

智能汽车人机协同控制的研究现状与展望

胡云峰^{1,2} 曲婷¹ 刘俊² 施竹清² 朱冰¹ 曹东璞^{1,3} 陈虹^{1,2}

摘要 随着人工智能、互联网技术、通信技术、计算机技术的快速发展,以电动化、智能化及网联化为基础的智能汽车成为汽车行业发展的一大趋势.按照汽车智能化、自动化的发展进程,美国汽车工程师协会将智能汽车的发展分为手动驾驶、驾驶辅助、部分自动化、有条件自动化、高度自动化和完全自动化 6 个级别,虽然不同层次、不同功能的汽车智能化技术正迅猛发展,但是真正意义上的全工况自动驾驶在短期内很难实现.因此,在未来很长一段时期内,智能汽车必然面对人机协同控制的局面,本文详细介绍了智能汽车人机协同控制中驾驶员建模及人机驾驶权动态优化控制的国内外研究现状,同时简要介绍了智能汽车测试与评价的国内外研究现状,提炼了共性问题,并对人机协同控制的发展趋势给出了一些观点.

关键词 智能汽车, 人机协同控制, 驾驶员建模, 测试与评价

引用格式 胡云峰, 曲婷, 刘俊, 施竹清, 朱冰, 曹东璞, 陈虹. 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

DOI 10.16383/j.aas.c180136

Human-machine Cooperative Control of Intelligent Vehicle: Recent Developments and Future Perspectives

HU Yun-Feng^{1,2} QU Ting¹ LIU Jun² SHI Zhu-Qing² ZHU Bing¹ CAO Dong-Pu^{1,3} CHEN Hong^{1,2}

Abstract With the rapid development of artificial intelligence, information and communication technology, intelligent vehicle oriented toward electrical, intelligence and network techniques becomes one of the major trends in the automotive industry. The society of automotive engineers (SAE) divides intelligent and autonomous vehicle technologies into six levels: manual driving, driving assistance, partial automation, conditional automation, highly automation and fully automation. Although intelligent and autonomous vehicle technologies at different levels and different functions are developed rapidly, it is very difficult to implement automatic driving in the near future. Therefore, intelligent and autonomous vehicle has to face the situation of human-machine coordinated control in a long period of time. This paper focuses on the research status and future perspectives of driver modeling, cooperative control strategy and test and evaluation of intelligent vehicle, in which the common problems are extracted and some views on the development trends of human-machine cooperative control are given.

Key words Intelligent vehicle, human-machine cooperative control, driver modelling, test and evaluation

Citation Hu Yun-Feng, Qu Ting, Liu Jun, Shi Zhu-Qing, Zhu Bing, Cao Dong-Pu, Chen Hong. Human-machine cooperative control of intelligent vehicle: recent developments and future perspectives. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(7): 1261–1280

收稿日期 2018-03-09 录用日期 2018-08-14
Manuscript received March 9, 2018; accepted August 14, 2018
国家重点研发计划项目 (2018YFB0105103, 2018YFB0105101, 2016YFB0100904), 国家自然科学基金项目 (61790560, 61790564, 61703177), 中国博士后科学基金 (2017M621209)
Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB0105103, 2018YFB0105101, 2016YFB0100904), National Natural Foundation of China (61790560, 61790564, 61703177), Postdoctoral Science Foundation of China (2017M621209)

本文责任编辑 李力

Recommended by Associate Editor LI Li

1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025 中国 2. 吉林大学控制科学与工程系 长春 130025 中国 3. 滑铁卢大学机械与机电工程系 滑铁卢 N2L 3G1 加拿大

1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China 2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China 3. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, University of Waterloo, Waterloo

汽车在提高人们生活水平的同时,也带来了能源、环境、安全、拥堵等日益严重的社会问题.根据国家安全监管总局、交通运输部发布的研究报告显示,2016 年我国发生道路交通事故 864.3 万起,造成死亡人数约 6.3 万,同年世界汽车保有量第三的日本交通事故死亡人数不到 0.4 万,我国交通事故死亡人数是日本的 16 倍;根据前瞻产业研究院发布的《2015~2020 年中国成品油行业市场调研与投资预测分析报告》指出,2015 年中国汽车的燃油消耗约占整个石油消费量的 1/3,预计到 2020 年这个比例将上升到 57%、石油对外依赖度将达到 56% 至 60%;城市交通拥堵日益加剧,据交通部 2014 年发布的数据显示,我国交通拥堵带来的经济损失高达

N2L 3G1, Canada

2500 亿元人民币, 占城市人口可支配收入的 20%。为此, 各国政府与汽车厂商相继提出了“零排放(低碳)”、“零死亡”与“零拥堵”等全新概念与终极目标。

随着人工智能、互联网技术、通信技术、计算机技术的飞速发展, 以电动化、智能化及网联化为基础的智能汽车成为解决上述问题的有效途径。有数据显示, 到 2025 年, 全球智能汽车潜在经济影响为 0.2 万亿~1.9 万亿美元。国家中长期科技发展规划纲要(2006~2020 年)中明确提出将包括汽车智能技术在内的综合交通运输信息平台列为我国中长期科技发展的国家战略, 这也是我国新一届政府“互联网+”行动计划的重要组成部分。汽车信息化和智能化技术关联性广, 商业化应用除车辆本身外, 覆盖道路和交通管理、相关交通参与者、通信和信息服务、互联网产业等, 涉及制修法, 是复杂的系统工程。

按照汽车智能化、自动化的发展进程, 美国汽车工程师协会将智能汽车的发展分为手动驾驶、驾驶辅助、部分自动化、有条件自动化、高度自动化和完全自动化 6 个级别, 如图 1 所示, 按照汽车智能化分级的定义, L0 级别的手段驾驶阶段车辆完全由驾驶员操控, 控制系统只是实现驾驶员的操作行为; L1 级别的驾驶辅助阶段, 控制系统会根据当前的工况、车辆状态及驾驶员的意图对驾驶员的操作进行辅助补偿, 以提高车辆的性能, 如车身电子稳定系统(Electronic stability program, ESP)可提高车辆转弯过程的安全性和操控性, 此时控制系统具有了初步的智能; 随着汽车驾驶智能化程度的不断提高, 智能汽车逐步具有了自适应巡航、特定工况自动驾驶等更高级别的智能控制技术。在这个过程中, 控制系统的智能化水平不断提高, 其在车辆运动中所起

的作用也越来越大, 而驾驶员的作用逐渐被弱化。但是, 驾驶员作为车辆的购买者和使用者, 其对智能汽车操控性、安全性、舒适性及经济性等性能的主观感受与评价是衡量智能化技术好坏的核心标准, 也是汽车智能化技术能否被消费者接受的重要因素。因此, 需要驾驶员(人)和控制系统(机)共同参与完成驾驶任务, 其目的是通过人机智能的混合增强与协作, 在满足驾驶员主观感受的同时, 提高车辆的操控性、安全性、经济型和舒适性等性能指标。本文综述的人机协同控制涵盖了从 L1 级别的驾驶辅助阶段到 L4 级别的部分自动化阶段 4 个不同阶段的汽车智能控制技术。

智能汽车人机协同控制是一种典型的人在回路中的人机协同混合增强智能系统, 如图 2 所示。人类驾驶员与智能控制系统之间存在很强的互补性, 一方面, 与智能控制系统的精细化感知、规范化决策、精准化控制相比, 驾驶员的感知、决策与操控行为易受心理和生理状态等因素的影响, 呈现随机、多样、模糊、个性化和非职业性等态势, 在复杂工况下极易产生误操作行为; 另一方面, 智能控制系统对比人而言, 学习和自适应能力相对较弱, 环境理解的综合处理能力不够完善, 对于未知复杂工况的决策能力较差。因此, 借助人的智能和机器智能各自的优势, 通过人机协同控制, 实现人机智能的混合增强, 形成双向的信息交流与控制, 构建“1+1>2”的人机合作混合智能系统, 可极大促进汽车智能化的发展。

智能汽车人机协同控制由感知、决策和执行三个层面构成, 主要研究内容包括环境感知、传感器信息融合、高精度地图与定位、智能决策与规划、控制执行、信息安全等核心技术^[1]。本文主要针对执行层的人机协同控制问题进行总结和归纳, 包括驾驶

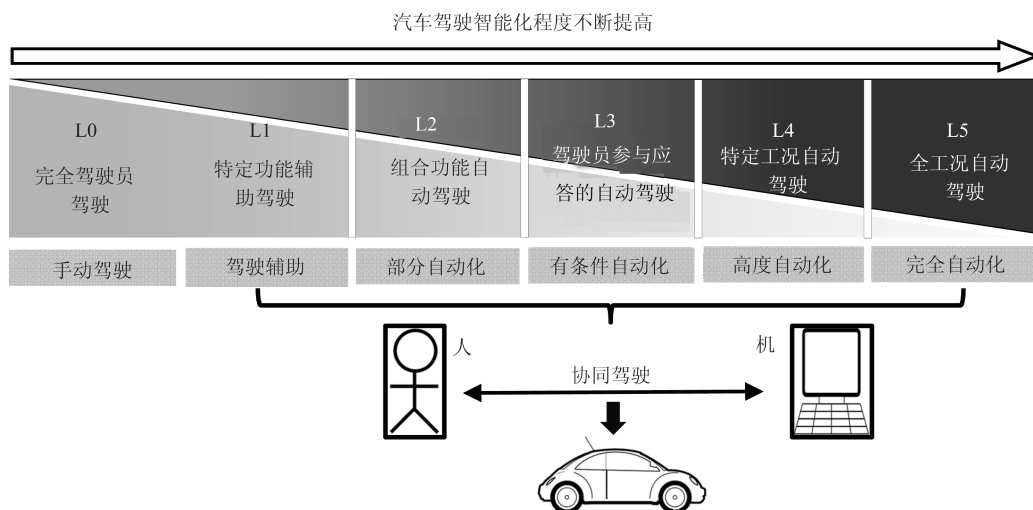


图 1 汽车智能化发展进程

Fig. 1 The development process of intelligent vehicle

员建模、人机驾驶权协同控制及测试与评价。由于从 L1 到 L4 级别的智能汽车都要面临人机协同控制问题, 人机协同控制又是车辆运动的最终执行者, 同时环境感知、传感器信息融合、高精度地图与定位等技术也都服务于人机协同控制。因此, 人机协同控制是汽车智能技术关键核心技术之一, 其研究难点主要体现在一下几个方面: 1) 针对驾驶员随机、多样、模糊、个性化和非职业化的特征, 研究满足个性化需求的人机协同控制方法; 2) 驾驶员的状态和意图对人机协同控制策略的制定起到了至关重要的作用, 如何准确监测驾驶员的状态和辨识驾驶员的意图是人机协同控制的难点之一; 3) 针对汽车行驶交通环境复杂(城市、乡村、高速)及天气情况多样(雨雪、大雾), 研究全工况、全天候的人机协同控制方法; 4) 智能汽车是一个人-车-环境-任务强耦合系统, 其测试场景和任务难以穷尽, 评价准则纷繁复杂, 智能汽车的测试与评价问题也是人机协同控制的难点之一。为了促进汽车智能化的发展, 《中国制造 2025》重点领域技术路线图中明确提出要突破人机交互、人机协同控制等关键技术, 到 2025 年, 实现汽车信息化产品自主份额达 60% 以上, 有条件自动化及高度自动化整车自主份额达 50% 以上的目标。国务院 2017 年 7 月发布的《新一代人工智能发展规划》中也明确提出了包含人机协同的混合增强智能板块, 强调了人工智能对于人机共驾技术研发与测试的重要性。在此背景下, 针对人机协同机理及切换控制提出创新性解决方案, 解决驾驶行为建模、驾驶员驾驶状态感知和意图识别、驾驶员在回路的人机协同感知与认知、人机在决策规划和控制执行中的交互与协同、个性化人机协同控制技术, 以及人机协同控制技术的测试与评价等问题, 不仅在解决

人机协同控制共性理论研究方面具有创新意义, 同时能够对我国汽车产业、人工智能产业的发展起到强有力的支撑作用。

1 人机协同控制的研究现状

人机协同控制是指驾驶员和智能控制系统同时在环, 协同完成驾驶任务。本文主要针对与控制执行层相关的人机协同控制问题进行总结和归纳, 按照不同的研究思路可将人机协同控制大致分为三类, 即增强驾驶员感知能力的智能驾驶辅助、基于特定场景的人机驾驶权切换和人机共驾车辆的驾驶权动态分配。同时, 由于驾驶员的状态、意图和行为对于驾驶过程有着至关重要的影响, 因此, 在研究人机协同控制的过程中, 驾驶员的状态监测、意图识别和驾驶行为建模也必不可少。下面将从驾驶员建模、人机协同控制的两方面详细综述研究现状, 并简述智能汽车测试与评价的研究现状。

1.1 驾驶员建模的研究现状

在智能汽车人机协同控制中, 如何更好地发挥人类驾驶员和智能控制系统各自的优势, 使智能汽车在操纵性、安全性、舒适性、经济性等方面达到最优的性能, 并且能够被驾乘人员接受和信任是智能汽车人机协同控制中的关键问题。在整个系统中最重要的是驾驶员, 文献 [2] 在国内首次较为完整地综述了驾驶行为智能分析研究的研究现状, 从纵向驾驶行为分析和避撞, 横向驾驶行为分析和道路偏离预警, 复杂驾驶行为学习以及驾驶员状态(疲劳、分心等)分析 4 个方面进行了综述。随着汽车智能化技术的发展, 驾驶员成为各子系统间相互协调和控制的关键环节, 需要针对近期的研究成果, 进一步深

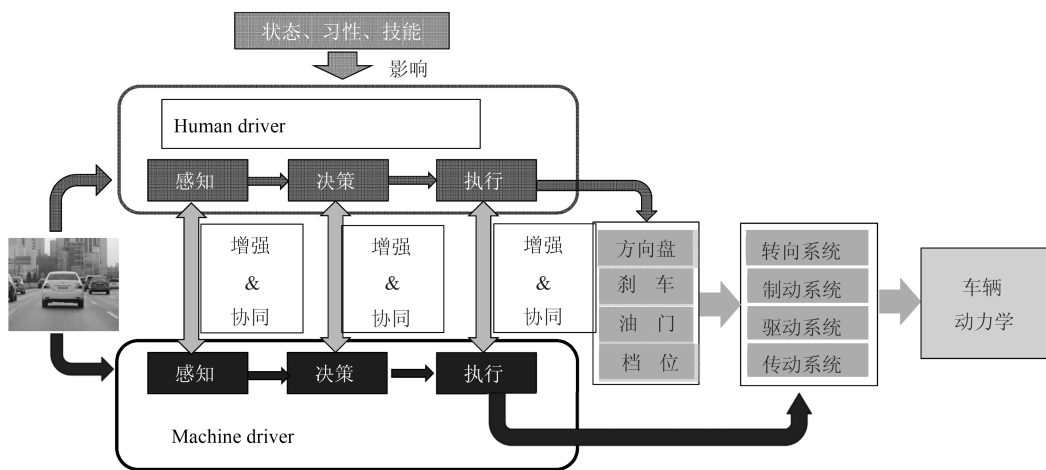


图2 人机协同控制结构示意图

Fig. 2 The structure of human-machine cooperative control

人的总结和探讨. 下面将从驾驶员状态监测与意图识别、传统车辆的驾驶员操纵行为建模和人机共驾系统的驾驶员行为建模三个方面分别进行阐述.

1.1.1.1 驾驶员状态监测与意图识别

1) 驾驶员状态监测

目前关于驾驶员状态监测的研究主要是通过传感器监测驾驶员的眼部、头部、面部、手部和脚部的动作, 借助生理、心理、车辆操纵数据、车辆状态参数等, 利用图像处理、信号处理技术, 采用传感器信息融合方法进行驾驶状态的监测和驾驶行为分析, 如图3所示. 在监测驾驶员状态方面, 主要可以分为疲劳监测、注意力不集中、多任务影响驾驶安全性等方面, 下面将详细进行说明.

在对驾驶员疲劳程度的监测方面, 研究主要集中在利用视觉手段处理摄像头采集的图像来监测驾驶员的疲劳程度. 文献[3]通过使用配备主动红外照明器的远程定位照相机获得视频图像, 通过眼睑运动、注视运动、头部运动、面部表情等视觉线索建立驾驶员疲劳模型, 开发了一种实时非接触式驾驶员疲劳监测实验系统. 文献[4]提出了一种先进的计算机视觉监测技术, 利用智能手机的前端摄像头捕捉驾驶员的图像, 然后使用先进的计算机视觉算法来监测和跟踪驾驶员的面部和眼睛, 从而监测驾驶员疲劳的视觉指标, 该技术使驾驶员疲劳监测系统的

价格更低且更便携. 文献[5]利用灰度投影函数精确定位人眼区域及自适应阈值法获取包含眼睛完整信息的二值图像, 主要包括人脸区域监测、眼睑闭合判断、头部区域定位和疲劳分析4个模块. 除此之外, 文献[6]通过多传感器实现对驾驶员眼睛运动的监测、驾驶员心率的监测和驾驶行为的获取, 通过数据集成和动态贝叶斯网络框架对驾驶员的疲劳程度进行评价. 文献[7]提出了利用模糊支持向量基的非线性语音处理技术来监测驾驶员疲劳的方法, 通过语音信号重建及非线性动力学语音建模, 建立了基于驾驶员语音样本疲劳识别的多特征融合分类器.

有关驾驶员注意力不集中, 即驾驶员在驾驶过程中存在分心行为的研究方面, 文献[8]利用眼动信息进行驾驶员状态识别, 可有效识别驾驶员当前状态是否注意力分散. 文献[9]通过采集方向盘转角和油门踏板位置的信号, 来监测驾驶员的注意力集中程度, 该方法虽然不如眼睛跟踪的准确, 但是利用车辆上现有的传感器即可实现驾驶员注意力集中程度的监测. 另外, 驾驶员在驾驶过程中使用电话也将导致注意力不集中, 具体表现为驾驶过程使用电话会导致车速的标准差要明显大于正常驾驶情况^[10]. 除此之外还有通过驾驶员的脑电波^[11]、心电信号^[12]、皮肤电反应^[13]及肌肉电^[14]等生理指标进行驾驶员状态监测和驾驶行为分析.

利用监测车辆运行状态参数监测驾驶员状态,

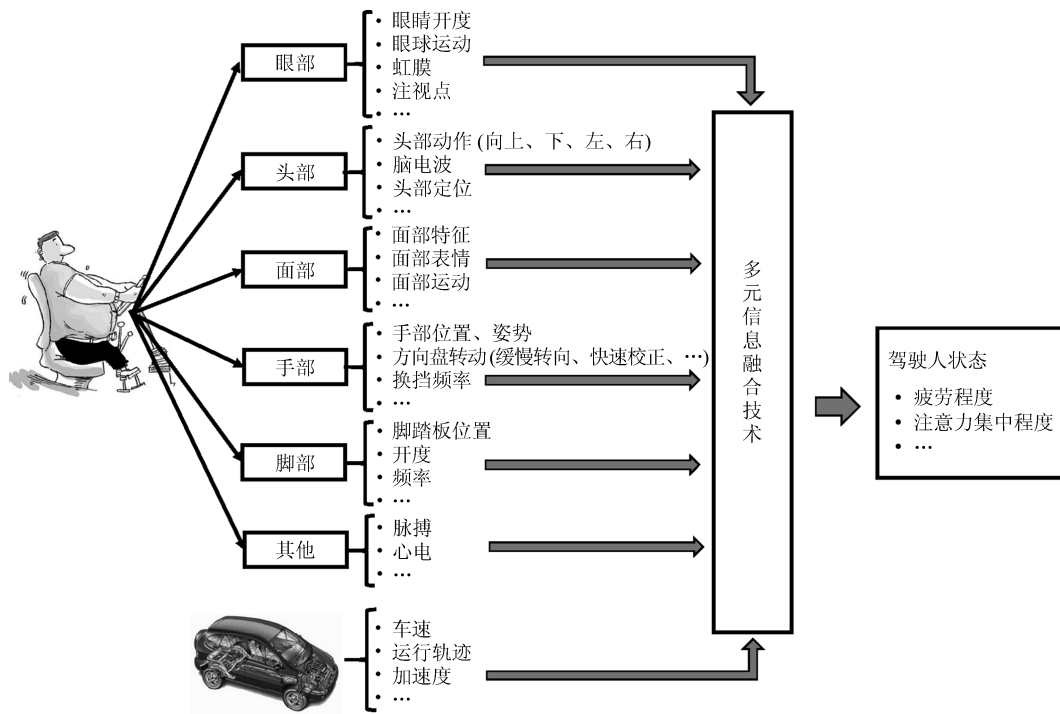


图3 驾驶员状态监测结构示意图

Fig. 3 The structure of driver distraction detection

具有可连续测量、价格低、无干扰的优点,即使在非常苛刻的环境条件也具有较好的鲁棒性,且不会因驾驶员的不同而变化.文献[15]讨论了通过转向运动估算驾驶员疲劳的方法,应用混沌理论解释了方向盘运动的变化,该方法对转向盘的数据进行预处理后,通过快速傅里叶变换与小波变换,计算当前驾驶员的疲劳状态.文献[16]同样应用转动转向盘的行为来监测驾驶员的疲劳程度,通过在驾驶模拟器中收集驾驶员的转向盘转角信号,基于人工神经网络方法给出了疲劳驾驶和非疲劳驾驶的界定范围.文献[17]利用驾驶模拟器测量得到的转向盘转角和车辆轨迹来监测驾驶员的疲劳状态.文献[18]在道路偏离警告和干预系统的范围内,建立以车辆横向位置为输入,方向盘位置为输出的模型对驾驶员状态进行评估.除此之外,文献[19]研究了多任务驾驶对驾驶行为造成的影响,发现多任务会影响驾驶员对车辆的控制能力,表现为紧急制动的次数增加和方向盘转角的变化增大等.同时,车辆的行驶轨迹、运行速度及加速度等车辆状态也会随着驾驶员执行任务的难易程度发生变化^[20].

2) 驾驶员意图识别

驾驶员的驾驶行为受驾驶意图的直接影响,但是驾驶意图不可观测且难以直接获取,因此需要依靠驾驶员的动作、姿势、车辆状态及交通环境信息进行推测和估计.文献[21]利用驾驶员状态信息预测驾驶意图来改善这一问题,通过提取驾驶员头部动态、眼睛、手的位置及脚部等信息,利用稀疏贝叶斯学习来辨别驾驶员的换道意图,提高了辅助驾驶系统的鲁棒性能.文献[22]基于概念模糊集合理论,提出了用于辨识左转向、右转向及直线行驶三个简单的驾驶员驾驶意图辨识模型.文献[23]基于模糊推理方法预测驾驶员的驾驶意图,该模型能有效地揭示驾驶员意图和驾驶环境对纵向最小安全距离的影响,从而提高碰撞预警的准确性和可靠性.文献[24]将驾驶员行为描述为马尔科夫随机过程,用于预测驾驶员的驾驶行为.文献[25]提出了一种用于驾驶员转向驾驶意图辨识的智能认知方法,利用层次化模型可预测长期的驾驶模式.文献[26]应用隐马尔科夫模型建立了驾驶员在十字路口操作的模型,预测驾驶员在十字路口的驾驶意图.文献[27]提出了一种基于高斯混合隐马尔科夫模型的驾驶员超车行为辨识方法,通过建立三个GM-HMM模型来模拟驾驶员左换道、右换道及车道保持的行为.文献[28]基于模糊模式识别方法,对驾驶员的加速意图、减速意图及超车意图进行辨识,并将辨识结果应用于自动变速器的换挡控制.文献[8]根据驾驶意图的特性及各驾驶操作的界限值在线判断出驾驶员的驾驶意图,辨识出的驾驶员驾驶意图通过避障系统无

线传送给其他临近车辆,同样本车也接受其他临近车辆提供驾驶员意图及环境信息,进而本车根据得到的信息及本车的驾驶员的驾驶意图,预知事故的发生以提前采取操作避免碰撞事故.

目前,关于驾驶员状态监测和驾驶意图识别方面的研究成果主要是针对某一特定的驾驶员状态进行监测和意图识别,并且这些研究大多是基于大量的实测数据和统计分析的方法,如何在理论上分析导致驾驶员在驾驶过程中所具有的随机性、复杂性和时变性,需要进行系统的深入研究.

1.1.2 驾驶员操纵行为建模

在智能汽车人机协同控制的发展进程中,所面临的问题之一是如何协调驾驶员驾驶能力与智能控制系统的冲突.这是因为,驾驶员对未知环境的理解和认知是目前智能控制系统所无法匹敌的,而智能控制系统高精度的传感、控制和执行不会像人类驾驶员那样容易疲劳、分心甚至是退化的.因此如何协调两者的优势,形成优势互补是促进智能汽车发展的有效途径,而人是关键环节,下面我们将集中精力分析驾驶员在驾驶过程中是如何感知、决策和执行的.

1) 传统车辆的驾驶员操纵行为建模

关于驾驶员操纵行为建模方面的研究可以追溯到20世纪70年代,其结构如图4所示,文献[29]于1967年开始将飞行员-飞机闭环控制的研究推广到汽车上,开启了驾驶员建模的新篇章.1981年,文献[30]中提出了一种用于仿真的驾驶员行为模型,该模型通过寻找合适的转向盘转角使得所驾驶车辆的运动轨迹与预期轨迹在允许的误差范围内,该模型的出现表明利用控制理论对驾驶员行为建模是行之有效的方法.

从模型中是否包含驾驶员的预瞄环节,可以分为补偿跟踪模型和预瞄跟踪模型.补偿跟踪模型的原理是通过描述驾驶员为消除与预期轨迹的偏差而进行补偿校正的行为特征来模拟驾驶员的行为,代表性成果是文献[31]提出的PID模型和文献[32]提出的Crossover模型.显然驾驶员的驾驶行为必然具有前视特征,我国知名学者郭孔辉院士于1982年提出了预瞄-跟随理论,有力地推动了驾驶员建模领域的发展,该理论不仅可以模拟驾驶员预瞄、跟踪及延迟等驾驶员特性,还可以反应出驾驶员对车辆动力学的认知和反应特性.

若将驾驶员的驾驶行为看成一个伺服性能最优的控制器,利用最优控制理论对驾驶员行为建模是一个行之有效的方法.文献[33]率先利用最优控制理论对驾驶员行为进行建模,该模型通过使目标函数在干扰和约束的作用下达达到最小或最大来模

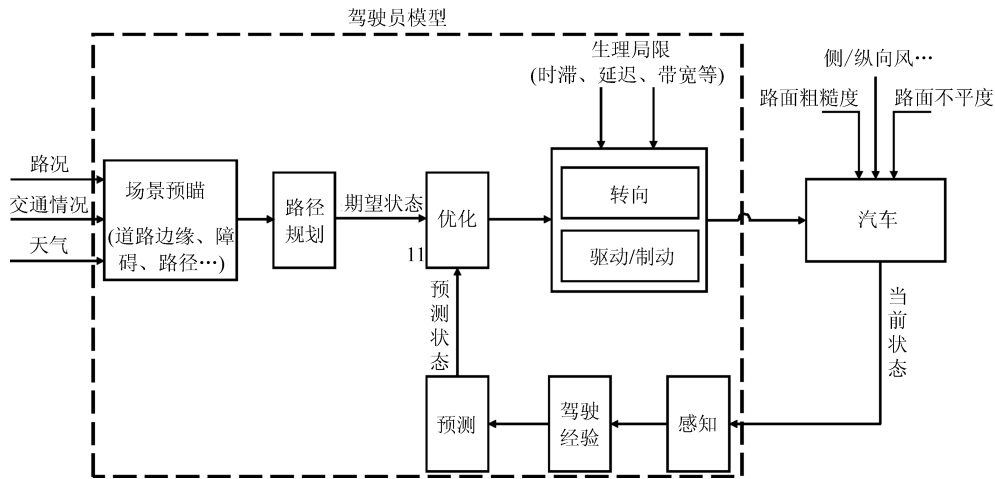


图4 驾驶员操纵行为模型结构示意图

Fig. 4 The structure of driver manipulation behavior modelling

拟驾驶员完成驾驶任务的过程。在如何应用最优控制理论对驾驶员行为建模上,文献[34]提出了基于多点预瞄的线性驾驶员模型,该模型通过求解一系列线性二次型调节(Linear quadratic regulator, LQR)问题得到状态和预瞄的控制增益来模拟驾驶员的转向行为。

近年来模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法在汽车控制上得到了广泛的应用,这是因为驾驶员的驾驶过程与模型预测控制的原理是一致的,文献[35–36]通过模块化建模方式,可以分别有效模拟驾驶员的感知、决策和执行行为。文献[37]中基于MPC思想提出了一种非线性驾驶员转向模型,该模型通过将轮胎侧偏力在一系列侧偏角处线性化,得到具有多个分段线性特性的非线性车辆动力学模型,构成多个内模来反映驾驶员的不同驾驶经验,通过仿真表明,这种多内模框架与MPC相结合的方法在模拟驾驶员经验方面具有潜在的应用价值。在此基础上,文献[38]通过对14名专业驾驶员进行双移线实验测试,利用实测数据辨识转向控制律中的参数,从而获得专业驾驶员的转向行为模型。

2) 人机协同控制中驾驶员操纵行为建模

在对智能汽车的人机协同控制中,驾驶员会对系统的适应导致其行为特征发生变化,因此有必要在对传统的驾驶行为分析的基础上,有针对性的研究在人机共驾中驾驶员的操纵行为^[39–41]。文献[39]在理论上分析了在间接共享控制中驾驶员的适应性和信任度,其中利用集成控制器的输入转换策略描述驾驶员的适应性,通过目标函数的变化表现驾驶员对智能系统信任度的变化。研究表明驾驶员的适应性和信任度将直接影响控制效果和舒适度,而驾驶员的舒适度将影响驾驶员的信任度。文献[42–43]

在博弈论的框架下模拟驾驶员的人机交互行为。其中文献[44]采用非合作纳什均衡理论描述了驾驶员与车辆防撞系统之间的冲突,并预测此时驾驶员的转向行为,研究表明可通过调整目标函数中路径误差的权重,模拟不同驾驶员的转向行为。文献[43]利用史坦柏格均衡理论研究驾驶员与主动前轮转向系统的交互行为,并分别采用线性二次动态优化算法和分布式模型预测控制方法研究驾驶员和主动前轮转向系统的控制策略,仿真结果表明通过改变驾驶员的路径偏差权重值可以反应不同驾驶员的驾驶行为。

目前,关于驾驶员操纵行为建模的研究大多数是模拟一个智能驾驶控制器,缺乏在人机协同控制中对人类驾驶员在感知、生理、心理和自学习等方面能力变化的分析,同时也缺少人机协同控制中驾驶员可能表现出的操纵动作对协同的影响,以及如何与智能控制系统相互协作等方面的研究。

1.2 人机协同控制的研究现状

1.2.1 增强驾驶员感知能力的智能驾驶辅助

增强驾驶员感知能力的智能辅助主要是指车载智能系统经由雷达、摄像头等探测范围更广和获取信息更丰富的感知设备,获得驾驶员不能了解或不全面的交通信息,通过智能系统分析并对驾驶员进行视听触多方位的预警,达到机器增强驾驶员感知的初级“人机协同”模式,其结构如图5所示。目前增强驾驶员感知能力的智能辅助主要分为车辆行驶外部环境的增强感知及车辆本身状态的增强感知两个方面。

在车辆行驶外部环境的增强感知方面,文献[45]通过两个简单的运动学公式对安全碰撞标准进行了说明。文献[46]给出了安全边界约束条件和碰撞预

警的标准, 划定了安全和危险的区域. 文献 [44] 在 THASV-II 平台的基础上提出了基于激光雷达的防追尾预警控制系统. 同时有很多学者利用简单摄像机进行信息感知, 文献 [47] 利用简单摄像机对前方障碍物进行探测, 通过一维扫描对障碍物的位置和距离信息进行处理, 相比高维扫描速度更快, 在高速条件下仍有很好的应用效果. 文献 [48] 利用差分 GPS 与卡尔曼滤波, 综合考虑了车辆速度、加速度、位置等状态信息, 更适合真实的交通场景. 文献 [49] 中不再单纯考虑安全距离, 而是通过引入了驾驶员反应时间和制动最短时间两个参数更好地体现出真实驾驶员的反应, 进而辅助驾驶员驾驶车辆. 上面研究成果从考虑车辆距离及车辆状态, 逐渐趋近真实驾驶情况, 其目的是为了能够更好地辅助驾驶员的操作, 在这个过程中考虑驾驶员的感知特性也是十分必要的, 文献 [50] 建立出包含驾驶员从发现障碍到紧急停车再到车辆完全停止中更多细节信息的 TTC 模型, 并可以根据当前时刻信息简单进行危险预测.

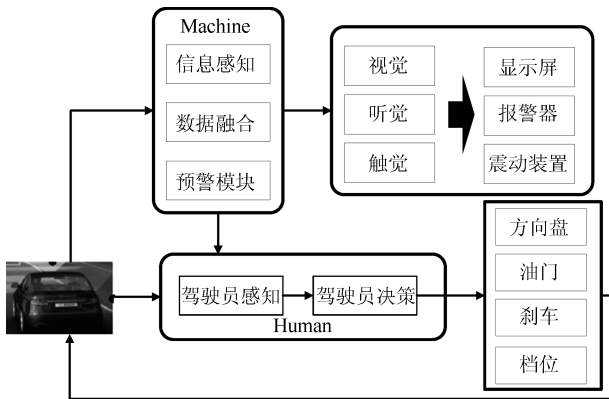


图5 增强驾驶员感知结构示意图
Fig. 5 The structure of enhanced perception

防碰撞预警系统是车与车以及车与交通参与者的预警, 车与道路的预警主要体现在车道偏离预警、盲区监测和换道预警. 文献 [51] 建立了基于视觉的车道偏离预警系统, 可以对未来状态进行短时间预测, 判断是否偏离车道. 考虑驾驶员自身具有校正车道的能力, 文献 [52] 在车道偏离预警机制中将车辆视为一个多凸边形, 并加入了趋向车道边界的速度信息进行预警判断, 当车辆快速偏离车道则进行预警; 反之, 则不预警, 依靠驾驶员的能力进行调整. 文献 [53] 则对预警的条件进行了更详细的分析, 将情况分为驾驶员可以调整和必须预警的情况, 并用偏离时间作为预警的标准. 对于车辆盲区的监测, 文献 [54] 通过监测车辆后方和侧向的盲点区域, 进行“人-车-路”的信息交互, 对换道条件进行提醒预警, 提高驾驶安全性.

在驾驶员对车辆本身状态的增强感知方面, 文

献 [55] 通过对道路湿度温度及路面附着系数等分析, 通过速度反应车辆稳定安全程度, 在将要超过最大安全车速时进行预警. 大多数学者直接采用侧倾或侧翻作为稳定的指标, 文献 [56] 提出了基于侧翻时间预测算法, 对侧翻进行动态预警. 由于重型卡车的侧翻几率更大, 文献 [57] 针对重型卡车, 对侧翻时预测算法进行改进, 设计了更适合重型车的防侧翻预警系统. 文献 [58] 针对带有先进驾驶辅助系统的智能汽车, 从驾驶员角度和先进驾驶辅助系统角度总结了两个方向的研究现状和主要难点, 讨论如何将两个方向结合成一个单一的集成系统提高车辆的安全性和舒适性. 综上, 虽然针对车辆外部行驶环境、车辆状态监测及防碰撞预警等先进驾驶辅助系统的研究已经取得大量成果, 但是现有的增强感知系统对于复杂交通环境的适用性较差, 无法针对驾驶员关注重点进行信息提醒和预警, 同时缺乏驾驶员与感知系统之间增强与协同感知方面的研究.

1.2.2 基于特定场景的人机驾驶权切换控制

由于全工况自动驾驶在短期内很难实现, 智能汽车技术的研究中引入了对于驾驶员和智能控制系统同时在环的人机驾驶权互相切换的控制方式, 这方面研究主要集中在特定场景下实现人类驾驶权和机器驾驶权的切换, 其结构如图6所示. 在某些场景下, 车辆控制超出驾驶员能力之外时, 智能系统获取车辆驾驶权; 相反, 当车辆控制超出智能系统能力范围的工况发生时, 系统需对驾驶员进行唤醒并移交控制权, 如自动紧急制动系统、自适应巡航系统和自动泊车系统等. 针对驾驶权转移这一概念的分类, 文献 [59] 将控制权转移分为强制转移和自由转移, 强制转移指驾驶员与智能系统一方不能胜任时被迫向另一方移交控制权, 自由转移指双方均能胜任时控制权自行转移至能力更好的一方.

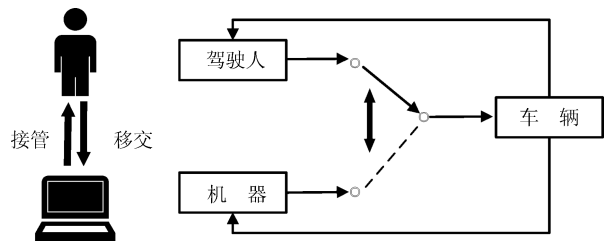


图6 人机驾驶权切换控制结构示意图
Fig. 6 The structure of switched authorities

驾驶员和智能控制系统可以通过物理开关等明确切换控制权限, 在此模式下, 由于存在驾驶员与智能系统间的博弈和冲突, 就需要对驾驶员、智能系统和道路环境等信息进行综合分析, 判断人类驾驶员和智能系统何者更适合控制车辆, 并在二者之间进行切换, 实现特定场景下的驾驶权切换. 为此, 学

者们针对驾驶权切换过程中存在的安全问题、切换控制时涉及驾驶员的接管反应和情景感知方面的影响、唤醒驾驶员注意力的方法、判断合适的切换时机以及具体的切换控制方法等方面进行了细致的研究。

由于驾驶权切换过程中存在诸多人为因素和控制因素导致的安全问题,很可能导致交通事故或临近交通事故的发生。文献[60]认为根据交通状况的不同,驾驶员会做出不同的监测行为,当交通流稀疏时,驾驶员倾向于忽视监测责任,而当交通流密集时,驾驶员会将注意力更多放在监测环境信息。文献[61]认为高度的自动驾驶中驾驶员在驾驶负担和对情况的理解方面有别于自动巡航控制,高度自动驾驶中驾驶员会更多地将注意力分散在非驾驶任务中。由于驾驶员在接管控制时会产生由于反应能力和注意程度不同而导致的安全问题,在人机驾驶权切换中,就需要研究驾驶员的接管反应、情景感知和注意力水平等对于车辆安全性的影响。

在驾驶员对于接管控制的反应方面,主要研究内容包括驾驶员对于不同情况下的肢体和意识反应方式,以及驾驶员驾驶能力随自动驾驶等级提高的变化情况。其中,针对驾驶员的肢体反应,文献[62]利用头部姿态和眼动信息来监测驾驶员的注视点与道路中央的偏离程度,研究了视觉关注状态与接管控制所需时间特性。文献[63]研究了部分自动驾驶情况下,驾驶员手部离开方向盘的间隔对自动控制器不能处理工况发生时的驾驶安全性的影响,通过对交通拥堵时前方车辆紧急停车时手部离开方向盘长短不同的驾驶员的反应进行分析,发现两者在制动时间和情况紧急程度方面都没有显著区别,研究认为,驾驶员手部长时间离开方向盘并不会导致驾驶员在接管情况下的性能缺陷。

针对驾驶员的意识反应时机,文献[64]认为随着驾驶员接管时间的缩短,驾驶员决策和反应变快,但其质量均有下降,并提出将部分自动驾驶作为高度自动驾驶的后备等级。文献[65]对比了三种模式(手动模式、利用增强现实抬头显示和传统抬头显示实现从自动驾驶到手动驾驶切换)下驾驶员在换道请求时的反应。研究发现,相比于手动模式,传统抬头显示使得切换过程达到30秒,且最大的制动踏板速度更高,导致加速度增大,但是增强现实抬头显示可以减轻两种影响,因此改善了缓慢交通情况下的驾驶舒适性。文献[66]研究了在危险交通场景下驾驶员从自动驾驶系统接管并恢复汽车控制过程中的知觉运动性能,分析了驾驶员避障反应的时机、类型和概率以及其受到情况危急程度的影响,认为在自动驾驶过程中,驾驶员接收到的可用视觉信息影响了驾驶员恢复手动控制的速度,但却不影响驾

员开始避障策略的时机。研究认为接管时间、时机和避障的质量在很大程度上是相互独立的,是运动学上的滞后而不是长的接管时间能够预知碰撞的结果。

针对自动驾驶等级对于驾驶员驾驶能力的影响,文献[67]研究了在自动控制失效时,高度自动驾驶和半自动驾驶对驾驶员的影响,认为随着自动驾驶等级的提高,驾驶员的驾驶能力有所降低。文献[68]提出了一种利用混杂系统方法,在线同步估计驾驶员在环的信息物理系统的状态。文献[69]认为自动驾驶模式下驾驶员对于智能驾驶系统过于信任,导致在接管请求发生时一部分人不能及时做出正确的接管动作。文献[70]针对自动驾驶汽车中驾驶员无法长时间完成监视任务的问题,研究了部分自动化驾驶是否可以合理担任监视驾驶状况的角色。利用特斯拉S型车的自动驾驶模式,收集影像观测信息作为公路研究的一部分。对影像的主题分析显示,驾驶员在坚持完成监测责任的过程中,并没有得到合适的支持,驾驶员表现出对自动控制器过于信任。

在影响驾驶员的情景感知方面,主要研究内容包括不同自动驾驶等级对驾驶员情景感知的影响,以及驾驶员在受到非驾驶任务影响时的情景感知能力。文献[71]提出了中级自动驾驶,以保留驾驶员在复杂控制系统中的作用,增强驾驶员情景感知能力。文献[72]研究了4种不同自动驾驶程度(完全自动驾驶、自动转向、自动速度控制和无自动驾驶)对驾驶员情景感知的影响。文献[73]建立了新的积分模型,用于描述自动驾驶过程中紧急接管情况发生时的驾驶员行为,认为是驾驶员的认知而不是行为动作决定了接管时间。文献[74]研究了与非驾驶任务相关的不同层次心理负荷对于接管请求发生时的影响,认为对非驾驶任务的参与会导致情景感知能力的降低。文献[75]研究了驾驶员对于从自动驾驶到手动控制的过程中,对交通状况的理解所需的时间,通过多个驾驶员对于三车道车辆信息的反应,认为驾驶员可以很快复现交通场景,但对于相对速度的估计至少需要20s。

在唤醒驾驶员注意力方面,针对视觉、听觉和触觉等不同唤醒方式,主要研究了对于提醒驾驶员接管车辆控制中的效果。文献[76]对驾驶员唤醒机制做了研究,提出了基于听觉、视觉和触觉及将三者进行结合的4种唤醒方式,并对不同紧急情况下唤醒方式的效用进行了对比。文献[77]对比了不同的声音输出形式,如通用的提示音和额外的语义语音输出对提醒驾驶员即将到来的接管请求方面的影响,实验结果表明在反映信息处理(如驾驶员结束非驾驶相关任务和将手部放在方向盘上)时间上,上面提出的方法比仅有通用提示音的情况用时更短。文献[78]研究了潜在危险发生前4s内,普通提示和特

殊提示对于驾驶员提高情景意识的作用。认为即便在很短时间内,具备提示驾驶员即将到来的危险内容的特殊提示比普通提示使驾驶员更能快速意识到情况并缓和碰撞。文献[79]对比了三种接管请求形式(听觉、触觉震动和听觉与触觉同时)和左右方向性对于驾驶员转向行为的影响。实验结果认为,对于转向接触时间,多模式的接管请求在统计上显著快于单模式的触觉震动的接管请求。但在制动时间和换道时间方面,两者没有显著区别。在三种模式中,多模式方法更佳。

在判断合适的切换控制时机方面,研究了不同情景下以保证车辆控制的安全性为前提的切换控制时机。文献[80]研究了驾驶辅助和自动驾驶中基本的人为因素问题,在此基础上,文献[81]设计的人机协同控制系统在车辆进入不可控的区域时对驾驶员进行提醒,但仅通过判断驾驶员对方向盘的握紧程度进行控制权刚性交接。文献[82]通过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。文献[83]研究了切换控制过程中的参数和设置对于切换控制的影响,文献[84]考虑了汽车控制何时安全地由自动驾驶系统切换到驾驶员的问题,基于描述驾驶员操控汽车能力,定义了车辆状态空间的子集,即驾驶员可控子集的概念,通过界定个体驾驶员正常驾驶包络的极限,找到驾驶员可控子集的估计边界。利用车辆模型和可达性分析,评价当车辆控制从自动驾驶到驾驶员时,车辆起始和保持状态是否在驾驶员可控子集内,并通过实车实验验证了方法的有效性。

在对切换控制方法的研究方面,文献[85]提出了一种评价驾驶员和智能驾驶系统间触觉共享控制合作等级的理论方法。文献[86]基于模型预测控制方法,提出了自动驾驶过程中处理驾驶员接管请求的方法,使得车辆在有限的接管时间内或遇到潜在的稳定障碍和危险工况前安全停车。文献[87]采用博弈论思想和分布式模型预测控制方法进行理论分析和实验研究,文献[88]研究了驾驶人在自动控制驾驶权切换时的作用因素,说明了二者对于人机协同控制的作用。文献[89]当汽车从自动控制切换到手动控制时,针对紧急转向动作和驾驶控制平滑切换的需求,提出了一种从驾驶辅助系统向驾驶员平滑切换转向控制权的方法,即通过驾驶辅助系统,基于触觉协同控制技术调整转向控制强度,并在微型电动车上进行实验验证了该方法的有效性。文献[90]提出了一种贝叶斯网络统计危险估计方法,适用于两种场景下的半自动驾驶车辆,即驾驶员控制和车辆自动控制,这一方法尤其适用于车辆固有技术产生的远程数据信息处理。

目前,针对特定场景人机驾驶权切换控制的研

究大部分尚在原理论证阶段,其方向主要集中在控制权切换前后驾驶人的接管反应、情景感知和唤醒效果等方面。缺少对于人机驾驶权切换控制发生时特定场景的全面探讨,以及关于唤醒策略和接管控制方法方面的研究。并未彻底解决因控制冗余造成的驾驶人与自动控制器间的冲突和负荷加重等问题。

1.2.3 人机系统动态协同控制

随着汽车智能化水平的不断提高,驾驶员和智能控制系统之间的关系不仅仅局限于提醒、警告或者人机之间互相切换,而会形成人机并行控制的复杂动态交互关系。在全工况自动驾驶实现之前,这种关系将会一直存在。为了实现高性能人机协同控制,需要对人机交互方式、驾驶权分配和人机协同关系等因素进行深入研究。现有的人机协同控制主要是利用驾驶员的状态和操纵动作、车辆状态和交通环境等信息,以安全、舒适等性能指标实时协调人与机之间的控制权。目前的驾驶权分配协同方式可以分为两类:输入修正式协同控制和触觉交互式协同控制^[91],下面分成两类详细说明。

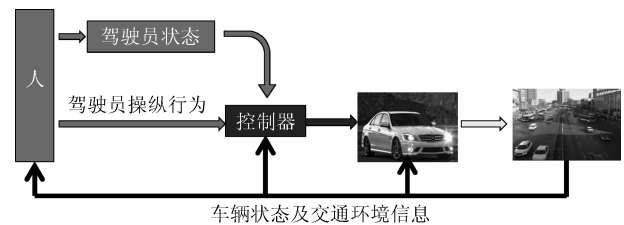


图7 输入修正式人机协同示意图

Fig. 7 The structure of input correction shared control

1) 输入修正式协同控制

输入修正式协同控制(如图7所示)指智能控制系统不直接参与控制端(方向盘、踏板等)的控制,只对驾驶员的操控输入与控制器的输入按照一定比例进行叠加或者修正,并将结果传递至车辆操作系统,实现人机共同驾驶。最初的研究^[92-93]假设驾驶员与控制器之间驾驶权重比例是固定的,通过设计控制器协同驾驶员驾驶车辆。文献[94]研究的底盘线控系统,前轮的实际转角输出是智能系统利用计算得到的期望转角将驾驶员的方向盘输入进行修正后的结果。文献[95]提出了一种车辆侧向运动协同控制方法,该控制方法运用模糊控制通过求解线性二次型优化问题计算控制器动作,同时将车辆纵向速度变化考虑在内,最终通过决策算法确定人机驾驶权分配。文献[96]研究在车联网环境下通信延迟对车辆转向行为的影响,针对延时问题设计了系统的协同转向控制策略,并验证控制算法的稳态性能和鲁棒性。文献[97]利用驾驶员模型预测驾驶员未来的驾驶行为,设计了一种非线性模型预测控制器,利用转角和制动控制,在最小干预情况下帮助驾驶员

完成避障和车道偏离控制. 文献 [98] 针对人机共驾过程中驾驶员行为的不确定性, 设计了一种鲁棒预测控制器, 通过具有随机特性的驾驶员模型对驾驶员行为进行预测, 在不确定驾驶员行为与系统约束情况下, 优化求解出保证驾驶员行车安全的最小转角. 文献 [99] 指出人机之间的驾驶权重应该随着驾驶员意图进行自适应调整. 文献 [100] 认为在人机共驾的过程中应该保证驾驶员的操作自由, 在必要时引入控制动作保证车辆安全, 通过提出路径同伦和人机输入混合的方法, 来保证驾驶员操作自由度和驾驶安全. 文献 [101] 针对后驱车辆设计了一种运动学协同控制策略, 该策略结合迟滞切换和 Lyapunov 理论确定控制率, 并在静态和时变环境下验证了控制策略有效性. 文献 [102] 利用模型预测控制方法实现人机协同控制, 该控制架构通过脑机接口实现驾驶员意图识别, 将跟随驾驶员意图和保证车辆安全同时考虑进一个优化问题中, 实现了在安全性前提下驾驶员尽可能拥有对车辆的绝对控制权. 文献 [103] 将人机协同分为直接和非直接两种协同方式, 并在非直接协同结构下建立滑动探测器监控并调整驾驶员与控制系统驾驶权重. 在此基础上, 文献 [39] 建立驾驶员意图估计模块, 通过估计获得驾驶员意图在非直接人机协同框架下进行人机协同驾驶权重分配. 文献 [40] 进一步讨论了在非直接框架下, 驾驶员对协同控制系统的信任程度对控制器工作性能有显著影响.

在此种协同方式中, 通过对车辆是否到达失稳边界或者预测车辆是否发生碰撞危险来确定人机共驾系统的介入时机与介入程度也是研究热点之一. 文献 [104] 提出协同控制对道路安全至关重要的研究部分不是提高日常驾驶任务的表现, 而是在发生危险工况时人机发生冲突或者突然失去力反馈时会出现怎样的后果, 协助控制不应该持续存在, 应该只在将要发生危险时进行警告或介入即可. 文献 [105] 提出了一种基于最优控制的主动安全框架的设计, 该框架能够在危险规避场景中执行轨道规划、危险评估和人机协同控制, 通过对车辆轨迹的预测实现危险评估, 以危险评估为基础实现不同程度的人机协同, 将车辆运动轨迹保持在可行区域范围内. 文献 [106] 提出了一种集危险评估、稳定性控制和驾驶员行为预测于一体的人机协同框架, 利用非线性模型预测控制方法, 共同优化车辆的制动和转向角来保证驾驶员行车安全. 文献 [107] 采用考虑轮胎非线性特性的凸优化方法实现人机协同转向控制器的设计, 在车辆轨迹预测过程中考虑了轮胎非线性动力学特征, 使控制器能够在发生危险时适时介入保证车辆和驾驶员的安全, 在此基础上, 文献 [108] 提出了一种利用两种安全包络实现避障和稳定控制的

协同控制框架, 一种包络定义车辆方向盘转角的可操纵边界, 另外一种描述了车辆空间上的可行区域, 在此种框架下控制器以最小干预的方式与人类驾驶员共同完成避障和车辆的稳定性控制. 文献 [109] 针对行人可能在道路突然出现的危险工况, 设计了一种基于风险分析的车辆横纵协同控制策略, 并验证该策略能够有效帮助驾驶员避险并跟踪理想速度.

2) 触觉交互式协同控制

相比输入修正式协同控制, 触觉交互式协同控制(如图8所示)有两个优点: a) 驾驶员通过触觉交互与系统进行持续反馈, 人的在环程度更深; b) 在紧急情况下驾驶员可以覆盖系统的输入实现对车辆的完全接管, 保留了驾驶员对车辆的最终控制权^[110]. 文献 [111] 最早提出了触觉交互式协同控制方法, 该研究表明, 在协同控制模式下, 车辆跟踪预期轨迹的能力以及对危险的反应能力都得到了提升. 文献 [112] 在车辆控制中加入了带有预测能力的触觉引导, 证明了此情况下车辆完成驾驶任务的能力和驾驶员的工作负荷能得到进一步的改善. 文献 [113] 将触觉反馈式协同控制应用在方向盘和踏板的控制中, 证明了协同控制下的车辆在车道保持(包括过弯)和跟车任务中的表现均能得到提升. 文献 [114] 利用预测优化控制设计了一种以驾驶员为核心的车道保持协同控制方法, 控制器通过动态前馈补偿和状态反馈相结合的方式实现人机协同转向, 并利用鲁棒比例积分观测器估计驾驶员力矩输入, 实现精确地人机协同转向. 文献 [115] 设计了一种以车道保持为目的的先进辅助驾驶系统, 该系统在预测优化控制方法基础上利用人-车-路一体化模型设计力矩辅助机制, 将驾驶员不确定性行为利用驾驶员模型预测, 并分析了驾驶员行为发生变化时系统的性能和稳定性. 文献 [116] 在研究触觉协同控制的时候, 提到可以采用改变触觉协同控制的强度来平滑地改变自动驾驶的水平, 视为从全人工过程过渡到全自动过程. 文献 [100] 通过对触觉反馈人机协同控制系统的分析, 得出现存的共驾系统能够纠正驾驶员的错误程度较高的驾驶行为, 但是为了提高共驾系统的性能, 必须对驾驶员和共驾系统在小偏差范围内的驾驶权冲突进行研究. 文献 [117] 通过视觉预瞄机制计算车辆的侧向位置偏差和车辆航向角偏差, 同时将侧向位置偏差和航向角偏差作为滑膜切换函数滑膜面的参数, 设计了以驾驶员驾驶状态和车辆位置偏差作为变量的模糊规则, 能够实现控制器和驾驶员的驾驶权平滑过渡的协同控制. 文献 [118] 实现转矩交互式转向共驾系统与直接横摆力矩的集成控制, 提高了路径跟踪性能, 实现了良好的人机合作特性, 并在小型电动车平台上验证了集成控制的优点. 文献 [119] 研究提出了一种风险预测的协同转向控

制, 基于潜在的风险预测, 如在城市道路上骑自行车的人, 在驾驶模拟器实验中, 研究了驾驶员对共驾系统的接受度并验证系统所提供听觉警报和视觉信息的有效性, 同时在具有隐藏的风险场景下实现了协同转向控制.

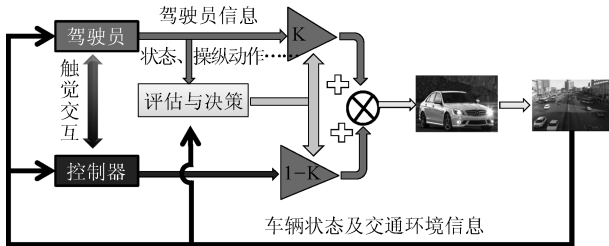


图8 触觉交互式人机共驾示意图

Fig. 8 The structure of haptic interaction shared control

触觉交互式协同控制的关键因素是确定符合人类神经肌肉运动特性的期望辅助力矩, 在研究适应驾驶员神经肌肉特性的触觉交互式人机协同控制方面, 文献 [120] 证明了充分理解人类神经肌肉运动与期望力矩的关系, 是改善人机共驾过程中力矩交互效果的关键因素. 结果表明, 当转矩的调节与真正的神经肌肉行为不匹配时, 指导力矩要么过高, 要么过低, 会大大降低人机共驾性能. 文献 [121] 研究了基于转向扭矩输入的主动转向系统与驾驶员在避障工况下共驾控制特性, 并利用驾驶模拟器重构危险场景, 对驾驶员与主动转向系统之间的协同控制特性进行了研究. 文献 [122] 指出了非个性化辅助系统在面对不同驾驶员时会由于和驾驶员产生转矩冲突影响辅助系统的控制效果, 针对个性化驾驶员调整控制器参数, 实现了针对个性化驾驶员的共驾系统匹配. 文献 [123] 将触觉反馈式协同控制用在了紧急避撞任务, 辅助力过大导致驾驶员出现下意识的反制现象. 文献 [124] 研究了不同程度触觉反馈力下的人机协同情况, 发现反馈力较小时系统性能的提升更为明显. 文献 [125] 研究了不同道路和不同速度下驾驶时人类驾驶员神经肌肉力学特性变化, 并认为触觉反馈共驾控制器参数应该随着道路环境和驾驶员肌肉特性变化进行调整. 文献 [126] 认为人机协同的关键在于确定驾驶员和控制系统之间的驾驶权, 通过对人类手臂生物力学阻抗建模, 设计了一种触觉交互式动态协同转向控制系统, 通过调节共驾系统阻抗的方式实现力矩对驾驶员反馈, 达到驾驶员肌肉神经转向响应与共驾系统的融合, 并在开发的实验平台进行了验证. 文献 [127] 开发一个包括巡航和自动车道保持功能的自动驾驶系统, 驾驶员被建模为一个带有神经肌肉动力学控制器. 该方法的一个特点是利用混合自动控制的概念来对不同的驱动模式进行建模, 利用平均停留时间的概念来评估

共驾系统的稳定性, 并使用度量间隔时间逻辑来对可能影响切换的不同参数进行验证.

通过驾驶员和智能系统的人机智能混合增强与协同可以显著提高汽车的性能, 部分学者围绕协调人机关系方面进行了探索, 以达到增强人机混合系统性能的目的. 文献 [128] 运用两点预瞄驾驶员模型对司机的行为进行预测, 并将其集成到控制器的设计过程中, 提出了一种避免人机冲突情况出现的变权重控制权决策算法. 文献 [129] 提出了一种路径跟踪驾驶员辅助系统, 并研究了与两点预瞄驾驶员模型的交互作用, 以此为基础设计了基于线性多变量输出调节器理论和模型预测控制理论的控制方法. 文献 [130] 在设计触觉反馈式共驾控制器的过程中, 考虑了智能系统对驾驶员意图的预测和控制权的移交问题. 文献 [131] 通过模糊控制方法, 将共驾系统的输入融入到驾驶员意图和输入当中, 运用 Lyapunov 稳定性理论设计控制器, 在不同车速范围内验证控制方法的有效性, 并且仅需要系统输出信号就可以完成控制方法实现, 减小了控制器实现的难度. 文献 [132] 则将转向过程协同控制看作微分博弈问题, 认为在驾驶员控制模型已知的情况下, 共驾控制器的最优输入应该使系统达到纳什均衡. 文献 [133] 指出作为促进合作的主要条件, 必须明确地考虑驾驶员的目标和转向操作, 将驾驶员转向运动描述为一系列运动基本单元形式, 以便计算最佳扭矩. 文献 [134] 利用对比实验验证共驾控制一定程度上影响了驾驶员的驾驶习惯, 当系统失效时驾驶员在弥补系统失效方面有一定困难, 指出协同控制中对人类驾驶员驾驶行为影响的研究十分匮乏. 文献 [135] 对现有触觉反馈式人机共驾系统分析, 着重总结了触觉系统(包括功能、触觉信号、通路和支持任务)的实验测试方法、如何评估这些触觉系统, 以及共驾系统对司机表现和行为产生的影响. 文献 [136] 认为辅助驾驶系统滥用会减弱人类驾驶员的驾驶能力, 而有效的人机协同应该能够促进人类驾驶员的驾驶能力, 以此为出发点提出了一种触觉交互式人机共驾控制策略, 减轻了驾驶员的驾驶负担, 同时促进了驾驶员驾驶能力的提高. 文献 [137] 通过虚构驾驶员模型建立人-车-路一体化控制模型, 并利用模糊控制方法处理驾驶员参数和车辆速度变化所造成的影响, 保障了车辆的安全和舒适性, 并在理论上分析了系统状态和输入受限情况下系统的鲁棒性. 文献 [138] 利用在线辨识参数的方式解决系统控制参数时变问题, 根据模型的更新确定交互等级, 最终计算合适的交互力矩. 文献 [139] 认为高性能的共驾控制实现必须对驾驶员的转向行为进行充分认识, 文中利用两点预瞄驾驶员模型在多工况下辨识模型参数, 利用卡尔曼滤波估计驾驶员行为, 将估计到的驾

驶员行为进行分析并根据驾驶员动作平滑程度利用 Lipschitz 指数进行分类,为共驾控制的高性能实现提供参考。

随着汽车智能化程度的不断提高,人机协同中驾驶员行为的研究是高性能的人机协同控制系统实现不可越过的难题。目前关于人机协同控制中对人的考虑多是利用现存的驾驶员建模方式对驾驶员进行预测和交互,而人机系统的存在会改变传统驾驶员的认知和驾驶习惯,如何对人机系统影响下驾驶员主观感受以及驾驶习惯进行建模目前还处于起步阶段;同时如何实现人机系统混合增强,而不是造成冲突与非合作模式是提升人机协同控制系统性能最关键的因素;最后在人机界面实现人机柔性交互也是提升驾驶员对人机共驾系统接受度值得关注的问题。

1.2.4 人机协同控制测试与评价的研究现状

自从车辆诞生之日起,人们就开始对车辆的运动性能进行测试和评价,传统车辆的运动性能主要包含操纵稳定性和平顺性两个方面。汽车操纵稳定性的测试包括低速行驶转向轻便性测试、稳态转向特性测试、瞬态横摆响应测试、汽车回正能力测试、转向盘角脉冲测试及转向盘中间位置操纵稳定性测试等。汽车平顺性,是指汽车在一般行驶速度范围内行驶时,避免因汽车在行驶过程中所产生的振动和冲击,使人感到不舒服、疲劳,甚至损害健康,或者使货物损坏的性能。由于平顺性主要是根据乘员的舒适程度来评价,所以又称为乘坐舒适性,它是现代高速汽车的主要性能之一^[140]。

不同于传统汽车的测试与评价,智能汽车测试评价的对象已从传统人、车二元独立系统变为人-车-环境-任务强耦合系统,测试场景及测试任务难以穷尽,评价维度纷繁复杂。因此,测试与评价是目前智能汽车的研究难点和热点之一。

在智能汽车测试方面,传统汽车测试主要是人、车二元独立测试,由于人的智能度较高,对车辆的行驶工况、环境及任务等具有很好的学习能力,因此,对于人的测试主要是通过典型工况的驾驶员考试进行测试;对于车的测试主要通过专业测试员在典型工况的实验进行测试。智能汽车是一个人-车-环境-任务强耦合系统,其测试内容包括智能汽车环境感知与定位系统、决策规划系统、控制执行系统及信息安全等模块和功能,需要通过复杂场景及任务的测试说明上述功能和模块的有效性、可靠性等性能。如果完全通过道路测试进行智能汽车测试,测试场景和测试任务难以穷尽,且存在道路安全问题,因此目前的智能汽车测试主要通过软件测试、硬件在环虚拟仿真测试、封闭场地测试及道路测试逐步

完成。测试场景是开展上述测试的重要前提,德国于2016年发起 PEGASUS 项目,计划于2019年底建成用于系统开发和测实验证的场景库^[141]。我国中汽中心、上海汽车城等也启动了中国智能驾驶场景数据库建设。在硬件在环仿真测试方面,Waymo 公司开发了模拟系统 Carcraft,国内外相关高校也就硬件在环实验测试平台的开发展开了相关研究,并建立了智能汽车虚拟测试平台^[142-145]。文献 [142] 搭建硬件在环仿真系统,其目的是在实验室环境进行智能汽车的研发、测试以及雷达和摄像头等传感器功能及算法的开发。文献 [143] 中建立等比例缩小的硬件在环实验平台,该平台系统包括按比例缩放的自主车辆、道路、监控中心、传输装置及定位装置等,并基于该平台进行了高速 U 型转弯等实验。文献 [144] 采用硬件在环测试平台实现了驾驶员智能辅助系统的测试与验证。文献 [145] 搭建了智能网联汽车硬件在环测试平台,该平台由真实发动机、测试机及虚拟动力学模型和交通环境仿真器组成,可实现基于智能交通信息的发动机油耗的优化控制。在封闭测试场建设方面,Waymo 公司建立了测试基地 Castle,美国密歇根大学建立了智能汽车专用实验场 Mcity,并提出了加速测试方法^[146-147],与非加速测试相比,可显著缩短测试时间,瑞典建立了 AstaZero 智能汽车实验场,我国在上海、重庆等地也建立了试点示范区。针对测试场景库的建立和测试平台虽然已经开展了一定的研究,但是现有数据库的测试场景还不够完备,特别是缺少满足我国国情需求的典型场景,场景特征要素尚不清晰;硬件在环测试平台中虚拟测试场景和真实场景之间的有效映射机制尚不明晰,柔性测试工具链和自适应加速测试技术尚不完善。

评价理论是建立智能汽车测试评价体系的基础,除了传统汽车评价的操纵稳定性和平顺性外,智能汽车评价还包括环境复杂度、任务复杂度、人工干预度及智能度等评价指标。美国标准与技术研究院提出了一种包含环境复杂度、任务复杂度和人工干预度的无人系统智能分级方法^[148]。德国亚琛工大研究了涵盖乘员、技术、交通和环境等方面的自动驾驶评价方法^[149]。文献 [150] 建立了两类评估模型评价自动驾驶汽车完成一个驾驶任务的智能度。但现有研究多针对特定功能或性能,缺乏通用性,主客观多维度综合评价理论还有待研究。构建系统的标准体系是智能汽车测试评价研究的核心目标。美国交通部、SAE 等均致力于完善智能汽车相关的标准条例^[151-153]。我国“智能汽车创新发展战略”等均将其列为重要战略任务,并出台了国家车联网产业标准体系建设指南^[154]。但现有智能汽车相关规范多为指南,缺少具体测试数据支撑,可执行性不高,尚无

系统级和整车级测试评价体系。综上,智能汽车测试评价技术尚未成熟,相关问题亟待突破。构建适用于我国国情的测试场景数据库,建立虚拟测试平台和封闭测试场,制定测试评价方法体系和相应国家标准,是我国智能汽车创新发展需要掌握的关键核心技术之一。

2 人机协同控制的研究展望

在人机共驾系统中,风格各异的驾驶员与车辆智能控制系统共同构成了对智能汽车的共驾控制,两者之间动态交互,形成相互耦合与制约关系。目前车辆驾驶任务中人机交互方式大多只停留在感知、决策或执行等单一层面,交互方式相对简单,难以应对未来人机共驾系统多层次多维度交互与协同的需求,且缺乏深入研究驾驶员的状态、意图和行为,以及驾驶员对智能控制系统在感知层、决策层和执行层等驾驶过程中的影响。因此,深入剖析和理解复杂车辆智能控制系统和驾驶员的驾驶机理,探索两者之间的冲突与交互机制,建立人机共驾理论体系,构建人性化、个性化的人机合作混合智能系统,搭建人机共驾系统测试验证平台,可极大促进汽车智能化的发展进程。为此,针对驾驶员共性的驾驶特征和个性的驾驶差异,需建立可反映驾驶状态、习性和技能的数学模型,辨识驾驶意图和预测驾驶行为;针对极限工况下车辆的运动稳定性问题,需探索考虑车辆运动的失稳机理,研究车辆失稳边界的辨识方法、共驾车辆的主动扩稳控制方法,以及车辆碰撞难以避免情况下的碰撞安全性控制;考虑到驾驶员具有较强的环境理解能力,可与智能系统具有精准的信息获取能力形成优势互补的特点,研究驾驶员在回路的人机协同感知与认知方法,增强人机系统对环境的感知与理解;综合可预测的驾驶行为和驾驶意图、失稳边界及协同感知信息,研究人机在决策规划及控制执行中的交互与协同方法;基于上述理论成果,开发个性化的人机共驾系统;研究人机协同控制系统的测试与评价方法,建立覆盖典型场景、评价量化、主客观结合的测评体系,构建虚拟和实车测试相结合的验证平台。为提高我国汽车产业自主创新能力和核心竞争力及实现《中国制造2025》的产业化目标提供基础理论与关键技术支撑。具体研究展望包含如下几个方面:

1) 驾驶员驾驶意图、状态及习性建模与预测

针对驾驶行为具有可完成驾驶任务的共性特征,研究基于先进控制理论、认知心理学与统计分析相结合的驾驶行为固有属性表述与建模方法,揭示驾驶员对行驶环境激励的响应机理、探究影响驾驶员对驾驶任务规划与决策的内因,建立驾驶员操控不同汽车的学习过程模型;针对驾驶员的驾驶状态、习

性和技能具有显著的个性差异的特点,设计典型工况实验进行不同类型驾驶员的人-车-环境闭环系统下驾驶数据的采集,研究基于深度数据挖掘与自学习方法的驾驶状态/负荷的在线监测方法,以及不同类型驾驶员的驾驶习性和技能的表征与辨识方法,实现导致驾驶行为差异性的特征变量提取和定量表述;针对驾驶意图和驾驶行为显著影响智能控制系统性能的问题,研究基于高斯隐马尔科夫模型与混合智能学习相结合的驾驶意图在线识别方法和驾驶行为预测方法;探究驾驶负荷和异常驾驶状态、意图及行为对安全驾驶操控的影响机理,促进智能驾驶系统在安全、舒适、人性化及个性化等性能全面提升。

2) 人机协同控制车辆的运动稳定性和碰撞安全性控制

针对极限工况下车辆的稳定性控制问题,研究轮胎非线性耦合特性和侧-纵-垂向高维动力学建模方法,以及车辆的失稳机理和失稳边界辨识方法;研究交通环境瞬变情况下交通参与主体状态预测及汽车动态安全包络预估方法,实现基于危险程度评估的汽车动态安全行驶区域的划分和快速求解;研究临界失稳状态下考虑驾驶员主观感受的主动扩稳控制方法,扩大车辆运动控制的稳定域;针对事故难以避免的情况,分析汽车行驶状态超出稳定性边界后的动力学特性,探索车辆漂移控制方法和碰后控制方法,进而通过失稳情况下的动力学控制避免交通事故的发生或避免碰撞后出现二次碰撞。

3) 驾驶员在回路的人机协同感知与认知

结合认知心理学、脑科学等领域的最新进展,研究驾驶员对环境及交通参与主体行为的感知与认知信息的提取方法;结合交通知识库及驾驶员行为分析,利用驾驶员感知与认知信息的有限数据,研究基于混合增强智能的人机交互学习机理,构建具有自动生成类似数据功能的生成模型,生成拥有更多驾驶员要素的复杂工况场景;结合智能系统在环境及交通主体感知方面的优势,研究复杂工况场景下的人机协同感知方法,提高人机共驾系统对交通环境的感知能力;在此基础上,利用驾驶员在交通环境理解与预测等认知方面的优势,研究非完整、非结构化信息处理的人工智能新方法,提高人机共驾系统对复杂交通环境的理解与交通参与主体行为的预测能力;实现人机协同共融的环境、情景理解,为实现人车驾驶控制权安全分配及切换控制提供理论支撑及启发机理。

4) 人机在决策规划以及控制执行中的交互与协同

针对如车道保持等人机共驾智能汽车驾驶场景,研究人机期望决策规划与控制执行一致程度的估

算分类模型, 给出共驾控制权的分配协议和柔性转移机制, 研究基于微分博弈论的驾驶员操作强度和车辆行驶性能优化的协同控制方法; 根据驾驶员状态(正常驾驶或异常)和驾驶场景(车道保持、自由换道或紧急避撞等)对共驾模式进行详细划分, 确定各模式下驾驶员控制权限和系统能力边界, 制定相应的控制权分配方案和转移规则; 研究人机共驾过程中控制权的平顺转移机理, 建立基于协同控制器输出的柔性过渡机制, 以操控安全性与驾驶舒适性作为评价指标, 实现共驾车辆驾驶权的柔性切换; 探讨非合作博弈模式相较于合作博弈模式的差异性, 研究基于微分博弈理论的驾驶员操作强度和车辆行驶性能优化的协同控制方法。

5) 个性化人机共驾系统开发

针对复杂行驶环境下人机交互需求, 建立驾驶员使用模式特征表征体系, 获得真实交通中人、车、道路环境三者之间的交互数据, 完善交通流、地理信息、车车通信基础上的信息应用机制; 针对适用于智能驾驶系统的驾驶意图个性化及其参数化描述的问题, 研究在典型工况下车辆运动意图(加速、制动和转向)的辨识与分析方法, 建立基于隐目的地和行为反应的混合式驾驶员驾驶意图评价体系; 利用智能交通信息、地理信息及驾驶员行为预测信息, 研究预测主动安全技术; 考虑个性化驾驶员的驾驶习性对安全、节能、减排及舒适性性能决策的影响, 解析驾驶习性对不同驾驶任务下的性能需求, 基于人机协同控制理论, 研究个性化人机共驾技术, 实现车适应人的目标, 以及个性化的节能、减排和舒适。

6) 人机协同控制系统验证平台开发与测试评价方法

针对实际道路上汽车驾驶遇到的工况复杂, 同时考虑到道路测试中存在的场景模型单一、测试耗时长、损耗大、存在环境干扰因素等问题, 研制模拟驾驶和实车驾驶相融合的人机共驾型智能汽车测试平台, 利用机器学习方法学习已有实际实验场景数据提取特征并扩展测试域, 构建不同工况下虚拟场景并进行实验, 验证系统的驾驶权分配、自主及人机共驾决策理论体系及逻辑转换控制策略、人机共驾系统的整体性能以及驾驶员和自动驾驶系统高度融合及融合等级; 针对人机共驾评价体系评价标准欠缺、实验要求范围广且主观评价实验差异大的特点, 利用数据建模、插值、回归等分析手段, 基于神经网络的多维分析方法, 通过聚类统计分析得到人机系统的驾驶行为参数分布, 训练得到接近人类评车师主观评价结果的类评车师模型, 建立起数字化、便捷化、计算快的类评车师汽车动力学性能主观评价体系, 实现对环境复杂度、任务复杂度、人工干预度及智能度等指标的定量评价, 进而结合客观评价方法

共同构建可评估人机共驾系统全方位性能指标的综合评价理论和体系。

References

- Li Ke-Qiang, Dai Yi-Fan, Li Sheng-Bo, Bian Ming-Yuan. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, **8**(1): 1–14
(李克强, 戴一凡, 李升波, 边明远. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势. *汽车安全与节能学报*, 2017, **8**(1): 1–14)
- Li Li, Wang Fei-Yue, Zheng Nan-Ning, Zhang Yi. Research and developments of intelligent Driving behavior analysis. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(10): 1014–1022
(李力, 王飞跃, 郑南宁, 张毅. 驾驶行为智能分析的研究与发展. *自动化学报*, 2007, **33**(10): 1014–1022)
- Zhu Z W, Ji Q. Real time and non-intrusive driver fatigue monitoring. In: *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Washington, USA: IEEE, 2004. 657–662
- He J, Roberson S, Fields B, Peng J, Cielocha S, Coltea J. Fatigue detection using smartphones. *Journal of Ergonomics*, 2013, **3**: Article No. 3
- Jia D Y, Zou S X. Driver fatigue monitoring based on head and facial features using hierarchical Bayesian method. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **548–549**: 1093–1097
- Lee B G, Chung W Y. Driver alertness monitoring using fusion of facial features and bio-signals. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(7): 2416–2422
- Li X, Tan N L, Wang T L, Su S Q. Detecting driver fatigue based on nonlinear speech processing and fuzzy SVM. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Signal Processing (ICSP)*. Hangzhou, China: IEEE, 2014. 510–515
- Liang Y L, Reyes M L, Lee J D. Real-time detection of driver cognitive distraction using support vector machines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, **8**(2): 340–350
- Torkkola K, Massey N, Wood C. Driver inattention detection through intelligent analysis of readily available sensors. In: *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Washington, USA: IEEE, 2004. 326–331
- Barkana Y, Zadok D, Morad Y, Avni I. Visual field attention is reduced by concomitant hands-free conversation on a cellular telephone. *American Journal of Ophthalmology*, 2004, **138**(3): 347–353
- Yang G S, Lin Y Z, Bhattacharya P. A driver fatigue recognition model based on information fusion and dynamic Bayesian network. *Information Sciences*, 2010, **180**(10): 1942–1954
- Nickel P, Nachreiner F. Sensitivity and diagnosticity of the 0.1-Hz component of heart rate variability as an indicator of mental workload. *Human Factors*, 2003, **45**(4): 575–590
- Mehler B, Reimer B, Coughlin J, Dusek J. Impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2138, 2009, 2138: 6–12

- 14 Mao Z, Yan X P, Wu C Z. Driving fatigue identification method based on physiological signals. In: Proceedings of the 7th International Conference of Chinese Transportation Professionals Congress (ICCTP). Shanghai, China: ASCE, 2007. 341–352
- 15 Takei Y, Furukawa Y. Estimate of driver's fatigue through steering motion. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Waikoloa, USA: IEEE, 2005. 1765–1770
- 16 Sayed R, Eskandarian A. Unobtrusive drowsiness detection by neural network learning of driver steering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2001, **215**(9): 969–975
- 17 Zhong Y J, Du L P, Zhang K, Sun X H. Localized energy study for analyzing driver fatigue state based on wavelet analysis. In: Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Beijing, China: IEEE, 2007. 1843–1846
- 18 Pilutti T, Ulsoy A G. Identification of driver state for lane-keeping tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 1999, **29**(5): 486–502
- 19 Tokuda S, Obinata G, Palmer E, Chaparro A. Estimation of mental workload using saccadic eye movements in a free-viewing task. In: Proceedings of the 2011 Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society. Boston, USA: IEEE, 2011. 4523–4529
- 20 Lansdown T C. Individual differences during driver secondary task performance: verbal protocol and visual allocation findings. *Accident Analysis & Prevention*, 2002, **34**(5): 655–662
- 21 Doshi A, Trivedi M. A comparative exploration of eye gaze and head motion cues for lane change intent prediction. In: Proceedings of the 2008 Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2008. 49–54
- 22 Ohashi L, Yamaguchi T, Tamai I. Humane automotive system using driver intention recognition. In: Proceedings of the 2004 SICE Annual Conference. Sapporo, Japan: IEEE, 2004. 1164–1167
- 23 Wu H R, Li Y, Wu C Z, Ma Z, Zhou H Y. A longitudinal minimum safety distance model based on driving intention and fuzzy reasoning. In: Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Banff, Canada: IEEE, 2017. 158–162
- 24 Takano W, Matsushita A, Iwao K, Nakamura Y. Recognition of human driving behaviors based on stochastic symbolization of time series signal. In: Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: IEEE, 2008. 167–172
- 25 Zou X, Levinson D M. Modeling intersection driving behaviors: a hidden Markov model approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1980, 2006.
- 26 Lv An, Hu Zhen-Cheng, Chen Hui. Recognition and analysis on highway overtaking behavior based on Gaussian mixture-hidden Markov model. *Automotive Engineering*, 2010, **32**(7): 630–634
(吕岸, 胡振程, 陈慧. 基于高斯混合隐马尔科夫模型的高速公路超车行为辨识与分析. *汽车工程*, 2010, **32**(7): 630–634)
- 27 Qin G H, Lei Y L, Niu M K, Ge A L, Dai Y S. Estimation of road situations and driver's intention in automotive electronic control system. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Vehicle Electronics Conference (IVEC'99). Changchun, China: IEEE, 1999. 199–201
- 28 Kuge N, Kimura T. Driving Intention Estimation System, Driver Assisting System, and Vehicle with the System, U. S. Patent 7809506, October 2010.
- 29 McRuer D T, Jex H R. A review of quasi-linear pilot models. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1967, **HFE-8**(3): 231–249
- 30 Reddy R N, Ellis J R. Contribution to the simulation of driver-vehicle-road system. In: Proceedings of the 1981 SAE International Congress and Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE, 1981.
- 31 Iguchi M. A study of manual control. *Journal of Mechanic Society of Japan*, 1959, **62**(481): 1053–1059
- 32 Mcruer D, Weir D H. Theory of manual vehicular control. *Ergonomics*, 1969, **12**(4): 599–633
- 33 MacAdam C C. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1981, **11**(6): 393–399
- 34 Sharp R S, Valtetsiotis V, Lugner P. Optimal preview car steering control. *Vehicle System Dynamics*, 2001, **35**(S1): 101–117
- 35 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
- 36 Qu T, Chen H, Ji Y, Guo H Y, Xu Y T. A stochastic model predictive control approach for modelling human driver steering control. *International Journal of Vehicle Design*, 2016, **70**(3): 249–277
- 37 Keen S D, Cole D J. Application of time-variant predictive control to modelling driver steering skill. *Vehicle System Dynamics*, 2011, **49**(4): 527–559
- 38 Keen S D, Cole D J. Bias-free identification of a linear model-predictive steering controller from measured driver steering behavior. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2012, **42**(2): 434–443
- 39 Li R J, Li S B, Gao H B, Li K Q, Cheng B, Li D Y. Effects of Human Adaptation and Trust on Shared Control for Driver-Automation Cooperative Driving, SAE Technical Paper 2017-01-1987, 2017.
- 40 Li R J, Li Y N, Li S E, Burdet E, Cheng B. Indirect Shared Control of Highly Automated Vehicles for Cooperative Driving between Driver and Automation. arXiv preprint arXiv: 1704.00866, 2017.
- 41 Sentouh C, Chevrel P, Mars F, Claveau F. A sensorimotor driver model for steering control. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Antonio, USA: IEEE, 2009. 2462–2467
- 42 Li Y N, Tee K P, Chan W L, Yan R, Chua Y W, Limbu D K. Role adaptation of human and robot in collaborative tasks. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, USA: IEEE, 2015. 5602–5607

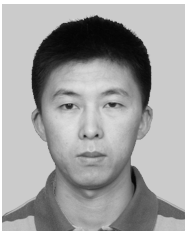
- 43 Na X X, Cole D J. Application of open-loop stackelberg equilibrium to modeling a driver's interaction with vehicle active steering control in obstacle avoidance. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, **47**(5): 673–685
- 44 Knipling R R. IVHS technologies applied to collision avoidance: perspectives on six target crash types and countermeasures. In: Proceedings of the 1993 Annual Meeting of IVHS America: Surface Transportation: Mobility, Technology, and Society. Washington, USA: IEEE, 1993. 249–259
- 45 Burgett A L, Carter A, Miller R J, Najm W G, Smith D L. A collision warning algorithm for rear-end collisions. In: Proceedings of the 16th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Windsor, Canada: National Highway Traffic Safety Administration, 1998. 566–587
- 46 Cheok K C, Smid G E, McCune D J. A multisensor-based collision avoidance system with application to a military HMMWV. In: Proceedings of the 2000 Intelligent Transportation Systems. Dearborn, USA: IEEE, 2000. 288–292
- 47 Dagan E, Mano O, Stein G P, Shashua A. Forward collision warning with a single camera. In: Proceedings of the 2004 Intelligent Vehicles Symposium. Parma, Italy: IEEE, 2004. 37–42
- 48 Tan H S, Huang J H. DGPS-based vehicle-to-vehicle cooperative collision warning: engineering feasibility viewpoints. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, **7**(4): 415–428
- 49 Zhang Y Z, Antonsson E K, Grote K. A new threat assessment measure for collision avoidance systems. In: Proceedings of the 2006 Intelligent Transportation Systems Conference. California, USA: IEEE, 2006. 968–975
- 50 Coelingh E, Eidehall A, Bengtsson M. Collision warning with full auto brake and pedestrian detection — a practical example of automatic emergency braking. In: Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Funchal, Portugal: IEEE, 2010. 155–160
- 51 Xiao Xian-Qiang, Wang Qi-Dong, Pan Sheng-Hui. A study on lane departure detection method based on vision and TLC concept. *Automotive Engineering*, 2010, **32**(1): 77–80
(肖献强, 王其东, 潘盛辉. 基于视觉及 TLC 概念的车辆跑偏检测方法研究. *汽车工程*, 2010, **32**(1): 77–80)
- 52 Hsiao P Y, Yeh C W, Huang S S, Fu L C. A portable vision-based real-time lane departure warning system: day and night. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, **58**(4): 2089–2094
- 53 Angkititrakul P, Terashima R, Wakita T. On the use of stochastic driver behavior model in lane departure warning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(1): 174–183
- 54 Ruder M, Enkelmann W, Garnitz R. Highway lane change assistant. In: Proceedings of the 2002 Intelligent Vehicle Symposium. Versailles, France: IEEE, 2002. 240–244
- 55 Fujii Y. Vehicle speed control system, U.S. Patent 5315295, May 1994.
- 56 Chen B C, Peng H. Differential-braking-based rollover prevention for sport utility vehicles with human-in-the-loop evaluations. *Vehicle System Dynamics*, 2001, **36**(4–5): 359–389
- 57 Biglarbegia M, Zu J W. Tractor-semitrailer model for vehicles carrying liquids. *Vehicle System Dynamics*, 2006, **44**(11): 871–885
- 58 Li L, Wen D, Zheng N N, Shen L C. Cognitive cars: a new frontier for ADAS research. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, **13**(1): 395–407
- 59 Goodrich M A, Boer E R. Multiple mental models, automation strategies, and intelligent vehicle systems. In: Proceedings of the 1999 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 1999. 859–864
- 60 Jamson A H, Merat N, Carsten O M J, Lai F C H. Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, **30**: 116–125
- 61 De Winter J C F, Happee R, Martens M H, Stanton N A. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: a review of the empirical evidence. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, **27**: 196–217
- 62 Merat N, Jamson A H, Lai F C H, Carsten O. Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors*, 2012, **54**(5): 762–771
- 63 Naujoks F, Purucker C, Neukum A, Wolter S, Steiger R. Controllability of partially automated driving functions — Does it matter whether drivers are allowed to take their hands off the steering wheel? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2015, **35**: 185–198
- 64 Gold C, Damböck D, Lorenz L, Bengler K. “Take over! How long does it take to get the driver back into the loop?” *Proceedings of 2013 Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2013, **57**(1): 1938–1942
- 65 Langlois S, Soualmi B. Augmented reality versus classical HUD to take over from automated driving: an aid to smooth reactions and to anticipate maneuvers. In: Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016. 1571–1578
- 66 Louw T, Markkula G, Boer E, Madigan R, Carsten O, Merat N. Coming back into the loop: drivers' perceptual-motor performance in critical events after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, **108**: 9–18
- 67 Strand N, Nilsson J, Karlsson I C, Nilsson L. Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, **27**: 218–228
- 68 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*, 2017, **48**(8): 2357–2367
- 69 de Waard D, van der Hulst M, Hoedemaeker M, Brookhuis K A. Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation Human Factors*, 1999, **1**(1): 67–82

- 70 Banks V A, Eriksson A, O'Donoghue J, Stanton N A. Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study. *Applied Ergonomics*, 2018, **68**: 138–145
- 71 Kaber D B, Wright M C, Sheik-Nainar M A. Investigation of multi-modal interface features for adaptive automation of a human-robot system. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2006, **64**(6): 527–540
- 72 Miller D, Sun A, Ju W. Situation awareness with different levels of automation. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2014. 688–693
- 73 Zeeb K, Buchner A, Schrauf M. What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, **78**: 212–221
- 74 Bueno M, Dogan E, Selem F H, Monacelli E, Boverie S, Guillaume A. How different mental workload levels affect the take-over control after automated driving. In: Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016. 2040–2045
- 75 Lu Z J, Coster X, de Winter J. How much time do drivers need to obtain situation awareness? A laboratory-based study of automated driving. *Applied Ergonomics*, 2017, **60**: 293–304
- 76 Lee J D, McGehee D V, Brown T L, Marshall D. Effects of adaptive cruise control and alert modality on driver performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006, **1980**(1): 49–56
- 77 Forster Y, Naujoks F, Neukum A, Huestegge L. Driver compliance to take-over requests with different auditory outputs in conditional automation. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, **109**: 18–28
- 78 Wright T J, Agrawal R, Samuel S, Wang Y, Zilberstein S, Fisher D L. Effective cues for accelerating young drivers' time to transfer control following a period of conditional automation. *Accident; Analysis and Prevention*, 2017, **116**: 14–20
- 79 Petermeijer S, Bazilinsky P, Bengler K, de Winter J. Take-over again: investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop. *Applied Ergonomics*, 2017, **62**: 204–215
- 80 Flemisch F, Schieben A, Kelsch J, Löper C. Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. In: Proceedings of the Human Factors for Assistance and Automation. Braunschweig, Germany: Shaker Publishing, 2008.
- 81 Flemisch F O, Bengler K, Bubb H, Winner H, Bruder R. Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire. *Ergonomics*, 2014, **57**(3): 343–360
- 82 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
- 83 Willemsen D M C, Stuiver A, Hogema J, Kroon L, Sukumar P. Towards guidelines for transition of control. In: FISITA World Automotive Congress. Maastricht, Netherlands: FISITA, 2014. 1023–1034
- 84 Nilsson J, Falcone P, Vinter J. Safe transitions from automated to manual driving using driver controllability estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(4): 1806–1816
- 85 Nishimura R, Wada T, Sugiyama S. Haptic shared control in steering operation based on cooperative status between a driver and a driver assistance system. *International Journal of Human Robot Interaction*, 2015, **4**(3): 19–37
- 86 Bahram M, Aeberhard M, Wollherr D. Please take over! An analysis and strategy for a driver take over request during autonomous driving. In: Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Seoul, South Korea: IEEE, 2015. 913–919
- 87 Na X X, Cole D J. Game-theoretic modeling of the steering interaction between a human driver and a vehicle collision avoidance controller. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2015, **45**(1): 25–38
- 88 Lu Z J, Happee R, Cabrall C D D, Kyriakidis M, de Winter J C F. Human factors of transitions in automated driving: a general framework and literature survey. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2016, **43**: 183–198
- 89 Wada T, Sonoda K, Okasaka T, Saito T. Authority transfer method from automated to manual driving via haptic shared control. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Budapest, Hungary: IEEE, 2016. 002659–002664
- 90 Sheehan B, Murphy F, Ryan C, Mullins M, Liu H Y. Semi-autonomous vehicle motor insurance: a Bayesian network risk transfer approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, **82**: 124–137
- 91 Abbink D A, Mulder M. Neuromuscular analysis as a guideline in designing shared control. *Advances in Haptics*. Vukovar, Croatia: InTech, 2010. 499–516
- 92 Brandt T, Sattel T, Bohm M. Combining haptic human-machine interaction with predictive path planning for lane-keeping and collision avoidance systems. In: Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007. 582–587
- 93 Mulder M, Abbink D A, Boer E R. Sharing control with haptics: seamless driver support from manual to automatic control. *Human Factors*, 2012, **54**(5): 786–798
- 94 Switkes J P, Rossetter E J, Coe I A, Gerdes J C. Hand-wheel force feedback for lanekeeping assistance: combined dynamics and stability. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2006, **128**(3): 532–542
- 95 Soualmi B, Sentouh C, Popieul J C, Debernard S. Fuzzy Takagi-Sugeno LQ controller for a shared control of vehicle. In: Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington, USA: IEEE, 2011. 956–961
- 96 Zhong M E, Wu P D, Peng J Q. Internet based shared control of vehicle steering when driver is under situation of tendency to accidents. *Materials Science Forum*, 2011, **704–705**: 650–656
- 97 Gray A, Ali M, Gao Y Q, Hedrick J K, Borrelli F. Semi-autonomous vehicle control for road departure and obstacle avoidance. In: Proceedings of the 2012 IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. Sofia: IFAC, 2012.

- 98 Gray A, Gao Y Q, Hedrick J K, Borrelli F. Robust predictive control for semi-autonomous vehicles with an uncertain driver model. In: Proceedings of the 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Gold Coast, Australia, 2013. 208–213
- 99 Flemisch F, Heesen M, Hesse T, Kelsch J, Schieben A, Beller J. Towards a dynamic balance between humans and automation: authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations. *Cognition, Technology & Work*, 2012, **14**(1): 3–18
- 100 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*, 2015, **57**(1): 5–20
- 101 Jiang J J, Astolfi A. Shared-control for the kinematic model of a rear-wheel drive car. In: Proceedings of the 2015 American Control Conference (ACC). Chicago, USA: IEEE, 2015. 1155–1160
- 102 Bi L Z, Wang M T, Lu Y, Genetu F A. A shared controller for brain-controlled assistive vehicles. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Banff, AB, Canada: IEEE, 2016. 125–129
- 103 Li R J, Li Y N, Li S E, Burdet E, Cheng B. Indirect Shared Control of Highly Automated Vehicles for Cooperative Driving between Driver and Automation. arXiv preprint arXiv: 1704.00866, 2017.
- 104 de Winter J C F, Dodou D. Preparing drivers for dangerous situations: a critical reflection on continuous shared control. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Anchorage, USA: IEEE, 2011. 1050–1056
- 105 Anderson S J, Peters S C, Pilutti T E, Iagnemma K. An optimal-control-based framework for trajectory planning, threat assessment, and semi-autonomous control of passenger vehicles in hazard avoidance scenarios. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2010, **8**(2–3–4): 190–216
- 106 Gray A, Ali M, Gao Y Q, Hedrick J K, Borrelli F. A unified approach to threat assessment and control for automotive active safety. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(3): 1490–1499
- 107 Massera F C, Wolf D F. Driver assistance controller for tire saturation avoidance up to the limits of handling. In: Proceedings of the 12th Latin American Robotics Symposium and 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR). IEEE, 2015. 181–186
- 108 Erlien S M, Fujita S, Gerdes J C. Shared steering control using safe envelopes for obstacle avoidance and vehicle stability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(2): 441–451
- 109 Saito Y, Raksincharoensak P. Risk predictive shared deceleration control: its functionality and effectiveness of an early intervention support. In: Proceedings of the 2016 Intelligent Vehicles Symposium (IV). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2016. 49–54
- 110 Erlien S M, Funke J, Gerdes J C. Incorporating non-linear tire dynamics into a convex approach to shared steering control. In: Proceedings of the 2014 American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2014. 3468–3473
- 111 Griffiths P G, Gillespie R B. Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors*, 2005, **47**(3): 574–590
- 112 Forsyth B A C, Maclean K E. Predictive haptic guidance: intelligent user assistance for the control of dynamic tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, **12**(1): 103–113
- 113 Mulder M, Abbink D A, Boer E R. The effect of haptic guidance on curve negotiation behavior of young, experienced drivers. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Singapore, Singapore: IEEE, 2008. 804–809
- 114 Sentouh C, Soualmi B, Popieul J C, Debernard S. The H2-optimal preview controller for a shared lateral control. In: Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Washington, USA: IEEE, 2011. 1452–1458
- 115 Saleh L, Chevrel P, Claveau F, Lafay J F, Mars F. Shared steering control between a driver and an automation: stability in the presence of driver behavior uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(2): 974–983
- 116 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
- 117 Merah A, Hartani K, Draou A. A new shared control for lane keeping and road departure prevention. *Vehicle System Dynamics*, 2016, **54**(1): 86–101
- 118 Inoue S, Ozawa T, Inoue H, Raksincharoensak P, Nagai M. Cooperative lateral control between driver and ADAS by haptic shared control using steering torque assistance combined with direct yaw moment control. In: Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016. 316–321
- 119 Saito Y, Mitsumoto T, Raksincharoensak P. Effectiveness of a risk predictive shared steering control based on potential risk prediction of collision with vulnerable road users. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(19): 84–89
- 120 Abbink D A, Cleij D, Mulder M, van Paassen M M. The importance of including knowledge of neuromuscular behaviour in haptic shared control. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Seoul, Korea (South): IEEE, 2012. 3350–3355
- 121 Iwano K, Raksincharoensak P, Nagai M. A study on shared control between the driver and an active steering control system in emergency obstacle avoidance situations. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, **47**(3): 6338–6343
- 122 Boink R, van Paassen M M, Mulder M, Abbink D A. Understanding and reducing conflicts between driver and haptic shared control. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). San Diego, UAS: IEEE, 2014. 1510–1515
- 123 Iwano K, Raksincharoensak P, Nagai M. A study on shared control between the driver and an active steering control system in emergency obstacle avoidance situations. In: Proceedings of the 19th IFAC World Congress. Cape Town, South Africa: IFAC, 2014. 102–113

- 124 Mars F, Deroo M, Hoc J M. Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of haptic shared control. *IEEE Transactions on Haptics*, 2014, **7**(3): 324–333
- 125 Van der Wiel D W J, van Paassen M M, Mulder M, Mulder M, Abbink D A. Driver adaptation to driving speed and road width: exploring parameters for designing adaptive haptic shared control. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Kowloon, China: IEEE, 2015. 3060–3065
- 126 Boehm P, Ghasemi A H, OModhrain S, Jayakumar P, Gillespie R B. Architectures for shared control of vehicle steering. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(19): 639–644
- 127 Kaustubh M, Willemsen D, Mazo M. The modeling of transfer of steering between automated vehicle and human driver using hybrid control framework. In: Proceedings of the 2016 Intelligent Vehicles Symposium (IV). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2016.
- 128 Sentouh C, Soualmi B, Popieul J C, Debernard S. Cooperative steering assist control system. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Manchester, UK: IEEE, 2013. 941–946
- 129 Zafeiropoulos S, Tsiotras P. Design of a lane-tracking driver steering assist system and its interaction with a two-point visual driver model. In: Proceedings of the 2014 American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2014. 3911–3917
- 130 Soualmi B, Sentouh C, Popieul J C, Debernard S. Automation-driver cooperative driving in presence of undetected obstacles. *Control Engineering Practice*, 2014, **24**: 106–119
- 131 Nguyen A T, Sentouh C, Popieul J C. Online adaptation of the authority level for shared lateral control of driver steering assist system using dynamic output feedback controller. In: Proceedings of the 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Yokohama, Japan: IEEE, 2015. 3767–3772
- 132 Flad M, Otten J, Schwab S, Hohmann S. Steering driver assistance system: a systematic cooperative shared control design approach. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). San Diego, UAS: IEEE, 2014. 3585–3592
- 133 Flad M, Fröhlich L, Hohmann S. Cooperative shared control driver assistance systems based on motion primitives and differential games. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, **47**(5): 711–722
- 134 Mars F, Deroo M, Charron C. Driver adaptation to haptic shared control of the steering wheel. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). San Diego, USA: IEEE, 2014. 1505–1509
- 135 Petermeijer S M, Abbink D A, Mulder M, de Winter J C F. The effect of haptic support systems on driver performance: a literature survey. *IEEE Transactions on Haptics*, 2015, **8**(4): 467–479
- 136 Wada T, Sonoda K, Tada S. Simultaneous achievement of supporting human drivers and improving driving skills by shared and cooperative control. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(19): 90–95
- 137 Nguyen A T, Sentouh C, Popieul J C. Driver-automation cooperative approach for shared steering control under multiple system constraints: design and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(5): 3819–3830
- 138 Ercan Z, Carvalho A, Gokasan M, Borrelli F. Modeling, identification, and predictive control of a driver steering assistance system. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, **47**(5): 700–710
- 139 You C X, Lu J B, Tsiotras P. Nonlinear driver parameter estimation and driver steering behavior analysis for ADAS using field test data. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, **47**(5): 686–699
- 140 Guo Kong-Hui. *Principle of Vehicle Handling Dynamics*. Nanjing: Science and Technology Press of Jiangsu, 2011. (郭孔辉. 汽车操纵动力学原理. 南京: 江苏科学技术出版社, 2011.)
- 141 Thomas F. General introduction to PEGASUS & Opening of the exhibition. In: PEGASUS Symposium. Federal MINISTRY for Economic Affairs and Energy, 2017. https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/Symposium-Vortraege/05_General%20introduction%20to%20PEGASUS-Form.pdf
- 142 Deng W W, Lee Y H, Zhao A. Hardware-in-the-loop simulation for autonomous driving. In: Proceedings of the 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando, FL, USA: IEEE, 2008. 1742–1747
- 143 Xu Z G, Wang M L, Zhang F Z, Jin S, Zhang J, Zhao X M. PaTAVTT: a hardware-in-the-loop scaled platform for testing autonomous vehicle trajectory tracking. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, **2017**: Article No. 9203251
- 144 Gietelink O J, Ploeg J, De Schutter B, Verhaegen M. Development of a driver information and warning system with vehicle hardware-in-the-loop simulations. *Mechatronics*, 2009, **19**(7): 1091–1104
- 145 Zulkefli M A M, Mukherjee P, Sun Z X, Zheng J F, Liu H X, Huang P. Hardware-in-the-loop testbed for evaluating connected vehicle applications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, **78**: 50–62
- 146 Zhao D, Lam H, Peng H, Bao S, LeBlanc D J, Nobukawa K, Pan C S. 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
- 147 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
- 148 Huang H M. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework: safety and application issues. In: Proceedings of the 2007 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems. Washington, USA: ACM, 2007. 48–53
- 149 Rösener C, Sauerbier J, Zlocki A, Fahrenkrog F, Wang L, Várhelyi A, de Gelder E, Breunig S, Mejuto P, Tango F, Lanati J. A comprehensive evaluation approach for highly automated driving. In: Proceedings of the 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Detroit Michigan, USA: National Highway Traffic Safety Administration, 2017.

- 150 Li L, Huang W L, Liu Y H, Zheng N N, Wang F Y. Intelligence testing for autonomous vehicles: a new approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1(2): 158–166
- 151 Intelligent transport systems-Lane keeping assistance systems (LKAS)-Performance requirements and test procedures, ISO 11270:2014, 2014.
- 152 Intelligent transport systems-Forward vehicle collision warning systems-performance requirements and test procedures, ISO 15623:2013, 2013.
- 153 U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Automated Driving Systems 2.0: A Vision for Safety. Washington, USA: U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2017.
- 154 国家车联网产业标准体系建设指南(智能网联汽车), 工信部联科〔2017〕332号, 2017.



胡云峰 吉林大学副教授. 2012年在吉林大学获得工学博士学位. 主要研究方向为汽车动力总成系统控制及汽车主动安全控制. E-mail: huyf@jlu.edu.cn
(**HU Yun-Feng** Associate professor at Jilin University. He received his Ph.D. degree from Jilin University in 2012. His research interest covers automotive powertrain control and active safety control.)



曲婷 吉林大学讲师. 2016年于吉林大学获得工学博士学位. 主要研究方向为驾驶员行为建模, 驾驶员类型辨识, 人机协同控制. E-mail: quting@jlu.edu.cn
(**QU Ting** Lecturer at Jilin University. She received her Ph.D. degree from Jilin University in 2016. Her research interest covers driver behavior modeling, driver type identification, and human-machine cooperative control.)



刘俊 吉林大学博士研究生. 2014年于吉林大学获得学士学位. 主要研究方向为车辆稳定控制, 自动驾驶, 人车协同控制. E-mail: liujun16@mails.jlu.edu.cn
(**LIU Jun** Ph.D. candidate at Jilin University. He received his bachelor degree in automation from Jilin University in 2014. His research interest covers vehicle stability control, autonomous driving, and human-vehicle cooperative control.)



施竹清 吉林大学博士研究生. 2014年于吉林大学获得工学学士学位. 主要研究方向为人机协作控制和模型预测控制. E-mail: shizq16@mails.jlu.edu.cn
(**SHI Zhu-Qing** Ph.D. candidate at Jilin University. She received her bachelor degree from Jilin University in 2014. Her research interest covers human-machine cooperation control and model predictive control.)



朱冰 吉林大学教授. 2010年于吉林大学获得工学博士学位. 主要研究方向为汽车智能集成控制, 智能汽车人机共驾. E-mail: zhubing@jlu.edu.cn
(**ZHU Bing** Professor at the Jilin University. He received his Ph.D. degree from Jilin University in 2010. His research interest covers intelligent integrated vehicle control and human-machine co-piloting for intelligent vehicles.)



曹东璞 加拿大滑铁卢大学教授. 2008年于加拿大康戈迪亚大学获得博士学位. 主要研究方向为车辆控制和智能化, 自动驾驶, 平行驾驶. 已发表130余篇论文和1件美国专利. E-mail: dongp_ca@yahoo.com
(**CAO Dong-Pu** Associate professor at University of Waterloo, Canada. He received his Ph.D. degree from Concordia University, Canada in 2008. His research interest covers vehicle control and intelligence, automated driving and parallel driving, where he has contributed more than 130 publications and 1 US patent.)



陈虹 吉林大学教授. 1997于德国斯图加特大学获得工学博士学位. 主要研究方向为预测控制, 鲁棒控制, 非线性控制和汽车控制. 本文通信作者. E-mail: chenh@jlu.edu.cn
(**CHEN Hong** Professor at the Jilin University. 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. Corresponding author of this paper.)