

梁 波,刘 涛,肖 尧,等. 特长隧道出口处交通标志与驾驶人感知关系试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2020,40(5):48-55.  
LIANG Bo,LIU Tao,XIAO Yao,et al. Experimental on relationship between traffic signs and drivers' perception at exit of extra-long tunnel  
[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2020,40(5):48-55.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.05.005

# 特长隧道出口处交通标志与驾驶人感知关系试验

梁 波<sup>1,2</sup>,刘 涛<sup>1</sup>,肖 尧<sup>1,3</sup>,张鸿鸣<sup>4</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074; 2. 重庆交通大学 省部共建山区桥梁及隧道工程  
国家重点实验室,重庆 400074; 3. 重庆市轨道交通(集团)有限公司,重庆 400042;  
4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉 430063)

**摘 要:**为分析隧道出口处内外横断面上交通标志的设置对驾驶人视认性的影响,通过现场实车试验和室内动态模拟试验研究了交通标志与驾驶人信息感知的关系。选择 3 名驾驶人运用德国生产的 SMI 眼动仪,对选取的 G65 包茂(包头—茂名)高速公路武隆段 6 条隧道分别进行了 34 次有效行车试验,并对比分析普通高速公路路段和隧道出口路段驾驶人的瞳孔直径变化比率。采用 Premiere 软件制作可调的动态交通标志,通过双投影系统将标志和实车录制的路段视频相融合,投射到同一个曲面幕布上,并切换不同隧道出口与标志的位置,以驾驶人视认标志的反应时间为表征参数进行隧道动态驾驶环境下的室内模拟试验。研究结果表明:瞳孔直径变化比率可以作为表征驾驶人明适应状态的表征参数,并在此基础上确定了车速为 80 km/h 时驾驶人正常瞳孔直径变化比率为 $\pm 5\%$ ;驾驶人完成出口明适应时的瞳孔直径状态,特长隧道出口处驾驶人的明适应时间为 2.129 s;特长隧道出口处内外交通标志的反应时间都呈现同一规律,交通标志与行车道位于同侧的反应时间比异侧时的短;交通标志位于隧道外的反应时间均值为 2.22 s,比隧道内的反应时间平均短 0.64 s。以时间为依据,当隧道出口与互通间距受地形限制,设计完成标志的有效视认时间小于 4.5 s 时,建议交通标志设置在隧道内部正中顶部位置;反之,设置在隧道外部道路右侧。

**关键词:**隧道工程;特长隧道;实车试验;室内模拟试验;交通标志;隧道安全

中图分类号:U458.1

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2020)05-0048-08

## Experimental on relationship between traffic signs and drivers' perception at exit of extra-long tunnel

LIANG Bo<sup>1,2</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, XIAO Yao<sup>1,3</sup>, ZHANG Hong-ming<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key  
Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing  
400074, China; 3. Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd, Chongqing 400042, China; 4. China  
Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of the driver's identification which was caused by the setting of traffic signs on the inner and outer cross sections of the tunnel exit, the relationship

收稿日期:2020-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51678096,51878107)

作者简介:梁 波(1964-),男,四川隆昌人,教授,工学博士,E-mail:liang\_laoshi@126.com

between traffic signs and driver's information perception was studied by field vehicle test and indoor dynamic simulation test. Three drivers were selected to use the SMI eye tracker produced in Germany, and 34 effective driving tests on the six tunnels of the G65 Baomao (Baotou to Maoming) Expressway Wulong Section were conducted. The ratio of pupil diameter change of drivers in ordinary highway section and tunnel exit section was compared and analyzed. Premiere software was used to make adjustable dynamic traffic signs. The logo and the real-time recorded road segment video would be merged and projected onto the same curved screen by the dual projection system, and the positions of different tunnel exits and signs could be switched. The indoor simulation test under the tunnel dynamic driving environment was conducted with the response time of the driver's identification signs as the characterization parameter. The results show that the pupil diameter change ratio can be used as a parameter to characterize the driver's bright adaptation state, and on this basis, it is determined that the normal pupil diameter change ratio of the driver is  $\pm 5\%$  when the vehicle speed is 80 km/h. When the driver completes the exit adaptation the pupil diameter state is defined, and the mean time of the exit adaptation is 2.129 s. The response time of traffic signs inside and outside the exit of super long tunnel is the same, which means that the reaction time on the same side of the traffic sign and the traffic lane is shorter than the opposite side. The average response time of traffic signs outside the tunnel is 2.22 s, which is 0.64 s shorter than that in the tunnel. Based on the time, when the distance between the tunnel exit and the interchange is limited by the terrain and the effective recognition time of the design completion sign is less than 4.5 s, it is suggested that the traffic sign should be set at the top of the middle of the tunnel, otherwise it should be set on the right side of the road outside the tunnel. 5 tabs, 8 figs, 30 refs.

**Key words:** tunnel engineering; extra-long tunnel; vehicle test; indoor simulation test; traffic sign; tunnel safety

## 0 引言

公路隧道往往是事故高发路段,其中特长隧道伤亡占比最高<sup>[1]</sup>。行车过程中,驾驶人主要依靠视觉获取周边交通环境信息,白天驾驶人驶出隧道是一个由低亮度向高亮度变化的过程,极易产生眩晕感,即“白洞”效应<sup>[2]</sup>。造成驾驶人心理负荷增大,不能准确感知标志信息,导致不能在设计的时间内改变行车方向以致错过出口,甚至慌乱变道引发交通事故。因此,如何科学合理地在隧道出口处设置交通标志,为驾驶人传递准确、醒目的路况信息,确保行车安全,已成为一个亟待解决的重要问题。

道路交通标志的实质就是传递信息及驾驶人感知信息相匹配的问题,驾驶人在不同环境下对相同交通标志的注意程度及反应状态不同<sup>[3-4]</sup>。视觉信息感知的准确性和完整性将直接关系到交通标志的有效性,Chien等研究了交通标志的版面设计和布设位置,研究表明,驾驶人只留意到沿线布设的50%~60%交通标志<sup>[5-6]</sup>。在隧道出口特殊路段交

通标志设置不当、驾驶人信息感知不准确,将会增加安全隐患。对此,Doman等为提高有效视认,高速公路出口方向的指示标志多采用门架式,门架牌上的标志牌分为右边出口信息和左边直行方向2个部分,但其关于交通标志可见度的研究仅考虑目标周围局部区域的影响,具有一定的局限性<sup>[7-8]</sup>。Jrgensen等提出警告标志的版面内容和安装位置应结合交通流的组成综合考虑,特别指出应优先满足长途货车驾驶人的视认要求<sup>[9]</sup>。美国交通标志标准(MUTCD)针对交通标志、交通标线、交通信号等安全设施的设置标准做了详细的规定<sup>[10]</sup>,但其缺乏针对隧道交通安全设施的相关规定,尤其是隧道特殊交通安全设施。

国外对交通标志的研究比较深入,由于交通环境及驾驶行为的差异,不能直接应用于中国的实际工程<sup>[11-13]</sup>。中国对交通标志的布设更多的是参照标准和法规<sup>[14]</sup>,虽然《公路隧道设计规范》(JTGD 70-2—2014)<sup>[15]</sup>和《道路交通标志和标线》(GB 5768.2—2009)<sup>[16]</sup>对标志位置和尺寸做了一些

说明,但没有明确标志的具体位置和尺寸,且特长隧道安全设施的设置往往具有盲目性,以致驾驶人无法准确感知标志信息<sup>[17-18]</sup>。闫彬等针对毗邻隧道群出口现有交通标志设置中存在的问题,建立理论模型对安徽六武(六安—武汉)高速公路毗邻隧道群出口交通标志的设置地点、合理俯角和出口距离进行分析计算,并验证其合理性<sup>[19]</sup>。杜志刚等根据隧道出口处亮度的急剧变化和视觉障碍的持续时间,建立了隧道外交通标志距隧道出口的安全距离公式,并从提高标志视认性设置的角度提出建议<sup>[20]</sup>。吴朝阳等指出隧道内标志设置的几何尺寸受到建筑净空的限制,并基于视觉连续性分析得出了标志在不同的隧道线形指标下设置的合适位置<sup>[21]</sup>。

综上所述,现有成果侧重于交通标志本身的物理属性和驾驶人的视认特性方面的探讨,鲜有从安全性、舒适性并结合驾驶人的生理和心理感知开展交通标志研究。本文研究主要包括两方面:一是通过现场实车试验得到特长隧道出口安全的明适应时间;二是通过自建室内模拟试验平台动态模拟特长隧道行车环境,并结合环境变化下驾驶人生理心理变化相关文献,获得驾驶人对不同位置的交通标志反应时间规律,为改善特长隧道出口段的行车安全和完善隧道交通安全设施提供参考和依据。

1 实车试验

本文试验装置有:德国 SMI 眼镜式眼动仪、Panasonic 牌摄像机、眼动仪数据采集软件 iView ETG。

1.1 试验人员及方案

男性驾驶人在理解交通标志方面优于女性<sup>[6]</sup>。本文驾驶人相关信息如表 1 所示。中国将隧道长度大于 3 000 m 分类为特长隧道。驾驶人心率的变化影响对其交通标志的感知及反应,研究表明,隧道出口的平均心率变化率从大到小依次为特长隧道、短隧道、中长隧道。特长隧道出口段驾驶人心理负荷大,严重影响行车安全<sup>[22]</sup>。

表 1 驾驶人信息

Tab. 1 Driver information

编号	性别	年龄	驾龄/年	熟悉程度	矫正视力
1	男	27	3	一般	1.0
2	男	28	1	熟悉	1.0
3	男	25	2	一般	1.0

本文选取 G65 包茂高速公路武隆段 6 条特长隧道进行试验,各隧道情况如表 2 所示。驾驶人配

戴好眼动仪,驾驶安装摄影机的小汽车,要求驾驶人按照隧道内限速 80 km/h 行车速度现场实车录制,并对隧道内外的同一路段左右车道分别录制。

表 2 隧道情况

Tab. 2 Tunnel conditions

隧道名称	全长/m	坡度/%	备注
白云隧道	7 300	2, -0.5	人字坡
白马隧道	3 050	1.95	单向坡
羊角隧道	6 836	0.84, -0.5	人字坡
大湾隧道	3 150	-1.45	单向坡
黄草岭隧道	3 250	-0.5, -1.4, 1.1	人字坡
武隆隧道	4 878	1.1, -1.0	人字坡

1.2 试验流程

试验前,试验记录员向驾驶人说明试验路线、试验流程及注意事项,并让其驾驶 1 遍熟悉路况。试验阶段,记录员给驾驶人配戴好眼动仪,通过数据线与笔记本电脑实时连接,采用 1 点定标法对驾驶人注视点进行校准、定标,确保驾驶人注视区域与实况影像中眼动仪所捕捉的注释区域一致。

驾驶人发动汽车进行实车试验,如图 1 所示。记录员开启视频录制设备和操作电脑开始记录数据,试验时均在自由流状态下行车,测试时记录人员不允许做一切有干扰驾驶人驾驶行为的动作。试验结束,记录员操作电脑停止记录数据并保存以及现场分析,确认驾驶人试验的有效性,为驾驶人取下眼动仪,让其下车休息调整 0.5 h,为下次试验做准备。3 名驾驶人对每条隧道左右路面分别进行 2 次有效试验。



图 1 现场试验

Fig. 1 Field test

1.3 表征参数及明适应状态确认

驾驶人在驾驶过程中约有 80% 以上的交通信息是依靠视觉获得,瞳孔直径变化能够反映其视觉适应性及驾驶视觉负荷程<sup>[23-24]</sup>。由于个体差异使得不同的人在相同环境下瞳孔直径也不相同。叶飞

等研究表明隧道出口处驾驶人完成明适应时,瞳孔面积递减速度的放缓,且最后 2 个特征点基本处于不变的状态<sup>[25]</sup>。为此,本文针对 3 名驾驶人在普通高速公路以速度 80 km/h 行驶 30 s 的瞳孔直径变化进行研究,拟定后一时刻驾驶人的瞳孔直径为  $d_{i+1}$ ,前一时刻驾驶人的瞳孔直径为  $d_i$ ,将该 30 s 内瞳孔直径的算术平均值  $M$  作为衡量瞳孔直径变化的基准,则瞳孔直径变化比率  $p$  为

$$p=\frac{d_{i+1}-d_i}{M}$$

用上述公式对 3 名驾驶人在普通高速公路的瞳孔直径进行数据分析,得到瞳孔直径变化比率,见图 2。由图 2 可得,瞳孔直径的变化比率呈对称分布,驾驶人回归正常波动范围的瞳孔直径变化比率在  $\pm 5\%$  范围内,本文以此作为驾驶人对光环境已经明适应了的表现状态。选取瞳孔直径变化比率  $p$  作为驾驶人在隧道出口路段光环境适应情况的表征参数并进行相关分析,旨在研究特长隧道出口处驾驶人明适应的时间。

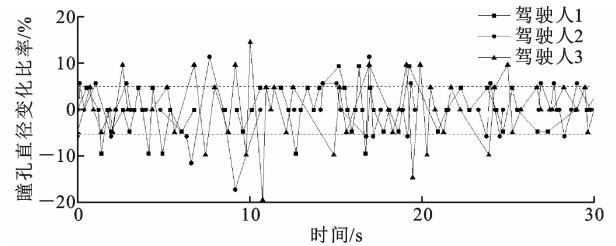


图 2 瞳孔直径变化比率  
Fig. 2 Ratios of pupil diameter change

#### 1.4 实车试验数据分析

隧道出口驾驶人的明适应距离一般按照 1~3 s 行程计算<sup>[26]</sup>,为确定特长隧道明适应时间,本文将各条隧道出口的试验数据扩充到 10 s 进行分析研究,驾驶人瞳孔直径变化比率如图 3 所示。

由图 3 可知,驾驶人在通过洞口截面时,瞳孔直径变化比率波动幅度迅速增大并在短时间内恢复,波动随之稳定一段时间。这种现象表明,在特长隧道出口光环境交界区,驾驶人视觉负荷的增大呈现出瞬时性,且能在较短时间内调节。根据瞳孔直径变化比率的趋势,选定出口外瞳孔直径变化比率首次回落在正常波动范围内( $\pm 5\%$ )的点,且该点之后有连续点在瞳孔直径变化比率范围内(图 3 中选定点的位置),该点对应的的时间,即为判定驾驶人适应洞外光环境的时间。各条隧道试验所得的 34 次有效明适应时间点,如表 3 所示。由表 3 可知,特长隧道出口明适应时间主要集中在 1~2.5 s 内,驾驶人

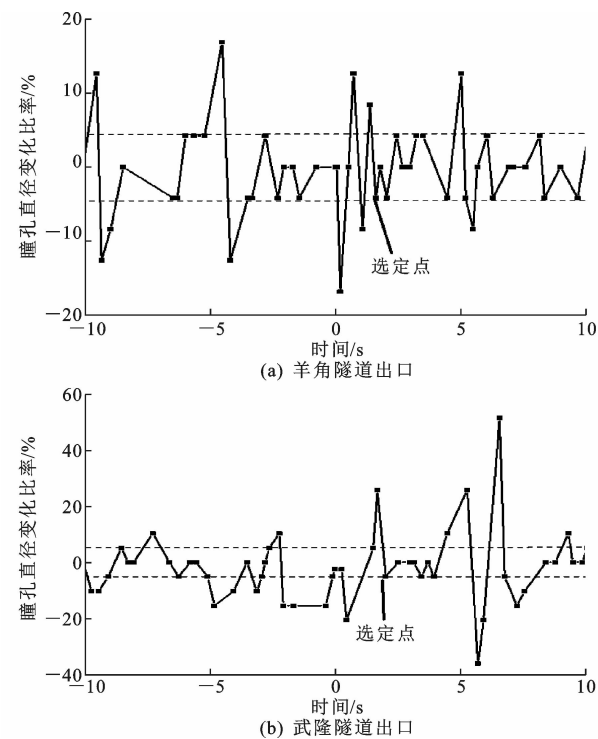


图 3 隧道出口处瞳孔直径变化比率  
Fig. 3 Ratios of diameter change of pupil at exit of tunnel

明适应时间均值从大到小依次为:驾驶人 3、驾驶人 2、驾驶人 1。表明驾驶人驾龄越长、对道路状况越熟悉、自身储存的交通信息越丰富,当受到外界刺激时,刺激信息能在较短时间内与记忆信息进行最佳匹配,根据周边环境做出决策。以明适应时间 0.5 s 为组距得出试验人员的明适应时间频数分布为偏正态分布,并求得各隧道出口的明适应时间均值为 1.782 s,标准偏差为 0.347 s,偏安全考虑,特长隧道出口明适应时间取为 2.129 s。

表 3 有效明适应时间

Tab. 3 Effective adaptation times s

现场测试	白云隧道	白马隧道	羊角隧道	大湾隧道	黄草岭隧道	武陵隧道
驾驶人 1	1.221	1.423	1.622	1.842	2.070	2.490
	1.875	1.442	1.274	1.646	1.630	0.752
驾驶人 2	3.022	0.806	1.057	0.835	1.130	2.139
	2.569	1.574	1.705	1.649	2.692	1.380
驾驶人 3		1.827	0.643	3.271	2.626	2.112
		1.136	1.273	3.087	1.936	2.040

## 2 室内模拟试验

当标志信息对人产生刺激时,这些视觉信息在大脑中形成画面,然后根据人的经验、记忆进行识别、判断和分析等过程,从而形成视觉。特长隧道交

通环境复杂,难以开展现场试验,因此,试验基于团队自主研发的动态环境下的反应时间测量试验平台,利用动态环境模拟输出装置在实验室内完成隧道内行车环境真实还原。

试验装置包括计算机、高清投影仪 2 台、投影曲面幕布、模拟驾驶装置(包括方向盘、脚踏板、挡位和手刹控制器等)、Premiere 软件设备等。

2.1 试验人员及方案

试验选取 32 名人员,年龄在 20~30 岁之间,24 名男性和 8 名女性,矫正视力均在 1.0 以上,均有 1 年以上驾龄,且有高速公路隧道驾驶经验。本文试验主要通过室内模拟研究隧道出口处交通标志的最佳位置,其设置情况如表 4 所示。以发现标志为起始点开始时间  $t_1$ ,驾驶人经过识别、认读、理解并采取相应措施为结束时间  $t_2$ ,将二者时间差  $t_f$  作为试验的表征参数;以时间差分析驾驶人对指路标志的视认情况,时间差越小表征视认情况越好,位置更佳,以此得到隧道出口处交通标志的最佳设置位置。

表 4 交通标志工况汇总

Tab. 4 Summary of traffic signs conditions

工况编号	交通标志位置	模拟行车环境
工况 1	左侧路面正中	隧道内
工况 2	右侧路面正中	隧道内
工况 3	隧道正中	隧道内
工况 4	公路左侧	隧道外
工况 5	公路右侧	隧道外

2.2 交通标志设计

本文考虑隧道建筑限界等要求以及《道路交通标志与标线》(GB 5768. 2—2009)<sup>[16]</sup>规定,设计的标志牌版面大小为 70 cm(高)×370 cm(长),文字高度和宽度取 50 cm,字间隔和笔画尺寸取值 5 cm,阿拉伯数字高度和宽度取值 50、25 cm,字母大小写分别为 25、20 cm,色彩为绿底、白图形、白边框、绿色衬边,实际效果如图 4 所示。行车过程是一个复杂的“人-车-路-环境”动态协调过程,故根据设计好的交通标志与参照实录视频中建筑物动态比例尺寸的变化,确定交通标志动态变化比例尺,通过 Premiere 软件进行制作,将隧道内外的交通标志作为可调的动态标志。

2.3 试验过程及步骤

为保证室内模拟试验与实车试验的相似性,本文选取实车录制 G65 包茂高速公路武隆段 6 条隧道的视频进行试验。

试验开始,试验者进行驾车模拟试验,见图 5。



图 4 隧道交通标志试验

Fig. 4 Experiment of tunnel traffic sign



图 5 室内试验

Fig. 5 Laboratory test

试验操作人员通过电脑控制双投影系统,将交通标志和路段实车录制的视频相融合,投射到同一个投影幕布中,为避免出口的“白洞”效应,交通标志的投放距隧道出口 300 m,使驾驶人在隧道内正常行驶的状态下视认标志。以驾驶人发现标志时松开油门为起始点,经过识别、认读、理解后踩下刹车为结束点,测量这个过程的时间差,模拟驾驶人发现标志后、进行判断并采取相应措施,即对交通标志的视认过程。为避免同工况多次测试具有预见性的影响,试验按照每个人对每个工况测试 1 次的原则进行方案设计,所有测试者重复上述步骤。

2.4 室内试验结果分析

根据试验人员对不同环境下的反应时间,得出 32 名测试者的平均反应时间差  $t_f$ ,计算得驾驶人对各工况交通标志反应时间均值,如表 5 所示。

表 5 反应时间均值

Tab. 5 Average reaction time

工况编号	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左行车	2.76	3.03	2.86	2.18	2.21
右行车	3.14	2.82	2.56	2.44	2.05

交通标志位于隧道内整体反应时间均值为 2.86 s,相比中国《公路项目安全性评价规范》(JTG/T B05—2015)的公路停车视距计算中反应时间 2.5 s 要长<sup>[27]</sup>。比较隧道内 6 种方案,工况 3 中右行车的反应时间最小,平均反应时间为 2.56 s,工况 1 中右行车的反应时间最长,平均反应时间为 3.14 s。驾驶人眼椭圆理论研究提出红色椭圆区内



部为安全注视区域,在该椭圆区域内,有较多的注视点分布,驾驶人对目标物能进行深加工<sup>[28-29]</sup>。驾驶行为是心理反应的外在表现,从现场左右行车环境下录制的视频来看,见图 6、图 7,在自由流状态下行车时,驾驶人注视点都主要集中在正前方,行车道靠左位置,使得左侧道路较右侧道路的注视点更远离行车道分界线。由此可见,驾驶人对正前方出现的标志注意力强,右行车驾驶人能及时感知位于隧道正中顶部的交通标志。

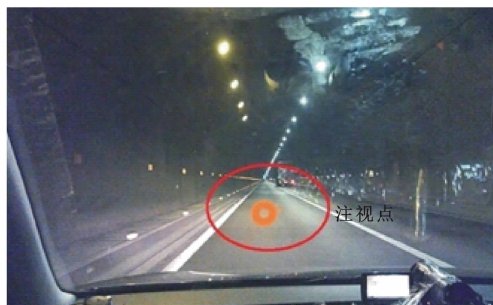


图 6 左行车驾驶人注视点轨迹

Fig. 6 Track of driver's fixation points of left driving



图 7 右行车驾驶人注视点轨迹

Fig. 7 Track of driver's fixation points of right driving

交通标志位于隧道外时,驾驶人的平均反应时间为 2.22 s;而驾驶人在真实交通危险工况中的制动反应时间一般低于 2 s,驾驶人驶出隧道,当亮度变化速率趋于  $400 \text{ cd/m}^2 \cdot \text{s}$  时出现“认知滞后”,增加到约为  $500 \text{ cd/m}^2 \cdot \text{s}$  时出现“调节滞后”,驾驶人的视看能力变差、反应时间变长<sup>[30]</sup>。比较隧道外试验 4 种方案可知:工况 5 中右行车反应时间最小,平均反应时间为 2.05 s;工况 4 中右行车反应时间最长,平均反应时间为 2.44 s;但行车道和交通标志位于同侧时,工况 5 中右行车的反应时间相对较短。

将隧道内各工况下对交通标志的反应时间汇总,如图 8 所示,其中“1-左”表示工况 1 左侧车道行驶时的反应时间,其他编号以此类推。

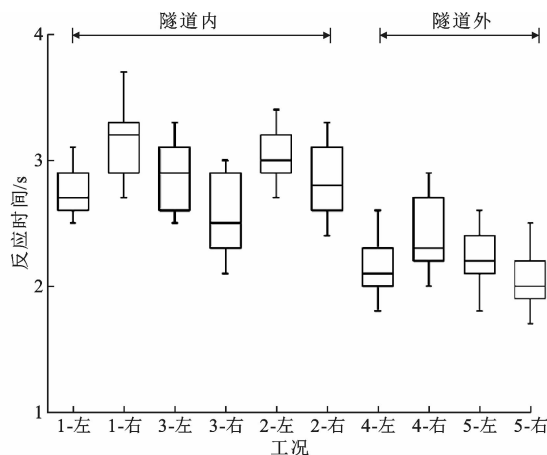


图 8 隧道内外交通标志反应时间

Fig. 8 Traffic sign reaction times inside and outside tunnel

由图 8 可知,隧道内驾驶人的反应时间主要集中在 2.1~3.2 s 内,隧道外驾驶人的反应时间主要集中在 1.7~2.8 s 内,试验者对交通标志位于特长隧道内的反应时间普遍高于隧道外。长时间在特长隧道中的单一视觉环境下行驶产生生理疲劳,造成驾驶人对交通标志感知及反应减弱;驶出隧道后视野开阔,驾驶人长时间压抑的心情得到释放,会更加关注周边交通信息,以调整并确保自己的驾驶操作满足行车安全。驾驶人对隧道内外交通标志的反应时间都呈现同一性规律,行车道和标志位于异侧时,驾驶人视认标志的扫视幅度和视偏角变大,极易分散注意力,传递相同信息需要更长时间;而中国交通法规和靠右行驶的驾驶习惯易诱导驾驶人偏向于关注道路右侧的交通标志,驾驶人能在短时间内感知右侧交通信息并选择合理的行车路线。

### 3 结 语

(1)以瞳孔直径变化比率为表征参数,进行了实车试验,可知,车速为 80 km/h 的普通高速公路,驾驶人的正常瞳孔直径变化比率波动范围为  $\pm 5\%$ ,特长隧道出口的明适应时间均值为 2.129 s,驾驶人驾龄越长、对道路状况越熟悉,明适应时间越少。

(2)通过室内模拟试验数据分析可知,驾驶人对隧道内外交通标志的反应时间都呈现同一性规律,交通标志和行车道位于同侧时的反应时间比异侧时短。驾驶人对位于特长隧道出口内交通标志的反应时间均值为 2.86 s,比交通标志位于隧道外时的平均值大 0.64 s。

(3)综合实车试验和室内模拟试验可知,当隧道

出口与互通间距受地形限制,设计完成标志的有效视认时间小于 4.5 s 时(驾驶人驶出隧道明适应后,应能及时识别出口预告标志,并完成认读、理解和行动等过程<sup>[26]</sup>),建议特长隧道出口处交通标志设置在隧道内部正中顶部位置;反之,设置在隧道外部道路右侧,从而改善隧道出口的交通安全。

(4)因实体隧道运营的特殊性,多采用室内模拟试验工况开展交通标志视认时间研究,这与真实行车环境存在一定差异。后续,可以对隧道出口处交通标志横向位置设置进行实车试验,以验证模拟试验的合理性。

## 参考文献:

## References:

- [1] 申艳军,杨 阳,邹晓龙,等.国内公路隧道运营期交通事故统计及伤亡状况评价[J].隧道建设,2018,38(4):564-574.  
SHEN Yan-jun, YANG Yang, ZOU Xiao-long, et al. Statistics on traffic accidents occurred in operating highway tunnels in China and their casualties evaluation[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 564-574.
- [2] 肖 尧,杜志刚,陶鹏鹏,等.公路隧道出口“白洞”效应改善方法研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2015,39(3):573-576.  
XIAO Yao, DU Zhi-gang, TAO Peng-peng, et al. Highway tunnel improvement method of the “white hole” effect[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering Edition, 2015, 39(3): 573-576.
- [3] MICHAEL P, LEEMING F, DWYER W. Headway on urban streets: Observational data and an intervention to decrease tailgating[J]. Traffic Psychology and Behaviour, 2000, 3(2): 55-64.
- [4] WOGALTER M, KALSHER M, RASHID R. Effect of signal word and source attribution on judgments of warning credibility and compliance likelihood[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(2): 185-192.
- [5] CHIEN S, TANG Y, SCHONFELD P. Optimizing work zones for two-lane highway maintenance projects [J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(2): 145-155.
- [6] AL-MADANI H, AL-JANAHI A R. Assessment of drivers' comprehension of traffic signs based on their traffic, personal and social characteristics[J]. Traffic Psychology and Behaviour, 2002, 5(1): 361-374.
- [7] DOMAN K, DEGUCHI D, TAKAHASHI T, et al. Estimation of traffic sign visibility considering local and global features in a driving environment [C]// IEEE. Proceedings of 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2014: 202-207.
- [8] 罗宇豪.复杂路网环境下高速公路交通安全设施优化分析[D].西安:长安大学,2018.  
LUO Yu-hao. Optimization analysis of highway traffic safety facilities in complex road network environment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [9] JRGENSEN F, WENTZEL-LARSEN T. Optimal use of warning signs in traffic[J]. Accident Analysis and Prevention, 1999, 31(6): 729-738.
- [10] AASHTO. Manual on Uniform Traffic Control Devices(2009 Edition)[S].
- [11] OU Y K, LIU Y C. Effects of sign design features and training on comprehension of traffic signs in Taiwanese and Vietnamese user groups[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(1): 1-7.
- [12] NG A, CHAN A H S. Investigation of the effectiveness of traffic sign training in terms of training methods and sign characteristics[J]. Traffic Injury Prevention, 2011, 12, 2(4): 49-53.
- [13] 彭余华,吕纪娜.基于驾驶人视认特性的高速公路作业区文字类交通标志尺寸[J].长安大学学报:自然科学版,2016,36(4):71-78.  
PENG Yu-hua, LU Ji-na. Text traffic signs in expressway work zone based on driver's visual characteristics[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(4): 71-78.
- [14] 李 杨,丁 伟,周俊杰,等.高速公路特殊路段交通标志布设优化研究[J].交通标准化,2013(22): 13-16.  
LI Yang, DING Wei, ZHOU Jun-jie, et al. Design optimization of traffic signs for special sections of expressway[J]. Traffic Standardization, 2013(22): 13-16.
- [15] JTG D70/2—2014,公路隧道设计规范——第二册 交通工程与附属设施[S].  
JTG D70/2—2014, Specifications for design of highway tunnels—Section 2: Traffic engineering and affiliated facilities[S].
- [16] GB 5768. 2—2009,道路交通标志和标线[S].  
GB 5768. 2—2009, Road traffic signs and markings [S].
- [17] 陈 磊.高速公路隧道群路段安全设施设置研究

- [D]. 西安:长安大学,2012.
- CHEN Lei. Study on layout of safety facilities in freeway tunnels[D]. Xi'an:Chang'an University,2012.
- [18] 樊兆董. 特长隧道特殊交通安全设施评估及优化方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2018.
- FAN Zhao-dong. Study on the evaluation and optimization method of special traffic safety facilities of extra-long tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Technology,2018.
- [19] 闫彬,周继彪,过年生,等. 毗邻隧道群出口的交通标志设置研究[J]. 西华大学学报:自然科学版,2013,32(3):85-89.
- YAN Bin, ZHOU Ji-biao, GUO Nian-sheng, et al. Study of traffic signs setting in adjacent tunnel exit [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition,2013,32(3):85-89.
- [20] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌. 高速公路隧道出口交通标志安全距离研究[J]. 公路工程,2008(1):55-58.
- DU Zhi-gang, PAN Xiao-dong, GUO Xue-bin. Traffic sign's safe distance from freeway tunnel's exit [J]. Road Construction,2008(1):55-58.
- [21] 吴朝阳,董爱强. 基于视觉连续性的隧道内标志设置版面与位置研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(2):369-374.
- WU Chao-yang, DONG Ai-qiang. Setting of traffic sign in tunnel based on the visual continuity[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2016,13(2):369-374.
- [22] 朱可宁,龚波. 高速公路特长隧道出口段驾驶人心理负荷变化规律[J]. 交通科技与经济,2017,19(3):6-9.
- ZHU ke-ning, GONG bo. Research on driver mental load in exit of super long tunnel[J]. Technology & Economy in Areas of Communications,2017,19(3):6-9.
- [23] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- WANG Dian-hai. Traffic flow theory [M]. Beijing: China Communications Press,2002.
- [24] 梁波,何世永,潘国兵,等. 基于新型内装材料的公路隧道行车安全研究[J]. 现代隧道技术,2015,52(2):16-21,29.
- LIANG Bo, HE Shi-yong, PAN Guo-bing, et al. Study of driving safety in a highway tunnel with new interior applied materials[J]. Modern Tunnel Technology,2015,52(2):16-21,29.
- [25] 叶飞,龚波. 基于瞳孔变动的隧道群区段视觉明暗适应特性研究[J]. 公路与汽运,2018(2):40-44.
- YE Fei, GONG Bo. Research on visual bright and dark adaptation characteristics of tunnel group based on pupil change [J]. Highway and Motor Applications,2018(2):40-44.
- [26] 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,2011,31(3):68-71,89.
- ZHAO Yi-fei, CHEN Min, PAN Bing-hong. Minimum spacing demand analysis between tunnel and exit of interchange [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2011,31(3):68-71,89.
- [27] JTG/T B05—2015,公路项目安全性评价规范[S].
- JTG/T B05—2015, Specification for highway safety and audit[S].
- [28] 黄静. 高速公路隧道驾驶员注视点分布特征分析[J]. 交通科技,2010(1):91-93.
- HUANG Jing. Analysis of distribution characteristics of driver's gaze point in expressway tunnels[J]. Traffic Science and Technology,2010(1):91-93.
- [29] 鄂德军,王水生,朱顺应,等. 视力角指标及在城市隧道安全评价中的应用[J]. 华东公路,2009(4):34-37.
- E De-jun, WANG Shui-sheng, ZHU Shun-ying, et al. Visual angle index and its application on safety evaluation in urban tunnel[J]. East China Highway,2009(4):34-37.
- [30] 李霖,朱西产,马志雄. 驾驶员在真实交通危险工况中的制动反应时间[J]. 汽车工程,2014,36(10):1225-1229.
- LI Lin, ZHU Xi-chan, MA Zhi-xiong. Driver braking reaction time under real traffic risk scenarios[J]. Automotive Engineering,2014,36(10):1225-1229.