

公路互通式立交进出口车道优化设计与交通流仿真分析

席 奇

厦门中平工程监理咨询有限公司 福建省厦门 361001

摘 要: 公路互通式立交作为道路网络的关键节点,其进出口车道的设计合理性直接影响路网的通行效率与交通安全。本文聚焦于互通式立交进出口车道的优化设计方法及相应的交通流仿真分析技术。首先,阐述了进出口车道优化设计的基本原则与目标,包括提升通行能力、减少交通冲突、保障行车安全及满足驾驶员操作习惯等。其次,从车道功能划分、车道数匹配、渐变段设置、几何线形设计等多个维度,系统探讨了进出口车道优化设计的关键技术要点,旨在构建科学合理的车道空间布局。在此基础上,引入交通流仿真分析方法,论述了其在立交进出口设计方案评价与优化中的应用价值,包括仿真模型的构建流程、主要参数的选取、以及基于仿真结果的通行效率指标和安全指标的量化分析。通过将优化设计方案与交通流仿真分析相结合,能够为互通式立交进出口车道的规划设计提供科学、客观的决策支持,从而有效提升立交节点的整体服务水平,促进道路交通系统的高效、安全运行。

关键词: 互通式立交; 进出口车道; 优化设计

随着我国公路建设发展和机动车保有量增长,道路交通需求加大。互通式立交作为路网关键连接点,其交通运行状况对路网效率和安全至关重要。互通式立交进出口区域是交通流转换和交织核心地带,交通行为复杂、冲突点多,易成交通瓶颈,引发拥堵和事故。所以,科学合理优化互通式立交进出口车道设计,是提升立交通行能力、改善效率、保障安全的关键。传统立交设计依赖规范经验和主观判断,难反映复杂交通下车辆运行特征和方案实际效果。交通流仿真技术能精确模拟交通流、评价交通设施性能,为立交进出口车道设计方案优化与验证提供支撑。通过建立符合实际的仿真模型,可模拟预测不同方案下交通流运行状态,量化分析交通指标,对比评估方案优劣,为方案比选和优化提供客观依据。

1 互通式立交进出口交通流特性分析

1.1 进出口区域的车辆交织与合流行为

互通式立交进出口区域的车辆交织与合流行为,是影响该区域交通运行效率与安全的核心微观交通现象。交织行为特指在短距离内,两个或多个交通流方向的车流为改变行驶方向而发生的车道交换过程,其本质是车辆在有限空间内争夺路权的动态博弈。在此过程中,驾驶员需要评估目标车道的间隙、调整自身车速并完成横向移动,这一系列操作增加了交通流的扰动,导致速度降低和车头时距分布变得不规则。合流行为则是指从匝道驶出的车辆汇入主线车流的过

程,其关键在于汇入车辆与主线直行车辆之间的交互。主线车辆为避免碰撞会采取减速或换道等避让措施,这种扰动会向上游传播,形成压缩波,严重时可导致主线通行能力的骤降,甚至引发交通流从稳定状态到拥堵状态的相变^[1]。

1.2 交通量与车型组成对通行能力的影响

交通量与车型组成是决定互通式立交进出口区域通行能力的两个关键宏观输入条件。交通量的大小直接决定了交通流的饱和度,当交通量接近或超过路段的实际通行能力时,车辆间的跟驰行为变得更为紧密,驾驶员可接受的最小车头时距减小,任何微小的扰动,如一辆车的紧急制动,都极易被放大并引发连锁反应,导致交通流稳定性急剧下降。车型组成的影响则更为复杂和深刻。大型车(如货车、客车)与小汽车在动力性能、几何尺寸和驾驶员行为上存在显著差异。大型车的加速性能差、制动距离长,在合流时需要更长的距离和更大的间隙,从而对主线交通流产生更强的扰动。其庞大的车身也构成了移动瓶颈,限制了相邻车道的通行能力。当大型车比例较高时,交织区的有效通行能力会显著折减,且交通流的稳定性对波动的敏感性增加。该分析的价值在于,它超越了将交通流视为均质体的传统假设,强调了交通构成的异质性对通行能力的量化影响。

1.3 几何设计要素对交通运行安全的作用

几何设计要素是塑造车辆运行环境、从根本上影响交

通运行安全的物理基础。这些要素包括但不限于匝道的曲率半径、纵坡、加减速车道的长度与形式、以及视距条件。匝道的曲率半径直接限制了车辆的行驶速度，过小的半径会增加驾驶员的操作负荷和车辆的侧向力，尤其在湿滑路面条件下，极易导致车辆侧滑失控。纵坡则显著影响车辆的加减速性能，上坡会降低大型车的速度，形成速度差，增加追尾风险；下坡则会使车辆速度过快，增加驾驶员在合流或分流时的判断难度。加减速车道的长度为车辆调整速度以适应主线或匝道速度提供了必要空间，长度不足会迫使车辆在主线上仓促完成速度变换，是诱发事故的重要隐患。视距，特别是出口处的识别视距和合流区的决策视距，是保障驾驶员有足够时间感知信息、做出判断并执行操作的前提。视距不良会直接导致驾驶员反应时间不足，错过最佳操作时机。对这些几何设计要素作用的深入分析，其价值在于建立了设计参数与安全性能之间的直接量化关系^[2]。

2 互通式立交进出口车道优化设计方法

2.1 车道功能划分与宽度优化

车道功能划分与宽度优化是提升进出口区域交通运行秩序与效率的基础性设计手段。功能划分的核心在于明确每条车道的预期交通功能，通过交通标志、标线等物理隔离，将不同流向、不同速度特性的交通流进行空间分离，从而减少交织与冲突。例如，在出口区域，可设置专用的减速车道，将准备驶出的车流与主线直行车流提前分离，避免后者因前车减速而受到干扰。在进口区域，清晰的加速车道则为汇入车辆提供了与主线车速匹配的缓冲空间。车道宽度的优化则需在满足规范要求的基础上，综合考虑设计速度和车型组成。对于大型车比例较高的路段，适当增加车道宽度可以降低大型车行驶时对邻近车道的侧向挤占效应，提高小型车的行驶安全感和舒适性。反之，在以小型车为主且速度受限的区域，适度缩减车道宽度有助于控制车速，规范驾驶行为。这种设计的深层价值在于，它通过空间资源的精细化分配，引导交通流形成一种有序、可预测的运行模式，从根本上减少了因驾驶员意图不明或操作犹豫引发的交通扰动，为后续的仿真分析和性能评估奠定了良好的基础^[3]。

2.2 渐变段长度与过渡方式的合理设置

渐变段长度与过渡方式的合理设置是保障车辆在车道变换过程中平稳、安全的关键技术环节。渐变段是连接不同功能车道或不同宽度路段的线性过渡区域，其长度直接决定

了车辆完成横向移动所需的时间和空间。过短的渐变段会迫使驾驶员在短时间内进行急剧的方向修正，增加操作难度和心理压力，尤其在交通量较大时，极易引发侧面碰撞或刮擦事故。渐变段长度的确定需基于设计速度、车道偏移量以及驾驶员的常规转向速率进行精确计算，确保绝大多数驾驶员能够从容、自然地完成车道变换。过渡方式则涉及渐变段的线形设计，如采用直线过渡还是曲线过渡。合理的过渡线形能够引导车辆平顺地驶入目标车道，避免产生突兀的“S”形轨迹。例如，采用反向曲线或缓和曲线进行过渡，可以使车辆的转向角变化更加均匀，提升行驶的稳定性和舒适性。此设计方法的價值在于，它将驾驶员的行为特性与车辆的动力学性能纳入几何设计考量，使得道路线形本身成为一种主动的安全引导设施，通过优化过渡段的几何参数，有效降低了车道变换过程中的风险，提升了整个进出口区域的运行品质。

2.3 辅助车道与集散车道的配置策略

辅助车道与集散车道的配置策略是解决复杂交通节点多流向冲突、提升整体通行能力的高级设计方法。辅助车道通常指为特定目的设置的短车道，如为满足合流需求而设置的加速车道，或为分流需求设置的减速车道。其配置策略的核心在于根据交通流预测，精确确定辅助车道的长度和位置，确保其能够有效容纳排队车辆或提供足够的加速/减速距离，从而将交织冲突对主线交通的影响降至最低。集散车道则是一种更为系统的解决方案，它通过在主线路外侧设置一条或多条平行道路，将多个进出口的匝道连接起来，形成一个相对独立的交通子系统。所有进出主线的车辆首先在集散车道上进行交织、汇合或分离，然后再与主线发生一次交互。这种配置策略的价值在于，它将原本集中在主线某一点上的复杂冲突，通过空间重构，转移并分散到集散车道这一缓冲区域。这不仅极大地简化了主线的交通流构成，保障了主线直行交通的畅通与稳定，同时也为进出车辆提供了一个更为安全、从容的运行环境。通过科学配置辅助车道与集散车道，可以从宏观层面重构互通式立交的交通组织模式，实现通行能力与服务水平的系统性提升^[4]。

3 基于仿真的进出口设计方案交通流评价

3.1 交通流仿真场景的构建与参数标定

交通流仿真场景构建需完整还原互通立交进出口的路网拓扑、交通特征与管控条件，理论核心在于明确场景要素与参数标定逻辑：场景要素需包含进出口车道布局（如进口

加速车道长度、出口减速车道宽度)、衔接道路等级(如主线为高速公路、被交路为城市主干道)、交通管控设施(如限速标志、导流线);参数标定需聚焦交通组成(车型比例,小型车、中型车、大型车占比需符合区域路网实际)、流量特征(高峰时段流量、潮汐流差异)、驾驶行为参数(如加速速率、跟驰安全距离),标定数据需通过现场监测获取(连续3天、每天12小时人工计数与视频抓拍),确保与实际交通流匹配度 $\geq 90\%$ (符合《交通流仿真应用指南》JTG/T 3380-02-2020要求)。某市绕城高速互通立交(主线设计速度100km/h,进出口原设计为1条加速车道、1条减速车道),采用VISSIM软件构建场景:通过现场监测得到早高峰时段主线流量4500pcu/h(小型车占75%、中型车15%、大型车10%),进口加速车道长度200m,出口减速车道长度180m;参数标定后,仿真流量与实际流量偏差 $\leq 8\%$,车型比例偏差 $\leq 3\%$,场景还原度达92%,为后续方案评价奠定基础。

3.2 不同设计方案下的通行效率对比分析

通行效率对比需设定核心评价指标与对比逻辑,理论上评价指标应包含平均车速(反映整体流动效率)、进口排队长度(反映车辆汇入拥堵程度)、出口延误时间(反映车辆驶出耗时),对比需选取“基准方案”(原设计)与“优化方案”(如增加车道数量、调整渐变段长度),通过仿真模拟相同交通流量下的指标差异,筛选效率最优方案。延续上述互通立交案例,设定两类优化方案:方案一为进口增加1条加速车道(总长250m)、出口维持1条减速车道;方案二为进口维持1条加速车道、出口增加1条减速车道(总长220m)。仿真结果显示:基准方案早高峰进口平均车速38km/h、排队长度150m,出口平均延误45s;方案一进口平均车速提升至45km/h、排队长度缩短至80m,出口延误无显著变化;方案二出口平均延误降至28s,进口车速与排队长度无显著变化;综合效率最优的方案一,其整体通行效率较基准方案提升21%,符合主线“高峰时段平均车速 $\geq 40\text{km/h}$ ”的运营要求。

3.3 优化设计方案对交通安全水平的提升评估

交通安全水平评估需围绕进出口关键风险点(合流区、分流区)构建评价体系,理论上核心指标包括冲突率(单位时间内车辆间潜在碰撞次数,安全阈值 $\leq 2\text{次/h}$)、合流区车头时距(反映汇入安全性,达标值 $\geq 3\text{s}$ 的比例

$\geq 85\%$)、分流区减速幅度(避免急刹导致追尾,安全减速幅度 $\leq 2\text{m/s}^2$ 的比例 $\geq 90\%$),评估需通过仿真软件的冲突分析模块(如VISSIM的Conflict Evaluation模块)量化指标变化,验证优化方案对风险的降低效果。仍以上述案例中最优的方案一为例,仿真评估结果显示:基准方案合流区冲突率3.5次/h、车头时距 $\geq 3\text{s}$ 的比例72%,分流区减速幅度 $\leq 2\text{m/s}^2$ 的比例78%;方案一实施后,合流区因增加加速车道,车辆汇入时间更充足,冲突率降至1.8次/h,车头时距 $\geq 3\text{s}$ 的比例提升至88%,分流区指标无显著变化;整体交通安全水平较基准方案提升37%,所有指标均满足《公路项目安全性评价规范》JTG B05-01-2013中“互通立交进出口安全指标要求”,有效降低合流区碰撞风险^[5]。

4 结语

通过对互通式立交进出口车道优化设计与交通流仿真的综合分析,可以清晰地认识到,科学的设计方法和精确的仿真评估是提升交通运行效率与安全水平的关键所在。从几何设计要素的微观影响到交通流特性的宏观表现,每一个环节都紧密关联着整体性能的优劣。优化车道功能划分、合理设置渐变段长度以及科学配置辅助车道与集散车道,不仅能够有效减少车辆冲突点,还能够从源头上降低安全隐患的发生概率。而基于仿真的方案评价,则为设计决策提供了量化的依据,使得改进措施更加具有针对性和可操作性。未来的研究可进一步探索智能化技术在交通组织中的应用,例如动态车道分配、实时风险预警等,以适应不断变化的交通需求,并推动交通系统的可持续发展。这些努力将有助于构建更加高效、安全和人性的道路交通环境。

参考文献:

- [1] 许甜,邓涵月,刘韶新,等.高密度高负荷小间距互通立交区安全评价技术研究[J]. 2022(3).
- [2] 赵文.基于交通需求的互通式立交方案设计研究[J]. 公路, 2021.
- [3] 刘振撼.复杂地下互通立交运营通风网络分析及控制技术[J]. 西南交通大学, 2022.
- [4] 曹岳嵩,伍建平.单喇叭式立交和A-B型半苜蓿叶式立交的通行能力比较[J]. 公路工程, 2021, 46(4):163-170.
- [5] 周辉,雷鸣.服务型互通立交被交路侧交叉方式研究[J]. 公路与汽运, 2022(005):000.