

DOI:10.11918/202202018

车辆换道行为风险评价方法研究进展

程国柱,王婉琦,王连震,张舒茜

(东北林业大学 交通学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 驾驶人的换道行为通常会对交通安全产生一定的负面影响,为了保证车辆换道安全,防止交通事故的发生,应该对车辆换道行为风险情况进行识别和评价。通过对国内外相关文献的系统研究,从文献统计分析、关键词可视化及数据集分析3个方面对车辆换道行为进行了综述,总结了车辆换道关键影响因素的研究热点;并通过回顾国内外车辆换道行为风险评价方法,总结了当前研究应用较为普遍的基于交通冲突的风险评价方法以及基于驾驶意图的风险评价方法;最后讨论了当前车辆换道行为风险评价研究存在的问题以及未来发展趋势。研究表明:车辆换道行为研究应结合交通环境特性,研究更具有普适性和可移植性的车辆换道模型是未来有待突破的研究方向;此外,在未来车辆换道行为风险评价研究中驾驶人驾驶意图、换道决策调整等变化是一个重要研究方向;基于当前车联网技术的发展,未来研究应考虑更广泛的影响因素,利用更加广泛的交通环境信息,考虑异构交通流环境对车辆换道行为风险的影响,进行更加综合的风险评价方法研究。研究人员有机会通过汽车远程信息,可以更好地理解驾驶行为和交通事故的成因,为车辆换道风险的综合评价方法研究带来了新的机遇和挑战。

关键词: 交通工程;车辆换道行为;风险评价;交通冲突;驾驶意图

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)03-0139-12

Research progress on risk assessment of vehicle lane-changing behavior

CHENG Guozhu, WANG Wanqi, WANG Lianzhen, ZHANG Shuqian

(School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The lane-changing behavior of drivers usually has a negative impact on traffic safety. In order to ensure the safety of vehicle lane-changing and prevent traffic accidents, the risk situation of vehicle lane-changing behavior should be identified. Through the systematic study of a large number of relevant publications at home and abroad, a review of vehicle lane-changing behavior was conducted from three aspects: statistical analysis of the literature, keyword visualization, and data set analysis. The research hotspots of key influencing factors of vehicle lane-changing were summarized. By reviewing the risk assessment methods of vehicle lane-changing behavior at home and abroad, the common risk assessment methods based on traffic conflict and driving intention were summarized and analyzed. Finally, the current issues and potential future directions for the risk assessment of lane-changing behavior were discussed. The existing research indicates that the research on lane-changing behavior should be combined with the characteristics of the traffic environment, and future research should focus on lane-changing models that are more universal and portable. In addition, the changes in drivers' driving intention and lane change decision adjustment are important research directions for the future risk assessment of vehicle lane-changing behavior. Based on the development of the Internet of Vehicles, future research should consider a wider range of influencing factors, use more traffic environment data, consider the impact of heterogeneous traffic flow environments on the risk of vehicle lane-changing behavior, and conduct more in-depth risk evaluation method studies. Researchers can use vehicle telematics to better understand driving behaviors and factors leading to traffic accidents, which opens up new opportunities and challenges for the study of comprehensive evaluation methods for vehicle lane change risk evaluation.

Keywords: traffic engineering; lane-changing behavior; risk assessment; traffic conflict; driving intention

近年来,随着汽车保有量的逐年提高,交通压力与日俱增,交通安全问题也在不断凸显出来。驾驶人作为交通环境中随机性最强的因素,在驾驶过程

中由于自身性格和驾驶习惯等原因,部分驾驶人会采取不安全的车辆换道行为,这种行为已经成为引发交通事故的重要原因。车辆换道行为对交通瓶颈

收稿日期: 2022-02-10; 录用日期: 2022-06-10; 网络首发日期: 2023-03-07

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230307.1111.002.html>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2020G002); 中央高校基本科研业务费专项资金(2572021AW35)

作者简介: 程国柱(1977—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王连震,rock510@163.com

的形成、通行能力下降等多方面的显著影响也得到越来越广泛的关注。

依据换道行为发生的诱因,可将车辆换道行为分为自由换道和强制换道,然而通过车辆换道行为获得预期的驾驶条件或者达到计划的目的地往往是以减慢附近道路使用者的速度和扰乱周围交通为代价的。例如,美国在 1999 年有约 539 000 起车辆变道事故^[1];2018 年,澳大利亚新南威尔士州分别报告了 2 530 起和 827 起追尾和侧滑碰撞;道路交通事故统计数据显示,中国 85% 的交通事故都是由驾驶人引起的,而危险的换道行为是导致交通事故的一个直接影响因素,危险的换道行为与交通事故的发生具有直接关系,由于人类的思维是非理性的^[2],难以建模预测,往往在相同的驾驶场景下,不同驾驶人可能会有不同的应对方法^[3],故对驾驶人换道行为风险评估的研究显得尤为重要。此外,交通拥堵状况也与车辆换道行为相关^[4],从而导致道路容量下降^[5-6],并具有环境影响^[7]。

以往研究人员针对换道决策模型研究较多,本文总结分析了车辆换道行为风险的关键影响因素研究,并对现有模型进行了回顾和比较,以便更好地了解目前的换道行为风险评价研究,并且重点对交通冲突严重程度判别指标以及驾驶意图识别进行了回顾和比较,进一步了解目前针对车辆换道的风险评价方法。在回顾和比较的基础上,提出并讨论了提高换道行为风险评价准确性和可靠性的研究方向。

1 车辆换道行为综述

本文采用 Webster and Watson(2002)^[8]的结构化检索方法收集文献。首先,在车辆换道行为研究领域,选择合适的期刊。然后通过引用相关文献进行逆向检索。最后,通过前向搜索,明确有价值的文章的贡献。所提取的参考资料来自 Web of Science、Google Scholar、Elsevier、EI 及中国知网 5 种数据库,文献内容涵盖交通工程、交通安全、仿真分析等领域。另外,与车辆换道相关的专利和商用产品不在本文的研究范围之内。采用韦伯斯特和沃森(2002)的方法,共识别出 1991—2021 年的 466 篇文献分别进行文献统计分析、关键词可视化分析及数据集分析。并以能够体现出该领域的研究发展历程且较为全面地体现当前研究现状及研究热点为原则,从中选择 81 篇代表性著作对车辆换道行为风险评价进行综述。

1.1 文献统计分析

早在 20 世纪 60 年代,已有研究人员对驾驶人换道行为作出研究,自 1991 年后,有关驾驶人换道

行为风险评估的研究逐渐受到研究人员的关注。然而,随着近年来数据采集及分析提取技术的不断发展,数据获取的难度逐渐降低,因此研究人员可基于更多影响因素对车辆换道行为进行分析研究,并取得了诸多研究成果。1991—2021 年间所选文献出版数量如图 1 所示,可以看出在 1991—2007 年期间,文献出版数量一直保持平稳态势,自 2008 年后,文献出版数量开始呈现上升的态势至今。

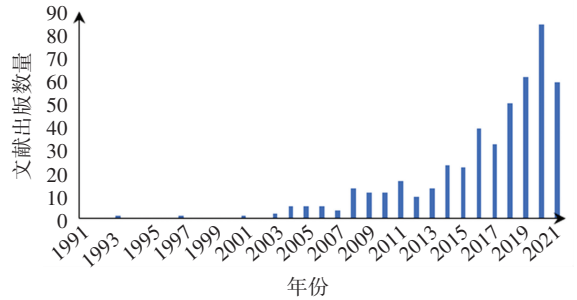


图 1 文献出版量逐年变化趋势

Fig.1 Changing trend of literature publication volume year by year

其次,除了对近年文献出版量分析以外,从文献所属地角度对现有换道行为领域研究进行分析,可以在一定程度上衡量一个国家在该领域的科研兴趣和创新水平。因此,本文以文献第一作者当前居住地为依据,统计整理了驾驶人换道行为相关研究学术成果在不同国家的分布状况,文献所属地共分布到 33 个国家,图 2 展示了 1991—2021 年期间出版文献数量多于两篇的国家,其余文献出版数量为 1~2 篇的国家用“其他”表示,包括奥地利、巴西、芬兰等 16 个国家。按照出版量从高到低前 5 位依次为:中国(54.7%)、美国(16.6%)、澳大利亚(4.1%)、韩国(3.7%)和德国(2.9%)。从出版数量来看,中国和美国目前在研究领域研究方面占据相对主导地位。

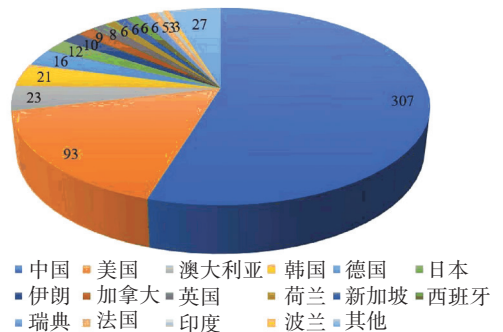


图 2 文献所属国家分布情况

Fig.2 Country distribution of publications

最后,根据每种期刊和国际会议的论文出版量,对 466 篇文献进行文献来源分析,图 3 展示了排名前 20 位的论文出版机构,包括 TR_C (Transportation Research Part C: Emerging Technologies)、TITS

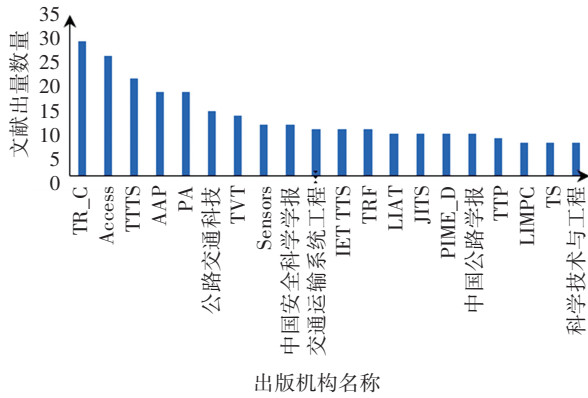


图3 不同文献出版数量

Fig.3 Number of relevant publications of different journals (Transactions on Intelligent Transportation Systems)、AAP(Accident Analysis & Prevention)、PA(Physica A)、公路交通科技、TVT(Transactions on Vehicular Technology)、Sensors、中国安全科学学报、交通运输系统工程与信息、IET ITS(IET Intelligent Transport Systems)、TRF(Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior)、IJAT(International Journal of Automotive Technology)、JITS(Journal of Intelligent Transportation Systems)、PIME_D(Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of

Automobile Engineering)、中国公路学报、TIP(Traffic Injury Prevention)、IJMPC(International Journal of Modern Physics C)、TS(Transportmetrica A:Transport Science)、科学技术与工程。可以看出除与交通安全、交通伤害等相关的专业期刊,计算机科学、心理学等相关期刊也收录了较多文献。此外,《Transportation Research Part C Emerging Techologies》作为主要关注交通运输系统和新兴技术领域解决发展、应用和影响较为权威的期刊,其论文出版量位列第一。

1.2 关键词可视化分析

利用VOSviewer1.6.18对989个与车辆换道研究有关的关键词进行共现分析,设置关键词最小共现阈值为2,共纳入符合条件的关键词119个,构建关键词共现网络可视化如图4所示,共形成12个聚类,其中前5个聚类规模相当。可以看出,以换道为主要关键词的聚类,主要包括了周围环境、碰撞时间、风险预测等关键词,且有包括结构方程模型、持续时间模型、模糊推理系统等研究方法;以间隙接受为主要关键词的聚类均包含了关于持续时间、风险因素、驾驶行为等元素;以预测模型为主要关键词的聚类均包含了关于特征选择、机器学习、支持向量机、随机森林、换道意图等关键词。

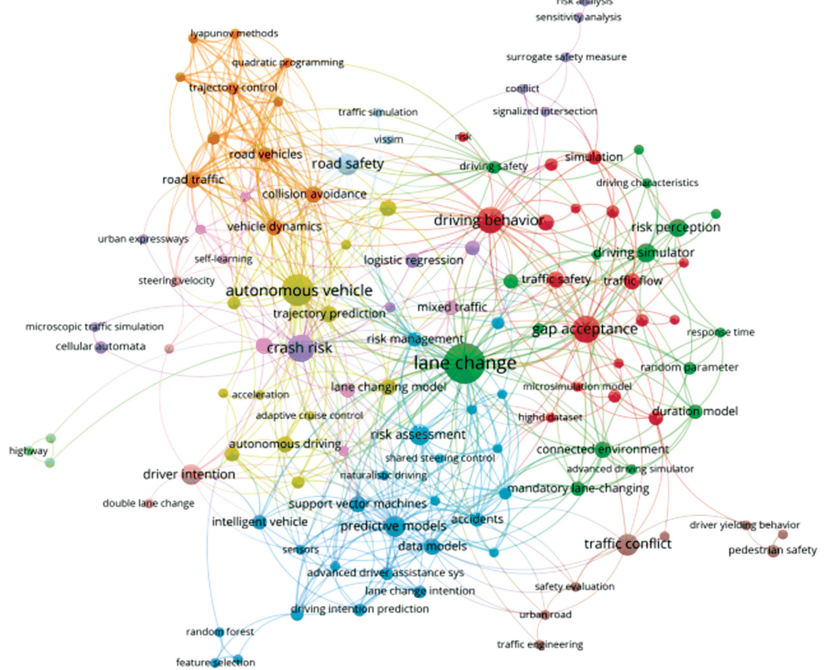


图4 关键词共现网络可视化

Fig.4 Keywords co-occurrence network visualization

从关键词共现密度可视化图中可以更加直观地发现车辆换道领域的研究重点和热点,如图5所示,车辆换道越趋于深红色,展示出较高的活跃度,除此

之外,无人驾驶车辆、碰撞风险、驾驶行为、风险预测、交通冲突、驾驶意图、预测模型等关键词也具有较高的关注度,也为该研究领域的热点内容。

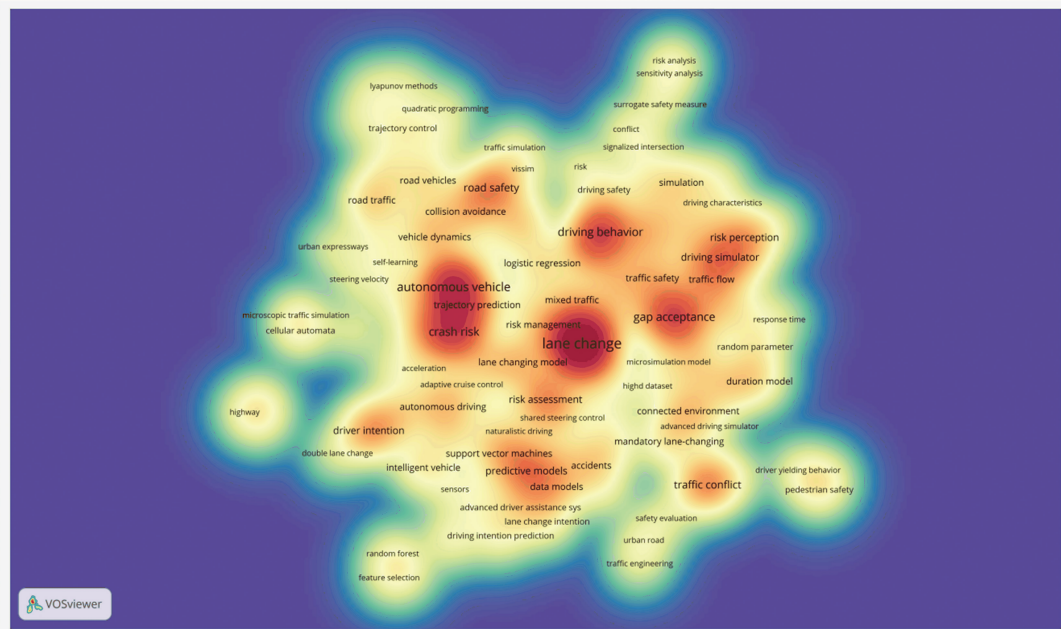


图 5 关键词共现密度可视化

Fig.5 Keywords co-occurrence density visualization

1.3 研究所采用的数据集分析

在数据集使用方面,本文所选的 81 篇代表性论文研究中涉及利用数据集的论文共 26 篇,所用数据大致分为 3 种:自然驾驶数据集、视频观测数据以及模拟仿真实验数据。

采用自然驾驶数据集的论文共 5 篇。由美国交通部与联邦公路局共同发起的下一代仿真技术(next generation simulation, NGSIM),生成了大量的微观车辆轨迹数据^[9]。NGSIM 数据是通过以 0.1 s 的时间分辨率处理视频图像得到的。这为高速公路换道研究提供了有价值的资料,例如 Bham^[10]利用 NGSIM 数据调查了高速公路上换道情况下的间隙接受行为。在 NGSIM 项目中,摄像头被用于从高层建筑的顶部记录道路上车辆的视频图像,并生成用于分析驾驶行为的轨迹数据集。Wu 等^[11]利用 NGSIM 车辆轨迹数据构建车道概率样本,对基于车辆实时运动信息的时间空间风险估计(TSRE)模型进行性能评估,在很大程度上促进了学者们对在高速公路与城市快速路车辆换道行为的研究。然而换道行为受当前交通量、天气等环境因素的影响,且 NGSIM 数据集的交通状况与发展中国家的交通组成、交通规则及驾驶习惯等存在很大的不同,且 NGSIM 数据道路路段的长度小于 1 609 m,存在很大的局限性,目前城市主干路车辆换道行为研究依然是一个难点问题。此外,由于当前各种车辆换道模型的构建思路、参数标定等不尽相同,难以有效评价各种模型的有效性,严重制约了车辆换道行为的研究发展。

除了自然驾驶数据集外,采用视频观测数据的论文共 12 篇。其中具有代表性的如 Toledo 等^[12]将摄像机安装在附近的高层建筑上收集了加州埃默里维尔的 I-80 公路东行段包括对所有车辆的物理尺寸及其行驶位置和车道观测等车辆轨迹数据。Yang 等^[13]使用 5 辆分别配备了 SHRP2 NextGen 数据采集系统(DAS)的通用轻型汽车用来收集真实的驾驶数据,并将其用于实证分析。通过摄像机观测的视频路段总长一般不足 1 km,研究存在一定的局限性。

还有部分学者由于受到设备条件等方面的限制,运用模拟仿真实验平台,包括 Prescan 软件^[14]等进行交通场景、车辆控制系统等模型搭建。采用交通仿真数据的论文共 9 篇。相比于 VISSIM、TISIS 等交通仿真软件,可以更广泛地应用于智能汽车、车路协同等系统的开发,但车辆换道行为方面研究需要大量微观车辆轨迹数据,目前通过交通仿真的数据难以提供较为真实的驾驶人换道行为轨迹数据,大多仅用于模型验证研究

另外还有一些如对 MITSIM^[15]、AIMSUN^[16]等模型的研究,以及驾驶风格^[17]、综述^[18]等论文没有使用数据集,不在这里过多赘述。

虽然各国研究人员在车辆换道行为风险评价方面的研究已经取得了一定的成果,但当前的研究水平与实际的应用需求之间还存在一定差距。尤其是在驾驶人行行为方面,驾驶行为的差异性严重影响了车辆换道模型的仿真精度以及其风险评价研究的可移植性。近年来同济大学构建了全域轨迹数据共享

平台 TJRD TS^[19-20], TJRD TS 数据在轨迹精度、路段长度和数量、采集时间、数据内容(包括气象、路面水膜、道路线形等数据)方面,远优于美国 NGSIM 数据集,在未来研究中为建立符合中国交通环境的车辆换道行为及风险评价研究奠定基础。

2 车辆换道行为风险评价

当驾驶人迫切的想在相邻的车道上获得更高的速度或者获得更舒适的驾驶条件,以及通过分流或合流到达目的地时,就会发生车辆换道行为。一般来说,研究人员将车辆换道行为分为两类,强制换道(mandatory lane changing, MLC)和主动换道(discretionary lane changing, DLC),当驾驶人为了到达计划的目的地而必须离开当前车道时(如驶出、驶入匝道等),执行强制换道行为;当驾驶人为了获得更快的行驶速度或拥有更短的队列时,则进行主动换道^[21]。在车辆换道过程中,车辆将不断地与当前车道或目标车道上的相邻车辆相互作用。当车辆想要变道时,提前了解潜在的碰撞或碰撞风险是至关重要的。并且不恰当的车辆换道行为不仅影响交通流特性,而且威胁着交通安全,从而导致交通拥堵甚至瘫痪。

车联网技术的发展可以为驾驶人提供车辆周围更多的交通信息,预测前方的交通状态,辅助驾驶人正确地做出下一步的操作决策,促进了车辆变道模型的研究^[22],随着车联网技术的发展和普及,国内外学者相继对车辆换道行为进行了相关研究,本文将针对筛选出的 81 篇代表性著作进行重点分析。

2.1 换道风险的关键影响因素

车辆换道行为的发生依赖于车辆换道的客观条件(空间条件、时间条件、车辆状态条件)和驾驶人的主观意愿^[23]。然而随着道路交通安全系统与新技术的不断融合,驾驶人的不可靠性在整个系统中逐渐突出,由驾驶人造成的碰撞事故比例将急剧上升。因此,本文分别从驾驶人的驾驶特征和换道过程两个角度,对车辆换道风险的关键影响因素研究进行综述。

关键特征选择可以更好地理解特征导致换道风险的潜在过程^[24]。目前针对驾驶人驾驶特征的主流分类方法主要有长短期记忆神经网络 LSTM^[25]、K-Means 聚类分析^[17]及支持向量机(SVM)模型^[26]等对驾驶人驾驶特性进行快速和准确地分类。刘思源等^[27]利用 K-Means 聚类将驾驶人分为激进和保守两种类型,并对不同驾驶特性的驾驶人进行了换道特性的分析,研究表明激进型的驾驶人换道次数更多,车速更大。张一恒^[28]采用支持向量机(SVM)

模型并结合驾驶人换道与跟驰状态下的操作特性,研究结果表明不同驾驶特征驾驶人在换道执行时间、换道时横纵向加速度以及跟驰状态下的车头时距均有显著差异,且激进程度越高的驾驶人在换道过程中车速的稳定性更低。

在车辆换道的整个过程中,车辆换道 3 个关键的影响因素分别为间隙接受度、车辆换道时间及对跟随车辆的影响^[13]。其中车辆换道持续时间作为测量换道执行阶段的长度,该阶段从换道车辆开始意图通过向目标车道移动来改变车道开始,到换道车辆稳定在目标车道时结束。换道持续时间在车辆换道中具有较大的取值范围和意义,对于换道持续时间的研究, Hanowski 等^[29-31]研究表示换道持续时间取值为 1~6 s;然而,车辆换道行为通常被简化为是一个即时事件或给定一个恒定的时间周期事件^[12]。

间隙接受是驾驶人决定是否进行变道的最重要的决定因素^[32]。自 20 世纪 80 年代以来,研究人员已经为交通微仿真软件建立了变道模型,而间隙接受度作为决策过程中的一个关键因素,即驾驶人评估自己的车辆与目标车道上的车辆之间的纵向间隙是否足够。将目标间隙分为前导间隙、目标车道内前导车辆与变道车辆的纵向距离,以及滞后间隙,即跟随车辆与变道车辆之间的距离^[33]。对于每一次变道,变道车辆相对于预期纵向距离和变道车辆相对于预期跟随车辆的风险因素应与可接受的风险因素进行比较。一般来说,换道车辆驾驶人不会拒绝大于可接受间隙的间隙,这被称为一致行为^[10]。然而,驾驶人若拒绝接受一个可接受间隙,原因多为未能到达预期目的地、车辆内部发生紧急情况以及分心驾驶等^[13]。早在 1996 年 Yang 等提出车道变换可以分为强制性换道(MLC)和自由性换道(DLC)^[15],这两种换道往往在间隙接受度方面存在差异^[29-32]。Toledo 等研究认为,间隙接受取决于几个附加因素,如时空位置、相对速度和周围车辆的加速度^[10,30-32],其中大多数与当前的交通状况直接相关^[34]。

间隙接受也是微观交通仿真中变道模型的重要组成部分。早期的车辆换道模型以交通流特征变化的影响作为模型主要考虑的因素,没有考虑驾驶人行为特征差异对换道行为的影响,Gipps 模型作为最基本的车辆跟随模型之一,考虑了安全间隙的存在、障碍物的位置、转向意图、重型车辆的存在等因素,采用减速来判断车辆是否能够实现安全变道^[35],忽略了驾驶人之间的差异以及驾驶人情绪的变化,在模拟激进型和保守型驾驶人时,往往车头时距的模拟结果偏差较大;MITSIM 模型^[15,36]主要以车道的使用权、单车道车速以及车头时距等作为模

型构建的主要因素^[37]。

两种模型均为许多未来的模型奠定了基础,后来有研究人员开始考虑驾驶人行为特征的影响,如 Toledo 提出了一种综合考虑强制性和非强制性因素的换道模型^[33],考虑驾驶人驾驶特征和驾驶能力等,运用标准正态分布函数表示了驾驶人的特征差异。Hill 等^[38]在换道持续时间和间隙接受特征之间的趋势研究中,将驾驶人驾驶特征分为非常保守,有点保守,有点激进和非常激进 4 个类别。

截至目前可以将车辆换道模型大致分为自动巡航模型和计算机仿真两大类,本文主要针对计算机仿真模型中微观模型进行了分类归纳,微观模型可分为间隙接受模型和人工智能模型两大类。其中间隙接受模型主要分为基于临界间隙的间隙接受模型和间隙接受概率模型两类。基于临界间隙的间隙接受模型假定只有前导车间隙和跟随车间隙同时满足临界间隙条件时才执行换道,如 AIMSUN 模型^[16]、SITRAS 模型^[39]、MITSIM 模型^[36]、CORSIM、MOBIL、LMRS 等。MOBIL 的换道模型和 LMRS 模型均设置如果换道车辆和目标车道跟随车辆的加速度大于安全减速阈值,则间隙是可以接受的。Halati 等在 CORridor SIMulation (CORSIM) 中,利用换道车辆在目标车道上避免与前车碰撞所需的减速度,建立可接受的前导车间隙模型。但由于 CORSIM 中的所有驱动程序都假定驾驶人具有相似的间隙接受行为,因此没有考虑间隙接受行为的可变性。Boxill 等在 AIMSUN 仿真器中,集成了 Gipps 基于安全阈值判

断的间隙接受模型^[16]。然而实际上,往往前导车间隙与跟随车辆间隙其中一个满足条件时,驾驶人便会选择换道^[40]。国内学者邹智军等^[41]提出了挤车换道行为,在交通拥挤的状态下,可接受间隙出现的概率很小,车辆往往是通过挤压相邻车道后随车辆来实现的。Ahmed 等^[42]开发了一个强制合并模型,当驾驶人不能满足当前驾驶条件时,通过估计当前车道和相邻车车道的效用函数,计算换道决策的概率函数,发现在拥挤的交通环境下,满足最小可接受长度的间隙很少,主车驾驶人通常通过跟随车辆的礼貌让步或通过迫使跟随车辆减速来完成车道变换。Goswami 等^[43]利用随机论方法建立了拥挤车道变换关键间隙模型。另一类是间隙接受概率模型^[44],主车驾驶人在换道过程中将会面临二元或多元选择,有学者采用二元决策模型判断车辆是否采取换道行为。Kita 等^[44]构建了一个用于分析驾驶人可接受间隙决策过程的二元选择模型,对入口匝道合流行为进行分析建模。研究表明主车车道与目标车道的相对速度、目标车道的密度等参数均会影响驾驶人的可接受间隙。但在目前的二元选择换道模型中,没有充分考虑驾驶人和车辆的异质性(如驾驶员攻击性、驾驶技能水平和车辆加速性能等)。主要原因是现有的交通数据和数据收集技术无法提供足够详细的信息来开发和测试这样的模型。然而,这些特征对于准确描述真实的换道行为非常重要,相关的解释变量应该被纳入到未来换道模型中。车辆换道模型分类如图 6 所示。

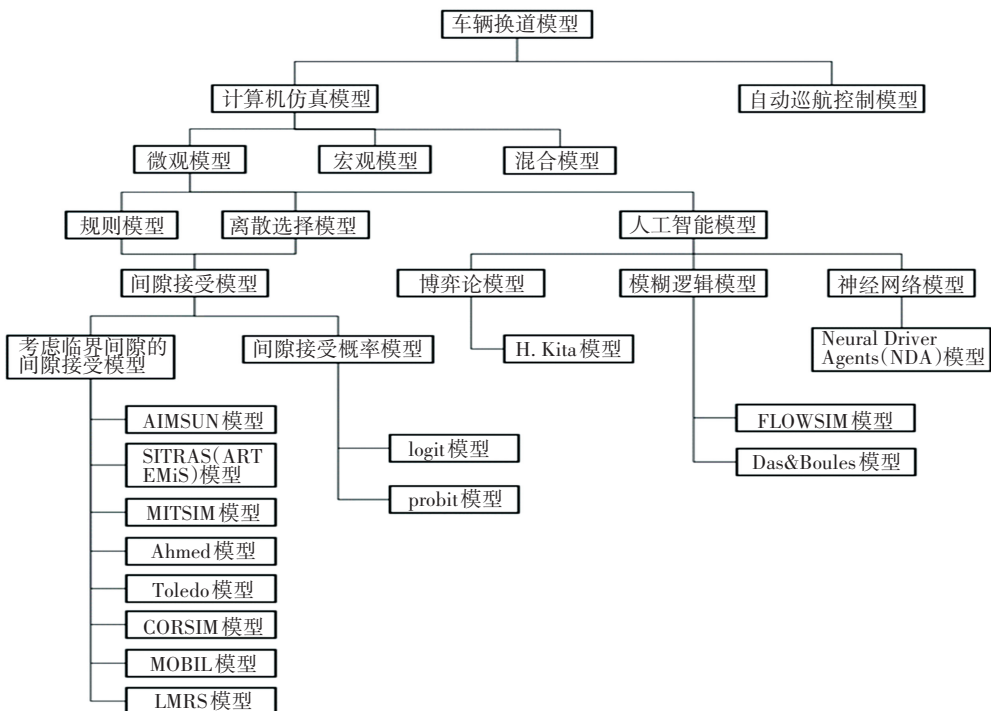


图 6 车辆换道模型分类 Fig.6 Classification of lane-changing models

综上所述,已有的研究开展了对车辆换道行为风险的关键影响因素的研究,其中由于间隙接受度直接影响了驾驶人的换道决策,因此研究人员对间隙接受的关注较早并进行了较多的研究,且间隙接受度直接影响了换道模型搭建的换道风险指标阈值的确定,换道风险的研究有着实测难度大、依赖仿真软件的特点,当前的车辆换道模型采用考虑临界间隙的间隙接受模型较多,缺少综合考虑交通状况、驾驶人驾驶特性等方面对间隙接受的影响,导致仿真结果与实际相差较远,不利于后续的风险评价研究。

相比于间隙接受,驾驶人的驾驶特性同样具有难以量化的特点,在车辆换道的过程中,驾驶人与前车之间的距离反映了驾驶空间的舒适度,影响驾驶人对当前车道的满意度,不同的驾驶人之间存在行为上的差异,驾驶人不同的驾驶特性会使其产生不同的换道决策。当前的研究主要采用监督学习和无监督学习的手段对驾驶人的驾驶特性进行分类,但对驾驶人在换道过程中驾驶人驾驶特性与换道决策调整之间的关系方面缺少较为深入的研究。且由于驾驶人驾驶特性的研究需要获取大量驾驶人的驾驶行为作为研究数据,样本采集工作量大,多数的相关研究存在采集的样本量较少,难以得出具有普适性的研究结果的问题。

2.2 基于交通冲突的车辆换道风险评价方法

长期以来大多数国家均采用以交通事故统计为基础的交通安全评价体系^[45],主要涉及碰撞频率和严重程度的推断^[46]。

然而,在许多情况下,交通碰撞数据存在随机性和罕见性,往往需要长期的数据收集才能获得足够的样本数据,这对统计显著性有很大影响。为了克服这些缺点,研究人员提出了基于交通冲突的风险评价方法,交通冲突作为交通事故数据的替代,其概念最初由 Perkins 和 Harris(1967)提出,他们将交通冲突定义为任何可能导致刹车或转向等规避行为发生的事故情况^[47]。后来研究人员对这个定义进行了改进,包括车辆换道的类别,以及冲突时车辆之间的时间和空间上的交互。国际上公认的交通冲突定义是“两个或两个以上的道路使用者在空间和时间上接近对方,以至于如果他们的移动保持不变,就有发生碰撞的风险的可观察情况”。基于交通冲突的风险评价方法可以有效量化碰撞风险,与碰撞的发生高度相关^[48]。基于交通冲突的风险评价方法分别以空间安全距离和时间安全距离两种评价指标,分为基于距离的评价方法和基于时间的评价方法两种。其中距离逻辑方法包括最小安全距离(MSS)和

停止距离指数(SDI)等;时间逻辑方法包括碰撞时间(TTC)^[49]、TTCA^[50]、车头时距(THW)^[51]等。这些方法大多基于车辆运动学和动力学理论。

交通冲突和交通量之间的关系紧密,Spicer等^[52]发现交通冲突总数与冲突量乘积的平方根成正比。Salman等^[53]研究了交通冲突与两种交通量度量之间的关系:交通量之和和产生冲突的交通量乘积的平方根。这两种测量方法都与交通冲突有很好的相关性,与交通量乘积的平方根具有更高的相关性。Sacchi等^[54]研究表明,冲突数量比交通量增长得更快。这一发现与Elvik等^[55]最近提出的假设相似,认为涉及变道或在十字路口刹车的冲突数量比交通量增加得更快是合理的。

交通冲突的判别指标有很多,如碰撞时间(time-to-collision, TTC)^[56]、侵犯后时间(post encroach time, PET)^[57]、安全减速时间(deceleration to safety time, DTS)^[58]、避免冲突最大减速率(deceleration rate to avoid crash, DRAC)^[59]、停止距离指数(stopping distance index, SDI)^[18, 60]等,已被广泛用于评估交通安全。其中最常见的是碰撞时间(TTC),定义为在碰撞过程中若两辆车继续在当前的轨道上行驶,并且保持速度差,两辆车发生碰撞的时间即为TTC^[61],碰撞时间(TTC)已被广泛用于评估车辆安全的碰撞风险。通常,TTC可以通过不同的阈值对不同的风险等级进行分类^[62],如果车辆不在碰撞过程中,则TTC的值是无限的;当车辆在碰撞过程中,TTC值是有限的,并随时间而减小。将车辆在碰撞过程中所达到的最小TTC作为评估冲突严重程度的关键度量。

Lee等^[63]利用碰撞紧迫性将变道安全性划分为4个阶段:碰撞、 $TTC < 3.0\text{ s}$ 、 $3.0\text{ s} < TTC < 5.5\text{ s}$ 和 $TTC > 5.5\text{ s}$ 。ISO标准17387采用 2.5 s 、 3.0 s 和 3.5 s 的TTC作为阈值,以确定不同速度的车道变道警告标准^[64]。Wu等^[11]研究结果表明一旦一个交通状况框架的TTC不大于 5.5 s ,将被视为危险状态,否则该框架将被视为安全框架。

然而仅用TTC作为车辆变道预警标准,在车辆间距离较小且车速相近,碰撞风险较高时,此时TTC可能大于预设阈值,无法准确识别当前碰撞风险。Sayed等^[65]设置了碰撞风险指标(ROC),指对观察到的冲突严重程度的主观衡量,依赖于驾驶人对冲突情况的感知控制,并将碰撞时间(TTC)和碰撞风险(ROC)作为交通冲突严重程度的判别指标。Yang等^[13]通过速度变化率、制动时间戳和碰撞时间(TTC)3个指标评估冲突影响,研究结果表明,当换道车辆开始换道行为时,有44%的跟随车辆驾驶

人采取制动行为,有 70% 以上的变道事件最小 TTC 发生在换道车辆开始换道到跨车道点之间。也就是说,在大多数需要制动的事件中,跟随车辆驾驶人在换道车辆插入其车道之前通过制动维持安全距离。Chen 等^[66]的研究表明,变道事件中的变道频率和 TTC 因紧急程度的不同而不同。俄文娟^[14]定义避险时间 TTA (time to avoidance) 为驾驶人制动行为开始至车辆完全停止所需的时间,汪宝等^[67]结合避险时间 (TTC) 和碰撞时间 (TTA) 两个冲突指标建立了车辆冲突换道模型,并运用聚类分析法,将换道冲突分为严重冲突、中度冲突、轻微冲突和一般冲突 4 个等级。为了可扩展性和易于理解,研究人员又开发了一些基于 TTC 概念的扩展指标,包括时间集成 TTC (TIT)^[68]、时间暴露 TTC (TET)^[69] 和时间到车道穿越 (TLC)^[70]。Wu 等^[11]研究提出了一种时间和空间风险估计 (TSRE),以识别实时的变道风险,利用故障树分析方法将时间风险等级 (TRL) 和空间风险等级 (SRL) 纳入综合风险指标。并对不同的风险阈值组合进行了识别精度的敏感性测试,结果表明,在选择合适的风险阈值组合时,所提出的 TSRE 模型对危险变道样本、交通冲突、危险帧和安全帧进行分类,准确率分别达到 97.45%、97.79%、84.1% 和 85.05%^[11]。

除了当前换道风险预警使用最广泛的 TTC, PET 也是在碰撞即将发生的情况下的一种有效的评估方法。它是两辆车沿不同方向先后通过同一点的时间间隔^[57]。(stopping distance index, SDI) 是一种离散方法,用于通过比较预定的停车视线距离 (stopping sight distances, SSDs) 来估计给定的车辆跟随场景是否安全。基于 SDI 的判定被用于交通风险估计^[60,71]。Park 等^[71]建立了一些扩展的 SSDs 模型来反映风险暴露水平和风险严重程度水平,并在变道风险估计方面取得了良好的效果。

综上所述,现有的基于交通冲突的风险评价方法研究主要集中在如何基于历史数据来评估变道过程的整体安全性,能够实现较为准确的碰撞风险识别。然而这些方法往往忽略了变道车辆与周边车辆之间的交互影响,存在评价周期长、评价指标单一的缺点,在换道风险严重程度判别、换道全过程的风险量化、风险实时辨识、与换道环境之间的深层次关系等方面缺乏具体的研究。虽然已有研究采用 TTC 方法对变道安全性进行评价取得了丰富的成果,但在实际应用中,这些方法的局限性也很明显,TTC 的定义仅仅基于车辆当前时刻的车速和行进方向,并没有考虑到车辆的加速度,导致判断误差较大^[59],且最主要的问题是基于 TTC 的方法很难识别车辆

纵向距离带来的风险。例如,两辆车之间的纵向距离很短,但它们的 TTC 往往很大。此外,大多数研究人员可能会给出一个理想的假设,如设置其他车辆在模型中保持恒定速度^[72]。PET 较好地揭示了车辆在时间和空间上的邻近性。与 TTC 相比,PET 只能在一个不动点上测量,不能获取动态位置上的数据,在变道风险识别的实际应用中也存在明显的局限性。

2.3 基于驾驶意图的车辆换道风险评价方法

还有一些研究人员考虑了交通环境的不确定性和换道行为的相互作用提出了基于意图的风险评价方法,一般首先估计驾驶行为意图,然后根据输出未来轨迹的碰撞概率来评估风险程度。基于统计的模型主要包括支持向量机 (support vector machine, SVM)^[73]、隐马尔可夫模型 (HMM)^[74]、贝叶斯公式 (Bayes rule)^[75]、蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo simulation, MC)^[76] 和卡尔曼滤波 (Kalman filter, KF)。Li 等^[77]采用基于 HMM 和贝叶斯滤波技术识别驾驶人的换道意图。Aoude 等^[73]采用基于 SVM 的意图预测器和随机快速搜索树来估计交叉口的风险。Havlak 等^[78]结合 KF 和高斯分布来预测未来的轨迹分布,然后计算碰撞概率,在仿真场景中可以达到很好的效果。此外,Ding 等^[79]通过采集目标车辆定位信息,分别对 HMM^[80]、KF、自回归平均移动算法 (ARIMA)^[81]、递归运动函数 (RMF)^[82] 及 R2-D2 算法^[83] 的轨迹预测性能进行比较,验证了长期轨迹预测比短期轨迹预测更具挑战性,且 KF 模型可以较好地捕捉潜在的轨迹模式。

基于深度学习模型方面,长短期记忆 (LSTM) 由于其在时间序列问题处理中的深度表征能力,在语音识别、机器翻译、图像字幕等方面取得了一系列突破。因此,许多研究将 LSTM 应用于驾驶意图识别及轨迹预测,取得了较好的预测效果^[84-85]。Anderson^[86]基于目标车辆历史轨迹数据包括横纵向速度及加速度、车辆类型,以及与周围车辆的相对历史轨迹作为模式向量,建立 3 层的 LSTM 网络模型同时学习目标车辆的轨迹和意图。研究结果显示目标车辆意图预测的准确性从换道前 3 s 的 35% 线性增加到换道前 1 s 的 95% 左右。张一恒^[28]采用双向长短时记忆神经网络 (Bi-LSTM) 对高速公路驾驶车辆换道意图进行识别并预测驾驶轨迹,利用轨迹冲突量化对换道风险进行评估。倪捷等^[87]基于模糊神经网络建立驾驶人换道意图识别模型,进行驾驶人换道意图的识别,模型准确率为 89.23%。Kim 等^[88]采用人工神经网络 (ANN) 对道路交通环境进行分析并使用动态神经网络 (NARX) 分析车辆

状态作为特征向量, 结合 SVM 进行驾驶意图分类。郭应时等^[89]研究认为证据理论识别模型对换道意

图的识别优于 BP 神经网络模型。图 7 展示了车辆换道行为风险评价方法的分类。

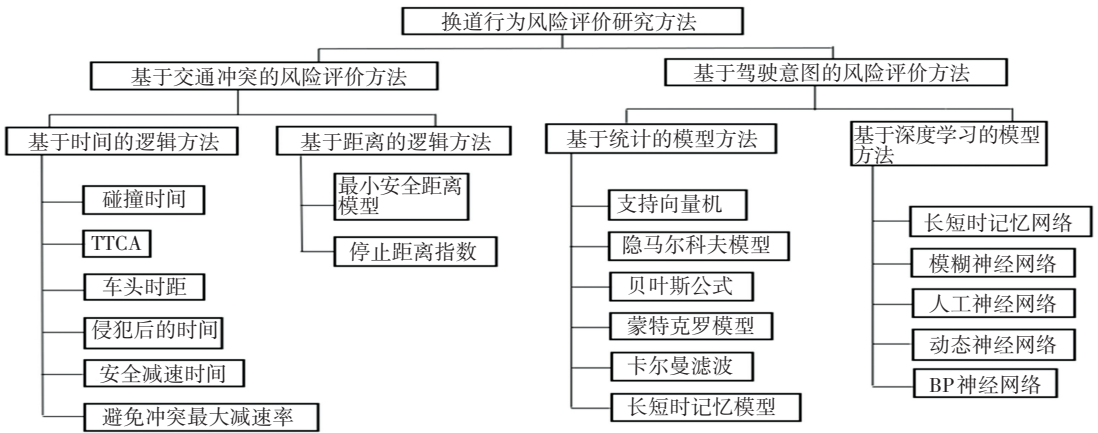


图 7 风险评价方法分类

Fig.7 Classification of risk assessment methods

综上所述, 现有研究对基于驾驶意图的风险评价研究包括通过未来轨迹的预测来评估换道风险, 结合深度学习模型, 优化驾驶人换道意图的识别精度, 提高了风险判别的准确率。但是换道行为遵循一个过程层次, 每个过程是多个不同级别性能的组合。现有的变道模型大多只考虑换道行为的决策过程, 忽略了车辆换道^[15,35]的执行过程, 在进行微观交通仿真时, 必须考虑车辆换道执行过程中的例如驾驶人驾驶意图变化、换道决策调整等因素。且虽然现有一些研究已经在驾驶人意图识别中取得了较好的成果, 但是仍然存在驾驶人意图识别模型的准确时长短、历史轨迹要求长等局限性。

3 结论与展望

本文通过收集换道行为风险评价相关文献, 多角度分析了车辆换道行为的研究热点; 并从换道风险的关键影响因素、基于交通冲突的风险评价方法和基于驾驶意图的风险评价方法三方面对车辆换道行为风险评价相关研究进行分析, 指出现有的车辆换道行为研究及风险评价指标的局限性及未来的研究方向, 具体如下:

1) 通过文献统计分析、关键词可视化及研究采用的数据集分析三方面对车辆换道行为进行了综述, 并对已有研究所用的数据集进行总结分析, 现有研究多采用 NGSIM 数据集、视频观测数据及仿真数据进行研究, 缺少符合实际交通情况的数据集。

2) 根据车辆换道风险评估的关键影响因素的研究现状, 重点总结分析了驾驶人的驾驶特征和换道过程中的间隙接受度, 以及简述了考虑间隙接受模型类别的车辆换道模型。现有研究都对间隙接受和驾驶特征进行了较为充分的研究, 但缺少综合考

虑交通状况、驾驶人驾驶特性等方面对间隙接受的影响研究。

3) 基于交通冲突的车辆换道风险评价方法研究较多, 其中最广泛使用的交通冲突判别指标为 TTC, 然而 TTC 仅基于车辆当前时刻的车速和行进方向, 并没有考虑到车辆的加速度, 且基于 TTC 的方法很难识别车辆纵向距离带来的风险, 导致判断误差较大。

4) 基于驾驶意图的车辆换道风险评价方法主要是通过未来轨迹的预测来评估换道风险, 现有研究结合深度学习模型, 对驾驶人换道意图的识别精度进行优化, 但仍然存在驾驶人意图识别模型的准确时长短、历史轨迹要求长等局限性。

5) 车辆换道行为风险评价方法作为交通安全的重要研究方向, 可为道路交通事故的主动预防以及自动驾驶车辆的行为提供决策依据。随着车联网技术的发展, 异构交通流环境将会存在相当长的一段时间, 且随着智能网联车辆的渗透率不断上升, 未来围绕异构交通流环境下的换道行为及风险研究将成为研究重点。在车联网环境下换道车辆可以获取当前道路基础设施信息、拥堵情况、行程车速等环境信息以及周边车辆的位置、速度、加速度等交通信息, 研究人员将有机会通过汽车远程信息的获取, 更好地分析驾驶行为和交通事故的成因, 综合考虑不同渗透率下的换道场景中的动态因素, 加强对智能网联车辆的换道行为分析, 探究智能网联车辆的换道决策机制, 为异构交通流环境下的车辆换道风险的综合评价方法研究带来了新的机遇和挑战。

参考文献

[1] SEN B, SMITH J. Analysis of lane change crashes[R]. Cambridge:

- National Highway Traffic Safety Administration, 2003
- [2] DRIGGS-CAMPBELL K, GOVINDARAJAN V, BAJCSY R. Integrating intuitive driver models in autonomous planning for interactive maneuvers[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(12): 61. DOI:10.1109/TITS.2017.2715836
- [3] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Depth deep in rectifiers; outperforming human-level results on ImageNet classification [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Washington DC: IEEE, 2015: 1026. DOI:10.1109/ICCV.2015.123
- [4] ZHENG Zuduo, AHN S, CHEN Danjue, et al. Applications of wavelet transform for analysis of freeway traffic: bottlenecks, transient traffic, and traffic oscillations[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(2): 372. DOI: 10.1016/j.trb.2010.08.002
- [5] AHN S, CASSIDY M. Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers[J]. *Transportation and Traffic Theory*, 2007, 1: 691
- [6] ZHENG Zuduo, AHN S, CHEN Danjue, et al. Freeway traffic oscillations: microscopic analysis of formations and propagations using wavelet transform [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, 17: 702. DOI:10.1016/j.trb.2011.05.012
- [7] LI Xiang, SUN Jianqiao. Studies of vehicle lane-changing dynamics and its effect on traffic efficiency, safety and environmental impact [J]. *Physica A*, 2017, 467: 41. DOI: 10.1016/j.physa.2016.09.022
- [8] WEBSTER J, WATSON R T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review [J]. *MIS Quarterly*, 2002, 26(2): XIII
- [9] ALEXIADIS V, COLYAR J, HALKIAS J, et al. The next generation simulation program[J]. *ITE Journal—Institute of Transportation Engineers*, 2004, 74(8): 22
- [10] BHAM G H. Estimating driver mandatory lane change behavior on a multi-lane freeway [C]// *Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington DC: Transportation Research Board, 2009
- [11] WU Jiabin, WEN Huiying, QI Weiwei. A new method of temporal and spatial risk estimation for lane change considering conventional recognition defects[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 148: 105796. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105796
- [12] TOLEDO T, ZOHAR D. Modeling duration of lanechanges [J]. *Transportation Research Record*, 2007, 1999(1): 71. DOI: 10.3141/1999-08
- [13] YANG Minming, WANG Xuesong, QUDDUS M. Examining lane change gap acceptance, duration and impact using naturalistic driving data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 104: 317. DOI:10.1016/j.trc.2019.05.024
- [14] 俄文娟. 无信号交叉口车车冲突检测与消解算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012
E Wenjuan. Research on vehicle-vehicle conflict detection and resolution algorithm at unsignalized intersection [D]. Changchun: Jilin University, 2012
- [15] YANG Q, KOUTSOPOULOS H N. Amicroscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems[J]. *Transportation Research Part C*, 1996, 4(3): 113. DOI:10.1016/S0968-090X(96)00006-X
- [16] BOXILL S A, LEI Yu. An evaluation of traffic simulation models for supporting ITS development: 167602-1[R]. Houston: Center for Transportation Training and Research, 2000
- [17] 李立治, 杨建军, 刘双喜, 等. 国内人群的驾驶风格分类及识别方法研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(11): 8
- LI Lizhi, YANG Jianjun, LIU Shuangxi, et al. Research on classification and identification method of driving style of domestic population [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(11): 8
- [18] MAHMUD S S, FERREIRA L, HOQUE M S, et al. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: a review of recent developments and research needs [J]. *IATSS Research*, 2017, 41(4): 153. DOI: 10.1016/j.iatssr.2017.02.001
- [19] WANG Junhua, FU Ting, XUE Jiangtian, et al. Realtime wide-area vehicle trajectory tracking using millimeter-wave radar sensors and the open TJRD TS dataset [J/OL]. *International Journal of Transportation Science and Technology*. [2022-03-16]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043022000247>
- [20] WANG Junhua, FU Ting. TJRD TS [EB/OL]. [2021-12-05]. <https://www.tjrdts.com>
- [21] 孙剑, 李克平, 杨晓光. 拥挤交通流交织区车道变换行为仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(13): 4174
SUN Jian, LI Keping, YANG Xiaoguang. Simulation on lane-changing behavior under congested weaving sections [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(13): 4174
- [22] 金盛, 王殿海. 考虑前方交通状态的车辆跟驰模型与数值仿真 [J]. *北京工业大学学报*, 2012, 38(8): 1236
JIN Sheng, WANG Dianhai. Car following model and simulation considering front traffic situation [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(8): 1236
- [23] 陈斌. 基于多智能主体系统的车道变换模型 [J]. *中国公路学报*, 2005, 18(3): 104
CHEN Bin. Lane-changing model based on multi-agent system [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(3): 104. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2005.3.023
- [24] GUYON I, ELISSEEFF A. An introduction to variable and feature selection [J]. *The Journal of Machine Learning Research*, 2003, 3: 1157. DOI: 10.1162/153244303322753616
- [25] LI Guofa, ZHU Fangping, QU Xingda, et al. Driving style classification based on driving images [J]. *IEEE Access*, 2019, 99: 1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2926494
- [26] WANG Wenshuo, XI Junqiang. A rapid pattern-recognition method for driving types using clustering-based support vector machines [C]// *American Control Conference (ACC)*. Boston: IEEE, 2016: 16194363. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526495
- [27] 刘思源, 喻伟, 刘洁莹, 等. 考虑驾驶风格的车辆换道行为及预测模型 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(1): 28
LIU Siyuan, YU Wei, LIU Jieying, et al. Lane-changing behavior and prediction model considering driving style [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 16(1): 28
- [28] 张一恒. 基于驾驶风格辨识和运动预测的换道风险评估及决策方法 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020
ZHANG Yiheng. Lane-changing risk assessment and decision method based on driving style identification and motion prediction [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020
- [29] HANOWSKI R J. The impact of local/short haul operations on driver fatigue [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000
- [30] SALVUCCI D D, LIU A. The time course of a lane change: driver control and eye movement behavior [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2002, 5(2): 123. DOI: 10.1016/S1369-8478(02)00011-6

- [31] MORIDPOUR S, SARVI M, ROSE G. Modeling the lane-changing execution of multiclass vehicles under heavy traffic conditions [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2161(1): 11. DOI:10.3141/2161-02
- [32] CHOUDHURY C F. Modeling lane-changing behavior in presence of exclusive lanes [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005
- [33] TOLEDO T, KOUTSOPOULOS H N, BEN-AKIVA M E. Modeling integrated lane-changing behavior [J]. *Transportation Research Record*, 2003, 1857(1): 30. DOI:10.3141/1857-04
- [34] SINGH K, LI Baibing. Discrete choice modelling for traffic densities with lane-change behaviour [J]. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 2012, 43: 367. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.04.110
- [35] GIPPS P G. A model for the structure of lane-changing decisions [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1986, 20(5): 403. DOI:10.1016/0191-2615(86)90012-3
- [36] LEE G. Modeling gap acceptance at freeway merges [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006
- [37] 许伦辉, 倪艳明, 罗强, 等. 基于最小安全距离的车辆换道模型研究 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(4): 1
XU Lunhui, NI Yanming, LUO Qiang, et al. Lane-changing model based on minimum safety distance [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 29(4): 1. DOI:10.16088/j.issn.1001-6600.2011.04.001
- [38] HILL C, ELEFTERIADOU L, KONDYLI A. Exploratory analysis of lane changing on freeways based on driver behavior [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2014, 141(4): 04014090. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000758
- [39] HIDAS P. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2002, 10(5/6): 351. DOI:10.1016/S0968-090X(02)00026-8
- [40] WENG J, MENG Q. Modeling speed-flow relationship and merging behavior in work zone merging areas [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(6): 985
- [41] 邹智军, 杨东援. 微观交通仿真中的车道变换模型 [J]. *中国公路学报*, 2002, 15(2): 108
ZOU Zhijun, YANG Dongyuan. Lane changing model in micro traffic simulation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(2): 108. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2002.02.026
- [42] AHMED K I, BEN-AKIVA M E, KOUTSOPOULOS H N, et al. Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior [C]// *Proceedings of the 13rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*. New York: Pergamon Press, 1996: 501
- [43] GOSWAMI V, BHAM G. Gap acceptance behavior in mandatory lane changes under congested and uncongested traffic on a multi-lane freeway [C]// *Proceedings of Transportation Research Board 86th Annual Meeting*. Washington DC: Transportation Research Board, 2007
- [44] KITA H. Effects of merging lane length on the merging behavior at expressway on-ramps [C]// *Proceedings of the 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*. New York: International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, 1993: 37
- [45] 张殿业. 道路交通安全管理评价体系 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005
ZHANG Dianye. Road traffic safety management evaluation system [M]. Beijing: People's Communications Press, 2005
- [46] FERREIRA S, COUTO A. A probabilistic approach towards a crash risk assessment of urban lane segments [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 50: 97. DOI: 10.1016/j.trc.2014.09.012
- [47] PERKINS S R, HARRIS J L. Traffic conflict characteristics accident potential at intersections [C]// *Proceedings of the 47th Annual Meeting*. Washington DC: Highway Research Board, 1967: 35
- [48] HYD'EN C. The development of a method for traffic safety evaluation; the Swedish Traffic conflicts technique [C]// *Bulletin Lund Institute of Technology*. Lund: Transportation Research Board, 1987: 57
- [49] ARCHIBALD J K, HILL J C, JEPSEN N A, et al. A satisficing approach to aircraft conflict resolution [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 2008, 38(4): 510. DOI:10.1109/TSMCC.2008.919162
- [50] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2001, 33(1): 89. DOI:10.1016/S0001-4575(00)00019-1
- [51] SHI Lei, ALLEN C, EWING M, et al. Multichannel sense-and-avoid radar for small UAVs [C]// *Proceedings of IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. New York: IEEE, 2013: 6E2-1. DOI: 10.1109/DASC.2013.6712628
- [52] SPICER B R, WHEELER A H, OLDER S J. Variations in vehicle conflicts at a T-junction and comparison with recorded collisions [C]// *Proceedings of the 2nd International Traffic Conflicts Technique Workshop*. Paris: Transportation Research Board, 1979: 28
- [53] SALMAN N K, AL-MAITA K J. Safety evaluation at three-leg, unsignalized intersections by traffic conflict technique [C]// *Proceedings of Human Performance and Safety in Highway, Traffic, and ITS Systems*. Amman: Transportation Research Record, 1995: 177
- [54] SACCHI E, SAYED T. Bayesian estimation of conflict-based safety performance functions [J]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2016, 8(3): 266. DOI:10.1080/19439962.2015.1030807
- [55] ELVIK R, ERKE A, CHRISTENSEN P. Elementary units of exposure [J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2103(1): 25. DOI: 10.3141/2103-04
- [56] HAYWARD J. Near misses as a measure of safety at urban intersections [D]. Pennsylvania: Pennsylvania Transportation and Traffic Safety Center, 1972
- [57] ALLEN B L, SHIN B T, COOPER P J. Analysis of traffic conflicts and collisions [J]. *Transportation Research Board*, 1978, 667: 67
- [58] TARKO A P. Use of crash surrogates and exceedance statistics to estimate road safety [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2012, 45: 230. DOI: 10.1016/j.aap.2011.07.008
- [59] MENG Qiang, WENG Jinxian. Evaluation of rear-end crash risk at work zone using work zone traffic data [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43(4): 1291. DOI: 10.1016/j.aap.2011.01.011
- [60] OH C, PARK S, RITCHIE S G. A method for identifying rear-end collision risks using inductive loop detectors [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38(2): 295. DOI: 10.1016/j.aap.2005.09.009
- [61] HAYWARD J C. Near-miss determination through use of a scale of danger [C]// *Proceedings of the 51st Annual Meeting of the Highway Research Board*. Washington DC: Highway Research Board, 1972: 24
- [62] WANG Chang, SUN Qinyu, FU Rui, et al. Lane change warning threshold based on driver perception characteristics [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2018, 117: 164. DOI: 10.1016/j.aap.

- 2018.04.013
- [63] LEE S E, OLSEN E C B, WIERWILLE W W. A comprehensive examination of naturalistic lane-changes: FHWA-JPO - 04 - 092 [R]. Virginia: Transportation Institute, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. DOI:10.1037/e733232011-001
- [64] Intelligent transport systems—Lane change decision aid systems (LCDAS)—Performance requirements and test procedures: ISO 17387 - 2008 [S]. Geneva: The International Organization for Standardization, 2008
- [65] SAYED T, ZEIN S. Traffic conflict standards for intersections[J]. Transportation Planning and Technology, 1999, 22(4): 309. DOI: 10.1080/03081069908717634
- [66] CHEN Rong, KUSANO K D, GABLER H C. Driver behavior during overtaking maneuvers from the 100-car naturalistic driving study [J]. Traffic Injury Prevention, 2015, 16(2): S176. DOI: 10.1080/15389588.2015.1057281
- [67] 汪宝, 高林杰, 隽志才. 基于避险时间的交织区车辆换道冲突分析[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(9): 3306
WANG Bao, GAO Linjie, JUAN Zhicai. Analysis of lane-changing conflicts in interleaved area based on avoidance time[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3306. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809010
- [68] VAN WINSUM W, BROOKHUIS K A, DE WAARD D. A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (TLC) during car driving[J]. Accident Analysis and Prevention, 2000, 32(1): 47. DOI:10.1016/S0001-4575(99)00048-2
- [69] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment[J]. Accident Analysis and Prevention, 2001, 33(1): 89. DOI:10.1016/S0001-4575(00)00019-1
- [70] RAHMAN M S, ABDEL-ATY M. Longitudinal safety evaluation of connected vehicles platooning on expressways[J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 117: 381. DOI:10.1016/j.aap.2017.12.012
- [71] PARK H, OH C, MOON J, et al. Development of a lane change risk index using vehicle trajectory data[J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 110: 1. DOI: 10.1016/j.aap.2017.10.015
- [72] 金立生, AREM B, 杨双宾, 等. 高速公路汽车辅助驾驶安全换道模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(3): 582
JIN Lisheng, AREM B, YANG Shuangbin, et al. Safety lane change model of vehicle assistant driving on the highway[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(3): 582. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb2009.03.030
- [73] AOUDE G S, LUDERS B D, LEE K H, et al. Threat assessment design for driver assistance system at intersections[C]//Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Funchal: IEEE, 2010: 1855. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625287
- [74] GOERLANDT F, RENIERS G. On the assessment of uncertainty in risk diagrams[J]. Safety Science, 2016, 84: 67. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.12.001
- [75] XIE Guotao, ZHANG Xinyu, GAO Hongbo, et al. Situational assessments based on uncertainty-risk awareness in complex traffic scenarios[J]. Sustainability, 2017, 9(9): 1582. DOI: 10.3390/su9091582
- [76] BELKHOUCHE F. Modeling and calculating the collision risk for airvehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2031. DOI: 10.1109/TVT.2013.2238265
- [77] LI Keqiang, WANG Xiao, XU Youchun, et al. Lane changing intention recognition based on speech recognition models[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69: 497. DOI: 10.1016/j.trc.2015.11.007
- [78] HAVLAK F, CAMPBELL M. Discrete and continuous, probabilistic anticipation for autonomous robots in urban environments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(2): 461. DOI: 10.1109/TRO.2013.2291620
- [79] DING Qingyan, WANG Xifu, ZHANG Xiuyuan, et al. Forecasting traffic volume with space-time ARIMA model[J]. Advanced Materials Research, 2011, 156: 979. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.979
- [80] MATHEW W, RAPOSO R, MARTINS B. Predicting future locations with hidden Markov models[C]// Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing. New York: Association for Computing Machinery, 2012: 911. DOI: 10.1145/2370216.2370421
- [81] HAMED M M, AL-MASAEID H R, SAID Z M B. Short-term prediction of traffic volume in urban arterials[J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(3): 249. DOI:10.1061/(asce)0733-947x(1995)121:3(249)
- [82] TAO Yufei, FALOUTSOS C, PAPANIAS D, et al. Prediction and indexing of moving objects with unknown motion patterns[C]//Proceedings of SIGMOD Conference. New York: Association for Computing Machinery, 2004: 611. DOI: 10.1145/1007568.1007637
- [83] ZHOU Jingbo, TUNG A K H, WU Wei, et al. A “semi-lazy” approach to probabilistic path prediction in dynamic environments [C]//Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Chicago: Association for Computing Machinery, 2013: 748. DOI: 10.1145/2487575.2487609
- [84] DEO N, TRIVEDI M M. Multi-modal trajectory prediction of surrounding vehicles with maneuver based LSTMs[C]//Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Changshu: IEEE, 2018: 1179. DOI: 10.1109/IVS.2018.8500493
- [85] KHOSROSHAHI A, OHN-BAR E, TRIVEDI M M. Surround vehicles trajectory analysis with recurrent neural networks [C]//Proceedings of IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rio de Janeiro: IEEE, 2016: 2267. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795922
- [86] ANDERSSON J. Predicting vehicle motion and driver intent using deep learning[D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2018
- [87] 倪捷, 刘志强. 基于驾驶人决策机制的换道意图识别模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 58
NI Jie, LIU Zhiqiang. Lane-changing intention recognition model based on driver's decision mechanism [J]. Traffic and Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(1): 58. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2016.01.009
- [88] KIM I H, BONG J H, PARK J, et al. Predicting the driver's intention to change trajectory by expanding sensor information using machine learning techniques [J]. Sensors, 2017, 17(6): 1350
- [89] 郭应时, 付锐, 赵凯, 等. 驾驶人换道意图实时识别模型评价及测试[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(6): 1836
GUO Yingshi, FU Rui, ZHAO Kai, et al. Evaluation and testing of real-time recognition model of driver lane change intention [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(6): 1836. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606011