

文章编号:1671-8879(2016)05-0067-12

面向车联网环境的车辆移动模型研究进展

唐 蕾,段宗涛,康 军,马峻岩,刘若辰

(长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:在车联网环境下,车辆的移动改变了交通状态,继而触发网络连通性的变化,引发相关车辆对自身移动方式的调整。为了更好地挖掘真实的车辆移动轨迹,首先从车辆、交通情境以及驾驶人角度剖析包括移动约束、交通环境及时间尺度等影响车辆运动方式的关键元素,为构建模型提供指导;然后依据移动模型的数学理论方法,回顾了移动模型近年来的研究进展、代表性研究成果及相关文献等,并将其分为交通波模型、车辆跟驰模型、元胞自动机以及行为模型这 4 类;为了生成贴近真实状态的模型,采用真实数据对理论模型进行验证并修正;在阐述该方法的基础上,选取用户相关的数据与车辆轨迹数据对移动模型进行具体划分,并论述其在刻画物理环境、车辆交互、出行者习性以及反映交通流的实时状况,预测未来车流趋势等方面的应用。研究表明:现有模型对车辆属性与驾驶行为特性考虑较少,这会造成移动模型对车辆及驾驶人个体特征的忽略,从而影响模型的适应性;如何在特定的交通应用下,加强网络仿真器与车辆移动模型之间的交互,挖掘特色应用领域,实现人、车辆、交通环境之间的最佳匹配,将是车辆移动模型的未来发展方向。通过展望车辆移动模型的发展趋势,为该领域学者选择正确的架构模块和适当的模拟粒度提供参考。

关键词:交通工程;车联网;车辆移动模型;交通仿真器;运行轨迹

中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A

Review of vehicular mobility models for vehicular ad hoc network

TANG Lei, DUAN Zong-tao, KANG Jun, MA Jun-yan, LIU Ruo-chen

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The traffic conditions would change when vehicles move under vehicular ad hoc networks (VANET). Then change of network connection was triggered which led to the adjustment of moving mode for related vehicles. In order to better investigate the actual vehicle moving trace, key factors influencing vehicle moving mode including mobile constraints, traffic environment and time scale were analyzed from the perspectives of vehicle, traffic situation and driver to provide a reference for the establishment of the model. Then the research development, representative research achievement and related literatures of the mobility model were reviewed according to the mathematical theory method. Four types of models including traffic wave model, car following model, cellular automation and behavioral model were presented. In order to generate a model truly reflecting the real estate, actual data were adopted to verify and modify the

收稿日期:2016-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(61303041,61402050);陕西省留学人员科技活动项目(0308-100702);交通运输部应用基础研究项目(2014319812150);陕西省工业攻关项目(2014K05-28,2016GY-078);中央高校基本科研业务专项资金项目(310824153405,310824161012)

作者简介:唐 蕾(1983-),女,四川江油人,副教授,工学博士,E-mail:tanglei24@chd.edu.cn.

theoretical model. Based on the method, mobility model was divided in detail by the selected related data of users and vehicle track, and the application of the method to the aspects such as real-time situations of physical environment, vehicles interaction, behaviors of users, real-time situation reflection for traffic flow and prediction for future traffic flow trend. The results show that the capability and driving behavior characteristics are less considered which leads to the neglect of the influence of mobility model on driver's personal characteristics, therefore the applicability of the model will be affected. How to enhance the interaction between network emulator and vehicular mobility model, discover feature application field to achieve the optimal match among users, vehicle and traffic environment are the research focus for vehicular mobility model. The prediction of the development trend of the model provides a reference for scholars in choosing correct architecture module and appropriate simulation particle size. 2 tabs, 69 refs.

Key words: traffic engineering; VANET; vehicular mobility model; traffic simulator; trace

0 引言

城市化进程的加快导致了交通问题的日益突出。分散、海量的交通信息资源,低效、被动的信息化交管模式,都给城市交通的发展带来了巨大的压力和挑战。车联网的出现为解决城市交通问题提供了新思路。与传统交通信息化环境相比,车联网是移动自组织网络在道路上的应用,其特殊的道路交通环境,车载节点高速行驶与自由移动区域受限等特性,直接影响了传统的自组织网络协议的信息传输能力,进而限制了其在道路安全和交通管制领域的发展。

在车联网环境下,车辆的移动改变了交通状态,继而触发网络连通性的变化,引发相关车辆对自身移动方式的调整。例如,驾驶人突然调整了行驶路线,致使其参与车路通信区域的连通性受到破坏,无法建立通信路径来完成消息转发。故而车辆的移动行为受交通与网络状态启动,以改变情境状态为终止。这种融合信息物理世界的闭环控制过程贯穿于车辆移动行为的整个生存期,它包括:①根据受控情境的偏差,实施移动行为的反馈控制;②根据对影响受控情境因素所造成的扰动测量,实施移动行为的前馈控制。同时,搭建仿真测试环境以支持对网络协议的评估是很有必要的。良好的车辆移动模型能够真实地刻画交通参与者的各类行为,因此,针对特定的车辆移动方式,研究车辆行驶的多种状态,并建立模型进行准确刻画将为车载通信协议的开发以及个性化车载服务的推送提供有效支撑。

目前学术及工业界也着力推动对车辆移动模型的开发,例如基于交通模型 VISSIM 与 TRANSIMS 仿真器,ETH 提出的基于真实路线图的模型等,然而国内外关于车辆运行模式领域的综述性文

献还很少见^[1-9]。鉴于此,本文将该领域的研究进展进行归纳总结,探寻对构建车联网环境下车辆行驶方式的有效支持;分析车辆移动模式的关键组成元素;回顾现有的理论和构建方法,通过分析和归类,指出它们的特点和不足;分析车辆移动模型在研究与实践中面临的问题,并讨论未来研究的若干方向。

1 车辆移动模型的组成元素

从宏观角度看,车辆移动模型偏重于刻画交通运输的整体状态,例如,车辆密度、平均速度等。这类模型通常以流体动力学为理论支持,来建模分析车辆交通形态。而强调车辆个体的模型主要以对特定行为的细节表述为目标。结合 Harri 的工作^[1],在总结 2 类模型特征的基础上,本文首先从交通状态方面给出了定义车辆移动模式的关键元素,包括移动约束、交通环境及时间尺度。移动约束模块表征车辆可进行自由移动的相对程度,它通常选取路网结构、障碍物或者相邻车辆与行人的动作等。交通环境着重描述参与者的属性,包括车辆类型与相邻车辆的距离,以及参与者的行为,例如加速、刹车和超车。时间尺度是前 2 类模块在时间上的扩展,这样,移动模型便能够反映 1 d 内或 7 d 内的交通状态。

从交通参与者的角度,移动模型可包括以下元素:

(1) 路网拓扑。从静态的角度,路网应包含道路分支、连同结构,例如,交叉路口、多车道等,路侧建筑物。完整的路网拓扑还可增设个性交通元素,如红绿灯、公交停靠站、道路限速标志物。同时,路网还需要反映城市分区,如居民区、商业区、办公区等。此外,时间相关的交通管制会改变路网结构,例如,道路单行限制,因此路网拓扑需要支持动态变化。

(2)车辆属性。不同类型的车辆有其独特的驾驶轨迹与限制。例如,超过7座的车辆可在公交车道上行驶,轿车刹车滑行的路线较卡车短。移动模型需要充分描述车辆类型等固有属性。

(3)驾驶行为偏好。车辆的移动方式很大程度上受到驾驶人个性喜好影响。主要反映在车辆的原子动作和车辆的移动路线。同时,不同驾驶风格,对交通状态的处理,以及驾驶人在不同时刻的身体状态,都需要在移动模型中得以表征。

2 理论驱动的车辆移动模型

采用数据理论分析车辆移动模式,是目前较常用的方法。早期的随机路点移动模型(random waypoint mobility model, RWP)强调节点以预定速度向目标进行移动^[2]。通过不断地调整目的地,RWP模型能够构造节点持续移动的场景。尽管RWP模型已被广泛地应用在自组织网络仿真器,例如NS-2中,但由于其自身设计过于简单,难以捕捉车联网环境下的车路约束,从而无法刻画车辆的移动特征。在RWP模型的基础上,针对车联网环境中节点移动受到其附近某个路点的影响现象,Boudec等提出了RRWP(restricted random waypoint model)模型,它根据市区地图选取路点构建行驶区域,通过引入道路拥堵状态等参数来确定对下一个路点的选择,进而引导车辆移动的方向^[3]。道路随机路点模型(street random waypoint, STRAW)的提出考虑到车辆移动会受到建筑、街道或其他障碍物,例如邻近车辆的限制,它引入了车辆间的交互行为、交叉路口管制等信息,并使用车辆尾随模型来刻画驾驶模式,使得该模型能够较准确地分析城市环境下真实的交通拥堵情况^[4]。

为了更加贴近真实车联网环境下车辆移动方式,需要引入更多的元素构造复杂的移动模型。根据Fiore等工作,理论型模型还可划分为:交通波模型、车辆跟驰模型、元胞自动机以及行为模型这4类^[5]。近年来,以流体动力学来分析宏观交通流中车辆的移动,以及分析微观车辆序列的跟驰模型研究较多。

2.1 交通波模型

交通波模型从宏观的角度分析车辆速度、密度与车流状况。它强调以流体力学的观点来分析车流密度的变化,进而描述车流的拥挤到消散过程。LWR(Lighthill-Whitham-Richard)模型遵循车辆数目守恒的原理,以车速与车流密度之间的平衡关系,着重刻画发生在信号灯交叉路口处的交通流现象。

在LWR模型的基础上,研究人员开始考虑非稳态公路交通流情况,如走停、拥挤、堵塞现象等。在出现不稳定车流的情况下,车流速度会随密度上升单调下降,即车速与密度的平衡关系会被打破,因此,分别从密度与速度差异这2个方面,研究者提出了多种数学模型方案来模拟车辆行驶过程中出现的各类交通波状况。基于车辆跟驰理论,Payne模型一方面描述驾驶人对前方交通情况的反应,同时表明驾驶人能够通过调节车速达到平衡速度行驶的行为。然而,该模型会违背车流的各向异性,出现车辆倒退现象,这也促使了速度梯度模型的产生。在此类流体力学模型中,速度波动带来的交通扰动仅能向下游传播,符合真实交通环境下的车辆行驶特征。考虑到道路拓扑的网络情况,Coclite等在LWR模型的基础上,引入驾驶人偏好因素,着重刻画交叉路口交通流的前进方向^[6]。相似的,针对交通拥堵路口,Garavello等结合Aw-Raschle速度梯度模型,给出了车辆驶离路口的概率描述^[7]。为了分析交通流的状态变化过程,Blandin在Colombo提出的 2×2 阶段转移模型,即刻画在畅行与拥堵区域车流密度、道路流量与车速之间关系的基础上,将高速公路上取决于2类交通状态参数的拥堵现象转化为对一系列初值-边值问题的求解;同时,他提出的阶段模型能够覆盖整个畅行与拥堵区域,避免了Colombo模型中的区域空隙问题^[8]。

2.2 车辆跟驰模型

车辆跟驰理论综合驾驶人对前车运行的观测与调整过程,着重分析单车道、限制超车行驶状态下的交通流特性。根据驾驶人在跟驰驾驶过程中,调节车速的判断依据,研究人员提出了多种模型。一般可分为:①以本车和前车的速度差来调节车速;②以本车和前车的间距来调节车速;③以本车和前面多辆车的间距或速度差来调节车速^[9-10]。Pipes将跟驰驾驶行为看作是对车速刺激的延迟反应,建立基于加速度与速度差之间相关性的移动模型。然而由于其难以体现驾驶人在反应时间上的差异,Sultan等根据大量的车辆跟随时间序列,对驾驶人决策过程中的相关因素,比如相对车速、间距与绝对车速的影响程度进行统计分析,披露了驾驶人实施加速、减速动作的触发模型^[11]。文献[12]从避免碰撞的安全界限角度考虑,分别采用车辆间距、相对车速等参数建立了车辆碰撞时间与车头时距的模型,并分析了两者之间的关系,即在假定相对与绝对车速保持不变的条件下,当与前车时距越小时,碰撞时间快速发生变化的可能性

越大,还对 Sultan 给出的跟驰行为数据进行验证。Gipps 模型提供了一种简单实用的解决方案,能够更好地反映驾驶人在不能完全预判前车运动的情况下,仅通过保持合理的安全间距来避免碰撞的行为。杨达等根据 2 s 跟驰规则,以实时车距与预估最优车距的差值作为驾驶人接受的刺激,建立 ODM(optimal distance model)模型,并使用 NGSIM 真实数据与 Gipps 模型进行对比^[13]。尽管以 Gipps 为代表的跟驰模型能够较好地模拟真实交通中车辆列队行驶行为,但其往往忽略了影响驾驶人决策的其他交通信息,比如信号灯等,难以刻画拥堵造成的最大交通量场景。为了提高模型真实性,更好地区分驾驶人在不同状态下的驾驶行为,Leutzbach 根据 Evans 等基于知觉试验的结果,结合最小安全跟驰距离,作为驾驶人的感知阈值,建立心理跟驰模型。该模型认为采用人为因素确定的阈值是判断产生驾驶人刺激的直接依据。然而由于驾驶特性的多样化,难以通过试验对感知阈值进行校准,这使得心理跟驰模型的有效性难以被验证。尽管如此,心理跟驰模型仍具有真实可操作性^[14]。文献[15]从分析驾驶人心理期望与行为出发,对 Wiedemann 提出的 AP(action point)模型进行修正,针对候选阈值点与真实驾驶行为(油门、刹车)的不匹配问题,收集大量真实驾驶行为数据进行可用性验证,进而将传统的螺旋式跟驰模型抽象为线性模式,有助于设计具有高满意度的驾驶辅助系统^[16]。

2.3 元胞自动机交通流模型

元胞自动机 CA(cellular automaton)重点刻画时间与空间呈现离散状态的非线性系统,它能够较方便地模拟各类随机变化规则。由于交通元素从本质上来说是离散的,用元胞自动机理论来研究交通,就避免了离散-连续-离散的近似过程。同时,元胞自动机在交通流上的应用不仅能够从微观层面上重现每辆车的行驶特征,而且还可以发现宏观交通流中存在的交通阻塞、时停时走、交通滞后等众多非线性现象。作为典型的一维单车道交通 CA 模型,NaSch 模型将道路划分为等距离的元胞,且允许最大车速大于 1。它引入了慢化概率来体现由于驾驶人个人和其他外部原因对车速产生的不确定延迟影响。Luo 等将元胞自动机思想应用在一维单车道公交车调度场景中,建立乘客上下车模型,模拟公交车到站载客、卸客的过程;通过设定不同的调度时间与候车乘客数目,分析公交车均匀到站与集簇到站状态下,公交运营能力、运行速度与乘客等待时间的关系,从而披露在大规模候车场景下,增设往返车辆较

增加发车频率更能提高公交车的运营能力^[17]。以 NaSch 模型为基础,研究者通过对其四步更新规则进行改进,将车速作为随机加减速概率的依据,提出了各种各样的交通流模型^[18]。文献[19]根据三相交通流理论,着重分析同步流阶段下车辆的移动模式。为了避免发生撞车,该模型对 NaSch 进行修正,加入了前车速度与两车距离的影响,能够描述在实际交通中,驾驶人为实现舒适驾驶而实施受控加速与减速行为的现象^[20]。Vasic 等在建模分析一维车道中混合交通流现象,通过构造 6 种空间模型,覆盖单向道路融合分岔、交叉、急转弯等结构,将 NaSch 更新规则应用于模拟汽车与自行车的移动模式;同时,对随机慢化规则进行调整,引入自行车对后面汽车的速度影响,从而实现对混合交通情况下车道共享所带来的车辆“贴边”行驶状态的模拟^[21]。Knospe 在元胞自动机模型基础上,引入前车的刹车灯状态来模拟驾驶决策过程,建立了经典 BL(brake light)模型。Tian 等调整了刹车灯与慢启动规则,通过设置随机概率来模拟自由流相、同步流相与宽运动堵塞之间的转变过程,进而披露了交通中断的产生原因,即车辆保持高速行驶的交通自由流与由刹车形成的交通同步流之间的博弈过程^[22]。针对城市交通中的二维路网结构,BL 模型应用了简单的演化规则来展现复杂的交通动力学特性。在此基础上,通过引入真实环境中的交通因素,研究者提出了许多更加复杂的改进方法^[23-24]。Ding 等引入了天桥元素,并使用随机顺序更新规则对 BML(Biham-Middleton-Levine)模型进行扩展,能够模拟同一时刻不同车辆向北或向东的行驶行为^[25]。Meng 等通过观测新加坡高速公路与主干线区域内不同类型车辆的行驶状态数据,对传统具有相同长度元胞的交通流模型进行改进,提出 ICA(improved cellular automata)模型。该模型根据不同道路配置下的实时交通流现象,采用车辆数目、换道行为持续长度与终止区域长度来建立随机概率函数,进而提高对车辆前进与换道规划过程的仿真真实性^[26]。元胞自动机交通流模型主要关注车辆当前的速度状态,以及其与前车的关联,根据预设的约束条件,描述真实环境下的复杂交通流行为,例如不同车辆密度状态下出现不同的车流量,以及随时间演化导致堵塞带与自由流区共存现象等。它与跟驰模型的不同在于它可通过调整更新规则来描述现实交通中的车辆换道行为。

2.4 基于模糊规则的车辆行为模型

模糊逻辑理论在交通领域下的应用能够很好地描述驾驶人的逻辑心理状态与驾驶行为的不确定和不一致性。与传统基于数学描述的车辆移动模型不同,此类模型可通过将驾驶经验表达为知识,进而利用规则推理技术,拟合驾驶人的非线性驾驶特性。Chakroborty 等使用模糊集来描述传统跟驰模型中的相对速度、间距与加速度,并设置不同的控制规则对不同驾驶行为进行模拟。王文清等研究了基于模糊推理的车辆跟驰间距算法,模拟驾驶人对前车加速和减速行为的不确定反应,并使用推理技术控制跟车速度^[27]。钟益萍等同样将模糊推理理论应用于车辆跟驰模型研究上,不同的地方在于其根据驾驶行为特性,设定不同的期望车头时距并进行仿真比较^[28]。Naranjo 等采用模糊推理实现 2 次换道与车道保持操作,为自动超车驾驶提供支持^[29]。通过模拟驾驶人在实施换道过程中意图产生、车道选择及执行行为阶段,Naranjo 选取相对横向距离偏离与方向角度偏离量作为构造模糊规则的输入,建立控制器对其所属左、中、右模糊集合进行实时检测,从而操控车辆由当前车道变换到相邻车道。模糊逻辑理论也被广泛地应用于解决独特的交通问题,例如路口交通控制、交通溢流预防及交通事故检测等^[30-31]。为了实现对道路交通信号的有效控制,有必要获取准确的未来交通状态。考虑到基于海量动态交通数据的预测工作会造成系统时延,地理模糊多代理 GFMAS(geometric fuzzy multiagent system)系统在多代理信号控制系统的基础上,采用二型模糊集合刻画车流密度、等待车辆数目及绿灯时长的不确定性特征^[32]。通过构造 1 组模糊规则,该系统根据邻近路口交通状态,实施基于贪婪算法的信号调整策略,从而可有效缓解交通路口的拥堵现象。Zhang 等针对高速公路交通瓶颈及拥堵严重程度的问题,提出了层次化模糊规则 HFRBS(hierarchical fuzzy rule-based system)系统,该系统通过对输入变量进行挑选与层次化组织,建立多个原子模糊系统的序列组合,以有限的规则实现对特定地点拥堵情况的准确预测,同时降低规则推理所造成的复杂性,提高系统实时性^[33]。张立东针对交通溢流的识别与控制问题,提出了基于模糊推理的智能检测算法,该算法构造了模糊推理器,将车辆排队比率和路段车辆平均车速映射为规则的模糊形容词,并依据专家知识提炼合适的溢流判别规则,实时进行交通溢流的检测及严重程度的判断。为了实现溢流消

散,其设定了模糊规则,推理出基于交通流相位的车辆行驶方向,并在此基础上建立面向路口信号的协调控制系统^[34]。FLoMiTSiM(fuzzy logic based microscopic traffic simulation model)模型将模糊推理技术应用用于对多种经典车辆移动模型的集成控制中,覆盖了路径选取、车道确定、跟车、换道与避开障碍物(例如公交站、交通事故区域等)行驶、路口排队通过行为^[35]。目前移动模型较多采用完整的减速与换道操作来模拟车辆躲避障碍物行为,然而,FLoMiTSiM 将此看作是车辆占用部分邻近车道进行较慢速行驶的过程,对相对障碍物距离进行 5 级模糊化,最终推理判别实施加速动作的必要性,并使用真实城市路网数据验证了模型的正确性。

3 交通数据驱动的车辆移动模型

交通数据可分为用户相关的数据与车辆轨迹数据。前者偏重于采集并统计用户生活数据,例如聚会或午餐时间,以及旅途远近等,进而构建移动模型以覆盖城市交通中出现的随机或规律性车辆行驶特征。通过采用真实数据对理论模型进行验证并修正,可生成贴近真实状态的模型。另一方面,直接从真实数据中抽象车辆移动模型,可以大大节省模型构建的时间与精力成本。

3.1 用户数据主导的移动模型

为了对真实交通网络进行仿真,有必要刻画物理环境、车辆交互以及出行者习性对行驶特征的影响。例如用户会根据其生活规律进行交通活动,包括出行时间、兴趣地点等,从而造成宏观交通流与微观车辆跟车或换道操作的变化。

通过设计调查问卷,获取可靠数据源,进而分析用户物理与心理特征,是进行用户研究的一个重要手段。UDel 模型构造了基于 GIS 数据的城市路网。它提出的移动模型主张通过跟踪用户生活与其对交通状态的影响,挖掘工作、娱乐活动潜在下的规律。UDel 模型分别采用美国劳工统计局与城市规划单位提供的调查数据,模拟了用户在室内活动(例如,参加会议)与室外出行场景(例如,使用自驾、乘坐地铁和步行方式上班)中涉及的各种城市交通现象。特别的,该模型采用出行者轨迹数据建立高峰时期的宏观交通流模型,通过研究出行者之间的速度-距离关系及其超越慢速者倾向,捕捉交通激波与交通稀疏波的演化过程^[36]。

将用户出行轨迹与在途行为数据,包括前进、转弯与停顿,应用于构建移动模型,能够使其更加真实

地反映实际的交通状况。Zheng 等从美国家庭出行调查数据中提取用户职业、出行信息(例如方式、距离与目的)和停留时间分布,将用户社交行为与路网拓扑结合,并驱动产生交通环境下节点(用户或车辆)的移动轨迹^[37]。Aschenbruck 等根据 CRAW-DAD 等开源项目提供的真实轨迹数据,分析了用户移动模式的 3 类识别方式,即通过跟踪携带设备位置信息、设备与附近基站呼叫记录以及设备间通信历史,并探讨了其在验证理论移动模型过程中的重要性^[38]。目前研究学者围绕移动网络协议设计、人文复杂环境仿真等领域现实问题,在使用真实调查数据构造用户相关的移动模型方面取得了一定进展^[39]。尽管部分移动模型以城市交通为其应用场景^[40-41],然而其更关注不同出行方式用户的规律性生活与社交活动,通常使用简单的随机模式来仿真车辆的移动轨迹,这忽略了车辆的个性化行驶方式,难以精准刻画交通流现象。因此,使用出行者数据来抽取其对交通流的约束,建立 2 类移动模式的转换关系,是提高模型真实性的有效方法。

3.2 基于车辆轨迹的移动模型

尽管理论模型能够模拟出车辆轨迹点及行驶规律,然而由于其源自经验与数学知识,其仿真结果往往与现实交通网络环境或个体行为不符,这造成了此类模型难以有效支撑对交通组织与优化方案的设计与评价。因此采用真实的车辆轨迹数据进行模型验证,有助于提高理论模型的可用性。另一方面,使用真实的车辆轨迹数据来提炼行驶特征,进而构造移动模型,能够直接反映交通流的实时状况,并预测未来车流趋势以进行有效的行车诱导^[1]。

3.2.1 基于轨迹的模型构造

车辆轨迹体现了个体驾驶偏好,同时也从宏观上反映了交通行为。通过跟踪移动车辆,主要是公交与出租车的位置数据来直接获取行驶轨迹是较简单的方式,例如 Doering 等选取芝加哥市公交车行驶位置数据进行轨迹分析,并将其应用于 ONE 仿真器进行验证^[42]。通过采集驶过美国旧金山海湾地区的出租车 GPS 数据,Cabspotting 项目以可视化形式反映了实时动态的城市交通状态,包括高峰时期、假期与交通事件等,进而有助于提取并分析当地居民经济、社交与文化生活数据^[43-44]。为了准确模拟车辆间短距离通信机制,Zhu 等从上海市区出租车行驶位置、方位角与载客等数据中计算转发概率,挖掘车辆交互行为,包括交互频率与时间分布;采用随机游走方式构造车辆移动路线,并选取不同位置作为车辆的兴趣

点,仿真宏观高峰交通流量的生成^[45]。此外,在微观层面上,根据 GPS 数据,META (METropolitan TAxis) 移动模型被用于构造车辆的转弯、稳速行驶行为。尽管 META 模型能够产生较真实的轨迹数据,然而其仅限于恒定车辆数目场景^[46]。由于该轨迹样本类型单一,数量小,通常仅覆盖部分交通现场,它难以重现复杂异常的交通事件。

目前,将官方调研成果,例如地图及人口普查数据等与交通微观仿真工具进行整合来获取车辆行驶轨迹有助于宏观交通流的刻画^[47-48]。STRAW 模型以美国人口普查局提供的整合地理编码数据为依据,将路网拓扑图与车辆跟驰行为结合,构造基于真实路段信息,包括限速、类型及路侧设施的车辆移动模型^[4,49]。VehILux 模型着重从宏观角度刻画卢森堡城市交通流,它一方面利用地面部署的车检设备获取不同时间段下具有不同车辆类型的交通量,同时使用真实地图数据再现详细的路网拓扑与各类地域面积和类型信息,例如商业、工厂及居民区。为了模拟在高峰时期不同流向的交通流运行轨迹,VehILux 模型根据地域特征提炼其关注程度,确定车辆行驶终点的被选概率,并生成相应的点到点路径仿真结果^[50]。通过对卢森堡市内显著地域进行层次化解构与重组,Nielsen 等从时间域、地域覆盖方面修正了 VehiLux 模型,提高了模型的仿真准确度^[51]。基于瑞士区域地图,MMTS 模型能够准确模拟不同个体生活方式对公共交通,特别是道路拥堵的影响,进而有效评估城市规划及其对经济的制约。利用 MMTS 模型生成的 1 d 内车辆移动轨迹,Naumov 建立了车联网环境下的路由发现模型,在保证实时通信的同时提高了车间信息传输速度^[52]。

3.2.2 基于轨迹的模型验证

Rao 等提出了多阶段模型验证框架,分别从对场景逻辑的定性重现与车辆行为的定量测试方面给出方法指导^[53]。Brackstone 等收集 3 类跟驰驾驶态度影响下的速度与车头时距变化数据,通过结合模型验证框架,对 FLOWSIM 模型的输出轨迹进行真实性评价^[54]。

通过将模型生成轨迹与真实交通世界数据进行误差比较,是目前模型验证的主要方法。文献^[55]首次使用真实用户在城市内行进记录对经典 RWP 模型表现出的目的地点与驻留时间分布进行调整。通过在微观与宏观层面上比对新加坡宏茂桥第 3 大街数据,Meng 等对 ICA 模型反映的车辆速度、位置以及流量进行相似度评估,引入计量经济学中 4 类误差

指标,分别对行驶于 2 个车道上的轿车与卡车的横纵向轨迹与速度进行测试。此外,ICA 模型对速度与流量关系的刻画能力也得以验证^[26]。杜恰曼等使用交通快速路网结构、交通量等实测数据对 VISSIM 模型进行校验,以支持其对实施 BRT 方案的可行性评估工作^[56]。尽管使用真实轨迹数据同模型仿真结果进行校验能够说明模型的准确度,然而由于数据集存在样本精度不一致以及处理方式多样化的问题,其难以形成统一标准,从而造成此类模型缺乏普适性。针对此现象,选取主流交通仿真系统(如 CORSIM, VIS-SIM)与开源移动模型(如 SUMO, SHIFT)作为基准,通过设置相同的仿真环境实施对比验证,有助于评估模型的真实性^[38,57]。VANETMobiSim 以 TSIS-CORSIM 作为验证其轨迹真实性的基准,通过在 CORSIM 中配置相同的换道与路口操作参数,比较两者在停车站、信号灯与多条车道场景下出现的车辆密度以及由周期扰动造成的交通激波相似性。该方法采取了规避轨迹数据采集问题的策略,其真实性受到基准系统性能的限制,特别是目前基准系统准确度的验证工作还在持续进行中^[58-60]。

4 讨 论

车辆的移动模式会影响车联网环境下的信息分发、通信网络以及协作式高效应用的接入机制,进而限制车联网的性能,因此,有必要构造真实车辆移动模型,来辅助研究人员根据其应用需求选择正确的架构模块和适当的模拟粒度^[61]。一方面,有助于分析动态实时交通状态在时空维度上对车载网络技术的影响;另一方面,可明确车联网环境下存在于车辆和路侧基础设施之间“无所不在”的数据传输。

4.1 车辆移动模型的选择

第 2 节提出的组成元素为移动模型的设计提供了指导。根据模型仿真结果,包含元素类型越多,模拟粒度越细,模型更符合真实交通环境下的车辆移动模式^[62]。如何选择合适的车辆移动模型需要综合考虑各种因素,特别是组成元素对模型的用途、准确度和计算时间的影响。简单的模型,元素信息处理与参数估计较容易,但精度可能不高;复杂的模型,会造成由于要进行繁复的参数估算而延长模型响应时间的问题。

路网拓扑是约束车辆移动方式的重要因素,其中路段长度、路口个数以及建筑物密度会从宏观上影响交通流,从微观上限制车辆速度。出行者旅途的起点和终点往往被嵌入在路网拓扑中,用以从宏

观上反映交通流的时间维度特性。利用拓扑中定义的各类障碍,交叉路口管理仿真策略能够限制车辆的停车或让路标志,以及信号灯的行进过程。该过程又受到车辆属性与驾驶偏好的限制,这体现在不同车辆类型的通过方式与速度要求对时间依赖交通流的影响,及其减速、加速操作能力与驾驶舒适阈值对车辆跟驰及换道行为的作用。下页表 1 为根据上述元素对主流车辆移动模型分类。从表 1 中可以看出,路网拓扑已成为车辆移动模型的必要元素,尽管部分模型仅是在模型验证阶段引入真实地图数据,如 ICA 模型,模型对车辆属性与驾驶行为特性考虑较少,这会造成移动模型对车辆及驾驶人个体特征的忽略,从而影响模型的适应性。如何更好地刻画人、车、路之间的交互,贴合人的身体结构和生理心理特点,这可能是车辆移动模型的未来发展方向。

以上分类方法的目标在于更真实地表示车辆的运动,而特定应用往往对模型有不同的精确级别需求,例如,路径诱导应用可能只需要宏观车流模型,高实时约束的安全超车应用需要获取微观车流模型,因此,有必要在特定应用下确定真实车辆移动模型^[63]。下页表 2 从安全、高效、便捷与环保方面提取车联网应用的需求,为选择合适的车辆移动模型提供指导^[64]。

4.2 车辆移动模型的融合

车联网所固有的复杂异构网络与庞大路网拓扑,使得无线网络与车辆移动性之间存在相互依存的关系。一方面,车辆移动造成区域内通信节点稀疏,城区内建筑物造成传输信号衰减,这都可能导致车联网大多数时候呈现不能连通的状态。尽管如此,利用 2 个移动车辆进入相互通信范围进行交换数据的机会来实施逐跳转发机制便可以实现车车或车路通信。在这个过程中车辆位置和运动方向会对网络拓扑连通率及上层路由协议产生影响,而这直接影响网络性能,如网络能耗、容量等。Naumov 等采用移动模型给出的轨迹信息对车联网环境下 AODV 与 GPSR 协议进行性能评价,指出不同的移动模型会明显地影响协议的性能,包括数据包传输速度与延迟^[52,65]。通过在 VISSIM 中嵌入通信模块,将 VCOM 方法引入交通流密度作为网络分组接收机制的指标,可支持大规模的 VANET 可靠仿真^[66]。

另一方面,车辆移动轨迹的建模效果主要依赖于需求信息的可用性和实时性。根据网络通信协议

表 1 车辆移动模型的元素及分类
Tab. 1 Components and classification of vehicular mobility models

移动模型	模拟层次	基本元素						
		路网拓扑				车辆属性		驾驶行为
		地图类型	出行 S-D	路径规划	车速设置	车辆类型	交管控制	
RRWP ^[3]	宏观	随机	随机 S-D 点	RWP, RWalk	区域相关	无	无	无
STRAW ^[4]	微观	TIGER	随机 S-D 点	RWalk, Dijkstra 算法	路段相关	无	信号灯	
FMVehILux ^[50]	宏观	OpenStreetMap	AP	Dijkstra 算法	速度受限	无	无	偏好路径
FLoMiTSiM ^[35]	微观	日本岐阜地图	随机 S-D 点	基于旅行时间	常量	汽车、重型卡车、公交车	公交优先、躲避障碍	CFM, LCM
UDel Models ^[36]	宏观	ESRI	随机 S-D 点	RWalk	速度受限	无	信号灯, 随机转弯	CFM
META ^[46]	宏观/微观	中国上海地图	随机、AP 型 S-D 点	RWalk	常量	出租车	信号灯, 基于路线转弯	无
VanetMobiSim ^[58]	微观	TIGER, GDF	随机、AP 型 S-D 点	RWP, Dijkstra 算法	区域相关	无	信号灯, 基于路线转弯	IDM
SUMO ^[57]	微观	TIGER	随机、AP 型 S-D 点	RWalk, Dijkstra 算法	速度受限	汽车、公交车、非机动车	停车标志, 随机转弯	CFM
ICA ^[26]	微观/宏观	新加坡施工作业区	随机 S 点		速度受限	汽车、重型卡车	无	无

注: S-D 为源点-目的点; AP 为兴趣点; RWP 为随机路点模型; RWalk 为随机游走模型; CFM 为跟驰模型; LCM 为换道模型; IDM 为智能驾驶模型。

表 2 车辆移动模型支持的应用
Tab. 2 Applications supported by vehicular mobility models

应用类型	支持应用场景	移动模型	
安全性	路口安全	管制路口碰撞告警 STRAW ^[4]	
	增强的交通标志	交通标志提示 VANETMobiSim ^[58]	
	行车安全辅助	前向碰撞告警	i-SIM ^[65]
		电子刹车灯	Knorr 等 ^[20]
		换道告警	ICA ^[26]
高效性	交通规划与决策	交通枢纽规划 Garavello 等 ^[7] 、UDel Models ^[36]	
		道路重新规划与调整 FLoMiTSiM ^[35]	
		交通信号配时优化 GFMAS ^[32]	
	路网运行管理	路网运行分析预测 Coclite 等 ^[6]	
		路网基础状态信息发布 VehILux ^[50]	
专用车辆运营管理	商业车队运营监管 META ^[46]		
便捷性	自驾出行	路口拥堵提醒 李启刚 ^[24]	
	公共交通出行	公交实时信息查询 邝先验等 ^[30]	
		公交换乘方案实时规划 Luo 等 ^[17]	
环保性	面向车辆	减少尾气排放 Mulder 等 ^[12]	

收到的动态交通事件可改变车辆移动模型,例如,监视车辆与路侧建筑物的距离阈值事件来指示车辆超车动作。然而,在此过程中,网络通信延迟和传输信息出错都会导致模型的真实性与有效性降低^[67]。TraNS 使用 NS-2 发送信息至 SUMO 来影响车辆行为,如通过周期性广播事故信息,使得邻居车辆减速行驶。

综上,根据交通应用需求,实现网络仿真器与车辆移动模型之间的交互,已成为 VANET 领域关注的重点。Jerome 等人研究了 3 类移动性与网络仿真器交互方法,并指出使用接口来实现双向交互关系能够支持多种仿真器,由此该方式将成为该领域的主流研究方向。由于车联网由 3 类网络通信方式组成,即车内、车际与车网通信,车辆移动变化所依

赖的控制事件来源于不同通信网络下的各类信息源,然而目前多数融合式移动模型仅提供全网范围内的通信解决方案。此外,为了提高模型仿真的精度,有必要对其组成元素进行准确、全面地描述,因此引入相关的成熟模型,如 GOMS 来刻画驾驶人对刺激的反应过程,能够利用专家知识对其进行建模指导,进而提高模型真实性。

4.3 车辆移动模型的应用

车辆移动模型的主要研究目标在于评估移动性如何影响网络和应用协议。由于该类运动模式具有高移动性和自由度受限的特点,这都使得传统自组织网络协议的适用性降低,因此,评估车联网协议的关键在于使用的移动模型要尽可能反映出实际交通中车辆的行为模式,这样才能保证该协议能够改变交通状态,从而达到行车安全或旅途最优化的目标^[68]。Maldonado 等在不同的交通场景下选取 4 类移动模型对配置不同网络标准的 AODV、DSDV 与 CBRP 协议进行多指标的评价^[69]。

高精度车辆移动模型能够产生较真实的运行轨迹数据集,这也为构造及验证车联网应用提供数据支撑。先进驾驶辅助系统往往需要以最接近驾驶人行为的方式执行相关动作,比如,自动巡航控制等。Bifulco 等使用车辆跟驰模型,通过监控驾驶人使用刹车与油门的次数,重新配置不同的车间距数据,从而使得该系统能够“以人为本”地执行控制操作^[15]。基于德国科隆城市道路拓扑图,Fiore 使用 SUMO 生成相关车辆移动轨迹集,来研究结合车车与车路通信环境中 3 类下行数据协作式传输过程中的调度问题,即确定以特定邻近车辆为数据接收者传输可用内容的执行时间^[65]。为了验证应用软件的可信性,一种可行的方式便是对软件失效行为进行设计干预与运行监控。在车联网环境下,软件被要求对复杂、动态的交通情境信息做出及时、有效地响应,环境的不确定性、请求服务的随机性会引起不可预知的软件行为,增加软件的失效概率,为传统交通软件构造方法带来了较大的挑战。然而,车辆移动轨迹能够反映真实车、路、人及相关情境约束,尽可能地降低车联网环境的不确定性,从而使得车联网软件的设计更加合理、完备以及高效。车辆移动模式在车联网的很多领域存在巨大的潜力,并对实现未来智慧交通具有重大影响。

5 结 语

(1)车联网主张让微小系统形成的自组织网络

围绕着交通参与者运转,即人、车和道路设施在智能交通空间中可以自然地、自发地“交互”。车辆的移动方式会影响其他交通参与者的感知与决策能力,从而改变车载通信网络性能与交通应用的执行方式。

(2)对车辆移动模型目前的研究进展,包括模型组成与 2 类主流模型发展进行了综述,还讨论了一些开放性问题,如模型的选择粒度、模型与交通仿真器的结合以及未来的应用领域等。

(3)当交通信息不完整,例如前方视野缺失,使用多源异构数据进行有效融合并挖掘模拟需求,进而帮助交通与信息领域学者选择正确的架构模块和适当的模拟粒度,将成为车辆移动模型进入新发展阶段的开始。

参考文献:

References:

- [1] HARRI J, FILALI F, BONNET C. Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(4): 19-41.
- [2] GORGORIN C, GRADINESCU V, DIACONESCU R, et al. An integrated vehicular and network simulator for vehicular ad-hoc networks [C]//ESM. Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference. Bonn: ESM, 2006: 1-8.
- [3] BOUDEDEC J Y L, VOJNOVIC M. The random trip model: stability, stationary regime, and perfect simulation [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2006, 14(6): 1153-1166.
- [4] CHOFFNES D R, BUSTAMANTE F E. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks [C]//ACM. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. New York: ACM, 2005: 69-78.
- [5] FIORE M, HARRI J, FILALI F, et al. Vehicular mobility simulation for VANETs [C]//IEEE. Proceedings of the 40th Annual Simulation Symposium. Washington DC: IEEE, 2007: 301-309.
- [6] COCLITE G M, GARAVELLO M. Vanishing viscosity for traffic on networks [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2010, 42(4): 1761-1783.
- [7] GARAVELLO M, PICCLI B. Traffic flow on a road network using the Aw-Rascle model [J]. Communications in Partial Differential Equations, 2006, 31(2): 243-275.
- [8] COLOMBO R M, MARCELLINI F, RASCLE M,

- et al. A 2-phase traffic model based on a speed bound [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2010, 70(7/8):2652-2666.
- [9] 李力, 姜税, 贾斌, 等. 现代交通流理论与应用(卷D-高速公路交通流[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
LI Li, JIANG Shui, JIA Bin, et al. Theory and application of modern traffic flow (volume D): highway traffic flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [10] BIFULCO G N, PARIOTA L, SIMONELLI F, et al. Real-time smoothing of car-following data through sensor-fusion techniques[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, 20(6):524-535.
- [11] SULTAN B, BRACKSTONE M, MCDONALD M. Drivers' use of deceleration and acceleration information in car-following process[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2004(1883):31-39.
- [12] MULDER M, ABBINK D A, VAN PAASSEN M M, et al. Design of a haptic gas pedal for active car-following support[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(1):268-279.
- [13] 杨达, 蒲云, 杨飞, 等. 基于最优间距的车辆跟驰模型及其特性[J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(5):888-894.
YANG Da, PU Yun, YANG Fei, et al. Car-following model based on optimal distance and its characteristics analysis[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(5):888-894. (in Chinese)
- [14] HOOGENDOORN S, HOOGENDOORN R G, DAAMEN W. Wiedemann revisited: new trajectory filtering technique and its implications for car-following modeling[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2011(2260):152-162.
- [15] BIFULCO G N, PARIOTA L, BRACKSTONE M, et al. Driving behaviour models enabling the simulation of advanced driving assistance systems: revisiting the action point paradigm [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 36(36):352-366.
- [16] BIFULCO G N, PARIOTA L, SIMONELLI F, et al. Development and testing of a fully adaptive cruise control system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 29(29):156-170.
- [17] LUO Y J, LI X G, WANG C, et al. A realistic cellular automata model of bus route system based on open boundary[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 25(8):202-213.
- [18] ROSENBLUETH D A, GERSHENSON C. A model of city traffic based on elementary cellular automata [J]. *Complex Systems*, 2011, 19(4):305-322.
- [19] CHMURA T, HERZ B, KNORR F, et al. A simple stochastic cellular automaton for synchronized traffic flow[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 405:332-337.
- [20] KNORR F, SCHRECKENBERG M. The comfortable driving model revisited: traffic phases and phase transitions[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2013, 1(7):1-20.
- [21] VASIC J, RUSKIN H J. Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, 391(8):2720-2729.
- [22] TIAN J F, JIA N, ZHU N, et al. Brake light cellular automaton model with advanced randomization for traffic breakdown[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 44(4):282-298.
- [23] SUN D, JIANG R, WANG B H. Timing of traffic lights and phase separation in two-dimensional traffic flow[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(2):301-304.
- [24] 李启朗. 路口瓶颈处交通状态的相图及元胞自动机模型研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
LI Qi-lang. Research on phase diagrams of traffic states in the intersection traffic bottleneck and cellular automata traffic models[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [25] DING Z J, JIANG Z Y, WANG B H, et al. Effect of overpasses in the Biham-Middleton-Levine traffic flow model with random and parallel update rule[J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2013, 88(2):2589-2593.
- [26] MENG Q, WENG J X. An improved cellular automata model for heterogeneous work zone traffic[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(6):1263-1275.
- [27] 王文清, 王武宏, 钟永刚, 等. 基于模糊推理的跟驰安全距离控制算法及实现[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(1):72-75.
WANG Wen-qing, WANG Wu-hong, ZHONG Yong-gang, et al. Car-following safe distance control algorithm and implementation based on fuzzy inference [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(1):72-75. (in Chinese)
- [28] 钟益萍, 张存保, 石永辉. 考虑驾驶员行为特性的模糊推理跟驰模型改进研究[J]. *交通信息与安全*, 2010,

- 28(3):17-20,42.
- ZHONG Yi-ping, ZHANG Cun-bao, SHI Yong-hui. Improving car-following model by considering driver's behaviors with fuzzy inference[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2010, 28(3):17-20, 42. (in Chinese)
- [29] NARANJO J E, GONZALEZ C, GARCIA R, et al. Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(3):438-450.
- [30] 邝先验, 许伦辉, 黄艳国. 交通信号公交优先控制策略及智能控制方法[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10):1284-1290.
- KUANG Xian-yan, XU Lun-hui, HUANG Yan-guo. Traffic signal bus-priority control strategy and intelligent control method[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10):1284-1290. (in Chinese)
- [31] HAWAS Y E. A fuzzy-based system for incident detection in urban street networks[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2007, 15(2):69-95.
- [32] GOKULAN B P, SRINIVASAN D. Distributed geometric fuzzy multiagent urban traffic signal control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3):714-727.
- [33] ZHANG X, ONIEVA E, PERALLOS A, et al. Hierarchical fuzzy rule-based system optimized with genetic algorithms for short term traffic congestion prediction[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 43(2):127-142.
- [34] 张立东. 城市交通溢流智能协调控制算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- ZHANG Li-dong. Urban traffic spillover intelligent coordinated control algorithm study[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [35] ERRAMPALLI M, OKUSHIMA M, AKIYAMA T. Development of the microscopic traffic simulation model with the fuzzy logic technique[J]. *Simulation*, 2013, 89(1):87-101.
- [36] BOHACEK V S, KIM J. UDel Models For Simulation of Urban Mobile Wireless Networks[EB/OL]. (2014-03-01) [2015-04-01]. <http://udelmodels.eecis.udel.edu>.
- [37] ZHENG Q W, HONG X Y, LIU J. An agenda based mobility model[C]//IEEE. Proceedings of the 39th annual Simulation Symposium. Washington DC: IEEE, 2006:188-195.
- [38] ASCHENBRUCK N, MUNJAL A, CAMP T. Trace-based mobility modeling for multi-hop wireless networks[J]. *Computer Communications*, 2011, 34(6):704-714.
- [39] MUNJAL A, CAMP T, ASCHENBRUCK N. Changing trends in modeling mobility[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012, 2012(2):1-16.
- [40] BALMER M. Travel demand modeling for multi-agent transport simulations; algorithms and systems[D]. Zurich: ETH Zurich, 2007.
- [41] LEE K, HONG S, KIMS J, et al. Slaw: A new mobility model for human walks[C]//IEEE. INFOCOM 2009. Rio de Janeiro. IEEE, 2009:855-863.
- [42] DOERING M, POGEL T, POTTNER W B, et al. A new mobility trace for realistic large-scale simulation of bus-based DTNs[C]//ACM. Proceedings of the 5th ACM Workshop on Challenged Networks. New York: ACM, 2010:71-74.
- [43] The cabspotting project [EB/OL]. (2014-01-23) [2015-04-01]. <http://cabspotting.org>.
- [44] LIU X, LI Z, LI W Z, et al. Exploring social properties in vehicular ad hoc networks[C]//ACM. Proceedings of the 4th Asia-Pacific Symposium on Internetware. New York: ACM, 2012:1-7.
- [45] ZHU H Z, LI M L, FU L Y, et al. Impact of traffic influxes: revealing exponential intercontact time in urban VANETs[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(8):1258-1266.
- [46] HUANG H Y, ZHU Y M, LI X, et al. Meta: a mobility model of metropolitan taxis extracted from GPS traces[C]//IEEE. Wireless Communications and Networking Conference. Los Alamitos: IEEE, 2010:1-6.
- [47] GRZYBEK A, DANOY G, BOUVRY P. Generation of realistic traces for vehicular mobility simulations[C]//ACM. Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications. New York: ACM, 2012:131-138.
- [48] UPPOOR S, FIORE M. Large-scale urban vehicular mobility for networking research[C]//IEEE. Vehicular Networking Conference. Amsterdam: IEEE, 2011:62-69.
- [49] SONG W B, HAITHCOAT T L, KELLER J M. A snake-based approach for TIGER road data conflation[J]. *Cartography & Geographic Information Science*, 2006, 33(4):287-298.
- [50] PIGNEY, DANOY G, BOUVRY P. A vehicular mobility model based on real traffic counting data[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [51] NIELSEN S S, DANOY G, BOUVRY P. Vehicular

- mobility model optimization using cooperative coevolutionary genetic algorithms[C]//ACM. Proceedings of the 15th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York; ACM, 2013; 1349-1356.
- [52] NAUMOV V, BAUMANN R, GROSS T. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces[C]//ACM. Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York; ACM, 2006; 108-119.
- [53] RAO L, OWEN L. Validation of high-fidelity traffic simulation models[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1710(1): 69-78.
- [54] WU J, BRACKSTONE M, MCDONALD M. The validation of a microscopic simulation model; a methodological case study[J]. Transportation Research Part C; Emerging Technologies, 2003, 11(6): 463-479.
- [55] ROJAS A, BRANCH P, ARMITAGE G J. Experimental validation of the random waypoint mobility model through a real world mobility trace for large geographical areas[C]//ACM. Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York; ACM, 2005; 174-177.
- [56] 杜怡曼, 吴建平, 贾宇涵, 等. 基于微观交通仿真的快速公交专用道效益评估[J]. 武汉大学学报:工学版, 2014, 47(1): 85-89.
DU Yi-man, WU Jian-ping, JIA Yu-han, et al. Evaluation of dedicated bus lanes based on microscopic traffic simulation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(1): 85-89. (in Chinese)
- [57] KRAJZEWICZ D, HERTKORN G, ROSSEL C, et al. An example of microscopic car models validation using the open source traffic simulation SUMO[C]//SCS European Publishing House. Proceedings of Simulation in Industry, 14th European Simulation Symposium. Dresden; SCS European Publishing House, 2002; 318-322.
- [58] HARRI J, FIORE M, FILALI F, et al. Vehicular mobility simulation with VanetMobiSim[J]. Simulation, 2011, 87(4): 275-300.
- [59] OTKOVIC I I, TOLLAZZI T, SRAML M. Calibration of microsimulation traffic model using neural network approach [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(15): 5965-5974.
- [60] SCHROEDER B J, KATAYOUN S, JOSEPH H. Calibration and field validation of four double-crossover diamond interchanges in VISSIM microsimulation[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2014(2404): 49-58.
- [61] HARTENSTEIN H, LABERTEAUX K P. VANET; vehicular applications and inter-networking technologies[M]. Weinheim: John Wiley & Sons, 2009.
- [62] SHREE D, SINGH D. Performance evaluation of realistic mobility models using road side units[J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 80(15): 29-32.
- [63] TAYAL S, TRIPATHY M R. VANET-challenges in selection of vehicular mobility model[C]//IEEE. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT). Washington DC; IEEE, 2012; 231-235.
- [64] 赵祥模, 惠飞, 史昕, 等. 泛在交通信息服务系统的概念、架构与关键技术[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 105-115.
ZHAO Xiang-mo, HUI Fei, SHI Xin, et al. Concept, architecture and challenging technologies of ubiquitous traffic information service system[J]. Journal of traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 105-115. (in Chinese)
- [65] FIORE M. Vehicular networking: from fundamental properties to network solutions[D]. Lyon: Universite Claude Bernard Lyon 1, 2014.
- [66] KILLAT M, HARTENSTEIN H. An empirical model for probability of packet reception in vehicular ad hoc networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009(1): 1-12.
- [67] KILLAT M, SCHMIDT-EISENLOHR F, KOSCH G T, et al. On the accuracy of coupling a mobility and a communication simulator for VANETs [C]//WIT. Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT). Hamburg; WIT, 2007; 137-142.
- [68] 哈尔腾泰因 H, 拉贝尔托尼斯 K P. VANET; 车联网技术及应用[M]孙利民, 何云华, 周新运, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2013.
HARTENSTEIN H, LABERTEAUX K P. VANET; vehicular applications and inter-networking technologies[M]. Translated by SUN Li-min, HE Yun-hua, ZHOU Xin-yun, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [69] MALDOMADO V, QUIRIONES M, ROHODEN K, et al. Comparison routing protocols and mobility models for vehicular ad-hoc networks using real maps[J]. International Journal of Computer Application, 2012, 60(19): 8-15.