

李琛,陈丰,林子鉴,等. 越江越海隧道入口处自发光标线应用效果[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(2): 101-114.
LI Chen, CHEN Feng, LIN Zi-jian, et al. Application effect of self-luminous road markings at entrance of cross-river and cross-sea tunnel[J].
Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 101-114.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.02.010

越江越海隧道入口处自发光标线应用效果

李琛, 陈丰, 林子鉴, 姜茗馨, 林宏伟

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对越江越海隧道入口处事故多发问题, 提出了一种基于自发光标线的改善策略。采用实车试验研究不同光环境下自发光标线的视认性能, 以此验证自发光标线代替普通标线的可行性, 并探究不同亮度与颜色之间的差异; 构建越江越海隧道入口段三维场景进行驾驶模拟试验, 分析驾驶人在不同场景下的驾驶行为与主观感受, 以此验证自发光标线设置于越江越海隧道入口段的应用效果。试验结果表明: 在环境照度大于 50 000 lx 时, 与 280、2 500 cd/m² 相比, 亮度为 1 500 cd/m² 的自发光标线视认性能最佳, 其视认距离均值与普通标线接近, 最高可达 89 m; 与黄色和白色相比, 橙色自发光标线在视认性与舒适度方面均表现更好。在环境照度小于 100 lx 时, 不同色温及亮度的自发光标线相较普通标线均可提升 20 m 以上的视认距离。此外, 亮度对舒适度影响显著, 其中 280 cd/m² 表现最佳, 而色温对舒适度影响不显著。相较于普通标线场景, 自发光标线场景中车辆的车道保持性能更佳, 行驶车速降低 5~20 km/h。通过自发光标线的提前警示, 驾驶人刹车踩踏频率、最大刹车力度与持续距离均有所减少, 驾驶人主观感受上其紧张感与操作难度有所降低, 自发光标线的应用对越江越海隧道入口处安全改善具有一定的效果。研究结果可为自发光标线或类似地面发光设施的亮度设置、应用方案设计等提供参考。

关键词: 交通工程; 行车安全; 驾驶模拟; 自发光标线; 视认性; 越江越海隧道

中图分类号: U417.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2024)02-0101-14

Application effect of self-luminous road markings at entrance of cross-river and cross-sea tunnel

LI Chen, CHEN Feng, LIN Zi-jian, JIANG Ming-xin, LIN Hong-wei

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University,
Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the problem of frequent accidents at the entrance of cross-river and cross-sea tunnel, an improvement strategy was proposed based on self-luminous road markings. The visual recognition performance of self-luminous road markings in different light environments was studied by real vehicle experiments, so as to verify the feasibility of replacing the ordinary road markings with self-luminous road markings, and to study the difference caused by different

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978522)

作者简介: 李琛(1998-), 男, 河北怀安人, 工学博士研究生, E-mail: lichen0115ha@163.com。

通讯作者: 陈丰(1982-), 男, 浙江浦江人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: lichen0115ha@163.com。

brightness and color. A three-dimensional scene of the entrance section of the cross-river and cross-sea tunnel was constructed to conduct driving simulation experiments, and the driving behavior and subjective feelings of drivers in different scenes were analyzed, so as to verify the application effect of setting the self-luminous road markings at the entrance section of the cross-river and cross-sea tunnel. The results show that when the ambient illuminance is greater than 50 000 lx, compared with 280 and 2 500 cd/m², the self-luminous road markings with a brightness of 1 500 cd/m² have the best visual recognition performance, and its average visual recognition distance is close to that of ordinary road markings, up to 89 m. Compared to yellow and white, orange self-luminous road markings are better in terms of visibility and comfort. When the ambient illuminance is less than 100 lx, the self-luminous road markings of different colors and brightness can increase the visual recognition distance by more than 20 m compared with ordinary road markings. In addition, brightness has a significant effect on comfort, brightness of 280 cd/m² performs best, color has no significant effect on comfort. Compared with the ordinary road markings scene, the lane keeping performance of the vehicle in the self-luminous road markings scene is better, and the driving speed is reduced by 5 to 20 km/h. Through the advance warning of self-luminous road markings, the driver's braking frequency, maximum braking force and continuous distance are reduced, and the driver's subjective feeling of tension and operation difficulty are reduced. The application of self-luminous road markings has a good effect on the safety improvement at the entrance of the cross-river and cross-sea tunnel. The results of this study can provide reference for luminance setting and application design of self-luminous road markings or similar ground luminescence facilities. 2 tabs, 15 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; traffic safety; driving simulator; self-luminous road marking; visible performance; cross-river and cross-sea tunnel

0 引言

随着中国经济的发展,区域之间联系更加紧密,仅依靠轮渡连接两岸的方式无法满足区域之间沟通的需求。于 1965 年开始建设,1971 年竣工的第一条越江隧道开启了中国越江越海隧道建设新纪元。经过几十年的技术积淀与工程实践,21 世纪以来大批越江越海隧道相继建成通车。采用隧道的越江越海形式相较于桥梁可减小交通受天气状况的影响^[1],同时不占用水面空间,减少对船舶航道及其净空产生的影响。越江越海隧道作为交通网中的“咽喉”,随着交通需求的不断增长,车流量增加,拥堵与事故易发。隧道入口是隧道中一个事故常发的路段,王辉等进行事故数量统计发现,隧道入口 400 m 路段事故数量占隧道全路段事故数量的 31.7%^[2]。越江越海隧道入口处常设置有较大的纵坡坡度以实现高程的降低,该处存在多方向车辆汇流,车流量大,车辆加减速及变道超车行为较多。此外隧道入口处行车环境变化剧烈。隧道外 3 m 处环境照度下降率可高达 35 811.5 lx/m^[3]。车辆行驶在海底

隧道入口段时,照度值锐减至 100 lx 以下,驾驶人受照度影响显著^[4]。刘宁伟等进行事故形态统计发现,追尾事故为隧道中最常发生的事故形态,占隧道事故总数 40%以上^[5]。因此针对具有多方汇流、常设置有较大纵坡坡度、车流量大、行车环境复杂且变化剧烈的越江越海隧道入口处,加强车辆引导与提前警示对提升安全性,降低事故率,提高运行效率具有较大意义。

当前已有针对提升隧道入口安全性的相关理论研究与实践。Wang 等发现通过设置隧道路段限速可减小速度离散性,降低隧道事故率^[6]。Liao 等通过仿真发现,使用隧道前匝道交通管控与可变信息提示、开放路肩、进行交通分流等策略对降低隧道事故率具有有效性^[7]。潘勇等建立了公路隧道拥堵疏散决策模型,并提出借助隧道交通诱导设施、路段收费站、卡口等进行交通管控和疏散^[8]。王乾等通过对城市道路隧道交通事故分析发现,使用限速管理手段以及设置减光结构可使驾驶人有更好的视觉适应,提升隧道入口段的安全性^[9]。黄婷等考虑全寿命周期成本最小,建议设置柔性警示柱、防撞

桶、警示型线形诱导标组合的方式,用以解决路侧导流线长期使用视认性降低的问题^[10]。但现有措施的效果与灵活性仍存在不足。吴玲等对隧道路段现铺设的减速设施分析发现,当前大多属于半强制减速设施,会对驾驶舒适性产生一定影响,且易带来突然的危险^[11]。Lu等提出使用可变信息板告知驾驶人隧道内实时交通情况,可使驾驶人提前做出决策以减少拥堵及事故^[12]。杜志刚等通过对公路隧道视线诱导设施作用分析,提出公路隧道视线诱导设施应遵循低位、多级对称、连续一致等诱导原则,并对现阶段实际隧道中的设施设置提出改善思路与对策^[13]。

道路标线在校正驾驶行为、提升驾驶安全方面具有重要作用^[14]。当前常用的道路标线形式为固定式热熔式标线漆,应用于越江越海隧道入口时不能根据多种管控措施进行灵活的协同变化。标线性能的差异对车辆偏离车道中心线的情况会产生较大影响。传统的反射式道路标线应用在隧道口时视认性能较差,且其在自然环境侵蚀以及车辆作用下不断被磨损,严重影响其使用效果^[15]。标线的性能可从事故数据分析、驾驶人主观评价、车辆行驶过程分析以及视认性能测试4个方面进行表征^[16]。Higgins等在对比不同工艺普通标线的夜间视认效果时使用了测量视认距离的方法,试验车辆开启近光灯以48.28 km/h速度向目标行驶,被试能够看到目标的地点,并说出目标物的特征^[17]。杨波等使用眼动仪分析驾驶模拟试验中被试注视点分布情况发现,发光标线诱导性能优于普通标线^[18]。因此,一些学者尝试使用蓄能发光形式改善标线视认性能。吴瑾设计了一种荧光标线并测试了其性能^[19]。Nance等介绍了一种将磷光涂料应用于道路标线的方法,但同时指出其中的成分在室外使用时容易发生水解^[20]。何锐等介绍了标线中长余辉发光材料掺量优化设计方法,但同时指出利用长余辉发光材料提高道路标线视认性能仍存在成本较高,且耐久性不佳的问题^[21]。此外蓄能型发光标线还存在受外界光照条件影响大,发光强度不稳定、不可控等问题。

随着LED技术的发展,在路面上使用LED自发光标线成为可能。LED自发光标线发光强度稳定,并且具有亮度、色温可调,显示灵活可变等优点。当前已有对路用LED设施的研究,其中对应用在人行横道的研究较多。石京等构建自发光斑马线的场景并进行模拟驾驶试验,结果表明,人行横道发光带与闪烁提示标志的使用能够有效降低驾驶人经过人

行横道前的速度,减少抢行行为^[22]。Costa等在过街人行道两端增设地面LED发光带,通过对过往车辆让行率进行统计发现,设置LED发光带对让行率有显著提升,且效果优于设置发光警示标牌^[23]。Villa等研究了LED道钉的视觉有效性,指出LED道钉的发光强度应根据光照和路面条件进行调节,该研究中同时结合了被试主观评价的方法^[24]。Zhu等使用驾驶模拟试验对夜间不同颜色的普通标线、LED主动发光点阵道钉及长条形LED标线的引导性能进行研究^[25]。此外,该团队对使用光纤作为导光材料的透光混凝土基自发光标线进行了相关研究,建立了视认距离与光纤掺量的回归模型,并给出了不同设计速度下光纤掺量的推荐值^[26]。综上,已有研究表明,使用LED作为光源是较为理想的发光标线方式,但目前对LED自发光标线在不同环境与交通条件下亮度、色温的选择等应用方式,以及对视认性能、驾驶行为干预等应用效果相关研究较少。因此本文使用实车试验面向隧道入口段所存在的光照环境,分别对主动式发光标线在环境照度高的晴天与环境照度低且有人造光源照明情况下的路用效果进行研究,并使用驾驶模拟器研究在隧道入口前提前设置主动式发光标线的引导与提示效果。

1 实车视认性试验

1.1 试验目的

LED主动式发光标线作为一种应用于道路设施的新技术,其适用性及使用效果需要得到验证。车辆白天行驶在隧道入口处时,其在隧道外环境光照条件良好,根据《LED主动发光道路标志》(GB/T 31446—2015)的要求,应对环境照度大于50 000 lx的晴天时视认性进行考察。车辆在进入隧道后,环境照度骤降至100 lx以下。因此本文在环境照度大于50 000 lx的白天以及环境照度小于100 lx且有人造光源照明的夜间2种情况下,对不同亮度与色温的LED自发光标线进行视认性试验,并与普通标线作对比,验证LED自发光标线的适用性,结合主观评价获取较优的LED发光标线亮度与色温方案。

1.2 试验方案

1.2.1 试验设备

试验使用单个发光表面尺寸为200 cm(长)×15 cm(宽)的发光标线进行,亮度及色温可调,其色温按照《道路交通标线质量要求和检测方法》(GB/T 16311—2009)规定的色温范围定制,涵盖了色品

坐标范围中的白色、黄色及橙色。最终试验使用的产品由上海三思(SANSI)提供。室外试验发光标线使用8 kW柴油发电机供电。试验车辆选用较为常见的大众BORA轿车。试验车速以及行驶距离使用OBD II智能盒进行记录,OBD II智能盒可以实现与车辆行车电脑通信,读取到车辆时速及行程距离,可在无卫星定位系统的试验位置进行。试验中LED自发光标线亮度测量使用柯尼卡美能达LS-100瞄点式亮度计,环境照度测量使用宏诚科技HT-8318分体式照度计,相关试验设备如图1所示。此次试验中为研究视认性能所定制的自发光标线产品需要具有较为宽泛的亮度与色温调节范围,因此标线的厚度8.5 cm。本产品未经过路用性能测试,且埋设于临时管控进行试验的已通车道路会对路面结构造成损伤,因此试验中选择临时搭设于路面上,使得发光表面高出路面。在此条件下,试验被试进行观察时的视线与标线平面夹角有一定减小,视认距离试验结果将偏保守。



图1 实车试验相关设备

Fig. 1 Equipments used in real car experiment

1.2.2 试验人员

本试验需操作人员2人,分别负责更换发光标线亮度与色温以及运行维护试验车辆设备、控制车速、保证行车安全。视认性试验招募了30位被试,其中男性21名,女性9名,驾龄在4年及以上的有16人,驾龄在6年及以上的有6人。被试具有正常的色觉与矫正视力。试验开始前被试在问卷中填写驾龄等基础信息,试验员向试验对象讲述其需要注意的现象及试验仪器的使用,并提醒被试按照正常

驾驶习惯观察前方,不需要刻意注视发光标线进行区分。被试在副驾驶按照类似驾驶时的坐姿就坐,可更加专注于视认任务。试验过程中被试在副驾驶不得出现不合适的坐姿,如过于靠前使胸部明显超出方向盘平面的坐姿。试验操作人员在驾驶车辆过程中需在被试出现不合适坐姿时进行口头提示,使其进行调整。试验过程中被试对各组试验舒适度进行打分。

1.2.3 试验内容

实车视认性试验分为低速与高速试验。低速试验由于速度较慢,场景较多,选择在同济大学嘉定校区嘉二路进行,该路段无普通道路标线干扰。根据《道路交通标志和标线 第三部分:道路交通标线》(GB 5768.3—2009),低速试验中标线的布置为限速60 km/h以下道路所采用2 m标线+4 m间隔的形式。普通标线的视认性试验在相邻的嘉三路进行,该路段照明条件与嘉二路相近,且具有新刷涂的普通道路标线,试验中使用标记物提示普通标线观测区域的起点,同时作为停车标志物。嘉二路与嘉三路夜间具有灯光照明,通过实测,嘉二路试验路段环境照度变化区间为28.4~50.4 lx,嘉三路试验路段环境照度变化区间为24.5~78.5 lx,而长江隧桥隧道中间段照度值变化区间为34.8~66.3 lx。已有研究表明越海隧道内照度小于100 lx^[4],嘉二路与嘉三路虽与隧道环境存在差异,但通过照度测试,其用于模拟隧道内有照明的环境具有可行性。高速试验作为低速试验的补充,验证LED自发光标线在隧道环境照度条件、不同行车速度下的视认性能。高速试验在上海市长江隧桥合作单位养护时进行,试验地点为上海市长江隧桥崇明方向隧道入口内500~1 500 m处,该段靠近隧道入口,环境照度稳定,可代表隧道内有光源照明的路段。标线布置为限速大于60 km/h道路所采用的6 m标线+9 m间隔的形式。低速与高速试验的试验地点及现场情况如图2、图3所示。

由于发光标线可能存在眩光问题,眩光严重时驾驶人将难以区分标线的虚实,试验以被试能够辨认清虚实线位置到标线的距离作为有效视认距离。试验分别对白、黄、橙3种颜色,每种颜色3种亮度下的标线视认性进行测量。试验前在黑暗环境中对每种组合的亮度进行测量。考虑到瞄点式亮度计量程以及驾驶人观察标线的视角,亮度测量方式采用瞄点式亮度计在距发光标线15 m处视高1.2 m瞄准测量发光标线亮度。经过每档亮度3次测量,亮



(a) 自发光标线低速视认性试验



(b) 普通标线低速视认性试验示意

图 2 低速实车试验路段

Fig. 2 Low-speed real vehicle test section

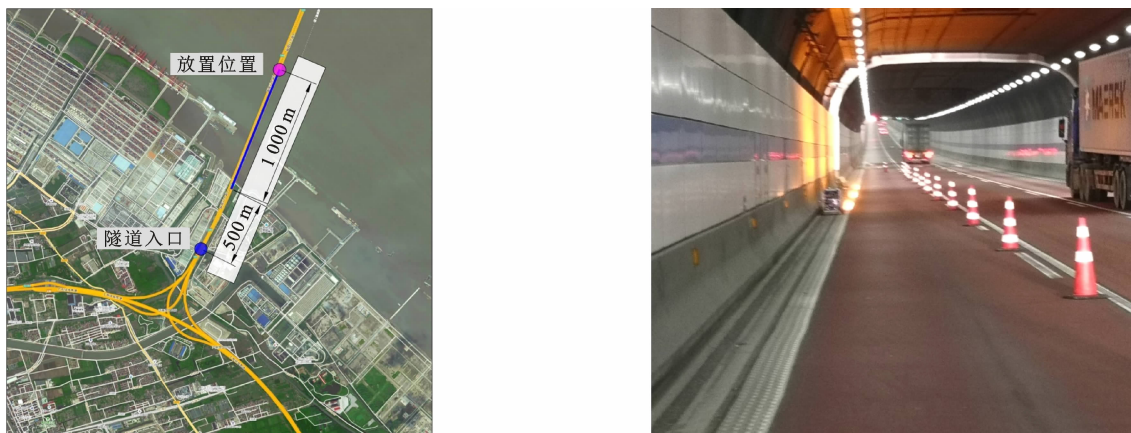


图 3 高速实车试验路段

Fig. 3 High-speed real vehicle test section

度 1~亮度 3 分别确定为 280、1 500、2 500 cd/m²。

试验流程如下:

(1) 试验前按照低速及高速实车试验标线形式放置发光标线。在标线铺设段起点设置停车标志作为视认距离测量终点。

(2) 被试坐在试验车副驾驶位置,在试验车启动前按照类似自己的驾驶坐姿调整座椅,并系好安全

带。试验车由起点出发向标线布置位置前进,低速试验车速控制为 10 km/h,高速试验车速分别控制在 40、60、80 km/h。

(3) 试验被试在车速稳定后将手指准备在“开始记录”按键上方,当其能够辨认出放置的标线为虚线时,即被试在并非刻意观察的情况下能够视认清所设置的发光标线散开成为 3 段,而非连接在一起,

立即按下按键开始记录。

(4)当车辆 B 柱与停车标志对齐停车时,按下“停止记录”按键停止记录。

(5)操作员更换发光标线亮度与颜色,重复流程(2)~流程(4)。

1.3 实车视认性试验结果分析

通过实车试验获取了被试在 2 种环境光照条件、9 种标线组合、不同车速情况下的视认距离及舒适度原始数据,本节将对实车试验数据进行分析,判断发光标线的有效性,探究发光标线不同发光形式之间的差异,获取各情况下较好的色温与亮度。可通过对比不同发光标线设置情况下试验结果的均值,从而获取不同环境亮度下视认效果最好以及被试感觉最为舒适的组别。在同一设置条件下,不同被试仍会产生有差异的视认距离结果与舒适度打分,各个设置条件下的试验结果均值会存在差异,因此需要进一步检验组间的均值差异是否由设置条件不同产生的影响,即二者是否存在相关关系。对有限个样本下相关性分析可采用双因素方差分析进行。

1.3.1 低速实车试验结果分析

对白天光照条件良好(环境照度 $>50\ 000\ \text{lx}$)情况下视认距离进行分析,使用 SPSS 绘制箱线图分析不同组别下视认距离及离散型,如图 4 所示。由图 4 可知:通过均值对比,普通标线在白天外界照明条件良好的情况下仍能保持较好的视认性,其视认距离平均值相较于发光标线较高,达到 92.8 m。亮度 1 发光标线表现相对较差,最小的视认距离均值仅有 73.3 m;亮度 2 与亮度 3 发光标线视认距离均值均达到 80 m 以上,亮度 2 表现略优于亮度 3;且橙色表现略优于其他 2 种颜色。对 9 组发光标线进行双因素方差分析,在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,对色温的方差检验量 $F=3.997$,其对应计算自由度下 F 分布中的概率值 $P=0.02<0.05$,表明在该显著性水平下白天不同色温发光标线视认距离具有显著差异。对亮度的方差检验量 $F=4.027$,其对应计算自由度下 F 分布中的概率值 $P=0.02<0.05$,表明在该显著性水平下白天不同亮度发光标线视认距离具有显著差异。

使用 SPSS 对试验参与者各组试验打分绘制箱线图如图 5 所示,可见,舒适度打分均值集中在 4.7~6.2 分。通过对比结果可发现,试验者同样对橙色以及亮度 2 的发光标线给出了较高的舒适度评分。

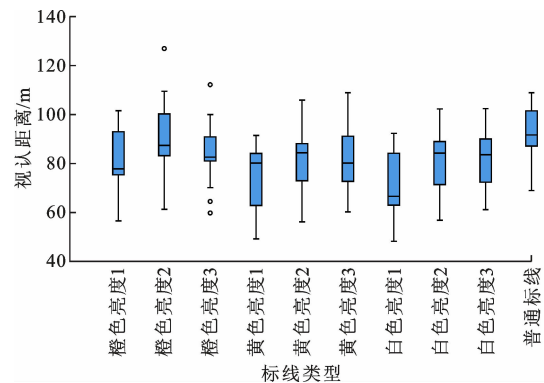


图 4 白天外界光照良好情况下标线视认距离箱线图
Fig. 4 Box diagram of line recognition distance under good external light at daytime

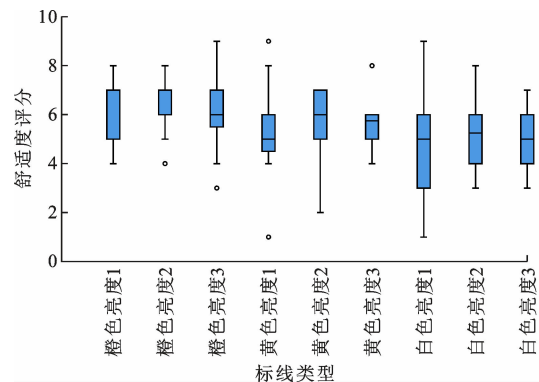


图 5 白天外界光照良好情况下舒适度评分箱线图
Fig. 5 Box diagram of comfort score under good external light at daytime

对夜晚外界光照条件不佳(环境照度 $<100\ \text{lx}$)情况下视认距离进行分析,使用 SPSS 绘制箱线图分析不同组别下视认距离及离散型如图 6 所示。由图 6 可知:通过均值对比,在夜晚外界照明条件不足的情况下,发光标线相较于普通标线展现出了很明显的优势,发光标线的视认距离均值均在 60 m 以上,而普通标线均值仅有 46 m。亮度 1 发光标线视认距离相对较好,亮度 3 次之。对 9 组发光标线视认性结果进行双因素方差分析,在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,对色温的方差检验量 $F=0.533$,其对应计算自由度下 F 分布中的概率值 $P=0.588>0.05$,表明在该显著性水平下夜间不同色温发光标线视认距离不具有显著差异;对亮度的方差检验量 $F=0.308$,其对应计算自由度下 F 分布中的概率值 $P=0.735>0.05$,表明在该显著性水平下夜间不同亮度发光标线视认距离不具有显著差异。

使用 SPSS 对试验参与者各组试验打分绘制箱线图如图 7 所示,可见,不同亮度下舒适度打分差异

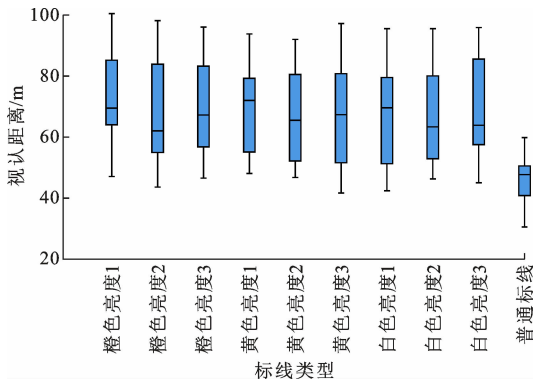


图 6 夜晚外界光照不佳情况下标线视认距离箱线图
Fig. 6 Box diagram of line recognition distance under poor external light at night

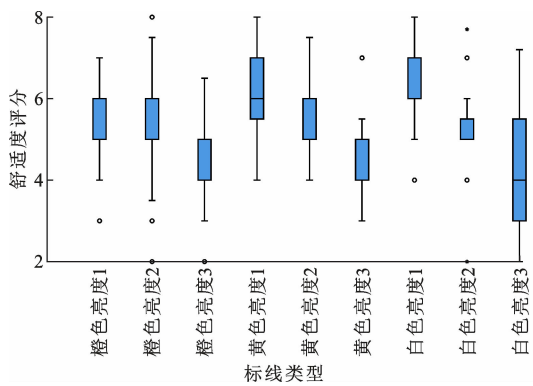


图 7 夜间外界光照不佳情况下舒适度评分箱线图
Fig. 7 Box diagram of comfort score under poor external light at night

较大,舒适度评分依次为亮度 1、亮度 2、亮度 3。此外在亮度 1 情况下黄色与白色发光标线舒适性评分相较于橙色标线较高。

1.3.2 高速实车试验结果分析

为保证不对其他正常行驶的车辆产生不利影响,隧道内高速试验选取低速试验夜间有路灯情况下,舒适度表现最佳的亮度 1 对 3 种颜色的标线进行视认性试验,试验车速选取 40、60、80 km/h,标线设置形式为 6 m 标线+9 m 间隔。试验结果如表 1 所示,可见,在动态试验情况下对 6 m+9 m 形式标线的视认距离均值均可达到 100 m 以上,在该试验环境下视认距离橙色标线表现最好,白色标线表现相对较差。

表 1 高速试验视认距离均值结果

Tab. 1 Mean values of visual distance in high-speed experiment

速度/(km·h ⁻¹)	视认距离/m		
	橙色亮度 1	黄色亮度 1	白色亮度 1
40	132.83	123.77	108.42
60	137.77	123.96	118.63
80	141.05	134.01	120.56

2 驾驶模拟试验

2.1 试验目的

第 1 节通过低速与高速 LED 自发光标线的视认性试验与舒适度调查,确定其应用于隧道路段明、暗条件的适用性。本节将构建长江隧桥由上海绕城高速外环隧道方向至长兴岛方向进入隧道的路段模型并进行驾驶模拟试验,针对隧道入口处发生车辆拥堵或停滞交通事件的危险情况,通过分析模拟车辆状态以及被试的评价,判断 LED 发光标线布设于隧道入口前的引导与预警效果。驾驶模拟场景中使用局部亮度与对比度的调整来模拟发光效果,与现实中的发光物体存在差异,不适用于研究其视认性能,因此驾驶模拟试验中并不特别关注其视认性能。

2.2 试验方案

2.2.1 试验平台

试验使用固定式驾驶模拟器,其配套 32 英寸三联屏显示设备可为被试提供宽阔的视野,使其能够沉浸于驾驶模拟场景中。互动设备为罗技 G27 套装,其方向盘与加减速踏板可提供接近于真实车辆的力反馈效果。驾驶模拟平台软件为 SCANeR Studio,该驾驶模拟软件场景较为真实,且对外部建立模型导入的支持友好,便于将发光标线模型导入道路场景进行试验。

2.2.2 试验场景

本文使用 Google Earth 线上观测以及现场调查方式对长江隧桥由上海绕城高速外环隧道方向至长兴岛方向进入隧道的路段进行调研,并以此为基础使用 SCANeR Studio 复现类似场景。试验场景设置为双向六车道,车道宽度为 3.75 m,车辆在经过 1 000 m 直线段与 500 m 弯道后与另一方向来车汇流,行驶 400 m 后进入隧道。隧道外主线限速 100 km/h,隧道内限速 80 km/h。发光标线设置于隧道入口前 300 m 至隧道口范围内。隧道入口前后直线段设置 2.9% 纵坡坡度,其产生的影响可在模拟车辆动力学状态中得到体现。

由于 SCANeR Studio 不自带发光标线模型,本文使用 CINIMA 4D 设计发光标线导入驾驶模拟场景中。标线设计中根据使用场景选取 3 种符合《道路交通标线质量要求和检测方法》(GB/T 16311—2009)标线色品坐标要求的颜色来表达不同的含义,即白色表示前方正常通行,橙色表示前方因拥堵使得车辆缓慢通行,红色表示前方因事故或拥堵使得

车辆发生停滞。考虑到驾驶模拟试验是对发光标线对驾驶人警示效果的研究,驾驶模拟平台中夜间场景下导入的发光模型效果较好,因此选用夜间场景

来进行驾驶模拟试验,试验场景中设置未放置发光标线的场景作为对照,驾驶模拟场景设置具体情况如表 2 所示。

表 2 驾驶模拟试验自发光标线参数设置

Tab. 2 Parameters setting of self-luminous road marking of driving simulation experiment

设计参数	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7	场景 8	场景 9	场景 10
设置长度/m		300	300		300	200	100	200	100	
标线颜色		白色	橙色		红色	橙色	橙色	红色	红色	
交通情况	自由流	自由流	车辆拥堵	车辆停滞	车辆停滞	车辆拥堵	车辆拥堵	车辆停滞	车辆停滞	车辆拥堵

试验中使用脚本控制放置于隧道口的车辆来模拟车辆拥堵与停滞的场景。已有研究通过对上海市长江隧桥隧道入口内 50 m 处监控视频数据进行统计,使用聚类算法得出自由流、拥堵流、拥挤流情况下前车速度分别为 80、40、20 km/h^[27]。据此,本文在车辆拥堵缓行场景中预设前车速度为 40 km/h。此外,试验中所设置的前方车辆停滞场景相较于拥挤流情况更具危险性。当试验人员驾驶的车辆行驶到隧道口处时触发放置于隧道口内 100 m 处车辆按照预设做出反应,模拟前方拥堵缓行与前方车辆停滞的情况。

2.2.3 被试

招募持有 C1 驾驶证人员进行试验,部分被试参与过实车视认性试验。考虑到一些被试使用驾驶模拟器会发生眩晕等身体不适情况,报名者先通过预试验场景进行熟悉。最终正式试验有 19 名男性和 11 名女性共 30 位被试,其中有 9 人为从业时间较长的职业驾驶人(网约车司机)。被试年龄及实际驾驶里程数如图 8 所示。试验前各被试保证充足的睡眠,试验过程中不存在疲劳驾驶、酒后驾驶等情况。被试先通过预试验熟悉场景,之后开始 10 个场景的正式试验。每 1 组试验后被试根据自己的感受完成关于紧张程度及舒适度等相关问题的问卷,如图 9 所示。

2.2.4 试验内容

被试从场景直线段起点出发进行提速,经过转弯后进入发光标线设置路段,随后进入隧道。被试需保持在指定车道行进。每个路段的路侧设置有限速标志,试验过程中被试根据自己的驾驶习惯进行速度选择。

2.3 结果分析

试验结束后导出模拟驾驶车辆速度、纵向加速度、横向偏移值等数据。原始数据按 10 Hz 的频率采集。将隧道入口位置定义为原点,根据行车方向,隧道外与隧道口距离为负值,隧道内与隧

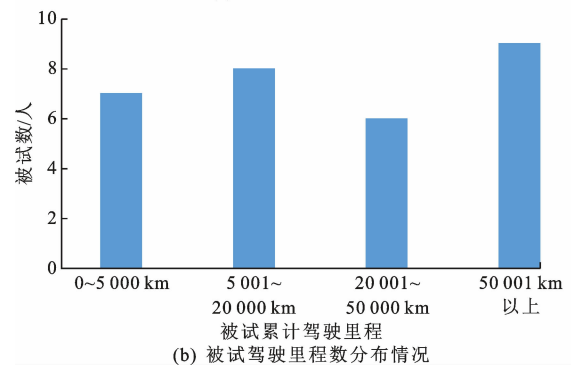
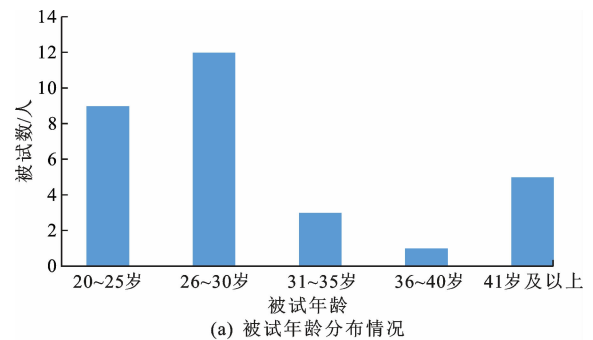


图 8 驾驶模拟试验参与者情况

Fig. 8 Situation of driving simulation experimenters

道口距离为正值。使用 MATLAB 程序提取并计算每次试验在隧道入口前 320 m 至进入隧道 120 m 处的各项数据。将该范围内每 20 m 的数据取均值,统一各次试验的数据结果,之后可对每种场景下所有样本数据进行平均以对比不同场景之间的数据。

驾驶模拟试验不同场景的设置旨在探究自由流、隧道内拥堵、隧道内因故车辆发生停滞情况下,发光标线的使用效果以及不同标线设置长度的效果。

2.3.1 自由流情况

自由流情况下被试由隧道外限速 100 km/h 道路驶入隧道内限速 80 km/h 道路,车速选择不受其他交通参与者干扰。设置普通标线的场景 1 与设置白色发光标线的场景 2 试验结果对比如图 10 所示,由图 10 可知:



图 9 驾驶模拟试验及问卷填写

Fig. 9 Driving simulation experiment and questionnaire filling

场景 2 在进入隧道前速度均值略小于场景 1, 差值在 5 km/h 以内。对 2 个场景下的速度均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为 0.000,在显著性水平 0.05 下场景 1 与场景 2 速度均值具有显著差异。场景 2 在隧道入口附近速度均值标准差小于场景 1,这表明设置有发光标线时在隧道入口附近被试的速度选择较为集中。

2 种场景均未出现过大的加速度或减速度。对 2 个场景下加速度均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为 0.970,在显著性水平 0.05 下场景 1 与场景 2 加速度均值不具有显著差异。场景 2 中被试加速踏板位置较为均匀,而场景 1 中被试在进入隧道前 200 m 处出现了集体性较为明显的加速度踏板开度减小现象。场景 2 中被试在车道中的位置较为集中,且处于中线略偏离发光标线的方向。对 2 个场景下行驶轨迹偏离车道中线距离均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为 0.014,在显著性水平 0.05 下场景 1 与场景 2 行驶轨迹偏离车道中线距离均值具有显著差异。

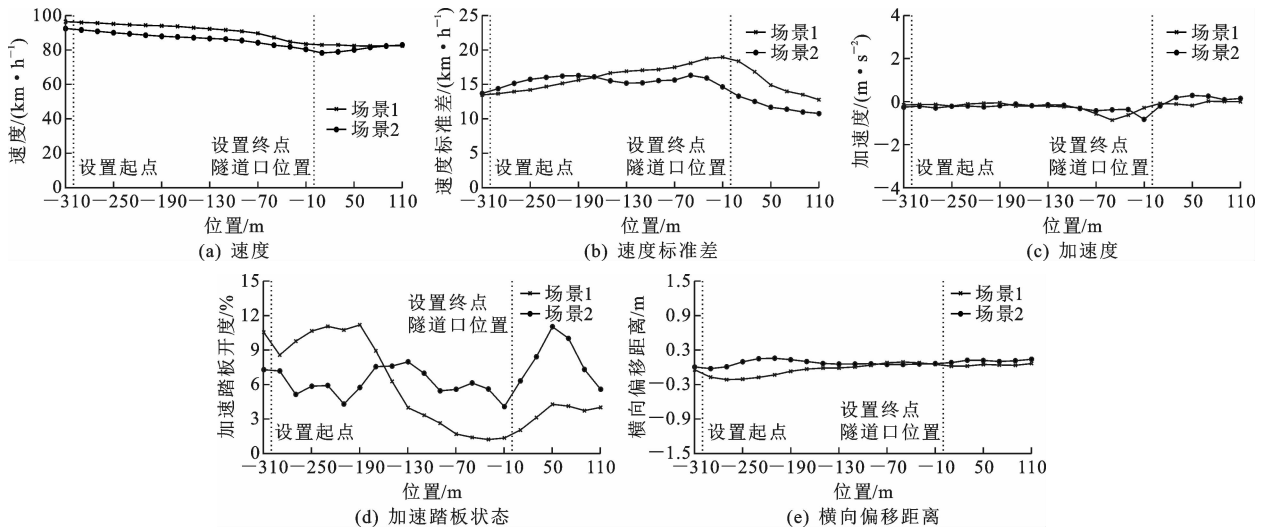


图 10 自由流条件下普通标线与发光标线驾驶模拟试验结果

Fig. 10 Experimental results of driving simulation of ordinary and luminous road marking under free flow condition

2.3.2 隧道内车辆拥堵缓行情况

隧道内拥堵情况下被试由隧道外限速 100 km/h 道路驶入隧道,遇到前方速度为 40 km/h 的缓行车辆限制其通行。设置有普通标线的场景 10 与设置有 300 m 橙色发光标线的场景 3 试验结果对比如图 11 所示,由图 11 可知:

隧道内车辆缓行状态下,在进入隧道前的发光标线设置路段,场景 3 中的速度均值小于场景 10。对 2 个场景下的速度均值进行相关样本 Wilcoxon

符号秩检验,其显著性结果为 0.000,在显著性水平 0.05 下场景 3 与场景 10 速度均值具有显著差异。2 种场景速度标准差差别较小,且在隧道入口附近增大,表明被试在该位置速度选择较为分散。

场景 3 中被试在隧道入口前 170 m 开始逐渐减速并持续至跟驰缓行车流,而场景 10 中被试在隧道入口前 210~170、110~70 m 出现 2 次明显的减速度增大情况,发现前方有缓行车辆采取的减速措施从隧道入口前 50 m 开始。场景 3 中被试减速度

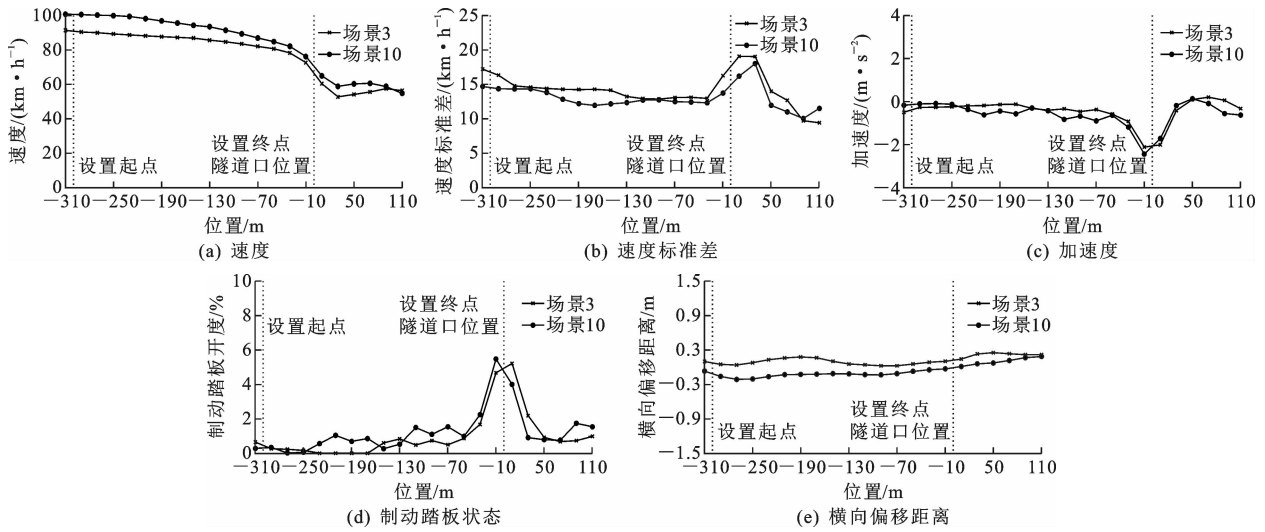


图 11 前方缓行条件下普通标线与发光标线驾驶模拟试验结果

Fig. 11 Experimental results of driving simulation of normal and luminous road markings under condition of slow-moving in front

水平略小于场景 10,且保持较大减速度水平的持续距离减少了 20 m。制动踏板开度同样展示出此规律。对 2 个场景下加速度均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为 0.367,在显著性水平 0.05 下场景 3 与场景 10 加速度均值差异不显著。试验结果表明设置有发光标线的情况下,被试对前方缓行路况提前感知后表现出的减速过程更安全,但在加速度的体现上并不显著。场景 3 中被试在车道中的位置较为集中,且处于中线略偏远离发光标线的方向。对 2 个场景下行驶轨迹偏离车道中线距离均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为 0.020,在显著性水平 0.05 下场景 3 与场景 10 行驶轨迹偏离车道中线距离均值具有显著差异。

隧道内车辆拥堵缓行情况下,分别设置 300、200、100 m 橙色发光标线的场景 3、场景 6、场景 7 试验结果如图 12 所示,由图 12 可知:

发光标线不同设置长度会带来进入隧道前运行速度上的差异,在前方缓行场景下,被试在发光标线起点处降低车速,发光标线布设长度增长可使被试提前减速。对 3 个场景下速度均值进行相关样本 Friedman 按秩的双向方差分析,其显著性结果为 0.001,在显著性水平为 0.05 的情况下,场景 3、场景 6 和场景 7 的速度均值具有显著差异。各种设置长度下在隧道入口处均产生了速度离散型增大的情况。

随着发光标线布设距离增加,模拟车辆产生的最大减速度值及保持较大减速度水平的距离减小,制踏板开度同样可以发现该规律,被试减速过程

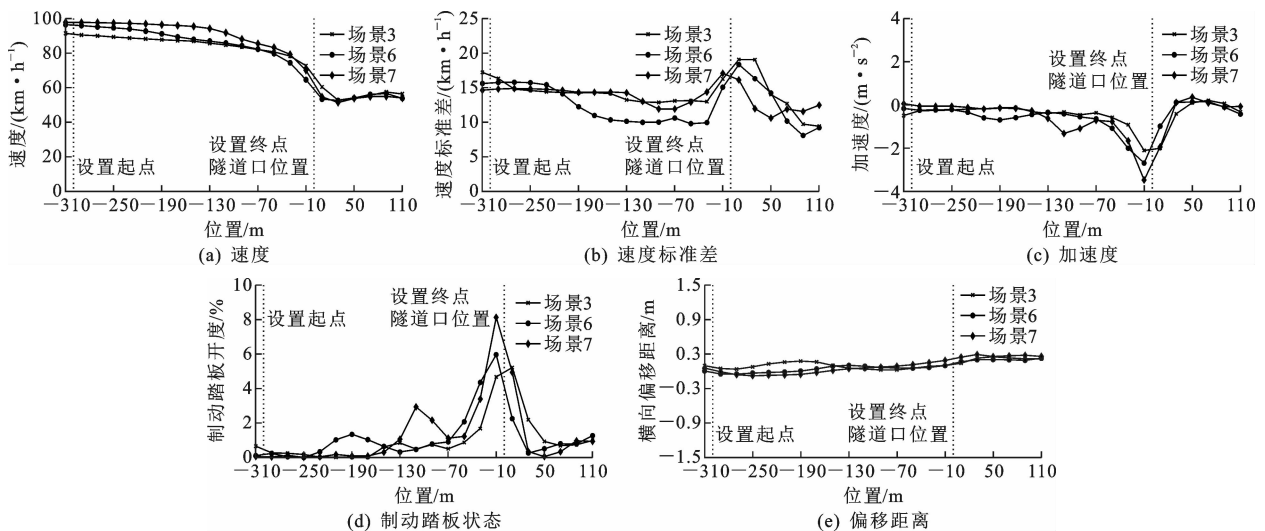


图 12 前方缓行条件下不同布设长度发光标线驾驶模拟试验结果

Fig. 12 Experimental results of driving simulation with different lengths of luminous road markings under condition of slow-moving in front

更偏安全。3种场景下被试在发光标线布设路段均保持车道中心线偏远离发光标线位置行驶。

2.3.3 隧道内车辆停滞情况

隧道内发生车辆停滞情况被试由隧道外限速

100 km/h 道路驶入隧道遭遇前方停止的车辆限制其通行。设置有普通标线的场景4与设置有300 m红色发光标线的场景5试验结果对比如图13所示,由图13可知:

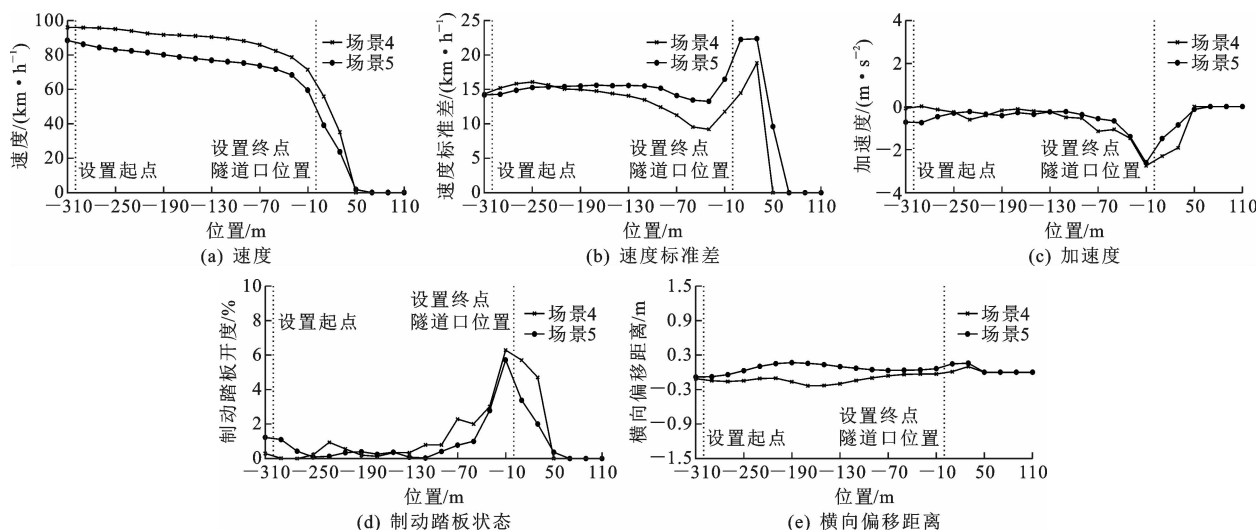


图13 前方停滞条件下普通标线与发光标线驾驶模拟试验结果

Fig. 13 Experimental results of driving simulation of normal and luminous road markings under condition of vehicle stagnation in front

隧道内车辆停滞的情况下,在进入隧道前的发光标线设置路段,场景5中的速度均值小于场景4,在隧道入口附近,场景5中的速度均值也小于场景4,最高达20 km/h以上。对2个场景下的速度均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为0.000,在显著性水平0.05下场景4与场景5速度均值具有显著差异。2种场景速度标准差在隧道入口附近增大,表明该位置速度选择较为分散,场景5中速度差异较场景4略大。

场景5中被试在隧道入口前110 m开始持续减速,减速度逐渐增大;场景4中被试在隧道入口前230、110、70 m处出现明显的小幅度减速情况,而发现前方停滞车辆的大幅度减速从隧道入口前50 m开始。场景5中被试在隧道入口处保持较大减速度的距离相较场景4减少20 m,制动踏板开度同样展示此规律。对2个场景下加速度均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为0.615,在显著性水平0.05下场景4与场景5加速度均值差异不显著。从试验结果分析可知:设置有发光标线的情况下驾驶人能够在提前感知后对前方危险情况进行主动防御,其减速过程更偏安全;未设置发光标线情况下驾驶人在隧道入口处需要更长距离、更大制动踏板开度以减小速度避免碰撞,直至车辆停止前制动踏板开度仍较大,减速过程相对危险。但整体减速过程加速度均值差异不明显。场景5中被试

在车道中的位置处于中线略偏远离发光标线的方向。对2个场景下行驶轨迹偏离车道中线距离均值进行相关样本 Wilcoxon 符号秩检验,其显著性结果为0.048,在显著性水平0.05下场景4与场景5行驶轨迹偏离车道中线距离均值具有显著差异。

隧道内车辆停滞情况下,分别设置300、200、100 m红色发光标线的场景5、场景8、场景9试验结果如图14所示,由图14可知:

发光标线不同设置长度会带来进入隧道前运行速度上的差异,较长的发光标线设置可使车辆一定程度降低其通过路段的速度,前方车辆停滞场景中每增设100 m发光标线可使运行速度均值减少5 km/h以上。对3个场景下速度均值进行相关样本 Friedman 按秩的双向方差分析,其显著性结果为0.000,在显著性水平为0.05下场景5、场景8和场景9的速度均值具有显著差异。各种设置长度下在隧道入口处均产生了速度离散性增大的情况。

随着发光标线布设距离增加,保持较大减速度水平的距离减小,制动踏板开度同样可以发现该规律,被试减速过程更偏安全。3种场景下被试在发光标线布设路段均保持车道中心线偏远离发光标线位置行驶。

2.3.4 被试主观评价情况

在每次试验结束后需要被试对整体场景驾驶感

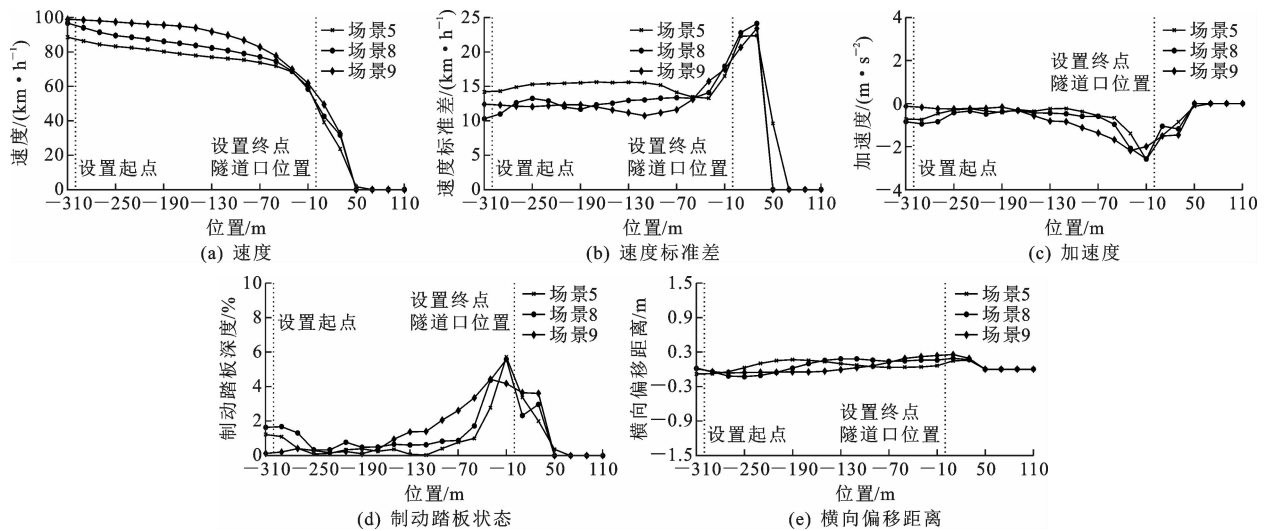


图14 前方停滞条件下不同布设长度发光标线驾驶模拟试验结果

Fig. 14 Experimental results of driving simulation with different lengths of luminous road markings under condition of vehicle stagnation in front

受进行打分(0~10分),分数越高代表此场景下整体感受越好,各场景分数平均值如图15所示。由图15可知:被试对自由流状态下整体感觉均较好。在前方缓行和停滞时,当不设置发光标线时均给出整体体验较差的评分,其次对设置100 m发光标线的场景也给出了略高于不设置发光标线但明显低于自由流情况下的评分。而对设置300 m自发光标线的场景评分均值较高,与自由流水平相近。

对各个分项的主观选择中,在隧道内车辆缓行或发生停滞场景中,未设置发光标线以及设置较短的发光标线(100 m)时更多的被试表示会紧张,操作中有难度,这种情况随着发光标线的设置及长度的增长会出现减少。此外大部分的被试主观上更加青睐于设置更长的发光标线路段。

3 结 语

(1)在良好光照条件下(环境照度 $>50\ 000\ \text{lx}$),不同亮度与色温的自发光标线视认性能差异显著,其中亮度为 $1\ 500\ \text{cd/m}^2$ 表现最佳,其视认距离均值最高可达89 m。与黄色和白色相比,橙色自发光标线在视认性与舒适度方面均表现较好。

(2)在不良光照条件下(环境照度 $<100\ \text{lx}$)自发光标线有显著优势。不同色温和亮度的自发光标线视认性能差异不显著,但与普通标线相比,其视认距离均可提升20 m以上。此外,亮度对舒适度影响显著,当亮度为 $280\ \text{cd/m}^2$ 时表现最佳。

(3)自发光标线的提前警示可使被试在隧道入口前降低车速,且随标线长度增加,减速效果更显著。与普通标线相比,紧急情况下自发光标线可提

前给予被试提示,使得其紧急制动位置提前60 m以上,紧急制动距离减少20 m左右。

(4)路面的发光设施在未来用于丰富交通管控方式、保障道路安全方面具有一定的前景,研究结果可为路面发光设施亮度、色彩等设计提供依据。未来的研究可围绕基于驾驶人生理、心理的发光标线设置方案、标线类型变化对交通流的影响等开展。此外发光标线作为铺设路面的新型道路设施,其在车辆与复杂道路线形影响下的适用性仍需进一步研究,其全寿命周期的养护成本也需进行考量。

参考文献:

References:

- [1] YEUNG J S, WONG Y D. Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 534-541.
- [2] 王 辉, 刘浩学, 赵炜华, 等. 公路隧道环境中交通事故特征分析[J]. 公路, 2009, 54(11): 144-147.
WANG Hui, LIU Hao-xue, ZHAO Wei-hua, et al. Analysis on the characteristics of traffic accidents in highway tunnel environment [J]. Highway, 2009, 54(11): 144-147.
- [3] 乔建刚, 谢一丹. 基于心生理反应的高速公路隧道入口安全 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 10074-10079.
QIAO Jian-gang, XIE Yi-dan. Safety of expressway tunnel entrance based on psychophysiological response [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 10074-10079.
- [4] 潘福全, 泮海涛, 王 铮, 等. 照度与纵坡耦合作用下海底隧道出入口段驾驶员视觉特征分析与建模[J].

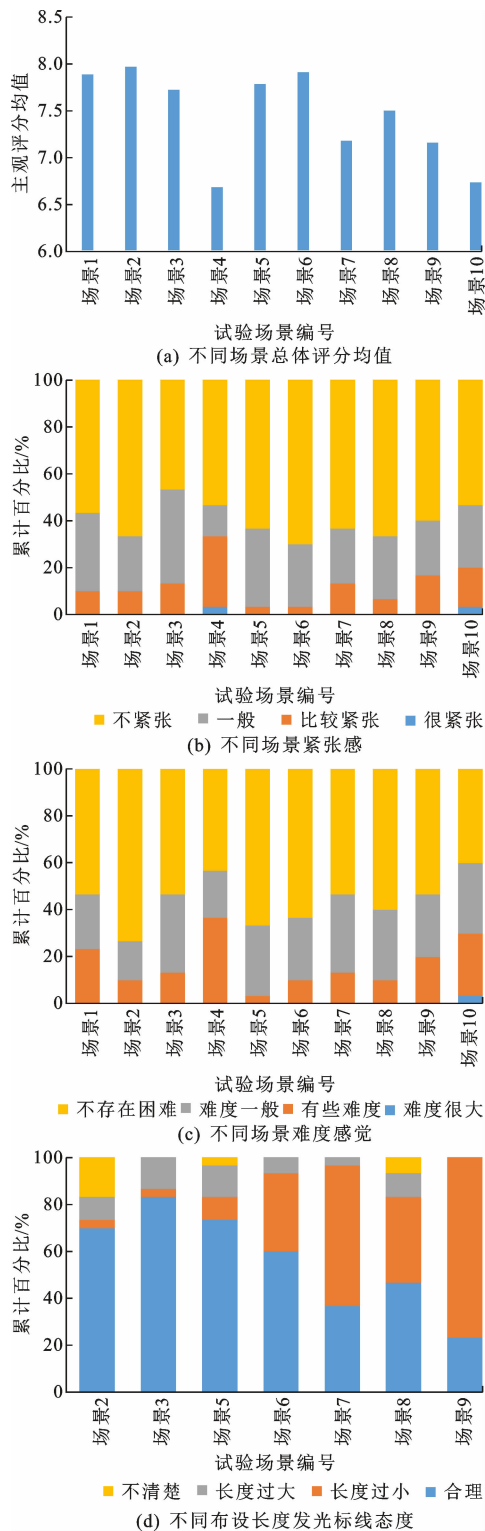


图 15 被试对不同场景主观评价情况

Fig. 15 Experimenter's subjective evaluation of different scenarios

交通运输系统工程与信息,2021,21(1):142-148.

PAN Fu-quan, PAN Hai-tao, WANG Zheng, et al. Analysis and modeling of drivers' visual characteristics at entrance and exit of undersea tunnel with cou-

pling of illuminance and longitudinal slope[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2021,21(1):142-148.

[5] 刘宁伟,梁 波,肖 尧,等.基于驾驶员反应时间特性的特长隧道行车安全[J].科学技术与工程,2020,20(26):10927-10933.

LIU Ning-wei, LIANG Bo, XIAO Yao, et al. Driving safety of extra-long tunnel based on reaction time characteristics of drivers[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26):10927-10933.

[6] WANG J, PERVEZ A, WANG Z W, et al. Crash analysis of Chinese freeway tunnel groups using a five-zone analytic approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,82:358-365.

[7] LIAO T Y, HU T Y, HO W M. Simulation studies of traffic management strategies for a long tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012,27(1):123-132.

[8] 潘 勇,罗 建,陈建忠,等.公路隧道交通拥堵疏散决策技术研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(3):936-942,954.

PAN Yong, LUO Jian, CHEN Jian-zhong, et al. Study on decision technology of traffic congestion and evacuation in a highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 936-942,954.

[9] 王 乾,蒋树屏,刘海龙,等.城市道路隧道交通事故特征分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增1):460-469.

WANG Qian, JIANG Shu-ping, LIU Hai-long, et al. Analysis on traffic accident characteristics of urban road tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 460-469.

[10] 黄 婷,陈 云,牟星宇,等.高速公路隧道提质升级交通安全设施典型问题及对策[J].公路,2020,65(4):256-261.

HUANG Ting, CHEN Yun, MOU Xing-yu, et al. Typical problems and countermeasures of upgrading and upgrading traffic safety facilities in expressway tunnels[J]. Highway, 2020, 65(4): 256-261.

[11] 吴 玲,张冬梅,刘浩学,等.高速公路中长途隧道出入口段视错觉减速标线设置研究[J].中国安全科学学报,2016,26(1):81-86.

WU Ling, ZHANG Dong-mei, LIU Hao-xue, et al. Study on setting optical illusion deceleration markings in entrance and exit section of freeway medium-long tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 81-86.

- [12] LU L J, LU J A, XING Y Y, et al. Statistical analysis of traffic accidents in Shanghai river crossing tunnels and safety countermeasures[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 2014: 1-7.
- [13] 杜志刚, 陈云, 倪玉丹. 公路隧道视线诱导设施典型问题及对策[J]. *公路*, 2019, 64(8): 153-157.
DU Zhi-gang, CHEN Yun, NI Yu-dan. Typical problems and countermeasures of sight guidance facilities in highway tunnels [J]. *Highway*, 2019, 64(8): 153-157.
- [14] 陆欢, 战晓峰, 杨文臣, 等. 高原山区公路环境下交通事故形态致因分析[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(5): 44-49.
LU Huan, JI Xiao-feng, YANG Wen-chen, et al. Cause analysis of different patterns of traffic accidents on plateau mountain roads[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(5): 44-49.
- [15] 钱华信, 梁映平, 吴晓明, 等. 双组分道路交通标线研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(35): 14892-14900.
QIAN Hua-xin, LIANG Yin-ping, WU Xiao-ming, et al. Research progress of two-component road marking[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(35): 14892-14900.
- [16] CARLSON P J, PARK E S, KANG D H. Investigation of longitudinal pavement marking retroreflectivity and safety[J]. *Transportation Research Record*, 2013(2337): 59-66.
- [17] HIGGINS L, MILES J D, CARLSON P, et al. Night-time visibility of prototype work zone markings under dry, wet-recovery, and rain conditions[J]. *Transportation Research Record*, 2009(2107): 69-75.
- [18] 杨波, 邓华. 基于驾驶员眼动特征的蓄能荧光标线诱导特性及设置方法[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(35): 14694-14700.
YANG Bo, DENG Hua. Inducing characteristics and setting method of energy storage fluorescent marking based on driver's eye movement characteristics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(35): 14694-14700.
- [19] 吴谨. 基于视觉特性的荧光标线涂料研发及模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
WU Jin. Development and simulation analysis of fluorescent marking coatings based on visual characteristics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [20] NANCE J, SPARKS T D. From streetlights to phosphors: A review on the visibility of roadway markings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 148: 105749.
- [21] 何锐, 梁映平, 解瑞松, 等. 铝酸锶长余辉发光材料在交通标线中的应用研究进展[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(3): 1-13.
HE Rui, LIANG Ying-ping, XIE Rui-song, et al. Research progress in application of strontium aluminate long afterglow luminescent materials in road markings[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(3): 1-13.
- [22] 石京, 木拉迪里江·拜克居力, 潘璇. 自发光人行横道对减少机动车“抢行”的效果研究[J]. *交通工程*, 2020, 20(1): 7-11.
SHI Jing, BAIKEJULI Muladilijiang, PAN Xuan. Study on the effect of self-luminating pedestrians crosswalks on reducing conflicts with motor vehicles [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2020, 20(1): 7-11.
- [23] COSTA M, LANTIERI C, VIGNALI V, et al. Evaluation of an integrated lighting-warning system on motorists' yielding at unsignalized crosswalks during nighttime[J]. *Transportation Research Part F*, 2020, 68: 132-143.
- [24] VILLA C, BREMOND R, SAINT JACQUES E. Visibility and discomfort glare of LED road studs[J]. *Lighting Research & Technology*, 2015, 47(8): 945-963.
- [25] ZHU B C, SONG C C, GUO Z Y, et al. Effectiveness of active luminous lane markings on highway at night: A driving simulation study[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1043.
- [26] 朱本成, 郭忠印, 宋灿灿. 透光混凝土基LED主动发光交通标线的设置[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 802-809.
ZHU Ben-cheng, GUO Zhong-yin, SONG Can-can. Fiber-optic parameters of light emitting diode active-luminous traffic markings based on light-transmitting concrete[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(6): 802-809.
- [27] 陈丰, 张婷, 黄雅迪, 等. 越江越海隧道入口段追尾事故风险预测模型研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(6): 167-175.
CHEN Feng, ZHANG Ting, HUANG Ya-di, et al. Rear-end crash risk prediction model on entrance section of cross-river and cross-sea tunnels[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(6): 167-175.