

智能时代的汽车控制

陈虹^{2,1,3} 郭露露¹ 宫洵^{1,4} 高炳钊¹ 张琳²

摘 要 自动驾驶是汽车产业发展的重要里程碑. 汽车驾驶自动化一直都在进行, 其发展进程是对驾驶人认知感知、决策规划和执行控制等各个环节的逐步增强或最终替代. 智能时代下, 大数据分析、泛在计算、泛在传感和人工智能等颠覆性技术为汽车驾驶自动化向着高级别迈进提供了新的机遇. 控制技术是智能时代汽车自动化进程中的基石, 更多的信息在先进控制技术的赋能下将衍生出更多的新功能与新系统, 从而实现汽车安全性、经济性以及舒适性等各个方面的提升. 本文对智能时代的汽车控制进行综述, 首先回顾汽车自动化的发展进程, 然后探讨汽车自动化进程中面临的问题, 最后梳理出一些未来智能汽车控制发展趋势与关键技术.

关键词 汽车控制, 驾驶自动化, 智能时代, 网联自动驾驶汽车, 协同控制

引用格式 陈虹, 郭露露, 宫洵, 高炳钊, 张琳. 智能时代的汽车控制. 自动化学报, 2020, 46(7): 1313–1332

DOI 10.16383/j.aas.c190329

Automotive Control in Intelligent Era

CHEN Hong^{2,1,3} GUO Lu-Lu¹ GONG Xun^{1,4} GAO Bing-Zhao¹ ZHANG Lin²

Abstract Autonomous driving is recognized as the milestone of automotive industry. The purpose of the continuous evolution of vehicular automation is to enhance or replace human-driver's maneuvers in terms of perception, decision-making and execution. With the advent of featured emerging technologies, such as big data, cloud computation, connectivity and artificial intelligence, vehicles are becoming more and more intelligent, leading to unprecedented opportunities to be promoted towards higher level automation. Being as the cornerstone in the process of vehicular automation in intelligent era, control technologies enable the development of new vehicular systems and extended functionalities to offer improved safety, fuel economy, mobility and comfort. This paper provides an overview of the state of the art on intelligent and automated vehicle in control-domain. First, a brief history of vehicle automation is reviewed. Then, key challenges in the development of the automotive control are discussed. Finally, promising technologies and future research trends in intelligent era are identified.

Key words Automotive control, automated driving, intelligent era, connected and automated vehicle, coordinated control

Citation Chen Hong, Guo Lu-Lu, Gong Xun, Gao Bing-Zhao, Zhang Lin. Automotive control in intelligent era. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1313–1332

汽车驾驶自动化覆盖了汽车、交通、互联网、电子、测绘等多个产业, 集成了 5G 通讯、人工智能、物联网、先进机器人、大数据、云计算、智能制造等多项对未来科技和人类社会产生重大影响的颠覆性技

术. 汽车驾驶的自动化是汽车产业发展的一个重要的阶段, 目前已经成为全球汽车业关注的焦点, 无论是政府还是企业都在大力推动汽车自动化技术的发展和运用.

美国汽车工程师学会 (SAE) 在 J3016 自动驾驶分级中, 根据自动化的程度将自动驾驶汽车分为 L0 ~ L5 等 6 个等级, 如图 1 所示, 即 L0 级完全驾驶员驾驶、L1 ~ L2 级驾驶辅助与部分自动化、L3 级有条件自动化、L4 级高度自动化和 L5 级完全自动化. 欧洲道路交通研究咨询委员会 (European Road Transport Research Advisory Council, ERTRAC) 在《Automated Driving Roadmap》中, 以美国 SAE 自动化分级为基础, 对不同类型的车辆进行进一步的讨论, 如从功能和自动驾驶场景的角度对乘用车各级自动化发展进行规划. 我国也给出

收稿日期 2019-04-30 录用日期 2019-12-08

Manuscript received April 30, 2019; accepted December 8, 2019

国家自然科学基金 (61790564, U1664257, U1864206, 61903152) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61790564, U1664257, U1864206, 61903152)

本文责任编辑 诸兵

Recommended by Associate Editor ZHU Bing

1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025 2. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804 3. 吉林大学控制科学与工程系 长春 130025 4. 吉林大学人工智能学院 长春 130012

1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804 3. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025 4. School of Artificial Intelligence, Jilin University, Changchun 130012

汽车自动驾驶发展的阶段目标,关于汽车驾驶自动化的研发和产业化发展规划已经提上了日程^[1].此外,自动驾驶发展所涉及的道路测试环境和信息获取(如地图测绘等)等相关政策也在逐步放开^[2-3].

从汽车驾驶任务的角度来讲,无论是新能源汽车还是传统内燃机汽车,有人驾驶的汽车还是自动驾驶的汽车,汽车驾驶的主要任务并没有改变,即实现从起点到终点的行驶,反映在操作层面上主要是对转向、油门、制动和挡位的操作.图2是汽车驾驶控制的示意图.人类驾驶员是智能度最高的驾驶控制器,汽车在行驶过程中,人做出制动、驱动和转向等操作,车辆的执行系统会根据这些驾驶操作意图,结合车辆和交通道路状态,计算出相应的车辆纵、侧、垂向运动控制信号,实现满足节能、安全和舒适等驾驶需求下的随意图行驶.在此过程当中,人的身体可以感受到车辆的震动、惯性、方向盘的反力等,驾驶员的感官如眼睛、耳朵、大脑的感知功能对周围的行车环境进行充分的感知和理解,然后根据驾驶经验、环境认知给出相应的驾驶决策.而汽车驾驶的自动化实际上是利用先进传感、自主交互,在完成驾驶任务的前提下,以提升安全、节能、环保、舒适等性能指标为目标,实现转向、驱动、制

动等的自动化操作.从控制的角度来看,这种操作层面的自动化是对人-车-路-环境闭环系统的感知认知、决策规划、执行控制各个环节的增强或彻底替代.

在汽车驾驶自动化的发展过程中,感知层面的自动化就是增强、替代驾驶员的眼睛、耳朵、大脑的感知功能,进而辅助或替代驾驶员对环境的理解,如增加车载感知的摄像头、雷达,增加V2X、GPS等;决策与规划层面的自动化就是增强、替代驾驶员大脑的决策规划功能,比如在自适应巡航当中,车辆的辅助驾驶控制器对前车或障碍物的位置、速度、加速度进行识别,实现驱动和制动的决策与规划,其他辅助驾驶功能如自动泊车、自动超车等部分工况的自动驾驶都是在特定场景下替代或增强驾驶员的决策;在执行层面的增强主要体现在转向、制动、驱动、换挡控制系统功能与性能的提升.

对驾驶员感知、决策、执行各个方面的增强与替代程度其实也是驾驶自动化的分级的依据.如图1所示,替代和增强程度越高,自动化程度就越高.可以看出,这种发展不是突然出现,而是伴随着汽车技术的发展一直都在进行.在驾驶自动化发展的初期,由于传感技术、控制及计算芯片的性能的限制,

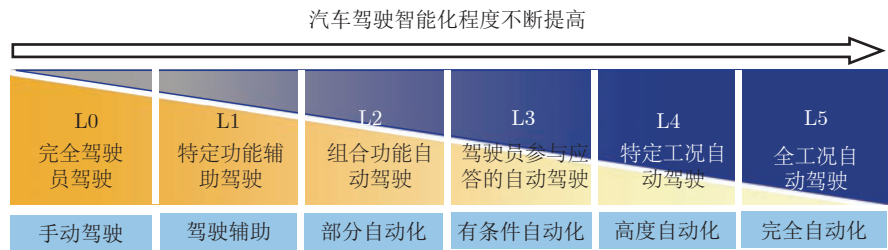


图 1 汽车自动化分级

Fig.1 Levels of automotive automation

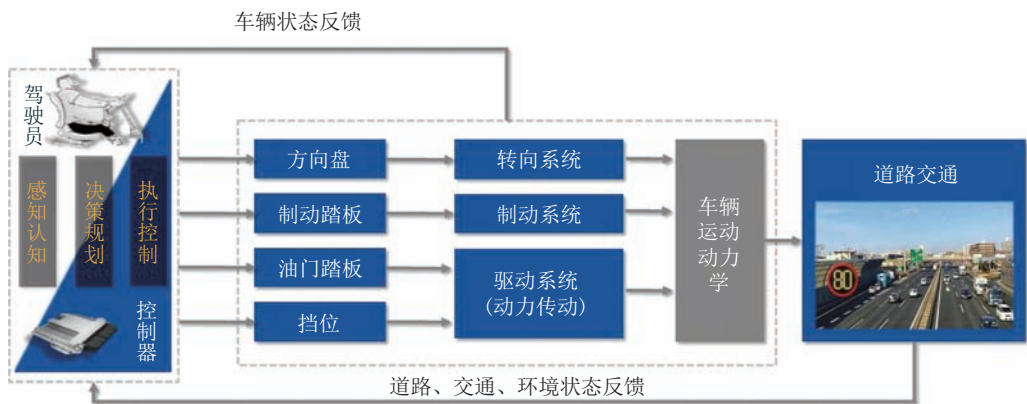


图 2 汽车驾驶控制系统框图

Fig.2 Diagram of automated vehicle control system

传统汽车自动控制技术主要集中在执行层面上,如自动变速箱是实现纵向行驶时换挡的自主决策与执行,彻底释放了左脚并减轻了右手的操作负担;自适应巡航系统可以在有限范围内实现加减速的自主决策与执行,释放了右脚;车身电子稳定程序 (Electronic stability controller, ESC)、紧急制动 (Autonomous emergency braking, AEB)、车道偏离辅助系统 (Lane keeping assistant, LKA) 等技术的出现,都对驾驶员的操作起到很好的辅助增强的作用。在智能时代下,随着泛在传感、泛在计算的快速发展,在先进控制技术的赋能下,驾驶自动化将逐渐渗透到了感知、规划、决策等各个环节,从而实现汽车安全、经济、环保、舒适等各个方面性能的提升。

作为汽车控制综述文章^[4]的后续,本文旨在传统汽车控制的基础上,对最近 5~10 年逐渐步入智能时代下的汽车自动化进程进行综述。首先从汽车纵、侧向行驶自动化的角度简要回顾汽车控制的发展历程,然后针对感知、决策、协同控制等方面概述汽车自动化进程中面临的主要问题,最后对大数据、信息融合为特征的智能时代下汽车控制的发展趋势及关键技术进行探讨,希望为从事汽车控制的读者在未来研究方向上带去一些启发。出于篇幅的限制,综述内容难以面面俱到,未尽之处还将在未来的工作中不断的补充。

1 汽车控制发展进程回顾

由于综述文章^[4]曾对传统汽车控制进行了较为详细的讨论,本文只进行简要回顾并对最新发展做适当补充。车辆运动分为纵向、侧向和由于路面不平引起的垂向运动,本文将从车辆纵向、侧向以及侧-纵向耦合三个方面来回顾汽车控制系统的发展现状。由于汽车垂向运动主要与乘坐舒适性相关,将不做深入讨论。

1.1 汽车纵向运动控制发展回顾

车辆纵向运动描述的是汽车的纵向行驶特征,涉及动力系统、传动系统和制动系统。在动力系统方面,传统内燃机车辆的发动机是纵向最重要的执行机构,其控制性能决定了车辆的燃油经济性、排放与纵向行驶品质。电子节气门^[5-6]的成功应用正式拉开了发动机自动控制时代的序幕,随后空燃比控制^[7]、点火正时控制^[8]、怠速控制^[9]等关键电控技术逐步得到了应用。针对发动机系统复杂、控制需求矛盾的问题,博世公司在 1998 年提出了以扭矩需求为中心的动力总成控制方案^[10],目前已经成为动力总成控制的行业标准。随着节能减排法规的日

益严格,发动机先进燃烧控制^[11]、复杂进气控制^[12-13]与排放后处理控制^[14]也得到了广泛的研究。关于发动机控制的详细综述请参考文献 [15]。传动系统是在发动机系统基础上实现车辆纵向动力传递、提高传动效率与燃油经济性的又一重要执行机构。随着电子控制技术的发展,变速器衍生出多种类型 (包括 AMT、AT、CVT、DCT 以及 EVT 等),实现了换挡过程的自动化^[16-18],从而使驾驶员从手动换挡操作彻底解放出来。随着电动汽车的发展,针对电动汽车的多挡位换挡控制成为研究热点,文献 [19-20] 根据电机工作效率 MAP,研究了基于模型的换挡过程和换挡规律。随着电动化程度的升高,多能量源混合动力车辆能量管理技术^[21]与纯电动车轮毂电机力矩分配^[22]也是近年来研究的热点。

在制动系统方面,目前发展成熟的控制单元有制动防抱死系统 (Anti-braking system, ABS)、驱动防滑系统 (Traction control system, TCS) 等,对纵向行驶的稳定性和安全性有重要作用。随着电子技术的发展,出现了更加高效和节能的线控技术。线控制动系统将传统气压或制动执行元件改为电驱动元件,每个车轮都有单独的控制器来确保制动力的最优分配,实现了汽车电子技术与网络通信技术的有机结合,更好地提升了汽车的自动化水平^[23]。线控制动系统按照执行机构的不同可分为电液线控制动系统 (Electronic hydraulic brake, EHB) 和电子机械式线控制动系统 (Electronic mechanical brake, EMB)^[24]。

动力、传动与制动系统的自动控制技术的发展,为纵向辅助驾驶/自动驾驶提供了底层执行基础。纵向辅助/自动驾驶主要根据前后车间距、设定的期望车速以及车辆自身状态对驱动和制动进行控制。自适应巡航 (Adaptive cruising control, ACC) 在定速巡航控制基础上融合了防撞系统,通过动力、传动与制动系统的协同控制,实现更加智能和安全的纵向速度控制策略,在特定工况将驾驶人从油门踏板和制动踏板的操作解放出来。文献 [25] 通过极点配置的方法设计了基于 PID 的自适应巡航控制器,保证了车间距误差和相对速度收敛到零。为了综合协调跟车时的追踪性能、跟车安全性以及燃油经济性,文献 [26] 研究了基于模型预测控制的多目标的 ACC 算法,并提出了优化问题在线快速计算解决方案。根据不同驾驶员对于舒适度的需求,文献 [27-28] 研究了考虑驾驶风格的 ACC 控制方算法。此外,近年来针对城市交通中低速行驶、频繁起停的工况,ACC 系统已经扩展到起停控制 (Stop and go, SG)、避撞控制 (Collision warning/avoid-

ance, CW/CA) 等。

1.2 汽车侧向运动控制发展回顾

汽车行驶时因制动、转动惯性等原因引发某一轴车轮或两轴车轮出现横向移动的现象称为侧滑。汽车侧滑对安全行车威胁较大,常造成甩尾、翻车等恶性交通事故^[29-30]。车身电子稳定系统(Electronic stability program, ESP)是对ABS和TCS功能的进一步扩展,增加了车辆侧向运动相关的传感器,通过控制车轮的驱动力和制动力,增强了车辆行驶的稳定性^[31-32]。此外,主动转向控制技术近年来也引起了国内外研究机构的兴趣。主动转向通过对驾驶员施加的转向角进行修正,依据汽车所处的不同工况进而自动调整汽车转向传动比,从而提升车辆低速时转向轻便性和高速时的侧向稳定性^[33-34]。随着技术的不断发展,主动转向可将人的因素考虑在控制算法的设计中,针对不同风格驾驶员的驾驶习惯进行人性化设计,变“人适应车”为“车适应人”,从而更好地辅助驾驶员操控车辆的行驶^[35]。

为了提高转向准确性和响应速度,线控转向系统(Steering-by-wire, SBW)得到广泛研究。为提高系统的安全性,线控转向系统可能同时装配多套驱动系统,保证一套系统失灵的情况下车辆仍能维持行驶和转向^[36-37]。线控转向系统根据不同的行驶工况实时改变传动比,与传统的机械式转向系统对比,线控转向的响应速度和准确性都有很大的提升,能进一步减轻驾驶员的驾驶负担^[38-39]。线控转向系统是高度电子化和智能化的产物,也是实现汽车完全自动驾驶的关键技术^[40]。

上述侧向运动控制系统为自动驾驶技术提供了车辆侧向自主控制的可行性。在车辆自动化进程的L2阶段,侧向运动控制仍然是针对特定驾驶任务、特定场景的辅助驾驶系统,如车道保持、自动换道、自动泊车控制系统等。其中,车道保持辅助系统着眼于车辆的安全性,通过主动转向系统对车辆的行驶姿态进行矫正,避免驾驶过程中车辆发生无意识的车道偏离行为,在修正的同时不影响驾驶员的正常驾驶^[41-42]。而自动泊车技术则是为满足汽车使用的方便性,实现帮助甚至替代驾驶员泊车的功能。自动泊车技术主要采用基于路径规划和基于经验规划两大研究方向^[43]。此外,自动换道系统根据驾驶员整体期望速度和周边车辆信息,进行主动换道决策,帮助驾驶员进行换道的操作。

1.3 汽车侧-纵向耦合运动控制发展回顾

随着汽车运动控制子系统的不断增多,由于子系统控制对汽车运动作用交互耦合、相互制约导致

车辆的整体性能无法实现最优。因此,如何避免控制系统间的冲突,充分发挥出各自优势,实现整车综合性能的最优,已成为当今汽车底盘控制领域亟需解决的关键问题^[44-45]。

在车辆运动控制系统中,车辆状态(轮胎力、纵向速度、侧向速度、横摆角速度、质心侧偏角等量)和路面信息(如道路坡度、附着系数)是非常关键的信息^[46],车辆状态和道路参数的实时在线估计^[47]是汽车底盘协调控制的一个重要的问题。在侧-纵向运动协同控制方面,文献[48-49]从优化轮胎力的角度研究了前轮转向、后轮转向和直接横摆力矩控制(Direct yaw-moment control, DYC)的协同控制。文献[50]基于前馈和反馈控制方法,提出ARS(Active rear-wheel steering)和DYC的协同控制策略。文献[51]研究了主动转向和DYC在不同工况下切换的协同控制。文献[52]讨论了侧向运动控制和持续减震控制(Continuous damping control, CDC)的协同。

目前,城市低速区与高速公路是L3级自动驾驶技术率先应用的两个场景,即在高速公路的标识牌、车道线等结构化特征清晰的简单交通环境中实现人机共驾。同时,车辆运动控制系统为典型的多输入多输出、强耦合非线性系统,在侧-纵向耦合工况中,如何设计高品质的运动控制策略已成为实现自动驾驶技术的重点和难点^[53-55]。目前,可实现侧纵向完全自动驾驶的车辆仍然处于研究当中,其主要针对的是特殊车辆,并在特定环境下使用,如矿山、校园等。

2 汽车自动化进程中面临的问题

回顾汽车控制发展的历程,可以看到当前的汽车行驶自动化基本可以实现辅助驾驶或特定工况下自动驾驶,包括自适应巡航、车道线保持辅助、低速转向跟车、自动远程泊车等。然而,面对更为复杂工况,如工况频繁转换或者突发状况时,目前的自动驾驶控制系统还无法可靠应对。近期,自动驾驶应用进程中所发生的一系列事故也给我们敲响了警钟,当前技术的发展成熟度还不足以支撑复杂混合交通(含机动车、非机动车、行人、施工障碍等)情况下的汽车完全自动驾驶的需求。Nature的评论文章^[56]指出,当前自动驾驶在可靠性和安全性方面尚存在不足,机器还达不到人类的灵活性、适应性、创造性,仍无法应对各种突发事件。下面从感知、决策以及协同控制技术等方面,概述其在当前汽车自动化进程中所处在的水平,并对面临的一些典型问题进行分析。

2.1 感知与信息融合的准确性、快速性亟待提高

智能化汽车对环境的认识是利用各种传感器对所处的交通环境进行数据采集,最大限度地提取测量数据中蕴含的信息,实现对交通环境中目标对象的检测和获取,完成对目标对象运动学特征的估计和跟踪.感知技术可为汽车的控制、决策等系统提供信息参考^[57].因此,环境感知技术是汽车自动化进程中非常关键的一环.智能化汽车对环境的认知所用到的传感器主要有超声波雷达、毫米波雷达、激光雷达、摄像头以及夜视设备等^[58].根据雷达或摄像头所适用的应用场景及其特有的感知距离等物理属性,通过选择合适的传感器布置方案和与之匹配的感知技术,可在一定程度上增强车辆对环境的感知能力,推动诸如自适应巡航控制、车道保持、紧急制动、辅助泊车等辅助驾驶技术的发展.

目前,基于单一传感器的环境感知技术发展的比较成熟,并广泛应用于自动化级别比较低的辅助驾驶技术中.在自适应巡航控制技术 ACC 方面,毫米波雷达可以实现多车道目标跟踪与检测,并结合弯道位置补偿技术,实现对目标车辆识别与跟踪^[59].另外,采用 CMOS 单目摄像头可以对目标车辆与道路环境进行检测识别并较为精确地获得车辆行驶纵向信息,也是 ACC 控制技术中的感知技术方案^[60].在盲区检测和辅助泊车方面,基于激光雷达或视觉的感知技术可以有效检测盲区和障碍物位置,锁定目标停车区域^[61-63].

随着车辆自动化级别的提升,为了获得更为丰富和准确的环境信息,车辆通常装有多传感器,基于多传感器信息融合的环境感知技术是目前的研究热点.信息融合算法是实现多传感器环境感知技术的核心.针对目前车辆避撞系统单一传感器不能有效识别前方车辆目标的问题,文献[64]应用联合概率数据关联进行雷达和摄像头数据的融合.文献[65]通过对由激光雷达和摄像头获得的复杂交通场景建模,利用混杂系统理论获得车辆的最优加速度,用于有效加强多车辆目标环境下的自适应巡航控制性能.文献[66]集成采用单目摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声雷达等传感器,并通过机器学习算法设计了一种最优 Gabor 滤波器用于对障碍物的检测识别与分类.

环境感知系统作为汽车驾驶自动化发展过程中的关键环节之一,其感知能力的水平直接决定智能车的智能化的水平.目前的传感器布置方案和感知技术可以保证在特定工况下实现有效的感知,但是对于环岛、交叉路口、非结构化道路等复杂道路环境以及光照、噪声、建筑物和天气等强干扰环境,感知与信息融合的准确性难以得到保证.主要问题分

析总结如下:1) 在复杂交通环境以及恶劣天气下的鲁棒性有待加强,如非铺装路面下俯仰/侧倾、雨雪极端天气、进出隧道的忽明忽暗等因素的干扰都会对感知系统的准确性产生很大影响;2) 车辆高速暂态行驶的情况下,车辆与目标物的相对速度、相对加速度等信息很难准确获得,导致感知系统的准确度很难得到根本性验证;3) 复杂交通环境下由原始级别测量数据到目标级别信息构成的准确性仍有待提升;4) 由感知系统获得的目标级别信息如何按需分配给各控制子系统还不明确.此外,涉及到汽车安全方面的控制系统需要感知系统提供快速更新的感知融合信息,先进信息融合算法的快速实现仍然是亟待解决的问题.

2.2 适应开放不确定环境的自主规划决策能力不足

在自动驾驶系统中,决策与规划是中枢指挥系统,相当于车辆的大脑.决策与规划系统在接收到各种感知信息后,结合对当前环境和车辆状态的分析,对底层执行控制系统下达指令.在自动驾驶车辆中,决策规划一般分为路径规划、行为决策、运动规划三个层次.关于自动驾驶决策规划的发展现状可以参考文献[67],下面仅做简要概述.

路径规划一般可分为全局路径规划和局部路径规划.全局路径规划是根据起点和终点以及道路拓扑结构等从宏观层面上规划出可选择的路径.局部路径规划则是在全局路径规划的基础上需要充分考虑路径的可行性^[68],并对其进行进一步细化.关于路径规划的方法主要有栅格法(图搜索法)、采样法、曲线插值法、数值优化法等^[69].行为决策层是在接收到规划路径后,结合感知系统的环境信息,对车辆做出具体的最佳行为决策,如跟随、变道和超车等^[70],其主要的方法有基于规则^[71, 73]、学习方法^[72]、随机理论^[74]、群体智能算法^[75]等.在决策行为确定之后,将行为转化为具体的行驶轨迹的过程是运动规划.运动规划在机器人领域中已经有较长的研究历史^[71],并逐渐移植到自动驾驶中.

决策与规划系统能够处理场景的复杂度是衡量和评价自动驾驶能力的核心指标之一.当前,决策规划系统主要应用于简单工况或封闭道路环境,在各种不确定性存在下的实际复杂工况,做出可靠自主决策的能力仍有不足.主要问题分析总结如下:1) 开放场景下的自动驾驶自主决策需要考虑很多不确定性,这些不确定性主要来自于感知误差^[76]、模型误差、障碍物^[78-79]以及其他交通使用者的行为不确定与随机性^[77]等,如何预测和估计环境中的不确

定性还是一个很难的问题; 2) 目前自动驾驶的路径规划需要考虑多种运动约束, 如何在满足算法实时计算速度需求的前提下, 规划出光滑且满足车辆运动学约束的路径是亟待解决的问题; 3) 相比于驾驶人的决策, 现阶段的自动驾驶决策系统还无法像人类司机那样的“思考”问题, 以换道决策为例, 自动驾驶可能在安全条件下做出反复频繁换道的“愚蠢”决策. 总之, 类比于人类驾驶决策, 自动驾驶决策系统在提前避让^[80]、博弈^[81]、记忆^[82]和不确定性估计^[83]等类人决策的各个环节上发展的不够完善, 仍需继续探索.

2.3 车辆运动协同控制尚未实现

随着汽车自动化程度的升高, 其运动控制系统集成复杂程度也不断增加 (包含车辆侧 - 纵 - 垂等方向的控制子系统, 如 TCS、ESC、ABS 等). 在当前实际工程中, 车辆运动控制通常是让一个子系统介入同时让另一个子系统退出, 各子系统作用分界线通过基于规则的方法标定得到, 系统间的协同未完全实现. 在极限工况下 (指汽车动力学系统进入非线性区的“非常规工况”, 如图 3 所示), 运动控制子系统及相关执行器之间相互干涉与冲突明显, 如何协同并扩大车辆稳定边界是一个难题. 主要体现在: 1) 侧 - 纵 - 垂动力学存在复杂的非线性耦合、轮胎力存在饱和及轮胎侧偏刚度时变等特征, 各子系统的安全性控制目标之间存在耦合; 2) 在自动驾驶发展的大背景下, 主动安全控制需要协调上层的规划、决策, 各子系统的标定量急剧增大, 为了需要满足上层自动驾驶的准确、快速执行的功能, 各子系统要具备良好的控制性能. 然而, 目前运动控制各系统是单独开发的, 分布式的控制方案给规划、决策、控制的协调执行带来了障碍. 因此, 为了从本质上解决子系统和执行器之间的干涉和冲突问

题, 扩大极限工况下的稳定边界, 需要从顶层的控制系统架构设计出发, 通过直接对侧 - 纵 - 垂向动力学进行优化, 实现汽车运动主动安全的一体化协同控制.

目前, 关于车辆协同控制还基本处于科学研究阶段. 文献 [84] 提出了一种主动前后轮转向与制动/驱动力分配的子系统协同控制策略, 基于制动/驱动力分配的车轮载荷均衡可以提高车辆的转向性能, 同时对横摆力矩进行补偿方法以减小横摆率跟踪误差, 整个协同控制策略可实现载荷均衡以及期望横摆率的快速跟踪. 文献 [85-88] 针对高速行驶的汽车发生爆胎危险工况, 分别采用约束 H_∞ 控制方法和鲁棒非线性控制方法, 通过协调转向子系统和制动子系统实现对爆胎汽车的轨迹跟踪控制和方向稳定性控制. 文献 [89] 探讨了四轮转向角度和主动悬架调节协同控制的方法, 在轮胎侧偏角较小的工况下控制主动悬架力, 提高了舒适性; 在轮胎侧向力达到饱和时, 通过控制车辆四轮转向角与垂向力的综合手段调节轮胎侧偏角达到车辆稳定性控制目标. 文献 [90] 以改善极限工况下操纵稳定性为目标, 通过汽车动力学一体化控制的方式, 运用模糊逻辑规则对四轮力矩与后轮转向角进行分配, 改善车辆的操控性能, 实现湿滑路面下防止车辆的轨迹偏离功能. 现有的协同控制主要针对典型工况下单一安全目标进行研究, 针对极限工况下非线性耦合系统协调优化控制问题还属开放性课题, 如何利用网联信息提高汽车主动安全性能也是现今的难点.

2.4 人机协同共驾刚刚起步

除了车辆运动控制系统之间存在协同问题, 驾驶员与车辆之间也存在交互与协同, 人机协同的实现难度也更大, 即如何协调人机混合驾驶决策自动控制系统和人类驾驶员的权重, 形成一种人机动态交互关系, 实现驾驶员和控制系统的驾驶权优化分配和切换.

目前, 人机协同共驾技术还处在科学研究阶段. 文献 [91] 采用模型预测方法利用道路信息规划出优化路径, 指导帮助驾驶员能更好驾驶. 文献 [92] 完善了 Copilot 概念, 给出自动化程度选择建议, 驾驶员根据多方面因素进行综合决策, 因此驾驶员具有直接控制权. 由于这类系统控制权由驾驶员决定, 在驾驶员注意力不集中或忽略自动控制器给出的指导意见时, 会出现驾驶操作错误, 很难有效避免交通事故. 为避免交通事故, 有些研究者采用驾驶员和自动控制器切换控制方法. 该方法通过对道路信息和驾驶员信息的分析, 判断是否适合人类驾驶员控制, 并进行人类驾驶员和自动控制器驾驶权的切

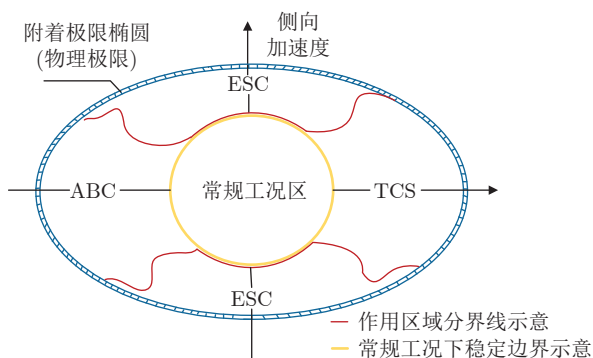


图 3 车辆极限工况示意图 (侧向 - 纵向)

Fig. 3 Schematics of extreme driving condition (lateral-longitudinal)

换. 文献 [93] 通过对处境分析和危险评估进行驾驶员控制、辅助驾驶和自动驾驶等模式的切换. 为解决人机共驾系统频繁切换的稳定性问题, 文献 [94] 利用复合 Lyapunov 函数分析了驾驶员单独驾驶、辅助驾驶、自动驾驶三种模式切换的稳定性. 人机协同的优化与控制权决策以驾驶员和机器的交互学习为基础. 如果汽车动力学进入非线性区域, 一般的驾驶员由于经验不足及心理恐慌等影响, 极易出现操作不当导致汽车进入失稳状态, 因此如何考虑人机耦合与驾驶环境的复杂性、驾驶员驾驶习性与行为不确定性, 是人机共驾面临的挑战性问题. 更多关于人机共驾研究现状的讨论可以参考文献 [95], 本文不再做过多的展开.

3 智能时代汽车控制发展趋势与关键技术

智能时代新兴技术的快速发展, 为汽车驾驶自动化发展提供了新的机遇. 泛在传感 (如高精度地图、网联技术) 不断发展, 可以为汽车控制系统提供更为丰富、快速、准确的环境信息; 泛在计算下的大数据分析、人工智能等技术的兴起为汽车控制与优化决策提供了更为智能高效的手段. 总而言之, 这些新技术在汽车上的应用使汽车的各项性能都上升到了新的高度, 使得以汽车、环境、驾驶员为载体的车辆控制系统逐渐成为一个典型的集成信息资源、物理资源、人类活动的综合智能系统 (Cyber-Physical-Human Systems). 将智能时代新兴技术融合到汽车控制系统的感知、认知建模、智能决策、以及执行各个核心环节, 实现新控制系统与新功能来提高汽车控制系统的安全性、节能性、环保性、舒适性和经济性是智能时代汽车控制的主体. 以下主要围绕车载计算与通信、大数据信息融合、先进控制理论在汽车控制的应用、智能化汽车控制系统新功能、人在回路的汽车控制、自动驾驶的测试与评价等 6 个方面, 分析智能时代汽车控制的未来发展趋势.

3.1 智能时代汽车控制车载计算与通信技术

随着自动化程度的升高, 汽车逐渐成为车轮上的数据交互与计算中心, 传统车载计算 ECU (Electronic control unit) 将难以满足未来高度自动化整车控制需求. 兼顾快速性、安全性、扩展性、低成本等多方面需求的车载边缘计算平台将是智能时代汽车控制的刚性需求. 带有多线程和并行处理能力的现场可编程门阵列 (Field programmable gate array, FPGA) 是先进汽车控制与优化算法快速实现的可行方案^[96]. 同时, 基于远程计算集群或车载工

作站的计算平台^[97] 是自动驾驶控制技术概念性研发与测试阶段的解决方案, 但是其高能耗、高成本等劣势依然是量产化要面临的挑战. NVIDIA 公司针对自动驾驶研发了 Drive PX Xavier 高性能计算芯片^[98], Mobileye 公司研发了 EyeQ 系列芯片, 其在研的 EyeQ5 预计在 2020 年面世并声称其最大计算功率在 10 瓦左右^[100]. Google 在 2016 年发布了 TPU, 该芯片专为 Google 深度学习平台 Tensorflow 框架而设计, 与同期 GPU 相比, 可以获得高达 30 倍的性能提升, 以及最高 80 倍的效能提升^[101]. 百度在 2018 年 7 月发布了全能 AI 芯片“昆仑”并声称是业内设计算力最高的计算芯片. 高通公司将“骁龙”芯片成功地从手机平台移植至车载平台, 在一块电路板上集成 5G 通信, 神经网络处理引擎、GPS、WiFi 等多功能的芯片, 可以适应未来智能网联与高度自动化汽车的需求. 目前, 无论是整车厂、互联网公司还是高校, 都在投入巨大的人力、物力来抢占智能车辆计算平台的战略高地, 研究快速、可靠、安全、低成本的边缘计算解决方案将一直是智能化汽车未来发展的热点. 此外, 云计算、雾计算^[99] 等集中或分布式高性能计算资源也将在未来对智能化汽车的发展提供支持.

从驾驶辅助向高级自动驾驶进化过程中, 图像、激光点云数据以及大量网联/传感信息逐渐渗透到控制系统中, 对车载通信技术也提出了更高的要求. 当前主要应用两种无线通信技术, 即专用短程通信 (Dedicated short range communication, DSRC) 和 4G LTE^[102]. 但是这两种技术都无法提供千兆比特/秒数据速率、高速移动性支持、大规模机器通信和超低延迟, 难以满足完全自动驾驶的要求. 智能时代的汽车控制也是 5G 技术重要应用场景之一, 相对 4G 通信技术, 5G 的数据传输速度可提升至 100 倍, 端到端的延迟可低至毫秒级^[103]. 因此, 5G 无线通信技术将为未来完全自动驾驶系统带来强大的助力, 为汽车节能、排放、安全等各个核心性能指标带来巨大的提升.

3.2 多源异构大数据信息融合技术

复杂环境下感知能力的不足是制约车辆实现完全自动驾驶的瓶颈. 智能时代下, 摄像头、雷达、GPS、高精地图以及网联环境 (V2X) 将为汽车的感知系统提供海量的多源异构信息^[104]. 无论信息来自车载传感、路侧还是周车, 信息融合技术都必不可少. 基于人工智能的新兴多源信息融合技术能够帮助理解环境的复杂度和信息之间的内在关联度、扩展感知空间和时间范围、提升感知可信度, 从而使汽车的感知能力及其鲁棒性得到极大提升, 是自动

驾驶汽车感知技术的发展趋势。未来一段时间,融合算法将一直是多传感器数据应用研究的热点。以卡尔曼滤波算法为代表的传统方法凭借递归形式进行数据融合^[105-106]。基于人工智能的融合算法主要包括神经网络和深度学习等^[107],意在设计网络拓扑结构,将多源信息作为输入,对输出信息进行学习、理解,确定网络权值分配,完成信息融合及知识获取。针对低成本导航系统,文献[108]提出神经网络方法用来融合惯导和GPS信号测量数据,以获得精确的位置信息。深度学习方法普遍采用监督式的深度学习,这种方案需要使用标注好的数据训练,但是依赖人力的标注工作量巨大。无监督学习算法不需要标签,但是需要不断地试错实现,风险较高。文献[109]在基于多图像特征信息感知的目标分类方面,为了提升深度学习中卷积神经网络的训练效率,在设计局部推荐网络基础上,结合目标检测结果共享图像的卷积特征,提出了基于学习的信息融合方法,一定程度上解决了海量样本训练时的空间开销。

3.3 先进控制理论与方法的逐步应用

汽车芯片计算能力的不断提升为先进控制理论与方法、机器学习与深度学习在实车中的应用带来了机遇。有关机器学习与深度学习的知识请参见文献[123-124],出于篇幅考虑本文不再进行详述。下面将以模型预测控制与非线性控制等先进控制方法为例,简要概述其在汽车控制应用中取得的最新进展。

智能化汽车控制与决策问题通常是多目标并带有约束的。模型预测控制(Model predictive control, MPC)^[125]最早应用于工业过程控制,能够处理带有约束的多变量、多目标优化问题。从上世纪90年代第一次应用在发动机怠速控制^[126]之后,MPC应用于汽车控制的文献开始大量涌现。目前,MPC已经成为解决汽车动力总成^[14, 127-128]、能量管理^[129-130]、排放^[131]、车辆稳定性^[133]等关键控制问题的重要方法。美国通用集团(General Motor, GM)用了5年时间,研发了基于MPC的涡轮增压发动机管理系统^[132],该系统将逐步应用于GM旗下2018年以后的量产车型,在世界范围内实现了预测控制汽车应用量产化零的突破。在智慧城市和网联交通的背景下,通过引入未来交通预瞄信息,MPC在车辆预测节能^[130]与预测安全^[134]等方面有了更广阔的应用前景。随着车辆系统的日益复杂,系统中含有大量不确定性或无法机理建模的动态,基于学习的MPC也逐渐成为了汽车控制的热点^[135]。此外,优化算法嵌入式研究^[136]也必将加速推进MPC在未来智能化汽车控制中的应用进程。

汽车控制系统中涉及诸多底层执行机构的跟踪控制问题,而大部分跟踪控制系统具有强非线性、高耦合性等特点,使得传统PID控制难以保证控制需求。反馈线性化^[137]、反步法^[10]等基于模型的非线性控制方法能够大幅提高控制系统的跟踪性能并具有良好的鲁棒性,虽然需要较为繁杂的公式推导和简化,依然具有很大应用潜力。面向解决汽车控制实际工程中的跟踪控制问题,文献[138]提出了一种新颖的“三步法”非线性控制系统设计方法,所得到的控制律以“稳态控制-前馈控制-误差反馈控制”的形式呈现,具有设计思路清晰、物理意义明确、工程实现结构简单等优点。该方法首先应用于缸内直喷汽油发动机的轨压控制,并在一汽技术中心的支持下完成了实验台架测试^[139]。随后,该方法扩展到了高阶、非仿射等一些系统中,分别为变速箱换挡控制^[140]、汽车稳定控制^[141]、故障诊断^[142]等问题提供了解决方案。

在未来,先进控制理论与方法将渗透到汽车控制的各个方面为智能化赋能,如博弈论在人机共驾^[143]和电动化汽车能量分配^[144]中的应用、逻辑控制^[145]在车辆调度、故障诊断中的应用等。

3.4 智能化汽车控制系统新功能

在智能交通和车辆智能化发展的背景下,汽车可以获取更多的外界信息,以模型预测控制为代表的先进控制方法与以深度学习、强化学习为代表的人工智能新技术将得到广泛关注。如前所述,随着云计算逐渐成熟和车辆边缘计算能力的显著提升,复杂高级算法在实车控制系统在线实现成为可能。这些技术的发展不仅增强了汽车上层驾驶决策与规划的能力,也为汽车转向、制动、驱动的新系统/新功能的衍生式发展创造了条件。

3.4.1 开放道路复杂场景的驾驶决策与规划

相比于简单工况,开放道路复杂环境的驾驶决策需要对复杂信息进行分析建模,并在海量信息的支持下做出最优决策,其控制脉络如图4所示。车辆及环境建模、其他交通参与者行为预测和不确定性分析是开放道路驾驶决策的难点。近年来,深度学习认知能力^[201]和强化学习的优化框架为开放道路复杂环境下自主决策带来了新思路。基于端对端的自动驾驶深度学习技术通过对采集的驾驶图像集训练,可实现从图像到车辆方向的直接控制^[110]。NVIDIA针对端对端的方案,进一步提出了可解释的神经网络系统^[111],并应用在车道估计^[112]、车道保持等方面^[113]。

针对环境不确定性,机器学习中的动态贝叶斯

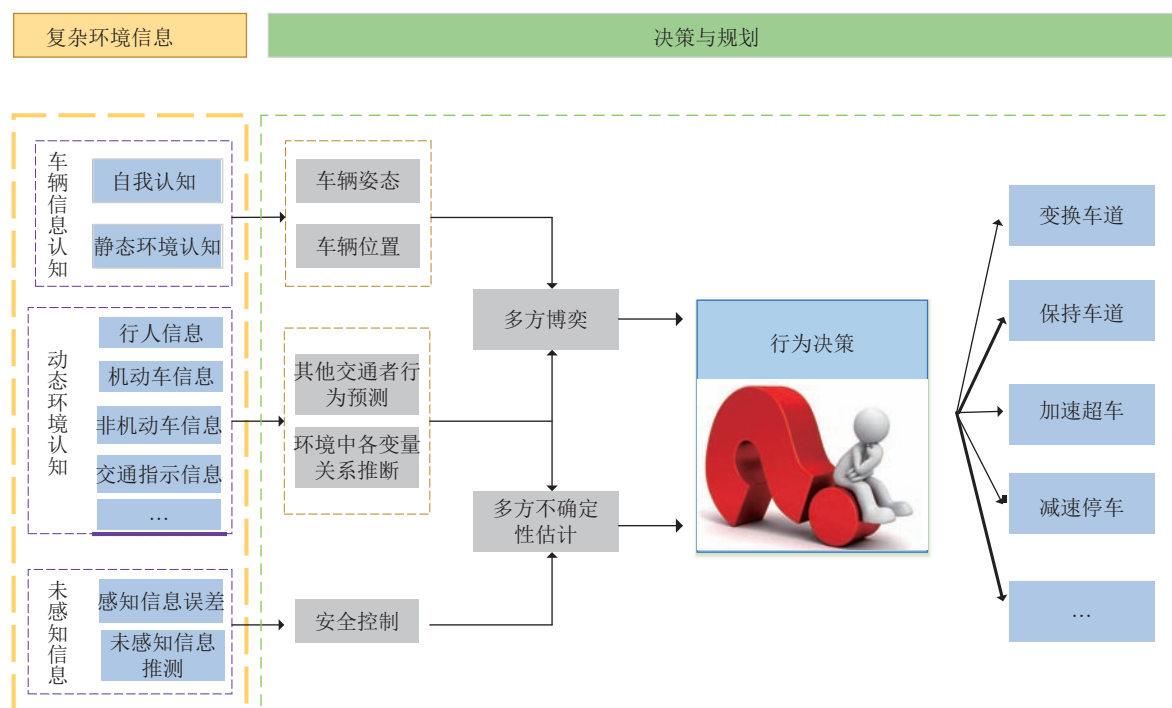


图4 开放道路复杂场景的驾驶自主决策与规划技术

Fig.4 The technology of decision-making and planning in open road with complex scenario

网络能够建立复杂状态的概率分布模型,是交通环境不确定性辨识与预测的典型解决方案^[114]。例如,文献[115]采用贝叶斯变化点来预测其他交通参与者的潜在行为,通过评估车辆与其他车辆相互作用的结果,可做到减速放行或者加速通过等控制策略。在有效利用复杂信息的前提下,自动驾驶决策的核心是如何在交互式环境下做出最优决策,这正是强化学习的用武之地:如文献[116]针对弱信号下右转弯速度控制问题,研究了基于AC算法的最优控制策略;文献[117]针对跟车问题,提出了一种基于强化学习的油门控制方法,并声称其控制策略接近最优控制解。同样,文献[118]提出了一种基于参数化强化学习的车辆纵向优化控制方案。针对模拟环境与实际环境差异产生的不确定性问题,文献[119]提出一种基于图像语义分割网络的强化学习新框架。针对实际应用中的数值问题,文献[120]采用基于逆强化学习方法,学习人类驾驶过程中的高价值策略,在仿真中验证了该方法可以学习人类的驾驶技巧,如加速迫使周围车辆减速等。为了减少对数据的依赖和考虑安全性,文献[121]提出自主学习过程,通过检查分类、聚类、自主学习、在线学习和优化模型,只使用少量数据就可进行自我完善的学习。

其实,现阶段基于深度学习的驾驶决策与规划仍存在问题^[122],如对数据依赖等。一些研究已试图提出新的学习框架和策略^[121]。在未来,不断完善机

器学习在复杂信息的处理、转化和优化决策上的能力,突破开放道路复杂场景时自主决策技术,提高对突发事件的处理能力,是汽车自动驾驶控制研究的一个发展趋势。

3.4.2 网联车辆的智能节能

智能节能技术是在传统节能技术的基础上,利用人-车、车-车、车-路通信的网联信息,对车辆行驶状态进行综合优化控制,从而进一步提高整车能源利用效率。如图5所示,车辆利用导航、高精度地图和交通环境的预测信息,综合考虑未来交通状态对车辆行驶经济性的影响,利用滚动时域的优化思想,有预见性地协调优化车辆驱动、制动和传动等系统状态,最终实现整车行驶能量的降低^[146-149]。相关研究表明,利用网联信息对车辆进行合理的速度规划可以使道路通行率提高10%以上,随着网联车辆渗透率的不断提高,最终可以提高50%~90%^[150]。此外,通过车辆的行驶策略与交通的协调优化,可以使整体交通能源消耗降低15%~20%^[151-152],若进一步考虑车辆动力传动系统的优化匹配,能源消耗可降低至30%。考虑到网联技术带给汽车巨大的节能潜力,美国能源部高级能源研究计划署(ARPA-E)于2017年斥资3200万美元,资助10个由美国顶尖高校和汽车研发部门组成的科研团队,开展为期3年的代号为“NEXTCAR”

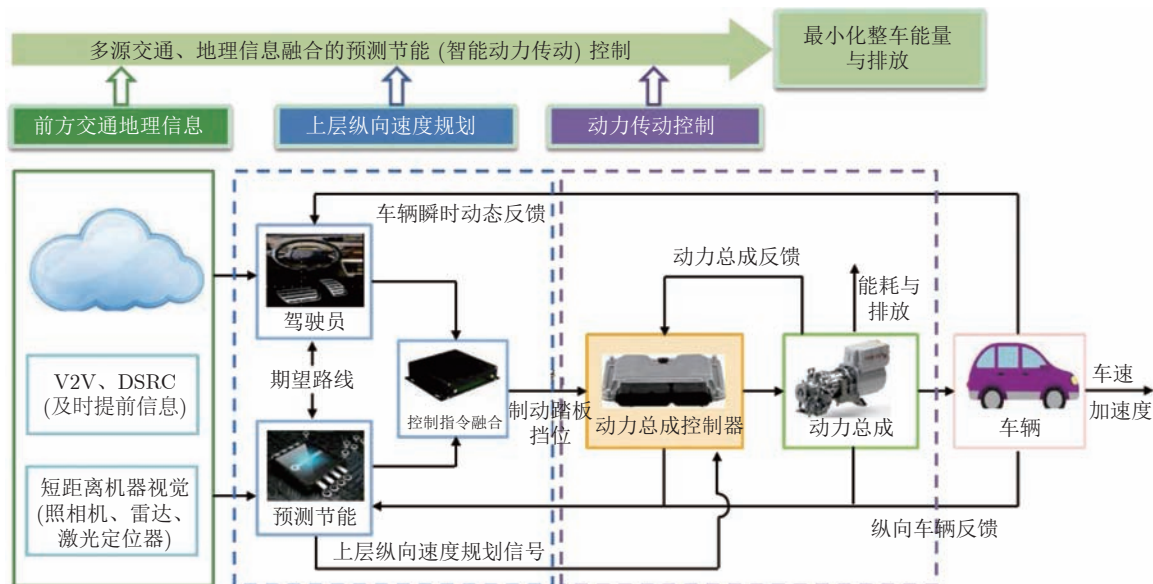


图5 智能网联环境下的智能节能与减排技术框图

Fig.5 Connectivity for improved fuel economy and reduced emission

研发项目,从不同角度研究下一代智能网联汽车的节能技术,期待达到20%燃油经济性的提升^[153].在此背景下,智能节能技术已经成为汽车智能化领域的热点研究方向之一.

在城市快速路和高速公路工况中,由于道路交通条件比较单一,节能潜力主要从考虑道路坡度、曲率等信息以及车速摄动中获取,如利用道路的坡度和GPS定位,综合优化驾驶任务的完成时间和消耗的能量^[154-155].相比高速路,城市路况则更为复杂,具有更多的约束条件和场景,所以目前针对城市路况下智能节能主要集中在某些特定的场景.考虑未来交通灯信息和预测速度信息,对行驶速度进行规划可以有效降低车辆红灯的等待时间同时达到节能的目的^[130,156-157].对于电动汽车在固定路段行驶任务的速度规划问题,通常要考虑电机和电池效率因素,对电动汽车行驶过程中的电机需求力矩、制动力、能量回收进行优化,实现整车续航里程的提升^[158-162].在实际道路行驶条件下,前车的驾驶行为对本车的能耗具有较大影响.因此,在预测巡航控制系统框架下,适当放宽巡航速度以及前后车间距的跟踪要求,可以提高车辆的节能潜力^[156,163].

目前关于智能节能技术的研究主要是针对动力源的能效优化,很少关注辅助设备(如空调系统、照明系统)对整车能耗的影响.实际上空调系统的能耗相当可观,对整车行驶里程的影响非常大,而车辆电动化程度越高,空调系统能量消耗所占总体能耗的比例越高.来自美国的一项统计表明,全美轻型乘用车每年空调所消耗的燃油量可达到70亿加

仑^[164].美国阿贡实验室针对福特福克斯纯电动车进行了夏季实车测试,在UDDS城市工况下受空调制冷的影响,车辆行驶里程将缩短53.7%^[165].针对冬天城市工况,美国阿贡实验室对2010丰田Prius混合动力汽车也进行了实车测试,分析了暖风对整车油耗的影响^[166].因此,把热管理扩展为一个控制维度,通过调控空调的出力,研究车辆的能量与热量一体化优化控制可以进一步挖掘车辆的节能潜力^[167].此外,目前智能节能优化方案主要集中于在某个特定场景,一方面车辆系统在复杂多变的交通环境下的节能效果难以评估,另一方面多源信息融合下的节能控制也鲜有研究.因此,车辆智能节能技术与智能交通、道路信息的融合方法需要进一步完善.在智能节能的研究过程中,单一考虑车辆能效提高往往带来“节能不舒适”、“节能动力不足”、“电池老化过快”等其他的性能降低问题,考虑电池健康管理、驾乘舒适性和安全性的多目标智能节能方法也是未来的研究热点.

3.4.3 网联车辆的智能减排

城市拥堵交通环境下,发动机频繁工作在瞬态工况,使得排放较为恶劣.一方面,后处理技术一直不断取得进展^[15].另一方面,与智能节能技术类似,结合网联信息的发动机排放控制也为改善发动机瞬态原排提供了机遇.

一般地,在智能网联环境下,基于V2V信息,通过反馈控制做到车辆的平顺行驶,可以减少起/停过程中车辆的污染排放和燃油消耗^[168].面向多交叉口通道的交通场景,通过合作车辆交叉口控制,

不仅可以有机会减少追尾事故发生, 同时降低车辆的排放^[169]. 进一步, 通过协调控制交通灯正时与车辆行驶轨迹对排放优化有着非常重要的意义^[170], 如结合车辆与动态交通信号灯之间的通信对车辆速度、挡位等进行优化, 实现 CO 、 NO_x 以及颗粒物等排放物的降低^[171-174]. 目前基于智能网联信息减排的一些成果主要以油耗最低或减少拥堵时间为目标优化巡航车速达到节能减排的目的. 未来随着排放法规的日益严格, 重型柴油商用车的预测减排控制、基于网联信息的油耗与排放一体化协同控制将是未来重型车辆的研究趋势. 此外, 基于网联信息的多车协同、多车编队控制也是智能化车辆节能减排研究的热点话题^[175-176].

3.4.4 网联车辆的预测安全控制

结合网联信息的预测安全控制为汽车主动安全的提升提供了机遇. 这里提到的预测安全控制的概念如图 6 所示. 预测安全控制技术借助 V2V、V2I 等网联信息获得的交通预瞄信息, 同时借助车辆动力学模型预测车辆未来的动力学信息, 进而应用模型预测控制方法来滚动优化安全性能指标, 指导车辆在遇到危险隐患情况前有预见性的对转向、制动、驱动等执行机构做出控制决策, 从而最大程度规避危险、减少交通事故的发生. 预测安全控制比较典型的例子有自动驾驶车辆主动避障系统^[177, 180]、爆胎后稳定性控制^[179]、车道保持^[178] 以及自动驾驶车辆路径规划与跟踪控制^[181] 等. 考虑到多变量并带有约束, 四轮驱动车辆中力矩分配与转向的协同控制^[182-183] 来保证横摆角速度的跟踪与车辆稳定性依然是一个挑战性的问题. 针对垂向主动/半主动悬架控制, 利用云端数据或摄像头等信息, 可以提前

预知前方的坑洼地带, 通过调节悬架来协调车辆的舒适性与安全性^[184].

另外, 由于驾驶员的操作不当或路面环境恶劣, 车辆往往会进入非线性区域的极限工况, 严重威胁驾驶员的生命安全. 因此, 极限工况下的车辆动力学协同控制是未来的关键技术与发展趋势. 极限工况主动安全控制技术的核心问题是如何通过制定主动安全功能的可控度最高的控制系统构架, 并根据当前工况下侧-纵-垂向主动安全功能的需求, 给出相互冲突的优化目标的数学表达, 进而利用交通预瞄信息与动力学预测模型, 对底层执行器的控制动作进行直接优化, 实现临界稳定情况的主动安全控制. 当系统处于失稳状态时, 利用安全行驶区域优化结果规划可行的安全性行驶轨迹, 进而通过对失稳状态下不稳定平衡点的跟踪控制, 实现漂移控制或避免二次碰撞控制, 提高汽车的主动安全控制性能.

3.5 人在回路的智能化汽车控制

在汽车智能化与自动化程度由低到高发展进程当中, 未来相当长的一段时间内汽车都要与人“打交道”. 人在回路 (Human in the Loop) 从微观角度涉及单车自动驾驶过程中的人机交互接管等问题, 从宏观角度上涉及不同自动驾驶车辆渗透率 (Penetration rate) 下自主车辆与人驾驶车辆的协同等问题.

3.5.1 混合增强智能下的人机共驾

人工智能虽然已经深入到智能车信息融合与感知、决策与控制各个环节, 但真正意义上的全工况自动驾驶在短期内很难实现, 驾驶人和智能系统分

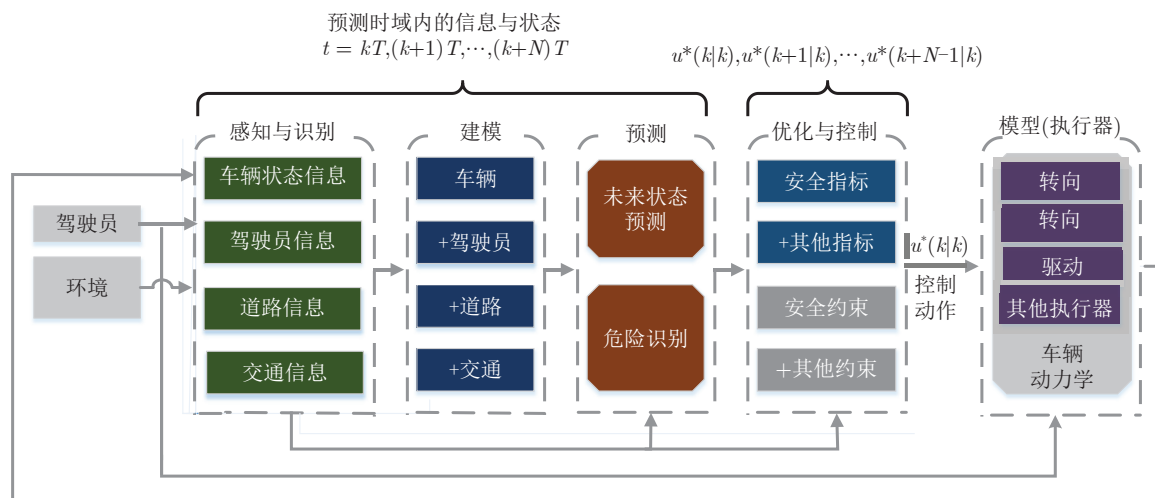


图 6 预测安全控制框架示意图

Fig. 6 Schematics of predictive safety control concept

享车辆控制权、协同完成驾驶任务的人机共驾必将长期存在. 因此, 结合人类智能与机器智能各自优势的人机智能混合增强技术可以进一步促进汽车智能化的发展, 是未来的发展趋势. 所谓混合增强智能是通过人机智能的混合增强, 形成双向的信息交流与控制, 构成“ $1+1>2$ ”的人机合作混合智能系统. 人机共驾主要涉及驾驶人意图/行为建模和人机协同两个方面的研究: 驾驶人意图识别主要是依靠驾驶人的动作和姿态、车辆状态和交通环境对驾驶人的意图进行推测和估计^[185], 而驾驶行为建模则涉及模拟人类驾驶过程中预瞄跟踪的特性^[186]以及人-车-路闭环系统随时空迁移的变化特征^[187]; 目前人机共驾按照接管程度可分为增加驾驶人感知能力的智能驾驶辅助^[188]、特定场景下人机驾驶权的切换^[189-191]和人机协同下的驾驶权动态分配^[192-193].

未来人机共驾的热点科学研究可能围绕如下几点展开: 1) 驾驶人驾驶状态、习性、技能建模与预测; 2) 人机共驾车辆的运动稳定性和碰撞安全性理论; 3) 驾驶人在回路的人机协同感知与认知; 4) 人机在决策规划以及控制执行中的交互与协同; 5) 个性化的人机共驾系统; 6) 面向有条件自动化/高度自动化的人机共驾系统; 7) 人机共驾系统验证平台与测试评价方法.

3.5.2 不同渗透率下的自动驾驶车辆控制

自动驾驶会是一个逐渐发展与普及的过程. 在未来相当长的一段时间内, 路面上的交通参与群体将呈现自动驾驶车辆与人驾驶车辆混杂的状态, 这就给原本复杂的交通环境带来了更多的复杂度和不确定性. 因此, 能够适应不同渗透率的智能驾驶控制及其能耗与安全评估将是未来的研究热点. 文献[194]面向微观混杂交通环境建模与车辆能耗评估需求, 研究车辆并线超车对自动驾驶车辆能耗的影响. 该文利用 Safety Pilot Model Deployment (SPMD) 大数据, 提出了随机车辆并线建模方法, 用“礼让系数”、“耐心系数”等重要的拟人化参数刻画驾驶人的并线行为并标定出概率分布, 将所建立的并线模型应用于混杂交通环境中, 揭示了有人驾驶车辆并线超车行为对自动驾驶车辆经济行驶需求下的速度轨迹规划的影响, 初步评估了自动驾驶车辆潜在在能耗提升潜力. 文献[195]针对匝道并入主路情况下的车辆能耗优化问题展开研究, 建立了混杂交通的仿真环境, 分析了不同混杂率交通环境对自动驾驶控制下车辆能耗的影响, 为混杂交通环境下的自动驾驶车辆控制提供了思路. 可以预见, 复杂交通环境不同渗透率情况下的自动驾驶自适应控制方法研究在未来很长的一段时间都将是热点问题.

3.6 自动驾驶控制系统的虚拟测试与评价技术

自动驾驶车辆的设计开发是一项严格的系统工程^[202], 其中测试和评价是关键要素. 自动驾驶控制系统的信息安全性及功能安全性要达到可以信赖的程度, 需要完成数亿至千亿英里的里程测试^[203]. 目前在安全性方面评估自动驾驶汽车主要是基于道路测试^[204]. 要完成既定的里程测试, 金钱成本和时间成本都是挑战^[205]. 美国谷歌公司提出实际道路测试和封闭试验场虚拟测试相结合的方式, 在 7 个月时间内完成了 300 万英里城市道路测试, 大幅度增加了测试速度. 因此, 建立能够反映真实复杂交通环境的虚拟试验平台, 开发可靠的补充测试方法 (如虚拟测试、情景测试), 可以缓解对于实际道路测试的依赖, 对于自动驾驶控制系统测试与评价至关重要, 是未来的发展趋势.

虚拟测试、加速测试等新兴测试方法正逐渐成为当前的研究热点. 为了构建智能驾驶模拟测试场, 美国密歇根大学在当地政府的支持下, 建造了世界上第一座专为测试智能汽车的虚拟小镇 Mcity. Mcity 在 2017 年发布的白皮书中公开了自动驾驶快速测试的方法论, 其主要思想是利用大数据建立可能发生危险情况的随机模型, 并通过基于学习的方法提取自动驾驶车辆的应对结果进行重要性抽样, 从而完成危险情况下自动驾驶的可靠性加速评估, 相较于传统的方式, 该方法能够大幅加快测试速度并且减少资金花费^[196-197]. 新型测试方法需要配合虚拟技术的研究, 例如虚拟测试中车辆的虚拟感知系统构建、虚拟场景的构建及数据集的获取. 密歇根大学交通运输研究所 UMTRI 融合了视频游戏技术和其他虚拟技术, 将现实世界与虚拟世界相结合, 应用增强现实技术创造出一种更快、更有效、更具经济效益的 CAV (Computer aided verification) 测试方法^[198]. 文献[206]指出在驾驶模拟系统中虚拟智能车辆对系统的真实感和实验的可靠性要求很高, 并使用数据库技术与碰撞检测算法构建虚拟智能车辆测试方法. 文献[207]基于新型视觉传感器, 利用公共数据集可用信息合成基于事件相机数据的模拟器, 将传统相机与基于事件的传感器相结合, 具有低延迟、高时间分辨率和高动态范围的优点. 此外, 一些商业仿真软件也用于构建模拟驾驶场景, 如 SIVIC、SCANeR 和 preSCAN 等^[208]. 最近, 基于平行理论的虚拟测试方法被提出^[199-200], 该方法通过虚实互动的车辆智能评估手段来测试和验证无人车对复杂交通场景的理解和行驶决策的能力, 可为推动无人驾驶技术的进一步发展助力.

尽管虚拟测试技术在自动驾驶控制系统测试中发挥着很大作用, 但是自动驾驶控制的测试终究离

不开实车或硬件在环台架测试。目前,很多自动驾驶新增控制模块需要与原底层执行机构电控单元进行信号交互,而底层电控单元开放权限大多掌握在整车厂或电控供应商手中,考虑产品保密和同行业竞争等因素,获得开放权限并不容易,于是一些重要的测试只能停留在仿真阶段。因此,为了打通完整的自动驾驶测试链条,电控单元接口开放将是未来需要解决的问题。

4 结束语

纵观汽车工业的发展历程,汽车驾驶的自动化进程一直都在进行,自动驾驶技术也从辅助驾驶向着方向盘、油门、制动和挡位的完全自动化操作逐步迈进。汽车智能时代的来临凸显了电控的重要性,控制决策与执行层面的自主研发能力是高度自动化汽车量产的前提和保证。智能时代下,汽车自动化进程中存在空前机遇的同时也存在极大的挑战,前方依然有许多未知的难题等待汽车控制工作者去探索。随着先进的算法与更多信息的相互交融衍生出更多新系统与新功能,汽车将会变得越来越智能,也将给我们带来更安全、更经济、更便捷、更舒适的智慧出行。

References

- 1 National Manufacturing-Power-Construction-Strategy-Advisory-Committee. 《Made in China 2025》technology roadmap in robotics. *Robot Industry*, 2015, (5): 36-43
(国家制造强国建设战略咨询委员会. "绿皮书"助跑机器人—解读"中国制造 2025"机器人领域技术路线图. 机器人产业, 2015, (5): 36-43)
- 2 Li Yu-Ke, Liu Yu. Development status and suggestions of intelligent networked automobile in China. *Automobile & Parts*, 2016, (41): 56-59
(黎宇科, 刘宇. 国内智能网联汽车发展现状及建议. 汽车与配件, 2016, (41): 56-59)
- 3 Chen Hong, Guo Lu-Lu, Bian Ning. On automobile intelligentization and key technologies. *Science & Technology Review*, 2017, 35(11): 52-59
(陈虹, 郭露露, 边宁. 对汽车智能化进程及其关键技术的思考. 科技导报, 2017, 35(11): 52-59)
- 4 Chen Hong, Gong Xun, Hu Yun-Feng, Liu Qi-Fang, Gao Bing-Zhao, Guo Hong-Yan. Automotive control: the state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 322-346
(陈虹, 宫洵, 胡云峰, 刘奇芳, 高炳钊, 郭洪艳. 汽车控制的研究现状与展望. 自动化学报, 2013, 39(4): 322-346)
- 5 Deur J, Pavkovic D, Peric N, Jansz M, Hrovat D. An electronic throttle control strategy including compensation of friction and limp-home effects. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(3): 821-834
- 6 Hu Yun-Feng, Li Chao, Li Jun, Guo Hong-Yan, Sun Peng-Yuan, Chen Hong. Observer-based output feedback control of electronic throttles. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(6): 746-754
(胡云峰, 李超, 李骏, 郭洪艳, 孙鹏远, 陈虹. 基于观测器的输出反馈电子节气门控制器设计. 自动化学报, 2011, 37(6): 746-754)
- 7 Powell J D, Fekete N P, Chang C F. Observer-based air fuel ratio control. *IEEE Control Systems Magazine*, 1998, 18(5): 72-83
- 8 Zhu G G, Haskara I, Winkelman I. Closed-loop ignition timing control for SI engines using ionization current feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(3): 416-427
- 9 Hrovat D, Sun J. Models and control methodologies for IC engine idle speed control design. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(8): 1093-1100
- 10 Gerhardt J, Hönninger H, Bischof H. A New Approach to Functional and Software Structure for Engine Management Systems-BOSCH ME7, SAE Technical Paper 980801, SAE, 1998
- 11 Ravi N, Liao H H, Jungkunz A F, Song H H, Gerdes J C. Modeling and control of exhaust recompression HCCI: split fuel injection for cylinder-individual combustion control. *IEEE Control Systems Magazine*, 2012, 32(4): 26-42
- 12 Qiu Z, Santillo M, Jankovic M, Sun J. Composite adaptive internal model control and its application to boost pressure control of a turbocharged gasoline engine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2306-2315
- 13 Hu Y F, Chen H, Wang P, Chen H, Ren L Q. Nonlinear model predictive controller design based on learning model for turbocharged gasoline engine of passenger vehicle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 109: 74-88
- 14 Hsieh M F, Wang J M. Development and experimental studies of a control-oriented SCR model for a two-catalyst urea-SCR system. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(4): 409-422
- 15 Cook J A, Sun J, Buckland J H, Kolmanovsky I V, Peng H, Grizzle J W. Automotive powertrain control — A survey. *Asian Journal of Control*, 2006, 8(3): 237-260
- 16 Glielmo L, Iannelli L, Vacca V, Vasca F. Gearshift control for automated manual transmissions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(1): 17-26
- 17 Szabo T, Buchholz M, Dietmayer K. Optimal control of a gearshift with a dual-clutch transmission. In: Proceedings of ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control. Arlington, USA: ASME, 2011. 751-756
- 18 Tepeš B, Kasać J, Deur J. Optimal control of automated transmission engagement process. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Control Applications. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2012. 329-335
- 19 Gao B Z, Liang Q, Xiang Y, Guo L L, Chen H. Gear ratio optimization and shift control of 2-speed I-AMT in electric vehicle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50(1): 615-631
- 20 Guo L L, Gao B Z, Chen H. Online shift schedule optimization of 2-speed electric vehicle using moving horizon strategy. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2858-2869
- 21 Sciarretta A, Guzzella L. Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, 27(2): 60-70
- 22 Zhao H Y, Ren B T, Chen H, Deng W W. Model predictive control allocation for stability improvement of four-wheel drive electric vehicles in critical driving condition. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(18): 2688-2696
- 23 Xiang W D, Richardson P C, Zhao C M, Mohammad S. Automobile brake-by-wire control system design and analysis. *IEEE*

- Transactions on Vehicular Technology*, 2008, **57**(1): 138–145
- 24 Han Wei, Xiong Lu, Hou Yi-Meng, Yu Zhuo-Ping. Vehicle yaw stability optimized control based on brake by wire system. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, **45**(5): 732–740
(韩伟, 熊璐, 侯一萌, 余卓平. 基于线控制动系统的车辆横摆稳定性优化控制. 同济大学学报(自然科学版), 2017, **45**(5): 732–740)
 - 25 Zhang J, Ioannou P A. Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic: environmental and fuel economy considerations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2006, **7**(1): 92–104
 - 26 Li S E, Jia Z Z, Li K Q, Cheng B. Fast online computation of a model predictive controller and its application to fuel economy-oriented adaptive cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(3): 1199–1209
 - 27 Yamamura Y, Tabe M, Kanehira M, Murakami T. Development of an Adaptive Cruise Control System with Stop-and-Go Capability, SAE Technical Paper 2001-01-0798, SAE, 2001
 - 28 Zhao D B, Hu Z H, Xia Z P, Alippi C, Zhu Y H, Wang D. Full-range adaptive cruise control based on supervised adaptive dynamic programming. *Neurocomputing*, 2014, **125**: 57–67
 - 29 Glaser H. *Electronic Stability Program ESP*. Lycksele, Sweden: Audi Press Presentation, 1996. 13
 - 30 Kremer M A. The electronic stability program (ESP) on the ford focus. In: Proceedings of 2000 European Conference on Vehicle Electronic Systems. Stratford-upon-Avon, UK: Vehicle Electronic Systems, 2000.
 - 31 Sheng Yong-Xin. Study on Lateral Stability Control Strategy for Car [Master thesis], Jilin University, China, 2008
(盛勇鑫. 轿车侧向稳定性控制算法研究 [硕士学位论文], 吉林大学, 中国, 2008)
 - 32 Yim S, Park Y, Yi K. Design of active suspension and electronic stability program for rollover prevention. *International Journal of Automotive Technology*, 2010, **11**(2): 147–153
 - 33 Cao Yang, He Deng-Bo, Yu Fan, Luo Zhe. Generalized predictive control based on vehicle path following strategy by using active steering system. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, **50**(3): 401–406
(曹阳, 贺登博, 喻凡, 罗哲. 基于主动转向的车辆路径跟随广义预测控制. 上海交通大学学报, 2016, **50**(3): 401–406)
 - 34 Liu Cheng-En. Research on the Design and Control Features of the Automobile Active Front Steering [Master dissertation], Chongqing Jiaotong University, China, 2017
(刘成恩. 汽车主动转向系统设计及控制特性研究 [硕士学位论文], 重庆交通大学, 中国, 2017)
 - 35 Cao Yang. Study of Vehicle Active Steering Control Based on Driver Model [Ph. D. dissertation], Shanghai Jiaotong University, China, 2016
(曹阳. 基于驾驶员模型的车辆主动转向控制研究 [博士学位论文], 上海交通大学, 中国, 2016)
 - 36 Zong Chang-Fu, Li Gang, Zheng Hong-Yu, Zhang Ze-Xing. Study progress and outlook of chassis control technology for X-by-wire automobile. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, **26**(2): 160–176
(宗长富, 李刚, 郑宏宇, 张泽星. 线控汽车底盘控制技术研究进展及展望. 中国公路学报, 2013, **26**(2): 160–176)
 - 37 He Lei. Research on Dual-motor Control Method Based on FlexRay Bus for Steering-by-Wire Automobile [Ph. D. dissertation], Jilin University, China, 2011
(何磊. 基于 FlexRay 总线的线控转向系统双电机控制方法研究 [博士学位论文], 吉林大学, 中国, 2011)
 - 38 Zong Chang-Fu, Han Yan-Dong, He Lei, Wang Xiang. Research on variable angle transmission ratio characteristics for automobile with SBW. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, **28**(9): 115–120
(宗长富, 韩衍东, 何磊, 王祥. 汽车线控转向变角传动比特性研究. 中国公路学报, 2015, **28**(9): 115–120)
 - 39 Wu X D, Zhang M M, Xu M, Kakogawa Y. Adaptive feedforward control of a steer-by-wire system by online parameter estimator. *International Journal of Automotive Technology*, 2018, **19**(1): 159–166
 - 40 Wu Meng, Zhang Fei-Tie, Wen Gui-Lin. The control strategy research of unmanned vehicles steering-by-wire system. *Computer Simulation*, 2016, **33**(12): 163–168
(吴蒙, 张飞铁, 文桂林. 无人驾驶汽车线控转向系统控制策略的研究. 计算机仿真, 2016, **33**(12): 163–168)
 - 41 Liu Chang-Chun, Du Dong, Pan Ji-Luan. Predictive control for lane control systems using a small deviation model. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, **55**(10): 1087–1092
(柳长春, 都东, 潘际奎. 基于小偏差模型预测的车道保持辅助控制. 清华大学学报(自然科学版), 2015, **55**(10): 1087–1092)
 - 42 Ren Dian-Bo, Cui Sheng-Min, Wu Hang-Zhe. Preview control for lane keeping and its steady-state error analysis. *Automotive Engineering*, 2016, **38**(2): 192–199
(任殿波, 崔胜民, 吴杭哲. 车道保持预瞄控制及其稳态误差分析. 汽车工程, 2016, **38**(2): 192–199)
 - 43 Guo Kong-Hui, Jiang Hui, Zhang Jian-Wei, Ding Hai-Tao. Automatic parallel parking steering controller based on fuzzy logic control theory. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, **39**(S2): 236–240
(郭孔辉, 姜辉, 张建伟, 丁海涛. 基于模糊逻辑的自动平行泊车转向控制器. 吉林大学学报(工学版), 2009, **39**(S2): 236–240)
 - 44 Crolla D A, Cao D P. The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration. *Vehicle System Dynamics*, 2012, **50**(S1): 95–109
 - 45 Pinto L. Advance Yaw Motion Control of a Hybrid Vehicle Using Twin Rear Electric Motors. *AVEC*, 2010
 - 46 Chen Hui, Gao Bo-Lin, Xu Fan. Review on vehicle sideslip angle estimation. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **49**(24): 76–94
(陈慧, 高博麟, 徐帆. 车辆质心侧偏角估计综述. 机械工程学报, 2013, **49**(24): 76–94)
 - 47 Guo Hong-Yan, Chen Hong, Zhao Hai-Yan, Yang Si-Qi. State and parameter estimation for running vehicle: recent developments and perspective. *Control Theory & Applications*, 2013, **30**(6): 661–672
(郭洪艳, 陈虹, 赵海艳, 杨斯琦. 汽车行驶状态参数估计研究进展与展望. 控制理论与应用, 2013, **30**(6): 661–672)
 - 48 Rajamani R, Piyabongkarn D N. New paradigms for the integration of yaw stability and rollover prevention functions in vehicle stability control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(1): 249–261
 - 49 Mokhiamar O, Abe M. How the four wheels should share forces in an optimum cooperative chassis control. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(3): 295–304
 - 50 Nagai M, Shino M, Gao F. Study on integrated control of active front steer angle and direct yaw moment. *JSAE Review*, 2002, **23**(3): 309–315
 - 51 Gao Xiao-Jie, Yu Zhuo-Ping, Zhang Li-Jun. Coordinated con-

- trol of AFS and ESP based on vehicle state identification. *Automotive Engineering*, 2007, **29**(4): 283–291
(高晓杰, 余卓平, 张立军. 基于车辆状态识别的 AFS 与 ESP 协调控制研究. 汽车工程, 2007, **29**(4): 283–291)
- 52 Cho W, Yoon J, Kim J, Hur J, Yi K. An investigation into unified chassis control scheme for optimised vehicle stability and manoeuvrability. *Vehicle System Dynamics*, 2008, **46**(S1): 87–105
 - 53 Ji Jie, Li Yi-Nong, Zheng Ling, Zhao Shu-En. Integrated control of longitudinal and lateral motion for autonomous vehicle driving system. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, **23**(5): 119–126
(冀杰, 李以农, 郑玲, 赵树恩. 车辆自动驾驶系统纵向和横向运动综合控制. 中国公路学报, 2010, **23**(5): 119–126)
 - 54 Katriniok A, Maschuw J P, Christen F, Eckstein L, Abel D. Optimal vehicle dynamics control for combined longitudinal and lateral autonomous vehicle guidance. In: Proceedings of the 2013 European Control Conference (ECC). Zurich, Switzerland: IEEE, 2013. 974–979
 - 55 Xu L H, Wang Y Z, Sun H B, Xin J M, Zheng N N. Integrated longitudinal and lateral control for Kuafu-II autonomous vehicle. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(7): 2032–2041
 - 56 Nunes A, Reimer B, Coughlin J F. People must retain control of autonomous vehicles. *Nature*, 2018, **556**(7700): 169–171
 - 57 Liu Y H, Fan X Q, Lv C, Wu J, Li L, Ding D W. An innovative information fusion method with adaptive Kalman filter for integrated INS/GPS navigation of autonomous vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **100**: 605–616
 - 58 Lu Bing-Hua, Liu Ting, Zhang Hai-Bin. Introduction and layout of sensors for intelligent driving cars. *Shanghai Auto*, 2017, (11): 40–43
(陆炳华, 刘婷, 张海滨. 智能驾驶汽车传感器介绍及布置. 上海汽车, 2017, (11): 40–43)
 - 59 Ma Guo-Cheng. Research on the Adaptive Cruise Control Tracking System Applied for Motor vehicles [Ph. D. dissertation], Beijing Institute of Technology, China, 2014
(马国成. 车辆自适应巡航跟踪控制技术研究 [博士学位论文], 北京理工大学, 中国, 2014)
 - 60 Kuo Y C, Pai N S, Li Y F. Vision-based vehicle detection for a driver assistance system. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, **61**(8): 2096–2100
 - 61 Takeuchi E, Yoshihara Y, Yoshiki N. Blind area traffic prediction using high definition maps and LiDAR for safe driving assist. In: Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas, Spain: IEEE, 2015. 2311–2316
 - 62 Heimberger M, Horgan J, Hughes C, McDonald J, Yogamani S. Computer vision in automated parking systems: design, implementation and challenges. *Image and Vision Computing*, 2017, **68**: 88–101
 - 63 Jung H G, Cho Y H, Yoon P J, Kim J. Scanning laser radar-based target position designation for parking aid system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, **9**(3): 406–424
 - 64 Sun Ning, Qin Hong-Mao, Zhang Li, Ge Ru-Hai. Vehicle target recognition based on multi-sensor information fusion. *Automotive Engineering*, 2017, **39**(11): 1310–1315
(孙宁, 秦洪懋, 张利, 葛如海. 基于多传感器信息融合的车辆目标识别方法. 汽车工程, 2017, **39**(11): 1310–1315)
 - 65 Möbus R, Baotic M, Morari M. Multi-object adaptive cruise control. In: Proceedings of the 6th International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control. Prague, Czech Republic: Springer, 2003. 359–374
 - 66 Cheng H, Zheng N N, Zhang X T, Qin J J, Van De Wetering H. Interactive road situation analysis for driver assistance and safety warning systems: framework and algorithms. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, **8**(1): 157–167
 - 67 Paden B, Čáp M, Yong S Z, Yershov, D, Frazzoli E. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, **1**(1): 33–55
 - 68 Kanayama Y J, Hartman B I. Smooth local-path planning for autonomous vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 1997, **16**(3): 263–284
 - 69 Feng Lai-Chun. Research on Autonomous Vehicle Motion Planning Method Using Parameterized RRT Based on Guiding Area [Master thesis], University of Science and Technology of China, China, 2017
(冯来春. 基于引导域的参数化 RRT 无人驾驶车辆运动规划算法研究 [硕士学位论文], 中国科学技术大学, 中国, 2017)
 - 70 Su Ti, Yang Ming, Wang Chun-Xiang, Tang Wei, Wang Bing. Classification and regression tree based traffic merging for method self-driving vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(1): 35–43
(苏梯, 杨明, 王春香, 唐卫, 王冰. 一种基于分类回归树的无人车汇流决策方法. 自动化学报, 2018, **44**(1): 35–43)
 - 71 Furda A, Vlacic L. Enabling safe autonomous driving in real-world city traffic using multiple criteria decision making. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2011, **3**(1): 4–17
 - 72 Ishikawa K, Fujinami T, Sakurai A. Integration of constraint logic programming and artificial neural networks for driving robots. In: Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the Next Millennium. Maui, USA: IEEE, 2001. 1011–1016
 - 73 Chong L S, Abbas M M, Flintsch A M, Higgs B. A rule-based neural network approach to model driver naturalistic behavior in traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, **32**: 207–223
 - 74 Xu Jun, Li Yi-Bing. A driver behavior model based on Markov decision processes. *Automotive Engineering*, 2008, **30**(1): 14–16, 60
(许骏, 李一兵. 基于 Markov 决策过程的驾驶员行为模型. 汽车工程, 2008, **30**(1): 14–16, 60)
 - 75 Wang Juan, Zhu Qing-Bao, Cui Jing. Robot path planning based on Bayes decision in complex environment. *Computer Engineering and Applications*, 2012, **48**(2): 245–248
(王娟, 朱庆保, 崔靖. 复杂环境下基于贝叶斯决策的机器人路径规划. 计算机工程与应用, 2012, **48**(2): 245–248)
 - 76 Ulbrich S, Maurer M. Probabilistic online POMDP decision making for lane changes in fully automated driving. In: Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). The Hague, Netherlands: IEEE, 2013. 2063–2067
 - 77 Brechtel S, Gindele T, Dillmann R. Probabilistic decision-making under uncertainty for autonomous driving using continuous POMDPs. In: Proceedings of the 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China: IEEE, 2014. 392–399

- 78 Havlak F, Campbell M. Discrete and continuous, probabilistic anticipation for autonomous robots in urban environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, **30**(2): 461–474
- 79 Tran Q, Firl J. Modelling of traffic situations at urban intersections with probabilistic non-parametric regression. In: Proceedings of the 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Gold Coast, Australia: IEEE, 2013. 334–339
- 80 Friedman J H. An overview of predictive learning and function approximation. *From Statistics to Neural Networks: Theory and Pattern Recognition Applications*. Berlin Heidelberg: Springer, 1994. 1–61
- 81 Osborne M J, Rubinstein A. *A Course in Game Theory*. Cambridge: MIT Press, 1994.
- 82 Graves A, Wayne G, Reynolds M, Harley T, Danihelka I, Grabska-Barwińska A, et al. Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory. *Nature*, 2016, **538**(7626): 471–476
- 83 Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, Clapp T. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, **50**(2): 174–188
- 84 Ando N, Fujimoto H. Yaw-rate control for electric vehicle with active front/rear steering and driving/braking force distribution of rear wheels. In: Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). Nagaoka, Niigata, Japan: IEEE, 2010. 726–731
- 85 Wang F, Chen H, Guo H Y, Cao D P. Constrained H_∞ control for road vehicles after a tire blow-out. *Mechatronics*, 2015, **30**: 371–382
- 86 Wang F, Chen H, Cao D P. Nonlinear coordinated motion control of road vehicles after a tire blowout. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, **24**(3): 956–970
- 87 Wang F, Chen H, Guo K H, Cao D P. A novel integrated approach for path following and directional stability control of road vehicles after a tire blow-out. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **93**: 431–444
- 88 Wang Fei, Liu Bai-Nan, Guo Hong-Yan, Chen Hong. Trajectory tracking and stability control for vehicle after tire blow-out. *Electric Machines and Control*, 2013, **17**(11): 97–104
(王菲, 刘柏楠, 郭洪艳, 陈虹. 爆胎汽车的轨迹跟踪与稳定性控制. 电机与控制学报, 2013, **17**(11): 97–104)
- 89 Shen X M, Yu F. Investigation on integrated vehicle chassis control based on vertical and lateral tyre behaviour correlativity. *Vehicle System Dynamics*, 2006, **44**(S1): 506–519
- 90 Song J. Integrated control of brake pressure and rear-wheel steering to improve lateral stability with fuzzy logic. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, **13**(4): 563–570
- 91 Li Yong. Research on Multi-Vehicle Cooperation and Control in an Intersection without Traffic Light [Master thesis], Beijing Institute of Technology, China, 2015
(李勇. 无信号灯十字路口协作车辆控制研究 [硕士学位论文], 北京理工大学, 中国, 2015)
- 92 Kawabe T, Nishira H, Ohtsuka T. An optimal path generator using a receding horizon control scheme for intelligent automobiles. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications. Taipei, China: IEEE, 2004. 1597–1602
- 93 Glaser S, Vanholme B, Mammar S, Gruyer D, Nouvelière L. Maneuver-based trajectory planning for highly autonomous vehicles on real road with traffic and driver interaction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 589–606
- 94 Koo Y, Kim J, Han W. A method for driving control authority transition for cooperative autonomous vehicle. In: Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Seoul, South Korea: IEEE, 2015. 394–399
- 95 Hu Yun-Feng, Qu Ting, Liu Jun, Shi Zhu-Qing, Zhu Bing, Cao Dong-Pu, et al. Human-machine cooperative control of intelligent vehicle: recent developments and future Perspectives. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(7): 1261–1280
(胡云峰, 曲婷, 刘俊, 施竹清, 朱冰, 曹东璞, 等. 智能汽车人机协同控制的研究现状与展望. 自动化学报, 2019, **45**(7): 1261–1280)
- 96 Xu F, Chen H, Gong X, Mei Q. Fast nonlinear model predictive control on FPGA using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(1): 310–321
- 97 Whaiduzzaman M, Sookhak M, Gani A, Buyya R. A survey on vehicular cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, **40**: 325–344
- 98 Yang M, Otterness N, Amert T, Bakita J, Anderson J H, Smith F D. Avoiding pitfalls when using NVIDIA GPUs for real-time tasks in autonomous systems. In: Proceedings of the 30th European Conference on Real-Time Systems (ECRTS 2018). Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2018. 1–21
- 99 Jalali H, Hinton K, Ayre R, Alpcan T, Tucker R S. Fog computing may help to save energy in cloud computing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, **34**(5): 1728–1739
- 100 Shi W J, Alawieh M B, Li X, Yu H F. Algorithm and hardware implementation for visual perception system in autonomous vehicle: a survey. *Integration*, 2017, **59**: 148–156
- 101 Abadi M, Barham P, Chen J M, Chen Z F, Davis A, Dean J, et al. TensorFlow: a system for large-scale machine learning. In: Proceedings of the 12th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation. Savannah, USA: ACM, 2016. 265–283
- 102 Cheng L, Henty B E, Stancil D D, Bai F, Mudalige P. Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, **25**(8): 1501–1516
- 103 Vaezi M, Ding Z G, Poor V. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Cham: Springer, 2019.
- 104 Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress: 2017. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, **30**(6): 1–197
(《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017. 中国公路学报, 2017, **30**(6): 1–197)
- 105 Wang W, Liu Z Y, Xie R R. Quadratic extended Kalman filter approach for GPS/INS integration. *Aerospace Science and Technology*, 2006, **10**(8): 709–713
- 106 Liu Y H, Fan X Q, Lv C, Wu J, Li L, Ding D W. An innovative information fusion method with adaptive Kalman filter for integrated INS/GPS navigation of autonomous vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **100**: 605–616
- 107 Hinton G E, Osindero S, Teh Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*, 2006, **18**(7): 1527–1554

- 108 Jaradat M A K, Abdel-Hafez M F. Enhanced, delay dependent, intelligent fusion for INS/GPS navigation system. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(5): 1545–1554
- 109 Ren S Q, He K M, Girshick R, Sun J. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. In: *Proceedings of the 28th Conference on Neural Information Processing Systems*. Cambridge, UK: MIT Press: ACM, 2015. 91–99
- 110 Bojarski M, Del Testa D, Dworakowski D, Firner B, Flepp B, Goyal P, Jackel L D, et al. End to end learning for self-driving cars. *Arxiv Preprint Arxiv*: 1604.07316, 2016.
- 111 Bojarski M, Yeres P, Choromanska A, Choromanski K, Firner B, Jackel L, et al. Explaining how a deep neural network trained with end-to-end learning steers a car. *arXiv preprint arXiv*: 1704.07911, 2017.
- 112 Kim J, Park C. End-to-end ego lane estimation based on sequential transfer learning for self-driving cars. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. Honolulu, USA: IEEE, 2017. 1194–1202
- 113 Sallab A E, Abdou M, Perot E, Yogamani S. End-to-end deep reinforcement learning for lane keeping assist. *arXiv preprint arXiv*: 1612.04340, 2016.
- 114 Brechtel S, Gindele T, Dillmann R. Probabilistic MDP-behavior planning for cars. In: *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Washington, USA: IEEE, 2011. 1537–1542
- 115 Galceran E, Cunningham A G, Eustice R M, Olson E. Multipolicy decision-making for autonomous driving via change-point-based behavior prediction: theory and experiment. *Autonomous Robots*, 2017, **41**(6): 1367–1382
- 116 Zhang Y X, Gao B Z, Guo L L, Chen H, Zhao J H. Velocity control in a right-turn across traffic scenario for autonomous vehicles using kernel-based reinforcement learning. In: *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. Jinan, China: IEEE, 2017. 6211–6216
- 117 Zhu Q, Huang Z H, Sun Z P, Liu D X, Dai B. Reinforcement learning based throttle and brake control for autonomous vehicle following. In: *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. Jinan, China: IEEE, 2017. 6657–6662
- 118 Huang Z H, Xu X, He H B, Tan J, Sun Z P. Parameterized batch reinforcement learning for longitudinal control of autonomous land vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(4): 730–741
- 119 Xu N Y, Tan B W, Kong B Y. Autonomous driving in reality with reinforcement learning and image translation. *arXiv preprint arXiv*: 1801.05299, 2018.
- 120 Sadigh D, Sastry S, Seshia S A, Dragan A D. Planning for autonomous cars that leverage effects on human actions. *Robotics: Science and Systems*. Ann Arbor, MI, USA, 2016. 2
- 121 Bieshaar M, Reitberger G, Krefß V, Zernetsch S, Doll K, Fuchs E, et al. Highly automated learning for improved active safety of vulnerable road users. *arXiv preprint arXiv*: 1803.03479, 2018.
- 122 Tian Y C, Pei K X, Jana S, Ray B. DeepTest: automated testing of deep-neural-network-driven autonomous cars. In: *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering*. Gothenburg, Sweden: ACM, 2018. 303–314
- 123 Duan Yan-Jie, Lv Yi-Sheng, Zhang Jie, Zhao Xue-Liang, Wang Fei-Yue. Deep learning for control: the state of the art and prospects. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(5): 643–654 (段艳杰, 吕宜生, 张杰, 赵学亮, 王飞跃. 深度学习在控制领域的研究现状与展望. *自动化学报*, 2016, **42**(5): 643–654)
- 124 Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, Rusu A A, Veness J, Bellemare M G, et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 2015, **518**(7540): 529–533
- 125 Chen Hong. *Model Predictive Control*. Beijing: China Science Press, 2013. (陈虹. 模型预测控制. 北京: 中国科学出版社, 2013.)
- 126 Hrovat D. MPC-based idle speed control for IC engines. In: *Proceedings of 1996 FISITA Conference*. 1996.
- 127 Huang M, Zaseck K, Butts K, Kolmanovsky I. Rate-based model predictive controller for diesel engine air path: design and experimental evaluation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, **24**(6): 1922–1935
- 128 Gong X, Kolmanovsky I, Garone E, Zaseck K, Chen H. Constrained control of free piston engine generator based on implicit reference governor. *Science China Information Sciences*, 2018, **61**(7): Article No.70203
- 129 Di Cairano S, Liang W, Kolmanovsky I V, Kuang M L, Phillips A M. Power smoothing energy management and its application to a series hybrid powertrain. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(6): 2091–2103
- 130 Guo L L, Gao B Z, Gao Y, Chen H. Optimal energy management for HEVs in eco-driving applications Using Bi-Level MPC. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **18**(8): 2153–2162
- 131 Hsieh M F, Wang J M, Canova M. Two-level nonlinear model predictive control for lean NO_x trap regenerations. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2010, **132**(4): Article No.041001
- 132 Bemporad A, Bernardini D, Long R X, Verdejo J. Model Predictive Control of Turbocharged Gasoline Engines for Mass Production, SAE Technical Paper 2018-01-0875, SAE, 2018.
- 133 Guo H Y, Liu F, Xu F, Chen H, Cao D P, Ji Y. Nonlinear model predictive lateral stability control of active chassis for intelligent vehicles and its FPGA implementation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(1): 2–13
- 134 Wang F, Chen H, Guo L L, Hu Y F. Predictive safety control for road vehicles after a tire blowout. *Science China Information Sciences*, 2018, **61**(7): Article No.70209
- 135 Xu X, Chen H, Lian C Q, Li D Z. Learning-based predictive control for discrete-time nonlinear systems with stochastic disturbances. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, **29**(12): 6202–6213
- 136 Xu F, Chen H, Gong X, Mei Q. Fast nonlinear model predictive control on FPGA using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(1): 310–321
- 137 Khalil H K. *Nonlinear Systems* (Third Edition). Prentice Hall, Upper Saddle River: Pearson, 2002.
- 138 Chen H, Gong X, Liu Q F, Hu Y F. Triple-step method to design non-linear controller for rail pressure of gasoline direct injection engines. *IET Control Theory & Applications*, 2014, **8**(11): 948–959
- 139 Liu Q F, Gong X, Chen H, Xin B Y, Sun P Y. Nonlinear GDI rail pressure control: design, analysis and experimental implementation. In: *Proceedings of the 34th Chinese Control Confer-*

- ence (CCC). Hangzhou, China: IEEE, 2015. 8132–8139
- 140 Gao B Z, Chen H, Liu Q F, Chu H Q. Position control of electric clutch actuator using a triple-step nonlinear method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(12): 6995–7003
 - 141 Wang F, Chen H, Cao D P. Nonlinear coordinated motion control of road vehicles after a tire blowout. *IEEE Transactions on Control Systems technology*, 2016, **24**(3): 956–970
 - 142 Wang Y L, Zong C F, Li K, Chen H. Fault-tolerant control for in-wheel-motor-driven electric ground vehicles in discrete time. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, **121**: 441–454
 - 143 Na X X, Cole D J. Modelling of a human driver's interaction with vehicle automated steering using cooperative game theory. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, **6**(5): 1095–1107
 - 144 Dextreit C, Kolmanovsky I V. Game theory controller for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, **22**(2): 652–663
 - 145 Yin X, Chen J, Li Z J, Li S Y. Robust fault diagnosis of stochastic discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, **64**(10): 4237–4244
 - 146 Qin H, Long S X, Yu K. Simulation research on the shift schedule in the auto with automated manual transmission based on cruise gear shift program. *Advanced Materials Research*, 2013, **712-715**: 2160–2163
 - 147 Hofman T, Dai C H. Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle. In: Proceedings of the 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Lille, France: IEEE, 2010. 1–6
 - 148 Mashadi B, Kazemkhani A, Lakeh R B. An automatic gear-shifting strategy for manual transmissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2007, **221**(5): 757–768
 - 149 Ozatay E, Ozguner U, Filev D. Velocity profile optimization of on road vehicles: pontryagin's maximum principle based approach. *Control Engineering Practice*, 2017, **61**: 244–254
 - 150 Kockelman K, Avery P, Bansal P, Boyles S D, Bujanovic P, Choudhary T, et al. Implications of Connected and Automated Vehicles on the Safety and Operations of Roadway Networks: A Final Report. CTR Technical Report FHWA/TX-16/0-6849-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, USA, 2016.
 - 151 Beusen B, Broekx S, Denys T, Beckx C, Degraeuwe B, Gijssbers M, et al. Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, **14**(7): 514–520
 - 152 Kamal M A S, Mukai M, Murata J, Kawabe T. Ecological driver assistance system using model-based anticipation of vehicle-road-traffic information. *IET Intelligent Transport Systems*, 2010, **4**(4): 244–251
 - 153 ARPA-E Programs [Online], available: <https://arpa-e.energy.gov/?q=program-listing>, December 13, 2019.
 - 154 Ahn K, Rakha H A, Park S. Ecodrive application: algorithmic development and preliminary testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013, **2341**(1): 1–11
 - 155 Barth M, Boriboonsomsin K. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, **14**(6): 400–410
 - 156 Asadi B, Vahidi A. Predictive cruise control: utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, **19**(3): 707–714
 - 157 Jin Q, Wu G Y, Boriboonsomsin K, Barth M J. Power-based optimal longitudinal control for a connected eco-driving system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(10): 2900–2910
 - 158 Dib W, Chasse A, Moulin P, Sciarretta A, Corde G. Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications. *Control Engineering Practice*, 2014, **29**: 299–307
 - 159 Sciarretta A, De Nunzio G, Ojeda L L. Optimal ecodriving control: energy-efficient driving of road vehicles as an optimal control problem. *IEEE Control Systems Magazine*, 2015, **35**(5): 71–90
 - 160 Guo L L, Gao B Z, Liu Q F, Tang J H, Chen H. On-line optimal control of the gearshift command for multispeed electric vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, **22**(4): 1519–1530
 - 161 Saust F, Wille J M, Maurer M. Energy-optimized driving with an autonomous vehicle in urban environments. In: Proceedings of the 75th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama, Japan: IEEE, 2012. 1–5
 - 162 Wahl H G, Holzäpfel M, Gauterin F. Approximate dynamic programming methods applied to far trajectory planning in optimal control. In: Proceedings of the 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Dearborn, USA: IEEE, 2014. 1085–1090
 - 163 Kamal M A S, Mukai M, Murata J, Kawabe T. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(3): 831–841
 - 164 Rugh J, Farrington R. Vehicle Ancillary Load Reduction Project Close-Out Report: An Overview of the Task and A Compilation of the Research Results, No. NREL/TP-540-42454, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO, USA, 2008.
 - 165 Jeffers M A, Chaney L, Rugh J P. Climate Control Load Reduction Strategies for Electric Drive Vehicles in Warm Weather, No. NREL/CP-5400-63551, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO, USA, 2015.
 - 166 Kim N, Rousseau A, Lee D, Lohse-busch H. Thermal Model Development and Validation for 2010 Toyota Prius, SAE Technical Paper 2014-01-1784, SAE, 2014.
 - 167 Wang H, Kolmanovsky I, Amini M R, Sun J. Model predictive climate control of connected and automated vehicles for improved energy efficiency. In: Proceedings of the 2018 Annual American Control Conference (ACC). Milwaukee, USA: IEEE, 2018. 828–833
 - 168 Yang H, Jin W L. A control theoretic formulation of green driving strategies based on inter-vehicle communications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, **41**: 48–60
 - 169 Lee J, Park B, Malakorn K, So J. Sustainability assessments of cooperative vehicle intersection control at an urban corridor. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, **32**: 193–206
 - 170 Coelho M C, Farias T L, Rouphail N M. Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2005, **10**(4):

- 323–340
- 171 Tielert T, Killat M, Hartenstein H, Luz R, Hausberger S, Benz T. The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emission. In: Proceedings of the 2010 Internet of Things (IOT). Tokyo, Japan: IEEE, 2010. 1–8
 - 172 Barth M, Boriboonsomsin K. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, **14**(6): 400–410
 - 173 Barth M, Mandava S, Boriboonsomsin K, Xia H T. Dynamic ECO-driving for arterial corridors. In: Proceedings of the 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems. Vienna, Austria: IEEE, 2011. 182–188
 - 174 Rajagopalan A, Washington G. Intelligent Control of Hybrid Electric Vehicles using GPS Information, SAE Technical Paper 2002-01-1936, SAE, 2002.
 - 175 Zheng Y, Li S B, Li K Q, Borrelli F, Hedrick J K. Distributed model predictive control for heterogeneous vehicle platoons under unidirectional topologies. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2017, **25**(3): 899–910
 - 176 Li S B, Zheng Y, Li K Q, Wang L Y, Zhang H W. Platoon control of connected vehicles from a networked control perspective: literature review, component modeling, and controller synthesis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, to be published
 - 177 Makarem L, Gillet D. Model predictive coordination of autonomous vehicles crossing intersections. In: Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). The Hague, Netherlands: IEEE, 2013. 1799–1804
 - 178 Turri V, Carvalho A, Tseng H E, Johansson K H, Borrelli F. Linear model predictive control for lane keeping and obstacle avoidance on low curvature roads. In: Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). The Hague, Netherlands: IEEE, 2013. 378–383
 - 179 Wang F, Chen H, Guo L L, Hu Y F. Predictive safety control for road vehicles after a tire blowout. *Science China Information Sciences*, 2018, **61**(7): Article No.70209
 - 180 Guo H Y, Shen C, Zhang H, Chen H, Jia R. Simultaneous trajectory planning and tracking using an MPC method for cyber-physical systems: a case study of obstacle avoidance for an intelligent vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(9): 4273–4283
 - 181 Guo H Y, Liu J, Cao D P, Chen H, Yu R, Lv C. Dual-envelop-oriented moving horizon path tracking control for fully automated vehicles. *Mechatronics*, 2018, **50**: 422–433
 - 182 Ren B T, Chen H, Zhao H Y, Yuan L. MPC-based yaw stability control in in-wheel-motored EV via active front steering and motor torque distribution. *Mechatronics*, 2016, **38**: 103–114
 - 183 Yuan L, Zhao H Y, Chen H, Ren B T. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints. *Mechatronics*, 2016, **38**: 1–15
 - 184 Li Z J, Kolmanovsky I V, Atkins E M, Lu J B, Filev D P, Bai Y C. Road disturbance estimation and cloud-aided comfort-based route planning. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, **47**(11): 3879–3891
 - 185 Mühlbacher-Karrer S, Mosa A H, Faller L M, Ali M, Hamid R, Zangl H, et al. A driver state detection system — combining a capacitive hand detection sensor with physiological sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, **66**(4): 624–636
 - 186 Guo Kong-Hui. Preview follower theory and simulations of large angle cornering motion of a man-vehicle system. *Automotive Engineering*, 1992, **14**(1): 1–11
(郭孔辉. 预瞄跟随理论与人-车闭环系统大角度操纵运动仿真. 汽车工程, 1992, **14**(1): 1–11)
 - 187 Qu T, Chen H, Cao D P, Guo H Y, Gao B Z. Switching-based stochastic model predictive control approach for modeling driver steering skill. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(1): 365–375
 - 188 Qin L J, Wang T. Design and research of automobile anti-collision warning system based on monocular vision sensor with license plate cooperative target. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, **76**(13): 14815–14828
 - 189 Glaser S, Vanholme B, Mammar S, Gruyer D, Nouvelière L. Maneuver-based trajectory planning for highly autonomous vehicles on real road with traffic and driver interaction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 589–606
 - 190 Enache N M, Mammar S, Netto M, Lusetti B. Driver steering assistance for lane-departure avoidance based on hybrid automata and composite Lyapunov function. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(1): 28–39
 - 191 Lv C, Liu Y H, Hu X S, Guo H Y, Cao D P, Wang F Y. Simultaneous observation of hybrid states for cyber-physical systems: a case study of electric vehicle powertrain. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, **48**(8): 2357–2367
 - 192 Petermeijer S M, Abbink D A, De Winter J C F. Should drivers be operating within an automation-free bandwidth? Evaluating haptic steering support systems with different levels of authority. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2015, **57**(1): 5–20
 - 193 Anderson S J, Walker J M, Iagnemma K. Experimental performance analysis of a homotopy-based shared autonomy framework. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2014, **44**(2): 190–199
 - 194 Gong X, Guo Y H, Feng Y H, Sun J, Zhao D. Evaluation of the energy efficiency in a mixed traffic with automated vehicles and human controlled vehicles. In: Proceedings of 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Maui, USA: IEEE, 2018. 1981–1986
 - 195 Rios-Torres J, Malikopoulos A A. Impact of partial penetrations of connected and automated vehicles on fuel consumption and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, **3**(4): 453–462
 - 196 Zhao D, Lam H, Peng H, Bao S, LeBlanc D J, Nobukawa K, et al. Accelerated evaluation of automated vehicles safety in lane-change scenarios based on importance sampling techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **18**(3): 595–607
 - 197 Zhao D, Huang X N, Peng H, Lam H, LeBlanc D J. Accelerated evaluation of automated vehicles in car-following maneuvers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, **19**(3): 733–744
 - 198 Feng Y H, Yu C H, Xu S B, Liu H X, Peng H. An augmented reality environment for connected and automated vehicle testing and evaluation. In: Proceedings of the 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Changshu, China: IEEE, 2018. 1549–1554

- 199 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293–302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293–302)
- 200 Li L, Wang X, Wang K F, Lin Y L, Xin J M, Chen L, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction. *Science Robotics*, 2019, **4**(28): Article No.eaaw4106
- 201 Chen Wei-Hong, An Ji-Yao, Li Ren-Fa, Li Wan-Li. Review on deep-learning-based cognitive computing. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(11): 1886–1897
(陈伟宏, 安吉尧, 李仁发, 李万里. 深度学习认知计算综述. 自动化学报, 2017, **43**(11): 1886–1897)
- 202 Agaram V, Barickman F, Fahrenkrog F, Griffor E, Muharemovic I, Peng H, et al. Validation and verification of automated road vehicles. *Road Vehicle Automation 3*. Cham: Springer, 2016. 201–210
- 203 Kalra N, Paddock S M. Driving to safety: how many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, **94**: 182–193
- 204 Wachenfeld W, Winner H. The new role of road testing for the safety validation of automated vehicles. *Automated Driving: Safer and More Efficient Future Driving*. Cham: Springer, 2017. 419–435
- 205 Pütz A, Zlocki A, Küfen J, Bock J, Eckstein L. Database approach for the sign-off process of highly automated vehicles. In: Proceedings of the 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Detroit, USA, 2017.
- 206 He H W, Lu Y M, Lou Y. Virtual reality based intelligent vehicle modeling in driving SIMULATION system. In: Proceedings of 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. Hangzhou, China: IEEE, 2006. 1–5
- 207 Mueggler E, Rebecq H, Gallego G, Delbruck T, Scaramuzza D. The event-camera dataset and simulator: event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM. *The International Journal of Robotics Research*, 2017, **36**(2): 142–149
- 208 Swanson K S, Brown A A, Brennan S N, LaJambe C M. Extending driving simulator capabilities toward hardware-in-the-loop testbeds and remote vehicle interfaces. In: Proceedings of the 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops). Gold Coast, Australia: IEEE, 2013. 115–120



陈 虹 同济大学特聘教授、吉林大学唐敖庆讲座教授. 1997 年获得德国斯图加特大学工学博士学位. 主要研究方向为预测控制, 鲁棒控制, 非线性控制, 汽车控制.

E-mail: chenh@jlu.edu.cn

(**CHEN Hong** Professor at Tongji University, China and Tangaoqing Joint professor at Jilin University, China. She received her Ph. D. degree from the University of Stuttgart, Germany in 1997. Her research interest covers model predictive control, nonlinear control, optimal and robust control, and automotive control.)



郭露露 美国佐治亚大学博士后副研究员. 2019 年获得吉林大学控制理论与工程博士学位. 主要研究方向为预测控制, 汽车能量管理, 智能网联汽车信息物理安全.

E-mail: guoll14@mails.jlu.edu.cn

(**GUO Lu-Lu** Postdoctoral associate professor at the University of Georgia, USA. He received the Ph. D. degree in control theory and control engineering from Jilin University, China in 2019. His research interest covers model predictive control, automotive energy management, and cyber-physical security of connected, and automated vehicles.)



宫 洵 吉林大学助理教授. 2016 年获得吉林大学控制理论与工程博士学位. 美国密歇根大学工学院博士后、联合培养博士. 主要研究方向为智能网联汽车控制与优化, 车辆大数据分析 with 建模. 本文通信作者.

E-mail: gongxun10@hotmail.com

(**GONG Xun** Assistant professor at Jilin University, China. He received his Ph. D. degree from Jilin University, China in 2016. He was a postdoctoral research fellow and joint Ph.D. candidate at the University of Michigan, USA. His research interest includes control and optimization of connected and automated vehicle, big data analysis and modeling. Corresponding author of this paper.)



高炳钊 吉林大学教授. 2009 年获得日本横滨国立大学机械工程博士学位、吉林大学控制工程博士学位. 主要研究方向为汽车动力传动系统控制.

E-mail: gaobingzhao@hotmail.com

(**GAO Bing-Zhao** Professor at Jilin University, China. He received his Ph. D. degrees from Yokohama National University, Japan and Jilin University, China, respectively in 2009. His main research interest is vehicle powertrain control.)



张 琳 同济大学博士后. 2019 年获得吉林大学工学博士学位. 主要研究方向为汽车底盘动力学控制, 智能运载测试与评价.

E-mail: zhanglin_jlu@foxmail.com

(**ZHANG Lin** Postdoctor at Tongji University. He received his Ph. D. degree in engineering from Jilin University in 2019. His research interest covers automotive chassis dynamics control, intelligent vehicle testing and evaluation.)