

文章编号:1001-7372(2019)06-0020-14

智能网联汽车运动规划方法研究综述

李 立¹, 徐志刚², 赵祥模², 汪贵平¹

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:分析了近年来智能网联汽车(Intelligent Connected Vehicle, ICV)运动规划方法的研究,根据规划时空尺度和任务目标,将 ICV 运动规划细分为路径规划、路线规划、动作规划和轨迹规划 4 级子任务,回顾了各级子任务中智能网联技术的研究和应用现状;探讨了 ICV 中驾驶人行为特性及其对运动规划结果的影响;从技术背景、研究场景、算法流程和应用理论 4 个方面,提出 ICV 运动规划方法研究的未来发展方向。结果表明:由于 ICV 主要依赖车辆网联信息规划运动路径,而路网中同时存在不同网联等级的 ICV,这将增加路径规划问题的求解难度;现有 ICV 路线规划模型较少考虑周边多车运动状态以及路段车道设置情况,将现有算法与微观交通流模型相结合有助于解决此问题;ICV 中人机协同及任务切换领域已出现诸多研究热点,如城市道路上换道与转弯动作规划、ICV 引导非网联车辆行驶等问题;借鉴驾驶人行为模式规划 ICV 运动轨迹已成为研究共识,但是车-车、车-路网联信息在此领域的应用仍然有限;采用反馈-迭代的方法进行 ICV 运动路线和动作协同规划、运动规划和轨迹跟踪控制有助于获得全局最优的运动规划结果和车辆控制策略;根据具体规划任务特点选择构建 ICV 运动规划模型的基础理论,有助于发挥各类理论的优势,提升规划算法的灵活性和适用性。

关键词:交通工程;智能网联汽车;综述;路径规划;路线规划;动作规划;轨迹规划

中图分类号:U491.25 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.06.002

Review of Motion Planning Methods of Intelligent Connected Vehicles

LI Li¹, XU Zhi-gang², ZHAO Xiang-mo², WANG Gui-ping¹

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Recent studies on motion planning methods of intelligent connected vehicle (ICV) are analyzed in this paper. In terms of working space, time, and objective, ICV's motion planning is divided into four subtasks: route planning, path planning, maneuver planning, and trajectory planning. Past research and applications of the techniques of vehicle intelligence and connection in each subtask are reviewed. Behavioral characteristics of the ICV driver and their impact on the outcome of ICV motion planning are discussed. Four aspects of the current trend in ICV motion planning research are discussed: technical background, research scenario, algorithm flow and applied theory. As an ICV mainly depends on vehicle connecting information to plan travelling route, this survey finds that the difficulty of ICV route planning increases when ICV's with

收稿日期:2018-10-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600600,2018YFB0105104);高等学校学科创新引智计划("111计划")项目(B14043);交通运输部基础应用项目(2015319812060);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-442);陕西省重点研发计划项目(S2018-YF-ZDGY-0300,2019ZDLGY15-04-02,2019GY-059)

作者简介:李 立(1985-),男,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:lili@chd.edu.cn。

通讯作者:徐志刚(1979-),男,湖北鄂州人,教授,工学博士,E-mail:xuzhigang@chd.edu.cn。

different connecting functions coexist in the road network. Dynamics of multiple surrounding vehicles and lane configuration are rarely considered in ICV's path planning. This is likely to be addressed by integrating the existing path planning algorithms with microscopic traffic flow models. The issues of human-machine cooperation and task transfer in ICV have recently become hot topics of research. These issues include lane changing and turning maneuver planning in urban arterial roads, maneuver guidance of ICV for non-connecting vehicle and others. There is academic consensus that the behavior of the driver in an ICV should be considered in trajectory planning. However, there is limited application of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure connecting information. We propose that applying feedback-iteration to coordinate ICV's path and maneuver planning as well as its motion planning and trajectory tracking control could help in globally optimized motion planning and vehicle control. Furthermore, formulating a model for ICV's motion planning on a theoretical foundation that is appropriate for the specific motion-planning task could not only take advantage of the merits of the theory but also increase flexibility and adaptability of the motion planning algorithms.

Key words: traffic engineering; intelligent connected vehicle; review; route planning; path planning; maneuver planning; trajectory planning

0 引言

智能网联汽车(Intelligent Connected Vehicle, ICV)是具有无线信息交互功能的智能汽车^[1],其在智能交通领域的发展最为迅猛。ICV在提高行车安全性、基础设施利用率和驾乘舒适性等方面具有巨大的潜力,使得相关的环境感知、网联通信、运动控制和系统优化等领域成为近年来的研究热点。世界各地已经建立多个ICV性能仿真和现场测试基地^[2-5]。运动规划模块是ICV车载系统的核心组成部分^[6],此模块通过接收和处理自身感知和网联通信信息,安全、合理、高效地为车辆规划从出行起点至终点的运动策略,并将规划结果输出至车辆运动控制模块,进而交由执行机构贯彻实施。

ICV运动规划机制取决于其“智能”和“网联”能力。一方面,ICV通过融合多种车载传感器信息充分感知行车环境,并基于此优化其运动模式,从而在各类行车场景中实现“自主智能”运动。另一方面,ICV借助车-车或车-路通信网络,与其他ICV及智能路侧设施共享环境感知和行驶决策信息,采用协同决策机制实现“网联智能”运行。综合考虑美国机动车工程师学会(SAE)的定义和中国道路交通条件,通常将ICV划分为5个“智能化”等级和3个“网联化”等级。“智能化”等级取决于车载自动驾驶模块和驾驶人的任务分工比例,智能化等级越低,驾驶人参与ICV运动规划决策的程度越深;“网联化”等级取决于二者所接收的外源交通感知信息的丰富

程度,网联化等级越低,所获取的信息越少。

业界普遍认为ICV将以“智能化+网联化”协同推进的态势发展,然而在ICV市场占有率逐渐提升的过程中,将会出现不同智能网联程度的ICV在道路上混合行驶的情况。这种环境下的ICV运动规划结果与本车和周边车辆中驾驶人的决策特性密切相关^[7-8]:一方面,驾驶人与自动驾驶模块分担不同比例的运动规划任务,驾驶人决策会影响整体规划结果;另一方面,ICV的网联功能决定了二者所获取网联信息的种类和丰度,信息呈现方式对驾驶人的影响也会左右车辆运动规划结果。因此,当不同智能网联等级ICV混合行驶时,ICV将面对“规划者类型+规划任务类型+规划信息类型”多重混杂的决策环境,使得解决此类条件下的ICV运动规划问题具有很强的现实意义和理论价值,这也是相关研究的热点和难点之一。

从ICV理论和技术发展伊始,学者们就开始研究各类型ICV混杂行驶情况下的车辆运动规划与控制问题,以及其中驾驶人所扮演的角色^[9]。近年来,随着ICV技术实用化进程加速,世界各汽车研发和生产大国的政府、学术界和工业界愈发认识到此问题的重要性,并将其确立为ICV理论和技术重点攻关领域。以中国为例,《国家自然科学基金“十三五”发展规划》优先发展方向包括“面向未来智能车的行驶优化与安全控制”的研究内容;《“十三五”交通领域科技创新专项规划》提出需要“解析互联信息环境下驾驶行为生成与演变机理、网联/非网

联混行状态下车-车耦合机理;揭示车路协同环境下人车路耦合机理……突破面向自主/人工车辆混行等交通场景下的新一代车辆协同安全和交通协同控制关键技术,建成车联网环境下驾驶行为与交通流一体化仿真系统”。目前,已有国内外学者针对此领域开展研究。李力等^[10]通过回顾驾驶人刺激-反应过程、决策-动作过程的建模方法和应用成果,总结了环境认知与驾驶人认知、驾驶人行为评估与面向驾驶人的控制之间的联系,提出“认知车”研究框架,此框架指明了人在 ICV 控制体系中的作用,强调了将认知科学和控制理论结合应用于 ICV 运动规划与控制系统中的必要性。然而,有关 ICV 运动规划方法研究中,普遍存在分析场景有限、假设过于理想等问题,也较少考虑驾驶人因素对运动规划结果的影响。

为了厘清 ICV 运动规划领域的研究现状,本文将从“自主智能”和“网联智能”2 个角度回顾 ICV “路径规划”、“路线规划”、“动作规划”和“轨迹规划”等方面的研究成果,提出有待完善之处,指出现实行车条件和驾驶人因素对 ICV 实施运动规划提出的挑战,并预测此领域研究未来的发展趋势。

1 运动路径规划

根据时空尺度和目标,ICV 运动规划任务自顶向下可细分为 4 级子任务^[11]:①长期运动路径(Route)规划;②中期运动路线(Path)规划;③短期运动动作(Maneuver)规划;④即时的运动轨迹(Trajectory)规划。图 1 展示了城市路网环境下各级子规划任务的工作空间和衔接关系。本节及后续章节将按照子任务分工回顾和评述现有研究。

车辆运动路径由道路网络中多个连续有限长度的路段构成,因此 ICV 运动路径规划是以高效、快捷地到达出行终点为目标,以在多个路网转向节点处选择行车路径为手段的运动规划决策。以图 1(a)所示城市路网为例,ICV 需要在节点 A 处选择通向节点 B 的“路径 1”或“路径 2”,每条路径均包含 2 个路段。路径规划问题的研究历史悠久,并且随着出行需求、出行方式、出行者特征和交通管制措施等不断推陈出新,时至今日此领域的研究仍然蓬勃发展。近年来,精细化出行数据和高性能模型求解方法^[12]不断涌现,使得开展大规模路网上的实时行车路径规划变为现实,谷歌、百度和高德均推出了具备此类功能的地图导航产品,并提供程序二次开发接口。这些技术积累为未来在车辆网联环境中进行 ICV

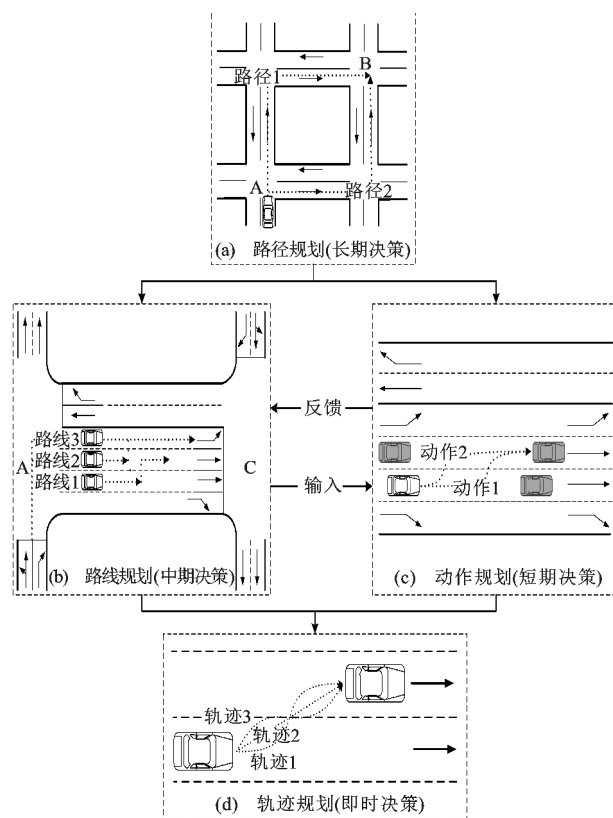


图 1 ICV 运动规划子任务

Fig. 1 Subtasks of ICV's Motion Planning

运动路径规划奠定了良好的基础。以图 2 所示商用车路径规划问题^[13]为例,车辆网联系统可快速汇集和更新物流供需状态,拓展现有面向实际应用的研究范畴,所获取的丰富实时信息也会改变现有路径规划问题的建模和求解方法。

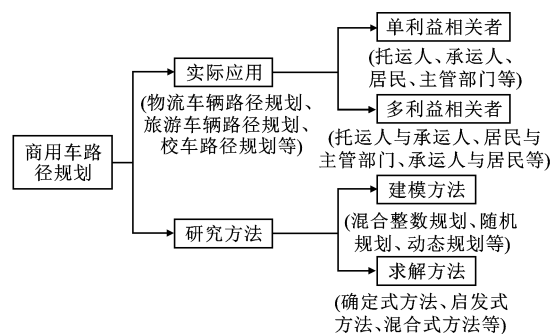


图 2 商用车路径规划问题研究分类^[13]

Fig. 2 Research Categories of Commercial Vehicle Routing Problem^[13]

与传统人工驾驶车辆相比,ICV 执行运动路径规划任务时能够获取大范围路网交通状态数据,而其对车辆自主智能的要求低于其他子任务。表 1 总结了近年来部分基于车-车或车-路网联信息的 ICV 运动路径规划研究,可见实现各类规划目标需要多类型网联信息的支撑。吴黎兵等^[17]提出了一种考

表 1 近期 ICV 运动路径规划的研究概况

Table 1 Summary of Recent Researches of Route Planning of ICV

文献	规划目标	网联信息来源
[14]	公交优先通行	断面交通流检测器、交通信号配时
[15]	规避拥堵路段	路网中的 ICV
[16]	增加路网空间使用效率、减少车辆行驶时间	断面交通流检测器、路网中的 ICV
[17]	减少车辆行驶时间	交通信号配时、路网中的 ICV
[18]	满足物流需求、增加可再生能源使用	物流中心、路网中的 ICV

虑 ICV 选路决策对相关道路未来通行状态影响的多 ICV 协同路径规划算法,此算法能够提高路网中 ICV 的选路协同性,降低道路上的滞留车辆数,减少车辆整体行驶时间开销。另外,基于纯电动货运 ICV 可获得路网交通状态、物流需求和充电设备状态信息的假设。Yu 等^[18]在二次约束混合整数线性规划的框架下对 ICV 物流配送和可再生能源充电规划问题进行建模,并设计了一种分布式模型求解算法,仿真结果显示此算法能够在大幅降低运算时间的情况下获得同时满足 ICV 快捷运输和及时充电需求的近似最优解。

现有研究多假设路网中行驶的均为能接收指路信息的 ICV,较少考虑不具备网联功能或网联程度较低的车辆对 ICV 路径选择的影响。当 ICV 只能获取部分车辆的空间位置和行驶状态信息时,其路径规划问题将变得较为复杂。Bagloee 等^[19]将 ICV 与非网联车辆混合行驶条件下的路径规划问题抽象为非线性互补问题,考虑了道路通行能力限制、弹性出行需求、多等级非对称行程时间等现实因素,构建了 ICV 追求系统最优、非网联车辆追求用户均衡的多类型车辆路径规划模型,并设计了合理的模型求解方法。其研究发现,路网规模增大后,模型求解难度和计算资源消耗会急剧上升。然而,现实中网联水平各异的 ICV 在路网中混合行驶是 ICV 普及过程中难以逾越的阶段,因此有必要在此方向开展持续深入的研究。

事实上,包括车辆网联技术在内的新一代信息技术不仅影响车辆运动路径规划,而且为交通出行的诸多环节带来深刻变革。文献^[20]指出传统交通网络均衡理论中有关出行个体理性且自利的假设与近年来行为经济学研究成果所显示的个体非理性且彼此合作的现实存在矛盾,进而从出行模式、路径选择、出发时间等角度,使用博弈论的研究框架分析了

ICV 技术在促进出行者相互合作、改善路网交通拥堵方面的潜力。此外该研究还指出,ICV 技术的普及和应用能从根本上解决出行者之间的信息不对称问题,从而改变传统的交通研究范式;更重要的是,此类信息的溢出效应将改变人们对于出行目的和方式的认知,从而深刻影响其工作和生活方式。已有研究还探讨了 ICV 对私人汽车保有量和停车需求管理的影响^[21-22],以及人们从私人驾驶汽车转为使用共享 ICV 的意愿^[23]等广泛议题。由此可以预见,ICV 技术对出行需求和行为的影响评估将是交通领域未来的研究热点之一。

2 运动路线规划

完成运动路径决策后,ICV 需要根据所选路段的几何设计、车道设置等条件确定目标行驶车道和障碍物绕避方式,本文将此类决策任务定义为运动路线规划。以图 1(b)为例,路线规划起点和终点分别为路段上游和下游交叉口出口道中某条车道的停车线,规划空间涵盖路段上所有直行及转向车道,可选路线集的规模取决于单幅道路的边界、几何线形、上下游交叉口车道布设、车辆行驶规则等因素。

不少 ICV 路线规划算法借鉴了移动机器人导航领域的研究成果,并根据各类行车环境中的车辆和交通特性进行改善^[24],其中的典型算法包括路线图法、网格占有法、网格状态法、车道线图法、状态空间采样法和数值优化法等^[11,25],部分算法特点如表 2 所示。由表 2 可知,这些算法可根据具体应用场景搭配使用,快速生成复杂道路几何和车道设置条件下绕避多重静态障碍物的运动路线。近年来迅速发展的高精度地图^[26]、车载传感和计算技术^[27]有助于提升上述算法的性能。然而,这些算法较少考虑周边移动物体的影响和车辆间协作关系^[25],此问题有望在算法中引入微观交通流模型得到改善。Evestedt 等^[28-29]基于公路入口匝道和交叉口处采集的车辆轨迹数据,研究了 ICV 运动路线规划方法,其规划机制如图 3 所示。由图 3 可见:一方面,根据道路基础数据和 ICV 定位信息,采用滚动时域法(Receding Horizon Approach)生成绕避静态障碍物的运动路线簇;另一方面,根据道路基础数据和周边车辆历史运动轨迹,将智能驾驶跟驰模型拓展为考虑周边车辆随机扰动的概率跟驰模型,使用其预测周边车辆运动轨迹;最后,结合二者构建预测 ICV 未来运动轨迹费用函数的概率密度模型,通过综合评价驾驶舒适性和碰撞风险为 ICV 选择运动路线。

表2 典型路线规划算法特点^[7]Table 2 Features of Typical Path Planning Algorithms^[7]

算法类型	优势	劣势
路线图法	全空间搜索、保持与障碍物的最大距离	适用于静态环境、可能输出不连续边
网格占有法	搜索空间离散化、计算资源消耗小	难以处理动态车辆、不善于绕避障碍物
网格状态法	计算资源消耗小、预先计算局部路线	难以处理曲线路段、不善处理躲避动作、移动方式受限
车道线图法	车道级的连续搜索空间	计算资源消耗大、移动方式受限

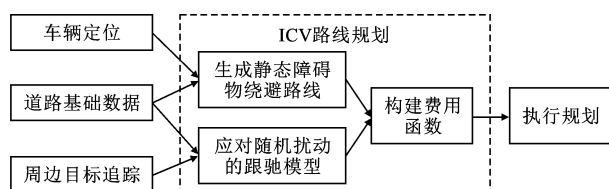


图3 文献[29]中的ICV路线规划机制

Fig. 3 Mechanism of ICV Path Planning in Reference [29]

此研究将微观交通流模型扩展为周边车辆运动状态预测模型,将其与既有路线规划算法相融合,提升了算法的动态响应特性和模拟车辆协同驾驶的能力。这种组合建模方法为改进现有典型路线规划算法提供了新的思路。

需要指出的是,过往研究已证实驾驶人自身具备在多车道路段上规划运动路线的能力。Wei等^[30]提出驾驶人规划车道级运动路线时会权衡出行目标和当前周边交通状态,基于此假设构建了整合路径选择模型、跟驰模型和换道模型的城市连续路段行驶路线规划算法。Sheu^[31]则设计了面向多车道路段的事点绕避路线规划方法。Choudhury等^[32]发现,不同驾驶人所规划路线的合理性和一致性与其驾驶经验、理性程度等个体属性密切相关。由此可以想象,当驾驶人参与ICV运动路线规划时,其决策行为的异质性(Heterogeneity)会增加ICV行车路线规划结果的随机性,从而提高周边ICV规划运动路线的难度。

现有研究较少讨论ICV如何在多车道路段上使用车辆网联信息规划运动路线,但是现实中存在此类需求。Ma等^[33]利用城市快速路出口匝道交通流数据建立了车道交通流失效(Traffic Breakdown)预测模型,发现此现象的出现概率与车道利用率(Lane Utilization)变化密切相关,内在原因是各条车道的流量分布不均衡会导致出口匝道处车流离散率下降,从而引发交通流失效现象。这种多车道流量分布不均是由驾驶人对特定车道的偏好引起的。

Duret等^[34]的研究表明,对特定车道采用限入管制和可变限速等交通控制手段,可在一定程度上改善车流分布失衡的情况,降低交通流失效现象的发生概率,提高路段通行能力。未来车辆网联技术普及应用后,多个ICV可以通过信息交互协同调整各自的运动路线,实现多车道流量分布均衡,有效防止交通流失效等现象的出现。需要指出的是,调节车道流量分布是通过ICV换道实现的,为了减少换道动作对交通流稳定性的负面影响,ICV应尽量采用协同换道策略(Cooperative Lane Change Strategy),而ICV的动作规划模块将负责执行此任务。

3 运动动作规划

在确定运动路线后,ICV需要在预测周边车辆和行驶环境状态变化的基础上规划未来局部时空范围内的运动动作,本文将此类决策任务定义为运动动作规划,规划任务包括高速公路及城市快速路匝道处驶入驶出、城市道路交叉口内部转弯、路段上跟驰^[35]、换道^[36]或超车^[37]等动作。ICV运动动作规划算法主要基于自动控制理论和微观交通流理论开发,前者通常以降低车辆碰撞风险为规划目标^[38],后者的应用范围更加多样,包括提升道路通行能力、维持交通流稳定性等^[39]。动作规划的参与者数量较少,通常以单车道或相邻两车道为规划空间,对ICV局部环境感知能力的要求高于路线规划任务。

车辆网联技术现已用于ICV运动动作规划的理论研究和工程实践中,研究内容包括ICV运动动作宏观影响分析及微观运动动作策略生成,见表3^[40-49]。由表3可见:宏观研究通常采用交通仿真手段评价ICV技术在优化交通流平顺性、行程时间可靠性、交叉口通行能力、交通排放等方面的潜力;微观研究多使用车-路或车-车联网信息优化ICV跟驰或换道动作,这方面研究已开展较长时间,并已有多款基于车辆网联技术的辅助驾驶系统面世,如表4所示^[50]。由表4可知,这些系统能够利用车-车或车-路通信技术,完成跟驰、换道、车辆编队与解编、车速控制等ICV运动规划任务。

以车辆网联技术在ICV换道动作规划中的应用为例,此技术可组织换道ICV与邻近跟驰ICV协作完成换道动作^[51-52]。Ntousakis等^[49]提出一种基于有限时域最优控制(Finite-horizon Optimal Control)理念的ICV换道动作规划方法,根据驾驶人主观偏好为保证驾驶安全、减少交通流扰动、减少燃油消耗、提高驾驶舒适性等多个目标赋予权重系数,并

表 3 ICV 运动动作规划近期研究概况
Table 3 Summary of Recent Researches of
ICV Maneuver Planning

类型	文献	研究目标	主要影响因素
宏观研究	[40]	交通流稳定性分析	ICV 市场渗透率
	[41]		动作反应时间
	[42]		车-车通信方式
	[43]	行程时间可靠性分析	ICV 专用车道
	[44]	交叉口通行能力优化	ICV 控制策略
	[45]	交叉口车辆排放	ICV 与信号协调控制
微观研究	[46]	电动车电能优化策略	侧向间距、路侧通信设施
	[47]	交叉口车流平顺行驶方法	车道交通流的离散状态
	[48]	车队碰撞风险分析	ICV 渗透率
	[49]	车辆协同换道方法	驾驶人车辆操控偏好

表 4 常见辅助驾驶系统^[50]
Table 4 Common Driving Assistance System^[50]

名称	功能				网联技术		
	跟驰	换道	编队	车速控制	V2V	V2I	V2X
协作自适应巡航控制	✓		✓		✓		
协作跟驰和汇入	✓	✓	✓		✓		✓
协作跟驰		✓			✓	✓	
协作可变限速系统				✓		✓	
集成全速度区间速度辅助系统	✓			✓	✓		✓
智能车速自适应				✓		✓	
车辆编队系统			✓		✓		✓

给出此规划问题的解析解。Wang 等^[53]提出了一种针对快速路上匝道区域内的 ICV 协同换道规划算法,针对单车和多车汇入等需求设计了基于规则的

行车动作控制算法,此算法能够保证单车汇入对主线交通的影响小于多车汇入。Talebpour 等^[54]将网联程度各异的 ICV 协作换道问题抽象为非零和非协作博弈(Non-zero-sum Non-cooperative Game)问题,为各类 ICV 设计了动作规划算法,并使用高精度车辆轨迹数据标定和验证模型。除了上述以换道车辆为中心的运动规划算法外,还有一类以降低换道车辆对目标车道跟驰 ICV 影响为规划目标的算法。Dou 等^[55]提出一种应对换道车辆插入的 ICV 控制算法,而 Arem 等^[56]验证了应用协作自适应巡航控制系统的主线车队对换道车辆插入扰动的削减作用。

值得注意的是,现有研究通常假设 ICV 能够依赖环境感知和智能决策能力高效合理地完成运动动作自主规划,然而 Koesdwiady 等^[57]指出应关注当 ICV 智能化程度有限时,车中驾驶人在规划任务分配、执行和交接过程中的角色,充分了解驾驶人的行为特性对规划结果的影响。驾驶人在 ICV 中通过人机交互协同控制系统监控行车环境与车辆状态、接收辅助决策信息、发布车辆控制指令和执行车辆操控任务^[58]。图 4 展示了此类系统的一种结构,包括车人间信息流动路径、人车交互与协同控制逻辑。由图 4 可见,驾驶人个体属性、驾驶目标、生理心理状态等因素会在多个环节影响 ICV 运动动作规划和执行。Blommer 等^[59]通过驾驶模拟器试验分析了不同智能化程度 ICV 中的驾驶人面对碰撞风险时的行为,发现驾驶人异质性会影响其在紧急情况下的反应时间和车辆控制权接管。

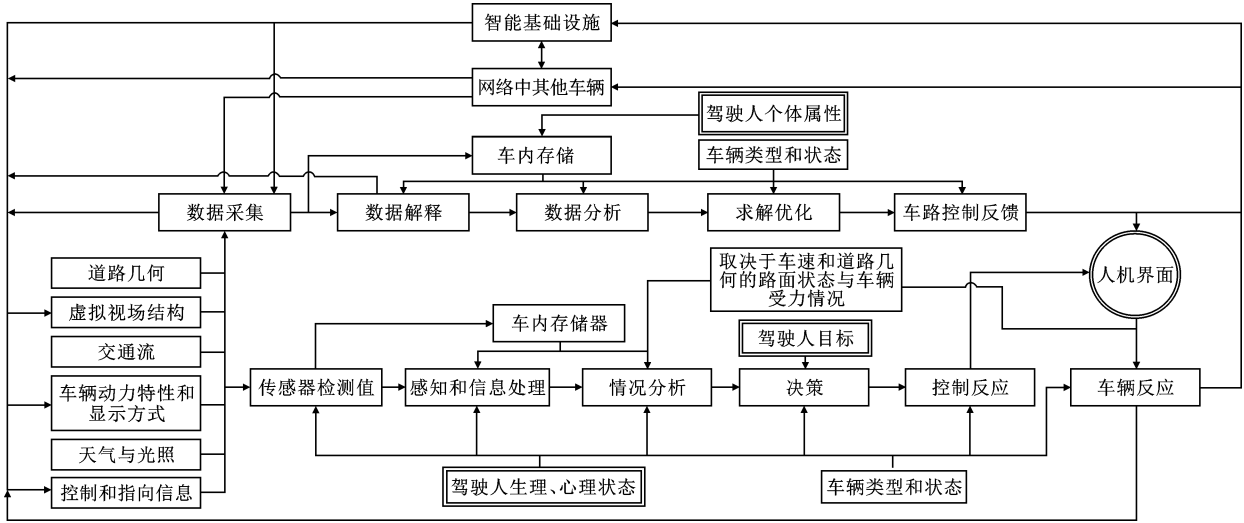


图 4 ICV 中人机交互协同系统结构^[52]

Fig. 4 Architecture of Human Vehicle Interaction and Cooperation System of ICV^[52]

更重要的是,驾驶人行为对单个 ICV 动作规划结果的影响可能削弱周边局部交通流稳定性。如图

5 所示^[60],驾驶人在车辆间距和车速选择上的差异会直接影响其跟驰及换道动作,进而导致道路通行

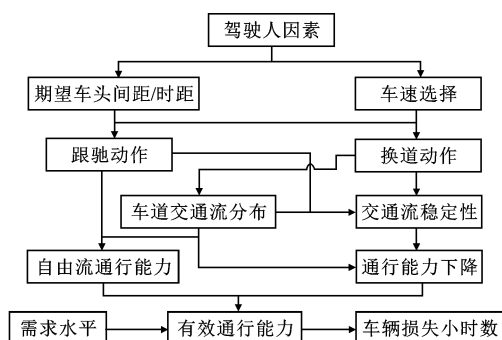


图5 驾驶人因素、ICV 运动动作和交通流状态之间的关系^[60]

Fig. 5 Relationship Among Human Factor, ICV Motion Maneuver and Traffic Flow State^[60]

能力下降,此影响可以通过在微观交通流模型中嵌入驾驶人因素得到检验和评估。表5为微观交通流模型中常见的驾驶人因素。Mahamassani^[63]研究了混杂有不同智能化程度车辆的交通流特征,解释了ICV有助于提升道路通行能力、增强交通流稳定性的原因,并提出驾驶人决策随机性和ICV渗透率等因素会减弱ICV技术对行车安全性和道路通行能力的整体提升作用。上述研究表明,为不同智能化水平ICV设计运动动作规划算法时,应充分考虑本车和周边车辆中驾驶人行为特性对规划结果的影响。

表5 微观交通流模型中的驾驶人因素^[61-62]

Table 5 Human Factors of Microscopic Traffic Flow Model^[61-62]

影响因素	内容
社会经济属性	性别、年龄、收入、教育程度、家庭结构
感知能力	最小车速或间距变化
估计误差	车速或间距估计值与真实值的误差
注意力	反应时间、分神、疲劳
预期能力	空间预期(周边多辆车)、时间预期(未来多个时点)
环境敏感性	对交通控制和交通流状态变化的敏感度
非精准操控	车辆操控结果与预期的偏差
驾驶风格	攻击型或保守型
期望值	期望车速、期望间距、期望车头时距

车辆网联技术在运动动作规划领域的研究仍存在进一步发展的空间:①不同网联等级ICV的信息收集能力各异,因此车中自动驾驶模块和驾驶人所接收的辅助决策信息也有所区别,较少有研究关注这种获取信息不对称所导致的ICV动作规划差异对行车安全和通行效率的影响;②多数研究假设路段上所有车辆均具有网联通信和协同驾驶功能,较少研究如何通过控制网联车辆的运动动作,引导非

网联车辆安全高效地达成其行驶目的;③现有ICV换道动作规划研究多数是将研究场景设定为高速公路或城市快速路干线及匝道,较少关注城市道路中段或交叉口进口道上的协作换道需求;④少有学者研究ICV的交叉口转弯汇入行为,事实上转弯车辆对汇入目标车道交通流的扰动比换道车辆更大,可能伴随更高的行车风险,应用车辆网联技术有助于减少转弯汇入车辆引发的车辆碰撞风险。

4 运动轨迹规划

ICV运动轨迹规划指通过对小范围内动静态障碍物的精确、可靠、高效感知,结合车辆机械动力性能、驾驶人操控能力等因素,为执行特定运动动作的ICV提供可供跟踪行驶的运动轨迹。与运动动作规划不同,运动轨迹规划较少以达成车道整体行车安全和通行能力最优为目标,而是更加注重保证车内人员的驾乘安全和舒适,因此在轨迹规划算法中考虑车内驾驶人应激方式、人机交互流等因素已经成为此领域研究者的共识^[64]。Li等^[65]将道路几何曲线变化情况下的ICV轨迹规划抽象为边界值问题(Boundary Value Problem),其提出的算法可生成一组光滑、运动可行的轨迹簇(图6中红色轨迹),然后设计速度控制律,在所生成轨迹的各点上指定一个最优速度值,以兼顾车辆行驶安全性和舒适性为目标在备选轨迹中选取最优运动轨迹(图6中的蓝色轨迹)。

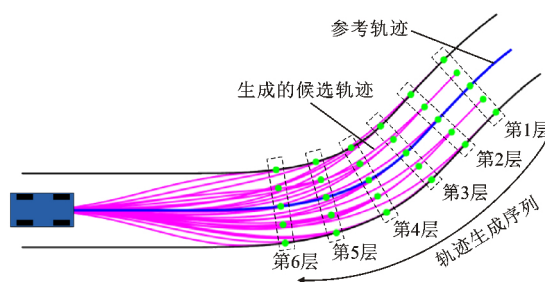


图6 空间轨迹规划结果^[65]

Fig. 6 Result of Spatial Trajectory Planning^[65]

在非完全自动驾驶ICV轨迹规划研究中,通常包含描述驾驶人行为逻辑和预测驾驶人行为趋势的模块,并将此模块输出作为ICV轨迹规划算法的输入信息。因此,驾驶人行为建模及预测的准确性直接影响ICV轨迹规划结果。表6总结了近年来部分跟驰、换道和转弯等场景中非完全自动驾驶ICV运动轨迹规划研究,以及其中考虑的驾驶人因素。随着车内环境感知技术的迅速发展,获取高精度驾驶人生理、心理、车辆操控动作等监测数据的难度显

表 6 考虑驾驶人因素的 ICV 运动轨迹规划的近期研究概况

Table 6 Summary of Recent Researches of Trajectory Planning of ICV Considering the Effect of Human Factors

文献	场景	研究目标	所考虑驾驶人因素
[66]	跟驰	跟驰 ICV 前向碰撞预警	驾驶行为波动性、驾驶人个体差异
[67]		ICV 碰撞预警信息提示阈值	驾驶人对预警信息的接受度
[68]	换道	ICV 安全换道轨迹生成技术	不同驾驶风格(缓慢且谨慎、急促且冒进)
[69]		推荐 ICV 换道轨迹的辅助跟踪	驾驶人特性、车辆状态、行车环境
[70]	转弯	ICV 转弯时的车速规划行为	用行车监测数据间接反映驾驶人操控特性

著降低,具备了使用此类数据对驾驶人行为精准建模的条件。严利鑫等^[71]招募了不同类型驾驶人使用具备自动驾驶功能的车辆开展现场试验,采用血流量脉冲和皮肤电导 2 个指标反映驾驶人心理状态,结合车内传感器采集的车速均值、加速度标准差、前轮转角标准差、车道偏离量等车辆运动和机械指标,对驾驶人行为危险态势进行分类,分析了其不同 ICV 辅助驾驶功能间的切换模式。Wang 等^[72]提出了一种融合高斯混合模型(Gaussian Mixture Model)和隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model)的驾驶人刹车意图预测方法,并以刹车意图、不刹车意图和刹车动作预测准确性为指标,展示了该方法相对于传统方法的优越性。

现有研究经常将驾驶人行为趋势预测纳入模型预测控制(Model Predictive Control)方法^[73]的框架中,对 ICV 轨迹规划机制进行建模,模型输出符合驾乘人员生理、心理和行为特性的运动轨迹,供驾驶人或车辆自主跟踪行驶,从而提升 ICV 行驶安全性、稳定性、舒适性和经济性。Wang 等^[69]设计了一个兼具自适应巡航和前向碰撞预警功能的双层 ICV 纵向运动控制器,上层控制器由驾驶人期望控制量预测算法和碰撞预警算法构成,下层控制器用于催动车辆执行机构实施上层控制器的决策。Qu 等^[74]基于随机模型预测控制的框架开发了一种 ICV 辅助转向控制算法,以缓解轮胎与道路交互作用引发的 ICV 转向轨迹偏差和驾驶人轨迹跟踪困难问题。

目前车-车或车-路网联信息在 ICV 轨迹规划中的应用相对较少。Zulkefli 等^[75]以车辆网联信息为

Gipps 跟驰模型和元胞传输模型的输入变量来预测周边车辆运动状态,并以此为基础提出混合动力汽车传动系统的性能优化算法,仿真结果显示,网联信息能够帮助车辆在不同场景下将燃油经济性提高 7%~10%。Luo 等^[76]以可用换道时间和空间为约束,提出一种以满足行驶安全、舒适性和通行效率为目标的动态换道轨迹规划和跟踪算法,此算法能够输出正常换道、紧急换道和换道受阻后驶回原车道的 ICV 轨迹,同时提出基于滑模控制理论的轨迹跟踪算法。事实上,车辆网联环境有助于 ICV 采集到车载传感器难以获取的信息,使得此领域研究具有广阔的发展空间。例如,ICV 规划运动轨迹时需要考虑车辆机械和传动系统性能,而这些硬件的工作表现与道路基础设施条件密切相关。现有车载传感器难以实时获取摩擦因数、平整度、干燥度等路面状态,若路侧监测设备能够采集此类信息并传送给 ICV,则能有效分担车载传感器的工作负荷,所释放的车载传感和计算资源可用于其他任务。

5 展 望

在复杂的行车环境中实现自主运动规划是 ICV 理论和技术研究的核心目标之一。本文从运动路径、运动路线、运动动作和运动轨迹等 4 个角度回顾了近年来 ICV 运动规划领域的研究成果,并分析了驾驶人因素的影响。此领域可从以下几个方面进一步开展后续研究:

(1)在技术背景上,现有研究通常假设 ICV 具有较高的智能网联水平,然而根据目前的技术发展趋势和市场普及水平,这种预期短期内难以实现,因此需要重视不同智能网联等级 ICV 混杂行驶环境中的 ICV 运动规划方法研究,并充分考虑单辆 ICV 中驾驶人对车辆运动规划结果的影响,以及多辆 ICV 中驾驶人决策的交互影响。

(2)在研究场景上,多数研究关注 ICV 在高速公路以及城市道路单车道或双车道上的行车场景,鲜有文献研究 ICV 在多车道环境中的行驶策略,也少见面向交叉口转向-直行共用车道、转向展宽车道和 U 形掉头车道等特定车道的 ICV 运动规划研究。后续进一步完善多种车道布设情况下的 ICV 运动规划研究对确保行车安全和效率具有十分重要的意义。另外,现有车-车或车-路通信协议、交叉口全自动控制等 ICV 支撑技术的研究场景通常驾驶 ICV 处于跟驰状态,少有研究关注这些技术如何在由跟

驰、换道、转弯等动作序列组成的 ICV 行驶全过程中发挥作用,有关不同类型运动动作自主切换策略的研究也亟待加强。

(3)在算法流程上,采用反馈-迭代的方式对 ICV 运动路线和动作进行协同规划有助于获得全局最优的运动规划结果(图 1)。在 ICV 运动规划 4 级子任务中,运动路径规划结果具有不可逆性,这是因为在选定目标路段后 ICV 很难改变行驶方向。另外,由于 ICV 轨迹规划的主要目标是确保车辆顺利完成运动动作,避免出现动作未完成的情况^[77],因此可认为 ICV 轨迹规划结果同样不可逆。与上述两类运动规划相比,在多车道路段上 ICV 通常有多条可行路线,其中最短路线的可用性取决于未来较短时期内车辆周边行驶条件,而 ICV 运动动作规划模块负责进行上述判断。以图 1(b)中计划在下路交叉口 C 左转的 ICV 为例,如果在上游交叉口 A 执行转弯动作时选择最内侧车道行驶(即图中的路线 3),则无需换道即可驶入交叉口 C 的左转车道。但是若 ICV 转弯时路线 3 不可用,则只能退而选择路线 2 或 1 行驶,后续择机换入左转车道。如果所有左转车辆的路线规划和动作规划之间均具有反馈-迭代机制,有望通过协调其行驶路线和换道时机,减少因抢占换道位置引发的行车安全风险和交通流紊乱。ICV 具备比传统车辆更强的信息获取和计算能力,有能力开展此类协同规划。

此外,为了保证 ICV 按照规划的行车轨迹平顺行驶,有必要在其运动规划模块和轨迹跟踪控制模块之间建立反馈-迭代机制。Li 等^[65]提出了一种 ICV 集成局部轨迹规划与跟踪控制(Integrated Local Trajectory Planning and Tracking Control, ILTPTC)模型,其概念框架如图 7 所示。处于上位的运动规划模块生成最优行车和轨迹;下位的轨迹跟踪模块中包含一种结合前馈和反馈功能的跟随控制器,将跟踪过程中获取的信息反馈给运动规划模块,以消减外部干扰和模型不确定性。仿真和实地测试结果均显示,此算法能够保证 ICV 在多种典型行车场景中安全舒适行驶。受限于试验条件,此研究在运动规划中并未使用车辆网联信息,后续研究可基于上述框架,进一步构建适用多辆 ICV 的协同运动规划和轨迹跟踪控制模型。

(4)在应用理论上,目前多数 ICV 运动规划算法从自动控制理论发展而来,这是因为在能够获取准确车辆模型和精确环境感知信息的前提下,基于

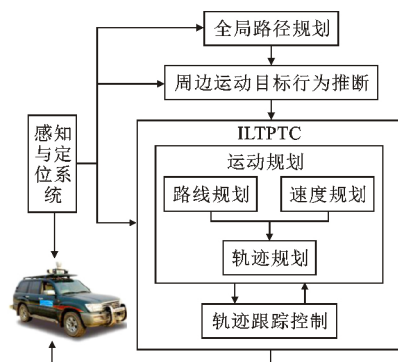


图 7 基于 ILTPTC 的自动驾驶车辆导航概念框架^[65]

Fig. 7 Schematic Navigation Framework for Autonomous Ground Vehicles by ILTPTC^[65]

此理论开发的运动规划模型能够较好地与车辆底层软硬件融合,对车辆机械传动和运动控制系统进行敏捷精确的调节。然而,此类算法较难将复杂道路环境、交通环境、通信环境等因素纳入模型中,同时也不适用于 ICV 中长期行驶策略规划。后续研究可以一方面利用微观交通流模型可扩展性强、微观交通流仿真软件与其他类型仿真软件交互能力强的特点,以微观交通流仿真软件为基础搭建混合仿真平台,基于此研究路段和车道级的 ICV 运动路线和动作规划策略;另一方面,可以基于自动控制理论构建面向局部较小时空范围内车辆轨迹规划任务的模型,从而较好协调 ICV 运动规划各级子任务的分工、目标和执行。

(5)值得注意的是,近年来高性能计算技术的迅速发展提升了人工智能算法的工程实用性,有望为 ICV 运动规划与控制开辟新的理论和技术研究路径。遗传算法、人工神经网络算法等已应用于移动机器人运动规划技术中,有研究证明其能克服许多传统规划方法的不足^[78]。近年研究发现强化学习(Reinforcement Learning)算法具有更强的拟人运动规划能力和容错性^[79],而深度学习(Deep Learning)算法能够在无先验模式设定的情况下仅依赖观测数据预测行为趋势,综合二者优点的深度强化学习(Deep Reinforcement Learning)已被应用于移动机器人运动规划领域并取得良好效果。有研究者^[80]提出了一种基于长短时记忆(Long Short-term Memory)网络的运动轨迹生成算法,其能够通过观察周边任意数量的运动物体来规划下一个动作,并利用增强学习机制,使得机器人的绕避能力随周边运动物体数量增加而不断提升。

(6)与移动机器人相比,ICV 需要在更为复杂的

环境中依规高速行驶,因此ICV运动规划对算法安全性、可靠性和时效性要求更高。此要求的一种技术实现路径是使用动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Network)^[81]、多层感知神经网络(Multi-layer Perception Neural Network)^[82]等机器学习算法模仿实际行车场景中驾驶人的规划决策机制。此类算法性能很大程度上取决于所使用训练数据的全面性,若缺乏紧急行车场景下的驾驶数据,则可能导致ICV难以应对突发交通事件。Chen等^[83]提出一种平行运动规划(Parallel Motion Planning)框架,不仅采用虚实结合的行车场景数据训练融合卷积神经网络(Convolutional Neural Network)和长短时记忆网络的ICV运动规划模型,还采用变分自编码器(Variational Auto-encoder)和生成对抗网络(Generative Adversarial Network)创建紧急行车场景数据并将其用于模型训练,此方法可在一定程度上解决以往研究中存在的训练样本数据匮乏的问题。与前文所述的面向不同任务层级的ICV运动规划技术不同,现有基于新一代人工智能技术的ICV运动规划算法多采用端到端(End-to-end)的实现方案,因此对车载感知和计算能力要求较高。如果能融合这两类技术路线,则有望在保证ICV运动规划效能的情况下减少感知和运算负担,加速相关技术的发展和普及。

参考文献:

References:

- [1] 李志强,戴一凡,李升波,等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI Ke-qiang, DAI Yi-fan, LI Sheng-bo, et al. State-of-the-art and Technical Trends of Intelligent and Connected Vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8 (1): 1-14.
- [2] XU Z, WANG M, ZHANG F, et al. PaTAVTT: A Hardware-in-the-loop Scaled Platform for Testing Autonomous Vehicle Trajectory Tracking [J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017: 9203251.
- [3] LI L, HUANG W L, LIU Y, et al. Intelligence Testing for Autonomous Vehicles: A New Approach [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 1 (2): 158-166.
- [4] 柴琳果,蔡伯根,王化深,等. 车联网关键指标对车辆安全影响仿真测试方法[J]. 汽车工程, 2017, 39(11): 1316-1324.
CHAI Lin-guo, CAI Bo-gen, WANG Hua-shen, et al. A Simulation Scheme for Testing the Effects of Key Indicators of the Internet of Vehicles on Vehicle Safety [J]. Automotive Engineering, 2017, 39 (11): 1316-1324.
- [5] 马育林,徐友春,吴青. 车队协同驾驶混成控制研究现状与展望[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(1): 1-13.
MA Yu-lin, XU You-chun, WU Qing. A Review of Cooperative Driving for Vehicle-platoon Hybrid Control [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2014, 4 (1): 1-13.
- [6] GONZALEZ D, PEREZ J, MILANES V, et al. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (4): 1135-1145.
- [7] OHN-BAR E, TRIVEDI M M. Looking at Humans in the Age of Self-driving and Highly Automated Vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1 (1): 90-104.
- [8] FISHER D L, LOHRENZ M, MOORE D, et al. Humans and Intelligent Vehicles: The Hope, the Help, and the Harm [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1 (1): 56-67.
- [9] AKAMATSU M, GREEN P, BENGLER K. Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future [J]. International Journal of Vehicular Technology, 2013, 2013: 526180.
- [10] 李力,王飞跃,郑南宁. 认知车——结合认知科学和控制理论的新研究方向[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 137-142.
LI Li, WANG Fei-yue, ZHENG Nan-ning. Cognitive Vehicle: A New Research Direction Integrating Cognitive Science and Control Theory [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28 (2): 137-142.
- [11] KATRAKAZAS C, QUDDUS M, CHEN W H, et al. Real-time Motion Planning Methods for Autonomous On-road Driving: State-of-the-art and Future Research Directions [J]. Transportation Research Part C, 2015, 60: 416-442.
- [12] GENDREAU M, JABALI O, REI W. 50th Anniversary Invited Article-future Research Directions in Stochastic Vehicle Routing [J]. Transportation Science, 2016, 50 (4): 1163-1173.

- [13] KIM G, ONG Y S, CHEN K H, et al. City Vehicle Routing Problem (City VRP): A Review [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 (4): 1654-1666.
- [14] SKABARDONIS A, GEROLIMINIS N. Real-time Monitoring and Control on Signalized Arterials [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning & Operations, 2008, 12 (2): 64-74.
- [15] LEONTIADIS I, MARFIA G, MACK D, et al. On the Effectiveness of an Opportunistic Traffic Management System for Vehicular Networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12 (4): 1537-1548.
- [16] WANG M, SHAN H, LU R, et al. Real-time Path Planning Based on Hybrid-vanet-enhanced Transportation System [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (5): 1664-1678.
- [17] 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 Li-bing, FAN Jing, NIE Lei, et al. A Collaborative Routing Method with Internet of Vehicles for City Cars [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40 (7): 1600-1613.
- [18] YU J Q, LAM A Y S. Autonomous Vehicle Logistic System: Joint Routing and Charging Strategy [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19 (7): 2175-2187.
- [19] BAGLOEE S A, SARVI M, PATRIKSSON M, et al. A Mixed User-equilibrium and System-optimal Traffic Flow for Connected Vehicles Stated as a Complementarity Problem [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32 (7): 562-580.
- [20] KLEIN I, BEN-ELIA E. Emergence of Cooperation in Congested Road Networks Using ICT and Future and Emerging Technologies: A Game-based Review [J]. Transportation Research Part C, 2016, 72: 10-28.
- [21] ZHANG W, GUHATHAKURTA S, KHALIL E B. The Impact of Private Autonomous Vehicles on Vehicle Ownership and Unoccupied VMT Generation [J]. Transportation Research Part C, 2018, 90: 156-165.
- [22] LIU W. An Equilibrium Analysis of Commuter Parking in the Era of Autonomous Vehicles [J]. Transportation Research Part C, 2018, 92: 191-207.
- [23] KRUEGER R, RASHIDI T H, ROSE J M. Preferences for Shared Autonomous Vehicles [J]. Transportation Research Part C, 2016, 69: 343-355.
- [24] 成伟明, 唐振民, 赵春霞, 等. 移动机器人路径规划中的图方法应用综述[J]. 图学学报, 2008, 29(4): 6-14.
CHENG Wei-ming, TANG Zhen-min, ZHAO Chun-xia, et al. A Survey of Mobile Robots Path Planning Using Geometric Methods [J]. Journal of Graphics, 2008, 29 (4): 6-14.
- [25] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 1-197.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's Automotive Engineering Research Progress: 2017 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (6): 1-197.
- [26] BRESSON G, ALSAYED Z, YU L, et al. Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2 (3): 194-220.
- [27] MUKHTAR A, XIA L, TANG T B. Vehicle Detection Techniques for Collision Avoidance Systems: A Review [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 (5): 2318-2338.
- [28] EVESTEDT N, WARD E, FOLKESSON J, et al. Interaction Aware Trajectory Planning for Merge Scenarios in Congested Traffic Situations [C] // IEEE. International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2016: 465-472.
- [29] WARD E, EVESTEDT N, AXEHILL D, et al. Probabilistic Model for Interaction Aware Planning in Merge Scenarios [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2 (2): 133-146.
- [30] WEI H, LEE J, LI Q, et al. Observation-based Lane-vehicle Assignment Hierarchy Microscopic Simulation on Urban Street Network [J]. Transportation Research Record, 2000 (1710): 96-103.
- [31] SHEU J B. Microscopic Traffic Behaviour Modelling and Simulation for Lane-blocking Arterial Incidents [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2013, 9 (4): 335-357.
- [32] CHOUDHRUY C, BEN-AKIVA M. Modelling Driving Decisions: A Latent Plan Approach [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2011, 9 (6): 546-566.

- [33] MA D, NAKAMURA H, ASANO M. Lane-based Breakdown Identification at Diverge Sections for Breakdown Probability Modeling [J]. Transportation Research Record, 2013 (2395): 83-92.
- [34] DURET A, SOYOUNG A, CHRISTINE B. Lane Flow Distribution on a Three-lane Freeway: General Features and the Effects of Traffic Controls [J]. Transportation Research Part C, 2012, 24 (5): 157-167.
- [35] KESTING A, TREIBER M, SCHONHOF M, et al. Extending Adaptive Cruise Control to Adaptive Driving Strategies [J]. Transportation Research Record, 2007 (2000): 16-24.
- [36] NILSSON J, BRANNSTROM M, COELINGH E, et al. Lane Change Maneuvers for Automated Vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18 (5): 1087-1096.
- [37] 游峰,张荣辉,王海玮,等.基于纵向安全距离的超车安全预警模型[J].华南理工大学学报:自然科学版,2013,41(8):87-92.
YOU Feng, ZHANG Rong-hui, WANG Hai-wei, et al. Warning Model for Safety Analysis of Overtaking Behavior Based on Longitudinal Safety Spacing [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41 (8): 87-92.
- [38] FURDA A, VLACIC L. Enabling Safe Autonomous Driving in Real-world City Traffic Using Multiple Criteria Decision Making [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2011, 3 (1): 4-17.
- [39] 秦严严,王昊,王炜,等.自适应巡航控制车辆跟驰模型综述[J].交通运输工程学报,2017,17(3): 121-130.
QIN Yan-yan, WANG Hao, WANG Wei, et al. Review of Car-following Models of Adaptive Cruise Control [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17 (3): 121-130.
- [40] 秦严严,王昊,王炜,等.不同CACC渗透率条件下的混合交通流稳定性分析[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(4):63-69.
QIN Yan-yan, WANG Hao, WANG Wei, et al. Mixed Traffic Flow String Stability Analysis for Different CACC Penetration Ranges [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17 (4): 63-69.
- [41] 邱小平,马丽娜,周小霞,等.基于安全距离的手动——自动驾驶混合交通流研究[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(4):101-108.
QIU Xiao-ping, MA Li-na, ZHOU Xiao-xia, et al. The Mixed Traffic Flow of Manual-automated Driving Based on Safety Distance [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16 (4): 101-108.
- [42] ZHENG Y, LI S, WANG J, 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.
- [43] TALEBPOUR A, MAHMASSANI H S, EL FAR A. Investigating the Effects of Reserved Lanes for Autonomous Vehicles on Congestion and Travel Time Reliability [J]. Transportation Research Record, 2017 (2622): 1-12.
- [44] VINE S L, LIU X, ZHENG F, et al. Automated Cars: Queue Discharge at Signalized Intersections with 'Assured-clear-distance-ahead' Driving Strategies [J]. Transportation Research Part C, 2016, 62: 35-54.
- [45] ZHU F, UKKUSURI S V. Modeling the Proactive Driving Behavior of Connected Vehicles: A Cell-based Simulation Approach [J]. Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering, 2018, 33: 262-281.
- [46] LI Y, ZHANG L, ZHENG H, et al. Nonlane-discipline-based Car-following Model for Electric Vehicles in Transportation-cyber-physical Systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19 (1): 38-47.
- [47] AHMANE M, ABBAS-TURKI A, PERRONNET F, et al. Modeling and Controlling an Isolated Urban Intersection Based on Cooperative Vehicles [J]. Transportation Research Part C, 2013, 28 (3): 44-62.
- [48] TIAN D, ZHOU J, WANG Y, et al. Modeling Chain Collisions in Vehicular Networks with Variable Penetration Rates [J]. Transportation Research Part C, 2016, 69: 36-59.
- [49] NTOUSAKIS I A, NIKOLOS I K, PAPAGEORGIOU M. Optimal Vehicle Trajectory Planning in the Context of Cooperative Merging on Highways [J]. Transportation Research Part C, 2016, 71: 464-488.

- [50] DIAKAKI C, PAPAGEORGIOU M, PAPAMICHAIL I, et al. Overview and Analysis of Vehicle Automation and Communication Systems from a Motorway Traffic Management Perspective [J]. *Transportation Research Part A*, 2015, 75: 147-165.
- [51] DEY K C, YAN L, WANG X, et al. A Review of Communication, Driver Characteristics, and Controls Aspects of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17 (2): 491-509.
- [52] BEVLY D, CAO X, GORDON M, et al. Lane Change and Merge Maneuvers for Connected and Automated Vehicles: A Survey [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1 (1): 105-120.
- [53] WANG Y, WENJUAN E, TANG W, et al. Automated On-ramp Merging Control Algorithm Based on Internet-connected Vehicles [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2013, 7 (4): 371-379.
- [54] TALEBPOUR A, MAHAMASSANI H S, HAMDAR S H. Modeling Lane-changing Behavior in a Connected Environment: A Game Theory Approach [J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 59: 216-232.
- [55] DOU Y, NI D, WANG Z, et al. Strategic Car-following Gap Model Considering the Effect of Cut-ins from Adjacent Lanes [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2016, 10 (10): 658-665.
- [56] AREM B V, DRIEL C J G V, VISSER R. The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-flow Characteristics [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7 (4): 429-436.
- [57] KOESDWIADY A, SOUA R, KARRAY F, et al. Recent Trends in Driver Safety Monitoring Systems: State of the Art and Challenges [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66 (6): 4550-4563.
- [58] OLAVERRI-MONREAL C, JIZBA T. Human Factors in the Design of Human-machine Interaction: An Overview Emphasizing V2X Communication [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017, 1 (4): 302-313.
- [59] BLOMMER M, CURRY R, SWAMINATHAN R, et al. Driver Brake vs. Steer Response to Sudden Forward Collision Scenario in Manual and Automated Driving Modes [J]. *Transportation Research Part F*, 2017, 45: 93-101.
- [60] HOOGENDOORN R, AREM B V, HOOGENDOORN S. Automated Driving, Traffic Flow Efficiency, and Human Factors: Literature Review [J]. *Transportation Research Record*, 2014 (2422): 113-120.
- [61] SAIFUZZAMAN M, ZHENG Z. Incorporating Human-factors in Car-following Models: A Review of Recent Developments and Research Needs [J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 48: 379-403.
- [62] ZHENG Z. Recent Developments and Research Needs in Modeling Lane Changing [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 60 (1): 16-32.
- [63] MAHAMASSANI H S. 50th Anniversary Invited Article-autonomous Vehicles and Connected Vehicle Systems: Flow and Operations Considerations [J]. *Transportation Science*, 2016, 50 (4): 1140-1162.
- [64] 陈慧岩, 陈舒平, 龚建伟. 智能汽车横向控制方法研究综述 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(6): 1203-1214.
CHEN Hui-yan, CHEN Shu-ping, GONG Jian-wei. A Review on the Research of Lateral Control for Intelligent Vehicles [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38 (6): 1203-1214.
- [65] LI X, SUN Z, CAO D, et al. Development of a New Integrated Local Trajectory Planning and Tracking Control Framework for Autonomous Ground Vehicles [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 87: 118-137.
- [66] WANG J, YU C, LI S, et al. A Forward Collision Warning Algorithm with Adaptation to Driver Behaviors [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17 (4): 1157-1167.
- [67] FOPPA M, POND K K, JONES D B, et al. Statistical Behavior Modeling for Driver-adaptive Precrash Systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14 (4): 1764-1772.
- [68] XU G, LIU L, OU Y, et al. Dynamic Modeling of Driver Control Strategy of Lane-change Behavior and Trajectory Planning for Collision Prediction [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13 (3): 1138-1155.
- [69] WANG J, ZHANG G, WANG R, et al. A Gain-scheduling Driver Assistance Trajectory-following Algorithm Considering Different Driver Steering Characteristics [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18 (5): 1097-1108.

- [70] GENG X, LIANG H, XU H, et al. Human-driver Speed Profile Modeling for Autonomous Vehicle's Velocity Strategy on Curvy Paths [C] // IEEE. Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2016: 755-760.
- [71] 严利鑫, 黄珍, 吴超仲, 等. 基于危险态势识别的智能车驾驶模式选择[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2016, 44(8): 139-146.
YAN Li-xin, HUANG Zhen, WU Chao-zhong, et al. Driving Mode Selection of Intelligent Vehicles Based on Risky Situation Identification [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 44 (8): 139-146.
- [72] WANG W, XI J, ZHAO D. Learning and Inferring a Driver's Braking Action in Car-following Scenarios [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (5): 3887-3899.
- [73] HROVAT D, CAIRANO S D, TSENG H E, et al. The Development of Model Predictive Control in Automotive Industry: A Survey [C] // IEEE. International Conference on Control Applications. New York: IEEE, 2013, 295-302.
- [74] QU T, CHEN H, CAO D, et al. Switching-based Stochastic Model Predictive Control Approach for Modeling Driver Steering Skill [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 (1): 365-375.
- [75] ZULKEFLI M A M, ZHENG J, SUN Z, et al. Hybrid Powertrain Optimization with Trajectory Prediction Based on Inter-vehicle-communication and Vehicle-infrastructure-integration [J]. Transportation Research Part C, 2014, 45 (9): 41-63.
- [76] LUO Y, XIANG Y, CAO K, et al. A Dynamic Automated Lane Change Maneuver Based on Vehicle-to-vehicle Communication [J]. Transportation Research Part C, 2016, 62: 87-102.
- [77] ZHAO L, SUN J, ZHANG H M. Observations and Analysis of Multistep-approach Lane Changes at Expressway Merge Bottlenecks in Shanghai, China [J]. Transportation Research Record, 2013 (2395): 73-82.
- [78] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
ZHU Da-qi, YAN Ming-zhong. Survey on Technology of Mobile Robot Path Planning [J]. Control and Decision, 2010, 25 (7): 961-967.
- [79] KIM B, PINEAU J. Socially Adaptive Path Planning in Human Environments Using Inverse Reinforcement Learning [J]. International Journal of Social Robotics, 2016, 8 (1): 51-66.
- [80] EVERETT M, CHEN Y F, HOW J P. Motion Planning Among Dynamic, Decision-making Agents with Deep Reinforcement Learning [C] // IEEE. International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2018: 3052-3059.
- [81] GINDELE T, BRECHTEL S, DILLMANN R. Learning Driver Behavior Models from Traffic Observations for Decision Making and Planning [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015, 7 (1): 69-79.
- [82] LEE D, YEO H. Real-time Rear-end Collision-warning System Using a Multilayer Perceptron Neural Network [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (11): 3087-3097.
- [83] CHEN L, HU X, TIAN W, et al. Parallel Planning: A New Motion Planning Framework for Autonomous Driving [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 6 (1): 1-12.