

智能电动汽车的感知、决策与控制关键基础问题及对策研究

李 克 强

清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084

摘要 电动化与智能化的融合是新一代汽车技术发展的前沿,因其所具有的环保、安全特性而在国际上引起极大关注。本文梳理总结了智能电动汽车的感知、决策与控制等方面的发展趋势和现有问题,指出智能电动汽车属于多学科交叉领域,集成难度高;其动力来源与传统汽车不同,这也带来了电池安全性、能量回收、动力学模型等基础问题。最后给出适合中国国情且清晰可行的研究对策,指出了该研究可带来的预期经济与社会效益。

关键词 智能电动汽车;环境感知;信息安全;人机交互;动力学控制

以移动互联、大数据及云计算等为代表的新一轮科技革命正推动着传统制造业快速升级。汽车作为国民经济的支柱产业,其智能化可极大促进电子、机械等上游产业链和生产、服务等下游产业链的发展,加速汽车工业实现“工业4.0”。智能电动汽车融合了“电动化”和“智能化”2大前沿技术,具有节能、低碳、安全、高效等特征,已成为继制造自动化、柔性化、高度集成化之后汽车工业智能制造的重要组成部分,是国内外瞩目的研究前沿和热点^[1]。

智能电动汽车依靠车载传感器和移动互联技术,获取前方道路、车辆等环境信息和汽车自身状态信息,通过智能决策与自动控制,实现安全、节能、环保、舒适的汽车行驶过程。美、日、欧等国家和地区通过政策引导和研发投入,初步取得了一些技术突破,研制了以特斯拉 Model X 和奔驰 F015 为代表的智能电动汽车原型系统。

1 智能电动汽车感知、决策、控制等基础问题

智能电动汽车属于车辆、能源、人因、交通、电子、信息和控制等多学科交叉领域,技术分散度大、集成难度高,系统功能的短板效应严重,特别是感知、决策和控制等基础共性问题,仍亟待突破。

另外,智能电动汽车具有其特殊性,在感知方面,它可通过融合电机力矩和转速等精确可知的信息提高自身状态观测精度;在信息安全方面,充电时需要与充电设施进行交互,考虑其电池安全性,还需要实时地远程监控;在决策、控制方

面,在进行多目标控制时需要考虑能量回收等因素,电动车自身构型也具有多样化特点,由此引发的问题需要解决。

1.1 综合态势感知

利用多传感器信息进行驾驶员状态监测、车辆状态估计和交通环境感知,是电动汽车智能化的前提。在这一领域,谷歌、斯坦福和 Mobileye 等已取得系列进展,包括驾驶员注意力状态的机器视觉监测^[2]、车辆运动状态和本征参数的主动滤波估计^[3]、摄像头和雷达的动态贝叶斯融合^[4]及多目标识别跟踪与即时场景构建^[5]等。

然而已有方法在实时性、精确性和稳健性方面尚存巨大挑战:复杂工况和环境产生的多重干扰,导致视听觉信息质量不高,且严重忽视“人-车-环境”固有关联特征,单项研究彼此割裂,导致多源信息有效利用率不高。因此,低信噪比和复杂干扰条件下,面对异构、多模态、不一致、不完备和不确定的多源信息,利用电动汽车驱动力矩准确可知的特点并通过信息融合实现“人-车-环境”综合态势感知,已成为公认的前沿课题。

1.2 信息安全

多源信息融合及移动互联技术的应用提高了电动汽车的智能化水平,但所带来的信息安全问题也日益严峻,信息篡改或“黑客”入侵可造成车毁人亡的严重后果。为此,日本 IPA (Information-technology Promotion Agency)、欧洲 EVITA (E-safety Vehicle Intrusion Protected Applications) 和美国 SAE (Society of Automotive Engineers) 相继发布了汽车信息安

收稿日期:2016-09-29;修回日期:2016-12-13

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFB0100900)

作者简介:李 克 强,教授,研究方向为汽车智能化和电动化技术,电子信箱:likq@tsinghua.edu.cn

引用格式:李 克 强. 智能电动汽车的感知、决策与控制关键基础问题及对策研究[J]. 科技导报, 2017, 35(14): 85-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.14.011

全模型、V2X(vehicle to X)网络安全报告和汽车信息安全标准,力图提升车载信息安全。以IBM、哥伦比亚大学为代表的诸多机构也对汽车信息安全框架及保护机制、汽车全生命周期的信息安全防护、汽车CAN(controller area network)总线的安全策略等进行了研究^[6-8]。

这些研究大都针对传统车辆架构的信息安全,没有考虑到智能电动汽车的特殊性,如充电交互及远程监控,特别是未能考虑电动汽车在感知域、决策域、控制域方面不同智能等级的差异性。如何建立多智能级别、多域汽车信息安全模型的理论及方法,将是保障智能电动汽车安全行驶的关键。

1.3 自主决策与人机共驾

车辆自主决策是电动汽车智能化的核心,而人机共驾是智能电动汽车个性化的基础。以谷歌和斯坦福等为代表的团队对驾驶行为决策和路径规划进行了前期研究,如驾驶决策的模式转移模型,驾驶决策的灰关联熵分析,利用ID3(Iterative Dichotomiser 3)分类算法的驾驶决策分类树,基于实时局部高程地图、可行方向角和矢量场直方图的自主运动规划^[9-10]等。

但上述方法偏重于特定场景,缺少道路环境和交通要素语义的认知,不能对有限的多源异构环境信息进行有效认知和理解,导致自动决策的有效度不足。

人机共驾方面,目前在驾驶人操控意图识别、自动驾驶干预策略、人机驾驶权分配等方面开展了多种探索性研究,典型的研究包括基于博弈论的换道驾驶意图识别^[11]、以安全包络为边界的共享干预策略^[12]、以力平衡为核心的控制权重分配^[13]等。

现有共驾方法的研究大多停留于单一通道的交互,缺乏不同感知通道的诱导机制和拟人机制研究,且未能建立平衡人驾驶共性和个性化特征的驾驶权分配策略,导致共驾过程偏向于同质化,对不同驾群、不同车型的适应性严重不足。

1.4 动力学控制

动力学控制是实现电动汽车智能化的关键环节,决定了汽车行驶的安全性、经济性和舒适性等基本性能。智能内燃机车辆动力学控制的研究重点聚焦于纵横向动力学控制:国外机构分别从单一性能控制及执行器容错控制等方面对电动汽车的动力学控制技术进行研究。基于轮胎侧偏角估计的电动汽车横向稳定性控制,可有效提高车辆行驶稳定性^[14]。预测控制方法设计了纵横协调控制律,以提高电动汽车行驶安全性^[15]。俄亥俄州立大学Wang等分析了电动汽车执行系统失效机理,并提出主动容错调节方法^[16]。中国学者在系统建模与优化控制等方面进行了大量研究:清华大学提出了智能电动汽车纵横向协调与重构控制,可保证系统状态在有限时间内收敛至平衡点^[17];吉林大学探索了用于电动汽车纵向控制的最优滑移率辨识技术,提出基于带遗忘因子的最小二乘法的电动汽车纵向控制系统^[18]。

实际上,道路上的电动汽车与其他车辆耦合成复杂的异

质网联系统,电动汽车的多车队列化行驶有望进一步解决现有充电管理局限问题,并提升交通效率、安全性和经济性^[19]。汽车队列化典型项目如美国PATH(partners for advanced transportation technology)^[20]、欧洲ICT4EV(information communication technology for electric vehicles)^[21]、日本Energy ITS(intelligent transport systems)^[22]等,所关注的问题包括构型优化、分布式控制、队列稳定性等。例如,加州大学伯克利分校对队列控制目标、间距布局、任务分配等问题进行了初探;欧洲沃尔沃实现了同质车辆队列的镇定与路测;日本名古屋名城大学进行了重卡车队的控制器设计和实车试验,燃油效率提升14%;瑞典查尔姆斯理工大学提出了协同式队列设计方法,成功应用于GCDC(grand cooperative driving challenge)活动。

目前,国外单车动力学控制研究仅从单一性能进行探讨,不能实现多性能目标综合最优,且主动容错能力不能满足行驶要求;队列方面的研究正向包含电动车的异质化队列发展,但仅局限于固定信息拓扑结构,尚缺乏统一架构下针对电动汽车的多车系统建模、性能分析与控制器设计。

2 目标与对策分析

2.1 总体目标

以智能电动汽车感知、决策及控制关键基础问题为研究重点,预期构建时空协同“视听体觉”信息融合的智能电动汽车“人-车-环境”系统综合态势感知理论;建立智能电动汽车信息系统安全模型、保障理论和防护方法;提出具备“驾驶脑”认知的电动车辆最优路径规划与驾驶决策方法;探明人机驾驶的本质差异与冲突机理,建立人机共驾交互理论与方法;构建智能电动汽车复杂机电系统动力学与控制理论;建立智能电动汽车网联系统的统一动力学模型,扩展不确定电动汽车队列的鲁棒镇定理论。

2.2 具体对策

围绕上述总体目标,紧扣国内外研究趋势,提出智能电动汽车研究技术路线图(图1)。

该路线图主要包含6大研究内容,具体阐述如下。

1) 在分析信息安全理论的基础上,考虑智能电动车辆与充电设施和其他智能设备间的交互特性,搭建针对智能电动汽车的信息系统安全模型,结合安全认证鉴权机制,建立智能电动汽车信息安全保障理论,融合车载信息漏洞检测技术,形成汽车信息安全防护方法。

2) 利用智能电动汽车电驱动系统的驱动力矩信息准确可知的特点,结合不完备、不一致和不确定的视听体觉信息,基于多源信息的时空关联机制,通过多层次深度融合,构建拟人认知的“人-车-环境”系统综合态势感知理论,形成智能电动汽车综合态势感知方法。

3) 考虑电动车辆充电需求,结合感知层的输出,由驾驶认知形式化语言对其统一描述,构成实时驾驶态势图,同时

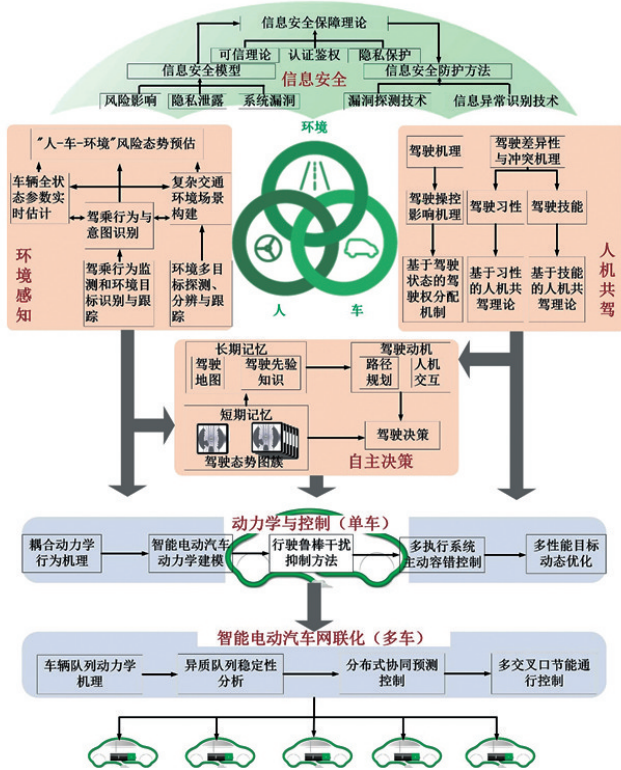


图1 智能电动汽车研究技术路线

Fig. 1 Technical Route of researches of intelligent electric vehicle

电动汽车的SOC(State of Charge)、速度、位置及航向也映射到驾驶态势中,形成全面反映当前驾驶态势的图簇,再结合驾驶地图、驾驶记忆棒、路径规划等知识,完成自主决策。

4) 通过探索具有共性特征的驾驶人驾驶机理,理解人机驾驶的本质差异,并揭示两者的冲突机理,通过研究反映驾驶人驾驶行为模式的个性化物理表征,形成基于驾驶权分配机制的人机共驾交互理论。

5) 揭示纵/横/垂向耦合动力学行为特征,构建智能电动汽车系统动力学模型,提取描述智能电动汽车行驶的特征信息,提出外界随机干扰的鲁棒抑制方法,分析面向不确定特性的线控电多执行器系统故障诊断机理,提出自适应主动容错控制方法,研究汽车安全、舒适、节能等多性能目标的量化方法,建立基于可行解空间的优化代价函数,构建具有主动容错特性的安全、节能、舒适多性能目标控制构架。

6) 考虑到电动汽车构型多样化,建立适合电动汽车队列的通用型动力学模型,利用多智能体一致性控制理论研究异质队列中稳定性、鲁棒性和可延展性,采用邻域信息单步传输的策略设计分布式模型预测控制器,最后利用所搭建的智能电动汽车平台完成多交叉路口的队列节能通行验证。

该技术路线设计分层次进行技术架构,包含了环境感知层、人机共驾层、自主决策层、动力学与控制层、信息安全层。它明确了各层间的支撑关系,初步形成了涉及智能电动

汽车感知、决策、控制与信息安全各项内容的研究体系。

3 结论

本文以解决智能化电动汽车的核心问题为目标,从综合态势感知、信息安全、自主决策与人机共驾、动力学控制等方面对国际研究现状与发展趋势深入分析,制定了层次明晰、逻辑清晰、关联明确的技术路线。其中信息防护层保障了其他层次的信息交互;环境感知层的成果为决策与控制等提供了“人-车-环境”综合信息支撑;人机共驾与决策的路径规划研究确定了上层动力学控制目标;动力学控制层通过建立一种多性能的目标控制体系构架,为网联化层的智能电动汽车队列行驶研究提供支撑。本路线针对层次内部,还阐述了其中的难点问题、关键技术的解决方法及研究内容的推进关系。相应地,合理互补的支撑逻辑关系与研究框架也说明了该技术路线具有较强的可行性。

参考文献(References)

- [1] Li K, Chen T, Luo Y, et al. Intelligent environment-friendly vehicles: Concept and case studies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 318-328.
- [2] Tawari A, Martin S, Trivedi M. Continuous head movement estimator for driver assistance: Issues, algorithms, and on-road evaluations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 818-830.
- [3] Kanghyun N, Hiroshi F, Yoichi H. Estimation of sideslip and roll angles of electric vehicles using lateral tire force sensors through RLS and Kalman filter approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 988-1000.
- [4] Held D, Levinson J, Thrun S, et al. Robust real-time tracking combining 3D shape, color, and motion[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(1/3): 30-49.
- [5] Natour G, Ait-Aider O, Rouveure R, et al. Toward 3D reconstruction of outdoor scenes using an MMW radar and a monocular vision sensor[J]. Sensors, 2015, 15(10): 25937-25967.
- [6] Bayram S, Papapanagiotou I. A survey on communication technologies and requirements for internet of electric vehicles[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014(1): 1-18.
- [7] Kitayama H, Munetoh S, Ohnishi K, et al. Advanced security and privacy in connected vehicles[J]. IBM Journal of Research and Development, 2014, 58(1): 1-7.
- [8] Zeadally S, Hunt R, Chen Y, et al. Vehicular ad hoc networks (VANETS): Status, results, and challenges[J]. Telecommunication Systems, 2012, 50(4): 217-241.
- [9] Okuda H, Ikami N, Suzuki T, et al. Modeling and analysis of driving behavior based on a probability weighted ARX model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 98-112.
- [10] Teichman A, Lussier J T, Thrun S. Learning to segment and track in RGBD[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(4): 841-852.
- [11] Hoult W, Cole D. A neuromuscular model featuring co-activation for use in driver simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(1): 175-189.

- [12] Beal C, Gerdes J. Model predictive control for vehicle stabilization at the limits of handling[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1258–1269.
- [13] Anderson S. Constraint-based navigation for safe, shared control of ground vehicles[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [14] Nam K, Fujimoto H, Hori Y. Lateral stability control of In-Wheel-Motor-Driven electric vehicles based on sideslip angle estimation using lateral tire force sensors[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2012, 61(5): 1972–1985.
- [15] Cairano S, Tseng H, et al. Vehicle yaw stability control by coordinated active front steering and differential braking in the tire sideslip angles domain[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1236–1248.
- [16] Wang R, Wang J. Fault-tolerant control for electric ground vehicles with independently-actuated in-wheel motors[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2012, 134(2): 194–203.
- [17] 郭景华, 罗禹贡, 李国强. 智能电动车辆纵向协调与重构控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1238–1244.
- Guo Jinghua, Luo Yugong, Li Keqiang. Cooperative and reconfigurable lateral and longitudinal control of intelligent electric vehicles[J]. Control Theory and Applications, 2014, 31(9): 1238–1244.
- [18] Gu Q, Cheng X. Study on optimal slip ration identification and traction control for electric vehicle[C]//International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin, China: IEEE, 2011: 738–742.
- [19] Hedrick J, Tomizuka M, Varaiya P. Control issues in automated highway systems[J]. IEEE Control Systems, 1994, 14(6): 21–32.
- [20] Desjardins C, Chaibdraa B. Cooperative adaptive cruise control: A reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1248–1260.
- [21] Taefi T, Kreutzfeldt J, Held T, et al. Strategies to increase the profitability of electric vehicles in urban freight transport[M]. Berlin, Germany: Springer, 2015, 367–388.
- [22] Dunbar W, Caveney D. Distributed receding horizon control of vehicle platoons: Stability and string stability[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(3): 620–633.

Key topics and measures for perception, decision-making and control of intelligent electric vehicles

LI Keqiang

State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Intelligent electric vehicles have attracted a great attention in the international community. This paper reviews its trends and existing problems, focusing on the perception, the decision-making and the control. Feasible researches best suited for our country are pinpointed, together with the expected economic and social benefits.

Keywords intelligent electric vehicles; environmental perception; information security; human-machine interaction; dynamics and control

(编辑 王志敏)