

高速公路隧道线性诱导系统设置 方法及效果评估

杨永正^{1,2}, 杜志刚^{1,2}, 梅家林^{1,2}

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063; 2. 交通信息与安全教育部工程研究中心, 武汉 430063)

摘要:为改善高速公路隧道交通安全,提出了运用线条形视线诱导设施,提高隧道局部亮度和对比度,形成勾勒隧道轮廓及道路线形走向的线性诱导系统的建议。首先,搭建隧道模拟场景,开展驾驶模拟实验和问卷调查,分析各线性诱导设施/系统对驾驶人视觉、心理与驾驶任务的影响;然后,探究各诱导设施的尺寸、方向、连续性以及组合方式对视觉参照系优化与空间路权感知的作用效果。结果表明,线性诱导系统能够提升隧道环境的显著度,降低视觉信息的获取难度,降低驾驶人的紧张心理。这是因为纵向诱导设施有利于明确道路边界和前进方向,增强驾驶人对位置的感知;竖向和横向诱导设施有利于明确隧道轮廓,增强驾驶人对速度的管控。现将不同类型诱导设施合理组合,以期能够取长补短,发挥各设施的共同优势,实现隧道交通安全的综合提升。

关键词:交通运输系统工程;高速公路隧道;线性诱导系统;视觉参照系;交通安全

中图分类号:U453.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)12-3885-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240458

Setting method and effect evaluation of linear guiding system in highway tunnels

YANG Yong-zheng^{1,2}, DU Zhi-gang^{1,2}, MEI Jia-lin^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Engineering Research Center of the Ministry of Transportation Information and Safety Education, Wuhan 430063, China)

Abstract: To improve traffic safety in highway tunnels, it is suggested to use line shaped visual guidance facilities to enhance local brightness and contrast of the tunnel, and form a linear guidance system that outlines the tunnel outline and road alignment. Firstly, set up a tunnel simulation scenario, conduct driving simulation experiments and questionnaire surveys, and analyze the impact of various linear induction facilities/systems on drivers' vision, psychology, and driving tasks; Then, explore the effects of the size, direction, continuity, and combination of various induction facilities on the optimization of visual reference frames and spatial rights-of-way perception. The results show that linear guiding system can effectively

收稿日期:2024-04-26.

基金项目:国家自然科学基金项目(52072291);国家留学高水平公派研究生项目(202306950072).

作者简介:杨永正(1995-),男,博士研究生.研究方向:隧道交通安全.E-mail:yyongzheng@yeah.net

通信作者:杜志刚(1977-),男,教授,博士.研究方向:道路与隧道工程.E-mail:zhig_du7@163.com

enhance the salience of the tunnel environment, reduce the difficulty of obtaining visual information, and ease the driver's nervousness. Longitudinal linear guiding facilities are conducive to clarifying the road boundary and the direction of travel, and enhancing the driver's perception of location. Vertical and horizontal linear guiding facilities help to clarify the outline of the tunnel and enhance driver's speed control. Through a reasonable combination of different linear guidance facilities, to complement the shortcomings, to achieve the overall improvement of driving safety indicators.

Key words: engineering of communication and transportation system; highway tunnels; linear guiding system; visual reference system; driving safety

0 引言

目前,我国高速公路隧道的建设规模和质量已居于世界前列^[1]。然而,随着隧道里程的增长,交通安全和能耗问题日益严重。研究表明^[2],公路隧道交通事故率高达普通路段的7倍,且死亡率为同期全部事故的1.6倍。此外,隧道路段存在事故危害大、救援难度高等问题,处理不当极易引发二次事故,甚至导致全线交通中断。高速公路隧道作为高速路网的咽喉节点,具有车流量大、运行速度快、重要性高等特点,面临着十分严峻的交通安全压力。提高高速公路隧道安全运营水平,对保障道路交通系统运营效率、维护驾驶人的生命财产安全至关重要。

在隧道交通安全研究方面,现有研究表明^[3],独特的交通环境是引发隧道交通事故发生的重要原因。高速公路隧道位于地下,空间狭小密闭、光环境不良、幽闭昏暗、驾驶人心理压力。在进入隧道之后,驾驶人的瞳孔面积变化虽趋于缓和,但注视、扫视频率增加,表明隧道环境会增大驾驶人视觉信息的获取难度^[4]。王首硕等^[5]分析了公路隧道对驾驶人心理生理的影响,发现照明环境不良会导致驾驶人心理恐慌。Yeung等^[6]对公路隧道与露天道路光环境进行对比,研究发现,驾驶人在隧道区域的驾驶态度通常更消极。此外,部分驾驶人存在“逃逸心理”,迫切想要离开隧道,变得激进易怒,诱发违规变道、超速等行为,隧道内追尾、刮擦事故高发可能与此有关。与此同时,隧道内部环境单调,缺乏有效的视觉参照物,驾驶人反应时间变慢,很容易产生视错觉,严重时甚至引发交通事故^[7]。当前的文献对隧道交通安全进行了广泛探讨,认为隧道光环境差、视觉信息获取困难是诱发交通事故的重要原因。因此,改善光环境是维护隧道交通安全的重要途径。

良好的隧道照明,是车辆正常行驶的前提,《公路隧道设计规范》(JTGD70/2-2014)给出了不同类型隧道的最低照明亮度。隧道光环境与交通安全呈正相关,加强照明能够显著改善隧道驾驶条件。提升隧道照明主要有3种途径:①通过增加照明灯具的功率或者数量提升照明亮度,但该方法低效粗放,会造成较大的能源浪费,性价比低^[8]。②通过优化灯具布置或使用新型材料等方法提高隧道局部亮度,进而提升驾驶人对隧道环境的感知^[9]。③智能调光,通过传感器实时监测隧道内外的亮度、车流量和车速,智能调控隧内亮度,实现“车来灯亮、车走灯暗/灭”,可以很好地兼顾隧道照明和节能^[10]。智能调光虽然可以平衡交通安全和照明能耗,但是受限于其可靠性和经济性,暂时无法大规模推广。因此,当前迫切需要一种经济、绿色、可靠的隧道交通安全改善方法。

在人、车、路、环境组成的交通系统中,人是车的操纵者、路的使用者、环境的感知者,是驾驶活动的主体。因此,道路的设计应该从“以人为本”,构建符合人因需求的道路交通环境,使“路适应人”,而不是“人适应路”。基于这一思想,部分学者提出了“自解释道路”概念,并运用具有“自解释”特征的视线诱导设施改善隧道交通安全。赵晓华等^[11]分析了长大隧道突起路标对驾驶人视觉特性的影响,研究发现,突起路标对驾驶人行为和心里有着显著影响。Du等^[12]分析了反光环对驾驶人空间感知能力的影响,研究表明,高速公路隧道反光环能够缩短驾驶人37%的反应时间。Jiao等^[13]分析了隧道侧壁人字形标志对驾驶人视觉的影响,研究认为,人字形标志能够提高驾驶人对公路隧道线形的感知。此外,在GB5768、D81、D82等规范中对合流诱导标、线形诱导标、轮廓标、突起路标等视线诱导设施进行了原则性的指导,只是对设施的应用场景、搭配方法还不够具

体,仍有赖于工程判断。

对隧道视线诱导设施的研究当前主要集中在分析单一设施对驾驶人/交通安全的影响,缺少系统化、理论化的研究,对安全提升机理不清楚、对各设施之间的配置方法不明确。本文对隧道视线诱导设施进行归纳和分类,从系统论的视角出发,提出线性诱导系统的概念,阐明其功能、应用场景,配置方法。同时,搭建驾驶模拟平台,从驾驶人因(驾驶人视觉、驾驶心理、驾驶任务)的角度验证所提出设置方法的合理性,探究不同线性诱导设施/系统对交通安全的改善机理。本文研究成果可为隧道视线诱导设施的运用提供理论依据,对隧道交安绿色提升有良好的参考价值。

1 线性视线诱导系统和空间路权

1.1 线性视线诱导系统

线性照明采用线条形灯具代替传统的点状照明,在照明的同时,能够有效勾勒出特定的图案,营造良好的艺术感和氛围感(见图1)。

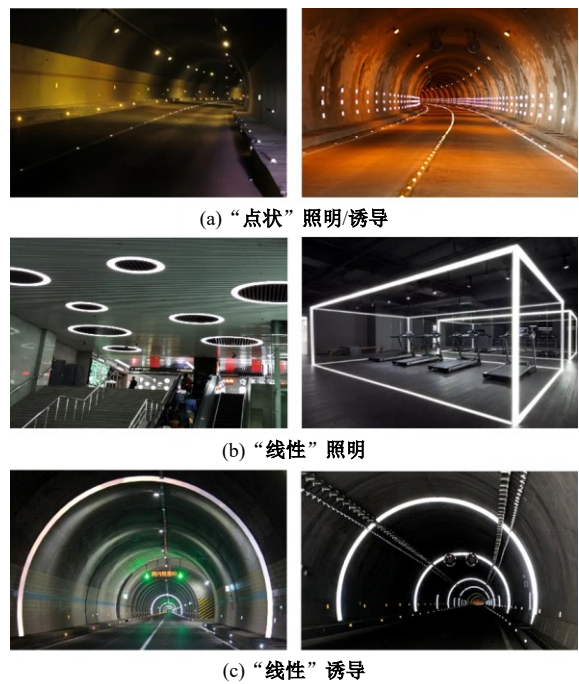


图1 点状照明、线性照明与线性诱导效果对比

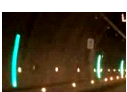
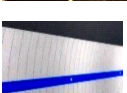
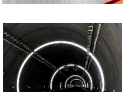
Fig.1 Comparison of the effect of point lighting, linear lighting and linear guiding

视线诱导的概念来自《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)(以下简称《细则》)。基于《细则》,并借鉴线性照明的理念,提出线性视线诱导概念(简称“线性诱导”)。高速公路隧道线性诱导系统,采用线条形诱导设施,通过提

高局部空间亮度和对比度,勾勒隧道侧壁、检修道轮廓及道路线形走向,营造良好的空间感和层次感,发挥轮廓诱导和线形诱导功能。典型的线性诱导设施如表1所示。

表1 典型线性诱导设施归纳分析

Table 1 Inductive analysis of typical linear guiding facilities

元素类型	设施示例	应用示例
点状信息	突起路标	 
竖向短线段 0.2 m<长<0.5 m	矩形轮廓标	 
竖向中线段 0.5 m≤长<2 m	弹性交通柱	 
竖向长线段 2 m≤长	反光条 /竖向线形诱导标	 
纵向短线段 长<1.50 m	路缘短立面标记	 
纵向中线段 1.50 m≤长<3 m	路缘长立面标记/横向诱导标	 
纵向长线段 3 m≤长	腰带线	 
环状信息 6 m≤长	LED轮廓带 /洞口环形立面标记	 

在照明形式上,线性诱导系统采用逆反射、蓄能自发光、LED发光、线性照明相结合的方式。在设施形状上,线性诱导系统以线(长/中/短)、环为主、以点为辅。公路隧道线性诱导系统具有以下特点。

- (1)更大尺寸,远端可视。相比点状诱导设施,线条形设施的尺寸更大,可视性更好。
- (2)形式多样,灵活组合。线性诱导设施形式多样,长度有长、中、短,方向有横向、纵向、竖向,形状有条形、环形,可根据需求组合使用。
- (3)发光均匀,减少眩光。发光面积更大,光照柔和均匀,减小对驾驶人的视觉刺激,提高视觉舒适性。
- (4)勾勒轮廓,明确限界。线性诱导设施贴近隧道限界设置,能很好地勾勒隧道轮廓及道路线形。

(5)节能环保,全生命周期成本低。LED 发光能耗仅为白炽灯的 1/10,为节能灯的 1/4,寿命可达 1 万 h 以上^[14]。在改善隧道交通安全的同时,具有较低的建设、运营、养护成本。

基于《细则》和现有研究,结合驾驶人视觉信息的感知规律,对线性诱导设施的组合、排列等方面做具体化研究,总结诱导设施的空间搭配原则如下。

(1)大尺寸、线条形设施优先。大尺寸、线条形设施有更好的可视性,诱导效果更佳。长线条的可视性优于短线条,短线条的可视性优于点状信息^[12]。

(2)高、中、低位搭配,全高度诱导。设施高度低于小汽车驾驶人注视高度的为低位诱导($< 1.2\text{ m}$),位于驾驶人 1~2 倍注视高度的为中位诱导($1.2 \sim 2.4\text{ m}$),高于驾驶人 2 倍注视高度的为高位诱导($> 2.4\text{ m}$)^[15]。不同高度的线性诱导设施相结合,构建全高度、多层次的诱导体系。

(3)远、中、近端搭配,全距离可视。环状、长线段设施远端可视,在复杂识别视距中警示驾驶人。中线段设施中距离可视,在简单识别视距显示隧道线形。短线段、点状设施近端可视,在停车视距内增强驾驶人对交通环境的感知^[16]。将不同可视距离的线性诱导设施相结合,能构建全距离、多等级的诱导体系。

(4)横、纵、竖向设施相结合。横向路权受车道线、隧道侧壁的影响较大,对车道保持和轨迹控制尤为重要。纵向路权受道路线形的影响较大,对跟驰行为有重要影响。竖向路权受到隧道净空和限界的影响较大,主要体现在对轮廓诱导的影响。立体式线性诱导系统能够强化驾驶人对空间路权的感知,有利于驾驶人控制车速、保持车距、明确方向,路径选择。将横、纵、竖向线性诱导设施相结合,能构建立体式、多维度的诱导体系。

1.2 空间路权与视觉参照系

空间路权是指驾驶人在一定空间内使用道路的权利,遵守路权是隧道安全行驶的重要前提^[17]。空间路权具体包括横向、纵向和竖向的路权,高速公路隧道空间路权划分如图 2 所示。

参照系是物理学中的基本概念。本文据此提出驾驶过程中视觉参照系的概念,该参照系主要包括各种交通工程设施(标线、标志)、道路景观、路侧广告等,可为驾驶人判断自身车辆的方向、位

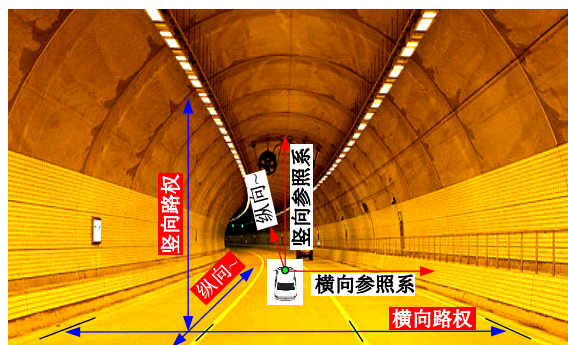


图 2 空间路权与视觉参照系

Fig. 2 Spatial right-of-way and visual reference system

置、车速及车距提供直观依据^[18]。视觉参照系与交通安全息息相关,安全的视觉参照系应该有良好的显著性。提升视觉参照系能够明确隧道限界、勾勒车道走向,改善隧道昏暗密闭环境,缓解驾驶人的恐慌心理,为驾驶人提供良好的位置感、速度感,并降低驾驶人的视错觉。线性诱导系统、空间路权与视觉参照系之间的关系如图 3 所示。

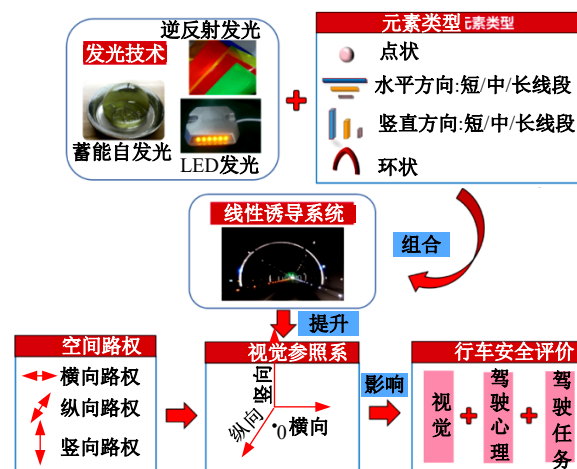


图 3 线性诱导系统对隧道交通安全的改善框架

Fig. 3 Improvement framework of linear guiding system for tunnel traffic safety

2 实验方案设计

2.1 隧道场景

为了验证线性诱导系统的有效性和诱导设施组合原则的合理性,本文对广东江罗高速沿线的王北凹隧道、三岔顶隧道等长大隧道进行调研,结合隧道的共同参数情况,搭建高速公路隧道模拟场景,具体参数如表 2 所示。

基于线性诱导理念,搭建 9 类线性诱导场景(仿真场景见图 4、设置参数见表 3)。其中,场景 1 无诱导设施,只有车道标线与灯具。场景 2、场景 3、场景 4、场景 5、场景 6 分别为单一诱导设施,场

表 2 隧道设计参数	
Table 2 Tunnel design parameters	
隧道特征	设计参数
隧道类型	双洞、单向三车道
隧道长度	2 000 m
车道宽度	3.75 m
限速	60~100 km/h
建筑净空高度	5 m
灯具设置方式	单排、左右两侧对称设置
灯具尺寸	0.3 m×0.6 m
灯具间距	5 m

景 2 为点状设施,场景 3、5 为纵向设施,场景 4、6 为竖向设施。场景 7 由两种纵向设施组成,场景 8 由两种竖向设施组成,场景 7 和场景 8 只包含单一维度的元素,无法构建立体式的诱导系统,也无法实现高-中-低位、远-中-近端可视的多层次诱导。场景 9 为场景 2、3、4、5、6 这 5 种设施的组合,各设施共同构建立体式视觉参照系。

通过比较场景 2~6 与场景 1,分析各种/各类诱导设施的功能和改善效果。通过比较场景 9 与场景 7~8,验证 1.1 节所提出的诱导设施空间搭配原则。

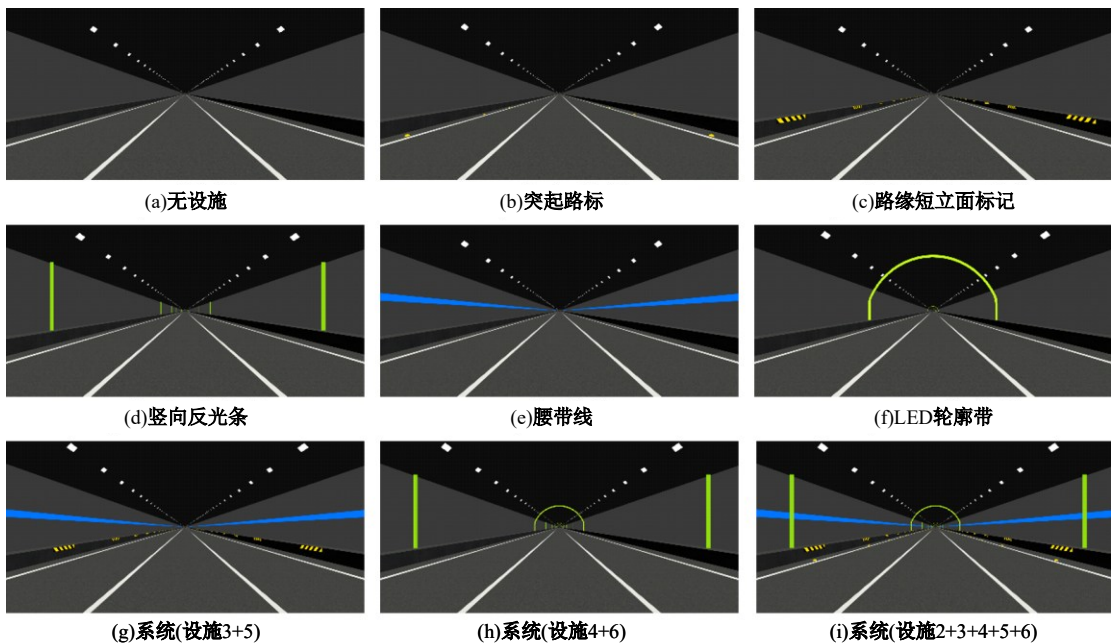


图 4 模拟场景

Fig. 4 Simulation scene

表 3 各场景的设置参数		
Table 3 Setting parameters of each scene		
场景	设置参数	备注
1. 无设施	—	原始场景
2. 突起路标	车道外边线两侧,间隔 10 m	点状、低位诱导、近端可视
3. 路缘短立面标记	黄黑色,长 2.5 m,宽 0.2 m,倾斜 45°,中心距地面 0.3 m,间隔 10 m	纵向中线段、低位诱导、中端可视
4. 竖向反光条	黄绿色,长 4 m,宽 0.2 m,间隔 50 m	竖向长线段、中位诱导、中端可视
5. 腰带线	蓝色、宽 0.3 m,中心距地面 2 m	纵向长线段、中位诱导、中端可视
6. LED 轮廓带	黄绿色,长 24 m,宽 0.3 m,间隔 250 m	环状(竖向+横向线段)、高位诱导、远端可视
7. 系统(3+5)	设置参数与场景 3、5 相同	简单线性诱导系统、低中位诱导、近中端可视
8. 系统(4+6)	设置参数与场景 4、6 相同	简单线性诱导系统、中高位诱导、中远端可视
9. 系统(2+3+4+5+6)	设置参数与场景 2、3、4、5、6 相同	复杂线性诱导系统、全高度诱导、全距离可视

2.2 数据采集

采用 UC-winroad 软件搭建仿真模型,驾驶模拟平台为武汉理工大学研发的 WUTITS-HD 模拟器,模拟 5 座小轿车在高速公路隧道的行驶场景,如图 5 所示。模拟平台以 30 Hz 的频率记录实

验数据,并在每一次实验结束后自动保存数据。实验采集了车辆坐标、速度、加速度、轨迹偏移、方向盘转角、油门、刹车等车辆运行参数,通过对车速特征和行车轨迹进行统计、分析,研究线性诱导系统对隧道驾驶任务的影响。

眼动数据采集设备为一台德国 ERG-ONEERS 公司生产的 Dikablis Professional Glasses 眼动仪,该设备采样频率为 60 Hz,瞳孔追踪精度为 0.05° ,视线追踪精度为 $0.1^\circ \sim 0.3^\circ$,可配合数据分析软件 D-Lab 采集和分析数据。

2.3 驾驶人

本文通过线下招聘与网络招聘结合的方法共招募了 30 位实验驾驶人,驾驶人信息统计如表 4 所示。全体实验驾驶人均有小型机动车驾驶证,并有着良好的身体状况以及心理状况,校正视力均在 0.8 以上,无色盲/色弱,实验前 3 天保持足够

表 4 驾驶人信息统计

Table 4 Drivers information statistics

性别	驾驶人类型	年龄	平均年龄	驾龄	平均行驶里程
男(18人); 女(12人)	高校师生(14人);出租车司机(8人);当地居民(8人)	22~58 岁	31.3 岁	1~4 年(8人);5~8 年(13人);>8 年(9人)	142 000 km

通过调查发现,高速公路隧道线形以直线段为主,在自由流条件下(不受其他车辆干扰),驾驶人倾向于在中间车道行驶。出于控制变量的考虑,驾驶人被要求在中间车道行驶,所有模拟场景为直线路段,照明灯具的设置情况相同,照明状况无差异。因此,实验中只有一个变量,即不同的设施场景。

在正式实验之前,先进行预实验,以加强驾驶人对实验平台的适应能力,并测试实验设备状态是否良好。在正式实验时,9 种交通场景随机排列。为了降低驾驶疲劳对后续实验的影响,9 种场景之间会有 8 次 2 min 的休息时间。在完成驾驶模拟实验后,开展调查问卷,获得驾驶人对不同场景的主观感受和评价。

3 视觉及驾驶心理

3.1 视觉信息获取

注视持续时间表征驾驶人在驾驶过程中处理驾驶相关信息所花费的时间,反映了驾驶人提取相关信息的难易程度。当前研究表明^[19],注视持续时间越长,注视区域内的信息获取难度越高,驾驶人的视觉负荷越大。

出于控制变量的考虑,本文在数据处理的过程中剔除了隧道进出口区域,只采用了 200~1 800 m 的隧道中间段。9 种场景的驾驶人注视持续时间的频率分布如图 6 所示。各场景注视持续时间主要位于 240~360 ms,各场景数据的离散性



图 5 驾驶模拟和实验设备

Fig. 5 Driving simulation and experimental equipment

的睡眠,没有服用药物。实验前对所有参与者进行实验操作培训,确保每一位驾驶人都能够明确实验流程。

相差较小。9 种场景的均值曲线分别集中在 $[320, 332]$ 、 $[313, 329]$ 、 $[305, 321]$ 、 $[296, 308]$ 、 $[281, 292]$ 、 $[283, 304]$ 、 $[270, 281]$ 、 $[274, 386]$ 、 $[252, 269]$ ms。相较于无设施场景(场景 1),各线性诱导设施/系统的注视持续时间均有所减小,对驾驶人视觉信息获取能力都有一定的改善。

通过注视持续时间表征驾驶人视觉信息获取能力 A_m ,各场景视觉信息获取的提升效果 $L_{A,m}$ 如下所示:

$$L_{A,m} = \frac{A_m - A_1}{A_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为各种交通场景(场景 1~9)。

提升情况如图 7 所示。由图 7 可知,各场景的注视持续视觉均值由低到高依次为:场景 9、场景 8、场景 7、场景 5、场景 6、场景 4、场景 3、场景 2、场景 1。相对于无设施场景(场景 1),场景 2~9 的视觉信息获取能力依次提升了 2.1%、4.9%、8.6%、12.9%、9.8%、14.4%、15.3%、23%。

3.2 驾驶心理调查

相关研究表明^[6],隧道路段环境封闭、光环境差、参照系单调,部分驾驶人在隧道内驾驶态度消极、心理紧张,并有快速离开隧道的想法。驾驶人完成实验后,填写相关问卷对场景进行打分,调查各场景空间路权的清晰明确程度,以及驾驶人在各场景的心理舒适程度。问卷采用五级打分法,具体分值如表 5 所示,具体得分情况如图 8 所示。

由图 8 可知,不同场景的空间路权清晰度有着较大差异,同一场景的横向、纵向与竖向路权清

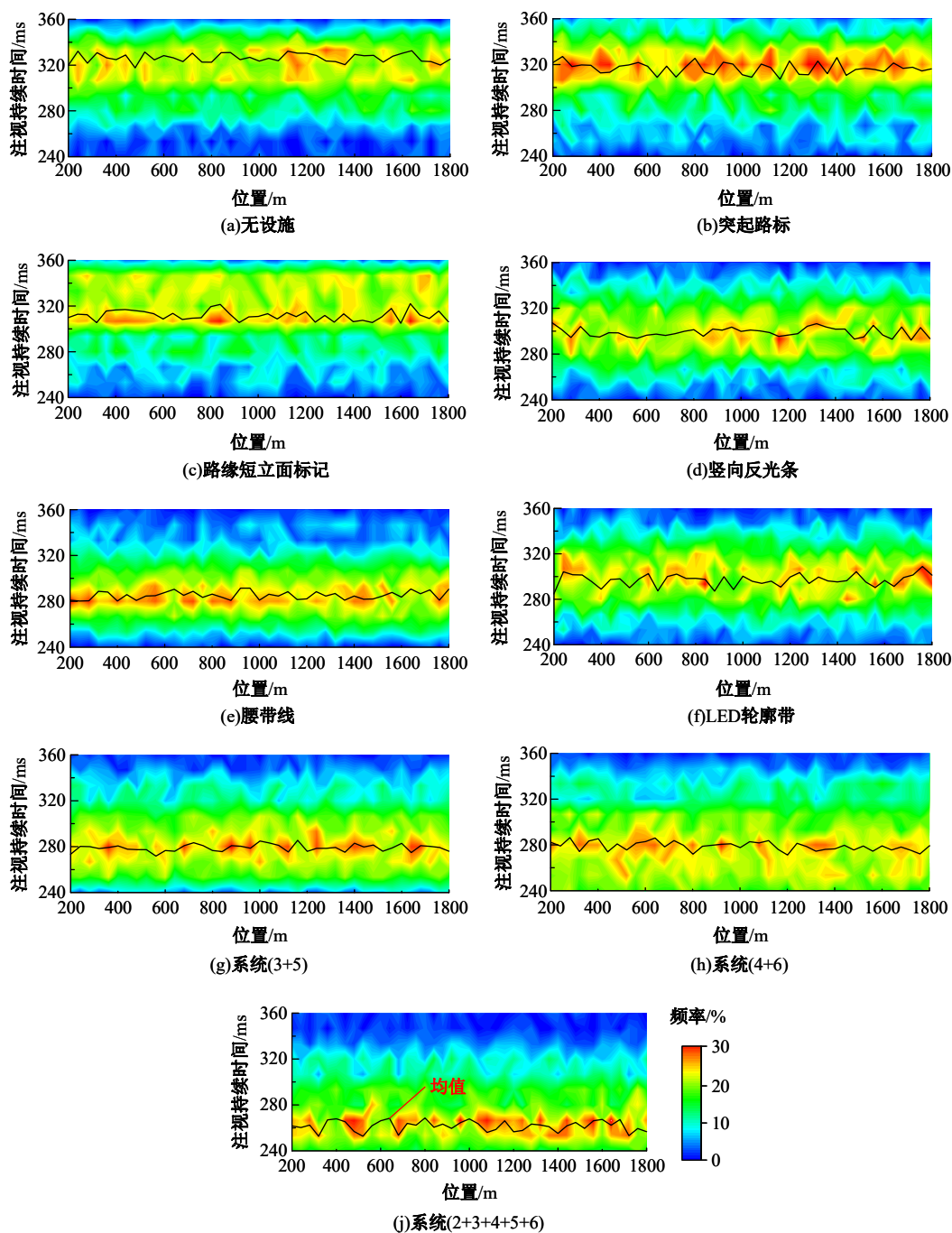


图 6 各场景的驾驶人注视持续时间分布

Fig.6 Fixation duration distribution of each scene

晰度也往往存在较大差异。场景1(无设施)的横向、纵向与竖向路权清晰度的清晰度皆差。场景2(突起路标)的竖向路权清晰度差、横向与纵向路权清晰度一般;突起路标沿道路边线连续设置,为连续的纵向点状信息,对显示车道位置与道路线形有一定的积极作用。场景3(路缘短立面标记)与场景5(腰带线)的竖向路权清晰度差、横向与纵向路权清晰度较好,两设施分别为纵向中线段与纵向长

线段,纵向线性诱导设施有利于驾驶人明确隧道两侧界限,从而提升驾驶人对横向路权的感知。场景4(竖向反光条)与场景6(LED轮廓带)的竖向路权清晰度较好、横向与纵向路权清晰度一般;两设施分别为竖向长线段、竖向一横向环状长线段,竖向线性诱导设施显现隧道轮廓,有利于明确竖向路权。场景7由路缘短立面标记与腰带线组成,兼具其组成设施的优点和缺点。场景8(竖向

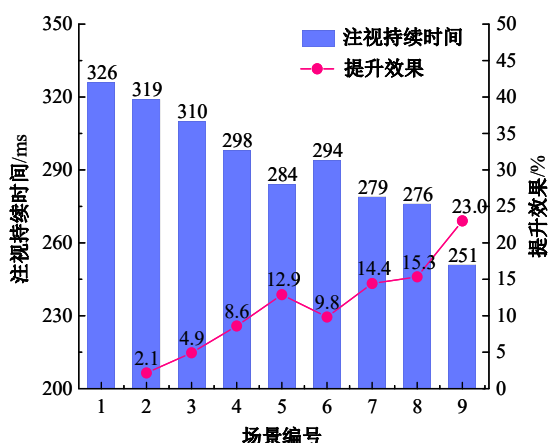


图 7 各场景视觉信息获取能力的提升效果

Fig. 7 Improvement effect of visual information acquisition ability of each scene

表 5 问卷分值及说明

Table 5 Questionnaire score and explanation

很清晰 /很舒适	清晰 /舒适	一般 /一般	不清晰 /紧张	很不清晰 /很紧张
5	4	3	2	1

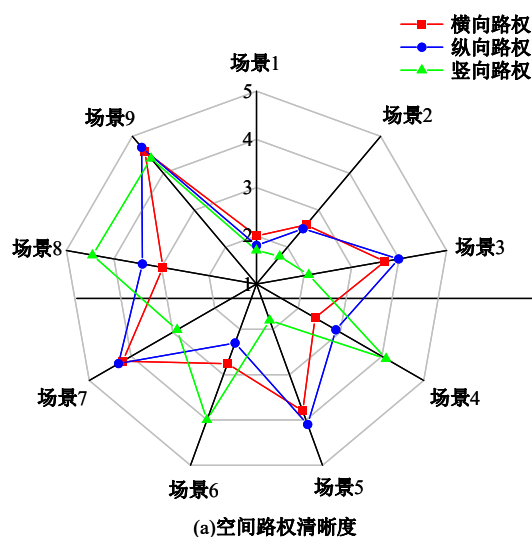
反光条+LED 轮廓带)的竖向路权清晰度较好、横向与纵向路权清晰度一般。场景 9 各项路权清晰度俱佳。

各场景的驾驶人心理舒适度从高到低依次为:场景 9、场景 8、场景 7、场景 5、场景 6、场景 4、场景 3、场景 2、场景 1。相对于场景 1,各场景中驾驶人的心理舒适度评分依次提升了 19.5%、38.9%、66.1%、77.9%、72.3%、87.1%、94.8%与 110.7%。

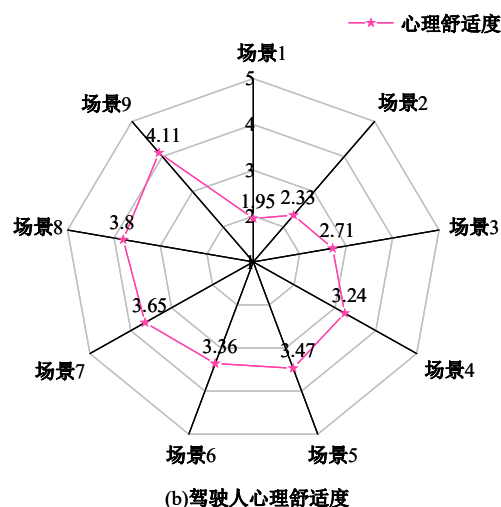
3.3 视觉信息获取与驾驶心理的关系

为了进一步分析各线性诱导设施的作用效果,探讨线性诱导系统对视觉与驾驶心理的影响机理。将各线性诱导设施/系统对视觉信息获取与驾驶心理的提升效果进行综合分析,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,视觉信息获取能力与心理舒适度正相关,视觉信息获取越好的场景,驾驶人心理舒适度越好。相对无设施场景,各诱导设施(场景 2~6)都有一定的改善效果,表明设置诱导设施对于改善隧道交通安全是十分必要的。对诱导设施而言,改善效果最差的为突起路标,其为点状设施,其他设施均为线条形,表明线条形设施有更好的诱导效果,可知线性诱导优于点状诱导。场景 3、场景 5 同为纵向设施场景,腰带线比路缘短立面标记的位置更高,其改善效果也更好。场景 4、



(a)空间路权清晰度



(b)驾驶人心理舒适度

图 8 各场景的驾驶人心理调查得分

Fig. 8 Driver's psychological survey scores in each scene

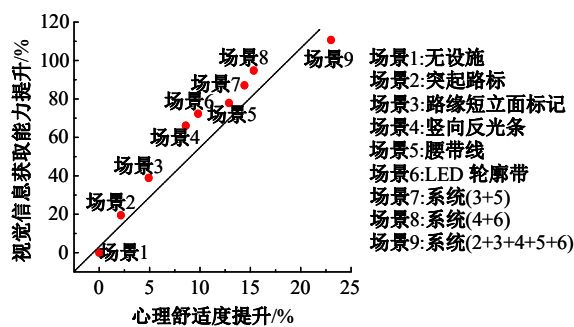


图 9 视觉信息获取与心理舒适度提升效果对比

Fig. 9 Comparison of visual information acquisition ability and psychological comfort

场景 6 也可以得到相同结论。诱导设施的参数、设置位置会影响其改善效果,总体而言,连续线条优于点状,大尺寸优于小尺寸,高位优于低位。大尺寸、高位置的连续线条更有利于视觉感知,进而缓解驾驶人紧张心理并提升隧道行车安全。

4 驾驶任务特征

驾驶任务主要体现为驾驶人对自身车辆控制,与周边车辆、周边环境的关系均能保持良好的状态。具体而言,就是控制车速,保持车道,保持车距,明确方向,选择路径。考虑到隧道内部大部

分区域不许变道,且无岔路口,故隧道内部的驾驶任务主要为车速控制与车道保持。

4.1 车速控制能力分析

对各场景下的车速进行统计,得到9种场景车速的频率分布,如图10所示。9种场景的车速均服从正态分布,拟合模型如表6所示。

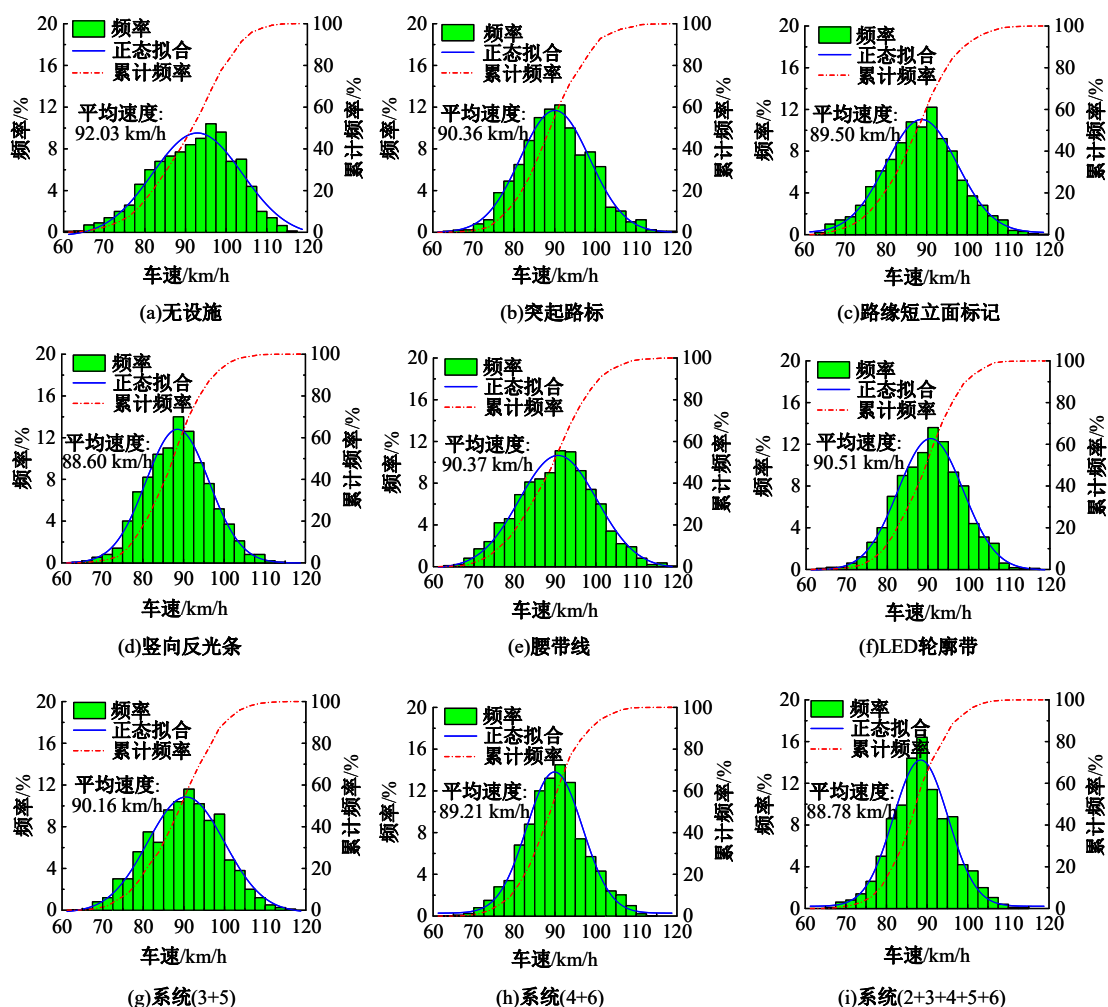


图10 各场景的速度分布

Fig.10 The speed distribution of each scene

当车速分别为92.92、90.04、88.76、88.51、90.69、90.66、90.52、89.90、88.43 km/h时,各场景的正态分布模型分别达到峰值(9.53、11.68、11.03、12.81、10.66、12.54、10.85、13.81、14.23)。峰值从小到大依次为场景1、场景5、场景7、场景3、场景2、场景6、场景4、场景8、场景9。9种场景的车速均值分别为92.03、90.36、89.50、88.60、90.37、90.51、90.16、89.21、88.78 km/h,场景9、场景4、场景8、场景3的平均车速小于90 km/h,相较于无设施场景(场景1),上述场景有较好的减速效果。

车速的离散大小表示驾驶人保持车辆行驶速度稳定的能力,引入离散系数进一步衡量不同场景下的车速控制能力 C_m 。离散系数为驾驶人在不同场景时的车速标准差及其均值的比值,如下所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (2)$$

$$C_m = V_m^{-1} = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$L_{C,m} = \frac{C_m - C_1}{C_1} \times 100\% \quad (4)$$

表 6 各场景的拟合模型
Table 6 Fitting model of each scene

场景	模型	ANOVA		
		R^2	F	P
1	$y_1 = -0.36 + 9.89e^{(x-92.92)^2/11.07}$	0.95	145.8	0.00*
2	$y_2 = -0.01 + 11.69e^{(x-90.04)^2/8.55}$	0.98	332.5	0.00*
3	$y_3 = 0.18 + 10.85e^{(x-88.76)^2/7.89}$	0.98	425.9	0.00*
4	$y_4 = -0.01 + 12.82e^{(x-88.51)^2/7.80}$	0.99	557.1	0.00*
5	$y_5 = -0.14 + 10.80e^{(x-90.69)^2/9.57}$	0.97	246.5	0.00*
6	$y_6 = -0.05 + 12.59e^{(x-90.66)^2/8.01}$	0.98	526.2	0.00*
7	$y_7 = -0.21 + 11.06e^{(x-90.52)^2/9.48}$	0.96	217.4	0.00*
8	$y_8 = 0.28 + 13.53e^{(x-89.90)^2/6.88}$	0.98	418.2	0.00*
9	$y_9 = 0.21 + 14.02e^{(x-88.43)^2/6.75}$	0.96	205.2	0.00*

式中: V_m 为车速变化量的离散系数, $V^{-1}_m(C_m)$ 越大; 车速控制能力越好, 反之亦然; σ 为标准差; N 为数据集的数据量; $L_{C,m}$ 为车速控制的提升效果, %。

各场景的车速控制能力对比结果如图 11 所示。由图 11 可知, 车速控制能力由高到低依次为, 场景 9、场景 8、场景 4、场景 6、场景 7、场景 3、场景 2、场景 5、场景 1。相关研究表明^[20], 车速过高是导致隧道交通事故的重要原因, 车速大小也是车速控制能力的重要体现, 由车速得出的车速控制能力的场景排序, 与上述结论基本一致。相对于无设施场景(场景 1), 各个线性诱导设施/系统场景的车速控制能力均有一定的提升, 场景 2~9 依次提升了 9.56%、15.9%、28.6%、6.02%、21.3%、17.7%、35.1%、45.4%。对单一线性诱导设施(场景 2~6)而言, 竖向反光条对车速控制有良好的效果, 含有竖向反光条的线性诱导系统(场景 9、场景 8)同样有良好的车速控制效果。对车速控制提升最少的为腰带线, 腰带线纵向连续设置, 没有规律性的间隔, 无法为车速感知提供有效参考。

4.2 车道保持能力分析

车辆在行车道内行驶时, 车辆轨迹相对于车道中心线往往存在一定程度的横向偏移, 轨迹横向偏移能够描述车身中轴线与车辆所在车道中线的横向位置关系。

对各个场景的轨迹偏移进行统计, 得到 9 种场景的轨迹偏移的频率分布, 如图 12 所示。当轨迹偏移为负值时, 表明车辆位于车道中线左侧, 即偏左行驶。反之, 为偏右行驶。当偏移量为 -19.8、-16.4、-18.2、-15.8、-15.2、-17.6、-13.9、

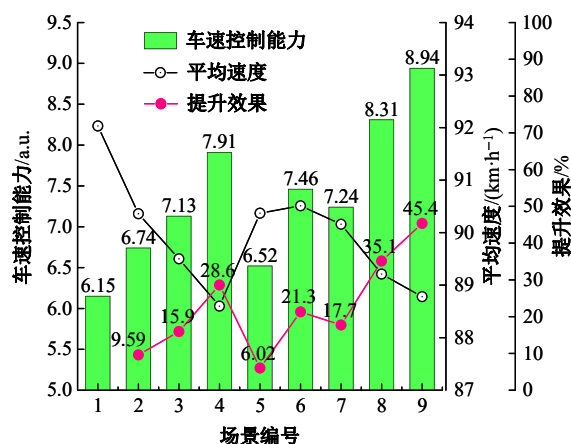


图 11 各场景的车速控制能力提升效果

Fig. 11 The improvement effect of speed maintenance

-16.8、-14.6 cm 时, 各场景的正态分布模型分别达到峰值(11.8、13.1、13.9、12.5、14.8、12.8、15.8、13.3、18.1)。峰值从小到大依次为场景 1、场景 4、场景 6、场景 2、场景 8、场景 3、场景 5、场景 7、场景 9。9 种场景的平均偏移分别为 -31.49、-26.72、-23.78、-28.26、-21.49、-28.21、-20.29、-26.32、-18.71 cm, 相较于无设施场景(场景 1), 各线性诱导设施/系统场景对轨迹偏移都有一定的改善效果。各场景的轨迹偏移均值都小于 0, 这说明驾驶人更倾向于偏左行驶, 这可能与驾驶人位于车辆左侧有关。

轨迹偏移的离散大小表示车辆在车道内维持稳定行驶的能力, 引入离散系数进一步衡量不同场景的车道保持能力 D_m 。离散系数为驾驶人在不同场景时的轨迹偏移标准差及其均值的比值, 如下所示:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (5)$$

$$D_m = T_m^{-1} = \left(\frac{\sigma_2}{\bar{d}} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$L_{D,m} = \frac{D_m - D_1}{D_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中: σ_2 为轨迹偏移的标准差; T_m 为归一化后的轨迹偏移离散系数, $T^{-1}_m(D_m)$ 越大, 车道保持能力越好, 反之亦然; $\bar{d}$ 为各场景的平均偏移, cm; $L_{D,m}$ 为车道保持的提升效果, %。

各场景下的车道保持能力对比如图 13 所示。由图 13 可知, 车道保持能力由高到低依次为: 场景 9、场景 7、场景 5、场景 3、场景 2、场景 8、场景 6、场景 4、场景 1, 与平均偏移的分布规律基本一致。

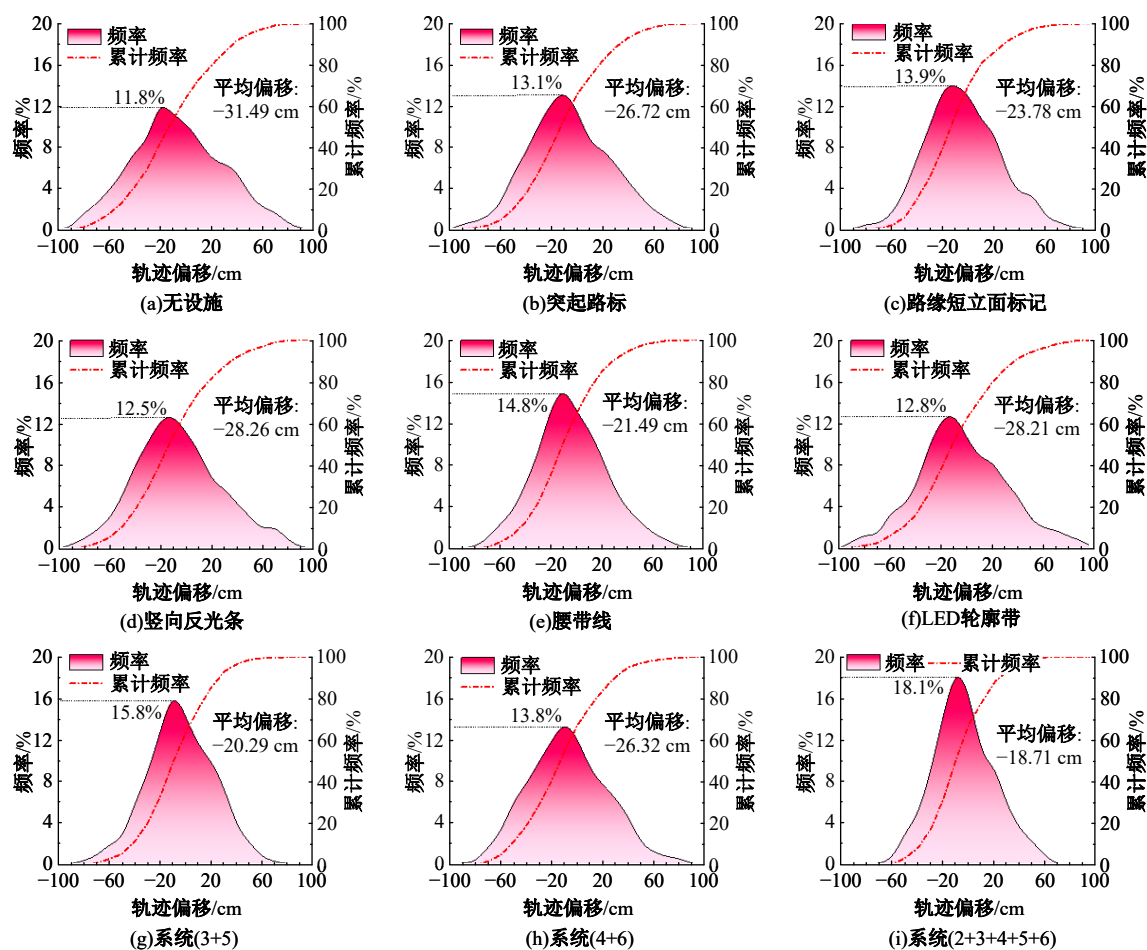


图 12 各场景的轨迹偏移分布

Fig.12 Trajectory offset distribution of each scene

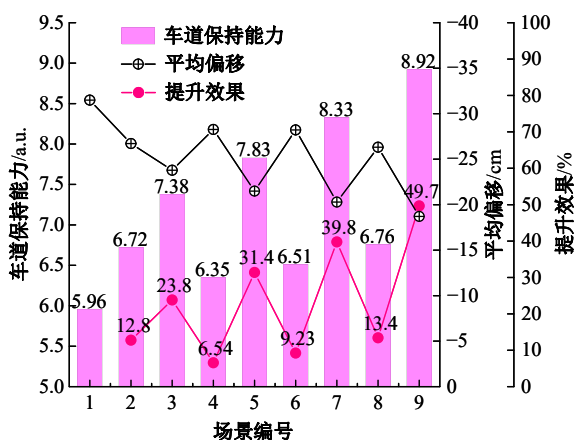


图 13 各场景的车道保持能力提升效果

Fig. 13 Improvement effect of lane keeping

相对于无设施场景(场景1),各个线性诱导设施/系统场景的车道保持能力均有一定的提升,场景2~9依次提升了12.8%、23.8%、6.54%、31.4%、9.23%、39.8%、13.4%、49.7%。对单一线性诱导设施(场景2~6)而言,腰带线、路缘短立面标记对车道控制有良好的提升效果,两设

施均为纵向线性诱导设施,纵向诱导设施显现隧道界限,增强了驾驶人对横向空间的感知。场景9与场景7代表的线性诱导系统,由于包含有腰带线、路缘短立面标记,同样有良好的车道保持效果。

4.3 车速控制与车道保持的关系

为了进一步分析各线性诱导设施的功能,下面讨论线性诱导系统中各设施的合理搭配。将各线性诱导设施/系统对车速控制与车道保持的提升效果进行综合分析,如图14所示。

由图14可知,单一线性诱导设施的功能相对单一,车速控制与车道保持往往不能兼得。腰带线、路缘短立面标记为纵向线段,对车道保持有良好的效果,但是对车速控制的提升效果较差。竖向反光条、LED轮廓带为竖向线段,对车速保持有良好的效果,但是对车道保持的提升效果较差。

将单一元素合理组合,可以发挥各元素的优点,实现改善效果的综合提升。例如场景9,横向(LED轮廓带顶部)、纵向(突起路标+立面标

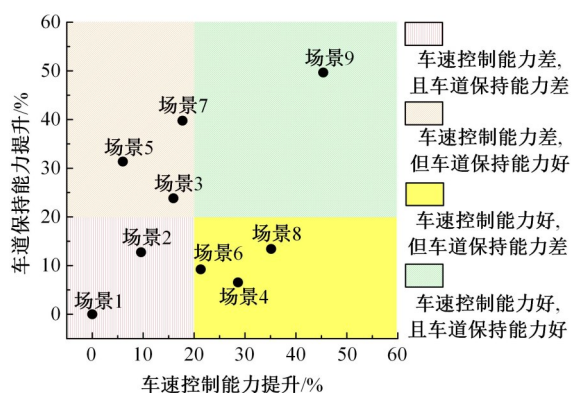


图 14 车速控制与车道保持提升效果对比

Fig. 14 Comparison of speed control and lane keeping improvement effect

记+腰带线)与竖向(竖向反光条+LED轮廓带两侧)设施结合,高、中、低位搭配,远、中、近端可视,各组成元素之间的优势互补,对车速保持与车道保持均有良好效果。需要注意的是,系统的作用效果不是各元素的简单叠加,也不是包含的元素越多越好,合理的元素组合是提升诱导功能的前提。例如场景7、场景8,两系统只选择同一维度的元素进行组合,无法构建起立体式的视觉参照系,不能为驾驶人的空间感知与速度感知提供准确参考,对隧道交通安全的提升效果不佳。

5 结 论

(1)提出了一种面向高速公路隧道交通安全提升的线性诱导系统,通过线条形诱导设施合理搭配,强化隧道环境中路面、侧壁、洞顶等结构的局部亮度和对比度,勾勒隧道轮廓及道路线形走向,优化视觉参照系,提升驾驶人心理舒适性,增强驾驶人的空间感和速度感。

(2)驾驶人视觉信息获取水平与心理舒适度正相关,线性诱导设施有助于改善视觉感知,并提升驾驶人心理舒适度。就诱导效果而言,由高到低依次为:腰带线、LED轮廓带、竖向反光条、路缘短立面标记、突起路标,线条形设施优于点状,大尺寸优于小尺寸,高位优于低位。

(3)腰带线、路缘短立面标记为纵向诱导设施,对车道保持有良好的效果,但对车速控制效果较差。竖向反光条、LED轮廓带为竖向诱导设施,对车速控制有良好的效果,但对车道保持效果较差。突起路标的功能比较均衡,但整体效果不突出。线性诱导系统能够发挥各设施的优势,实现改善效果的全面提升。

(4)诱导设施合理搭配是线性诱导系统发挥效果的重要前提。诱导设施的组合要遵循“高-中-低位、远-中-近端、横-纵-竖向设施相结合”的原则。

参考文献:

- [1] Yang Y, Alonso F, Du Z, et al. How to resolve the contradiction between driving safety and lighting energy conservation in a highway tunnel?—An experiment on linear guiding system[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2024, 103: 319-339.
- [2] Ma Z, Fang S, Liu S. Analysis of the relationship between the number of traffic accidents and the traffic flow & section location in extra-long tunnel[J]. Engineering, 2020, 12(2), 71-81.
- [3] 徐进, 潘存书, 符经厚, 等. 典型道路场景以及场景切换时的速度行为特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(4): 1331-1341.
Xu Jin, Pan Cun-shu, Fu Jing-hou, et al. Speed behavior characteristic on typical driving scenarios and along switched scenarios[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(4): 1331-1341.
- [4] Zheng Z, Du Z, Yan Q. The impact of rhythm-based visual reference system in long highway tunnels[J]. Safety Science, 2017, 95: 75-82.
- [5] 王首硕, 杜志刚, 冯守中, 等. 高速公路隧道入口区域视线诱导系统有效性研究[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 267-277.
Wang Shou-shuo, Du Zhi-gang, Feng Shou-zhong, et al. Research on effectiveness of visual guiding system in entrance zone of freeway tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 267-277.
- [6] Yeung J S, Wong Y D. Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 534-541.
- [7] 杜志刚, 倪玉丹, 杨理波, 等. 高速公路隧道曲线路段视线诱导设施有效性试验[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 215-225.
Du Zhi-gang, Ni Yu-dan, Yang Li-bo, et al. Effectiveness experiment of sight induction facilities of curve sections in highway tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 215-225.
- [8] 叶飞, 苏恩杰, 梁晓明, 等. 公路隧道景观设计现状

- 和思考[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1):23-37.
- Ye Fei, Su En-jie, Liang Xiao-ming, et al. Review and thinking on landscape design of highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 23-37.
- [9] 何世永, 周渊涛, 梁波, 等. 长大隧道光环境下驾驶人信息感知表征方法研究现状和进展[J]. 隧道建设: 中英文, 2022, 42(2):176-187.
- He Shi-yong, Zhou Yuan-tao, Liang Bo, et al. Research status and progress on driver information perception and representation methods in long tunnel light environment[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(2): 176-187.
- [10] Xu R, Ye H, Hu B, et al. Intelligent dimming control and energy consumption monitoring system of tunnel lighting[J]. Lighting Research & Technology, 2024, 56: 72-86.
- [11] 赵晓华, 鞠云杰, 李佳, 等. 基于驾驶行为和视觉特性的长大隧道突起路标作用效果评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 29-41.
- Zhao Xiao-hua, Ju Yun-jie, Li Jia, et al. Evaluation of the effect of RPMs in extra-long tunnels based on driving behavior and visual characteristics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(6): 29-41.
- [12] Du Z, Wang S, Yang L, et al. Experimental study on the efficacy of retroreflective rings in the curved freeways tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: No 103813.
- [13] Jiao F, Du Z, Wong Y, et al. Design and evaluation of visual guiding facilities along urban road tunnel horizontal curves based on vision and speed perception[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 133: No. 104937.
- [14] 郑号染, 杜志刚, 王首硕, 等. 基于线性诱导的高速公路隧道交通安全优化设计[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 134-141.
- Zheng Hao-ran, Du Zhi-gang, Wang Shou-shuo, et al. Optimal design of highway tunnel traffic safety based on linear induction[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8):134-141.
- [15] 陈莹, 杜志刚, 徐进, 等. 基于线形诱导的低等级公路弯道交通设施优化[J]. 公路, 2022, 67(10): 292-300.
- Chen Ying, Du Zhi-gang, Xu Jin, et al. Optimization of traffic facilities on curves of low grade highway based on linear guidance[J]. Highway, 2022, 67(10): 292-300.
- [16] 杜志刚, 韩磊, 梅家林, 等. 基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉环境优化研究框架[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2023, 51(9): 1372-1382.
- Du Zhi-gang, Han Lei, Mei Jia-lin, et al. Research framework for visual environment optimization of small radius highway long tunnels based on psychological rotation effect[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(9): 1372-1382.
- [17] 徐进, 王延鹏, 陈海源, 等. 山区公路回头曲线小客车纵向行驶特性及运行速度模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(12): 3432-3445.
- Xu Jin, Wang Yan-peng, Chen Hai-yuan, et al. Longitudinal driving characteristics and operating speed prediction model of cars on hairpin curves of mountainous roads[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(12): 3432-3445.
- [18] 赵晓华, 刘畅, 亓航, 等. 高速公路交通事故影响因素及异质性分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(4): 987-995.
- Zhao Xiao-hua, Liu Chang, Qi Hang, et al. Influencing factors and heterogeneity analysis of highway traffic accidents[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(4):987-995.
- [19] 李洪涛, 王琳虹, 李俊达. 公路交叉口照明和限速对视觉搜索能力的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(8): 2287-2297.
- Li Hong-tao, Wang Lin-hong, Li Jun-da. Influence of lighting and speed limit on visual search ability at highway intersections[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(8): 2287-2297.
- [20] 王海晓, 李永翔, 丁旭, 等. 基于边缘智能的城市下穿隧道车辆行车安全预测[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(6): 1337-1343.
- Wang Hai-xiao, Li Yong-xiang, Ding Xu, et al. Traffic safety prediction of urban underpass tunnel vehicles based on edge intelligence[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(6): 1337-1343.