

隧道出口异型连接段交通行为分析及改善方案研究

——以广州大学城官洲隧道出口为例

赖海东¹, 臧晓冬^{2*}, 周少博¹, 刘元骞¹, 罗强²

(1. 广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510016; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510016)

摘要:为降低隧道出口异型连接段对交通安全的影响,提高隧道出口的安全管理水平,该研究基于广州大学城官洲隧道出口异型连接段的实测数据,深入分析连接段内各个特征断面的交通流特性,挖掘交通设计和交通管理中存在的不足,提出具体的交通改善方案,并给出安全评价方法。利用VISSIM交通仿真平台构建仿真模型,通过模型标定和精度验证后,模拟隧道连接段改善前后的行车状态。通过对仿真数据的深入解析,采用路段的平均每车潜在事故风险值和速度差进行路段安全性评价,在此基础上对特殊路段采用延误和排队长度指标进行运行效率评价,并以此综合评估改善方案优化效果。评估结果表明官洲隧道出口连接段的交通运行方案有较大的提升空间,该文的改善方案能够提高隧道出口连接段行车安全性和交通运行效率,可为隧道异型出口连接段的交通安全管理提升提供理论支撑。

关键词:交通工程;交通改善;仿真分析;隧道出口连接段;交通安全;交通评价

中图分类号:U491.4

文献标志码:A

0 引言

隧道出口的安全问题历来得到人们的关注,为了隧道出口的安全,相关规范对隧道出口设计进行了专门的规定,如:“洞口内外侧各3 s设计速度行程长度范围的平、纵线形应一致”等^[1-4]。但是由于用地限制等原因,有的隧道出口设计即使满足规范要求,接下来的连接段设计中也仍存在诸多不合理现象,不乏异型连接段^[5-6]。隧道与连接段是串联系统,优良的隧道设计对连接段也提出了更高的要求^[7-8]。如果连接段采用的管理措施不科学,则很容易造成驾驶员的错觉,使驾驶员忽略对连接段的关注,则更增加了安全隐患,同时降低了通行效率。为了克服异型连接段对交通安全带来的不利影响,采用科学合理的管理措施,将安全风险降到最低,首先要对异型连接段的交通行为特征进行深入的分析,然后针对不同的交通行为制定相应的管理措施,以提高其安全性。本文以广州大学城官洲隧道出口连接段为

例,基于现状调查和VISSIM仿真,深入分析异型连接段的交通行为,结合现有管理措施,提出改善方案,并基于仿真平台给出评价结果。

1 研究现状回顾

目前,国内外关于道路交通运行安全性的研究主要基于车辆行驶速度特性、道路线形、管理策略等方法。在车辆行驶速度特性方面,阎莹等^[9]从车辆运行速度及线形过渡方面,建立了平纵组合特征的隧道进出口线性综合模型,提出了以运行速度差为线性指标进行安全评价;杨文臣等^[10]基于实测数据对高速公路隧道断面运行车速分布规律展开研究,建立了小型车与大型车的运行速度预测模型进而分析隧道运营安全性;Lave等^[11]研究发现:事故的发生与车速的离散性(即车辆的车速与平均车速的差值)有关,车速离散性越小,发生事故的可能性就越小;反之,车速的离散性越大,发生事故的可能性就越大,因此得出车速的限制旨在降低车速的离散性的

收稿日期:2023-05-20(修改稿)

基金项目:广州市科技计划项目(202102020249)

作者简介:赖海东,男,硕士,工程师.E-mail:laihaidong77@163.com

*通信作者:臧晓冬,男,博士,教授.E-mail:1565795883@qq.com

结论。

在道路线形设计方面,王琰等^[12]针对隧道进出口区域的运行环境过渡特征,构建了隧道进出口线形过渡技术指标,用于衡量隧道进出口区域线形设计的安全性;郑建国等^[13]以隧道洞口的行车安全性为研究对象,运用仿真手段模拟车辆行驶过程,提出了判别洞口线形一致性的两个标准,并建立了定量评价高速公路隧道洞口平面线形一致性/安全性的指标;Wong等^[14]对道路线形设计与交通安全性之间的内在关系进行了研究,提出了道路线形的连贯性、车辆的动力协调性和行驶车速的一致性。

在道路交通安全评价策略方面,邓丽娟等^[1]从隧道平、纵、横断面线形3个方面研究隧道出入口路段线形过渡安全性指标,为隧道出入口的线形设计安全性评价提供参考依据;Fitzpatrick等^[15]研究了道路线形与交通事故的内在关系,提出了交通安全标准和道路设计目标,即设计的连贯性、行驶车速的一致性和驾驶的动力协调性;Berhanu^[16]以公路安全手册为标准,提出了一种基于IHSDM碰撞预测模块的公路安全评价模型,通过模型评分和专家打分的方式进行公路安全评价。

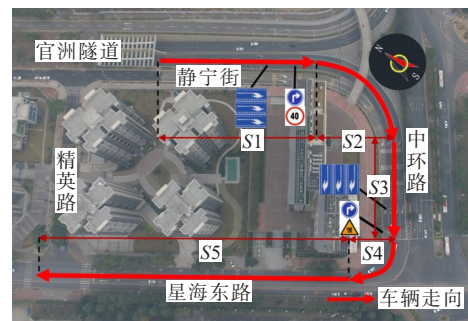
综上,现有的研究成果对道路安全性进行了大量研究,关注重点在于道路线形或者管理策略与道路安全和通行效率的关系,但是对于隧道出入口与连接段衔接性的研究还不充分。虽然,道路线形与安全的关系研究也包含对隧道连接段的研究,但是就隧道出入口与连接段的协调性而言,有其独特的交通运行特性,需要基于系统化的视角综合考虑隧道出口与连接段速度、线形、管理措施等多种因素,优化其交通设计方案和管理策略,进一步提升其安全性和通行效率。本文基于实测数据综合分析官洲隧道出口与异型连接段车辆的交通行为,探求此路段范围内车辆的运行特征,研究引起交通事故的潜在因素,提出科学的改进方案并进行仿真论证,以提升隧道出口与连接段的交通安全水平。

2 大学城官洲隧道出口连接段交通现状分析

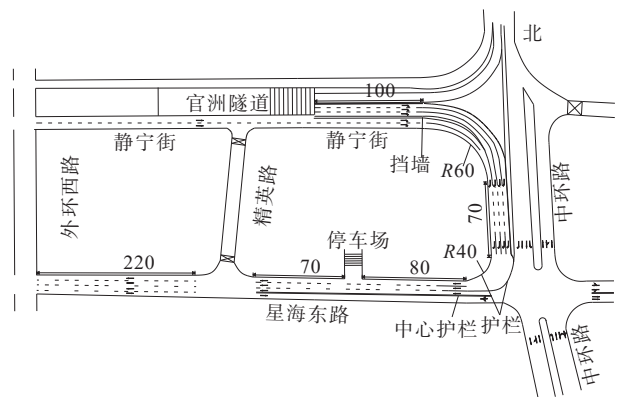
2.1 官洲隧道出口连接段的平面布置

官洲隧道位于广州市大学城北侧入口,大致呈

南北走向,北起仑头隧道出口,南止于大学城中环西路(大学城中环路)。隧道内为双向四车道,限速50 km/h,隧道外单向三车道,限速40 km/h。其现状如图1(a)所示,整个出口连接路段无信号灯,隧道出口直行段尾部落有限速和右转标志牌。通过第一个圆曲线后设有减速慢行和右转标志,车流汇入大学城星海东路,连接段内均设置地面标线。连接段各个部分的几何要素如图1(b)所示,隧道出口直线连接段长度约为100 m,然后与圆曲线相连,圆曲线半径60 m,圆曲线尽头与70 m长的直线相连,由于静宁街右转车道的接入,此处横向变为四车道。紧接着为右转车道,半径约为40 m,右转弯处共设4个右转车道。星海东路连接段为双向四车道,北行设置3个车道,其中,2个车道与连接段右转车道连接,另1个车道为中环路—星海东路平面交叉口的出口车道;南行设置1个车道,为直左右共用车道。整个连接段线形变化频繁、横断面车道数不均衡、转弯半径小、与相交道路的连接方式异常,属于异型连接段。



(a) 官洲隧道现状



(b) 官洲隧道平面布置图

图1 广州市官洲隧道平面布置图(单位:m)

2.2 现状交通安全特性分析

由于车辆从隧道内驶出后,经过复杂的道路环境,车辆经历连续的加减速过程,车辆的行驶特性发

生连续变化,为细致分析此过程的交通特性,将该路段分成5个分析单元,记为S1(隧道出口直行段)、S2(首个右转圆曲线段)、S3(中部直行段)、S4(第二个右转圆曲线段)和S5(尾部直行段),见图1(a)。并在各分析单元中部位置设置速度采集点^[10],记为D1、D2、D3、D4和D5。使用雷达测速枪分别对5个速度采集点所在特征断面进行速度调查,调查时段为06:30—09:30,调查时间为期1周。经过对调查数据的筛选和统计分析,绘制研究路段不同位置车速与距隧道出口距离变化图如图2所示。

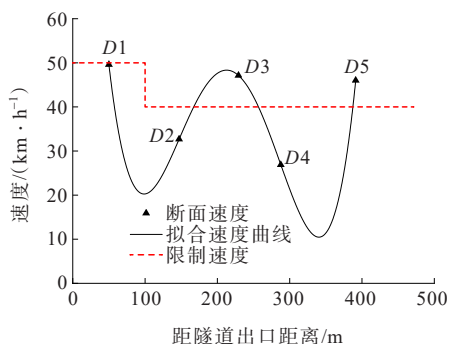


图2 车辆通过研究路段距离-速度变化图

图2反映了车辆通过研究路段各分析单元中部断面的平均速度变化,虚线表示该路段限制车速。车辆驶出隧道通过研究路段时经历连续弯道、车道减少等复杂路况,车速发生持续性变化,速度波动幅度较大,且部分路段存在较为严重的超速行为。

大量研究表明:速度变化的差值与安全紧密相连。速度变化越大,安全隐患越大;速度一致性越好,道路越安全。现行的《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)特别制定运行速度一致性指标以评价线形的一致性和路段安全性,相关评价指标归纳如表1所示。

表1 基于运行速度的路段安全性评价标准

$\Delta v_{\text{相邻路段}}(\text{指标1})/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$\frac{ v_{85_{\text{前}}} - v_{85_{\text{后}}} }{v_{85_{\text{前}}}}(\text{指标2})/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	安全性
≤ 10	≤ 20	好
$> 10 \sim 20$	$> 20 \sim < 40$	中
> 20	≥ 40	差

本研究结合速度采集点实测速度,参考表1标准,对官洲隧道出口连接段进行安全性评价,评价结果如表2所示。

表2 两种评价方法对各路段的安全性评价结果

安全性	S1-S2		S2-S3		S3-S4		S4-S5	
	指标1	指标2	指标1	指标2	指标1	指标2	指标1	指标2
	1	2	1	2	1	2	1	2
好								
中	✓	✓	✓				✓	
差				✓	✓	✓		✓

由表2可以发现该出口连接段安全评价结果为中或者差,说明该路段车辆加减速频繁,速度变化剧烈,路段存在较大安全隐患。同时对比速度偏差值评估法(指标1)和偏差率评估法(指标2)的评价结果,发现使用运行速度偏差值进行安全性评价时可能会过高地估计路段安全性。

2.3 现状速度特性分析

根据调查数据,计算各个特征断面速度的平均值和标准差,如表3所示。

表3 研究路段调查数据统计表

时间段	路段/采集点	平均速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	标准差/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	样本量/ 个
06:30—07:30	S1/D1	54.42	9.89	9 254
	S2/D2	38.82	9.21	9 254
	S3/D3	53.81	10.38	9 772
	S4/D4	33.55	11.94	9 772
	S5/D5	50.11	8.72	11 585
07:30—08:30	S1/D1	49.59	11.52	11 032
	S2/D2	32.69	10.37	11 032
	S3/D3	47.13	11.07	11 774
	S4/D4	26.88	12.24	11 774
	S5/D5	46.01	9.55	14 469
08:30—09:30	S1/D1	50.31	10.79	10 276
	S2/D2	34.90	9.43	10 276
	S3/D3	51.84	10.68	10 899
	S4/D4	27.37	12.12	10 899
	S5/D5	47.32	9.22	12 782

对比表中3个时间段的平均速度和标准差,可以发现:07:30—08:30时间段各个特征断面的平均速度最低,标准差最大。这与实际是相符的,主要是因为该时间段为通勤高峰期,车流量较大,车辆速度受到前后车约束而下降,车辆间的干扰更大,速度离散程度更高。

再对比3个时间段D4断面的速度标准差,发现

不论是在高峰期还是非高峰期,其值变化不大,说明D4断面的速度离散特性主要受到该处设计指标和管理措施的影响,与交通流内部干扰的关系不大。

进一步,选取07:30—08:30高峰期的速度进行分析并采用单样本K-S检验对该时段各断面车辆速度数据进行检验,检验结果如表4所示。结果显示:断面D2、D5速度Z值都大于0.5,双尾检验系数P都大于0.05,接受行车速度正态分布的假设。断面D1、D3和D4双尾检验系数P都小于0.05,正态分布对于断面D1、D3和D4的偏态特性描述不足,故使用对偏态特性描述较好的三参数威布尔进行拟合,拟合结果显示其判定系数 $R^2(D1)=0.925\ 3$, $R^2(D3)=0.934\ 8$, $R^2(D4)=0.902\ 3$ 。

表4 各研究断面车速分布K-S检验结果

断面	样本 数/个	正态参数			极差		K-S 检验统 计量Z	双尾检 验系 数P
		均值	标准 差	绝对 值	正值	负值		
D1	11 032	49.59	11.52	0.041	0.041	−0.024	1.041	0.000
D2	11 032	32.69	10.37	0.028	0.025	−0.028	1.028	0.200
D3	11 774	47.13	11.07	0.029	0.029	−0.024	1.045	0.037
D4	11 774	26.88	12.24	0.050	0.050	−0.034	1.050	0.000
D5	14 469	46.01	9.55	0.015	0.015	−0.010	1.015	0.200

深入分析各个断面速度分布特征,可以得到如下推断:① 车辆从隧道出口驶出后,在S1段,由于道路环境发生急剧变化,交通信息提供不足,驾驶员的心理因素对速度分布的影响较大;② 到达S2断面后,驾驶员基本适应了隧道外的环境,车辆的速度调整基本完成,机动车的行驶状态受环境干扰减小;③ 在S3、S4断面,由于内侧车道增加和车辆为了转弯而变换车道,使车辆间的干扰加大,速度分布也受到较大影响;④ S5断面为右转弯的连接段,车辆之间的干扰逐步减小,速度分布受到的影响也较小。

2.4 现状交通量横向分布特性分析

对横断面的车道进行编号,沿车辆行驶方向各车道从右至左依次编号右1、右2和右3,并用右0表示D3断面静宁街汇入车道。统计各个断面的交通量,并绘制交通量在横断面的分布图,如图3所示。

由图3的交通量分布特征可以发现:研究路段车流量主要集中在内侧车道,到达D1、D3断面后,由于右转弯的需要,部分内侧车道的车辆会变换到中间

车道。最外侧车道车流量较少,但是存在少部分中间车道车辆在路况较好的直行段变换到外车道。此外,在实地观测中发现大量外车道车辆在右转过程中与内侧车辆抢道,造成交通拥堵,而且随着交通量的增加争道抢行现象加剧。

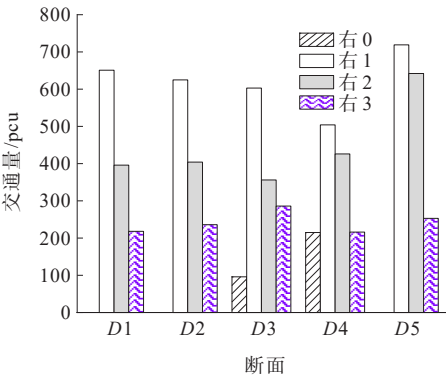


图3 早高峰07:30—08:30车辆数横向分布图

2.5 现状问题分析

通过对交通调查数据的分析,可以总结出道路环境变化、交通信息的提供、交通标线的设置、路权的设置都对隧道出口连接段的交通运行造成影响。主要体现在:

(1) 交通信息提供不足。在S1路段,当驾驶员驶出隧道由于“白洞”效应视力下降,加之道路纵坡的影响,驾驶员较难同时兼顾路面和路侧信息,若有车辆并排行驶时,道路右侧限速标志极易被并行车辆遮挡,驾驶员不能获取完整交通信息。

(2) 合流位置缺乏明确指引。S2右转圆曲线尾段右侧有静宁街汇入的交通流,从隧道出口行驶过来的驾驶员在该路段注意力主要集中于修正方向盘以保证行驶轨迹与道路右转线形一致,难以观察到汇入车道车辆,容易造成车辆刮擦、追尾等交通事故^[17]。

(3) 设计技术指标过低。S2与S4路段之间直线段过短,车辆行驶轨迹不连续,驾驶员通过该路段时舒适度较低,易发生侧滑、偏移等交通事故。

(4) 交通标线设置不规范。车辆在S4段需要在右转行驶过程中完成四车道向两车道的转变,此过程集中在10 m左右的范围内完成,标志标线的缺失使驾驶员在转弯过程中只能根据已有驾驶经验和实际交通状况自行变道行驶,致使该路段交通延误较高,安全状况差。

(5) 道路行驶路权不清晰。在S4路段,在车辆转入星海东路的右转弯处,最外侧车道经常与内侧车道

抢道,此处既无停车让行标志也无信号灯指引,造成路权不清,交通运行混乱。而且最外侧车辆在转弯过程中,行驶轨迹与左侧交叉口的来车存在冲突,此处无任何路权标志的指引,极易发生交通事故。

3 改善方案

3.1 提高有效交通信息承载量

道路环境提供的有效信息量,对于安全驾驶的作用很大,尤其是在危险路段,给予充分的有效信息,可以提高驾驶员的关注度,提前预判可能发生的危险。由于驾驶员长时间在隧道内行车的压抑心理得到释放,车辆速度在隧道出口段有明显的上升趋势,存在较为严重的超速行为。为此,在隧道出口约 40 m 处设置震荡减速带,提示驾驶员减速并观察周边转弯限速标志,在距出口 60 m 处加入路面限速标线,路边设置合流标志,如图 4(a)所示。使驾驶员从路面和路旁均能获得减速与右转信息,辅以路侧合流标志牌,通过视觉与触觉两方面提醒驾驶人员减慢行驶速度,做好转弯及车辆合流准备。同时在 S3 段尾部增添车道减少标志,使驾驶员对前方路况有提前预判,如图 4(b)所示。

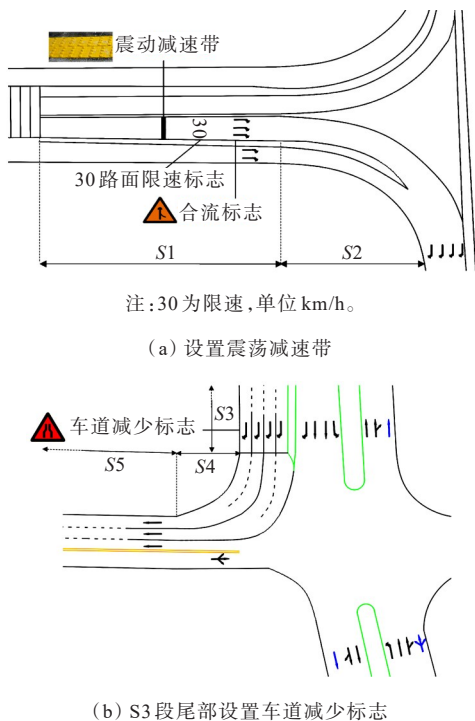


图 4 标志标线增设图

3.2 精准划分路权提升管理策略

对 S4 段进行渠化,清晰各个车道的路权,在冲突

区设置停车让行标志,使车辆各行其道,提高交通运行效率和安全性。对此,本文提出 3 种可供选择的优化方案,见图 5。

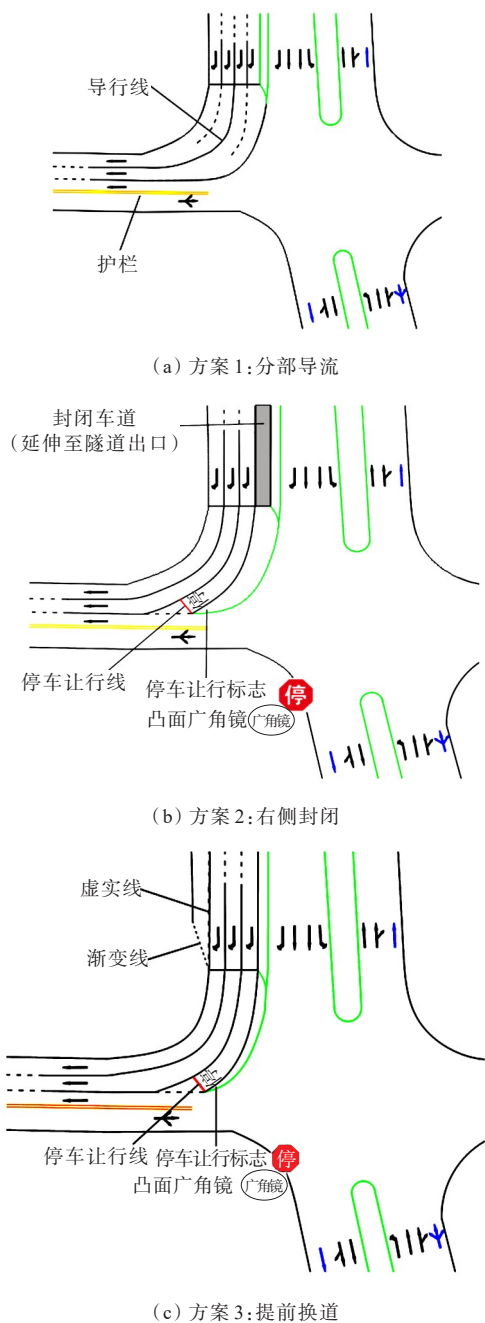


图 5 改善方案设计

(1) 方案 1:分部导流。对 S4 段进行车道减少渠化设计,将驶入 S4 的四车道均分成两部分后与驶出 S4 的两车道分别对应,两部分之间以实线隔离,每个部分内部车道之间设置渐变引导线。这种方案将 4 个车道无序右转,转化为两车道之间并道,采用拉链式合流方式,可以提高车辆运行的有序性,减少交通冲突。但是,每个部分内部两股交通流之间仍然存

在较大的干扰。

(2) 方案2:右侧封闭。将隧道洞口至S3段尾部外侧车道封闭,S3段内侧两车道右转后汇入S5段,剩余车道在汇入S4段右转冲突区后设置停车让行线,车道左侧设置停车让行标志和凸面广角镜,在交叉口无车辆汇入时驶入S5外车道。这种方案,杜绝了最外侧车道的争道抢行,保证了内侧三个车道的有序运行,由于内侧车道之间无相互干扰,因此,通行能力会有所提升。但是,最内侧车道转弯半径小,车辆在右转弯时会侵入内侧车道,影响了右转车道的通行能力,同时牺牲了最外侧车道转弯半径大的优势。

(3) 方案3:提前换道。S3段内侧车道设置虚实线,使静宁街汇入车流在此段提前换至中间车道。S3段中间两车道与S5段内侧两车道连接,外侧车道汇入S4段后设置停车让行线,车道左侧护栏处设置停车让行标志和凸面广角镜,车辆停车等待交叉口车辆通过后汇入S5外车道。这种方案,可以消除最内侧车道半径小、转弯时占用中间车道的不足,发挥中间车道的通行效率,提升右转车道通行能力,并可以充分发挥最外侧车道转弯半径大的优势,有利于公交车等大型车的通过。

3.3 优化周边路网交通组织

现阶段精英路处于两侧封闭状态,仅作为内部道路用于行人过街,据观测人流量较小。可将静宁街右转车辆提前引入精英路分流,原车道则作为通往停车场专用道,从而减少汇入S2段的交通量,减小S4段交通压力。

4 改进方案的评价

4.1 隧道口异型连接段评价指标的选取

4.1.1 安全性指标

常见的城市交通安全评价的方法主要分为基于交通事故数据的方法和基于交通冲突技术的方法两种。前者需要大量交通事故数据,后者受观测人员主观性影响较大^[18]。本文基于速度过快是导致交通事故的重要原因^[19],考虑客观性和应用的便捷性,引入等效跟驰距离 D_{FDE} 和平均每车潜在事故风险值 R_{FX} 指标,同时结合中国现行《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)使用85位速度差 ΔV_{85} 和85位单车速度差 $85\Delta V$ 对道路线形一致性和安全一致

性进行评估。

(1) 等效跟驰距离与平均每车潜在事故风险值评估法

等效跟驰距离(Following Distance of Equivalent, D_{FDE})是依据AASHTO的停车视距模型,综合考虑前后车辆的距离、速度差和路面摩擦系数等因素对事故风险性的影响^[20],建立在车辆间跟驰行为上的用来评价具有一定交通量的道路前后车辆的事故风险性的指标。其计算公式:

$$D_{FDE} = \frac{v_L h - v_F t}{3.6} + \frac{v_L^2 - v_F^2}{254(f \pm g)} - L \quad (1)$$

式中: v_L 为前车车速(km/h); v_F 为后车车速(km/h); h 为车头时距(s); t 为后车驾驶员的反应时间(s); f 为路面摩擦系数; g 为道路纵坡; L 为前车车长(m)。

根据中国《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)和《公路路线设计规范》(JTGD20—2017)的公路停车视距计算中,驾驶员反应时间通常取值为2.5s。根据《公路沥青路面养护设计规范》(JTG5421—2018)并结合实际路况^[21],路面摩擦系数取0.5。

由于 D_{FDE} 只能反映隧道连接段某一时刻前后某两辆车的行车安全性,采用 $D_{FDE} \leq 0$ 时存在潜在事故风险的值进行求和后得出的总潜在风险值与通过车辆数的比值,即平均每车潜在事故风险值 R_{FX} 来表征这一路段的安全性可排除车辆数量的影响,其计算公式为:

$$R_{FX} = \frac{\text{潜在事故风险总值}}{\text{路段车辆绝对数}} \quad (2)$$

(2) 85位速度差 ΔV_{85} 法和85位单车速度差 $85\Delta V$ 法

按照测定的从低速到高速排列的第85个百分点对应的车辆行驶速度 V_{85} 来表示运行速度。运行速度差可表示为:

$$\Delta V_{85} = V_{1,[0.85]} - V_{2,[0.85]} = (\mu_1 - \mu_2) + Z_{[0.85]} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3)$$

式中: ΔV_{85} 为前后路段的速度差; $V_{1,[0.85]}$ 、 $V_{2,[0.85]}$ 分别为路段1、2的第85位车速; $Z_{[0.85]}$ 为标准正态分布的85位值; $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2$ 分别为路段1、2车速的均值、标准差。

然而 ΔV_{85} 假设速度在两个路段上是相互独立的条件与实际可能不相符合,此时85位单车速度差法

可以发挥优势。此方法,对单个车辆进行全程速度跟踪,再取前后道路线形单元上单车车速之差的第 85 位,这在很大程度上消除了 ΔV_{85} 所存在的弊端。85 位单车速度差 ($85\Delta V$) 可表示为:

$$85\Delta V = (V_1 - V_2)_{[0.85]} = (\mu_1 - \mu_2) + Z_{[0.85]} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\text{COV}(V_1, V_2)} \quad (4)$$

式中: $\text{COV}(V_1, V_2)$ 为协方差。

记 V_1, V_2 的相关系数 $\rho = \frac{\text{COV}(V_1, V_2)}{\sigma_1 \sigma_2}$, 根据

相关系数的性质有: $\left| \frac{\text{COV}(V_1, V_2)}{\sigma_1 \sigma_2} \right| \leq 1$, 由此可得:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\text{COV}(V_1, V_2)} \geq (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5)$$

即 $\Delta V_{85} \geq 85\Delta V$ 恒成立。可见采用 ΔV_{85} 进行线形连续性评价时,可能会过高地估计线形的连续性,从而高估该路段的安全性。

结合《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015)中速度一致性和线形连续性评价标准,具体评价标准如表 5 所示。

表 5 速度一致性评价标准

$\Delta V_{85}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$85\Delta V/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	线形连续性	安全水平
≤ 10	≤ 10	好	好
$> 10 \sim 20$	$> 10 \sim 20$	中	中
> 20	> 20	差	差

4.1.2 交通运行效率指标

在实地观测过程中发现,车辆在通过 S4 段右转

交叉口时,车辆之间相互干扰剧烈,时常发生交通拥堵,故对该路段除安全指标评估外,还需对改进方案进行交通运行效率评价。为反映改进方案的效果,采用延误和排队长度作为评价指标。本文所指延误是指车辆按照正常限制速度通过 S4 路段的时间与车辆在实际交通条件下通过该路段时间之差。本文所指排队长度指车辆在 S4 路段起始断面后停车等待通过的车辆排队数。

4.2 改进方案的仿真评价

4.2.1 仿真参数设置

根据现场勘查采集到的道路几何指标和交通特性,对官洲隧道周边道路进行 VISSIM 仿真建模,根据实测数据标定模型参数,并用平均速度作为评价指标,对模型进行精度验证,当仿真平均速度与实测平均速度之间的相对误差小于 5% 时,认为精度满足仿真要求。

按照图 1(b)所示布设检测器,在 S1 段尾部、S2 段与 S3 段连接处、S3 段与 S4 段连接处、S4 与 S5 连接处、S5 段尾部每车道共设置 17 个数据采集器,采集每车车头到达该采集器的时间、车辆速度、车辆类型和车辆长度等。对这些信息的整理计算分析可以得到该路段行车安全性。为便于对相邻路段间速度差进行分析,将同一断面检测器与各分析路段相互对应。

4.2.2 安全性评估结果

改善前后仿真试验结果和安全评价结果如表 6、7 所示。

表 6 改善前后仿真结果对比

断面	检测器 编号	现状		方案 1		方案 2		方案 3	
		$\sum(D_{\text{FDE}} < 0)$	R_{FX}	$\sum(D_{\text{FDE}} < 0)$	R_{FX}	$\sum(D_{\text{FDE}} < 0)$	R_{FX}	$\sum(D_{\text{FDE}} < 0)$	R_{FX}
D1	1, 2, 3	-12 118.17	-7.69	-9 359.52	-5.96	-13 769.58	-8.77	-7 951.85	-5.06
D2	4, 5, 6, 7	-9 150.36	-5.44	-3 137.61	-1.97	-15 117.81	-9.50	-2 101.71	-1.32
D3	8, 9, 10, 11	-7 364.23	-4.38	-3 315.50	-2.08	-12 872.28	-8.09	-3 919.22	-2.46
D4	12, 13, 14	-12 027.33	-5.63	-10 900.09	-5.32	-8 907.81	-4.35	-6 415.57	-3.13
D5	15, 16, 17	-12 930.74	-6.05	-13 811.16	-6.46	-13 487.96	-6.31	-14 273.79	-6.68

表 7 相邻路段安全评价结果

路段	现状		方案 1		方案 2		方案 3	
	ΔV_{85}	$85\Delta V$	ΔV_{85}	$85\Delta V$	ΔV_{85}	$85\Delta V$	ΔV_{85}	$85\Delta V$
S1-S2	-14.70(中)	-16.43(中)	-12.64(中)	-15.17(中)	-13.53(中)	-15.19(中)	-12.29(中)	-14.78(中)
S2-S3	11.64(中)	15.67(中)	10.35(中)	13.38(中)	10.23(中)	13.65(中)	9.73(好)	12.62(中)

续表7

路段	现状		方案1		方案2		方案3	
	ΔV_{85}	85 ΔV	ΔV_{85}	85 ΔV	ΔV_{85}	85 ΔV	ΔV_{85}	85 ΔV
S3-S4	-21.05(差)	-24.27(差)	-16.72(中)	-18.86(中)	-17.15(中)	-20.32(差)	-10.12(中)	-11.93(中)
S4-S5	18.33(中)	21.40(差)	15.42(中)	17.43(中)	18.23(中)	21.40(中)	12.79(中)	14.13(中)

注: ΔV_{85} 、85 ΔV 单位为km/h;括号内“好”“中”“差”指安全水平。

通过对改善前后仿真结果和安全性指标的分析,得到如下结论:

(1) 仿真数据显示,通过对出口直行段S1增加震荡减速带及路面限速标志,驾驶员在获取相关标志标线信息后采取相应减速措施并做好右转准备,该路段平均每车潜在事故风险值 R_{FX} 显著降低,安全性有较大提高。

(2) 在精英路将大部分车辆进行分流的情况下,少部分通过静宁街汇入的车辆对于原右转车辆几乎无影响,合流车辆与原右转车辆均可以较为安全地通过该路段。

(3) 针对S4段的3种改善方案均能较为显著地降低车辆事故风险,提升路段安全性水平,其中以提前换道方案效果最佳。在车流主要集中于中间车道的情况下,该方案中间车道车辆右转时干扰小,右转弯曲线大,车辆通过S4段安全性较其他方案高。

(4) S5段由于精英路少量流量汇入,平均每车潜在事故风险值有略微增加,但增加幅度不大,车辆能够较为安全地通过该路段。

(5) 仿真结果验证了 ΔV_{85} 会过高估计路段安全性的结论,同时显示车辆在研究路段行驶时车速较改善前趋于稳定,其中提前换道方案整体速度最为稳定,相邻路段间车辆速度差下降明显,安全性有较大程度提高。

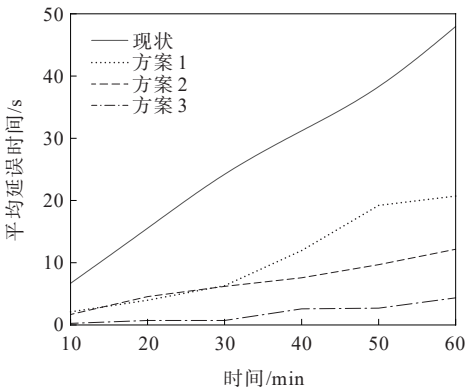
4.2.3 交通运行效率评价结果

根据S4路段的3种改进方案,仿真获得其延误和排队长度结果如图6所示。

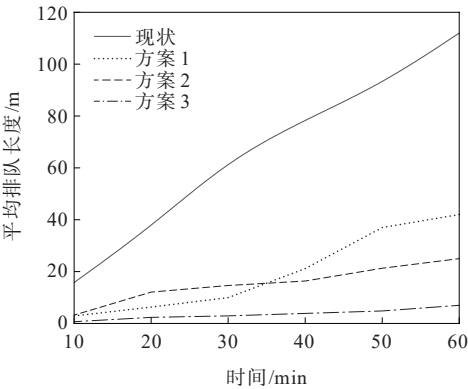
由图6可知:对该路段进行路权优化后,车辆通过S4段的平均延误时间、平均排队长度和进行路权优化前相比都有较大幅度的降低,且随着时间推移降低效果更为显著,其中以提前换道效果最优。提前换道方案中静宁街汇入车辆在S3段提前换道,车流量密集的内侧车道直接右转汇入S5段,少量外侧车道车辆停车等待合适时机后汇入S5段,该方案保

证了大部分车辆不受干扰通过S4段,同时增大了转弯半径。模拟数据可以看出:提前换道优化方案不仅能提升该路段安全性,保障行车安全,也能减少排队延误,提高通行效率,是针对S4右转段较为理想的一种改善方案。

通过上述分析可知:经过交通安全改善,官洲隧道出口连接段安全性和通行效率有了较大幅度的提升,分析和评价结果可以作为交通改善的依据。



(a) 平均延误时间对比图



(b) 平均排队长度对比图

图6 不同方案下两种评价指标和时间的关系

5 结论

(1) 速度变化的差值与安全紧密相连,速度变化越大,安全隐患越大;速度一致性越好,道路越安全。

官洲隧道出口连接段线形复杂,在较短时间内经过连续弯道,速度变化剧烈,是典型的事故易发点、多发点,减小车辆速度差是保证车辆安全平稳通过该路段的关键。

(2) 通过对交通信息承载量、路权和周边路网交通组织等改善后,车辆以一个较为平稳的速度从一个线性单元过渡到下一个线性单元,仿真结果显示相邻路段间速度差降低明显,路段行车安全性水平显著提高。

(3) 提前换道方案中车辆通过 S4 段时车辆间干扰小,转弯半径大,车辆安全性和通行效率明显优于其他方案,此改善措施有显著效果。

本文评价结果和改善措施建议可为相关职能部门对该路段进行交通管理,改善安全现状和提高通行效率提供依据和参考。

参考文献:

- [1] 邓丽娟,高峰.公路隧道出入口路段线形安全性评价研究[J].交通科技,2019,293(2):125-127.
- [2] 戚亚军.避险车道几何设计指标研究[D].西安:长安大学,2018.
- [3] 万航.山区高速公路平行式避险车道设置研究[D].西安:长安大学,2020.
- [4] 冼长策,魏业清.公路隧道洞口 3 s 设计速度行程与路线平、纵面线形关系探讨[J].建筑技术开发,2018,45(15):22-23.
- [5] 尚婷,吴鹏,盛启锦.山区高速公路隧道群-互通路段安全间距研究[J].中外公路,2022,42(5):257-262.
- [6] 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.
- [7] 李洋,赵业梅,陈天幸.基于合流视距的公路主线入口路段竖曲线最小半径研究[J].中外公路,2023,43(2):259-266.
- [8] 周海宇.山区高速公路小半径平曲线隧道交通安全保障技术研究[D].西安:长安大学,2019.
- [9] 阎莹,张宇辉,郭忠印.基于运行速度的隧道进出口线形安全性评价[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(4):72-76.
- [10] 杨文臣,田毕江,胡澄宇,等.山区高速公路隧道路段运行速度分析与预测[J].中外公路,2018,38(6):308-313.
- [11] LAVE C, ELISA P. Did the 65 mph speed limit save lives[J]. Accident Analysis and Prevention, 1994, 26(1):50-62.
- [12] 王琰,孔令旗,郭忠印,等.基于运行安全的公路隧道进出口线形设计[J].公路交通科技,2008,25(3):134-138.
- [13] 郑建国,黄兵,林国进,等.雅康高速二郎山隧道多功能交通转换带设计与分析[J].中外公路,2021,41(6):296-301.
- [14] WONG S C, SZE N N, YIP H F, et al. Association between setting quantified road safety targets and road fatality reduction[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38: 997-1005.
- [15] FITZPATRICK K, ELEFTERIADOU L, HARWOOD D W, et al. Speed prediction for two-lane rural highways[J]. Drivers, 2000.
- [16] BERHANU G. Models relating traffic safety with road environment and traffic flows on arterial roads in Addis Ababa[J]. Accident Analysis & Prevention, 2004, 36: 697-704.
- [17] 许伦辉,倪艳明,罗强,等.基于最小安全距离的车辆换道模型研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2011,29(4):1-6.
- [18] 孙林.基于交通冲突技术的城市交叉口交通安全评价方法研究[D].西安:长安大学,2015.
- [19] 武文杰.城市道路交通安全状态监测指标体系构建[D].南京:东南大学,2017.
- [20] 戴忧华,郭忠印,孔令旗,等.城市道路施工交通安全评价研究[J].交通信息与安全,2009,27(4):92-96.
- [21] 李海莲.西北寒旱地区高速公路沥青路面技术状况分析及养护决策方法研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.