

车路协同环境下的交通工程

王云鹏, 鲁光泉, 于海洋

(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 交通工程的产生与发展始终围绕着交通系统中的人车路耦合关系, 来实现高效、安全、绿色的目标。载运工具智能化和车路/车车互联推动了车路协同技术的发展, 将使交通系统逐渐从车路协调走向车路协同, 并进一步提升交通系统的效能与安全。在车路协同环境下, 传统交通系统中人为因素弱化, 人车路耦合性增强, 系统可控可测, 随机性减弱, 系统的感知、决策及控制主体逐渐从驾驶人转向机器, 这给传统交通工程的基础理论方法带来了诸多变化与挑战。本文主要从人车路耦合的角度重点探讨车路协同系统对交通工程的影响, 并提出未来发展过程中亟需解决的科学问题。

关键词: 交通工程; 车路协同; 发展趋势

中图分类号: U491.2 **文献标识码:** A

Traffic Engineering Considering Cooperative Vehicle Infrastructure System

Wang Yunpeng, Lu Guangquan, Yu Haiyang

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The development of transportation engineering is performed with a focus on the coupling between human, vehicles, and roads to improve the level of efficiency, safety, and environmental friendliness. Technologies associated with the cooperative vehicle infrastructure system (CVIS), which is based on the concepts of intelligent vehicles and V2V and V2I communication, will cause the transportation system configuration to gradually change from human-vehicle-road coordination to vehicle-infrastructure cooperation, thereby greatly improving traffic efficiency and safety. Under the CVIS environment, conventional human factors affecting traffic have less influence, and the coupling of human-vehicle-road is enhanced; thus, the systems can be controlled and evaluated effectively, and the randomness in traffic systems can be reduced. The processes of perception, decision-making, and control are performed by robots instead of humans, and this could lead to numerous changes and challenges to the theory of transportation. This paper discusses the influence of CVIS on transportation engineering, and the associated scientific issues.

Keywords: traffic engineering; cooperative vehicle infrastructure system; development trend

一、前言

传统的智能交通系统通过“感传知用”实现交通要素一体化集成, 是道路交通有序运行的重要保

障。随着信息技术的不断进步, 车辆由驾驶辅助向协同智能发展已成定势, 车路协同技术作为解决交通安全问题、提升通行效率的重要手段日益受到国内外学者和交通行业管理部门的重视 [1]。车

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-04-12

通讯作者: 鲁光泉, 北京航空航天大学, 教授, 研究方向为驾驶行为、交通安全、车车协同安全控制; E-mail: lugq@buaa.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+’行动计划的发展战略研究”(2016-ZD-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

路协同技术的发展,将进一步改变交通系统的组织形式、运营模式和运行方式,引发交通系统技术的一系列变革性发展。交通工程学科需要在新的技术环境下发展新的理论体系,建立新的技术架构。

二、交通系统是人车路耦合的复杂系统

交通运输系统包括载运工具、基础设施、运营服务等要素,涵盖规划、设计、建设、养护、运营等内容,旨在实现高效、安全、绿色等目标 [2]。交通运输工程其所涵盖的内容越来越广泛而发散,但所有的交通技术都必须坚持交通运输工程系统性的理念。交通运输系统是人车路等交通要素组成的复杂系统,系统中的各种行为都是人车路交通要素相互作用的结果,任何目标的实现都与车路之间的作用密切相关。因此,不能把人车路割裂开来,而应站在系统的高度谈交通工程。

人车路的耦合关系首先表现在驾驶行为上。驾驶行为在表象上体现在驾驶过程中,可分为三个阶段:路径规划、轨迹规划和轨迹控制。路径规划阶段涉及到驾驶人对路径选择行为、宏观的路网规划,以及车路间的匹配等。驾驶人习惯于选择自己熟悉的路,或是根据路网交通状态信息选择路径,这是人与路网的耦合;不同的车需要走不同的路,受大型车辆道路条件(如限高等)的影响,大型车辆驾驶人的路径选择受到车与道路的耦合关系的限制。因此,人车路等交通要素之间的耦合关系很大程度上影响着路径规划的过程。轨迹规划及控制相比路径规划更为微观,涉及车辆在运行过程中的具体运动过程,如换道、跟驰、超车等。车车、车路之间的耦合关系对轨迹规划存在一定的约束,人车、车路之间的关系也影响着驾驶人对于车辆的操控行为。

人车路的耦合关系也体现在交通流特征上。如单车道的通行能力很大程度上取决于驾驶人对于车头时距的选择,这是人车路相互作用的结果;换道行为影响车流的稳定性,这是车与车相互作用的结果;这些都会影响交通流特征,从而影响道路通行能力和服务水平。

人车路的耦合关系还是交通设计组织的基础。比如设计视距时需要结合人的行为特征以及车路的参数,达到相互协调的目的。坡道、弯道、桥梁的

几何设计也需要考虑到车与路之间的相互作用关系。而道路的信号控制与交通流组织更是离不开人车路之间的耦合作用。因此,只有把人车路交互作为交通运输系统的基本要素来考量,才能在交通设计组织时更游刃有余。

三、从车路协调到车路协同

目前的交通系统主要是从人车路协调的角度去设计,而将来可能走向人车路协同的发展路线。

(一) 中国交通发展进入新的阶段

目前中国的道路交通系统发展已经进入了一个新的阶段。我国的高速公路面积密度已经达到了 $1.4 \text{ km}/100 \text{ km}^2$,高于美国的 $1.1 \text{ km}/100 \text{ km}^2$,低于日本的 $2.2 \text{ km}/100 \text{ km}^2$;而高速公路每万辆车所拥有的高速公路里程数已经超过了美国和日本。到2020年前后,大规模的交通基础设施扩张式建设将基本结束,主要的工作转向设施完善及服务提升。那么如何才能更好地利用现有的交通资源来提升服务水平呢?利用新技术提升现有基础设施的服务能力是重要的解决手段。

(二) 新技术释放交通系统能力

2030年后,交通系统将更多地结合新技术来提升交通的体验、提供多样化的出行服务。有预测表明智能交通技术的应用能够使交通系统的能力提升1.5倍。目前,交通技术的发展呈现出如下趋势:载运工具智能化的快速发展;信息技术与交通深度融合;交通系统呈协同运行趋势。近年来以构建车路协同系统为目标的研究也引起了广泛关注 [3]。

1. 载运工具智能化

载运工具智能化的发展速度远超想象,无人驾驶汽车近年来一直处在行业的风口浪尖,成为高校、企业和媒体的宠儿。无人驾驶汽车作为继智能手机之后的下一个移动互联网的主要终端,将是汽车产业未来发展的一个重要趋势 [4]。美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)把汽车智能化水平分为五级。其中0级为人工驾驶;1级为具有特殊功能的智能化;2级为具有多项功能的智能化;3级为具有限制条件的无人驾驶;4级为全工况无人驾驶。目前许

多中高级车辆已经具备了1级到2级的车辆智能化水平，而3级无人驾驶是正在突破的技术瓶颈，全球各地正在测试验证。然而，单独以车辆为主体的自动驾驶的实现，需要很强的人工智能技术、高昂的经济成本和较难预测的时间周期。目前其安全性和可靠性仍有较大局限，难以在短期内大规模应用，迫切需要借助完备的车路信息交互下的网联联控实现车路各要素的智能一体化耦合与协同，达到系统总体的最优。车路之间的发展实际上是相互促进的过程，而无人驾驶汽车出现之后，交通设施也需要做出相应的变化来适应其发展。汽车的智能化已经对交通基础设施的智能化提出了新的需求。

2. 信息技术与交通深度融合

移动互联、人工智能、大数据等信息技术对于交通工程科技的改变是革命性的，两者的深度融合催生了诸多交通行业的新业态[5]。如移动互联技术应用在租车行业产生汽车共享服务；大数据与交通行业的融合更是对交通信息采集、分析与预测产生深远影响。随着信息技术与交通的深度融合，新的业态、新的运行模式还在不断产生。国内外专家对车路协同也给予了极大的期待。

3. 交通系统呈现协同运行趋势

传统的自动驾驶汽车在发展初期甚至目前阶段，都是考虑让车辆更智能地适应现有的交通系统。比如利用机器视觉识别道路标线，但这在一定程度上增加了计算负荷，同时降低了可靠性。而随着移动通信的发展，车与车之间的互联，车与基础设施之间的互联得到了越来越广泛的关注。如果交通系统能够稍微做一些改变，实际效果往往可能事半功倍。如标线、标志信息电子化后能够直接发送给车辆，对于自动驾驶的设计也是革命性的变化。因此，未来的交通系统不仅仅包括车辆的智能化，还涵盖车与人车路等对象的互联互通及互操作[6]。

综上所述，传统的交通系统通过平、纵曲线设计，视距设计及路侧环境设计等方法来实现人车路的协调，达到高效、安全、绿色的目标。但在未来的交通系统中，高度智能化的车辆将变成主要交通元素，车车/车路间的信息交互能力不断增强，车辆能够根据道路信息调整行为，路也能够根据车的行为调整状态。因此，未来将通过构建动态的车路协同系统使整个交通系统更高效、更安全、更环保。

四、车路协同系统带来的交通工程变化

理想的的车路协同状态下，车辆都具备高度自动驾驶能力，将传统交通系统中的人为因素弱化甚至去除，所以交通系统中的诸多模式将发生变化。感知模式从驾驶人感知变为车辆感知；决策模式由驾驶人决策变为机器决策；管控模式从交通诱导变为车辆主动控制。传统交通系统是时变、强非线性、不连续、不可控、不可测的，理论上是无解的，因为道路上的汽车都不受控。而车路协同系统却有可能通过模型解构将其变成可控可解的问题，使一切问题回归到物理领域[7]。

《交通工程手册》中将交通工程学定义为：研究道路交通中人、车、路、环境之间的关系，探讨道路交通规律，建立交通规划、设计、控制和管理的方法，以及有关设施、装备、法律和法规等，使道路交通更加安全、高效、快捷、舒适的一门技术科学。交通工程教科书中所涵盖的内容基本为交通调查、交通流理论、通行能力、服务水平、交通规划等。那么，车路协同将给这些交通工程的内容带来什么样的变化呢？

首先是交通调查的变化，获取参数方式从传统的人工观察、地磁到多传感器、全时空的自动采集，基本解决了交通可测性问题。分析方法从问卷调查数据统计到多传感器数据融合；数据颗粒度也从断面、局部数据变为精准的全时空轨迹数据。

在交通流理论方面，传统的交通流理论主要基于动力学分析，个体相对独立、被动反应，而在车路协同环境下，信息交互性强、协同性好，更多地将通过数据来驱动。

车路协同能够充分挖掘现有交通系统的资源，在提高服务水平和通行能力的同时也使其变得更为弹性。目前成熟的电子不停车收费系统（ETC）技术能够极大地提高高速公路出入口的服务水平，车路协同的发展不但可以使收费系统得到极大的改善，还能够实现目前ETC技术无法实现的电子路票、按里程收费等更多的应用。传统的潮汐车道一般通过固定的标志标线实现控制，而车路协同环境下，可以通过实时的交通状态来调整潮汐车道的数量和方向。

在交通规划上，众所周知，传统的交通规划的交通起讫点调查（OD调查）普遍存在难以解决的

诸多问题。车路协同环境下的大数据技术将给城市交通规划的建模仿真带来革命性变化。

交通管理与控制方面的变化涉及多源、动态数据,实时态势分析以及精细化的交通控制。主要涵盖交通信息采集的变化:从断面信息到轨迹全息;交通管理方法的变化:从现场、人工操作到远程信息化管理;交通控制方法的变化:从交通流群体控制到车辆个体控制。

传统的交通安全比较关注驾驶人,着重于提高驾驶人对于车辆控制的安全性,而将来更可能以系统可靠性为重点。车车、车路的协同作用将突破传统的驾驶视距限制,达到超视距预警控制的目的。此外,驾驶过程中的控制模式由驾驶人控制转变为人机共驾,这也将带来人机交互协同的安全问题。

交通设施未来将向数字化、智能化、共享化方向发展。目前的交通设施主要为适应驾驶人而设计,能适应人机共驾、适应车路协同、适应自动驾驶、适应智能车的控制是未来交通设施应着力解决的问题。

五、需要解决的科学问题

在车路协同环境下,许多交通科学上的基础理论方法都面临着重构的过程[8]。

(1) 车路协同环境下的交通系统要素运行规律。车路协同环境下交通系统要素的运行规律明显区别于有驾驶人控制车辆的交通系统,主要包括车路协同环境下的车车/车路耦合机理以及群体车辆与道路设施的协同运行机理等。

(2) 个体服务与群体控制的平衡机理。理想的完全无人驾驶情况下,理论上可以精确控制到每一辆车、服务到每一个人。如此一来,在面临个体最优与系统最优的矛盾时,平衡精准服务与群体优化显得至关重要。

(3) 面向车路协同的新型智能基础设施构建理论与方法。一方面,在智能车辆、无人驾驶成熟之后,道路需要做出变化来适应车辆的变化;另一方面,优化车辆感知的数字化道路系统,使其在环境感知方面更可靠、更精准。

(4) 不同智能等级车辆混行条件下的交通设计。无人驾驶的目标并不是一蹴而就的,其发展过程必定要经历不同智能等级混行的阶段,而交通系统也

将长时间处于人机共驾的状态。因此在这种情况下进行交通设计以让系统最优,也是亟待解决的问题。

(5) 智能网联交通系统与外部环境的耦合关系。交通本身并不是一个孤立的系统,而车路协同技术的发展将不断加强未来交通与外部环境的耦合关系。比如智能网联交通与能源网、信息网、支付网、交通网等的耦合,涉及包括电子收费、环境污染、城市拥堵等方面。

六、结语

总而言之,交通系统整体上是一个人-车-路耦合的系统,交通工程的规划设计也需要考虑系统各元素之间的关系和相互作用。目前我国道路交通也在从以建设为主,走向存量优化的过渡阶段。车路协同将是未来交通发展的必然趋势。因此,交通工程学科的发展也应该适应交通发展的新趋势,从前瞻性的角度研究解决在该趋势下的基础科学问题。

车路协同系统的交通工程重构需要汽车、交通、通信等领域的全面、深度融合,作为跨行业、跨领域的系统工程,需将其视为集国家法律、中国标准、国家科技创新、智能制造以及市场经济模式下的社会服务等多重要素于一体的系统性“国家工程”,按照“坚定的国家意志、活跃的科技力量、严肃的市场经济”三位一体的组织方式,着力夯实控制与感知硬件、核心软件、可靠通信、核心平台等技术演进与产业化相关联配套的工程,坚持迭代地推动发展和产业落地,在国家重大标志性工程及重点城市先行示范应用,最终完成现有交通工程模式的转变和产业转型升级,从而在未来10年产生万亿级的国民经济的新增长点。

参考文献

- [1] 王云鹏. 国内外ITS系统发展的历程和现状[J]. 汽车零部件, 2012(6): 36.
Wang Y P. The history and current situation of the development of ITS at China and abroad[J]. Automobile Parts, 2012(6): 36.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1-161.
China Journal of Highway and Transport Editorial Department. Review on China's traffic engineering research progress (2016)[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 1-161.
- [3] 陆化普, 李瑞敏. 城市智能交通系统的发展现状与趋势[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2014, 6(1): 6-19.

- Lu H P, Li R M. Developing trend of ITS and strategy suggestions [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2014, 6(1): 6–19.
- [4] Rafiq G, Talha B, Patzold M, et al. What's new in intelligent transportation systems: An overview of European projects and initiatives [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2013, 8(4): 45–69.
- [5] Fukuda A, Hisazumi K, Ishida S, et al. Towards sustainable information infrastructure platform for smart mobility—Project overview [C]. Kumamoto: Iiai International Congress on Advanced Applied Informatics, IEEE, 2016.
- [6] Green D, Bennett P, Han C, et al. Cooperative intelligent transport systems (C-ITS)—An overview of the ARRB/Austroads C-ITS work program 2010—2013[J]. *World Journal of Diabetes*, 2014, 23(2): 15–28.
- [7] 余志. 交通系统革命的主要特征与影响 [C]. 广州: 第三届华南智能交通论坛, 2017.
- Yu Z. The main features and influence of the traffic system revolution [C]. Guangzhou: The 3rd South China Intelligent Transportation Forum, 2017.
- [8] Lu N, Cheng N, Zhang N, et al. Connected vehicles: Solutions and challenges [J]. *Internet of Things Journal IEEE*, 2014, 1(4): 289–299.