

文章编号:1005-0930(2024)03-0601-026 中图分类号:U491.31 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.03.001

高速公路非常规交通事故研究综述

杨洋^{1,2}, 王文慧³, 吴先宇³, 王云鹏^{1,2}

(1.北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京 100191;2.北京航空航天大学车路协同与安全控制北京市重点实验室,北京 100191;3.北京交通大学交通运输学院,北京 100044)

摘要:高速公路事故频发造成了严重的生命财产安全问题.诸多学者在高速公路交通事故致因分析、事故严重程度分析及事故预测等方面获得了丰硕的研究成果,然而多数研究和文献聚焦于对常规事故研究成果的梳理,缺少对高速公路二次事故、多车事故等非常规事故足够的关注.本文对目前高速公路交通事故方面的研究成果以及新技术手段在高速公路交通安全的应用进行了总结,并着重对二次事故及多车事故等非常规交通事故研究进展进行梳理,指出目前研究的问题、需求和挑战,并探讨未来的研究方向.分析表明,高速公路常规交通事故与非常规事故的发生机理存在一定差异;在针对影响因素挖掘、严重程度分析和事故预测的研究中,两类事故的模型适用性也有所不同.模型特性方面,基于数理统计分析的传统模型在处理事故与多因素之间的非线性关系中并不占优势,机器学习手段在处理输入和输出数据之间的非线性关系方面优势显著,但模型可解释性不强;各类方法的侧重点不同导致其均存在一定的局限性.随着交通事故信息采集技术手段的丰富以及计算机性能的提升,如何扩展研究角度并提高模型性能值得进一步思考;车路协同与智能网联等新兴技术的发展将与高速公路交通安全深度融合,这将为交通安全数字治理与动态服务提供全新的应用场景.

关键词:交通事故;高速公路;道路交通安全;非常规事故;二次事故;单车事故;多车事故;数字治理

随着经济发展及人民群众出行需求的增长,中国道路交通运输行业快速发展,交通安全形势日趋复杂,由此引发的交通事故问题备受关注.《国家综合立体交通网规划纲要》指出,“要推进综合交通安全发展,加强交通运输安全风险预警、防控机制和能力建设,并建立健全多部门联动、多方式协同、多主体参与的综合交通应急管理协调机制,完善科学协调的综合交通应急管理保障预案体系.构建应急管理大数据中心,推动信息互联共

收稿日期:2023-07-24;修订日期:2023-11-02

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2022JBZY005);国家自然科学基金项目(52302423)

作者简介:杨洋(1988—),男,博士,副研究员.E-mail:yangphd@buaa.edu.cn

通信作者:吴先宇(1983—),男,博士,副教授.E-mail:wuxy@bjtu.edu.cn

享.构建快速通达、衔接有力、功能适配、安全可靠的综合交通应急运输网络”.根据世界卫生组织的数据,每年因为道路交通事故引发了130万起死亡和约5000万人的受伤,这成为了全球范围内儿童和青少年死亡的主要致因.2021年,世卫组织发布了名为《道路安全行动十年全球计划》的倡议,呼吁各国政府在2021~2030年的10年间通过“安全系统”办法,多方干预,合力实现到2030年将道路交通死亡和重伤人数减少50%的目标^[1].交通事故是在特定道路系统下,“人-车-路-环境”各要素协调失调的综合表现^[2].高速公路相较于低等级公路,在发生事故时往往造成更加严重的伤亡与财产损失^[3].高速公路的交通事故还是造成节点瘫痪和拥堵蔓延的重要诱因^[4].据统计,高速公路中超过50%的非常规拥堵由交通事故引发,这严重影响通行效率^[5].

因此,为提升高速公路交通安全,保障车辆通行效率,国内外学者对交通事故的成因机理、影响因素、严重程度及风险预测等方面进行了大量研究,对于减少事故发生率、降低事故严重性具有重大意义.本文将现有高速公路事故的研究分为常规事故与非常规事故.常规事故定义为交通事故数据集直接记录,包括时间、地点、天气条件等信息的独立事件;而非常规事故主要为二次事故和多车事故.二次事故(Secondary Crash, SC)的定义为:由主事故(一次事故, Primary Crash, PC)引起的在其空间和时间影响区域边界内发生的事件^[6].高速公路二次事故的发生受多方因素影响,具有较多特殊性,其中最主要的特点:与一次交通事故相比,二次事故更严重、伤害影响更大^[7].研究表明:2.2%~3.9%的高速公路事故会引发二次事故^[8],二次事故死亡人数占所有高速公路交通事故死亡人数的18%^[9].考虑二次事故造成的经济、社会损失及其潜在可预防性,如何预防二次事故发生已经成为道路交通安全领域的研究热点.除二次事故外,多车事故也受到学者们的广泛关注.一般将仅涉及1辆车的事故称为单车事故(Single Vehicle Crash, SV),而涉及2辆及以上车辆数的事故则称为多车事故(Multi Vehicle Crash, MV).单车事故通常是由于驾驶员行为不当而导致车辆失控引起的;而多车事故最常见的原因是驾驶员在与其他车辆交互时的失误^[10].因此确定单车和多车事故在影响因素、严重程度及预测模型上的差异性非常重要,有利于对不同涉事车辆数的事故提出针对性的预防对策.高速公路多车连环事故通常伴随着严重的后果,包括多人伤亡和多车受损,更严重的事故甚至导致车辆报废.这类事故的危害性和经济损失通常远超普通高速公路交通事故,可能高出数倍甚至10多倍^[11].由此可见,非常规事故较常规事故后果更为严重,更具威胁性与破坏性,需给予更多关注.

与此同时,大数据、车路协同等技术的发展为高速公路交通安全与事故分析提供了新思路,掀起了“智慧高速”的热潮.应用多源信息感知融合、车车/车路通信、智能路侧设施等关键技术将驾驶人-车-路-环境结合成有机整体,自动、实时对车辆进行识别、定位、追踪、监控和预警,可有效降低非常规事故发生率.

目前,研究人员已对高速公路非常规事故进行了广泛研究,取得了许多宝贵的研究成果.然而,这些研究主要基于选取的研究区域和相关数据,难以直接移植应用到非常规事故的实际分析中.因此,本文梳理了与高速公路非常规事故相关的研究成果,旨在提供对不同类型非常规事故研究成果的全面概述.通过归纳2000~2023年高速公路交通事故的相关研究,围绕常规事故的分析与预测,二次事故识别与预测,单车和多车事故差异性

新技术在道路交通安全的理论研究和应用实践 4 方面总结了现有研究进展,并提出发展方向。

1 常规事故分析与预测

常规交通事故通常是指由交通事故数据集直接记录的独立事件,包括事故发生时间、横断面位置、路面状况、天气条件等数据信息,常规事故无需识别且事故间相互独立,可直接对事故数据进行统计、分析、处理。目前大量研究对常规事故数据进行了剖析,试图厘清事故致因、分析事故严重性并对事故进行预测,具体可分为事故时空维度的确定、事故影响因素分析、事故严重程度分析和事故预测。

1.1 事故时空维度的确定

1.1.1 时空单位 时空单位是时空维度的第 1 个分量,包括研究时间的长度划分和研究段的长度划分。大多数研究使用 5min 作为时间单位^[12],然而风险可能在短时间内迅速变化,固定的时间单元可能无法有效捕获事故演化机制。常见的空间单元划分方法主要包括定长法、基于检测器的方法和聚类法。定长法是一种不考虑其他因素,仅简单地将高速公路从起点至终点划分为等长路段单元的方法,通常将高速公路均匀分割成相同长度的路段,典型的划分长度为 500m 或 1km^[13]。定长法操作简单,对数据的完整性要求也较低,但因其不考虑线形特征及组合特点,容易造成同一个路段内部的事事故频数差距过大,从而影响事故分析。基于检测器的方法通常选择上游检测器和下游检测器之间的区域作为研究段。而聚类法将事故发生水平相近的相邻路段划分为一段,以便将事故多发和事故少发的相邻路段分开考虑,也有助于更好地理解和分析交通事故的空间分布特征,但聚类指标的选取对路段划分结果有很大影响^[14]。

1.1.2 时空作用范围 时空作用范围即事故影响持续的时间和空间范围。因采用的数据样本和研究区域的道路交通环境不同,高速公路交通事故持续时间预测研究的方法与成果存在差异,主要有概率分布模型、时间序列模型、决策树模型和回归模型^[15]。概率分布模型是一种将交通事故的持续时间视为随机变量,并假设其符合某种概率分布,通过构建概率密度函数进行预测和分析的方法,但并不适用于所有事故持续时间的预测^[16]。时间序列模型是将观测到的事故数据按照一定的时间顺序进行排列,引入相关参数,通过拟合构建预测模型,但是进行模型的标定和准确性验证,具有一定的局限性^[17]。回归分析模型是应用数学表达式来描述自变量和因变量之间关系的方法^[18],其关键是选取回归参数,对数据的完整性要求较高,在实际应用中不具有广泛性。决策树模型的核心建立在属性测试的基础上,通过提取 If-Then 规则进行分类,其规则简单且学习效率高,在实际应用中具有潜在优势,特别在交通事故持续时间预测方面具有实用价值。

用于研究由交通事故引起的交通拥堵范围的方法通常包括两种:基于排队理论的方法和基于流体动力学的方法^[19]。基于排队理论的方法将交通事故引发的交通拥堵看作一个标准的车辆排队问题^[20],包括排队理论的确定性模型^[21]、到达和离开累积曲线模型^[22]、流量累积曲线模型^[22]以及排队预测的随机模型^[23]。排队理论的确定性模型使用到达和离开速率曲线来估计交通事件引起的总延迟,但其假定到达和离开的速率恒定,导致计算结果与实际情况存在差异。到达和离开累积曲线模型以及流量累积曲线模型都依赖

于实际数据,更符合实际情况.随机排队预测模型通过引入交通状态的随机参数来预测交通事故发生位置的排队长度,但需要结合传感器数据,仅适用于分析单车道拥堵情况,不考虑排队长度溢出到路段上游传感器的情况.每种方法在交通拥堵传播范围的问题研究中都有一定的优势和局限性,方法的选择取决于特定的研究问题和数据的可用性.

1.2 事故影响因素分析

1.2.1 常规事故影响因素 高速公路交通事故的发生是由多个因素共同作用导致的结果,现有研究多从人的因素、车辆因素、道路因素和环境因素^[24]来分析(表1).

表1 高速公路常规事故影响因素

Table 1 The influencing factors of conventional freeway accidents

要素	具体因素	影响机制
人	驾驶人生理、心理状态	驾驶员的生理、心理状况直接影响车辆的行驶状态,驾驶员的失误操作、粗心大意均可能引发事故
车	超载超限,车辆软硬件故障	车辆状态的改变促使驾驶员重新适应系统变化,一旦驾驶员无法精准控制车辆状态,将引起人、车等因素的失衡,容易导致事故发生
路	道路结构、线型	道路的可靠性在于其诱导性、适应性和协调性;在特殊设计的路段,应为驾驶员提供良好的诱导,否则容易导致驾驶人忽略潜在风险,或注意到风险却无法控制车辆状态以应对风险,从而导致系统失衡,事故发生
环境	道路设施、路侧环境、天气情况、交通环境	标志设置不合理,辨认性不足,严重影响驾驶人对路况信息的识别;在雨、雪、雾等恶劣天气下,驾驶人视度变差,路面附着系数变小,致使车辆制动能力降低,特别是在浓雾、团雾天气或路面结冰时,路面湿滑,刹车不灵,极易导致事故的发生;交通量、交通组成比例等都直接影响驾驶人的心理

1.2.2 事故影响因素分析方法 通过分析事故数据,对高速公路事故的信息和变量进行特征化,以发现事故的原因所在,有助于剖析驾驶行为,划定不安全区域,生成与事故数据相关的分类规则与分析方法,进而对事故模型中需要提取的变量进行选择.在分析高速公路事故影响因素方法方面,相应的方法包括聚类算法^[25]、决策树^[26]、关联规则^[27-28],如图1.

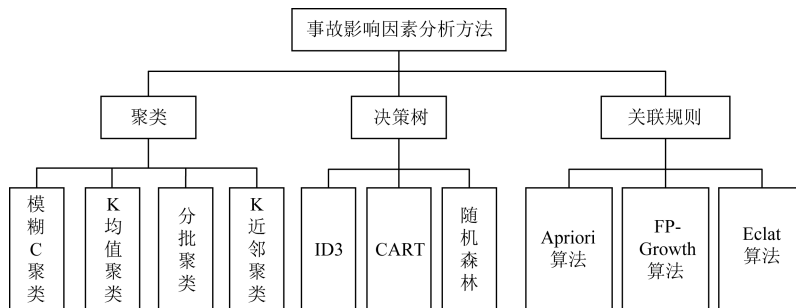


图1 事故影响因素分析方法

Fig.1 Methods of accident influence factors analysis

聚类分析是一种将研究对象按照相似性分组的方法,其目标是确保同一组内的对象尽可能相似,而不同组之间的对象尽可能不相似.聚类算法多应用对象之间的关联程度作

为共同特征进行分析,并在处理连续元素时使用距离函数来计算特征的相似度,在处理定性元素时使用相似度来度量^[29].基于相似函数的方法包括 K 近邻, K 均值聚类算法^[30]和潜类聚类(Latent Class Clustering, LCC)^[31],对于同时具有定性和定量属性的数据集,可以使用两步聚类^[32]技术,应用对数距离函数对聚类进行预分配,然后通过比较其与给定阈值的距离来验证预分配.聚类分析方法在降低数据维度、简化数据结构方面有很大优势,但其缺点在于对数据的异常值十分敏感,需要较高的数据预处理技术.

决策树以树或树状图的形式构建分类模型,其分析方法是探索性的而不是推论性的,可以用于高维数据和不完全信息的数据集.常见的决策树方法有 ID3、CART、随机森林等算法.Scott-Parker 等^[33]使用层次树对澳大利亚、新西兰和哥伦比亚 16~25 岁的年轻司机进行道路事故风险分割,预测因素主要包括使用手机、使用酒精饮料和搭载朋友作为乘客.决策树分析可以清晰地展示决策点与分支间的关系,可解释性强,但是容易存在过拟合现象.

关联规则挖掘是一种数据挖掘方法,用于从数据集中提取不同属性之间的潜在相关性^[34].其中,Apriori 关联算法是最经典的用于挖掘大型数据库中关联规则的算法之一,其主要目标是在大量数据中发现事物之间的潜在关系^[35].在交通事故影响因素分析的研究中,提出了很多改进的 Apriori 算法,如考虑事故属性约束的 Apriori 算法^[2]、WOMDI-Apriori 算法^[36-37].其关联关系主要由 3 个指标体现:支持度、置信度和提升值^[38].相对来说关联规则易于理解和应用,但是只能得到因素间的关联关系,无法知道其因果关系.

尽管研究人员开发了不同的具有较强预测和分析能力的交通事故影响因素分析模型,但每种模型都存在局限性,而且对影响因素之间的差异解释能力较弱,可能导致交通事故风险评价的偏差估计.交通事故通常发生于多因素的综合作用,各种因素对事故影响程度不同,难以通过单一因素做出全面综合的分析.从多因素角度分析交通风险因素并确定不同因素对交通事故影响的重要程度值得深入探讨.

1.3 事故严重程度

1.3.1 事故严重程度预测方法 事故严重程度预测模型通常采用离散选择模型,包括 Logit 模型和 Probit 模型,此后的研究多为对这类基础模型的改进(图 2).Shibata 等^[39]使用 Logistic 回归模型考虑多种因素来分析致死和非致死事故的严重程度.多项 Logit/Probit 模型^[40]以及嵌套 Logit 模型^[41]可用于分析多种结果的事故严重程度.考虑到预测指标与影响因素之间存在有序性,有序 Logit/Probit 模型^[42-43]被提出,以增强模型对实际情况的表达能力.将线性回归方法与基础模型结合,学者提出了对数线性模型^[44],旨在提高模型复杂性和性能.为了更好地反映事故规律,非参数模型^[45]被提出,即人工神经网络.该方法拟合度和预测性能较好,但对原始数据集的依赖性强,不便于建立通用的事故严重程度预测模型.除此之外,混合 Logit 模型^[46]和混合 Probit 模型^[47]的出现解决了数据异质性问题,贝叶斯网络^[48]、贝叶斯逻辑回归^[49]等模型也被用于事故严重性的预测.混合 Logit 模型、有序模型以及潜在类别模型等也受到广泛关注,具有良好的发展前景^[50].

1.3.2 严重程度影响因素分析 交通事故严重程度的影响因素主要包括两方面:主观因素(驾驶员)和客观因素(车辆、道路、环境).地面天气条件与事故严重程度之间存在很

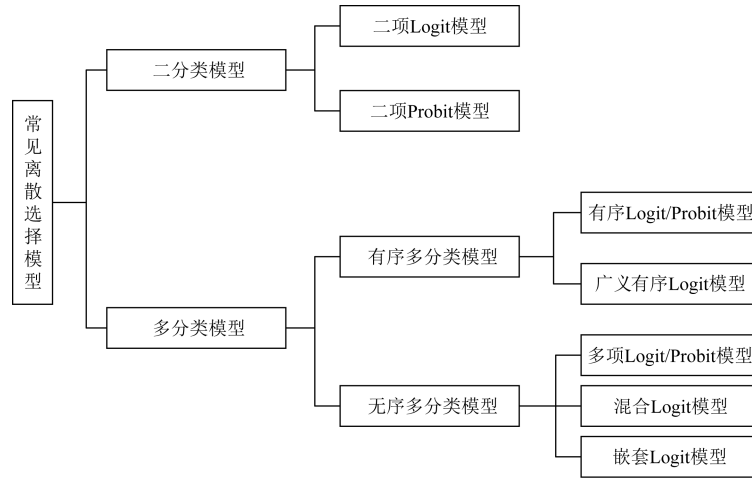


图2 常见的离散选择模型

Fig.2 Common discrete choice models

强的正相关关系,不良的天气条件如雨雪等可以增加事故的严重程度^[51],酒驾、超速以及是否使用安全带等驾驶行为对事故严重程度有显著影响^[39],车辆日行驶里程(Daily Vehicle Miles of Travel, DVMT)、男性比例(Male)、失业率(Unemployment Rate, UR)和25岁及本科以上学历的驾驶员比例(Bachelor's Degree, BD)等在一定的碰撞严重程度下呈正态分布^[52].道路照明、中央分隔带、路肩等道路条件也对事故的发生和事故严重程度存在影响.此外,驾驶员性别、车辆类型、碰撞位置、车辆性能、安全设施使用、路侧和中央分隔带的护栏、交通量等因素也对事故严重程度具有影响^[53-54].总的来说,事故严重程度的影响因素涉及到驾驶员的行为、道路条件以及气候等多方面,分析各因素的重要程度有助于采取及时措施以减轻交通事故的严重性.

1.4 常规事故预测

1.4.1 未考虑零值的交通事故预测模型

交通事故通常被视为小概率事件,尤其在高交通量的情况下,可以将交通事故的发生视为伯努利试验的极限状态^[55].在交通事故研究中,泊松分布模型被广泛用于对事故数据的分析和拟合.通过比较泊松模型和多元线性回归模型对交通事故数据的拟合效果,研究者得出了泊松分布模型更适合对交通事故数据进行分析 and 拟合的结论^[56-57].

负二项分布模型解决了泊松模型对方差和均值相等的假设的限制^[58],更适合处理交通事故数据中存在的过度离散性.负二项分布是一种泛化的泊松分布,不仅考虑了均值,还能够灵活地处理不等方差的情况.由于交通事故通常是小概率事件,其数据分布具有明显的离散性,负二项模型的引入能够更好地拟合这种分布.多项研究表明,采用负二项模型拟合交通事故数据的效果优于传统的泊松模型.Lord等^[59]、Pirdavani等^[60]、Montellah等^[61]和Gomes等^[62]的工作进一步验证了负二项模型在交通事故数量预测和分析方面的优势.这种模型的应用有助于提高对交通事故发生概率的准确理解,并能更好地支持相关政策 and 预防措施的制定^[63],已成为交通事故分析和预测的重要工具.

1.4.2 考虑零值的零膨胀回归模型 零膨胀回归模型^[64]假设交通事故的发生可以分为两种状态,一种是不发生交通事故;另一种是发生交通事故.其应用为解决交通事故数据中存在大量零值的问题提供了新方法,零值表示大多数时间或路段没有发生交通事故的情况.这种模型能够更好地适应数据的特点,克服了泊松模型和负二项模型在处理零值方面的限制,能够更准确地拟合交通事故数据.目前,已有许多研究通过零膨胀回归模型建立交通事故分析模型,包括交叉口交通事故分析模型^[65]、道路交通安全影响因素方模型等^[66].这些研究结果表明,零膨胀回归模型在拟合交通事故数据方面具有优势.然而,零膨胀回归模型将交通事故的发生过程划分为两种状态,可能与实际情况不完全一致,需要谨慎考虑模型的适用性,并根据具体情况做出决策^[67].应该根据数据的特点和研究目的来确定模型,以确保模型能够准确地反映交通事故情况并准确预测.

1.4.3 考虑零值的 Tobit 回归模型 Tobit 回归模型的应用为处理交通事故率数据中存在大量零值的问题提供了一种有效的方法.Tobit 模型通常用于处理含有截尾(Censored)或左截尾(Left-censored)的数据,其中数据值受到下限约束,因此对于零值数据(即交通事故率中的零值)的建模非常适用.一些研究者已经应用 Tobit 回归模型来分析交通事故率数据.例如,Anastasopoulos 等^[68]使用 Tobit 回归模型分别建立了交通事故率分析模型和交通事故次数分析模型,并验证了这种方法的有效性^[69-70].研究也证明了 Tobit 回归模型在分析交通事故率中的零值问题时具有很好的拟合效果^[71-72].在存在大量零值的情况下 Tobit 模型是一种有效的工具,其有效性有助于更准确地理解交通事故率数据的分布和相关因素,从而支持交通安全政策和预防措施的制定.

除上述模型外,机器学习具有可处理多维数据、编码灵活和预测能力强的优点,目前已被广泛应用在道路事故的预测中^[63,73-74].主要方法有贝叶斯网络^[75]、遗传算法和进化计算^[76]、支持向量机^[77]、人工神经网络^[78]和深度学习算法^[79]等.

2 二次事故识别与预测

二次事故的定义:在某一事故(一次事故,Primary Crash,PC)的时空影响范围内,由于受PC影响而导致发生的交通事故,称之为二次事故(Secondary Crash,SC),即在第一次事故发生的空间区域和时间边界内再次发生的碰撞事故.有研究指出,发生二次事故与未发生二次事故的碰撞相比,造成严重伤害的可能性增加了6.98倍^[80].二次事故严重危害司乘人员的生命财产安全,给道路交通管理工作带来压力,同时也严重威胁着人们的出行安全.高速公路二次事故的威胁及预防,已经成为交通从业人员亟需解决的问题.因此国内外学者针对二次事故的识别、预测及预防手段开展了大量研究.

2.1 二次事故识别

交通事故数据集包含了许多事故属性,但在大多数事故数据系统中,事故没有被归类为一次事故或二次事故.研究人员需要通过事故数据和交通数据来识别二次事故.如果可以获得准确的碰撞时空信息,且在一次碰撞的影响区域内发生再次碰撞,则认定其为二次事故,前一次碰撞为一次事故.二次事故识别方法主要包括4类:静态时空阈值法、基于排队论、基于速度等值线图 and 基于冲击波的方法^[81](表2).

表 2 高速公路二次事故识别方法概述

Table 2 Overview of SCs identification methods on freeways

方法	基本原理	优点	缺点
静态时空 阈值	通过定义固定的时空阈值,借以描述事故影响预期	简单方便,对数据要求较低	缺乏弹性,特定环境下的识别容易出错
排队模型	以排队长度建立一系列解释变量(到达率、转移率、事故持续时间)的函数	更准确,可以动态判断一次事故影响区域	精度取决于解释变量的数量和质量,无法应用于整体路网
速度 等高线图	利用速度传感器数据绘制速度轮廓图,定量分析一次事故空间影响	考虑反复出现的拥堵情况,引入了加权系数	需要沿途速度传感器数据,精度与参考速度的选择有关
冲击波	采用交通流理论对二次事故进行识别	综合考虑了交通流特性,识别较为精确	交通流量及密度难以测量

2.1.1 静态时空阈值法 静态阈值法是最经典的二次事故识别方法,通过定义固定的时空阈值来识别一次事故和二次事故组合,基本原理如图 3 所示.给定一次事故的位置和发生时间 (t_p, s_p) ,使用以下标准判断

$$SC \begin{cases} 1, & \text{if } [t_c \in (t_p, t_p + \Delta t) \ \& \ s_c \in (s_p, s_p + \Delta s)] \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_c, s_c 分别表示需要判断的碰撞发生的位置和时间; Δt 和 Δs 分别表示一次事故的持续时间和空间影响面积; s_c 值为 1 表示碰撞被识别为二次事故,否则为 0.这种静态方法的准确性主要取决于所设定的阈值及其对研究区域的适用性.静态时空阈值法由 Raub^[82]于 1997 年提出,规定二次事故应位于一次事故上游不超过 1.6km 的位置,并且在不超过一次事故清除后的 15min 内发生.静态阈值法是后续二次事故识别方法研究的基础^[83], Tian 等^[84]引入了 3 种时空标准来识别佛罗里达州州际公路上的二次事故:(1)3.2km,2h;(2)3.2km,事故持续时间+15min;(3)3.2km,事故持续时间+30min.识别结果因阈值设置不同而有所差异,采用同一事故数据集,使用标准(2)和标准(3)仅能识别出标准(1)下二次事故数的 50%.

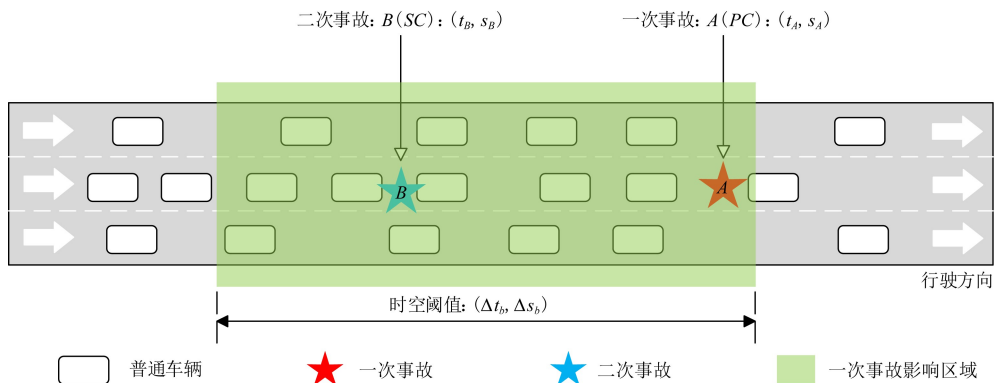


图 3 时空阈值法识别二次事故示意

Fig.3 Schematic diagram of the spatio-temporal threshold method for identifying secondary crashes

静态时空阈值法简单实用,可以粗略估计特定研究领域中的二次事故,但缺乏弹性,因此容易出错.一次事故影响区域可能因天气、交通状况或一天中的时间而有很大差异,

造成二次事故错误识别的可能性很大.此外,该方法的可移植性需要进一步探究;当应用于不同研究领域时,误报率达到 75%^[85].

2.1.2 基于排队模型的方法 排队模型^[86]更好地描述了一次事故的影响区域,通过建立定量的统计模型,将一组变量与队列长度联系起来,该队列长度近似于一次事故的影响区域

$$Q_{(t,s)} = f(X) \quad (2)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示影响队列长度的因素,如到达率、离开率、车道通行能力、事件持续时间、速度等; $f(X)$ 为映射函数.给定估计的队列长度,位于队列边界的碰撞将被识别为二次事故.Zhan 等^[86]提出一个简单的线性方程,使用到达率、分流率、公路通行能力调整系数、车道数、车道容量和驶离率来计算最大队列长度和队列消散时间.Sun 等^[87]提出使用三阶多项式方程,根据一次事故发生后的时间动态计算事件进展曲线.该方法很大程度上取决于可用预测因子的数量和质量.考虑到影响队列形成和消散的因素可能因情况而异,采用该方法预测的影响区域可能不准确.

2.1.3 基于速度等高线图的方法 随着传感器技术的发展, Park 等^[88]提出基于速度等高线图的方法来动态识别二次事故,主要思想是根据传感器测得的速度值来建立速度等高线图.时空图根据特定的时间间隔(如 5min、15min 等)和传感器所在的位置被分为网格单元.

通常根据如下标准确定每个单元是否拥挤

$$V_{(t,s)}^b = \begin{cases} 1, & \text{if } V_{(t,s)} < V_{(t,s)}^r \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{(t,s)}$ 表示当前速度, $V_{(t,s)}^b = 1$ 表示该单元拥挤, $V_{(t,s)}^b = 0$ 表示该单元畅通; $V_{(t,s)}^r$ 表示从历史数据中获得的参考速度.因此,可以使用一次事故发生后的拥堵单元来描述一次事故的影响区域.如果拥堵单元内发生另一次碰撞,则会将其识别为二次事故.该方法的关键前提是选择参考速度 $V_{(t,s)}^r$. Yang 等^[89]将用户定义的历史速度与环路探测器的当前速度数据进行了比较,以获得事故引发的碰撞区域.该方法考虑了常发性拥堵,并引入了用户定义的加权系数,然后绘制二元速度等高线图,以识别位于碰撞区域的一次事故和二次事故组合.

2.1.4 基于冲击波的方法 应用交通流理论对二次事故进行识别,一次事故的影响区域被假定为时空速度等高线图中的一个三角形,与一次事故发生和清除有关,由向后形成和释放的冲击波构成.这两种冲击波的传播速度分别为 ω_f 和 ω_d ,是根据一次事故引起的交通流和密度的变化计算的

$$\begin{cases} \omega_f = \frac{q_{\text{nor}} - q_p}{k_{\text{nor}} - k_p} \\ \omega_d = \frac{q_{\text{nor}} - q_{\text{sat}}}{k_{\text{nor}} - k_{\text{sat}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_{nor} 、 q_p 和 q_{sat} 分别表示一次事故发生前的正常流量、发生时的流量以及道路的饱和流量; k_{nor} 、 k_p 和 k_{sat} 分别表示相应的密度.一次事故的影响区域由 3 个顶点 (s_p, t_p) 、 $(s_p, t_p + t_d)$ 和 (s_1, t_1) 组成的三角形区域定义.其中 (s_p, t_p) 表示一次事故的起始里程和时间, t_d 是

一次事故的持续时间, (s_1, t_1) 表示向后形成和释放冲击波交点的里程和时间. Zheng 等^[90] 引入了简单的冲击波模型, 用排队和消散线来描述一次事故的影响区域. 其模型依赖于几个关键假设, 包括月平均小时交通量代表一次事故发生时的交通流状况且排队过程稳定不变. 后来提出了改进的基于冲击波的方法, Vlahogianni 等^[91] 使用自动跟踪移动交通堵塞模型 (ASDA) 提取交通信息和事件信息, 以定义基于冲击波的影响区域.

就目前国内高速公路的信息采集设备而言, 交通流量和密度难以精准测量, 基于冲击波的二次事故识别方法应用较少; 速度传感器在我国高速公路较为普及, 在采集到的速度数据较为完整的路段, 选择合适的速度参考值可用于对二次事故的识别; 静态时空阈值法和排队模型对数据的要求较低且应用简单方便, 适用于目前我国高速公路的二次事故识别.

2.2 二次事故预测

二次事故的发生与不同因素之间存在不同的潜在关系, 包括道路几何特性、一次事故、天气条件、交通特征等^[92-94], 其建模方法主要有参数法和非参数法.

在参数化方法的应用中, 通常使用统计模型来分析二次事故发生的风险. 一般采用逻辑回归模型来表征在一次事故发生的情况下, 二次事故发生的二分类性质: 即发生或不发生. 通过对模型参数的标定和评价, 可以确定各因素对二次事故发生风险的影响. 一次事故的清除时间、季节、事故涉及的车辆类型和一次事故的位置、事故能见度和车道拥堵时间是影响二次事故发生的重要变量^[95]. 一些研究对传统的逻辑回归模型做出改进, 以便更准确地预测二次事故的风险. Khattak 等^[94] 提出一种两级分层预测方法来解决事故持续时间信息的测量误差问题. 该方法先使用最小二乘回归模型来估计事故持续时间, 然后应用基于估计持续时间和其他因素 (如天气、道路信息和 AADT) 的逻辑回归模型来预测二次事故的发生. Xu 等^[96] 开发了一个随机效应 Logit 模型, 将二次事故发生的可能性与实时交通流条件、一次事故特征、环境条件以及道路几何特征联系起来. 逻辑回归模型应用简单方便, 但无法模拟由单个一次事故引起的多个二次事故. 为了表征二次事故的多发性机理, 多项 Logit 模型和其他广义线性模型被提出, 另外比例检验和概率模型也被运用于预测二次事故发生的可能性^[97-98].

神经网络和决策树等非参数化方法被应用于分析二次事故的可能性. Vlahogianni 等^[99] 开发了一个贝叶斯网络, 根据各种事件和交通特征对二次事故发生在不同影响区域的概率进行估计. 结果表明, 一次事故发生时的交通状况和事故清除所需时间是二次事故上游影响的最重要决定因素. Vlahogianni 等^[100] 又开发了一个解释性更强的神经网络模型. 研究表明, 速度、一次事故的持续时间、小时交通量、降雨强度以及一次事故涉及车辆数是与二次事故发生可能性相关的最重要决定因素.

参数模型虽然应用简单、易于理解, 但是无法预测一次事故引发的多个二次事故, 而现实中这种情况是真实存在的^[101]. 非参数模型有较好的预测性能, 但由于其复杂的非线性传输和激活函数, 以及受限于黑箱特性的变量, 导致模型对各影响因素与二次事故之间关系的作用机制解释性有限. 另一方面, 目前大多数预测模型使用的数据是一般道路特性或交通特性, 如道路几何线型、车道组成、天气气候条件、AADT 等, 这些变量作为历史值或平均值, 在一定程度上限制了预测结果的可靠性, 并不能反映事故发生时的真实交通状

态.部分研究使用考虑动态交通流条件影响的实时数据来预测二次事故发生的可能性^[96],但是使用实时交通流数据对数据的可靠性、普及性和可访问性有较高的要求,这也是未来二次事故预测模型建立需要解决的实际问题.

2.3 二次事故预防

除了二次事故的识别和预测外,一些研究者关注了二次事故的预防问题.现有研究中探讨的主要对策包括使用可变信息标志(Changeable Message Sign, CMS, 或 Variable Message Signs, VMS)、可变限速控制(Variable Speed Limit, VSL)和联网车辆(Connected Vehicle, CV)进行主动交通管理.如 Kopitch 等^[102]验证了 11 个 CMS 的有效性,CMS 提供了有关事故、工作区、拥堵、前方限速和警报的实时交通信息,以降低二次事故风险.研究发现,CMS 的有效性在 3.2~17.9km 之间增加,在 17.9~35.9km 减少.Li 等^[103]利用天气和交通流信息实施可变限速策略,以缓解二次事故风险,在加利福尼亚州 I-880 号公路的一项案例研究中,发现 2 种安全措施,包括碰撞时间(TET)和碰撞时间积分(TIT),在大雨条件下减少了 40%~50%.2017 年,Yang 等^[104]研究了联网车辆对提高驾驶员的情景意识以缓解二次事故的影响.图 4 展示了一个基于网联车的二次事故预防系统.如果联网车辆在高速公路上的渗透率(例如 15%)相对较高,则通过模拟冲突数来判断的二次事故风险会显著降低.

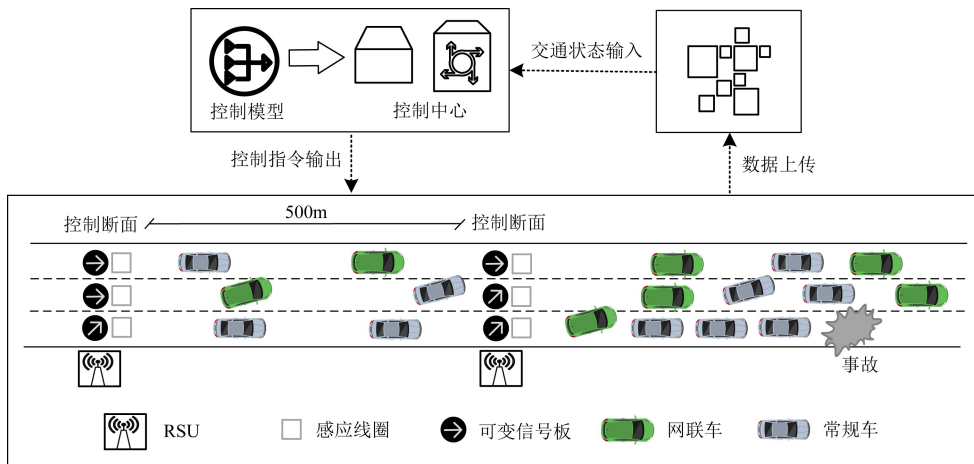


图 4 基于网联车的二次事故预防系统

Fig.4 Secondary crash prevention system based on networked vehicles

许多交通管理机构利用高速公路服务巡逻(Freeway Service Patrol, FSP)快速识别和应对事故.FSP 的目标是尽量减少事故持续时间,提高事故现场的安全性.研究发现,有效的 FSP 计划通过减少事件响应和清除时间来改善事件管理,从而减少事故相关的延迟和二次事故的概率^[105].FSP 车辆通过沿着指定的高速公路路段连续行驶,在道路上通过标志牌和警告标志来实现交通控制和安全保护,使救援人员可以更快地到达事故现场^[106].这种控制和保护有助于驾驶员在事故现场附近保持谨慎,从而降低其他道路使用者和救援人员的安全风险^[107].Salum 等^[108]对 2015~2017 年佛罗里达州杰克逊维尔高速公路上发生的 6 088 起事故进行了分析,发现基于事故影响持续时间减少 16min,道路巡警(Road

Rangers) 可以将二次事故的概率降低 21%。这些发现有助于事件管理者、响应者和研究人员评估项目的有效性。

3 多车事故与单车事故的差异性

一般将仅涉及 1 辆车的事故称为单车事故(SV 事故),而涉及 2 辆或 2 辆以上车的事故称为多车事故(MV 事故)^[109]。具体来说,SV 事故通常涉及越出车道的事故和撞击固定物,而 MV 事故通常涉及追尾事故和侧碰等事故。因此,交通安全研究人员认为,SV 事故和 MV 事故的致因不同^[10]。虽然 MV 事故的比例小于 SV 事故,但与 SV 事故相比,发生在高速公路上的 MV 事故会造成更为严重的人员伤亡与车辆和道路结构的损坏,这引起了相关学者的高度关注,对 MV 事故的影响因素、事故严重程度及预测展开一系列的研究与讨论(表 3)。

表 3 多车事故相关研究

Table 3 Multi vehicle crash related research

文献	研究层面	研究方法	研究内容
[110]	影响因素	对比分析	事故碰撞特征与碰撞车辆数量的关系
[111]	影响因素与热点识别	单变量负二项条件自回归和双变量负二项式空间条件自回归模型	确定 SV 和 MV 碰撞的不同影响因素,并确定是否可以通过单独考虑 SV 和 MV 碰撞来更好地确定热点
[112]	严重程度	混合 Logit 模型	分别对农村公路上涉及卡车的 SV 事故和 MV 事故的伤害严重程度进行建模,调查 SV 和 MV 事故中驾驶员受伤严重程度的差异
[113]	严重程度	多项式 Logit 和有序 probit 模型	碰撞对象是涉及道路弱势使用者、乘用车和重型车辆的事故严重程度影响因素
[114]	预测模型置信区间	泊松-伽马和二元 probit 模型	SV 和 MV 碰撞分别建模和同时建模时,泊松-伽马模型预测的置信区间差异
[115]	事故次数预测	多元泊松对数正态(MVPLN)模型	利用 MVPLN 空间模型估计不同多车碰撞类型的碰撞次数

3.1 事故致因

研究分析 SV 事故和 MV 事故的潜在影响因素,发现存在明显差异(表 4)。

关于交通量对 2 种事故的影响,目前尚未得出一致的结论。Persaud 等^[119]以及 Geedipaly 等^[114]研究表明,交通量对 SV 事故和 MV 事故都有促进作用,而 Lord 等^[120]研究发现,交通量对 SV 事故和 MV 事故有显著影响,但是作用相反,交通量与 MV 事故次数呈正相关,但与 SV 事故次数呈负相关。与上述研究不同,Yu 等^[117]、Ma 等^[118]发现交通量仅对 MV 事故有显著影响。

山区高速公路的线形条件相对复杂,包括道路平曲线半径较小、纵坡坡度较大、视距不良以及长大下坡等情况。此外,雨雪等恶劣天气容易导致路面湿滑,从而增加了事故的发生风险。与平原地区相比,山区高速公路上的事故发生频率通常更高^[121]。在山区高速公路上,多车连环事故(Multiple Vehicles on Mountain Expressways, MME)的后果通常比单车事故更为严重。在多车事故影响因素的研究中,特别关注了山区高速公路,重点探究可能导致 MME 事故的驾驶员因素。Zhang 等^[122]分析了我国江西泰赣高速公路的 MME 事故数

据,发现年轻的女性驾驶员,对严重的 MME 事故的影响更大.研究人员也探索了道路几何特征,例如,Rusli 等^[123]研究了马来西亚的 MME 事故,发现小交叉口的存在会增加 MME 事故的可能性,而陡坡上水平曲线和超车车道的存在也会增加 MME 事故发生的可能性.天气因素对 MME 事故的影响也是关注的重点,如降雨^[123]、路面状况^[118,124]会显著影响 MME 事故的发生.

表 4 SV 事故和 MV 事故影响因素的差异

Table 4 Differences in factors affecting SV and MV crashes

影响因素	MV 事故	SV 事故
乘客侧路肩宽度 ^[116]	+	-
曲率 ^[117]	+	o
速度限制 ^[116-117]	o	+
纵向坡度 ^[117]	o	+
视距 ^[116]	o	-
服务水平 ^[116]	o	-
路面湿度 ^[118]	o	+
车道数 ^[118]	-	o
中间带宽度 ^[111,117]	-	-
水平曲线比例 ^[111]	+	+
纵坡长度 ^[111]	+	o

注:“o”表示无显著影响;“+”表示与事故发生率呈正相关;“-”表示与事故发生率呈负相关.

上述对一般高速公路或山区高速公路 MV 事故和 SV 事故的致因研究基于特定区域、特定线路的事故数据,造成某些研究结论不一致,需要进一步研究不同的数据和基础设施类型来证实模型的可靠性.对于不同道路线型、路面结构、交通量、天气条件等因素的高速公路,在 MV 事故和 SV 事故的预防中还需结合现实条件,不能盲目采取措施.后续的研究应给出综合性的结论,例如“在车道数为多少,曲率半径在多大范围内,纵坡坡度与长度为多少的条件下,可通过何种手段减少 MV 事故的发生”.

3.2 事故预测模型

鉴于 SV 和 MV 碰撞相关特征差异,交通安全领域的研究人员^[125-127]提出,应为这 2 类碰撞建立不同的碰撞预测模型,开发 2 个不同的模型相比将 2 类碰撞组合在一起的综合模型可以提供更好的预测性能.

Shankar 等^[128]分析了公路设计特征、天气和季节性变量对不同碰撞类型的安全影响,使用不同模型来预测不同的碰撞类型比将所有碰撞类型组合在一起的单一模型具有更强的解释力.Mensah 等^[125]研究了交通流聚合和分散对预测模型估计的影响,发现 SV 和 MV 碰撞具有显著不同的特征,对于相同的 2 类事故,使用 SV 和 MV 碰撞的聚合模型比 2 个单独模型进行预测输出的事故数更少.Qin 等^[129]针对不同的碰撞类型开发了零膨胀泊松模型.Srinivas 等^[114]比较了使用 SV 和 MV 碰撞的综合模型与不同模型进行预测时,置信区间是否存在重要差异.

单独的模型在很大程度上忽略了 SV 和 MV 碰撞之间的相关性,可能会降低参数估计的精度和模型效率^[115,130].为了解释 SV 事故和 MV 事故之间的相关性,Karlis^[131]、Ma 等^[132]提出了多变量建模方法,包括多元泊松(MVP)模型、多元负二项回归(MVNB)模

型^[133]、多元泊松-伽马混合(MVPG)模型和多元泊松对数正态(MVPLN)模型^[130],来研究SV事故和MV事故.Ma等^[118]建立了具有相关路段特定随机效应的二元泊松对数正态模型,所提出的模型结构可以解决SV和MV之间的相关性、SV和MV在每段内的时间相关性、SV和MV碰撞的时间相关性之间可能存在的联系.Yu等^[117]开发了2种碰撞的聚合和分解模型,使用贝叶斯二元泊松对数正态模型和具有相关随机效应的贝叶斯分层泊松模型,来分析2种碰撞可能的相关性及其发生条件。

4 新兴技术在高速公路交通安全中的应用

4.1 新技术的理论研究

在非常规事故的识别、诊断和管理中,传统技术面临着许多限制.随着车路协同、大数据、数字孪生、物联网等新技术的不断发展,“卡脖子”技术的突破为事故分析与主动安全管控提供了全新的思路.当前,研究重点集中在推动“智慧高速”技术的发展,这也是高速公路发展的必要趋势,通信、控制、信息和新能源等技术的综合应用,为应对非常规事故带来了更为创新的解决方案。

发达国家和地区如美国、欧盟、英国、日本等在该领域的起步较早,21世纪初开始,美国提出了智能交通系统(Intelligent Traffic Systems, ITS)发展规划,到2011年,ITS规划基本成型,消除或减少了15%的事故损失,标志着美国高速公路紧急救援体系的建立^[134].在事故检测和处理过程中,美国采用新的ITS系统大大提升交通安全事故的处理效率,逐渐形成了较为成熟的高速公路事故管理(Freeway Incident Management, FIM)程序.数字孪生技术先后带领多个欧美国家率先实现了智慧交通升级.欧洲27国于2015年共同提出了“第五代交通”的发展理念,针对欧洲超 3×10^4 km的路网进行网络化管理,并根据统一规则进行整体网络关键路段的判别.英国智能公路计划包含3项新技术:可变信息标志、新型事故探测仪和全国互联的路网信息系统.日本高速公路的ETC2.0系统的研究与引入使其成为交通管理系统较为先进的亚洲国家.总体上说,这些发达国家将事故响应、救援、现场清理、事后恢复等流程统筹结合,对常规事故和非常规事故在发现、处理、预警、预防各方面形成了相应的监测系统与控制中心,形成了较为完善的高速公路事故管理系统。

针对智能交通技术和车路协同的研究,我国起步较晚,但学者们也进行了积极的探索,而且发展十分迅速.杜豫川等^[135]提出了智慧高速的逻辑架构(图5).姚佼等^[136]基于车路协同技术,针对事故发生地点的不同,分主线、进口匝道下游、出口匝道下游3种场景提出了协同引导策略.洪晋夫^[137]提出了一套基于车路协同的弯道安全度预警系统.龙科军等^[138]基于多源数据融合,创建了高速公路黑点特征数据集,应用集成学习的CatBoost算法判别了高速公路交通事故黑点.伍永豪等^[139]提出了一种基于物联网与云服务技术的高速公路安全预警系统设计方案,可实现数据采集、行车智能预警、实时高清视频监控及图像捕捉功能.张敬木翰等^[140]提出了一种基于物联网环境下交通模拟的拥堵队列长度预测方法,利用物联网(Internet of Things, IoT)传感技术,结合路网中的交通、天气和可感知的道路基础设施状况,快速、实时地预测交通事件发生后复杂道路环境中的拥堵发展情况。

新兴技术开始应用于二次事故的安全预警中.杨澜等^[141]在4G和DSRC通信网络基

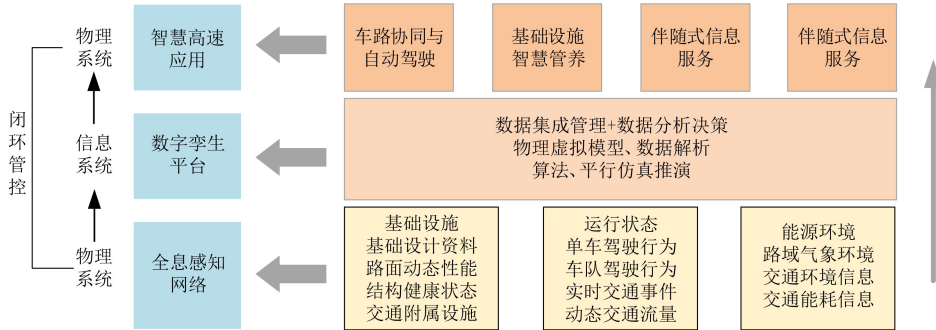


图 5 智慧高速的逻辑架构

Fig.5 Logical architecture of intelligent freeway

础上构建了高速公路通信场景与事故预警框架,可在车速低于 120km/h 的情况下有效避免追尾和侧向碰撞.马英魁等^[142]设计了基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的车路协同事故通告系统,对道路前方事故情况进行通告,降低高速公路二次事故的发生概率.汪宇等^[143]将普通的防撞护栏升级成智能防撞护栏系统,具备碰撞检测、空间定位、早期警报和系统连通功能,一定程度上降低了二次事故的发生率.

目前新兴技术在多车事故的研究中应用较少.通过事故再现得出的事故分析结果是责任认定的基础^[144],而多车事故由于涉事方多,事故原因复杂,事故再现对多车交通事故责任认定具有重要意义.谭正平等^[145]运用多源信息融合技术,提出了将碰撞痕迹、事件数据记录系统(Event Data Recorder,EDR)、微量物证、视频/音频等信息要素融合的分析思路和方法.

与国外成体系的高速公路交通安全管理系统相比,我国当前的研究大多基于高速公路系统中的某一要素或几个要素的集合,缺乏“人-车-路-环境”的有机结合,应将碎片化管理转向全要素、全时空感知、全方位管控,推动伴随式信息服务、实时交通管控.高速公路运行环境相对封闭,现有研究主要侧重于事故事后处置,属于被动管控,容易导致事故影响范围扩大和事故影响程度加重,难以满足新时代高质量出行体验和高效业务管理的需求.因此,通过对高速公路运营的动态和静态数据进行分析,进行多时间尺度的运营态势预测,精准识别或预测主要匝道、瓶颈路段和主要通行通道,对车流提前引导和管控,实现主动安全管控^[146],是智能高速公路决策和控制的基本发展方向.

4.2 新技术的工程实践

美国等发达国家更早地将新技术应用于高速公路工程实践中.目前美国智慧公路的覆盖率达到 80%以上,高速公路管理局(NHTSA)分析和统计了 700 多万起交通事故,得出一个重要的结论,即车联网系统的部署可以减少近 80%的车辆碰撞事故.怀俄明州交通部将 I-80 州际高速公路作为车联网重要试点项目的一部分,采取了多项措施来改善高速公路的安全性和运行效率.针对重型卡车流量大、冬季暴雪和大风等因素导致的事故高发问题,开展了车车交互和车地通信的部署,提供前方事故预警、道路运行态势感知、事故区域警告、天气情况、险情通告等 5 项功能.英国采用数字孪生技术实时监测 M25 号高速公路的运营状态,并根据实时状态来调整限速,有效地减少了 M25 号高速公路的交通拥堵,

提高了道路的安全性.日本自 2016 年提出 ETC2.0,以高速公路的动态收费标准为例,使用 ETC 车辆轨迹数据分析路网的通行情况,主动引导车辆绕行外环高速公路,并根据拥堵情况提供高达 50%的通行费折扣,有效缓解了市内道路的交通拥堵状况.ETC2.0 还支持高速公路运行状态分析,通过监测车速变化等特征,精确识别路网的瓶颈节点,有助于及时开展应急救援和基础设施优化,提高了道路的安全性和通行效率.

我国高速公路的路网规模在短期内迅速扩张,现已拥有全球最长的高速公路网,但是交通监控、智能交通系统(ITS)、交通数据分析等先进技术的应用并未与迅猛的高速公路规模发展同步实现.近些年也越来越认识到将新兴技术运用于高速公路运营管理来提升效率和安全性的重要性.2016 年交通运输部发布了《交通运输信息化“十三五”发展规划》并提出推进智慧公路示范应用,各省纷纷投入到智慧高速公路的建设和实践中.江西省在这方面走在了全国前列,2017 年 12 月宁定高速公路利用北斗等先进技术,通过在高速公路沿线部署设备,实时监测车流情况,并整合报警手机定位、路况预测等多种功能,在发生交通事故或其他紧急情况时,相关部门可以更快速地获知信息,做出及时反应和处置,完成了首批智慧高速公路的建设和运营.图 6 为基于车路协同技术的交通信息检测、交互的原理图.广西借助北斗高精度位置网,构建了一套智慧高速公路系统,具备车辆引导、安全监控、设施数字化等多项功能^[147],可以更好地监控车辆位置,确保道路安全,提高了交通管理的效率.沪杭甬智慧高速公路在绍兴段采用了先进的技术,部署了一系列“慧眼”设备,通过视频数据结构化和毫米波雷达分析,可以在短时间内检测到异常事件,一旦发现异常,系统会弹出警报通知管理人员,异常事件的主动发现比例从 1.3%提升到 90%以上,大大提高了道路安全和交通运行的可控性.杭绍台智慧高速公路,利用视频事件自动识别异常停车、行人以及机动车走应急车道等场景,采用激光雷达轨迹跟踪进行道路风险的评估,实现了车道及交通状态的感知、拥堵原因的可视化.杭州湾大桥利用 344 部桥面摄像机和后台视频 AI 分析,实现全路段车辆轨迹、路面事件实时还原,并与经纬度一一映射,96%的异常事件可以在 30s 内自动识别发现.除此之外,上海、浙江、江西、河北、湖北等多个省市正在积极推动新一代智慧高速公路、智慧高速特管区、5G 智慧高速等项目的建设^[148].这一系列项目的推进标志着我国的智慧高速公路事业从探索期逐步迈入了发展期.

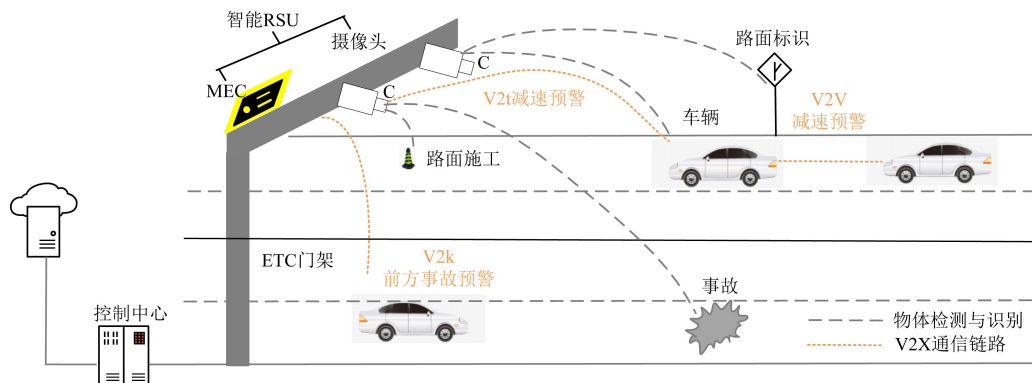


图 6 基于车路协同技术的交通信息监测、交互原理

Fig.6 Schematic diagram of traffic information detection and interaction based on V2X

与欧美国家高速公路智慧化建设的对比可知,在今后的高速公路建设中,技术应用与基础设施建设应尽可能同步.我国虽然已经建设多条智慧高速示范路段,但立足于当前的技术条件,落地小范围示范工程尚有余力,要达到网络级、城市级大范围的主动安全管控技术的联合应用仍比较困难.目前,管控措施的有效性依赖智慧感知系统提供的交通数据,而受成本约束,外场监测设施部署往往难以实现低成本全域覆盖,除去高速公路核心区域及关键节点,大部分外场感知设备不具备升级条件,难以实现大范围普及.

5 未来研究方向

本文总结了高速公路常规事故与非常规事故的研究现状,讨论了二次事故的识别、预测及预防手段,分析了多车事故与单车事故的差异性,并针对车路协同等新技术在高速公路交通安全方面的应用进行了梳理.

对于常规事故,随着雷达、视频、传感器等数据采集设施的广泛应用,多源海量交通数据的获取变得更加便捷.大数据在交通安全领域成为研究的热点,深入挖掘高速公路数据所蕴含的交通信息成为关注焦点,数据挖掘算法设计与开发方面需要进行更深入的研究.轨迹数据也成为研究者关注的一个重要方向,通过不同技术手段得到的轨迹数据在颗粒度和准确性上存在差异;因此,未来的研究方向之一是如何获取高速公路车辆行驶更高精度的轨迹数据,并基于这些高精度轨迹信息进行交通冲突与事故风险分析.人工驾驶车辆(HDV)和网联自动驾驶车辆(CAV)混合行驶的时代即将到来,研究高速公路场景下HDV与CAV混行状态下的新交通安全理论迫在眉睫.此外,基于模拟驾驶技术,设计面向高速公路靶向场景的模拟驾驶实验方案与架构,是针对驾驶人因素维度,来实现高效事故风险辨识与精确行车安全诱导的重要途径.同时,车路协同技术的发展为高速公路安全管理标定了新方向,基于车路协同的高速公路事故风险建模与安全控制应用也将成为未来高速公路安全管理的探索趋势.

对于二次事故,首先,“自动识别”成为二次事故研究的重要需求之一,除传统的道路检测器外,视频探测器和联网车辆成为高精度交通信息的重要来源,多源融合数据为判断二次事故的时空影响区域提供了更多的视角,成为进一步研究要解决的重要问题.其次,遗传算法、深度学习、强化学习等先进的学习算法可很好地探究事故风险与特定因素之间的关系,可将其应用于二次事故的实时研究中.再次,在二次事故的预测中,现有的预测模型仅考虑了数据集中包含的可用变量,但一些未包含的变量也可能是显著变量,忽略这些变量有可能导致研究结论与实际不符.更加详细的数据采集和发布对研究人员获取必要的信息以开发更可靠的预测模型十分重要.最后,在二次事故的预防方面,相较于CMS和VMS标志,联网车辆(CV)能提供更加实时的共享信息,通过CV将一次事故的信息传输给驾驶员,让驾驶员根据自身需求及时调整驾驶行为和出行路径,不仅能降低二次事故的风险,还能提高通行效率.

对于多车事故,目前大多数对影响因素、事故严重性的研究是针对特定的城市地区,采用特定路段的数据进行分析,其中道路几何形状、环境和交通特征数据存在一定的差异,研究结论的普适性及模型的泛化能力仍需通过大量数据集的扩展研究来进一步论证.当前的研究仅给出了对MV事故和SV事故发生和严重程度的不同显著影响因素变量,但

事故往往由多种因素促成,严重程度也不止受单个因素影响,因此未来的挑战之一是进一步给出影响因素的不同组合对危险级别的影响,例如车辆失控与路面潮湿组合将产生最大危险,驾驶员失误与雾天环境组合将产生较大危险^[149]。此外,需要特别指出的是,区别于2车事故,还应当特别关注涉及3辆及以上多车事故的发生机理及其影响因素的耦合效应。利用物联网技术和车辆通信技术,给车辆赋予具有联网功能的“二代身份证”,使高速公路上行驶的车辆能够互相通信并与道路基础设施连接,以共享信息和警报,实现智能化的识别、定位、跟踪、监控和管理,前方发生异常及时发出预警,预防高速公路连环事故的发生。还可以整合工程学、数据科学、心理学、医学等领域的知识,开展综合交叉学科的研究,以综合应对多车事故问题。

智慧高速的发展必将引领高速公路交通安全关键技术的新突破。目前智慧高速应用如车路协同、安全增强等取得了一系列的研究成果与工程实践^[150],但在通讯稳定性、诱导有效性等方面仍存在一定问题。因此,未来研究需继续开发更可靠的通信软硬件技术,以确保车辆间及车辆与基础设施间的实时通信稳定性,进一步优化车路协同系统中的模型和算法,包括交通流量预测、路径规划和事故处理等方面的算法优化,以提高实时诱导的准确性和效果。另外,未来的高速公路交通流将是普通汽车和智能网联汽车,包括低级别智能网联汽车和高级别智能网联汽车的混合体,如何在高度混合的交通流条件下进行交通数据采集、多源信息融合、为智能化程度不同车辆的信息提供服务、基于交通流特征的风险评估等高速公路交通控制技术,也是需要进一步思考的问题。非常规事故由于其不确定性大、后果严重性强,更应受到关注与重视。未来可以通过一系列智能化监测设施,建立智慧管控中心,运用联动控制技术,实现事故的智能化协同处置。应用AI图像识别等技术,对道路上的安全隐患进行全息感知,前端多源数据融合,通过大数据算法进行管理,并预置各场景的应急预案、知识图谱等,综合分析做出决策。新兴技术,如大数据、人工智能、融合感知和车路协同,在高速公路领域的整合和应用正在迅速发展。同时,新的交通模式,如编队驾驶、远程驾驶和无线充电等也在逐渐落地,这将进一步扩展高速公路管理和服务的内涵,显著提升高速公路交通的通行能力和安全水平。

参 考 文 献

- [1] 交通事故每年夺走130万人生命 世卫组织发起“道路安全十年计划” 警惕车祸中的这10个“死亡风险”[EB/OL].[2022-11-01].http://news.cnhubei.com/content/2021-11/23/content_14267308.html
Traffic accidents kill 1.3 million people a year WHO launched the “road safety 10-year plan” Be aware of the 10 “risk of death” in car accidents.[2022-11-01].http://news.cnhubei.com/content/2021-11/23/content_14267308.html
- [2] 袁振洲,娄晨,杨洋.时间差异条件下的高速公路交通事故成因分析[J].北京交通大学学报,2021,45(3):1-7
Yuan Zhenzhou, Lou Chen, Yang Yang. Analysis of highway traffic accidents causes under time differences[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(3): 1-7
- [3] 杨洋,袁振洲,陈治,等.基于改进系统工程决策理论的高速公路交通安全评价研究[J].北京交通大学学报,2022,46(3):34-48
Yang Yang, Yuan Zhenzhou, Chen Zhi, et al. Study on freeway traffic safety evaluation based on improved system engineering decision theory[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 34-48
- [4] Yuan Z, He K, Yang Y. A roadway safety sustainable approach: Modeling for real-time traffic crash with limited data and its reliability verification[J]. Journal of advanced transportation, 2022, 2022: 1-14
- [5] 杨洋.考虑区域类型差异的高速公路事故风险识别与交通安全评价研究[D].北京:北京交通大学,2020

- Yang Yang. Research on the method of freeway crash risk identification and comprehensive traffic safety evaluation considering the regional type difference[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020
- [6] Li J, Guo J, Wijnands J S, et al. Assessing injury severity of secondary incidents using support vector machines[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2022, 14(2): 197-216
- [7] 安静方, 张萌, 周帅. 高速公路二次事故的研究综述[J]. 现代交通技术, 2023, 20(1): 70-74
An Jingfang, Zhang Meng, Zhou Shuai. Review of secondary accidents on expressway[J]. Modern Transportation Technology, 2023, 20(1): 70-74
- [8] Xu C, Xu S, Wang C, et al. Investigating the factors affecting secondary crash frequency caused by one primary crash using zero-inflated ordered probit regression[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 524: 121-129
- [9] Owens N, Armstrong A, Sullivan P, et al. Traffic incident management handbook[R]. 2010
- [10] Dong B, Ma X, Chen F, et al. Investigating the differences of single-vehicle and multivehicle accident probability using mixed logit model[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 18: 1-9
- [11] 李家龙, 邵毅明, 付立家. 高速公路交通事故成因分析及对策研究[J]. 公路交通技术, 2007, (增1): 120-122
Li Jialong, Shao Yiming, Fu Lijia. Causes analysis of expressway traffic accidents and counter measures[J]. Technology of Highway and Transport, 2007(S1): 120-122
- [12] Wang L, Zou L, Abdel-Aty M, et al. Expressway rear-end crash risk evolution mechanism analysis under different traffic states[J]. Transportmetrica. (Abingdon, Oxfordshire, UK), 2022: 1-18
- [13] 由冰玉. 高速公路交通事故影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
You Bingyu. Study on influencing factors of freeway accidents[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [14] 钟连德, 陈永胜, 孙小端, 等. 基于有序聚类分析的高速公路路段长度划分研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, (1): 43-46
Zhong Liande, Chen Yongsheng, Sun Xiaoduan, et al. Research on section division of freeway with ordinal clustering method[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, (1): 43-46
- [15] 赵蕾. 高速公路交通事故持续时间预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2018
Zhao Lei. Prediction of the duration of highway traffic accident[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018
- [16] Zhan C. Development of prediction models for freeway incident durations using data mining techniques[D]. Florida International University, 2006
- [17] 赵小强. 交通事故持续时间预测理论与方法[D]. 北京: 清华大学, 2010
Zhao Xiaoqiang. Theory and method of the incident duration prediction[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010
- [18] Cameron A C, Trivedi P K. Regression analysis of count data[M]. Cambridge University Press, 2013
- [19] 马阿瑾. 高速公路交通事故持续时间和影响范围研究[D]. 西安: 长安大学, 2013
Ma Ajin. Study on the freeway traffic accident duration and influence range[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013
- [20] 杨洋, 胡嫣然, 袁振洲, 等. 高速公路交通事故时空影响动态效应的传播分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 123-133
Yang Yang, Hu Yanran, Yuan Zhenzhou, et al. Analysis on propagation of spatio-temporal dynamic effects towards freeway traffic crash[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 123-133
- [21] Morales J M. Analytical procedures for estimating freeway traffic congestion[J]. Public Roads, 1986, 50(2): 55-61
- [22] Newell G F. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1993, 27(4): 281-287
- [23] Sheu J, Chou Y, Chen A. Stochastic modeling and real-time prediction of incident effects on surface street traffic congestion[J]. Applied Mathematical Modelling, 2004, 28(5): 445-468
- [24] 李婣娟. 复杂路网环境下高速公路二次事故预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2014
Li Chanjuan. The study of the secondary accident fore-warning of the expressway under network condition[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014
- [25] Cao G, Micheline J, Grigoriadis K, et al. Cluster-based correlation of severe driving events with time and location[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2016, 20(6): 516-531
- [26] Castro Y, Kim Y J. Data mining on road safety: Factor assessment on vehicle accidents using classification models[J]. International Journal of Crashworthiness, 2016, 21(2): 104-111

- [27] Ait-Mlouk A, Agouti T. DM-MCDA: A web-based platform for data mining and multiple criteria decision analysis: A case study on road accident [J]. *SoftwareX*, 2019, 10: 100323
- [28] Yang Y, Tian N, Wang Y, et al. A parallel FP-growth mining algorithm with load balancing constraints for traffic crash data [J]. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2022, 17(4): 4806
- [29] Bae J, Helldin T, Riveiro M, et al. Interactive clustering: A comprehensive review [J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2020, 53(1): 1-39
- [30] Kumar S, Toshniwal D. A data mining framework to analyze road accident data [J]. *Journal of Big Data*, 2015, 2(1): 1-18
- [31] De ona J, López G, Mujalli R, et al. Analysis of traffic accidents on rural highways using latent class clustering and bayesian networks [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 51: 1-10
- [32] Ma J, Kockelman K M. Crash modeling using clustered data from Washington State: Prediction of optimal speed limits [C]. *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 2006
- [33] Scott-Parker B, Oviedo-Trespalacios O. Young driver risky behaviour and predictors of crash risk in Australia, New Zealand and Colombia: Same but different? [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 99: 30-38
- [34] 崔妍, 包志强. 关联规则挖掘综述 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(2): 330-334
- [35] Cui Yan, Bao Zhiqiang. Survey of association rule mining [J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(2): 330-334
- [35] 牛毅, 李振明, 樊运晓. 基于数据挖掘的高速公路货车交通事故影响因素关联分析研究 [J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(4): 180-188
- Niu Yi, Li Zhenming, Fan Yunxiao. Correlation analysis of influencing factors of truck traffic accidents on expressways [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(4): 180-188
- [36] Yang Y, Yuan Z, Meng R. Exploring traffic crash occurrence mechanism toward cross-area freeways via an improved data mining approach [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2022, 148(9): 4022052
- [37] 杨洋, 袁振洲, 王印海, 等. 基于 WOMDI-Apriori 算法的高速公路交通事故风险识别 [J]. *交通工程*, 2021, 21(6): 1-10
- Yang Yang, Yuan Zhenzhou, Wang Yin Hai, et al. Freeway crash risk identification based on a new improved method of WOMDI-Apriori algorithm [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2021, 21(6): 1-10
- [38] 郭圣煜, 骆汉宾, 滕哲, 等. 地铁施工工人不安全行为关联规则研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(10): 185-190
- Guo Shengyu, Luo Hanbin, Teng Zhe, et al. Research on association rules of unsafe behavior for metro construction workers [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(10): 185-190
- [39] Shibata A, Fukuda K. Risk factors of fatality in motor vehicle traffic accidents [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1994, 26(3): 391-397
- [40] Shankar V, Mannering F. An exploratory multinomial logit analysis of single-vehicle motorcycle accident severity [J]. *Journal of Safety Research*, 1996, 27(3): 183-194
- [41] Shankar V, Mannering F, Barfield W. Statistical analysis of accident severity on rural freeways [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1996, 28(3): 391-401
- [42] Saccomanno F F, Nassar S A, Shortreed J H. Reliability of statistical road accident injury severity models [J]. *Transportation Research Record*, 1996, 1542(1): 14-23
- [43] Garrido R, Bastos A, de Almeida A, et al. Prediction of road accident severity using the ordered probit model [J]. *Transportation Research Procedia*, 2014, 3: 214-223
- [44] Chen W, Jovanis P P. Method for identifying factors contributing to driver-injury severity in traffic crashes [J]. *Transportation Research Record*, 2000, 1717(1): 1-9
- [45] Abdelwahab H T, Abdel-Aty M A. Development of artificial neural network models to predict driver injury severity in traffic accidents at signalized intersections [J]. *Transportation Research Record*, 2001, 1746(1): 6-13
- [46] Milton J C, Shankar V N, Mannering F L. Highway accident severities and the mixed logit model: An exploratory empirical analysis [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2008, 40(1): 260-266
- [47] Christoforou Z, Cohen S, Karlaftis M G. Vehicle occupant injury severity on highways: An empirical investigation [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(6): 1606-1620
- [48] Yang Y, Wang K, Yuan Z, et al. Predicting freeway traffic crash severity using XGBoost-Bayesian network model with consideration of features interaction [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022: 4257865

- [49] Chen C,Zhang G,Liu X C, et al.Driver injury severity outcome analysis in rural interstate highway crashes:A two-level Bayesian logistic regression interpretation[J].*Accident Analysis & Prevention*,2016,97:69-78
- [50] Savolainen P T,Mannering F L, Lord D, et al.The statistical analysis of highway crash-injury severities:A review and assessment of methodological alternatives[J].*Accident Analysis & Prevention*,2011,43(5):1666-1676
- [51] Amin M S R,Zareie A,Amador-Jiménez L E.Climate change modeling and the weather-related road accidents in Canada [J].*Transportation Research Part D*,2014,32:171-183
- [52] Li Z, Chen X, Ci Y, et al. A hierarchical Bayesian spatiotemporal random parameters approach for alcohol/drug impaired-driving crash frequency analysis[J].*Analytic Methods in Accident Research*,2019,21:44-61
- [53] 赵伟宁.基于改进 Logit 模型的高速公路交通事故严重程度分析方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020
Zhao Weining.Analysis of traffic accident injury severity on freeway based on improved logit model[D].Harbin ;Harbin Institute of Technology,2020
- [54] Wang Y G,Chen K M,Ci Y S, et al.Safety performance audit for roadside and median barriers using freeway crash records:Case study in Jiangxi,China[J].*Scientia Iranica*,2011,18(6):1222-1230
- [55] Jovanis P P,Chang H.Modeling the relationship of accidents to miles traveled[J].*Transportation Research Record*,1986,1068:42-51
- [56] Miaou S,Lum H.Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships [J]. *Accident Analysis & Prevention*,1993,25(6):689-709
- [57] Ye X,Pendyala R M,Shankar V, et al.A simultaneous equations model of crash frequency by severity level for freeway sections[J].*Accident Analysis & Prevention*,2013,57:140-149
- [58] Hauer E,Ng J C,Lovell J.Estimation of safety at signalized intersections[J].*Transportation Research Record*,1988,1185:48-61
- [59] Lord D,Mannering F.The statistical analysis of crash-frequency data:A review and assessment of methodological alternatives[J].*Transportation Research Part A:Policy and Practice*,2010,44(5):291-305
- [60] Pirdavani A,Brijs T,Bellemans T, et al.Evaluating the road safety effects of a fuel cost increase measure by means of zonal crash prediction modeling[J].*Accident Analysis & Prevention*,2013,50:186-195
- [61] Montella A,Imbriani L L.Safety performance functions incorporating design consistency variables[J].*Accident Analysis & Prevention*,2015,74:133-144
- [62] Gomes M J T L,Cunto F, Da Silva A R.Geographically weighted negative binomial regression applied to zonal level safety performance models[J].*Accident Analysis & Prevention*,2017,106:254-261
- [63] 刘振博.基于 ZINB 及 Tobit 回归的高速公路交通事故预测模型研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019
Liu Zhenbo.Research on prediction models of freeway traffic accidents based on ZINB and Tobit regression [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2019
- [64] Greene W H.Accounting for excess zeros and sample selection in Poisson and negative binomial regression models[J]. Discussion Paper EC-94-10,Department of Economics,New York University,1994
- [65] Dong C,Clarke D B,Yan X, et al.Multivariate random-parameters zero-inflated negative binomial regression model:An application to estimate crash frequencies at intersections[J].*Accident Analysis & Prevention*,2014,70:320-329
- [66] Malyshkina N V,Mannering F L.Zero-state Markov switching count-data models:An empirical assessment[J].*Accident Analysis & Prevention*,2010,42(1):122-130
- [67] Lord D,Washington S,Ivan J N.Further notes on the application of zero-inflated models in highway safety[J].*Accident Analysis & Prevention*,2007,39(1):53-57
- [68] Anastopoulos P C,Tarko A P,Mannering F L.Tobit analysis of vehicle accident rates on interstate highways[J]. *Accident Analysis & Prevention*,2008,40(2):768-775
- [69] Anastopoulos P C,Shankar V N,Haddock J E, et al.A multivariate tobit analysis of highway accident-injury-severity rates[J].*Accident Analysis & Prevention*,2012,45:110-119
- [70] Anastopoulos P C.Random parameters multivariate tobit and zero-inflated count data models:Addressing unobserved and zero-state heterogeneity in accident injury-severity rate and frequency analysis[J].*Analytic Methods in Accident Research*,2016,11:17-32
- [71] Zeng Q,Wen H,Huang H, et al.A Bayesian spatial random parameters Tobit model for analyzing crash rates on roadway segments[J].*Accident Analysis & Prevention*,2017,100:37-43

- [72] Chen F, Ma X, Chen S. Refined-scale panel data crash rate analysis using random-effects tobit model [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 73:323-332
- [73] Zheng M, Li T, Zhu R, et al. Traffic accident's severity prediction; A deep-learning approach-based CNN network [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:39897-39910
- [74] Yang Y, He K, Wang Y, et al. Identification of dynamic traffic crash risk for cross-area freeways based on statistical and machine learning methods [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2022, 595:127083
- [75] 杨洋, 贺昆, 王云鹏, 等. 面向动态交通流的高速公路事故风险模型空间移植研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(3):174-186
Yang Yang, He Kun, Wang Yunpeng, et al. Spatial transplantation for modeling of freeway traffic crash risk based on dynamic traffic flow [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(3):174-186
- [76] Hashmijnejad S H, Hasheminejad S M H. Traffic accident severity prediction using a novel multi-objective genetic algorithm [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2017, 22(4):425-440
- [77] Yang Y, Yin Y, Wang Y, et al. Modeling of freeway real-time traffic crash risk based on dynamic traffic flow considering temporal effect difference [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(7):4023063
- [78] Alkheder S, Taamneh M, Taamneh S. Severity prediction of traffic accident using an artificial neural network [J]. *Journal of Forecasting*, 2017, 36(1):100-108
- [79] 袁振洲, 胡嫣然, 杨洋. 考虑多维动态特征交互的高速公路实时事故风险建模 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(3):215-223
Yuan Zhenzhou, Hu Yanran, Yang Yang. Modeling towards freeway real-time traffic crash prediction considering multi-dimensional dynamic feature interactions [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(3):215-223
- [80] Xie K, Ozbay K, Yang H. Secondary collisions and injury severity: A joint analysis using structural equation models [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2018, 19(2):189-194
- [81] Yang H, Wang Z, Xie K, et al. Methodological evolution and frontiers of identifying, modeling and preventing secondary crashes on highways [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 117:40-54
- [82] Raub R A. Occurrence of secondary crashes on urban arterial roadways [J]. *Transportation Research Record*, 1997, 1581(1):53-58
- [83] Karlaftis M G, Latoski S P, Richards N J, et al. ITS impacts on safety and traffic management: An investigation of secondary crash causes [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 1999, 5(1):39-52
- [84] Tian Y, Chen H, Truong D. A case study to identify secondary crashes on Interstate Highways in Florida by using Geographic Information Systems (GIS). [J]. *Advances in Transportation Studies*, 2016, (2), 103-112
- [85] Imprialou M M, Orfanou F P, Vlahogianni E I, et al. Methods for defining spatiotemporal influence areas and secondary incident detection in freeways [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2014, 140(1):70-80
- [86] Zhan C, Gan A, Hadi M. Identifying secondary crashes and their contributing factors [J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2102(1):68-75
- [87] Sun C C, Chilukuri V. Dynamic incident progression curve for classifying secondary traffic crashes [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(12):1153-1158
- [88] Park H, Gao S, Haghani A. Sequential interpretation and prediction of secondary incident probability in real time [R]. 2017
- [89] Yang H, Bartin B, Ozbay K. Investigating the characteristics of secondary crashes on freeways [C]. 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, 2013
- [90] Zheng D, Chittur M V, Bill A R, et al. Secondary crash identification on a large-scale highway system [C]. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2014
- [91] Vlahogianni E I, Karlaftis M G, Golias J C, et al. Freeway operations, spatiotemporal-incident characteristics, and secondary-crash occurrence [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2178(1):1-9
- [92] Zhan C, Gan A, Hadi M. Identifying secondary crashes and their contributing factors [J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2102(1):68-75
- [93] Zhang H, Khattak A. What is the role of multiple secondary incidents in traffic operations? [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(11):986-997

- [94] Khattak A, Wang X, Zhang H. Incident management integration tool: Dynamically predicting incident durations, secondary incident occurrence and incident delays[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2012, 6(2): 204-214
- [95] Karlaftis M G, Latoski S P, Richards N J, et al. ITS impacts on safety and traffic management: An investigation of secondary crash causes[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 1999, 5(1): 39-52
- [96] Xu C, Liu P, Yang B, et al. Real-time estimation of secondary crash likelihood on freeways using high-resolution loop detector data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 71: 406-418
- [97] Hirunyanitiwattana W, Mattingly S P. Identifying secondary crash characteristics for California highway system[R]. 2006
- [98] Khattak A, Wang X, Zhang H. Are incident durations and secondary incidents interdependent? [J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2099(1): 39-49
- [99] Vlahogianni E I, Karlaftis M G, Golias J C, et al. Freeway operations, spatiotemporal-incident characteristics, and secondary-crash occurrence[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2178(1): 1-9
- [100] Vlahogianni E I, Karlaftis M G, Orfanou F P. Modeling the effects of weather and traffic on the risk of secondary incidents[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2012, 16(3): 109-117
- [101] Sarker A A, Paleti R, Mishra S, et al. Prediction of secondary crash frequency on highway networks[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 98: 108-117
- [102] Kopitch L, Saphores J M. Assessing effectiveness of changeable message signs on secondary crashes[R]. 2011
- [103] Li Z, Li Y, Liu P, et al. Development of a variable speed limit strategy to reduce secondary collision risks during inclement weathers[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 72: 134-145
- [104] Yang H, Wang Z, Xie K. Impact of connected vehicles on mitigating secondary crash risk[J]. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2017, 6(3): 196-207
- [105] Chimba D, Kutela B, Ogletree G, et al. Impact of abandoned and disabled vehicles on freeway incident duration[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2014, 140(3): 4013013
- [106] Lou Y, Yin Y, Lawphongpanich S. Freeway service patrol deployment planning for incident management and congestion mitigation[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(2): 283-295
- [107] Olmstead T. The safety benefits of freeway management systems and motorist assistance patrols [J]. *Research in Transportation Economics*, 2004, 8: 285-334
- [108] Salum J H, Kitali A E, Sando T, et al. Evaluating the impact of Road Rangers in preventing secondary crashes[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 156: 106129
- [109] Hong J, Tamakloe R, Park D. A comprehensive analysis of multi-vehicle crashes on expressways: A double hurdle approach[J]. *Sustainability*, 2019, 11(10): 2782
- [110] Öström M, Eriksson A. Single-vehicle crashes and alcohol: A retrospective study of passenger car fatalities in northern Sweden[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1993, 25(2): 171-176
- [111] Wang X, Feng M. Freeway single and multi-vehicle crash safety analysis: Influencing factors and hotspots[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 132: 105268
- [112] Chen F, Chen S. Injury severities of truck drivers in single-and multi-vehicle accidents on rural highways[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, 43(5): 1677-1688
- [113] Bandyopadhyaya R, Mitra S. Modelling severity level in multi-vehicle collision on indian highways[J]. *Procedia-social and Behavioral Sciences*, 2013, 104: 1011-1019
- [114] Geedipally S R, Lord D. Investigating the effect of modeling single-vehicle and multi-vehicle crashes separately on confidence intervals of Poisson-gamma models[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(4): 1273-1282
- [115] Hosseinpour M, Sahebi S, Zamzuri Z H, et al. Predicting crash frequency for multi-vehicle collision types using multivariate Poisson-lognormal spatial model: A comparative analysis[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 118: 277-288
- [116] Ivan J N, Pasupathy R K, Ossenbruggen P J. Differences in causality factors for single and multi-vehicle crashes on two-lane roads[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1999, 31(6): 695-704
- [117] Yu R, Abdel-Aty M. Multi-level Bayesian analyses for single-and multi-vehicle freeway crashes[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 58: 97-105
- [118] Ma X, Chen S, Chen F. Correlated random-effects bivariate poisson lognormal model to study single-vehicle and multivehicle crashes[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2016, 142(11): 4016049

- [119] Persaud B N, Mucsi K. Microscopic accident potential models for two-lane rural roads [J]. *Transportation Research Record*, 1995, 1485: 134-139
- [120] Lord D, Manar A, Vizioli A. Modeling crash-flow-density and crash-flow-V/C ratio relationships for rural and urban freeway segments [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2005, 37(1): 185-199
- [121] Meng Y. Estimation of crash severity on mountainous freeways in Chongqing [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017; 9764309
- [122] Zhang C, Guo X, Wang Y, et al. What leads to severe mountainous freeway crashes in southeast of China? [J]. *Tehnicky vjesnik/Technical Gazette*, 2016, 23(6): 1747-1753
- [123] Rusli R, Haque M M, Afghari A P, et al. Applying a random parameters Negative Binomial Lindley model to examine multi-vehicle crashes along rural mountainous highways in Malaysia [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 119: 80-90
- [124] Wang Y, Zhang H, Shi N. Factors contributing to the severity of heavy truck crashes: A comparative study of Jiangxi and Shaanxi, China [J]. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2021, 15(1): 41-51
- [125] Mensah A, Hauer E. Two problems of averaging arising in the estimation of the relationship between accidents and traffic flow [J]. *Transportation Research Record*, 1998, 1635(1): 37-43
- [126] Ivan J N. New approach for including traffic volumes in crash rate analysis and forecasting [J]. *Transportation Research Record*, 2004, 1897(1): 134-141
- [127] Jonsson T, Ivan J N, Zhang C. Crash prediction models for intersections on rural multilane highways: Differences by collision type [J]. *Transportation research record*, 2007, 2019(1): 91-98
- [128] Shankar V, Mannering F, Barfield W. Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1995, 27(3): 371-389
- [129] Qin X, Ivan J N, Ravishanker N. Selecting exposure measures in crash rate prediction for two-lane highway segments [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2004, 36(2): 183-191
- [130] Agüero-Valverde J, Jovanis P P. Bayesian multivariate Poisson lognormal models for crash severity modeling and site ranking [J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2136(1): 82-91
- [131] Karlis D. An EM algorithm for multivariate Poisson distribution and related models [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2003, 30(1): 63-77
- [132] Ma J, Kockelman K M. Bayesian multivariate Poisson regression for models of injury count, by severity [J]. *Transportation Research Record*, 2006, 1950(1): 24-34
- [133] Rodgers G B, Leland E W. An evaluation of the effectiveness of a baby walker safety standard to prevent stair-fall injuries [J]. *Journal of Safety Research*, 2005, 36(4): 327-332
- [134] Carvell J R J D, Balke K, Ullman J, et al. *Freeway management handbook* [R]. United States. Federal Highway Administration, 1997
- [135] 杜豫川, 刘成龙, 吴荻非, 等. 新一代智慧高速公路系统架构设计 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 203-214
Du Yuchuan, Liu Chenglong, Wu Difei, et al. Framework of the new generation of smart highway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 203-214
- [136] 姚佼, 李俊杰, 李佳洋, 等. 车路协同下高速公路突发交通事故的车流引导策略 [J]. *物流科技*, 2022, 45(15): 78-82
Yao Jiao, Li Junjie, Li Jiayang, et al. Guidance strategy of traffic flow on freeway when accidents happen with cooperative vehicle infrastructure [J]. *Logistics Sci-Tech*, 2022, 45(15): 78-82
- [137] 洪晋夫. 基于车路协同的高速公路弯道危险预警系统设计 [J]. *山西交通科技*, 2019, (2): 25-27
Hong Jinfu. The early-warning system design of the highway dangerous bend based on the vehicle-road coordination [J]. *Shanxi Science & Technology of Communications*, 2019, (2): 25-27
- [138] 龙科军, 邹道兴, 何石坚. 基于多源数据融合的高速公路交通事故黑点判别 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1): 89-95
Long Kejun, Zou Daoxing, He Shijian. Identification of black spots in highway traffic accidents based on multi-source data fusion [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)* 2022, 19(1): 89-95
- [139] 伍永豪, 余正红, 李聪. 基于物联网的高速公路安全预警系统研究 [J]. *计算机与数字工程*, 2014, 42(2): 280-285

- Wu Yonghao, Yu Zhenghong, Li Cong. Highway safety warning system based on internet of things[J]. Computer & Digital Engineering, 2014, 42(2):280-285
- [140] 张敖木翰,张平,曹剑东.物联网环境下高速公路交通事故影响范围预测技术[J].物联网技术,2015,5(5):41-43+47
- Zhang Aomuhan, Zhang Ping, Cao Jiandong. Highway traffic accident impact range prediction technology in IoT environment[J]. Intelligent Processing and Application, 2015, 5(5):41-43+47
- [141] 杨澜,马佳荣,赵祥模,等.基于车路协同的高速公路车辆碰撞预警模型[J].公路交通科技,2017,34(9):123-129
- Yang Lan, Ma Jiarong, Zhao Xiangmo, et al. A vehicle collision warning model in expressway scenario based on vehicle-infrastructure cooperation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(9):123-129
- [142] 马英魁,向郑涛,陈宇峰,等.基于SDN的车路协同事故通告系统[J].湖北汽车工业学院学报,2022,36(3):26-29
- Ma Yingkui, Xiang Zhengtao, Chen Yufeng, et al. Vehicle-road cooperative accident notification system based on SDN[J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2022, 36(3):26-29
- [143] 汪宇,潘强,刘林,等.面向二次事故预警的主动式智慧防撞护栏设计[J].科技创新与应用,2022,12(13):103-107+112
- Wang Yu, Pan Qiang, Liu Lin, et al. Active and intelligent crash barrier design for secondary accident warning[J]. Technological Innovation and Application, 2022, 12(13):103-107+112
- [144] 张晓云,金先龙,亓文果,等.基于刹车印迹的典型碰撞事故再现分析[J].应用基础与工程科学学报,2006,14(3):418-426
- Zhang Xiaoyun, Jin Xianlong, Qi Wenguo, et al. Re-enactment analysis of typical collision accidents based on brake marks[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(3):418-426
- [145] 谭正平,何霞,张道文,等.基于多信息融合的多车事故碰撞过程分析方法[J].中国司法鉴定,2021,(1):98-104
- Tan Zhengping, He Xia, Zhang Daowen, et al. A multi-vehicle accident collision process analysis method based on multi-information fusion[J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2021, (1):98-104
- [146] 强波浪.基于车路协同技术的交通安全应用实践[J].物流时代周刊,2022,(4):115-117
- Qiang Bolang. Traffic safety application practice based on vehicle-circuit collaboration technology[J]. China Logistics Times, 2022, (4):115-117
- [147] 王小军,王少飞,涂耘.智慧高速公路总体设计[J].公路,2016,61(4):137-142
- Wang Xiaojun, Wang Shaofei, Tu Yun. Overall design of smart expressway[J]. Highway, 2016, 61(4):137-142
- [148] 董莹,董鹏,唐猛.我国智慧交通的现状和发展对策研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(8):264-266
- Dong Ying, Dong Peng, Tang Meng. Research on the current situation and development countermeasures of ITS in China[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2019, 15(8):264-266
- [149] Santos K, Dias J P, Amado C, et al. Risk factors associated with the increase of injury severity of powered two wheelers road accidents victims in Portugal[J]. Traffic Injury Prevention, 2021, 22(8):646-650
- [150] 徐志刚,李金龙,赵祥模,等.智能公路发展现状与关键技术[J].中国公路学报,2019,32(8):1-24
- Xu Zhigang, Li Jinlong, Zhao Xiangmo, et al. A review on intelligent road and its related key technologies[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(8):1-24

Review of the Research Toward Freeway Unconventional Traffic Accidents

YANG Yang^{1,2}, WANG Wenhui³, WU Xianyu³, WANG Yunpeng^{1,2}

(1.School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Key Laboratory for Cooperative Vehicle Infrastructure Systems and Safety Control, Beihang University, Beijing 100191, China; 3.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract

Frequent traffic accidents on freeways have caused serious safety problems of human life and property. Previous researches have yielded valuable insights into accidents cause analysis and accident severity prediction methods, but often focus on conventional traffic accidents, ignoring unconventional accidents such as secondary and multi vehicle crashes. This review aims to summarize the current research literature review of freeway traffic accidents and the application of innovative technologies in freeway traffic safety. Especially, it focuses on the research progress towards unconventional traffic accidents such as secondary traffic accidents and multi vehicle traffic accidents, figures out the problems, demands and challenges of the current research, and discusses the future research and application direction. The analysis indicates that there are some differences between the occurrence mechanism of conventional traffic accidents and unconventional accidents. For the research towards factors' exploration, severity analysis and accident prediction, the model applicability between conventional traffic accidents and unconventional accidents is typically different. In terms of model characteristics, the traditional models based on mathematical statistics analysis are not dominant in dealing with the nonlinear relationship between accidents and multiple factors, while the machine learning approaches have significant advantages in dealing with the nonlinear relationship between input and output data. However, the machine learning approaches are not strong in interpretation. Consequently, due to the different mechanism of these models, there are some limitations in various methods. With the abundance of the traffic accident information collection means and accuracy, as well as the improvement of computer performance, extending the research ideas and improving the model performance are worthy of further consideration. Moreover, emerging technologies such as Vehicle-to-Everything (V2X) communication systems and intelligent networking will be deeply integrated with freeway traffic safety, providing new application scenarios for traffic safety digital governance and dynamic services.

Keywords: traffic accident; freeway; roadway traffic safety; unconventional traffic crash; secondary traffic crash; single vehicle crash; multi vehicle crash; digital governance