

新技术时代城市交通管理与服务研究发展展望

陈艳艳, 李同飞, 何 佳, 杨 洋, 孙浩冬, 贺正冰
(北京工业大学交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 随着通信技术、计算机技术、车辆技术的快速发展,物联网、互联网、车联网逐步形成并广泛应用,乘客、驾驶员、调度员、车辆、道路、出行环境及云端得以高效联通,智能网联、自动驾驶等新兴技术得到蓬勃发展,巨量时空大数据随之产生与获取,城市交通的发展进入了新技术时代。同时,在可持续发展目标的引领下,出行即服务、共享出行等新兴理念伴随着新兴技术的发展正逐步颠覆现有的城市交通运行场景与运营管理模式,相关理论研究与实践探讨将是未来一段时间内城市交通管理与服务领域的发展方向与研究重点。在总结城市交通发展机遇与挑战的基础上,首先分析了新技术时代解决城市交通管理与服务问题的新思路。随后,分别从交通大数据、共享出行、网联自动驾驶3个方面对城市交通管理与服务领域最新研究成果进行了全面的总结与综述。最后,梳理了新技术时代城市交通管理与服务的相关研究方向。

关键词: 交通大数据; 共享出行; 智能网联; 自动驾驶; 城市交通管理与服务; 出行即服务

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2020)06-0621-09

doi: 10.11936/bjtxb2019120032

Development and Prospects of Urban Transportation Management and Services in the New Era

CHEN Yanyan, LI Tongfei, HE Jia, YANG Yang, SUN Haodong, HE Zhengbing
(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: With the rapid development of communication technology, computer technology, and vehicle technology, the internet of things, the internet, and the internet of vehicles have gradually formed and are widely adopted. Passengers, drivers, dispatchers, vehicles, roads, travel environment, and the cloud can be connected efficiently. The emerging technology developed rapidly, such as intelligent interconnection, autonomous driving, etc. Besides, the big spatial-temporal data was generated and collected. The development of urban transportation has entered a new era. Meanwhile, under the guidance of the sustainable development goals, the development of emerging concepts such as MaaS, intelligent interconnection, autonomous driving, and sharing mobility are gradually subverting the existing urban traffic operation scenarios and operation management models. Related theoretical studies and practical discussions will be the development direction and research focus of urban transportation management and services in the future. Based on the summary of the opportunities and challenges of urban transportation development, the new ideas of solving urban transportation management and services problems in the new era was first analyzed. Then, the three aspects of transportation big data, sharing mobility, and connected autonomous vehicles were separately analyzed. Accordingly, the latest research

收稿日期: 2019-12-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFE0206800,2018YFB1601300); 国家自然科学基金资助项目(71901007)

作者简介: 陈艳艳(1970—), 女, 教授, 主要从事城市交通规划与管理方面的研究, E-mail: cdyan@bjut.edu.cn

通信作者: 李同飞(1990—), 男, 讲师, 主要从事复杂交通系统建模与分析、合乘出行方面的研究, E-mail: tfli@bjut.edu.cn

on urban transportation management and services were comprehensively summarized. Finally, the related research directions of urban transportation management and services in the new era were sorted out.

Key words: transportation big-data; sharing mobility; intelligent connection; autonomous vehicles; urban transportation management and serves; molility as a service (MaaS)

根据联合国人居署预测,到2030年全球将有43座常住人口超过1 000万的超大城市,届时全球60%人口将居住在城市,城市内部有活动目的的人与货物空间移动需求与有限的交通供给(服务)能力间的矛盾将愈演愈烈,全球城市将普遍受到交通病的困扰。

随着城市社会、人口、空间与经济的发展,城市交通系统面临的出行需求、拥堵成因、解决方案都在变化,主要有以下几点:1)城市综合交通体系服务对象与范围进一步扩展。随着中国城镇化及轨道交通快速发展,城市居民出行从城市、都市圈、城市群多个空间圈层扩展,人口海量,长距离通勤及高频商务出行增加,出行方式多样,对城市(群)综合交通体系规划及建设提出新需求。2)城市出行服务注重满足高品质多样化门到门出行需求。随着人们生活品质的提高及对美好生活的向往,新时期人们对出行服务提出了更高的及差异化需求;新的时期,公共交通由无差别的基本服务转向了差异化(不同人群、不同目的、不同时间、不同品质)、全链条(门到门)多模式一体化出行服务。3)城市交通治理更注重精细化、人性化及可持续。在国家提出“城市交通需以人为本,并扭转过度依赖小汽车交通”的政策背景下,住建部牵头制定了《城市交通设计导则》,明确要求交通规划与设计要精细化、人性化及可持续。精细化交通规划与设计的内涵可以概括为:以“以人为本”为核心,以注重细节、面向实施为导向,以全局统筹、多专业融合为技术特征,以嵌入“交通设计”环节为实施手段。这意味着精细化的交通规划设计原则更多从交通的实际参与者角度出发,平等地考虑交通的各类参与者,包括行人、非机动车骑行者、机动车驾乘者等的实际通行感受,扭转近些年城市交通建设中“以车为本”的错误倾向,强调增强城市人的可移动性,特别注意在规划和设计方案中体现相对“弱势”的步行和自行车等交通系统使用者的友好和关怀。4)城市交通发展将转向供需双向调控阶段。城市交通目标是在有限交通资源供给下安全、经济、高效地满足及服务多圈层海量人口完成有目的的活动的出行需求。交通问题的根本根源是供需不平衡,早期为需求满足型的设施建

设阶段,以及通过信号灯控制局部交通流,新时期会进入基础设施建设与多层次需求管理并重的双向调控阶段;交通供给提升的内涵也由设施通行能力提高延伸为运输服务能力提高,如定制公交、合乘出行等。

与此同时,得益于近年来通信技术、计算机技术、车辆技术的发展,物联网、互联网、车联网快速形成并广泛应用,先进的无线通信技术高效地降低了信息传输壁垒,实时信息处理技术使得实时或极短时间内匹配调度变成现实,智能算法极大地减少了整体交通组织所需的工作量,乘客、驾驶员、调度员、车辆、道路、出行环境及云端得以高效联通,并伴随产生巨量可用于交通监测、调度、组织与优化的时空大数据,城市交通的发展进入智能网联与大数据主导的新时代。伴随着可持续发展目标的引领与车辆技术的发展,共享出行(共享单车、共享汽车、合乘出行、定制公交等)、自动驾驶汽车、智能网联汽车也应运而生,不断颠覆现有的城市交通运行场景与运营管理模式,新时代下的城市交通发展充满了机遇与挑战。

本文在总结城市交通发展机遇与挑战的基础上,分析了新技术时代城市交通管理与服务问题解决的新思路;从交通大数据、共享出行、网联自动驾驶3个方面对城市交通管理与服务领域最新研究成果进行了全面的综述;据此,对新技术时代城市交通管理与服务未来发展进行展望。

1 新技术时代城市交通发展的机遇与挑战

新技术在颠覆现有城市交通运行场景与运营管理模式的同时,也给城市交通管理与服务的发展带来了新的机遇。

1)新技术支持了海量人口出行的全息感知。浮动车、手机、IC卡、众包、网络签到、遥感影像等时空大数据为城市交通出行全息感知、精准服务及主动引导提供了新的机遇,也为城市交通系统科学规划、实施、效果评估及滚动调整提供了新的机遇。其中,用地、人口、活动、出行、交通流及环境的全面感知,有助于我们更深刻理解城市交通问题的内在原因及源头,在交通规划与城市规划一体化的大趋势

下^[1-2],进而进行更精细、更高效的协同规划与调度管理服务。

2) 新技术奠定了智能决策基础。智能化成果和大数据信息的利用被当作是推动城市治理、解决城市病的一大机遇,智慧城市、城市大脑等新型技术代表应运而生,交通复杂巨系统的认知、评估、推演和治理的能力显著提升,城市交通治理正加速迈入“全息感知+协同联动+动态优化+精准调控”的新时代。城市大脑整合大数据与人工智能技术,其核心是利用实时全量的城市数据资源,对城市进行全局的即时分析、指挥、调动、管理,最终实现对城市的精准分析、整体研判、协同指挥,主要包括以下5步:第1步,针对感知对象采取多种感知手段采集感知数据,搭建数据平台利用多种数据分析手段进行交通感知;第2步,在问题识别与趋势推演的基础上进行交通评价与研判;第3步,采用数据、模型及经验驱动的致因挖掘进行致因分析;第4步,采用规划生成与决策仿真的方法进行交通对策生成与决策制定;第5步,方案实施,并根据交通感知手段对方案实施效果进行反馈,基于此对方案不断修正调整。

3) 新技术催生了交通服务新模式、新业态。借助人车定位、网上预约及电子支付等技术,可精准快速地响应海量的个性化出行需求,也为出行者提供了多样化的选择,使得差异化高品质精准服务成为可能。

4) 新技术提供了交通管控新手段。智能网联使泛在控制成为可能,自动驾驶进一步模糊了人与车的决策与行为边界,车车/车路互联为安全、效率与环保的提升提供了新可能。

在总结新时代城市交通发展机遇的同时,更应该清醒地认识到未来城市交通面临的挑战。《交通强国建设纲要》明确了中国交通强国建设的总目标是“人民满意、保障有力、世界前列”,这就使得新时期交通强国战略的实现城市交通提出了更高的要求,需要迎接以下4个方面的挑战:需要不断提升感知能力,特别是针对海量人口的多样化组合动态出行感知;更强的决策能力,实现对交通供需的精准调控及准确治理;综合保障能力提升,科学合理的综合交通体系一体化规划、管理与运营;更高的智能化水平,以及始终贯彻以人为本与可持续发展理念。

2 城市交通管理与服务问题解决新思路

2.1 出行主动引导

中国多数城市当前需求管理多以强制的行政手

段为主,而新技术时代,可以采用出行需求的全链条感知、双向信息交互及出行服务新模式等进行出行主动引导。新技术时代的交通需求管理策略包含:1) 出行总量控制,通过活动远程化手段,消减出行需求,如家庭办公、在线教育、电话会议、远程医疗、合乘出行等;2) 出行结构优化,可以采取动态全过程公交信息服务、定制公交、共享单车等措施倡导公交优先、推动慢行交通发展;3) 通过路况信息推送、车位预约、夜间配送等措施引导出行需求在时间上的均衡分布;4) 通过动态路径推荐、拥堵动态收费等措施引导出行需求在空间上的均衡分布。

2.2 合作式交通系统

传统交通系统中的参与者一般是竞争、对立或弱合作关系,如出行者对有限道路资源或运力的相互竞争,不同运输主体(轨道、公交、出租)的竞争,这就造成了城市交通规划、设计、管理与运营者的工作脱节,交通管理者与被管理者的对立(如网约车平台与行业监管、交管执法)。而新技术时代兼顾系统最优与个体最优的合作式出行、多主体协同共治的合作式交通系统将成为可能,使得交通系统规划、管理、控制一体化综合治理,自动驾驶与人工驾驶长期共存下的人、机合作也将成为趋势。

2.3 人、车、路泛在管控

5G将牵引新一轮技术创新,全面赋能自动驾驶和智慧交通,实现自动驾驶的低延时、高可靠和高速率与人、车、路、云等协同互联,并使得人、车、路泛在管控成为可能。交通管理与控制泛在化主要体现在:强控制与行为规范管理并存;路口、路段等泛在控制点;人、车、路多控制对象及参数。最终,人、车、路全网泛在控制将提升全路网的通行能力及安全水平,避免瓶颈及冲突。

2.4 出行与生活整合服务

现阶段城市交通出行服务仍属于以交通模式划分出行服务体系,这就造就了割裂的交通服务、孤立的出行数据以及各自为政的支付手段与途径。而在新技术时代,技术驱动的智能交通将倒逼交通行业信息采集、管理和服务模式的改变,“出行即服务(MaaS)”将成为可能,交通信息将从单向管控式传输转变为双向传输,实现服务模式创新,为用户提供个性化、定制化、门到门全链条服务,以人为本的出行服务体系将逐步建立。以人为本的出行服务体系是从用户需求出发,根据当前实时起讫点(origin destination, OD)需求和个体出行偏好,为用户主动匹配并推荐最佳出行方式或组合(除私家车),在不

提升甚至降低出行成本的前提下,为乘客提供更加友好的出行服务体验,出行即服务通过以需求导向下的供给侧改革将促进公交吸引力和竞争力的全面提升。

3 新技术下的城市交通管理与服务

新技术时代伴随产生巨量的时空大数据,可用于交通监测、调度、组织与优化,同时自动驾驶、共享出行被公认为是未来城市交通发展趋势^[3]。因此,针对新技术下的城市交通管理与服务领域的研究,将分别从交通大数据、共享出行、网联自动驾驶3个方面对最新研究成果与进展进行全面的综述。

3.1 交通大数据

交通大数据支撑居民出行、交通运行、交通服务和需求致因的同步感知与协同决策,物联网和互联网结合,可产生和收集包括人口、活动、出行、交通运行及交通环境污染的大数据,而需求致因的同步采集又对交通问题的根源解决提供了可能。交通大数据可以从出行感知与预测、规划决策辅助、设施评价、运营组织等方面促进交通问题根源治理,并促使管理决策能力与实施能力的全面智能化。

1) 出行感知与预测。交通大数据可用于出行活动的全链条感知,利用手机、IC卡和GPS可对门到门的全过程多方式出行链进行感知,而微博、微信和电子商务等各种互联网平台,可深刻感知人出行背后的相关活动,从而为出行源头分析提供可能。同时,融合多源异构交通大数据,采用数据挖掘、机器学习及行为学的相关方法与理论可用于出行需求预测,传统交通需求预测方法用的是四阶段法,因为难以根据区域类别、人群类别进行精细化分析和预测,难以反映需求影响因素的复杂性和需求随机性变化,并受限于调查规模,有很强的局限^[4-7]。基于交通大数据的研究方法可以对每一个交通小区进行出行需求解析,识别确定性需求(通勤)、突发性需求(如大型活动的出行需求)、噪声性需求(如日常性的随机活动波动)等。以北京网约车数据为例和厦门手机信令数据进行出行分析,研究发现确定性需求往往发生在就业岗位聚集区,突发性需求往往发生在商业区、公园、机场,噪声性需求相对来说分布比较散,偏商业区^[8]。

2) 规划决策辅助。近年来,北京市人口疏解的效果颇受关注,精准分析近几年人口总量、就业岗位、居住人口变化情况及交通需求变化情况成为关键问题^[9-11]。由于手机信令可以完整捕捉每个人的

出行信息,基于手机信令数据进行人的职住精准识别,并据此精准分析区域的居住人口和就业岗位情况。目前,人口疏解工程更多是针对特定地区有针对性地进行疏解,如动物园批发市场及大红门市场的疏解力度较大。从手机信令数据很明显看得出来,相比疏解前,2个区域静态人口分别下降了21%和18%,相应的交通需求变化也很明显,疏解之后,出行量明显减少。利用大数据可以同步感知城市交通需求变化,如OD变化,也可以了解居住人口和就业岗位的变迁根源,据此可更好地把握需求源头,分析政策及规划效果。此外,手机信令数据还用于城市配送系统规划问题的研究,用于辅助配送点的优化布局、配送时间优化、夜间配送政策制定等^[12]。

3) 设施综合评价。以公共交通出行为例,大数据可支持出行链-活动链一体化精准探测及多维度可达性评价。中国近年来一直倡导公交优先,但公共交通吸引力仍处于较差水平。分析原因,关键在于全链条服务品质并没有提升,特别是换乘以及两端接驳问题。而通过IC卡或GPS数据可进行全链条服务水平感知,如出行全链条时间、车内时间、换乘时间、行程时间波动,从而发现各环节问题。大数据也可支撑不同区域公共交通可达性多维度评估,包括时间可达性、生活可达性、距离可达性等,从而辅助用地、公共交通设施、生活设施的一体化规划。通过距离可达性可辅助识别给定区域在不同的出行距离中出行效率的薄弱环节,进而通过轨道交通、公共汽车、步行和自行车系统的一体化设计,针对不同的出行距离设计更好的出行选择。以北京市朝阳区为例,计算朝阳区30个交通小区的区域公交可达性值,结果表明,区域公交可达性值,可以更加直观地展现城市内部不同区域对周边其他区域的公交可达性水平,这为选址分析、公交优化等提供了量化的公交可达性信息^[13]。

4) 交通大数据用于运营组织促进交通新业态发展。大数据还可帮助进行绿色出行服务新业态的方案设计。例如,把网约车需求转移到定制公交,而定制公交模式基本上是服务两端,中间没有停靠站的一站抵达式,或中间设一些大站,就需要首先了解定制公交适合的出行类型,即对哪些现有网约车出行用户有吸引力,再进行线路设计。通过把北京市网约车需求进行凝聚式层次聚类,将起始区分成233类,目的地区分成274类,并将起讫点间设置可选路线,删去小于8 km或者是区域人数少的线路,剩下295条线路,然后利用线网优化方案对295条

线路进行进一步的优化分配和配流,再进行反馈调整.这样就可以利用大数据技术辅助定制公交网络规划,将个性化网约车需求转为集约化且满足一定个性化需求的定制公交需求^[14-15].

3.2 共享出行

在共享经济的浪潮以及可持续发展的理念引导下,共享单车、共享汽车、合乘出行、定制公交等共享出行服务模式兴起并得到快速发展.在出行即服务引领未来城市出行发展方向的大趋势下,基于网约车平台的共享出行可以实现资源的优化组合,显然是一种更好地缓解交通拥堵的出行方式.

共享单车、共享汽车需求的空间与时间不对称会造成的车辆资源分布不均,进而影响用户的使用,对共享单车、共享汽车进行实时调配,提升供需匹配的效率,是共享单车、共享汽车关注的核心问题,同时共享汽车还涉及站点配置、差异化定价和车辆调度问题.除此之外,共享单车、共享汽车的行为特征与规律、出行需求预测也是研究关注的重点.与此同时,据统计城市道路单人驾驶率高达60%~70%^[16],造成了道路交通资源的极大浪费,在共享经济的浪潮下,基于网约车平台的合乘出行可以实现社会车辆资源的优化组合,充分利用车辆闲置运力,也受到广泛关注,相关研究主要集中在以下几个方面:1) 合乘出行模式下出行者个体选择行为的研究.合乘出行模式下出行者的选择行为研究属于基础研究问题,是探究合乘出行如何影响城市交通系统、合乘出行模式下交通规划方案制定与交通管理策略优化等一系列问题的基础.很多学者对合乘出行模式下出行者个体选择行为(出行方式选择、出行路径选择、出发时刻选择)展开了研究,其中相关研究主要集中在研究合乘出行模式下出行者整合的出行方式与出行路径选择行为^[16-20].针对合乘出行模式下出行者整合的出发时刻与出行方式选择问题,也有少数学者^[21-22]进行了研究.2017年,Liu等^[21]在一辆合乘车辆只能搭载一名合乘乘客的假设条件下,研究了合乘出行模式下交通走廊单一瓶颈路段的早高峰通勤出行问题,将合乘出行模式下出行者整合的出发时刻与出行方式选择问题,建立一个合乘出行动态用户均衡模型.随后,Ma等^[22]进一步考虑了一辆合乘车辆可以搭载多名合乘乘客的情况,提出了新的合乘出行动态用户均衡模型.2) 合乘出行定价的研究.合理的合乘定价可以有效提高出行者选择合乘出行的概率,从而改善整体交通运行状态.Wang等^[20]基于所建立的描述

合乘出行用户均衡的变分不等式模型,采用灵敏度分析的方法,测试了合乘出行定价在一定区间变化时交通系统的表现情况.除此之外,Liu等^[21]、Ma等^[22]先后基于各自建立的合乘出行动态用户均衡模型,研究了不同的合乘定价方案对于早高峰通勤出行的影响,结果表明交通系统的拥堵水平与合乘定价之间并不是简单的单调递增或者递减关系,同时合理的随时间变化的合乘定价可以有效缓解瓶颈路段的拥堵状态.3) 合乘出行匹配与合乘车辆调度问题的研究.以往关于合乘出行问题的研究,大量集中在合乘出行匹配与合乘车辆调度问题^[23-35],高效的合乘匹配与车辆调度能有效减少合乘乘客的等待时间与合乘驾驶者的绕行距离,对于提高乘客满意度和合乘出行效率具有重要意义.

3.3 网联自动驾驶

随着物联网、人工智能及其他新兴技术的发展,网联自动驾驶车已经被公认为是未来车辆发展的方向.当前,以美国、欧盟、日本等为代表的全球主要发达国家都大力扶持相关产业,谷歌、百度、通用、特斯拉、蔚来等国内外互联网公司、汽车厂商也纷纷布局网联自动驾驶领域,中国也高度重视网联自动驾驶车辆的发展,将其列为“中国制造2025”重点领域之一.与此同时,根据最新的预测数据,2035年中国网联自动驾驶汽车有望达到570万辆,将超越美国(450万辆)成为全球最大应用市场.

网联自动驾驶车辆是车联网与自动驾驶车辆的有机联合,包含两大方面的核心技术:一是自动驾驶技术,由车载系统代替人进行车辆的驾驶操作,国际自动机工程师学会将自动驾驶技术分为从驾驶支援到完全自动驾驶的5个发展阶段(L1~L5);二是车联网技术,可以实现车辆与外界的智能信息交换,包括车与车通信(V2V)、车与基础设施通信(V2I)、车与云端通信(V2C)等,两大核心技术也正是未来车辆发展的趋势.

新兴车辆技术的发展带来了新型的交叉口组织形式与路段行驶模式,彻底颠覆了当前的交通运行场景,同时对现有的交通组织、交通管理、交通规划措施提出了新的挑战,网联自动驾驶车与普通车辆混行条件下的城市交通系统存在大量基础科学问题亟待解决:网联自动驾驶车辆有更短的反应时间,在行驶过程中彼此可以保持更短的车头间距、车头时距,可以形成车队大幅提高路段通行能力,这就使得混行条件下路段通行能力的计算变得非常复杂;同时,混行条件下2类车辆的出行者是如何选择出行

路径的;以及面对新型的混行交通模式,交通规划部门将如何进行交通规划与管理等.网联自动驾驶车作为一种新兴的车辆技术,相关研究还非常有限,以往的研究主要分别从路段、道路交叉口、路网3个层面进行了研究:

1) 道路交叉口通过特性研究. 交叉口是城市道路的重要组成部分,具有疏散车流及疏导人流的作用,同时也是阻碍城市道路通行效率提升、制约城市道路通行能力增加的瓶颈之处. 网联自动驾驶系统的出现使得车辆在通过交叉口时,车辆间发生信息交互,采用集中控制的方式,按照一定的通行规则,自动避免交通冲突,无障碍通过交叉口,从而有效缓解交通拥堵,减少交通事故,提高通行效率,增大通行能力^[36-39]. 鹿应荣等根据网联自动驾驶车辆可以与路测设施(V2I)及区域中心控制系统(V2C)实时信息交互的特性,提出了连续信号交叉口车速控制方法,保证车辆能够连续通过下游多个交叉口^[36]. 在网联自动驾驶车辆与人工驾驶车辆混行条件下,姜慧夫等基于微观车辆跟驰理论,优化网联自动驾驶车辆的速度轨迹来对整体交通流进行优化^[37]. 随后,面向网联自动驾驶车辆与普通车辆混行环境下的信号交叉口,他们又进一步设计了相应的网联自动驾驶车辆时空轨迹优化控制系统,系统能够有效降低网联自动驾驶车辆燃油消耗,同时系统通过网联自动驾驶车辆对普通车辆的影响,实现对整体交通的控制,有效降低道路交通燃油消耗总量,并分析了网联自动驾驶车辆不同比例条件下的燃油节省效果. 李勇^[38]在网联自动驾驶车辆与人工驾驶车辆混行条件下,通过搭建仿真平台以及利用实际车辆实验的方法分别研究了多个无人驾驶车辆之间、无人驾驶车辆与有人驾驶车辆之间的交互. 冯琦^[39]着重研究自动驾驶车辆在交叉口的协调控制策略,通过建自动驾驶车辆优先通行规则库、自动驾驶车辆路段控制模型及自动驾驶车辆交叉口协调控制算法. 但其研究对象假设均为自动驾驶车辆,行驶至交叉口的车辆均受到中央协同控制器的集中控制,最后用 VISSIM 进行了交叉口协调控制策略的仿真.

2) 路段行驶特性研究. 很多学者对网联自动驾驶车辆的路段行驶特性进行了研究,如加减速跟驰行为^[40-42]、换道行为^[43-45]、超车行为^[46]、编队行驶^[47-48]等. 路段道路通行能力的计算是交通控制与交通规划方案决策的基础,很多学者采用微观仿真的方法研究了网联自动驾驶车在交通系统中数量的

增加对于路段通行能力的改变^[49]. 不同于微观仿真的手段,Chen 等^[49]采用理论研究的方法分别研究了1条车道、2条车道以及多条车道和不同的车道行驶规则条件下,道路通行能力与网联自动驾驶车在车辆中占比的关系. 马明娜^[50]分别建立了单车道、双车道交通环境下以及双车道环境下自动驾驶车辆排队行驶的元胞自动机交通流模型,通过数值分析对3种交通环境下的自动驾驶-手动驾驶交通流特性进行了深入和系统的研究,并分析了自动驾驶车辆比例对道路拥堵状况的影响.

3) 交通网络层面的研究. 从宏观交通网络层面,对于网联自动驾驶车辆与人工驾驶普通车辆混行条件下的交通系统研究非常少,仅有的研究如下: Auld 等^[51]通过建立交通仿真模型分析了网联自动驾驶技术对于交通需求量的影响,研究发现网联自动驾驶车不仅会改变交通系统中车辆的运行,同时也将影响出行者的出行选择行为. Minelli 等^[52]基于调查问卷数据,提出了一个简单的迭代算法更新不同交通方式的出行时间,建立了出行者出行方式选择模型,在此基础上研究了网联自动驾驶车不同占比对于出行方式选择的影响,最后,该方法在加拿大多伦多市进行了验证.

4 新技术时代城市交通管理与服务研究展望

新技术时代的到来正逐步颠覆现有的城市交通运行场景与运营管理模式,相关理论的研究与实践问题的探讨将是未来一段时间内城市交通管理与服务领域的发展方向与科学研究的重点,有大量基础科学问题亟待解决:

1) 大数据技术可以对传统的交通规划技术进行扩展和延伸,过去是满足型规划,现在是需求约束型规划. 通过对交通需求全面感知,支撑需求源头管理及引导. 过去是单方式交通网络规划,现在是多模式复合网络规划. 通过大数据支撑多模式、全过程出行链路的成本和服务水平评估. 过去是确定型规划,假设交通需求是确定的;现在是应变型规划,通过大数据了解并应对需求的突变性及噪声性. 过去是单目标规划,现在是多目标规划,利用大数据实现对整个系统多维度评价. 过去是群体性服务体系规划,如公共交通规划,现在是个性化、群体化协同的规划,如定制公交规划. 总之,大数据、云计算、移动互联及人工智能技术对交通需求的理解及引导控制能力增强,使得交通系统规划、管理、控制、服务一体化及多方合作机制形成成为一种可能,交通规

划技术本身也将发生重大变革。

2) 在共享单车、共享汽车动态定价方面,缺少对多样化用户的动态化差异化定价机制策略的研究;在共享单车调配方面,对弹性需求的考虑尚不充分,共享汽车调度方面,现在针对共享汽车调度的研究没有充分考虑车辆调度过程中的人员分配问题,也没有充分考虑针对电动共享汽车的电池容量、充电时间、充电站位置等问题。目前对于合乘出行的研究,国内外学者主要集中在合乘出行匹配问题与合乘车辆调度问题的研究,对于这种新兴出行模式影响出行者决策行为的机理尚缺乏系统深入的研究,同时假设过于严格(合乘车辆只能搭载一名乘客、合乘乘客与合乘驾驶员必须相同起讫点、出行者是同质的且都拥有机动车辆)、乘客一次合乘出行过程中换乘多辆合乘车辆(与实际出行不符)、没有考虑公共交通出行模式等问题。前人关于合乘定价对于交通系统的影响研究,都是基于灵敏度分析的方法,初步的分析结果均表明合乘定价与交通拥堵水平之间的关系非常复杂,并不是简单的单调递增或者递减关系,目前对于合乘定价与交通系统之间深层次的作用机理尚缺乏系统性研究,对于从交通管理者的角度如何优化决策合乘定价的问题,尚未提出有效的优化模型及求解算法。

3) 网联自动驾驶正在向现有的微观交通流理论发起挑战,相关基础理论与方法亟待拓展,如网联自动驾驶与普通车辆混合状态下自动驾驶如何进行速度控制形成编队、如何通过交叉口等。此外,目前绝大多数都是从微观层面采用交通仿真的方法或交通流理论,着重对网联自动驾驶车交叉口通过特性、路段行驶特性(跟驰、换道、超车、编队等)进行分析,且研究往往局限于单个交叉口、单条路段、全部为网联自动驾驶车的情况,并据此研究交叉口优化组织方法或分析路段通行特性;对于网联自动驾驶参与下的交通系统中出行者的出发时刻选择行为、出行路径选择行为、出行方式选择等一系列选择行为尚无研究,宏观交通基础理论亟待拓展;智能网联带来了新型的道路交叉口组织形式、新型的路段行驶模式,同时也带来了新的交通组织、交通规划、交通管理方法,针对新技术时代新型交通场景下交通规划决策问题、交通管理决策问题的研究也将是未来研究的重点。

参考文献:

[1] LI T F, WU J J, SUN H J, et al. Integrated co-evolution

model of land use and traffic network design [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2016, 16(2): 579-603.

- [2] LI T F, SUN H J, WU J J, et al. Optimal toll of new highway in the equilibrium framework of heterogeneous households' residential location choice [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 105: 123-137.
- [3] 王健. 什么是出行即服务(MaaS)[J]. *人民公交*, 2018, 5: 34-36.
WANG J. What is MaaS [J]. *People's Public Transportation*, 2018, 5: 34-36. (in Chinese)
- [4] WANG Z Z, HE S Y, LEUNG Y. Applying mobile phone data to travel behaviour research: a literature review [J]. *Travel Behavior & Society*, 2017, 11: 141-155.
- [5] CHEN C, MA J T, SUSILO Y, et al. The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 68: 285-299.
- [6] 孙卓, 刘即明, 阎妮. 基于手机信令大数据的城市居民出行OD预测[J]. *数学的实践与认识*, 2019, 49(11): 68-77.
SUN Z, LIU J M, YAN N. Prediction of urban residents' OD matrix based on mobile phone big data [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2019, 49(11): 68-77. (in Chinese)
- [7] 赵光华, 赖见辉, 陈艳艳, 等. 基于朴素贝叶斯分类的居民出行起讫点识别方法[J]. *计算机应用*, 2019, 40(1): 36-42.
ZHAO G H, LAI J H, CHEN Y Y, et al. Residents' travel origin and destination estimation method based on the naive Bayes classification [J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 40(1): 36-42. (in Chinese)
- [8] CHEN Y Y, ZHANG Z, LIANG T W. Assessing urban travel patterns: an analysis of traffic analysis zone-based mobility patterns [J]. *Sustainability* 2019, 11(19): 5452.
- [9] LI T F, SUN H J, WU J J, et al. Optimal urban expressway system in a transportation and land use interaction equilibrium framework [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, 15(2): 1247-1277.
- [10] LI T F, SUN H J, WU J J, et al. Household residential location choice equilibrium model based on reference-dependent theory [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2020, 146(1): 1-12.
- [11] LI T F, CHEN Y Y, WANG Z, et al. Analysis of job-housing relationship and commuting characteristics around urban rail transit stations [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 175083-175092.
- [12] 方珊珊, 陈艳艳, 刘小明, 等. 基于手机信令数据的

- 快递员辨识方[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(3): 413-421, 322.
- FANG S S, CHEN Y Y, LIU X M, et al. Identification of city couriers based on mobile phone data[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(3): 413-421, 322. (in Chinese)
- [13] 陈艳艳, 魏攀一, 赖见辉, 等. 基于 GIS 的区域公交可达性计算方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 61-67.
- CHEN Y Y, WEI P Y, LAI J H, et al. A calculation method of area public transit accessibility based on GIS [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 61-67. (in Chinese)
- [14] HAN Z L, CHEN Y Y, LI H, ZHANG K S, SUN J Y. Customized bus network design based on individual reservation demands[J]. Sustainability, 2019, 11(19): 5535.
- [15] XIONG J, CHEN B, CHEN Y Y, JIANG Y, LU Y. Route network design of community shuttle for metro stations through genetic algorithm optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 53812-53822.
- [16] XU H Y, PANG J S, ORDONEZ F, et al. Complementarity models for traffic equilibrium with ridesharing [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 81: 161-182.
- [17] XU H Y, ORDONEZ F, DESSOUKY M. A traffic assignment model for a ridesharing transportation market [J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49(7): 793-816.
- [18] BAHAT O, BEKHOR S. Incorporating ridesharing in the static traffic assignment model[J]. Networks and Spatial Economics, 2016, 16(4): 1125-1149.
- [19] DI X, MA R, LIU H X, et al. A link-node reformulation of ridesharing user equilibrium with network design[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 112: 230-255.
- [20] WANG X L, YANG H, ZHU D L. Driver-rider cost-sharing strategies and equilibria in a ridesharing program [J]. Transportation Science, 2018, 52(4): 868-881.
- [21] LIU Y, LI Y Y. Pricing scheme design of ridesharing program in morning commute problem[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 79: 156-177.
- [22] MA R, ZHANG H M. The morning commute problem with ridesharing and dynamic parking charges [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 106: 345-374.
- [23] 唐方慧. 出租车合乘路径选择及费率优化问题研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- TANG F H. The research on the optimization of taxi ride-sharing route and rate [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [24] 王银虎. 合乘出租车动态调度模型与算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- WANG Y H. Research on the model and algorithm for the dynamic shared taxi scheduling problem [J]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [25] PELZER D, XIAO J J, ZEHE D, et al. A partition-based match making algorithm for dynamic ridesharing [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2587-2598.
- [26] XU Z T, YIN Y F, ZHA L T. Optimal parking provision for ride-sourcing services [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 105: 559-578.
- [27] WANG X, AGATZ N, ERERA A. Stable matching for dynamic ride-sharing systems [J]. Transportation Science, 2017, 52(4): 850-867.
- [28] AGATZ N, ERERA A L, SAVELSBERGH M W P, et al. Dynamic ride-sharing: a simulation study in metro Atlanta [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 17: 532-550.
- [29] AGATZ N, ERERA A L, SAVELSBERGH M W P, et al. Optimization for dynamic ride-sharing: a review [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 223(2): 295-303.
- [30] STIGLIC M, AGATZ N, SAVELSBERGH M W P, et al. The benefits of meeting points in ride-sharing systems [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 82: 36-53.
- [31] STIGLIC M, AGATZ N, SAVELSBERGH M W P, et al. Making dynamic ride-sharing work: the impact of driver and rider flexibility [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 91: 190-207.
- [32] LONG J C, TAN W M, SZETO W Y, et al. Ride-sharing with travel time uncertainty [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 118: 143-171.
- [33] FURUHATA M, DESSOUKY M, ORDONEZ F, et al. Ridesharing: the state-of-the-art and future directions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 57: 28-46.
- [34] HE J, YANG H, TANG T Q, et al. An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 641-654.

- [35] CHEN Z, HE F, YIN Y. Optimal deployment of charging lanes for electric vehicles in transportation networks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 91: 344-365.
- [36] 鹿应荣, 许晓彤, 丁川, 等. 连续信号交叉口网联自动驾驶车速控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(11): 2257-2266.
- LU Y R, XU X T, DING C, et al. Connected autonomous vehicle speed control at successive signalized intersections [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(11): 2257-2266. (in Chinese)
- [37] 姜慧夫. 网联自动驾驶环境下信号交叉口环保驾驶控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- JIANG H F. Research on eco-driving control at signalized intersections under connected and automated vehicles environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [38] 李勇. 无信号灯十字路口协作车辆控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- LI Y. Research on multi-vehicle cooperation and control in an intersection without traffic light [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [39] 冯琦. 自动驾驶车辆交叉口协调控制策略[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- FENG Q. Coordination control strategies of automatic vehicles at the intersection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [40] GE J I, OROSZ G. Dynamics of connected vehicle systems with delayed acceleration feedback [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 46: 46-64.
- [41] 何潇. 自动驾驶车辆动态城市道路工况跟驰方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- HE X. Study of following method of autonomous vehicle in dynamic urban road situation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [42] KHONDAKER B, KATTAN L. Variable speed limit: a microscopic analysis in a connected vehicle environment [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 58: 146-159.
- [43] LUO Y, 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: 87-102.
- [44] 袁盛玥. 自动驾驶车辆城区道路环境换道行为决策方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- YUAN S Y. Decision-making modeling of lane changing behavior for autonomous vehicles in urban road environment [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [45] LETTER C, ELEFTERIADOU L. Efficient control of fully automated connected vehicles at freeway merge segments[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 80: 190-205.
- [46] 徐优志. 自动驾驶车辆高速道路环境下超车行为决策研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- XU Y Z. Decision-making modeling of overtaking behavior for autonomous vehicles on freeway environment [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [47] ZHAO L, SUN J. Simulation framework for vehicle platooning and car-following behaviors under connected-vehicle environment[J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013, 96: 914-924.
- [48] AMOOZADEH M, RAGHURAMU A, CHUAH C N, et al. Security vulnerabilities of connected vehicle streams and their impact on cooperative driving [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(6): 126-132.
- [49] CHEN D, AHN S, CHITTURI M, et al. Towards vehicle automation: roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 100: 196-221.
- [50] 马丽娜. 基于元胞自动机的自动驾驶-手动驾驶交通流特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- MA L N. Research on automated driving traffic flow based on the cellular automata model [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [51] AULD J, SOKOLOV V, STEPHENS T S. Analysis of the effects of connected-automated vehicle technologies on travel demand [J]. *Transportation Research Record*, 2017, 2625(1): 1-8.
- [52] MINELLI S, IZADPANAH P, RAZAVI S. Evaluation of connected vehicle impact on mobility and mode choice [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 2(5): 301-312.

(责任编辑 杨开英)