, 以及 CAT 编队运行规划控制研究两

大类, 以下分别简述其对应的关键问题。

1) CAT 编队市场应用。

理论上, 通过编队方式可降低货车能耗和排放, 从而不同程度地节省运输成本。然而, Cheng 等^[13]研究表明, CAT 编队降低货车排放的同时也会增加道路设施维护产生的排放; 引入 CAT 编队可降低车-路系统的总排放量约 5.1%, 而由此造成的额外道路养护会导致车-路系统总成本增加约 4.6%。另外, Wang 等^[14]分析了 CAT 编队可能影响高速路匝道入口车辆通行; Calvert 等^[15]研究表明, 饱和车流情形下 CAT 编队的负面影响更为明显, 故建议只有主干道处于非饱和交通条件下才允许货车编队运行。有关 CAT 编队应用, 尚存以下问题有待研究。

问题 1: CAT 市场接受度。

CAT 技术迭代、车辆售价及其自动化程度, 将对货车司机就业造成深远影响, 不同规模和类型的货运企业, 将对 CAT 应用作出各自选择。因此, 分析 CAT 市场推广因素, 以及预测未来不同地区及企业的 CAT 接受度, 已成为国际上广泛关注的内容。

问题 2: CAT 编队成本分配。

系统评价 CAT 编队带来的企业运营受益与社

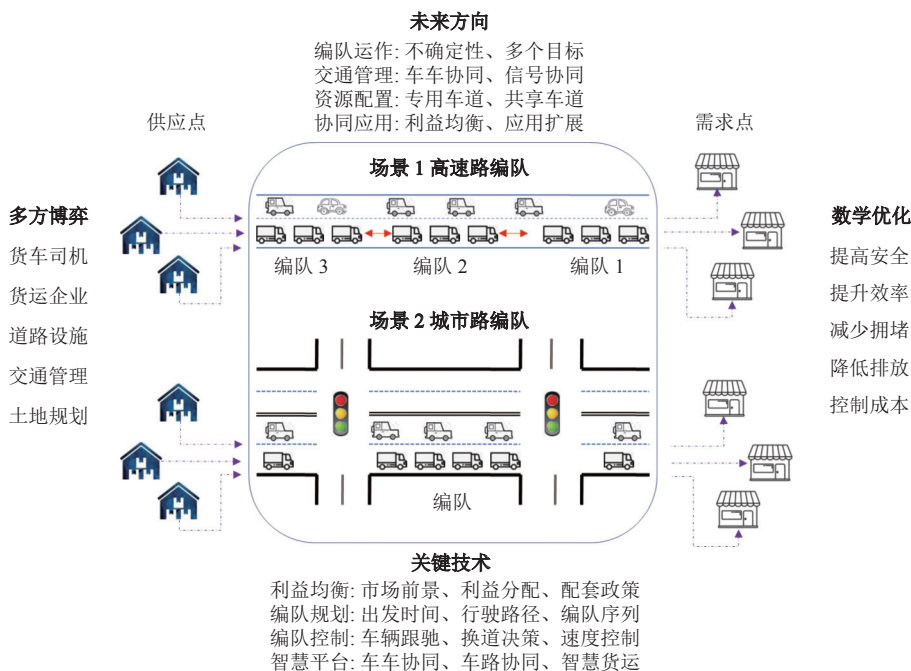


图 2 本文研究架构

Figure 2 The framework

会潜在损失，并在利益相关方之间进行综合成本与收益^[16]的均衡分配，是 CAT 编队推广应用并实现可持续发展的关键。

问题 3：配套管理措施。

CAT 编队运行涉及道路标志标线、专用道规划等基本条件设置，也涉及编队在路口/路段的运行规范、与信号灯交互实现车路协同、配套法律体系等管理体系建设。

以上问题的研究现状，将在第本文第 3 节进行论述。

2) CAT 编队运作管理。

Hou 等^[17]将 CAT 编队技术研究划分为网络通信、任务调度、编队规划、货车控制等内容。Zhang 等^[18]综述了通信延时对编队运行稳定性的影响及其补偿策略。Bhoopalam 等^[19]系统梳理 CAT 编队规划的内涵，及其与共享出行、货物集运的不同之处。Nasri 等^[20]进行货车行驶路径与速度规划研究。Guanetti 等^[12]从运动规划、实时控制、生态驾驶、多车协同等角度，对 CAV 运行控制进行系统分析。Turri 等^[21]提出在编队协调层计算速度参考值，在车辆控制层完成货车运行控制。针对已有文献，可归纳出三方面的编队运作管理重点问题。

问题 1：基于任务的 CAT 编队规划。

根据物流运输任务的起终点、时间窗等信息，

通过优化方法决定哪些货车、选择什么路径、在何时何地组成编队，以及货车在编队中的排列位置，这是形成编队的基础。

问题 2：CAT 编队规模及控制。

考虑安全限制、通信范围、风阻效应等因素，进行编队长度、编队形式动态优化，对加入编队货车的横向换道、编队内间距保持的纵向跟驰等车辆操作行为进行控制。

问题 3：CAT 编队运行稳定性。

在编队运行过程中，避免通信延时、网络攻击带来的负面影响，保障货车运行安全、编队弦稳定，并促进与 CAT 编队相关联运输道路交通流的运行稳定。

以上问题的研究现状，将在本文第 4、5 节进行论述。

3 应用前景预测与利益相关方协同

相比传统货运，网联自动驾驶货运具有货运信息共享化、车辆驾驶智能化、货运整合便捷化等特点，既符合货车技术发展的趋势，也满足物流运输业降本增效的需求。然而，网联自动驾驶货车的市场化应用，还应考虑更多实际因素：1) 货车司机、运输企业对自动驾驶技术及其置换成本的接受程

度; 2) 运输企业联盟的组建及其成本、收益再分配; 3) 包括道路基础、专用道设置以及相关配套政策的全方位支持。

3.1 CAT 编队应用前景预测

自动驾驶作为一项新兴技术, 其普及应用的主要障碍包括用户/政策侧的驾驶安全、用户接受度、配套法律因素; 技术侧的计算机软硬件、网联通信、高精地图等要素^[22-23]。就隐私泄露、制造成本高、社会公平性等用户/政策侧的制约因素来看, 研究表明各因素存在相互耦合关系, 且用户接受度是影响自动驾驶技术应用的最显著因素, 而用户接受度低又与缺乏行业标准与规范直接相关^[24]。

一项针对美国加州和德国的线上问卷调查表明, 70% 的受访者对 L1 及 L2 等级的 CAT 编队技术持欢迎态度, 倾向于支持车间距介于 15~20 m 且至多 5 辆车的编队场景^[25]。然而, 随着自动驾驶等级的提升, 人工操作参与度逐渐降低, 驾驶员担心薪资下降甚至失业, 因此对 L4 等级货车编队的接受度将发生变化。以荷兰货车司机为采访对象的研究中, 受访者认为 CAT 技术的应用, 将使司机主要工作从车辆驾驶转向货物装卸, 从而影响到其工作热情; 另外, 受资金投入和规模效益的制约, 只有资金雄厚的大规模运输企业和物流公司才能赢得市场^[26]。

有关 CAT 市场渗透率预测研究表明, 如自动驾驶技术进展缓慢, 有可能严重限制其应用推广甚至导致推广失败; 如技术快速提升使得公众认可度提高, 加之有利价格因素, 则 25 年后 CAT 的快速应用将成为现实^[27]。通过调查 400 家美国货运企业使用 L3 等级 CAT 的意向, 发现企业规模、员工学历及年龄, 均对 CAT 渗透率提升有影响; 对新技术持乐观态度且运输服务覆盖全国的大型企业, 更乐于采用 CAT 编队技术降低运营成本^[3,28]。

现有 CAT 渗透率预测研究, 还存在相关影响因素耦合关系不清楚、数据调研不充分、企业采纳行为有差异、政策影响难以估计等问题, 故学术界对未来 CAT 市场渗透率的可能变化, 还缺乏普遍共识^[29]。

3.2 相关利益方成本分配

在货车编队行驶时, 队列中的前车可减少后车前侧的空气阻力, 从而降低后车的燃料消耗, 在整体上减少燃料消耗, 降低货运成本。未来货运行业

可采取承运商联盟合作形式, 通过信息平台共享运输需求, 进行运输整合以及 CAT 编队运行^[30]。由此将产生运输成本变更, 包括为支持联盟企业而共享车辆运力所增加的运输费用, 为组成 CAT 编队而产生的出发时间延迟、绕道行驶等额外成本^[31], CAT 编队中处于不同位置所导致的燃料消耗差异等。为实现承运商联盟可持续发展, 需要对参与编队的企业进行运输成本再分配。

Chen 等^[30] 分析了组成承运商联盟的两项重要条件: 一是编队成本分担到所有企业而不出现预算赤字 (效益条件); 二是所有承运商愿意组成大联盟而非另行组成小联盟 (稳定性条件)。然而, 联盟内 CAT 协同编队运作中, 可能难以保证所有参与方均能充分从联盟中获益。因此, 政府可制定补贴方式, 来鼓励联盟发展并降低碳排放。联盟内部, 可采取成本均衡分配手段, 来尽可能降低参与大联盟相较于另组小联盟的机会成本。需要说明的是, 从多承运商参与编队的合作博弈角度来看, 可能存在核心为空的情形。因此, 研究者通过放松效益、稳定性两项条件, 来扩展编队合作博弈中的近似核心概念。关于联盟内的企业成本分配, 通常包括 Sharply 值、比例值、Ad Hoc 等十多种分配方法。有关 CAT 编队合作博弈及其成本分配研究, 读者可参考文献 [16]、[30]、[31] 及其所列文献。

3.3 配套基础设施与管理体系

为实现联盟内货车编队运行, 除需要通过信息平台共享供需信息、协同运输路径及时间外, 还涉及到道路基础设施建设、交通管理措施、配套法律体系等方面的配套支持。

CAT 发展初期, 为实现车路协同常需要铺设路侧通信设备。随着编队技术的应用, 则可能需要规划专用车道、优化道路标志标线, 以提高编队运行安全与效率。另外, CAT 编队具有行驶速度快、车头间距小的特点, 将显著增加路面磨损与损害, 这也可能涉及对现行道路建设及养护标准的更新。

为降低传统大型货车对交通效率、运输安全的影响, 国内城市均采取部分路段或者中心区限制大货车通行的管理措施。在车辆驾驶自主可控、车路通信畅通的条件下, 管理部门可考虑在城市内规划新的专用线路、为中小型货车编队开通信号优先、制订货车编队行驶规则, 从而规范货车在城市内的运力合理分布, 以此来降低小微货车运行里程, 提

升最后一公里配送效率。针对高速公路,管理部门则可出台夜间货运编队运行支持政策,通过开辟最右侧专用道、限制匝道出入口的编队规模、适当调整高速路收费标准等,来引导 CAT 编队的落地应用。

作为 CAT 编队技术应用的重要保障,立法部门应明确自动驾驶环境下的物流技术标准、行驶与装载安全要求等,考虑各方利益来建立完整的配套法律体系。执法部门需要开展相应的法规宣传教育,普及政策法规内容,确保货运企业合法且安全地运营。应对网联自动驾驶货运突发情况时,需要明确利益相关者及对应的责任,便于确定事故责任承担主体^[32]。

4 网联自动驾驶货车编队规划

在 CAT 渗透率较低阶段,需要进行有计划的编队规划与组织;应用普及后,则可实现 CAT 在途自行编队。由于货车编队服务于物流运输组织,因此,经典的货车调度、路径规划仍然是 CAT 编队规划的技术基础。

4.1 货车运输调度与路径规划

重型货车、集装箱调度模式包括传统的货车与客户一对一服务,牵引车头与车身货柜分离、编队服务等。针对货车运输调度问题,通常建立以运输成本最低、等待时间最少、能耗最低为目标函数的线性或非线性运筹学模型,通过商业软件、精确算法或启发式算法求解货车行驶路径、出发时间等^[33]。

其中,在一定时空范围内具有重叠路径,是形成货车编队的必要条件。因此,面向货车编队进行路径规划^[34],就是要在运输起点、终点、出发与到达时间窗给定条件下,通过优化货运服务模式、行驶路径、出发时间或行驶速度等,在路网安全、交通干扰允许条件下^[35]进行编队预规划。

众所周知,在运输网络或客户规模增加情况下,传统路径规划问题求解效率存在挑战。为了控制问题复杂度,通常可将货车行驶路径与出发时间独立建模。Luo 等^[36]分析出发时间对货车编队的影响,分别建立车辆路径规划与出发时间计划数学模型,提出基于路径-时间的动态迭代求解启发式算法,以期提高求解效率。

如果在优化模型中,同时考虑行驶路径与出发时间,则构成更为复杂的集成优化问题^[37-38]。如 You

等^[38]系统性地将货车路径规划问题归纳为传统运输模式 1、货箱共享模式 2、车头车身可分离模式 3,并提出能够统一以上模式的货车编队运作模式 4。编队运作模式下,允许客户被多车服务、货柜可在客户间共享。论文证明了当编队规模为 1 或 2 时,模式 2、3 分别是模式 4 的一个特例。由于模式 2、3 对应的数学问题已被证明为 NP-hard 问题,因此,本文讨论的货车编队规划问题显然也是 NP-hard 问题。

4.2 CAT 编队规划

CAT 编队规划是在路径规划基础上进一步明确货车进入编队的时间、地点及其在编队中的顺序。CAT 编队规划按方式,可分为预先离线规划、动态在线规划以及临时性自组织 3 类^[19]。

4.2.1 预先离线规划

在信息充分共享条件下,所有物流供需信息及货车行程信息均已知,故参与货车编队行驶的路线等计划可提前制定,被称为离线或静态编队规划。若按线路特点和编队规模情况,可将编队规划分为固定、可变路线规划,以及有限制、无限制编队规划。

现实中,企业根据运输需求,可预先为每辆货车设计一条固定的运行路线。在实际运输过程中,为了组成有效的货车编队,部分货车需要根据进入编队的时间和地点要求,来动态调整其预定路线。

若不考虑编队规模则属于无限制编队;若考虑编队对交通流的影响^[15],及道路设施的磨损^[39-40],则应对货车编队规模进行限制。

1) 无限制、固定路线编队。

根据如图 3 所示的运输任务,货运企业对内部车队或与联盟企业合作,规划出不同货车的出发时间、行驶速度,并根据规划信息最大限度地使编队目标车辆的行驶路线重叠。从而,在部分重叠路径上形成编队,以降低风阻及减少燃料消耗^[19]。

在固定路线条件下,货车只需要提前考虑与自身路径重合度较高的其他货车编队。与只考虑地形、车辆特征、编队车辆数的传统燃料模型相比,Liang 等^[41]提出通过安全条件下的前车减速、后车加速进行两车组队,从而避免因绕路、等待造成额外支出。Zhang 等^[42]研究不确定行程时间条件下的编队规划问题,结论表明,只有各货车计划到达时间差异小于一定阈值时,目标货车才有编队可能。

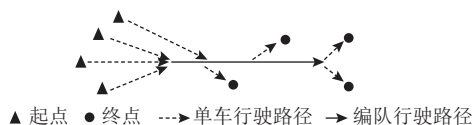


图3 固定路线的编队场景

Figure 3 A platooning scenario with fixed routes

进一步对比分析表明, 合流后编队相较于编队后分流情形, 由于需要在合流处等待其他货车, 将增加额外编队损失与行驶时间成本。故而 CAT 编队应用于先编队后分流的业务场景, 更为有效。

2) 无限制、可变路线编队。

可变路线编队场景中, 除了要确定货车的出发时间和行驶速度外, 编队规划问题还需要确定每辆货车的路线。如图4所示, 为了使总成本最低, 可能需要货车更改原有预规划路径, 额外的路径规划也会使得问题变得更加复杂。

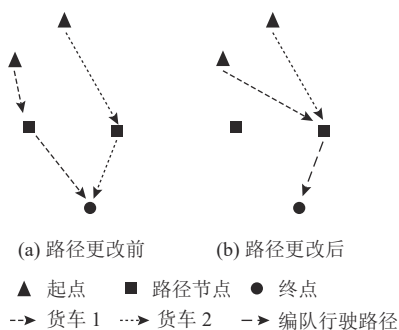


图4 可变路线的编队场景

Figure 4 A platooning scenario with flexible routes

为了最大限度减少燃料的消耗, Larsson 等^[43]将编队规划, 视为一种通过货车编队实现燃料消耗最小化的路径规划问题。同时, 指出编队规划问题属于 NP-hard 问题, 甚至对于所有货车同时处于同一起始点的简单情形, 也只能求解小规模案例。通过提出一种整数规划模型, 验证了车辆规模适当增加有利于燃油节省; 对于 200 辆规模的车队, 在相同起点出发情况下可获得 9% 的燃料节省。

Zhao 等^[44]从信息平台角度出发, 提出面向货车编队的车辆路径与出发时间联合优化方法, 系统总结了相应的混合整数规划模型、启发式求解算法。以包含 647 个节点、1390 个路段的德国路网为例, 验证了编队规划问题求解算法有效性及计算效率。

3) 有限制、固定路线编队。

对于大规模车队及路网情形, 货车编队数随可行路径规模呈几何级增长, 因此, 有必要通过设置

限制性条件, 进行问题规模控制。比如, 设定最小共同距离、最大和最小编队规模、最大等待时间、最小收益等条件。为此, Meisen 等^[45]提出一种基于数据挖掘的启发式方法进行编队规划求解。假定货车编队最多为 4 辆, 通过实验分析以上限制性条件, 对编队收益、编队灵活性、编队可靠性的影响, 并得出以上限定条件的推荐取值。这就为后续编队规划问题建模, 提供了合理设置约束条件方面的参考。

4.2.2 动态在线规划

货车之间、货车与路侧单元通过定期通信, 系统可全面掌握联盟内货车的位置、速度信息, 因此, 有条件对进出编队进行动态调整。动态在线编队规划, 包括定周期更新以及事件驱动^[46]两种模式。

假定车辆到达编队站点服从泊松分布, Adler 等^[47]从排队角度研究多辆货车实时编队案例, 分析了以一定时间间隔或一定编队规模为触发条件, 驱动站点货车编队离开不同策略。结果表明, 限定编队规模策略使每个编队长度平均增加了 1 辆货车, 故而在燃料节省方面表现更优。

需要指出的是, 从物流运输大数据角度, 可挖掘出大规模货运车辆行驶规律^[19], 从而为动态编队提供有益的启发式规则, 以降低 CAT 编队规划计算复杂度。

4.2.3 临时性自组织

在动态在线规划中, 货车编队计划由中央控制系统生成。在没有任何提前计划的情况下, 彼此靠近的货车自发地形成编队, 这种类型的编队被称为自发或临时性编队^[6]。

Liang 等^[48]利用欧洲某地一天内的 1800 辆重型货车的数据, 对货车自发性编队的发生率和油耗节省情况进行分析, 结果发现自发编队的发生率为 1.2%, 相比于没有编队的情况, 可节省 0.07% 的油耗。

5 网联自动驾驶货车编队控制

网联自动驾驶货车编队控制, 以编队规划的车辆时空轨迹信息为基础, 根据道路几何信息及车辆动力学模型, 进行编队运作控制和编队协同控制^[49]。

5.1 车辆编队运作控制

如图5所示, 车辆编队运作涉及并入编队、编队保持和驶离编队等关键过程^[50], 其中主要控制内

容包括速度规划、纵向控制、横向控制技术等^[5, 51-52]。在车队编队运作控制中,保障车队的稳定性至关重要,CAT 编队运行稳定性问题聚焦于编队运行中如何防范通信延时、网络攻击等潜在威胁,以及如何保障货车的行程安全和编队整体的平稳。

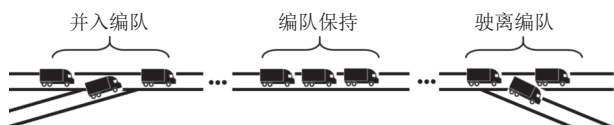


图 5 自动驾驶货车编队运作控制示意

Figure 5 An example of the control for CAT platoons

1) 并入编队。

并入编队是指车辆从独立行驶状态加入到已有编队中的过程。这一操作需要考虑与已有车辆的协同和平稳过渡。关键技术如下。(1) 协同速度规划。确保新加入车辆的速度与编队中的其他车辆相适应。例如高速公路匝道的场景下,车辆通过计算最优加速度,使车辆在匝道合流处高效、安全和舒适地形成编队^[53]。(2) 空间位置优化。利用车辆时空轨迹信息和道路几何信息,优化车辆的空间位置以形成编队。例如高速路匝道车辆选择合适的合流缝隙,通过估算主干道车辆的未来位置,再基于模型预测控制等方法来调整匝道车辆的速度,使其空间位置满足编队的需求,并在满足状态约束(如安全车头距离、最大速度等)的情况下,控制车辆平稳地并入编队^[54]。

2) 编队保持。

编队保持是指车辆在编队中保持相对位置和速度的过程。关键技术如下。(1) 车队速度规划。根据车辆动力学模型和车队整体速度,制定合理的速度规划,例如车辆根据最优的燃油消耗,并保证车辆之间的安全车头距离和车队稳定的情况下,规划编队中的车辆速度以减小燃料损耗及排放^[55]。(2) 纵向控制。使用纵向控制维持车辆之间的安全距离和相对速度,跟随车能够根据领航车的距离和速度,调整自己的速度和加速度,保持与前车的安全距离^[21]。(3) 横向控制。通过横向控制技术维持车辆在编队中的相对位置,避免编队受到外界干扰而解散。例如通过调整编队中的车辆速度,在编队中创造一个合适的间隙,然后让编队中的车辆依次换道,防止编队变道时因其他车辆影响导致编队解散^[56]。

3) 驶离编队。

驶离编队是指车辆从编队中分离出去的过程,

目的是为了满足不同车辆的个性化需求(例如与编队中其他车辆目的地不同或需要加油),该过程需要确保离队车辆的操作对整体编队不产生负面影响。关键技术如下。(1) 分离车辆轨迹规划。利用车辆时空轨迹信息规划离队轨迹,确保安全、高效地脱离编队^[56]。(2) 协同速度调整。脱离车辆与编队中其他车辆的速度调整,例如通过设计控制器实现编队的速度与间距控制,以实现无碰撞的编队分离^[57]。

以上关键技术车辆在编队的运作控制中起着重要的作用,通过这些控制技术,可以实现编队高效、安全、稳定运行。

5.2 车辆编队协同控制

车辆编队规划为编队形成提供可能性,车辆编队运作控制,则对车辆并入、编队保持和车辆驶离,提供稳定可靠的编队操作策略。车辆编队协同,主要考虑编队与编队之间的协同,以及货车编队与其他车辆之间的协同。

从行业角度而言,随着企业内车辆编队的应用增长,可通过出发预先规划、在途动态调整、临时性自组织,将更多跨企业、跨联盟的货车组成编队。因此,如何通过编队协同控制,来实现更大时空范围内的运输成本节省、碳排放降低等综合性目标,将成为未来 CAT 编队付诸应用的关键内容。Lesch 等^[58]分别从概念与战略层面,综述了编队协同控制的架构、决策目标、优化层级、空间范围、触发机制等宏观要素,以及协同优化中的目标函数、输入参数、约束条件、求解算法等具体内容。更有价值的是,也指出了存在的挑战:1) 常用的集成式协同控制架构,多适用于企业内部编队协同,对于跨企业的大规模编队协同,可能存在系统可靠性、公众接受度问题;2) 决策目标方面多考虑运输能耗节省,对于现实应用还应考虑各参与方的综合目标以及司机的选择;3) 约束条件中,通常考虑编队规模限制、速度限制、运输时间窗约束等,对于道路限行、地形特征、车队头车与尾车配置还缺乏考虑;4) 线性规划、非线性规划常用于编队协同控制问题建模,求解方法多采用生物种群算法,但对于现实环境中考虑不确定因素、高密度交通的大规模编队协同建模与求解问题,相关工作还比较少。

从交通角度而言,货车编队在开放道路环境的运行,将对邻近车道、路段交通流产生安全和效率方面的潜在影响。因此,有必要通过货车编队与外

部交通流的协同, 来实现交通系统的全局性目标。代表性的研究包括, 货车编队与高速路上、下匝道车辆协同^[14, 59], 以及货车编队与城市道路控制信号协同^[60-61]等。有关网联车辆编队对高速路交通流、安全、环境的影响, 读者可参考 Martinez-Diaz 等^[62]、Calvet 等^[15]的研究工作。

需要指出的是, 随着城市物流配送轻型货车编队、最后一公里配送机器人编队等编队形式的试点应用, 货车编队将会对城市交通运行管理、道路资源分配等产生复杂而深远的影响, 但学术界的关注度还不够高, 相关研究正处于起步阶段。

6 未来研究方向

本文围绕网联自动驾驶货车编队规划与控制, 进行技术内涵分析与外延展开, 介绍国内外 CAT 示范项目与应用场景。从文献分析角度, 梳理国内外研究的基本趋势与丰富视角, 从系统工程角度, 综合物流行业、运输企业、交通参与者、管理部门等利益相关方的研究脉络, 归纳出已有 CAT 编队应用影响评价、编队运行规划控制研究的 6 个关键问题。在此基础上, 重点对 CAT 应用前景预测、利益相关方协同、编队组成规划、编队运作与协同控制进行技术综述与评析, 以期国内从事相关研究的学者提供有益参考。

通过分析 CAT 在国内外开展应用存在的潜在问题与挑战, 结合智慧高速公路^[63]发展趋势, 提出以下重点研究方向。

1) 从问题建模角度, 开展考虑利益相关方综合目标、不确定因素^[64] (如车辆交互、道路拥堵) 的 CAT 编队规划数学模型研究。

2) 从编队运作角度, 在车道层面探索多车道 CAT 编队间的协同控制技术, 在路网层面开展 CAT 编队轨迹规划与路口信号控制协同研究。

3) 从交通管理角度, 提出 CAT 对城市路口、路段和路网交通流综合影响的评价方法, 研究人工与自动驾驶、CAT 与 CAV 混合交通流模型, 开发混合流交通仿真技术。

4) 从资源配置角度, 利用实际数据开展城市配送需求及货车运行规律分析, 研究城市内路网及城际间货运通道设计与货车编队专用道^[65]优化配置方法。

5) 从市场应用角度, 结合多方利益诉求, 评估

不同 CAT 渗透率条件下的成本分摊、利益分配机制, 建立多主体合作博弈条件下的 CAT 编队可持续运营体系。

6) 从应用扩展角度, 考虑 CAT 编队与城市最后一公里配送相衔接, 研究 CAT 与机器人配送、CAT 与无人机配送协同问题, 促进 CAT 应用场景丰富化。

参考文献:

- [1] HUMMER J E. Driverless America: what will happen when most of us choose automated vehicles[M]. USA: SAE International, 2020.
- [2] TALEBIAN A, MISHRA S. Unfolding the state of the adoption of connected autonomous trucks by the commercial fleet owner industry[J]. *Transportation Research Part E*, 2022, 158: 102616.
- [3] SIMPSON J R, SHARMA I, MISHRA S. Modeling trucking industry perspective on the adoption of connected and autonomous trucks[J]. *Research in Transportation Business and Management*, 2022, 45: 100883.
- [4] BERGENHEM C, HEDIN E, SKARIN D. Vehicle-to-vehicle communication for a platooning system[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 48: 1222-1233.
- [5] MAITI S, WINTER S, KULIK L. A conceptualization of vehicle platoons and platoon operations[J]. *Transportation Research Part C*, 2017, 80: 1-19.
- [6] JANSSEN G R, ZWIJNENBERG J, BLANKERS I J, et al. Truck platooning: driving the future of transportation[DB/OL]. (2015-02). <https://trid.trb.org/view/1350499>.
- [7] TSUGAWA S, KATO S, AOKI K. An automated truck platoon for energy saving[C/OL]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2011: 4109-4114 (2011-12-05). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6094549>.
- [8] MA X, HUO E, YU H, et al. Mining truck platooning patterns through massive trajectory data[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 221: 106972.
- [9] 周伟力. 文远知行发布 L4 自动驾驶轻客, 进军货运领域[EB/OL]. (2021-09-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1710577370636936360&wfr=spider&for=pc>.
- [10] 亦城时报. 自动驾驶卡车企业抢下两个全市首家[EB/OL]. (2023-10-10). <https://open.beijing.gov.cn/html/yizhuang/gzdt/2023/10/1696907894219.html>.
- [11] 潘亮. 广州首个自动驾驶卡车来了! 获准 L4 级编队行驶测试[EB/OL]. (2023-11-22). http://k.sina.com.cn/article_2131593523_7f0d893302001chpg.html.
- [12] GUANETTI J, KIM Y, BORRELLI F. Control of connected and automated vehicles: state of the art and future challenges[J]. *Annual Reviews in Control*, 2018, 45: 18-40.
- [13] CHENG H, WANG Y, CHONG D, et al. Truck platooning reshapes greenhouse gas emissions of the integrated vehicle-road infrastructure system[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1-10.

- [14] WANG M, MAARSEVEEN S V, HAPPEE R, et al. Benefits and risks of truck platooning on freeway operations near entrance ramp[J]. *Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673(8): 588-602.
- [15] CALVERT S C, SCHAKEL W J, Arem B V. Evaluation and modelling of the traffic flow effects of truck platooning[J]. *Transportation Research Part C*, 2019, 105: 1-22.
- [16] GUAJARDO M, RÖNNQVIST M. A review on cost allocation methods in collaborative transportation[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2016, 23(3): 371-392.
- [17] HOU J, CHEN G, HUANG J, et al. Large-scale vehicle platooning: advances and challenges in scheduling and planning techniques[J]. *Engineering*, 2023, 28: 26-48.
- [18] ZHANG Y, XU Z, WANG Z, et al. Impacts of communication delay on vehicle platoon string stability and its compensation strategy: a review[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2023, 10(4): 508-529.
- [19] BHOOPALAM A K, AGATZ N, ZUIDWIJK R. Planning of truck platoons: a literature review and directions for future research[J]. *Transportation Research Part B*, 2018, 107: 212-228.
- [20] NASRI M I, BEKTAS T, LAPORTE G. Route and speed optimization for autonomous trucks[J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 100: 89-101.
- [21] 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.
- [22] BEZAI N E, MEDJDOUB B, AL-HABAIBEH A, et al. Future cities and autonomous vehicles: analysis of the barriers to full adoption[J]. *Energy and Built Environment*, 2021, 2(1): 65-81.
- [23] 景鹏, 袁代标, 杜刘洋, 等. 基于科学知识图谱的自动驾驶技术接受度研究综述 [J]. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44(1): 14-21.
JING Peng, YUAN Daibiao, DU Liuyang, et al. Research of acceptance of autonomous vehicles technology based on mapping knowledge domain[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 14-21.
- [24] RAJ A, KUMAR J A, BANSAL P. A multicriteria decision making approach to study barriers to the adoption of autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part A*, 2020, 133: 122-137.
- [25] CASTRITIUS S M, LU X, BERNHARD C, et al. Public acceptance of semi-automated truck platoon driving. A comparison between Germany and California[J]. *Transportation Research Part F*, 2020, 74: 361-374.
- [26] BHOOPALAM A K, VAN DEN BERG R, AGATZ N, et al. The long road to automated trucking: insights from driver focus groups[J]. *Transportation Research Part C*, 2023, 156: 104351.
- [27] SIMPSON J R, MISHRA S, TALEBIAN A, et al. An estimation of the future adoption rate of autonomous trucks by freight organizations[J]. *Research in Transportation Economics*, 2019, 76: 100737.
- [28] SIMPSON J R, MISHRA S. Developing a methodology to predict the adoption rate of connected autonomous trucks in transportation organizations using peer effects[J]. *Research in Transportation Economics*, 2021, 90: 100866.
- [29] BECKER F, AXHAUSEN K W. Literature review on surveys investigating the acceptance of autonomous vehicles[J]. *Transportation*, 2017, 44(6): 1293-1306.
- [30] CHEN S, WANG H, MENG Q. Cost allocation of cooperative autonomous truck platooning: efficiency and stability analysis[J]. *Transportation Research Part B*, 2023, 173: 119-141.
- [31] BOUCHERY Y, HEZARKHANI B, STAUFFER G. Coalition formation and cost sharing for truck platooning[J]. *Transportation Research Part B*, 2022, 165: 15-34.
- [32] SINDI S, WOODMAN R. Implementing commercial autonomous road haulage in freight operations: an industry perspective[J]. *Transportation Research Part A*, 2021, 152: 235-253.
- [33] XUE Z, LIN H, YOU J. Local container drayage problem with truck platooning mode[J]. *Transportation Research Part E*, 2021, 147: 102211.
- [34] 张泽锡, 钟文健, 林柏梁. 带时间窗的卡车编队路径优化 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(5): 253-263.
ZHANG Zexi, ZHONG Wenjian, LIN Boliang. Optimization of Truck platooning routing with time windows[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(5): 253-263.
- [35] OKTE E, AL-QADI I L. Determining road networks' platoonability[J]. *Journal of Transportation Engineering Part A*, 2021, 147(10): 04021060.
- [36] LUO F, LARSON J. A repeated route-then-schedule approach to coordinated vehicle platooning: algorithms, valid inequalities and computation[J]. *Operations Research*, 2022, 70(4): 2477-2495.
- [37] YAN X, XU M, XIE C. Local container drayage problem with improved truck platooning operations[J]. *Transportation Research Part E*, 2023, 169: 102992.
- [38] YOU J, MIAO L, ZHANG C, et al. A generic model for the local container drayage problem using the emerging truck platooning operation mode[J]. *Transportation Research Part B*, 2020, 133: 181-209.
- [39] GUNGOR O E, SHE R, AL-QADI I L, et al. One for all: decentralized optimization of lateral position of autonomous trucks in a platoon to improve roadway infrastructure sustainability[J]. *Transportation Research Part C*, 2020, 120: 102783.
- [40] SONG M, CHEN F, MA X. Organization of autonomous truck platoon considering energy saving and pavement fatigue[J]. *Transportation Research Part D*, 2021, 90: 102667.
- [41] LIANG K Y, MARTENSSON J, JOHANSSON K H. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4): 1051-1061.
- [42] ZHANG W, JENELIUS E, MA X. Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty[J]. *Transportation Research Part E*, 2017, 98: 1-23.
- [43] LARSSON E, SENNTON G, LARSON J. The vehicle platooning problem: computation complexity and heuristics[J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 60: 258-277.

- [44] ZHAO B, LEUS R. An improved decomposition-based heuristic for truck platooning[J]. *Computers and Operations Research*, 2024, 161: 106439.
- [45] MEISEN P, SEIDL T, HENNING K. A data mining technique for the planning and organization of truck platoons[C/OL]//International Conference on Heavy Vehicles. Hoboken: Wiley Online Library, 2008: 270-279 (2009-04-06). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118557464.ch30>.
- [46] VAN DE HOEF S. Fuel-efficient centralized coordination of truck platooning[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2016.
- [47] ADLER A, MICULESCU D, KARAMAN S. Optimal policies for platooning and ride sharing in autonomy-enabled transportation[M/OL]//Algorithmic Foundations of Robotics XII. Switzerland: Springer, 2020: 848-863 (2020-05-07). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-43089-4_54.
- [48] LIANG K Y, MARTENSSON J, JOHANSSON K H. Fuel-saving potentials of platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data[C/OL]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2014: 1061-1068 (2014-06-14). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6856540>.
- [49] BESSELINK B, TURRI V, VAN DE HOEF S, et al. Cyber-physical control of road freight transport[C/OL]//IEEE International Conference on Autonomic Computing. New York: IEEE, 2016, 104 (5): 1128-1141 (2016-03-21). <https://ieeexplore.ieee.org/document/7437386>.
- [50] LI Q, CHEN Z, LI X. A review of connected and automated vehicle platoon merging and splitting operations[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 22790-22806.
- [51] 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.
- [52] LIAN R, LI Z, WEN B, et al. Multiagent deep reinforcement learning for automated truck platooning control[J/OL]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2023 (2023-10-06). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10273625>.
- [53] DURET A, WANG M, LADINO A. A hierarchical approach for splitting truck platoons near network discontinuities[J]. *Transportation Research Part B*, 2019, 132: 285-302.
- [54] XUE Y, DING C, YU B, et al. A platoon-based hierarchical merging control for on-ramp vehicles under connected environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 21821-21832.
- [55] KIM J. Truck platoon control considering heterogeneous vehicles[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(15): 5067.
- [56] LI M, LI Z, ZHOU Y, et al. A cooperative energy efficient truck platoon lane-changing model preventing platoon decoupling in a mixed traffic environment[J/OL]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2022 (2022-11-16). <https://doi.org/10.1080/15472450.2022.2119386>.
- [57] DASGUPTA S, RAGHURAMAN V, CHOUDHURY A, et al. Merging and splitting maneuver of platoons by means of a novel PID controller[C/OL]//IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. New York: IEEE, 2017 (2018-02-05). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8280871>.
- [58] LESCH V, BREITBACH M, SEGATA M, et al. An overview on approaches for coordination of platoons[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10049-10065.
- [59] ZHAO C, LI L, LI J, et al. The impact of truck platoons on the traffic dynamics around off-ramp regions[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 57010-57019.
- [60] LI D, ZHU F, CHEN T, et al. COOR-PLT: a hierarchical control model for coordinating adaptive platoons of connected and autonomous vehicles at signal-free intersections based on deep reinforcement learning[J]. *Transportation Research Part C*, 2023, 146: 103933.
- [61] 高云峰, 席建伟, 孙科. 面向客货分离交叉路口的网联货车队列车速引导与信号优先组合优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(4): 88-101.
- GAO Yunfeng, XI Jianwei, SUN Ke. Joint optimization of speed guidance and signal priority control for connected autonomous truck platoon at intersections with car and truck separation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(4): 88-101.
- [62] MARTINEZ-DIAZ M, AL-HADDAD C, SORIGUERA F, et al. Platooning of connected automated vehicles on freeways: a bird's eye view[J]. *Transportation Research Procedia*, 2021, 58: 479-486.
- [63] 岑晏青, 宋向辉, 王东柱, 等. 智慧高速公路技术体系构建[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(7): 111-121.
- CEN Yanqing, SONG Xianghui, WANG Dongzhu, et al. Establishment of technology system of smart expressway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(7): 111-121.
- [64] 张晓彤, 王嘉诚, 何景涛, 等. 面向不确定性环境的自动驾驶运动规划: 机遇与挑战[J]. *模式识别与人工智能*, 2023, 36(1): 1-21.
- ZHANG Xiaotong, WANG Jiacheng, HE Jingtao, et al. Motion planning uncertainty for autonomous driving: opportunities and challenges[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2023, 36(1): 1-21.
- [65] 李茜瑶, 牛树云, 车晓琳, 等. 自动驾驶车辆混入下的货车专用车道设置条件评价方法[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(6): 182-193.
- LI Xiyao, NIU Shuyun, CHE Xiaolin, et al. An evaluation method for setting condition of dedicated truck lane mixed with automatic vehicles[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(6): 182-193.