

公路隧道紧急停车带端墙立面标记方案优化设计

黄婷¹, 蒋锦港², 牟星宇¹, 杜志刚^{2*}

(1. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为了提升公路长大隧道中紧急停车带处的交通安全, 基于认知心理学原理等理论对隧道紧急停车带端墙进行了优化设计, 然后进行驾驶模拟试验对无立面标记方案、大面积弧形立面标记方案、条形与箭头组合方案对比研究。试验结果表明: 条形与箭头组合方案平均可视距离达 (307.4 ± 1.6) m, 满足计算识别视距要求, 平均视认反应时间最小, 为 1.176 s, 且立面标记面积比大面积弧形立面标记方案小 74.0%, 工程建设及维护费用更低, 该方案的改善效果最好。因此推荐在高速公路隧道紧急停车带端墙使用该方案。

关键词: 隧道交通安全; 隧道紧急停车带; 端墙立面标记; 可视距离; 视认反应时间

1 前言

截至 2018 年底, 中国大陆等级运营公路上的隧道有 17 738 座, 总长约 17 236 km, 其中特长隧道 1 058 处, 长隧道 4 315 处^[1]。高速公路隧道也是事故高发地段, 王晓燕(2017)^[2]分析 2012—2016 年隧道事故数据指出高速公路隧道死亡人数占全部隧道事故死亡总数的 59.4%, 平均每年死亡约 137 人; 钟鼎文(2017)^[3]统计调查高速公路隧道事故得到特长隧道、长隧道平均事故占比数为 64%, 而发生在高速公路隧道中间地段的交通事故为 2.68 起/(km/年), 为事故多发地段。而在不设置硬路肩或硬路肩宽度小于 2.5 m 的山岭特长隧道和长隧道, 应设置紧急停车带(750 m/道), 但是紧急停车带处横断面突变, 端墙形成障碍物, 是典型交通安全隐患^[4]。研究表明: 驾驶人在行驶过程中感知到的交通信息中, 视觉信息占 80% 以上, 且 95% 都是动态视觉信息^[5-6]。而通常隧道内空间狭窄封闭、光环境单调昏暗, 隧道紧急停车带端墙与周边环境区分度小, 难以辨识, 极易诱发不良驾驶行为, 并导致交通事故。例如 2012 年在瑞士南部瓦莱州境内 9 号高速公路隧道内发生了一起大巴车与隧道中部紧急停车带端墙相撞的重大交通事故, 共造成 28 人死亡; 2019 年在中国广西桂三高速公路宛田合作村隧道

内, 一辆大型普通客车撞上了紧急停车带端墙, 造成了 4 人死亡。

董凯(2018)^[7]指出: 隧道内道路标识不足、视线诱导设施设置不当等因素是导致交通事故的主要原因之一。因此改善高速公路隧道紧急停车带处的视觉环境, 对于提升隧道安全具有重要意义。为了改善公路隧道中部的行车安全, 杜志刚(2018)^[8]等提出在隧道中部构建视线诱导系统来增强隧道交通安全。立面标记作为视线诱导设施的一种, 可起到警示驾驶人注意近旁有高出路面或车行道内的构造物, 防止车辆碰撞构造物; 傅磊(2018)^[9]指出在隧道入口洞门端墙面涂反光立面标记可加强对驾驶人的警示效果及安全引导; 王少平(2013)^[10]结合行车轨迹和行车速度分析了在隧道紧急停车带路段处的驾驶行为变化特征, 并给出相关改善措施。

总体而言, 中国高速公路隧道光环境与一般道路有显著差异, 隧道中部光环境单调昏暗, 而紧急停车带等特殊路段更易导致交通事故, 所以在公路隧道, 尤其是在隧道特殊路段设置一些诱导设施能够提升隧道诱导性和安全性。黄婷(2019)^[11]研究指出在隧道洞口添加视线诱导系统能够显著提高隧道洞口接近段的视认性; 陈柳晓(2017)^[12]提出一种设置在隧道入口的空间视错觉减速景观, 它能够起到警示效果和减速效果, 满足驾驶员的行车舒适性; 郑展骥(2017)^[13]指出在公

收稿日期: 2021-04-03(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51578433); 贵州省交通运输厅科技项目(编号: 2017-123-031)

作者简介: 黄婷, 女, 高级工程师。E-mail: 284594815@qq.com

* 通信作者: 杜志刚, 男, 博士, 教授。E-mail: zhig_du7@163.com

路隧道内设置诱导系统能有效降低驾驶员的反应时间,增强隧道交通安全。但是目前针对隧道研究大多集中在隧道出入口和中间普通路段,隧道紧急停车带视线诱导设施对行车安全的影响缺乏定量评价指标,紧急停车带立面标记方案优化不足^[14-15]。该文拟通过研究隧道紧急停车带端墙立面标记的布置方案和评价指标,以期提升高速公路隧道中部交通安全提供新方法。

2 隧道紧急车带视认分析

2.1 识别视距

由于隧道中部光环境单调昏暗、参照信息少、难以辨识前方车辆及路侧障碍物等,导致驾驶人较大的视觉负荷与不良驾驶行为;同时隧道内紧急停车带区域隧道断面宽度发生剧烈过渡,且渐变段长度比一般路基紧急停车带渐变段长度要短,紧急停车带端墙往往会成为障碍物,驾驶人如果无法及时识别就会造成交通事故,所以提高紧急停车带的视距尤为重要。接近紧急停车带过程中,驾驶人需提前辨识端墙、判别车辆运动轨迹是否偏离行车道、前方道路状况,并在调整车速、停车、修正车道、变换车道等几种行为中做出决策。所以隧道紧急停车带端墙立面标记设计视距采用识别视距,来提供更多的视认反应时间,并提供额外的安全和操纵空间。

识别视距由认知距离和行动距离两部分组成。其中认知距离分为目视前方、发现危险、辨识风险、应变 4 个过程,行动距离又称为完成动作长度。考虑到最不良的条件下需要的视距最长,所以对驾驶人发现车辆出现故障或可能出现故障后,从左侧车道变道进入右侧紧急停车带,且不会对隧道内的交通造成影响或带来交通事故隐患的状况进行分析。其中将完成动作过程分为 3 个部分(图 1):① 变道过程:采取动作后,车辆从左侧车道安全变换到右侧车道,距离为 L_1 ;

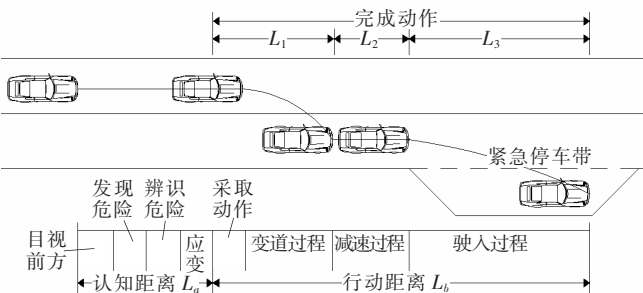


图 1 识别视距

② 减速过程:车辆到达右侧车道后减速,准备进入紧急停车带,距离为 L_2 ;③ 驶入过程:车辆驶入紧急停车带,距离为 L_3 。

其中,识别视距可以参照 JTG B01—2014《公路工程技术标准》规范,如表 1 所示。

表 1 规范识别视距

设计速度/ (km · h ⁻¹)	停车视距/ m	识别视距/m	
		单纯	复杂
60	75	170	240
80	110	230	300
100	160	290	380
120	210	350	460

该文研究的对象为高速公路隧道,设计速度为 80 km/h,所以公路隧道紧急停车带端墙立面标记的规范识别视距,经查询为 300 m,但是规范只是保证了最低安全视距要求,为了进一步提升交通安全性,公路隧道紧急停车带端墙立面标记的设计识别视距可以根据公式具体求得。

认知距离长度 L_a :

$$L_a = Vt \tag{1}$$

式中: L_a 为认知距离长度(m); V 为设计速度(m/h); t 为识别时间(s),一般采用 2.5 s。

王少平^[10]对左侧车辆要想进入紧急停车带这一过程进行分析,得知在限速 80 km/h 下,变道过程 L_1 距离为 67 m,减速过程 L_2 距离为 141 m。其中紧急停车带长度为 40 m,所以 L_3 距离为 40 m。

行动距离长度 L_b :

$$L_b = L_1 + L_2 + L_3 \tag{2}$$

根据式(1)、(2)求得的认知距离的长度为 56 m,行动距离的长度为 248 m。公路隧道紧急停车带端墙立面标记的具体设计识别视距为两者之和,为 304 m。

2.2 评价指标

由于驾驶人未能及时视认紧急停车带和判断出行车方向是导致交通事故的重要原因,所以该文以不同隧道紧急停车带端墙立面标记方案的实际可视距离是否满足识别视距要求,以及驾驶人是否能及时判断出行车方向为评价标准。该文视认距离的评价指标为:视认距离(m)=驾驶人判断出隧道紧急停车带时驾驶人与隧道紧急停车带的距离。

视认反应时间指标刺激作用于驾驶人到明显的反应所需的时间。该文视认反应时间衡量标准为:视认反应时间(s)=驾驶人看到前方有异样时刻—判断

出行车方向按下按钮的时刻(无论判断正确与否)。

通过 3ds Max 软件和 e-prime 平台进行模拟驾驶试验,实际可视距离数据通过试验人员人工记录,视认反应时间由 e-prime 获取。通过上述理论可知:试验中,在高速公路隧道中实际可视距离大于设计视距 304 m 时为最安全,大于规范要求 300 m 且小于 304 m 时较为安全,小于 300 m 时则不安全。而视认反应时间越小,即能及时判断出行车方向,说明此方案的改善效果也越好^[13]。

3 端墙立面标记方案优化设计

3.1 设计原理

(1) 认知心理学理论

认知心理学是指采用信息加工观点研究认知过程。在道路上,驾驶人认知交通信息时间越短就越安全。而标志的核心功能就是帮助驾驶者导出道路信息,“导”字是指本身起到指导的作用;“识”在“指导”之下,主体完成了“识别”的行为过程^[16]。要保证交通安全,驾驶人需要时刻注意交通标志、前方道路方向、障碍物等重要交通元素以及及时认知和应对处理复杂情况。标识导向系统,通过标识符号、箭头、色彩等设计元素,能够有效地指引用户完成相应的目标搜索任务^[17]。刘景升(2018)^[18]通过试验表明不同类型安全标志视觉关注自上而下为提示、禁止、警告、指示;雋志才(2005)^[19]采用特征说理论解释了标志的独特性有利于驾驶人的识别。图形导识设计中采用具有方向性的线条或图形进行视觉诱导,简洁明了传递方位信息^[20]。

立面标记作为视线诱导设施的一种,设置在紧急停车带端墙上能够对驾驶人起到警示作用。通过对紧急停车带端墙立面标记进行图形设计,加强驾驶人紧急停车带的认知能力,除了能起到提醒驾驶人注意在车行道内或近旁有高出路面的构造物,以防止碰撞的作用外,还有增加方向诱导作用,增加安全性。所以该文从认知心理学理论角度出发,设计隧道紧急停车带端墙立面标记方案,进而提升警示性和诱导性。

(2) 视觉成像原理

利用简易视觉成像原理(不考虑物体亮度、环境能见度等)^[21],提升紧急停车带端墙立面标记的理论可见距离。如图 2 所示,目标物体视点高度为 H ,人眼可见物体最小角度为 α ,则人眼可视距离 L 为:

$$L = H / \left[2 \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (3)$$

由式(3)可知:目标物体越高越宽,即视点越高越宽,人的理论可见距离越长。所以该文将通过改变紧急停车带端墙立面标记的高度和宽度,来改变隧道紧急停车带端墙立面标记的可见距离。

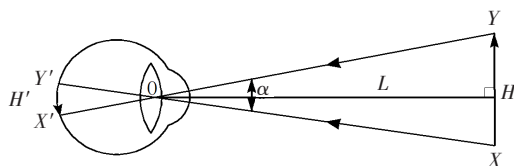
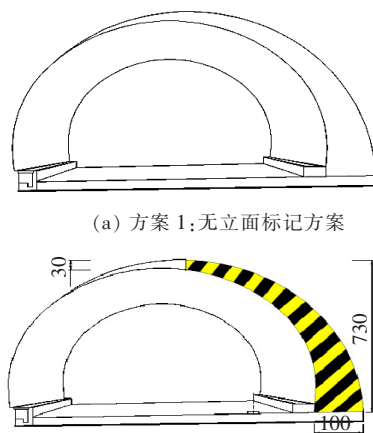


图 2 视觉成像

3.2 方案设计

该文研究对象为高速公路隧道,结构为分离式独立双洞隧道,限高 5.0 m,车道宽 3.75 m,左侧向宽 0.5 m,右侧向宽 0.75 m,检修道宽度 0.75 m。紧急停车带宽度 3.5 m,有效长度 40 m。根据调查得知, JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》对隧道紧急停车带区域缺少针对性规定,更没有研究紧急停车带诱导设施方案,所以大部分紧急停车带端墙采用方案 1[图 3(a)],端墙无立面标记,作为对照组。但是中国已有部分隧道对紧急停车带端墙采用端墙大面积弧形立面标记进行改善(方案 2),如图 3(b)所示,但是同时增加了工程成本与养护难度,也会对驾驶人产生眩光作用。



(b) 方案 2:大面积弧形立面标记方案

图 3 改善前方案(单位:cm)

针对隧道紧急停车带的改善设计主要包括两部分:可视距离和诱导性功能。首先是可视距离的改善设计:根据简易视觉成像原理,视点越高越宽,可视距离 H 越长,所以采用 30 cm 宽条状弧形黄黑立面标

记。其次是增强诱导性:根据认知心理学理论,增加立面标记的方向性信息,所以进行图形设计,外侧用宽 30 cm、长 100 cm 的条形与箭头组合立面标记样式,指向行车方向(方案 3)。具体如图 4 所示。

不同方案的初步评价具体见表 2。由于紧急停车带端墙立面标记的视认性还受汽车车灯照度、立面标记逆反射率等因素的影响,为了更好地证明隧道紧急停车带端墙立面标记方案的优越性,不同方案的视认

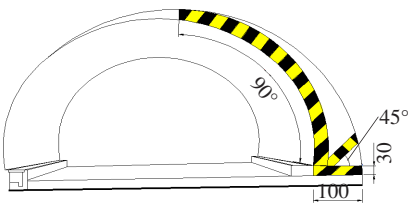


图 4 方案 3:条形与箭头组合立面标记方案(单位:cm)

性是否满足识别视距要求和对驾驶人判别行车方向的诱导性,还需试验进一步验证。

表 2 不同方案初步对比

方案	立面标记特色	最大高度/cm	最大宽度/cm	立面标记面积/m ²	方向诱导信息强度
1	无立面标记,弱反光				无
2	大面积弧形块,超强级反光膜	730	100	15.29	弱
3	小面积条形+箭头,超强级反光膜	730	100	3.97	强

4 试验验证

4.1 试验设计

为比选出不同方案的优劣性,试验采取 3ds Max 构建高速公路隧道模型进行模拟驾驶试验,其中试验设备为武汉理工大学智能交通系统研究中心自主研发的驾驶综合模拟器,由 DHN 激光投影机、图形工作站、中控系统(CS8100M)组成。该设备具有良好的操纵真实感和沉浸感,用于驾驶员的驾驶行为特性研究。

选用灯具进行安装配置,模拟隧道照明在 100% 标准照度下,驾驶人驾驶小车通过隧道,车速为(80±2.5) km/h,并在 e-prime 平台上播放视频。其中 100% 标准照度根据 JTJ 026.1—1999《公路隧道通风照明设计规范》设置:间距为 10 m 双侧对称布设 80 W 的高压钠灯。每个方案都会构建车辆运动轨迹正常和运动轨迹偏离车道中间两个视频。

向社会招募有驾驶经验且矫正后视力 5.0 以上的被试者 30 人,其中分为 20~30、30~40 和 40~50 岁 3 个年龄段,每个年龄段各 10 人。

被试者的每个试验场景由 3 种方案组成,方案顺序随机,其中一个方案的运动轨迹偏离车道中间,并保证每个方案的运动轨迹偏离车道中间的次数相同。被试者在每个场景分别需重复 3 次试验,30 名被试者共计 90 次试验。

试验流程为:① 在大屏幕上投影仿真视频,大屏幕与被试者的距离设置为 6 m;② 向被试者讲解试验

流程,并让被试者熟悉试验环境;③ 被试者在提示下进行模拟驾驶试验;④ 播放视频,起点为隧道洞门,被试者判断出紧急停车带时按下仪器上对应按钮,记下距离,随后继续,驾驶人判断出行车方向并按下按钮,随后直到仿真视频结束;⑤ 暂停 2 min 让被试者休息;⑥ 随后从步骤④开始下一个仿真视频,直至重复 3 次结束,换下一位被试者;⑦ 用 e-prime 软件导出试验数据进行整理,计算时间间隔为有效视认反应时间;⑧ 对试验结果取平均值,得到各组的有效视认距离和视认反应时间。

4.2 试验结果分析

4.2.1 视认距离分析

不同方案不同年龄的视认距离分析结果见表 3。由表 3 可知:

(1) 比较同一方案下不同年龄的视认距离,视认距离随着年龄的增加而减小,不同年龄段间平均下降幅度达 2.95%。因为随着驾驶人年龄增大,人眼黄斑化、透光率减弱等因素导致视认距离的降低。

(2) 比较各个方案的视认距离平均值,方案 1 的公路隧道紧急停车带视认距离为(101.5±1.5) m,远小于规范识别视距 300 m,是不安全的。而方案 2 和方案 3 的紧急停车带视认距离分别为(329±1.5)、(307±1.6) m,能够满足规范的识别视距 300 m 要求,同时能够满足更安全的设计识别视距 304 m 要求。对比方案 1 和方案 2 的数据可知:方案 2 能大幅度提升被试者对紧急停车带的视认距离,达 225.1%。对比方案 1 和方案 3 可知,方案 3 能够提升被试者对

紧急停车带的视认距离,但不如方案 2 效果明显,达 203.4%。比较两组视认距离提升率,年龄越大改善幅度越大,方案 2、3 的 40~50 岁年龄段视认距离提升程度分别高达 240.6%和 217.9%。表明方案 2 和方案

3 都能显著提升驾驶人对紧急停车带的视认距离,且效果为:方案 2>方案 3>方案 1。

利用 SPSS 软件对视认距离数据进行单因素方差分析,所得结果如表 4 所示。

表 3 不同方案不同年龄的视认距离分析

年龄/ 岁	视认距离/m			方案 2 较方	方案 3 较方
	方案 1	方案 2	方案 3	案 1 提升/%	案 1 提升/%
20~30	107.8±1.2	335.4±1.6	311.5±1.8	211.0	188.9
30~40	101.3±1.4	327.8±1.2	307.3±1.3	223.6	203.4
40~50	95.4±1.8	324.9±1.8	303.2±1.6	240.6	217.9
平均值	101.5±1.5	329.4±1.5	307.4±1.6	225.1	203.4

表 4 视认距离单因素方差分析结果

项目	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	948 020.705	2	474 010.352 39.593	11 972.167	0.001 0
组内	3 444.564	87			
总数	951 465.269	89			

由表 4 可知:以 0.05 为显著性水平,不同公路隧道紧急停车带端墙立面标记方案对驾驶人视认距离的影响显著。

4.2.2 视认反应时间分析

不同方案不同年龄的视认反应时间分析见表 5。
由表 5 可知:

表 5 不同方案不同年龄的视认反应时间分析

年龄/ 岁	视认反应时间/s			方案 2 较方	方案 3 较方
	方案 1	方案 2	方案 3	案 1 降低/%	案 1 降低/%
20~30	2.070±1.031	1.449±0.823	1.096±0.523	29.98	47.04
30~40	2.317±1.134	1.561±0.721	1.174±0.563	32.61	49.33
40~50	2.686±1.241	1.767±0.642	1.259±0.506	34.21	53.14
平均值	2.357±1.353	1.592±0.729	1.176±0.531	32.27	49.84

(1) 比较同一方案下不同年龄贺驶人员,视认反应时间随着年龄的增加而增大,不同年龄段间平均增加幅度达 10.52%。因为随着驾驶人年龄增大,操作能力、注意力下降等因素导致视认反应时间增大。

(2) 比较各个方案的视认反应时间平均值,对比方案 1 和方案 2 的数据可知:方案 2 能大幅度降低被试者对紧急停车带的视认反应时间,达 32.27%。对比方案 1 和方案 3 可知,方案 3 能够降低被试者对紧急停车带的视认反应时间,效果比方案 2 明显,达 49.84%。比较两组视认反应时间降低率,年龄越大改善幅度越大,方案 2、3 的 40~50 岁年龄段视认反应时间提升程度分别高达 34.21%和 53.14%。表明方案

2 和方案 3 都能显著降低驾驶人对紧急停车带的视认反应时间,且效果为:方案 3>方案 2>方案 1。

利用 SPSS 软件对反应时间数据进行单因素方差分析,结果如表 6 所示。

表 6 视认反应时间单因素方差分析结果

项目	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	21.538	2	10.769 0.123	87.729	0.001 6
组内	10.680	87			
总数	32.218	89			

由表 6 可知:以 0.05 为显著性水平,不同公路隧道紧急停车带端墙立面标记方案对驾驶人反应时间的

影响显著。

5 结 论

通过室内仿真试验对不同紧急停车带端墙立面标记方案进行试验验证,得到如下主要结论:

(1) 公路隧道紧急停车带端墙不设置立面标记的可视距离为 (101.5 ± 1.5) m,远小于规范要求识别距离 300 m,不够安全。

(2) 紧急停车带的视认距离和视认反应时间与年龄有关系,视认距离随年龄增长而下降,不同年龄段间平均下降幅度达 2.95%,视认反应时间随年龄增长而增大,不同年龄段间平均增加幅度达 10.52%。

(3) 大面积弧形立面标记方案平均视认距离为 (329.4 ± 1.5) m,满足规范识别视距 300 m 的要求,也满足更安全设计识别视距 304 m 要求且提升率最大,为 225.1%,能保障交通安全。小面积条形+箭头方案平均视认距离为 (307.4 ± 1.6) m,也满足更安全设计识别视距 304 m 的要求,也能保障交通安全。但是条形与箭头组合立面标记方案平均视认反应时间最小,为 1.176 s,说明诱导性最强。小面积条形+箭头方案面积比大面积弧形块方案少 74.0%,工程投资少,易于养护,不容易产生眩光,更具经济性。

(4) 综合比较经济性、视认距离和视认反应时间,该文建议在实际工程中隧道紧急停车带端墙立面标记方案实施的优先等级为:条形+箭头组合方案>大面积弧形方案。今后研究中还需要进一步对立面标记对运行车速大于 80 km/h 的车辆视认性、驾驶行为的影响开展研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[R], 2017.
- [2] 王晓燕,马兆有,董宪元. 我国隧道交通事故分析及管理对策研究[J]. 交通工程, 2017, 17(6): 33—37.
- [3] 钟鼎文. 高速公路隧道交通事故特征分析研究[J]. 科技创新与应用, 2017(22): 183, 185.
- [4] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S].
- [5] Underwood G, Chapman P, Bowden K, et al. Visual Search While Driving: Skill and Awareness During Inspection of the Scene[J]. Transportation Research Part F Psychology & Behaviour, 2002, 5(2): 87—97.
- [6] Underwood G, Chapman P, Brocklehurst N, et al. Visual Attention While Driving: Sequences of Eye Fixations Made by Experienced and Novice Drivers[J]. Ergonomics, 2003, 46(6): 629—646.
- [7] 董凯. 隧道交通安全设施设置的探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(1): 180—183, 192.
- [8] 杜志刚,徐弯弯,向一鸣. 基于视线诱导的公路隧道光环境优化研究框架[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 122—129.
- [9] 傅磊. 永吉高速公路隧道入口处安全设施设计[J]. 交通世界, 2018(22): 82—83.
- [10] 王少平. 高速公路隧道紧急停车带对行车安全性影响分析[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2013.
- [11] 黄婷,张世娟,蒋锦港,等. 公路隧道入口洞门立面标记视认性实验研究[J]. 公路, 2019, 64(12): 204—210.
- [12] 陈柳晓,刘唐志,段萌萌. 基于视错觉的隧道入口减速景观设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 99—103.
- [13] 郑展骥,杜志刚,李平凡. 长隧道韵律型视觉环境设计研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1 800—1 805.
- [14] 江治东,刘国盼,宋超. 高速公路隧道入口路段驾驶人视觉注意转移规律研究[J]. 公路交通技术, 2016, 32(1): 122—125, 129.
- [15] WANG Y, WANG L, WANG C, et al. How Eye Movement and Driving Performance Vary Before, During, and After Entering a Long Expressway Tunnel: Considering the Difference of Novice and Experienced Drivers under Daytime and Nighttime Conditions [J]. Springer Plus, 2016, 5(5): 1—10.
- [16] 郭娟,钟畅. 城市导识系统设计方法与数字化展示的思考[J]. 大众科技, 2009(6): 90—91.
- [17] 章莉莉. 导向设计[M]. 上海: 上海大学出版社, 2005.
- [18] 刘景升,班涛,周霏. 基于视觉注意理论的安全标志识别研究[J]. 南方农机, 2018, 49(13): 48—49.
- [19] 隗志才,曹鹏,吴文静. 基于认知心理学的驾驶员交通标志视认性理论分析[J]. 中国安全科学学报, 2005(8): 8—11, 113.
- [20] 徐燕. 旅游城市导识系统的视觉要素研究[J]. 包装工程, 2018, 39(6): 266—270.
- [21] 张云熙. 关于人眼视觉的一些计算[J]. 光学技术, 1988(5): 6—11.