

高速公路互通式立交安全性分析与优化研究

涂 雄

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051

[摘要]随着城市化的快速推进和智慧城市的建设,高速公路互通式立交是高速公路路网的重要节点,其安全状况直接影响着整个路网的安全状况以及交通通行效率,文章对不同类型互通式立交的安全性特点进行归纳总结并对其相关安全研究成果进行了分析,在此基础上从交通流、几何设计、驾驶行为、交通管理四个方面对影响互通式立交安全性的因素进行探讨,从而提出了包括几何线形优化、交通组织优化、标志标线优化、信息技术应用以及完善安全设施等一系列综合措施来增强互通式立交的安全性,并认为应同时考虑设计标准的合理性及实际情况的适应性,在对多种因素综合分析后有针对性地进行设计才能达到提高互通式立交安全性能的效果。

[关键词]高速公路;互通式立交;安全性分析;优化设计

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19664

中图分类号: U412.352.12

文献标识码: A

Research on Safety Analysis and Optimization of Expressway Interchange

TU Xiong

Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

Abstract: With the rapid advancement of urbanization and smart cities, highway interchanges are important nodes in the highway network, and their safety directly affects the safety and traffic efficiency of the entire network. This article summarizes the safety characteristics of different types of interchanges and analyzes their related safety research results. Based on this, the factors affecting the safety of interchanges are discussed from four aspects: traffic flow, geometric design, driving behavior, and traffic management. A series of comprehensive measures are proposed to enhance the safety of interchanges, including geometric shape optimization, traffic organization optimization, sign and marking optimization, information technology application, and improvement of safety facilities. It is believed that the rationality of design standards and the adaptability to actual situations should be considered simultaneously. Targeted design based on comprehensive analysis of multiple factors is necessary to improve the safety performance of interchanges.

Keywords: expressway; interchange interchange; security analysis; optimization design

引言

互通式立交是保持高速公路畅通的重要环节,而主线进出口更是互通式立交的一个重要部分,也是互通区内行车环境最复杂的地段,匝道内的道路状况、交通流量情况、行车环境等都较一般段落更为复杂,它是影响高速公路的安全性和通行能力的关键。在我国高速公路里程不断攀升的同时,互通式立交的数量也在逐年上升,互通式立交的安全运行逐渐成了一个比较严重的问题,环形匝道由于是互通区内路况条件最差的一段道路,成为了高速公路交通事故频发区。所以进行高速公路互通式立交安全性评价以及改进的研究对提高高速公路的安全性有着较大的理论意义及实际作用,有着极大的必要性。

1 高速公路互通式立交安全性研究基础

互通式立交是用来满足道路空间上的交叉及交通流转换的重要结构物,可分为枢纽式互通与服务式互通。枢纽式互通用作高速公路之间交通转换,其设计要求比较高;而服务式互通用于连接高速公路与其他普通道路,由于匝道平面线形条件较差,所以服务水平和服务功能较差一些。互通式立交主要包含主线、匝道以及加减车道等组成部分,匝道的平面线形组合是否合理直接影响到整个互通式立交的安全性水平。交通安全理论作为基础性的理论研究依据;人因工程学适用对主线和匝道的安全性分析;交通冲突理论适用于对交通冲突区段的安全性分析;运行速度协调理论应用于基本路段的安全性分析。安全评价指标体

系主要是事故率指标、运行速度匹配度指标、驾驶员作业强度指标以及碰撞指标。对于互通式立交安全性的研究国内外进行了大量的探索,但是由于其进出口复杂难以形成系统性研究结论。通过几何参数指标、安全评价方法、行驶速度三个层次分析得出,现有标准在变速车道长度上考虑的因素较为粗略地忽视了车辆需要的实际变道距离需求;对分合流鼻端视野的规定并没有考虑到车辆类型的不同以及驾驶员的反应时间差异。当前对于分合流鼻端的研究还是在二维空间下进行的,几何指标并没有关注其平纵指标的综合情况。以上几点都说明,迫切需要建立一个更加系统更加完整的安全评价分析和改进的方法体系。

2 互通式立交安全影响因素识别与分析

2.1 交通流特性因素

道路交通特征是影响互通式立交安全的重要因素之一。交通流量大小与交通事故有着很大的关系,饱和度在0.4~0.6之间的时候,流量就变成不稳定的饱和流了,事故发生的频率是比较高的。行驶速度也是一个影响交通安全的关键性因素,事故发生数量与速度的变化是有很大关系的,速度的变化说明的就是匝道上频繁出现的变道以及超车问题,这是引起交通事故频发的一种主要原因。速度的变化对于大、小车的交通冲突影响也十分明显,不同车辆之间的速度差异容易导致高速匝道上车辆追尾的情况,从而引发匝道堵塞问题。车流量大小也会影响互通式立交通行安全情况,在高流量环境下车辆变道以及加速减速等动作频次增加碰撞概率大幅提升。

2.2 几何设计因素

几何设计是互通式立交安全性的重要决定因素,包括平面线型、纵断面线型以及横断面构成还有超高设置等。

而关于分合流鼻端的研究则以二维为主,几何设计指标的研究也没有集中在平纵组合的效果上。环形匝道线形组合设计是互通式立体交叉甚至高速公路行车安全的重要部分,在我国的规范中对环形匝道的技术指标规定不够健全,造成了已经建设好的互通式立交的安全隐患问题。

从行车安全、舒适的方面来考虑,应该让半径与匝道内车速相匹配,交通量大的匝道要有较高的平面线形指标;驶出匝道要比驶入匝道拥有更高的平面线形指标。匝道纵断面线形受到两端相连主线纵坡值大小、方向及跨线构筑物标高的约束,若不合理地进行纵坡设计会造成车辆上坡阻力增大而造成车辆在匝道内滞留时间长或在匝道内下坡时减速过快难以降下的情况,给车辆驶入交叉口位置带来较大危险性。

2.3 驾驶行为因素

驾驶行为因素主要由变道行为、反应时间和驾驶负荷等几个方面组成,互通式立交区的驾驶任务较为繁杂,在分合流段需要进行信息识别以及动作完成,分流行驶需要避免与目标车道前方车辆相撞或者被本条车道后方车辆碰撞;合流行驶需要避免与目标车道后部车辆发生碰撞或被自身车道后面的车辆撞击。驾驶员反应时间受到路面状况、视野范围、驾驶技能的影响,在复杂的路况下,反应时间明显延长,因此出入口视距的研究应该结合实际的路况情况以及不同的车型特点;在小半径匝道线形情况下,驾驶员的操作负担加重,心理压力加大容易产生疲倦感及误操作等情况。

2.4 交通组织与控制因素

道路交通组织与管理要素包括了标线标识、车道分配以及信号灯控制等要素。标线标识是用于指引车辆行车方向和保证夜晚和气候恶劣条件下行车安全的重要装置;双组份超高强耐磨反光标线以双组份聚合物相互反应固化成膜,并配合使用高效反光玻璃珠,其粘结力非常强,耐磨性比传统的热熔标线高出很多倍,使用年限可以达到三年以上;在夜晚灯光照射下反光强度提高30%以上,在下雨或者大雾天气里面反光也十分明显。车道分配方面,适当的车道布局能有效避免机动车变道过多引发的交通事故。导流线的设计对规范汽车行进路线、避免误驶出入口都有积极作用。对于分流区、合流区以及交织区这类存在安全隐患的路段,要设立醒目突出的交通安全标识牌,

表1 互通式立交几何设计要素与安全性关联分析

几何设计要素	对安全性的影响	常见问题	设计要点
平面线形	影响车辆行驶轨迹与操作难度	小半径圆曲线增大操作难度,缓和曲线参数过小易引发事故	圆曲线半径应适应速度变化,交通量大的匝道采用较高指标
纵断面线形	影响车辆爬坡能力与制动性能	纵坡过大导致爬坡困难,下坡速度过高减速困难	采用缓坡,避免极限纵坡,分合流处竖曲线半径满足视距要求
横断面组成	影响临时停车安全与视线诱导	硬路肩宽度不足影响停车安全与养护作业	硬路肩宽度不小于2.5m,保证横净距要求
超高横坡	影响横向稳定性与行车舒适度	超高不足或过大影响车辆稳定性	合理确定超高横坡,保证横向力系数要求

在进入该路段前提醒驾驶员注意前方出入口的相关信息，从而防止车辆在出口位置发生违章变道或者紧急刹车停车甚至是倒车掉头的现象发生。

3 高速公路互通式立交安全优化设计策略

3.1 几何设计与线形优化

几何设计以及线形优化是最基本也是最直接提高互通式立交安全性的一项工作，在匝道平面线形方面要科学地选择合适的圆曲线半径及缓和曲线参数，匝道运行速度不同所对应的圆曲线半径也不同，匝道交通流量较大应选取较高的平面线形指标，设置缓和曲线，回旋线参数 a 不宜大于 1.5 倍的圆曲线半径，两个回旋线反向连接则两者的回旋线参数之比应该小于 1.5；纵断面设计要采取缓坡，严禁极限纵坡的存在；分合流处竖曲线半径不仅要满足停车视距而且还要满足通视条件的要求。目前的规定线形协调性以及连续性的评判标准都是基于传统的 $\Delta v85$ 的方法，但是这种方法的基础与现实不符，过高估计了道路的安全性。所以要根据实际的速度来进行线性协调性的评估及改进，变速车道的长度设计要以对驾驶员的行为的研究为基础，首先是对变速车道中加速度的变化趋势进行分析。对于不同类型的汽车，在不同类型出入口处的速度预测模型还需要进一步探索，以精确化的运行速度来支撑几何设计的优化。

3.2 交通组织与车道功能优化

交通组织及车道功能设计对于完善互通式立交区域交通流管理有重要意义。车道功能设计上要依据匝道的交通量及车辆构成来布置好加减速车道的数量与宽度，保证车辆顺利汇入和驶出；导流线的设计也要合理，让车辆按预先设定好的路线行驶，防止行车轨迹交汇或错位。合流点、分流点及交织点这些危险节点，要对车道的功能进行改造，减少车辆变道的需求量。锥体式物理减速，在事故多的匝道可以起到很好的预防作用。出口匝道路段要在入口处就设立提示标志牌，给驾驶人员留足反应时间和处理距离。针对进匝道部分应保证加速车道有足够的长度使得车辆可以加速汇入，降低汇入冲突的发生概率。

3.3 标志标线与信息诱导优化

标志标线以及信息诱导装置是保证互通式立交运行安全的基础设施。标志布置应当满足信息完整性和统一性的要求，在出入口处合理布置多次提醒标志，使驾驶人员能够在进入匝道之前做好转向准备^[1]。指路标志的信息要简约明晰，防止过多信息造成驾驶员判断滞后。对标线来说，双组分高效反光耐磨耗标线拥有高效的反射率、卓越

的耐磨损特性以及长久的使用期限，在行车道隔离带使用此款标线能够达到昼夜可见，经久耐用的目的。标线铺设也要清楚标明车道边线和导向箭头的界限，在分流鼻端处渠化标线更要科学指引车辆分流方向。信息诱导系统可以配合可变信息显示屏对驶入出口匝道前的路况以及发生的各类交通事故信息进行及时播报，让驾驶员可以做到心中有数，从而更好地作出相应选择；对于出口匝道区域，在入口处增设前方急弯提示标志牌、加长导流线来解决识别视距过短的问题。

3.4 智能交通技术应用

智能交通科技的应用给互通式立交的安全性提升开辟了一种新思路。智能交通数据分析系统采用毫米波车载移动雷达检测仪以及夜间摄像机等设备，能够做到对车流量的速度情况进行实时监控。基于 BIM 及交通仿真软件联合建模方法，通过对互通式立交建立三维模型，模拟车流量运行路线，使方案选择以及风险预测有直观参考依据；动态引导系统可以依据实际的交通状况随时变化自己的引导模式，使车辆分散开来避免拥堵发生。交通交织技术是对整个互通式立交的交通流进行深入研究，从而找出存在的问题并且给出解决方案。进出口通行速度的研究主要以浮动车数据为主、龙门架以及雷达测速数据为补充，为变道车道的设计以及视距校验提供依据。智能预警系统在高风险地点设置同频爆闪灯以及智能警告标识牌，对驾驶员进行主动预警。在高速路护栏头增加防撞桶，立交桥进出口统一添加防撞垫，符合标准配置防撞桶、弹性防撞柱、爆闪灯等，大大加强了重点区域的防护力度。

3.5 安全设施完善与防护提升

安全设施的完善与防护提升是保障互通式立交安全的重要补充措施。

护栏装置方面，旧双波梁钢护栏提质再使用，对旧护栏面板进行统一防锈处理、防锈层重新刷漆以及局部修补等措施，保障经修复后的护栏达到相应的防撞等级与防腐标准，提质后的双层双波梁护栏可以满足 JTG D81-2017 A 级护栏防护性能标准，使用寿命长达 8 年左右^[2]。SA 级双线型新型钢护栏用于中央分隔带，通过对结构形式进行改进，以双线型承载方式代替传统的单线型，在保证防撞等级不变的基础上使每延长一米所使用的钢材比国家标准护栏减少 15% 以上，施工方便不需要浇筑养护，施工速度提高 40%。防撞装置方面；防护升级方面，既要兼顾性价比又要保障安全性，双线型新型钢护栏材料易于拆卸重复使用，整体寿命期内的成本更低，每公里造价降低 20%，比新泽西护栏便宜。

表2 互通式立交安全设施类型与优化策略

安全设施类型	功能定位	主要设置位置	优化提升策略
波形梁护栏	防止车辆驶出路外	匝道两侧、桥梁段	旧护栏提质再利用, 双层双波梁满足现行规范 A 级防护能力
混凝土护栏	高强度防撞隔离	中央隔离带、桥侧	分离式双层桥组合式护栏与钢筋混凝土护栏综合对比选型
防撞垫	缓冲消能保护	分流鼻端、出口端头	统一加装防撞垫, 提升重点部位防护能力
防眩设施	防止对向灯光眩目	中央分隔带	合理设置防眩板高度与间距
视线诱导标	引导视线、明确线形	曲线段、匝道连续处	加密设置线形诱导标, 强化夜间视线诱导
爆闪警示灯	主动警示与预警	分流区、事故多发点	增设同频爆闪警示灯, 恶劣天气条件下强化警示

4 结语

互通式立交的安全评价及优化是一个综合性课题, 在几何设计、交通安全、驾驶行为、智能交通等方面都有一定的影响。文章建立了以研究背景、影响因素以及优化手段为主体的研究体系, 指出了以交通流量特性、几何设计要素以及驾驶行为要素、交通组织方式、环境条件为主要的因素, 提出几何线形调整、交通组织改进、标志标线完善、智能交通技术的应用以及安全防护措施加强等多方面综合地优化方案。互通式立交的安全性提升不能仅考虑一个方面或某一层面的问题, 而应该从设计规范、运行特征、驾驶需求等各个方面着手解决并随着新理论、

新技术的发展不断充实和完善自己的优化思路。后续研究可以深入探讨人因因素在互通式立交安全性评估的应用, 丰富运行速度预测算法, 发掘基于智能检测、主动报警技术应用于互通式立交安全防护的研究。

[参考文献]

- [1]张驰,刘锴,王世法,等.高速公路互通式立体交叉出入口安全性研究综述[J].交通信息与安全,2023,41(2):1-17.
 - [2]彭俊.高速公路互通式立交 TOD 综合改造技术研究[J].市政技术,2025,43(8):136-144.
- 作者简介:涂雄(1993—),男,湖北鄂州人,长安大学硕士毕业,中级工程师,现主要从事路线及互通设计。