

城市立交上盖交织区交通运行特征分析及优化设计

马跃¹, 黄诗淇², 郭凯³

(1.广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060; 2.华南理工大学, 广东 广州 510641;

3.广东省建筑设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要:为满足城市高速立交市政化过程中土地资源的集约使用,立交上盖改造成为了有效的手段。通过匝道的改建与上盖平台的构筑,上盖结构的内部形成了上盖交织区,该区域耦合了立交交织区和隧道的双重复杂交通特性,不仅存在交织区内车辆频繁变换车道、分流合流等特性,还叠加了隧道环境下视野受限、空间局促等风险,构成了显著的安全隐患。探讨了城市立交上盖交织区交通运行影响因素,并聚焦于上盖交织区出入口实施的实地调研,采集和分析断面速度数据。结果显示,上盖交织区出口附近的断面间速度差、断面速度标准差和断面超速率均较高,表明这些路段交通运行风险较大。此外,结果还显示,设置纵向减速标线能有效降低速度标准差和车辆断面平均速度,减少超速现象,进而降低行车风险,是一项切实可行的交通组织优化策略,对于城市立交上盖交织区的优化设计具有重要应用价值。

关键词:立交上盖;交织区;交通运行特征;优化设计

中图分类号: U412.39

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0016-08

0 引言

近年来,随着城市化进程的快速推进,城市的地域范围与空间规模持续扩大,原有的环城高速公路逐渐难以满足城市车辆绕行的需求。因此,这些高速公路被改为城市快速路,以更好地服务于城市交通。但是,作为关键节点的互通立交,其收费站和绕行匝道占用面积较大,不仅导致周边土地被分割,影响城市整体规划和空间布局,也导致了城市土地资源的浪费。因此,为改善城市土地资源的紧张状况,兼顾生态需求和土地节约,立交上盖改造逐步成为提升城市空间利用效率、实现可持续发展的重要手段。

立交上盖改造的核心为匝道改造及上盖平台建设。匝道是以拆除原有的收费广场,并将环绕式匝道改建为直通匝道的方式进行改造的,这样不仅可以缩减车辆的绕行距离,还能提高土地利用效率。上盖平台的建设目的是在路面上方创建一个绿色平台,该平台不仅连接了立交两侧土地,还具有减少交通噪声污染、增加城市绿化面积等多重功效,对提升城市生态质量有着显著作用。上盖平台的搭建使得立交空间分为上下两部分:上盖部分成为空中绿地,为

居民提供休闲娱乐的场所;上盖的内部则形成了封闭的“地下隧道”,供车辆和行人通行。

城市立交上盖交织区是以传统立交交织区为基础,受上盖结构物影响而形成的。由于上盖结构覆盖了交织区的分合流点,因此交织区与上盖区域的出入口存在一定程度的重叠。本文为研究方便,将上盖交织区分为上盖交织区入口(上盖匝道及主线入口)、上盖交织路段及上盖交织区出口(上盖匝道及主线出口),如图1所示。



图1 城市立交上盖交织区及区域划分

立交上盖交织区是一个特殊区域,结合了传统交织区和上盖结构下的“地下空间隧道”,既面临车辆在交织区频繁变道、分流带来的交通隐患,又受上盖出入口光线变化的影响,给驾驶员增加了行驶风险。故上盖交织区面临明显的交通安全挑战。

本研究旨在研究上盖交织区交通运行影响因素,并对该区域的出入口进行调研。调研内容包括:测量断面速度数据,分析上盖交织区出入口及纵向减速标线前后的速度特征;然后,根据分析结果得出交织区的交通运行特征及纵向减速标线的减速特性;最后,

收稿日期: 2024-08-06

作者简介: 马跃(1982—),男,硕士,高级工程师,从事市政道路工程设计工作。

针对上盖交织区交通运行的特性,提出相应的优化设计建议。

1 交通运行影响因素分析

上盖交织区交通功能独特,并受到出入口光线变化的影响,容易导致该区域交通流紊乱,这不仅会降低道路的通行效率,还会加剧安全风险,使交织区变成交通拥堵与事故频发的地带,因此分析上盖交织区交通运行的影响因素显得尤为重要。分析流程如图 2 所示。

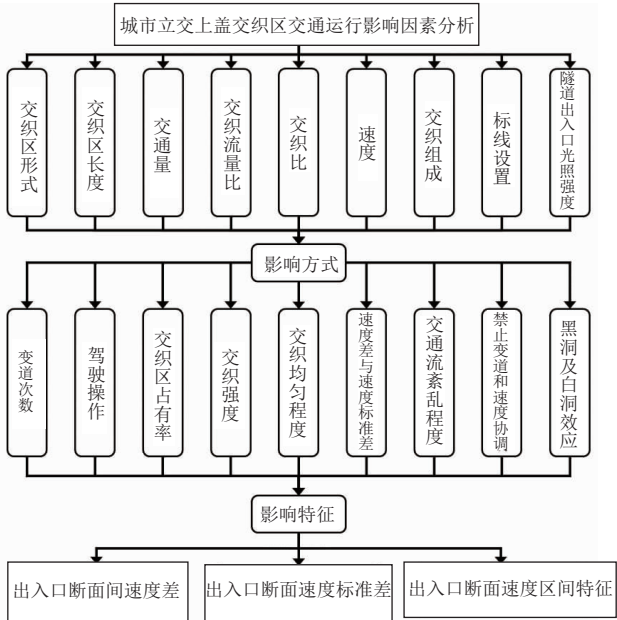


图 2 上盖交织区交通运行影响因素及影响特征分析流程图

1.1 交织区的形式

依据交织区出入口的布局特征,交织区可分成双侧交织和单侧交织两种基本类型。其中,单侧交织又能进一步细分为单侧匝道交织和单侧主线交织。图 3 为交织区形式示意图。

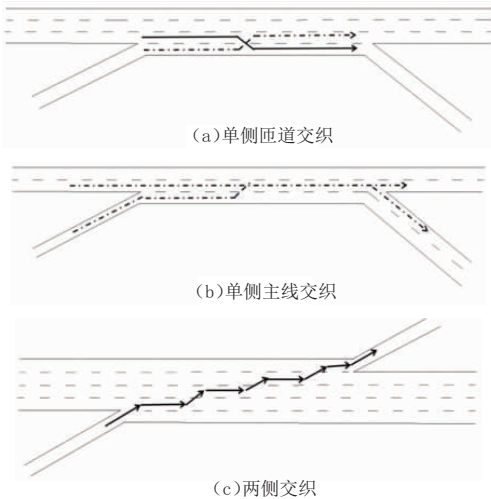


图 3 交织区形式

交织区的形式不同会导致车辆换道次数的不同,换道次数越多,车辆变道和追尾冲突的风险就越大,因此交织区的形式可以影响交织区通行的效率和安全。

1.2 交织区长度

为方便研究,本文将交织区分合流点之间的距离定义为交织区长度。交织区长度会对车辆变道行为和司机的心态造成影响,从而对交织区运行效率和安全产生作用。Cirillo^[1]发现,增加交织区长度可以降低道路事故率,但并不是越长越好,较长的交织区容易出现紊流,导致较高的换道率^[2]。国内也有研究^[3]指出,适度增加交织区长度能提高车流速度,但超过一定长度后效果趋于平稳。若交织区过短,驾驶员在大流量下进行交织操作时的压力和风险更大,因此交织区长度也不宜过短。

1.3 交通量参数

(1) 交通量

交织区入口的交通量可以分为两部分,即主线交通量和匝道交通量。根据车辆行驶方向的不同又可以将交通量分类为 4 种基本流向。图 4 为交织区交通流分布图,交通流单位为 pcu/h。

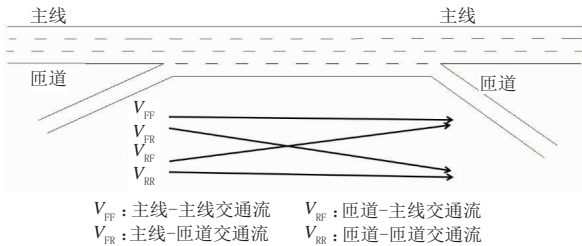


图 4 交织区交通流分布图

根据图 4,交织交通量 $V_W = V_{RF} + V_{FR}$,非交织交通量 $V_{NW} = V_{FF} + V_{RR}$,总交通量 $V = V_W + V_{NW}$ 。

数据显示,交织区连续变道的困难性会在高峰时段提高^[4],同时交通湍流水平也会在这一时段提升^[5]。国内也有研究表明,交织区交通量与车公里冲突率(ATC)、交通事故发生率正相关。由此可见,当交织区的交通量增加时,道路的占有率也会随之提高,进而导致车辆之间的交互频率上升,最终使交织区内的交通运行安全隐患增大,造成通行效率下降。

(2) 交织流量比和交织比

交织流量比为交织流量在总流量中的占比,表示交织区的交织强度。交织流量比越大,通常意味着交织区域的交通流量较大,且交织活动更为频繁,因而意味着交通流的混乱程度越大。交织比指两个交织车流中较小的流量在总交织流量中的占比,反映

交织车流的均匀程度和道路的交织干扰程度。交织流量比和交织区长度固定时,通过优化交织比可合理分配交通量,提高车道的使用效率,并增强交织区的运行效能。由此可知,交织流量比和交织比在提高交织区的通行效率和确保安全方面起着关键作用。

1.4 速度

车辆的速度会受到主线和匝道路段的限速和上盖出入口区域光线条件变化的影响,并会随着交织行为而变化。这些速度变化可以通过两个指标来表示:一个是速度标准差,表示速度的离散程度;另一个是速度差,表示前后断面间的车速差异。速度标准差^[6]及断面间速度差^[7]也与交通安全状况密切相关。

1.5 交通组成

在交织区发生交织行为时,不同车型之间动力性能的显著差异会导致车流之间产生较大的速度差异^[8],从而容易导致交通流的不稳定。除此之外,变道时体积较大的大车可能使小车驾驶员视线受阻,增大危险隐患,故而在一定程度上,交织区的运行会受到交通组成的影响。

1.6 标线设置

标线不同,对于交通运行的作用也不尽相同。例如:禁止变道的实线设置在交织区出口处,可以有效减少车辆的变道次数,降低行驶车速;纵向减速标线设置在交织区辅道出口处,有助于降低进入匝道前的车辆速度,提升主线与匝道之间的流畅性和安全性。

1.7 上盖出入口光照强度

上盖结构使交织区内形成了“地下隧道”。进出上盖结构时,司机会遇到“黑洞效应”及“白洞效应”,这些突然的光线变化会影响驾驶员的视觉感知,从而影响其驾驶行为^[10],如图5所示。统计数据显示,公路隧道的事故发生概率比开放路段大,而且这些事故大概率发生在隧道的出入口附近。因此,隧道出入口的光照强度对上盖交织区的安全也起着重要作用。



(a) 黑洞效应

(b) 白洞效应

图5 广州东圃立交上盖隧道出入口光照对比图

2 实验设计与方案

为了解交织区的交通特点,本研究将通过开展实地调研实验,获取车辆行驶的真实速度数据的方式来进行。

2.1 调研地点

本项研究选择了广州市东圃立交作为调研地点。该立交原为广州东环高速上一个重要的大型互通立交。随着高速公路转变为城市快速路,东圃立交拆除了旧收费站和部分绕行匝道,并建设了上盖平台,进行了一系列改造。改造后,上盖下方形成了类似地下隧道的封闭区域,并带来了复杂的交通交织现象,因此东圃立交成为了一个理想的研究场所。调研地点位置如图6所示。



图6 调研地点位置图

2.2 调研内容

根据本文第1章对上盖交织区影响的详细分析,可以得出公路隧道的交通事故多发生于隧道的出入口区域,基于这一结论,本次调研将重点观察上盖交织区的出入口部分。由于交织区交通量的增加也会降低交织区的通行效率,从而影响调研结果,因此本次调研选择在上午9点至下午4点的时间段进行,避开早晚的交通高峰期,保障调研车流处于流畅状态。根据前文对于上盖交织区区域的划分及纵向减速标线的位置选择,本次调研确定的调研位置如图7所示,调研具体内容包括:

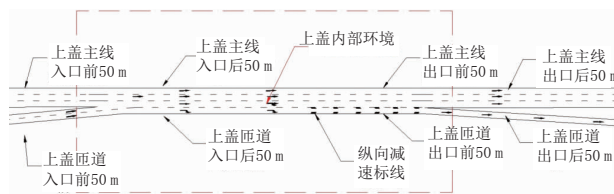


图7 调研位置示意图

(1)在上盖主线和上盖匝道的出入口前后各50 m的位置,共8个断面处,收集车辆运行速度集合(简称

断面速度)。50 m 取匝道限速值 60 km/h 三秒行程。

(2)在纵向减速标线前后 2 个断面处,收集车辆运行速度集合(简称断面速度)。

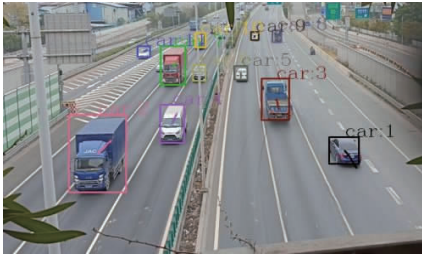
2.3 调研工具

本研究采用了两种方法来收集交织区出入口的车辆断面速度数据：

(1)对于上盖匝道出入口 4 处断面及纵向减速标线前后 2 处断面,由于其断面速度方便测量,因此使用雷达测速枪进行测量,如图 8(a)所示。



(a)雷达测速枪



(b)视频车辆追踪软件效果图

图 8 调研工具

(2)对于上盖主线出入口 4 个断面的速度,由于雷达测速不适用,故用视频车辆追踪软件对该路段视频进行分析,得出上盖主线出入口的断面速度数据,处理后的效果如图 8(b)所示。

2.4 调研方案

本研究用以上两种调研工具,在东圃立交上盖获取了出入口前后断面的速度数据,并对这些数据进行了以下特征分析。

(1)分析上盖交织区出入口断面的速度数据,得出断面间的速度差及速度标准差特征。

(2)分析上盖交织区出入口断面的速度区间,得出速度分布频率和超速率特征。

(3)分析纵向减速标线的减速效果及减速特性。

3 数据分析

3.1 上盖交织区出入口交通特征分析

根据分析指标的差异,本节可以分为以下两项特征分析：

(1)断面速度特征分析:断面速度标准差和断面间速度差的特征分析,见 3.1.1 节。

(2)断面速度分布特征分析:断面速度分布频率和超速率的特征分析,见 3.1.2 节。

3.1.1 上盖交织区出入口断面速度特征分析

(1)断面速度处理

将调研数据按行驶车辆分为大车和小车两类,然后算得断面速度标准差和断面平均速度,并用平均速度计算得到断面间速度差,公式见表 1。

表 1 断面速度分析指标公式

断面速度指标	公式	备注
断面平均速度	$\bar{V} = \sum_{i=1}^n V_i$	n 为通过断面车辆数,辆; V_i 为断面车辆速度,km/h
断面速度标准差	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1}}$	—
断面间速度差	$\Delta V = \bar{V}_2 - \bar{V}_1$	$\bar{V}_1$ 为前断面平均速度,km/h; $\bar{V}_2$ 为后断面平均速度,km/h

将上盖主线和上盖匝道出入口前后断面的数据按大小车分类,并利用表 1 中公式分别计算出各断面的速度指标(见表 2)。

表 2 上盖交织区出入口断面速度指标

测量位置	小车			大车		
	小车平均速度 / (km·h ⁻¹)	小车断面间 速度差 /(km·h ⁻¹)	小车速度 标准差	大车平均速度 / (km·h ⁻¹)	大车断面间 速度差 /(km·h ⁻¹)	大车速度 标准差
上盖匝道入口前 50 m	45.09	—	8.56	44.45	—	8.32
上盖匝道入口后 50 m	35.16	-9.93	7.04	34.66	-9.79	6.65
上盖匝道出口前 50 m	42.44	8.28	12.10	39.05	4.39	9.66
上盖匝道出口后 50 m	46.92	3.48	8.69	47.19	8.14	8.34
上盖主线入口前 50 m	57.37	—	9.86	57.59	—	10.03
上盖主线入口后 50 m	55.27	-2.10	13.93	50.60	-6.99	11.64
上盖主线出口前 50 m	58.46	3.19	18.45	52.47	1.87	14.83
上盖主线出口后 50 m	63.15	4.69	13.25	63.42	10.95	12.81

(2)上盖匝道及主线出入口断面速度特征分析
将以上调研数据进行整合处理得到条形图(见图9、图10)。

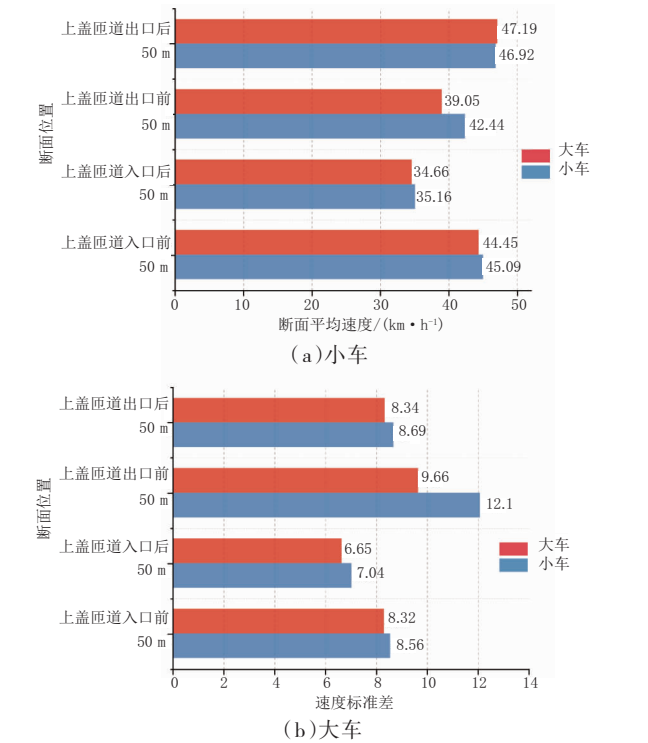


图9 大小车上盖匝道出入口断面速度特征

综合图9和图10,大小车在经过上盖区时都经历了减速后加速的过程,且交织区出口前50m处大小车的速度标准差达到最大,即在此断面的车辆表现出较大的速度离散性,提高了行车风险。同时,在出口后50m处,大小车的平均速度升至最高水平,大车在出口前后的速度差异较大。由此可知,交织区出口前后的路段风险系数较高。

3.1.2 上盖交织区出入口断面速度分布特征分析

(1)断面速度处理

本文将上盖交织区出入口的断面速度分成3个等级不同的区间,即低速、中速和高速区间,分别对应上盖匝道区间20~40 km/h、40~60 km/h、60~80 km/h和上盖主线区间40~60 km/h、60~80 km/h、80~100 km/h,然后根据调研数据统计每个区间内车辆

表3 大小车上盖匝道出入口断面速度频率分布

测量位置	小车				大车			
	20~40 km/h	40~60 km/h	60~80 km/h	超速率	20~40 km/h	40~60 km/h	60~80 km/h	超速率
上盖匝道入口前 50 m	28%	68%	4%	4%	86%	14%	0	0
上盖匝道入口后 50 m	72%	27%	2%	29%	88%	8%	4%	12%
上盖匝道出口前 50 m	42%	44%	14%	68%	70%	27%	2%	29%
上盖匝道出口后 50 m	16%	78%	6%	6%	35%	59%	6%	6%

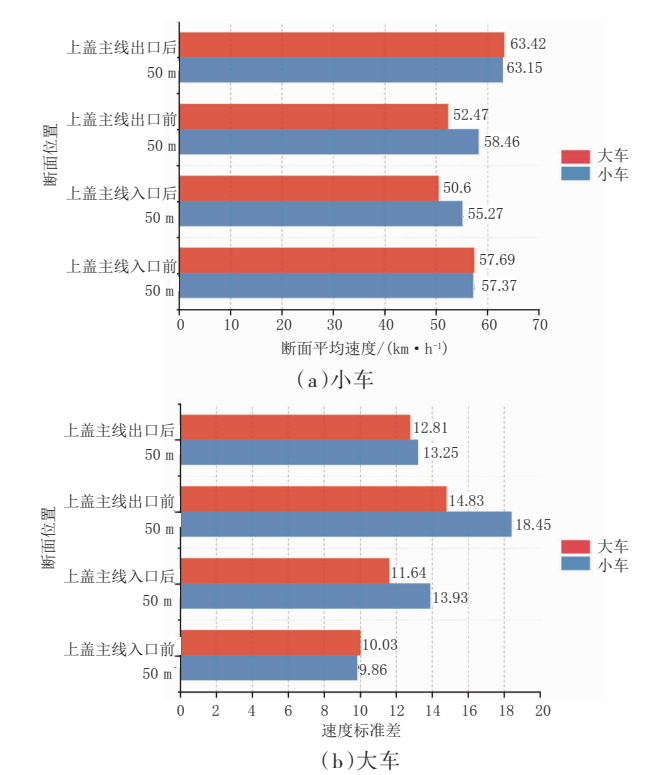


图10 大小车上盖主线出入口断面速度特征

的占比。
根据车辆在各速度区间的占比,计算交织区出入口的超速率。因上盖外的限速比内部限速高20 km/h,故其超速率仅为高速区的车辆占比,而上盖内的超速率包括中速区和高速区的车辆占比。超速是高速公路事故发生的重要诱因^[1],对交通安全有着显著影响,故本节将超速率作为衡量上盖交织区出入口行驶危险程度的指标。

(2)上盖匝道及主线出入口断面速度分布特征分析

已知:东圃立交匝道非上盖路段限速60 km/h,上盖路段限速40 km/h;立交主线非上盖路段限速80 km/h,上盖路段限速60 km/h。根据调研数据,分别计算出匝道及主线出入口共8个断面的车辆在各个断面中不同速度区间的占比及超速率,计算结果见表3及表4。

表 4 大小车上盖主线出入口断面速度频率分布

测量位置	小车				大车			
	40~60 km/h	60~80 km/h	80~100 km/h	超速率	40~60 km/h	60~80 km/h	80~100 km/h	超速率
上盖主线入口前 50 m	63%	33%	4%	4%	71%	24%	5%	5%
上盖主线入口后 50 m	82%	17%	2%	19%	82%	18%	0	18%
上盖主线出口前 50 m	64%	28%	8%	36%	61%	31%	8%	39%
上盖主线出口后 50 m	46%	40%	14%	14%	41%	45%	14%	14%

将以上调研数据进行整合处理得到条形图（见图 11、图 12）。

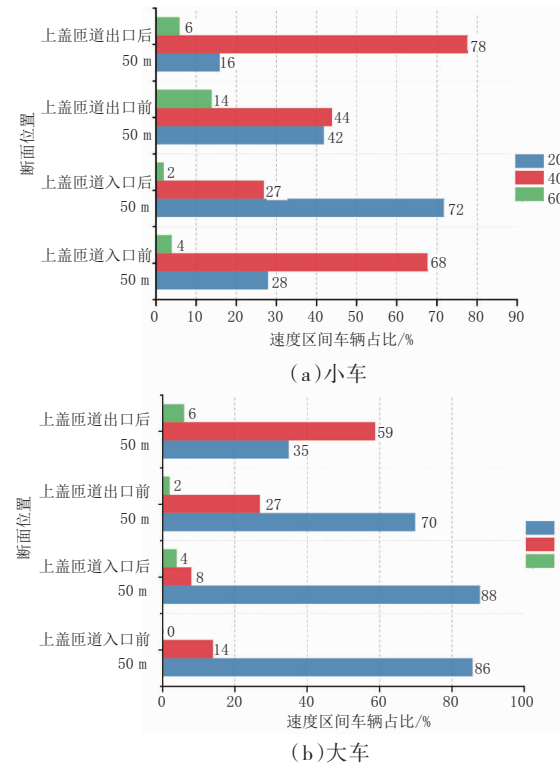


图 11 大小车上盖匝道出入口断面速度分布特征

综合图 11 和图 12,大小车在上盖交织区出口后 50 m 的速度集中在中速区,而在其他断面则集中在低速区,特别是在出口前 50 m 处,大小车超速率升至最高。这表明交织区出口处行车的危险程度较大,有显著的安全隐患,是上盖交织区中危险系数较高的路段。

3.2 纵向减速标线减速特性分析

根据分析指标的差异,本节可以分为以下两项特征分析:

(1)断面速度特征分析:断面速度标准差和断面间速度差的特征分析,见 3.2.1 节。

(2)断面速度分布特征分析:断面速度分布频率和超速率的特征分析,见 3.2.2 节。

3.2.1 纵向减速标线前后断面速度特征分析

将纵向减速标线前后断面的速度数据按大小车分类,并根据表 1 所示的公式分别计算出车辆的速

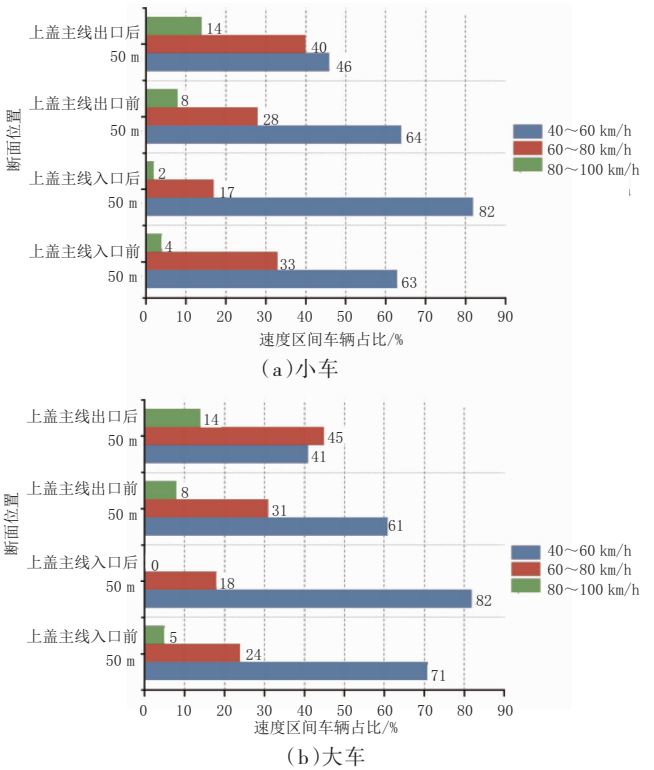


图 12 大小车上盖主线出入口断面速度分布特征度指标,结果见表 5。

表 5 大小车纵向减速标线前后断面平均速度及速度标准差

测量位置	小车		大车	
	小车平均速度 / (km·h ⁻¹)	小车速度标准差	大车平均速度 / (km·h ⁻¹)	大车速度标准差
纵向减速标线前	43.44	12.10	39.05	9.66
纵向减速标线中	39.68	6.51	38.33	6.86
断面间速度差 / 速度标准差的差值	-3.76	-5.59	-0.72	-2.80

由图 13 可得,纵向减速标线对大车和小车的速度都有显著的降低效果,对起始速度较高的小车尤其有效。同时,纵向减速标线能降低车辆速度标准差,增加车辆整体行驶的平稳程度,从而提升速度的一致性。

3.2.2 纵向减速标线前后断面速度分布特征分析

根据纵向减速标线前后断面数据,将车辆按大小车分类,分别计算每个断面不同速度车辆的分布

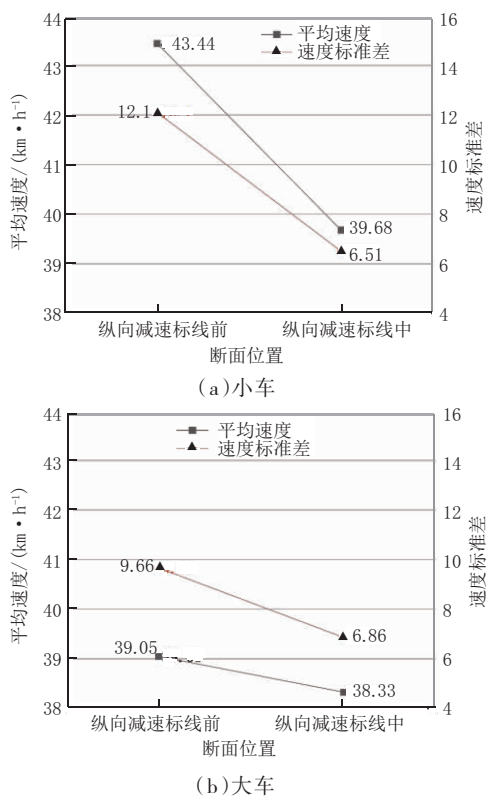


图 13 大小车纵向减速标线前后断面速度特征

及超速率,计算数据见表 6。其中,低速、中速、高速区间分别对应速度区间 20~40 km/h、40 ~60 km/h、60 ~80 km/h。

表 6 大小车纵向减速标线前后断面速度区间分布

车型	纵向减速标线前				纵向减速标线中			
	20~40 km/h	40~60 km/h	60~80 km/h	超速率	20~40 km/h	40~60 km/h	60~80 km/h	超速率
小车占比 /%	42	44	14	14	49	51	0	0
大桥占比 /%	70	27	2	2	83	17	0	0

前后,由于行车环境变化的影响,车辆行驶的速度较高,车辆速度的离散性较大,因此是行车风险较高的区域。结合纵向减速标线的减速特性,可以得出以下城市立交上盖交织区的交通工程优化设计:

- (1)交织区长度设计不宜过长也不宜过短,过长或过短的长度都会对驾驶员的驾驶心理造成负面影响,从而影响交织区的安全。有仿真研究建议,交织区长度应取 150~350 m,在极限条件下可取最小值。
- (2)在上盖交织区出口处前后的路段设置禁止变道的实线标线。车辆的变道行为会增加交织区内交通流的紊乱,对驾驶员的心态造成负面影响,增加车辆行驶的风险。禁止变道标线可以限制车辆变道,减少车辆在出口处的变道次数,从而保障交织区出口路段交通流的安全性和流畅性。
- (3)改善隧道内部的照明系统。由于上盖结构内

图 14 显示:纵向减速标线前,大车的速度集中在低速区间,小车的速度分布在低速和中速两个区间;纵向减速标线后,虽然速度分布没有变化,但所有车辆的超速现象消失。说明纵向减速标线能有效降低断面车速,减少车辆超速行为,从而提高行车安全。

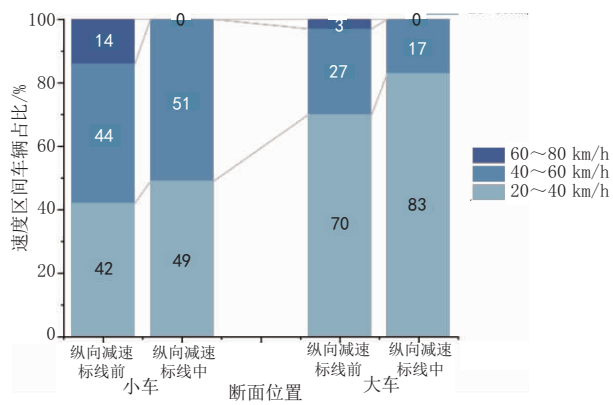


图 14 大小车纵向减速标线前后断面速度区间分布图

综上,纵向减速标线可以有效降低车辆平均速度和速度标准差,减少超速率。这种减速效果有助于平稳车辆速度,提升行车安全。因此,纵向减速标线被证实为一项高性价比的交通改善设施。

4 优化设计

上文的调研数据结果表明,在上盖交织区出口

部的隧道区域光线条件受限,导致上盖交织区出口处前后光线变化较大,驾驶员从隧道驶出时易产生“白洞效应”,致使车辆行驶速度的离散性较大,产生车辆行驶的安全隐患。因此,可以通过改善隧道内的光照条件,如白天增强隧道内的照明,晚上减弱隧道内的照明,来达到减小交织区出入口与外界环境光线差异的目的,从而缓解交织区出入口光线差异对驾驶员造成的不良影响,以保障交织区出口段的安全。

- (4)在交织区出口处前后 50 m 的范围内设置纵向减速标线。从本文第 3 章的数据分析结果可以得出,纵向减速标线有着显著的降速效果,对降低车辆断面行驶速度和速度标准差有很大的帮助。同时,其他研究^[12]也表明,纵向减速标线的影响范围在上游 150 m 至下游 100 m 共约 250 m 的范围内。因此,纵

向减速标线可以有效地在整个交织区出口区段对车辆的速度进行调节,保障交织区交通状况的通畅和安全。

5 结论与建议

本研究对广州东圃立交上盖进行实地调研,重点考察了上盖主线及匝道出入口前后 50 m 的 8 个断面速度数据。综合这些资料,对城市立交上盖交织区交通运行特点、纵向减速标线的减速作用等进行了研究,得出如下结论:

(1)研究发现,大小车速度标准差在上盖交织区出口前 50 m 达到最大,而平均速度在出口后 50 m 达到最大。在出口后 50 m 处,车辆速度集中在中速区间,而其他断面则主要在低速区间。此外,大小车在上盖交织区出口前后 50 m 的超速率也升至最高水平。因此,上盖交织区出口前后风险系数较高,有显著的交通安全隐患。

(2)纵向减速标线不仅能有效降低断面平均速度,还能显著减少速度标准差,有助于实现速度协调,降低行车风险。因此,在城市立交上盖交织区的优化设计中,设置纵向减速标线是一种有效的策略。

(3)根据交通特征研究的结果,在上盖交织区的交通工程优化设计中,可以采用禁止变道的实线以及纵向减速标线来对车辆的变道行为和车辆的行驶速度进行约束,也可以考虑通过改善隧道内部的照明系统来缓解车辆在交织区出入口行驶时光线差异对驾驶员造成的不良影响,以达到提高交织区出口处的安全程度和流畅性的作用。

面对上盖交织区出口处行车风险较高区域的优化设计,除了通过设置禁止标线和纵向减速标线,对车辆的变道行为及速度进行调控之外,还可以结合

交通标志牌或交通动态电子屏幕等对驾驶人员进行提醒,具体的优化效果还需要通过进一步的研究确定。

参考文献:

- [1] CIRILLO J A. The relationship of accidents to length of speed-change lanes and weaving areas on interstate highways[J]. Highway Research Record, 1970(49):17-32.
- [2] JOEWONO P, ISHAK B, ARIFIN N, *et al.* Weaving length and lane-changing behavior at two-sided weaving section along federal road FT050: jalan kluang-ayer hitam[J]. Matic Web of Conferences, 2018(181):1-8.
- [3] 江俐颖,王芬.基于元胞自动机的城市快速路冲突区交织长度仿真研究[J].中国水运(下半月),2017,17(1):84-88.
- [4] YUAN J H, ABDEL-ATY M, CAI Q, *et al.* Investigating drivers' mandatory lane change behavior on the weaving section of freeway with narrow lanes: A driving simulator study[J]. Transportation Research, 2019, 62F(4):11-32.
- [5] BEINUM A V, FARAH H, WEGMAN F, *et al.* Driving behaviour at motorway ramps and weaving segments based on empirical trajectory data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018(92):426-441.
- [6] 裴玉龙,程国柱.高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J].中国公路学报,2004,17(1):74-78.
- [7] 王晓飞,符铨砂,葛婷.高速公路立交入口区域行车风险评价模型[J].交通运输工程学报,2011,11(5):88-92.
- [8] 温惠英,孙佳人,曾强,等.高速公路交通构成的安全效应计量评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(6):1-7.
- [9] 广东省公路管理局.高速公路出入口标线设置指南[M].广州:广东省公路管理局,2020.
- [10] 傅顺.基于驾驶员生理特性的隧道出入口照明研究[D].重庆:重庆交通大学.
- [11] 吴焱,钱振邦,王建军,等.高速公路交通安全风险评价与敏感性分析[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(4):134-141.
- [12] 郭延永,刘攀,梁启宇.视觉减速标线控速效果评价[J].交通信息与安全,2014,32(6):106-112.

(上接第 11 页)

- [12] BP, 2021. BP Statistical Review of World Energy 2021, London [R/OL].[http://www.bp.com/statisticalreview].
- [13] VEHICLE OPERATING COSTS CALCULATOR [CP/OL].https://voc.engr.unr.edu/
- [14] Department for Transport UK 2018, Transport Energy Model

- [R/OL].[https://assets.publishing.service.gov.uk/]
- [15] 何水苗.基于 GPS 数据的城市道路机动车 CO₂ 排放测算及时空分布特征分析[D].西安:长安大学,2020.
- [16] 龚华凤,陈俊成,赵聪霄,等.路网容量计算方法研究——以重庆解放碑商圈为例[J].交通世界,2023(10):11-14.