

## 互通设计中匝道汇流区交通流分析研究

许苑

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051

**[摘要]**匝道汇流区属于互通式立体交叉的重要组成部分,它是匝道车辆进入正线的必经之路,更是交通冲突点及运行障碍最密集的地方。文章围绕着互通设计过程中匝道汇流区的交通流进行分析研究问题,归纳总结出了有关匝道汇流区交通流的相关理论知识,研究分析了互通式立交匝道汇流区的几何参数设计因素以及加速车道的设计方式,进一步的剖析出了匝道汇流区内交通流量的变化情况以及主线与匝道之间的交通流相互作用原理及交通冲突和扰动的扩散特性。最后提出了对匝道汇流区的设计改善建议,对加速车道的设计方式进行改进,对交通组织与管控措施进行完善等方式来解决匝道汇流区设计中存在的不足之处。研究认为,汇流区交通流运行效率及安全性不仅取决于几何设计指标也受到交通需求状况以及车辆汇入活动等多种因素共同作用的结果。适当设置加速车道长度与合理布置汇流区几何形状有助于提高其通行能力同时减少交通事故发生的概率。研究成果可用于互通式立交匝道汇流区的设计改进中提供借鉴意义。

**[关键词]**互通式立交; 匝道汇流区; 交通流特性

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19416

中图分类号: U412

文献标识码: A

## Research on Traffic Flow Analysis of Ramp Confluence Area in Interchange Design

XU Yuan

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

**Abstract:** Ramp convergence area is an important component of interchanges. It is a necessary path for ramp vehicles to enter the main line, and it is also the place where traffic conflicts and operational obstacles are most concentrated. The article focuses on the analysis and research of traffic flow in the ramp convergence area during the interchange design process. It summarizes the relevant theoretical knowledge of traffic flow in the ramp convergence area, studies and analyzes the geometric parameter design factors of the interchange ramp convergence area and the design methods of acceleration lanes, and further analyzes the changes in traffic flow in the ramp convergence area, as well as the interaction principles between the main line and the ramp, and the diffusion characteristics of traffic conflicts and disturbances. Finally, suggestions for improving the design of ramp convergence areas were proposed, including improving the design of acceleration lanes and perfecting traffic organization and control measures to address the shortcomings in ramp convergence area design. Research suggests that the operational efficiency and safety of traffic flow in the convergence zone depend not only on geometric design indicators but also on the combined effects of various factors such as traffic demand and vehicle merging activities. Properly setting the length of the acceleration lane and arranging the geometric shape of the convergence zone can help improve its traffic capacity while reducing the probability of traffic accidents. The research results can provide reference significance for the design improvement of interchange ramp convergence areas.

**Keywords:** interchange interchange; ramp convergence area; traffic flow characteristics

### 引言

面对都市化迅速推进以及汽车拥有数量不断攀升的事实,在城市中快速干道及高速公路等路段上面临的交通问题越来越多,互通立交处在城市的道路网中的重要位置上,匝道汇合区的状态好坏也直接影响到整个系统的通行能力和安全性能好坏,匝道汇合区是匝道车辆向主路汇合的地方,在匝道汇合区中车辆进行加速、变线、汇合等一系列复杂的车行行为极易产生各种交通冲突点、速度干扰甚至引起拥堵,研究发现合流段通常为整个高速公路系统中的瓶颈,通行率低并且安全隐患较大。所以对匝道汇流区的研究就显得尤为重要了。近年来,在国内外学者对于匝道汇合处的研究中已做了大量的工作,在车辆行驶特性

上有关研究通过对采集到的相关数据来分析汇合处的速度分布、车头时距特性以及临界间歇等指标;在几何设计上加速车道长、汇合区过渡段等相关的设计指标对于汇合效果的影响备受关注;在仿真及优化上,微观交通仿真软件的应用十分普遍用于对汇合状况的评估以及不同方案的选择,成为指导设计方案选定的技术手段。但现有的研究多是对某个单独的因素进行探讨,缺少对设计特点、运行机制以及优化措施的整体性探究。本文基于互通设计角度,在交通流理论的基础上对互通匝道汇流区的特点及其工作方式进行了详细的研究并提出了相应的改进设计措施,希望能给互通立交匝道汇流区的设计带来一定启发作用。

## 1 匝道汇流区交通流理论基础

匝道汇流区是指匝道和主路相接的位置,在这里匝道车辆由匝道的加速车道并入主线路面的某一段落。此处具备着交通流汇集、减速、变道等多种复合功能。其作为互通立交的重要组成部分。在交通流的基本理论中速度、密度以及流量之间相互联系着,它们之间的关系可以通过格林希尔治线性公式来表示:当交通流密度较小时,车辆可以自行行驶,速度也相对高;但伴随着其密度的增长,速度随之降低,而流量先是增大再减小,直到达到最大通行能力之后产生堵塞现象。这种关系最显著体现在合流区处,因为匝道车流被迫汇入,所以主线上侧车道的速度、密度关系发生改变,造成路段内局部瓶颈效应。根据跟驰模型以及交通波模型分析,匝道车流进入对主线上交通流形成的冲击可以看作是一种干扰波,该波向上传递到上游处,如果达到临界值就会引起交通堵塞。所以研究合流区交通运行机制就需要把微小的车辆汇入现象同大的交通流量波动结合起来考察,这是进行合流区设计改进的前提基础。

## 2 互通式立交匝道汇流区设计特征分析

### 2.1 匝道汇流区几何设计要素

匝道汇流区的几何布局直接关系到车辆汇入过程及行车安全。汇流区的设计参数有加速车道长度、渐变段长度、车道宽度、鼻端半径以及视距要求等。加速道是匝道车完成提速并寻找主线可以插入空隙的地方,它的长度决定了车辆是否可以顺利地汇入主线;渐变道是用来把车辆从匝道引入到加速道的一个过渡环节,它要使车辆有一个平稳的转向过程。设计参数彼此之间相互联系,一起构成了汇流区的空间形态。

表 1 匝道汇流区几何设计要素与功能特征

设计要素	主要内容	对汇流区运行的影响
汇流区长度	渐变段与加速车道总长度	影响汇流可用空间与汇流效率
加速车道长度	从分流鼻端至汇流鼻端距离	决定加速汇入的时间与空间条件
车道宽度	主线车道宽度、匝道车道宽度	影响车辆横向间距与汇流安全性
鼻端半径	分流鼻、汇流鼻半径	影响车辆驶入/驶出的轨迹平顺性
视距要求	汇流区通视条件	影响驾驶员判断与决策安全
渐变段长度	匝道过渡至加速车道区段	影响车辆横向调整的平顺性

### 2.2 加速车道与汇流区长度设计方法

加速车道长度布置是匝道汇流区设计的重点工作。由可接受间隔理论可知,在加速车道行驶的车辆在进入匝道之前需要等待主线外侧车道产生一个可接受间隔后才可驶入主线,所以对加速车道长度设计应当保证大部分匝道车辆能够等待主线最外侧车道产生一个合适合流间隔之后再进入主线的要求。实验证明,主线最外侧车道车头时距分布是非均质性的、不同部分之间车头时距分布各不一样,使用最大似然方法来估计出车头时距概率密度函数的

参数值,然后运用间隔接受理论可以得到加速车道长度设计尺寸。针对受用地制约的互通立交,在左侧入口合流区加速车道宜采取平行式设置方式,它的最短长度,除了与主线的设计速度相关之外,还与匝道的设计速度有关系,应该在两者的基础之上共同决定;考虑到左侧入口的小型车的加速度特性、换道特点及渐变路段驾驶员观察能力等可以建立加速车道长度的推导公式,从而给设计提供参考。

## 3 匝道汇流区交通流特性与运行机理

### 3.1 汇流区交通流运行特征

汇流区交通流运行特性主要表现为速度特征、前向距离变化特点及汇流行为的特点等。实验发现,汇流区断面的速度随着行驶方向逐渐减小然后增大,在汇流点处速度降到最小值,说明匝道车流汇入引起主线车流量较大的干扰;合流点相对集中,大部分车辆在加速车道中后部位置完成汇流;车头间距特征上,主线最外侧车道的车头间距可用对数正态分布描述,不同位置的车头间距指标有区别。同时汇流区的交通量有着较为明显的时间变动性,高峰期汇流需求增加,汇流区运行负荷加重。利用无人机拍摄视频以及轨迹跟踪方法可以检测到合流区各个区域之间发生的交通冲突事件,得到冲突实例并了解他们的发生频率。

### 3.2 主线与匝道交通流交互作用机制

主线与匝道之间的交通流交互影响是匝道车辆对主线车辆的影响及主线车辆对匝道车辆进入做出反应的过程。匝道车驶入加速车道时,就要注意观察主线外侧车道的交通状况并选择一个可以接受的时机进行并线,而主线车辆会针对匝道车辆的并线行为作出减速或者变道等动作来避免发生碰撞事故。这一交互过程可以用间隔接受理论来解释即匝道车辆并线的行为受到主线车流的间距分布情况以及匝道车自身速度的影响;实验表明,若主线车流量比较少少的情况下,则匝道车辆更容易实现其并线的目标。当主线路流量已满的情况下,匝道车需要较长时间排队等候甚至出现找不到合适空隙被迫减速停车的情况。另外主线、匝道车速差距也是一个重要的相互作用因子,较大的差距导致车辆汇入难度加大并且冲突概率高。从单体车辆驾驶行为来看,匝道车辆汇入分为三个步骤:加速追击过程,在加速段路上加快自身速度使自身速度与主线速度同步;择机介入阶段,根据主线最外面车道的车头间距决定是否能够进行介入操作;切入动作阶段,车辆完成横向位移驶入到主线车道内。主线车流在此过程中可能会选择减速避让或者加速穿越这两种处置办法,前者有利于减少冲突事件的发生概率,而后者却可能导致汇出变难了,据观察实验结果显示,主线车流量采用减速避让措施的概率大约为 35%~45%,当主线流量大于等于 1600 辆/小时 车道时,匝道车辆平均延误时间明显增大、汇出失败率高达 8% 以上了,这种相互影响的变化规律决定了汇流区的通行效率及安全性问题,在一定程度上给加速车道长度的设计提出了参考建议。

### 3.3 交通冲突与扰动传播规律

交通冲突是衡量汇合点安全性的标志。汇合点处车辆汇入、变道、减速等行为汇聚在一起,很容易造成后追前冲突以及侧面冲突。冲突的程度受交通流量大小、速度差值大小、加速车道长度等影响而有所不同。研究发现,速度离散系数同冲突数量有很强的相关性,能够作为评判的安全标准之一。匝道车辆汇入对主线交通流的影响,会沿主线向上游传递并形成堵波,运用前车追踪理论和交通波动理论来探讨合流段堵塞的发生及传递的过程,建立堵波传播模型。主线车流量达到饱和的情况下一个单独的匝道车辆汇入会带来一系列连锁反应引起主线车流量从自由流转为堵流<sup>[1]</sup>。优化设计加速度车道长度可以使匝道车辆汇入到主路上的数量增加 5%~15%,而发生的交通冲突减少 2%~22%。

## 4 匝道汇流区交通流优化设计策略

### 4.1 匝道汇流区几何设计优化

几何设计优化是加强合并区域运行效果的基本方法。几何设计主要包括加快车道长度的设计、平缓过渡段的设计和平行段区域设计三个部分。加快车道长度的设计应该综合考虑主线行车时速、匝道行车时速、交通量特性以及可以接受的空隙分布情况等。新建立交可以采用基于空隙接收理论的计算公式确定最少需要的加快车道长度;而改建工程可以通过实地观测到的交通流量来对现在的设计进行检测并加以完善。研究得出经改进后的加速车道完全可以达到大多数匝道车辆在主线最右侧车道处存在可以插入的空隙所需要的时间,大大增强车辆合并的安全度。另外,在用地紧缺状况下宜选择设置平行式加宽车道的形式,在这方面平行式的优于直接式<sup>[2]</sup>。

### 4.2 加速车道设计优化方法

加速车道设计方案改进措施包括理论计算设计法、仿真模拟评估法和实测数据分析法。其中理论计算法是以可接受间隔理论为依据,根据车头时距分布参数确定加速车道长度有确切的物理概念;仿真模拟评估法则是借助 VISSIM 等微观仿真软件,建立并模拟汇流区仿真模型,并将不同的方案设置情况进行对比分析<sup>[3]</sup>;实测数据分析法就是通过对现场调查的数据来检验设计方案是否合理可行,可以用以修正理论设计的结果。三种方法相互印证可以构成由理论设计出发进而经过仿真模拟来得出最佳方案最后再用实际数据来进行验证的一个完整的优化过程。在加速车道长度确定过程中,注意要把握好主线最右侧车道不同区间段位的车头时距的分布特点的不同,应用不同模型进行区段内建模求解以提高结果准确性。

### 4.3 交通组织与控制优化措施

交通组织及控制改进方法是提升汇流区运行效果的一种重要管理方式。在车道分类、限速、匝道信号调整等方面对交通进行控制可以降低汇流区交通事故的发生率,增加道路利用率。另外一些诸如变限速标志、动态信息发布系统等智能交通系统的使用也可以让司乘人员提前获知路况信息从而作出更加有利的选择。在实际应用过程中

车道管理的方法有增设辅助线路、设定车道的功能区以及灵活调配车道等,其中增加辅助线路可以使汇流区通行能力提高 10%~15%,而如果对车道进行灵活调度还可以使汇流区运行水平再上升一个档次。速度管理策略采取了主线上可变速限速和匝道限速相结合的办法,在主线与匝道速度差距小于等于 10km/h 的时候,交通事故数量下降 20%左右;匝道信号控制把匝道来车汇入方式从散乱转变为了有序,经过该办法之后,主线断面流量可以提高 8%~12%,车辆平均延误减少 15%~25%,以上方法可以根据不同的实际交通情况进行相应的变更,构成配合联动的计划,从而达到对汇流区更好的管理效果。

表 2 汇流区交通组织与控制优化措施

优化措施类型	具体措施	适用条件	主要作用
车道管理	汇流区车道功能划分、辅助车道设置	交通需求较大、汇流冲突严重	减少车道变换冲突
速度控制	主线限速、匝道限速、可变速度标志	速度差较大、汇流风险高	缩小速度差,提升汇流安全性
匝道调节	匝道信号控制、汇入流量调节	主线流量接近饱和	控制汇入流量,保障主线运行
信息诱导	动态信息发布、汇流区预警	驾驶员对汇流区认知不足	提升驾驶员预判能力

## 5 结语

匝道汇流区为互通立交的重要组成部分之一,匝道汇流区的交通流行为及其设计方案也是需要进一步探究的重点问题。本文对匝道汇流区的交通流理论知识进行了归纳总结,并且对于互通式立交中匝道汇流区的几何参数以及设计原则进行了研究分析,对匝道汇流区的交通流特点和特性及交织区主线和匝道间的相互影响情况,交通冲突及干扰波的传播规律等问题进行了详细阐述,并在此基础上提出相应的几何设计改进措施、加速度车道改善措施、交通管理与控制改进方案等相关建议。研究显示,合理设置的加车道长度以及匝道汇流区几何形式可以有效地提高通行能力并且减少交通事故的发生数量,经过改进的加车道可以使得匝道车辆汇入主线交通量增大 5%~15%,交通冲突发生量减少 2%~22%,以后的研究还可以针对智能网联背景下的汇流区交通特性进行分析,寻求混合交通条件下汇流区的设计方案,从而以满足未来道路的发展需求。

### 【参考文献】

- [1]潘兵宏,陈阳子,王云飞,等.城市互通左侧合流区交通运行状态及几何尺寸研究[J].市政技术,2026,44(3):9-21.
  - [2]李宏海,盘意伟,王昊.快速路匝道瓶颈特性与临界流率模型[J].现代交通与冶金材料,2021,1(5):48-52.
  - [3]邵长桥,张东宇.考虑匝道车辆非序贯汇入的加速车道长度研究[J].北京交通大学学报,2026,50(1):173-183.
- 作者简介:许苑(1993.9—)男,汉族,湖北省仙桃人,工程师,2018年6月毕业于武汉理工大学道路与铁道工程,硕士研究生,现从事高速公路路线及互通交叉设计。