

高速公路互通式立体交叉出入口安全性研究综述*

张 驰^{1,2▲} 刘 锴^{1,2} 王世法³ 谢子龙^{1,2} 王 雪^{1,2}

(1. 长安大学公路学院 西安 710064;

2. 长安大学道路基础设施数字化教育部工程研究中心 西安 710064;

3. 四川成绵苍巴高速公路有限责任公司成都分公司 成都 610599)

摘 要: 高速公路互通式立交是保障高速公路正常运行的关键节点,而主线出入口是互通立交的重要组成部分,同时也是互通区交通流特性最为复杂的路段。国内外学者对互通式立交的安全性展开了较多研究,并取得了一系列成果,但由于互通式立交出入口的复杂性,相关研究并不系统。为此,以高速公路互通式立交以及高速公路出入口的安全性为主题进行文献分析,得到高速公路互通立交出入口安全性的研究热点,从几何设计指标、安全性评价方法以及运行速度3个方面对研究成果进行梳理与综合评述。研究结果表明:①我国现行规范对变速车道长度的考虑因素过于单一,与车辆实际运行中的变速距离需求不吻合;规范中对互通立交分合流端视距的规定,未针对车辆性能、驾驶人对道路交通环境的感知-反应时间进行优化;②目前对分合流鼻端的研究主要从二维角度开展,几何设计指标研究重点未聚焦于平纵指标的组合效果;③事故统计法、层次分析法以及模糊综合评价法在高速公路安全评价中应用较多,事故统计法可以客观的反映道路安全状态,但依赖于事故统计数据的准确性,层次分析法可以较好的构建安全性评价指标体系,但指标赋权较主观,使得评价结论不稳定,模糊综合评价方法对系统安全水平的准确评价依赖于隶属函数的选择,对研究人员的专业性提出了较高的要求;④现行规范的线形协调性、连续性的评价标准以传统方法 Δv_{85} 为基础,该方法假设基础与实际相悖,高估了道路的安全性能,针对不同车型在不同出入口形式的运行速度预测模型有待深入研究。得到针对相关研究的建议与展望如下:①变速车道研究可以基于驾驶行为,优先考虑对变速车道上加速度变化趋势进行研究;②出入口视距研究应考虑复杂道路条件、视觉刺激下的反应时间,结合不同车型的车辆特性展开研究;在事故统计方法、预测模型基础上,可结合出入口特点进一步优化,并用相对成熟的安全评价方法进行检验;③出入口处的运行速度研究可考虑以浮动车辆数据(floating vehicle data, FCD)为主,龙门架及雷达测速数据为辅对车辆实际行驶速度变化过程进行研究。

关键词: 高速公路;匝道出入口;变速车道;安全性评价;运行速度

中图分类号: U412.35+2 **文献标识码:** A **doi:**10.3963/j.jssn.1674-4861.2023.02.001

A Review on the Safety Studies at Entrances and Exits of Expressway Interchanges

ZHANG Chi^{1,2▲} LIU Kai^{1,2} WANG Shifa³ XIE Zilong^{1,2} WANG Xue^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Engineering Research Center for Digitization of Road Infrastructure of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Sichuan Chengmian Cangba Expressway Co., Ltd Chengdu Branch, Chengdu 610599, China)

Abstract: Interchanges of expressways are critical nodes for traffic operation, and their entrances/exits are key components and show most complex traffic flow behaviors. Researchers have conducted numerous safety studies on in-

收稿日期:2022-10-09

* 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005)、四川省科技计划资助项目(2022YFG0048)、四川省交通运输科技项目(2022-ZL-04)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,教授.研究方向:道路安全与仿真.

E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

terchanges and obtained a variety of conclusions, but their studies are not systematic due to the complexity of interchanges and the entrances/exits. To this end, this paper looks into the literature on the safety of interchanges and entrances/exits of expressways, identifies corresponding research topics of interest, and reviews corresponding findings in three areas: geometric design index, safety evaluation method and operation speed. Study results indicate that: ①The number of factors considered during the design of speed-change lanes in the existing standards in China is not enough to match the required distance for speed change from the field. The criterion of sight distance at the merging end of an interchange is not optimized based on vehicle performance and drivers' perception-reaction time to different traffic scenarios. ②Studies in the literature on the merging nose are mainly carried out from a two-dimensional perspective, and the geometric design factors are not focused on the effect of the combination of flat and longitudinal factors. ③The accident statistics method, analytic hierarchy process, and fuzzy comprehensive evaluation method are most commonly used in evaluating the safety of expressways. The accident statistics method can objectively be used to evaluate the safety, but it is dependent on the accuracy of accident statistics; the analytic hierarchy process can be used to develop safety evaluation indexes, but the weights associated to the indexes are often subjectively determined, which often makes the results useless; the fuzzy comprehensive evaluation method relies on the selection of the affiliation function to ensure a good accuracy of the evaluation of the level of safety, which places high requirements on the knowledge of the user. ④The evaluation criteria of coordination and continuity of road alignment in the existing standards are based on the traditional method Δv_{85} , whose basis is contrary to the reality leading to overestimating the safety performance of the road. Therefore, speed prediction models for different vehicles in different entrances/exits should be studied in depth. From these results, the suggestions for the future works are as follows: ①Studies on speed-change lanes can be based on driving behavior, with a focus on the analysis of acceleration patterns over speed-change lanes. ②Studies on sight distance at entrances/exits should take into account complex traffic circumstances, drivers' reaction time under visual stimuli and characteristics of vehicles. Further optimization can be conducted based on the unique characteristics of entrances/exits, and tested with relatively mature safety evaluation methods, such as accident statistics methods and prediction models. ③In terms of the operating speed at entrances/exits, floating vehicle data (FCD) can be used together with the data from gantry cranes and radars to study the process that vehicles change their speed.

Keywords: expressway; entrance and exit of ramp; speed-change lane; safety evaluation; operation speed

0 引言

近年来,我国交通运输事业蓬勃发展,伴随高速公路里程数的不断增加,高速公路交通安全问题一直是国内外学者研究的重点。由于高速公路具有完全控制出入的特点,车辆的驶入、驶出均通过互通式立交完成,车辆须在互通立交区较短距离内完成车道变换、分合流、交织等驾驶行为,使得互通立交出入口附近的交通流状况远比高速公路基本路段复杂,互通立交范围内事故数也在高速公路事故数中持续占有较高的比重。高速公路互通立交的合理设计与运营管理是保障高速公路正常运行的关键^[1]。

2021 年我国发生了 273 098 起交通事故,死亡人数达到 62 218 人^[2],其中高速公路交通事故发生率最高,死亡率约为普通公路的 8 倍。根据我国近年来的研究数据表明,发生在高速公路互通立交及其附近的交通事故占到高速公路事故总数的近 30%,其中有 70% 的交通事故集中于互通式立交出入口路段^[3]。根据数据计算,2015—2021 年中国公路里程由 457.73×10^4 km 增加至 520×10^4 km,随着高速公路主

线里程每增长 1%,分、合流区事故率分别增长 3.5% 和 2.23%^[4]。这反映出高速公路互通式立交出入口是高速公路的关键路段,对立交出入口的研究也必将成为未来道路安全研究的重点。

国内外诸多学者针对互通式立交展开了一系列的研究,并形成了体系,但针对互通立交出入口的安全性研究仍存在不足。互通式立交出入口处的车辆运行特性及组成较为复杂,现有的出入口几何指标考虑因素较单一,安全评价方法不系统,且针对出入口运行速度预测模型研究较少。

因此,对已有的研究成果进行归纳、总结,围绕出入口几何设计指标、安全性评价方法、运行速度预测 3 个方面,分析当前研究的问题,提出未来研究方向。

1 研究热点

为获得更具代表性的成果,利用主题检索 CNKI 核心及以上期刊文献,检索时间范围为 2000 年 1 月—2022 年 6 月,对文献进行去重及文献相关性筛选,得到与主题相关性较高的核心文献。本文探究的 2 个相关主题数据来源如下:①探究出入口在高速公路

互通立交研究中的重要性,以“高速公路互通式立交”为主题关键词进行文献检索,得到SCI文献90篇、EI文献102篇、CNKI文献608篇,共涉及关键词464个;②为找到高速公路出入口相关研究中的重点问题,以“高速公路出入口”为主题进行文献检索,获取SCI文献42篇,EI文献60篇,CNKI文献631篇,共提取关键词460个。以文本的格式导出获取的文献,利用6.1.R3版本的CiteSpace软件对导出的文献进行数据分析及可视化处理,最终得到主题分析结果。

1.1 高速公路互通式立交关键词

以“高速公路互通式立交”为主题获取到的文献关键词中,设定5为关键词频次临界值,并以“频次”“中心度”作为关键词的2个主要因素,列举频次前25位的关键词并绘制成关键词共现表,见表1。前5位的关键词为:设计(91次)、方案比选(42次)、匝道(34次)、选型(29次)、改扩建(28次)。关键词出现频次越高,中心度越大,表明该方向的研究热度越高,在关键词网络中更加重要。

表1 高速公路互通式立交关键词共现 (频次>4)
Tab. 1 Motorway interchange keyword co-occurrence (frequency >4)

序号	频次	中心度	关键词
1	91	0.25	设计
2	42	0.11	方案比选
3	34	0.12	匝道
4	29	0.06	选型
5	28	0.05	改扩建
6	24	0.06	山区
7	22	0.08	交通量
8	18	0.03	交通组织
9	16	0.04	变速车道
10	14	0.05	交通安全
11	14	0.04	最小间距
12	13	0.04	立交
13	11	0.04	间距
14	10	0.02	安全
15	9	0.04	出口匝道
16	8	0.03	互通式
17	8	0.02	运行速度
18	7	0.02	互通
19	7	0.01	安全性
20	7	0.02	安全评价
21	6	0.01	山区高速
22	6	0.01	线形设计
23	5	0.01	净距
24	5	0.02	减速车道
25	5	0.01	分流点

由表1可见:以“高速公路互通式立交”为主题

得到的关键词,基本可划分为设计方案研究和安全性研究。与设计方案研究相对应的关键词为设计、方案比选、选型、改扩建等,该方向的研究主要针对互通立交设计型式、设计要点等方面展开;对互通式立交某一路段的安全研究主要集中于匝道(34次)和出入口(35次)。互通式立交出入口虽未作为关键词直接出现在互通式立交的研究中,但作为互通式立交中连接主线与匝道的关键路段,出入口被细化为变速车道、出口匝道、入口匝道、分流点、合流点等多个方面,每个方面皆单独进行了研究。

利用CiteSpace对文献进行突现词分析,得到23个突现的关键词,见图1。总体分析,突现词的涌现表明高速公路互通式立交研究在近20年快速发展,大致可分为2个阶段。

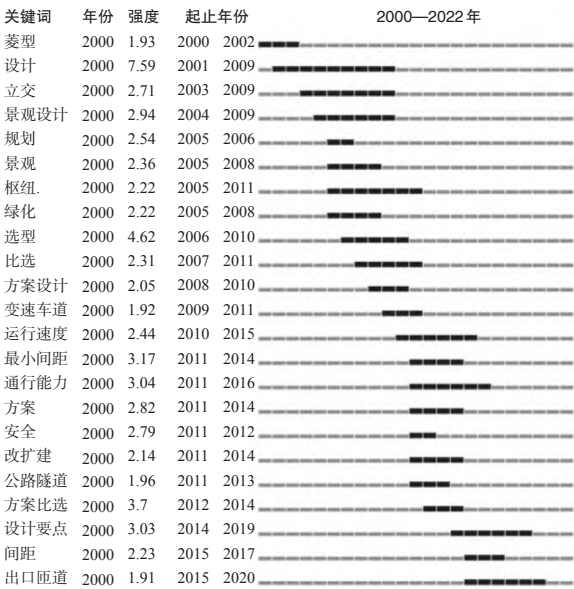


图1 高速公路互通式立交研究突现词

Fig. 1 Motorway interchange study breakout words

工程研究阶段(2000—2009年)。在这段时间内,国内学者对互通立交的研究尚处于起步阶段,随着高速公路建设的不断发展,有大量的互通立交工程问题待解决。2004年,朱宗余^[5]针对互通立交设计,探讨设计人员在设计过程中常出现的概念不清、方法不当、标准运用不灵活等问题,在丰富设计经验的基础上,理顺了立交设计中的设计指标与设计方法。2006年,赵发科等^[6]基于25种典型立交形式,提出路网规划阶段对互通立交等级划分和形式选择的方法。该阶段的研究主要以解决实际问题为目的,互通式立交的设计规范、设计方法、立交选型、方案比选等方面是研究的主要方向。

深化研究阶段(2010—2022年)。随着对互通立交研究的不断深入,许多学者开始注意到互通立交

区与高速公路普通路段的路段特征有所区别。2009—2011 年涌现了 8 个突现词,对互通立交的研究开始聚焦于局部路段,并以提高安全性为研究的主要目的,围绕互通立交区的交通特性,展开了互通立交区的深化研究。2013 年,高建平等^[7]以匝道连续分流点间距为研究重点,从交通量、交通标志等方面入手,研究最小间距的影响因素,应用交通冲突技术进行安全评价,并基于驾驶员行为和可接受间隙理论建立了最小间距的计算模型。2016 年,邵阳等^[8]在高建平等的研究基础上,深入研究互通立交连续出入口间距,详细划分了分合流驾驶行为,并分别得到了主线连续分流匝道间距的推荐值。目前,高速公路的互通立交区已成为研究重点,不断形成完整的体系。

1.2 高速公路出入口关键词

以“高速公路出入口”为主题获取到的文献关键词中,设定 5 为频次临界值,以“频次”“中心度”为关键词的 2 个主要因素,列举频次前 25 位的关键词并绘制关键词共现表,见表 2。其中前 5 位的关键词为:交通安全(25 次)、快速路(23 次)、互通立交(23 次)、交通工程(22 次)、交通组织(21 次)。

由表 2 可见:出入口的研究对象主要为高速公路互通立交出入口以及城市快速路出入口,与其相关的研究大多针对交通安全问题展开,与安全问题相关的关键词共出现 52 次(交通安全、安全评价、安全设施、交通事故、综合评价),关键词中心度较高。

对检索范围内的 800 篇文献进行可视化分析,可视化结果见图 2。图中关键词节点越大,表明关键词出现频次多,在关键词网络中权重越大;节点颜色代表时间区段,越接近红色表明关键词在近几年的研究中频繁出现,是目前该领域内的研究热点。

由图 2 可见:交通安全是出入口研究的中心问题,围绕高速公路互通立交出入口展开的相关研究所占权重更大,结合关键词权重、研究热度,以及与其他关键词的关联性,得到以下热点关键词:变速车道、安全评价、运行速度、改扩建、交通量、交通事故。综合考虑互通立交出入口特点,本文选出入口几何指标、出入口安全评价,以及出入口运行速度为本文深入研究的重点,对这 3 个方面的国内外研究进行综述。

2 几何设计指标

高速公路互通立交出入口的几何设计指标主要包括变速车道长度、渐变段长度、分合流区视距、平

表 2 高速公路出入口关键词共现 (频次大于 4)
Tab. 2 Motorway entrance/exit keyword co-occurrence (frequency >4)

序号	频次	中心度	关键词
1	25	0.06	交通安全
2	23	0.08	快速路
3	23	0.06	互通立交
4	22	0.13	交通工程
5	21	0.05	交通组织
6	14	0.01	交通仿真
7	14	0.02	匝道
8	13	0.03	收费站
9	11	0.01	安全评价
10	10	0.01	运行速度
11	10	0.04	城市道路
12	8	0.04	设计
13	7	0.01	交通特性
14	7	0.01	改扩建
15	6	0.01	变速车道
16	6	0.01	安全设施
17	5	0.01	交通管理
18	5	0.01	交通事故
19	5	0.01	交织区
20	5	0.03	交通
21	5	0.01	城市化
22	5	0.01	城市交通
23	5	0.01	景观
24	5	0.01	协调控制
25	5	0.02	综合评价

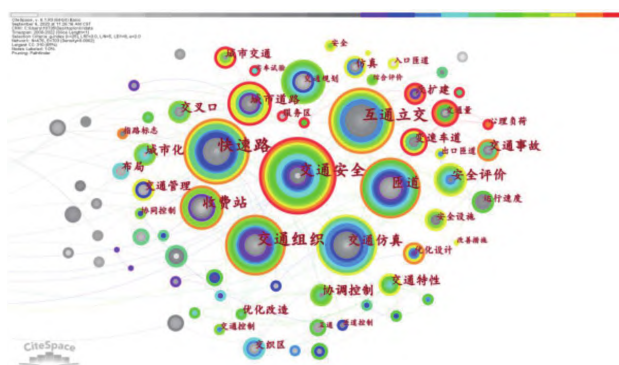


图 2 高速公路出入口关键词图谱

Fig. 2 Keyword mapping of highway entrances and exits

曲线要素,以及竖曲线半径等,几何指标的合理选取是车辆运行安全的重要保障。出入口处车辆发生车道变换及加减速操作过程主要在变速车道上进行,而出入口处视距的满足是车辆识别出入口位置、进入变速车道的前提,分合流鼻端作为变速车道与匝道的连接点,其设计指标的选取对出入口的视距与行车安全产生影响。基于研究热点分析,变速车道长度与出入口视距是几何设计指标研究的重点,考

虑到出入口几何设计指标的研究仍处于不断深化阶段,分合流鼻端的几何技术指标虽未在研究热点中体现,但该区域的研究十分重要,本文选取变速车道长度、出入口视距,以及鼻端设计指标作为几何设计指标的研究重点。

2.1 变速车道长度

2.1.1 加速车道长度

高速公路合流区包括匝道、加速车道和与之相联系的主线变宽部分,图3为双向4车道高速公路合流区示意图。加速车道是合流车辆完成加速、汇入过程的主要路段,驾驶人需在此路段观察主线情况,采取加速措施,寻找车流空隙,最终安全汇入主线。若加速车道长度过短,驾驶人顺利完成上述操作的难度增加,合流车辆需等待汇入时机,加速车道供车辆加速的作用难以实现,或者合流车辆不得不强行汇入主线,干扰主线相邻车道上的正常通行,甚至会引发交通事故;增加加速车道长度,可以为驾驶人提供较长的观察、反应时间,一定程度上可缓解汇入主线过程中出现的问题,但长度增加至一定程度后,合流车辆在较长路段范围内可随时汇入主线,主线相邻车道的车辆需时刻保持警惕,给驾驶人带来较大的心理负担,同时也易造成资源浪费和建设成本的增加。

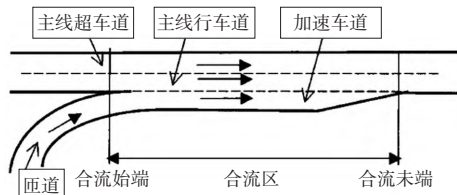


图3 高速公路合流区示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the highway merge area

各国单车道加速车道长度见表3,中国现行规范主要借鉴国外规范中的加速车道长度,并结合实际经验给出推荐值。以主线设计速度为依据对加速车道长度进行分类,在规定过程中主要考虑主线及合流车辆的速度变化过程,未考虑车辆完成加速后的汇入过程。这个汇入过程其实是小范围的动态过

表3 各国单车道加速车道长度规定
Tab. 3 List of single-lane acceleration lane lengths by country

主线设计速度/(km/h)	加速车道长度/(m)			
	中国	美国	德国	英国
60	155	90~150	190	175
80	180	90~150	190	175
100	200	90~370	190	235
120	230	245~520	190	255

程,但目前涉及汇入过程的加速车道长度研究,大多从静态角度建模,与实际情况有一定差距。

国外学者针对加速车道长度与合流车辆驾驶安全的关系进行了相关研究,McCartt等^[9]与Ahammed等^[10]基于大量的变速车道事故数据,研究变速车道长度与安全性的关系,指出增加变速车道长度可降低事故率,同时合流车辆行驶舒适性与安全性受加速车道长度和连接方式影响较大。Fatema等^[11]研究发现,交通事故发生频率和严重程度的增加与高速公路互通立交有关,且通常是由于司机无法安全地汇入主线交通流造成的。Dabbour等^[12]在分析美国AASHTO现行几何设计指南中加速车道长度设计推荐值的基础上,指出AASHTO中变速车道长度设计表是基于1950年代和1960年代进行的研究得到的,为此提出了1种基于真实驾驶人行为模拟和车辆机械特性计算加速车道长度的新方法。

国外学者较早地开展了加速车道长度的研究,中国学者在此基础上,进一步分析中国互通立交加速车道主线与匝道交通特性,得到了加速车道的影响因素。邵长桥等^[13]以合流车辆运行特点与影响因素为主要研究对象,提出用相对车头时距的概念表示主线、合流车辆速度差和主线车流量对合流过程的影响,在此基础上优化传统的接受间隙模型,得到了较合理的加速车道计算模型。

一些学者在分析了主线和匝道的交通流特性及影响因素的基础上,对加速车道长度计算模型进行优化,提出了加速车道长度的计算方法。徐秋实等^[14]以纵坡作为切入点,通过分析主线和匝道纵坡与合流的关系,对互通范围内的纵坡进行修正,以无信号的次要道路平面交叉口平均延误作为参考确定主线交通量,使高速公路加速车道长度的计算方法与实际情况趋于吻合。智永锋等^[15]基于可接受间隙理论,使用Erlang分布描述车头时距,深入研究合流车辆汇入主线的概率,考虑主线上加速车道相邻车道车流量、加速车道车流量、最小车头时距等因素,优化了加速车道长度设计方法。

上述学者从比选车头时距分布、考虑纵坡、优化交通量计算等方面改进了加速车道长度计算模型,但并未应用模型给出加速车道长度推荐值,故模型优化的有效性待验证。一些学者分析、改进模型后,得到了加速车道长度推荐值。邵孜科等^[16]基于车辆的合流过程,综合考虑人、车、路及合流车辆汇入过程随机属性,得到了基于动态汇入过程的加速车道长度计算模型,通过蒙特卡罗模拟,实现了模型求

解。唐宗鑫等^[17]基于车辆时空分布数据,确定了车辆加速度随速度线性递减模型,并选定货车为加速车道计算的设计车辆,建立了加速车道长度的概率

计算模型,研究表明:可靠度方法比确定性方法更适于计算加速车道长度。中国学者对加速车道长度的推荐值与规范规定值对比见表4。

表4 加速车道长度推荐值对比

Tab. 4 Comparison of recommended values for acceleration lane length

	类型	匝道设计车速/(km/h)	主线设计速度/(km/h) 加速度车道长度/m			
			120	100	80	60
《公路路线设计规范》 ^[18]	单车道		230	200	180	155
	双车道		400	350	310	270
孔令臣 ^[19]	平行式单车道	60	215	180	145	
		40	270	235	195	
	直接式双车道	60	325	270	220	
		40	405	355	295	
尹露 ^[20]	平行式单车道	60	250	180	115	
		40	305	235	170	
	直接式双车道	60	375	270	175	
		40	460	355	255	

现行《公路路线设计规范》中加速车道长度主要参考日本和美国的规范取值,当主线与匝道交通量较小的情况下,这种计算方法得到的加速车道长度能够满足合流要求。但随着主线交通量的增加,加速车道上的车辆加速到与主线合流必须达到的速度时常出现不能及时汇入主线的情况。因此为更好地达到合流车辆安全、舒适、快速驶入主线车流的要求,加速车道长度计算方法需进一步优化。为解决这一问题,国内外学者主要通过建立车辆汇入主线的概率模型,基于可汇入间隙接受理论研究加速车道长度。虽研究得到较多的计算模型,但模型与实际情况的吻合性尚有待验证,需要更多的学者和机构基于中国道路环境及特性,对概率模型进行优化,从而得到系统的计算方法和更加合理的加速车道长度推荐值。

2.1.2 减速车道长度

减速车道作为连接主线和匝道的附加车道,是高等级公路的重要组成部分,其长度也是匝道设计的重要指标。驶出高速公路的车辆,均需通过减速车道驶入匝道,完成方向转换。在此过程中,车辆需完成车道变换并降速至与匝道相适应的车速,这导致减速车道成为互通范围内最容易发生交通事故的路段。中国现行规范将减速车道分为平行式与直接式,虽然平行式减速车道车道划分明确,方便行车辨认,但考虑车辆行驶在平行式减速车道时,行驶轨迹呈“S”形,增加驾驶人操作,且驾驶人在变道过程中更希望方向明确的直接行驶出车道,故减速车道更

适合采用直接式^[21],其形式见图4~5。

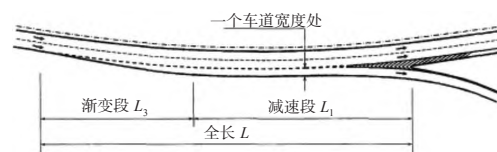


图4 平行式减速车道

Fig. 4 Parallel deceleration lane

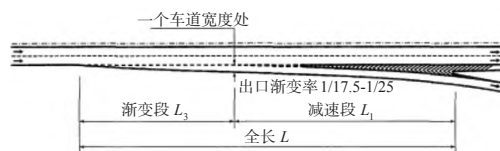


图5 直接式减速车道

Fig. 5 Direct deceleration lane

国外学者较早地开展了对减速车道的研究。El-Basha等^[22]研究了减速车道长度与运行安全性的关系,分别从减速车道碰撞次数和分流车辆、通过车辆速度差异的角度分析减速车道长度对运行安全的影响。Fitzpatrick等^[23]比较了不同版本的AASHTO出版物中减速车道长度推荐值,2011版中推荐的长度与1965年出版的长度相似。Abdelnaby等^[24]提出使用概率方法分析减速车道长度,这种基于可靠性的分析可以得到无法进行舒适减速的驾驶员数量占总驾驶人数量的百分比。

考虑到中国规范中对减速车道设计的相关规定与国外规范有所不同,一些学者将国内外减速车道长度规定值及其计算方法进行了对比分析,从而找到适合中国情况的减速车道计算方法。马香娟等^[21]对比国内外规范的减速车道计算方法,结合车辆驶

出主线的减速过程计算得到减速车道长度,并按照匝道设计速度进行分类,建议以匝道设计速度为划分依据,对减速车道长度进行分类规定。

随着互通立交研究的不断深入,诸多学者在前人基础上,分析减速车道长度的影响因素,从不同的角度切入,得到了减速车道相关几何指标的研究成果。沈强儒等^[25]分析得到了出口匝道的事故特征,基于驾驶人对标志的识别过程,提出主线约束型出口的识别视距值应根据不同的主线、匝道设计速度进行规定。潘兵宏等^[26]对减速段车辆减速过程进行分析,得到了直接式双车道减速车道长度及渐变率的推荐值,一定程度上建立了减速车道长度与流出角的关系。夏国栋等^[27]通过构建二自由度汽车模型,分析得到不同交通条件下高速公路出口匝道车辆安全分流区间界定模型,为高速公路出口匝道指示标识及相关设施的位置设置提供了参考依据。

为了验证模型效果的适用性,一些学者基于二次减速理论,计算得到了以主线和匝道速度为分类标准的减速车道长度推荐值。王海君等^[28]指出现行规范减速车道最小长度推荐值不合理,通过分析国内外车辆运行数据,基于二次减速理论及三角渐变段长度,建立减速车道长度计算模型,研究表明:该模型计算的设计速度为120 km/h的直接式单车道减速车道长度合理,可作为《公路路线设计规范》的补充。尹露^[29]对减速车道设计过程中的主要参数进行说明,以二次减速理论为基础,建立了减速车道长度计算模型,计算得到主线设计速度分别为80, 100, 120 km/h,匝道设计速度为30~80 km/h对应的直接式双车道减速车道长度推荐值。

中国《公路路线设计规范》^[18]中仅根据主线设计速度规定减速车道长度,并未将匝道设计速度作为减速车道长度的分类依据,即在匝道设计速度取值不同时,减速车道长度规定值相同。而在实际行驶过程中,车辆的减速距离很大程度上和主线与匝道设计速度的差值相关,按照当前《公路路线设计规范》中的选取方法进行长度规定,并未考虑主线与匝道速度差的减速要求。对比日本规范,中国规范中减速车道长度取值相对保守,而对比美国规范,中国规范的问题在于,当主线设计速度较高时,减速车道长度较短,安全性有待检验;当主线设计速度较低时,减速车道长度较长,存在资源浪费情况。为解决这个问题,国内学者基于车辆运行特性,深入研究主线车辆驶入减速车道的运行过程,并以此为依据计算得到了一系列减速车道长度推荐值,虽推荐值的

可取性有待进一步验证,但各位学者均提出,减速车道长度应根据匝道设计速度进一步划分。对于车辆在减速车道上的减速过程,中国车辆运行特性可用二次减速理论进行描述,此理论可作为减速车道长度研究的基础。诸多学者在此基础上优化了不同主线设计速度下的减速车道长度推荐值,并对不同匝道设计速度的减速车道长度进行了划分,但基于二次减速理论针对不同减速车道类型,以及不同纵坡、横坡条件下的减速车道长度还有待进一步研究。

2.2 出入口视距

在互通式立交出入口处,车辆不仅要完成对标志信息的识别、决策,还要在短时间内完成加减速、换道等操作,因为该区域的行驶空间有限,应采用识别视距对平纵横指标进行检验,因此视距也是出入口几何设计指标研究的重点。

沈强儒^[29]对互通立交区的事故特征进行分析,对主线线形约束型互通式立交出口位置情况进行归纳,计算得到了出口识别视距推荐值。徐洋^[30]基于汽车理论、出入口识别视距等对互通立交范围内的平纵线形指标进行研究,为出入口处识别视距的研究提供参考。吴朝阳^[31]针对高速公路主线分岔、合流连接部的交通运行特性,提出了适用于分叉处的识别视距计算模型,并根据计算的视距值,得到了主线分岔、合流连接部的平曲线、竖曲线半径值。潘兵宏等^[32]界定了识别视距的范围,并针对分流区交通流特点和需求,对车辆换道特性进行分析,提出了基于车道变换的出口识别视距计算模型。屈强等^[33]以双向4车道高速公路为对象,针对互通式立交出口车辆的行驶特点,提出了基于减速换道过程的视距,并得到了左、右转弯曲线满足减速换道视距对应的圆曲线最小半径。

互通立交出口的识别视距,主要为了满足驾驶人对出口连接部小鼻点附近的防撞护栏、标线等进行识别,以此来判断具体的立交出口位置的需求;互通立交入口的识别,主要依赖于主线距合流鼻100 m,匝道距合流鼻60 m形成的通视三角区,满足匝道车辆与主线车辆的相互识别需求,以降低合流车辆与主线车辆发生追尾事故的概率。在现行规范与细则中,出入口的识别视距主要是针对分合流端部进行规定,但目前对识别视距的计算中,未针对当前车辆减速性能及驾驶人在不同环境下的反应时间进行计算模型的优化。同时,当前对通视三角形的研究相对较少,但基于目前规范中对主线及匝道平纵指标的规定,存在一些指标组合下,通视三角形难以满足

的情况。视距作为出入口几何设计的检验指标,应进行重点研究,对不同出入口形式及不同车型的识别视距进行分析,得到不同主线与匝道设计速度下的视距值,合理规定通视三角形。

2.3 鼻端设计指标

高速公路互通立交分合流鼻端是连接变速车道与匝道的关键节点,鼻端区域内往往伴随着道路线形的变化,以实现主线较高设计标准向匝道较低设计标准的道路技术指标过渡。由于车辆在进出匝道前需要进行加减速操作,而实际情况下车辆通过分合流鼻端时,常常未完全达到匝道设计速度,仍保持着加减速的趋势,这使得鼻端的技术指标选取对保障互通立交出入口的运行安全尤为重要。互通立交减速车道分流鼻端见图 6。

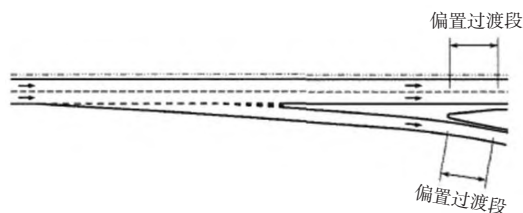


图 6 减速车道分流鼻端

Fig. 6 Deceleration lane diversion nose

中国现行的 JTG/T D21—2014《公路立体交叉设计细则》中对出口匝道分流鼻端处平曲线的最小曲率半径值和竖曲线最小半径值给出了规定,见表 5。其中,入口匝道合流鼻端未进行平曲线最小曲率半径规定,竖曲线最小半径值与分流鼻端规定相同。

表 5 分流鼻端处平曲线、竖曲线指标规定
Tab. 5 Specification of flat and vertical curves at the end of the diversion nose

主线设计速度/(km/h)	最小曲率半径/m		竖曲线最小半径/m			
	极限值	一般值	凸形		凹形	
			极限值	一般值	极限值	一般值
120	300	350	2 000	3 500	1 500	2 000
100	250	300	1 800	2 800	1 200	1 800
80	200	250	1 400	2 000	1 000	1 500
60	150	200	1 200	1 800	850	1 200

鼻端平曲线、竖曲线半径值均是根据鼻端通过速度得到,针对互通立交鼻端实际通过速度,国内学者开展了众多研究。苏世毅^[34]对互通立交分流鼻端的车辆运行速度进行了分析与研究,其研究结果为出口匝道的设计提供了一些借鉴。马向南^[35]与白浩晨等^[36]均采用链式雷达测速仪收集高速公路出入口特征点运行速度,得到了出入口渐变段起点、分合流点、分合流鼻端等位置小客车通过速度,研究表明:实际行驶时,分合流鼻端的运行速度与目前规范规

定有一定差距,以此为基础分别得到了出入口运行速度模型与出口匝道运行速度过渡段长度。

基于对分合流鼻端处车辆运行速度数据的处理分析,一些学者开展了对鼻端平纵设计指标值的研究。吴朝阳^[37]通过对互通立交分、合流端事故类型、交通流特性进行分析,基于合理选取分流鼻实际通过速度,考虑驾驶员心理特性,计算得到了分流鼻附近圆曲线半径及竖曲线半径最小值。张驰等^[38]为研究出口匝道分流鼻端平纵指标组合对行车安全性的影响,采用小客车行车动力学仿真的方法,通过改变分流鼻端的圆曲线半径与纵坡坡度,进行工况设计,基于对车辆侧向加速度的评价,得到了不同工况下分流鼻端平纵组合指标推荐值。

针对互通立交分流鼻端的安全问题,一些学者从视距、受力分析、标志标线设置等角度开展了一些列研究。沈强儒等^[39]以菱形立交分流区为研究对象,针对主线平面、纵断面指标和识别视距的关系建立了视距模型,其中对分流鼻端平曲线视距与竖曲线视距进行了分析。马永杰^[40]基于驾驶人标志识别距离与静态认读时间实验,建立了标志识别模型,计算得到了不同设计速度条件下的鼻端识别距离合标志识别视距,从而得到匝道分流连接部圆曲线最小半径。

中国《公路立体交叉设计细则》中对分合流鼻端处平曲线、竖曲线指标的规定主要以鼻端通过速度为主要考虑因素,大多数学者主要基于实测数据进行鼻端行驶速度的分析,但由于实测公路的线形已定,测得的鼻端通过速度受互通立交出入口几何设计影响,存在一定变化,因此,学者基于不同地区的速度数据计算所得鼻端平纵指标更适合作为相似道路线形情况下的设计参考值。同时,在研究过程中,较少学者考虑将出入口几何设计指标,特别是鼻端处的平纵指标进行不同组合设计,以得到基于目前规范规定指标下线形组合对行车安全的影响,从设计指标组合的角度研究鼻端对行车安全性的影响,是未来鼻端设计指标研究的重点方向。

3 立交出入口安全评价

高速公路基本路段的安全性评价研究已经形成了较为系统的评价体系,而针对高速公路特殊路段,特别是互通立交区的安全性评价总体上还处于初期阶段,评价方法及研究结论还需进一步验证。下面分别对目前互通式立交出入口安全性评价中应用较多的事故统计法、层次分析法、模糊综合评价法、虚

实结合法进行分析。

3.1 事故统计法

事故统计法是以事故数据为基础,以数据分析与数据建模为技术手段,研究事故特点并进行分类,得到事故发生的时间、空间规律的方法。这种方法应用于互通立交安全评价领域,可以得到事故率与出入口间距、匝道流出角、变速车道长度、出入口平纵线形等因素之间的内在联系,对现有的事故预测模型和结论进行验证与完善,为互通式立交出入口的安全性分析提供依据。

Bared等^[41]对变速车道上的交通事故数据进行统计分析,指出变速车道长度较短时,变速车道路段有着较高的事故率。Bonneson等^[42]基于统计学,对互通立交事故数据进行分析,得到了匝道类型、几何指标及交通量等因素与安全性的关系。中国一些学者在国外相关统计方法与技术的基础上,基于局部路段事故数据,得到了一系列研究成果。刘亚非等^[43]对陕西某高速公路出口匝道2007—2009年的事故资料进行统计分析,基于交通心理学,得到出口匝道的事故成因,并提出了出口匝道安全改善措施。余晓东^[44]采用统计学方法,借鉴国外学者的研究成果,以2000—2010年全国事故与经济损失统计数据与国内通货膨胀率为依据,建立了效益-成本模型,对单车道、双车道变速车道进行模型分析,得到了变速车道建议值。郭唐仪等^[45]以美国佛罗里达州互通立交出口匝道的事故数据为依据,建立了出口匝道运行速度差、运行速度变化率,以及几何指标的事故预测模型,以此进行出口匝道的安全性分析。王晓玉^[46]与杨丰羽等^[47]均选取互通立交为研究对象,分别对国内7座互通立交与杭宁高速公路11座互通立交的事故数据进行统计学分析,以此为基础评价互通立交出入口安全性。

基于上述对出入口的事故资料分析,互通立交出入口事故的显著形态是追尾、翻车、挤撞、刮碰。互通立交出口处事故发生往往受到出口识别条件的影响,一部分主线车辆因未及时识别出口而紧急制动驶入减速车道,甚至采取倒车行为驶入减速车道而导致追尾事故发生;另一部分车辆因出口位置或线形不符合驾驶人行为惯性而导致车辆操作不当撞上护栏,甚至翻车。互通立交入口处事故主要因为匝道车辆未达到合流车速强行汇入主线,或者持续无法汇入主线而导致追尾。虽然互通立交出入口的事故具体原因不同,但基于对众多事故情况的分析,许多学者指出公路引导的驾驶行为与驾驶人的驾驶

期望不相符是重要原因。互通立交出入口的安全性研究应当聚焦于驾驶行为、驾驶期望,以及道路条件对驾驶人感知-反应的影响,这需要在事故数据与互通立交出入口几何设计分析的基础上开展。

许多欧美发达国家于20世纪七八十年代就开展了高速公路安全性评价的相关研究,对事故数据的统计也较为重视,这些国家有较为详细、真实的事故数据可供使用。在研究过程中,分析事故数据可以判断互通立交事故多发区域,同时可以建立道路几何要素、交通量、车辆组成等因素与事故率的关系,这对于立交规范的合理制定、设计方案优化等具有重要意义。中国高速公路建设发展迅速,但对建设初期道路的安全性认识不足,针对互通立交区域的安全性研究开展的较少,部分设计标准的研究角度较片面,对运营期的安全问题研究不够重视。同时,高速公路沿线的基础设施布设有待完善,特别是缺少详细事故数据以及气象数据的采集设施。这些原因都导致中国互通立交的事故统计数据不准确、不全面,且记录的时间短,加之中国没有相关的平台对全国道路事故数据进行共享,获取道路信息的难度较大,使得事故统计法在中国应用十分困难。目前国内许多事故原因研究大多基于某条高速公路开展,由于互通立交出入口数量较少,事故数据不全面,导致出入口的事故分析难以用具体的事故分析数据体现,为得到事故率与互通立交出入口具体设计的关系,对各地区事故数据的共享尤为重要。随着中国对高速公路交通安全问题的重视程度不断提高,应尽快统一各地区的事故数据记录标准,建立道路信息共享平台,以推动互通立交安全性研究的进一步深入。

3.2 层次分析法

层次分析法是在分析问题后,将影响决策的元素进行分解,以元素内部联系为依据形成由目标、准则、方案等层次组成的多层次结构模型,从而实现定性和定量分析的决策方法。由于互通立交十分复杂,涉及人、车、路、环境、运营等因素,且各因素相互作用,共同影响互通立交的安全运行,采用层次分析法划分互通式立交出入口安全影响因素,对评价指标进行赋权,有助于解决互通式立交出入口安全系统评价指标分层交错,多个影响因素难以定量描述的问题。

起初国内学者主要将层次分析法应用于互通式立交安全评价,以划分互通式立交的结构层次。于恩亚^[48]考虑变速车道长度、出入口设计、交通标线、

安全护栏、视距等因素,建立了互通式立交安全评价指标体系,采用层次分析法确定各指标权重,分 5 个等级对立交设计安全性进行评价^[60]。冯心谊^[1]指出了互通立交安全性分析的重要性,从互通式立交总体出发,提出了安全评价应包括的内容及基本流程。

随着对出入口的研究逐渐深入,诸多学者也采用层次分析法划分出入口的元素。贺舰^[49]考虑匝道出入口处变速车道长度、分流点曲率半径等因素对匝道安全的影响,采用层次分析法构建了考虑人、车、路、环境、管理 5 个因素的风险评价指标体系,结合熵权法、专家打分法,以及秩和比法建立了风险评估模型。张炜^[50]针对互通式立交出口匝道的特性,将减速车道长度、匝道车辆速度、车辆组成、匝道交通量等因素作为评价指标,在比较影响因素的重要性时运用层次分析法,由此建立出口匝道安全评价模型。

互通式立交出入口的通行特点决定了在此区域内,驾驶人与道路条件及环境之间的相互关联更加紧密,行车条件更为复杂。立交出入口路段在高速公路全路段中占极小的比例,但事故率却占有较高的比重,针对此区域特点采用层次分析法系统构建评价指标体系,分析过程清晰明确,具有较好的逻辑性,但评价结论的准确性并不能得到较好的保障。在评价过程中,不同研究者对评价指标的选择及层次划分标准不同,赋权方法的不同也对评价过程产生影响,不同的研究者同时选用层次分析法进行评价时结论不一致,主观性较强;在互通式立交安全性评价时多从整体出发,对局部路段,特别是出入口位置的考虑不够全面,无法准确识别危险路段,难以成为工程应用的主要手段。

3.3 模糊综合评价法

互通式立交出入口的安全性由人、车、路、环境等因素影响,各个因素之间相互作用,在评价过程中难以明确地划分各个因素对安全水平的影响,也就是说在立交出入口的安全水平确定过程中存在诸多模糊概念。因此,模糊综合评价方法广泛应用于安全性评价中,也逐渐延伸到互通式立交出入口的研究中,模糊综合评价过程见图 7。

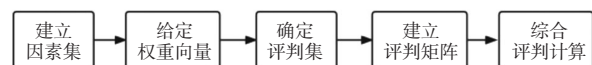


图 7 模糊综合评价过程

Fig. 7 Fuzzy comprehensive evaluation process

许多学者对影响因素进行聚类分析,在此基础上以互通立交出入口为对象进行模糊综合评价。杨

少伟等^[51]在互通立交安全水平等级的研究中,将冲突率作为互通出入口间交织区的评价指标,采用聚类分析及模糊综合评价法,分级并量化安全水平。周俊昌等^[52]使用 VISSIM 对交通冲突进行模拟,对冲突率进行聚类后,选用模糊综合评价法确定道路安全等级,并将方法应用于宁波市穿山—好思房高速公路上好思房方向霞浦互通的交通安全评价。张志召^[53]在对互通式立交分合流区的交通冲突特性进行分析,以冲突率为评价指标,提出了互通立交分合流区安全水平的模糊综合评价法。

随着对互通立交出入口的认识逐渐清晰,层次分析法与模糊综合评价法的应用越发成熟,一些学者对模糊综合评价方法进行优化后,将层次分析法与模糊综合评价法相结合,应用于互通立交安全评价。陈功宇^[54]对比分析几种模糊评价模型,在模糊综合评价模型的基础上引入模糊矩阵合成算子,提出了多层次非线性模糊综合评价法,有效解决了安全评价中采用线形加权法的缺陷。张炜^[50]与曹实等^[55]分别选取互通立交出口与入口为研究对象,采用层次分析法从道路、车辆等角度构建评价指标体系,与模糊层次分析法相结合,评价互通立交出口与入口安全性。梁中岚^[56]运用层次分析法建立互通式立交安全性评价指标体系,运用灰色关联度求解评价指标的隶属度,与模糊综合评价法相结合,建立了安全性评价模型。

模糊综合评价主要结合模糊数学的隶属度理论将定性评价指标转化为定量评价,以此进行多因素分析,得到系统的总体评价,这种方法操作性强,考虑了系统内部的复杂关系,适用于定性指标较多的综合分析,但易造成指标信息重复,评价结果准确性也依赖隶属函数的合理选择,同时在处理不确定性问题时,模糊综合评价无法有效处理不同的专家意见,评价结果主观性较强且不具备知识推理能力。目前应用模糊综合评价法进行安全评价时,大多学者会将层次分析法、灰色关联分析法与之结合,以适应评价指标的模糊性,同时解决赋权过程中因评价指标过多导致各因素权重均过小的情况。针对模糊综合评价法,国内外学者均进行了大量研究,但研究的最新成果并未在互通立交出入口的安全评价中有所体现,应用优化后的新方法可开拓安全评价研究思路。

3.4 虚实结合评价法

随着仿真技术的不断发展,许多学者在进行互通式立交安全性评价研究时,将数字技术应用到安全研究领域。通过数字技术,将互通立交信息可视

化,与仿真软件相结合,从而得到相对真实的驾驶反馈。目前这种虚实结合的评价方法主要应用于危险路段识别领域,应用仿真技术,实现不同工况下互通立交的安全性评价。

国内一些学者将仿真技术与传统安全性评价方法相结合,针对互通立交安全评价展开了一系列研究。白志军等^[57]应用VISSIM进行仿真分析,从变速车道长度、出入口坡度、交通量变化等方面,对互通式立交出入口的行车安全进行评价。长安大学王晓玉^[46]以Carsim为仿真平台对驾驶人、车辆、道路进行仿真模型构建,通过与互通式立交安全评价方法和体系相结合,确定了不同运行速度下匝道的安全水平。齐晨^[58]首次将IHSDM立交模块引入互通立交安全评价中,并建立了互通区主线、匝道的事故预测基本模型和修正模型。

传统评价方法多从指标的角度评价互通立交的安全性,对于基本路段,有较好的评价效果,可以较为真实地得到互通立交的安全状况。但在出入口处,主线与匝道相互连接,采用传统的安全评价方法难以准确评价三维空间线形组合的合理性,空间视野遮挡问题较难发现,因此虚实结合的安全评价方法有较大的优势。目前,在互通立交中,特别是出入口处的安全评价研究较少,有必要应用仿真技术,对出入口范围内的空间结构形式、平纵线形组合指标、视觉条件、安全运行等进行系统的分析。

4 立交出入口运行速度

为了保证车辆在高速公路行驶有较好的连续性,相邻路段的运行速度或速度梯度,以及同一路段的运行速度与设计速度之差应保持在合理范围内。中国在JTG D20—2006《公路路线设计规范》中对运行速度与安全评价之间的关系进行了相关规定,线形协调性、连续性的评价标准见表6~7。

表6 线形协调性评价指标

Tab. 6 Evaluation index of linear coordination

评价指标	线形协调性
$ \Delta v_{85} < 10 \text{ km/h}$	好
$10 \text{ km/h} < \Delta v_{85} \leq 20 \text{ km/h}$	良好
$ \Delta v_{85} > 20 \text{ km/h}$	差

表7 线形连续性评价标准

Tab. 7 Linear continuity evaluation criteria

评价指标	线形协调性
$v_{\text{运}} - v_d \leq 10 \text{ km/h}$	好
$10 \text{ km/h} < v_{\text{运}} - v_d \leq 20 \text{ km/h}$	中
$v_{\text{运}} - v_d > 20 \text{ km/h}$	差,需要安全性验算

国外一些机构与学者通过分析互通立交区域内车辆的实际运行速度,发现实际运行速度高于设计速度,指出设计速度与运行速度的不协调是影响立交范围内车辆运行安全的重要因素。为了得到更多准确的判断,一些学者针对行驶速度本身展开了一系列研究。Brewer等^[59]使用速度回归模型证实曲率半径是对斜坡速度影响最大的变量之一,且这种影响是非线性的。Římalová等^[60]提出采用浮动汽车数据(FCD)进行行驶数据的分析,研究立交匝道速度行驶轨迹,以探究曲率和车道对匝道行驶速度的影响。丁瑞等^[61]针对互通立交开展了一系列小客车实车驾驶实验,通过研究横、纵向加速度关系,分析了车辆在互通立交行驶过程中的驾驶风险。

基于国内外学者对互通立交范围内车辆实际运行速度的研究,中国一些学者指出目前《公路路线设计规范》采用的速度一致性评价方法在互通立交出入口区域应用的弊端,并提出了相应的评价方法。郭唐仪等^[62]指出传统方法 Δv_{85} 过高估计安全性的弊端,提出从车辆位于互通立交入口开始到匝道的过程中对单车速度进行全程跟踪,以此得到相邻2路段的单车运行速度差 $85\Delta v$,取代相邻2路段的路段运行速度差 Δv_{85} ,并将 $85\Delta v$ 与传统速度一致性检验采用的运行速度差 Δv_{85} 进行对比分析,证明了 $85\Delta v$ 更适用于工程安全性评判。 $85\Delta v$ 计算见式(1)。

$$85\Delta v = (v_1 - v_2)_{[0.85]} = (\mu_1 - \mu_2) +$$

$$Z_{[0.85]} \times \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2 \text{Cov}(v_1, v_2))} \quad (1)$$

式中: $v_{1,[0.85]}$ 、 $v_{2,[0.85]}$ 分别为路段1和路段2的85分位车速,单位km/h; μ_1 、 μ_2 、 σ_1 、 σ_2 分别为路段1和路段2上车速的均值和标准差,单位km/h; $Z_{[0.85]}$ 为标准正态分布的85位值; $\text{Cov}(v_1, v_2)$ 为协方差。

梁中岚^[56]对匝道范围内速度协调性评价方法进行分析,指出现行速度协调性评价标准在运行速度区间不同的情况下,评价线形连续性并不可靠,并提出用相邻路段运行速度差的比值RV评价路段的连续性。该指标计算见式(2)。

$$v_R = \left| \frac{v_{85i} - v_{85i-1}}{v_{85i-1}} \right| \quad (2)$$

式中: v_R 为相邻路段运行速度差的比值; v_{85i} 为当前路段的运行速度,单位km/h; v_{85i-1} 为前1个路段的运行速度,单位km/h。

基于现行标准采用运行速度进行协调性与安全性验证的关键问题在于运行速度预测模型的准确

性,对此国内外进行了大量研究,特别是基于运行速度协调理论的高速公路基本路段安全性评价已经形成了较为系统的体系并广泛应用。但针对高速公路

互通立交范围内主线和匝道运行速度的研究较少,部分学者对互通立交出入口车辆运行速度的研究情况见表 8。

表 8 互通立交匝道处车辆运行速度模型研究

Tab. 8 Study on the model of vehicle speed at the interchange ramp

年份	作者	研究内容
2009	吴文斌 ^[63]	在大量实测数据的基础上,分析半定向匝道上车辆运行速度变化规律,并以此为依据将匝道发为减速段、匀速段、加速段,建立了不同单元的运行速度与曲率半径、超高等要素关系的预测模型
2012	Xia 等 ^[64]	选取分流鼻、圆曲线中点以及连接段为研究对象,对匝道特征点处大货车与小客车运行速度进行分析,得到了大货车与小客车在该处运行速度与纵坡、圆曲线半径、超高关系的模型
2015	张智勇等 ^[65]	分析了小型车在互通式立交匝道内的运行速度影响因素,进行正交试验,运用 SPSS 回归软件进行分析,得到了匝道减速、匀速及加速段处运行速度与影响因素关系预测模型
2018	张驰等 ^[66]	采用链式开普勒雷达测速仪收集单车道入口小客车速度数据,对合流点、合流鼻以及加速车道终点等匝道特征点处自由流小客车速度进行分析,选用 SPSS 软件进行回归分析,建立了合流点及加速车道终点处小客车运行速度越策模型

现行 JTG D20—2006《公路路线设计规范》中给出了线形协调性、连续性的评价标准,这一标准在中国高速公路安全性评价时应用至今,传统方法建立在 2 个路段速度相对独立的基础上,但是车辆在 2 个路段上行驶时,运行速度与驾驶人的年龄、驾驶技术、车辆特性相互联系,可见实际情况与假设相悖;除此之外,传统方法仅对运行速度的差值进行了规定,并未考虑在不同设计速度下,相同的速度差给驾驶人带来的感受并不相同,因此,传统方法会高估道路的安全性能。目前对运行速度模型的研究大多集中于高速公路基本路段及匝道基本路段,而忽略了对高速公路互通式立交出入口的车辆运行速度的研究,在此区域内,驾驶人经历了匝道识别过程以及变速过程,运行速度变化趋势与其他路段有明显差别,应从互通式立交出入口的驾驶行为出发,对环境特点、几何设计指标及交通参数等方面进行分析,得到符合互通式立交出入口特点的运行速度模型,进一步优化出入口设计的安全性。

5 问题与展望

基于上述研究,从互通式立交出入口几何设计指标、匝道出入口安全性评价方法,以及运行速度 3 个方面对高速公路出入口匝道研究的问题进行总结并展望如下。

5.1 存在的问题

5.1.1 出入口几何设计指标

1) 中国现行规范中的变速车道长度推荐值,仅以变速车道形式和主线设计速度对变速车道长度进行划分,未考虑匝道设计速度、匝道纵坡和圆曲线半

径等因素对车辆变速过程的影响,可能出现变速车道与车辆变速需求不匹配的情况,易造成资源浪费。

2) 现有研究多从线形、变速车道形式、匝道设计速度等设计要素的角度出发,将变速车道长度的分类细化;针对加速车道的长度研究,研究学者多考虑了立交范围内主线交通流与匝道车辆汇入概率而建立加速车道计算模型,模型的准确性基于对主线交通流和匝道上车辆行驶行为的模拟,同时互通立交设计复杂,主线分合流连接部车辆驾驶行为影响因素较多,模型准确性仍有待验证。

3) 现行规范及细则中对互通式立交分合流端部的识别视距进行了规定,但未考虑当前车辆的减速性能存在变化,且对不同道路环境下驾驶人反应时间取值相同,识别视距计算模型待优化;对于合流区通视三角形,目前安全评价方法主要从二维角度进行通视评价,但评价过程中未考虑主线、匝道的不同线形组合下桥梁护栏对车辆通视的影响情况,有必要对不同线形组合下的合流通视性进行检查。

4) 目前针对互通立交分合流鼻端的几何设计指标研究相对较少,且现有的鼻端指标研究大多从平面的角度开展,但鼻端处常常同时存在平面线形、纵断面线形以及超高的变化,鼻端平纵指标组合的研究有待开展。

5.1.2 安全性评价方法

在出入口安全性评价中,大多用层次分析法从人、车、路、环境的角度对评价指标进行划分,但评价指标不全面、指标赋权较主观,使得评价结论不稳定;事故统计法可以客观的反映道路安全状态,但由于我国事故统计数据不准确、不全面,国内学者大多

不将此方法作为主要研究手段;模糊综合评价方法对系统安全水平的准确评价依赖于隶属函数的选择,对研究人员的专业性提出了较高的要求;虚实结合合法可以较好的解决采用传统方法评价出入口时,三维空间线形组合不易体现、空间视野遮挡较难发现的弊端,但评价准确性受仿真模型影响。

5.1.3 运行速度

1) 现行规范的线形协调性、连续性的评价标准以传统方法 Δv_{gs} 为基础,该方法假设基础与实际符合性较差,且仅对运行速度的差值进行了规定,并未考虑在不同的设计速度下,相同的速度差给驾驶人带来的感受并不相同,高估了道路的安全性能。

2) 目前对运行速度模型的研究大多集中于高速公路基本路段及匝道基本路段,较少对高速公路互通式立交出入口的研究,不同车型在不同出入口形式的运行速度预测模型有待深入研究。

5.2 研究展望

针对目前高速公路互通式立交匝道出入口研究存在的问题与不足,对今后的研究思路提出以下建议。

1) 变速车道长度计算是1个复杂的过程,交织行为并不会因为交织区的不断增长而均匀分布于交织区段内,而是集中地发生在分岔、合流连接部附近区域,在变速车道研究过程中,首先应考虑车辆的整个合流过程,在变速车道长度规定时考虑主线与匝道交通量、车型组成、立体线性等因素。车辆行驶环境是复杂的,应尽可能地还原真实环境,在现有变速车道长度计算模型的基础上,优化模型中所涉及到的参数取值,对模型与实际运行状况的吻合度进行验证;其次,目前在构建模型时,大多是调查了车辆的运动学和动态能力,但对驾驶人行为考虑较少,除了紧急情况,驾驶人往往不会使用车辆最大运动学和动态能力,应当考虑从满足驾驶人需求的角度进行探讨,可对变速车道上车辆的加速度曲线模型进行深入研究,因为车辆变速运动时加速度不是恒定的,可以考虑采用线性递减模型并对其进行优化。

2) 互通立交出入口的视距对驾驶人进入匝道前的驾驶过程有较重要影响,计算识别视距时,应结合出入口信息密集,几何指标不断变化的特点,综合考虑道路复杂性、驾驶人风险感知及视觉刺激下驾驶人在出入口的感知-反应时间,在此基础上对研究出入口处驾驶行为与视距的关系,以此优化出入口视距计算模型,并针对不同的出入口形式、不同的匝道设计速度进行详细规定;针对合流区通视三角形的研究,可在现有规范规定的基础上,建立BIM三维

立体模型,基于BIM三维可视化功能,对出入口处主线、匝道不同线形组合情况下合流区通视性进行检查,建立线形组合与通视性关系,用于指导出入口线形设计。

3) 车辆行驶在互通立交分流鼻端处,受道路立体线形变化、复杂标志标线等行车环境影响的同时,需要进行减速操作;行驶在合流鼻端时,在适应线形变化、识别主线交通状况的同时,还需进行加速操作。因此,应从三维角度对互通立交分合流鼻端平纵指标组合行车安全性进行研究,可以考虑从不同组合下,对不同车型开展行车动力学仿真,在对行车舒适性、安全性研究的基础上,对鼻端平纵指标组合的安全性进行评价。

4) 互通式立交出入口的安全性评价方法研究中,应结合出入口的特点,对评价指标体系进行完善,结合层次分析法与模糊综合评价法的优点,尽可能地减小主观因素对评价结果的影响。基于灰色理论的分析方法适用于总体框架清晰,部分信息不完善的系统,互通立交出入口也具有相同特点,因此可尝试使用灰色关联分析法、灰色聚类法对出入口安全性评价进行研究。事故分析、事故预测模型在国外有大量相关研究,国内高速公路事故资料虽然较缺乏,但可借鉴国外学者的研究方法,针对中国高速公路交通环境、行驶车辆进行方法的优化与改良,结合安全性评价方法进行检验。

5) 由于互通立交出入口结构复杂,三维空间线形组合也是出入口安全性评价的重点。结合动静视觉效应,采用多维可视化信息建模和虚拟现实(virtual reality, VR)仿真技术融合,实现模型与实际空间结构形式、主线平纵组合指标、视觉条件等因素相匹配,优化模型精细度。

6) 基于运行速度协调理论的互通立交安全性评价研究应首先以出入口处车辆行驶速度研究为基础,目前运行速度模型假设大多假定整个曲线的速度恒定,但这与事实不符,为了得到更符合车辆真实行驶状况的数据,可采用浮动车辆数据(floating car data, FCD),以龙门架和传感器等基础设施探测数据辅助,从而优化运行速度模型。在优化后的速度预测模型的基础上,从互通立交出入口的驾驶行为出发,对环境特点、几何设计指标及交通参数等方面进行分析,针对不同车型不同匝道形式特点得到一系列运行速度模型,进一步优化出入口设计的安全性。

7) 匝道出入口的安全问题,除了受本文提到的几何设计指标、匝道出入口安全性评价,以及运行速

度预测影响之外,还与出入口间距、标志标线等诸多因素相关,目前国内外一些学者在开展交通安全的研究时也将驾驶行为、驾驶需求作为重要的考虑因素,随着对驾驶行为的不断深入,也应当将驾驶行为特性的相关研究成果引入匝道出入口的安全性研究中。开展安全性研究特别应当注意的是,现有研究方法模型的准确性,依赖于运行车辆特性、车辆换道模型,以及驾驶人行为特性等因素的真实模拟,因此在研究过程中,不能仅聚焦于某一相关因素的选择,应将研究所涉及到的变量与相关领域最新研究成果进行对比分析,尽可能选择最贴合真实情况的变量计算方法。

6 结束语

高速公路互通式立交出入口作为高速公路的重要节点,其合理设计与运营保障对高速公路安全运行具有重要意义。本文以安全性研究为主要对象,首先分析了高速公路互通式立交及高速公路出入口的研究历程,归纳总结了近年来高速公路互通立交出入口具有代表性的安全性研究热点问题,分别从几何设计指标、立交出入口安全评价,及立交出入口运行速度 3 个方面,对高速公路互通式立交安全性研究的现状进行了综述,并分别从变速车道长度计算、出入口视距研究、鼻端平纵指标组合研究、安全性评价方法、多为可视化建模以及运行速度模型构建等方面进行了研究展望。然而,互通式立交出入口的安全性研究仍存在许多问题,如考虑驾驶人因素较少、数据获取精度有待提高等。这些问题的深入探讨与研究,有助于开阔互通立交出入口安全性研究的新思路,为保障高速公路安全运行提供更有利的支持。

参考文献

References

- [1] 冯心宜. 高速公路互通立交安全性评价[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
FENG X Y. Safety evaluation of expressway interchanges[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)
- [3] 庞渊博. 绕城高速公路互通式立交净距与立交出口交通安全机理研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
PANG Y B. Research on the clear distance of interchanges and the traffic safety mechanism of interchange exits on the ring expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [4] 罗龙浩. 基于智能车路协同仿真的高速公路分流区危险场景要素研究[D]. 成都:西华大学, 2022.
LUO L H. Research on elements of hazardous scenarios in highway diversion areas based on intelligent vehicle-road co-simulation[D]. Chengdu: Xihua University, 2022. (in Chinese)
- [5] 朱宗余. 对互通式立交设计几个问题的探讨[J]. 中外公路, 2004(3): 1-4.
ZHU Z Y. Discussion on several issues of interchange design [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] 赵发科, 宋家骅, 李旭宏. 高速公路网规划阶段互通式立交选型方法研究[J]. 公路交通科技, 2006(10): 99-102.
ZHAO F K, SONG J H, LI X H. Research on the selection method of interchange in the planning stage of highway network[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2006(10): 99-102. (in Chinese)
- [7] 高建平, 廖丽. 互通式立交匝道连续分流点最小间距研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 103-107.
GAO J P, LIAO L. Study on the minimum spacing of continuous diversion points of interchange ramps[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2014, 33(2): 103-107. (in Chinese)
- [8] 邵阳, 潘兵宏, 王云泽. 高速公路互通式立交连续出口和入口间距研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1642-1651.
SHAO Y, PAN B H, WANG Y Z. Study on continuous exit and entrance spacing of highway interchanges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1642-1651. (in Chinese)
- [9] MCCARTT A T, NORTHROP V S, RETTING R A. Types and characteristics of ramp-related motor vehicle crashes on urban interstate roadways in Northern Virginia[J]. Journal of Safety Research, 2004, 35(1): 107-114.
- [10] AHAMMED M A, HASSAN Y, SAYED T A. Modeling driver behavior and safety on freeway merging areas[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(9): 370-377.
- [11] FATEMA T, ISMAIL K, HASSAN Y. Validation of probabilistic model for design of freeway entrance speed change lanes[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2014, (1): 97-106.
- [12] DABBOUR E, EASA S M, DABBOUR O. Minimum lengths of acceleration lanes based on actual driver behavior and vehicle capabilities[J]. Journal of transportation engineering, Part A: Systems, 2021, 147(3): 04020162.
- [13] 邵长桥, 荣建. 加速车道长度计算模型及其影响因素[J].

- 北京工业大学学报,2008(1):72-75.
SHAO C Q, RONG J. Calculation model of acceleration lane length and its influencing factors[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008(1):72-75. (in Chinese)
- [14] 徐秋实,任福田,孙小端,等. 高速公路互通式立交加速车道长度的研究[J]. 北京工业大学学报,2007(3):298-301.
XU Q S, REN F T, SUN X D, et al. Research on the length of the speeding lane of the expressway interchange[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007(3):298-301. (in Chinese)
- [15] 智永锋,张 骏,史忠科. 高速公路加速车道长度设计与车辆汇入模型研究[J]. 中国公路学报,2009,22(2):93-97,115.
ZHI Y F, ZHANG J, SHI Z K. Research on the length design of the expressway acceleration lane and the vehicle merge model[J]. Chinese Journal of Highways, 2009, 22(2):93-97, 115. (in Chinese)
- [16] 邵孜科,李文权,孙春洋,等. 基于蒙特卡罗模拟的平行式加速车道长度模型[J]. 公路交通科技,2017,34(1):137-142,148.
SHAO Z K, LI W Q, SUN C Y, et al. Parallel acceleration lane length model based on Monte Carlo simulation[J]. Highway Traffic Technology, 2017, 34(1):137-142, 148. (in Chinese)
- [17] 唐宗鑫,杨 迪,陈思凯,等. 基于可靠度的高速公路加速车道长度[J]. 东南大学学报(自然科学版),2018,48(5):961-966.
TANG Z X, YANG D, CHEN S K, et al. Length of expressway acceleration lane based on reliability[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(5):961-966. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国交通部. 公路路线设计规范:JTG D20—2006[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
Ministry of Transport, People's Republic of China. Design specification for highway alignment: JTG D20—2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)
- [19] 孔令臣. 多车道高速公路互通式立交加减速车道长度及最小净距研究[D]. 西安:长安大学,2012.
KONG L C. A study on the length and minimum clear distance of acceleration and deceleration lanes in multi lane expressway interchanges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [20] 尹 露. 高速公路变速车道几何设计参数及安全保障措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
YIN L. Research on geometric design parameters and safety guarantee measures of expressway speed change lanes[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [21] 马香娟,李建士,张胜平. 高速公路互通式立交变速车道设计研究[J]. 中外公路,2012,32(6):311-314.
MA X J, LI J S, ZHANG S P. Research on the design of the speed change lane of the expressway interchange[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(6):311-314. (in Chinese)
- [22] EL-BASHA R H S, HASSAN Y, SAYED T A. Modeling freeway diverging behavior on deceleration lanes[J]. Transportation Research Record, 2007, 2012(1):30-37.
- [23] FITZPATRICK K, CHRYSLER S T, BREWER M. Deceleration lengths for exit terminals[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(6):768-775.
- [24] ABDELNABY A, HASSAN Y. Probabilistic analysis of freeway deceleration speed-change lanes[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2014, (1):27-37.
- [25] 沈强儒,赵一飞,陈璋勇,等. 高速公路互通式立交约束型出口识别视距分析[J]. 中外公路,2012,32(6):305-307.
SHEN Q R, ZHAO Y F, CHEN Z Y, et al. Analysis of sight distance analysis of constrained exit identification of expressway interchanges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(6):305-307. (in Chinese)
- [26] 潘兵宏,董爱强,田 曦. 立交减速车道流出角的研究[J]. 中外公路,2014,34(1):328-333.
PAN B H, DONG A Q, TIAN X. Research on the outflow angle of the deceleration lane of the interchange[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(1):328-333. (in Chinese)
- [27] 夏国栋,张仲瑾. 高速公路出口匝道安全分流区间界定方法研究[J]. 交通与运输(学术版),2016(1):248-251,259.
XIA G D, ZHANG Z J. Research on the method of defining the safe diversion interval of the expressway exit ramp[J]. Traffic and Transportation (Academic Edition), 2016(1):248-251, 259. (in Chinese)
- [28] 王海君,杨少伟. 高速公路互通式立交单车道减速车道长度研究[J]. 公路交通科技,2015,32(3):124-128.
WANG H J, YANG S W. Research on the length of the single-lane deceleration lane of the expressway interchange[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2015, 32(3):124-128. (in Chinese)
- [29] 沈强儒. 高速公路互通式立交约束型出口安全保障技术研究[D]. 西安:长安大学,2011.
SHEN Q R. Research on safety assurance technology of restricted exit of expressway interchange[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [30] 徐 洋. 互通式立交范围内主线主要技术指标研究[D]. 西安:长安大学,2014.
XU Y. Research on the main technical indicators of the main line within the scope of interchange interchange[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [31] 吴朝阳. 高速公路主线分岔、合流连接部关键技术指标研究[D]. 西安:长安大学,2016.
WU C Y. Research on key technical indicators of bifurcation and merging of expressway main line[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [32] 潘兵宏,周锡滨,周廷文,等. 高速公路互通式立交出口识别视距计算模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(9):1312-1318,1352.

- PAN B H, ZHOU X Z, ZHOU T W, et al. Calculation model of sight distance for highway interchange exit identification [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2020, 48(9): 1312-1318, 1352. (in Chinese)
- [33] 屈 强, 张朝辉, 吴明先, 等. 双向四车道高速公路出口减速换道视距探讨[J]. 公路, 2022, 67(5): 46-51.
- QU Q, ZHANG C H, WU M X, et al. Discussion on the visual distance of two-way four-lane expressway exit deceleration and lane change[J]. Highway, 2022, 67(5): 46-51. (in Chinese)
- [34] 苏世毅. 基于运行速度设计方法的互通立交出口匝道设计[J]. 北方交通, 2010(7): 42-44.
- SU S Y. Design of interchange exit ramps based on operational speed design method[J]. Northern Transportation, 2010(7): 42-44. (in Chinese)
- [35] 马向南. 高速公路互通立交单车道出入口小客车运行速度模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- MA X N. Study on the speed model of single-lane entrance/exit minibuses at highway interchanges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [36] 白浩晨, 柳银芳. 互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 262-267.
- BAI H C, LIU Y F. Study on the length of transition section of interchange exit ramp operation speed[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 262-267. (in Chinese)
- [37] 吴朝阳. 互通式立体交叉分、合流端关键技术指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WU C Y. Research on key technical indicators of interconnected three-dimensional crossover diverging and merging ends[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [38] 张 驰, 张 宏, 齐 晨, 等. 互通式立交出口匝道分流鼻端平纵组合指标研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 99-108.
- ZHANG C, ZHANG H, QI C, et al. Study on the combined flat and longitudinal indexes of the diverging nose end of interchange exit ramps[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 99-108. (in Chinese)
- [39] 沈强儒, 杨少伟, 赵一飞, 等. 菱形立交分流区主线线形指标分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(9): 90-94.
- SHEN Q R, YANG S W, ZHAO Y F, et al. Analysis of main-line alignment indexes in diamond-shaped interchange diversion area[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(9): 90-94. (in Chinese)
- [40] 马永杰. 基于驾驶员视认特性的匝道分流连接部平面线形指标及地点方向信息预告设置研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- MA Y J. Research on the plane alignment index and location direction information preview setting of ramp diversion connection based on driver's visual recognition characteristics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [41] BARED J, GIERING G L, WARREN D L. Safety evaluation of acceleration and deceleration lane lengths[J]. ITE Journal, 1999, 69(5): 50-54.
- [42] BONNESON J A, ZIMMERMAN K, FITZPATRICK K. Roadway safety design synthesis[M]. Texas: Texas Transportation Institute, 2005.
- [43] 刘亚非, 杨少伟, 潘兵宏. 基于交通心理学的高速公路出口匝道事故成因研究[J]. 公路, 2011(11): 104-108.
- LIU Y F, YANG S W, PAN B H. Research on the causes of expressway exit ramp accident based on traffic psychology [J]. Highway, 2011(11): 104-108. (in Chinese)
- [44] 余晓东. 互通立交变速车道长度的探究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2014, 34(2): 71-74.
- YU X D. An Exploration on the length of interchange interchange variable speed lane[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 34(2): 71-74. (in Chinese)
- [45] 郭唐仪, LIN X L, KRACHT M. 高速公路出口匝道事故预测模型优选及弹性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(3): 682-686.
- GUO T Y, LIN X L, KRACHT M. Optimization and elastic analysis of prediction model of expressway exit ramp accident[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(3): 682-686. (in Chinese)
- [46] 王晓玉. 基于Carsim的高速公路互通式立交安全评价与对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- WANG X Y. Research on safety evaluation and countermeasures of expressway interchange interchange based on Carsim [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [47] 杨丰羽, 赵 艳, 张燕飞. 高速公路互通式立交路段交通事故特性分析[J]. 交通科技, 2019(2): 107-110.
- YANG F Y, ZHAO Y, ZHANG Y F. Analysis on traffic accident characteristics of highway interchange interchange[J]. Traffic Science and Technology, 2019(2): 107-110. (in Chinese)
- [48] 于恩亚. 基于层次分析法的互通式立交设计安全性评价[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2006, 6(4): 14-17.
- YU E Y. Safety Evaluation of interchange interchange design based on analytic hierarchy method[J]. Journal of Jiangsu Vocational College of Architecture, 2006, 6(4): 14-17. (in Chinese)
- [49] 贺 舰. 枢纽型互通式立交运营阶段交通安全风险评估研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- HE J. Research on traffic safety risk assessment in the operation stage of hub-type interchange[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [50] 张 炜. 高速公路互通立交出口匝道安全设计与评价[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- ZHANG W. Safety design and evaluation of highway interchange exit ramp[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

- (in Chinese)
- [51] 杨少伟,王 晓,冯玉荣,等. 基于交通冲突技术互通式立交最小净距研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2011,33(3):133-138.
- YANG S W, WANG X, FENG Y R, et al. Study on minimum net distance of interchange interchange based on traffic conflict technology[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2011,33(3):133-138. (in Chinese)
- [52] 周俊昌,常玉林,郭 敏,等. 基于交通冲突技术的高速公路安全评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(5):974-978.
- ZHOU J C, CHANG Y L, GUO M, et al. Expressway safety evaluation based on traffic conflict technology[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2011,30(5):974-978. (in Chinese)
- [53] 张志召. 高速公路立交分合流区和收费站交通冲突研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- ZHANG Z Z. Study on traffic conflict between expressway interchange and diversion area and toll station[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2014. (in Chinese)
- [54] 陈功宇. 基于非线性模糊法的高速公路互通式立交安全评价研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- CHEN G Y. Research on safety evaluation of highway interchange interchange based on nonlinear fuzzy method[D]. Xi'an:Chang'an University,2014. (in Chinese)
- [55] 曹 实,熊 刚. 高速公路出入口匝道安全性评价方法研究[J]. 公路交通技术,2016,32(4):128-133.
- CAO S, XIONG G. Research on safety evaluation method of highway entrance and exit ramp[J]. Highway Traffic Technology,2016,32(4):128-133. (in Chinese)
- [56] 梁中岚. 高速公路互通式立交安全性评价方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- LIANG Z L. Research on safety evaluation method of expressway interchange[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2018. (in Chinese)
- [57] 白志军,陈 慧,张绍理. 高速公路互通立交出入口位置行车安全性分析[J]. 中外公路,2015,35(5):334-337.
- BAI Z J, CHEN H, ZHANG S L. Analysis of highway interchange entrance/exit location traffic safety[J]. Journal of China & Foreign Highway,2015,35(5):334-337. (in Chinese)
- [58] 齐 晨. 基于IHSDM的互通式立交安全性评价模型标定及评价方法研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- QI C. Research on calibration of interchange safety evaluation model and evaluation method based on IHSDM[D]. Xi'an:Chang'an University,2018. (in Chinese)
- [59] BREWER M A, STIBBE J. Investigation of design speed characteristics on freeway ramps using shrp2 naturalistic driving data[J]. Transportation Research Record,2019,(3):247-258.
- [60] ŘÍMALOVÁ V, ELGNER J, AMBROS J, et al. Modelling the driving speed on expressway ramps based on floating car data[J]. Measurement,2022(195):110995.
- [61] 丁 瑞,刘 俊,蒋 艳,等. 基于车辆加速度数据的互通立交匝道驾驶风险分析[J]. 交通信息与安全,2021,39(1):17-25.
- DING R, LIU J, JIANG Y, et al. Risk analysis of driving on interchange ramps based on vehicle acceleration data[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39 (1): 17-25. (in Chinese)
- [62] 郭唐仪,邓 卫. 基于速度一致性的高速公路出口安全评价[J]. 交通运输系统工程与信息,2010,10(6):76-81.
- GUO T Y, DENG W. Expressway exit safety evaluation based on speed consistency[J]. Transportation Systems Engineering and Information Technology,2010,10(6):76-81. (in Chinese)
- [63] 吴文斌. 互通立交匝道运行速度预测模型研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
- WU W B. Research on the prediction model of the running speed of the interchange ramp[D]. Beijing: Beijing University of Technology,2009. (in Chinese)
- [64] XIA L G, LU J, MA Y F. Vehicle operating speed prediction model on freeway exit ramp[C]. International Conference of Logistics Engineering and Management 2012. Reston: ASCE,2012.
- [65] 张智勇,郝晓云,吴文斌,等. 互通立交匝道运行速度预测模型[J]. 公路,2015,60(3):1-7.
- ZHANG Z Y, HAO X Y, WU W B, et al. Prediction model of operation speed of interchange ramp[J]. Highway, 2015, 60(3):1-7. (in Chinese)
- [66] 张 驰,宫权利,马向南,等. 互通立交单车道入口小客车运行速度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(4):71-79.
- ZHANG C, GONG Q L, MA X N, et al. Running speed model of single-lane entrance passenger car of interchange interchange[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2018,38(4):71-79. (in Chinese)