

智能电动汽车信息感知技术研究进展*

张艳辉¹, 徐坤¹, 郑春花¹, 冯伟¹, 徐国卿²

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055; 2. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444)

摘要:智能电动汽车是一类特殊的移动智能机器人,能够改变人类生活品质、时空价值和文化融合。主要介绍了智能电动汽车发展的历程和国内外相关研究的发展水平和核心技术;重点讨论了智能电动汽车-路感知、智能充电桩和电池管理系统等智能电动汽车主要研究热点,分析了传感技术、数据融合算法、控制算法和通信技术等智能汽车关键核心技术的研发现状。随着大数据、云计算等新型智能传感技术的发展,未来的智能感知将彻底改变传统机器视觉技术在底层特征上的模式识别。在智能电动汽车产业化过程中也需解决人性、安全性、可靠性以及法律和道德等问题。总之,智能电动汽车技术的迅猛发展将改变人类的时空观念,也必将对交通运输业产生深远且革命性的影响。

关键词: 智能电动汽车; 信息感知; 传感器; 数据融合

中图分类号: TH-39 U469.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.2010

Advanced research on information perception technologies of intelligent electric vehicles

Zhang Yanhui¹, Xu Kun¹, Zheng Chunhua¹, Feng Wei¹, Xu Guoqing²

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Defined as a type of mobile robot, smart electric vehicle is changing the quality of human life, space-time value and cultural integration. In this paper, the development of smart electric vehicle is detailed introduced as well as its technological level and related core technologies at home and abroad. The information perception, electric vehicle charging pil, and battery management system are focused. The related core technologies in electric vehicle, such as sensing technology, data fusion, control algorithm, and communication technology, are summarized. With the development of novel intelligent sensing technology, such as large data and cloud computing, future intelligence perception will completely change the pattern recognition of traditional machine vision technology on the underlying characteristics. In the process of industrialization of intelligent electric vehicles also need to address human nature, security, reliability and legal and moral issues. The rapid development of intelligent electric vehicle technology will change the concept of time and space of mankind, but also will have a far-reaching and revolutionary impact on the transport industry.

Keywords: smart electric vehicle; information perception; sensor; data fusion

1 引言

经过百余年的发展,汽车正逐步迈进千家万户,并不断改变着人类的生活品质、时空价值和文化融合。电动化、智能化和互联网化是现代汽车工业发展的典型化趋

势,三者之间相互糅合和相互影响。智能电动无人驾驶汽车是采用先进的传感技术实现车速、位置以及特征图像等信息的获取,并利用数据融合技术实现人-车-路之间特征数据信息的提取和分析,并最终使车辆具备信息感知、多源信息融合以及人机共驾交互的能力,而且可实现智能分析车辆行驶工况得能力,是一类具备特殊功能

的智能机器人^[1-2]。

智能电动汽车不断改变着当前的交通运输生态系统,而且随着智能网联信息交互技术的不断发展,必将逐步降低严重的城市拥堵病和交通事故,在一定程度上提高车辆能量利用率和提高人类的工作效率。

我国宣布将在2025年左右全面停止销售内燃机传统汽车,电动汽车将凭着政策春风迎来发展的良机。电动汽车的智能化和信息化,是人类未来交通工具的主要表现形式,必将改变传统内燃机汽车行业发展格局,也会不断体现并改变着人类的时空概念。因此,在资本市场智能电动汽车系统已必将成为资本追逐的对象和下一个万亿级蓝海市场。

2 国内外典型的智能车辆系统

2.1 智能驾驶汽车发展历程

随着大数据和云计算等信息技术的蓬勃发展,智能车辆研究驶入了快车道,但其实智能驾驶车辆研究已经有将近70余年的历史。历史上第一台自主导航车辆于1953年诞生在美国贝瑞特电子公司在—间杂货仓库中,是改造牵引式拖拉机^[3]。后来,美国军方注意到智能驾驶汽车在作战中的功能,为了减少战争期间人员损伤以及运送物资的需要,决定投入大量研发资金用于智能车的研究。美国国防研究计划局于2004年起举办了3届智能无人驾驶比赛,期图实现车辆的高度智能化。但首届智能车竞赛由于时间仓促和规定的行驶道路崎岖,并没有车辆顺利完成竞赛任务。

为了更好地应对城市环境中复杂的车路工况,美国国防高等研究计划署于2007年11月在洛杉矶举行了第3届智能车辆驾驶竞赛,规定是在6h内按照规定的城市交通路线行驶97km。最终,卡耐基梅隆大学的BOSS、斯坦福大学的Junior和弗吉尼亚州大学的Odin获得比赛的前3名。2007年卡耐基梅隆大学的BOSS和斯坦福大学的Junior如图1所示。



(a) 卡耐基梅隆大学(BOSS) (b) 斯坦福大学(Junior)
(a) Carnegie Mellon University(BOSS) (b) Stanford University(Junior)

图1 第3届都市挑战赛车辆

Fig. 1 The 3rd vehicles of urban challenge

2.2 谷歌无人驾驶汽车

2014年谷歌研发出无人驾驶的首台原型车,最高时速40 km/h,且待交通灯变绿的1.5 s之后车辆才会启动。该车顶安装有可发射64束激光射线的激光测距仪,该激光测距仪可有限实现车辆定位以及车辆与周围环境之间的有效距离。谷歌无人驾驶车利用传感器采集到的数据结合GPS和高精度的3D地图,可确定车辆的全方位状态信息,实现多方位数据的融合,确定车辆周围的动态和静态情况。车辆传感器获得的车速等数据信息与车载摄像机捕获的周围环境的动态或静态图像一起输入到中央控制器内的数据处理中心,利用先进的控制算法选择最小危险系数的车辆安全驾驶。按照美国高速公路安全管理局(national highway traffic safety administration, NHTSA)自动驾驶分类,目前谷歌智能车属于第4级别,如图2所示。

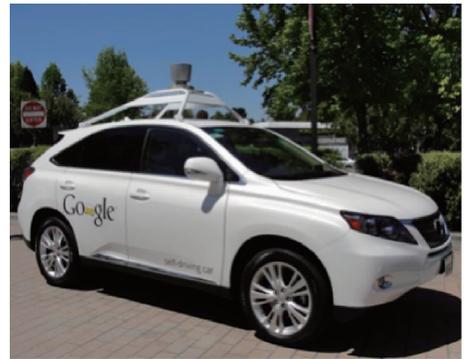


图2 谷歌无人驾驶智能车

Fig. 2 Google unmanned intelligent vehicle

2.3 TerraMax 无人驾驶汽车

TerraMax主要定位于国防需求,参加了2004年美国国防高等研究技术署的竞赛^[4]。该车辆可以通过感知车辆轮胎的软硬度,有效识别地面是否有泥沙、泥坑等状况。目前该类型车辆的主要研究方向是实现车辆的自动扫雷。该车型采用超声波和惯性导航等系统实现了车辆周围的障碍物和车辆本身状态信息的采集,将采集到的图像等信息通过数据融合技术分析和辨识后输入到含有8个高性能处理器的中央处理单元,并糅合先进的降噪算法实现干扰信息屏蔽处理,最终确定车辆全方位的信息;最后,通过先进的决策算法和控制模型确定智能车辆最小危险模式下的运行方式和运动轨迹。国内外主要智能汽车实验车型、研究单位及其核心技术如表1所示。

表1 国内外主要智能车型及核心技术

Table 1 Main smart vehicles and core technologies at home and abroad

实验车型	研发单位	核心技术
Navlab 系列	美国卡耐基梅隆大学	计算机视觉系统
XLAB 智能车	Google 公司	3D 环境建模、影像地图技术
ARGO 实验车	意大利帕尔玛大学	低成本传感器系统
VAMP 实验车	德国奔驰公司	环境识别系统
CITAVI 系统	国防科技大学	视觉导航,最高时速 75.6 km/h
JUTIV 智能车	吉林大学	路径识别与规划
ALVLAB 智能车	浙江大学	避障、越野及岔路选择等
THMR-V 智能车	清华大学	结构化道路的车道线自动跟踪以及道路避障
夸父一号智能车	西安交通大学	采用增强 Gabor 检测的方法检测车辆
CyberTiggo	上海交通大学	嵌入式视觉感知,基于环视的自动泊车系统

2.4 Tesla 辅助驾驶汽车

Tesla 公司目前最为先进的自动辅助驾驶系统是 Autopilot2.0 自动驾驶系统,为进一步减轻驾驶员行驶过程中的精神负担,最大的亮点是采用了 NVIDIA Drive PX2 处理芯片,计算处理速度提升了 40 倍,如图 3 所示。DRIVE PX 2 配备了高速的新型处理器,可呈现自动巡航和 3D 地图,并且可使用深度学习技术处理传感器数据融合信息。

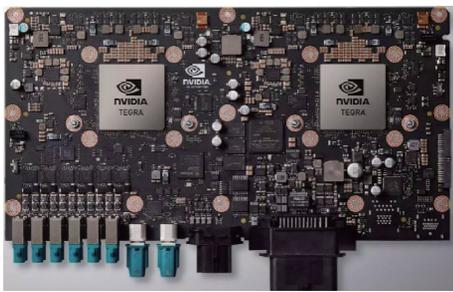


图3 DRIVE PX2 系统

Fig. 3 DRIVE PX2

特斯拉整套自动辅助驾驶系统共包含有 9 个摄像头,其中前置 3 个不同视角摄像头(广角、长焦、中等)、4 个后置摄像头(广角、长焦、中等,倒车图像)以及 2 个侧边摄像头(侧边车距测量等)、12 个超声波传感器(较上版本测量距离范围增加一倍)、一个前置雷达(增强版)和高速处理芯片 NVIDIA PX2。

Autopilot 系统是特斯拉智能驾驶的主要手段,其可以实时拍摄到的动态图像为判断车辆行驶工况得依据,而雷达则作为辅助设备对环境信息补充和纠正。所以,Tesla 可利用雷达和摄像头获得的传感数据并结合数据融合技术,可建立车辆周围接近于现实工况的 3D 地图,实现更加精准的物体识别和信号处理。

但是,在恶劣的自然环境下(雨雪天等),计算机视觉可能无法发挥应用功能,精度大大降低。而且,特斯拉系统中设定的障碍物仅限于摩托车、卡车和轿车。按照 NHTSA 自动驾驶分类,目前特斯拉智能车属于第三级别,可在有限情况下可实现自动驾驶。

根据目前智能电动汽车的主要功能,可以分为两部分:1)智能驾驶,主要是为了车辆行驶过程安全和高效,实现车辆的安全行驶且最优的行驶路径的选择以及降低能源消耗;2)人-车-路间互联,在充分保证车辆行驶工况安全高效的前提下,高效发挥车辆“第三空间”的功能,提高车内人员更加愉悦的体验。因此,发展智能电动汽车的主要目的是减少交通事故,扩大人类时空距离以及提高社会单位时间产值。

根据智能电动汽车的用途可分为两类:1)军用,该类智能电动汽车需要适应更加苛刻的特殊环境,需要应对非结构化的泥坑等道路、需要有高速且高效的数据处理系统和夜视环境下目标的识别等;2)民用,民用的主要目标是实现车辆的安全行驶,减少驾驶员的驾驶强度,且较多行驶在结构化道路,所以实现的难度低于军用。因此,一套完整的智能驾驶系统需具备智能的中央控制系统、高清晰度的摄像头、车路环境信息交互,具备精确的导航系统、环境识别等功能。

3 智能电动汽车“车-路”感知

智能电动汽车是以智能感知、决策及控制等关键问题为核心,集环境感知、信息安全、自主决策、动力学控制等前沿核心技术于一体,最终实现感知、认知、决策和执行的闭环控制。智能电动汽车通过传感器系统(摄像头、雷达等)实现环境感知,利用多传感器数据融合技术实现障碍物认知、环境认知和车辆认知等并实现三维环境重

构,最终实现车辆的精确定位和障碍物与车牌等物体识别,实现路径规划和底层控制(速度控制、纵向稳定控制和横向稳定控制等),利用先进控制算法将执行信号反馈到电机端或者其他执行机构,最终实现智能电动汽车

自动驾驶,系统框图如图4所示。为保证车辆-环境信息交互过程中数据的安全性,在智能电动汽车运行过程中需充分考虑车网信息交互过程中的数据隐私和安全性^[5,6]。

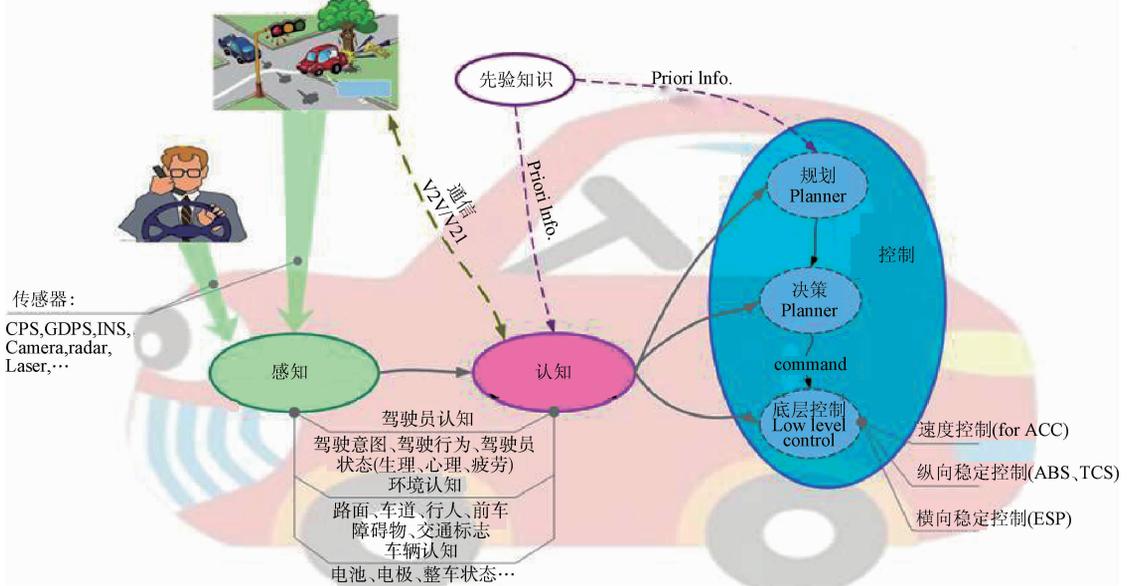


图4 智能电动汽车系统
Fig.4 System of smart electric vehicle

3.1 车道线偏离报警

车道偏离预警功能(lane departure warnings, LDWS)是在没有开转向灯的情况下,通过方向盘震动或者报警的方式警告驾驶员的系统。目前车辆偏离预警系统根据车辆行驶方向可分为纵向偏离预警和横向偏离预警。纵

向偏离警告系统主要用于预防车速过快或驾驶员操作过程中方向盘晃动等工况;而横向偏离警告系统则主要用于预防驾驶员过度疲劳等工况。车道偏离报警系统采用的报警模型如表2所示。

表2 车道偏离报警系统采用的报警模型

Table 2 Alarm modes in Lane departure warning system (LDWS)

类型	理论依据
车辆当前位置	仅靠前车轮和车道边界的相对位置判断 ^[7]
车辆将来偏移量	根据车辆的运行轨迹估算车辆可能偏离的时间 ^[8]
车辆横越车道线边界时间	该模型考虑驾驶员个人习惯,以虚拟车道为参考,主要依靠两个参数:预期时间和虚拟车道边界 ^[9]
道路场景感知	根据相机对图像场景的感知,并发出报警信息 ^[10]
稳态预瞄模型	利用车辆纵向加速度的稳态值预测车辆行驶轨迹 ^[11]
左右车道线夹角偏离方法	该方法是比较简单的一种评价方法,根据图像中左右两条线的夹角是否在正常的范围内 ^[12]

车道线图像信息的识别与跟踪是实现 LDWS 的前提和基础,即通过计算机图像和视觉技术的处理提取车道线的曲率和车道宽。车道线识别和跟踪方法可以分为两类:1)基于道路图像显著特征的辨识,该方法主要是通过检测结构化道路图像尤其是边缘线的典型化特征(如灰度梯度特征等)识别道路边界或车道标识线;2)基于道路图像模型的辨识。主要是依据不同的计算机视觉图像

模型,利用丰富的模式识别技术实现车道线识别的目的。目前市场上最为常见的 LDWS 系统,较多采用前置摄像头方式采集道路信息,车道偏离预警系统需要从数字化影像中辨识典型化结构道路的实线 with 虚线。雨雪天气易影响驾驶者视野,同时也影响着计算机视觉的精确度。计算机视觉技术往往通过采集基本的道路数据完成数据挖掘和图像信息处理,但雨雪天气严重影响了数据

的可信度,造成车道线识别可信度的下降。为有效应对该难题,部分车型在前方保险杠两侧安装红外线传感器,通过红外信号分析周围路面环境信息。

道路环境感知是实现车辆智能化运动轨迹的前提,准确识别车辆和周围环境的图像等数据信息是保证行驶安全的基础。而且,现有的车道偏离告警,前车距离告警以及障碍物避障等均是建立在准确且清晰的环境感知之上。因此,结构化和非结构化道路的图像识别和分割对智能驾驶的实现具有举足轻重的地位。

3.1.1 结构化道路

城市化道路基本属于典型化的结构化道路,也是人类工作生活中应用较广的区域。该类道路检测关键的核心技术是车道线的检测与定位,可保证智能车辆安全行驶和准确到达目的地。因此,典型的结构化车道路的图线识别可最终转化为图像分割。

Bertozzi A 等人^[13]为了充分利用典型化结构化道路的几何特征,采用逆投影映射实现车道线图像的识别与定位,但存在计算量大和处理不及时弊端;Goldbeck J 等人^[14]提出了一种前方关键区域的车道线图像提取方

法,该方法降低了高速处理器的工作量且提高了检测过程中的实时性,提高了图像信息挖掘的精度;Pomerleau D 等人^[15]考虑到公路特定的模型,建立了用回旋曲线作为车道线模型的方法,该方法有利于在宽度固定的结构化道路环境下实现。随着现代信息交互技术不断发展,深度学习方法也逐渐应用在结构化道路的车道线提取方法中^[16]。

3.1.2 非结构化道路

泥沙、泥泞道路或者标示线不明显的道路均属于非结构化道路。非结构化道路的特点是:道路表面变化不规则;道路宽度不规定;非定期出现静态或动态障碍。因此,有必要开展面向非结构化道路环境的车辆驾驶的关键技术的研究。

非结构化道路的计算机图像视觉识别问题归根结底是图像的分割问题。在众多的图像分割方法中,阈值方法因其计算量小且无需人工干预的优点将凸显出来。目前,典型在非结构化道路图像分割应用较广的的阈值方法有最大类方差法(Otsu 法)^[17]、最小误差法^[18]、灰度直方图法^[19]、最大熵法^[20]。典型非结构化道路检测方法如表3所示。

表3 典型非结构化道路检测方法

Table 3 Typical unstructured road detection method

类型	方法	优点	缺点
道路特征方法 ^[21]	利用灰度、纹理等特征匹配识别特定区域	对于道路的形状不敏感	路面情况比较敏感
道路模型的检测方法 ^[22]	利用图像分析和道路的参数模型	路面情况不敏感	对于道路的形状敏感。
神经网络方法 ^[23]	利用神经网络方法对道路进行检测	具有自学习功能	依赖对样本集的学习

3.2 电动汽车先进动力学感知

与传统车辆相比,电动车辆的电驱动系统为车辆的安全节能控制带来诸多优势,包括可实现精确快速的转矩测量与控制、具有双向能量变换能力、易于实现灵活的分散驱动结构等。因此,充分挖掘电动汽车电驱动系统特有的优点,发挥电驱动系统快速感知、快速控制、能量回馈的优势,提升电动车辆的安全性及节能性,具有重要的科学意义。

电动汽车的电气参数随负载变化(如轮胎-路面接触变化引起的摩擦阻力变化)可表现出不同的动态特性,利用电气参数的变化特征可实现动力学状态参数的感知。此外,电动车辆采用电驱动系统,电机激励的电磁转矩输出具有响应快、控制精确、动态特性好等突出特点,这使得以往动力学控制中的激励响应慢的问题不再是个突出的瓶颈,将有效改变单纯依赖踏板实现制动的方式。不同路面下驾驶员安全踏板操作范围如图5所示。

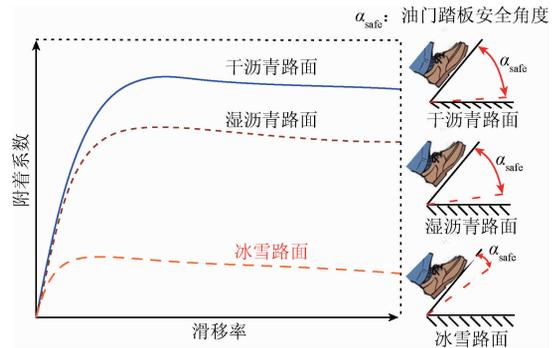


图5 不同路面下驾驶员安全踏板操作范围

Fig. 5 Operating range of the pedal at different road

附着系数与滑移率的获取对现有牵引力控制系统(traction control system, TCS)、制动防抱死系统(antilock brake system, ABS)系统至关重要。TCS、ABS系统一般依据当前轮胎-路面接触的附着系数、滑移率信号,进行附着状态的判定,进而根据控制律施加合适的控制作用,即

通过主动调节驱动力来保持附着稳定状态。然而,大部分的附着参数估计研究还是基于传统发动机车辆系统,主要思路是使用专用传感器或通过其他参数间接计算或估计。

车辆的 TCS/ABS 控制本质上是对轮胎-路面接触的附着进行控制,本文将 TCS/ABS 统一归入附着控制。当车辆紧急制动或在低附着路面加速时,总是希望能充分利用当前轮胎-路面接触的最大附着特性,以保证安全的同时提供足够的牵引或制动性能。但由于轮胎-路面接触特性的多样化、不确定性,不同轮胎-路面接触条件下的最优附着参数(如最大附着系数、最优滑移率)也不相同,难以在线获取。实际应用中一般考虑最差路面条件(如冰雪路面),保证附着稳定性。

近年来,如何充分利用电动汽车快速精确转矩控制的优点,研究更适合电动车辆实际应用的新型附着控制方法成为动力学控制研究的热点。其中,中科院深圳先进院徐国卿教授研究团队做出了重要贡献和突出成果^[24-25]。该团队针对最优滑移率难以获取而难以实现未知路面条件下的附着稳定性判定问题,提出了基于力传递特性的轮胎-路面接触附着稳定性的新型判定理论和方法;针对未知轮胎-路面接触条件下难以实现最优附着控制的问题,提出了基于力传递特性的最优工作点在线辨识方法,并提出了驱动防滑控制策略。路面发生变化时等效的负载电流变化如图6所示。

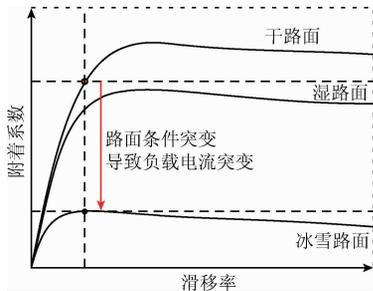


图6 路面发生变化时等效的负载电流变化

Fig.6 Load current change as the road surface changes

3.3 智能充电桩

电动汽车已经在我国得到一定程度的发展,但是电动汽车较弱的续航能力、充电设施不完善等问题大大限制了电动汽车的全面推广应用^[26-27]。目前我国的电动汽车的动力来源一般是锂离子电池。在电动汽车工作期间,电池组始终处于频繁的充放电过程。为保证电动汽车的正常行进速度和运转性能,电动汽车需要进行充电设施。目前电动汽车的充电方式包括常规充电、电池组快速更换和快速充电3种类型。其中,电池组需要面对重量大、体积重以及各个厂家信号不兼容的问题,因此快速更换并不可取。

而电动汽车智能充电桩的应用很好的解决了电动汽车充电难的问题。智能充电桩可应用于不同类型的电

池,通过与电池管理系统的通信得到合适的充电信号和充电电流倍率,进而选择恰当的充电策略^[28-30]。2012年,通用电气公司推出的首款智能充电桩“Watt Station”可以帮助人们更好地实现对电动汽车充电的管理,并且可自动选择合适的充电电价。而且,当出现电网波峰时,当地电网公司会允许用户通过 Watt Station 把电动汽车的电量反馈给电网,从而缓解供电压力^[31]。图7所示为 Watt Station 充电桩。



图7 Watt Station 充电桩

Fig.7 Charging pile at Watt Station

3.4 电池管理系统

电池管理系统(battery management system, BMS)是实现电池组管理与控制的核心部件,是电动汽车和电化学电池的桥梁,直接关系到电池的使用寿命和电动汽车的运行性能^[32]。电池系统不仅需要合适的串联和并联的拓扑方式组合成为一个完整的电池组整体,而且为有效克服电压不一致性也需要配备必要的均衡系统,以及电池组电压、电流和荷电状态等监控装备等。

电池荷电状态的估算是连接电池本身和电动汽车能量管理系统和安全系统的纽带,是实现电池管理和控制的核心参数。准确的电池荷电状态估计在 BMS 中起着关键作用:1)安全性能方面:电池管理系统根据动力电池的 SOC 估值来判别电池是否处于过充和过放状态,保证电系统的安全性;2)行驶里程方面:BMS 可以根据电池之间的荷电状态差异,对电池单体进行针对性的充放电均衡,充分保证电池组之间的一致性和延长电池使用时间;3)整车控制方面:电池管理系统通过总线与电机控制器、整车控制器等报送当前的电池 SOC,方便整车控制器选择合适的控制策略,保证车辆的行驶安全性和经济性。电池的 SOC 估计是跟据电池的外特性和内部变量之间的关系,即电池电量与电池的电压、温度、电流、内阻等关系,来估算电池当前的剩余电量。电动汽车行驶的复杂工况和受电池本身极化效应、自放电、电池老化等影响,动力电池的 SOC 估计算法在实际使用中精度不是很高,需要大量基础测试、实验数据的积累和深入研究^[33]。

4 智能车辆信息感知关键技术

4.1 传感技术

只有准确且实时掌握车辆自身的状态参数和车辆周围环境之间的信息,才能最终达到无人驾驶的应用目标。可信的图像或视频传感数据是智能无人驾驶汽车安全运转的基础,但原始数据的采集只能依赖于传感器。合适的传感器的选取以及传感器采集数据的实时性与稳定性,决定了后续决策算法和控制模型的可信度。目前为实现车辆智能化,应用较广的传感器主要包括以下几种。

1) 雷达系统

雷达是一种即使在阴雨等恶劣天气影响下也可实时直接测量距离、速度、方位等信息的传感器。毫米波雷达是感知周围环境的有效手段,普遍用于检测车道边缘、感知车辆行人和障碍物以及获取车速数据等。毫米波雷达和计算机视觉的有效搭配,克服了机器视觉受环境影响较大的缺陷,为智能车辆的信息感知和控制决策系统提供了准确的道路环境动态信息^[34]。目前,毫米波雷达系统受外界环境的影响较小,智能车辆更倾向于采用 76 ~ 77 Hz 的毫米波。但是,毫米波也存在目标识别能力不足方面的问题,无法准确区分转弯还是变道^[35]。

激光雷达相比传统雷达技术,其具备高测量精度、精细的时间和空间分辨率以及大的探测距离,从而成为一种重要的主动遥感工具。激光雷达通过发射多束激光射线探测目标物的典型特性信息(空间位置和相对速度等),并通过配备的发射器和接收器实现信号信息的互通,并建立三维点云图,实现车辆本身和周围信息感知。由激光雷达组成的三维环境感知系统在智能电动无人驾驶车辆系统具有“眼睛”的功能,根据其三维建模的数据量与范围,可分为3类:(1)单线局部激光雷达,只有一个激光发射束,可针对一定范围内障碍物获取线状扫描点,典型系统 SICK 激光雷达^[36-37];(2)多线局部激光雷达,相比于单线局部激光雷达,其扫描点密度更高,可以反映更丰富的目标物信息,但因扫描范围有限,需要安装多部多线局部雷达实现车辆周围 360°扫描,典型系统如 IBEO 激光雷达^[38];(3)多线全视场激光雷达,该类型可实现全方位的实时路况信息扫描,具有数据量丰富的优点,但对处理器速度有较高要求^[39]。典型系统如 Velodyne 公司的 16 线激光雷达(VLP-16)、32 线激光雷达(HDL-32) FFW 及 64 线激光雷达(HDL-64)。

2) 机器视觉

随着大规模集成电路的出现,机器视觉技术可实现智能车辆结构化/非结构化道路和周围环境信息的深度处理。目前,智能化车辆多采用三维多角度立体视觉技

术,通过安装多部 CCD 等成像元件的摄像机,获取同一景物的不同角度,进而实现环境的感知和障碍的检测。德国 UBM 大学 Dickmanns 教授研究的 EMS-Vision (expectation-based multi focal saccadic vision system)就是利用多视角模拟人眼进行环境感知的^[40]。但在实际应用中如遇到大雾、黑夜、雨天等恶劣天气,需结合毫米波雷达等装置,突破其单一作用下的环境适应能力差的特点。

3) 高精度的数字地图和 GPS 技术

目前,一个 GPS 的单点定位精度为 10 m^[41],载波相位差分技术可显著提高 GPS 定位精度,通过蜂窝式基站和流动站提供厘米级精度的三维定位^[42-43]。高精度的数字地图可以实现预设且全面的道路信息获取,预先感知必须的基本道路信息,如曲率、车道线等。而且,高精度的数字地图有助于实现道路的预知,减少雨雪等恶劣自然条件下的交通事故;也有助于车辆自身的精准定位,便于变道和全路径规划;有助于降低系统成本。高精度全球定位系统可结合车辆本身建立的 3D 环境地图,确定行驶过程中的状态信息。

4.2 数据算法

1) 数据融合算法

数据融合技术是实现智能车辆核心数据处理的一种方法,是车辆行驶过程中动态规划与控制决策的基础。单一的机器视觉、GPS 传感器所采集的数据是不全面的,还需要对比多个数据并自动排除明显错误的信息。多传感器采集的数据错综复杂,按其抽象程度可分为数据层融合、特征层融合和决策层融合。所谓数据层融合就是将各传感器所采集的不同数据进行数据融合,再提取特征,最终进行融合判断;而特征层融合则是分别提取各数据特征,进行特征融合,从而融合判断;决策层融合是分别提取每个数据的特征,根据这些特征将最终判断决策融合结果^[44-47]。

基于多传感器数据融合的分割通常借助于立体视觉技术,利用多个图像采集传感器不同角度采集车辆的场景信息,从中获得关键区域各目标物体间的距离信息和立体信息。Oh J. H. 等人^[48]采用红外和光学摄像头相结合的方式,采用基于多模态体视分析的方法实现了后视镜关键区域位置目标信息的提取;Yoo H 等人^[49]利用多维视觉描述技术检测出关键区域场景中的路面信息,再提取出具有垂直边缘特性的目标区域;Zhao L 等人^[50]通过两个已标定的红外摄像头和激光雷达采集车辆前方的场景信息,通过分析计算图像的深度信息对所得的深度图像进行分割。

2) 视觉算法

计算机视觉技术是促进并提升车辆智能化水平的关键技术。图像获取信息量大,需要具备高实时性和稳定

性的检测与识别,进而得到视频图像中有效的环境信息。此外,在复杂的环境条件下,如阴天、雨天、下雪等天气以及各种不良道路环境的影响下,需要协同其他感知传感器获取数据并将有用的数据信息提供给中央控制平台^[51]。视觉算法可以实现智能电动汽车周围物体的深度信息、定位导航以及避障等。

为了充分提高结构化道路边缘线的检测算法精度,徐友春等人^[52]采用像素级特征和帧图像特征相结合的认识算法,该方法具有较好的抗干扰能力;Gern A 等人^[53]基于传统几何学和时间序列,提出了一种新颖的结构化道路边缘识别算法,有效提高了雨雪等自然条件下车道线辨识的准确度,增强了偏转角稳定性和曲率参数估算精度;Otsuka Y 等人^[54]依据车道线具有向扩张中心(focus of expansion, FOE)聚焦的特征的车道线识别方法。

清华大学郭磊等人^[55]基于数据融合的思想,提出了一种有效结合计算机视觉技术和雷达数据信息技术数据融合的车道线识别方法。首先,采用多传感器数据融合的方法实现车辆在图像中的关键区域识别,随后通过比对方式判断车道线具体位置。深度学习是一种模拟人类大脑运行机制,利用多隐层的多层感知结构和数据之间的关联性实现数据模式的学习算法。瑞士学者Schmidhuber 等人为实现智能车行驶路径的优化和道路环境的感知,采用一种快速且参数化的 GPU 实现深度神经网络算法(deep neural network, DNN)实现了道路标识的识别,该算法并不需要特征提取,而是以监督方式的方式自我学习。而且,将不同预处理方法得到的深度神经网络数据组合成多列 DNN,进一步提高了交通标志识别率,结果超过人类识别率达到了 99.46%^[56]。自从 2006 年加拿大多伦多大学教授 Geoffrey Hinton 首次提出深度学习的概念,深度学习已经在视觉算法领域(图像识别、人脸识别等)取得了飞速的发展。随着深度学习算法的发展,未来将使智能电动汽车无人驾驶技术的应用更快的落地,主要涉及车辆状态识别、身份识别和对比、车辆行为分析和驾驶控制等。

3) 控制算法

智能驾驶的数学模型是一个严重的非线性控制系统,高精度的纵向和横向控制决策算法是无人驾驶的关键核心技术,良好的控制决策算法可保证车辆自主导航,并逐步完成智能自动驾驶的目标任务。智能自动驾驶车辆可实现车辆按规定路线和速度行驶,跟随前方车辆和节能行驶等功能^[57-60]。

智能控制算法是保证车辆智能行驶和降低驾驶员精神负担的保证。但目前控制算法仍有诸多需要解决的问题:在颠簸道路或雨雪天气容易出现趋于非稳定工况;动力学控制参数和电池参数互动交互能力不足;轮胎附着

力与车辆制动控制能力不足等^[61]。

良好的控制算法需要不断提高算法的鲁棒性、清晰性和自适应。首先,需要研究如何保证车辆动力学行驶的安全性和可靠性;其次,实现精确的车辆本身定位和车辆运行轨迹的收敛性和跟踪;最后,根据采集到的多传感器数据实现车辆跟踪和变道的安全性,实现车辆系统的最优化控制^[62-64]。

为了实现车辆预定的期望轨迹行驶,郭孔辉^[65]提出了“预瞄-跟随”的车辆轨迹跟踪控制模型;王荣等人^[66]基于视觉引导和二自由度动力学模型为基本模型,结合计算机视觉技术,研究了各种智能控制算法下车道线跟踪的控制精度;为增强智能汽车在高速公路和结构化道路上超车的动态特性,游峰^[67]以轨迹跟踪误差的收敛性为目标,设计了超车轨迹跟踪算法;针对独立驱动的电动汽车控制,Kang J. Y. 等人^[68]采用了监督控制的驱动控制算法提升了车辆机动性、横向稳定性;根据车辆纵向模型不确定的特征和鲁棒控制理论,Luo Y. G. 等人^[69]采用多模型分层切换的方法,并为了验证该方法的有效性,进行了理论分析和仿真。

4.3 通信技术

智能电动汽车的信息感知技术是新型无线通信技术和现代汽车工业技术相互促进的产物,是建设现代智能交通系统和提高道路交通安全的关键技术。汽车网络信息交互过程中的隐私和数据安全性是制约网络发展的关键因素,直接影响到车辆网络系统的安全性,造成隐私泄露或者其他重大损失。实时可靠的信息传输是车联网面向交通道路安全应用的基础。车联网是以车辆、道路和其他基础设施为主的信息物理系统。车联网网络中涵盖了丰富的车辆、交通和驾驶员的私密信息,而且节点常以集群方式和快速移动变化形式存在,因此车联网信息的加密和身份验证需要调整。

智能辅助驾驶和超车、变道提醒可有效提高驾驶者预警(在目前还未完全普及完全自动驾驶情况下),车-车与车-路之间的通信依赖于 802.11p 无线通信技术,提供了车路短距离通信协议。

随着现代通信技术和智能交互技术的发展,数据信息安全已经从单机系统逐渐转变到信息网络架构,赋予了信息通信安全新的研究热点和产业难点。在以智能驾驶车辆、典型化城市结构道路以及周围交通基础设施为架构的信息物理系统中,存在基础节点数量众多且常以集群方式存在的弊端,易于造成网络拥塞,因此需要研究开发多通道的新型移动通信系统。而且,信息数据交互过程中,频繁的智能驾驶车辆节点与周围环境信息感知节点之频繁信息交互,数据信息的加密和身份验证是急需突破的技术难点。感知节点一旦被潜入,智能驾驶车辆或车主的信息将存在被盗取的风险。因此,智能汽

车与信息节点数据通信中的密钥管理以及数据加密是急需关注的话题^[70-71]。

5 结论与展望

智能电动汽车是一辆移动的智能机器人,其研究过程中涉及车-车、车-环境-道路之间的复杂、时变和非线性系统。它的研究技术跨度大,涉及认知学、人工智能、通信技术、传感技术等众多理论和方法,同时也是验证各种高精尖技术的最佳平台。随着计算机视觉技术、毫米波雷达技术的迅猛发展以及新型控制算法的出现,未来将有效解决智能化电动无人驾驶汽车实时性、准确率和经济性之间的矛盾,最终实现和普及无人驾驶。

智能电动无人驾驶汽车的应用将大幅度减少减少酒驾和疲劳驾驶等人为引起的交通事故;提高道路和车辆利用率,实现车辆的家庭级统筹安排;改变目前人-车交互方式,真正使车辆成为人类的“第三空间”。

智能电动驾驶车辆在复杂不确定环境中的机器学习能力、优化决策能力和控制策略体现了车辆的智能化水平,但其多耦合关系下的求解以及人-车-路之间的环境信息理解和多源数据信息融合处理都是现在所面临的主要理论和技术挑战。大数据技术驱动下的智能感知将彻底改变传统机器视觉技术在底层特征上的模式识别,为车辆的环境感知和节能化带来突破。

目前智能电动无人驾驶汽车在城市复杂行驶工况和特殊环境下的无人驾驶,均需要调动社会资源实现车载终端、通讯协议、测试评价以及其他关键技术完善的技术标准规范,建立相应的道路试验场进行实用性测试;同时,智能电动汽车若真正走进寻常百姓家庭,也需要解决在发展过程中遇到的人性、安全性、可靠性以及法律和道德问题等关键核心问题。

参考文献

- [1] SUN ZH H, ZHOU X S. To save money or to save time: Intelligent routing design for plug-in hybrid electric vehicle[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016,43(3): 238-250.
- [2] MAXEMCHUK N F, LIN S P, GU Y T. 13 Architectures for intelligent vehicles [C]. Vehicular Communications and Networks, 2015:275-299.
- [3] 张辰贝西,黄志球.自动导航车(AGV)发展综述[J]. 中国制造业信息化, 2010,39(1):53-59.
ZHANGCHEN B X, HUANG ZH Q. Evolution summarization of automated guided vehicles (AGV)[J], Manufacture Information Engineering of China, 2010, 39(1):53-59.
- [4] CHEN Q, ÖZGÜNER Ü, REDMILL K. Ohio state

university at the 2004 darpa grand challenge: 102 Developing a completely autonomous vehicle [J]. IEEE Intelligent Systems, 2004, 19(9):8-11.

- [5] 卜莉娜.高速公路车联网系统安全架构研究[D].天津:天津大学,2012.
BO L N. Research on security architecture for highway vehicle network [D]. Tianjin :Tianjin University, 2012.
- [6] SCHMIDT S, MERCORELLI P. Optimal regulation for dynamic hybrid systems based on dynamic programming in the case of an intelligent vehicle drive assistant [J]. IFAC-PapersOnLine, 2016,49(15):169-174.
- [7] RISACK R, MOHLER N, ENKELMANN W. A video based lane keeping assistant [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000:3-5.
- [8] LEE S, KWON W, LEE J W. A vision based lane departure warning system [C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999: 160-165.
- [9] MAMMAR S, GLASER S, NETTO M. Time to line crossing for lane departure avoidance: a theoretical study and an experimental setting [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 226-241.
- [10] MOHAMMAD M A, IOANNIS K, YULIA H, et al. Ontology-based framework for risk assessment in road scenes using videos [J]. Procedia Computer Science, 2015,60: 1532-1541.
- [11] 张立存. 汽车驾驶员控制行为统一决策模型的研究[D]. 吉林:吉林大学,2007
ZHANG L C. Research on driver unified decision model for vehicle assistant control [D]. Jilin: Jilin University, 2007.
- [12] 刘志强,陈彦博,葛如海.基于路面图像对称性的车道偏离识别方法研究,汽车工程,2007,29(7):626-629
LIU ZH Q, CHEN Y B, GE R H. A study on lane departure detection based on edge distribution Function Automotive Engineering, 2007,29(7): 626-629.
- [13] BROGGI A, BERTE S. Vision based road detection in automotive systems: A real time expectation driven approach [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1995, 3(1): 325-348.
- [14] GOLDBECK J, HUERTGEN B, ERNST S, et al. Lane following combining vision and DGPS [J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(5): 425-433.
- [15] POMERLEAU D, JOCHEM T. Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering [J]. Machine Vision. 1996, 11(2):19-17
- [16] KIM Z W. Robust lane detection and tracking in challenging scenarios [J]. IEEE Transactions on

- Intelligent Transportation System, 2008, 9(1):16-26.
- [17] ZHU N B, WANG G, YANG G B, et al. A fast 2D Otsu thresholding algorithm based on improved histogram [C]. Pattern Recognition, 2009: 1-5.
- [18] 王义敏, 安锦文. 基于最小错误率的 SAR 图象分割方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(16):80-84. WANG Y M, AN J W. Minimum error ratio based automatic SAR image segmentation [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(16):80-84.
- [19] 胡琼, 汪荣贵, 胡韦伟, 等. 基于直方图分割的彩色图像增强算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(9): 1776-1784. HU Q, WANG R G, HU W W, et al. Color image enhancement based on histogram segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(9): 1776-1784.
- [20] ENGIN A, DERYA A. An expert system based on fuzzy entropy for automatic threshold selection in image processing [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 3077-3085.
- [21] MIGUEL A S, RODRIGUEZ F J, MAGDALENA L, et al. A color vision-based lane tracking system for autonomous driving on unmarked roads[J]. Autonomous Robots, 2004, 16(1):95-116.
- [22] WANG Y, TEOH E K, SHEN D G. Lane detection and tracking using B-Snake [J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(4): 269-280.
- [23] ALPER B, ENIS G. Efficient edge detection in digital images using a cellular neural network optimized by differential evolution algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2645-2650.
- [24] XU K, XU G Q, ZHENG C H. Novel determination of wheel-rail adhesion stability for electric locomotives[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacture, 2015, 16(4): 653-660.
- [25] XU G Q, XU K, ZHENG CH H, et al. Optimal operation point detection based on force transmitting behavior for wheel slip prevention of electric vehicles[C]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Minor Revision Submitted, 2016, 17(2):481-490.
- [26] 徐新黎, 皇甫晓洁, 王万良, 等. 基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3):570-578. XU X L, HUANGPU X J, WANG W L, et al. Wireless charging routing algorithm in WSN with a path-fixed sink[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3):570-578.
- [27] ANDRENACCI N, RAGONA R, VALENTI G. A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas[J]. Applied Energy, 2016, 182(11):39-46.
- [28] BAHNES N, KECHAR B, HAFFAF H. Cooperation between Intelligent Autonomous Vehicles to enhance container terminal operations[J]. Journal of Innovation in Digital Ecosystems, 2016, 31(1):22-29.
- [29] LUO Y G, ZHU T, WAN SH, et al. Optimal charging scheduling for large-scale EV (electric vehicle) deployment based on the interaction of the smart-grid and intelligent-transport systems[J]. Energy, 2016, 97(15): 359-368.
- [30] 张辉, 金侠挺. 基于曲率滤波和反向 P-M 电动车充电孔检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1626-1638. ZHANG H, JIN X T. Detection method for electric vehicle charging hole based on curvature filter and inverse P-M diffusion[J]. 2016, 37(7):1626-1638.
- [31] LIU L S, KONG F X, LIU X, et al. A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51(11): 648-661.
- [32] MORTEZA M G, MEHDI M K. Optimized predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicle based on traffic condition [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139(15):935-948.
- [33] KUMAR K N, TSENG K J. Impact of demand response management on chargeability of electric vehicles [J]. Energy, 2016, 111(15):190-196.
- [34] 朱愿. 基于视觉和雷达的智能车辆自主换道决策机制与控制研究[D]. 上海: 中国人民解放军军事医学科学院, 2014. ZHU Y. Research on decision making mechanism and control of intelligent vehicle autonomous lane change based on vision and radar [D]. Shanghai: Academy of Military Medical Sciences, 2014.
- [35] 党宏社. 韩崇昭 段战胜. 智能车辆系统发展及其关键技术概述[J]. 公路交通科技, 2002, 19(6):127-130. DANG H SH, HAN CH ZH, DUAN ZH SH. Survey of intelligent vehicles development and associated key technologies[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(6):127-130.
- [36] 刘建. 基于三维激光雷达的无人驾驶车辆环境建模关键研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016. LIU J. Research on key technologies in unmanned vehicle driving environment modelling based on 3D lidar [D]. Heifei: University of Science and Technology

- of China, 2016.
- [37] 彭梦, 蔡自兴. 基于系数矩阵二范数的2维激光-摄标方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 749-757.
PENG M, CAI Z X. Calibration method for 2D laser radar and camera based on 2-norm of coefficient matrix[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 749-757.
- [38] HU Y W, LI X, GONG J W. Multi-feature extraction for drivable road region detection with a two dimensional laser range finder[C]. Advanced Materials Research, 2011, 304: 381-386.
- [39] ZHANG L, LI Q Q, M LI, et al. Multiple vehicle-like target tracking based on the velodyne LiDAR[C]. 8th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicle, 2013, 46(10): 126-131.
- [40] GREGOR R, DICKMANN E D. EMS-Vision: Mission performance on road networks[C]. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000: 140-145.
- [41] 陈权新. GPS精密单点定位技术误差改正及测量精度研究[J]. 中国新技术新产品, 2012(13): 31.
CHEN Q X. Research on error correction and measurement precision of GPS precise point positioning technique[J]. China New Technologies and Products, 2012(13): 31.
- [42] 张照杰. 网络RTK定位原理与算法研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2007.
ZHANG ZH J. Principle and algorithm research for GPS Network[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2007.
- [43] SONG X, LI X, TANG W C, et al. A fusion strategy for reliable vehicle positioning utilizing RFID and in-vehicle sensors[J]. Information Fusion, 2016, 31(C): 76-86.
- [44] 汪明磊. 智能车辆自主导航中避障路径规划与跟踪控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 4-29.
WANG M L. Research on local collision-free path planning and path tracking control technologies in the autonomous navigation of intelligent vehicle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 4-29.
- [45] JOSE D, PRASAD S, SRIDHAR V G. Intelligent vehicle monitoring using global positioning system and cloud computing[C]. Procedia Computer Science, 2015, 50: 440-446.
- [46] LUO Y G, CHEN T, LI K Q. Multi-objective decoupling algorithm for active distance control of intelligent hybrid electric vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64(12): 29-45.
- [47] XIA Y J, WANG C H, SHI X M, et al. Vehicles overtaking detection using RGB-D data[J]. Signal Processing, 2015, 112(7): 98-109.
- [48] OH J H, LEE S H, LEE B H, et al. Probability analysis of position errors using uncooled IR stereo camera[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 76(5): 346-352.
- [49] YOO H, SON J, HAM B, et al. Real-time rear obstacle detection using reliable disparity for driver assistance[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 56(C): 186-196.
- [50] ZHAO L, THORPE C E. Stereo- and neural network-based pedestrian detection[J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(3): 148-154.
- [51] FAN Y, CHU Y L. Study of a new vehicle detection algorithm based on linear CCD images[J]. Optic-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(24): 5932-5935.
- [52] 徐友春, 王荣本, 李克强, 等. 一种基于直线模型的道路识别算法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(7): 858-864.
XU Y CH, WANG R B, LI K Q, et al. A linear model based road identification algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 858-864.
- [53] GERN A, MOEBUS R, FRANKE U. Vision-based lane recognition under adverse weather conditions using optical flow[J]. Intelligent Vehicle Symposium, 2002(2): 652-657.
- [54] OTSUKA Y, MURAMATSU S, TAKENAGA H, et al. Multitype lane markers recognition using local edge direction[C]. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2002(2): 604-609.
- [55] 郭磊, 王建强, 李克强. 存在车辆干扰的车道线识别[J]. 汽车工程, 2007, 29(5): 372-376.
GUO L, WANG J Q, LI K Q. Lane detection under vehicles disturbance[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(5): 372-376.
- [56] CIRESAN D, MEIER U, MASCI J, et al. Multi-column deep neural network for traffic sign classification[C]. Neural Networks, 2012, 32(1): 333 - 338.
- [57] YOU F, ZHANG R H, GUO L, et al. Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(14): 5932-5946.
- [58] POTLURI R, SINGH A K. Path-tracking control of an autonomous 4WS4WD electric vehicle using its natural feedback loops[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(5): 2053-2062.
- [59] HOU Y, EDARA P, SUN C. Situation assessment and

- decision making for lane change assistance using ensemble learning methods [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(8):3875-3882.
- [60] ZHENG Z D, AHN S, CHEN D J, et al. The effects of lane-changing on the immediate follower: Anticipation, relaxation, and change in driver characteristics [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 26(1):367-379.
- [61] LI Z P, CHEN L Z. Effects of intelligent control mechanism on multiple-vehicle collision under emergency[J]. *Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 404(24):16-25.
- [62] LI Z P, LI W Z, XU S Z, et al. Stability analysis of an extended intelligent driver model and its simulations under open boundary condition [J]. *Physical A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2015, 419(2):526-536.
- [63] AZADI S, NAGHIBIAN M, KAZEMI R. Adaptive integrated control design for vehicle dynamics using phase-plane analysis[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2015, 29(6):2477-2485.
- [64] LUO Y G, CHEN T, ZHANG S W, et al. Intelligent hybrid electric vehicle acc with coordinated control of tracking ability, fuel economy, and ride comfort [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(4):2303-2308.
- [65] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 1991.
GUO K H. *Vehicle handling dynamics*[M]. Changchun: Jilin science and Technology Press, 1991.
- [66] 王荣本,张荣辉,储江伟,等. 区域交通智能车辆控制器优化设计和品质分析平[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(1):22-25.
WANG R B, ZHANG R H, CHU J W, et al. Optimizing design and quality analysis for cyber car controller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(1):22-25.
- [67] 游峰. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究[D]. 长春:吉林大学, 2005.
YOU F. Study on autonomous lane changing and autonomous overtaking control method of intelligent vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [68] KANG J Y, YOO J H, YI K. Driving control algorithm for maneuverability, lateral stability, and rollover prevention of 4WD electric vehicles with independently driven front and rear wheels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(7):2987-3001.
- [69] LUO Y G, XIANG Y, CAO K, et al. A dynamic automated lane change maneuver based on vehicle-to-vehicle communication[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 62(1):87-102.
- [70] 赵海涛,朱洪波,张晖,等. 基于连通概率感知的车联网资源优化技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(8):1724-1734.
ZHAO H T, ZHU H B, ZHANG H, et al. Research on resource optimization technique based on connectivity probability perception for internet of vehicle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(8):1724-1734.
- [71] QU F ZH, WU ZH H, WANG F Y, et al. A security and privacy review of VANETs[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2015, 16(6):2985-2996.

作者简介



张艳辉, 2008年于青岛科技大学获得学士学位, 2011年于东北电力大学获得硕士学位, 2014年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院深圳先进技术研究院助理研究员, 主要研究方向为电动汽车能量变换与智能控制。

E-mail: zhangyh@siat.ac.cn

Zhang Yanhui received his B. Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2008, his M. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2011, and his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Science in 2014. Currently, he is an assistant research fellow in Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include Advanced Energy Conversion and Control of Electric Vehicles.



徐国卿(通讯作者), 分别在1988年、1991年和1994年于浙江大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为上海大学电机与控制工程研究所所长, 主要研究方向为电动汽车能量变换与智能控制。

E-mail: xugq1967@126.com

Xu Guoqing (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Zhejiang University in 1988, 1991, and 1994, respectively. Now he is the director of Institute of Electrical & Control Engineering of Shanghai University. His main research interests include Advanced Energy Conversion and Control of Electric Vehicles.