

高速公路隧道出口至互通立交最短距离的探讨

彭广银

(江苏森尚工程设计研究院有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对隧道出口与互通段的交通安全问题,从驾驶员的视认特性的角度出发,通过分析驾驶员在隧道出口与互通段获取标志信息并实施操作的过程,明确了交通标志在隧道内外时出口与互通的最小间距设置参数和计算方法;通过现场试验,研究出隧道出口处驾驶员瞳孔直径变化规律以及瞳孔直径变化比率波动幅度,计算出驾驶员在隧道出口的明适应时间均值为1.782 s,建议交通标志位于隧道内外时隧道出口与互通段的最小间距分别为400 m和500 m。

关键词: 隧道出口;互通;最短间距;瞳孔直径变化比率

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0041-04

0 引言

我国幅员辽阔,地形地貌变化多样,对于地形复杂的山区高速公路,由于地形的限制导致互通式立交的出口与隧道洞口的缓冲距离较短,虽然现在的设计中已经充分考虑,但实际设计中的设计方案均为大同小异,且事故发生也较多^[1]。在隧道入口和出口处,由于隧道内外光环境的快速变化,驾驶员的视觉和心理负荷大大增加,很容易引起驾驶员的不良驾驶行为,导致交通事故的发生,而且隧道由于其特殊的环境特征,容易发生二次事故,使得事故在很短的时间内急剧扩大,造成更大的伤亡和财产损失。因此,如何能有针对性的解决此类交通事故的发生是亟待解决的重要问题。国外对于互通式立交最小间距开展较早,目前已经出台相应的标准规范^[2]。主要代表作包括:Patrick T W Broeren^[3]等人以交通流特性为出发点,将隧道出口与互通段分为三部分进行分析研究,分别对隧道出口洞内外视觉适应段、驾驶员判别人口段以及分流段的最小距离进行了研究,最终确定隧道出入口与立交出入口连接段的最小长度。日本学者Narisada^[4]运用眼球追踪仪,研究了驾驶员靠近隧道口时眼部运动情况,研究结果表明,在隧道入口前一段距离处,驾驶员的注视点会集中在隧道口。我国起步较晚研究较少,主要集中在互通的通行能力、交通流特性、设计标准等方面,如《高速公路互通式立交分、合流区辅助车道长度设计标准》^[5]。石小法、廖军

洪^[6,7]等将实际工程与仿真模拟相结合,以驾驶员行车过程中道路的交通量、驾驶员对不同交通标志出现的反应时间等因素为研究对象,确定出隧道出口与互通短的最小间距。赵一飞^[8]等从交通事故特征出发,以驾驶员出口处视觉适应时间以及驾驶员对出口标志的反应操作时间,总结计算出高速公路隧道出口与互通的极限最小间距。冯玉荣^[9]基于交通流理论和仿真模拟的交通冲突技术,对互通式立交的最小间距做了研究。刘桂强^[10]等提出山区高速公路隧道群复杂运营管理问题,并提出了隧道与互通式立交的协调交通控制策略。李新伟^[11]等通过调研运营隧道与互通间距路段的运行速度,对其他隧道与临近互通立交路段的运行车速进行预测,得到了一定成果。

为了保障交通安全,降低事故发生率,本文在总结和借鉴以往研究经验的基础上,针对隧道出口与互通段的交通安全问题,从驾驶员的视认特性的角度出发,结合生理心理状态,通过现场试验和室内模拟试验分析,对交通标志和互通最小间距做了相关研究,找出影响隧道出口与互通安全的关键因素并制定合理可靠的交通改善措施。为隧道出口和互通路段提出改善措施,从而提高交通安全,以期工程实际提供有益参考。

1 隧道出口与互通立交最小间距分析

考虑在条件受限下,在隧道内设置指路标志的情况,隧道出口与互通最小间距的研究分为指路标志设置在隧道内、外两种情况进行研究。

1.1 交通标志在隧道内

驾驶员在隧道内通过交通指路标志的信息获取,

收稿日期: 2022-02-21

作者简介: 彭广银(1985—),男,硕士,高级工程师,从事高等级公路设计工作。

并实施操作过程,一共包括了感知阶段、判断准备阶段、动作阶段3个阶段。在感知阶段,驾驶员在F点发现交通标志,在R点完成识别,到达G点完成信息认识,这个阶段称为感知阶段;之后,途经标志消失点K和标志点M,驾驶员完成对交通标志信息的分析并判断,在适应隧道出口段光环境变化后到达动作点E,这个过程称为判断准备阶段;最后,在可插入点H,驾驶员判断可插入,进行车速调整,到达车速调整点I,准备侧向插入右方车道,到达横移点J,车辆横移入右侧车道到达安全距离点T,准备进入互通下道,至此动作结束,这个过程称为动作阶段,整个过程见图1。

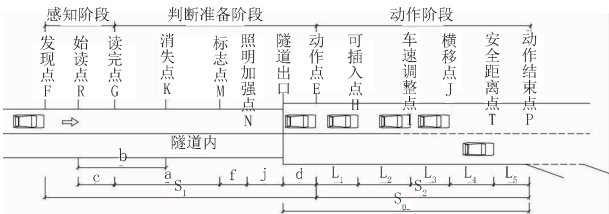


图1 隧道内驾驶获取标志信息并实施操作过程

由图1可知,隧道出口与互通最小间距 S_n 为:

$$S_n = d + S_2 = d + L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (1)$$

根据冯玉荣^[9]研究,可插入间隙的平均等候时间 t_w 由式(2)计算可得:

$$t_w = H_n = \frac{1}{\lambda} [e^{\lambda(t-\tau)} - \lambda(t-\tau) - 1] \quad (2)$$

式中: t 为车辆临界时间(s),一般取值为4 s; λ 为单位时间内平均到达率(辆/s), $\lambda = Q/3\ 600$, Q 为最大服务交通量(取二级服务水平); τ 为车头时距(指连续两车通过车道或道路同一地点的时间间隔)最小值,一般取1.2 s。将以上数值带入式(2),参照相关交通参数取值计算,得到如表1所示。

表1 车道变换交通参数取值表

相关参数	单向 两车道	单向 三车道	单向 四车道
车道折减系数	1.85	2.57	3.18
最大服务交通量 $Q/(\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$	2 960	4 112	5 088
平均到达率 $\lambda/(\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$	0.411	0.381	0.353
车头时距最小值 τ/s	—	1.2	—
车辆临界间隙 t/s	—	4.0	—
平均等待时间 t_w/s	2.457	2.203	1.981

因此,等待间隙插入距离 L_1 为:

$$L_1 = \frac{V}{3.6} t_w \quad (3)$$

在等待可插入间隙出现的时间内,车辆一直以变换车道最低车速 V_h 匀速行驶,直到车辆可插入,

整个过程车辆行驶的距离为 $V_h t_w$ 。相邻车道的车速一般不相同,相对车速为 ΔV ,调整时间 t_2 为 $V_h t_w / \Delta V$ 。根据相关研究成果, V_h 为设计速度 V 的0.76倍。因此,判断可插入间隙时间所行驶的距离 L_2 为:

$$L_2 = \frac{V}{3.6} \cdot \frac{V_h t_w}{\Delta V} \approx 3.167 t_w \quad (4)$$

车辆在可变换车道时,驾驶员通过不断调整车速进行变道直到变道成功,这段距离为变换车道调整距离 L_3 ,根据研究表明该段距离所需时间 t_3 取2.5 s计算出 L_3 为:

$$L_3 = \frac{V}{3.6} \cdot t_3 \quad (5)$$

车辆在驾驶员对方向盘的操纵下慢慢横移,需要一定的时间 t_4 。根据研究结果表明,横移的速度一般为1 m/s,高速公路道路宽度为3.75 m,横移时间为道路宽度与横移速度的比值,则 t_4 为3.75 s,因此,变换车道横移的距离 L_4 为:

$$L_4 = \frac{V}{3.6} \cdot t_4 \quad (6)$$

到达互通出口前的安全距离 L_5 ,车辆从外侧车道到达互通匝道需要驾驶员对车辆进行操作,使得车辆能够顺利进入互通匝道口,安全距离视具体情况而定,一般情况下安全距离取100 m,即:

$$L_5 = 100 \text{ m} \quad (7)$$

我国《公路隧道设计规范》(JTG D70-2—2014)指出,隧道内同向车道分界线在出口端应向洞外延伸100 m,则

$$d + L_1 + L_2 + L_3 > 100 \text{ m} \quad (8)$$

1.2 交通标志在隧道外

交通标志位于隧道外的驾驶获取标志信息和实施操作的过程和标志在隧道内的过程一致,也分为感知、判断准备和动作三个阶段,如图2驾驶员在F点发现交通标志,经过始读点R、读完点G完成感知阶段,进入判断准备阶段,直至最后动作阶段的完成。

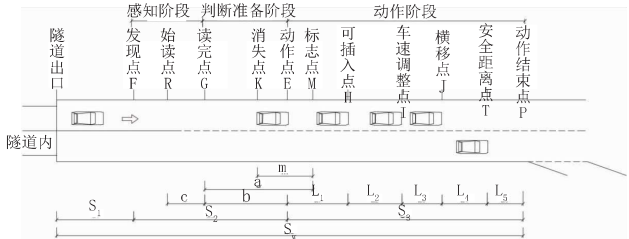


图2 隧道外驾驶获取标志信息并实施操作过程

根据驾驶员获取标志信息并实施操作的整个过程梳理,要保证驾驶员读完交通标志信息时交通标志并未消失,标志在隧道内时,见图2,必须保证 $b > c$;

标志在隧道外时,必须保证 $a > m$ 。交通标志在隧道外有别于隧道内,交通标志处于隧道内时,驾驶员在隧道内已经对交通标志进行了发现、识别、认读、和理解,在隧道出口处与互通立交的小间距离主要考虑的因素主要包括车辆出隧道后驾驶员眼睛适应光变化的适应距离、内侧车道换道距离以及隧道标志线的距离。相较于隧道内,交通标志在隧道外时还需考虑交通标志的发现、识别、认读、理解过程,相对复杂。由图2可得,隧道出口到动作结束点 p 的距离 S_w :

$$S_w = S_1 + S_2 + S_3 \quad (9)$$

式中: S_1 为出口驾驶员光环境适应距离, S_2 为发现点 F 到动作点 E 的距离, S_3 的取值将在下一节内容详细阐述, S_3 的取值与标志在隧道内的相同, S_2 的取值引用相关文献模型, S_2 为:

$$S_2 = \frac{V}{3.6} t_f + \sqrt{\frac{H^2 + (B/2)^2}{\tan(\theta/2)}} \quad (10)$$

式中: V 为运行速度 (km/h); t_f 为标志视认反应时间 (s); H 为标志与小客车驾驶员视线的高差 (m), 一般取 1.2 m; B 为驾驶员眼睛可视点至单悬臂的指路标志中间距离 (m); θ 为驾驶员眼睛视野的界限角度 (°), 相关研究表明视轴移动 5° 为最佳, 本文 θ 取值 5°。

2 试验方案设计

现场试验主要针对在隧道出口段的眼动特性进行研究, 拟通过眼动试验采集隧道中驾驶员的眼动特性参数, 该眼动仪眼动追踪技术提供 60 Hz 双眼追踪技术, 可对驾驶员的眼动数据进行深化分析。使用时与电脑相连, 操作者可采集驾驶员的属性、执行校准、观测实时注视轨迹并实时标注受试者的行为, 获取隧道出口段驾驶员眼动的变化规律, 得到驾驶员出口明适应适应时间。驾驶员驾车分别对白马隧道、大湾隧道、黄草岭隧道、武隆隧道开展眼动特性试验, 利用眼动仪的眼球追踪技术, 实时跟踪和采集驾驶员的眼动数据。试验选取 3 名驾驶员, 驾驶员年龄分别为 25、27、28 岁, 其矫正视力均在 5.0 以上, 驾驶员在隧道内驾车保证车速在 80 km/h 左右。每条隧道进行两次试验, 分别分路面左侧和右侧试验。由于山区高速地形地貌会对光环境造成影响, 驾驶员经过隧道出口明适应后瞳孔直径稳定值不同。因此, 本文选取瞳孔直径变化比率作为驾驶员在隧道出口路段光环境适应情况的表征参数。选取试验隧

道出口前后 10 s 的试验数据进行分析研究, 横轴为时间轴, 以隧道出口的时间点为零点, 纵轴为瞳孔直径变化比率。驾驶员瞳孔直径变化比率变化正常范围为 $\pm 5\%$, 而对于长隧道路段, 隧道洞内的瞳孔直径变化比率较大, 出口 (时间轴 0 s 的点) 后呈减小趋势。三个驾驶员随时间的瞳孔直径变化比率图以及选定点, 见图 3~ 图 5。

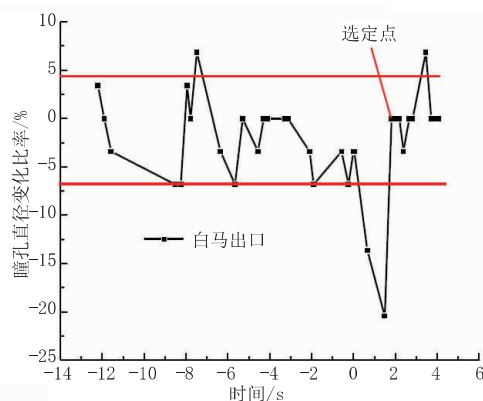


图3 驾驶员1不同隧道出口瞳孔直径变化比率图

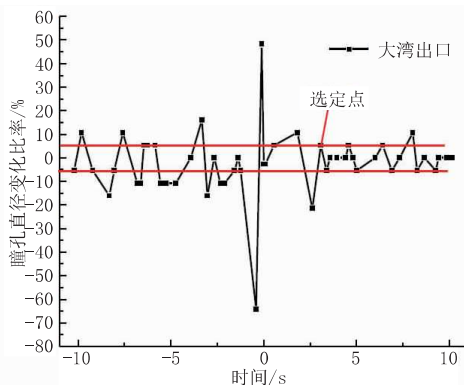


图4 驾驶员2不同隧道出口瞳孔直径变化比率图

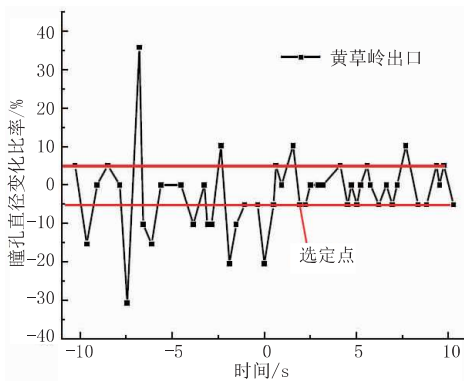


图5 驾驶员3不同隧道出口瞳孔直径变化比率图

由图3~图5可知, 驾驶员在隧道内即将出洞时, 瞳孔直径变化比率波动幅度增大, 出隧道后瞳孔直径变化比率在短时间内进行了恢复, 波动随之稳定。现将各条隧道试验所得的 24 次有效明适应时间汇总, 见表 2。

由表 2 可知, 隧道出口明适应时间主要集中在

表 2 隧道出口明适应时间表

驾驶员编号	白马隧道	大湾隧道	黄草岭隧道	武隆隧道
1	1.422 6	1.841 5	2.072 6	2.493 3
	1.441 5	1.646 2	1.629 5	0.751 7
2	0.806 2	0.835 4	1.129 8	2.138 5
	1.574 2	1.648 8	2.692 4	1.380 1
3	1.827 0	3.271 3	2.625 7	2.111 6
	1.136 1	3.086 7	1.935 5	2.040 4

1~2.5 s 内,得到本试验隧道出口的明适应时间均值为 1.782 s。国内外对隧道出口明适应的相关研究表明,驾驶员的明适应距离一般按照 3 s 行程计算,与本试验的结果相符,取值偏于安全。根据试验结果,考虑隧道出口相关安全问题,本试验研究明适应距离按照 3 s 行程取值。

3 隧道出口互通最小间距

3.1 交通标志在隧道内

交通指路标志位于隧道内时,隧道出口与互通最小间距为:

$$S_n = d + L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \tag{11}$$

其中洞口明适应距离 d 为 2 s 行程,由于 S_n 行程较短,为简化计算,将隧道出口互通路段视为匀速运动,本文试验时车速为 80 km/h,计算时速度 V 取 80 km/h。各个距离计算见表 3。计算得出交通标志在隧道内的互通与出口最小间距 S_n 为 370 m。

表 3 交通标志在隧道内各区段计算表

区段	d	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
速度 $V/(km \cdot h^{-1})$	80	80	—	80	80	—
时间 /s	3	2.45	—	2.5	3.75	—
距离 /m	67	55	8	56	84	100

3.2 交通标志在隧道外

交通指路标志位于隧道外时,考虑驾驶员对交通标志的视认情况,驾驶员驶出隧道出口后最不利情况为左行车右出口和右行车左出口,其反应时间均值分别为 2.21 s 和 2.44 s,考虑室内模拟试验和实际情况的差异性, S_2 行程计算时 t_f 取值 3 s, B 取 11 m, S_3 区段距离与交通标志位于隧道内相同,车速取 80 km/h,具体计算见表 4。计算得出交通标志在隧道内的互通与出口最小间距 S_w 为 464 m。

综上所述,交通标志在隧道内时,隧道出口与互通最小间距为 370 m;标志在隧道外时,最小间距为 464 m,考虑实际路况的复杂性,隧道出口后驾驶员一般会提高车辆行驶速度,行程越长,速度越快。因

表 4 交通标志在隧道外各区段计算表

区段	S1	S2	S3
速度 $V/(km \cdot h^{-1})$	80	80	—
时间 /s	3	3	—
距离 /m	67	94	303

此,交通标志在隧道内时,建议出口与互通最小间距取 400 m;标志在隧道外时,最小间距为 500 m。

4 结 论

实际工况中,隧道内外的高度差、减光措施的设置、驾驶员的驾龄及疲劳程度等都会对明适应时间有所影响;同时隧道出口处驾驶员的加速行为等也会影响互通立交出口的设置距离。

因此,本文主要通过分析驾驶员在隧道出口与互通段获取标志信息并实施操作过程,重点从驾驶员的视认特性的角度出发,结合生理心理状态,在理想状态下,通过现场试验,探讨出交通标志分别位于隧道内外时隧道出口与互通段的最小间距。主要得到以下结论:

(1)试验以瞳孔直径变化比率为表征参数,在隧道出口处,隧道内的瞳孔直径变化比率波动幅度大于隧道外,出隧道后瞳孔直径变化比率在短时间进行恢复,随之稳定;

(2)隧道出口明适应时间主要集中在 1~2.5 s 内,试验得到隧道出口的明适应时间均值为 1.782 s。

(3)当交通指路标志在隧道内时,最小间距为 370 m;标志在隧道外时,最小间距为 464 m。考虑隧道出口后车速的提高和行程,交通标志在隧道内时,建议出口与互通最小间距取 400 m;标志在隧道外时,最小间距为 500 m。

参考文献:

[1] 交通部工程管理局译制组译.日本高速公路设计要领[M].西安:陕西旅游出版社,1991.

[2] H Al-Madani A A.Assessment of drivers' comprehension of traffic signs based on their traffic, personal and social characteristics[J].Transportation Research Part F Traffic Psychology & Behaviour, 2002,5(1): 63-76.

[3] H Hoeksma P B H H.Tunnel Road Design Junctions In and Near Tunnels in Freeways[G].Netherlands:International Symposium on Highway Geometric Design,2008.

[4] K N, K Y.Tunel Entrance Lighting-Effect Of Fix Point And Other Factors On The Determination Of Requirements[J].Lighting Research & Technology,1974.

(下转第 56 页)



图4 天文馆周边规划公共停车示意图

5 结 语

城市新区属于用地与建设快速变化的地区,该区域的公共停车规划既要近期现状补缺口,又要

着眼于远期进行合理预留与控制。本文以上海南汇新城为例,在综合分析新城主要停车问题成因的基础上,针对公共停车的发展策略制定、规模预测方法、明确服务对象、多样化的建设模式、近远期规划合理衔接等方面提出了相应的优化思路和建议,对完善新区公共停车规划方案具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 王波.面向实施的公共停车场用地规划方法研究——以广州为例[J].城市规划,2020,44(8):107-111.
- [2] 何洪波.大都市郊区新城静态交通综合措施和管理机制研究——以上海临港新城主城区为例[J].交通与港航,2020(2):63-68.
- [3] 刘瑞远,何鹏,汤祥,等.考虑近远期规划衔接的城市公共停车场规划方法研究[J].交通运输研究,2018,4(5):43-49.
- [4] 黄金平.新上海70年:迈向卓越的全球城市之路[J].地图,2019(5):36-53.

(上接第44页)

- [5] 交通部公路科学研究所.高速公路互通式立交分、合流区辅助车道长度设计标准[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 石小法,翁军杰.四脚岔隧道出口与互通式立交间需求距离分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016(8):219-222.
- [7] 廖军洪,王芳,邱洪波.高速公路互通立交与隧道最小间距研究[J].公路,2012(1):1-7.
- [8] 赵一飞,陈敏,潘兵宏.隧道与互通式立交出口最小间距需求分析[J].长安大学学报(自然科学版),2011(3):68-71.
- [9] 冯玉荣.高速公路互通式立交最小间距研究[D].西安:长安大学,2009.
- [10] 刘桂强,王少飞,卢辉,等.增从高速公路互通-路段-隧道协调交通控制策略[J].2013(3):145-150.
- [11] 李新伟,王晓飞,符锌砂,等.深圳外环高速公路隧道立交路段运行速度预测及安全性评价[J].公路,2015(6):133-136.
- [12] 杜志刚,李杰,潘晓东,等.高速公路隧道路段驾驶员最小注视时间确定及应用[J].公路交通科技,2010(9):138-142.