

自动驾驶出租车调度系统研究综述

曾伟良 吴森森 孙为军 谢胜利

广东工业大学自动化学院 广州 510006

(weiliangzeng@gdut.edu.cn)



摘要 人工智能和大数据科学的发展带来了新一代产业革命。基于人工智能、大数据、车联网等技术的自动驾驶出租车调度系统将成为下一代交通系统的重要组成部分。文中从车联网环境下的自动驾驶调度系统的数学建模问题和系统构建两个方面对现有的文献进行了梳理和讨论。针对乘客出行需求的动态不确定性的共享问题,着重讨论了自动驾驶出租车在不同路径共享模式下的路径规划,以及共享合乘定价和智能调度系统构建的关键技术。最后,总结了自动驾驶出租车在解决交通拥堵和减少资源浪费方面的优势,并指出了自动驾驶出租车系统的技术难点和发展趋势。

关键词: 自动驾驶;大数据;调度系统;动态共享;路径规划;合乘定价

中图法分类号 TP391

Comprehensive Review of Autonomous Taxi Dispatching Systems

ZENG Wei-liang, WU Miao-sen, SUN Wei-jun and XIE Sheng-li

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract The development of artificial intelligence and big data science has brought about a new generation of industrial revolution. Autonomous taxi dispatching systems based on artificial intelligence, big data, and connected vehicle technology will definitely be one of the most important components of the next generation transportation system. The existing literatures are reviewed and discussed through two aspects of scheduling modeling and system construction problem of the autonomous taxi dispatching system. Particularly, the critical dispatching problems on the sharing modes, sharable routing planning, and pricing strategy for a dynamic and sharable dispatching scheme are discussed. Finally, the advantages of autonomous taxis such as alleviating traffic congestion and reducing resource waste are summarized. The technical difficulties and development prospects of the future autonomous taxi system are pointed out.

Keywords Autonomous vehicle, Big data, Dispatching system, Dynamic sharing, Path planning, Multiplication pricing

1 引言

大数据、车联网与人工智能技术的高速发展为交通领域的建设提供了更多的思路,新的交通工具、服务模式和管理手段为未来交通系统带来了更多创新发展的机遇。汽车智能化技术正逐步得到广泛应用,其中最为典型的是自动驾驶技术^[1]。自动驾驶汽车集成了自动控制、人工智能、计算机视觉等多种技术,整个驾驶过程包括汽车对路网环境的感知、路径信息的获取和汽车的控制。机器学习的广泛应用和精密传感器的诞生也极大地推动了自动驾驶技术的发展^[2],例如自动驾驶车辆能根据计算机视觉和车联网通信实现多方信息交互^[3]、模仿人的决策能力^[4]、预测交通参与者的短时运动行

为^[5]等。在工业界,Google、Uber、Tesla、Toyota、百度等世界知名的汽车制造商和互联网企业已经在仿真环境甚至特定的公路测试它们的自动驾驶产品。另一方面,随着共享经济^[6]迅速兴起,未来共享自动驾驶汽车将逐步替代人工驾驶私家车,之前由司机做决定的驾驶行为也将由综合调度系统取代,实现自动化的车乘匹配和人性化的行程服务。

早在1995年,Dial^[7]就提出了自动驾驶出租车调度系统,客户通过电召的方式呼叫出租车,调度指令可完全交于电脑控制。随着科技的进步,自动驾驶出租车调度系统能够胜任更多任务分派的工作,在应对复杂动态的出租车运营时能准确执行订单分配、路径规划、动态定价等任务,减少道路行驶的汽车数量,有效缓解交通拥堵压力,提升运营效率,缩短

到稿日期:2019-04-04 返修日期:2019-09-29 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61803100,61703112,61773128);广东省自然科学基金资助项目(2014A030308009);广东省科技计划项目(2013B091300009,2014B090907010,2015B010131014,2016B030308001,2017B010125002,2019B010118001,2019B010121001)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61803100,61703112,61773128), Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2014A030308009) and Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (2013B091300009, 2014B090907010, 2015B010131014, 2016B030308001, 2017B010125002, 2019B010118001, 2019B010121001).

通信作者:孙为军 1569@qq.com

乘客等待时间和行车里程^[8-11]。此外,自动驾驶出租车还能从路网中收集大量的感知数据,这有利于调度系统进一步了解乘客时空分布模式并重新进行协调运作^[12-15]。因此,自动驾驶出租车系统既是新时代科技革命的产物,也是解决传统交通拥堵问题的良方。

本文将对自动驾驶出租车调度系统的构建进行概述,第2节概括了调度系统的整体建模问题;第3节讨论了构建自动驾驶出租车调度系统的关键技术问题;第4节指出了基于大数据和车联网的调度系统的研究方向和发展趋势;最后总结全文。

2 自动驾驶出租车调度系统的模型

随着城市化进程的加快,城市人口不断增加,交通供需矛盾日益突出,传统的出租车调度方法落后,导致它在目前的交通环境中没有发挥出最大的作用。在复杂的交通环境中,调度问题需要考虑多种约束条件,例如乘客起始点位置、出租车总体行程时间、出行需求的动态不确定性、乘客间合乘共享条件等。这些约束条件共同作用使得调度模型变得难以直接求解。从以往的研究来看,Maciejewski等^[16]提出了一种实时出租车调度策略,使得调度系统在每个决策时段找到全局最优的司乘匹配方案。Nourinejad等^[17]设计了一种基于交通流预测的分派模型。该调度模型通过分析城市路网实时需求信息做出判断并向欠饱和状态地区派遣出租车。Yuan等^[18]利用乘客行为模式和出租车GPS轨迹学习上下车行为,构建了一个司乘匹配推荐系统。Wang等^[19]基于实时信息和交通流量的多元数据,提出了一种针对多辆出租车的协同调度算法,实现了最佳驾驶线路和预期收入。Jung等^[20]以最大化载客量和最小化行程时间为优化目标,提出混合模拟退火调度算法。Verma等^[21]的调度模型通过精确预算算法处理司乘匹配约束,有效提高了出租车的利用率。Xing等^[22]以最大化乘客服务数量为主要目标,以乘客需求的等待时间和费用为约束条件,建立了调度模型。各文献调度模型的特点如表1所列。

表1 调度模型的特点
Table 1 Features of scheduling models

文献	优化目标	动态交通
Maciejewski等 ^[16]	T	是
Nourinejad等 ^[17]	V,C	是
Yuan等 ^[18]	T,V,C	否
Wang等 ^[19]	P	是
Jung等 ^[20]	T,C	是
Verma等 ^[21]	C	否
Xing等 ^[22]	C,T,P	否

注:V代表车辆数,C代表运载体量,T代行程时间,P代表出行总价

自动驾驶出租车调度模型的关键技术是处理好订单分配和路径规划的问题,然后以此为基础,在时间和空间上对全局需求分布做进一步的优化。Kummel等^[23]提出了一个基于家庭模型的自动驾驶路径规划的理论框架,通过在需求地点预先分配车辆,简化了自动驾驶车队调度的复杂度。Bischoff等^[24]模拟用自动驾驶出租车替代私家车在柏林运营,他们的调度模型以供需平衡策略为核心。在Llorca等^[25]对慕尼黑都市区的共享自动驾驶出租车的仿真研究中,调度模型的构

建参考了Maciejewski等^[26]提出的动态车辆路径规划方法和Bischoff等^[27]对自动驾驶出租车的时空分析,评价了自动驾驶出租车的服务水平。而Liu等^[28]在需求生成、出租车分配操作、实时动态路径规划3个方面构建了自动驾驶出租车调度模型,并对比分析了实时数据和历史数据对调度策略的影响。

上述研究分别从不同方面考虑出租车调度中存在的约束条件和决策变量。各研究针对复杂交通情况提出了相应的解决方法,并通过仿真计算展示了调度系统在减少车辆数量、提高交通运输能力和出租车运营效率、提升服务水平等方面的优势。但是,大部分研究欠缺对合乘共享绕路问题的细分和考虑,有的研究缺乏考虑路网交通流量的动态变化,使仿真结果产生过高或过低优化的假象。

3 自动驾驶出租车调度的关键技术问题

如图1所示,调度系统框架包括共享模式、路径规划、需求预测、空车调度和定价策略等5个部分,通过有效计算城市出行最小出租车车队^[29],制定合理的动态定价策略^[30]和动态路径规划^[31],最终使得城市路网的总体出行效率达到最优状态。针对上述出租车调度问题,可利用人工智能和大数据技术带来的科技创新,建立一个“车联网+大数据+共享出行”的自动驾驶出租车智能调度系统。

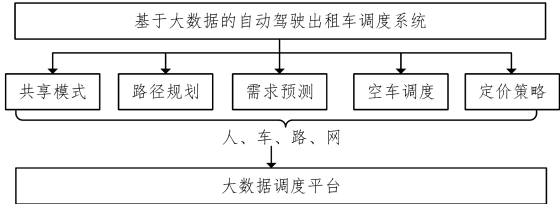


图1 自动驾驶出租车调度系统的组成
Fig. 1 Framework of autonomous taxi system

3.1 共享模式

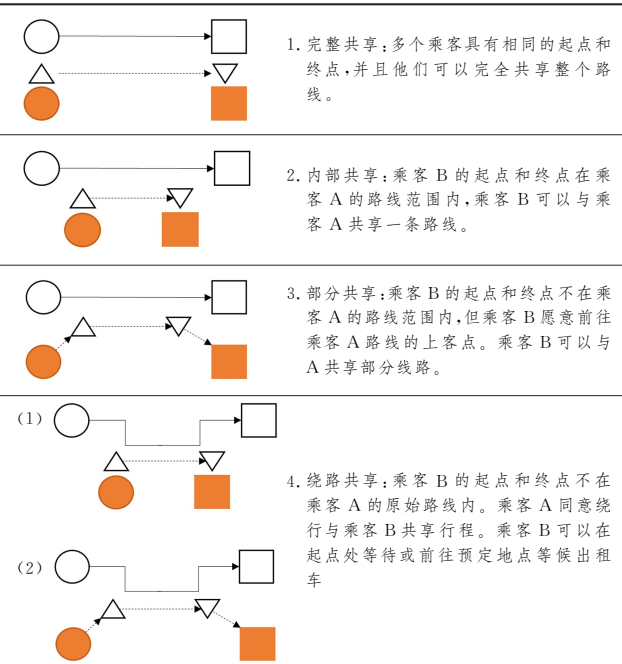
运营中的自动驾驶出租车可分为空载车、期望空载车和可共享车。空载车是目前没有载客的出租车;期望空载车是车上乘客即将到达目的地的出租车;可共享车是目前正处于载客状态,但行车路径上可以搭载其他乘客的出租车。区别于非共享模式的传统出租车系统,自动驾驶出租车调度系统将精细化乘客共享模式,在遵循乘客意愿的情况下智能地根据各个乘客的出行链信息匹配可共享车辆,可大幅度地提高出租车的使用率,有效缓解交通拥堵,减少能源浪费,降低出行费用。文献[32-35]指出合乘模式属于“低碳出行”,能够提高道路承载力和出租车运力,缓解高峰期“打车难”的问题。

自动驾驶出租车调度系统在运营过程中,通过动态共享的方式将具有相似行程计划的乘客在短时间内聚集运送^[36]。在整个城市的路网中,共享服务不仅需要规模合适的出租车队来确保效率和可持续性,还需要有相应算法提供支持和优化,以实现乘客与共享车辆之间的实时匹配^[37]。如今发展迅速的互联网技术为精细化的共享出行带来了更多新的模式^[38]。调度系统在接收到乘客电召的实时需求后,根据时间、合乘意愿、人数、费用等约束条件,调派合适的出租车载客。合乘共享能让乘客为出行支付更少的费用,而绕路补偿

机制可进一步吸引乘客^[39]。因此,设计吸引乘客的合乘机制、制定合理的乘车安排、建立在线系统中匹配机制与未知乘客的信任^[40]是共享调度系统的3个关键技术。

需要首先讨论的是乘车安排,即精细化共享模式,共享模式的研究如表2所列。自动驾驶出租车的共享模式大致可以分为:完整共享、内部共享、部分共享以及绕路共享。前3种共享方式属于重合模式,即合乘的乘客中某一个乘客的路径完全包含在另一位乘客的路径中。这种共享模式在文献中的研究较多,而绕路共享的调度问题却鲜少提及。传统的匹配机制几乎没有考虑到共享模式的分类,而是根据就近原则载客,新的调度系统应该考虑到多种模式的共享问题,以进行路径规划、调度和定价^[40]。关于共享问题的研究有 Hosni 等^[41]提出的一种混合整数规划模型,他们针对动态系统提出了增量成本的启发式算法。Kleiner 等^[42]利用滚动时间窗口,在考虑时间预算的情况下尽可能晚地安排行程。他们提出了一种考虑合乘参与者和合乘意愿偏好的近似拍卖机制的解决方案。仿真实验表明,基于拍卖机制可为共享问题提供接近最优的解决方案。Tsao 等^[43]提出了预测控制算法来协调自动驾驶车队调度,并研究了车辆与合乘服务的结合方案。Farhan 等^[44]提出了一个基于禁忌搜索的优化框架来模拟共享的自动驾驶电动汽车并进行案例分析。Lokhandwala 等^[45]比较了传统出租车和自动驾驶出租车的表现,提出了一个基于智能体的框架来实现共享出行。

表2 自动驾驶出租车共享模式
Table 2 Sharing modes of autonomous taxi dispatching



注:○表示乘客A的起点;□表示乘客A终点;●表示乘客B起点,■表示乘客B终点;△表示乘客B上车点;▽表示乘客B下车点。→表示乘客A路线;---表示乘客B路线

绕路共享模式相较于前3种共享模式更为复杂,需要考虑更多的约束条件。传统的出租车行业不具备完善的协调功能来搭载多名乘客,每次只能搭载一位或同行几位的乘客,不仅浪费出租车的运载能力,也降低了司乘双方的收益。如果自动驾驶出租车的共享合乘模式能够快速推广开来将有利于

交通服务水平的提升并拉动经济增长。然而,现有的研究通常只考虑非绕路共享,对绕路共享模式的研究还未能做到精细化判断。现有研究对不在同一路径的多起点、多终点的出行情况的分类不够精细,鲜有针对这些情况制定共享合乘的方案。考虑乘客之间绕路共享模式的调度,可达到用最少的出租车接待最多乘客的全局最优状态。如图2、表3、表4所示,假设一辆出租车可以服务4名乘客,在共享模式中未考虑绕路共享时需要3辆出租车,而加入绕路共享的算法后调度系统只需要派遣一辆车就可以完成载4人的任务。综合来看,解决共享问题的关键在于建立一个支持大规模实时共乘^[46]、具有实时匹配能力^[47]、能够考虑乘客个性化偏好^[48]的动态调度系统。该系统一方面满足乘客时空上的动态分布的特点^[49],另一方面为预测乘客需求^[50]提前做好准备,实现在有效时间内绕路载客。



(a)传统非共享模式



(b)动态共享模式

图2 非共享与共享场景

Fig. 2 Non-sharing vs. sharing modes

表3 传统非共享模式事件表

Table 3 Traditional non-shared mode event table

时间	状态	出租车 ID	上下车人数	剩余座位
9:00	PU1	A	2	2
9:04	PU2	B	1	3
9:10	PU3	C	1	3
9:11	DO1	A	2	4
9:20	DO2	B	1	4
9:27	DO3	C	1	4

表4 动态共享模式事件表

Table 4 Dynamic shared mode event table

时间	状态	出租车 ID	上下车人数	剩余座位
9:00	PU1	A	2	2
9:05	PU2	A	1	1
9:12	DO1	A	2	3
9:14	PU3	A	1	2
9:25	DO2	A	1	3
9:30	DO3	A	1	4

动态乘车共享系统旨在短时间内将具有类似出行计划的乘客自动匹配在一起,使乘车共享的匹配可以在出发前数分钟内建立^[45]。自动驾驶出租车调度系统需要快速精准地对

交通环境中的动态不确定性做出相应的判断,因此动态需求的预测一直是出租车调度系统研究的热点。Agatz 等^[51]定义了动态乘车共享的概念,建立了最短行程时间和最大化共享人数的动态共享乘车系统。Alan 等^[52]用滚动范围方法为实际动态共享乘车问题的实例提供了解决方法,并在亚特兰大都市区开展模拟研究。Douglas 等^[53]以运载量、乘客最大行程成本和最大等待时间设立动态共享约束条件。在动态问题中,研究方法基于最短路径的快速计算,将时间划分为时间段,使其可被看作静态问题,然后通过贪婪随机自适应搜索得到最优解。Bathla 等^[54]提出了一种 4 人共乘模型,并开发了一种分布式出租车共乘算法来解决乘坐共享请求的动态调度问题。Li 等^[55]提出的动态共享模型可为乘客的请求随机产生共享组合,生成的乘客信息包括有时间窗口的上车地点和下车地点。一旦有乘客提出请求,系统可立即做出接受或拒绝的决定。如有多于一辆出租车可供使用,乘客可选择最近的出租车上车。

相较于现有的智能调度系统,自动驾驶出租车调度系统将动态合乘和绕路共享考虑得更加全面。如果不加入针对动态乘坐共享的调度,漫无目的地空载巡航和重新定位会增加路面交通流量,导致交通拥堵和行程时间的增加^[56]。面对越来越多的打车需求,客户端和数据中心处理高并发数据的速度需要得到相应的提高。如今,随着智能手机技术的发展,动态共乘系统使乘客可以随时随地通过移动平台打车^[57]。调度系统可通过汽车共享实现最大化共乘^[58],对缩短车辆行驶时间和乘客出行时间、降低运营成本等^[59]有显著成效。

3.2 路径规划问题

动态车辆路径问题是自动驾驶出租车系统必须解决的关键问题之一。本节主要针对动态车辆路径问题^[60](Dynamic Vehicle Routing Problems, DVRP)和空车调度^[61]进行路径规划问题的回顾和探讨。

基于经典的车辆路径问题(Vehicle Routing Problems, VRP),先后有带时间窗的路径规划 VRPTW(Vehicle Routing Problems with Time Windows)、考虑车辆容量的 CVRP(Capacitated Vehicle Routing Problem)、具有不同运载量异构车队的 HVRP(Heterogeneous Vehicle Routing Problem)、陆地运输的拨号乘车问题 DARP(Dial-A-Ride Problems)等方法。在静态和确定性调度中,所有的输入都是事先已知的,路径规划执行后也不会发生改变。然而,在真实的交通运营环境中,出租车调度面对更多的是动态、时变的问题,按部就班套用静态路径规划无法优化动态问题,且冗余的车辆增派将增加路面交通压力。面对部分甚至全部输入是未知的动态交通环境,路径在设计和执行期间需要考虑来自各方面随机变量的影响。

自动驾驶出租车调度系统在优化路径规划问题时,既要计算最短路径和最短行程时间,也要考虑随着新的共享请求的出现及时更新路径,然后综合这两方面来解决合乘共享的路线行驶最优问题。调度中心路径规划简明图如图 3 所示,如上文提及的动态信息和需求预测,灰色区域为打车高频区域。静态网络对随机插入的请求单独派遣车辆,共享的路径也限于完全共享。动态调度不仅需要提早预测打车高频地区

的乘车需求,还需要根据实时订单及时修改路径导航,以接待更多的乘客。以往对动态路径规划的研究如下:Levin^[62]考虑拥堵时的共享路线和乘客匹配线性方案,提出了具有链路传输模型的系统最优交通分配模型,但该方案中的自动驾驶出租车只考虑携带一名乘客。Rahili 等^[63]基于分布式强化学习的方法为自动驾驶出租车选择最优路径。Bertsimas 等^[64]提出了一种适用于多种应用场合的在线出租车路径滚动窗口层优化策略,使数千辆出租车能够实时规划路径,每小时涵盖数万名客户的出行。Wong 等^[65]根据元胞、Logit 搜索和介入机会构建搜寻乘客路径模型。Stiglic 等^[66]在路径中引入合乘站点进行司乘匹配。Zhang 等^[67]开发了一种数据挖掘方法,研究出租车司机如何从大量的出租车 GPS 数据中选择有效路径。该方法能够获得反映了出租车司机思维的路径图,因此更加智能和实用。在出租车自动调度系统中,如果能够实时利用 GPS 数据,可以自主地帮助出租车选择最优路线。

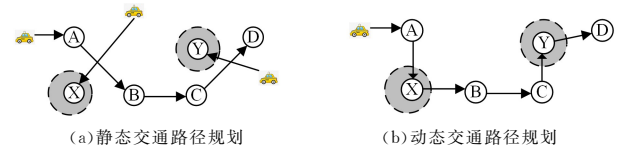


图 3 静态和动态调度策略
Fig. 3 Static and dynamic dispatching strategies

然而,空车调配不当会造成不同路网中的车辆分配不平衡,进而影响乘客的使用需求。如图 4 所示,本文通过一个静态网络对问题进行说明。图 4 中有 4 个区域且各区域都存在乘车请求与空载车,但供需情况并不平衡。B 区域车辆过剩而 A 和 D 区域乘客需求更多,因此有必要为 B 区域的空载车进行路径规划。动态交通环境使空车调度情况更具复杂性。Yu 等^[68]根据马尔可夫决策过程制定空载出租车最佳路线。Hou 等^[69]为出租车巡航提供路线建议,协助空置出租车尽快找到乘客,从而达到最小化出租车空置率的目的。Gao 等^[70]提出两种解决空车调度的方法,一种是基于排队理论,根据乘客需求使出租车路径参照环境状态来更新的模型,另一种是无模型的学习方法,出租车从观察到的轨迹数据中学习并得出最佳的决策。Zou 等^[71]建立了动态概率模型,考虑了不同空载出租车出行路线对乘客接送概率的影响。目前全球大力倡导发展低碳经济,解决路径规划问题可加快路网车辆的运行周转,持续高效地实现空车资源的动态优化调配。

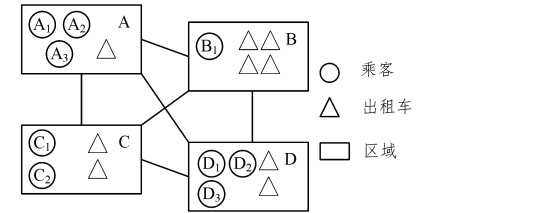


图 4 车辆调配过程
Fig. 4 Vehicle dispatching process

3.3 合乘定价问题

费用是吸引乘客关注并采用合乘方式的重要因素。不同于传统出租车“起步价+按里程收费”,自动驾驶出租车路径的选取和合乘的体验会很大程度地影响定价策略。自动驾驶出租车的定价目的是实现运营公司和乘客的双赢。制定合理

的合乘费率可以让运营公司的收益比非合乘有所增加^[72];另一方面,给予乘客一定的绕路补偿,能够使乘客的出行成本降低。因此,定价问题应当从乘客利益、运营利益、资源利用等多方面入手,寻求定价策略的平衡点。自动驾驶出租车调度系统定价的流程如图5所示,先判断乘客选择的出行方式进行计费,在合乘时基于不同的合乘人数给予不同的绕路补偿系数,基于绕路共享增加的路程给予一定的价格折扣补偿。

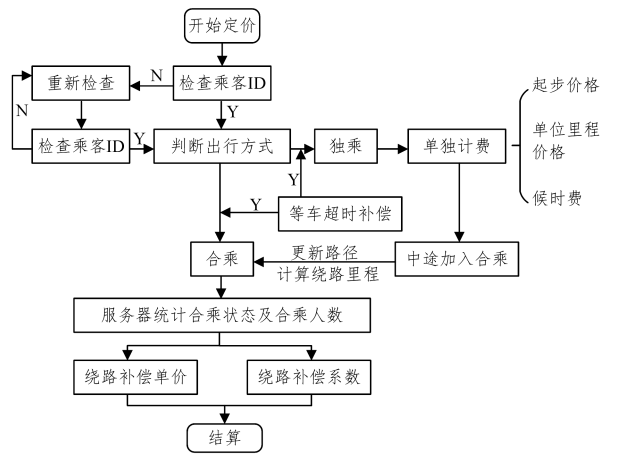


图5 定价流程
Fig. 5 Pricing process

在自动驾驶出租车运行环境中,因为无驾驶员参与,定价策略的目标之一是优化乘客和运营者之间的利益。对于运营者来说,自动驾驶出租车在合乘调度时行驶里程的消耗是其主要成本,但合乘加入的乘客又能为运营者增加收益。对于乘客来说,他们合乘与否受多方面因素的共同作用。合理的合乘价格会极大地吸引人们选择合乘出行。合乘用户的陌生程度、性别、文化差异等会让乘客产生不安甚至恐惧感而拒绝合乘,因此乘客们关注的价格问题可以从两方面来剖析:1)合乘人数;2)绕路。合乘人数会影响乘客的舒适度和信任度,因此应基于不同合乘人数给出不同的折扣率,乘客对于是否合乘也有自主选择权。由于绕路带来绕行时间的增加,乘客可能需要支付更多的路费,因此需制定一项补偿绕路的定价策略才能保证价格的公平性和吸引力。

Liu等^[73]在天津市和西安市开展调查,研究了合乘人数和心理因素对参与合乘支付意愿的影响。Simoni等^[74]针对共享和非共享自动驾驶汽车运营的不同场景考虑拥堵定价策略,区别于传统的拥堵收费问题,其提出了基于动态边际成本定价的拥堵定价策略,并根据早晚峰值来分配收费。Korolko等^[75]考虑了在时间和空间上动态供需平衡的定价方式。Furuhata等^[76]总结了与动态实时共享相关的定价机制,如公平的成本分摊机制、在线机制、真相诱导机制。Wang等^[77]引入双边市场理论,提出了一个非线性方程组求出均衡解,基于偏导数进行敏感性分析,评估了定价策略对出租车市场绩效的影响。He等^[78]还考虑了客户的“预定/取消”行为,通过惩罚连续线性规划算法,制定并解决了出租车定价和补偿策略优化问题。Gan等^[79]将博弈论概念与现有的出租车市场模型相结合,提出在高峰时段提高票价的动态时间定价策略。Guo等^[80]认为动态定价是按需乘车服务的核心组成部分,他

们研究了不同时段乘客的打车频率,如高峰期、周末等,然后提出了一种动态定价算法并设计了动态定价区域。上述研究针对不同的情况给出了不同的定价方式,其特点总结如表5所列。

表5 已有研究中的定价策略的特点
Table 5 Characteristics of pricing strategies in literatures

方法	研究目标	共享模式
Liu等 ^[73] 的方法	心理因素	非绕路
Simoni等 ^[74] 的方法	拥堵	非绕路
Korolko等 ^[75] 的方法	时空动态供需平衡	非绕路
Furuhata等 ^[76] 的方法	动态实时共享相关定价机制	非绕路
Wang等 ^[77] 的方法	市场绩效	非绕路
He等 ^[78] 的方法	补偿策略	非绕路
Gan等 ^[79] 的方法	时间段	非绕路
Guo等 ^[80] 的方法	时间段、区域	非绕路

综上所述,合理定价能鼓励合乘,减少交通拥堵。出行费用根据乘客选择的出行方式来确定,非共享模式下的定价与传统出租车的定价相似,都是制定起步价和超出起步里程的价格。共享模式下的定价需要计算独乘阶段的费用和合乘阶段的费用。独乘阶段的费用与非共享模式保持一致,合乘阶段则根据合乘人数折扣率计算费用。绕路计费是定价策略的一个关键问题,在绕路情况下可参考总路径长度与非共享最短出行距离之差,根据补偿系数和补偿单价计算绕路的经济补偿。

4 思考与展望

4.1 对未来调度系统的思考

城市的发展与交通基础设施的完善使我国的交通服务水平有了显著的提高,但传统出租车调度方法的表现仍然不尽人意。传统出租车的种种负面报道表明城市交通虽然发展迅速,却依然达不到市民的期望。智能交通是针对复杂交通问题的新兴解决方案之一,它通过信息整合、资源共享实现城市交通智能化、动态化。自动驾驶出租车调度系统是未来智能交通系统中的一部分。自动驾驶出租车服务属性的提升^[81]会大大提高用户市场渗透率。针对车队的优化算法可最大限度地缩短用户等待时间并减少出行成本^[82],且拥有预定成功率高^[83]等优势,自动驾驶出租车能够鼓励和吸引用户合乘,起到节能减排的作用。这种环保的出行方式必将成为今后倡导的出行方式。然而,自动驾驶出租车的调度建模往往伴随着大量的约束条件,这使得构建一个新的调度系统变得异常困难。在研究过程中,欲解决这些问题都会先降低约束条件的个数,或者让其中的变量精简化。这样虽然能得出结果,但是实际上并不能完全匹配实际生活中出租车调度问题的最优解。因此调度系统对共享模式的分类需要更为精细,探析各个决策因素对调度系统的影响,把难以解决的大问题分解为多个可解决的小问题,再通过启发式算法逼近最优解。

随着汽车通信技术飞速发展,调度系统开始能够胜任长期的信息处理任务,并逐步向车联网迈进。未来汽车有望实现互联互通,并能与周围环境进行海量的数据交互。从大数据的角度来看,自动驾驶汽车无时无刻不在产生数据,整个出租车行业汇总的数据将涵盖道路、天气、行人、交通信号、建筑等。因此,处理好多元动态的海量交通大数据是未来交通系

统实现高效化和智能化的前提。

4.2 车联网与调度系统

出租车是交通出行的中坚力量之一,又具有流动性强、乘客多元化、需求多样化等特点。但由于监管技术水平发展相对落后,出租车调度随着司机与运营公司的利益矛盾而问题频发,如黑车、挑客、宰客、乱收费等。为了满足出租行业管理的需求,提升乘客的出行体验,自动驾驶出租车调度系统可结合车联网展开优化。随着嵌入式智能设备越来越先进,5G 信号即将普及,新的人、车、路间的相互关系也逐渐形成。

联网汽车意味着车辆是互联世界的一部分^[84],也是推动世界技术革命和创新的一份子。随着数字服务和自动驾驶功能的完善,车联网中的汽车将实现包括手机、交通信号灯、其他车辆、导航在内的自动连接功能^[85]。针对未来联网汽车,Dakroub 等^[86]提出了一种新的车联网架构,包括语音系统、后端系统、车车之间的数据共享等。Chen 等^[87]提出了一种车辆认知网络(Cognitive Internet of Vehicles, CIOV),这是一种以人为本的全面加强车联网智能化的系统。Xu 等^[88]研究了车联网、车载环境与大数据的关系,结合大数据研究车联网的传输、存储、计算,探析基于大数据的车联网得到的收益。Kumar 等^[89]构建基于车联网的智能交通控制系统,用蚁群优化算法为车辆寻找最佳路线。Yaqoob 等^[90]以最小化拥堵和降低消息传递延迟为目标,提出了一种基于 Fog-assisted 的车联网拥塞避免方案。

得益于物联网的发展^[91],车联网在其基础上也获得了更多的创新机会。车联网是移动互联网与物联网的融合,在智慧城市场景中部署车联网^[92],促进 V2V, V2R, V2I 实时共享数据和信息交换,无疑能够有效提高自动驾驶出租车调度系统的效率。车联网作为未来 ITS 的核心信息通信平台,推动着自动驾驶出租车调度系统与大量的数据流紧密结合,让调度系统可以及时接收来自路网的多源数据,然后根据车联网的信息精确预判车辆和道路状况^[93],有效管理和控制交通流量^[94]。

4.3 大数据与调度系统

在未来车联网智能化时代,高效率的车联网、精确的复杂绕路共享算法以及大数据驱动的智能调度将使出租车乃至整个交通行业的运营效率和服务水平得到显著提升。在调度系统运营过程中,通过大数据技术挖掘出租车接送热点区域^[95],基于海量轨迹数据推荐出行路线^[96],能够更加精准和人性化地实现自动驾驶调度^[97]。

基于大数据的自动驾驶出租车调度平台将由面向出租车调度领域应用的、可复用的通用服务能力组件构成,支持高可用及横向扩展的分布式架构,支持分布式大数据存储,支持不同来源和不同格式的交通流检测。多源数据集存储于标准化的交通流数据仓库,并在云计算平台的支撑下,支持对海量交通需求数据和历史轨迹信息进行存储与整合,支持对路网交通状态进行分析与预测,最后为出租车调度的共享合乘匹配和路径规划提供最优的解决方案。在面向交通领域的应用中,大数据处理技术有基于 Hadoop 的实时批处理调度模型^[98]、利用 MognoDB 和 Spark 建立分布式系统寻找出租车高利润区域^[99]、以 Storm 为代表的分布式流处理技术^[100]等。这些技术实时处理车联网领域的高并发数据,提高了分布式

技术优化的部署,突破了频繁数据交互高吞吐量的限制,大幅度提升了车联网大数据的使用性能。因此,积极引入“互联网+交通”的产业思路,把握人工智能和共享经济的发展机遇,加快自动驾驶技术和智能出租车系统的研发,才能在国际中力争上游,占据领导地位。

结束语 本文主要介绍了自动出租车调度系统的体系结构,包括共享模式、路线规划和合乘定价策略,并描述了动态和共享的两个主要特征。最后,本文讨论了使用当前新技术的自动出租车调度系统的前景。期望在创新技术的支持下,调度系统可以更平稳地运行,但与此同时,我们意识到自动出租车调度系统的推广将遇到新的问题。

我们预测未来该系统将有广泛的应用领域:1)大型城市出租车调度的优化;2)对共享运输方式的政策激励和补贴;3)动态准确的自主共享出租车系统匹配算法。我们相信,自动出租车调度系统的应用可以为交通科学和智能城市建设提供宝贵的研究机会,我们希望引用的文献和评论能够为研究人员带来更多的贡献。

参 考 文 献

[1] BERGER C. From a competition for self-driving miniature cars to a standardized experimental platform: concept, models, architecture, and evaluation[J]. arXiv:1406.7768,2014.

[2] CAO P, HU Y, MIWA T, et al. An optimal mandatory lane change decision model for autonomous vehicles in urban arterials [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(4):271-284.

[3] AN K H, HAN W Y. Autonomous vehicle driving system and method; U. S. Patent Application 10/235,885[P]. 2019-3-19.

[4] LI L, OTA K, DONG M. Humanlike driving: empirical decision-making system for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8):6814-6823.

[5] DJURIC N, RADOSAVLJEVIC V, CUI H, et al. Motion prediction of traffic actors for autonomous driving using deep convolutional networks[J]. arXiv:1808.05819,2018.

[6] HEINRICHS H. Sharing economy: a potential new pathway to sustainability[J]. GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society, 2013, 22(4):228-232.

[7] DIAL R B. Autonomous dial-a-ride transit introductory overview[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1995, 3(5):261-275.

[8] SHAHEEN S A, COHEN A P. Carsharing and personal vehicle services: worldwide market developments and emerging trends [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2013, 7(1):5-34.

[9] FAGNANT D J, KOCKELMAN K M. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 40:1-13.

[10] LEE D H, WANG H, CHEU R L, et al. Taxi dispatch system based on current demands and real-time traffic conditions[J]. Transportation Research Record, 2004, 1882(1):193-200.

[11] ZHANG D, HE T, LIN S, et al. Online cruising mile reduction in large-scale taxicab networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(11):3122-3135.

- [12] MIAO F, HAN S, LIN S, et al. Data-Driven Robust Taxi Dispatch Under Demand Uncertainties[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017(99): 1-17.
- [13] ZHANG D, HE T, LIN S, et al. Dmodel: Online taxicab demand model from big sensor data in a roving sensor network[C]// 2014 IEEE International Congress on Big Data. IEEE, 2014: 152-159.
- [14] BALAN R K, NGUYEN K X, JIANG L. Real-time trip information service for a large taxi fleet[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM, 2011: 99-112.
- [15] ASIF M T, DAUWELS J, GOH C Y, et al. Spatiotemporal patterns in large-scale traffic speed prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 794-804.
- [16] MACIEJEWSKI M, BISCHOFF J, NAGEL K. An assignment-based approach to efficient real-time city-scale taxi dispatching[J]. IEEE Intelligent Systems, 2016, 31(1): 68-77.
- [17] NOURINEJAD M, RAMEZANI M. Developing a large-scale taxi dispatching system for urban networks[C]// 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2016: 441-446.
- [18] YUAN N J, ZHENG Y, ZHANG L, et al. T-finder: A recommender system for finding passengers and vacant taxis[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2013, 25(10): 2390-2403.
- [19] WANG Y, LIANG B, ZHENG W, et al. The development of a smart taxicab scheduling system: A multi-source data fusion perspective[C]// 2016 IEEE 16th International Conference on Data Mining (ICDM). IEEE, 2016: 1275-1280.
- [20] JUNG J, JAYAKRISHNAN R, PARK J Y. Dynamic shared-taxi dispatch algorithm with hybrid-simulated annealing[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2016, 31(4): 275-291.
- [21] VERMA S K, VO H T. A predictive taxi dispatching system for improved user satisfaction and taxi utilization[C]// 2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity). IEEE, 2015: 175-182.
- [22] XING X, WARDEN T, NICOLAI T, et al. Smize: a spontaneous ride-sharing system for individual urban transit[C]// German Conference on Multiagent System Technologies. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 165-176.
- [23] KUMMEL M, BUSCH F, WANG D Z W. Framework for automated taxi operation: The family model[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 22: 529-540.
- [24] BISCHOFF J, MACIEJEWSKI M. Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin[J]. Procedia computer science, 2016, 83: 237-244.
- [25] LLORCA C, MORENO A T, MOECKEL R. Effects of shared autonomous vehicles on the level of service in the greater Munich metropolitan area[R]. Transportation Research Procedia. Munich, 2017.
- [26] MACIEJEWSKI M, SALANOVA J M, BISCHOFF J, et al. Large-scale microscopic simulation of taxi services. Berlin and Barcelona case studies[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2016, 7(3): 385-393.
- [27] BISCHOFF J, MACIEJEWSKI M. Autonomous taxicabs in Berlin-a spatiotemporal analysis of service performance[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 19: 176-186.
- [28] LIU Z, MIWA T, ZENG W, et al. Shared Autonomous Taxi System and Utilization of Collected Travel-Time Information[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018.
- [29] VAZIFEH M M, SANTI P, RESTA G, et al. Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility[J]. Nature, 2018, 557(7706): 534.
- [30] GUO S, LIU Y, XU K, et al. Understanding ride-on-demand service: demand and dynamic pricing[C]// 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). IEEE, 2017: 509-514.
- [31] WANG M, SHAN H, LU R, et al. Real-time path planning based on hybrid-VANET-enhanced transportation system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 1664-1678.
- [32] JUNG J, JAYAKRISHNAN R, CHOI K. Shared-taxi operations with electric vehicles[R]. Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, CA. Technical Report, 2012.
- [33] TAO C C. Dynamic taxi-sharing service using intelligent transportation system technologies[C]// 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. IEEE, 2007: 3209-3212.
- [34] CHEN T D, KOCKELMAN K M, HANNA J P. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 243-254.
- [35] SILVA E, KOKKINOGENIS Z, CÂMARAÁ, et al. An exploratory study of taxi sharing schemas[C]// 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2016: 247-252.
- [36] 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.
- [37] ALONSO-MORA J, SAMARANAYAKE S, WALLAR A, et al. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(3): 462-467.
- [38] DONG Y, WANG S, LI L, et al. An empirical study on travel patterns of internet based ride-sharing[J]. Transportation research part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 1-22.
- [39] MA S, ZHENG Y, WOLFSON O. Real-time city-scale taxi ride-sharing[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2015, 27(7): 1782-1795.
- [40] FURUHATA M, DESSOUKY M, ORDÓÑEZ F, et al. Ride-sharing: The state-of-the-art and future directions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 57: 28-46.
- [41] HOSNI H, NAOUM-SAWAYA J, ARTAIL H. The shared-taxi problem: Formulation and solution methods[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 303-318.
- [42] KLEINER A, NEBEL B, ZIPARO V A. A mechanism for dynamic ride sharing based on parallel auctions[C]// Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2011, 22: 266-272.
- [43] TSAO M, MILOJEVIC D, RUCH C, et al. Model Predictive

Control of Ride-sharing Autonomous Mobility-on-Demand Systems[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2019.

[44] FARHAN J, CHEN T D. Impact of ridesharing on operational efficiency of shared autonomous electric vehicle fleet[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 93: 310-321.

[45] LOKHANDWALA M, CAI H. Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 97: 45-60.

[46] TIAN C, HUANG Y, LIU Z, et al. Noah: a dynamic ridesharing system[C]// Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2013: 985-988.

[47] AGATZ N, ERERA A, SAVELSBERGH M, et al. Sustainable passenger transportation: Dynamic ride-sharing[J]. Erasmus Research Institute of Management, 2010, 2: 10-33.

[48] MALODIA S, SINGLA H. A study of carpooling behaviour using a stated preference web survey in selected cities of India [J]. Transportation Planning and Technology, 2016, 39(5): 538-550.

[49] D'OREY P M, FERNANDES R, FERREIRA M. Empirical evaluation of a dynamic and distributed taxi-sharing system [C]// 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2012: 140-146.

[50] MOREIRA-MATIAS L, GAMA J, FERREIRA M, et al. Predicting taxi-passenger demand using streaming data [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1393-1402.

[51] AGATZ N, ERERA A, SAVELSBERGH M, et al. Optimization for dynamic ride-sharing: A review[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 223(2): 295-303.

[52] AGATZ N, ERERA A, SAVELSBERGH M, et al. Dynamic Ride-Sharing: a Simulation Study in Metro Atlanta[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 17: 532-550.

[53] SANTOS D O, XAVIER E C. Taxi and Ride Sharing: A Dynamic Dial-a-Ride Problem with Money as an Incentive[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(19): 6728-6737.

[54] BATHLA K, RAYCHOUDHURY V, SAXENA D, et al. Real-Time Distributed Taxi Ride Sharing[C]// 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2018: 2044-2051.

[55] LI B, KRUSHINSKY D, REIJERS H A, et al. The share-a-ride problem: People and parcels sharing taxis[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 31-40.

[56] LEVIN M W, KOCKELMAN K M, BOYLES S D, et al. A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017, 64: 373-383.

[57] ZHANG C, XIE J, WU F, et al. Algorithm Designs for Dynamic Ridesharing System[C]// International Conference on Algorithmic Applications in Management. Springer, Cham, 2018: 209-220.

[58] MANNA C, PRESTWICH S. Online stochastic planning for taxi and ridesharing[C]// 2014 IEEE 26th International Conference on Tools with Artificial Intelligence. IEEE, 2014: 906-913.

[59] MA T Y, RASULKHANI S, CHOW J Y J, et al. A dynamic ridesharing dispatch and idle vehicle repositioning strategy with integrated transit transfers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 128: 417-442.

[60] PSARAFTIS H N. Dynamic vehicle routing problems[J]. Vehicle routing: Methods and studies, 1988, 16: 223-248.

[61] BABICHEVA T, BURGHOUT W, ANDREASSON I, et al. The matching problem of empty vehicle redistribution in autonomous taxi systems [J]. Procedia Computer Science, 2018, 130: 119-125.

[62] LEVIN M W. Congestion-aware system optimal route choice for shared autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 82: 229-247.

[63] RAHILI S, RIVIERE B, OLIVIER S, et al. Optimal Routing for Autonomous Taxis using Distributed Reinforcement Learning [C] // 2018 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). IEEE, 2018: 556-563.

[64] BERTSIMAS D, JAILLET P, MARTIN S. Online vehicle routing: The edge of optimization in large-scale applications[J]. Operations Research, 2019, 67(1): 143-162.

[65] WONG R C P, SZETO W Y, WONG S C. A cell-based logit-opportunity taxi customer-search model [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48: 84-96.

[66] STIGLIC M, AGATZ N, SAVELSBERGH M, et al. The benefits of meeting points in ride-sharing systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 82: 36-53.

[67] ZHANG J, MENG W, LIU Q Q, et al. Efficient vehicles path planning algorithm based on taxi GPS big data[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(5): 2579-2585.

[68] YU X, GAO S, HU X, et al. A Markov decision process approach to vacant taxi routing with e-hailing[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 121: 114-134.

[69] HOU Y, LI X, ZHAO Y, et al. Towards efficient vacant taxis cruising guidance[C]// 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2013: 54-59.

[70] GAO S, YU X, HU X. Optimizing Vacant Taxis' Routing Decisions: Model-based and Model-free Approaches [R]. Proc. , Transportation Research Board Annual Conf. Washington, DC: Transportation Research Board, 2019.

[71] ZOU Q, XUE G, LUO Y, et al. A novel taxi dispatch system for smart city [C] // International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 326-335.

[72] JACOB J, ROET-GREEN R. Ride Solo or Pool: The Impact of Sharing on Optimal Pricing of Ride-Sharing Services[R]. Technical report, University of Rochester, Working Paper. 2017.

[73] LIU P, GUO Q, REN F, et al. Willingness to pay for self-driving vehicles: Influences of demographic and psychological factors [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 100: 306-317.

[74] SIMONI M D, KOCKELMAN K M, GURUMURTHY K M, et al. Congestion pricing in a world of self-driving vehicles: An analysis of different strategies in alternative future scenarios[J].

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 98: 167-185.
- [75] YAN C, ZHU H, KOROLKO N, et al. Dynamic pricing and matching in ride-hailing platforms[J]. Naval Research Logistics, 2019: 1-20.
- [76] FURUHATA M, DESSOUKY M, ORDÓÑEZ F, et al. Ride-sharing: The state-of-the-art and future directions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 57: 28-46.
- [77] WANG X, HE F, YANG H, et al. Pricing strategies for a taxi-hailing platform[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 93: 212-231.
- [78] HE F, WANG X, LIN X, et al. Pricing and penalty/compensation strategies of a taxi-hailing platform[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 263-279.
- [79] GAN J, AN B. Game-Theoretic Considerations for Optimizing Taxi System Efficiency[J]. IEEE Intelligent Systems, 2017, 32(3): 46-52.
- [80] GUO S, LIU Y, XU K, et al. Understanding ride-on-demand service: demand and dynamic pricing[C]// 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). IEEE, 2017: 509-514.
- [81] KRUEGER R, RASHIDI T H, ROSE J M. Preferences for shared autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69: 343-355.
- [82] CEPOLINA E M, FARINA A. A new shared vehicle system for urban areas[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 21(1): 230-243.
- [83] WANG Y, ZHENG B, LIM E P. Understanding the effects of taxi ride-sharing—A case study of Singapore[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2018, 69: 124-132.
- [84] SWAN M. Connected car: quantified self becomes quantified car[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2015, 4(1): 2-29.
- [85] VIERECKL R, AHLEMANN D, KOSTER A, et al. Racing ahead with autonomous cars and digital innovation[J]. Auto Tech Review, 2015: 18-23.
- [86] DAKROUB H, SHAOUT A, AWAJAN A. Connected car architecture and virtualization[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2016, 9: 153-159.
- [87] CHEN M, TIAN Y, FORTINO G, et al. Cognitive internet of vehicles[J]. Computer Communications, 2018, 120: 58-70.
- [88] XU W, ZHOU H, CHENG N, et al. Internet of vehicles in big data era[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(1): 19-35.
- [89] KUMAR P M, DEVI U, MANOGARAN G, et al. Ant colony optimization algorithm with Internet of Vehicles for intelligent traffic control system[J]. Computer Networks, 2018, 144: 154-162.
- [90] YAQOOB S, ULLAH A, AKBAR M, et al. Fog-assisted Congestion Avoidance Scheme for Internet of Vehicles[C]// 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2018: 618-622.
- [91] PARISE G, PARISE L, PARISE M. Evolution of Human Society and of Things Assisted by IoT[C]// 2018 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS). IEEE, 2018: 95-101.
- [92] ANG L M, SENG K P, IJEMARU G K, et al. Deployment of IoV for Smart Cities: Applications, Architecture, and Challenges[J]. IEEE Access, 2019, 7: 6473-6492.
- [93] XIONG H, LIU J, ZHANG R, et al. An Accurate Vehicle and Road Condition Estimation Algorithm for Vehicle Networking Applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 17705-17715.
- [94] CHEN J, XU W, CHENG N, et al. Reinforcement Learning Policy for Adaptive Edge Caching in Heterogeneous Vehicular Network[C]// 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2018: 1-6.
- [95] QI H, LIU P. Mining Taxi Pick-Up Hotspots Based on Spatial Clustering[C]// 2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI). IEEE, 2018: 1711-1717.
- [96] QU B, YANG W, CUI G, et al. Profitable Taxi Travel Route Recommendation Based on Big Taxi Trajectory Data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019: 1-16.
- [97] ZHANG J, WANG F Y, WANG K, et al. Data-driven intelligent transportation systems: A survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1624-1639.
- [98] BARBIERU C, POP F. Soft real-time hadoop scheduler for big data processing in smart cities[C]// 2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE, 2016: 863-870.
- [99] PUTRI F K, KWON J. A distributed system for finding high profit areas over big taxi trip data with MognoDB and spark[C]// 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress). IEEE, 2017: 533-536.
- [100] LEIBIUSKY J, EISBRUCH G, SIMONASSI D. Getting Started with Storm[M]. O'Reilly Media, Inc., 2012.



ZENG Wei-liang, born in 1986, Ph.D, associate professor. His main research interests include routing problem in complex network, traffic simulation, and big data visualization for smart city.



SUN Wei-jun, born in 1975, Ph.D, is a member of China Computer Federation. His main research interests include internet of thing and machine learning.